

无线电

业余无线电丛书

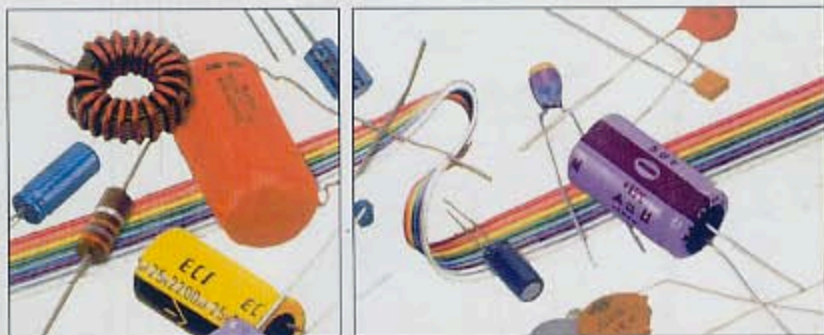
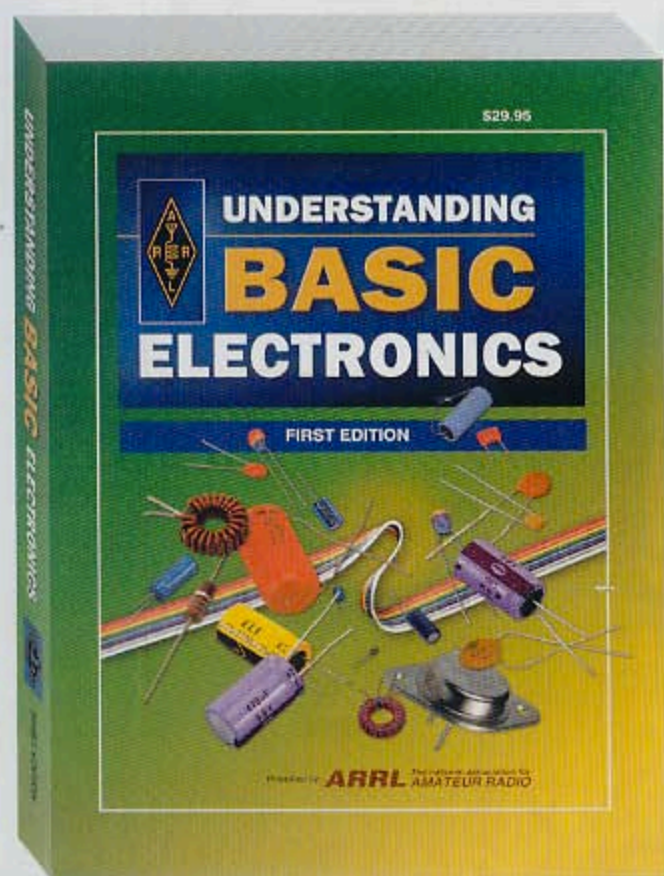


ARRL

The national association for
AMATEUR RADIO

从零起步 学电子

UNDERSTANDING
BASIC ELECTRONICS



[美] Larry D. Wolfgang (WR1B) 著
王龙 (BA4RX) 傅道坤 (BG4XTL) 译

- 全球业余无线电爱好者公认的ARRL品牌
- 受到读者广泛欢迎的电子基础知识读本
- 轻松助您进入有趣的电子世界

中国无线电运动协会推荐



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

无线电 业余无线电丛书



ARRL

The national association for
AMATEUR RADIO

从零起步 学电子

**UNDERSTANDING
BASIC ELECTRONICS**

[美] Larry D. Wolfgang (WR1B) 著
王龙 (BA4RX) 傅道坤 (BG4XTL) 译

人民邮电出版社

北京

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。

这本书由4个主要部分或者称为单元组成，它们是：

必备的教学知识

直流电学初步知识

交流电学初步知识

常用电路元器件

在每个单元中，相关的主题构成一章。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。大多数模块占用2页，当然也有少数的模块占用4页。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。

例如，如果你有很强的数学背景，你可以选择跳过整个第一单元。你已经熟悉了公制单位制了吗？你已经能够解决方程和三角函数了吗？如果是的话，就没有必要在这些章节中花费时间。

学习任何包含你不熟悉的主题的模块。也许你决定跳过数学单元中的大部分内容，但是你对解决对数部分的知识的能力缺乏自信，那么你一定要复习相关的章节。

祝你学习好运。我们希望你轻轻松松地看这本书，享受这本书带给你的乐趣！

业余无线电丛书编委会

主 任：谢飞波（BA1XIE）

副主任：蒋伟（BG1ANA） 陈平（BA1HAM）

委 员：（以姓氏笔画排序）

马惠敏（BG1RAR）	刘涛（BD1DO）	陈方（BA4RC）
陈新宇（BA1RF）	周海婴（BA1CY）	范斌（BA1RB）
龚万骢（BA1DU）	黄彤（BG1WXD）	钱皋韵（BA1KY）
童效勇（BA1AA）	樊绍民（BA1EO）	

业余无线电丛书编委会

主 任：谢飞波 (BA1XIE)

副主任：蒋伟 (BG1ANA) 陈平 (BA1HAM)

委 员：(以姓氏笔画排序)

马惠敏 (BG1RAR) 刘涛 (BD1DO) 陈方 (BA4RC)

陈新宇 (BA1RF) 周海婴 (BA1CY) 范斌 (BA1RB)

龚万骢 (BA1DU) 黄彤 (BG1WXD) 钱皋韵 (BA1KY)

童效勇 (BA1AA) 樊绍民 (BA1EO)

目 录

第一单元 必备的数学知识	2	第二单元 直流电学初步知识	62
第1章 学会和数字打交道	4	第7章 电压——电流的动力	64
一、什么是数?	4	第8章 电流——流动的电子	66
二、实数	6	第9章 电和磁	68
第2章 处理较大和较小的数	8	一、电荷间相互作用规则	70
一、幂和科学记数法	8	二、物质的结构	72
二、幂的运算法则	10	三、磁体和磁场	74
三、购买一个计算器	12	四、电场与磁场相似	76
四、我已经拥有电脑了	14	五、动手实验看电场	78
五、在计算器和电脑上使用指数表示法	16	第10章 导体、绝缘体和电阻	80
第3章 运用等式的技巧	20	一、有的物体比其他物体更容易让电子 流过——导体	80
一、别称它为代数	22	二、有的物体中，电子需要较大的力才能 流过——绝缘体	82
二、简单的方程组	24	三、可控制、阻碍电流的流动——电阻	84
三、代入法解方程	26	第11章 电路	86
第4章 公制计量体系	28	一、串联电路	86
一、国际单位制	28	二、并联电路	88
二、共同的公制前缀	32	第12章 欧姆定律	90
三、公制前缀的换算	34	一、电压、电流和电阻的相互关系	90
第5章 基础三角学	36	二、寻找未知数——欧姆定律“圆”	92
一、直角三角形	36	三、练习及其答案	94
二、三角函数的定义	38	四、欧姆定律在电路和电路元件上的应用	96
三、三角函数的运用	40	第13章 基尔霍夫定律	98
四、直角坐标系	42	一、基尔霍夫电压定律	98
五、极坐标系	44	二、简化串联电路	100
六、坐标系之间的转换	46	三、基尔霍夫电流定律	102
七、用计算器解决三角学问题	48	四、简化并联电路	104
八、三角问题和电脑	50	五、简化混联电路	106
第6章 电子学中的对数	52	第14章 能量和功率	108
一、压缩数标	52	一、能量是做功的能力	108
二、对数的定义	54	二、功率是做功的速度或者是利用能量的 速度	110
三、指数函数——对数函数的反函数	56	三、更多功率的计算	112
四、熟练掌握你的计算工具	58		
五、电脑也能求对数	60		

目 录

第一单元 必备的数学知识2

第1章 学会和数字打交道4

- 一、什么是数? 4
- 二、实数 6

第2章 处理较大和较小的数8

- 一、幂和科学记数法 8
- 二、幂的运算法则 10
- 三、购买一个计算器 12
- 四、我已经拥有电脑了 14
- 五、在计算器和电脑上使用指数表示法 16

第3章 运用等式的技巧 20

- 一、别称它为代数 22
- 二、简单的方程 24
- 三、代入法解方程 26

第4章 公制计量体系 28

- 一、国际单位制 28
- 二、共同的公制前缀 32
- 三、公制前缀的换算 34

第5章 基础三角学 36

- 一、直角三角形 36
- 二、三角函数的定义 38
- 三、三角函数的运用 40
- 四、直角坐标系 42
- 五、极坐标系 44
- 六、坐标系之间的转换 46
- 七、用计算器解决三角学问题 48
- 八、三角问题和电脑 50

第6章 电子学中的对数 52

- 一、压缩数标 52
- 二、对数的定义 54
- 三、指数函数——对数函数的反函数 56
- 四、熟练掌握你的计算工具 58
- 五、电脑也能求对数 60

第二单元 直流电学初步知识 62

第7章 电压——电流的动力 64

第8章 电流——流动的电子 66

第9章 电和磁 68

- 一、电荷间相互作用规则 70
- 二、物质的结构 72
- 三、磁体和磁场 74
- 四、电场与磁场相似 76
- 五、动手实验看电场 78

第10章 导体、绝缘体和电阻 80

- 一、有的物体比其他物体更容易让电子
流过——导体 80
- 二、有的物体中，电子需要较大的力才能
流过——绝缘体 82
- 三、可控制、阻碍电流的流动——电阻 84

第11章 电路 86

- 一、串联电路 86
- 二、并联电路 88

第12章 欧姆定律 90

- 一、电压、电流和电阻的相互关系 90
- 二、寻找未知数——欧姆定律“圆” 92
- 三、练习及其答案 94
- 四、欧姆定律在电路和电路元件上的应用 96

第13章 基尔霍夫定律 98

- 一、基尔霍夫电压定律 98
- 二、简化串联电路 100
- 三、基尔霍夫电流定律 102
- 四、简化并联电路 104
- 五、简化混联电路 106

第14章 能量和功率 108

- 一、能量是做功的能力 108
- 二、功率是做功的速度或者是利用能量的
速度 110
- 三、更多功率的计算 112

第15章 分贝	114
一、分贝的定义	114
二、分贝和功率比值	116
三、基准功率的详细说明	118

第三单元 交流电学初步知识

第16章 频率和波长	122
一、直流信号的电流只沿一个方向流动	122
二、电流可以恒定不变,也可以改变	124
三、如果电流方向改变,就变成了交流信号	126
四、正弦波表示平稳变化的交流电	128
五、正弦波和旋转轮	130
六、转速与波的频率的关系	132

第17章 电容器	134
一、存储电荷,产生电场	134
二、增加极板面积,增强电场强度	136
三、增加极板数量以增加极板的面积	138
四、减少极板间距增强电场强度	140
五、介电常数和电场强度	142
六、决定电容大小的因素	144
七、实用电容器	146

第18章 容抗	148
一、电容器阻碍外加电压的改变	148
二、低频率上有更多的反抗	150

第19章 电感器	152
一、电流产生磁场	152
二、把导线绕成线圈增强磁场强度	154
三、在磁性材料上绕线圈增强磁场强度	156
四、决定电感器电感大小的因素	158
五、电感器以磁场形式存储电能	160

第20章 感应电抗	162
一、电感器阻碍电流的变化	162
二、频率越高电抗越大	164

第21章 电路性能——电路元件的 品质因数	166
一、电路电抗和电阻确定电路性能	166
二、 Q 值越大,元件上串联的电阻越小	170
三、电阻增大,电路 Q 值降低	172

第22章 变压器	174
一、一个线圈的磁场可以在另一个线圈 中产生电流	174
二、变压器可以提高或者降低电压	176
三、匝数比值确定变压大小	178
四、变压器也可以改变电流级别	180

第23章 阻抗	182
一、欧姆定律也适用于交流电路	182
二、电压和电流可能不会同时到达峰值	184

三、电容器上的电压和电流	186
四、电感器中的电压和电流	188
五、电感器和电容器的电路电抗	190
六、RL电路中的电压和电流	194
七、RC电路中的电压和电流	199
八、RLC电路中的电压和电流	202
九、并联电路中的电压和电流	204

第24章 谐振电路	206
一、如果感抗与容抗相等时,会发生什么	206
二、串联谐振电路的条件	208
三、并联谐振电路的条件	212

第四单元 常用电路元器件

第25章 半导体材料	216
一、让我们从原子开始	216
二、半导体掺杂	218

第26章 二极管	220
一、二极管允许电流单向流动	220
二、半导体材料的固态二极管	222
三、二极管特性和参数	224
四、半波整流电路	228
五、全波整流电路	230
六、桥式整流电路	232
七、我们可以把二极管作为开关使用	234

第27章 双极性三极管	236
一、三极管的三明治结构	236
二、PNP和NPN型三极管	238
三、用较小的输入电流来控制较大的输出电流	240
四、偏置三极管	242
五、共发射极电路	244
六、共基极电路	246
七、共集电极电路	248
八、晶体管参数	250

第28章 场效应管	252
一、通过变化的电场控制电流	252
二、结型场效应管(JFET)的构造	254
三、金属氧化物半导体场效应管(MOSFET) 的构造	256

第29章 集成电路	258
一、线性器件	258
二、运算放大器	260
三、数字器件	262
四、定时器	264

第30章 电子管	266
一、热电子发射	266
二、电子二极管	268
三、电子三极管——场效应器件	270
四、有额外控制电极的四极管和五极管	272
五、阴极射线管显示器	274

第一单元

必备的数学知识

这一单元你将学习：

- 什么是数
- 帮助你掌握使用大数和小数的技巧
- 方程的意义以及如何解方程
- 关于公制计量体系
- 如何进行三角形和三角函数计算
- 什么是对数？对数在电子学中的重要性

学习电子学首先要求你能求解一些简单的数学问题。即使你并不想去设计电路，也必须知道如何作简单的运算。数学知识将帮助你理解一个简单的电路是如何工作的。实际上这些运算并不复杂，只需要懂得一些基本的数学运算规则，比如如何进行加、减、乘、除。本单元将解释如何处理你在学习基本的电子学中会遇到的各种数学问题。

数字帮助我们理解电路中某一部分发生改变是如何影响电路中的另一部分。开尔文勋爵，英国著名科学家，认为数字和计算是重要的。开尔文勋爵曾说过，除非你会测量，并且会用数字表达，才仅仅能够开始理解。开尔文也许没提到电子学，但他的观点对现代电子学也同样正确。

许多人对数学都有一点恐惧。但有很多工具可以帮助你学习数学，接受学习的挑战。当我们学习现代电子学时，科学计算器是种很有用的工具（我们这里的“科学”是指这种计算器上有一些键可以进行重要的数学计算）。

你需要一些基本工具做简单试验，以便得到关于电路的实际操作经验。科学计算器对学习电子学也很重要，利用它你可以轻松地解决复杂的问题。科学计算器帮助你思考数字背后的真相。数学可以增长你的电子学知识，提高你的理解能力。

除非你会测量，并且会用
数字表达，你才仅仅能开
始理解。

——开尔文勋爵

第1章

学会和数字打交道

一、什么是数？

数字给我们一个描述发生在我们周围的事情的方法，我们每天都使用着数字。我们用数具体地描述时间、距离以及描述一个物体有多重。举例来说，假设你上班或上学需要花30分钟，回来也需要30分钟。把两个时间加起来，就可以知道你每天花在路上的时间（在这个例子中，你每天花了60分钟或者说1个小时在路上）。再举一例，假设你的卧室长4米，宽3米，把两个尺寸相乘可以知道你的卧室需要铺12平方米的地毯。

数字同样能够表示电路中各种不同的情况。通过简单的计算得到的数据就可以帮助我们弄清楚电路的相关问题。这些计算并不比上面所说的计算路上需要花费的时间或是铺卧室需要买多少地毯更难。如果你对基本表达式很熟悉，你会很容易理解

数字和电子学中的计算。这都很容易举出一些例子来说明。

数是你学习电子学的工具。使用这个工具时，你要弄清科学家和工程师讨论的这些数的含义。当你提到数的时候，绝大多数人想到的是一组“数的数字”（1、2、3、4等）。数学上称这些数为整数。

——整数是数不尽的。如果你想到一个你认为最大的数，你加1就可以得到一个比它更大的数。比如，你想到九亿九千九百九十九万九千九百九十九（就是999 999 999），如果加1，就是十亿（1 000 000 000）。

不管你想的数有多大，你总可以对它再加1。数学家在讨论无穷大的时候就是用这样一种思考方式。所以整数有无数个！这就有点像在晴朗的夜晚，走到户外，有数不清的星星。当你以为自己数完的时候，另外有人用望远镜，告诉你还有一些肉眼看不到的星星。通过望远镜，你发现能看到的星星确实比原来数的要多2颗甚至更多。即使有办法弄清哪些是已经数过的星星，要想真的数清也是不大可能的！

表示数有一个简单的方法就是在纸上画一条



图 1-1 你可以画出这样一个简单的数轴。



线。在线上取一点，穿过线做上标记，在线上把这个标记记作 0，然后在 0 这一点的右边（大约 10 毫米）处再找一点，记作 1。把线延长，以同样的间隔找下一个整数，就像找 1 那样。我们把这条线称作数轴。当然，你肯定在数尽数字之前就把纸用光了，但你明白了整数是无穷的含义。

若在 0 的左边还留有空间，你也可以填上一些数，但在前面要添负号。比 0 小的数叫作负数（有时比没有还少会是个不小的麻烦。比

如，当银行认为你的支票账户透支时，他们会对你很不满意）。

由于负整数和正整数一样多，数的定义就扩展到 0 的两边。我们通常用符号 ∞ 表示整数。使用这个符号，我们可以用下列的式子表示所有的整数：

$$-\infty < I < +\infty$$

如果 I 表示任何整数，那么这个式子告诉我们，整数的范围是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 。

二、实数

如果在你的数轴线上两个整数点之间再取一个点会怎么样呢？没有哪个整数可以表示它，但你很容易看出来这一点是存在的。如果你在 5 和 6 的中间找到一点，我们可以认为此点表示 5.5。见图 1-2，在 1 250 和 1 251 中间的那点可以看作 1 250.5。这点将两个连续整数之间的线



图 1-2 不难发现数轴上整数之间有一些空间。比如，在 5 和 6 的中间取一点，我们可以把这点叫做 5.5。

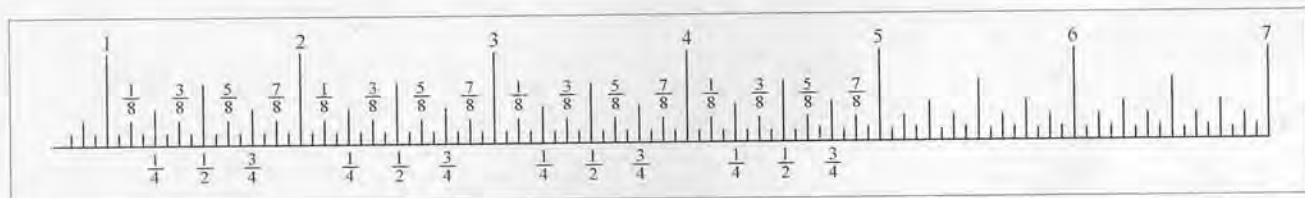


图 1-3 通过放大数轴上的刻度，你可以在两个整数之间包含更多的值。数学家思考数轴时，他们想象在两个整数之间有无数个点。

段平分。现在我们将平分的两部分再平分。则每一部分就是原来两个整数间距离的 $1/4$ 。

如果你开始把数轴看成一把直尺，你是对的！就像是在尺子上将每厘米划分为越来越小的部分。将两个整数间四分之一长的线段平分，则可平均分为 8 等份。这样，每一部分表示两个整数间的八分之一。

现在你可能已经意识到，两数之间我们可以等分无穷次！实际上，当你等分数轴时，你很快就会发现无法再等分成更小的部分。当笔画的宽度比要等分的空间还要宽时，你会觉得已经划分到了极限，但是如果你另画一条线，将两个整数之间留有更大的距离，或者用更细的笔，那么你就可以画出更小的部分。图 1-3 表达的就是这个意思。

记住，我们用数轴来描述数字，无论数轴上的部分有多么小，总能将它等分！

用小数代替分数表示将会更加简便，比如， $1/2$ 就是 0.5， $1/4$ 就是 0.25 等。同理 $1250 \frac{1}{2}$ 就是 1 250.5。事实上，使用小数可以表示分数无法表

示的数，比如 3.141 592 654……（省略号表明这个数并未写完，不是精确值）这个数在有关圆的运算中非常重要。在数轴上没有哪个简单的分数能准确地表示这个点。

我们的数轴，包括前面所画的数轴上的点，再加上每两点之间所有能想象到的数，就是数学上所称的实数。我们可以像整数一样用一个式子表达它，如果用 R 代表实数（数轴上的任一点），那么

$$-\infty < R < +\infty$$

所以，实数包含一切可能的数值。

你已经明白数可以非常大。在数轴上表示巨大的数需要更大的空间，想象一下试图简单地在数轴上添加 4 567 835 251 000 000 000 或 85 432 164 749 000 000 000 这样的数，就会令人混淆。图 1-4 表明，我们可以扩展数轴的范围来表示越来越大的数。

在靠近零刻度的另一端，在 0 和 1 之间，与 0 越接近则数越小。在电子学中，经常会出现小数点和非零数间有许多个 0 的小数。比如，你必须处理

图 1-4

像 0.0
数。
些数

To 0

图 1-5
上任意

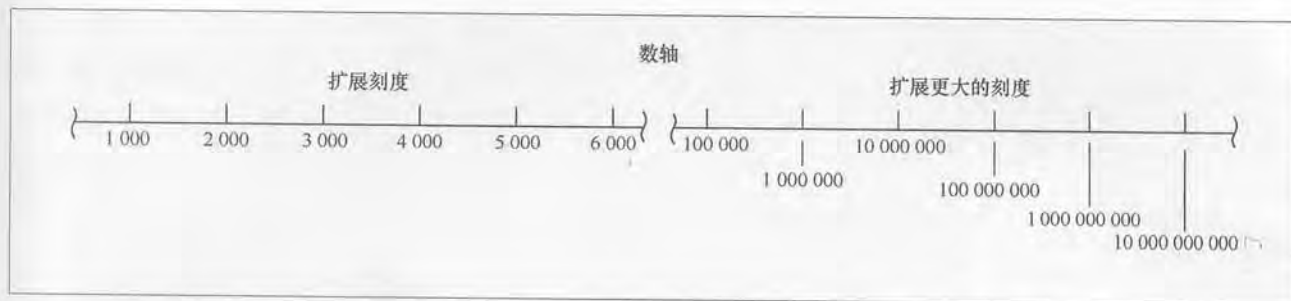


图 1-4 当数越来越大时，扩展的刻度可以显示距离 0 很远的数的点。与此类似，在 0 的左边也有相同的刻度表示相应的负数。

像 0.000 000 000 053 7 或 0.000 000 000 049 1 这样的数。小数点后 0 越多，数越小（即越接近于 0）。这些数也同样会把人搞晕，而且很容易弄错 0 的个数。

图 1-5 扩展了数轴上 0 和 1 间的刻度，表示在向零移动时，数越来越小。

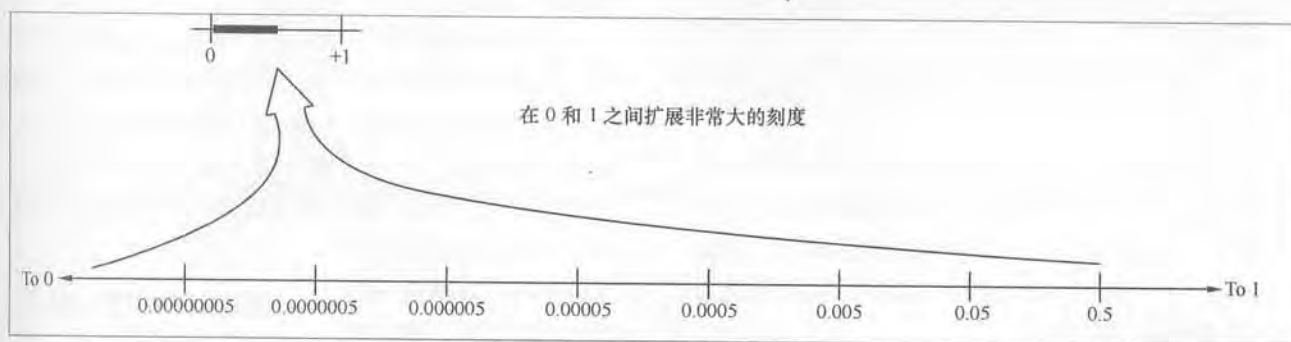
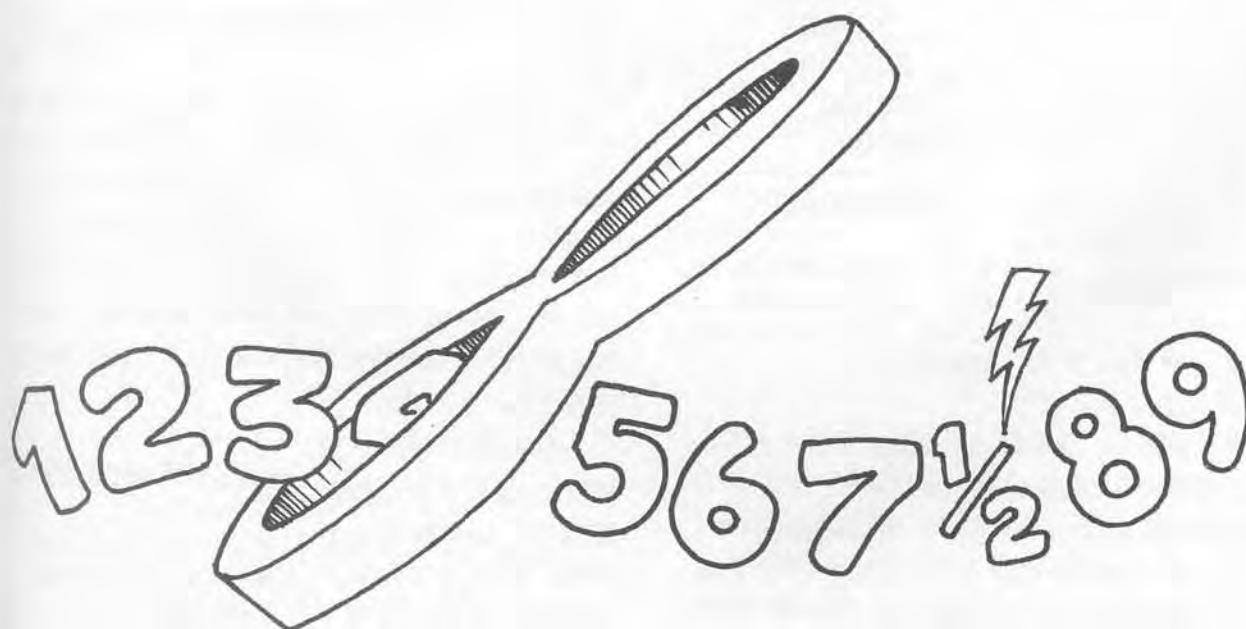


图 1-5 数轴上 0 到 1 之间的部分。小数点和非 0 数之间的 0 越多，数越小，并且越接近于 0。我们可以用同样的方式扩展数轴上任意两个整数间的刻度。



第2章

处理较大和较小的数

一、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，也很可能少一个0或多个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！

比如，当你计算250 000与500 000的乘积时，见图2-1，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，就是将这个数的小数点向右移一位，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）。

$$\begin{array}{r}
 250000 \\
 \times 500000 \\
 \hline
 000000 \\
 000000 \\
 000000 \\
 000000 \\
 000000 \\
 1250000 \\
 \hline
 125000000000
 \end{array}$$

图2-1 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。

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 10^2 。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 25×10^4 。4是10自乘的个数。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 25×10^4 写成一般形式，即25后添4个0

（250 000）。这表明，幂，即10的乘方，告诉我们小数点移动的位数。

$$250\,000 = 25 \times 10^4$$

图2-2 我们可以很容易将较大的数写成幂的形式。

数（500 000）可以写成 5×10^5 。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 $0.45 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10 \div 10$ ？”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

$$5 \times 10^5 = 500\,000$$

图2-3 我们可以很容易将幂或科学记数法形式的数还原。

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： $\frac{45}{10^7}$

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（分数线上面）上。

$45 \div 10^7$ 表示将 10 除以 7 次，可以改写为 45×10^{-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 0.45×10^{-5} 。

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

$$0.0000045 = 4.5 \times 10^{-6} = 45 \times 10^{-7}$$

图 2-4 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。

← 负数	正数 →
$5.204 \times 10^{-5} = 0.00005204$	$4.025 \times 10^7 = 40\,250\,000$
展开 10 的负指数时，把小数点向左移	展开 10 的正指数时，把小数点向右移

图 2-5 这是要记住的将幂的形式的数展开还原的简便方法。

2-5。

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：

我们可以将 40 250 000 000 写成 4.025×10^7 或是任何一种含有 10 的指数的形式的数。所有这些都叫这个数的幂的形式。有一种情况写成 4.025×10^{10} ，就是将这个数写成科学记数法的形式。



二、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，会将数以幂的形式输入计算器。在计算结果时，计算器会记录 10 的指数。了解幂的运算法则会帮助你更好地理解计算过程。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，将 10 的指数相加得到 10^9 。将两部分合并就是答案：

$$125 \times 10^9$$

你可以通过将小数点向右移 9 位，将这个数还原：

$$125\,000\,000\,000$$

图 2-6 说明了这个过程。如果你不想用指数形

$$250\,000 = 25 \times 10^4$$

$$500\,000 = 5 \times 10^5$$

(A)

$$\begin{array}{r} 25 \times 10^4 \\ \times 5 \times 10^5 \\ \hline 125 \times 10^{4+5} = 125 \times 10^9 \end{array}$$

(B)

$$125 \times 10^9 = 125\,000\,000\,000$$

(C)

图 2-6 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。

式做乘法，你可以试试。这对证明两种方法得到的结果是相同的，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 2-7。

$$500\,000 = 5 \times 10^5$$

$$0.000\,004\,5 = 45 \times 10^{-7}$$

(A)

$$\begin{array}{r} 45 \times 10^{-7} \\ \times 5 \times 10^5 \\ \hline 225 \times 10^{-7+5} = 225 \times 10^{-2} \end{array}$$

(B)

$$225 \times 10^{-2} = 2.25$$

(C)

图 2-7 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。

$$500\,000 = 5 \times 10^5$$

$$0.000\,004\,5 = 45 \times 10^{-7}$$

将数字部分相乘，将指数相加，得到：

$$5 \times 45 = 225 \text{ 和 } 10^{5+(-7)} = 10^{-2}$$

$$5 \times 10^5$$

$$\times 45 \times 10^{-7}$$

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：

$$5 + (-7) = -2$$

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 2-8A 就是两个写成指数记数法和科学记数法的数做除法。图 2-8B 部分告诉我们如何将 10 的指数从分母转化到分子上。图 2-8C 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 2-9A 的图 2-9B 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:

$$\frac{25 \times 10^4}{5 \times 10^5} = 5 \times 10^{-1} = 0.5$$

10^{-1} 中的指数是由 $4-5$ 得到的, 见图 2-10。

当我们要对较大或较小的数进行乘除运算时, 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。做加

$$\frac{764\ 000\ 000}{382\ 000} = \frac{764 \times 10^6}{382 \times 10^3} = \frac{7.64 \times 10^8}{3.82 \times 10^5}$$

(A)

$$\frac{7.64 \times 10^8 \times 10^{-5}}{3.82} = 2 \times 10^{8+(-5)}$$

(B)

$$2 \times 10^3 = 2\ 000$$

(C)

图 2-8 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。

$$\frac{75\ 000\ 000}{50\ 000\ 000} = \frac{75}{50} = 1.5$$

(A)

$$\frac{75 \times 10^6}{5 \times 10^7} = \frac{75 \times 10^{6+(-7)}}{5} = 15 \times 10^{-1} = 1.5$$

(B)

图 2-9 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)。

图 2-10 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。

$$\frac{250\ 000}{500\ 000} = \frac{25 \times 10^4}{5 \times 10^5}$$

(A)

$$5 \times 10^{4+(-5)} = 5 \times 10^{-1} = 0.5$$

(B)

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, 2 000 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 51×10^4 、 5.1×10^5 , 甚至 510 000。

图 2-11 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弄懂它们。

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。将数据写成这样的形式非常方便。

$$12\ 300\ 000\ 000 + 45\ 000\ 000$$

$$\begin{array}{r} 12300 \times 10^6 \\ + 45 \times 10^6 \\ \hline \end{array}$$

(A)

$$\begin{array}{r} 7.5 \times 10^4 \\ 126 \times 10^3 \\ 415 \times 10^5 \\ + 25 \times 10^2 \end{array} \quad \begin{array}{r} 75 \times 10^3 \\ 126 \times 10^3 \\ 41500 \times 10^3 \\ + 2.5 \times 10^3 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 41703.5 \times 10^3 \\ \hline \end{array}$$

(B)

$$7\ 930\ 000\ 000 - 7\ 137\ 000\ 000$$

$$\begin{array}{r} 7930 \times 10^6 \\ - 7137 \times 10^6 \\ \hline \end{array}$$

$$793 \times 10^6$$

(C)

$$0.000000753 - 0.000000008$$

$$\begin{array}{r} 7.53 \times 10^{-7} \\ - 0.08 \times 10^{-7} \\ \hline \end{array}$$

$$7.45 \times 10^{-7}$$

(D)

图 2-11 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。

四、我已经拥有电脑了

你也许会说，“我为什么要急急忙忙地赶去买计算器？我桌上就有一台家用电脑！”（也许你一直把它存放在阁楼，直到发现它还有点用）。毕竟，你买它的原因之一就是电脑能帮你做数学。除此之外，售货员没有告诉你利用计算机 BASIC 语言可以处理各种各样的复杂计算吗？现在，让我们立即把这点弄明白。是的，事实上你可以用你的家用电脑代替科学计算器去解决电子学上的数学问题。

绝大多数家用电脑中的 BASIC 语言都包含你的计算器上的科学计算功能。BASIC 语言同样能够处理以指数形式表示的数。如果你已经有了一台电脑，它可以像计算器那样为你服务。

有些计算机拥有像科学计算器那样运算的程序（就像 IBM 的个人兼容计算机）。在本章，我们只讨论 BASIC 语言。如果你正使用计算器程序，勤加练习，以便熟练掌握。

当然，作为一部计算器使用，第一步是打开电脑，进入运行 BASIC 状态。如果你使用计算器程序，还要在电脑上运行这个程序。这个步骤在不同的电脑上各有差异，所以要仔细查看电脑的用户说明书。对某些电脑来说，比如 Commodore 64 或 128（注释：电脑的品牌），你打开电脑时就处在 BASIC 运行状态。甚至你可能拥有的是一台更老的 Sinclair 或 Timex 电脑，一台 Texas TI-99 或一台 Commodore VIC20。这些电脑都提供了 BASIC 语言程序，它们中任何一台都符合你电子学计算的要求。

如果你的电脑通常使用软盘存储程序，当你开机时，要对软盘进行信息检索。苹果和 IBM 的个人电脑（或任何和它们类似的），甚至有不止一个版本的 BASIC 语言供你使用。此外，你要看看随电脑附送的用户手册，以便了解你的电脑的特点。

如果你输入时不要加行号，你的计算机将立即执行 BASIC 命令。利用这个功能，电脑就像计

算器一样。若要计算 250 000 乘以 500 000，你可以输入：

```
PRINT 250000*500000
```

然后按一下返回键。符号（*）是 BASIC 语言中的乘法符号。

电脑应该像图 2-16 那样显示（如果你忘了打 PRINT，计算机仍然会做乘法，不过计算结果却不会出现在显示器上）。

你弄明白了！计算机中的 E 表示以指数的形式显示，+11 表示在数字之后还有 11 个 0。

然而，还是会遇到一些困难。如果你匆忙输入数据，有可能在科学函数上遇到困难。尽管这些问题很容易解决。当我们更深入地研究各种函数时，会告诉你如何处理这些问题。

如果你非常熟悉 BASIC 程序，就能轻松运用



图 2-15 许多计算机在开机时就已经自动运行 BASIC 程序了。



图 2-16 当你输入命令要求输出一个简单乘法运算的结果时，电脑很可能给出这样的输出形式。



图 2-17 当你输入了数据并按过返回键后，电脑是不是这样显示？如果是，那时因为你忘了告诉电脑要把结果显示出来！

BASIC 程序有更多了解后，就会发现，有很多方式可以通过计算机解决电子学的计算。事实上，计算机比计算器能做更多的事！

然而，与计算机相比较，科学计算器也有很多优点。计算器可以轻松拿着带在身边。它使用电池做电源（或是太阳能电池提供的光能）。再有，计算器键盘上通常会有提示告诉你如何使用。你不必非要像使用计算机那样记住每一条命令的准确格式和文字拼写。你迟早会发现拥有科学计算器和拥有电脑一样有好处！

科学函数。若不然，就找出随机配送的 BASIC 使用手册，学习更多的科学函数功能。当你对电脑和



五、在计算器和电脑上使用指数表示法

学

会在科学计算器上将数字用指数形式表示非常容易。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 2 位数据是 10 的指数。图 2-18 给出了一些简单问题，请你将数字写成科学记数法的形式。同样还有一些将以指数记数法形式的数字还原成原数的问题。有些计算器拥有允许你将数字在指数形式和普通形式之间转换的功能。查看用户手册弄清你的计算器是否有此功能。如果有这些功能，请按照操作手册上的说明完成这些问题。如果没有，

不用计算器，动手练习。图 2-20 列出了这些问题的答案。

图 2-19 中的问题是让你练习如何解决包括指数形式的简单问题。这些问题可以帮助你熟悉计算器的基本操作。当你完成所有问题后，你就会知道如何不假思索地将数字以指数形式输入。图 2-21 是

把下列数字用科学记数法表示

- a) 9 460 000 000 000
- b) 186 000
- c) 0.000 015 78
- d) 300 000 000
- e) 0.000 000 000 001 113

把下列数字展开成非指数的普通记数法

- f) 147.1×10^6
- g) 83.14×10^2
- h) 6.67×10^{-11}
- i) 6.022×10^{23}
- j) $1.380 6 \times 10^{-23}$

图 2-18 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。对照图 2-20 检查你的答案。

完成下列计算

- a) $12.5 \times 10^{-3} \times 6.8 \times 10^3 =$
- b) $625 \times 10^{-3} \times 5.6 \times 10^3 =$
- c) $6.28 \times 3.75 \times 10^6 \times 2.48 \times 10^{-4} =$
- 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 2-19 用科学计算器或电脑完成练习。图 2-21 给出答案。

这些问题的答案。

计算器给出的答案也可能是五花八门的。计算器显示数字的位数以及计算器对过大而不能全部显示的数字舍入方法影响着结果。所以，你得到的答案与图 2-21 给出的可能不会完全一致。检查一下你的结果，最后一位或两位数字是否和我们给出的答案有所不同。

你要注意使用计算器有两个很重要的限制。第一个限制是计算器最多只能处理不超过 10^{99} 的数据。如果你要计算器计算包含 5.24×10^{125} 这样的数据，它将无能为力（不过不用担心，在电子学的计算中，你不会遇到如此巨大的数据）。你也同样不能处理结果超过 10^{99} 的数据。当然，你也不会碰到这样的问题。所以，这个局限性并不重要。

如果你试图输入的数据是指数超过两位数，以 10 为底的幂，绝大多数计算器只使用最后输入的两位数。拿起你的计算器，试着输入下面这串数字：

2.5641GEE346521

结果，显示的是：

2.564×10^{21}

如果你在输入 10 的指数时不小心按错了键该怎么办？你可以通过输入正确的数据来更正这个错误。这比清空计算器然后重新开始要快得多。无论如何，你必须清楚对于输入这样的数据，计算器将做出如何反应。

第二个局限是计算器无法计算比它显示位数更多的数据。如果你试着输入更多的位数，计算器可能忽略掉多出的数字。这是一个问题，因为你没有注意到计算器显示的数字没有包含你输入的所有数字。如果你继续计算下去，得到的当然是错误的结果。让我们再做一个例子。将下列这串数据输入到你的计算器中：

123 456 789 101 112

现在看看显示的内容。很有可能只显示最初的 8 位数据：

12 345 678

或 10 位数据

1 234 567 891

现在输入算式的其余部分：

$\times 3 =$

这个问题的正确答案是：

370 370 367 303 336

而你的计算器是如何显示答案的？如果它能显示 10 位数，可能就是：

3 703 703 673





- [illegible]

图 2-20 请将图 2-18 练习中你自己做的答案和这里给出的对照一下。

而如果只能显示 8 位, 就是:

37 037 034

上面的两个和正确的结果差别巨大。对于 10 位显示的计算器而言，结果小了 10 000 倍，而 8 位的小了 1 000 000 倍。

那么，你怎样用你的计算器来解决问题呢？先把数字写成科学记数法的形式，然后再输入计算器。用科学记数法把 123 456 789 101 110 写成 $1.234\ 567\ 891\ 011\ 12 \times 10^{14}$ 。将此数据输入计算器，再乘以 3，计算器将会显示

 $3.703\,703\,673^{14}$

或

 $3.703\,703\,4^{14}$

计算器已经舍入了数字，但 10 的指数是正确的。上面的结果都很接近于正确答案。这个例子告诉我们为什么你要学会如何将数据写成科学记数法或指数记数法的形式。

也许你决定用你的个人电脑而不买科学计算器。你也许想知道如何解决图 2-18 和图 2-19 中所列出的问题。你已经知道要先将电脑打开并运行 BASIC 程序。然后你只不过将想解决的问题输入电脑，等着答案从屏幕上自己跳出来（最重要的要记得在程序的开头输入 PRINT，否则你会一直坐在那里等着答案冒出来）。

如果你对 BASIC 程序多少还了解的话，也许你会对为了解决图 2-18 的问题而写一小段程序颇感兴趣。虽然这不值得费太大的劲，因为在你头脑中将数字在一般形式和指数记数法之间转换非常容易。

为了计算，将指数记数法表示的数据输入计算机时，你要先输入数字部分，然后输入字母 E，最后输入 10 的指数：

1.234 567 891 011 12E14

你可以在 E 和 10 的指数间添一个“+”号，但这并不一定需要。不过，如果 10 的指数是一个负数，你就必须用上“-”号了：

1.2345E-14

在上述讨论计算器的部分，我们提到使用计算器会存在两大局限。同样在用电脑计算时也会有类似的局限。电脑用户手册会告知你的电脑在计算时可以算多少位数字。通常情况下，电脑使用 8~12 位数据。有些电脑允许使用“双精度”，意思是在进行计算时，电脑使用 16 位或更多位数。不同型号的电脑的双精度运算不同。你最好仔细阅读用户手册以便弄清电脑的准确信息。输入：

PRINT 123456789101112*3

然后观察显示在屏幕上的结果。可能显示的是我们前面给出的正确答案，或是显示的是位数较少的科学记数法形式。

绝大多数电脑不能处理比 10

的 38 次方更大，或比 10 的 -39 次方更小的数。其实与计算器相比，电脑的限制更多，计算器是 10 的 -99 到 99 次方之间。这是由于电脑表示数据的方式而决定的。当然，你也不会遇到很多超过这个范围的实际数据需要处理。

用电脑解决图 2-19 所示的问题，与图 2-21 给出的答案对照。

a) 85

b) 35×10^2

c) 5.8404×10^3

d) 0.99

e) 2.001×10^{-18}

f) $\frac{1}{7.9161912 \times 10^{11}} = 1.263233763 \times 10^{-12}$

你计算器上的倒数键或者 1/x 键将很方便地解决这样的问题

g) 5.9375×10^4

h) $\frac{2.00 \times 10^6}{2.50 \times 10^2} = 8000$

i) $\frac{4900}{7.0 \times 10^1} = 70$

j) $\frac{2.94725956 \times 10^{37}}{1.5405625 \times 10^{17}} = 1.913106128 \times 10^{20}$

注意，分母是平方，或者自乘

图 2-21 你由图 2-19 的问题得到的答案可能与这里给出的会有所不同。计算器可能显示不同数位的数据，而这与通常得到的答案不符。这有可能会引发处理处理数据的不同，给出不同的结果。

第3章

运用等式的技巧

我们第一步用数字表示一些物体的数量或对这些物体的测量。第二步是用等式将一个数量和其他的量联系起来。如果你按照一些基本的法则去做，解决本书中的数学等式就很简单。那么，什么是等式呢？韦氏词典对等式定义的描述是一个“数学上的等值或等量的客观陈述，也可以是逻辑表达式。”现在你也许想知道等量的含义。在这本词典的同一页上，我们发现等量的意思是“数量或意义上相等”。

我们已经接近我们所能理解的定义了。韦氏词典又是如何定义相等的呢？词典上相等的意思是“相等的大小、数量、多少或数值”等。相等也意味着完全相同，特别当我们讨论数学符号的时候。在数学上，我们通常用一个特殊的符号(=)表示相等。然后我们将两个相等的量放在等号的两边写成等式。

如果你对数学等式不太熟悉，你也许想知道是什么样的相同项的值中间写上等号。其实等式的最简单形式很可能就像式 3-1 那样。

$$5=5 \quad (3-1)$$

尽管这并不是我们一般会想到的。

有趣的是在一个数学等式中，这两项并不一定要看上去一模一样但它们必须在数学上相等。我们能够写出如下的等式。

$$1+3=2+2 \quad (3-2)$$

这些项字面上并不相同，但等号两边数字相加得到的值结果是相等的，都是 4。这是一个你要理解的重要概念。等式中的项在字面上很少相同，但在数学意义上一致。

关于等式还有更重要的概念是在等式中一般会有一部分项是未知量，这意味着你要理解相等的含义以便求出未知量。举例来说，我们可以将方程式 3-2 写成：

$$1+3=2+x \quad (3-3)$$

这里 x 用来表示未知量。

首先，你可以将 1 加上 3 得到 4。接着，你知道 2 加上未知数的总数和这个值相同。这样你就能很快算出未知数的值，在这个情况下一定是 2。

方程式的解决办法并不总是像这个例子一样那么明显。通常你处理的数据经常有好几位数。特别是在电子学的问题中，你解决的方程式中也许还有小数，有些可能还有 10 的乘方。尽管这有些复杂，如果按下面的几条简单法则去做，你能解决遇到的绝大多数问题。

在解决方程式中，最重要的，同时也是最容易忽略的，就是尽量简洁！将要做的组织成整齐的格式，花点时间，尽量写得简洁，这样每个人都能很容易就看懂。当你做题时，很容易将一个数据弄错成另一个或是丢了式中的某一部分。保持方程式简洁，你就可以避免这样或那样因粗心而造成的错误。

规则：保持简洁

你要完成的计算顺序很重要。例如：

$$3 \times 6 + 2 = 20 \quad (3-4)$$

式 3-4 很清楚地告诉了我们想要的结果。但如果我们写成这样：



下的顺序计算：先算等式中出现的乘方和开方运算，然后从左到右依次做乘除，最后做加减。加减可以按任何顺序进行。

规则：按以下顺序进行运算

- 1) 以任何顺序做乘方或开方
- 2) 从左到右做乘除
- 3) 以任何顺序做加减

$$2+3 \times 6 \quad (3-5)$$

你应先做乘法后做加法，否则可能会错误地得到30这个结果。所以你必须正确地理解运算顺序和规则。

我们经常用一对小括号将一个等式中的项组合起来。小括号告诉你某些计算要先于其他项的计算。在等式 3-5 中给出的例子中，我们可以用小括号写成：

$$2 + (3 \times 6) \quad (3-6)$$

现在你就知道应该先做 3×6 ，然后再加上 2 得到结果。这将得到问题的正确结果——20。如果我们真的想先计算 2 加上 3，我们应该用小括号将这些数字结合起来。

$$(2+3) \times 6 \quad (3-7)$$

规则：先完成小括号里的运算

对含有括号的计算题，有特别的运算顺序。如果不含小括号，或小括号中不只一步运算，可按以

有的时候，你可能会发现括号里面还含有括号，或者使用中括号 $[]$ 和大括号 $\{ \}$ 。这些符号表明分成了几个层次。在这种情况下，从最里面的一对括号开始运算，由里向外，每次只去掉一对括号。运算顺序上要确保遵循其他的规则。

$$5 + \{2 + 3 - [10 - 2 \times (3 + 1)]\} = x \quad (3-8)$$

这里的 x 是问题中的未知数。

$$5 + \{2 + 3 - [10 - 2 \times 4]\} = x$$

$$5 + \{2 + 3 - [10 - 8]\} = x$$

$$5 + \{2 + 3 - 2\} = x$$

$$5 + \{3\} = 8$$

遵循这些简单的规则，并坚持按正确的顺序运算。通过练习你会很快发现，当你做题时几乎不用特别考虑到这些规则了。

一、别称它为代数

当着手解决含有未知数的方程时，你必须遵循一些基本的法则。当然，这也不妨碍使用一些技巧去解决。

什么叫解方程？当你去解一个方程的时候，你通常只要将未知数放在等号的一边，方程的其他部分（已知数通常拿来算未知数）放在等号的另一边。

在数学上，包含解方程在内有一分支，它拥有自己的名字——代数。这个词可能会让有些读者回想起那些复杂的计算规则和困难的计算。不过在我们基础电子学中用到的方程相当简单，而且你能很容易将它们求解出来。在这一部分，我们会解释一些你在解决电子学方程时要遵循的法则。同时，我们也将讨论一些在解决这些简单方程时会用到的最常用的方法。你甚至可以学到一些技巧，使你的工作更加简单。

当然，第一个法则，还是尽量简洁！一开始，整理出一个工作区，并使你需要的工具容易取得。仔细书写，正确排列你的数字和字母。不要把你的工作挤成一团，如果做错了，要确保完全擦干净。一次只完成一步到两步，每一步要把方程仔细抄写到新的一行。随后你可以更灵活地处理并且不需写那么多步。除非你有足够的做题经验，否则你都要仔细按照这样的步骤一步一步地完成。

第一个规则是尽量简洁！

你要一直把你的最终目标放在头脑中。你要把含有未知数的项放在等号的一边，其余项放在等号的另一边。每一步简化方程式都将帮助你达成最终目标。通常，为了帮助你实现目标，你可以对方程式进行任何数的加减乘除（但不能除以0。乘以0也不起作用！乘以1或加减0也同样不起作用）。对等号的一边所做的任何运算，对等号的另一边也要做相同的运算。将等号的一边整体运算比分开运算要好。有一些例子将帮助解释这个过程。

你对等号的一边所做的任何运算，对另一边也要做。

让我们用字母 I 代表电路中的电流。接着我们可以假设有一个方程将这个电流和其他的电路条件联系起来。我们想解决这个电路的方程。

$$2I+5-3I=10-16I \quad (3-1)$$

第一步是在等式两边同时加上 $16I$ 。

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

由于我们把所有项相加，所以我们并不一定需要添括号。我们可以合并同类项，把方程化简。

$$15I+5=10$$

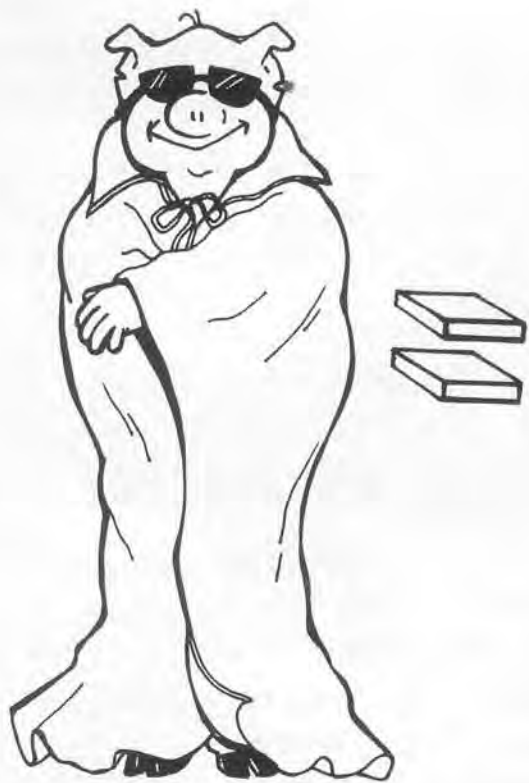
第二步是从方程两边同时减去 5。

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

第三步合并同类项。

$$15I=5$$

在求解出方程之前我们还有一步要做。在方程两边同除以 15，这样方程的左边就只有未知数了！



$$\frac{15I}{15} = \frac{5}{15}$$

$$I=0.333\ 3$$

到这里我们就解出了我们的方程。由于我们度量电流的单位称为安培，那么电路中的电流就是 0.333 安培。

在这个问题中有什么技巧可以节省时间和步骤呢？你可能从这个例子中已经得到了一些想法。方程两边同时加上一项，相当于消掉了一边中的这一项，并把它移到了另一边（加上一个负数等于做减法，所以你可以在方程两边同时加减一项）。在等号的另一边，正项变成了负的，负项变成了正的。这是一个省时的技巧，就是越过等号移项。

省时的技巧就是越过等号移项。

假设我们有方程：

$$I+25=30 \quad (3-2)$$

我们可以简单移动 25 这一项来代替在方程两边同时减 25 的这一步，写成：

$$I=30-25=5$$



还有个技巧被称作交叉相乘法。这个技巧通过在方程两边同时乘或除某些项而提供一个快捷的方式。

通过在方程两边同时乘或除某些项，交叉相乘是一个快捷的方法。

假设有个方程像这样：

$$\frac{44x}{10} = \frac{80}{9} \quad (3-3)$$

这里 x 是一个未知数。

我们可以两边同乘 9 然后再两边同乘 10。交叉相乘可以替代。将两个分数的分母交叉相乘（分母就是分数线下方的部分）。

$$\frac{44x}{10} = \frac{80}{9}$$

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

$$396x = 800$$

现在，我们可以将 x 前的系数 396 移到等号的另一边（将未知数 x 留在原处），396 就变成等号右边的分数的分母了。

$$x = \frac{800}{396}$$

$$x = 2.02$$

每个问题都与其他的问题有些不同，因此不可能给出可以遵循的精确的步骤。因为有可能可以用几种不同的方法去解决同一个问题。你要学会为每个问题找出相应的方法去解决，按照本章例子中所给出的原则进行，经过练习你会有信心解决更难的问题。

二、简单的方程圆

方程说明了各种数据之间的联系。如果知道了方程中其余所有项的值，你就可以利用方程求出未知的值。为了完成这样的计算，你必须知道如何解方程。方程有时比它本身看上去要复杂得多，因为我们用各种符号来表示各种量，而且你还得弄清这些字母在方程中所代表的量。你必须判定哪个是已知量，哪个是未知数。这个过程并不难，只要记住这些字母所代替的是什么量，用字母符号列出这些量以及已知的值。

这里有一个涉及几个量的方程：假设你开车行驶了4小时，在这段时间内驾驶员保持40千米/小时的速度，你想知道你行驶了多远了吗？在速度、时间和路程之间有个简单的联系，这也许不会让你太吃惊的。你甚至都能指出可以用一个方程式来表示这种联系。

$$s=v \times t \quad (3-4)$$

这里：

s = 路程 = ?

v = 速度 = 40 千米 / 小时

t = 时间 = 4 小时

运算相当简单，因为方程的未知量 s 本身就在等号的一边。

$$s = 40 \text{ 千米 / 小时} \times 4 \text{ 小时} = 160 \text{ 千米}$$

当你在解方程时关于乘号 $\times$ ，有一点可能容易混淆。我们经常在方程中省略这个符号。你很容易将手写的 $\times$ 符号（乘号）误写为字母 X 。在数学中我们又经常用字符 X 来代替我们不知道的量。有时我们使用 $(\cdot)$ 代替 $\times$ 做乘法，也经常根本什么符号都不用。当你看到两个字母互相紧挨在一起，中间没有任何运算符号，你就应该知道需将它们相乘了。当你在做电子学方程时要记住这一点。方程 3-4 也可写成：

$$s=v t \quad (3-5)$$

更经常写成：

$$s=v t \quad (3-6)$$

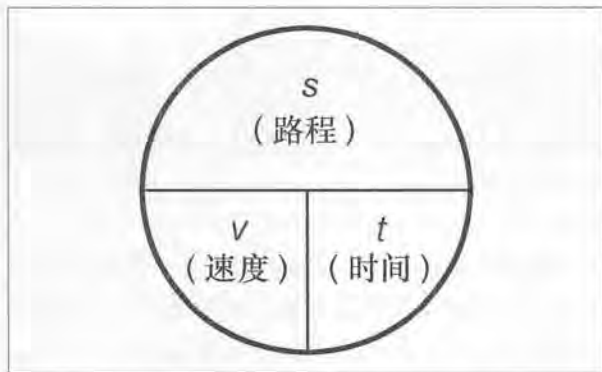


图 3-1 这是简单的方程圆。这个圆表明了和方程 3-4 相对应的路程、速度和时间关系。将你想算的量所代表的字母盖住，余下的字母表明乘或除就可以找到答案。

在求未知量时，许多方程仅包含乘或除。你对任何项进行交叉相乘，求解绝大多数这样的方程。对于大多数你将应用到的基本电子学的方程都是正确的。方程圆会给你视觉提示，如何完成交叉相乘。有些例子将帮助你理解什么是方程圆以及如何使用方程圆。

图 3-1 是路程、速度和时间关系式（方程 3-4）的方程圆。怎样使用方程圆呢？首先确认你想要计算的量，然后用手指、一张纸片或其他的物品覆盖它，那么余下的字母就会给你显示如何求解方程。

如果骑车 20 千米花费你 2.5 小时，那么你骑车的平均速度是多少呢？要解决这个问题，我们就要算出速度，那么在图 3-1 中将速度 v 覆盖。请注意，现在你就得到了一个路程 (s) 除以时间 (t) 的一个分式。根据这张图，我们可以写出求 v 的方程式：

$$v=s/t \quad (3-7)$$

$$v=20 \text{ 千米} / 2.5 \text{ 小时}$$

$$v=8 \text{ 千米} / \text{小时}$$

看，用方程圆去解决问题多容易啊！

在特定条件下，你也能为其他方程画出方程圆。首先，基本方程应该在等号的一边只有某个字母本身，而等号另一边的项必须做乘法。在等式中不能有任何加减法，否则无法画出方程圆来。而在学习基础电子学时，你会发现有很多这样的方程，所以，方程圆非常有用。

让我们举出几个电子学中方程的例子吧。可能你不知道这些方程中所有的量，在本书中，你会对它们有更多的认识。现在，我们的主要兴趣应集中在如何解简单方程。

我们将从被称为欧姆定律的方程开始入手。欧姆定律描述了同一电路中的电压 (U)、电流 (I)

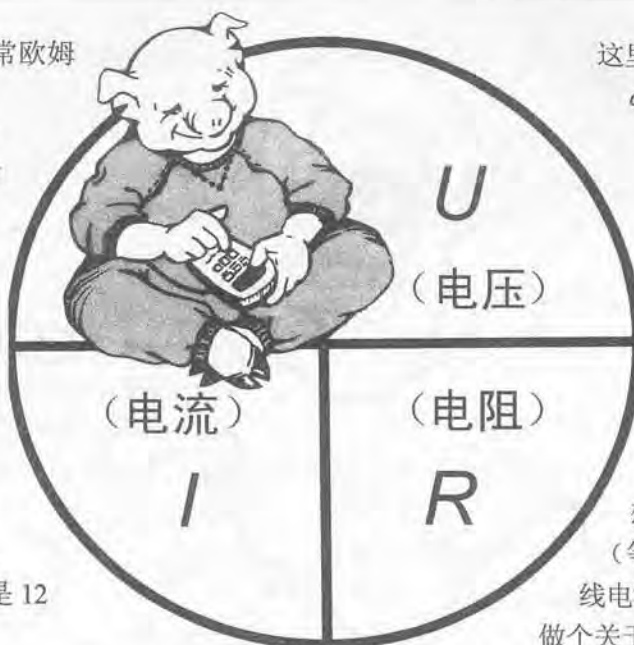
和电阻 (R) 之间的关系。通常欧姆定律写成:

$$U=IR \quad (3-8)$$

如果已知电流和电阻 (I 和 R), 而求电压比较好办。可是, 如果你想求的是 I 或 R 该怎么办呢? 你得用这个方程来求其他量。

图 3-2 显示的是欧姆定律的方程圆。确定一下你要求的量, 然后用手、纸或其他东西将它覆盖住, 余下的字母会告诉你如何求解这个方程。

假如给电路施加的电压是 12



这里:

c = 无线电波的速度

f = 电波频率

λ = 波长

无线电波穿越空间的速度和光速相同。如果需要, 你可以在参考书中找到光速。我们近似认为无线电波的速度是 3.00×10^8 米/秒。现在假设我们想得到频率为 3 700 000 Hz (等同于 3.70×10^6 Hz) 的无线电波波长是多少。我们可以做个关于方程 3-10 的方程圆。在上半圆, 我们写上 c 代表光速, 把下半

图 3-2 方程圆会帮你解决欧姆定律的问题。文字部分描述了如何使用这样的方程圆解决问题。如果结构类似, 你可以将其其他的方程也做成方程圆。

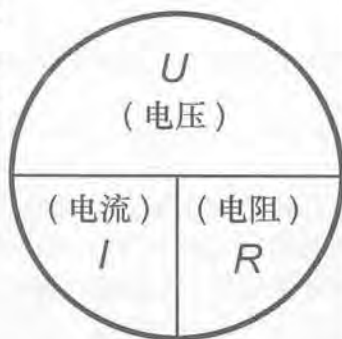
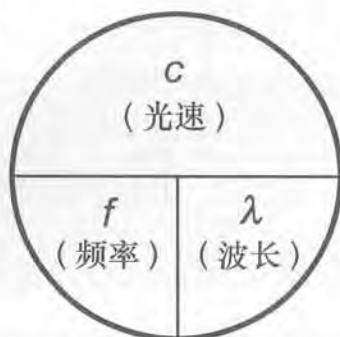


图 3-3 这是方程圆的另一个例子。文字部分也同样描述了如何使用方程圆解决问题。你可以给有类似结构的方程做方程圆。



伏, 当你测量电流时, 你发现有 0.5 安培通过电路。你想计算出电路的电阻 (记住, 也许你对这些电子学术语不太熟悉, 但我们在这里的目的是教你如何解方程)。请注意, 当你覆盖图 3-2 的方程圆上的 R 时会留下一个分式, 其中 U 是分子, I 为分母。由此我们可以写出:

$$R = U/I \quad (3-9)$$

接着, 我们可以将具体数值代入这个方程, 解出电路中的电阻

$$R = 12 \text{ 伏特} / 0.5 \text{ 安培} = 24 \text{ 欧姆}$$

另举一例, 我们选择一个关于无线电波的波长和频率的方程 (你不必担心自己不懂这些术语的含义。在本书随后的学习中, 你将对它们有更多了解)。方程是:

$$c = f\lambda \quad (3-10)$$

圆分成两部分, 在一边写上 f , 另一边写上 λ 。看上去完成的方程圆应该和给出的图 3-3 一样。

要解出方程中的波长, 将方程圆中 λ 的覆盖住, 写上 $\lambda =$, 然后根据方程圆中剩余的部分完成方程。

$$\lambda = c/f \quad (3-11)$$

然后代入已知值完成计算。

$$\lambda = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} / 3.70 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$\lambda = 81.1 \text{ m}$$

方程圆也可以作为帮助你记住方程的记忆工具。你可以在脑中形成一个包含字母符号的方程圆。这样通常可以很容易记住方程。



三、代入法解方程

我们经常用字母代表被测量的数值来写方程数据。有时信息似乎会被遗漏，这会给你解决问题带来困难。不过这通常意味着你必须进行额外的运算去找到遗漏的数据。

当你在求解问题时，开始你应该列出问题中你所知道的全部信息，然后确认你要计算什么。通常用表示数据的字母列出信息，会使你更加容易地找到解决问题的方程。在你确认了已知量和未知数后，你就能准备找出方程了。你也许无法直接得到能够解决问题的方程，如果是这样，可以试着找出和未知数有关的其他方程（我们将通过例题告诉你如何列出相关方程）。

在列出你需要的方程后，接着你也许得选两种方法之一继续进行。你可以将需要求解的问题的各个部分计算出来，然后用这些数据算出结果。这个

方法似乎是最直接的，但也有一个大问题。每当你书写数字完成计算时，都在冒着出错的风险。如果你没有将数字写清楚，就很容易错写成别的数字。在进行下一步计算时，必须小心将数字抄写正确。另一个问题是在数字上可能会多写或少写了0，特别是数字后面有超过3或4个0的时候出错的可能性更大。

解决这个问题的更好办法就是去解文字方程。文字方程就是用字母符号来代替数字的方程。所以你要去解文字方程，就要和这些字母打交道。只有在你处理完方程后再将数据代入方程。有时你又会遇到第二个方程，它会提供一些主方程中遗失的信息。这时，将你需要的信息替代字母。下面让我们通过例子来做具体说明。

我们列举一个电子学的问题作为例子，你不必对我们用到的方程和其中的项很熟悉。在这一部分，我们的目的是教给你在电子学学习中解决问题所需要的数学方法。

在给定的电路中，你测量了通过50欧姆电阻两端的电压是125伏特。那么这个电阻的功率是多少呢？如图3-4所示，我们的第一步是列出已知量

和未知数。方程 3-12 是解决电路中功率问题最常用的方程

$$P=IU \quad (3-12)$$

这里:

P = 电路的功, 单位瓦特

I = 电路中的电流, 单位安培

U = 电路的电压, 单位伏特

你马上就会发现我们有麻烦了。图 3-4 中列出的信息不包含电流, 所以我们不能直接用方程 3-12。你同样会注意到题中给出了电阻, 但方程 3-12 中用不到这个量。接下来你的问题就是“我怎样才能用电压和电阻找到电流?” 对电子学熟悉的人立即回答, “用欧姆定律!” 方程 3-13 表示的是欧姆定律。

$$U=IR \quad (3-13)$$

这里:

U = 电路中的电压

I = 电路中的电流

R = 电路电阻

我们想用这个方程找到电流, 这样我们得解

电压 = $U = 125V$

电阻 = $R = 50\Omega$

功率 = 未知数

$$P=IU$$

图 3-4 解决所有问题的第一步都是列出问题的所有信息, 包括表示每个量的符号和所有已知的量。

出这个方程的 I 。图 3-5 显示了欧姆定律的方程圆。根据这个图, 我们可以写出方程 3-14。

$$I = \frac{U}{R} \quad (3-14)$$

现在我们用这个文字方程代替方程 3-12 中的 I 。下一步, 我们将把方程 3-12 和方程 3-14 合并起来。

$$\begin{aligned} P &= IU \\ P &= \frac{U}{R} U \end{aligned} \quad (3-15)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3-16)$$

这样我们得到计算功率的另一个方程, 而且它用到数据都是我们问题中已知的。现在我们可以将数值代入到方程中, 计算出功率。

$$\begin{aligned} P &= \frac{(125 V)^2}{50 \Omega} \\ P &= \frac{15625 V^2}{50 \Omega} = 312.5 W \end{aligned}$$

这里介绍的技巧涉及有关代入的方法, 就是用已知量的表达式来替代另一个方程中的位置量。在你练习完这个问题后, 你可以用这种技巧解决更加复杂的问题, 从中获得更多的经验。

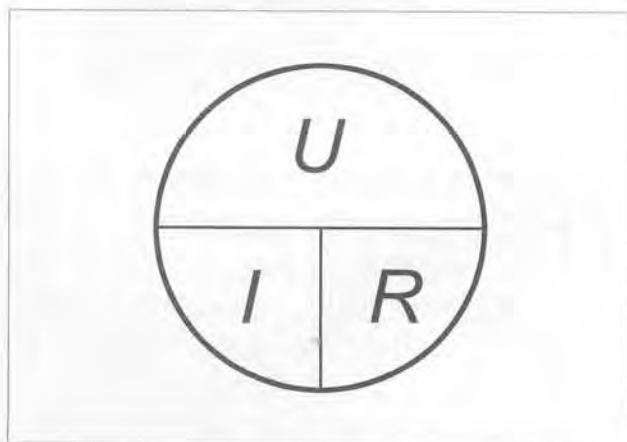


图 3-5 这是欧姆定律的方程圆。前一部分刚讲过什么是方程圆和如何使用它们。



第4章

公制计量体系

一、国际单位制

在我们度量某物体时，会用数字表示测量结果的大小尺寸或者它的数量。我们也可用数字表示简单（或复杂）运算的结果。除了这些数字之外，还要用一个单位或说明来描述这个数字的意义。在电子学中，这些单位都是公制单位制的一部分。

绝大多数人都听说过公制，但这并不是在美国的常用方式。公制中一些不熟悉的项使人们对它产生恐惧。当然，在你学完这一节后，你就不再是他们中的一员了！

公制单位是被国际大多数科学家所使用，并得到国际公认的测量系统。我们称它为国际单位制，缩写为SI（这是法语 *Système International's Unites* 单词首字母缩写）。国际计量局监督这个系统的使用并建议把其他测量系统转换成这个系统。世界上大多数国家把这个系统作为他们的标准测量系统，科学家用公制进行测量和处理试验。

在你学习了几个基本项后，公制会非常容易理解。不过，在进一步详细了解公制之前，让我

们简要回顾一下它的历史。我们来看看过去那些年测量系统是如何变化的。

从有记录的最早的历史看看，人们意识到有必要对各种物体的数量进行测量。每种不同的文化都诞生了一套自己的测量单位。

一种流行的测量系统是用人体的部位作为度量的工具。当人们想知道某个东西有多长时，他们总随身带有一套测量工具。一只脚的长度或一步的步长常用来测量距离。用伸展的手臂指尖间的距离测量长度。人们还发现了测量其他项目的一些简便方式。例如，人们用篮子或其他容器测量蔬菜或水果的数量。

试想一下，当两个人都用这样的系统去测量时

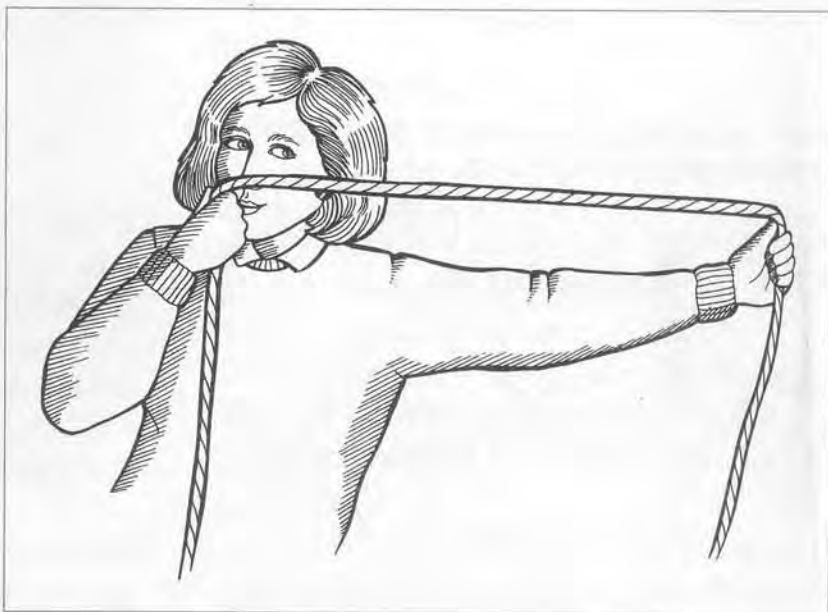


图4-1 人们总是使用各种度量工具去估计各种物体的尺寸大小。



图 4-2 农民通常用各种不同大小的篮子来度量蔬菜或水果的数量。



会有多少不同。让我们假设有一个 2 米高的篮球明星和一个 10 岁孩子去测量篮球场的长度。2 米高的人所说的数字肯定比 10 岁孩子说的数字少几步！如果去市场买些土豆，你肯定会到用最大篮子装土豆的农民那儿去购买。

由于精确测量变得非常重要，人们不得不采用标准度量单位。即使用他们所熟悉的，但做过选择的标准尺寸。因此，就有了标准厘米、分米、米等。这些标准都有实物，所以人们可以用其他度量工具和这些实物做比较，从而确保精确性。比如，生产米刻度尺的制造商就可以把它们的产品和标准尺寸相比较，从而确保这些刻度尺是精确的。

在美国，我们的国家标准技术研究所制定了一套标准砝码和标准尺寸。我们可以将



图 4-3 脚长或步长有很大的不同,这取决于个人的尺寸大小。想象一下当用不同的尺寸度量工具去衡量相同场地时,会有多么迷惑吧。

这些标准和保存在法国塞弗雅的国际计量局的国际标准进行比较。

早在 1790 年,科学家们就创设了一套以 10 倍换算的测量系统,并称它为公制系统。当测量物体时,你可以从一个基本单位开始,将它等分成 10 份得到更小的单位。你还可以将这 10 份中的每一份再等分 10 份得到更小的单位。如此下去直到得到一个可以方便测量的单位。同样的,你可以将基本

单位乘以 10、100、1 000

甚至更多,去得到更大的合适单位。

那么究竟在公制中有多少不同的单位需要去学习熟悉呢?噢,

在任何测量系统中,

都必须包含有关长度、质量

(或重量)和时间的单位。我们还需

要能测量温度(或者温度的不同)以及电荷。你不可能用其他单位去测量基本单位,所以开始必须要给它们确定下来。你可以根据这些单位去测量其他所有的量(例如,一旦你定义了一个长度单位和一个时间单位,你就可以测量速度了。速度是行驶的距离除以通过这段距离所花费的时间)。

到目前为止制定了 5 个基本单位。实际上,还有另外两种量需要确定测量它们的基本单位。它们是光强(光线的明亮程度)和摩尔量(物体中存在的原子数量)。因为在我们基础电子学的学习中不需要度量这些量,所以,我们现在不必担心那些单位。

那么,这些基本量的公制单位是什么呢?嗯,长度的基本单位是米(metre)(在美国,绝大多数人写为 meter,而在世界的其他地方是 metre)。质量的基本单位是克(g)。时间的基本单位是秒(s),这与美国系统是一致的。尽管正式的公制中温度的单位是开尔文温标,但在日常生活中,我们经常使用摄氏温度温标(°C)。最后,库仑(C)是测量电量的单位。

图 4-4 显示的是一些常用项,帮助你理解这些基本单位。其中尺子(以实际大小显示)将帮你估

计1米有多长。从尺子的一边0到有数字10标注的部分是十分之一米那么长（随后你会学到那些数字代表什么）。所以，如果你用这把尺沿着桌边量10次，你就可以得到1米的长度。一只普通的回形针（同样在图4-4中以实物大小显示）的质量大约是1克。在摄氏温度温标中，水在0℃凝固，在100℃沸腾。开尔文温度温标与摄氏温标非常相似，在两种温标中，单位的大小一样，只是水的凝固点是273.15开（K），沸点是373.15开（K）（请注意，在开尔文温标中没有度的符号，我们也从不会说多少开尔文度）。一库仑电量相当于 6.24×10^{18} 个电子的电量。

你现在至少了解了公制中使用的基本单位，也没有任何理由让你对公制感到恐惧。由这些单位我们可以定义其他任何我们想要测量的量了。你已经做好准备去学习如何通过将基本单位乘或除而得到对任何测量都很方便的量了。

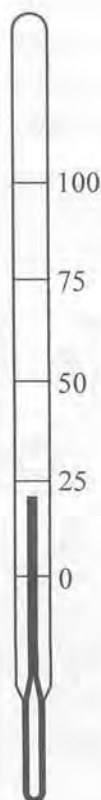
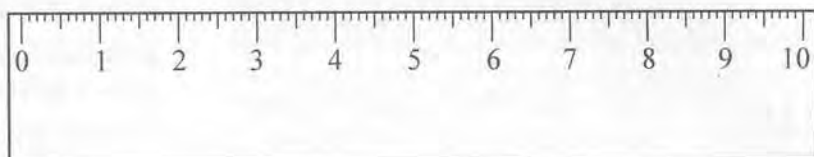


图4-4 尺子上的每两个数字标记间的距离代表0.01米，所以从尺边沿到数字10间的距离代表0.1米。一只普通的夹纸用的曲别针质量大约是1克。在摄氏温度中，水在0℃冰冻，在100℃沸腾。房间温度是（68°F）20℃。这幅图以实际大小显示了尺子和回形针。绝大多数的温度计都比在这里显示的要长。

二、共同的公制前缀

当 使用公制时，你只需要熟悉几个基本的单位。如果你需要更大或更小的测量单位，只需要将基本单位简单地乘以或除以 10 的因数即可。这些 10 的因数或者叫 10 的倍数，在公制中有专门的名称，我们把这个名称叫做前缀，把它们组合在基本单位前面。

这里有几个例子让你更容易理解。第一个例子，如果我们想要测量一个农民的土地有多长。记得基本的长度单位是米。那是一片广阔的土地，用一把米尺去测量将是非常困难的！用 10 米长的卷尺去测量可能会更加方便。10 倍于基本单位的前缀是 10 (deca)，这样我们就可以说卷尺是 10 米长（注意，我们只是在基本单位米的前面加了前缀）。你可以发现前缀被拼写为 deca。

在这个例子中，更长的单位会比较方便。我们可以用等于 10 个 10 米或 100 个米的单位。前缀 100 倍就是 hecto (百)，所以 100 米就是 hectometer (100 米)。kilo 意味着一千，所以 kilometer 就是 1000 米长。

现在让我们设想要测量更小

的物体，比如说门的厚度。这一次，我们需要将 1 米至少等分成 10 份。1/10 的前缀是 deci。1 decimeter (1 分米) 就是 0.1 米。我们还可以将单位等分为 100 份，前缀 centi 表示这个 100 等分中的 1 份。1 centimeter (厘米) 等于 0.01 米，10 centimeters 等于 1 decimeter (分米)。图 4-1 尺子上标记了数字厘米的分度。注意，每个厘米被等分为 10 份并作了标记。这样 1000 个更小的刻度组成了 1 米（每一份是 0.001 米）。我们将这些更小的分度叫做 millimeters (毫米)，所以表示千分之一的前缀是 milli。

让我们花些时间来回顾一下在这一部分中你学习了哪些东西。你已经熟悉了最常用的公制前缀。kilo 是千的意思，hecto 意味着百，deca 意味着十。deci 是十分之一，centi 是百分之一，milli 是千分之一。我们可以在公制的任何单位中使用这些前缀。克是质量的基本单位。1 kilogram (千克) 等于 1 000 克。同样，1 millisecond (毫秒) 等于 0.001 秒。汽车的速度计也许是以千米每小时来标注刻度的，可以告诉你汽车运动得有多快。

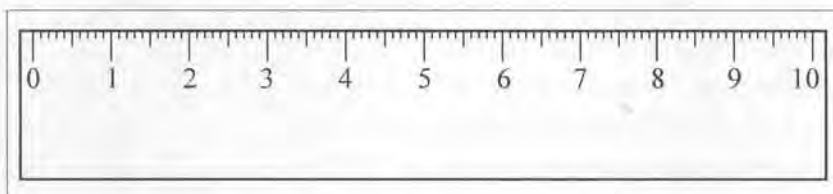


图 4-5 这把公制尺是以实际大小显示在图片中的。每个标记的数据代表 1 厘米。注意到每 1 厘米又被等分为 10 份。每一份叫做 1 毫米。这把尺子是 10 厘米或 1 分米长。



(拥有 10 级能量的方程超人)

当你看到一个不熟悉的公制单位时，首先看看它的前缀，确定你理解了前缀的含义，然后再看看基本单位，弄明白它代表的含义。如果你在超市看到一个容器的标签标明该容器容纳 2 000 (millilitres) 毫升，那是什么意思呢？这听起来好像有很多东西，不是吗？嗯，首先注意到它的前缀是毫 (milli)。因为 milli 的意思是 0.001，如果用它去乘 2 000，我们得到 2：

$$2\,000 \times 0.001 = 2 \quad (4-1)$$

由此，你可以明白了“2 000milli”等于 2 的某种单位。

那么单位升 (L) 是什么意思呢？也许你早已知道这是一个体积单位，常被用在液体体积的测量上。它有多大呢？嗯，一升是一立方分米体积的另一个名称 (见图 4-6)。描述它的方法是想象一个每一边都是一分米的立方体 (就是每一边 0.1 米或 10 厘米。图 4-5 的尺子是 1 分米长)。一个 2 000 毫升的容器的容量和一个 2 升的瓶子的容量一样。

你可能已经注意到医生用来给病人注射药品的针头注射器 (见图 4-7)。医生通常以立方厘米计量药品 (缩写为 cc)。一立方厘米等同于一毫升 (millilitre)。因为 1 升是 1 000 毫升，所以一升为 1 000 立方厘米。

大多数时候在使用前缀时，我们把公制中的前缀缩写。每个前缀都有一个通用的缩写。你要熟悉这些前缀，以便能很容易认出它们。有一个例外，我们都用前缀的第一个字母作为缩写。我们用 m 代替 milli，用 c 代替 centi，用 d 代替 deci，h 代替 hecto，k 代替 kilo。那个例外就是 deca，我们缩写为 da。这些缩写和单位的缩写组合在一起，确定测量的单位。例如，cm 是厘米，km 是千米，dag 是十克。

你必须熟悉将较大和较小的数写成指数记数法

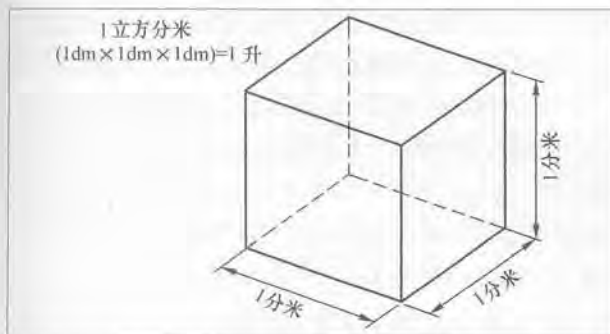


图 4-6 一立方分米与一升等同。一个每边都是一分米长的立方体就是容积为 1 升的容器。一分米等于 10 厘米，这个立方体也可看作每一边长是 10 厘米。



图 4-7 医生使用的用于皮下注射药品的注射器上标记了每一立方厘米以便计量药品。1 立方厘米等于 1 毫升。

形式的技巧。如果你需要复习，回头再看看前面那个部分。当我们以这样的方式写数字时，数字中包含了以 10 为底的幂。这种方式可以告诉我们在展开这些数时小数点需要移动几位。举例来说，我们可以将 405 000 写成 405×10^3 。在这里 10 的指数是 3。它告诉我们小数点得在 405 的 5 后面右移 3 位 (这样就多了 3 个 0)。将一个数乘以 10^3 等同于乘以 1 000。由此你可以发现因数 10^3 等同于添上前缀 kilo。hecto 等同于因数 10^2 ，deca 等同于 10^1 。deci 等于 10^{-1} ，centi 等于 10^{-2} ，milli 是 10^{-3} (负指数的意思是将这个数除以含 10 的因数。这也告诉我们如果要将这些数展开需要将小数点向左移动几位)。

在电子学中我们经常会处理较大或较小的数。很多时候我们需要一个比基本单位大 1 000 倍的单位。有时也需要比基本单位小 1 000 倍单位。还有一些公制的前缀比我们讨论到现在为止的单位大或者小 1 000 的倍数。表 4-1 显示了所有公制的前缀，还包括了所有标准缩写以及每一个的 10 的幂。

表 4-1

国际单位制 (SI) - 公制

前缀	符号	倍增因数
exa	E	$10^{18} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
peta	P	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
kilo	k	$10^3 = 1\,000$
hecto	h	$10^2 = 100$
deca	da	$10^1 = 10$
(unit)		$10^0 = 1$
deci	d	$10^{-1} = 0.1$
centi	c	$10^{-2} = 0.01$
milli	m	$10^{-3} = 0.001$
micro	μ	$10^{-6} = 0.000\,001$
nano	n	$10^{-9} = 0.000\,000\,001$
pico	p	$10^{-12} = 0.000\,000\,000\,001$
femto	f	$10^{-15} = 0.000\,000\,000\,000\,001$
atto	a	$10^{-18} = 0.000\,000\,000\,000\,000\,001$

三、公制前缀的换算

使用公制，用同类的不同单位，相对尺寸相差了以 10 为底的幂。在你学习了公制前缀后，你可以任意使用这些前缀毫不费力地表示测量的量。如果我们测量一段 12.5 千米路程和另一个 100 个 10 米的路程，我们怎么把这两个数字相加呢？首先我们必须对它们其中一个做变换，以便可以把它们统一为相同的单位。我们可以把 12.5 千米换算成 1250 个 10 米，或者把 100 个 10 米换算成 1 千米（稍候我们会给出这些换算的更多细节）。现在我们可以把这些数字相加：

$$\begin{array}{rcl} 12.5 \text{ 千米} & \text{或者} & 1250 \text{ 个 } 10 \text{ 米} \\ + 1 \text{ 千米} & & + 100 \text{ 个 } 10 \text{ 米} \\ \hline 13.5 \text{ 千米} & & 1350 \text{ 个 } 10 \text{ 米} \end{array}$$

虽然它们的单位看上去不同，但这两个答案却彼此相同。我们甚至可以把这两个测量数值换算成其他不同的单位，然后相加。例如，我们可以在相加之前把这两个数字全部换算成用米做单位。

现在，你可能还不太确信如何把一个公制前缀转换成另一个前缀。不过，从这个例子你可以看出，非零的数字保持相同，只是移动了小数点的位置。所有公制前缀都相当于以 10 为底的幂。总是通过移动小数点的位置而把一个前缀换算成其他的前缀。

换算公制的前缀有两种简单的方法。第一种方法，我们覆盖住以 10 为底的幂的因数的每个公制前缀，让我们设想，你有一些测量数值且都使用了不同的前缀，你可以通过简单地替换以 10 为底的幂的前缀将它们换算成基本单位。举例来说，这里有一组数值必须全部指定为相同的前缀以便于后期计算：

0.05 兆克，125 千克，25 克和 45 个 10 克，我们可以用 10 为底的幂作为因数代替公制前缀来书

写这些数字：

$$0.05 \times 10^6 \text{ 克}, 125 \times 10^3 \text{ 克}, 25 \text{ 克} \text{ 和 } 45 \times 10^1 \text{ 克}.$$

这里有点缺陷，在将它们的前缀换算成对应的以 10 为底的幂后，你仍然必须再处理。在对这些数进行加、减或做其他运算之前，还必须将它们换算成相同指数的以 10 为底的幂。这意味着你将不得不再稍稍来回移动一下小数点的位置。例如，把兆 (10^6) 换算成千 (10^3)，它们相差 10^3 倍，这就像乘以 1000，或者把小数点向右移 3 位。所以 0.05×10^6 和 50×10^3 是相等的（小数点向右移动了 3 位）。

假设你想把千 (10^3) 换算成兆 (10^6)，它们相差 10^3 倍，和除以 1000 是一样的。我们可以通过把小数点向左移 3 位，把 125×10^3 转换成 0.125×10^6 。表 4-1 归纳了所有公制前缀、它们的缩写以及每一个前缀对应的以 10 为底的幂。

让我们尝试把例子中的数字转换成其他几个不同的以 10 为底的幂。首先把它们全部转换成基本单位 (10^0)。

$$0.05 \text{ 兆克} = 0.05 \times 10^6 \text{ 克} = 50000 \text{ 克}$$

$$125 \text{ 千克} = 125 \times 10^3 \text{ 克} = 125000 \text{ 克}$$

$$25 \text{ 克} = 25 \times 10^0 \text{ 克} = 25 \text{ 克}$$

$$45 \text{ 个 } 10 \text{ 克} = 45 \times 10^1 \text{ 克} = 450 \text{ 克}$$

另一个例子，我们移动小数点把原前缀转换成千 (10^3)。

$$0.05 \text{ 兆克} = 0.05 \times 10^6 \text{ 克} = 50 \times 10^3 \text{ 克} = 50 \text{ 千克}$$

$$125 \text{ 千克} = 125 \times 10^3 \text{ 克} = 125 \text{ 千克}$$

$$25 \text{ 克} = 25 \times 10^0 \text{ 克} = 0.025 \times 10^3 = 0.025 \text{ 千克}$$

$$45 \text{ 个 } 10 \text{ 克} = 45 \times 10^1 \text{ 克} = 0.45 \times 10^3 = 0.45 \text{ 千克}$$

现在你应该开始懂得如何在公制中转换前缀了吧。首先用适当的以 10 为底的幂来表示数值，然后移动小数点。经过稍稍实践，你就能很轻松地进行前缀的换算了。

另一个换算公制前缀的方法需要一些技巧，见图 4-8。当你准备进行转换时，把这张表写在纸上。总是从左边大的前缀开始，然后向右，前缀越来越小。有时你也可以只做一张简表，只从千写到千分之一，如图 4-9 所示。若你需要比千大或比千分之一

10^{18}	10^{15}	10^{12}	10^9	10^6	10^3	10^2	10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}
E	P	T	G	M	k	h	da	U	d	c	m	μ	n	p	f	a

图 4-8 此表包含了公制前缀中的所有符号和与之相对应的以 10 为底的幂。从左到右，将前缀按从大到小的顺序写出来。在某两个前缀间的点代表那两个前缀间有两位小数。在你将一个前缀转化为另一个的时候，你必须确保数清每一个点代表的小数位数。当你将大前缀化成小前缀时，在表中向右移动。你要转换的数的小数点也要向右移动。同样，当你将较大前缀化为较小的时候，在表中你要向左移，小数点也要向左移。

10^3 10^2 10^1 10^0 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3}
k h da U d c m

图 4-9 有时你可以用一张小些的表，只列出部分的前缀。这是当你要处理的数在一千到千分之一一个基本单位之间使用的。

小的单位，一定要包含图 4-4 所示的小数点（它们在较大和较小的前缀间起标记多余小数位数的作用，以 1000 倍代替每个 10）。一旦你学会正确绘制这种表，进行前缀的换算会非常简单。

只是作为练习，我们将 12.5 千米化成米。由于我们从千米开始（kilo），从表中的 k 开始。现在数右边的每个符号，直到基本单位（U）为止。你是数了 3 位吗？那就是你将千米化为米时必须移动的位数。小数点向哪边移动呢？在表中又向哪边移动呢？向右。小数点也向同一方向移动。现在你可以写出答案：12.5km=12 500m！

假设你将一组小容器的容量相加，得到它们的总容积是 5 436 000 毫升，它是多少升呢？首先，我们将公制前缀写出来。由于我们不需要比千分之一更小或比千更大的前缀，就列简表。见图 4-6。这次我们无需写出 10 的乘方。为了将毫升换成升的单位，我们向左数出 3 位数位。这告诉我们将数据中的小数点向左移动 3 位。

5 436 000 毫升 = 5 436 升

其他哪种前缀也可以方便地将容量表示出来呢？也许最明显的就是千，当然我们也可以选择任何我们想用的前缀。让我们将容积以千升来表示。首先，在我们的表中数出从基本单位（U）到千（k）的位数。我们会发现还需将小数点向左移动 3 位。

5 436 升 = 5.436 千升

为了更多地练习通过移动小数点来换算前缀，让我们另试一例。在这个例子中，我们用一个你在电子学中经常会遇到的单位——赫兹。赫兹（简写 Hz）是表示收音机或电视机无线电波频率的单位。若某人告诉你将你的收音机调到 75 635 000 000Hz 该怎么样呢？你不可能找到哪台无线电收音机的标盘标有这样的刻度！为了使数字更符合实际，我们将把频率写成接收机上更可能出现的刻度的前缀。

E . . P . . T . . G . . M . . k h da U d c m . . μ . . n . . p . . f . . a

图 4-11 在此例中，我们需要用到完整的前缀表。我们必须将小数点向左移动 9 位。从基本单位开始，在符号 G 处停下，G 代表前缀兆。在此例中，我们将基本单位的 75 635 000 000Hz 化成 75.635GHz。

个个随
 十进制跳跃
 噢 1, 噢 2,
 噢 3

k h da U d c m

从基本单位
到千要左移
3 位

从千分之一到
基本单位要左
移 3 位

图 4-10 此例中，我们可以用更小的表。你必须将小数点向左移动 3 位，将前缀从千分之一化到基本单位。要将基本单位化到千，你还得将小数点再向左移动 3 位。从千分之一到千，总共得移动 6 位。

我们的第一步是选择一个新的前缀来表示这个数。我们可以将数字写成小数点左边只有 1 位或 2 位的形式。这看起来好像是我们需要一个完整的前缀表，所以像前面描述的一样写出那张表，见图 4-11。

第二步工作是数一数你能移动多少位小数点。最后得到的数据应使小数点左边只有 1 位或 2 位数。记住公制前缀中比千更大的代表的是再乘 1000 或 10^3 。在我们的例子中，对于 75 635 000 000Hz，你将小数点移动 10 位了吗？那就是 7.5635×10^{10} Hz。可是没有哪个公制前缀是 10^{10} 的，所以那不是写出这个数的方便的方法。由于更大的公制单位是再乘以 10^3 ，将小数点移动 9 位而不是 10 位可能更方便。那样的话，我们可以将数写成 75.635×10^9 Hz。

现在我们可以回到图 4-7 的表中，向左数 9 位（这与我们移动小数点的方向和位数都相同）。表中的新点表明我们的新公制前缀。图 4-6 表明新前缀是吉，简写为 G。用前缀代替以 10 为底的幂，此时，我们可以将频率写成 75.635GHz。

按照本节描述的步骤，你很快就可以轻松换算公制前缀了。只要记住写下前缀表，数出小数点移动的位数。

第5章

基础三角学

一、直角三角形

画 两条首尾相连的线段，但要互成一定角度，这样它们就不在一条直线上了（见图 5-1A）。再画第三条线段将刚才两条线段余下的两端连接起来，这三条线段就构成了一个三角形（triangle），见图 5-1B。当两条线段互相邻接时就构成一个角，所以三角形的 3 条边就构成了 3 个角。Tri 是英语前缀 3 个的意思，三角形意思就是 3 个角。三角形的 3 个内角相加是 180° （完整圆圈的一周是 360° ）。

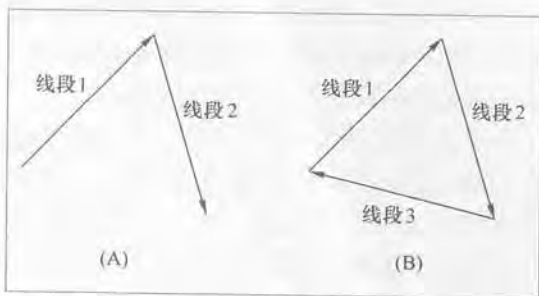


图 5-1 三条线段首尾相接，最后一条线段回到起点，构成一个三角形。

我们通常用小写字母 a 、 b 、 c 来标记三角形的边，用大写字母标记角，如见图 5-2 所示。注意，对应的字母相对于对应的边。角 A 对应于边 a ，所以我们通常称边 a 的对角是角 A （我们也称角 A 的对边也是边 a ）。同样，角 B 对应于边 b ，角 C 对应于边 c 。三角形哪条边标 a 、 b 、 c 都没有区别，你可以根据

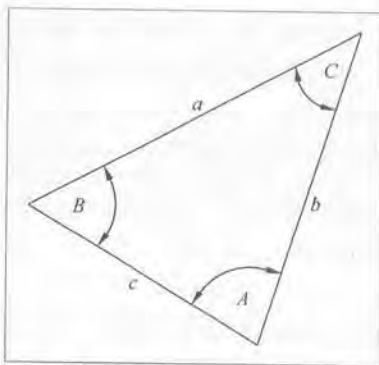
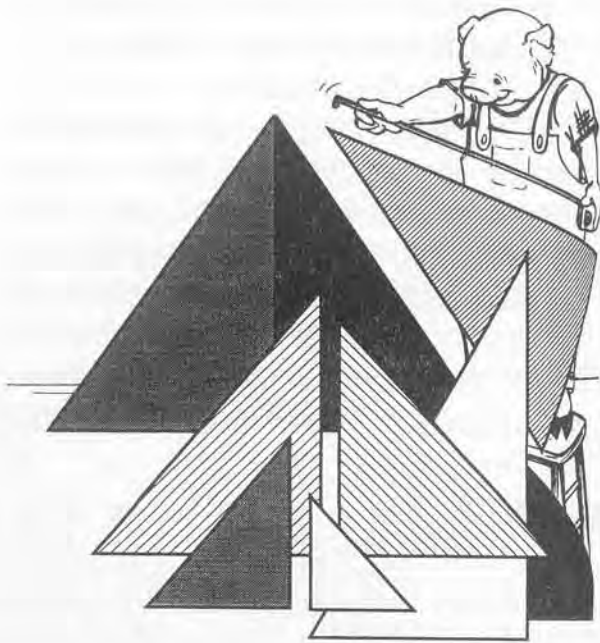


图 5-2 用小写字母 a 、 b 、 c 标记三角形的边，用大写字母 A 、 B 和 C 标记角。角与其对应的边要用同一对大小写字母表示。

你的喜好给它们以任意顺序，任意字母命名。但大多数情况下，我们将三角形最长的边命名为 c 。但要确保用一对大小写字母表示角与其对应的边。

如果两条线段构成 90° 角，我们称它们互相垂直。垂线形成的角为直角（见图 5-3A）。直角就是 90° 角。如果线段构成的角小于 90° ，我们就得到锐角，图 5-3B 给出了几个锐角。大于 90° 的角叫钝角。图 5-3C 显示了几条线段，它们构成了钝角。

角内画的弧线确定锐角或钝角，曲线两端有箭头（注意，我们也能量出两线相交形成的另一个角，它大于 180° ）。在直角中画了个小正方形说明它们和其他角度不同。也许区分直角和 85° 到 95° 之间的其他角的不同比较困难，所以在角落中的正方形可以帮助我们断定直角。



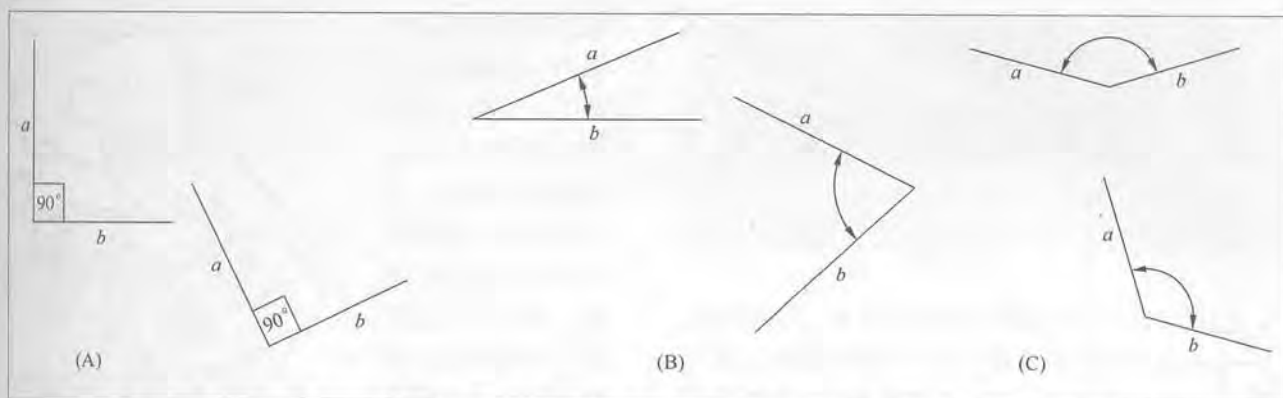


图5-3 每当两条线端相交就形成一个角。A图是直角，构成的是 90° 的角。注意，我们通过 $\square$ 在角的角上画一个小正方形表示直角。B图中的是锐角，因为他们小于 90° ，C图中表示是两个钝角，或者说是大于 90° 的角。在锐角和钝角内画一个弧线，弧线通常两端带有箭头。

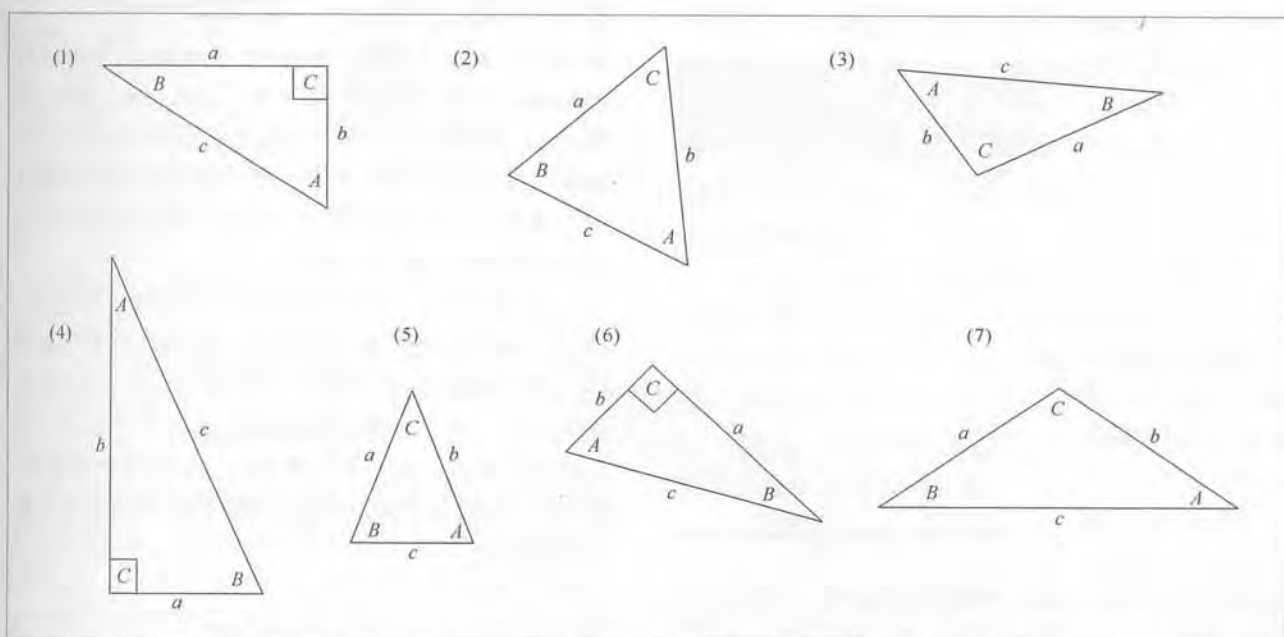


图5-4 三角形形状大小各异。这张图中混合了直角三角形、锐角三角形和钝角三角形，你能根据它们的形状区分每个三角形吗？

我们可以画出各式各样的三角形，就像图5-4中给出的那样。通常我们根据三角形中所包含的角的类型来描述三角形。例如，如果三角形中只有锐角，我们就称它为锐角三角形。显然，如果三角形中有一个角是钝角，那么它就是钝角三角形。现在大概可以猜到，如果一个三角形包含直角，那么我们就称它为直角三角形。你能指出图5-4中的三角形哪个是锐角、哪个是钝角、哪个是直角三角形呢？写出你的答案和表5-1给出的进行对照。

表5-1

图5-4中三角形的类型

锐角	(1)
锐角	(2)
锐角	(3)
锐角	(4)
锐角	(5)
锐角	(6)
锐角	(7)
锐角	(8)

二、三角函数的定义

许多电子学问题都需要建立直角三角形图形。这就是你必须要知道一些解决直角三角形问题的原因。有一个解决直角三角形问题的数学分支，它有一个特殊的名字：三角学。三角学给出了计算直角三角形中边长和角度的方法。

三角学包括一个直角三角形中边和角之间的系列函数。函数就是这样一种关系，当给定一个数值，根据关系就可以得到另一个数值。让我们任意设定一个函数，称为SAMPLE。表5-2给出将1到10和100代入函数SAMPLE后得到结果。你能从这张表中指出函数SAMPLE代入其他值时如何计算结果吗？你能注意到结果总是输入的这个数值的自乘吗？SAMPLE函数给出的是输入值的平方。你可以得到将函数SAMPLE输入任何值的结果，只要输入值将本身自乘即可。我们可以写成：

$$\text{SAMPLE}(2) = 4$$

$$\text{SAMPLE}(6) = 36$$

$$\text{SAMPLE}(20) = 400$$

你要认识到我们可以通过SAMPLE函数的值反过来求出原来输入的值。当我们由函数值反过来求原输入值时，我们使用的是反函数。我们可以把它写成：

$$\text{Inverse SAMPLE}(400) = 20$$

$$\text{Inverse SAMPLE}(900) = 30$$

反函数通常写成在函数名称后添加个指数-1的形式：

$$\text{SAMPLE}^{-1}(100) = 10$$

不要被函数这个字弄晕，它只不过是描述数和

数之间某种确定关系的一种简便方式罢了。你可以从表格中查到某种特定函数的函数值，大多数科学计算器和电脑对重要的函数，都可以通过给定一个数就可得到对应的值（它们也能求出反函数）。

那么，我们前面提到的三角函数是什么呢？三角

函数有 sine、cosine、tangent、cotangent、secant 和 cosecant，它们通常缩写为 sin、cos、tan、cot、sec 和 csc。稍加练习，你就会对这些函数中的前三个函数非常熟悉，然后你就有能力解决任何包括解直角三角形的电子学问题了（解决大多数的电子学问题用不到 cot、sec 或 csc）。

见图5-5，三角形中直角所对的边（标记为c的边）称为直角三角形的斜边。因为在直角三角形中，我们知道角C是90°。然后看角A，边a是角A的对边，边b是角A的邻边。而对角B而言，边b是它的对边，而a是它的邻边。这些术语很重要，你必须学会这些定义以便能理解联系着角与边关系的函数的意义。

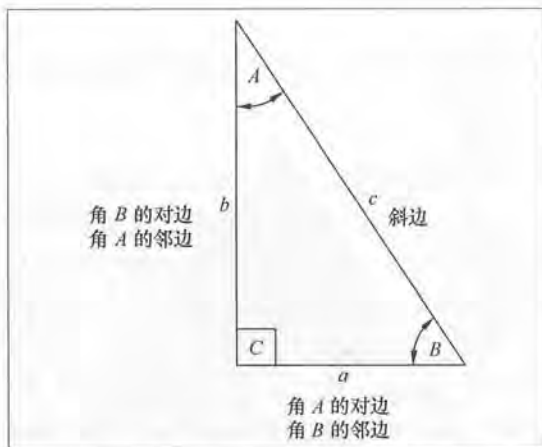
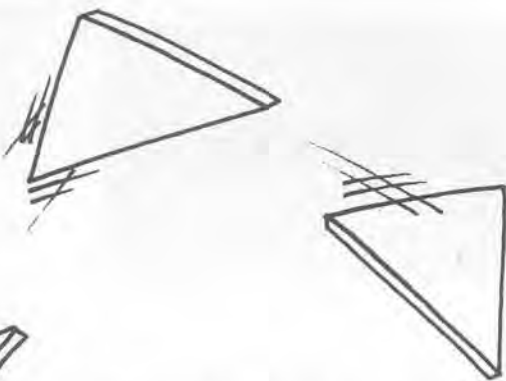
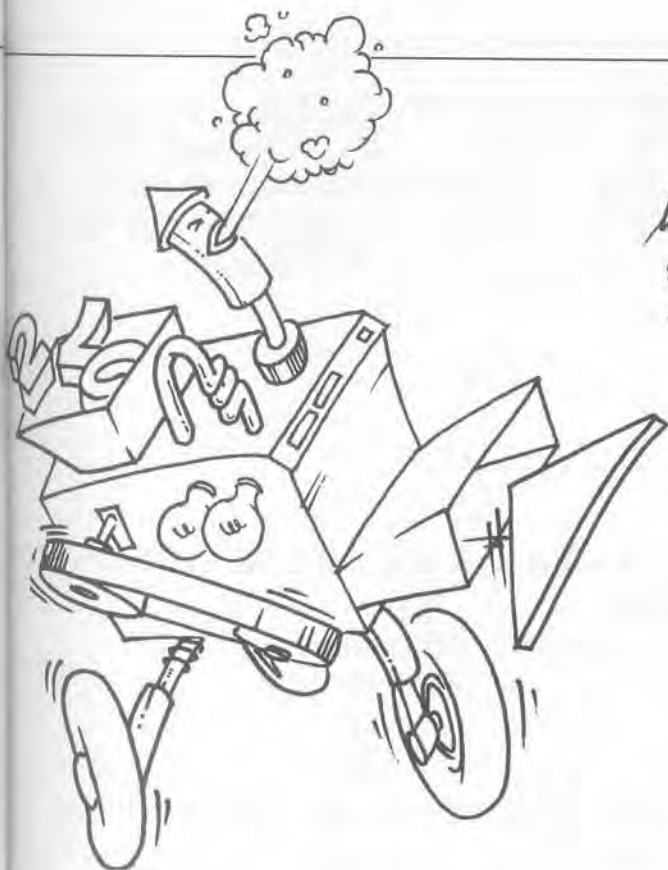


图 5-5 这个示意图表明了一个直角三角形的各个部分，角 C 是直角，边 c 是直角三角形的斜边，边 a 与角 A 相对，与角 B 相邻。类似的，边 b 与角 A 相邻与角 B 相对。

现在我们可以定义 3 种三角函数了，他们可以用于解决电子学问题：





不要尝试把这里列出的值记忆下来，因为在你需要的时候你可以方便地查阅到。表 5-3 将帮你了解随着角度变化时三角函数值是如何变化的，它也同样能帮你更好地理解函数的意义。

还有一个功能强大的解决直角三角形问题的公式，这个公式就是以希腊数学家毕达哥拉斯命名的毕达哥拉斯定理（勾股定理）：

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (5-4)$$

当你将一个数取平方（或2次方）时，也就是将这个数本身自乘一次。

为了求任何一个边的长度，我们必须去求出这个字母符号的方程。解这个方程就是说只要把某个字母放在等号的一边，而其余的字母必须放在另一边，然后等式两边同取二次平方根。

例如，要求出斜边（边 c ），我们只需简单地将等式 5-4 两边开平方：

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5-5)$$

求平方根（符号由 $\sqrt{\quad}$ 表示）是平方函数的反函数。你可以通过把这些数自乘后求出它的值。别为如何求平方根而烦恼，你的计算器有可以完成这个任务的按钮，只需要输入你想求平方根的数，按下 $\sqrt{\quad}$ 键。

为了求出边 a 的长度，首先在等式 5-4 两边同时减去 b^2 ：

$$c^2 - b^2 = a^2 + b^2 - b^2$$

注意等式右边有 $b^2 - b^2$ ，可以消去得到 a^2 。然后两边同时取平方根，可以得到下面的等式

$$\sqrt{c^2 - b^2} = a \quad (5-6)$$

你可以得到类似的计算边 b 的等式。利用同样的步骤，只是两边同时减去的是 a^2 而不是 b^2 。

你做好准备去学习如何运用三角函数计算一个直角三角形中的边与角了吗？翻开一页阅读下一节。其中给出了几个例子，说明如何计算任意直角三角形的边与角。

$$\text{sine} = \sin = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}} \quad (5-1)$$

$$\text{cosine} = \cos = \frac{\text{邻边}}{\text{斜边}} \quad (5-2)$$

$$\text{tangent} = \tan = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}} \quad (5-3)$$

在直角三角形中，每个三角函数都与每个角的具体数值有关。有些参考书包括了这些三角函数值的表格。你可以运用“三角函数表”找到某个确定的数值。当然，你也可以不必查表，因为你的计算器会告诉你这个值是多少。如果你知道了三角形的边长，根据公式 5-1、5-2、5-3 做除法，也可以得到相同的数值。

表 5-3 列出了某些角度的上述三角函数的值。

表 5-3

选定的三角函数值

角度 (X)	sin(X)	cos(X)	tan(X)
0°	0	1	0
10°	0.174	0.985	0.176
20°	0.342	0.940	0.364
30°	0.500	0.866	0.577
40°	0.643	0.766	0.839
45°	0.707	0.707	1
50°	0.766	0.643	1.192
60°	0.866	0.500	1.732
70°	0.940	0.342	2.747
80°	0.985	0.174	5.671
90°	1	0	90° 未定义

三、三角函数的运用

我们怎么使用三角函数去计算三角形的各个部分呢？下面让我们看几个例子，假设图 5-6 给出的三角形中角 A 是 30° ，斜边长 6 米，因为知道了三角形中角 A 和斜边，应用正弦 ($\sin$) 函数将帮助我们计算出边 a 的长度，由正弦的定义可得：

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}} \quad (5-7)$$

$$\sin(30^\circ) = \frac{a}{6\text{m}}$$

现在将斜边长度移到等号另一边，所以在等式的右边只剩下未知量：

$$\sin(30^\circ) \times 6\text{m} = a$$

我们如何解决 $\sin(30^\circ)$ 这部分呢？这就要求助于科学计算器了。在计算器上输入 30，再按下标有 $\sin$ 的按钮，显示屏是不是显示为 0.5？应该如此！现在按下计算器上的 $\times$ (乘号) 键，再输入 6，当你按 $=$ 键时，显示屏上将显示 3，那么边 a 的长度就是 3 米。

我们如何求边 b 的长度呢？嗯，有几种方法都可以得到答案。一种方式是使用角 A 和余弦 ($\cosine$) 函数：

$$\cos(A) = \frac{\text{邻边}}{\text{斜边}} \quad (5-8)$$

$$\cos(30^\circ) = \frac{b}{6\text{m}}$$

接着，可用上个例子中求 a 同样的方式求出 b ：

$$\cos(30^\circ) \times 6\text{m} = b$$

在计算器上输入 30，再按下 $\cos$ 键，显示屏上将到 0.866 (有可能会显示更多位小数，但你可以舍入，只需要保留三位小数)，然后按 $\times$ 键，再输入 6，按 $=$ 键，答案应为 5.196 米 (舍入后等于 5.20 米)。

好，现在我们算出了三角形中的三边，但只知道 2 个角，第三个角是多少呢？当然，我们有很多方法算出这个角。也许最简单的方法是记得三角形内角之和是 180° ，其中一个角是直角 (90°)，

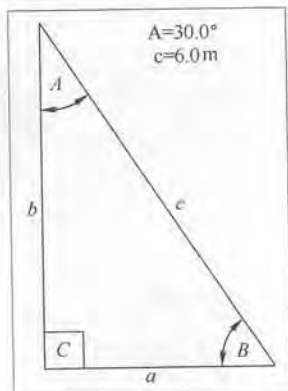


图 5-6 这是一个有一个角为 90° 度，另一角为 30° 度的三角形，我们还知道斜边是 6 米长。这个例子使用三角函数算出另两边和三角形的第三个角。

另一个角是 30° ，由这些信息我们可以算出第三个角。

首先把两个已知的角相加

$$\begin{array}{r} 90^\circ \\ +30^\circ \\ \hline 120^\circ \end{array}$$

接着，用 180° 减去这个数，得到第三个角的角度：

$$\begin{array}{r} 180^\circ \\ -120^\circ \\ \hline 60^\circ \end{array}$$

现在我们算出了直角三角形的 3 个角以及 3 条边。

还可以选择其他哪些方法来解决这个问题呢？如果我们先求出第三个角，我们可以用 60° 角的正弦或余弦函数代替 30° 角。我们也可以使用正切 ($\tangent$) 函数来求三角形的最后一条边。

$$\sin(B) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\sin(60^\circ) = \frac{b}{6\text{m}}$$

$$0.886 \times 6\text{m} = 5.196$$

(这和我们利用 30° 角的 $\cosine$ 函数所求 b 的边长相同)

现在尝试用正切函数来求解最后一条边的边长。

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\tan(30^\circ) = \frac{a}{b}$$

$$\tan(30^\circ) = \frac{a}{5.196\text{m}}$$

$$\tan(30^\circ) \times 5.196\text{m} = a$$

$$0.577 \times 5.196\text{m} = 3.00\text{m}$$

(3.00是从计算器给出的答案2.998中舍入成3位数得到的数值。)

如果知道了直角三角形的两条直角边,也可以用毕达哥拉斯定理求出斜边。假设我们已知两条直角边是 3.00 米和 5.196 米,那么斜边是多少呢?

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5-9)$$

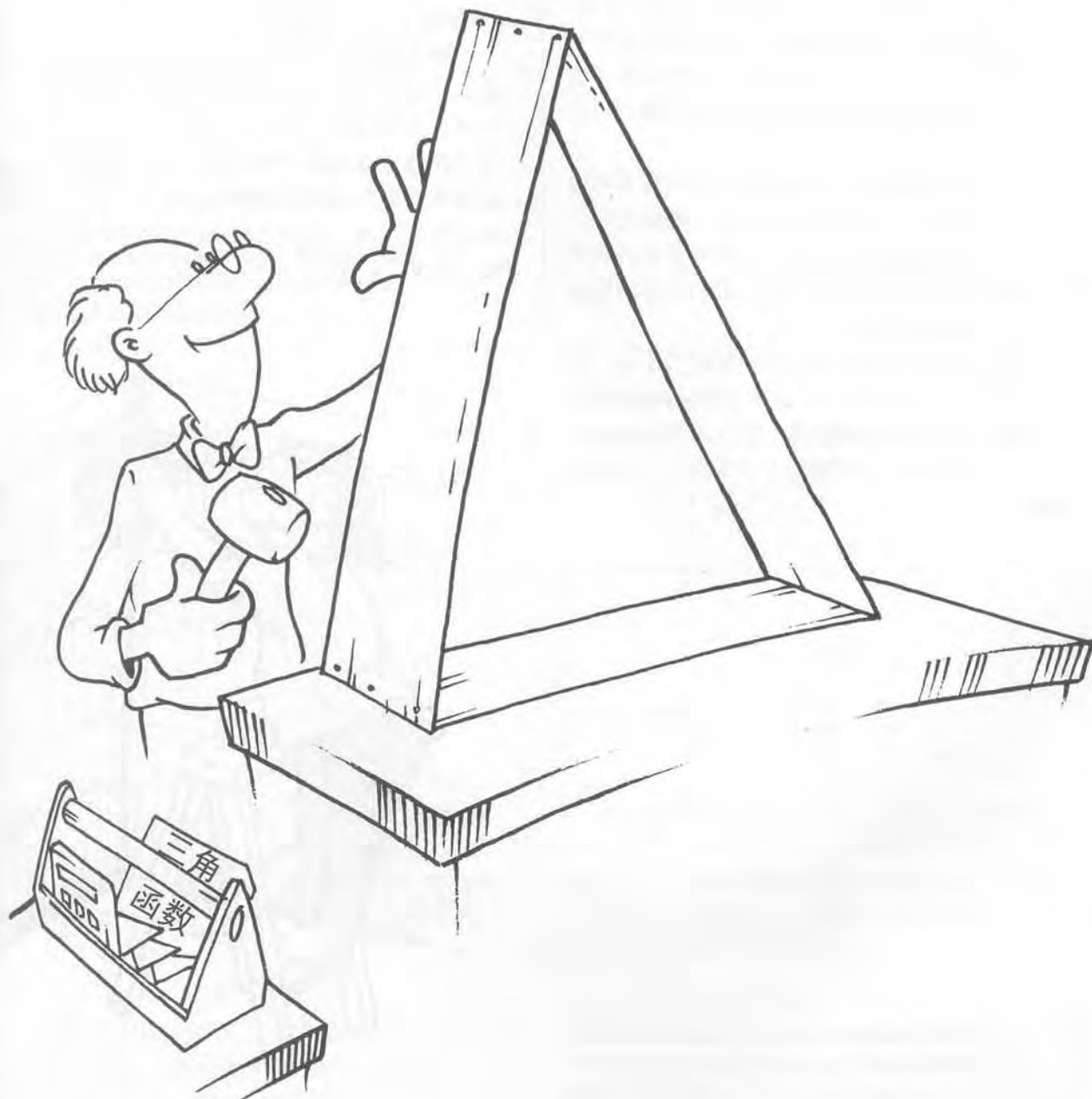
$$c = \sqrt{(3.00 \text{ m})^2 + (5.196 \text{ m})^2}$$

$$c = \sqrt{9 \text{ m}^2 + 27.0 \text{ m}^2}$$

$$c = \sqrt{36.0 \text{ m}^2} = 6 \text{ m}$$

注意,这个答案与原来问题中给出的斜边值是一致的。

用本节提供的解题思路帮你解出直角三角形的各个部分。你的计算器将帮助你完成数学计算并找出三角函数的值。在你学习更多的电子学知识后,将会碰到很多涉及求解直角三角形的问题。



四、直角坐标系

数字可以帮助我们度量或计算物体的量。处理这些数字时，用图形或图表来表示这些数字之间的关系对我们很有帮助。坐标系是一种有刻度的图表，它为我们绘制图形提供了一种方式。

坐标系用一组数确定平面内的任一点的位置。在单位长度上绘制一组坐标或数字可以帮助你更好地认识数据类型和它们之间的关系，否则你很可能会遗漏掉。这些图形在解决某些类型的问题时可能会特别有用。

经常有助于解决电子学问题的一种坐标系叫做直角坐标系。图 5-7 将帮你弄明白这个系统是如何被命名的。你可以通过给定这个点到每条轴或基线的距离来详细说明这个点的位置。我们通常将横轴称为 x 轴，竖轴称为 y 轴。

假设你想在这个直角坐标系中描述一个点，如图 5-7 中的点 A。首先，给出这个点到横轴的距离，然后，给出该点到竖轴的距离，则点 A 的坐标就是 $(5, 3)$ 。意思是这个点到横轴 5 个单位长，到竖轴 3 个单位长。

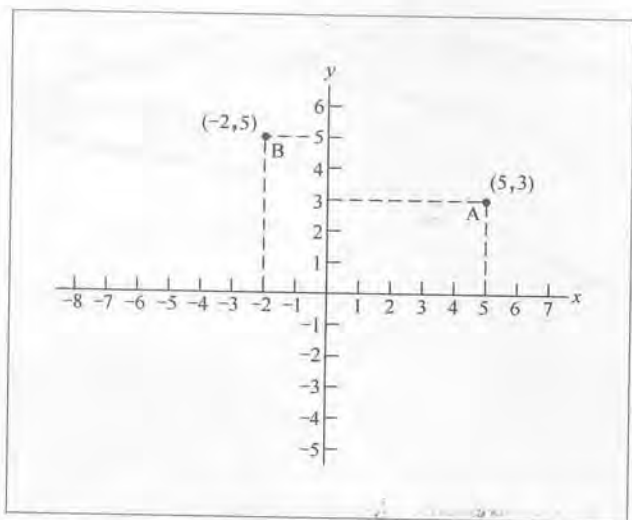


图 5-7 一组水平和竖直的直线，标上单位长度就形成了直角坐标系，我们通常将横轴称为 x 轴，称竖轴为 y 轴。在图中，从一点出发画直线，使他们分别垂直于 x 轴和 y 轴，会形成直角，这就是直角坐标系命名的原因。

注意，点 B 在横轴或 x 轴的负数的一边，点 B 的横坐标 x 的数值要在前面加个负号。我们可以将这点表述为 $(-2, 5)$ 。

在实际运用中，直角坐标系的单位长度可以取任何值。横轴和竖轴的单位长度不必非得一致。为了有助于解决特殊问题，你可选择实际数值作为单位长度。图 5-8 给出了不同单位长度的各种直角坐标系。

直角坐标系可以在你的想象下向各个方向延长。你不可能在一张纸上画出整个系统。我们通常只给出包含了用于解决问题的有关数字所在部分的图形。图 5-9 给出了坐标系的一部分，它远离中心点或我们所说的原点。

绝大多数时候，我们所用到的是二维坐标系，意思是说只要用 2 个数字就可以在图中确定任意一点，也就是说，这个图形是一个平面的。我们可以在直角坐标系中添加第三维。我们需要第三条线或数轴与前面两条都成 90° 。要在一张纸上绘出有点困难，但图 5-10 试着说明了这样一个三维坐标系。



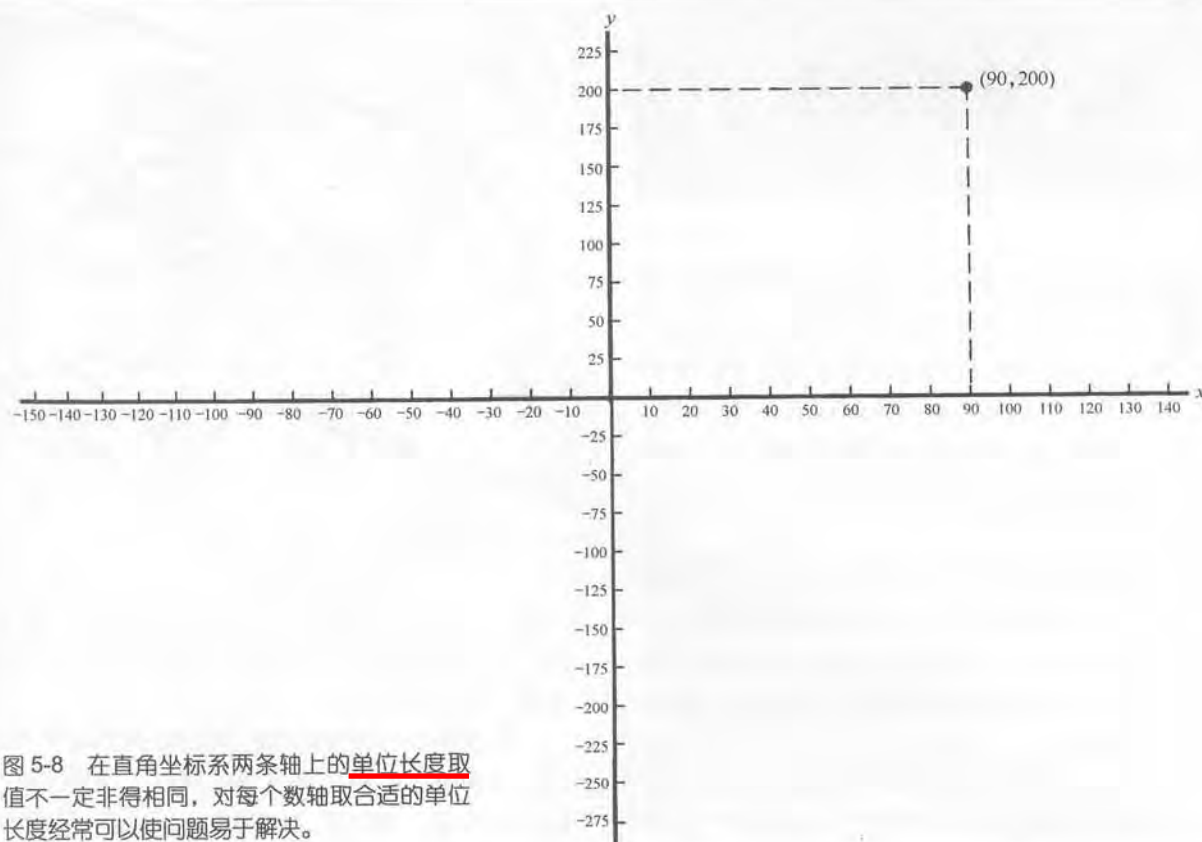


图 5-8 在直角坐标系两条轴上的单位长度取值不一定非得相同，对每个数轴取合适的单位长度经常可以使问题易于解决。

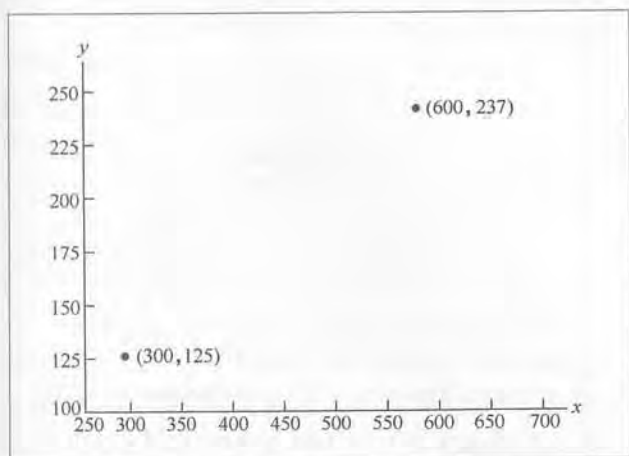


图 5-9 通常我们只将坐标系的一部分显示出来，由此可知，你可能需要绘出与中心点（或原点）相距很远的部分图形。

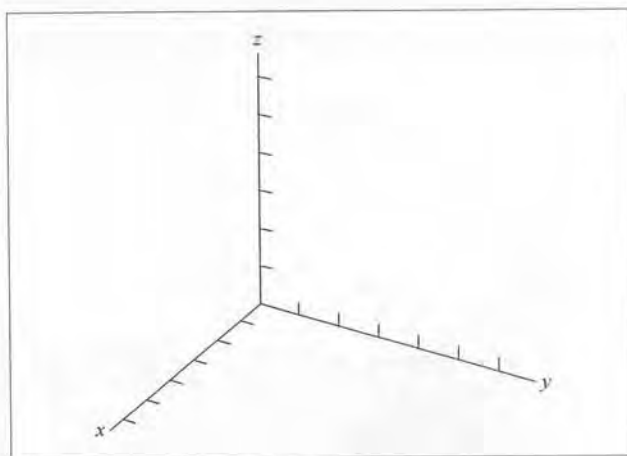


图 5-10 若你画三条数轴，使每条数轴都与其他两条垂直，那么就是一个三维坐标系。用这样的坐标系确定房间中的一点或空中的位置是很有用的。

要描绘这样一个系统的另外一种方式就是看房间的角落。在角落处，墙与地面接触，有两条线构成 90° 角，这就像我们在纸上绘出的坐标系中的 x 轴、 y 轴。由两面墙相交形成的交线

就像是第三条数轴，与另两条呈 90° 。你可以用这样的系统在你的屋子里确定任何点的位置，只要测量出这个点到两面墙的距离和相对于地板的高度。

五、极坐标系

我们应该考虑使用直角坐标系的局限性。坐标图中确定点的位置的数字表示这个点到原点的距离，但我们总是沿着 x 坐标轴和 y 坐标轴测量这个距离。我们都知道两点之间最短的距离是一条直线，所以直角坐标系没能告诉我们点到原点的最短距离。这就是使用直角坐标系的一个缺陷。

有一种坐标系给出了坐标系里点和原点间的最短距离。极坐标系采用一些同心圆来测量距离。见图 5-11，每个圆的半径代表到原点的一个距离。因此图 5-11 中点 A 到原点的距离是 5，这是由点所在的圆表示出来的。

现在你可能已经认识到你不可能只通过给定点到原点的距离来确定这个点的位置，毕竟这个点可以在同一个圆上任意位置。我们还需确定参考线到这个点的角度。就像图 5-11 所示，参考线通常是从原点出发水平向右延伸出来的。我们通常度量从这条线开始测量逆时针转过的角度。我们通常在极坐标系中还含有水平与竖直交叉的线，这些线提供

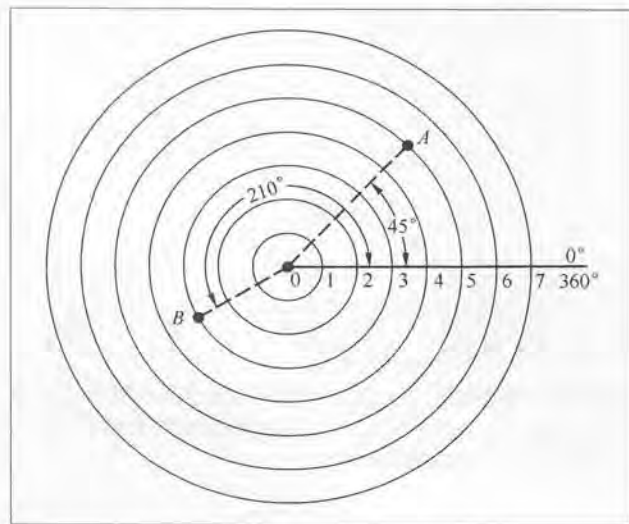


图 5-11 这是一幅极坐标系的图。这样的坐标系帮助我们通过测量到原点或中心点的距离确定点的位置。一个坐标详细说明原点到点的直线距离，我们还需要说明一个角度，它是从原点出发水平向右延伸的射线为始边，逆时针转过的角度。



了 0° 、 90° 、 180° 、 270° 和 360° 这些参考点。图 5-11 中的点 A 在 45° 角，我们可以将它的坐标定为 $(5, \angle 45^\circ)$ 。

看看图 5-11 中的点 B，你会注意到这个点在半径为 3 的圆上，你也会发现它绕过了从参考线出发的大半个圆，角度是 210° 角。所以你可以给点 B 的坐标定为 $(3, \angle 210^\circ)$ 。

极坐标系中的半径单位长度可依实际需要取任何值。你选择的实际值必定会使你解决问题更加方便。当然，角度的范围总是在 0° 到 360° 之间，沿着圆逆时针旋转。

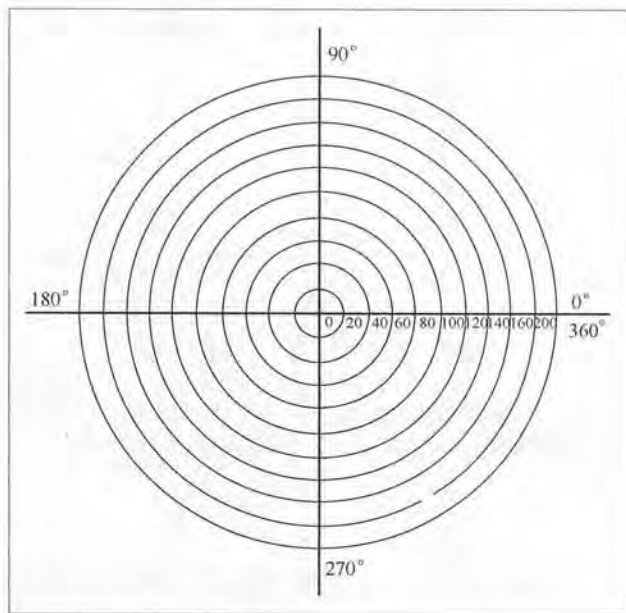


图 5-12 你可以依据要解决的问题选择刻度，但无论你的半径选择多大的额度，整个一圈是 360° 。所以不同的图表中测量的角度是不会改变的。

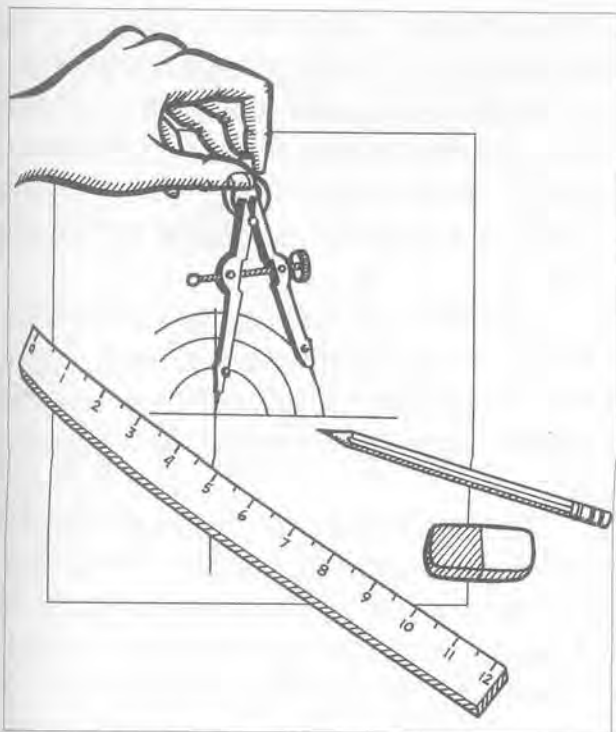


图 5-13 圆规对于划弧或部分圆非常有用。

你可以在极坐标系中不断添加更多的圆，使坐标系变大。你选择的刻度长度限制了你能在纸上显示的坐标系的部分。图 5-13 给出了另一种可能选择的极坐标系单位长度的刻度。

你可以购买印有极坐标系的坐标纸。不过，对于你将要处理的绝大多数电子学问题而言，并不需要坐标纸。通常情况下，你最多只需要一个简单的草图。事实上，大部分时候在图中你不必画出完整的圆。你可以在过中心点的线上简单地标出刻度，然后运用这些标记找到你的点落在哪个半径上。圆规对画圆或者测量点到原点之间的距离非常有用。

把环绕中心点的圆完整显示出来并不总是很方便的。有时你知道问题中所有的值似乎都在某半圆或 $1/4$ 圆上，所以为解决问题，你只需画出极坐标系的一部分。图 5-14 显示了一个只在经过图形中心的交叉线上标有刻度的极坐标。

极坐标系是二维的或称平面系统，我们可以添加第二个旋转方向使之成为一个三维的系统。这使我们可以描绘周围的位置。这样一个球坐标系在描述宇宙位置时非常有用。运用球坐标系，我们可以给出恒星和行星相对于地球的位置。图 5-15 给出了一个球坐标系，不过你看这幅图时需要发挥一点想象力，他试图在二维平面上展示三维视角，这会

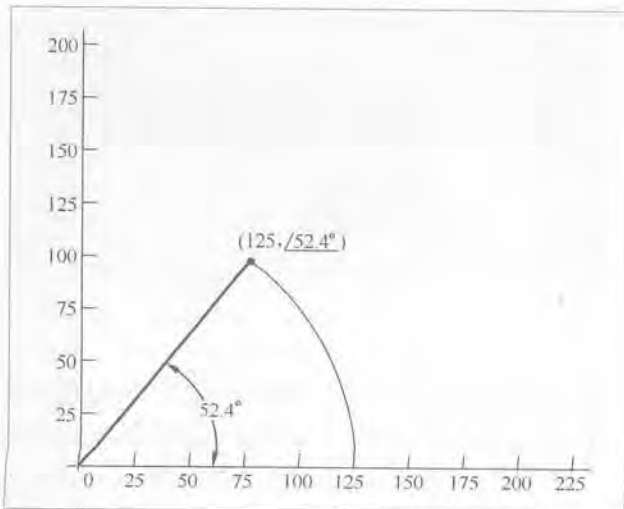


图 5-14 在极坐标系中你不必总是画出完整的圆。在画一个草图解决问题时，你通常只需要半圆或 $1/4$ 圆。同样地，通常你不需要将整个圆画出来。首先沿着穿过图形中心点的交叉线上画上刻度，然后你可以运用刻度去测量图上任一点的距离。

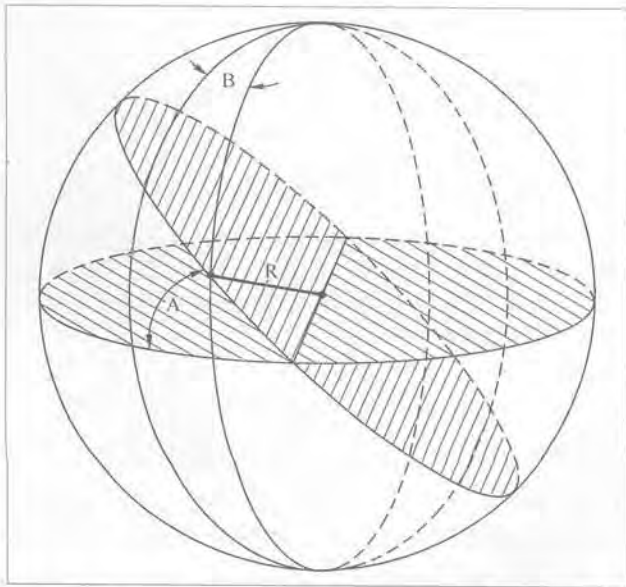


图 5-15 要形成一个三维坐标系，从极坐标系开始入手，然后添加第三个转出纸面的旋转方向。这个新的系统就是球坐标系。这样的系统可以使你在我们三维世界中确定位置，特别有助于描述地球表面或上空位置，包括宇宙中其他恒星和行星的位置。

让人有点迷惑。但如果你不太理解如何运用这样一个系统确定位置，你也不必太担心。你不会遇到很多需要用球坐标系去解决的电子学问题！

六、坐标系之间的转换

你是从本章开头开始学习的吗？如果是，你可能想知道什么样的直角坐标系和极坐标系必须用到三角学。请你继续读下去，下面我们就要回答这个问题！

通过画图表或作图，你可以非常容易地去解决很多电子学问题，图表中的线代表包含在具体问题

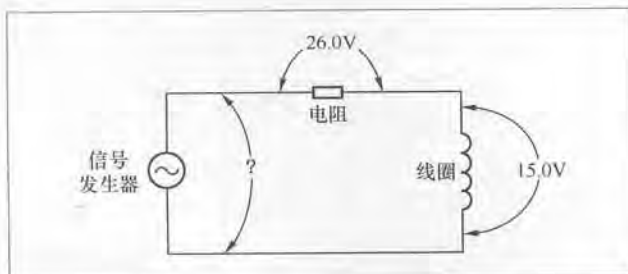


图 5-16 这是一个简单的电路图，它由一个信号发生器或称电压源、一个线圈或称电感器和一个电阻组成。电路图显示了这个电路中线圈和电阻两端的电压值。我们的任务是要计算出由信号发射器提供的电压。

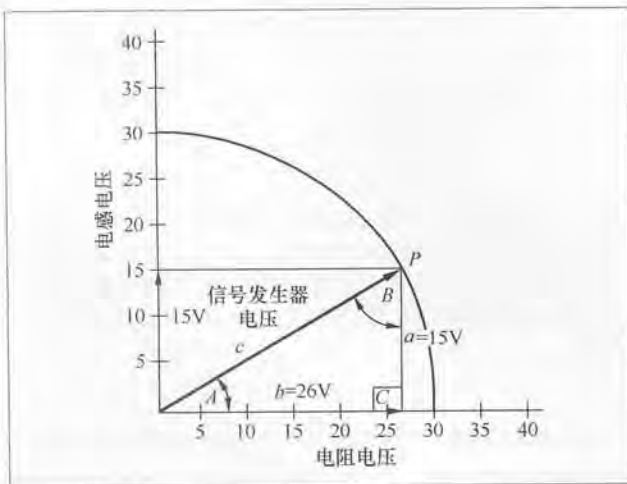


图 5-17 本图反映了图 5-16 中电路中电压之间的关系。边 a 代表线圈两端的电压（电感电压），边 b 代表电阻两端的电压，边 c 是直角三角形的斜边，代表信号发生器提供的电压。角 A 在此题中也很有意思。在本书随后的部分，你将会学到为什么这个角这么重要。

中的电学中的量。例如，图 5-16 中显示了一个简单的电路图。有一个电压源（或称为信号发生器），一个电阻和一个电磁线圈（或电感器）。某人测量出了电阻和电感器两端电压，然后把这些数据写在图表上。电阻两端电压 U_R 是 26.0 伏特；线圈两边电压 U_L 是 15.0 伏特。我们的问题是求出电源的电压。

现在看图 5-17，沿着 x 轴的线段代表电阻两端的电压，沿 y 轴的代表电感器两端的电压。从原点到点 P 所画线段表示提供给电路的电压（在本书的后面部分你会研究更多类似问题，并学会如何解决它们）。

图 5-17 反映了图 5-16 中电路中各个电压之间的关系，你可以看出在这儿构成了一个直角三角形。三角形的斜边代表了供给电路的电压。通过运用直角坐标系，可以为我们的问题绘出图形，若你绘图很准确仔细，你可以用单位长度量出边的长度。我们还需要知道图 5-17 中角 A 。如果你是很认真仔细地画出这个图形，就可以根据刻度测量出 c 边的长度。我们还测量图 5-17 中的角 A 。当然，如果我们非常仔细地画，就可以根据图形测出角的大小。我们需要一个叫做量角器的特殊工具完成测量。图 5-18 给出如何用量角器去测量一个角的大小。只要你认真测量和仔细画图，像这样的图解法并不困难。当然，通过简单的三角计算，你得到的答案会更加准确。

在这个问题中，你已知了直角三角形的两条直角边，要求出斜边。计算斜边最直接的方法就是使用毕达哥拉斯（勾股）定理。你还记得那个等式吗？

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5-10)$$

$$c = \sqrt{(15.0\text{V})^2 + (26.0\text{V})^2}$$

$$c = \sqrt{225\text{V}^2 + 676\text{V}^2}$$

$$c = \sqrt{901\text{V}^2} = 30.0\text{V}$$

接下来，我们需要计算出角 A 。我们可以用三角函数算出这个角。通常你需要用几个数据才能解出一个问题，解决问题的很多部分中尽量使用原始信息是一个好的主意。这时，如果你在计算的某一步出现了错误，这个错误不会影响到余下的计算。因为涉及直角三角形的一个角和两条直角边，所以

使用你的三角函数



正切函数好像满足这个需要。那正是我们开头的问题中所提供的信息。

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}} \quad (5-11)$$

$$\tan(A) = \frac{15.0V}{26.0V} = 0.577$$

现在我们要求出正切函数的反函数。当你求这个函数的反函数时，你要找出正切值为 0.577 对应的角的大小。在计算器上找到标签为 INV, ARC 或 2ND 的键，你的计算器说明书会告诉你按下哪个键去求解三角函数的反函数。当我们在等式中写正切函数的反函数时，我们在 tan 上添上指数 -1，-1 的意思是求这个函数的反函数。

$$\tan^{-1}(\tan(A)) = \tan^{-1}(0.577)$$

$$A = 30.0^\circ$$

检查计算过程是个好习惯。我们可以用正弦函数进行双重核算斜边的长度，这个斜边代表的是提供给电路的电压。

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}} \quad (5-12)$$

$$\sin(30.0^\circ) = \frac{15.0V}{c}$$

通过移动将 c 和 $\sin(30.0^\circ)$ ，交叉相乘就可以从等式中求出 c 。

$$c = \frac{15.0V}{\sin(30.0^\circ)}$$

$$c = \frac{15.0V}{0.500} = 30.0V$$

因为这与毕达哥拉斯定理（勾股定理）计算出的结果一致，我们就可以肯定这个结果是正确的。我们可以将供给电路的电压在直角坐标系中用坐标表示为：(26.0, 15.0V)。但大多数时候，我们更喜欢用极坐标系统将它表示为：(30.0V, $\angle 30.0^\circ$)。

在这个问题中，有一个非常有趣的问题值得你注意。我们开始是用直角坐标系表示两个电压，不过，我们更愿意用极坐标系来表示结果。我们用三角函数将直角坐标系转换成了极坐标系，这种转换正是我们解决问题所需要的。你会发现其他电子学问题你也可用极坐标形式表示信息。这些问题通常会要求将答案在直角坐标系中表示出来。你可以用这种简单、直接的方式解决很多电子学问题。

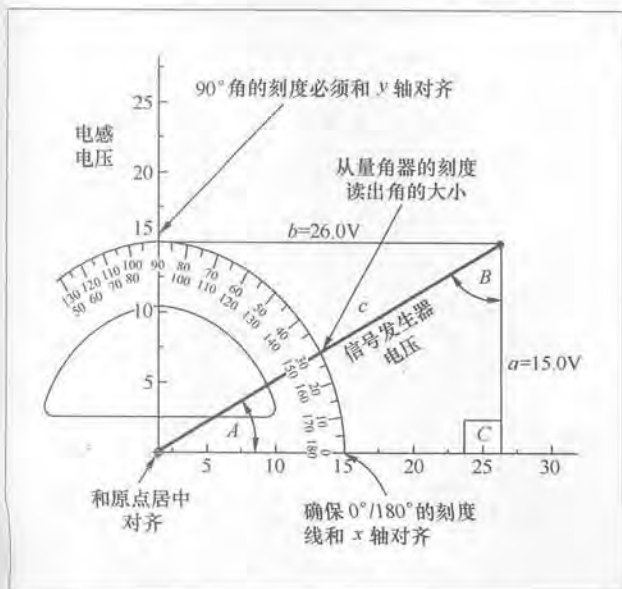


图 5-18 你就可以用量角器测量经过仔细测量和准确画出的图形的角度。这样的图解法可以帮助你验证你的数学计算。请将量角器的一边仔细地角的另一边对齐，确保将量角器的中心点与角的两边的交点仔细的对准，这样角的另一边就会穿过画在量角器上的某条刻度线。你可以很容易读出和这条线重合的刻度，测量出角的大小。

七、用计算器解决三角学问题

在本章的前面，你已经学习了三角函数。你的科学计算器已经帮你解决了一些“三角”问题。当然，也许你可能还要多练习使用计算器，那么接着就是你所需要的。

第一步，你要确保自己能找到计算器上所有必要的按键。找到标有 SIN、COS 和 TAN 的按键。这些键可以算出任何角的正弦、余弦和正切的值。

你当然也要找到反三角函数的功能键。许多计算器上用 INV 或 ARC 键。在按 SIN、COS 或 TAN 键之前按下这些按键，就可以得到与这些函数值对应的角度。

我们通常将三角函数的反函数写成 arcsine(反正弦)、arccosine(反余弦)和 arctangent(反正切)，有时我们也会在函数名称上添加指数 -1 来表示反函数，式 5-13 是我们如何使用指数的一个例子。

$$\sin^{-1}(0.707) = \arcsin(0.707) = x = 45^\circ \quad (5-13)$$

有些计算器通过使用标有 2ND 的按键启动键上方所标注的功能。那样的话就在 SIN、COS 和 TAN 键上可以找到 ARCSIN、ARCCOS 和 ARCTAN 标签。

图 5-19 给出 10 个角，用你的计算器算出这些角的正弦、余弦和正切值，图 5-22 给出图 5-19 中问题的答案。只有在你用计算器算出所有答案后再去看图 5-22，检查你的答案。

图 5-21 列出了 10 个三角函数。对每个正弦、余弦和正切值，求出函数对应的角度。图 5-23 中列出了这些问题的答案。

图 5-21 给出 4 个三角形。每个三角形都给出了一些信息，但并不是给出所有三条边和三个角。用你的三角学知识和计算器算出每个三角形中的未知量。将你的答案与图 5-24 中给出的答案对照。图 5-24 中给出的解决方法只是求三角形中多种方法中的一种。你可以根据不同的顺序求出每个答案。你也可以用不同的等式来求解，不过最后的答案应该是一致的。

	角度	sine	cosine	tangent
1)	10°	_____	_____	_____
2)	25°	_____	_____	_____
3)	30°	_____	_____	_____
4)	40°	_____	_____	_____
5)	45°	_____	_____	_____
6)	50°	_____	_____	_____
7)	60°	_____	_____	_____
8)	65°	_____	_____	_____
9)	70°	_____	_____	_____
10)	80°	_____	_____	_____

图 5-19 用你的科学计算器求出每个三角形的正弦、余弦和正切函数。

- 1) 求出正弦值为 0.2588 的角 $\arcsin(0.2588) =$ _____
- 2) 求出余弦值为 0.2588 的角 $\arccos(0.2588) =$ _____
- 3) 求出正切值为 4.7046 的角 $\arctan(4.7046) =$ _____
- 4) 什么角的余弦值是 0.7880? $\cos^{-1}(0.7880) =$ _____
- 5) 什么角的正弦值是 0.8910? $\sin^{-1}(0.8910) =$ _____
- 6) 求出正弦值为 0.01745 的角 $\arcsin(0.01745) =$ _____
- 7) 什么角的正切值是 3.4874? $\tan^{-1}(3.4874) =$ _____
- 8) 什么角的正弦值是 1.000? $\sin^{-1}(1.0000) =$ _____
- 9) 求出正切值为 1.000 的角 $\tan^{-1}(1.0000) =$ _____
- 10) 什么角的余弦值是 1.000? $\cos^{-1}(1.0000) =$ _____

图 5-20 你的计算器将帮你把每个三角函数对应的角计算出来。你必须利用反函数或弧函数来解决这些问题。

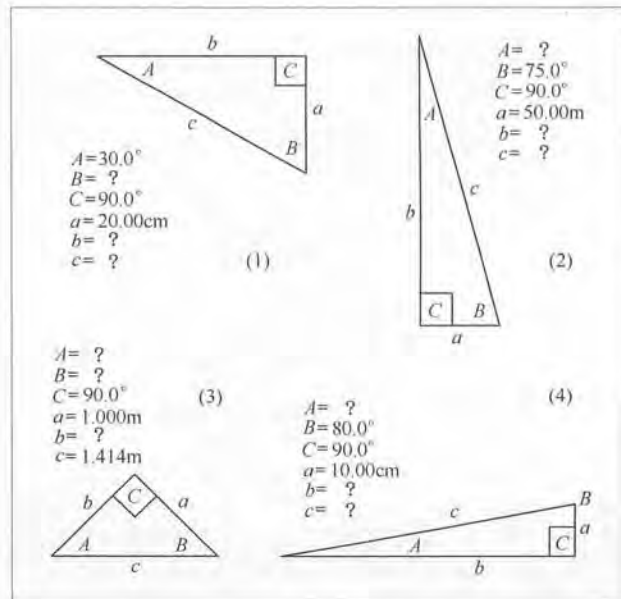


图 5-21 求每个三角形中缺少的量。用你的三角学知识找到这些量。你的科学计算器可以帮助你求出三角函数值。

角度	SINE	COSINE	TANGENT
1)	0.1736	0.9848	0.1763
2)	0.4226	0.9063	0.4663
3)	0.5000	0.8660	0.5774
4)	0.6428	0.7660	0.8391
5)	0.7071	0.7071	1.0000
6)	0.7660	0.6428	1.1918
7)	0.8660	0.5000	1.7321
8)	0.9063	0.4226	2.1445
9)	0.9379	0.3420	2.7475
10)	0.9848	0.1736	5.6713

图 5-22 这张表列出了图 5-13 中每个三角形的正弦、余弦和正切函数值。你的计算器显示的位数可能比这里列出的更多。当你舍入保留 4 位小数的时候，结果应该与此一致。

1) arcsine(0.2588) = 15°
2) arccosine(0.2588) = 75°
3) arctangent(4.7046) = 78°
4) cos ⁻¹ (0.7880) = 38°
5) sin ⁻¹ (0.8910) = 63°
6) arccos(0.01745) = 89°
7) tan ⁻¹ (3.4874) = 74°
8) sin ⁻¹ (1.0000) = 90°
9) tan ⁻¹ (1.0000) = 45°
10) cos ⁻¹ (1.0000) = 0°

图 5-23 本图给出图 5-14 中所列的每个三角函数对应的角度。你的计算器可能比这儿显示的位数要多，不过，但当你舍入保留位数后结果应一致。

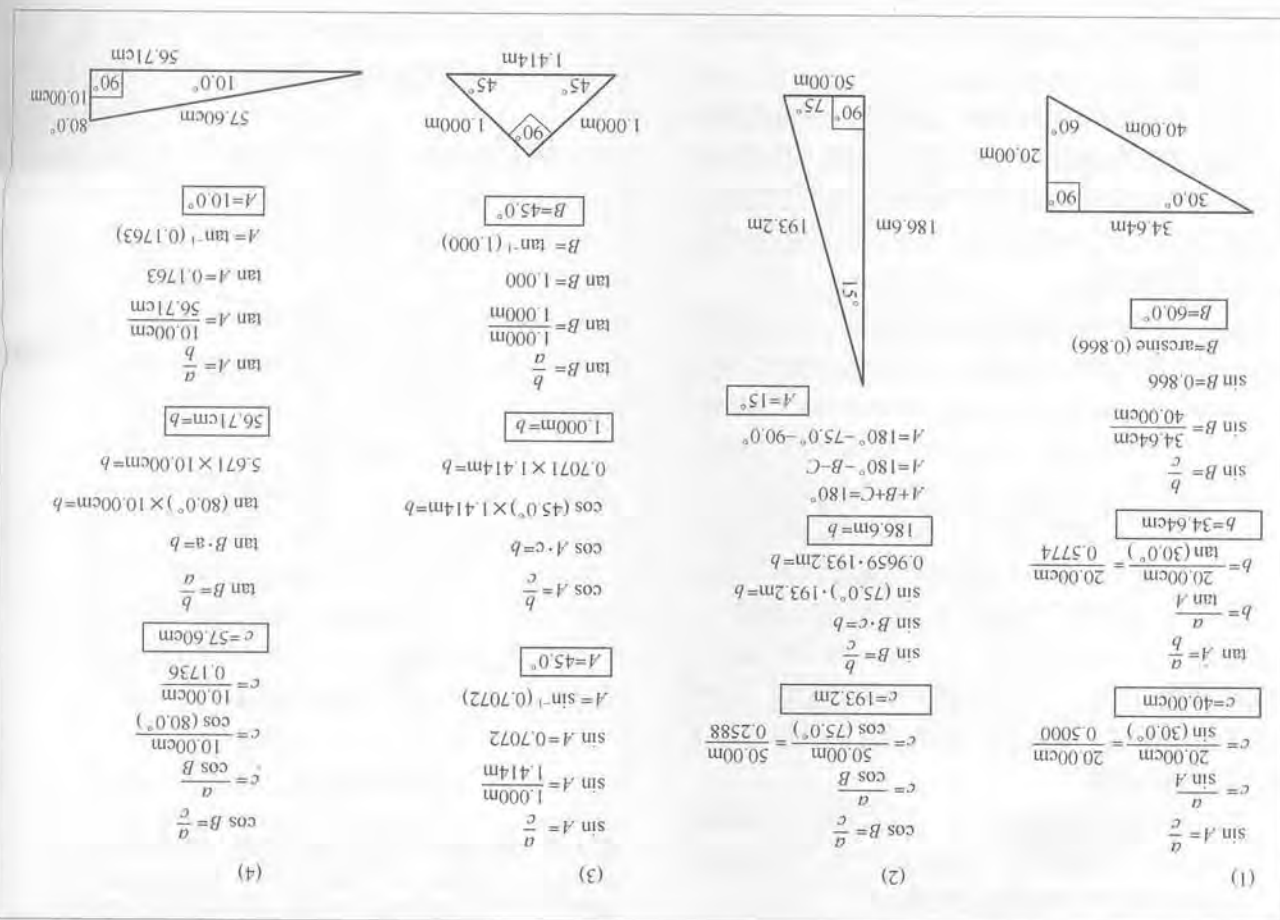


图 5-24 这里显示了图 5-21 中三角形中所有缺少的量。这里给出的解题方法只是每个问题中许多解题方法中的一种。你可以用不同的三角函数去求三角形的边与角。你甚至也可能以用不同的顺序解题，但最终的答案应该是一致的。

八、三角问题和电脑

在本章的前一部分，你已经学习了三角函数及其应用，甚至还用科学计算器进行了解决实际问题的练习。那么，如果没有计算器又该怎么办呢？也许你拥有个人电脑并想用它解决问题。即使你已有了计算器，你也许仍想知道如何用电脑解决三角问题。

几乎任何一台电脑都可以解决三角问题。毕竟电脑比计算器在功能上更加强大。然而，你还要学习一些额外的技巧。有了这本书的帮助，再加上阅读电脑的操作手册做指导，你会很快学会利用你的电脑解决三角学问题。

有很多可用的个人电脑，但每种品牌的电脑和与其他品牌的都会略有不同，正因如此，我们无法在本书中给出使用电脑的详细信息，那是电脑操作手册的工作。我们只能给你几乎在任何电脑上都能使用的一般性指导。

有几种方法可以帮你解决这些问题。也许最普通的就是用计算机 BASIC 语言写一个程序。BASIC 语言是 Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code (初学者通用符号指令代码) 的首字母缩写。每台电脑中 BASIC 略有不同，有些电脑中有几个可用的 BASIC 版本。

大多数个人电脑中有一个或多个可用的电子表格程序。一个电子表格程序可在电脑中制出一张庞大的表格并将其中的一部分显示在你的显示器上。电子表格中每一部分都是一个单元，允许你输入文本或计算用的等式。电子表格程序中已安装了三角函数和其他函数，因此你只需把等式的一部分用正确的指令输入即可。

有些电脑还有计算器程序，它可能是一个单独的程序，或是作为其他程序打包附带的程序。在 IBM 的电脑或者兼容机上普遍都有计算器程序。

如果你的电脑中有计算器程序，试用一下，它是不是科学计算器吗？有些仅仅是简单的数学计算器，有些是包含许多特殊功能的金融或统计用的计算器。

科学计算器程序也许是用电脑解决三角学问题最简便的方法。试着用电脑中的计算器去解决上一节中的问题。它与一个小计算器运作起来非常相似。你在屏幕上输入数据，按下显示的各种功能键。

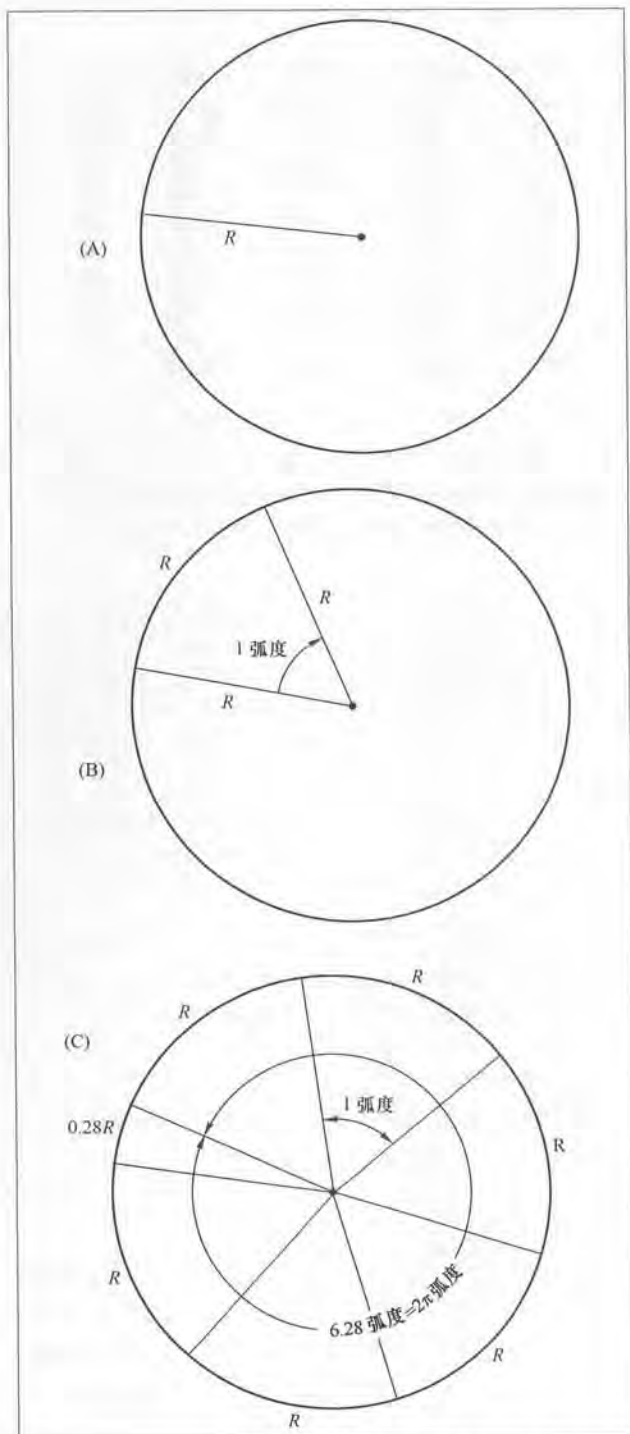


图 5-25 图 A 表示一个半径为 R 的圆。图 B 中的圆上标记了一个扇形，它定义了一个弧度的大小。你可以如图 C 中那样，继续以半径的长度在圆周上划线。半径长应该与圆相交 6 次，你还需要另外一个 0.28 倍半径的长度去填满最后一部分。

使用电子表格程序时，你将一个等式输入一个或多个单元格中。当你按下 ENTER 键后，电脑将你输入的等式在单元格中显示结果。

大多数电子表格程序用符号 @ 字符去定义数学函数。输入 @sin, @cos 或 @tan 就可以调用这些三角

函数。这些函数都需要一个自变量。函数的自变量就是函数中使函数变化的量。在三角函数或者反三角函数中，角度就是函数的自变量。

例如，输入 $@ASIN(0.500)$ 去计算出哪个角的正弦是 0.500。你的电脑很可能不会输出 30.0° 作为问题的答案。如果是这样的话，可能结果显示为 0.523 6 (如果结果保留 4 位小数)。那是因为电脑通常不是用角度来思考，它们使用另一种角度度量制，称为弧度制。当然，你可以很轻松地用你的电脑将结果转化成度数。在 BASIC 语言中，处理三角函数的角度时也是用弧度来表示。继续看下去，学习关于弧度制的知识。你可以将同样的方法用在电子表格和 BASIC 程序中。

你可以通过两种方式使用 BASIC 计算机语言。你可以输入一条简单的 BASIC 指令，让电脑立即执行这个指令。你也可以输入一系列命令组成一个程序，然后你可以保存程序以便以后使用。程序是按顺序执行每一步，执行完一条指令再进入到到下一步指令。

图 5-25A 是一个半径为 R 的圆。沿着圆周量出一个半径的长，现在再画出另一条半径，形成一个扇形。图 5-25B 表示出了这条弧形。以这样的方式划分的角就叫做一个弧度角。

若我们在圆周上一直这样划分最终会出现什么情况呢？图 5-25C 显示了划分结果。整个圆周上，6 个半径长弧线环绕整个圆周后，还剩下很少一部分，大约需要用比半径长的 $1/4$ 多一些的长度去填满。

圆的周长是半径的 2π 倍。 π (π) 无法用精确的小数来代替，它近似等于 3.14，所以 2π 大约为 6.28。因此，我们可以圆周划分为半径的 6.28 倍。另一种说法是一个圆上有 2π 弧度和一个圆周是 360° 一样。那么一个弧度相当于多少度呢？用 360 除以 2π ，算算看：

$$360^\circ / 2\pi \text{ 弧度} \approx 360^\circ / 6.28 \text{ 弧度} \quad (5-14)$$

$$1 \text{ 弧度} \approx 57.3^\circ$$

那么 1° 又是多少弧度呢？用 2π 除以 360° 。

$$2\pi \text{ 弧度} / 360^\circ \approx 6.28 \text{ 弧度} / 360^\circ \quad (5-15)$$

$$1^\circ \approx 0.01744 \text{ 弧度}$$

(符号 $\approx$ 表明近似相等)

如果有一个以度计算的角，你想将它换成弧度角，那么每一度乘以 0.017 44 弧度，如果有一个角用弧度表示，你想将它转换成度，每一弧度乘以 57.3° 即可。

把等式输入到电子表格中，然后按回车键，你得到的结果应当与等号右边给出的答案类似。

$$@ASIN(0.500) * 57.3 = 30$$

$$@SIN(30 * 0.01744) = 0.500$$

由于 π 无法用精确的小数表示，这里给出的值都是四舍五入得到的。而你的电脑可以用更多的位数来计算。若你的电子表格程序或 BASIC 有个称为 π 的函数，就可以用这个值了。写一个等式去计算每一度是多少弧度和每一弧度是多少度，将这些等式用到电子表格或 BASIC 程序中。

BASIC 有内置函数去计算角的正弦、余弦和正切值。用等式 5-15 将这些角转化为弧度。

图 5-26 是一个 BASIC 程序，提示你要输一个角，然后输出这个角的正弦、余弦和正切值。它把你以度输入的角转换成弧度。这个程序非常简单，你可以增加扩展去提高程序的显示和实用性，它不需要修改就可在大多数 BASIC 版本上运行。

图 5-27 也是一个 BASIC 程序，它询问你是否想求出一个值的反正弦，反余弦或反正切，然后程序提示输入这个值，求出合适的反函数，最后，将角从弧度转化为度数，并将显示出计算结果。此程序是从 BASIC 内置的反正切 (ATN) 函数中得到反正弦和反余弦函数。大多数 BASIC 版本没有内置反正弦或反余弦函数。

请用此部分描述的其中一种方法解决前面所研究的三角学练习题。你的答案应和给出的很接近。不过可能会有些不同，这是由于电脑舍去位数的方式不同。

```
10 CLS
20 PI = 3.141592654
30 PRINT "ENTER AN ANGLE IN DEGREES."
40 INPUT AN
50 AR = AN * (2 * PI / 360)
60 PRINT "SINE = "; SIN(AR)
70 PRINT "COSINE = "; COS(AR)
80 PRINT "TANGENT = "; TAN(AR)
```

图 5-26 这个 BASIC 程序提示你输入一个角，程序将它从度数转换成弧度并算出这个角的正弦、余弦和正切函数。

```
10 CLS
20 PI = 3.141592654
30 PRINT "ENTER ARCS FOR ARCSINE, AC FOR ARCCOSINE OR AT FOR ARCTANGENT"
40 INPUT TR$
50 PRINT "ENTER A VALUE FOR THIS FUNCTION"
60 INPUT X
70 IF TR$ = "ARCS" THEN PRINT "ARCSINE( "; X; ") = "; (2 * ATN(X / (1 + SQR(1 - X * X)))) * (360 / (2 * PI))
80 IF TR$ = "AC" THEN PRINT "ARCCOSINE( "; X; ") = "; (-ATN(X / SQR(-X * X + 1)) + 1.57079) * (360 / (2 * PI))
90 IF TR$ = "AT" THEN PRINT "ARCTANGENT( "; X; ") = "; ATN(X) * (360 / (2 * PI))
```

图 5-27 这个 BASIC 程序询问你是否要算反正弦 (ARCS)、反余弦 (ACS) 或反正切 (ATN) 值。它提示你输入函数值并找到合适的反函数，最后程序将角度从弧度转化为度并显示结果。

第6章

电子学中的对数

一、压缩数标

当你在进行电子学测量时，你会用到比 1×10^{-12} 还小，比 1×10^{12} 还大的数。这说明在最小和最大数之间差值超过了1兆倍。你能画出一条数轴表示这些值吗？图6-1显示了这个数轴的一部分。当然，要想画出一条线能表示每个整数（可计数字）确实是不可能的，不是吗？

我们用单位微法（百万分之一法拉）和皮法（万亿分之一法拉）度量电容容量。用毫亨（千分之一亨）或微亨（百万分之一亨）度量电感量。当我们提到电阻值时，你会看到千欧（一千欧姆）和兆欧（一百万欧姆）这样的术语。我们用兆赫兹（一百万赫兹）和千兆赫兹（十亿赫兹）度量频率。（别担心，你在本书中的后面章节将学到什么是电容、电感、电阻。你也会学到我们所说的频率的意思）。

你能认出这些公制的前缀吗？兆（M）、千

（kilo）、毫（m）、微（ μ ）、皮（p）应该比较熟悉。请看表4-1，更新这些前缀的记忆及他们值的记忆。

让我们尝试用另一种方式来画数轴，图6-2是一个只显示10倍数的数轴，这样看上去不那么混乱，而且我们可以在一条数轴上显示很大范围的数。但我们仍未能显示所有的整数。那并不是关键，只要我们可以在这些列出的数字中估计数值。不管怎样，当你在谈论以兆计的数字时，几千又算得了什么呢？

仔细观察图6-2，你应该注意到这条数轴的几个特点。首先，我们沿数轴把所有10倍数等距分布，在每个10倍数之间标有8个小刻度。在1到10之间（ 10^0 和 10^1 ），这些小刻度值表示从2到9，在10到100之间（ 10^1 和 10^2 ），它们表示从20到90，而在 10^4 和 10^5 之间它们表示20 000到90 000。对于小于1的值，在 10^{-2} 和 10^{-1} 之间，这些小刻度表示从0.02到0.09。那么在 10^{-6} 和 10^{-5} 之间时，这些刻度又表示什么呢？

你同样应当注意到在10倍数之间的刻度在从2到9时渐渐接近，这就是图6-2数轴中数标是压缩的证据。我们压缩数标的意思是什么呢？比1大得多的数之间的刻度比接近1的数之间的刻度更靠近。而比1小得多的数之间的刻度分得更开一些。我们沿着数轴每次移动相同的距离，10的因数数字变得大或更小。与图6-1中数轴相比，这导致了数轴的挤压或者缩短。

一个测定值经常在另一个值改变了很小量时而在较大范围内变化。从低通滤波器输出的信号强度就是一个很好的例子。业余无线发信机或接收机在它的输出端也许有个低通滤波器。这样的滤波器允许想要的信号通过。滤波器阻止高频信号，防止它

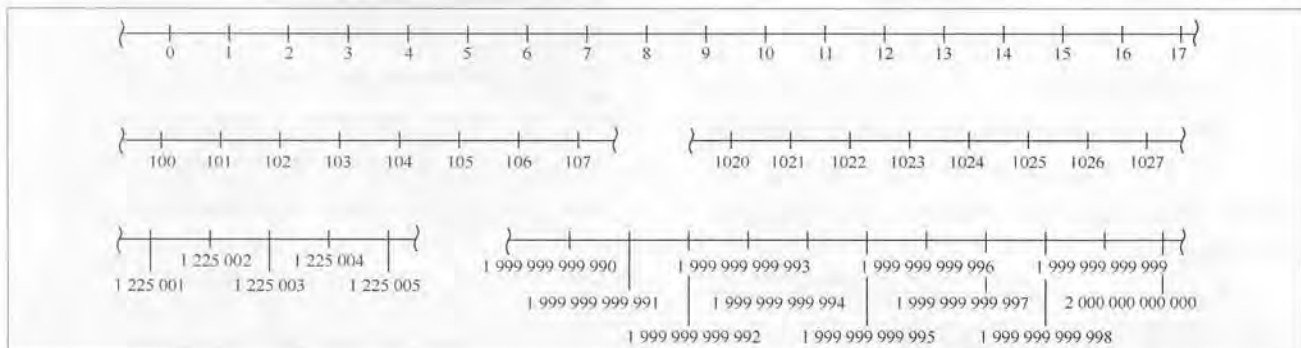


图6-1 这是表示0到2兆间的数的数轴的一个片断。在数轴上包含这个范围内所有可计数的数字几乎是不可能的。

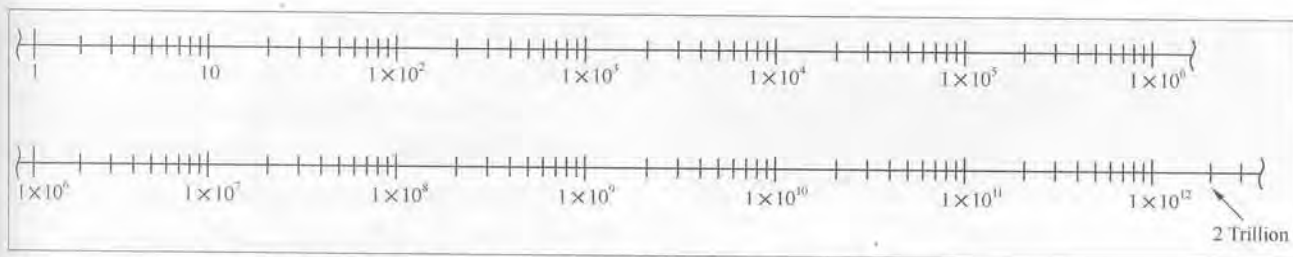


图 6-2 我可以用 10 的幂代替所有整数来画数轴。在 10 的幂间作标记帮助估计 10 的倍数间的值。

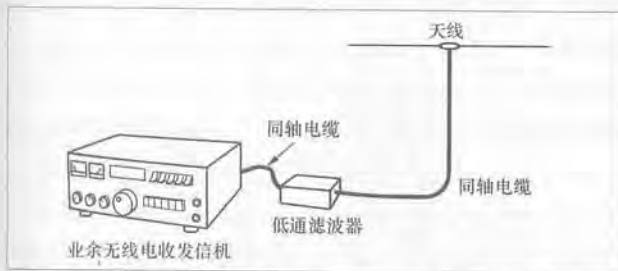


图 6-3 你可以在业余无线电收发信机的输出端添加一个外部通滤波器。这个滤波器允许需要的业余无线电信号传送到天线上，而阻挡不必要的高频信号。

们被发射出去。许多业余无线电发信机和收信机都包含内置的低通滤波器。作为预防措施，特别是老式的发信机，很多爱好者会使用一个外部滤波器。图 6-3 显示的是你如何将外部滤波器和发信机连接的示意图。

一个滤波器效果的测试，就是给滤波器输入信号，接着测量输出的信号。然后我们改变输入信号的频率，但保持相同的输入功率。我们测量输出强度，将其值在图中用点描出。这就是图 6-4 所表示的。

图 6-4 是滤波器输出信号强度的图像。横轴或称 x 轴，覆盖一个很小范围的频率。我们用普通的数标标注这根轴。纵轴或称 y 轴，覆盖了很大范围的输出强度，我们使用了压缩过的数标，就像图 6-2 中的数轴那样标注这个数轴。

频率标度从 28 兆赫 (MHz) 开始。低于这个频率，输入 100W 的功率，输出功率还是 100W。滤波器对低于 30MHz 的信号不起作用。在 31.7MHz 时，滤波器开始减少输出信号的强度。只有在高于 34MHz 时，滤波器将 100W 输入信号减少到 50W 输出。在 40MHz 时，对于 100W 的输入信号只得到不到 1W 的输出信号。而当频率到达 49MHz 时，滤波器将 100W 的输入信号减弱为大约 0.001 7W！

你能想象试图用线性数标来表示纵轴，画出图 6-4 吗？压缩数标对这种情况是再合适不过了。你会发现压缩数标的很多其他用途。

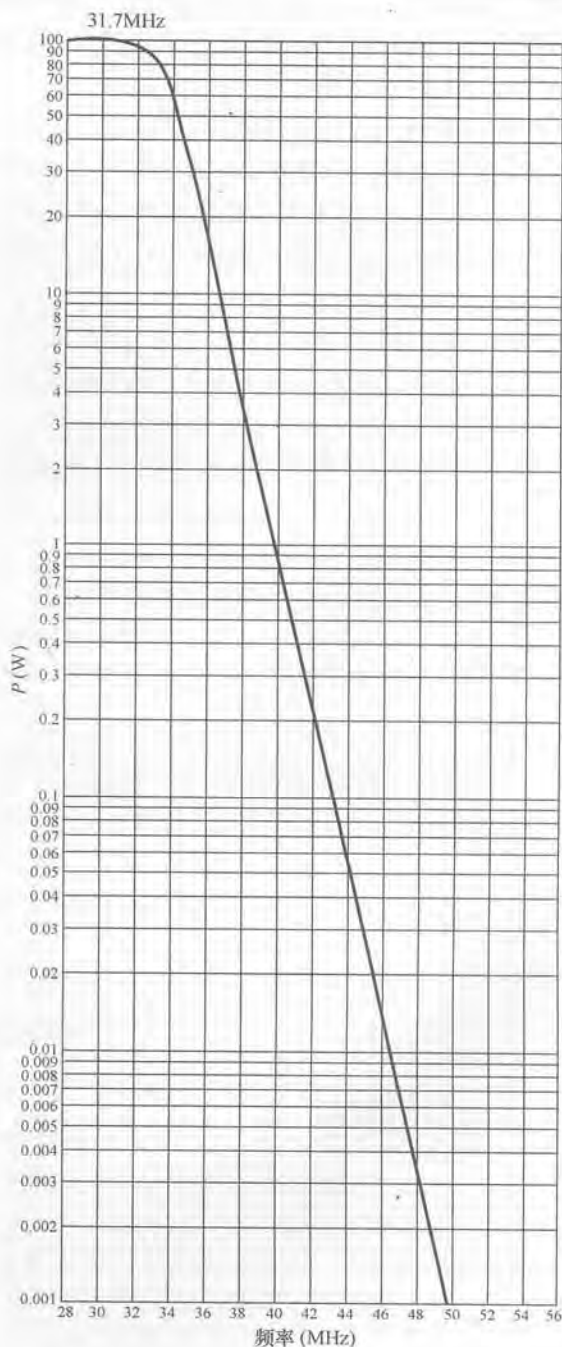


图 6-4 这幅图显示了低通滤波器的输出情况。纵轴即 y 轴使用与图 6-2 类似的压缩数标，当频率发生很小的变化时，滤波器的输出功率会在很大范围内发生改变。

二、对数的定义

以 10 为底的幂帮助我们处理较大的数和较小的数，还帮助压缩数标，涵盖很大范围内的数值。10 的幂也为我们提供了一种压缩数标的方式。此时你可能开始认识到我们在很多电子学应用中使用 10 的幂。

我们能将任何数写成指数或科学记数法的形式。意思就是我们可以将数字写成任何非 0 数字和 10 的幂的形式。10 的幂表明将数字展开需要将小数点移动多少位。展开形式是指不用 10 的幂来表示。

例如，我们把 45 300 写成 453×10^2 或 4.53×10^4 。我们也可以将这个数表示成小数点在其他位置正确的 10 的幂的形式。

我们也把小于 1 的数用 10 的幂表示。记住

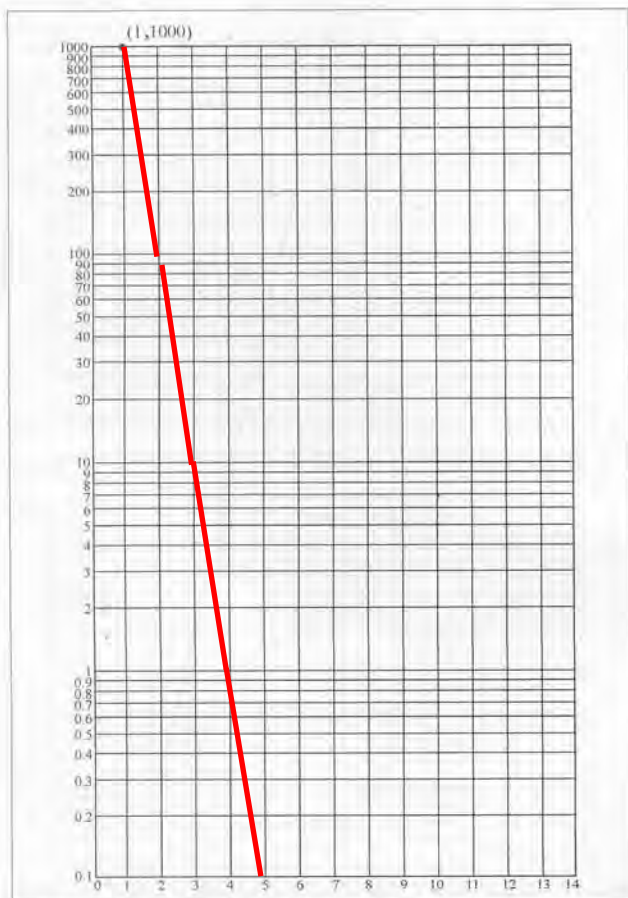


图 6-5 这张在 y 轴或称纵轴上使用了压缩数标。将表 6-1 中给出的数据绘在此图上，并将这些点连成线。

0.006 25 和 6.25×10^{-4} 等同。我们也可以将它写成 625×10^{-6} 。

在本书前面的章节，你已经学习了如何将数字写成 10 的幂的形式，练习了使用指数或科学记数法。若你对把数字写成 10 的幂的形式还不太确信，现在就复习一下那部分内容，并再做些练习。

让我们看一些把 10 的倍数写成科学记数法的形式。你怎样把 10 写成科学记数法呢？在科学记数法中，写成 1×10^1 。把 100 写成 1×10^2 ，1 000 写成 1×10^3 ，1 000 000 写成 1×10^6 。注意，我们可以把每个表达式前面的“1×”去掉。任何时候把数乘以 1 没有实际作用，因此你可以去掉 1。这意味着我们把 10 写成 10^1 ，100 写成 10^2 ，1 000 写成 10^3 ，1 000 000 写成 10^6 。我们将这些数完全仅用 10 的幂表示出来了。

我们能将小于 1 的数仅用 10 的幂表示出来吗？当然可以，正如早些时候你在前面已经看到的，指数或幂有负值。我们可以把 0.1 写成 10^{-1} ，0.01 写成 10^{-2} ，0.000 001 写成 10^{-6} 。

把数字写成以 10 为底的幂的形式我们就把数

标压缩了。10 的幂沿数标相等间隔，而不是沿标度标出所有的整数。图 6-5 中的 y 轴或称纵轴，就是一个压缩的数标。

表 6-1

图 6-5 中的数据点

(1, 1 000)
(2, 100)
(3, 10)
(4, 1)
(5, 0.1)

将表 6-1 中给出的数据用点绘在图 6-1 中，数据是以一对数组的形式给出的。第一个数代表沿 x 轴即横轴的距离，第二个代表沿 y 轴的距离。我们已经为你绘出了第一个点，并在点的旁边上写出了此点的 x、y 值。现在用直线连接所有数据所代表的点。你的所有的点是在同一条直线上吗？

现在我们将试图把同样的数据绘制在图 6-6 中线性图上。你马上就会发现纵轴太小了，你不可能刻度上标出从 0 到 1000 的数，因为数标只到 10！首先我们必须要将 y 轴的数值压缩，你可能会想，“我们可以用科学记数法来实现！”我们把 y 轴的数值写成 $1\,000 = 10^3$ ， $100 = 10^2$ ， $10 = 10^1$ ， $1 = 10^0$ 以及 $0.1 = 10^{-1}$ （我们将 1 写成 10^0 ，这因为你无需再将它展开成原数时移动小数点。记住，在 10 的幂前应



有“ $1 \times$ ”。

你为学习有关技巧做好准备了吗？我们将只用指数或幂将数据绘在图 6-2 中！表 6-2 给出了要在图上绘出的点的数据。同样，我们已将第一个点绘出，并且在它的旁边写上了它的值。将余下的数据绘成点，并用线连起来。所有数据点在同一条直线上吗？两张图形几乎一样。图 6-5 中压缩了数标，省去了我们把绘制数据换算成 10 的幂的麻烦。

我们可以用 10 的幂的形式写出所有 10 的倍数

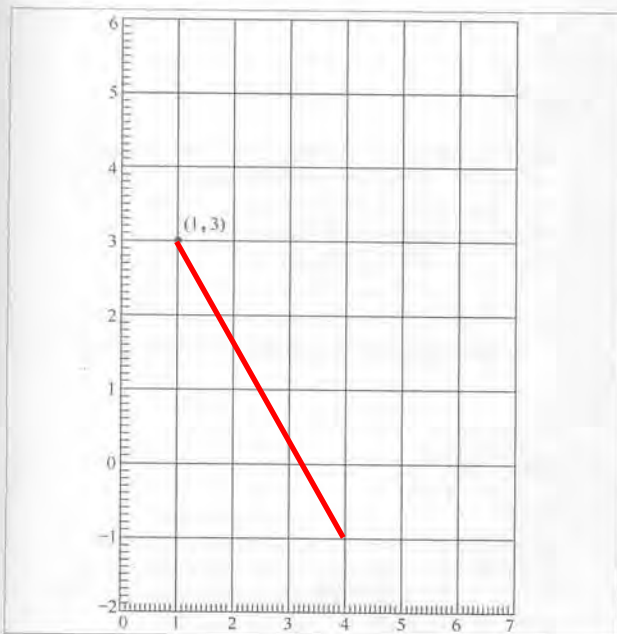


图 6-6 因为 y 轴不够长，我们不能将表 6-1 的数据绘在这张图上。首先我们用 10 为底的幂的形式压缩数据。表 6-2 为你在图中绘出这些点压缩了数据。标上数据，然后用线连接点。

的整数。也许你会好奇我们能否将其他数据写成仅含有 10 的幂的形式。答案是肯定的，我们可以。这为我们解决许多问题提供了很有用的数学工具。

见图 6-6 中的纵轴，沿轴整数间都留有空间，你可以估计数值，像 1.5 和 3.25。这些数值在我们的压缩数标上表示很大的值。2 到 3 之间的数值表示 100 到 1 000 之间的数。0 到 1 之间的数值代表 1 到 10 之间的数。

这个用一个数代表另一个数的过程就是数学上的函数。前面你已经学习了三角函数。对数函数得到的值是以 10 为底的幂的指数，将这个幂展开就得到原数。例如，你要将 10 升到三次方 (10^3) 才能得到 1 000，因此 1 000 的对数就是 3。那么 100 的对数是多少？对了，是 2。0.1 的对数是 -1 ($0.1=10^{-1}$)。我们将所给出的数据的对数值沿着图 6-2 给出的纵轴绘出相应点。图 6-1 中的 y 轴就是对数刻度。等式 1 给出了对数 ($\log$) 函数的数学定义。

如果 $x=10^y$ ，那么

$$\log(x) = y \quad (6-1)$$

这里的 x 取任何值而 y 是 10 的指数，也是 x 的对数函数值。

科学计算器会替你算出对数的值，这对除所

表 6-2

图 6-6 中的数据点

(1,3)
(2,2)
(3,1)
(4,0)
(5,-1)

有 10 的倍数以外的数都非常有用。在你的计算器里输入 20，然后按下有 LOG 标记的按钮（在某些计算器上，可能要你先按下

FUNCTION 或 2ND 键）。应该显示 1.301 03。20 的对数就是 1.301 03。现在输入 200 并按下 LOG 键，应该显示 200 的对数是 2.301 03。

对数函数只定义在正数范围，所以你不能算出 0 的对数。若你试着做了，计算器会告诉你计算出错。你也不能计算负数的对数值，若你试着做了，计算器会显示错误信息。

在本书下面的单元中，你将学到更多的对数知识以及学会如何使用对数。

三、指数函数——对数函数的反函数

对数给我们提供了一种压缩数标的方法。在一些电子学计算中，我们也使用对数(logs)，你将在本书后面的章节学到更多使用 logs 的方法。

对数是函数。函数以某种方式把一个数和另一个数联系起来。你已对正弦、余弦和正切函数很熟悉了，这些是三角函数。你也许还熟悉其他一些数学函数。

你应当记得三角函数可以反转。给出一个函数值，你可以找出它的反函数，三角函数的反函数是一个与函数值相关的角。

对数也可以直接反转。当已知某数的对数，你可以通过反函数而求出原数。我们有时把反对数写成 $\log^{-1}$ ，这与三角函数用指数 -1 表示的意思一样。

为了定义对数函数，我们写出公式 6-2。

若 $x=10^y$ ，则

$$y=\log x \quad (6-2)$$

反之也成立

若 $y=\log x$ ，则

$$x=10^y \quad (6-3)$$

公式 6-3 定义了反对数。它告诉我们若将对数值作指数，求以 10 为底的幂，就又可以得到原数。

例如，某个数的对数是 2。这个数是什么？我们用公式 6-3 来求未知数的值。

$$\begin{aligned} x &= 10^y \\ x &= 10^2 = 100 \end{aligned}$$

注意，我们不需要计算器或其他任何辅助条件就可以求出这个数。你可以不需要任何帮助就能说出 100 或者 1000 的对数。反过来求原数也一样容易。

再举一例，-2 的反对数什么？公式 6-2 再一次给了你帮助。

$$\begin{aligned} x &= 10^y \\ x &= 10^{-2} = 0.01 \end{aligned}$$

你可以通过将 10 的倍数的整数写成科学记数

法的形式来求解他们的对数。10 的指数就是这个数的对数。求任何整数的反对数也很简单，将某数写成 10 的幂的形式，然后再写成科学记数法。

对于有分数的数求对数，你需要用到计算器，2.5 的反对数是什么？你不太可能在你脑中算出 10 的 2.5 次方。

看看计算器上的按键，你看见一个有 ANTILOG 的标记了吗？如果有就用这个键。有标有 INV 的键吗？你也可以用这个键和 LOG 组合使用求出反对数。如果这两个键你一个也没有找到，你可能会找到标有 10^x 、 y^x 或其他类似的按键。图 6-7 到图 6-10 说明如何组合使用这些键。

2.5 的反对数是什么？在计算器上输入 2.5，然后再按下 ANTILOG 键，你的计算器上将显示出 316.227 77 或者其他非常接近的值。2.5 的反对数是 316.227 77。另一种说法就是 10 升到 2.5 次幂就是 316.227 77。

图 6-7 此例说明如何使用计算器上的 ANTILOG 键求解反对数。

求一个对数是 2.75 的数。在这个例子中，我们假设你的计算器标有 INV 键。输入 2.75，然后在按下 LOG 键后再按下 INV 键。你的计算器上将显示 562.341 332 75 的反对数是 562.341 33。

图 6-8 此过程说明如何用计算器上的 INV 键求反函数。

如果你的计算器上有 ANTILOG 键，按图 6-7 的例子完成。若计算器上有 INV 键，按图 6-8 的例子。图 6-9 告诉你若计算器上有 10^x ，如何求反对数，图 6-10 给出使用 y^x 键求反对数的实例。当你应用计算器学完这些实例后，求出其余例题中的反对数。

如果你的计算器上有 10^x 键，按照这个步骤完成。3.25 的反对数是什么？根据定义，10 自乘的结果就是反函数。所以把 3.25 输入计算器，然后按下 10^x 键。你的计算器将显示 1 788.279 4；如果 10^x 标在按键的上方，例如在 LOG 键上方，那么按下 10^x 键前，先按下标记为 INV 或 2ND 的键。如果对 INV 或 2ND 这两个键不确定，请查看你的计算器操作手册。

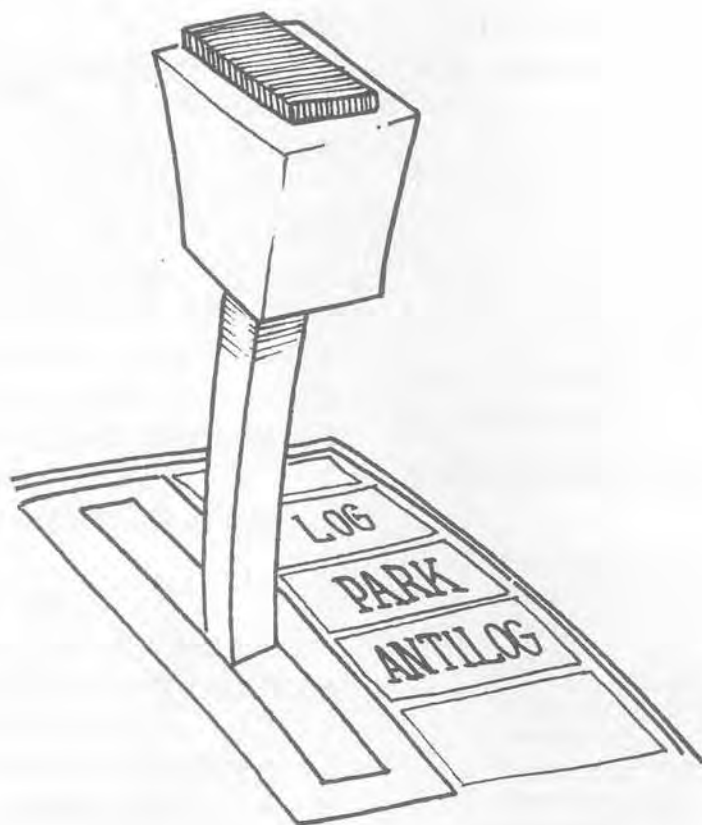
图 6-9 这些步骤指明了如何用计算器上的 10^x 键求反对数。

使用计算器上的 y^x 键，你必须输入一个额外的数字。你的计算器有两个或两个以上用于将要使用的数字的寄存器。每个寄存器用于存储数字。对于大多数计算器，你输入第一个数。接着按操作键，然后输入第二个数字。第一个寄存器被称为 X 寄存器，无论何时你通过按键输入数字，这个数字都寄存在 X 寄存器。当你输入第二个数字时，第一个数字迁移到 Y 寄存器。

要告诉你的计算器你要对 10 自乘，你先输入 10，然后再按下 y^x 键，接着你输入指数，或者你想求的数的反对数。用 1.398 作为例子。

在你输入 10，按下 y^x 键后，输入 1.398。为了完成计算，你必须再按下 = 键。现在，你的计算器将显示 25.003 454。

图 6-10 某些计算器上有 y^x 键，这里是用这样的计算器求反对数的一些步骤。



(LOG- 对数 PARK- 停车 ANTILOG- 反对数)

四、熟练掌握你的计算工具

你的计算器可能有好几种键可以帮你处理对数和反对数。把它添加到你的工具箱非常有价值。当然，你还必须提高你的计算技巧，从计算器上获得更多的好处。通过练习，你会很快很轻松地处理那些对数问题。

图 6-11 中列出了 10 个数。用计算器求出每个数的对数值。将你的答案与图 6-13 中给出的答案相比较。我们已将结果舍入保留到小数点后 5 位。在你将数字舍入后，答案应该与之相似。

分解对数仅仅是你要面对的一个挑战。有时你也需要通过求出这个数的反对数来还原这个数。你的计算器也只不过是这些任务的工具。当然，这是一个错综复杂的过程，除非你不断练习这些技巧。

求出图 6-12 中给出的 10 个数的反对数，将你的

- | | | |
|---------------------------------|---|-------|
| 1) $\log(625)$ | = | _____ |
| 2) $\log(1250)$ | = | _____ |
| 3) $\log(3.1623)$ | = | _____ |
| 4) $\log(2.512 \times 10^6)$ | = | _____ |
| 5) $\log(4.00 \times 10^{-4})$ | = | _____ |
| 6) $\log(1024)$ | = | _____ |
| 7) $\log(6.25 \times 10^{18})$ | = | _____ |
| 8) $\log(75)$ | = | _____ |
| 9) $\log(6.67 \times 10^{-11})$ | = | _____ |
| 10) $\log(9.80665)$ | = | _____ |

图 6-11 将这里列出的每个数求对数。将你的答案与图 6-13 中给出的答案相对照。

- | | | |
|-------------------------------|---|-------|
| 1) $\text{antilog}(8.38021)$ | = | _____ |
| 2) $\log^{-1}(-1.11351)$ | = | _____ |
| 3) $\log^{-1}(10.95521)$ | = | _____ |
| 4) $\text{antilog}(1.78364)$ | = | _____ |
| 5) $\text{antilog}(2.92620)$ | = | _____ |
| 6) $\log^{-1}(0.08988)$ | = | _____ |
| 7) $\log^{-1}(3.214)$ | = | _____ |
| 8) $\text{antilog}(-4.71444)$ | = | _____ |
| 9) $\log^{-1}(2.4864)$ | = | _____ |
| 10) $\log^{-1}(1.76043)$ | = | _____ |

图 6-12 用计算器求出这里每个数值的反对数。图 6-14 中列出答案以便你检查结果。

的结果与图 6-14 中给出的结果相对照。你必须再将计算器的答案四舍五入。

在你学习电子学时，会在好几个地方出现对数。第一个地方可能是比较电路中的功率电平。在本书随后的章节中，你会学到用对数比较功率电平。当我们计算中使用对数时，它会给出一些有趣的结论。

让我们做一些计算。求出 25 的对数，并保留小数点后 5 位。你得到 1.397 94 了吗？2 的对数是什么？也保留小数点后 5 位。答案是 0.301 03 吗？很好，现在将这些值相加：

$$1.397\ 94 + 0.301\ 03 = 1.698\ 97$$

1.698 97 的反对数是什么呢？你的答案应该约等于 50。

把对数相加就像是把某些数相乘。如果我们把对数相减，你认为又会发生什么呢？让我们试着通过一个例子去找出答案。

5 400 的对数是什么？当你保留小数点后 5 位，应为 3.732 39。让我们从这个数中减去 200 的对数。上个例子中，你已经知道了 2 的对数，用这个信息，你可以不必再从计算器上得到更多的帮助，就可以求得 200 的对数。毕竟 200 是 2×10^2 ，在 2 的对数前放上一个 2，得到 2.301 03（若你不确信，用计算器算 200 的对数，证明它是正确的）。

$$3.732\ 39 - 2.301\ 03 = 1.431\ 36$$

1.431 36 的反对数又是什么呢？你的答案约等于 27。

$$5\ 400 \div 200 = 27$$

求出 25 的对数。你的计算器上显示的是 1.397 94 吗？将此值乘以 2 再求反对数。

$$\log^{-1} 2.795\ 88 = 625$$

这里我们将反对数写成对数加指数 -1 的形式，这是表示反对数的一般方式。

在这个例子中，你通过将某个数的对数乘以 2 得到了它的平方。将某个数的对数乘以 3，你就得到此数的立方（这与某数自乘 3 次效果一样。 $A^3 = A \times A \times A$ ）。你可以用对数将某个数任意乘方，只

抱歉，伙伴 ...

科学计算器是解决对数的首选



要简单地将这个数的对数与你想要乘方的数相乘，结果取反对数即可得到你需要的答案。

让我们再举一个对数计算的例子：求出 27 的对数，将你得到的结果除以 3。

$$\log 27 = 1.431\ 363\ 8$$

$$1.431\ 363\ 8 \div 3 = 0.477\ 121\ 3$$

现在求出 0.477 121 3 的反对数。

$$\log^{-1} 0.477\ 121\ 3 = 3.00$$

在刚才的例子中，我们求得了 27 的立方根。一个数的立方根自乘 3 次就能得到这个数本身。在我们的例子中，若你将 3 乘以 3 再乘以 3，就得到 27。

你可以通过将任何数的对数除以 3 而得到它的立方根。将对数除以 2 得到平方根。你可以很容易得到一个数的任何次方根。先将这个数的对数除以想要求的方根的次数，再取计算结果的反对数。若你

想知道一个数的立方根或 4 次方根，对数会是求出答案的最容易的办法。

1) $\log(625)$	=	2.79588
2) $\log(1250)$	=	3.09691
3) $\log(3.1623)$	=	0.50000
4) $\log(2.512 \times 10^6)$	=	6.40002
5) $\log(4.00 \times 10^{-4})$	=	-3.39794
6) $\log(1024)$	=	3.01030
7) $\log(6.25 \times 10^{18})$	=	18.79588
8) $\log(75)$	=	1.87506
9) $\log(6.67 \times 10^{-11})$	=	-10.17587
10) $\log(9.80665)$	=	0.99152

图 6-13 图 6-11 中数据的对数应与你得到的答案近似。计算器可能显示更多或更少的位数，但近似值应该相同。

1) $\text{antilog}(8.38021)$	=	2.40×10^8
2) $\log^{-1}(-1.11351)$	=	7.70×10^{-2}
3) $\log^{-1}(10.95521)$	=	9.020×10^{10}
4) $\text{antilog}(1.78364)$	=	60.763
5) $\text{antilog}(2.92620)$	=	843.723
6) $\log^{-1}(0.08988)$	=	1.23
7) $\log^{-1}(3.214)$	=	1636.82
8) $\text{antilog}(-4.71444)$	=	1.930×10^{-5}
9) $\log^{-1}(2.4864)$	=	306.48
10) $\log^{-1}(1.76043)$	=	57.60

图 6-14 这里是图 6-12 中列出的数据的对数。你的答案应该与之近似。

抱歉，伙伴 ...

科学计算器是解决对数的首选



要简单地将这个数的对数与你想要乘方的数相乘，结果取反对数即可得到你需要的答案。

让我们再举一个对数计算的例子：求出 27 的对数，将你得到的结果除以 3。

$$\log 27 = 1.431\ 363\ 8$$

$$1.431\ 363\ 8 \div 3 = 0.477\ 121\ 3$$

现在求出 0.477 121 3 的反对数。

$$\log^{-1} 0.477\ 121\ 3 = 3.00$$

在刚才的例子中，我们求得了 27 的立方根。一个数的立方根自乘 3 次就能得到这个数本身。在我们的例子中，若你将 3 乘以 3 再乘以 3，就得到 27。

你可以通过将任何数的对数除以 3 而得到它的立方根。将对数除以 2 得到平方根。你可以很容易得到一个数的任何次方根。先将这个数的对数除以想要求的方根的次数，再取计算结果的反对数。若你

想知道一个数的立方根或 4 次方根，对数会是求出答案的最容易的办法。

1) $\log(625)$	=	2.79588
2) $\log(1250)$	=	3.09691
3) $\log(3.1623)$	=	0.50000
4) $\log(2.512 \times 10^6)$	=	6.40002
5) $\log(4.00 \times 10^{-4})$	=	-3.39794
6) $\log(1024)$	=	3.01030
7) $\log(6.25 \times 10^{16})$	=	18.79588
8) $\log(75)$	=	1.87506
9) $\log(6.67 \times 10^{-11})$	=	-10.17587
10) $\log(9.80665)$	=	0.99152

图 6-13 图 6-11 中数据的对数应与你得到的答案近似。计算卷可能显示更多或更少的位数，但近似值应该相同。

1) $\text{antilog}(8.38021)$	=	2.40×10^8
2) $\log^{-1}(-1.11351)$	=	7.70×10^{-2}
3) $\log^{-1}(10.95521)$	=	9.020×10^{10}
4) $\text{antilog}(1.78364)$	=	60.763
5) $\text{antilog}(2.92620)$	=	843.723
6) $\log^{-1}(0.08988)$	=	1.23
7) $\log^{-1}(3.214)$	=	1636.82
8) $\text{antilog}(-4.71444)$	=	1.930×10^{-5}
9) $\log^{-1}(2.4864)$	=	306.48
10) $\log^{-1}(1.76043)$	=	57.60

图 6-14 这里是图 6-12 中列出的数据的对数。你的答案应该与之近似。

五、电脑也能求对数

你 有个人电脑吗？也许你想用它来做电子学计算。电脑能求对数吗？当然可以。你可以用与处理三角函数同样有效的方式来做。你的电脑中也许有一个和科学计算器一样工作的程序。电子表格程序通常会有内置的对数函数。几乎每台个人电脑都能用 BASIC，所以你可以写一段简单的 BASIC 程序去求对数和反对数。

若你的电脑中已有了科学计算器程序，就使用它。查看操作手册中的详细说明。它也许和前面讲过的计算器的使用差不多。求解上一节中的练习题你应该没有什么困难了。

当你学习用电脑解决三角问题时，有一个额外复杂的问题。电脑以弧度度量角。你至少要知道如何将度换成弧度，或是将弧度化成度。

用电脑解决对数问题时，也有个小小的困难。在本章的开头部分，我们描述了常用对数。然而，常用对数不是唯一的一种类型。另一种类型的对数是自然对数，或称纳皮尔对数。电脑使用的是自然对数。

公式 6-4 定义了常用对数。

若 $X=10^Y$ ，则

$$Y=\log X \quad (6-4)$$

自然对数，或称纳皮尔对数，用其他数代替 10。式 6-5 定义了自然对数。我们将自然对数缩写表示为 ln，这有助于将自然对数和常用对数 $\log$ 区分开来。

若 $X=e^Y$ ，则

$$Y=\ln X \quad (6-5)$$

$X=e^Y$ 是一种特殊的函数，称为指数函数。这种特殊的函数出现在许多计算中，包括在一些电子学应用中。e 的值不是一个精确的数值。它是一个循环小数。若你在计算器或电脑中输入 e 的 1 次方，

就可以得到一个近似值。

$$e^1=2.718\,281\,828 \quad (6-6)$$

这个数是“1828”循环的，无论多少位都一直这样重复下去。

那么我们怎样才能用电脑求出常用对数而不是自然对数呢？幸运的是，有一个简单的解决方法。你所要做的只是将某数的自然对数除以 10 的自然对数。这就将自然对数转化为常用对数了。

$$\log X = \frac{\ln X}{\ln 10} \quad (6-7)$$

我们可以通过找到 10 的自然对数来化简这个等式。然后将结果被 1 除求得倒数。

/.....A/.....B/.....C/.....D/.....E/.....F						
1 Value	@LOG(A2)	@LN(A2)	C2/@LN(10)	10^(B2)	@EXP(C2)	
2	2	0.301029	0.693147	0.301029995	2	2
3						
4						

图 6-15 此图给出了一张简单的电子表格的部分单元格。你可以在电子表格中用等式计算对数和反对数。

$$\log X = \frac{\ln X}{\ln 10} = \frac{\ln X}{2.302\,585\,1}$$

$$\log X=0.434\,294\,5\ln X \quad (6-8)$$

有些电子表格程序包含了对数函数。另一些则只有自然对数函数。图 6-15 给出一张电子表格的部分单元格。第一行的标号定义了第二行的函数。在单元格 A2 中输入任何一个值。若你的电子表格程序有对数函数，单元格 B2 计算对数。单元格 C2 求自然对数，D2 将所得结果除以 10 的自然对数。

为求某个数的反对数，你必须用这个数作为 10 的乘方的次数，并求出来。绝大多数电子表格用 ^ (插入记号) 求某数的几次方。在大多数电脑键盘上用移位键配合使用。单元格 E2 计算单元格 B2 中数值的反对数。你可以用同一个电子表格通过将输入 B2 单元格的数代替 A2 单元格来求出反对数 (先将此行中的单元格复制到另一行，这样你就不会丢失 B2 单元格中的等式了)。单元格 F2 计算单元格 C2 中数值的指数函数。指数函数是自然函数的反函数。

你可以运用指数函数求得一个常用对数的反对数。首先你必须将常用对数转化为自然对数。你能

猜出怎么做吗？是的，只要将常用对数除以 e 的常用对数就可以了。

$$\ln X = \frac{\log X}{\log e} = \frac{\log X}{\log 2.718\ 281\ 828} \quad (6-9)$$

$$\ln X = \frac{\log X}{0.434\ 294\ 5} = 2.302\ 585\ 1 \log X$$

(6-10)

在你的电子表格中，用图 6-15 中所示的例子设计些等式。记住，你已经知道了 $\log X$ 的值。你不需要使用 @LOG 函数。启用另一个单元格存放值，这个值的反对数是你要求的。然后用单元格 F2 中给出的指数函数计算反对数。

你也可以用 BASIC 语言去计算对数。某些 BASIC 版本包含常用对数函数。大多数 BASIC 版本只有自然对数。BASIC 允许你用 ^ (插入记号) 算一个数的乘方。用下面的命令求反对数：

PRINT 10^X

这里 X 是对数值，你想求其反对数。

对电子表格使用的方法也同样适用于 BASIC 程序。图 6-16 列出一段简单的 BASIC 程序去求常用对数。若你在程序中遇到任何困难，BASIC 程序手册会给你指导。你可以对此段程序进行改进。这里的程序仅是为确保在不做任何修改的情况下，能在大多数 BASIC 版本下运行。

图 6-17 列出求反对数的一段 BASIC 程序。BASIC 用 ^ (插入记号) 表示你想要对某数乘方。若我们取乘方 10，就求出了通常写成幂的数的反对数。

用一种（或多种）方法求出本节图 6-15 和图 6-16 所列的数的对数和反对数。你的答案应与这里列出的一致。

如果你试图解决那些问题，你会发现某些对数问题包括将数写成科学记数法。电子表格和 BASIC 用大写字母 E 表示 10 的乘方。你应当把 2.512×10^6 输成 2.512E+6。10 的负指数次幂，要在指数前添负号。把 6.67×10^{-11} 输成 6.67E-11。

```
10 REM COMMON LOG PROGRAM
20 PRINT "ENTER A POSITIVE NUMBER, OR 0 TO END:";
30 INPUT N
40 IF N = 0 THEN GOTO 100
50 A = LOG(N)
60 B = LOG(10)
70 L = A / B
80 PRINT "THE COMMON LOG OF "; N; " IS "; L
90 GOTO 20
100 END
```

图 6-16 这段 BASIC 程序可在大多数 BASIC 版本上运行。它通过将计算机的自然对数值化为常用对数值来求常用对数。



图 6-17 这段程序通过将数取 10 的乘方来求反对数。你也可以通过将常用对数值转变为自然对数值和运用指数函数来求反对数。你可以用程序中 150 语句代替 50 语句去计算反对数。

```
10 REM ANTILOG PROGRAM
20 PRINT "ENTER A VALUE TO FIND AN ANTILOG, OR 0 TO END:";
30 INPUT N
40 IF N = 0 THEN GOTO 80
50 A = 10^(N)
60 PRINT "THE COMMON ANTILOG OF "; N; " IS "; A
70 GOTO 20
80 END

100 REM ROUTINE TO FIND ANTILOG USING EXPONENTIAL FUNCTION
150 A = EXP(2.3025851 * N)
```

第二单元

你的第一个任务是

研究电路中稳定不变的信号的作用

这一单元你将学习:

- 关于电压——使电流在电路中移动的原因
- 关于电流——电路中电流大小的度量
- 电场和磁场的比较以及观察电场的作用力
- 通过使用导体、绝缘体或者电阻器构成的电路我们可以很容易地控制电路中的电流
- 基本的电路有串联和并联两种
- 怎样使用电学中的一个重要原理——欧姆定律计算电路状况
- 关于另外两个电学中的重要定律——基尔霍夫定律
- 电能是什么
- 怎样计算功率——使用能量的快慢
- 如何使用分贝比较电路中放大率

直流电学初步知识

你已经了解了电学，而且掌握了计算电路时所需要的重要的数学技巧。

大多数电路都是用某些特定的方法来处理信号。所谓信号，也许简单得就像闭合开关时产生的一个电子脉冲，然而大多数的信号都比较复杂。无线电接收机从天线接收信号，然后把这些信号转换成声音；电视机接收信号，把信号转换成屏幕上的图像。无线电和电视信号不断地改变。在转换成声音或图像时，无线电接收机或电视接收机会使信号发生很大变化，在这样的电路中有很多电子零件。当你查看收音机的内部结构时，你也许会认为你不可能明白这样的电路是如何工作的。

在整个电路中，每一部分都有特殊的工作，当这些信号通过时，每一部分都按一定的方式运转。我们通过研究每一部分的工作来分析电路，然后研究信号经过时产生的效果。通过这样的方法，我们甚至可以了解更为复杂的电路。

我们不从研究电路是如何影响改变信号来开始电学的学习，仅仅着眼于信号正在做什么会比较困难。我们将从着手于一个稳定不变的信号开始学习，这样我们可以集中精力去学习基本原理而不是去留意信号正在做什么。

你的首要任务是研究电路中稳定不变的信号的作用，这样的信号让我们更多地了解电路是如何工作的。一旦你熟悉了怎样通过稳定不变的信号来分析电路，你就会比较容易理解变化信号的作用。

对于一个不变的信号，电流的流动方向是唯一的。只向一个方向流动的电流叫做直流信号，流动方向不断改变的电流叫做交流信号。我们通常用缩写 DC 和 AC 来表示直流电和交流电这两种电流。有时候一个直流信号的大小改变，但仍然是向一个方向流动，在这个单元中，我们统一把它看成不变的直流信号。

电压 电流 电场 流动 电路 分贝 规则

补步的直流电知识

■ 电流

直流

DC

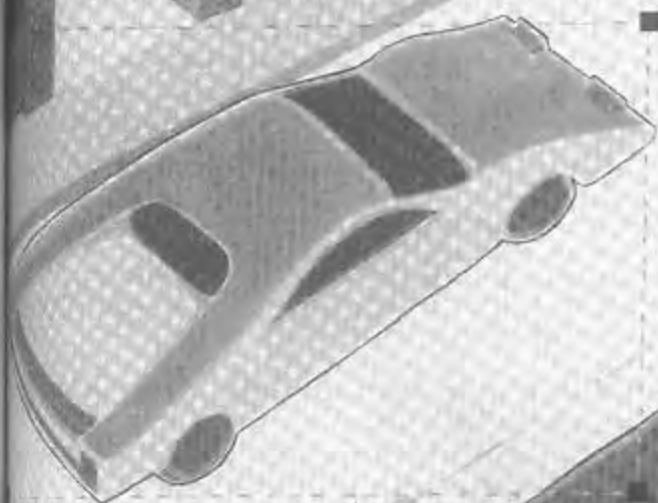
交流

AC

帮助

拉里电
力供应

ONE WAY



第8章

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，或者电脑开始工作。电源提供了动力或压力推动电流经过电路。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表示。我们常把安培简写成 **amp**，或者简写成 **A**。流过电路中电流的大小称为电流强度。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 的电压，20A 的电流推动电路工作。一个 60W 的灯泡需要 120V、0.5A 的电流来工作。便携式收音机也许需要配用 9V 的晶体管电池来，只需要很小的电流来工作。

电流强度也常用毫安？什么是毫安呢？请记住，我们在电学中应用的单位也是公制。所以“毫”是公制中的千分之一，或者 10^{-3} 。毫安就是千分之一安培。有的电路中的电流可能只有几毫安。你必须熟悉所有公制的前缀，它们出现在各种电学测量中。表 8-1 所列是我们在电学测量中常用的一些公制前缀。

图 8-1 是一个简单电路的电路图。电路图使用特殊的符号来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。你是否还记得电源有两个极？电流是按什么路径流出电池？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

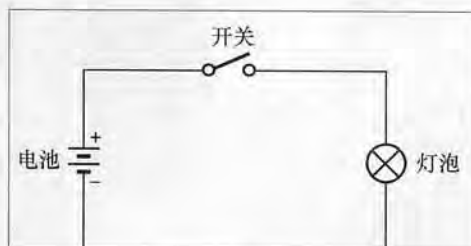


图 8-1 这张图是一个简单电路的电路图，它表示的是手电筒的电路。我们在图中标出了每个符号，帮助你识别电路的每个部分。

表 8-1

电子电路中通用的公制前缀

前缀	缩写	值
千兆	G	10^9
百万	M	10^6
千	k	10^3
十	da	10^1
一		10^0
十分之一	d	10^{-1}
百分之一	c	10^{-2}
千分之一	m	10^{-3}
百万分之一	μ	10^{-6}
兆分之一	p	10^{-12}

的答案却有两个。

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，所以他描述电流从电源的正极流出，经过电路，返回电源的负极。图 8-2 显示电流从电源的正极流出，流经电路，回到电源的负极，电气工程师把这称为惯称电流。现代电学中的很多计算沿用这个约定，或者说电气工程师中间的协定。他们说电流从电源正极流出，从负极流入。

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的这个重要的角色——电子）。今天我们知道电子从负极流出，流过电路回到电池。图 8-3 显示的是电子流过我们电路的方向。

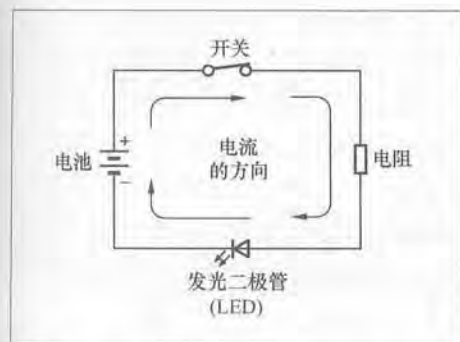


图 8-2 这是一张附加了惯称电流方向的电路图。惯称电流的方向是从电源的正极流出，流经电路，然后回到电源的负极。

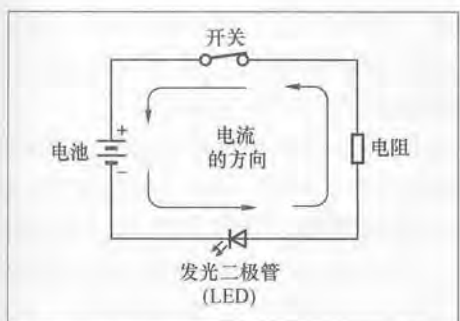


图 8-3 这张电路图是图 6-2 电路中电子流动的方向。

难道我们不能忽略老的惯称电流吗？噢，我们通常是可行的。但是你必须知道惯称电流，因为电气工程师仍然沿用这个约定进行计算。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办法。很多电路符号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 8-4 显示的是电路图中二极管的符号。惯称电流按照箭头的方向流过二极管。



图 8-4 这是二极管在电路图中的符号，箭头是电流流经二极管的方向。

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。在无线电爱好者常用的参考书《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。但不是所有的出版物都是如此。在为研究电学学习其他书籍时，你一定要先弄明白在涉及电流时书中使用的是惯称电流还是电子流动的方向。

第9章

电和磁

磁

我们通常认为电学是现代发展中的科学。其实早在18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（这种石头我们今天称为琥珀）。电这个词来源于这个石头的希腊名称。

直到1733年，有人认识到有两种电荷，或两种力的存在。查尔斯·杜菲发现带了电荷的一片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。

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种物质中。事实上，它们是构成所有物质的基本粒子。

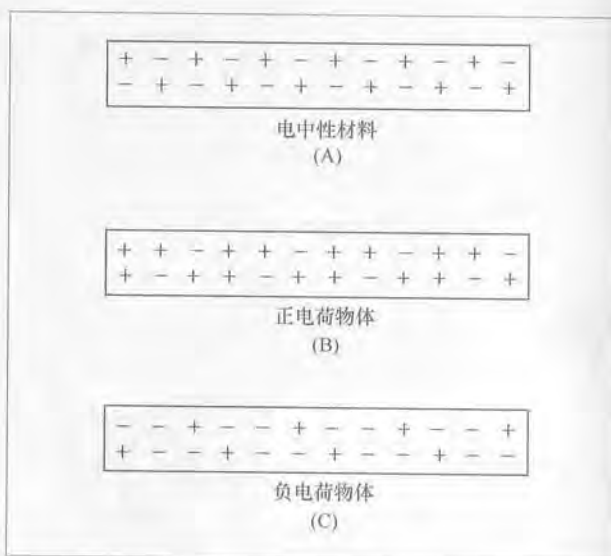


图9-1 一个物体在通常情况下，例如展示的金属棒，拥有相同数量的正电荷和负电荷。A中所显示的金属棒呈电中性。如果一个物体带有正电荷粒子比负电荷粒子多，这个物体就带正电荷，例图中B部分。如果一个物体带有负电荷粒子比正电荷粒子多，这个物体就带负电荷，如图中C部分。

电子所带的负电荷的数量和质子所带的正电荷数量相同，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9-1，一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自由的电子）。

你也许很熟悉当你拖着脚走过地毯，然后你碰到某些金属，比如门把手，会发生什么现象！根据这个原理你也可以做这样的简单实验，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

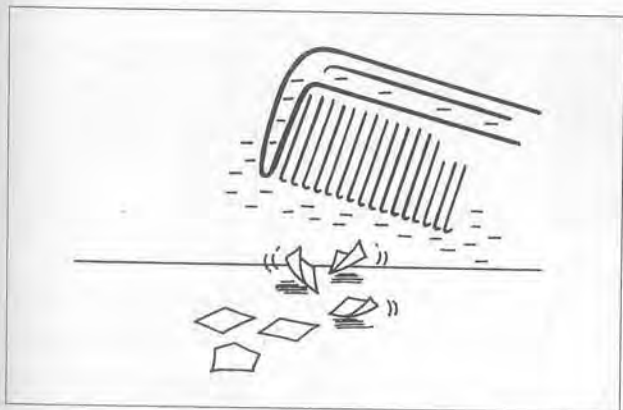


图 9-2 带负电荷的物体会吸引小纸屑或其他轻小的物体。

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 6.24×10^{18} （也就是 6 240 000 000 000 000 000）个电子所带的电量。当然，数出每个带电体所带额外电子的数量是不可能的。不是怎样测出一个库仑，取而代之的是测量电荷的作用效果。作用效果大的物体所带电量就多。

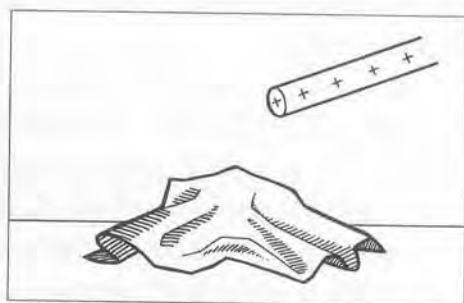


图 9-3 你可以用丝绸反复摩擦玻璃棒得到正电荷。



一、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 9-4 所示的是验电器，这是一个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 9-5A 所示。

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 9-5B 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 9-6 所示。

这些例子说明电荷间相互作用的一个重要规则：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，它们之间的作用力也较大的斥力。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

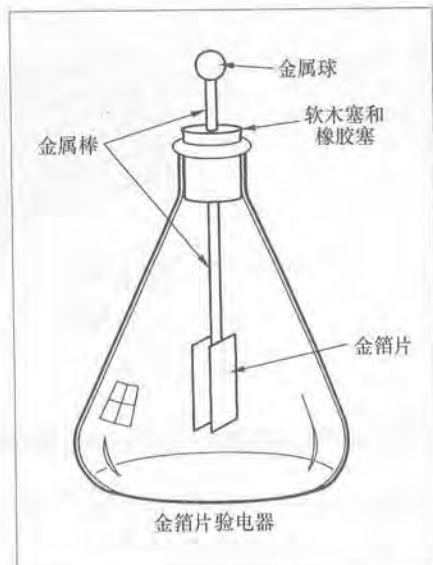


图 9-4 验电器展示带电体间的作用产生的效果。玻璃罐的目的是为了保护脆弱的金箔片。

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 9-6 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 9-7 所示。

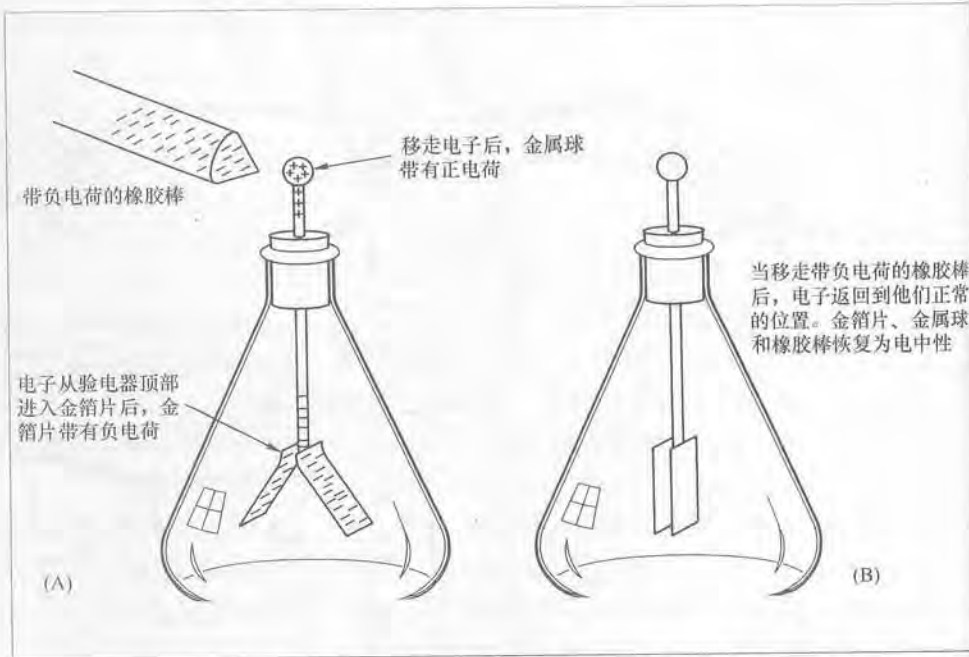


图 9-5 当你把带负电荷的物体靠近验电器的顶部，电子从金属球流向金箔片，当金箔片带了多余的电子，它们相互排斥而张开，如图中 A 所示。当我们把带负电荷的物体离开验电器的顶部，电子流回验电器的顶部，这时金箔片再次呈电中性，金箔片竖直下垂，如图中 B 所示。

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 9-8 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，而金箔片却带上了正电荷，因为有一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。

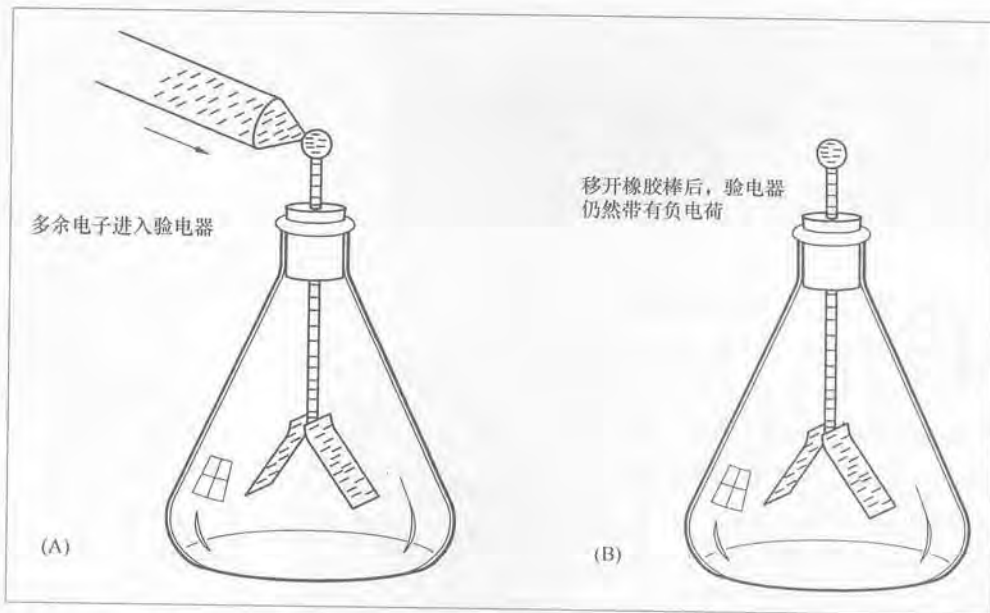


图 9-6 将带负电荷的物体接触验电器顶部的金属球，一些多余的电子将流向金箔片，如图中 A 所示。而当我们把带电体移开，电荷仍然留在验电器内，金箔片将一直张开，如图中 B 所示。



图 9-7 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 9-8 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。

二、物质的结构

我们已经学习了电荷和带电极，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 9-9 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，但我们可以把水分子分开，最后得到一个氧原子和两个氢原子。图 9-10 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、氮、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。

正如你的想象，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

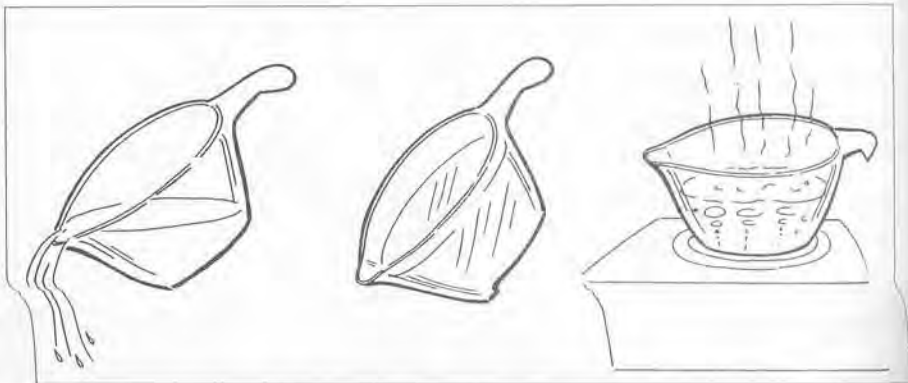


图 9-9 图中是水的三种状态。室温下，水是液态，如果温度足够低，水将变成固态——冰，如果把水放在炉子上加热，水将变成气态——水蒸气。

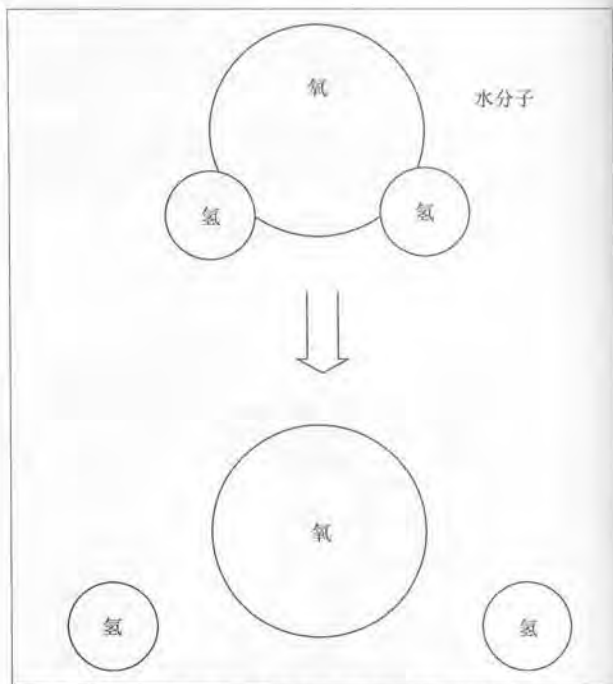


图 9-10 每个水分子由 1 个氧原子和 2 个氢原子组成，我们可以把水分子分割成这些单独的原子，但分割后得到的是氧和氢，而不再是水。

空间，几乎是空的，里面有负电荷，如图 9-11 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。科学家们在原子核中有两种粒子，核中

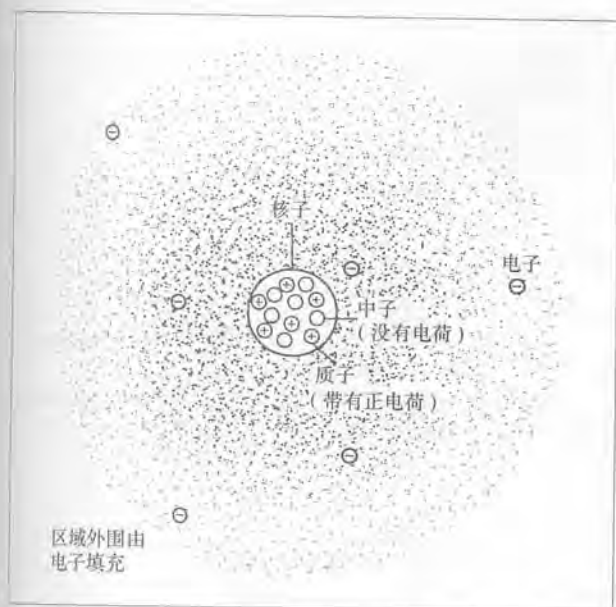


图9-11 这张图展示了原子的简单结构。中间有个核，称为原子核。原子核内有带正电荷的质子和不带电的中子。原子核周围是个很大的几乎是空的空间，带负电荷的电子在这个空间内。原子核周围的电子数和核内的质子数相同，所以原子呈电中性。

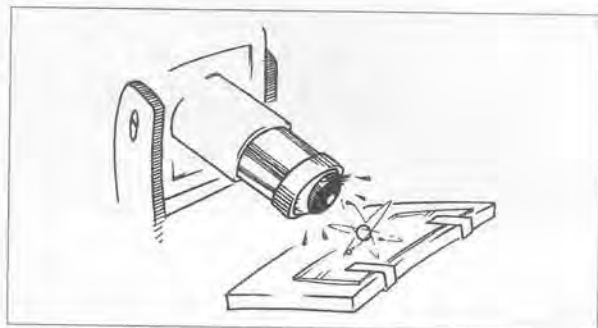
带正电荷的粒子叫做质子，另一种不带电的粒子叫中子。质子和中子的质量几乎是电子的1840倍，这也有助于解释为什么电子比质子和中子更容易移动。

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个电子和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9-12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他原子上，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。

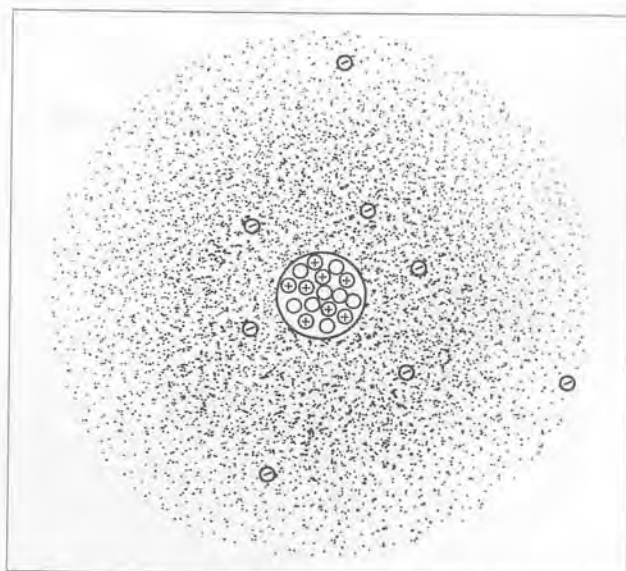


图9-12 这是1个氧原子的简单结构图。原子核内有8个质子，核外有8个电子以电子云形式包围着。在这张图中氧原子核内还有8个中子。在其他的氧原子中也许有5到12个中子！

三、磁体和磁场

大多数读者都熟悉磁体的一些基本特性。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和南极（如果让磁体能够自由移动，那么磁体的北极静止时将指向地球的北极，这就是为什么我们把那个极叫做磁体的北极）。

我们知道同名磁极相互排斥，异名磁极相互吸引。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（镍和钴能略带磁性，铝和

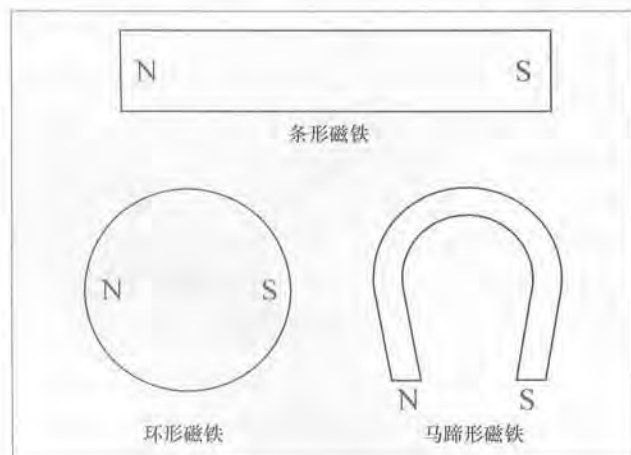


图 9-13 每个磁体都有两个极，这两个极代表相反的两种磁性。

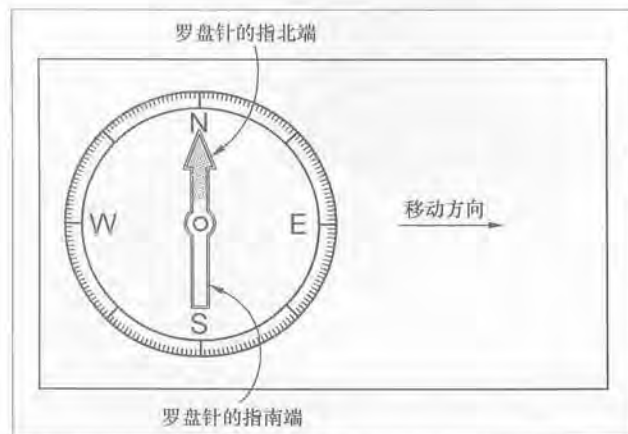


图 9-14 磁体的南极和北极取决于它们所指向的地球的磁极。

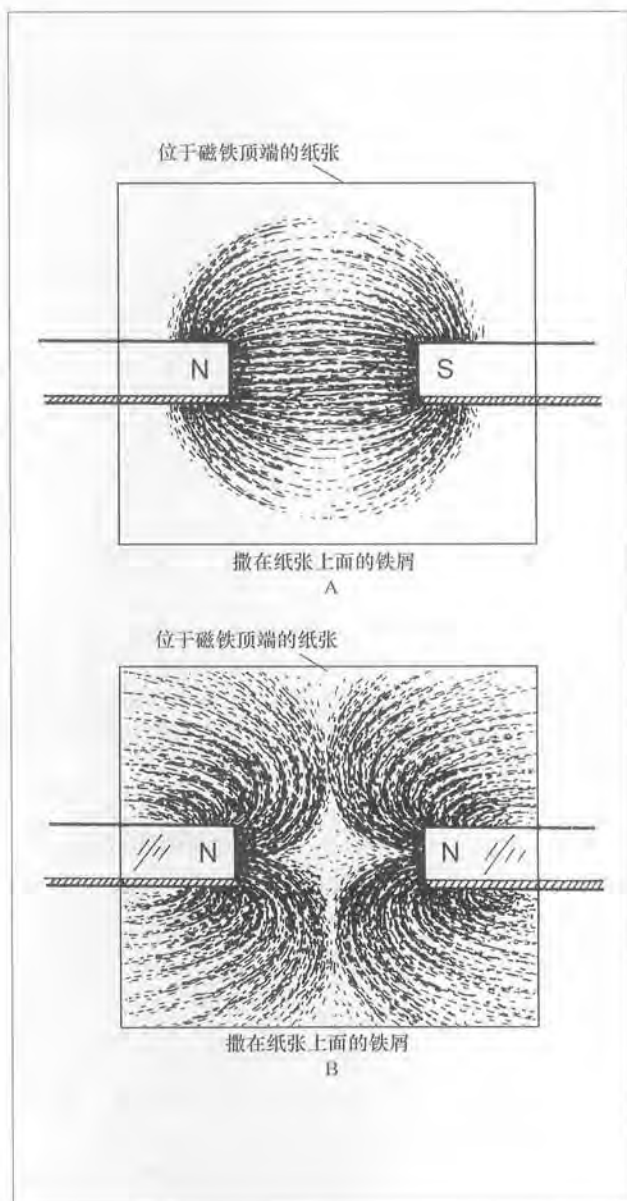


图 9-15 为了说明磁场中的磁力线，我们在两个磁体上放一张纸，然后把铁屑撒在上面，铁屑将排列成磁力线。如果两个磁体间的磁力线较多，说明磁场较强，如果只有很少的磁力线，说明磁场较弱。磁力线的数量多少代表引力或斥力的强弱。如果磁力线从一个磁体延伸到另一个磁体，如图中 A，说明这两个磁体相互吸引，如果磁力线从一端出发而返回到同一个磁体，如图中 B，这两个磁体相互排斥。

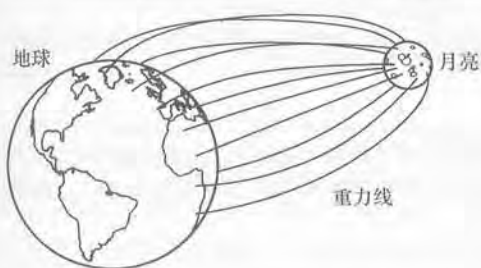
铜则是不能被磁化的金属的代表）。

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，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，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

图 9-16 有很多力的例子，它们需要通过相互接触而产生。



图 9-17 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。

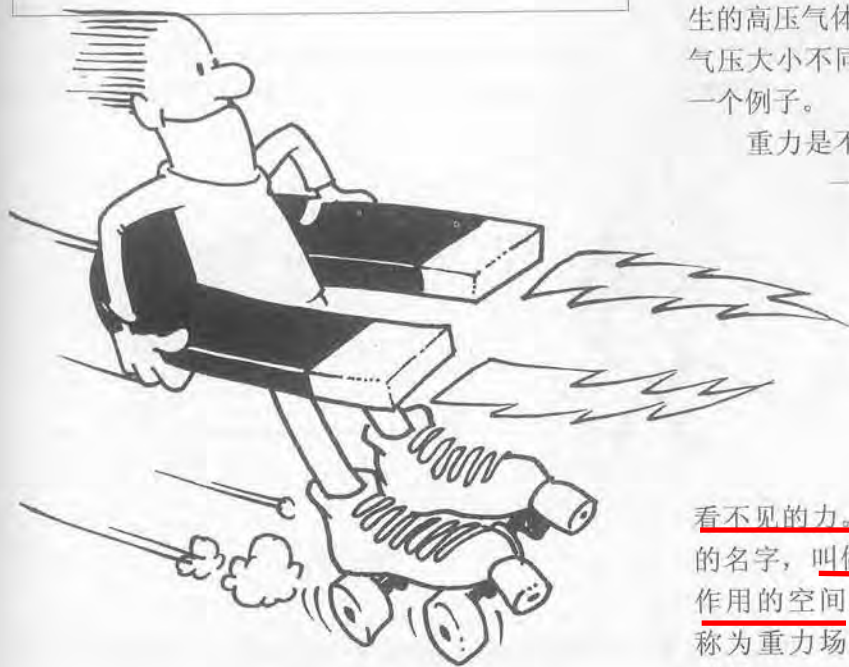


摩擦力试图阻止椅子的移动，这个力是因为椅子的腿和地板接触而产生。

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作用。地球和太阳之间的重力使地球绕太阳沿轨道运动。

你可以把通过空间作用的力称为看不见的力。科学家给这些看不见的力一个特别的名字，叫做“场”。“场”也指通过它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，在描述磁力时也把它称为磁场。



四、电场与磁场相似

任 何一个磁体的两端代表两个相反的磁性，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法非常一致，同种电荷相互排斥也与同名磁极相斥方法一致，见图 9-18。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 4 到 5 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 9-19。

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电体。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 9-20 展示的是一

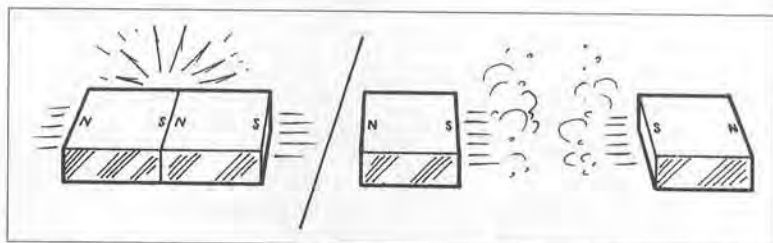


图 9-18 磁场描述的是两个磁体间看不见的力。当两个磁性相反的磁极相互作用时，磁体间相互吸引，而两个相同的磁性磁极则相互排斥，或称为相斥。

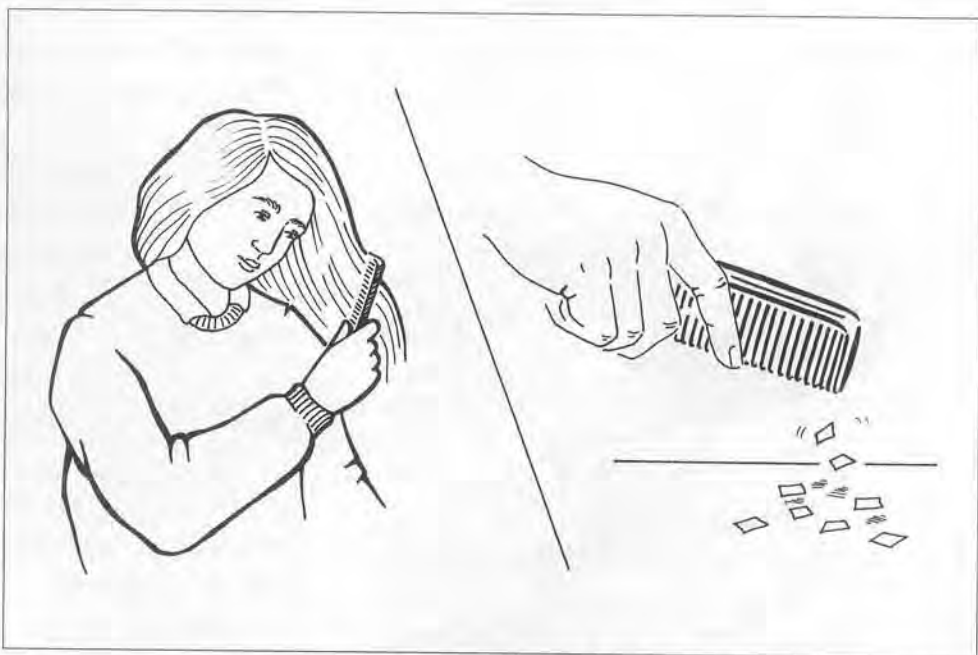
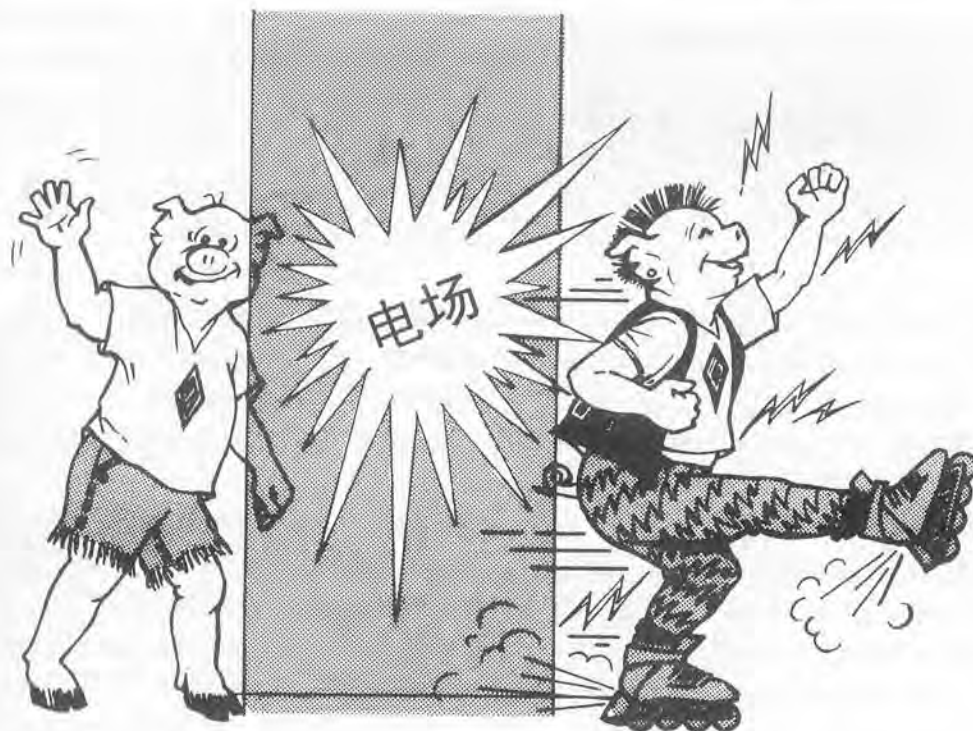


图 9-19 做这个简单的实验。撕一些纸屑放在桌上，然后把梳子在上梳理几下，慢慢地把梳子靠近纸屑，观察发生的现象。



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 9-21 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。

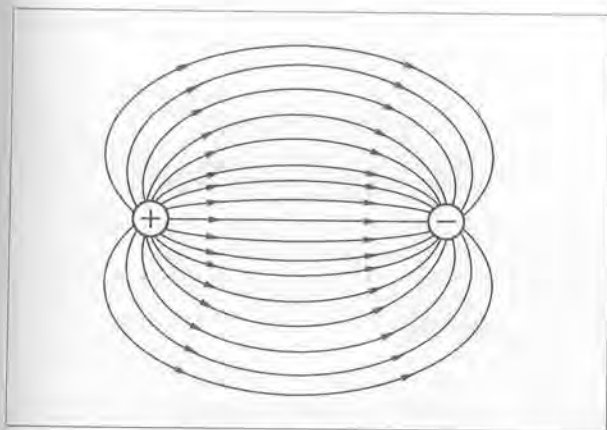


图 9-20 电场描述两个带电体之间看不见的力。这张图说明的一个正电荷球和负电荷球之间的电场。注意电力线方向从正电荷指向负电荷。

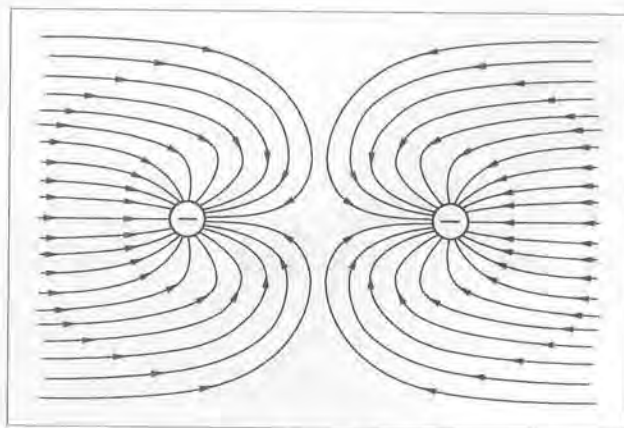


图 9-21 这张图说明的是两个负电荷球之间的电场，注意电力线的方向指向负电荷。两个正电荷球之间的电场和它相似，只是电力线的方向是离开带电体。

五、动手实验看电场

在本章的前面章节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是比较困难的，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 5 分钟，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，实验结果是令人神往的！

首先找一个宽约 2.5cm 到 3.8cm 的铝箔条。一

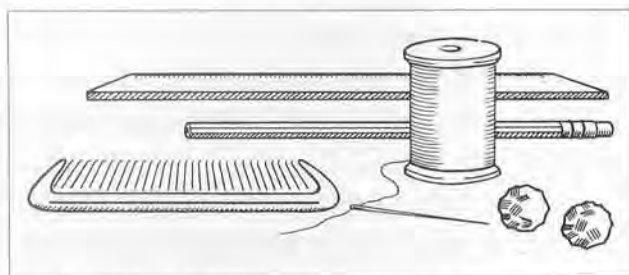


图 9-22 这些是你做简单电场实验要准备的器材。用两条 2.5 ~ 3.8cm 宽、15.24cm 长的铝箔绕成两个小球，线的长度不需要太精确，2 根 25.4 ~ 50.8cm 的缝衣线即可。用线把小球扎上，然后用线悬挂在铅笔下，铅笔或小木头都可以。

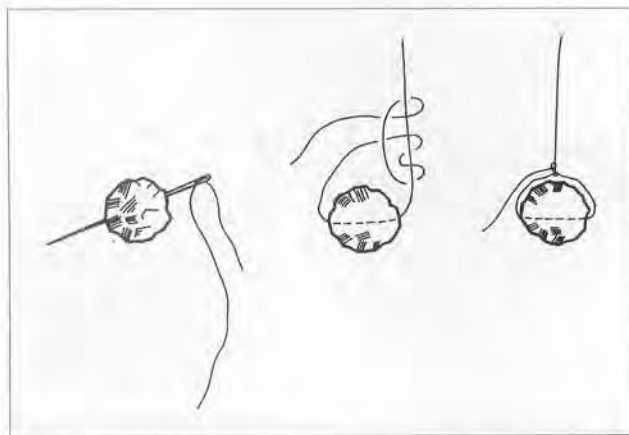


图 9-23 用线将两个小铝箔球扎起。用缝衣针将线穿过小球，然后将线绕过小球打上结。

个标准的铝箔宽 30.48cm，把铝箔撕成两个 15.24cm 长，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 25.4cm 到 50.8cm 就足够了。你还需要准备一根缝衣针、一支铅笔和一把尼龙或硬橡胶的梳子。图 9-22 显示的是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，然后把线绑在铅笔或者小木条上。图 9-23 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 9-24 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。

现在你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，这是因为梳子附近电场作用的效果。图 9-25 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

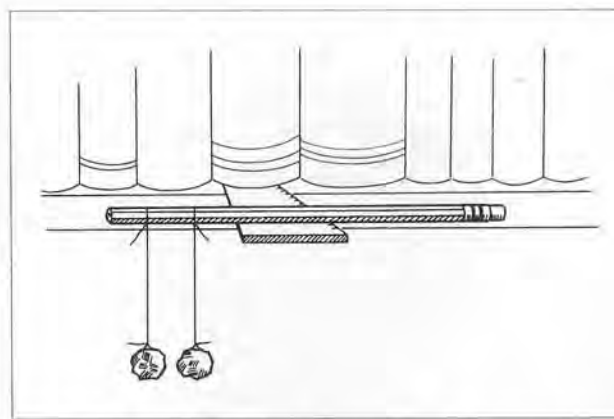


图 9-24 用线把两个小铝箔球悬挂在铅笔上并保持高度相同。把铅笔挂起，这样小铝箔球离开其他可能妨碍它们运动的物体。这里用一些书压住刻度尺，铅笔就平衡在尺上。保持悬挂线的尾部在同一段，这样可以使线在尺的同一边。两小铝箔球相隔大约 3.8cm。

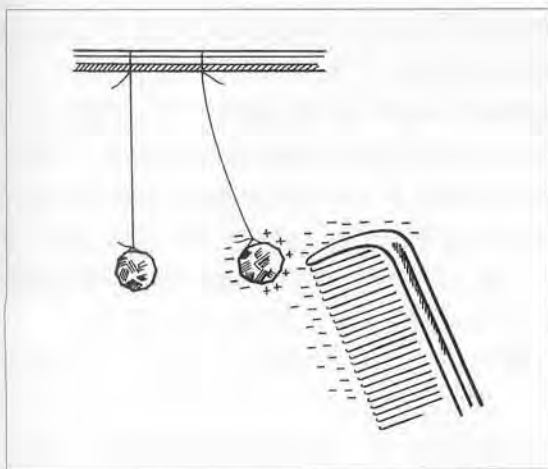


图 9-25 把梳子快速梳过你的头发，使它带上负电荷。现在把梳子靠近小铝箔球，观察梳子是如何吸引小铝箔球的？如果在梳子梳过头发时更快，时间更长又会发生什么现象呢？尝试用梳子梳过其他家庭成员的头发，你也可以用家里的狗或猫的皮毛来做实验。

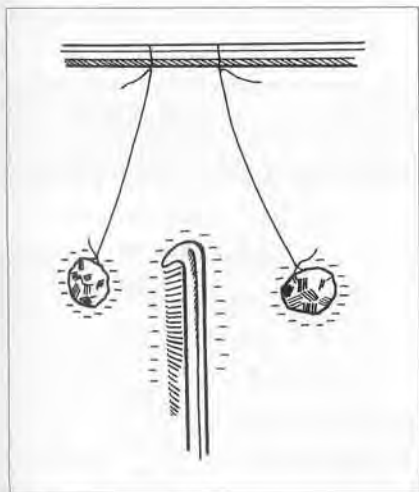


图 9-26 在用梳子吸引小铝箔球实验后，让梳子接触小铝箔球，注意它们在接触后是如何立即分开的？实验中梳子把小球推来推去。把两球摆动到两边，让它们再次接触梳子，两个球得到更多的负电荷了吗？你怎么去辨别呢？重复几次这样的过程观察在小铝箔球和梳子之间可以产生多大的力。

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，现在小球和梳子相互排斥，因为它们带上同种电荷，如图 9-26 所示。

再让梳子梳梳头发使它再次带上电荷。因为电场，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，在使用玻璃棒时一定要注意安全。



第 10 章

导体、绝缘体和电阻

一、有的物体比其他物体更容易让电子流过——导体

有的物质非常容易失去电子，而有的物质束缚电子的能力特别强，很难失去电子。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为了提供电流移动的道路。

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。金虽然也是一种很好的导体，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，虽然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铜导线，但在铁导线中通过同样的电流需要较大的电压）。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，水银有一些有趣的用途。

物体的导电率告诉我们物体的导电性能。这里我们不去仔细研究如何测量物体的导电率，只要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，习惯上常使用物体的导电率与铜的导电率的比值，即相对导电率。如果相对导电率大于 1，说明这个物体的导电能力比铜强；如果小于 1，则导电能力不如铜。

表 10-1 中列出一些常用的金属导体。表中也列出了它们的相对导电率。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 10-1 展示的铜导线的一个截面，帮助你更好地理解电子是如何在导体中移动的，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

表 10-1
一些普通的电导体

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

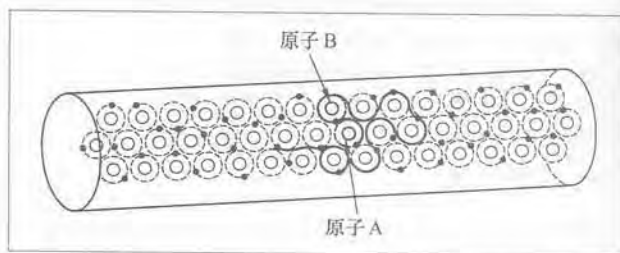


图 10-1 这张图描述的是铜导线中铜原子的简化模型。图中显示的是在原子核外电子云中的一个电子，这个电子可以轻易地在原子之间转移。图中的那根虚线代表其中一个电子运动的轨迹。

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 10-2 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。如果你能看见一个电子在导线中运动，你会发现它每秒钟只运动几厘米。

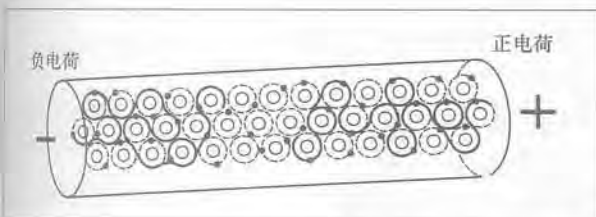


图 10-2 如果我们把一段铜导线接到电源两端（比如电池），电子向正极方向移动。每个电子每秒钟也许只能移动几厘米。电子不断从电源的负极流入导线，另外一些电子不断从导线流入电源的正极。

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 10-3 是从正在导电的铜导线中截取的一个薄片截面。通过计算出每秒钟内有多少个电子流过这个截面，我们测量出电流的大小。如果每秒钟有 6.24×10^{18} 个电子通过这个截面，那么电流的大小就是 1A！（是的，那一定是很多电子！虽然原子很小，即使很细的导线，截面中也有无数的电子），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

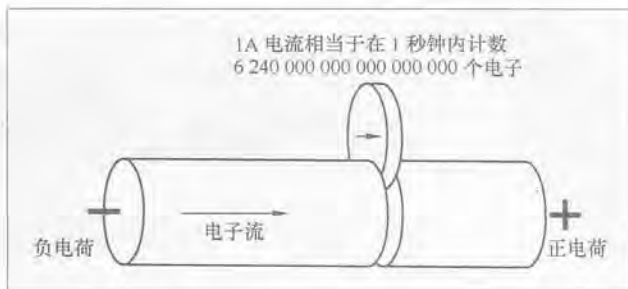


图 10-3 为了更容易观察电子，我们从铜导线中截取一个薄片截面。假设我们可以数出电子流过切片的数量。如果能做到这样，可以给我们一个导线中电流大小的测量方法。即每秒钟有 6.24×10^{18} 个电子通过这个截面，那么电流的大小就是 1A。

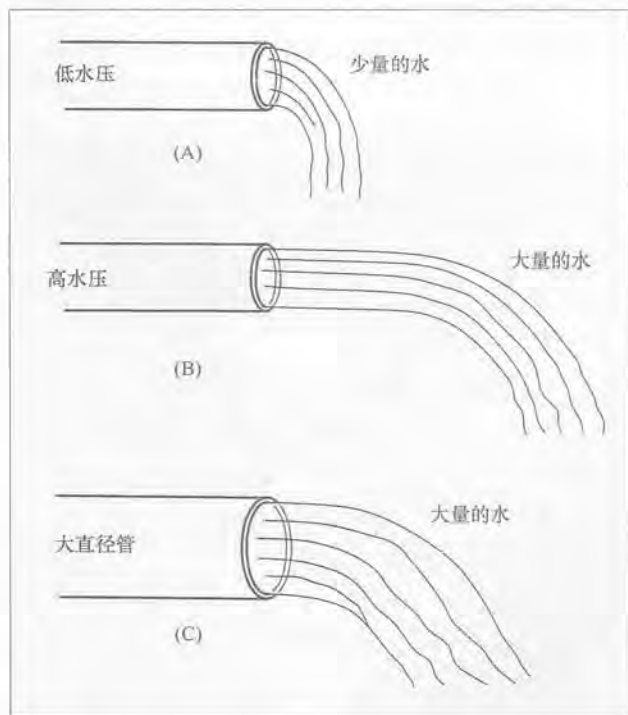


图 10-4 我们可以把导线中电流的运动和水管中水的流动类比。水压越大，水流越大，或用直径较大的水管可得到较大的水流。

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。与此相似，较粗的导线可以通过更大电流。

二、有的物体中，电子需要较大的力才能流过——绝缘体

有的物体中的原子对它们的电子束缚的能力很强。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。但是，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，因为它们可以帮助我们电路中到我们想要的电压和电流。在一些电路中，绝缘体还帮助我们防止触电。

图 10-5 显示的是通过一个电火花穿过的绝缘体。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，使绝缘体击穿。

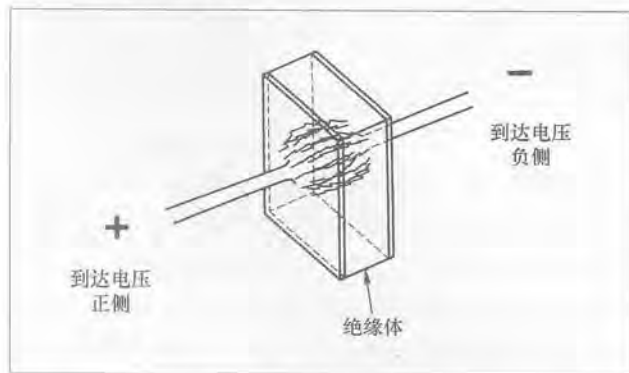


图 10-5 通过施加足够大的电压，你都可以对任何绝缘体产生电火花。这样的电火花会在物体上击穿出小孔，通常会毁坏绝缘体。

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。

让我们来讨论两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



图 10-6

是发生在即将接触门把手时。在这个例子中，在你走过地毯时，你的身体带上电荷。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，把手指指向你靠近的金属，逐渐靠近直到手指和金属之间放电，你的手指产生轻微疼痛。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，对于金属门把手和你身体之间的电压你知道什么？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。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！

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 10-2 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，任何一种材料都有安全使用的击穿电

压极限。表 10-3 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一条通道。见图

10-8，一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。

表 10-2 普通的绝缘体

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

表 10-3

绝缘体	击穿 1cm 厚度的绝缘体所需要的电压 (V)
云母	500 000
油纸	400 000
石蜡	350 000
玻璃	250 000
空气	30 000



图 10-7 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，放电击穿空气。



图 10-8 有时绝缘体周围的污垢和潮湿会使绝缘体导线形成电火花。

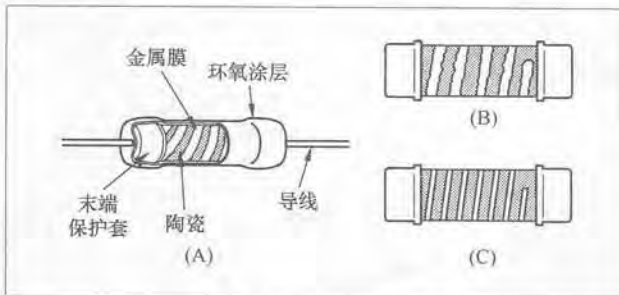
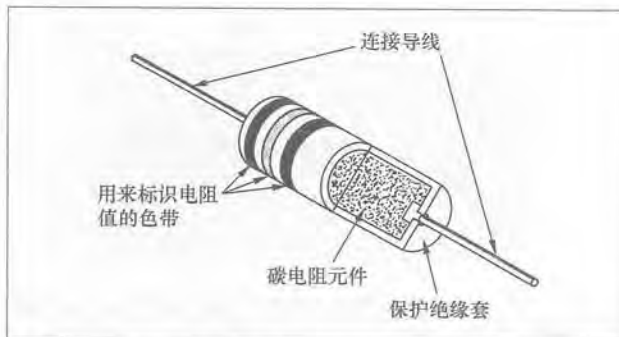


损害电阻本身或周围的任何物体非常重要。

金属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 10-13 展示的是一些商业制造的绕线电阻。

碳，黑色、粉状的物质，它的电阻比铜的电阻大得多。制造商把碳和粘土混合，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。粘土的作用是将碳粉粘合在一起。通过改变混合物中粘土的数量，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。图 10-14 是一个碳电阻剖面图。

一种用得越来越多的制造电阻的方法是用一个圆筒状的绝缘陶瓷，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 10-15 是薄膜电阻的结构剖面图。



第 11 章

电路

一、串联电路

上一章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运动的路径。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 11-1 为手电筒图，是一种简单的电路。

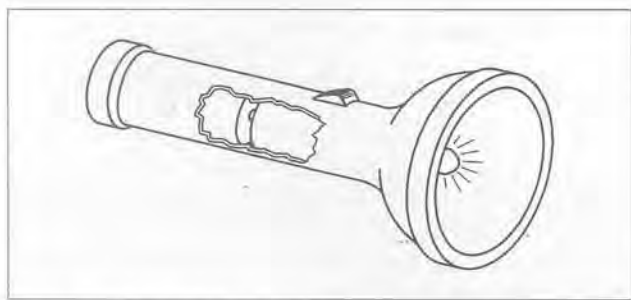


图 11-1 手电筒是最简单电路的一个例子。

图 11-2 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 11-2 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 11-2 中开关是打开的，灯泡不发光。开关在这种状态时，我们把此时得到电路叫开路，电路

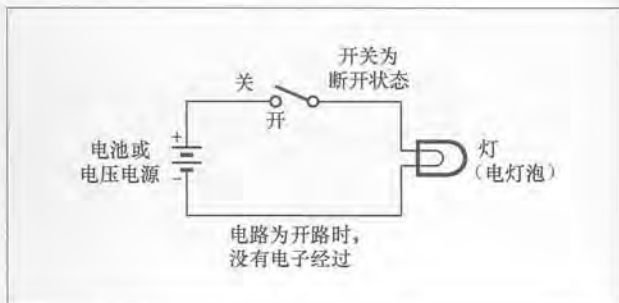


图 11-2 这是图 11-1 中手电筒的电路图。电路中的标注说明的是每个特殊符号代表的意义。这些符号代表电路中各个部分。在这个电路中，开关是断开的，所以我们叫它为开路，此时灯泡不发光。

中没有电流流动。让我们合上开关，如图 11-3 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 11-2 和图 11-3 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要有这 3 部分。

我们通常在电路中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 11-4 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的特征。任何电子从电池的负极流出，必须流经电路中

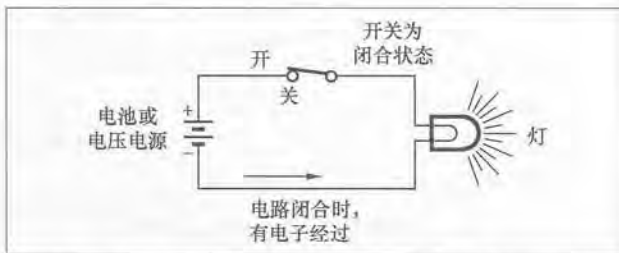


图 11-3 电路图中开关处于闭合状态。这时我们得到闭合电路或叫通路，此时灯泡发光。

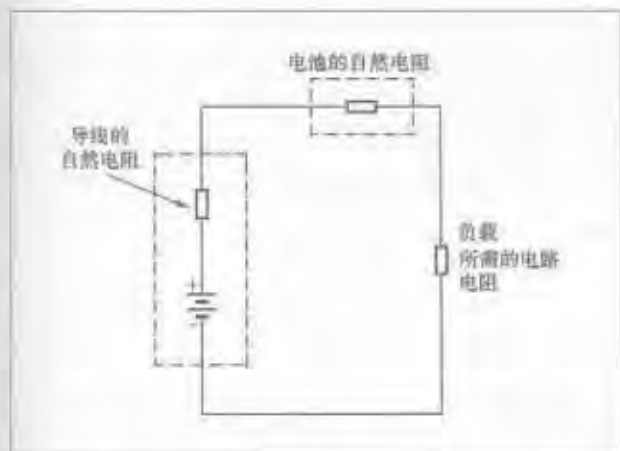


图 11-4 电流流过时，电路中各个部分都会有些电阻，这包括电池、导线和其他部分以及电阻。在这个电路图中，包括了电路中的自然电阻以及电路中的负载电阻。

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，所有的电流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相等。如果你在串联电路中测量了任意一点的电流，你将知道电路中任何部分的电流。

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。如果你对些灯比较熟悉，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小问题。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。

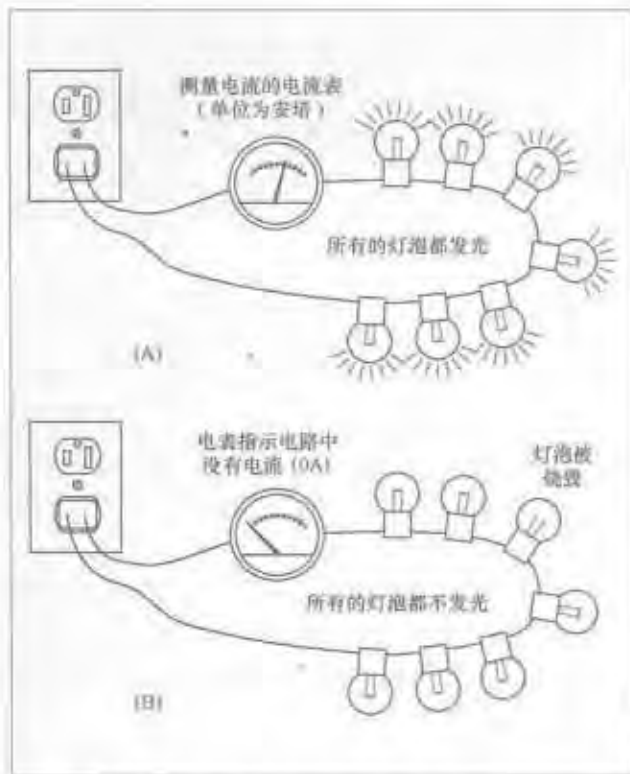


图 11-5 很多圣诞树上的灯泡都是串联方式连接的，一旦一个灯泡烧毁，整个电路中没有灯泡再会发光。



二、并联电路

许多电路包含了并联的通道让电流流过。图 11-6 就是这种电路的一个例子。电子可以通过两条电路从电源的负极流出，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 11-7 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



图 11-6 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。

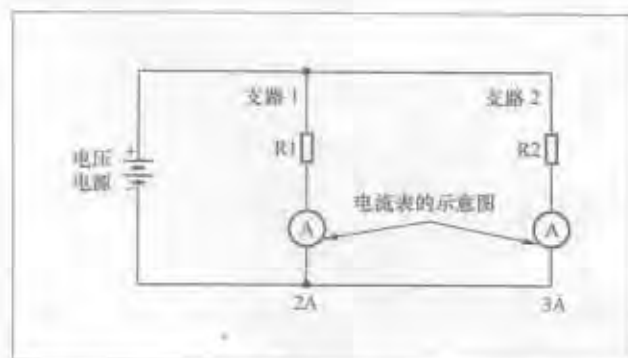


图 11-7 电流表测量电路中的电流。电路中每个支路都有一个电流表。所有支路中的电流相加，总的电流就是从电池中流出的电流。在这个例子中，电池中流出的电流是 5A。

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 11-7 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。橡胶软水管就像是串联电路。橡胶软水管所连接的水龙头就好比是电源，提供使水流过水管的压力，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。无论你用水管去浇草坪，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，有的流入浴缸，有的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。

观察图 11-8 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。并联电路中，一个支路断路，并不影响其他支路工作。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。

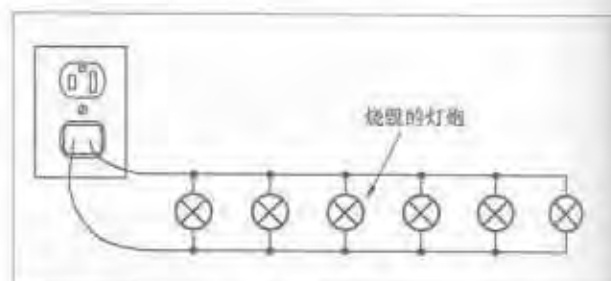


图 11-8 这些灯泡并联连接。如果一个灯泡烧毁，电流仍然可以从其他支路中流过。

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。

你也许有时会看到混联电路。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 11-10 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，只要记住电路中所有部分有的是串联连接，有的部分是并联连接。

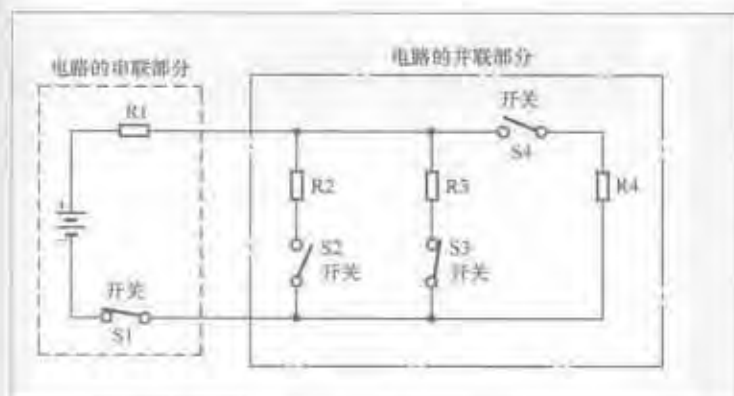


图 11-9 这是一个混联电路的例子。电路中有的部分电流要全部通过，而有的部分电流可以选择通过。并联支路中的开关可以控制支路加入或者移出电路。开关 S1 在串联部分，可以切断所有的电流。

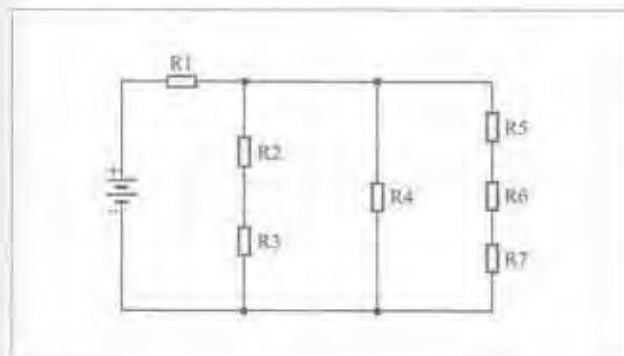


图 11-10 并联电路的支路中可以包含串联部分。

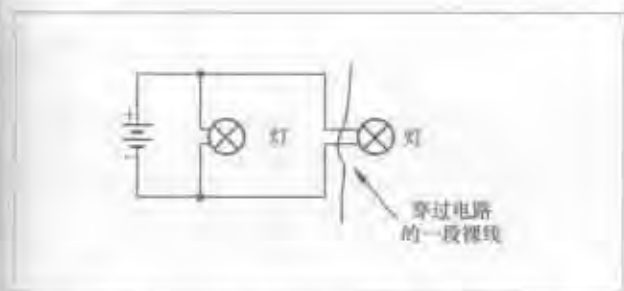


图 11-11 如果有导体在电路负载上形成一条电路的通路，就形成了短路。短路可能损害电路中其他部分，也可能产生很大的热量而引发火灾。

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。假如一个裸金属线或者其他导体穿过你的电路，如图 11-11 所示。这条金属线形成的支路电阻很小，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，因为这给电流形成了一个捷径，这就是短路。

有很多形成短路的原因。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，这也许会造成火灾。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，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 11-12 显示的是用保险丝保护电路，防止短路的电路。

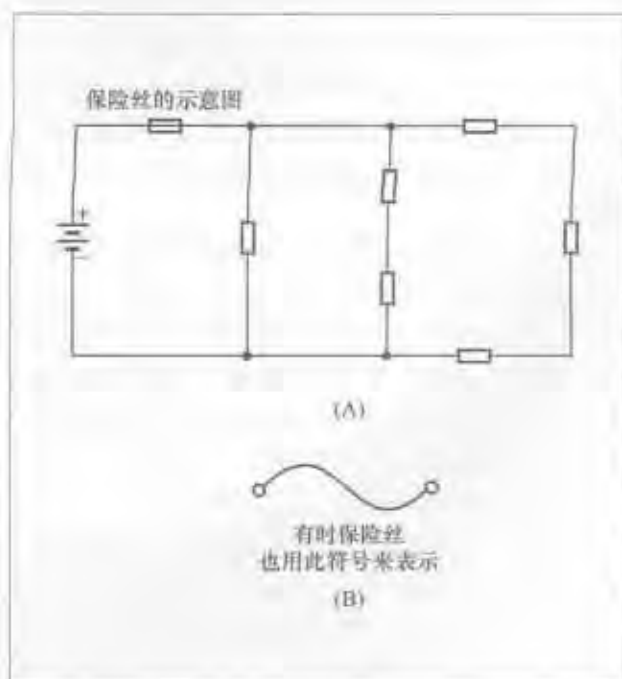


图 11-12 保险丝可以在发生短路时保护电路。当电流超过保险丝的额定电流时，保险丝会熔化，这样保险丝使电路开路，切断了电流。图中 B 部分是电路图中用来表示保险丝的另一常用符号。

第 12 章

欧姆定律

一、电压、电流和电阻的相互关系

在详细学习欧姆定律之前，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。在我们前面的学习中，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 3 个量之间有一定关联。

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电学最重要的钥匙。

来研究一下图 12-1 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 至 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小。表 12-1 是我们用这个电路实验得出的一些数据。仔细研究

表 12-1

图 12-1 中的电压与对应电流的变化情况

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

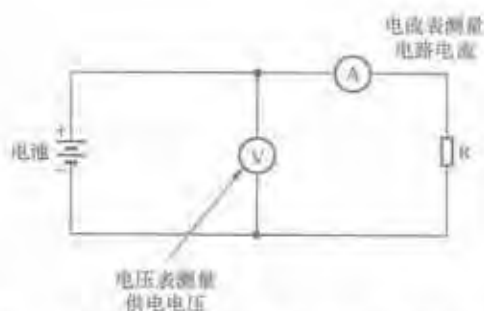


图 12-1 这个简单电路将帮助我们研究电压、电流和电阻之间的关系。电压表和电流表可以方便地测出电路状态。图中文字说明描述我们可以测量电路中的一些物理量。表 12-1 和表 12-2 列出的是用 2 个阻值的电阻分别测出的数据。

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，每次我们把电压成倍增加，电流也成倍增加。图 12-2 中的图表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。我们测量出的这种直接关系，如图 12-2 所示。在数学中，我们称电压和电流互相成正比。

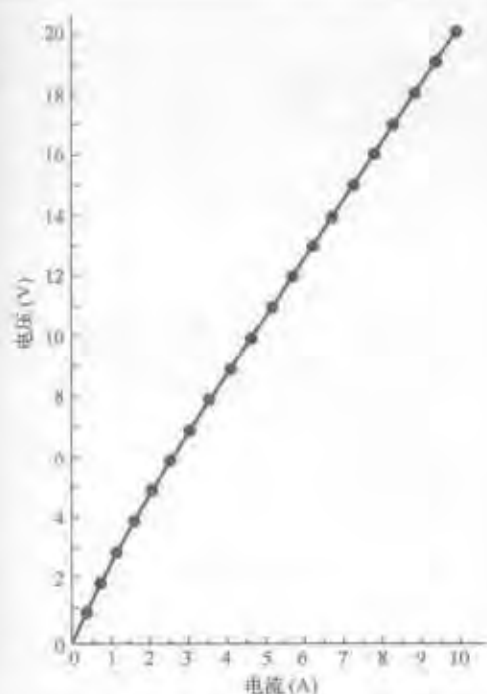


图 12-2 这张图的数据来自于表 12-1，显示的直线表明电压和电流成正比。表 12-1 中的数据都是理想情况下的数据，实际测量的数据和这些数据略有变化。

如果两个量成正比，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。所以要求出电路中任何电流两端的电压，只要知道这个正确的数字（常量），我们就可以把这个正比例写成方程：

$$\text{电压} = \text{电流} \times \text{常量} \quad (12-1)$$

从表 12-1 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。

现在让我们来假设有一个电阻是图 12-1 中电阻的两倍。这样表 12-2 得到了电压在 0 到 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 12-2 电压和电流的图表。你将得到一条直线图线，证明电荷和电流仍然成正比。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 欧姆，在第二个例子中，它

的电阻是 4 欧姆。这样方程 12-1 中的常量就是电路中的电阻，我们把方程重新写成：

$$\text{电压} = \text{电流} \times \text{电阻} \quad (12-2)$$

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，intensity），用字母 R 代表电阻。用这些字母来表示方程 12-2，我们可以写成：

$$U = I \times R \quad (12-3)$$

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 Ω (omega) 表示单位欧姆。如果一个定值电阻的大小是 200 欧姆，我们可以写成 200 Ω 。

如果我们知道方程 12-3 中 3 个量中的任意 2 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换形式。

表 12-2

图 12-1 中的电压与对应电流的变化情况

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

二、寻找未知数——欧姆定律“圆”

在 你将要学习的大多数电路中，欧姆定律是一个很好的工具。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：

$$U=I \times R \quad (12-4)$$

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写在其他字母后面：

$$U=IR \quad (12-5)$$

当你知道了电路中 3 个量（电压、电流和电阻）中的任意 2 个，你可以求出第 3 个量。

假设我们从图 12-3 电压表中读出电压是 10V，从电流表上读出电流是 0.5A。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 12-5 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：

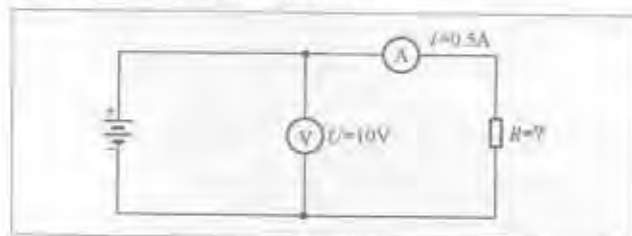


图 12-3 这是利用欧姆定律简单计算的电路。你可以利用已知的电压和电流求出电阻。

$$R = \frac{U}{I} \quad (12-6)$$

然后计算出电路中的电阻：

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

如果你对解方程不熟悉，也许你想知道我们使用的什么神奇方法！现在是来复习解方程方法的好机会了。图 12-4 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。

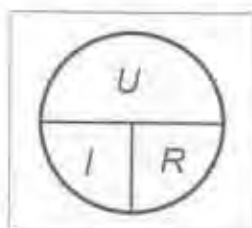


图 12-4 欧姆定律“圆”是一种辅助记忆，帮助我们利用欧姆定律求出电压、电流或电阻。

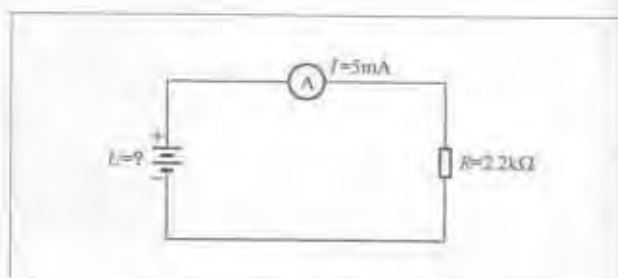


图 12-5 这是利用欧姆定律计算的另一个电路。这次已知电流和电阻，要求出电路中的电压。



图 12-6 哈姆雷特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）。

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”或圆来找到这些信息)。图 12-5 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 ,如哈姆雷特(图中小猪的名字)在图 12-6 中显示的那样。这时在图表中你仍可以看到 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。

$$U = 5\text{mA} \times 2.2\text{k}\Omega$$

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

(你还记得这样用 10 为底的幂来代替公制中的前缀吗?如果忘记了,现在该去复习第一单元中的“很大和很小数字的运算”了)

我们还要再举一例吗?看图 12-7。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 12-8),圆中的结果是 U 在“圆”的上部,而 I 在“圆”的下部,这显示的是除法问题,此时方程和方程 12-6 一样。

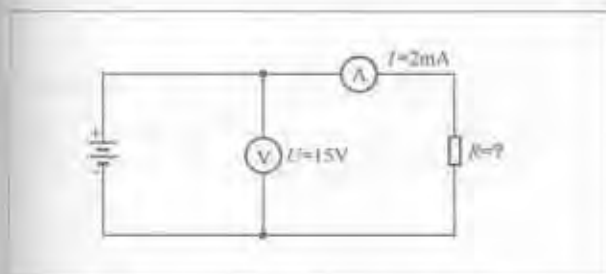


图 12-7 这个电路图中,我们已知电压和电流,但不知道电阻。欧姆定律将帮助我们利用已知的信息计算出电阻。

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

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

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

让我们利用欧姆定律“圆”再做一例。图 12-9 问题中,我们已知了电压和电阻,需要我们求出电流。图 12-10 显示了如何利用欧姆定律“圆”来找到方程:



图 12-8 这张图中哈姆雷特利用欧姆定律“圆”来解决图 12-7 中的问题。

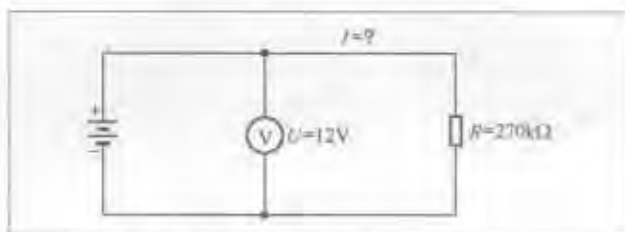


图 12-9 这是另一个电路图。图中我们已知电压和电阻,但不知道电流,欧姆定律将再次帮助我们计算出电流。

$$R = \frac{U}{I} \quad (12-7)$$

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

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

或

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

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。



图 12-10 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。

三、练习及其答案

练 习得越多，利用欧姆定律计算问题的自信心就会越强。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 6 个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 12-11 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，你可以用下一页的解题答案来检查你的解题过程（当然，你必须把书倒置才能看清这些答案）。

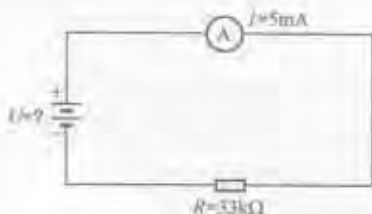
图 12-11 欧姆定律“圆”给我们提供解决任何实际问题时写出欧姆定律方程的简单方法。



1. 练习题

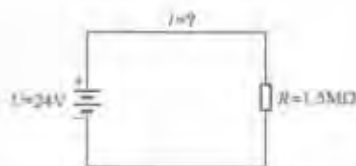
练习题 12-1:

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，这时电流大小是 5mA ，则电池的电压是多大？



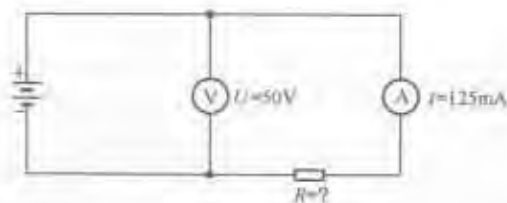
练习题 12-2:

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



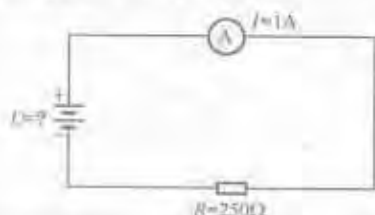
练习题 12-3:

电路示意图中，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？



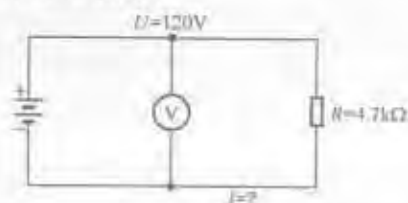
练习题 12-4:

你要在 250Ω 的电阻上施加多大的电压才能有 1A 的电流通过这个电阻?



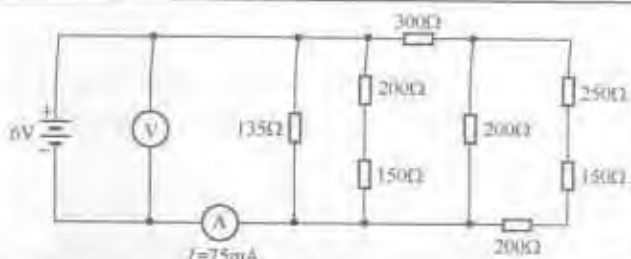
练习题 12-5:

在 4700Ω 的电阻上施加 120V 的电压, 电路中的电流是多大?



练习题 12-6:

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。这些复杂连接的电阻的总阻值是多大?



2. 练习答案

不要把电阻看成是一个元件。问题的目的是练习欧姆定律的计算。我们可以通

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6\text{V}}{75\text{mA}} = \frac{6\text{V}}{75 \times 10^{-3}\text{A}} = 80\Omega$$

过测量出这些复杂连接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?

练习题 12-6:

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 $U = IR$ 没有记住, 可利用欧姆定律“圆”。 $U = 250\text{V}$

练习题 12-4:

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

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

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

$I = \frac{1.5 \times 10^6\Omega}{24\text{V}}$

$I = \frac{1.5\text{M}\Omega}{24\text{V}}$

$I = \frac{R}{24\text{V}}$

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

利用欧姆定律“圆”, 我们把方程写成:

练习题 12-2:



练习题 12-5: 如果你还需要, 可以利用欧姆定律“圆”来写出求电流的方程。

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120\text{V}}{4.7\text{k}\Omega} = \frac{120\text{V}}{4.7 \times 10^3\Omega} = 0.0255\text{A} \text{ 或者 } I = 25.5 \times 10^{-3}\text{A} = 25.5\text{mA}$$

求电阻。

$$R = \frac{U}{I} = \frac{50\text{V}}{125\text{mA}} = \frac{50\text{V}}{125 \times 10^{-3}\text{A}} = 400\Omega$$


练习题 12-3:

利用欧姆定律“圆”

$U = IR$

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

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

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


练习题 12-1:

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:

四、欧姆定律在电路和电路元件上的应用

通 过练习，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同样也能帮助我们解决更复杂的电路吗？答案是令人狂热的肯定。

查看图 12-12 中的电路。这里 3 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 12-13 中的水管的左端提供高水压。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。到了这里又有碰到了另一个阻塞，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压降。压降表示推动电子通过电阻需要的力或者电势（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 12-14A 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 12-14B 所示，电压表的读数将比电池的总电压要小。图 12-14C 显示，当把电压表并联接 B 点和 C 点之间的 R2 两端时，电压表的读出读数也比电池的总电压小。当然，当把电压表接在 C 点和 D 点之间时，电压表的读数也小于 12V。图 12-14D 显示的是电压表接

在 R3 两端，测量 R3 两端的电压。

我们现在的的问题是，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。

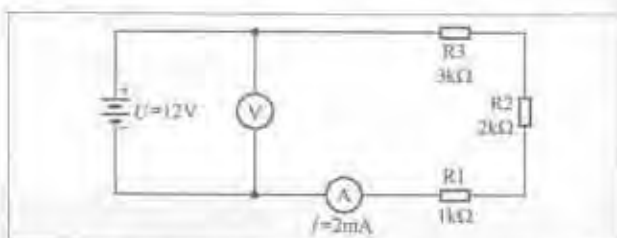


图 12-12 利用欧姆定律可以帮助我们计算出串联电路中每个电阻两端的压降。电压表测量出给整个电路提供的电压，电流表测出电路中流过每个电阻的电流。

我们利用欧姆定律来算出电阻 R1 两端的压降：

$$U_1 = IR_1 \quad (12-8)$$

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

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

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

在图 12-14B 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，两端的压降又是多少呢？

$$U_2 = IR_2 \quad (12-9)$$

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

$$U_2 = 2 \times 10^{-3} \text{A} \times 1 \times 10^3 \Omega$$

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

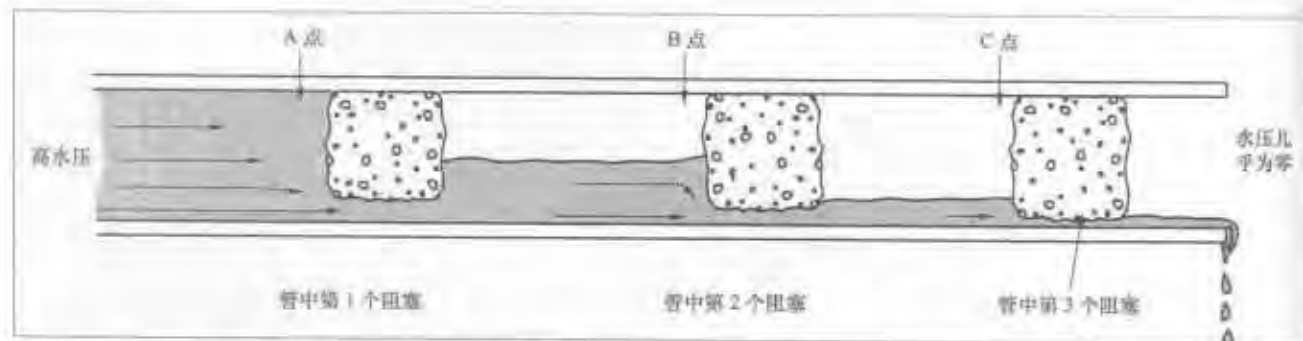


图 12-13 电路中的电阻和水管中的阻塞类似。水通过水管中的每个阻塞点后，水压比通过前要小。图中我们看到，当水流过阻塞点 C 后，只剩下很小的水压，水只能从水管中滴出。

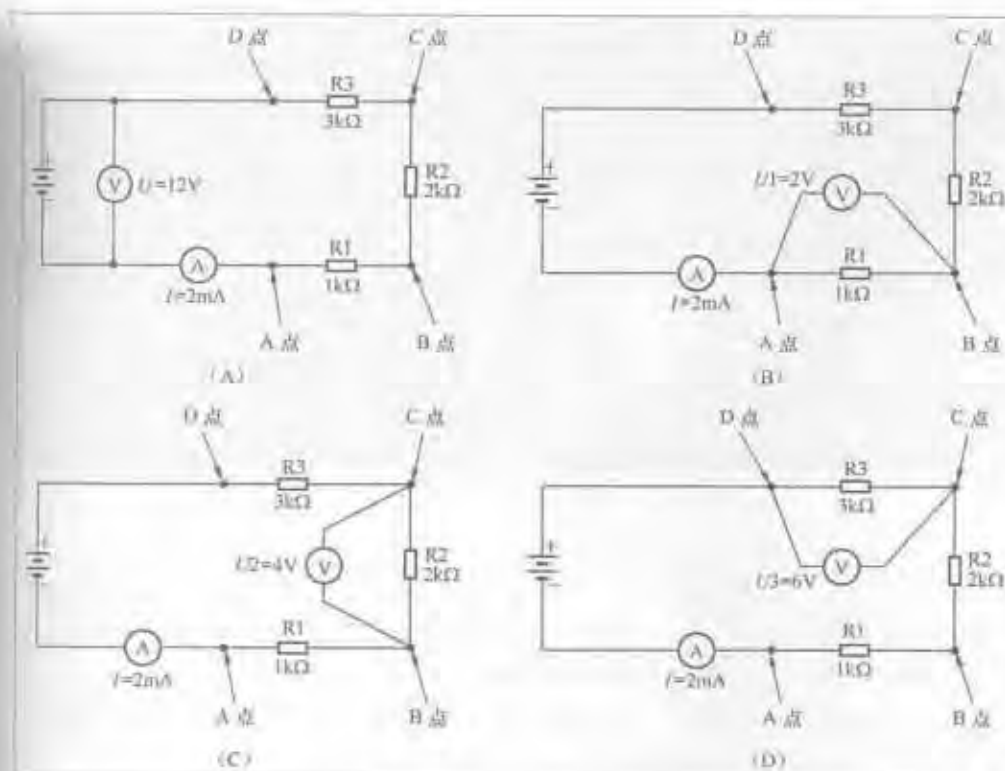


图 12-14 图中 A 是一个简单的串联电路。电压表测量电池的电压，电流表测量通过电路中的电流。如果我们把电压表接在 A、B 两点间，如图中 B 所示，我们可以测出电流，R1 两端的压降（注意，电压表和电阻并联，在测量电压时，你必须始终把电压表并联在电路中待测部分的两端。）图中 C，电压表连接在 B、C 两点间，和 R2 并联，这样我们就测出例题中 R2 两端的压降。为了测量 R3 两端的压降，我们把电压表接在电路中 C、D 两点间，如图中 D 所示。

所以 R2 两端的压降是 4V，这和图 12-14C 中电压表的读数一致。

那么 R3 两端的压降是多少呢？

$$U_3 = IR_3 \quad (12-10)$$

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

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

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

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

现在查看图 12-15。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上是一样的。这样，我们就可以用欧姆定律来计算每条支路的电流。

画一个欧姆定律“圆”，然后写出利用欧姆定律求电流的方程。

$$I = \frac{U}{R} \quad (12-11)$$

首先让我们求出经过 R1 的电流：

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

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

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

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，你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，我们将来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。

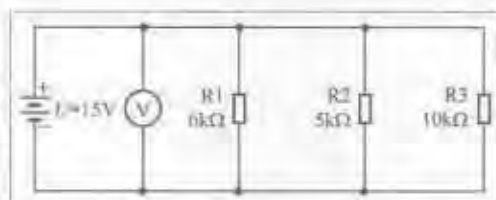


图 12-15 这是一个 3 个电阻和电源电压并联连接的电路。欧姆定律可以帮助我们计算出每条并联支路中所通过的电流。

第 13 章

基尔霍夫定律

一、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。在 1857 年，也就是欧姆去世后 3 年，基尔霍夫发表了他的两个重要的电路定律。

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：

$$\sum U_{\text{升压}} = \sum U_{\text{压降}} \quad (13-1)$$

大写希腊字母 sigma (Σ) 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，把它们相加，然后识别回路中所有的压降，把它们相加。你记得怎样用欧姆定律来计算压降吗？

图 13-1 中的简单电路中，有一个电源和 4 个压降。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 13-1 中的基尔霍夫第一定律方程：

$$\begin{aligned} \sum U_{\text{升压}} &= \sum U_{\text{压降}} \\ 30\text{V} &= IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 \end{aligned}$$

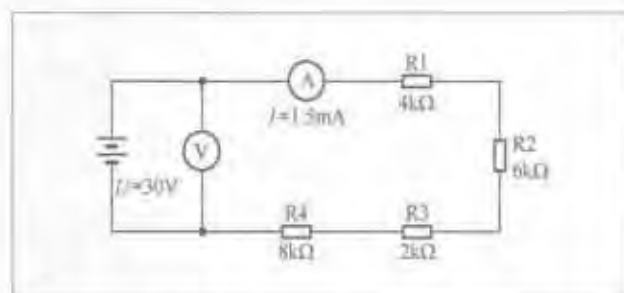


图 13-1 这是一个简单的闭合串联电路。通过分别把所有的升压和压降相加，我们可以写出基尔霍夫电压定律方程。

$$30\text{V} = 1.5\text{mA} \times 4\text{k}\Omega + 1.5\text{mA} \times 6\text{k}\Omega + 1.5\text{mA} \times 2\text{k}\Omega + 1.5\text{mA} \times 8\text{k}\Omega$$

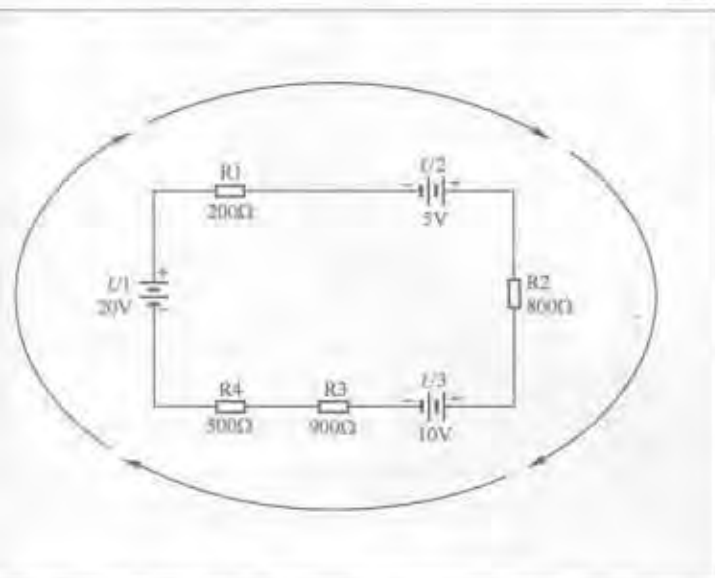
$$\begin{aligned} 30\text{V} &= 6\text{V} + 9\text{V} + 3\text{V} + 12\text{V} \\ 30\text{V} &= 30\text{V} \end{aligned}$$

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 13-2 是描述的另一电路。这个电路中有 3 个电源，让我们用基尔霍夫电压定律来计算出电路中的电流。

图 13-2 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，取回路的方向沿电源的负极到电源的正极的方向。注意，我们在



3-1 中的例子中就是取的这个方向。沿电源的正极到正极方向，结果是电压增加或电压升高。如沿电源的正极到负极方向，结果是电压降低！——例如是，如果电源的方向和回路方向相反，给电压负值。图 13-2 中的例子会使你很容易明白这



3-2 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。基尔霍夫电压定律，我们可以列出方程，求出电路中的电流。

个概念。

首先我们写出基尔霍夫电压定律方程：

$$\sum U_{\text{升压}} = \sum U_{\text{降压}}$$

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，这点的结果是由压降低，所以在方程中 U_3 数值前加负号。

$$\sum U_{\text{升压}} = U_1 + U_2 + U_3 \quad (13-2A)$$

$$\sum U_{\text{升压}} = 20V + 5V - 10V = 15V \quad (13-2B)$$

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 ($U=IR$)。

$$\sum U_{\text{压降}} = IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 \quad (13-3A)$$

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。

$$\sum U_{\text{压降}} = I \times 200\Omega + I \times 800\Omega + I \times 900\Omega + I \times 500\Omega$$

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 13-3A 写成：

$$\sum U_{\text{压降}} = I \times (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

$$\sum U_{\text{压降}} = I \times (200\Omega + 800\Omega + 900\Omega + 500\Omega)$$

$$\sum U_{\text{压降}} = I \times (2400\Omega) \quad (13-3B)$$

现在我们可以把方程 13-2B 和 13-3B 组合在一起，写成基尔霍夫方程 (如同方程 13-1) (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)。

$$\sum U_{\text{升压}} = \sum U_{\text{压降}}$$

$$15V = I \times 2400\Omega \quad (13-4)$$

解方程中的 I ，等式两边同时除以 2400Ω 。

$$\frac{15V}{2400\Omega} = \frac{I \times 2400\Omega}{2400\Omega} \quad (13-5)$$

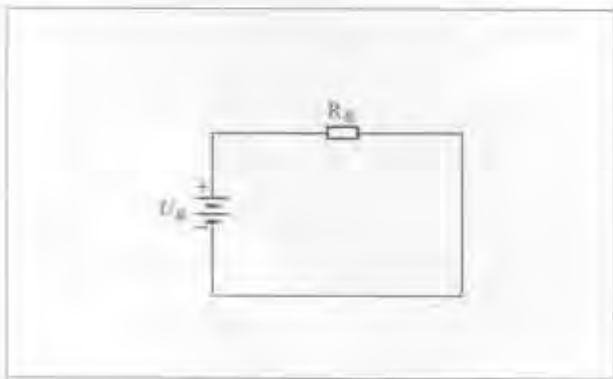
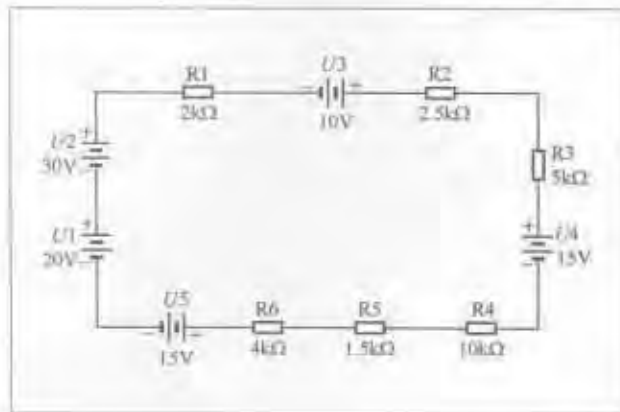
$$I = 6.25 \times 10^{-3} A = 6.25 \text{ mA}$$

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。

二、简化串联电路

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 13-3 所示的电路。电路包括了一些电源，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 13-4 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：

$$\sum U_{\text{电源}} = \sum U_{\text{电阻}} \quad (13-6)$$

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。沿着大多数电源都是从负极流向正极的方向作为回路的方向，把电源电压相加。注意其连接的顺序不是问题，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动势前加上负号（把这些电源电压从其他的电压中减去）。

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，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 13-3 中所示的那样，找到电路中的总电源电压。

$$U_{\Sigma} = 20\text{V} + 30\text{V} + 10\text{V} - 15\text{V} - 15\text{V} \quad (13-6)$$

$$U_{\Sigma} = 30\text{V}$$

这就是图 13-4 中的一个等效电源。

现在让我们计算出图 13-14 中的一个等效电阻。再次利用基尔霍夫电压定律，沿着回路把所有的压降相加，虽然不知道电流的大小，但我们可用 I 来表示。

$$\sum U_{\text{电阻}} = I \times R_1 + I \times R_2 + I \times R_3 + I \times R_4 + I \times R_5 + I \times R_6 \quad (13-7)$$

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：

$$\sum U_{\text{电阻}} = I (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) \quad (13-8)$$

这里我们真正所要做的是找到图 13-3 中的等效电阻。这一个等效电阻上所产生的压降必须和其他所有电阻上共同产生的压降相同。电流 I 乘以等效电阻必须和方程 13-8 右侧相等。这样：

$$I (R_{\Sigma}) = I (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6) \quad (13-9)$$

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。

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (13-10)$$

串联连接的电阻的等效电阻等于串联电阻之和。用

于任何串联连接的电阻的通用方程是:

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (13-11)$$

这里, R_n 表示一串电阻中的最后一个电阻。这个方程对于2个电阻或200个(或更多)电阻串联连接都适用, 然而, 这个方程不适用于并联电路(我们将在后面讨论并联情况)。

图 13-3 中的例子, 总电阻就是:

$$R_{\text{总}} = 2\text{k}\Omega + 2.5\text{k}\Omega + 5\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega + 1.5\text{k}\Omega + 4\text{k}\Omega$$

$$R_{\text{总}} = 25\text{k}\Omega$$

利用方程13-9, 我们可以把方程写成:

$$I(R_{\text{总}}) = I \times 25\text{k}\Omega$$

我们也可以把方程13-8写成:

$$\sum U_{\text{电阻}} = I \times 25\text{k}\Omega$$

现在我们可以把计算出来的所有条件带入到方

程 13-6。

$$\sum U_{\text{电阻}} = \sum U_{\text{电源}}$$

$$30\text{V} = I \times 25\text{k}\Omega$$

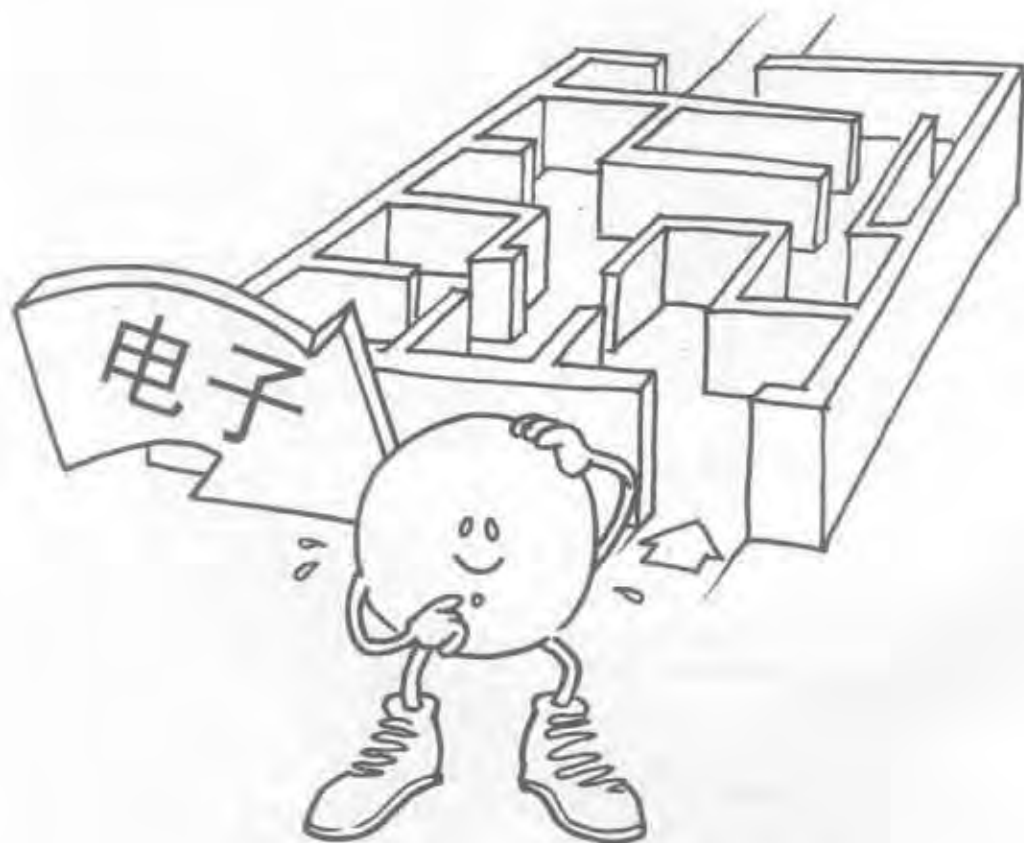
这看起来和欧姆定律方程相像吗? 当然是, 解这个方程, 求出电流:

$$I = \frac{30\text{V}}{25\text{k}\Omega}$$

$$I = \frac{30\text{V}}{25 \times 10^3 \Omega}$$

$$I = 1.2 \times 10^{-3} \text{A} = 1.2\text{mA}$$

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。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。



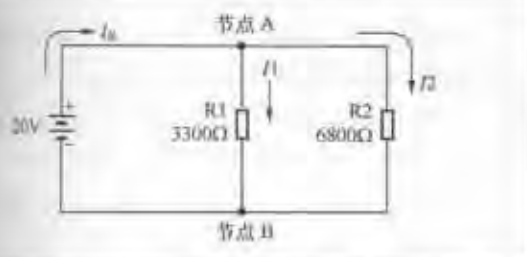


图 13-7 这个图将帮助说明用联立方程的技巧来解决有多个未知量的问题。我们可以计算出电池的总电流和电路中每个支路的电流。课本解释了这个过程。

多数这样的问题超出了本书初学者的范围。让我们来做一个简单的例子，当然，正是如此，你可以看到这些解决步骤。

图 13-7 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，这意味着我们要找出这 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。

$$\begin{aligned}\sum I_{\text{流入}} &= \sum I_{\text{流出}} \\ I_A &= I_1 + I_2\end{aligned}\quad (13-15)$$

这个方程描述了我们所要求的 3 个量，所以你可能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 13-8 显示的电路和图 13-7 一样，利用两个确定的回路写出这些方程。

$$\sum U_{\text{升压}} = \sum I \times R_{\text{电阻}} \quad (13-16)$$

对于回路 1:

$$20\text{V} = I_1 \times R_1 \quad (13-17)$$

对于回路 2:

$$20\text{V} = I_2 \times R_2 \quad (13-18)$$

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 13-17，通过方程两边同时除以 R_1 来求出 I_1 。

$$\frac{20\text{V}}{R_1} = \frac{I_1 \times R_1}{R_1}$$

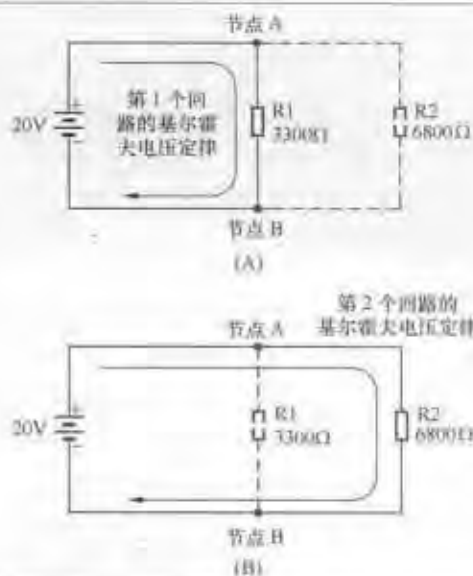


图 13-8 图中两个部分与图 13-7 等同。A 部分显示的是我们可以用来写出基尔霍夫电压定律方程的回路。图 B 显示的是第二个回路。从这些回路中，利用基尔霍夫电压定律写出的两个方程，从而使我们可以计算出电路 3 个电流。

$$\frac{20\text{V}}{R_1} = I_1 \quad (13-19)$$

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 。

$$\begin{aligned}\frac{20\text{V}}{3300\Omega} &= I_1 \\ 6.06 \times 10^{-3}\text{A} &= 6.06\text{mA} = I_1\end{aligned}$$

接着，我们用同样的方法求出 I_2 。

$$\begin{aligned}\frac{20\text{V}}{R_2} &= \frac{I_2 \times R_2}{R_2} \\ \frac{20\text{V}}{R_2} &= I_2\end{aligned}\quad (13-20)$$

从图 13-7 中，我们也知道了 R_2 的值，所以我们可以完成这个计算。

$$\begin{aligned}\frac{20\text{V}}{6800\Omega} &= I_2 \\ 2.94 \times 10^{-3}\text{A} &= 2.94\text{mA} = I_2\end{aligned}$$

我们已经求出 I_1 和 I_2 ，现在我们可以代入方程 13-15。

$$\begin{aligned}I_A &= I_1 + I_2 \\ I_A &= 6.06\text{mA} + 2.94\text{mA} \\ I_A &= 9.00\text{mA}\end{aligned}\quad (13-21)$$

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。

四、简化并联电路

当 我们学习基尔霍夫电压定律时，我们发现它可以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。

你也许想知道基尔霍夫电流定律能否提供一个类似的方法来简化并联电路。答案是确切的“是”。

图 13-9 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，它们都提供相

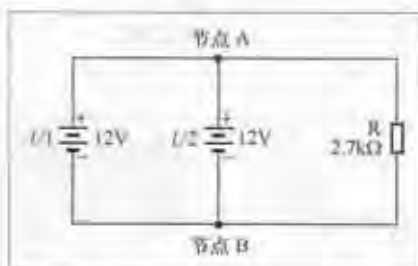


图 13-9 如果电池的电压相等，我们可以把它们并联连接。这样可以提高电池的使用时间，因为这时每个电池流入到电路中的电流都较少。

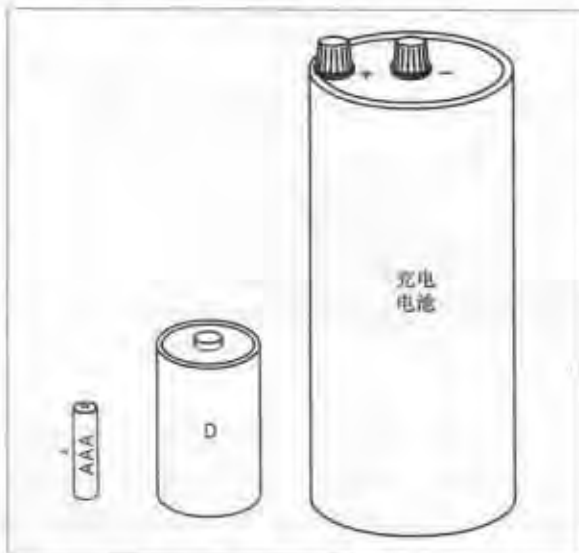


图 13-10 一节 5 号电池、一节 1 号电池和充电电池都提供 1.5V 的电压。不过在电池用完前，大尺寸的电池提供的电流比小尺寸的电池要多。

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，使它们发热，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 13-9，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。

基尔霍夫电流定律能帮助我们吧几个并联连接的电阻结合在一起，用一个等效电阻来代替吗？再次重申：是的！让我们从图 13-11 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 的基尔霍夫电流定律方程。

$$\sum I_{\text{流入}} = \sum I_{\text{流出}} \quad (13-23)$$

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (13-24)$$

如图 13-12，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。

$$U = I_1 \times R_1 \quad (13-25)$$

求出电流 I_1 ：

$$\frac{U}{R_1} = \frac{I_1 \times R_1}{R_1} \quad (13-26)$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad (13-27)$$

下一步，我们求出电流 I_2 ：

$$U = I_2 \times R_2 \quad (13-28)$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} \quad (13-29)$$

最后，求出第 3 个支路的电流：

$$U = I_3 \times R_3 \quad (13-30)$$



图 13-11 这是一个 3 个电阻与电池并联连接的电路。要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。

$$I_3 = \frac{U}{R_3} \quad (13-30)$$

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，方程 13-23。

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_{\text{总}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \quad (13-31)$$

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 $I_{\text{总}}$ 。

$$I_{\text{总}} = \frac{U}{R_{\text{总}}} \quad (13-32)$$

代入方程 12-31，我们得到：

$$\frac{U}{R_{\text{总}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \quad (13-33)$$

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。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (13-34)$$

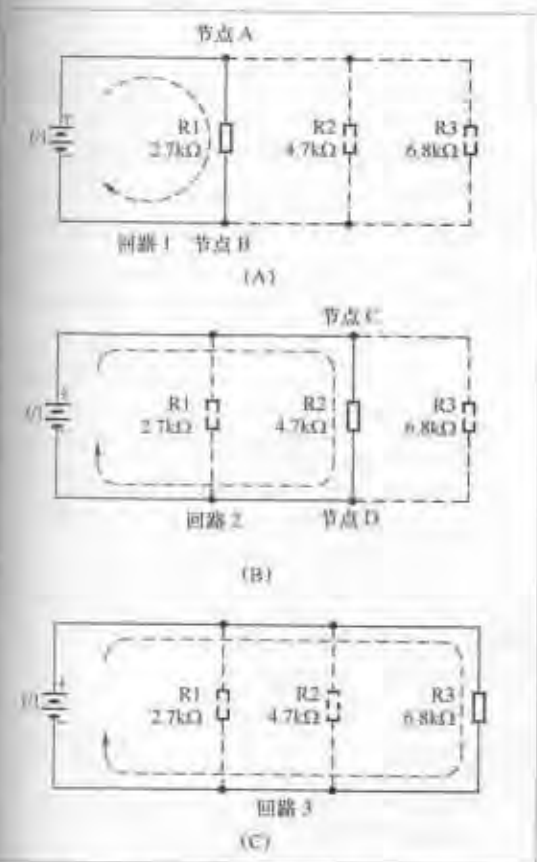


图 13-12 图中的 3 个部分显示的是图 13-11 中的电路。每个部分显示一个电路回路帮助我们利用基尔霍夫电压定律得出相应的方程。

在科学计算器上很容易求出倒数 (1 被另一个数相除)。通过几个很简单的步骤你就可以解出这个方程。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{2.7\text{k}\Omega} + \frac{1}{4.7\text{k}\Omega} + \frac{1}{6.8\text{k}\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{3.7 \times 10^{-4} + 2.1 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-4}}{\Omega}$$

用 $R_{\text{总}}$ 交叉相乘，使它离开分母：

$$1\Omega = 7.3 \times 10^{-4} R_{\text{总}}$$

现在可以交叉相乘，求出 $R_{\text{总}}$ ：

$$\frac{1\Omega}{7.3 \times 10^{-4}} = R_{\text{总}}$$

$$1400\Omega = R_{\text{总}} \quad (13-35)$$

(你的计算器上的读数也许是 1369.86，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，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。

$$\frac{1}{R_{\text{总}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (13-36)$$

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 13-35 所给的答案，图 13-11 中并联电阻的总电阻只有 1.4kΩ，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比这些电阻中的任何一个电阻的阻值都小。

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三分之一。你可以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。



找出这
电阻的
正文中
这个问

电路。又会立即注意到离电源最近的 3 个电阻是串联连接的。所以，我们的下一步是把这 3 个电阻组合成一个等效电阻。利用公式 13-38，我们得到：

$$\frac{1}{R_{4-8}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6-8} \quad (13-40)$$

这里 R_{4-8} 表示的是原电路中 R_4 到 R_8 的一个等效电阻。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{1}{4.7\text{k}\Omega} + \frac{1}{8.2\text{k}\Omega} + \frac{1}{1.68\text{k}\Omega} \\ \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{1}{4.7 \times 10^3 \Omega} + \frac{1}{8.2 \times 10^3 \Omega} + \frac{1}{1.68 \times 10^3 \Omega} \\ \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{2.13 \times 10^{-4} + 1.22 \times 10^{-4} + 5.95 \times 10^{-4}}{\Omega} \\ \frac{1}{R_{4-8}} &= \frac{9.30 \times 10^{-4}}{\Omega} \end{aligned}$$

交叉相乘，求出这个方程中的 R_{4-8} ：

$$\frac{\Omega}{9.30 \times 10^{-4}} = R_{4-8}$$

$$1075\Omega = R_{4-8}$$

图 13-16B 表示的是用等效电阻重新画的电路图。注意电阻 R_3 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。

$$R_{3-8} = R_3 + R_{4-8}$$

$$R_{3-8} = 390\Omega + 1075\Omega = 1465\Omega$$

图 13-16C 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？ R_2 和 R_{3-8} 是如何连接的呢？你如何找到它们的等效电阻呢？没错，它们并联连接。所以利用方程 13-38，我们把它们的倒数相加。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{2-8}} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{3-8}} \quad (13-41) \\ \frac{1}{R_{2-8}} &= \frac{1}{100\text{k}\Omega} + \frac{1}{1465\Omega} \\ \frac{1}{R_{2-8}} &= \frac{1.00 \times 10^{-5} + 6.826 \times 10^{-4}}{\Omega} \\ \frac{1}{R_{2-8}} &= \frac{6.926 \times 10^{-4}}{\Omega} \end{aligned}$$

交叉相乘，求出 R_{2-8} 。

$$\frac{\Omega}{6.926 \times 10^{-4}} = R_{2-8}$$

$$1444\Omega = R_{2-8}$$

图 13-16D 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_{2-8} 组合起来。因为它们是串联连接，所以也不必再写方程，直接把它们的值相加即可。

$$R_{1-8} = R_1 + R_{2-8} \quad (13-42)$$

$$R_{1-8} = 560\Omega + 1444\Omega$$

找出这
电阻的
正文中
个问题的



密的等效

用这样

串联又

能代替

当然，

的总电

流方程，

然而，对

的任务。

解决这个

的练习。

让我

来，确定

是，当称

R_8 是串

联电阻。

(13-39)

的等效电

电阻 R_6 ，

这个参

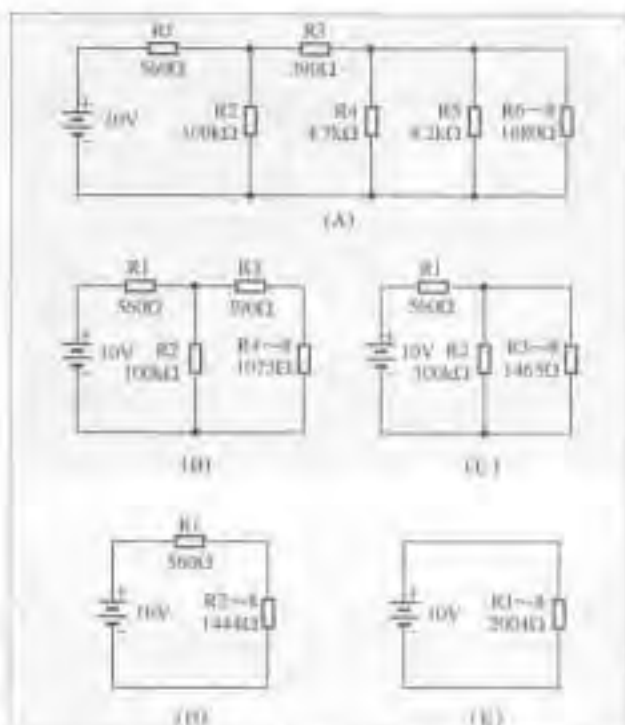


图 13-16 图中的各部分说明了在简化图 13-15 电路时的每个步骤。每个部分说明进一步简化电路中电阻的数量，直到图 E 部分，只剩下一个电阻。从电源流出，经过这个电阻的电流和图 13-15 中流入的总电流相同。

$$R_{1-8} = 2004\Omega$$

图 13-16E 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。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“倒”找到新的方程)

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

$$(13-43)$$

$$I = \frac{10\text{V}}{2004\Omega} = 4.99 \times 10^{-3}\text{A}$$

$$I = 4.99\text{mA}$$

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，但是这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。

第14章 能量和功率

一、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。电能使电机带动钻头转动，锯条旋转或使电吹风机工作。烤箱或电炉灶中的加热元件利用电产生热量用来烹饪食物，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，让我们一起复习一些基本定义。我们也将通过一些例子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，就要用力乘以物体移动的距离。在

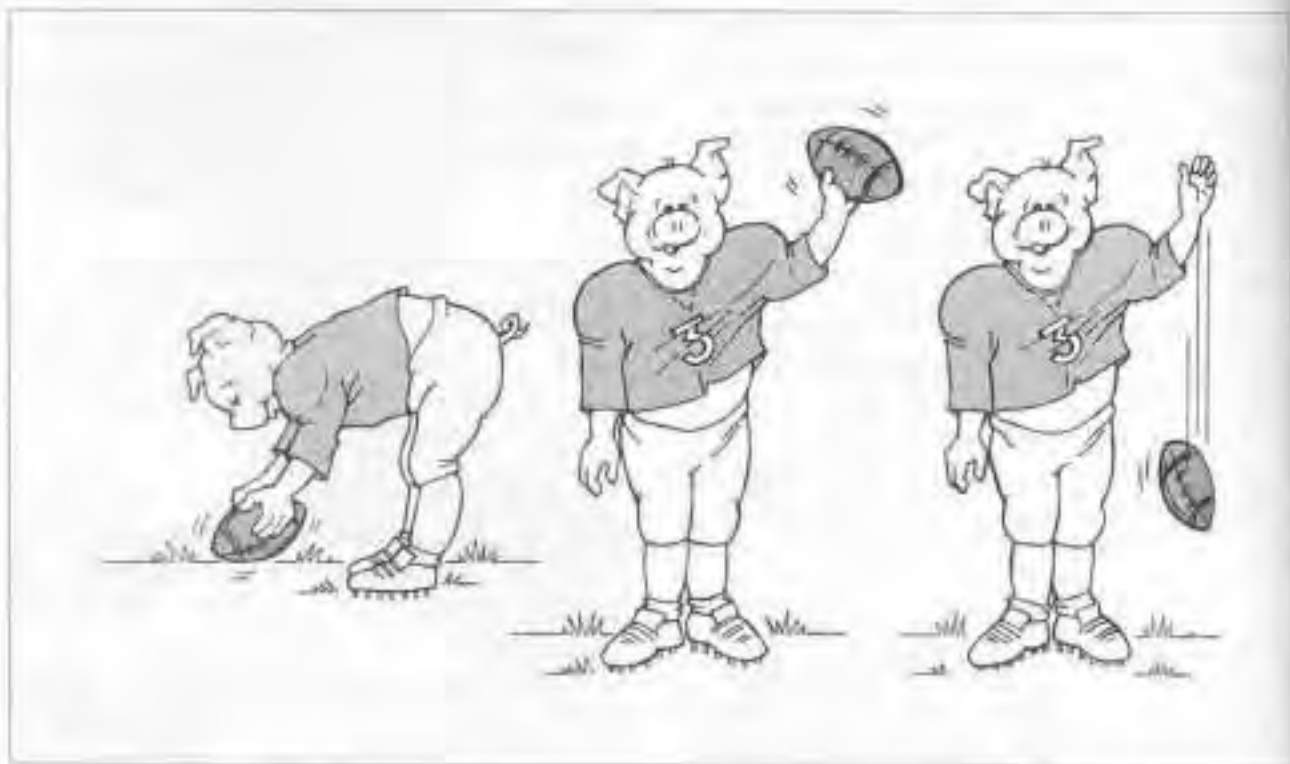


图 14-1 猪胡特通过拿起橄榄球，举过头顶这个动作来帮助我们理解功和能量的含义。当他对橄榄球做功，拿起橄榄球时，也在球中储存了一些能量，我们把这个能量叫做势能。而后，当他让橄榄球落下时，橄榄球的势能转化成动能，这是由于物体的运动而具有的能。

量中,功的单位是焦耳。能量是物体能做多少功的度量。1焦耳的能量能做1焦耳的功。焦耳通常的缩写是J。

图14-1表示的是功和能的简单的例子。哈姆雷特拉起一个橄榄球,并把它举过头顶。为了拉起球,他对球施加的力等于球受到的重力。在公制单位中,假如用1N(牛顿)的力,哈姆雷特把球举高1m,那么他就做了1J的功。我们也可以说橄榄球现在具有1J的势能。如果哈姆雷特让球落下,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,现在就具有了动能,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电能。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压降,压降的大小取决于电流和电阻的大小。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,它们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。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)1C(库仑)等于 6.24×10^{18} 个电子所带的电量。如果1秒钟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。

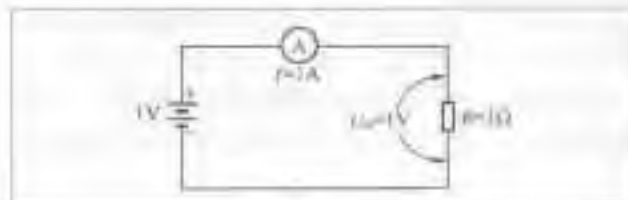


图 14-3 这是解释电池每秒做1J功的简单电路图。1J的功使1库仑的电子移动产生1V的压降。

假设我们有个图14-3所示的电路,电路中电流大小为1A,经过1Ω的电阻后产生1V的压降。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,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的定义,不过你现在已经能认出公制中前缀“千”和时间的单位小时。



图 14-2 从电池的负极离开,经过电路中任何电阻后,电子的势能减小。电子在正极具有的势能最大,在正极时势能为0。(在这里不要混淆惯例电流的方向和电子流动的方向。对于惯例电流,我们将认为在电池的正极势能最大,和着眼于电子的叙述正好相反。)

二、功率是做功的速度或者是利用能量的速度



14-4 电路每秒钟消耗 2J 的功，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 14-4 电路中的电池做了 2J 的功，我们也可以说图 14-5 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 14-5 的电路中电池 8 秒钟做 2J 的功（这是图 14-4 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



图 14-4 这是一个每秒钟消耗 2J 能量的简单电路。

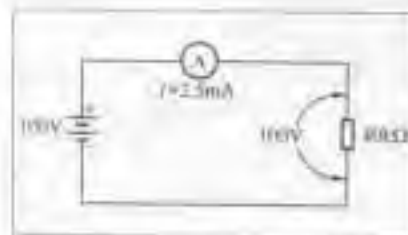


图 14-5 这个电路中的电源电压比图 14-4 中的电源电压大得多。因为电阻较大，这个电路以较小的速度供给电路能量。实际上，这个电路消耗能量的速度是每秒钟 1/4J。

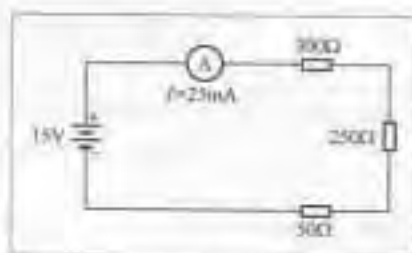


图 14-6 你可以通过用电路中的电压乘以电流来计算电路中消耗能量的速度（就是功率）。

率中很小的单位，所以我们使用千瓦（1000 瓦，或 kW）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 秒钟内通过 1 库仑的电子电量定义为 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。

$$P=IU \quad (14-1)$$

其中：

P 表示功率，单位是瓦；

I 表示电流，单位是安培；

U 表示电压，单位是伏特。

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？不管它是柠檬蛋糕、樱桃面包屑或者是南瓜，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 14-6。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 14-1 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 14-1，我们得到：

$$P=IU \\ P=0.025A \times 15V=0.375W$$

图 14-7 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？

$$P=IU$$

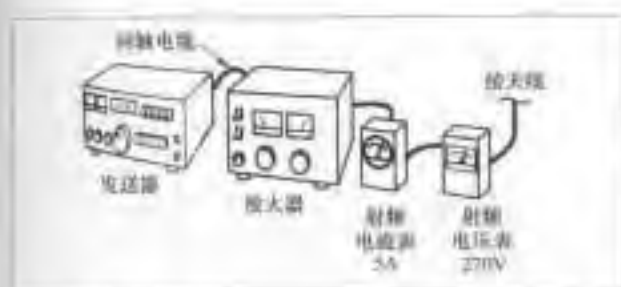


图 14-7 这个业余无线电台包括发信机和功率放大器。同时也包含电表用来测量馈线中的射频电流和电压。你可以通过电表显示出的电流乘以电压，求出输出功率。这个放大器提供给天线的功率是 1.350W。

$$P = 5A \times 270V = 1.350W$$

你也可以把它用于瓦表示。在这个业余台中，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 14-1 来求出电流和电压，我们也可以画一个“功率圆”，如图 14-8 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 14-2 和方程 14-3。

$$I = \frac{P}{U} \quad (14-2)$$

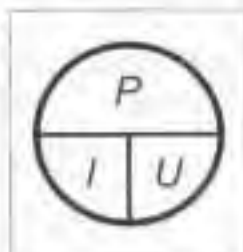


图 14-8 “功率圆” 给我们提供一个利用简单的功率方程解决 3 个量中任何一个量的方法。如同欧姆定律“圆”，简单地遮盖要求的量，剩余的两个部分显示你如何计算。利用这个“圆”写出计算功率、电流和电压的方程。

$$U = \frac{P}{I} \quad (14-3)$$

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 14-2。

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

$$I = \frac{2W}{6V} = 0.33A$$

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。

三、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非常容易。方程 14-4 表示如何完成这个计算。

$$P=IU \quad (14-4)$$

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。

$$U=IR \quad (14-5)$$

得到

$$I=\frac{U}{R} \quad (14-6)$$

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。

$$P=\frac{U}{R} \times U = \frac{U^2}{R} \quad (14-7)$$

图 14-9 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 14-7 计算这个电路的功率。

$$\begin{aligned} P &= \frac{U^2}{R} \\ P &= \frac{(25V)^2}{50\Omega} = \frac{625V^2}{50\Omega} \\ P &= 12.5W \end{aligned}$$

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 14-10，这是一个串联电路，我们知道了它的电流和电阻（至少我们可以很容易地算

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。

$$P=IU$$

$$P=I \times IR = I^2 R \quad (14-8)$$

$$P=(0.700A)^2 \times 300\Omega$$

$$P=0.49A^2 \times 300\Omega = 147W$$

方程 14-7 和方程 14-8 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 14-11 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 8200Ω、1500Ω 和 1200Ω，那么电池

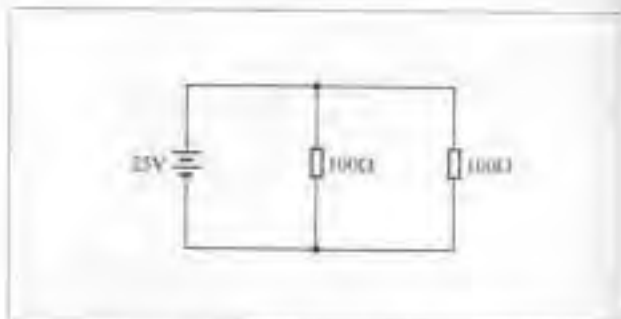


图 14-9 求出电池提供给电路的功率。首先你必须求出并联电阻的等效电阻，课文中讲解了计算功率的步骤。

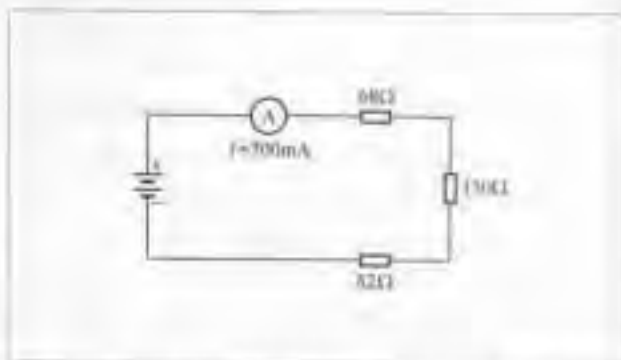


图 14-10 电池提供给这个串联电路的功率是多大呢？在求解这个串联电路的等效电阻时，你会碰到少许麻烦。

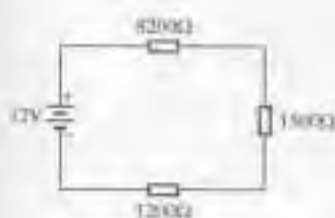


图 14-11 在这个串联电路中，电路图中标出了电源和 3 个电阻的大小，我们必须求出 3 个电阻的等效电阻，然后再求出电源供给电路的功率。

是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 $10.9\text{k}\Omega$ (10900Ω)。现在，因为我们知道了电阻和电压，我们可以用方程 14-7 来计算电池的功率。

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = \frac{(12\text{V})^2}{10.9 \times 10^3 \Omega} = 0.0132\text{W}$$

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 $13.2 \times 10^{-3}\text{W}$ 。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。

$$13.2 \times 10^{-3}\text{W} = 13.2\text{mW}$$

图 14-12 所示的较复杂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 $390\text{k}\Omega$ 一个为 $0.150\text{M}\Omega$ ，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 $108\text{k}\Omega$ 。现在你准备用方程 14-8 来计算电路中的功率。

$$P = I \times IR = I^2 R$$

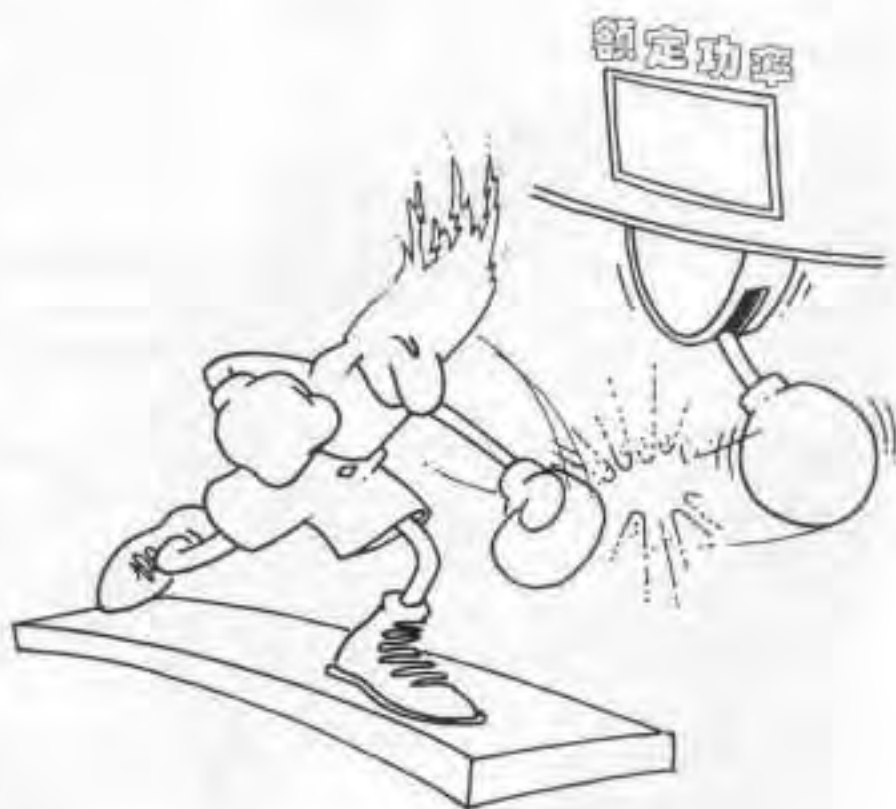
$$P = (1.5 \times 10^{-3}\text{A})^2 \times 108\text{k}\Omega$$

$$P = 2.25 \times 10^{-6}\text{A}^2 \times 108 \times 10^3 \Omega$$

$$P = 0.243\text{W} = 243 \times 10^{-3}\text{W} = 243\text{mW}$$



图 14-12 找出一个等效电阻代替电路中的两个并联连接的电阻，然后计算出电源供给电路的功率。



第 15 章

分贝

一、分贝的定义

分 贝是电学中一个你经常听到、使用或滥用的单位。那么这个术语是什么意思呢？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 表示分贝，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，很多人是由于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的轰鸣都是极强声音的例子。很多声音太强而

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要响 1×10^{12} 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如此广的刻度范围的数字。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。

$$bels = \log(I_1/I_0) \quad (15-1)$$

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，如果用响的声音的强度作为基准参照声音，你会得到同样的值，不过却是负值。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 1×10^{12} 倍。把这个数代入方程 15-1 中作为 I_1/I_0 的值，计算出用分贝作单位的值，即我们的听力范围。

$$bels = \log(I_1/I_0)$$

$$bels = \log(1 \times 10^{12}) = 12$$

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中（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作单位。10 分贝是 1 贝尔，因此用分贝做单位是用贝尔做单位的方程的 10 倍。

$$dB = 10 \log(P_1/P_0) \quad (15-2)$$

其中：

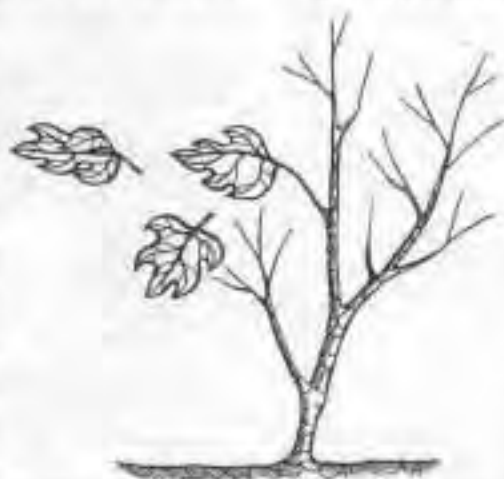


图 15-1 如果没有很多的其他噪音，我们可以听到非常微弱的声音。



图 15-2 在大的声音中要听到微弱声音几乎不可能。

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。记住功率强度的比值，意思是我们用一个功率除以基准功率对比功率。

假设我们测量一个业余无线电发射机的输出功率，测出其功率大小为 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？这个功率放大器使功率增加了多少？为了解决这个问题，我们把 15W 的功率作为基准功率，我们想用这个值作为基准和放大器功率比较。方程 15-2 将帮助我们解决这个问题。

$$\text{dB} = 10 \log(P_1/P_0)$$

$$\text{dB} = 10 \log(1500\text{W}/15\text{W}) = 10 \log(100)$$

$$\text{dB} = 10 \times 2 = 20$$

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把功率从 15W 放大到 150W，然后再用一个放大器把功率从 150W 放大到 1500W。每个放大器获得 10dB 的增益（注：用“分贝”做单位时，放大倍数称之为增益），这是比较真实的数据。

记住 10 为底的幂的对数，就等于这个幂的指

数。你会发现求 100 的对数几乎不用计算器，因为 100 是 10^2 ！把功率之比转化成像 10、100、1000 等就非常有利（这些数的对数分别是 1、2 和 3）。

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 的输出功率作为基准功率，我们想对比天线的功率和放大器的功率。再次使用方程 15-2，帮助我们回答这个问题。

$$\text{dB} = 10 \log(P_1/P_0)$$

$$\text{dB} = 10 \log(150\text{W}/1500\text{W}) = 10 \log(0.10)$$

$$\text{dB} = 10 \times (-1) = -10$$

信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。如果你的电缆在合理的长度内有 10dB 的损耗，显然，这可不是个好消息。



图 15-3 这组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。

$$dB = 10 \log\left(\frac{4mW}{2mW}\right) = 10 \log(2)$$

$$dB = 10 \times 0.3 = 3.0$$

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 15-4 将帮助我们解决这个问题。

$$dB = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

$$dB = 10 \log\left(\frac{20W}{10W}\right) = 10 \log(2.0)$$

$$dB = 10 \times 0.3 = 3.0$$

所以收发信机的调整使我们的功率增加了 3dB。

如果我们用 20W 作为基准功率，情况又是如何？

$$dB = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

$$dB = 10 \log\left(\frac{10W}{20W}\right) = 10 \log(0.5)$$

$$dB = 10 \times (-0.3) = -3.0$$

负值代表什么意思呢？功率减小了 3dB！所以功率电平作为基准强度是非常重要的。

假如你测量另一台收发信机的输出功率，测得功率是 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，你期望结果是什么？功率改变了多少分贝？再次使用方程 15-4 帮助我们解决这个问题。

$$dB = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

$$dB = 10 \log\left(\frac{50W}{100W}\right) = 10 \log(0.5)$$



$$dB = 10 \times (-0.3) = -3.0$$

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？

$$dB = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

$$dB = 10 \log\left(\frac{40mW}{5.0W}\right) = 10 \log(8.0)$$

$$dB = 10 \times 0.9 = 9.0$$

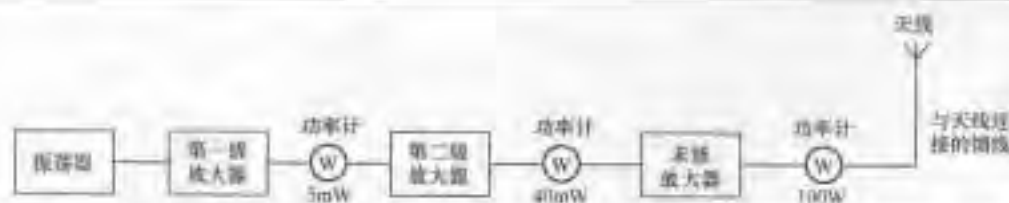
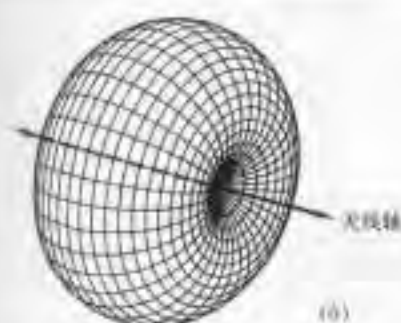
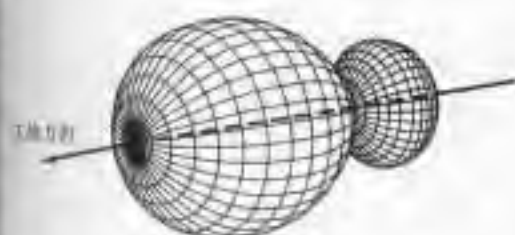


图 15-6 一个简单的业余无线电收发信机放大振荡器的信号，然后把信号供给天线。它使用了多级放大。其中一级的输入功率是 5mW，从这一级输出的功率是 40mW。正文叙述了计算这个放大级的增益。

我们有时使用理论上完美的天线作为这种比较基准。这种假想的完美的天线是悬浮在空中的一点，它远离地表，在对其他电台发送信号时，天线附近没有物体干扰它的发射（真正的天线受其他



(A)



(B)



(C)

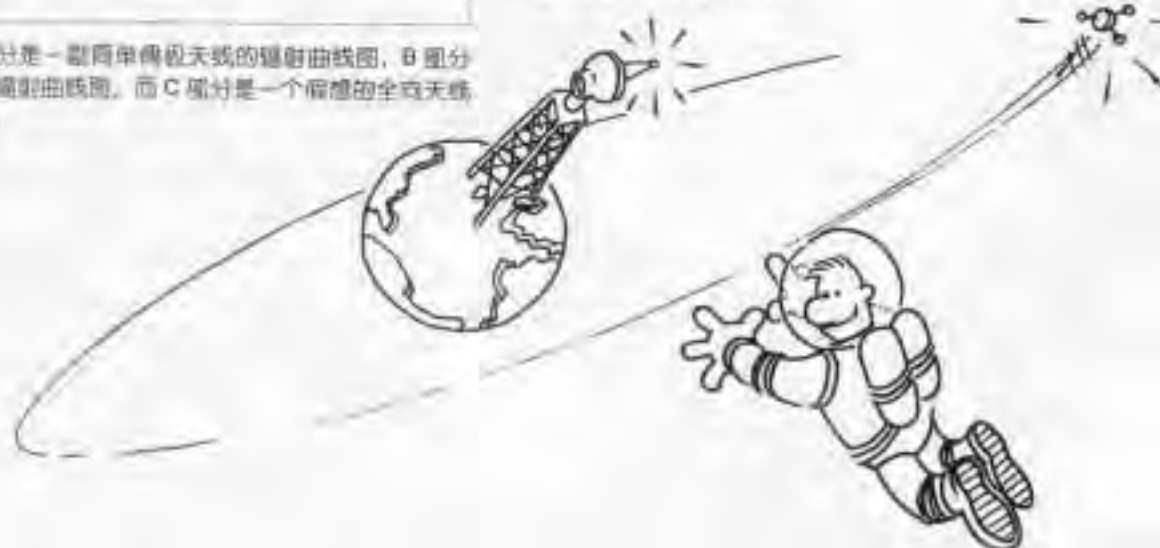
图1 A部分是一副简单偶极天线的辐射曲线图，B部分是一副定向天线的辐射曲线图，而C部分是一个假想的全向天线的辐射曲线图。

物体的影响，比如地面、树木、建筑物和山脉）。我们把这种假想的完美的天线叫做全向天线。加在分贝后面的小写字母 i 告诉我们，在比较天线发射功率时是采用假想的完美的全向天线发出的功率作为基准功率。有些天线工程师计算出 SSB 天线达到 9dBi 的增益。这意味着 SSB 天线在某一个方向上的发射功率比全向天线的发射功率多 8 倍。那么我们前面提到的 LSB 天线和全向天线相比，获得的增益又是多少呢？嗯，我们知道 SSB 天线和 LSB 天线相比，获得 3dB 的增益，那么 LSB 天线获得的增益就一定是 6dBi 了。

有时把我们的天线和一个有实用价值的天线相比，比与假想的天线相比更好。很多爱好者使用半波偶极天线，这是用作对比的好的标准（不用担心这些天线是什么形状，或者怎样做这些天线）。在分贝后面加小写字母 d 表示我们用作对比的是一副偶极天线。那么一副“Triple-Loop Sender”天线（5dBd 增益）和一副“TR35B”天线（2 dBd 增益）相比情况如何呢？显然，“Triple-Loop Sender”天线信号的强度是“TR35B”天线的 2 倍。

你明白吗？我们规定一个标准的基准，这样我们对放大器、天线或其他系统进行比较。在学习电学时，你还将看到一些组合，比如 dBm, dBW, dBi 或者 dBd。当你学到这些时记住，除了分贝的测定，你要知道作为基准的功率。

我们也常在分贝后加其他字母。每个字母表示在计算中作为基准的量。在今后学习更多电学知识的过程中你会逐渐学到。当你碰到分贝值后加一个额外的字母，设法断定它多半是基准功率。如果你对字母不熟悉，可以询问其他的无线电爱好者，你也可以查阅电学字典。



第三单元

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。

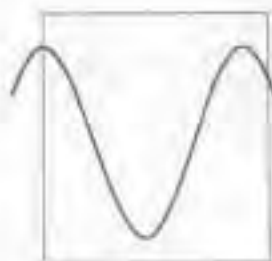
我们学习直流电路时，已经了解了电路电阻。当所有信号都是稳定不变的信号时，电阻是一个重要的电路条件。然而，大多数电路包含的信号往往都在不断地改变。电路中即使电流方向不变，其大小也可能随时间的变化而增大和减小。其他电路中电流的方向也常常不断地改变。我们把方向发生改变的信号叫作交流（AC）信号。

电感器和电容器是变化信号的电路中用于特殊目的的元件。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，我们称之为电抗。电抗用来控制电路中交流电的大小。

电场和磁场对初学者理解电容器和电感器如何工作非常重要。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。交流电学正是研究不同的电路元件具有的正弦信号效应：

交流电学初步知识

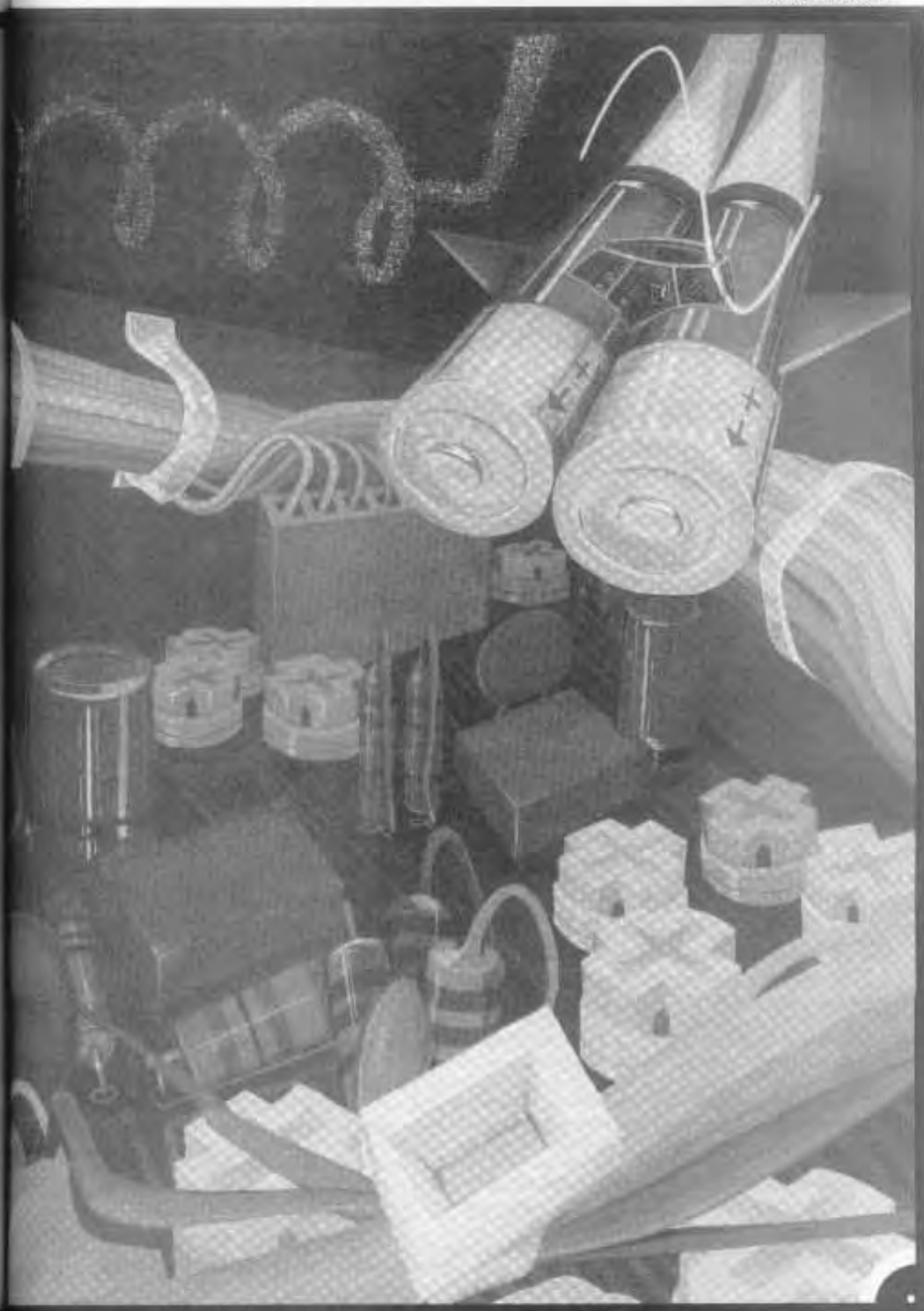


交流电学是研究不同的电路元件具有的正弦信号效应的

这一单元你将学习：

- 所有的交流信号都有确定的波长和频率
- 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作电抗
- 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，我们称这个电路发生了谐振

电路
的



第 16 章

频率和波长

一、直流信号的电流只沿一个方向流动

在第二单元中，你学习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 16-1 是一个简单电路的电路图。有电池、1 个开关和 2 个电阻。按惯例称电流方向，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例称电流的方向相反。

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。

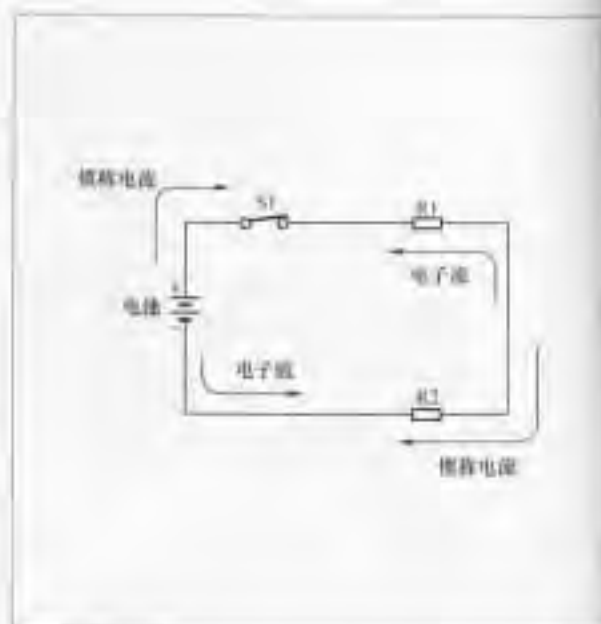


图 16-1 这个简单的直流电路有着稳定不变的电流。电子从电池的负极流出，经过电路回到电池的正极。



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。

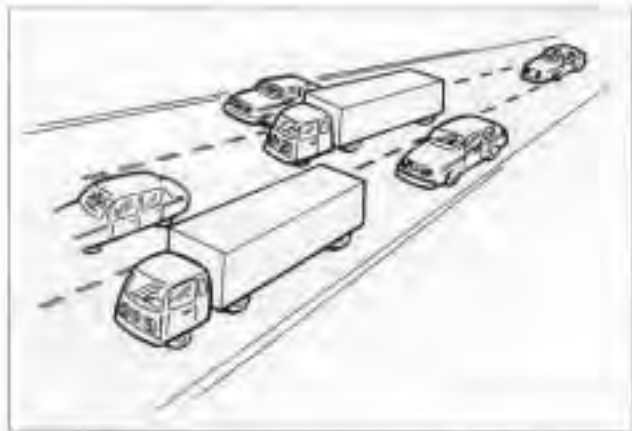


图 16-2 你可以把简单的直流电路想象成类似于一条高速公路，所有的车在相同的速度下向同一个方向运动。

二、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随电路状态的改变而发生变化。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 16-3 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。

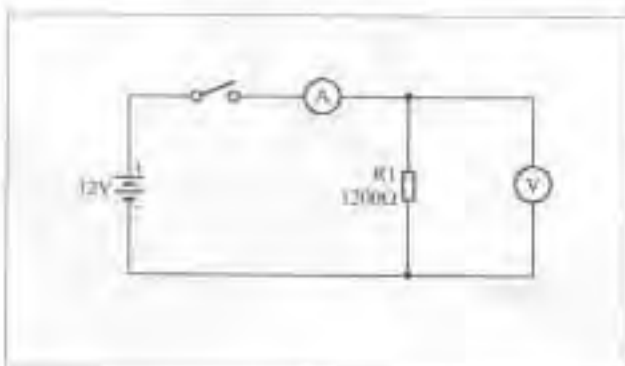


图 16-3 每次改变开关的状态，这个电路中的电压和电流就会发生变化。电压表测量电阻两端的电压，电流表测量流过电阻的电流。

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，而当开关闭合时，电流表的显示立即变成了 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 16-4 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 16-4 中显示的是一个矩形波信号。



图 16-4 假设我们在图 16-3 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，左侧纵轴或称为 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 R_1 的电流。

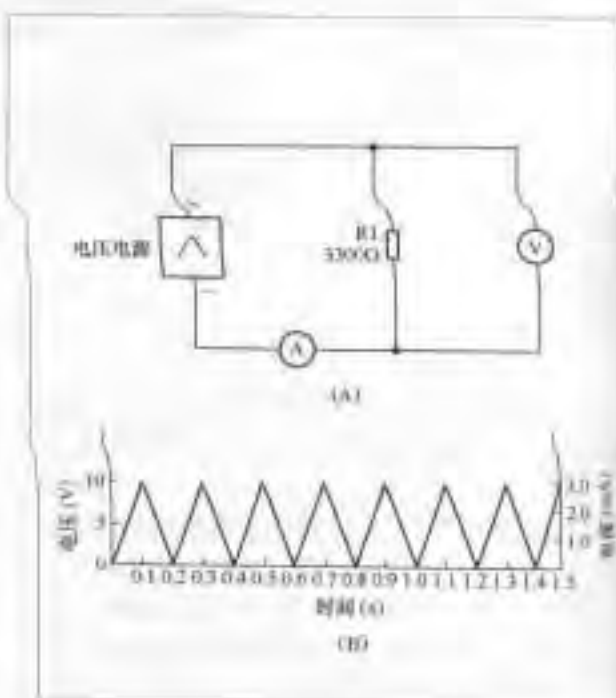


图 16-5 图 16-5 (A) 部分表示的是一个电源电压有规律地增大和逐渐减小的电路。这个电源产生三角形波形。图 16-5 (B) 部分显示的是这个三角形波形的电压和电流。



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 16-3 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，车辆必须停止。

然而，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 千米立即加速到 55 千米，需要几秒钟的时间进入到正常前进速度。

有些电路中电压和电流是逐渐增加，降低也是逐渐减少。图 16-5(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 16-5(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，我们称之为三角波，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。

三、如果电流方向改变，就变成了交流信号

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16-6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，你控制着一般车道上的红灯停，绿灯行。图16-6中显示有4股车道对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股车道为东西向东的车辆开放，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。

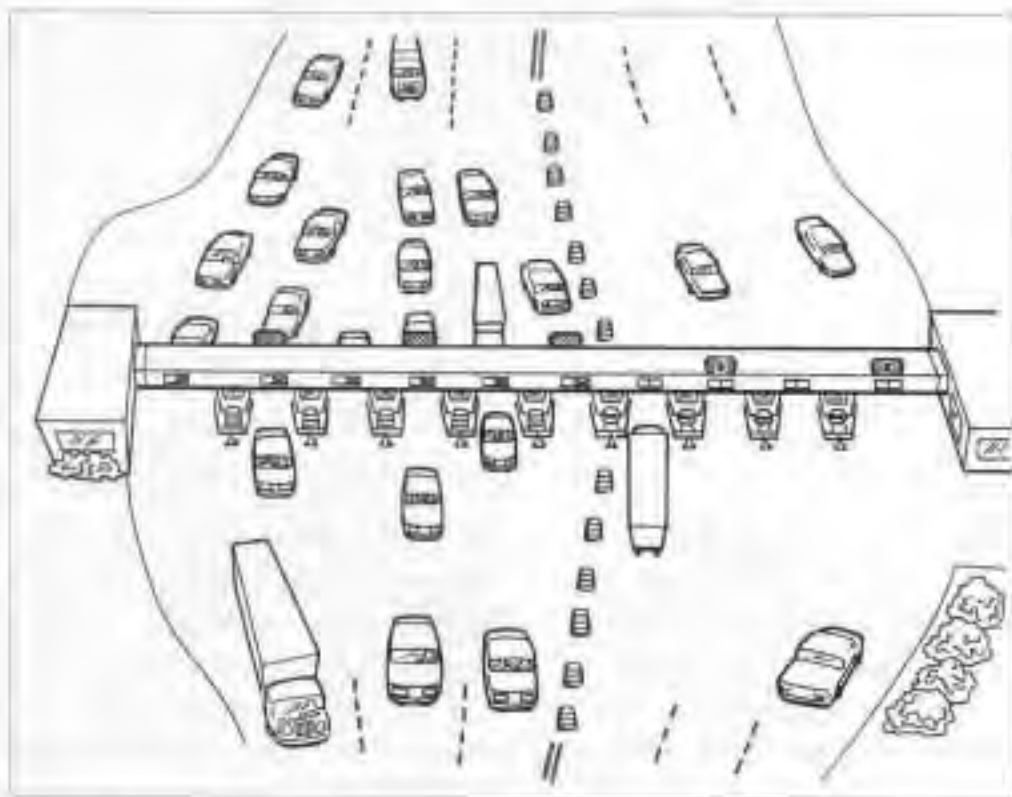


图16-6 通过大桥收费广场的操作可以帮助你理解变化方向的电压和电流的电路。当车辆向东行驶时，在图中表示为由底部向广场靠近。这些车刚刚经过大桥。当它们接近广场时，它们看到红灯和绿灯。它们可以通过绿灯的车道，而那些红灯的车道是为相反方向行驶的车辆开放的。当它们向西行驶时，图中显示是从顶部向广场靠近。如图中显示，有6股车道为向西行驶的车辆开放，而只有4股车道为向东行驶的车辆放行。过了一段时间后，向西放行的2股车道关闭而改成为向东行驶的车辆放行。车辆经过的这2股车道变成了相反的通行方向。这2股车道的通行方向的改变，取决于每个方向上的车流量的多少。

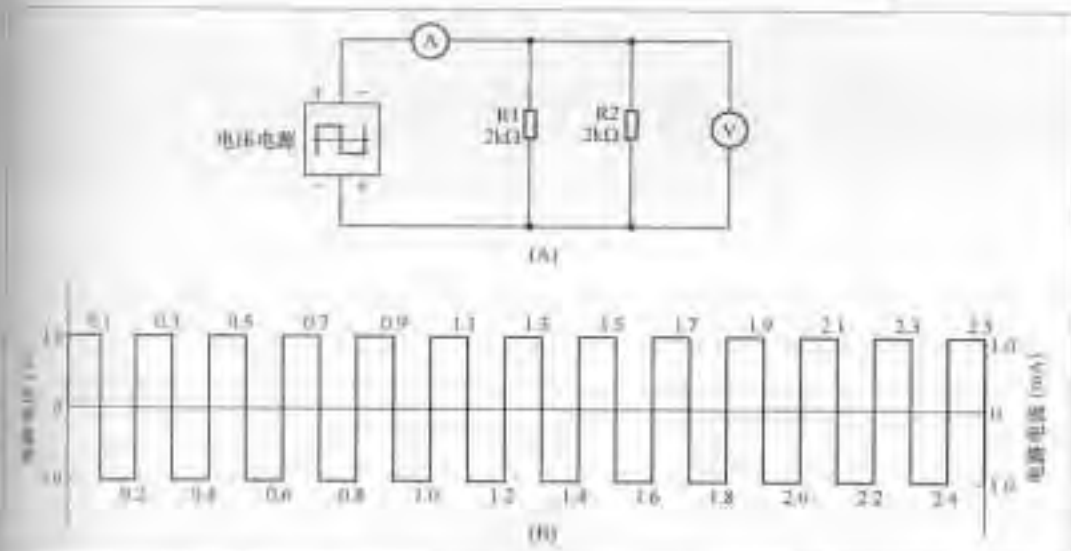


图 16-7 在图 A 电路中, 电源电压的极性每秒翻转 10 次, 两个电阻并联连接, 电压表和电流表用来测量电路的状态。(B) 图表示电阻器两端的电压和总的电路电流。

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, 我们称之为交流电。我们把交流电简写成 AC。

图 16-7 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, 因此我们把电阻并联连接, 我们用一个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 16-7(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, 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 16-7(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 16-7(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的形状。图 16-7(B) 中的电源产生的是一个方形 (或称矩形) 的波形。我们称之为方波信号。

很多交流信号具有规律的重复形状。看图 16-7(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 16-7(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。这是为了纪念德国海因里希·赫兹, 一位德国的科学家, 对无线电波进行了实验。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 1000Hz, 或者 1 秒内有 1000 个完整的周期。5 兆赫 (MHz) 指每秒内有 500 万个周期。

$$f = \frac{1}{T} \quad (16-1)$$

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 16-1 来计算图 16-7 中波的频率。

$$f = \frac{1}{0.2s} = \frac{5}{s} = 5\text{Hz}$$

这个方波的周期是 0.2 秒, 频率是 5Hz。

四、正弦波表示平稳变化的交流电

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 16-8 显示的是几个可能的交流电波形。

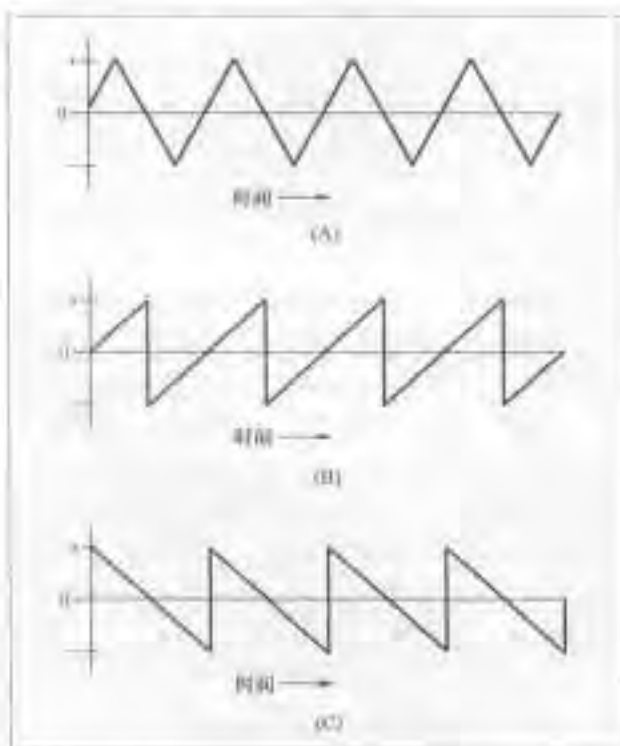


图 16-8 这些图表示的是几种交流电的波形。在图 16-8 (A) 中的信号是三角形波形，(B) 中是锯齿形斜坡波形。电压从负峰值之间增大，当它到达它正峰值时（或电流）突然下降到负峰值。然后电压（或电流）再开始逐渐增加。图 16-8 (C) 中的信号是反向锯齿形波形。在这个例子中，电压突然增加到它的正峰值，然后逐渐降低到它的负峰值。

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 16-9 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，我们开始标记另一个完整的周期。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：中国家庭电路的交流电的频率是 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。

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 1080kHz。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 λ 表示波长。所有电磁波辐射都以 300 000 000m/s 的光速穿过空间，你可以用科学记数法表示为 3.00×10^8 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

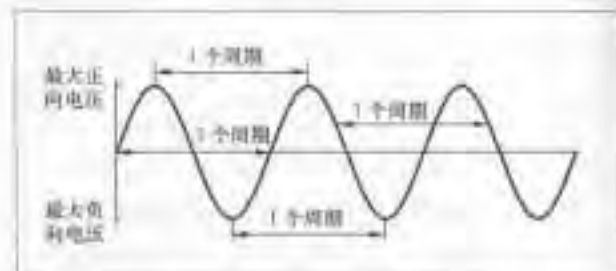


图 16-9 这是正弦波交流电的波形。这是交流信号中最常见的一种波形。在波形上不同点划分了周期。注意，从哪个点开始测量周期无关紧要，无论从哪里开始作为起点，你都必须测量到下一次波形中出现的同样的位置。

$$c = f\lambda \quad (16-2)$$

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);

λ 是波长, 单位是米 (m)。

你可以画出一个这个方程的“圆”。方程“圆”帮助你解决频率或波长的方程。利用图 16-10 的方程“圆”写出方程 16-2 和方程 16-4, 即

$$f = c/\lambda \quad (16-3)$$

$$\lambda = c/f \quad (16-4)$$

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 16-4 求出频率为 7.123 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 16-3 求出波长为 80.5 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 1 A 的电流, 测出电阻产生的热量, 接着,

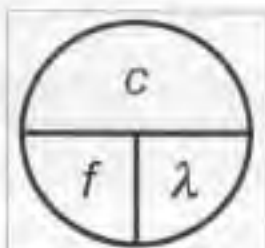


图 16-10 这是电磁辐射或者无线电波的速度、频率和波长关系的方程“圆”。用手覆盖住你想计算的量, 则“圆”中剩余部分表示如何去计算。

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 1 A 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 100 V, 那么它的均方根电压就是 70.7 V (这个信号也要达到 100 V 的负峰值)。这个正弦波信号的峰间电压是 200 V。图 16-11 的图表中指出了正弦波信号的峰值、峰间值和均方根值。

$$\text{均方根值} = 0.707 \times \text{峰值} \quad (16-5)$$

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。

$$\text{平均值} = 0.637 \times \text{峰值} \quad (16-6)$$

这个方程也可应用于正弦波电压和电流。

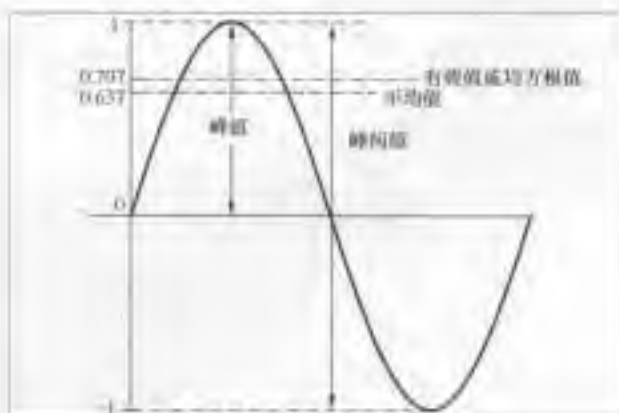


图 16-11 这个正弦波上标出了峰值、峰间值、均方根值和电压平均值。这里的均方根值和平均值只应用于正弦波信号。

五、正弦波和旋转轮

正弦波是交流信号中一个非常重要的波形。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 16-12 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；第二，图中没有突然变化或者棱角。

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 16-13 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° 、 180° 和 270° 的位置。

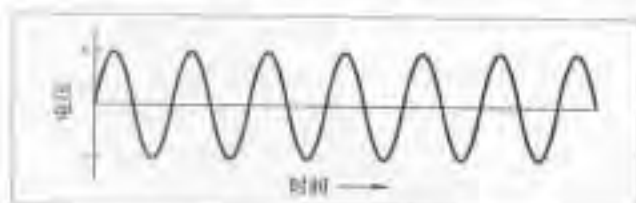


图 16-12 这张图显示一个正弦波电压如何随时间而变化（这张图也可以表示电流）。电压值在正峰值和负峰值之间变化。这些电压以固定的速度重复变化。

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线，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，观察车轮的边缘）。

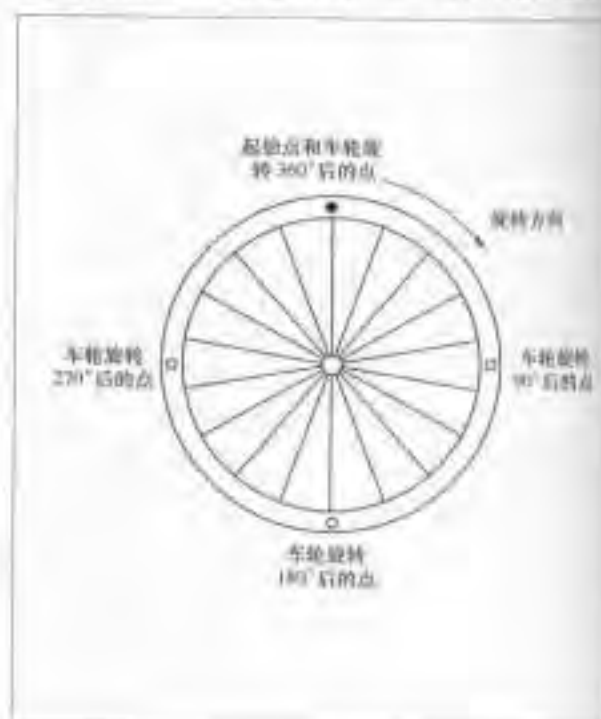


图 16-13 这个旋转的自行车车轮将帮助你理解正弦波的形状。车轮顶部的圆点表示旋转的起点，空心圆点表示车轮旋转 90° 、 180° 和 270° 后的位置。当车轮旋转 360° 时，圆点回到车轮顶部。

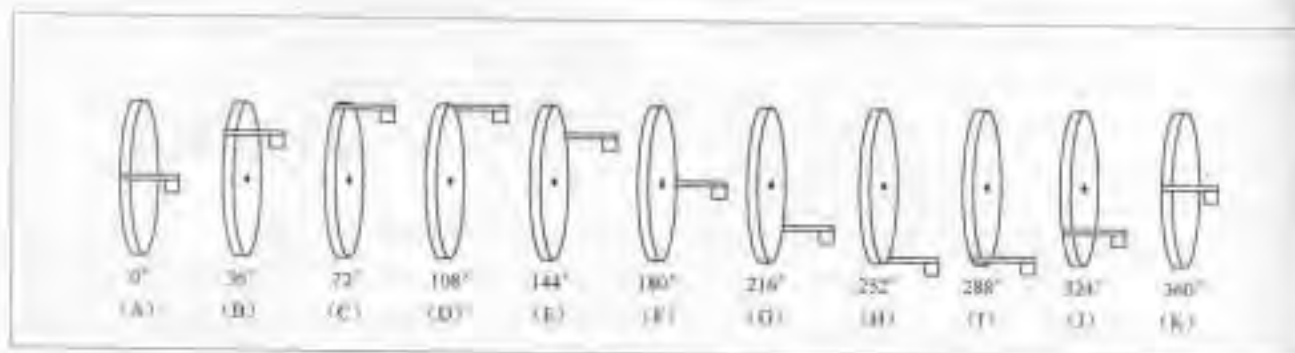


图 16-14 这一连串图表示旋转车轮的快照。标记将帮助你想象旋转。每张照片间隔 0.1 秒，每张照片车轮旋转 36° 。注意标记看来像是上下移动，好像旋转着离开你。标记到达顶部或底部花费的时间比运动穿过车轮中间的时间要长。



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 16-14 是一连串的“快照”，冻结车轮运动。图 16-14 中显示车轮向离开你的方向旋转。我们把标记扎在轮胎上，这样这个标记便于你观察车轮的旋转。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° 。从图 16-14(A) 的 0° 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，车轮 1 秒钟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相似。

表 16-1

图 16-14 中所列角度的正弦函数值

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

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。

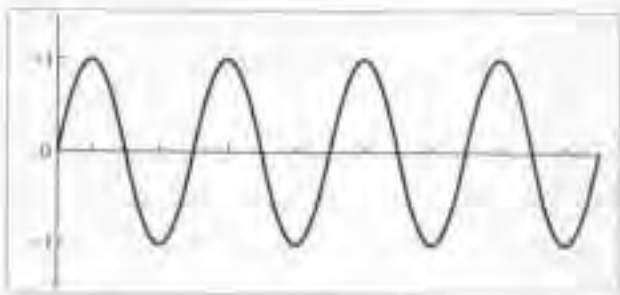


图 16-15 这张图表示标记在图 16-14 中车轮的移动。此时车轮在你的前面从左向右运动。

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 16-15 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 16-14 中每个角度的正弦，比较你的计算结果和表 16-1 中的数据。

六、转速与波的频率的关系

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 16-16。第一个轮子每秒钟转动一周，第二个轮子转动的速度是第一个轮子的两倍，一次它每秒钟转动两周。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 16-17 显示的两张图片就是描述的这个运动。

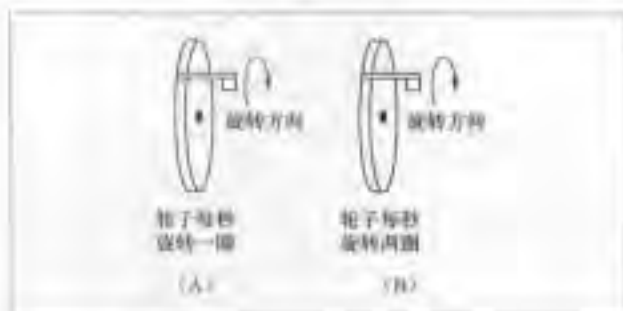


图 16-16 两个不同转速的轮子产生的正弦波的频率不同。图(A)中每秒钟转动一周，而图(B)中轮子每秒钟转动两周。

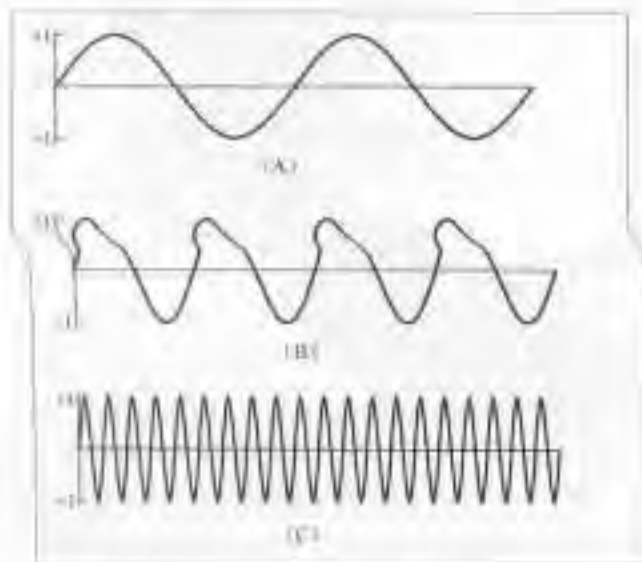


图 16-17 当图 16-16 中的两个轮子在你面前运动穿过房间，带给它们的运动轨迹如图中的(A)和(B)。图(B)中的正弦波的频率是图(A)的 2 倍。图(C)中是由一个转速是(A)的 10 倍的轮子旋转产生的正弦波。

注意，图中 16-17(B) 来回运动两周的距离和图 16-17(A) 中来回运动一周的距离相同。因为第二个轮子转动的速度是第一个轮子的 2 倍。

如果另一个轮子转动的速度是第一个轮子的 10 倍又会怎样呢？图 16-17(C) 描述的就是这个运动的图像。这个图像说明图 16-17(A) 轮子来回运动一次，图 16-17(C) 来回运动 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。假设图 16-17(A) 显示的正弦波的频率是 1Hz，那么图 16-17(B) 的正弦波的频率就是 2Hz，图 16-17(C) 的正弦波的频率就是 10Hz。

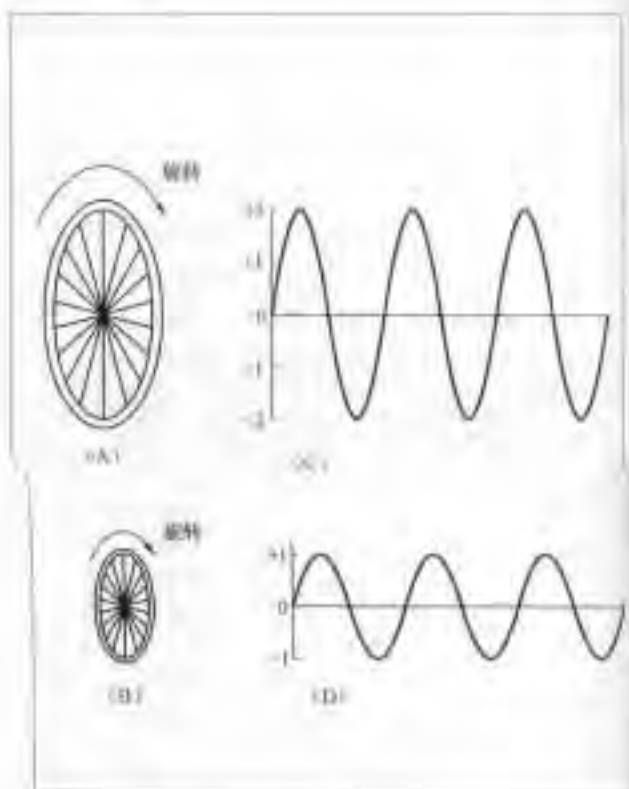
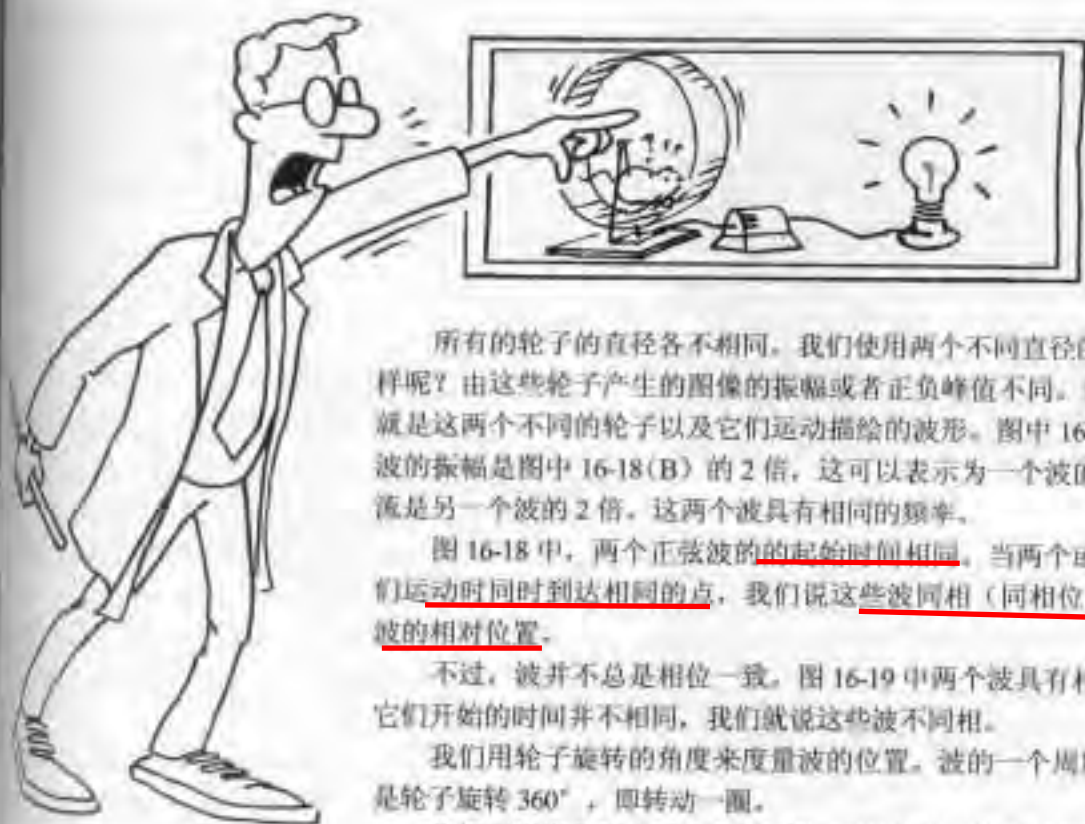


图 16-18 图中(A)的轮子的直径是 1.0m，(B)中轮子的直径是 0.5m。当两个轮子在你面前运动时，它们产生的正弦波图形如图中的(C)和(D)。图中(C)的正弦波的振幅达到(D)的正弦波振幅的 2 倍。

图 16-18 是同时穿过中正弦波 (90



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 16-18 表示的就是这两个不同的轮子以及它们运动描绘的波形。图中 16-18(A) 的正弦波的振幅是图中 16-18(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率。

图 16-18 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时同时到达相同的点，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 16-19 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° ，就是轮子旋转 360° ，即转动一圈。

我们同样用角度来度量相位。图 16-19 中显示的两个波相位相差 90° 。第二个波到达 0 点时，第一个波到达 90° 。图 16-20 中的两个波的相位相差 180° 。

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° 和 180° 之间。如果你发现一个相位角超过 180° ，你可以用这个角度减去 180° ，再利用类似轮子来作比。轮子上的两点间的距离不可能超过轮子周长的一半。

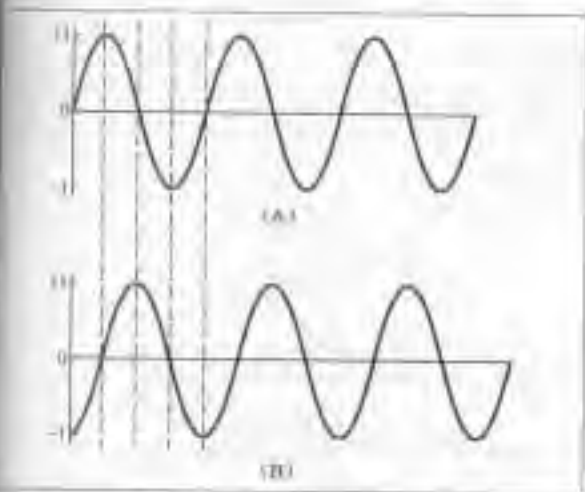


图 16-19 这两个正弦波具有相同的频率，然而这两个波不是同时开始的。它们的相位相差 90° 。图 (B) 中的正弦波穿过 0 点时，图 (A) 中正弦波到达正的最大值。当图 (B) 中正弦波开始的时候，(A) 正弦波已经穿过了四分之一周期 (90°)。

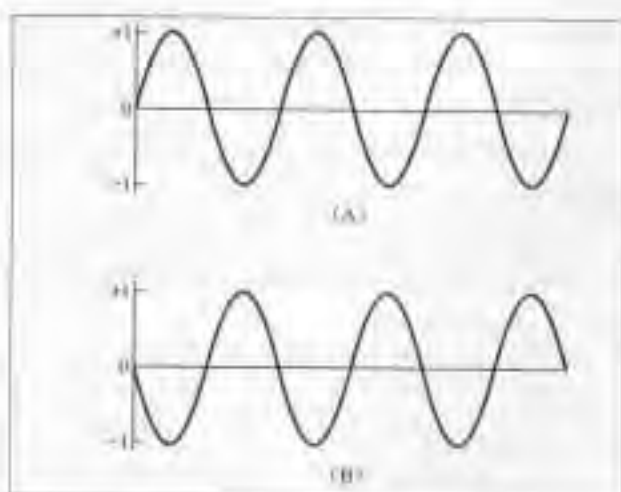


图 16-20 这些正弦波具有相同的频率，但它们的相位相差 180° 。当第二个正弦波穿过 0 点向它的负向最大值运动时，第一个正弦波穿过 0 点向正向最大值运动。注意，当一个波到达它的正向最大值的时候，另一个波到达它的负向最大值。

第17章

电容器

一、存储电荷，产生电场

在这一章中，你将学习电容器，电容器有点像电的“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，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。河中的水坝存储水，存储的水的势能可以推动发电机发电。

你也许想知道电容器是如何存储电能的呢？图17-1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。这个示意图准确地画出了电容器的结构，



图 17-1 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。正文中解释了电路中电能是如何存储在电容器中的。

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。当你开始闭合开关时，可以用欧姆定律计算出电路中的电流。你还记得欧姆定律吗？没关系，电压等于电流乘以电阻。写出解电流的方程，然后代入图17-1中的电压电阻。

$$I = \frac{U}{R} \quad (17-1)$$

$$I = \frac{20V}{100\Omega} = 0.2A = 200mA$$

但是，这个电流不能持续很久。电子到达电容器，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，电子到达电容器中导体的表面，这些电子增加电力，排斥对面导体表面的电子；第二，电池正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17-2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。

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极板上获得更多的电子。

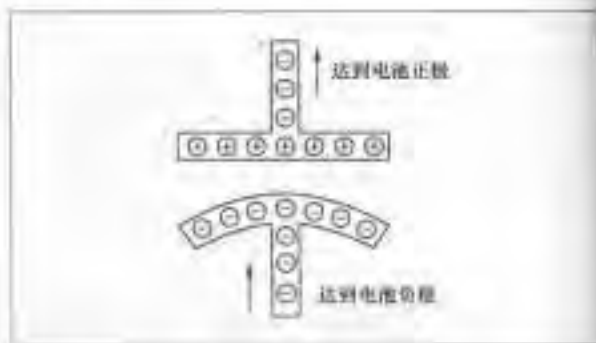


图 17-2 电容器的一个极板获得负电荷而另一个极板获得正电荷。最终，不再有更多的电子能流入任一极板，也不再有电子离开正极一侧的极板。

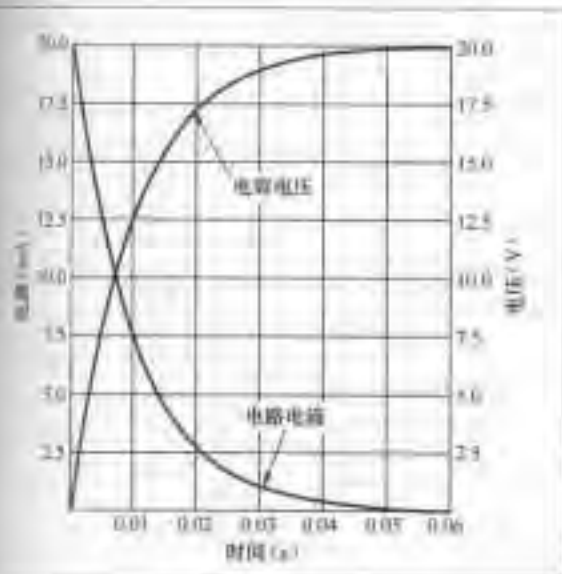
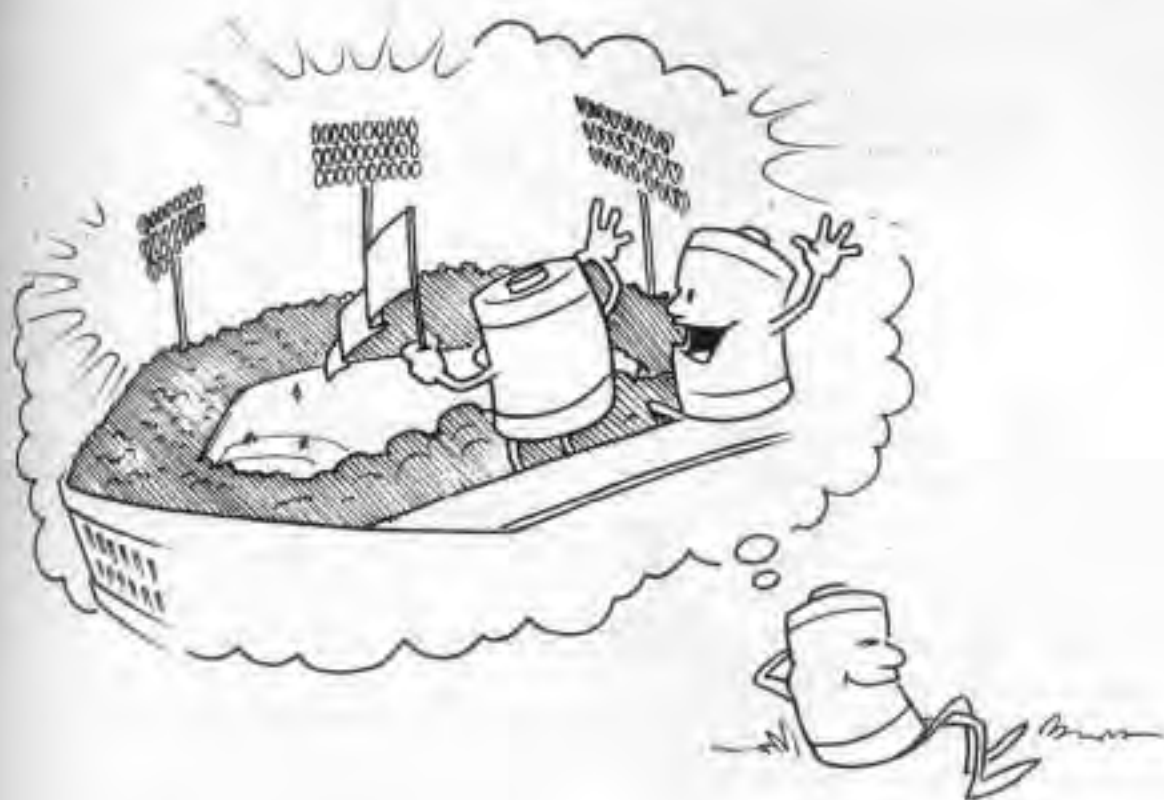


图 17-3 这张图描述了通过图 17-1 电路的电流，也描述了电容器极板的电压。

图 17-3 显示的是电路中电流的图表，但你刚开始开关时，电流是 20mA，然而，电流很快下降。

图 17-3 中也表示了电容器两个极板之间的电压。当刚闭合开关时，两个极板间没有电压，而当电

荷不断堆积时，两个极板间有了电压，不过，当这个电压等于电池的电压时，电路中就没有了电流。

图 17-3 中的时间、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，于是，在两个极板间建立起一个电场。

电容器两个极板之间的电场表现为存储的电能。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的，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。

二、增加极板面积 增强电场强度

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。高电压存储的电荷较多，得到的能量也会更多。

的电子，得到更多的正电荷。

图 17-4 显示的是两个用铝箔作为极板的电容器。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 17-4(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 17-4(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。电容器 (B) 拥有的电荷是电容器 (A) 拥有电荷的 10 倍，电容器 (B) 的电场强度比

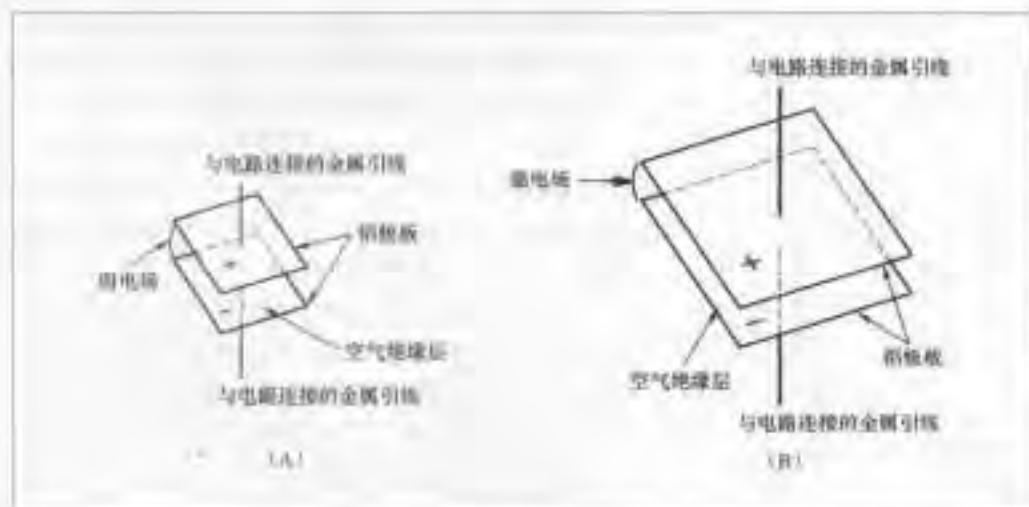


图 17-4 图 (A) 中电容器的极板面积较小，它拥有较少的电荷，两个极板间的电场也微弱。电容器 (B) 比电容器 (A) 要大，当连接到相同的电压上时，电容器 (B) 拥有的电荷更多。电容器 (B) 两极板间的电场也比电容器 (A) 两极板间的电场强。

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 1 升的瓶子，你也许想要一个 2 升甚至 4 升的水瓶。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

要强 10 倍。

圆形陶瓷电容器有两个金属极板，中间是一个薄陶瓷绝缘层。每个极板上接有金属引线，这样就可以把它们连接在电路中。图 17-5 显示的是一个圆形陶瓷电容器的剖视图。

绝缘层的材料和厚度决定了电容器的最高安全工作电压。如果你把一个电容器接到电压超过绝缘层所能承受的电压，将会击穿绝缘层，毁灭



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。

图 17-5 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，或者是避免电容器受到其他有害的影响。

三、增加极板数量以增加极板的面积

面积大的极板可存储更多的电荷，极板间的电场更强，存储的电能量也更多。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平面中间。图 17-6 表示的就是用这个方法做成的电容器。



图 17-6 这个电容器有两个对折在一起的极板，可以节省空间。

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 17-7 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，或者在你调谐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，而当极板不重叠时，电容器的容量最小。

图 17-8 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。



图 17-7 这个电容器有两组极板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。



图 17-8 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。

还有另一个减小电容器包装大小的方法。如果不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箔片。当你组装你的电容器时，更迭这些短条的方向，这样第 1 和第 3 层的箔片连接在一侧，而第 2 和第 4 层箔片连接在另一个侧。

图 17-9 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 17-9(B) 显示的是卷成后的电容器。

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。

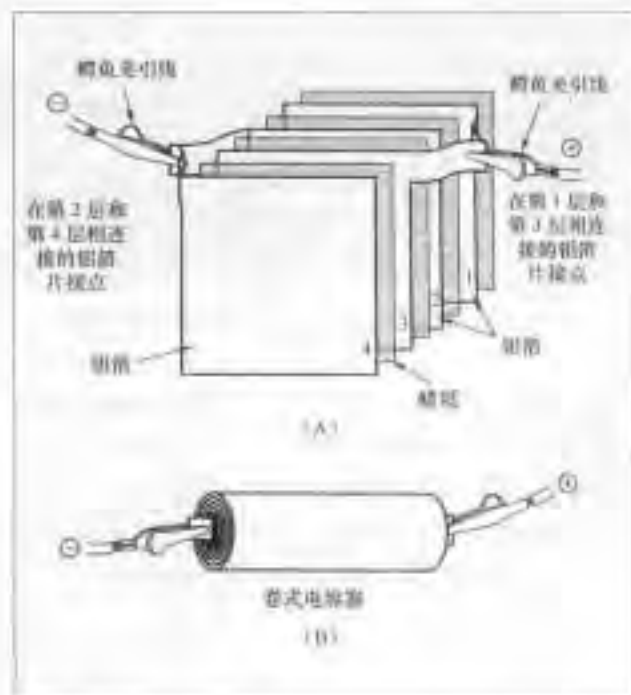


图 17-9 你可以做一个实验用的电容器。图中 (A) 部分表示的是一个铝箔和夹在其中的蜡纸的“三明治”。图中 (B) 表示的是如何把电容器卷成一个圆柱体。

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上，这将非常危险。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。



四、减少极板间距 增强电场强度



17-10 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。

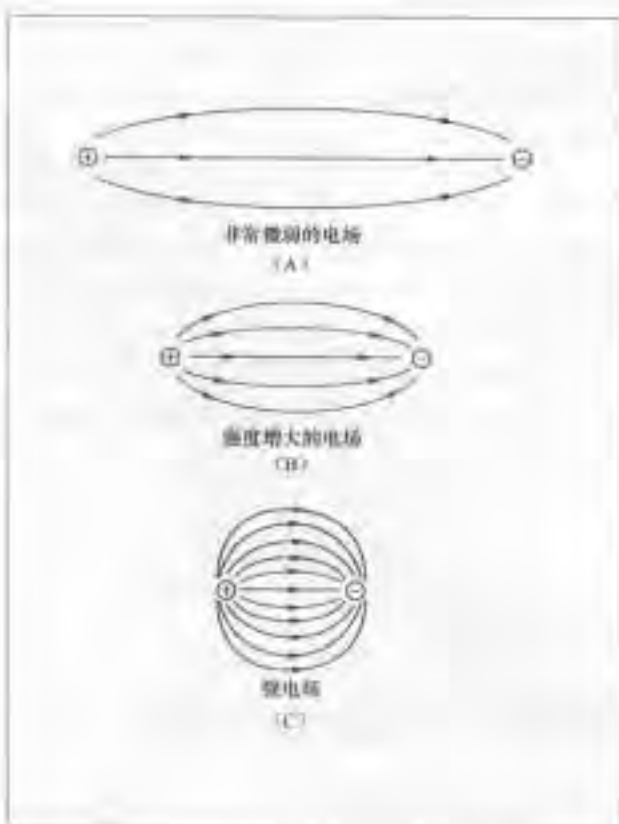


图 17-10 一个正电荷和一个负电荷之间逐渐相互靠拢。图 17-10 (A) 中，它们离得很远，彼此之间的吸引力微弱。它们之间有一个微弱的电场。在图 17-10 (B) 中，我们把它们靠得较近。现在它们之间的引力变强，它们之间的电场强度也变强。在图 17-10 (C) 中，两电荷靠得很近。现在它们之间有很强的吸引力，同时也存在一个很强的电场。

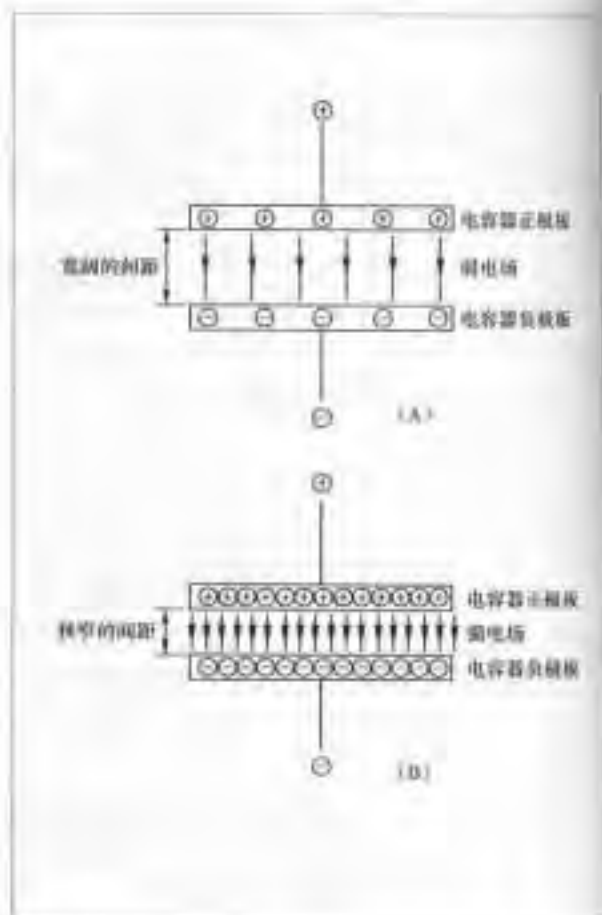


图 17-11 图 (A) 中的电容器极板之间的距离较宽。我们将电池和它相连，给电容器充电。这样在它的极板上分别带上一些正、负电荷。因为极板之间距离较宽，所以它们之间的电场微弱。在图 (B) 中，我们把两个极板靠拢，极板的尺寸规格不变。我们把这个新的电容器和给图 (A) 中电容器充电时一样的电池相连。这一次在电容器的负极板上有了更多的负电荷，正极板上的正电荷也同样变大。我们通过使极板的距离靠近来增强电场强度。

图 17-11(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极板靠拢。图 17-11(B) 显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 17-11 中, 8 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。但是, 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 17-12 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, 极板所拥有更多的电量, 也产生更强的电场。

其他电容器使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。

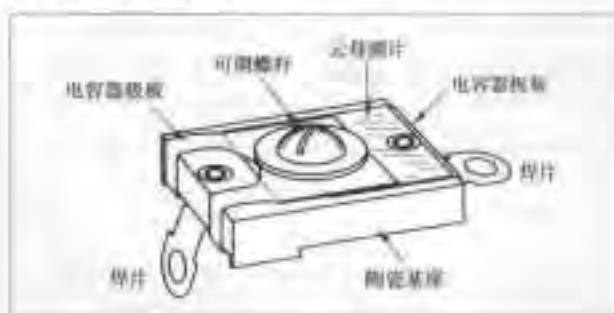
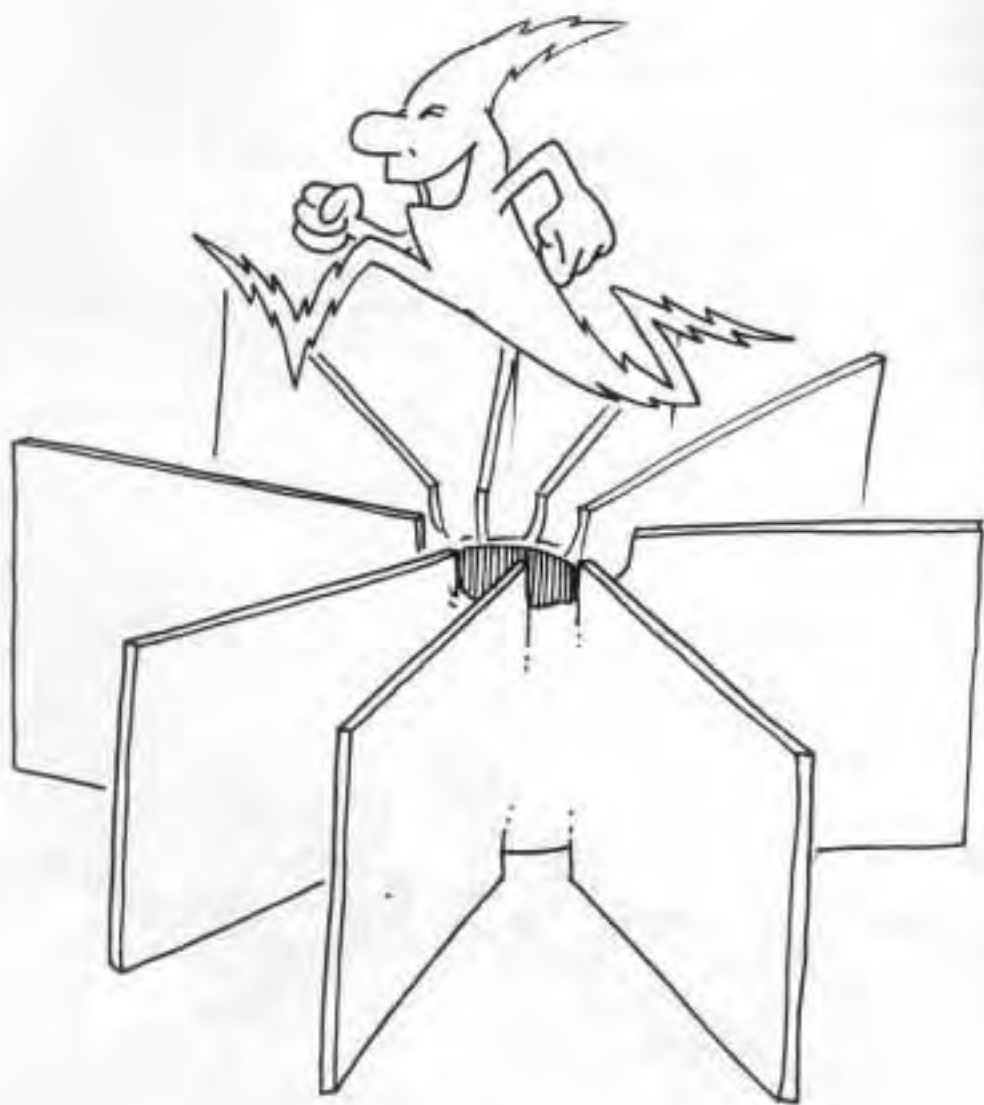


图 17-12 云母可变电容在两个极板之间使用了一层云母薄片。螺杆穿过极板和云母, 套在底部陶瓷上。当你向下旋紧螺杆时, 挤压电容器极板, 使它们靠拢。这样增加了电容, 在极板间产生较强的电场。



五、介电常数和电场强度



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，有一个极短暂的电流，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=0.000 025 4米=0.002 54厘米。

空气的击穿电压是每密尔21伏。假定你计划将一个电容用在电压为20伏的电路中，这意味着极板间的厚度至少是0.002 54厘米（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200伏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 4厘米。

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1000伏到5 600伏。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，瞬间放电将击穿绝缘层。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和5.9之间。这表示的是什么意思呢？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到5.9倍。

表 17-1

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
玻璃 (耐热玻璃)	4.8	535
云母 (红宝)	5.4	3800 ~ 5600
云母玻璃	7.4	250
纸 (皇家灰)	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 (熔炼品)	3.8	1000
聚四氟乙烯	2.1	1000 ~ 2000

表 17-1 列出一些常见的电介质。表格中列出了这些材料的相对介电常数和击穿电压值。击穿电压以伏每密尔为单位（伏/密尔）。

这些相对介电常数在工作频率为1兆赫时测定。通常，在你增加工作频率时介电常数减少，不过这种改变往往很小。



图 17-13 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。

六、决定电容大小的因素

在本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。电容是电容器存储电荷能力的量度。

电容的基本单位是法拉。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})，缩写为 μF ，以及皮法(10^{-12})，缩写为 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})作单位，缩写为 nF 。你应该熟悉这些公制的前缀。

3个主要因素决定了电容器的电容。其中，第

一个因素是极板的表面积。电容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17-14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。

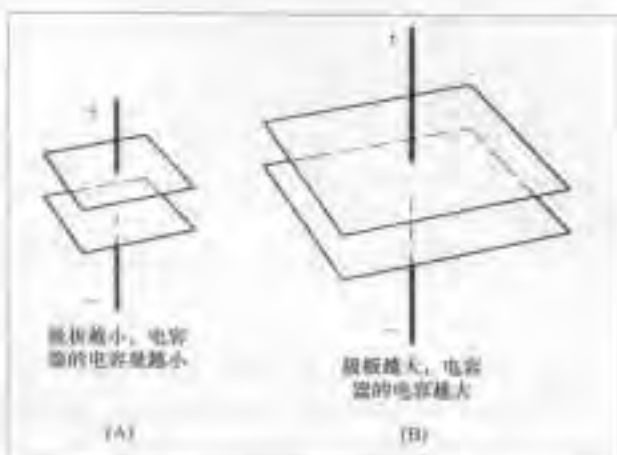


图 17-14 电容的变化直接随极板面积的变化而变化。如果其他因素都相等，电容器的极板表面积越大，电容器的电容量也越大。

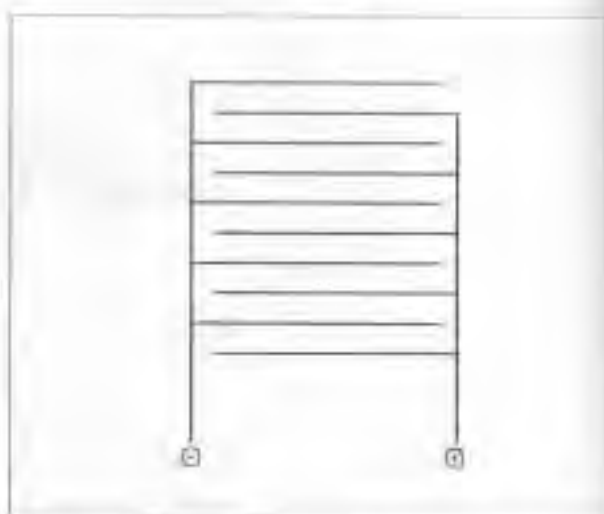


图 17-15 你可以连接多套极板制作更大表面积的电容器。

记住，你可以通过增加更多的电容器极板来增加电存储的面积。图 17-15 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。把很多细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，把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 17-16 显示的两个电容器极板面积相同，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 17-17 描述的两个电容器。它们具有相同的极板面积和极板间距离。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。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；你可以通过使用更好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质。

3 个主要因素 决定电容大小：

- 极板面积
- 极板间距离
- 电介质介电常数

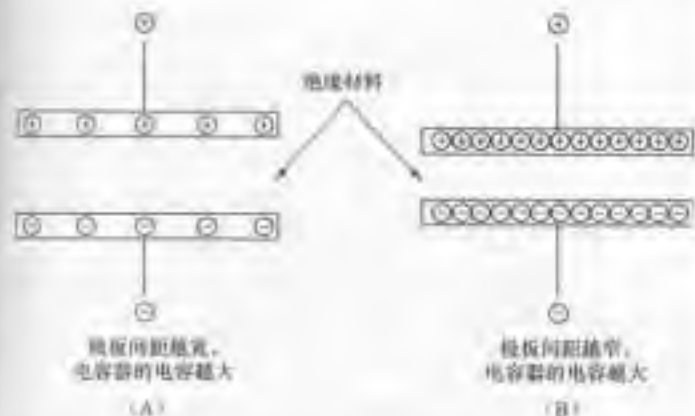


图 17-16 电容量与极板间的距离成反比。如果其他的因素相同，极板靠近的电容器具有的电容更大。

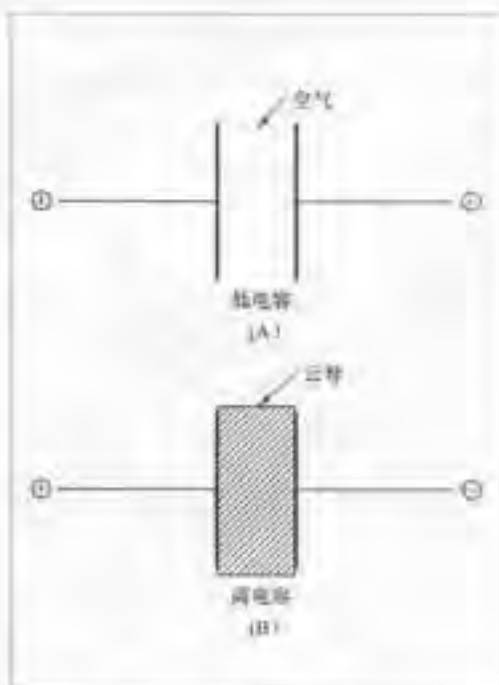


图 17-17 电容量取决于极板间电介质的介电常数。

七、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，作为音频旁路电容，一个便宜的陶瓷电容器可以工作得很好，而在射频振荡电路中则不要使用普通的陶瓷电容器。

本节说明普通电容器的构造方法和电介质材料，这些信息起引导的作用。这将帮助你理解为什么一个 $10\mu\text{F}$ 纸介电容器不是 $10\mu\text{F}$ 钽电容器的理想替代物。

你也许看到电容器击穿电压值给出的是直流工作电压。这是你可以安全连接到电容器上的最高电压。你选择的电容器的击穿电压（耐压）至少是你希望它承受的电压的两倍，这样就提供了一个安全余量。

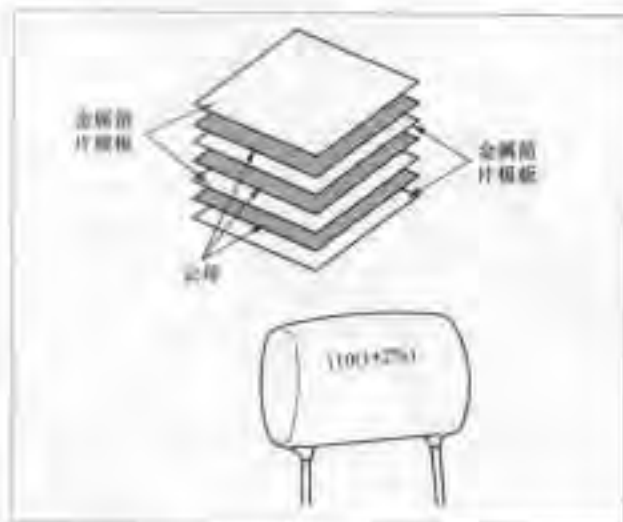


图 17-18 云母电容器有一层云母将金属箔电容器极板分开。间隔的薄片连接到电容器的引线。陶瓷封装保护器件防止灰尘和潮湿。

云母电容器由被薄云母片隔开的金属箔组成。图 17-18 为所示的结构。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。

云母的击穿电压（耐压）在每密尔 3 800V 到 5 600V 之间。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的原因。重要的是它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。

云母电容的电容量平均值范围在 1pF ~ $0.1\mu\text{F}$ 之间，而击穿电压值可能高达 35 000V。

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 17-19 展示了它的结构。这个电容器有塑料或者陶瓷封装保护。

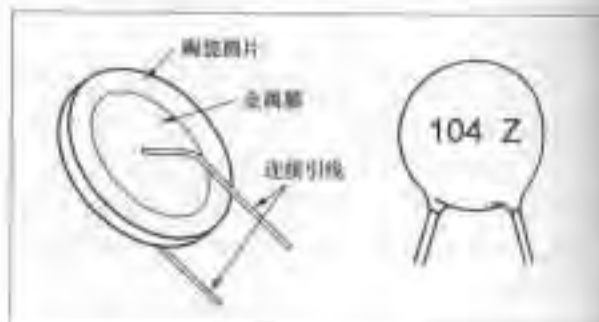


图 17-19 这张图显示薄片陶瓷电容器的结构。在小的陶瓷薄片两侧覆着金属膜构成电极。金属丝和金属膜相连，器件被塑料或陶瓷封装。

陶瓷电容器价格不贵而且很容易生产，很多电子电路使用陶瓷电容器。然而，你也不能把它们运用在任何地方。

普通陶瓷电容器的电容量会随温度的变化而改变。你不能把它们用在要求电容量温度稳定性真的电路中。

有些电容器具有负温度系数，意思是它们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。这种 NPO 电容器具有零温度系数。NPO 表示的是“negative-positive zero”（负-正零）。一个 NPO 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，NPO 电容器的电容量几乎不变。

你可以购买一个电容量在 1pF ~ $0.1\mu\text{F}$ 的陶瓷电容器。击穿电压值高达 1 000V 的陶瓷电容器是

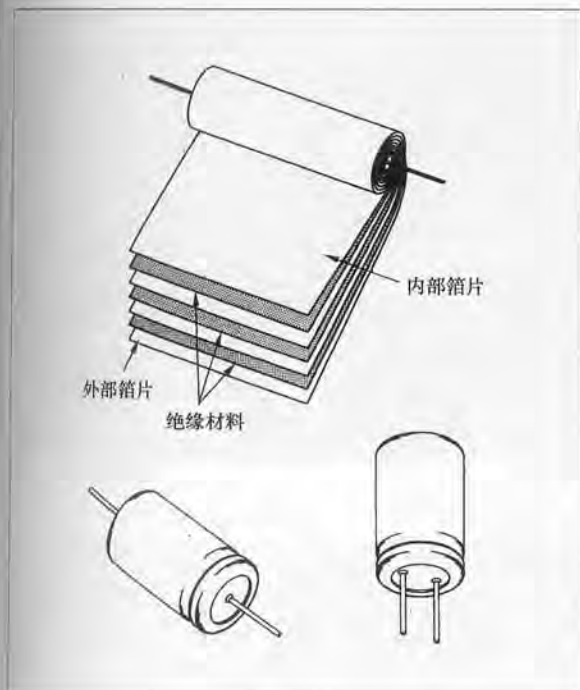


图 17-20 不少种类的电容器和纸介电容器的结构相同。电介质夹在金属箔极板之间构成电容器，卷起组件装入圆柱体内，然后用保护膜封装完成。纸介电容器使用绝缘纸作为电介质。塑料薄膜电容器使用聚酯薄膜或聚苯乙烯。化学药品浸泡过的纸加在铝箔间构成铝电解电容器。

非常普遍的。

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 17-20 所示。

电容器用塑料封装或者用蜡封装，这个最外层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点，这样外层金属箔可帮助电容器屏蔽射频能量。

纸介电容器的电容量的范围在 $500\text{pF} \sim 50\mu\text{F}$ ，它们的直流工作电压可达 600V 。

纸介电容器通常很便宜。对于给定的电容量，它们比其他电容器的尺寸更大，这在某些方面显得不太实用。

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。塑料材料使电容器能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，平均电容量在 $5\text{pF} \sim 0.47\mu\text{F}$ 。

铝电解电容器也采用类似的工艺结构。铝箔薄片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，电解电容器可以体积小而电容量大。

电解电容器的一根引线总是清晰地标上符号“+”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，你也会毁坏这个电解电容器。

电解电容器电容量的有效值在 $1\mu\text{F} \sim 100\,000\mu\text{F}$ (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式。相同的电容量下，钽电容器比铝电解电容要小，它们通常是水滴形状。

钽电容器的阳极或正极是一个小的钽丸，一层二氧化锰形成了固态的电解质，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。

环氧涂层给钽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”的原因。图 17-21 显示的就是一个钽电容器的结构。

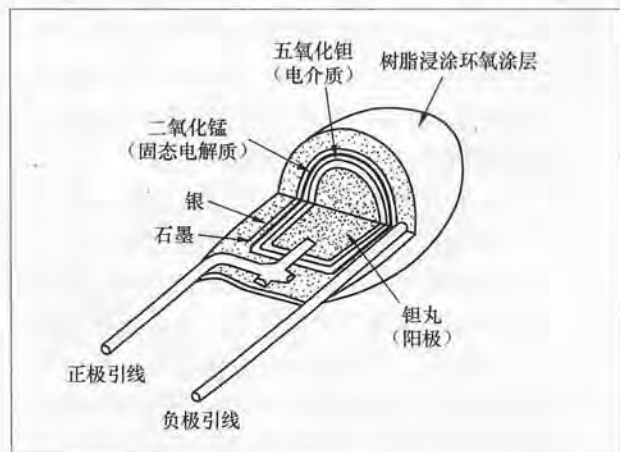


图 17-21 钽电容器，有时称为“泪珠电容器”，利用一个很小的钽丸作为正极。这张图显示了这个电容器的结构。

第 18 章

容抗

一、电容器阻碍外加电压的改变

电 容器两端接通直流电源将使电容器带电。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 18-1(A) 显示的是一个简单的给电容充电的电路。当开关在 1 状态时，有电流过 R_1 后给电容器充电。图 18-1(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 18-2(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电阻 R_2 的电流释放出来。当电容器把储存的能量释放出来后就失去了电荷，电容器两端的电压下降到零。欧姆定律告诉我们，电压减小时，通过 R_2 的电流也要减小。图 18-2(B) 显示的是在改变开关的位置后，通过 R_2 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接到电容器上会发生什么？图 18-3 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，施加到电容器上极板的电压为正。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，又开始逐渐降低到零。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

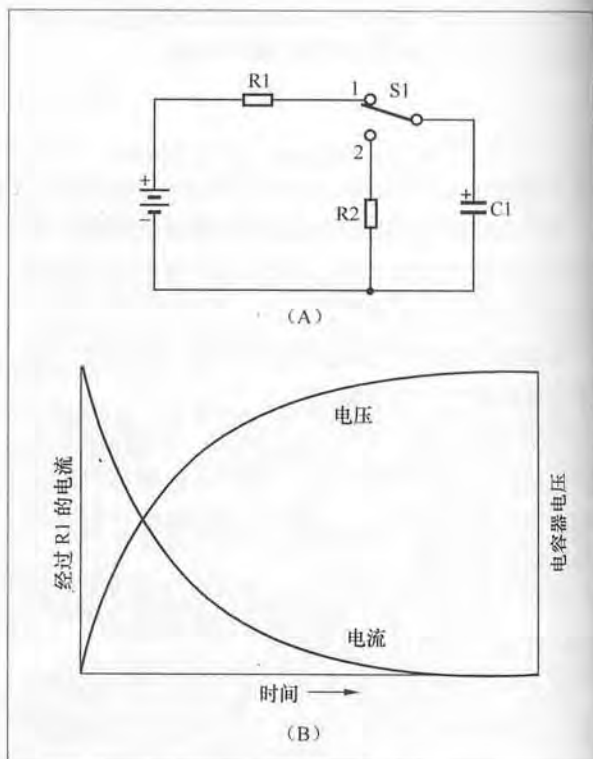


图 18-1 当开关在 1 的位置时，我们可以用图 18-1 (A) 中的电路给电容器充电。图 18-1 (B) 中是在电容器充电时，经过电容器极板间的电流和电压图像。注意，开始时电容器两端没有电压，而电流很大。不过，当电容器极板上积累电荷后，电压开始增加，而电流开始减小。当电容器极板间的电压等于电池的电压时电流停止。

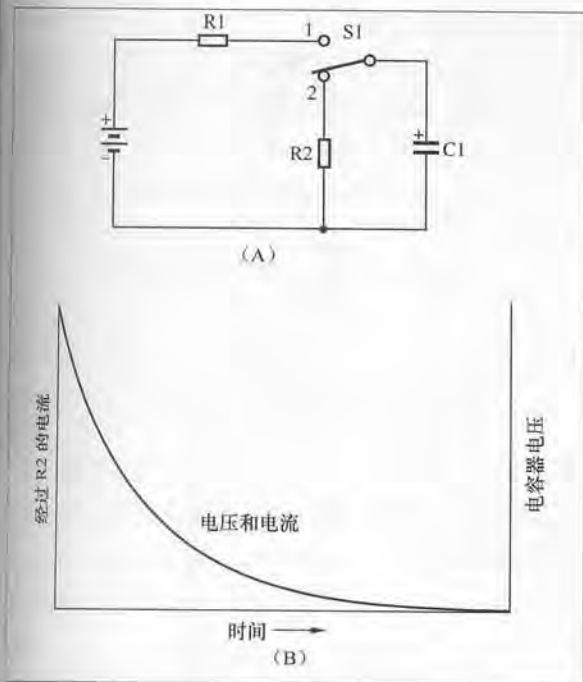


图 18-2 图 18-2 (A) 是图 18-1 (A) 中开关移动到 2 的位置的电路, 这使得电池从电路中断开, 而把电阻 R_2 接到了电容器的两端。图 (B) 中显示了经过电阻 R_2 的电流和电容器两端的电压。电容器释放储存的能量。

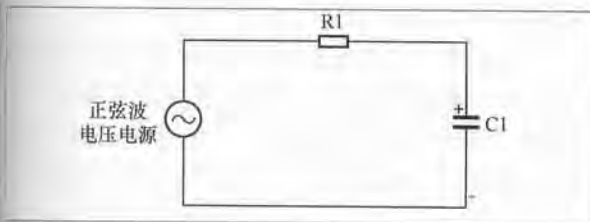


图 18-3 我们可以把交流电施加到电容器的两端, 观察这个电路中电流和电容器电压。正文描述了施加的电压经过一个正弦波周期的结果。

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 18-3 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 18-4 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的数值、施加的电压和正弦波的频率。

在研究图 18-4 时注意, 图中电容器的电流的最大值在 0° , 而施加的电压直到 90° 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。交流电电压到达它波形上的每一点都比到达该点的电流晚 90° 。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角都是 90° 。

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释放到电路中, 这个作用可以考虑为阻碍电压的降低。

电容器反抗电压的改变, 试图阻碍电压的变化。我们把电容器这种反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。

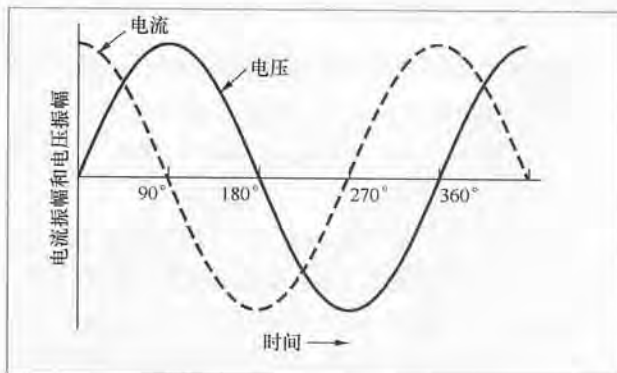


图 18-4 实线表示施加在图 18-3 中电容器极板上的电压。这是一个从零开始的正弦波电压。在第一个半周期施加在电容器上极板上的是正电压。在第二个半周期中, 正电压施加在了电容器下极板上。

二、低频率上有更多的反抗

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”电容器的作用就像是短路。电容器开始充电时电路中有很大的电流，随着电压的增加，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 18-5。我们把 10Hz 的交流电施加到 1μF 的电容器上。电路中电源电压是均方根 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？

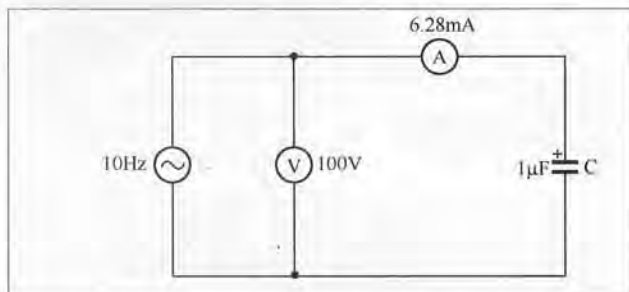


图 18-5 我们将利用这个电路做电容器容抗的试验。

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碍。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

$$U = IX_c \quad (18-1)$$

解这个方程，求 X_c ，或者利用图 18-6 中的方程“圆”，即

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

$$X_c = \frac{100V}{6.28mA} = \frac{100V}{6.28 \times 10^{-3} A}$$

$$X_c = 15924 \Omega$$

(不要忘记，6.28mA 是 $6.28 \times 10^{-3} A$ 。)

让我们改变一下电路做下一个实验。把 1μF 的电容器换成 2μF 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 18-1 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，容抗变成原来的 1/2。如果我们使用 3μF 的电容器，你认为容抗会是多少？如果你说是 5308Ω，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 1μF 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 1μF 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

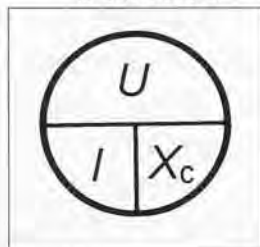


图 18-6 利用这个方程“圆”去求出方程其中的容抗 X_c 。

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。

18-1)
的方

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降低。

已 $1\mu\text{F}$
读数
方程

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。

电容
使用
说是
成反

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 2π ,这是一个周期的弧度。方程 18-2 表示如何计算容抗。

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (18-2)$$

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。

注意
会惊
容
号产

考虑
施加
么。
号来
容抗。
交流
号电
电容
所能

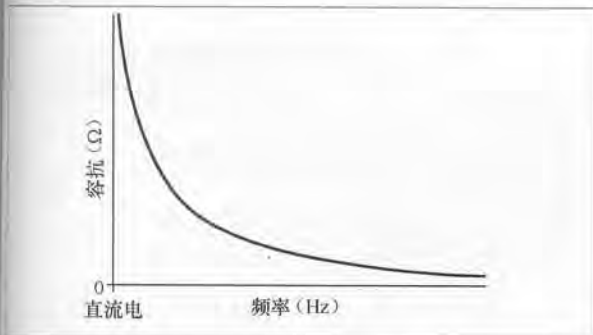
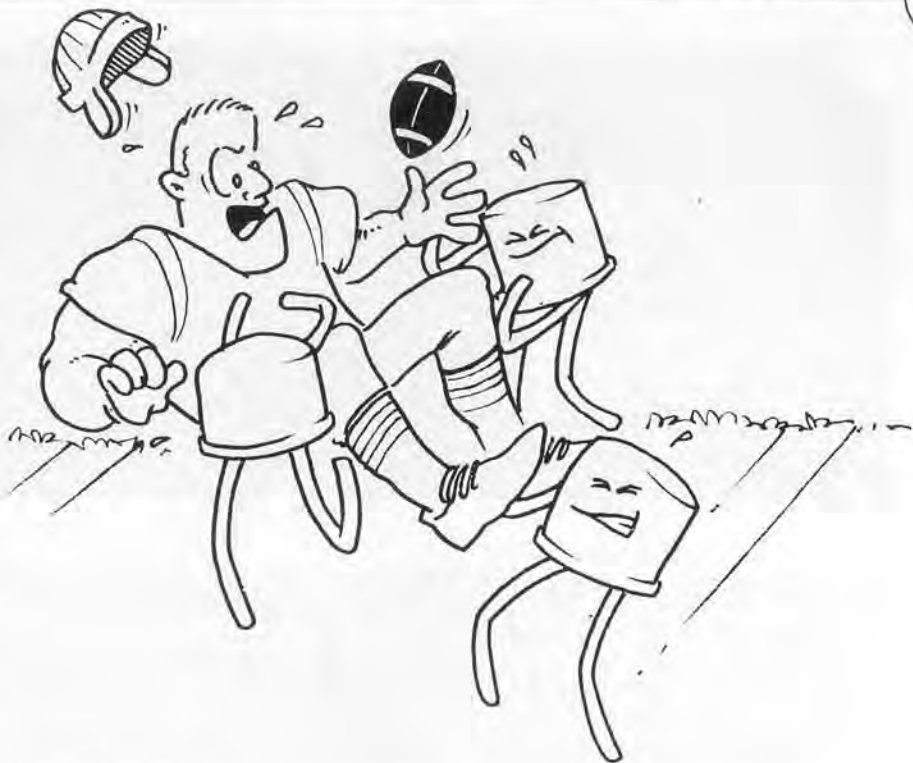


图 18-7 这张图显示了容抗随频率的变化。在直流电时,容抗非常大,而在高频率时,容抗很小。



计算 $1\mu\text{F}$ 的电容器,施加 10Hz 信号时的容抗。这是图 18-5 中的例子。

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{2\pi fC} \\ X_c &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 10\text{Hz} \times 1 \times 10^{-6}\text{F}} \\ X_c &= \frac{1}{6.28 \times 10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{6.28 \times 10^{-5}} \\ X_c &= 15\,924\,\Omega \end{aligned}$$

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 $2\mu\text{F}$ 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)。

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{1}{2\pi fC} \\ X_c &= \frac{1}{2 \times 3.14 \times 100\text{Hz} \times 2 \times 10^{-6}\text{F}} \\ X_c &= \frac{1}{6.28 \times 200 \times 10^{-6}} = \frac{1}{1.256 \times 10^{-3}} \\ X_c &= 7\,962\,\Omega \end{aligned}$$

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。

第 19 章

电感器

一、电流产生磁场

当 电子移动时，它们的周围会产生磁场，电流通过导线同样会产生磁场。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 19-1(A) 画出这个磁场像一系列同心圆环绕着导线。大的圆环表示磁场中较弱的部分。图 19-1(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 1m 长的导线末端的绝缘体剥去，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。

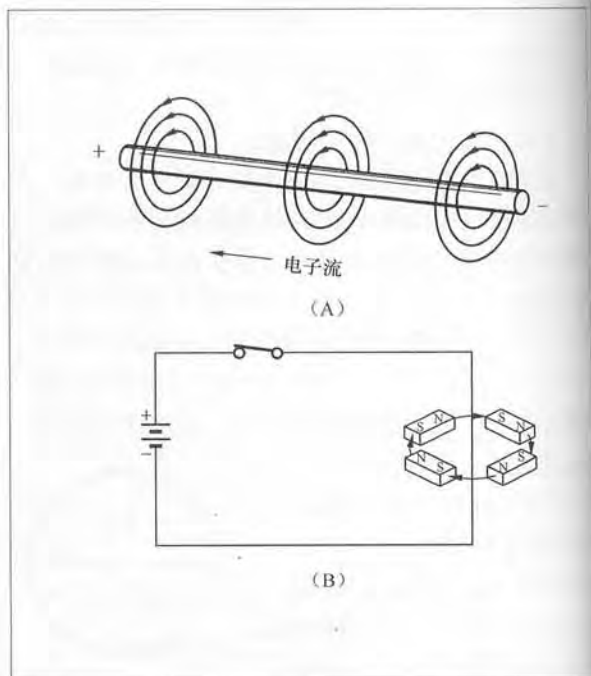
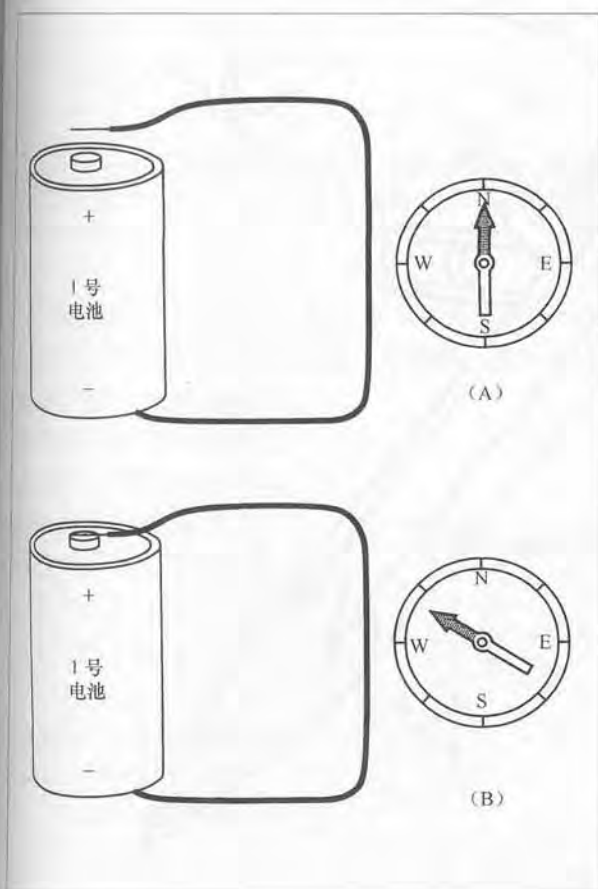
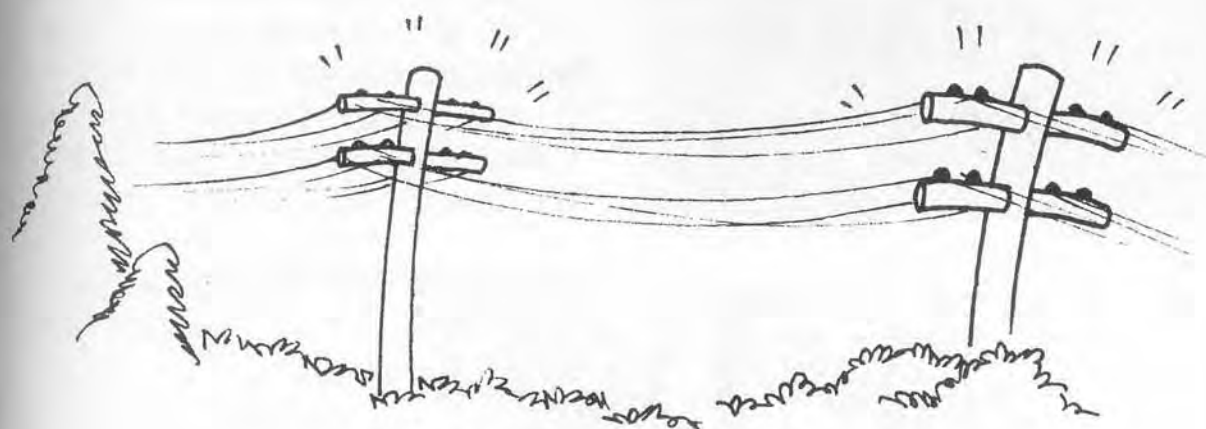


图 19-1 当电子移动时会产生磁场。图 (A) 中显示的一系列环绕导线的同心圆代表磁场。图 (B) 中表示这个磁场就像很多个小磁体环绕着导线。



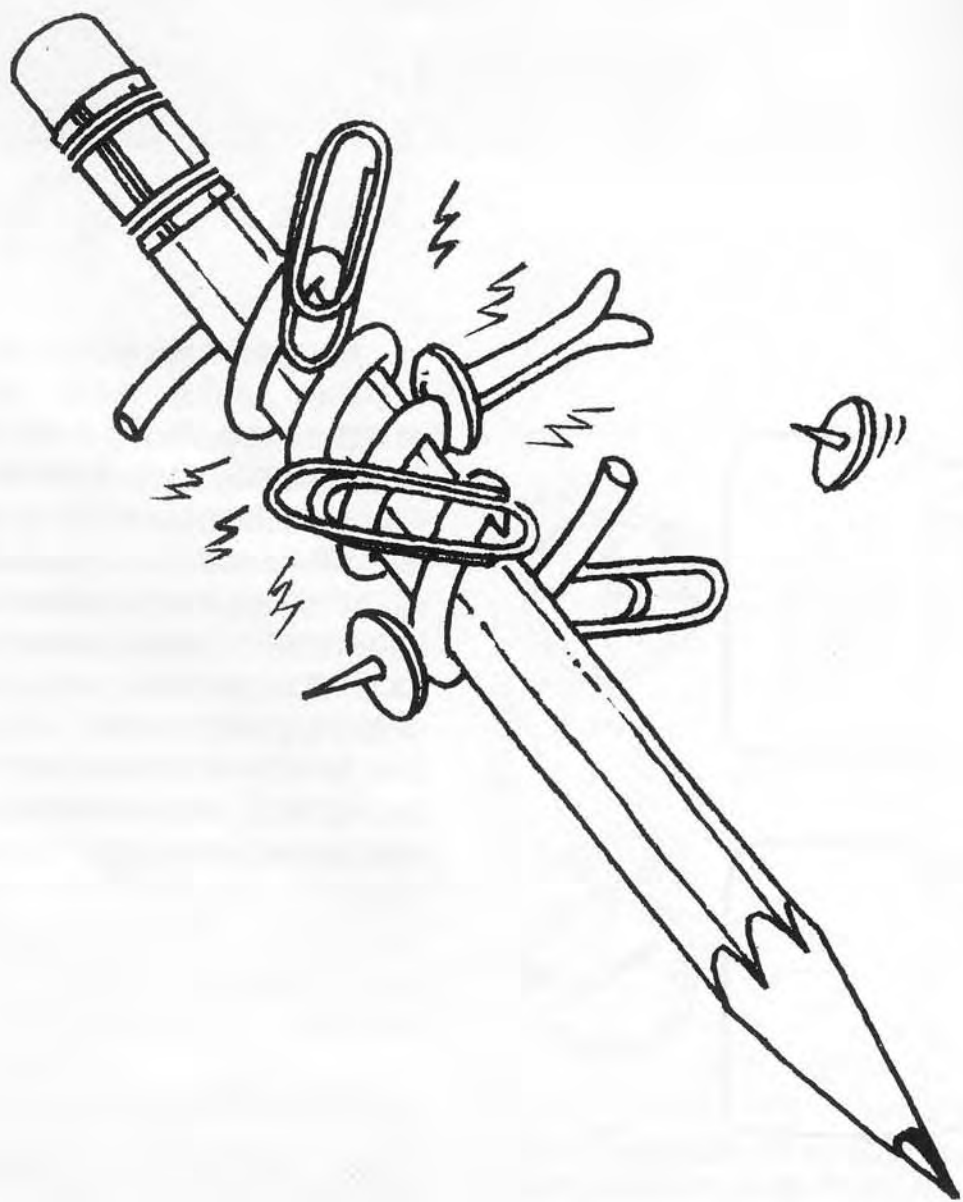
如果指南针的指针似乎没有移动，你也许需要一节新电池。也有另一种可能，你没有把指南针和导线靠得足够近。图 19-2 显示的是当你把导线和电池接触时指南针的指针是如何偏转的。

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。大多数电表都是利用较小的电流产生电磁开始工作。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。

图 19-2 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。

二、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，使每圈导线两边的磁性加强。图 19-3 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。

你大概还记得曾经做过电磁铁，如果你没有做过，这是尝试的好机会。

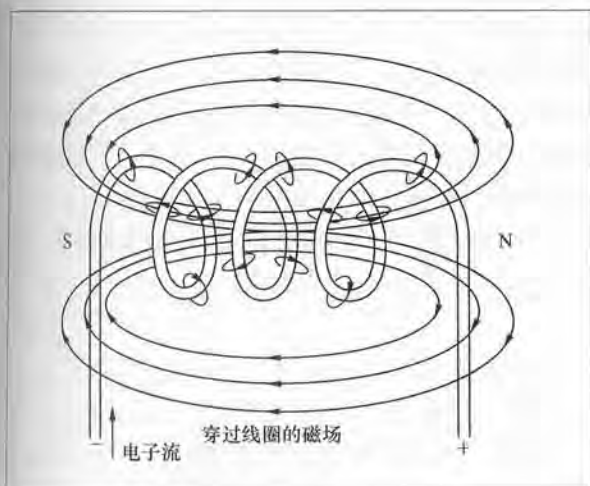


图 19-3 电流流过线圈产生的磁场比同样的电流经过直导线产生的磁场要强。每个线圈周围产生的磁场加强了其他线圈周围产生的磁场。

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 20 厘米，开始在铅笔上绕线，如图 19-4 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 10 厘米，把导线的另一头也留出 20 厘米，把剩余的导线剪掉，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 号电池的两个极

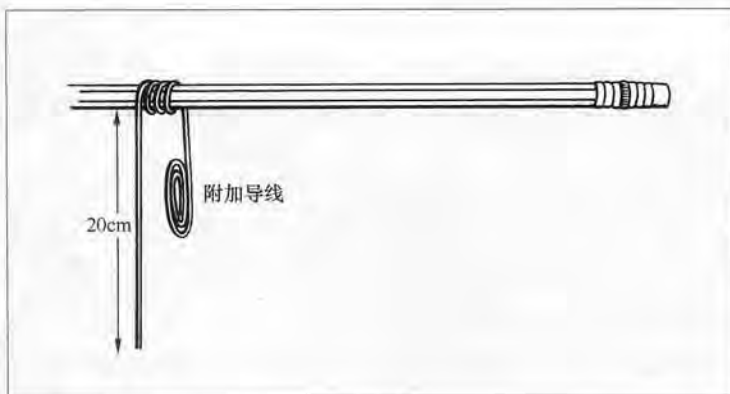


图 19-4 回形针放入线圈内被磁化，然后它可以吸引更多的回形针。

上，就成了电磁铁。现在试着把线圈的一端靠近一堆回形针，它将会吸引起一些回形针。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，见图 19-5。

你的电磁铁可以吸引多少枚回形针呢？如果你的电磁铁连接到 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？

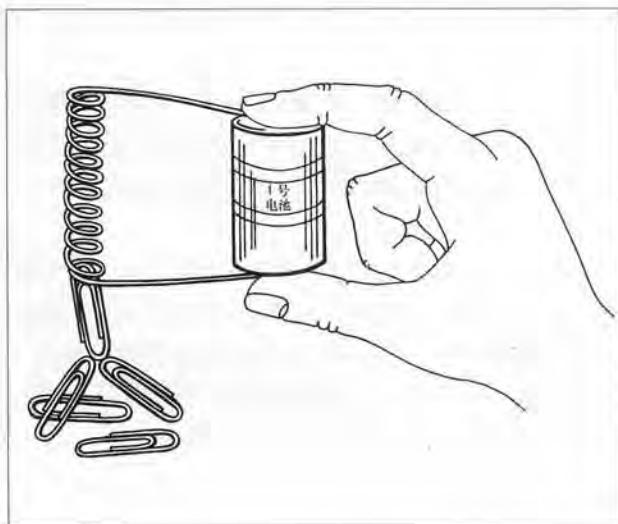


图 19-5 你可以通过在铅笔或其他圆柱体上绕制线圈，做成一个简单的电磁铁。正文中讲解了如何绕线。

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。如果有些绕线是一个方向（顺时针），而其他的绕线是相反的方向（逆时针），磁场的方向相反。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。电流经过电感器时必然会产生一个磁场。在本章和下一节中，你将学习更多的关于电感器和它们产生的磁场。

三、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制线圈做一个电磁铁。你曾经做过这样的电磁铁吗？或许你曾用钉子或者铁棒做过一个电磁铁。

现在你可能想做这样一个电磁铁。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？肯定比上一节不用铁钉的线圈要多得多。

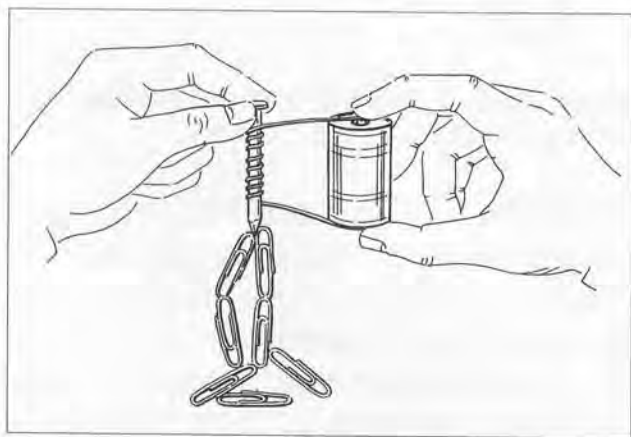


图 19-6 绕在铁钉或铁棒上的线圈构成很强的电磁铁。

这样，你就知道了增加电感器磁场强度的一种方法。把线圈绕在铁芯（磁芯）上将会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。这些产品中最基本的两种材料是铁粉（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，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。铁和铁粉材料通常只能覆盖音频范围，不同的铁氧体混合物分别覆盖射频范围的不同部分。

图 19-7 显示的是两种普通类型的电感器。在

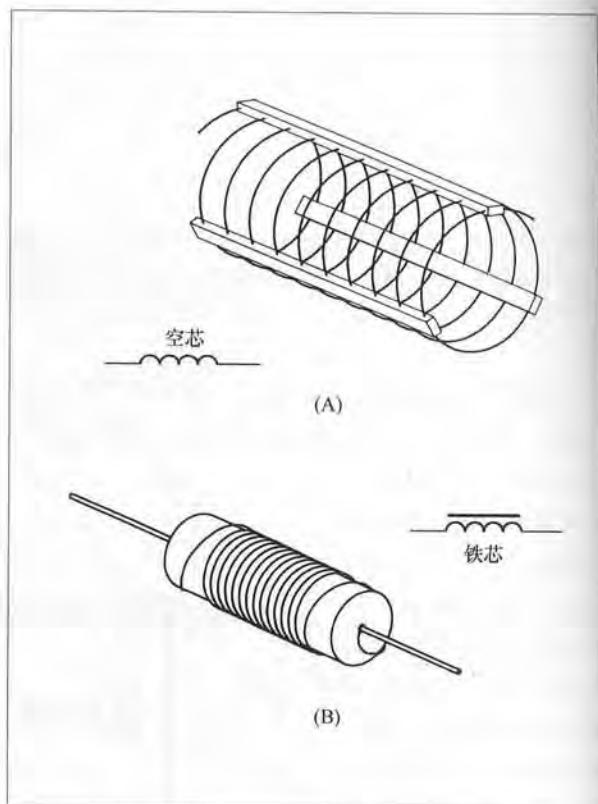


图 19-7 塑料条把导线安全固定在一种常见的空芯电感器的适当位置上。铁芯电感器的形状很多，图 19-7 (B) 中显示的是绕线在铁粉棒上的电感器，重型线植入磁芯内做成将电感器连接到电路中的引线。

无线电发射机和功率放大器中，你可以看到很多空芯的电感器。在很多电子电路中有铁芯电感器。图19-7中给出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19-8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，因为磁感线是一个闭合回路。

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，自己本身是封闭的，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。一种方法是空芯的电感器上连接一根引线。见图19-9(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芯管上，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19-9(B)显示的就是这样一种可变电感器。

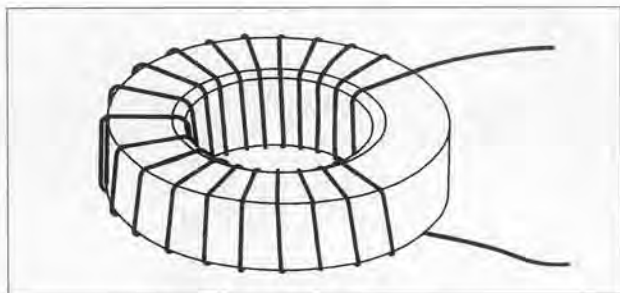


图 19-8 这个线圈绕在环形磁性上。这个线圈产生的磁场全部保持在磁芯内部。

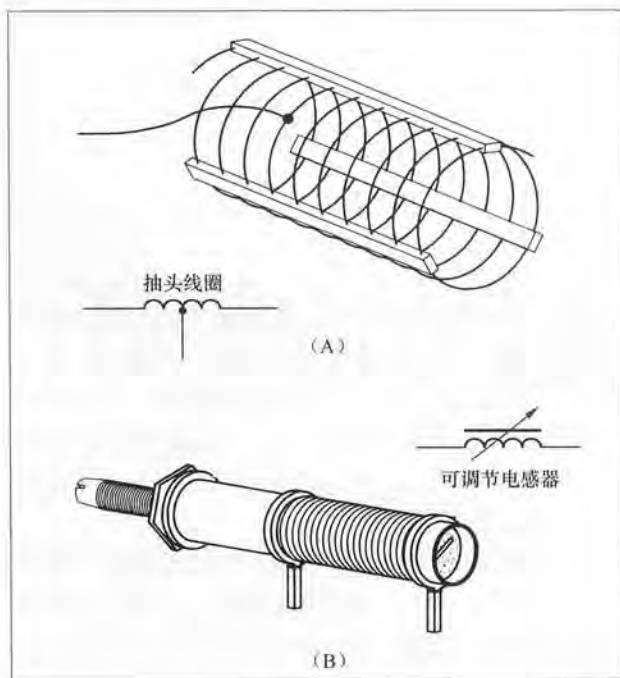


图 19-9 图 (A) 中告诉你如何在空芯电感器上连接引线。它可以让你根据应用需要选择线圈的面数。图 19-7 (B) 展示的是另一种可调节的电感器。陶瓷或其他材料做的空芯管上绕上线圈，用铁粉或铁氧体材料做成的磁芯旋转插入，你可以通过调节铁氧体在线圈内的位置调节磁场。



四、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。

下面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。线圈的电感是用来表述线圈产生磁场强度的性质。我们用大写字母 L 表示电感。电感大的线圈比电感小的线圈产生的磁场要强。

电感的基本单位是亨利，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 世纪初就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。大多数测量时我们采用毫亨 (mH , 10^{-3}) 和微亨 (μH , 10^{-6})。你必须熟悉这些公制的前缀。

4 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。

第一个决定因素，电感量的大小取决于使用的线圈的匝数，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 19-10 比较了两个不同匝数线圈的电感量。

第二个决定因素，电感量取决于电感器的长度，或者是每匝线圈之间的距离。图 19-11 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 5 厘米长。第二个线圈中每匝线圈靠得很近，第二个线圈只有 1 厘米长，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 19-12 显示了两个电感器，它们有相同的线圈匝

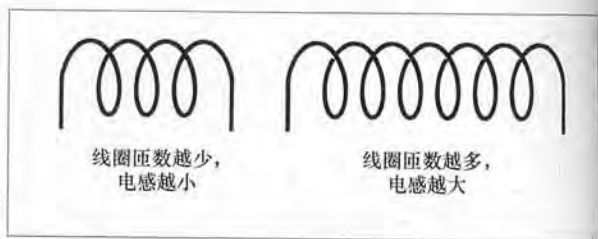


图 19-10 一个线圈的电感量取决于制作线圈的匝数。

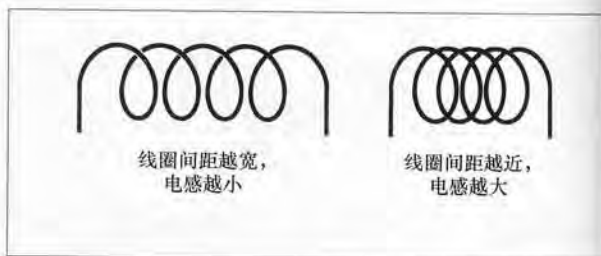


图 19-11 线圈的长度或者每匝线圈间的距离影响电感量。

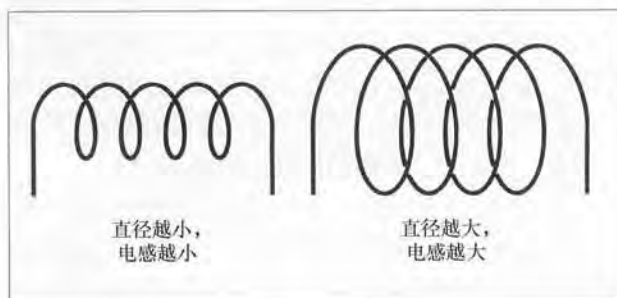
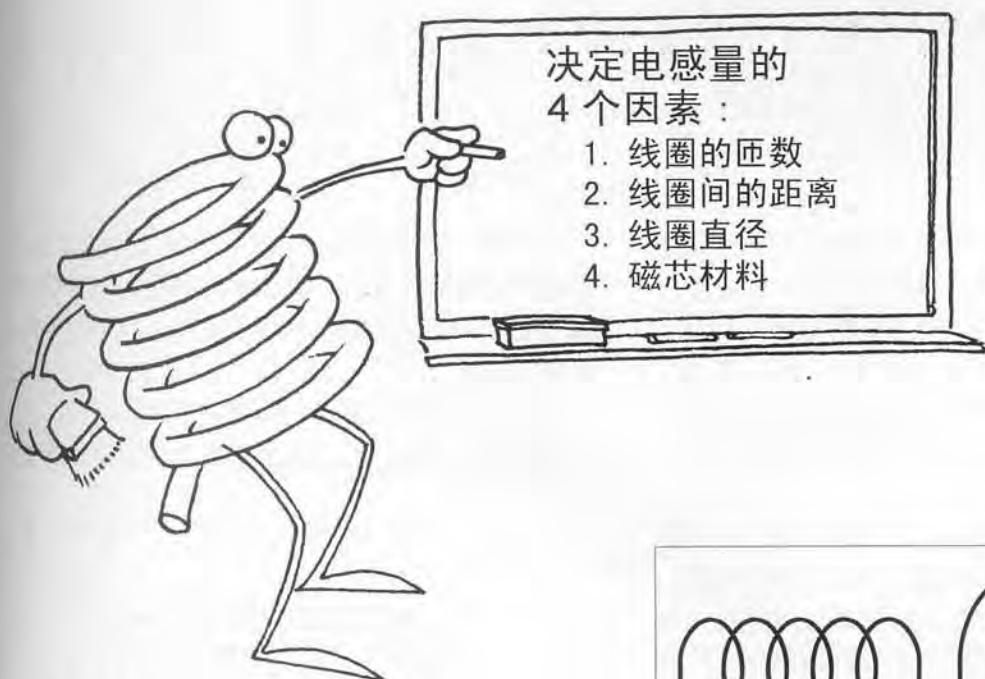


图 19-12 电感量的大小取决于线圈的直径。

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芯线圈上的电感量多多少呢? 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芯线圈大 25 倍。

图 19-13 显示了 3 个相同的线圈。一个是空芯线圈, 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。

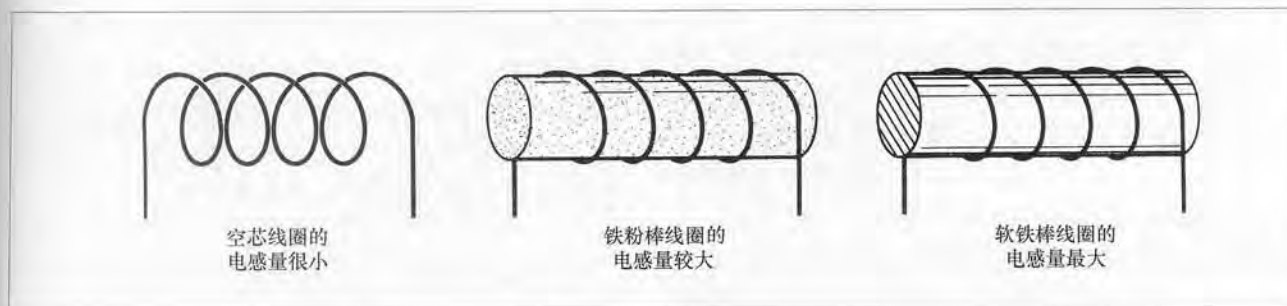


图 19-13 磁芯材料或者电感器中间的材料也决定了电感量大小。

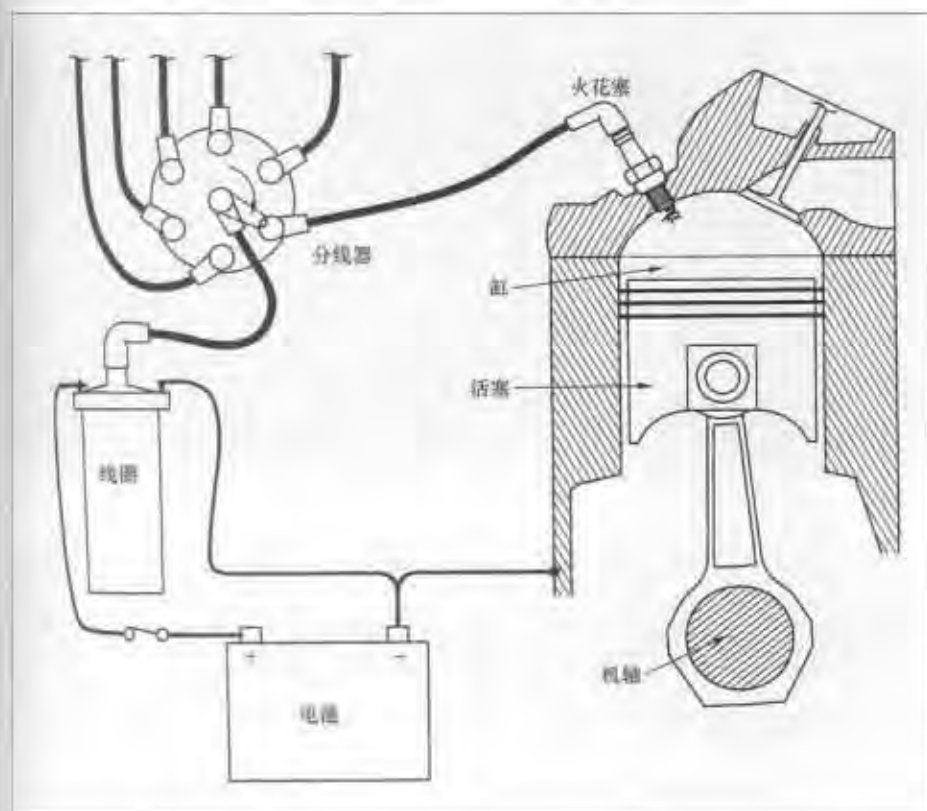


图 19-16 汽油发动机依靠强大的感应电压产生电火花使汽油燃烧。在电路断开前通过电感器产生很强的磁场，这就在线圈上产生很大的感应电压，这个电压在火花塞上产生电火花。

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。

你也许会问，“如果衰减的磁场通过电感器感应一个电压，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。

这正是使用在汽油发电机上的感应线圈的原理。大电流流过线圈，在恰当的瞬间一组接点断开，产生比电池提供的电压更大的电压。这个感应电压使

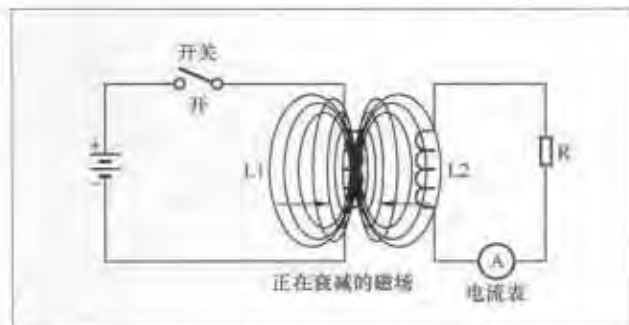


图 19-17 电感器的磁场能对另一个电感器产生感应电压。

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，见图 19-16。

图 19-17 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。



会如何？当
的电流降为
会减弱。
电感器释
的变化。这
，试图保
仍然会随
止了电流
小强度的

况呢？如
多大？用
应该算出

感器会再
生一个和
电动势，
是电动势
反向电
电压。

流的初
变。接
。注意，
降低到

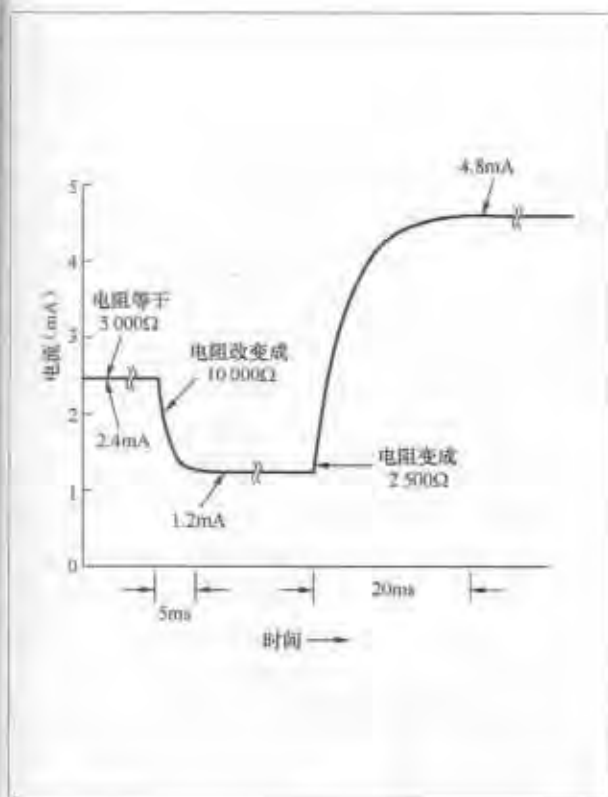


图 20-2 此图为流经图 20-1 电感器中的电流变化曲线图。在本实验中，可变电阻的初始值是 $5\,000\,\Omega$ ，电流是 2.4mA 。然后将电阻增大到 $10\,000\,\Omega$ ，此时电流减小为 1.2mA 。最后，将电阻减小到 $2\,500\,\Omega$ ，电流增大为 4.8mA 。

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。

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。

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 ）。

二、频率越高 电抗越大

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 20-3 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？

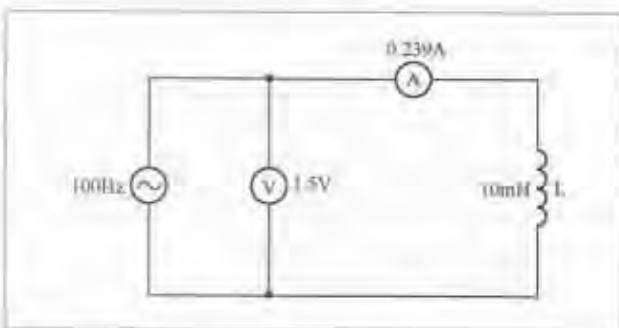


图 20-3 我们将使用此电路来进行电感器电抗的思考性实验。

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 。

$$U = I X_L \quad (20-3)$$

可以用公式 20-3 或图 20-4 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。替换后的电感器的电抗是多大呢？可以用公式 20-3 求得 X_L （注意 47.8mA 是 47.8×10^{-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 62.8Ω ，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 1000Hz 的电压电源，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。你们有没有注意到，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。

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

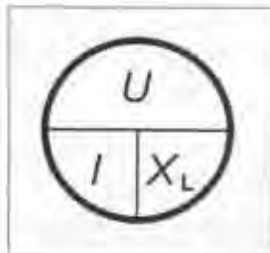


图 20-4 利用方程圆计算公式 20-3 中的感抗 X_L 。

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,电感器起阻碍电流的变化的作用。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,它通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 20-5 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数表示频率,单位为赫兹(Hz)。我们也可

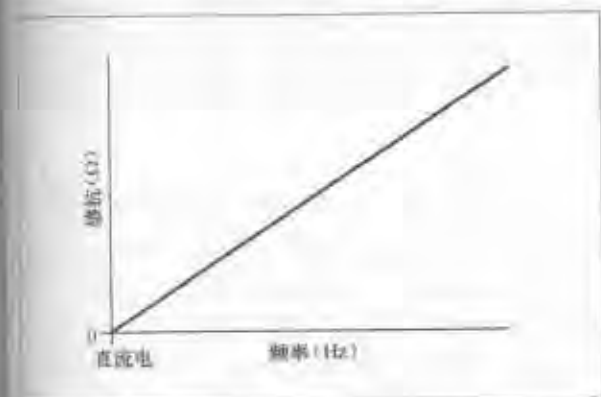


图 20-5 此图为感抗随信号频率变化的关系图。直流电时,感抗为零。信号频率越高,电抗越大。

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,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 2π 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 20-4 来计算感抗。

$$X_L = 2\pi fL \quad (20-4)$$

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 20-3 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:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 100\text{Hz} \times 10 \times 10^{-3}\text{H}$$

$$X_L = 6.28 \times 1000 \times 10^{-3} \Omega = 6.28 \times 1.000$$

$$X_L = 6.28 \Omega$$

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,200μH 电感器的电抗(这与本节中早期出现的问题不同):

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 1000\text{Hz} \times 200 \times 10^{-6}\text{H}$$

$$X_L = 6.28 \times 2.00 \times 10^{-1} \Omega = 1.256 \Omega$$

你们可以多做几个有关感抗的习题,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。

第 21 章

电路性能——电路元件的品质因数

一、电路电抗和电阻确定电路性能

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，它们都没有电阻和容抗。

当然，电路元件在实际应用中都不会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，只不过我们通常都是将其忽略掉罢了。

来看一个例子。图 21-1(A) 所示的电路中，有 3 个 $1\,000\Omega$ 的电阻器串联在一起，并假定电路导线的电阻为 0.1Ω 。图 21-1(B) 所示的电路中，1 个 0.1Ω 的电阻器与其他 3 个 $1\,000\Omega$ 的电阻器串联在一起。这个 0.1Ω 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。计算结果几乎没什么改变！（在这个练习中，应该先用图 21-1(A) 中的电阻来计算电流，然后再用图 21-1(B) 中的电阻来计算电流）

由于电容器具有外接电路时所需要的引线，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不同之处。

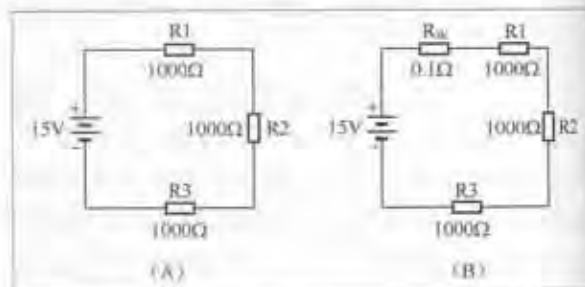


图 21-1 图 (A) 为 3 个 $1\,000\Omega$ 的电阻器与 15V 的电池串联在一起的电路图。图 (B) 与图 (A) 的电路相同，只不过图 (B) 多接了一个电阻。 R_W 表示电路中导线的电阻。作为练习，可以使用欧姆定律来分别计算两个电路的电流。

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 1 个电阻表是无法来计算这个电阻的阻值，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前

电阻时,发现其值为无穷大(大得不可能测量出来)。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 21-2 所示的电路由 1 个电容器和 1 个交流电信号组成。在电路中用虚线标出了 1 个电阻器和 1 个电感器,它们分别表示实际电容器引线的电阻和电抗。

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时,这些相邻的线圈作用就像是 1 个小电容器。图 21-3 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。



图 21-2 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他们是电容器的一部分,而不是电路中实际存在的物理元件。

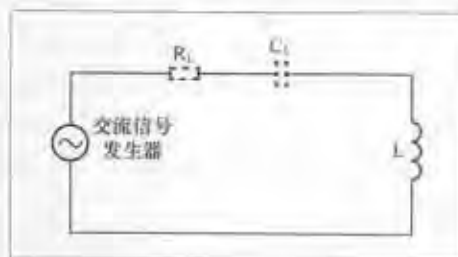


图 21-3 实际应用的电感器包括了一小部分电容和电阻。图中以虚线表示电阻器和电容器,它们不是电路中实际存在的物理元件。



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,你必须要考虑到这些电路元件的缺陷。它们对工作在甚高频范围和高频范围内的射频电路会有很大影响。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,称之为 Q 值。一个完整的电路也有一个 Q 值,电路的 Q 值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 C 的 Q 值,等于容抗除以电阻。电容器 Q 的数学定义式如下:

$$Q = \frac{X_C}{R} \quad (21-1)$$

实际电感器 L 的 Q 值,等于感抗除以电阻。电感器 Q 的数学定义式如下:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (21-2)$$

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,其后随着频率的增高而减小。感抗在频率最低时最小,其后随着频率的增高而增大。这些特点将会对 Q 产生怎样的影响?我们来看几个例子。

图21-4为一个有 $25\mu\text{F}$ 的电容器,其引线电阻为 0.01Ω 。假设给这个电容器接一个 40Hz 的信号,此时该电容器的 Q 值为多少?首先来计算容抗。

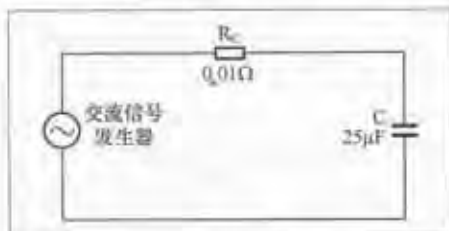


图 21-4 $25\mu\text{F}$ 的电容器具有 0.01Ω 的电阻。交流信号发生器为该电容器产生 40Hz 的信号。稍后,该信号生成器再产生一个 400Hz 的信号。正文介绍了在相应条件下,如何来计算电抗和 Q 的值。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (21-3)$$

$$X_C = \frac{1}{6.28 \times 40\text{Hz} \times 25 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$X_C = \frac{1}{6.28 \times 10^{-3}} = 159\Omega$$

现在可以用公式 21-1 来计算电容器 Q 值。

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{159\Omega}{0.01\Omega} = 15900$$

如果接入信号的频率为 400Hz 时, Q 值又是多大呢?现在用公式 21-3 来计算这个电抗。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6.28 \times 400\text{Hz} \times 25 \times 10^{-6}\text{F}}$$

$$X_C = \frac{1}{0.628} = 15.9\Omega$$

用这个电抗来计算新的 Q 值。

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{15.9\Omega}{0.01\Omega} = 1590$$

高频时的电抗是低频时电抗的 $1/10$,所以高频时的 Q 值也是低频时的 $1/10$ 。当电容器外接一个高频率信号时,电抗和 Q 值均变小。

图 21-5 中所示的 5mH 电感器的电阻为 0.05Ω 。当接入的信号频率为 40Hz 时,该电感器的 Q 值为多少?首先来计算感抗。

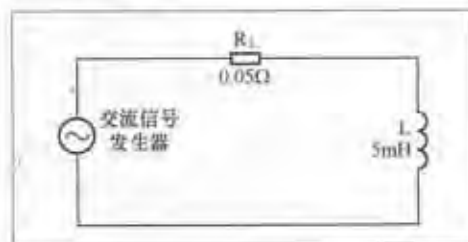


图 21-5 50mH 的电感器具有 0.05Ω 的电阻。交流信号发生器先产生一个 40Hz 的信号。随后再产生一个 400Hz 的信号。正文介绍了在不同信号输入时,如何计算电抗和 Q 的值。

$$X_L = 2\pi fL \quad (21-4)$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 40\text{Hz} \times 5 \times 10^{-3}\text{H}$$

$$X_L = 6.28 \times 200 \times 10^{-3} = 1.256\Omega$$



接下来, 使用公式 21-2 来计算电感器 Q 的值。

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

$$Q = \frac{1.256\Omega}{0.05\Omega} = 25.12$$

如果接入的信号频率为 400Hz, 此时电感器 Q 的值为多大呢?

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{12.56\Omega}{0.05\Omega} = 251.2$$

通过计算得知, 在信号频率为 400Hz 时, 感抗是 12.56Ω。下面用公式 21-2 重新计算 Q 值。

通过计算电感器的 Q 值, 你能得出什么结论?
是的, 当频率增大时, 电抗和 Q 值均增大。

二、 Q 值越大， 元件上串联 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 21-6 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。在电源滤波器中使用足够大的云母或陶瓷电容器并不现实，这样的电容体积太大。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，云母和陶制电容器的 Q 值比较大。

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，电阻会越小。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。当对 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。

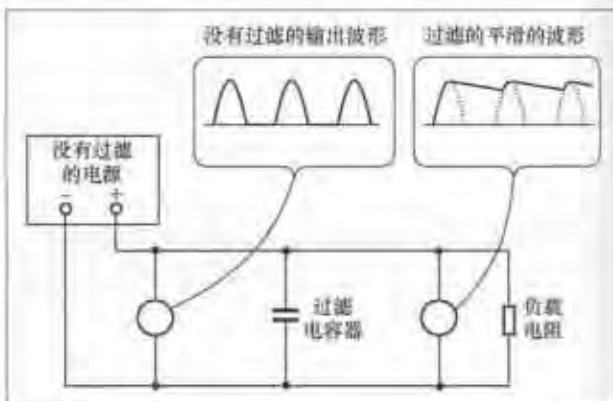
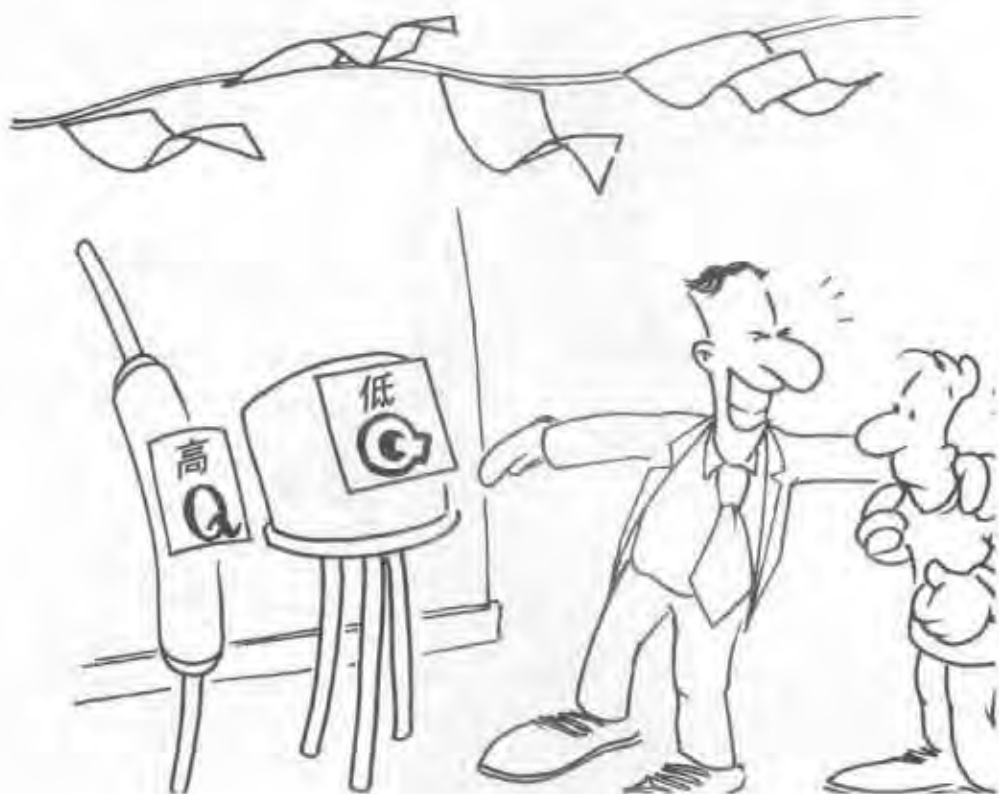


图 21-6 一个可以将交流电转化为在电路中应用的直流电的电源。来自交流电的输出信号会有波纹抖动或者微小变化。滤波电容器可以平滑这些波形，产生稳定的直流电输出。



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，同时它也有导线电阻。但在射频放大器中，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，所以有时也称之为扼流圈。图 21-7 为具有这样一个扼流圈的电路。

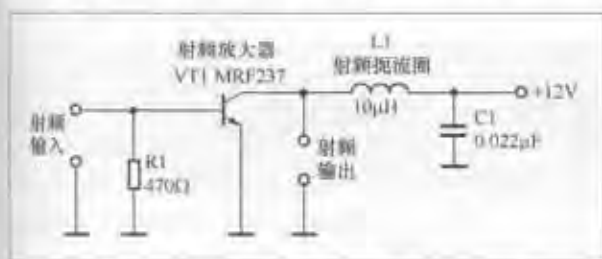


图21-7 射频扼流圈阻碍射频信号沿着导线返回到电源端。在无线电工作频率中线圈的高电抗特性阻碍射频，而在直流电时，电感器只有很小的导线电阻，没有电抗，来自电源的直流电流通过电感器向无线电台提供它所需要的电流。

你不必用高 Q 值的线圈来充当扼流圈。你只

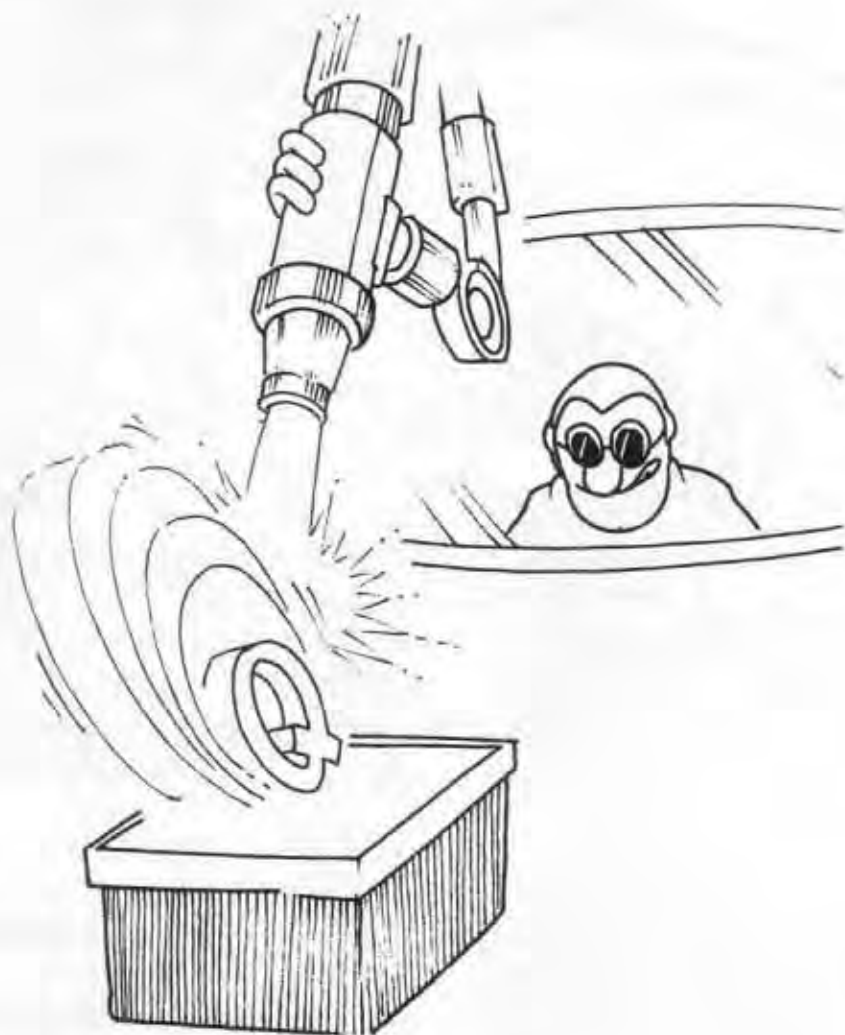
要使用一个电流源，它可提供放大器所需电流以及提供线圈中的能量损失。

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。

在一些大功率的放大器中可以使用铜管线来制作电感器线圈。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。



三、电阻增大，电路 Q 值降低

我们大多数对 Q 的讨论主要集中在低损耗的电感器和电容器上。当你把这些元件接入电路中，也就相当于给电路增加了一定的电阻。这个电阻可能以串联的方式与电感器或电容器相连，也可能以并联的方式相连。

你是怎样考虑这些增加的电阻对电路 Q 值的影响的呢？从这一节的标题应该可以猜到，电阻增大， Q 值降低。那么，为什么会发生这样的情况呢？

来看图 21-8。图中所示的电感器具有较小的电阻，用 R_L 表示。除此之外，还有一个电阻与电感器串联。在计算电路 Q 值时，你必须把这两个电阻值相加。我们已经在图中标出了感抗的值，所以没有再进行计算。现在用公式 21-5 计算电路的 Q 值。

$$Q = \frac{X}{R} \quad (21-5)$$

$$Q = \frac{4500\Omega}{201\Omega} = 22.4$$

现在不考虑附加的电路电阻，我们来单独计算电感器的 Q 值。可以用公式 21-5 来计算电感器的 Q 值。

$$Q = \frac{X}{R}$$

$$Q = \frac{4500\Omega}{1\Omega} = 4500$$

可以看出，在电路中串联上一个很小的电阻将会导致 Q 值的明显下降。流经电阻器的电流将一部分电能转化为热能，这个热能也就是在电路中损耗的电能。所以附加电阻加大了能量的损失，这也是导致 Q 值减小的原因。

图 21-9 表示的是图 21-8 中的电感器具有 1Ω 的导线电阻。我们这次用一个 $2M\Omega$ 的电阻和电感器（还有它的导线电阻）并联起来。在我们进行电路 Q 值的计算之前，先进行一个短暂的思考性实验。

这个 $2M\Omega$ 的并联电阻为信号电流提供了一条可以选择的电流支路。这电阻将把一部分电能转化为热能，造成电路中的能量损失。在串联电路中，我们知道这个附加电阻会降低电路的 Q 值。

如果用一个较小值的电阻来替换掉 $2M\Omega$ 的电阻将会发生什么情况呢？随着并联电阻的减小，通过此电阻的信号电流也会增大。经过电阻的电流越大，能量损失得就越多。

那么现在我们可以得出一个结论，那就是并联后电感器（或电容器）的附加电阻增大，能量损耗增加，电路的 Q 值降低。这与我们在串联电路中得出的结论一致。不过，你必须注意到，是并联后增加较小的电阻才造成这个结果。

现在回到数学计算上来。目前为止，我们在利用公式计算 Q 值时， Q 值都会随着电阻增加而减小。现在我们需要一个可以产生相反效果的公式来计算并联电路中的 Q 值。公式 21-6 给了我们

想要的结果。

$$Q = \frac{R}{X} \quad (21-6)$$

图 21-9 中电路的 Q 值是多大呢？由于电路的大部分能量损失是由并联的电阻造成的，因此为了简化问题的分析处理，我们可以忽略掉电感器造成的能量损失（只要电阻器的能量损失至少是电感器损失的 10 倍大时，我们就可以使用这个简化原则。本例子中用到了这个原则）。在公式 21-6 中，用并联电阻除以感抗，可得 Q 值。

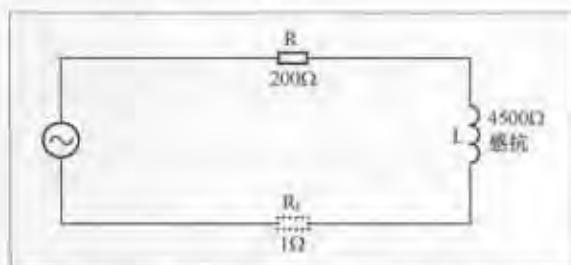


图 21-8 电路中，电感器的电阻为 1Ω 。在图中用 R_L 来表示这一电阻。与电感器串联的是一个 200Ω 的电阻器。正文中对如何计算带有附加电阻器的电路的 Q 值作了说明。

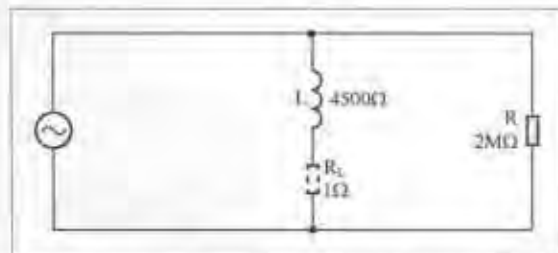


图 21-9 在电路中，将一个 $2M\Omega$ 的电阻与电感器并联。正文中说明了电阻和电感器并联时，如何计算电路中的 Q 值。

$$Q = \frac{R}{X}$$

$$Q = \frac{2 \times 10^6 \Omega}{4500\Omega}$$

$$Q = 444$$

在图 21-8 中，如果我们将电感器和一个 200Ω 的电阻器并联，电路的 Q 值将是多少呢？还是用公式 21-6 来计算 Q 值。

$$Q = \frac{R}{X}$$

$$Q = \frac{200\Omega}{4500\Omega} = 0.0444$$

哇！电路的 Q 值真的减小了。

第 22 章

变压器

一、一个线圈的磁场 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 22-1 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。

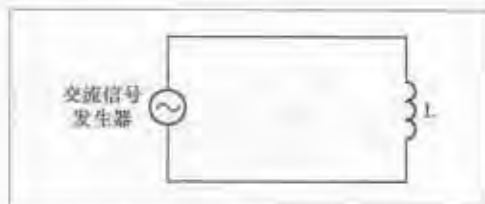


图 22-1 交流电信号源在电感器周围产生一个变化的磁场。

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 22-2 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？是的，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 22-3 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。

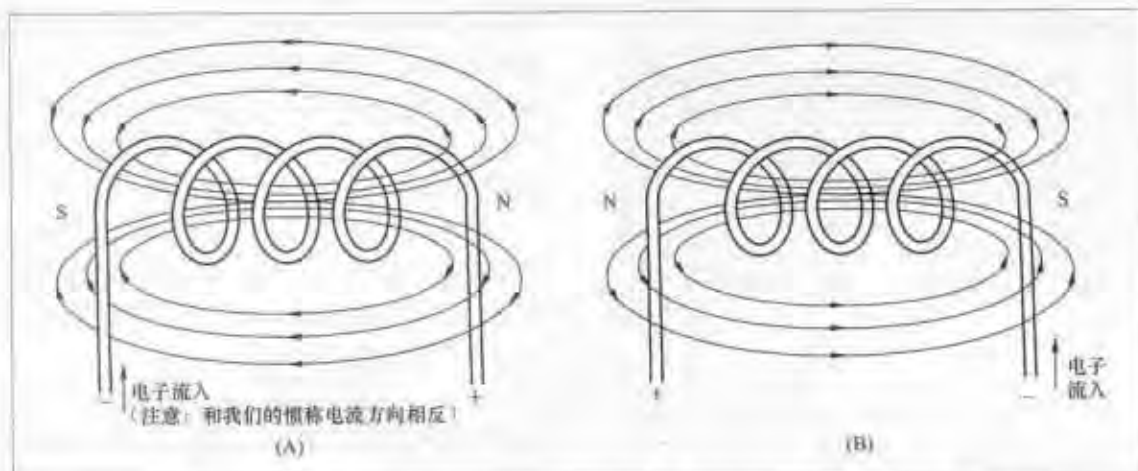


图 22-2 当电流方向改变时,电感器上产生的磁场的极性也会改变。在图(A)中,电子流经左边的导线,磁场北极指向线圈的右端。在图(B)中,电子流经右边的导线,磁场北极指向线圈的左端。

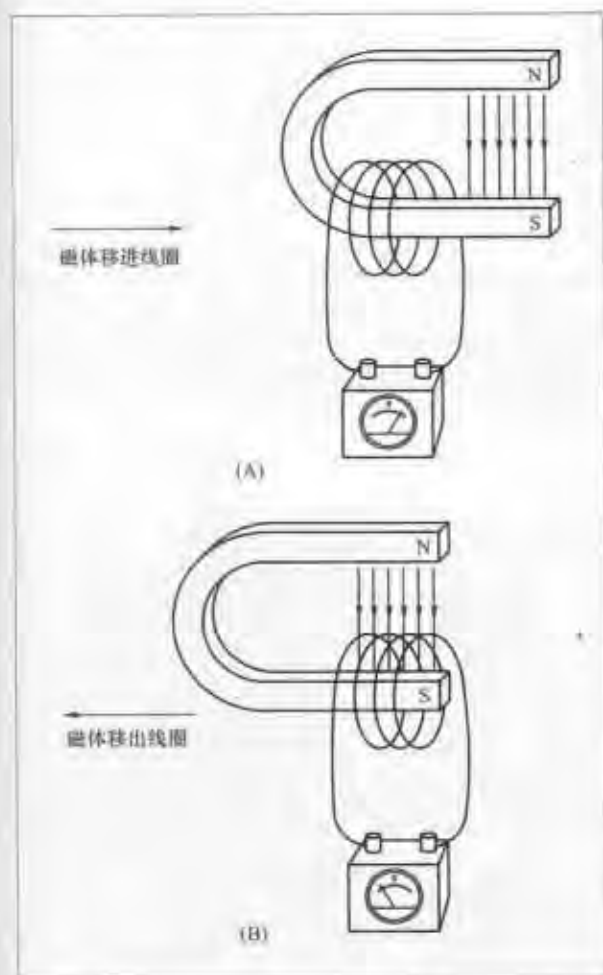


图 22-3 在一个磁场中移动线圈可以在线圈上产生电压,这个电压在线圈上产生一个电流。电压极性和电流方向会随着线圈移动方向的改变而改变。

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 22-4 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。有时也把具有互感的线圈称为联动线圈或耦合线圈。

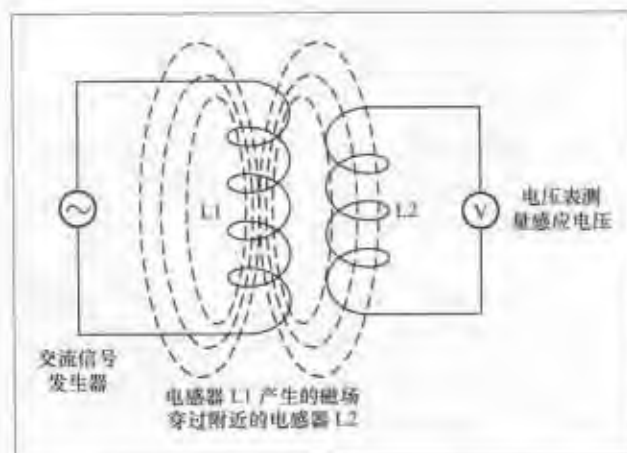


图 22-4 线圈 L1 中的变化磁场穿过了线圈 L2。L1 的磁场在 L2 上产生电压,并产生了一个流经 L2 线圈的电流。

另一端有一根导线，可以直接接到收音机、电话、放音机等其他设备中。电源供应器的初级线圈电压是 120V 的家用电压（中国的家用电路电压是 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，而另一个输出电压比输入电压小。

变压器具有多种外形和尺寸。通常来讲，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。交流电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 22-8 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。

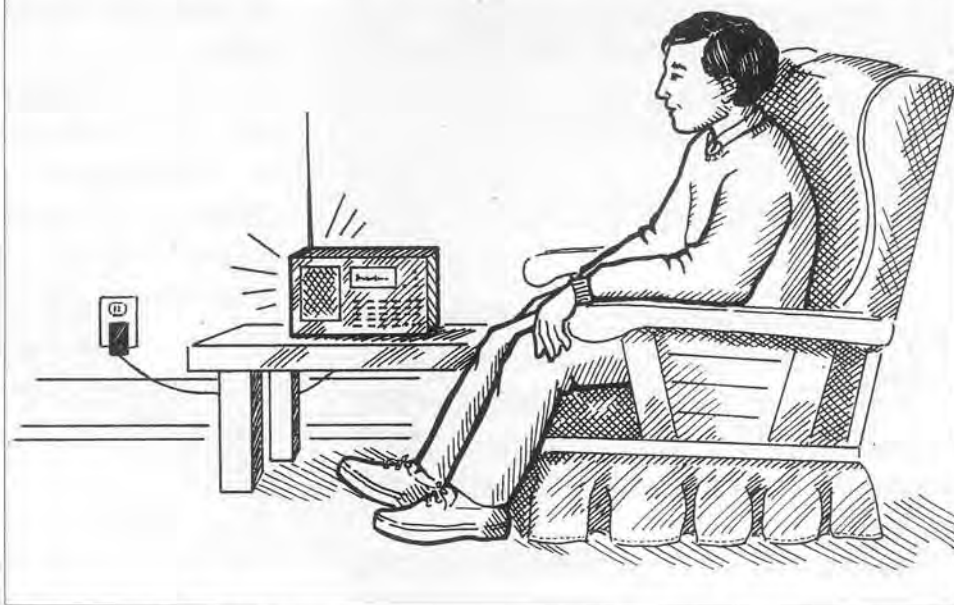


图 22-9 图中列出了多种形状的变压器。

三、匝数比值确定变压大小

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；把线圈缠绕在铁芯上、铁粉芯或铁氧体物质上也可以增大磁场强度。

图 22-10 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也相同。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 22-10 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。

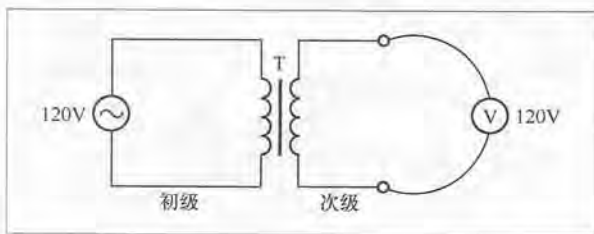


图 22-10 这个变压器具有相同的初级和次级线圈。当初级线圈接入 120V 交流电时，次级线圈上也会产生 120V 的交流电。

变化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 22-11 为具有两个次级线圈的变压器。初级线圈的匝数为 1 000 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是非常的容易，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公式来表示，当在输入电压已知时，可用这个公式来计算变压器的输出电压。

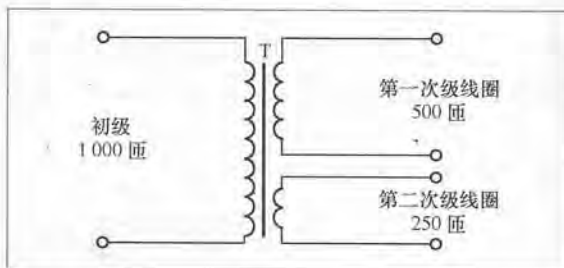


图 22-11 这是一个带有 2 个次级线圈的变压器。第 1 个次级线圈的匝数是第 2 个次级线圈匝数的 2 倍，第 1 个次级线圈上的电压也将会是第 2 个次级线圈上的 2 倍。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s} \quad (22-1)$$

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 500 匝初级线圈和 400 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 22-1，可以求得 U_s 。

$$\begin{aligned} \frac{N_p}{N_s} &= \frac{U_p}{U_s} \\ \frac{500}{400} &= \frac{120V}{U_s} \\ 1.25 &= \frac{120V}{U_s} \end{aligned}$$

（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 1.25，可得答案）

$$U_s \times 1.25 = \frac{120V \times U_s}{U_s}$$

$$\frac{U_s \times 1.25}{1.25} = \frac{120V}{1.25}$$

$$U_s = \frac{120V}{1.25} = 96V$$

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 96V。如果初级线圈上的电压为 12V，则次级线圈上的输出电压为 9.6V。你可以计算出这个值么？输出电压要小于输入电压。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 22-1 来求解变压器的线圈匝数比。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{500}{4000} = 0.125$$

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 22-1 来计算次级电压。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s}$$

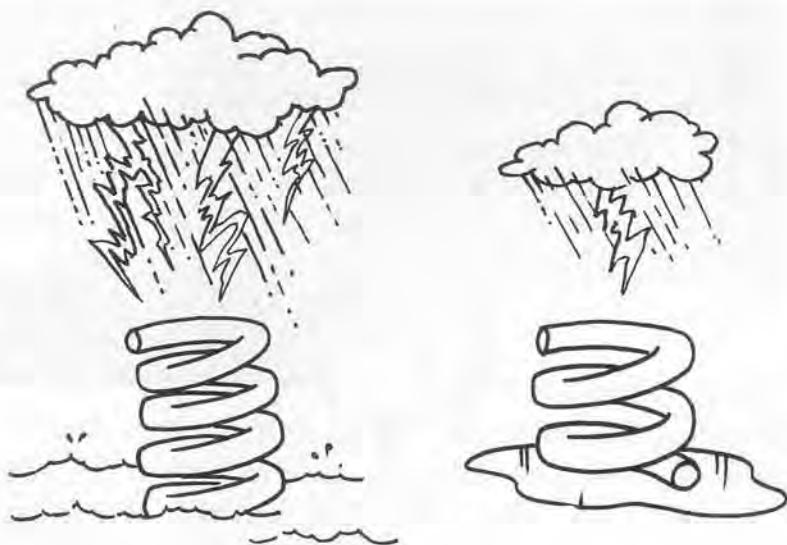
$$0.125 = \frac{120V}{U_s}$$

（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，在一对电线上的不远处标记一个点 P，在另一对电线上的不远处标记另一个点 S。你可以利用标记设置试图作为变压器的初级线圈和次级线圈。图 22-12 告诉你如何将变压器连接到交流电源上。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。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 22-1 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率。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s}$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{120V}{25V} = 4.8$$

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。

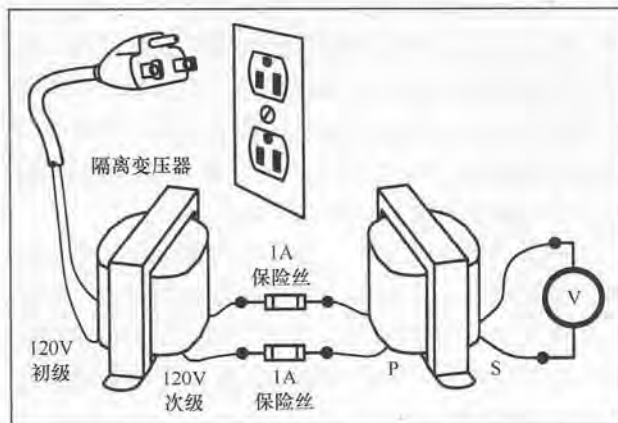


图 22-12 测试装备展示了测试一个不了解具体参数的变压器的方法。接入的保险丝起到了防止电路短路的作用。在测试中，必须所有的连接电路都是绝缘的，以防止电路意外地连接到家用电压中。只有在非常熟悉测试步骤和安全措施后才可以进行如图所示的测试。

四、变压器也可以改变电流级别



通过变压器，我们可以把任何交流电压进行转换。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，产生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，产生的次级电压要比初级电压小。

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。实际中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 22-2 是变压器输入功率的数学表达形式。

$$P_{\text{输入}} = I_p \times U_p \quad (22-2)$$

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 22-3 与公式 22-2 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。

$$P_{\text{输出}} = I_s \times U_s \quad (22-3)$$

我们可以通过把变压器假设为理想状态的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 22-2 必须等于公式 22-3。

$$P_{\text{输入}} = P_{\text{输出}} \quad (22-4)$$

我们也可以用电压和电流来表示这个公式。

$$I_p \times U_p = I_s \times U_s \quad (22-5)$$

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 22-5, 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 22-5 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 22-5。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:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (22-6)$$

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 22-7 是这个关系的数学表达式。

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (22-7)$$

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 22-5 中的初级和次级的电压之比用公式 22-7 中的初级与次级线圈匝数之比来代替。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (22-8)$$

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 22-13 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? 可用公式 22-8 来计算这个电流。

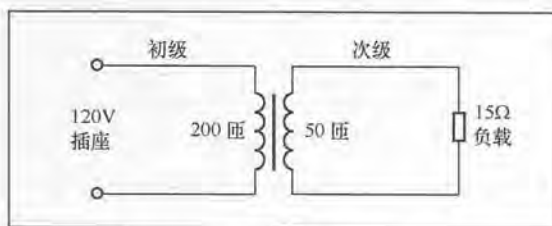


图 22-13 这个变压器将 120V 的家用电压转换为 30V。正如正文中所说, 在 120V 输入电压时, 初级电路的电流为 0.5A, 次级电路的电流是 2A。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (22-9)$$

$$\frac{200}{50} = 4 = \frac{2A}{I_p}$$

交叉相乘, 可以求得初级电 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 5A 电流, 那么次级线圈上的电流有多大? 同样, 再次用公式 22-8 来进行求解。

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

$$5.5 = \frac{I_s}{5A}$$

$$5.5 \times 5A = I_s = 27.5A$$

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, 有效的电流也能得到改变。

第 23 章

阻抗

一、欧姆定律也适用于交流电路

在图 23-1 的电路中，12V 电池和一个阻值为 $1\,200\Omega$ 的电阻相连构成闭合回路。我们可以用欧姆定律来计算这个电路中的电流。

公式 23-1 给出了欧姆定律的公式：

$$U = IR \quad (23-1)$$

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，我们可以写出电流的公式：

$$I = \frac{U}{R} \quad (23-2)$$

$$I = \frac{12V}{1\,200\Omega} = 0.01A$$

你也可以把电流的单位用毫安来代替安培。

$$I = 10mA$$

现在，将图 23-1 中的电池替换为正弦波交流电源。图 23-2 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。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，信号发生器的均方根输出电压为 12V。图 23-3 是一个标出了峰值、峰间值（又称峰峰值）和均方根值的图表。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，即 33.94V。

图 23-1 我们用欧姆定律来计算直流电路中电流的大小。



图 23-2 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。

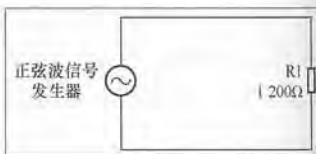
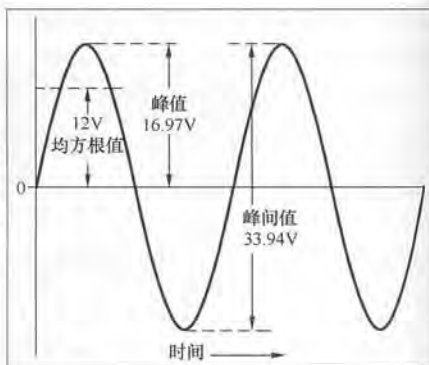


图 23-3 在这个正弦波形图中，标记出了均方根值、峰值、峰间值。



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：

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

$$I_{\text{有效}} = \frac{U_{\text{有效}}}{R} = \frac{12V}{1\,200\Omega}$$

$$I_{\text{有效}} = 0.01A = 10mA$$

$$I_{\text{峰值}} = \frac{U_{\text{峰值}}}{R} = \frac{16.97V}{1\,200\Omega}$$

$$I_{\text{峰值}} = 0.01414A = 14.14mA$$

$$I_{\text{峰间}} = \frac{U_{\text{峰间}}}{R} = \frac{33.94V}{1\,200\Omega}$$

$$I_{\text{峰间}} = 0.02828A$$

$$I_{\text{峰间}} = 28.28mA$$

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。

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，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

二、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 23-6(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大而增大。当信号电压达到最大值时，电流也达到了最大值。图 23-6(B) 显示了这个电路的电流和电压的波形图。

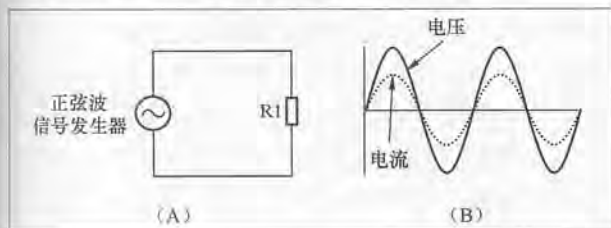


图 23-6 这个简单的电路图举例说明了电阻器上的交流电压和电阻器上的电流之间的相位关系。图 23-6 (B) 为电压和电流的波形。注意，这两个波形是同相的。

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。相位涉及到时间，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° 的角度之间建立联系。图 23-7 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。

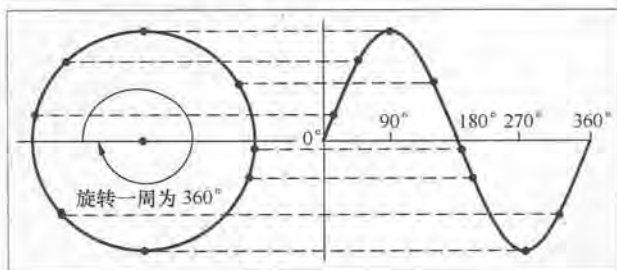


图 23-7 我们通常把每个周期和旋转轮旋转一周建立联系。波形上的每一个点都与旋转轮上的一个旋转角度相对应。一个完整的周期是 360° ，我们用角度测量的方法来表示两个波形之间的相位关系。

图 23-8 显示两个异相关系的波形图。图 23-8(a) 中的波形到达波峰的同时，图 23-8(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° 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。

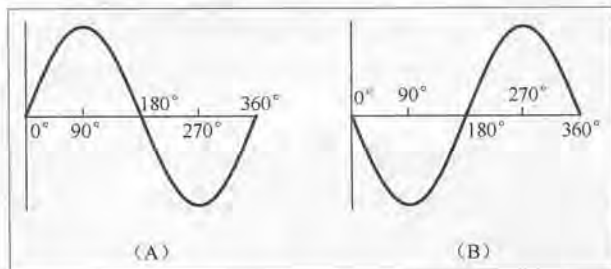


图 23-8 这两个波形看起来像完全相反。当图 23-8 (A) 中的波形到达波峰时，图 23-8 (B) 中的波形达到波谷。我们说这两个波形的相位差是 180° 。

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° 到 360° 之间，只有当波形之间的相位角度是 0° （或 360° ）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° 。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° 。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。

三、电容器上的电压和电流

容抗是交流电通过电容器时电容器对电流的阻力。交流电的频率越低，容抗越大，随着频率的增高，容抗减小。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 23-9 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，

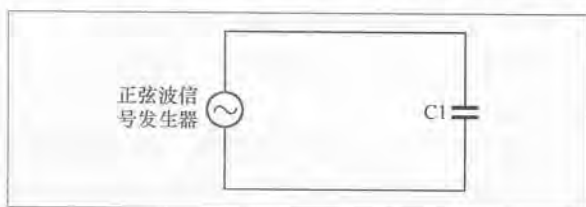


图 23-9 我们将用这个电路来研究电容器的电压和电流之间的关系。当电路中只有电压源和电容器时，我们可以用容抗替代欧姆电路中的电阻进行计算。

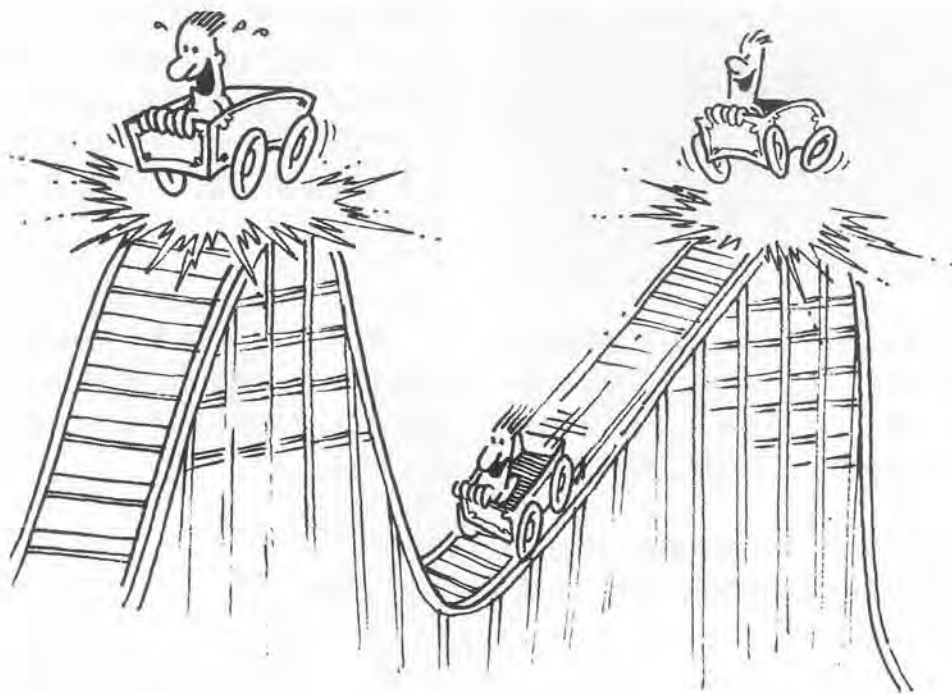
电容器上的电压也达到最大值，此时电流为零。

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 23-10 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 23-11 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相位关系呢？研究图 23-11，注意到当电压波形即将从零开始它的正半个周期变化时，电流的波形已经达到正向最大值。当电压波形为正向最大瞬间，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° 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。

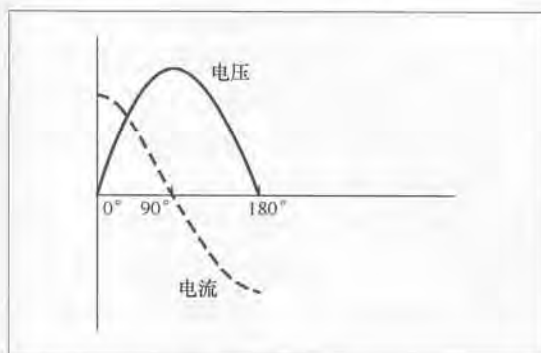


图 23-10 这幅图描述了在外加电压的正半个周期里，电容器的电流是如何变化的。图中，我们用实线表示电压波形，用虚线表示电流波形。我们没有在图中标出电压和电流的振幅范围。这两个波形具有不同的振幅，所以你很 easy 就可以区分这两条曲线。

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° 的点？在图 23-11 中可以看到，电流波形在 0° 时到达正向最大值，电压波形在 90° 时才到达正向最大值。电流波形在 180° 时到达负向最大值，电压波形在 270° 时到达负向最大值。

可见，电压波形总要比电流波形落后 90° 。

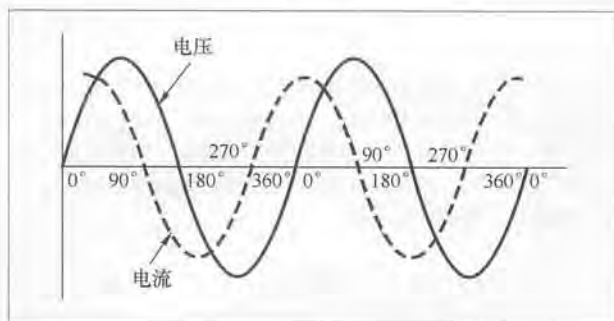


图 23-11 这幅图显示了在外接电压波形的两个完整周期里，电流是如何变化的。实线和虚线以及不同的振幅帮助你区分电压和电流波形。

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，也就是说电场的变化和施加的电压具有同相关系。

四、电感器中的电压和电流

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 23-12 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。

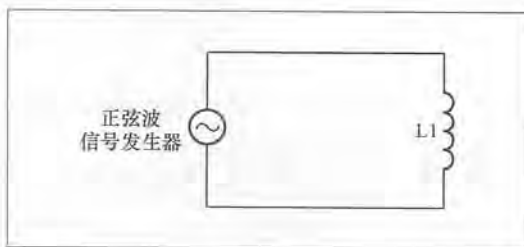


图 23-12 这个交流信号发生器供给电感器一个电流。这个理想的电路中没有任何电阻。当流过电感器的电流增加时，电感器将一部分电能转化为磁场储存的能量，而当流过电感器的电流减小时，电感器把储存的能量释放到电路中。这个过程每隔半个周期重复一次。

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。电流从为零开始向正峰值开始增加，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 23-13 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。

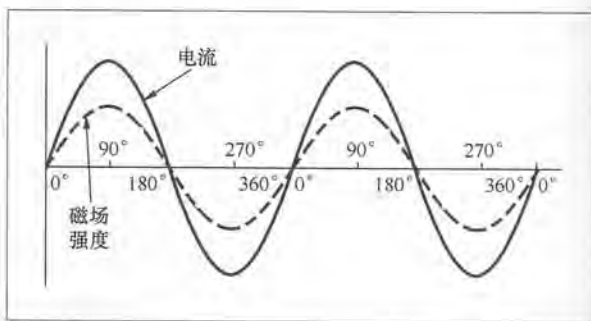


图 23-13 此图为电流增大时电感器上的磁场也随之增大的波形图。当电流减小时，磁场强度也减小。如果电流方向发生反转，磁场方向也发生反转。电感器周围的磁场与电感器的电流相位相同。

记住，变化的磁场会在电感器上产生感应电压。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。

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 23-14 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 23-14 中可以看到, 感应电压比电流滞后 90° (我们也可以说电流比感应电压超前 90°)。

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。

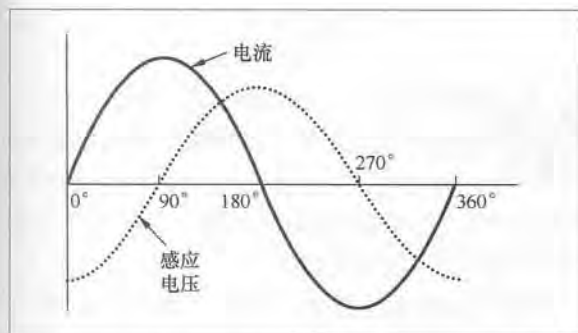


图 23-14 在图中, 粗实线表示通过电感器的电流。点虚线表示变化磁场在电感器上产生的感应电压。注意, 感应电压滞后电流 90° (电流超前感应电压 90°)。

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° 的相位差。图 23-15 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 23-15 中, 外加电压在 0° 时, 达到正向最大值。电流在 90° 时达到正向最大值; 电压在 180° 时达到负向最大值, 电流在 270° 时达到负向最大值。可见, 外加电压领先电流 90° , 我们也可以说电流滞后外加电压 90° 。

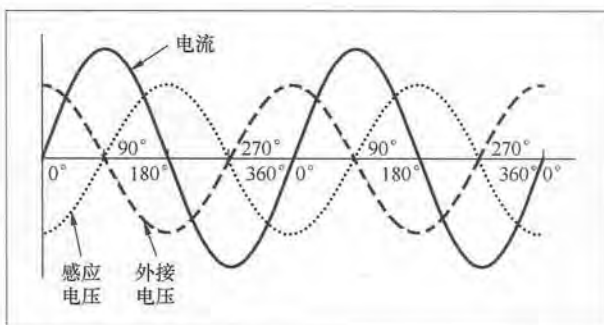


图 23-15 这里我们在图 23-14 基础上添加了短划线。新加的短划线表示电感器上的外加电压。外加电压和感应电压具有 180° 的相位差, 感应电压超前电流 90° , 我们也可以说电流滞后感应电压 90° 。



五、电感器和电容器的电路电抗

给 电容器外加一个交流电压，就会产生一个相位超前电压 90° 的电流。给电感器外加一个交流电压，则会产生一个相位滞后电压 90° 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 23-16 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。

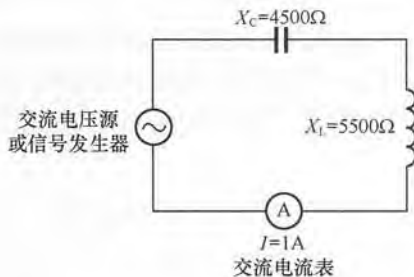


图 23-16 我们用这个电路来研究电路中容抗和感抗的组合效果。电抗值适用于一个输出频率的信号发生器。虽然不知道输出频率有多大，但这不会影响我们的计算。交流电流表测得电路中的电流值为 1A。

图 23-16 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° 。我们是怎么知道的呢？图 23-17 可以帮助我们理解这个结论。

如图 23-17(A) 所示，我们建立一个 x - y 坐标轴，

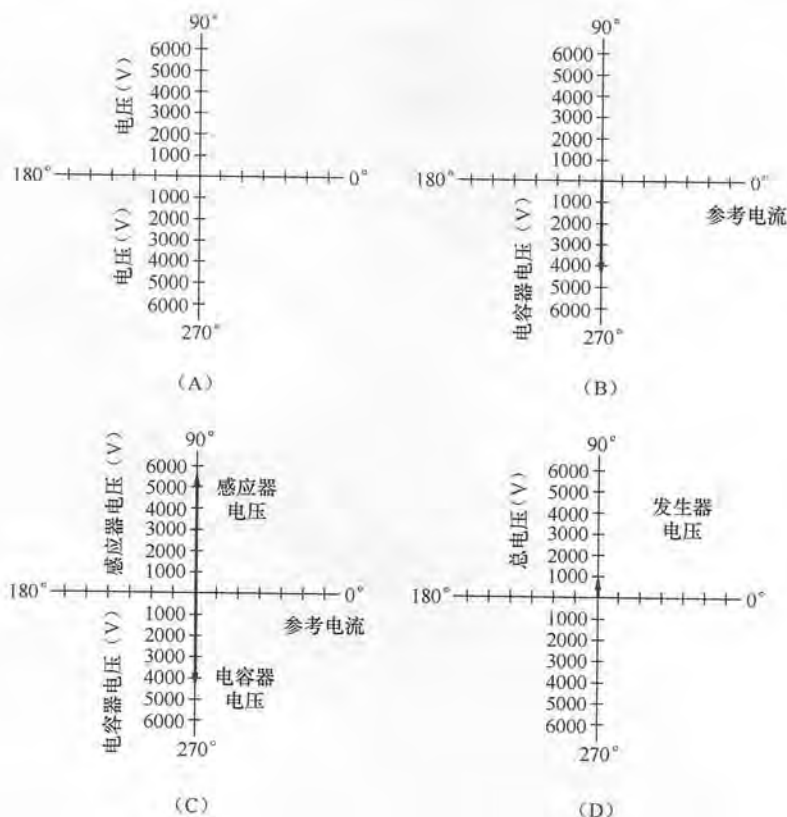


图 23-17 这个图说明了我们如何表示串联电路中电感器和电容器的电压。我们从 x 轴的右边开始，以逆时针方向测量角度。因为电容器电压滞后电流 90° ，我们在 270° 位置标记出了电容器电压。我们在 90° 位置标记出了电感器电压，也就是说电感器电压超前电流 90° 。我们可以从电感器电压中减去电容器电压就可以得到发生器的总电压。图 23-17 (D) 表示电容器和电感器的组合的电压是 $1\ 000\text{V}$ 。

并在此基础上建立一个极坐标，坐标轴的水平线右侧是 0° ，坐标轴竖轴的顶部为 90° （如果你不了解极坐标，可以回顾本书中数学技巧单元的相关章节内容）。

接着，我们在图中标识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 23-16 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 $4\ 500\Omega$ 的电抗，我们把这两个值相乘可得电容器的电压：

$$\begin{aligned} U &= IR \\ U &= IX_C = 1\text{A} \times 4\ 500\Omega \\ U &= 4\ 500\text{V} \end{aligned}$$

电容器上的电压滞后于电流 90° 。如果我们在 0° 位置来表示电流的相位，那么需要在 270° 的位

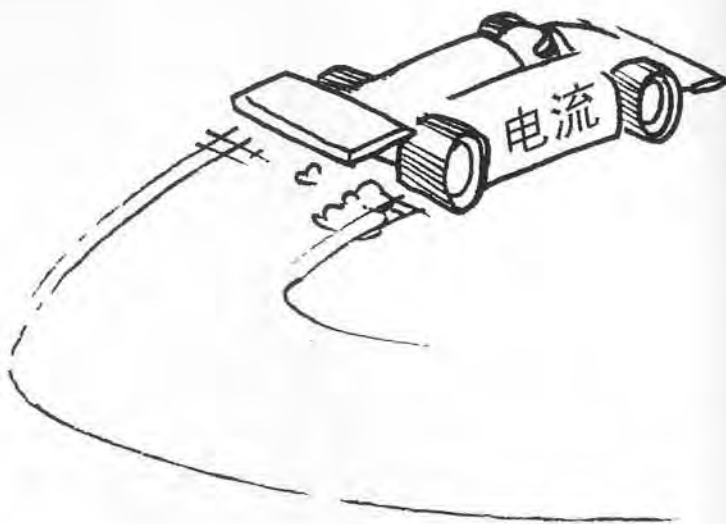
置来表示电容器电压的相位。这样正好使电容器电压滞后电流 90° 。图 23-17 (B) 中添加了电容器电压。

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 23-16 中可以知道感抗为 $5\ 500\Omega$ 。我们再次利用欧姆定律，把两个值相乘，得到电感器电压：

$$\begin{aligned} U &= IR \\ U &= IX_L = 1\text{A} \times 5\ 500\Omega \\ U &= 5\ 500\text{V} \end{aligned}$$

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 23-17 (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 $5\ 500\text{V}$ 减去



4 500V，也就是1 000V。电感器电压和电容器电压怎么可能比总电压大呢？这就是电抗的一个比较有趣的属性。

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。所以能量在电容器和电压器之间来回地传递。如果电路中不存在电阻时（就像图 23-16 中的理想电路），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。

$$U = IX$$

其中 X 表示电路联合电抗

$$X = X_L - X_C$$

$$X = 5\,500\Omega - 4\,500\Omega = 1\,000\Omega$$

$$U = 1A \times 1\,000\Omega = 1\,000V$$

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 23-7(D)，因为电容器

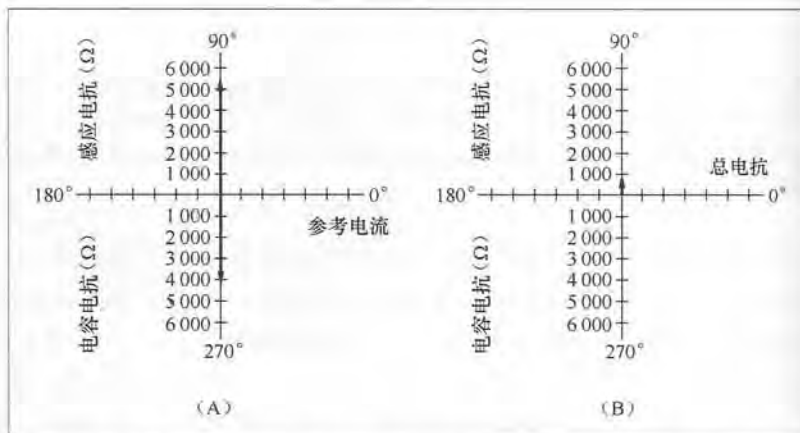


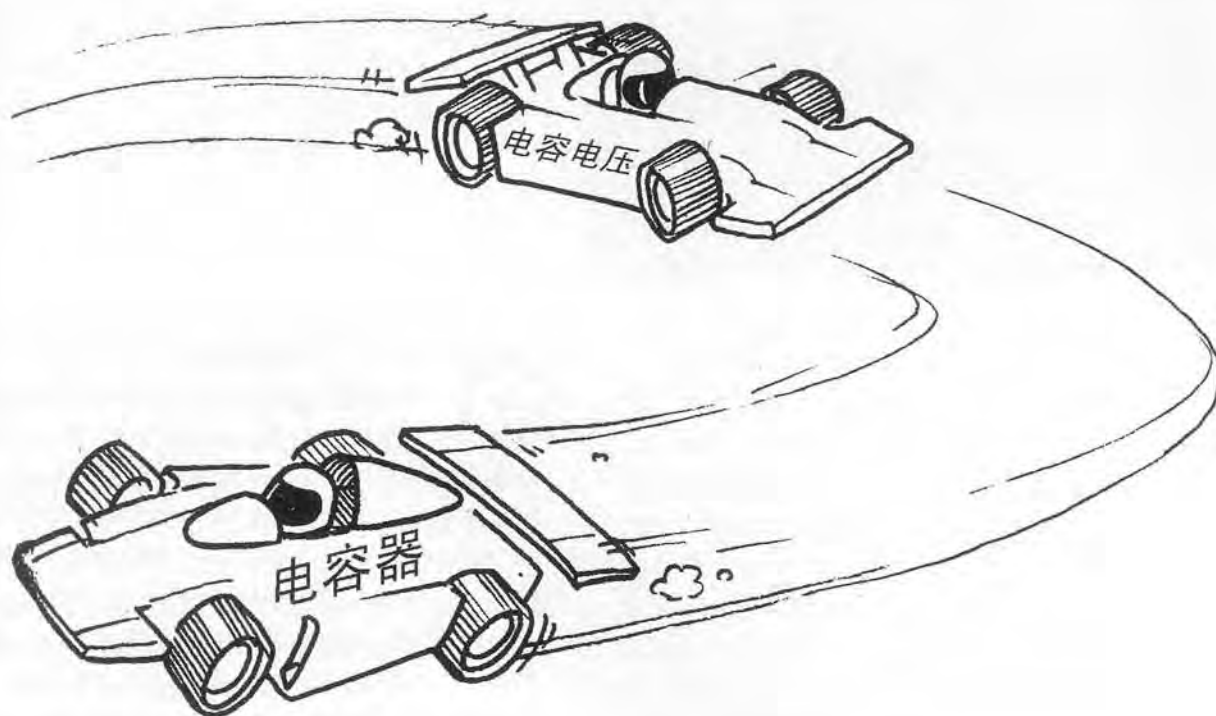
图 23-18 在表示串联电路的电抗时，我们采用的方式和图 23-17 类似。感抗的方向为 y 轴正向，也就是 90° 位置，容抗的方向为 y 轴负向，也就是 270° 位置。

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 x 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 23-18 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° 。

如果电路包含多个电感器和电容器又该怎么办呢？简单！只要将所有的感抗相加，标在图中 90° 位置上，然后把所有的容抗相加，并标在图中 270° 位置上。总的感抗减去总的容抗，就可以得到电路的总电抗。

图 23-19 所示的电路中，总电抗有多大呢？首先将 3 个感抗相加：

$$\begin{aligned} X_{L1} &= 250\Omega \\ X_{L2} &= 200\Omega \\ X_{L3} &= 150\Omega \\ X_{L\text{总}} &= 600\Omega \end{aligned}$$

接着将 2 个容抗相加：

$$\begin{aligned} X_{C1} &= 450\Omega \\ X_{C2} &= 250\Omega \\ X_{C\text{总}} &= 700\Omega \end{aligned}$$

现在把这两个值合并：

$$\begin{aligned} X_{\text{总}} &= X_{L\text{总}} - X_{C\text{总}} \\ X_{\text{总}} &= 600\Omega - 700\Omega = -100\Omega \end{aligned}$$

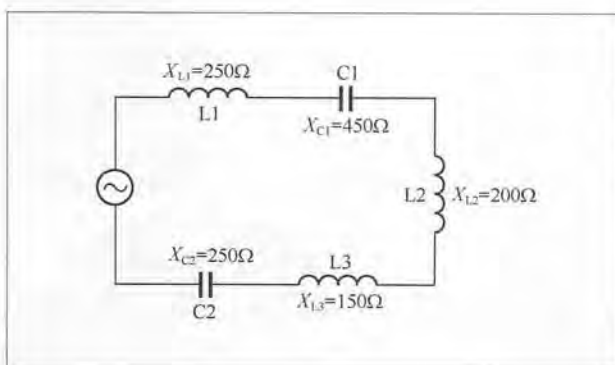


图 23-19 电路中通常有不止一个电容器和一个电感器。把所有的感抗相加后，再减去所有容抗的和，我们就可以得到串联电路的总电抗。

这一次容抗大于感抗。总的电抗表现为容抗，这也说明总电压相位滞后电路电流 90° 。

在这一节中只我们讨论了串联电路。求解串联电路总电压和电路电抗的方式不能直接应用到并联电路中。在本章以后的章节中，你将会学习到并联电路的电压、电流和电抗的计算方法。

六、RL 电路中的电压和电流

我们研究了只有电源、电感器和电容器的理想电路，你从中学会了如何计算电路电抗。通过前面的学习，你可以计算出电感器和电容器上的电压，确定电压和电流之间的相位关系。但是所有这些电路计算都没有包含电路中的电阻。

所有实际电路中都会有一定的电阻，电感器的导线、电容器的连接导线也存在一定的电阻。可以说，实际电路的每一部分都有一定的电阻。在这一节中，你将学到实际电感器电压的计算方法，也可以学到电感器电流和电压之间相位差的测量和计算方法。

在图 23-20 的电路中，一个理想电感器和电阻器串联在一起。电阻器可以表示实际电感器的电阻。不过在这个例子中，我们将电感器的电阻看作是电路中一个单独存在的元件。

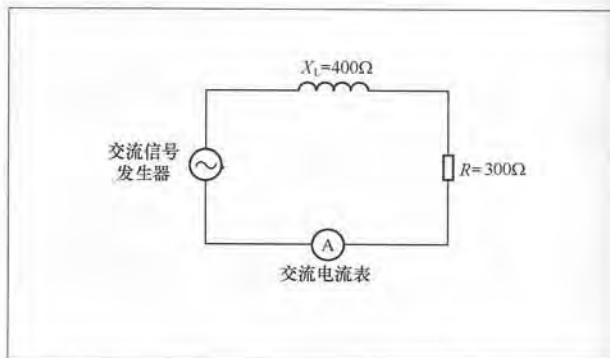


图 23-20 实际的电感器总会存在一定的电阻。这个电路把一个理想电感器和电阻器串联起来。这个电阻器包含了电路中所有电阻器的电阻，也包含了导线电阻和其他元件的电阻。

假设我们读出电流表的读数是 20mA。这是一个串联电路，因此电路中每个部分的电流都是 20mA。那么，信号发生器输出的电压值是多大呢？

为了解决这个问题，我们需要分别计算电阻器和电感器上的电压，然后将这两个值合并。由于电阻器和电感器上的电压相位不同，所以我们不

能简单地把两个数值相加。

我们将会用欧姆定律来计算电压。对此你会感到惊讶吗？

$$U_R = IR \quad (23-5)$$

$$U_R = 20 \times 10^{-3} \text{ A} \times 300 \Omega$$

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

电阻器上的电压是 6V。

$$U_L = IX_L$$

$$U_L = 20 \times 10^{-3} \text{ A} \times 400 \Omega$$

$$U_L = 8 \text{ V}$$

电路中的电感器电压是 8V。

现在让我们来看看如何把这两个电压合并起来。首先，我们用一个图来表示电流和电压之间的相位关系。图 23-21(A) 为一个坐标轴，x 轴和 y 轴上的度量单位是角度。我们把 0° 线作为电流参考线。

电阻器上的电压和电流具有同相关系。我们把电阻器电压标记在 0° 轴线上，如图 23-21(B) 所示。

电感器上的电流和电压之间的相位关系又是什么呢？在记忆这些相位关系时，我们可能会觉得有些麻烦，用来帮助我们记忆的词在英语中叫做 mnemonic（像这样用来辅助记忆的词叫做助记符，这个单词的英语发音为 “no-mon-ik”，这是一个英文单词，而不是电子学术语）。

当你需要回忆起电感器上的电流和电压的相位关系时，只要想到你有一个名叫 ELI 的朋友就可以了（注：在美国，电压用 E 表示）。我们用字母 L 来表示电感器，字母 E 来表示欧姆定律中的电压，字母 I 来表示欧姆定律中的电流。所以无论何时你想起 ELI 时，就会想起电感器的电压的相位总在电流之前。因为单词中字母 E 在 I 之前，所以是电感

器上的电压的相位超前于电流。

你的朋友 ELI 甚至可以帮助你记住电容器的电流和电压之间的相位关系。因为 ELI 的工作是卖冰激淋的，所以他就是 ICE man（冰激淋售货员）。ICE 这个单词中，I 在 E 之前。这个第二个助记符 ICE 将在下一节中派上用场。

好吧，现在回到我们的问题中来。ELI 告诉我们电感器中电压超前电流。我们可以如图 23-21(B) 所示，把电感器电压标记在 90° 线上。

上一部分非常容易。现在我们加深难度。用我们在图 23-21(B) 上画的两个电压作为起始点，画一个如图 23-21(C) 所示的完整矩形。如果你使用的是方格纸，在 0° 线上第 6 格上作一条 0° 线的垂线，用来表示 90° 轴上的 8V 的电压。然后在 90° 线上第 8 格作一条垂直于 90° 线的垂线，用来表示 0° 轴上的 6V 的电压。我们只是在这里做一个草图，所以只画了个比较粗糙的矩形。在图中从原点（轴的交叉点）到矩形的对角画一条虚线。请仔细按照步骤来操作，在这里不要走捷径，这里也没有捷径可走。

当你画的图形看起来像图 23-21(C) 时，就可以准备计算总电压了。这里需要用到三角学知识。你对 sin、cosine、tangent 这些术语还熟悉吗？如果不熟悉，你应该回过头去复习一下本书中数学技巧单元章节中的三角学知识。

矩形的任何一半都形成一个 90° （直角）三角形。我们现在已经知道直角三角形的两条边，要求出三角形的斜边（直角的对边）。在图 23-21(C) 中找到标有 A 的角度。

我们用正切函数来求角度 A 。正切是角度对边与角度邻边的比值：

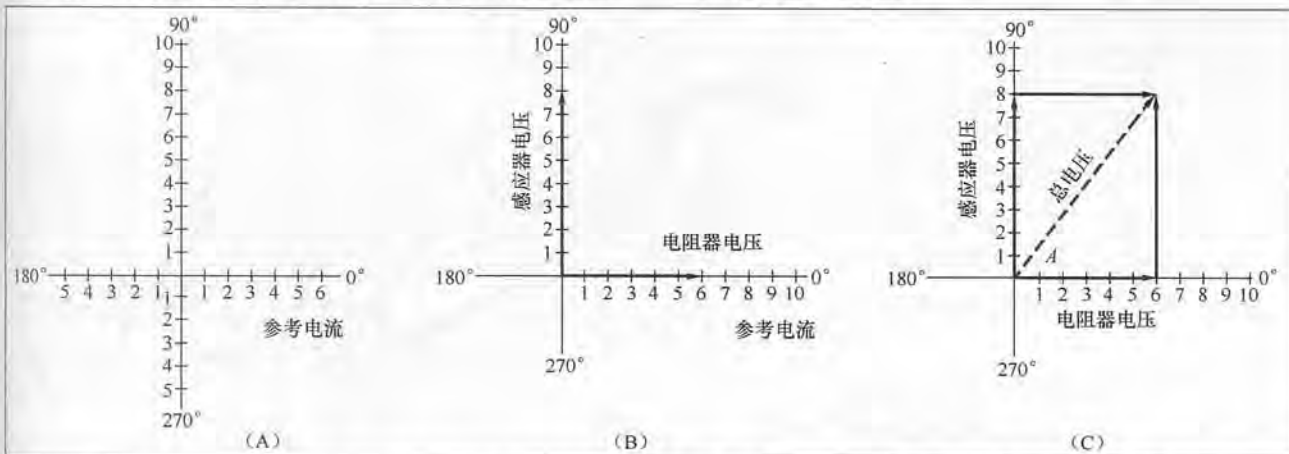


图 23-21 这个图表示我们如何计算电阻器电压和电感器电压的方法。在图 23-20 (C) 中，我们通过先画矩形图，然后从原点出发画一条斜线（对角线），求出总电压。正文中说明了如何用画图法计算总电压的方法。

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{直角三角形邻边}} \quad (23-6)$$

$$\tan(A) = \frac{8V}{6V} = 1.33$$

现在用你的计算器来求出反正切值。

$$A = \tan^{-1}(1.333) = 53.12^\circ$$

最后，可以用这个角度和正弦函数来求出直角三角形斜边：

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{直角三角形斜边}} \quad (23-7)$$

解公式求得直角三角形斜边，此斜边就是我们电路中的总电压。

$$\begin{aligned} \text{斜边} &= \frac{\text{对边}}{\sin(A)} \\ U_{\text{总}} &= \frac{8V}{\sin(53.12^\circ)} = \frac{8V}{0.800} \\ U_{\text{总}} &= 10V \end{aligned}$$

什么是电路中电流和总电压之间的相位角呢？我们计算的角 A 就是它们之间的相位角。我们在本节前部分就计算出了这个角度。电路中施加的电压超前电流 53.12° 。

你也可以用其他方法来求解这个问题。例如，在已知道两条边的情况下，你可以使用勾股定理来求出直角三角形的斜边，也就是总电压（需要将两条边分别平方后相加，然后再求其平方根）。当然你也可以使用其他三角函数达到相同的效果。

我们用阻抗来表示电路中电阻和电抗的总和。与求电压的方式相同，我们可以用画图法和三角几何知识来求出电路中的阻抗。

在求阻抗时，我们可以把电阻的阻值标在 0° 线上，把感抗标在 90° 线上。这正和我们求电路中这些元件的总电压一样。在图 23-20 中，我们标出了为解决这个问题所涉及的电阻和感抗。对角线表示图 23-19 电路中的阻抗。

我们可以按照求解总电压的步骤来计算阻抗。首先用正切函数来求解角度 A ，然后用正弦公式求得直角三角形的斜边，也就是全电阻的值：

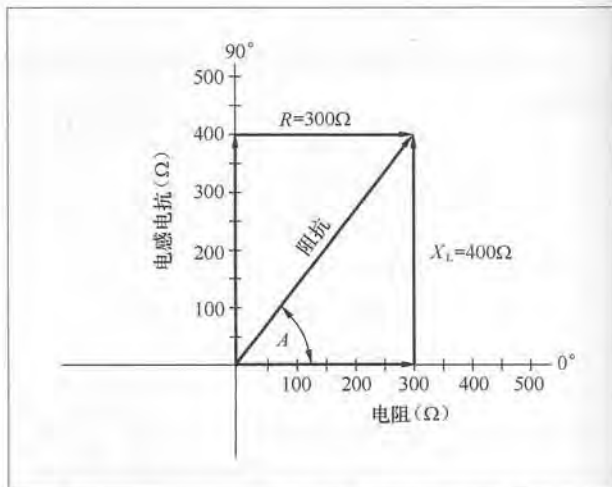
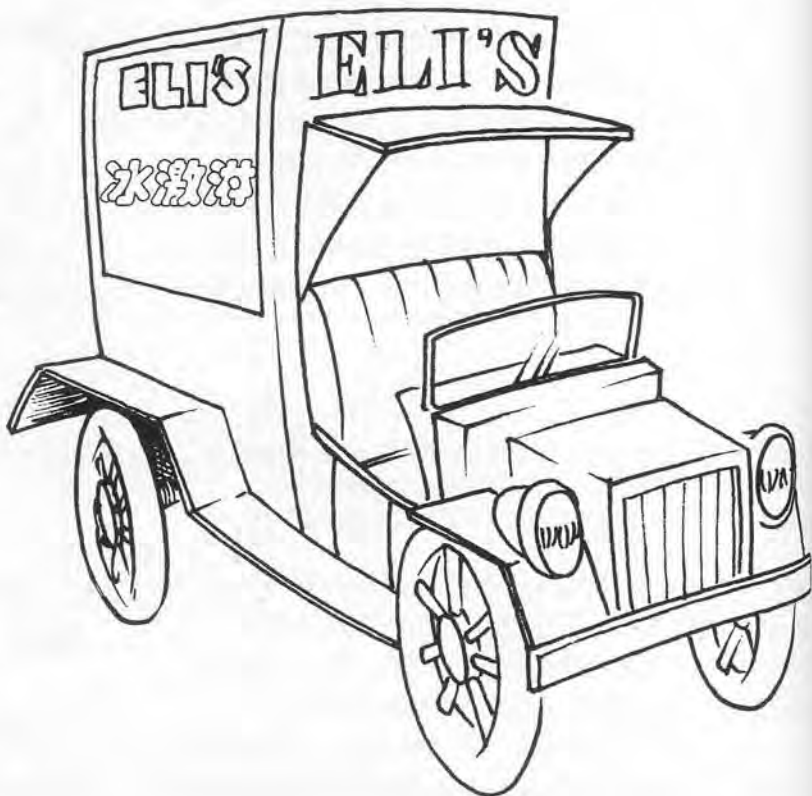


图 23-22 我们可以用与图 23-20 相似的方式来表示电路电阻和电抗。利用矩形中形成的三角形，我们可以计算出这个电路的阻抗。正文中说明了计算的步骤。



$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\tan(A) = \frac{400\Omega}{300\Omega} = 1.333$$

现在用反正切函数求解角度 A 。

$$A = \tan^{-1}(1.333) = 53.12^\circ$$

可以看到，这个阻抗的相位角度和电压与电路电流的相位角相同。

$$\text{直角三角形斜边} = \frac{\text{对边}}{\sin(A)}$$

$$\text{全电阻} = \frac{400\Omega}{\sin(53.12^\circ)} = \frac{400\Omega}{0.800}$$

$$\text{全电阻} = 500\Omega$$

在电路图和计算中，我们通常用大写字母 Z 表示阻抗。这个电路的阻抗 Z 在 53.12° 时是 500Ω 。
因为阻抗和相位角有关，所以在描述阻抗大小时一

定要标出它的相位角。如果相位角度不同，即使阻抗相等，对电路的影响也会不同。

最后，让我们在欧姆定律中使用阻抗来求解总电压。注意我们测量出此时电路的电流为 20mA 。在公式 23-8 的欧姆定律中用阻抗来替代电阻：

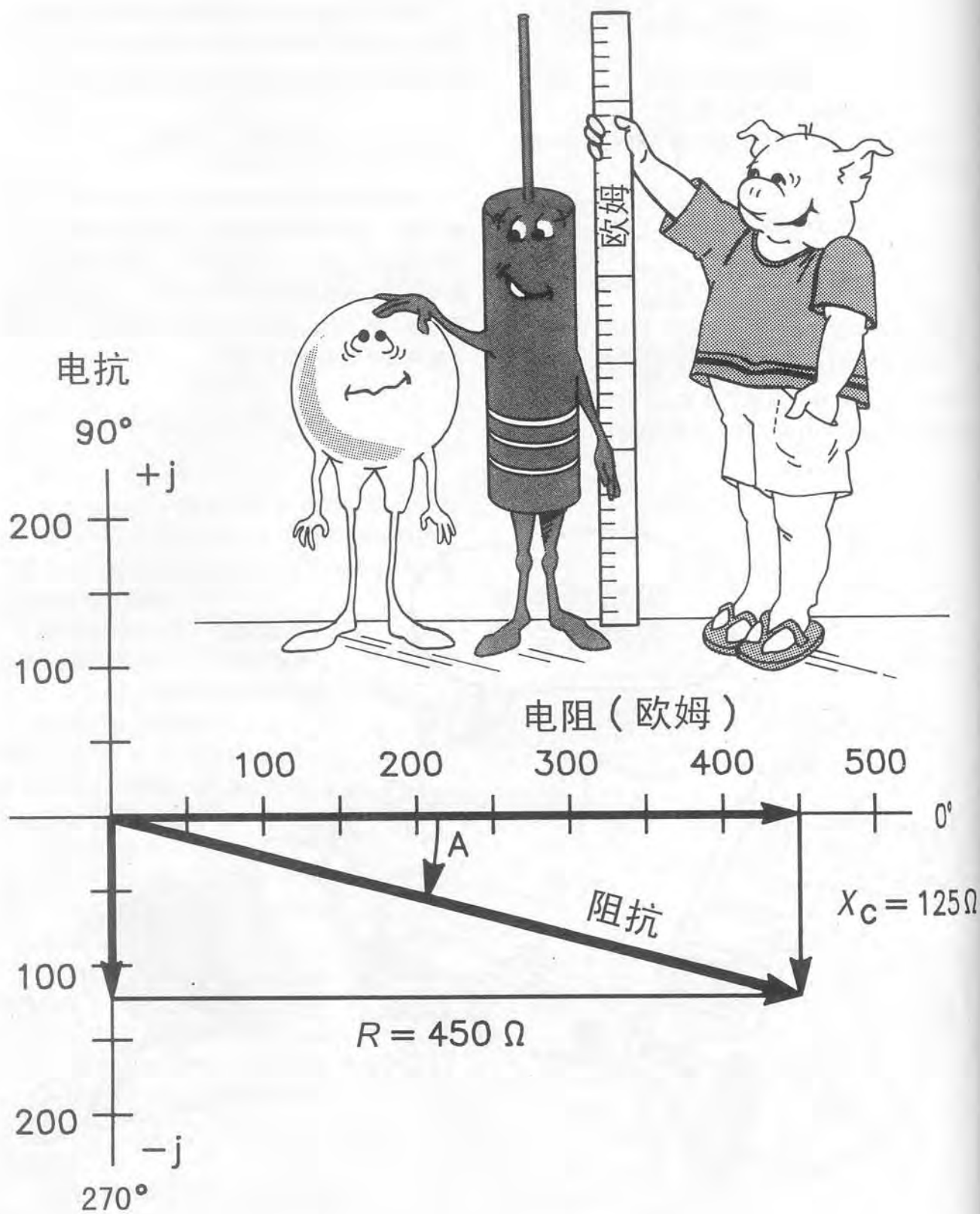
$$U = IZ \quad (23-8)$$

$$U = 20 \times 10^{-3} \text{A} \times 500\Omega$$

$$U = 10\text{V}$$

当发现这个值与前面计算出来的电压值相同时，你们有没有感到惊讶呢？我们发现可以用两种方法来计算总电压。第一种方法，通过把电阻器上的电压和电感器上的电压合并起来，可以求出总电压。第二种方法，在计算出电路的阻抗后，把它代入欧姆定律中来求解总电压。





七、RC 电路中的电压和电流

所有实际应用中的电容器都有一定的电阻。电容器的引线有电阻，电容极板也有电阻，同时电容板之间的绝缘物质也会损失一部分电能。在这一节中，我们通过把实际电容器看成是一个理想电容器和一个电阻串联来研究实际电路。

图 23-23 是一个理想电容器和一个电阻器串联相接的电路。这个电阻器包含了电容器引线和其他电路导线的全部电阻。正弦波信号发生器提供给电路的电流为 50mA。我们利用欧姆定律来计算出电路的总电压。

由于这是一个串联电路，电路中各处的电流均为 50mA，我们可以用欧姆定律计算出在 450Ω 电阻器上的电压。在使用欧姆定律计算时，只要把电阻替换为容抗。从图 23-23 中我们看到，该电路的容抗为 125Ω。

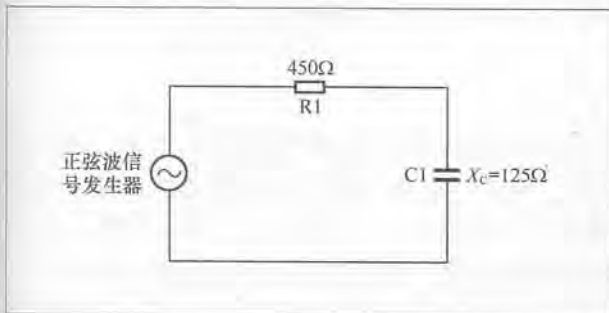


图 23-23 我们用这个电路来研究实际电容器对电路的影响。实际中电路总会有一定的电阻。正文中说明了计算电路总电压的方法。我们也可以计算出这个电路的阻抗。

首先让我们计算出电阻器上的电压，欧姆定律告诉我们，用电流和电阻相乘就可以得到电压。

$$\begin{aligned} U_R &= IR \\ U_R &= 50 \times 10^{-3} \text{A} \times 450 \Omega \\ U_R &= 22.5 \text{V} \end{aligned}$$

在前面的公式中，把 R 替换为 X_C ，可求得电容器上的电压。

$$\begin{aligned} U_C &= IX_C \\ U_C &= 50 \times 10^{-3} \text{A} \times 125 \Omega \\ U_C &= 6.25 \text{V} \end{aligned}$$

想想看，我们可以把这几个电压值相加来求出总电压吗？当然不能，因为这些电压的相位不同，我们只能把同相位的电压直接相加。我们必须利用图形法和三角几何知识来合并电阻器电压和电容器电压。这个求解过程和上一节中求解电阻器和电感器电路的电压相似。

图 23-24(A) 中的图形与上一节中表示电阻器和电感器的图形类似。电阻器上的电压和电流相位相同。用电流作为参考点，所以我们沿着 0° 线方向标记电阻器电压。这样我们电阻器电压标在图 23-24(B) 上。

那么电容器上的电流和电压之间是什么样的相位关系呢？还记得我们冰激淋销售员 (ICE man) 朋友 ELI 吗？助记符 (ICE) 提醒我们经过电容器 (C) 中的电流 (I) 总是超前电压 (U) (也可以说电压滞后电流)。

图 23-24(C) 告诉我们如何把电容器电压标注在图中。我们为什么要把电压标注在 270° 线上呢？因为电容器的电压滞后电路电流 90° ，所以它也滞后电阻器电压 90° 。

在图中分别标出电阻和容抗的值，画出一个矩形。然后从图中的原出发点画一条矩形对角线。整个矩形如图 23-24(D) 所示，则对角线就代表总电压。

我们先用三角正切函数来计算角度 A ，然后再用正弦函数来计算总电压。

$$\begin{aligned} \tan(A) &= \frac{\text{对边}}{\text{邻边}} \\ \tan(A) &= \frac{6.25 \text{V}}{22.5 \text{V}} = 0.278 \end{aligned}$$

接着用你的计算器计算出 0.278 的反正切函数：

$$\begin{aligned} A &= \tan^{-1}(0.278) \\ A &= 15.54^\circ \end{aligned}$$

我们可以用角度 A 的正弦函数来求解直角三角形的斜边。这条斜边，也就是直角的对边，表示电路的总电压。

~)

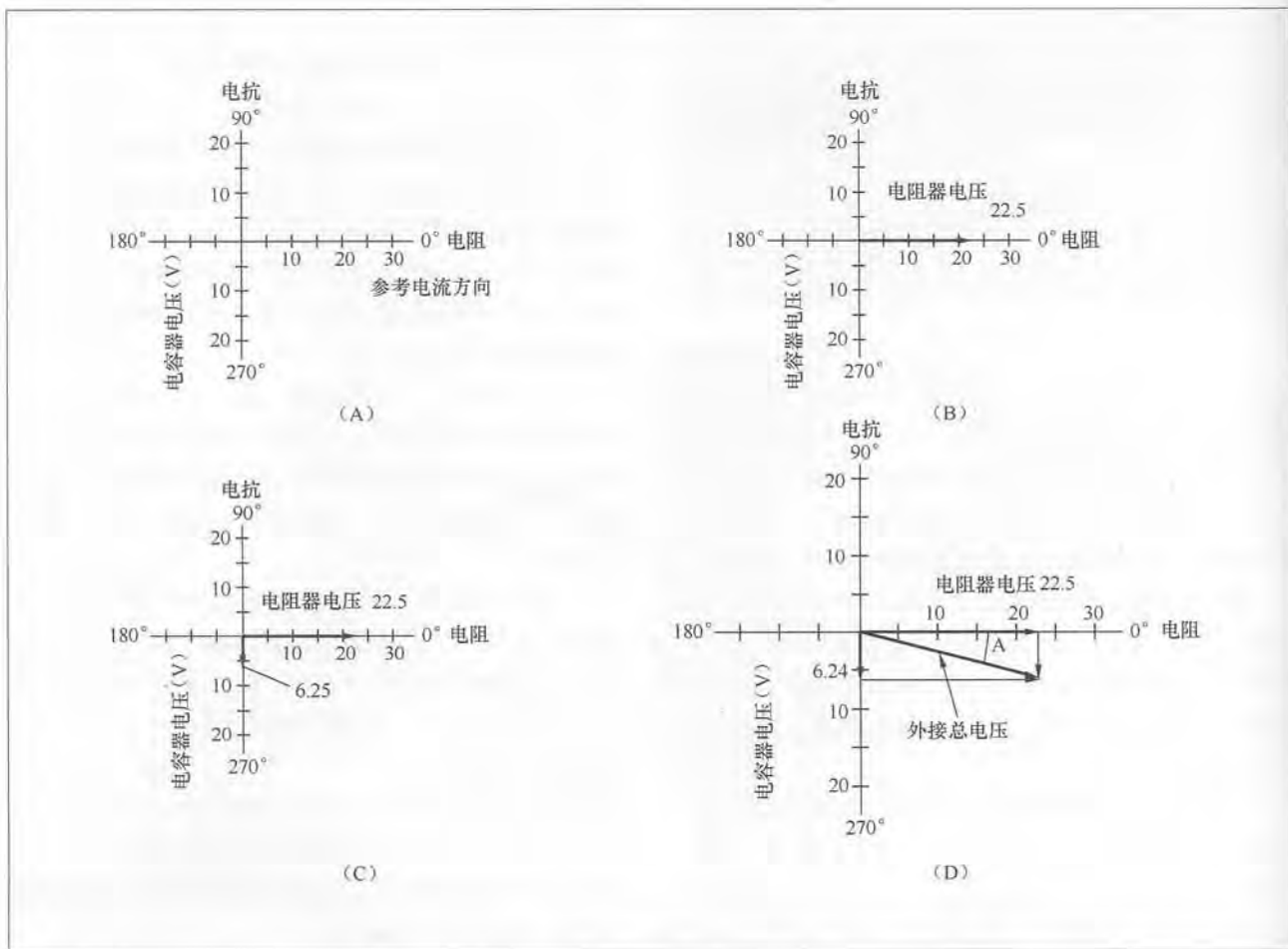


图 23-24 此图告诉我们如何创建一个 $x-y$ 坐标系，并在坐标轴上标记出电阻器和电容器的电压。23-24 (A) 图为坐标轴，用角度来表明相位关系。我们在 23-24 (B) 图中标记出电阻器电压，在 23-24 (C) 图中标记出电容器电压。23-24 (D) 图标记出的总电压为以电阻器电压值和电容器电压值构造的矩形中的对角线。

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}}$$

$$\text{斜边} = \frac{\text{对边}}{\sin(A)}$$

$$U_{\text{总}} = \frac{6.25\text{V}}{\sin(15.54^\circ)} = \frac{6.25\text{V}}{0.268}$$

$$U_{\text{总}} = 23.32\text{V}$$

在我们的图中，角度 A 表示总电压和电路电流的相位角度，前面我们已经计算出这个相位角是 15.54° 。也就是说电流的相位超前总电压 15.54° ，或者说电压的相位滞后电流 15.54° 。

因为这个角度是从 0° 开始顺时针移动而形成，所以我们通常称这个角为负角。我们从 0° 开始逆时针方向测量的角为正角。为了准确完整地描述这个电压，我们把它描述为在 -15.54° 时，总电压为 23.32V 。

可用另一种方法来形成这个负角。我们在 270° 线上，也就是负向电抗轴上来标记出电容器电压。事实上，在实际中，将容抗值标记为一个负值，通常情况下在小写字母 j 前面加一个“-”号。在这里我们不探究这里使用 j 的数学意义，只是用它来提醒你，容抗的方向在图中为电阻轴的负方向。如果电抗标记为 $j250\Omega$ 或者 $+j250\Omega$ ，这表明它是感抗。在这种情况下，加号表示，在你的图中你必须把这个阻值标在电阻轴的正方向上。

在计算电压时，再回到欧姆定律公式，我们可以在容抗前添加一个“-”号，这使得到的电压成为一个负值。负号说明在图中标记电容器电压时，要沿着阻抗轴的负方向来标记。因此，如果在我们在计算角度时电压取的是一个负值，那么我们的结果就是一个负值。下面就

是这个计算的过程。

$$U_C = IX_C$$

$$U_C = 50 \times 10^{-3} \text{A} \times -j125 \Omega$$

$$U_C = -j6.25 \text{V}$$

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\tan(A) = \frac{-j6.25 \text{V}}{22.5 \text{V}} = -j0.278$$

因为负号只说明我们是从 0° 线顺时针测量角度，所以现在可以把符号 j 丢弃：

$$A = \tan^{-1}(-0.278)$$

$$A = -15.54^\circ$$

有多种方法可以用来解决三角形问题。你也许想用与我们例题不同的函数来求解总电压，你或许想用勾股定理来求解总电压。其实只要你严格按照步骤进行计算，用不同的方法得到的结果都相同。

假如你想计算电路的阻抗而不是总电压，可以用与求总电压类似的方式来求解。电路阻抗是电阻电抗的组合，可以用直角三角形和三角函数来求解。

在构造阻抗三角形时，我们总是沿着 0° 线来标记电阻，沿着 270° 线来标记容抗。电阻和容抗的方向与电阻器和电容器上电压的方向完全一致。

图 23-25 为解决问题所画的电路阻抗图。因为是容抗，所以相位角度为负值，图中对角线表示电路阻抗 Z 。可以用正切函数来计算相位角度，用正弦函数来计算电路阻抗值：

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\tan(A) = \frac{-j125 \Omega}{450 \Omega} = -0.278$$

接着，用你手头的计算器用上的反正切函数求解角度 A ：

$$A = \tan^{-1}(-0.278)$$

$$A = -15.54^\circ$$

由于我们是从 0° 开始顺时针测量这个角度，所以角度 A 为负角。

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}}$$

$$\text{斜边} = \frac{\text{对边}}{\sin(A)}$$

$$Z = \frac{-j125 \Omega}{\sin(-15.54^\circ)} = \frac{-j125 \text{V}}{-0.268}$$

$$Z = 466 \Omega$$

注意在这里已经去掉负号。阻抗的值为正，相位角为负。我们在完整描述阻抗值时，必须要指定角度。

$$Z = 466 \angle -15.54^\circ \Omega$$

现在让我们证明一下，这个电路阻抗上的电压是否与前面求解出的电压相等。我们在欧姆定律中使用电路阻抗和电路电流来计算总电压。

$$U_{\text{总}} = IU$$

$$U_{\text{总}} = 50 \text{mA} \times 466 \Omega$$

$$U_{\text{总}} = 50 \times 10^{-3} \text{A} \times 466 \Omega$$

$$U_{\text{总}} = 23.3 \text{V}$$

也许你应该可以猜测出，这个电压落后电流 15.54° 。我们可以将总电压写成：

$$U_{\text{总}} = 23.3 \angle -15.54^\circ \text{V}$$

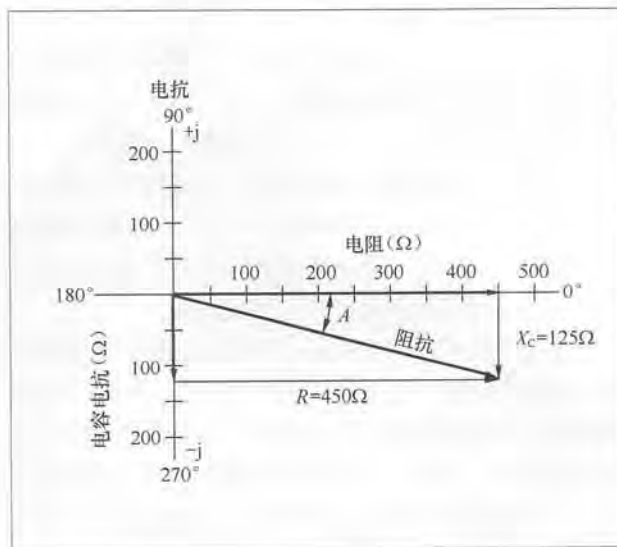


图 23-25 这张图上画出了电阻和容抗。我们用矩形来合并电阻和容抗，并用对角线求得电路阻抗。正文对计算步骤做了具体说明。

八、RLC 电路中的电压和电流

在这一节中，我们将研究带有电阻器、电感器和电容器的串联电路。在研究过程中，我们要结合 RL 电路和 RC 电路中用到的方法。如果你掌握了前面所说的解决 RC 和 RL 中的问题的方法，那么下面的问题对你来说会很简单。如果你在解决这些问题时还有一些困难，不用担心，你可以通过这一节的学习来增强信心。

图 23-26 为一个由电感器、电容器、电阻器组成的串联电路，一个正弦波信号发生器和这些元件相连。为了节省你的计算，我们在图中标出了相应的感抗和容抗值。如果我们只给你电感和电容大小，你还必须知道信号发生器输出信号的频率，才能计算感抗和容抗的值。给出的感抗和容抗值总是和某一个信号频率相对应，如果信号发生器的频率发生改变，那么容抗和感抗也要发生改变。

图 23-26 中，假设我们测出电路中的电流为 450mA，那么信号发生器的输出电压为多大？电路的阻抗又是多大呢？

我们在电抗坐标轴上以相反方向来标记出感抗和容抗，并与以各自电抗相同的方向标记出电感器和电容器的电压，也就是说电感器电压和电容电压的方向相反，而且都是在 y 轴或称之为电抗轴上。

假如我们的电路中有多个电阻器，我们需要把所有电阻器的值相加，合并为一个电阻值。同样，如果我们有多个电感器或多个电容器，也需要分别把它们的电抗相加，得到一个总的感抗值和一个总的容抗值。

让我们先来计算电路中的阻抗。图 23-27(A) 中有一个标有电阻、容抗和感抗的坐标轴。记住前面讲过，感抗的方向沿电抗轴的正方向，要在感抗值前面加上 +j 符号，容抗的方向沿电抗轴的负方向，所以要在容抗前面加上 -j 符号。我们的坐标轴上显示的值如下所示：

$$\begin{aligned} R &= 8\,660\Omega \\ X_L &= +j\,25\,000\Omega \\ X_C &= -j\,20\,000\Omega \end{aligned}$$

下一步来合并这两个电抗值。把一个负数与正数相加，相当于正数减去负数的绝对值。

$$\begin{aligned} X_{\text{总}} &= X_L + X_C \\ X_{\text{总}} &= +j\,25\,000\Omega + (-j\,20\,000\Omega) \\ X_{\text{总}} &= +j\,25\,000\Omega - j\,20\,000\Omega \\ X_{\text{总}} &= +j\,5\,000\Omega \end{aligned}$$

图 23-27(B) 为合并后的图，标记出了电阻和合并后的电抗。现在用这两个值来做一个矩形，矩形对角线表示阻抗。图中有一个直角，因此可以用三角公式来求解阻抗 Z 和相位角 A。

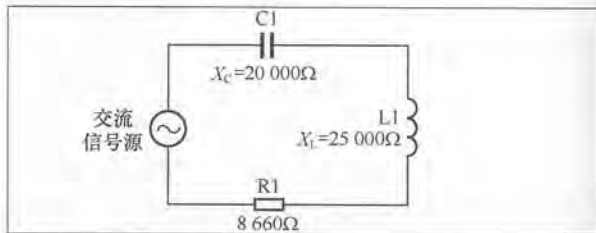


图 23-26 我们用这个电容器、电感器和电阻器串联连接的电路来学习如何计算串联电路的阻抗。我们用类似的方法计算信号发生器施加到电路中每个元件上的电压及其总电压。

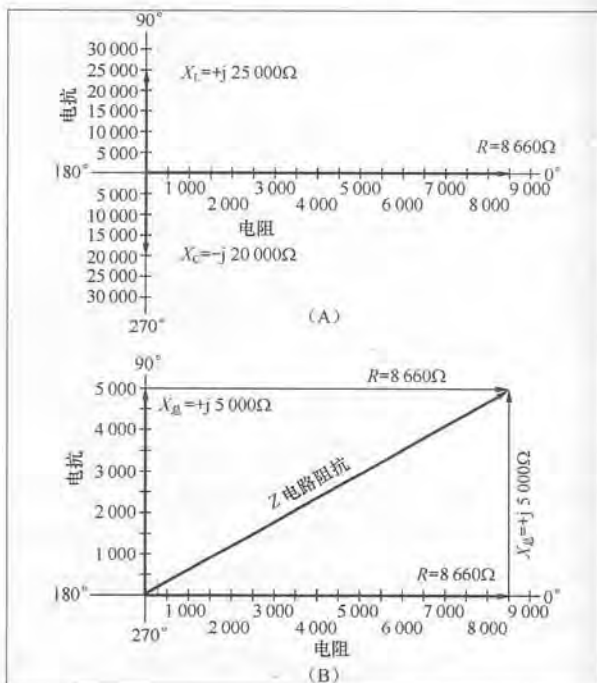


图 23-27 图 (A) 是一个标记了电阻、感抗和容抗的坐标轴。注意到感抗的方向为向 y 轴正方向，也就是 +j 方向。容抗的方向为 y 轴负方向，也就是 -j 方向。

让我们先用正切函数来求解相位角：

$$\begin{aligned} \tan(A) &= \frac{\text{对边}}{\text{邻边}} \\ \tan(A) &= \frac{+j\,5000\Omega}{8660\Omega} = 0.577 \end{aligned}$$

然后用 0.577 的反正切函数求得角度 A：

$$A = \tan^{-1}(0.577) = 30.0^\circ$$

现在让我们用正弦函数来求解电路阻抗。可用下式求出直角三角形的斜边,也就是阻抗的值:

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}}$$

$$Z = \frac{X_{\text{总}}}{\sin(A)}$$

$$Z = \frac{+j5\,000\Omega}{\sin(30^\circ)} = \frac{+j5\,000\Omega}{0.500}$$

$$Z = 10\,000\Omega$$

当包含一个相位角时,我们可以把这个电路的阻抗表示为:

$$Z = 10\,000 \angle 30^\circ \Omega$$

现在让我们用阻抗代入欧姆定律去计算从信号发生器中输出的总电压。

$$U_{\text{总}} = IZ$$

$$U_{\text{总}} = 450\text{mA} \times 10\,000\Omega$$

$$U_{\text{总}} = 450 \times 10^{-3} \text{A} \times 10\,000\Omega$$

$$U_{\text{总}} = 4\,500\text{V}$$

我们用欧姆定律来计算每一个电路元件上的电压,并将它们合并,然后对每种方法产生的结果进行比较。我们利用欧姆定律求出每个元件的电压:

$$U_R = IR$$

$$U_R = 450 \times 10^{-3} \text{A} \times 8\,660\Omega$$

$$U_R = 3897\text{V}$$

$$U_L = IX_L$$

$$U_L = 450 \times 10^{-3} \text{A} \times (+j25\,000\Omega)$$

$$U_L = +j11\,250\text{V}$$

$$U_C = IX_C$$

$$U_C = 450 \times 10^{-3} \text{A} \times (-j2\,000\Omega)$$

$$U_C = -j9\,000\text{V}$$

记住, +j 告诉我们要在 y 轴正方向上标出这个电压, -j 表示要在 y 轴负方向上标出电压。图 23-28(A) 为标记了这 3 个电压的坐标轴。

下一步是合并电感器电压和电容器电压。从 11250V 电感器电压中减去 9000V 电容器电压,就可得合并后的电压。

$$U_x = U_L + U_C$$

$$U_x = +j11\,250\text{V} - j9\,000\text{V}$$

$$U_x = +j11\,250\text{V} - j9\,000\text{V} = +j2\,250\text{V}$$

图 23-28(B) 为将总电抗电压和电阻器电压合并的过程。这个合并后的电压就是信号发生器的总电压。目前为止,这些带有矩形和直角三角形的图形看起来都很相似。或许你已经求出了这个总电压。如果还没有,那么我们现在来求这个值。

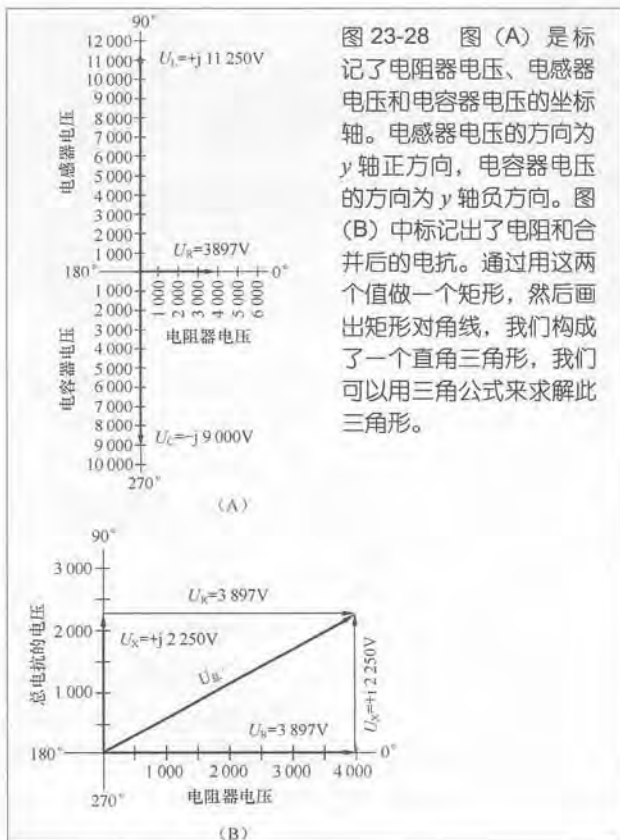


图 23-28 图(A)是标记了电阻器电压、电感器电压和电容器电压的坐标轴。电感器电压的方向为 y 轴正方向,电容器电压的方向为 y 轴负方向。图(B)中标记出了电阻和合并后的电抗。通过用这两个值做一个矩形,然后画出矩形对角线,我们构成了一个直角三角形,我们可以用三角公式来求解此三角形。

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\tan(A) = \frac{+j2\,250\text{V}}{3\,897\text{V}} = 0.577$$

然后用反正切函数求解出角度 A。

$$A = \tan^{-1}(0.577) = 30.0^\circ$$

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}}$$

$$U_{\text{总}} = \frac{U_x}{\sin(A)}$$

$$U_{\text{总}} = \frac{+j2\,250\text{V}}{\sin(30^\circ)} = \frac{+j2\,250\text{V}}{0.500}$$

$$U_{\text{总}} = 4\,500\text{V}$$

在涉及相位角时,可以把信号发生器的总电压表示为如下形式:

$$U_{\text{总}} = 4500 \angle 30^\circ \text{V}$$

当然,对于这样的结果你不会感到惊讶了!

大家有没有注意到,电抗元件(电感器和电容器)上的电压要比信号发生器产生的电压大?这与电容器和电感器存储能量的方式有关,而电感器或者电容器的电压应该等于外接电压与存储能量产生的电压和,所以才会出现电感器和电容器上的电压大于信号发生器产生的电压的现象。

九、并联电路中的电压和电流

到目前为止，我们讨论的都是关于串联电路的分析与计算。不过在电子学中，我们还常常碰到并联电路。我们可以使用与串联电路中类似的方法来解决有关并联电路的问题，但两者存在一些重要的区别。

通常情况下，欧姆定律总是和电压、电流、电阻、电抗或阻抗相关。但在并联电路中，我们不能像在串联电路中那样直接利用图形和直角三角形求出电路阻抗。这个求解过程有点棘手，在这本书中我们忽略这个问题。不过我们要告诉你如何用欧姆定律来计算电路的阻抗。

看图 23-29 所示的电路，这个电路中包含了电阻器、电容器和电感器，一个正弦波信号发生器向这 3 个元件提供电压。发生器输出的电压直接施加到所有 3 个元件上，发生器输出的电流可以有选择地经过电阻器、电感器或电容器。这些事实清楚地表明这是一个并联电路。

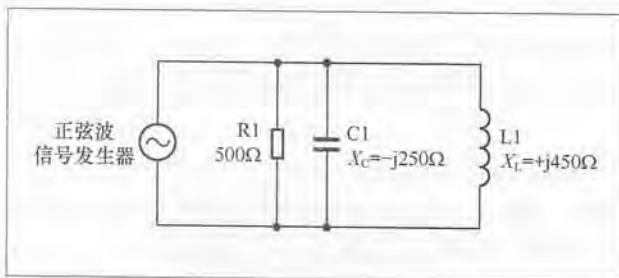


图 23-29 这个并联电路将帮助我们学习如何计算电路中的电流和阻抗，我们将用欧姆定律和三角公式来完成这些计算。正文中对相关步骤进行了解释。

假设我们测量出信号生成器的输出电压为 10.0V，那么电路中经过每个元件的电流是多大呢？公式 23-9、23-10、23-11 分别为求出每个电路元件电流的欧姆定律表示式。

$$U_R = I_R R \quad (23-9)$$

$$U_C = I_C X_C \quad (23-10)$$

$$U_L = I_L X_L \quad (23-11)$$

我们利用这些公式求出电流 (I)，并解出每个元件上的电流值：

$$U_R = I_R R$$

$$I_R = \frac{U_R}{R}$$

$$I_R = \frac{10.0V}{500\Omega}$$

$$I_R = 0.0200A = 20.0mA$$

这是经过电阻器的电流。

$$U_C = I_C X_C$$

$$I_C = \frac{U_C}{X_C}$$

$$I_C = \frac{10.0V}{250\Omega}$$

$$I_C = 0.0400A = 40.0mA$$

我们没有在这个公式中包含 $-j$ 指示符号。稍后，我们就要考虑电容器和电感器中电流的方向。

$$U_L = I_L X_L$$

$$I_L = \frac{U_L}{X_L}$$

$$I_L = \frac{10.0V}{450\Omega}$$

$$I_L = 0.0222A = 22.2mA$$

因为电阻器上的电压和电流相位相同，所以我们可以轻松地在图 23-30(A) 中标记出电阻器电流的方向。 x 轴的正方向表示 0° 相位角，所以这是我们要标注标记 I_R 的地方。

那么在图中哪个位置标记电容器电压呢？嗯，记住我们那个卖冰激淋的朋友 ELI，电容器中电流领先于电压，电流超前电压 90° ，因此我们可以在 y 轴正方向，也就 90° 方向上标记出电容器电流。在串联电路中我们称 y 轴为 $+j$ 轴，现在我们还是称它为 $+j$ 轴，但是要注意电容器电流也是在这个 $+j$ 方向上。

或许你已经能猜出在哪里标记电感器的电流了。由助记符 ELI 可知，电感器的电流滞后于总电压。所以电感器的电流方向为 y 轴负方向，也就是 $-j$ 方向，即在 270° 位置，滞后电压 90° 。

图 23-30(B) 为标记有 3 个电流的坐标轴。我们把电容器电流和电感器电流相加合并。由于电感器的电流是负值，所以在合并过程中，从电容器电流中减去电感器的电流。

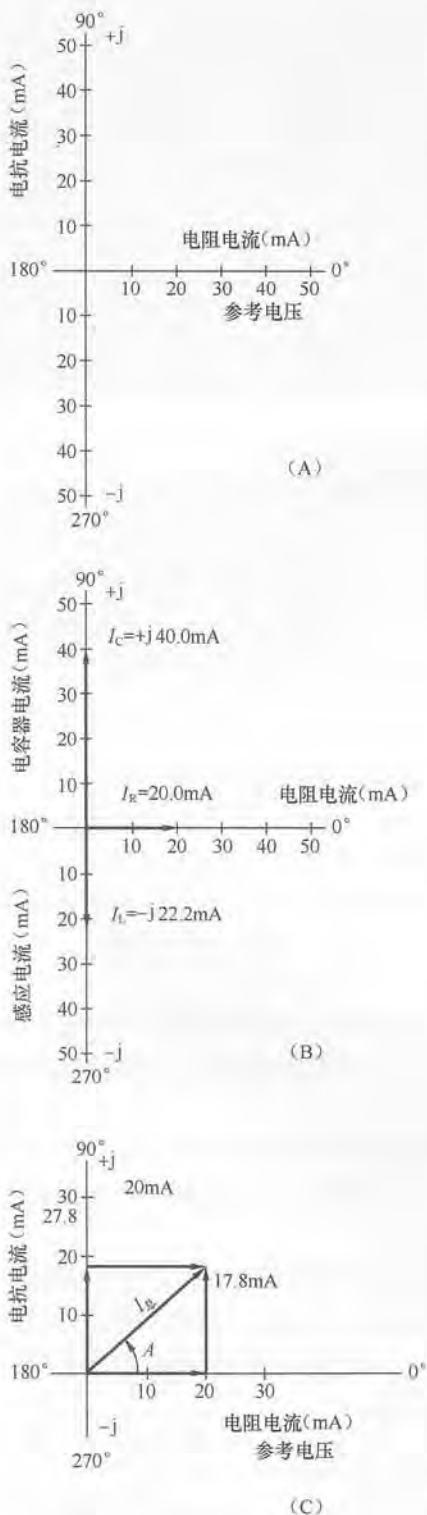


图 23-30 这些图描述了怎样在图中标注每个元件的电流。正文中说明了为什么电容器电流方向为 +j 轴而电感器电流方向为 -j 轴。图 (C) 标识了电阻器电流和合并后的电抗电流。矩形的对角线表示了电路的总电流。

$$I_X = I_C + I_L$$

$$I_X = +j40.0\text{mA} + (-j22.2\text{mA})$$

$$I_X = +j40.0\text{mA} - j22.2\text{mA}$$

$$I_X = +j17.8\text{mA}$$

由于电容器的电流比较大, 所以总的电抗电流方向为 y 轴正方向, 或者叫 90° 上的 +j 方向。我们在图 23-30(C) 中标记出这个值。图中也画出了完整的矩形, 矩形的对角线表示总的电路电流。我们可以再次使用三角公式来计算直角三角形的斜边。这一次, 三角形斜边表示电路的总电流 $I_{\text{总}}$ 。

$$\tan(A) = \frac{\text{对边}}{\text{邻边}}$$

$$\tan(A) = \frac{17.8\text{mA}}{20.0\text{mA}} = 0.890$$

$$A = \tan^{-1}(0.890)$$

$$A = 41.7^\circ$$

$$\sin(A) = \frac{\text{对边}}{\text{斜边}}$$

$$\sin(41.7^\circ) = \frac{17.8\text{mA}}{I_{\text{总}}}$$

$$I_{\text{总}} = \frac{17.8\text{mA}}{\sin(41.7^\circ)} = \frac{17.8\text{mA}}{0.665}$$

$$I_{\text{总}} = 26.8\text{mA}$$

在相位角为 41.7° 时, 总电流为 26.8mA。总电流领先电压 41.7° 。

那么电路中的阻抗为多大呢? 最简单的方法是用欧姆定律来求解电路阻抗, 即

$$U_{\text{总}} = I_{\text{总}} \times Z$$

$$Z = \frac{U_{\text{总}}}{I_{\text{总}}}$$

$$Z = \frac{10\text{V}}{26.8\text{mA}} = \frac{10\text{V}}{26.8 \times 10^{-3}\text{A}}$$

$$Z = 373 \angle 41.7^\circ \Omega$$

当然我们之前已经用电流计算出了这个相位角度。

即使不知道电路总电压, 你也可以用这个方法求出并联电路的阻抗。只要找出电压, 求出通过每元件上的电流就可以了, 而这个电压就是外接电压。

你已经学习了很多电子学的知识, 并且开始研究高等电子学中的内容, 要熟练解决图中电阻和电抗的数学问题, 你还要学习很多的技巧。不过, 这里提供的方法将帮助你不用高等数学就可以求出电路的阻抗。

第 24 章

谐振电路

一、如果感抗与容抗相等，会发生什么

电路中感抗和容抗的作用相反。在电感器中，感应电压和电流有 90° 的相位差。在电容器中，电容电压和电流也有 90° 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° 。在并联电路中，电感器电流和电容器电流的相位差为 180° 。

我们将串联的电感器电压和电容器电压分别画在 y 轴上相反的方向上，然后合并这些电压。在标记电感器电压时，可以在前面添加 $+j$ 符号，表示电压器电压的方向为 y 轴正方向。在标记电容器电压时，在前面添加 $-j$ 符号，表示电容器电压的方向为 y 轴负方向。

并联电路中，电感器的电流和电容器的电流相位差为 180° 。我们沿 y 轴正方向，也就是 $+j$ 方向来标记电容器电流，沿 y 轴负方向，也就是 $-j$ 方向来标记电感器电流。

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？电容器的容抗变大。

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 24-1 中包含了一个线圈电感器的感抗曲线

图，图中直线表示感抗如何随信号频率增大而增大。图 24-1 中还包含了一个电感器感抗的曲线图。在我们增加信号频率时，容抗随之减小。我们没有在图中标出频率范围和电抗范围，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，将出现一个特殊的状态。我们把这种特殊状态称为谐振。

在将感抗和容抗组合时，总会有一个频率使它们的电抗相等。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？下列公式将更新你的记忆：

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_L = 2\pi f_r L = X_C = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

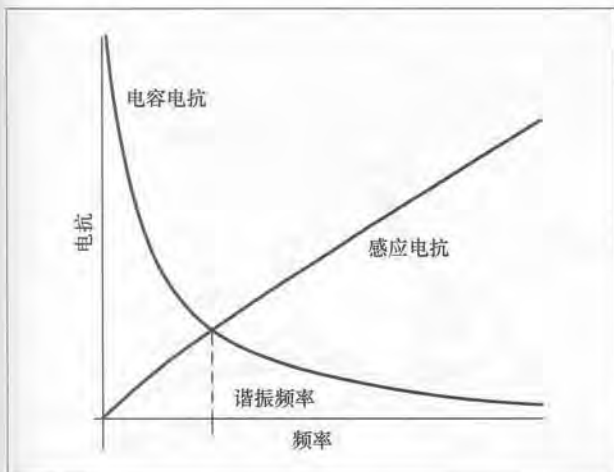


图 24-1 图中直线表示线圈电感的感抗。感抗随着频率的增大而增大。曲线表示电容器的容抗，容抗随着频率的增大而减小。因为具体的数值并不重要，所以 x 和 y 轴上都没有标记具体数值，我们希望表示出一般情况下的图线。对于给定的电容器和电感器，这两条线只有一个交点。这个点表示的就是容抗和感抗组合后的谐振频率。

现在，为了简化公式，我们需要对上式交叉相乘，然后合并同类项，即

$$1 = \frac{1}{(2\pi f_r L)(2\pi f_r C)}$$

$$1 = \frac{1}{(2\pi)^2 (f_r)^2 LC}$$

$$(f_r)^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}$$

最后，对公式两边开平方：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (24-1)$$

让我们用公式 24-1 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 ，那么这两个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，于是

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{6.28 \times 10^{-6} \text{H} \times 20 \times 10^{-12} \text{F}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{125.6 \times 10^{-18} \text{Hz}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times 11.2 \times 10^{-9}} = \frac{1}{7.04 \times 10^{-8} \text{Hz}}$$

$$f_r = 14.2 \times 10^6 \text{Hz} = 14.2 \text{MHz}$$

你可以用公式 24-1 来计算出任何感抗和容抗组合后的谐振频率。你也可以用它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中非常重要。一个谐振电路可以设置振荡器电路的工作频率，谐振电路也可帮助我们选择需要的信号，排除不需要的信号。

图 24-2 所示的谐振电路中，包含有一个简单的可变频率振荡器 (VFO)。这个电路可以用来设置简单的接收机和发射机的工作频率。

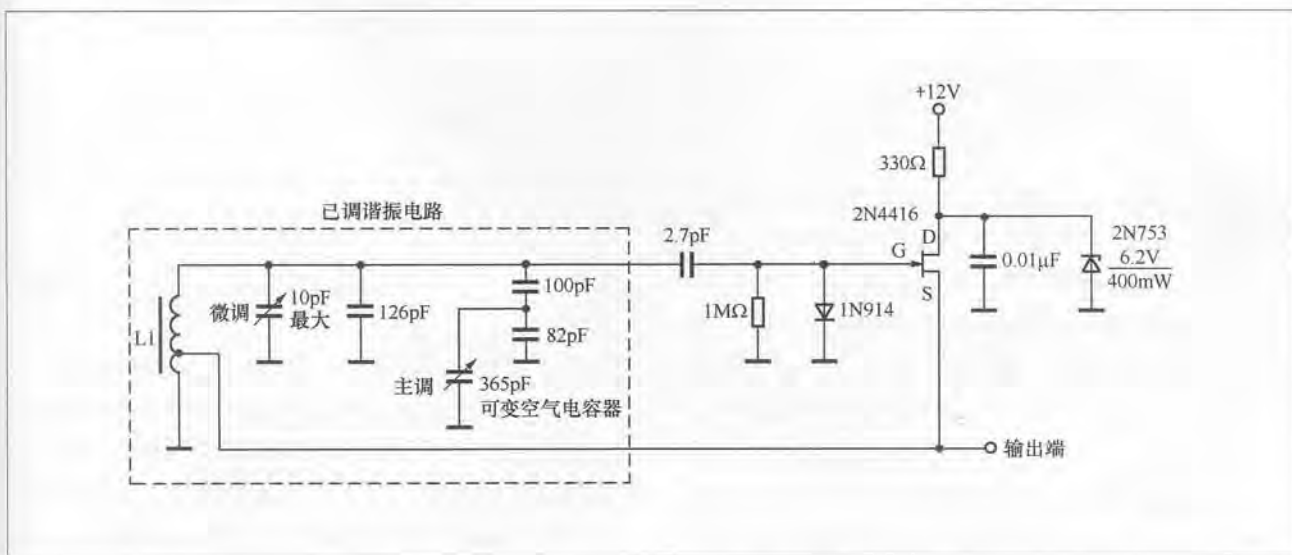
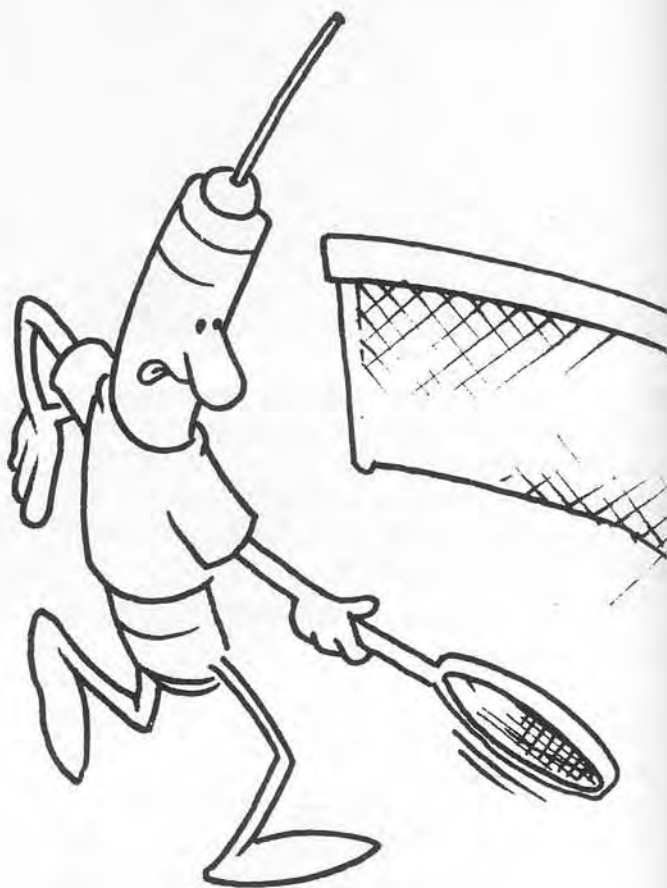


图 24-2 这个电路包含 1 个电感器和 1 个可变电容器。你可以通过改变可变电容器来改变振荡器的工作频率。每一个电容器和电感器组合后可以产生一个不同的谐振频率。我们可以用这个可变频率振荡器 (VFO) 来设置简单接收机和发信机的工作频率。

二、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 1 个 200pF 的电容器和 1 个 2.44μH 的电感器，让我们把这 2 个元件和 1 个 100Ω 的电阻以及正弦波信号发生器串联起来构成 1 个闭合回路。电路如图 24-3 所示。它的谐振频率是多大呢？公式 24-1 将帮助你找到答案。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{2.44 \times 10^{-6} \text{ H} \times 200 \times 10^{-12} \text{ F}}}$$

$$f_r = \frac{1}{6.28 \times \sqrt{488 \times 10^{-18} \text{ Hz}}}$$

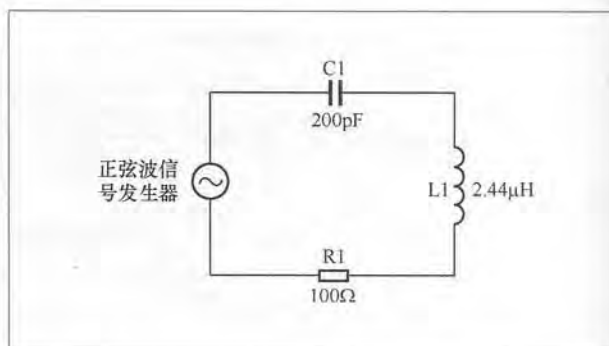
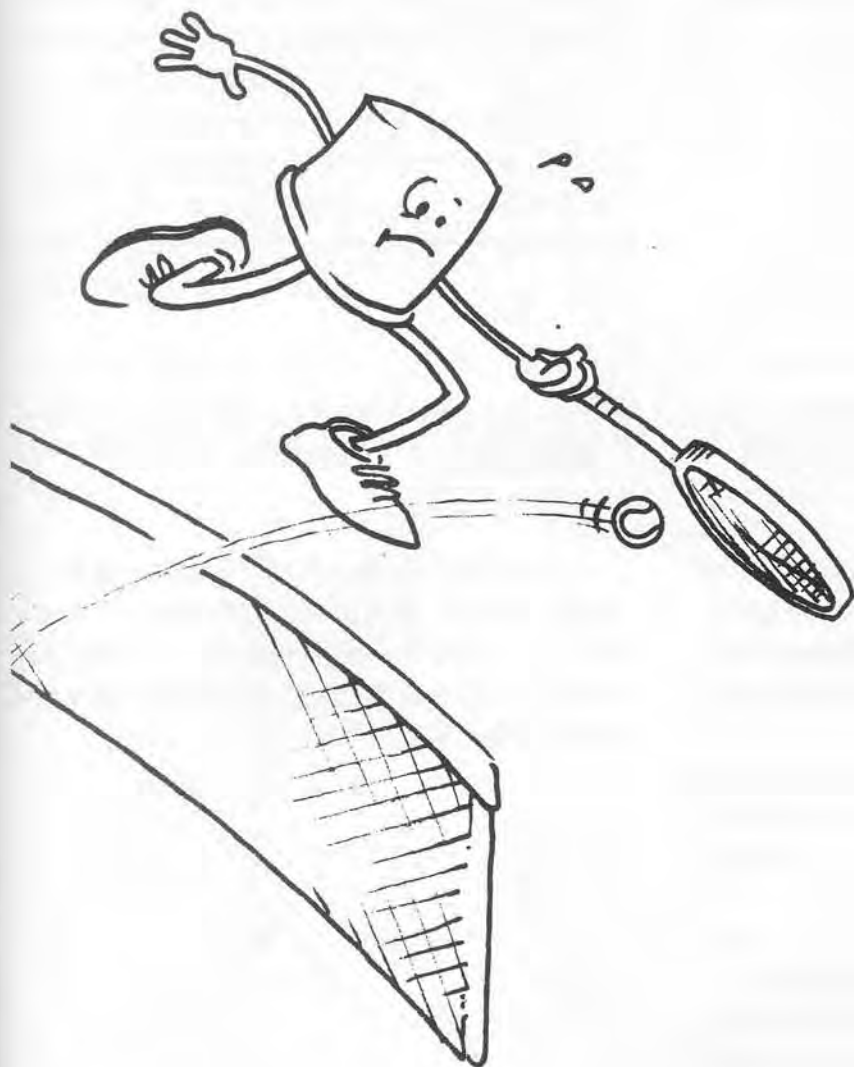


图 24-3 这个电路由 1 个 2.44μH 的电感器，1 个 200pF 的电容器，1 个 100Ω 的电阻器和 1 个信号发生器串联组成。我们将用这个电路来研究改变信号频率对 RLC 串联电路的影响。



$$f_r = \frac{1}{6.28 \times 22.1 \times 10^{-9} \text{ Hz}}$$

$$f_r = \frac{1}{1.39 \times 10^{-7}} = 7.19 \text{ MHz}$$

把信号发生器的频率设置为 7.19MHz，如果信号发生器输出的电压是 50V，那么电路中的电流有多大呢？记住，谐振电路中电感器电压和电容器电压方向相反，但大小相等的关系。在达到谐振频率时，电路的阻抗等于电阻器的阻值 100Ω 。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电流：

$$U = IR$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50\text{V}}{100\Omega}$$

$$I = 0.50\text{A} = 500\text{mA}$$

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 6.0MHz 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，容抗将会增大，而且容抗要比感抗大，也就意味着电路阻抗将会增大。

图 24-4 为这个电路的阻抗三角形。-j 轴的值表

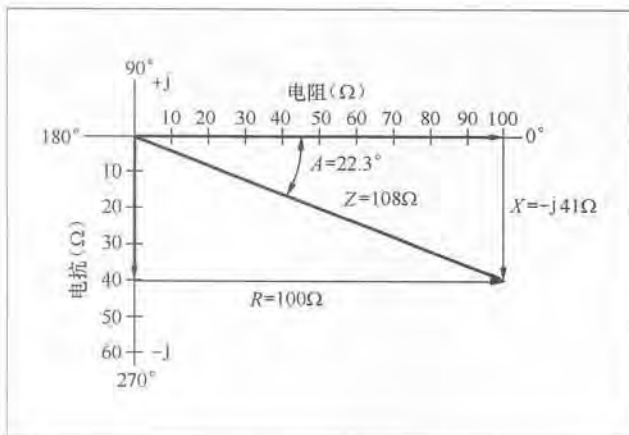


图 24-4 这个图表示信号频率低于谐振频率时的电路阻抗。注意到容抗要大于感抗。总电抗的和表现为容抗，方向为 $-j$ 轴方向。

示感抗和容抗之间的差值。因为直角三角形的斜边要大于另外两条边，所以电路阻抗要大于 100Ω 。

这也意味着，电容器的电压要比电感器的电压大。由于总的发生器电压为 $50V$ ，所以电阻器上分配的电压不到 $50V$ 。

你也许想计算在信号频率为 $6.0MHz$ 时感抗和容抗的值，这是一个不错的练习。你还可以计算新的频率下电路的阻抗和每一个电路元件上的电压值。

通过上面的计算和讨论你可以判别，在信号频率低于谐振频率时，电路电流减小。信号频率越低，容抗越大，感抗越小，电路的阻抗也越大，因此，电路中的电流会随着信号频率的降低而减小。

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的容抗。合并这两个值，可以产生一个沿着 $+j$ 轴方向的结果。图 24-5 为信号频率大于谐振频率时的电路阻抗图。

图 24-5 中，直角三角形的斜边为电路阻抗，其值大于电阻器的值 100Ω 。此时，电路阻抗大于谐振频率时的电路阻抗，当然，电流小于谐振频率时的电流。

作为练习，我们再计算一下，当信号频率为 $7.5MHz$ 时电路的感抗和容抗值。然后你再计算出新的频率下电路的电流和每一个元件上的电压值。

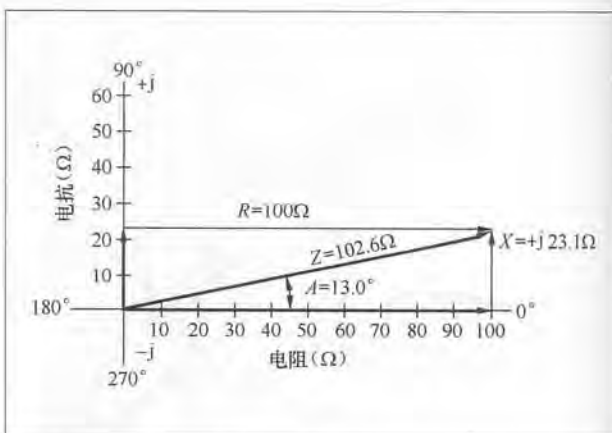


图 24-5 这个图表示信号频率高于谐振频率时的电路阻抗。这次感抗大于容抗。总电抗表现为感抗，方向为 $+j$ 轴方向。

图 24-6 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。

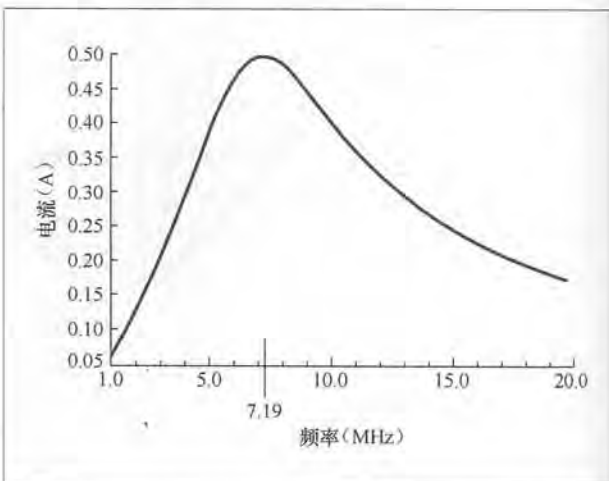


图 24-6 这张图表示在一定的频率范围内经过图 24-3 电路的电流图形。在谐振频率时，电路电流达到最大值，电路阻抗达到最小值。

在谐振频率时，电路的电阻越小，电流就越大。如果电路中没有电阻器，此时只有元件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？我们通过电抗除以电阻，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，它的电流曲线图就越平缓；内在电阻越小，电流曲线图就越倾斜。

图 24-7 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 10，另一个电路的 Q 值是 100。让我们假设这两个电路具有相同的电抗和电压。 Q 是 100 的电路电阻为 Q 是 10 的电路电阻的 1/10。

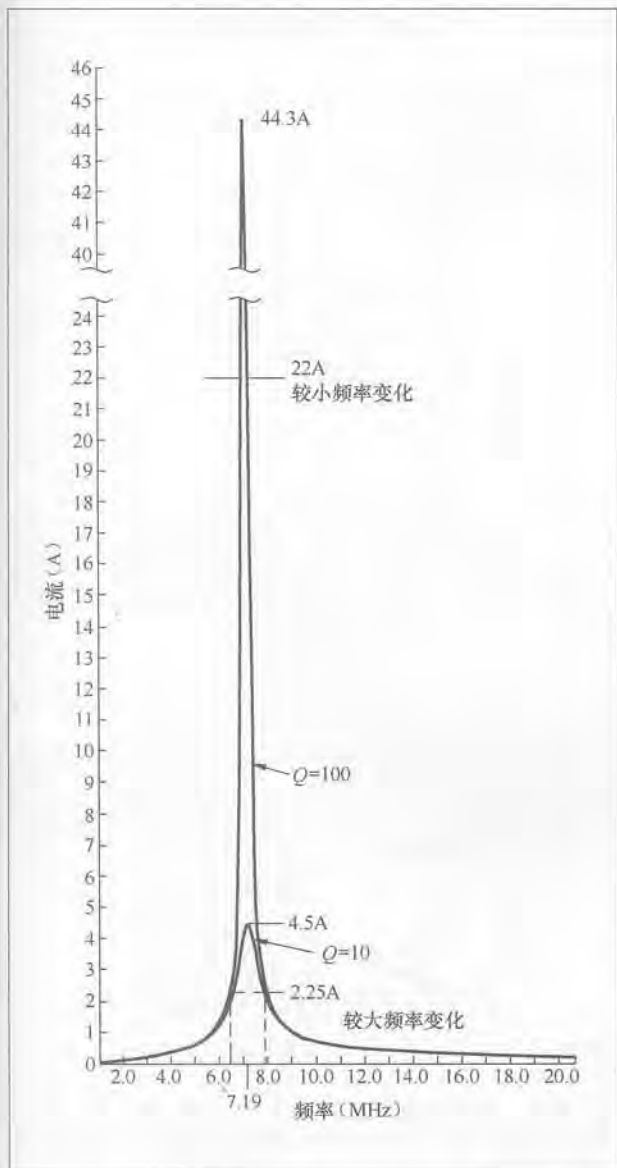


图 24-7 此图为 Q 值是 10 的电路和 Q 值是 100 的电路的电流比较图。 Q 比较大的电路图形比较陡峭。在信号频率达到谐振频率之前，电流一直较小。在谐振频率时，电流值很快达到峰值，而在频率大于谐振频率后又迅速减小。

我们可以通过构造几个数值计算 Q 值来证明

这一点。假定在两种情况下，电抗均为 100Ω 。高 Q 值的电路电阻为 1Ω ，低 Q 值的电路电阻为 10Ω 。

$$Q = \frac{X}{R}$$

$$Q_1 = \frac{100\Omega}{1\Omega} = 100$$

$$Q_2 = \frac{100\Omega}{10\Omega} = 10$$

高 Q 值的电路电阻是低 Q 值的 1/10，电流是低 Q 值的 10 倍。可以用欧姆定律来证明这个结论。但是，高 Q 值电路的电流曲线形状要比低 Q 值的电路尖锐。在信号频率接近电路谐振频率前，电流比较小，在达到谐振频率时，电流暴涨到它的最大值，随后随着信号频率的继续增大，电流回落到一个较低的值。

仔细来看图 24-7，找出每条电流曲线上电流是峰值电流一半的点。在高 Q 值电路中，这个电流是 22A；在低 Q 电路中，这个电流是 2.25A。现在我们来对这些值的频率范围进行比较。虽然在这个图上很难读出频率的确切值，但你能够看出高 Q 值电路的频率范围要比低 Q 值电路的频率范围小。

我们称这个频率范围为频宽。在这个频率范围内，信号强度要大于一些指定部分的最大值。在这个例子中，我们指定的电流大小为峰值的一半，当然我们也可以指定这个电流是最大值的 3/4、1/4 或者甚至 1/10，然后我们就可以测量大于这个指定值的信号频率范围。

虽然测量的频率范围互不相同，但这些测量中的每一个都代表一个频宽。我们在指定信号电平时，必须要说明它的带宽。在这个例子中，我们测定出半选电流的频宽。另外常用半功率作为信号频宽测量基准，你会经常看到这个基准频宽写为 -3dB 或 3dB 。把功率降低一半，表示频宽减少了 3dB （如果对分贝没有印象，请参阅数学技巧单元中的相关章节）。

电路中电感器和电容器的电压可能比谐振时信号发生器输出的电压还高。你们可能认为，谐振频率时的电感器电压或电容器电压应该为零，这是不正确的。谐振时电路中每个部分的电压都要比信号发生器产生的电压大。

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。

三、并联谐振电路的条件



24-8 电路中, 200pF 的电容器和 2.44μH 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 24-1 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, 经过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 24-9 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 轴正方向, 也就是 +j 轴方向。

图 24-8 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 24-10 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°。

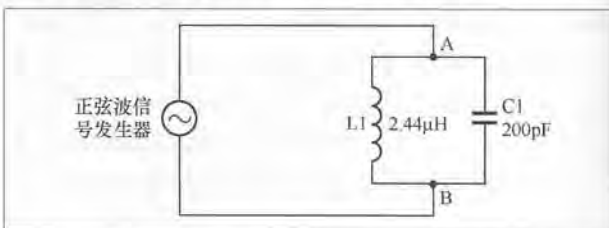


图 24-8 在电路中, 电感器和电容器与信号发生器并联连接。我们将用这个电路来研究并联谐振电路的条件。

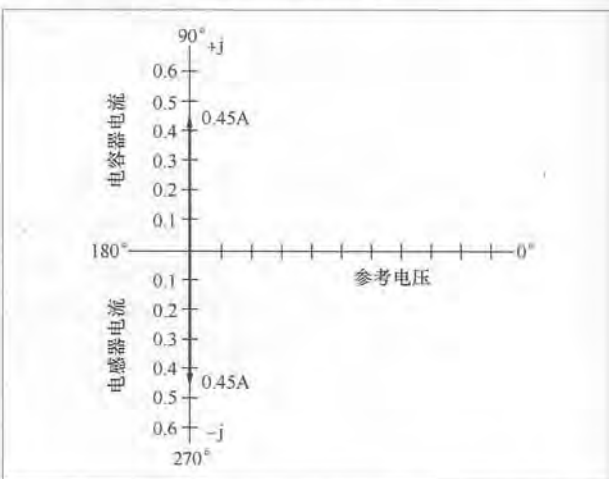


图 24-9 电感器电流的相位滞后电压 90°, 因此我们沿着 -j 轴进行标记, 0° 轴表示参考电压方向。电容器电流超前电压 90°, 所以我们沿着 +j 轴进行标记。

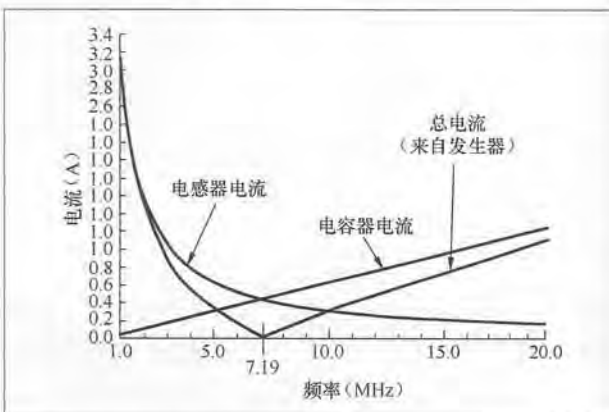


图 24-10 这是电感器电流、电容器电流和信号发生器总电流的比较图。发生器电流是电容器电流和电感器电流的差值。注意, 谐振频率电路中, 总的电流变为 0。

当你分析图 24-10 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的电流或经过电容器的电流为 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。

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。

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多，就可以画出像图 24-10 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。

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

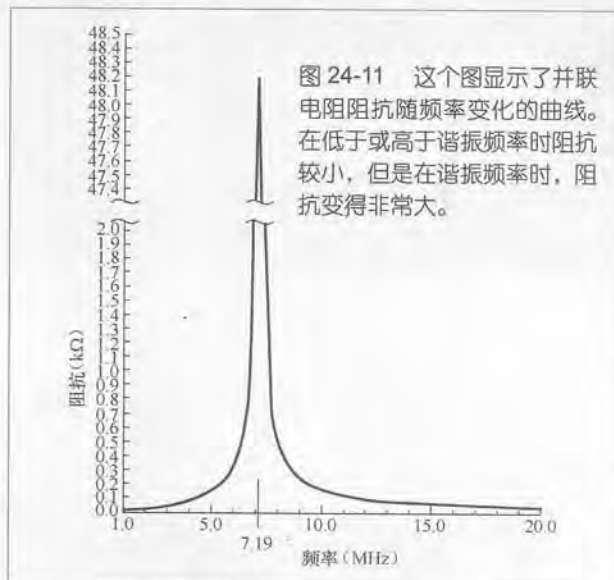
$$I = \frac{U}{X}$$

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阻抗。用电压除以电流：

$$Z = \frac{U_{\text{总}}}{I_{\text{总}}}$$

图 24-11 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。

表 24-1

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

第四单元

常用电路元器件

这一单元你将会学习：

- 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

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的能力）。

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。

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。



没有有源器件也就没有无线电以及人们所熟知的收音机、电视机

第 25 章

半导体材料

一、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之为半导体的材料。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，

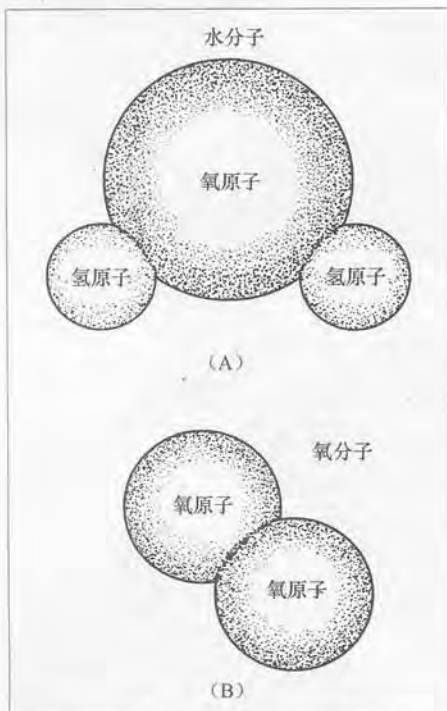


图 25-1 原子是构成物质的基本模块。几个原子可以构成分子。图 (A) 显示为氢原子和氧原子如何构成了水分子。图 (B) 为 2 个氧原子构成了 1 个氧分子。

这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。

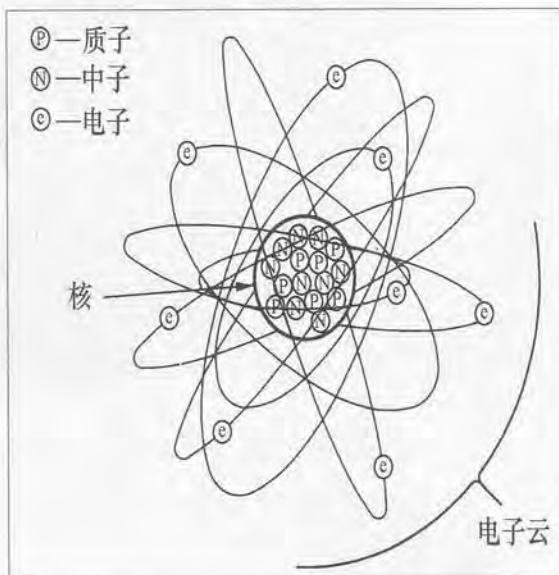


图 25-2 一个原子机构模型，原子中的核子内包含有质子和中子。电子像云一样绕在核子周围。此图表示为 1 个氧原子的原子结构图。在原子核内有 8 个质子和 8 个中子，原子核周围还有 8 个电子。

原子可以组成更大的构件，我们称之为分子。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 25-1 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 25-2）。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 25-3 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？



图 25-3 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。

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如何与其他原子结合。它们好有几种结合的方式，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。



二、半导体掺杂

硅和锗是制造半导体的常用材料（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 25-4 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之为半导体的原因。有时它们表现得像导体而有时表现得像是绝缘体。

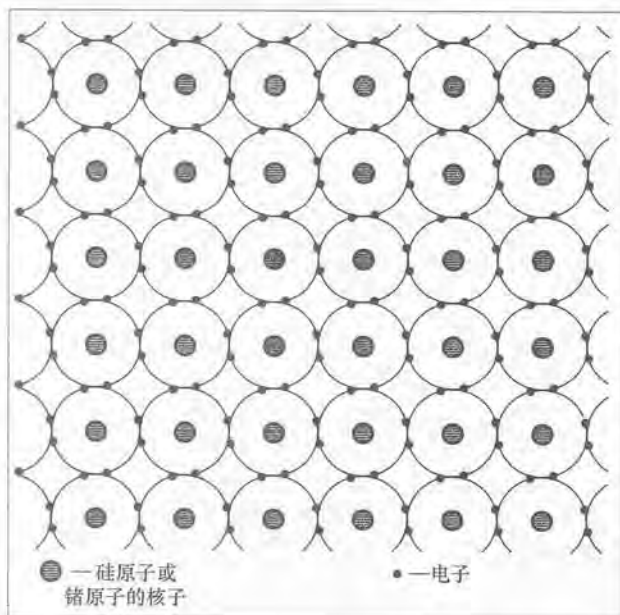


图 25-4 硅原子和锗原子把它们自己排列成有规则的模式，我们称之为晶体。从图中可注意到，晶体结构中，每一个原子都是与附近的原子共享 4 个电子。

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 25-5 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）

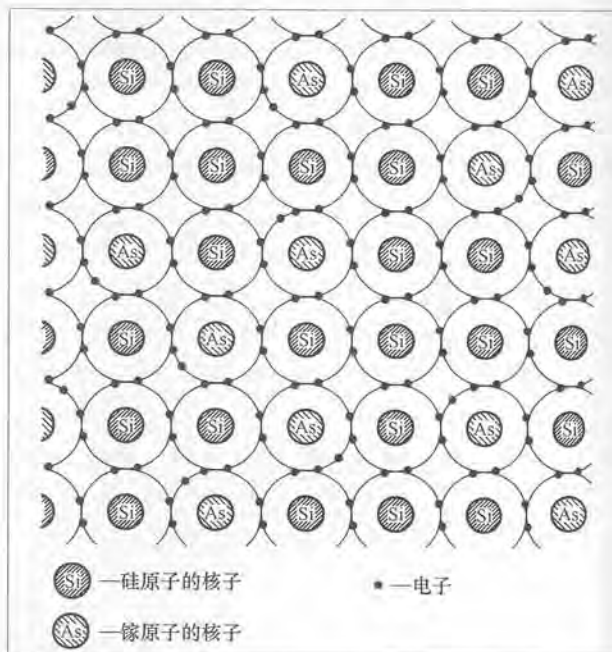


图 25-5 制造商可以在硅晶体或锗晶体中加入砷原子或锑原子。这些杂质原子给晶体结构增加了额外的电子，从而生成了 N 型半导体材料。

和硅原子、锗原子一样，杂质原子本身呈电中性。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。这就是我们称之为施主原子的原因。

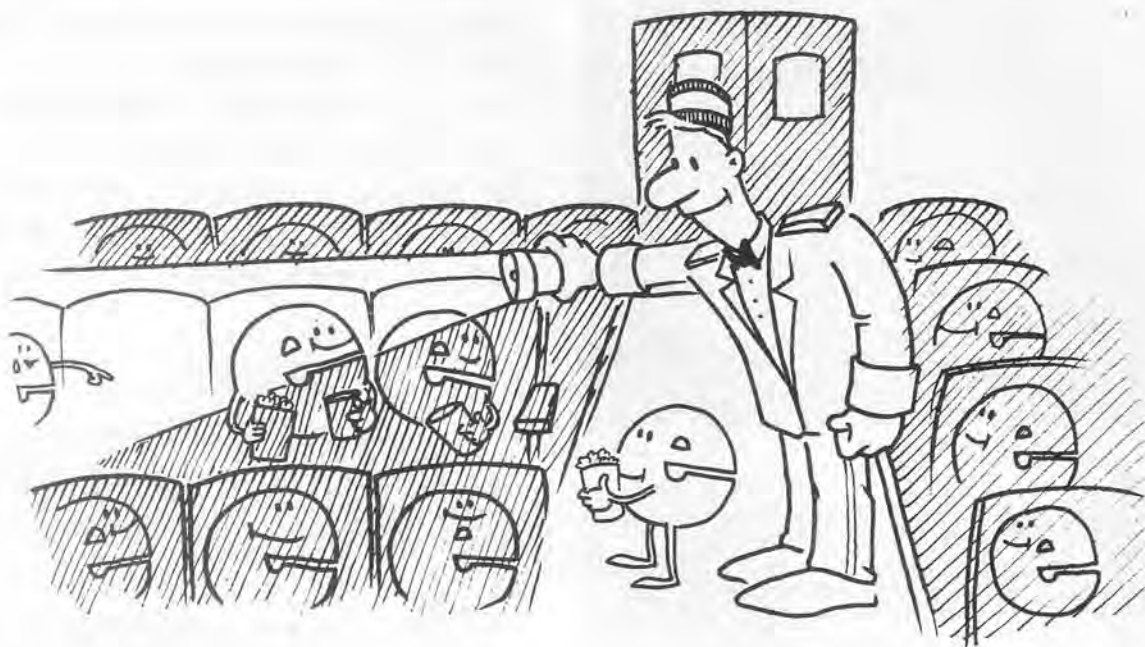
现在假设制造商加入的是镓原子或者铟原子，取代了砷原子或者锑原子。由于镓原子和铟原子最外层只有 3 个电子可以与周围其他原子共用，因此当晶体中加入镓原子和铟原子后，晶体结构中产生了可以放置电子的额外空间。

图 25-6 是一个晶体结构中存在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
半
型

图 25-6
杂质原
生一个
料。



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。

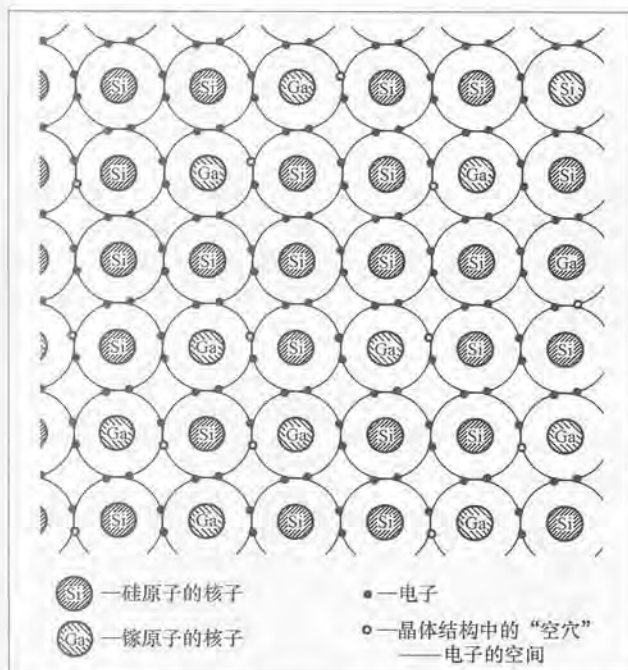


图 25-6 制造商可以在硅或锗晶体中加入镓或铟原子。这些杂质原子只有 3 个可以共享的电子，这将会在晶体结构中产生一个容纳其他电子的空穴。这种方法可产生 P 型半导体材料。

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。

第 26 章

二极管

一、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 26-1(A) 为施加稳定直流电压时，电阻器的电流变化图；图 26-1(B) 为施加逐渐增大的直流电压时，电阻器的电流变化图；图 26-1(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 26-2 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有很多，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。

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，就可以用耳机接收到无线电信号。来看图 26-3，我们仍然利用二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。

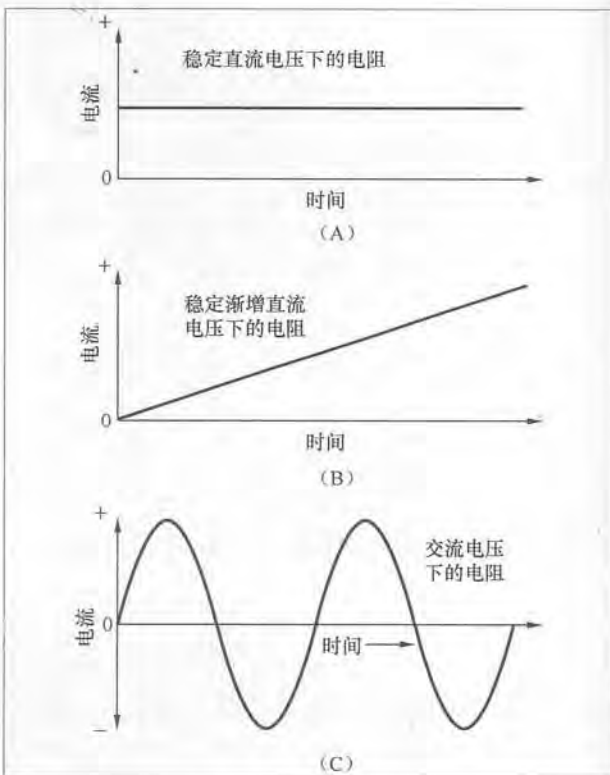


图 26-1 图 (A) 表示的是我们给电路施加一个稳定的直流电压时，电阻器上的电流变化图。施加了稳定逐渐增大的直流电压时，电阻器上的电流变化如图 (B) 所示。图 (C) 显示的是我们给电路施加一个交流电压时，电阻器上的交流电流变化图。

图 26-4 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 26-5，当二极管以这样的方式连接好后，就会有电流流过二极管。我们说二极管是正向偏压。

现在我们把电源反向连接二极管，图 26-6 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，

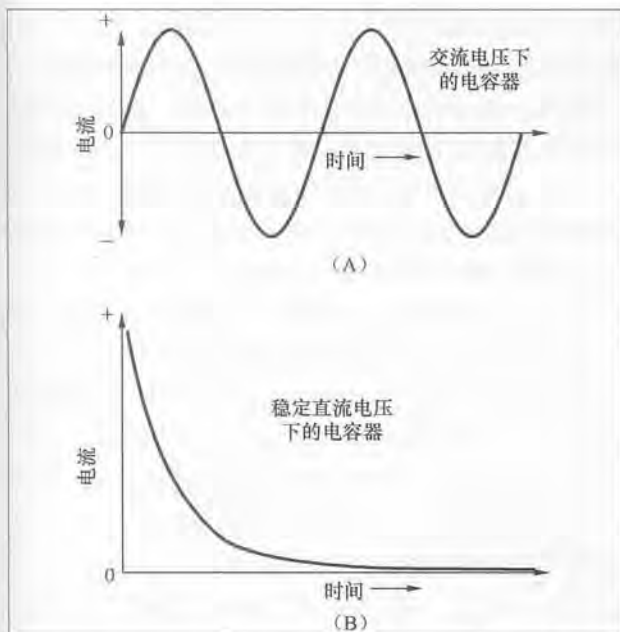


图 26-2 当我们给电容器施加一个交流电压时，将会产生一个如图(A)所示的交流电流。当给电容器施加一个直流电压时，电流会随着电容器的充电结束而停止。电流变化如图(B)所示。

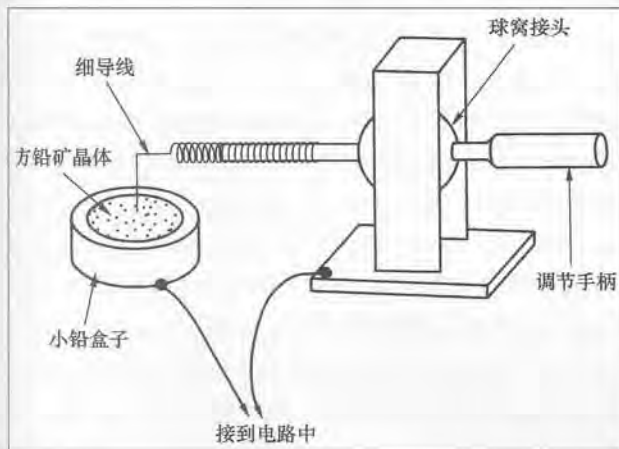


图 26-3 在无线电早期，简单的接收器使用这种类型的二极管来检测无线电信号。

电路中没有电流经过。

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，也许你会期望，当二极管阳极上电压极性为正时，电路中有电流通过，而当电压极性反转时，二极管阳极上的电压极性为负时，电路中电流停止。当



图 26-4 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。

交流电压的下半个周期到来时，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 26-7，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。

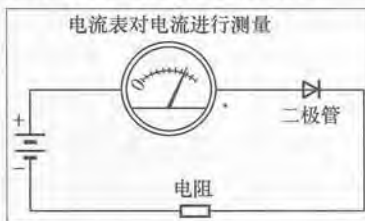


图 26-5 当你按照如图所示连接好二极管后，将会有电流经过二极管（和电路）。

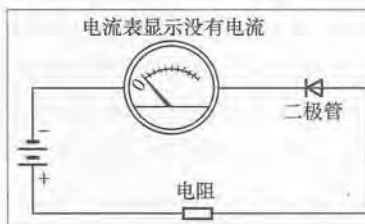


图 26-6 现在以和图 26-5 相反的方向来连接二极管。电池正极连接二极管阴极，负极连接到二极管的阳极。在这种情况下，没有电流经过二极管（和电路）。

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。

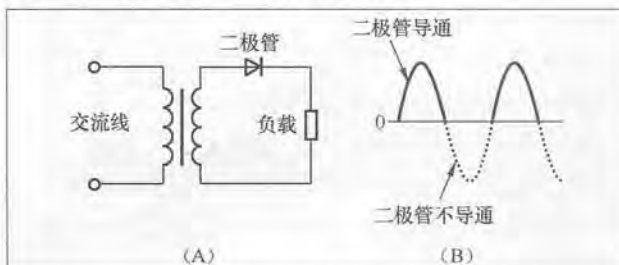


图 26-7 这张图总结了当我们为二极管施加交流电压时，二极管是如何工作的。当交流电压的顶部是正向电压时，二极管阳极与正向电压连接，电路中有电流存在。当交流电压的顶部是负向电压时，二极管阳极与负向电压相连，电路中没有电流。图(B)为施加电压在几个周期中的电路电流变化图。



二、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材料制造的。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，这些都是用半导体材料制作二极管的优点。目前还有部分电路使用电子管二极管，不过这些电子二极管已经不再普及。

在本单元第1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

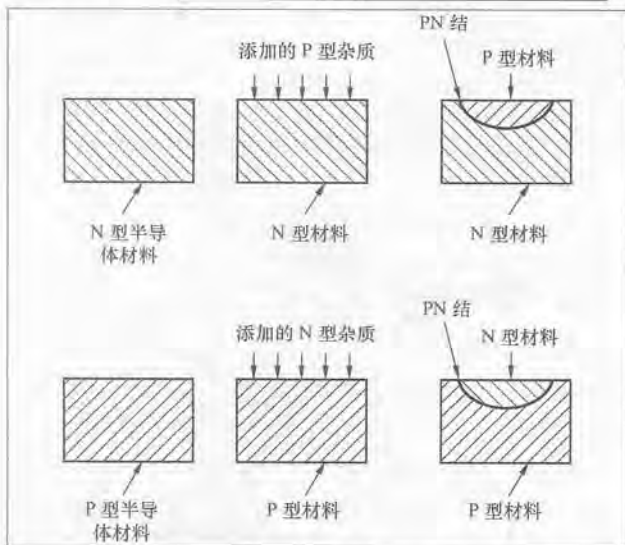
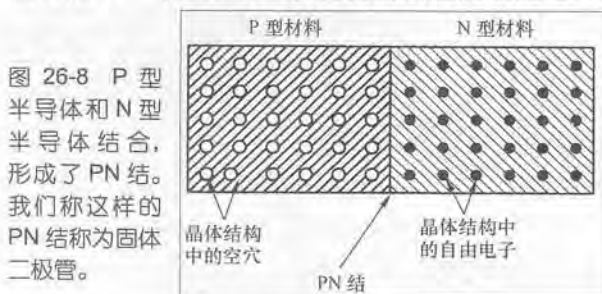


图 26-9 制造商首先选择一个块 P 型或 N 型半导体材料，然后把这块半导体表面上的一个小区域改变为另一种半导体材料类型，从而做成 PN 结。

材料中间的这个 PN 结。

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改变为另一种半导体类型。具体过程可参见图 26-9。厂商在制造 PN 结时，需要几个工艺过程，不过对我们来说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 26-10。

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。

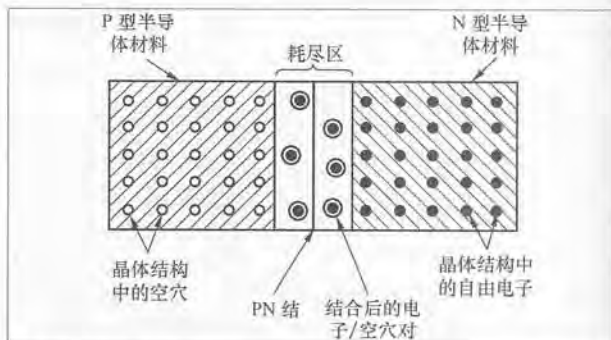


图 26-10 靠近 PN 结的自由电子和空穴会穿过 PN 结，然后相互结合，这样在二极管 PN 结处形成了一个耗尽区。

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 26-11 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 26-12 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 26-12 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。电池的一个目的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, 你不能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 26-13 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,

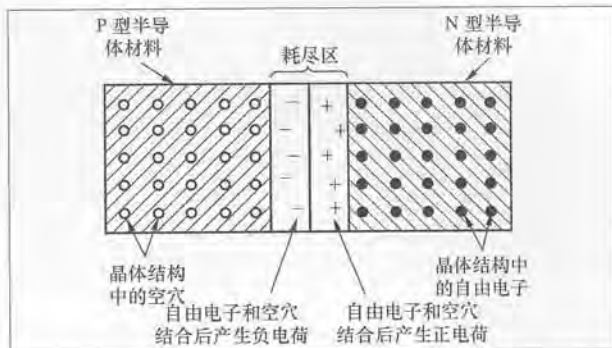


图 26-11 空穴和自由电子可以穿过二极管 PN 结, 所以电子可以填充到空穴中。但是这会半导体材料相反的两侧留下正电荷和负电荷。这些电荷排斥额外的电荷载体, 从而阻止耗尽区变得过大。

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, 使得耗尽区变大。因为耗尽区太大, 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 $10\mu\text{A}$)。正向电流至少比反向电流 (或称为漏电电流) 大 1 000 倍。

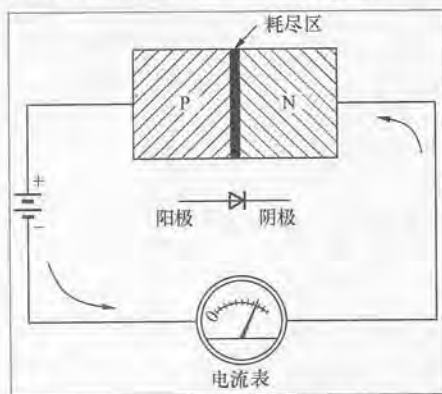


图 26-12 把二极管连接到如图所示的电源上时, 二极管允许电流通过。注意, 半导体下面的二极管符号, 电源负极与阴极相连, 而正极与阳极相连, 我们称这样的二极管为正向偏压二极管。

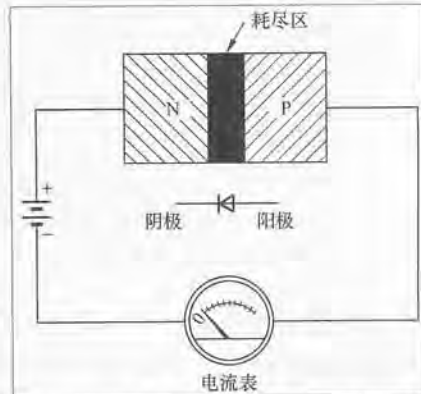


图 26-13 当我们把二极管连接到如图所示的电压源上时, 电路中没有电流通过。当二极管阳极与电源负极相连, 阴极与电源正极相连时, 我们称这样的二极管为反向偏压二极管。

三、二极管特性和参数

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（电池正极与二极管阳极相连，二极管阴极与电源负极相连）。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，我们把二极管的阳极与电源负极相连，而把二极管的阴极与电源正极相连）。

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 26-14 所示，我们把二极管接到电路中。电源上有一个可以控制输出电压大小的装置，这样可以方便地调节施加在二极管上的电压。当输出电压为 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，电路中将会出现一个小的电流（小于 1mA）。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，电流迅速增加。图 26-15 为一个典型的二极管的特性曲线图的一部分。

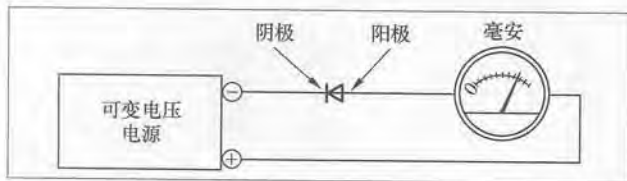


图 26-14 如图所示，把二极管阳极与可变电压电源的正极相连。电流表显示电路中有电流通过。

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 100 Ω 。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 26-15，图中显示，当电压超过门限电压后，只要稍微增高电压，电流将迅速增大。

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。

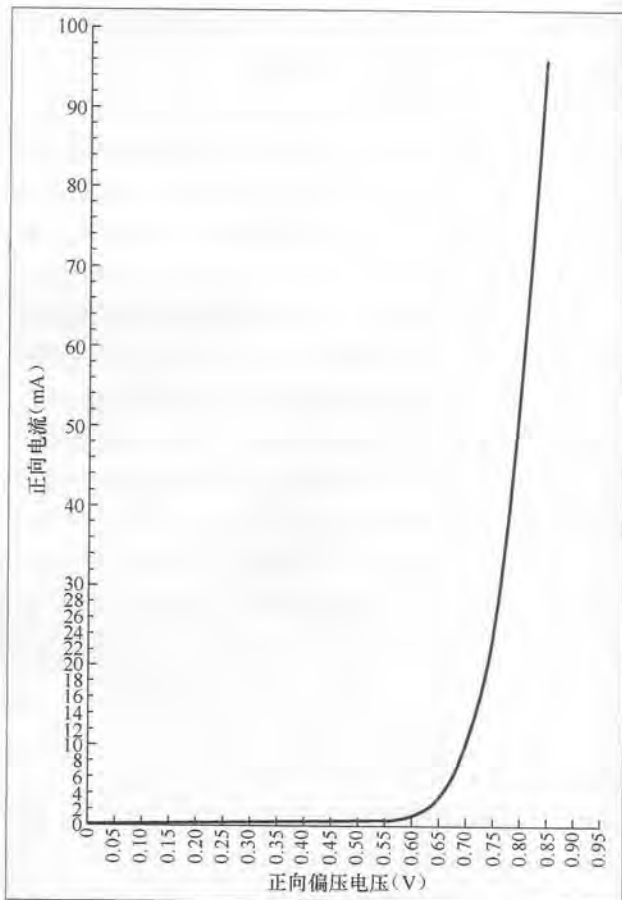


图 26-15 这是一个典型的硅二极管在正向偏压时的特性曲线图。当锗二极管的正向电压达到 0.3V 后，正向电流开始增大。如果通过二极管的电流大于二极管允许的正向平均电流，二极管将被损坏。



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的处理 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,这样就可以让较大的电流通过二极管。图 26-16 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



图 26-16 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。

二极管。

现在让我们来改变电路中二极管的方向。图 26-17 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。

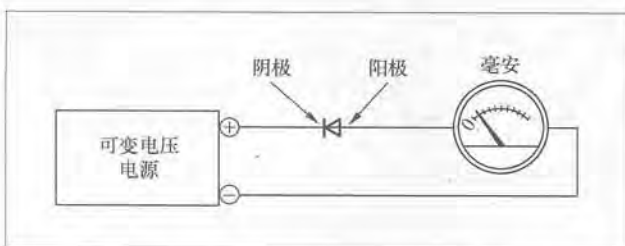


图 26-17 如图所示，把二极管的阴极与可变电压源的正极相连。图中灵敏度电流计显示，电路中只有几微伏的反向电流。

最后，随着我们继续增大电压，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

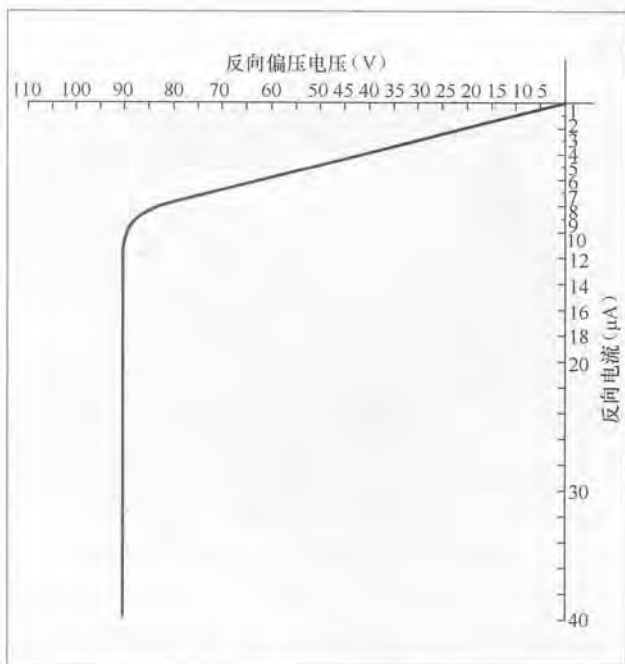


图 26-18 此图为一个二极管的反向偏压特征曲线图。引起二极管电流迅速增大的反向偏压电压与二极管的类型有关。当二极管反向导通时，二极管通常会遭到损坏。

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 26-18 所示，它的最大反向电压大约是 85V。当你为电路选择二极管时，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，将会有有一个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情况。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 26-19(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，二极管的电流也会降低。当交流电压再次降为 0V 时，二极管停止导电。接着，交流电压在负方向增加，二极管为反向偏置状态，此时二极管不导电，电路中

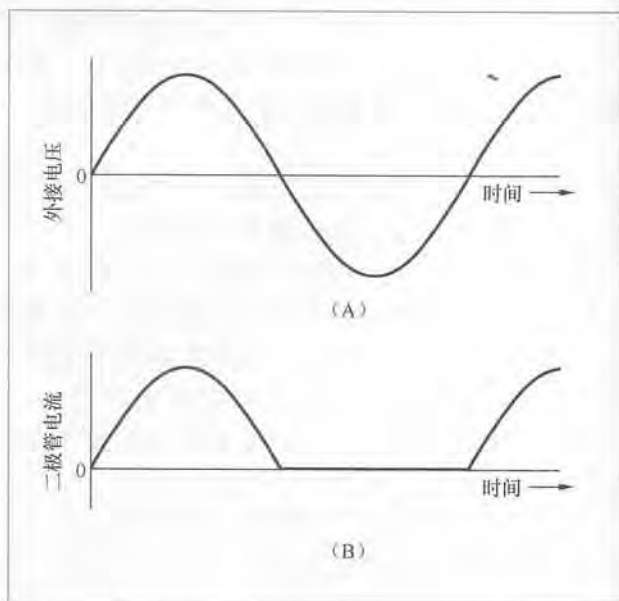


图 26-19 图(A)为施加到二极管上的交流电压波形。图(B)为施加交流电压后，通过二极管的电流。二极管只有在阳极电压为正时才具有导电性。

也没有电流。当电压再一次变化到正向时，二极管将重新开始导电。图 26-19 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变化而变化。图 26-20(A) 电路中，1 个电阻器和 1 个二极管串联连接。图 26-20(B) 为施加到电路中的交流电压波形。图 26-20(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 26-20 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。经过二极管的每一个脉冲电流必须是二极管平均正向电流的 2 倍。

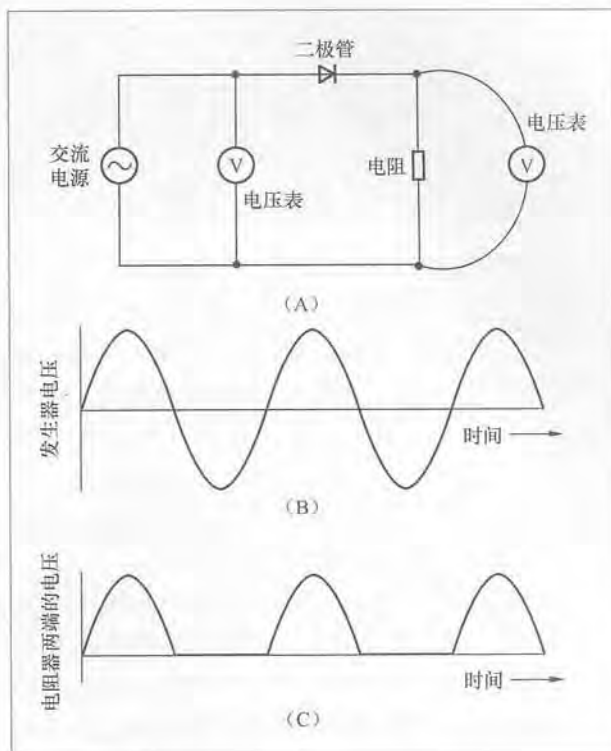
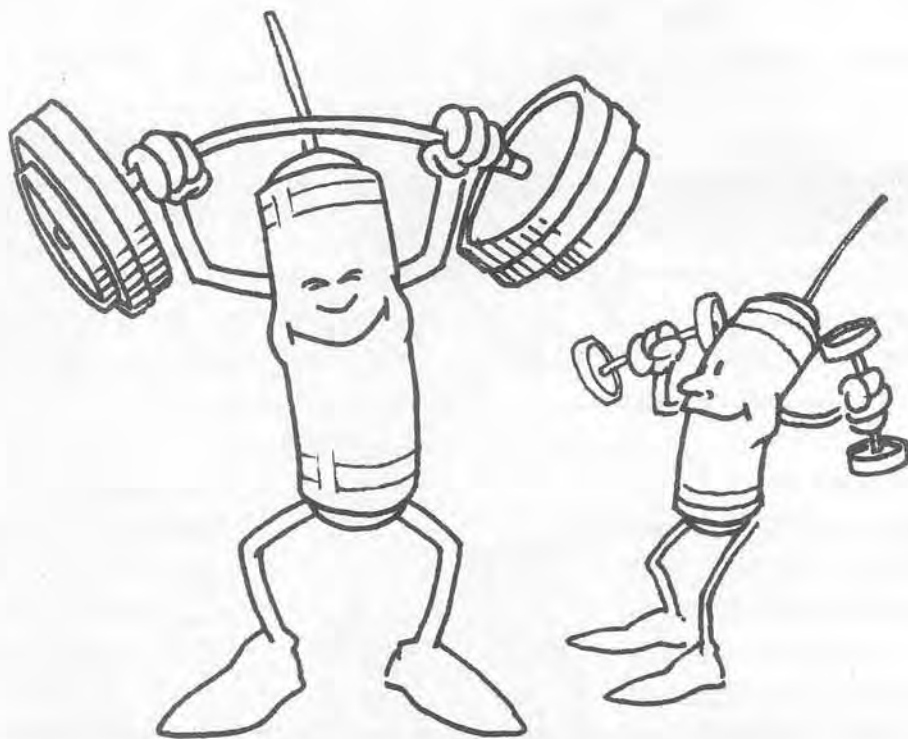


图 26-20 图(A) 显示如何测量带有二极管的电路中电阻器电压的方式。只有电路中有电流时，电阻器上才会有电压。图(B) 为施加到电路中的交流电压图。图(C) 为施加交流电压时，测量出的电阻 R 两端的电压图。



图(B)
在阳极

四、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 26-21 所示。从电阻器“输出”的电压为脉冲电压。在交流电电路中，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 26-22 为交流电压输入和输出的电压波形。

这个电路产生的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 26-22 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

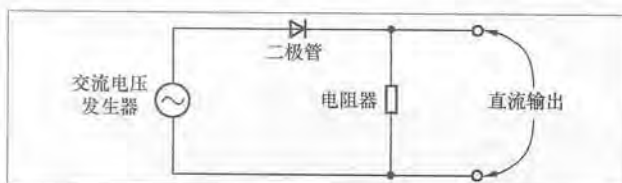


图 26-21 半波整流是一个可以把输入的交流电压转换成输出直流电的简单电路，你只需要一个二极管和电阻器即可。

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。输出的直流电电压的峰值（PEAK）与输入的交流电电压的峰值相等。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

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414 \quad (26-1)$$

例如，让我们假设一个交流电信号发生器的有效输出电压是 120V，见图 26-23，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 26-1 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。

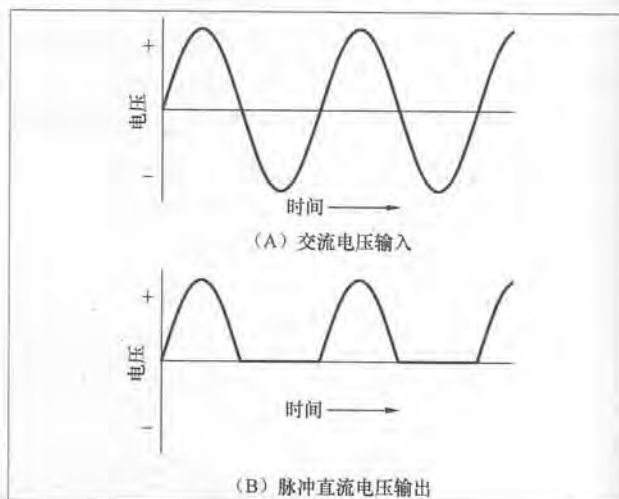


图 26-22 图 (A) 为输入到半波整流电路的交流电压波形，图 (B) 为半波整流电路输出的脉冲直流电压波形。

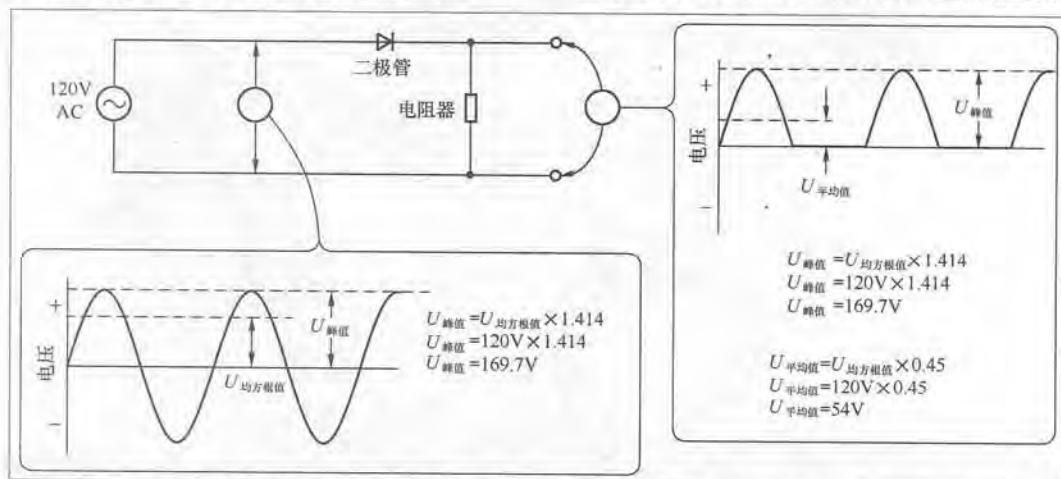


图 26-23 这是一个半波整流器与交流电发生器相连的电路图，交流电发生器的有效输出电压是 120V，该图同时显示了输入和输出电压的波形以及它们的峰值和平均值。

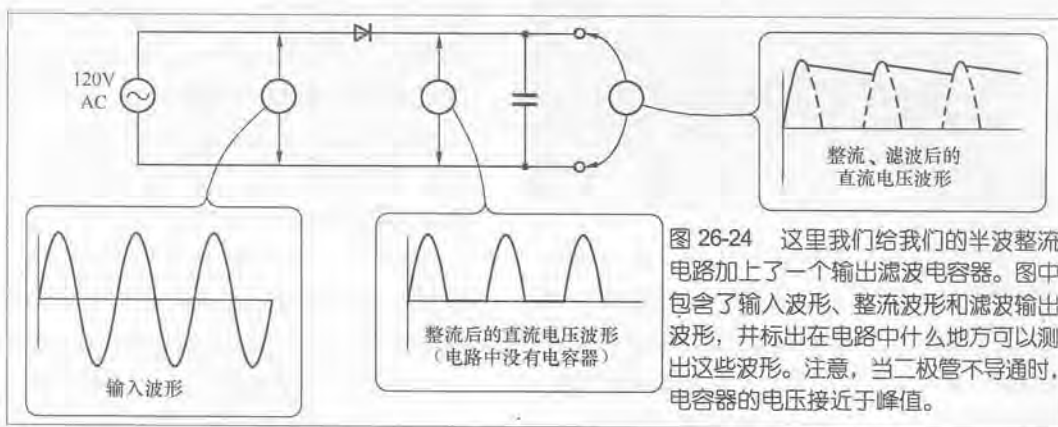


图 26-24 这里我们给我们的半波整流电路加上了一个输出滤波电容器。图中包含了输入波形、整流波形和滤波输出波形，并标出在电路中什么地方可以测出这些波形。注意，当二极管不导通时，电容器的电压接近于峰值。

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：

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.45 \quad (26-2)$$

用我们上面的一个例子来看，我们可以用公式 26-2 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 26-1 中的峰值电压相等。在选择将二极管接入确定的电路中时，你必须要考虑峰值电压的值。如图 26-23 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）。

很多电子设备在半波整流输出的脉冲直流电下不能正常工作，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 26-24 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 26-25 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 1000μF 或更大。如果输出电流太小（小于几毫安），输出电压将相当稳定。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。

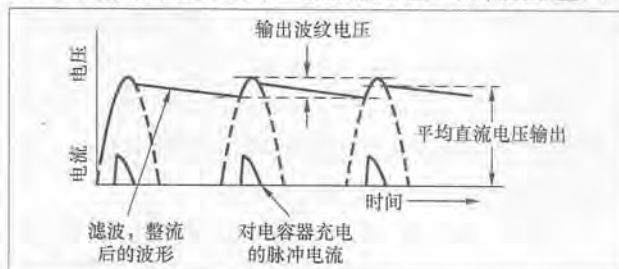


图 26-25 每当二极管是正向偏置时（可导电），会产生一个短暂的脉冲电流。这个脉冲对滤波电容器进行充电，使其达到电压峰值。在波形周期另外半周的时间里，二极管反向偏置，电容器缓慢放电。在二极管不导通时，滤波电容器的电容越大，它的输出电压减低得越慢。

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：

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2.8 \quad (26-3)$$

或者是

$$U_{\text{最大反压}} = 2 \times U_{\text{峰值}} \quad (26-4)$$

现在让我们回到信号发生器的有效电压为 120V、峰值电压为 169.7V 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：

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2.8 = 120 \text{ V} \times 2.8 = 327.6 \text{ V}$$

因此，我们应该选择一个峰值反向电压是 650V 的二极管。

五、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 26-26 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 26-26，当顶部电压是正向电压时，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 26-27 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 26-28(A) 为输出端接有一个滤波电容器的全波整流电路。图 26-28(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。

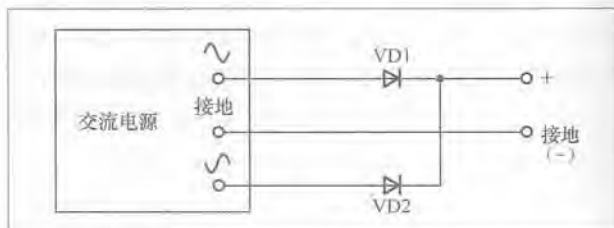


图 26-26 此图是一个全波整流电路。注意，交流电压输入有一个中间连接，也叫接地连接。相对于这个接地连接点，另外两个端子上的电压的正负极相互改变。

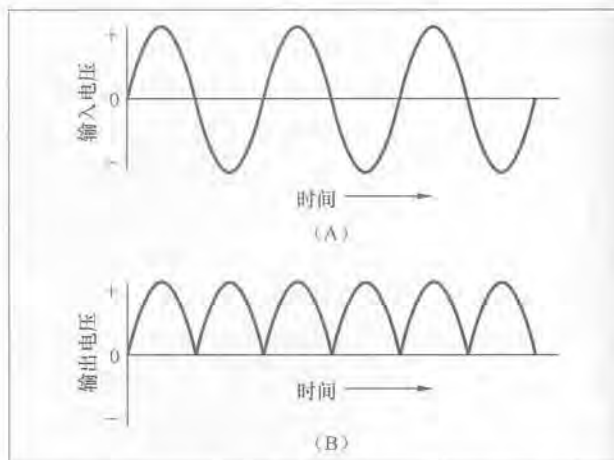


图 26-27 图 (A) 为输入电压的波形，图 (B) 为全波整流器的输出电压波形。注意，每个输入周期产生两个输出脉冲电压。输出电压在 0 到最大值之间变化，而且它总是出现在 0 轴线的一侧。输出电压是一个脉动直流电压。

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。

$$U_{\text{峰值}} = U_{\text{均方根值}} \times 1.414 \quad (26-1)$$

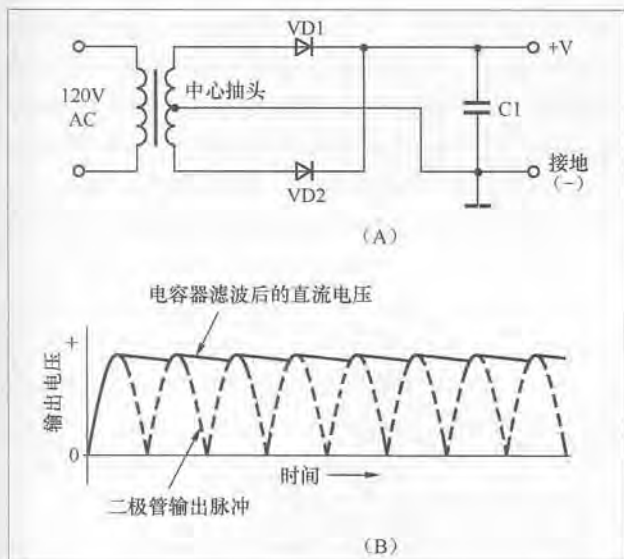


图 26-28 图 (A) 为输出端接有一个滤波电容器的全波整流电路。图 (B) 显示了电容器是如何平滑输出的脉冲电压。

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。

$$U_{\text{平均值}} = U_{\text{均方根值}} \times 0.9 \quad (26-5)$$

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 26-29，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。

$$U_{\text{最大反压}} = U_{\text{均方根值}} \times 2 \times 1.414 = U_{\text{均方根值}} \times 2.828 \quad (26-6)$$

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 $U_{\text{最大反压}}$ 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 26-29 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 26-1 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 26-5 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。

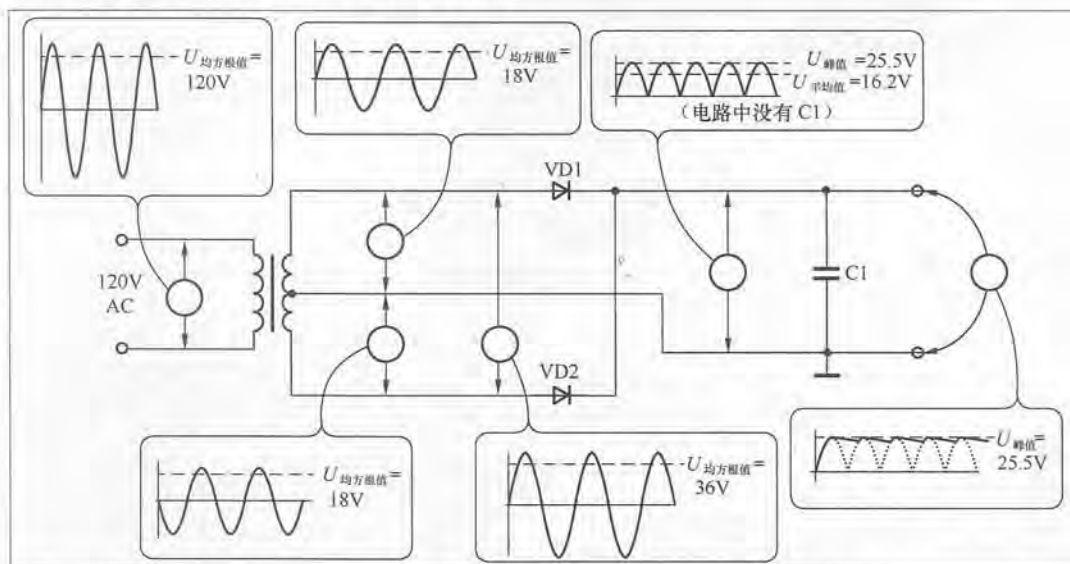


图 26-29 这是一个全波整流的电路示意图。这个电路显示了电路中不同时刻的输入和输出电压波形。你可以利用输入电压的均方根值计算出输出电压的峰值和平均输出电压。输出端上容量较大的电容器可以使整流后输出的脉冲电压更加平滑。

六、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，而没有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 26-30 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 26-31(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

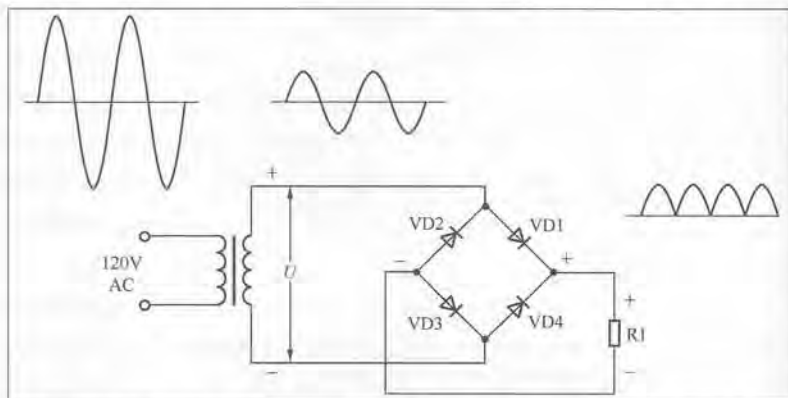


图 26-30 这是一个桥式整流电路。图中包含了变压器初级电压和次级电压的交流电压波形，也包含了由整流器产生的脉冲直流电压的输出波形。

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。

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 26-31(B)。现在变压器底部电压为正极，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

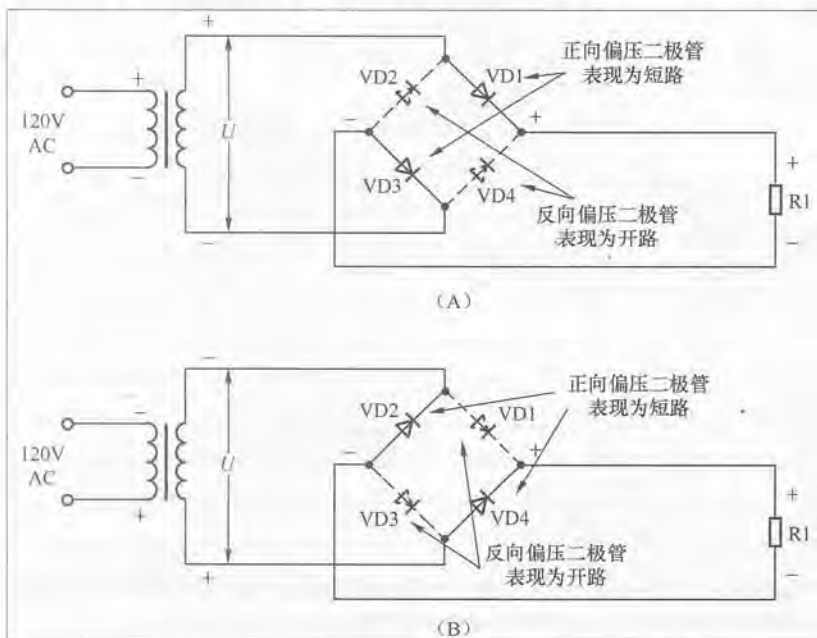


图 26-31 图 (A) 显示为变压器顶部电压极性为正，底部电压极性为负的整流电路。二极管 VD1 和 VD3 为正向偏置，可导通，二极管 VD2 和 VD4 为反向偏置，不导通。图 (B) 为输入电压极性反转时的电路状态。此时，变压器底部电压极性为正，顶部电压极性为负。在图 (A) 和图 (B) 中，均用虚线来描绘反向偏置二极管，表示这些二极管在电路中相当于开路的效果，实际效果就是此时它们可以从电路中去掉。

任然是通路,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 26-30 和图 26-31 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 26-32 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 26-1 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,我们常常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 26-33 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纹抖动。总体来说,电容越大,输出电压具有的

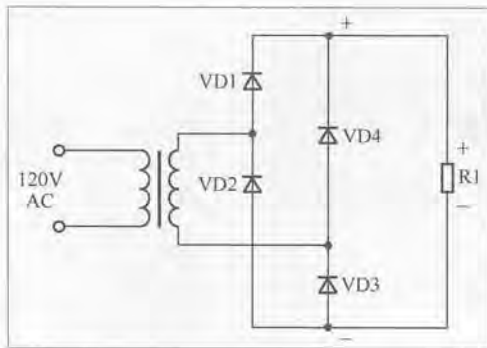


图 26-32 如图所示的二极管结构,有助于更好地理解桥式整流电路是如何工作的。此图适用于正文中描述的电路。

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 26-31,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 26-1 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 26-5 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 50 V 的二极管。

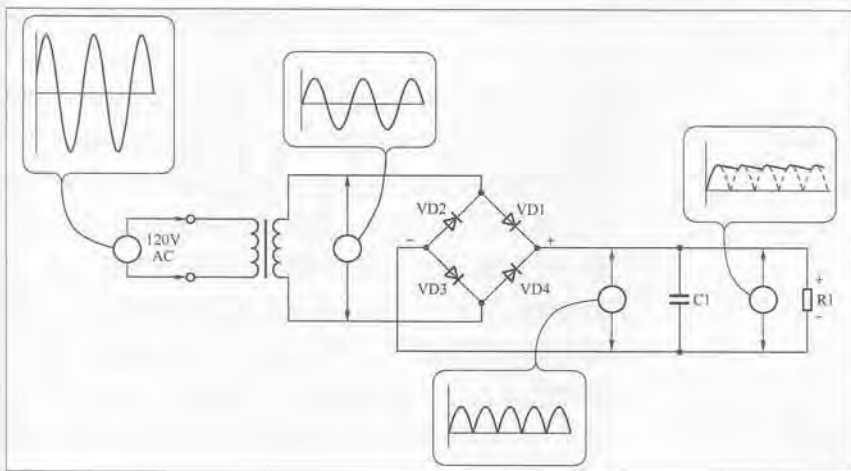


图 26-33 桥式整流器在每一个完整的输入波形周期内产生两个输出脉冲。接在输出端上的大容量电容器的作用是使脉冲电压更加平滑,使我们得到一个平滑稳定的直流电压。

七、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

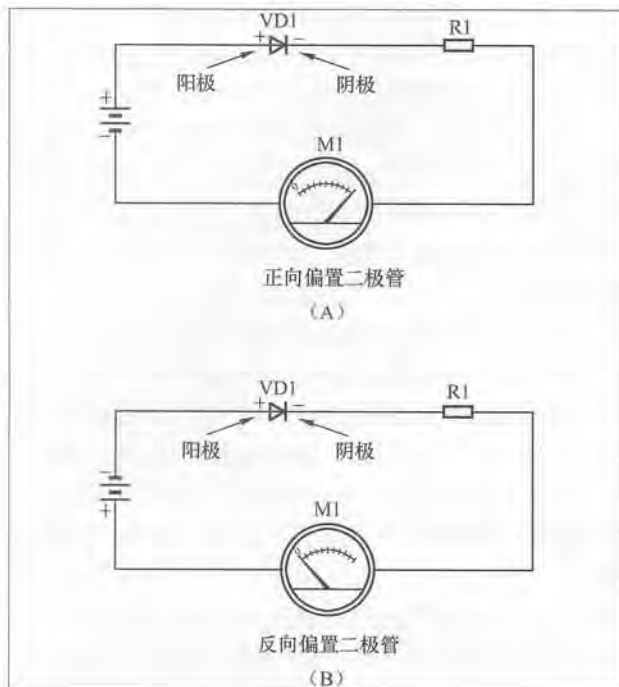


图 26-34 正向偏置二极管表现为闭合开关，可以允许电流经过电路，如图 (A) 所示。反向偏置二极管表现为断开开关，阻止电流经过电路。如图 (B) 所示。

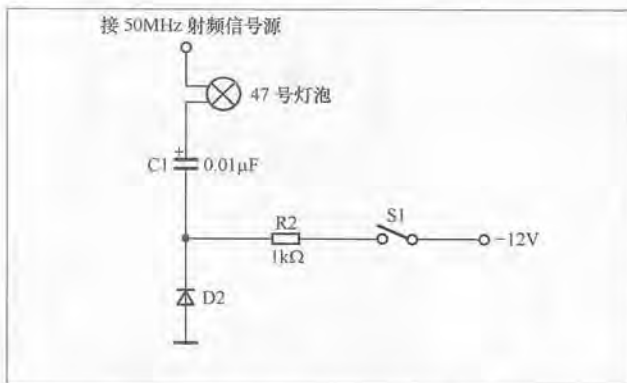
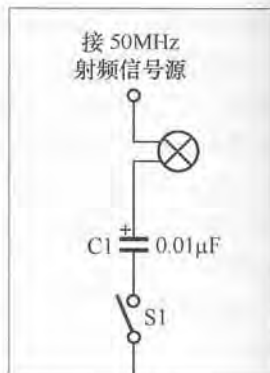


图 26-35 这是一个简单的二极管开关。闭合 S1 时，VD2 的电压为正向偏压，二极管导通，允许电流经过灯泡。

图 26-36 在图 26-35 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。



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。

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 26-35 描述的就是这样的一个二极管开关。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 26-35 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 26-36）。

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

图 26-37 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。

连, 就可以完成电路的切换功能。

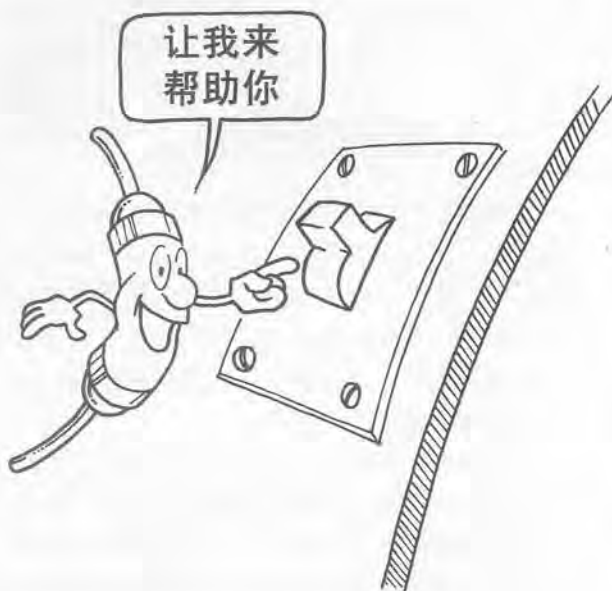
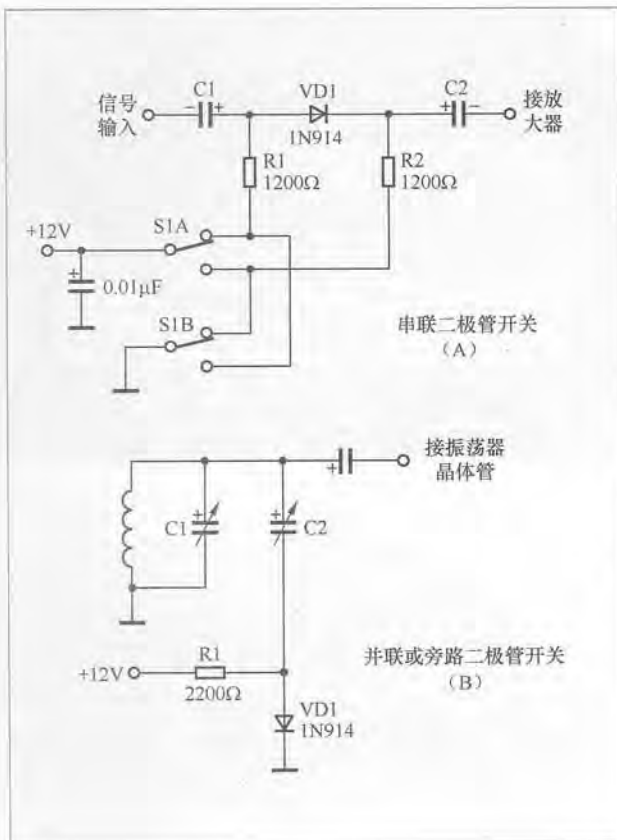
二极管开关还有另一个重要的优势。你可以在电路中合适的地方安置一个二极管作为开关, 然后通过在一定距离外的机械开关为它提供直流偏压, 从而实现电路的切换功能。机械开关可以设置在控制板上, 也可以是在其他方便的地方。否则, 我们将不得不用一根很长的导线将开关连接到电路中。一般来说, 对于直流电使用长导线没有什么问题, 但在转换音频或无线频率信号时, 我们需要使连接线越短越好。

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(旁路)。图 26-37 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。



第 27 章

双极性三极管

一、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,3 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“转移电流穿过电器”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 3 位科学家因此荣获了 1956 年的诺贝尔物理学奖。

我们知道,PN 结二极管中,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,就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,这时,几乎没有电流经过二极管。

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。图 27-1 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起来形成单块半导体,在这个过程

中发现了晶体管效应。图 27-2 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,两个二极管阴极相连。

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 27-3 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 27-4 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会有电流通过。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减小。肖克利和他的同事称这个现象为晶体管效应。正向偏置电路中的电流经过反向偏置二极管的电阻被传递。

这个现象是怎么发生的呢?图 27-5 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。

因为这个模型展示了晶体管的效应,所以称之为

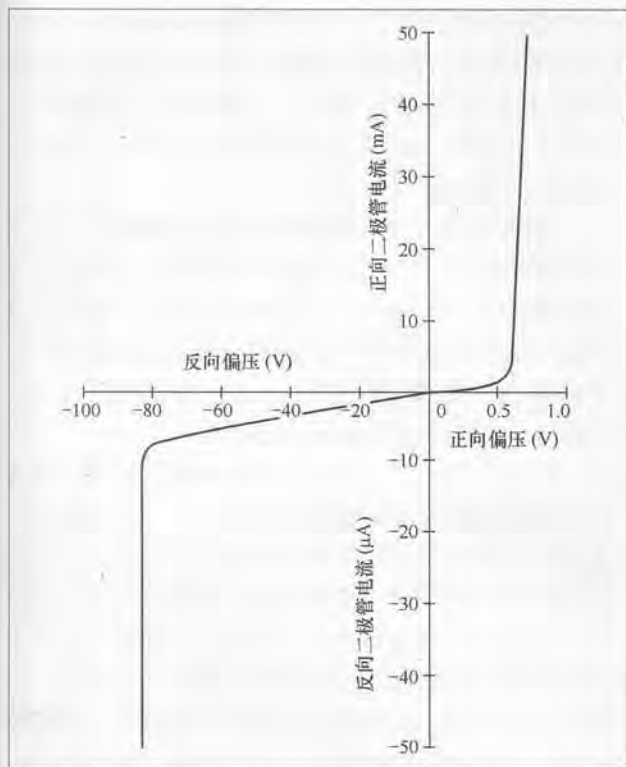


图 27-1 此图显示了外接电压变化时，二极管中的电流变化情况。当电压正极与二极管阳极相连，也就是二极管 P 端是正向电压时，正向电流迅速增大。对硅二极管来说，要产生正向电流，所加电压必须大于 0.6V；对锗二极管来说，正向偏压要大于 0.2V。当电压正极与二极管阴极相连，也就是说二极管 N 端是正向电压时，电路中只有较小的漏电流。一旦反向偏压电压超过二极管的击穿电压，将会产生很大的反向电流，对于一般二极管来说将被毁坏。

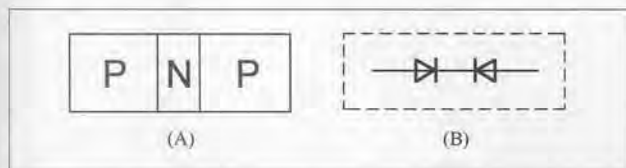


图 27-2 此图为半导体材料的三层“三明治”夹层结构。这个“三明治”结构构成了两个 PN 结二极管，如图 (B) 所示。虚线方框表示这两个二极管封装到一个半导体中，它们不是单独的二极管。

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 层紧密相连才具有晶体管效应。

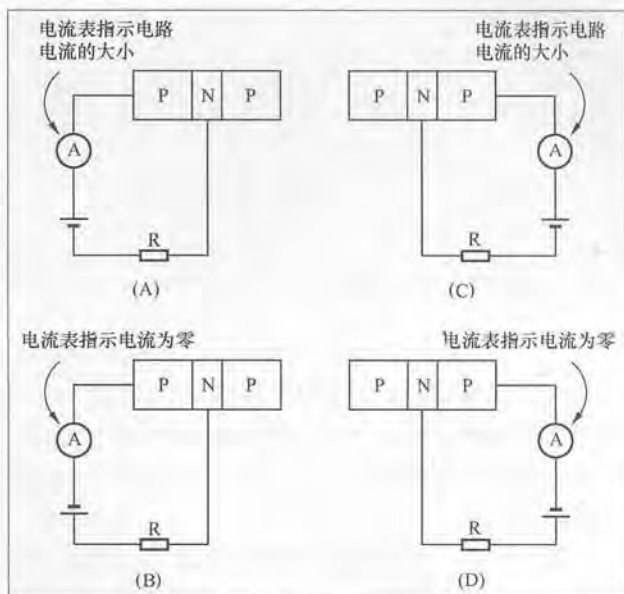


图 27-3 每一个 PN 结都表现得像一个典型的二极管。图 (A) 和图 (B) 分别表示左边 PN 结为正向偏置和反向偏置。图 (C) 和图 (D) 分别表示右边 PN 结为正向偏置和反向偏置。当半导体的任何一个 PN 结所加电压是正向偏压时，它可以导电；为反向偏压时，PN 结不导电。

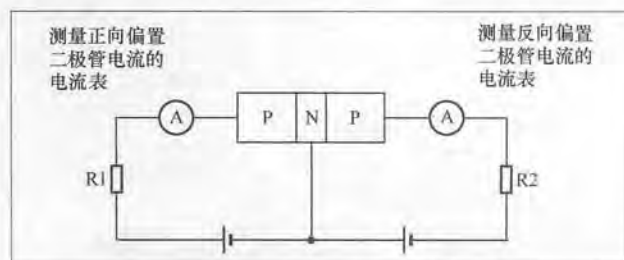


图 27-4 图中，“三明治”中的一个二极管为正向偏置，另一个二极管为反向偏置。这个电路很好地解释了晶体管效应。正向偏压二极管的电流引起反向偏压二极管的电流。

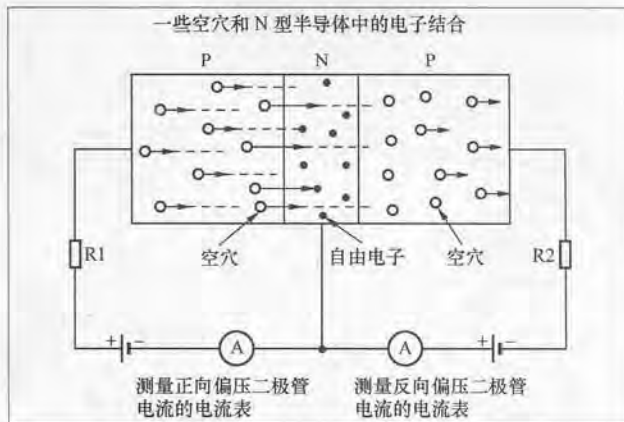


图 27-5 此图说明了我们的“三明治”中空穴和电子的运动情况。空穴穿过了 N 型半导体的薄层，另一侧的第二层 P 型半导体端与电源负极相连，吸引这些空穴，第三端聚集这些空穴。这些空穴的移动产生了穿过第二个二极管的电流。

二、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层“三明治”结构。在上一节的例子中，使用的是由两个 P 型半导体材料和一个 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

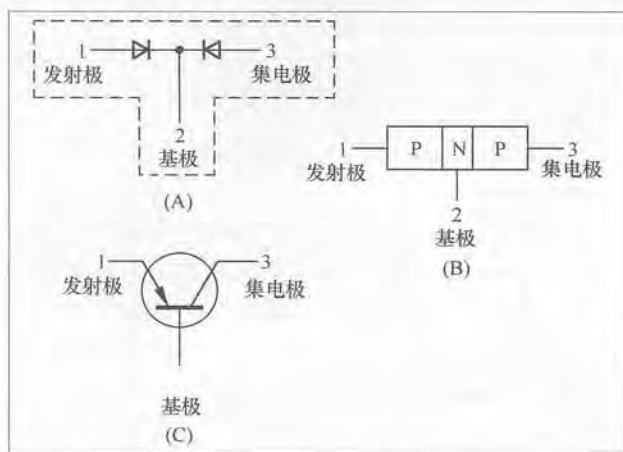


图 27-6 这张图分别用一对二极管和半导体“三明治”夹层结构表示 PNP 三极管。虚线方框表示这两个二极管制造在一个半导体中，而不是各自独立的。图 (C) 为 PNP 型三极管的示意图符号，图中的箭头指向基极。

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 27-6 中的二极管就是用这样连接的。图 (B) 为三极管的三层“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 27-6 所示的三极管结构中，在两层 P 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 27-7 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 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

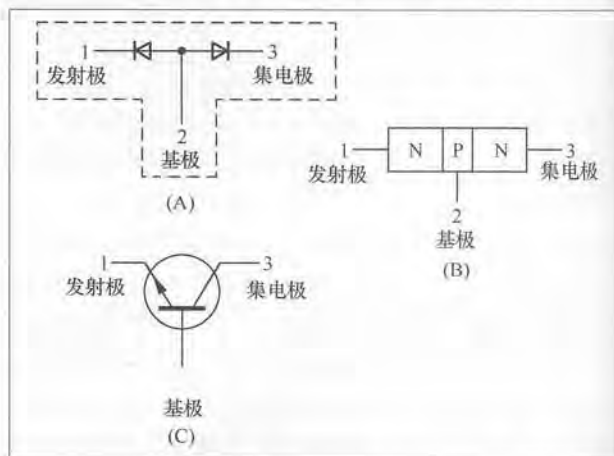
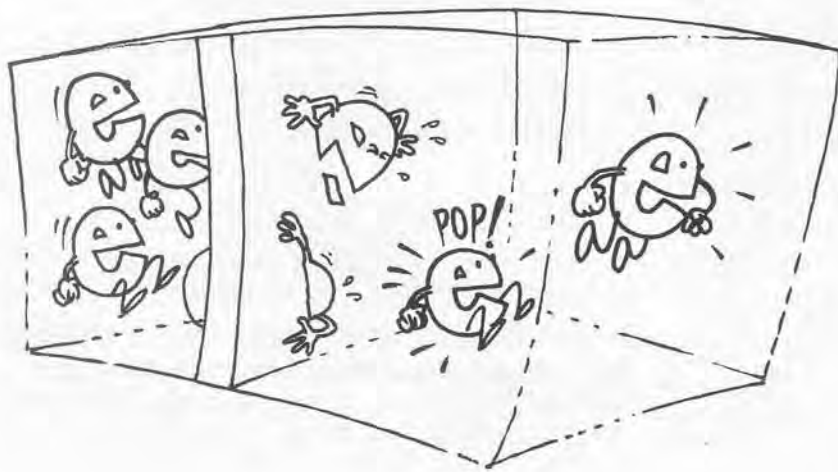


图 27-7 一对二极管的阳极相互连接构成形成了一个 NPN 型三极管。虚线框表示这两个二极管制造在一个半导体中，而不是各自独立的。图 (C) 为 NPN 型三极管的示意图符号，图中的箭头不是指向内，而是指向外。



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。

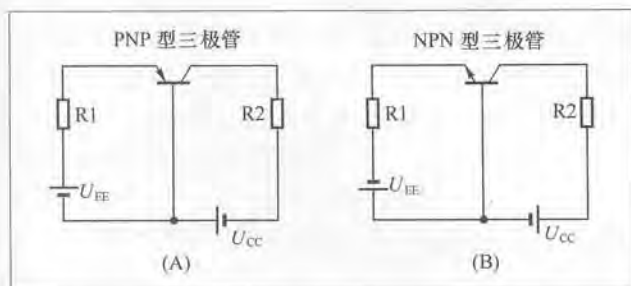


图 27-8 图(A)为 PNP 型三极管的一个简单测试电路。 U_{EE} 和 U_{CC} 分别为发射极和集电极的偏置电压。电阻器 R1 和 R2 起到了限流的作用。图(B)为一个相似的 NPN 型三极管的测试电路。

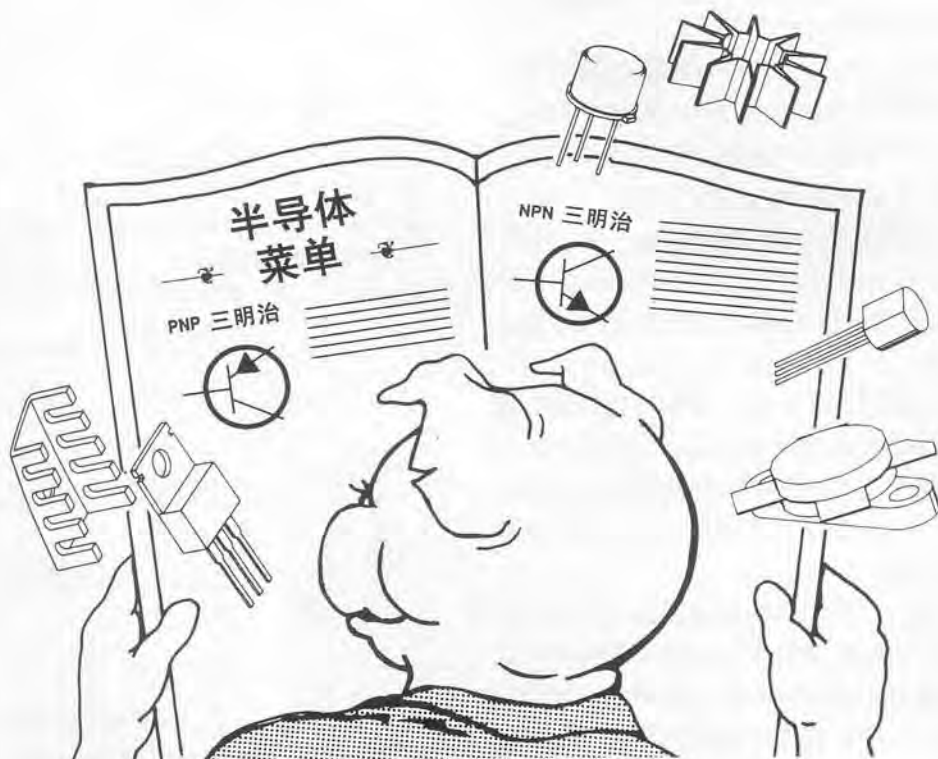
在图 27-8(A) 中,PNP 型三极管连接在测试电路中。发射极与电源正极相连,集电极与第二个电源的负极相连。此时,发射极和基极之间的二极管为正向偏置,集电极和基极之间的二极管为反向偏置。

图 27-8(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而生产出性能更好的三极管。



三、用较小的输入电流来控制较大的输出电流

在图 27-9 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 27-9 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。

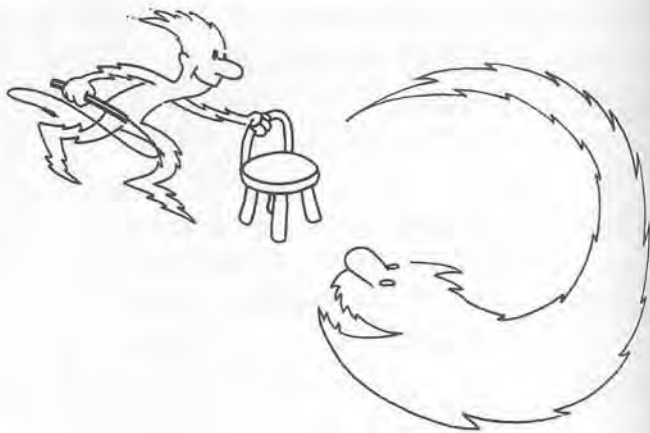
让我们从 U_{CC} 和 U_{BB} 电压为 0 时开始，调节 U_{CC} 直到电压表 M4 的读数为 5V，然后增大 U_{BB} ，直到电流表 M2 的读数为 0.2mA。这时我们读出电流表 M3 的读数为 4.2mA。

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 27-10 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，

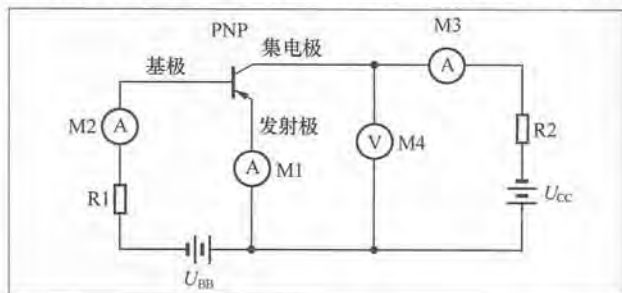


图 27-9 这个测试电路可帮助我们测量三极管电路的状态。三极管的偏置电压可以用 U_{BB} 和 U_{CC} 来调整。电表帮助我们测量电路中到达每个极的电流及集电极和发射极之间的电压。

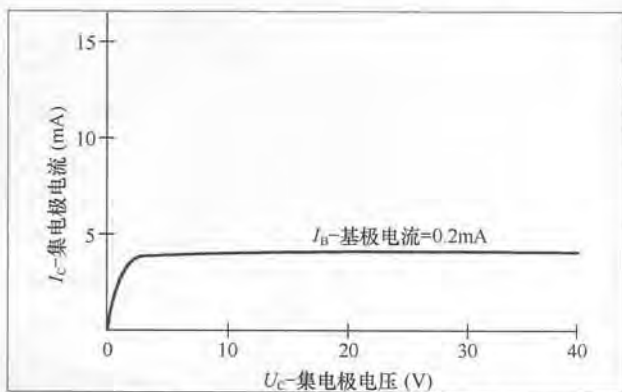


图 27-10 这张图描述了图 27-9 电路中的测量值。数值显示当集电极电压在一个较大范围内变化时，集电极电流保持不变。

发射极电流一直维持在 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 27-1 表示了基极电流、发射极电流和集电极电流之间的关系。

$$I_E = I_B + I_C \quad (27-1)$$

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 27-11 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。

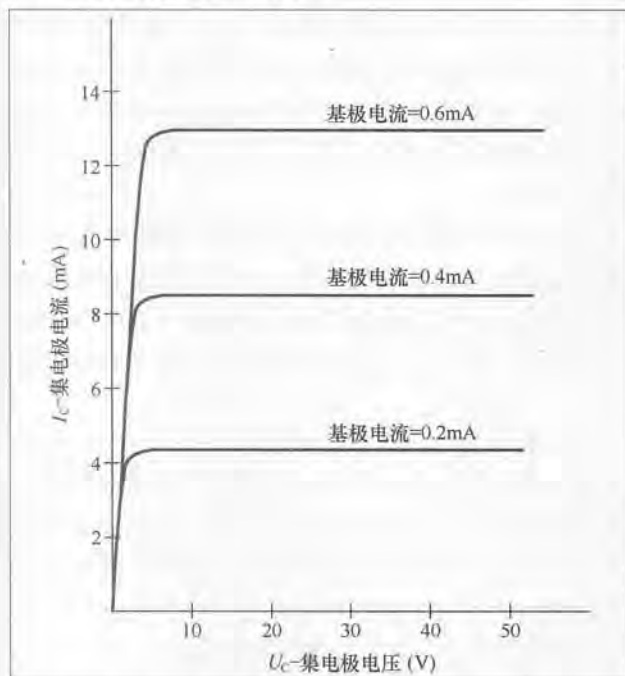


图 27-11 此图为我们所选三极管的特性曲线图。尽管其他类型的三极管的电压和电流不同，但是它们的特征曲线图相似。

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 α (α) 和 β (β) 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作用。

用集电极电流除以发射极电流可以计算出电流放大系数 α 。 α 总是小于 1，正常情况下在 0.92 到 0.98 范围之间。

$$\alpha = I_C / I_E \quad (27-2)$$

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 α 。

$$\begin{aligned} \alpha &= I_C / I_E = 4.2\text{mA} / 4.4\text{mA} \\ \alpha &= 0.9545 \end{aligned}$$

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 α 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 β 。电流放大系数 β 通常在 10 和 200 之间。对于具体类型的三极管，其电流放大系数 β 并不是常数。如果一个三极管的 β 值为 100，同类型的另一个三极管的 β 值可能为 150 或 200。即使是同一个三极管，其电流放大系数 β 甚至也会随着操作环境的变化而改变。尽管如此，它仍然是电路设计者和工程师的一个重要参数。

$$\beta = I_C / I_B \quad (27-3)$$

其中 I_B 为基极电流。

可以用公式 27-3 来计算例子中三极管的 β 值：

$$\begin{aligned} \beta &= I_C / I_B = 4.2\text{mA} / 0.2\text{mA} \\ \beta &= 21 \end{aligned}$$

你可以用图 27-11 中的其他集电极电流和基极电流值来计算 β 值。

四、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用图形画出了这些特性。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 27-12 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。

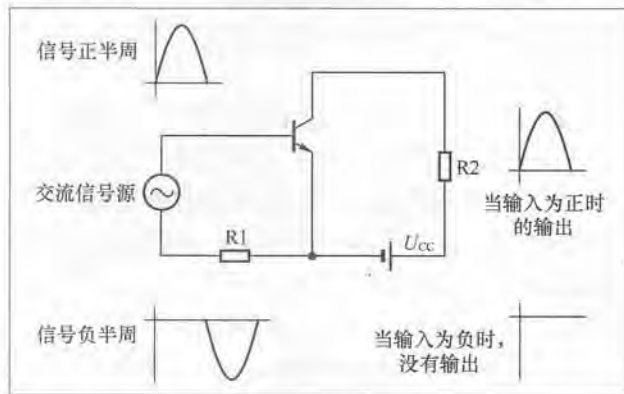


图 27-12 这个 NPN 三极管电路中，有一个交流信号施加在基极上。当信号电压为正向时，基极和发射极之间的 PN 结为正向偏置。此时，这个 PN 结是导通的，并产生集电极电流。当信号电压为负向时，基极和发射极之间的 PN 结为反向偏置。此时既没有基极电流，也没有集电极电流。

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，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期望的从三极管电路中得到的输出信号。图 27-12 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压电压去设置三极管特性曲线图的工作点。适当的偏置电压可以设置静态工作点，或称为 Q 点。

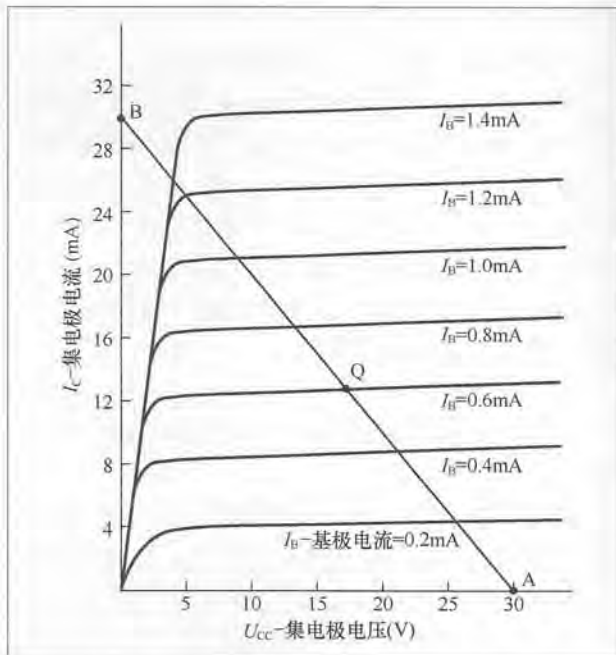


图 27-13 此图为典型的三极管特性曲线图。直线 AB 是 U_{CC}=30V, R₂=1kΩ 时的负载线。Q 为静态工作点 Q 点。

图 27-13 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。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。

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 27-13 中的特性曲线来说，输入信号电流的变化幅度为 4mA，它相应电压的变化幅度为 13V，也就是说它改变偏置电压的变化范围为 33V (20+13V) 到 7V (20-13V)。

图 27-13 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。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。

来看看图 27-14 的电路图和图 27-13 的特性曲线图。由于电阻器 R₂ 上没有压降，当电路中没有集电极电流时，集电极电压为 30 V。这就是负载线上的 A 点。接着考虑集电极和发射极之间 PN 结短路时的情况，此时 R₂ 的压降为 30V。可以用公式 27-4 来计算经过 R₂ 和三极管上的电流。

$$I = U / R \quad (27-4)$$

$$I = 30 \text{ V} / 1000 \Omega = 30 \text{ mA}$$

负载线上的 B 点表示集电极的压降为 0V, 集电极电流为 30mA。

连接 A 点和 B 点构成一条负载线。Q 点将会落在这条线的某个位置。在这个例子中, 我们希望 Q 点落在 $I_B=0.6\text{mA}$ 的线上。为了提供 0.6mA 的基极电流, 我们可以用欧姆定律来选择 U_{BB} 和 R_1 。

这些简单的计算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 27-14 那样的电路不可靠。

在图 27-15 的电路中, 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。旁路电容还具有辅助电路稳定的作用。如果交流信号流经发射极电阻器, 它将倒置电路的偏置状态。

输入和输出耦合电容器 C2 和 C3 可以通过

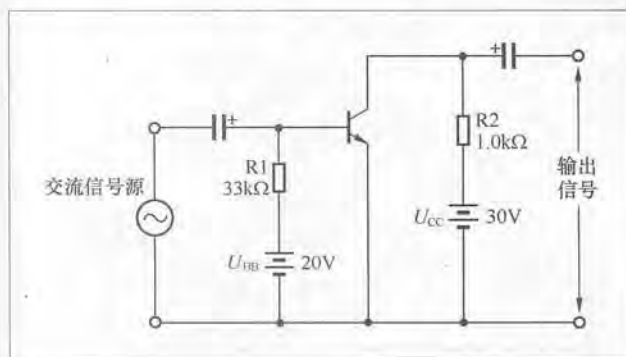
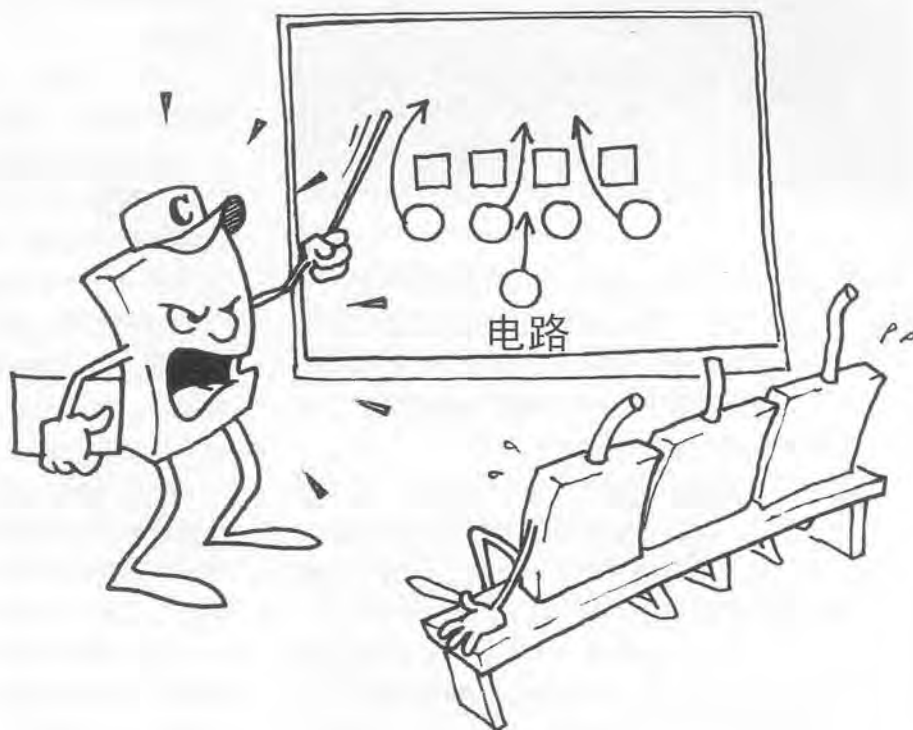


图 27-14 这是在图 27-12 上进行修改后的电路图。我们添加了基极偏压, 并在输入和输出端增加了耦合电容。耦合电容器可以阻碍直流偏压到达交流信号源和输出端电路。



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。

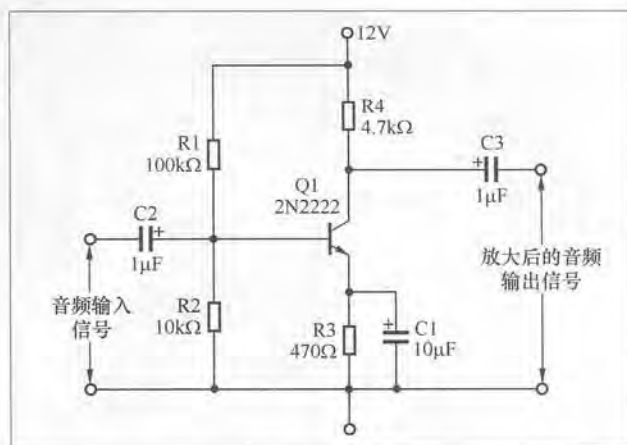


图 27-15 这个音频放大电路使用了一个普通的 2N2222 NPN 型三极管。电阻器设置了合适的 Q 点的偏置电压, 并减少了因为温度和三极管自身特性的变化对电路的影响。电容器 C1 是发射极旁路电容。输入和输出的耦合电容器 C2、C3 有时也称为隔直流电容器。

五、共发射极电路

双极型三极管有基极、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 27-16 显示的是一个 NPN 型三极管连接成共发射极放大电路。这个电路看起来比较熟悉，因为我们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 β 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 把交流信号耦合输入和输出放大器。输出的放大信号和输入信号的相位差为 180° 。

图 27-17 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 27-16 中

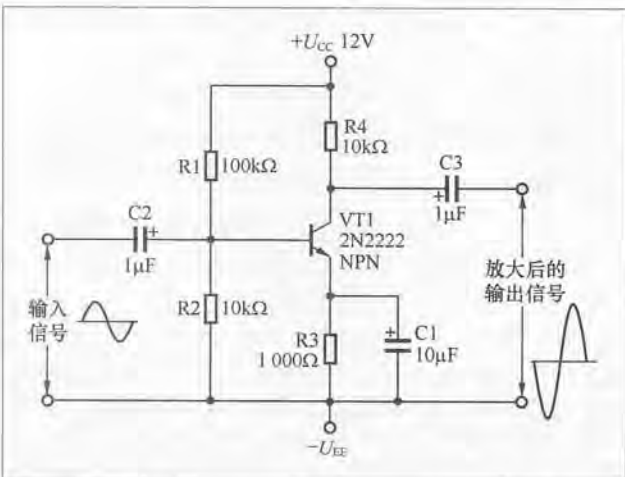


图 27-16 这是一个典型的 NPN 型共发射极放大电路。

的电路相同，不过，偏置电压的极性和图 27-16 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 ($1M\Omega$) 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 R3 的阻值通常在 100Ω 到 1000Ω 之间，R2 的阻值大约是 R3 的 5 ~ 10 倍。R1 和 R2 形成分压器，设置三极管的基极偏压电压。R1 的阻值应该大约是 R2 的 10 倍，输出电阻器 R4 的阻值应该是发射极电阻器 R3 的 5~10 倍。现在让我们用公式来概括这些规则。

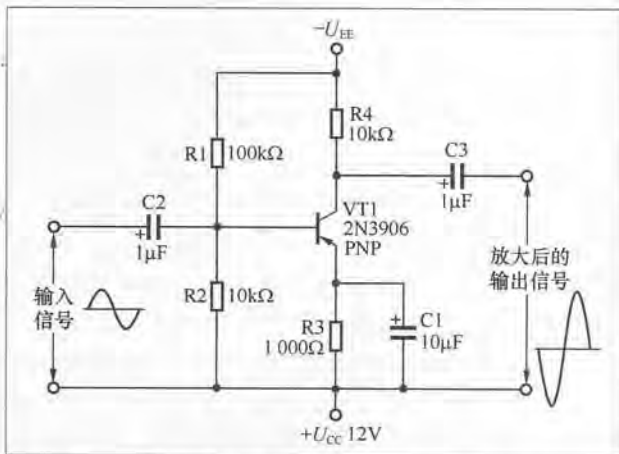


图 27-17 这是一个典型的 PNP 型共发射极放大电路，与 NPN 型共发射极放大电路非常相似。

$100\Omega \leq R3 \leq 1000\Omega$ 之间

$R2 \approx 5 \times R3$ 到 $10 \times R3$

$R1 \approx 10 \times R2$

$R4 \approx 5 \times R3$ 到 $10 \times R3$

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 $R2$ 。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 $R2$ 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 β 放大了发射极电阻器的值。假如我们三极管的 β 值是 50，当 $R3$ 为 1000Ω 时，产生的电阻则为 $50k\Omega$ 。实际上 $R2$ 与它并联，因此可以计算出并联后的总电阻。因为 $R3$ 要比 $R2$ 大很多，所以并联后的结果略小于 $R2$ ，这使得 $R2$ 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 $R4$ 。

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 $R4$ 并联，并联后的电阻略小于 $R4$ 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 27-5、27-6、27-7 描述了这些增益与电路中的电阻相关。

$$A_i = R2 / R3 \quad (27-5)$$

$$A_v = R4 / R3 \quad (27-6)$$

$$A_p = A_i \times A_v = R2 \times R4 / R3^2 \quad (27-7)$$

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。



六、共基极电路



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 27-18 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 耦合交流信号。

我们通常希望用一个偏置电压来替代图 27-18 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 27-19 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 27-20 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 27-19 相同。可以看到，输入信号和输出信号的相位相同。

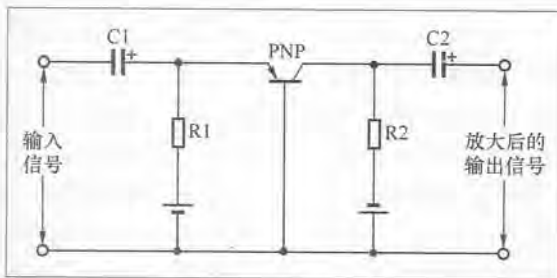


图 27-18 这是一个简单的共基极三极管电路。独立的发射极和基极以及基极和集电极的偏置电压有助于你更好地理解电路的工作原理。

共基极三极管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 27-8 来计算输入阻抗。

$$Z_m = 26 / I_E \quad (27-8)$$

其中 I_E 是发射极电流，单位为毫安培。

在发射极电流是 1mA 时，共基极电路的输入阻抗是 26 Ω。

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。

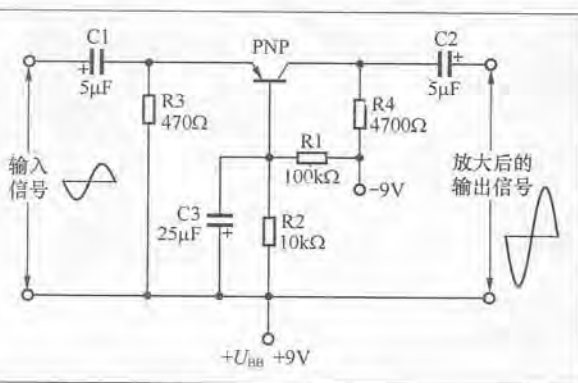
负载电阻 R4 设置了共基极电路的输出阻抗，因为这个电阻和二极管结并联。根据电路输出阻抗的需要，R4 的值可以在几千欧姆到 100k Ω 之间变化。在任何情况下，与基极和集电极之间的 PN 结的阻抗相比，负载电阻都是一个较小的值。因此，电路输出阻抗近似等于 R4 的值。

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 27-9 表示电流增益：

$$A_i = I_o / I_i = I_c / I_e \quad (27-9)$$

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 α 。通过公式 27-9 我们知道，共基极电流增益与三极管参数 α 相等。因为发射极电流

图 27-19 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。



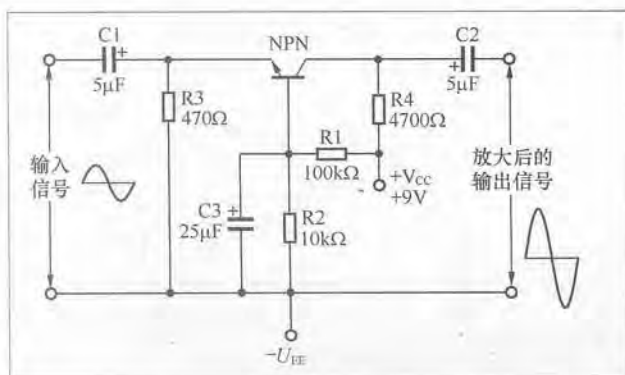
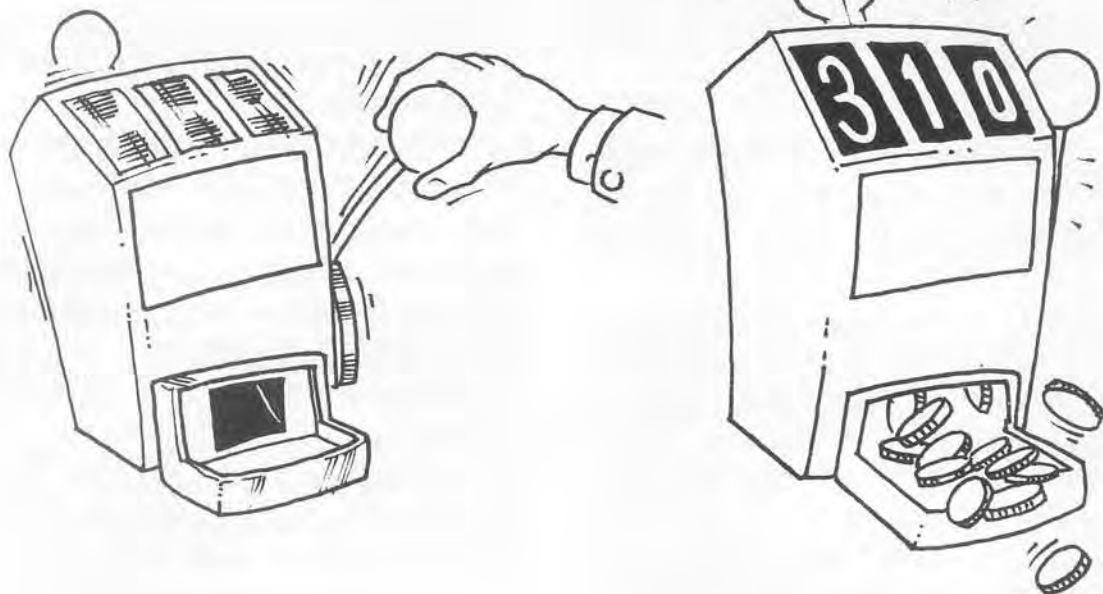


图 27-20 这个共基极晶体管放大器使用的是一个 NPN 型三极管。这个电路图和图 27-19 中的电路相似，只是偏置电压的极性相反。

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。 α 的典型值在 0.90 到 0.99 之间。

$$A_i = \alpha \quad (27-10)$$

输出电压除以输入电压可以求出电路的电压增益。公式 27-11 为电压增益的另一种表示方法。

$$A_v = \alpha \times R_4 / Z_{in} = \alpha \times I_e \times R_4 / 26 \quad (27-11)$$

其中：

R_4 为负载电阻器的电阻， I_e 为发射极电流值。

公式 5 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。

$$A_p = A_i \times A_v \quad (27-12)$$

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。

七、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 27-21 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。

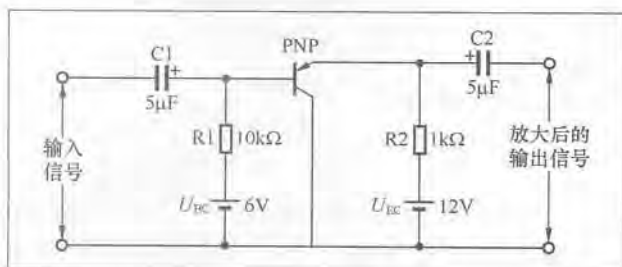


图 27-21 此图为一个简单的共集电极三极管电路。独立的偏置电压帮助你更好地理解电路工作。电池 U_{BC} 和 U_{EC} 分别提供了合适的正向偏置电压和反向偏置电压。

不过，图 27-21 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 R_2 上有电压降存在，而这个电压降的大小与经过 R_2 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，这个压降非常重要。

基极和集电极之间电路中的 R_1 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 R_1 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。 R_1 和 R_2 具有限流作用， C_1 和 C_2 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 27-21 中的两个电源。利用一个分压器可以使共集电极电路很好地工作。我们用一个类似的分压器给共发射极和共基极电路工作。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 27-22 为带有适当偏置电阻的 PNP 型三极管。注意，输入和输出信号的相位相同。

电阻器 R_1 和 R_2 构成了分压器，用来设置电路的偏置电压。发射极电阻器 R_3 作为负载电阻器。合并后的电阻设定了三极管的 Q 点。

图 27-23 是用 NPN 型三极管连接的共集电极放大器。电路图与图 27-22 类似，偏置电压极性与图 27-22 相反。

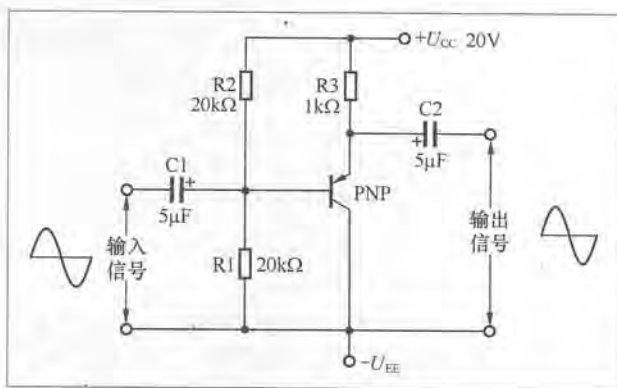


图 27-22 这个 PNP 型三极管工作在共集电极电路中。电路中一个单独的偏置电压源。这个放大器特性不会随着温度变化而改变。

也许你已经注意到图 27-22 和图 27-23 电路的另一个区别。在图 27-23 中，我们从负载电阻 R_3 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， R_3 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

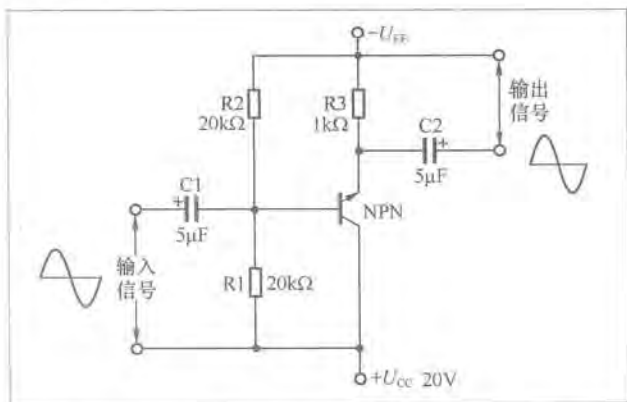


图 27-23 这个共集电极晶体管放大器使用一个 NPN 型三极管。这个电路和图 27-22 中的电路相似,但偏置电压极性相反。从 R3 上取出输出信号,也告诉我们为什么我们常把共集电极电路称为电压跟随放大器。

发射极电流的变化。由于发射极电流是基极电流的 β 倍,也就是说发射极电流的变化倍数也是基极电流变化的 β 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 $\pm 2.5\text{V}$ 内变化,这也会在 R3 上产生几乎 $\pm 2.5\text{V}$ 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。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 $50\text{k}\Omega$ 。电路的输入阻抗近似等于 R1、R2 和 $50\text{k}\Omega$ 并联后的值。对于图 27-22 和图 27-23 中的电路来说,输入阻抗大约为 $8\,333\Omega$,这个值近似等于 $10\text{k}\Omega$ 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 80Ω 。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 27-22 和图 27-23 中的电路输出阻抗大约为 74Ω 。

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 27-13 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。

$$A_U = U_o / U_i \quad (27-13)$$

我们也可以用输入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。

$$A_i = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} \cdot \frac{1}{R3} \quad (27-14)$$

在图 27-23 所示电路中,电流增益为 10。

放大器的功率增益可用公式 27-15 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。

$$A_p = A_i \times A_v \quad (27-15)$$

图 27-23 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,共集电极放大器作用就像一个阻抗变换器。



八、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会毁坏晶体管。

晶体管都有最大额定电压。例如，对于通用的 2N2222 NPN 型晶体管来说，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。

不同类型的晶体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）。你会发现有的晶体管 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 27-1 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

$$P_{max} = U_{CE} \times I_C \quad (27-16)$$

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_{CEO} 与最大集电极电流 I_{Cmax} 相乘，三极管的最大消耗功率通常要比这个

表 27-1

普通用途的三极管（按照设备的序号排列）

		最大集 电极 - 发射极 电压 (U_{CEO})	最大集 电极 - 基极电 压 (U_{CBO})	最大发 射极 - 基极电 压 (U_{EBO})	最大集 电极电 流 (I_C)	最大 设备 损耗 (P_O)	电流增 益带宽 积 (f_T)	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）； $U_{CE} = 20\text{V}$ ； $f = 100\text{MHz}$

乘积小得多。

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 27-16 求出集电极的电流(在求解公式时,两边同除以 U_{CE})。

$$\begin{aligned} P_{\max} &= U_{CE} \times I_c \\ P_{\max} / U_{CE} &= U_{CE} \times I_c / U_{CE} \\ P_{\max} / U_{CE} &= I_c \quad (27-17) \\ I_c &= P_{\max} / U_{CE} = 1.2 \text{ W} / 20 \text{ V} = 0.06 \text{ A} \\ I_c &= 60 \text{ mA} \end{aligned}$$

从表 27-1 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} 。

$$\begin{aligned} U_{CE} &= P_{\max} / I_c \quad (27-18) \\ U_{CE} &= 1.2 \text{ W} / 0.800 \text{ A} = 1.5 \text{ V} \end{aligned}$$

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。有些散热片只是一些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 27-24 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 27-25 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 27-25 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 27-1 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 N_F 。噪声系数 N_F 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多。很多电子电路中,除了将三极管用做放大器外,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。



图 27-24 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。

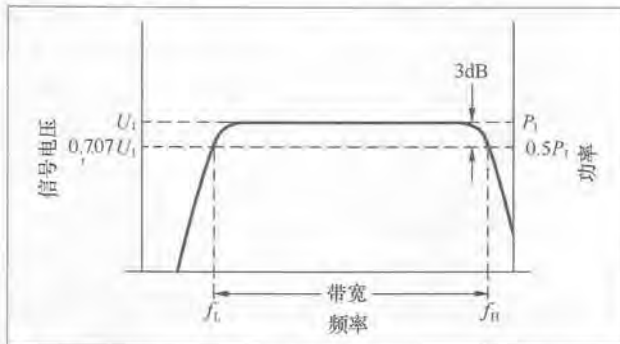


图 27-25 这张图描述了理想三极管放大器的频率响应。我们可以通过测量输出信号电压或功率的方式来找出放大器的频率响应。低频率截断点和高频截断点之间的差额表示带宽。

第 28 章

场效应管

一、通过变化的电场控制电流

双极性晶体管（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，因为它们是依靠电场来工作的。我们通常用缩写 FET 来表示场效应管。

图 28-1 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 28-2 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排出，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一端称为源极。

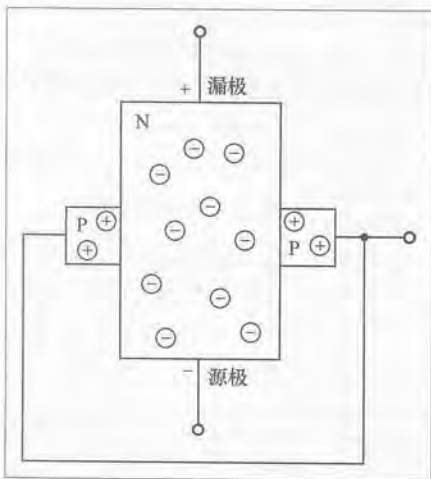


图 28-1 这张图图解了场效应管 (FET)。场效应管由一块 N 型半导体材料和两侧的 P 型半导体材料构成。

图 28-2 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。

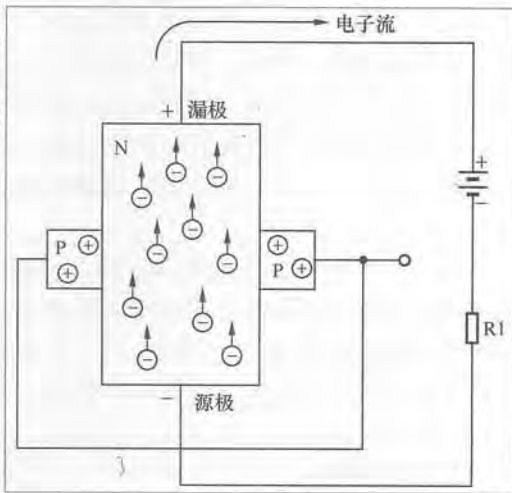


图 28-3 中, 我们把两块 P 型体材料与电池负极相连, 电池的正极和 N 型材料的源极相接。这样电池在场效应管 (FET) 的栅极 (gate) 和源极之间的 PN 结上施加了反向偏压。

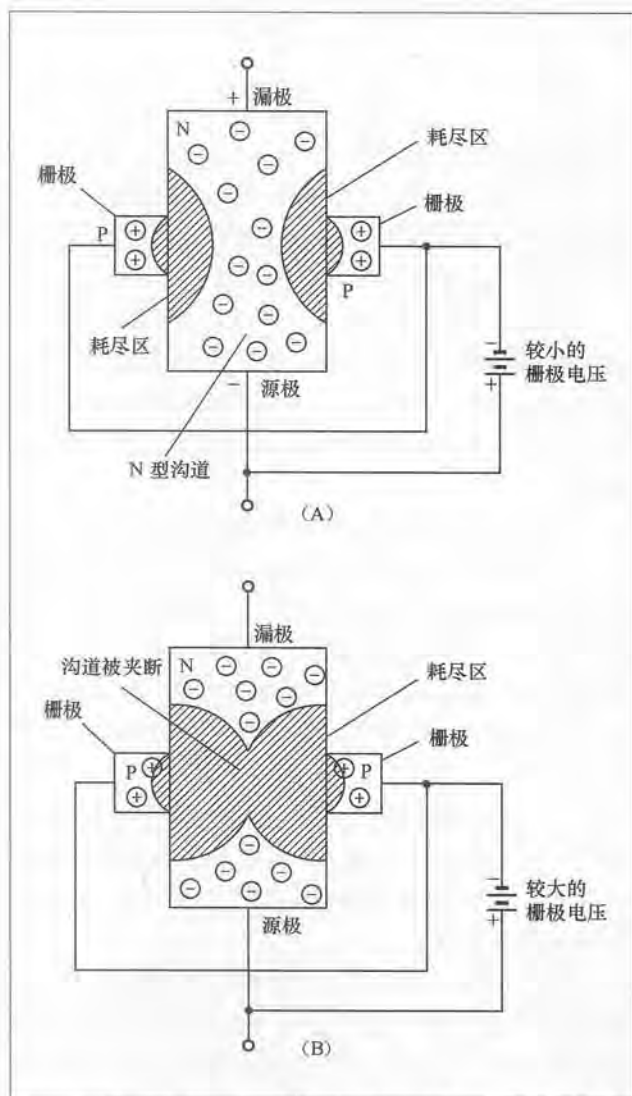


图 28-3 我们给栅极和源极之间的 PN 接入一个反向偏置电压。耗尽区域开始关闭 N 型半导体上的电流沟道。图 (B) 显示, 当反向偏压足够大时, 耗尽区域把电流沟道完全关闭。

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 28-3(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 28-3(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 28-4 为这个电路的完整连接。

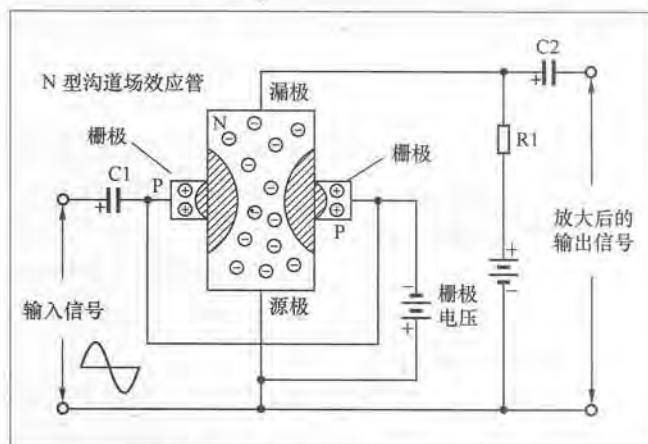


图 28-4 这张图为 N 型沟道场效应管的工作原理图。栅极电源确保输入信号为正时, 栅极上处于反向偏置。输出电流经过 R1 时, 会产生电压降。这个电压降提供了放大后的输出电压。

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。

二、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内前，制造商用导线与金属触点连接起来引出电极。图 28-5(A) 描述了 N 型沟道 JFET 的结构图。

图 28-5(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 28-6 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出去。图 28-7 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

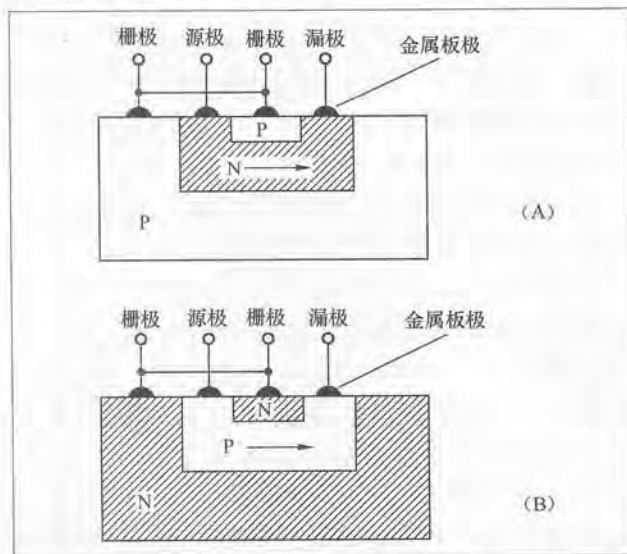


图 28-5 图 (A) 为 N 型沟道结型场效应管的构造。制造商在 P 型半导体底座上形成了一个 N 型材料沟道，然后再加上一小块 P 型材料构成第二个栅极。他们在半导体上面植入很薄的金属层形成电极。图 (B) 为 P 型沟道 JFET 构造，其方式与图 (A) 类似，但是半导体类型相反。



图 28-6 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。

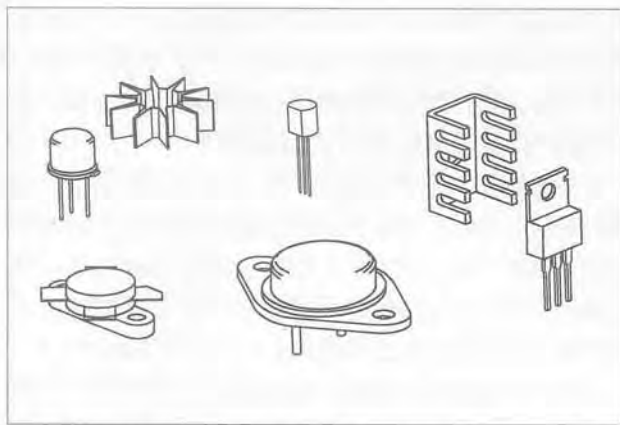
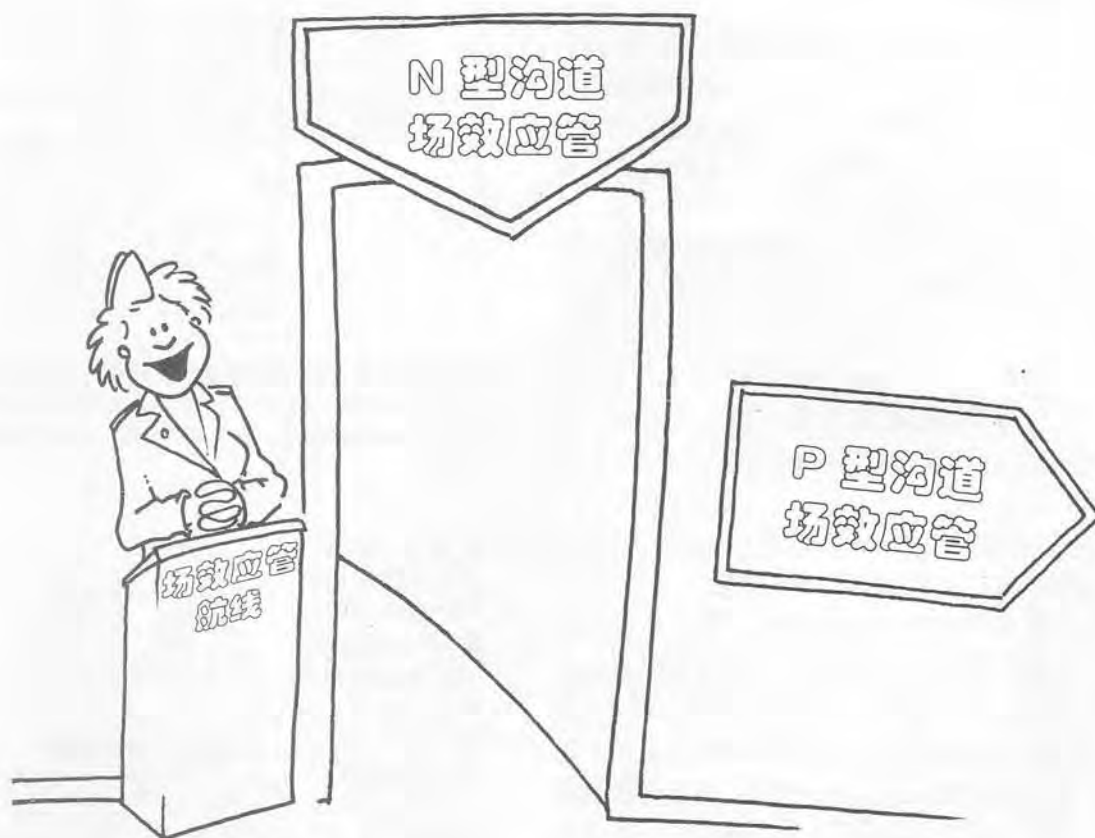


图 28-7 FET 的封装与双极型三极管的封装类似。有些 FET 需要借助散热片来传导所产生的热量。

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。



三、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板，栅极层作为另一块电容板。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，从而损坏晶体管，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 28-8 显示的就是耗尽型 MOSFET 的构造图。

图 28-8(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 28-9 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 28-10 为增强型 MOSFET 结构。增强型

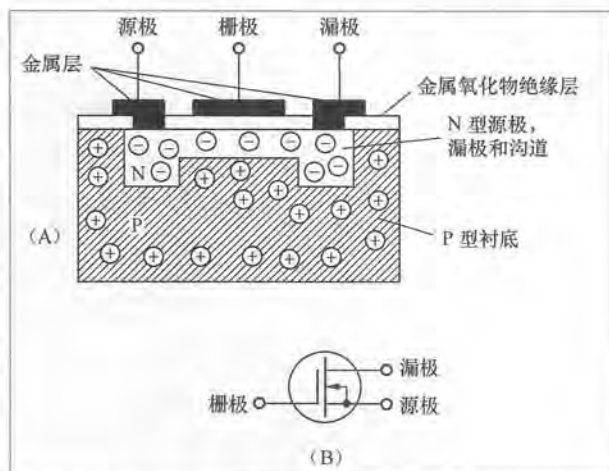
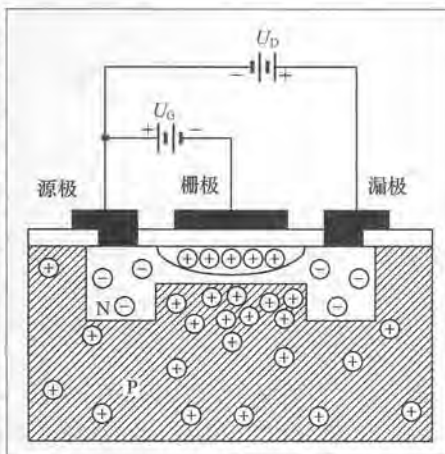


图 28-8 图 (A) 为 N 型沟道耗尽型金属氧化物半导体场效应管的结构图。图 (B) 为这个晶体管的示意图符号。在 N 型沟道 MOSFET 中，箭头指向沟道。注意到栅极导线上没有箭头。

图 28-9 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。



MOSFET 中最有意思的是在 N 型源极和漏极之间不存在沟道。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 结上会产生一个小的漏电流。在这种情况下,PN 结存在一个反向偏压。

如图 28-11 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 28-12 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。

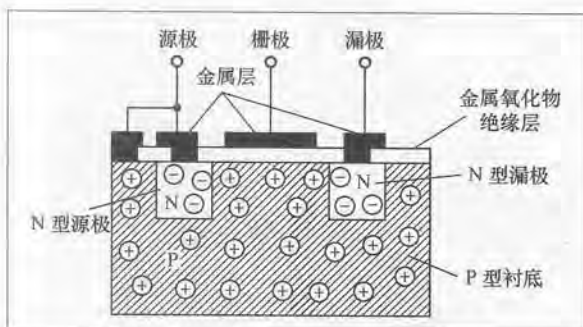


图 28-10 N 型沟道增强型金属氧化物半导体场效应晶体管的结构图。

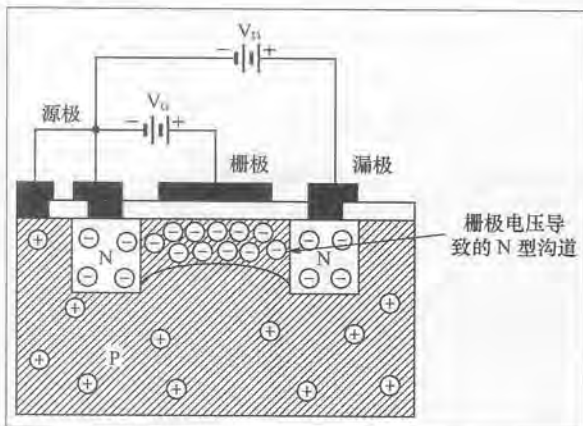
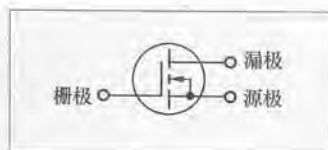


图 28-11 N 型沟道增强型 MOSFET 的工作原理图。正向栅极电压吸引 P 型半导体中的电子。由于 P 型半导体中的自由电子要比空穴少,我们称这样的电子为少数载流子。这些电子构成了源极和漏极之间的 N 型沟道。

图 28-12 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。



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 28-13 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。

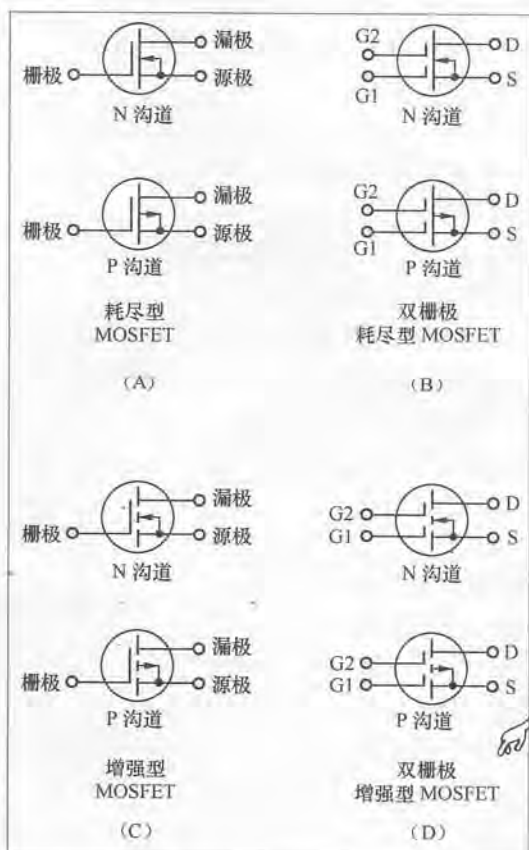


图 28-13 这些符号表示了不同类型的金属氧化物半导体场效应管。这些符号表示了 N 型沟道和 P 型沟道的耗尽型和增强型 MOSFET,图中我们还包括了双栅型 MOSFET。

第 29 章

集成电路

一、线性器件

硅和锗半导体材料制成了很多电子器件，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 29-1 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？

图 29-3 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。

集成电路就是一单片半导体材料，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 29-2 显示了一些常用封装的集

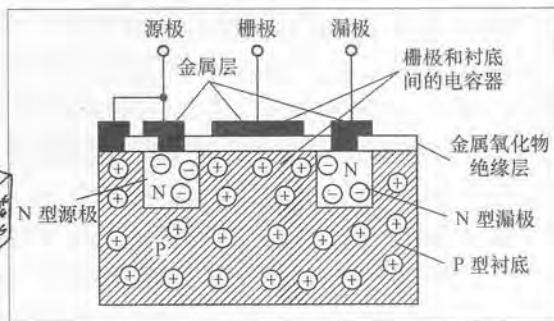


图 29-1 金属氧化物半导体场效应晶体管，包含了一个半导体电容器。

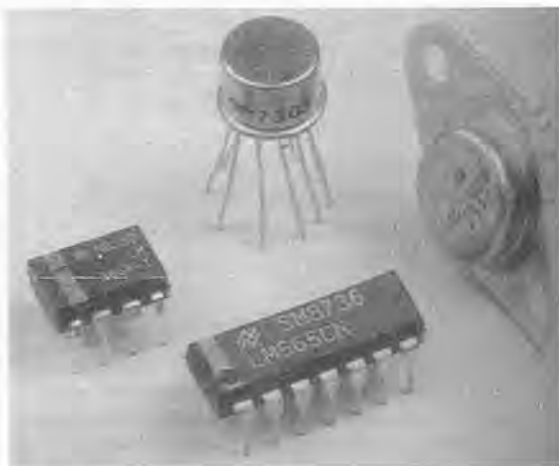
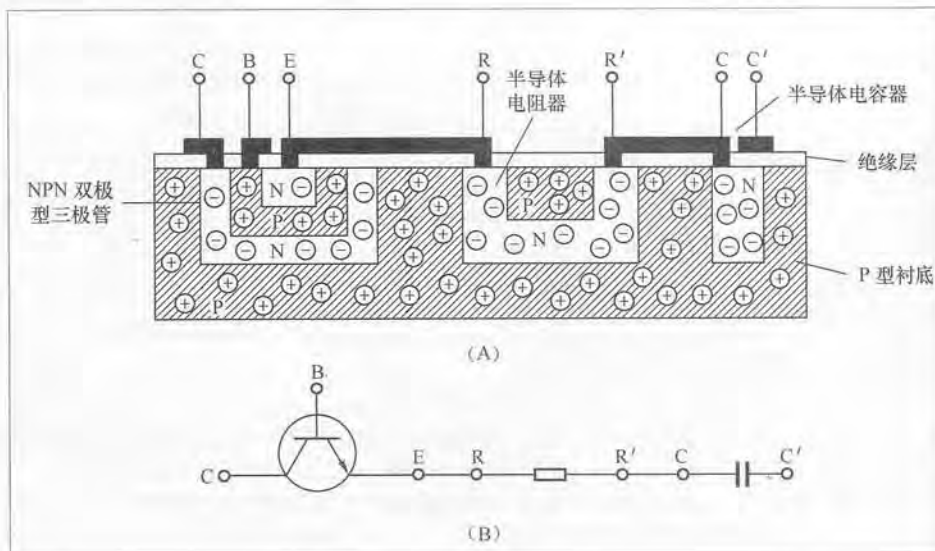


图 29-2 这张图中显示了几种 IC 封装类型。



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 29-3 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 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。

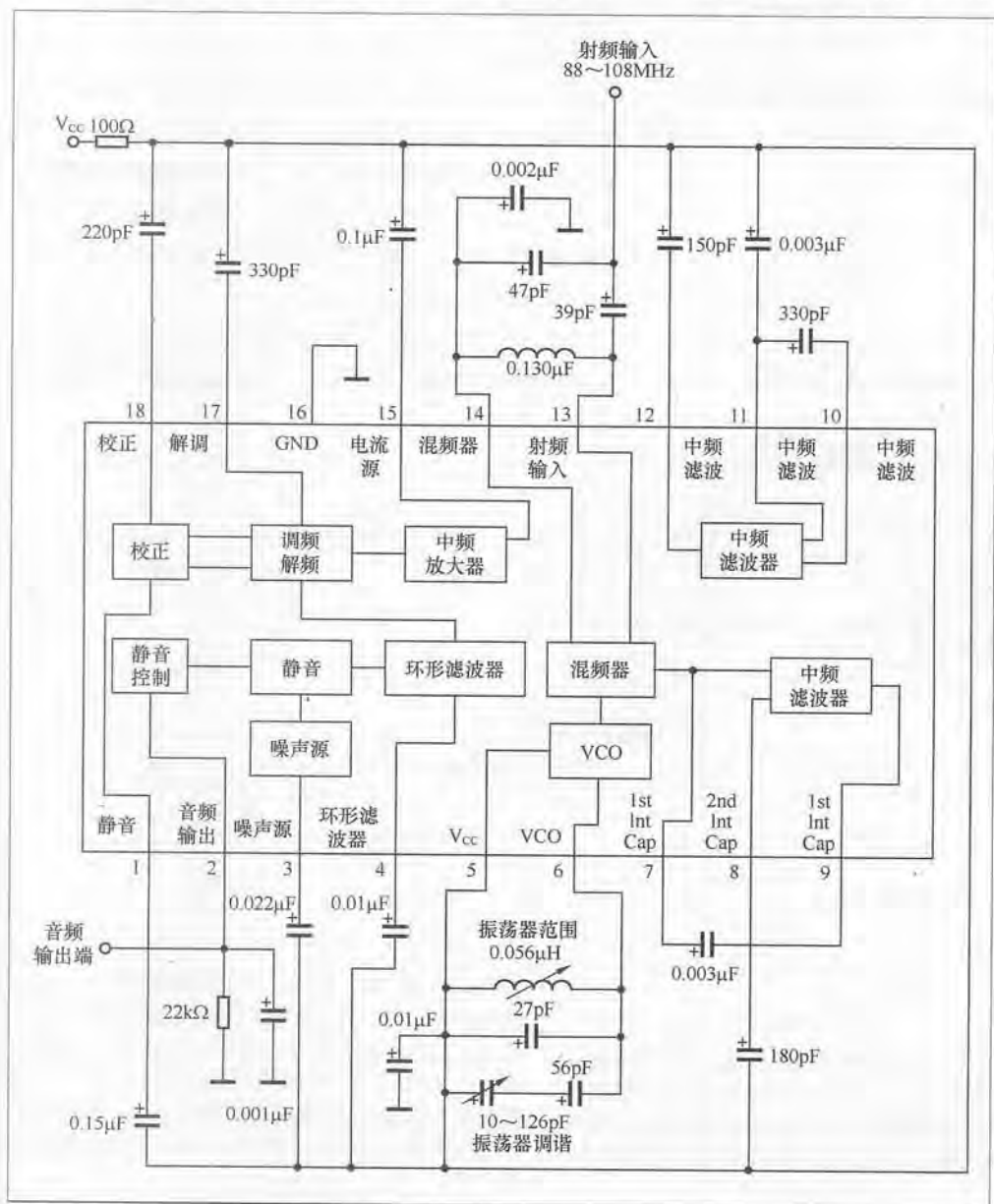
线性 IC 可以作为放大器、振荡器等来使用,

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。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 29-4 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 29-4 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。

二、运算放大器

线性集成电路有很多产品，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。

现代 IC 运算放大器是高增益直接耦合差动放大器。差动放大器有两个输入端，它对两个输入信号的差值进行放大。直接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具有：

- (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漂移。

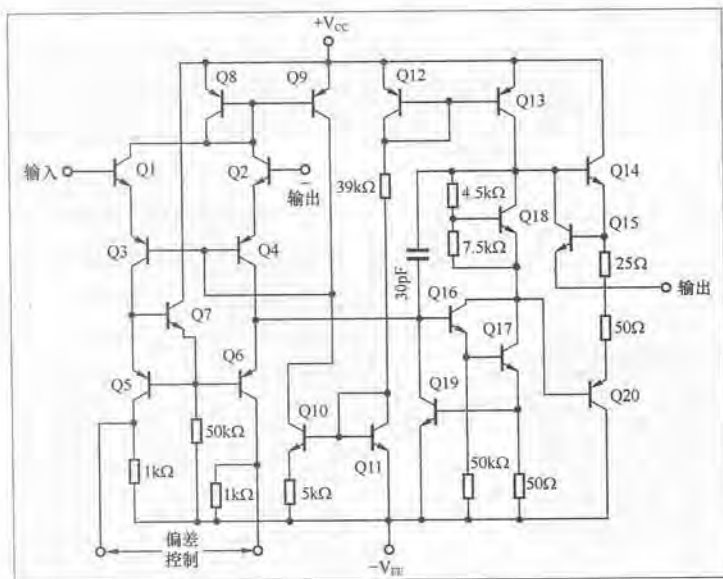


图 29-5 这张图是一个 741 运算放大器电路示意图。电路中有同相输入端和反相输入端，以及一个输出端。向运算放大器提供正向电压输入和负向电压输入，可以把运算放大器作为差动放大器来使用。你可以通过偏差控制校正，调整放大器，以保证两个输入端的信号相同时不会产生输出。

现代 IC 运算放大器可以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。

图 29-5 的示意图是一个 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，这是 IC 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将告诉你接入到每条 IC 引线上的电压和信号。

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，所以它们的特性仔细地匹配着。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 + 输入标记，表示同相输入端。另一个有 - 输入标记，表示反相输入端。

图 29-6 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，放大后的输出信号和输入信号之间具有 180° 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，输出信号向反向变化。

在 IC 中有两个工作电压输入端。很多运算放大器需要对称电压电源，一个电源相对于接地端为

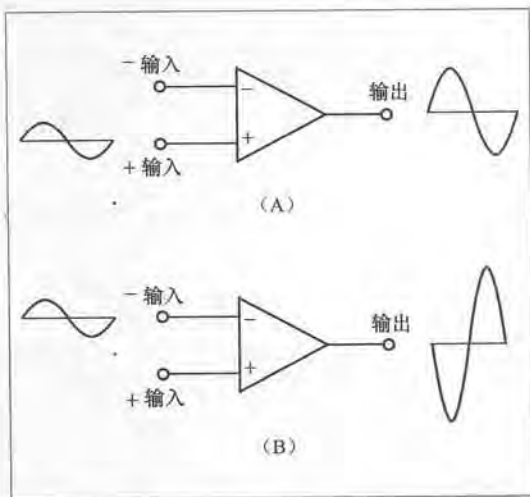


图 29-6 图 (A) 是将一个正弦波信号接入到放大器同相输入端，输入和输出信号相位相同。当输入信号达到正向最大值时，输出信号也达到正向最大值。图 (B) 是将一个信号接入反相输入端，在这种情况下，输入信号和输出信号具有 180° 的相位差。在输入信号达到正向最大值时，输出信号达到负向最大值。

正电压，第二个电源相对于接地端为负电压。这对运算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。

你可以用运算放大器做一个音频放大器。图29-7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反馈，从而稳定了电路的工作。

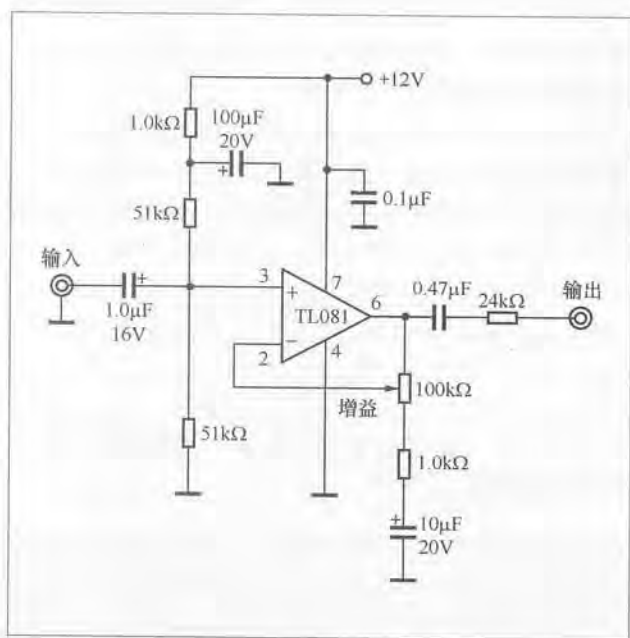


图 29-7 这是一个音频放大器的示意图。你可以用它来增大从话筒输出的信号，输入和输出连接器是同轴类型，因为你可以用屏蔽线或同轴电缆来制作这些连接。

理想的运算放大器



- 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) 无穷大的带宽
- 5) 噪声为零
- 6) 时间和温度变化时无漂移

有源滤波器是另一种常见的运算放大器。图29-8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滤波器。

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。

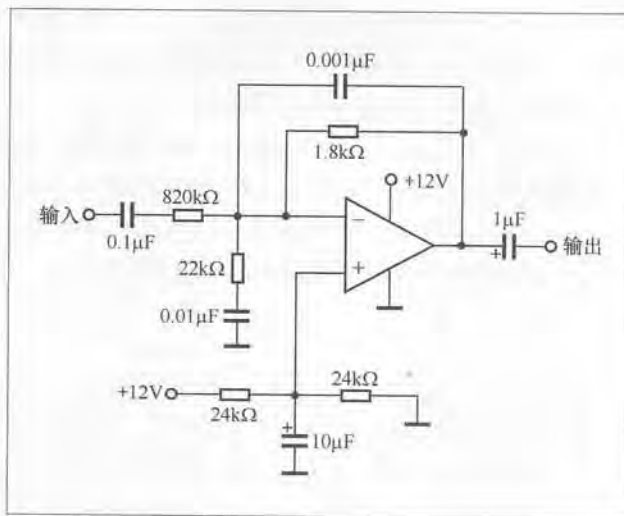


图 29-8 这个有源带通滤波器适合用于业余无线电收音机的 CW 滤波器，它的中心频率为750Hz，你可使用一个741或TL081运算放大器。

表 29-2

“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

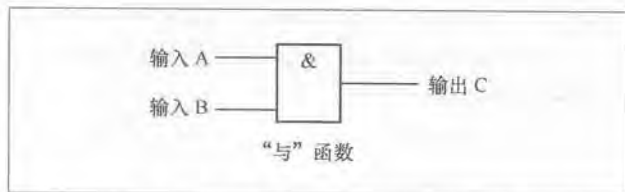


图 29-12 这个符号表示两个输入端的“与”门。只有两个输入信号都为 1 时，才会输出 1。如果两个或者一个为 0，那么输出就为 0。

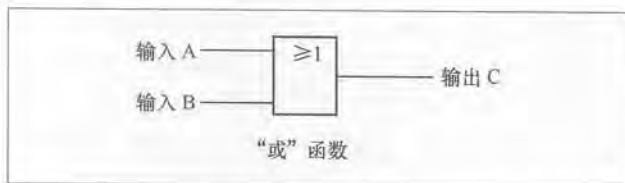


图 29-13 我们用这个符号表示两个输入端的“或”门的示意图。只要有一个输入端是 1，那么输出就是 1。

表 29-3

“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

输出也是 0。表 29-22 为逻辑“与”电路的真值表。

图 29-12 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端，一个输出端。只要有一个输入是 1，输出就是 1。图 29-13 为两个输入端的“或”门示意图。表 29-3 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。触发器是 1 个储存 1 位二进制数字或信息单位的数字电路。

图 29-14(A) 所示的双稳态触发器由“或”电路和反相器组成。图 29-14(B) 显示的是触发器的示意图符。图 29-14(C) 为双稳态触发器的真值表。

两个输入是 SET(S) 和 RESET(R)。

当 S=1, R=0 时，输出端 Q 是 1。当 S=0, R=1 时，输出端 Q 是 0。注意，双稳态触发器有第 2 个输出端，用 $\bar{Q}$ 来表示（读为 Q 非，表示 Q 的反相值，或者说 Q 的相反值）。 $\bar{Q}$ 端的输出值总是和 Q 端的输出值相反。当 S 和 R 的输入值都是 0 时，输出值不变。通过真值表也可以看到，如果两个输入值都是 1，就没有办法确定输出值。在你使用触发器时，需要记得这一点。

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。这个名字来自于制造 IC 所用的双极型晶体管有关。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，而 4081 有 4 个“与”门。

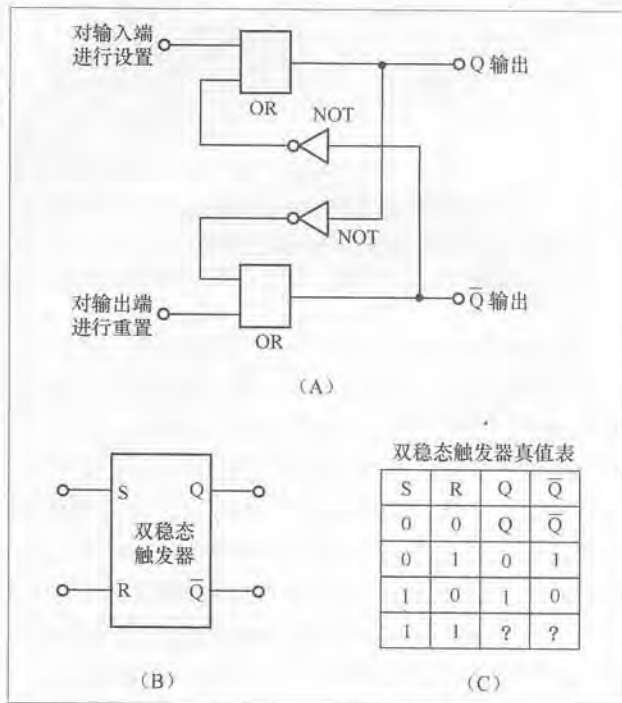


图 29-14 你可以用两个“与”门和两个反相器来构造触发器。图 (B) 为表示 IC 触发器的示意图符号。图 (C) 为这个触发器的真值表。

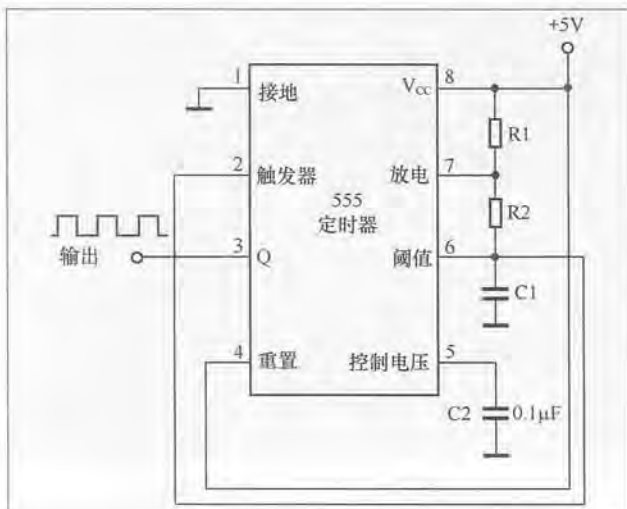


图 29-16 555 定时器 IC 也可以构成一个无稳态多谐振荡器。在没有任何输入信号的情况下，这个电路能产生一串输出脉冲。电阻器 R1、R2 和电容器 C1 确定了输出脉冲的频率。

我们可以用公式 29-2 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。

$$f = \frac{1.46}{[R1 + (2 \times R2)] \times C1} \quad (29-2)$$

其中 f 是频率，单位为 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，那么电路输出信号的频率为多少？

$$f = 1.46 / (10 \times 10^3 \Omega + (2 \times 100 \times 10^3 \Omega)) \times 0.01 \times 10^{-6} F$$

$$f = 1.46 / (10 \times 10^3 + 200 \times 10^3) \times 0.01 \times 10^{-6}$$

$$f = 1.46 / 210 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}$$

$$f = 1.46 / 2.1 \times 10^{-3} = 695 \text{ Hz}$$

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 29-17 为另一个无稳态多谐振荡器，这是一个非常好的实验电路。电阻器 R2 和 R3 替代了图 29-16 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 29-2 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 29-2 中的 R2 的值。我们也可以用公式 29-2 计算 R3 不存在时的输出频率。通过计算，可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上搭建这个电路。实验电路板和所有用到的元件都可以在无线电器材商店找到。

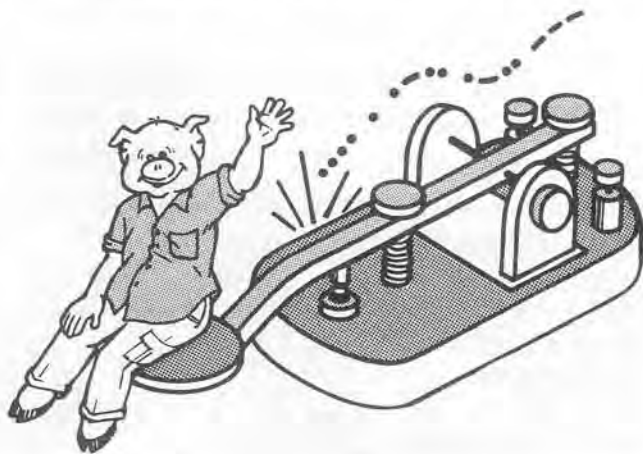
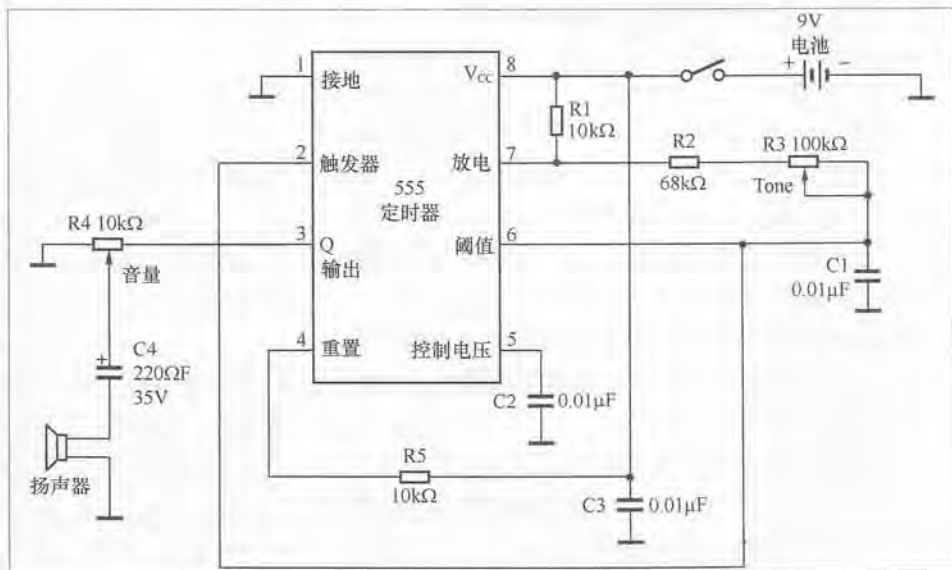


图 29-17 你可以在一块实验电路板上搭建这个无稳态多谐振荡器电路。在收听输出信号时，调整 R3 和 R4。你也可以在电路中使用其他的电阻器和电容器，用莫尔斯电码电键替代开关，你就可以得到一个电码练习振荡器了。



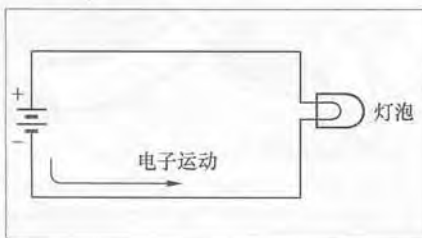
第 30 章

电子管

一、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 30-1 中所示，电池中的化学能在电路中提供了这样的能量。

图 30-1 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。



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汽化（见图 30-2）。

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。

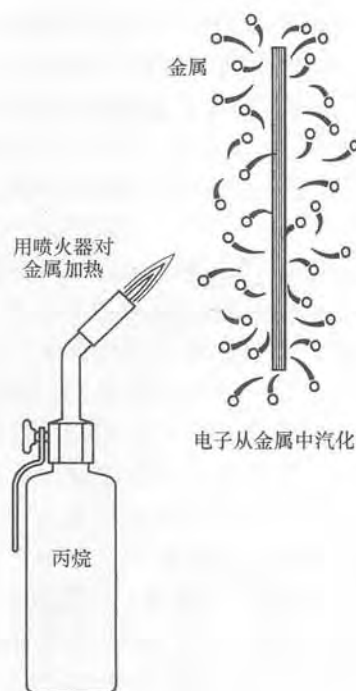


图 30-2 对金属加热可以使部分电子获得离开金属材料所需的能量。这些自由电子运动到离金属表面周围很近的空间。当这些电子离开后，金属中留下阳离子。这些阳离子吸引电子，使这些电子停留在离金属表面很近的空间内。这些阳离子还把部分电子吸引返回到金属中。

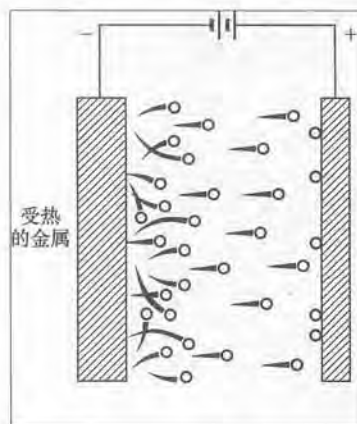


图 30-3 第二块金属板放在靠近第一块金属板的位置。如果我们给它施加电压，就会吸引自由电子。

如图 30-3 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。

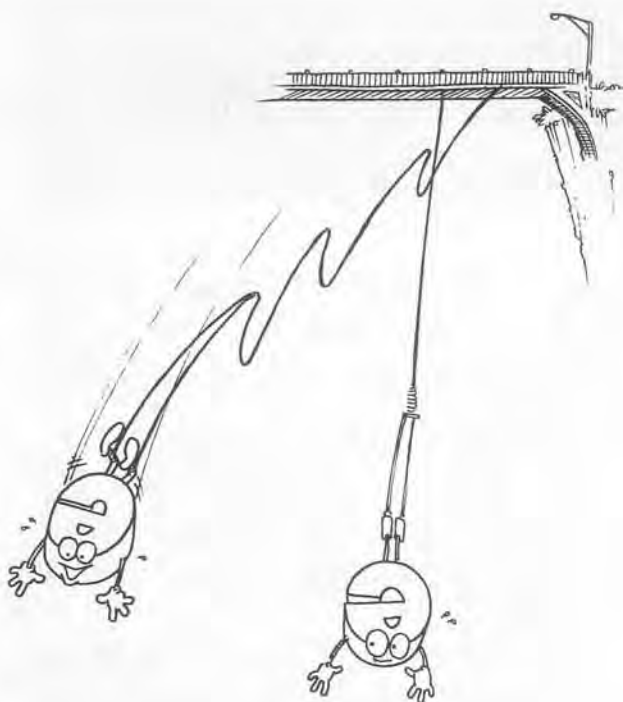
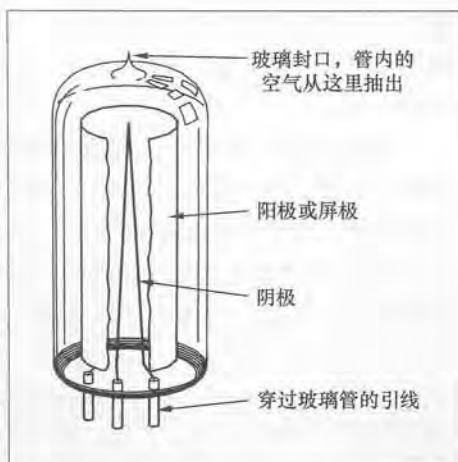


图 30-4 这是一个简单电子管的结构图。玻璃封装中引出的导线可以把这个电子管接到电路中。一个电源提供电流对阴极加热，另一个电源向阳极提供正向电压。

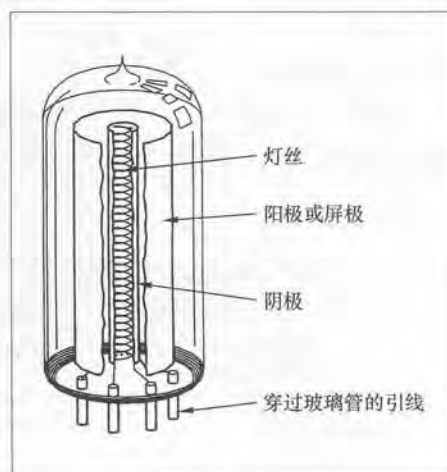


我们把这个装置封装到玻璃器皿中，再抽去器皿中的空气，就做成了一个电子管，也称为真空管。抽成真空的目的是保证自由电子从阴极顺利到达阳极。管内的气体分子将驱散电子，吸收这些电子的能量，并使它们偏移原来的运动轨迹。图 30-4 显示了这个电子管的构造。电子管的阳极和阴极穿出玻璃管，提供了和外部电路连接的输出端。

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

图 30-5 有些电子管使用独立灯丝来对阴极加热。



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 30-4 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 30-5 显示的是旁热式阴极电子管的结构。

二、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。这个正向电压吸引阴极发射的电子穿过这两个电极的空间。

图 30-6 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真空管的有源元件。

在图 30-7 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

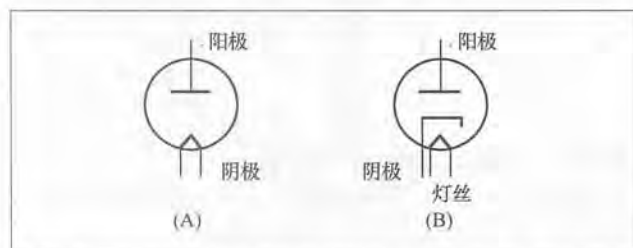


图 30-6 这些符号是电子二极管的示意图符号。图 (A) 中符号表示直热型阴极电子管，图 (B) 中符号表示旁热式阴极电子管。

图 30-7 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。

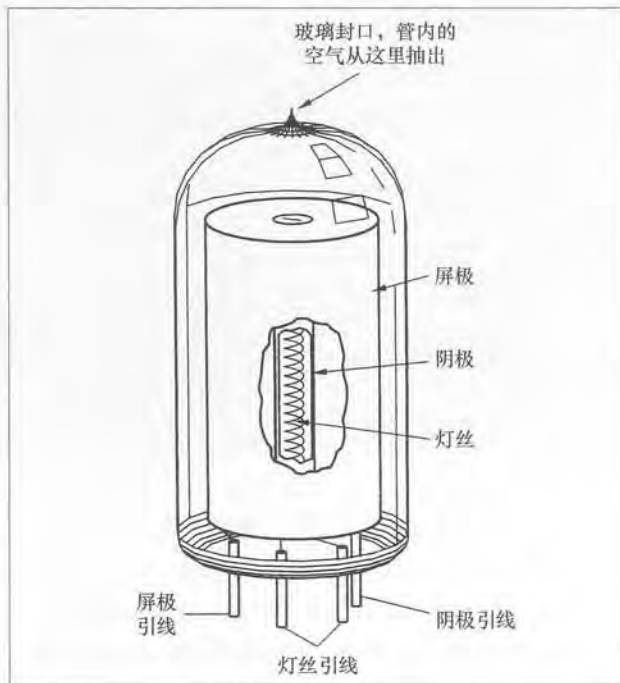
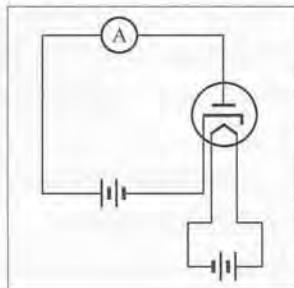


图 30-8 这是一个典型电子二极管的构造结构切面图。

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。

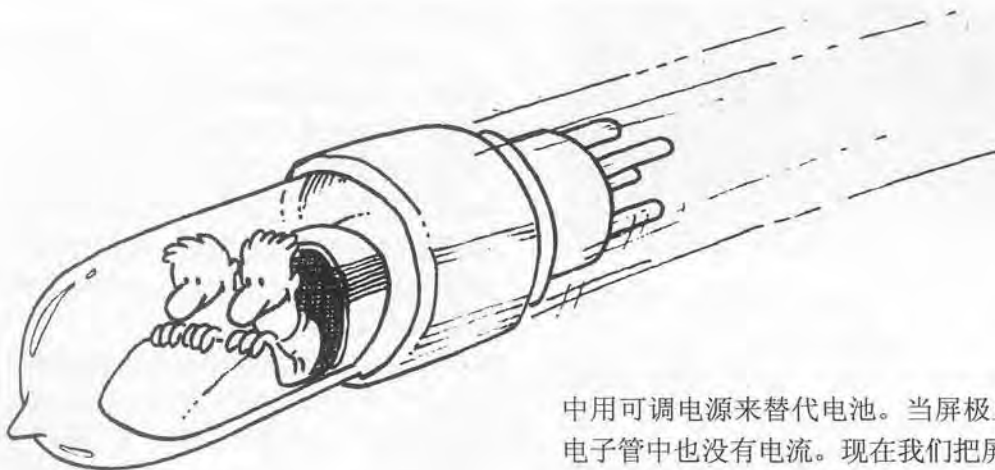
图 30-8 为一个电子二极管构造结构的切面图。屏极（阳极）把阴极完全包围，这样可以保证阴极发射的所有电子都能被阳极接受。

那么屏极电压是如何影响经过电子二极管的电流的呢？让我们来做简单的实验。在图 30-7

表 30-1

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



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 30-1 为这个电子管的一组测量数据。图 30-9 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，因为它的温度不够）。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 30-10 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。

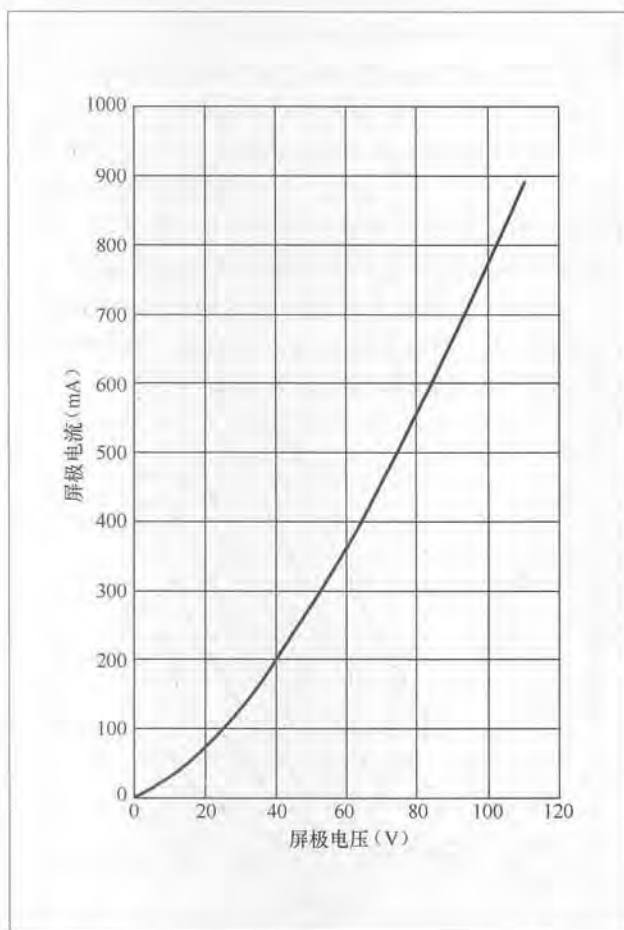


图 30-9 此图是根据表 30-1 数据画出的特性曲线图，它显示了电子管中的电流随屏极电压的变化情况。

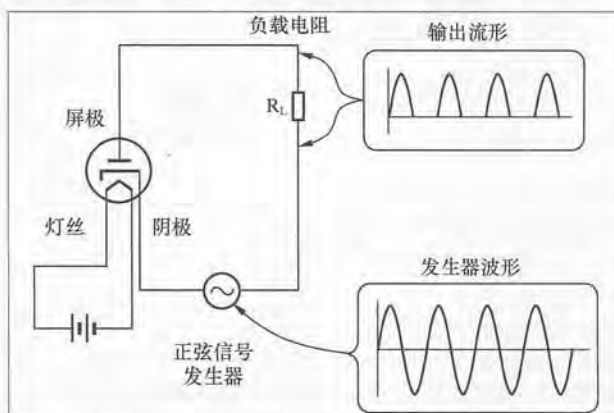


图 30-10 一个电子二极管把正弦波交流输入转换为一连串的直流脉冲。

三、电子三极管 ——场效应器件

在现代电子学中，我们很少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使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上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 30-11 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。这个电源的正极和阴极相接。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 30-12 的电路来测试电子



图 30-11 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。

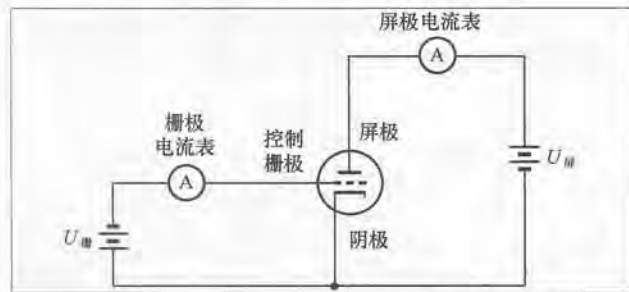


图 30-12 我们可以用这个电路来研究电子三极管的工作状况。一个电源接在阴极和屏极（阳极）之间，连接方式和电子二极管相同。另一个电源接在阴极和控制栅极之间，使栅极相对于阴极为负电压。

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 30-12 中的电源 U_{g1} ）。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 4.5mA。

现在让我们把栅极上的电源重新放到图 30-12 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 30-12 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。

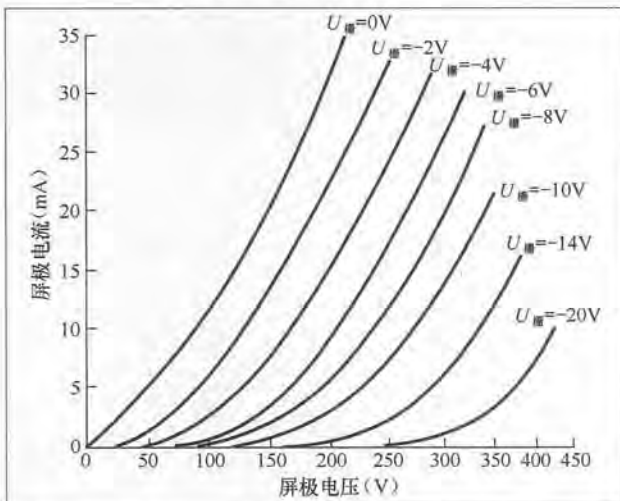


图 30-13 此图为一个电子三极管的典型特性曲线图。对于图中的每一个栅极电压，我们是从 0 开始增大屏极电压得到的。

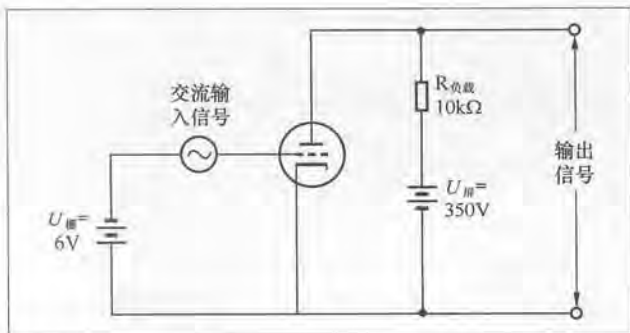


图 30-14 这个简单电路解释了电子三极管如何放大输入信号电压的过程。输入信号电压的微小变化叠加到栅极偏压电池上。栅极电压的变化产生一个变化的屏极电流，从而导致输出电压发生很大变化。

有两种方法可以改变电子三极管的屏极电流。与电子二极管类似，增大屏极电压可以增大屏极电流（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 30-13 为一个电子三极管的典型特征曲线图。我们可以用与图 30-2 类似的电路来测量并画出这些曲线。我们可以首先设置一个确定栅极电压，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 30-13 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 30-13 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，我们做一个简单地描述，帮助你理解为什么这个电子管如此重要。

图 30-14 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 30-15 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_{gg} 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 30-15 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 30-15 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）。

$$U = IR \quad (30-1)$$

$$U = 8.7 \times 10^{-3} A \times 10 \times 10^3 \Omega = 87 V$$

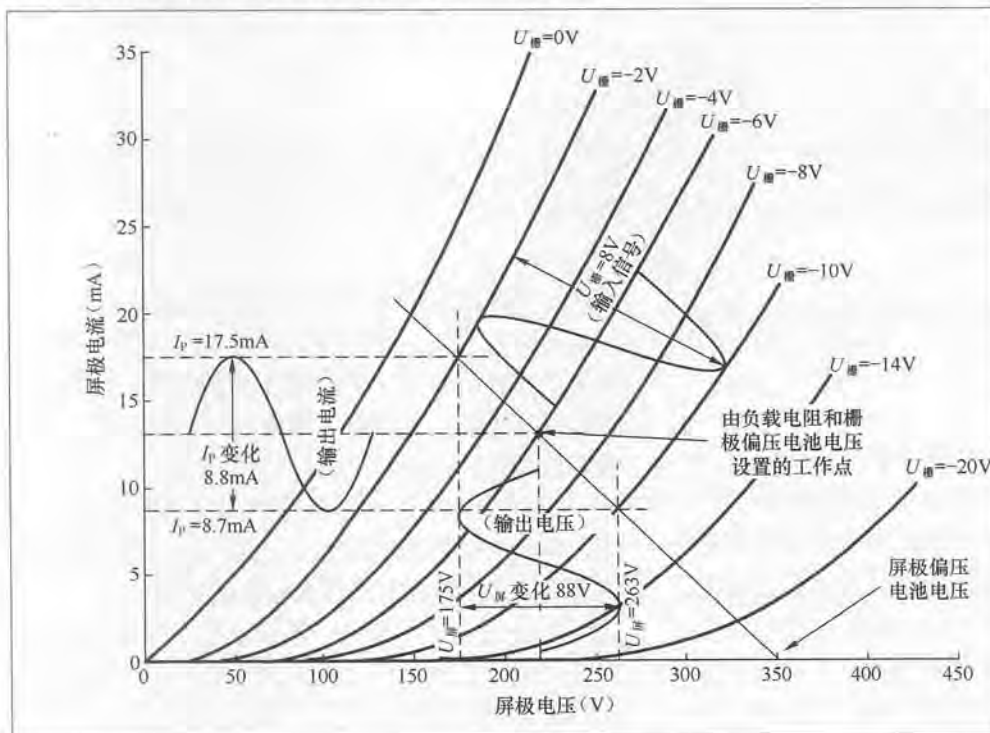
从电池电压中减去这个压降，就可以求出输出信号的电压（在这个例子中， $350 V - 87 V = 263 V$ ）。

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。

$$U = 17.5 \times 10^{-3} A \times 10 \times 10^3 \Omega = 175 V$$

用 350 V 的电池电压减去这个值，我们将得到 175 V 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。

图 30-15 这是一张由输入信号引起的栅极电压变化图，同时也显示了屏极电流和输出电压的变化。此图解释了电子三极管是如何放大输入信号的。



四、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 30-16 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，电子管测试者又给三极管增加了一个新的栅极。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（Tetrad，Tetra 在希腊语中表示 4）。

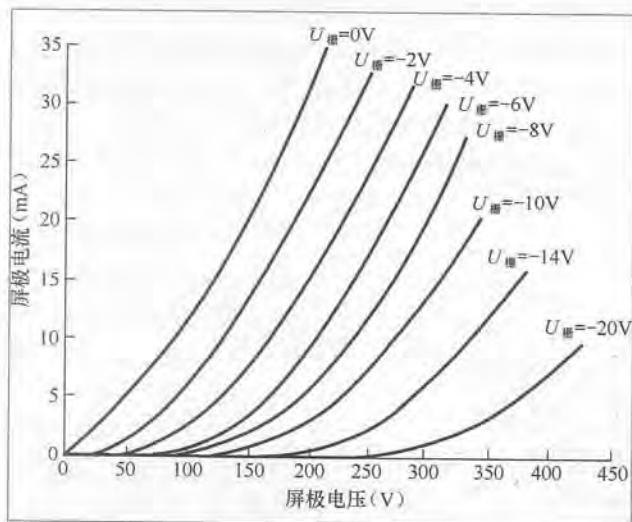


图 30-16 此图为电子三极管的屏极电流和屏极电压的特性曲线。注意，在每一个特定的栅极电压下，屏极电流是如何随屏极电压变化的。

如图 30-17 所示，在四极管中的帘栅极施加正向电压，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。

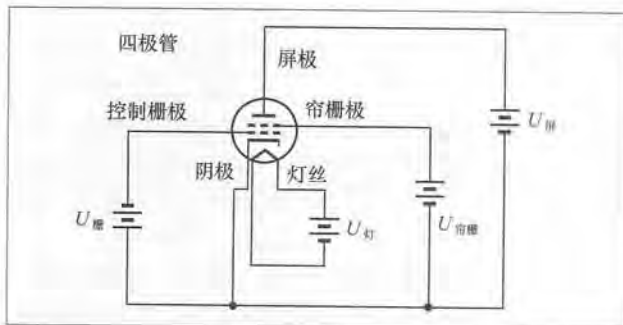


图 30-17 四极管除了具有电子三极管的所有元件外，还增加了一个栅极，称为帘栅极。帘栅极使屏极电流几乎不会随着屏极电压的变化而变化。

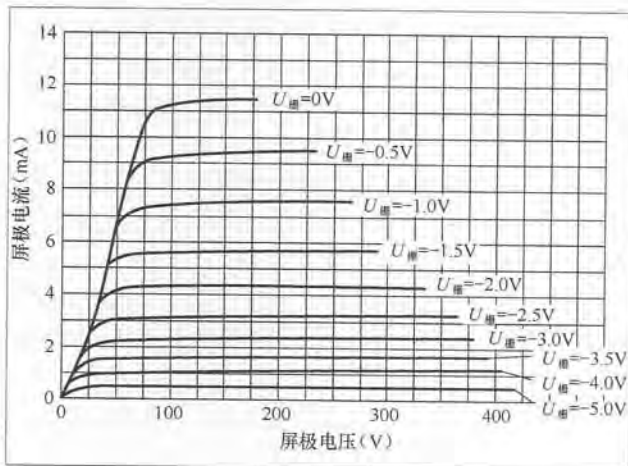


图 30-18 在现代电子学中，我们很少使用四极电子管。此图为一个理想四极管的一组特性曲线，可以看到，控制栅极电压给定时，屏极电流几乎与屏极电压的变化无关。

当然，帘栅极电流还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 30-18 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，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。

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。当次级电子向帘栅极运动时，抑制栅极排斥这些次级电子，并把它们推回屏极。

图 30-19 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。

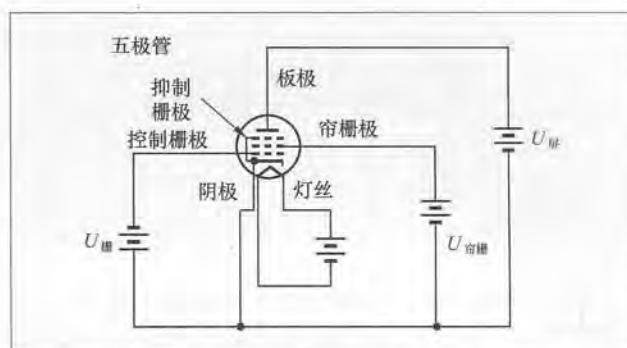


图 30-19 此图为电子五极管示意图符号。通过电池连接的导线可以判断出典型放大电路中使用的偏压极性。

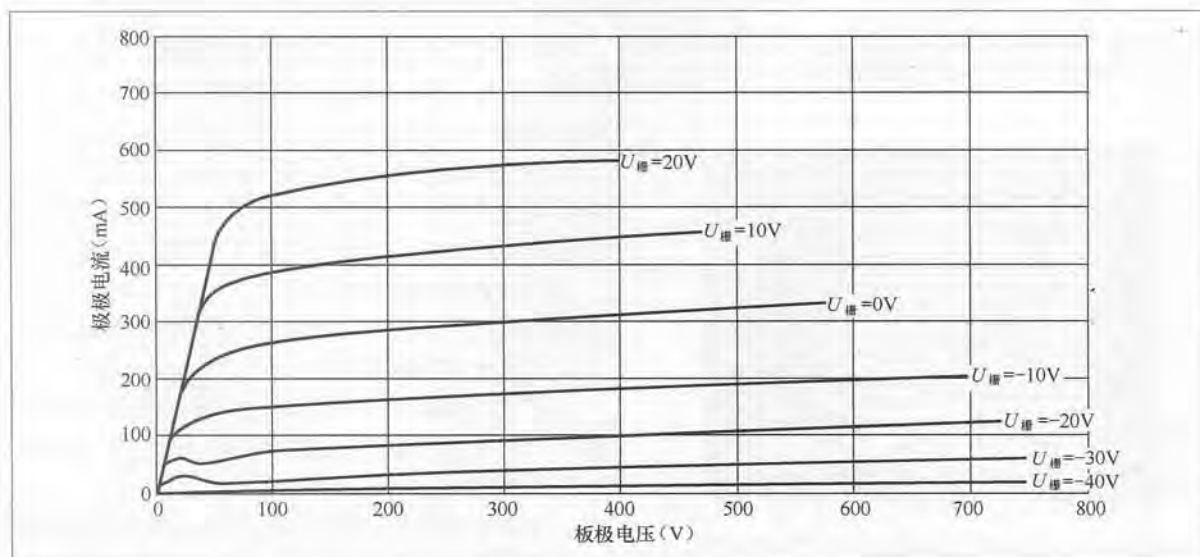
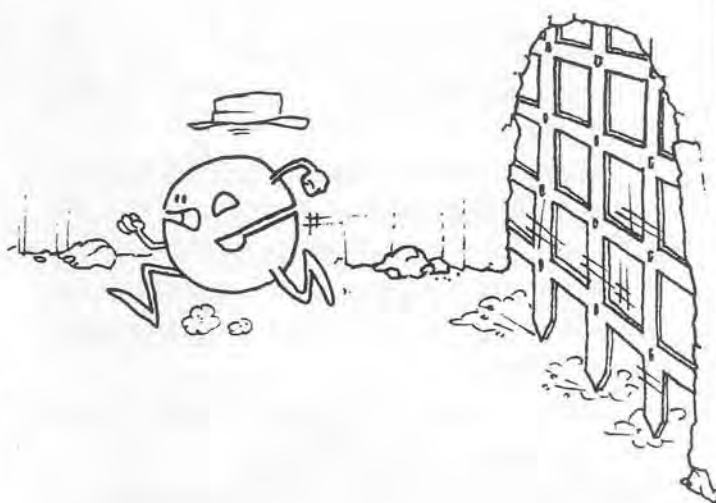


图 30-20 此图为电子五极管的一组典型特性曲线。

五、阴极射线管显示器

电子管在电子电路中有很多应用，然而，它们的很多应用已经被诸如双极性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。

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 30-21 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 30-22 为频谱分析仪显示的无线电发射机器输出的测试结果。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输出信号的频率。每根最高的线表示这个信号的强度。

电视机和计算机显示器也用到了 CRT。这些电

图 30-21 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。

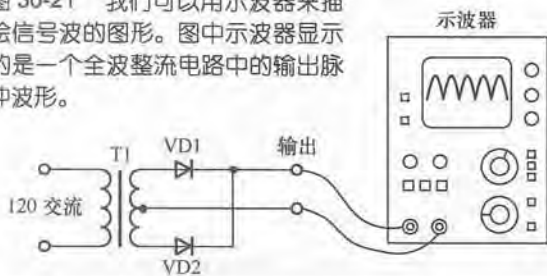
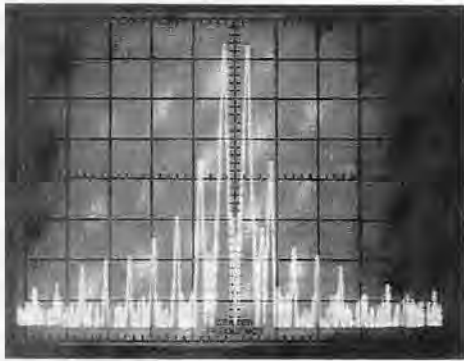


图 30-22 在频谱分析器的显示器上，用条状图显示了信号频率和强度。当一个波形有多个正弦波信号组成时，可以使用频谱分析器来进行分析和研究。图中显示的是从发射机输出的双音频测试时的频谱形状。我们把两个声音频率正弦波信号输入到话筒中，然后对输出信号频率和强度进行测量。



子管既可以显示介于黑色和白色之间的灰度，也可以显示彩色。

图 30-23 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幕的亮度。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 30-24 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 30-25 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。

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。

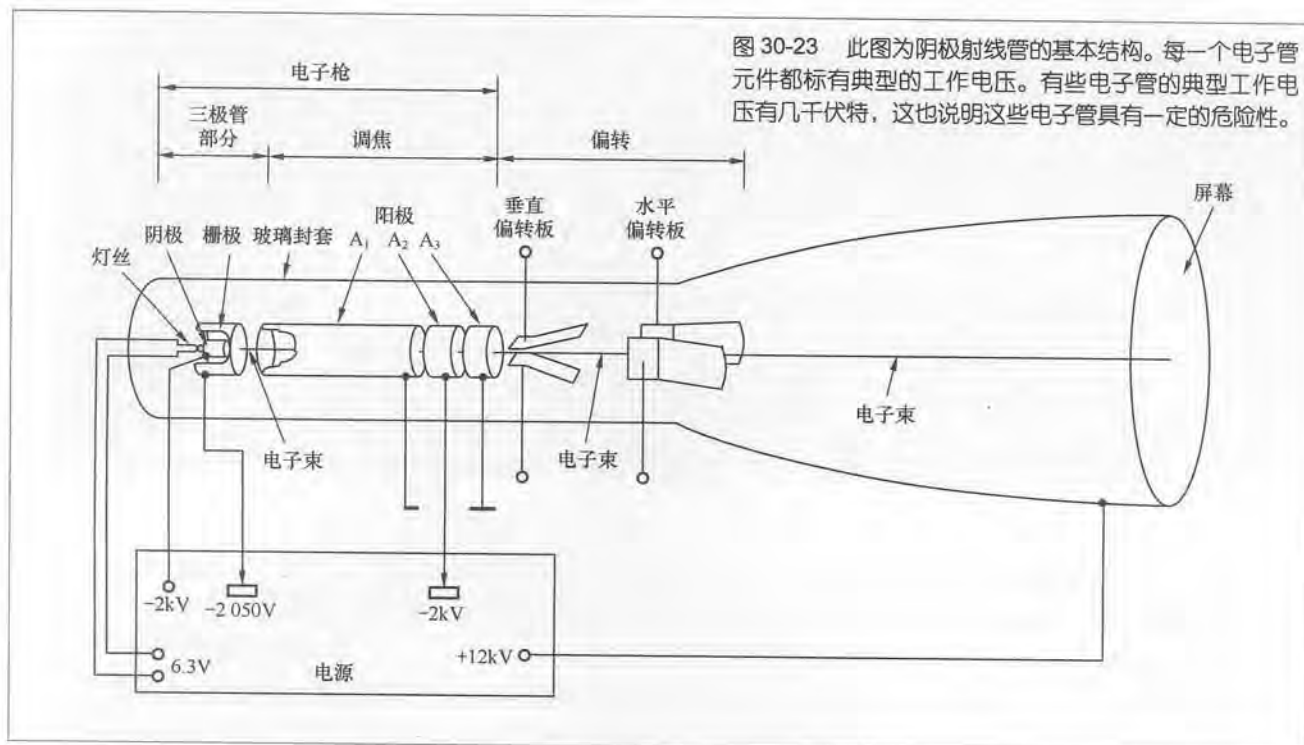


图 30-24 当偏转板上有电压时，经过偏转板的电子束会发生弯曲。电压越大，弯曲程度越大。

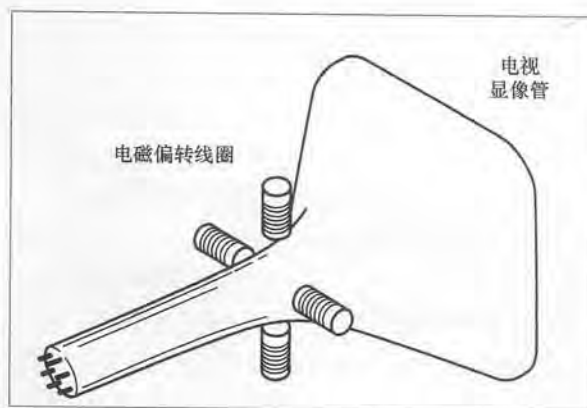
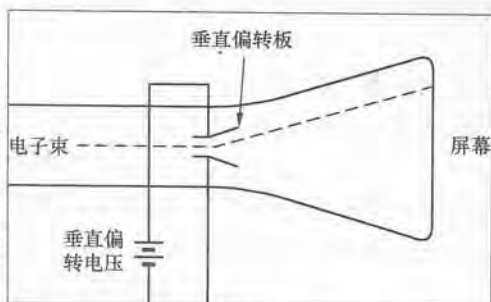


图 30-25 电视机显像管使用电磁偏转线圈控制着电子束移动到显像管前端。这些线圈产生一个水平磁场和一个垂直磁场。在磁场的控制下，电子束在显像管上发生左右偏移和上下偏移。电子束每秒钟扫描整个电子管表面 30 次。

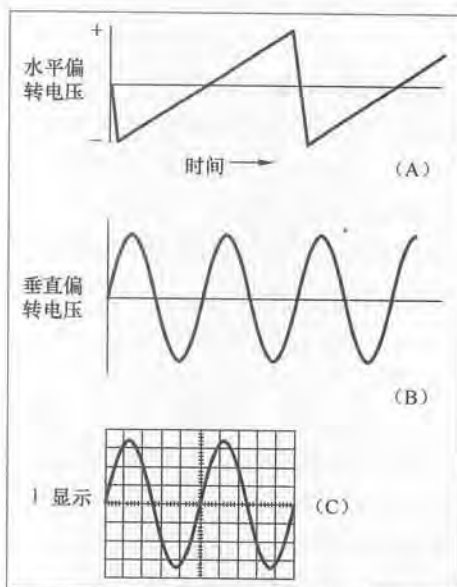


图 30-26 图 (A) 为水平偏转电压的锯齿波形。图 (B) 为正弦波垂直输入电压。合并后的偏转电压在示波器上产生了如图 (C) 所示的波形。

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 30-26。

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。

电子学与业余无线电术语表

A1A 发射——FCC(联邦通信委员会)发射标识,用于描述通过开关键控无线电射频信号而产生的莫尔斯码电报。

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° 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(α)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 α 值在 $0.92 \sim 0.98$ 。

阿尔法(α)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1kHz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秒钟内有 6.24×10^{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(510~1600kHz)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)。

振幅压扩单边带——在发射机上使用对数放大器来压缩语音信号，并在接收机上使用反反对数放大器来解压语音信号的单边带系统。

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 20 ~ 20 000 Hz。

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。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) 时两个方向之间的半角宽度，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。

β ——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 β 值也可

能差异甚大。

β 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，用于确保回扫的过程不被看见。

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的接收电路中。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受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。

基于计算机的消息系统——使用计算机来存储消息以备以后读取的系统。通常也称为 RTTY 邮箱。

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

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——一个具有很高的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kol—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。

同轴电容器厂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受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。

基于计算机的消息系统——使用计算机来存储消息以备以后读取的系统。通常也称为RTTY邮箱。

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，也称为隔直电容器。

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“答”。

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。一分贝的 1/10 等于两个功率比值的对数。 $dB=10\log(P_2/P_1)$ 。

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成为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。

发射标识——由两个字母和一个数字组成的标志，用来表示一个无线电信号。例如，A3E 表示全载波双边带调幅电话。

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。

F1B 发射——用来表示频移键控数字通信的 FCC 发射标识符。

F2B 发射——用来表示音频频移键控 (AFSK) 数字通信的 FCC 发射标识符。

F3E 发射——用来表示调频语音通信的 FCC 发射标识符。

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。它与电子管电压表等效。

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值电感。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。

飞点扫描器——使用移动光点来进行页面扫描的设备。光电管感知到反射光的光强后会产生一个包含页面信息的信号。

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 秒钟内完成周期性变

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。

后记

访问美国业余无线电协会 (ARRL)

2007年5月,笔者随人民邮电出版社社长季仲华先生、副社长蒋伟先生等一行4人参观访问了美国业余无线电协会(ARRL)总部。ARRL主席David Sumner先生(K1ZZ)和首席执行官Harold Kramer先生(WJ1B)详细介绍了ARRL的工作情况以及美国业余无线电活动,双方进行了广泛的业务探讨和技术交流。

David Sumner主席向我们介绍说,美国是开展业余无线电活动非常活跃的国家之一。早在100年前就已有很多人参与业余无线电通信活动,1914年5月,由发明家、实业家、同时也是无线电爱好者的马克希姆先生在美国的康涅狄格州发起组织一个业余团体,将全美国的业余电台组织起来,就是现在全球闻名、与业余无线电共同进步的ARRL,这是一个由业余无线电爱好者管理,并为业余无线电爱好者服务的非赢利组织。在第二次世界大战期间,美国的业余无线电活动受到一定影响,但ARRL并未停止工作,仍继续组织、普及无线电通信技术知识,为战后的经济建设培养了大量的技术人才。

首席执行官Harold Kramer先生热情地带着我们逐个房间地参观了ARRL总部,详细地介绍了各个部门的工作分工,主要包括图书期刊出版部门、培训考试部门、竞赛活动部门和市场策划部门等,另外还有QSL卡片管理部门和邮购部门等。ARRL现有会员15万人,每月出版发行面向无线电爱好者的《QST》杂志,另外出版《QEX》季刊和《NCJ》杂志。除了杂志外,ARRL每年都出版《业余无线电手册》(THE ARRL HANDBOOK),这本书已成为全球业余无线电爱好者公认的宝典之一。另外,还出版《天线手册》(ANTENNA BOOK)以及和无线电DIY制作相关的一系列出版物。人民邮电出版社在这次访问中达成了ARRL业余无线电丛书中文版的版权合作协议。

ARRL总部的走廊里摆放着世界各地业余无线电协会组织赠送的礼品,ARRL的实验室里摆放了大量的测试仪器、制作工具以及各类无线电元器件,《QST》杂志中的很多技术文章和实验制作都是在那里完成的,另外,还有一间屏蔽室,用来测量业余通信电台产品的各项性能指标。我们还饶有兴趣地参观了为ARRL创始人马克希姆(H. P. Maxim)先生设立的纪念电台W1AW,这里保留了大量的古董通信器材,另外还有大量最新型号的通信机,可以称得上是一个小型的业余无线电通信博物馆。据介绍,每一个有业余电台执照的无线电爱好者都可以来W1AW上机操作,同世界各地的业余电台通信联络。

通过此次参观访问,双方增进了友谊,加深了了解,为今后的交流合作奠定了基础,而ARRL业余无线电丛书中文版的出版,也就此拉开序幕。衷心希望这套丛书能为中国无线电爱好者了解、学习业余无线电知识提供有益的帮助,也为他们打开一扇了解国外业余无线电技术发展的窗户,为中外业余无线电爱好者架起一座沟通交流的桥梁。