

# 电路、器件和系统

上册

(美) 拉·杰·史密斯 著

大连工学院电工学教研室 译

人民教育出版社

## 译 序

我们伟大的社会主义祖国,在以华主席为首的党中央抓纲治国战略决策的指引下,正以豪迈的气势和跃进的步伐,向着农业、工业、国防和科学技术现代化的宏伟目标进军。在实现四个现代化的过程中,科学技术现代化是关键。毛主席教导我们:“自然科学方面,我们比较落后,特别要努力向外国学习。但是也要有批判地学,不可盲目地学”。(引自毛泽东选集第五卷第286页)。我们翻译的这本《电路、器件和系统》,可以为高等工业院校电工学课程的改革提供借鉴,也可供科技人员参考。

《电路、器件和系统》是美国斯坦福大学史密斯教授所著的电工初级教程,是一本电工方面的入门教材。全书比较注重基本理论的阐述,反映了一些电工领域中新的科学成就。书中有范围较广泛的实例和比喻,借以启发学生理解比较深奥难懂的理论;还有各种类型的习题,供学生复习基本概念、培养计算技巧以及提高分析问题和解决问题的能力之用。

我们在翻译的过程中,尽量使译文保持原意,只在个别叙述欠妥的地方稍加润色。我们发现书中有些由于作者疏忽或校对不周等所造成的错误,都一一予以改正。原书每章的各节都没有序号,译本中增添编排了节次序号,使之更为醒目,以便阅读。原书的目录比较简略,译本则按实际情况作了补充。原书中的下标,凡是用英文全文的,译本中均译成中文。原书为一册,译本分为上、中、下三册。

本书由蒋德川主译,一起翻译的还有郭建新(一、二、三章)、马鏊(四、五、六章)、徐清华(序言、七、八、九章、索引)、张新昌(十、十一、十二、十三、十九章)、周武禄(二十、二十一、二十二章)、陈远超(十八、二十三、二十四章)、唐介(二十五、二十六、二十七章)和刘国忱(附录)。

由于我们的水平有限,时间仓促,译本中一定会有许多错误和不当之处,殷切希望读者予以批评指正。

译者

一九七八年一月

# 原 序

本书第三版采纳了使用过前一版的教师和学生所提出的许多有益建议，并且反映了迅速发展的电工领域内所出现的变化。修订的意图在于：使材料的编排更为醒目，应用的重点更为新颖，并对例题和习题重新加以修改和安排。

基本目的和处理方法仍然保持原状。主要的变化是在内容与安排方面：增强了金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)、集成电路(IC)、可控硅(SCR)和运算放大器(OP AMP)的内容；提前并更突出了数字装置和逻辑电路的论述；重新编排了课题，以便能够做到由简到繁、循序前进。为了使前后份量更为均衡，并给新的材料留出篇幅，对前版作了少量删减。

## 目 的

编写本书的目的在于：理解电工学的基本原理，熟悉电气工程师的观点和术语，以及介绍在工程的所有分支上解决困难问题的若干现代技术。企图在逐渐掌握重要原理和有效方法的过程中，采用现代的教学方法和引人入胜的应用。达到的目标是要具备判断普通电路和器件的作用的能力，以及确定关键参数来设计简单系统的能力。

作者认为使用这本书的学生已经学完基本物理课程中的力学、电学和磁学部分；虽然如此，当本书介绍基本物理概念时，学生仍有机会去复习它们。还认为，学生已经具有微分和积分的运算能力。不需要更深的微分方程知识；这里采用的分析方法提供了一个结合工程应用情况列出和求解一、二阶线性微分方程的良好阶梯。

在这本电工初级教程中，目的是有限的。在诸如电路、电子学、数字系统、机电或控制系统方面，本教程所选定的题目和途径，为更进一步的工作提供了基础。对于将在今后详细钻研上述全部内容的电气工程师，书本的初步目的是清晰地描述这些题目范围的相互关系。至于其他系的学生，本书可帮助他们很好掌握这些方面的基本原理，这有助于他们今后选修有关课程并为此准备一个坚实的基础。

## 内 容

重点始终是在原理方面，而不是在实际方面。可是所选择的题目，在现代电气工程中都具有“实际的”重要性。同时，编写了一些例证以引起学生们的广泛兴趣。本书包括的题目虽然广泛，但不只是为了浏览一下。通过把讨论限制在每个主要课题的更为基本的一些方面，就有时间去十分严密地处理这些方面，因而获得富有意义的、定量的有用结果。

第一篇“电路”，目的在于对网络分析和应用给以一个扎实的入门知识，为提高教学效果而在内容上作了重新调整。网络理论在第二章内介绍，以便早些用于电阻电路；并作为与一般电路有关的内容在第八章内作了重述。在第七章内加进了用二瓦特表法测量功率的内容；作为耦合

器件的理想变压器则编入第八章。新加的第九章介绍了系统概念,例如反馈和传递函数,并为第一篇作了一个适当的结束。

第二篇“电子器件”,内容作了更新以反映新技术的发展;还进行了改写以便适当地侧重于数字装置和运算放大器部分;并且重新作了编排,以便稳步地从简单的概念进展到完整的系统。第十章介绍电、磁场内的电子运动;讨论了阴极射线管的作用,作为实验室工作的基础;并简短地叙述了真空管。第十一章和十二章是讲半导体的性能、 $pn$ 二极管的作用、大讯号的模拟以及二极管在整流和波形成形上的应用。第十三章定量地说明场效应管和双极结型晶体管、集成电路以及可控整流器的作用。然后,在适宜于采取简单模型的数字装置和逻辑电路的分析中(第十四章和十五章),采用了上述的器件和电路。用了四章来讨论放大器,开始是大信号放大器,这里采用了令人满意的图解分析法,接着是小信号和反馈放大器,这里需要运用更为复杂的模型;最后,详尽地介绍了多用运算放大器的作用和应用。

第三篇“机电器件”,在我们的能量资源情况下,能源和转换问题已具有重大的意义,在第二十章写了这两方面的材料。在磁路、变压器和电机各章(从第二十一章到二十三章)所介绍的内容,与前版相比有所改进,消除了混乱,变动了侧重点,借以增进启发和诱导。第二十四章和第二十五章的直流电机和交流电机,取代了前版中关于旋转电机的冗长的一章;在关于交流电机调频驱动的整流器讨论中,反映了现代的实践成果。控制系统(第二十六章)的重点是在稳态特性方面,但也讨论了动态特性。

## 方 法

下面的概念顺序表表明,在处理各不相同的课题方面是怎样达到了统一的。为了满足工科学生的需要和兴趣,每个新器件的叙述都有一个定量的物理解释。例如,在二极管和晶体管的论述中,用半导体导电和位垒效应来解释;在旋转电机特性的公式推导中,运用了基本的机电原理。

为了使范围广泛的题目之间相互连贯,我们反复地运用了几个基本手段。例如,对于晶体管、变压器、变换器和旋转电机,使用了相同的模拟方法。着重运用某些简化的假定,把一个本身为非线性的复杂系统简化为线性的、比较简单的形式。其他常用的方法有:极点-零点概念、阻抗函数、传递函数、负载线方法以及方框图等。

## 体 系

同前几版一样,我想方设法去帮助学生学好和教师教好。每一章后面的作业,照旧归纳为三类:复习题主要为了让学生自己去检查他对本章概念和术语的理解程度;练习题有难有易,但是一般地说,它们是新的原理在具体情况下的直接应用;问题则更为繁难一些,可能需要延伸一个概念,或者作出简化的假定,或在某一构思中把一些想法集中起来。练习题的答案以及问题的题解,都包括在讲师手册之中,这个手册可以从出版商以及在课堂上采用本书的教师那里弄到。

在斯坦福大学这里,关于电路、电子器件和机电的课程,目前我们是在定为三个学期的一学

年中完成的,本教程反映了这个教学体制情况。电子器件部分不是学习机电部分的先决条件。在讲师手册中,包括了这里遵循的进度表、对于不同学时和重点的其他的可能的安排以及从教员观点出发的每章内容提要。由于实验室工作对于教程正文的讨论是一个很有价值的补充,因此,手册中介绍了一个合适的实验室教程,并包含有实验指导实例。我欢迎关于教程及手册的任何方面内容的来信。

## 致 谢

愉快地感谢在修订中很多人的协助。斯坦福大学同事罗伯特·海力威和哈里·加兰在提高教程的质量方面给了我宝贵的建议,通用电气公司的约翰·阿·埃略生在驱动调速方面提供了意见。另外,还有联邦海军学院的查尔斯·埃·福勒第三,德莱克赛大学的马丁·恩·卡普兰和爱达荷大学的威廉·帕列希等评阅了修订稿。虽然他们的建议并没有全部采纳,但本书的大量改进是他们评论的结果。在其他许多协助我修订的人们中间,我要感谢林丹,吉姆·邓海姆,安纳潘·坎纳,王凯,唐·保罗和安迪·内里等人在练习题和问题方面给予我的宝贵帮助。

非常感谢约翰·林佛的热情鼓励。对于巴贝拉·纽曼的概要性的指点和某些复杂内容的赐教才能,我向她表示感谢。我要特别感谢我的夫人路易丝,由于她熟练地进行核对并做了细心的校阅,从而使我的工作有所减轻。

加里福尼亚州斯坦福大学 拉尔夫·杰·史密斯

# 上册目录

译序.....	1
原序.....	1

## 第一篇 电 路

第一章 电量.....	1
1-1 引言.....	1
1-2 定义和定律.....	3
1-3 电路元件.....	11
第二章 电路原理.....	21
2-1 电路定律.....	21
2-2 网络理论.....	30
2-3 非线性网络.....	37
第三章 信号波形.....	47
3-1 指数函数.....	48
3-2 正弦函数.....	50
3-3 相量.....	54
3-4 周期性波形.....	58
第四章 自然响应.....	68
4-1 一阶系统的方程式.....	68
4-2 二阶系统的自然响应.....	72
4-3 阻抗的概念.....	77
4-4 极点和零点.....	80
第五章 强制响应.....	93
5-1 强制函数的响应.....	93
5-2 相量法.....	97
5-3 交流电路分析.....	101
5-4 模拟与对偶.....	105
第六章 全响应.....	117
6-1 一般程序.....	118
6-2 一阶电路.....	119
6-3 二阶电路.....	123
6-4 脉冲和冲激的响应.....	126
第七章 稳态交流电路.....	135
7-1 功率计算.....	135
7-2 频率响应.....	141
7-3 谐振.....	144
7-4 三相电路.....	153

第八章 一般网络分析.....	167
8-1 单口网络.....	167
8-2 双口网络.....	172
第九章 系统概论.....	184
9-1 系统工程.....	184
9-2 方框图.....	186
9-3 反馈电路.....	188
9-4 传递函数.....	190

# 中 册 目 录

## 第二篇 电子器件

第十章 电子管	201
10-1 电子运动	201
10-2 阴极射线管	206
10-3 真空二极管	210
10-4 双口电子器件	215
第十一章 半导体二极管	227
11-1 固体的导电现象	227
11-2 掺杂半导体	231
11-3 结型二极管	234
11-4 特殊用途二极管	239
第十二章 二极管的应用	245
12-1 二极管模型	245
12-2 整流器	248
12-3 滤波器	250
12-4 成形电路	256
第十三章 晶体管 and 集成电路	265
13-1 场效应晶体管	265
13-2 结型晶体管	269
13-3 集成电路	276
13-4 闸流晶体管	280
第十四章 数字装置	288
14-1 开关逻辑	288
14-2 电子开关	292
14-3 存储器	298
第十五章 逻辑电路	307
15-1 二进制数系	307
15-2 布尔代数	309
15-3 逻辑电路的分析	311
15-4 逻辑电路的综合	312
15-5 求最简化电路的图解法	316
15-6 计算机的结构	319
第十六章 放大器的偏置和大信号运行	326
16-1 实际的放大器	326
16-2 偏置电路	329
16-3 功率放大器	336
16-4 其它类型的放大器	342
第十七章 小信号模型	349
17-1 大信号和小信号	349
17-2 二极管	352
17-3 场效应晶体管	353
17-4 结型晶体管	357
第十八章 小信号放大器	369
18-1 $RC$ 耦合放大器	369
18-2 频率响应	372
18-3 多级放大器	381
18-4 反馈放大器	383
第十九章 运算放大器	399
19-1 理想的运算放大器	399
19-2 典型应用	403
19-3 实际的运算放大器	410
19-4 模拟计算机	415



# 下册目录

## 第三篇 机-电 器 件

第二十章 能量转换现象	423
20-1 能源	423
20-2 电能的生产	425
第二十一章 磁场和磁路	433
21-1 磁场	433
21-2 磁路	438
第二十二章 变压器	440
22-1 交流励磁的磁路	449
22-2 变压器的运行	454
22-3 线性电路模型	457
22-4 变压器的性能	464
第二十三章 电机学原理	471
23-1 平移换能器	471
23-2 旋转换能器	476
23-3 动铁换能器	484
第二十四章 直流电机	497
24-1 直流发电机	497
24-2 直流电动机	503
第二十五章 交流电机	516
25-1 交流发电机	516
25-2 同步电动机	520
25-3 感应电动机的运行	525
25-4 感应电动机的性能	529
第二十六章 自动控制系统	540
26-1 控制系统的特性	541
26-2 机电器件的动态响应	543
26-3 反馈控制系统	549
第二十七章 仪表和测量系统	559
27-1 电指示仪表	559
27-2 电子指示仪表	564
27-3 仪用变换器	568
27-4 仪表测量系统	574
附录	580
习题选答	590
索引	596

# 第一篇 电 路

## 第一章 电 量

---

### 引言 定义和定律 电路元件

---

#### 1-1 引 言

能量和信息是文明的标志，而电气工程师通过改进能量的转换和信息的处理来影响社会的变革。在遥远的水电站中，把水的位能变换成电能的形式，再以高压输送到城市的负载中心，使用在照明、电动机和工业生产过程中，能量是极其重要的量。在侦察卫星中，把传感器的输出变换成数字的形式，进行了初步的数据处理，然后再把结果送回地面，在这里能量仅供处理信息之用。

一般来说，电气工程师负有使电能或信息的发生、储存、传输、控制以及转换过程最佳化的责任。但是，所有的工程师都要使用电气装置和系统，要富有成效地应用电气元件和概念，这就有待于对电工学的基本原理的掌握。而且原来单纯地为了解决电气问题而发展起来的器件模型和系统分析的方法，现在已经应用到工程的所有分支上去了。

回顾过去两个世纪以来，某些偶然的和某些精心的实验结果，经过组编、解释而形成几个对我们比较有用的基本原理。为了应用这些原理去分析现有的器件和系统、进行新的创造以及改进设计，巧妙的方法已经发展起来。这些基本原理和常用方法的结合构成了本书的主题。

#### 力和场

电荷决定于相互间的作用力，实验表明，作用力取决于电荷的大小、它们的相对位置以及它们的速度。取决于电荷位置的力叫做电场力，而取决于电荷速度的力叫做磁场力。所有与电气工程有关的电和磁的现象，都可以利用电荷之间的力来解释。

在电视显象管中，电极的设计是为了产生加速度和偏转电场以控制电子的路径而形成图象。在计算机的存储器中，很小的磁“环”为脉冲电流所磁化，于是以磁场的形式“记忆”下数字的信息。在电动机中，铁的电枢和铜线绕组的组合，形成了强磁场，当导体通过磁场时产生转矩。场的特点是在一个区域内到处分布的，所以必须用二维或三维来确定。

#### 电路

与场大不相同，电路的特点完全可以用单一的维度，也就是沿着构成电路的途径的位置来描述。在电路中，有关的变量是沿着电路上不同点的电压和电流。如果电路的电压和电流是恒定的（不随时间而变化），电流就受电阻的限制。在用发电机对电池组充电的情况下，100 呎的铜线

将具有确定的电阻去限制电流流动。也可用 1 呎电阻线、1 吋电阻碳棒或者 1 密耳<sup>①</sup> 的半导体来得到同样的效果。

当元件的尺寸无关紧要而且总的效果可以认为是集中在一点时,或者叫做“集总”,则元件可由集总参数来表示。对比之下,作为天线用的 100 呎铜线的性能则跟它的尺寸以及电压与电流沿着铜线的分布情况有关,因此天线必须用分布参数来表示。在本书中,我们仅仅讨论集总参数的电路。

### 器件

电路对于在器件内部以及组成系统的器件向内和向外传导能量来说是重要的。电器件则要完成象信号的发生、放大、调制和检波的作用。举例来说,在广播电台里,调制器依照音符改变发射波的振幅而产生调幅。传感器是将能量或信息从一种形式变换为另外一种形式的器件,话筒就是将输入的声波的声能变换为输出电流的电能的传感器。

### 系统

系统是将电路和器件结合起来赖以达到预期结果的整体。通信系统包括:作为传感器的话筒、保证辐射效率而产生高频载波的振荡器、将声音信号重迭在载波上的调制器、将电磁波辐射到空间去的天线、接收用的天线、从载波中分离出所需信号的检波器、各种放大器和电源以及把电流变换为同原来的声音信号一模一样的扬声器。宇宙航行器的导航系统包括:把所需要的航向变换为电信号的传感器、将实际航向与所需航向进行比较的误差检测器、将其差额放大的放大器、推动微调控制喷嘴的激励器、确定实际航向的传感器以及容许进行必需的比较的反馈环节。

### 模型

电路的重要性还有另外的理由:用电路模型来代表一个器件或一个完整的系统往往是有利的。假设把前面提到的 100 呎铜线绕成一个多匝的线圈并且加上频率可变的电压。如果把所加电压  $V$  和由其引起的电流  $I$  之比作为频率的函数进行测量的话,观察结果将如图 1.1 所示。在范围  $A$  内,线圈可用一个单一的集总参数(电阻  $R$ )来表示,换句话说,从图 1.1a 的电路所得到的结果与实际的导线线圈所产生的结果几乎是一样的。同理,范围  $B$  内线圈的性能可用图 1.1b 电

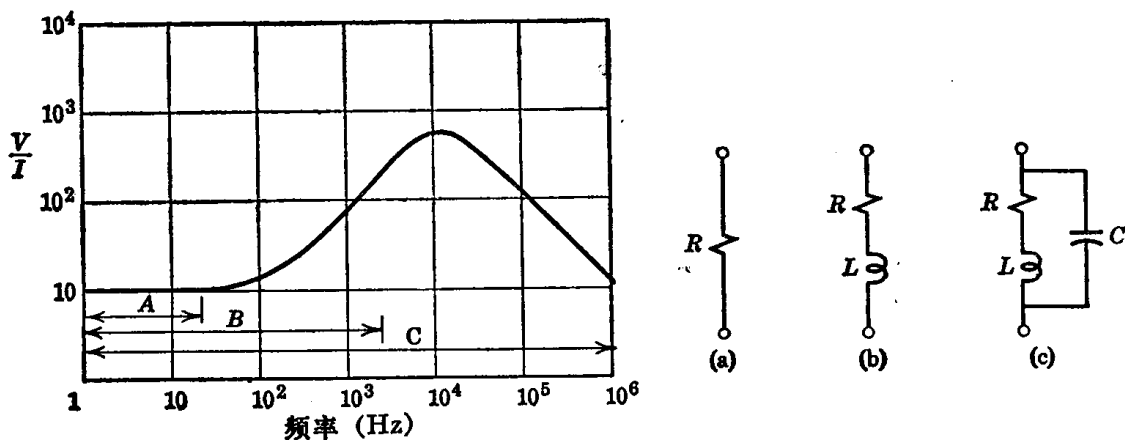


图 1.1 线圈特性和电路模型

① 1 密耳(mil)等于 0.001 吋——译者注。

踏来表示,这个电路包含着另一集总参数(电感 $L$ )。在整个宽广的频率范围内,还需要追加一个参数(电容 $C$ ),并用图 1.1c 的电路模型来表示。

把一个复杂的物理器件,用比较简单的模型近似地表示出来的方法,是电工学的重要部分。在本书中,我们用模型来表示诸如二极管和晶体管之类的器件(图 1.2)。这样一种模型的优点

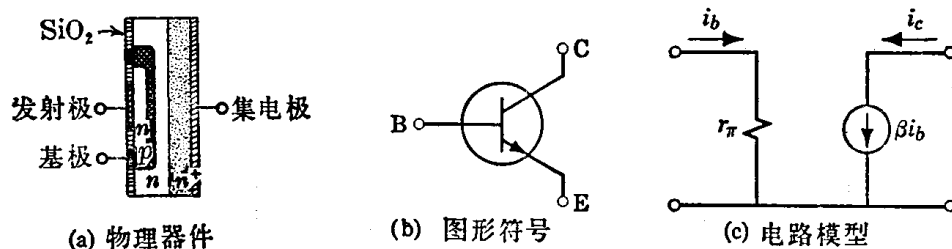


图 1.2 晶体管表示法

之一是它适于数学分析。用电路模型来代表晶体管,就可以使用众所周知的电路定律来估算实际晶体的性能。

### 内容简介

本书共有三篇。第一篇是电路,专门论述计算各种各样电路的性能所需要的一套基本原理和有效方法。应该强调的是这些原理和方法在处理力学的、热学的或水力学的元件所组成的“回路”时是同样有价值的。第一篇的最后一章则对系统工程作了介绍。

在第二篇的电子器件里,我们阐明电子管和半导体中电子运动的物理原理,并且注意这些原理如何应用于包括集成电路在内的电子器件中。然后我们探讨通常的器件在波形成形、数字电路以及各种各样放大器中的应用。

最后一篇是电机,先从能源和能量转换入手,然后我们研究机电能量转换的基本原理并注意它们在实际器件中,特别是在旋转电机中的应用。

虽然本书主要涉及的是电气现象,但是所讨论的许多原理和方法都是重要的,而且在整个工程学中都有所应用。

## 1-2 定义和定律

在开始学习电路之前,我们必须先给主要的电路物理量下定义,并且采用一套标准的单位、符号和缩写字母。这里的材料多数属于普通物理学的复习,但值得仔细地注意,因为它所构成的“语言”表达了思想,形成了概念并作出了结论。

其次,我们对在以前实验的基础上导出的电阻、电感和电容的三个定律要进行新的观察。用这些实验的结果和模型化的方法,我们创造了具有高度抽象性的理想化的电路元件,然后了解它们在电路中的作用以及它们怎样转换能量。

### 国际单位制

在工程上,我们一定要能够定量地描述各种物理现象,而使每个人都按同一意义来理解它们。我们需要一个自相一致的标准单位系列,并在世界各地都可复制。在电工学里,我们使用

SI<sup>①</sup>制，它以米为长度的单位，公斤为质量的单位，秒为时间的单位。另一基本量是温度，它在SI制中的单位是开尔文度。在确定电量的时候，还需要有附加的单位，用安培作为电流单位就可满足这种要求。坎德拉是确定照明量所需要的。凡在本书见到的量，都可以通过表1-1中所

表1-1 基本量

量	符号	单位	单位符号
长度	<i>l</i>	米	m
质量	<i>m</i>	公斤	kg
时间	<i>t</i>	秒	s
温度	<i>T</i>	开尔文	K
电流	<i>i</i>	安培	A
光强度	<i>I</i>	坎德拉	cd

列的六个单位来确定。当数据使用其它的单位时，先将它们变换成SI制单位，然后再代入能应用的公式中去。有三种变换是经常需要的：1米=39.37吋，1公斤=2.205磅(质量)，1牛顿=0.2248磅(力)。其它有用的换算因子在附录中给出。

### 定义

为了在电路中进行定量计算，我们把需要下定义的量列在表1-2内。在以前的学习中，对这些或许都已熟悉，然而在这里进行简短的复习可能是会有帮助的。

**力** 1牛顿的力是引起1公斤的质量以每秒每秒1米的变化率改变其速度时所需要的力。在本书中，我们主要涉及的是电场力和磁场力。

表1-2 重要的导出量

量	符号	定义	单位	单位符号	(备考)
力	<i>f</i>	推或拉	牛顿	N	(kg-m/s <sup>2</sup> )
能	<i>w</i>	作功能力	焦耳	J	(N-m)
功率	<i>p</i>	单位时间的能量	瓦特	W	(J/s)
电荷	<i>q</i>	电流的积分	库伦	C	(A-s)
电流	<i>i</i>	电荷流动的速率	安培	A	(C/s)
电压	<i>v</i>	单位电荷的能量	伏特	V	(W/A)
电场强度	$\mathcal{E}$	单位电荷的力	伏/米	V/m	(N/C)
磁通密度	<i>B</i>	单位电荷动量的力	特斯拉	T	(Wb/m <sup>2</sup> )
磁通	$\phi$	磁通密度的积分	韦伯	Wb	(T-m <sup>2</sup> )

**能量** 将需要1牛顿的力来维持其对重力的反抗的物体(即1牛顿“重”的物体)升高1米时，获得1焦尔的位能。1公斤的质量以每秒1米的速度运动时具有1/2焦尔的动能。

**功率** 功率是衡量能量转换率的。1秒钟内转换1焦尔的能量表示平均功率为1瓦特。通常，瞬时功率定义为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-1)$$

① SI是System International(国际制)的缩写——译者注。

**电荷** 电流对时间的积分是电荷,是解释物理现象的一个有用的概念。所谓电荷“不灭”,就是说它既不能创造,也不能消灭。它之所以被称为“量子化”,因为1个电子的电荷( $1.602 \times 10^{-19}$ 库)是能够存在的最小电荷量。而库伦可以定义为  $6.24 \times 10^{18}$  个电子的电荷,或者在每米1伏特的电场中承受1牛顿的力的电荷,或者在1秒钟内以1安培的电流所传送的电荷。

**电流** 电场的作用是由于电荷的存在而引起的,磁场的作用是由于电荷的运动而引起的。通过截面  $A$  的电流定义为在单位时间内通过该截面的电荷。通常,电荷可以是正的也可以是负的,因而通过截面时有两个方向。电流是正电荷流动的净速率,是标量。在正电荷向右运动而负电荷向左运动的特定场合下,两者作用的总效果是正电荷向右运动;流向右边的电流由方程式

$$i = +\frac{dq^+}{dt} + \frac{dq^-}{dt} \quad (1-2)$$

来给定。例如在氖灯里,正离子向右运动而负电子向左运动的结果形成向右流动的电流。1安培的电流就是电荷以每秒钟1库伦的速率进行迁移。

**电压** 电荷移动时能量转换的能力决定于电荷穿过的电位差或电压。1库伦电荷在穿过1伏电压而移动时接收或交出1焦耳的能量,或者一般地写成,

$$v = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

能源的功用,譬如汽车的电池,是将能量加到电流上去;12伏电池对单位电荷所加的能量为6伏电池的两倍。

**电场强度** “场”在电场力和磁场力的计算中是一个有利的概念。在电荷的周围,我们设想一个其影响所及的范围,称为“电场”。电场强度  $\mathcal{E}$  由在电场中单位正电荷上所受作用力  $f$  的大小和方向来定义,它是矢量。用矢量表示的定义方程式是

$$f = q\mathcal{E} \quad (1-4)$$

其中  $\mathcal{E}$  的单位是每库伦牛顿。但是,记得能量和电压的定义时,我们就会注意到

$$\frac{\text{力}}{\text{电荷}} = \frac{\text{力} \times \text{距离}}{\text{电荷} \times \text{距离}} = \frac{\text{能量}}{\text{电荷} \times \text{距离}} = \frac{\text{电压}}{\text{距离}}$$

因而以每库伦牛顿为单位的电场强度恰好跟电位梯度<sup>①</sup>大小相同而方向相反,即

$$\mathcal{E} = -\frac{dv}{dl} \quad \text{V/m} \quad (1-5)$$

**磁通密度** 在运动着的电荷或电流的周围,我们设想一个其影响所及的范围,称为“磁场”。在条形磁铁中,它的电流是由铁原子中的旋转着的电子所形成,这种电流对另一没有磁化过的铁片的旋转电子作用的结果,产生众所周知的吸力。磁效应的强度取决于磁通密度  $B$ ,它是一个矢量,用在磁场中以速度  $u$  运动的电荷  $q$  上所受作用力  $f$  的大小和方向来定义。用矢量表示的定义方程式是

$$f = qu \times B \quad (1-6)$$

① 在无线电发射机周围,辐射电场会有每米毫伏的强度,换句话说,1米天线将能产生毫伏级的信号电压被馈送到接收机去放大。

可见, 1 库伦的电荷以每秒 1 米的速度, 垂直于 1 特斯拉的磁通密度运动时, 所受的力为 1 牛顿。

磁通 在历史上, 磁场先是用磁力线或通量线来描述的。通量线(这样叫是因为它和运动着的流体中的流线相似)是有用的抽象概念, 能够从常见的铁屑散落在磁场中的纸片上的图案里想象出来。单位为韦伯的磁通  $\phi$  是磁通密度在面积  $A$  上的积分所得到的总量。其定义方程式为

$$\phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1-7)$$

因为这种历史背景, 磁通密度经常用每平方米韦伯作为派生单位来表示。当然, 在这本教科书中, 我们考虑把特斯拉作为  $B$  的主要单位。

### 电功率和能量

电路中的一般问题是根据预期的电流和电压来计算功率和能量的转换。因此, 根据定义,  $v = dw/dq$  与  $i = dq/dt$ , 瞬时功率为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = vi \quad (1-8)$$

从而, 总能量为

$$w = \int p dt = \int vi dt \quad (1-9)$$

### 例 题 1

阴极射线管的“电子枪”发射高速电子束。

(a) 假如电子在穿过 20,000 伏的电位差时加速走了 4 cm 的距离(图 1.3), 计算平均电场强度。

(b) 计算供给每秒 5 千万亿电子束的平均功率。

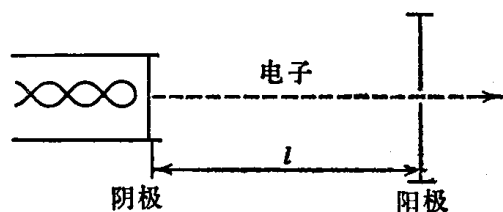


图 1.3 电流和功率

(a) 根据定义  $\mathcal{E} = -dv/dl$  或

$$\mathcal{E}_{av} = \frac{\Delta v}{\Delta l} = \frac{20,000}{0.04} = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$$

(b) 根据定义  $i = dq/dt$  或

$$i = \frac{\text{电荷}}{\text{电子}} \times \frac{\text{电子}}{\text{秒}} = 1.6 \times 10^{-19} \times 50 \times 10^6 \times 10^9 = 0.008 \text{ A}$$

由式 1-8, 功率为

$$p = vi = 2 \times 10^4 \times 8 \times 10^{-3} = 160 \text{ W}$$

### 实验定律

与上述任何定义对照, 有三条就要讨论的定律是从实验观察到的事实得来的(约 200 年前)。我们目前对于电气现象已经了解得更为深入, 因而这些定律很容易从基本理论推导出来。可是在我们论述电路的这个阶段, 根据任何实验室的实际装置在实验中所揭示出来的结果来考虑这些关系, 毕竟是比较可取的。从对实际器件的性能的观察中, 我们可以推导出各种电路元件的理想化模型和定律, 这些定律决定这类元件组成简单的或复杂的电路时的性能。

### 电阻

请看一个实验(图 1.4a), 其中用一台发电机向一根铜棒供应变化的电流  $i$ 。电流以及由此引起的电压  $v$  可由示波器观察, 而且把电压作为电流的函数描绘出来(图 1.4c)。如果其它的因

素(譬如温度)都保持不变, 可以看到电压近似地与电流成正比。由这个电阻器实验所得到的关系可用方程式

$$v \cong Ri \quad (1-10)$$

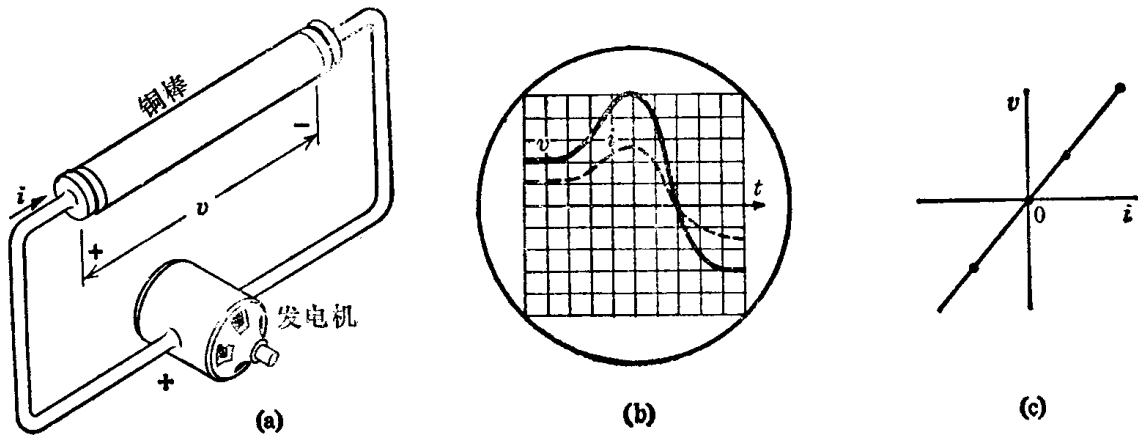


图 1.4 确定电阻器特性的实验

来表示, 式中的  $R$  是比例常数。在这里,  $v$  的单位是伏特,  $i$  的单位为安培, 式 1-10 规定电阻  $R$  的单位为欧姆(缩写为  $\Omega$ ), 并且把它叫做欧姆定律, 用以纪念德国的物理学家乔治·欧姆, 他的原始实验就导出了这个简单的关系。同样的关系也可由方程式

$$i \cong Gv \quad (1-11)$$

来表示, 此式规定电导  $G$  的单位为西门子(S)或姆欧( $\mathcal{U}$ )。

我们现在已经知道象铜那样的金属导体含有很多相对自由的电子。在外加电压作用下所产生的电场使这些传导电子加速, 而且所引起的运动重迭在电子的杂乱的<sup>热</sup>运动上, 比方说在室温下的杂乱的<sup>热</sup>运动上。电子由电场加速与铜原子碰撞, 于是交出它们的能量。它们再从电场获得能量而重新加速, 然后再碰撞, 再交出它们的能量。自由电子由外加电场所引起的运动重迭在由热能所引起的杂乱的<sup>热</sup>运动上, 就有一个平均的净方向运动, 或者叫做由外加电场所引起的<sup>漂</sup>移。已经发现漂移的速度直接与外加电场成正比。所以在给定的导电元件中, 电荷流动率或电流正比于电场, 而电场又正比于外加电压。用这种方法, 欧姆定律就可以由所讨论的导电机构中直接引伸出来。

### 电容

现在再看另一个实验(图 1.5a), 这里已将铜棒改削成两片由空气作为绝缘体而隔离开来的平板。图中没有画出用来量测电压、电流和电荷的伏特表、安培表以及电子示波器。如图所示, 当加上电压时, 可以察觉正电荷出现在左侧的板上而负电荷出现在右侧的板上。如果将发电机断开, 极板上的电荷仍然存在。这种储存电荷的装置叫做电容器。

只要电压是常数, 电荷就继续保持而无电流流动。如果电压随时间变化(图 1.5b), 可以观测到电流近似地正比于电压的变化率。这个实验所得的关系可用方程式

$$i \cong C \frac{dv}{dt} \quad (1-12)$$



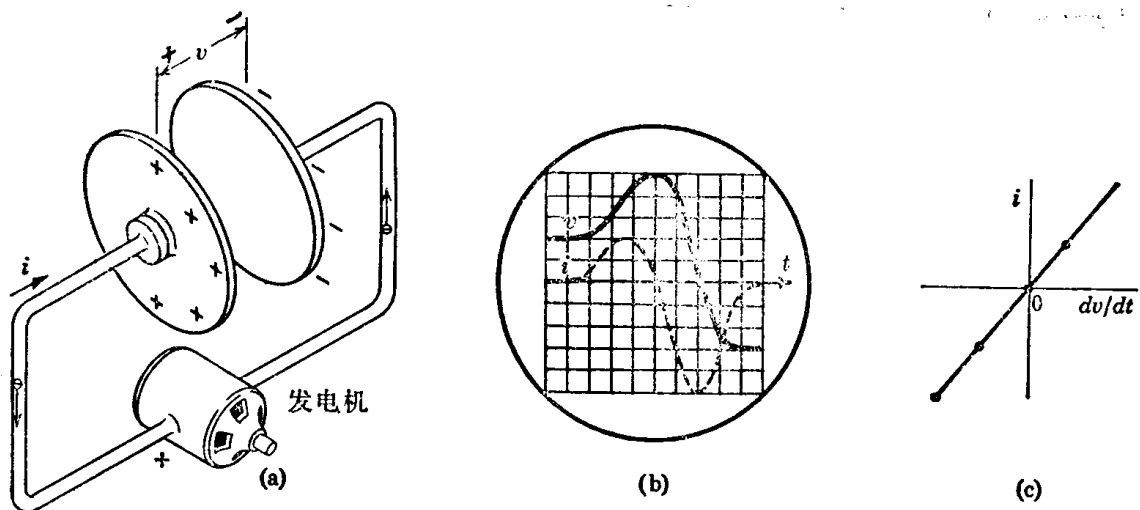


图 1.5 确定电容器特性的实验

来表示, 式中  $C$  为比例常数, 称为电容, 单位为法拉(缩写为 F), 用以纪念有创造才能的英国实验家米切尔·法拉第。

方程式 1-12 也可以由另外的方法求得。如果将电容器上的电荷精确地测量出来, 就可以看出它正比于外加电压, 即

$$q \cong Cv \quad (1-13)$$

式中的  $C$  同前面所决定的数值相同。因为根据定义  $i = dq/dt$ , 方程式 1-12 就可以从式 1-13 的关系中推导出来。

### 电感

如果改变一下, 把铜棒拉长而且做成图 1.6a 的形状, 就会得到完全不同的结果。现在发电机用来向多匝线圈供应电流。在这里可以看到, 只要很低的电压就足以维持相当可观的不变的电流, 但是要产生迅速变化的电流却需要比较高的电压。如图 1.6c 所示, 电压近似地正比于电流

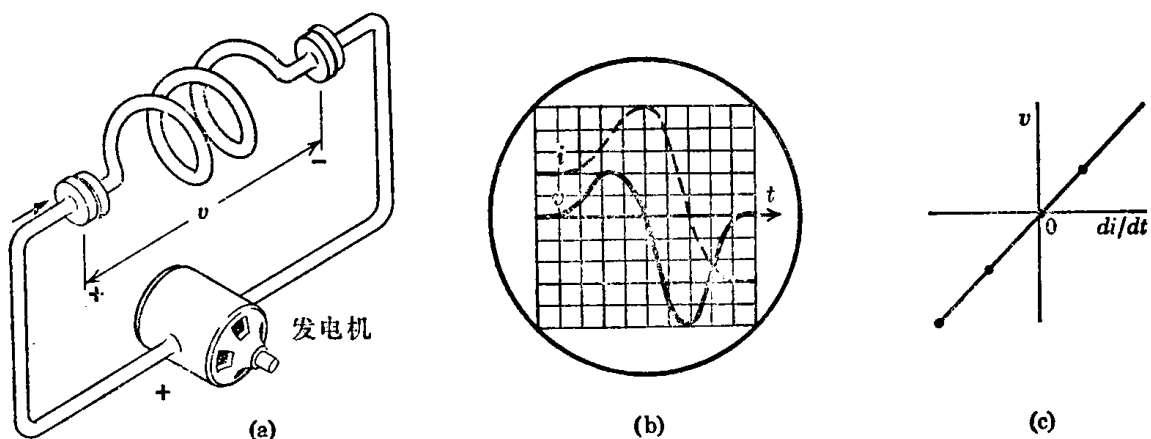


图 1.6 确定电感器特性的实验

的变化率。这个实验所得的关系可用方程式

$$v \cong L \frac{di}{dt} \quad (1-14)$$