

“十二五”  
国家重点图书出版规划项目

无线电



ARRL

业余无线电丛书

# 从零起步学电子

## (第2版)

【美】Walter Banzhaf (WB1ANE) 著  
王龙 (BA4RX) 译

## Understanding Basic Electronics

绝佳的电子入门指导书  
超级经典的电子自学教材  
轻松学好基础电学的必备辅导书



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

无线电

# 从零起步学电子 (第2版)

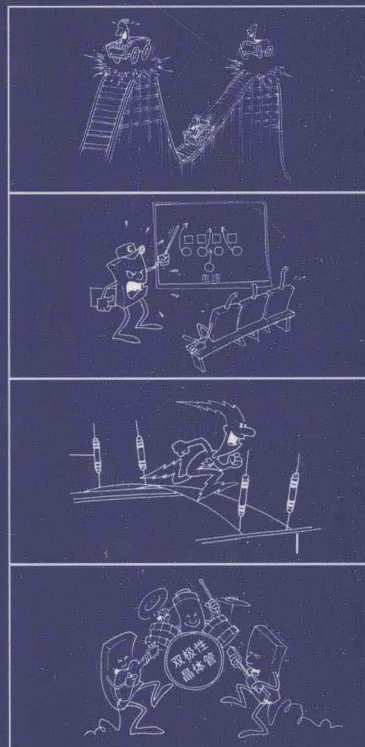
## Understanding Basic Electronics

美国业余无线电协会推荐的《从零起步学电子》(第2版)是一本能带你走进神奇电子学世界的入门书籍。本书考虑到初学者和非专业读者的阅读喜好,以轻松愉快、浅显易懂的风格编写。即便你拥有一定的电子学基础,相信你也会喜欢本书每个章节的“小模块”形式——便于读者对大段学习材料的分层消化。诸多的实例和清晰的插图会让你的学习过程充满乐趣。

### 谁需要这本书?

- 掌握加、减、乘、除等基本数学技能的青少年学生——仅再需要一款廉价的计算器!
- 想对电子学基本原理有一个系统理解的业余无线电爱好者和经验丰富者——在学习更复杂的专业教程前可以使用本书。
- 渴望解开电子电路奥秘的各年龄阶段学习者。

通过该书,你不用成为工程师或者数学高手,便可以充分享受到电子电路实验所带来的乐趣。



封面设计: 胡萍丽

分类建议: 电子技术 / 无线电通信  
人民邮电出版社网址: [www.ptpress.com.cn](http://www.ptpress.com.cn)

ISBN 978-7-115-27978-1



9 787115 279781 >

ISBN 978-7-115-27978-1

定价: 52.00 元



“十二五”  
国家重点图书出版规划项目

⊖ 业余无线电丛书 ⊖

# 从零起步学电子

(第2版)

**Understanding Basic Electronics**

【美】Walter Banzhaf (WB1ANE) 著

王龙 (BA4RX) 译

人民邮电出版社

北京

我的博客 <http://book-life.blog.163.com>

## 图书在版编目(CIP)数据

从零起步学电子：第2版 / (美) 班茨哈夫  
(Banzhaf, W.) 著；王龙译. -- 2版. -- 北京：人民邮  
电出版社，2012.7

(业余无线电丛书)  
ISBN 978-7-115-27978-1

I. ①从… II. ①班… ②王… III. ①电子学—基本  
知识 IV. ①TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第086924号

## 版权声明

Understanding Basic Electronics, Second Edition by Walter Banzhaf(WB1ANE), ISBN 0-87259-082-3-3  
Copyright ©2010 by The American Radio Relay League, Inc.

All rights reserved. No part of this work may be reproduced in any form except by written permission of the publisher.  
Simplified Chinese translation edition jointly published by The American Radio Relay League, Inc. and POSTS &  
TELECOM PRESS.

本书简体中文版由美国业余无线电协会授权人民邮电出版社出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复  
制本书的任何部分。

版权所有，侵权必究。

## 内 容 提 要

本书是由美国业余无线电协会(ARRL)出版的《Understanding Basic Electronics》(第2版)的中文译本。

本书是一本真正从零基础开始的面向电子初学者的入门读物。全书分为4个单元，分别从电子学的作用、直流  
电路、交流电路、有源器件等方面详尽、生动、有趣地介绍了电子学的基本知识，包括电压、电流等基础电路参  
数、基础元器件功能、经典电路定律、基础电路原理等。第2版图书在保留了第1版图书轻松、幽默风格的基础上，  
对内容结构做了调整，并与时俱进地对知识体系进行了更新，更符合电子初学者的学习要求。

本书不仅适合业余无线电爱好者阅读，帮助他们了解电子学的基础知识，还是一本非常好的青少年学习电学  
知识的课外读物。

业余无线电丛书

## 从零起步学电子(第2版)

- 
- ◆ 著 [美] Walter Banzhaf (WB1ANE)
  - 译 王 龙 (BA4RX)
  - 责任编辑 房 桦
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
  - ◆ 开本：800×1000 1/16  
印张：23  
字数：486千字 2012年7月第2版  
印数：9 001—13 000册 2012年7月河北第1次印刷

著作权合同登记号 图字：01-2012-1197号

ISBN 978-7-115-27978-1

定价：52.00元

读者服务热线：(010)67132837 印装质量热线：(010)67129223

反盗版热线：(010)67171154

广告经营许可证：京崇工商广字第0021号



# 前 言

电子学，这个词令人想到的就是工程师和技师围聚着他们最新的作品，周围四处散落着灼热的电烙铁和一段段导线，工作室里到处都是电阻、晶体管和其他零件，手中拿着计算器，实验者在电路板上打孔，并迅速选择一个新元件试图安装在电路中。

也许，你可以享受电子电路实验带给你快乐，而不必成为工程师或者数学高手。

这本书将向你讲授基本电子学原理。你所需要具备的数学技巧仅仅是加、减、乘、除。这本书以轻松愉快、浅显易懂的风格来编写，非专业的读者将非常喜欢。卡通画和插图很好地说明了电子学概念，帮助你加深理解。

本书用模块方法进行讲授。通常一个主题我们用 2 页篇幅，没有一个模块超过 4 页。在使用这本书时，这样的方式便于分成一个个小单元进行学习，这也便于你轻松跳过那些你已经熟悉的模块。

你有了电台执照，但想获得更完整的电子学基本原理吗？这本书就是你需要的。也许你只是想学习电子学的基础知识，而不想研究 FCC 法规和其他的操作实践，这本书也是你需要的。

美国业余无线电协会首席执行官  
David Sumner (K1ZZ)

# 译者序

世界业余无线电日曾有过一个主题：Amateur Radio A Foundation of Technical Knowledge（业余无线电 技术知识的基础）。众所周知，无线电最早应用于航海中传递信息，而随着信息技术日新月异的发展，作为推动信息技术发展的主要载体，无线电技术的应用越来越普及和广泛，无线电中新的技术层出不穷，它涉及到社会发展的各个领域。从深空探测、射电天文、航天技术到广播电视、交通运输、日常生活，无线电无处不在，可以说无线电已经渗入到我们生活中的各个角落。

英国作家萧伯纳曾经说过：常识是本能，有足够的常识便是天才。电子学是无线电的基础，无论你是无线电爱好者，还是无线电的使用者，如果能够掌握或者了解电子学的基本原理，不仅可以丰富你的生活，享受无线电科技带来的乐趣，而且可以拓展你的知识面，更好的使用无线电技术。

这本书是人民邮电出版社从美国业余无线电协会引进的业余无线电系列丛书之一《从零起步学电子》的第2版，和第1版相比，第2版保留了第1版深入浅出、幽默风趣的风格，在知识结构上做了调整，做到了与时俱进，更符合从零开始学习电子学的初学者的学习要求。第2版中，作者在每个章节后增加了温故而知新的 复习检测 ，帮助你了解每个章节知识的掌握情况。从这本书中，我们还可以了解到国外的学习理念，这也许会给你的工作和学习带来启发，这也是这本书的第1版深受读者喜爱的原因之一。

如果你是一位科技爱好者，这本书可以帮助你了解电子学的基本知识，拓展你的知识面，为你进一步理解身边和电子技术有关的科学知识做好铺垫。

如果你是一位刚刚入门的无线电爱好者，但缺乏系统的理论知识，那么这本书可以帮助你补充电子学的基本理论，让你由浅入深地系统学习电子学基本知识，为你进一步研究无线电知识奠定良好的基础。

对于青少年读者来说，随着素质教育的推广和普及，业余无线电已经成为培养青少年探索科技知识的重要平台。通过无线电这个平台，了解更多的科技知识，在青少年时期提高自身的科技素养，为在将来更好地迎接科学技术和知识的挑战积累知识，这本书也是你优秀的科普读本。如果你对无线电充满好奇和兴趣，这本书将引领你进入电子学的殿堂。

由于工作繁忙，这本书的翻译工作是在业余时间完成。本人才疏学浅，书中的翻译错误和不当之处欢迎读者批评指正。

王龙 (BA4RX)

2012年4月



# 导 言

现代技术触及到我们生活的每个方面。我们必须了解这些技术的基本概念，让这些技术在我们的生活中发挥有效的作用。将科技应用在你的爱好中，可以增长你的知识并使你获得极大的乐趣。当你追求一个爱好时，你就是在探索新的兴趣并了解你身边的多彩世界。

电子学是现代技术中迷人的一门学科。无论你在哪里，你都能看到电子设备和装置。从汽车到邮局的邮政编码阅读器，几乎每个机器都要用到一些电子控制。你可以不必了解大多数设备的电子学原理，但是，当你了解了电子学的基本原理后，你会了解你身边更多的东西。

要想知道某装置、某设备是如何工作的，没有比自己去掌握它更好的方法了。很多业余无线电操作者喜欢制作各种各样的电子装置。从他们的无线电台的小装置到完整的无线电收发信机，很多火腿会很开心地说，这是我自己制作的。你可以用你的电子学知识去完成各种有用的设计。

这本书将帮助你学习最重要的电子学基本原理。你会对你完成一个设计的能力充满自信，并且了解这些设计的工作原理。通过理解这些基本原理，你可以阅读理解更深的内容。你会熟悉电子技术和业余无线电技术的术语和行话。

这本书的主要目的是给你讲授电子学基本原理。书中贯穿了很多业余无线电的例子，向你展示在业余无线电中如何应用这些原理。你将要学习简单的直流电路和简单的交流电路。

在每个单元中，相关的主题构成一个章节。例如，某一章中主要介绍公制测量，另一章专门研究欧姆定律。有的章节是关于电容器和双极晶体管，每一章由一个或者更多的模块组成。

这些模块构成了书的核心，每一个模块介绍与这章相关的重要概念。本书内容用尽可能简单、通俗的语言来表达，用简单的解说来表达这些重要的术语。附录中包含了电子学术语表和业余无线电术语。当你碰到不熟悉的术语时，你可以随时查阅这个术语表。

我们建议你从头开始学习这本书，并完整地学习这本书。在编写这本书时，我们按照逻辑关系精心组织这些主题。每个部分的知识建立在上一章你获得的知识之上。当你完成了这本书的学习，你会获得电子学的基础。

本书中大量的例题是通过逐步分析的方式来得到解答的。在你阅读这本书时完成这些计算，理解过程中的每一步，并达到与答案一致。本书还提供了额外的练习题。

你也许会发现，书中有的主题你已经非常熟悉。如果是那样的话，你可以考虑跳过这个章节，学习那些你还不是很熟悉的内容。每个模块都是独立的课文内容，你可以跳过一些模块，选择那些你最感兴趣的模块。如果你发现一些不熟悉的术语和概念，可以在附录中查阅，并复习相关的模块。

祝你学习好运。我们希望你能轻轻松松地阅读这本书，享受这本书带给你的乐趣！



# 录

前言

译者序

导言

## 第一单元 电子学导论

- 第 1 章 电子学——能做什么？（绝对最重要的东西）.....
- 第 2 章 模拟电子电路 .....
- 第 3 章 数字电子电路 .....
- 第 4 章 模拟电路的组件 .....
- 第 5 章 数字电路的组件 .....

## 第二单元 直流电路概念

- 第 6 章 电学术语：电压和电流 .....
- 第 7 章 导体、绝缘体和电阻 .....
- 第 8 章 电和磁 .....
- 第 9 章 电容器和电感器 .....
- 第 10 章 电路——串联电路和并联电路 .....
- 第 11 章 欧姆定律 .....
- 第 12 章 如何解决电路问题——一些技巧和窍门 .....
- 第 13 章 能量和功率 .....

## 第三单元 交流电路概念

- 第 14 章 什么是交流电（AC）？.....
- 第 15 章 频率、周期和交流电的例子 .....



第 16 章	交流电中的电容器——容抗	16
第 17 章	交流电中的电感器——感抗	17
第 18 章	电感和电容的品质因数	18
第 19 章	变压器	19
第 20 章	阻抗	20
第 21 章	谐振电路——开心玩转交流电路	21

#### 第四单元 有源器件的概念

第 22 章	半导体材料	22
第 23 章	二极管——电路中的单向阀门	24
第 24 章	双极性晶体管 (BJTs)	26
第 25 章	场效应管 (FETs)	28
第 26 章	集成电路——将所有的元件放入一个小包中	29

#### 附录

附录 A	科学记数法	31
附录 B	了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器	31
附录 C	电子管	31
附录 D	分贝	31
附录 E	电子学与业余无线电术语表	31

# 第一单元

# 电子学导论

电子学可以被定义为控制电子（所有原子的最外层部分）去完成对人类有用的任务。电子学使我们每天使用和完全依赖的各种各样的设备变成可能。试想一下，没有调频收音机、无绳电话、计算机、MP3 播放器、GPS 导航系统、电视剧或者 嗯，你明白我的意思了吧。从某种程度上说，如果不是这些围绕在我们身边的电子奇迹，我们刚刚过去的的生活还是一个相当原始的生存状态。

区分电器装置和电子设备非常重要。墙壁开关是电气设备的一个例子，它用来打开和关闭家里的电灯。墙壁开关没有什么微妙之处，当开关闭合，电流通过，灯亮，当开关断开，没有了电流，灯熄灭。

对比一个具有调光控制器的墙壁开关，因为有了调光功能，灯的亮度可以改变，在完全关闭到彻底打开之间，灯的亮度有一个很大范围的变化。调光器是一种简单的电子设备，它利用有源器件来控制电流。

有源器件包括晶体管和二极管，现在它们

## 在这一单元你将学习：

- ✓ 一些行业中，电子学在我们日常生活中扮演的重要角色
- ✓ 一些基本的模拟电路和数字电路，以及如何对它们进行区分
- ✓ 关于基本电路的组件

是由专门的人造半导体材料制成。在 100 多年前，电子管作为有源器件在使用，不过今天它们已经很少被使用了，除非在一些特殊的应用中（例如在广播和电视台中的大功率发射机上）。无论电流是工作于灯泡、听音乐的耳机或者是视频播放器，用有源器件控制电子的流动都非常容易。

本书中，你将学习令人兴奋的电子学，并正确了解你（是的，就是你自己）能用它来做什么。这不仅是一个令人愉快的爱好，而且可以成为一个很值得的职业。



# 第1章

## 电子学——能做什么？ (绝对最重要的东西)



### 目录

- 日常生活中的电子学
- 忙碌着的电子学
- 电子学使生活更安全
- 复习检测

# 日常生活中的电子学

本章中我们列举了不少生活中电子学的应用，虽然这些应用我们感觉是理所当然的，但它们在我们的生活中却扮演着非常重要的角色。当你在浏览这些应用时，思考一下那些你熟悉的，但没有被我们列出来的应用，甚至可以想象一下那些应用在你的未来生活中会有什么发展。

## 个人电脑

我在编写这章书稿时使用的是我的便携式电脑，它比全球几十年前的所有电脑组合在一起还要先进，它有更多的计算、分析和显示信息的能力。几十年前，5MB 的硬盘需要外接电源，体积有好几个冰箱那么大，要用铲车才能移动，而我现在的 4GB 的 U 盘体积比我的小拇指还要小，比一个小的手电筒还省电（4GB=4000MB）。

## 移动电话

当然，我腰带上的手机时刻准备帮我和世界上任何地方的想联络我的人通话。现在手机或 POTS（普通老式电话服务）有线电话通话的语音质量非常好，已经不能区分电话是从隔壁的房间，还是穿过半个地球的地方打过来的。2007 年，也就是第一个移动电话网络安装后的第 26 年，全世界已经有了大约 33 亿个移动电话用户，相当于地球上有一半的人在使用手机。

要拨打电话，我可以按数字键盘上的按



图1-1：在电子技术的不断进步下，手机已经变得更小，功能已成倍增加。

钮，或者我只要说一声 家、语音邮件 或者 乔治。而几十年前，任何基于数字信号处理的语音识别技术都是不可用的。最初的语音识别技术是在电脑上实现，现在这个技术已经应用在我的小小的手机上了。一旦识别了我的声音，手机将尽职尽责地拨出根据我发出的语言相关联的数字。

## 玩具

在 2007 年玩具行业协会举办的玩具展上，约有 3/4 的玩具使用微芯片（具有储存程序的微型集成电路）使玩具说话、灯光闪烁和对声音做出反应等。像 Wii 这样的游戏系统使用微型集成电路加速计来感受手柄控制器的运动，允许系统接收在虚拟高尔夫俱乐部中如何努力击球的准确数据。

## 忙碌着的电子学

### 汽车

在我驾驶汽车时，有三台电脑都在工作：一台电脑负责引擎部分的工作，一台电脑负责换挡传动部分的工作，第三台电脑负责车身部分的工作。无论是寒冷的冬天还是炎热的夏天，负责引擎工作的电脑都会保证火花塞在准确的时间点火。它持续监测废气，调整注入汽缸的燃油量。

负责换挡传动的计算机在适当的发动机转速下提供良好的油耗和性能。它甚至在我使用几次后，能够掌握我的驾驶风格，并调整相应挡位。

当汽车速度达到 15 英里每小时时，负责车身的电脑自动锁上车门，当我停车时，能帮我关掉我忘记关掉的灯，当汽车快没油时，它

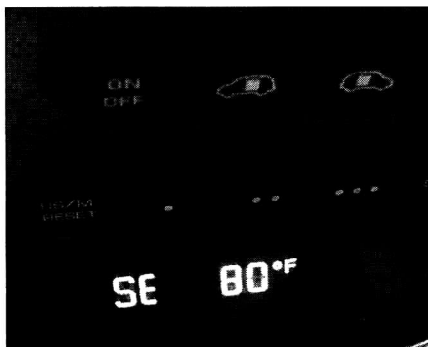


图1-2：现代的汽车通常包含一个车载计算机显示重要的信息。这张图中显示了外界温度和罗盘方位（这辆车的方向是SE，东南方向）

发出蜂鸣声提醒我。利用它，不需要门的把手就可以开关车门。如果我没系安全带，经过 20 秒的宽限时间后，它



图1-3：在使用GPS接收机前，我们是怎么找到路的呢？型号为Garmin街道领航员7200的导航仪是为车设计的，用以显示地图和行驶线路，并从点烟器插孔供电。电池供电的手持式导航仪，如型号为麦哲伦导航仪，深受远足等户外爱好者的欢迎。

响亮而且恼人的声音，敦促我系上安全带。

当然，我的仪表盘上的行车电脑告诉我已行驶的英里（或公里）数，即时和平均油耗（每加仑英里数或每 100 公里公升数），以及在油箱耗尽前还能行驶的距离。这是另一台电脑，一台很小的电脑。

电子学也使我们的汽车更安全。当汽车发生事故时，汽车上的安全气囊系统（SRS，辅助防护系统）识别到事故，向方向盘中心的爆破装置输送电流。在事故发生后的千分之几秒内，安全气囊内就会充满气体，作为缓冲，防止司机的上半身向前运动。

ABS 系统（防抱死制动系统）不断监测每个车轮的转速。如果一个轮子的转速比其他轮子慢，就可能造成车轮打滑的现象（也许是因为路面光滑造成的）。对于打滑的车轮，ABS 系统脉冲式控制它的制动液压，让它抓牢路面，让司机恢复对打滑汽车的控制。

有的汽车使用 ABS 系统，能让司机知道轮胎的胎压是否偏低，因为胎压偏低的轮胎比正常充气的轮胎要小一些，同时比正常的轮胎旋转得快一些。ABS 系统能辨别转速上的微小差别，从而告诉司机哪个轮胎的胎压偏低了。

## GPS 导航

我很幸运拥有两个全球定位系统（GPS）接收器。一种是手持式的，我徒步旅行时使用它，另一个用于我的汽车。两种导航仪都能告诉我（用不同的方式）身处地球上的什么位置，可以精确到米。所有 GPS 接收机都完全依靠距地球几千英里高空中绕地球转动的 24 颗卫星组成的网络。每颗卫星花费数百万美元，包含保持时间精确到百万分之一左右的原子钟。

然而 GPS 接收机本身花费有几百美元，它们坚固、可靠，而且容易使用。

# 电子学使生活更安全

## 烟雾报警器

只需比一顿便宜的午餐花费还少的费用就可以购买一台电池供电式烟雾探测器，可以将它安放在墙上或者你的卧室内，它的电池能够工作一年左右的时间，在你睡觉时监测到烟雾颗粒的存在，发出刺耳的警报声去唤醒你。安装了烟雾探测器、CO（一氧化碳）探测器和可燃气体探测器（丙烷和天然气）在我们家中处在危险环境中时及时提供可靠和

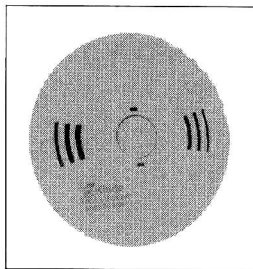


图1-4：低成本，电池供电的烟雾探测器已经挽救了成千上万人的生命。图中还包含了一个CO（一氧化碳）探测器。现代的技术烟雾报警器的电池（安装的是特殊的电池）能使用数月甚至几年。

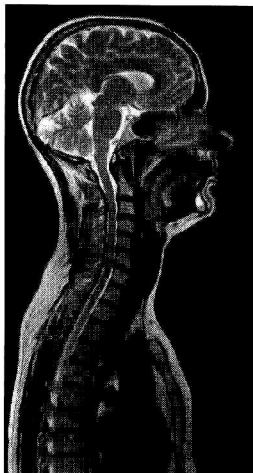


图1-5：核磁共振成像（MRI）技术可以让医生进行某些疾病的诊断，而在不久的过去，还需要通过外科手术来诊断。请注意这张头部和上半身脊椎图片中出色的细节，包括颈部和胸部脊椎以及它们之间的椎间盘。

有效的预警。

每个家庭中都应该安装烟雾探测器。如果你家中使用任何种类的燃料（如燃油、天然气、丙烷或煤油）来取暖或做饭，你还应该投资购买一个一氧化碳探测器。如果你使用天然气作为燃料，同样地，你还需要拥有一个可燃气体探测器。在现代电子学帮助下，你只需要花费大约外出吃一顿饭的费用就可以购买这三种探测器。

## 医学

50年前，一个腹部疼痛的病人经常需要进行手术检查，打开腹部，让外科医生检查和确定造成腹部疼痛的原因。今天，由于CAT（计算机辅助断层摄影）、MRI（核磁共振成像）、超声波和其他无创伤性诊断工具的出现，可以通过电子查看身体内到底是怎么回事，而不再需要通过外科手术和由它造成的痛苦、费用和恢复时间以及感染的风险等问题。

## 下一步是什么？

本章介绍了电子学提高并简化了我们生活的一些事例。如果没有电子系统，我们的生活将会是一个非常简陋的状态。

在本单元下面的章节中，我们将着眼于模拟和数字电路以及它们的组成，现在，组成电路的每一个元器件你几乎都能购买到，或者能使用到。



复习检测：-----

答案：-----

1.1 首字母缩略语GPS代表：

- a) 大功率开关
- b) 灰芥末三明治
- c) 全球定位系统
- d) 愉快的人们在歌唱

1.1 c

1.2 b

1.3 d

1.4 a

1.5 c

1.6 a

1.7 d

1.2 如果家中使用任何种类的燃料（燃油、天然气、丙烷、煤油灯），则必须有：

- a) 两部手机
- b) 一个一氧化碳检测器
- c) 一台核磁共振设备
- d) 可以的冷冻比萨饼

1.3 首字母缩略语SRS代表：

- a) 连续无线电话服务
- b) 半导体复原服务
- c) 短波电台选择
- d) 辅助约束系统

1.4 以下是电子设备的例子的是：

- a) 调光开关
- b) 门铃按钮开关
- c) 手电筒上的开关
- d) 墙壁上的电灯开关

1.5 5GB等于：

- a) 50MB
- b) 5000MB
- c) 5000MB
- d) 0.5MB

1.6 汽车的安全气囊的触发是通过：

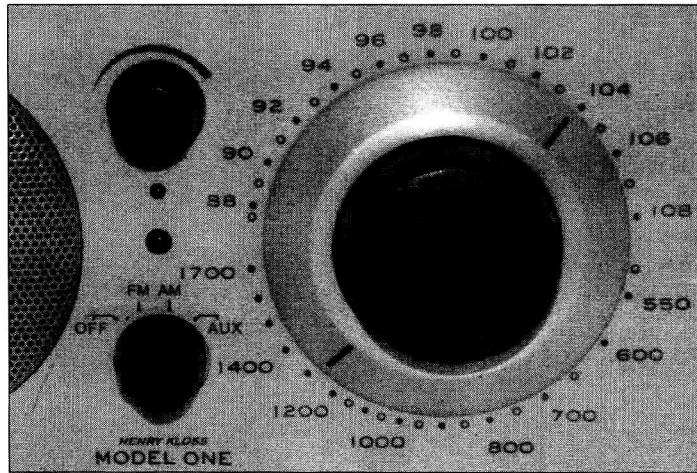
- a) 感应冲击力
- b) 手机的重力
- c) 引爆方向盘
- d) 看到迎面而来的车辆

1.7 汽车的ABS（防抱死制动系统）可以做所有这些，除了：

- a) 辨别哪个车轮的胎压偏低
- b) 检测哪个轮胎的转速快
- c) 告诉你什么时候汽车打滑
- d) 查明何时司机使用手机

## 第2章

# 模拟电子电路



这台台式收音机利用模拟电路在选台

### 目录

- 模拟信号连续可变
- 线性电路
- 复习检测

# 模拟信号连续可变

对于使用模拟电子电路或者数字电子电路的设备大家可能都很熟悉，即使我们并没有意识到这些电路的存在。许多现代设备中既有模拟电路，又有数字电路。例如，蜂窝电话（有时也称之为移动电话）同时具有模拟电路和数字电路，电脑也一样。一台老式调幅或调频收音机使用刻度盘调谐，它完全没有数字电路，而带有数字显示的收音机就同时具有模拟电路和数字电路。

那么，模拟电路和数字电路之间有什么区别呢？模拟信号连续变化，而数字信号被分割成不连续的离散梯级。打个比方，以钟的表面为例，如果是模拟信号的钟，秒针平稳连续转动，准确显示任何时刻的时间。而数字钟用 1 秒间隔显示时间，而不显示秒和秒之间的时间。

图 2-1 显示了一个信号强度连续变化的模

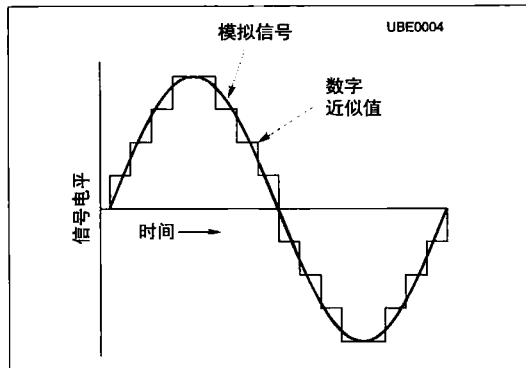


图2-1：根据信号强度不断变化的模拟信号波形，而同一信号的具有离散梯级的数字信号波形和它相似。

拟信号波形，和一个波形相似，具有离散梯级的数字信号波形。当然，如果梯级足够小，数字信号的波形非常接近于它所对应的模拟信号波形。

# 线性电路

**模**拟电路有时也被称为线性电路，电路中通常有输入（如公共广播系统的话筒中发出的语音信号）和输出（从扬声器中发出的更大或者是经过放大过的语言信号）。如果你增加输入信号的大小（专业术语叫做振幅），或许就是通过对着话筒大声说话，那么输出的信号也会变大，这就形成了线性放大。

图 2-2 (A) 显示的是一个放大器，在其输入端输入小信号，在输出端输出一个被放大的信号。图中输出信号的幅度是输入信号幅度的 3 倍，在这个例子中我们可以说，这个放大器的增益是 3。

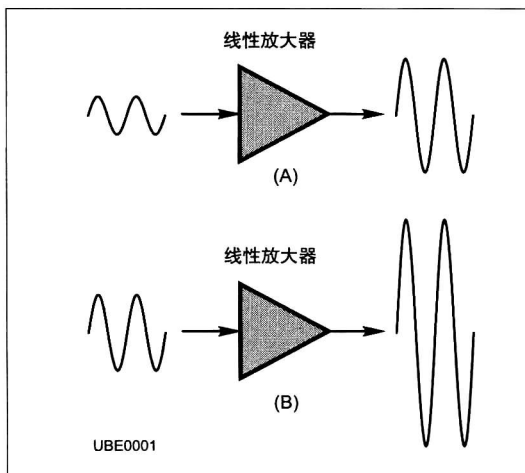


图2-2：图中 (A)，线性放大器将输入信号的振幅提高了3倍（增益等于3）。图中 (B)，同样的放大器，输入的信号更大，它也同样放大了3倍。在 (A) 和 (B) 中，输出的信号都比输入信号放大了3倍。



图 2-3：一台手机，显示了话筒和扬声器/耳机。（图片由摩托罗拉公司提供）

在图 2-2 (B) 中，输入的信号很大，而输出的信号和输入信号相比，仍然是输入信号的 3 倍。无论输入信号的大小如何，输出信号总是输入信号的 3 倍，直到输出信号达到不能再大的程度。你也许听到过这样的情况，一台廉价的收音机的音量调得过高时，听起来明显的失真了。也就是说，此时，线性放大器达到了它线性放大范围的上限。

事实上，几乎所有的设备中都有模拟电路。在手机上（见图 2-3），有一个放大器，用来处理来自话筒的微小声音信号，它把声音信号放大到合适的水平再向外发送信号。另一个

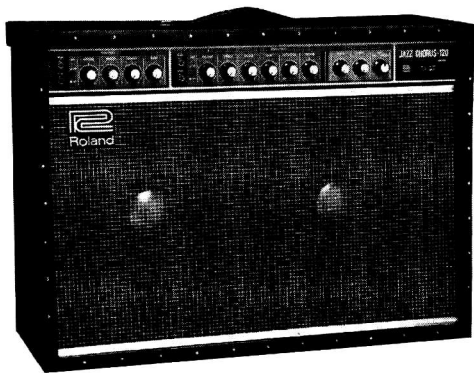


图2-4：一台模拟吉他放大器可能有几个用于不同乐器和话筒的输入接口。增益控制旋钮用来决定将声音放大多少（以及放大的声音是多少）。其他控制旋钮也许影响声音的音调或添加一些特殊效果。（照片由罗兰公司提供）

放大器用来增强输入的语言信号（来自手机通话另一端的人），使其足以驱动耳机或者手机上的扬声器。

因此，当你使用手机订购比萨饼时，麦克风的放大器将你发出的声音信号请额外多添加点奶酪放大，然后传送到手机的发射器上去。比萨饼厨师收到你的订单，并询问你想在比萨饼上加点凤尾鱼吗？当你的手机收

到这个问题的声音信号时，信号确实相当微小，你手机中的输出放大器会将这个微弱信号放大，这样可以让你通过耳机（或扬声器）清晰地听到。

吉他放大器是另一个模拟电路放大器的例子，如图 2-4 所示。当吉他琴弦振动时，吉他上的拾音器将这个振动转化为微弱的电信号，这些信号通过电缆传送到吉他放大器，吉他放大器里面几个不同的放大器彼此连接，一个放大器的输出端和下一个放大器的输入端相连，如图 2-5 所示。这些放大器被称为级联连接。每个放大器依次放大信号的振幅，直到这个信号足够使一个大的扬声器发出充满整个房间的吉他声音。

这个世界的本质上都具有模拟性：音量、天空的亮度、温度和你的体重、杯子或湖中水的数量、汽车的速度、飞机的高度、一片草叶的长度等，它们的数值变化都是连续的。不过为了测量、记录和控制这些模拟参数，数字技术被越来越普遍地使用。下一章将讲述数字的概念和数字电路。然后在第 4 章，我们将返回模拟电子电路的世界，着眼于那些广泛的消费电子产品中的模拟电路的组件。

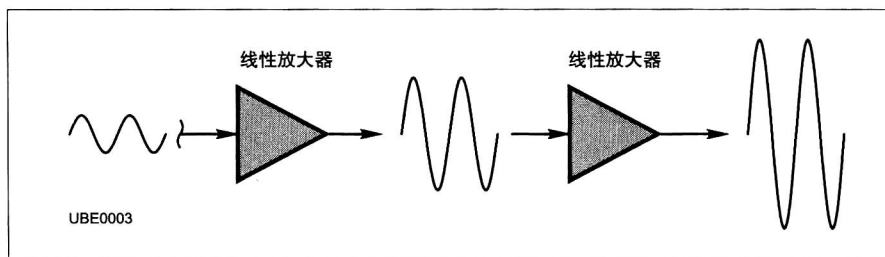


图2-5：两个线性放大器级联连接，一个放大器的输出端连接到下一个放大器的输入端。每一个放大器，称为级，提高输入端输入的一定数量信号的振幅。在话筒或吉他输入端到扬声器输出端之间，吉他放大器有4或5个级。



复习检测：-----

答案：-----

2.1 模拟电路是：

2.1 d

- a) 只有少数几个电子器件
- b) 只存在于电池供电的设备中
- c) 只在手机中的电路
- d) 有时也被称为线性电路

2.2 b

2.3 d

2.2 一个调频或调幅的收音机中使用的调谐旋钮可能：

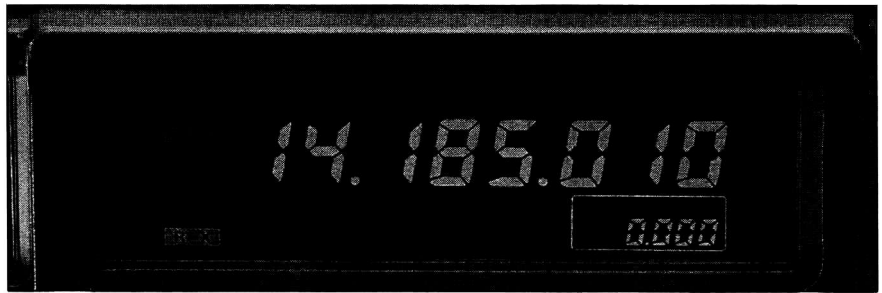
- a) 只有数字电路
- b) 只有模拟电路
- c) 同时具有模拟电路和数字电路
- d) 至少一周需要维修一次

2.3 和手机上你对着说话的话筒相连接的是：

- a) 耳机
- b) 天线
- c) 电池
- d) 放大器

## 第3章

# 数字电子电路



现代业余无线电收音机采用数字电子显示工作频率

### 目录

- 二进制数字
- 储存数字信息
- 复习检测

# 二进制数字

正如你所知，当今世界有着形形色色的电子设备，而且它们涉及到的数字电路增加得越来越多。首先，让我们来尝试了解什么是数字电路吧。

数字信息基于二进制。二进制采用的是以2为基数的记数制，只用数字0和1。人类对十进制系统非常熟悉，十进制基于10为基数的记数制，有10个符号（0、1、2、3、4、5、6、7、8和9）。

在数字电子技术中，一个设备只有几种有限数量的状态（相对于模拟电路技术中电压或其他物理量的连续变化）。一个很好的二进制设备的例子就是控制房间电灯的墙上开关。开关要么是断开（二进制0），要么是闭合（二进制1）。就是这样，在二进制中只有0或1，没有其他状态存在的可能。二进制的0和1被称为 比特（比特是二进制的简称）。

用像晶体管这样的有源器件很容易构成数字电路。这个电路要么接通，要么断开，它可以在一个很大的温度和湿度范围内工作，可以用新电池或即将耗尽的电池工作。在实际电路中，一定范围内的电压值可以用来表示二进制的1和0（见图3-1）。

相反，用数字电路很难做出能在一定范围变化的输出电压以及能表示一个十进制数范围的电路，数字电路在温度和电源电压的变化时可保持输出值不变。要么闭合要么断开，这就是为什么在这么多应用中数字电路用二进制而不是十进制。

## 位数越多越精确

好吧，现在我们意识到如果我们都用一个数位，那么二进制系统就存在一个问题。用一个数位我们只能表示开或者关，但很多时候我们关心的事（例如调频电台的频率、体温、汽车燃油箱内有多少燃油、一个比萨饼的价格）需要的是比1和0（开或关）更多的数字信息。解决问题的办法是使用更多的数位，使用的数位越多，表达的数值越精确。例如，我们是否满意使用数字体温计测量体温，显示98°F（华氏度）、99°F或100°F，而不是98.62°F呢？也

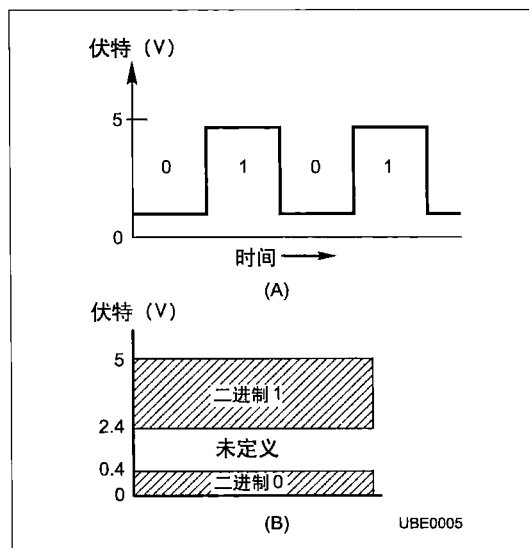


图3-1：二进制状态中的0和1可以用两个不同的电压值来代表，例如图（A）中的0V和5V。在实际电路中，0和1可以用一个电压范围来表示，如图（B）所示。

许我们希望精确到  $0.1^{\circ}\text{F}$  ( $98.6^{\circ}\text{F}$  相对于  $98^{\circ}\text{F}$ )。在二进制中，我们可以通过使用更多的数位来表示温度，然后将二进制信息转换成十进制格式。

音频 CD 使用 16 数位或者 18 数位来表示音乐振幅强度的范围。如果使用 16 数位，就可以有 216 即 65 536 个电压值，如果使用 18 数位，则有 218 即 262 144 个电压值可以使用。这些电压值的数值范围非常大，可以准确转化为数字音频 CD 前的原始模拟信号的声音。

这个技术可以将原始的模拟音频信号很好地复制，因为用这些高数量的数位（高精度）可以用来表示非常微小的电压（和它所代表的声音的响度）差异。幸运的是，使用调制解调器集成电路技术，可以非常容易，而且相当便宜地做到，只要在数字电路中增加所需要的数位。

除了音频，视频信息也被转换存储为数字格式（例如 DVD）。许多数字视频文件是用 8 位来表示每个像素（在显示的图像中，很多像素中非常小的一部分）的亮度。上面谈到用 16 位或 18 位来表示声音的响度，为什么只用 8 位来表示亮度呢？简单地说，8 位对大多数人的眼睛来说已经足够了。8 位可以有 28 或 256 种亮度。更多的像素实际上没有必要，

一般人对于用超过 8 位（256 种）来表示亮度的图像时，看到的图像质量不会有任何提高。

同样，如果一个温度计显示你的体温是  $98.6237^{\circ}\text{F}$ ，对于你是否发烧来说，这个精确度太高了。只要略多一位，显示  $98.6^{\circ}\text{F}$  或者  $98.7^{\circ}\text{F}$  就够了。这是低精度，但已经达到预期的测量目的了。

## 数字电路和模拟电路的组合

用数字显示频率的调频或者调幅收音机，它的调谐同时具有模拟电路和数字电路。数字部分担任调谐（设置无线电收音机正在调谐的频率），并告诉用户使用的频率。收音机中其他部分的电路是模拟电路，这里同样也是，数字电路的位数取决于你的实际需要。通常将你的调频收音机调到  $91.3\text{MHz}$ ，而不是  $91.29735\text{MHz}$ 。

大多数手机有很多的数字电路而有较少的模拟电路。但最起码手机中的输入的信息是模拟格式的（用户的语音），输出的信息也是模拟格式的（你听到的通话人的声音）。坦率地说，对于用户来说，手机中有多少数字电路并不重要，只要能用手机订到比萨饼，并能清晰地让比萨饼店知道你是否需要比萨饼上加凤尾鱼。

## 储存数字信息

如果用数字格式储存信息，储存信息廉价、简便而且可靠。CD 或者 DVD 是用强大的激光烧成极其微小的点（也称为坑，见图 3-2）或在塑料上铸模的方式，在盘上弯曲的轨道上储存二进制的 1 和 0 来储存数字信息。如图 2-3 所示，为了读出这些数字信息，从一个较弱的激光器发出一束狭窄的光束照在这些弯曲轨道上的微小的点上，这些点将这些光反射到光电探测器或者将这些光散射。由于磁盘在激光 / 光电探测器下旋转，从光电探测器中传出的是一串 1 和 0，表示字母和数字（如 Q、f、Z、7、4）。当这些字母或数字被其他电路接收和转换，结果可能是一个文件、一张图片或者是一首歌曲。

这些坑极其微小，宽度大约是 0.5 微米（ $0.5\ \mu\text{m}$ ），长度大约 1.0 微米（微表示百万分之一）。让我们来感受一下这个尺寸，一个典型的自动铅笔的笔芯的直径是 500 微米。由于坑的尺寸非常微小，一张 CD 可以容纳大约 650 百万个字节，相当于 5200 百万个位。

理解字节的概念非常重要，这是许多规格的计算机的基本单位。例如，一台电脑的内存可能是 2 千兆字节（2 GB，意思是 20 亿个字节），而硬盘的容量是 100GB。

那么，什么是字节呢？一个字节是一连串 8 个位，可以用来表示一个符号，比

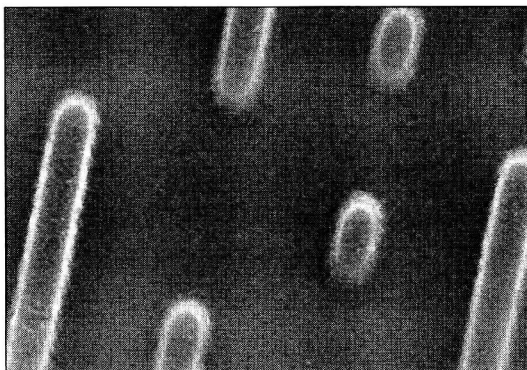


图3-2：从电子显微镜中扫描的CD上的坑。一个坑的宽度大约是0.3微米（ $0.3\ \mu\text{m}$ ）。作为比较，人的头发的直径大约是 $75\ \mu\text{m}$ 。（照片由罗切斯特大学光学研究所提供）

如字母、数字和标点符号。字母 A 以 8 位 ASCII 码（美国信息互换标准代码）表示是 01000001，其他一些 8 位 ASCII 码，比如 DEL（字母 delete 的符号）是 01111111，\$ 是 00100100，a 是 01100001，而 9 是 00111001。所以在 CD 上，如果你的电脑用 ASCII 码储存了数字 9，就会有 8 个点（8 位组成一个字节）。

在第 5 章中，你将看到用一些数字电路组件来处理位和字节，这些组件通常在手机和其他消费产品的电路中使用。

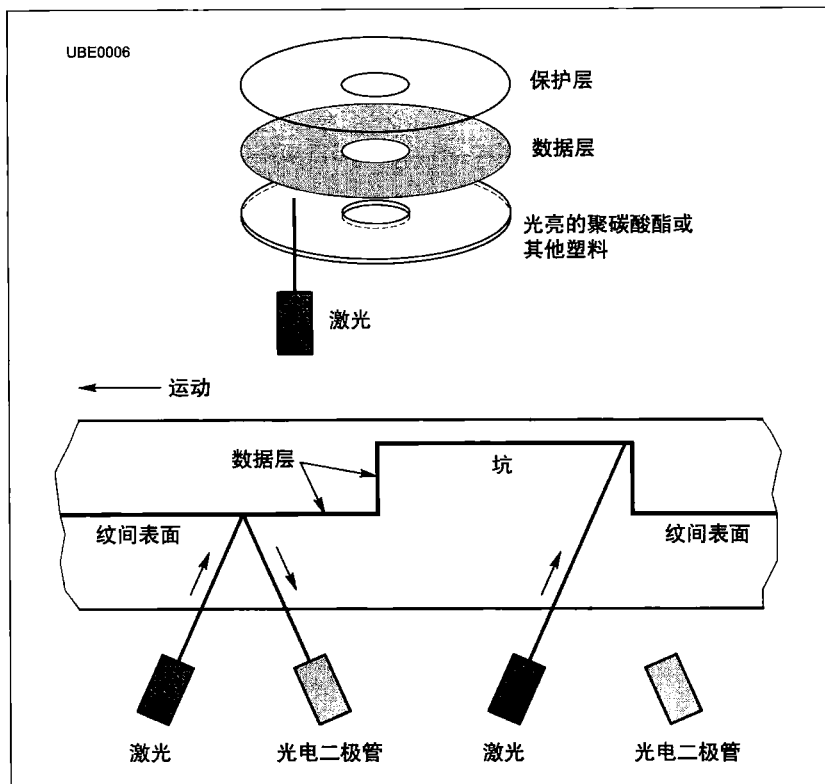


图3-3：数据如何从CD上读出简易图。当激光照射到纹间表面上时，光被反射到光电二极管，当激光束找到坑时，光束被散射，没有到达光电二极管。随着CD旋转，从光电二极管传出的电信号是一串1和0，这是转换成字节的信息。

## 复习检测：-----

### 3.1 数字电路：

- a) 仅仅只在少数电子设备中存在
- b) 用很多不同的电压来表示数字
- c) 基于二进制数字系统
- d) 用手指表示数字

### 3.2 音频CD：

- a) 用模拟格式存储音乐
- b) 使用16或者18位存储音乐的振幅
- c) 做个非常好的摆在茶杯下的茶杯垫
- d) 有数百万个小的激光器嵌入其中

### 3.3 一个字节是：

- a) 8位
- b) 零食
- c) 声音响度的单位
- d) 相当于DVD中的像素

## 答案：-----

3.1 c

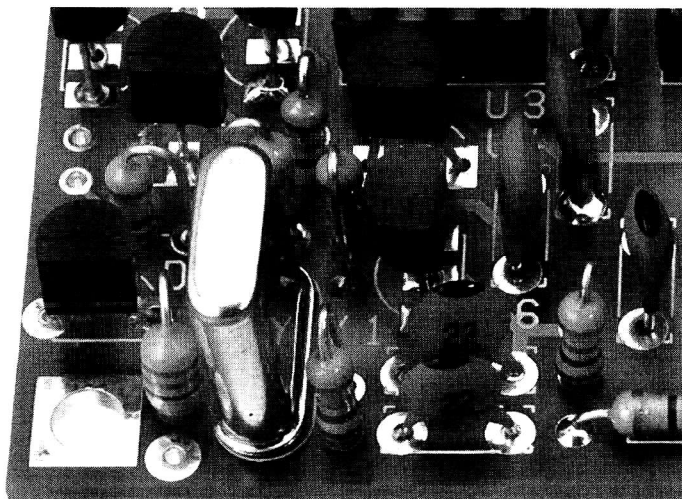
3.2 b

3.3 a



## 第4章

# 模拟电路的组件



振荡电路是模拟电路中产生信号的模块

### 目录

- 放大器
- 滤波器
- 混频器
- 振荡器
- 电源
- 复习检测

# 放大器



任何一块模拟电路设备，如收音机或电视机，都是由大量较小的电路或者组件一起工作，构成最终产品。本章将简要讨论一些非常重要的组件以及这些组件的用途。

正如第2章中简单讨论的那样，放大器是一个电路，它接受一个输入信号（如传入话筒的使用，或者是收音机通过天线获取的信号），并使这个信号变大（即增加了功率）。当然这些功率不会无缘无故地产生，这些增加的功率来自于电源，如电池或者是电力公司提供给你家的电能。

从放大器输出的功率可能输送给扬声器或者天线。试想一下助听器：从话筒中输入的微小信号被放大，然后输入到佩戴者耳道中的微型耳机（小的扬声器）。这个输出的功率可能有千分之几瓦特，但它足以让助听器的佩戴者了解别人对他或她所说的话。很小的输出功率意味着电池可以持续工作很长时间。

另一方面，电视台用于载有视频（图像）信息的RF（射频 无线电频率）功率放大器，输出功率可能高达300 000W！这个功率足够供应大约300个家庭对电能的需求，这也是将电视信号发送到千家万户所需要的能量。用于商业广播电视台或广播电台发射的电能花费每天高达数千美元。图4-1显示的是在业余无线台中常见的功率大小比较适度的射频

放大器。

正如第2章中所讨论的，通常会将两个或更多的放大器连接在一起，通过几级放大，使信号达到需要的强度。有一个非常重要的概念，那就是所有的这些输出功率，无论是千分之几瓦或者是数十千瓦，都是由外部电源提供的电能转化而来。

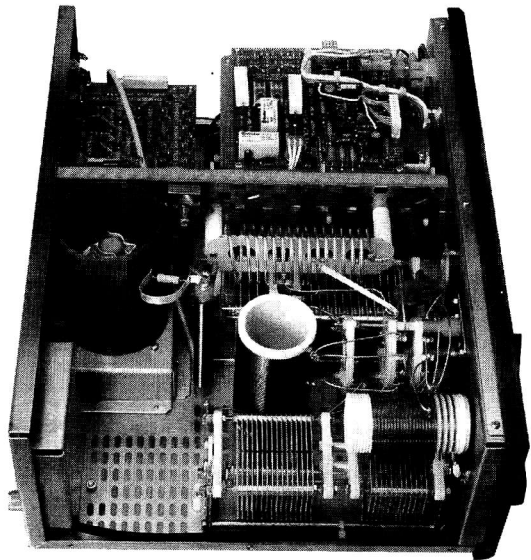


图4-1：这是一个业余无线电台功率放大器的内部结构，它将100W的信号放大到1000W。这个放大器单元使用一个电子管，并且从交流电获得电能。

# 滤波器

**滤**波器是用来选择或过滤掉一定范围的频率。例如，立体声放大器上的高音控制可以增加或者削减音频信号中的较高的频率。

**陷波滤波器**可以用来消除噪声或对你想听到的信号造成干扰的信号，例如，在摇滚音乐会上的话筒可能收到音乐厅中电源线（用于照明）产生的频率为 60 赫兹（Hz）的噪声。可用一个 60Hz 的陷波滤波器从话筒中去除这个干扰，而允许高于或低于这个 60Hz 的陷波器的频率的信号被发送并放大到音乐厅的扬声器。

**带通滤波器**可以允许一定范围的频率通过，而拒绝低于或高于这个范围的频率通过。例如，在人的声音中，理解人们说话的重要频率范围在 300~4000Hz。在助听器中，对于这个频率范围，带通滤波器非常重要，它可以消除低频（如汽车在路面上行驶产生的隆隆的声音）和高频（汽车风噪）。如果这些声音在到

达配戴助听器的人耳前被阻止，那么言语更容易被理解。

带通滤波器还用于收音机和电视接收机，用来选择你想听（或观看）的频道，而拒绝其他的频道。想想我们调频广播频段，范围从 88~108MHz，你喜爱的频率会是这个频段中的某一个频率，而我喜爱的频率是 91.3MHz（哈佛大学非营利性广播电台）。你的调频接收机的任务是接收从 88~108MHz 的所有电台的信号，然后用带通滤波器从众多的电台信号中分离出你想要的信号，然后发送到一个或多个放大器，这样你就可以听到你选择的电台信号了。用带通滤波器完成这个任务，拒绝了除 91.3MHz 外的所有电台信号。

通常，当电子设备的信号被其他电子设备的操作干扰时会使用滤波器。在图 4-2 所示的滤波器被设计用来阻止通过交流电源线获取的无线电信号。



图4-2：交流线滤波器被设计用来阻止通过电力线获取的无线电信号对电子设备的干扰。

# 混频器

让我们真正清楚地了解混频器。在音响领域，混频器是一个可以有数个音频输入（话筒和 / 或者乐器的拾音器），把其他的输入信号混合产生一个输出信号的箱子。如果有多个输入信号，操作混频器面板的人可以选择每个输入的音频信号输出量的多少。

而在模拟电路的范围内，混频器是一个非常不同的电路组件。在这里，混频器将两个不同的输入信号创建成一个包含一些不同频率的输出信号。例如，如果一个调频收音机的输入信号是 91.3MHz，另一个纯正弦波信号的频率 102.0MHz，那么从混频器输出的两个信号将是 10.7MHz（ $102.0-91.3$ ）和 193.3MHz（ $102.0+91.3$ ），如图 4-3 所示。

事实证明，几乎每个调频收音机都首先将调整接收的无线电信号放大，将接收频率（在上个例子中是 91.3MHz）转换为 10.7MHz，然后

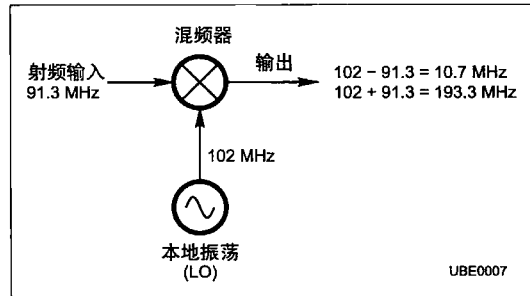


图4-3：混频器输入两个不同的输入信号，然后产生一个包含两个输入频率进行相加和相减后的输出频率。

将这个转换到 10.7MHz 的新的频率再送到几组放大器放大。因此，无论调频收音机调到什么频率，都会被接收机中的 IF（中频）放大器进行放大，增加信号的振幅。顺便说一下，中频放大器中包含一个带通滤波器。

# 振荡器

**振**荡器的功能是产生一个无噪声或无失真的单一频率纯信号。完成这一切所需要的是放大器、滤波器和一些反馈。放大器利用反馈电路将放大的输出信号返送到它的输入端来增加信号的幅度(增益),如图4-4所示。

适当调整放大器的增益和反馈信号的幅度,振荡电路的输出将自我维持。这就是所谓的振荡。为了使振荡器产生所需要的频率输出,在反馈电路中必须包括一个滤波器,使反馈信号中只出现预期的频率。

一个常见的振荡器的例子是会堂的扩音系统,当放大器(增益)的音量调高一点,而响度增加很大时,几乎每个人都经历过扬声器发出的尖叫声并做出痛苦的表情,直到有人重新调整话筒或者调低音量。在这个电声振荡器中的滤波器实际上是一个声波滤波器,是由话筒、扬声器、房间的声学特征,以及在不同频率下它们如何响应而组合成的声波滤波器,在

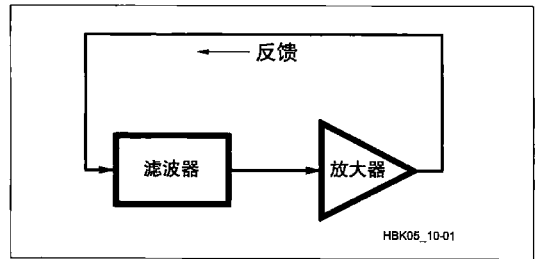


图4-4：一个电子振荡器的方框图。很多放大器有一个输入信号（可能是从话筒或天线输入的），输出信号反馈给另一个设备（例如扬声器），但振荡器产生自己的信号。振荡器产生的频率取决于滤波器和反馈电路。

这个系统中，振荡是极不可取的。

但作为电子电路中的许多用途中，振荡器和有振荡器产生的正弦输出的波形往往是我们极其需要和有益的。电子变频振荡器用于调谐收音机和电视机，也用于测试功放、扬声器甚至人的听觉。

## 复习检测：

### 4.1 所有的放大器：

- 具有高功率输出信号
- 需要用电源获得额外的能量输入
- 必须有多个输入
- 可以用于音频信号

### 4.2 滤波器：

- 煮咖啡时必须使用
- 放大非常微小的信号
- 通过或者阻止一个范围内的频率
- 使你饮用水的口感更好

### 4.3 在模拟电子电路中，混频器：

- 当多个话筒连接到吉他放大器上时需要使用
- 比用勺子搅拌更能做出更好的核仁巧克力饼
- 增加或者减少二进制数
- 产生相加和相减的频率

### 4.4 墙疣：

- 一种插入电源插座的电源
- 可以避免每天两次清洗墙壁
- 振荡调谐收音机
- 将无线电信号转换成音频信号

# 电源



电源是提供电能，使其他电子电路工作的电路。电源的一个简单的例子是手电筒中的电源。两节 D 型号（1 号电池）电池提供能量去点亮灯泡，这两节 D 型号电池就是电源。手机里有一块电池，这个手机里电源电路可为手机里的模拟和数字电路提供几个不同的电压。

有些电源工作于交流电，并将 120V 的交流电转换，提供出一个或者多个直流电，供给其他电子电路工作。例如，电视机的电路中需要四五种不同的电压，都是从一个电源中获得的。

手机中的电源可能像集成电路一样小，大小如你的拇指指甲。很多电子设备（掌上电脑、MP3 播放器、应答器、手机）可能是用供电柜（有时称为“墙疣”，如图 4-5 所示）提供电能，或者为电池充电。对于一个大的射

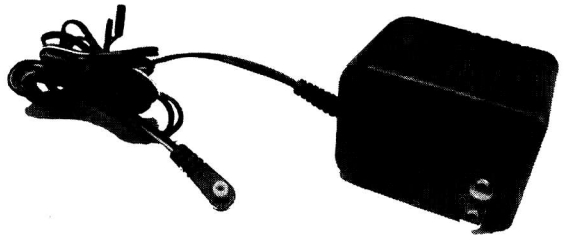


图4-5：图示为一个“墙疣”电源。它插入交流供电线（120V交流电），以直流电形式为其他设备提供能量。有数以百计的不同配置的墙疣——不同的电压、不同的最大电流，甚至不同的极性（中心针为+，或者中心针为-）。

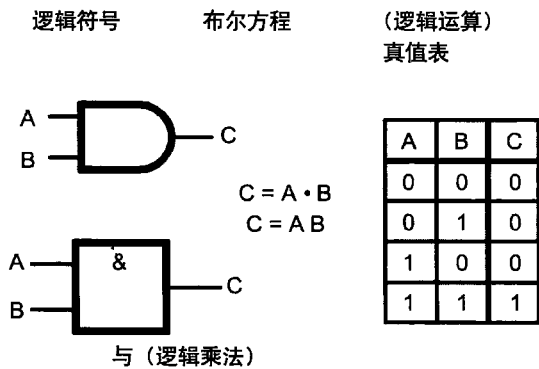
频发射机（电台或电视台），它的电源可能会像汽车一样大。不管其大小如何，电源工作的原理都是一样的：提供给和它相连的电子电路或者电子系统所需的能量。

答案：-----

- 4.1 b
- 4.2 c
- 4.3 d
- 4.4 a

# 第5章

## 数字电路的组件



数字逻辑门是这章中若干组件之一

### 目录

- 处理二进制
- 数字设备
- 复习检测



# 处理二进制

这是一个数字电路和数字系统中使用的功能模块的简短介绍。回想一下，数字电路的基本能力是需要处理，有时需要储存代表 1 或 0（开和关）的二进制。一旦一个处理二进制的基本电路设计出来，复制这个电路并制作处理大量二进制的大型电路将会非常容易。

例如，我在写这个段落时，每隔几分钟，我告诉我的电脑保存这个文档。电脑将这个文档保存到连接在我电脑 USB 口上的一个 4GB 的记忆棒里（闪存）。这个记忆棒只存储了不到一半的容量，但保存了几乎最近两年来我写的所有的文章（除了照片）。

来显示一下 4GB 闪存的不可思议的存储容量（4GB，4 000 000 000），如果一张纸上的文档有 60 行，每行有 80 个字符，存储这张纸需要大约  $60 \times 80 = 4800$  个字节的内存。来看看这个闪存能存储多少张，我们用 4 000 000 000 字节除以每页的 4800 字节，我们得到的是 833 333 页。

一令纸约 2.5 英寸厚，大约 500 张纸。所



这个很小的4GB闪存可以存储和833 333张纸包含的一样多的信息。

以 833 333 除以每令 500 张纸，我们得到的是 1667 令纸。这确实是很多的纸！用 1667 乘以每令 2.5 英寸，这堆纸的厚度是 4167 英寸（347 英尺）高。而所有这些文本内容可以全部存储在这个很小的闪存里。

# 数字设备

**最**简单的数字设备是开关和继电器。不过电子数字系统是使用数字 IC 集成电路来产生、检测或以某种方式处理数字信号的。不过，无论是开关还是微处理器，所有的数字系统都使用已知常见的数学逻辑原则。

在二进制数字逻辑电路中，每一个输入的组合产生一个特定的输出或者是输出的组合。数字电路完成加、减、乘、除基本上都使用二进制系统（基数 2），使用数字 0 和 1 来分别表示两种状态。

## 逻辑门

逻辑门是一个拥有一个或者多个输入端和通常是一个输出端的单一数字模块。最简单的逻辑门是非门，它有一个输入。如图 5-1 所示。如果输入值是 1，则输出值为 0，而如果输入值是 0，则输出值为 1。

一个普通的逻辑门是与门，它有两个或者更多个输入端和一个输出端。只有当所

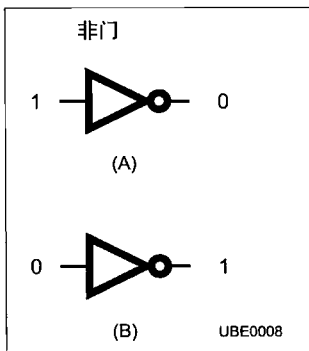


图5-1：A部分非门的输入值是一个“高”逻辑电平值=1，在输出端是一个“低”逻辑电平值=0。B部分中，输入值是0，输出值是1。

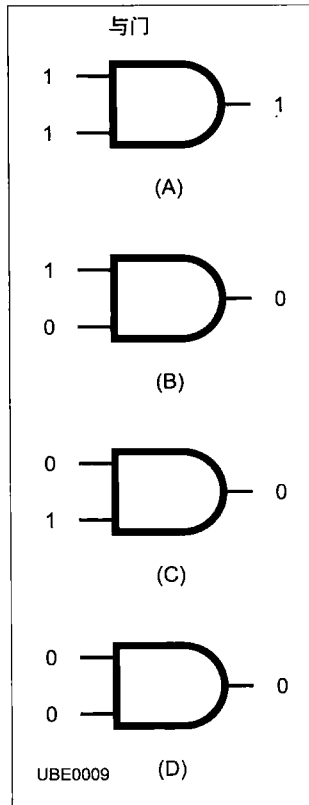


图5-2：上面显示了与门所有可能的输入值的组合。注意，只有当所有的输入值是1时，输出值是1（A部分）。如果有任何一个输入值是0，或者所有的输入值都是0，那么输出值就是0。

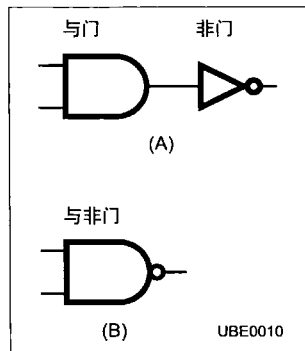


图5-3：与非门是在与门的输出端添加一个非门构成。逻辑电路设计师们发现复杂的设计（例如，一个数字手表或者手机的逻辑电路部分）可以使用与非门而变得更简单。

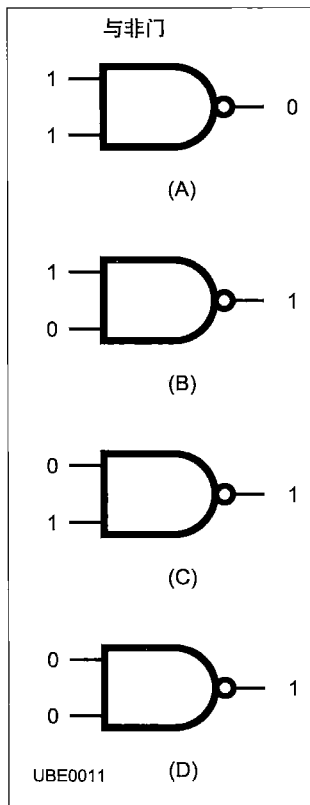


图5-4：上面显示的是与非门所有可能的输入组合。注意，只有当所有的输入值为1时，输出值为1（A部分）。如果有任何一个输入值为0，或者所有的输入值都是0，那么输出值为1。

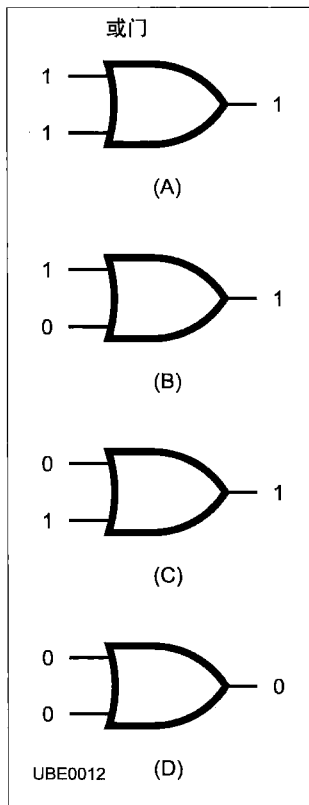


图5-5：上面显示了或门所有可能的组合。请注意，只有当所有的输入为0，输出才是0（D部分）。如果任何一个输入是1，或者所有输入都是1，则输出为1。

有的输入值都为1，则输出值为1；其他可能的输入值的结果都是输出值为0（如图5-2所示）。当你想打开车载收音机是一个与门情景的例子。钥匙必须插入点火开关转向开的位置，而车站收音机的开关必须处于打开的状态。

有时将一个非门连接到与门的输出端，这样就构成了与非门（如图5-3所示）。只有

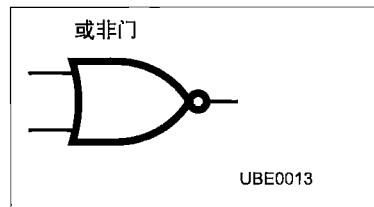


图5-6：这个或非门是将一个非门连接在或门的输出端构成。只有当所有的输入为0时，输出为1，如果有一个或者全部的输入为1，则输出为0。逻辑设计师们发现，像与非门一样，使用或非门合适使复杂的设计变得简单。

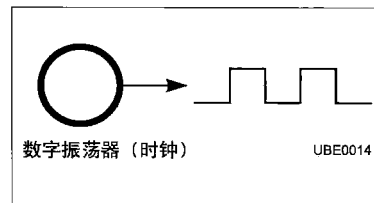


图5-7：数字振荡器或时钟是数字系统的节拍器。在手表、手机、电脑和DVD播放器中有时钟，事实上，在所有的数字设备中都有时钟。数字振荡器或时钟输出的是一个具有固定的、非常稳定的频率的方波。

当所有的输入值为1时，输出值为0；所有其他可能的输入，得到的输出值都是1（如图5-4所示）。与非门提供了比与门更有灵活性的设计。

或门像与门一样，有两个或者多个输入端和一个输出端。只有当所有的输入值为0，输出值为0；所有其他可能的输入值，其输出值都是1（如图5-5所示）。汽车上的顶灯是或门

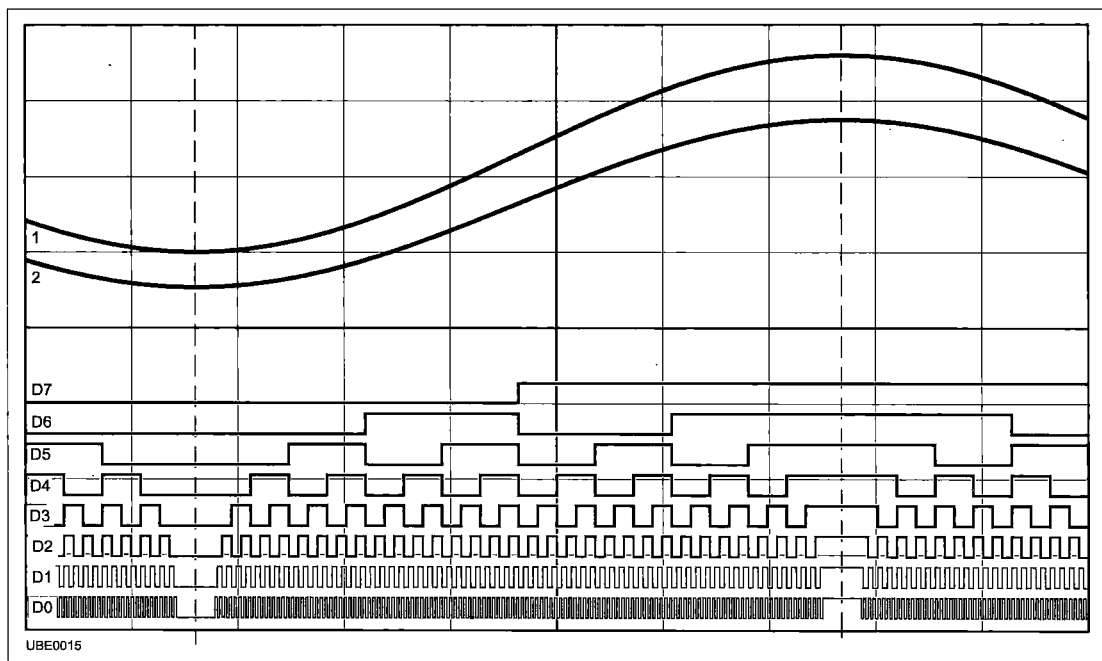


图5-8：在显示图片的顶部是示波器显示的两条纯正弦波描述，是输入到8数位模拟至数字转换器的模拟输入信号。底部的8条痕迹是A/D转换器输出的数字电平（0或1）。D0是最低位，而D7是最高位。随着模拟信号振幅的变化，8数位的数字（一个字节）从00000000（当正弦波在其最低值时）变化到11111111（当正弦波在其最大值时）。

情形的一个很好的例子。如果任何车门打开，或者有一个以上的门打开，汽车顶灯发光。另一种情形是，只有当所有车门关闭时，顶灯才熄灭。

如果非门连接到或门的输出端，就构成了一个或非门（如图 5-6 所示）。或非门提供了比或门更有灵活性的设计。或非门的输出和或门的输出相反。

## 计时

数字系统里的时钟是一个用逻辑门做成的振荡器，它可以产生源源不断的准确间隔脉

冲(如图 5-7 所示)。就像一个管弦乐队的指挥，这个时钟用来确定什么时候所有其他数字电路改变它们的输出值。

通常这个时钟的频率由晶体精确控制。你的数字手表里就有这样一个时钟，它由一个振动频率为 32 768Hz 的晶体控制。一连串的数字电路（称为触发电路）连接到这个时钟上，将 32 768Hz 的频率除以 2，首先得到 16 384Hz，然后得到 8192Hz，4096Hz，2048Hz，依此类推，直至达到 1Hz。这个 1Hz 的信号允许你的数字时钟以非常精确的 1 秒的增量跟踪时间。

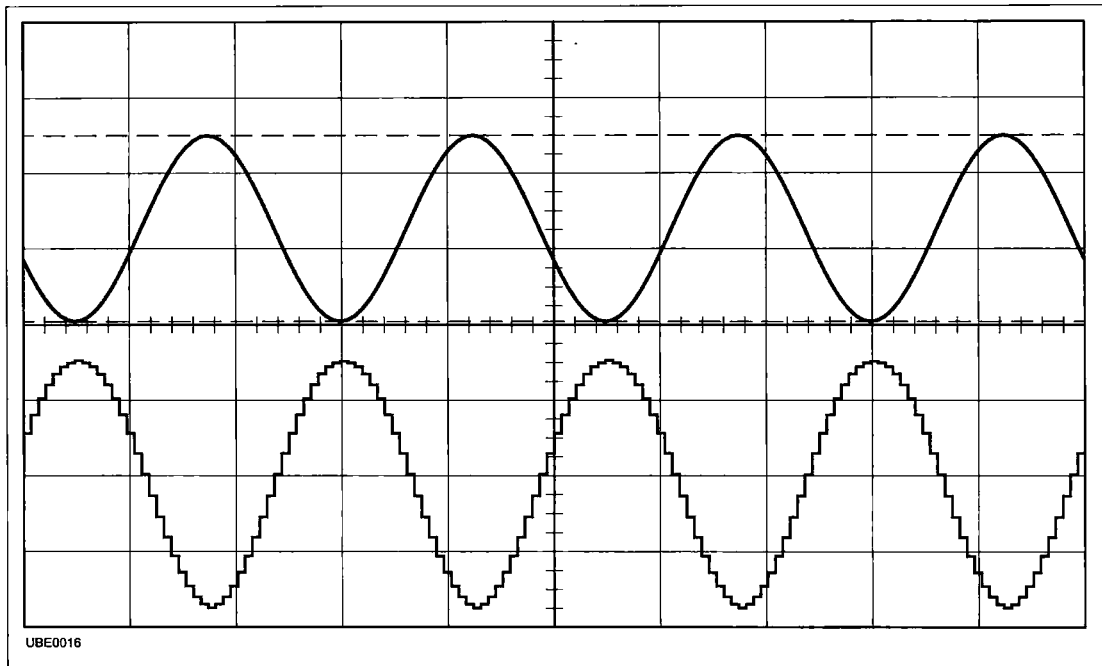


图5-9：在显示图片的顶部是示波器显示的一条纯正弦波描述，是输入到8数位模拟至数字转换器的模拟输入信号（A/D）。底部的痕迹显示的是数模（D/A）转换器的（反相），模拟输出，这个转换器的输入信号是图5-8中的8数位数字信号。请注意，这个模拟输出信号是一个反相的、失真的、近似于输入信号的信号。我们可以看到它从一级跳入一级，而不是匀滑变化，因为输入的模拟信号的变化比模拟至数字（A/D）转换器处理的要快。在任何时候模拟信号转换成数字信号格式时都会产生一些失真。使用一个快速A/D转化器，并用较多的数位（例如，用16位代替8位），产生的失真就可以忽略。

## 存储器

锁存器是一种使用逻辑门组成的存储器。通过简单暂存，它会记住（通过存储电压电平）二进制值（0或1）。电梯按钮就是锁存器的很好的例子。如果你想乘电梯上楼，你只需按一个向上的按钮，锁存电流记住你的要求，开启向上箭头按钮的灯。你不需要一直按住向上的箭头按钮，或不停重复按这个按钮（虽然我们很多人都这么做）。

触发器，也被称为双稳态多谐振荡器，

存储一个比特的信息。它像一个锁存器，不同之处在于它有一个时钟输入。在触发器输出端的变化与来自时钟产生的数字脉冲同步，虽然一个触发器只能存储一个数位，但把触发器组合起来就可以用来计算和记录。时钟输入非常重要，它可以确保所有的数字电路在同一时间执行它们的任务。

寄存器是多个触发器的集合，用来存储多个数位（通常是8位或者一个字节）。因此，当你按下计算器上的一个数字，计算器里的寄存器将会记下这个数字，用于后面的计算。

计数器是有着多种用途的多个触发器的集合。其中一个用途是向上或者向下计数。一块手表或一个秒表就是计数器向上计数的一个例子。微波炉上的定时器是计数器向下计数的例子，你设定定时 30 秒，它从 30 秒开始向下倒数到 0，足够给你吃剩的比萨饼加热。

## 转换器

模拟信号到数字信号（A 至 D）转换器将从话筒、摄像机、电子温度计、压力传感器或光电池获得电信号（电压），将这个电压转换成数字信息。输出的数位的数量取决于信息将被如何使用。出色的音频需要 16 位或者 18 位，而你电话应答机的音频可能只有 8 位。因为只有较少的数位，应答机不具备 CD 播放机的音质，但它通常足够复制电话的声音。图

5-8 显示为一个模拟到数字转换器输入端的模拟正弦信号，和一个对应输出的数字波形。

数字信号到模拟信号（D 至 A）转换器将输入的数字信号转换成一个模拟电压输出。CD 播放机使用数字到模拟转换器从 CD 机上获取数字信号 1 和 0，再重新创建一个模拟信号，就是以数字格式存储在 CD 上的音乐。和模拟到数字转换器一样，位数是数字到模拟转换器的一个非常重要的技术参数。图 5-9 显示了慢速数模转换器将一个 8 个数位的数字输出转换成一个有失真的模拟信号的结果。

还有其他的数字电路组件（包括多路复用器、多路分配器、缓冲器、解码器、运算逻辑运算器和移位寄存器等）已超出了本章介绍的范围，我们介绍给读者的是构成数字系统的基本电路。

复习检测：-----

答案：-----

5.1 关于与门：

- a) 有一个输入和一个输出
- b) 必要关闭，这样奶牛不会逃出
- c) 只有当所有的输入是“高位”时，输出才会是“高位”
- d) 有一个输入和两个输出

- 5.1 c
- 5.2 a
- 5.3 d
- 5.4 b
- 5.5 b

5.2 关于数字系统中的时钟：

- a) 创建一个精确间隔的脉冲
- b) 应该在每年的4月调到日光节约时间
- c) 告诉使用者日期和时间
- d) 使用AAA电池

5.3 关于锁存器：

- a) 保持牧场大门关闭，这样只有牧民能够进入
- b) 有三个输出状态：高位、低位和任何可能
- c) 有一个时钟输入
- d) 是一个数字存储设备，它可以记住一个“1”或者一个“0”

5.4 在数字电路中，计数器是：

- a) 是时钟的另一个名称
- b) 是触发器的集合，用来计数或倒计数
- c) 是你在餐馆吃饭时坐的地方
- d) 把时间信息转换成二进制格式

5.5 数字至模拟转换器可以用有：

- a) 将模拟信息转换成数字格式
- b) 将数字信息转换成模拟格式
- c) 使汽车废气得到更完整的燃烧
- d) 将欧元换成卢比

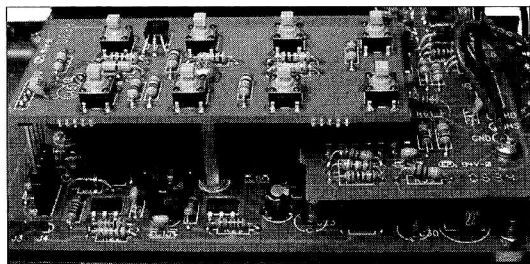
## 第二单元

# 直流电路概念

我们已经在第一单元中看到电子电路能完成一些简洁和实用的工作，以及用构件来创建电子系统，现在我们应该熟悉一些电气和电子学的语言和基本概念了。

大多数电子电路以某种特定的方法处理信号。信号可能和闭合开关触点产生的电子脉冲一样简单，当然，大多数信号都要复杂得多。无线电接收机通过天线获取信号，然后把信号转化成声音。电视机接收信号，然后在屏幕上形成图像。收音机和电视机的信号不断变化。收音机和电视接收机在将这些信息转换成声音或者图像时发生很大变化。在这样的电路中有很多电子零件。当你查看收音机的内部，你可能会认为要弄清楚这样的电路是如何工作的，对你来说几乎是不可能的。

在整个电路中，每个部分都有具体的工作。当这些信号通过时，每个部分都以特定的方式工作，我们通过查看每个部分的任务来分析电路。然后我们研究信号经过它产生的效果。通过这种方法，即使是最复杂的电路，我们也能弄明白。



第二单元中的章节描述了许多元件和设计电路的概念

我们不从研究电路是如何影响改变信号来开始我们电子学的学习。仅仅掌握信号在做什么这样的线索会非常棘手。我们将通过观察恒定不变的信号来开始我们的学习。这样你可以集中精力学习基本原理，而不用努力去了解信号在做什么。

因此，你的首要任务是研究电子电路中稳定不变的信号的作用。这样的信号能让我们了解很多关于电子电路如何运行的原理。一旦你知道如何分析稳定信号的电路，那么再去理解变化的信号产生的效果就会非常容易。



对于没有变化的信号，电流只向一个方向上流动。只向一个方向流动的电流是直流信号。流动方向不断变化的电流叫做交流信号。当我们在描述这两种电流时，我们常使用缩写DC和AC。有时，直流信号的强度发生了变化，但它仍然是向一个方向流动。在这个单元中，我们将着重于分析流动方向不发生变化的直流信号。

第二单元，从第6章到第13章将给你一些背景知识，让你明白以下现象发生的原因：

- ◆当冰箱启动时，房间里的灯光会短时变暗
- ◆汽车上的跨接电缆是如此的厚实沉重
- ◆当很多电器的插头插入一个插座时，断路器常会跳闸（或熔丝熔断）
- ◆你的电费比你预期的要多
- ◆闪电时，树可能被炸裂
- ◆用电池给设备供电比插入市电供电更为昂贵
- ◆拔掉插头后，电视机或电脑的显示器就会一片漆黑
- ◆电力公司一般会在靠近你房子附近架设高压电（大约13 000V）

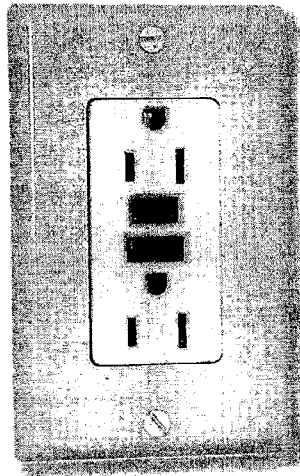
不过我们将要进行一些学习，不仅需要新的词汇（伏特、安培、欧姆、焦耳和瓦特），而且需要一些数学知识（不用担心，我们将使用计算器使事情变得简单），学会用科学计数法和工程符号来表达很小数字以及其他很大数字的技巧。

### 在这一单元你将学习：

- ✓关于电压，使电流通过电路的压力
- ✓关于电流，电路中电流大小的度量
- ✓通过与磁场对比，以及通过观察电场力在电场空间的表现效果，了解什么是电场
- ✓我们可以通过选择导体、绝缘体或电阻来组成电路，轻松控制流过电路的电流大小
- ✓有两种基本的电路：串联电路和并联电路
- ✓如何应用欧姆定律。这是电子学中计算电路的一个非常重要的原理
- ✓关于另外两个电子学重要原理，基尔霍夫定律
- ✓电能是什么
- ✓怎样计算功率。使用能量的快慢

## 第6章

# 电学术语：电压和电流



你可能知道，你家中电源插座提供120V的交流电，但这到底是什么意思呢？

### 目录

- 电压——电流的压力
- 水压类比电压
- 电流——流动的电子
- 复习检测

# 电压——电流的压力

大多数人都听说过电压这个术语。汽车蓄电池的额定电压是12V，而烤面包机或电视机要插入墙上的插座，这个插座提供120V电压才能使它们工作。有时，我们看到危险，高压电的警示牌，因为在那附近可能有电力线和变电站。我想我们应该好好探究一下电压这个词的意义。

外面很黑，出门前你会带上手电筒。当你接通开关，一束灯光照亮了你的前方。你曾驻足思考过这束从手电筒里射出的神奇的光束吗？当你接通开关的瞬间发生了什么呢？装在手电筒内的电池储存了电能，当你合上开关时，你给电流完成了一条通路，使电流流过灯泡，这样灯就亮了。

电池以化学能的形式储存了电能，当电

池内部发生化学反应时就产生了电（稍后你会学习到电池是如何工作的）。电池使电流通过灯泡。电池推动电流，使电流运动，然后使灯泡发光。也许你注意到不同的手电筒产生的光强度可能不同。

使用1节5号电池的手电筒发出的光束较小，而使用4节或更多节1号电池的筒发出的光束巨大而明亮，然而最终电池的电能开始耗尽，光束变得越来越小，越来越微弱。像5号、7号、2号和1号这些型号的电池，它们的额定电压都是1.5V。其他型号的电池的额定电压不同。例如，小型的晶体管电池（圆角长方形电池）的额定电压是9V，手灯电池（顶部装有螺旋弹簧的那种类型的电池）的额定电压是6V，车用蓄电池额定电压为12V。还有其他类型，像小的手表电池，有不同的额定电压。图6-1展示的是一些不同种类的电池。

这些额定电压告诉我们一些关于电池将产生多大的压力去推动电流通过电路。你必须为特定的工作需要选择合适的电池，否则电路



图6-1：常见的电池有各种形状和尺寸。对于不同的用途你应该选择与之合适的电池，否则你就可能造成电路被烧毁的危险，或者起码电路不能正常工作。

中无法获得大小合适的电流。如果你试图将一个 12V 的车用电池连接到使用 5 号电池的电池筒上,灯泡将会被迅速烧坏(由于过高的电压)。当然,一节 5 号电池也不可能使你汽车的前灯发光,因为设计时,它们只有在 12V 电压下才能正常发光。

现在找几个电池仔细研究一下。所有的电池都有两个极或者两个部位用来连接导线。一个极标有符号 + (加号) 另一个极标有符号 - (减号)。

有些电子器件(手电筒的小灯泡就是一个例子)可以直接连接到电池的两极,不用考虑小灯泡的哪一端连接到电池的正极。其他电路(几乎所有的电子设备,包括计数器、电子手表或收音机)只有当它们与正确的电极相连,才能正常工作,也就是说,电路的正极输入端必须和电池的正极相连。

图 6-2 显示的是一个手电筒的电路。电路构成了电流流动的完成的路径(回路)。电流从电池的一个极开始,经过连接电池的导线,流过电路的负载(在这个例子中,手电筒中的灯泡就是负载,它是电路中传递能量的部分),接着电流回到电池的另一个极。如果电路不是闭合的,电流将不会流过。这就是为什么合上开关手电筒发光,而断开开关手电筒熄灭。如果电路中没有完整的路径让电流流动,则电路中就没有电流。

在电路中,被称为伏特的单位(通常缩写为 V)度量压力或者推力的大小。这个推力使电流流动,所以我们有时也把电压称为电动势,缩写为 EMF。有时我们还把它们称之为电位或电势。

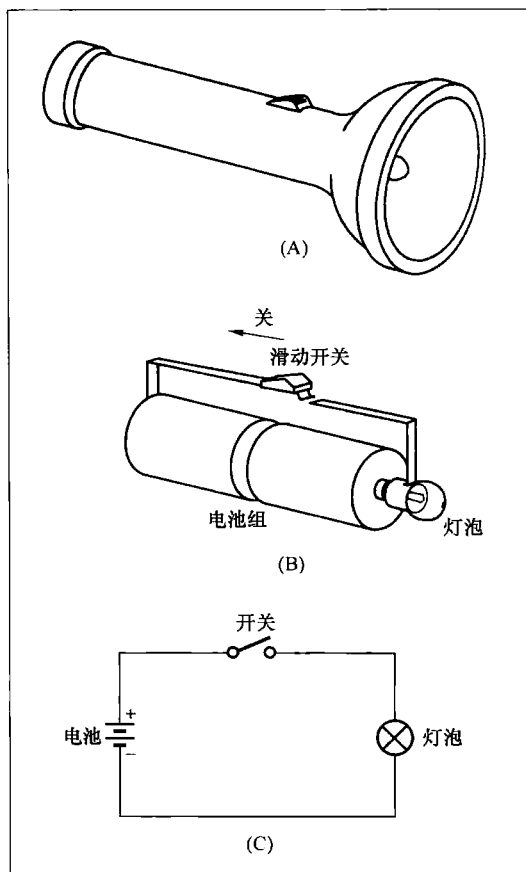


图6-2: 手电筒是简单电路的最好的例子。任何一个电路都有3个重要部分, 电源(在这个电路中是手电筒电池)、导线或其他能传输电流的导体、最后是负载(用电器)或者其他利用电流工作的东西, 在这个例子中, 灯泡作为负载。图中(A)部分是手电筒, (B)部分是手电筒内部的电路, (C)部分是电路图。电路图使用特殊的符号来表示电路中的元件。

# 水压类比电压

理解电压的很好的方法是将它和你已经非常熟悉的水压联系起来。我们很多人都使用过橡胶软管给植物浇水、清洗汽车，或在炎热的夏天喷湿你的朋友。水的压力越大，在软管的另一头流出的水就越急也越多。

图 6-3 展示的是一个几乎装满水的容器。一些水从靠近容器底部的小孔中流出。是什么使水从容器中流出呢？是容器中水的压力使水从小孔中流出。如图 6-3 (A) 所示，当容器装满水时水压很大，从底部小孔中流出的水将会喷射得很远。当容器中的水快流完时，如图 6-3 (B) 所示，水压变小了，现在水就不能喷射很远了。水压的大小取决于水面距离容器底部小孔的高度，容器中的水越多，容器底部推动水流出的水压也越大。

这个例子可以帮助你更好地理解电压，因为电压和水压很相似。电动势或者电压的大小表明电源可推动多大的电流在电路中流动。

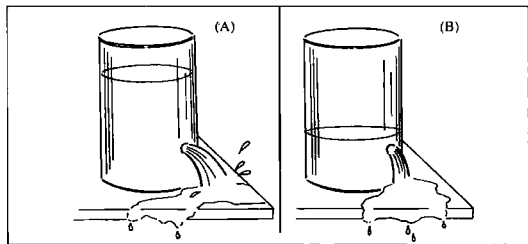


图6-3：容器中水的高度决定了容器底部水压的大小。图中 (A) 部分，容器中装满水，所以有较大的水压，从容器底部小孔喷射出的水的距离较远。图中 (B) 部分，容器中的水快流尽，所以水压较小，喷射出的水也不远。

一个 100V 的电动势比 10V 的电动势要强大得多。在同样的电路中，高的电压比低的电压推动的电流要多。

那么，我们如何能改变应用于电路中的电势、电动势或者电压呢？一种方法是使用更多的电池。一节 5 号电池两极间的电压大约是 1.5V。如果我们取两节 5 号电池，把一节电池放在另一节电池的顶上，我们组成一个  $1.5V+1.5V=3.0V$  的电池。汽车电池使用 6 组电池，每一组的电压是 2V（汽车中铅和硫酸的化学构造和 5 号电池不同）。

如图 6.4 所示，我们看到一节电池产生 1.5V 电压，两节电池有两种不同的连接方法：串联和并联。大多数手电筒中用几节电池串联来增加电压。

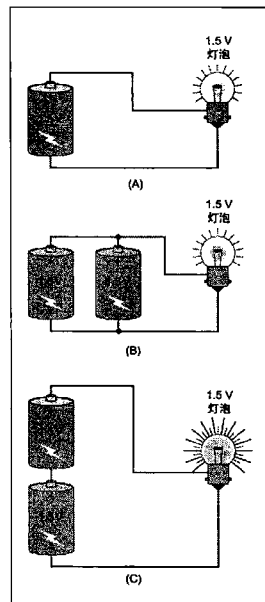


图6-4：图中A部分，给1.5V的灯泡应用1.5V电压，灯泡正常发光。图中B部分，两节1.5V的电池并联连接，作用在灯泡两端的电压还是1.5V，因此，灯泡也能正常发光，但两节电池是图中A部分一节电池持续时间的2倍。图中C部分，两节电池串联连接，现在作用在灯泡两端的电压是3.0V，而灯泡设计的工作电压是1.5V，所以灯泡非常亮，但很快会被烧坏。

# 电流——流动的电子

当你闭合电路，就会发生某种现象。在漆黑的夜晚手电筒的光束照亮你的道路，收音机开始播放，手机发出蜂鸣声或者电脑开始工作。电源（如电池，或者电力网）提供了动力或压力推动电流流过电路。正如我们已经谈到的，我们用伏特来度量这个动力。高电压推动更多的电流经过电路。那么，我们怎样来度量电流的大小呢？

流过电路中电流的大小用安培来描述。我们常把安培简写成 amp，或者简写成 A。在电路中流过的电流的数量称为电流强度。电路中除了要求有确定的电压，而且需要有足够的电流强度来工作。例如，一个业余无线电收发信机也许需要一个 12V 电压，20A 的电流才能使电路工作。一个 60W 的家庭照明灯需要 120V、0.5A 的电流来工作。便携式收音机经常使用 9V 的晶体管电池，这样的收音机只需要千分之几安培（也称为毫安）的电流来工作。有的电路也许只使用百万分之几安培（被称为微安）的电流来工作；一个数字腕表就是使用这么微小的电流进行工作的例子。

## 公制前缀

这是介绍公制前缀的好时机。我们听过毫米（1 毫米是 0.001 米）和千克（1 千克是 1000 克）。公制前缀经常用于电子学中的很多单位中。表 6-1 所列出的是我们最常用的公制前缀。

第三栏显示的是工程符号中的公制前缀

值。参见附录 A，了解更多的关于科学计数法和工程符号的知识。那里有大量的例子和实践问题会帮助你熟悉这些节省时间的符号。

要注意的是，对于大量数的公制前缀（G 千兆，M 兆，k 千）用大写字母，除了千（k）。这是因为在科学和工程中，大写字母 K 被用于开尔文温度的符号，所以按照道理来说，千

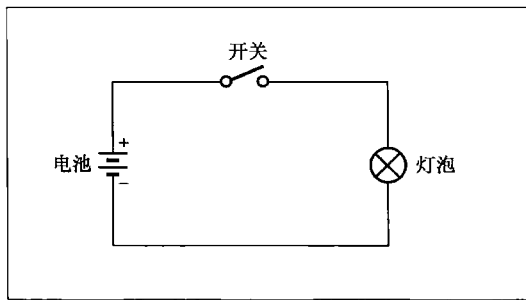


图6-5：这张图是一个简单电路的电路图，它表示的是手电筒的电路。我们在图中标出了每个符号，帮助你识别电路的每个部分。

表6-1：电子电路中常用公制前缀

前缀	符号	值	值
千兆	G	$10^9$	1000000000
百万	M	$10^6$	1000000
千	k	$10^3$	1000
千分之一	m	$10^{-3}$	1/1000
百万分之一	$\mu$	$10^{-6}$	1/1000000
十亿分之一	n	$10^{-9}$	1/1000000000
兆分之一	p	$10^{-12}$	1/1000000000000

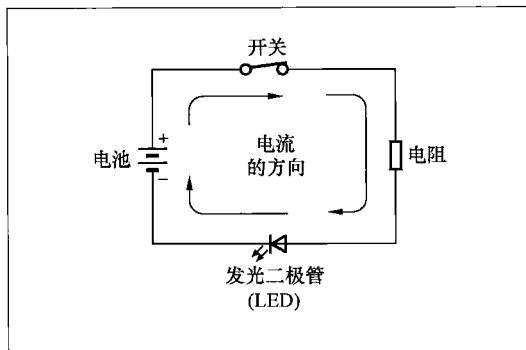


图6-6: 这是一张附加了惯称电流方向的电路图。惯称电流的方向是从电源的正极流出, 流经电路, 然后回到电源的负极。

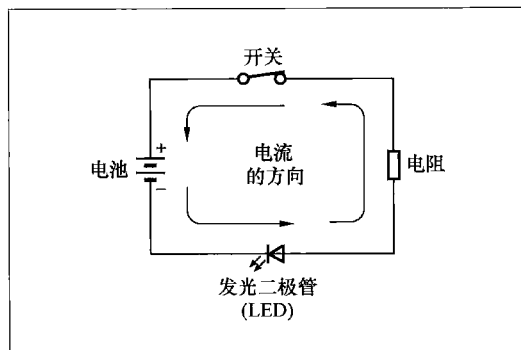
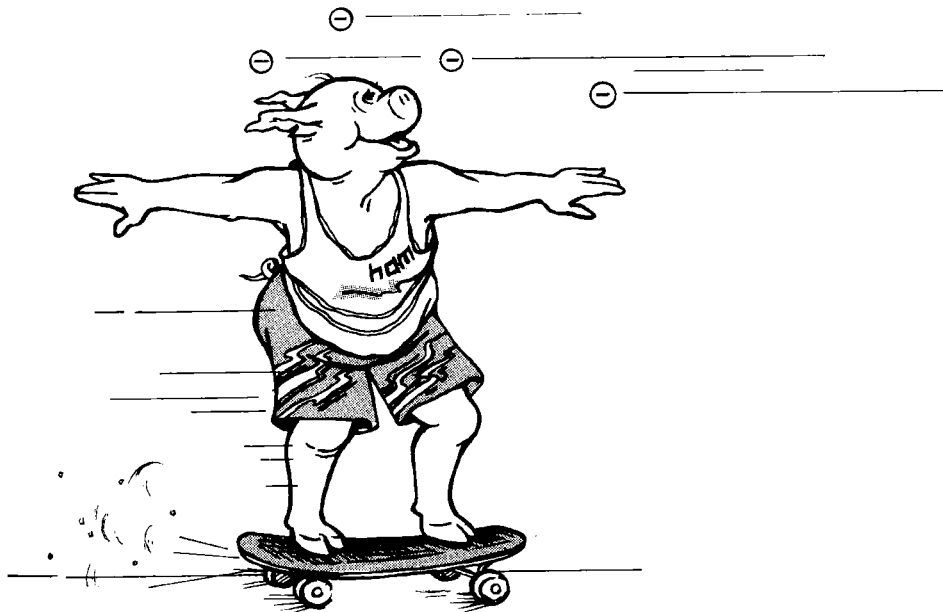


图6-7: 这是一张附加了惯称电流方向的电路图。惯称电流的方向是从电源的正极流出, 流经电路, 然后回到电源的负极。

的前缀应该用大写字母 K 表示, 而现在用小写字母 k 表示。

图 6-5 是一个简单电路 (手电筒) 的示意图。电路图使用特殊的符号分别表示电路中的各个组成部分。电路图展示这些部分是如何连

接构成一个电路的。你是否还记得每个电源都有两个极? 也许有人在想 电流是按什么路径流出电池的呢? 这是一个非常重要的问题, 因为问题的答案将确定电流流动的方向。不幸的是这个问题的答案有两个。



早在科学家掌握了我们今天的电学知识的前几百年，本杰明·富兰克林进行了一些电学实验。富兰克林认为电流从电池的正极流出，流过后电路，返回电源的负极。图 6-6 显示电流从电源的正极流出，流经电路（导致发光二极管发光），然后回到电源的负极。工程师们把这叫做惯称电流。

因为 19 世纪的大量关于电流和电子的实验发现都基于富兰克林的假设，所以在现代电子学的计算中遵守如下约定：电流从正极流向负极。

富兰克林实验后的很多年，科学家认识到在电路中构成电流的是带负电荷的粒子——电子（在后面的章节中你将学习更多关于这个角色——电子的知识）。今天我们知道电子实际上从负极流出，流过电路回到电池正极。图 6-7 显示的是电子流过我们电路的方向。

难道我们不能忽略老的惯称电流吗？当然，我们通常是可以做到的，但是知道惯称电流非常重要，因为工程师在很多计算中都使用

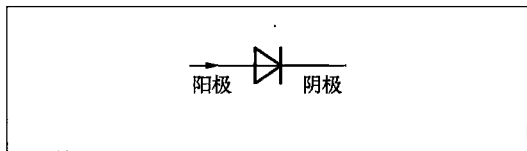


图6-8：这张电路图是图6-2 电路中电子流动的方向。

惯称电流。我们继续使用惯称电流，因为它在很多问题上提供了方便的数学求解方法。通常电路示意图中包括很多种类的箭头，这些箭头指出了电路中惯称电流通过那个部分的方向。例如，图 6-8 表示的是电路图中二极管的符号，箭头表示经过二极管的惯称电流的方向。

在本书中，我们已经非常谨慎地区分了惯称电流和电子流动的方向。在 ARRL 《业余无线电手册》，以及 ARRL 的其他出版物中，也同样谨慎地进行了区分。然而，不是所有的出版物都是如此。所以在你阅读其他有关电子学书籍时，你一定要先弄明白，在涉及电路中的电流时，书中的电流指的是电子流动的方向还是惯称电流方向。



## 复习检测：-----

6.1 DC是电气术语，与之有关的是：

- a) 其他某个国家的首都，是总统住房的所在地
- b) 电流只沿一个方向流动
- c) 电流在流动时改变方向
- d) 介电常数

6.2 EMF是个电气术语，和它意思相同的是：

- a) 电流
- b) 功率
- c) 能量
- d) 电压

6.3 当电池连接到某个物体上，这个物体使用电能工作，那么这个物体称为：

- a) 导线
- b) 安培表
- c) 负载
- d) 鸭子

6.4 电子（或与电有关的）电路是：

- a) 一个完整的路径，电流可以在这个路径中流动
- b) 只有使用电池时才能创建
- c) 是能源所在地
- d) 将要产生电火花——赶紧逃命！

6.5 在大多数手电筒中，两节或两节以上的电池的目的在于：

- a) 构成完整的电路让电路通过
- b) 为了保持最小的成本
- c) 并联连接，增加电荷
- d) 串联连接，增加电压

6.6 试想一下，你被要求向三年级的学生解释电压和电流的差别，如果用水来做比喻，你将如何来解释？

6.7 我们知道真正的电流是从电池的负极，经过负载（也许是个手电筒的灯泡）流向正极。然而，在许多电子学的书籍中表示为电流从电池的正极流向负极，这是为什么呢？

## 答案：-----

6.1 b

6.2 d

6.3 c

6.4 a

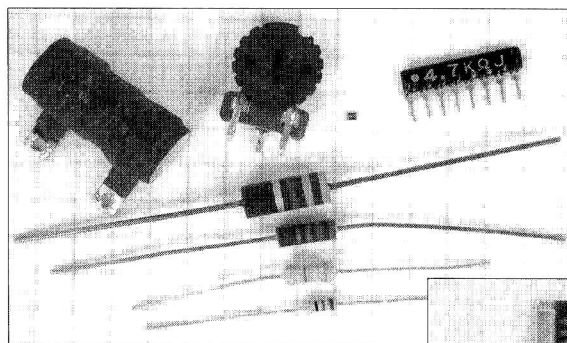
6.5 d

6.6 电压是电的压力，它推动电流流过电路，类似于橡胶软管中的水压。电流是每秒钟内流过电路的电荷的数量，类似于橡胶软管中水的流量。

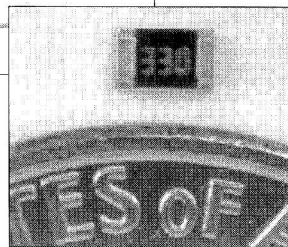
6.7 惯称电流定义为电流从电池的正极，经过电路，流向负极。这是本杰明·富兰克林在我们掌握实际电流的实质是电子的流动很久以前作出的一个不正确的决定。因为电学和磁学是在19世纪这个并不正确的决定基础上建立起来的，所以惯称电流沿用至今。虽然，我们都知道电流的真实情况是什么，但是今天在计算中使用的数学公式和方程仍使用惯称电流。

## 第7章

# 导体、绝缘体和电阻



电阻器有各种形状和大小



### 目录

- 导体
- 绝缘体
- 电阻
- 复习检测

# 导体

有些材料，可以让它们的电子很容易地从一个原子转移到另一个原子上，这些材料被称为导体。其他材料束缚电子的能力特别强，很难失去电子，这样的材料叫做绝缘体。电压或电位差的大小决定了电子在物体中能够自由运动的程度。如果施加较小的电压就有很多电子通过物体，我们把这种材料称为导体。在电路中使用导体的目的就是提供了提供电流移动的路径。

大多数金属都是良好的导体。铜大概算是最普通的导体了。尽管很贵，但银应该是最好的导体之一。金自然也一种很好的导体，但不如铜。用金做导体的最大优点是不会像铜那样容易腐蚀。在开关触点或接插件表面镀一薄层金或银可以使它们保持良好的接触。铝的导电性不如铜，但铝便宜而且较轻。

铁也导电，但是它不是一个非常好的导体（只需要较小的电压就可以使一定电流通过

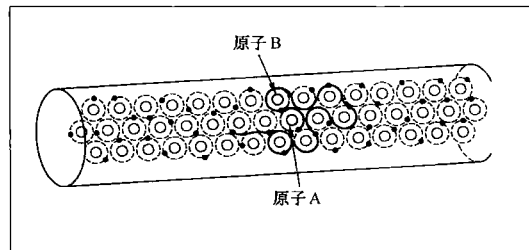


图7-1 这张图描述的是铜导线中铜原子的简化模型。图中显示的是在原子核外电子云中的一个电子，这个电子可以轻易地在原子之间转移。图中的那根虚线代表其中一个电子运动的轨迹。

表7-1: 一些普通金属的相对导电率（与铜相比较）

银	1.064
铜	1.000
金	0.707
铝	0.659
锌	0.288
黄铜	0.243
铁	0.178
锡	0.151
汞	0.018

铜导线，但在铁导线中通过同样的电流却需要较大的电压)。水银，常温下是一种液体的金属，能够导电。尽管不属于最好的导体，但因为是液体，所以水银有一些有趣的用途。

物体的导电率反应了它们的导电性能。这里我们不去仔细研究如何测量物体的导电率，只需记住导电率大的物体比导电率小的物体导电性能好。实际上，在电学计算中我们很少使用物体实际的导电率，习惯上常用物体的导电率与铜的导电率的比值，即相对导电率来衡量各种物体的导电性能。如果物体的相对导电率大于1，说明这个物体的导电能力比铜强。如果物体的相对电导率小于1，则导电能力不如铜。表7-1中列出一些常用的金属导体以及它们的相对导电率。表格顶部是性能最好的导体，底部是表格中性能最差的导体。

图7-1展示的是铜导线的一个截面，来帮助你更好地理解电子是如何在导体中移动的，

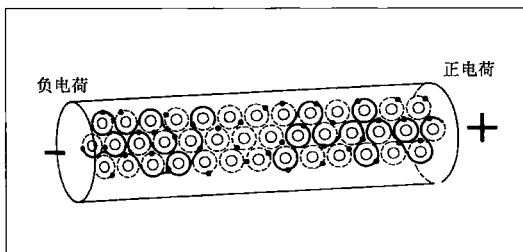


图7-2 如果我们把一段铜导线接到电源两端（比如电池），电子向正极方向移动。每个电子每秒钟也许只能移动几厘米。电子不断从电源的负极流入导线，另外一些电子不断从导线流入电源的正极。

这张图描述的是铜原子的最简化图，而且每个原子只画了一个电子，这个电子可以在原子之间自由移动。假设电子从A原子移动到B原子，A原子会立即从其他原子那里吸引一个电子来填补移走的电子的空缺。电子通常是在原子之间随意漂移，但不会离开最初的原子周围一定的范围。

现在让我们在导线两端加上电压。在电压正极一侧立即吸引电子，那些在原子间漂移的电子向导线正极部分移动。图7-2显示的就是导线中的这个电流。当我们在描述单个电子的运动时，我们使用漂移这个词，这是因为电子在导线中运动得相当慢。如果你能看见一个

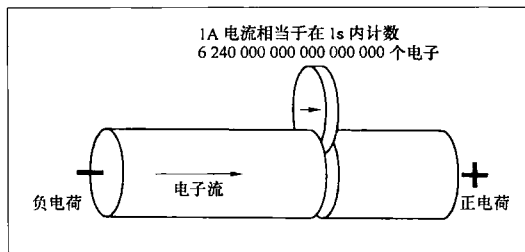


图7-3 为了更容易观察电子，我们从铜导线中截取一个薄切片截面。假设我们可以数出电子流过切片的数量。如果能做到这样，可以给我们测量导线中电流大小的方法。即每秒钟有 $6.24 \times 10^{18}$ 个电子通过这个截面，那么电流的大小就是1A。

电子在导线中运动，你会发现它每秒钟只能运动几厘米。

这听起来好像电子在导线中运动得相当慢。如果电子运动得这么慢，怎么在我们合上开关的同时电灯就会迅速发光了呢？你必须记住的是，在你合上开关的时候，电子已经在和电灯相连的导线上了，它们只是在等待电压推动它们流过灯泡。所以在我们施加电压的同时，这些电子开始移动，导线中的电子开始向正极移动。电源负极端导线中的电子在导线中向前移动，而电源负极端中的电子流入导线。电源正极端导线中的电子立即离开导线进入电源正极。我们不测量导线电流中每个电子移动的



快慢，而是测量有多少电子在移动。

图 7-3 是从正在导电的铜导线中截取的一个切片截面。通过计算出每秒钟内有多少个电子流过这个截面，我们就能测量出电流的大小。如果每秒钟有  $6.24 \times 10^{18}$  个电子通过这个截面，那么电流的大小就是 1A!  $6.24 \times 10^{18}$  可以写成  $624 \times 10^{16}$  或者 6 240 000 000 000 000 000。(是的，那一定是很多电子！虽然原子很小，但即使很细的导线，截面中也有无数的电子)。如果施加的电压是 120V，那么点亮一盏 100W 的电灯，大约需要 1A 的电流。

当然，事实上我们不必数出通过导线中的电流所含电子的数量。在稍后的章节中我们将讨论测量电流的详细内容。你也许想到较粗导线截面中的原子一定比细导线中的要多得多。大电流能更容易（因为较小的电阻）流过粗导线是因为粗导线中有更多的电子可以移动。

请注意，导线中的电子不是沿直线移动的，这非常有趣。取而代之的是，电子从一个原子移动到另一个原子，甚至有可能有时漂移回电源的负极。而当我们在导线两端提高电压，电子就会更多地直接流向电源的正极。

我们可以把导线中电流的运动和水管中

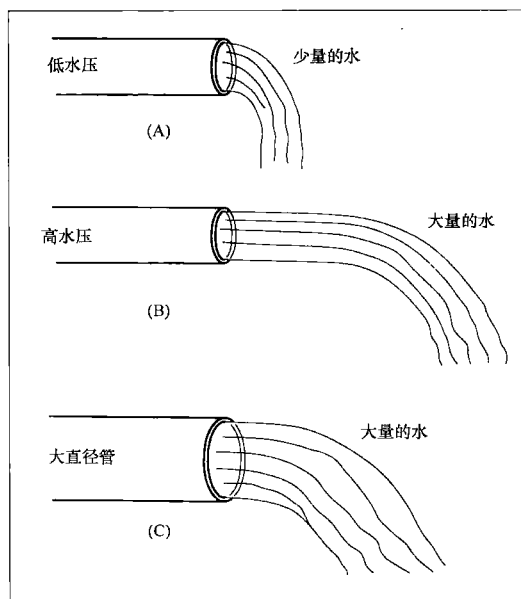


图7-4 我们可以把导线中电流的运动和水管中水的流动类比。水压越大，或用直径较大的水管，水流则越大。

水的流动类比。如果水压越大，水流越大。那么，电压越大，导线中流动的电子也越多。如果用一个直径更大的水管，更多的水可以轻易流过水管，如图 7-4 所示。与此相似，较粗的导线可以通过更大电流。

# 绝缘体

有的物体中原子对他们的电子的束缚能力很强。在电压较小时，这些物体不允许它们的电子移动。所有这些不容易导电的物体叫做绝缘体。然而，你必须知道，任何物体都有可能使电流通过。因此，只要电压足够大，即使最好的绝缘体也将被击穿，从而使它们的电子移动。绝缘体在电学中非常重要，因为利用它们可以帮助我们得到我们想要的电压和电流。在一些电路中，绝缘体还能帮助我们防止触电。

图7-5显示的是一个电火花穿过绝缘体。一旦电压产生电火花，即使是很低的电压，电流将会继续流动。电火花实际上在绝缘体上产生小孔，造成绝缘体被击穿。

正如所有的导体的导电能力各不相同一样，所有的绝缘体的绝缘性能也各不相同。有

的绝缘体和其他绝缘体相比，在较低的电压下就会被击穿而导电。不过，如果增加绝缘体的厚度，它承受的击穿电压也将得到提高。

让我们来讨论几个你们可能已经很熟悉的被击穿的绝缘体的例子。几乎每个人都有这样的经验，当你走路穿过地毯后，用手碰到金属门把手时常被电击。你也会注意到在你走在房间中间时并没有被电击，而是发生在即将接触把手时。在这个例子中，在你走过地毯时，你的身体会带上电荷。你的手指和门把手之间的空气作为绝缘体隔离了它们放电，但你靠近门把手时，减小了你和门把手之间空气的厚度，在一定距离时电压就能击穿空气这个绝缘体而放电。

你可以重复刚才的实验，穿过厚毛绒地毯，小心地靠近金属表面，把手指指向你靠近

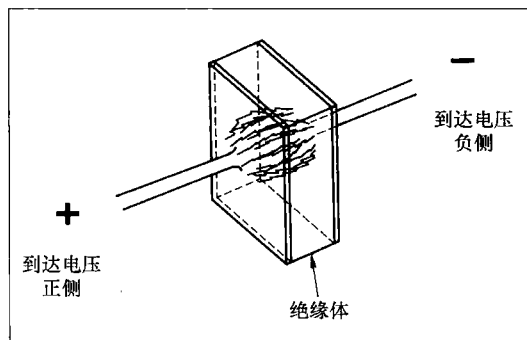


图7-5 通过施加足够大的电压，你都可以对任何绝缘体产生电火花。这样的电火花会在物体上击穿出小孔，通常会毁坏绝缘体。

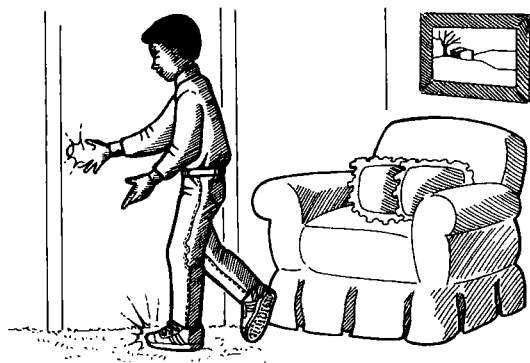


图7-6：你有没有受到过触摸门把手的电击？



图7-7：闪电是自然界的电能。空气使云和云或者云和大地之间绝缘。云和云或云和大地都带有电荷，并在它们之间形成电压。当电压足够大时，电火花击穿空气。

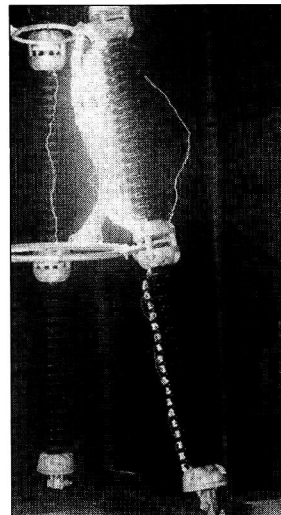


图7-8：有时绝缘体上的污垢和水分传导电火花，使电火花在绝缘体上跳跃。

的金属，逐渐靠近直到手指和金属之间放电，你的手指产生了轻微疼痛（见图 7-6）。在放电前你的手指离金属多远呢？尝试在房间内走几圈，使身体带上更多的电荷。如果电荷足够多，你怎么知道金属门把手和你身体之间的电压？这次放电的距离近了还是远了？

闪电是高电压经过绝缘体而使绝缘体被击穿的另一个例子。闪电是云层之间或云和大地之间的放电现象（见图 7-7）。与你穿过地毯而带上电荷放电相比，造成闪电的电压又是怎样的呢？当然，造成闪电的电压非常高，因为它使电荷穿过了更厚的空气，往往是几千英尺！

水管中水压的例子也许可以帮助你理解绝缘体被击穿。空心的水管就像是导体，水管本身就像导线上的绝缘层，如果你阻塞水管一端，然后增加水压，最终水管会爆裂，水将不会留在水管中，而是从爆裂的水管部位喷射而

出。使橡胶水管爆裂的水压和使镀锌铁管爆裂的水压肯定不同，无论水管多么结实，只要水压足够大，都可以使其爆裂。

表 7-2 是我们电路中常使用的一些绝缘体材料。它们是按照承受击穿电压高低降序排列的。橡胶是我们所知道的较好的绝缘材料，云母是另一种出色的绝缘材料（云母很容易切割成薄片，非常光亮，有轻微颜色差异）。纸也可变成好的绝缘体，特别是浸泡过某些油或蜡的纸。瓷器和大多数陶瓷材料是非常好的绝缘体。胶木是一种较脆的塑胶材料，在较早的电器设备中经常作为绝缘体使用。玻璃和玻璃纤维也是常用的绝缘体。空气可作为绝缘体，尽管它的击穿电压很大程度上取决于温度和湿度。只要木材干燥，你也可以把它作为绝缘体。现代电路中也常用不同的塑料材料作为绝缘体。

请记住，任何一种绝缘材料都有安全使用的击穿电压极限。表 7-3 列出的是一些常用绝缘体的击穿电压。这些数据并不完全精确，但它们将给你一些关于绝缘体能承受多大电压的概念。

还有一个关于绝缘体的问题必须考虑。绝缘体周围的污垢和湿气会导电。如果一个绝缘体较脏污而且周围潮湿，你可能会碰到一些麻烦。注意这不是绝缘体本身所能承受的击穿电压的问题。绝缘体本身也许可以承受很高的击穿电压，但是上面的污垢却为电流提供了

表7-2：普通绝缘体

云母
橡胶
石蜡
瓷器
绝缘电木
塑胶
玻璃
玻璃纤维
干燥木材
空气

一条通道，见图 7-8。一些累积起来的污垢会导致电路出现问题，因此，保持绝缘体清洁使其发挥自己的作用显得非常重要。

在美国佛罗里达州，靠近大西洋海岸的向岸风携带含有盐分的海水小水滴，高压电力线上的绝缘子会被覆盖上一层海盐。在潮湿的条件下（在佛罗里达州非常频繁），就可能产生危险的电弧，高电压产生的电流穿过绝缘子的表面。为了防止这样的电弧，在不切断电路的情况下，专用车向绝缘子上喷射细雾状蒸馏水（水溶化盐，去除掉绝缘体上的盐）！只要使用无污染的水去喷淋绝缘体以除去上面盐的沉积，就能提高电路传输的可靠性。

表7-3：击穿电压

绝缘体 (1cm厚)	击穿电压 (V)
云母	500 000
油纸	400 000
石蜡	350 000
玻璃	250 000
空气	30 000



# 电阻

“有些材料可以控制阻碍电子的流动。”

所有的材料都会不同程度地阻碍电子的流动。如果这种阻碍相当小，这种材料就是导体。绝缘体则是对电子流动具有很大阻碍作用的材料。举一个非常简单的例子，比如我们把烤面包机或一盏灯插入电路。插头上的叶片是金属材料（像黄铜一样的良导体），而插头的主体是一个良好的绝缘体（塑料，防止电流通过我们的手）。

有些材料相对于良导体而言，对电流有较大的阻碍作用，但相对于绝缘体而言，则可通过较大的电流。因为它们能阻碍电子的流动，所以这些材料在电路中非常有用。这样的材料可以用来制作电阻。电阻可以阻碍电子的通过。

电阻在非电子电路中的例子如烤面包机、电烤箱、电吹风或空间加热器，见图 7-9。在所有这些设备中，一种阻值远远超过铜的金属产生很大的阻力，阻碍电流通过，这样就需要较大的电压迫使电流通过。电流和电压共同产生电能，而在这种情况下，电能转换成了热能。这是一个很好的结果，这些设备被设计用来产生热量。这种设备通常使用镍铬合金（一种镍、铬和铁的合金）线，和铜相比，它具有更低的导电性和更高的电阻。

不是好的导体而用来实现有用功能的其他例子是保险丝和白炽灯泡。保险丝，如图 7-10 所示，是用来防止过大的电流通过电路。许多保险丝是将高电阻丝、用金属或合金制成的扁平小片封装在塑料或玻璃的管内。如果电

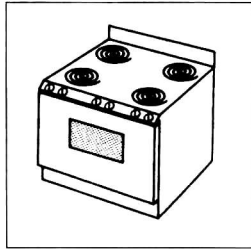


图7-9：所有电路都会产生热量。大多数时间内我们不希望得到这些热量，但有时我们需要这种电路，其主要目的就是为了获得这些热量。

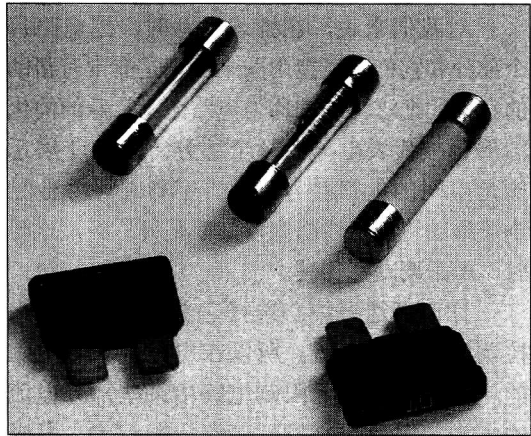


图7-10：保险丝（熔断器）有不同大小、形状、外壳和各种额定电流。这些是电路中常见的保险丝。这些外壳由玻璃、塑料和陶瓷（它们全部是绝缘体）制成，每个保险丝有两个金属接点。

流超过保险丝的额定电流，电阻丝或扁平小片变热而熔化（是的，金属变成了液体），这样电路会断开，彻底中断了电流的流动。

灯泡的工作是使玻璃壳内的金属（钨）变热，从而使灯丝达到白炽状态并发光。钨比

铜的电阻大得多，比其他金属的熔点高得多，因此，它可以发出白炽光而不熔化。所以说，钨是用来做灯泡的奇妙的材料，但如果用来做保险丝就非常可怕，因为当有过大的电流通过时，它不会熔断从而不能断开电路。

我们刚刚谈到电路（烤面包机、电吹风、电熨斗和电炉），这些设备的电阻是特地选择用来产生热量的。然而，在大多数电子电路中，电阻是用来进行某些控制（比如调节放大器的音量、控制显示器的亮度和收音机的调谐）。与电吹风和烤面包机不同，在大多数电子电路中，电路中产生的热是电路中的电阻不希望得到的结果。从电路中安全除去这种热量是设计电路的重要部分。

对我们来说，在描述电路时，把电路每个部分和它们的连接用图来标识是非常有帮助的。我们把这样的图称为电路图。特殊的简化图形符号代表电路的每个部分。图 7-11 展示的是电阻的电路符号。“Z”字形线段好像给电子移动造成交通阻塞，似乎是说，经过电阻时，电子要减速行驶。

你可以通过细心选择适当大小的电阻来控制电路中的电流。所以在电路中使用电阻的一个重要原因是限制电路中某些部分电流的大小。例如，电阻可以使一个 LED（发光二极管）产生需要的亮度；可调电阻可以让你使 LED 发光更多或更暗些。细心挑选并放在电路中合适的位置，电阻将准确控制电路中各部分的电流大小，见图 7-12。

电流通过任何电阻都会产生热量，电流越大，产生的热量也越多。大多数时间内，这种热量是一种废弃物，我们必须从电路中排除掉。然而，偶尔我们会利用电路产生热量。

有些金属的电阻比我们常用的导体铜的

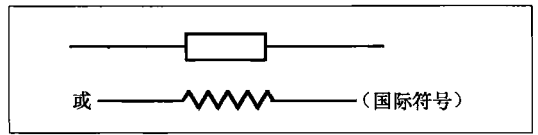


图7-11：这是电路图中电阻的符号。

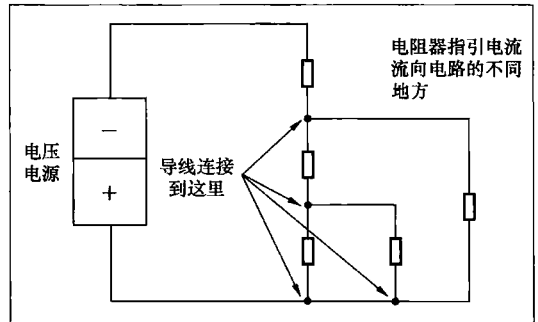


图7-12：电阻给了我们控制电路中不同部分通过不同电流的办法。

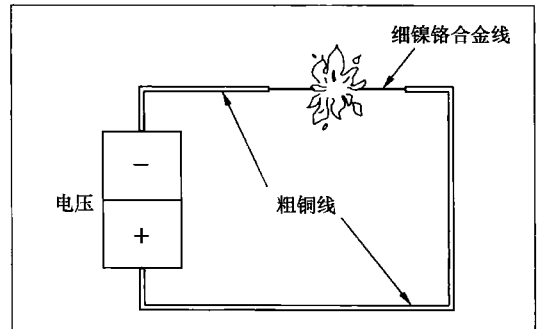


图7-13：如果电流通过电阻产生的热量过大，电阻会被熔化，甚至于发生火灾。

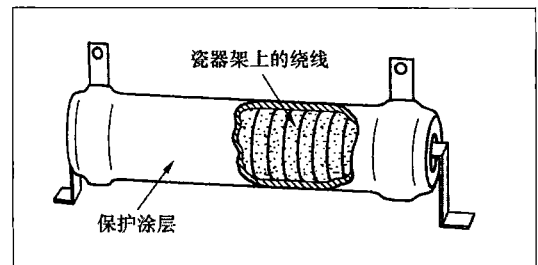


图7-14：一些绕线电阻的结构。

电阻大得多。通过选用较大电阻(如镍铬合金)的金属线,你可以控制电路中的电流大小。通过镍铬合金线中的电流要比同样粗细的铜线中的电流小得多。

控制电路中电流大小的另一个方法是选择合适直径的金属线。电子通过较小直径的金属线比通过直径较大的金属线要困难得多。因此在电路中选择合适直径的金属线可以控制电路中电流的大小。当然还要记住,当电流较难通过细金属线时,电流要产生热量。如果热量过大会发生火灾,或者使金属线熔化而断路。因此,确保电阻产生的热量能散发掉而不损害电阻本身或周围的任何物体非常重要,见图 7-13。

当汽车电瓶只有很弱或者没有电时,汽车无法启动,这时就要使用汽车跨接电缆。跨接电缆将另一辆车的正常的电瓶连接到没有电的电瓶上,正常的电瓶的能量使没有电的这辆汽车发动。这些跨接电缆的直径大,用来减少电阻(热能以及电压下降),避免小直径导线常出现的一些问题。

导线的长度也决定了电路中这部分电阻的大小。你可以把细金属线绕在木钉或其他物体上做成电阻。电阻的大小取决于金属线的材料种类、长度和直径。你能猜想出为什么我们把一些电阻叫做绕线电阻吗?图 7-14 展示的绕线电阻是如何制成的。

碳,这个黑色、粉状的物质,它的电阻比铜的电阻大得多,被称为半导体。制造商把碳和黏土混合,做成小圆柱形或者小球形,然后在它们两端接上金属线做成电阻,这样我们可以方便地将它接入电路。黏土的作用是将碳粉粘合在一起。通过改变混合物中黏土的数量,

制造商可以控制电阻的大小。也许你能猜到,我们把用这样的方法生产出来的电阻叫做碳电阻,很多年来,他们在电子电路中被普遍使用。图 7-15 是一个碳电阻剖面图。

现代电阻通常用另一种方法来制造。制造商开始使用圆筒状绝缘陶瓷材料,在陶瓷上覆盖上一层碳膜,接上引线,然后再用一层环氧树脂覆盖,起到绝缘和保护作用。这样的电阻叫做碳膜电阻。可用同样的方法将金属薄膜覆盖在陶瓷上,这样的电阻叫做金属膜电阻。图 7-16 是薄膜电阻的结构剖面图。

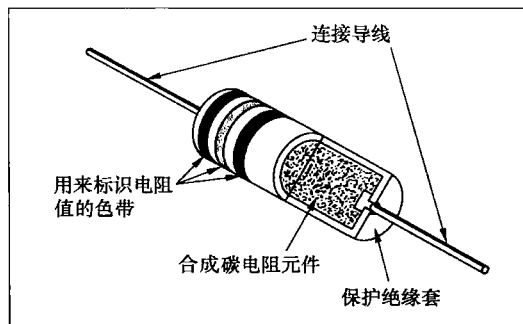


图7-15: 这是显示了典型的合成碳结构的剖面图,表明了这种电阻的构成。电阻材料是粉末碳和粘土的混合物。

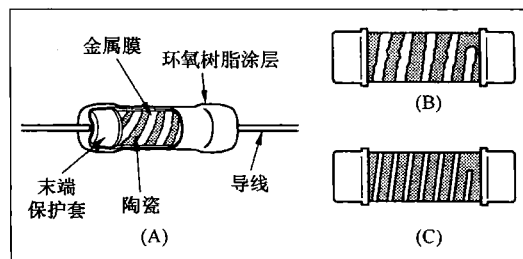


图7-16: 这是一个薄膜电阻的剖面图。金属膜电阻和碳膜电阻使用相同的基本构造技术。金属膜或碳膜都被修整成螺旋线形来控制电阻大小。图 (B) 展示的是用车床修整而成的电阻,图 (C) 是用激光修整而成的电阻。

复习检测：-----

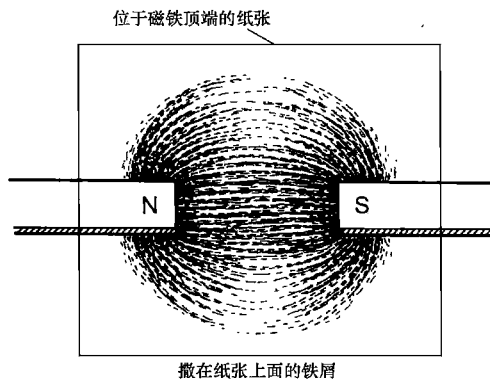
- 7.1 你能说出五种常见的导体吗?
- 7.2 什么决定一种材料(元素)是一个好的导体?
- 7.3 1A的电流表示1s内大约有多少个电子在流动?
- a) 7  
b) 大约100万 ( $10^6$ )  
c) 大约10亿 ( $10^9$ )  
d) 100亿亿 ( $10^{18}$ )
- 7.4 如果一种材料需要非常巨大的电压才能使电子通过, 这种材料称为:
- a) 不给力  
b) 绝缘体  
c) 半导体  
d) 导体
- 7.5 你能说出五种常见的绝缘体吗?
- 7.6 哪两个常见的金属, 它们不是好的导体, 但在我们每个人的家中几乎都能发现?
- 7.7 另一个应用非常广的金属, 但它不是好的导体的是:
- a) 喇叭线  
b) 延长线  
c) 保险丝  
d) 听音乐的耳机线

答案：-----

- 7.1 银、铜、金、铝、汞、铁、锡、铅, 一般来说来金属都是导体。
- 7.2 一个元素的原子最外层的电子数决定了这个导体的导电性能的好坏。银和铜原子的最外层有一个“自由”的电子, 它们是两个最好的导体。
- 7.3 d  
1s内有 $6.24 \times 10^{18}$ 个电子通过时, 电流就是1A。  
10亿等于 $10^9$ , 100亿亿等于 $10^{18}$ 。
- 7.4 b  
绝缘体保护我们免受危险的电压。接线板延长线上铜导线外面包裹的塑料只是绝缘体的一个例子。
- 7.5 橡胶、云母、纸、油、陶瓷、玻璃、空气和许多塑料都是很好的绝缘体。
- 7.6 镍铬合金(一种两种金属的合金——镍和铬)用于烤面包机、吹风机、电热器、电烤炉里的加热元件。钨用于白炽灯泡里的灯丝。
- 7.7 c

## 第8章

# 电和磁



两根磁铁和一些铁屑让你想象磁场中的磁力线

### 目录

- 电荷
- 电荷间相互作用规则
- 物质的结构
- 磁体和磁场
- 电场与磁场相似
- 动手实验看电场
- 复习检测

# 电荷

我们通常认为电学是现代发展中的科学。其实早在 19 世纪后期，人们已经开始利用电学使社会受益。实际上早在 2000 多年前人们就发现了电子。古希腊因为哲学、数学和他们的科学家而闻名于世，这些科学家发现了他们身边很多的东西。其中他们发现有一种小石头被毛皮或布摩擦后看起来具有不可思议的性质，这个小石头他们称为 **elektron**，它可以吸引轻小的干树叶、木屑、秸秆等物质（今天我们把这种石头称为琥珀）。今天，电这个词就是以希腊的这个石头而命名的。

直到 1733 年，有人认识到也许有两种电荷，或两种力的存在。查尔斯·杜菲发现带了电荷的一块玻璃吸引一些带了电荷的其他物体，但却排斥带了电荷的另一些物体，因此他得出存在两种电荷的结论。18 世纪中叶，本杰明·富兰克林做了更深层次的电学实验，也正是富兰克林给这两种电荷命名为正电荷和负电荷。

在富兰克林时代，科学家们认为，电流是存在于物质中的一种流体。如果有一种以上的流体，物体具有什么样的流体，就带有什么样的电荷，正电荷或者负电荷。

今天科学家已经发现了更小的带电粒子。质子带正电荷而电子带负电荷，而这些粒子都非常小，我们无法用肉眼看到，实际上他们小得只能用具有强大性能的显微镜才能看到。科学家已经发现了通过他们产生的效果来检测他们的方法。质子和电子存在于我们已知的每一

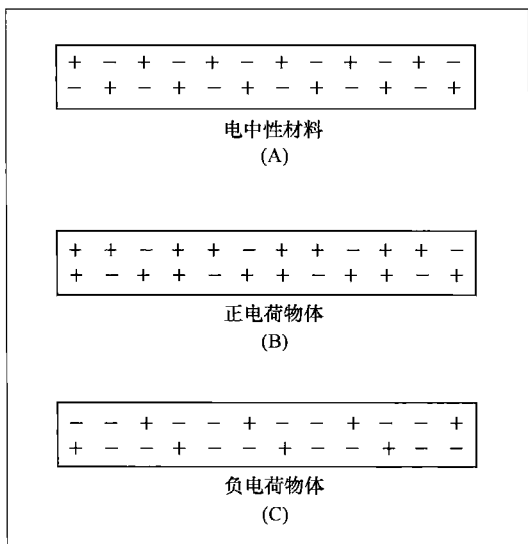


图8-1：一个物体在通常情况下，例如展示的金属棒，拥有相同数量的正电荷和负电荷。(A)中所显示的金棒呈电中性。如果一个物体带有正电荷粒子比负电荷粒子多，这个物体就带正电荷，见图中(B)部分。如果一个物体带有负电荷粒子比正电荷粒子多，这个物体就带负电荷，见图中(C)部分。

种物质中。事实上，它们是构成所有物质的基本粒子。

电子所带的负电荷的数量和质子所带的正电荷数量相等，所以物体中电子和质子的相对数量决定了带电体所带电荷的多少。如果电子数多，则物体带负电荷，而如果质子数多，则物体带正电荷，通常情况下，物体呈电中性，或者说电子数和质子数相同。见图 8-1，一个带电体将对其他物体施加力的作用，但物体间

的这个作用力并没有通过物体直接接触而产生，因为这个力是通过空间而表现出来的作用。

此刻你也许想知道一个物体如何变成带电体，因为通常情况下物体是电中性的。让我们来考虑两个例子。古希腊人发现他们可以通过用毛皮反复摩擦使琥珀或者琥珀金带电。毛皮和石头间的摩擦，使石头能吸引一些毛皮上已带电荷的物体，这样，石头变成带负电荷的带电体（实际上，这是由于反复摩擦产生的热使毛皮上产生了自由的电子）。

你也许很熟悉这样的情景所发生的现象，当你拖着脚走过地毯，然后你碰到某些金属，比如门把手！你可以根据这个原理做这样一个简单实验，首先撕碎一些纸片，把它们放在桌上，接着用硬橡胶或尼龙做的梳子在头上快速摩擦几下，你反复摩擦，将把电子从你头发上吸引到梳子上，这样梳子带上了负电荷。现在把梳子靠近桌上那些碎纸屑，注意，纸屑如何在梳子上跳动？梳子上的电荷对纸屑施加了力，将它们吸引到梳子上。

你想再试试下一个实验吗？吹一个气球，然后在头发上反复摩擦，再小心把气球粘在墙上或者天花板上。气球和你头发间的反复摩擦使气球带上负电荷，带电体施加的力使球和墙粘在一起。不是所有的物体反复摩擦后都带上负电荷。用丝绸反复摩擦一块玻璃，比如玻璃棒，反复摩擦产生的热会使玻璃上一些电子成为自由电子，这些电子离开玻璃棒，使玻璃带上正电荷，然而玻璃棒仍然可以吸引小纸屑和其他轻小物体。和带负电荷的物体一样，带上正电荷的物体也可产生电力。

通过数量了解物体所带电荷的多少非常

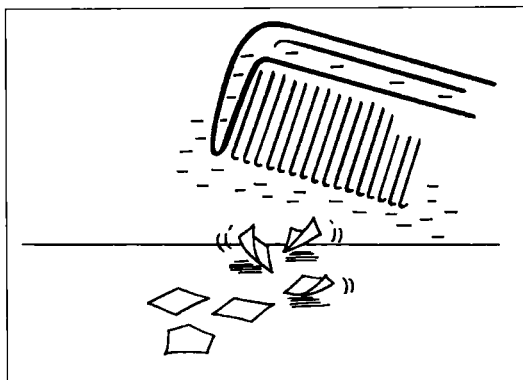


图8-2：带负电荷的物体会吸引小纸屑或其他轻小的物体。

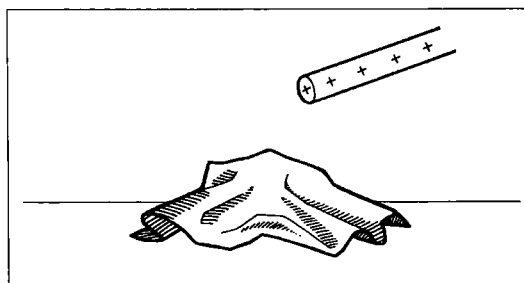


图8-3：你可以用丝绸反复摩擦玻璃棒得到正电荷。

有益。一个简单的测量方法是比较两个物体所带电荷的多少。在电学中，我们用库仑来度量电荷的多少。1库仑的电量近似等于  $6.24 \times 10^{18}$ （也就是 6 240 000 000 000 000 000）个电子所带的电量。（回忆一下，1s内有  $6.24 \times 10^{18}$  个电子流过导体就是1A。）当然，数出每个带电体所带额外电子的数量是不可能的。不是我们怎样来测出一个库仑电子的多少，取而代之的是测量电荷的作用效果。一个物体作用效果越大，物体所带电量就越多。

## 电荷间相互作用规则

在上一部分我们知道存在两种电荷：正电荷和负电荷。如果一个物体中一种电荷比另一种电荷的数量多，它就会对附近的物体施加电力。这一部分，你将学习怎么确定物体带上的是正电荷还是负电荷。你还要学习带电体间相互作用的一些规则。

图 8-4 所示的是验电器，这是一个能说明带电体所带电荷效果的简单装置。金属棒和金箔片装在玻璃瓶内，主要是为了保护脆弱的金箔片。如图所示，当两个金箔片呈电中性时，它们竖直下垂。

现在用一个带负电荷的物体靠近瓶口的金属球（可能是用毛皮反复摩擦过的硬橡胶棒），一些电子从金属球流向金箔片，当两个金箔片带上多余电子，它们互相排斥，这个作用力使金箔片张开，如图 8-5 (A) 所示。

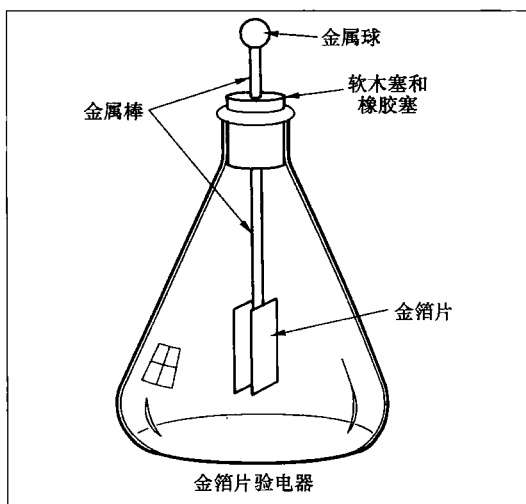
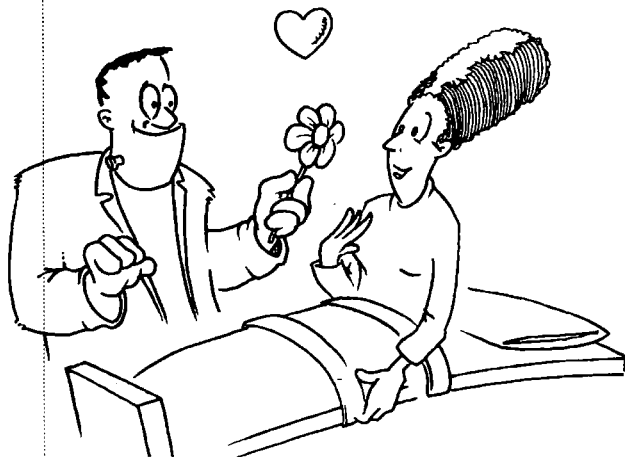


图8-4：验电器展示带电体间的作用产生的效果。玻璃罐的目的是为了保护脆弱的金箔片。

不接触验电器而移开橡胶棒，电子将恢复到它们的正常状态，而金箔片又将闭合。图 8-5 (B) 所示的是验电器不带电，或者是电中性的状态。如果我们把橡胶棒接触验电器金属球，一些电子将从橡胶棒流向金属球，多余的电子使金箔片带上负电荷，金箔片张开，直到再次成为电中性，如图 8-6 所示。

这些例子说明电荷间相互作用的一个重要规则：带有同样电荷（具有相同的电荷——正电荷和正电荷，或者负电荷和负电荷）的物体将要相互排斥，我们说：同种电荷互相排斥。如果物体间只有少量的多余电荷，它们之间只有较小的斥力；如果物体间有大量的多余电荷，





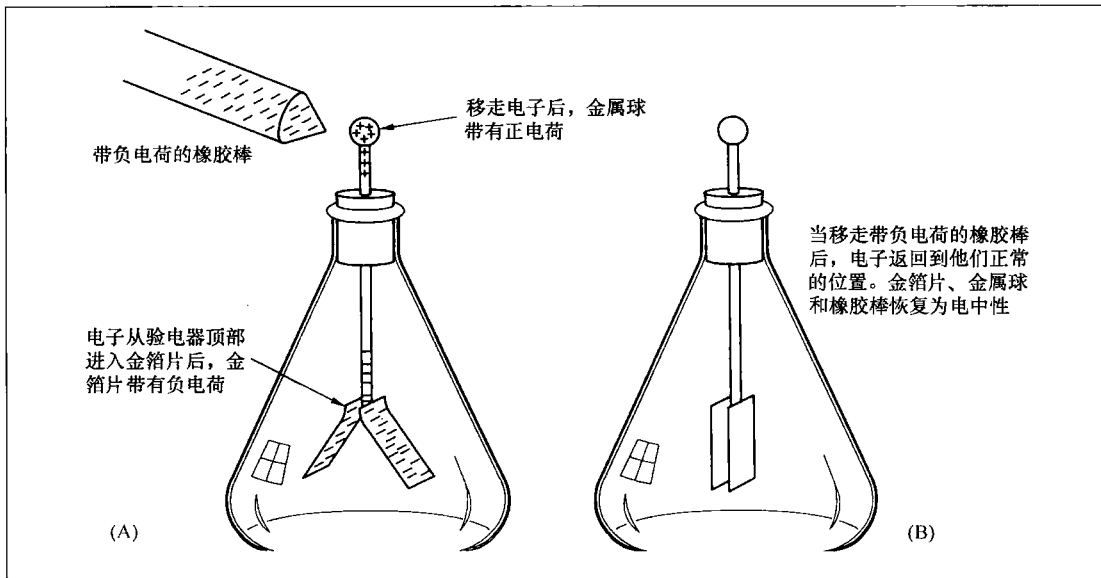


图8-5：当你把带负电荷的物体靠近验电器的顶部，电子从金属球流向金箔片，当金箔片带了多余的电子，他们相互排斥而张开，如图中（A）所示。当我们把带负电荷的物体离开验电器的顶部，电子流回验电器的顶部，这时金箔片再次呈电中性，金箔片竖直下垂，如图中（B）所示。

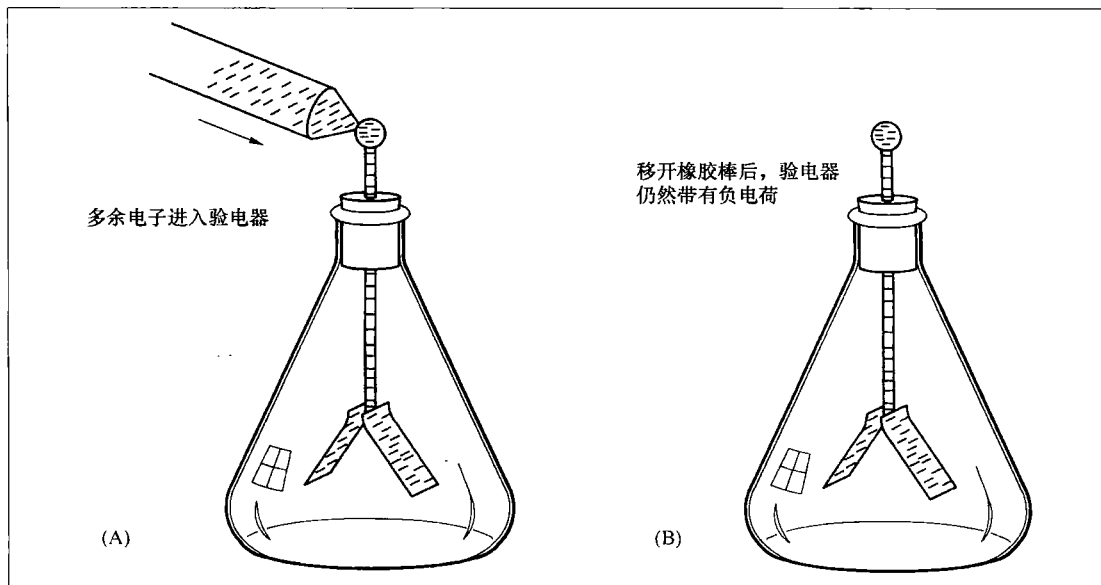


图8-6：将带负电荷的物体接触验电器顶部的金属球，一些多余的电子将流向金箔片，如图中（A）所示。而当我们将带电体移开，电荷仍然留在验电器内，金箔片将一直张开，如图中（B）所示。

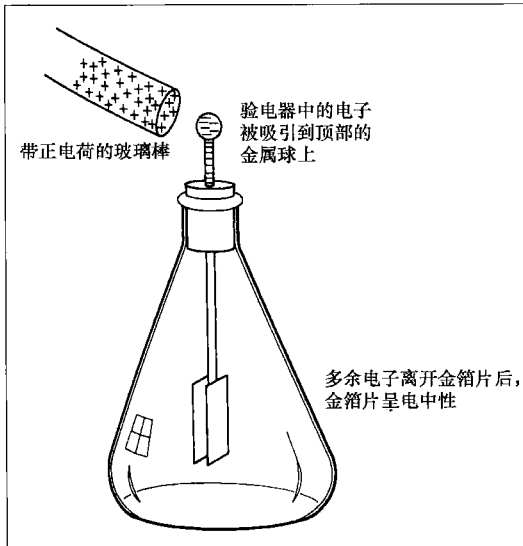


图8-7：当你把带正电荷的玻璃棒靠近带负电荷的验电器，金箔片将闭合。这是因为带正电荷的玻璃棒把额外的电子吸引到验电器的顶部，使金箔片再次呈电中性。

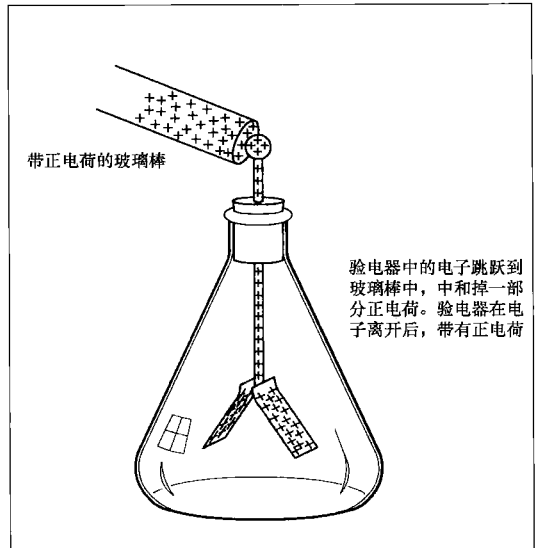


图8-8：当带正电荷的玻璃棒接触验电器的顶部时，带负电荷的验电器再次带电。现在带正电荷的验电器上的金箔片再次相互排斥而张开。

它们之间就产生较大的斥力。利用验电器，你也可以观察到电力大小的变化。当你把带电的橡胶棒靠近验电器，金箔片张开。而当你再靠近一些，张开的角度更大。如果橡胶棒有足够多的电荷，你可以让金箔片近乎水平张开。

再回到带了负电荷的验电器，如图 8-6 所示。现在假设我们把一根玻璃棒用丝绸反复摩擦，丝绸将从玻璃棒上吸引一些电子，使玻璃棒带上正电荷。当我们把这根玻璃棒靠近验电器，张开的金箔片闭合，如图 8-7 所示。为什么会这样呢？原来带正电荷的玻璃棒把金箔片上的电子吸引到验电器的顶部，随着金箔片失去额外的负电荷，它们再次竖直向下垂。

现在让我们用带正电荷的玻璃棒接触验电器顶部的金属球，图 8-8 显示金箔片将再次张开。一些电子从验电器移动到玻璃棒上，代替被丝绸吸引走的电子，这时玻璃棒上所带的正电荷比接触验电器前少了一些，而金箔片却带上正电荷，因为有部分电子从它这里移出。

从这个问题的讨论中你应该认识到在正负电荷之间有一种引力。这告诉我们电荷间相互作用的第二个重要规则：异种电荷相互吸引。

理解和记住这两个重要的电力规则非常重要，它们将帮助你理解很多电学的重要原理，记住：同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引。

# 物质的结构

我们已经学习了电荷和带电体，知道了有两种电荷，电子和质子是携带这些电荷的微小粒子。你也许还想知道这些电荷是如何在物体上运动的，如何从一个物体移动到另一个物体上。要想更好地理解这些电荷的运动，我们必须先了解物质的组成。

物质是描述所有物体的科学术语。物质可能是固体、液体或者是气体。让我们从观察一杯水来开始我们的研究。通常，我们把水看做是液体。记住，虽然我们可以通过冷冻把水变成固体，也可以通过煮沸使其变成气体，但无论结果怎样的变化，这个物质仍然是水（当我们煮沸水时，它变成水蒸气，水蒸气离开了杯子，但是它仍然是水），如图 8-9 所示。

设想一下，我们把水分成极小的部分，直到最后我们取得 1 个水分子。分子是任何物质保持其物质特性的最小微粒。

我们不能把水分子分得更小，但我们还

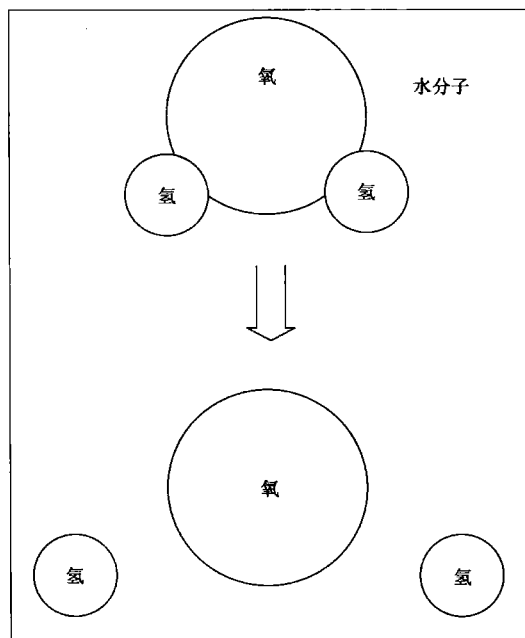


图8-10：每个水分子由1个氧原子和2个氢原子组成，我们可以把水分子分割成这些单独的原子，但分割后得到的是氧和氢，而不再是水。

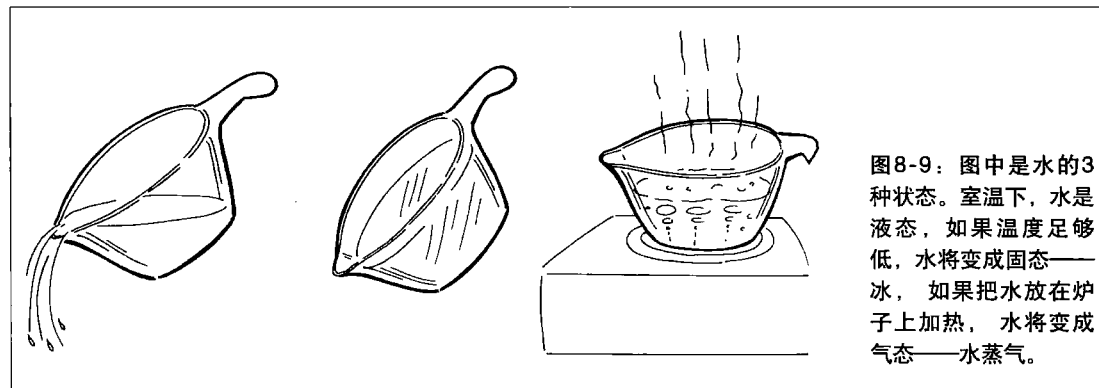


图8-9：图中是水的3种状态。室温下，水是液态，如果温度足够低，水将变成固态——冰，如果把水放在炉子上加热，水将变成气态——水蒸气。

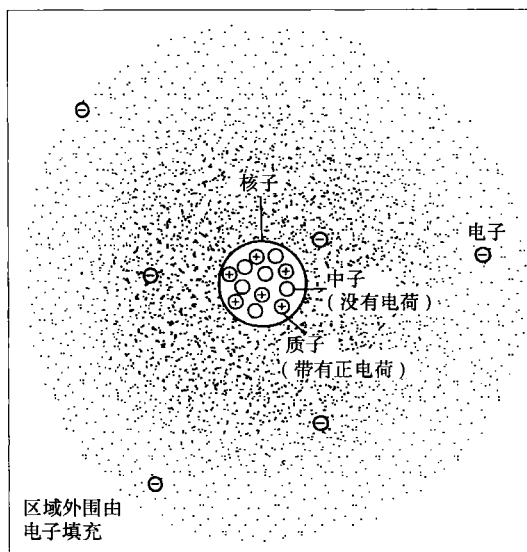


图8-11：这张图展示了原子的简单结构。中间有个核，称为原子核。原子核内有带正电荷的质子和不带电的中子。原子核周围是个很大的几乎是空的空间，带负电荷的电子在这个空间内。原子核周围的电子数和核内的质子数相同，所以原子呈电中性。

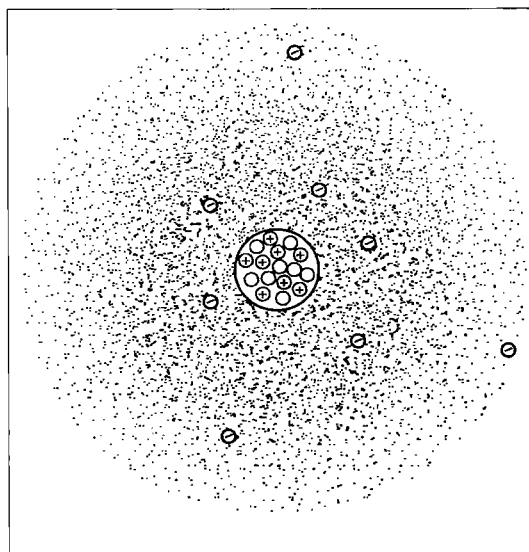


图8-12：这是1个氧原子的简单结构图。原子核内有8个质子，核外有8个电子以电子云形式包围着。在这张图中氧原子核内还有8个中子。在其他的氧原子中也许有5到12个中子！

可以把水分子分开，最后得到一个氧原子和两个氢原子。图 8-10 说明 1 个水分子分成了氧原子和氢原子。原子是构成各种元素的最小单位，它组合构成组成物质的分子。元素是物质的最简单形式，每种元素都有各自区别于其他元素的特性。铜、金、氨、硅和铀都是元素。

研究物质的科学家们期待把粒子分得更小。到我们目前的讨论为止，你已看到他们非常成功地发现了构成我们每天生活的物体的微小粒子。

正如你想象的那样，当他们发现原子的时候并没有停止脚步，他们想知道原子又是怎么组成的。甚至用性能强大的显微镜，也很难看见单个的原子，然而，通过许多实验，科学

家们知道了原子是如何结合在一起的。

原子几乎是空的空间，在原子中间有个很小的固体，即原子核，带正电荷，原子核周围有很大的空间，几乎是空的，里面有负电荷，如图 8-11 所示。有和正电荷相同数量的负电荷在原子核周围，他们的共同作用使原子呈电中性。

在原子核周围的负电荷叫做电子。这些电子高速运动。科学家们发现在原子核中有两种粒子，核中带正电荷的粒子叫做质子，另一种不带电的粒子叫中子。质子和中子的质量几乎是电子的 1840 倍，这也助于解释为什么电子比质子和中子更容易移动。任何原子的质子数和电子数相等，而中子数则不尽相同。质

子数决定了原子的种类。例如，氢原子有 1 个电子和 1 个质子，氦原子有 2 个质子和 2 个中子，而碳原子各有 6 个电子和质子，氧原子的原子核有 8 个质子，而金原子有 79 个质子。

图 8-12 展示的是氧原子的简单模型，原子核有 8 个质子和 8 个中子，有 8 个电子在原子核外的空间绕着原子核快速运动。尽管原子核周围的大多数空间是空的，但是由于电子的高速运动好像充满了整个空间，这可以帮助我们想象成电子云围绕着原子核。电子云没有明确的边缘或界限，有时一个电子可能运动到离原子核很远的地方，而有时又可能飞到很靠近的地方。

也许可以用某种方法来帮助你理解原子和原子核的相对大小。想象一颗很小的沙粒放在足球场的中央，沙粒可以看成是原子核，而电子将在球场内任意方向运动，充满整个球场。科学家给原子确定了一个明确、详细的结构模型，不过你现在不必掌握它们的详细内容。你只要记住有的元素的电子结构比其他的更稳定，有的元素的电子很容易离开原子移动到其它原子上，有的原子很容易吸引其他原子的一个或两个电子，但也有的元素的原子几乎不可能允许其他电子进入它的电子云中。

如果一个原子失去一个电子，则这个原子中的正电荷比负电荷多一个。当我们用丝绸反复摩擦玻璃棒，我们从玻璃棒的原子上得到电子，这些原子失去电子后，正电荷比负电荷



多，所以玻璃棒带上正电荷。与此类似，如果一个原子获得一个电子，则它的负电荷比正电荷多。当你用毛皮反复摩擦硬橡胶棒，橡胶棒从毛皮上得到电子，橡胶棒上的负电荷比正电荷多，所以橡胶棒带负电荷。

记住电子是从一个原子移动到另一个原子上，这非常重要。正常情况下，原子中电子数和质子数相等，所以原子呈电中性。如果电子数大于质子数，则原子带负电荷，而如果电子数少于质子数，则原子带正电荷。有的元素的原子，比如铜、金、银，允许他们的电子很容易地从一个原子移动到另一个原子上，而有的物质的原子对它们的电子的束缚力很强，阻止它们的电子从一个原子移动到另一个原子上。

# 磁体和磁场

大多数读者都熟悉磁体的一些基本特性。如图 8-13 所示，任何一个磁体都有两个极，而这两个极的磁性相反。这两个相反的磁极分别是磁体的北极 (N) 和南极 (S)。如果让磁体能够自由移动，那么静止时磁体的北极将指向地球的北极，这就是为什么我们把那个极叫做磁体的北极的缘故。如图 8-14 所示。

磁体的任何一个极都能吸引没有被磁化过的铁。除了铁，有些金属也能够被磁化或者被磁体吸引，很多金属则不能被磁化。

(钴和镍略有磁性，铝和铜则是不能被磁化的金属的代表。)

在这里，我们还要了解磁体的另一个重要的特性。磁体间相互引力和相互斥力是通过空间来实现的，磁力不必通过相互接触而产生。图 8-15 表示的是磁力线，这和你熟悉的许多

其他自然力不同。

例如，仔细琢磨一下当你把椅子推着或拉着滑过地板（见图 8-16）。由于物体相互接触而产生几个力的作用。你必须接触椅子去移动它，而不能看着椅子就能使它在房间内移动！同时还有一个摩擦力试图阻止椅子的移动，这个力是因为椅子的腿和地板接触而产生。

还有很多其他例子，这些力只有当物体间直接接触时才产生作用。汽车发动机中汽油燃烧产生的高压气体推动活塞运动就是其中的一个例子。气压大小不同产生的作用使飞机在空中飞行是另一个例子。

重力是不用相互接触而产生的自然力。拾起一个小石头，握住它悬在空中，你能感觉到地球对它施加的力吗？如果你松开手，小石头将落回地面。重力也能通过很远的距离产生

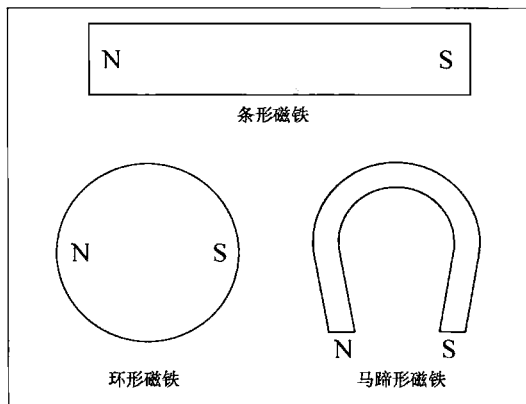


图8-13：每个磁体都有两个极，这两个极代表相反的两磁性。

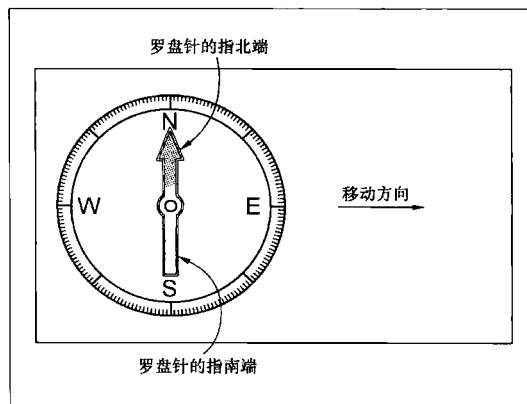


图8-14：磁体的南极和北极取决于它们所指向的地球的磁极。

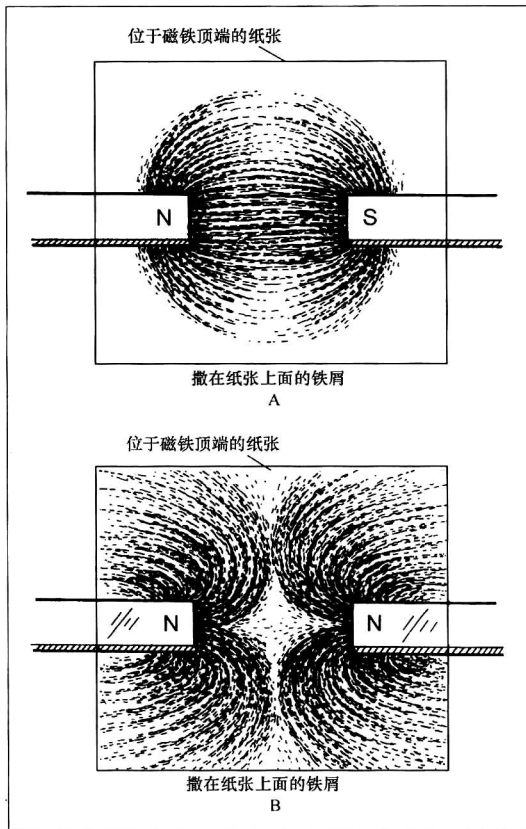


图8-15：为了说明磁场中的磁力线，我们在两个磁体上放一张纸，然后把铁屑撒在上面，铁屑将排列成磁力线。如果两个磁体间的磁力线较多，说明磁场较强，如果只有很少的磁力线，说明磁场较弱。磁力线的数量多少代表引力或斥力的强弱。如果磁力线从一个磁体延伸到另一个磁体，如图中A，说明这两个磁体相互吸引，如果磁力线从一端出发而返回到同一个磁体，如图中B，这两个磁体相互排斥。

作用。地球和太阳之间的引力使地球围绕太阳轨道运动。同样，引力场控制月亮围绕地球轨道运动。（见图 8-17）

你可以把通过空间作用的力称为看不见

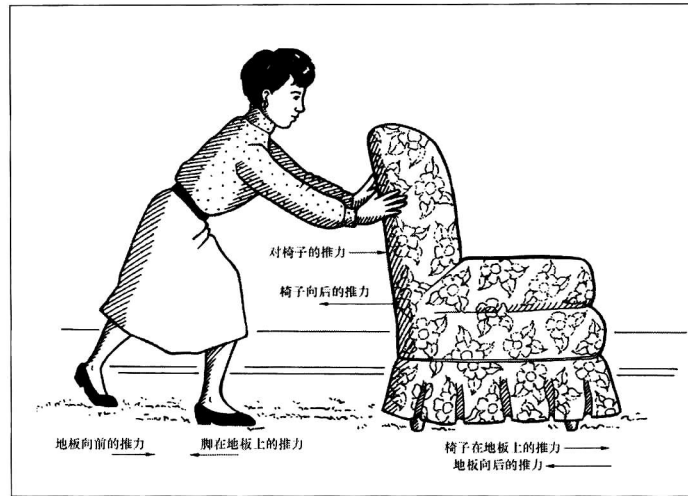


图8-16：有很多力的例子，它们需要通过相互接触而产生。

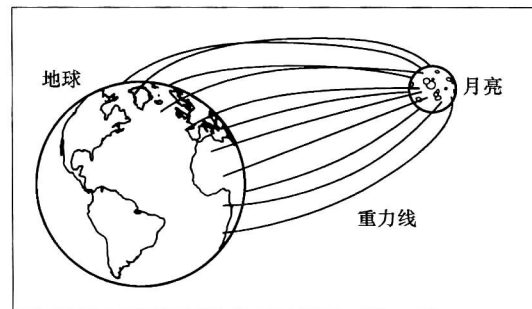


图8-17：在地球和月亮之间存在重力场使月亮沿轨道绕地球运动，这些线条代表重力线。

的力。科学家给这些看不见的力一个特别的名字，叫做“场”。“场”也指能产生力的作用的空间。当科学家描述重力时，他们把它称为重力场。同样，在描述磁力时也叫它称为磁场。

## 电场与磁场相似

任何一个磁体的两端都代表着两个相反的磁性，磁体通过磁场产生力的作用。两种电荷，正电荷和负电荷，与两种磁极相似。正电荷吸引负电荷与磁体的南极吸引北极的方式非常一致，同种电荷相互排斥也与同名磁极相斥方式一致，见图 8-18。电荷间的相互作用也不需要相互直接接触，而是通过空间作用，大概正如你所猜想的，我们把它称为电场。

让我们来探究一下电场的特性。和磁场一样，电场也是看不见的。撕一些纸屑放在桌子上，然后将一把塑料梳子在你头发上梳理四五次，现在把梳子靠近纸屑。会发生什么现象呢？纸屑会离开桌面向梳子跳起 1cm 或 2cm 吗？你能看到有物体从梳子上伸出去捡起纸屑吗？见图 8-19。

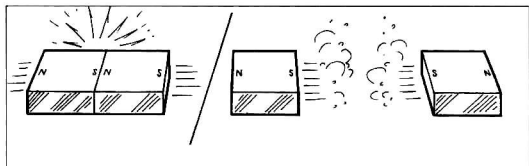


图8-18：磁场描述的是两个磁体间看不见的力。当两个磁性相反的磁极相互作用时，磁体间相互吸引，而两个相同的磁性磁极则相互排斥，或称为相斥。

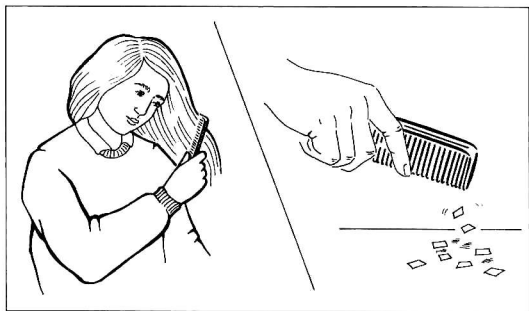
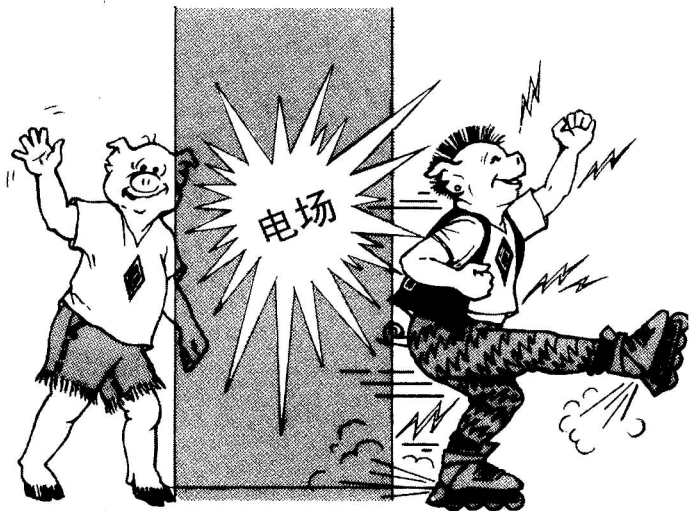


图8-19：做个简单的实验。撕一些纸屑放在桌上，然后把梳子在上梳理几下，慢慢地把梳子靠近纸屑，观察发生的现象。



当梳子通过头发发生移动时，摩擦使一些电子离开头发转移到梳子上，这样梳子有了额外电子成为负电荷带导体。如果你用梳子梳理头发 15 或 20 次，而不是 5 次，那么梳子上可以获得更多的额外电子（当然你能收集到梳子上的电荷数量是有限的，你不可能通过梳理比 20 次更多的 50 或 100 次来获得更多大量的电荷）。当你把梳子更靠近纸屑，纸屑跳动的高



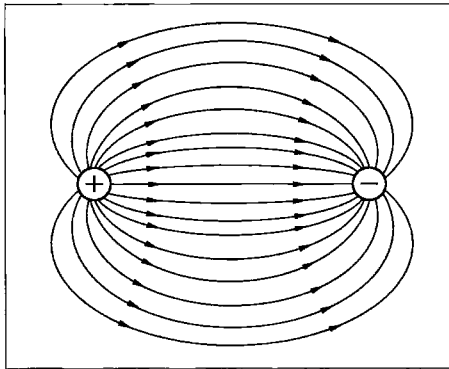


图8-20：电场描述两个带电体之间看不见的力。这张图说明的一个正电荷球和负电荷球之间的电场，注意，电力线方向从正电荷指向负电荷。

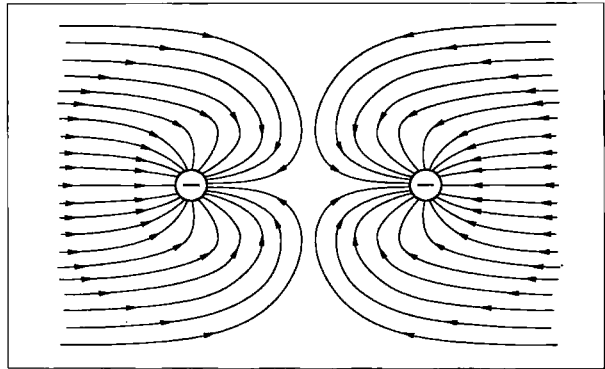


图8-21：这张图说明的是两个负电荷球之间的电场，注意电力线的方向指向负电荷。两个正电荷球之间的电场和它相似，只是电力线的方向是离开带电体。

度会更高吗？答案是肯定的。当梳子上有了大量的负电荷，它对纸屑产生的力也更大一些。梳子上的电荷越多，梳子和纸屑之间的电场也越强。

我们可以用同样的方法对正电荷带电体进行实验。用丝绸反复摩擦玻璃棒，丝绸会和梳子吸引头发上的电子一样从玻璃棒上得到额外电子，这样反复摩擦后的玻璃棒会因为失去电子而带上正电荷。我们通过画出一系列线条来表示电场，这和我们画出磁场的方法非常相似。图 8-20 展示的是一个正电荷球和负电荷球之间的电场。注意线条上的箭头是从正电荷指向负电荷，这些箭头表示了电场的方向。

图 8-21 所示的是两个负电荷球间的电场。同样的图也可以表示两个正电荷球的电场。

线条的数量表示了电场的强度。强度较大的电场中的线条比较弱的电场要多，电场也表示了带电体间力的大小。电场力可以使带电体运动。我们在梳子和纸屑的实验中，纸屑向梳子跳起。梳子推开电子吸引正电荷带电体。我们把电场对电荷的这种能力称为电势（电场有使电荷发生运动的潜能或可能性）。电压是电势的另一个名字。电压就像一个压力使电子在导线中运动。

电场和电压一样吗？不，它们相互有关，但不相同。对于学习基础电学你不必掌握更详细的内容，所以在本书中我们将从大量费力的数学问题中跳开。只要记住这条重要的概念：任何时候两个带电体之间都有电压或电势差，它们之间存在一个电场。

## 动手实验看电场

在本章前面的章节中，你学习了电荷和电场，但你既看不见电荷也看不见电场，确实如此，但是你可以看到电荷和电场的一些作用效果。对于一些看不见的东西理解起来比较困难，而通过观察它们所发生的现象却可以帮助你获得一些对它们的理解和认识。

准备这个实验大约要花 5min，不过，如果你准备实验的时间比观察现象的时间多得多，千万不要感到惊讶，实验结果将是令人神往的！

首先找一个宽约 2.5 ~ 3.8cm 的铝箔条。一个标准的铝箔宽度为 30.48cm，把铝箔撕成两个 15.24cm 长的条，然后把它们卷成两个小的铝箔球，接着你需要找两根缝衣线，它们不必太长，每根 25.4 ~ 50.8cm 就足够了。你还需要准备一根缝衣针、一支铅笔和一把

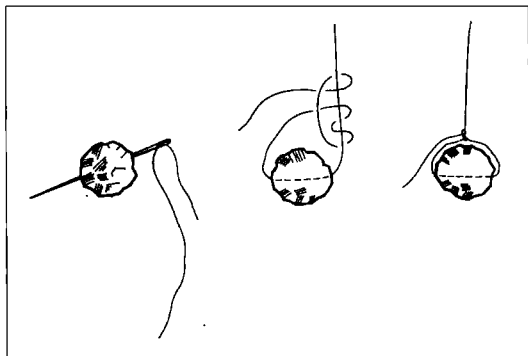


图8-23：用线将两个小铝箔球扎起。用缝衣针将线穿过小球，然后将线绕过小球打上结。

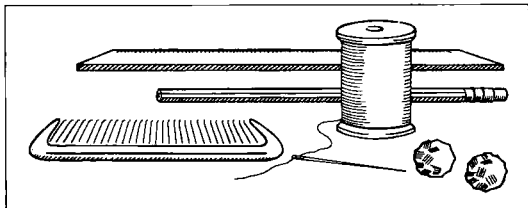


图8-22：这些是你做简单电场实验要准备的器材。用两条2.5~3.8cm宽、15.24cm长的铝箔绕成两个小球，线的长度不需要太精确，2根25.4~50.8cm的缝衣线即可。用线把小球扎上，然后用线悬挂在铅笔下，铅笔或小木头都可以。

尼龙或硬橡胶的梳子。图 8-22 显示了我们要准备的所有材料。

下面进入比较困难的部分。用缝衣针把线穿过小铝箔球，将线拉出，拉出几厘米，用拉出的线紧绕在球上，在长线处打个小结，然

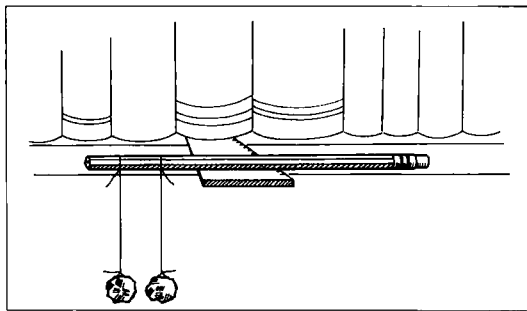


图8-24：用线把两个小铝箔球悬挂在铅笔上并保持高度相同。把铅笔挂起，这样小铝箔球离开其他可能妨碍它们运动的物体。这里用一些书压住刻度尺，铅笔就平衡在尺上。保持悬挂线的尾部在同一端，这样可以使线在尺的同一边。两小铝箔球相隔大约3.8cm。

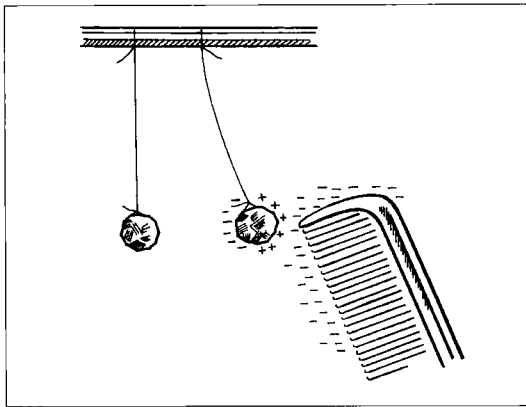


图8-25：把梳子快速梳过你的头发，使它带上负电荷。现在把梳子靠近小铝箔球，观察梳子是如何吸引小铝箔球的？如果在梳子梳过头发时更快，时间更长又会发生什么现象呢？尝试用梳子梳过其他家庭成员的头发，你也可以用家里的狗或猫的皮毛来做实验。

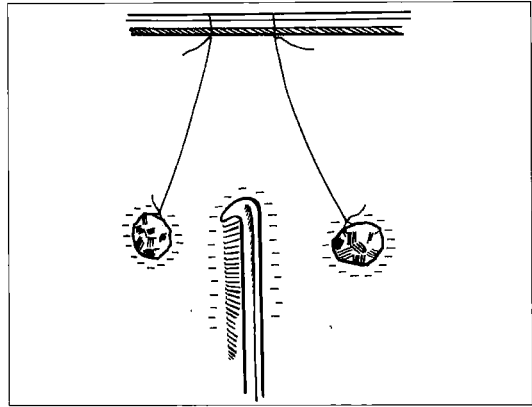


图8-26：在用梳子吸引小铝箔球实验后，让梳子接触小铝箔球，注意它们在接触后是如何立即分开的？实验中梳子把小球推来推去。把两球摆动到两边，让它们再次接触梳子，两个球得到更多的负电荷了吗？你怎么去辨别呢？重复几次这样的过程观察在小铝箔球和梳子之间可以产生多大的力。

后把线绑在铅笔或者小木条上。图 8-23 示出了捆扎小球的详细过程。现在把两个球都悬挂在铅笔上，保持高度相同。

最后，设法把实验器材悬挂，使小球可以自由摆动，两个小球间保持 3.05cm 的距离。图 8-24 展示的用书架里的书压住刻度尺的方法。在这个例子中，铅笔在尺上保持平衡，当然你可以设计更好的方法来悬挂这个实验装置。

现在就可以开始做实验了。用梳子在你的头发中梳理几次，这样就使梳子带上了负电荷，把梳子靠近小铝箔球，然后观察发生的现象。

首先，小铝箔球向梳子方向摆动，这是因为负电荷吸引它们。你可以不接触球而把球吸引在梳子附近，这是梳子附近电场作用的效果。图 8-25 显示的是梳子上的负电荷把靠近梳子一侧的小球上的负电荷排斥到小球另一侧，这样使小球这侧带上正电荷。这就是梳子

会吸引小球的原因。

让一个小球接触梳子。注意小球接触梳子后是如何立即跳离梳子的？当小球接触梳子时，它从梳子上得到一些电子，这时小球变成负电荷带电体，现在小球和梳子会相互排斥，因为它们带上同种电荷，如图 8-26 所示。

再让梳子梳梳头发使它再次带上电荷。因为电场作用，你现在可以不让梳子和球接触而使它们相互排斥。当然如果你试图把小球排斥更远，重力会胜过电场力，小球向梳子方向下落。小心地把梳子放在两个小球中间，先使一个小球接触梳子，同样再让另一个小球接触梳子，你可以重复几次这样的过程使小球带上更多的电荷（当然，你使小球所带电荷的数量是有限度的）。

如果你能够找到玻璃棒和丝绸，则可以用正电荷重复这个实验，当然，在使用玻璃棒时一定要注意安全。

复习检测：-----

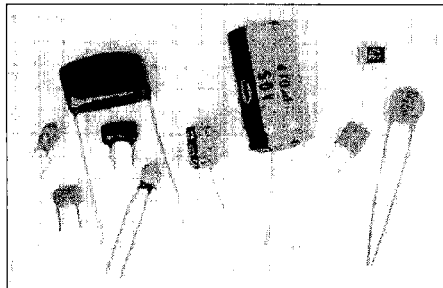
- 8.1 电子这个词来源于哪里?
- 8.2 有两个薄金箔片的仪器叫什么仪器?
- 8.3 任何材料中具有物质属性的最小微粒是什么?
- 8.4 解释为什么地球北极是地磁的南极?
- 8.5 完成这个句子：带异种电荷的物体总是\_\_\_\_\_。
- 8.6 完成这个句子：在一个水分子中，有\_\_\_\_\_个\_\_\_\_\_原子和\_\_\_\_\_个\_\_\_\_\_原子。
- 8.7 和电子相比，质子：
  - a) 带相同的负电荷
  - b) 有更多的正电荷
  - c) 有更大的质量
  - d) 有更小的质量

答案：-----

- 8.1 电子一词来源于希腊语种中琥珀，它可以用来产生静电。
- 8.2 验电器
- 8.3 原子
- 8.4 指南针的北极指向地球的地理北极。因为异名磁极相互吸引，所以地球地理北极一定是地磁南极。
- 8.5 吸引
- 8.6 一个水分子有连个氢原子核一个氧原子。水分子的化学符号是 $H_2O$ 或者是 $H_2O$ 。
- 8.7 c 质子的质量大约是电子质量的1840倍。

## 第9章

# 电容器和电感器



这些是电路中常见的电容

### 目录

- 存储电荷，产生电场
- 增加极板面积，存储更多电荷
- 增加极板数量，增加了极板的面积
- 减少极板间距，增强电场强度
- 介电常数和电场
- 决定电容大小的因素
- 实用电容器
- 电感器——电流产生的磁场
- 把导线绕成线圈增强磁场强度
- 在磁性材料上绕线圈增强磁场强度
- 决定电感器电感大小的因素
- 电感器以磁场形式存储电能
- 复习检测

# 存储电荷，产生电场

在这一章中，你将学习电容器。电容器听上去有点像“容器”。你也许想在字典中查一查“容器”这个词。“容器”具有保存、容纳或提供空间的意思。一个汽车的油箱可以存放 10 加仑的油，而这辆车可以装 5 个成年人乘客和 3 个大箱子。学校礼堂里的标记告诉我们这个礼堂可以容纳 250 个人。这给了我们定义电容器一个好的开端，电容器存储电能。正如你前面所学到的，能量具有做功的能力。

你一定熟悉不少存储能量的装置。电池存储化学能，在适当的条件下电池发生化学反应，产生电流或电能。河中的水坝存储了水，存储的水的势能可以推动发电机发电。纱门的弹簧存储能量：打开门时，弹簧拉伸，存储能量。松开手，弹簧的能量将门关上。

你也许想知道电容器是如何存储电能的。图 9-1 描述的就是电容器存储电能的电路。注意，电容器的电路符号看起来像中间有一定间距的两根平行的导线。这个示意图准确地描绘了实际中的电容器的结构：顶部和底部各有层个金属板，在这两块板之间插有一层绝缘体。

当你合上开关，电子离开电池的负极，电池的正极吸引这些电子，这些电子在电路中移动。但是，这个电流不能持续很久。电子到达电容器（底部极板），但电子却不能穿过电容器，这是因为在电容器中间有一层绝缘层。这里发生了两件事：第一，电子到达电容器底部极板的表面，这些电子施加电力，排斥对面导体（顶部极板）表面的电子；第二，电池正

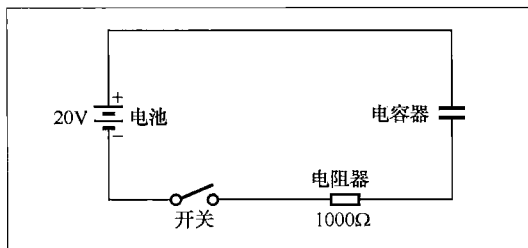


图9-1：这个电路图包含了1个电池，1个开关，1个电阻和1个电容器。正文中解释了这个电路中电能是如何存储在电容器中的。

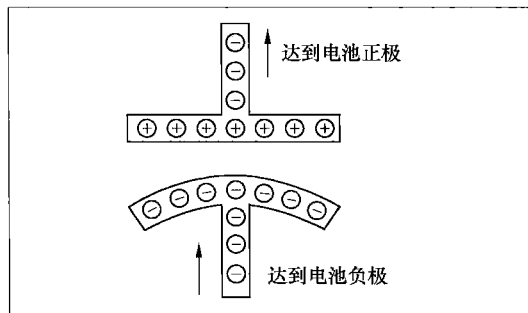


图9-2：电容器的一个极板获得负电荷而另一个极板获得正电荷。最终，不再有更多的电子能流入负极一侧的极板，也不再会有电子离开正极一侧的极板。

极从电容器靠近正极一侧的导体表面吸引电子，当电子从这个表面离去时，电容器的这一侧带上正电荷。

图 9-2 表示了电容器中导体（或称为极板）上电荷开始积累。第一个极板上的负电荷同样也排斥更多的试图移动到这个极板上的电子。开始时只有较少的电子，这个排斥力较小。电

池用较大的力推动电子，所以电子在极板上不断地积累。不过，当更多的电子堆积在极板上时，排斥力不断增强。最终，电容器极板上的电子的斥力等于电池对电子的推力，不再有电子流入电容器的底部极板。

当电子在一个极板上堆积时，电池将获得另一个极板上的电子。这里，当电池不断从极板上获得电子时，获得电子的能力也越来越弱。同样的道理，力达到了平衡，电池不能再从电容器顶部极板上获得更多的电子。

请注意，这里发生了非常奇妙的事情。电子从电池的负极流出，并在电容器底部极板积累，这迫使其他电子（不相同的电子）离开电容器顶部极板，流回到电池。没有一个电子流过底部和顶部极板之间的空间！工程师们把

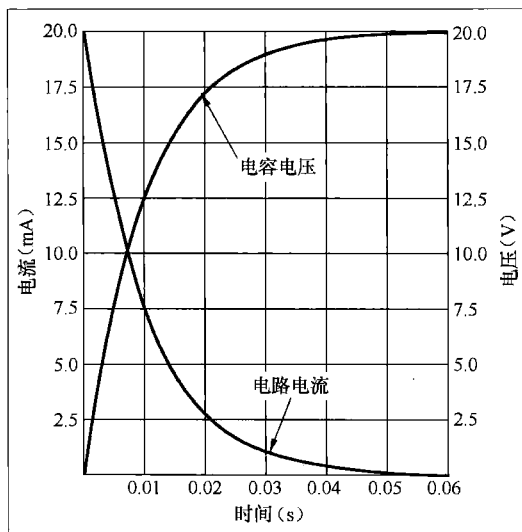
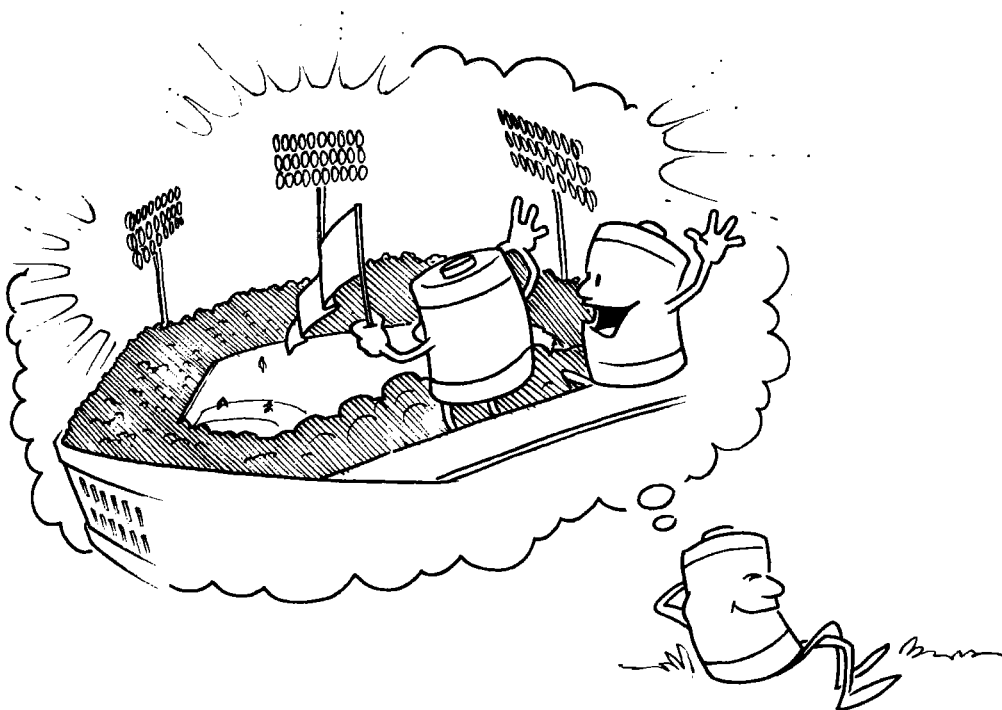


图9-3：这张图描述了通过图17-1电路的电流，也描述了电容两极板间的电压。



这种电流（流入一个极板，从另一个极板流出）称为位移电流。

图 9-3 显示的是电路中电流的图表。当你刚闭合开关时，电流是 20mA (0.020A)。现在你不必担心为什么它是 20mA。后面我们将学习欧姆定律，电流的大小由电路中的电压和电阻所决定。

不过几乎是瞬间，电流降低。图 9-3 中有一个接在电容两极板上的电压。当你刚闭合开关时，两个极板间没有电压（此时电容器被称为未充电状态）。而当电荷不断堆积时，两个极板间就有了相应的电压，不过，当这个电压最终等于电池的电压时，电路中就没有了电流，此时电容器充满了电。

图 9-3 中显示的时间、电流和电压只适用于这个电路。这些数据取决于电池的电压、电路中的电阻和电路中使用的电容器。其他的组合导致图表上的数据不同，不过图的形状不会改变。

你记得在两个带电体之间存在一个电场吗？这与两个磁体间存在磁场相似。当电容器极板上不断堆积电荷时，在两个极板间就会建立起一个电场。

电容器两个极板之间的电场表现为存储

的电。只要电容器极板上有电荷，电容就将存储这个能量。

假设我们把电容器从电路中移出，一个理想的电容器将不会失去任何电荷。当然，没有任何一个电容器是理想电容，所以一部分电荷将会通过电容器极板间的绝缘体渗漏。电容器必须有引线，以便连接在电路中，所以有些电荷通过电容器的引线渗漏到引线周围的空气中。

你要小心对待电路中的电容器，当你断开电路很久后，它们可能还会保留危险的电荷。如果你意外地碰到这样的电容的引线，你可能会遭到电击。电容的电击可能使你惊恐、痛苦甚至是致命的。

一台旧电视机或者电脑显示器的显像管利用高压在屏幕上产生图像，这个显像管本身就好像一个电容器，可以存储电荷数小时或好几天，而在非常干燥的天气中，甚至可以存储数周。这时连接在显像管上的电容器的电压可以达到几万伏，产生的电击可以造成巨大痛苦（可能非常危险）。如果在不知道你将做什么时，千万不要打开包含显像管的电视机或者电脑显示器。



# 增加极板面积，存储更多电荷

电容器有两个被绝缘体分开的极板。电池或者其他电源把额外的电子堆积到一个极板上，使其带上负电荷，电源从另一个极板上移去电子，使其带上正电荷。这两个导体表面或极板上的电子也就产生了电场。

假如你把一个电容器连接到电源上，电容器就开始充电直到极板间的电压等于电源电压。这时，不能再增加电容器的电量，除非你再增加电源电压。高电压下存储的电荷较多，得到的能量也会更多。

你在你的冰箱中保存过一瓶水吗？有时，没有什么比一杯冰水更能解渴了。在炎热的夏天，也许你需要一个容量更大的装水的瓶子，取代容量为 1L 的瓶子，你也许想要一个 2L 甚至 4L 的水瓶。大容量的瓶子可以装更多

的水。

这给了你在电容器中存储更多电能的办法。你猜想如果电容器的极板更大将会发生什么？是的，负极板将拥有更多的电子，而正极板也将失去更多的电子，得到更多的正电荷。

图 9-4 显示的是两个用铝箔作为极板的电容。空气把极板分开，使它们绝缘，这样没有电子可以在它们中间移动。图 9-4 (A) 中的电容器极板面积小，只能存储很少的电荷，两个极板之间的电场微弱，它不能存储更多的电能。

图 9-4 (B) 显示的是一个极板面积较大的电容器。让我们假设它的面积是电容器 (A) 的 10 倍。如果给它们充电的电压相同，电容器 (B) 拥有的电荷就是电容器 (A) 拥有电荷的 10 倍。

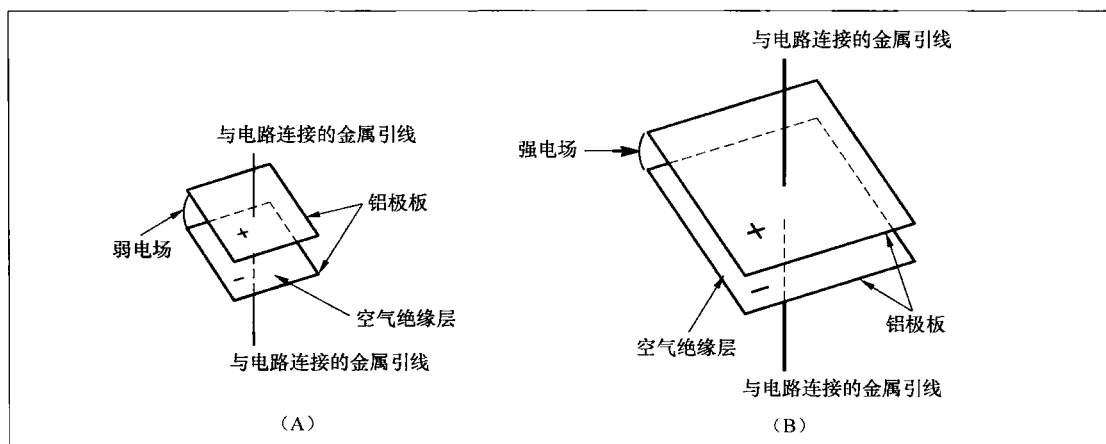


图 9-4: 图 (A) 中电容器的极板面积较小, 它拥有较少的电荷, 两个极板间的电场也较弱。电容器 (B) 比电容器 (A) 要大, 当连接到相同的电压上时, 电容器 (B) 拥有的电荷更多。

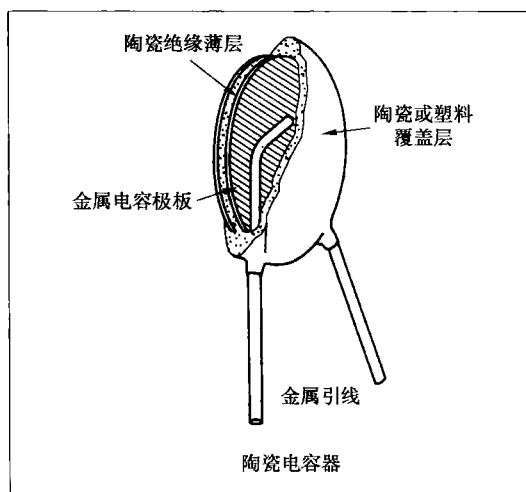
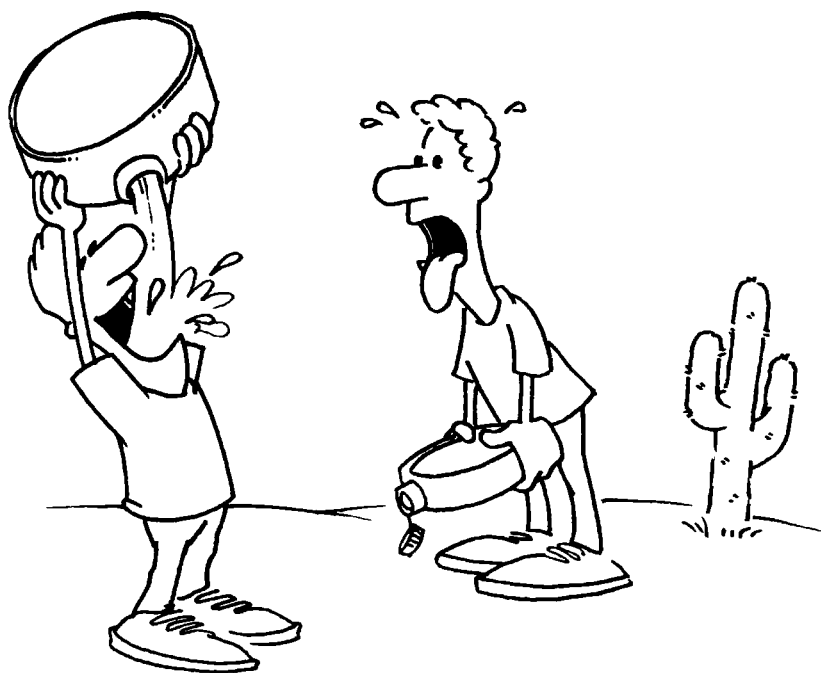


图9-5：这是一个圆形陶瓷电容器的剖视图。在两个金属极板之间有一层很薄的陶瓷绝缘层。小的金属线接在每个极板上，这样你可以把电容器连接到电路中。这个装置中还有一层陶瓷或者塑料覆盖层，起到电容器防潮的作用，或者避免电容器受到其他有害的影响。

圆盘形陶瓷是一种常见类型的电容器。这些电容器的两个金属板之间有一层陶瓷绝缘层。每个极板上接有金属引线，这样你可以把它们连接在电路中。图 9-5 显示的是一个圆形陶瓷电容器的结构图。

绝缘层的材料和厚度决定了电容器的最高安全工作电压。如果你给一个电容器外接超过绝缘层所能承受的电压，将会击穿绝缘层，毁坏电容器。

假设你找到两个额定电压相同的圆形陶瓷电容器，其中一个电容器的极板直径比另一个的大，那么哪一个电容器的额定容量更大呢？当然，极板直径较大的电容器的容量更大，它将拥有更多的电荷，存储更多的电能。

# 增加极板数量，增加了极板的面积

面积更大的极板可存储更多的电荷，极板间的电场也更强。那么，我们可以做出多大的电容器极板呢？你能想象做一个一侧极板直径是 50cm 的电容器吗？这样将限制我们设计出很小的电子电路。

我们可不想电容器占据的面积有餐桌那么大。那么我们如何制造出极板面积更大的电容器呢？假设我们把两个极板对折，把每个极板的一边夹在另一个极板对折的两个半面中间。图 9-6 表示的就是用这个方法做成的电容器。

把极板多次折叠比较困难，因为多次折叠后你无法使它们组合在一起。不过你可以把大的极板切成小片，然后把一半属于同侧的小片连接在一起，把一半属于另一侧的小片连接

在一起。你可以把这两组小片放在一起，如图 9-7 所示。

这是比使用两个大的极板更实用的构造。很多类型的电容器都使用这种堆积式结构。可是当你查看电容器时你很难看到它的结构。大多数电容器都有一个防护壳，因此你不能看到它的内部。

很多电子电路需要可调节电容量大小的电容器。你可以根据需要改变它的容量，例如，在你调节无线电接收机时改变电容器拥有电荷的数量。

一种常见的可变电容器由一组可旋转的极板（动片）和另一组固定的极板（定片）组成。旋转的极板改变重叠的面积。当极板完全吻合时，电容器的容量最大，而当极板不重叠

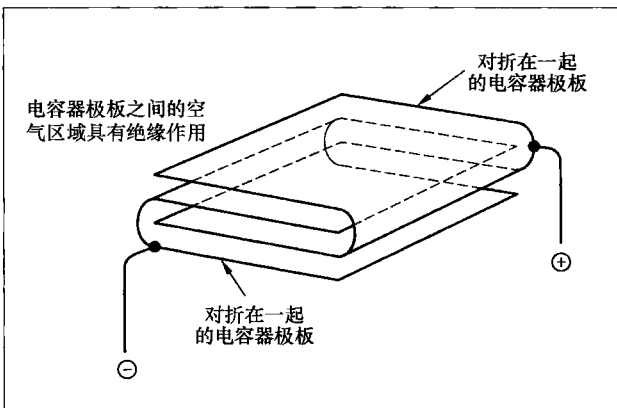


图9-6：这个电容器有两个对折在一起的极板，可以节省空间。

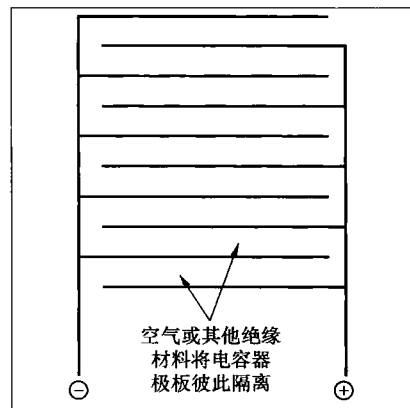


图9-7：这个电容器有两组每边各自连接在一起的极板，空气或其他绝缘材料使两组极板彼此绝缘。

时，电容器的容量最小。

图 9-8 表示的就是这样一种可变电容器。一层空气将这组极板隔离，防止电子在它们中间流动。

你可以发现许多不同尺寸的这种空气可变电容器。有些有几个很小的极板，而有些有很大的极板，通常更多的是大极板式。

还有另一个减小电容器包装大小的方法。如果你是用金属箔作为极板，你可以把它们卷成筒状，在圆筒中放入绝缘材料。当然，你只有在极板间加入固体绝缘材料才行。

你可以用这种结构方法来制作电容器。你需要一些铝箔和蜡纸。铝箔电容极板的尺寸并不重要。裁剪 4 张正方形蜡纸，使它们的长度和卷起的圆筒的宽度相等。然后裁剪 4 张铝箔，把铝箔的大小尺寸做得比蜡纸小一些。每一个箔片上留一个短条，这些短条将间隔连接箱片。当你组装你的电容器时，更迭这些短条的方向，这样第 1 层和第 3 层的箔片连接在一侧，而第 2 层和第 4 层箔片连接在另一个侧。

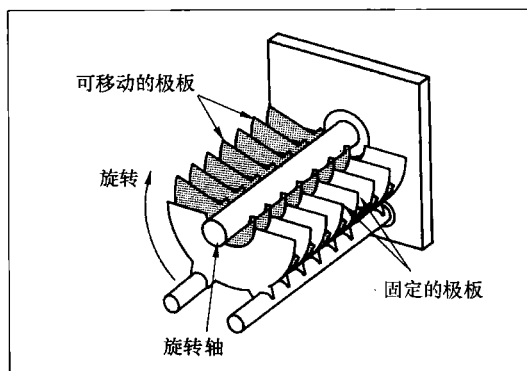
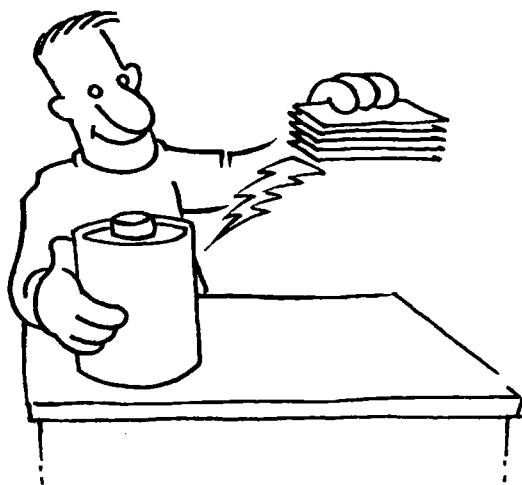


图9-8：这个可变电容器有两组极板。一组极板可以旋转，而另一组极板不能转动。可旋转的极板（动片）向内旋转或向外旋转离开固定的极板（定片），改变重叠的面积。

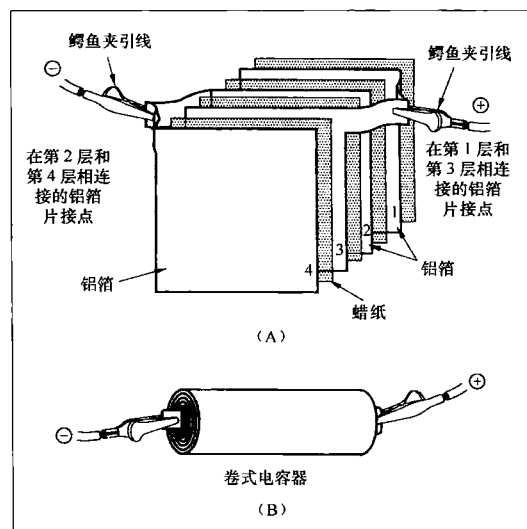


图9-9：你可以做一个实验用的电容器。图中（A）部分表示的是一个铝箔和夹在其中的蜡纸的“三明治”。图中（B）表示的是如何把电容器卷成一个圆柱体。

图 9-9 显示的是一个有多层铝箔和蜡纸的“三明治”。奇数层的铝箔连接在一起构成了电容器的一边，偶数层的铝箔连接在一起构成了电容器的另一边。蜡纸层将每层铝箔隔开，“鳄鱼夹”引线连接电容器的每一边。

现在你可以从夹子引线对面的末端开始卷起你的电容器。几个小的短条将保持电容器成圆柱形。图 9-9 (B) 显示的是卷成后的电容器。

如果你愿意，你现在可以用你的电容器完成实验。将一个引线接到 6V 或 12V 电池的负极，另一个引线接到电源的正极。现在把电压表接到电容器的两个引线上，电压表将记录电池电压。

拆下电池，观察电压表。电压表的读数将逐渐减小。电压表消耗存储的电能，因为记录电压需要有电流。

再次给你的电容器充电，但不连接电压表。拆下电源，等一两分钟，然后再接上电压表。记住哪一边是和电池的正极相连接的，连接电压表时要用同样的方法。否则电压表的指针将向错误的方向摆动，这样可能会损坏你的电压表。

不要把你的电容器接到交流电源（你家中墙上的插座）上，这将非常危险，因为墙上插座提供的电压可以致命。为了安全，只能把你的电容器连接到电池上，不要使用交流电源。

## 减少极板间距，增强电场强度

**图** 9-10 显示的是单个正电荷和单个负电荷。这两个电荷离得很远，它们之间有一个非常微弱的电场。现在把这两个电荷靠近，当它们靠近时，电场变强。记住，异种电荷相互吸引。当它们靠拢时，它们之间有很强的引力。

图 9-11 (A) 中的电容器极板相距很远。在负极板上拥有的额外的电子施加一个微弱的力排斥正极板上的电子（负极板上同样也施加一个微弱的力吸引电容器正极板上的正电荷）。

现在让我们把电容器两

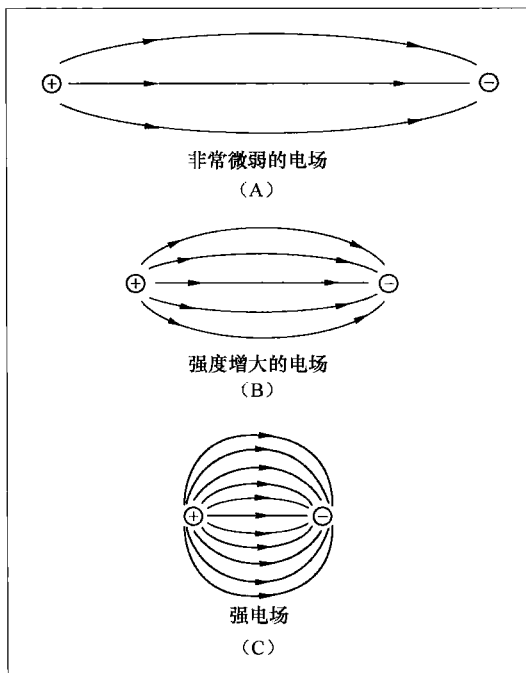


图9-10：一个正电荷和一个负电荷之间逐渐相互靠拢。图17-10 (A) 中，它们离得很远，彼此之间的吸引力微弱。它们之间有一个微弱的电场。在图17-10 (B) 中，我们把它们靠得较近。现在它们之间的引力变强，它们之间的电场强度也变强。在图17-10 (C) 中，两电荷靠得很近。现在它们之间有很强的吸引力，同时也存在一个很强的电场。



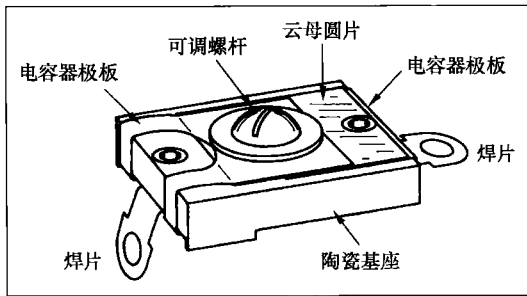


图9-12: 云母可变电容在两个极板之间使用了一层云母薄片。螺杆穿过极板和云母, 套在底部陶瓷上。当你向下旋紧螺杆时, 挤压电容器极板, 使它们靠拢。这样增加了电容, 在极板间产生较强的电场。

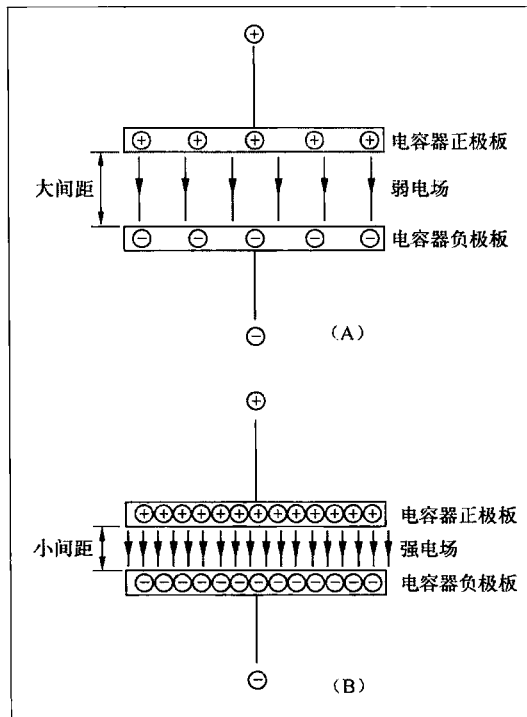


图9-11: 图(A)中的电容器极板之间的距离较大。我们将电池和它相连, 给电容器充电, 这样在它的极板上分别带上一些正、负电荷。因为极板之间距离较宽, 所以它们之间的电场微弱。在图(B)中, 我们把两个极板靠拢, 极板的尺寸规格不变。我们把这个新的电容器和给图(A)中电容器充电时一样的电池相连。这一次在电容器的负极板上拥有了更多的负电荷, 正极板上的正电荷也同样变大。我们通过使极板的距离靠近来增强电场强度。

极板靠拢。图9-11(B)表示此时极板间的电场变强。有更多的电子在负极板上, 同样正极板上也拥有了更多的正电荷。

两次电容器的极板尺寸规格相同。每次我们把电容器也都连接到相同电压的电源上。图9-11中, 这两个电容器中唯一可改变的是极板之间的距离。

我们能把电容器的极板移动得有多近呢? 记住, 在极板之间有绝缘层防止电子转移到正极板上。只要电压不会变得很高, 空气是一个好的绝缘体。然而, 闪电是电火花击穿空气的一个很好的例子。即使在较低的电压下, 当极板靠得太近时, 电子也会穿过极板间的间隙。

在安全的工作电压和通过使极板靠拢以增大电容量这两者之间有一个权衡, 这就是为什么大多数电容器选择除空气外的绝缘体的原因。很多的材料可以比空气承受更高的电压, 一薄层云母或者陶瓷材料就是电容器中良好的绝缘体。

图9-12显示的是一个云母可变电容。几组极板被云母薄片隔开。螺杆穿过组件中间的孔, 套在云母电容的底部。当你把螺杆向下旋转, 螺杆压缩电容器的极板, 使极板靠拢。正如你前面所学到的, 当两极板靠拢时, 极板会拥有更多的电量, 也产生更强的电场。

其他电容器采用的结构方法和前面一节里你的实验电容器相似。固体绝缘材料允许极板靠得更近, 以增加电容器存储的电量, 把组件卷成圆柱体可以减少包装尺寸。

# 介电常数和电场

电容器不能传导直流电，这是因为电容器极板之间的绝缘层切断了电流的通路。前面已经学过，在你刚把电容器接入到电源上时，有一个很短暂的电流，电容器很快被电源充电，这时电流停止。

我们把夹在电容器中间的绝缘体叫做电介质，因为电容器不能传导直流电。空气介质电容器使用空气作为电容器极板间的绝缘体。常用的电容电介质是云母、聚苯乙烯塑料、纸、陶瓷和氧化铝。

击穿电压是电介质的一个重要参数。你通常可以看到击穿电压标注为每密尔电介质的厚度承受的电压。1 密尔 =  $0.000\ 0254\text{m} = 0.002\ 54\text{cm}$ 。

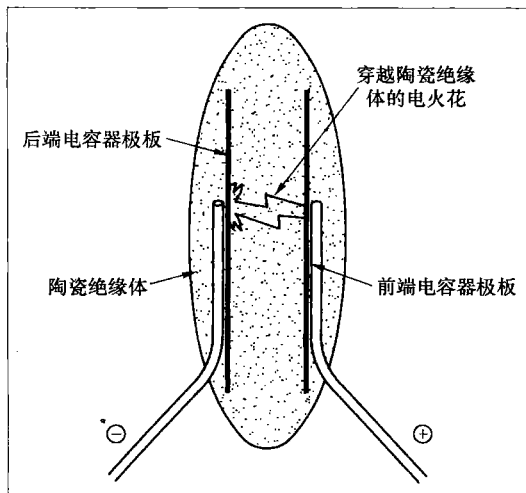


图 9-13：当电压足够大时，电火花将穿过任何绝缘材料。厚度较大的绝缘体需要较高的电压才能产生电火花。

表9-1：介电常数和击穿电压

材料	相对介电常数 (在1 MHz时)	击穿电压V/mil
空气	1.0	21
酚醛树脂	4.4~5.4	240
酚醛树脂 (添加云母)	4.7	325~375
胶木	4.6~4.9	450
玻璃 (普通窗玻璃)	7.6~8	200~250
云母 (红宝)	5.4	3800~5600
云母玻璃	7.4	250
纸 (皇室灰)	3.0	200
聚乙烯	2.3	1200
聚苯乙烯	2.6	500~700
瓷	5.1~5.9	40~100
水晶 (熔炼晶)	3.8	1000
聚四氟乙烯	2.1	1000~2000
玻璃 (耐热玻璃)	4.8	335

空气的击穿电压是每密尔 21V。假定你计划将一个电容用在电压为 20V 的电路中，这意味着极板间的厚度至少是 0.002 54cm（出于安全因素，你可能考虑使这个距离更大一些）。如果你要把电容器用在 200V 的电路中该怎么办呢？极板间的厚度需要 10 密尔或者说 是 0.025 4cm。

大多数电容器电介质材料都比空气具有更高的击穿电压。例如，云母，每密尔的击穿电压等级是 3800 ~ 5600V。显然，1 密尔厚的云母足够满足大多数的应用。

在把电容器接入电路之前，你要检查电



容器的击穿电压等级。通常情况下，相同容量的低电压电容比高电压电容的体积小。如果电容器不能承受施加到它两端的电压，瞬间放电将会击穿绝缘层，如图 9-13 所示。这将毁坏电容器，也许还会损坏电路中的其他元件。

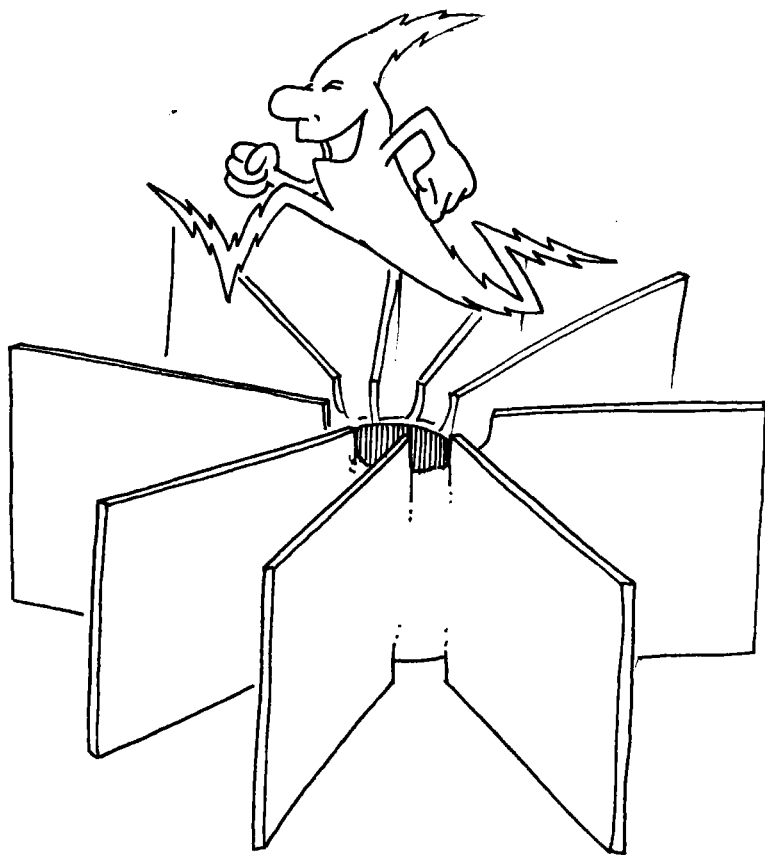
电介质的另一个重要的参数是介电常数，它用来量度电容器两极板间能存储多少能量。换句话说，介电常数表明了电场强度。

通常当你看到一张介电常数列表时，它可能列出了相对介电常数。相对介电常数是和

空气作对比。工程师把空气的相对介电常数定为 1.0。

瓷是陶瓷中用于电容器中的一种。瓷的相对介电常数在 5.1 ~ 5.9 之间。这表示的是什么呢？假设你做了一个陶瓷电容器和空气电容器，它们具有相同的尺寸和间隔。瓷介质电容器的电容量是空气介质电容器的 5.1 ~ 5.9 倍。

表 9-1 列出一些常见的绝缘材料以及它们的特性。



## 决定电容大小的因素

在这一章中你已经学习了电容器。当你把电容器和电源连接时，电荷将积累在电容器的极板上。额外的电子积累在一个极板上，使这个极板带上负电荷，而另一个极板失去电子，带上正电荷。这些相反的电荷被绝缘材料分隔开，产生电场。电容器以电场的形式存储电能。

在本章的前几节，我们讨论了增加电容器保存电荷数量的几种方法。在这一节我们将总结这些因素。不过，首先还是让我们来讨论度量存储电荷的单位。电容量是电容器存储电荷能力的量度。

电容量的基本单位是法拉。科学家用迈克尔·法拉第的名字来命名。法拉第是一位 19 世纪早期的英国科学家。法拉第对静电场很有

兴趣，例如，充电后的电容器的电场。我们用大写字母 F 来缩写法拉。

对于实际运用中的电容器，法拉这个单位太大。1 个 1 法拉的电容器的容量在物理上非常巨大。微法 ( $10^{-6}\text{F}$ )，缩写  $\mu\text{F}$ ，以及皮法 ( $10^{-12}\text{F}$ )，缩写为  $\text{pF}$ ，是更实用的度量单位。你也许还会看到电容容量用纳法 ( $10^{-9}\text{F}$ ) 作单位，缩写为  $\text{nF}$ 。在附录 A 中，你将学习更多关于公制的微、纳和皮的单位。

3 个主要因素决定了电容器的电容量。其中，第一个因素是极板的表面积。电容量的变化直接随极板面积的变化而变化。把电容器极板的面积加倍，电容器的电容量也加倍。图 9-14 显示的一个电容器的极板面积较小，另一个电容器的极板面积较大。

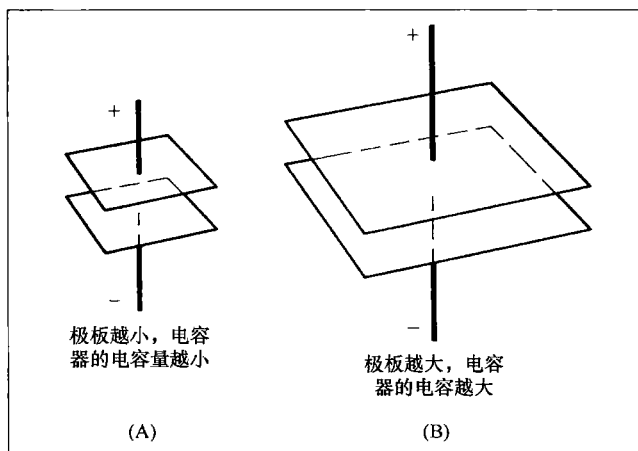


图9-14：电容的变化直接随极板面积的变化而变化。如果其他因素都相同，电容器的极板表面积越大，电容器的电容量也越大。

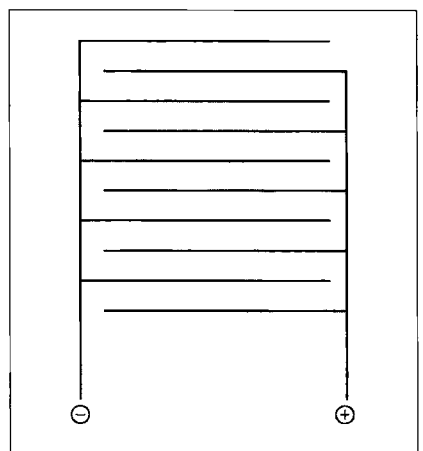


图9-15：你可以连接多套极板制作更大表面积的电容器。

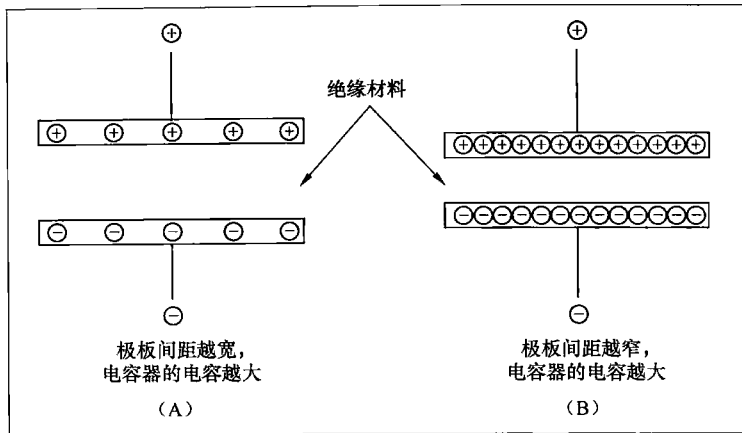


图9-16：容量与极板间的距离成反比。如果其他的因素相同，极板靠近的电容器的电容具有的电容量更大。

记住，你可以通过增加更多的电容器极板来增加电容器的表面积。图 9-15 显示把间隔的极板连接到电容器相反的一端。很多电容器使用这种多极板结构技术。

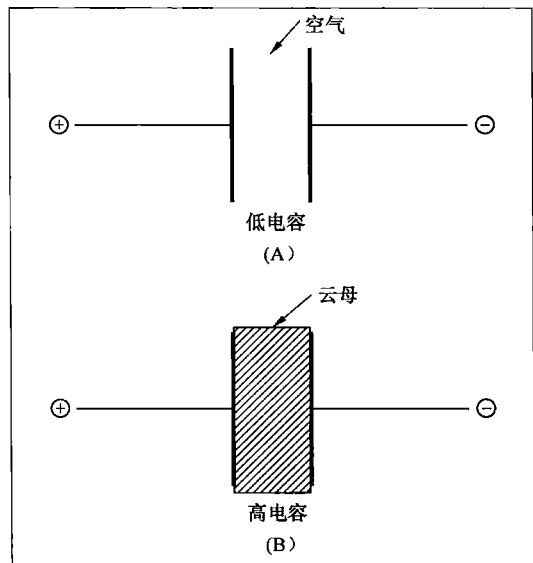
巨大的极板制作出的电容器的体积巨大。把很多较小的极板堆积起来同样也增加了电容器的尺寸大小。生产商把有些类型的电容器堆积的极板卷起，加入绝缘材料放入圆柱体内。

第二个影响电容器容量大小的因素是极板间的距离。电容跟极板表面间距离的变化相反。当极板间距离靠近时，电容量增加。图 9-16 显示的两个电容器极板表面积相同，但极板间的距离不同。

第三个决定电容量大小的因素是极板间电介质的介电常数。电介质的介电常数越高，产生的电容量就越大（这个设定的前提是相同的极板面积和极板间的距离）。

图 9-17 描述的两个电容器。它们具有相同的极板表面积和极板间距离。第一个电容器中的电介质是空气，而第二个电容器中的电介质是云母。云母的介电常数是空气的 5.4 倍。云母电容器的电容量就是空气电容器的 5.4 倍。

图9-17：电容量取决于极板间电介质的介电常数。



另外，云母电容器的耐压也非常高。

概括来说，有 3 种方法可以增加电容器的电容量：你可以通过增加极板的尺寸大小，或者增加极板的数量来增加极板的表面积；你可以通过使用更薄的电介质来减少极板间的距离；你可以在极板间使用更好的（电介常数更大）电介质。

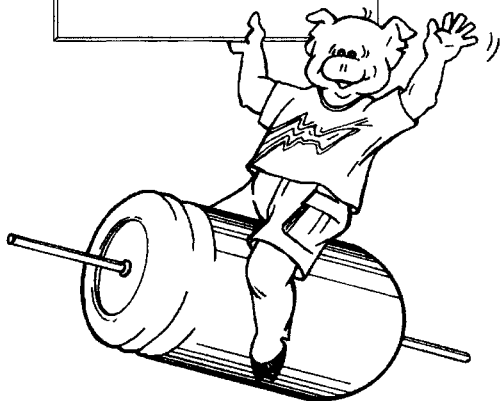
# 实用电容器

你可以购买到用不同电介质生产的电容器。每一种电介质适用于某一种结构技术。考虑到成本、击穿电压（耐压）和尺寸大小之间有个权衡，有些介质材料在很高的工作频率下效果会减低，所以你要避免在高频（RF）电路中使用这种电容器。工作温度的改变对有些电容器的电容量也会有很大影响。

对于具体电路，选择适当的电容器并不困难。不过，你必须考虑对电容器使用效果影响的权衡。例如，在音频放大电路中（音频的频率为 20 ~ 20 000Hz），作为音频旁路电容或者耦合电容，一个便宜的陶瓷电容器就可以工作得很好，而在射频振荡电路中则不要使用普通的陶瓷电容器。射频的频率通常从数百千赫

3个主要因素决定电容大小：

- ◆ 极板面积
- ◆ 极板间距离
- ◆ 绝缘介电常数



兹到数十亿赫兹（吉赫兹）。在这些高频（RF）电路中陶瓷电容器工作效果不好。

这一节是常见电容器的构造方法和电介质材料的介绍。这将帮助你了解为什么  $10\mu\text{F}$  的纸质电容器可能不是  $10\mu\text{F}$  钽电容器的好的替代品。

你也许看到电容器击穿电压值给出的是直流工作电压（WVDC）。这是你可以安全连接到电容器上的最高电压。明智的选择是电容器的击穿电压（耐压）至少是你希望它承受的电压的两倍，这样提供了一个安全余量。记住，一旦电容器中的绝缘介质材料被过高的电压击穿，电容器就被毁坏了，在某些情况下，它甚至会发生爆炸。

## 云母电容器

云母电容器由被薄云母片隔开的金属箔组成。图 9-18 所示为它的结构。间隔的极板接在各自的电极上，用塑料或者陶瓷将电容器封装。

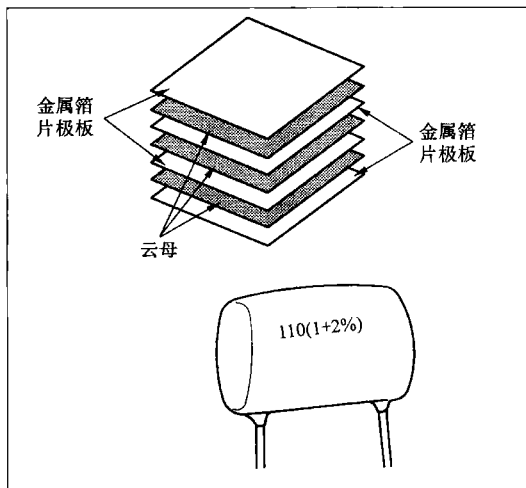


图9-18：云母电容器有一薄层云母将金属箔电容器极板分开。间隔的薄片连接到电容器的引线。陶瓷封装保护套件防止灰尘和潮湿。

云母的击穿电压（耐压）在每密尔 3800 ~ 5600V（1 密尔就是千分之一英寸，也就是 0.000 0254m）。这就是为什么我们在发射机和大功率放大器上使用云母电容器。重要的是它们具有承受很高电压的能力。

云母电容器具有很好的温度稳定性。在温度变化时，它们的电容量变化很小。云母电容器的电容量平均值范围在 1pF~0.1 $\mu$ F，而击穿电压值可能高达 35 000V。

## 陶瓷电容器

陶瓷电容器在很薄的陶瓷盘两边覆有金属薄膜。引线和金属薄膜相连。图 9-19 展示了它的结构。这个电容器有塑料或者陶瓷封装保护。

陶瓷电容器价格不贵而且很容易生产。很多电子电路中使用着陶瓷电容器。然而，你也不能把它们运用在任何电路中。

普通陶瓷电容器的电容量随温度的变化而改变。把陶瓷电容器用于那些要求电容器不随温度变化而改变的电路中是不明智的，在温度升高后，你将不得不多次反复调整振荡器的频率。

有些电容器具有负温度系数。意思是它们

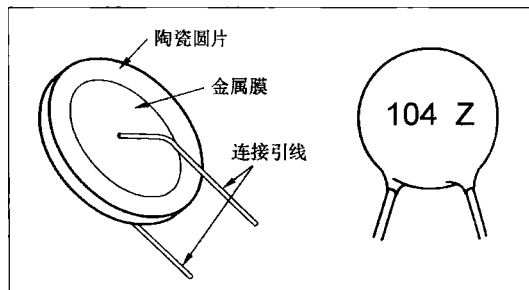


图9-19：这张图显示圆片陶瓷电容器的结构。在小的陶瓷圆片两侧覆盖着金属膜构成电极。金属丝和金属膜相连，组件被塑料或陶瓷封装。

的电容量在温度升高时减小。有些电容器具有正温度系数。它们的电容量在温度上升时增加。

有些特殊的陶瓷电容器，它们的电容量不随温度变化而改变。这些 C0G 电容器具有零温度系数。C0G 电容器既没有负温度系数，也没有正温度系数，在很大的温度变化范围内，C0G 电容器的电容量几乎不变。你可以购买一个电容量在 1pF~0.1 $\mu$ F 的陶瓷电容器。击穿电压值高达 1000V 的陶瓷电容器是非常普通的。

## 纸介电容器和塑料膜电容器

纸介电容器由间隔的金属箔和绝缘纸组成。引线和两套金属箔极板相连。然后生产商把它们卷成圆柱体，如图 9-20 所示。

电容器用塑料封装或者用蜡封装。最外层封装保护电容器防止灰尘和潮湿。

环绕电容器的一端可能有条纹。这表明这个引线和外层的金属箔极板相连。你可以把电容器的这一端接到电路的接地端，这样外层金属箔帮助电容器屏蔽射频能量。

纸介电容器的电容量的范围从 500pF ~ 50 $\mu$ F。它们的直流工作电压达 600V。纸介电容器通常很便宜。对于给定的电容量，它们比其他的电容器的尺寸更大，所以在某些方面它们显得不太实用。

塑料膜电容器的结构和纸介电容器相似。薄片的聚酯薄膜或聚苯乙烯作为绝缘层。塑料材料给电容器以较小的包装而承受较高的电压。聚酯薄膜和聚苯乙烯电容有很好的温度稳定性，平均的电容量在 5pF~0.47 $\mu$ F。

## 电解电容器

铝电解电容器也使用相类似的结构技术。

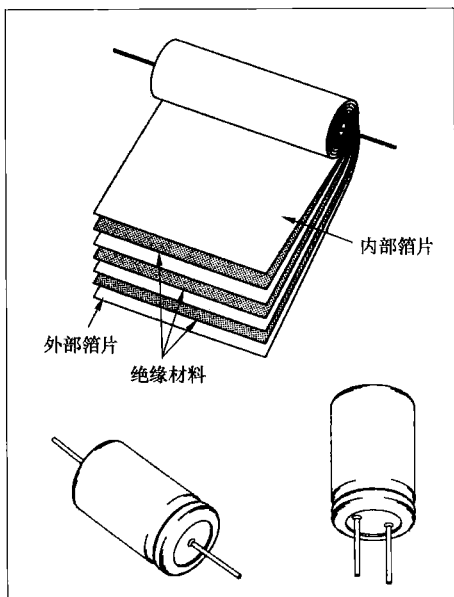


图9-20：不少种类的电容器和纸介质电容器的结构相同。电介质夹在金属箔极板之间构成电容器，卷起组件装入圆柱体内，然后用保护膜封装完成。纸介质电容器使用绝缘纸作为电介质。塑料薄膜电容器使用聚酯薄膜或聚苯乙烯。化学药品浸泡过的纸加在铝箔间构成铝电解电容器。

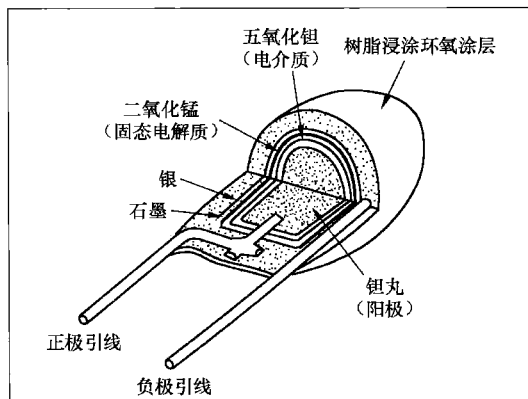


图9-21：钽电容器，有时称为“泪珠电容器”，利用一个很小的钽丸作为正极。这张图显示了这个电容器的结构。

铝箔薄片中有一层化学溶液浸泡过的纸。卷起的组件装在金属罐的保护外壳内。

当你通电后，化学药品发生反应，所以我们称这种化学药品为电解液。这是我们取名电解电容器的缘由。

电压加在电容器上时，在正极板表面发生化学反应，这个反应产生一个薄的氧化铝层，构成了电容器的电介质。因为这个很薄的电介质，电解电容器体积可以做得很小而容量很大。

电解电容器的一根引线总是清晰地地上符号“+”或“-”。在把电容器连接到电路中时，你必须观察这个极性。如果你连错了电解电容器的极性，在电容器内会形成气体，这可能会造成电容器爆炸。最低限度下，连接相反的极性时，你有可能会毁坏这个电解电容器。将电解电容器反向连接的另一个问题是，此时电容器的表现像一个电阻器而不是电容器。

电解电容器容量的有效值在 1 ~ 100

000  $\mu\text{F}$  (0.1F)。它们有的额定电压在 400V 或更高。大电容量，高电压的电解电容器体积较大。

钽电容器是电解电容器的另一种形状。相同的电容量下，钽电容器比铝电解电容要小，它们通常是水滴形形状。

电容器的阳极或正极是一个小的钽丸，一层二氧化锰构成了固态的电解质，或者是钽丸外侧产生氧化物层的化学药品。这个氧化物层充当电介质。一层碳或银构成了电容器极板的负极。

环氧涂层覆盖层给电容器生成了特殊的形状。这就是为什么我们常把它们称为“泪珠电容器”。图 9-21 显示的就是一个钽电容器的结构。

# 电感器——电流产生的磁场

当电子移动时，它们必然会产生磁场，电流通过导线产生磁场。磁场从导线向外延伸。靠近导线的磁场较强，远离导线磁场变弱。图 9-22 (A) 画出这个磁场像一系列同心圆环绕着导线。每一个大的圆环表示磁场中较弱的部分。图 9-22 (B) 描述磁场就像一些条形磁体环绕着导线。

你看不见磁场，但你可以观察到它的影响。观察磁场的一个办法是用指南针。把一根 1 米长的导线末端的绝缘层剥去，将一个 1 号电池底端和导线的一端相连，把指南针放在桌子的边缘，拿着导线靠近它，用导线的另一端去短暂接触电池的上端，然后靠近观察指南针。当你将导线和电池接触的瞬间，你会发现指南针的指针稍微偏转，而当你将导线从电池上移开时，指南针的指针又回到原来的位置。

不要将导线和电池连接的时间超过几秒

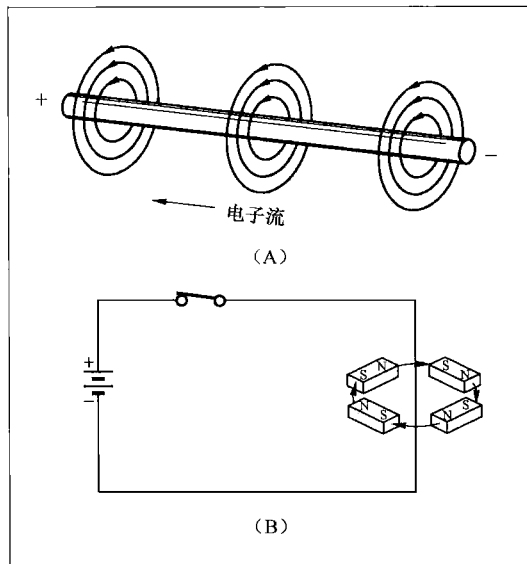
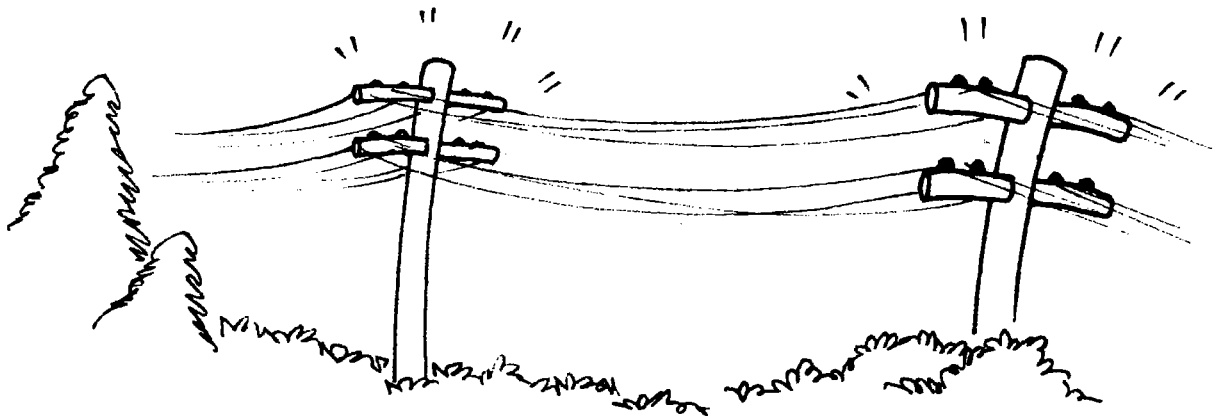


图9-22：当电子移动时会产生磁场。图 (A) 中显示的一系列环绕导线的同心圆代表磁场。图 (B) 中表示这个磁场就像很多个小磁体环绕着导线。



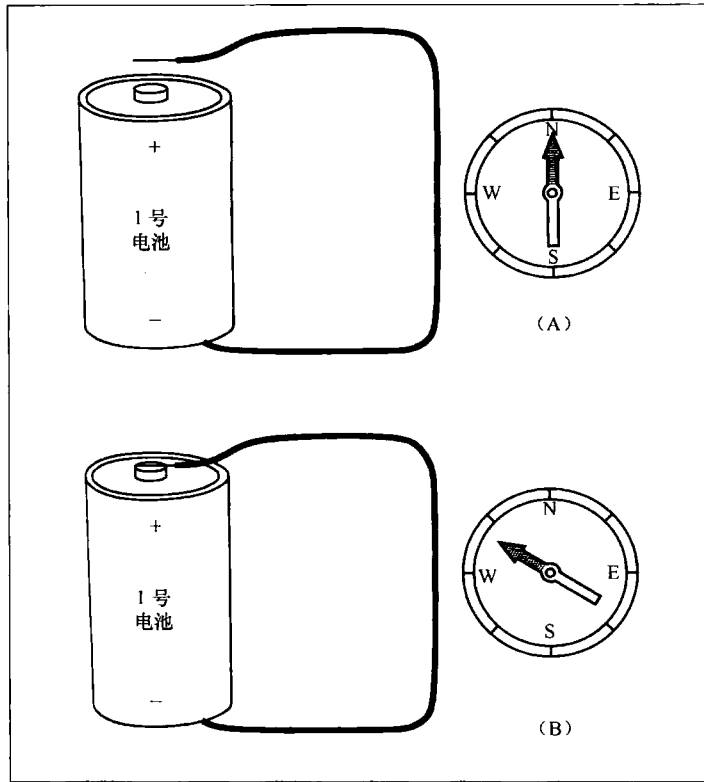


图9-23：这些图中有1号电池、导线和指南针。当你把导线和电池相连时，指南针的指针稍微偏转。

钟，否则电池将过热，就有发生爆炸的危险。这个实验会把电池的电能很快耗尽，所以导线只能和电池短暂地接触。

如果指南针的指针似乎没有移动，你也许需要一节新电池。也有另一种可能，你没有把指南针和导线靠得足够近。图 9-23 显示的是当你把导线和电池接触时指南针的指针是如何偏转的。

电和磁之间的关系非常重要。有时你也

许需要做一个简单的电磁体。大多数电表都是因为较小的电流产生电磁才能开始工作。电磁体转动，是因为在电磁体周围有一个永磁体。一根指针附着在这个电磁体上，移动时越过刻度。电压表、电流表和欧姆表都是利用这个原理工作的。

电动机转动是因为电流通过电动机中的线圈时产生的磁场。就连无线电信号的存在也是靠电场和磁场之间的关联。



# 把导线绕成线圈增强磁场强度

上一节中你学习了通电导体周围存在着磁场。直导线周围的磁场强度一般较弱。

大电流产生的磁场较强。需要用很大的电流才能在直导线中产生较强的磁场。

如果你把导线绕成圈，并把很多圈一个紧挨一个，情况又会如何呢？每圈导线周围微弱的磁场叠加起来，使每圈导线两边的磁性加强。图 9-24 显示的是绕了几圈的导线。磁力线从圆柱体中间穿过从外部环绕。线圈的磁场比单个直导线的磁场强了很多。

你大概还记得曾经用大钉子、一些导线和手电筒的电池做过电磁铁，如果你没有做过，这是尝试的好机会。

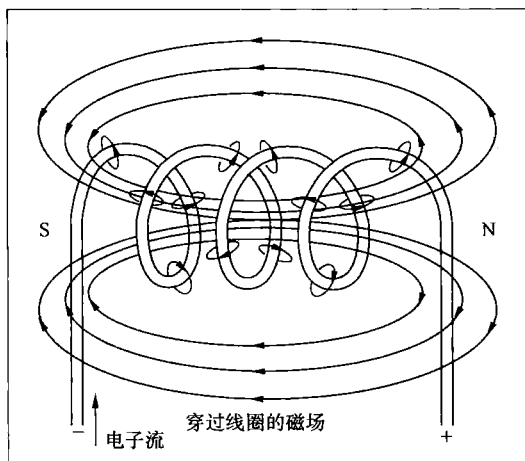


图9-24：电流流过线圈产生的磁场比同样的电流经过直导线产生的磁场要强。每个线圈周围产生的磁场加强了其他线圈周围产生的磁场。

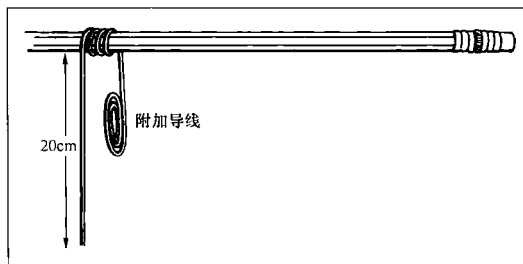
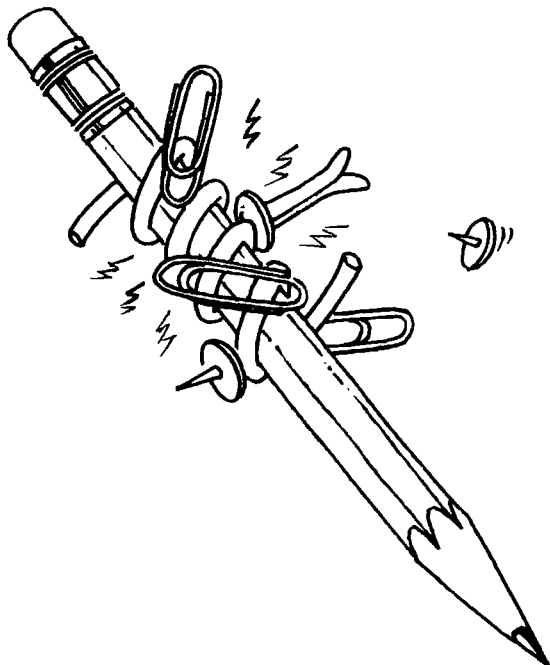


图9-25：回形针放入线圈内被磁化，然后它可以吸引更多的回形针。

做这样一个电磁铁，你需要一支铅笔或塑料柄的钢笔，你还需要一些直径较小的线圈，漆包铜线。把导线的一端预留出大约 20cm，开始在铅笔上绕线，如图 9-25 所示，绕线时

每一圈紧挨上一圈，但不要将导线重叠，一直在铅笔上绕大约 10cm，把导线的另一头也留出 20cm，把剩余的导线剪掉，然后将铅笔取出。这样就做成了一个开路线圈。然后把两头漆包线上的绝缘层去掉。

把导线的两端分别接到 1 号电池相反的两个极上，完成电磁铁。现在试着把线圈的一端靠近一堆回形针，它将吸引起一些回形针。你也许得把一枚回形针放到线圈内，这枚回形针被磁化变成磁体，它也将吸引其他的回形针，如图 9-26。

你的电磁铁可以吸引多少枚回形针呢？如果把你的电磁铁连接到 3V 的电池而不是 1.5V 的电池上，你认为它的磁性会变强吗？如果你绕制了更长的线圈，你认为会怎么样？

增加电池的电压也就增加了通过导线中的电流，这将使磁场变强。增强铅笔上线圈的圈数，同样也增强了磁场的强度，不过你一定要注意，只能沿一个方向绕线。如果你在第一

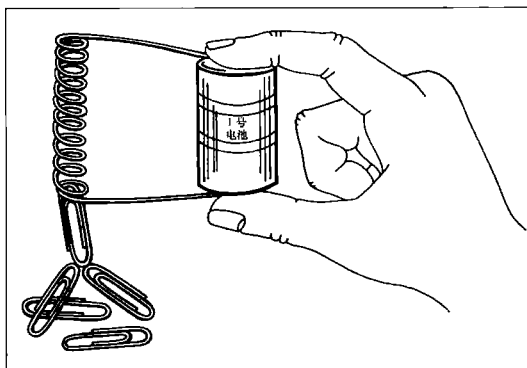


图9-26：你可以通过在铅笔或其他圆柱体上绕制线圈，做成一个简单的电磁铁。正文中讲解了如何绕线。

层线圈上反向回绕线圈，磁场的方向就会相反。在这种情况下，你的磁场会减弱而不是加强。

我们把电子电路中的线圈叫做电感器。电流经过电感器产生一个磁场。在本章和第三单元中，你将学习更多的关于电感器和它们产生的磁场的知识。

# 在磁性材料上绕线圈增强磁场强度

上一节我们描述了如何在铅笔上绕线圈做一个电磁铁。你曾经做过这样的电磁铁吗？或许在你自制电磁铁计划中，你曾用钉子或者铁棒插入线圈中。

现在你可能想做这样一个如图 9-27 所示的电磁铁。用一个大铁钉或一根铁棒，和前面一节用铅笔做的一样，将漆包线绕在铁钉上，然后把你的新的电磁铁连接到 1 号电池上。这个新的电磁铁能吸引多少回形针呢？多半比上一节不用铁钉的线圈要多得多。

这样，你就知道了增加电感器磁场强度的一种重要方法。把线圈绕在铁芯（磁芯）上产生一个很强的磁场。

其他还有什么材料可被我们用来制作电感器的磁芯或线圈呢？有很多材料特别有助于我们作为电感器的磁芯。将铁粉和粘土及其他化合物混合就是其中的一种。生产商把这些材料做成棒条形或者其他形状，然后把这些材料烧硬。生产商根据不同的应用准备不同的混合材料。这些产品中基本的两类是铁粉（powdered iron）和铁氧体（ferrite）材料。Ferrite 一词来自于拉丁文中的铁。化学家常把铁的化合物叫做铁氧体材料

铁氧体材料和铁混合成为金属合金。生产商选择不同合金混合，可以提供特殊的性能。你可以选择一种混合物为一个特定的频率范围提供最好的性能。铁和铁粉材料通常覆盖音频范围。不同的铁氧体混合物覆盖射频范围的不同部分。

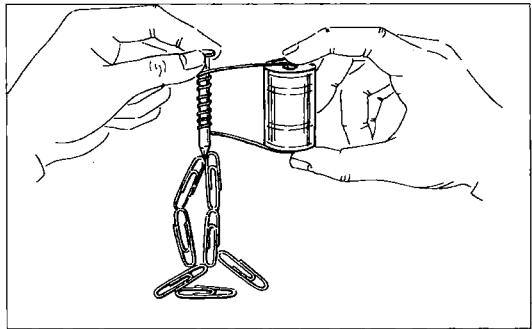


图9-27：绕在铁钉或铁棒上的线圈构成很强的电磁铁。

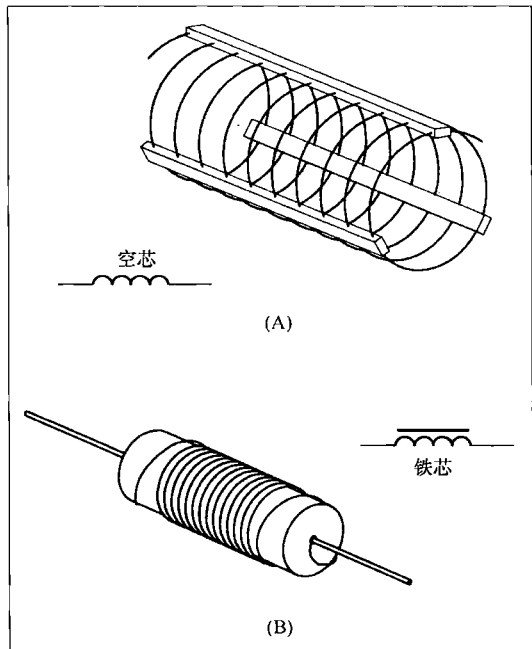


图9-28：塑料条把导线安全固定在一种常见的空芯电感器的适当位置上。铁芯电感器的形状很多，图19-7 (B) 中显示的是绕线在铁粉棒上的电感器，重型线植入磁芯内做成将电感器连接到电路中的引线。

图 9-28 显示的是两种普通类型的电感器。在无线电发射机和功率放大器中，你可以看到很多空心磁芯的电感器。在很多电子电路中有很多铁芯电感器。图 9-28 中包括了这些电感器的示意图。

很多收发信机电路中使用一种特殊形状的磁芯。环形电感器是绕线在圆环（磁环）上的电感器。很多铁粉和铁氧体都可作为环形电感器的磁芯。图 9-29 显示的是绕了线圈的环形磁芯。

记住，电感器产生的磁场穿过中间的磁芯。直筒线圈产生的磁场在磁芯外以曲线环绕，因为磁感线总是一个闭合环路。

不过，环形磁芯内部的磁场不必在磁芯外部环绕。因为磁环是环形（它是一个封闭的圆），磁场完全存在于磁芯内部。这是环形电感器的一大优点。

很多电子电路中需要磁场强度可以改变的电感器。有很多办法可以做出这种可变或可调节的电感器。一种方法是空心磁芯的电感器上连接一根引线。见图 9-30 (A)。根据应用选择合适的抽头线圈，你可以把这根引线接在这匝线圈上的任何一点。射频功率放大器电路经常使用多触点开关选择线圈抽头位置。根据放大器工作的不同波段，你需要选择不同的触点。

你还可以通过铁粉或铁氧体磁芯在线圈中移动（插入或者抽出）做一个可调节的电感器。你可以把线圈绕在用陶瓷或者其他材料做成的空心管上，接着把一个铁芯或者其他铁氧体磁芯旋转插入陶瓷管内。你可以通过调节磁芯在线圈中的位置，改变磁场强度。图 9-30(B) 显示的就是这样一种可变电感器。

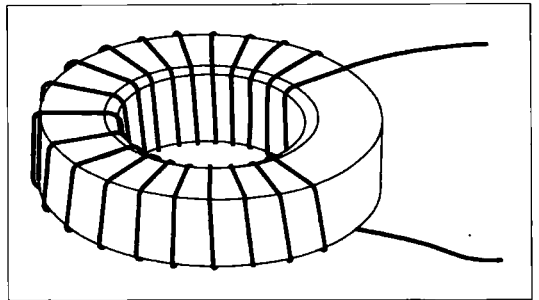


图9-29：这个线圈绕在环形磁性上。这个线圈产生的磁场全部保持在磁芯内部。

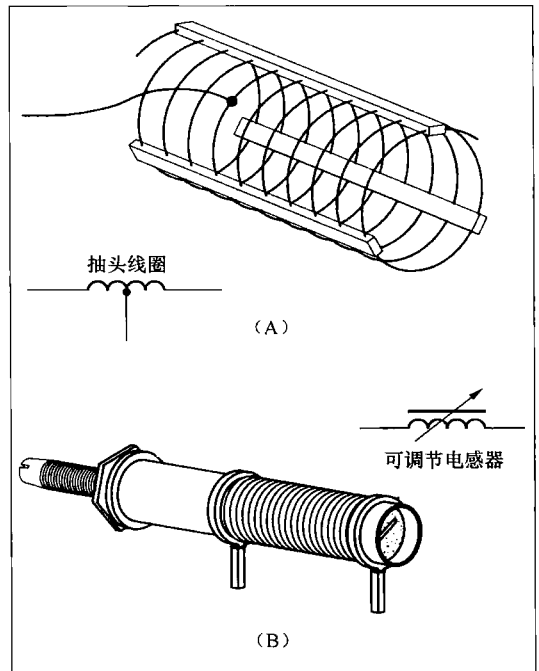


图9-30：图 (A) 中告诉你如何在空芯电感器上连接引线。它可以让你根据应用需要选择线圈的匝数。图 (B) 展示的是另一种可调节的电感器。陶瓷或其他材料做的空芯管上绕上线圈，用铁粉或铁氧体材料做成的磁芯旋转插入，你可以通过调节铁氧体在线圈内的位置调节磁场。

# 决定电感器电感大小的因素

本章中你已经学习了电感器。在上节中你学习了当电子流过电感器时，它们将产生一个磁场。通过把导线绕成线圈，我们可以得到较强的磁场。你还学习了可以把线圈绕在铁或其他磁性材料上。在电感器的中间加入磁性材料也可以增加磁场强度。

在第三单元你将会发现为什么我们使用电感器来描述电子电路中的线圈。线圈的电感量是叙述线圈产生磁场强度的性质。我们用大写字母  $L$  表示电感量。电感量大的线圈比电感量小的线圈产生的磁场要强。

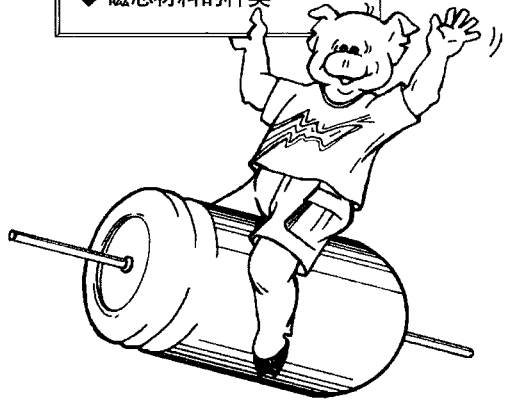
电感量的基本单位是亨利，简写为  $H$ 。这是为了纪念美国物理学家约瑟夫·亨利，他早在 19 世纪初发现了电和磁的关系。

亨利这个单位在实际电感的测量中是个太大的单位， $1H$  的电感量在物理上非常大。大多数测量时，我们用毫亨 ( $mH, 10^{-3}$ ) 和微亨 ( $\mu H, 10^{-6}$ )。你必须熟悉这些公制的前缀。

四个重要的因素决定了线圈的电感量。改变任何一个因素，线圈的电感量都会发生改变。

决定电感量大小的4个因素：

- ◆ 线圈的匝数；
- ◆ 线圈间的距离；
- ◆ 线圈的直径；
- ◆ 磁芯材料的种类



电感量的大小取决于线圈的匝数，线圈的匝数越多，电感量增加，减少线圈的匝数，电感量减小。图 9-31 比较两个不同匝数线圈的电感量。

电感量取决于电感器的长度，或者是每

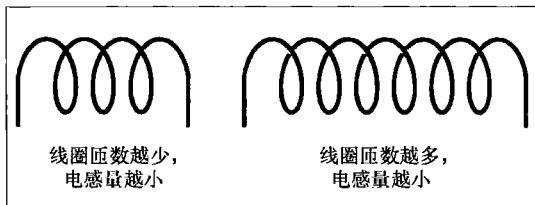


图9-31：一个线圈的电感量取决于制作线圈的匝数。

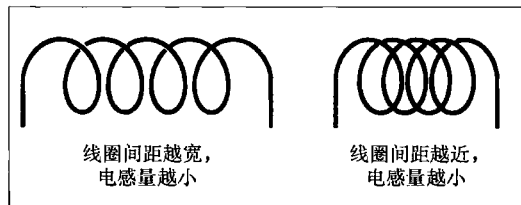


图9-32：线圈的长度或者每匝线圈间的距离影响电感量。

匝线圈之间的距离。图 9-32 中显示的是两个匝数相同的电感器。第一个电感器中每匝线圈间隔较大的距离，线圈是 5cm 长。第二个线圈中每匝线圈靠得很近，第二个线圈只有 1cm 长，你认为哪个线圈的电感量大呢？当然，间隔较小的线圈具有的电感量大。

第三个决定电感量大小的因素是线圈的直径。你也许会看到线圈的直径被称为横截面积。这也许会使你很惊奇，直径越大的电感器电感量越大。图 9-33 显示了两个电感器，它们有相同的线圈匝数，每匝线圈间距相同。第一个电感器的直径较小，而第二个电感器的直径较大，第二个电感器比第一个电感器的电感量要大。

第四个影响电感量的因素是线圈中间的

磁芯材料。磁导率亦称“导磁系数”是描述磁性材料导磁能力的物理量。磁导率也告诉我们线圈内加入这种磁芯材料后磁场有多强。

磁导率常常以相对磁导率出现。它的意思是介质的磁导率与空气的磁导率的比较。

一种铁氧体的相对磁导率是 75，线圈绕在这种材料上比绕在空心线圈上的电感量多多少？是大 75 倍吗？对了！另一种相对磁导率是 25 的材料，产生的电感量比相同的空心线圈大 25 倍。

图 9-34 显示了 3 个相同的线圈。一个是空心线圈，一个是中间是铁粉棒，还有一个中间是软铁棒（软的意思是铁没有被淬火而使之硬化）。这张图举例说明了磁芯材料对电感器的影响。

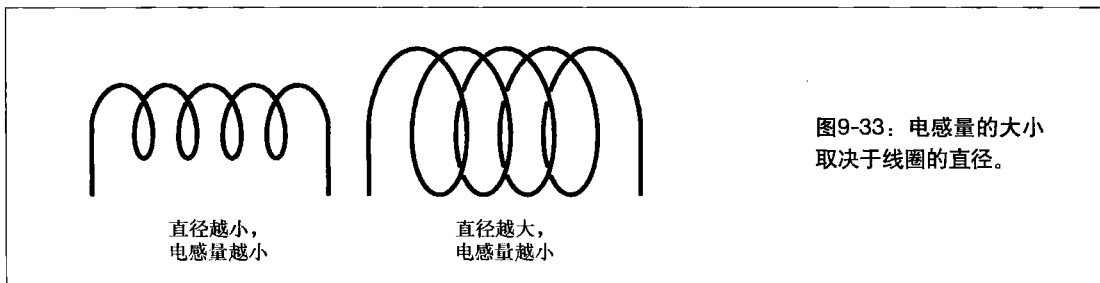


图9-33：电感量的大小取决于线圈的直径。

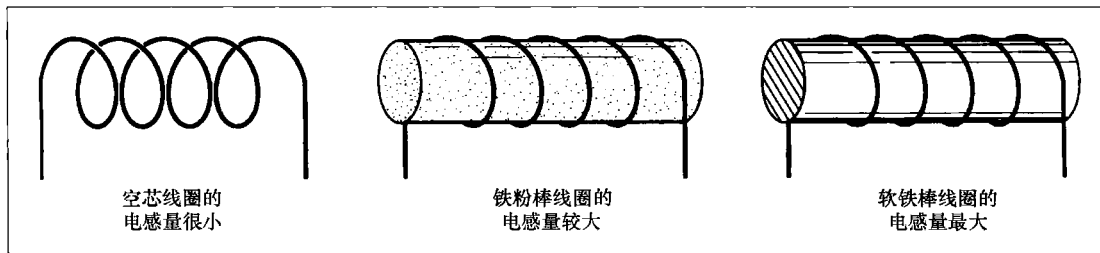


图9-34：磁芯材料或者电感器中间的材料也决定了电感量大小。

# 电感器以磁场形式存储电能

磁  
场在电子电路中的目的是什么？你也许很想知道。这是个很好的问题。毕竟我们没有讨论任何关于电感器对电路影响的问题。电感器的用途来自于发生变化的电流而不是稳定不变的电流。本节给出这个问题的部分答案。下面的章节中，将会对电感器在电路中扮演的角色进行更为清晰的描述。

导线本身并不产生磁场，而当电流流过导线时必然会产生一个磁场。在你把导线接入电源前没有磁场，而当你接上电源，电子开始流动，磁场逐渐增加（当然，磁场几乎是立即就产生了，不过，如果你能用慢动作来研究，你会发现磁场是逐渐增加的）。

图 9-35 显示的是一个电感器和电池相连。电池提供大小不变的直流电压，这个电压产生一个稳定的直流电。磁场能够达到的强度决定

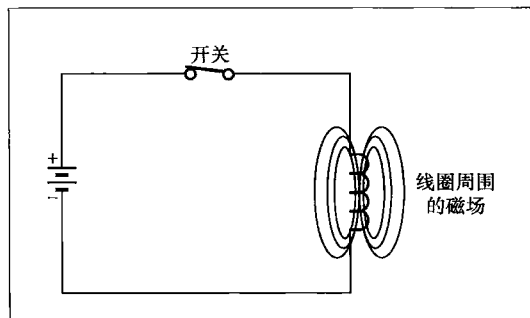


图9-35：当你刚把电感器和电源相连，电感器周围的磁场从零开始增加。磁场的强度取决于电流大小和电感量。稳定不变的电流通过电感器产生的磁场强度不变。

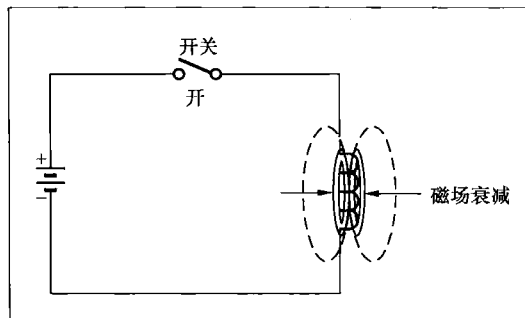


图9-36：当你断开开关时，磁场开始衰减。磁场把它储存的能量通过线圈产生的感应电压释放出来，感应电压试图保持电流的流动。

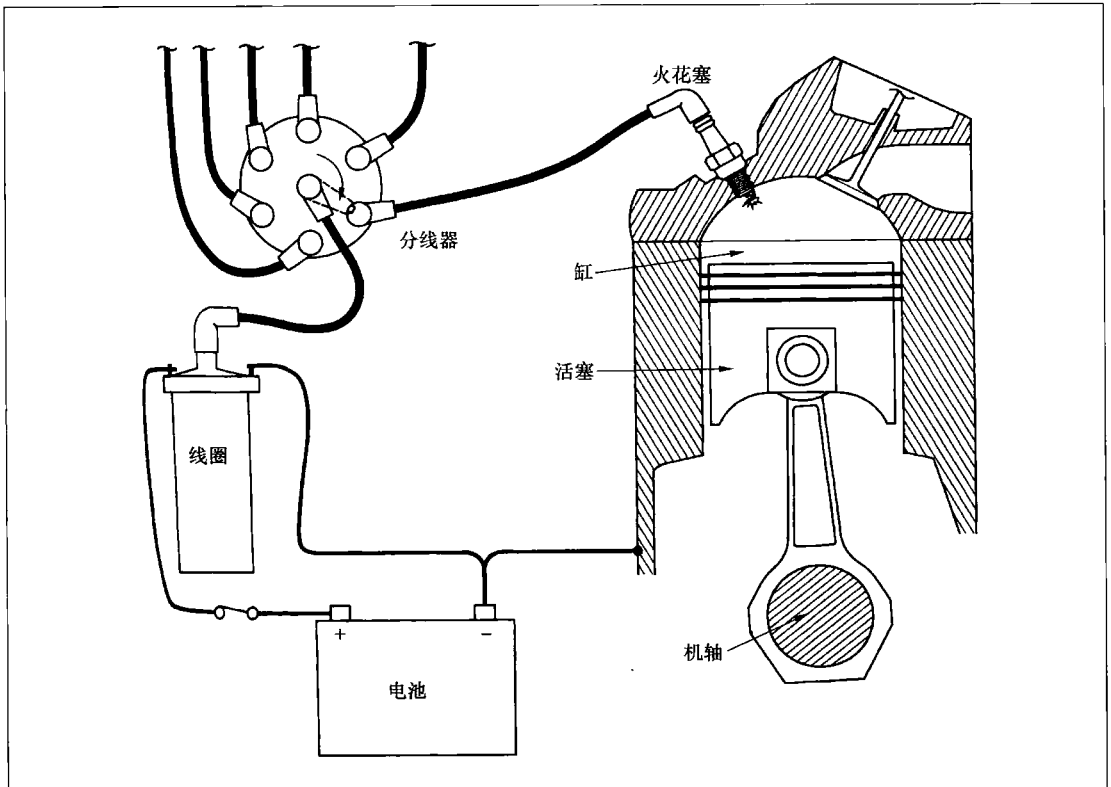


图9-37：汽油发动机依靠强大的感应电压产生电火花使汽油燃烧。在电路断开前通过电感器产生很强的磁场，这就在线圈上产生很大的感应电压，这个电压在火花塞上产生电火花。

于电流的大小和线圈的电感量。这个磁场相当于储存了能量。一旦磁场达到由电流和电感量决定的磁场强度，只要保持这个电流的稳定，磁场就不再发生变化。

想象你正在注视电子流过导线。我们在这里可以做有趣的观察。让我们断开开关，切断电路。

当你断开电源时，磁场衰减。这个变化非常快，当然，如果你放慢观察，你可以看到，磁场是逐渐减小的。

当你切断电源时，电子并没有立即停止

移动，而是随时磁场的减弱，移动的电子的数量逐渐减少。磁场把储存的能量通过继续促使电子在导线中移动而释放出来。

如果电子继续移动，即使是很短的时间，也必须要有电压推动它们（这个结论由欧姆定律得出，我们将在后面的章节中去讨论）。我们把电池从电路中移出，因此它不再给电路提供任何电压。电感器是唯一留在电路中的元件，所以它一定产生了电压，在磁场减弱时保持电子的移动。

衰减的磁场在电感器上感应出一个电压，



以设法保持电流不变。电感在字典中的定义是“被说服或被作用而移动”。衰减的磁场“说服”一些电子继续移动，通过线圈，如图 9-36 所示。

你也许会问，“如果衰减的磁场通过电感器感应出一个电压，那么增强的磁场也会产生一个感应电压吗？”是的，确实如此。不过在那种情况下，电压试图阻止电流。所以当磁场强度增强时，感应电压和电源电压的极性相反。这就是为什么你刚开始连接电池时电流逐渐增加的原因。

自感电压的大小取决于电流改变的快慢（频率）。假设你给线圈建立了一个很强的磁场，然后突然断开电路，线圈中就存在一个很大的感应电压。这个很大的电压试图保持电流继续通过线圈。这个电压可能比起初加在线圈两端的电压大很多倍，通常在你断开开关的瞬间会发现开关触点间产生电火花。

这正是使用在老式汽油发电机上的感应线圈（点火线圈）的原理。大电流流过线圈，在恰当的瞬间一组接点（开关）断开，产生比电池提供的电压更大的电压。这个感应电压使火花塞产生电火花，这个电火花点燃汽缸内的汽油，汽油燃烧推动活塞驱动发动机。如图 9-37 所示。当然，现代电子学已经改变了发动

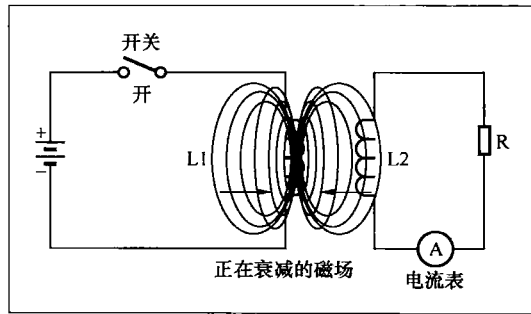


图9-38：电感器的磁场能对另一个电感器产生感应电压。

机的设计。最新的系统更换了机械设计，每个火花塞都有一个独立线圈，所有操作在引擎控制电脑的控制下工作。

图 9-38 中显示了两个电感器。电池和第一个电感器相连，而第二个电感器只把电阻接在它的两端。第二个电感器和第一个电感器非常靠近。现在设想我们断开开关，使第一个电感器从电路中断开，一只灵敏电流表将会显示当开关断开时第二个电路中会有微小的电流。

这是另一个衰减的磁场产生感应电压的例子。不过，这一次感应电压产生在另一个线圈上。电感器的磁场能对靠近它的另一个电感器产生感应电压。

复习检测：-----

9.1 在它的电场中存储能量的原件是：

- a) 电感器
- b) 电容器
- c) 电阻器
- d) 磁体

9.2 电容极板之间的绝缘层被称为：

- a) 电介质
- b) 导体
- c) 电阻
- d) 记忆电阻

9.3 为了增加平行极板电容器的电容，我们可以减少极板之间的距离，这种变化将：

- a) 增加电容的击穿电压
- b) 导致极板极性反向
- c) 导致极板面积增大
- d) 降低电容器的击穿电压

9.4 能够承受高电压一种介质材料是：

- a) 水
- b) 铜
- c) 云母
- d) 铝

9.5 为了提高电容器的电容，下列做法可行的是：

- a) 增加极板之间的距离
- b) 增加极板的面积
- c) 把电介质改为空气
- d) 用铜来替代铝极板

9.6 电解电容：

- a) 具有很小的电容
- b) 是可变电容，可以电容可以改变
- c) 和电阻表现相同
- d) 有极性，一端为“+”，另一端为“-”

9.7 电感器：

- a) 是一个有强磁场的电容器
- b) 是一种永磁体

c) 是电池的一部分

d) 当电流流过时，将能量以磁场的形式储存起来

9.8 电感器的芯通常用什么材料制成：

- a) 铁或铁氧体材料
- b) 电解液
- c) 铜
- d) 瓷

9.9 电感的测量单位是：

- a) 法拉
- b) 欧姆
- c) 亨利
- d) 安培

9.10 磁导率是用来表达：

- a) 电容溶于水性能如何
- b) 磁场是如何轻松穿过物体
- c) 电感中金属线的长度
- d) 线圈的直径

9.11 如果你改变了通过电感的电流：

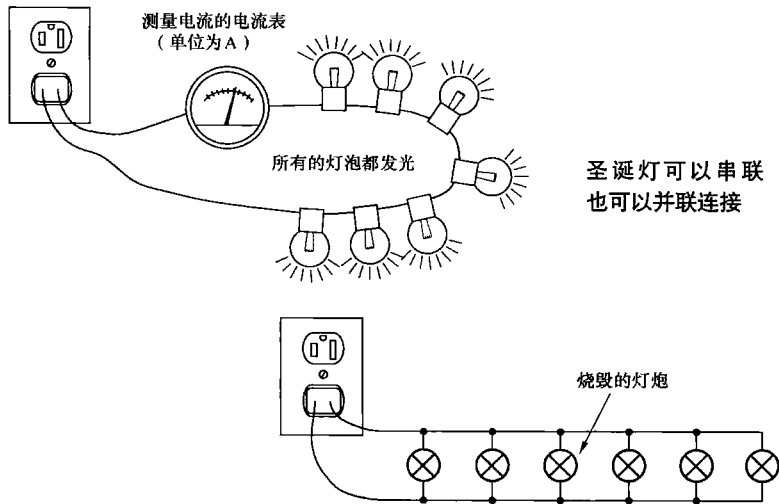
- a) 电感器将产生一个感应电压
- b) 你不能改变电流，它必须保持不变
- c) 电感器将在很短时间内变成一个电容器
- d) 任何事情都不会发生

答案：-----

- 9.1 b
- 9.2 a
- 9.3 d
- 9.4 c
- 9.5 b
- 9.6 d
- 9.7 d
- 9.8 a
- 9.9 c
- 9.10 b
- 9.11 a

## 第10章

# 电路——串联电路 和并联电路



### 目录

- 串联电路
- 并联电路
- 复习检测

# 串联电路

在第7章中我们讨论了电路中的导体、绝缘体和电阻。那么什么是电路呢？简单的定义就是电流流通的路径。电路通常包括一根以上连接电源正极和负极的导线，以及其他帮助电路工作的有用的部分。图10-1中的手电筒就是一个简单的电路。

图10-2显示的是手电筒工作电路的电路图。两节2号电池作为电源使电路工作。图10-2中标注的电源的符号适用于任何电池。电源符号中长线和短线分别代表电源的正极和负极。图中的开关符号是几种常用开关符号之一，当你逐渐熟悉电路时，你会学到其他几种开关符号。图中灯泡的符号可以代表任何型号的灯泡。

图10-2中开关是打开的，灯泡不发光。开关在这种状态时，我们把此时的电路叫开路，电路中没有电流流动。让我们合上开关，如图10-3所示，这时电路是通路，电子从电池的负极流出，经过电路回到电池的正极，电流流过灯泡时，灯泡发光。当开关处于闭合状态时，电路闭合，我们也称为通路。电子只能在闭合电路中流动。

现在让我们来回忆一下，要得到一个有用的电路我们需要做些什么。首先，我们需要一个电源，它提供产生电流的电压。接着我们还需要一些导线或其他导体，最后电路还必须要有它的目的。图10-2和图10-3中，电路的目的就是使灯泡发光。我们通常把电路中作为电路用途的部分叫做负载。所以手电筒电路中，灯泡就是负载。一个有用的电路至少有这三部分。

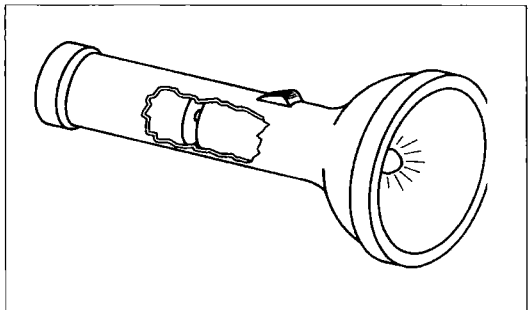


图10-1：手电筒是最简单电路的一个例子。

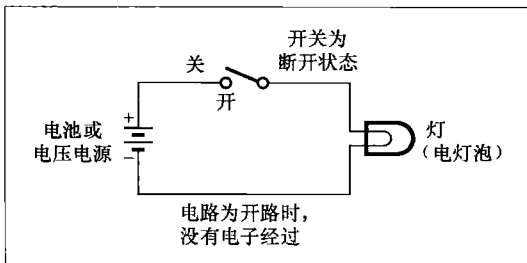


图10-2：这是图10-1中手电筒的电路图。电路中的标注说明的是每个特殊符号代表的意义。这些符号代表电路中各个部分。在这个电路中，开关是断开的，所以我们叫它为开路，此时灯泡不发光。

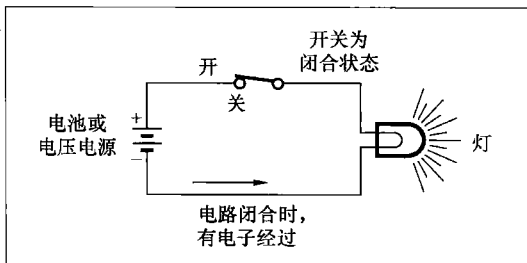


图10-3：电路图中开关处于闭合状态。这时我们得到闭合电路或叫通路，此时灯泡发光。

我们通常在电路用电阻代表电路中的负载。有时也用一个电阻代表电路中所有部分电阻的组合。这个电阻也能包括连接电路的导线的电阻。甚至电池，作为电路的电源，在电流经过时也存在一定的电阻，这些电阻不是商业生产用于电路中的电阻。它们代表不可避免的材料中的自然电阻。图 10-4 表示的是包括负载的电阻和电路其他电阻的简单电路。

本节中所有电路都具有一个共同的重要特征。任何电子从电池的负极流出，必须流经电路中的每个部分才能到达电池的正极。电路中电子没有其他可选择的流动的方向。这有点像进入了一条洲际高速公路后，却发现没有离开高速公路的出口。你只能一直行驶，直到到达旅途的终点。

我们给这种没有给电子提供其他路径流动的电路一个专用名称——串联电路。在串联电路中，所有的电子必须经过相同的路径，经过电路中的每个部分。串联电路中各部分电流都相等。如果你在串联电路中测量了任意一点

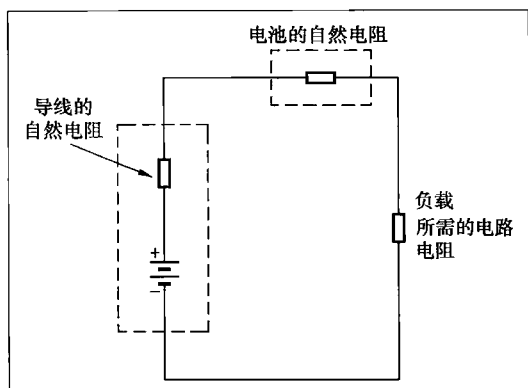


图 10-4：电流流过时，电路中各个部分都会有些电阻，这包括电池、导线和其他部分以及电阻。在这个电路图中，包括了电路中的自然电阻以及电路中的负载电阻。

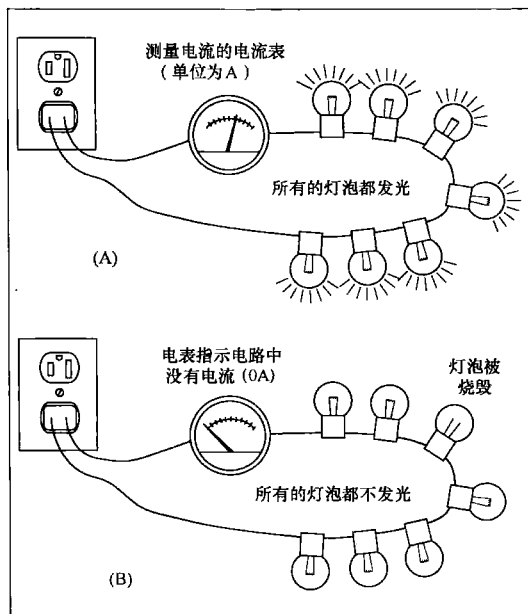


图 10-5：很多圣诞树上的灯泡都是串联方式连接的，一旦一个灯泡烧毁，整个电路中没有一个灯泡再会发光。

的电流，你将知道电路中任何其他部分的电流。

在串联电路中，可以有一个或多个负载。如果在电路中连接了多个负载，相同的电流经过每个电阻，我们就得到了一个串联电路。圣诞树上的灯串就是多个负载串联的常见串联电路。灯串通常是将小灯泡串联连接，如图 10-5 所示。

如果你对这些灯比较熟悉，你也许就知道这种串联电路的一个缺点。如果在这种电路中有一处断开，整个电路就会变成断路，再也没有电子可以流过。所以，只要有一个灯泡烧坏，所有的灯都将熄灭。当然在这种情况下，找到那个烧坏的灯泡会是个不小的问题。通常，当你设法找到烧坏的灯泡后，立即换上一个灯泡，所有的灯泡又会立即发光！如果几个灯泡同时烧坏，那可确实是个不小的问题了。

# 并联电路

许多电路包含了并联的通道让电流流过。图 10-6 就是这种电路的一个例子。电子从电源的负极流出可以通过两条电路，回到电源的正极。并联电路就是有多个通路，因此，所有的电子不必沿相同的道路运动。每个可通过电流的道路就是并联电路的支路。

流过每个支路的电流可能不同。图 10-7 电路中每个支路有一个电流表测量电流大小。在这个例子中，支路 1 中的电流是 2A，而支路 2 中的电流是 3A。在并联电路中，各支路电流相加就是从电源流出的总电流。在图 10-7 中电源负极端我们可测量出电路中的电流是 5A（记住，在串联电路中，电路中各部分的电流相同）。

用水流过水管来比喻电路可以帮助我们理解电路。橡胶软管就像是串联电路。橡胶软管所连接的水龙头就好比是电源，提供使水过水管的压力，水管的另一端就好比是电路中的负载，利用负载电路完成它的有用的工作。无论用水管去浇草坪、洗汽车或给游泳池加水，水都是从水管的一端流入，从另一端流出。水没有其他道路从水管中流出——至少你的水管不能漏水。

与此类似，我们可以用你用的水管来比喻并联电路。有的水流入你家的热水器，有的水流入厨房洗碗池，有的水流入浴缸，有的水流入到屋外的水龙头。有很多条通道让水流动，也许许多水龙头同时工作，也许只有一个水龙头在工作。这与并联电路很相似。

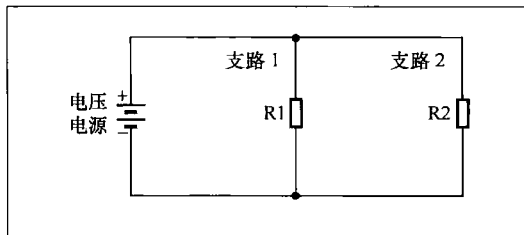


图 10-6：只是一个简单并联电路的例子。至少有两条通道可以让电子从电池的负极流出，回到电池的正极。

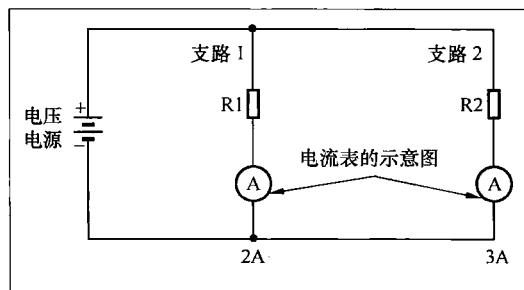


图 10-7：电流表测量电路中的电流。电路中每个支路都有一个电流表。所有支路中的电流相加，总的电流就是从电池中流出的电流。在这个例子中，电池中流出的电流是 5A。

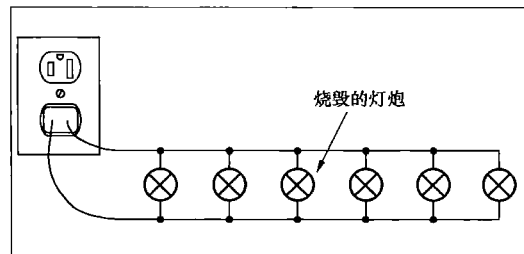


图 10-8：这些灯泡并联连接。如果一个灯泡烧毁，电流仍然可以从其他支路中流过。

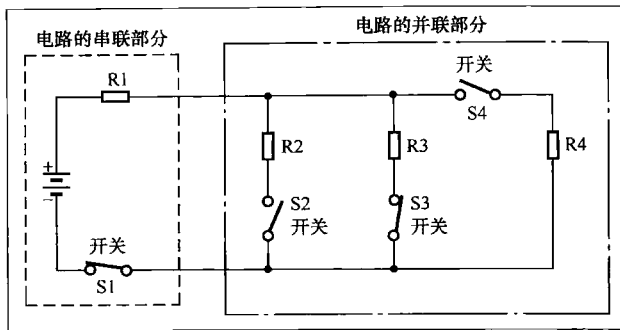


图10-9：这是一个混联电路的例子。电路中有的部分电流要全部通过，而有的部分电流可以选择通过，并联支路中的开关可以控制支路加入或者移出电路。开关S1 在串联部分，可以切断所有的电流。

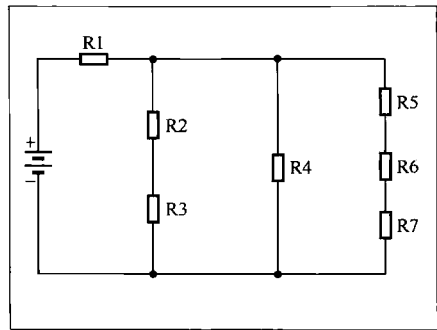


图10-10：并联电路的支路中可以包含串联部分。

观察图 10-8 所示的电路图。这里，我们把很多灯泡并联连接。注意，其中一个灯泡烧坏了，但其他的灯泡仍然发光。这是并联电路的一个重要特性。在并联电路中，一条支路断路，并不影响其他支路的工作。在一条支路上连接上一个开关，可以控制这个支路的通、断状态，一条支路断路，不影响其他支路上的电流。

尽管是并联电路，电路中有一部分电路要让所有的电流通过。例如，将电池和电路其他部分连接起来的导线，将要通过所有的电流。图 11-9 中包含了一个电阻，所有的电流都将流过这个电阻。我们把通过所有电流的电路部分用线标成电路的串联部分，把只通过部分电流的部分标成电路的并联部分。

有时你也许会看到混联电路。简单来说，电路中有的部分按串联连接，有的部分按并联连接。图 10-10 是混联电路的一个例子。注意，你可以把有的部分看成是串联，有的部分看成是并联。

有的电路看起来非常复杂，只要记住电



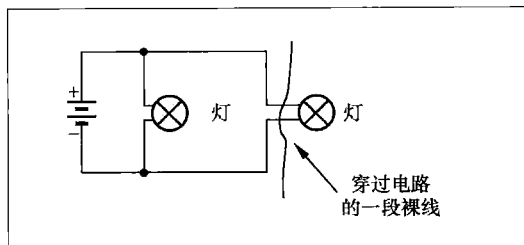


图10-11：如果有导体在电路负载上形成一条电路的通路，就形成了短路。短路可能损害电路中其他部分，也可能产生很大的热量而引发火灾。

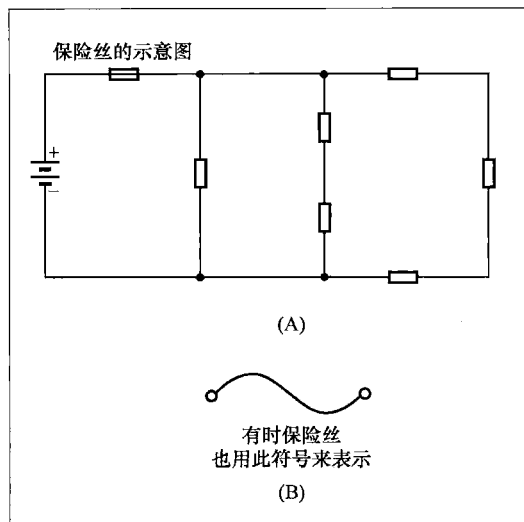


图10-12：保险丝可以在发生短路时保护电路。当电流超过保险丝的额定电流时，保险丝会熔化，这样保险丝使电路开路，切断了电流。图中（B）部分是电路图中用来表示保险丝的另一常用符号。

路中所有部分有的是串联连接，有的部分是并联连。用这样的思路，你可以把电路简化成容易理解的电路。

你应该了解另一种特殊的并联电路。假如一根裸金属线或者其他导体穿过你的电路，如图 10-11 所示。这根金属线形成的支路中电阻很小，很大的电流将从电池流出，我们称这根裸金属线使电路短路，因为它给电流形成了一个捷径，这就是短路。

有很多形成短路的可能原因。电源线的绝缘层磨损就是一个常见的原因。这样的情况非常危险。首先，如果有人接触到这个裸露部分会发生电击或者触电身亡。当裸露导线相互接触会发出电火花，也许会造成火灾。短路电路中的强电流会使导线发热，这个热量也可能形成火灾。

很多电路中安装了保险丝来防止短路。保险丝是很细的一根导线，当强电流通过它时，它发热并熔化。每根保险丝都有能承受的额定电流。如果通过的电流比额定电流大，保险丝熔化，使电路断开（没有电流可以通过断开的电路）。当你纠正了短路的原因后，可以重新换上一根新的保险丝。图 10-12 显示的是用保险丝保护电路，防止短路的电路。



复习检测：-----

答案：-----

10.1 经过电路中每个元件的电流大小相等，这个电路的名称是：

- a) 并联电路
- b) 开路
- c) 串联电路
- d) 共振电路

- 10.1 c
- 10.2 a
- 10.3 c
- 10.4 b
- 10.5 d

10.2 电路中电流可以分开，并流过不同负载的电路是：

- a) 并联电路
- b) 开路
- c) 串联电路
- d) 共振电路

10.3 如果两根导线的绝缘皮老化了，这两根线碰到一起，产生火花，直到电池完全放电（如果你幸运的话），或者发生一场火灾（如果你不幸的话），这种现象叫做：

- a) 电路开路
- b) 糟糕的一天
- c) 电路短路
- d) 串并联失败

10.4 把流过花园软管中的水比喻成：

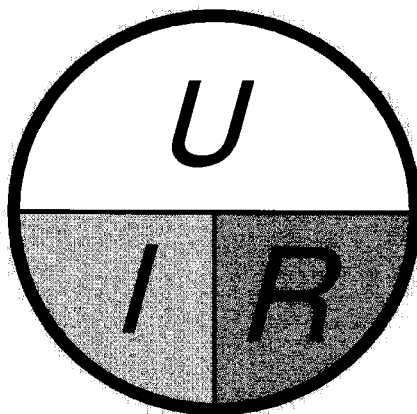
- a) 并联电路
- b) 串联电路
- c) 串并联电路
- d) 厨房水槽

10.5 在电路中可以防止过多电流通过的设备是：

- a) 好的绝缘体
- b) 并联电路的支路
- c) 电流限制器
- d) 保险丝

## 第11章

# 欧姆定律



这张图将帮助你记住欧姆定律中各物理量的关系

### 目录

- 电压、电流和电阻的相互关系
- 寻找未知数——欧姆定律“圆”
- 一些实际问题和它们的解决方法
- 欧姆定律在电路和电路元件上的应用
- 数学和计数器的窍门
- 复习检测

# 电压、电流和电阻相互关系

在学习欧姆定律之前，让我们先复习一些基本定义：电压是使电子运动的动力；电流是电子在导线或导体中的定向运动；电阻是任何材料都具有的，它阻碍电子移动。在前面的学习中，我们提到如果电压越大，电路中的电流也越大。我们还提到如果导体对电流的阻碍越大，电流将会减小。显然，这三个量之间有一定的关联。

19 世纪 20 年代后期，德国科学家乔治·西蒙·欧姆用简单电路进行实验，欧姆发现了电路中的电压、电路中的电阻以及通过电路中的电流之间的简单数学关系。起初，其他科学家都不接受欧姆的发现，直到 19 世纪 40 年代，科学家们才逐渐认识到他的发现的重要性。不管怎么说，今天欧姆定律也许是我们理解现代

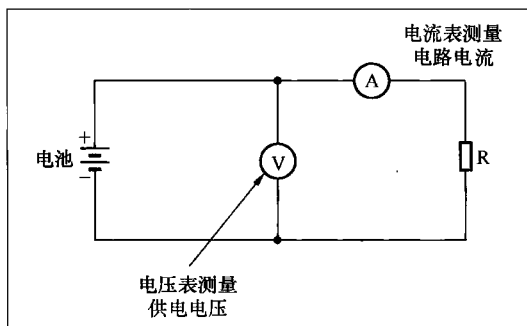


图11-1：这个简单电路将帮助我们研究电压、电流和电阻之间的关系。电压表和电流表可以方便地测出电路状态。图中文字说明描述我们可以测量电路中的一些物理量。表12-1 和表12-2 列出的是用 2 个阻值的电阻分别测出的数据。

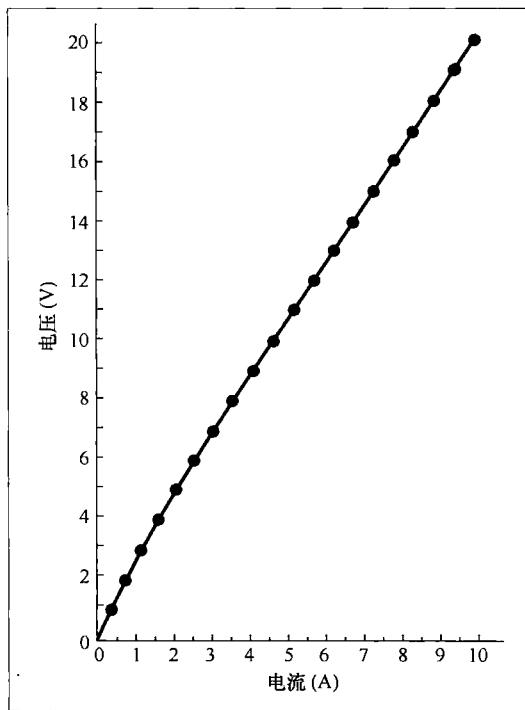


图11-2：这张图的数据来自于表12-1，显示的直线表明电压和电流成正比。表12-1 中的数据都是理想情况下的数据，实际测量的数据和这些数据略有变化。

电学最重要的一把钥匙。

先来研究一下图 11-1 中的简单电路。电路中有电源，电源正负极之间有一些电阻，电路中还有一个电压表，让我们可以很方便地测出电压，一个电流表可以显示电路中的电流。

让我们假定电路中的电阻大小不变，但我们可以使电压在 0 ~ 20V 之间变化。在改变电压时，我们可以通过电流表读出电流的大

表11-1：电压和电流的测量

这些是根据图11-1中的电路中，当电压在0~20V之间变化时测量出的数据

电压(V)	电流(A)
0	0
1	0.5
2	1.0
3	1.5
4	2.0
5	2.5
6	3.0
7	3.5
8	4.0
9	4.5
10	5.0
11	5.5
12	6.0
13	6.5
14	7.0
15	7.5
16	8.0
17	8.5
18	9.0
19	9.5
20	10.0

表11-2：电压和电流的测量

这些是根据图11-1中的电路中，当电压在0~20V之间变化时测量出的数据。其中改变了电阻（R）的阻值，其阻值大小是表格11-1中阻值的2倍。

电压(V)	电流(A)
0	0
1	0.25
2	0.50
3	0.75
4	1.00
5	1.25
6	1.50
7	1.75
8	2.00
9	2.25
10	2.50
11	2.75
12	3.00
13	3.25
14	3.50
15	3.75
16	4.00
17	4.25
18	4.50
19	4.75
20	5.00

小。表 11-1 是我们用这个电路实验得出的一些数据。仔细研究表格中这些数据，你可以得出什么规律吗？首先，你可以发现电压增大时，电流也增大。另一个规律不是很明显，就是每次我们把电压成倍增加，电流也成倍增加。

图 11-2 是基于表格 11-1 中数据的图表，它可以帮助你观察到这个规律。显然，电路中的电压和通过电路的电流有直接关系。从数学方面来说，我们称电流和电压成正比。从另一个角度说，电压和电流之间是线性关系。

如果两个量成正比，我们就可以写出一个简单的数学方程。对于其中一个量的任意值，（我们用电流来做例子），你可以通过乘以一个

数字（常量）来得到另一个量。所以为了求出电路中任何电流流过的部分两端的电压，只要知道这个正确的数字（常量），我们就可以把这个正比例关系写成方程：

$$\text{电压} = \text{电流} \times \text{常量} \quad (11-1)$$

根据表格 11-1 中的数据，你可分辨出我们例子中的常量是 2。如果你把表格中任何一个电流乘以 2，你就可得到产生这个电流的电压。

### 改变电阻时会发生什么？

现在让我们来假设有一个电阻是图 11-1 中电阻的两倍，这样表格 11-2 得到了电压在 0 ~ 20V 变化时对应的电流。当然，再次说明，

每次电流增大一倍，对应电压也增大一倍。你可以画出类似于图 11-2 的电压和电流的图像。你将得到一条直线，证明电压和电流仍然成正比。然而这次你必须把电流乘以 4 得到相对应的电压。

这里我们得到了和欧姆所做实验中一样的发现！我们判定，电路中的电阻的大小就是我们要得到电压时需要乘以的常量。所以在我们第一个例子中，电路中的电阻是  $2\Omega$ ，在第二个例子中，它的电阻是  $4\Omega$ 。这样方程一中的常量就是电路中的电阻，我们把方程重新写成：

$$\text{电压} = \text{电流} \times \text{电阻} \quad (11-2)$$

我们用字母  $U$  代表电压（或电动势），用字母  $I$  代表电流（法语单词电流，*intensite*），用字母  $R$  代表电阻。用这些字母来表示方程二，我们可以写成：

$$U = I \times R \quad (11-3)$$

这样我们就得到了欧姆定律的最常用的表达形式。

欧姆定律方程为测量电阻定义了一个单位，这个单位就是欧姆，这是为了纪念欧姆和他所做的实验。我们常用大写的希腊字母  $\Omega$  (*omega*) 表示单位欧姆。如果一个定值电阻的大小是  $200\Omega$ ，我们可以写成  $200\Omega$ 。我们可以把  $1000\Omega$  写成  $1k\Omega$  (*kilohm*)， $1000000$  欧姆写成  $1M\Omega$  (*megohm*)。

如果我们知道方程 11-3 中三个量中的任意二个，我们就能求出另一个量。例如，给出了电流和电阻的值，我们就可以求出电压。如果我们知道了电压和电阻，我们就可以求出电路中的电流。如果我们知道了电路中的电流和电压，我们也能算出电路中的电阻。在下一节，我们将讨论在欧姆定律方程基础上的变化，那种方法将帮助我们记住这些变形式。

# 寻找未知数——欧姆定律“圆”

在你要学习的大多数电路中，欧姆定律是一个很有用的工具。当你学习更多的现代电子学时还会有其他重要的定律和规则。然而，所有这些定律和规则都要求对欧姆定律有很好的理解。

我们通常把欧姆定律写成这样的方程：

$$U = I \times R \quad (11-4)$$

在这样的方程中，我们通常省略掉乘号，在方程中，简洁地把要相乘的字母直接彼此写在其他字母后面：

$$U = IR \quad (11-5)$$

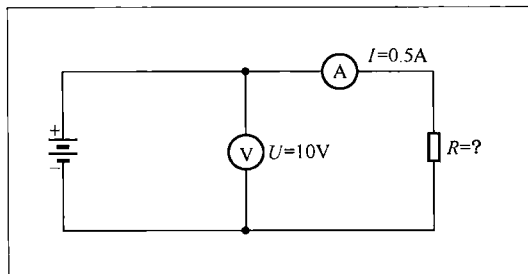


图11-3：这是利用欧姆定律简单计算的电路。你可以利用已知的电压和电流求出电阻。

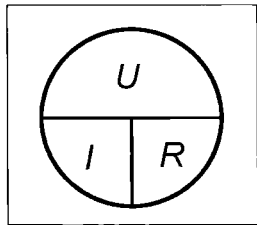


图11-4：欧姆定律“圆”是一种辅助记忆，帮助我们利用欧姆定律求出电压、电流或电阻。

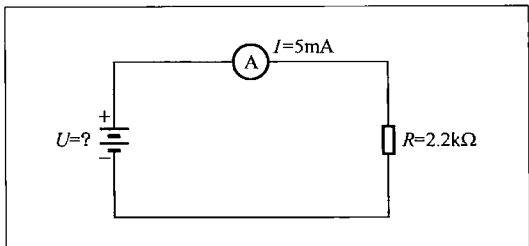


图11-5：这是利用欧姆定律计算的另一个电路。这次已知电流和电阻，要求出电路中的电压。

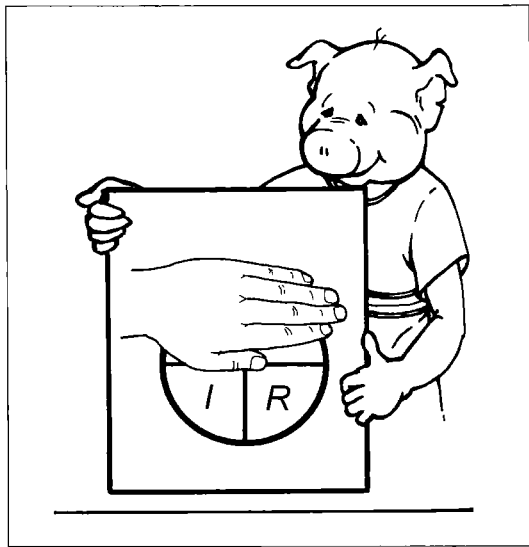


图11-6：这章图告诉我们怎样使用欧姆定律“圆”来解决电路中的电压。覆盖住我们要求的量，剩下的字母就告诉我们怎样来解决这个问题。这里，我们必须把电流 ( $I$ ) 和电阻 ( $R$ ) 相乘，得到电压 ( $U$ )。

当你知道了电路中三个量（电压、电流和电阻）中的任意两个，你就可以求出第三个量。

假设我们从图 11-3 中的电压表上读出电压是 10V，从电流表上读出电流是 0.5A。那么我们怎样求出电路中的电阻呢？当然利用欧姆定律。如果你记得怎样解方程，利用方程 11-5 你可以不太费力地求出电阻。也许你已经改写出了新的方程：

$$R = \frac{U}{I} \quad (11-6)$$

然后计算出电路中的电阻：

$$R = \frac{10V}{0.5A} = 20 \Omega$$

如果你对解方程不太熟悉，也许你想知道我们使用的什么神奇方法！现在是我们来复习解方程方法的好机会了。图 11-4 也为我们提供了一种非常有益的用于运用欧姆定律计算的记忆图。

这张图用起来非常简单。首先确定你要计算的量和你已经知道的那两个量（你可以检查“圆”或图来找到这些信息）。图 11-5 是我们要计算的另一个例子。我们试图求出电压，图中给了我们电路的电流和电阻。在这种情况下，覆盖住欧姆定律“圆”上的字母  $U$ ，如图 11-6 中显示的那样。这时在图表你仍可以看到  $I$  和  $R$ ，他们并列在一起，表示他们两者相乘。

现在我们可以写出方程。你覆盖住的字母写在等式的左边，另两个字母写在等式的右边：

$$U = IR$$

然后把问题中的数值带入等式进行数学计算。

$$U = 5mA \times 2.2k \Omega$$

$$U = 5 \times 10^{-3}A \times 2.2 \times 10^3 \Omega = 11V$$

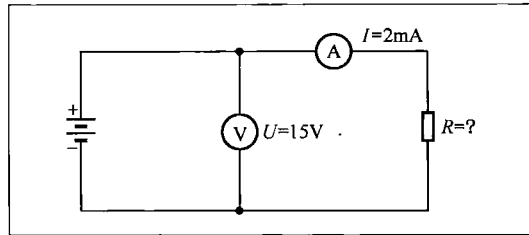


图11-7：这个电路图中，我们已知电压和电流，但不知道电阻。欧姆定律将帮助我们利用已知的信息计算出电阻。

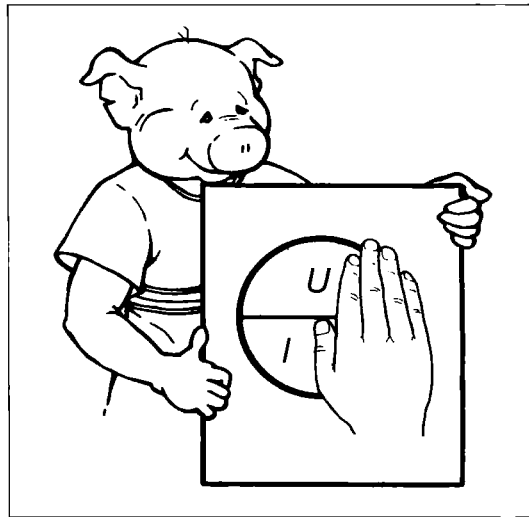


图11-8：这张图帮助我们利用欧姆定律“圆”来解决图11-7中的问题

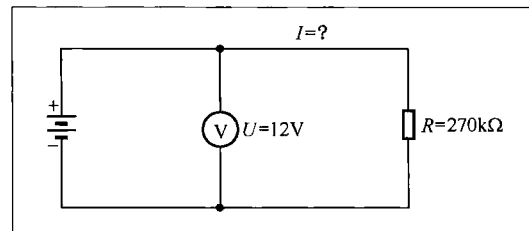


图11-9：这是另一个电路图。图中我们已知电压和电阻，但不知道电流，欧姆定律将再次帮助我们计算出电流。

(你还记得怎样用 10 为底的幂来代替公制中的前缀吗? 如果忘记了, 这正是去附录 A 中复习公制单位的时候了)

我们可以再举一个例子, 看图 11-7。电路中已知电压和电流, 要我们求出电阻。我们将再次利用欧姆定律“圆”。这次我们要覆盖住  $R$  (见图 11-8), 图中的结果是  $U$  在“圆”的上部, 而  $I$  在“圆”的下部。

这显示的是除法问题, 此时的方程和方程 11-6 一样。

$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{15\text{V}}{2\text{mA}} = \frac{15\text{V}}{2 \times 10^{-3}\text{A}}$$

$$R = 7.5 \times 10^3 \Omega = 7.5\text{k}\Omega$$

让我们利用欧姆定律“圆”再做一例。图 11-9 问题中, 我们已知了电压和电阻, 需要我们求出电流。图 11-10 显示了如何利用欧姆定律“圆”来找到方程:

$$R = \frac{U}{I} \quad (11-7)$$

$$I = \frac{12\text{V}}{270\text{k}\Omega} = \frac{12\text{V}}{270 \times 10^3 \Omega}$$

$$I = 4.44 \times 10^{-5}\text{A} = 0.0444 \times 10^{-3}\text{A} \\ = 0.0444\text{mA}$$

或

$$I = 4.44 \times 10^{-5}\text{A} = 44.4 \times 10^{-6}\text{A} \\ = 44.4 \mu\text{A}$$

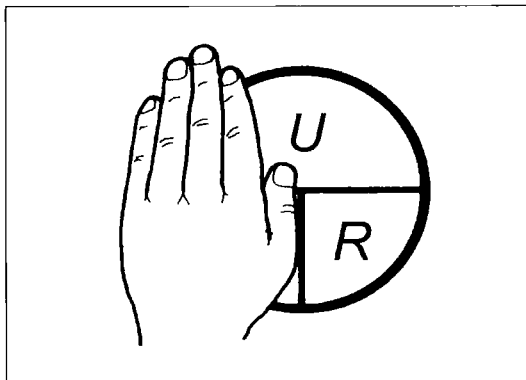


图11-10: 覆盖住欧姆定律“圆”中的  $I$ , 我们可以得到解决图12-9 中问题的方程。

请注意, 上列问题中电流用两种方法来表示—— $0.0444\text{mA}$  ( $1\text{mA}$  的一小部分), 或  $44.4 \mu\text{A}$  (有不少微安)。回忆一下,  $1\text{mA}$  等于  $1\text{A}$  的千分之一, 而  $1 \mu\text{A}$  是  $1\text{mA}$  的千分之一, 或者说是  $1\text{A}$  的百万分之一。我们也可以说,  $1000 \mu\text{A}$  等于  $1\text{mA}$ 。在电子电路中, 毫安和微安都是我们常用的电流大小的计量单位。

通过这些例子, 你计算了欧姆定律问题的每一种类型, 分别计算了例题中的电压、电阻和电流。一定要记住欧姆定律“圆”, 因为它可以告诉你不同情况下的正确的方程。你不必担心是否会记住这些方程, 只要在计算每个问题时画出这个“圆”图就可以了。

在第 12 章中, 我们将学习如何计算电路问题。



# 一些实际问题 and 它们的解决方法

熟能生巧。练的越多，利用欧姆定律计算问题的自信心就越强。在我们进一步学习前，提高利用欧姆定律解决问题的技巧，增强解题自信，非常重要。这一节就是通过练习帮助你达到这个目标。

每个问题我们都用标上了相应数值的电路示意图来表示，图中也标出了所求问题。图11-11是欧姆定律“圆”，帮助你方便地解决这些问题。完成这些问题后，你可以在六道题目后面提供的解题方法来检查你的解题过程。

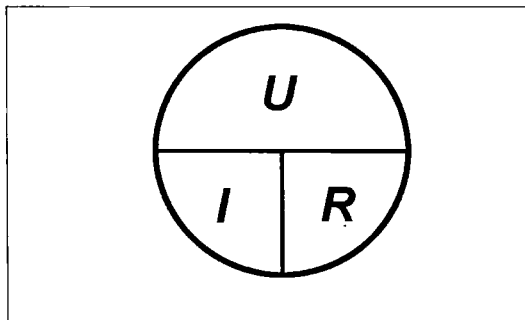
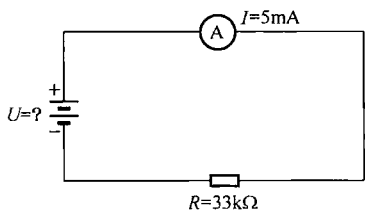


图11-11：欧姆定律“圆”给我们提供解决任何实际问题时写出欧姆定律方程的简单方法。

## 练习题

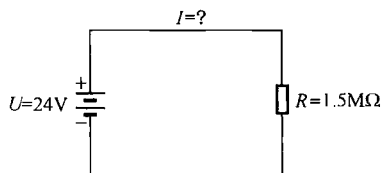
### 练习题 1：

电路示意图中，一个  $33\text{k}\Omega$  的电阻接在电池两端，用电流表测出电流大小是  $5\text{mA}$ ，问电池的电压是多大？



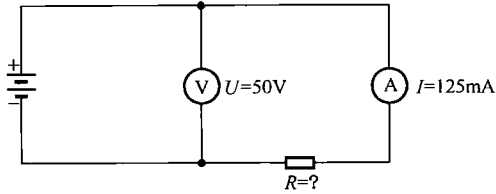
### 练习题 2：

我们用电压表测量电池的电压，此时电压表读数是  $24\text{V}$ ，有多大的电流将通过与电池相连的  $1.5\text{M}\Omega$  的电阻？



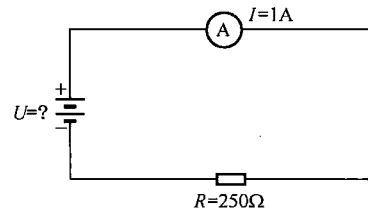
练习题 3：

电路示意图中上，一个未知阻值大小的电阻和电源相连。通过连接在电路上的电表，我们得到电路中电压是 50V，电流是 125mA。那么电路中的电阻的阻值是多少？



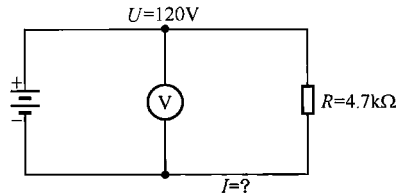
练习题 4：

你要在  $250\Omega$  的电阻上施加多大的电压才能使 1A 的电流通过这个电阻？



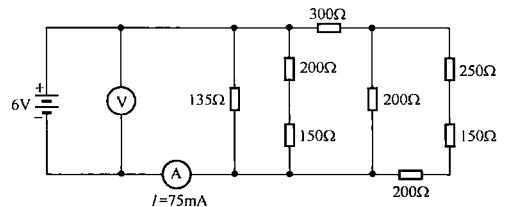
练习题 5：

在  $4700\Omega$  的电阻上施加 120V 的电压，电路中的电流是多大？



练习题 6：

一个 6V 的电池接到相互间既有串联又有并联的复杂电阻两端。电路中电流表显示有 75mA 的电流从电池中流出。这些错综复杂连接的电阻的总阻值是多大？



# 练习答案

## 练习题 1 :

利用欧姆定律“圆”找到计算电压的方程, 这样我们可以写出方程:



$$U = IR$$

$$U = 5\text{mA} \times 33\text{k}\Omega$$

$$U = 5 \times 10^{-3}\text{A} \times 33 \times 10^3 \Omega$$

$$U = 165\text{V}$$

## 练习题 3 :

利用欧姆定律“圆”求电阻。



$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{50\text{V}}{125\text{mA}} = \frac{50\text{V}}{125 \times 10^{-3}\text{A}}$$

$$R = 400 \Omega$$

## 练习题 5 :

如果你还需要, 可以利用欧姆定律“圆”来写出求电流的方程。

$$I = \frac{U}{R}$$

$$I = \frac{120\text{V}}{4.7\text{k}\Omega} = \frac{120\text{V}}{4.7 \times 10^3 \Omega}$$

$$I = 0.025 \text{ A}$$

或者

$$I = 25.5 \times 10^{-3}\text{A} = 25.5\text{mA}$$

## 练习题 2 :

利用欧姆定律“圆”, 我们把方程写成:



$$I = \frac{U}{R}$$

$$I = \frac{12\text{V}}{270\text{k}\Omega} = \frac{12\text{V}}{270 \times 10^3 \Omega}$$

$$I = 1.6 \times 10^{-5}\text{A}$$

$$I = 16 \times 10^{-6}\text{A} = 16 \mu\text{A}$$

或者

$$I = 0.016 \times 10^{-3}\text{A} = 0.016\text{mA}$$

## 练习题 4 :

现在也许你已经记住了用欧姆定律基本方程来求电压, 如果还没有记住, 可利用欧姆定律“圆”。

$$U = IR$$

$$U = 1\text{A} \times 250 \Omega$$

$$U = 250\text{V}$$

## 练习题 6 :

不要把它看成是一个恶作剧的问题。问题的目的是练习欧姆定律的计算。我们可以通过测量出这些复杂迷宫式连接的电阻两端的电压和电流来求出它们的总电阻。用欧姆定律求电阻的方程式是什么呢?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6\text{V}}{75\text{mA}} = \frac{6\text{V}}{75 \times 10^{-3}\text{A}}$$

$$R = 80 \Omega$$

# 欧姆定律在电路和电路元件上的应用

通过上面的练习，我们已经利用欧姆定律完整地计算了电路的电压、电流或电阻。那么这个重要的定律是否也能帮助我们解决更复杂的电路呢？答案是绝对的肯定。

查看图 11-12 中的电路。这里三个电阻和电池串联连接。电压表显示电路电压是 12V，电流表告诉我们这时电路中的电流是 2mA。

电路中用了不少电池来提供电压推动电子流过每个电阻。这和水管中有好几处被阻塞相类似。图 11-13 中的水管的左端提供高压，水管中 A 点的阻塞对所有流过的水产生阻碍。当水通过这个阻塞到达 B 点后，水压将减小。到了这里又碰到了另一个阻塞，这里阻塞的水更多，当水通过 C 阻塞点后，只有很少的水滴出水管！

电路中的每个电阻和水管中的阻塞有点类似。电阻两端的电压我们通常叫做电压降。电压降表示推动电子通过电阻需要的力或者电

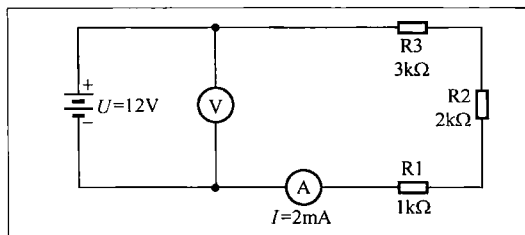


图11-12：利用欧姆定律可以帮助我们计算出串联电路中每个电阻两端的电压降。电压表测量出给整个电路提供的电压电流表测出电路中流过每个电阻的电流。

势（如果你需要得到大的电流——大量的电子——就要施加较大的电压）。

例如，你把电压表接在如图 11-14 (A) 的电路中，从表中读出电池的总电压是 12V。当你把电压表接在 R1 两端（电压表与 R1 并联），如图中 (B) 所示，电压表的读数将比电池的总电压要小。图中 (C) 显示，当把电压表并联接 B 点和 C 点之间的 R2 两端时，电

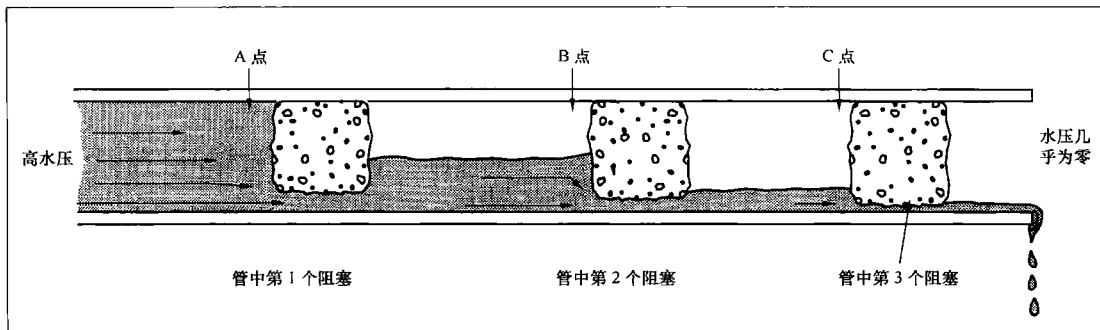


图11-13：电路中的电阻和水管中的阻塞类似。水通过水管中的每个阻塞点后，水压比通过前要小。图中我们看到，当水流过阻塞点C后，只剩下很小的水压，水只能从水管中滴出。

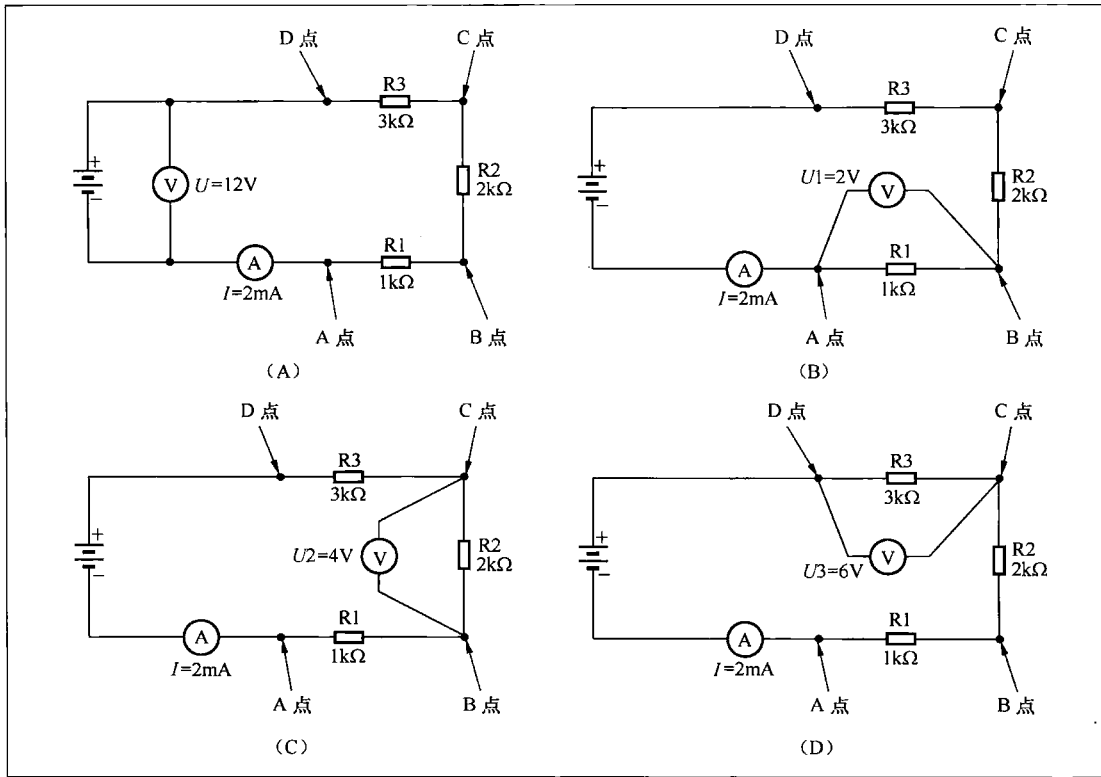


图11-14：图中（A）是一个简单的串联电路。电压表测量电池的电压，电流表测量通过电路中的电流。如果我们把电压表接在A、B两点间，如图中（B）所示，我们可以测出R1两端的电压降（注意，电压表和电阻并联，在测量电压时，你必须始终把电压表并联在电路中待测部分的两端）。图中（C），电压表连接在B、C两点间，和R2并联，这样我们就测出例题中R2两端的电压降。为了测量R3两端的电压降，我们把电压表接在电路中C、D两点间，如图中（D）所示。

压表读出的读数也比电池的总电压小。当然，当把电压表接在C点和D点间时，电压表的读数也小于12V。图中（D）显示的是电压表接在R3两端，测量R3两端的电压。

现在的问题是，电流流过每个电阻后电压要降低多少？电流经过每个电阻后电路的电压降相同吗？好，让我们来看看欧姆定律是如何为我们来解决这些问题的。从电路图中我们知道了每个电阻的阻值，因为串联电路中的电

流处处相等，这样你也就知道了通过每个电阻的电流大小。电流表上显示的读数是2mA。

我们利用欧姆定律来算出电阻R1两端的电压降：

$$U_1 = IR_1 \quad (11-8)$$

$$U_1 = 2 \text{ mA} \times 1 \text{ k}\Omega$$

$$U_1 = 2 \times 10^{-3} \text{ A} \times 1 \times 10^3 \Omega$$

$$U_1 = 2 \text{ V}$$

如图11-14（B）中，电压表的读数是

2V，和我们计算的结果一致！

电流经过 R2 后，两端的电压降又是多少呢？

$$U_2 = IR_2 \quad (11-9)$$

$$U_2 = 2 \text{ mA} \times 2 \text{ k}\Omega$$

$$U_2 = 2 \times 10^{-3} \text{ A} \times 2 \times 10^3 \Omega$$

$$U_2 = 4 \text{ V}$$

所以 R2 两端的电压降是 4V，这和图 11-4 (C) 中电压表的读数一致。

那么 R3 两端的电压降是多少呢？

$$U_3 = IR_3 \quad (11-10)$$

$$U_3 = 2 \text{ mA} \times 3 \text{ k}\Omega$$

$$U_3 = 2 \times 10^{-3} \text{ A} \times 3 \times 10^3 \Omega$$

$$U_3 = 6 \text{ V}$$

我们可以用欧姆定律来计算串联电路中每个电阻两端的电压降。我们所需要的就是要知道电阻和电路中的电流。

现在查看图 11-15。这个并联电路表示的是略有不同的问题。通过每条支路的电流都不相同。不过，如果仔细检测电路，你会发现电池的总电压施加到每条支路两端是相同的，这样，我们就可以利用欧姆定律来计算每条支路的电流了吗？当然可以！

画一个欧姆定律“圆”，然后写出利用欧姆定律求电流的方程。

$$I = \frac{U}{R} \quad (11-11)$$

首先让我们求出经过 R1 的电流：

$$I_1 = \frac{15 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega}$$

$$I_1 = \frac{15 \text{ V}}{6 \times 10^3 \Omega}$$

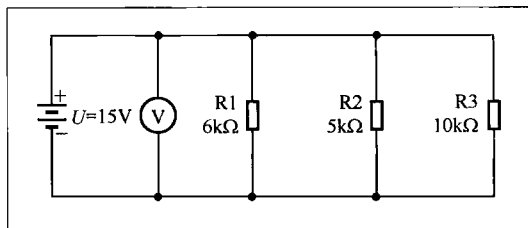


图11-15：这是一个3个电阻和电源电压并联连接的电路。欧姆定律可以帮助我们计算出每条并联支路中所通过的电流。

$$I_1 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ A} = 2.5 \text{ mA}$$

现在计算经过 R2 的电流：

$$I_2 = \frac{15 \text{ V}}{5 \text{ k}\Omega}$$

$$I_2 = \frac{15 \text{ V}}{5 \times 10^3 \Omega}$$

$$I_2 = 3.0 \times 10^{-3} \text{ A} = 3.0 \text{ mA}$$

最后，我们求出经过 R3 的电流：

$$I_3 = \frac{15 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega}$$

$$I_3 = \frac{15 \text{ V}}{10 \times 10^3 \Omega}$$

$$I_3 = 1.5 \times 10^{-3} \text{ A} = 1.5 \text{ mA}$$

欧姆定律对我们学习电学非常重要，它不仅帮助我们了解一个完整电路的情况，而且可以把欧姆定律用在电路中的每个元件上。在后面的学习中，我们将要扩展对欧姆定律的理解。在我们开始学习更复杂的电路时，我们将要给这个重要的定律增加一些定义。那就是，每个电路都遵守欧姆定律。

# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录A——科学和工程计数法。

## 怎样解方程

在求未知量的方程时，我们必须遵循一些基本规则。在解方程时我们必须遵循几个简单的步骤。当然，掌握一些小窍门也是必须的。

什么是解方程呢？在你解方程时，你通常要将未知量放在等号的一边。方程中的其他量（用于计算未知数的已知量）放在等号的另一侧。

在数学中，涉及方程方面的部分有一个自己的名称——代数。这个词可能让我们部分读者感到过程复杂，难以计算。不过，在基本电路中使用的方程非常简单，你可以轻松对付。本节中，我们将介绍几个解决电子学方程中应该遵循的规则。此外，我们将讨论解决这些最简单的方程中最常见的技巧。学习这些技巧，会使你对付这些问题更加轻松。

### “第一规则是要有条理”

第一个规则是要有条理！从有条理的部分开始，找到你唾手可得的信息。仔细书写，特别是那些数字，并正确书写字母。不要把几个过程混在一起，如果发现出了错误，一定要彻底纠正。每次只能写一到两步，每一步将方程仔细抄写在新的一行中。接着，你可以做一

些智力上的工作，而不必写很多的过程。除非你已经掌握了足够的解题经验，否则，一定要按照解题规则一步一步仔细完成。

始终记着你的最终目标。你必须把未知量放在等号一侧，把其余量放在等号的另一侧。简化方程的每一步都是帮助你向这个目标靠近。一般情况下，你可以在等式两边同时加、减、乘、除任何量来实现目的（记着，不能在等式两边同时除以0，也不能同时乘以0！在等式两边同时乘以1，或者加减0，对你解题没有任何帮助）。

### “等式两边进行相同的操作”

等式两边必须进行相同的操作。等式的一侧是以一个整体而不是一个单独量来进行处理。下面的几个例子可以帮助你理解这个过程。

我们用字母  $I$  表示一个电路中的电流大小。假设我们根据电路情况列出了一个与电流有关的方程，我们求出方程中的电流。

$$2I + 5 - 3I = 10 - 16I$$

第一步是在等式的两侧加上  $16I$ 。

$$(2I + 5 - 3I) + 16I = (10 - 16I) + 16I$$

因为是对所有量相加，所以我们不需要括号。我们可以把同类项进行合并，对方程进行简化。

$$15I + 5 = 10$$

下一步是在等式两侧同时减去5。

$$15I + 5 - 5 = 10 - 5$$

然后再次合并同类项。

$$15I = 5$$

在解出我们的方程前，我们还有一步要做。在等式两侧同时除以 15，这样就将未知数单独放在了等式的一侧。

$$15I/15 = 5/15 = 0.333$$

$$I = 0.333$$

这样，我们求出了我们方程的解。因为我们测量电流大小的单位是安培，我们这个电路中电流是 0.333A。

### “交换规则是一个省时的技巧”

有什么技巧可以使我们省时又省步骤呢？当然，从已经介绍过的例子中你可能已经有了不少启发。在等式两侧同时加减一个量，以及将一个量移到等式的另一侧（增加一个负数相当于减去一个数，因此，你可以在等式两侧加上或减去一个数）。把一个量移动到等式的另一侧，正的量变为负，负的量变为正。所以，一个省时的技巧是等式两边的量进行交换。

假设我们有这样一个方程：

$$I + 25 = 30$$

不需要将等式两侧同时减去 25，我们可以简化为：

$$I = 30 - 25 = 5$$

### “交叉相乘是在等式两侧同时乘或除一个量的快捷方式”

另一个技巧叫做交叉相乘。这个技巧可以帮助我们快速地在等式两侧同时乘以或除以一个量。

假设我们有这样方程：

$$44Z/10 = 80/9$$

这里的  $Z$  是一个未知数

我们可以在等式两边同时乘以 9，然后同时乘以 10。现在用交叉相乘的方法，沿等号的对角线移动这两个分数的分母。（分母是指分式的底部部分）

$$44Z/10 = 80/9$$

$$44Z \times 9 = 80 \times 10$$

$$396Z = 800$$

现在我们可以再次利用交叉相乘沿等号的斜线移动 396 这个数。（只留下未知数，在这个例子中是  $Z$ ），或者可能更简单，我们可以将等式两边同时除以 396，

$$396Z/396 = 800/396 = 2.02$$

$$Z = 2.02$$

每个问题可能会略有不同，所以不可能给你提供一个确切的步骤。当然，同一个问题可以利用不同的规则去解决。你必须研究没有问题，并发现解决的方法。按照本节中描述的指导规则去处理问题。多实践，你很快对这些问题甚至更复杂的问题得心应手。



# 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决欧姆定律这一章中的方程问题。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

## 例题 1

$$U = I \times R$$

$$U = 5\text{mA} \times 2\text{k}\Omega$$

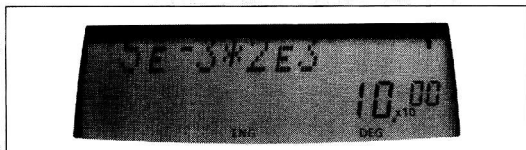
$$U = 5 \times 10^{-3}\text{A} \times 2 \times 10^3\ \Omega = 10\text{V}$$

计算器按键：

$$52\text{nd EE} - 3 \times 22\text{nd EE} 3 =$$

[请注意，方程中的上方的-（负号）键是在3这个键下方的白色键，而-（减号）键在+（加号）的上方，千万不能在需要输入代表负号的白色键时输入了蓝色的减号键]

$$\text{计算器第二行显示：} 10 \times 10^{00}$$



[请注意  $10^{00} = 10^0 = 1$ ，所以， $10 \times 10^{00} = 10 \times 1 = 10$  (V)]

## 例题 2

$$R = U / I$$

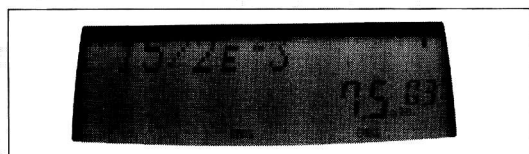
$$R = 15\text{V} / 2\text{mA} = 15\text{V} / (2 \times 10^{-3}\text{A})$$

$$R = 7.5 \times 10^3 = 7.5\text{k}\Omega$$

计算器按键：

$$15 \div 22\text{nd EE} - 3 =$$

$$\text{计算器第二行显示：} 7.5 \times 10^{03}$$



## 例题 3

$$I = U / R$$

$$I = 12\text{V} / 270\text{k}\Omega$$

$$I = 12\text{V} / (270 \times 10^3\ \Omega)$$

$$I = 4.44 \times 10^{-5}\text{A}$$

$$I = 0.0444 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$I = 0.0444\text{mA}$$

或者

$$I = 4.44 \times 10^{-5}\text{A}$$

$$I = 44.4 \times 10^{-6}\text{A}$$

$$I = 44.4\ \mu\text{A}$$

计算器按键：

$$12 \div 2702\text{nd EE} 3 =$$

$$\text{计算器第二行显示：} 44.4 \times 10^{-06}$$

[计算器显示44.44444444，不过，对于我们的例子，小数点后一位或两位就达到了我们足够的精度]

$$I = U / R$$

$$I = 12\text{V} / 270\text{k}\Omega$$

$$I = 12\text{V} / (270 \times 10^3\ \Omega)$$

$$I = 4.44 \times 10^{-5}\text{A}$$

$$I = 0.0444 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$I = 0.0444\text{mA}$$

或者

$$I = 4.44 \times 10^{-5}\text{A}$$

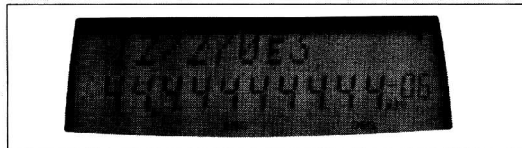
$$I = 44.4 \times 10^{-6}\text{A}$$

$$I = 44.4\ \mu\text{A}$$

计算器按键：

$$12 \div 2702\text{nd EE} 3 =$$

$$\text{计算器第二行显示：} 44.4 \times 10^{-06}$$



[计算器显示44.44444444，不过，对于我们的例子，小数点后一位或两位就达到了我们足够的精度]

复习检测：-----

11.1 描述电压、电流和电阻之间关系的数学公式被称为：

- a) 安培定律
- b) 欧姆定律
- c) 麦克斯韦方程
- d) 平方反比定律

11.2 告诉我们流过电路中电流大小的测量仪器是：

- a) 电子电表
- b) 验电器
- c) 瓦特计
- d) 电流表

11.3 在公式中用来表示电压的字母是：

- a)  $I$
- b)  $P$
- c)  $U$
- d)  $R$

11.4 在公式中用来表示电流的字母是：

- a)  $I$
- b)  $R$
- c)  $U$
- d)  $C$

11.5 看看你是否能用三种不同的句子，用文字来描述电压、电流和电阻之间的关系。

11.6 假设电路中有固定的电压（可能是12V的电池），如果电阻增加一倍，那么电路中的电流将会怎么样呢？

- a) 保持相同的电流
- b) 电流加倍
- c) 电流减半
- d) 电流下降到零

11.7 欧姆的符号是：

- a)  $O$
- b)  $\Omega$
- c)  $\pi$

d)  $\lambda$

11.8 当电压为9V时，通过一个100 $\Omega$ 电阻的电流是多大？

11.9 在电压为12V的电池两端放置多大的电阻，会使通过该电阻的电流为2mA？

11.10 如果50mA的电流通过阻值为400 $\Omega$ 的电阻，那么电阻两端的电压是多少？

答案：-----

11.1 b

11.2 d

11.3 c

11.4 a

11.5 电压是电流和电阻的乘积 ( $U = IR$ )  
 电流等于电压除以电阻 ( $I = U/R$ )  
 电阻等于电压除以电流 ( $R = U/I$ )

11.6 c

11.7 b

11.8  $I = U/R$

$$I = 9V / 100 \Omega = 0.09A = 90mA$$

11.9  $R = U/I$

$$R = 12V / 2mA$$

$$R = 12V / (2 \times 10^{-3}A)$$

$$R = 6 \times 10^3 \Omega = 6k\Omega$$

11.10  $U = IR$

$$U = 50mA (400\Omega)$$

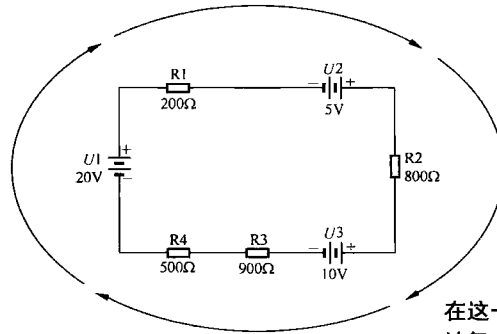
$$U = (50 \times 10^{-3}A) (400\Omega)$$

$$U = 20\,000 \times 10^{-3}V$$

$$U = 20V$$

## 第12章

# 如何解决电路问题 ——一些技巧和窍门



在这一章中，你将学习如何去估计复杂电路中的电压和电流

### 目录

- 基尔霍夫电压定律
- 简化的串联电路
- 基尔霍夫电流定律
- 简化的并联电路
- 简化的混联电路
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

# 基尔霍夫电压定律

欧姆定律可以帮助我们计算电压、电流或电阻。你已经熟悉了这个电学中的重要定律，也能用它来计算出电路中的相关量。不过，如果你还能了解其他一些常用定律，将可节省你的计算时间。

基尔霍夫电压定律，有时也叫做基尔霍夫第一定律，就是其中之一。G.R. 基尔霍夫和乔治·西蒙·欧姆一样，也是德国科学家。

根据基尔霍夫电压定律，对任何闭合回路，如果有电流流过，那么电路中各段电阻上的电压降总和等于电路中所有升压之和。我们利用欧姆定律计算电路中所有的电压降，电动势通常指电源，比如电池。我们分别把所有的升压和电压降相加，如果你认为基尔霍夫第一定律听起来像一个数学方程，那你就对了！你可以把这个定律写成：

$$\sum U_{\text{升压}} = \sum U_{\text{降压}} \quad (12-1)$$

大写希腊字母  $\sigma$  ( $\Sigma$ ) 表示总和，或所有相关量相加。使用基尔霍夫定律，你首先必须识别所工作的电路回路中所有的升压，把

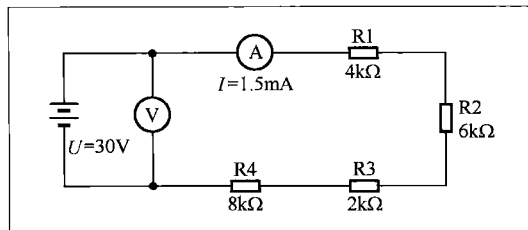


图 12-1：这是一个简单的闭合串联电路。通过分别把所有的升压和降压相加，我们可以写出基尔霍夫电压定律方程。

它们相加，然后识别回路中所有的电压降，把它们相加。你记得怎样用欧姆定律来计算电压降吗？

图 12-1 中的简单电路中，有一个电源和 4 个电压降。在使用基尔霍夫电压定律时，必须是一个完整的电路回路。让我们写出图 12-1 中的基尔霍夫第一定律方程：

$$\sum U_{\text{升压}} = \sum U_{\text{降压}}$$

$$30\text{V} = IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4$$

$$30\text{V} = 1.5\text{mA} \times 4\text{k}\Omega + 1.5\text{mA} \times 6\text{k}\Omega + 1.5\text{mA} \times 2\text{k}\Omega + 1.5\text{mA} \times 8\text{k}\Omega$$

$$30\text{V} = 6\text{V} + 9\text{V} + 3\text{V} + 12\text{V}$$

$$30\text{V} = 30\text{V}$$

这个例子说明了基尔霍夫电压定律的意义。通常，我们利用这个定律来计算通过电路的电流。图 12-2 是描述的另一电路。这个

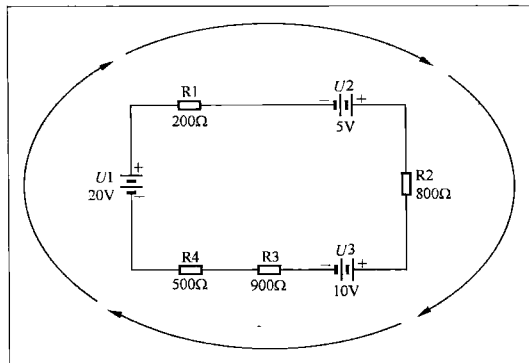


图 12-2：这张电路图是一个较复杂的串联电路，包括了 3 个电源和 4 个电阻。利用基尔霍夫电压定律，我们可以列出方程，求出电路中的电流。

电路中有 3 个电源，让我们用基尔霍夫电压定律来计算电路中的电流。

图 12-2 将帮助说明使用基尔霍夫电压定律的另一个要点。在你围绕电路回路时会有两个方向，即顺时针方向和逆时针方向。通常，选取回路的方向是沿电源的负极到电源的正极的方向。注意，我们在图 12-1 中的例子中就是取的这个方向。沿电源的负极到正极方向，结果是电压增加或电压升高。如果沿电源的正极到负极方向，结果是电压降低！一般惯例是，如果电源的方向和回路方向相反，给电源取负值。图 12-2 中的例子会使你很容易明白这个概念。

首先我们写出基尔霍夫电压定律方程：

$$\Sigma U_{\text{升压}} = \Sigma U_{\text{降压}}$$

沿电路回路箭头指示方向，把所有的电动势相加。注意，在计算  $U_3$  时，方向是从电池的正极到负极，这点的结果是电压降低，所以在方程中  $U_3$  数值前加负号。

$$\Sigma U_{\text{升压}} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (12-2A)$$

$$\Sigma U_{\text{升压}} = 20V + 5V - 10V = 15V \quad (12-2B)$$

把所有压降相加，我们利用欧姆定律计算出每个电阻上的压降 ( $U = IR$ )。

$$\Sigma U_{\text{压降}} = IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 \quad (12-3A)$$

我们不知道电路中的电流（这也是我们要试图求出的），但我们知道每个电阻的阻值。

$$\Sigma U_{\text{压降}} = I \times 200 \Omega + I \times 800 \Omega + I \times 900 \Omega + I \times 500 \Omega$$

你有没有注意到，我们用电流  $I$  乘以每个电阻的阻值？当一组数据每个数值都乘以一个相同的常数，你可以简化这个问题。首先把这组数值相加，得到的和再乘以这个常数。这样

我们可以把方程 12-3A 写成：

$$\Sigma U_{\text{压降}} = I \times (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\Sigma U_{\text{压降}} = I \times (200 \Omega + 800 \Omega + 900 \Omega + 500 \Omega)$$

$$\Sigma U_{\text{压降}} = (I \times 2400 \Omega) \quad (12-3B)$$

现在我们可以把方程 12-2B 和 12-3B 组合在一起，写成基尔霍夫方程（如同方程 12-1）（我们可以同时写出等式两边的式子，但通常为了更加方便，我们分别写出两个式子，然后把它们组合在一起得到最后的方程）。

$$\Sigma U_{\text{升压}} = \Sigma U_{\text{降压}}$$

$$15V = I \times 2400 \Omega \quad (12-4)$$

解方程中的  $I$ ，等式两边同时除以 2400  $\Omega$ 。

$$15V / 2400 = I$$

$$I = 6.25 \times 10^{-3} A = 6.25 \text{mA}$$

你可以用基尔霍夫定律解决比这个电路更为复杂的电路问题。下一节你将学习利用这个重要的定律帮助你简化复杂的串联电路。

## 简化的串联电路

**基**尔霍夫电压定律给我们提供了一些简化串联电路的方法。观察图 12-3 所示的电路，电路中包括了一些电源，比如电池，相互串联连接，以及一串电阻。有时我们也许希望把电路重新画成一个等效的电路。等效电路具有和原电路相同的电压和电流，不过等效电路中只有一个电源和一个电阻。图 12-4 中就是简化后的电路，但没有标明电压和电阻的大小。

我们将利用基尔霍夫电压定律找出这些元件的数值。从基尔霍夫电压定律方程着手：

$$\Sigma U_{\text{升压}} = \Sigma U_{\text{降压}} \quad (12-5)$$

记住，我们首先分别从等式的两边开始着手，这样会更加容易些。在电路回路中，沿大多数电源从负极流向正极的方向，把电压相加。注意电源的连接顺序不是问题，它们相加的顺序也没有任何影响，甚至在它们中间串联了几个电阻也没有任何影响。只要记住，给

任何一个方向是沿正极到负极的电源前加上负号（把这些电源从其他电源中减去）。

根据基尔霍夫电压定律，你可以看到电源不是帮助电流通过就是阻碍电流通过电路。在涉及我们如何连接电源时，有时你也许会听到“辅助”和“补偿”这两个术语。辅助电源连接时是从正极连到负极，所以电压增加。补偿电源连接时是负极到负极（或者正极到正极），所以电压减小。你可以通过简单计算，像图 12-3 中所示的那样，找到电路中的总电源电压。

$$U_{\text{总}} = U_1 + U_2 + U_3 + (U_4) + (-U_5) \quad (12-6)$$

$$U_{\text{总}} = 20\text{V} + 30\text{V} + 10\text{V} + (-15\text{V}) + (-15\text{V})$$

$$U_{\text{总}} = 30\text{V}$$

这就是图 12-4 中的一个等效电源。

现在让我们计算出图 12-4 中的那个等效

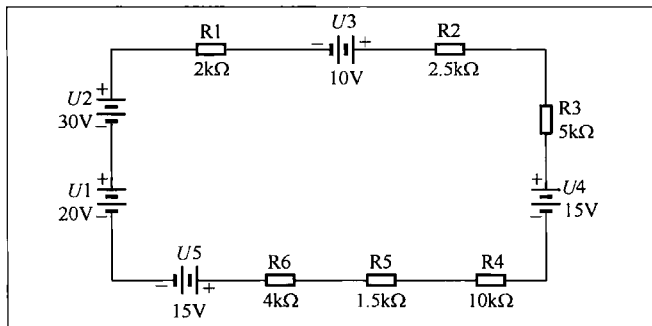


图12-3：4个电源和6个电阻串联组成的闭合回路。

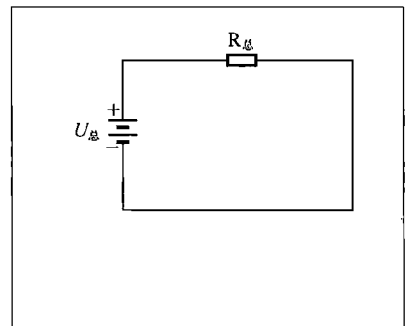


图12-4：图12-3简化后的闭合回路。

电阻。再次利用基尔霍夫电压定律，沿着回路把所有的电压降相加，虽然不知道电流的大小，但我们可用  $I$  来表示。

$$\Sigma U_{\text{压}} = I \times R_1 + I \times R_2 + I \times R_3 + I \times R_4 + I \times R_5 + I \times R_6 \quad (12-7)$$

因为我们乘的是同一个电流， $I$  乘以每一个电阻，所以我们可以把方程写成：

$$\Sigma U_{\text{压降}} = I (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) \quad (12-8)$$

这里我们真正所要做的是找到图 12-3 中的等效电阻。这个等效电阻上所产生的电压降必须和其他所有电阻上共同产生的电压降相同。电流  $I$  乘以等效电阻必须和方程 12-8 右侧相等。这样：

$$IR_{\text{总}} = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) \quad (12-9)$$

把方程两边都除以电流  $I$ ，消去等式中的电流。这样我们得到一个方程，计算以串联方式连接的电阻的总电阻。

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (12-10)$$

这个结果告诉我们，串联连接的电阻的等效电阻等于电路中各个串联电阻之和。用于任何串联连接的电阻的通用方程是：

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N \quad (12-11)$$

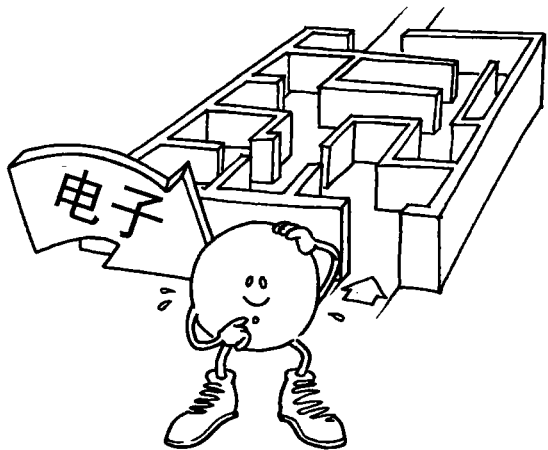
这里， $R_N$  表示一串电阻中的最后一个电阻。这个方程对于两个电阻或两百个（或更多）电阻的串联连接都适用，然而，这个方程并不适用于并联电路（我们将在后面讨论并联情况）。

图 12-3 中的例子，总电阻就是：

$$R_{\text{总}} = 2\text{k}\Omega + 2.5\text{k}\Omega + 5\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega + 1.5\text{k}\Omega + 4\text{k}\Omega$$

$$R_{\text{总}} = 25\text{k}\Omega$$

回到方程 12-9，我们可以把方程写成：



$$IR_{\text{总}} = I \times 25\text{k}\Omega$$

我们也可以把方程 12-8 写成：

$$\Sigma U_{\text{压降}} = I \times 25\text{k}\Omega$$

现在我们可以把我们计算出来的所有条件代入到方程 12-1。

$$\Sigma U_{\text{升压}} = \Sigma U_{\text{压降}}$$

$$30\text{V} = I \times 25\text{k}\Omega$$

这看起来和欧姆定律方程相像吗？当然是。在这里未知数是电流。现在我们可以求出电流：

$$I = \frac{30\text{V}}{25\text{k}\Omega}$$

$$I = \frac{30\text{V}}{25 \times 10^3 \Omega}$$

$$I = 1.2 \times 10^{-3} \text{A} = 1.2\text{mA}$$

在基尔霍夫电压定律的帮助下，我们计算出了电路的总电流。事实上电路中只有一个电流，因为在串联电路中，通过电路中的每个元件（电源电压、电阻等）的电流相等。你可以用这种方法计算出包含更多电源和电阻的电路中的未知量。

# 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律有时也称为基尔霍夫第二定律，这是一个非常重要的电学定律。基尔霍夫电流定律给我们提供了一个学习电路和计算电路状态的强有力的工具。

在学习这个定律的内容前，你要学习一些常用的描述部分电路的术语。电路节点是指2个或2个以上导体连接的电路上的任意一点。节点是2个电阻的连接点，导线和电池的连接点也叫节点。通常我们寻找的节点是指电路中的分支点，至少3个导体和这个点相连。图12-5中标出了电路中的多个节点。

基尔霍夫电流定律规定：所有流入电路节点的电流等于所有流出这个节点的电流。如果你思考一下，这个定律表面上似乎和基尔霍夫电压定律形似。毕竟，电流必须流向某个地方，而电子在流过电路时没有失去电子。不管这是多么显而易见，然而，在帮助我们解决电

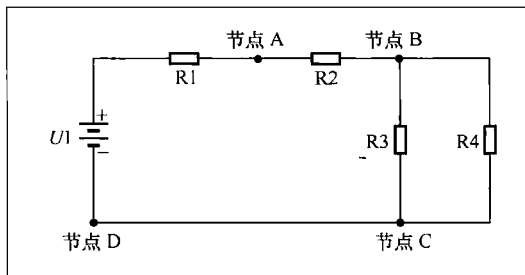


图12-5：这个电路图标注了几个电路节点。节点是2个或2个以上导体的连接点。通常我们感兴趣的是电路支路处的节点。在这种情况下，会有3个或3个以上的导体相连，如图中的节点B和节点C。

路问题时这个定律还是显得非常重要，也是非常有效的。

基尔霍夫电流定律显示，我们可以写出任何一个电路节点的电流方程。再一次，我们使用希腊字母  $\sigma$  ( $\Sigma$ ) 表示相似值的总和。

$$\Sigma I_{\text{流入}} = \Sigma I_{\text{流出}} \quad (12-12)$$

图12-6显示的是一个简单的并联电路。电流表测量两条支路中的电流，但是我们不知道电池流出的总电流。基尔霍夫电流定律将帮助我们计算出这个电流。节点A，有一个电流  $I_{\text{总}}$  流入，有两个电流  $I_1$ 、 $I_2$  流出。

记住，工程上定义电流的方向是从电源的正极流向电源的负极。在我们涉及基尔霍夫电流定律时，通常使用惯称的电流方向。这仅仅是方便的问题，因为当你用一个正电压（升压）除以一个电阻，如果是正数表明是正电流，如果是负值意味着电流是反方向的。

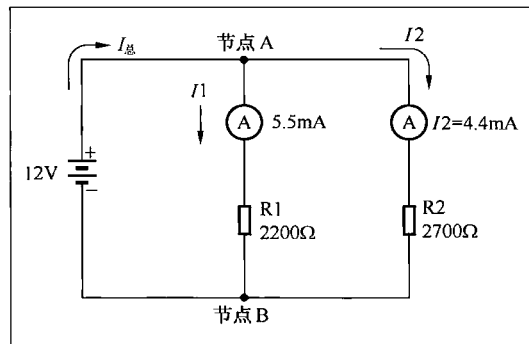


图12-6：这个简单的并联电路中包含了测量支路电流的电流表，但是，没有测量电池中流出的总电流的电流表。我们必须用基尔霍夫电流定律来找到总电流。



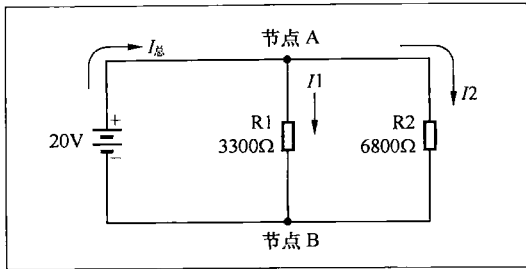


图12-7：这个图将帮助说明用联立方程的技巧来解决有多个未知量的问题。我们可以计算出电池的总电流和电路中每个支路的电流。课文解释了这个过程。

我们可以用方程 12-12 写出图 12-6 中节点 A 的基尔霍夫电流定律方程，这样可以让我们求出流出电池的总电流。

$$\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}}$$

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 \quad (12-13)$$

$$I_{\text{总}} = 5.5\text{mA} + 4.4\text{mA} = 9.9\text{mA}$$

你也许想写出针对节点 B 的方程，只是为了证明计算结果是否相同。

$$\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}}$$

$$I_1 + I_2 = I_{\text{总}} \quad (12-14)$$

$$5.5\text{mA} + 4.4\text{mA} = I_{\text{总}} = 9.9\text{mA}$$

这个例子也许太简单了。基尔霍夫电流定律真正的作用是在比这个电路更为复杂的电路中。对这些更复杂的问题，我们通常必须同时使用基尔霍夫的两个定律。时常电路中有很多电路状态需要我们去计算，解决方案包括求解联立方程的方法。简单说来就是如果电路中有超过一个的变量或未知量，你需要写出多个电路状态的方程，对于每个未知量你需要一个方程，而且这些方程必须在同一时间内应用于电路中（这就是联立的含义）。

多数这样的问题超出了本书初学者的范围。让我们来完成一个简单的例子，当然，正

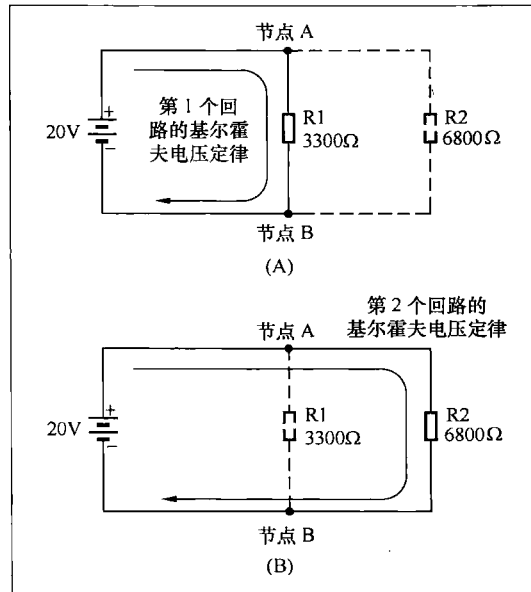


图12-8：图中两个部分与图12-7等同。(A)部分显示的是我们可以用来写出基尔霍夫电压定律方程的回路，图(B)显示的是第二个回路。从这些回路中，利用基尔霍夫电流定律写出的两个方程，从而使我们计算出电路3个电流。

是如此，你可以看到这些解决步骤。

图 12-7 显示的是一个并联电路。从图中我们知道了电源电压和电阻值。我们想求出电路中通过每条支路的电流以及从电池中流出的总电流，这意味着我们要求出这 3 个电流。我们可以通过写出节点 A 的基尔霍夫电流定律开始计算。

$$\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}}$$

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 \quad (12-15)$$

这个方程描述了我们所要求的 3 个量，所以你也也许想知道它是如何帮助我们的。请记住，对于 3 个未知量，我们需要这个电路的 3 个联立方程。我们可能写出其他什么方程呢？这个电路至少有两个基尔霍夫电压定律方程。

图 12-8 显示的电路和图 12-7 一样，利用两个确定的回路写出这些方程。

$$\Sigma U_{\text{升压}} = \Sigma I \times R_{\text{压降}} \quad (12-16)$$

对于回路 1：

$$20\text{V} = I_1 \times R_1 \quad (12-17)$$

对于回路 2：

$$20\text{V} = I_2 \times R_2 \quad (12-18)$$

现在我们有 3 个不同的方程来表示电路中的 3 个未知量。解决这个联立方程有几种数学技巧。其中之一，适合这种简单的联立方程的方法叫做代入法。在使用这种方法时，我们先解出一个或多个方程，求出未知量或其他变量，然后把所求出的值代入剩下的方程（这个方法比听起来要容易得多，继续我们的例子，看看如何求解）。

首先，我们用方程 12-17，通过方程两边同时除以  $R_1$  来求出  $I_1$ 。

$$\begin{aligned} \frac{20\text{V}}{R_1} &= \frac{I_1 \times R_1}{R_1} \\ \frac{20\text{V}}{R_1} &= I_1 \end{aligned} \quad (12-19)$$

因为图中给出了  $R_1$  的值，我们将这个值

代入方程，求出  $I_1$ 。

$$\frac{20\text{V}}{3300\ \Omega} = I_1$$

$$6.06 \times 10^{-3} \text{A} = 6.06 \text{mA} = I_1$$

接着，我们用同样的方法求出  $I_2$ 。

$$\frac{20\text{V}}{R_2} = \frac{I_2 \times R_2}{R_2}$$

$$\frac{20\text{V}}{R_2} = I_2 \quad (12-20)$$

从图 12-7 中，我们也知道了  $R_2$  的值，所以我们可以完成这个计算。

$$\frac{20\text{V}}{6800\ \Omega} = I_2$$

$$2.94 \times 10^{-3} \text{A} = 2.94 \text{mA} = I_2$$

我们已经求出  $I_1$  和  $I_2$ ，现在我们可以代入方程 12-15。

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2$$

$$I_{\text{总}} = 6.06 \text{mA} + 2.94 \text{mA} \quad (12-21)$$

$$I_{\text{总}} = 9.00 \text{mA}$$

这个例子让你知道基尔霍夫定律可以用来解决复杂的电路问题。你可以解决有很多并联支路的电路，虽然数学上有点错综复杂。

# 简化的并联电路

当我们学习基尔霍夫电压定律时，我们发现它可帮助我们简化串联电路。例如，如果有多个电源串联连接在电路中，我们可以用一个等效的电源来代替。我们也发现用一个简单的方程来计算出替代几个串联电阻的一个等效电阻值。

你也许想知道是否基尔霍夫电流定律提供了一个类似的方法来简化并联电路。答案是确切的“是”。

图 12-9 显示的是两个电池作为电源并联连接的电路图。这样的连接在电路中的效果是什么呢？每个电池给电路提供一些电流。不写方程，让我们思考基尔霍夫电流定律是如何应用在这个电路中的。每个电池提供一个电流流入节点 A，总电流从节点 A 流出。将电池并联连接可以使供电时间更长。这和电路中需要更多的电流时，使用较大的电池比较小的电池提供的电流更多很相似。例如，将 1.5V 的 5 号电池和 1.5V 的一号电池比较，如图 12-10

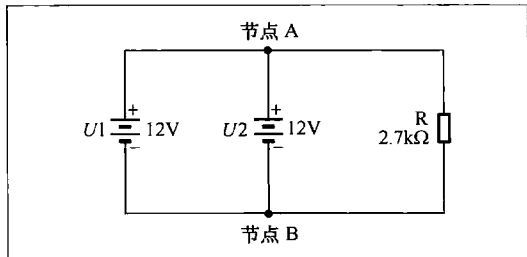


图12-9：如果电池的电压相等，我们可以把它们并联连接。这样可以提高电池的使用时间，因为这时每个电池流入到电路中的电流都较少。

所示，它们都提供相同的电压，但是大电池能提供更多的电流。

通常，你不能将不同电压的电池并联连接，这样可能会导致电池间有较大的电流流入，使它们过热，并可能造成其他的危险或危险状态。但有时，你可能想把几个相同电压的电池并联连接。

再看一下图 12-9，有两个电源，每个电源具有相同的电压，并联连接在电路中。我们可以用一个提供相同电流的电源来代替这两个电源，非常简单，不是吗？

基尔霍夫电流定律能帮助我们几个并联连接的电阻结合在一起，用一个等效电阻来

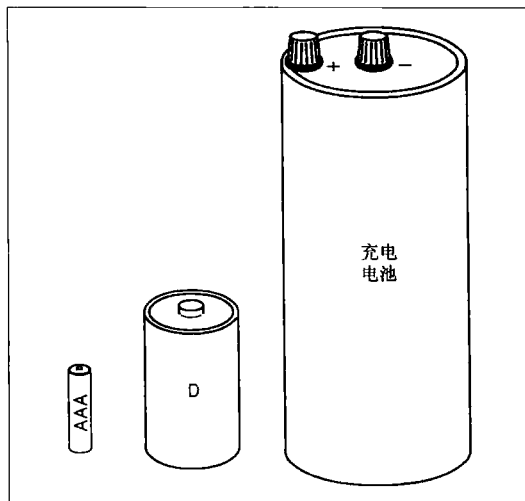


图12-10：一个手表电池、一节5号电池和一节1号电池都能提供1.5V的电压。不过，在电能用完前，电池的形状越大，它能提供的电流也就越多。

代替吗？再次重申：是的！让我们从图 12-11 的电路开始着手。一个多大阻值的电阻能代替图中的 3 个并联电阻呢？从电池中流出的总电流相同。首先，我们写出节点 A 基尔霍夫电流定律方程。

$$\Sigma I_{\text{流入}} = \Sigma I_{\text{流出}} \quad (12-22)$$

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (12-23)$$

如图 12-12 所示，利用电路中的 3 个回路，我们可以写出基尔霍夫电压定律方程。因为 3 个回路中，每个回路包含一个电源和一个电阻，总电压加在每个电阻上。我们可以利用欧姆定律写出加在每个电阻上的电压方程，然后利用这 3 个方程，求出每个支路的电流。

$$U = I_1 \times R_1 \quad (12-24)$$

求出电流：

$$\frac{U}{R_1} = \frac{I_1 \times R_1}{R_1} \quad (12-25)$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad (12-26)$$

下一步，我们求出电流：

$$U = I_2 \times R_2 \quad (12-27)$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} \quad (12-28)$$

最后，求出第三个支路的电流：

$$U = I_3 \times R_3 \quad (12-29)$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} \quad (12-30)$$

现在我们可以把这 3 个支路的电流值代入基尔霍夫电流定律。

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_{\text{总}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \quad (12-31)$$

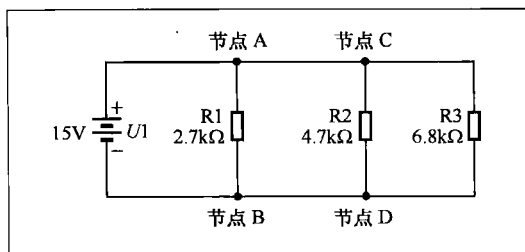


图12-11：这是一个3个电阻与电池并联连接的电路。我们想在电路用效果相同的一个等效电阻来代替这3个电阻。正文中描述了这个具体过程。

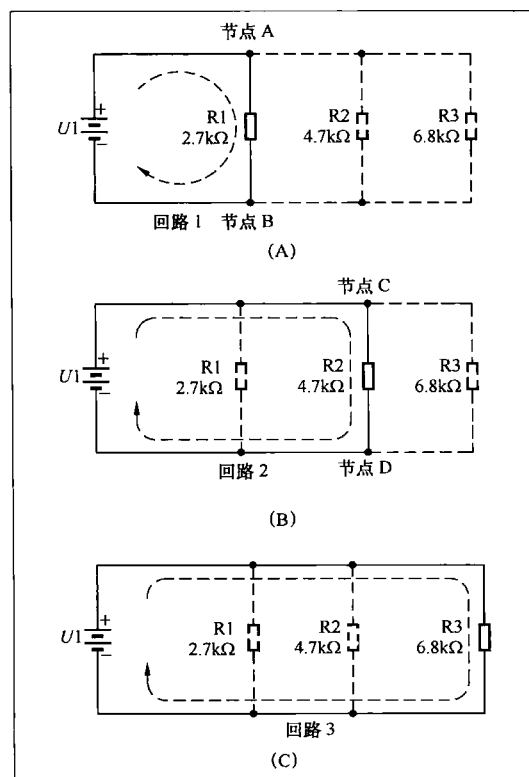


图12-12：图中的3个部分显示的是图12-11中的电路。每个部分显示一个电路回路帮助我们利用基尔霍夫电压定律写出相应的方程。

电路中流入等效电阻的总电流和流入3个并联电阻的总电流相同。根据这个信息，我们可以利用欧姆定律方程求出

$$I_{\text{总}} = \frac{U}{R_{\text{总}}} \quad (12-32)$$

代入方程 12-31，我们得到：

$$\frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \quad (12-33)$$

通过等式两边同时除以电压  $U$ ，我们可以把方程中的电压约去，这时剩下的就是计算几个并联连接的电阻的总电阻的方程。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (12-34)$$

在科学计算器上很容易求出倒数（1被另一个数除）。通过几个很简单的步骤你就可以解出这个方程。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{2.7\text{k}\Omega} + \frac{1}{4.7\text{k}\Omega} + \frac{1}{6.8\text{k}\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{3.7 \times 10^{-4} + 2.1 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-4}}{\Omega}$$

请注意在方程右侧分母（底部）欧姆的符号 ( $\Omega$ )，这是最终答案  $R_{\text{总}}$  的单位。要记住的是，电阻的大小用欧姆来表示。

下一步，将分子进行相加：

$$3.7 \times 10^{-4} + 2.1 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-4} = 7.3 \times 10^{-4}$$

有好几种方法来解出  $R_{\text{总}}$  的方程。一种方法是使方程两边同时倒数：

$$\frac{1\Omega}{7.3 \times 10^{-4}} = R_{\text{总}}$$

$$R_{\text{总}} = 1400\Omega \quad (12-35)$$

（你的计算器上的读数也许是 1369.49，但是我们把结果只保留 2 位有效数字。）

如果有一串电阻并联连接（ $N$  个电阻），

你要找出它的等效电阻，只要把每个电阻的倒数相加，就可以得到等效电阻的倒数。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (12-36)$$

例如，将  $10\Omega$ ， $20\Omega$ ， $50\Omega$  和  $100\Omega$  四个电阻并联，他们的总电阻可以这样来计算：

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{20\Omega} + \frac{1}{50\Omega} + \frac{1}{100\Omega}$$

$$= (0.1 + 0.05 + 0.02 + 0.01) \frac{1}{\Omega} = (0.18) \frac{1}{\Omega}$$

$$R_{\text{总}} = \left( \frac{1}{0.18} \right) \Omega = 5.56\Omega$$

非常重要的是你必须认识到是把电阻的倒数相加，而不是把电阻值直接相加！用你手边的科学计算器，你可以很容易地把电阻的倒数相加。

还有一些非常重要的观察，那就是我们要确定这些电阻是并联。注意方程 12-35 所给的答案，图 12-11 中并联电阻的总电阻只有  $1.4\text{k}\Omega$ ，这比电路中任何一个电阻的阻值都小。只要你把一些电阻并联在电路中，这些电阻的等效电阻总比这些电阻中的任何一个电阻的阻值都要小。

把两个大小相等的电阻并联在电路中，会出现一个有趣的情况。把两个阻值相等的电阻并联连接，总电阻将等于原来电阻阻值的一半，把 3 个阻值相等的电阻并联连接，总电阻将等于原来电阻阻值的  $1/3$ 。你可以迅速求出任何数量的阻值相同的电阻并联时的总电阻，用一个电阻的阻值除以并联电阻的数量。这给你提供了一个计算相同阻值的电阻并联时等效电阻的快捷方法。

## 简化的混联电路

**基**尔霍夫电压和电流定律给我们提供了简化电路的工具。如果电路中包含了一组串联连接的电阻，我们可以用一个等效电阻来代替。同样，如果电路中有一组电阻并联连接，我们也可以找到一个等效电阻来代替。为了组合串联连接的电阻，我们只需把所有电阻的阻值相加。

$$I_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (12-37)$$

为了组合并联连接的电阻，我们必须把每个电阻的倒数相加，得到这个和的倒数。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (12-38)$$

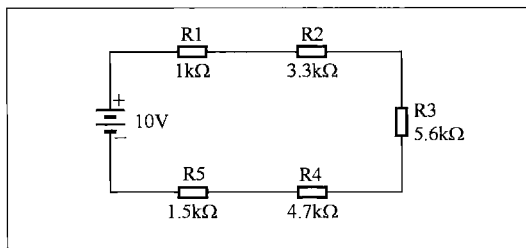


图12-13：找出这些串联连接电阻的等效电阻，正文中有如何解决这个问题的说明。

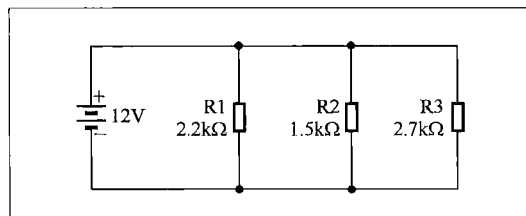


图12-14：找出这些并联连接电阻的等效电阻，正文中说明了这个问题的解题步骤。

最好的学习如何使用这些方程的方法就是练习，所以让我们来做几个例题。图 12-13 显示的是 5 个电阻串联的电路。那么它的等效电阻是什么呢？

因为这是串联电路，所以我们必须用方程 12-37，只要把 5 个电阻的阻值相加起来就可以得到等效电阻，听起来很容易，不是吗？

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

$$R_{\text{总}} = 1\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega + 5.6\text{k}\Omega + 4.7\text{k}\Omega + 1.5\text{k}\Omega$$

$$R_{\text{总}} = 16.1\text{k}\Omega$$

现在来做并联电路的练习。图 12-14 显示的是 3 个电阻并联连接的电路。那么这 3 个并联电阻的等效电阻是多少呢？这需要使用方法 12-38 来解决。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{2.2 \times 10^3 \Omega} + \frac{1}{1.5 \times 10^3 \Omega} + \frac{1}{2.7 \times 10^3 \Omega}$$

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{4.5 \times 10^{-4} + 6.7 \times 10^{-4} + 3.7 \times 10^{-4}}{\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{14.9 \times 10^{-4}}{\Omega}$$

利用交叉相乘求出方程中的  $R_{\text{总}}$ 。

$$R_{\text{总}} = \frac{\Omega}{14.9 \times 10^{-4}} = 670 \Omega$$

这看起来比前面的一个问题要做更多的计算，但是借助科学计算器的帮助，不会给你增加太多的麻烦。在今后的学习中，你会做更多的串、并联电阻的计算练习。

你会发现电学中的电路比这些串联和并联电路要复杂得多。大多数电路中包含了串联和并联的组合。你必须用这些简单电路的知识去解决这些问题。一次解决一步，每步解决电路中的一部分，利用这样的方法我们就可以解决一些复杂电路的问题。

让我们来看看图 12-15。这是一个既有串联又有并联的网络电路。你的任务就是找出一个能代替整个网络电阻的等效电阻值。为什么要这样做呢？当然，一个实际原因是将要计算出流进这个电路的总电流。现在你可以写出基尔霍夫电压和电流定律方程，利用这些方程计算出这个电路的总电流。然而，对于像图 12-15 这样的电路，却是个比较困难的任务。你会得到 7 个变量，需要 7 个联立方程来解决这个问题。这是留给具有较高水平的学生比较好的练习。我们怎样找到这个电路中的等效电阻呢？让我们从离电源最远的点开始解决。研究电路图，确定在那个点上连接的那些电阻是串联还是并联。当你观察图 12-15 时，你会注意到，R6、R7 和 R8 是串联连接的，第一步是把这 3 个电阻组合成一个电阻。我们写出适合这个问题的方程。

$$R_{6-8} = R_6 + R_7 + R_8 \quad (12-39)$$

这里  $R_{6-8}$  的意思是代替编号从 6 ~ 8 的电阻的等效电阻。

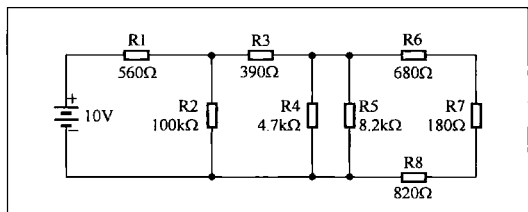


图12-15：这是一个混联电路。你要找出这个网路电路的等效电阻。正文以及图12-16 说明了具体的步骤。

$$R_{6-8} = 680\Omega + 180\Omega + 820\Omega$$

$$R_{6-8} = 1680\Omega$$

图 12-16 (A) 表示的是用这个电阻代替电阻 R6、R7 和 R8 后的电路。再仔细观察图 12-16 (A) 这个新的电路，又会立即注意到离电源最远的 3 个电阻是并联连接的，所以，我们的下一步是把这 3 个电阻组合成 1 个等效电阻。利用公式 12-38，我们得到：

$$\frac{1}{R_{4-8}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_{6-8}} \quad (12-40)$$

这里  $R_{4-8}$  表示的是原电路中 R4 ~ R8 的一个等效电阻。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{1}{4.7k\Omega} + \frac{1}{8.2k\Omega} + \frac{1}{1.68k\Omega} \\ \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{1}{4.7 \times 10^3\Omega} + \frac{1}{8.2 \times 10^3\Omega} + \frac{1}{1.68 \times 10^3\Omega} \\ \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{2.13 \times 10^{-4} + 1.22 \times 10^{-4} + 5.95 \times 10^{-4}}{\Omega} \\ \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{9.30 \times 10^{-4}}{\Omega} \end{aligned}$$

交叉相乘，求出这个方程中的  $R_{4-8}$ ：

$$\begin{aligned} \frac{\Omega}{9.30 \times 10^{-4}} &= R_{4-8} \\ 1075\Omega &= R_{4-8} \end{aligned}$$

图 12-16 (B) 表示的是用等效电阻重新画的电路图。注意电阻 R3 和  $R_{4-8}$  是串联连接的，我们可以把这两个电阻相加得到它们的等效电阻的阻值。

$$\begin{aligned} R_{3-8} &= R_3 + R_{4-8} \\ R_{3-8} &= 390\Omega + 1075\Omega = 1465\Omega \end{aligned}$$

图 12-16 (C) 中把这个等效电阻包含在了电路中。现在这个图看起来简单多了，不是吗？R2 和 R3~8 是如何连接的呢？你如何找到它们的等效电阻呢？说得很对，它们并联连

接。所以利用方程 12-38，我们把它们的倒数相加。

$$\frac{1}{R_{2\sim 8}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{3\sim 8}} \quad (12-41)$$

$$\frac{1}{R_{2\sim 8}} = \frac{1}{100\text{k}\Omega} + \frac{1}{1465\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{2\sim 8}} = \frac{1.00 \times 10^{-5} + 6.826 \times 10^{-4}}{\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{2\sim 8}} = \frac{6.926 \times 10^{-4}}{\Omega}$$

交叉相乘，求出  $R_{2\sim 8}$ 。

$$\frac{\Omega}{6.926 \times 10^{-4}} = R_{2\sim 8}$$

$$1444\Omega = R_{2\sim 8}$$

图 12-16 (D) 表示的是这个电路的最新电路，接近完成的最后一步。剩下的工作是把  $R_1$  和  $R_2 \sim R_8$  组合起来。因为它们都是串联连接，所以也不必再写方程，直接把它们的值相加即可。

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_{2\sim 8} \quad (12-42)$$

$$R_{\text{总}} = 560\Omega + 1444\Omega$$

$$R_{\text{总}} = 2004\Omega$$

图 12-16 (E) 表示的是最后的等效电路。

通过一步步简化电路，我们找到了整个电路的一个等效电阻。现在你可以利用这个等效电阻求出从电源流出的总电流了。欧姆定律将帮助你完成这个计算。

$$U = IR$$

求出方程中的电流  $I$ （或者利用欧姆定律“圆”找到新的方程）

$$I = \frac{U}{R} \quad (12-43)$$

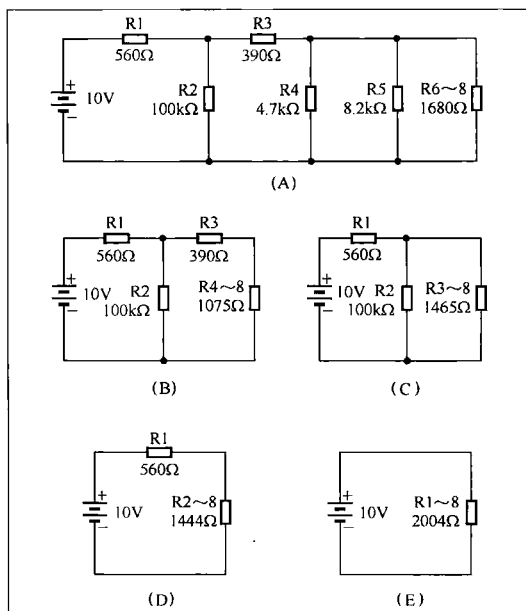


图12-16：图中的各部分说明了在简化图12-15 电路时的每个步骤。每个部分说明进一步简化电路中电阻的数量，直到图中E部分，只剩下一个电阻。从电源流出，经过这个电阻的电流和图12-15 中流入的总电流相同。

$$I = \frac{10V}{2004\Omega} = 4.99 \times 10^{-4}A$$

$$I = 4.99mA$$

这里我们不再做更多的计算。再回到原电路，计算出通过每条支路的电流并不困难，基尔霍夫电流和电压定律将给我们的计算提供极大的帮助。虽然简化电路要做很多工作，却是计算总电流的最容易的方法。

记住，当你想简化一个复杂的电路时，从离电源最远的那个点开始，一次一步，把串、并联在一起的电阻用等效电阻替换。最后，你会得到一个代替电路中所有电阻的等效电阻。



# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 12 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以它们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

### 例题一

如果  $5\Omega$ 、 $8\Omega$  和  $10\Omega$  三个电阻并联，那么他们的总电阻计算如下：

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{总}}} &= \frac{1}{5\Omega} + \frac{1}{8\Omega} + \frac{1}{10\Omega} \\ &= (0.20+0.125+0.10) \frac{1}{\Omega} \\ &= (0.425) \frac{1}{\Omega} \\ R_{\text{总}} &= \left(\frac{1}{0.425}\right) \Omega = 2.3529\Omega \end{aligned}$$

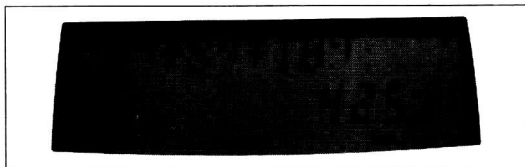
计算器按键：

$$5x^{-1} + 8x^{-1} + 10x^{-1} =$$

计算器第二行显示： $425 \times 10^{-3}$

[ 请 注 意， $10^{-3}=10^{-3}=0.001$ ， 所 以， $425 \times 10^{-3}=425 \times 10^{-3}=425 \times 0.001=0.425$  ]

但是，我们并没有完成计算，因为  $425 \times 10^{-3}$  是  $1/R_{\text{总}}$ ，为了求出  $R_{\text{总}}$ ，我们必须将  $425 \times 10^{-3}$  反转，或求出其倒数。



有两种方法可以完成这个计算。最简单的方法是按  $x^{-1}$  这个键，这个键将会求出赋予值的倒数 ( $425 \times 10^{-3}$  的倒数)。所以在计算器第二行显示  $425 \times 10^{-3}$  这个值后，按下  $X^{-1}$  键，将会显示所求总电阻的阻值  $R_{\text{总}} = 2.3529\Omega$ 。

另一个也是非常容易的方法是重新输入  $1/R_{\text{总}}$ ，在本例题中就是  $0.425$ （或者  $425 \times 10^{-3}$ ），然后按  $X^{-1}$  键，总电阻就会在计算器上显示 ( $R_{\text{总}} = 2.3529\Omega$ )。

注意，上面计算器键入显示为：

$$5x^{-1} + 8x^{-1} + 10x^{-1} =$$

是将三个电阻的倒数相加，这是求出  $5\Omega$ 、 $8\Omega$  和  $10\Omega$  三个电阻并联的第一步。你的计算器将完成下列计算：

$$(1/5) + (1/8) + (1/10) =$$

你可以再回顾一下本章中例子，例如，求出  $2.2\text{k}\Omega$ 、 $1.5\text{k}\Omega$  和  $2.7\text{k}\Omega$  三个电阻并联时的总电阻。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{2.2\text{k}\Omega} + \frac{1}{1.5\text{k}\Omega} + \frac{1}{2.7\text{k}\Omega}$$

你得到的答案将是：

$$R_{\text{总}} = \frac{1}{1.49158 \times 10^{-3}} \Omega = 670\Omega$$

(你的计算器也许会显示出  $670.429$ ，不过我们的答案取整数，只取两位有效数。)

## 复习检测：-----

- 12.1 基尔霍夫电压定律 (KVL) 是解决电路问题的一个有力工具, 请用你自己的话来描述基尔霍夫电压定律。
- 12.2 基尔霍夫电流定律 (KCL) 也是解决电路问题的一个有力工具, 请用你自己的话来描述基尔霍夫电流定律。
- 12.3 4个电阻 $10\Omega$ ,  $30\Omega$ ,  $50\Omega$ 和 $R_x$ 串联在一起, 它们的总电阻是 $150\Omega$ , 请问 $R_x$ 的组值是多少?
- 12.4 有3个阻值分别为 $10\Omega$ ,  $40\Omega$ 和 $32\Omega$ 的电阻并联在电路中, 请问并联后的总电阻是多少?
- 12.5 (一个棘手的问题) 4个阻值相等的电阻 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 和 $R_4$ 以下列方式连接:  $R_1$ 和 $R_2$ 串联,  $R_3$ 和 $R_4$ 并联, 然后将 $R_1$ 和 $R_2$ 串联后的电阻与 $R_3$ 和 $R_4$ 并联后的电阻串联, 总电阻是 $15\Omega$ , 那么每个电阻的阻值应该是多少欧姆? 提示: 估测电阻大小, 然后看看是否合适, 是快速得到答案的好方法。

## 答案：-----

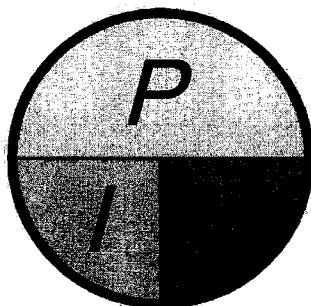
- 12.1 根据基尔霍夫电压定律, 电路中所有电压压降等于电路中所有升压。当电流通过电路中任何电阻时电压会下降, 我们利用欧姆定律计算出电路中总的下降的电压。电压升压通常指电源, 例如电池。我们可以把所有升压和所有降压相加。如果你觉得基尔霍夫第一定律的描述听起来像一个数学方程, 你是完全正确的! 我们可以把这个定律写成:  $\sum_{升压} = \sum_{降压}$
- 12.2 基尔霍夫电流定律表示, 所有流入电路节点的电流等于所有流出该节点的电流。这似乎是显而易见的, 因为电流流到某个地方。当电流在电路占用流动时, 并没有失去电子。无论这个定律多么显而易见, 然而, 这个定律非常重要而且在帮助我们解决电子电路问题时非常强大。我们可以把这个定律写成:  $\sum_{流入} = \sum_{流出}$
- 12.3 因为电阻串联, 所以  
 $R_{总} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 10\Omega + 30\Omega + 50\Omega + R_x = 150\Omega$   
 $R_x = 150\Omega - (10\Omega + 30\Omega + 50\Omega) = 150\Omega - 90\Omega = 60\Omega$
- 12.4 因为电阻并联, 所以  

$$\frac{1}{R_{总}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{总}} = \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{40\Omega} + \frac{1}{32\Omega} = \frac{1}{0.15625} \Omega = 6.4\Omega$$
- 12.5 回想一下, 两个等值电阻并联 (本题中是 $R_3$ 和 $R_4$ 并联), 其并联后的总电阻是每个电阻值的一半。  
 假设电阻是 $1\Omega$ :  
 $1\Omega + 1\Omega + 1\Omega/2 = 2\Omega + 0.5\Omega = 2.5\Omega$ ; 显然总电阻偏小  
 假设电阻是 $10\Omega$ :  
 $10\Omega + 10\Omega + 10\Omega/2 = 20\Omega + 5\Omega = 25\Omega$ ; 显然总电阻偏大  
 正确的答案是 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 6\Omega$   
 $6\Omega + 6\Omega - 6\Omega/2 = 12\Omega + 3\Omega = 15\Omega$

## 第13章

# 能量和功率



这幅图和欧姆定律“圆”相似，  
但它是用来进行功率的计算

### 目录

- 能量是做功的能力
- 功率是做功的速度，或者是利用能量的速度
- 更多功率的计算
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

## 能量是做功的能力

电 能可以为我们做什么？当电流流过灯泡，电能使灯发光。电能使马达带动钻头转动、锯条旋转或使电吹风工作。烤箱或电炉灶中的加热元件利用电能产生热量来烹饪食物。电流流过收音机和电视机，把无线电信号转化成声音和图像，这样的例子不胜枚举。

电力公司卖给我们电，并根据我们每月使用多少电来收费。那么他们是根据什么来收取费用的呢？他们统计我们每月使用多少电，这比测量电流或电压更公平，因为电流和电压会不断变化。电力公司使用一种仪表，这种仪

表可以测量你使用电能的多少（电能表就是测量电能的仪表）。

什么是电能？怎样来测量电能？正如小标题所说，能量是做功的能力。做功的多少决定需要多少能量。也许你对这些术语还不熟悉，让我们一起来复习一些基本定义。我们也将通过一些例子来帮助大家更好地理解这些术语。

做功需要两个条件。一是有力作用在物体上，并且物体在这个力的作用下移动一段距离。要计算做了多少功，就用力乘以物体移动的距离。在公制中，功的单位是焦耳。能量是

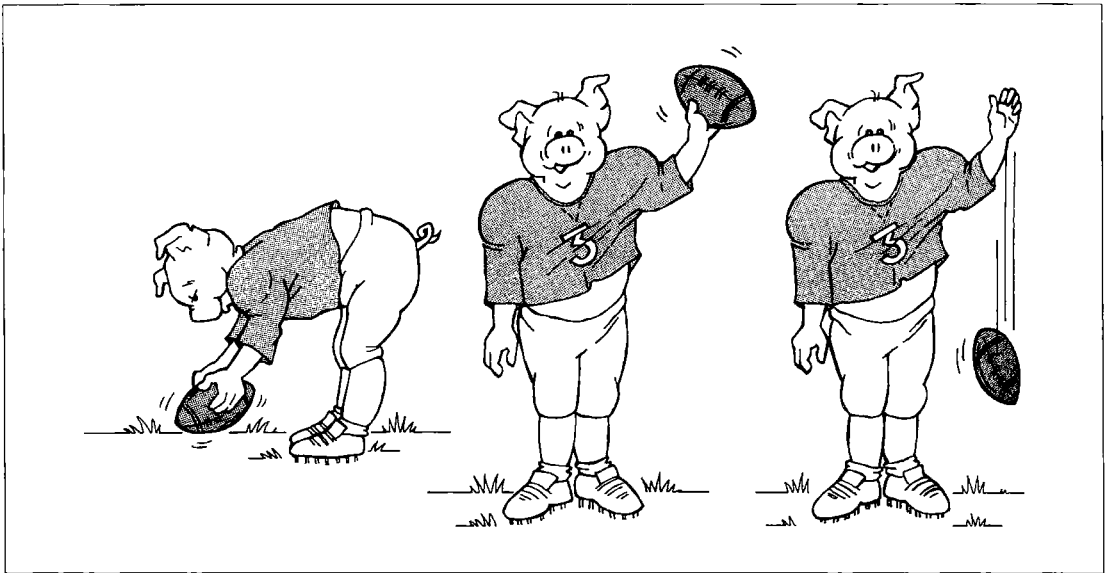


图13-1：通过拿起橄榄球，举过头顶这个动作来帮助我们理解功和能量的含义。当他对橄榄球做功，拿起橄榄球时，他也在球中储存了一些能量，我们把这个能量叫做势能。而后，当他让橄榄球落下时，橄榄球的势能转化成动能，这是由于物体的运动而具有的能。

物体能做多少功的量度。1 焦耳的能量能做 1 焦耳的功。焦耳通常的缩写是 J。

图 13-1 表示的是功和能的简单的例子。捡起一个橄榄球，并把它举过头顶。为了捡起橄榄球，你对球施加的力等于球受到的重力。在公制单位中，假如用 1 牛顿的力，你把球举高 1m，那么你就做了 1J 的功。我们也可以说橄榄球现在具有 1J 的势能。如果让球落下，重力将把它拉回地球。势能是储存在物体中以后可以释放的能。当球落回地面，就会失去本身的一些势能，因为球的高度降低了，球不能再下落更多（记住，功等于力乘以距离）。但是，现在球具有了动能，这是由于运动而具有的能。

这些和电学有什么关系呢？电子可以储存势能。例如，在电池负极的电子具有势能。这是因为当我们把电池连接在电路中时，电池电压将推拉电子通过电路（记住，电压是使电子通过电路的力）。电子也有动能，因为每个原子中的电子绕原子核匀速运动。当一个电子通过电阻后，有较小的电压推拉电子通过余下的电路。欧姆定律告诉我们通过一个电阻后会产生电压降，电压降的大小取决于电流和电阻的大小（ $U=IR$ ）。当电子靠近电池的正极时，电子的势能减小。这和橄榄球相似，当橄榄球接近地面时，球的势能减小。有的电子的能量在电阻中转化成了热能。当电子流过灯泡时，它具有的能量转化成光能（有的也转化成灯泡的热能）。

我们以电池负极的电子储存了一定的能量开始。当电子流过电路，我们发现电子的势能越来越小（见图 13-2）。我们还发现电给了我们其他形式的能量。这是个非常重要的概念，能量的总和不变。能量从一种形式转化成另一种形式，但我们拥有的能量的总和没有发生变

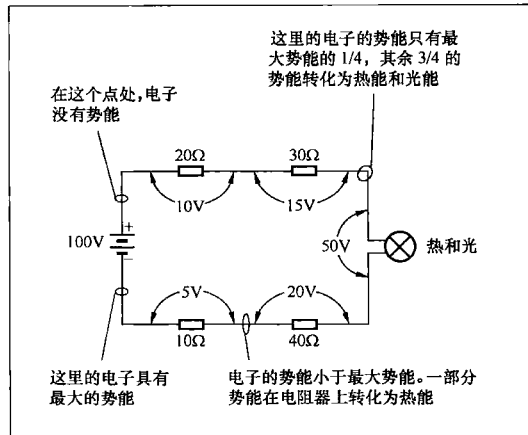


图13-2：从电池的负极离开，经过电路中任何电阻后，电子的势能就会减小。电子在负极具有的势能最大，在正极时势能为0（在这里不要混淆惯称电流的方向和电子流动的方向。对于惯称电流，我们将认为在电池的正极势能最大，和着眼于电子的观察正好相反）。

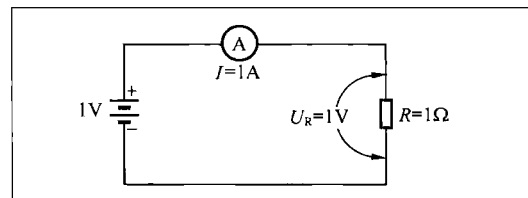


图13-3：这是解释电池每秒做1J功的简单电路图。1J的功使1库仑的电子移动产生1V的电压降。

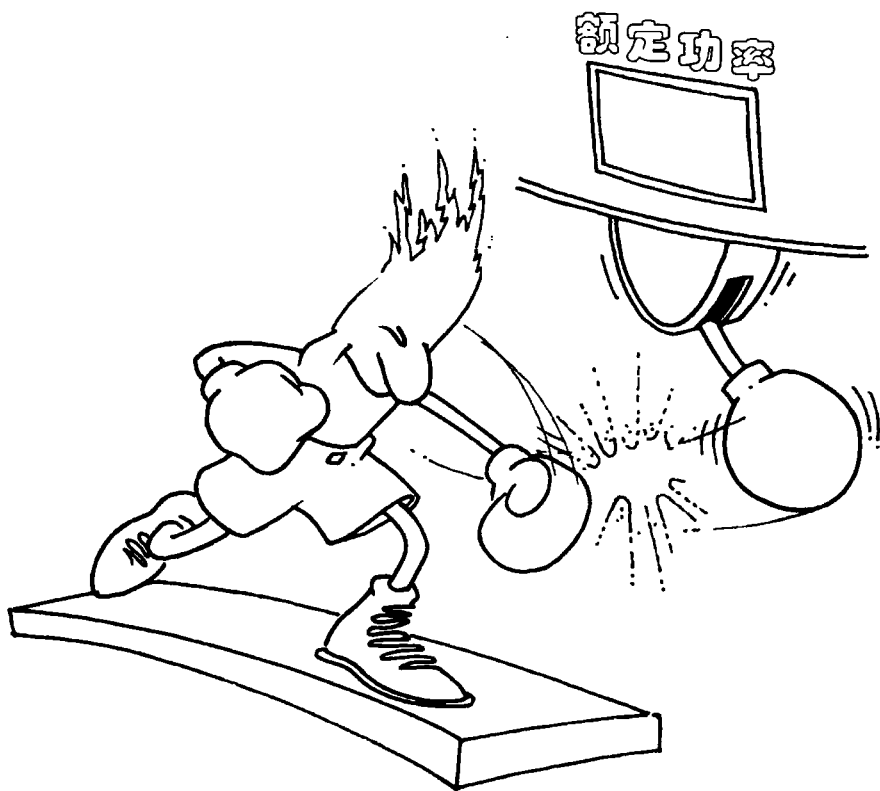
化。科学家把这个原理称为能量守恒原理。做功时能量从一种形式转化成另一种形式，物体做了多少功，就有多少能量发生转化。

前面我们说过，电力公司测量我们消耗多少电能，然后他们根据这个电能的数量来收费。记住我们通常用库仑来量度电荷的数量（或者电子的数量）。1库仑等于 $6.24 \times 10^{18}$ 个电子所带的电量。如果1秒内通过电路导体横截面的电量是1库仑，则电路中的电流大小就是

1A。现在我们已经给你描述了这些重要的概念，我们可以解释 1J 的电能的含义。

假设我们有个图 13-3 所示的电路，电路中电流大小为 1A，经过  $1\Omega$  的电阻后产生 1V 的电压降。当电池推动 1A 的电流经过电阻时，电池每秒钟就做了 1J 的功。从这里你可以想象出 1J 的电能是个很小的量。实际上因为焦

耳这个单位太小，不适合电力公司的使用。他们经常使用一个较大的单位——千瓦时（等于 1000 瓦小时），来计算用户每月使用的电能。我们在后面将给出这个单位的详细定义，不过你现在已经能认出公制中前缀“千”（1000 的意思）和时间的单位小时。



# 功率是做功的速度，或者是利用能量的速度

**图** 13-4 所示的电路每秒钟消耗 2J 的电能，此时我们也可以说电路中电源每秒钟做了 2J 的功。

如果我们仅仅测量能量的多少，并不能告诉我们多少电路中的情况，这就是为什么我们在说明时包括了时间。

假设我们只是说图 13-4 电路中的电池做了 2J 的功，我们也可以说图 13-5 中的电路做了 2J 的功。当然这两个电路彼此相差很大。实际上，图 13-5 的电路中电池 8 秒做 2J 的功（这是图 13-4 电路所花时间的 8 倍）。我们甚至可以画一个电路，这个电路花 1 小时或更长的时间做 2J 的功。要点是不同的电路消耗能量（或者做功）的速度不同，电路在单位时间内做的功给了我们更多电路中重要的信息。

一个专门名词用来定义做功或者使用能量的速度。功率是衡量做功快慢的物理量。如

果物体使用能量的速度是每秒钟 1J，那么功率就是 1 瓦（缩写 W）。大多数读者至少听说过这个名词。詹姆斯·瓦特，一个科学家和发明家，第一个成功建造了蒸汽机，为了纪念他，功率的基本单位用他的名字命名。瓦特是功率中很小的单位，所以我们使用千瓦（1 000W，或 1kW）来度量其值较大的功率。当你在谈及发电厂时，你甚至用兆瓦（MW）来度量它的输出功率。

此时你也许想知道实际中我们如何来测量能量和功率。1J 表示移动 1 库仑的电子产生 1V 的电势（或电压）的改变。1 秒内通过 1 库仑的电子的电量定义为 1A。不需要通过一些数学计算，你可以看出我们依据电压和电流来定义瓦特。我们用电路中的电流乘以这段电路上产生的压降，得到这段电路上的功率。因为我们很容易测量出电流和电压这给我们提供

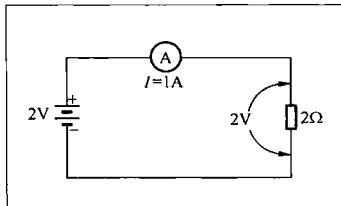


图13-4：这是一个每秒钟消耗2J能量的简单电路图。

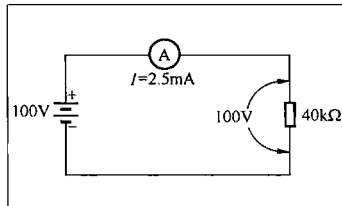


图13-5：这个电路中的电源电压比图13-4中的电源电压大得多。因为电阻较大，这个电池以较小的速度供给电路能量。实际上，这个电路消耗能量的速度是每秒1/4J。

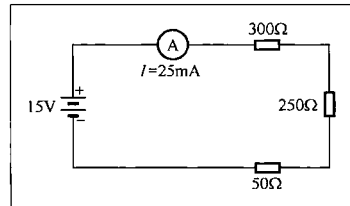


图13-6：你可以通过用电路中的电压乘以电流来计算电路中消耗能量的速度（就是功率）。

一个好的测量功率的实用办法。

我们可以写出计算功率的方程。

$$P = IU \quad (13-1)$$

其中：

$P$  表示功率，单位是瓦 (W)；

$I$  表示电流，单位是安培 (A)；

$U$  表示电压，单位是伏特 (V)。

这也许是最容易记忆的电学公式。再看看字母，拼写起来不像你最喜欢的一种甜点吗？不管它是柠檬蛋糖霜、樱桃裹面包屑或者是南瓜，大多数人都喜欢各种 PIE (馅饼)。一旦你产生这样的联想，你就会一直记住这个计算电功率的公式。

看一看图 13-6。电池在这个电路中的功率是多少？电池电压是 15V，电路中的电流是 25mA。因为方程 13-1 中要求电流的单位是安培，我们必须把 25mA 转换成 0.025A，然后利用方程 13-1，我们得到：

$$P = IU$$

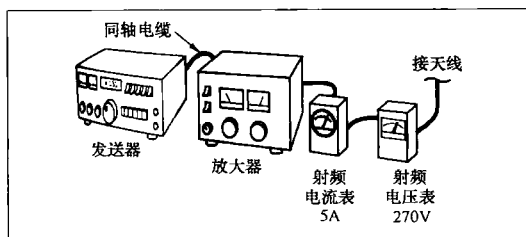


图13-7：这个业余无线电台包括发信机和功率放大器。同时也包含电表用来测量馈线中的射频电流和电压。你可以通过电表显示出的电流乘以电压，求出输出功率。这个放大器提供给天线的功率是1 350W。

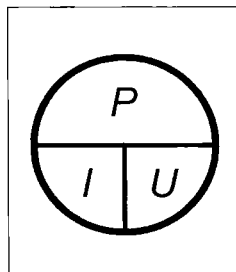
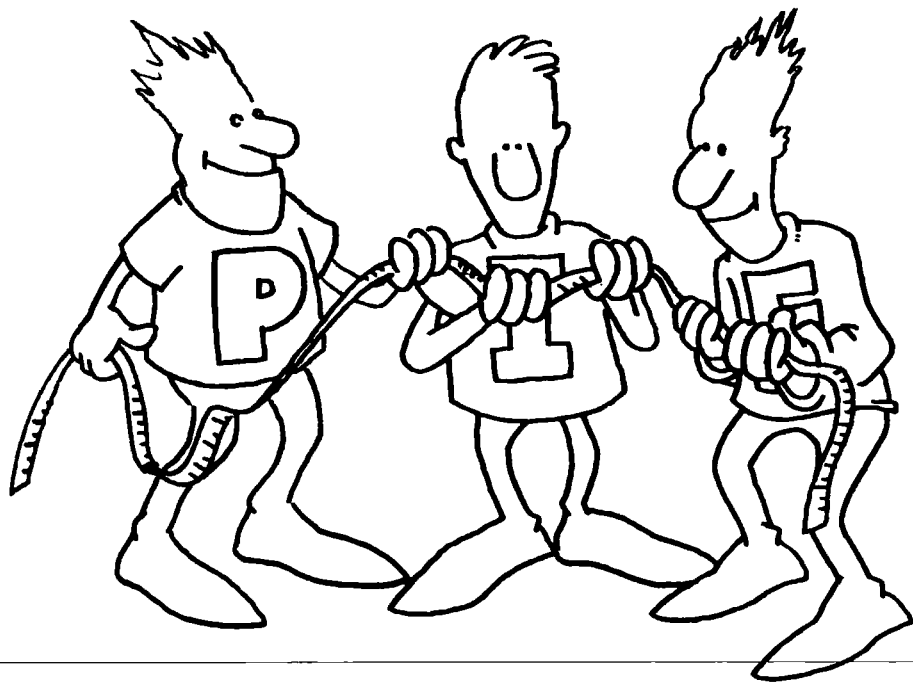


图13-8：“功率圆”给我们提供一个利用简单的功率方程解决3个量中任何一个量的方法。如同欧姆定律“圆”，简单地覆盖要求的量，剩余的两个部分显示你如何计算。利用这个“圆”写出计算功率、电流和电压的方程。





$$P = 0.025\text{A} \times 15\text{V} = 0.375\text{W} \text{ (或 } 375\text{mW)}$$

图 13-7 是一个调制在 20m 波段、14.030MHz 频率下的无线电发信机和功率放大器。连接到天线的馈线上的电表测出从发射机上发出的射频电流。馈线上的电流是 5A，电压表测出的电压是 270V，那么发信机和放大器的输出功率是多大呢？

$$P = IU$$

$$P = 5\text{A} \times 270\text{V} = 1\,350\text{W}$$

你也可以把它用千瓦表示。在这个业余电台中，放大器提供给天线的功率是 1.35kW。如果你知道了电路中的功率、电流或者电压，可以用功率的方程求出第三个量。你可以使用我们利用欧姆定律求电压或电阻的同样方法，用方程 13-1 来求出电流和电压。我们也可以画一个“功率圆”，如图 13-8 中所示。在“功率圆”中，覆盖我们要求的量，再根据剩余部分写出方程。确信你能根据“功率圆”写出方程 13-2 和方程 13-3。

$$I = \frac{P}{U} \quad (13-2)$$

$$U = \frac{P}{I} \quad (13-3)$$

让我们用一个简单的手电筒电路来做例子。我们的手电筒使用一节 6V 的电池，灯泡的固定功率是 2W，那么从电池中流出的电流是多少？从“功率圆”我们可以写出方程 13-2。

$$I = \frac{P}{U}$$
$$I = \frac{2\text{W}}{6\text{V}} = 0.33\text{A}$$

如果你知道功率和电流，你可以用相似的过程求出电路中的电压。

电灯泡（或任何电器）的额定功率描述了使用电能的定额。在白炽灯中，一些能量转化为光能，一些转化为热能。额定功率帮助我们计算出灯泡需要的电流或电压。当然这也告诉我们灯泡要发出多少光。然而，不要指望 75W 的灯泡每秒钟产生 75J 的光能。荧光灯和白炽灯相比发光时产生的热量较小，所以在额定功率下它“浪费”的能量就少。

# 更多功率的计算

如果知道了电路中的电压和电流，完成电路中功率的计算就非常容易。方程 13-4 表示如何完成这个计算。

$$P=IU \quad (13-4)$$

通常，你并非直接知道其中的两个量，然而，你也许可以根据电路条件帮助你计算功率。记住，欧姆定律告诉我们电压、电流和电阻之间的关系。如果你知道电路中的电压和电阻，你可以通过欧姆定律计算出电流，然后从这些量中再求出功率。我们并不需要用代入数字利用欧姆定律求出电流，我们可以用字母符号，用这些符号代入功率方程，这样只需要一步就可以求出功率。这样可以节省时间，减少可能出现的数字错误。

首先，让我们假定我们知道电路中的电压和电阻，利用欧姆定律，我们可以计算出电流。

$$U=IR \quad (13-5)$$

得到

$$I=\frac{P}{U} \quad (13-6)$$

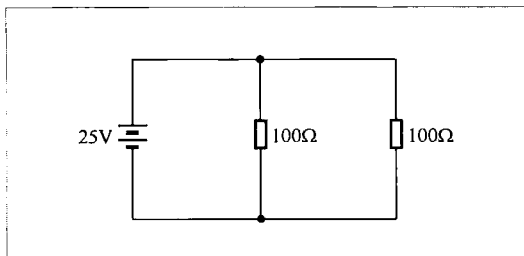


图13-9：求出电池提供给电路的功率。首先你必须求出并联电阻的等效电阻，课文中讲解了计算功率的步骤。

如果我们把这个电流表达式代入功率方程，将得到在这些条件下计算功率的单独的方程。

$$P=\frac{U}{R} \times U=\frac{U^2}{R} \quad (13-7)$$

图 13-9 显示的是包含电源电压和两个并联电阻的简单并联电路。在这个电路中，电源电压提供给电路多大的功率呢？电源电压是 25V，两个电阻的等效电阻是 50Ω（要确信你能计算出等效电阻，如果需要帮助，可参考本书中关于基尔霍夫定律章节）。

利用方程 13-7 计算这个电路的功率。

$$P=\frac{U^2}{R}$$

$$P=\frac{(25V)^2}{50\Omega}=\frac{625V^2}{50\Omega}$$

$$P=12.5W$$

假设我们知道电路中的电流，但不知道其电压，如果我们也知道它的电阻，我们能求出功率吗？当然可以。看图 13-10，这是一个串联电路，我们知道了它的电流和电阻（至少我

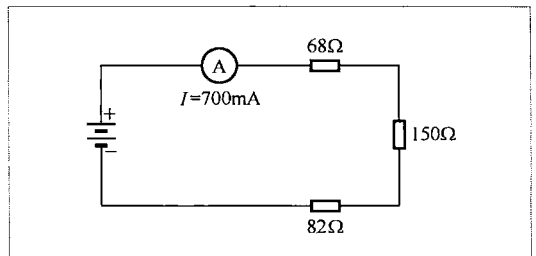


图13-10：电池提供给这个串联电路的功率是多大呢？在求解这个串联电路的等效电阻时，你会碰到少许麻烦。

们可以很容易地算出它的等效电阻)。电流表显示电流为 700mA, 当我们把电阻合并成一个等效电阻时, 得到的阻值是 300Ω。首先我们找出求功率的方程。利用欧姆定律, 我们可以找到电路电压。

$$U = IR$$

接着, 我们可以把这个电压表达式代入功率方程。

$$P = IU$$

$$P = I \times IR = I^2 R$$

$$P = (0.700A)^2 \times 300\Omega$$

$$P = 0.49A^2 \times 300\Omega = 147W$$

方程 13-7 和方程 13-8 是重要的功率变形公式。正如你在这里学到的, 你可以把欧姆定律和基本的功率方程结合在一起得到这些方程。这两个方程非常重要, 你必须和基本功率方程一起记住它们。

让我们来做一些复杂点的问题。图 13-11 显示的是另一个由电源和 3 个电阻串联连接的电路。电源是一个 12V 的电池, 但电路中没有给出电流。电阻值分别是 8 200Ω、1 500Ω 和 1 200Ω, 那么电池提供给电路的功率是多少呢? 首先, 你要计算出电路的等效电阻, 结果是 10.9kΩ (10 900Ω)。现在, 因为我们知道了电阻和电压, 我们可以用方程 13-7 来计算

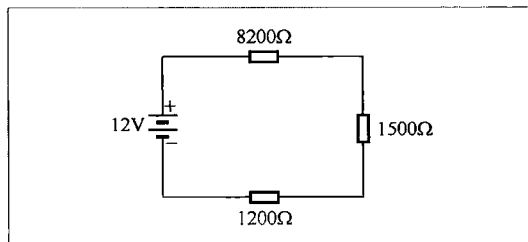


图13-11: 在这个串联电路中, 电路图中标出了电源和3个电阻的大小, 我们必须求出3个电阻的等效电阻, 然后再求出电源提供给电路的功率。

电池的功率。

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = \frac{(12V)^2}{10.9 \times 10^3 \Omega} = 0.0132W$$

这是个相当小的功率。因为瓦是公制单位, 我们可以在单位前加上公制前缀, 这样我们可以把功率写成  $13.2 \times 10^{-3}W$ 。这将有助于了解我们常用的较小的功率数量级的公制前缀。

$$P = 13.2 \times 10^{-3}W = 13.2mW$$

图 13-12 所示的较复杂的电路需要由你来解决。有一个电流表测量电路电流, 其指针指向 1.5mA, 如果电阻一个为 390kΩ 一个为 0.15MΩ, 则电路的等效电阻是多少? 电路中的功率是多少毫瓦?

因为这些电阻是并联连接, 我们必须把它们的倒数相加, 然后取结果的倒数。当然你一定要确信你熟悉并联电阻的计算。将你的结果四舍五入, 保留 3 位数, 这样得到等效电阻是 108kΩ。现在你准备用方程 13-8 来计算电路中的功率。

$$P = I \times IR = I^2 R$$

$$P = (1.5 \times 10^{-3}A)^2 \times 108k\Omega$$

$$P = 2.25 \times 10^{-6}A^2 \times 108 \times 10^3\Omega$$

$$P = 0.243W = 243 \times 10^{-3}W = 243mW$$

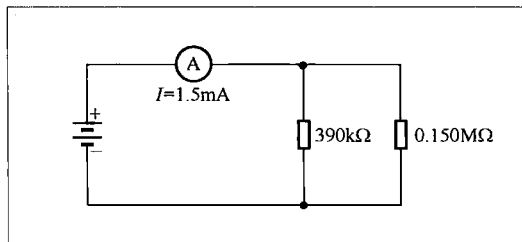


图13-12: 找出一个等效电阻代替电路中的两个并联连接的电阻, 然后计算出电池提供给电路的功率。

# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 13 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以他们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

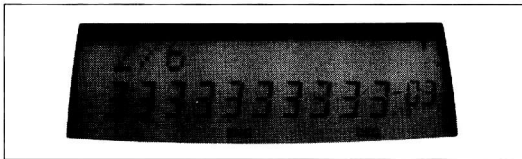
### 例题一

$$I = \frac{P}{U} \quad (13-2)$$

$$I = \frac{2\text{W}}{6\text{V}} = 0.33\text{A}$$

计算器按键：2 ÷ 6 =

计算器第二行显示结果：333.333 × 10<sup>-03</sup>



[ 请注意，10<sup>-03</sup> = 10<sup>-3</sup> = 0.001，所以，333 × 10<sup>-03</sup> = 333 × 0.001 = 0.333 ]

### 例题二

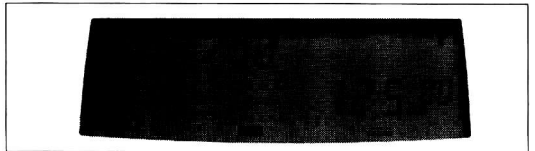
$$P = \frac{U^2}{R} \quad (13-6)$$

$$P = \frac{(25\text{V})^2}{50\ \Omega} = \frac{625\text{V}^2}{50\ \Omega}$$

$$P = 12.5\text{W}$$

计算器按键：25x<sup>2</sup> ÷ 50 =

计算器第二行显示结果：12.5 × 10<sup>00</sup>



[ 请注意，10<sup>00</sup> = 10<sup>0</sup> = 1，所以，12.5 × 10<sup>00</sup> = 12.5 × 1 = 12.5 (W) ]

### 例题三

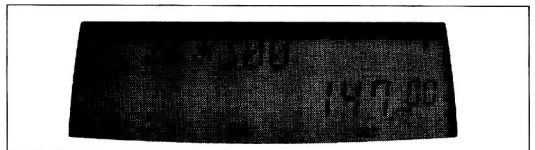
$$P = I \times U$$

$$P = I \times IR = I^2 R \quad (13-7)$$

$$P = (0.700\text{A})^2 \times 300\ \Omega$$

$$P = 0.490\text{A}^2 \times 300\ \Omega = 147\text{W}$$

计算器按键：.7x<sup>2</sup> × 300 =



计算器第二行显示结果：147 × 10<sup>00</sup> 或者 147 (W)

复习检测：-----

13.1 能量的单位是：

- a) 瓦特
- b) 伏特
- c) 安培
- d) 焦耳

13.2 用你自己的语言解释能量和功率的不同之处。

13.3 一台加热器，设计的工作电压为120V，可以将1500W的电能转化成热能（在寒冷冬天的夜晚给你的脚取暖）。请问有多大的电流通过这个加热器？

13.4 埃尔伍德正在学习电子学，他将一个 $10\Omega$ ， $0.5W$ 的电阻（这个功率是指该电阻能在安全范围内能够消耗的最大功率），连接在电压为12V的电池的两端。利用你所学习的关于功率的知识，预测将发生什么。

13.5 埃尔伍德从 $10\Omega$ ， $0.5W$ 的电阻上了解了一点知识（看上面一个问题），他将在120V下工作的1500W加热器带到欧洲（那里很多国家的电压是240V），埃尔伍德将加热器插在240V电压的插座上，然后合上开关，接下来将发生什么？

答案：-----

13.1 d

13.2 能量是能够做功的能力。一节1号电池以化学能的形式储存能量，它可以转化成一定数量的电能。一节1号电池可以点亮手电筒的灯泡，大约工作24小时。如果将2个手电筒的灯泡并联接入一节1号电池的两端，它们消耗的时间将减半，大约12小时，10个手电筒的灯泡消耗的时间大约是2.4小时。所以，功率是使用电能的速度。一个100W的灯泡点亮10小时，消耗同样的电能（千瓦时），一台500W的加热器大约工作2小时，或者1000W的功率工作1小时。在这种情况下，功率以瓦做单位，能量的单位是千瓦时。

13.3 当然，如果加热器被关闭，零电流通过，不过你的脚趾很冷。当打开加热器，我们可以计算出电流： $P = U \times I$ ，所以 $I = P/U = 1500W/120V = 12.5A$ 。

13.4  $P = U^2/R$ ，所以埃尔伍德的电阻将消耗的电能（意思是转化成内能） $P = (12V)^2/(10\Omega) = 144/10 = 14.4W$ 。这个可怜的 $1/2W$ 的电阻将很快变成LER（发光电阻）和SER（烟雾发生电阻），因为它转化的热量大约是它能承受的安全功率的29倍（ $14.4W/0.5W$ ）。

13.5 这个加热器设计在120V的电压下工作（在120V电压下产生1500W的加热功率），工作的电流是12.5A（ $P = U \times I = 120V \times 12.5A = 1500W$ ）。参看问题13.3以及其答案。当埃尔伍德将这个加热器插入它设计工作电压2倍的电路上，加热器的电流是其120V的设计工作电压下的2倍。现在的功率是 $P = U \times I = (2 \times 120V) \times (2 \times 12.5A) = 6000W$ ！如果比较幸运的话，加热器将把保险丝熔断，否则，它会由于发热而发光，甚至发生火灾。想想这个问题：如果一个欧洲的加热器，设计的工作电压是240V，在此电压下发热功率是1500W，将它插入美国的插座，将发生什么情况？

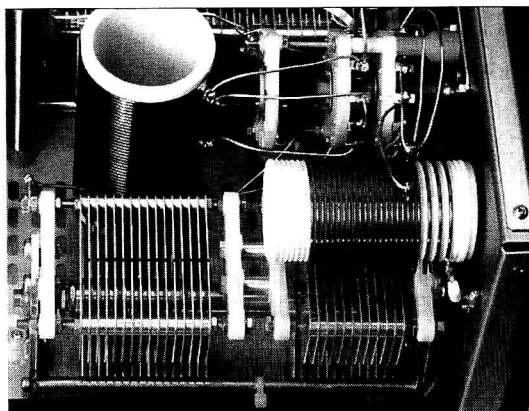
## 第三单元

# 交流电路概念

在第二单元中，我们学习了稳定不变的电压和电流，利用电学原理，通过这些稳定的电压计算出电路状态。现在我们来学习变化的电压和电流。

我们学习直流电路时，已经了解了电路电阻。当所有信号都是稳定不变的信号时，电阻是一个重要的电路条件。然而，大多数电路包含的信号往往都在不断地改变。电路中即使电流方向不变，其大小也可能会随时间的变化而增大和减小。其他电路中电流的方向也常常不断地改变。我们把方向发生改变的信号叫做交流（AC）信号。

电感器和电容器是变化信号的电路中用



电感器和电容器在电路中具有改变信号的特殊作用，我们将在本单元中研究它们

于特殊目的的元件。它们帮助引导直流和交流信号分别到达电路中的适当部分。当电流通过时，这些元件阻碍电流的改变，我们称为电抗。电抗用来控制电路中交流电的大小。

为了掌握电容器和电感器如何工作，了解电场和磁场非常重要。这些元件以电场和磁场的形式存储能量。当信号通过电感器或电容器时，磁场或电场将会发生改变。

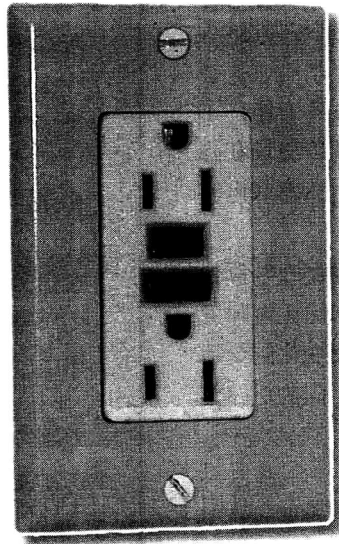
在本单元中我们研究的大多数信号都会随时间有规律地变化，这样的信号比无规律变化的信号容易研究。我们把有规律变化的交流信号叫正弦波。交流电电子学是不同的电路元件对正弦信号的研究。

### 在这一单元你将学习：

- √所有的交流信号都确定的波长和频率
- √什么是电容器以及它们是如何影响各类信号的
- √电容器表现出对交流信号特有的阻碍作用，这种特有的阻碍作用叫做电抗
- √什么是电感器以及它们是如何影响各类信号的
- √电感器也表现出对交流信号的阻碍作用——感抗。你还要学习电感性电抗（感抗）和电容性电抗（容抗）两者的差别
- √关于电容器、电感器的品质因数以及电路的 $Q$ 值
- √变压器是如何把输入信号的电压和电流变大或变小的
- √关于电路中电阻和电抗的组合效果——阻抗
- √当电路中串联或并联的感抗和容抗相等时，我们称这个电路是谐振电路

## 第14章

# 什么是交流电（AC）？



我们每天都在使用  
交流电（AC）

### 目录

- 直流信号的电流只沿一个方向流动
- 电流可以恒定不变，也可以改变
- 复习检测



# 直流信号的电流只沿一个方向流动

在第二单元中，你学到了很多重要的电学原理，学习了电压、电流和电阻。你还研究了两种形式的电路：串联电路和并联电路。欧姆定律与基尔霍夫电压与电流定律帮助你分析与计算电路。

在上述电路中，我们使用的是电压稳定不变的电源给这些电路提供电流。电流在经过电路时不发生变化。利用稳定不变的电流，你很容易理解这些电学原理，直流电源为电路提供的是不变的电流。

电池是最普通的直流电源。图 14-1 是一个简单电路的电路图。有电池、1 个开关和 2 个电阻。按惯称电流方向，电流从电池的正极流出，经过电路然后回到电池的负极。电路中电子移动的方向和惯称电流的方向相反。

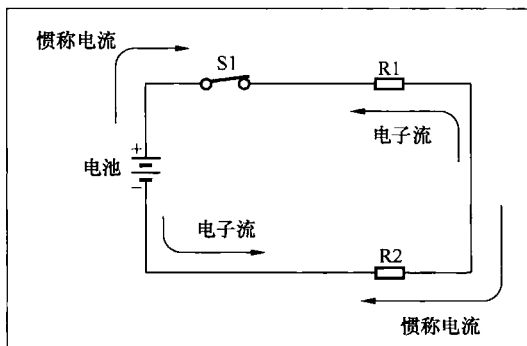


图 14-1：这个简单的直流电路有着稳定不变的电流。电子从电池的负极流出，经过电路回到电池的正极。

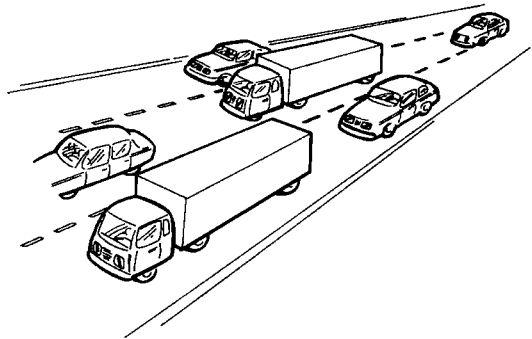


图 14-2：你可以把简单的直流电路想象成类似于一条高速公路，所有的车在相同的速度下向同一个方向运动。

把电路假想为 4 车道高速公路，你的车道上的车都按同一个方向运动，大多数车在限定的车速上前进，所以你的车按照稳定的速度移动，这条高速公路就像一个直流电路，汽车就像在电路中移动的电子，所有的电子都在几乎相同的速度下向同一个方向移动。

研究高速公路上的交通模式非常容易，同样研究电子在简单直流电路中的移动也非常容易。

然而，大多数道路不像我们的高速公路。交通速度的加快和减慢取决于交通量和道路状况。同样，只有很少的电路会像简单直流电路那样。为了理解更复杂的电路，我们将用已经学过的最基本的原理去研究电路中电压和电流变化时发生的情况。在下面的几个章节中，我们将研究电压和电流变化的电路。

# 电流可以恒定不变，也可以改变

到目前为止，我们学习的电路中的电流都是恒定不变的。但是，大多数电路中的电流会随电路状态的变化发生改变。最简单的改变是电路中有一个开关，当我们闭合开关，有电流流过电路，而当我们断开开关时，电路中就没有电流。

图 14-3 是一个最简单的用开关控制接通电池或断开电池的电路。电路中电压表测量电阻两端的电压，电流表测量流过电阻的电流。

电路中开关断开，电阻两端没有电压，而当我们闭合开关时，电阻两端的电压立刻变成 12V。当电路中开关断开，电路中没有电流通过，而当我们开关闭合时，电流表的立即变成了 10mA。显然这个电路具有变化的电流和电压。

现在假设我们每 10 秒改变一次开关的状态。图 14-4 中画出了电阻两端电压和电路中

电流随时间变化的图像。注意，图像左侧纵轴表示的是电压，而右侧的纵轴表示的是电流。随着每次开关的断开和闭合，电压和电流都发生改变，所以这个图像同时表示了两个量。

当我们提及电流或电压的波形时，我们所指的是信号的电压或电流形状。图 14-4 中显示的是一个矩形波信号。

你在高速公路上行驶时碰到过收费站吗？在有些收费的公路上，每隔一段距离你要在收费站前停车，缴纳一点费用。你可把这种收费的公路类似看作图 14-3 中的电路。在两个收费站之间，就像电路畅通，你在高速公路上开车前进，而当你到达一个收费站时，就像开关断开，交通必须停止。

和交流电不同，你的车不是立刻停止，而是需要花点时间去踩刹车，使车减速。当然同样车也不可能从每小时 0 英里立即加速到

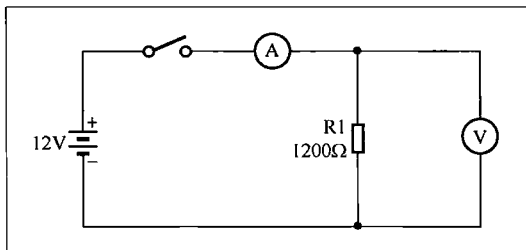


图14-3：每次你改变开关的状态，这个电路中的电压和电流就会发生改变。电压表测量电阻两端的电压，电流表测量流过电阻的电流。

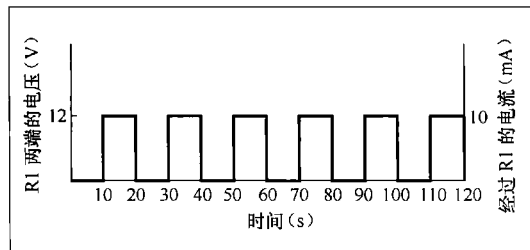


图14-4：假设我们在图14-3的电路中每10秒改变一次开关的状态。横轴或称为x轴表示时间，每10秒一个间隔，左边纵轴或称y轴表示的是电压表显示的电阻两端的电压，而右边的y轴表示的是电流表显示的经过电阻R1的电流。

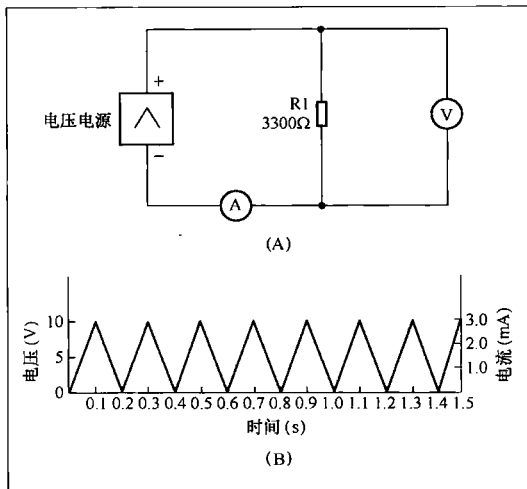


图14-5: 图14-5 (A) 部分表示的是一个电源电压有规律逐渐增大和逐渐减小的电路。这个电源产生三角形波形。图14-5 (B) 部分显示的是这个三角形波形的电压和电流。

65 英里，车需要几秒钟的时间达到正常前进速度。

有些电路中电压和电流是逐渐增大，即使减小也是逐渐减小。图 14-5 (A) 中是一个电源电压会逐渐增大和逐渐减小的电路。我们把这种电源用一个方块表示，取代普通电池符号。图中 (B) 表示的是从这个电源输出的电压和电流，输出的信号有点像一连串的三角形，我们称为三角波，你会感到吃惊吗？

改变电压和电流的方法很多。有的波形简单，就像我们刚才研究过的，有的波形比较复杂，流动时没有规律的形状。只要电子按照一个方向经过电路，我们就说这是个直流信号。

复习检测：-----

14.1 “AC” 缩写的意思是：

- a) 全部清除
- b) 交流电
- c) 逆时针
- d) 艾伯特·加缪

14.4 如果电路中的电流只沿一个方向移动，这种电流称为：

- a) DC
- b) LC
- c) AC
- d) RC

14.2 阻止电流或电压改变的电路元件的名称是：

- a) 共振
- b) 磁阻
- c) 拒绝
- d) 电抗

答案：-----

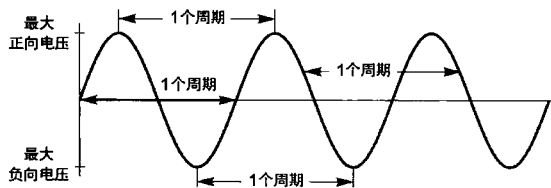
14.3 信号发生器产生一个电压，这个电压跳到+5V，然后跳到-5V，周而复始。如果在+5V所用时间和-5V所用时间相等，那么这个信号称为：

- a) 三角形波
- b) 正弦波
- c) 方波
- d) 指数波

- 14.1 b
- 14.2 d
- 14.3 c
- 14.4 a

## 第15章

# 频率、周期和交流的例子



这个正弦交流电波形显示了几个周期

### 目录

- 如果电流改变方向，就变成了交流电信号
- 平稳变化的交流电是一个正弦波
- 正弦波和旋转车轮
- 旋转速度和波的频率有关
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

# 如果电流改变方向，就变成了交流电信号

前面两节，我们用高速公路作为例子来研究直流电路。这一节我们将用高速公路的其他例子来研究改变电流方向的电路。取代驾车前进作为例子，而是假设你是一座大桥的收费员。你的收费广场在桥的东端。每个方向

有3股车道通过大桥。

图 15-1 显示的是你的收费广场。收费广场上有 9 个收费亭和穿过广场的 10 股车道。作为一名收费员，你控制着一股车道上的红灯停，绿灯行。图 15-1 中显示有 4 股车道对

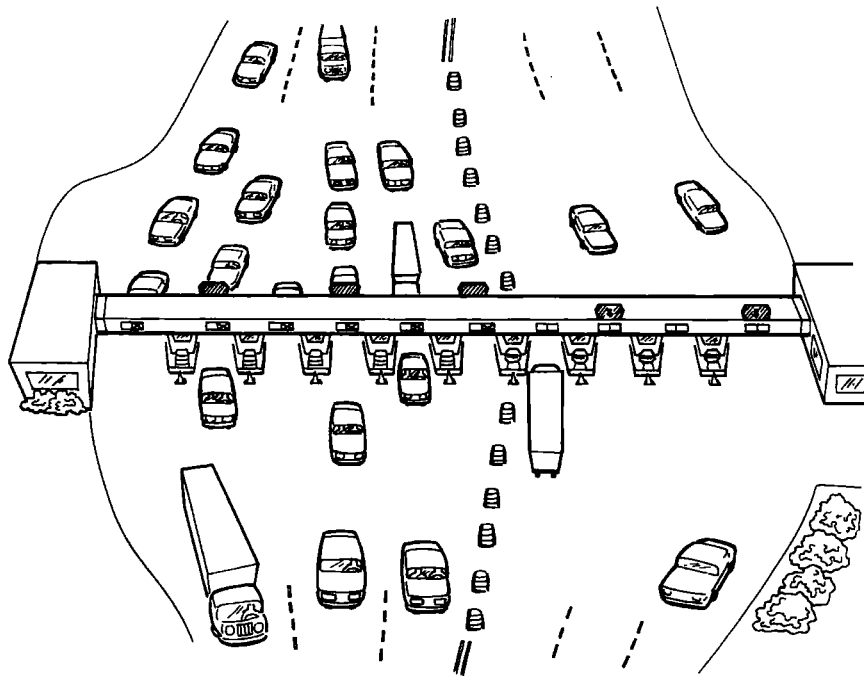


图 15-1：通过大桥收费广场的操作可以帮助你理解变化方向的电压和电流的电路。当车辆向东行驶时，在图中表示为由底部向广场靠近。这些车刚刚经过大桥。当它们接近广场时，它们看到红灯和绿灯。它们可以通过绿灯的车道，而那些红灯的车道是为相反方向行驶的车辆开放的。当它们向西行驶时，图中显示是从顶部向广场靠近。如图中显示，有 6 股车道为向西行驶的车辆开放，而只有 4 股车道为向东行驶的车辆放行。过了一段时间后，向西放行的 2 股车道关闭而改成为向东行驶的车辆放行。车辆经过的这 2 股车道变成了相反的通行方向。这 2 股车道的通行方向的改变，取决于每个方向上的车流量的多少。

由西而来的车辆放行（这是从图中底部开出）。有 6 股车道对由东而来的车辆放行。现在由东而来的车辆很多，所以此时中间的车道为这个方向的车辆放行。

几个小时后，大多数车辆是由西而来，此时大桥上交通量放缓，你意识到这是因为开放的 4 股车道不能让车辆迅速通过。而由东而来的车辆很少，所以那 6 股车道几乎是空的。

你在中间的收费亭，因此你决定改变你收费亭两边的车道的信号灯。首先你把由东向西方向的绿灯改成红灯，然后你再把由西向东的红灯改成绿灯。立刻，一些车辆离开拥挤的车道，驶到你刚开放的两股新车道上。现在有 6 股车道为西向东的车辆开放，而只有 4 股车道为西行的车辆开放。

在你改变信号灯的时候，中间两股车道的交通方向发生了改变。汽车在同一股车道上同

时只能沿同一方向前进。你可以通过转换信号灯来改变车道上车辆的通行方向。

有些电路和这个例子很相像。电路中电子可以沿一个方向运动，在一个很短的时间后它们能改变方向，沿电路中的另一个方向运动。如果电子首先沿一个方向运动接着又改变成沿另一个方向运动，我们称为交流电。我们把交流电简写成 AC。

图 15-2 中 (A) 部分显示的是一个交流信号的电路。这是个包括一个电源和两个电阻的简单电路，这次我们把电阻并联连接，我们用有两个电极的盒子表示电源。注意，当盒子顶部的电极为正极时，底部的一个电极就是负极，而当顶部的电极为负极时，底部的一个电极就是正极。

图 15-2 (B) 是电阻两端的电压和经过电阻的电流的图像。每秒钟电压的极性改变 10 次

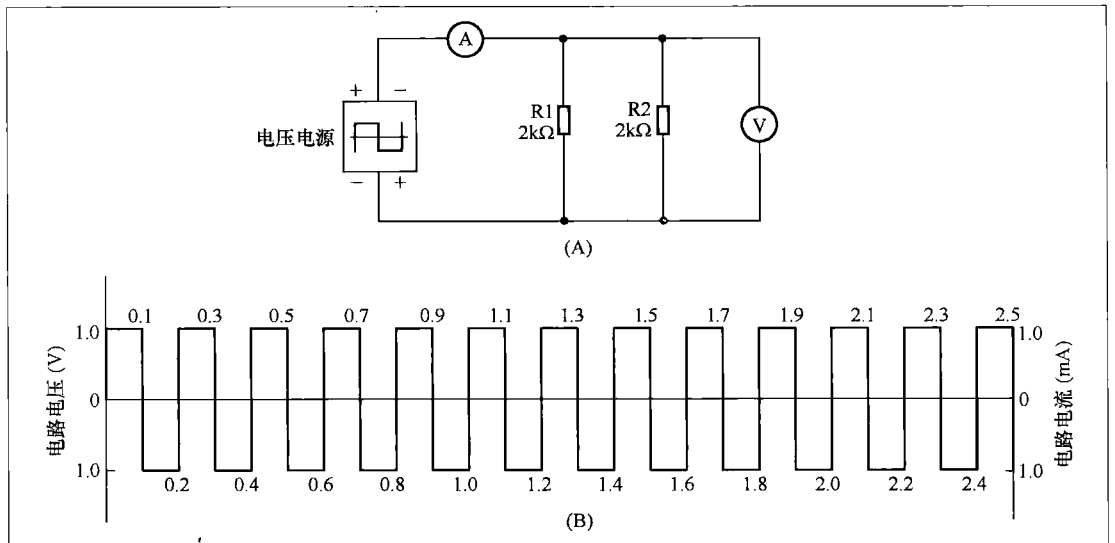


图 15-2：在图 (A) 电路中，电源电压的极性每秒钟翻转 10 次，两个电阻并联相接，电压表和电流表用来测量电路的状态。(B) 图表示电阻器两端的电压和总的电路电流。

次，而当电压的极性改变时，电流的方向也跟着发生改变。让我们先把电源的顶部作为正极，底部作为负极。在图 15-2 (B) 中画为正电压，惯称电流沿顺时针方向流过电路从电源正极流向负极，在图 15-2 (B) 中画为正电流。

十分之一秒后电源的极性改变，现在电源的顶部为负极，底部为正极。在图中画为负电压，电流也是负值，因此电流沿逆时针方向，仍然从正极流向负极。

你必须学习交流电路中的一些重要的定义。在你继续学习电子学时，你会经常听到这些名词。交流信号的波形指的是电压或电流随时间变化的形状。图 15-2 (B) 中的电源产生的是一个方形（或称矩形）的波形，我们称为方波信号。

很多交流信号具有规律的重复形状。看图 15-2 (B)，从正信号开始，变成负信号，接着又变成正信号。这表示了波的一个完整循环。

波完成一个完整循环所用的时间叫波的周期。我们用时间来测量周期，所以用大写字母  $T$  来简写周期。图 15-2 (B) 中，波每 0.1 秒改变一次极性，这意味着用了 0.2 秒完成一次从正极到负极然后再回到正极的循环。在这个例子中波的周期就是 0.2 秒。

波的频率是指 1 秒内波完成周期性变化的次数。频率是周期的倒数。你还记得怎样求一个数的倒数吗？用 1 除以这个数即可。你的计算器上可能有一个标有“1/x”的键，可以很容易求出倒数。

---

**频率的基本单位是赫兹，这个单位是为了纪念海因里希·鲁道夫·赫兹（1857—1894 年），这位德国科学家在世界上第一个演示了无线电波的发送和接收。**

---

我们用赫兹作为测量频率的单位，简写为 Hz。你可以把公制中的任何一个前缀和这个单位组合，千赫 (kHz) 是 1 000Hz，或者 1 秒内有 1 000 个完整的周期。5 兆赫 (MHz) 指每秒内有 500 万个周期。

$$f = \frac{1}{T} \quad (15-1)$$

其中， $T$  的单位是秒，则频率的单位是赫兹。

现在让我们用方程 15-1 来计算图 15-2 中波的频率。

$$f = \frac{1}{0.2\text{s}} = \frac{5}{\text{s}} = 5\text{Hz}$$

这个方波的周期是 0.2 秒，频率是 5Hz。

## 平稳变化的交流电是一个正弦波

在研究交流电时你将会学到，电压的大小有时是逐渐而不是突然地改变。电压和电流的极性也是逐渐地变化的。很多波形都可以表示交流信号，除了方波，你可以发现有的电路是三角波形，你甚至可以发现还有锯齿波信号。图 15-3 显示的是几个可能的交流电波形。

在电子学中，你最常见的交流电波形是正弦波。正弦波电压值在正峰值和负峰值之间逐渐变化。在正弦波中没有突然的改变或者“棱角”。图 15-4 中是一个正弦波电压或电流的波形图。图中，从波穿过基准线向正极端运动开始，标出一个完成的周期。注意，当波再次穿过基准线时，周期并没有结束。此时，波只是完成了正半周的周期，准备开始进入负半周。

当电压或者电流在正极峰值时，我们开始标出另一个完整的周期。不论从哪里开始测量周期，只要你测量到再次出现时的同一个点上。

交流信号经过导体和直流信号经过导体的情况大致相同。交流信号还产生电磁辐射，我们经常称电磁辐射为无线电波。可见光、紫外线、X 射线、伽马射线和其他种类的辐射都属于电磁辐射。

从前面关于频率的讨论中，你一定已经认识到，变化的电流和电压能以任何可以想象的速度改变方向。有的信号频率低，电力公司提供给你家中的就是 60Hz 的交流电（注：中国电力网交流电的频率是 50Hz）。有的信号有很高的频率，比如无线电信号，可以产生和发送超过几兆赫的频率。

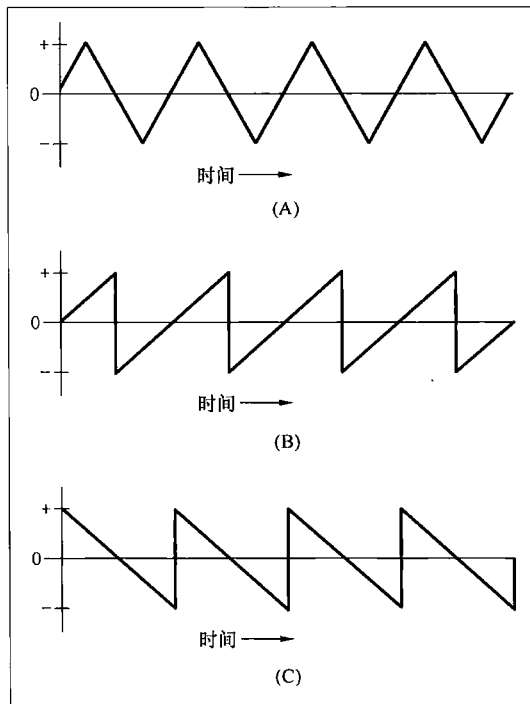


图 15-3：这些图表示的是几种交流电的波形。在图 15-3 (A) 中的信号是三角形波形，(B) 中是锯齿形斜坡波形。电压从负峰值之间增大，当它到达它正峰值时（或电流）突然下降到负峰值。然后电压（或电流）再开始逐渐增加。图 15-3 (C) 中的信号是反向锯齿形波形。在这个例子中，电压突然增加到它的正峰值，然后逐渐降低到它的负峰值。

如果你知道交流信号的频率，你可以用频率来描述这个信号。比如，你的烤箱使用频率为 60Hz 的电力。你喜欢的调幅广播电台的频率可能是 1 080kHz。也许你喜欢在 145MHz 的业余无线电波段上操作。所有这些频率描述了



详细的信号。

波长是另一个经常和交流信号联系在一起的数量。正如名称上所包含的，波长是指波在一个周期内通过的距离，我们用小写的希腊字母  $\lambda$  表示波长。所有电磁波辐射都以  $300\,000\,000\text{m/s}$  的光速穿过空间，你可以用科学记数法表示为  $3.00 \times 10^8\text{m/s}$ 。

信号的频率越高，它的波长就越短。有一个关于信号的频率、波长和光速之间关系的方程，即

$$c = f\lambda \quad (15-2)$$

这里：

$c$  是光速， $3.00 \times 10^8\text{m/s}$ ；

$f$  是波的频率，单位是赫兹 (Hz)；

$\lambda$  是波长，单位是米 (m)。

你可以画出这个方程的“圆”。方程“圆”将帮助你解决频率或波长的方程。利用图 15-5 的方程“圆”写出方程 15-2 和方程 15-4，即

$$f = c/\lambda \quad (15-3)$$

$$\lambda = c/f \quad (15-4)$$

从这些方程中你将看到，频率增高，波长减小，频率降低，波长变长。

利用方程 15-4 求出频率为  $7.125\text{MHz}$  的无线电信号的波长（记住把频率的单位兆赫换算成赫兹），即

$$\lambda = c/f$$

$$\lambda = \frac{3.00 \times 10^8\text{m/s}}{7.125 \times 10^6\text{Hz}} = 42.1\text{m}$$

另一个例子，用方程 15-3 求出波长为  $80.5\text{m}$  的无线电信号的频率为

$$f = c/\lambda$$

$$f = \frac{3.00 \times 10^8\text{m/s}}{80.5\text{m}} = 3.727 \times 10^6\text{Hz} = 3.727\text{MHz}$$

你还应该熟悉其他几个交流电电流和电

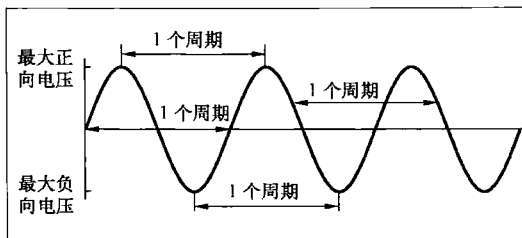


图15-4：这是正弦波交流电的波形。这是交流信号中最常见的一种波形。在波形上不同点划分了周期。注意，从哪个点开始测量周期无关紧要，无论你从哪里开始作为起点，你必须测量到下一次波形中出现的同样的位置。

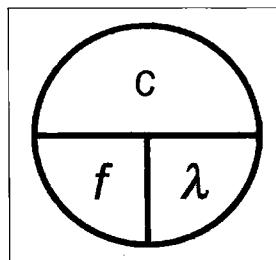


图15-5：这是电磁辐射或者无线电波的速度、频率和波长关系的方程“圆”。用手覆盖住你想计算的量，则“圆”中剩余部分表示如何去计算。

压的测量方法。交流电波形图显示了电压和电流随时间变化。从我们已经见过的波形图来看，波形图半周为正值，另半周为负值。这有什么好处？负值部分抵消了正值部分的作用了吗？电子就在导线中来来回回地运动，从没有准备运动到其他地方去吗？在我们开始研究交流信号时，你也许就问过了这样的问题。

如果你把直流电用的电压表去测量交流信号的电压，电压表的读数为 0。的确，一半的时间，表的指针要向正极偏转，而另一半时间指针要向负极偏转，因此，我们不能用测量直流电的电压表去测量交流电电压（同样的原因，我们不能用测量直流电的电流表去测量交流电电流）。

测量交流电电压和电流的电表可以使用二极管把交流信号转变成直流信号。当二极管把交流信号转化成直流信号时，我们说二极管整流交流信号（在第四单元，你将学习更多关于二极管的知识，以及二极管如何整流交流信号）。制造商调整了电表上的刻度以读出适当的值。大多数交流电表显示的是电压和电流的有效值。什么是有效值呢？先让直流电通过电阻，例如，我们使用 1A 的电流，测出电阻产生的热量，接着，让交流电通过电阻，调节电流大小，直到它产生和刚才的直流电相同的热量效果，这样你得到就是 1A 的有效值电流（我们也可以用这样的测量方法确定交流电的等效电压）。

等效值电压或电流的另一个名字叫均方根 (RMS) 值电压或电流（亦称为有效值）。这个名字来自于数学上的取值方法。这些字母表示 Root Mean Square。Mean 是平均值的数学术语，这个数学计算超出了我们这本书的范围。在涉及交流信号时，你会经常听到均方根电压或均方根电流这个术语。

相对于交流电电压或电流的峰值，每个交流电波的均方根值各不相同。你必须熟悉正弦波的值，因为在交流电中你会经常看到。正弦波电压或电流的均方根值等于它们峰值的 0.707 倍。如果一个正弦波电压的峰值是 100V，那么它的均方根电压就是 70.7V（这个信号也要达到 100V 的负峰值）。这个正弦波信号的峰间电压是 200V。图 15-6 的图表中指出了正弦波信号的峰值、峰间值和均方根值。

$$\text{均方根值} = 0.707 \times \text{峰值} \quad (15-5)$$

这个方程可应用于正弦波电压和电流。

大多数电表显示的值对应于整流后交流信号的平均值。对于正弦波，这个平均值是峰

值的 0.637 倍。

$$\text{平均值} = 0.637 \times \text{峰值} \quad (15-6)$$

这个方程也可应用于正弦波电压和电流。

你也许会想，交流电源的一个周期内，有正值部分和负值部分，是否会在一个完整的周期内抵消。想想手电筒灯泡（一种将电能转化为热能和光能的电阻）。如果一个手电筒灯泡连接到直流电源上（一节电池），电压和电流有相同的极性（也许是上部的正值），电压和电流都为正值，所以提供给灯泡的功率为正 ( $P=I \times U$ )。

如果你将电池反过来，电压和电流的极性也都和刚才的相反，灯泡仍然发光。因为两个负数相乘，结果为正数，所以功率仍然是正值 [ $P = (-I) \times (-U) = +I \times U$ ]。实质上灯泡并不在乎电流是沿着一个方向或其他方向流动。无论电流在一个正弦波周期的正半周或负半周，都能使灯泡变热并发光。根本原因是，交流电在一个周期内，无论正半周期或负半周期都产生电能。

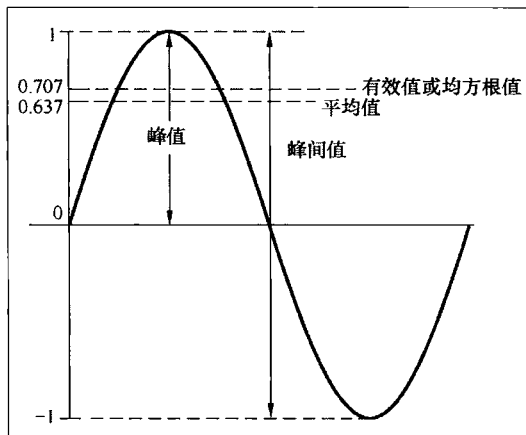


图15-6：这个正弦波上标出了峰值、峰间值、均方根值和电流、电压平均值。这里的均方根值和平均值只应用于正弦波信号。

# 正弦波和旋转车轮

正弦波是交流信号中一种非常重要的波形。因为电压和电流平稳地变化，所以正弦波是学习交流电中最简单的波形。你可以把不同频率和振幅的正弦波组合生成更复杂的波形。

图 15-7 画的是一个正弦波。横轴或  $x$  轴代表时间，纵轴或  $y$  轴代表电压（它也可以代表电流）。该图表示电压如何随时间而变化。从图中你可以得到两个观察结果：第一，波每隔一定时间重复一次；第二，图中没有出现突然变化或者棱角。

让我们引用一个简单的实验帮助你理解正弦波的形状。想象一个轮子，比如自行车车轮、小汽车车轮，甚至于摩天轮。集中观察你轮上的单独一点，轮自转时观察这个点。图 15-8 表示的是一个自行车车轮顺时针旋转。车轮来回旋转时，你观察的那个点重复运动。这个运动非常平稳，运动中没有突然的变化。图中画出开始旋转时圆点的位置，空心圆点表示车轮旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  的位置。

如果可以的话，找一辆自行车，把车倒置，以便可以使车轮旋转。在轮胎上扎上一根细绳或丝带，旋转车轮，然后退后观察一会（退后观察，以便你可以看到自行车的前面或者后面，观察车轮的边，本书中此页很难展示出这样的运动。为了帮助你想象车轮的旋转，图 15-9 是一连串的“快照”，冻结车轮运动。图 15-9 中显示车轮向离开你的方向旋转。我们把标记扎在轮胎上，这样这个标记帮助你观察车

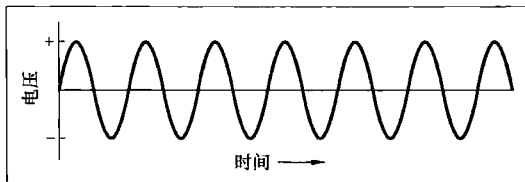


图 15-7: 这张图显示一个正弦波电压如何随时间而变化（这张图也可以表示电流）。电压值在正峰值和负峰值之间变化。这些电压以固定的速度重复变化。

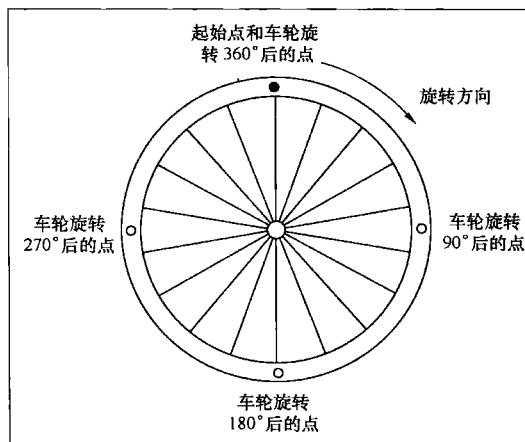


图 15-8: 这个旋转的自行车车轮将帮助你理解正弦波的形状。车轮顶部的圆点表示旋转的起点，空心圆点表示车轮旋转  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  后的位置。当车轮旋转  $360^\circ$  时，圆点回到车轮顶部。

轮的旋转。这个标记，扎在车轮的前端，向上运动然后向下回来。每张照片车轮旋转  $36^\circ$ 。从图 15-9 (A) 的  $0^\circ$  开始测量，我们标出每次车轮转动的角度。我们每 0.1 秒取一张照片，

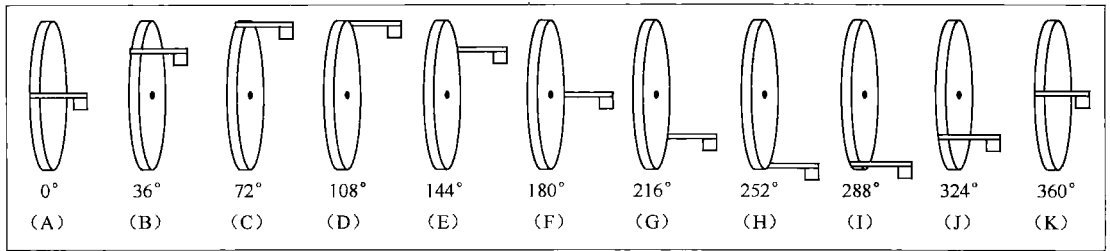


图15-9：这一连串图示表示旋转车轮的快照。标记将帮助你想象旋转。每张照片间隔0.1秒，每张照片车轮旋转36°。注意标记看来像是上下移动，好像旋转着离开你。标记到达顶部或底部花费的时间比运动穿过车轮中间的时间要长。

车轮1秒完成一次完整的旋转。

研究标记的竖向运动。你能看到标记上下运动吗？这个运动和电压的正弦波变化十分相似。

车轮匀速旋转，我们在观察时，它既不加速，也不减速。每张照片之间时间相等。然而照片之间的竖直方向的运动却发生了改变。注意，在顶端和底端改变方向时，竖直方向的运动似乎减速和停止，标记在中心点快速通过。

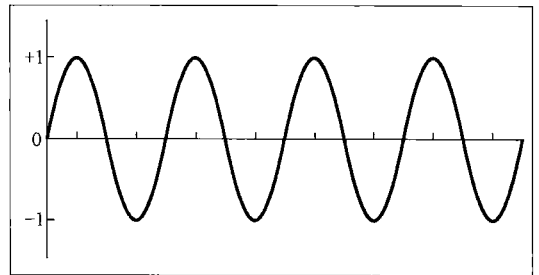


图15-10：这张图表示标记在图15-9中车轮的移动，此时车轮在你的前面从左向右运动。

表15-1

角度	正弦函数值
0°	0.000
36°	0.588
72°	0.951
108°	0.951
144°	0.588
180°	0.000
216°	-0.588
252°	-0.951
288°	-0.951
324°	-0.588
360°	0.000

现在设想车轮旋转时从左向右运动。在背景的墙上描绘出标记的运动，图15-10显示的是这个运动的结果。这个图像看起来和我们画过的正弦波图像完全一样！把中线表示为0V，这样标记在+1V和-1V之间移动。用这样的标度，你可以很容易地计算出车轮旋转时任意时刻标记的位置。只要找出车轮旋转的角度的正弦即可。用你的计算器算出图15-9中每个角度的正弦，比较你的计算结果和表15-1中的数据。

# 旋转速度和波的频率有关

上一节我们研究车轮的旋转来帮助你理解正弦波。这一节我们将继续这种类比。和我们上节的方法一样，假设在两个轮子上扎上标记，见图 15-11。第一个轮子每秒钟转动完一周，第二个轮子转动的速度是第一个轮子的两倍，它每秒钟转动两周。现在假设两个轮子在你面前从左向右移动，两个轮子以同样的速度穿过房间。图 15-12 显示的两张图片就是描述的这个运动。

注意，图中 15-12 (B) 来回运动两周的距离和图 15-12 (A) 中来回运动一周的距离相同。因为第二个轮子旋转的速度是第一个轮子的 2 倍。

如果另一个轮子旋转的速度是第一个轮子的 10 倍又会怎样呢？图 15-12 (C) 描述的就是这个运动的图像。这个图像说明图 15-12 (A) 轮子来回运动一次，图 15-12 (C) 来回 10 次。

轮子转速描述了正弦波的频率。波的频率与波每秒钟有多少个完整的电压或电流变化有关。我们用赫兹来度量频率，简称为 Hz。当轮子旋转加快时，它产生一个高频率的正弦波。

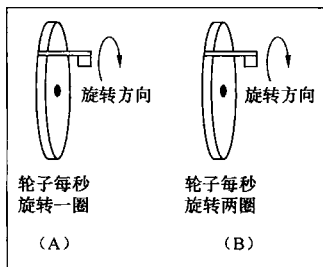


图 15-11：两个不同转速的轮子产生的正弦波的频率不同。图 (A) 中每秒钟转动一周，而图 (B) 中轮子每秒钟转动两周。

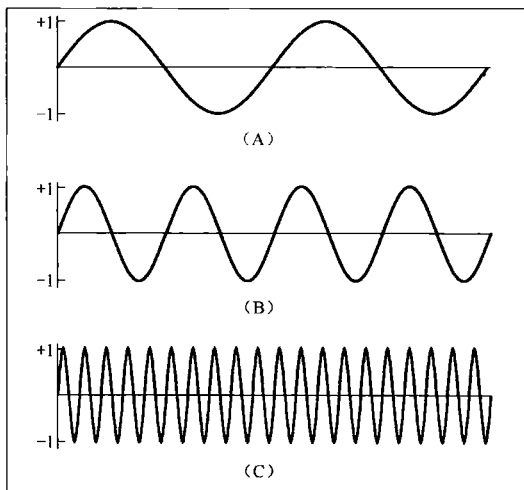


图 15-12：当图 15-12 中的两个轮子在你面前运动穿过房间，描绘它们的运动轨迹如图中的 (A) 和 (B)。图 (B) 中的正弦波的频率是图 (A) 的 2 倍，图 (C) 中是由一个转速是 (A) 的 10 倍的轮子旋转产生的正弦波。

假设图 15-12 (A) 显示的正弦波的频率是 1Hz，那么图 15-12 (B) 的正弦波的频率就是 2Hz，图 15-12 (C) 的正弦波的频率就是 10Hz。

所有的轮子的直径各不相同。我们使用两个不同直径的轮子将会怎么样呢？由这些轮子产生的图像的振幅或者正负峰值不同。图 15-13 表示的就是这两个不同的轮子以及它们运动描绘的波形。

图 15-13 (A) 的正弦波的振幅是图 15-13 (B) 的 2 倍，这可以表示为一个波的峰值电压或电流是另一个波的 2 倍。这两个波具有相同的频

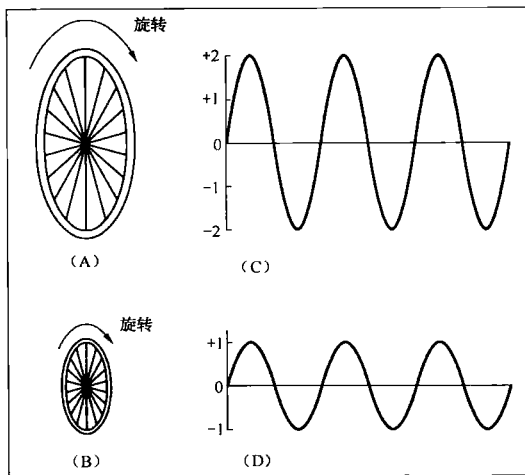


图15-13：图中 (A) 的轮子的直径是1.0m，(B) 中轮子的直径是0.5m。当两个轮子在你面前运动时，它们产生的正弦波图形如图中的 (C) 和 (D)。图中 (C) 的正弦波的振幅达到 (D) 的正弦波振幅的2倍。

率。图 15-13 中，两个正弦波的起始时间相同。当两个或更多个波在它们运动的任一瞬间同时

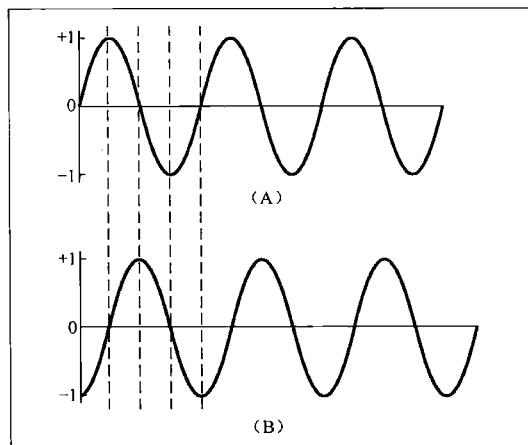


图15-14：这两个正弦波具有相同的频率，然而这两个波不是同时开始的。它们的相位相差 $90^\circ$ 。图 (B) 中的正弦波刚穿过0点时，图 (A) 中正弦波到达正的最大值。当图 (B) 中正弦波开始的时候，图 (A) 正弦波已经穿过了四分之一周期 ( $90^\circ$ )。

到达相同的点，我们说这些波同相（同相位）。相位指的是波的相对位置。

不过，波并不总是相位一致。图 15-14 中两个波具有相同的频率，但它们开始的时间并不相同，我们就说这些波不同相。

我们用轮子旋转的角度来度量波的位置。波的一个周期是  $360^\circ$ ，就是轮子旋转  $360^\circ$ ，即转动一圈。

我们同样用角度来量度相位。图 15-14 中显示的两个波相位相差  $90^\circ$ 。第二个波到达 0 点时，第一个波到达  $90^\circ$ 。图 15-15 中的两个波的相位相差  $180^\circ$ 。

两个或更多个波之间的相位角可以是任意的角度。不过我们通常使用的角度在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  之间。如果你发现一个相位角超过  $180^\circ$ ，你可以用这个角度减去  $180^\circ$ 。再利用类似轮子来对比，轮子上的两点间的距离不可能超过轮子周长的一半。

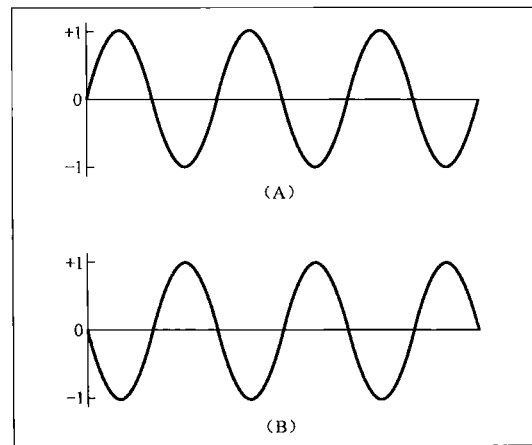


图15-15：这些正弦波具有相同的频率，但它们的相位相差 $180^\circ$ 。当第二个正弦波穿过0点向它的负向最大值运动时，第一个正弦波穿过0点向正向最大值运动。注意，当一个波到达它的正向最大值的时候，另一个波到达它的负向最大值。

# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 15 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以它们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，可参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

## 复习检测：-----

- 15.1 电压或电流的形状被称为：
- 正弦曲线
  - 长方形
  - 沙漏
  - 波形
- 15.2 某交流电电压频率是 25Hz，它的周期是多少？
- 15.3 在示波器上看某个电流电电流，每 5 μs（微秒）重复一次，那么这个电流的频率是多少？
- 15.4 一个 4MHz 的无线电波在自由空间里的波长是多少？
- 15.5 一个交流电电压的 RMS 值是 20V，请问“RMS”代表什么意思？
- 常规运动信号
  - 均方根
  - 电阻测试系统
  - 真正的枫蜜
- 15.6 峰值是 6V 的交流电。它的均方根值是多少？

## 例题

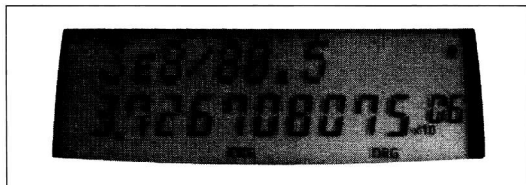
$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (15-3)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{80.5 \text{ m}} \\ = 3.727 \times 10^6 \text{ Hz} = 3.727 \text{ MHz}$$

计算器按键：

$$3 \quad 2^{\text{nd}} \quad \text{EE} \quad 8 \div 80.5 =$$

计算器第二行显示结果：3.7267 × 10<sup>06</sup>



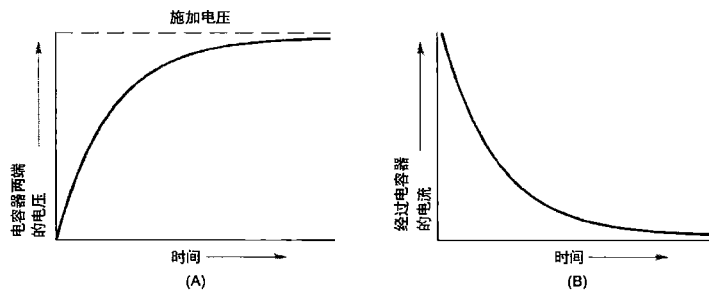
[ 请注意，10<sup>06</sup>=10<sup>6</sup>=1 000 000，所以，  
3.7267 × 10<sup>06</sup>=3.7267 × 1 000 000=3.7267MHz]

## 答案：-----

- 15.1 d
- 15.2 周期=1/频率=1/25Hz=0.04s=40ms
- 15.3 频率=1/周期=1/(5 × 10<sup>-6</sup>)  
=0.2 × =0.2 × 10<sup>6</sup>MHz=200kHz
- 15.4 λ = c/f=(3 × 10<sup>8</sup>m/s)/  
(4 × 10<sup>6</sup>Hz)=0.75 × 10<sup>2</sup>m=75m
- 15.5 b
- 15.6  $U_{\text{均方根}}=0.707 \times U_{\text{峰值}}=0.707 \times 6\text{V}=4.24\text{V}$

## 第16章

# 交流电中的电容器 ——容抗



电容器阻碍外加电压的变化

### 目录

- 电容器阻碍外加电压的变化
- 对低频信号有更多的阻碍
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测



# 电容器阻碍外加电压的变化

电 容器两端接通的直流电源会使电容器带电。当电荷从零开始增加时，有很小的电流通过电容器，而当电容器极板两端的电压等于电源电压时，电流停止。图 16-1 (A) 显示的是一个简单的给电容器充电的电路。当开关在 1 状态时，有电流流过  $R_1$  后给电容器充

电。图 16-1 (B) 是充电时电容器的电流和电压图像。

现在把开关移动到 2 的位置，如图 16-2 (A) 所示。这样把电源断开，把电阻  $R_2$  连接到电容器的两端。此时，电容器把储存的电能通过流过电阻  $R_2$  的电流释放出来。当电容器把储

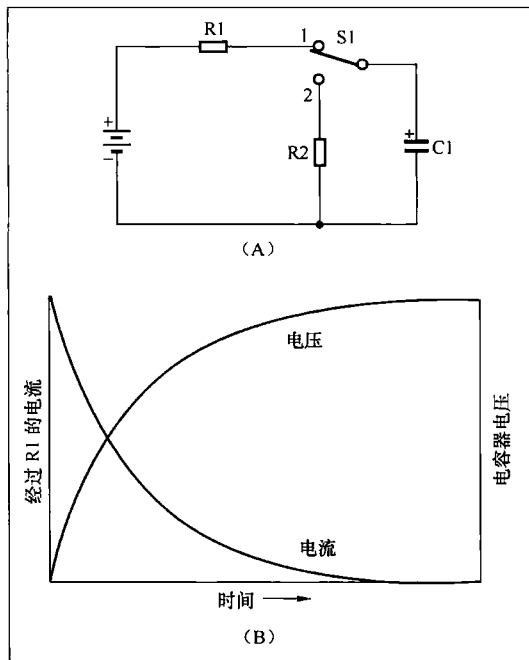


图 16-1: 当开关在 1 的位置时，我们可以用图 16-1 (A) 中的电路给电容器充电。图 16-1 (B) 中是在电容器充电时，经过电容器极板间的电流和电压图像。注意，开始时电容器两端没有电压，电流很大。不过，当电容器极板上积累电荷后，电压开始增加，而电流却开始减小。当电容器极板间的电压等于电池的电压时电流停止。

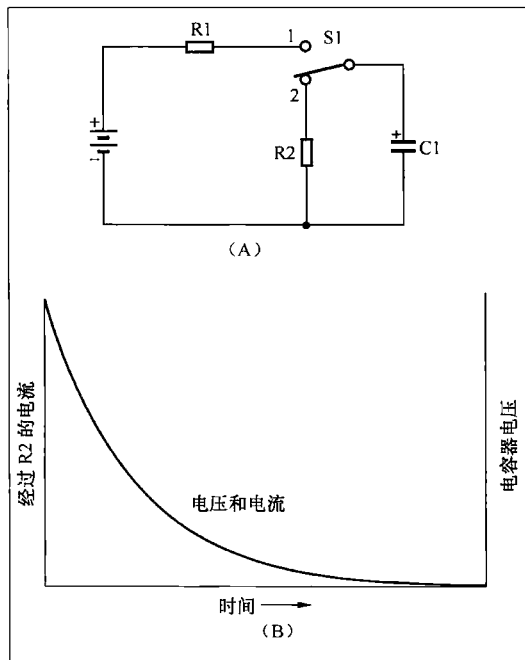


图 16-2: 图 16-2 (A) 是图 16-1 (A) 中开关移动到 2 的位置的电路，这使得电池从电路中断开，而把电阻  $R_2$  接到了电容器的两端。图 (B) 中显示了经过电阻  $R_2$  的电流和电容器两端的电压。电容器释放储存的能量。

存的能量释放出来后失去电荷，电容器两端的电压下降至零。欧姆定律告诉我们，电压减小时，通过 R2 的电流也要减小。图 16-2 (B) 显示的是在改变开关的位置后，通过 R2 的电流和电容器电压的图像。

你可以猜想一下，如果我们把一个交流电源连接到电容器上会发生什么？图 16-3 显示的是一个正弦波交流电源的简单电路。电源的正弦波第一个半周为正，所以施加在电容器上面极板为正极。正弦波电压从零开始增加，当电容器开始充电时，有一个冲击电流，而随着电量的增加，这个电流逐渐减小。

正弦波电压达到最大值时，开始又逐渐降低到零。电压减少时，电容器开始把自己存储的电能释放到电路中。当电压开始降低时，电流的方向发生改变，认识到这点非常有意义。当电容器开始充电时，电子移动到图 16-3 中电容器下极板上。现在电子从下极板离开，因为电容器开始向电路释放能量。

在下一半正弦波中会发生什么情况呢？电压的极性相反，所以施加到电容器上极板的电压极性变成了负极。电子离开下极板，而到达上极板。很快电容器把原有的电荷全部释放到电路中，电容器开始反向充电。电荷增加时，电流在减少。

当电源的正弦波达到负的最大值时，电压再一次开始降低到零。现在电容器再一次向电路释放储存的能量。电子从上极板流出，电流再一次改变方向。

图 16-4 是一个正弦波电源电压和电容器电流的图表。我们用实线表示电压，用虚线表示电流。因为我们没有试图显示具体的数据，所以在图中没有将数字标在横轴和纵轴的刻度上。实际电压、电流和时间取决于电阻和电容

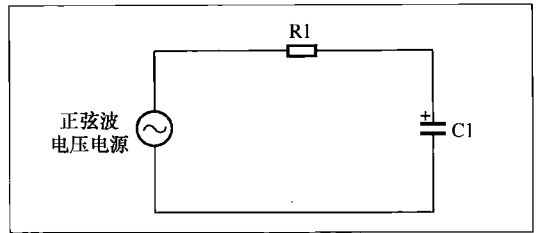


图16-3：我们可以把交流电施加到电容器的两端，观察这个电路中电流和电容器上的电压。正文描述了施加的电压经过一个正弦波周期的结果。

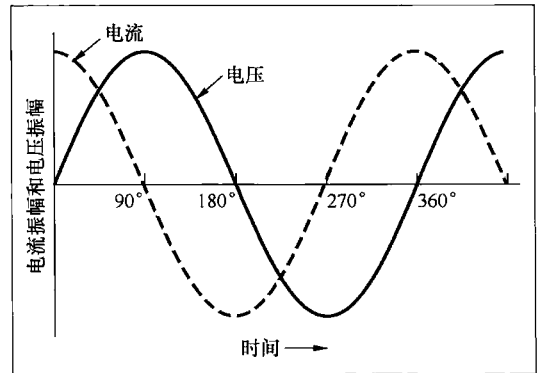


图16-4：实线表示施加在图16-3 中电容器极板上的电压。这是一个从零开始的正弦波电压。在第一个半周期施加在电容器上极板上的是正电压。在第二个半周期中，正电压施加在了电容器下极板上。

的数值、施加的电压和正弦波的频率。

在研究图 16-4 时注意，图中电容器的电流最大值在  $0^\circ$ ，而施加的电压直到  $90^\circ$  时才达到最大值。这描述了交流电流通过电容器和电容器两端电压的相位关系，交流电压到达它波形上的每一点比到达该点的电流晚  $90^\circ$ 。有时，我们说穿过电容器的电压滞后于穿过电容器中的电流。换句话说，经过电容器的电流超前穿过电容器的电压。在这两种情况下，电压和电流之间的相位差角都是  $90^\circ$ 。

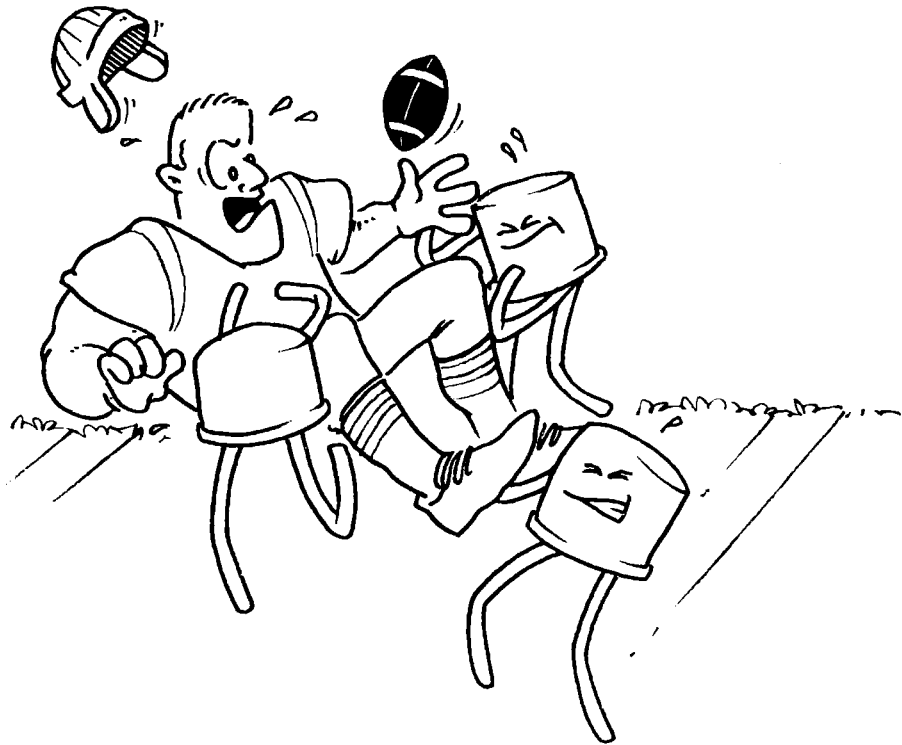
记住这种相位的关系的简便方法是记住一个短语“ELI the ICE man”。电流 ( $I$ ) 通过电容器 ( $C$ )，电压 ( $E$ ) 超前  $90^\circ$ （译者注：在国外，用字母  $E$  来表示电压）。在下一章中我们会发现，通过电感器的电压 ( $E$ ) 相对于通过电感器 ( $L$ ) 的电流 ( $I$ ) 超前  $90^\circ$ 。所以记住 Eli 这个卖冰淇淋 (ICE) 这个人。你要始终记住电感器和电容器中电压和电流之间的相位关系。

看上去电容器似乎不愿意施加在它上面的电压发生改变。电容器反抗电压的改变以至于阻碍这种改变：当电压增加时，电容器从电

源上得到电能，你可以把这看作是试图阻碍电压的增加。当电压降低时，电容器把储存的电能量释放到电路中，这个作用可考虑为阻碍电压的降低。

电容器对抗电压的改变，试图阻碍电压的变化。我们把电容器这种对抗电压改变的性质叫做容抗。电容器中这种对电压（和电流）改变的反抗与电阻对电流的反抗类似。事实上，我们同样可以用欧姆来度量容抗。

下一节，你将学习如何去计算容抗。你还将学到施加信号的频率如何影响这种对电压和电流改变的反抗。



## 对低频信号有更多的阻碍

在 你把电容器连接到电源上的瞬间，一个没有充电的，或者说是“空的”电容器的作用如同是短路。电容器开始充电时电路中会有很大的电流，随着电容器两端电压的增加，通过电容器的电流逐渐降落到了零，电容器阻塞了直流电流。

容抗是电流通过电容器时对电流的阻碍。因为电容器不能通过恒定的直流电流，所以你可以说电容器对直流电有很大的电抗。

看图 16-5。我们把 10Hz 的交流电施加到  $1\mu\text{F}$  的电容器上。电路中电源电压是均方根值 100V。交流电电流表显示通过电路的电流是 6.28mA。那么电容器的容抗是多大呢？

这听起来有点像欧姆定律的问题吧？是的。你知道了电路的电压和电流，希望知道对电流的阻抗。在这个问题中，可利用欧姆定律计算容抗，而不是电阻。

因为这是一个“思维试验”，所以我们假设所有的元件都是理想的。也就是说电容器中没有电阻，导线中也没有任何电阻。真正的元件中总会有一定的电阻，如果电路中既有电阻又有容抗，在计算上有点困难，在这里我们暂且不考虑这样的问题。在你学习了基本原理后，你会知道如何处理这个比较复杂的数学问题。

我们用  $X$  表示容抗。下标 C 提醒我们是在和电容方面的问题打交道。电容的容抗就是用  $X_C$  表示，写成欧姆定律

$$U = IX_C \quad (16-1)$$

解这个方程，求  $X_C$ ，或者利用图 16-6 中

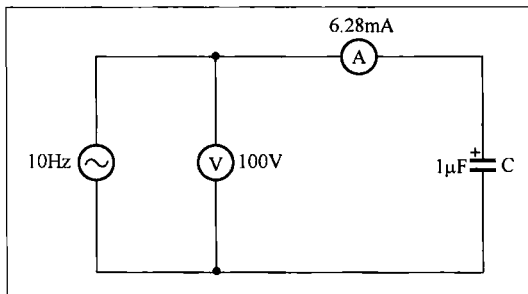


图16-5：我们将利用这个电路做电容器容抗的试验。

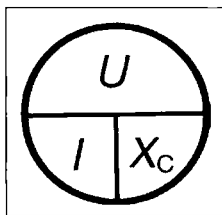


图 16-6：利用这个方程“圆”去求出方程其中的容抗  $X_C$ 。

的方程“圆”，即

$$X_C = \frac{U}{I}$$

$$X_C = \frac{100\text{V}}{6.28\text{mA}} = \frac{100\text{V}}{6.28 \times 10^{-3}\text{A}}$$

$$X_C = 15924\ \Omega$$

(不要忘记，6.28mA 是  $6.28 \times 10^{-3}\text{A}$ 。)

让我们改变一下电路做下一个实验。把  $1\mu\text{F}$  的电容器换成  $2\mu\text{F}$  的电容器。这次电流表的读数是 12.56mA。新电容器的容抗是多少呢？再用方程 16-1 来求出  $X_C$ 。

$$X_c = \frac{U}{I}$$

$$X_c = \frac{100V}{12.56mA} = \frac{100V}{12.56 \times 10^{-3}A} = 7962 \Omega$$

从这个实验中你学到了什么？当我们把电容量加倍时，容抗将变成原来的 1/2。如果我们使用  $3 \mu F$  的电容器，你认为容抗会是多少？如果你说是  $5308 \Omega$ ，你就答对了。电容器的容抗和电容量成反比例关系，较大电容量产生较小的容抗。

现在再一次改变我们的电路。这一次我们连接了一个  $100Hz$  的电源，电容器换回原来的  $1 \mu F$  的电容器，电源电压仍为  $100V$ 。这一次电流表的读数是  $62.8mA$ 。计算新电源电压下  $1 \mu F$  电容器的容抗为

$$X_c = \frac{100V}{62.8mA} = 1592.4 \Omega$$

新的信号的频率是原来频率的 10 倍。你注意到了吗，电流也是第一个实验中的 10 倍。你会惊奇地发现容抗减小为原来的 1/10。这个实验告诉你，容抗和频率成反比。对于给定的电容器，高频信号产生较小的容抗。

你认为这是一个合理的结论吗？让我们考虑一下，当我们给电容器施加了高频信号后发生了什么。

你知道对于直流信号来说，电容器具有高的容抗。当你连接上一个低频的交流信号时，电容器充满信号电压。对那个信号电压，电容器将尽可能充满它自己所能拥有的电量。

现在开始增加信号的频率。如果在电容器充满电荷前信号电压到达峰值，开始降低了将会怎么样？如果电容器没有充满电荷，它不具有和前面的电容相同的反抗。如果频率增加更多，电容器的反抗就越小。图 18-7 是容抗

和频率的图表。直流电时容抗最大，但随着频率的增高会很快减小。

在这节中，我们发现两个影响容抗的因素。当电容量或频率增加时，容抗减小。根据这两个因素我们可以写出计算容抗的方程。

我们通常用每秒钟波形周期的数量来表示频率，用赫兹来度量。我们也可以把每个周期和轮子的滚动联系起来，这样我们用每秒钟转过的弧度来表示频率。你可以把任何用赫兹表示的频率转换成每秒钟的弧度，只要把频率乘以  $2\pi$ ，这是一个周期的弧度。

方程 16-2 表示如何计算容抗。

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (16-2)$$

这里：

$f$  是用赫兹表示的频率；

$C$  是用法拉表示的电容量。

如果你知道的频率的单位是千赫或者兆赫，在这个方程中你必须把它们转换成赫兹。如果你知道的电容量的单位是微法或者皮法，你必须把它们转换成法拉。

计算  $1 \mu F$  的电容器，施加  $10Hz$  信号时的容抗。这是图 16-5 中的例子。

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10Hz \times 1 \times 10^{-6}F}$$

$$X_c = \frac{1}{6.28 \times 10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{6.28 \times 10^{-5}}$$

$$X_c = 15924 \Omega$$

对于这个结果和前面利用电压和电流通过欧姆定律计算的结果相同，你不必感到惊讶。我们再来尝试一个例子。计算  $2 \mu F$  的电容器施加  $100Hz$  信号时的容抗（这和本节前面所

计算的结果不同)。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10\text{Hz} \times 2 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$X_C = \frac{1}{6.28 \times 200 \times 10^{-6}} = \frac{1}{1.256 \times 10^{-3}}$$

$$X_C = 7962 \Omega$$

你可以练习更多的电容容抗的问题。试着计算本节开始研究的其他电路的容抗。你的计算结果一定和我们这里发现的一致。你也许想计算频率为 1kHz 和 1MHz 的电容器的容抗。随着不断练习（和你可信赖的科学计算器），你将很快熟练地计算出电容器的容抗大小。

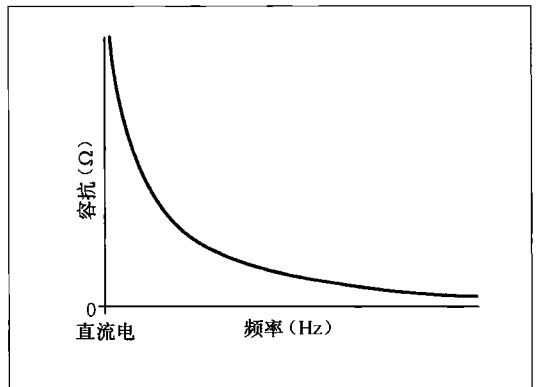


图16-7：这张图显示了容抗随频率的变化。在直流电时，容抗非常大，而在高频率时，容抗很小。

## 数学和计算器的窍门



### 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

### 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 16 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以它们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

### 例题一

$$X_C = \frac{U}{I}$$

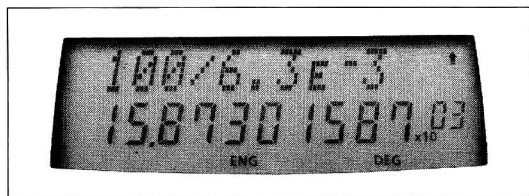
$$X_C = \frac{100V}{16.3mA} = 15.873 \Omega$$

计算器按键：

$$100 \div 6.32 \text{ EE } -3 =$$

计算器第二行显示结果： $15.873 \times 10^3$

[ 请注意， $10^3=10^3=1,000$ ，所以， $15.873 \times 10^3=15.873 \times 1,000=15.873k\Omega$  ]

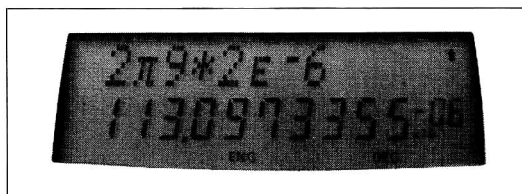


第一步：

计算器键入：

$$2 \pi 9 \times 22 \text{ EE } -6 =$$

计算器第二行显示结果： $113.1 \times 10^{-6}$



第二步，计算器键入：

$$X^{-1} =$$

计算器第二行显示结果： $8.8419 \times 10^3$



### 例题二

一个  $2 \mu F$  的电容器在  $9\text{Hz}$  的频率下，它的容抗 ( $X_C$ ) 是多大？

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C} \quad (16-2)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 9\text{Hz} \times 2 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$= \frac{1}{113.1 \times 10^{-6}}$$

$$= 8.842 \Omega$$

为了能在计算器的第一行显示所有的数值，我们可以把这个计算分成两步：第一步，只计算分母  $2 \pi f C$ ，第二步，取这个计算结果，然后求它的倒数。

当然我们可以一步完成这个计算，不过这样的话，计算器的第一行不能显示出所有键入的数据。这里有两种方法一次计算出结果。尝试用下面的两种方法来进行计算，确保两种方法得到的结果相同。

计算器键入：

$$(2 \pi 9 \times 22 \text{ EE } -6) x^{-1} =$$

或

计算器键入：

$$1 \div (2 \pi 9 \times 22 \text{ EE } -6) =$$

复习检测：-----

- 16.1 把电容器连接到直流电源上，将：
- a) 对电容器充电
  - b) 使电容器完全放电
  - c) 导致一个恒定的电流流入电容器
  - d) 把电容器变成电感器
- 16.2 当一个电容器两端跨过一个交流电压，电流将 \_\_\_ 电压 \_\_\_ 度。
- 16.3 电容器中产生的阻碍通过它的电压改变，这种阻碍被称为：
- a) 阻抗
  - b) 限流
  - c) 电抗
  - d) 一个坏的态度
- 16.4 有一个8V的交流电穿过电容器，通过的电流是25mA，那么电容器的电抗是多少？
- 16.5 一个5  $\mu$ F 的电容器，在60Hz的频率下它的电抗是多少？
- 16.6 不通过计算，如果频率改变到120Hz，5  $\mu$ F 的电容器的电抗是多少？ 参见问题16.5。

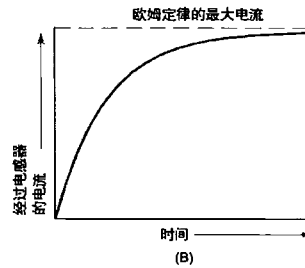
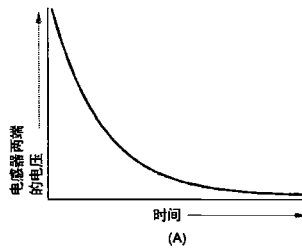
答案：-----

- 16.1 a
- 16.2 电流将超前电压90度
- 16.3 c
- 16.4  $X_C = E/I = 8V/25mA = 320\Omega$
- 16.5  $X_C = 1/(2\pi fC) = 1/(2\pi \times 60 \times 5 \times 10^{-6}) = 530.5\Omega$
- 16.6 如果频率改变到120Hz (60Hz的两倍)，意味着电抗将减少到60Hz时的电抗的一半。  
 $1/2 \times 530.5\Omega = 265.3\Omega$



## 第17章

# 交流电中的电感器 ——感抗



电感器阻碍电流的任何变化

### 目录

- 电感器阻碍电流的变化
- 对高频信号有更多的阻碍
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

# 电感器阻碍电流的变化

**图** 17-1 所示的电路由 1 个电感器和 1 节提供稳定直流电压的电池串联组成，还有 1 个可变电阻和电感器串联。由于电感器只由金属导线缠绕而成，因此在电路中几乎没有电阻，可用欧姆定律来计算电路中的电流。如果将可变电阻器的值设置为  $5\,000\,\Omega$ ，那么电流有多大？

$$U = IR \quad (17-1)$$

用这个公式你可以很容易地求出电流大小：

$$I = U/R \quad (17-2)$$

$$I = 12\text{V} / 5000\,\Omega$$

$$I = 2.4 \times 10^{-3}\text{A} = 2.4\text{mA}$$

当电路中有电流通过时会在电感器周围产生磁场。只要电流大小不发生改变，磁场强度就会保持不变。

假如增加可变电阻器的阻值，结果又会如何？当可变电阻器的值增大为  $10\,000\,\Omega$  时，电路的电流降为  $1.2\text{mA}$ 。电流的减小，意味着磁场强度也将会减弱。

当我们调节电阻时，电流随之减小，电感器将释放存储在磁场中的部分能量来应对电流的变化。这部分释放的能量在电感器上产生一个电压，力图保持流经电感器的电流大小不变。不过电流仍然会随着磁场强度的减弱而减小，电感器只是阻止了电流立即变化。减小后的电流可以维持一个较小强度的磁场。

如果电阻减小，你认为会发生什么情况呢？如果电阻降低为  $2\,500\,\Omega$ ，此时电流又会

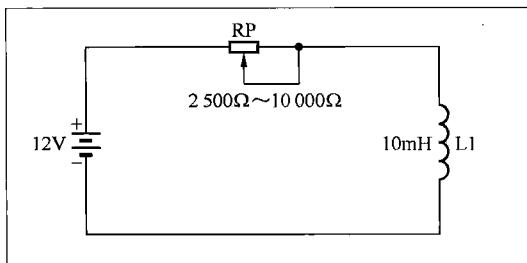


图 17-1：我们可以用这个电路来研究变化电流对电感器的影响。通过调整可变电阻器的值可以改变电路的电流。大写字母 L 在示意图和公式中均表示电感器。

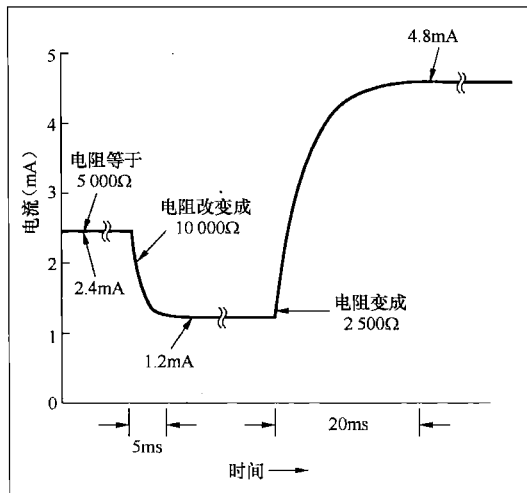


图 17-2：此图为流经图 17-1 电感器中的电流变化曲线图。在本实验中，可变电阻的初始值是  $5\,000\,\Omega$ ，电流是  $2.4\text{mA}$ 。然后将电阻增大到  $10\,000\,\Omega$ ，此时电流减小为  $1.2\text{mA}$ 。最后，将电阻减小到  $2\,500\,\Omega$ ，电流增大为  $4.8\text{mA}$ 。

有多大？用欧姆定律和公式 17-2 计算这个电流，你应该算出电流值是 4.8mA。

大电流产生强度大的磁场。当然，电感器会再次对电流的变化做出反应。电感器上将会产生一个和电池电压方向相反的电压，通常称为反向电动势，它起到了阻碍电流增加的作用。记住，emf 是电动势的简写，电动势是电压的另一个名字。因此，反向电动势是指由于电流变化而在电感器上产生的电压。

图 17-2 是这个实例的电路电流图。电流的初始值是 2.4mA，在电阻增大之前一直保持不变。接下来，电阻增大为 10 000  $\Omega$ ，电流降到 1.2mA。注意，电流的这个变化不是立刻发生的，而是逐渐降低到一个新的值。当我们减小电阻时，电流逐渐增大为 4.8mA。切记，这个改变是逐渐产生的。

电阻和电感决定了电流改变的速度。本书中我们不会涉及这一计算，有兴趣者可以参阅《ARRL 业余无线电手册》，里面有相关计算的详细介绍。眼下你只要记住流经电感器的电流是缓慢变化的就可以了。

当电感器对电流的改变做出反应时，它阻碍电流的改变。这种改变是通过存储在磁场中的能量的变化来抵制电流的变化的。

你可以注意到电感器和电容器之间具有某些相似性。电容器通过它所存储的电能来对变化做出反应。施加的电压决定了电容的电荷数量。电容器通过提供电流对电压的降低做出反应，而通过阻止更多的电流对电压的增大做出反应。

我们可以认为电感器和电容器是相互对立的。与电容器把能量存储在电场中不同，电感器是将能量存储在磁场中。当电流发生变化时，电感器将产生一个阻碍电流变化的电压。

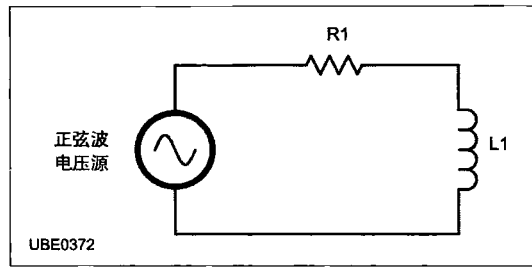


图 17-3：一个交流电接入电阻和电感器串联的电路。描述一个完整的正弦波周期内电流和电压变化的情况。

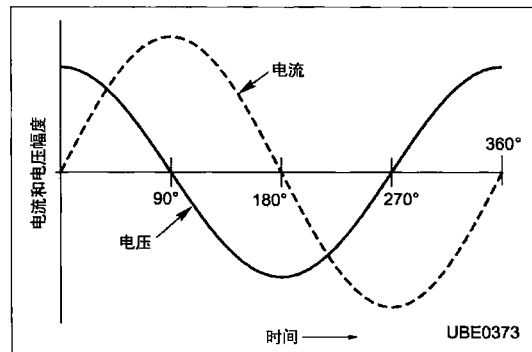


图 17-4：虚线表示通过电感的电流，而实线表示图 17-3 中，电感器两端的电压。电流指一个从 0° 起始的正弦波。

我们用“电抗”这个术语来描述电感器对电流的阻碍变化，也用这个术语来描述电容器对电压的阻碍变化。我们用感抗（感应电抗）和容抗（电容电抗）来区别这两个术语。在公式中用大写字母 X 表示电抗，下标 C 和 L 分别表示为容抗 ( $X_C$ ) 和感抗 ( $X_L$ )。

你能想象，如果把交流电连接到电感器上会发生什么情况吗？图 17-3 显示的是一个拥有正弦波电源的简单 RL 电路。图 17-4 显示的是在从 0° ~ 360° 的一个完整的周期内，

电感器的电流和电压。实线表示电压，而虚线表示电流。

在图中竖轴上没有标明数值，因为我们不需要标注特定的值。实际电压和电流大小取决于电阻和电感的大小、施加的电压值以及正弦波的频率。

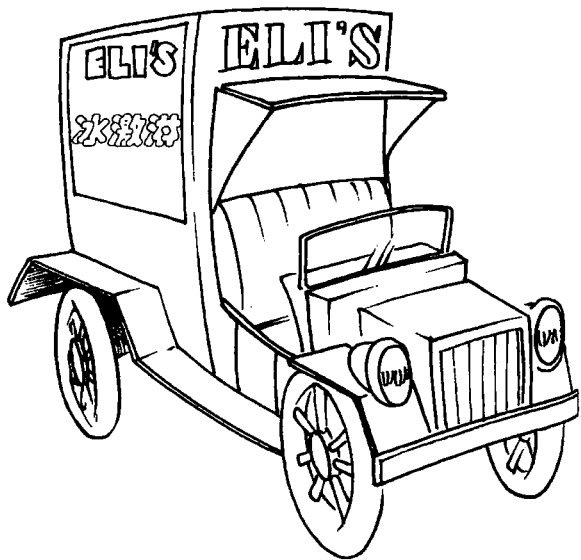
在正弦波电流的前半个周期初始，电感器的电流和电压相位在  $0^\circ$ 。注意，此时电感器的电流大小为 0。然而，尽管电流大小为 0，但它变化非常迅速（变化的速度，或斜率最大）。其结果是试图阻碍这个快速的变化的电感电压最大。电压的极性或反电动势为正，试图阻碍电流的这个变化。

随着电流大小从 0 开始增加，向正的峰值变化，电流变化的速度越来越慢，而电感电压向 0 值变化。

在  $90^\circ$  时，电流达到它的正的最大值，而不再变化。回想一下，电感器通过产生一个电感电压（反电动势）来阻碍这个变化；而电流不在变化，所以在电感器中即时电流的正值最大时，电感电压为 0。

随着电流开始减小（在  $90^\circ \sim 180^\circ$  之间），电感电压通过产生一个负极性电压，再次阻碍电流的这个变化。在  $180^\circ$  时，电感电流为大小为 0，而在  $270^\circ$  时，电感电流达到负的最大值，此时电感电压为 0。

看图 17.4，我们可以看到电感电压和电感电流之间的相位。图中  $0^\circ$  时，电感电压最



大，而在  $90^\circ$  前，电感电流没有达到最大值。这描述了一个交流电通过电感器时，电流和电压的相位关系。电压超前电流  $90^\circ$ 。或者，我们可以说，电流滞后电压  $90^\circ$ 。

记住这种相位的关系的简便方法是记住一个短语“ELI the ICE man”。电感电压 ( $E$ )（译者注：在国外，用字母  $E$  来表示电压）在电感器 ( $L$ ) 中的相位超前电流 ( $I$ )  $90^\circ$ 。电流 ( $I$ ) 在电容器 ( $C$ ) 中超前电压 ( $E$ )  $90^\circ$ 。所以记住 Eli 这个卖冰淇淋 (ICE) 这个人。你要始终记住电感器和电压器中电压和电流之间的相位关系。

# 对高频信号有更多的阻碍

电感器由缠绕成圆筒状的金属线圈组成。金属线圈的电阻较小，当你给电感器外接一个直流电压源时，将会产生一个很大的电流。为了避免电路中的电流过大，大多数电路都为电感器串联上一个电阻器，用以限制电流。

流经电感器中的电流不会发生急剧变化，但可通过串联的电阻使电流逐渐增大到设置值。在直流电路中，电感器的作用就像是短路。

感抗对电流的变化起到了阻碍作用。由于电感器在直流电路中具有短路的效果，因此我们说电感器在外接直流电时的电抗为零。

现在考虑低频正弦波电压对电感器的影响。图 17-5 为 100Hz 的交流电接到 10mH 电感器上的简单电路图。当电源施加在电路上的均方根电压为 1.5V 时，电流表的读数为 0.239A。此时电感器的电抗是多大呢？

听起来是不是有点像另一个欧姆定律问题呢？你知道了电路中的电压和电流，想要找出电感器的电抗。利用欧姆定律来解决这个问题，只需把电阻换成电抗。

由于这是一个“思考性的实验”，我们假定电感器是理想状态的，也就是说电感器的金属线圈中没有电阻，电路中的其余导线电阻也为零。在实际应用中，电路元件总是有一定的电阻存在的。如果同时考虑电路的电阻和电抗，那么这个计算将会相当困难。这里我们不会解决这样的问题。在学习了电路基本原理后，你们可以去学习处理更为复杂的数学计算。

我们用  $X$  来表示电抗。下标  $L$  提醒我们，我们正在处理的是电感问题。电感器的电抗符号是  $X_L$ 。

$$U = IX_L \quad (17-3)$$

可以用公式 17-3 或图 17-6 中给出的方程圆来求解  $X_L$ 。

$$X_L = U/I$$

$$X_L = 1.5V/0.239A$$

$$X_L = 6.28 \Omega$$

现在让我们改变一下电路，进行下一个分实验。把电路中的 10mH 电感器替换为 50mH 电感器，此时，电流表的读数为 47.8mA。替

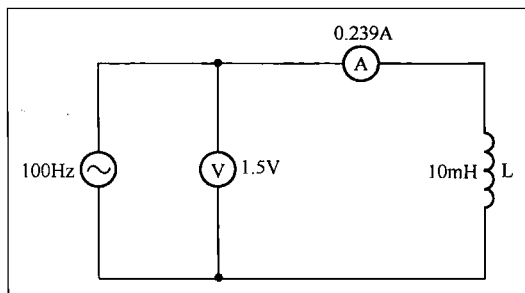


图17-5：我们将使用此电路来进行电感器电抗的思考性实验。

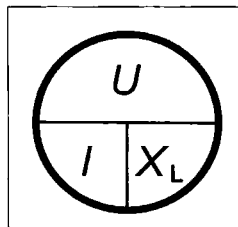


图17-6：利用方程圆计算公式17-3中的感抗 $X_L$ 。

换后的电感器的电抗是多大呢？可以用公式 17-3 求得  $X_L$ （注意 47.8mA 是  $47.8 \times 10^{-3}$  安培）

$$X_L = U/I$$

$$X_L = 1.5V / 47.8 \times 10^{-3} A = 31.4 \Omega$$

从这个实验中你学到了什么呢？我们把电感增大为初始值的 5 倍时，电抗也增大到原来的 5 倍。如果我们现在使用 100mH 的电感器，那么电抗为多大呢？如果你的答案是  $62.8 \Omega$ ，那么你答对了。感抗与电感直接相关。电感越大，电抗也就越大。

现在再一次改变电路。这次我们接上 1 000Hz 的电源电压，并将电感器替换为原来的 10mH 电感器。电压仍然为 1.5V，此时电流表读数为 23.9mA。现在使用新的电压电源来计算 10mH 电感器的电抗。

$$X_L = 1.5V / 23.9mA = 62.8 \Omega$$

新信号的频率是原信号频率的 10 倍。你有没有注意到，此时电流的大小只是第一个实验的 1/10。通过这部分实验，我们知道电抗与频率直接相关。对于确定的电感器，信号频率越高，产生的感抗也越大。

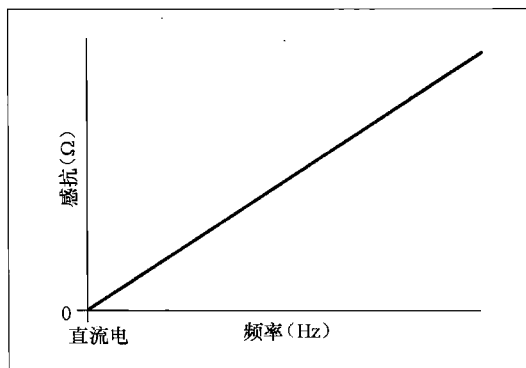
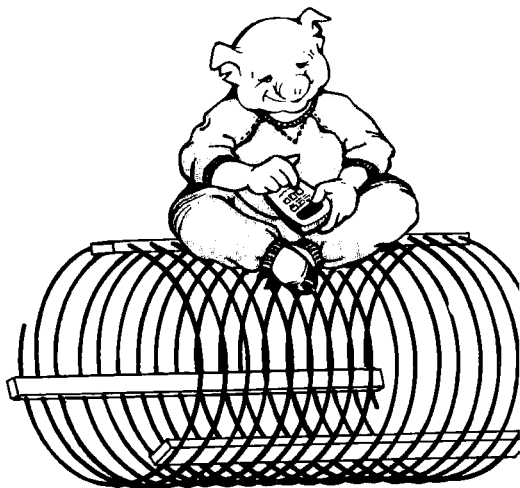


图17-7：此图为感抗随信号频率变化的关系图。直流电时，电抗为零。信号频率越高，电抗越大。

你认为这个结论合理吗？让我们来思考一下在电感器外接高频信号时，会发生什么。你知道对于直流信号，电感器相当于短路。当电感器外接一个低频率交流电信号时，电感器将能量存储在磁场中，电感器起阻碍电流变化的作用。如果电路中的电流是缓慢变化的，电感器对此几乎没有什么反应。也就是说，对于一个低频率的交流电信号，电感器不会产生很大的电抗。

现在开始增大信号频率。信号的频率越高，它经过一个周期所用的时间就越短，在此期间，电流和电压也会发生快速的变化。对于快速变化的电流，电感器产生更为强烈的反应。随着频率的增大，感抗也随之增大。图 17-7 为感抗和信号频率的关系图。直流电时，感抗为零，并且感抗随着信号频率的上升而增大。

在这一节中，我们发现了影响电抗大小的两个因素。电感或信号频率增大时，电抗都会增大。根据这两个因素，我们可以写出计算感抗的公式。

通常情况下，我们以每秒钟出现的波形周期的数量表示频率，单位为赫兹 (Hz)。我们

也可以将每一个周期的波形想象为车轮旋转了一周，这样就可以用每秒钟所经过的弧度来表示频率，并可以把赫兹表示的任何频率都转换为每秒钟所经过的弧度。把赫兹为单位的频率与  $2\pi$  相乘可计算出弧度，其值表示一个周期中弧度的数量。可以用方程 17-4 来计算感抗。

$$X_L = 2\pi fL \quad (17-4)$$

其中： $f$  表示频率，单位为赫兹； $L$  表示电感，单位为亨利。

当频率的单位是千赫兹或者是兆赫兹时，在利用公式进行计算前要先把它转化为单位为赫兹的频率。如果电感是以毫亨或者微亨为单位时，计算前也必须将它转换为单位为亨利的电感。

在图 17-5 中，输入信号的频率为 100Hz，电感器的电感为 10mH，可以计算出感抗：

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 100\text{Hz} \times 10 \times 10^{-3}\text{H}$$

$$X_L = 6.28 \times 1000 \times 10^{-3} \Omega = 6.28 \times 1.000 \Omega$$

$$X_L = 6.28 \Omega$$

现在的计算结果和前面用欧姆定律计算出的结果相同，这一点也不奇怪。我们来看另一个问题，求出在输入信号频率为 1000Hz 时，200  $\mu$ H 电感器的电抗（这与本节中早期出现的问题不同）：

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 1000\text{Hz} \times 200 \times 10^{-6}\text{H}$$

$$X_L = 6.28 \times 2.00 \times 10^{-1} \Omega = 1.256 \Omega$$

你们可以多做一些有关感抗的习题，并试着求解本节前期出现的其他电路中的电抗，答案应该和这里的答案一致。你们甚至可以计算 1 千赫兹和 1 兆赫兹频率时电感器的电抗。通过练习（和你信赖的科学计算器），相信不久后你就可以轻松计算出感抗的值。

# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 17 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以他们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

### 例题

一个 8mH 的电感，在 50Hz 的频率时，它的感抗是多大？

$$X_L = 2\pi fL \quad (17-3)$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 50\text{Hz} \times 8 \times 10^{-3}\text{H}$$

$$X_L = 6.28 \times 400 \times 10^{-3} = 6.28 \times 400 \times (1/1000)$$

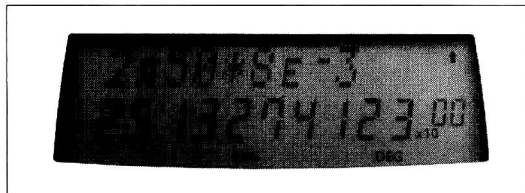
$$X_L = 6.28 \times 0.4 \Omega$$

$$X_L = 2.51 \Omega$$

计算器键入：

$$2 \pi 50 \times 8 2^{\text{nd}} \text{EE} -3 =$$

计算器第二行显示结果：2.513 × 10<sup>00</sup>



## 复习检测：-----

17.1 EMF是一个缩写，它的意思是：

- a) 一部分运动的能量
- b) 电子移动的场
- c) 电动势
- d) 非常快乐的人

17.2 一个电感器两端有一个频率为500Hz，20V的交流电，流过它的电流是80mA，那么这个电感器的感抗是多少？

17.3 不通过计算，如果在上一题中，交流电的频率变为4000Hz，此时电感器的感抗又是多大？

17.4 当电感器两端施加一个交流电，那么电流将\_\_\_\_电压\_\_\_\_。

17.5 100mH的电感器在3kHz的频率时，它的感抗是多大？

## 答案：-----

17.1 c

17.2  $X_L = U/I$ ,  $X_L = 20\text{V}/0.08\text{A}$ ,  $X_L = 250 \Omega$

17.3 如果频率变化到4000Hz (500Hz的8倍)，那么感抗也将是500Hz的8倍，所以， $8 \times 250 \Omega = 2000 \Omega$

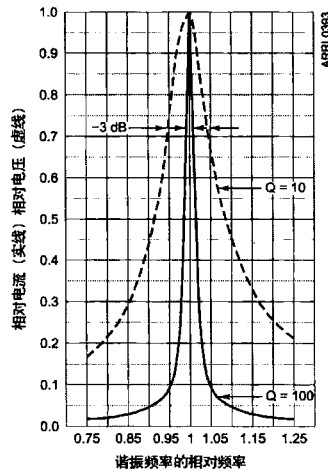
17.4 当电感器两端施加一个交流电，那么电流将滞后电压90°。

17.5  $X_L = 2\pi fL = 2\pi (3 \times 10^3) \times (100 \times 10^{-3}) = 1885 \Omega$



## 第18章

# 电感和电容的品质因数



### 目录

- 电路的电抗和阻抗决定电路的品质因数 ( $Q$ )
- $Q$ 值越大，电感或电容上串联的电阻越小
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

# 电路的电抗和阻抗决定电路的品质因数 ( $Q$ )

理想的电路元件通常只具有一种类型的电路性能，而与电路接的是稳定直流电压还是交流信号源无关。电路元件由电阻为零的导线进行连接。当把电阻器接入到电路中时，它绝不会表现出电容器或电感器的特性。理想的电容器只有电容而没有电阻或电感。理想的电感器只有电感，而没有电阻和电容。

当然，电路元件在实际应用中都不可能满足这些理想的条件。连接电路元件的导线都具有一定的电阻。而当不考虑这些导线电阻并不影响对电路工作原理的理解时，我们通常都是将其忽略掉罢了。

来看一个例子。图 18-1(A) 所示的电路中，有 3 个  $1000\Omega$  的电阻器串联在一起，并假定电路导线的电阻为  $0.1\Omega$ 。图 18-1 (B) 所示的电路中，1 个  $0.1\Omega$  的电阻器与其他 3 个

$1000\Omega$  的电阻器串联在一起。这个  $0.1\Omega$  的电阻用于表示电路导线的电阻，我们用  $R_w$  来标识。现在用欧姆定律来计算一下，这个附加电阻会对电路电流的大小产生多大影响。计算结果是几乎没什么改变 [ 在这个练习中，应该先用图 18-1 (A) 中的电阻来计算电流，然后再用图 18-1 (B) 中的电阻来计算电流 ]。

由于电容器需要用引线接入到电路中，而这些引线具有一定的电阻。存储在电容器中的电能会在电介质或者电容板之间的绝缘物质上产生热量，因而致使电子电路不能继续利用这部分已经转化为热能的电能，也就是说这部分能量在电路中损耗掉了。这是实际电容器和理想电容器的另一个不同之处。

我们把电容器的引线电阻和介电损失看作 1 个电阻。但是，通过在电容器上接一个电阻

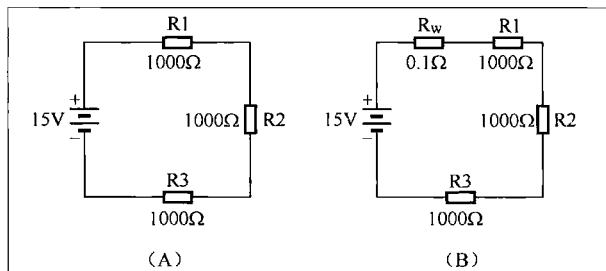


图18-1：图 (A) 为 3 个  $1000\Omega$  的电阻器与  $15V$  的电池串联在一起的电路图。图 (B) 与图 (A) 的电路相同，只不过图 (B) 多接了一个电阻。 $R_w$  表示电路中导线的电阻。作为练习，可以使用欧姆定律来分别计算两个电路的电流。

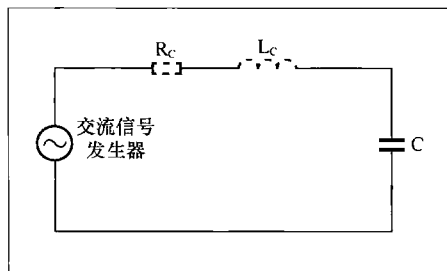


图18-2：图中包含了一个小电阻和一个电感，它们都是实际电容器的组成部分。虚线标出的电阻器和电感器表示它们是电容器的一部分，而不是电路中实际存在的物理元件。

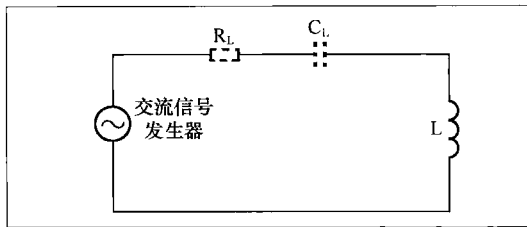


图18-3：实际应用的电感器包括了一小部分电容和电阻。图中以虚线表示电阻器和电容器，它们不是电路中实际存在的物理元件。

表是无法来计算这个电阻的阻值的，因为导线的电阻太小，电阻表不可能测量出来。在用电阻表测量绝缘物质的电阻时，发现其值为无穷大（大的不可能测量出来）。在电容器两个引线之间接入电阻表时，其值显示此电路为断路。

电容器的引线具有一定的电感。在低频率时表现为一个较小的感抗，随着信号频率的增大，感抗也增大。这也是在电容器外接高频信号时需要考虑电感的原因。

图 18-2 所示的电路由一个电容器和一个交流电信号组成。在电路图中用虚线标出了一个电阻器和一个电感器，他们分别表示实际电容器引线的电阻和电感。

大多数电感器是由金属线圈缠绕而成，由于金属线圈具有一定的电阻，因此实际的电感器也具有电阻。电感器的线圈一圈圈地紧密连在一起，当交流信号通过电感器中时，这些相邻的线圈作用就像是小小的电容器。图 18-3 所示的电路中，电感器上接的是一个交流电信号。电路中虚线画出的电阻器和电容器分别表示实际电感器的电阻和电容。

我们通常忽略电容器的微弱电感和电感器的微弱电容。然而，在实际应用中，你必须考虑到这些电路元件的缺陷。然而，当它们

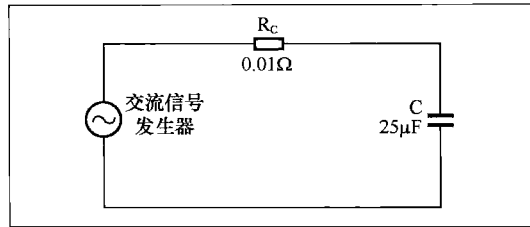


图18-4：25 μF 的电容器具有0.01 Ω 的电阻。交流信号发生器为该电容器产生40Hz的信号。稍后，该信号生成器再产生一个400Hz的信号。正文介绍了在相应条件下，如何来计算电抗和Q的值。

工作在 30 ~ 300MHz 的甚高频（VHF）或者更高频率的射频（RF）电路中时会产生很大影响。不过，我们在本书其余的章节中还是忽略掉这些影响。

通常我们需要这些电路元件的导线电阻，但希望这个电阻能够远小于电容器或电感器的电抗。通常，较好质量的电容器和电感器的电阻较小。

我们可以给线圈或电容器指定一个数值来表明这些电路元件的优缺点。这一数值表示为元件的品质因数，称为 Q 值。一个完整的电路也有一个 Q 值，电路的 Q 值可以帮助我们了解实际电路和理想情况的接近程度。

Q 值定义为电抗与电阻的比值。这一定义适用于电感器和电容器。

实际电容器的 Q 值等于容抗除以电阻。电容器 Q 值的数学定义式如下：

$$Q = \frac{X_C}{R} \quad (18-1)$$

实际电感器的 Q 值等于感抗除以电阻。电感器 Q 值的数学定义式如下：

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (18-2)$$

从上面两个公式中，第一个值得你注意

的是，电阻越小，所产生的  $Q$  值越大。 $Q$  值越大说明元件的质量也越好。

你需要记住的是，电抗会随着频率的变化而变化。容抗在频率最低时达到最大，而随着频率的增高而减小。感抗在频率最低时最小，而随着频率的增高而增大。这些特点将会对  $Q$  值产生怎样的影响？我们来看几个例子。

图 18-4 为一个  $25\mu\text{F}$  的电容器，其引线电阻为  $0.01\Omega$ 。假设给这个电容器接入一个  $40\text{Hz}$  的信号，此时该电容器的  $Q$  值为多少呢？首先来计算容抗。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (18-3)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 40\text{Hz} \times 25 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$X_C = \frac{1}{6.28 \times 10^{-3}}$$

现在可以用公式 18-1 来计算电容器  $Q$  值。

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{159\Omega}{0.01\Omega} = 15900$$

记住，品质因数  $Q$  没有单位（比如欧姆，法拉或赫兹之类）。 $Q$  值是两个量的比值（电阻和电抗），它们的单位都是欧姆。因为分子和分母的单位都是欧姆，相互约掉。

如果接入信号的频率为  $400\text{Hz}$  时  $Q$  值又是多大呢？现在用公式 18-3 来计算这个电抗。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 400\text{Hz} \times 25 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$X_C = \frac{1}{6.28 \times 10^{-3}} = \frac{1}{0.0628}$$

用这个电抗来计算新的  $Q$  值。

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{15.9\Omega}{0.01\Omega} = 1590$$

高频时的电抗的值是低频时电抗的  $1/10$ ，

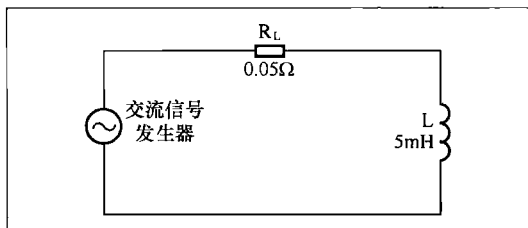


图18-5：50mH的电感器具有 $0.05\Omega$ 的电阻。交流信号发生器先产生一个 $40\text{Hz}$ 的信号，随后再产生一个 $400\text{Hz}$ 的信号。正文介绍了在不同信号输入时，如何计算电抗和 $Q$ 的值。

所以高频时的  $Q$  值也是低频时  $Q$  值的  $1/10$ 。当电容器外接一个高频率信号时，电抗和  $Q$  值均变小。

图 18-5 中所示的  $5\text{mH}$  电感器的电阻为  $0.05\Omega$ 。当接入的信号频率为  $40\text{Hz}$  时，该电感器的  $Q$  值为多少呢？首先来计算感抗。

$$X_L = 2\pi fL \quad (18-4)$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 40\text{Hz} \times 5 \times 10^{-3}$$

$$X_L = 6.28 \times 200 \times 10^{-3} = 1.256\Omega$$

接下来，使用公式 18-2 来计算电感器的  $Q$  值。

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (18-2)$$

$$Q = \frac{1.256\Omega}{0.05\Omega} = 25.1$$

如果接入的信号频率为  $400\text{Hz}$ ，此时电感器的  $Q$  值为多大呢？通过计算可知，在信号频率为  $400\text{Hz}$  时，感抗是  $12.56\Omega$ 。下面用公式 18-2 重新计算  $Q$  值。

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{12.56\Omega}{0.05\Omega} = 251$$

通过计算电感器的  $Q$  值，你能得出什么结论呢？是的，当频率增大时，电抗和  $Q$  值均增大。

# Q值越大，电感或电容上串联的电阻越小



一个理想的电感器或者电容器不会给电路带来额外的电阻，不过，实际应用中的电路元件总会有一定的电阻存在。只不过电路元件的性能越好，它的电阻也会越小。那为什么不能总是使用性能最好的元件呢？那样的话，我们就没必要考虑电感器或电容器的品质因数了，也不会为 $Q$ 值犯愁了。

在选择电路元件时要考虑到各种平衡因素。例如：电路的作用是什么？元件在电路中发挥怎样的作用？接入到元件中的信号应该具有多大的频率？通过思考这些相关问题，可以有助于在工作中选择合适的元件。除此之外，还要考虑电路元件的成本，尺寸和所使用的连接方法等。

你的电路不一定需要最好的元件。假设你有一个电源，可以将120V的交流电转化为

12V的直流电。在不安装滤波电容器时，此电源可输出60Hz或120Hz的波动电压（图18-6为滤波电容器将波纹平滑化的过程）。这种情况下，不需要考虑电容器的高频特性，也没必要过多地关注电容器中微弱的能量损失。

如果你打算在甚高频无线电接收机的射频部件中使用电容器，它必须满足一些别的需求。这个电容必须具有很好的高频特性，电路中的任何信号损失必须降到最小值。

电源滤波器中经常使用的是铝电解电容器。它可以在一个较小的容器中存放大量的电容。铝电解电容器的 $Q$ 值与其他类型的电容器相比要小，这是因为铝电解电容器具有很大的能量损失，频率越高，损失越大。

云母和陶瓷电容器更多地出现在高频应用中。但是在电源滤波器中使用足够大的云母

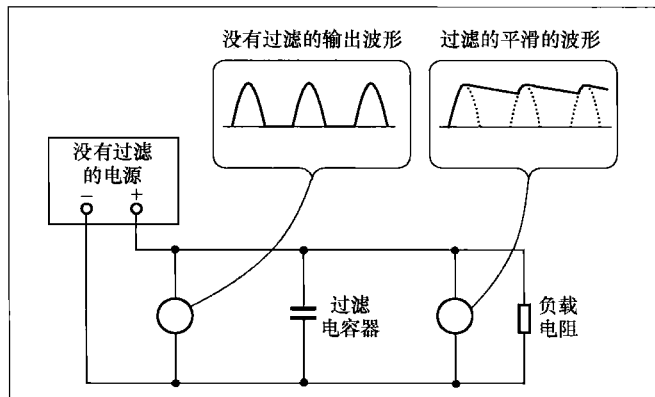


图18-6：一个可以将交流电转化为在电路中应用的直流电的电源。来自交流电的输出信号会有波纹抖动或者微小变化。滤波电容器可以平滑这些波形，产生稳定的直流电输出。

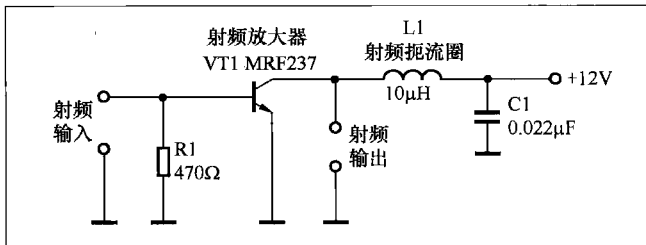


图18-7：射频扼流圈阻碍射频信号沿着导线返回到电源端。在无线电工作频率中线圈的高电抗特性阻碍射频，而在直流电时，电感器只有很小的导线电阻，没有电抗，来自电源的直流电流通过电感器向无线电台提供它所需要的电流。

或陶瓷电容器并不现实，这样的电容器的体积太大。然而，这类电容器的电介质的能量损失要低于电解物质的能量损失。因此，云母和陶瓷电容器的  $Q$  值都比较大。

我们怎么来减小电感器的导线电阻呢？我们知道，导线的直径越大，电阻就越小。因此，将导线缠绕为直径较大的线圈形状，在线圈之间留有大一点的空间都可以减小能量损失。当然，有时电路中的空间不足以放置一个大线圈的电感器。若对  $Q$  的要求不是很高时，可以在应用中使用直径小一点的线圈电感器。

你可以给电源串联一个电感器，并和射频放大器连接。这个电感器可以承载电源产生的一个较小直流电流。在直流电时，电感器的电抗非常小，同时连接电感器的引线有一定电阻。但在射频放大器，电感器表现出很大的电抗，阻止了任何射频电流反向流回到电源端。因为这样的线圈可以允许低频信号的通过，而阻塞高频信号的传输，所以有时也称为扼流圈。图 18-7 为具有这样一个扼流圈的电路。

你不必用高  $Q$  值的线圈来充当扼流圈。你只要使用一个电流源，它可提供放大器所需电流以及提供线圈中的能量损失。

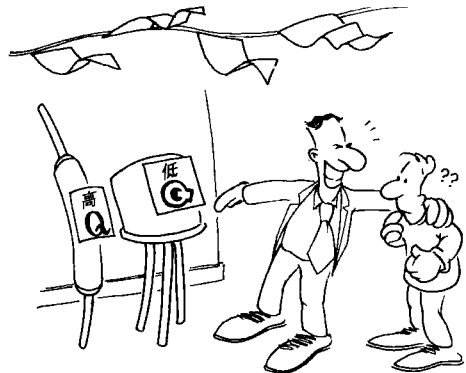
但你一定需要一个高  $Q$  值的电感器用于大功率射频放大器的输出网络。你不希望在线圈上损失任何你辛辛苦苦得到的射频功率。输出

电感器必须能够为 1500W 的放大器承载几安培的射频电流。如果电感器的线圈电阻太大，那么线圈上的能量损失将会很大，这样，传送到天线上的射频功率会出现令人失望的减少。

在一些高功率的放大器中可以使用铜管线圈来制作电感器线圈。铜管线的直径越大，电阻就越小，电感器的  $Q$  值就越高。

任何具有高  $Q$  值的设备或电路的电阻都比较小。高  $Q$  值也意味着元件中其他形式的能量损失也就越低。高  $Q$  值的电容器一般使用低损耗的电介质材料。

高  $Q$  值的电路元件不会损失太多的存储在元件中的能量。 $Q$  值反映了电容器或电感器中存储的能量与损失的能量之间的关系。 $Q$  值较高的电路元件在每一个波形周期中存储的能量要大于它所损失的能量。



# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 18 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以他们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

### 例题

一个  $12\ \Omega$  电抗的电感器和  $0.05\ \Omega$  的电阻串联，它的  $Q$  值是多大？

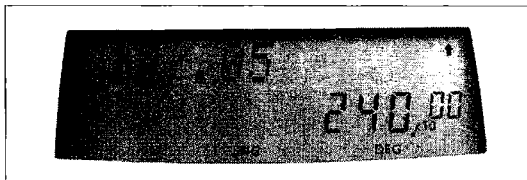
$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (18-2)$$

$$Q = \frac{12\ \Omega}{0.05\ \Omega} = 240$$

计算器键入：

$$12 \div .05 =$$

计算器第二行显示结果： $240 \times 10^{00}$



记住，品质因数计算时是用欧姆除以欧姆，所以它没有单位。因此， $240 \times 10^{00} = 240 \times 1 = 240$

## 复习检测：-----

18.1 在讨论实际电感器和电容器时， $Q$  值指的是：

- a) 半现实的
- b) 合格的电抗
- c) 灵敏电阻
- d) 品质因数

18.2 几乎理想的电感器或电容器的  $Q$  值是：

- a) 非常小
- b) 1.0
- c) 非常大
- d) 0

18.3 有一种电容器，它的  $Q$  值比其他大多数的电容器都低，它是：

- a) 铝质电解电容
- b) 云母
- c) 陶瓷
- d) 射频

18.4 一个电感器，其感抗 ( $X_L$ ) 是  $90\ \Omega$ ，和它串联的电阻阻值是  $1.5\ \Omega$ ，求它的  $Q$  值。

18.5 和品质因数  $Q$  值相关的单位是：

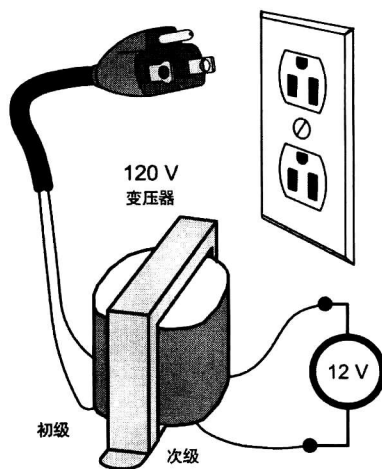
- a) 欧姆
- b)  $Q$  值没有单位
- c) 法拉
- d) 亨利

## 答案：-----

- 18.1 d
- 18.2 c
- 18.3 a
- 18.4  $Q = X_L/R = 90\ \Omega/1.5\ \Omega = 60$
- 18.5 b

# 第19章

## 变压器



变压器将交流电压转换成另一个交流电压。在这种情况下，变压器将墙上插座里的120V电压转化成用一个用电器所需要的电压

### 目录

- 一个线圈上的磁场可以在另一个线圈中产生电流
- 电压器可以提高或降低电压大小
- 线圈匝数比值决定变压大小
- 变压器也可以改变电流大小
- 复习检测



# 一个线圈上的磁场可以在另一个线圈中产生电流

电 流经过电感器会在电感器周围产生磁场。没有电流就没有磁场，而当电路中出现电流时，电感器周围“长出”磁场。当电流增大时，磁场的强度也随着增强。而当一个稳定的直流电流过电感器时，那么电感器周围

产生的磁场强度也会保持恒定。如果电流减小，磁场强度也随之减弱。而当电流消失时，磁场强度也衰减为零。

图 19-1 显示的是给电感器施加一个正弦波交流信号的电路。电路中的电流发生稳定变化。当电流变化时，磁场强度也随着变化。

当交流电信号从零开始增加时，磁场强度也随之增大。当交流信号减为零时，磁场强度也减为零。如果交流电信号的电流方向发生改变，磁场会发生什么变化呢？磁场的极性也会发生变化。图 19-2 为线圈周围的磁场。注意到当电流方向反转时，磁场的南极和北极也会发生反转。可以想象到磁场强度的波形和所接

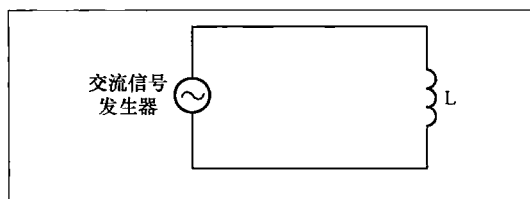


图 19-1：交流信号源在电感器周围产生一个变化的磁场。

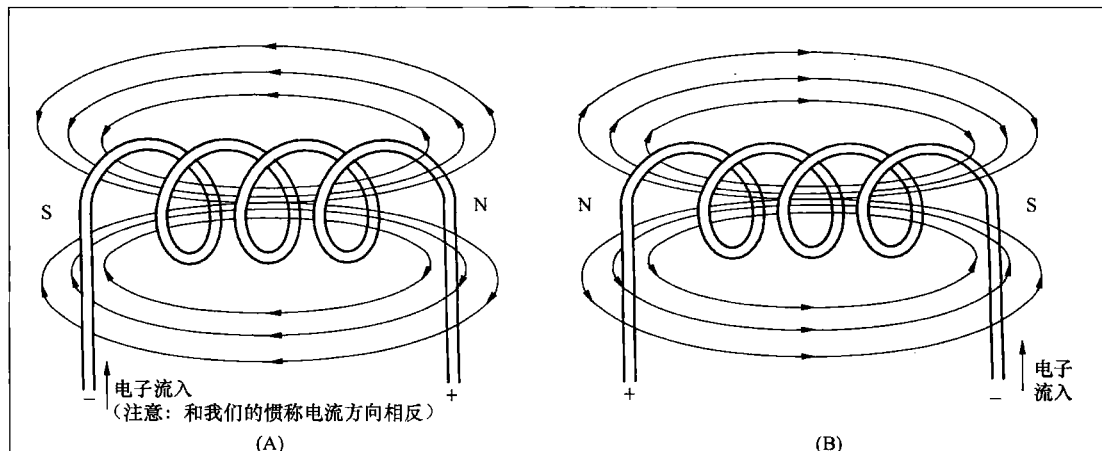


图 19-2：当电流方向改变时，电感器上产生的磁场的极性也会改变。在图 (A) 中，电子流经左边的导线，磁场北极指向线圈的右端。在图 (B) 中，电子流经右边的导线，磁场北极指向线圈的左端。

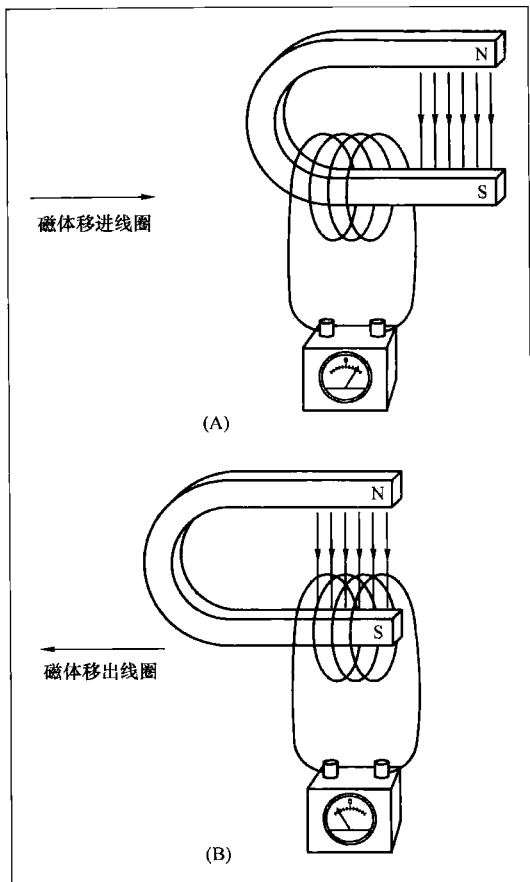


图19-3：在一个磁场中移动线圈可以在线圈上产生电压，这个电压在闭合的线圈回路上产生一个电流。电压极性和电流方向会随着线圈移动方向的改变而改变。

信号电流的波形一样，都是正弦波。

变化的电流产生变化的磁场。那么变化的磁场能不能产生变化的电流呢？当然可以！发电机就是用这个原理来工作的。

我们怎样才能产生一个变化的磁场呢？一个方法就是移动磁铁。图 19-3 为马蹄形磁铁在线圈中移进移出的图形。线圈与一个灵敏电流表连接在一起，组成了一个闭合回路。当磁铁移进到线圈中时，线圈中有电流产生，电流表指针向右边移动。当磁铁移出线圈时，线圈中的电流和前面的电流方向相反，仪表指针向左边移动。

无论是磁场的移动，还是电感器线圈的移动，都会在电感器上产生电压。因此，线圈在穿过永久磁铁的磁场或永久磁铁在穿过线圈时都会有电压产生。流经电感器的交流电信号也可以产生一个变化的磁场，这个磁场会随着电流的变化而增强、衰减和反转极性。

在一个线圈上变化的磁场可以在另一个线圈中产生电压。图 19-4 为两个相邻很近的电感器。流经左边电感器的交流电信号会在右边的电感器上产生一个变化的磁场。

当一个线圈的磁场穿过另一个线圈时，我们就可以说线圈产生了互感应。有时也把具有互感应的线圈称为联动线圈或耦合线圈，也被称为变压器。

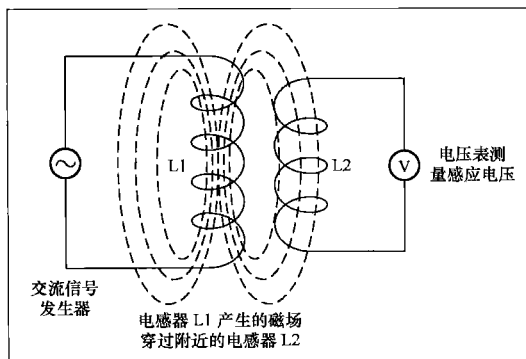


图19-4：线圈L1中的变化磁场穿过了线圈L2。L1的磁场在L2上产生电压，并产生了一个流经L2线圈的电流。

# 电压器可以提高或降低电压大小

当一个电感器的变化磁场穿过另一个电感器时，电感器线圈之间产生了互感。这个磁场将在第二个电感器上产生感应电压。

有的电路要求你减少任何形式的互感，因为感应电压有时会破坏电路的工作。

而有的电路需要利用互感来进行工作。在这一节中，我们主要关注我们需要的互感效果。

图 19-5 为两个放置好的线圈，当一个线圈中电流变化时会在另一个线圈上产生感应电压。我们称这样的组合为变压器。变压器可以由两个以上的线圈组成。

在一个电感器上施加了输入信号，这个电感器是变压器的初级线圈。变压器初级线圈可以在一个或多个次级线圈上产生感应电压。这些次级线圈为电路提供一个输出电压。

变压器可以把能量从电路的一部分转移到电路的另一部分，而且电路中的这两部分没

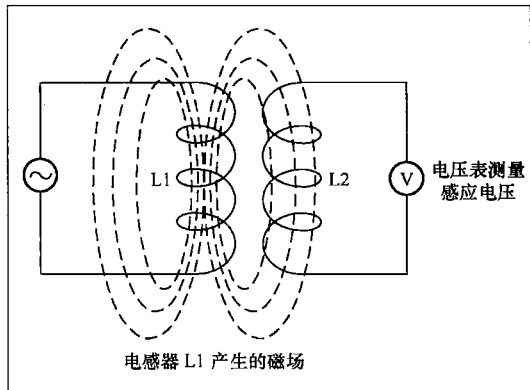


图19-5：流经电感器L1的电流产生一个磁场，这个磁场穿过电感器L2的线圈，L2上变化的磁场产生了一个电压。这些电感器的组合形成了变压器。

有直接地连接。当然，输入初级线圈的能量是电能，然后转化成磁能，接着在次级线圈中，又转化成电能。

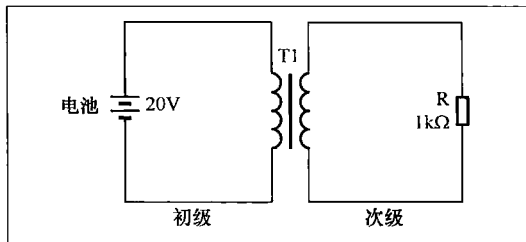


图19-6：变压器的初级线圈这边接有20V的电池。在次级线圈那边接有一个1kΩ的电阻器。电感器之间的实线表示变压器为铁芯变压器。此时，在次级线圈上没有电压，在电阻上也没有电流。变压器需要在初级线圈上加有变化的电压才能在次级线圈上感应出电压。

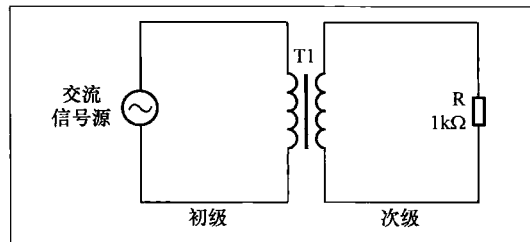


图19-7：当将图19-6中的变压器与交流信号源连接时，会在次级线圈上产生电压，这个感应电压产生一个交流电流通过电阻。

我们通常希望变压器的初级和次级线圈之间的互感达到最大值，这样可以确保能量在电感器之间很好地转移。这就要求两个线圈自身必须相互靠近。初级线圈的大部分磁场必须穿过次级线圈。为此，我们往往把初级线圈和次级线圈缠绕在同一磁芯上。磁芯通常用铁、铁粉或铁氧体材料制成。

图 19-6 为变压器的初级线圈与电池相连，电池为变压器提供了一个直流电流。变压器的次级线圈和一个电阻器连接在一起。两个线圈之间的实线表示变压器为铁芯变压器。

你能描述次级线圈上生成的电压吗？你认为会有多大的电流流过电阻？记住，只有变化的磁场才能在次级线圈上产生感应电压。

你的答案是不是次级线圈上没有电压，流过电阻器的电流为零呢？非常好！顺便说一下，将直流电源（例如电池）连接到变压器的初级线圈上是一个非常糟糕的主意；其结果是变压器会由于过热而冒烟，或者彻底损坏变压器。

在图 19-7 中，我们将变压器与一个交流信号连接。这时次级线圈上产生感应电压，因此也有电流流过电阻。

为很多电子设备提供动力的“电源供应器”（俗称“稳压电源”）中就有一个变压器。这些“电源供应器”插头直接插入墙壁上的电

源插座中，然后另一端有一根导线，可以直接接到收音机、电话、MP3 等其他设备中。电源供应器的初级线圈电压是 120V 的家用电压（注释：中国的家庭电路电压是 220V），次级线圈输出电压通常是较低的电压，比如 9V 或 12V 电压。

我们可以利用变压器产生任何所需大小的输出电压。有些变压器的输出电压比输入电压低，而有些变压器的输出电压要比输入电压高。

有些变压器还不止一个次级线圈。这些变压器可以从一个输入电压中产生多个输出电压。你甚至可以找到一种变压器，在它的两个输出电压中，一个输出电压比输入电压大，而另一个输出电压却比输入电压小。

变压器具有多种外形和尺寸。通常，变压器越大，产生的电压越高，或者要用粗导线来负载更大的电流。变压器的铁芯通常由硅钢片堆叠而成，这个金属“盒子”被包裹起来保护电线。设计用于在射频信号中使用的变压器通常用铁粉或铁氧体做磁芯。在射频用变压器中经常可以看到环形或圆环形状的铁芯。

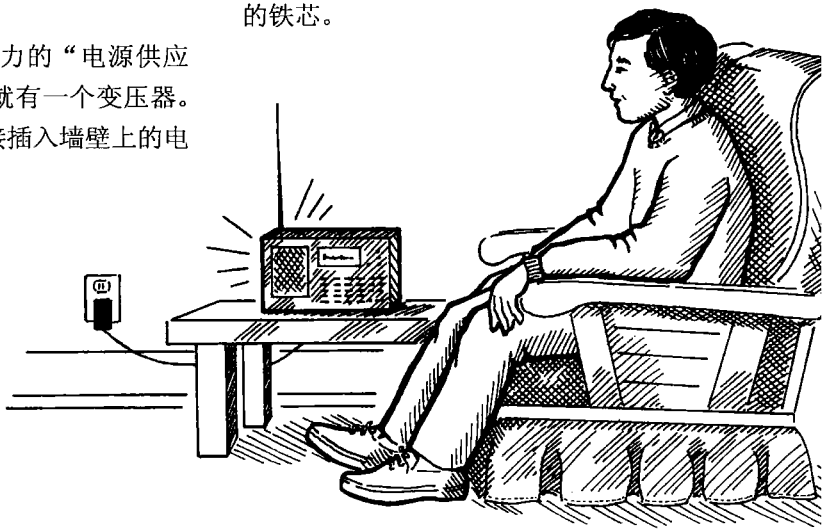


图19-8：较小的稳压电源变压器可以为很多电子设备提供动力，例如像这台便携式短波收音机。

# 线圈匝数比值决定变压大小

电感器周围的磁场强度与几个因素有关。当电感器上所接的电压变大时，磁场强度增强，流经电感器的电流也增大；当电感器的线圈匝数比较多时，磁场强度也会增大；把线圈缠绕在铁芯、铁粉芯或铁氧体物质上也可以增大磁场强度。

图 19-9 为带有两个相同线圈的理想变压器。这个变压器的初级线圈和次级线圈的匝数相同。理想变压器可以把输入到初级线圈的全部能量转移到次级线圈上，而且不会在线圈的电阻上或者变压器的铁芯上有任何能量的损失。

在图 19-9 中，我们把变压器与 120V 的家用电压相连，这个初级电压将在次级线圈上产生一个 120V 的电压。

变化的磁场产生的感应电压与电感器线圈的匝数成比例。线圈匝数越多，在电感器上所产生的感应电压也就越大，线圈匝数越少，

产生的感应电压也就越小。

图 19-10 为具有两个次级线圈的变压器。初级线圈的匝数为 1000 匝，第 1 个次级线圈的匝数为 500 匝，第 2 个次级线圈的匝数为 250 匝。现在我们把初级线圈接入 120V 的电压，测量每个次级线圈上的电压。你们注意到了吗？第 1 个次级线圈的匝数只有初级线圈的一半。在第 1 个次级线圈上，你测量的电压测量值将为 60V。你认为我们在第 2 个次级线圈上测得的电压会有多大？第 2 个次级线圈的匝数为第 1 个次级线圈的一半，是初级线圈的 1/4。因此，我们在第 2 个次级线圈上测得的电压将是 30V。

前面的例子说明计算变压器输出电压非常容易。我们只要知道初级线圈和次级线圈的匝数比值。初级线圈的匝数除以次级线圈的匝数就是它们的匝数比值。匝数比和输入、输出的电压比值相同。我们可以将这个文字表述用

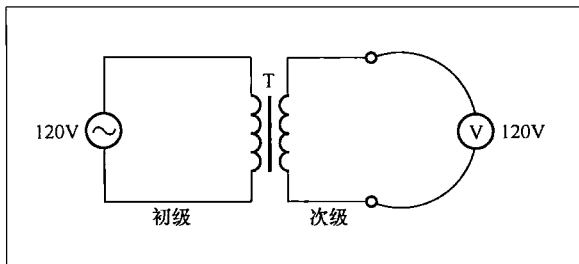


图19-9：这个变压器具有相同的初级和次级线圈。当初级线圈接入120V交流电时，次级线圈上也会产生120V的交流电。

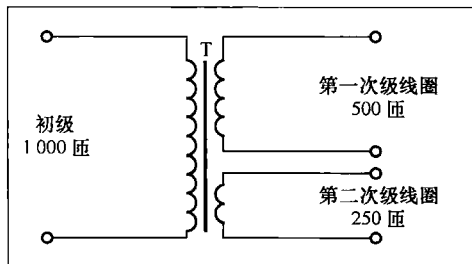


图19-10：这是一个带有2个次级线圈的变压器。第1个次级线圈的匝数是第2个次级线圈匝数的2倍，第1个次级线圈上的电压也将会是第2个次级线圈上的2倍。

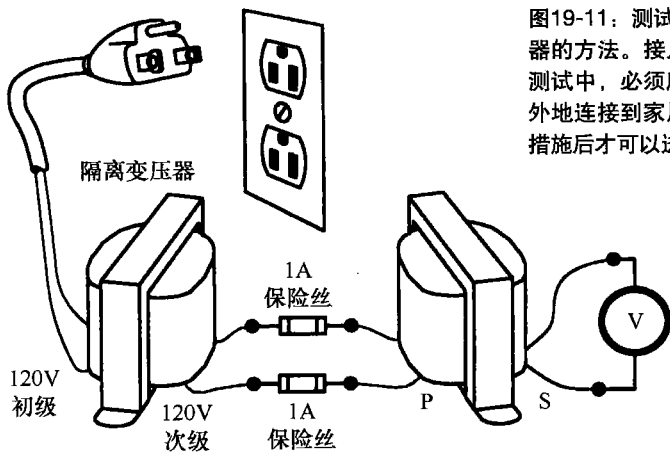


图19-11：测试装备展示了测试一个不了解具体参数的变压器的方法。接入的保险丝起到了防止电路短路的作用。在测试中，必须所有的连接电路都是绝缘的，以防止电路意外地连接到家用电压中。只有在非常熟悉测试步骤和安全措施后才可以进行如图所示的测试。

公式来表示，当输入电压已知时，可用这个公式来计算变压器的输出电压。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s} \quad (19-1)$$

其中：

$N_p$  是初级线圈的匝数；

$N_s$  是次级线圈的匝数；

$U_p$  是初级电压；

$U_s$  是次级电压。

假设我们有一个具有 300 匝初级线圈和 100 匝次级线圈的变压器。当初级线圈上的电压为 120V 交流电时，次级线圈上的电压为多大？把这些值代入公式 19-1，可以求得  $U_s$ 。

$$\begin{aligned} \frac{N_p}{N_s} &= \frac{U_p}{U_s} \\ \frac{300}{100} &= \frac{120V}{U_s} \\ \frac{3}{1} &= \frac{120V}{U_s} \end{aligned}$$

（利用这个公式求解  $U_s$  的最简单的方法是两边同时乘以  $U_s$ ，这样可以消去等式右边

的  $U_s$ ，并把  $U_s$  放到等式左边，然后两边除以 3，你就可得答案。）

当变压器的初级线圈接入 120V 电压时，次级线圈上的电压值是 40V。如果初级线圈上的电压为 12V 时，则次级线圈上的输出电压为 4V。你可以计算出这个值么？输出电压比输入电压小，而且输入电压和输出电压的比值总是 3:1。由于变压器产生的输出电压比输入电压小，所以称这个变压器为降压变压器。

让我们来看另一个例子。假如我们现在有一个初级线圈是 500 匝，次级线圈是 4000 匝的变压器。这个变压器的线圈匝数比是多少？如果初级线圈的电压为 120V 交流电，次级线圈的电压为多大？我们可以利用公式 19-1 来求解变压器的线圈匝数比。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{500}{4000} = \frac{1}{8} = 0.125$$

线圈匝数比小于 1，这也说明这个变压器是升压变压器。升压变压器可以产生一个大于输入电压的输出电压。现在用公式 19-1 来计算次级电压。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s}$$

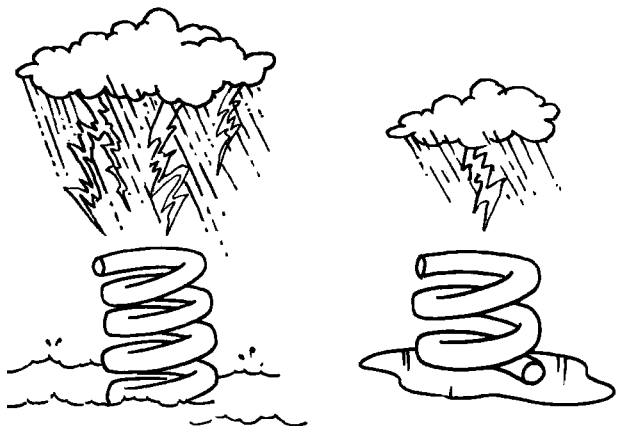
$$0.125 = \frac{120V}{U_s}$$

(使用与前面例子类似的方法来求得  $U_s$ )

$$U_s = \frac{120V}{0.125} = 960V$$

再来看另一个例子吧。假如你在当地电子市场中找到了一个便宜的变压器。商店老板告诉你，变压器的包装盒和说明书都已经丢失了。你不能确定它的次级电压有多大，当然你也不能拒绝这么便宜的货物，所以你还是把它买了回去。

当你在检测这个变压器时，你发现有一个标记 P 在一对电线上的不远处，另一个标记 S 在另一对电线上的不远处。你断定这些标记表示了变压器的初级线圈和次级线圈。图 19-11 告诉你如何将变压器安全连接到交流电源上。在两根测试引线上分别连接了一个 1A 的保险丝。在接上电源前，你必须确保所有的线路连接都是绝缘的。如图 19-11 所示，连接到交流电上的变压器的线圈之比是 1:1，称为隔离变压器。它的作用是为它的次级线圈提



供 120V 的交流电，而同时将它和交流电源隔离。

测量输出电压时，你发现次级线圈上的电压为 25V。那么变压器的线圈匝数比是多少呢？

我们可以再次使用公式 19-1 来求解。现在由于不知道初级线圈和次级线圈的具体匝数，所以我们只能求得二者之间的一个比值。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s}$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{120V}{25V} = 4.8$$

可以算出，初级线圈的匝数是次级线圈的 4.8 倍。恭喜你！你现在可以将这个廉价的变压器用到你设计的低压电源中了。

你的邻居有一个降压变压器，如果你家附近有电线杆，电线杆上有电力线、电话线（有时有光纤电缆）、电视光纤或同轴电缆，仔细观察杆的顶部。离地面最远的那组电线（为了安全，离人最远）叫做主电线，它们之间的交流电压高达 23 000V。如果在风暴期间它们被树枝撞击到地面上，将会非常危险。你家中需要 120V 的交流电，而有的电线杆上靠近主电线附近有一个非常大的灰色的桶状物（和垃圾桶的大小差不多），你猜对了吗？它是降压变压器，里面填满了铜导线（初级线圈和次级线圈），铁（变压器的核心）和油（用来隔离和冷却导线）。

如果你家房子地下有一些公用设施（电力线、电话线、有线电视线），请仔细观察你家房子和邻居周围，在靠近街道附近可能有一个大的水泥板，上面有一个巨大的金属装置。这个装置内装着将 2300V 交流电变成接入你家中的 120V 的降压变压器。

## 变压器也可以改变电流大小

通过变压器，我们可以把任何交流电压进行变换。变压器将能量从初级线圈传递到次级线圈。如果次级线圈的匝数比初级线圈多，变压器为升压变压器，它的次级电压要比初级电压大。如果次级线圈的匝数比初级线圈少，变压器为降压变压器，它的次级电压要比初级电压小。

到目前为止，你可能认为，变压器是一种神奇的设备，因为它可以提高电压。不过它其实和操场上的跷跷板，或者用来将钉子从木头中取出的羊角锤差不多的装置。

让我们来看看跷跷板，一个大人坐在它的左侧，一个小孩坐在它的右侧。如果跷跷板的支点在两个的中间合适的位置，小孩可以将大人一端翘起来。这是一个奇迹？或者是一种简单机械——杠杆给小孩增加了力吗？当然，

这里没有免费的午餐。如果小孩想把大人翘起离开地面 12 英寸，那么小孩必须将自己一端的跷跷板压低超过 12 英寸。跷跷板在另一端增加了向上的力，但是在这端需要降低更多的距离。见图 19-12。

能量守恒定律是一个基本的自然定律，所有的变压器都遵守这个定律。根据能量守恒定律，系统中的能量总和保持不变。因我们既不能创造能量，也不能消灭能量，我们只能将能量从一种形式转化为另一种形式。

这个定律告诉我们，在变压器中，我们从次级线圈中获得的能量不可能大于初级线圈上输入的能量。实际的变压器会把一部分能量转化为导线和铁芯物质上的热能。克服导线的电阻需要消耗一部分能量，这部分能量表现为导线上产生的热能。磁化铁芯物质需要消耗部

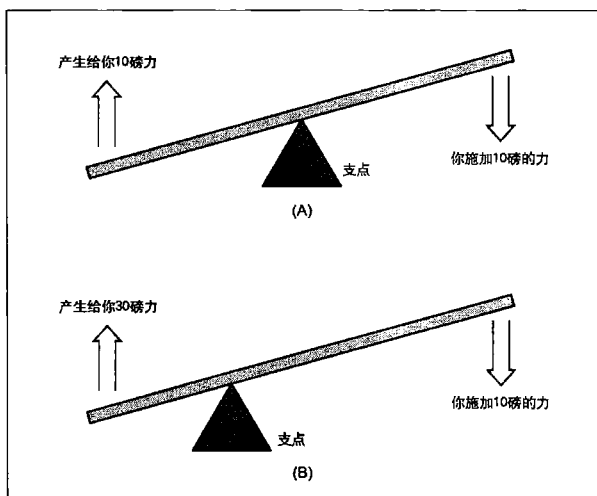


图19-12：图中A部分是一根杠杆，一个简单的机械装置，由一块板和支撑点（支点）组成。有一个施加的力（你施加的力）和一个输出的力（你产生的力）。A部分的杠杆支点在中间，施加的力和输出的力相等。B部分中，支点向输出力的一端靠近，结果显示，输入一个小的力，可以产生一个较大的输出的力。杠杆可以看成是一个可以提升力的机械“变压器”。



分能量，这部分能量表现为变压器铁芯上产生的热能。电能转化为热能表现为电能的损失，但不是能量的丢失。

功率表示使用能量的速率。我们通过电流与电压相乘可得功率。下面我们从功率角度来考虑变压器中的能量守恒定律。

我们通过测量初级线圈的电压和电流计算出输入功率。公式 19-2 是变压器输入功率的数学表达形式。

$$P_{\text{输入}} = I_p \times U_p \quad (19-2)$$

其中：

$P_{\text{输入}}$  表示输入电路或者初级电路的功率；

$I_p$  表示初级电流；

$U_p$  表示初级电压。

公式 19-3 与公式 19-2 类似，告诉我们怎样计算变压器的输出功率。这些符号的下标代表了输出功率，次级电流和次级电压。

$$P_{\text{输出}} = I_s \times U_s \quad (19-3)$$

我们可以通过把变压器假设为理想状态变压器来简化我们的分析，也就是假设导线没有电阻，在磁化铁芯时也不会带走任何能量。因此，变压器不会造成电能的损失。能量守恒定律告诉我们，输入功率必须等于输出功率，公式 19-2 必须等于公式 19-3。

$$P_{\text{输入}} = P_{\text{输出}} \quad (19-4)$$

我们也可以用电压和电流来表示这个公式。

$$I_p \times U_p = I_s \times U_s \quad (19-5)$$

当然，实际应用中的变压器肯定会有电阻，磁化铁芯时也会带走一部分能量。总有一部分输入能量转化为热能。因此，变压器的实际输出能量也总会略小于输入能量。

再看一下公式 19-5，电压和电流的乘积必须相等。升压变压器会升高电压，所以有效的电流会减小。降压变压器会减小电压，也就

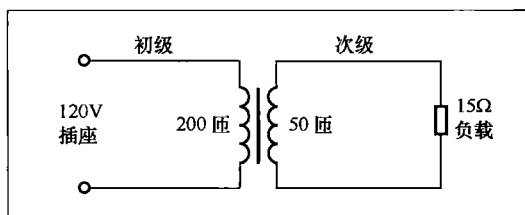


图19-13：这个变压器将120V的家用电压转换为30V。正如正文中所说，在120V输入电压时，初级电路的电流为0.5A。次级电路的电流是2A。

意味着次级线圈中的电流要比初级线圈中的电流大。在公式 19-5 中，电压和电流是成反比的，其中一个值的增加将导致另一个值的减小。

我们来改写公式 19-5。把电压关系写在等号的一边，把电流关系写在等式的另一边。利用交叉相乘，我们可以把公式改写为：

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{I_p}{I_s} \quad (19-6)$$

你或许还记得初级电压与次级电压之比等于初级线圈匝数与次级线圈的匝数之比。公式 19-7 是这个关系的数学表达式。

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (19-7)$$

现在我们把变压器的线圈匝数比和它们的电流比进行比较。把公式 19-5 中的初级和次级的电压之比用公式 19-7 中的初级与次级线圈匝数之比来代替。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (19-8)$$

注意，初级电流和次级电流的大小与线圈匝数数量相反，这是一个反比关系。线圈匝数越多，负载的电流越小。这也说明你应该用直径较大的导线制作匝数较少的线圈，而可以用直径较小的导线制作匝数较多的线圈。

导线的尺寸决定了变压器可以安全处理

的电流的大小。记住，导线的直径越小，导线的电阻就越大。你必须知道，在为特别应用选择选择变压器时，这是一个折中方案。用直径小的导线制作的变压器体积比较小，价格也便宜。用直径大的导线制作的变压器可以承载更大的电流。所以你必须决定次级线圈通过的电流的大小以及它允许的一个安全系数，然后根据变压器的额定电流以及要输出的电流再选择合适的变压器。

图 19-13 中显示和一个消耗 2A 电流的负载相连的降压变压器。这个变压器的初级线圈有 200 匝，次级线圈有 50 匝。初级线圈可以从壁装电源插座中获得的电流有多大呢？可用公式 19-8 来计算这个电流。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

$$\frac{200}{50} = 4 = \frac{2A}{I_p}$$

交叉相乘，可以求得初级电流  $I_p$ 。

$$I_p = \frac{2A}{4} = 0.5A$$

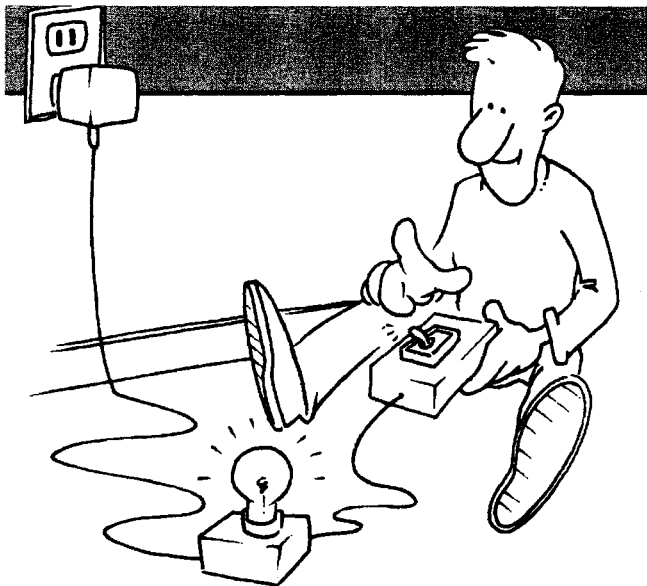
另一个变压器的线圈匝数比在 5.5 到 1 之间。也就是说这个变压器的初级线圈的匝数是次级线圈的 5.5 倍之多。如果这个变压器的初级线圈可以处理 4A 电流，那么次级线圈上的电流有多大呢？同样，再次用公式 19-8 来进行求解。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

$$5.5 = \frac{I_s}{4A}$$

$$5.5 \times 4A = 22A$$

这些例子显示出了变压器的初级电压、电流和次级电压、电流之间的重要关系。变压器在电子电路中有很多用途，我们通常把变压器作为改变电压级别大小的装置，通过变压器，有效的电流也得到改变。



复习检测：-----

19.1 当磁场从一个线圈穿过另一个线圈时，线圈中会有：

- a) 磁屏蔽
- b) 互感
- c) 循环链接
- d) 成为好朋友

19.2 用永磁铁在线圈中产生电压，下列哪种方法是可行的？

- a) 磁铁必须靠近线圈
- b) 必须用磁体的北极
- c) 磁体必须在线圈内
- d) 磁铁或线圈彼此间要相对运动

19.3 埃尔伍德将一节1.5V的一号电池链接到变压器的初级线圈，令他非常失望的是，在次级线圈上没有输出电压。你会怎样告诉他为什么次级线圈没有输出电压？

19.4 环状变压器的铁芯：

- a) 仅用于升压变压器
- b) 仅用于降压变压器
- c) 圆环状，用于射频变压器
- d) 可以食用

19.5 一个变压器的初级线圈有1000匝，次级线圈有250匝，那么这个变压器是：

- a) 降压变压器
- b) 升压变压器
- c) 隔离变压器
- d) 匝数比是1250 : 1

19.6 如果上一个问题中，给初级线圈输入的电压是100V，求出次级线圈上的输出电压。

19.7 一个升压变压器：

- a) 输出功率大于输入功率
- b) 次级线圈中的电流大于初级线圈中的电流
- c) 放在楼梯的最好处
- d) 次级线圈中的电流小于初级线圈中的电流

答案：-----

19.1 b

19.2 d

19.3 为了在任何电感器中产生感应电压，磁场必须发生变化。1号电池为初级线圈提供大小不变的电压和电流，不变的直流电流不会产生变化的磁场，所以在次级线圈中不会有感应电压。

19.4 c

19.5 a

19.6  $1000/250 = 100V/U_s$

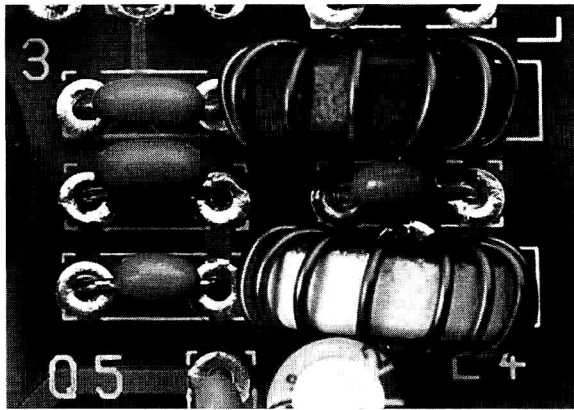
$$4/1 = 100V/U_s$$

$$U_s = 25V$$

19.7 d

## 第20章

# 阻抗



阻抗是用来描述电路中电阻和电抗组合的术语

### 目录

- 欧姆定律也适用于交流电路
- 电压和电流可能不会同时到达峰值
- 电容上的电压和电流
- 电感中的电压和电流
- 电感器和电容器的电路电抗
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

# 欧姆定律也适用于交流电路

在图 20-1 的电路中，12V 电池和一个阻值为  $1200\ \Omega$  的电阻相连。我们可以用欧姆定律来计算这个电路中的电流。公式 20-1 给出了欧姆定律的数学表达式。

$$U = IR \quad (20-1)$$

其中， $U$  是电路电压； $I$  是电路电流； $R$  是电路电阻，或是电流所遇到的阻抗。

为了计算出电流，我们可以找出电流的公式。

$$I = \frac{U}{R} \quad (20-2)$$

$$I = \frac{12\text{V}}{1200\ \Omega} = 0.01\text{A}$$

你也可以把电流的单位用毫安来代替安培。

$$I = 10\text{mA}$$

现在，将图 20-1 中的电池替换为正弦波交流电源。图 20-2 为替换电压后的新电路，正弦波发生器产生一个 12V 有效输出电压。交流电的 12V 有效电压和 12V 直流电压给阻值为  $1200\ \Omega$  的电阻  $R_1$  提供的功率相等。

记住，交流电波形的有效值的另一个名称是均方根值（RMS）。在这个例子中，信号生成器的均方根输出电压为 12V。图 20-3 是一个标出了峰值、峰间值和均方根值。从图中可以发现，峰值是均方根值的 1.414 倍，也就是 16.97V。峰间值为峰值的两倍，33.94V。

简单来说，交流电的波形电压大小在不断变化，当它的电压到达 16.97V 的峰值时，在整个周期的大部分时间内，电压值却都小于这个峰值。事实上，在一个周期内，正弦波交

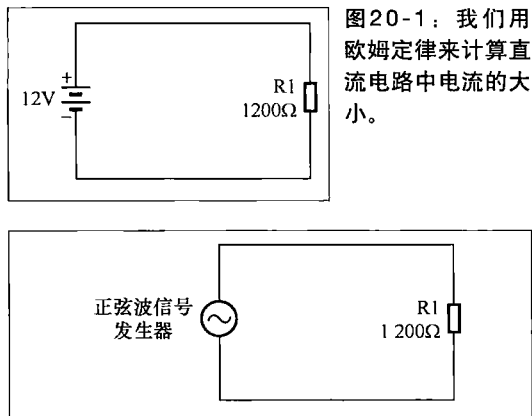


图 20-2：我们可以用欧姆定律来计算通过电阻器的交流电流。在计算这个电流时，需要知道电压的峰值或峰间值，并计算出相对应的电流大小。

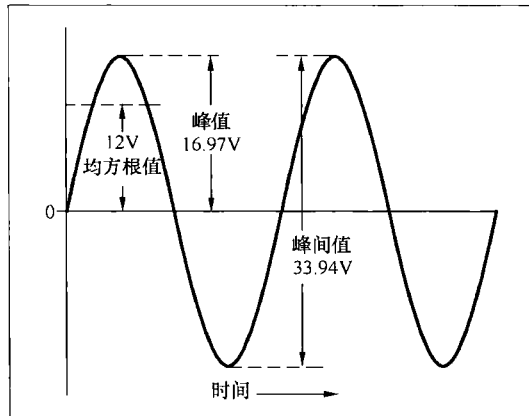


图 20-3：在这个正弦波形图形中，标记出了均方根值、峰值、峰间值。

流电有两次电压值为 0V。交流电的均方根值或有效值和同样大小的直流电给 R1 加热的效果是一样的。

在计算电路中的电流时，我们该选用哪一个电压呢？嗯，其实只要指定了计算方法，我们就可以使用任何一个电压值。现在让我们用欧姆定律来分别计算电路中的均方根电流，波峰电流和峰间电流，公式 23-2 给出了电流的计算方法：

$$I = \frac{U}{R}$$

$$I_{\text{有效}} = \frac{U_{\text{有效}}}{R} = \frac{12V}{1200\Omega}$$

$$I_{\text{有效}} = 0.01A = 10mA$$

$$I_{\text{峰值}} = \frac{U_{\text{峰值}}}{R} = \frac{16.97V}{1200\Omega}$$

$$I_{\text{峰值}} = 0.01414A = 14.14mA$$

$$I_{\text{峰间}} = \frac{U_{\text{峰间}}}{R} = \frac{33.94V}{1200\Omega}$$

$$I_{\text{峰间}} = 0.02828A$$

$$I_{\text{峰间}} = 28.28mA$$

大家已经知道波峰电流是均方根电流的 1.414 倍，一旦计算出了波峰电流后，不使用欧姆定律就可计算出波峰到波谷的电流大小了。

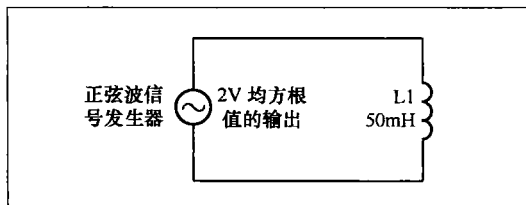


图20-4：交流电信号发生器给电感器提供一个2V的正弦波信号。正文中解释了如何使用欧姆定律来计算电路电流。感抗是电感器对电流的阻碍度量。

欧姆定律在交流电压中的工作方式和在直流电压中的工作方式相同。但是，需要注意的是要求解的是均方根值还是波峰值。大多数情况下，我们计算的是交流信号的均方根值，因此也就没必要在结果中特意写上均方根。当不确定测量类型时，一般都理解为是均方根测量。

在电子电路中电阻不是唯一阻碍电流的元件。电感器和电容器对交流电流都有阻碍作用，这个阻碍与交流信号电压的频率相关，我们把这种阻碍电流的性质称为电抗。公式 23-3 将提醒你如何计算电感器的感抗  $X_L$ 。

$$X_L = 2\pi fL \quad (20-3)$$

其中， $\pi$  是与 3.14 大致相等的常数； $f$  是信号频率，单位为赫兹； $L$  是感应系数，单位是亨利 (H)。如果对这个公式不熟悉，可以回顾前面讲述电感器和感抗那部分章节的内容。

图 20-4 的电路中，包含有一个正弦波信号发生器和一个 50mH 的电感器。让我们把正弦波信号的输出频率设置为 5 000Hz，信号发生器产生的输出电压为 2V，此时可以用欧姆定律来计算电路电流，但首先我们需要计算出感抗。由于感抗是电感器对交流电的阻碍而产生的，因此用它来替代欧姆定律中的电阻。

用公式 20-3 来计算电感器的感抗  $X_L$ ：

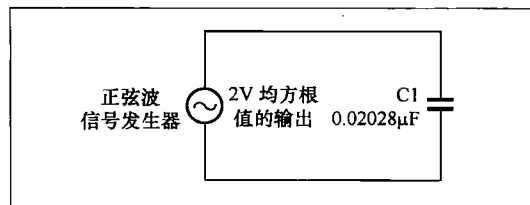


图20-5：交流电信号发生器给电容器提供一个2V的正弦波信号。容抗是电容器对电流的阻碍度量。正文中对如何使用欧姆定律来计算电路电流作出了解释。

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 5\,000\text{Hz} \times 50 \times 10^{-3}\text{H}$$

$$X_L = 1\,570\Omega$$

现在用感抗替代欧姆定律中的电阻，求解出电路电流：

$$I = \frac{U}{X_L}$$

$$I = \frac{2\text{V}}{1570\Omega} = 1.27 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$I = 1.27\text{mA}$$

如果我们把信号发生器的输出频率降为 2 500Hz 将会发生什么变化？输出信号频率变化后，感抗的值也会发生变化，从而引起电流的变化。下面我们来计算这个感抗和电路电流（信号发生器输出电压仍然是 2V）：

$$X_L = 2\pi fL = 2 \times 3.14 \times 2\,500\text{Hz} \times 50 \times 10^{-3}\text{H}$$

$$X_L = 785\Omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{2\text{V}}{785\Omega} = 2.55 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$I = 2.55\text{mA}$$

在图 20-5 中，0.020 28  $\mu\text{F}$  的电容器与信号发生器连接在一起。我们把信号发生器的输出频率再次设置为 5 000Hz，输出电压为 2V，那么经过电路中的电流是多大呢？

容抗是电容器对交流电流呈现出的阻碍作用，这个阻碍的值就是容抗。公式 20-4 将提醒你如何计算电容器的容抗  $X_C$ ：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (20-4)$$

其中， $\pi$  是一个与 3.14 大致相等的常数； $f$  是信号频率，单位是赫兹； $C$  是电容，单位是法拉（F）。现在用容抗替代欧姆定律公式中的电阻，来计算图 20-5 电路中的电流大小。在计算电流前，必须先计算出电容器的容抗：

$$X_C = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 5000\text{Hz} \times 0.020\,28 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$X_C = \frac{1}{6.368 \times 10^{-4}} = 1570\Omega$$

现在用公式 20-2 来计算电路中的电流：

$$I = \frac{U}{X_C}$$

$$I = \frac{2\text{V}}{1570\Omega} = 1.27 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$I = 1.27\text{mA}$$

假设信号发生器的频率变为 2 500Hz。作为额外练习，你应该算出改变后电路中的电流应为 0.637mA（提示：你必须首先计算出新的容抗）。尽管我们在欧姆定律中用感抗和容抗来代替电阻，分别计算经过电感器或者电容器的电流，但是感抗和容抗与电阻并不完全一样。我们用阻抗来表示电阻或电抗，或是两者的组合。

假设在电路中，一个信号发生器与一个电阻器和电感器（或电容器）串联在一起。由于电阻器和电抗并不相同，所以在计算时不能只是把它们值简单相加。当我们讨论电路的阻抗时，可以用一个统一的术语来表示电阻、电抗或者两者的组合。在下一个章节中，你将学习到更多关于电路阻抗和阻抗计算的知识。

## 电压和电流可能不会同时到达峰值

当电路中存在电源电压和电阻时，可以用欧姆定律来描述电路中的电压、电阻和电流之间的关系。电源电压可为电路提供直流电流或交流电流。

当电路中存在电源电压和电容器或电感器时，也可以用欧姆定律来描述电路中的电压、电抗和电流之间的关系。大多数含有电容器或电感器的电路都具有交流电源。

你还记得如果给电容器接上直流信号时会发生什么吗？在一个很短时间内会有一个电流通过电容器，直到电容器的电压等于施加的电压时，电流将消失。在对电容器的充电初期，电路中的电流很大，但随着对电容器的持续充电，电流迅速减小。这里我们不考虑计算这个

变化的直流电，因为这超出了这本书中的数学知识范围。我们只考虑经过电容器的交流电的变化情况。

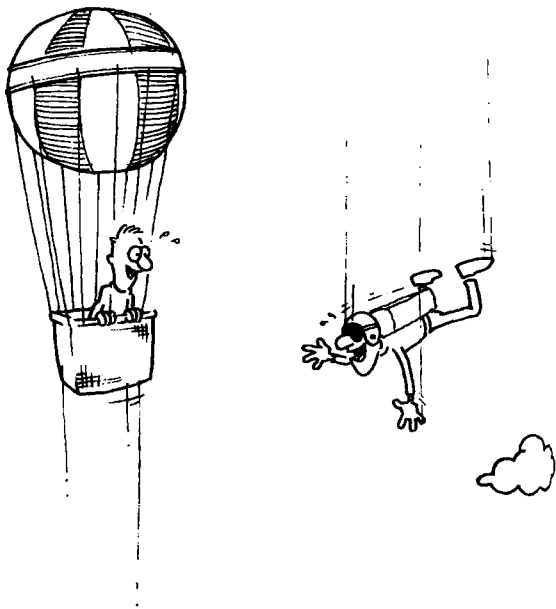
理想电感器对稳定的直流电流没有任何阻碍作用，也就是说，对于直流电路来说，理想的电感器相当于短路，此时，只有电感器的导线电阻对电流产生阻碍。在本书中，我们只计算电感器在外接交流电源时的电流。

在图 20-6 (A) 电路中，假设我们给电阻器接上一个交流电。正弦波信号电压从零开始增加，电阻器上的电流会随着电压的增加而增大。当信号电压达到最大值时，电流也达到了最大值。图 20-6 (B) 显示了这个电路的电流和电压的波形图。

这些信号具有相同的频率而且同时到达峰值。如果符合这样的条件，我们称这样的信号同相。相位涉及时间，比如两个有规律地重复事件的时间间隔。

如果每个交流电的信号和其他交流电信号的频率相同，它们的每个周期的时间就相同。我们可以把周期和旋转轮旋转一周，也就是在  $360^\circ$  的角度之间建立联系。图 20-7 显示为正弦波信号的不同位置与旋转轮旋转位置的对应关系。利用旋转轮旋转对应的角度，我们可以不用依赖实际的波形频率来测量相位。

当电流流过电阻器时，电阻器会把部分电能转化为热能。电容器和电感器都会把流过的电流以电能形式储存起来，而理想电容器或电感器不会把电能转化为热能（实际应用中的电





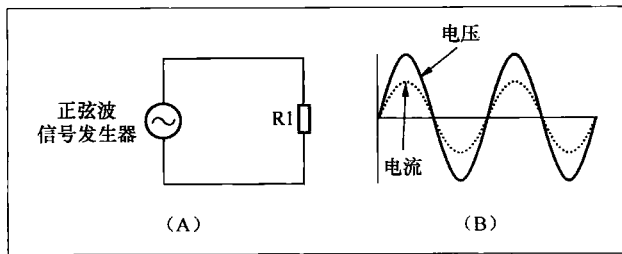


图20-6：这个简单的电路图举例说明了电阻器上的交流电压和电阻器上的电流之间的相位关系。图20-6 (B) 为电压和电流的波形。注意，这两个波形是同相的。

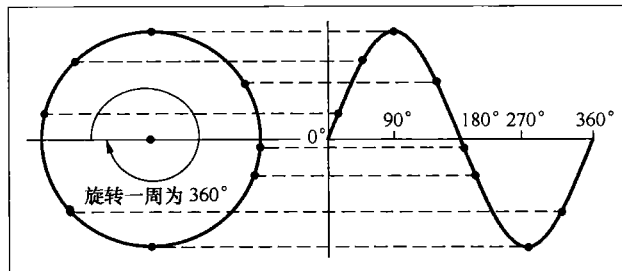


图20-7：我们通常把每个周期和旋转轮旋转一周建立联系。波形上的每一个点都与旋转轮上的一个旋转角度相对应。一个完整的周期是 $360^\circ$ ，我们用角度测量的方法来表示两个波形之间的相位关系。

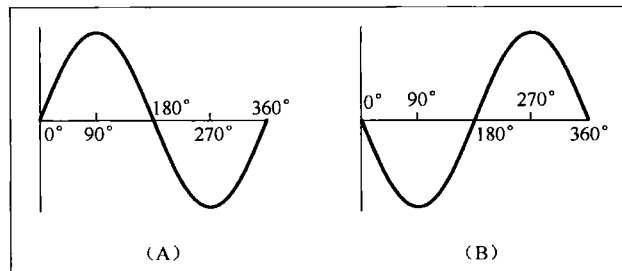


图20-8：这两个波形看起来像完全相反。当图20-8 (A) 中的波形到达波峰时，图20-8 (B) 中的波形达到波谷。我们说这两个波形的相位差是 $180^\circ$ 。

感器和电容器都会把部分电能转化为热能，只是数量很小，通常可以忽略)。

能量存储造成的一个结果是电压和电流的波形不同相，有时我们说这些波形异相。

图 20-8 显示两个异相关系的波形图。图 20-8(A) 中的波形到达波峰的同时，图 20-8(B) 中的波形到达了波谷。在这个例子中，两个波形有  $1/2$  个周期差距，或者说有  $180^\circ$  的相位差。注意到，在水平轴，也就是  $x$  轴上，我们标记的单位是度数而不是时间。

你可以对两个同频波形之间的相位角度进行测量。波形之间的任何相位关系在  $0^\circ$  到  $360^\circ$  之间，只有当波形之间的相位角度是  $0^\circ$  (或  $360^\circ$ ) 时，它们才是同相。

如果电路只有电压源和电阻器，那么电压和电流之间的相位角度肯定是  $0^\circ$ 。如果电路中包含有电容器或者电感器，则电压和电流之间的相位角度将会大于  $0^\circ$ 。相位角取决于电路中的电抗值和电阻值。在下一节中，你将学习如何计算相位角度。

# 电容上的电压和电流

**容**抗是交流电通过电容器时电容器对电流呈现的阻力。交流电的频率越低，容抗越大，随着频率的增高，容抗就减小。我们给电容器外接一个交流电源，当电压增大时，电容器以电场的形式储存能量，而当电压减小时，电容器再把这些能量返回到电路中。

图 20-9 所示的电路中有一个交流信号发生器和电容器。我们可以用电容来代替电阻，再利用欧姆定律计算出它的容抗，计算出这样的电路中的电流或电压。

现在让我们回顾一下，当我们给电容器外接交流电源时会发生怎样的情况？我们从零电压开始，增大外加电压，直到最大值。起初，因为电容器中没有存储电荷，因此会有一个很大的电流对电容器充电。随着电子在电容负极板上的聚集，这些电荷试图阻止更多的电子继续向电容负极板移动，因此，电流也随之减小。当外接电压增大到它的最大值时，电容器上的电压也达到最大值，此时电流为零。

现在开始减小外加电压。由于电容器上的电压要比外加电压大，所以电子会离开电容负极板，产生一个反向电流。随着外接电压不断减小，电容器产生的电流不断增大，电容板上的电荷最终被全部耗尽。图 20-10 为电压和电流变化的关系图。

外加电压的后半个周期与前半个周期相同，但极性相反。随着外接电压向负峰值电压增加，对电容器产生一个很大的充电电流。当电压值到达负峰值时，电流降为零。当电压再

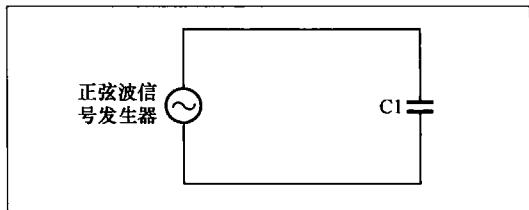


图20-9：我们将用这个电路来研究电容器的电压和电流之间的关系。当电路中只有电压源和电容器时，我们可以用容抗替代欧姆电路中的电阻进行计算。

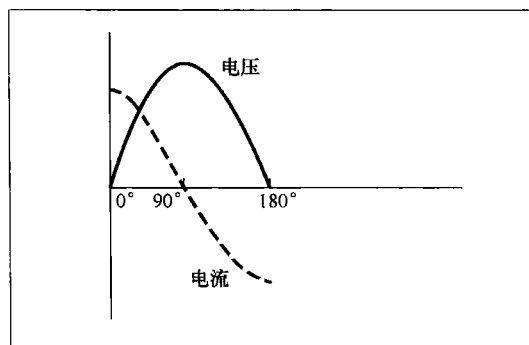


图20-10：这幅图描述了在外加电压的正半个周期里，电容器的电流是如何变化的。图中，我们用实线表示电压波形用虚线表示电流波形。我们没有在图中标出电压和电流的振幅范围。这两个波形具有不同的振幅，所以你很容易就可以区分这两条曲线。

一次向零减小时，电容器会产生一个反向电流，对电容器放电。当电压减小为零时，电流增大到最大值。图 20-11 给出了电压和电流的两个完整周期。

电容器上的电压和电流之间具有怎样的

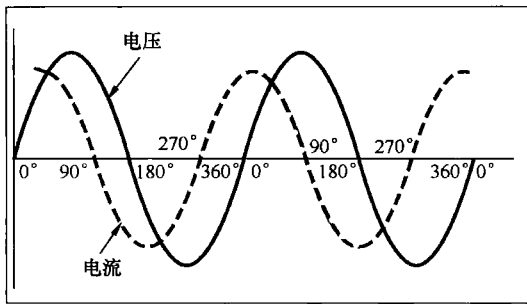


图20-11：这幅图显示了在外接电压波形的两个完整周期里，电流是如何变化的。实线和虚线以及不同的振幅帮助你区分电压和电流波形。

相位关系呢？研究图 20-11，注意到当电压波形即将从零开始它的正半个周期变化时，电流的波形已经到达正向最大值。当电压波形为正向最大值瞬间，电流波形已经降为零。当电流波形到达负向最大值时，电压波形已经从正向最大值减小到零。

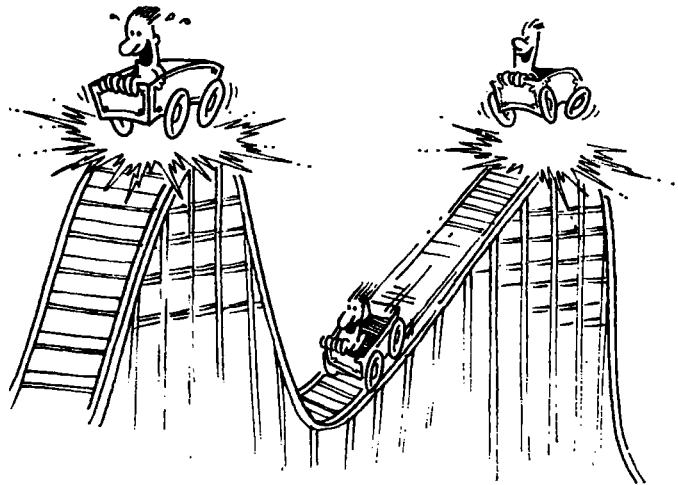
显然，这两个波形之间有  $90^\circ$  的相位差。在波形从正向到负向变化时，我们可以通过测量两个正峰值或者两个零交叉点之间的角度得到相位差。你也可以通过测量两个负峰值之间的角度得到相位差，你还可以在波形从负向到正向变化时，通过测量两个零交叉点的角度得到两个波形的相位差。是不是只能在这些点测量相位差角度呢？不是，只要你可以在两个波形上找到同一时刻的点，就可以求得相位差。只不过利用波形的峰值和零交叉点来测量相位差比较方便而已。

你有没有注意到电流波形总是在电压波形之前到达每一个  $90^\circ$  的点？在图 20-11 中可

以看到，电流波形在  $0^\circ$  时到达正向最大值，电压波形在  $90^\circ$  时才到达正向最大值。电流波形在  $180^\circ$  时到达负向最大值，电压波形在  $270^\circ$  时到达负向最大值。可见，电压波形总要比电流波形落后  $90^\circ$ 。

通过这些观察，你就可以理解我们为什么说电容器中电流变化导致的电压变化了，我们有时也说电压变化落后于电流变化。这两种说法表达的意思相同，这是一个很重要的关系。

前面我们提到，外加电压可以把电能存储在电容器的电场中。当电压为零时，电场强度为零。随着电压的增大，电场也逐渐增强，当电压达到最大值时，电场强度也达到最大值。当电压降低时，电场把能量释放到电路中时，电场强度减小。所以电场的波形变化和电压的波形变化一致，也就是说电场和施加的电压具有同相关系。



# 电感中的电压和电流

电感器对交流电有阻碍作用，我们把这种阻碍作用叫做电感器的感抗。在低频时，电感器的感抗较小，随着频率的增高，感抗也增大。当有交流电通过电感器时，电感器将一部分电能存储在它周围的磁场中。

图 20-12 电路中包括一个交流电源和一个电感器。我们可以用感抗替换欧姆定律中的电阻，计算出这个电路中的电流或电压。

我们给理想的电感器接上一个交流电源，看看接下来会发生什么情况。电流按正弦波规律从零开始向正峰值逐渐增加，增大的电流在电感器周围生成一个存储能量的磁场。此时电流迅速增大，同时磁场强度也迅速增大。

当电感器中的电流达到正峰值并将开始减小时，存储在磁场中的能量达到最大值。随着电流的减小，电感器把能量释放回电路，磁场逐渐减弱。当电流降为零时，磁场把能量全部释放回电路，磁场强度也变为零。

紧接着电流的方向发生改变。电流值从零开始向负峰值方向增大。电感器周围的磁场方向也随之改变，并重新存储能量。电流达到负峰值瞬间，磁场强度也达到最大值。然后电流再次减小，电感器将能量释放回电路，磁场逐渐减弱。

图 20-13 为电感器中的电流和电感器磁场强度波形图。电感器上的磁场与电感器中的电流具有同相关系。两个波形上的相似点发生在同一时刻。

记住，变化的磁场会在电感器上产生感

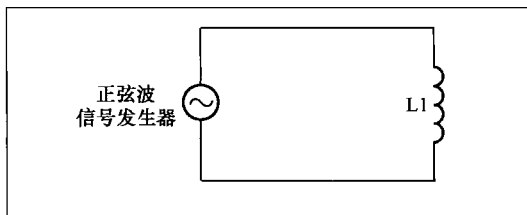


图20-12：这个交流信号发生器供给电感器一个电流。这个理想的电路中没有任何电阻。当流过电感器的电流增加时，电感器将一部分电能转化为磁场储存的能量，而当流过电感器的电流减小时，电感器把储存的能量释放到电路中。这个过程每隔半个周期重复一次。

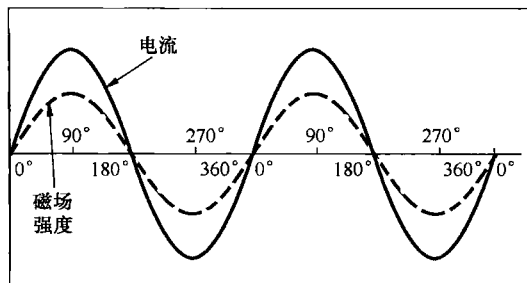


图20-13：此图为电流增大时电感器上的磁场也随之增大的波形图。当电流减小时，磁场强度也减小。如果电流方向发生反转，磁场方向也发生反转。电感器周围的磁场与电感器的电流相位相同。

应电压。这个感应电压的大小取决于磁场变化的快慢。磁场强度变化越快，感应电压值越大。变化缓慢的磁场产生一个较小的感应电压。如果磁场强度没有发生变化，则不会产生感应电压。

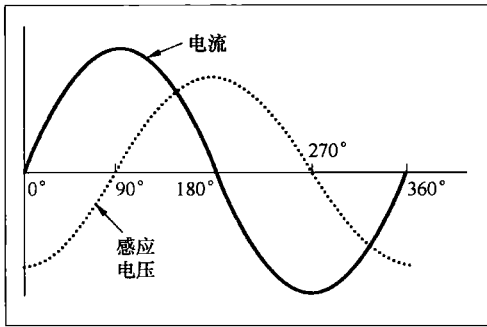


图20-14：在图中，粗实线表示通过电感器的电流。点虚线表示变化磁场在电感器上产生的感应电压。注意，感应电压滞后电流 $90^\circ$ （电流超前感应电压 $90^\circ$ ）。

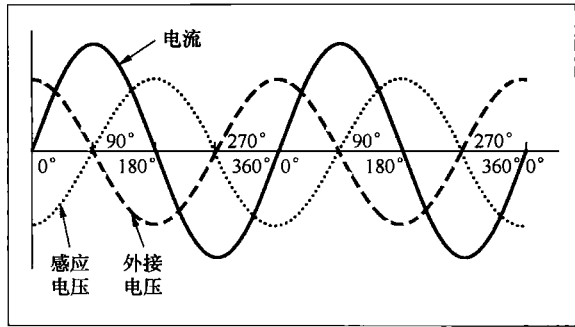


图20-15：这里我们在图20-14基础上添加了短划线。新加的短划线表示电感器上的外加电压。外加电压和感应电压具有 $180^\circ$ 的相位差，感应电压超前电流 $90^\circ$ ，我们也可以说电流滞后感应电压 $90^\circ$ 。

无论电流从零开始向哪个方向流动，电流都在快速变化。此时，磁场的变化速度也极快，直到产生最大的感应电压。无论电流（和磁场）在哪个方向达到最大值，在一个短暂瞬间它们不会发生变化，在这个瞬间，感应电压值为零。

感应电压总有极性阻碍电流变化，它总是试图将电流维持在一个稳定不变的状态。这也意味着当电流正向流动时，感应电压具有相反的极性。

图 20-14 为经过电感器的电流和感应电压的波形图。注意，电流从零开始向正峰值方向增加时，感应电压从负峰值开始减小。当电流增大到最大值时，感应电压变为零。而当电流从正峰值开始减小时，感应电压变为正（正向感应电压试图阻止电流的降低）。从图 20-14 中可以看到，感应电压比电流滞后  $90^\circ$ （我们也可以说电流比感应电压超前  $90^\circ$ ）。

你可能注意到了，我们一直没有提起外加电压。电源给电感器施加一个电压，并迫使电

流流过电感器。施加的电压和电感器中的电流之间没有同步关系。变化的电流在电感器周围产生一个变化的磁场，然后这个磁场在电感器上产生感应电压，有时也称这个感应电压为反向电动势。

外加电压试图产生流经电感器的电流，而感应电压则试图去阻止这个电流的产生。也就是说外加电压和感应电压的功能恰好相反。如果这两个电压为反相关系，那么它们就有  $180^\circ$  的相位差。图 20-15 显示了电感器上的电流、外加电压和感应电压的相位关系。

让我们来看看外加电压和电感器电流之间的相位关系。这也是我们最想要了解的关系。

在图 20-15 中，外加电压在  $0^\circ$  时，达到正向最大值。电流在  $90^\circ$  时达到正向最大值；电压在  $180^\circ$  时达到负向最大值，电流在  $270^\circ$  时达到负向最大值。可见，外加电压领先电流  $90^\circ$ ，我们也可以说电流滞后外加电压  $90^\circ$ 。

# 电感器和电容器的电路电抗

给 电容器外加一个交流电压，就会产生一个在相位上超前电压  $90^\circ$  的电流。给电感器外加一个交流电压时，则会产生一个相位滞后于电压  $90^\circ$  的电流。而给电阻器外加一个交流电压时，产生的电流与电压相位相同。

在图 20-16 的电路中，包括一个交流电源、一个电容器和一个电感器。让我们看看怎样确定每个元件上的电压和电流。

图 20-16 中的电路是串联电路还是并联电路呢？由图可见，信号发生器产生的电流流过每一个电路元件然后返回信号发生器。在这个电路中，电流没有其他支路可以选择。因此，这是一个串联电路。

串联电路中，经过每一个元件的电流都相等。从这个信息中我们可以判断出，经过电容器的电流和经过电感器的电流的相位相同。但是电容器和电感器上的电压的相位却不同，它们在相位上相差  $180^\circ$ 。我们是怎么知道的呢？图 20-17 可以帮助我们理解这个结论。

如图 20-17 (A) 所示，我们建立一个  $x$ - $y$  坐标轴，并在此基础上建立一个极坐标，坐标轴的水平线右侧是  $0^\circ$ ，坐标轴竖轴的顶部为  $90^\circ$ 。

接着，我们在图中标示出电容器上的电压和电感器上的电压。我们可以利用欧姆定律和元件电抗来计算这两个电压的大小。在这个例子中，假设电流表的读数为 1A，电感器和电容器的电抗值已经在图 20-16 中标了出来。需要注意的是，这些电抗数值只对应于信号发

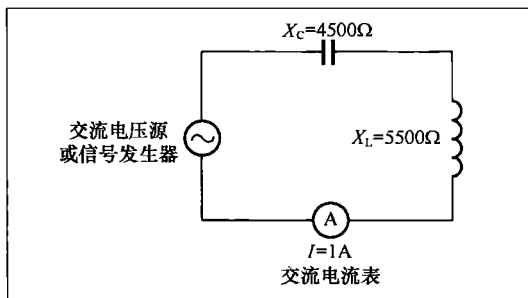


图20-16：我们用这个电路来研究电路中容抗和感抗的组合效果。电抗值适用于一个输出频率的信号发生器。虽然不知道输出频率有多大，但这不会影响我们的计算。交流电流表测得电路中的电流值为1A。

生器的某一个输出频率，当输出频率变化时，它们的电抗值也将发生变化。

首先让我们来计算电容器电压。1A 电流经过  $4500\ \Omega$  的电抗，我们把这两个值相乘可得电容器的电压。

$$U = IR \quad (20-5)$$

$$U = IX_C = 1A \times 4500\ \Omega$$

$$U = 4500\ V$$

电容器上的电压滞后于电流  $90^\circ$ 。如果我们在  $0^\circ$  位置来表示电流，那么需要在  $270^\circ$  的位置来表示电容器电压的相位。这样正好使电容器电压滞后电流  $90^\circ$ 。图 20-17(B) 中添加了电容器电压。

接着我们来计算电感器的电压。电感器上的电流还是 1A，通过图 20-16 中可以知道感抗为  $5500\ \Omega$ 。我们再次利用欧姆定律，把

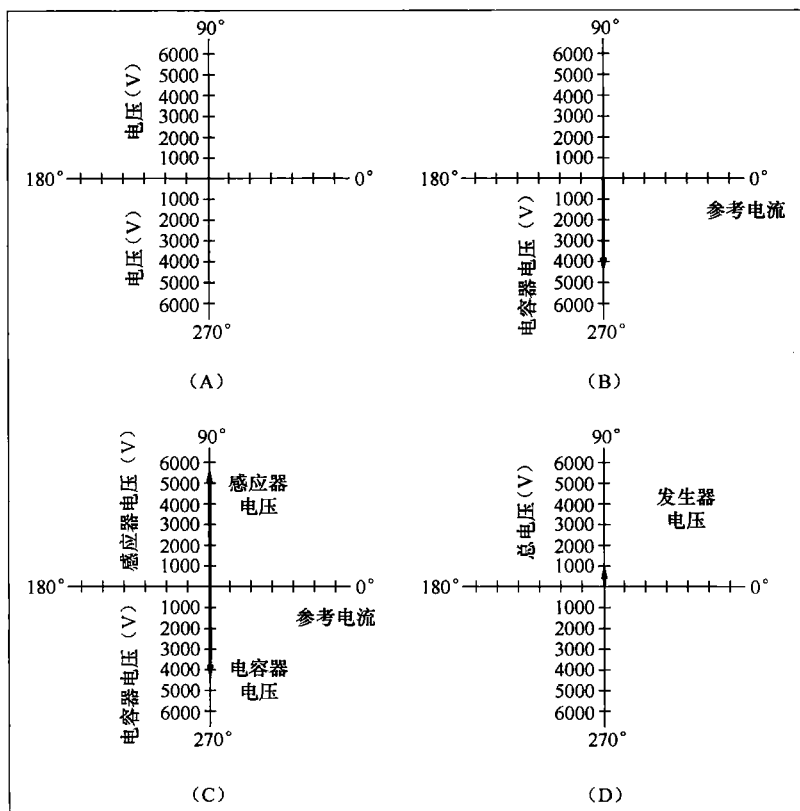


图20-17: 这个图说明了我們如何表示串联电路中电感器和电容器的电压。我们从x轴的右边开始, 以逆时针方向测量角度。因为电容器电压滞后电流90°, 我们在270°位置标记出了电容器电压。我们在90°位置标记出了电感器电压, 也就是说电感器电压超前电流90°。我们发现可以从电感器电压中减去电容器电压就可以得到发生器的总电压。图20-17 (D) 表示电容器和电感器的组合的电压是1000V。

两个值相乘, 得到电感器电压。

$$U = IR \quad (20-5)$$

$$U = IX_L = 1A \times 5500 \Omega$$

$$U = 5500 V$$

电感器上的电压超前电流 90°。因此我们可以在图中 90° 位置来标记电感器电压。图 20-17 (C) 中添加了电感器电压。

电感器电压和电容器电压具有 180° 的相位差, 因此当其中任何一个值达到正向最大值时, 另一个也达到负向最大值。我们可以通过合并这两个电压求出总电压。这个总电压就是信号发生器加在电路上的电压。图中, 电感器的电压方向为 y 轴正方向, 电容器的电压方向

为 y 轴负方向。为了合并这两个电压, 我们把这两个值相减。总电压为 5500V 减去 4500V, 也就是 1000V。电感器电压和电容器电压怎么可能比总电压大呢? 这是电阻器与存储电场的电容器和存储磁场的电感器的串联电路中的一个有趣的属性。

这种情况在没有电抗的纯电阻的串联电路中绝对不会发生。在纯电阻串联电路中, 每个电阻器两端的电压之和等于施加在电路两端的总电压, 因为没有能量存储在电阻器中。

电容器将能量存储在它的电场中, 然后再释放回电路。电感器将来自电容器的能量存储在磁场中, 然后再释放回电路。所以能量在电

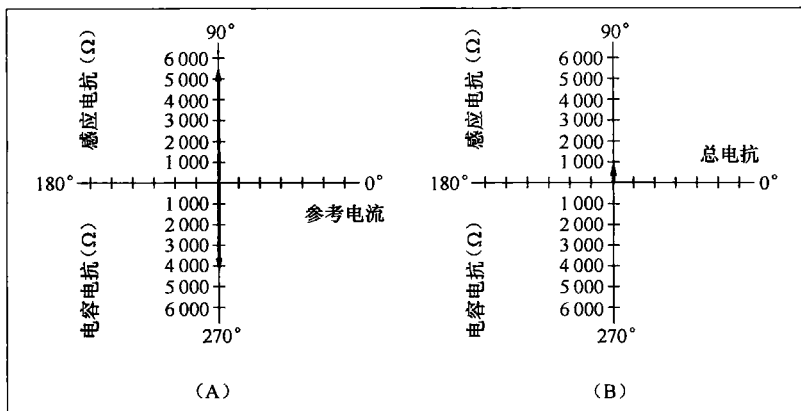


图20-18：在表示串联电路的电抗时，我们采用的方式和图20-17类似。感抗的方向为y轴正向，也就是90°位置，容抗的方向为y轴负向，也就是270°位置。

容器和电压器之间来回地传递。如果电路中不存在电阻（就像我们如图 20-16 中所示的理想电路），这个能量传递过程将会一直持续下去。

如果你用数学来思考这个过程，你应该能意识到，在计算施加到电路上的总电压时，可以不必先计算电感器电压和电容器电压的大小。为了计算施加的总电压，我们先简单合并这两个元件的电抗，然后在欧姆定律中用这个合并后的电抗进行计算。

$$U = IX \quad (20-6)$$

其中  $X$  表示电路联合电抗

$$X = X_L - X_C$$

$$X = 5500 \Omega - 4500 \Omega = 1000 \Omega$$

$$U = 1A \times 1000 \Omega = 1000 V$$

为什么我们从感抗中减去容抗呢？为什么不从容抗中减去感抗呢？我们只是用一个较大值作为被减数吗？不是。现在来看图 20-17 (D)，因为电容器电压滞后电流 90°，所以需要把电容器电压标记在 y 轴负方向。

无论何时将电容器和电感器串联在一起，我们都要在 y 轴负方向上来标记电容器电压，而在 y 轴正方向上来标记电感器电压。

我们通常用相似的图表来表示电路图中的电阻和电抗。我们把电阻标记在 0° 线，也就是 y 轴正方向上，把感抗标记在 90° 线，也就是 y 轴正向上；把容抗标记在 270° 线，也就是 y 轴负向上。如图 20-18 所示。

总电抗的方向在正方向上，也就是说电路中的感抗要大于容抗。也可以说，总电压超前电路电流 90°。请记住，如果频率改变了，这种情况也可能会改变。在不同的频率下，容抗有可能比感抗大，在这种情况下，总电压将滞后电路电流 90°。你知道这种情况发生在高频还是低频情况下吗？想想看，感抗  $X_L$  和容抗  $X_C$  是如何随频率变化的。如果你的答案是在低频情况下，容抗大于感抗，那么恭喜你，答对了！

只包含电感器和电容器而不包含电阻器的电路，在实际情况下是不存在的。在电路中，即使没有电阻器，实际中用绕制电感器的铜线本身也有电阻。在上面的例子中，我们只是忽略了电感器本身的电阻。在下一章中，我们将关注到电感器和电容器与电阻串联的实际电路。



# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 20 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以他们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和使用你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

## 例题

当在容抗为  $1570\text{k}\Omega$  的电容器两端施加  $2\text{V}$  的电压，将有多大的电流流过电容器？

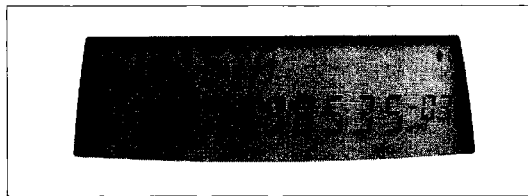
$$I = \frac{E}{X_c}$$

$$I = \frac{2\text{V}}{1570\Omega} = 1.27 \times 10^{-3}\text{A} = 1.27\text{mA}$$

计算器键入：

$$2 \div 1570 =$$

计算器第二行显示结果： $1.2739 \times 10^{-03}$



(结果  $1.2739 \times 10^{-03} = 1.2379 \times 0.001$   
 $= 1.274\text{mA}$ )

复习检测：-----

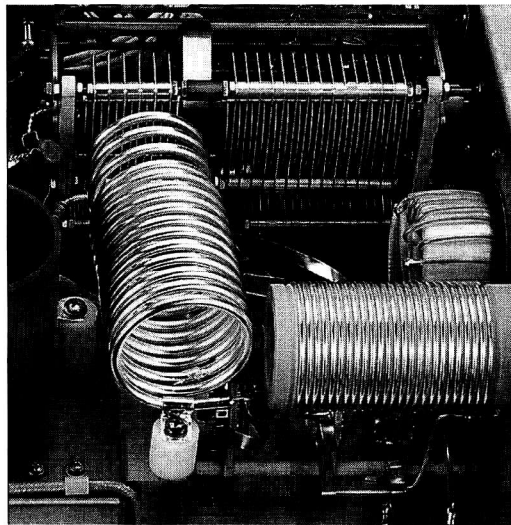
- 20.1 如果用示波器来观察120V交流电源的电压，那么显示的峰值是多大？
- 20.2 在500Hz的频率下，电容器的容抗是300Ω，如果频率变为1000Hz，那么电容器的容抗将变成：
- a) 300Ω  
b) 150Ω  
c) 600Ω  
d) 500Ω
- 20.3 在500Hz的频率下，电感器的感抗是300Ω，如果频率变为1000Hz，那么电感器的感抗将变成：
- a) 300Ω  
b) 150Ω  
c) 600Ω  
d) 500Ω
- 20.4 一个串联电路中有如下元件：一个感抗为40Ω的电感器和一个容抗为30Ω的电容器，那么在这个LC串联电路中，电路的总电抗是多少？
- 20.5 如果在上述电路中接入一个交流电源，并且有1A的电流通过电路，那么电感器两端的电压，电容器两端的电压和电源两端电压各是多少？

答案：-----

- 20.1 我们知道，除了特别说明外，交流电的大小指的是RMS（均方根值）。
- $$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根}} \times 1.414 = 120\text{V} \times 1.414 = 170\text{V}$$
- 20.2 b
- 20.3 c
- 20.4 因为电感器中电压超前电流90°，而电容器中电压滞后电流90°，电感器L和电容器C的电压相位差是180°。因为这个相位的关系，为了求出总的电抗，我们必须从电抗 $X_L$ 中减去感抗 $X_C$ 。
- $$X_{\text{总}} = X_L - X_C = 40\Omega - 30\Omega = 10\Omega$$
- 20.5  $U_L = IX_L = 1\text{A} \times 40\Omega = 40\text{V}$   
 $U_C = IX_C = 1\text{A} \times 30\Omega = 30\text{V}$   
 $U_{\text{电源}} = U_{\text{总}} = IX_{\text{总}} = 1\text{A} \times (40\Omega - 30\Omega)$   
 $= 1\text{A} \times 10\Omega = 10\text{V}$

## 第21章

# 谐振电路——开心玩转 交流电路



这些大功率射频放大器电路中的电容和电感相互调整，在需要的操作频率上构成一个谐振电路

### 目录

- 如果感抗和容抗相等会发生什么情况？
- 串联谐振电路的条件
- 并联谐振电路的条件
- 数学和计算器的窍门
- 复习检测

## 如果感抗和容抗相等会发生什么情况？

电路中感抗和容抗对电路的作用相反。在电感器中，电感电压和电流有  $90^\circ$  的相位差。在电容器中，电容电压和电流也有  $90^\circ$  的相位差。在电感器中，电压超前电流，而在电容器中，电压滞后电流。

在串联电路中，电感器电压和电容器电压的相位差为  $180^\circ$ 。在并联电路中，电感器电流和电容器电流的相位差为  $180^\circ$ 。在串联电路中，通过 L 和 C 的电流相同，电感电压的相位超前电流  $90^\circ$ ，而电容电压的相位滞后电流  $90^\circ$ 。当 L 和 C 电压大小相等时，它们相互抵消。你也许会非常惊讶，在 LC 串联电路中还存在电压。事实上，L 和 C 的电压通常非常大，它们的电压比施加到电路上的电压要大得多。实际上，它们的电压可能是施加电压的  $Q$  倍（回忆一下品质因数  $Q$ ）。

例如，在一个  $Q$  值等于 20 的 LC 串联电路中，信号发生器提供的电压只有 1V，而电路中，电感器和电容器两端的电压是 20V。不用担心，因为这两个电压有  $180^\circ$  的相位差，它们两者电压相加后的总电压是 1V。

在 LC 谐振电路中有类似的情况。在 LC 并联电路中，通过电感器的电流和通过电容器的电路有  $180^\circ$  的相位差。因为并联的电感器和电容器，接入它们两端的电压相同，通过电感器的电流的相位比电压滞后  $90^\circ$ ，而通过电容器的电流的相位比电压的相位超前  $90^\circ$ 。

当通过电感器和电容器的电流大小相等时，它们几乎相互抵消，同样存在有趣的现象。

通过电感器和电容器的电流可能都非常大。事实上，电感器和电容器中的电流比输入电路中的电流大很多——与电路中  $Q$  值的大小有关。不用担心通过电感器和电容器中的电流比从电源输入并联的 LC 电路中的电流大很多，而它们电流相加几乎为 0。这是因为它们的相位差是  $180^\circ$ ，几乎相互抵消。

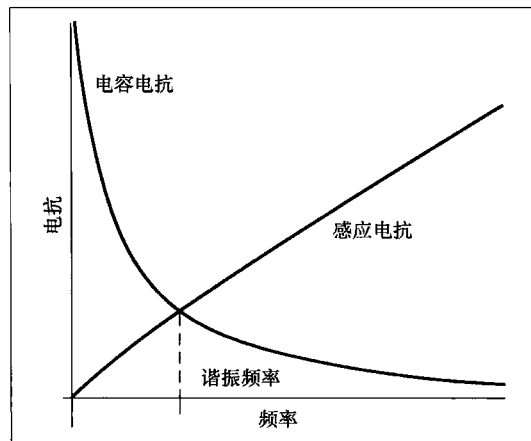


图21-1：图中直线表示线圈电感的感抗。感抗随着频率的增大而增大。曲线表示电容器的容抗，容抗随着频率的增大而减小。因为具体的数值并不重要，所以  $x$  和  $y$  轴上都没有标记具体数值，我们希望表示出一般情况下的图线。对于给定的电容器和电感器，这两条线只有一个交点。这个点表示的就是容抗和感抗组合后的谐振频率。

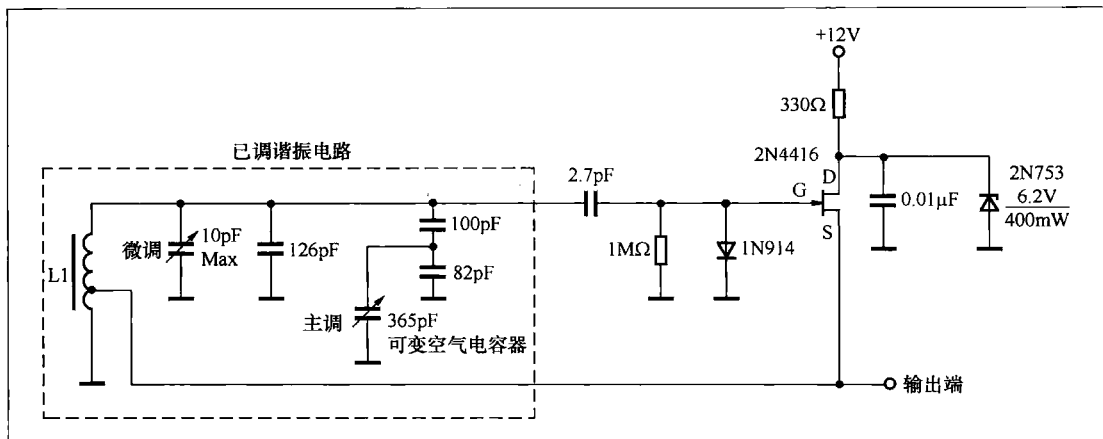


图21-2：这个电路包含1个电感器和1个可变电容器。你可以通过改变可变电容器来改变振荡器的工作频率。每一个电容器和电感器组合后可以产生一个不同的谐振频率。我们可以用这个可变频率振荡器（VFO）来设置简单接收机和发信机的工作频率。

当我们使信号频率降低时，感抗是如何变化的呢？感抗变小。而当信号频率降低时，容抗又是如何变化的呢？电容器电抗变大。

如果我们增大信号频率，感抗和容抗表现出的效果完全相反。随着信号频率的增大，感抗变大，容抗变小。

图 21-1 中包含了一个线圈电感器的感抗曲线图。直线表示感抗如何随信号频率增大而增大。图 21-1 中还包含了一个电容器容抗的曲线图。在我们增加信号频率时，容抗随之在减小。我们没有在图中标出频率范围和和电抗范围，因为具体的大小并不重要。对任意电容器和电感器来说，它们的电抗曲线只会在一个点相交。

无论电路是串联还是并联，当感抗和容抗相等时，出现一个特殊的状态。我们把这样的特殊情况称为谐振。

我们生活中有很多方面都有谐振现象。想想音乐家或钢琴调音师使用的音叉，音叉在

频率相同时发生振动。音叉的振动频率决定于音叉的厚度和音叉臂的长度。在你吹口哨时，你的口腔构成一个共振腔，它取决于所吹声音的音调（频率）。当你把一个孩子放在秋千上，每个周期内你推动一次，如果你在谐振频率上推动，秋千（和孩子）摆动的幅度将非常大。你的电子手表或者电子钟内有一个石英晶体，它的振动频率是 32768Hz，它让你的手表走时准确。

在对感抗和容抗组合时，总有一个频率正好使它们的电抗相等。这个频率就是电抗组合后的谐振频率。

当感抗和容抗相等时就会发生谐振。我们可以用公式来计算任意一对电感器和电容器的谐振频率。你还记得怎么计算感抗和容抗吗？公式 21-1 和 21-2 将更新你的记忆：

$$X_L = 2\pi fL \quad (21-1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (21-2)$$

我们知道，谐振时这两个值大小相等，所以我们可以列一个方程，使他们相等。我们用  $f_r$  表示谐振频率，这是  $X_L$  和  $X_C$  相等时的频率。

$$X_L = X_C \quad (21-3)$$

现在，为了简化公式，我们需要对公式交叉相乘，然后进行合并同类项。

$$1 = \frac{1}{(2\pi f_r L)(2\pi f_r C)}$$

$$1 = \frac{1}{(2\pi)^2 (f_r)^2 (LC)}$$

$$(f_r)^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 (LC)} \quad (21-4)$$

最后，对公式两边开平方。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (21-5)$$

让我们用公式 21-5 来计算谐振频率。假设电容器的电容为 20pF，电感器的电感为

6.28mH，那么这两元件的谐振频率是多少呢？需要注意，在公式中我们必须用亨利来表示电感的值，用法拉来表示电容的值。

你可以用公式 21-5 来计算出任何感抗和容抗组合后的谐振频率。你也可以用公式 21-4 来求解电感或电容的值。给出任何一个电感器或电容器，你都可以计算出给定谐振频率给定后另一个元件的值。

谐振电路在无线电收发信机非常重要。一个谐振电路可以设置振荡器电路的工作频率。振荡器决定了发信机发射的频率，也决定我们接收机接收的频率。谐振电路也可帮我们选择需要的信号，排除不需要的信号。

图 21-2 所示的是一个实际变频振荡器 (VFO) 中的稍微有点复杂的谐振电路，这个电路可以用来设置简单接收机和发射机的工作频率。

# 串联谐振电路的条件

假设你从身边找出几个以前用过的电路元件，例如找到一个  $200\text{pF}$  的电容器和一个  $2.44\ \mu\text{H}$  的电感器，让我们把这两个元件和一个  $20\ \Omega$  的电阻以及正弦波信号发生器串联起来组成一个闭合回路，看看会发生什么现象。电路如图 21-3 所示。首先我们要找到这个电路的谐振频率。公式 21-6 帮助我们求出这个频率。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (21-6)$$

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{2.44 \times 10^{-6}\text{H} \times 200 \times 10^{-12}\text{F}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{488 \times 10^{-18}\text{Hz}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times 22.1 \times 10^{-9}\text{Hz}}$$

$$f_r = \frac{1}{1.39 \times 10^{-7}\text{Hz}} = 7.19\text{MHz}$$

把信号发生器的频率调到  $7.19\text{MHz}$ ，看看这个电路在做什么。如果信号发生器输出电压是  $10\text{V}$ ，通过电路中的电流是多大？记住，电感器电压和电容器电压相位相反，但是大小相等。在谐振频率下，电流的总电抗等于电阻大小，即  $20\ \Omega$ ，这是因为电感器的感抗和电容器容抗大小相等，相互抵消，在谐振频率时，信号发生器的整个电压加在电阻器上。欧姆定律可以告诉我们电路中的电流。

$$U = IR \quad (21-7)$$

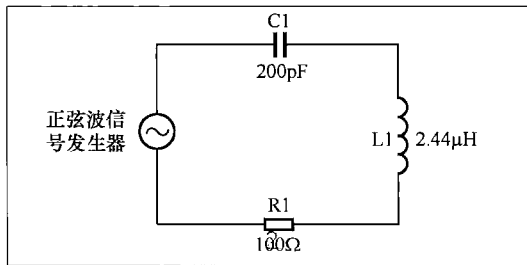


图21-3：这个电路由1个 $2.44\ \mu\text{H}$ 的电感器，1个 $200\text{pF}$ 的电容器，1个 $100\ \Omega$ 的电阻器和1个信号发生器串联组成。我们将用这个电路来研究改变信号频率对RLC串联电路的影响。

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50\text{V}}{100\ \Omega}$$

$$I = 0.50\text{A} = 500\text{mA}$$

现在来考虑当信号频率高于谐振频率和低于谐振频率时的电流大小。你们认为电流会发生改变吗？增大还是减小？

调整信号发生器，使其产生一个  $6.0\text{MHz}$  的信号，这个频率比谐振频率低。你已经学过，在这个信号频率下，感抗将会减小，而容抗将会增大。当频率低于谐振频率时，容抗大于感抗，也就意味着电路总的电抗将会增大，而电流要比在  $7.9\text{MHz}$  谐振频率下电路的电流要小。

随着频率降低，电容器的容抗会变得更大，而电感器的感抗会变得更小。这样，电路的电抗会随着频率的减小而增大。因此，随着频率的降低，电路中的电流变小。

现在让我们来考虑信号频率高于谐振频

率时，对电路电流的影响。调整信号发生器，使其产生一个 8.0MHz 的输出信号，这个频率比谐振频率要高。这次感抗要大于谐振频率下产生的感抗，而容抗要小于谐振频率下产生的容抗。合并这两个值，我们得到电路的净电抗，这是一个感抗，所以电路中总阻抗增加，而电流比在谐振频率下电路的电流要小。

上面讨论的是一个非常重要的结论。在 LCR 串联电路中，在谐振频率  $f_r$  时，电路中的电流最大，而频率高于或低于谐振频率  $f_r$  时，电流中的电流减小。

图 21-4 为一定频率范围下的电路电流图。注意图形的形状。所有的 RLC 串联电路（包含有电阻器、电感器和电容器的电路）都有一个相似的电流图形。实际电流的大小取决于信号发生器电压和电路元件的参数值。在谐振频率时，电路的电阻越小，电流会越大，如果电路中没有电阻器，此时只有元件（L 和 C）的电阻会对电流有限制作用。

还记得电路的品质因数  $Q$  值吗？我们通过电抗除以阻抗，可以求得  $Q$  值。在谐振电路中，我们可以使用感抗或者容抗来计算谐振电路的  $Q$  值。计算这个谐振频率下的电抗。注意不要使用合并后的电抗来计算  $Q$  值，因为谐振时合并后的电抗为 0。

$Q$  值可以用来确定电流曲线的倾斜程度。任何电路中的阻抗的作用是使曲线底部变宽。电路元件的内阻越大，电路的电流曲线图就越平缓；而电路元件的内电阻越小，电路的电流曲线图就越倾斜。

图 21-5 对两个电路的电流图进行了一番比较。其中一个电路的  $Q$  值是 5.5，另一个电路的  $Q$  值是 11。让我们假设这两个电路具有相同的电抗和电压。 $Q$  是 11 的电路电阻为  $Q$

是 5 的电路电阻的一半。

我们可以通过计算  $X_L$ （或  $X_C$ ，因为两者任何之一都可以使用），然后计算出  $Q$  值来证明。利用感抗公式，我们发现谐振频率下  $X_L$  大小如下：

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2\pi \times (7.19\text{MHz}) \times (2.44\mu\text{H})$$

$$X_L = 6.28 \times (7.19 \times 10^6) \times (2.44 \times 10^{-6})$$

$$X_L = 6.28 \times (17.5 \times 10^0) = 110\Omega$$

谐振时，低  $Q$  值的电路电阻是  $20\Omega$ （见图 21-3），峰值电流是 0.5A，或 500mA。从图 21-5 上，我们可以推断高  $Q$  值的电路是  $10\Omega$ ，是  $20\Omega$  的一半，因为谐振时，它的电流是 1000mA（是低  $Q$  值电路中电流的两倍）。

现在我们可以计算这两个电路的品质因数  $Q$  了。

$$Q = \frac{X}{R} \quad (21-8)$$

$$Q_1 = \frac{X}{R} = \frac{110\Omega}{20\Omega} = 5.5$$

$$Q_2 = \frac{X}{R} = \frac{110\Omega}{10\Omega} = 11$$

高  $Q$  值电路，电阻是低  $Q$  值电路的一半（ $10\Omega$ ），而电流是其两倍。你可以利用欧姆定律来证明。高  $Q$  值电路的电流图形非常陡峭，然而，直到信号频率接近谐振电路频率前，电流都比较小。达到谐振频率时，电流迅速到达最高峰值。接着，当你增加频率，超过谐振频率时，电路电流迅速降低到低值。

仔细观察图 21-5，找出每个图中大小等于 0.707 倍峰值电流的电路电流。在高  $Q$  值电路中，这个电流是 1A，而在低  $Q$  值电路中，这个电流是 0.50A。现在我们来比较这两个值的频率范围。在图中我们很难读出确切的值，



但你可以看到，在高  $Q$  值电路中，频率范围比低  $Q$  值电路的频率范围要小。我们称这个频率范围为频宽。在这个频率范围内，信号的价值比最大值的某个倍数（本例中是最大值的 0.707）高。我们可以测量出这个频率范围，这个频率范围内的信号强度高于一个指定值。

每一个测量出的范围都代表频宽，当然，每一个频率的频宽都不同。我们必须指定一个信号强度作为带宽的条件。在我们的例子中，我们测量带宽取高于或低于谐振频率，此时它们的电流大小下降到峰值的 0.707 倍。可能你想知道，0.707 这个值是从哪里来的。噢，这是个非常好的问题，这里我们给出答案。如果流过电阻（图 21-3 中的  $R_1$ ）的电流降到谐振频率时电流的 0.707 倍，提供给电阻的功率会发生什么变化？我们可以用我们熟悉的计算功率的公式来回答这个问题。

我们把谐振频率时的电流称为  $I_{\text{谐振}}$ ，把谐振时的功率称为  $P_{\text{谐振}}$ ，那么谐振时电路提供

给电阻的功率可以这样来计算：

$$P_{\text{谐振}} = I_{\text{谐振}}^2 \times R$$

在两个频率（低于和高于谐振频率）上，它们的电流大小下降到  $0.707 \times I_{\text{谐振}}$ ，让我们把这个两个频率的电流称为  $I_{\text{带宽}}$ ，把此时的功率称为  $P_{\text{带宽}}$ ：

$$P_{\text{带宽}} = I_{\text{带宽}}^2 \times R$$

我们知道，这个两个频率对应的电流  $I_{\text{带宽}}$  等于  $0.707 \times I_{\text{谐振}}$ ，把它们写出方程，我们得到：

$$I_{\text{带宽}} = 0.707 \times I_{\text{谐振}}$$

把它们代入  $P_{\text{带宽}}$  公式中，我们得到：

$$P_{\text{带宽}} = I_{\text{带宽}}^2 \times R$$

$$P_{\text{带宽}} = (0.707 \times I_{\text{谐振}})^2 \times R$$

$$P_{\text{带宽}} = (0.707)^2 \times (I_{\text{谐振}})^2 \times R$$

$$P_{\text{带宽}} = 0.49985 \times I_{\text{谐振}}^2 \times R$$

显然，0.49985 非常接近 0.5，在这两个频率（低于和高于谐振频率）时，电路的功率下降到谐振频率时功率的一半。

$$P_{\text{带宽}} = 0.5 \times I_{\text{谐振}}^2 \times R$$

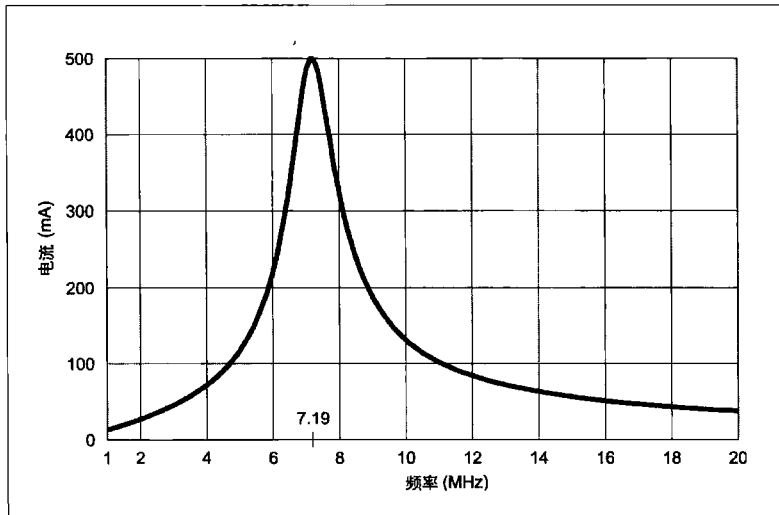


图21-4：这张图表示在一定的频率范围内经过图21-3 电路的电流图形。在谐振频率时，电路电流达到最大值，电路阻抗达到最小值。

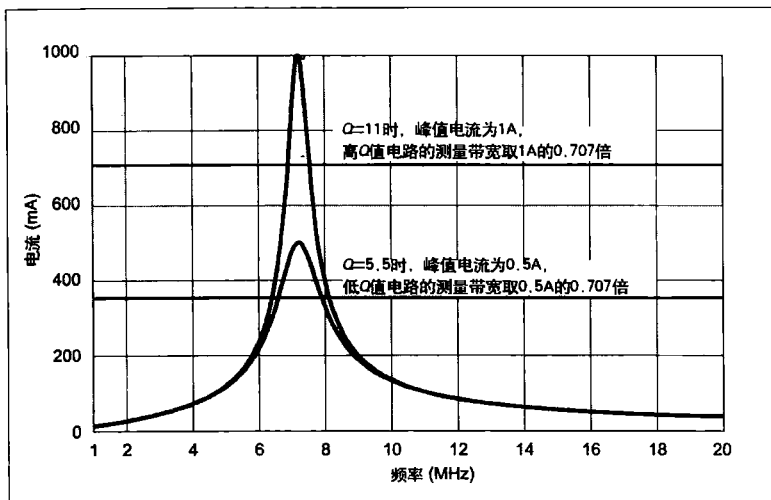


图21-5：此图为 $Q$ 值是11的电路和 $Q$ 值是5.5的电路的电流比较图。 $Q$ 比较大的电路图形比较陡峭。在信号频率达到谐振频率之前，电流一直较小。在谐振频率时，电流值很快达到峰值，而在频率大于谐振频率后又迅速减小。

$$P_{\text{频宽}} = 0.5 \times P_{\text{谐振}}$$

刚才我们所做的表明，可以这样来确定频宽。观察电流（或者电压）频率图，找到两个频率（一个高于谐振频率，一个低于谐振频率），这两个频率，对应的电流（或电压）的大小等于谐振频率时电流（或电压）的0.707倍。当然，在实际电路中，可以通过改变正弦波信号发生器的频率，测量电阻两端的电压来完成。

上面我们讨论的带宽被称为半功率频宽。你常常会看到这个带宽被写上  $-3\text{dB}$  频宽或写成  $3\text{dB}$  频宽。把功率减小一半代表减小了  $3\text{dB}$  [如果你想知道更多关于分贝 (dB) 的知识，你可以参阅附录中相关内容]。

在谐振情况下，电感器和电容器两端的电压会比信号发生器产生的电压要高得多。你也许会想，在谐振时电感器或电容器的电压可能是0吧。这不准确！它们任何一个的电压可能会比信号发生器产生的电压高很多。

这些高电压的产生是因为储存在电容器

电场和电感器磁场中的能量。进入到磁场中的能量来自于电场，而进入到电场中的能量来自于磁场。电感器和电容器来回地传递这些能量。

在谐振情况下很容易可以计算出通过电感器和电容器的电压；只要将正弦波信号发生器产生的电压 ( $V_{\text{发生器}}$ ) 乘以品质因数  $Q$  就可以得到。在上面的例子中，低品质因数 ( $Q=5.5$ ) 的电路中，信号发生器产生的电压是  $10\text{V}$ ，那么通过  $L$  和  $C$  两端的电压：

$$V_L = V_C = QV_{\text{发生器}}$$

$$V_L = V_C = 5.5 \times 10\text{V} = 55\text{V}$$

这看起来很奇怪，一个  $10\text{V}$  的信号发生器能在电容器和电感器上产生  $55\text{V}$  的电压。回忆一下，电感器两端的电压相位超前电流  $90^\circ$ ，而电容器两端的电压滞后电流  $90^\circ$ ，它们的相位差是  $180^\circ$ 。换句话说， $L$  和  $C$  的电压相互抵消，如果直接测量  $L$  和  $C$  两端的总电压，它们的电压为  $0$ 。这是因为每个周期内，电容器和电感器间来回转移能量。

# 并联谐振电路的条件

**图 21-6** 电路中，200pF 的电容器和 2.44 μH 的电感器并联连接。信号发生器在任何频率下产生的电压都是 50V。通常，我们应该在信号发生器上串联一个电阻器，用以限制电路中的电流。在我们的讨论中将忽略这个电阻，这样可以简化计算。当然，在大多数实际的并联谐振电路中都会包含一些串联的电阻。

公式 21-1 将帮助我们计算这个电路的谐振频率，我们曾用同样的公式计算串联谐振电路中的谐振频率。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{2.44 \times 10^{-6} \text{H} \times 200 \times 10^{-12} \text{F}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{488 \times 10^{-18} \text{Hz}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times 22.1 \times 10^{-9} \text{Hz}}$$

$$f_r = \frac{1}{1.39 \times 10^{-7} \text{Hz}} = 7.19 \text{MHz}$$

信号发生器产生的电流有两条路径可以流通。有一部分电流可以流经电感器，另一部分电流流经电容器。这两条路径为分支电路，流经支路上的电流为支路电流。我们知道，电感器电流相位滞后电压 90°，电容器电流相位超前电压 90°，这说明电感器电压和电容器电压具有 180° 的相位差。图 21-7 为支路电流和电压参考图。电感器电流方向沿 y 轴负方向，也就是 -j 轴方向；电容器电流方向沿 y 轴正

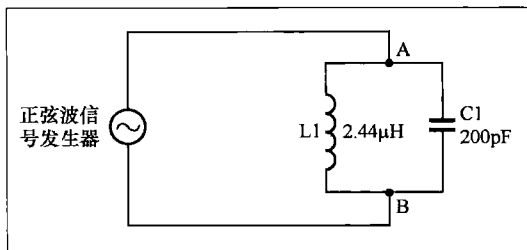


图21-6：在电路中，电感器和电容器与信号发生器并联连接。我们将用这个电路来研究并联谐振电路的条件。

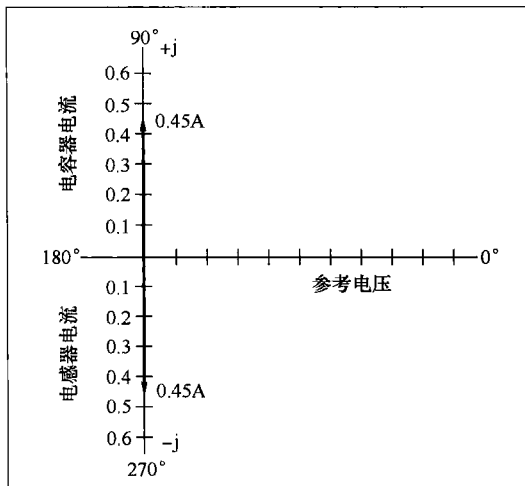


图21-7：电感器电流的相位滞后电压90°，因此我们沿着-j轴进行标记，0°轴表示参考电压方向。电容器电流超前电压90°，所以我们沿着+j轴进行标记。

方向，也就是 +j 轴方向。

图 21-6 中的点 A 和点 B 给了我们思考支路电流的另一种方法。在某一个瞬间，经过电感器的交流电流似乎从 A 流向 B，而在同一瞬

间电容器的电流似乎从 B 流向 A。在交流电的下半个周期，它们的方向正好相反。

我们发现从信号发生器流出的电路的总电流等于两个支路电流相加（这就意味着电感器的电流值减去电容器电流值）。

当我们改变施加的信号频率时，感抗和容抗随之发生改变。欧姆定律告诉我们，支路电流也要发生改变。图 21-8 为电容器电流、电感器电流和信号发生器的总电流图。需要记住，在任何时刻，电容器电流和电感器电流的方向都相反，它们的相位差为  $180^\circ$ 。

当你分析图 21-8 时，你会看到总电流值在谐振频率下变为 0。但这并不意味着经过电感器支路的电流或经过电容器支路的电流为 0，这只是意味着在这一点上流进或流出信号发生器的电流为 0。

当然，如果我们使用的是理想的电感器和电容器，那么信号发生器的电流应为 0。但是实际的电感器和电容器总会存在一定的电阻。因此信号发生器将提供一小部分电流来弥补并联谐振电路中由于电阻而造成的损耗。

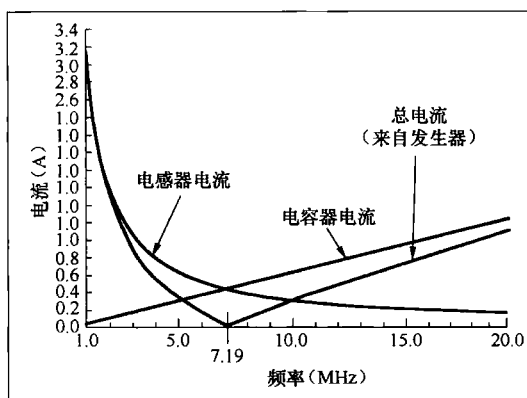


图21-8：这是电感器电流、电容器电流和信号发生器总电流的比较图。发生器电流是电容器电流和电感器电流的差值。注意，谐振频率电路中，总的电流变为0。

在谐振频率时，信号发生器的电流非常小，但是，经过分支电路的电流会很大。看起来，支路电流就像是在电感器和电容器之间交替流动着。

电感器和电容器之间能量来回传递。电感器把能量存储在磁场中，然后再释放到电路中。电容器将释放到电路中的能量存储在电场中，然后再传递给电感器。

你也许想计算几组不同频率时的感抗和容抗，然后再使用欧姆定律计算电抗上的电流。信号发生器为电路提供了 50V 的电压。我们可以把电容器电压和电感器电流合并起来，求得它们的总电流。如果计算出的值足够大，就可以画出像图 21-8 一样的图形。表 24-1 列出了几组不同频率时的电抗和电流值。运用下式将帮助你完成这些计算。

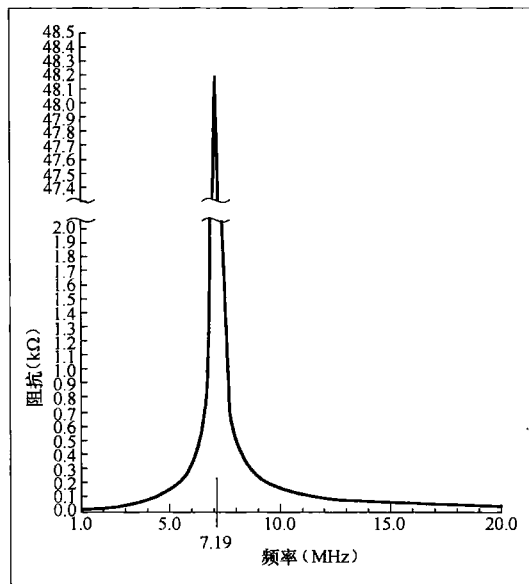


图21-9：这个图显示了并联电阻阻抗随频率变化的曲线。在低于或高于谐振频率时阻抗较小，但是在谐振频率时，阻抗变得非常大。

$$X_L = 2 \pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2 \pi fC}$$

$$I = \frac{U}{X}$$

当你知道了总电路电流和施加的电压，欧姆定律可以帮助你计算电路的总阻抗。用电压除以电流：

$$Z = \frac{U_{\text{总}}}{I_{\text{总}}}$$

图 21-9 为一个宽频范围内的电路阻抗图形。当信号频率低于谐振频率时，阻抗较小，容抗很大，所以它的电流很小。而在低频时，感抗较小，所以大部分电流经过电感器。

当信号频率高于谐振频率时，阻抗还是比较小。现在电感器的感抗很大，而电流很小，电容器的容抗很小，所以大部分电流经过电容器。

在谐振频率时，感抗和容抗方向相反，电感器上的电流和电容器上的电流大小相等、方向相反。如果电路元件是理想元件，那么电路总电流为 0。当一个很大的电压产生的电流为 0，或者是产生的电流较小时，电路阻抗很大。

无论是在串联谐振电路还是在并联谐振电路中，电路的  $Q$  值都相当重要。电感器和电容器的  $Q$  值越高，能量损失越小，反之，能量损失越大。此外，高  $Q$  值电路的频宽比低  $Q$  值电路的频宽要窄。

我们知道，电感器电流相位滞后电压  $90^\circ$ ，电容器电流相位超前电压  $90^\circ$ 。这说明电感器电压和电容器电压具有  $180^\circ$  的相位差。图 21-7 为支路电流和电压的参考图。电感器电流方向沿  $y$  轴负方向，也就是  $-90^\circ$  方向；电容器电流方向沿  $y$  轴正方向，也就是  $+90^\circ$  方向。

表21-1：电路计算值

频率(MHz)	电容电抗(Ω)	感应电抗(Ω)	电容器电流(A)	电感器电流(A)	发生器电流(A)	电路阻抗(Ω)
2.0	398	31	0.126	1.613	1.487	33.6
3.0	265	46	0.189	1.087	0.898	55.7
4.0	199	61	0.251	0.820	0.569	87.9
5.0	159	77	0.314	0.649	0.335	149.3
6.0	133	92	0.376	0.543	0.167	299.4
7.0	114	107	0.439	0.467	0.028	1 785.7
7.19	110.7	110.2	0.452	0.454	0.002	25 000
8.0	100	123	0.500	0.407	0.093	537.6
9.0	88	138	0.568	0.362	0.206	242.7
10.0	80	153	0.625	0.327	0.298	167.8
11.0	72	169	0.694	0.296	0.398	125.6
12.0	66	184	0.758	0.272	0.486	102.9
13.0	61	199	0.820	0.251	0.569	87.9
14.0	57	214	0.877	0.234	0.643	77.8

# 数学和计算器的窍门

## 数学窍门

有关更多的数学背景知识，请参阅附录 A——科学和工程计数法。

## 计算器窍门

下面的例子是告诉大家如何利用 TI-30X IIS 型计算器解决第 21 章中的方程问题。使用的数据很简单，所以他们可以同时显示在计算器上。要了解更多利用这个型号的计算器解决问题的例子，参阅附录 B——了解和你的 TI-30X IIS 型科学计算器。

## 例题

一个感量为 6mH 的电感器和容量为 5mF 的电容器，它们的谐振频率是多少？

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{6 \times 10^{-3} \text{H} \times 5 \times 10^{-6} \text{F}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{30 \times 10^{-9}}}$$

$$= \frac{1}{6.28 \times (173.2 \times 10^{-6})} = \frac{1}{1.088 \times 10^{-3}}$$

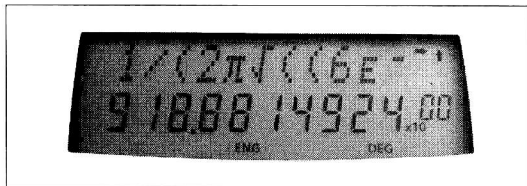
$$f_r = 918.9 \times 10^0 \text{Hz} = 919 \text{Hz}$$

计算器键入：

[ 这里有比屏幕能显示的字符多得多的字符需要输入，仔细输入每一个字符，在屏幕的第二行，你能看到你的答案 ]

$$1 \div (2 \pi \sqrt{(6 \text{E}^{-3}) \times 5 \text{E}^{-6}}) =$$

计算器第二行显示结果：918.88 × 10<sup>00</sup>



结果  $918.88 \times 10^{00} = 918.88 \times 1 = 918.88 \text{Hz}$

复习检测：-----

21.1 在LC电路中，当感抗( $X_L$ )等于容抗( $X_C$ )时称为：

- a) 最佳
- b) 配合
- c) 模糊
- d) 谐振

21.2 100mH的电感器和0.2  $\mu$ F的电容器，在什么频率下 $X_L = X_C$ ?

21.3 对于连接到电源的串联谐振电路，在谐振频率时：

- a) 电流最大
- b) 电流最小
- c) 电容器两端电压比电感器两端电压大
- d) 电感器两端电压比电容器两端电压大

21.4 对于连接到电源的串联谐振电路，频率高于谐振频率时：

- a) 电流停止流动
- b) 电流最大
- c) 感抗大于容抗
- d) 容抗大于感抗

21.5 一个谐振电路(串联或并联)有一个3.6MHz的谐振频率，其频宽是180kHz，求出这个电路的品质因数。

21.6 一个连接到电源上的并联谐振电路，在谐振频率时：

- a) 电流最大
- b) 电流最小
- c) 电容器两端电压比电感器两端电压大
- d) 电感器两端电压比电容器两端电压大

21.7 对于连接到电源的并联谐振电路，频率高于谐振频率时：

- a) 通过电容器的电流大于通过电感器的电流
- b) 电感器两端电压大于电容器两端电压
- c) 没有电流通过电感器或电容器
- d) 电感器中的电流最大

答案：-----

21.1 d

21.2 当 $X_L = X_C$ 时，谐振频率 $f_{\text{谐振}}$ 为

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{100 \times 10^{-3} \text{H} \times 0.2 \times 10^{-6} \text{F}}} \\ &= 1125 \text{Hz} \end{aligned}$$

21.3 a

21.4 c

21.5  $Q = f_r / \text{BW} = (3.6 \times 10^6 \text{Hz}) / (180 \times 10^3 \text{Hz}) = 20$

21.6 b

21.7 a

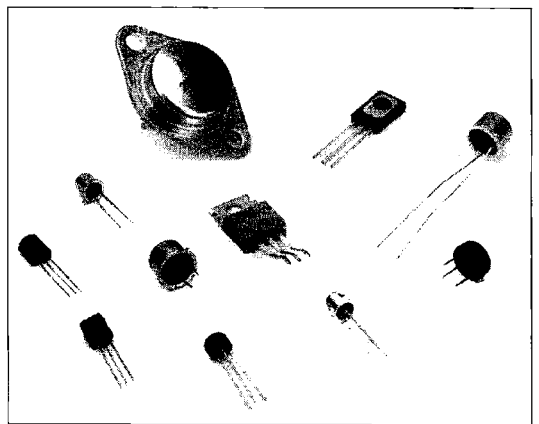
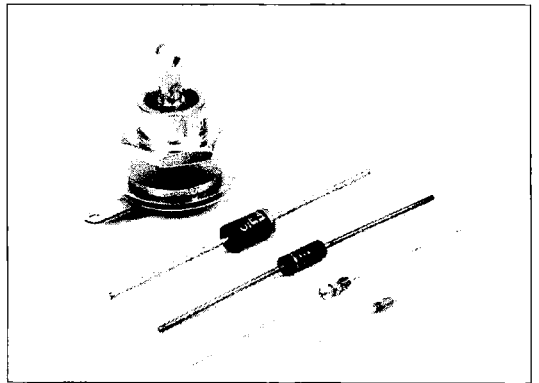
## 第四单元

# 有源器件的概念

如果你是从头开始学习本书，那么你已经懂得了很多电子学原理。你已经能计算稳定直流电路的状态，而且也能够计算很多交流电路的问题了。

到目前为止，我们只讨论了无源元件。无源元件只能接收一个输入信号，然后产生一个输出信号。它们不需要额外的电压源，通常输出信号要比输入信号小，也就是说无源元件在信号输出时损失了一部分信号（实际上，无源元件是把一部分信号能量转化为热能或别的形式能）。

无源元件相当重要，每一个电子电路都包含有无源元件。但是，对于有些电子学方面的功能无源元件却无能为力：无源元件不能放大信号，或使信号更强；无源元件也不能构成一个振荡器——在输入直流信号后产生一个交流信号；还有其他对信号处理的功能，无源元件都是无法完成的。这些功能需要另一种电路元件——有源器件来完成。



在本章中，我们将介绍二极管和晶体管等有源器件



有源器件需要一个输入电压来驱动它们工作，通常用直流信号设置工作点，并且提供正常工作时所需的能量。有源器件利用输入电压来放大信号，产生交流信号，并完成其他功能。

有源器件是许多电子电路的重要组成部分。如果没有有源器件，就没有我们今天所知道的无线电与电视发射和接收器，也没有计算机或电子计算器了。

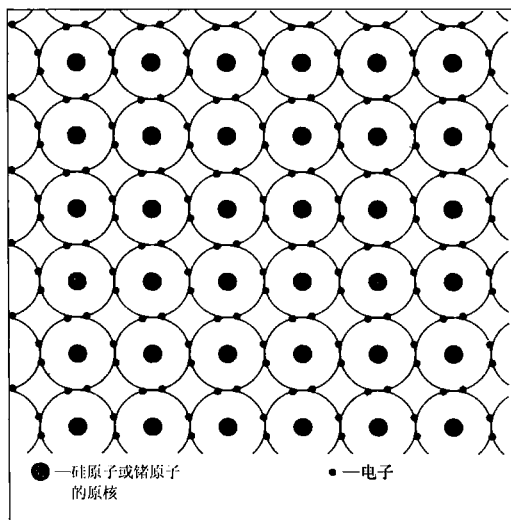
让我们把注意力集中到有源器件中来。我们将要研究一些有源器件以及它们的工作方式，我们也将研究这些元件在电子电路中的功能。

### 在这一单元你将学习：

- √什么是半导体
- √二极管的单向导电性以及我们如何在电子电路中利用这个原理
- √什么是双极性晶体管，什么是场效应晶体管，它们在电路中的作用
- √集成电路是如何把整个电路集成在一块微小的半导体材料上的
- √电子管是如何工作的

## 第22章

# 半导体材料



硅和锗原子按一定的规律排列。这些材料的特性可以在电子电路中用于制成半导体元件

### 目录

- 让我们从原子开始
- 半导体掺杂
- 复习检测

# 让我们从原子开始

任何一个现代电子电路中都包含我们称为半导体的材料。制造商用半导体材料制成不同的元件和器件。因此，了解这些半导体材料的工作原理非常重要，它对你学习现代电子学很有帮助。

为了对半导体原材料内部的工作原理有一个全面的理解，我们必须研究一些物理和化学的相关知识。当然，不必担心！即使你们从来没有学习过这些科目，也可以对半导体的基本工作原理有所了解。事实上，本书的其他章节已经包含了你所需要知道的知识。这一节中，我们将会描述绝缘体和导体原子的简单模型。

记住，组成物质的微小粒子叫做原子。原子非常小，如果没有高倍显微镜的辅助，任何人都不能看到它们。原子是所有物质的基本构件，科学家把每一种不同的原子类型称为一种元素。目前科学家已经发现了超过 100 多种的元素，并且正在寻找更多的元素。

原子可以组成更大的构件，我们称为分子。分子可以由不同元素的原子组成，也可以由同一个元素的多个原子组成。我们以水分子为例，它包含 1 个氧原子和 2 个氢原子。氧和氢都属于元素。但是我们所呼吸的氧气由氧分子组成，每个氧分子由 2 个氧原子构成。图 22-1 显示了原子是如何形成分子的。

有些粒子甚至比原子还要小。质子、中子和电子结合在一起形成了原子。质子带有正电荷，电子带有负电荷，中子不带电荷，它们结合后使组成的原子不带电。或许你还记得看

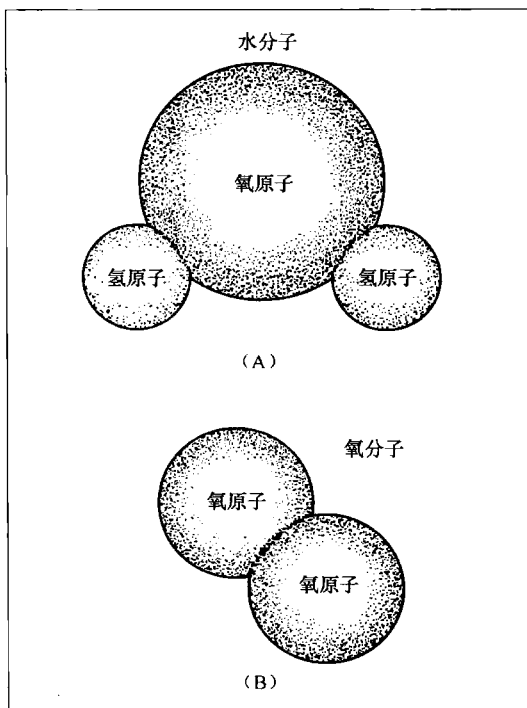


图22-1：我们所画的是一个氧原子中的电子层或电子轨道图。这些轨道中，每条轨道可以容纳一定数量的电子。在具体的轨道上，电子具有特定的能量。越是远离原子核的轨道上的电子，具有的能量越大。

过这样一个图，中间是质子和中子，外面围绕着电子云。类似这样的图形用来表示原子的结构（见图 22-2）。科学家把中间的质子和中子群或质子和中子球称为原子核。

每一种元素的原子都有确定数量的质子。例如，1 个氢原子有 1 个质子，1 个氦原子有 2 个质子，而 1 个铜原子有 29 个质子。原子呈

电中性，所以它必须具有与质子同等数量的电子。这也意味着氢原子有 1 个电子，氦原子有 2 个电子，而铜原子有 29 个电子。

有时把一个新的概念与熟悉的事物联系起来，可以有助于概念的理解。我们把原子核想象成太阳，把电子想象成围绕着太阳旋转的行星。在这种图形中，电子出现在距离核子不同的位置上。科学家用这样的图形来描述原子，并把电子到核子的距离定义为电子运行的轨道或层次。每一个轨道可以控制一定数量的电子（有些轨道只能控制 2 个电子，而有些轨道可以控制 6 个、10 个，甚至 14 个电子）。事实上，原子的结构要比图 22-3 所示的结构更为复杂，电子也不会像我们画的那样出现在确定的层次上。但是这个模型非常有用，可以帮助解释原子内部的活动状况。

轨道离原子核的距离是这个轨道中的电子具有能量多少的量度。轨道离原子核越远，电子的能量也就越大。这也是科学家称这样的图为能量分级图的原因。

这些轨道非常重要。如果一个原子中的电子数量恰好填满了一个轨道，那么原子核可以紧紧地吸引住它的电子。这样的原子构成了良好的绝缘体。假如一个原子的电子数量填满了一个轨道，还有一个或两个多出的电子进入它的下一个轨道，那么这些原子会与其他原子共用这些电子，或者是把这些电子让给其他原子。这样的原子就构成了良好的导体。而用来制造半导体的元素在最外层轨道上有 4 个电子。通过上面分析，我们可以看出它们既不是良好的导体，也不是良好的绝缘体。你能猜出为什么我们称它们为半导体吗？

任何一种元素的电子以特定的模型来填充电子轨道结构，这个模型可以决定这个原子

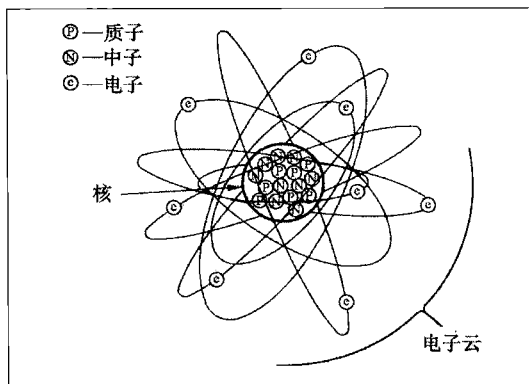


图22-2：原子是构成物质的基本模块。几个原子可以构成分子。图(A)显示为氢原子和氧原子如何构成了水分子。图(B)为2个氧原子构成了1个氧分子。

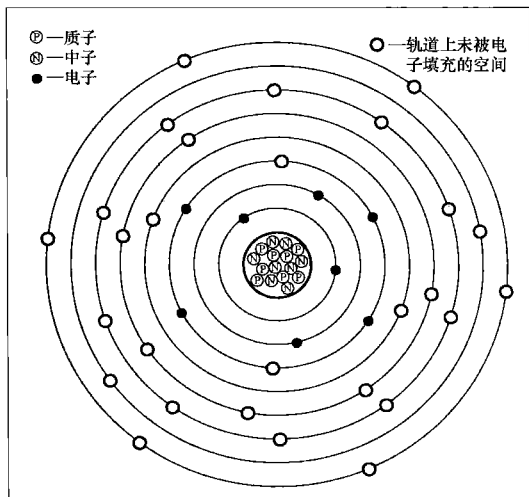


图22-3：一个原子机构模型，原子中的核子内包含有质子和中子。电子像云一样绕在核子周围。此图表示为1个氧原子的原子结构图。在原子核内有8个质子和8个中子，原子核周围还有8个电子。

如何与其他原子结合。它们有好几种结合的方式，但在这里不必去具体了解。不过，这将帮助你认识到原子结构的重要性。

# 半导体掺杂

硅和锗是制造半导体常用的材料（元素硅与普通的润滑剂和称为硅树脂的橡胶状密封胶不相同）。硅有 14 个质子和 14 个电子，锗有 32 个质子和 32 个电子。在电子轨道的最外层，硅和锗都有 4 个电子。硅原子和锗原子与周围的其他原子共同使用这 4 个电子。

一些原子共享它们的电子，这些原子把它们自己排列成有规则的模式，我们称这些原子构成了晶体。图 22-4 为硅和锗原子产生晶体的过程（原子类型不同，形成的晶体的模式可能不同）。硅和锗形成的晶体不是好的电导体，而且也不是良好的绝缘体。这就是为什么我们把这些材料称为半导体的原因。有时它们表现得像导体而有时表现得又像是绝缘体。

制造商通过精密控制，给这些晶体添加其他元素的原子，我们把这个过程叫做掺杂。用这样的方式把原子添加到晶体中后，产生的材料不再是纯净的硅或锗。我们称添加的原子为杂质原子。

例如，制造商在制造晶体时，可能在硅或锗中加入一些砷原子或者锑原子。每个砷原子或者锑原子共享 5 个电子。图 22-5 中显示的是一个最外层轨道上具有 5 个电子的原子填充到晶体结构中的过程。在这种情况下，晶体中有一个额外的电子，我们把这个电子称为自由电子，并把用这种方法制作的半导体物质称为 N 型半导体（这个名字来源于晶体结构中的额外负电荷）。

和硅原子、锗原子一样，杂质原子本身

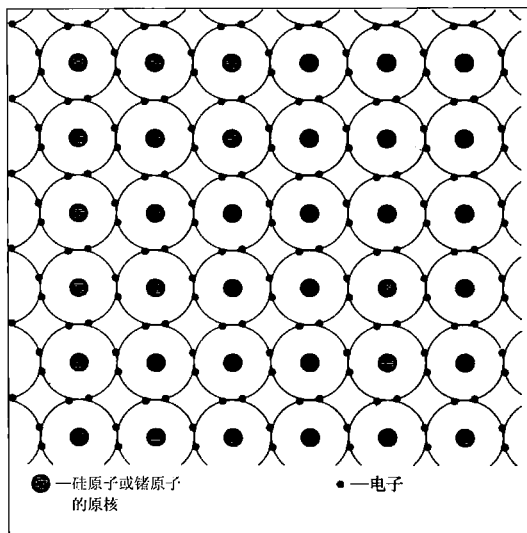


图22-4：硅原子和锗原子把它们自己排列成有规则的模式，我们称为晶体。从图中可注意到，晶体结构中，每一个原子都是与附近的原子共享4个电子。

呈电中性。自由电子来自于晶体结构本身。这些杂质电子在晶体结构中产生（供给）了自由电子。这就是我们称为施主原子的原因。

现在假设制造商加入的是镓原子或者铟原子，取代了砷原子或者锑原子。由于镓原子和铟原子最外层只有 3 个电子可以与周围其他原子共用，因此当晶体中加入镓原子和铟原子后，晶体结构中产生了可以放置电子的额外空间。

图 22-6 是一个晶体结构中存在着可以填入电子的额外空间的例子。我们称这样的电子空间为空穴。这种方法制作的半导体物质为 P 型半导体。因为杂质原子在晶体结构中产生了

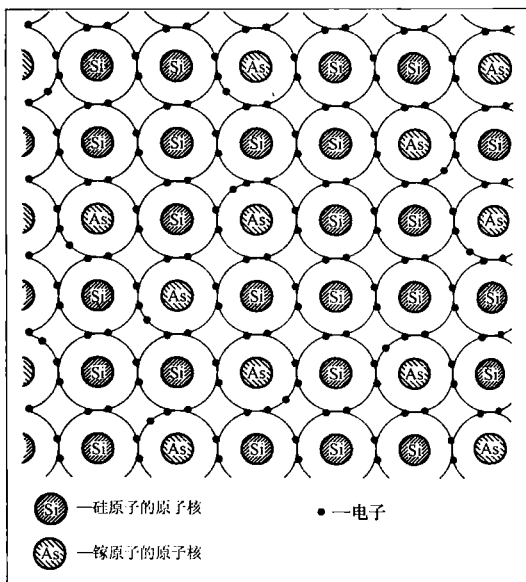


图22-5：制造商可以在硅晶体或锗晶体中加入砷原子或锑原子。这些杂质原子给晶体结构增加了额外的电子，从而生成了N型半导体材料。

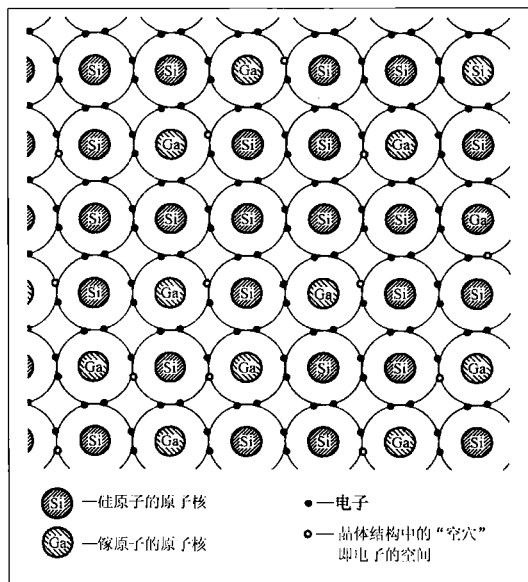


图22-6：制造商可以在硅或锗晶体中加入镓或铟原子。这些杂质原子只有3个可以共享的电子，这将会在晶体结构中产生一个容纳其他电子的空穴。这种方法可产生P型半导体材料。

空穴，可以接受额外的电子，所以称它为受主原子。

此外，你应该意识到杂质原子的电子数量和质子数量相等，因此材料本身还是电中性。P型半导体材料中，晶体结构中缺少一个电子，而在N型半导体材料中，晶体结构中多出一个额外的电子。

假如我们把一个电源接到N型半导体上。电源的正极吸引电子，晶体结构中的自由电子在晶体中向电源正极方向移动。

下面我们假设给P型半导体上外加一个电源。电源的负极吸引空穴，它们在半导体中向电源负极方向移动。

自由电子和空穴以相反的方向通过晶体。这是为什么我们把电子和空穴称为电荷载体——载流子的原因。

制造商在生产半导体物质时，控制半导体材料的电特性。他们通过精确地控制加入到硅或锗晶体中的杂质原子的数量和类型，从而控制它们的电特性。

制造商把N型和P型半导体根据不同的组合彼此组合在一起，用这种方法制造出多种电子元件和器件。

半导体属于固体晶体，它非常结实，不会因为振动和粗鲁的操作而轻易损坏。我们把用半导体物质制作的电子器件称为电晶体器件。

复习检测：-----

22.1 下列元件中，哪个不是无源器件？

- a) 电阻
- b) 二极管
- c) 电容器
- d) 电感器

22.2 为了制作一个放大器，或者振荡器，除了R,L和C元件外，你还需要：

- a) 有源器件
- b) 变压器
- c) 逻辑门
- d) 可变电容器

22.3 在原子中\_\_\_周围的\_\_\_包含\_\_\_，它可以确定原子的电特性。

22.4 大多数半导体材料中原子的电子轨道最外层中含有的电子数是：

- a) 1
- b) 8
- c) 2
- d) 4

22.5 你能说出三种半导体材料的名称吗？

22.6 如果把最外层电子为3个电子的杂质原子添加到半导体材料中，这个原子称为：

- a) 受主原子
- b) 施主原子
- c) 中和原子
- d) 乔治

22.7 在半导体材料中的载流子称为\_\_\_和\_\_\_。

答案：-----

22.1 b

22.2 a

22.3 在原子中原子核周围的轨道包含电子，它可以确定原子的电特性。

22.4 d

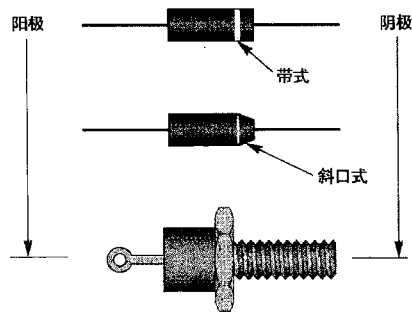
22.5 (略)

22.6 a

22.7 在半导体材料中的载流子称为电子和空穴。

## 第23章

# 二极管——电路中的单向阀门



二极管有多种形状和尺寸

### 目录

- 二极管允许电流单向流动
- 半导体材料的固态二极管
- 二极管的参数和特性
- 半波整流电路
- 全波整流电路
- 桥式整流电路
- 我们可以把二极管作为开关使用
- 复习检测



# 二极管允许电流单向流动

**要**记住，一个理想的电阻器，不管通过它的是直流电还是交流电。流过电阻器的电流只取决于施加的电压和自身电阻的大小。图 23-1 (A) 为施加稳定直流电压时，电阻器的电流变化图；图 23-1 (B) 为施加逐渐增大的直流电压时，电阻器的电流变化图；图 23-1 (C) 为施加交流电压时，电阻器的电流变化图。

但是，对理想的电容器来说，你会得到不同的结果。当给电容器施加一个交流电压时，将会产生一个交流电流。如果施加一个直流电压，电容器在充电时会产生一个急剧变化的电流，不过，电容器充电完毕就不再有电流通过。图 23-2 为分别施加直流电压和交流电压时，电容器中电流的变化图形。

在本章中，我们主要讨论这样一种器件，它只允许电流单向流动，而且和施加电压的种类无关。我们把这样的设备称为二极管(Diode，这个词来自于希腊单词。前缀 Di 表示 2 的意思，Ode 表示一条通道或一条路。所以二极管是指这个设备内部由两部分组成或者有两个连接端)。二极管的制造材料和制造方法很多，在现代电子电路中有着广泛的用途。不过，所有的二极管都有一个共同的特性：只允许电流向一个方向流动即单方向导电性。

当我们将两块不同的金属相互接触，做一个最简单的电路连接，就做成一个简单的二极管。早期的无线电接收器中使用的就是一种简单的二极管。把小的方铅矿晶体放在铅盒内就构成了二极管的一部分（铅是一种灰色的软金

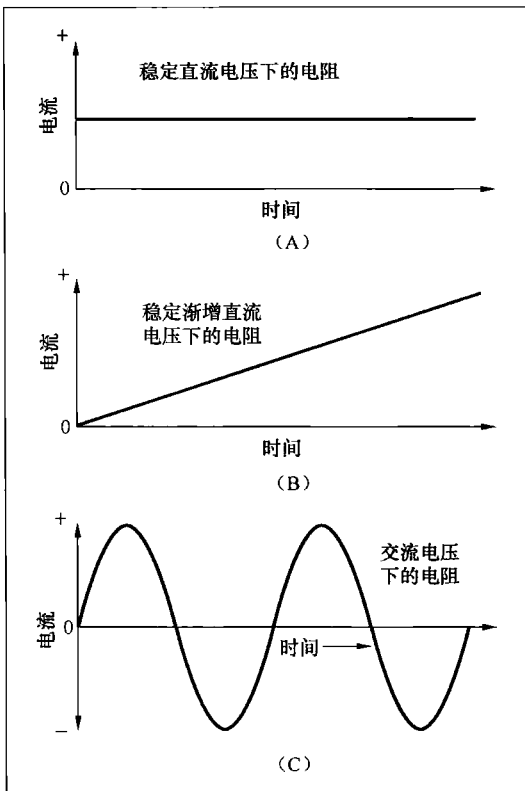


图23-1：图 (A) 表示的是我们给电路施加一个稳定的直流电压时，电阻器上的电流变化图。施加了稳定逐渐增大的直流电压时，电阻器上的电流变化如图 (B) 所示。图 (C) 显示的是我们给电路施加一个交流电压时，电阻器上的交流电流变化图。

属，方铅矿是一种含铅的矿石)。将一根细导线与方铅矿表面相接触，如果你找到方铅矿晶体正确的触点（灵敏点），就可以用耳机收到无线电信号了。来看图 23-3，我们仍然利用二

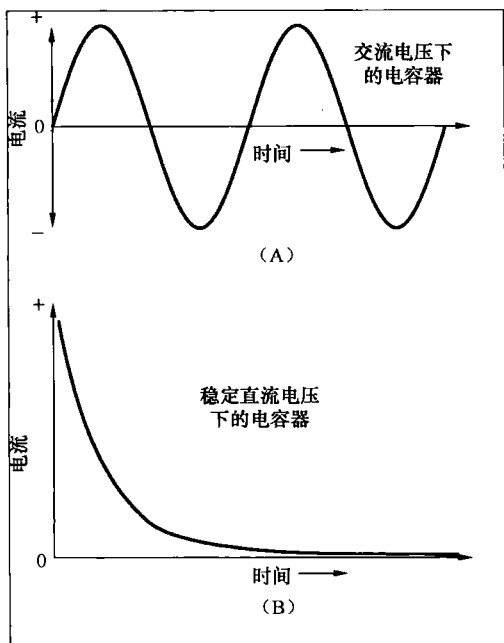


图23-2：当我们给电容器施加一个交流电压时，将会产生一个如图（A）所示的交流电流。当给电容器施加一个直流电压时，电流会随着电容器的充电结束而停止。电流变化如图（B）所示。

极管来检测接收器接收的无线电信号。二极管将信号改变为你可以收听到的类型。

图 23-4 显示的是电路图中表示二极管的符号。箭头端有一根小竖线的一端为阴极，箭头端的相反端为阳极。

二极管是怎么工作的呢？我们来看一个简单的电路图。首先，将二极管的阳极与电池的正极相连，二极管的阴极与电池的负极相连。来看看图 23-5，当二极管以这样的方式连接好后，就会有电流流过二极管。我们说给二极管加的是正向偏压。

现在我们把电源反向连接二极管，图 23-6 为连接好后的电路。这一次电池正极与二极管阴极相连，电池负极与二极管阳极相连。在这种情况下，电路中没有电流经过。这时给二极管加的是反向偏压。

你的下一个问题可能就是，“如果我们给二极管施加一个交流电压时会发生什么情况呢？”二极管两端电压极性不断地变化，也许

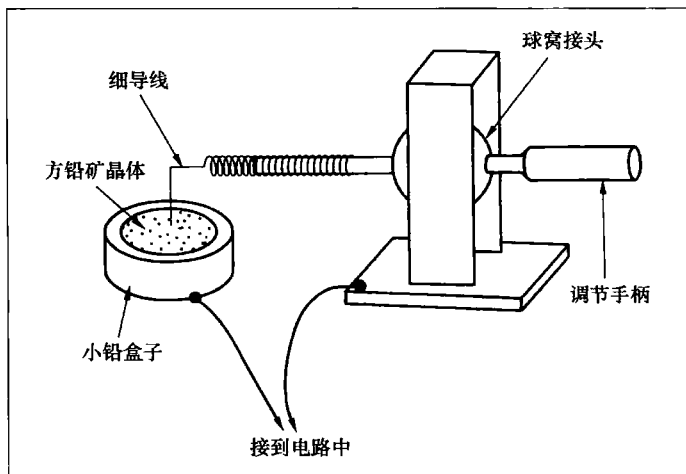


图23-3：在无线电早期，简单的接收器使用这种类型的二极管来检测无线电信号。

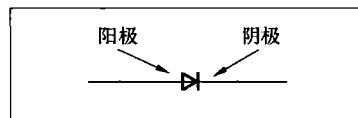


图23-4：这是电路图中的二极管符号。看起来像一个箭头刺进了木板中。箭头端有小竖线一端是二极管的阴极，箭头相反的一端是二极管的阳极。

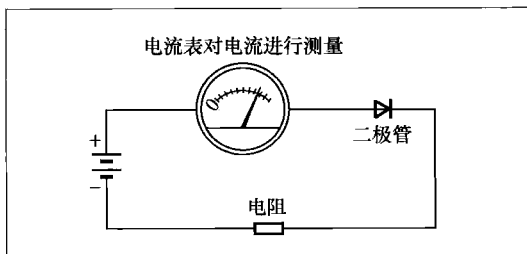


图23-5：当你按照如图所示连接好二极管后，将会有电流经过二极管（和电路）。

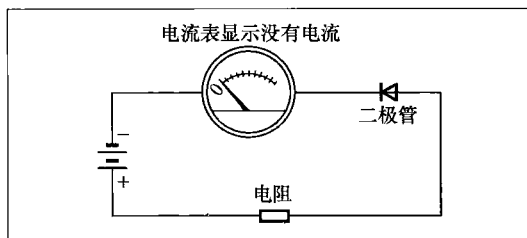


图23-6：现在以和图23-5相反的方向来连接二极管。电池正极连接二极管阴极，负极连接到二极管的阳极。在这种情况下，没有电流经过二极管（和电路）。

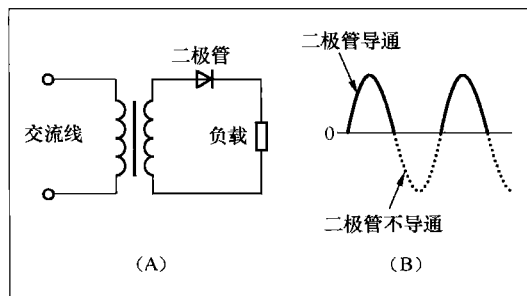
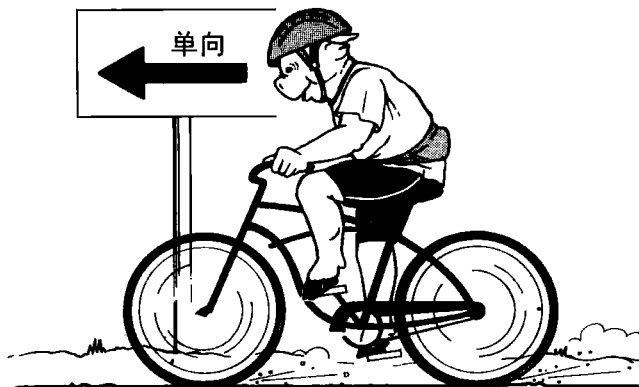


图23-7：这张图总结了当我们为二极管施加交流电压时，二极管是如何工作的。当交流电压的顶部是正向电压时，二极管阳极与正向电压连接，电路中有电流存在。当交流电压的顶部是负向电压时，二极管阳极与负向电压相连，电路中没有电流。图（B）为施加电压在几个周期中的电路电流变化图。



你会期望，当二极管阳极上电压极性为正时，电路中就会有电流通过，而当电压极性反转时，二极管阳极上的电压极性为负时，电路中电流就会停止。当交流电压的下一个周期到来时，二极管阳极重新与正向电压连接，电路中将会再次出现电流。现在看图 23-7，只要施加在二极管上的电压为交流电压，这个过程将会一直持续下去。可见，电流只能沿着一个方向经过二极管，而且电子流动的方向与二极管符号中的箭头指向相反。

给二极管输入一个交流电，二极管将会输出一个直流电，我们称这个过程为整流。也因为这个原因，有时称这样的二极管为整流器。

# 半导体材料的固态二极管

**现**代电子电路中使用的二极管大多数都是由半导体物质制造的。半导体的工作电压较低，结实可靠，此外，它只有非常小的热能损耗。

在第 22 章中，你了解了制造半导体的材料。现在你可能很想知道怎样使用半导体材料来制造二极管。嗯，第一步，需要记得二极管由两个部分组成。为了制造固态二极管，我们需要两块半导体材料。因为半导体材料只有两种类型的材料（P 型和 N 型），所以我们需要每种类型各取一块。

我们通过把 2 块半导体材料连接就构成了一块二极管材料。N 型和 P 型材料在中间相互接触，从而形成了一个 PN 结。引起我们兴趣的正是这两种材料中间的这个 PN 结（如图 23-8 所示）。

制造商是如何制造形成 PN 结的呢？他们通常先选择一块 P 型或 N 型半导体材料，然后把这块半导体材料表面上的一个很小区域通过掺杂（杂质扩散）改变为另一种半导体类型。具体过程可参见图 23-9。厂商在制造 PN 结时，

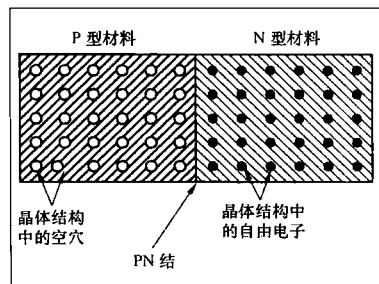


图23-8：P型半导体和N型半导体结合，形成了PN结。我们把这样的PN结称为固体二极管。

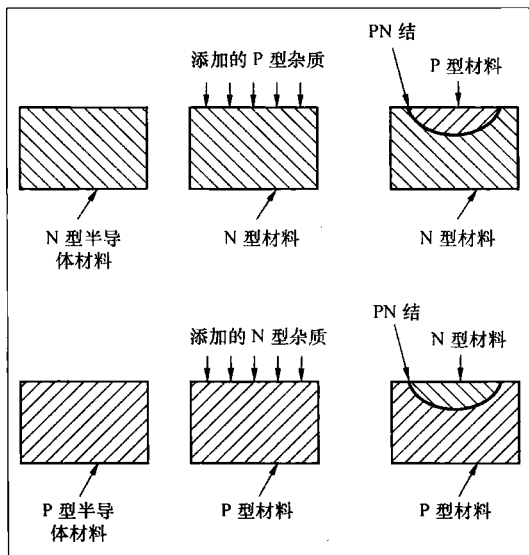


图23-9：制造商首先选择一个块P型或N型半导体材料，然后把这块半导体表面上的一个小区域改变为另一种半导体材料类型，从而做成PN结。

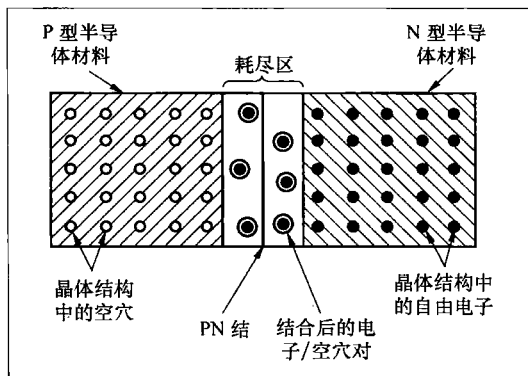


图23-10：靠近PN结的自由电子和空穴会穿过PN结，然后相互结合，这样在二极管PN结处形成了一个耗尽区。

需要几个工艺过程,不过对我们来说暂不需要了解这些具体的细节。

好了,你已经大概了解了制造商如何制造一个二极管,现在你或许想知道二极管是如何工作的了。在我们将二极管接入电路之前,将会发生很有趣的事情。N型半导体材料中的自由电子会穿过PN结,填充到P型半导体材料的空穴中!这个过程产生两个结果。首先,在PN结附近的区域不再有空穴或自由电子,我们称这个区域为耗尽区。这是因为空穴和自由电子,或者叫半导体电荷载体已经耗尽。具体过程可参见图23-10。

你们也许会问,“为什么不是N型半导体中的所有电子都穿过PN结,并填充到P型半导体的空穴中呢?”这是个很好的问题。随着一部分电子穿过PN结,N型半导体中的杂质电子带有了正电荷(原子是不带电的,但如果失去了电子,那么它将带有正电荷;如果得到了电子,将带有负电荷)。随着自由电子填充到P型半导体的空穴中,P型半导体中的受主原子得到了额外的电子,成为负电荷。这是因为它们现在有了多余的电子。P型半导体中的空穴也可以向N型半导体移动,这个移动过程在P型半导体中留下负电荷,在N型半导体中留下了正电荷。

电子和空穴穿过PN结的移动对半导体材料的影响效果相同。这个运动使得在N型半导体中留下正电荷,在P型半导体中留下负电荷。随着耗尽区的扩大,在PN结P这一侧的负电荷增加,这会阻止更多的电子穿过PN结。在PN结N这一侧的正电荷也增大,从而吸引着电子返回N型半导体。

电荷也会阻止更多的空穴穿过PN结进入N型半导体材料一侧。图23-11为这些电荷对

耗尽区所产生的影响,这些电荷阻止了耗尽区的进一步扩大。电子和空穴穿过PN结的移动会产生电荷,这是这个移动过程的第二个影响。

现在你已经开始了解晶体二极管的结构。让我们把一个二极管接入到电路中,来看看将会发生什么。图23-12为一个二极管、安培表和电池串联连接的电路。在电路中,电池正极与P型半导体连接,电池负极与N型半导体连接。你已经学过,同种电荷互相排斥,异种电荷互相吸引,所以电池的负极会排斥N型半导体中的额外电子。与之相似,电池正极排斥P型半导体中的空穴(空穴担当正电荷的角色)。

电池电压必须足够大,才能有能力强推动(和拉动)电子穿过耗尽区(如果是锗半导体,则需要至少为0.3V的电压,如果是硅半导体,这个电压为至少0.7V)。一旦电子和空穴穿过耗尽区,电压就可以吸引着它们穿越半导体。正向电压吸引N型半导体材料中的电子穿过P型半导体材料和PN结,然后电子经过电路到

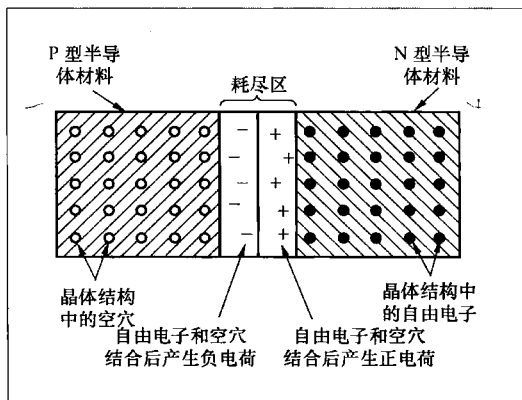


图23-11:空穴和自由电子可以穿过二极管PN结,所以电子可以填充到空穴中。但是这会在半导体材料相反的两侧留下正电荷和负电荷。这些电荷排斥额外的电荷载体,从而阻止耗尽区变得过大。

达电池正极。

同样的方式，电池负极吸引着空穴穿过 N 型半导体材料和 PN 结（在电路中，空穴的流动方向和电子流动方向相反）。图 23-12 电路中，电流表显示有电流经过电路。在这个例子中，二极管扮演着一个电阻的角色。

你可能很想知道，是不是所有电子都会脱离半导体，然后电流将会停止呢？这样会损坏半导体吗？不，不要担心所有的电子都会逃脱！每当一个自由电子离开半导体材料时，电池负极就会有一个新的电子进入到 N 型半导体中。电池的一个作用就是提供保持电路中电流流动所需的电子。

晶体结构中的受主杂质原子和施主杂质原子会设法保证半导体中的电子数量与初始时相等。所以当我们移去二极管上的电压后，半导体材料会返回到初始的状态，因此，你 cannot 通过把二极管接到电路中来移去半导体中的自由电子和空穴。

现在让我们把电池和二极管反向连接，如

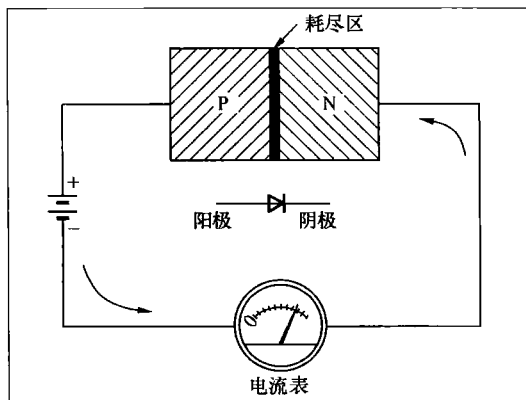


图23-12：把二极管连接到如图所示的电源上时，二极管允许电流通过。注意，半导体下面的二极管符号，电源负极与阴极相连，而正极与阳极相连，我们称这样的二极管为正向偏压二极管。

图 23-13 所示。这一次电池负极与 P 型半导体相连，电池正极与 N 型半导体相连。记住，同种电荷互相排斥，异种电荷互相吸引，所以电池的负极会排斥 P 型半导体中自由电子，吸引它的空穴，而电池的正极会排斥 N 型半导体中的空穴，吸引它的电子。由于空穴和电子脱离 PN 结，使得耗尽区变宽。因为耗尽区太宽，电子和空穴无法穿过耗尽区，所以不再有电流产生。

当电源正极与二极管的 P 端相连，负极与二极管的 N 端相连时，二极管 PN 结为正向偏压结，正向偏压二极管可以允许电流经过二极管。而当电压极性调换时，二极管 PN 结为反向偏压，反向偏压二极管不允许电流经过二极管。

实际上，最后一句话并不完全正确。在反向偏压二极管中，通常会有一个非常微小的电流经过，而且这个电流小到了可以忽略的地步（可能会有大于 10mA 的电流经过正向偏压二极管，同样的二极管在反向偏压时，流过它的电流可能会小于 10 $\mu$ A）。正向电流至少比反向电流（或称为漏电电流）大 1 000 倍。

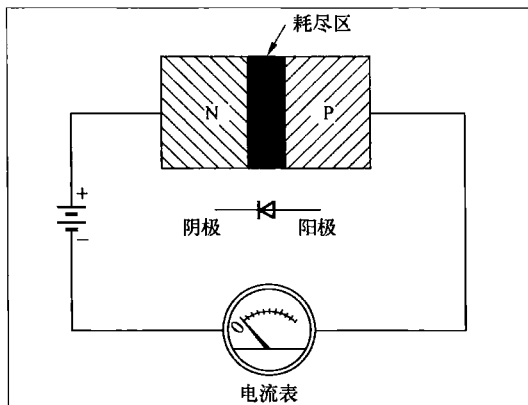


图23-13：当我们把二极管连接到如图所示的电压源上时，电路中没有电流通过。当二极管阳极与电源负极相连，阴极与电源正极相连时，我们称这样的二极管为反向偏压二极管。

## 二极管的参数和特性

当你把二极管以正向偏压方式连接到电路中时，会有电流经过电路（电池正极与二极管正极相连，二极管负极与电源负极相连）。如果我们以反向偏压方式连接二极管，电路中将没有电流通过（这时，我们把二极管的正极与电源负极相连，而把二极管的负极与电源正极相连）。

让我们来观察一下，当我们改变施加在二极管两侧的电压时，经过正向偏压二极管的电流会有什么变化。如图 23-14 所示，我们把二极管接到电路中。电源输出电压为 0V 时，我们没有测量到任何电流。现在我们开始逐渐增大电压，如果我们使用的是锗二极管，只有当电压接近 0.3V 时，电流才开始增大。而如果是硅二极管，只有在电压增加到接近 0.7V 后，电流才开始增大（这些电压代表临界点，在这个点处，半导体材料才开始导电）。当你增大施加的电压超过这个值之后，电流将迅速增加。图 23-15 为一个典型的二极管的特性曲线图的一部分。

二极管的作用就像一个可变电阻器。当电压刚刚超过 0V 时，它的电阻可能要大于 100Ω。一旦电压超过门限电压，电阻迅速减小到几欧姆。现在我们一起来看看图 23-15，一旦电压超过门限电压，哪怕电压只增加一点点，但电流却会迅速变大。如果我们忽略这个让电流正向通过的小的门限电压（小于 1V）的话，我们就可以说二极管对电流没有阻碍作用。

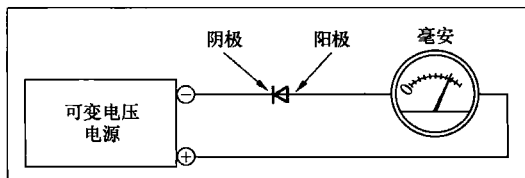


图23-14：如图所示，把二极管阳极与可变电压电源的正极相连。电流表显示电路中有电流通过。

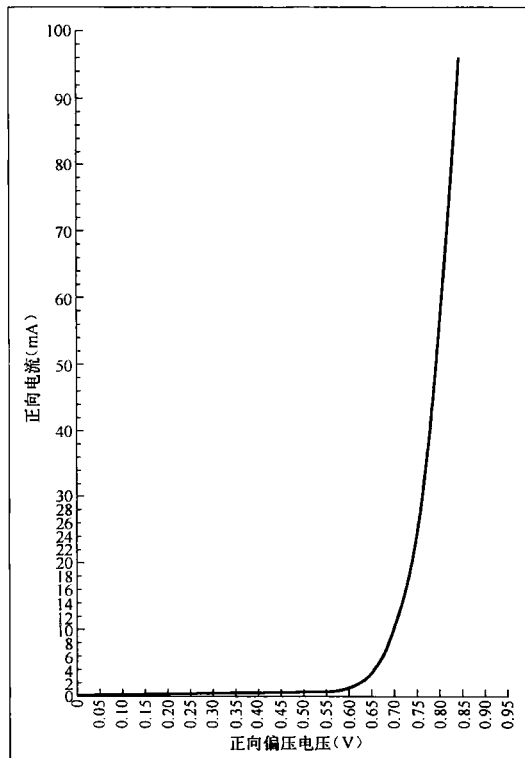


图23-15：这是一个典型的硅二极管在正向偏压时的特性曲线图。当锗二极管的正向电压达到0.3V后，正向电流开始增大。如果通过二极管的电流大于二极管允许的正向平均电流，二极管将被损坏。

这告诉我们二极管的一个重要参数。对二极管来说有一个电流限制，就是二极管可以通过多大的电流。由于二极管内部存在一定的电阻，因此在电流经过时会产生热量，经过的电流越大，二极管将会变得越热。如果二极管过热，二极管将被损坏。制造商使用不同的参数值来描述二极管处理电流的能力。我们现在讨论的这个参数是正向平均电流。

正向平均电流是二极管允许通过的最大电流（在有些条件下，可能会有更大的电流脉冲经过二极管，但是这只能持续极其短暂的时间）。如果经过二极管的电流超过了正向平均电流参数，二极管有可能被损坏。

因此，在把二极管应用到具体的电路中时，你必须要知道二极管的正向平均电流值。有些二极管只能处理最大值为 100mA 的正向平均电流，而有些二极管甚至不能处理这么大的电流，还有些二极管可以轻松处理 10A 甚至更大的电流。一般而言，所能处理的电流越大，二极管的体积也就越大。半导体材料的体积和

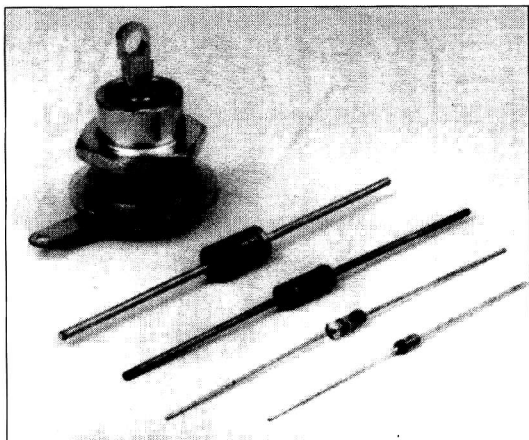


图23-16：固体二极管有不同尺寸和形状。一般来说，二极管的个头越大，可处理的电流就越大。用螺栓作引线的二极管通常可以安全地通过好几安培的电流。

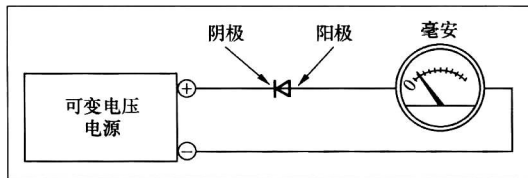


图23-17：如图所示，把二极管的阴极与可变电压源的正极相连。图中灵敏度电流计显示，电路中只有几微伏的反向电流。

表面积较大时，二极管的散热能力也越强。

在制作二极管时，制造商会在一端的引线处做个螺栓。通过这条导线，二极管可以固定在块头较大的金属或散热片上。散热片可以把二极管上的热量散发出去，这样就可以允许较大的电流通过二极管。图 23-16 为一些典型的半导体二极管。图中有一个装有散热片的大电流二极管。

现在让我们来改变电路中二极管的方向。图 23-17 为改变后的电路，这时二极管是反向偏压。我们需要使用一个灵敏电流表来测量电



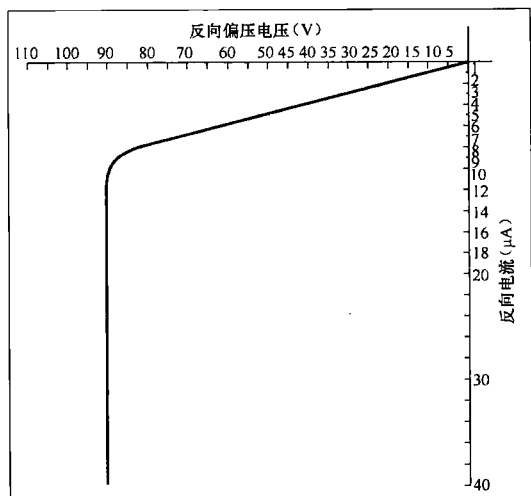


图23-18: 此图为一个二极管的反向偏压特征曲线图。引起二极管电流迅速增大的反向偏压电压与二极管的类型有关。当二极管反向导通时，二极管通常会遭到损坏。

路中的微小电流。还是逐渐增大施加在二极管上的电压，现在二极管上的电流可能只有几微安大小，但随着电压的增大，二极管中的电流几乎没有增加。

最后，倘若我们继续增大电压，我们将会发现一个点，当电压达到这个点时，二极管突然允许电流通过。如果电路中没有足够大的电阻进行限流，反向电流将会变得非常大。因此，你必须限制电路中的电流，否则二极管将会很快由于自身产生的热量而烧毁。图 26-18 为二极管反向电压特征曲线图。

这带来了二极管的另一个重要参数：最大反向电压（PIV）。最大反向电压表示我们可以安全施加在二极管上的反向电压的最大值，它要比引起二极管通过最大反向电流的电压值略小。一个二极管的反向电流特性如图 23-18 所示，它的最大反向电压大约是 85V。当你为电

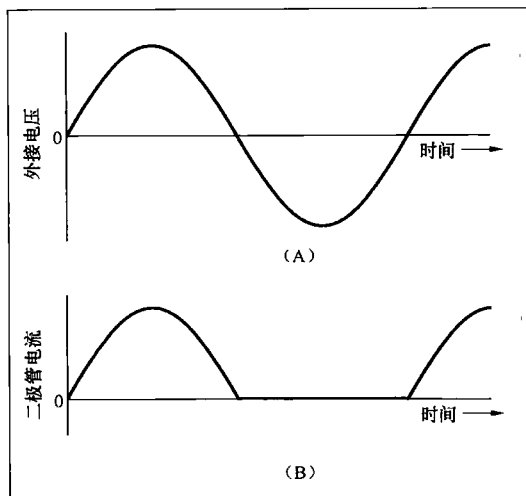


图23-19: 图 (A) 为施加到二极管上的交流电压波形。图 (B) 为施加交流电压后，通过二极管的电流。二极管只有在阳极电压为正时才具有导电性。

路选择二极管时，必须保证二极管的 PIV 要比电路可提供的反向偏压电压大。否则，将会有很大的反向电流经过二极管，将其击穿。

概括地说，如果我们使二极管正向偏置，二极管的电阻较小，或者说相当于短路。如果我们把二极管反向偏置，二极管的电阻很大，相当于断路。至此，我们已经讨论了二极管在直流电下的工作状况。现在我们将简单了解一下二极管在外接交流电时会发生什么情况。

图 23-19 (A) 为一个交流电压波形。让我们从 0 电压开始正向增大电压（也就是图中左边部分的情况）。没有对二极管施加电压，二极管不导电。随着交流电压的增大，二极管表现为正向偏置状态，二极管开始导电，并且随着电压的增加，电流也增加。图 26-19 (B) 为二极管电流图。当电压达到正向峰值后开始减小时，二极管的电流也会降低。当交流电压

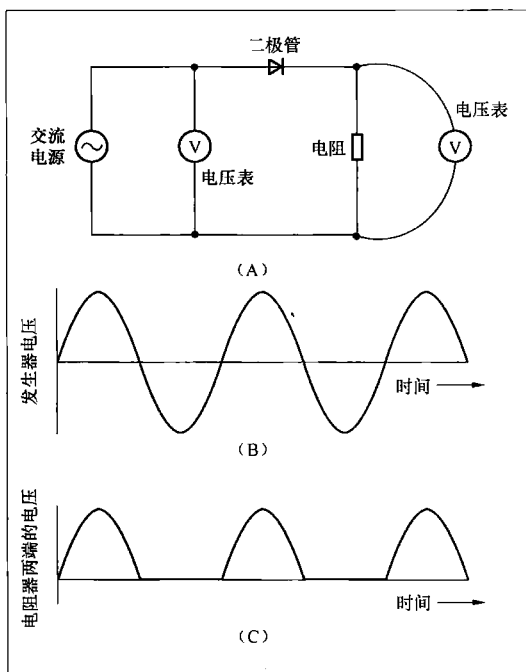
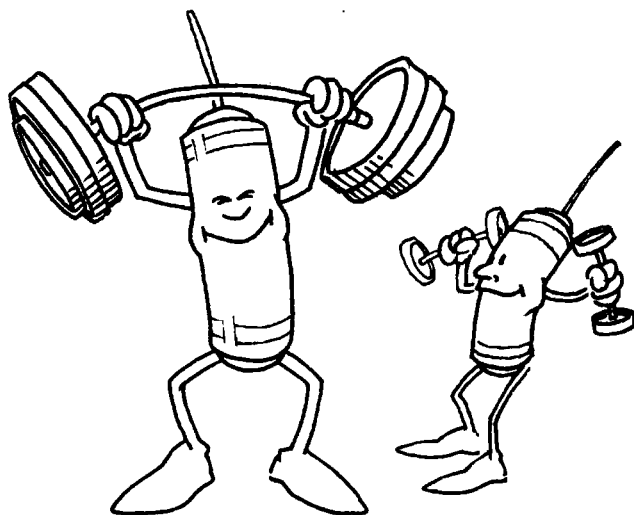


图23-20：图(A)显示如何测量带有二极管的电路中电阻器电压的方式。只有电路中有电流时，电阻器上才会有电压。图(B)为施加到电路中的交流电压图。图(C)为施加交流电压时，测量出的电阻R两端的电压图。

再次降为0V时，二极管停止导电。接着，交流电压在负方向增加，二极管处于反向偏置状态，此时二极管不导电，电路中没有电流。当电压再一次变化到正向时，二极管将重新开始导电。图23-19描述了这个变化的完整过程。

通过上面讨论可以看出，二极管有一个非常重要的用途：把二极管接入电路，我们施加一个交流电压时，二极管会输出一系列脉冲电流，这些脉冲电流沿着一个方向流动，不会随着交流电压方向的改变而变化。图23-20(A)电路中，一个电阻器和一个二极管串联连接。图23-20(B)为施加到电路中的交流电压波形。图23-20(C)为电阻器两端的电压波形。电阻器上的电压取决于二极管的脉冲电流。

在图23-20所示的电路中，二极管在一半时间内正向偏置。而这段时间内，电路中会有电流通过。每个通过二极管的脉冲电流都是二极管平均正向电流的两倍，因为在另一半时间内，二极管的电流为0。



# 半波整流电路

**现** 在我们将一个二极管、一个电阻器和一个交流电压源串联起来，如图 23-21 所示。在电阻器两端“输出”的电压为脉冲电压。在交流电路中，每当二极管处于正向偏置时，就产生一个脉冲信号。输入的交流电中每个周期产生一个脉冲电压。而当二极管处于反向偏置时，没有输出电压，所以两个脉冲之间没有输出电压。图 23-22 为交流电压输入和输出的电压波形。

这个电路输出电压的波形只是输入电压波形的一半，我们把这样的电路称为半波整流电路（记住，整流器指的是使输入的交流电输出为直流电的设备或电路）。半波整流器的一个最大的优点是电路简单，而它的最大缺点是输入电压的利用率低。

从图 23-22 中的输出波形可以看出，输出电压总是出现输入电压的正半部分（用零电位作参考线时，输出电压可以是正向的，也可以是负向的。反转二极管的方向可以改变输出电压的极性）。输出电压随着时间变化，而电路

中的电流也会随着这些变化而变化，但是电路中电流的方向保持不变，因此我们的半波整流电路把交流电转换为脉动的直流电。

整流后输出的电压不是一个稳定的值。输出电压大小在 0 和峰值之间变化。输出的直流电压的峰值（PEAK）与输入的交流电压的峰值相等。如果你知道输入电压的均方根电压值（RMS）即有效电压值，就可以计算出输出电压的峰值，只要简单地把均方根电压乘以 2 的平方根（即 1.414），即

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414 \quad (23-1)$$

例如，让我们假设一个交流信号发生器的

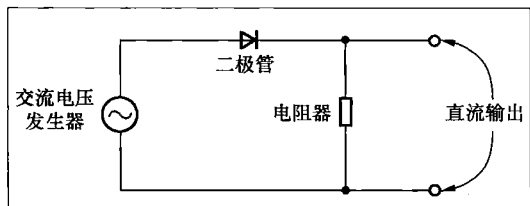


图23-21：半波整流是一个可以把输入的交流电压转换成输出直流电的简单电路，你只需要一个二极管和电阻器即可。

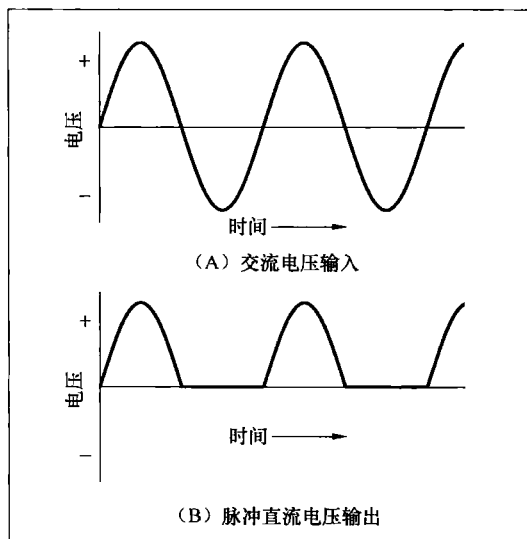


图23-22：图 (A) 为输入到半波整流电路的交流电压波形，图 (B) 为半波整流电路输出的脉冲直流电压波形。

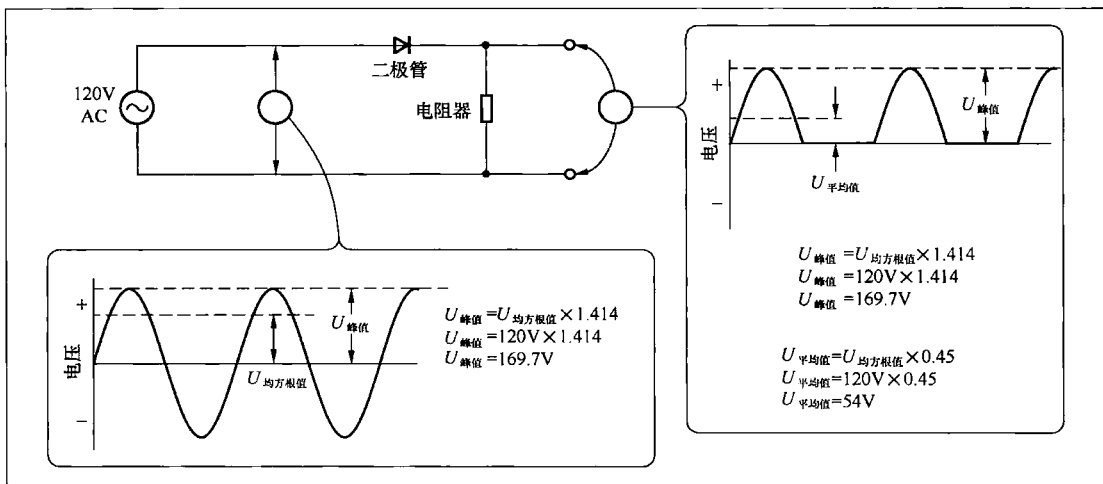


图23-23：这是一个半波整流器与交流电发生器相连的电路图，交流电发生器的有效输出电压是120V，该图同时显示了输入和输出电压的波形以及它们的峰值和平均值。

有效输出电压是 120V，见图 23-23，那么与信号发生器相连的半波整流电路的输出电压峰值为多大呢？公式 23-1 将帮助我们回答这个问题。

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414 = 120\text{V} \times 1.414 = 169.7\text{V}$$

求得输入有效电压为 120V 的交流电，半波整流电路整流后的输出电压峰值为 169.7V。

我们还想知道半波整流后产生的直流电压平均值（AVG）是多大。记住，在两个脉冲间隔内，输出的电压为零。而且，输出电压只是在一个周期的一瞬间达到最大值。因此，按平均数计算，输出电压的平均值要小于峰值。事实上，你可以用输入电压的有效值乘以 0.45 得到输出电压平均值：

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.45 \quad (23-2)$$

用我们上面的一个例子来看，我们可以用公式 23-2 求出输出电压平均值：

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.45 = 120\text{V} \times 0.45 = 54\text{V}$$

二极管必须能够承受峰值反向电压（PIV），这个电压与公式 23-1 中的峰值电压相

等。在选择将二极管接入确定的电路中时，你必须考虑峰值电压的值。如图 23-23 中的电路，你必须选择二极管的 PIV 参数大于 170V 的。考虑到安全限度，在选择二极管时，它的 PIV 值大约是施加电压反向峰值的两倍（在这个例子中，为了安全起见，你应该选择 1 个 PIV 至少是 340V 的二极管）。

很多电子设备直接使用半波整流输出的脉冲直流电不能正常工作，它们需要在一个大小不变的稳定直流电下才能正常工作。那我们如何利用半波整流的输出电压呢？我们在使用这个输出电压前必须对它进行“过滤”。滤波器将帮助填补输出的脉冲电压之间的间隔，同时把电压维持在一个相当稳定的状态。我们可以通过在输出端连接一个大容量电容器做成一个简单的滤波器，如图 23-24 所示。

当我们合上开关时，电容器很快充电并达到峰值电压。在二极管还没有导通时，电容器上的电压开始减小。不过，输出电压比没有

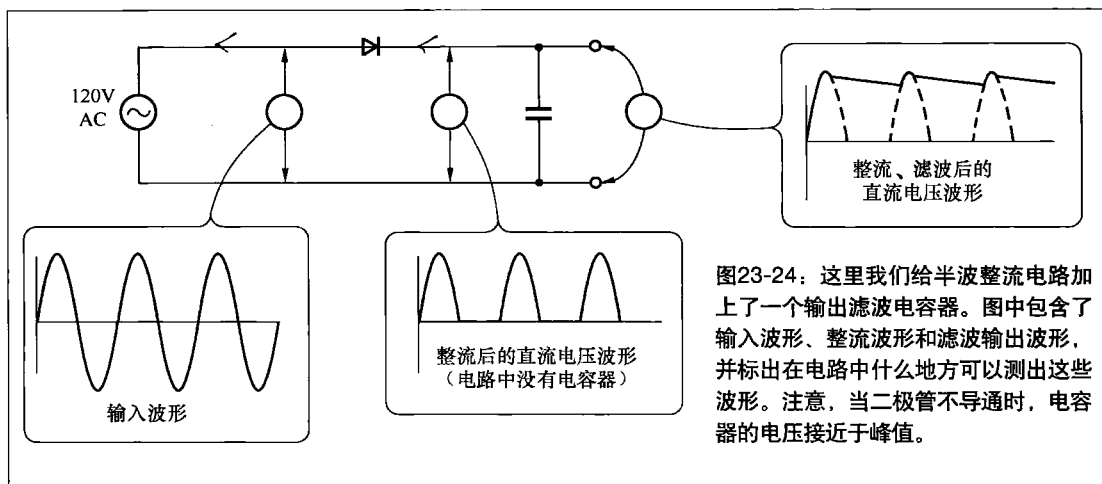


图23-24: 这里我们给半波整流电路加上了一个输出滤波电容器。图中包含了输入波形、整流波形和滤波输出波形, 并标出在电路中什么地方可以测出这些波形。注意, 当二极管不导通时, 电容器的电压接近于峰值。

电容器时更加缓慢地下降。接着二极管开始导通, 电容器再次开始充电, 达到峰值。图 23-25 为经过滤波的半波整流后的输出电压。滤波电容器的电容量通常很大, 经常是  $1\ 000\ \mu\text{F}$  或更大。如果输出电流太小 (小于几毫安), 输出电压将会相当稳定。当二极管不导通时, 电容器电压将会下降。如果电路使用的电流越大, 电容器的电压下降就会越多。

在电路中使用滤波电容器时会使需要的二极管的峰值反向电压参数发生重要的改变。因为电容器改变了峰值电压, 加在二极管上的反向电压最大值是峰值电压的 2 倍 (电路施加的峰值输出电压从电容器到二极管的一端, 与此同时, 它从信号发生器到二极管的另一端施加一个峰值反向电压。所以, 二极管相当于和这两个电压串联)。在电容滤波的半波整流电路中, 经过二极管的最大反向电压可由下式求得:

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2.828 \quad (23-3)$$

或者是

$$U_{\text{最大反压}} = 2 \times U_{\text{峰值}} \quad (23-4)$$

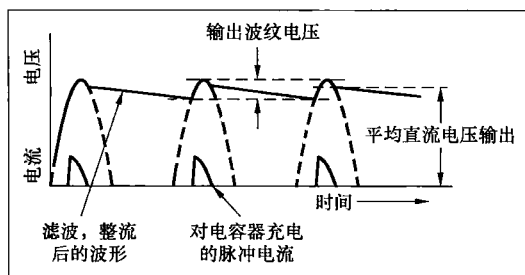


图23-25: 每当二极管是正向偏置时 (可导电), 会产生一个短暂的脉冲电流。这个脉冲对滤波电容器进行充电, 使其达到电压峰值。在波形周期另外半周的时间里, 二极管反向偏置, 电容器缓慢放电。在二极管不导通时, 滤波电容器的电容越大, 它的输出电压降低得越慢。

现在让我们回到信号发生器的有效电压为  $120\text{V}$ , 峰值电压为  $169.7\text{V}$  的例子中。当在输出端接上滤波电容器时, 二极管上的峰值反向电压为:

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2.828 = 120\text{V} \times 2.828 = 339\text{V}$$

因此, 我们应该选择一个峰值反向电压是  $680\text{V}$  的二极管。

# 全波整流电路

上一节我们讨论了半波整流电路。那么我们怎样才能比这个电路更有效地利用输入电压呢？这一节介绍的全波整流电路可以使输入交流电的每半个周期都能产生一个直流输出脉冲电压。这个电路使用了两个二极管，在连接这两个二极管时，我们使一个二极管在输入电压的正半个周期内导通，而另一个二极管在负半个周期内导通。

不过，这个增加的效率需要和电路进行折中。输入信号发生器必须在电压正向峰值和负向峰值之间的 1/2 电压处接一个端子。这个接线端子称为中心抽头，作为地电位。信号发生器在两个二极管上交替产生正向电压和负向电压，在两个二极管之间的公共点或者说是接地端提供一个参照点。图 23-26 就是这样的一个电路。

通常用一个与交流干线相连接的变压器提供交流输入电压。你选择的变压器应该满足这样的条件：使它的次级电压或者它的输出电压通过整流后能达到所需电压的峰值。

全波整流电路需要一个有中心抽头的变压器来提供输入电压，而且整个变压器的次级电压必须是你所期望得到的输出电压峰值的两倍。换句话说，中心抽头任何一侧的电压必须等于峰值输出电压。与此相反，半波整流电路不需要中心抽头变压器，因此，该变压器的次级电压只要等于所需的峰值输出电压就可以了。

全波整流电路是如何工作的呢？让我们再来看看图 23-26，当顶部电压是正向电压时，

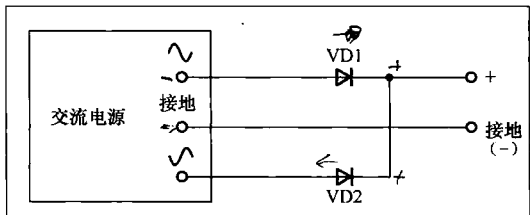


图 23-26：此图是一个全波整流电路。注意，交流电压输入有一个中间连接，也叫接地连接。相对于这个接地连接点，另外两个终端上的电压的正负极相互改变。

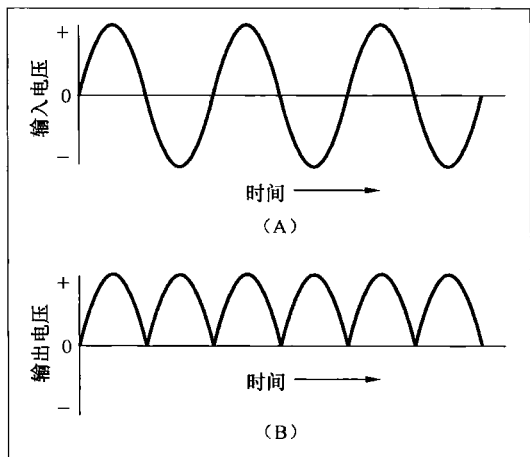


图23-27：图 (A) 为输入电压的波形，图 (B) 为全波整流器的输出电压波形。注意，每个输入周期产生两个输出脉冲电压。输出电压在0到最大值之间变化，而且它总是出现在0轴线的一侧。输出电压是一个连续脉动的直流电压。

二极管 VD1 为正向偏置，可导通。而底部电压相对于地是负方向，VD2 是反向偏置。当输入电压极性反转时，底部电压为正向，顶部

为负向，VD2 为正向偏置，可导通，VD1 为反向偏置。注意，从 VD2 输出到负载电阻器的电压与 VD1 输出到负载电阻器的电压极性相同，因此从 VD2 输出的脉动电压与 VD1 的输出脉动电压方向相同。从图 26-27 中看出，在输入波形的每半个周期内，都产生一个输出脉动电压，而且这两个脉动电压具有相同的方向。因此，我们得到的是脉动直流输出电压。

图 23-27 表示的就是全波整流后的输出电压波形，每个完整的输入电压周期都会产生两个脉动输出电压。可见，脉动输出频率是输入频率的两倍，而半波整流器的脉动频率与波形输入频率相等。脉动频率越高，越容易对它进行过滤，以产生一个平滑的直流电压。也就是说与半波整流相比，全波整流更容易对输出的脉动电压进行滤波。在全波整流电路中，一个

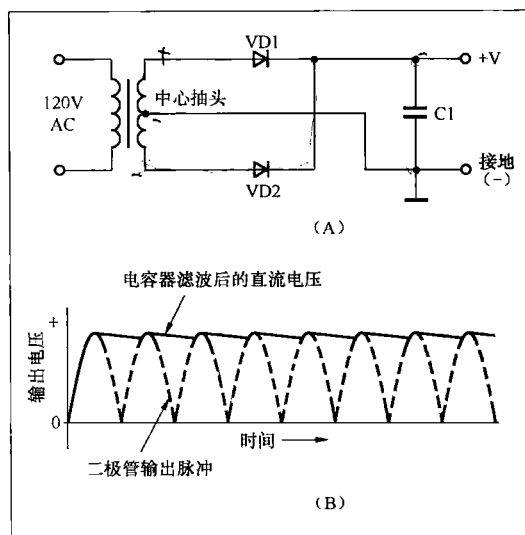


图23-28：图 (A) 为输出端接有一个滤波电容器的全波整流电路。图 (B) 显示了电容器是如何对输出的脉冲电压进行平滑滤波的。

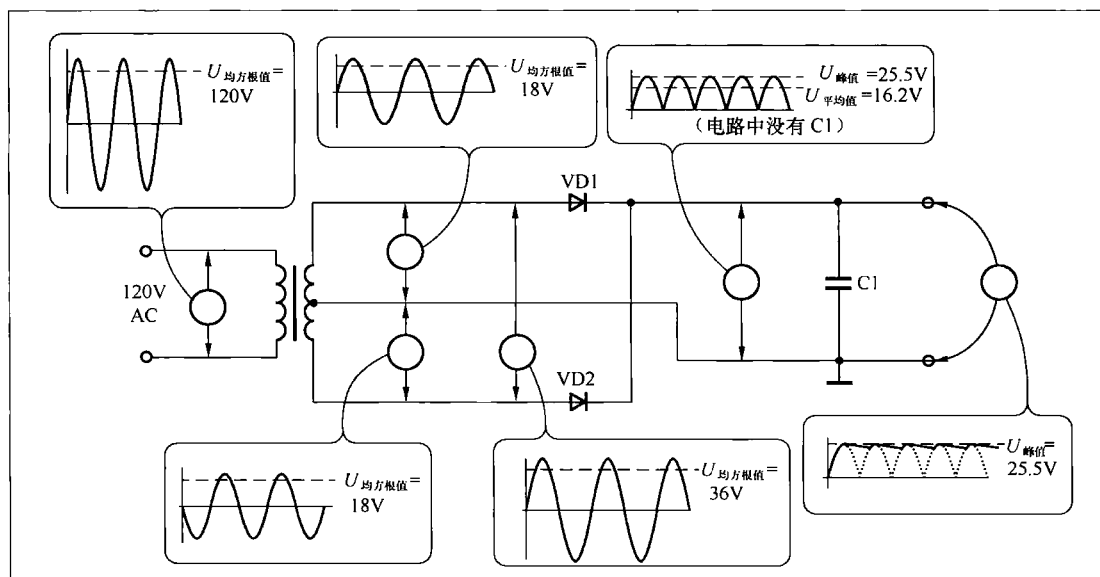


图23-29：这是一个全波整流电路的示意图。这个电路显示了电路中不同时刻的输入和输出电压波形。你可以利用输入电压的均方根值计算出输出电压的峰值和平均输出电压。输出端上电容量较大的电容器可以使整流后输出的脉冲电压更加平滑。

容量较小的滤波电容器输出波形的平滑程度与半波整流电路中用较大容量的滤波电容器滤波的效果相同。图 23-28 (A) 为输出端接有一个滤波电容器的全波整流电路。图 23-28 (B) 描述了一个充了电的电容器如何把输出电压波形控制成一个几乎大小不变的平滑波形。

从全波整流器输出的电压是一个直流脉动电压。每个完整的输入信号周期内，这个电压发生两次从 0 到峰值的变化。你可以计算出这些脉动电压的峰值。首先你必须知道中心抽头的变压器上，从抽头端子到任意一端的次级电压的均方根值。

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414$$

我们也想知道输出电压的平均值。为了计算这个电压值，你必须知道变压器中心抽头端子和任意一端之间次级电压的均方根值。

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.9 \quad (23-5)$$

也许你还记得在半波整流器中，平均输出电压是施加电压均方根值的 0.45 倍。而在全波整流电路中，一个信号输入波形可以产生两个输出电压！这是一个相当大的进步。

在给全波整流电路选择二极管时，我们必须要考虑二极管的反向峰值电压。来看图 23-29，当变压器顶部为正向电压时，二极管 VD1 导通，而这个正向电压施加在 VD2 的阴极上。此时，变压器底部为负向峰值电压，并与 VD2 的阳极相连，因此 VD2 不导通。这样 VD2 上

的反向峰值电压就是中心抽头端和任意一端变压器次级峰值电压的两倍。当变压器输出电压的极性翻转时，VD1 上的情况和 VD2 刚才的情形相同。

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2 \times 1.414 = U_{\text{均方根值}} \times 2.828 \quad (23-6)$$

因此，当你在为全波整流电路选择二极管时，为了安全保证，二极管的反向峰值电压应该是  $U$  最大反压的两倍。

现在让我们通过一个例子来看如何计算全波整流电路实际值。在图 23-29 中，全波整流电路的电压由一个中心抽头变压器提供，变压器顶部和底部的输出电压的均方根值都是 18V。首先让我们来计算电路中的输出电压峰值。公式 23-1 将会帮助我们完成这个计算：

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414$$

$$U_{\text{峰值}} = 18\text{V} \times 1.414 = 25.5\text{V}$$

接着，我们将用公式 23-5 来计算平均输出电压：

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.9$$

$$U_{\text{平均值}} = 18\text{V} \times 0.9 = 16.2\text{V}$$

最后，我们用公式 26-6 来计算二极管上的最大反向电压：

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2 \times 1.414 = U_{\text{均方根值}} \times 2.828$$

$$U_{\text{最大反压}} = 18\text{V} \times 2.828 = 50.9\text{V}$$

所以，出于电路安全因素，我们应该选择一个最大反向电压参数值为 100V 的二极管。



# 桥式整流电路

桥式整流电路提供了全波整流电路良好的特性，又克服了全波整流电路的主要缺点。与全波整流电路相同，桥式整流电路在每一个输入电压周期内也会输出两个脉冲电压。可见，桥式整流器也是一种全波整流器。与全波整流器不同的是，它不需要中心抽头的变压器，因此，变压器次级交流电压会全部输出到整流电路中。图 23-30 为标有输入电压和输出电压波形的桥式整流电路。

桥式整流器有一个可能的缺陷：电路中需要 4 个二极管。记住，在全波整流器中需要使用 1 个具有中心抽头的二级变压器。2 个二极管的额外花费和两倍次级电压的中心抽头变压器的花费相比，实在算不上什么。所以这也是个折中的办法。事实上，桥式整流电路的应用非常广泛，因此生产厂商在制造桥式整流器时通常把 4 个二极管封装在一个外壳内。

现在让我们来分析一下桥式整流电路是如何工作的。第一眼看上去，这个电路也许有点复杂。但是再仔细深入看一看，就会发现这个电路很容易理解。

首先，我们把这个电路图重新绘制出来，如图 23-31 (A) 所示。注意，此时变压器顶部引线端为正，底部引线端为负，也就是说 VD1 是正向偏置，VD2 是反向偏置。我们用虚线画出 VD2，表示此时它不在电路中起作用。由于 VD1 是正向偏置的，因此变压器电压与负载 R1 相连。这个电压在 R1 上产生压降，不过与变压器底部电压相比，它仍然是正向的。因此，VD3 是正向偏置，VD4 是反向偏置 (VD4 用虚线来绘制，表明此时它也不在电路中起作用)。电流从变压器电压正极端流出，经过 VD1，负载电阻 R1 和 VD3 后回到变压器电压负极端。

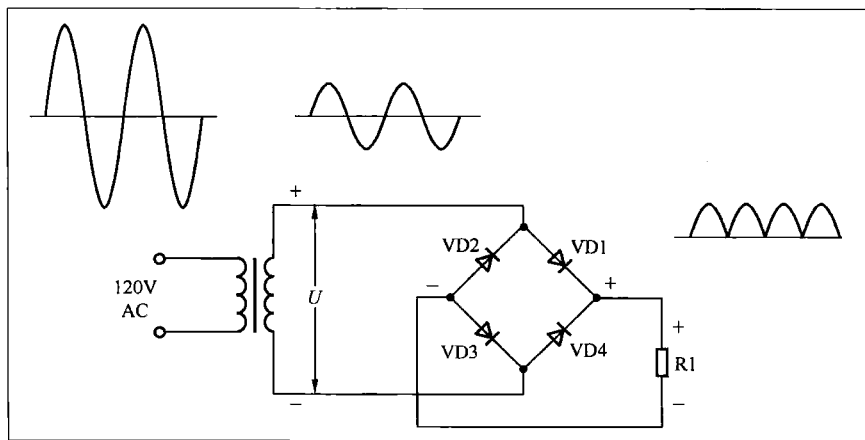


图23-30：这是一个桥式整流电路。图中包含了变压器初级电压和次级电压的交流电压波形，也包含了由整流器产生的脉冲直流电压的输出波形。

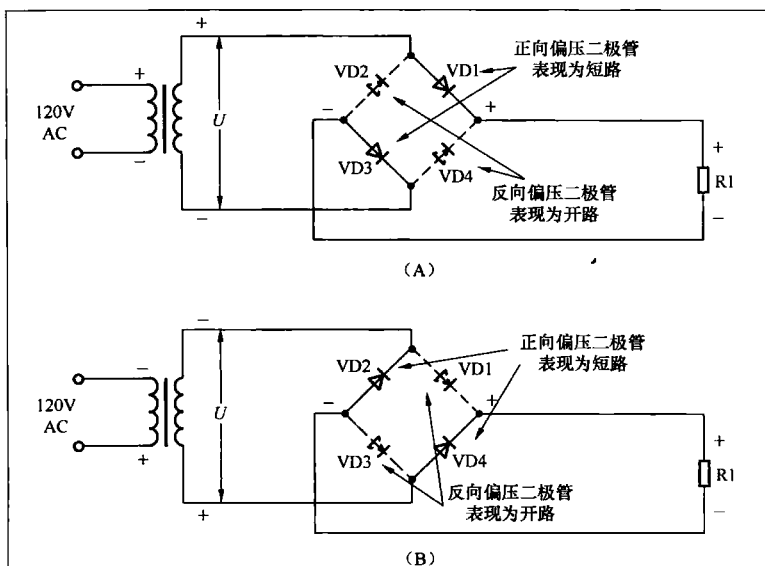


图23-31：图(A)显示为变压器顶部电压极性为正，底部电压极性为负的整流电路。二极管VD1和VD3为正向偏置，可导通，二极管VD2和VD4为反向偏置，不导通。图(B)为输入电压极性反转时的电路状态。此时，变压器底部电压极性为正，顶部电压极性为负。在图(A)和图(B)中，均用虚线来描绘反向偏置二极管，表示这些二极管在电路中相当于开路的效果，实际效果就是此时它们可以从电路中去掉。

如果变压器上的电压极性翻转，又会发生什么情况呢？来看看图 23-31 (B)。现在变压器底部电压为正极端，顶部为电压负极端。此时 VD4 是正向偏置，VD3 是反向偏置。变压器电压经过 VD4 连接到负载电阻 R1 上，并在 R1 上产生压降。尽管如此，VD1 与 VD2 结合点处的电压仍然要大于变压器顶部电压。VD2 此时为正向偏置，VD1 为反向偏置，此时电路仍然是通路，电路中有电流经过。这一次，电流从变压器电压底部流出，经过 VD4，负载电阻 R1 和 VD2 后回到变压器顶部。

图 23-30 和图 23-31 是桥式整流电路的传统表示法。二极管分别在菱形的 4 条边上。如果我们把电路画成如图 23-32 所示的电路，你也许会发现这个电路的工作过程更容易理解。在输入波形的前半个周期，VD1 和 VD3 导通，在后半个周期，VD2 和 VD4 导通。

正如你预料的，桥式整流器输出的电压为脉动直流电压。在输入电压的每一个完整周期

内，输出电压历经两次从零到最大值的变化过程。如果已知变压器次级电压的均方根值，则可以用公式 23-1 计算出脉冲输出电压的峰值：

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414$$

你可以在任何时候利用这个公式计算出正弦波交流电的峰值电压。

我们也许还想知道输出电压的平均电压值，利用变压器次级电压的均方根值，我们可以求输出波形的平均电压：

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.9$$

这个公式也适用于全波整流电路中，求出输出电压的平均值。

和其他整流电路一样，我们在把这些输出的直流电压施加给电路前，都需要使这些脉冲电压平滑输出。我们可以用滤波电路来平滑这些脉冲直流电。图 23-33 中就显示了这样一个连接在桥式整流电路电压输出端的滤波电容器。电容器提供了一个平滑稳定的直流电，只在电压输出端有微小的变化或者说是微小的波

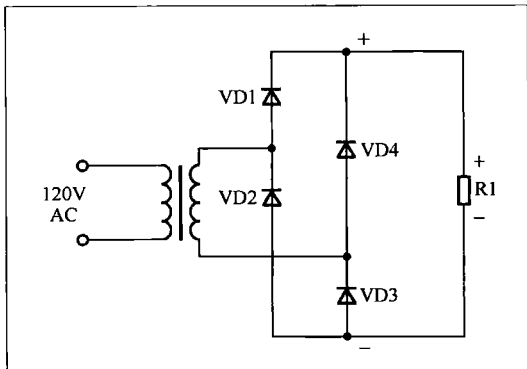


图23-32: 如图所示的二极管结构, 有助于更好地帮你理解桥式整流电路是如何工作的。此图适用于正文中描述的电路。

纹抖动。总体来说, 电容越大, 输出电压具有的波纹抖动越小。

在给桥式整流电路选择二极管时, 我们必须要考虑二极管的反向峰值电压。再来看看图 23-31, 当变压器顶部电压为正时, 二极管 VD1 和 VD3 导通, 变压器的正向峰值电压接到了 VD2 和 VD4 上。当变压器电压极性反转后, VD2 和 VD4 导通, VD1 和 VD3 与变压器的次级电压相接。因此, 每一个二极管必须能

够承受次级输出电压峰值, 即

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414$$

为了安全保证, 在为桥式整流电路选择二极管时, 它的峰值反向电压应该是  $U_{\text{最大反压}}$  的两倍。

现在我们要用一个例子来说明如何计算桥式整流电路的最大反向电压值。我们假设变压器输出均方根值为 18V 的电压到桥式整流电路上。首先, 让我们来计算电路上的峰值输出电压。公式 23-1 将帮助我们解决这个问题:

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414$$

$$U_{\text{峰值}} = 18\text{V} \times 1.414 = 25.5\text{V}$$

现在我们用公式 23-5 计算平均输出电压:

$$U_{\text{最大平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.9$$

$$U_{\text{最大平均值}} = 18\text{V} \times 0.9 = 16.2\text{V}$$

最后, 我们用下式计算二极管上的反向峰值电压:

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414$$

$$U_{\text{最大反压}} = 18\text{V} \times 1.414 = 25.5\text{V}$$

考虑到安全因素, 我们应该选择最大反向电压参数值为 50V 的二极管。

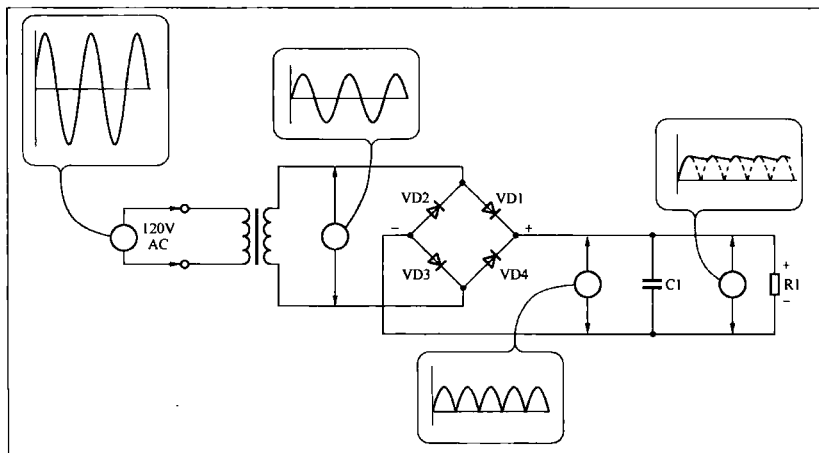


图23-33: 桥式整流器在每一个完整的输入波形周期内产生两个输出脉冲。接在输出端上的大容量电容器的作用是使脉冲电压更加平滑, 使我们得到一个平滑稳定的直流电压。

## 我们可以把二极管作为开关使用

**正**向偏置的二极管表现出短路的效果（记住，正向偏置的二极管是指正向电压与它的阳极相接，负向电压与它的阴极相接）。与之类似，反向偏置的二极管表现出断路的效果，这时，二极管阴极与正向电压相接，阳极与负向电压相接。这样的描述是不是听起来感觉二极管有点像开关呢？当二极管是正向偏置时，它就相当于一个闭合的开关；而当它反向偏置时，则相当于一个断开的开关。如图 23-34 所示。

事实上，在电子电路中经常使用二极管

作为开关，控制射频电流的通断。你可以通过设置二极管的偏置电压来控制这样一个开关的通、断。图 23-35 描述的就是这样一个二极管开关。图中的 VD2 作为开关来控制用 50MHz 的射频电源下工作的灯泡。当 S1 断开时，VD2 为反向偏置，这时二极管表现为一个断开的开关，灯泡中没有电流通过。当 S1 闭合时，VD2 的阴极电压小于阳极电压，二极管为正向偏置，表现为闭合的开关，可以导通电流。这时射频电源电路是一个闭合的回路，有电流通过灯泡、C1 和 VD2 进入接地端。灯

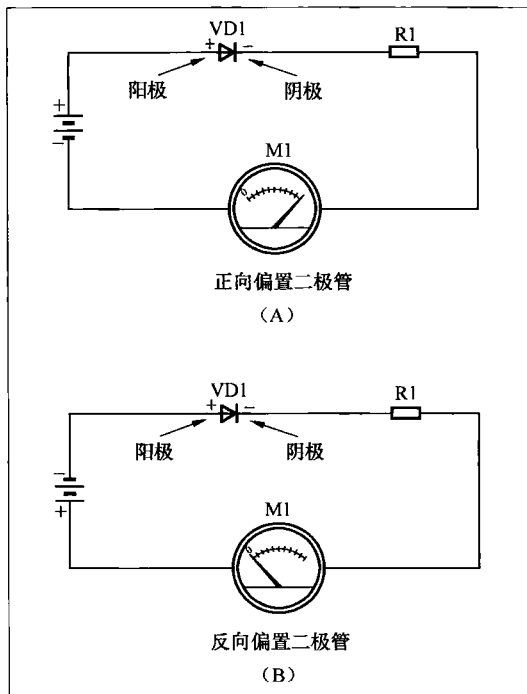


图23-34：正向偏置二极管表现为闭合开关，可以允许电流经过电路，如图（A）所示。反向偏置二极管表现为断开开关，阻止电流经过电路，如图（B）所示。

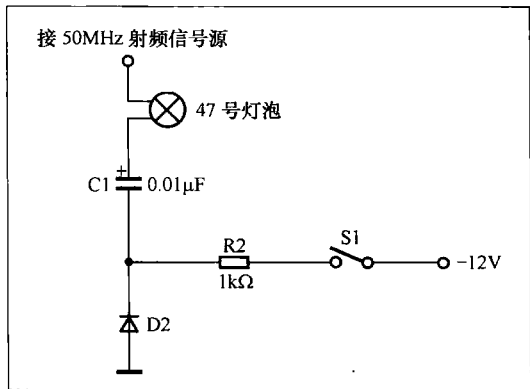


图23-35：这是一个简单的二极管开关。闭合S1时，VD2的电压为正向偏压，二极管导通，允许电流经过灯泡。

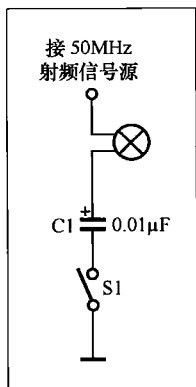


图23-36：在图23-35 所示的电路中使用二极管开关可能好处不是很明显。你可以用一个机械开关来代替这个二极管，而且整个电路看起来简单不少。但是，对于比较复杂的电路，用二极管作为开关有很多优点。

泡发光。

你们也许会说，“嗨，等一下！和机械开关控制电路的通、断相比，用二极管做开关有什么好处呢？”这是一个很好的问题！比如，对于像如图 23-35 所示的简单电路，二极管开关确实没有表现出什么优势。你可以在 VD2 的位置用一个机械开关来取代，这个开关可以控制灯泡的工作（见图 23-36）。

假设我们的电路是一个比较复杂的电路。例如电路是一个无线电接收电路，我们在接收器中选择不同的滤波电路。我们也许有 4~5 根导线和每个滤波器保持连接或断开。我们需要同时转换每一根导线，使电路从一个滤波器转换到另一个滤波器上。

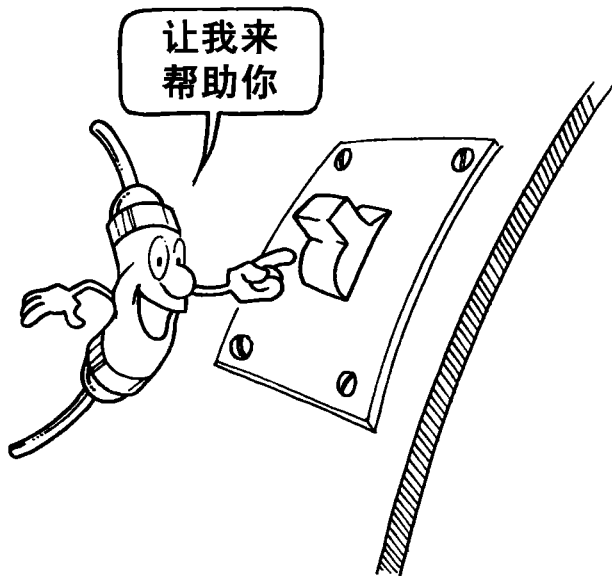
我们可以使用一个有 5 个接线柱的双掷开关（如果我们可以找到这样的开关的话）来完成这个切换，但我们用几个二极管就可以完成这个切换。现在，使用一个机械开关和控制所有二极管的偏置电压相连，就可以完成电路的切换功能。

二极管开关还有另一个重要的优势。你可以在电路中合适的地方安置一个二极管作为

开关，然后通过在一定距离外的机械开关为它提供直流偏压，从而实现电路的切换功能。机械开关可以设置在控制板上，也可以是在其他方便的地方。否则，我们将不得不用一根很长的导线将开关连接到电路中。一般来说，对于直流电使用长导线没有什么问题，但在转换音频或无线频率信号时，我们需要使连接线越短越好。

也许二极管开关最大优点是它可以实现自动操作。假设电路中的一部分测量出特定的条件，并根据这个条件来控制开关。例如，也许有这样一个电路，可以用这一个电路来检测是否从无线发信机产生了射频能量。这个电路可以通过二极管开关把发信机和天线连接起来。当电路中没有射频信号时，这个二极管开关把天线连接到无线电接收器上。

我们有两种方法连接二极管开关：一个方法是把二极管与信号线串联起来；另一个方法是把二极管接在信号线与接地端之间（旁



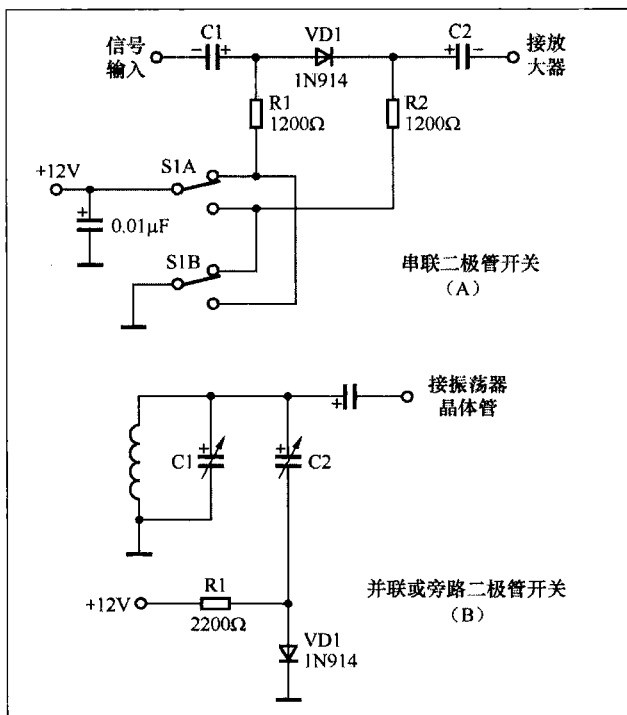


图23-37：图(A)为与二极管开关串联的放大电路的一部分。当S1在图中位置时，VD1为正向偏置，信号经过二极管流向放大器。当开关反方向放置时，二极管为反向偏置，在这种情况下，信号不能到达放大电路。电阻器R1和R2起到了限制二极管电流的作用，并将信号电流与偏流隔离开来。图(B)为振荡器电路的一部分，旁路二极管开关在正向偏压时（施加12V电压）把C2连接到电路上。当电路电容增大时，振荡器频率降低。这个二极管开关通过改变调谐电路元件的值，可以为振荡器提供两个频率范围。这种类型的二极管开关在直流电路或者在低于VHF（甚高频）频率范围时不能正常工作。

路)。图 23-37 为应用了这两种二极管开关技术的部分电路。

在选择二极管作为开关时，你必须选择它的峰值反向电压参数适合你的电路，同时你还要注意它的最大正向电流参数符合电路要求。这取决于你工作的电路中预计的电流的大小。开关二极管最重要的参数是它的速度，也就是切换时间。制造商生产二极管都有确定的用途，

有些二极管作为整流二极管使用，有些作为开关二极管使用。你必须根据你的用途选择合适的二极管。

当二极管从正向偏置转换成反向偏置时，电路的通断转换需要一定的时间来完成。在这段时间里，二极管中会有反向电流通过。一般来说，为整流电路设计使用的二极管的切换时间，要大于开关二极管的切换时间。

复习检测：-----

答案：-----

23.1 二极管允许：

- a) 电流只沿一个方向流动
- b) 电流可以立刻从两个方向流过
- c) 没有电流通过
- d) 很旧的东西，它们非常宽容

23.2 二极管把交流电转换成直流电叫做\_\_\_\_\_。

23.3 二极管P型和N型材料之间的区域：

- a) 必须安装一个电感器
- b) 是未掺杂的材料
- c) 电流可以自由地在两个方向移动
- d) 称为耗尽区

23.4 在电流通过硅二极管之前，在二极管上必须施加一个大约是0.7V的电压，这个电压被称为：

- a) 二极管控制电压
- b) 门限电压
- c) 反向电压
- d) 电源电压

23.5 二极管通过大的正向电流时会过热，除非附加一个：

- a) 半导体隔热层
- b) 冷却风扇
- c) 金属散热片
- d) 绝缘片

23.6 当把二极管反向偏置时，能够安全加在它两端的最大电压称为\_\_\_\_\_。

23.7 把二极管连接成使正弦波信号的每个半波都能输出产生输出电压称为\_\_\_\_\_。

23.8 在设计电路时，下列哪两个二极管的重要参数必须考虑？

- a) 最大正向电流
- b) 二极管引线的直径
- c) 反向偏置电压
- d) 库仑容量

23.1 a

23.2 二极管把交流电转换成直流电叫做整流。

23.3 d

23.4 b

23.5 c

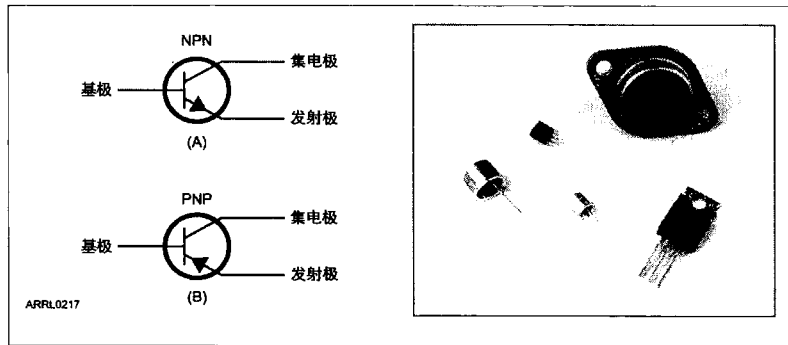
23.6 当把二极管反向偏置时，能够安全加在它两端的最大电压称为最大反向偏压。

23.7 把二极管连接成使正弦波信号的每个半波都能输出产生输出电压称为全波整流。

23.8 a, c

## 第24章

# 双极性晶体管 (BJTs)



双极性晶体管可以在许多电路中找到

### 目录

- 三极管的三明治结构
- PNP和NPN型三极管
- 小电流控制大电流
- 偏置三极管
- 共发射极电路
- 共基极电路
- 共集电极电路
- 晶体管参数
- 复习检测



# 三极管的三明治结构

在20世纪30年代和40年代，科学家用半导体材料做了很多试验。1947年，三位物理学家在贝尔电话实验室取得重大发现，那就是威廉·肖克利（William Shockly），约翰·巴丁（John Bardeen）和沃尔特·布拉顿（Walter Brattain）发现的晶体管效应，他们用这个术语描述了“迁移的电流穿过电阻”的效应。这个重大发现为固体电子学奠定了基础。对现代

科学技术的发展具有非常重要的意义，这三位科学家因此荣获了1956年的诺贝尔物理学奖。

我们知道，二极管PN结中，电流只能沿着一个方向流动。当电池或其他电源的正极与二极管的P端连接，负极与N端连接时，在二极管两端加上了正向偏压，此时会有电流通过二极管。如果我们调换电源的极性，则二极管两端为反向偏压，在这种情况下，几乎没有

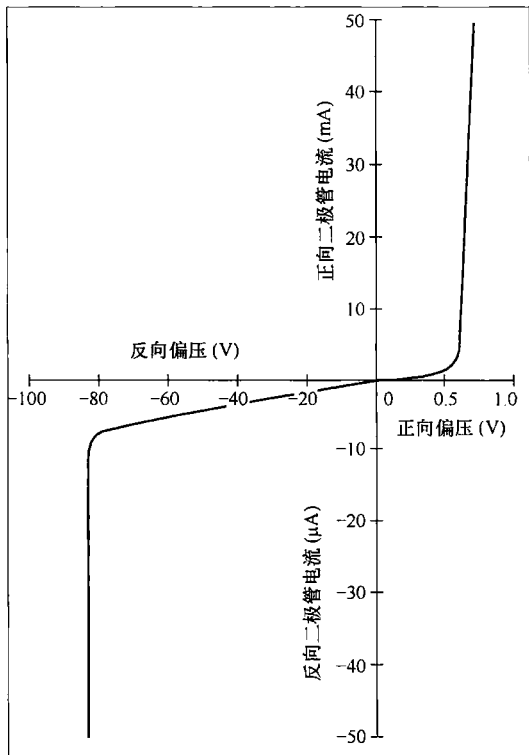


图24-1：此图显示了外接电压变化时，二极管中的电流变化情况。当电压正极与二极管阳极相连，也就是二极管P端是正向电压时，正向电流迅速增大。对硅二极管来说，要产生正向电流，所加电压必须大于0.6V；对锗二极管来说，正向偏压要大于0.2V。当电压正极与二极管阴极相连，也就是说二极管N端是正向电压时，电路中只有较小的漏电电流。一旦反向偏压电压超过二极管的击穿电压，将会产生很大的反向电流，对于一般二极管来说将被毁坏。

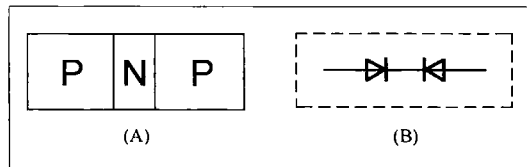


图24-2：此图为半导体材料的三层“三明治”夹层结构。这个“三明治”结构构成了两个PN结二极管，如图(B)所示。虚线方框表示这两个二极管封装到一个半导体中，它们不是单独的二极管。

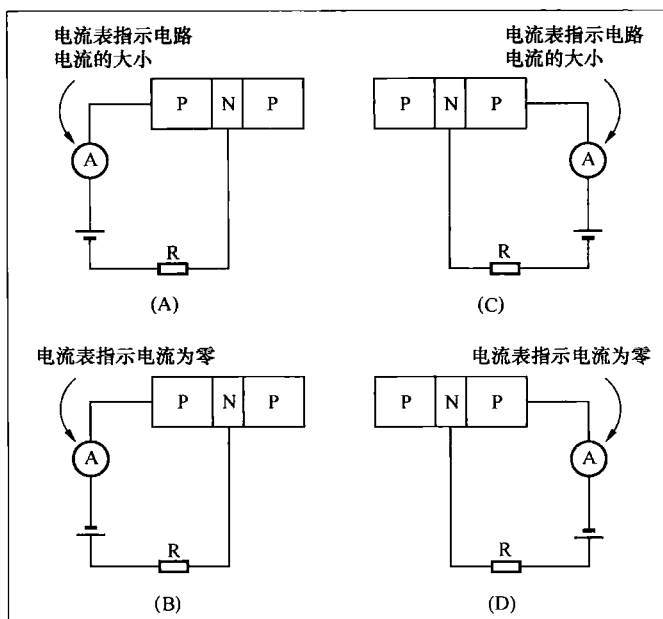


图24-3：每一个PN结都表现得像一个典型的二极管。图(A)和图(B)分别表示左边PN结为正向偏置和反向偏置。图(C)和图(D)分别表示右边PN结为正向偏置和反向偏置。当半导体的任何一个PN结所加电压是正向偏压时，它可以导电；为反向偏压时，PN结不导电。

电流经过二极管。

在二极管反向偏置时，电路中会产生一个非常小的漏电流。如果我们施加足够大的电压，就会有有很大的反向电流通过二极管，我们把这样的反向电压称为击穿电压。如果我们允许这样的情况（在二极管上施加反向击穿电压，产生很大的反向电流）发生，我们就会制造出一个 SED（散发烟雾二极管），然后二极管很快被烧毁。图 24-1 是一个典型二极管的电压和电流关系图，称为二极管的伏安特性曲线。

肖克利、巴丁和布拉顿通过扩散工艺把两个二极管背靠背连接形成单块半导体，在这个过程中发现了晶体管效应。图 24-2 为半导体材料的三层结构。在两层 P 型半导体之间夹有一层很薄的 N 型半导体。在这个例子中，两个二极管负极相连。

我们无论把其中任何一个二极管与电源

相连，这个“三明治”都会表现出二极管的特征。图 24-3 为两个二极管的结合点处与电池连接的电路图，电路中的电阻器对正向电流起限流作用，以避免电流过大烧毁二极管。

现在我们来做一个实验。把一个二极管接正向偏压，另一个接反向偏压。图 24-4 为这个电路的连接图。你会认为有电流通过正向偏置的二极管电路，而没有电流通过反向偏置的二极管电路。

然而，当你在做这个实验时，令人惊异的事情发生了。正向偏置电路中有电流通过，而同时反向偏置的电路中也有电流通过。而且当正向偏置电路中的电流增大时，反向偏置电路中的电流也随之增大。当正向偏置电路中的电流减小时，反向偏置电路中的电流也随之减小。肖克利和他的同事称这个现象为晶体管效应。正向偏压电路中的电流被传递经过反向偏

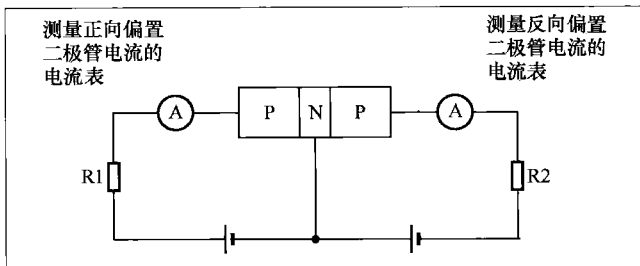


图24-4：图中，“三明治”中的一个二极管为正向偏置，另一个二极管为反向偏置。这个电路很好地解释了晶体管效应。正向偏置二极管的电流引起了反向偏置二极管的电流。

置二极管的电阻被传递。

这个现象是怎么发生的呢？图 24-5 是一个有自由电子的 N 型半导体和有空穴的 P 型半导体构成的半导体材料。外接正向偏压的 P 型半导体中，空穴向外接负极电压的 N 型半导体中移动。在空穴移动接近 PN 结时，这个电压吸引空穴，从而加速了它们的移动速度。

这个运动使空穴没有和自由电子结合就越过 N 型半导体的薄层，空穴进入第二层 P 型半导体材料。这个材料上的反向电压自始至终吸引着空穴穿过这层 P 型半导体材料。

因为这样的结构展示了晶体管的效应，所以这种结构称之为晶体管。我们把第一层 P 型半导体称为发射区。发射区会使电流进入晶体管，或者说发射电流。第二层 P 型半导体称为集电区，因为它可以把穿过 N 型半导体的空穴聚集起来。中间层的 N 型半导体则称为基区。

有一点非常重要，你不能把两个二极管进行简单的连接就做成一个三极管。只有当两个二极管做成一个单独的整体，两个 P 层必须与较薄的 N 层紧密相连才行。

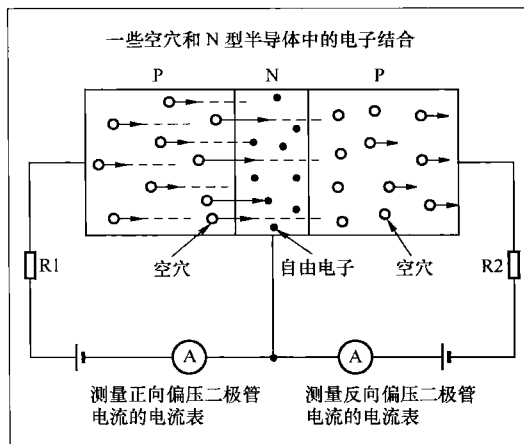
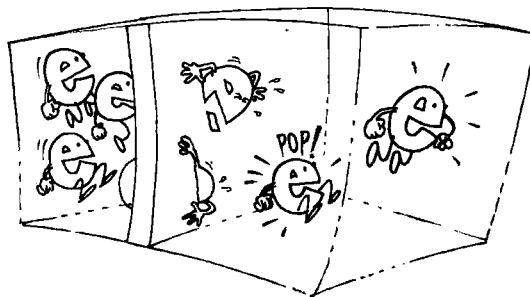


图24-5：此图说明了我们的“三明治”中空穴和电子的运动情况。空穴穿过了N型半导体的薄层，另一侧的第二层P型半导体端与电源负极相连，吸引这些空穴，第三端聚集这些空穴。这些空穴的移动产生了穿过第二个二极管的电流。



# PNP和NPN型三极管

上一节我们学习了晶体管是由P型半导体材料和N型半导体材料组成的“三明治”结构。在上一节的例子中，使用的是由两层P型半导体材料和一层N型半导体材料组成的三极管。

我们用两个PN结二极管以阴极相连接的方式来画出一个三极管，而且二极管阴极的结合点处表示为三极管的一个连接端。三极管的另外两个连接端是二极管的阳极。图24-6中的二极管就是采用这种连接的。图(B)为三极管的“三明治”结构。图(C)是我们在电路图中表示三极管的示意图符号。

图24-6所示的三极管结构中，在两层P

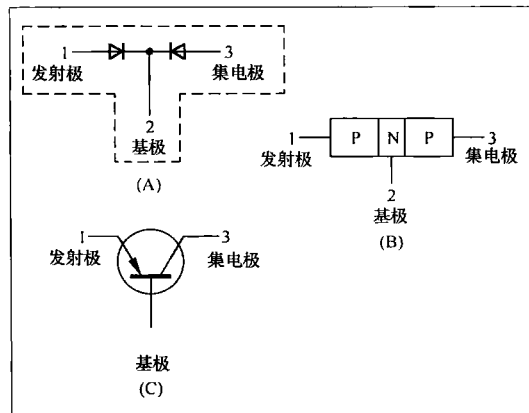


图24-6：这张图分别用一对二极管和半导体“三明治”夹层结构表示PNP三极管。虚线方框表示这两个二极管制造在一个半导体中，而不是各自独立的。图(C)为PNP型三极管的示意图符号，图中的箭头指向基极。

型半导体材料中间是一层N型半导体材料。这就是为什么我们称它为PNP型三极管的原因。你会注意到在三极管示意图中，发射极引线上标记箭头，这个箭头指向晶体管的基极。请牢牢记住，在PNP三极管中，此箭头始终指向基极。

也许你想知道，我们是否能用两层N型半导体材料和一层P型半导体材料来制作一个三极管呢？答案是：“是的，当然可以”。图24-7中的三极管就由阳极相连的一对二极管的组合而成，这样就构成了中间层为P型材料的一对PN结。我们就得到了一个NPN“三明治”，或者叫做NPN型三极管。在图(C)所示为

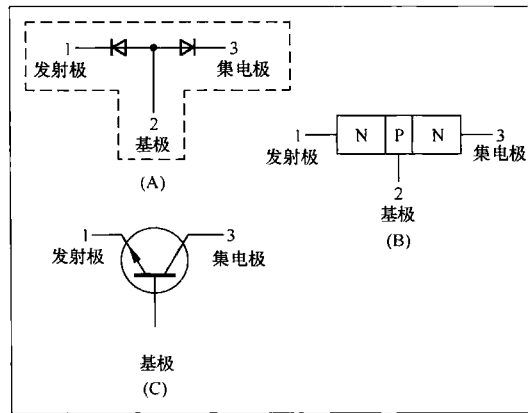


图24-7：一对二极管的阳极相互连接构成形成了一个NPN型三极管。虚线框表示这两个二极管制造在一个半导体中，而不是各自独立的。图(C)为NPN型三极管的示意图符号，图中的箭头不是指向内，而是指向外。

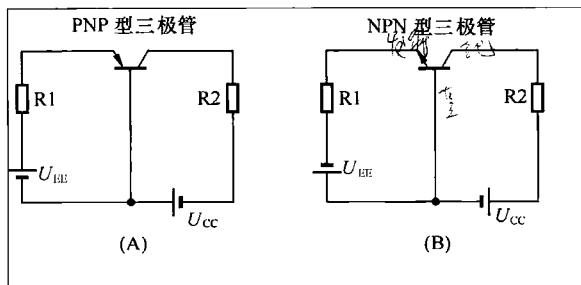


图24-8：图（A）为PNP型三极管的一个简单测试电路。 $U_{EE}$ 和 $U_{CC}$ 分别为发射极和集电极的偏置电压。电阻器R1和R2起到了限流的作用。图（B）为一个相似的NPN型三极管的测试电路。

NPN型三极管的示意图符号，发射极接线上仍标记有一个箭头，注意这个箭头的方向。

在二极管符号中，箭头的指向与惯称电流方向相同，与电子流动的方向相反。在三极管符号中也是这样，箭头方向指向惯称电流的方向，这个箭头总是标记在发射极上。

在图24-8（A）中，PNP型三极管连接在测试电路中。发射极与电源正极相连，集电极与第二个电源的负极相连。此时，发射极和基极之间的二极管为正向偏置，集电极和基极之间的二极管处于反向偏置。

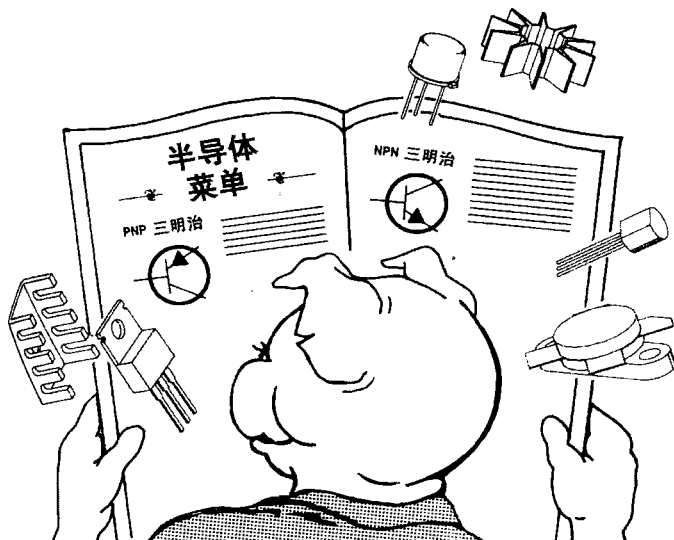
图24-8（B）为一个NPN型三极管的测试电路。NPN型三极管的发射极与电源的负极相连。集电极与第二个电源的正极相连。此时，发射极和基极之间的二极管为正向偏置，而集电极和基极之间的二极管也为反向偏置。

在PNP型三极管中，当偏置电压吸引发射区中的空穴穿过很薄的基区时，会发生晶体管效应。这些空穴不停地移向集电区，而偏置电压继续吸引空穴穿过半导体材料。

NPN型三极管中的晶体管效应与之相似。这次发射极接电源的负极，基极接电源的正极。基区吸引发射区中的自由电子，这些电子快速移动直接穿过很薄的基区。一旦这些自由电子进入集电区，正向偏置电压会继续吸引这些电子。

当我们用一对二极管或两个半导体材料小方块来表示三极管时，看起来结构对称。你

也许想知道是不是可以用任何一个连接端作为发射极呢？其实在生产三极管时，它们的机构并不对称。制造商把发射极和集电极做成不同结构从而生产出性能更好的三极管。



## 小电流控制大电流

在图 24-9 所示的 PNP 型三极管电路中，电路中包含了测量不同电路状态的电流表和电压表。三极管的发射极和基极之间的二极管为正向偏置。

电流表 M1 用来测量经过发射极和基极之间 PN 结的电流，电流表 M2 测量三极管基极导线中的电流，电流表 M3 测量基极和集电极之间的 PN 结反向偏压时的电流，电压表 M4 测量发射极和集电极之间的电压。

我们将使用图 24-9 的测试电路来测量三极管电路的状态。通过每次改变三极管的偏置电压，我们会对晶体管效应有更多的认识。让我们用这个电路进行实验，得出一些测量数据。假设我们可以根据需要调整发射极和集电极的偏置电压。

让我们从  $U_{CC}$  和  $U_{BB}$  电压为 0 时开始，调

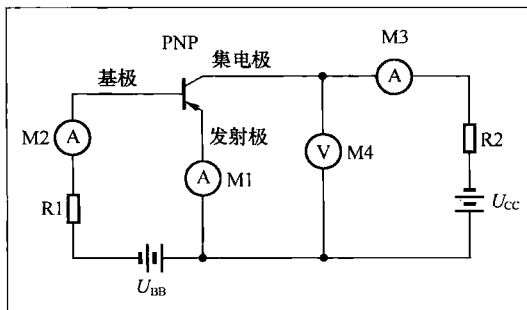


图24-9：这个测试电路可帮助我们测量三极管电路的状态。三极管的偏置电压可以用  $U_{BB}$  和  $U_{CC}$  来调整。电表帮助我们测量电路中到达每个极的电流及集电极和发射极之间的电压。

节  $U_{CC}$  直到电压表 M4 的读数为 5V，然后增大  $U_{BB}$ ，直到电流表 M2 的读数为 0.2mA。这时我们读出电流表 M3 的读数为 4.2mA。

在接下来的实验中，我们增大  $U_{CC}$  电压，直到 M4 的读数为 10V。继续增大  $U_{CC}$  电压，每次增大 5V，直到读数为 40V。M3 显示的就是集电极电流的大小。

集电极电流保持不变！这个结果可能会让你感到惊讶。当集电极电压达到 40V 时，集电极电流仍然是 4.2mA。图 24-10 为集电极电流随集电极电压变化的图形。在集电极电压改变时，电流表 M1 的读数始终为 4.4mA。

在这个实验中，测量出的结果都是在理想三极管状态时的值。实际的三极管中，随着集电极电压的增加，集电极电流通常会有微小的增加，只不过增加的幅度很小。现在让我们继

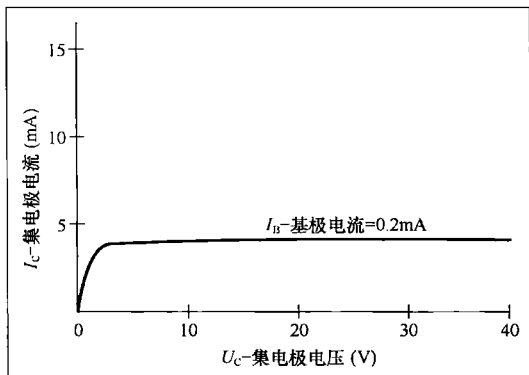


图24-10：这张图描述了图27-9电路中的测量值。数值显示当集电极电压在一个较大范围内变化时，集电极电流保持不变。

续用理想三极管进行实验。

再次调整  $U_{CC}$  电压，直到 M4 的读数再次为 5V，然后增大  $U_{BB}$ ，观察测量基极电流的电流表 M2，直到 M2 的读数为 0.4mA。你认为 M3 的读数会是多大呢？嗯，我们把基极电流加倍，如果你的答案为 8.4mA，你猜对了。

现在我们准备再次增加集电极电压。调整电压  $U_{CC}$ ，使 M4 的读数为 10V，读出此时 M3 上的集电极电流的值。每次增加 5V，继续增大集电极电压并读取集电极的电流。这一次，当你发现集电极电流维持在 8.4mA 时，你一定不会感到惊讶了。同样，发射极电流会一直维持在 8.8mA 不变。

重新调整电压  $U_{CC}$ ，直到集电极上的电压为 5V。调整  $U_{BB}$ ，直到基极电流是 0.6mA。注意，此时集电极电流为 12.6mA。然后继续增大集电极的电压，每次 5V，每次读取集电极电流和发射极电流的大小。发射极电流表 M1 的读数是多少呢？如果按照上面的思路，你可以估计出发射极的电流为 13.2mA。公式 24-1 表示了基极电流、发射极电流和集电极电流之间的关系。

$$I_E = I_B + I_C \quad (24-1)$$

其中： $I_E$  为发射极电流， $I_B$  为基极电流， $I_C$  为集电极电流。

我们可以用这个实验来测量三极管的性能特征。图 24-11 为每次测量基极电流时，集电极电压和集电极电流之间的变化情况图形。制造商制造了不同类型的三极管，每种类型的特性曲线的具体数值不同，但特征曲线的形状却非常相似。

最后，我们发现基极电流达到一定大小后，继续增加基极电流并不会引起集电极电流的增加。对于我们例子中所用的三极管来

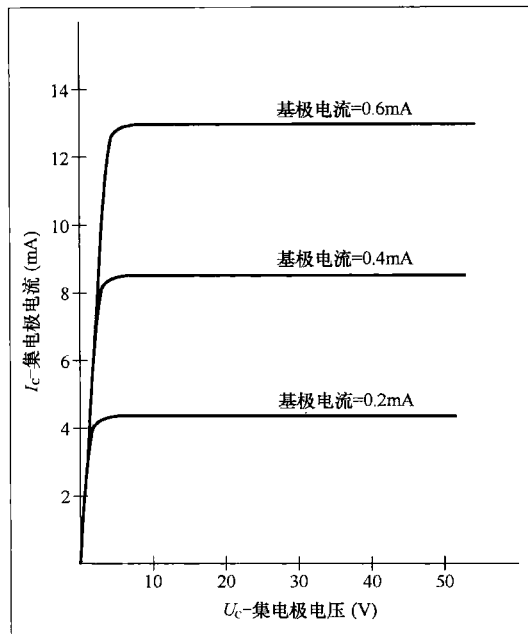


图24-11：此图为我们所选三极管的特性曲线图。尽管其他类型的三极管的电压和电流不同，但是它们的特征曲线图相似。

说，这个基极电流就是 1.2mA 这个点。当集电极电流达到最大值时，我们说三极管达到饱和。饱和的意思是集电极电路把从发射极穿过基区的所有电荷体聚集起来。在 PNP 三极管中，这些电荷载体是空穴；在 NPN 三极管中，这些电荷载体是自由电子。通过这个实验，我们还学到了什么？基极电流的微小变化会引起集电极电流的较大变化。如果我们把一个信号与三极管的基极相连，集电极会对这个信号进行放大然后输出。假如基极信号在 0.2mA 到 0.6mA 之间变化，则集电极电流在 4.2mA 和 12.6mA 之间变化。

较小的基极电流控制较大的集电极电流。输出的信号是被放大后的输入信号，所以我们

就说电路放大了输入信号。正因为晶体管效应的存在,我们的电路才具有信号放大器的功能。

你将听到两个用来描述三极管的电流增益特性的术语。这些增益特性对电路设计者和工程师非常重要。在目前的电路计算中你也许用不到这些特性,在进一步学习更深的电路知识后,可以用这些增益系数进行相关计算。晶体管的  $\alpha$  ( $\alpha$ ) 和  $\beta$  ( $\beta$ ) 放大系数将帮助你估算出一个具体型号的三极管对电流的放大性能。

用集电极电流除以发射极电流可以计算出电流放大系数  $\alpha$ 。 $\alpha$  总是小于 1, 正常情况下在 0.92 到 0.98 范围之内。

$$\alpha = I_C / I_E \quad (24-2)$$

其中:

$I_C$  为集电极电流,  $I_E$  为发射极电流。

现在我们来计算我们例子中三极管的电流放大系数  $\alpha$ 。

$$\alpha = I_C / I_E = 4.2\text{mA} / 4.4\text{mA}$$

$$\alpha = 0.9545$$

尝试用我们测量的其他不同基极电流下

的集电极和发射极电流来计算  $\alpha$  值, 你会得到相同结果。

集电极电流除以基极电流可以得到电流放大系数  $\beta$ 。电流放大系数  $\beta$  通常在 10 和 200 之间变化。对于具体类型的三极管, 其电流放大系数  $\beta$  并不是常数。如果一个三极管的  $\beta$  值为 100, 同类型的另一个三极管的  $\beta$  值可能为 85 或 130。即使是同一个三极管, 其电流放大系数  $\beta$  甚至也会随着操作环境(温度和集电极的电流)的改变而变化。尽管如此, 它仍然是电路设计者和工程师的一个重要参数。

$$\beta = I_C / I_B \quad (24-3)$$

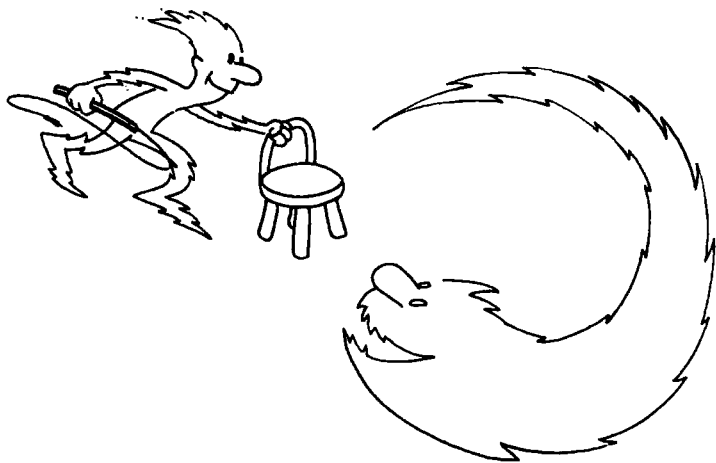
其中  $I_B$  为基极电流。

可以用公式 24-3 来计算例子中三极管的  $\beta$  值:

$$\beta = I_C / I_B = 4.2\text{mA} / 0.2\text{mA}$$

$$\beta = 21$$

你可以用图 24-11 中的其他集电极电流和基极电流值来计算  $\beta$  值。





# 偏置三极管

**施**加在三极管两个 PN 结上的电压决定了电路中的工作状态。在上一节中，我们测量了三极管的特征并以图形画出了这写特性。我们发现，基极电流控制着集电极电流。如果我们在三极管的基极上接入一个变化的信号，例如为正弦波信号，会发生什么情况呢？

假设我们加在三极管基极上的电压仅有一个交流信号。图 24-12 所示的 NPN 型三极管电路中，只有一个交流信号而没有其他状态。当信号电压为正向时，基极和发射极之间的 PN 结为正向偏置状态，这个电压产生一个基极电流，接通了集电极电流。

当信号电压为负向时，会发生什么情况？基极和发射极之间的 PN 结处于反向偏置状态，

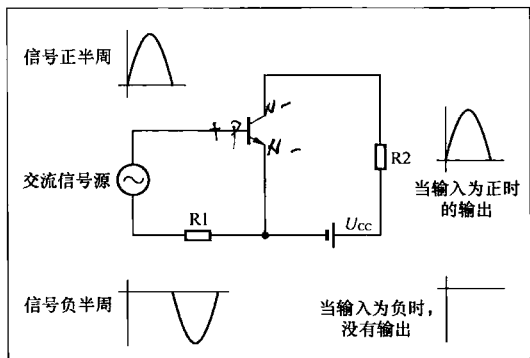


图24-12：这个NPN 三极管电路中，有一个交流信号施加在基极上。当信号电压为正向时，基极和发射极之间的PN结为正向偏置。此时，这个PN结是导通的，并产生集电极电流。当信号电压为负向时，基极和发射极之间的PN结为反向偏置。此时既没有基极电流，也没有集电极电流。

此时不会产生基极电流，使集电极电流停止。

在输入电压的每半个周期内，集电极电流输出为一个脉冲。这与半波整流电路中的输出情况相似。但这并不是我们通常所希望从三极管电路中得到的输出信号。图 24-12 所示的电路对输入信号没有放大作用。

三极管电路需要一个直流偏置电压去设置三极管特征曲线图的工作点。适当的偏置电压可以设置静态工作点，或称为 Q 点。静态的意思是“直流工作状态”，或没有信号出现。

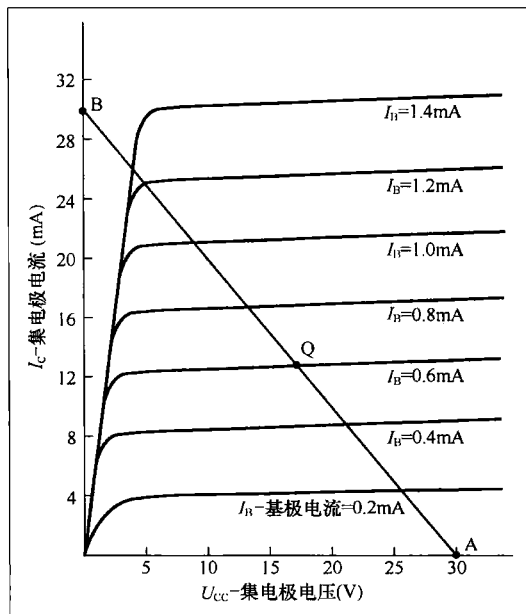


图24-13：此图为典型的三极管特性曲线图。直线AB是 $U_{CC}=30V$ ， $R_2=1k\Omega$ 时的负载线。Q为静态工作点Q点。

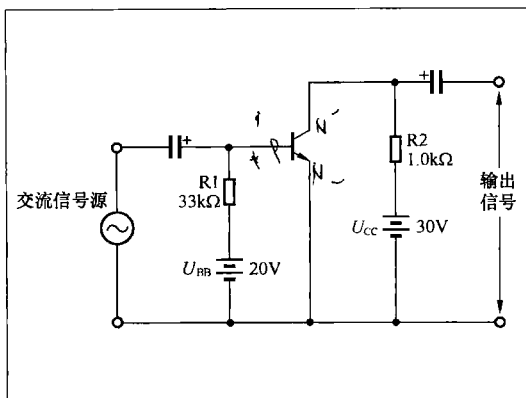


图24-14：这是在图24-12上进行修改后的电路图。我们添加了基极偏压，并在输入和输出端增加了耦合电容。耦合电容器可以阻碍直流偏压到达交流信号源和输出端电路。

图 24-13 为三极管的一组特性曲线。Q 标记为想得到的静态工作点，即 Q 点。这一点表示着在没有交流信号输入时，直流偏置电压下得到的电路的状态。

图 24-13 中也标记出了负载线。我们可以用负载线来描绘电路的工作状况。让我们来看图 24-14，这是一个放大器原理图。计算三极管偏置电压值和电路元件值所需要的公式和知识不在本书讨论范围之内。但是，你可以用欧姆定律来理解基础知识。

在图 24-14 中，如果三极管被“关闭”，那么集电极的电流将是 0mA，集电极电压将是 30V，这就是图 24-13 中的 A 点。

如果三极管“接通”，处于饱和状态（尽可能多地传导集电极电流），集电极电流大于等于 30V 除以 1kΩ，也就是 30mA。这就是在负载线上的 B 点。你能在图 24-13 中找到这两个点吗？

现在选一个 0.6mA 的基极电流  $I_B$ ，我们

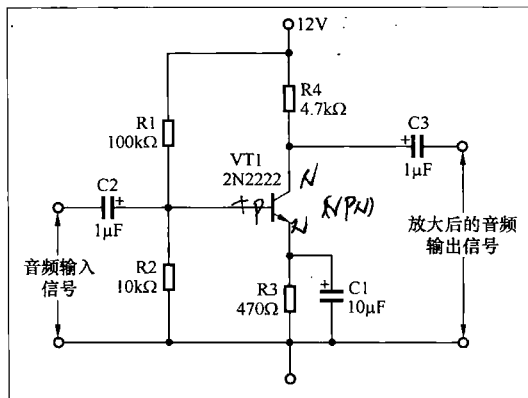


图24-15：这个音频放大电路使用了一个普通的 2N2222NPN型三极管。电阻器设置了合适的Q点的偏置电压，并减少了因为温度和三极管自身特性的变化对电路的影响。电容器C1是发射极旁路电容。输入和输出的耦合电容器C2、C3有时也称为隔直电容器。

可以用欧姆定律来选择  $V_{BB}$  和  $R1$ 。但现在我们不需要这样的计算。

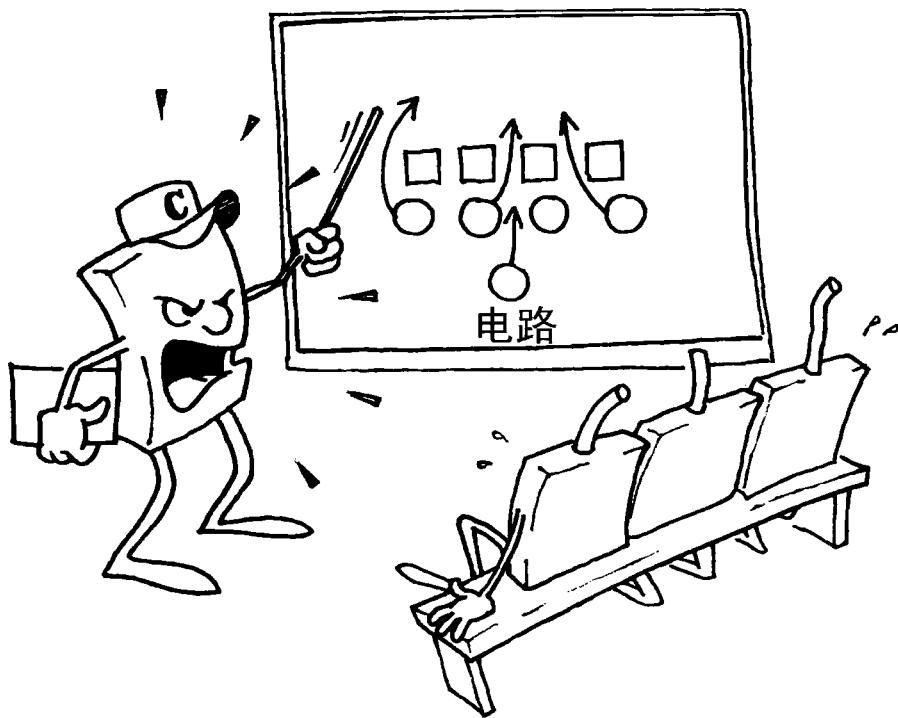
Q 点确定后，变化的输入信号改变基极和发射极之间 PN 结处的偏置电压。如果输入的信号的电压在一定范围内，那么这个输入信号不会在基极和发射极之间的 PN 结处产生反向偏压。对于图 24-13 中的特征曲线来说，输入信号电流（基极电流， $I_B$ ）在  $\pm 0.4\text{mA}$  范围内变化，因为我们已经设定了在静态工作点 Q 静态基极电流  $I_B$  为 0.6mA，当交流输入信号变化时，最大和最小的基极电流计算如下：

$$I_{B \text{ 最大}} = 0.6\text{mA} + 0.4\text{mA} = 1.0\text{mA}$$

$$I_{B \text{ 最小}} = 0.6\text{mA} - 0.4\text{mA} = 0.2\text{mA}$$

查看图 24-13，可以发现电路状态由负载线决定，当基极电流是 1.0mA 时，集电极电流大约是 21mA，而集电极电压大约是 10V。同样，当基极电流是 0.2mA 时，集电极电流大约是 4mA，而集电极电压大约是 26V。

输入信号电流在  $\pm 0.4\text{mA}$  范围内变化产



生了输出电流（集电极电流）的变化幅度为  $17\text{mA}$  ( $21\text{mA} - 4\text{mA} = 17\text{mA}$ )，这是  $\pm 8.5\text{mA}$  峰间值。

对应的集电极电压峰间值变化为  $16\text{V}$  ( $26\text{V} - 10\text{V} = 16\text{V}$ )。我们发现了什么呢？由于我们输入信号的变化，三极管的电流增益（放大）将产生一个变化幅度很大的输出电压。而三极管的电流放大也使电路中电压放大。我们设计的放大器就是用来将较小的输入信号放大。

这些例子将帮助你认识为什么负载线和 Q 点在电路中如此重要。设计三极管电路时，还需要考虑其他因素。在实际电路中使用两个偏置电压的情况很少。每个三极管自身特性的变化和温度的稳定性也使得像图 24-14 那样的

电路不可靠。

在图 24-15 的电路中，采用同一个电源提供基极偏置电压和集电极偏置电压。增加的电阻提供了电路中温度的稳定性，降低了电路对三极管自身特性的依赖。

电容器 C1 是发射极旁路电容器，这个电容给交流信号一个通路，绕过发射极电阻器 R3。旁路电容阻止 R3（帮助稳定 Q 点）降低整个放大电路的增益（放大）。如果信号电流通过发射极电阻，电路增益将急剧下降。直流发射极电流流过 R3，而信号电流通过 C1。

输入和输出耦合电容器 C2 和 C3 可以通过交流信号，阻碍直流偏压。由于这些电容器可以阻碍直流电压，我们有时也称它们为隔直流电容器。

# 共发射极电路

双极性三极管有基极、发射极和集电极 3 个极。到目前为止我们所学习的三极管放大电路中，输入信号都是从基极和发射极之间进入，从集电极和发射极之间取出输出信号。发射极是输入电路和输出电路的公共极。

连接输入和输出电路需要 4 个接线端，而三极管只有 3 个极，所以三极管的一个极为输出和输入电路共用。在本书下面两节中，你将会学习三极管作为放大器使用的其他连接方式。

图 24-16 显示的是一个 NPN 型三极管连接成的共发射极放大电路。这个电路看起来比较熟悉，因为前面我们已经接触过这个电路。注意，在该电路中只有一个偏压电源。

电阻器 R1 和 R2 形成了分压电路，给基极和发射极之间的 PN 结提供适当的偏置电

压。发射极电阻 R3 可以维持电路的稳定，并降低电路对三极管自身电流增益  $\beta$  的依赖。集电极电流经过电阻器 R4，形成了输出电压。电容器 C1 旁路掉了发射极电阻器上的交流信号。电容器 C2 和 C3 把交流信号耦合后输入和输出放大器。在共发射极电路中，输出放大信号和输入信号的相位差为  $180^\circ$ 。

图 24-17 是用一个 PNP 型三极管连接成的共发射极放大电路。注意，这个电路几乎与图 24-16 中的电路相同，不过，偏置电压的极性和图 24-16 中的相反。

在上一节中，我们用了共发射极电路来测量三极管的特性。制造商和电路设计人员把三极管的这些特性称为共发射极特性。

三极管放大电路的输入和输出阻抗非常重要。现在我们先考虑三极管自身的输入和输

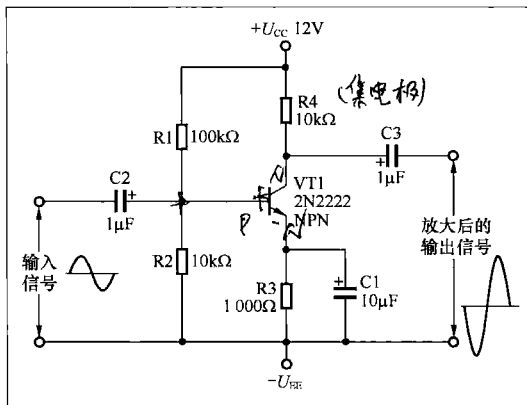


图 24-16：这是一个典型的 NPN 型共发射极放大电路。

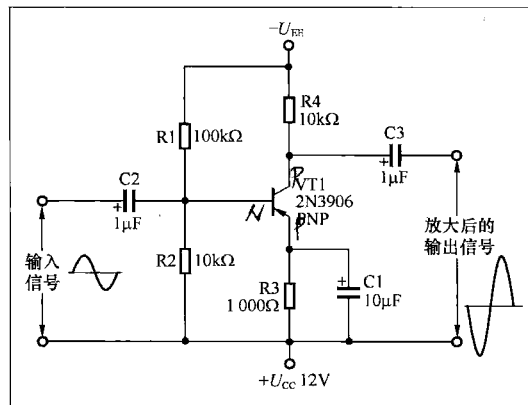


图24-17：这是一个典型的PNP型共发射极放大电路，与NPN型共发射极放大电路非常相似。

出阻抗，然后再学习这些阻抗和电路阻抗的关系。

基极和发射极之间的 PN 结是一个正向偏置的二极管，正向偏置的二极管可以导通电流，并且电阻很小，通常为几欧姆或更小。因此我们可以说这时三极管只有很小的输入阻抗。

基极和集电极之间的 PN 结是一个反向偏置的二极管，反向偏置的二极管不容易导通，它表现为一个很大的电阻，通常为 100 万欧姆（ $1\text{M}\Omega$ ）或更大。因此，三极管的输出阻抗很大。

请不要把三极管输入和输出阻抗与放大器的阻抗混淆。如果我们选择合适的数值，放大器阻抗将取决于偏压电阻值。本书不讲授设计三极管放大器的知识，这不在本书的范围之内。你可以在以后继续学习电路设计知识。当然，一些规则将帮助你理解电路的工作原理。这些规则也会帮助你评估和修改别人设计的电路。

发射极电阻器  $R_3$  的阻值通常在  $100\Omega$  到  $1000\Omega$  之间， $R_2$  的阻值是  $R_3$  的  $5 \sim 10$  倍。 $R_1$  和  $R_2$  形成分压器，设置三极管的基极偏置电压。 $R_1$  的阻值应该大约是  $R_2$  的 10 倍，输出电阻器  $R_4$  的阻值应该是发射极电阻器  $R_3$  的  $5 \sim 10$  倍。现在让我们用公式来概括这些规则。

$$100\Omega \leq R_3 \leq 1000\Omega \quad (24-4)$$

$$R_2 \approx 5 \times R_3 \text{ 到 } 10 \times R_3 \quad (24-5)$$

$$R_1 \approx 10 \times R_2 \quad (24-6)$$

$$R_4 \approx 5 \times R_3 \text{ 到 } 10 \times R_3 \quad (24-7)$$

其中，“ $\approx$ ”表示近似等于。

我们不需要进行完整的数学分析。依据一些简单的假设，可以分析出我们的放大电路的输入阻抗接近于  $R_2$ 。你可以观察共发射极

放大电路，很快确定电路的输入阻抗。只要查看基极和接地（公共端）之间连接的偏压电阻器就可以得出电路的输入阻抗。

你有这样的疑问吗？为什么  $R_2$  决定了电路的输入阻抗？我们可以这样来考虑。虽然基极和发射极之间的 PN 结的电阻只有几欧姆，但是三极管的电流增益  $\beta$  放大了发射极电阻器的值。假如我们三极管的  $\beta$  值是 50，当  $R_3$  为  $1000\Omega$  时，产生的电阻则为  $50\text{k}\Omega$ 。实际上  $R_2$  与它并联，因此可以计算出并联后的总电阻。因为  $R_3$  要比  $R_2$  大很多，所以并联后的结果略小于  $R_2$ ，这使得  $R_2$  近似等同于电路的输入阻抗。

你也可以通过查看电路来确定电路输出阻抗，输出阻抗近似等于输出电阻  $R_4$ 。

为了更好地理解电路输出阻抗的近似值，我们来分析三极管的输出阻抗。记住，由于反置偏压的 PN 结的阻抗很大，这个阻值与阻值很小的  $R_4$  并联，并联后的电阻略小于  $R_4$  的电阻。

增益涉及放大器可以将输入信号强度放大多少。根据实际应用，你会对放大器的电流增益、电压增益和功率增益比较感兴趣。公式 24-8、24-9、24-10 描述了这些增益与电路中的电阻相关。

$$A_1 = R_2 / R_3 \quad (24-8)$$

$$A_v = R_4 / R_3 \quad (24-9)$$

$$A_p = A_1 \times A_v = R_2 \times R_4 / R_3^2 \quad (24-10)$$

共发射极放大器具有很大的输入和输出阻抗。这种方法可以稳定电路状态，使电路不依赖于温度的变化，减小了电流的增益。不过共发射极放大器具有很好的功率增益，它们是最常用的双极性三极管放大电路。

## 共基极电路

目前我们学习的三极管电路，都是把发射极作为输入和输出电路的公共端。你也许想知道其他两个电极是否也可以作为这两部分的公共端。是的，三极管中 3 个电极的任何一个极都可以被输入电路和输出电路共用。

图 24-18 为一个简单的共基极电路。在这个例子中，我们使用的是 PNP 型三极管，当然，我们也可以使用 NPN 型三极管。注意，发射极和基极之间的 PN 结处于正向偏置，基极和集电极之间的 PN 结为反向偏置。如果用的是 NPN 型三极管，我们需要反转偏置电压的极性。在共基极偏压电路中没有什么意外的东西。分开的电池给发射极和基极以及基极和集电极施加偏置电压。R1 和 R2 具有限流作用，C1 和 C2 用来耦合交流信号。

我们通常希望用一个偏置电压来替代图 24-18 中的两个电压。和在共发射极电路工作一样，分压器可以在共基极电路中很好地工作。我们也希望我们的电路对于温度的变化具有稳定性，而且这个电路应该也与三极管自身的变化无关。图 24-19 为带有适当偏压电阻的 PNP 型三极管。

电阻器 R1 和 R2 形成了分压器，可以为基极和发射极提供合适的偏置电压。发射极电阻器 R3 和负载电阻 R4 用来稳定电路工作。并联后的电阻器可以设置三极管的 Q 点。

图 24-20 是用 NPN 型三极管连接而成的共基极放大电路。除了偏置电压的极性相反，图 27-20 电路其余部分与图 24-19 相同。可以

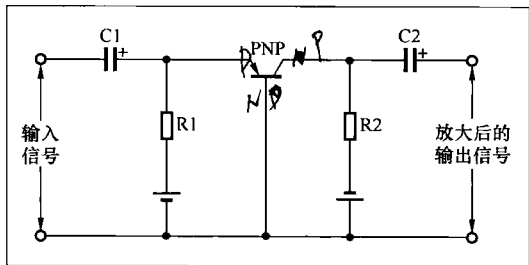


图24-18：这是一个简单的共基极三极管电路。独立的发射极和基极以及基极和集电极的偏置电压有助于你更好地理解电路的工作原理。

看到，在共基极电路中输入信号和输出信号的相位相同。

共基极电路的输入阻抗很小，这是因为基极和发射极间的 PN 结为一个正向偏置二极管。阻抗取决于发射极电流，

三极管效应的发现者肖克利发现，可以用公式 24-11 来计算输入阻抗。

$$Z_m = 26 / I_E \quad (24-11)$$

其中  $I_E$  是发射极电流，单位为毫安 (mA)。

在例子中，当发射极电流为 1mA 时，共基极电路的输入阻抗是 26  $\Omega$ ，而当发射极电流是 2mA 时，其阻抗是 13  $\Omega$ 。

三极管的基极和集电极之间的 PN 结为一个反向偏置二极管，所以电路的输出阻抗很大。因为反向偏置的 PN 结具有很大的阻抗。

负载电阻 R4 设置了共基极电路的输出阻抗，因为这个电阻和二极管结并联。根据电路输出阻抗的需要，R4 的值可以在几千欧姆到

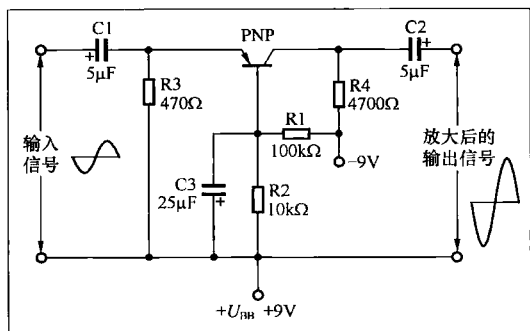


图24-19: 这是PNP型三极管共基极电路。这个电路只有一个偏置电压。放大器对于温度的变化具有很好的稳定性。

100kΩ 之间变化。在任何情况下,与基极和集电极之间的PN结的阻抗相比,负载电阻都是一个较小的值。因此,电路输出阻抗近似等于R4的值。

你可以用输出电流除以输入电流计算出放大器的电流增益。输出电流等于集电极电流,输入电流等于发射极电流。我们可以用公式24-12表示电流增益:

$$A_i = I_o / I_i = I_c / I_e \quad (24-12)$$

在前面章节中,我们把三极管中集电极电流除以发射极电流定义为三极管的电流放大系数  $\alpha$ 。通过公式24-12我们知道,共基极电流增益与三极管参数  $\alpha$  相等。因为发射极电流

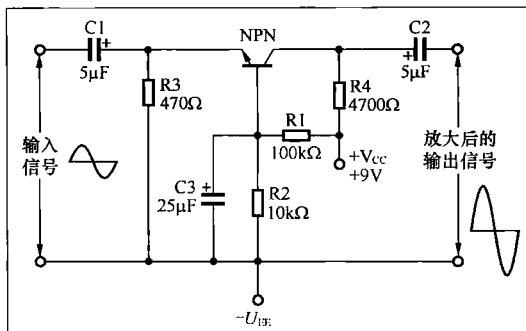
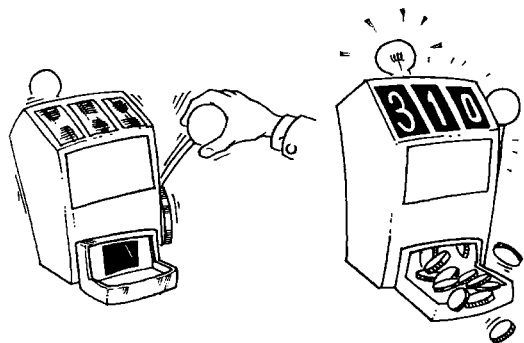


图24-20: 这个共基极晶体管放大器使用的是一个NPN型三极管。这个电路图和图24-19中的电路相似,只是偏置电压的极性相反。

由集电极电流和基极电流合并而成,因此集电极电流略小于发射极电流。 $\alpha$ 的典型值在0.90到0.99之间。

$$A_i = \alpha \quad (24-13)$$

输出电压除以输入电压可以求出电路的电压增益。公式24-14为电压增益的另一种表示方法。

$$A_v = \alpha \times R_4 / Z_{in} = \alpha \times I_c \times R_4 / 26 \quad (24-14)$$

其中:

R4为负载电阻器的电阻,  $I_c$ 为发射极电流值。公式24-15给出了共基极电路的功率增益,其值等于电流增益和电压增益的乘积。因为电流增益略小于1,所以功率增益也略小于电压增益。

$$A_p = A_i \times A_v \quad (24-15)$$

电压增益的典型值大约是320,这个值对应的功率增益大约为310。共基极电路输出功率将是输入功率的310倍。

共基极放大器具有输入阻抗很小而输出阻抗很大的特点。不过,这个电路本身不是很稳定,当增益过大时,电路容易产生振荡。

# 共集电极电路

这一节，我们将学习第三种三极管放大电路。在这一类型的放大电路中，输入和输出电路部分共用集电极，我们称之为共集电极电路。

图 24-21 为一个简单的共集电极三极管放大器。这个例子中使用的是 PNP 型三极管，当然也可以使用 NPN 型三极管。如果用的是 NPN 三极管，只需要反转偏置电压的极性。

不过，图 24-21 中的电路并不实用，因为我们通常只想在电路中使用一个电源来施加偏置电压。当然，这个电路可以帮助我们学习共集电极电路的工作原理。

来看看这个三极管的偏置电路。相对于集电极来说，基极和发射极的电压均为正向。集电极和发射极之间的正向电压要大于基极和集电极之间的正向电压。你可以查看电路，判定出三极管集电极和发射极之间的电压是 12V。不过事实并非如此。因为 R2 上有电压降存在，而这个电压降的大小与经过 R2 的电流有关（记得欧姆定律吗）。电路设计人员在设置偏置状态时，这个电压降非常重要。

基极和集电极之间电路中的 R1 上也有压降，所以基极和集电极之间的电压要略小于 6V。因为基极电流很小，所以我们经常忽略 R1 上的压降。发射极和基极之间的 PN 结上是一个正向偏压，因为发射极的电压大于基极电压，所以发射极和基极之间的 PN 结为正向偏置电压。电池  $U_{BC}$  为基极和集电极之间的 PN 结提供了一个反向偏置电压。

尽管这个偏置电路看起来与另外两种放大器电路有点不同，但原理是相同的。分开的电池给发射极和基极以及基极和集电极施加偏置电压。R1 和 R2 具有限流作用，C1 和 C2 用以耦合交流信号，将信号输入和输出放大器。

我们通常希望使用一个单独的偏置电源代替图 24-21 中的两个电源。利用一个分压器

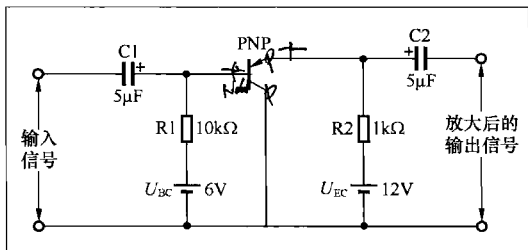


图 24-21：此图为一个简单的共集电极三极管电路。独立的偏置电压帮助你更好地理解电路工作。电池  $U_{BC}$  和  $U_{EC}$  分别提供了合适的正向偏置电压和反向偏置电压。

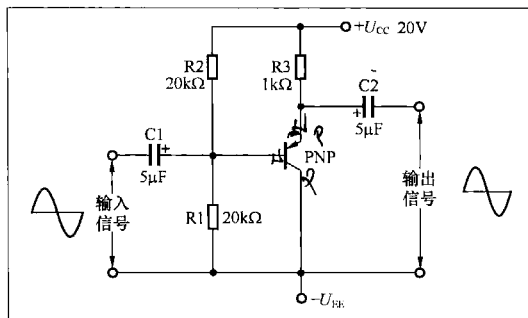


图 24-22：这个 PNP 型三极管工作在共集电极电路中。电路中一个单独的偏置电压源。这个放大器特性不会随着温度变化而改变。



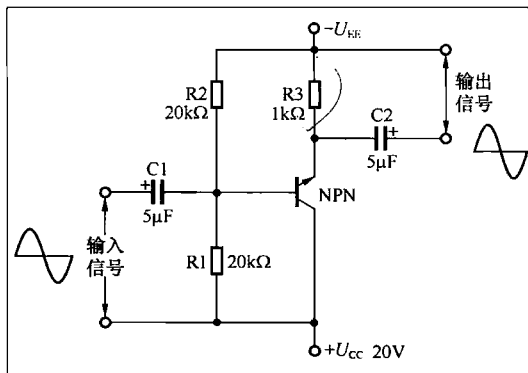


图24-23：这个共集电极晶体管放大器使用一个NPN型三极管。这个电路和图24-22中的电路相似，但偏置电压极性相反。从R3上取出输出信号，也告诉我们为什么我们常把共集电极电路称为电压跟随放大器。

可以使共集电极电路很好地工作。我们也希望这个电路可以适应温度的变化。而且这个电路应该尽可能不依赖于三极管自身的变化。图24-22为带有适当偏置电阻的PNP型三极管。注意，在共集电极电路中输入和输出信号的相位相同。

电阻器R1和R2构成了分压器，用来设置电路的偏置电压。发射极电阻器R3作为负载电阻器。合并后的电阻设定了三极管的Q点。图24-23是用NPN型三极管连接的共集电极放大器。电路图与图24-22类似，偏置电压极性与图24-22相反。

也许你已经注意到图24-22和图24-23电路的另一个区别。在图24-23中，我们从负载电阻R3上取出输出信号。我们这样说明，是为你介绍共集电极电路另一个名字的来历。

数学分析显示，R3上的电压与基极电压的变化成正比。假如我们给放大器提供一个输入信号，这个信号会引起基极电流的变化，基极电流又引起发射极电流的变化。由于发射极

电流是基极电流的 $\beta$ 倍，也就是说发射极电流的变化倍数也是基极电流变化的 $\beta$ 倍。发射极电流的变化结果引起R3上的电压的变化。

现在让我们选择一个输入信号，它可以使基极电压在 $\pm 2.5V$ 内变化，这也会在R3上产生几乎 $\pm 2.5V$ 的电压变化。我们把R3两端的电压称为发射极电压。在共集电极电路中，发射极电压紧跟着基极电压变化。因为这个原因，共集电极电路也称为电压跟随器。

共集电极电路的输入阻抗很大，这是因为集电极和基极之间的PN结是一个反向偏置的二极管。共集电极电路中使用的典型三极管的输入阻抗为 $50k\Omega$ 。电路的输入阻抗近似等于R1、R2和 $50k\Omega$ 并联后的值。对于图24-22和图24-23中的电路来说，输入阻抗大约为 $8333\Omega$ ，这个值近似等于 $10k\Omega$ 电阻、R1、R2并联后的值。

三极管的输出阻抗较小，因为基极和发射极之间的PN结为正向偏置二极管。正向偏置的PN结具有较小的阻抗。

在共集电极放大器中，典型三极管的输出阻抗大约为 $80\Omega$ 。电路的输出阻抗近似等于这个值与负载电阻R3的并联值。图24-22和图24-23中的电路输出阻抗大约为 $74\Omega$ 。电压跟随器（共集电极放大器）的电压增益大约是1，从我们对电路工作原理的讨论可以得出这个结论，也就是说输入电压和输出电压几乎相等。公式24-16显示，我们可以用输出电压除以输入电压的方式来求出电压增益。

$$A_v = U_o / U_i \quad (24-16)$$

我们也可以用电流除以输出电流来计算出电流增益。对于我们的共集电极电路，电流增益就是R1和R2并联的阻值除以负载电阻R3的阻值。

$$A_i = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (24-17)$$

在图 24-23 所示电路中，电流增益为 10。

放大器的功率增益可用公式 24-15 来求解，它的值等于电流增益和电压增益的乘积。由于电压增益为 1，所以功率增益近似等于电流增益。

$$A_p = A_i \times A_v \quad (24-18)$$

$$A_p = A_p \approx A_i$$

图 24-23 的功率增益为 10。

共集电极放大器具有输入阻抗大、输出阻抗小的特点，由此产生一种稳定的放大电路，是低阻抗负载和高阻抗信号源之间理想的缓冲器。在这种情况下，共集电极放大器的作用就像一个阻抗变换器。



# 晶体管参数

所有的电子元件都有一个最大额定电压和最大额定电流，晶体管也不例外。晶体管有几个电压和电流的额定值我们必须熟悉，同时也需要对其余参数有一定的了解。电路设计者在设计电路时，必须保证电路中的电流和电压不会超过这些参数值，施加过高的电压或通过过大的电流都会毁坏三极管。

晶体管都有最大额定电压。例如，对于通用的2N2222 NPN型三极管来说，加在集电极和发射极之间的电压不能超过30V，集电极和基极之间的PN结的反向电压不能超过60V。基极和发射极之间的PN结的反向电压也不能超过5V。

不同类型的三极管标有不同的电压参数。我们用缩写 $U_{CEO}$ 表示发射极和集电极之间的电压（下标字母O表示三极管的另一极——

这里是基极——是断开的，或者说是没有电压）。你会发现有的三极管 $U_{CEO}$ 为15V或更低，而有的三极管的 $U_{CEO}$ 为200V或更高。

集电极和基极之间的PN结的电压缩写是 $U_{CBO}$ 。有些三极管的 $U_{CBO}$ 参数为30V或更低，而有些三极管的 $U_{CBO}$ 参数为200V或更高。

我们用 $U_{EBO}$ 表示发射极和基极之间的PN结的电压。对某些二极管来说，这个值在3.0V或更小的电压到10V之间变化。表24-1列出了一些其他常用的三极管的参数值。

三极管可以处理的最大集电极电流参数也很重要。有些三极管只能处理50mA的集电极电流，而有些三极管可以安全地承受2A甚至更高的电流。

三极管另外一个比较重要的参数是最大消耗功率 $P_{max}$ 。消耗功率表示三极管内部转化

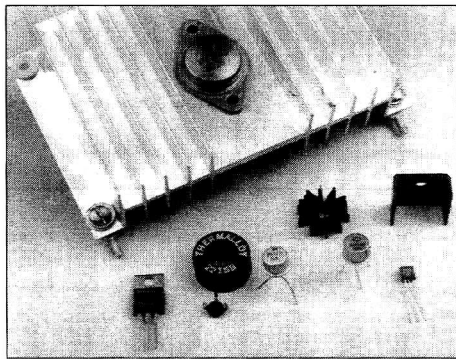


图24-24：这张图中为一些普通的三极管和典型的散热片。散热片可以把三极管产生的过多热量传导出去，降低半导体PN结的温度。

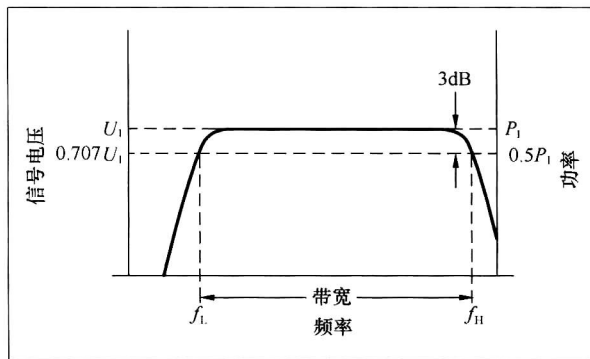


图24-25：这张图描述了理想三极管放大器的频率响应。我们可以通过测量输出信号电压或功率的方式来找出放大器的频率响应。低频率截止点和高频截止点之间的差额表示带宽。

表24-1：普通用途的三极管（按照设备的序号排列）

设备	类型	最大集电极- 发射极电压 ( $U_{CE0}$ )	最大集电极- 基极电压 ( $U_{CBO}$ )	最大发射极- 基极电压 ( $U_{E0}$ )	最大集电 极电流 ( $I_C$ )	最大设 备损耗 ( $P_0$ )	电流增益 带宽积 ( $f_\beta$ )	最大噪 声系数 ( $N_F$ )
2N918	NPN	15	30	3.0	50	0.200	600	6.0
2N2102	NPN	65	120	7.0	1000	1.0	60	6.0
2N2218	NPN	30	60	5.0	800	0.8	250	
2N2218A	NPN	40	75	6.0	800	0.8	250	
2N2219	NPN	30	60	5.0	800	3.0	250	
2N2219A	NPN	40	75	6.0	800	3.0	300	4.0
2N2222	NPN	30	60	5.0	800	1.2	250	
2N2222A	NPN	40	75	6.0	800	1.2	300	4.0
2N2905	PNP	40	60	5.0	600	0.6	200	
2N2905A	PNP	60	60	5.0	600	0.6	200	
2N2907	PNP	40	60	5.0	600	0.400	200	
2N2907A	PNP	60	60	5.0	600	0.400	200	
2N3053	NPN	40	60	5.0	700	5.0	100	
2N3053A	NPN	60	80	5.0	700	5.0	100	
2N3904	NPN	40	60	6.0	200	0.625	300	5.0
2N3906	PNP	40	40	5.0	200	1.5	250	4.0
2N4037	PNP	40	60	7.0	1000	5.0		
2N4123	NPN	30	40	5.0	200	0.35	250	6.0
2N4124	NPN	25	30	5.0	200	0.350	300	5.0
2N4125	PNP	30	30	4.0	200	0.625	200	5.0
2N4126	PNP	25	25	4.0	200	0.625	250	4.0
2N4401	NPN	40	60	6.0	600	0.625	250	
2N4403	PNP	40	40	5.0	600	0.625	200	
2N5320	NPN	75	100	7.0	2000	10.0		
2N5415	PNP	200	200	4.0	1000	10.0	15	
MM4003	PNP	250	250	4.0	500	1.0		
MPSA55	PNP	60	60	4.0	500	0.625	50	
MPS6547	NPN	25	35	3.0	50	0.625	600	

\*测试条件： $I_C=20\text{mA}$ （直流）； $U_{CE}=20\text{V}$ ； $f=100\text{MHz}$

为热能的能量大小，我们用电压和电流的乘积计算功率。对于三极管的消耗功率来说，其值等于集电极和发射极之间的电压与集电极电流的乘积，即

$$P_{\max} = U_{CE} \times I_C \quad (24-19)$$

注意，我们在计算最大功率消耗时，不

是用最大集电极和发射极之间电压  $U_{CE0}$  与最大集电极电流  $I_{C\max}$  相乘，三极管的最大消耗功率通常要比这个这里需要平衡因素。如果电路所加的电压接近于最大电压参数，此时确保集电极电流小于最大值。

如果电路中的电流接近于最大电流参数，

那么需要电压降低到最大电压参数以下。假设在 2N2222A 三极管中，集电极和发射极之间的电压是 20V，在不超过三极管最大消耗功率 1.2W 时，电路中通过集电极的电流有多大？我们可以用公式 24-19 求出集电极的电流（在求解公式时，两边同除以  $U_{CE}$ ）。

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= U_{CE} \times I_c \\
 P_{\max} / U_{CE} &= U_{CE} \times I_c / U_{CE} \\
 P_{\max} / U_{CE} &= I_c & (24-20) \\
 I_c &= P_{\max} / U_{CE} = 1.2 \text{ W} / 20 \text{ V} = 0.06 \text{ A} \\
 I_c &= 60 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

从表 24-1 中我们发现，2N2222A 的最大集电极电流为 800mA。我们的计算结果比电流参数小很多。你也可以计算电流为 800mA 时，集电极和发射极之间的最大电压。这一次用公式 27-16 求解  $U_{CE}$ 。

$$\begin{aligned}
 U_{CE} &= P_{\max} / I_c & (24-21) \\
 U_{CE} &= 1.2 \text{ W} / 0.800 \text{ A} = 1.5 \text{ V}
 \end{aligned}$$

半导体的 PN 结对热量比较敏感。晶体管中任何功率的耗散都会使 PN 发热。如果三极管不能尽快散发掉热量，那么将会毁坏 PN 结。在大功率电路中使用的三极管通常需要安装散热片。散热片就是一块能把三极管产生的过多热量迅速传导出去的金属片。有些散热片只是覆盖在三极管上的很薄的金属条。还有些散热片由很大的金属块构成，它们附着在三极管的底座或底盘上。图 24-24 为一些普通的三极管和散热片。

你也许想为业余无线电收音机或发信机做一个射频放大器，那么你就必须要考虑电路中所用三极管的频率响应。有些三极管的频率响应为几百千赫兹，而有些可以达到吉赫兹范围。因此，你必须选择合适的三极管，在你设计的电路频率工作范围内工作。当然，价格和

其他特性会影响到你最终的选择。

图 24-25 为理想的频率响应图。实际应用中，电路的电阻器和电容器会限制低频率响应，三极管特性会限制高频率响应。理想情况下，电路可以等量放大最小值和最大值之间的所有信号。但在实际应用中，放大器不可能如图 24-25 所示，在顶部出现一个平坦的响应。

我们可以测量放大后信号的电压。通过改变频率，我们找出频率的上限值和下限值，这两个点的电压值是峰值电压的 0.707 倍。这两个频率的差值表示电路带宽。我们也可以对放大后信号的功率进行测量。同样频率的最大值和最小值出现在图中 1/2 的功率点处。当功率降低到初始值的 1/2 时，功率衰减 3dB。

表 24-1 列出了电流增益带宽乘积。这个术语表示三极管的最高有效频率值。在这个点上，电路增益降为 1。由于输出信号不再强于输入信号，所以也就没有了增益。

这里还有一个参数需要提及，这就是三极管的噪声系数 NF。噪声系数 NF 用来测量三极管在放大信号上增加多少噪声，制造商用分贝来描述噪声系数。他们用晶体管的噪声信号功率和测试电路中电阻部分产生的噪声信号功率进行比较。

随着你对电子学的深入学习，你对三极管参数的认识也会越来越多。很多电子电路中，除了将三极管用作放大器外，还有其他很多用途。本章所学习的知识将帮助你更好地理解晶体管的其他特性以及其他应用。

复习检测：-----

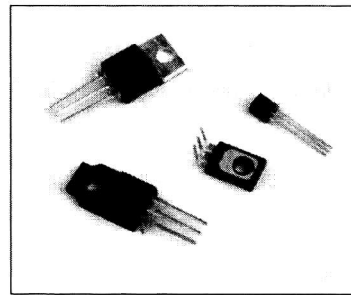
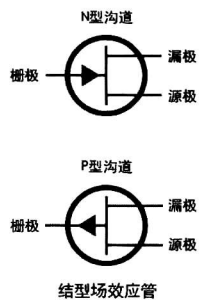
- 24.1 晶体三极管的三个极是\_\_\_\_、\_\_\_\_和\_\_\_\_。
- 24.2 晶体三极管的两种类型是\_\_\_\_型和\_\_\_\_型。
- 24.3 解释一下三极管的作用。
- 24.4 当增加基极电流而不造成相应集电极电流的增加，这称为三极管：
- 疲劳
  - 需要修理
  - 需要重新换一个
  - 饱和
- 24.5 三极管放大系数 $\alpha$ 总是：
- 稍小于1.0
  - 正好是1.0
  - 比1.0大一点
  - 通常在80-100之间
- 24.6 在三极管的PN结施加一个直流电压，使三极管满足需要的工作条件，这叫\_\_\_\_晶体管。
- 24.7 三极管放大系数 $\beta$ 总是：
- 正好是1.0
  - 稍小于1.0
  - 通常在80-100之间
  - 比1.0稍大
- 24.8 在三极管电路中添加偏置电压将使电路在Q点工作。Q点表示。
- 24.9 晶体管的三种放大电路分别是\_\_\_\_、\_\_\_\_和\_\_\_\_。

答案：-----

- 24.1 晶体三极管的三个极是集电极、基极和发射极。
- 24.2 晶体三极管的两种类型是PNP型和NPN型。
- 24.3 从基极流向发射极的小电流，通过正向偏置的基极反射极之间的结，控制从集电极流向发射极，通过反向偏置的集电极和基极之间结的较大的电流。
- 24.4 d
- 24.5 a
- 24.6 在晶体管的PN结施加一个直流电压，使三极管满足需要的工作条件，这叫偏置晶体管。
- 24.7 c
- 24.8 在晶体管电路中添加偏置电压将使电路在Q点工作。Q点表示静态。
- 24.9 晶体管的三种放大电路分别是共发射极、共基极和共集电极。

## 第25章

# 场效应管（FETs）



场效应管可能看起来和三极管相似，但它们的性能不同

### 目录

- 通过变化的电场控制电流
- 结型场效应管（JFET）的构造
- 金属氧化物半导体场效应管（MOSFET）的构造
- 复习检测

## 通过变化的电场控制电流

双极晶体管（三极管）依靠输入信号电流来控制输出信号电流。输入信号电流发生变化，输出电流也跟着发生变化，输出电流把输入信号电流进行了放大。

理想放大器不会损耗信号源输出的电流。这样的放大器的输入阻抗相当大。三极管放大电路可以有很大的输入阻抗。但在实际电路中，总要消耗一些电流，所以限制了电流的实际值。

可以制造出这样一种半导体器件，在实际工作时不需要通过电流来控制，而是依靠施加在器件上的电压产生的电场来控制输出电流，

我们称这样的器件为场效应管，因为它们是靠电场来工作的。我们通常用缩写 FET 来表示场效应管。

图 25-1 为一块 N 型半导体材料，N 型材料的两侧附着两块 P 型半导体材料。这个图与双极结型三极管的“三明治”三层结构有些类似。两块 P 型半导体材料之间有一个公共的连接，这个连接可能是在晶体管内部或是外部的一根导线。

N 型半导体材料给电流提供一个从一端流向另一端的通道。图 25-2 中，一个电池和电阻器连接在 N 型半导体材料的两端。在半

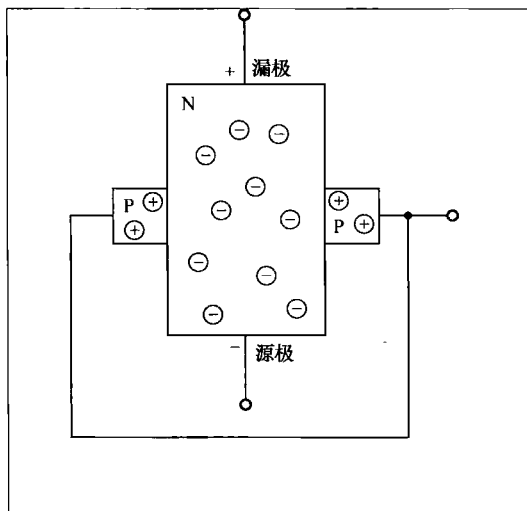


图25-1：这张图图解了场效应管（FET）。场效应管由一块N型半导体材料和两侧的P型半导体材料构成。

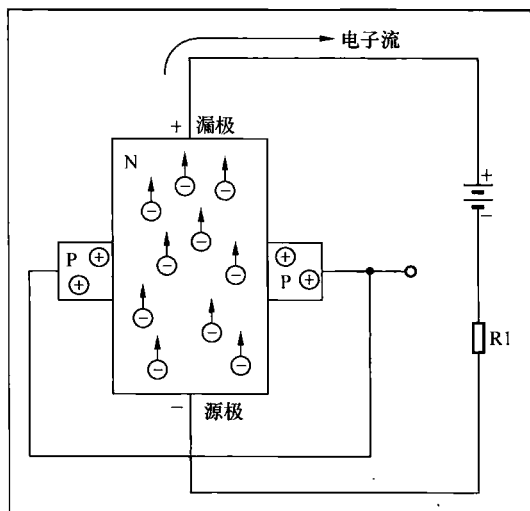


图25-2：N型半导体材料为电流穿过FET构成了一条直接通路。图中显示，电子从漏极流出，经过电路，从源极返回到半导体。



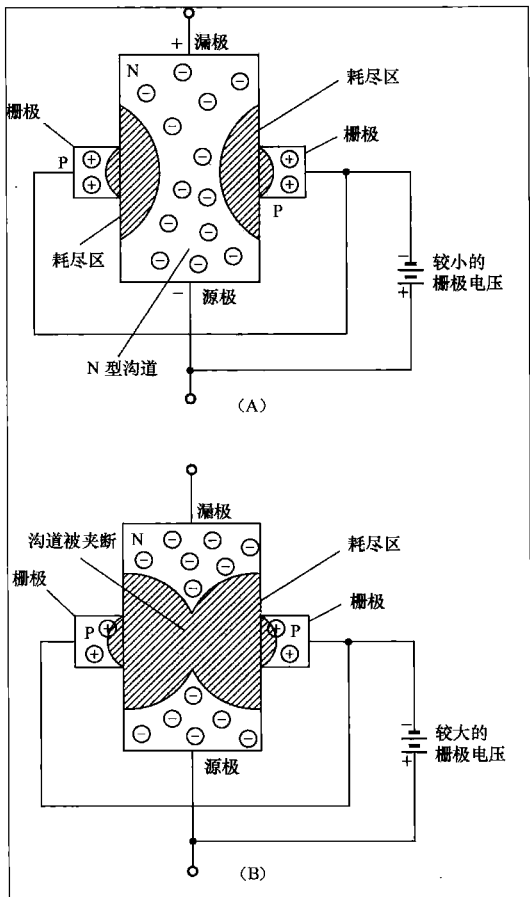


图25-3：我们给栅极和源极之间的PN结接入一个反向偏置电压。耗尽区域开始关闭N型半导体上的电流沟道。图（B）显示，当反向偏压足够大时，耗尽区域把电流沟道完全关闭。

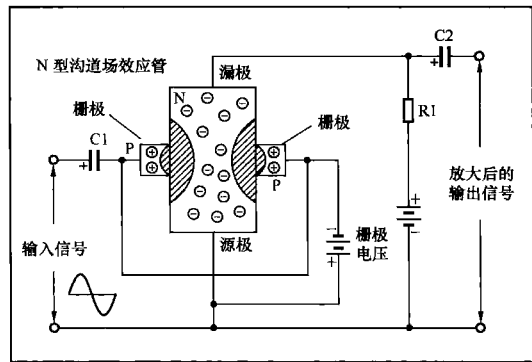


图25-4：这张图为N型沟道场效应管的工作原理图。栅极电源确保输入信号为正时，栅极上处于反向偏置。输出电流经过R1时，会产生电压降。这个电压降提供了放大后的输出电压。

导体材料中，自由电子流向电源的正极。这些自由电子在半导体材料靠近电源的正极端送出，我们称这一端为场效应管（FET）的漏极。电子从漏极流出，通过电路到达这个N型半导体材料的另一端，然后它们再进入半导体材料。我们把电子进入半导体的一端称为源极。

图 25-3 中，我们把两块 P 型体材料与电池负极相连，电池的正极和 N 型材料的源极相接。这样电池在场效应管(FET)的栅极(gate)和源极之间的 PN 结上施加了反向偏压。

当这个 PN 结上施加反向偏压时，N 型材料中的自由电子远离 P 型材料，P 型材料中的空穴也会远离 N 型材料。自由电子和空穴的漂移运动使得耗尽区变宽。图 25-3 (A) 显示了耗尽区是如何关闭从源极流向漏极的电子的沟道的。

当栅极电压足够大时，耗尽区完全夹断沟道。图 25-3 (B) 显示的就是这个极端情况。

现在让我们看看，当我们把一个信号电压与 FET 的栅极相接，会发生什么情况呢？我们

也要把漏极和源极接入到电路中，因此，我们可以用这个晶体管作为放大器来使用。图 25-4 为这个电路的完整连接。

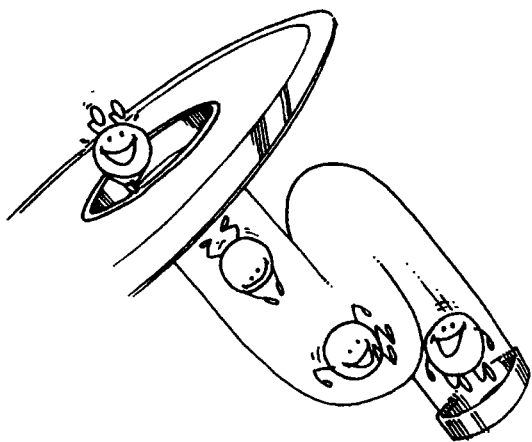
当信号电压为负时，栅极电压负向增大，这使得 N 沟道变窄，因此输出电路上的电流减小。

接下来，当输入信号电压变为正向，栅极电压负向减小（栅极电压源保证栅极和源极之间的 PN 结始终为反向偏置）。N 沟道变宽，输出电路上的电流增大。

在本节开始，我们已经知道场效应管（FET）的输入阻抗很大。因为反向偏置，所以几乎没有电流通过栅极和源极之间的 PN 结。典型的 FET 输入阻抗为  $1\text{M}\Omega$  甚至更大。

一单块 N 型半导体材料控制场效应管的输出阻抗，这意味着场效应管的输出阻抗很小。

在本节中，我们只讨论了 FET 是由围绕一块 N 型半导体材料制成的。也许你想知道，FET 能不能围绕一块 P 型半导体材料制成呢？



答案是：“是的，有用 P 型材料制成的场效应管。”这时 FET 的栅极就是由两块 N 型半导体制成，此时，场效应管中就由 P 型沟道替代了 N 型沟道。除了电压极性相反外，它们的工作原理相同。P 型沟道 FET 的栅极电压为正电压，漏极与输出电压负边相连。在 P 型半导体材料中，电荷载体是空穴，而不是自由电子。

# 结型场效应管 ( JFET ) 的构造

上一节，我们学习了场效应管 (FET)。这种晶体管中有一个 PN 结，这个结就像栅门一样控制经过沟道的电流，正是由于晶体管的这个 PN 结，我们把这样的晶体管命名为结型场效应管，缩写为 JFET。在这一节中，我们将深入了解 JFET 的构造。

制造商在制造 N 型沟道 JFET 时，都是先从 P 型材料开始。他们在 P 型材料底座上通过杂质扩散制造出 N 型沟道。接着，在 N 沟道顶部制造出一小块 P 型材料。最后一步，把金属触点存放入半导体区域中形成电极。这些金属触点可以使你的 FET 接入电路，在将晶体管封装入保护晶体管的塑料外壳或其他外壳前，制造商用导线与金属触点连接起来引出电极。图 25-5 (A) 描述了 JFET 的结构图。

图 25-5 (B) 是类似的 P 型沟道 JFET 构造图。在一块 N 型材料上形成 P 沟道后，生产厂商在 P 沟道顶部通过杂质扩散添加一薄层 N 型材料，生成第二个栅极。

用这种方式生产的场效应管有对称的沟道，因此漏极端和源极端没有区别，你可以选择沟道的任何一端作为场效应管的漏极或源极。

当然，沟道并不总是对称的。制造过程的变化使源端和漏端有所不同，而这些不同提供了特定的三极管特性。因此，在用结型场效应管构造电路时，必须仔细鉴别源端和漏端，否则可能会损坏晶体管。

图 25-6 为 N 型沟道和 P 型沟道结型场效

应管的示意图符号。N 型沟道 JFET 有一个 P 型栅极部分。注意，在 N 型沟道 FET 中，箭头总是从 P 型栅极指向 N 型沟道。P 型沟道 JFET 有一个 N 型栅极部分，箭头总是从沟道指向 N 型材料的栅极。在半导体器件中，箭头总是从 P 型材料指向 N 型材料。

FET 有多种封装类型。一般来说，体积越大，表示可以负载的功率越大。有些 FET 需要使用散热片把晶体管产生的热量传导出

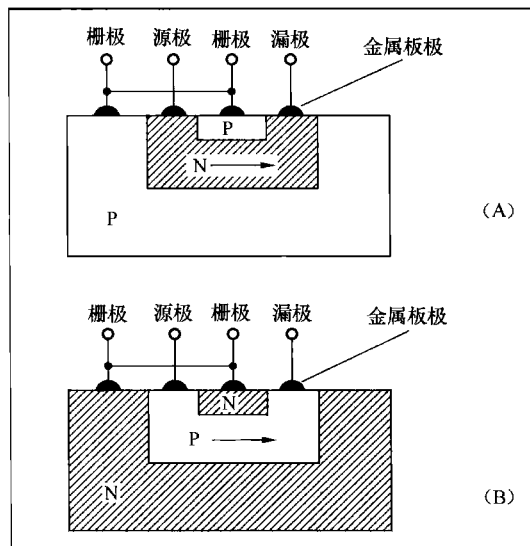


图25-5: 图 (A) 为N型沟道结型场效应管的构造。制造商在P型半导体底座上形成了一个N型材料沟道，然后再加上一小块P型材料构成第二个栅极。他们在半导体上面植入很薄的金属层形成电极。图 (B) 为P型沟道JFET 构造，其方式与图 (A) 类似，但是半导体类型相反。

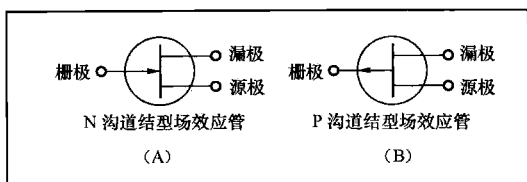


图25-6：在电路原理图中，图(A)表示N型沟道结型场效应管，图(B)表示P型沟道结型场效应管。

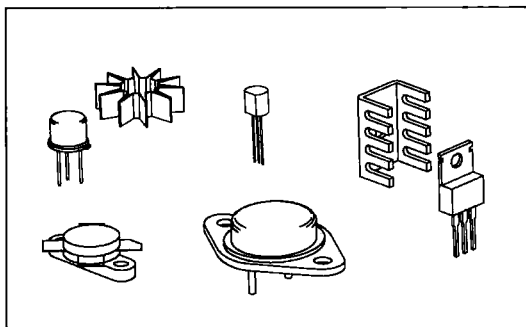
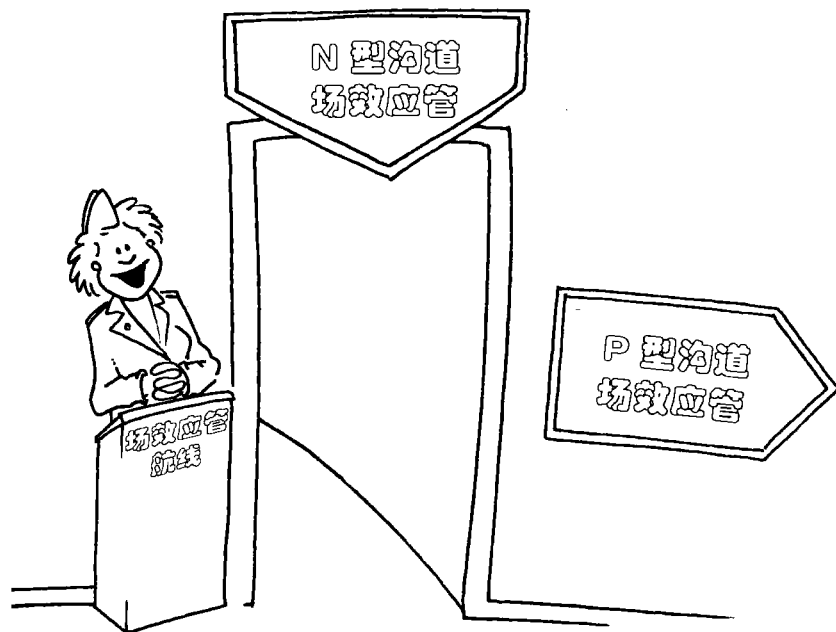


图25-7：FET的封装与双极性三极管的封装类似。有些FET需要借助散热片来传导所产生的热量。

去。图 25-7 为普通封装类型的 FET。

制造商常用用硅和锗半导体材料来制造大多数的 JFET。在本单元前面的章节中，我们已经熟悉这两种材料。它们也是用来制造晶体二极管和双极结型晶体管的材料。

在设计作为 UHF（超高频）微波频率使用的场效应管时，制造商使用其他的材料。在这些频率中噪声是一个非常重要的因素。砷化镓是一种半导体化合物。用它制造的 FET 在 UHF 频率上工作时噪声很小。它的化学符号是 GaAs，我们称用砷化镓制造的场效应管为砷化镓场效应管，缩写为 GaAsFETs。这种场效应管在较低频率时产生的噪声较大，所以在实际使用中，很少在 HF（短波）下使用它。



# 金属氧化物半导体场效应管 (MOSFET) 的构造

上面我们学习的场效应管中，它们的栅极都是用PN结形成的。还有一种场效应管的构造方式，是在沟道和栅极之间添加一层很薄的绝缘的金属氧化物，我们称这样的三极管为绝缘栅型场效应管，缩写为IGFET。

在IGFET中，绝缘层形成了一个电容器。沟道作为电容器的一块电容极板，栅极层作为另一块电容极板。这种构造技术解决了在JFET中反向偏置PN结存在漏电电流的问题，IGFET的绝缘的栅极不会出现这样的问题。

最常用的绝缘材料是半导体底座上的一

层很薄的金属氧化物，根据这一结构特点，也把这种类型的场效应管称为金属氧化物半导体场效应管，缩写为MOSFET。典型的MOSFET的输入阻抗为几兆欧姆，远大于JFET的输入阻抗。

金属氧化物绝缘层非常薄，击穿电压比较低，甚至积累的静电荷就可以击穿绝缘层，从而毁坏晶体管，这是MOS器件的一个缺陷。在你接触MOSFET前，必须先释放掉身体上的静电。注意，只能用手拿它们的外壳，而不是电极。有些MOSFET内部有一个起静电保

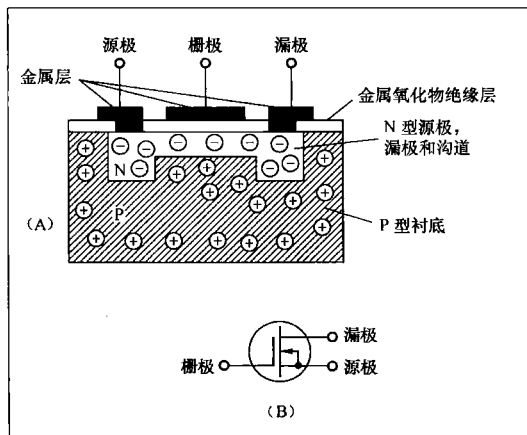


图25-8: 图(A)为N型沟道耗尽型金属氧化物半导体场效应管的结构图。图(B)为这个晶体管的示意图符号。在N型沟道MOSFET中，箭头指向沟道。注意到栅极导线上没有箭头。

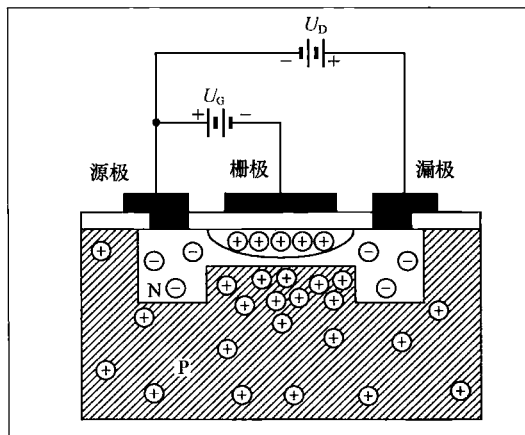


图25-9: 负向栅极电压吸引P型材料衬底中的空穴。这些空穴与N型沟道中的自由电子结合，减小了沟道的有效宽度。沟道变窄，经过的电流变小。正向栅极电压排斥空穴，增大了沟道宽度，更多的电流可以流过沟道。

护作用的齐纳二极管。

制造 MOSFET 的方法有很多种。我们先来讨论耗尽型 MOSFET 的结构和工作原理。

在制造 N 型沟道场效应管时，我们首先选择一块 P 型半导体材料，接着，在 P 型材料的衬底上覆盖或堆积一层 N 型材料构成沟道，然后把一层很薄的金属氧化物覆盖在这些半导体材料上面。现在，我们需要在绝缘层上打一些孔，作为源极和漏极的输出端，穿过洞穴附着上金属层，在中间中央位置构成栅极。最后接上导线，并封装到保护壳中。听起来是不是很简单？图 25-8 显示的就是耗尽型 MOSFET 的构造图。

图 25-8 (B) 为 N 型沟道耗尽型金属氧化物半导体场效应管 (MOSFET) 的示意图符号。栅极不包含 PN 结，所以栅极导线上不存在箭头。但是，MOSFET 中会有一个指向连接源极沟道的箭头。箭头指 N 沟道，显示是 N 沟道的器件。

图 25-9 显示的是一个负向栅极电压的 MOSFET。注意，这个负向栅极电压从 P 型衬底中吸引空穴。这些空穴与一些穿过沟道的载流子—自由电子结合。这样耗尽或减少了经过沟道的电荷载体。这就是为什么我们称之为耗尽型 MOSFET。

你可以想象，当我们在栅极施加一个变化的信号电压时会发生什么现象。变化的电压改变了穿过沟道的电流大小。负向栅极电压使沟道宽度变窄，只有少量电流通过沟道。正向栅极电压排斥空穴，增大了沟道宽度，所以有更多的电流流过。

图 25-10 为增强型 MOSFET 结构。增强型 MOSFET 中最有意思的是在 N 型源极和漏极之间

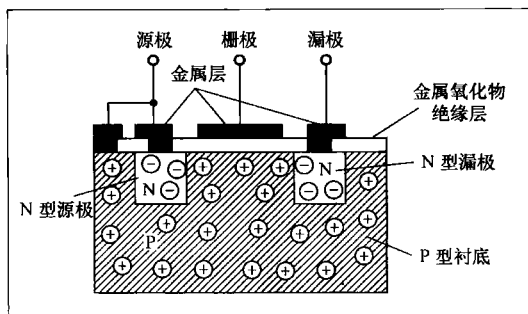


图25-10: N型沟道增强型金属氧化物半导体场效应晶体的结构图。

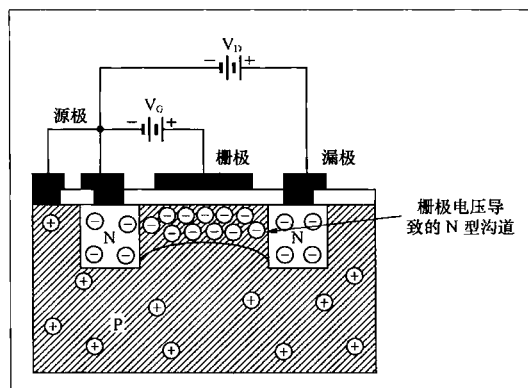


图25-11: N型沟道增强型MOSFET的工作原理图。正向栅极电压吸引P型半导体中的电子。由于P型半导体中的自由电子要比空穴少，我们称这样的电子为少数载流子。这些电子构成了源极和漏极之间的N型沟道。

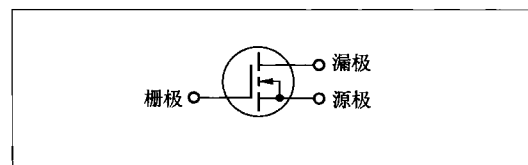


图25-12: 此图为N型沟道增强型MOSFET的示意图符号。注意，中间的线被断开，分别表示漏极、沟道和源极。

不存在沟道。在 P 型衬底和 N 型源极材料之间有一个连接。对于大多数晶体管，这是个内部连接，其他的则需要在外接电路上增加这个连接。N 型漏极和 P 型底层形成一个 PN 结，当漏极正向电压大于源极正向电压时，这个 PN 结上会产生一个很小的漏电电流。在这种情况下，PN 结存在一个反向偏压。

如图 25-11 所示，现在给增强型 MOSFET 外接一个正向栅极电压。正向栅极电压可以吸

引 P 型半导体中的电子。因为 P 型半导体中的大多数电荷载体是带正电的空穴，所以称这些电子为少数载流子。这些少数载流子聚集在 P 型半导体材料的表面，但不能穿过绝缘金属氧化物层。这样在 N 型源极和漏极之间的 P 类型半导体中形成了一个负向通道。少数载流子控制着漏极电流的大小。因此，正向栅极电压增强了晶体管的载流能力。

图 25-12 为增强型 MOSFET 的示意图符号。注意，中间分割的线段分别表示源极、漏极和衬底。这与耗尽型 MOSFET 的符号中间的实线有微小差别。

金属氧化物半导体场效应管还有其他的构造方式，这里我们不再一一赘述。不过还有一种场效应管你必须知道，这就是双栅型 MOSFET 的结构。在双栅型 MOSFET 中，栅 1 是信号栅，栅 2 为控制栅，这样可以通过控制电压改变放大器的特性。

制造商可以利用 N 型沟道结构或 P 型沟道结构生产出各种类型的 MOSFET。我们在这一节中所学习的都是 N 型沟道器件。如果要制造 P 型沟道器件，只要把 N 型和 P 型半导体材料调换，并改变电压的极性。图 25-13 中显示了 N 型和 P 型沟道耗尽型和增强型 MOSFET 的示意图符号，还包含了双栅型 MOSFET 的符号。

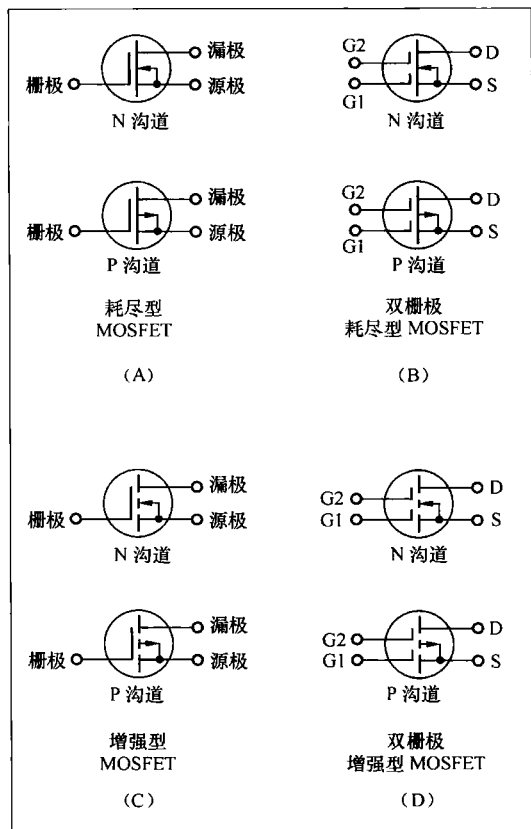
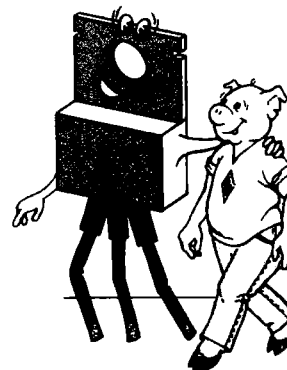


图25-13：这些符号表示了不同类型的金属氧化物半导体场效应管。这些符号表示了N型沟道和P型沟道的耗尽型和增强型MOSFET，图中我们还包括了双栅型MOSFET。



复习检测：-----

- 25.1 场效应管的三个极分别是\_\_\_\_、\_\_\_\_和\_\_\_\_。
- 25.2 两种场效应管分别是\_\_\_\_和\_\_\_\_。
- 25.3 场效应管通过改变\_\_\_\_极两端的\_\_\_\_使通过电流的沟道打开一些或者关闭一些，这使\_\_\_\_的宽度最大或减小。
- 25.4 金属氧化物半导体场效应管MOSFET分为\_\_\_\_MOSFET和\_\_\_\_MOSFET两种。
- 25.5 下列哪种材料不是用来制造场效应管的三种半导体材料之一？
- a) 锗
  - b) 硅
  - c) 碳
  - d) 砷化镓
- 25.6 砷化镓场效应管非常适合用于\_\_\_\_频率放大器，因为他们又较小的\_\_\_\_。
- 25.7 IGFET对什么非常敏感而且很容易被它毁坏：
- a) 沟道中的大多数载流子
  - b) 静电
  - c) 没有经常断开栅极
  - d) 放大的爵士音乐

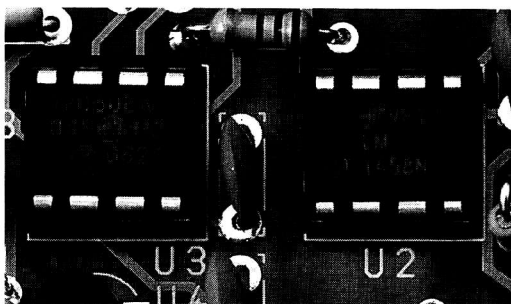
答案：-----

- 25.1 场效应管的三个极分别是源极、栅极和漏极。
- 25.2 两种场效应管分别是N沟道场效应管和P沟道场效应管。
- 25.3 场效应管通过改变栅极两端的电压使通过电流的沟道打开一些或者关闭一些，这使耗尽区的宽度最大或减小。
- 25.4 金属氧化物半导体场效应管MOSFET分为耗尽型MOSFET和增强型MOSFET两种。
- 25.5 c
- 25.6 砷化镓场效应管非常适合用于UHF频率放大器，因为他们又较小的噪声。
- 25.7 b



## 第26章

# 集成电路——将所有的 元件放入一个小包中



在这些8脚集成电路中包含了很多个电路

### 目录

- 线性器件
- 运算放大器
- 数字器件
- 定时器
- 复习检测

# 线性器件

**硅**和锗半导体材料制成了多种电子器件，用这些材料制造出了二极管，双极性三极管和场效应管等器件。

制造商通过控制添加到半导体衬底或基础材料中的 P 型或 N 型半导体材料的数量和位置，制造出多种多样的晶体管。通过仔细控制制造过程，制造商可以设置这些材料的阻抗。用同样的方法，他们可以在硅或锗的基座上设置电阻。

你还记得金属氧化物半导体场效应管的构造么？MOSFET 的栅极是一个电容，图 26-1 显示的就是这个构造。

制造商能不能在一个单片衬底上放置多个三极管和二极管呢？当然可以。还可以在这些晶体管之间添加电阻器和电容器，它们也成为半导体的一部分。这个听起来是不是像在一片半导体材料上存放了一个完整的电路呢？

集成电路就是一片单片半导体材料，可以替换一个电路中的很多个部分。你经常看到集成电路的缩写 IC。因为集成电路通常做成在很小的一块硅片上，也许你会听到它们被称为芯片。

制造商生产出集成电路后用不同的方法封装，使它们便于使用。图 26-2 显示了一些常用封装的集成电路。这些封装必须提供一些 IC 和外界电路连接方式，因此引线是 IC 中一个重要组成部分。制造商一直在寻求使芯片封装的体积更小的方法。

有些集成电路可能只包含几个晶体管和其他元件，但有很多种芯片，在一个芯片封装里包含了成百上千个三极管、二极管、电阻器和电容器。这些元件都是在衬底上，由半导体材料层组成。在图 26-3 是这个结构的简单电路，包含 1 个双极性三极管，1 个电阻器和 1

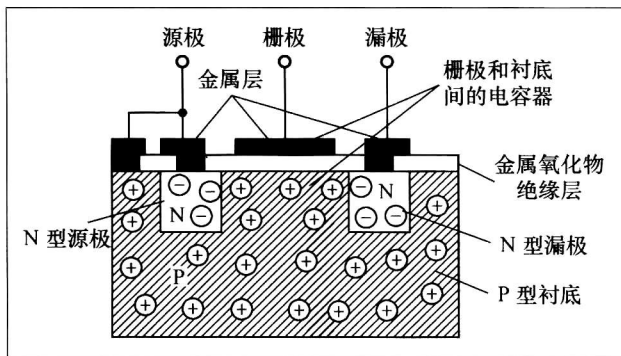


图26-1：金属氧化物半导体场效应晶体管，包含了一个半导体电容器。

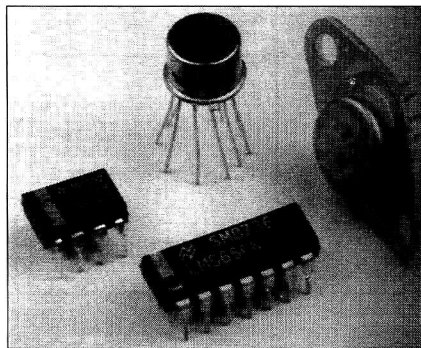


图26-2：这张图中显示了几种 IC 封装类型。

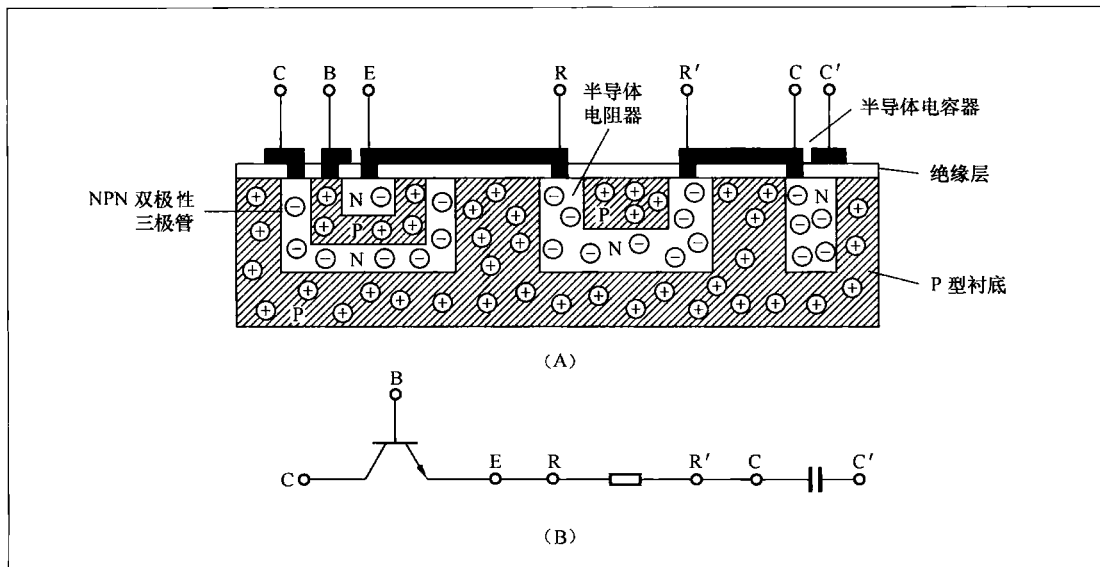


图26-3：图 (A) 是用半导体材料制成一个简单IC的原理图，图 (B) 是图 (A) 的电路图。

个电容器。当然，大多数 IC 要比这个电路复杂得多。

线性集成电路利用从一个值到另一个值平稳变化的信号工作。正弦波就是这种信号的一个很好的例子。在本章稍后，你还将了解数字集成电路。

线性 IC 可以作为放大器、振荡器等来使用，也可以作为接收器、发送器或其他电路的部分元件来使用。只需少量的外部元件，例如电源、扬声器或耳机，用线性 IC 甚至可以做成完整的接收机。

有些线性 IC 是通用的芯片，这些芯片可以很好地适用于不同电路中的多种用途。运算放大器就是一种通用器件，它可以用在多种类型的电路中，包括小信号放大器和滤波电路。运算放大器还用于助听器、移动电话、计算机硬盘、MP3 播放器等应用中。在下一节中可

以学到更多运算放大器知识。

有些线性 IC 设计成专门完成电路中特殊功能的器件。这些特殊用途的 IC 可以在立体声录音机、收音机和电视机等电子设备中找到。

图 26-4 是型号为 TDA7000 的 IC 电路图。如框图所示，这个芯片相当于一个完整的 FM 无线电设备。只要在电路中再接少量电阻器、电容器和电感器就可以实现接收器功能。这些元件提供滤波和振荡频率控制功能。电源作为外设元件提供必要的输入电压。

通过进一步学习电子学，你将学到更多的专门用途的 IC。记住，IC 是一个电路元件，通过制造商的数据表和操作说明书可以了解一块 IC 的详细信息。这些信息告诉你 IC 芯片的安全电压输入范围，还告诉你，要完成电路还需增加那些额外的电路元件。

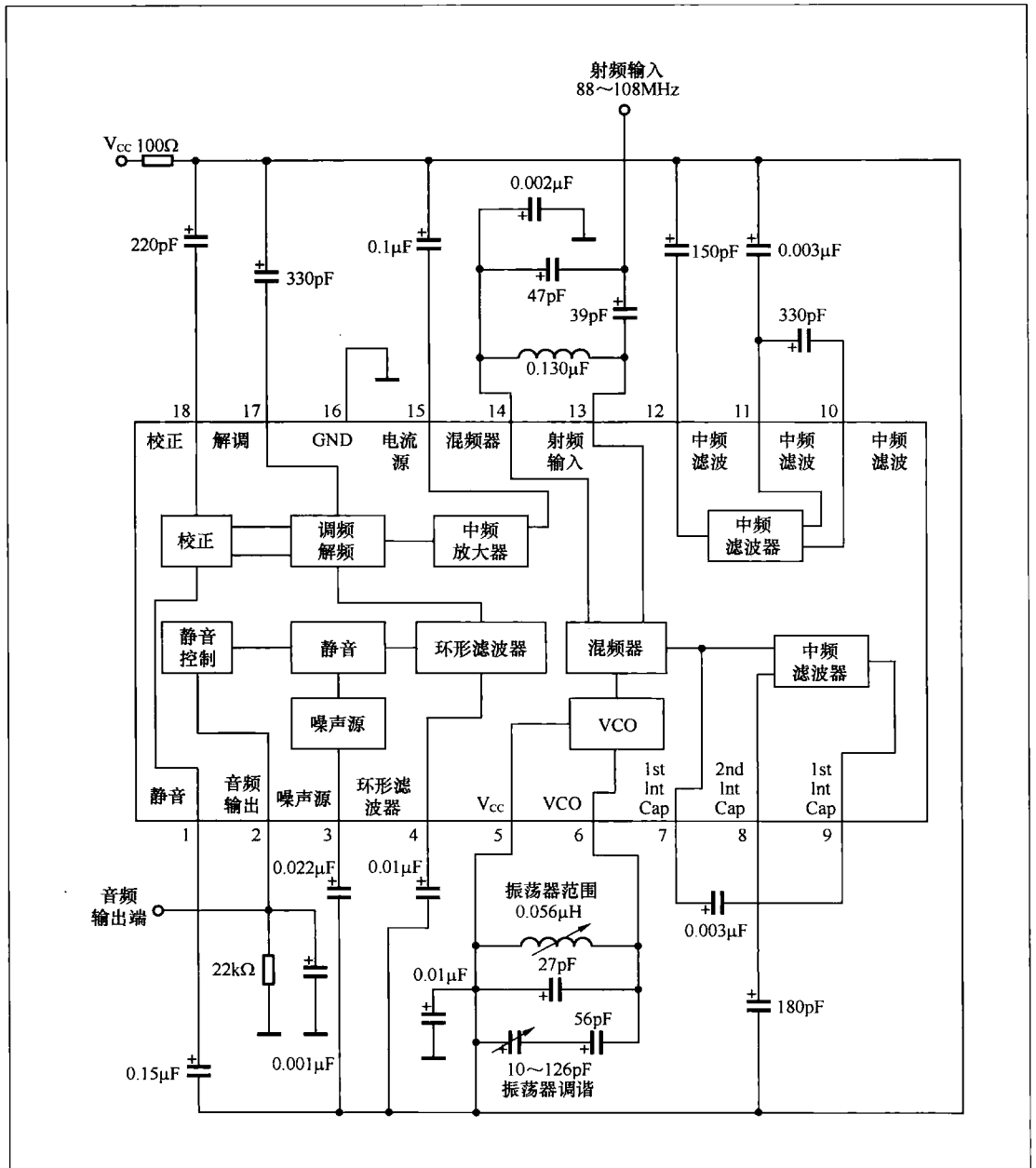


图26-4：TDA 7000是一个FM无线电的子系统IC，你只需要添加少量的外部元件就可以做成一个完整的接收器。

# 运算放大器

线性集成电路有很多种类，一个最常见例子就是运算放大器。运算放大器这个名字出现在模拟计算机时代。在模拟计算机中，数字用模拟电压来表示。数值越大，电压越大。这样的计算机使用直流放大器完成数学运算，例如加法和减法，甚至微积分运算。

现代 IC 运算放大器是高增益直流耦合差分放大器。差分放大器有两个输入端，它对两个输入信号的差值进行放大。直流耦合放大器可以放大直流信号，也可以放大交流信号。

我们可以根据 6 个理想的放大器参数来评估运算放大器。理想的运算放大器应该有：

- 1) 无穷大的电压增益；
- 2) 无穷大的输入阻抗；
- 3) 零输出阻抗；
- 4) 无穷大带宽；
- 5) 噪声为零；
- 6) 时间和温度变化时，无信号漂移。

现代 IC 运算放大器接近实现前三个条件，但不如后三个条件做得好。但制造商坚持不懈地努力提升这些方面的性能。

在图 26-5 的示意图是包含一个 741 运算放大器的内部电路。我们不需要关心这个电路的工作原理，事实上，甚至根本不用考虑。大

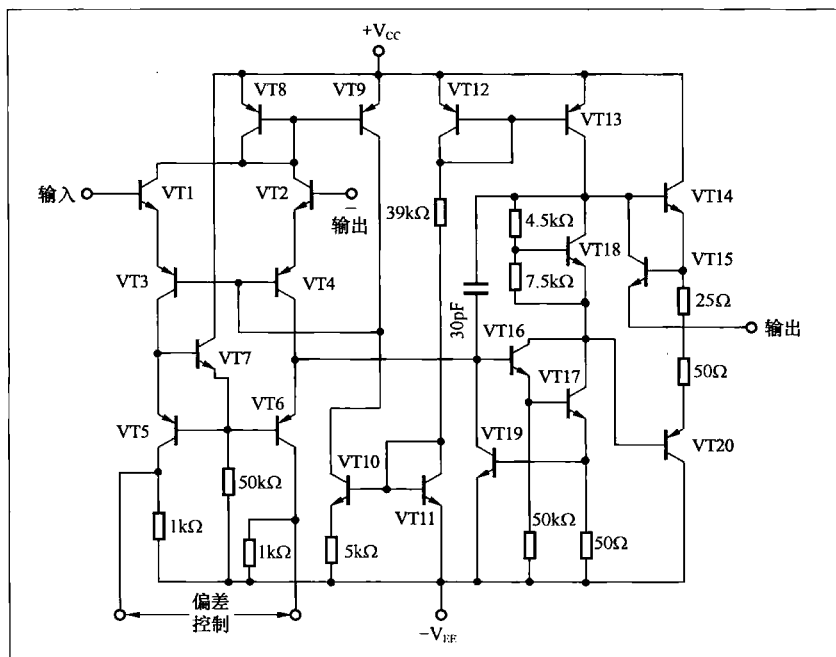


图26-5 这张图是一个741运算放大器电路示意图。电路中有同相输入端和反相输入端，以及一个输出端。向运算放大器提供正向电压输入和负向电压输入，可以把运算放大器作为差分放大器来使用。你可以通过偏差控制校正，调整放大器，以保证两个输入端的信号相同时不会产生输出。

多数的工程师并不完全了解运算放大器的内部电路，但这不是个问题。这是 IC 电路的优点，你不需要知道这个“黑盒子”内部的工作状态。制造商提供的数据表告诉你接入到每条 IC 引线上的电压和信号，并提供应用指南，帮助电路设计者在各种各样应用中广泛使用。

在这个集成电路芯片中有 20 个晶体管。所有的三极管都在同一个衬底上，所以它们的特性非常地匹配。如果用独立的三极管和电阻器来构造与之相似的运算放大器，你不可能获得成功。

你必须注意图中的两个输入端。一个有 + 输入标签，表示同相输入端。另一个有 - 输入标签，表示反相输入端。

图 26-6 为运算放大器的示意图符号。图 A 显示一个正弦波信号接入到同相输入端，放大后的输出信号与输入信号相位相同。图 B 显示一个信号接入到反相输入端的信号，这次放大后的输出信号和输入信号之间具有  $180^\circ$  的相位差。这就是这两个输入端的区别。在反相输入时，输入信号向正向变化时，输出信号向反相变化。

在 IC 中有两个工作电压输入端。很多运算放大器需要双电源工作。一个电源相对于接地端输入正电压，第二个电源相对于接地端为一个负电压。这对运行差动放大器非常重要。

假设你施加一个输入信号到 + 输入端，另一个同样的信号输入到 - 输入端。如果这两个信号之间的差值是 0V，那么输出信号应为 0V。

有时两个输入放大器不能完全平衡，这意味着对于相同的输入信号会有一些输出信号。这时我们要用到最后两个运算放大器连接端。在输入信号相等时，你可以调节偏差控制，使输出信号为 0。

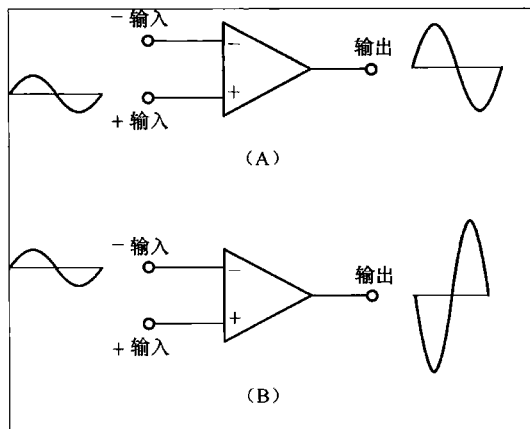


图26-6：图 (A) 是将一个正弦波信号接入到放大器同相输入端，输入和输出信号相位相同。当输入信号达到正向最大值时，输出信号也达到正向最大值。图 (B) 是将一个信号接入反相输入端，在这种情况下，输入信号和输出信号具有  $180^\circ$  的相位差。在输入信号达到正向最大值时，输出信号达到负向最大值。

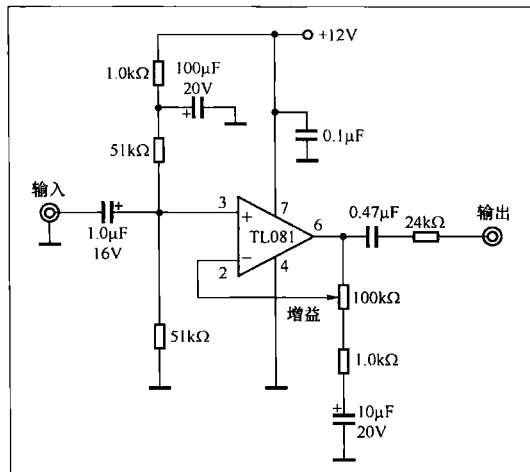


图26-7：这是一个音频放大器的示意图。你可以用它来增大从话筒输出的信号，输入和输出连接器是同轴类型，因为你可以用屏蔽线或同轴电缆来制作这些连接。

你可以用运算放大器制作一个音频放大器。图 26-7 显示的放大器，你可以用来增大话筒的输出信号。这个电路可以给无线电发射机或其他设备提供信号。负电源电压端接地。在这个电路中，因为只有一个输入信号连接到反相输入端，因此在这个电路中你不必使用一个负电源电压。反相输入端通过增益控制电阻器与输出端相连，这给放大器提供了一些负向反馈，从而稳定了电路的工作。

有源滤波器是另一种常见的运算放大器。图 26-8 是一个你可以组建的音频带通滤波器。这个电路的中心频率为 750Hz，因此你可以把它作为业余无线电收音机的外接 CW（连续波）滤波器，以便更容易听抄莫尔斯电码。

运算放大器还有很多其他用途。这一节的描述将帮助你熟悉这一类器件。

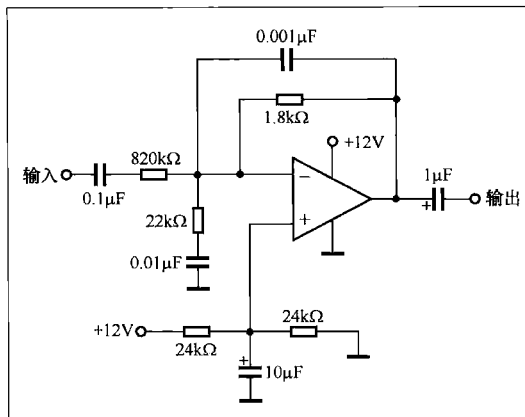
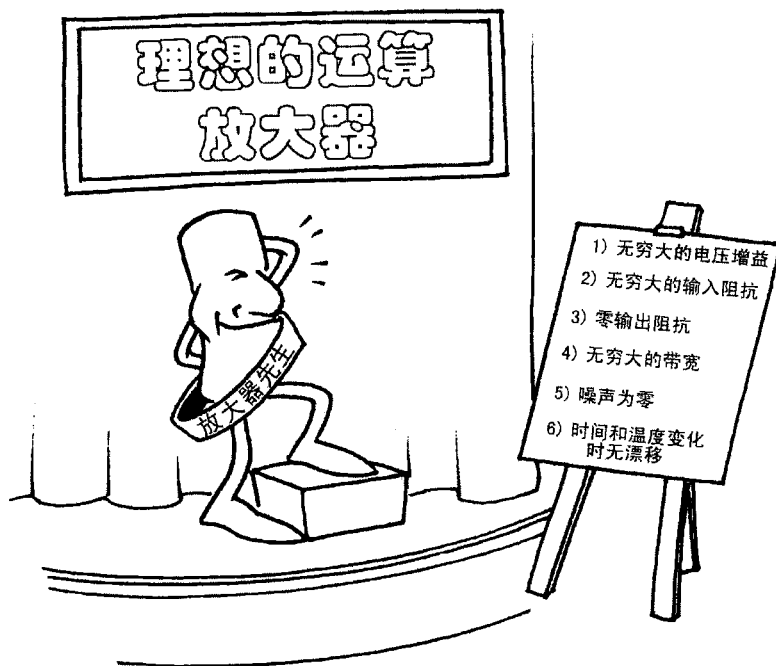


图26-8：这个有源带通滤波器适合于业余无线电收音机的CW滤波器，它的中心频率为750Hz，你可以使用一个741或TL081运算放大器。



# 数字器件

**数**字电子学是现代电子学的一个重要分支。在数字电路中，信号用确切的电压值来表示。当信号电压落在这些确定的值之间时，需要进行向上或向下的调整，以达到确定值。图 26-9 为用数字表示的正弦波。注意，梯形外形的值。

很多数字电路都使用两个电压电平，我们称这样的电路为二进制电路。二进制数字系统只用两个数字，0 和 1。我们用二进制数 0 和 1 表示两个电压电平或电路状态，它们可以

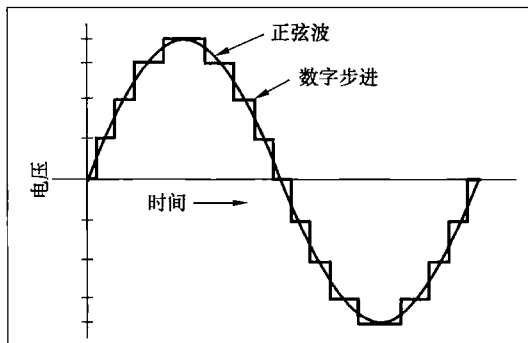


图26-9：这个阶梯状图形是用数字形式表示的一个正弦波。数字信号有特定详细的大小。如果模拟信号的值落入在两个信号阶梯之间，数字信号调整为向上或者向下最接近这个值。

表26-1：反相器真值表（“非”函数）

输入 (A)	输出 (B)
0	1
1	0

表26-2：“与”门真值表

输入 (A)	输入 (B)	输出 (C)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

表26-3：“或”门真值表

输入 (A)	输入 (B)	输出 (C)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

表示电路的“通”和“断”状态。在数字通信系统中，二进制数状态可以表示空号和信号，例如莫尔斯电码或无线电传打字机。

实际电压取决于电路，但是“断”（OFF）状态的电压通常是 0V，“通”（ON）状态的电压可以是 5V，也可以是 12V 或其他值。而有些电路恰好相反。图 26-10 为二进制电路中的一串数字脉冲。

数字计算机中使用数字逻辑电路。这些电路用二进制编码系统来表示十进制数字。计算机可以用二进制数字完成很多复杂的任务。

数字逻辑电路测量一个或多个输入信号，输出 1 或 0。第一代数字计算机中用电子管和机械继电器组成逻辑电路。这些庞大的计算机需要很多能量，并且会产生大量的热能。后来，晶体管取代了电子管和继电器。



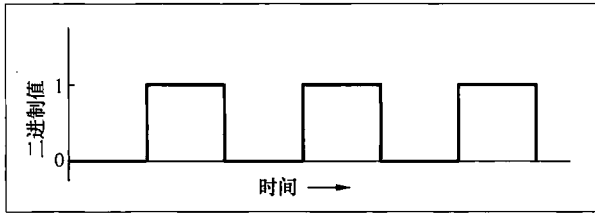


图26-10：这些脉冲表示从二进制数字电路中的输出信号，输出电路是“通”（ON）用二进制数1表示，“断”（OFF）用二进制数0表示。

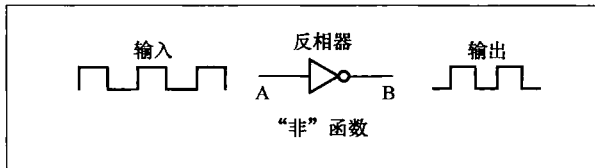


图26-11：这个符号是反相电路的示意图，输入和输出的信号说明了反相器的工作原理。

数字集成电路取代了用单独晶体管制造的逻辑电路。一个数字 IC 是一个完整的逻辑网络，通常只需要 1 个或多个输入信号和一个电源。大多数数字 IC 可以产生一个或多个输出信号。

有很多逻辑函数，每个函数有一个数字 IC 或者多个 IC 的组合。由于数字 IC 实在太多，不可能一一讨论每个数字 IC 以及它们的工作原理。我们将介绍几种常用的电路，使你对数字 IC 有尽可能多的了解。

一个简单的逻辑函数就是反相器。反相器接收一个输入的数字信号，产生一个相反的输出信号。图 26-11 为反相器的示意图符号。我们用符号表示输入和输出波形。当输入信号为 1 时，输出信号为 0。当输入信号为 0 时，输出信号为 1。我们有时也称之为“非”逻辑函数。反相器符号输出端上的小圆告诉你，电

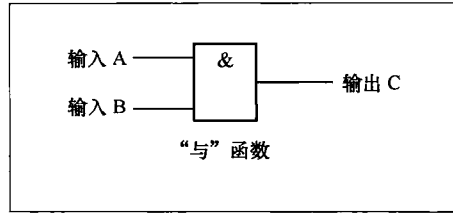


图26-12：这个符号表示两个输入端的“与”门。只有两个输入信号都为1时，才会输出1。如果两个或者一个为0，那么输出就为0。

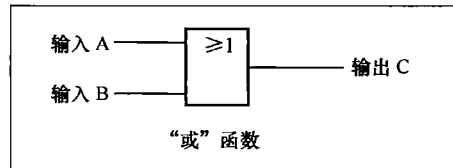


图26-13：我们用这个符号表示两个输入端的“或”门的示意图。只要有一个输入端是1，那么输出就是1。

路执行的是“非”功能，也就是反相功能。

表 26-1 为反相器真值表，真值表列出了所有可能输入信号的组合，也列出与输入信号对应的输出信号的值。真值表是一个非常有用的工具，帮助你理解逻辑电路的工作原理。

在逻辑“与”电路中，有两个或多个输入。只有当所有输入都是 1 时，输出才是 1。如果所有的输入都是 0，或者是有些输入是 1，其他输入是 0，输出也是 0。表 26-2 为逻辑“与”电路的真值表。

图 26-12 为两个输入端的“与”门的示意图。（门是一个用来描述数字逻辑 IC 的术语。）

另一个逻辑电路是“或”门。“或”电路有两个或多个输入，一个输出。只要有一个输入是 1，输出就是 1。图 26-13 为两个输入端的“或”门示意图。表 26-3 为这个电路的真值表。

你可以使用这些数字 IC 电路模块构造出几乎是任何可以想象得到的逻辑电路。制造商把这些模块集成在集成电路中。锁存器是一个存储单个二进制数字或比特信息的数字电路。当你在接收机上按下 CAPSLOCK 这个键，锁存器会记住你按下的这个键（即，它的输出原来是逻辑 0，现在更改为逻辑输出 1）。当你再次按下 CAPSLOCK 键，锁存器的输出恢复到逻辑 0。

当你在键盘上按下一个数字或者字母的键时，8 个锁存器将存储代表这个字母或数字的 8 个位的信息。这 8 个位是一个完整字节的信息。

图 26-14A 所示的锁存器由一个“或”电路和反相器组成。B 图显示的是锁存器作为单独一个 IC 的示意图符。C 图为锁存器的真值表。两个输入是 SET(S) 和 RESET(R)。

当  $S=1$ ， $R=0$  时，输出端 Q 是 1。这是 SET（设置）的命令。当  $S=0$ ， $R=1$  时，输出端 Q 是 0。注意，锁存器有第 2 个输出端，用来表示  $\bar{Q}$ （读为 Q 非，表示 Q 的反向值，或者说是 Q 的相反值）端的输出值总是和 Q 端的输出值相反。有一个例外，如果你设  $S=1$ ，和  $R=1$ ，这就是一个无效的逻辑指令。

当 S 和 R 的输入值都是 0 时，输出值不变，这个被称为记忆指令。通过真值表也可以看到，如果两个输入值都是 1，那么两个输出值将都是“？”。实际上，它们的输出值都是逻辑 1。记住，如果“与”门有一个或者两个输入值为 1，它们的输出值就为 1。而问号表示如果无效/不合逻辑的指令跟在记忆指令之后，不可能预测输出结果是 Q 还是 Q 非。

如果  $S=1$ ， $R=1$ ，我们给锁存器输入的就是一个无效或者是非逻辑的指令。我们告诉锁

存器同时 SET 或者 RESET。就像告诉一辆汽车，让它同时前进和后退。你可以这么输入指令（对锁存器可以，但汽车不行），但对于这个无效的指令存在一个大的问题：如果同时将 S 和 R 从逻辑 1 改变到逻辑 0，则无法确定输出结果。在使用锁存器时记住这一点。

和锁存器非常相似的一个数字元件是双稳态触发器。它们都有 Q 和  $\bar{Q}$  输出端，也都有两个控制元件的输入端。不过双稳态触发器还增加了一个输入端，称为时钟输入端。锁存器会立即响应它的输入信号，而双稳态触发器需要时钟输入信号发出指令后才开始响应输入信号。

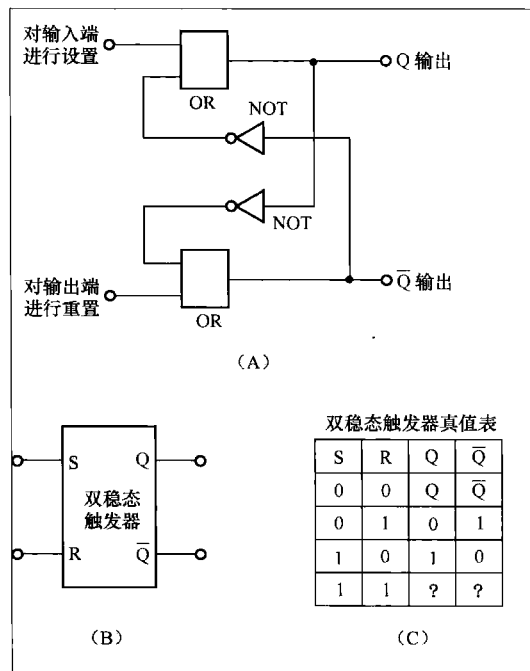
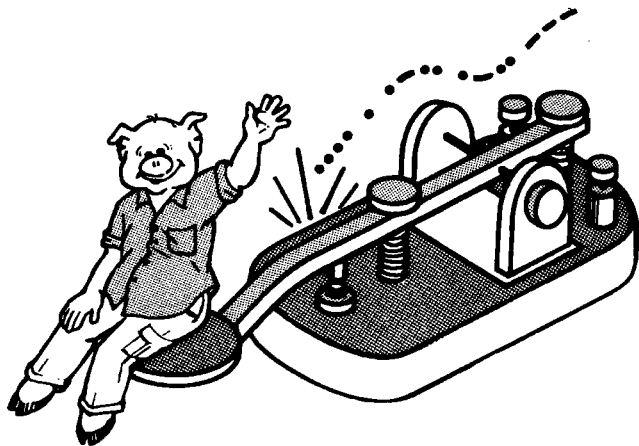


图26-14：你可以用两个“与”门和两个反相器来构造触发器。图（B）为表示IC触发器的示意图符号。图（C）为这个触发器的真值表。

有多种构造技术用于制造数字 IC。通常，你使用的器件应该由同一种结构方法制造。一种常见的数字 IC 家族称为晶体管—晶体管逻辑电路，或者叫 TTL。这个名字来源与制造 IC 所用的双极性晶体管有关。7400 系列中的部分数字简要地说明了 TTL IC 参数。一个 7404 IC 封装内有 6 个反相器。一个 7432 中有 4 个“或”门。

另一种常见的数字 IC 家族中，在同一个底座上同时使用 P 型沟道和 N 型沟道金属氧化物半导体场效应管。我们称 P 型沟道和 N 型沟道 MOSFET 互补。因此我们称这样的结构为互补型金属氧化物半导体，或简称 CMOS。4000 系列的部分数字说明 CMOS IC 的参数。例如，4069 有 6 个反相器换器，而



4081 有 4 个“与”门。还有其他逻辑电路家族，包括 ECL，HCT（或称为  $I^2L$ ）。每一种都有他们自己的优点（例如速度和成本）和限制（例如好点与抗扰性），如果你要使用逻辑电路，你一样要了解这些不同家族的逻辑电路。

# 定时器

有一些专门用途的数字集成电路，它们由其他多个数字器件组合起来，制造成一个单独的 IC。你可以购买一块 IC，用于计算信号脉冲或者按预设值分割一系列脉冲信号。你可以购买芯片把数字信号转换成模拟信号，或者把模拟信号转换成数字信号。有很多 IC 是为数字计算机专门设计的。

这一节我们将学习定时器 IC。这个非常有用的结构单元有着非常广泛的用途。555 是最常见 IC 定时器，电路如图 26-15 所示，图中对定时器的引脚做了标注。

现在让我们来分析图 26-15 中的电路，通

过它学习定时器 IC。正常情况下，触发引脚 2 的电压为 +5V。通过施加一个负的输入脉冲，或用一根导线将引脚 2 和地（引脚 1）接触，我们将在一瞬间把引脚 2 的触发导线与地接触，这会在引脚 3 产生一个正的输出脉冲，我们称之为 Q 输出。从电源流出的电流经过 R1 给电容器 C1 充电。当电容器电压超过输入电压的 2/3（在此例中大约是 3.3V）时，引脚 7 迅速放电，接着输出端重新为 0。输出点保持为 0，直到输入下一个负向触发脉冲。

通过洗手间的操作，可以帮助你理解什么是单稳多谐振荡器或称一次多谐振荡电路。

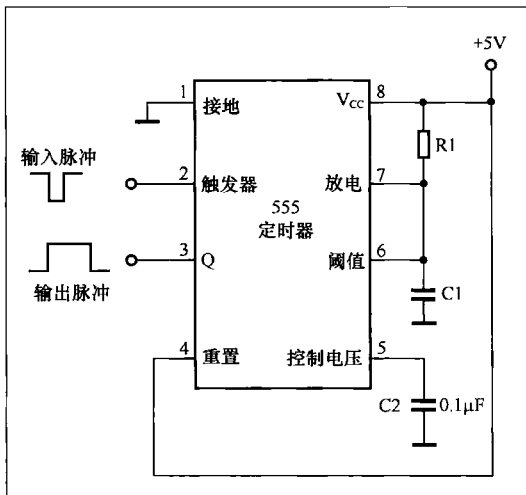


图26-15：555定时器IC电路是一个单稳多谐振荡器。触发引脚（引脚2）上的负向脉冲在输出端（引脚3）产生一个正向输出脉冲。电阻器R1和电容器C1决定了输出脉冲的持续时间。

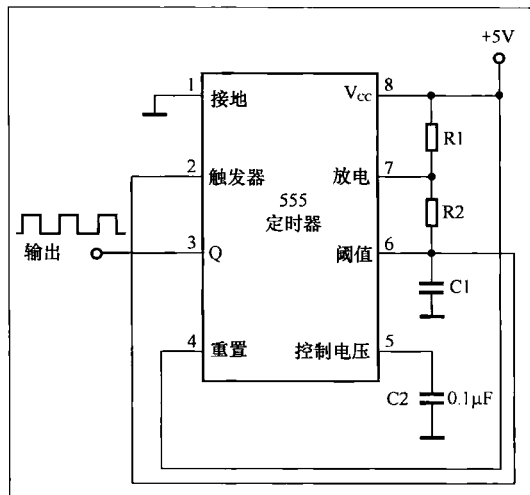


图26-16：555定时器IC也可以构成一个无稳态多谐振荡器。在没有任何输入信号的情况下，这个电路能产生一串输出脉冲。电阻器R1、R2和电容器C1确定了输出脉冲的频率。

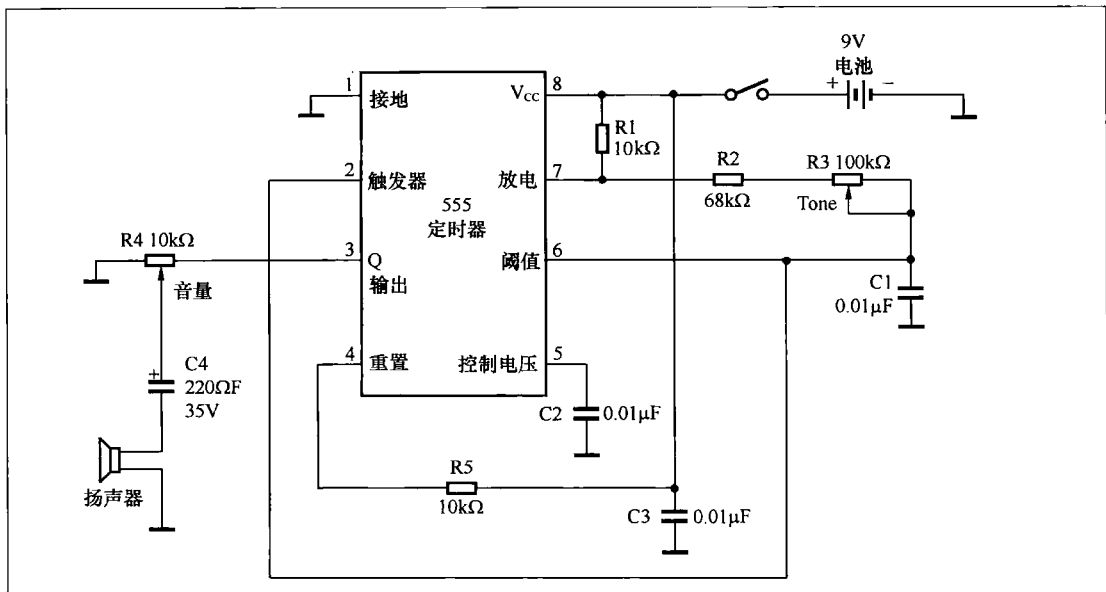


图26-17：你可以在一块实验电路板上搭建这个无稳态多谐振荡器电路。在收听输出信号时，调整R3和R4。你也可以在电路中使用其他的电阻器和电容器，用莫尔斯电码电键替代开关，你就可以得到一个电码练习振荡器了。

洗手间是一个液态单稳多谐振荡器在不冲洗，水箱里装满水时，洗手间全天处于稳定状态，直到你按下冲厕按钮（用手触发信号）。触发按钮后，洗手间处于不稳定状态（水箱内水放空，水管的水重新将水箱装满水）。水箱再次装满水，洗手间重新进入稳定状态，耐心等待下一次的触发。这个触发也许是一会过后，或者是几个星期之后。“单”的意思就是一次，所以单稳态多谐振荡器有一个稳定的状态。它被触发进入不稳定状态后，总要恢复到稳定状态。多谐振荡器意思是在另一个输出条件间跳转的电路。

输出脉冲的长度依赖于R1和C1的值。因此这两个因素设置了电路的时间常数。在你学习电容器电路时，学习了如何计算时间常数，用以欧姆为单位的电阻值，乘以用法拉为单位的

的电容值就可以求出时间常数（秒）。时间常数越大，输出脉冲的长度就越长。

$$T = 1.1 \times R_1 \times C_1 \quad (26-1)$$

其中：T为以秒为单位的输出脉冲的长度。假如在图26-15电路中，电阻器R1为10kΩ，电容器C1为10μF。那么输出脉冲的长度为多大呢？

首先我们把单位进行转化，电阻用欧姆表示，电容用法拉表示。

$$10\text{k}\Omega = 10 \times 10^3 \Omega$$

$$10\mu\text{F} = 10 \times 10^{-6}\text{F}$$

现在把这两个值带入到公式26-1中。

$$T = 1.1 \times 10 \times 10^3 \Omega \times 10 \times 10^{-6}\text{F}$$

$$T = 1.1 \times 100 \times 10^{-3} = 0.1\text{s} = 110\text{ms}$$

在此例中，每一个输出脉冲的持续时间

为 0.11s。

图 26-15 电路中有两种可能的状态。只要引脚 2 上的电压保持在大约 5V，输出电压就为 0。这是电路的稳定状态。当引脚 2 的电压为 0（接地）时，在引脚 3 的输出电压上升到 5V。不过，这个电路状态只持续很短的时间，这是个不稳定的状态。

这类电路有很多应用。我们把具有一个稳定状态和一个不稳定状态的电路称为单稳多谐振荡器。单稳态说明电路只有一个稳定的状态。多谐振荡器是说电路会在两个输出状态之间跳跃。你可以把单稳多谐振荡器做成独立的元件，但是 555 定时器提供了较为方便的包装。

图 26-16 为另一个用途广泛的多谐振荡器。它是一个不稳定的多谐振荡器，也称自由摆动多谐振荡器。不稳定的多谐振荡器有两个不稳定状态（高或低，1 或 0），电路会在这些输出结果之间变化。在没有任何输入信号的情况下，这个电路会不停地产生一串输出脉冲。这个电路中我们也使用了 555 定时器。你可以用其他元件来构成这个非稳定的多频振荡器，但用 555 定时器，只需要几个额外的电阻器和电容器就可以构成这个电路。

这个电路的工作原理与图 26-15 类似。当电容器 C1 通过 R1 和 R2 进行充电，直到到达 2/3 输入电压时，输出（引脚 3）是高电位。瞬间，引脚 3 电位降低，然后电容器通过 R2 放电，直到到达 1/3 输入电压。即刻，C1 开始充电，输出高电位，整个过程重新开始。

R1, R2 和 C1 的值确定了输出脉冲的持续时间和脉冲之间的间隔。图 26-16 中的输出脉冲一半时间是“开”(ON)状态，一半时间是“关”(OFF)状态。你可以通过选择电阻器和电容器

的值来设置几乎任何输出脉冲的时间。

我们可以用公式 26-2 计算输出脉冲的频率。在这个公式中，电阻值单位必须是欧姆，电容单位必须是法拉。

$$f = \frac{1.46}{[(R_1 + (2 \times R_2)) \times C_1]} \quad (26-2)$$

其中  $f$  是频率，单位为赫兹 (Hz)。

让我们选择一个阻值为 10k $\Omega$  电阻器 R1 和阻值为 100k $\Omega$  电阻器 R2，挑选一个容量为 0.01  $\mu$ F 电容器 C2。此时，电路输出信号的频率为多少呢？

$$f = 1.46 / (10 \times 10^3 \Omega + (2 \times 100 \times 10^3 \Omega)) \times 0.01 \times 10^{-6} \text{F}$$

$$f = 1.46 / (10 \times 10^3 + 200 \times 10^3) \times 0.01 \times 10^{-6}$$

$$= 1.46 / 210 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}$$

$$f = 1.46 / 2.1 \times 10^{-3} = 695 \text{ Hz}$$

这个电路的输出信号频率在你可以听到的范围之内。如果你把输出信号连接到扬声器上，你将听到声音。

图 26-17 为另一个非稳定的多谐振荡器，这是一个非常好的实验电路。电阻器 R2 和 R3 替代了图 26-16 电路中的 R2。R4 用作音量控制。C4 通过对方波输出脉冲的调整，改善音质。

尝试改变 R1, R2, R3 和 C1 的值，然后收听调整 R3 和 R4 后的效果。用公式 26-2 计算出这个电路的输出频率。当你增加 R2 和 R3 的值后，在计算频率时，要替换掉公式 26-2 中的 R2 的值。我们也可以用公式 26-2 计算 R3 不存在时的输出频率。通过计算，给出你所期盼的电路输出音调范围。

你可以用这个电路作为电码练习振荡器来学习莫尔斯电码。用电键替代电路中的开关 S1。你可以在很小的实验电路板搭建这个电路。

复习检测：-----

26.1 线性集成电路通常使用以下类型的信号：

- a) 方波
- b) 外星人信号
- c) 数字数据串
- d) 正弦波

26.2 运算放大器得名是因为他们：

- a) 被外科医生用于医疗手术
- b) 通常被用来完成数学运算，包括微积分
- c) 非常适合做放大运算
- d) 被海勒姆先生发明

26.3 尽你所能列出理想运算放大器的特性。

26.4 在集成电路中，集成的含义是什么？

26.5 在运算放大器电路中利用负反馈的目的是：

- a) 稳定电路并设置放大器的增益
- b) 把负电压变成正电压
- c) 减少运算放大器功率消耗
- d) 把负反馈变成有用的反馈

26.6 有一个输入端和一个输出端的数字集成电路是：

- a) 与门
- b) 或门
- c) 反相器
- d) 与非门

26.7 数字逻辑门的真值表是：

- a) 每一人冷静地坐在着，停止说谎
- b) 列出所有可能的输入组合，并列出一个组合的输出值
- c) 是你寻找数字IC电路规格的首选之地
- d) 说实话，我真的不知道真值表示什么

26.8 数字锁存器和双稳态触发器的区别是什么？

26.9 “一次”电路的另一个名字是：

- a) 单稳多谐振荡器
- b) 非稳态多谐振荡器
- c) 双稳态触发器
- d) 锁存器

答案：-----

26.1 d

26.2 b

26.3 无限增益，无穷大输入阻抗，零输出阻抗，无穷大带宽，零噪声，时间和温度的零漂移。如果你能记住超过其中3个，鼓励一下自己。

26.4 一片半导体材料上包含二极管、晶体管、电容器和电阻器。这是通过给半导体材料，通常是硅，添加N型或P型杂质。通过这样的方法，组成电路所需要的元件可以集成在一片半导体材料上。

26.5 a

26.6 c

26.7 b

26.8 锁存器和双稳态触发器都有两个输出端，记忆或者存储一个位的数字信息。锁存器会立即响应输入端输入的信息，而双稳态触发器有一个时钟输入端，所以双稳态触发器只有在时钟输入端发出信息后才会改变输出端。

26.9 a

## 附录A

# 科学记数法

$$250\ 000 = 25 \times 10^4$$

$$5 \times 10^5 = 500\ 000$$

### 目录

- 幂和科学记数法
- 幂的运算法则
- 在你的计算器上使用指数表示法
- 什么是指数表示法？它和科学记数法的区别是什么？



# 幂和科学记数法

在现代电子学中经常会遇到较大或是非常接近于 0 的较小的数。对这两种数而言，由于 0 太多，要写清楚是极其困难的。就是再仔细的人，在对这些数进行计算时，也很可能丢个 0 或多加个 0。对我们绝大多数人而言，对它们进行计算简直就是个噩梦！

小手电筒中的灯泡里大约有 0.1A 的电流流过。而从烟雾探测器中 9V 的电池中流出的电流接近 0.000010A。如果用每秒钟流过的电子数来计算它的电流，大约是每秒 63 000 000 000 000 个电子。

一个电子电路中，它的电阻是 910,000 Ω。集成电路中微导体（在集成电路中连接各个元件的导线）的宽度大约是 0.000 000 5m，或者称为宽 0.000 5mm。相比之下，机械铅笔中的石墨的直径大约是 0.5mm。因为零的数量，大数字和小数字都很难应付。

$$\begin{array}{r} 250000 \\ \times 500000 \\ \hline 000000 \\ 000000 \\ 000000 \\ 000000 \\ 000000 \\ 1250000 \\ \hline 125000000000 \end{array}$$

图A-1：与你想要解决的方法相比，这么做看上去很乱。只要你有一丁点儿的粗心，就彻底失败。图A-2 我们可以很容易将较大的数写成幂的形式。

$$\begin{array}{l} 250\ 000 = 25 \times 10^4 \\ 5 \times 10^5 = 500\ 000 \end{array}$$

图A-2：我们可以很容易将较大的数写成幂的形式。

比如，当你计算 250 000 与 500 000 的乘积时，见图 A-1，很容易把 0 漏掉或是跳行。即使用三位分节法（留空隙）来间隔，也很容易把结果（125 000 000 000）算错。

有更简便的方法去弄清 0 的个数。把一个数每乘以 10，就是将这个小数点向右移一位，同时添个 0。所以你可以这样记数：先将所有非 0 的数位写下来，每少写一个 0，就在后面乘以一个 10。如，250 000 记为  $25 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ （现在你也许认为这并不是一个更好的办法，但请耐心看下去）。

若将一个数自乘，就称作对它做了乘方。10 的 2 次方又称 10 的平方，或记做 10<sup>2</sup>。2 是 10 的指数，就是 10 × 10，或 100。

回到开头的例子，我们可以将乘法运算中的第一个因数（250 000）写成  $25 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$ 。用乘方表示，就是  $25 \times 10^4$ 。4 是 10 自乘的个数。如图 A-2 所示。开头，我们是将小数点向右每移一位（添一个 0）就乘以一个 10。反过来，我们也能将  $25 \times 10^4$  写成一般形式，即 25 后添 4 个 0（250 000）。这表明，幂，即 10 的乘方，告诉我们

$$0.0000045 = 4.5 \times 10^{-6} = 45 \times 10^{-7}$$

图A-3: 当我们将较小的数(非常接近于0)写成指数或科学记数法的时候, 10的指数是负值。

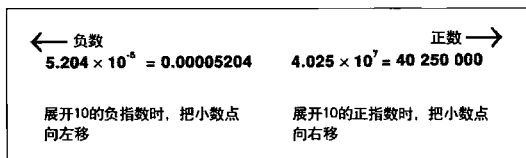
小数点移动的位数。在例子中的第二个因数(500 000)可以写成 $5 \times 10^5$ 。如图 A-2 所示。当我们把数用 10 的乘方的形式书写的时候, 可以写成幂的形式。再举一例, 我们可以将数 670 310 000 写成  $67\ 031 \times 10^4$ 。

而对于那些小于 1, 又比 0 大不了多少的数而言, 有类似的问题。这些数在小数点后有很多 0, 比如 0.000 004 5。你也许会发现将小数点向左移一位和除以 10 有一样的效果。你也许会想到, “那么, 这是否意味着可以将 0.000 004 5 写成  $0.45 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10$  或是  $45 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10$  ? ” 答案是肯定的! 你可以将这个数写成上述的任何一种形式。

如果我们把非 0 的部分 45 先写下来, 就要除以 7 次 10 才能和原数相等。我们可以将除以 10 的部分先组合起来写成 10 的乘方, 即  $10^7$ 。现在可以记为  $45 \div 10^7$  (请注意, 我们也可以记为  $0.45 \div 10^5$  或是  $4.5 \div 10^6$ 。) 如果你愿意, 还可以将它写成分数的形式:

$$45/10^7$$

在用幂进行计算的时候, 有一些技巧。如果 10 的乘方在分数的分母(分数线下面), 我们可以通过改变指数而将它放在分子(分数



图A-4: 我们可以很容易将幂或科学记数法形式的数还原。

线上面)上。

$45 \div 10^7$  表示将 10 除以 7 次, 可以改写为  $45 \times 10^{-7}$ 。-7 告诉我们要将这个数还原, 需要将小数点向左移 7 位。如果我们将小数点向左移 2 位, 到 4 的前面, 还有 5 个位次要移, 所以就是  $0.45 \times 10^{-5}$ 。见图 A-3。

当你运用幂的形式计算时, 想象一下数轴。若 10 的指数为正, 则小数点向右移(就像正数那样); 若 10 的指数为负, 则小数点向左移(就像负数)。见图 A-4。

有一种特殊的幂的形式, 叫做科学记数法。科学记数法要求写成小数点前只能有一个非 0 的数乘以 10 的指数的形式。

看以下几个例子:

数字符号	科学记数法
8.19	$8.19 \times 10^0$
62.4	$6.24 \times 10^1$
536.2	$5.362 \times 10^2$
7209	$7.209 \times 10^3$
0.819	$8.19 \times 10^{-1}$
0.0624	$6.24 \times 10^{-2}$
0.00536	$5.36 \times 10^{-3}$

# 幂的运算法则

让我们先来熟悉一下有关幂的一些运算法则。在解决有关电子学的问题中，会将数以幂（科学记数法或工程记数法）的形式输入计算器。在计算结果中，计算器会记录10的指数。了解幂的运算法则会帮助你更好的理解计算过程，同时帮助你查看结果是否合理，因为我们有时在计算器上会按错数字。在使用计算器前让我们先了解幂的一些基本法则。

第一条法则是有关乘法。对幂（或科学记数法）形式的数做乘法时，先把数字部分相乘，然后将10的指数相加，把两者合并书写就是答案。

让我们看一个例子——250 000 乘以 500 000。先把它们写成指数记数法的形式：

$$250\ 000 = 25 \times 10^4$$

$$500\ 000 = 5 \times 10^5$$

然后，写成乘法运算形式：

$$\begin{array}{r} 25 \times 10^4 \\ \times 5 \times 10^5 \\ \hline \end{array}$$

将数字部分相乘得到125（即： $25 \times 5 = 125$ ），将10的指数相加得到 $10^9$ （即： $4 + 5 = 9$ ）。将两部分合并就是答案：

$$25 \times 10^4 \times 5 \times 10^5 = 125 \times 10^9$$

你可以通过将小数点向右移9位，将这个数还原：

$$125 \times 10^9 = 125\ 000\ 000\ 000$$

或者你可以写成：

$$125 \times 10^9 = 1.25 \times 10^{11}$$

记住，我们通过把125除以 $10^2$ 得到1.25，

所以数字不变，而 $10^9$ 乘以 $10^2$ 。

图A-5说明了这个过程。如果你不想用指数形式做乘法，你可以试试。这对证明两种方法得到的结果相同很有意义。但在处理那些0的时候，要格外细心。如果答案不一致，回头检查，你很有可能在哪儿弄错了！

若计算50 000 乘以0.0000045呢？让我们将这些数写成指数的形式，然后写成做乘法的竖式。见图A-6。

$$500\ 000 = 5 \times 10^5$$

$$0.000\ 004\ 5 = 45 \times 10^{-7}$$

将数字部分相乘，将指数相加，得到：

$$5 \times 45 = 225 \text{ 和 } 10^{5+(-7)} = 10^{-2}$$

我们怎么会得到 $10^{-2}$ 呢？别忘了有一个指数是-7，所以当5和-7做加法时，我们有：

$$5 + (-7) = -2$$

见图A-6。

$$\begin{array}{l} 250\ 000 = 25 \times 10^4 \\ 500\ 000 = 5 \times 10^5 \\ \text{(A)} \\ \begin{array}{r} 25 \times 10^4 \\ \times 5 \times 10^5 \\ \hline 125 \times 10^4 \cdot 5 = 125 \times 10^9 \\ \text{(B)} \end{array} \\ 125 \times 10^9 = 125\ 000\ 000\ 000 \\ \text{(C)} \end{array}$$

图A-5：将相乘的数写成指数记数法的形式，先将数字部分相乘，再将10的指数相加。

我们的第二条法则是关于除法。将两个写成指数记数法（或科学记数法）的数相除时，先将数字部分相除，再将分子部分指数减去分母部分的指数（分母在分数线下面，而分子在分数线上面）。图 A-7 (A) 就是两个写成指数记数法和科学记数法的数做除法。图 A-7 (B) 部分告诉我们如何将 10 的指数从分母转化到分子上。图 A-7 (C) 是最终答案。

你可能已经发现在做除法前，可以将分母和分子同时约去相同个数的 0。接下来是关于 10 的乘方的除法法则。比如，分子有 6 个 0，而分母有 7 个 0，可以约掉 6 个 0。图 A-8 (A) 的图 A-8 (B) 部分说明如何使用指数记数法解决问题。

再举个例子，250 000 除以 500 000。我们可以写成：

$$\frac{25 \times 10^4}{25 \times 10^5} = 5 \times 10^{-1} = 0.5$$

$$\begin{aligned} 500\ 000 &= 5 \times 10^5 \\ 0.0000045 &= 45 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (\text{A})$$

$$\frac{45 \times 10^{-7}}{\times 5 \times 10^5} \\ \underline{225 \times 10^{-7+5}} = 225 \times 10^{-2} \quad (\text{B})$$

$$225 \times 10^{-2} = 2.25 \quad (\text{C})$$

图A-6：对含有负指数的数做乘法时，要将指数部分当作负数来计算。

$$\frac{764\ 000\ 000}{382\ 000} = \frac{764 \times 10^8}{382 \times 10^3} = \frac{7.64 \times 10^8}{3.82 \times 10^5} \quad (\text{A})$$

$$\frac{7.64 \times 10^8 \times 10^{-5}}{3.82} = 2 \times 10^{8+(-5)} \quad (\text{B})$$

$$2 \times 10^3 = 2000 \quad (\text{C})$$

图A-7：对指数形式的数做除法，首先将数字部分相除，然后改变分母上10的指数的符号并将其移到分子上，最后，将数字和指数部分合并写出。

$$\frac{75\ \cancel{000}\ \cancel{000}}{50\ \cancel{000}\ \cancel{000}} = \frac{75}{50} = 1.5 \quad (\text{A})$$

$$\frac{75 \times 10^6}{5 \times 10^7} = \frac{75 \times 10^{6+(-7)}}{5} = 15 \times 10^{-1} \\ = 1.5 \quad (\text{B})$$

图A-8：做除法时，可将分母和分子部分同时约去相同个数的0 (A)。你也可以先将这些数写成幂的形式 (B)。

$10^{-1}$  中的指数是由  $(4-5 = -1)$  得到的，见图 A-9。

当我们要对较大或较小的数进行乘除运算的时候，将它们写成指数形式是很方便的。当对有很多个 0 的数做加减运算时，还有另一些不同的法则。

$$\frac{250\ 000}{500\ 000} = \frac{25 \times 10^4}{5 \times 10^5}$$

(A)

$$5 \times 10^{4-(5)} = 5 \times 10^{-1} = 0.5$$

(B)

图A-9：如果分母的指数大于分子的指数，结果是10的负指数。（即结果小于1。）这是容易理解的，除以一个较大的数，商总是小于1的。比如，1/2、2/4、3/6 结果都是0.5，小于1。

做加减法时，要先将数据写成含有10的相同指数的形式。然后将数字部分做通常的运算，答案的指数部分就是10的相同指数的形式。（对数字部分做加减运算时，要仔细确保小数点对齐。这是我们将数据写成同为10的指数的原因。）比如，2000与508 000求和，你应该写成：

$$\begin{array}{r} 2 \times 10^3 \\ + 508 \times 10^3 \\ \hline 510 \times 10^3 \end{array}$$

你也可以将结果写成  $51 \times 10^4$ 、 $5.1 \times 10^5$ ，甚至510 000。

图A-10是指数形式的数进行加减运算的例子，仔细研究这些例子并看懂它们。

以上讨论法则的过程，对进行指数运算很有好处，便于理解较大的数和较小的数是如何运算的。我们在电子学中每天处理的大量数据通常是写成幂的形式的。将数据写成这种形式非常方便。

$$12\ 300\ 000\ 000 + 45\ 000\ 000$$

$$12300 \times 10^6$$

$$+ 45 \times 10^6$$

---


$$12345 \times 10^6$$

$$= 12.345 \times 10^9$$

(A)

$$7.5 \times 10^4$$

$$75 \times 10^3$$

$$126 \times 10^3$$

$$126 \times 10^3$$

$$415 \times 10^5$$

$$41500 \times 10^3$$

$$+ 25 \times 10^2$$

$$+ 2.5 \times 10^3$$

---


$$41703.5 \times 10^3$$

(B)

$$7\ 930\ 000\ 000 - 7\ 137\ 000\ 000$$

$$7930 \times 10^6$$

$$- 7137 \times 10^6$$

---


$$793 \times 10^6$$

(C)

$$0.000000753 - 0.000000008$$

$$7.53 \times 10^{-7}$$

$$- 0.08 \times 10^{-7}$$

---


$$7.45 \times 10^{-7}$$

(D)

图A-10：幂的加减法的例子。注意要写成10的相同指数的形式，并将小数点对齐运算。

# 在你的计算器上使用指数表示法

学会在科学计算器上将数字用指数形式表示非常容易。参阅附录 B，一个科学计算器的详细说明。这个计算器有 EE 键，在输入数字时，用来输入 10 的指数。在按下 EE 键后，下面输入的一位或两位数就是 10 的指数。在你购买计算器时，要确认计算器上含有 EE，EXP 或 EEX 的键。当输入数据时，按下这个键，提醒计算器即将输入的 1 位或两位数

据是 10 的指数。

图 A-11 给你提供一些简单练习，把数字写成科学记数法形式和把科学记数法还原成普通记数形式。花点时间去完成练习，因为通过练习，可以帮你面对指数和科学记数法时更加自信。这个练习的答案在图 A-13 中。

图 A-12 中列出的问题给你练习解决包含

a) 9 460 000 000 000

b) 186 000

c) 0.00001578

d) 300 000 000

e) 0.000000000001113

把下列数字展开成非指数的普通记数法

f)  $147.1 \times 10^6$

g)  $83.14 \times 10^2$

h)  $6.67 \times 10^{-11}$

i)  $6.022 \times 10^{23}$

j)  $1.3806 \times 10^{-23}$

图A-11：这里的题目是要求你能将数据在指数记数法或科学记数法和原数间转化。对图A-14检查你的答案。

a)  $12.5 \times 10^{-3} \times 6.8 \times 10^3 =$

b)  $625 \times 10^{-3} \times 5.6 \times 10^3 =$

c)  $6.28 \times 3.75 \times 10^5 \times 2.48 \times 10^{-4} =$

d)  $22.0 \times 10^6 \times 0.045 \times 10^{-6} =$

e)  $1.38 \times 10^{23} \times 290 \times 5 \times 10^2 =$

f)  $\frac{1}{6.28 \times 21.15 \times 10^6 \times 5.96 \times 10^3} =$

g)  $\frac{7.125 \times 10^6}{1.2 \times 10^2} =$

h)  $\frac{10.0 \times 10^2 \times 2.00 \times 10^3}{50 + 2.00 \times 10^2} =$

i)  $\frac{15 \times 10^2 + 3.4 \times 10^3}{7.0 \times 10^1} =$

j)  $\frac{6.67 \times 10^{-11} \times 6.02 \times 10^{24} \times 7.34 \times 10^{22}}{(3.925 \times 10^8)^2} =$

图A-12：用科学计算器或电脑完成练习。图A-15给出答案。



# 什么是指数表示法？它和科学记数法的区别是什么？

如果你习惯了科学记数法，那么工程记数法就很容易理解。在科学记数中，指数（10的幂）可以使任何整数，例如-4，-3，2或5。而工程记数是科学记数的一种形式，它的指数是3的倍数，如-6，-3，6或9。对于常用的指数是3的倍数，这是公制（国际单位制）的前缀。工程记数和公制的前缀广泛用于工程和科学中。虽然你刚刚接触，通过熟悉它们，将帮助你更加容易地去学习电子学。

你可能了解一些公制的前缀：长度以毫米（mm）做单位，路程用千米（km）做单位，液体的体积用毫升（ml）做单位，一个镇或城市的预算用百万美元或十亿美元做单位。下面的表格列出了公制前缀和它们的10的幂。

前缀	符号	大小	大小
Giga	G	$10^9$	1 000 000 000
Mega	M	$10^6$	1 000 000
Kilo	K	$10^3$	1 000
milli	m	$10^{-3}$	1/1 000
micro	$\mu$	$10^{-6}$	1/1 000 000
nano	n	$10^{-9}$	1/1 000 000 000
pico	p	$10^{-12}$	1/1 000 000 000 000

让我们尽快熟悉用科学记数法来表示一些熟悉的数量，接着，我们要使用公制前缀。

莎莉高 1.8m，也就是  $1.8 \times 10^0\text{m}$ 。如果我们想用毫米来表示莎莉的高度，我们知道应该是毫米是  $10^{-3}\text{m}$ ，所以用 1.8 乘以  $10^3$ ，这样单

位就比米小了  $10^3$ 。记住：

$$10^3 \times 10^{-3} = 10^{[3+(-3)]} = 10^0 = 1$$

所以把数字方法  $10^3$ ，单位就缩小了  $10^{-3}$ ，我们已经可以用新的单位毫米来表示莎莉的高度了。这个数字看起来好像不一样了，但她的高度相同。

$$\begin{aligned} H &= 1.8\text{m} = 1.8 \times (10^3 \times 10^{-3}\text{m}) \\ &= (1.8 \times 10^3) \times (10^{-3}\text{m}) = 1800\text{mm} \end{aligned}$$

虽然看上去很愚蠢而且不切实际，但哦我们仍然可以把她的高度用千米来表示：

$$\begin{aligned} H &= 1.8\text{m} = 1.8 \times (10^{-3} \times 10^3\text{m}) \\ &= (1.8 \times 10^{-3}) \times (10^3\text{m}) = 0.0018 (\text{km}) \end{aligned}$$

有些电力线的电压是 2300V。我们可以表示为 23 千伏或者 23kV。如果我们想用兆伏（MV）来做单位，应该怎么表示呢？

“兆”是  $10^6$ ，而“千”是  $10^3$ 。为了把电压的单位放大 1000 倍（ $10^6$  是  $10^3$  的  $10^3$  倍），我们必须把电压的大小缩小 1000 倍。步骤如下：

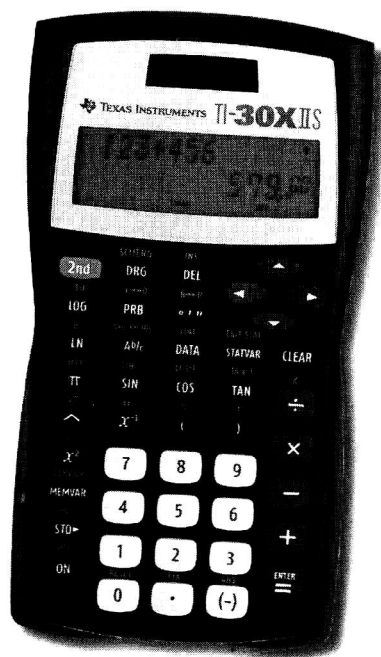
$$\begin{aligned} \text{电压 } U &= 23\text{kV} \\ &= 23 \times 10^3 \text{V} \\ &= 23 \times (10^{-3} \times 10^3) \times 10^3 \text{V} \\ &= (23 \times 10^{-3}) \times (10^3 \times 10^3) \text{V} \\ &= 0.023 \times 10^6 \text{V} \\ &= 0.023 \text{MV} \end{aligned}$$

你会很快熟悉用工程记数来解决问题，懂得计算器显示的内容。你的计算器有三种方法来表示数字：浮点，科学记数法和工程记数法。



## 附录B

# 了解和使用你的 TI-30X IIS型科学计算器



这本书中使用的是 TI-30X IIS 型计算器。这个计算器相当实惠，而且简单易学，用途广泛，可以满足你所有的计算。这种计算器还有很多功能（分数、三角函数、双曲线、矩形、极坐标和概率），但这些功能在本册书的内容中没有需要。所以不要被计算器上这么多键所吓倒，你会很快掌握你所用到的几个键。

也许你已经有了一个运用得很好的计算器，你所以做的是确定我们书中所列举的例子中所需按的键。

这个附录的最后是有关在哪里找到这种计算器的额外信息的列表。

## 计算器信息

- 如果 5 分钟内没有按键，计算器将自动关闭。当你再次打开时，显示屏第二行所有的信息仍然会保留。

- 如果无法打开，请换电池。

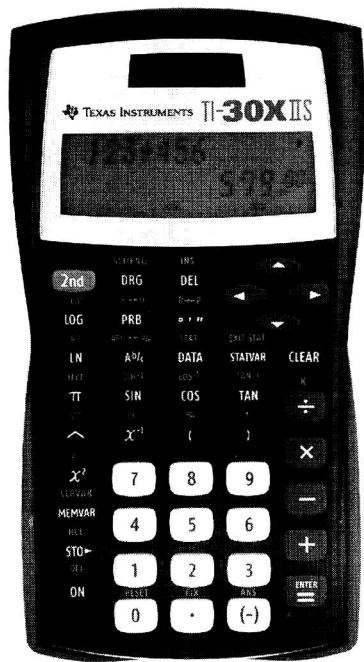
- 如果输入数据后显示屏是空白的，请更换电池。

- 如果得到的答案不正常，请更换电池。

- 这种型号的计算器的显示屏有 2 行。上面一行可以容纳 88 个字符，包括数字和运算符号比如（ $\times$ ，乘法符号），但你同时只能看到 11 个字符。左、右箭头键（ $\leftarrow$ 和 $\rightarrow$ ）允许你在第一行任何位置移动。在图 B-1 中，你可以看到在第一行输入式  $123+456$ ，在下面第二行看到 579。

- 如果你完成了一个计算，答案将会在第一行显示，你可以通过按下  $2^{\text{nd}}$ （ $-$ ）这个键，把结果插入新的计算中。如果你用了这个方便的功能，你就不必再重新输入这个结果。

- 还有两个键可以进行实时存储。当你输入完方程，按下等号键（ $=$ ）去看结果，你



图B-1: TI-30XIIS型计算器

输入的数方程存储在内存中。要检索你刚才输入的方程，只要按下向上箭头键（ $\uparrow$ ）。利用这个便捷的功能，无需重新输入数据，你可以更换方程中的数据并快速看到答案。利用向上箭头和向下箭头键（ $\downarrow$ ），你可以滚动搜索浏览到你最近输入的方程。

- 有两个键，初次看上去很像。减号键，一个深蓝色的键，上面有个白色的加号（ $+$ ），在进行两个数的相减时要用这个键（例如， $7-4=3$ ）。负号键是白色键，有一个用括号括起来的黑色的减号。当输入负指数时需要用到这个键，例如  $10^{-2} = 1/10^2 = 1/1000$ 。

- 在键盘左上方是一个标记为  $2^{\text{nd}}$  的淡蓝色键。在很多键的上面有淡蓝色标记，如果先按下按下  $2^{\text{nd}}$  键，再按下这个键，用的就是这

表格B-1: 完成基本操作所需要的按键

操作	按键
打开计算器	ON
关闭计算器	2 <sup>nd</sup> ON
重置计算器	ON CLEAR (同时按下这两个键)
重置计算器	2 <sup>nd</sup> RESET
修复显示的位数	2 <sup>nd</sup> FIX →→ (或更多) =
取消最后输入的	EDL
取消任何输入的字符	EDL (将光标放在要删除的字符上)
在两个字符间插入字符	2 <sup>nd</sup> INS (将光标移动到字符上, 新字符将插在它的左边)
输入科学记数模式	2 <sup>nd</sup> SCI/ENG → =
输入工程记数模式	2 <sup>nd</sup> SCI/ENG → → = (工程记数是这本书中所有计算的最好的方式)

个键的第二功能。例如, 要求出 16 的平方根, 你必须按:

$$2^{\text{nd}} X^2 16$$

因为  $X^2$  键上淡蓝色标记就是第二功能求平方根。

●如果有混淆, 请用括号让计算器明白你想做什么。例如, 你想把 2 和 3 相加, 然后再乘以 4, 按一下的操作则不会得到正确的答案:  $2+3 \times 4$ 。在计算器进行计算时, 它有非常特定的顺序。要得到准确的答案, 你必须输入  $(2+3) \times 4$ , 显示屏上将出现 20 这个准确答案。记住, 上面一行可以容纳 88 个字符, 所以使用括号不会有任何问题, 而是帮助你得到正确的答案。

●在使用计算器时, 你必须熟练利用它来完成你的计算。例如, 在输入  $(2+3) \times 4$  时,

你可以省去  $\times$  (乘号), 而直接输入  $(2+3) 4$ , 你可以得到同样的结果。

●表示角度的默认单位是度。圆的角度是 360 度, 直角是 90 度。如果你第一次打开计算器, 或者你重置过计算器, 角度的模式是度。如果你需要, 你可以把角度的模式改成弧度或梯度模式。但在这本书的计算中, 角度的模式是度。

在图 B-1 中, 在显示屏底端, 你可以看到 ENG 和 DEG 标记。这告诉我们计算器已经设置成了科学和工程记数模式, 角度的单位是度 (不是弧度或梯度, 在这本书中没有需要)。在这本书中所有的计算, 用工程记数法是最好的方式。

表 B-1 总结了基本操作所需要的键。

## 例题

下面的例题是演示如何用你的 TI-30XIIS 型计算器来解决问题。

### 例题一

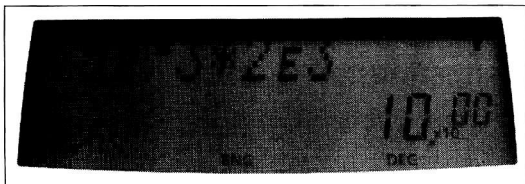
$$U = I \times R$$

$$U = 5 \text{ mA} \times 2 \text{ k}\Omega$$

$$U = 5 \times 10^{-3} \text{ A} \times 2 \times 10^3 \Omega = 10 \text{ V}$$

计算器键入：

$$5 2^{\text{nd}} \text{EE} - 3 \times 2 2^{\text{nd}} \text{EE} 3 =$$



[注意，上面例子中的 -(负号) 键是在 3 键下那个白色的键，而 - (减号) 键在 +(加号) 键的上面的键。当你在想用白色的负号键时，千万不要使用蓝色的减号键]

计算器显示屏第二行显示：10×10<sup>00</sup>

[注意，10<sup>00</sup>=10<sup>0</sup>=1，所以

$$10 \times 10^{00} = 10 \times 1 = 10 \text{ (V)}]$$

### 例题二

$$R = E / I$$

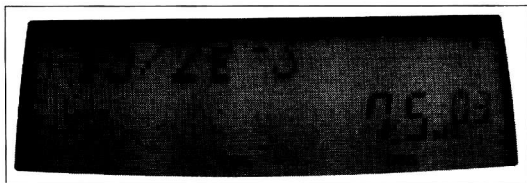
$$R = 15 \text{ V} / 2 \text{ mA} = 15 \text{ V} / (2 \times 10^{-3} \text{ A})$$

$$R = 7.5 \times 10^3 = 7.5 \text{ k}\Omega$$

计算器键入：

$$15 \div 2 2^{\text{nd}} \text{EE} - 3 =$$

计算器显示屏第二行显示：7.5×10<sup>03</sup>



下面是第 3 单元第 15 章中，关于交流电压、频率和周期的例子。

### 例题三

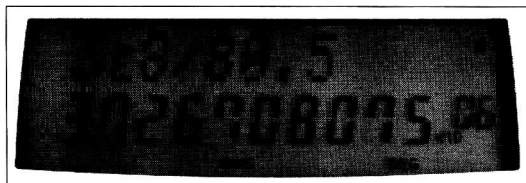
$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (15-3)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{80.5 \text{ m}} = 3.727 \text{ MHz}$$

计算器按键：

$$3 2^{\text{nd}} \text{EE} 8 \div 80.5 =$$

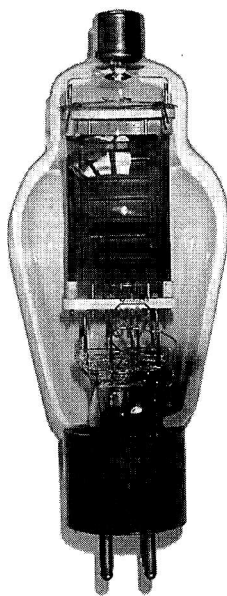
计算器第二行显示结果：3.7267×10<sup>06</sup>



[请注意，10<sup>06</sup>=10<sup>6</sup>=1000000，所以，3.7267×10<sup>06</sup>=3.7267×1 000 000=3.7267MHz]

## 附录C

# 电子管



大多数业余无线电和基础电子电路的初学者已经很少会再碰到电子管了，但在几十年里，电子管却是电子学的支柱，直到固态设备，包括二极管、晶体管和集成电路一统天下。出于对历史的兴趣和出于你想去使用你的老设备，这个附录提供了真空电子管的概述。此外，尽管晶体管已经取代了电子管，但在大功率放大器和其他应用中，我们还在使用电子管

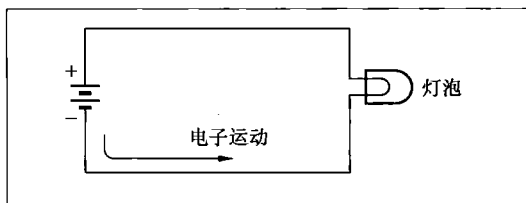
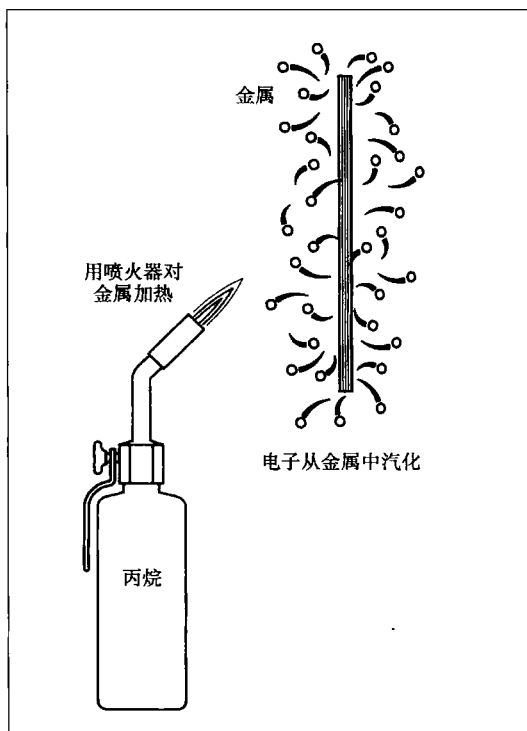
### 目录

- 热电子发射
- 电子二极管
- 电子三极管——场效应器件
- 有额外控制电极的四极管和五极管
- 阴极射线管显示器

# 热电子发射

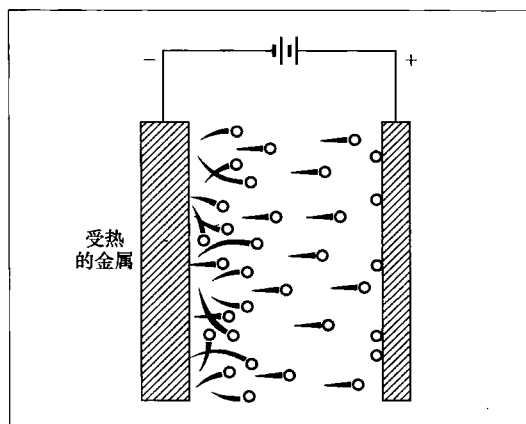
电流由电子的运动而形成。记住，电子在铜导线内的旅途中会在原子间碰撞。在电子沿导线运动前，这些电子必须获得足够的能量脱离原子，成为自由电子。如图C-1中所示，电池中的化学能在电路中提供了这样的能量。

你还可以通过加热金属，给电子获得这样的能量。当金属温度足够高时，电子可以获得使它们发生自由跃迁的能量。这些自由电子可以脱离固体表面，在金属附近表面形成电子云。我们称金属中的电子发生了汽化（见图C-2）。

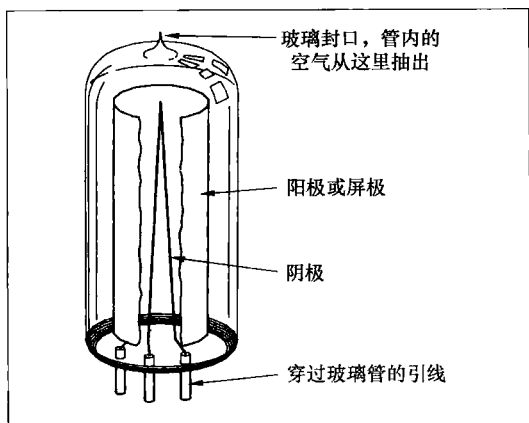


图C-1：电池中的化学能帮助导线中的铜原子中的部分电子成为自由电子，这可以使电子在导线中从一个原子运动到另一个原子。

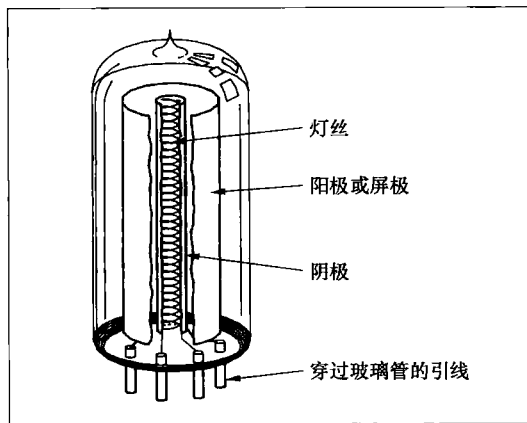
图C-2：对金属加热可以使部分电子获得离开金属材料所需的能量。这些自由电子运动到离金属表面周围很近的空间。当这些电子离开后，金属中留下阳离子。这些阳离子吸引电子，使这些电子停留在离金属表面很近的空间内。这些阳离子还把部分电子吸引返回到金属中。



图C-3：第二块金属板放在靠近第一块金属板的位置。如果我们给它施加电压，就会吸引自由电子。



图C-4: 这是一个简单电子管的结构图。玻璃封装中引出的导线可以把这个电子管接到电路中。一个电源提供电流对阴极加热, 另一个电源向阳极提供正向电压。



图C-5: 有些电子管使用独立灯丝来对阴极加热。

我们称这些电子为阴离子, 当这些电子离开金属后, 在金属中留下阳离子。通过对金属加热发射电子的过程称为热电子发射。

正常情况下, 我们希望这些电子会散失部分这样的热能, 再返回到金属中。金属中的阳离子会吸引这些电子, 返回金属表面。

如图 C-3 所示, 假设我们把另一块金属与第一块金属相互靠近。因为在电路中这两块金属与电源相接, 所以我们称它们为电极。我们把第一个电极与电源负极相连, 第二个电极与电源正极相连。我们把第一个电极称为阴极, 因为它和电源负极相连, 我们把第二个电极称为阳极, 因为它和电源的正极相连。有时我们也把阳极称为屏极。

我们把这个装置封装到玻璃器皿中, 再抽去器皿中的空气, 就做成了一个电子管, 也称为真空管。抽成真空的目的是保证自由电子从阴极顺利到达阳极。管内的气体分子将驱散电子, 吸收这些电子的能量, 并使它们偏移原来

的运动轨迹。图 C-4 显示了这个电子管的构造。电子管的阳极和阴极穿出玻璃管, 提供了和外部电路连接的输出端。

你也许想知道, 我们如何加热这个电子管内的阴极。我们有两种方法来完成这个工作。这两种方法都包含一个电流, 因为当电流流过金属中时会产生热量。

让电流通过阴极时会加热阴极的金属。一个电源向阴极供给电流, 另一个电源连接在阴极和阳极之间。这样的方式工作的电子管称为直热式阴极电子管。图 C-4 中所示就是直热阴极电子管的结构。

有些电子管使用独立的灯丝来加热阴极。当灯丝中有电流经过时, 会产生热量, 然后间接地对阴极加热。图 C-5 显示的是旁热式阴极电子管的结构。

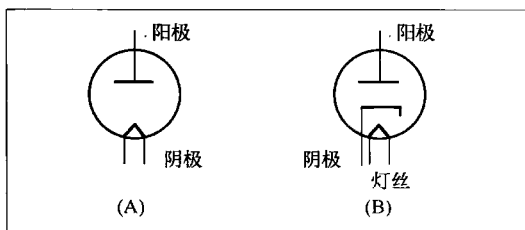
我们称这些电子为阴离子, 当这些带负电荷的电子离开金属后, 在金属中留下阳离子。通过对金属加热发射电子的过程称为热离子发射。这个加热过程中发射离子。

# 电子二极管

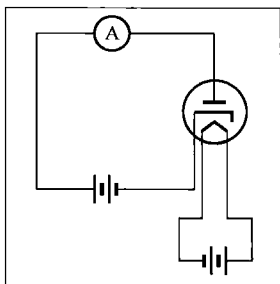
电子二极管中包含两个电路元件，我们常把这些元件称为电极。你也许知道二极管有两个电极，因为二极管（diode）的前缀 di 表示 2 的意思。

阴极释放电子，产生电子管内的电流。阴极与电源负极相连。在直热式阴极电子管中，电流经过阴极加热金属线。旁热式阴极电子管利用靠近阴极的灯丝给阴极间接加热，提供自由电子所需要的热量。

阳极，或称为屏极，接收从阴极发射过来的电子。阳极和电源的正极相连。这个正向



图C-6：这些符号是电子二极管的示意图符号。图（A）中符号表示直热型阴极电子管，图（B）中符号表示旁热式阴极电子管。



图C-7：电源正极和电子二极管屏极相连，电子管用灯丝对阴极加热，独立电源给灯丝电路供电，电流表用来测量经过电子管的电流。

表 C-1：电子二极管板极电流和屏极电压的特性

屏极电压 (V)	屏极电流 (mA)
0	0
10	25
20	70
30	130
40	200
50	275
60	360
70	450
80	560
90	660
100	775
110	890

电压吸引阴极发射的电子穿过这两个电极的空间。图 C-6 为电子二极管的两种示意图符号。你也许想知道，为什么我们在旁热式阴极电子管中没有把灯丝作为第三个电极。这是因为，灯丝不是电子管电路的一部分，它的唯一功能就是对阴极加热，使其释放电子。因此，我们没有把灯丝作为电子管的有源元件。

在图 C-7 显示的是一个带有灯丝、并和电源相连的电子二极管电路。我们在电路中连接了一个电流表，用来测量经过电子二极管的电流。电子二极管阳极的正向电压吸引从阴极发射的电子。这些电子穿过电子管内部空间，产生一个经过电子二极管的电流。



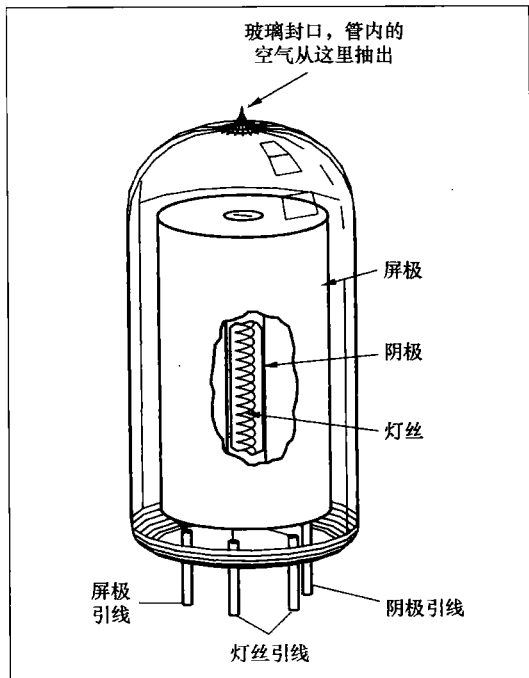
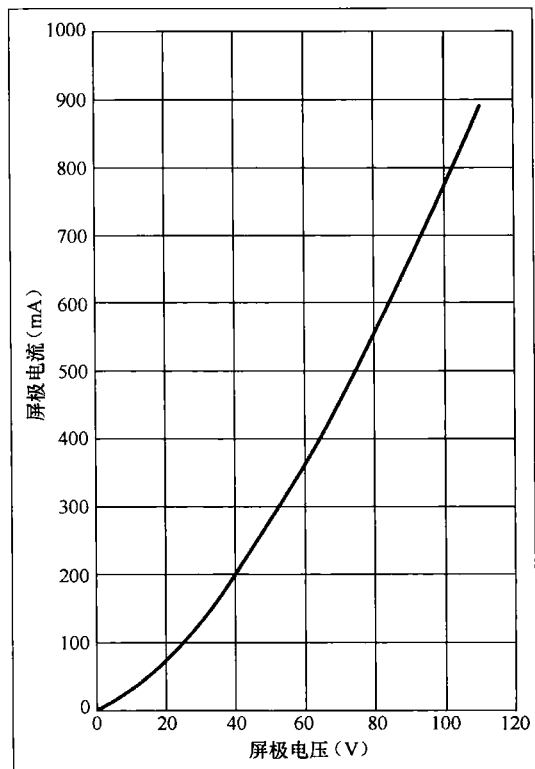
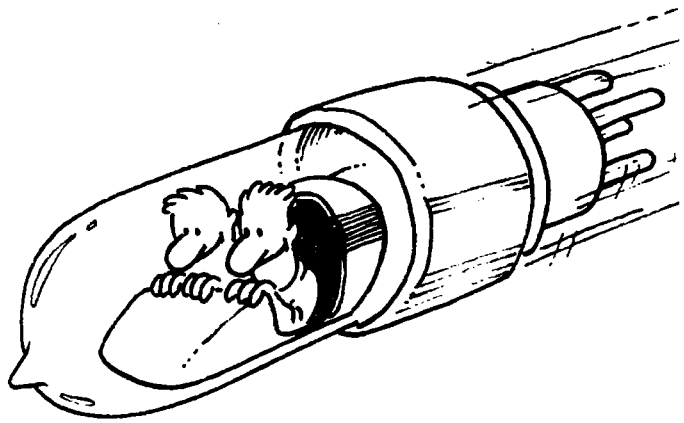


图 C-8 : 这是一个典型电子二极管的结构切面图。

图 C-8 为一个电子二极管结构的切面图。屏极（阳极）把阴极完全包围，这样可以保证阴极发射的所有电子都能被阳极接受。

那么屏极电压是如何影响经过电子二极管的电流的呢？让我们来做一个简单的实验。在图 C-7 中用可调电源来替代电池。当屏极上没有电压时，电子管中也没有电流。现在我们把屏极电压增大到 10V，电流表显示这时经过电子管的电流为 25mA。

继续增大屏极电压，每次 10V，并读出每次对应的屏极电流。表 C-1 为这个电子管的一组测量数据。图 C-9 是根据测量数据画出的特性曲线。不同类型的电子二极管，其特性曲线也不相同。不过，尽管电子管上的电压和电流不相同，但是特性曲线的形状大致相同。注

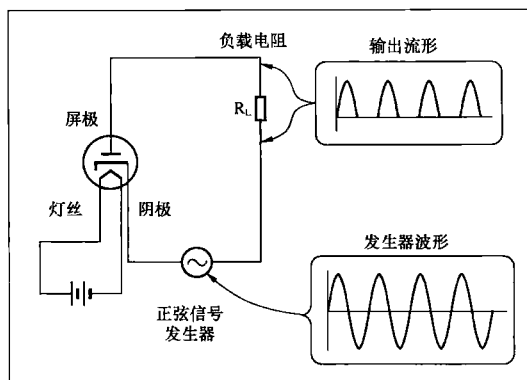


图C-9: 此图是根据表C-1数据画出的特性曲线图，它显示了电子管中的电流随屏极电压的变化情况。

意，当屏极电压为 0 时，电流也降为 0。

如果我们把屏极与电源的负极相连，而阴极与电源的正极相连，将会发生什么情况呢？此时，屏极不但不能吸引阴极发射出的电子，反而具有排斥作用，从而阻碍任何电流穿过电子管（屏极不会发射任何电子，因为它的热量不够）。在阴极和屏极之间施加反向偏置电压，电子二极管的呈截断状态，也就是说没有电流经过电子二极管。

电子二极管和晶体管二极管的工作方式相同。在阴极和屏极之间施加交流电时，二极管只在交流电压的半个周期内导通。图 C-10 显示的是一个连接了交流电的二极管。当施加在屏极上为交流电为正半周时，电子管输出一连串脉冲波形。



图C-10：一个电子二极管把正弦波交流输入转换为一连串的直流脉冲。

# 电子三极管——场效应器件

在现代电子学中，我们很少再使用电子二极管来对电路中的交流信号整流。因为电子二极管会产生大量热量，而且可靠性也比固体二极管差。不过电子二极管涵盖了所有电子管的基本工作原理。尽管在很多应用中晶体管已取代了电子管，但是我们还是把电子管用在功率放大器和其他应用中。

在电子管作为放大器使用时，我们必须用一定的方式来控制电子管中的电流。在电子二极管的阴极和阳极之间添加第三个电极可以形成电子三极管。这第三个电极称为控制栅极。图 C-11 为电子三极管的示意图符号。

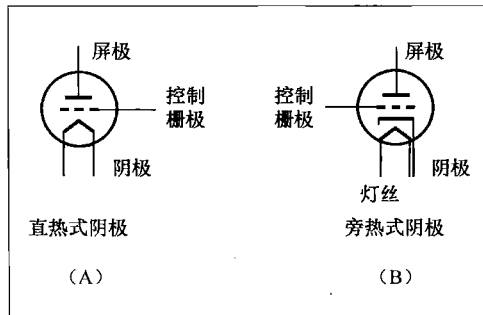
控制栅极是一个放置在阴极和阳极（屏极）之间的金属网，电子可以轻易地穿过这个金属网。

我们通常把控制栅极（栅极）与电源负

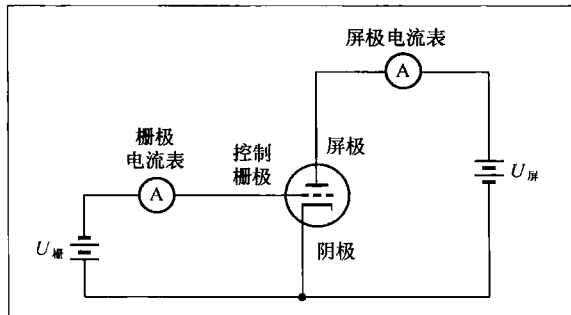
极相连。栅极电源  $U_{\text{栅}}$  的正极和阴极相接。在这种连接方式下，栅极可以排斥部分从阴极发射出的流向屏极的电子。也许我们可以用图 C-12 的电路来测试电子三极管的工作情况。

现在开始分析这个三极管，我们假设控制栅极的电压为 0（用导线替换掉图 C-12 中的栅极电源）。阴极可以为直热式阴极，也可以为旁热式阴极。当阴极足够热时，它发射出电子。因为和阴极相比，阳极为正电压，所以它可以吸引这些电子。电子从阴极穿过电子管到达阳极。听起来是不是与电子二极管一样？在这个实验中，我们假设屏极上电流表的示数为  $4.5\text{mA}$ 。

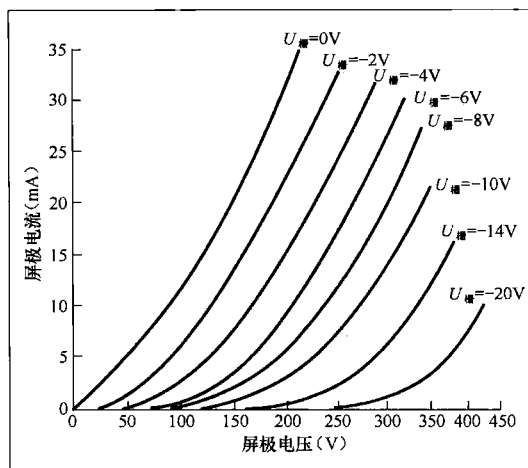
现在让我们把栅极上的电源重新放到图 C-12 的电路中。在我们的思维实验中，我们可以把栅极电压调整为任何需要的值。现在我



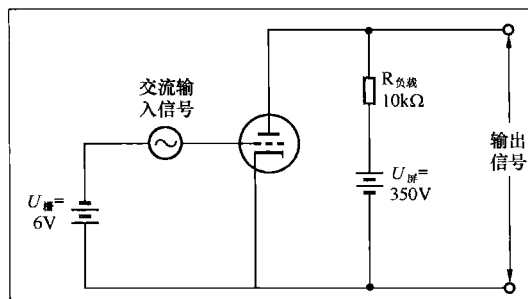
图C-11: 这些符号是电子三极管符号示意图。有些电子三极管的阴极是直热型阴极，有些是旁热式阴极。注意，我们可以从图中符号的左边引出控制栅极导线，也可以从右边引出。



图C-12: 我们可以用这个电路来研究电子三极管的工作状况。一个电源接在阴极和屏极（阳极）之间，连接方式和电子二极管相同。另一个电源接在阴极和控制栅极之间，使栅极相对于阴极为负电压。



图C-13: 此图为一个电子三极管的典型特性曲线图。对于图中的每一个栅极电压, 我们是从0开始增大屏极电压得到的。



图C-14: 这个简单电路解释了电子三极管如何放大输入信号电压的过程。输入信号电压的微小变化叠加到栅极偏压电池上。栅极电压的变化产生一个变化的屏极电流, 从而导致输出电压发生很大变化。

们把它设置为 3V。因为这个电源的负极和控制栅极相连, 所以栅极电压试图排斥从阴极发射出的电子。此时屏极上的电流表示数为 0.15mA。可以看出, 给控制栅极施加负电压可以减小屏极电流。

现在把栅极电压增大为 10V。此时栅极电压排斥所有从阴极发射出来的, 所以没有电

子到达屏极。现在屏极上电流表的示数为 0。当控制栅极电压大到阻碍屏极电流的产生时, 我们说电子管处于截止状态。

如果我们使栅极电压相对于阴极为正电压时, 你想又会发生什么情况呢(换句话说, 如果我们把图 C-12 中的电源反接, 将会发生什么情况呢)? 此时和屏极一样, 屏极会吸引从阴极发射出来的电子。当然, 因为栅极只是一个金属网, 所以大多数电子会径直穿过它, 到达屏极。这时屏极继续吸引电子, 因此屏极电流将比栅极电压为 0 时的电流大得多。有些电子将撞击栅极, 所以栅极电流也将增大。

我们把设置电子管运行状态的电压称为偏压。与阴极相比, 屏极获得的是正向偏压。为了使电子管正常工作, 控制栅极为反向偏压。

大屏极电流(你千万不能施加比制造商规定的额定电压更高的电压, 同时也不能使屏极电流超过额定值)。在前面的实验中我们知道, 改变栅极偏压可以改变屏极电流。

图 C-13 为一个电子三极管的典型特性曲线图。我们可以用与图 C-2 类似的电路来测量并画出这些曲线。可以首先设置一个确定的栅极电压, 然后从 0 开始增大屏极电压至最大值。接下来把栅极电压调整为一个新值, 用相同幅度调整屏极电压。在收集好一系列栅极电压数据后, 我们就可以画出图 C-13 中的曲线了。

每个电子三极管都有一组特定的特性曲线。不同类型的电子管类型有不同的屏极电压和屏极电流, 以及不同的栅极电压值, 甚至曲线形状也会有些不同。图 C-13 为一个具有代表性的三极管特征曲线图样本。

完整描述电子三极管放大信号的工作原理已经超出了本书的范围。不过, 我们做一个简单的描述, 帮助你理解为什么这个电子管如

此重要。

图 C-14 电路图说明了电子三极管是如何放大信号的。实际的放大器电路还需要很多其他元件。我们也不需要两个电池分别为屏极和栅极提供电压。在这个例子中，栅极偏压电池和屏极电池可以设置电子管的工作状态。

图 C-15 为增加了工作状态的三极管特性曲线图。输入信号电压在 +4V 和 -4V 之间变化，这个输入信号叠加到栅极电压  $U_{\text{栅}}$  上（加到栅极电压上或从栅极电压上减去）。栅极偏置电压在 -2V 和 -10V 之间变化。

如图 C-15 所示，栅极电压的变化引起了屏极电流的变化。这个例子中，屏极电流在 17.5mA 和 8.7mA 之间变化。

图 C-15 也表示出了屏极电流变化时，输出电压的变化情况。屏极电流通过负载电阻器时，产生了压降，你可以用欧姆定律来计算这

个值（如果屏极电流是 8.7mA，那么在 R 负载上的电压降是 87V）。

$$U = IR \quad (30-1)$$

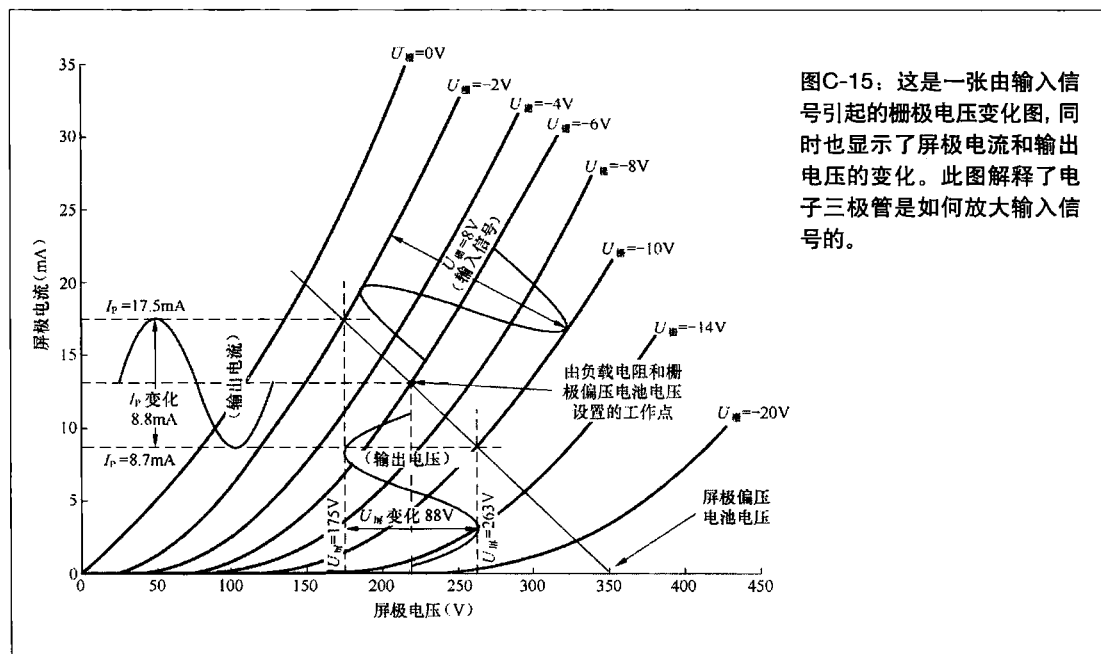
$$U = 8.7 \times 10^{-3} \text{A} \times 10 \times 10^3 \Omega = 87 \text{V}$$

从电池电压中减去这个压降，就可以求出输出信号的电压（在这个例子中， $350 \text{V} - 87 \text{V} = 263 \text{V}$ ）。

如果屏极电压增大到 17.5mA，在负载电阻器上将形成的压降更大。

$$U = 17.5 \times 10^{-3} \text{A} \times 10 \times 10^3 \Omega = 175 \text{V}$$

用 350V 的电池电压减去这个值，我们将得到 175V 的输出电压。当输入电压在正峰值和负峰值之间的变化范围为 8V 时，输出电压峰值的变化范围为 88V。可见，输出电压是被放大的输入电压。用 88V 的峰值变化电压除以 8，得到电压的增益是 11。



## 有额外控制电极的四极管和五极管

尽管电子三极管可以用来制造性能良好的放大器，但是三极管的一个特征可能导致一个问题，它的屏极电流对屏极电压的变化非常敏感。图 C-16 为三极管的一组特性曲线图。

即使在屏极上发生很小的电压变化，都可以造成屏极电流显著的变化。这意味着我们必须用非常平滑的屏极电压来产生稳定的放大信号。

为了解决这个问题，制造商又给三极管增加了新的栅极。这个新接的栅极称为帘栅极。如果不算用来加热阴极的灯丝，电子管中有 4 个电极。含有 4 个电极的电子管称为四极管 (Tetrade, Tetra 在希腊语中表示 4)。

如图 C-17 所示，在四极管中的帘栅极施

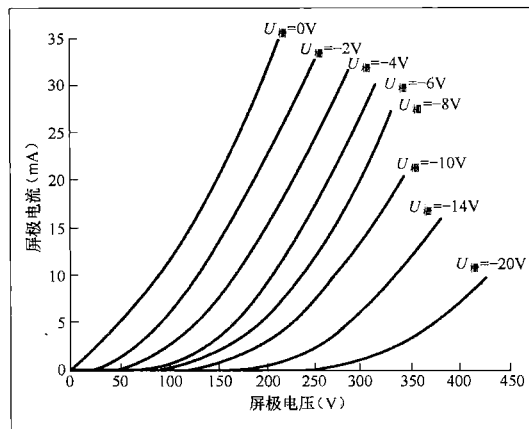


图 C-16: 此为电子三极管的屏极电流和屏极电压的特性曲线。注意，在每一个特定的栅极电压下，屏极电流是如何随屏极电压变化的。

加正向电压，这样帘栅极可以帮助吸引从阴极发射出的电子。正如它的名字的含义，我们用金属网或屏来制作帘栅极，这样它可以允许电子轻易穿过。由于屏极上正向电压大于帘栅极电压，因此屏极可以吸引电子穿过帘栅极，到达屏极并聚集起来。当电子穿过电子管时，帘栅极也会吸引并聚集一部分电子。当然，帘栅极电流总是要小于屏极电流的。

与屏极相比，帘栅极的物理位置要更靠近阴极。在电子离开阴极时，正向帘栅极电压对它们的影响要比屏极电压大。因此，屏极电压的微小变化几乎没有造成屏极电流的变化。

四极管解决了电子三极管放大器中的最大问题。图 C-18 为四极管的一组理论上的特性曲线图。注意，屏极电流几乎与屏极电压的变化无关。

在现代电子电路中，我们也很少使用四

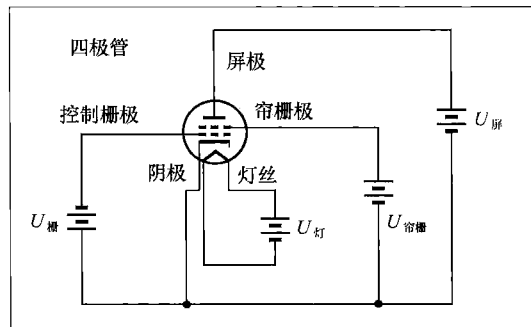
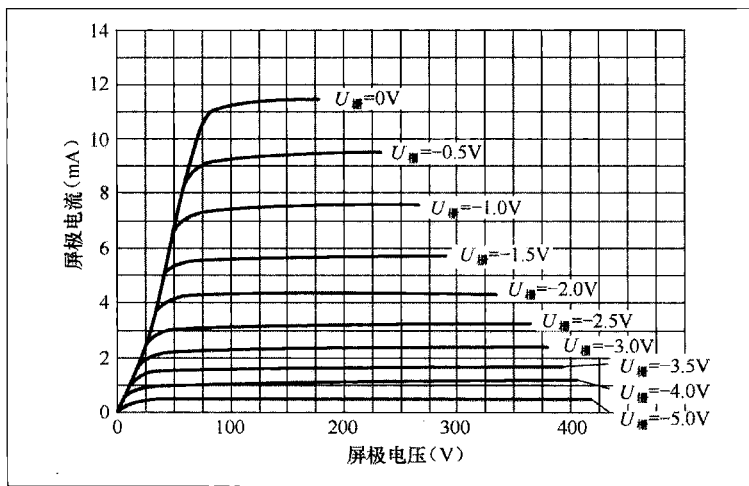


图 C-17: 四极管除了具有电子三极管的所有元件外，还增加了一个栅极，称为帘栅极。帘栅极使屏极电流几乎不会随着屏极电压的变化而变化。



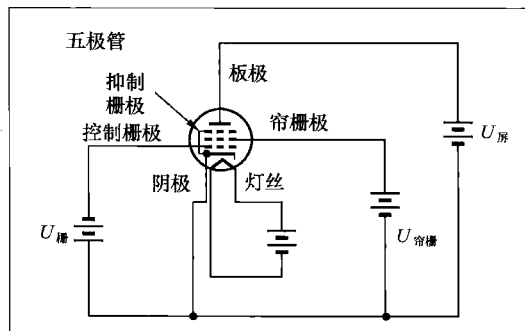
图C-18：在现代电子学中，我们很少使用四极管。此图为一个理想四极管的一组特性曲线，可以看到，控制栅极电压给定时，屏极电流几乎与屏极电压的变化无关。

极管。因为它会产生另一个问题。在四极管中，帘栅极电压和屏极电压都是正电压，同时吸引阴极发射的电子。这个吸引力吸引电子穿过电子管的内部空间，所以到达屏极时电子的速度太快。

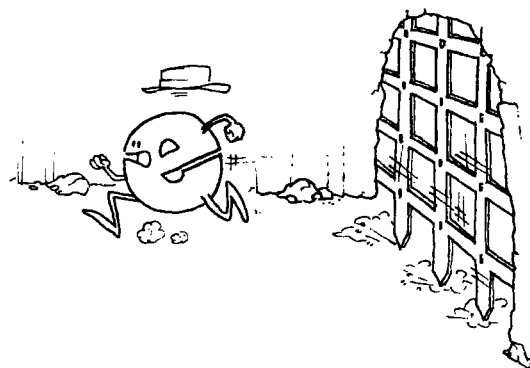
当高速的电子撞击屏极时，它们使屏极表面上的其他电子发射。我们把撞击其他电子的过程称为次级电子发射。这个过程中，很多次级电子飞离屏极，并被帘栅极上的正电压吸引到帘栅极。当这些电子反向经过电子管后，会增大帘栅极的电流。糟糕的是，他们减少了屏极电流，降低了四极管放大器的增益。

我们在四极管中添加第五个电极，以便消除这个缺点，确保四极管的优势。第五个电极安放在帘栅极和屏极之间，此时，这个电子管的电极数为5个，所以我们称之为五极管（Pentode，Penta在希腊语中是5的意思。）

这个新接入的元件称为抑制栅极，与阴极相连。连接线可以在电子管内，也可以在管外。抑制栅极和阴极的电压相同。当次级电子



图C-19：此图为电子五极管示意图符号。通过电池连接的导线可以判断出典型放大电路中使用的偏压极性。

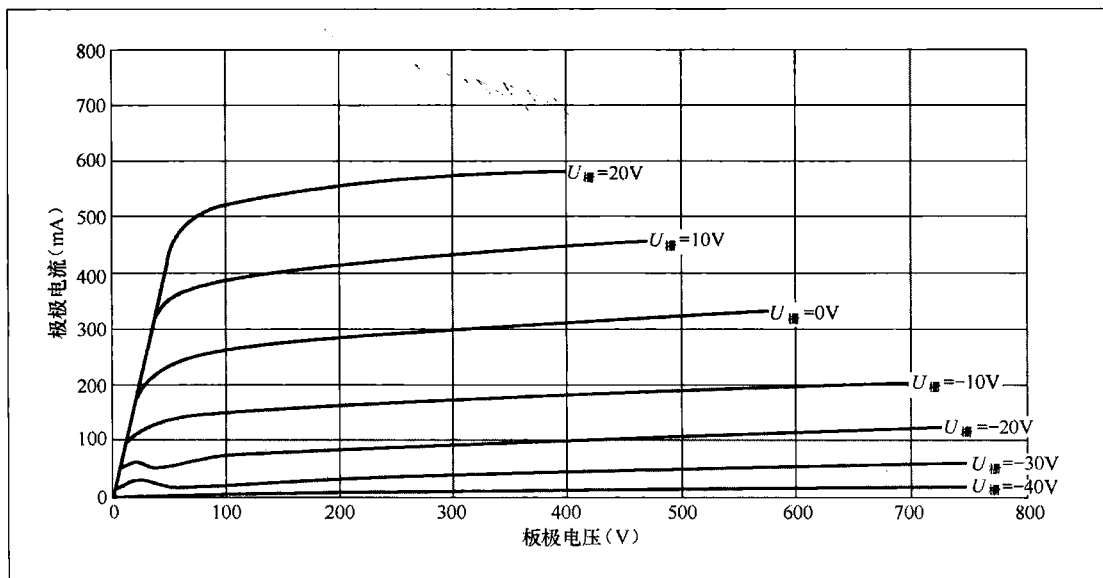


向帘栅极运动时,抑制栅极排斥这些次级电子,并把它推回屏极。

图 C-19 为五极管电子的示意图符号。分开的电池显示施加在五极管上的偏压极性。图 30-20 为五极管电子的一组屏极特性曲线。和其他电子管一样,每个类型的五极电子管都有

各自特定的特性曲线。这里显示的曲线只是五极管典型曲线形状的一个示例。

很多大功率射频放大器中使用四极管或五极管。五极管中的阴极、屏极和控制栅极的工作方式与在三极管中的工作方式相同。五极管放大器的工作方式也与三极管放大器相同。



图C-20: 此图为电子五极管的一组典型特性曲线。



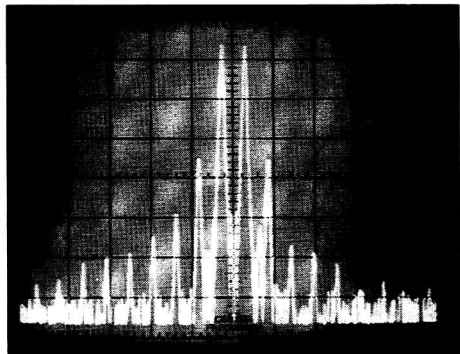
# 阴极射线管显示器

从历史角度来说，电子管在电子电路中有许多应用，然而，它们的很多应用已经被诸如双极型晶体管和场效应管等电晶体器件所取代。今天，当我们想起电子管时，就会想到大功率射频放大器。

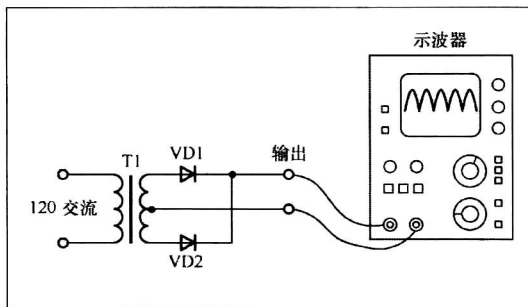
今天，应用最广泛的电子管可能就是阴极射线管。这种电子管是一种显示设备。直到最近，它还被用在电视、电脑显示器和其他许多产品中。

很多非常重要的电子测试设备都使用了CRT显示器。示波器使用CRT来显示电路中的信号波图形。图C-21为一个简单的全波整流电路的示意图。我们把示波器与电路输出端相连，示波器将显示二极管输出的脉冲信号。

频谱分析仪也使用CRT来显示组成波形的正弦波信号频率条形图。图C-22为频谱分析仪显示的无线电发射器输出的测试结果。我们把两路音频正弦波信号从无线电发射机的话筒输入。显示器显示出从发射机输出的每个



图C-22：在频谱分析器的显示器上，用条状图显示了信号频率和强度。当一个波形有多个正弦波信号组成时，可以使用频谱分析器来进行分析和研究。图中显示的是从发射机输出的双音频测试时的频谱形状。我们把两个声音频率正弦波信号输入到话筒中，然后对输出信号频率和强度进行测量。



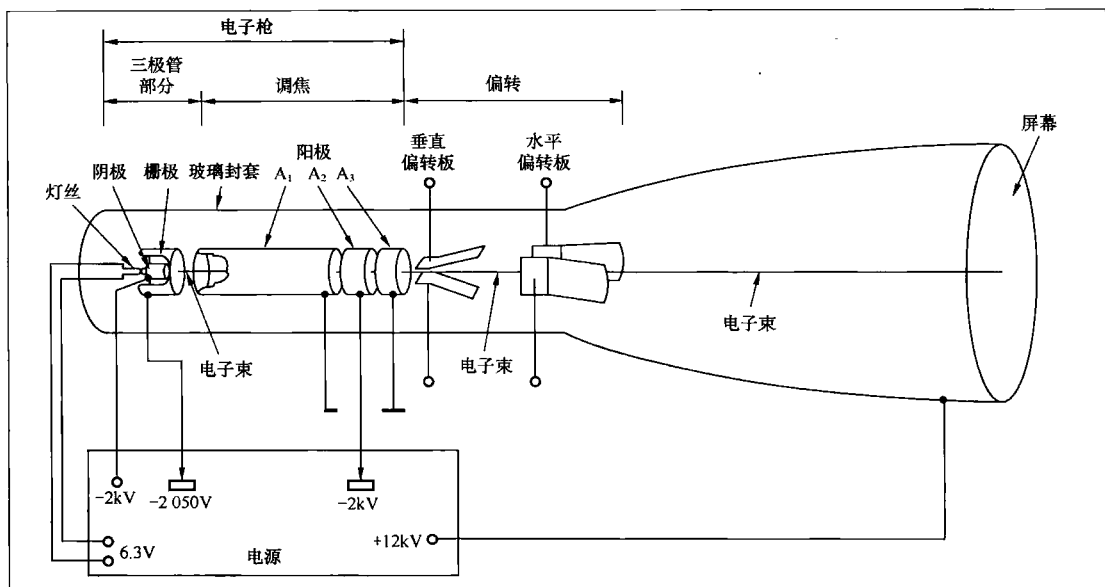
图C-21：我们可以用示波器来描绘信号波的图形。图中示波器显示的是一个全波整流电路中的输出脉冲波形。

输出信号的频率。每根最高的线表示这个信号的强度。

图C-23为一个基本构造的阴极射线管。你应该认识灯丝或加热丝、阴极、栅极和阳极。它们和我们学习的其他电子管的基本元件相同。

灯丝对阴极进行加热，促使阴极发射电子。栅极控制着这些电子流向阳极。通过控制增加和降低电子束中电子的数量，我们可以控制显示屏的亮度。阳极吸引电子，并使电子加速，因此在它们接近阳极时速度极快，但是，阳极并不聚集大多数的电子。

阳极有三部分，作用就像一个电子透镜。这个透镜把电子聚集成很小的



图C-23：此为阴极射线管的基本结构。每一个电子管元件都标有典型的工作电压。有些电子管的典型工作电压有几千伏特，这也说明这些电子管具有一定的危险性。

一束，并使它穿过阳极末端的一个小孔。我们把这样的装置称之为“电子枪”，这是因为它把很小的电子束射到电子管的前端表面上。

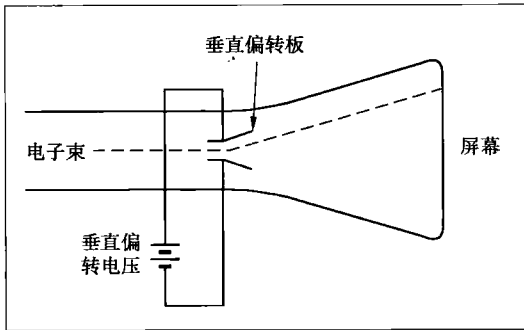
电子管的前端表面覆盖了一层称为荧光粉的特殊材料。当高速电子束撞击荧光粉时，荧光粉中的电子会获得额外的能量。然后这些电子再辐射出这些额外的能量，返回到荧光粉原子中的正常状态。它们所发射的能量是以可见光形式辐射，光的颜色与荧光粉所使用的颜色相同。有些荧光粉发射出绿光，有些发射出白光，还有一些产生出彩色显示器所需要的红光、蓝光和绿光。

当电子束从电子枪中发射出去后，电子束要穿过两块偏转板。一块偏转板可以使电子束发生水平移动，另一块可以使电子束发生垂直移动。在图 C-24 中可以看到，电子束穿过垂直偏转板后发生偏转。示波器和其他测试设备

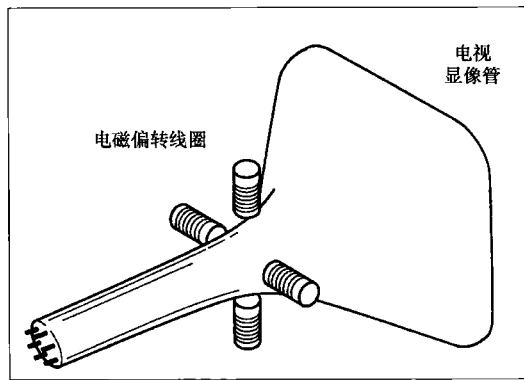
通常使用静电偏转。

大多数电视机显像管使用另一种使电子束偏转的方式——磁偏转。磁偏转的一个优点是电磁铁可以安置在电子管颈部外面。磁场使电子束发生弯曲，从而改变了电子轰击荧光粉的位置。图 C-25 为放置在电视机显像管颈部的磁偏转线圈。

静电偏转具有比较好的高频操作性能，这也是示波器使用静电偏转的原因。当偏转板没有电压时，电子束直接轰击到屏幕中心。当右边偏转板为正向电压，左边偏转板为负向电压时，因为电压和电子之间的吸引和排斥作用，使得电子束偏向右边。又因为电子的移动速度太快，所以它们也不可能轰击到偏转板上。当偏转板的电压极性反转时，电子束偏向左边。垂直偏转板的工作方式与之相同，只不过是使电子束发生向上或向下的偏移罢了。



图C-24: 当偏转板上有电压时, 经过偏转板的电子束会发生弯曲。电压越大, 弯曲程度越大。



图C-25: 电视机显像管使用磁偏转线圈控制着电子束移动到显像管前端。这些线圈产生一个水平磁场和一个垂直磁场。在磁场的控制下, 电子束在显像管上发生左右偏移和上下偏移。电子束每秒钟扫描整个电子管表面30次。

电子束的偏转程度与偏转板的电压大小有关。电压越小, 电子束的偏转角就越小; 电压越大, 电子束的偏转角就越大。

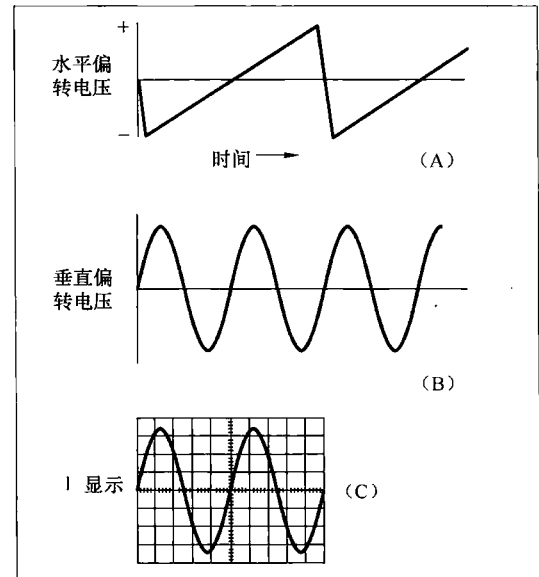
示波器工作时, 内部提供电压施加到水平偏转板上, 而垂直偏转板需要的电压由测试电路的信号电压来提供。

在示波器中, 施加在水平偏转板上的电压为锯齿波形电压。这个电压从荧光屏的左侧开

始出发, 水平扫描穿过显像管。在电压的锯齿波形从正向峰值变到负向峰值的短暂时间内, 电子束又跳回到屏幕左边。

垂直偏转板的电压使电子束在屏幕上下移动。电子束在屏幕上从左到右移动的同时, 也进行着上下运动。这样, 示波器就显示出了输入信号的波形。你必须调节水平扫描的速度, 以便和输入波形的频率匹配, 这样才能得到有用的图像。见图 C-26。

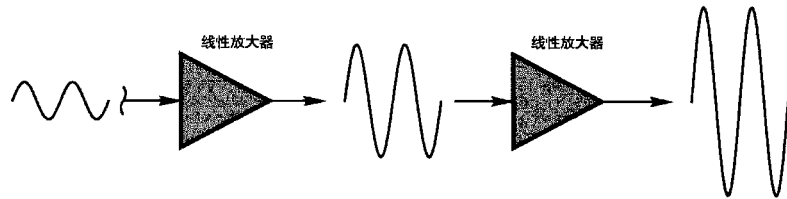
在电视机中, 使用专用电路可以使电子束发生水平移动和垂直移动, 从而完成对整个显像管的扫描。一个完整的扫描是一秒钟 30 次。电视机的接收信号控制电压与栅极相接, 可以改变电子束的强度。当电子束强度改变时, 荧光粉的发光强度也会改变, 从而在屏幕上产生图像。



图C-26 图 (A) 为水平偏转电压的锯齿波形。图 (B) 为正弦波垂直输入电压。合并后的偏转电压在示波器上产生了如图 (C) 所示的波形。

# 附录D

## 分贝



每个放大器有3分贝 (dB) 的增益，也就是说，输出信号的强度是输入信号强度的两倍

### 目录

- 分贝的定义
- 分贝和功率的比值

# 分贝的定义

分贝是电学中一个经常使用（或有时被滥用）的单位。那么这个术语是什么意思呢？首先我们先来定义这个术语，然后来看看电学中我们使用分贝的一些情况。

你也许认识“分”这个公制的前缀，它的意思是十分之一，因此，我们在这里真正讨论的单位是“贝尔”，分贝就是贝尔的十分之一。我们常用大写字母 **B** 表示贝尔。因为小写字母 **d** 是十分之一的缩写，所以分贝的专有的缩写是 **dB**。单位“贝尔”是以亚历山大·格雷厄姆·贝尔的名字命名的，很多人是因为他发明了电话而记住了他。贝尔对与失聪人群的合作非常感兴趣，希望借此研究我们听到声音的方法。贝尔设法发明一种能放大声音的装置，帮助部分听力丧失的人，电话就是他这个研究工作的结果。

我们可以听到非常微弱的声音，就像一片树叶穿过其他树叶下落时的沙沙声。我们也能听到极强的声音，一个手持式风钻在城市路边人行道上连续钻孔或者喷气式发动机轰鸣都

是极强声音的例子。很多声音太强会给我们造成痛苦。这些令人痛苦的声音可能比树叶下落微弱的声音或者低低的耳语声响  $1 \times 10^{12}$  倍（是的，这是百万的百万倍），我们能听到这个范围内的声音。

为了使数字更容易操作，我们通常使用对数来表示变化范围如此之广的数字。我们可以说我们的耳朵对声音的响度或者强度的反映具有对数的响应。贝尔是将两个声音响度进行相互比较，其中一个声音作为比较的基准对象。计算第二个声音比基准声音响或者安静多少贝尔，简单的计算是用作为基准的声音的强度去除另一个值，然后求出这个结果的对数。

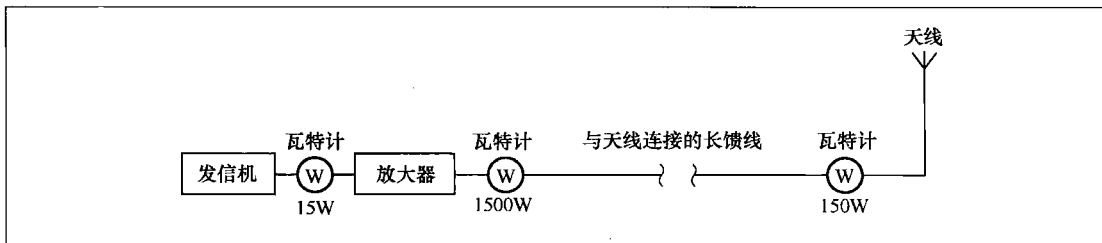
$$B = \log \frac{I_1}{I_0} \quad (D-1)$$

其中：

$I_0$  是基准声音的强度或响度

$I_1$  是要和基准声音对比的声音的强度

用安静的声音强度（一个非常小的数字）作为参照声音得到的是一个贝尔的正值，不过，



图D-1：这张图说明了一台业余电台发信机输出功率强度的测量。这张图也显示了信号经过功率放大器和较长的同轴电缆后的功率强度。

如果用响的声音的强度作为基准参照声音，你得到同样的值，不过是负值。所以，贝尔数是正值，表明这个声音比基准的声音要响，如果是负值，表明这个声音比基准的声音要安静。

令人痛苦的声音可能是我们能听到的最低的声音的  $1 \times 10^{12}$  倍。把这个数作为  $I_1/I_0$  的比值代入公式 E-1 中，计算出用分贝做单位的值，即我们的听力范围。

$$B = \log \frac{I_1}{I_0}$$

$$B = \log (1 \times 10^{12}) = 12$$

我们能听到的声音强度的范围大约在 12 贝尔。你在家中普通的声音，比如轻音乐、交谈或者电视的声音比你听到的最低的声音的响度高 4 ~ 7 贝尔。

声音的强度和声音的功率相似，所以我们可以把贝尔应用到电学中的功率电平。(注：某一功率  $P_1$  与一基准功率  $P_0$  相比求出对数乘以 10 表示的值为功率  $P$  的功率电平)。即使是比较声音强度程度，贝尔也是个非常大的单位。所以我们通常用分贝做单位。10 分贝是 1 贝尔，因此用分贝做单位比较两个功率强度的方程式是用贝尔做单位的方程的 10 倍。

$$dB = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (D-2)$$

其中：

$P_0$  是基准功率强度；

$P_1$  是要和基准功率对比的功率强度。

用一个例子来帮助你理解贝尔和分贝。记住两个功率强度的比值，意思是我们用一个功率除以基准或者对比的功率。

假设我们测量一个业余无线电发射机的输出功率，测出其大小为 15W，如果我们在发射机后使用一个功率放大器，我们测出功率

是 1500W。增益（放大倍数）是多少呢？这个功率放大器使功率增加了多少呢？为了解决这个问题，我们把 15 W 的功率作为基准功率，我们想用这个值作为基准和放大的功率比较。公式 E-2 将帮助我们解决这个问题。

$$dB = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$dB = 10 \log \left( \frac{150000}{1500} \right)$$

$$dB = 10 \log (100) = 10 \log (10^2)$$

$$dB = 10 \times 2 = 20 \text{ 分贝}$$

这个放大器使功率增加了 20dB。这个例子说明了怎样去做这个计算。在真正的业余无线电台上，我们可能用一个放大器使把功率从 15W 放大到 150W，接着再用一个放大器把功率从 150W 放大到 1500 W。每个放大器获得 10dB 的增益（注：用“分贝”做单位时，放大倍数就称之为增益），这是比较真实的数据。

注意到上面计算中， $\log 100$  也就是  $\log 10^2$ ，等于 2。 $\log$  是对数 (logarithm) 的缩写，也就是说 10 为底的幂的对数，就等于这个幂的指数。这样，1000 的对数就是  $\log 10^3$ ，等于 3。那么一百万的对数是多少呢？

如果你把一百万写成  $10^6$ ，然后得到  $10^6$  的对数就是 6。完全正确！如果你需要的都不是 10 或 100、1000（等）数的对数，那么最方便的方法就是利用手边的计算器。按照下列顺序按键，你就可以得到 500 的对数：

$$\log 500 =$$

得到的答案是 2.7。

如果功率减少了怎么办呢？好，让我们来看一个例子然后再弄清楚。我们可以继续上面的问题，测量到达天线的实际功率。在这个电台，一个很长的电缆连接发信机和天线，因

为在电缆上的功率损失，我们测得天线上的功率只有 150W。这次我们将放大器 1500W 的输出功率作为参照功率，我们想对比天线的功率和放大器的功率。再次使用公式 E-2，帮助我们回答这个问题。

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{1500}{15} \right)$$

$$\text{dB} = 10 \log (10^{-1})$$

$$\text{dB} = -10 \text{ 分贝}$$

负号告诉我们功率比基准功率要小。当然，我们知道因为天线上的功率比放大器产生

的功率要小。那个功率到底是怎么回事？一些能量在经过同轴电缆时变成了热量以及其他在电缆中的损耗。所有的同轴电缆中都会有一些损耗。如果你的电缆在任何合理的长度内有 10dB 的损耗，显然，这不是个好事情！电缆中 10dB 的损耗，意味着输入功率的 90% 以热量的形式损耗了，而电缆只输出了 10% 的功率。如果损耗 20dB（非常糟糕的状态），那么输入功率有 99% 变成热能，而只有 1% 的功率被输出。这时是做些改变的时候了：将天线和发射机靠得更近一些（电缆变短意味着损耗将减小），或者更换一根好的电缆。

## 分贝和功率的比值

我们经常用分贝来比较电路中的功率电平，你怎样求出功率电平的分贝值呢？首先选出你想要作为对比的功率强度，这是你的基准功率强度，通常是初始功率。它也许是信号经过放大器前或者是经过电缆到达天线前的功率。接着，用新的功率除以你选定的基准功率，求出功率之比的对数。最后，在计算结果前乘以 10。下面的几个例子将告诉你计算分贝是多么地容易。

如果这些比值像 10, 100, 1000 等，你甚至不需要计算器就可以求出它们的对数。小于 1 的 10 的倍数，像 0.1, 0.01, 0.001 等也非常容易。利用你的计算器和我们一起完成几个例子，这样你很快就可以不用计算器完成这样的对数计算。下面是一些简答的例子。

$$\log(1) = \log(10^0) = 0$$

$$\log(10) = \log(10^1) = 1$$

$$\log(100) = \log(10^2) = 2$$

$$\log(1000) = \log(10^3) = 3$$

$$\log(0.1) = \log(10^{-1}) = -1$$

$$\log(0.01) = \log(10^{-2}) = -2$$

$$\log(0.001) = \log(10^{-3}) = -3$$

让我们假设你有个工作在 2 米波段上的业余无线电收发信机，你的收发信机的输出功率是 10W，但你希望有个更大点的功率去使用远处的中继，此时放大器正是你所需要的设备。连接上新的放大器后，你再次测量你的输出功率，发现现在的功率是 100W，那么使用放大器后功率增加了多少分贝呢？在这种情况下，

我们用 10W 的信号作为基准功率。100 除以 10 得到功率的比值。

$$\text{功率比值} = \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{D-3})$$

这里：

$P_0$  是基准功率强度；

$P_1$  是要和基准电平对比的功率强度。

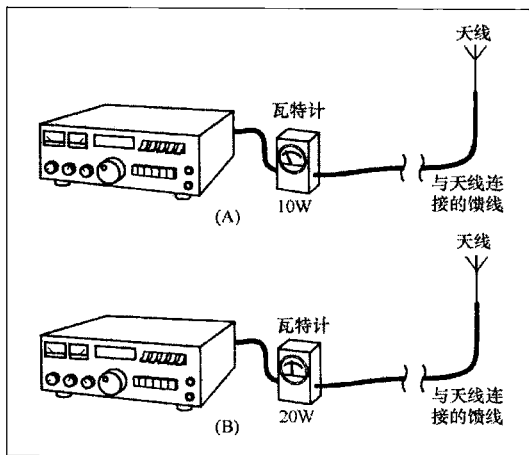
$$\text{功率比值} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{100\text{W}}{10\text{W}} = 10$$

现在求出功率比值的对数。

$$\log(10) = \log(10^1) = 1$$

最后，把这个结果乘以 10

$$\text{分贝} = 10 \times 1 = 10$$



图D-2：一台业余电台收发信机的输出功率是10W，在对收发信机进行了一些调整之后，你再次测量输出功率，现在的功率增加到20W。正文叙述了在电路调整后增加的分贝的计算。



放大器把你 2 m 波段信号的功率增加了 10dB。

现在假设放大器把你的信号增加了 1000W。再次把 10W 作为你的基准功率，用新的功率除以基准功率。

$$\text{功率比值} = \frac{P_1}{P_0}$$

$$\text{功率比值} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{1000W}{10W} = 100$$

现在求出功率比值的对数。

$$\log(100)=2$$

把这个结果乘以 10 得到分贝数

$$\text{分贝} = 10 \times 2 = 20$$

如果我们把这些步骤整理在一起变成一个方程，我们可以得到分别的定义：

$$\text{分贝 (dB)} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (\text{D-4})$$

这里：

$P_0$  是基准功率强度；

$P_1$  是要和基准电平对比的功率强度。用这个方程计算功率电平的分贝值。

你必须知道功率的确定比值，因为这个比值经常发生变化。例如，我们来看看，如果把已知的功率增加 1 倍会发生什么。假如从

2mW 功率的电路开始，如果我们把功率增加一倍到 4mW，那么功率将增加多少分贝？我们从分贝的基本定义（方程 E-4）着手。

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{4\text{mW}}{2\text{mW}} \right)$$

$$= 10 \log (2)$$

$$= 10 \times 0.3 = 3.0\text{dB}$$

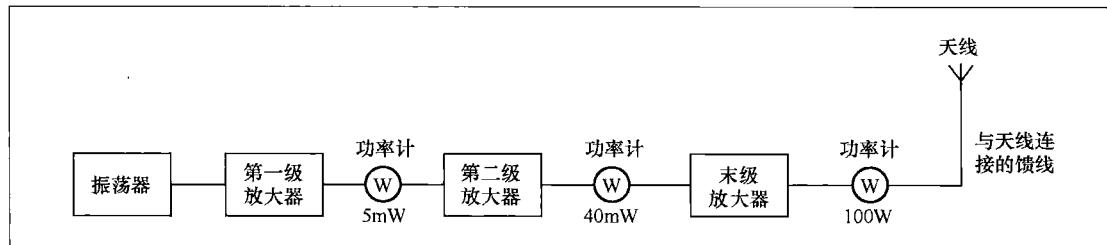
当我们把功率加倍时，功率有 3dB 的增加。无论实际功率多大，这都是完全正确的。让我们来看一个大功率电平的例子，它们增加的分贝值是一样的。

我们测量一个业余电台收发信机的输出功率，发现其功率是 10W，把这个功率作为基准功率，在对电路进行调整后，我们再次测量它的发射功率，这次测得的发射功率增加到了 20W，用分贝计算，功率增加了多少？方程 E-4 将帮助我们解决这个问题。

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$= 10 \log \left( \frac{20W}{10W} \right)$$

$$= 10 \log (2)$$



图D-3：一个简单的业余无线电收发信机放大振荡器的信号，然后把信号供给天线。它使用了多级放大。其中一级的输入功率是5mW，从这一级输出的功率是40mW。正文叙述了如何计算这个放大级的增益。

$$= 10 \times 0.3 = 3.0\text{dB}$$

所以收发信机的调整使我们的功率增加了 3dB。

假如你测量另一台收发信机的输出功率，测得其功率是 100W，稍后，试验这台收发信机的新电路后，你测出输出功率是 50W，在输出功率上，你的试验结果是什么？功率改变了多少分贝？再次使用公式 E-2 帮助我们解决这个问题。

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{50\text{W}}{100\text{W}} \right)$$

$$= 10 \times \log (0.50)$$

$$= 10 \times (-0.30) = 3.0\text{dB}$$

虽然你的两个例子中功率强度不同，但都有 3dB 的改变。这是关于分贝的重要一点。它比较两个功率强度，分贝值取决于功率的比值，而不是取决于真正的实际功率。功率电平

3dB 这个值也非常重要，因为它说明一个功率强度是另一个功率强度的 2 倍。功率增加到 2 倍，分贝增加 3dB，功率减小到一半，分贝减小 3dB。

只要你把基准功率乘以或除以 2，你的功率将有 3dB 的改变。也许你会猜想，就是如果你把功率乘以 4，就有 6dB 的增加，你把功率乘以 8，就有 9dB 的增加。这两种情况你的猜想都是正确的。

假设测量出部分电路的功率是 5mW，而测出另一部分电路的功率是 40mW，用 5mW 的值作为基准功率，那么 40mW 的功率增加了多少分贝呢？

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right)$$

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{40\text{mW}}{5\text{mW}} \right)$$

$$= 10 \log (8.0) = 10 \times 0.9 = 9.0\text{dB}$$

## 附录E

# 电子学与业余无线电 术语表

**电磁波吸收**——电磁波穿过任意物质后自身的能量损失。这部分损失的能量可被转化为热能或其他形式的能。电磁波吸收通常是指电磁波在穿越电离层时的能量损失。

**吸收式波长计**——一种测量频率或波长的设备。当波长计的频率与测量电路的谐振频率相等时，会从电路中吸收一部分能量。

**爱德考克天线阵**——一种无线电定向天线阵列，它由两个具有  $180^\circ$  相位差的垂直辐射单元构成，并且可以旋转。

**导纳**——阻抗的倒数，通常用来辅助计算并联电路中的阻抗。

**阿尔法 ( $\alpha$ ) 比率 (共基极电流放大系数)**——晶体管集电极电流与发射极电流的比值。结式晶体管的  $\alpha$  值在  $0.92 \sim 0.98$ 。

**阿尔法 ( $\alpha$ ) 截止频率 (共基极截止频率)**——用来表示晶体管可用频率上限的术语。共基极放大器工作在阿尔法截止频率时的增益是其工作在  $1\text{kHz}$  频率时的  $0.707$  倍。

**交流电**——在导线中的流动方向随着时间周期性变化的电流为交流电流。外加电压的极性改变并导致电流的方向也发生变化。这种电流方向反转的速率等于交流电的频率，并一直持续下去。

**交流发电机**——可以产生交流电流的设备。

**交流发电机噪声**——一种常见的传导干扰形式。比较有代表性的传导干扰是接收信号或发射信号上感应产生的音调噪声。交流发电机噪声的音高随着发电机的转速而变化。

**业余无线电爱好者辅助会**——由 ARRL 各分部主管管理的志愿性组织，其主要目标是促进业余爱好者的自律和对法律法规的遵守。

**业余无线电通信**——利用业余无线电电

台进行的非商业目的的通信。整个通信过程纯粹是出于个人目的，且与金钱和商业利益无关（这里所说的金钱包括货币或实物等任何形式的报酬）。

**业余无线电操作员**——持有有效的业余无线电台操作执照的人员。在美国，由联邦通信委员会负责颁发相关执照。

**业余无线电服务**——由业余无线电爱好者开展的无线电通信服务，包括自我训练、相互通信和技术研究等项目。

**业余无线电台**——得到许可开展业余无线电服务的电台，包括以进行业余无线电通信为目的而安装在特定地点的必要设备。

**安培 (A)**——电流的基本单位， $1$  安培相当于在  $1$  秒内有  $6.24 \times 10^{18}$  个电子穿过某一特定点。通常缩写为 **amps**。

**放大器**——使用电子管或晶体管来增大信号电压、信号电流或信号功率的电路或设备。放大器件可以使用一个较小的信号来控制外源电流或电压，使得较小的输入信号经过放大后出现在电路或设备的输出端。

**调幅**——一种将携带信息的信号与射频载波相互融合的方法。在双边带语音调幅传输中，我们使用语音信息来改变（调制）射频信号的振幅。短波广播电台和工作在标准广播波段 ( $510 \sim 1600\text{kHz}$ ) 的电台均使用这种调幅方式。业余无线电爱好者很少使用双边带语音调幅，他们使用的是一种变体，叫做单边带 (SSB)。

**AMTOR**——业余无线电传系统的简称。AMTOR 具有纠错能力。具体请参见自动重传请求 (ARQ) 和前向纠错 (FEC)。

**“与”门**——只有当两个输入端都是  $1$  时，输出端才为  $1$  的逻辑电路。

**阳极**——连接至电源正极的接线端。

**天线**——为了把所加载能量以电磁波的形式辐射出去所特别设计的一种电子电路。天线是可逆的，当电磁波通过天线时也会在其中产生感应电流。天线可用于发射和接收无线电波。

**天线带宽**——天线具有良好工作性能的频率范围。通常，天线带宽以一段频率范围来表示。在这个范围内，天线的驻波比会低于某个给定值。

**天线效应**——简单环形天线的两种操作模式之一，此时，环形天线将会表现出小型全向垂直天线的特性。

**天线效率**——天线辐射电阻与天线系统总电阻的比值。

**天线切换开关**——用于将发射机、接收机或收发机与数个天线相互连接并进行切换的开关。

**远地点**——卫星轨道（如月球）上距离地心最远的一个点。

**视在功率**——在不考虑电路电压有效值和电路电流有效值之间的相位角的情况下，电压和电流有效值的乘积就是视在功率。

**上升过顶**——相对于某一地面站，航天器向北方运行的卫星过顶。

**ASCII**——美国信息交换标准码。这是一种在计算机和无线电传设备中使用的7位数字编码。

**无稳态多谐振荡器**——一种在两个不稳定状态间交替变化的电路。无稳态多谐振荡器可以看作是方波振荡器。

**异步触发器**——输出状态与数据输入有关而与时钟信号无关的电路。

**原子**——构成所有物质的基本单元。在

原子内部，密实的原子核带有正电荷，其周围环绕带有负电荷的电子云。由于正电荷和负电荷的数量相等，因此原子不带电。

**衰减**——减小振幅。

**ATV（业余电视）**——一种可以使用商业传输标准的宽频电视系统。业余电视只能在70厘米波段或更高的频率下使用。

**音频（AF）**——人的耳朵可以察觉到的频率范围。声音频率通常在20Hz～20000Hz。

**音频整流**——由被设备整流和放大的强射频场所导致的对电子设备的干扰。

**声频频移键控**——通过切换馈送到FM发射机麦克风输入端的两个音调来发送无线电传信息的方式。常用于VHF和UHF波段的无线电传。

**极光**——来自太阳的带电粒子与地球磁场相互作用而在地球极地上产生的一种大气层扰动现象。极光通常表现为一种有色光，居住在地球磁极区域附近的人可以观察到。极光会阻碍高频无线电通信，但可以增强甚高频无线电通信的能力。极光分为可见极光和无线电极光。

**自动增益控制**——可以在一个宽阔的输入范围内产生相对稳定的输出振幅的放大器电路。

**自动重传请求**——一种AMTOR模式。在自动重传请求模式（也称为模式A）中，两个电台总是相互确认对方发送的信息。如果数据在传输过程中丢失，该数据将被不断地重发直到接收方确认已正确地接收。

**自动转接器**——允许中继台用户通过中继台打电话的设备。

**雪崩点**——在二极管特性曲线上，反向偏置电压的微小增加都会引起反向电流急剧增

大的一个点。

**平均功率**——在纯电阻交流电路中，等效直流电流和电压的乘积为平均功率。当所加电压为正弦波时，其为功率峰值的一半。

**方位角等距投影图**——以某一地理位置为中心，陆地的其他部分从这个点作投影形成的地图，也称为大圆图。在使用定向天线与特定位置进行通信时，大圆图可以有效地确定定向天线的指向。

**反电动势**——因电流变化而在感应线圈上产生的与外加电压方向相反的电动势（电压）。在一定条件下，它的值可以与外加电压的值相等。

**反向散射**——信号在经过电离层后，有一小部分被地球表面重新反射的过程。被反射的信号可能会沿着多条不同的路径重新进入电离层，然后被再次折射回地球表面。反向散射可以辅助与盲区内的无线电台进行通信。

**平衡馈线**——由两条具有同值反向电压的对地导线组成的对称馈线。

**平衡调制器**——在单边带抑制载波发射机上使用的电路，用来合并语音与射频信号。平衡调制器的输入信号被相互隔离，而且也与输出信号相互隔离，因此只有两个输入信号的差值到达输出端。

**巴伦**——平衡/不平衡转换器的缩写，可以实现平衡负载和不平衡负载之间的相互转换。通常使用巴伦把不平衡馈线接到平衡天线上。

**带通滤波器**——只允许一定频率范围内的信号通过的电路。带通滤波器对不在这个频率范围内的信号具有衰减作用。

**波段规划**——划分无线电频谱并在相应部分内进行操作的协议。波段规划为诸如

CW、SSB、FM、中继台和单向通信等不同模式的业余无线电操作保留了固定的频率。

**频带扩展**——一种接收机的质量指标，用来描述相邻两个电台之间的最小频率间隔。我们通常以调谐旋钮旋转最小单位所改变的频率千赫数来表示频带扩展。注意，频带扩展会影响频率的分辨率。

**带宽**——用赫兹表示的频率范围。在这个范围内，信号低于峰值电平但强于某指定值。比如，如果某信号在  $\pm 3\text{kHz}$  的范围内，其强度都强于峰值电平的一半，那么这个信号 3dB 的带宽就是 6kHz。

**底部加感**——通过在垂直天线底部插入一个具有特定电抗值的线圈，以抵消天线的容性电抗，从而产生谐振天线系统的技术。

**电池**——将化学能量转化为电能的设备。电池提供了多余电子来形成电流并提供了电压或电动势来推动这些电子在电路中流动。

**波特**——用来描述数字信号传输速率的单位。对于单通道信号来说，1 波特等于每秒传输 1 比特。

**博多 (Baudot) 码**——在电传应用中使用的五位数字码元。

**指向性天线**——一种具有方向性的天线。为了能覆盖不同的方向，指向性天线必须能够旋转。

**波束宽度**——与指向性天线相关，指的是在最大辐射方向两侧，辐射功率下降至峰值功率的一半 (3dB) 时两个方向之间的主瓣宽度，用两个方向之间的夹角来衡量。

**拍频振荡器**——为接收机乘积检波器提供信号的振荡器。在乘积检波器中，拍频振荡器信号与入流的信号混合产生一个音频信号。

$\beta$ ——晶体管集电极电流与基极电流的

比值。即使某些晶体管的型号相同，它们的贝塔值也可能差异甚大。

**$\beta$  截止频率**——共发射极放大器的增益是频率为 1kHz 时增益的 0.707 倍时的频率点。

**双极性晶体管**——通过在两层同类型的半导体材料（N 型或 P 型）之间扩散一层相反类型半导体材料的方式来形成两个 PN 半导体结的晶体管。

**双稳态多谐振荡器**——具有两个稳定输出状态的触发器的另一个名字。

**帧间隔**——视频信号的一部分，用于确保回描的过程不被看见。

**泄漏电阻**——接在电源滤波电容上的大阻值电阻。当电源关闭时，泄漏电阻可以把电源滤波电容中残留的电荷全部释放掉。

**框图**——使用方框来表示复杂设备的元件或复杂过程的图形。框图可以表示各部分之间的相互关联。

**阻塞**——因为附近强信号的存在而导致接收机不能正常接收到所需要的微弱信号的状态。

**击穿电压**——可以在绝缘材料上产生电流的电压。不同的绝缘材料其击穿电压的大小也不相同。此外，击穿电压还与绝缘材料的厚度有关。

**巴特沃斯滤波器**——通频带的频率响应曲线尽可能平滑的滤波器。该滤波器是在巴特沃斯多项式的基础上设计的，可以用来计算输入/输出特性。

**旁路电容**——在某些电路元件周围提供一条相对低阻的交流通路的电容器。

**呼叫频率**——为建立通联而保留的频率。一旦两个电台之间的建立起通联，它们就应改频到另一个未被占用的频率上。

**（陷波表的）电容耦合**——利用电场把陷波表振荡器中的能量转移到调谐电路中的方法。

**电容器**——由两个或多个导电板组成，板间用绝缘材料进行隔离而成的电子元件。电容器把能量存储在静电场中。

**滤波电容器**——一种电源滤波器，装有一个直接与整流输出相关联的电容。

**俘获效应**——一种在调频系统和调相系统中需着重提及的效应。在这些系统中，到达解调器的信号中最强的一个将进入后续接收电路中。你无法判断是否存在其他微弱的信号。

**碳质电阻器**——用来限制电路中电流大小的电子元件，由碳粉和黏土混合制作而成。

**碳膜电阻器**——在圆形陶瓷架上沉积一层碳膜而形成的电阻器。

**心形辐射方向图**——在一个方向有一个单一的巨大主瓣，在相反方向有一个狭窄深长的零信号点的心形天线辐射图。

**阴极**——连接至电源负极的接线端。

**阴极射线管**——可以将电子束聚焦在冷光屏幕上的电子射线管。通过改变光电出现在屏幕上的位置可以产生图形。阴极射线管经常用在示波器中和电视机的显像管中。

**空腔谐振器**——一个具有很高  $Q$  值的调谐电路，某一个特定频率的电磁波可以无衰减或极少衰减地通过；但是在其他相近频率下，电路将表现出很高的阻抗。

**中心加感**——在天线振子的中央或附近串联一个电感来抵消天线容性电抗的技术。通常在天线振子小于  $1/4$  波长时使用。

**百分之一**—— $10^{-2}$  的公制前缀，或者是除以 100。

**陶制电容器**——在两个或多个导电板

之间用陶瓷绝缘材料进行隔离而形成的电子元件。

**特性阻抗**——电路表现出来的对电流的阻碍作用。除了电阻外，阻抗还包括其他因素。通常应用在交流电路中。理想情况下，天线馈线的特性阻抗与发射机的输出阻抗和天线输入阻抗相等。

**机壳接地**——电路中所有与电源相连部分共同电气连接。

**契比雪夫滤波器**——通带和阻带频率响应幅度等波纹波动的滤波器。它向阻带的转变要比巴特沃斯滤波器更尖锐。契比雪夫滤波器是基于可以计算输入/输出特性的契比雪夫多项式。

**扼流圈输入滤波器**——感应器（扼流圈）直接与整流输出端相接的电源滤波器。

**圆极化**——具有旋转电场和磁场的电磁波。如果电场矢量按顺时针方向旋转，就称为右旋圆极化；如果是逆时针方向旋转，则称为左旋圆极化。注意确定极化方向时以人站在发射天线的后面为准。如果是一个接收天线，则以人站在天线前方为准。

**限幅**——因为过调制而导致语音波形的峰值在发射机上被截断的现象。通常也称为平顶。

**同轴电缆**——coax（读音为 ko1-aks）。指一种导体包于另一种导体内的馈线。同轴电缆的中心导体被塑料、泡沫或气态绝缘材料所包裹。绝缘材料外层被屏蔽导体所覆盖。最后，再使用聚乙烯绝缘材料封装整个电缆。

**同轴电容器**——用来抑制噪声的圆柱形电容器。需要进行过滤的线路与电容器两端相接，第3个接线端作电接地使用。电容器的一侧为两个端点之间提供了直流通路，另

一侧接地。

**电键**——产生莫尔斯电码的开关设备。

**电码练习振荡器**——可以产生音频单音的设备，用于进行莫尔斯电码的学习。

**耦合系数**——两个线圈之间的互感效应的测量单位。耦合系数越大，线圈上的互感就越强。耦合系数也可以用来衡量能够在线圈之间转移的能量总量。

**线圈**——缠绕成一系列环状的导线。

**色码**——用不同颜色来表示不同数值的方法。通过在电阻器或其他元件上印上有色条纹可以表示它们的值。

**通信终端**——在计算机控制下对 RTTY 和 CW 信号进行解调，并将结果显示在计算机或 ASCII 终端上的设备。通信终端也可以从计算机或其他终端上接收信息并将其调制为待发送信号。

**压缩扩展**——在振幅压扩单边带系统中，在发射机中压缩语音信号以及在接收机中对其进行解压的过程。

**互补金属氧化物半导体（CMOS）**——用来制造数字集成电路的一种构造元件。CMOS 由位于同一芯片上的 N 沟道金属氧化物半导体（MOS）设备和 P 沟道 MOS 设备组成。

**复数**——包含一个实部和虚部的数。当有些量（如阻抗）是由两种不同的量（如电阻和电抗）组合而成时，可以用复数来表示。

**复合视频信号**——由实际的图形信息、消隐脉冲和同步脉冲组成的一个完整的视频信号。

**电导系数**——电阻的倒数，是导纳复量的实部。

**传导噪声**——通过与无线电设备相连的电源导线而进入到无线电发射机或接收机上的



电噪声。

**导体**——含有大量自由电子，可通过电流的物质。

**已连接状态**——两个使用分组交换的电台之间正在相互通信的状态。当接收方正确接收到传送的数据时会返回一个确认消息。

**定k式滤波器**——基于影像参数法设计的滤波器。在通带范围内，其串臂阻抗与并臂阻抗的乘积与频率无关。

**竞赛**——一种空中通联操作活动。不同的竞赛有着不同的目标，如在给定的时间内尽可能多地与其他业余无线电爱好者通信，尽可能与不同国家的业余无线电爱好者进行通信，或是联络的范围覆盖某一个州内所有的郡，诸如此类。

**连续波**——在业余爱好者的眼里，这是莫尔斯电码通信的同义词。爱好者通常采用插入发射机送出的连续波信号的方式来形成莫尔斯电码通信所需要的点和划。

**主控操作员**——已经取得电台操作执照，并负责业余无线电台的信息传输的业余无线电爱好者。

**协调世界时 (UTC)** ——以穿越英格兰格林尼治的本初子午线为准的时间系统。

**磁芯**——位于线圈中心的磁性材料，加入磁芯影响线圈的电感量。

**电晕放电**——静电荷聚集在天线上（通常是移动天线），使得天线周围的空气绝缘层发生电离，并发出淡蓝色光芒的情形。

**计数器（除法器，n路除法计数器）**——每当接收到一个输入信号后，就从一种状态跳到下一个状态的电路。计数器在接收到预定数量的输入信号后，会产生一个输出信号。

**耦合电容**——当交流信号的频率高于某

个频率时，耦合电容在电路中表现为一条低阻的通路。当交流信号的频率较低或信号为直流信号时，耦合电容表现出高阻。由于它对直流信号和低频率交流信号有阻碍作用，也称为隔直电容。

**CQ**——请求与任何人通话时所用的一般性呼叫。

**临界角**——如果无线电波以大于此电波频率的临界角的角度离开天线，那么电波就会穿过电离层而不会回到地面。

**临界频率**——垂直入射的无线电波被电离层反射回来的最高频率。如果无线电波的信号频率高于临界频率，将会穿过电离层，而不再返回到地面。

**交叉调制**——一种由于无用信号调制在目标信号的载波上形成的互调。

**晶体振荡器**——使用压电晶体（通常为石英）的机械共振作为主频决定元素的振荡器。

**晶格滤波器**——使用压电晶体（通常为石英）作为电抗元素的滤波器。晶格滤波器通常用在接收机或发射机的中频级。

**晶控标志发生器**——使用石英晶体来设置频率的振荡电路，其输出带有丰富的谐波可用于确定接收机波段的边缘。大约每100kHz或更少就会产生一个输出。

**方框天线**——天线振子为四边形的天线。

**电流**——电子在电路中的流动。

**截断频率**——在高通、低通或通带滤波器中，滤波器的输出功率降低到输入功率的1/2时的频率为截断频率。

**D层**——电离层的最低层。D层对短波无线电传播几乎没有作用。它对穿过的电波起到吸收的作用。在昼间，这种吸收对低于7.5MHz的信号有着明显的影响。

**达松伐耳表头动作机构**——将线圈悬挂在一个永磁体两极之间的表头动作机构。当线圈中有直流电流经过时会致其旋转，其旋转量与电流大小成比例。此时安装在线圈上的指针可在刻度盘上指示出偏转量来。

**划**——在莫尔斯电码中的长音。读音为“嗒”。

**分贝 (dB)** ——能被人耳感知到的声级最小变化。功率增益和衰减都可使用分贝来表示。1 分贝的 1/10 等于两个功率比值的对数。 $\text{dB} = 10\log(P2/P1)$ 。

**倾角**——天赤道与空间中的物体所形成的角度，分南北两边。

**三角环形天线**——方框天线的一种变种，其天线振子形状为三角形。

**三角形匹配**——在明线传输电缆和非对称的半波辐射器之间的一种阻抗匹配方式。馈线电缆向外散开，并与中心点附近的天线导线对称相接。连接后的形状看起来有点像希腊的大写字母 Delta。

**耗尽模式**——JFET 或 MOSFET 的操作模式的一种，电流大小由加于栅极的反向偏压进行控制。

**耗尽区**——位于半导体 PN 结附近的一个区域。区内的电荷密度很小，并形成了一道电势屏障阻止电流通过 PN 结。一般来说，当 PN 结被加上正向偏压时，耗尽区很薄；加上反向偏压时，耗尽区会变厚。

**下降过顶**——相对于某一地面站，航天器向南方运行的卫星过顶。

**降灵**——当接收机前端受噪声或本地发射机出来的射频影响而导致过载时，接收机的灵敏度发生降低，称为降灵。

**检波器**——接收机将调制信号（语音或

其他信息）从射频信号中检出的电路。

**偏移**——在调频系统中，调制波的瞬时频率和非调制波频率之间的最大差值。

**偏移比**——在调频系统中，最大频率偏移和最大调变频率之间的比值。

**电介质**——一种绝缘材料。当电场在电介质上建立起来后，只需要很少甚至无需额外的能量就可以维持这个电场。

**介电常数**——绝缘材料的一个属性，用来衡量绝缘材料在给定电压下可以存储的电荷数量。

**介质材料**——在很少甚至没有外加能量的条件下可以维持一个（既有）电场的材料。通常为绝缘体材料或非导体。

**数字中继台**——用来转发信号的分组无线电台。这些待转发信号已经标明需要由该台进行转发。

**数字通信**——能够被自动接收打印的业余无线电通信以及计算机之间的直接信息传递。

**数字集成电路**——输出表示为开（1）或关（0）二者之一的集成电路。

**陷波表**——在振荡器当前调谐频率下为另一个谐振于该频率的电路提供能量的可调射频振荡器。陷波表通过指示电流的下降表示出何时电路中被耦合出最多能量。

**偶极天线**——一种带有两个直线排列单元，中间馈电的天线。顾名思义，有两个极。在业余无线电领域，偶极天线通常为半波长。

**直接变频接收机**——用一个混频级把射频信号转化为音频信号的接收机。

**直流电流**——只能沿着一个方向流动的电流。

**定向天线**——在特定方向把辐射能量集

中形成一个或多个主瓣的天线。定向天线的接收方向图和发射方向图相同。

**指向性**——天线把传送能量聚集成束的能力，也表示增强从特定位置接收到的信号的能力。

**引向器**——位于定向天线激励单元前方的寄生元件，用来增强天线前向辐射信号的强度。通常要比激励单元短 5%。

**直接序列**——利用快速的二进制比特流来改变射频载波相位的扩频通信系统。

**直射波**——从发射天线直接到达接收天线的无线电波，也称为“视距”通信。

**分布电容**——线圈匝之间存在的寄生电容。

**掺杂**——向半导体材料添加特定微量杂质，以提供额外的电子或正电荷载体（空穴）的过程。

**多普勒漂移**——实际观察到的信号频率与信号发射频率之间的变化称为多普勒漂移，通常由于卫星相对于观察者进行移动而导致。

**点**——莫尔斯电码中使用的短音，念作“嘀”。

**双刀双掷开关**——一种具有 6 个触点的开关。在双刀双掷开关中，有 2 个中心触点，这两个中心触点可分别与任意一边的对应触点相接。

**双平衡混频器**——对两个输入端平衡的一种混频电路。其输出信号只含输入频率的和值及差值却不含任何输入频率。在双平衡混频电路中，除非两个输入信号都存在，否则没有信号输出。

**漏极**——电荷载体脱离场效应晶体管的部位。等同于电子管的板极。

**漂移**——与运算放大器相关，表现为偏

置电压随温度的变化而变化。通常情况下，偏置电压每摄氏度变化几微伏特。

**激励器**——与馈线直接相连接的天线振子。

**双踪示波器**——具有两个独立垂直输入电路的示波器。双踪示波器可以用来同时观测两个波形。

**波导**——当逆温现象将无线电波限制在大气某封闭层内所产生的无线电波导管效应。

**假负载（假天线）**——为发射机提供合适负载的电阻。假负载可以在不辐射信号的情况下消耗发射机的输出功率。通常，假负载用于测试发射机的性能。

**双工器**——利用腔体将发射机和接收机同时与一副天线相连的设备。在大多数情况（例如在中继台）下，发射机和接收机需要在不同频率下同时运行。

**DX**——远距离的，国外的。

**DX 世纪俱乐部（DXCC）**——一个在业余无线电界享有声望的奖项，授予那些可证明自己已至少与 100 个不同 DXCC 实体进行过联络的业余无线电爱好者。

**动态输入（边缘触发）**——像触发器这样在检测到时钟脉冲的上升（下降）边缘时才进行采样的输入。

**动态范围**——一种接收机性能的度量指标，表示最小可用信号电平和不会在音频输出端产生失真的最大信号电平之间的差异，用分贝来表示。

**E 层**——高度第二低的电离层。E 层只在白天存在，在一定条件下对无线电波有折射作用，程度足以将其反射回地面。

**接地**——与冷水管相连或与接地棒相连的电路连接。

**月面反射 (EME)**——借助月球表面来反射无线电信号,并与其他站点通信的方式。

**地面操作**——通过在太空中运行的无线电台站对无线电信号进行自动中继来完成的业余无线电通信,路径为地面—太空—地面。

**等效全向辐射频率 (EIRP)**——对天线系统辐射功率的一种衡量指标,考虑了发射机输出功率、馈线损耗、其他系统损耗以及相对于全向辐射体的天线增益。

**有效辐射功率**——从天线向特定方向辐射的功率相对量,需要考虑系统增益和损耗。

**有效电压**——交流电压的有效值等于将某一电阻元件加热到相同温度所需的直流电压值。

**电场**——电力对带电物体发生作用的区域。如果位于某区域中的带电物体受到电力作用,那么所对应的空间中就存在电场。

**电力**——一个带电物体通过空间对另一个带电物体施加的拉力或推力。

**电解电容器**——由很薄的金属箔电极和浸泡过化学物质的纸介质组成的极性电容器。

**电磁辐射**——电磁波的另外一个名称,由正交的电场和磁场组成。

**电磁波**——以变化的电场和磁场的形式在空间或物体中传递的扰动。

**电动势**——推动电流在电路中流动的作用力或压力。

**电子**——微小、带负电荷的粒子,通常环绕在原子核周围运动。移动的电子形成电流。

**电子电键 (自动键)**——用来在电路中产生摩尔斯电码点划的设备。电子电键的一个键柄可产生点,另外一个产生划。通过控制旋钮,可以使发送速度在每分钟 5~10 个词到 60 个词甚至 60 个词以上的范围内任意调节。

**椭圆滤波器**——在通带内具有等幅波纹,在阻带内具有无限衰减点的滤波器。该设计基于用来计算输入/输出特性的椭圆函数。

**发射**——由业余无线电台站发射出的信号。

**发射权限**——使用某种发射类型(如莫尔斯电码或语音)的许可。

**能量**——做功的能力;对物体施加外力使其发生移动的能力。

**增强模式**——金属氧化物场效应管(MOSFET)的一种工作类型,此时 MOSFET 的栅极正向偏压控制电流的变化。

**春秋分**——太阳直射点位于地球赤道的日子。春分标志着春天的开始,而秋分则意味着秋天的到来。

**异或逻辑门**——一类逻辑电路。当两个输入中任一个为 1,另一输入不为 1 时,输出为 1;当输入都不为 1,或都为 1 时,输出为 0。

**F 层**——电离层中最高的一层,由 F1 层和 F2 层组成。无线电波经过 F 层的折射后,返回地面。F 层的高度会随着时间、季节和太阳黑子数的变化而大幅度变化。

**传真**——对照片或图像进行扫描,并把信息转化为信号以在异地还原副本的过程。

**虚假或欺诈信号**——以误导或迷惑接收方为目的而发送的信号。例如,在没有实际突发事件时发送的遇险信号就是虚假或欺诈信号。

**法拉**——电容的基本单位。

**法拉第旋转**——当无线电波穿过电离层中电离的磁场时产生的无线电波极化面的旋转。

**快扫描电视 (业余电视)**——业余无线电爱好者使用的电视系统,其视频信号标准与

商用电视标准相同。

**馈线**——发射机和接收机与天线相连时所使用的电线或电缆。参见传输线。

**铁氧体环**——为了增大磁通量而缠绕在铁氧体磁棒上的环形天线。也称为铁氧体棒天线。

**场**——自然界中不可见力所穿过的空间区域。这些不可见力可以是重力，电力或磁力。

**野外通信日**——一年一度的活动，期间业余无线电爱好者在户外架设电台互相联络，并鼓励使用应急电源。

**场效应管**——一种压控半导体器件。在场效应管中，当输入电压变化时，输出电流也会随之变化。场效应管具有很大的输入阻抗。

**场效应管万用表**——一种可以用来测量电压、电流和电阻的多量程计量表。其电路利用一个 FET 放大器来提供一个很高的输入阻抗。因此，读数要比普通万用表的读数更精确。它与真空管电压表等效。

**场强计**——一种简单的测试设备，用来查看是否存在射频能量以及射频场的相对强度。

**填充**——通常因为干扰而请求重复发送先前传输的部分数据。

**滤波器**——允许某些信号通过，但对其他信号具有明显削弱作用的电路。在电源电路中，滤波器可以使交流纹波变得平坦。

**滤波扼流圈**——用于电源滤波器中的大电感。主要用来平滑整流器的脉动直流输出中的纹波。

**发报风格**——每个业余无线电爱好者自身发送莫尔斯电码的独特节奏。

**固定电阻器**——电阻值不可调的电阻器。

**双稳态多谐振荡器**——具有两个稳定的

输出状态，并且在检测到合适的输入信号后会从一个输出状态转换到另一个输出状态的电路。

**折叠偶极天线**——由两条（或多条）相互平行、紧密放置、并在末端连接的半波长导线组成的天线。其中一条导线中部馈电。

**正向偏压**——施加在半导体结上的电压，使其趋向于产生电流。

**正向偏置**——二极管的阳极的电势高于阴极。二极管处于导通状态。

**前向纠错**——业余无线电传通信的一种模式。在前向纠错模式（也叫模式 B）中，每一个字符发送两遍。接收方对收到字符的传号空号比进行检查。如果发现错误，接收方会打印出一个空格，表示接收到了一个出错的字符。

**频率**——交流电流在 1 秒内完成周期性变化的次数。

**频段**——授权给业余无线电通信使用的一组频率。

**频率协调员**——保持记录中继台上下行频率的志愿者。他同时也对希望架设新中继台的爱好者提供建议。

**频率计数器**——对一定时间内电磁波的周期进行计数并给出频率读数的数字化电子设备。

**频率偏移**——调频发射机中的载波频率在调制后与调制前相比发生的变化量。

**鉴频器**——从调频信号中还原音频的电路。鉴频器输出振幅依赖于接收的信号相对于中心（载波）频率的偏离量。

**频域**——一种与时间无关的查看复信号的方式。构成复合波形的各个正弦波成分依频率和振幅在图表或频谱仪的显示器上显示出来。

**跳频**——一种扩频通信系统，其中常规载波的中心频率按照伪随机信道表在一秒钟内变化多次。

**调频**——依据调制信号的瞬时变化改变射频载波频率的过程。调制载波频率的信号可以是音频、视频、数据或其他形式的信息。

**频率权限**——使用一组特定频率进行通信的许可。

**频率分辨率**——接收机表盘上标记之间的间隔。频率分辨率越大，就越容易把靠在一起的信号分离开。需要注意，频率分辨率会影

响到频带扩展。

**频移键控**——通过将射频载波在两个不同频率之间相互切换的方式来传递无线电传信息的一种方式，常用于短波。

**前后比**——定向天线前向辐射的能量与后向辐射的能量的比值。

**全插入 (QSK)** ——通过使用“在发射中切入”的方式，业余无线电爱好者可以收听到编码符号之间的信号。QSK 也允许另一个爱好者不需要等待发送站点传完信息就可以加入到通信中来。

封面

书名

版权

前言

目录

过去·现在·未来& [美] 纳特·沙克纳 著 单伟健 译

美国制& [美] 杰·梯·麦金托什 著 朱荣键 译

霜与火& [美] 雷·布雷德伯里 著 陈珏 译

沙王& [美] 乔治·马丁 著 凌寒 译

大机器要停止运转了& [英] E.M.福斯特 著 何明 译

真名实姓& [美] 弗诺·文奇 著 罗布顿珠 译