

电 工 基 础

(第二版)

裴家度 主编

航空工业出版社

1997

初版前言

本书是根据航空中等专业学校教材委员会的决定,由西安航空高等专科学校(西安航专)、成都航空工业学校(成都航校)、上海航空工业学校(上海航校)及大庸航空工业学校(大庸航校)的有关教师联合编写而成,包含了国家教委颁布的中等专业学校电类专业用《电工基础》教学大纲所规定的基本内容。全书以电路为主,还简单介绍了静电场、稳恒电流磁场、磁路与铁心线圈的基本知识。考虑到中专教学的特点,本书的内容安排为先路后场,先直流后交流,先稳态后暂态。在直流电路中适当加强了对含电流源电路的分析,还简单介绍了含受控源的电路及直流非线性电路。交流电路的基本概念,基本元件及相量法集中在第三章。第四章介绍交流电路的分析方法,并简单介绍了谐振电路及双口网络。

“微型计算机在电工计算中的应用”为教委大纲外的内容。这一章是为学过 BASIC 语言的读者编写的,可以集中讲授或分开作为专题选学。附录中的电路及磁路计算程序可供教学中选用或参考。

为了方便教学,每节末附有少量思考题,每章末附有习题和少量国外电工题。后者用来帮助学生学习英语电工词汇,供教学选用。

本书原为 1985 年四校合编,并经部教材编审室审定出版的内部教材,由裴家度同志任主编,曹彦芳、黄永林同志任副主编。绪论、第一章和第十二章由西安航专裴家度副教授编写,第二章和第九章由西安航专曹彦芳副教授编写,第三章和第十一章由成都航校黄永林高级讲师编写,第四章和第七章由大庸航校吴贤杰讲师编写,第五章和第十章由西安航专冯济群讲师编写,第六章和第八章由上海航校吴铁才高级工程师编写。

经过五年试用,根据航空航天工业部中专教材的规划,经过修订后正式出版。修订中吸收了兄弟院校老师们的许多宝贵意见,并增加了少量内容。这次修订工作,除吴铁才同志因工作调动未参加外,其余编者分别承担了原来编写章节的修改工作。第六章和第八章改由上海航校秦桂宝讲师修改。

本书由北京航空航天大学梁怀壁副教授主审,梁怀壁副教授仔细阅读了全部书稿,并提出了许多宝贵意见。值此书正式出版之际,特向使用过本书,并为本书的修改完善提出过宝贵意见的同志们表示感谢。由于编者水平有限,错误之处一定难免,欢迎广大读者提出批评和建议,意见请寄西安航空高等专科学校电工教研室。

编 者

1990 年 3 月

第二版前言

本书正式出版六年以来,受到使用学校的认可和欢迎,并提出了许多宝贵的意见。值此第二版出书之际,特向所有使用本书的老师深表感谢。

此次再版,除对个别内容作了调整修改外,仍保留了原书的基本内容和基本结构。修改工作,除第6章和第8章外,仍由原编者进行。第6章和第8章由上海航空工业学校吴仁雄高级讲师修改。

“微型计算机在电工计算中的应用”一章,非统编大纲的规定内容,仅供有条件的学校选用。此次再版时,对附录中的计算程序作了修改,可直接在一般PC机上运行。近几年来,有的学校(如大庸航空工业学校)已结合该章内容,安排学生进行上机练习,对加深学生对电工理论的了解,提高学生应用计算机的能力收到较好效果,值得有条件的学校借鉴。

由于编者水平有限,加之教学任务较重,时间比较仓促,书中肯定还有错误和不妥之处,欢迎大家批评指正。

编 者

1996年3月

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 电路的基本概念和基本定律	
1.1 电路和电路模型	(3)
1.2 电流和电压	(4)
1.3 电功和电功率	(9)
1.4 欧姆定律与电阻元件	(11)
1.5 电压源与电流源	(15)
1.6 基尔霍夫定律	(20)
1.7 电气元件的额定值	(24)
习题	(26)
第 2 章 直流电路的分析与计算	
2.1 电阻的串并联	(31)
2.2 电阻星形和三角形联接的等效变换	(37)
2.3 电源的等效变换	(41)
2.4 电路中电位的计算	(44)
2.5 负载获得最大功率的条件	(47)
2.6 支路电流法	(49)
2.7 网孔电流法	(52)
2.8 节点电位法	(55)
2.9 叠加原理	(61)
2.10 戴维南定理和诺顿定理	(64)
2.11 含受控源的电路	(69)
2.12 直流非线性电阻电路	(72)
习题	(77)
第 3 章 正弦交流电路基础	
3.1 正弦量及其三要素	(86)
3.2 正弦量的相位差	(89)
3.3 正弦量的有效值	(91)
3.4 正弦量的相量表示	(93)
3.5 电容元件	(96)
3.6 电感元件	(101)
3.7 电阻中的正弦交流电	(106)
3.8 电容中的正弦交流电	(108)
3.9 电感中的正弦交流电	(111)

习题	(114)
第4章 正弦交流电路分析	
4.1 RLC 串联电路	(120)
4.2 阻抗的串并联	(124)
4.3 导纳与阻抗的等效变换	(130)
4.4 正弦交流电路的功率	(133)
4.5 功率因数的提高	(137)
4.6 串联谐振	(140)
4.7 并联谐振	(145)
4.8 正弦交流复杂电路	(148)
4.9 双口网络	(149)
4.10 交流电路的实际元件	(154)
习题	(156)
第5章 三相交流电路	
5.1 三相电源	(162)
5.2 三相负载的Y形联接	(165)
5.3 三相负载的 Δ 形联接	(171)
5.4 三相电路的功率	(175)
习题	(180)
第6章 互感耦合电路	
6.1 互感耦合	(183)
6.2 互感耦合电路的计算	(187)
6.3 空心变压器	(193)
习题	(197)
第7章 非正弦周期电流电路	
7.1 非正弦周期性电流和电压	(200)
7.2 非正弦周期波的分解	(202)
7.3 几种对称的非正弦波	(206)
7.4 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	(210)
7.5 非正弦周期电流电路的计算	(212)
习题	(217)
第8章 线性电路的过渡过程	
8.1 过渡过程与换路定律	(220)
8.2 RC 电路的零输入响应	(224)
8.3 RC 电路的零状态响应及全响应	(228)
8.4 RL 电路的零输入响应	(231)
8.5 RL 电路的零状态响应及全响应	(234)
8.6 一阶线性电路的三要素法	(236)
8.7 RL 电路在正弦电源作用下的零状态响应	(240)

8.8	RLC 电路的零输入响应	(243)
	习题	(249)
第 9 章 静电场		
9.1	静电场和电场强度	(254)
9.2	电位和电压	(257)
9.3	$\vec{E}$ 通量和 $\vec{D}$ 通量	(261)
9.4	高斯定理	(264)
9.5	电介质的极化与击穿	(267)
9.6	电容的计算	(270)
9.7	电场能量和电场力	(275)
	习题	(278)
第 10 章 磁场		
10.1	磁场、磁感应强度及磁通	(281)
10.2	毕奥-沙伐定律	(284)
10.3	磁场强度及磁压	(287)
10.4	全电流定律及其应用	(289)
10.5	电感计算举例	(292)
10.6	二平行载流直导线间的作用力	(296)
10.7	磁场能量和电磁铁吸力计算	(298)
	习题	(300)
第 11 章 磁路与铁心线圈		
11.1	铁磁材料及其磁化	(303)
11.2	磁路和磁路定律	(307)
11.3	恒定磁通磁路的计算	(309)
11.4	交流铁心线圈	(313)
11.5	理想变压器	(320)
	习题	(325)
第 12 章 微型计算机在电工计算中的应用		
12.1	用微型计算机解决简单的电工问题	(329)
12.2	直流电路计算程序	(333)
12.3	交流电路计算程序	(339)
12.4	简单磁路计算程序	(343)
	习题	(347)
附 录 微型计算机用电路及磁路计算程序		
附录 1	含 VCCS 的直流电路计算程序	(349)
附录 2	含 VCCS 的交流电路计算程序	(351)
附录 3	磁路计算程序	(355)
思考题与习题答案		(358)

绪 论

随着科学技术的发展,电在工农业生产及人民生活中起着越来越重要的作用。从各种类型的家用电器到工厂中使用的各种设备,从深入地下的采矿机械到翱翔太空的宇宙飞船,从简单的电灯电话到复杂的电子计算机,几乎都离不开电。今天,如果没有电,我们将丧失现代科学带给我们的绝大多数乐趣和方便,生产和生活将会陷入一片混乱。

《电工基础》就是一门以电和电磁现象为研究对象的基础理论课。

电工技术的发展与电工理论的发展是密切相关的。从发现库仑定律的 1785 年到今天才 200 年,这在人类历史的长河中只是短暂的一瞬,但电工技术和电工理论都经历了长足的进步:为人类提供电能的不再是简单的伏打电池,而是强大的火力、水力和核动力发电站;人类所处理的电路不再是只包含几个或几十个元件的简单电路,而是包含几十万个元件和上百万个元件的大电网和超大规模集成电路。电工技术的发展,给电工理论提出了广泛的课题,促进了电工理论的发展;而电工理论的发展,又反过来为电工技术的发展奠定了坚实的理论基础。

19 世纪是电工理论飞速发展的时期。作为现代电机基础的电磁效应是丹麦物理学家奥斯特在 1819 年发现的;1820 年法国科学家安培发现了磁铁对电流的作用力和电流之间的相互作用;英国科学家法拉第和俄国科学家楞次分别在 1831 年解决了感应电动势的大小及方向的问题;1865 年英国科学家麦克斯韦建立了电磁场方程,从理论上论证了电磁场以光速在真空中传播,奠定了电磁场的理论基础。在电路理论方面,德国物理学家欧姆在 1826 年从实验中总结出了著名的欧姆定律;作为电路分析基础的基尔霍夫定律是德国物理学家基尔霍夫在 1845 年提出来的,当时他还是一个年仅 21 岁的大学生;1883 年法国工程师戴维南解决了有源二端网络的化简问题,提出了至今仍被广泛应用的戴维南定理;1952 年荷兰科学家特勒根建立的特勒根定理,是电路理论的一个新发展,是电路分析的新的强有力的工具。

电工理论和电工技术的发展是全世界各国人民共同劳动的结晶。我国早在公元前六七世纪就有“上有慈石者,其下有铜金”的记载。所谓“慈石”即今天所说的磁石。这个记载表明,我国已经发现了自然界中的磁现象。公元一世纪,东汉王充就把“顿牟掇芥”的静电现象和“磁石引针”的静磁现象并列起来,说明我们的祖先已开始注意到电磁现象之间的联系。但是,几千年的封建统治,我国的电工技术长期停滞不前,只有在解放以后,我国的电力工业和电子工业才得到了飞速的发展。1995 年我国的年发电量约为 10000 亿度($1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h}$),是 1949 年的 233 倍,占世界第 4 位。今天,我国已能够生产各种类型的电机、电器和电子仪器。目前,全国人民正在为加速发展电子工业、微电子技术和电子计算机技术而加倍努力,为实现国家的电气化、自动化而加倍努力,为实现“四化”,建设具有中国特色的社会主义加倍努力。毫无疑问,电工技术和电工理论将在我国的社会主义建设中发挥巨大作用。

《电工基础》是各种电气专业学生必修的一门重要基础课。本课程包括电路的基本理论(第 1 章至第 8 章)和电磁场的基本理论(第 9 章至第 11 章)。电路理论包括直流电路的基本知识及分析方法(第 1 章和第 2 章),交流电路的基本知识和各种交流电路的分析方法(第 3 章至第 7 章)。第 1 章至第 7 章讨论电路的稳态情况,第 8 章介绍直流和交流的过渡过程。计算机的发

展使电路理论及分析方法发生了重大变化,本书的第12章介绍了微型计算机在电路计算中的应用,并附有简单的电路分析程序。

《电工基础》是一门理论性较强的课程,它的很多基本概念、定律和定理已十分成熟,分析方法也日趋完善。学习这门课程时,首先要注意弄清基本概念,弄清各个概念的基本定义和物理意义,弄清各个概念间的区别和联系。其次,还要掌握有关电路和电磁场的基本定理和定律,这些定理和定律的数量并不太多,但却是电磁现象客观规律的反映,是分析电工问题的理论依据。最后,还要学会分析和解决电工问题的原理和方法,学会把复杂的问题分解为若干个简单问题,各个突破。上述三个方面是本课程的基本理论部分,相互联系,缺一不可。为了使读者能够掌握这三个方面的基本内容,本书各章节末都附有相当数量的习题。只有在弄清基本理论的基础上,独立完成一定数量的习题,认真总结做题中的经验教训,才能逐步掌握解决电工实际问题的理论和方法。

本课程另一部分重要内容是电工实验。通过电工实验大家可以了解一般电工仪器、仪表的使用方法,获得一定的实验工作能力,加深对所学理论的理解。理论课和实验课是本课程不可分割的两个方面,相互促进,相辅相成。只有既掌握基本理论,又有一定的实验工作能力的人,才能掌握解决电工实际问题的主动权。在实验课中一定要做到理论和实践相结合,既动手,又动脑,才会收到更好的效果。

随着电工技术的发展,特别是集成电路制造技术的发展,电路元件的概念,电路分析的理论和方法都会有新的发展。学完了这本书,只是刚刚跨入电工理论的大门,更为广阔的、日新月异的领域还有待大家去学习和探索。

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

内容提要 本章介绍直流电路的基本概念、基本元件和基本定律。

基本概念包括电流、电压、电位和电功率等重要概念。要弄清各概念的定义、单位及物理意义。特别要注意各物理量正、负的含义及电流、电压的参考方向问题。

基本元件包括电阻元件、电压源和电流源。要掌握各元件的伏安特性。

基尔霍夫定律是电路的基本定律,它说明了电路中各电流、电压间的相互关系,是电路分析的理论基础。

本章的内容不仅对学习直流电路非常重要,而且可以推广应用于交流电路分析。

1.1 电路和电路模型

定向流动的电荷形成**电流**(Current)。电流所经之路叫做**电路**(Circuit)。人类根据生产的需要,设计和制造了成千上万种不同的电路,迫使电荷在特定的电路中流动,从而完成特定的电能传递、分配和变换任务。

组成各种电路的实际电路元件种类繁多,特性各异,如电池、发电机、电灯、电炉、电动机等。这些元件一般可以分成两大类:一类是向电路提供能量的元件,叫做**电源**(Source),如电池、发电机等;另一类是使用电能的元件,叫做电路的**负载**(Load),如电灯、电炉、电动机等。电源和负载之间通过导线联接起来。图 1-1 是一个最简单的电路,电池是电源,灯泡是负载,二者用导线联接在一起。习惯上,把电源部分的电路叫做**内电路**(Internal Circuit),把电路的其余部分,包括导线及负载等,叫做**外电路**(External Circuit)。

由于实际电路元件种类繁多,特性各异,由它们组成的电路更是千变万化,非常复杂。为了简化电路的设计和计算,人们分析了各种实际元件的主特性,从中抽象出数量有限、特性简单的理想元件。直流电路中的理想元件有:电阻元件、电压源和电流源。它们的电路符号见图 1-2,它们的特性将在 1.4 和 1.5 中仔细研究。有了这些理想元件,我们就可以将实际电路元件用单个理想元件或几个理想元件的组合来等效代替。例如:一个电池可以用一个电压源与一个电阻相串联的等效电路来近似代替;灯泡可以近似看作一个电阻元件。将实际元件用理想元件代换后,我们可以得到一个理想元件组成的电路,它能反映出原来电路在特定条件下的主要特性。这个由理想元件组成的电路叫实际电路的**电路模型**。图 1-3 即是图 1-1 的电路模型。图中电

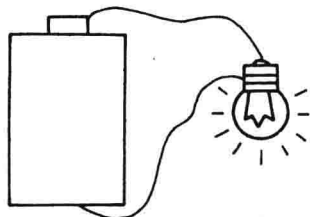


图 1-1 最简单的电路

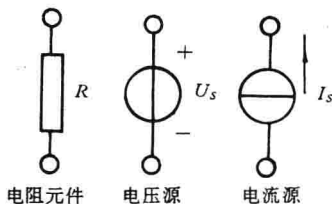


图 1-2 理想元件的电路图符号

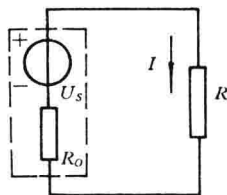


图 1-3 图 1-1 的电路模型

压源 U_s 和电阻 R_o 近似代替了原来电路中的电池,电阻 R 近似代替了原来的灯泡。这样做的结果,不仅简化了电路的画法,更重要的是,由于电路中只包含为数不多的、特性比较简单的理想元件,使电路的分析计算大大简化。电路理论的研究对象主要是这种理想化的电路模型。本书下面所涉及到的电路一般也指的是这样的电路模型。

思考题

- 1-1-1 什么叫电源? 什么叫负载? 试各举数例。
- 1-1-2 在电路分析中采用理想元件和电路模型有何好处?
- 1-1-3 直流电路中主要的理想元件有哪几种? 它们的电路符号是什么?

1.2 电流和电压

描述电路工作情况的基本物理量是**电流强度**(Current Intensity)和**电压**(Voltage)。

电流强度是表示电流强弱的物理量,其定义是:在时间 dt 内,沿着某一方向通过导体横截面的电荷量若为 dq ,则比值 $\frac{dq}{dt}$ 即为电路中该方向的电流强度 i

$$i = \frac{dq}{dt} \tag{1-1}$$

电流强度是一个代数量,其绝对值表示电荷穿过导体横截面的速率。在国际单位制(International System of Units,简称 SI)中,电流强度的单位为**安培**①(A)。如果有1库仑②(C)的电荷在1秒钟内匀速穿过导体的某一截面,其电流强度即为1A。为了使用方便,常在SI单位前增加一定的词头,构成SI单位的倍数单位。常用的国际单位制词头及其相应的倍数关系见表1-1。利用这些词头,可组成较小的或较大的电流强度单位,如毫安(mA)、微安(μ A)、千安(kA)等,它们与安培的关系是 $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$, $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$, $1\text{kA}=10^3\text{A}$ 。

表 1-1 部分国际单位制词头

倍 数	词 头	符 号
10^9	吉	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳	n
10^{-12}	皮	p

本书的计算公式,如无特殊说明,均使用国际单位。计算结果可采用适当的倍数单位,使该物理量的数值在0.1~1000的范围内。例如0.02 A可写为20 mA,15000 A可写为15 kA , 1.2×10^{-5} A可写为12 μ A 等。

① 安培(A. -M. Ampere, 1775~1836), 法国物理学家, 电动力学的创建人之一。
② 库仑(C. -A. de Coulomb, 1736~1806), 法国物理学家, 用实验发现了库仑定律。

根据定义, 电流强度的正负与电荷运动的方向有关。为了计算电流强度, 先要选定电流 i 的计算方向, 即所谓参考方向, 并在电路图中用箭头标明, 如图 1-3。如果正电荷沿参考方向运动, 则 dq 为正, 该方向的电流强度 i 为正; 如果是负电荷沿参考方向运动, 则 dq 为负, 该方向的电流强度 i 为负。习惯上, 我们把正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向规定为电流的方向, 因此可以说, 当电流的方向与参考方向一致时, 电流强度 i 为正; 当电流的方向与参考方向相反时, 电流强度 i 为负。在电路中, 对同一电流, 若选定的参考方向相反, 其电流强度的正负也应相反。

电流强度是个代数量, 计算结果有正有负, 其正负与参考方向密切相关, 离开参考方向谈正、负, 正、负就没有意义。只有同时知道电流的正负和参考方向, 才能判定电流的实际方向。图 1-4 概括了电流的方向和正、负的问题。图中实线箭头表示参考方向; 虚线箭头表示电流的实际方向, 即习惯上规定的电流方向。

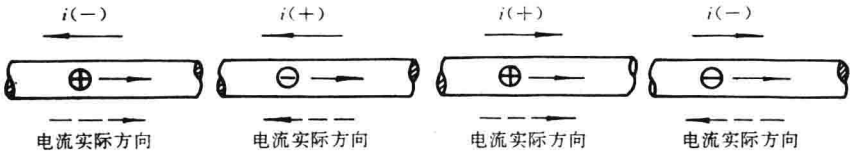


图 1-4 电流的参考方向和正、负

电流强度也简称电流。如“电流为 5 A”, 实际上是指“电流强度为 5 A”。随时间变化的电流叫做**变动电流**(Varying Current), 大小和方向均不随时间变化的电流叫**恒定电流**, 或**直流电流**(Direct Current)。习惯上用小写字母 i 表示变动电流, 用大写字母 I 表示直流电流。直流电流的电流强度不随时间变化, 即 $\frac{dq}{dt}$ 等于常数, 其电流强度的定义式可简化为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \tag{1-2}$$

式中, Δt 为任意选定的时间间隔, Δq 为在 Δt 时间内沿参考方向通过导体某截面的电荷量。

电路中的电流具有连续性。例如, 当电荷在无分支电路中运动时, 任意瞬间通过电路各部分的电流强度均相等。图 1-5 所示为一段无分支的导体, 根据电流的连续性, 通过各截面的电流强度应相等。又如, 图 1-3 所示的电路也是一个无分支电路, 因而通过电源的电流与通过电阻的电流应相等。电流的连续性是下面将要研究的基尔霍夫电流定律的基础。

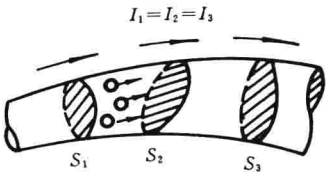


图 1-5 电流的连续性

例 1-1 一段导体如图 1-6, 若每秒钟有 3 亿亿个电子匀速穿过截面 S , 每个电子的电量为 $-1.602 \times 10^{-19} \text{C}$, 求沿图示方向的电流强度 I 。

解 选图示方向为 I 的参考方向, 设取 $\Delta t = 1 \text{ s}$, 由题意可知将有 3×10^{16} 个电子沿参考方向通过截面 S

$$\begin{aligned} \text{则 } \Delta q &= 3 \times 10^{16} \times (-1.602 \times 10^{-19}) \\ &= -4.806 \times 10^{-3} \text{ C} \end{aligned}$$

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{-4.806 \times 10^{-3}}{1} = -4.806 \times 10^{-3} \text{ A} = -4.806 \text{ mA}$$

负号表示电流实际方向与图示参考方向相反。根据电流的连续性,通过截面 S 与截面 S' 的电流相同,截面 S 与 S' 之间的一段导体中没有多余电荷积累。

例 1-2 一段导体如图 1-7。导体中的电流 $I = -1 \text{ A}$,参考方向如图。试指出导体中电流的方向和自由电子运动的方向,并求出一秒钟内有多少个电子通过截面 S 。

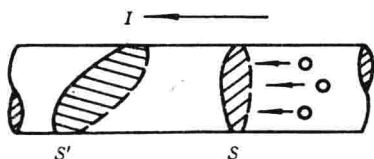


图 1-6 例 1-1 图

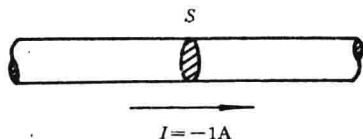


图 1-7 例 1-2 图

解 因为电流 I 为负,所以电流方向与图示参考方向相反,即从右向左。电子运动方向与电流方向相反,从左向右。

在一秒钟内沿参考方向通过截面 S 的电荷量为

$$\Delta q = I \cdot \Delta t = -1 \times 1 = -1 \text{ C}$$

每个电子带电量为 $-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$,所以 1 库仑的电量相当于 $n = \frac{-1}{-1.602 \times 10^{-19}} = 6.242 \times 10^{18}$ 个电子带的电量,即一秒钟内有 624.2 亿亿个电子沿电流的参考方向穿过截面 S 。

电压是描写电路中任意二点之间电场力做功本领的物理量。在电路理论中,电压是这样定义的:若电荷 dq 从电路中某点 1 运动到另一点 2,电场力对电荷 dq 做的功为 dA_{12} ,则比值 $\frac{dA_{12}}{dq}$ 即为由点 1 至点 2 的电压 u_{12} ,即

$$u_{12} = \frac{dA_{12}}{dq} \quad (1-3)$$

不随时间变化的电压叫**直流电压**。电压与电流均不随时间变化的电路叫**直流电路**。与直流电流的定义类似,直流电压的定义式可简化为

$$U_{12} = \frac{\Delta A_{12}}{\Delta q} \quad (1-4)$$

式中用大写字母 U 表示直流电压。 U_{12} 的双下标分别表示计算电压的起点和终点。 ΔA_{12} 为电荷 Δq 从点 1 运动到点 2 时电场力做的功。 ΔA_{12} 为正表明电场力做正功。推动电荷运动; ΔA_{12} 为负表明电场力做负功,阻碍电荷运动。例如,电荷在电源内部运动时,电场力做负功,电源内的非电场力克服电场力的阻碍作用推动电荷运动。

电压的 SI 单位为伏特^① (V)。加上适当的词头(见表 1-1)可以构成倍数单位,如毫伏 (mV)、微伏 (μV)、千伏 (kV) 等。当电压 U_{12} 为 1 伏特时,1 库仑的电荷从点 1 运动到点 2,电场

^① 伏特 (A. Volta, 1745~1827), 意大利物理学家, 伏打电池的发明人。

力对电荷做的功为 1 焦耳^① (J)。

电压也是一个代数量,其正、负取决于 Δq 和 ΔA_{12} 的正负。设 Δq 为正电荷,从点 1 移动到点 2 时电场力做正功,即 ΔA_{12} 为正,则电压 U_{12} 为正;反之,若电场力做负功,即 ΔA_{12} 为负,则电压 U_{12} 为负。在电路分析中,习惯上把电场力对正电荷做正功的方向叫做电压的方向,因此,当电压的方向与参考方向(即选定的计算方向)一致时,电压为正;电压的方向与参考方向相反时,电压为负。在电路中常以“+”号标注计算电压的起点,以“-”号标注计算电压的终点。标注“+”号的一端叫做电路的参考正极,标注“-”号的一端叫参考负极。由“+”至“-”的方向即电压的参考方向(图 1-8, a)。也可用箭头表示电压的参考方向(图 1-8, c),或用双下标表示计算电压的起点和终点(图 1-8, b),由起点至终点的方向即电压的参考方向。图 1-8 中的三种标注方法实际上是等效的,本书常用 a, b 的标注方法。图中的二端网络表示任意一个具有两个对外连接端钮的电路,其中可以包含各种电路元件。

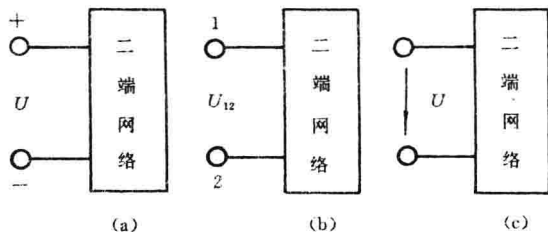


图 1-8 电压的参考极性和参考方向

在电路中,电荷 Δq 从点 1 至 2 点时电场力做的功 ΔA_{12} ,与同一电荷 Δq 从点 2 至点 1 时电场力做的功总是绝对值相等,但正、负号相反,即 $\Delta A_{12} = -\Delta A_{21}$ 。所以,当我们改变计算电压的参考方向后,电压的绝对值不变,但正、负相反,即

$$U_{12} = -U_{21} \quad (1-5)$$

电荷从电路中的一点运动到另一点时,电场力做的功只与起点和终点的位置有关,而与电荷所经过的路径无关。因此,电路中任意两点间的电压也只与起点及终点的位置有关,而与计算时选取的路径无关,即两点间的电压具有唯一性。否则,若两点间的电压随计算路径不同而变化,我们就无法单值地确定两点间的电压,电压的定义也就无意义。电压的唯一性是后面要研究的基尔霍夫电压定律的基础。

电荷沿电路移动时电场力做的功,等于电荷所经过的各段电路上电场力做的功的代数和。因此,电路中任意两点间的电压,等于两点间各段电路电压的代数和。

综上所述,我们可以总结出一个非常简便的计算电压的法则:计算任意两点间的电压时,可先在两点间任选一条易于计算电压的路径,然后,沿着选定的路径,从计算的起点到终点。依次计算各段电路上的电压,这些电压的代数和即为两点间的总电压。选择计算路径时,应使其包含的元件较小,且元件的电压应易于计算。计算各段电路的电压时,要特别注意参考方向和正负。

例 1-3 电路如图 1-9。已知 $U_{ac} = -6 \text{ V}$, $U_2 = 4 \text{ V}$, $U_3 = 3 \text{ V}$, 求 U_{ab} , U_1 , U_4 和 U_{bc} 。

解 由公式(1-5)可知

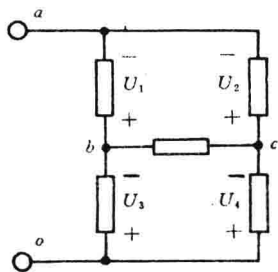


图 1-9 例 1-3 图

^① 焦耳 (J. P. Joule, 1818~1889), 英国物理学家, 用实验确定了电能与热能间的关系。

$$U_{oa} = -U_{ao} = 6 \text{ V}$$

为计算 U_1 , 可在电路中任选一条计算路径, 其起点为 U_1 的“+”端, 终点为 U_1 的“-”端, 且路径上各元件的电压已知, 则各元件电压的代数和即为 U_1 。若选择计算路径为 $b \rightarrow o \rightarrow a$, 则

$$U_1 = (-U_3) + U_{oa} = -3 + 6 = 3 \text{ V}$$

同理, 计算 U_4 时, 若选择计算路径为 $o \rightarrow a \rightarrow c$, 则

$$U_4 = U_{oa} + (-U_2) = 6 - 4 = 2 \text{ V}$$

计算 U_{bc} 时, 若选择计算路径为 $b \rightarrow a \rightarrow c$, 则

$$U_{bc} = U_{ba} + U_{ac} = U_1 - U_2 = 3 - 4 = -1 \text{ V}$$

计算 U_{bc} 时, 也可以选计算路径为 $b \rightarrow o \rightarrow c$, 则

$$U_{bc} = U_{bo} + U_{oc} = (-U_3) + U_4 = -3 + 2 = -1 \text{ V}$$

可见, U_{bc} 的数值与计算路径无关。负号表示从 b 点至 c 点电场力对正电荷做负功, 电压的实际方向与参考方向相反。

对于比较复杂的电路, 常在电路中选择一参考点作为计算电压的基准。电路中其余各点到参考点的电压叫做该点的**电位**(Electric Potential)。如果把参考点记为 o , 则电路中任一点 a 的电位 V_a 即从 a 点到参考点 o 的电压 U_{ao} , 电位的定义式为:

$$V_a = U_{ao} = \frac{\Delta A_{ao}}{\Delta q} = \frac{\Delta W_a}{\Delta q} \quad (1-6)$$

式中 ΔA_{ao} 为电荷 Δq 从 a 点移动到 o 点时电场力所做的功, 也就是电荷 Δq 在 a 点所具有的电位能 ΔW_a , 因而, a 点的电位就是电荷 Δq 在 a 点所具有的电位能 ΔW_a 与其电荷量 Δq 的比值, 在数值上等于单位正电荷在 a 点所具有的电位能。电位与电压的单位相同, 即伏特(V), 毫伏(mV), 微伏(μV), 千伏(kV)等。

计算电位的参考点可任意选定。工程上常选大地、仪器外壳或底板作参考点。理论研究时常取无穷远处为参考点。根据定义, 参考点的电位总为零。电位 V_a 为正, 说明正电荷由 a 点移动到参考点时电场力做正功, 习惯上说 a 点的电位高于参考点的电位; 电位 V_a 为负, 说明当正电荷由 a 点移动到参考点时电场力做负功, 习惯上说 a 点的电位低于参考点的电位。

根据电压和电位的定义, 我们可以找出电路中任意两点间的电压与电位的关系。例如, 设 a 、 b 两点间的电压为 U_{ab} , o 为参考点, 则 a 点的电位为 $V_a = U_{ao}$, b 点的电位为 $V_b = U_{bo}$, 选取计算 U_{ab} 的路径为 $a \rightarrow o \rightarrow b$, 则

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1-7)$$

可见, 电路中任意两点间的电压等于两点间的电位差。从高电位点到低电位点, 电位差为正, 两点间的电压为正; 从低电位点到高电位点, 电位差为负, 两点间的电压也为负。电压的方向也就是从高电位点到低电位点的方向, 或者说电压的方向就是电位降低的方向。两点间的电压即由计算起点到终点的电位降。电压为正, 说明由起点到终点电位降低了; 电压为负则表示由起点到终点电位升高了。

例 1-4 电路如图 1-10, $U_{ao} = -6 \text{ V}$, $U_c = 2 \text{ V}$, $U_e = 1 \text{ V}$, $U_2 = 1.3 \text{ V}$, 求电位 V_a, V_b, V_c, V_e 。

解 图中的符号“⊥”为接机器外壳的符号, 说明 o 点为参考点, 所以 $V_o = 0$,

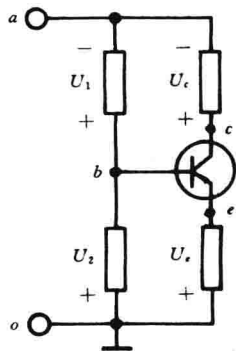


图 1-10 例 1-4 图

a 点的电位 $V_a = U_{ao} = -6 \text{ V}$

b 点的电位 $V_b = U_{bo} = -U_2 = -1.3 \text{ V}$

c 点的电位 $V_c = U_{co} = U_c + U_{ao} = 2 - 6 = -4 \text{ V}$

e 点的电位 $V_e = U_{eo} = -U_e = -1 \text{ V}$

负号表示各点的电位均低于机器外壳的电位。

思考题

1-2-1 什么叫参考方向,它与电压、电流的正负有何关系?

1-2-2 如何根据电压的正、负和参考极性判定电压的方向?

1-2-3 电路中有五个点,两点间的电压有几种? 选定参考点后电位有几种?

1.3 电功和电功率

电流经过电路时,电场力对运动电荷做的功叫**电功**,作功的速率叫**电功率**(Power)。若电流与电压的实际方向相同,正电荷由高电位端移向低电位端,电场力做正功,该电路消耗电能;若电流与电压实际方向相反,正电荷由低电位端移向高电位端,电场力做负功,非电场力推动电荷运动,电路输出电能。知道电路中电流和电压的大小及参考方向,就可算出电功和电功率。

设有任意二端网络,端电压为 U , 电流为 I , 电压与电流的参考方向一致,如图 1-11。在 Δt 的时间内,从电路的参考正极流向参考负极的电荷量为 $\Delta q = I \cdot \Delta t$, 电场力对电荷做的功为 ΔA , 由公式(1-4)可得

$$\Delta A = U \cdot \Delta q = U \cdot I \cdot \Delta t \quad (1-8)$$

ΔA 的正负与 U 、 I 的正负有关。 U 和 I 的参考方向一致时,若 ΔA 为正,说明 U 、 I 同时为正或同时为负,二端网络吸收电能;若 ΔA 为负,说明 U 、 I 的实际方向相反,电场力做负功,二端网络输出电能,如图 1-11。

电场力做的功 ΔA 与作功时间 Δt 的比值,表示单位时间内电路消耗的电能,即电路消耗的功率 P , 当 U 、 I 的参考方向一致时,其计算公式为

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta t} = U \cdot I \quad (1-9)$$

当电压、电流随时间变化时,电路消耗的瞬时功率 p 可用下式计算

$$p = \frac{dA}{dt} = u \cdot i \quad (1-10)$$

功率的单位是瓦特^① (W), 较小的单位为毫瓦(mW), 较大的单位为千瓦(kW)。

功率的绝对值表示电路消耗或输出电能的速率。当电压与电流的参考方向一致时,上述公式的计算结果表示电路消耗的电功率,计算结果为正,表示电路消耗功率为正,电路消耗电能;

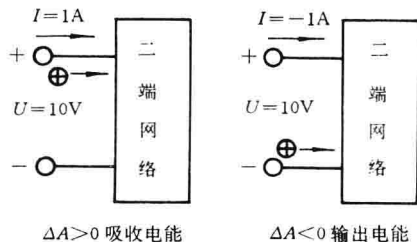


图 1-11 电流作功

^① 瓦特 (J. Watt, 1736~1819), 英国工程师和发明家, 蒸汽机的发明者。

计算结果为负,表示电路消耗功率为负,实际上电路向外输出电能。

在电路分析中,常常有部分电路的电压与电流的参考方向相反,此时公式(1-9)和(1-10)的物理意义也应相反,上述公式的计算结果表示该部分电路的输出功率;计算结果为正,表示电路输出功率为正,电路输出电能;计算结果为负,表示电路输出功率为负,实际上电路在消耗电能。

若二端网络的瞬时电功率为 p ,则在时间 T 内,电路所消耗或输出的电能为

$$W = \int_0^T p \cdot dt \quad (1-11)$$

直流电路中,电功率不随时间变化,设为 P ,则电路消耗或输出的电能为

$$W = P \cdot T \quad (1-12)$$

若功率的单位为(W),时间的单位为(s),则电能的单位为焦耳(J)。实际上,功率常以(kW)为单位,时间常以小时(h)为单位,则电能的单位为千瓦小时(kW·h)。1千瓦小时的电能也叫做1度电,所以

$$1 \text{ 度电} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

例 1-5 教室中有 40 W 日光灯 12 只,每只耗电 $P_1=47 \text{ W}$ (包括灯管及镇流器的耗电),每天用电 4 小时,每月按 30 天计算,每度电收费 0.25 元,问一月的电费为多少?

解 12 只灯的总功率为:

$$P = 12P_1 = 564 \text{ W} = 0.564 \text{ kW}$$

一月用电时数:

$$T = 30 \times 4 = 120 \text{ h}$$

一月共用电:

$$W = P \cdot T = 67.68 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

应付电费为: $67.68 \times 0.25 = 16.92$ 元。

例 1-6 电池向小灯泡供电,电流 $I=0.3 \text{ A}$,电池端电压 $U_s=3 \text{ V}$,实际方向和极性如图 1-12(a),求灯泡及电池的电功率。

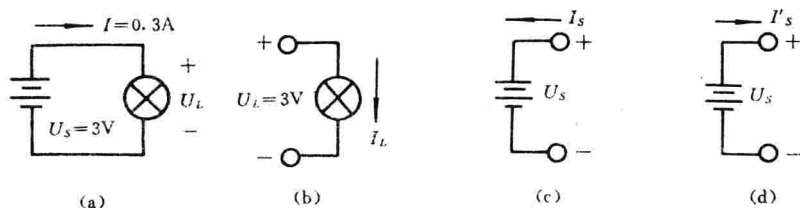


图 1-12 例 1-6 图

解 1. 灯泡部分的电路如图 1-12(b),设其端电压 U_L 与电流 I_L 的参考方向一致,方向如图。由题意可知 $U_L=U_s=3 \text{ V}$, $I_L=I=0.3 \text{ A}$,电路消耗的功率为

$$P_L = U_L \cdot I_L = 3 \times 0.3 = 0.9 \text{ W}$$

计算结果为正,说明灯泡的确消耗电能,为耗能元件。

2. 电池部分的电路如图 1-12(c),设电池中电流 I_s 的参考方向与其端电压 U_s 的参考

方向一致,方向如图。由于 I_s 的参考方向与实际电流 I 的方向相反,故 $I_s = -I = -0.3 \text{ A}$, 电池消耗的电功率为

$$P_s = U_s \cdot I_s = 3 \times (-0.3) = -0.9 \text{ W}$$

由于 U_s 与 I_s 的参考方向一致, P_s 为负说明电池消耗功率为负,实际上输出电能,输出功率为 0.9 W 。

3. 若取电池电流的参考方向与其端电压 U_s 的参考方向相反,如图 1-12(d) 中的 I'_s , 则 $I'_s = I = 0.3 \text{ A}$, 电池输出的电功率为

$$P'_s = U_s \cdot I'_s = 3 \times 0.3 = 0.9 \text{ W}$$

由于电流的参考方向不同, P'_s 与 P_s 的计算结果相差一个负号,但均说明电池输出电功率为 0.9 W , 与灯泡消耗的电功率相等,符合能量守恒定律。

思考题

1-3-1 电流和电压的参考方向相同和相反时 $P=U \cdot I$ 表示的物理意义有何不同? 计算结果为负说明什么问题?

1-3-2 试写出电流和电压参考方向相反时电路消耗功率的计算公式。

1-3-3 试写出电流和电压参考方向相同时电路输出功率的计算公式。

1.4 欧姆定律与电阻元件

电流、电压和电功率是描述电路特性的基本物理量,是学习电路理论必须搞清楚的基本概念。掌握了这些基本概念后,我们就可以开始研究电路的基本元件:电阻元件、电压源和电流源。研究各个元件时,关键在于掌握各元件的伏安特性。所谓元件的伏安特性,就是元件的端电压与元件中的电流之间的函数关系。知道了元件的伏安特性,就可算出元件的电功率;知道了电路中各元件的伏安特性,就可以进一步掌握整个电路的工作状态。由此可见,了解元件的伏安特性,是分析计算电路的基本条件。

欧姆定律(Ohm's Law)是说明常用导体伏安特性的重要定律。1826 年,欧姆^①通过实验发现:当导体温度不变时,导体中的电流 I 与导体两端的电压 U 成正比,电流的方向是由高电位端流向低电位端。这就是有名的欧姆定律。

当 U 、 I 的参考方向一致时,欧姆定律可表示为

$$U = I \cdot R \quad \text{或} \quad I = \frac{U}{R} \quad (1-13)$$

式中 R 为导体两端电压 U 与导体中的电流 I 的比值,叫做导体的电阻(Resistance),即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-14)$$

电阻的单位为欧姆(Ω),较小的单位为毫欧($\text{m}\Omega$),较大的单位为千欧($\text{k}\Omega$),兆欧($\text{M}\Omega$)。

在电路计算中,常常使用电导的概念。一段无源电路的电流 I 与电压 U 的比值叫做这段电路的电导 G (Conductance)。电导的定义式为

^① 欧姆 (G. S. Ohm, 1787~1854), 德国物理学家。