

佟 亮 主编

尹 明 主审

电路分析基础

清华大学出版社

电路分析基础

佟亮 主编 / 尹明 主审

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书较全面地介绍了电路的基本概念、基本定理和基本分析方法。教材内容从电路的基本概念和定律、线性电阻电路、线性动态电路 3 个角度加以叙述,注重与后续课程之间的良好衔接。

本书主要包括:电路模型和电路变量、电路元件、基尔霍夫定律及电路的两类约束、电阻电路的等效变换、电路的一般分析方法、电路定理、动态电路的时域分析、正弦稳态电路的分析、动态电路的复频域分析。本书内容简洁,语言流畅,重点突出,保证基础。配合正文内容有适量的例题和习题。

本书可作为电气工程及其自动化、电子信息工程、通信工程、自动化、计算机科学与技术等专业的本科生教材,也可作为全日制、自学考试、函授的大专生参考教材,同时也可供相关领域的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/佟亮主编. —北京:清华大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-302-23560-6

I. ①电… II. ①佟… III. ①电路分析 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 158123 号

责任编辑:张占奎

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:9.5 字 数:240 千字

版 次:2010 年 8 月第 1 版 印 次:2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:18.00 元

前 言

多年来,作者在“电路分析基础”课程的教学过程中,先后使用过多种教材。为适应加强素质教育,培养创新精神的需要,在教学过程中,对选用的教材和参考书的内容不断调整、提炼和更新,逐步形成了有一定特色的讲稿,经试用修改后,编写了这本教材。

本书在编写过程中,主要考虑了以下几个方面:①重点介绍基本概念、基本理论和基本分析方法,了解电路原理的发展概况,为学习后续课程及从事有关工程技术、科学研究打好理论和实践基础;②强调要经过思维过程,通过对概念的理解及习题训练达到提高学生综合素质的目的,而不仅仅是教会学生掌握一些程序化的解题模式;③介绍一些与电学相关的科学史,使学生对科学理论及其演变过程有一个大概的了解,从而体会到探索自然奥秘的幸福和艰辛,加深对科学的认识,激发学生的学习热情,培养学生的科学精神。

在编写中,充分考虑了本教材的教学适用性。在内容安排上,既遵循电路理论本身的系统和结构,也注意了适应学生的认识规律,合理、有序地组织教材内容,使各章、节的中心明确,层次清楚,概念准确,论述简明。书中配有较多的例题,用以加深对概念的理解,提高分析和解决电路问题的能力。

本书适合约40~60学时(不含实验学时)的“电路分析基础”课程使用。建议学时分配如下:

第1章	电路模型和电路变量	4学时
第2章	电路元件	4学时
第3章	基尔霍夫定律及电路的两类约束	4学时
第4章	电阻电路的等效变换	2学时
第5章	电路的一般分析方法	6学时
第6章	电路定理	4学时
第7章	动态电路的时域分析	6学时
第8章	正弦稳态电路的分析	4学时
第9章	动态电路的复频域分析	6学时

本书由齐齐哈尔大学佟亮担任主编,齐迹、郝冰担任副主编。佟亮编写了绪论和第6、8章;齐齐哈尔大学齐迹编写了第2、5、7章;郝冰编写了第1、4、9章;黑龙江八一农垦大学赵肖宇编写了第3章;东北石油大学任志平编写了绪论。全书由佟亮统稿。齐齐哈尔大学尹明副教授审阅了全书并提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

由于编者水平和时间有限,书中不当之处,敬请读者指正。

编者

2010年8月

目 录

绪论	1
----	---

第 1 篇 电路的基本概念和定律

第 1 章 电路模型和电路变量	5
1.1 电路分析概述	5
1.1.1 电路理论	5
1.1.2 电路分析	6
1.2 电流和电压	8
1.2.1 电流	8
1.2.2 电压	9
1.3 参考方向	10
1.4 电功率和能量	11
习题	13
第 2 章 电路元件	15
2.1 理想电路元件	15
2.2 电阻元件	15
2.3 独立电源	18
2.3.1 独立电压源	18
2.3.2 独立电流源	19
2.4 受控电源	20
习题	22
第 3 章 基尔霍夫定律及电路的两类约束	24
3.1 基尔霍夫定律	24
3.1.1 基尔霍夫电流定律	24
3.1.2 基尔霍夫电压定律	25
3.2 电路的两类约束	26
习题	28

第 2 篇 线性电阻电路的分析

第 4 章 电阻电路的等效变换	33
4.1 引言	33
4.2 等效变换	33

4.3	电阻的串联和并联	34
4.3.1	电阻的串联	34
4.3.2	电阻的并联	36
4.4	电压源、电流源的串联和并联	38
4.4.1	电压源的串联	38
4.4.2	电流源的并联	38
4.5	实际电源的两种模型及其等效变换	39
4.5.1	实际电源的两种模型	39
4.5.2	两种电源模型的等效变换	40
4.6	平衡电桥电路	42
	习题	43
第5章	电路的一般分析方法	46
5.1	图论的基础知识	46
5.2	2b法	49
5.3	支路电流法和支路电压法	51
5.4	结点电压法	53
	习题	57
第6章	电路定理	59
6.1	叠加定理	59
6.2	替代定理	61
6.3	戴维南定理	64
6.4	最大功率传输定理	67
	习题	69

第3篇 线性动态电路的分析

第7章	动态电路的时域分析	75
7.1	动态元件	75
7.1.1	电容元件	75
7.1.2	电感元件	76
7.2	动态电路的方程及其初始条件	77
7.3	一阶动态电路的零输入响应	79
7.3.1	RC电路的零输入响应	79
7.3.2	RL电路的零输入响应	82
7.4	一阶动态电路的零状态响应	83
7.4.1	RC电路的零状态响应	83
7.4.2	RL电路的零状态响应	85
7.5	一阶动态电路的全响应	86

7.6	三要素法	87
7.7	二阶动态电路	89
	习题	90
第 8 章	正弦稳态电路的分析	95
8.1	正弦量	95
8.2	复数	98
8.3	相量法的基础	101
8.3.1	相量	101
8.3.2	相量的线性性质和微分性质	102
8.4	两类约束关系的相量形式	103
8.4.1	基尔霍夫定律的相量形式	103
8.4.2	电路元件 VCR 方程的相量形式	104
8.5	阻抗和导纳	106
8.6	阻抗(导纳)的串联和并联	108
8.7	相量图	109
8.8	正弦稳态电路的分析	110
8.9	正弦稳态电路的功率	112
	习题	115
第 9 章	动态电路的复频域(s 域)分析	121
9.1	拉普拉斯变换	121
9.2	拉普拉斯变换的基本性质	123
9.3	拉普拉斯反变换	127
9.4	两类约束关系的复频域(s 域)形式	129
9.4.1	基尔霍夫定律的复频域(s 域)形式	129
9.4.2	电路元件 VCR 方程的复频域(s 域)形式	130
9.5	拉普拉斯变换分析法	132
	习题	135
	习题参考答案	138
	参考文献	144

绪 论

人类对电磁现象的认识始于对静电、静磁现象的观察。中国殷商时代,甲骨文中出现“雷”字。西周时代,青铜器的铭文中出现“电”字。战国时鬼谷著《鬼谷子》“谋篇”中记载“郑子取玉,必载司南,为其不惑也”。《吕氏春秋》中,最早出现磁石引铁的记载。公元前 585 年,古希腊自然哲学家泰勒斯发现摩擦琥珀吸引微小物体的摩擦起电现象。最早对电磁现象进行系统研究的是英国人威廉·吉尔伯特(1544—1603),他在 1600 年出版的《磁石论》是物理学史上第一部系统阐述电磁学的科学专著,他进一步发现,除琥珀外,还有许多物体经摩擦都有吸引力。他将这类吸引力归结为电力,并用希腊文琥珀(elektron)一词创造了“电”(electricity)这个新词,这是人类对电的第一次系统研究后的正式命名。

自吉尔伯特的开创性研究以来,电学一直处在盲目摸索阶段,基本的概念框架尚未建立,也缺乏定量实验。1729 年,英国卡尔特修道院养老金领取者 S. 格雷(1675—1736)通过实验发现了导电物质与非导电物质的区分,将材料分为两类——导体和绝缘体。1747 年,美国著名的政治家、科学家富兰克林(1706—1790)在一封信中讲述了对电的本性的看法,提出了正电和负电的概念。从 18 世纪中叶开始,不少人定量地研究了电荷力,他们中最著名的是英国人卡文迪许(1731—1810)和法国人库仑(1736—1806)。卡文迪许 1777 年在论文里提出了电荷作用的平方反比律,1785 年,库仑使用自己的扭秤测定带电小球之间的作用力,发现电的引力或斥力与两个小球上的电荷之积成正比,而与两个小球球心之间的距离的平方成反比。这个定律现在被称为库仑定律,库仑定律是历史上最早的静电学定律,这是人类在电磁现象认识上的一次飞跃。

人类对电流的发现纯属偶然,1752 年意大利学者祖尔策(1720—1779)用一片铅片和一片银片放在舌头上。他发现舌尖的感觉很奇怪,由于找不到解释,他就没有再把这件事放在心上。实际上,他的舌尖上流通了两个金属相接触而产生的接触电。1790 年 9 月 20 日,意大利波仑亚大学的医学教授伽伐尼(1737—1798)和他的两个助手做解剖青蛙的实验,一名助手无意中将解剖刀碰到了一只蛙腿的神经上,顿时四只蛙腿猛烈地抽动。伽伐尼在做了一些其他的实验后提出,动物体内部存在着“动物电”,这种电与摩擦电完全一样,只是起因不同。今天我们知道,伽伐尼的看法是错误的,然而,他的工作极大地促进了人们对该问题的深入研究。伽伐尼的发现引起了意大利帕维亚大学的自然哲学教授伏特(1745—1827)的注意,1792 年,他从实验上证明了伽伐尼电本质上是因为两种金属与湿的动物体相连造成的,蛙腿只起验电器的作用。1800 年,伏特制成了著名的伏特电堆,使人们第一次有可能获得稳定而持续的电流,从而为研究电现象打下了基础。这一发明具有划时代的意义,电流的发现标志着一个电气时代的来临。

19 世纪,电磁学进入了一个大发展的时期。1820 年,丹麦物理学家奥斯特(1777—1851)通过实验发现了电流的磁效应,在电与磁之间架起了一座桥梁,打开了近代电磁学的突破口。同年,法国物理学家安培(1775—1836)提出了著名的安培环路定律,这一发现成为研究电磁学的基本定律,为电动机的发明做了理论上的准备。1826 年的德国物理学家欧姆

(1789—1867)提出了著名的欧姆定律,尽管这一定律今天看来十分简单,但当时构成欧姆定律的“电阻”、“电压”的概念尚未出现,而“电流”的概念也才刚刚由安培定量化,因此当初发现它并不那么容易。1831年,英国物理学家法拉第(1791—1867)发现了电磁感应现象,感生电流的发现有着重大的意义,它意味着通过连续地运动磁体可以不间断地得到电流,这一发现成为发电机和变压器的基本原理。1832年,美国科学家亨利(1797—1878)发现自感现象,并提出线圈的自感系数 L 代表通过电流时的自感应作用。1873年,英国物理学家麦克斯韦(1831—1879)出版了其伟大的著作《电磁通论》,总结了当时所发现的种种电磁现象的规律,将它们表达为麦克斯韦方程组,并预言了电磁波的存在,为电路理论奠定了坚实的基础。

在电磁学理论得到巨大发展的同时,电作为一种新型能源被应用于社会经济生活中,人类迎来了一个前人从未想过的电气时代。1834年,德国物理学家雅可比(1801—1874)发明了直流电动机。1888年,美国发明家特斯拉(1856—1943)发明了交流感应电动机。1867年,德国工程师西门子(1816—1931)制造了第一台自馈式的发电机。1838年,画家出身的美国人莫尔斯(1791—1872)发明了电报,1844年,他用电报机从华盛顿向40 mile(1 mile=1609 m)外的巴尔的摩发出电文。1876年,美国科学家贝尔(1847—1922)发明了电话。1879年,美国发明家爱迪生(1847—1931)发明了碳丝灯泡,电灯的广泛使用,是电能应用的一次大普及。1894年,意大利工程师马可尼(1874—1937)和俄国物理学家波波夫(1859—1906)分别发明了无线电,从此开始了无线电通信的时代。

以电报为代表的一系列伟大发明的出现,增加了对电路分析和计算的需要。1845年,德国科学家基尔霍夫(1824—1887)在深入研究了欧姆的工作成果之后,提出了电路的两个基本定律——基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。基尔霍夫定律是集总参数电路中电压、电流必须服从的规律,是电路原理的基石。1853年,英国物理学家汤姆逊(1824—1907)采用电阻、电感和电容的电路模型,分析了莱顿瓶的放电过程,用数学分析导出了电振荡方程和电振荡频率。同年,德国物理学家亥姆霍兹(1821—1894)提出电路中的等效发电机定理,1883年,法国电报工程师戴维南(1857—1926)也提出了该定理,所以也称为亥姆霍兹—戴维南定理。1854年,汤姆逊发表了电缆传输理论,为大西洋电缆工程作出了贡献。1857年,基尔霍夫考虑到架空传输线与电缆不同,得出了包括自感系数在内的完整的传输线上电压及电流方程式,称为基尔霍夫方程。至此,包括传输线在内的电路理论就初步建立起来了。

19世纪末,交流电技术的迅速发展,促进了交流电路理论的建立。1893年,德国出生的美籍电机工程师施泰因梅茨(1865—1923)创立了计算交流电路的实用方法——相量法。1925年,英国电器工程师O. 亥维赛(1850—1925)把拉普拉斯变换应用到求解电网络暂态过程的问题上,提出了运算法。近代,吉尔曼将图论引入到电路分析。电网络方程的建立、计算参数的拓扑公式、信号流图、故障诊断、集成电路布线、通信网络、电力系统等问题均与图论密切相关。计算机在电路分析、综合和设计中被广泛应用,使得对电路的优化设计和故障诊断成为可能。

迄今为止,人类经历了三次技术革命。继以蒸汽机为第一次技术革命和以电动机为代表的第二次技术革命后,世界近代史上的第三次技术革命于20世纪中叶爆发,主要标志为集成电路、计算机、原子能等技术的诞生。当前的电系统主要包括通信系统、计算机系统、控制系统、电力系统、信号处理系统。这些系统广泛的应用于日常生活、工农业生产、科学研究以及国防等各个方面,电气化、信息化时代已经来临。

第 1 篇

电路的基本概念和定律

第 1 章 电路模型和电路变量

1.1 电路分析概述

1.1.1 电路理论

电在现代日常生活、工农业生产、科研和国防等许多方面都有十分广泛的应用。人们利用电能几乎可以瞬间地传送到远处这一性质,将电能应用于能量和信息两大领域。常见的电系统分为:电力系统、通信系统、信号处理系统、控制系统及计算机系统。电力系统涉及大规模电能的产生、传输和转换,构成现代工农业生产、家庭生活等方面的基础。这里,能量是主要的着眼点。通信系统是产生、传送、分配信息的电系统,信号处理系统是对表现信息的电信号进行处理的电系统,控制系统是用电信号控制生产、生活过程的电系统,计算机系统是用电信号处理信息的电系统。这些电系统中,电能以极其微小且被精确控制的形式传送,具有携带信息的能力,是控制其他形式能量的手段。这里,信息是主要的着眼点。电系统之间存在着相互作用与联系。例如,通信系统会用计算机系统控制信息流动;计算机系统中包含控制系统,而控制系统中也包含计算机系统;信号处理系统中会包括通信、计算机和控制系统。

电系统是由各式各样的实际电路构成的,实际电路都是由各种元件相互连接组成的。元件的类型主要包括以下几类:有源器件,主要是各种交直流有源器件;基本器件,包括电阻、电容、电感、电位器、可变电容和变压器等;二极管类器件,主要包括普通二极管、稳压二极管、发光二极管、全桥和可控硅;三极管类器件,包括三极管、达林顿管和场效应管等;模拟类 IC,主要指各类运算放大器;TTL 集成电路;CMOS 集成电路;复合数字类 IC,包括存储器等复合集成电路;混合类 IC,主要包括数模转换、模数转换和 555 集成电路等;指示器件,包括电流表、电压表、数码显示器、指示灯和蜂鸣器等;多功能器件,主要指保险丝、电子管和晶振等;控制器件,包括乘法器、除法器、积分器、微分器和限幅器等;射频器件,包括射频电感、电容和晶体管等;电子机械器件,包括感应和记忆开关等。互联网、计算机、卫星、电视、用于诊断的医学设备、机器人以及各式各样的电气设备都是由各种元件互联而成的,它们已成为现代化社会的重要标志。

从 19 世纪开始,电磁学(electromagnetism)和电子学(electronics)得到了巨大的发展。19 世纪 60 年代,麦克斯韦建立了统一的电磁理论,19 世纪末,洛伦兹建立了古典电子理论。与此相呼应,工程技术专家敏锐地意识到电力技术对人类生活的意义,纷纷投身于电力开发、传输和利用方面的研究,以电报机、电话机、电灯、电动机、发电机为代表的一系列伟大电气设备被发明、制造出来。复杂电气设备的出现,使得电路的分析和设计成为需要。尽管广义的电磁学和电子学理论似乎是研究电现象的出发点,但其应用不仅麻烦,而且需要使用高深的数学。如果在研究电现象时,电系统满足以下 3 个假设时,研究该电系统就可以应用电

路理论而不是电磁学和电子学理论：(1) 电效应在瞬间贯穿整个系统；(2) 系统里所有元件的净电荷总是零；(3) 系统里的元件之间没有磁耦合。

上面提到的“电效应在瞬间贯穿整个系统”是指电信号同时影响系统中所有的点。从定量的角度，如果电信号的波长远远大于电系统的物理尺寸，则称该系统为集总参数系统，集总参数系统满足电效应在瞬间贯穿整个系统这一假设。一般认为，如果电系统的物理尺寸小于电信号波长的 $1/10$ ，则称该系统为集总参数系统。如不满足这一条件，称电系统为分布参数系统。例如，对无线电调频接收机来说，若接收的信号频率为 100 MHz ，则对应的波长 $\lambda=c/f=3\text{ m}$ （传播速度以光速计，即 $c=3\times 10^8\text{ m/s}$ ），连接接收天线与接收机之间的传输线即便只有 1 m 长，也不能作为集总参数系统来处理。又如，我国电力用电的频率为 50 Hz ，对应的波长为 6000 km ，对以此为工作频率的实验室设备来说，其尺寸远小于这一波长，可以按集总参数系统处理；而对远距离输电线来说，就必须考虑到电场、磁场沿线分布的现象，不能按集总参数系统来处理。如果电系统是集总参数系统，可以应用电路理论来研究^①；如果电系统是分布参数系统，就必须应用电磁学和电子学理论来研究。

1.1.2 电路分析

电路多种多样，功能各不相同，但它们是受共同的基本规律支配的。在研究电路共同规律的过程中，形成了“电路理论”这一学科。1845年，德国科学家基尔霍夫提出的基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law)是电路理论的基石。“电路分析”属“电路理论”学科，本书学习的是电路理论的电路分析部分^②。

为了能够运用数学工具分析实际电路，需要忽略实际电路的次要性质，在一定条件下建立足以表征实际电路主要物理性能的电路模型。这是因为，即便是最简单的电阻器，其参数也会随外部条件变化，当电流通过电阻器时会产生磁场，因而还兼有电感的性质，其他电路元件也有类似的或更复杂的情况，运用数学工具分析实际电路显然是困难的。因此需要对实际电路进行科学的抽象与概括，用一些具有确定电磁性质的、具有精确数学定义的理想电路元件来表征实际电路元件的主要电磁性能。用理想电路元件和理想导线的组合模拟实际电路就是“数学建模”的过程，理想电路元件和理想导线的组合就是实际电路的电路模型。电路分析研究的对象是电路模型，而不是实际电路^③。

建模时必须考虑工作条件，并按不同精度的要求把实际电路的电磁性能表征出来。例如，在直流条件下，一个线圈的模型可以是一个理想电阻元件；在低频条件下，一个线圈的模型可以是理想电阻元件和理想电感元件的串联组合；在高频条件下，还要考虑到导体表面的电荷作用，即电容效应，这时线圈的电路模型中还要包含理想电容元件。可见在不同的条件下，对同一个实际电路元件应该采用不同的模型。模型建立的准确，对电路模型的分析 and 计

① 集总假设为本书的基本假设，本书中的电路系统均为集总参数系统。

② 电路理论主要有两个分支，电路分析和电路综合。电路分析是研究给定电路模型的电磁现象，电路综合是设计出满足设计要求的电路模型。

③ 以后如没有特殊强调，本书中涉及的电路均为“电路模型”。

算结果就与实际电路的情况接近;反之,模型建立的不准确,分析结果就会与实际情况有很大的误差,甚至得到错误的结果。数学建模问题需要专门研究,本书不作介绍。

电路分析是电气工程设计的重要组成部分,下面通过图 1.1 说明其在电气工程中的地位 and 作用。工程设计的目标在于满足提出的要求,这个要求可以是改善现有设计,也可以是崭新的设计。在设计时首先需要对提出的要求进行仔细的分析,以便将要求抽象成设计要求。设计要求要具有可测量性,一旦开始进行设计,设计要求就成为评估设计能否满足要求的标准。对设计要求的完全理解产生概念。概念来源于设计者的洞察力,洞察力与设计者的受教育程度和经验有关。概念可以体现为一张草图,一段文字描述或其他形式。

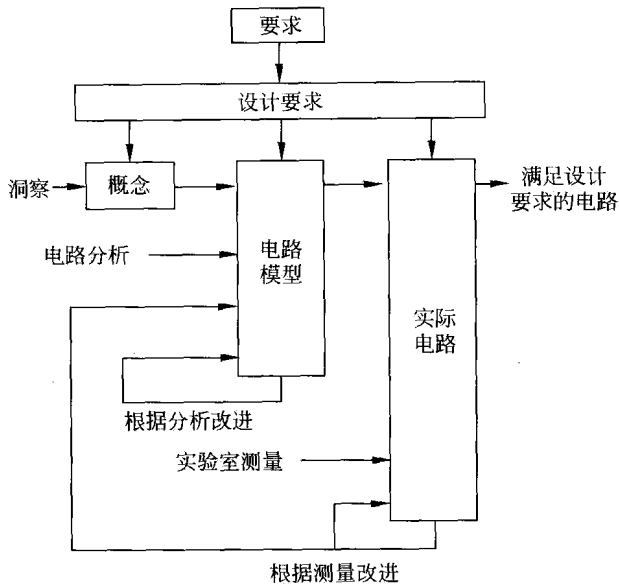


图 1.1 电气工程设计的概念模型

接下来是将概念转化为数学模型,电系统的数学模型就是电路模型。一般设计者会首先选用成熟的电路模型,使最开始选用的电路模型就尽可能接近设计要求。设计者对选用的电路模型进行电路分析(电路分析以数学为基础,用来预测电路模型的电路行为,对电路模型的电路分析方法是本书的学习重点)。然后比较电路分析得到的预测电路行为和设计要求中的期望电路行为的异同,进而进行电路模型的改进。重复进行以上过程,一旦预测电路行为和期望电路行为一致,则电路模型的设计就完成了。

电路模型的设计完成后,要根据电路模型构造出实际电路。实际电路是真实的物理模型,由实际电路元件构成,实际电路的电路行为可以通过仪表进行测量。将仪表测量的实际电路行为与电路分析得到的预测电路行为以及设计要求中的期望电路行为相比较,然后进行实际电路和电路模型的改进。重复进行以上处理,不断改进电路元件和系统结构,最终设计出一个满足设计要求的电系统。从以上描述可以清楚看出,设计过程中电路分析起了非常重要的作用,只有具备了电路分析的能力才能使设计者具有用电路模型模拟实际电路的能力。

1.2 电流和电压

电流的发现纯属偶然。1752年,一位名叫祖尔策的意大利学者,将一片铅片和一片银片放在舌尖上。当这两个金属片的另一头连在一起时,他发现舌尖的感觉很奇怪。由于找不到解释,他就没有再把这件事放在心上。实际上,他的舌尖上流通了两种金属相接触而产生的接触电,味觉因而发生了变化。三十年后,意大利波仑亚大学的医学教授伽伐尼重新遭遇了这种现象。1780年9月20日,他的一名助手无意中将解剖刀碰到了一只蛙腿的神经上,顿时四只蛙腿猛烈地抽动。伽伐尼反复做了各种实验后提出,动物体内存在着“动物电”,认为这种电与摩擦电完全一样。今天我们知道,伽伐尼的看法是错误的,但他的工作极大地促进了对该问题的深入研究。伽伐尼的发现,引起了意大利物理学家伏特的注意。起初他同意伽伐尼的观点,但几个月后,他开始怀疑蛙腿主要是一种验电器,而电源则在动物之外。伏特对这个问题进行了更深入的研究,结果得出了著名的伏特序列:锌、锡、铅、铜、银、金……他发现,只要将这个序列里前面的金属与后面的金属相接触,前者就带正电,后者带负电。1800年3月20日他宣布发明了伏特电堆,他在一封写给皇家学会会长班克斯的信件中介绍了他的发明,用的标题是《论不同导电物质接触产生的电》。伏特电堆的出现,使人们第一次有可能获得稳定而持续的电流,为研究电现象打下基础。1820年到1827年,法国物理学家安培对电磁现象进行了研究,在研究的过程中提出了“电流”的概念,并规定了电流的方向。1827年,德国物理学家欧姆出版了《关于电路的数学研究》,给出欧姆定律的理论推导。之后,他又给出了“电流、电压和电阻”的精确概念。至此,电流和电压才被人们所认识,它们是反映电系统电磁现象的重要参数。

1.2.1 电流

电流的原始定义基于本杰明·富兰克林的理念,即电的本性是某种呈正电性的液体,它不均匀地渗透在一切物体之中。今天,我们知道,电实际上是由带负电荷的电子造成的,富兰克林正好弄反了。安培受富兰克林的影响,把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。安培没有把电子运动的方向规定为电流的实际方向^①,但只要彻底一贯的坚持这个规定,也不会带来什么麻烦,因此物理学界依然沿袭了安培的这个规定。

电流磁效应的发现也使测量电流的大小成为可能。规定单位时间内通过导体横截面的电量为电流强度,用以衡量电流的大小,即

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (1-1)$$

电流用符号 i 表示。在国际单位制(SI)中,电量的单位为 C(库[仑])^②,时间的单位为 s(秒),电流的单位为 A(安[培])。A 是国际单位制的基本单位之一。关系式为

① 1897年,英国物理学家 J.J. 汤姆逊发现了电子(1856—1940),而安培早在 1836 年就已经去世了。

② 6.24×10^{18} 个电子所具有的电量为 1C, 1 个电子的电量只有 1.60×10^{-19} C。

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$$

此外,电流常用的单位还有 kA(千安)($1\text{kA}=10^3\text{A}$)和 mA(毫安)($1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$)和 μA (微安)($1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$)。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则该电流称为恒定电流,简称直流(direct current,DC),用符号 I 表示。否则称为时变(time varying)电流,用符号 i 表示。若时变电流的大小和方向都随时间作周期性变化,则该电流称为交变电流,简称交流(alternating current,AC)。

1.2.2 电压

在英语中电位和电动势这两个概念是同一个单词 potential。电动势在电化学中用的较多,在工业或日常生活中电动势有时也被称作电压(voltage)。电位、电压、电动势是三个既有联系,又有区别的物理量。理解电位是理解电压、电动势的基础。

电位是衡量电荷在电路中某点具有多少能量的物理量。在数值上,电路中某点的电位,等于把单位正电荷从无限远处(电位为零)移动到该位置所消耗的能量。电位是一个相对物理量,电路中某点电位的极性和大小与参考点(即零电位点)^①的选择有关。只有选定零电位点,电路中各点电位才能唯一确定,不指定零电位点,讨论电位是没有意义的。零电位点可以选为电路上的任意点,习惯上规定大地为零电位点^②,电子线路中常取多个元器件汇聚的公共点或机壳为零电位点。电路中任一点的电位,就是该点与零电位点之间的电位差。比零电位点高的电位为正,比零电位点低电位为负。电位降低的方向就是电场力对正电荷做功的方向。

电压又称电位差,是衡量电场力做功本领大小的物理量。在电路中,若 a 点电位为 u_a , b 点电位为 u_b ,则 a 、 b 两点间电压 $u_{ab} = u_a - u_b$ 。规定电压的方向是从高电位指向低电位; a 、 b 两点间电压的大小等于电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功,即

$$u(t) = \frac{d\omega(t)}{dq(t)} \quad (1-2)$$

电位的大小是相对的,它和零电位点的选择有关;电压的大小是绝对的,它和零电位点的选择无关。

电压用符号 u 表示(如果电压的大小和方向不随时间变化,则用 U 表示)。电压的单位为 V(伏[特])。此外,电压常用的单位还有 kV(千伏)($1\text{kV}=10^3\text{V}$)、mV(毫伏)($1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$)和 μV (微伏)($1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$)。

电动势是衡量电源力(或非静电力)做功本领大小的物理量。规定电动势的方向是从低电位指向高电位(或从电源的负极指向正极);电源的电动势大小等于电源力把单位正电荷从低电位移到高电位(或从电源的负极移向正极)所做的功。电动势与电压的物理意义并不相同,但就其对外部的效果而言,两者是没有区别的。所以近代电路理论中逐渐省略了电动势这个量。电位、电动势和电压的单位一样,都是 V。教材中常用电压对电路模型进行分析。

① 由于常将参考点的电位规定为零,所以参考点又叫零电位点。

② 大地容纳电荷的能力很大,它的电位很稳定,不会因为局部电荷量的变化而影响大地电位的高低。

1.3 参考方向

电流、电压的实际方向是客观存在的,物理学规定电流的实际方向是正电荷运动的方向,电压的实际方向是从高电位指向低电位。虽然电流、电压的实际方向物理意义明确,但采用电流、电压的实际方向进行电路分析却并不方便。这是因为,电路中电流、电压的实际方向往往难以事先判定,并且电流、电压的实际方向还往往随着时间发生变化。这就产生了矛盾:一方面,有时电流、电压的实际方向是未知的、可变的;另一方面,在对电路进行分析时需要明确的电流、电压方向。为了解决这一矛盾,引入了电流、电压的参考方向这一概念。事实上,如没有特殊强调,本书介绍概念、定理、分析方法时涉及的电流、电压方向均是电流、电压的参考方向,而不是电流、电压的实际方向。

对电路进行分析前须预先设定电路中相关电流、电压的参考方向。电流与电压的参考方向可以随意设定,但是一经设定,便不得任意改变。这样,在电路分析过程中电流、电压便有了明确的方向,该方向是人为设定的电流、电压的参考方向。从数学观点看,作为时间函数(常量可以看成时间函数的特例)的电流和电压都是代数量,其值可以为正,也可以为负。如果设定的电流、电压参考方向与电流、电压实际方向恰巧一致,其函数值为正,反之为负。也就是说,如果电流、电压值为正值,那么设定的参考方向与实际方向恰巧一致,反之则不一致。

在电路图中,电流的参考方向用箭头表示,如图 1.2 所示^①。电流的参考方向共有 2 种标注形式,本书采用图 1.2(a)形式。电压的参考方向可以用“+”、“-”号表示,也可以用箭头表示,如图 1.3 所示,本书采用图 1.3(b)形式。电流的参考方向就是箭头的指向,电压的参考方向是从元件(或支路)的高电位点(“+”极)指向低电位点(“-”极)。图 1.2 和图 1.3 所示参考方向都是向右的。

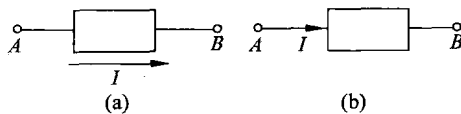


图 1.2 电流的参考方向标注

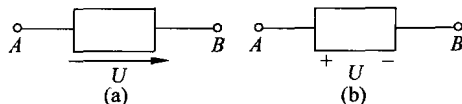


图 1.3 电压的参考方向标注

同一元件(支路)的电流和电压参考方向可以分别独立规定,但为了分析方便,常设定其电流和电压的参考方向一致,如图 1.4 所示。这时,该元件电流和电压的参考方向是相同的,称为关联(associated)参考方向。反之,元件电流和电压的参考方向是不相同的,如

^① 图 1.2 和图 1.3 中的长方框表示一个二端元件。但电流、电压的参考方向标注并不局限于元件,也可以是支路。支路的概念将在第 5 章 5.1 节介绍。