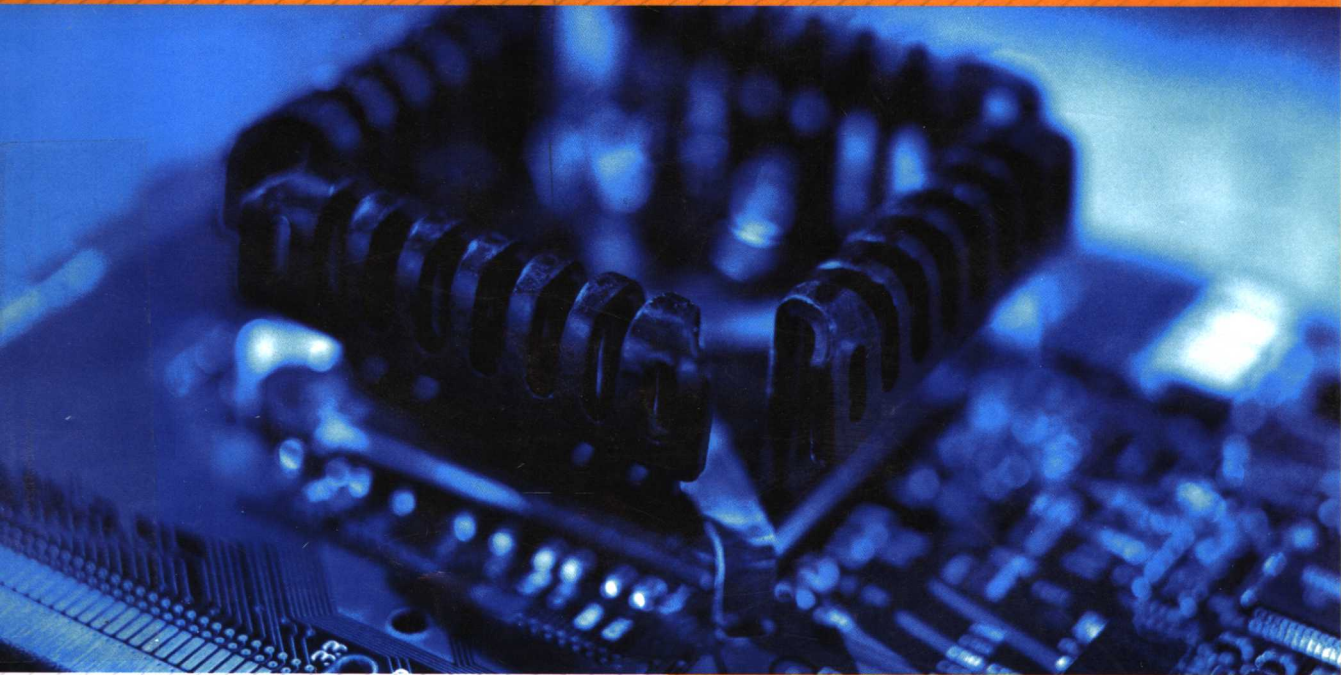




21 世纪高等院校应用型规划教材

电工与电子技术

主 编 祝红芳 江路明
主 审 林知秋



TM/118

2007

21 世纪高等院校应用型规划教材

电工与电子技术

主 编 祝红芳 江路明

主 审 林知秋

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

本书是根据高等院校非电专业电工电子技术课程的特点和电工电子技术飞速发展的新形势而编写的教材，作为高等院校工科非电专业学生学习电工与电子技术的教材，经适当取舍，也可作为成人专科教育和中等职业学校教材及企业工程技术人员的培训教材。

“电工电子技术”是非电专业的技术基础课程。通过本课程的学习，使学生掌握应用型工程技术人才必须具备的电工与电子技术理论知识，具有较强的实践能力，为学习后续课程及从事实际工作奠定良好的基础。

全书共分14章，前七章为电工技术模块，主要介绍电工基础、电机及其拖动等内容；后七章是电子技术模块，主要讨论模拟电路与数字电路等内容。为满足教学需要，突出对学生实践能力的培养，我们还编写了与之配套的教材，即《电工与电子技术实验指导》。它包括常用电工电子仪器设备的使用、基本电子元器件的识别与检测、电工电路技术实训、模拟电子技术实训、数字电子技术实训等模块，精选了五十余个实训课题。

本书总结了编者长期从事电工与电子技术教学的经验，尤其是近年来在教学改革不断深化的新形势下的教学实践体会，并吸取了各校同行的意见与建议。在编写过程中，力求做到文笔流畅、语言精练、重点突出、图文并茂、深入浅出、适应性强。教材内容的取舍以应用为目的，遵循理论教学内容“必须，够用”的原则，注重新技术、新方法、新工艺的应用，联系工程实际，培养学生的创新精神与实践能力；不强求理论体系的完整性，不追求难度与深度，避免出现过于繁杂的数学推导及大篇幅的理论叙述。使学生在已掌握的数学和物理知识的基础上，能够学以致用，融会贯通。

本书由祝红芳、江路明任主编。参加编写的教师有：祝红芳（第1、3章），李汉珊（第2章），黎小桃（第4章），辛峰（第5、9章），黄运发（第6、7章），伍振铭（第8、12、13章），谢华东（第10、11章），江路明（第14章）。成稿后由主编总纂定稿，林知秋主持审稿工作。

限于编者的水平，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
第1章 直流电路	(3)
1.1 概述	(3)
1.2 基尔霍夫定律	(7)
1.3 电压源与电流源	(14)
1.4 叠加定理	(19)
1.5 戴维南定理	(22)
习题与思考题	(25)
第2章 正弦交流电路的分析	(29)
2.1 正弦交流电的概念	(29)
2.2 同频率正弦交流电的和与差	(40)
2.3 纯电阻电路	(42)
2.4 纯电感电路	(45)
2.5 纯电容电路	(48)
2.6 电阻、电感、电容串、并联电路	(52)
2.7 谐振电路	(58)
习题与思考题	(66)
第3章 三相正弦交流电路	(68)
3.1 三相交流电源	(68)
3.2 三相负载的连接	(72)
3.3 三相电功率	(75)
习题与思考题	(77)
第4章 磁路与变压器	(78)
4.1 磁导率	(78)
4.2 铁磁物质的磁性	(79)
4.3 简单磁路的概念	(81)
4.4 电磁铁	(83)
4.5 涡流	(85)
4.6 变压器的基本构造及工作原理	(86)

4.7 变压器的功率和效率	(90)
4.8 三相变压器	(92)
4.9 特殊变压器	(92)
习题与思考题	(95)
第5章 交流电动机	(96)
5.1 三相异步电动机的基本构造	(96)
5.2 旋转磁场的产生	(98)
5.3 异步电动机的运转原理	(101)
5.4 异步电动机的工作过程	(102)
5.5 异步电动机的转矩特性	(103)
5.6 异步电动机的启动、调速、制动和反转	(106)
5.7 异步电动机的功率损耗与效率	(111)
5.8 三相异步电动机的铭牌	(112)
5.9 单相异步电动机	(113)
5.10 同步电动机	(116)
习题与思考题	(119)
第6章 直流电动机	(121)
6.1 直流电动机的基本原理	(121)
6.2 直流电动机的构造和励磁方式	(123)
6.3 直流电动机的工作过程和机械特性	(126)
6.4 直流电动机的启动、调速和反转	(129)
习题与思考题	(131)
第7章 电力拖动	(133)
7.1 选择电动机的一般原则	(133)
7.2 常用的低压控制和保护电器	(136)
7.3 鼠笼式异步电动机的接触控制	(142)
7.4 鼠笼式异步电动机的自动控制	(146)
7.5 安全用电	(149)
习题与思考题	(151)
第8章 半导体二极管与三极管	(153)
8.1 半导体的基本特性与PN结	(153)
8.2 半导体二极管	(157)
8.3 半导体三极管	(160)
习题与思考题	(166)

第9章 三极管放大电路	(169)
9.1 单管电压放大电路	(169)
9.2 图解分析法	(173)
9.3 微变等效电路分析法	(180)
9.4 多级放大电路	(185)
9.5 负反馈对放大电路性能的改善	(189)
9.6 射极输出器	(194)
9.7 功率放大电路	(197)
9.8 场效应管及其放大电路	(202)
习题与思考题	(209)
第10章 运算放大器及其应用	(214)
10.1 差动放大电路	(215)
10.2 运算放大器的基础知识	(220)
10.3 运算放大器的基本放大电路	(222)
10.4 运算放大器的应用	(224)
习题与思考题	(229)
第11章 正弦波振荡器	(231)
11.1 正弦波振荡器的工作原理	(231)
11.2 LC 正弦波振荡器	(234)
11.3 石英晶体振荡器	(238)
11.4 RC 正弦波振荡器	(240)
习题与思考题	(243)
第12章 整流与直流稳压电源	(247)
12.1 整流电路	(248)
12.2 滤波电路	(251)
12.3 直流稳压电路	(256)
习题与思考题	(262)
第13章 晶闸管及其应用	(264)
13.1 晶闸管	(264)
13.2 可控整流电路	(268)
13.3 晶闸管的保护	(271)
13.4 晶闸管的触发电路	(272)
13.5 晶闸管应用举例	(274)
习题与思考题	(278)

第 14 章 脉冲与数字电路	(279)
14.1 概述	(279)
14.2 逻辑代数基础	(281)
14.3 基本逻辑门电路	(290)
14.4 组合逻辑电路	(297)
14.5 集成触发器	(303)
14.6 寄存器	(310)
14.7 计数器	(312)
14.8 模拟量与数字量的相互转换	(315)
习题与思考题	(321)
附录一 本书常用文字符号一览表	(325)
附录二 本书常用图形符号一览表	(328)
部分习题与思考题答案	(330)
参考文献	(333)

绪 论

一、电能的应用及特点

在现代社会中,电能的应用范围是极为广泛的。现代一切科学技术的发展无不与电有着密切的联系。今天,电能的利用已远远超出作为机器动力的使命,电气化程度的高低已成为衡量一个国家生产技术和综合国力的主要标志之一。

电的应用有两大方面:一方面是作为一种能量——电能来应用;另一方面是作为一种信息——电信号来应用。

电能之所以能得到如此广泛的应用,是因为它具有无可比拟的优越性,这主要表现在:

(1) 便于转换。电能不仅可以从其他多种形式的能量转换而来,而且它本身也易于转换成其他形式的能量。作为信息,电信号与各种非电信号之间的相互转换也容易实现。

(2) 便于输送。电能可以方便地被输送到远方,而且输电设备简单,输电效率高。电信号还可以以电磁波的形式在空间传播。

(3) 便于控制、测量和调整。利用电能可以达到高度电气化、自动化,从而提高劳动生产率和产品质量创造有利条件。

作为电能的应用,电动机、电光源、电焊、电镀与电解等,在生产和生活中早已十分普及。作为电信号的应用,生产检测与控制、科学实验与探测、通信与广播、电影与电视等,也日益广泛。

现代社会要求人们能迅速而准确地计算和处理日益浩繁的各种数据和信息。电子计算机就是应用电信号来模拟、存储、传送、处理和控制在各种数据和信息的。大规模半导体集成电路的问世,极大地促进了微型电子计算机的发展,为普及运用电子计算机、实现高度自动化和发展人工智能,奠定了坚实的基础。

二、电工与电子学的发展概况

电工学是研究电磁理论的基本知识及其应用的一门学科。电工学发展迅速,且日益渗透到其他学科领域,在我国社会主义现代化建设中占有重要的地位。

翻开浩瀚的历史画卷,可以看到,人类很早就已发现电和磁的现象。我国古籍中就有“慈石召铁”和“琥珀拾芥”的记载,而指南针则是这一时期电磁方面的最为卓著的发明。

18 世纪末和 19 世纪初是电磁理论发展史上最为重要的时期。由于生产发展的需要,在电磁现象方面的研究工作发展迅速,相继涌现出一大批伟大的科学家和发明家。从库仑到奥斯特,从安培到欧姆,从法拉第到楞次,从焦耳到雅可比,从多里沃·多勃罗沃尔斯基到麦克斯韦,从赫兹到马可尼以及波波夫等。他们的辛勤劳动与聪明才智,带来了电磁理论上的一个又一个的突破:从电荷概念开始具有定量的意义到电磁感应现象的发现,从电机理论到电机工程,从电磁波理论到无线电技术等。就这样,电磁学从现象到理论,从理论到应用,一步步地将人类文明推向前进。

电子学是最近一百多年发展起来的一门新科学。1883 年美国发明家爱迪生发现了热电子效应。1904 年弗莱明据此制成了电子二极管。1906 年美国的法福雷斯发明了电子三极管。1948 年,美国贝尔实验室制成晶体管,以此取代了电子管。1958 年,集成电路的第一个样品见诸于世,以后又出现了大规模和超大规模的集成电路……

从 1946 年第一台电子计算机问世以来,已经历了四代。目前,第五代人工智能计算机正在研制开发之中。

数字控制和数字测量也在不断发展并得到日益广泛的应用。

在工业上晶闸管也获得广泛应用,使半导体技术进入了强电领域。

三、本课程的目的、任务、内容和学习方法

电工与电子学是高职工科非电专业的技术基础课程。它的目的和任务是:使学生在原有的物理知识的基础上,掌握电工与电子技术的基础理论知识,并受到较强的实践技能的训练,能正确地使用本专业生产中常见的电气设备,为学习后续课程以及今后从事技术工作打下必要的基础。

本课程主要包括电工学与电子学两大部分。电工学部分主要包括:电工基础、电机及其拖动。电子学部分主要包括:模拟电路和数字电路。

电工与电子学是一门理论性和实践性都比较强的课程,怎样学习才能获得较好的效果呢?首先要有正确的学习目的和端正的学习态度,然后就是要讲究学习方法。就学习方法而言,我们提供以下几点供参考:

(1) 牢固掌握基础理论知识,注意各部分知识的内在联系。对物理概念要理解其意义;做数学推演和运算时,应注意过程的物理意义及分析方法;注重思考,培养一定的自学能力,不要死记硬背。

(2) 理论与实践紧密结合。密切结合所学知识完成一定数量的习题和作业,勤于动手,做好各项实验,学会一些电工电子技术操作技能和常见仪器仪表使用等。

(3) 掌握重点。对教学大纲中规定的“三基”内容,即一个非电专业的工程技术人员应该具备的电工与电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,应切实掌握;在这个基础上,再结合专业特点学习有关内容。

第1章

直流电路

1.1 概 述

人们在日常生活中或在生产和科研实践中广泛地使用着种类繁多的电路。例如为了采光而使用的照明电路；收音机和电视机中将微弱信号进行放大的放大电路；从各种不同信号中选取所需信号的输入调谐电路；交通运输中使用的各种信号的控制电路；传输电能的超高压输电线路；自动化生产线上的各种专门用途的电路等。总之，人们的日常生活和国民经济的发展离不开各种电路。

本章在物理学的基础上阐述直流电阻电路的分析和计算。它所涉及的基本理论和方法具有普遍的意义，只要稍加扩展也可适用于交流电路，是分析与计算电路的理论基础。

1.1.1 电路的构成和电流的方向

电路就是电流通过的路径。电路一般由电源、负载和中间环节三部分构成。电源是产生或提供电能的装置，如各种发电机、稳压电源以及电池等装置。负载即用电设备，它是取用电能的装置，其作用是将电能转换为其他形式的能量（如机械能、热能、光能等）为人们所利用。常见的电灯、电动机、电炉和扬声器等都是电路中的负载。电源和负载之间的部分是中间环节，包括连接导线、控制电器和保护、测量装置等，它的作用是传递、分配和控制电能。

电路的功能是实现能量的输送、转换和控制，或者实现信息的传递、处理和储存。

手电筒电路就是一个简单的实用电路。该电路是由一个电源（干电池）、一个负载（灯）、一个开关和连接导体（手电筒金属条或金属壳）所组成，如图 1.1 所示。

电流可分为直流电流和交流电流两种。方向保持不变的电流称为直流电流，通称直流。方向和大小都保持不变的电流称为恒定电流，通常也简称为直流。方向和大小随时间作周期性变化而且在一周期内的平均值为零的电流称为交流电流，通称交流。本章讨论的直流电流，是指电路中通过的恒定电流。

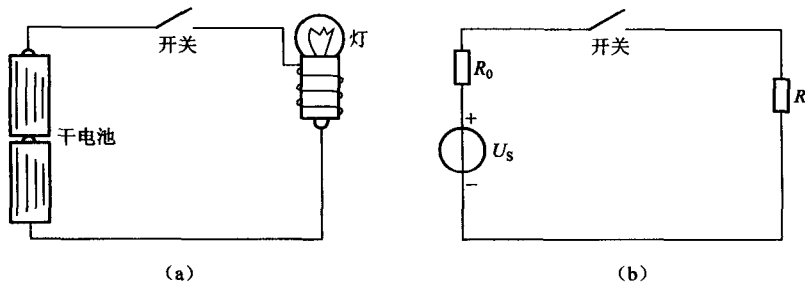


图 1.1 手电筒电路
(a) 实际电路; (b) 电路模型

电流的实际方向习惯上指正电荷移动的方向。简单电路中电流的实际方向容易按电源极性来判定。在比较复杂的电路中, 电流方向往往难于直观判断。为了分析计算电路的需要, 我们引入参考方向的概念。

电流在导体中流动的实际方向有两种可能, 任意选取其中一个方向作为参考标准, 称为参考方向。设电路中某一未知电流的参考方向已经选定, 如果求得此电流为正值, 说明电流的实际方向与选定的参考方向一致; 若求得此电流为负值, 说明电流的实际方向与选定的参考方向相反。可见, 电流的参考方向是预先任意选定的, 参考方向一经选定, 电流值的正、负也随之确定; 若不选定参考方向, 讨论电流值的正、负便失去意义了。

同理, 电动势与电压的参考方向也可以任意选取, 当实际方向与参考方向一致时, 电动势与电压为正值, 反之为负值。

本书规定, 参考方向用实线箭头表示, 实际方向用虚线箭头表示。

1.1.2 电路的工作状态

电路在实际工作中, 根据不同的需要和不同的负载情况, 有三种可能的工作状态: 通路、断路和短路。

1. 通路

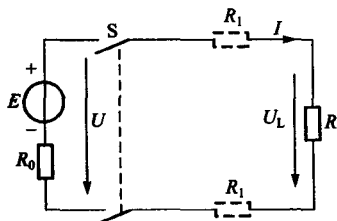


图 1.2 电路图

通路(负载状态)就是电源和负载接成闭合回路, 如图 1.2 所示的电路中开关 \$S\$ 合上时的工作状态。其电源通过开关与负载连接, 有电流通过负载, 电源向负载输送功率, 负载的电压降等于路端电压 \$U\$:

$$U = U_L = \frac{R}{R_0 + R} E \quad (1.1)$$

短距离输电导线的电阻很小, 常忽略不计。若输电导线较长, 就要考虑它的电阻。实际应用中为了简化计算, 常用

等值的集中电阻来代表实际导线的分布电阻,如图1.2中用虚线表示的电阻 R_1 。

输电导线的横截面积应根据线路上的容许电压损失(一般规定为额定电压的5%)和最大工作电流适当选定,过小则导线上的电压损失太大,过大则浪费材料。

电器设备的额定值是制造厂家为用户提供的,它是考虑设备安全运行的限额值,也是设备经济运行的使用值。通常制造厂规定了在一定的工作条件下电器设备的额定电压、额定电流和额定功率等。设备只有在额定值情况(额定工作状态)下运行,才能保证它的寿命。

如果外加电压大大高于额定电压,电器设备将被烧毁。如果通过设备的电流超过额定值(过载状态),设备温度过高,不仅影响使用寿命,有些材料甚至会出现炭化,造成设备和人身事故。如果外加电压或电流比额定值小得多,有些电器会处于不良工作状态,甚至不能工作。例如220 V、40 W的灯泡,若接到110 V的电压上,则灯光昏暗;若半导体收音机的干电池电压过低,则收音机音量微弱,甚至不能收音。

2. 断路

断路(开路)就是电源与负载没有接通成闭合回路,如图1.2中开关S断开时的工作状态。断路状态相当于负载电阻等于无穷大,电路的电流为零,即

$$R = \infty, I = 0 \quad (1.2)$$

电源不输出电功率,即

$$P_S = 0, P_L = 0 \quad (1.3)$$

这种情况称为电源空载。电源空载时的端电压称为断路电压或开路电压。电源的开路电压 U_{oc} 就等于电动势 E :

$$U_{oc} = E \quad (1.4)$$

3. 短路

从广义上讲,电路里不同电位的两点被导线直接相连,使该两点的电压为零,这种现象称为短路。图1.3所示的是短路时的情况,图中折线是指明短路点的符号。电源输出的电流就以短路点为回路而不通过负载。

若忽略输出导线的电阻,短路时回路中只存在电源的内阻 R_0 。这时的电流为

$$I_{sc} = \frac{E}{R_0} \quad (1.5)$$

I_{sc} 称为短路电流。因为电源内阻 R_0 一般都比负载电阻小得多,所以 I_{sc} 总是很大的。

如果短路状态不迅速排除,由于电流热效应,很大的短路电流将会烧毁电源、导线以及短路回路中所接的电流表和开关等,以致引起火灾。

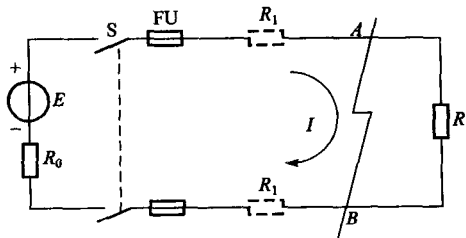


图1.3 短路示意图

短路是一种严重的事故，应尽量预防。产生短路的原因往往是错误的接线、误操作和绝缘损坏，因此在接线时要避免错误，遵守操作规程，还应经常检查电气设备和线路的绝缘情况。此外，为了防止短路事故所造成的后果，通常在电路中安装熔断器或其他自动保护装置，一旦发生短路，能迅速切断故障电路，从而防止事故扩大，保护电气设备和供电线路。

有时为了某种需要，人为地将电路中的某一部分短路。例如为了防止电动机启动电流对串接在电动机回路中的电流表的冲击，在启动时先将电流表短路，使启动电流旁路通过，待电动机启动完成后断开短路线，恢复电流表的测量作用。这种有用的短路称为短接。

1.1.3 电路中的电位计算

1. 电位的概念

了解电路中某些点的电位（或电势），比较两点间电位的高低，对分析电路十分有用。

在电路中任选一点做参考点，则某点的电位就是由该点到参考点的电压。电位用字母 V 表示。参考点本身的电位，就是参考点到参考点之间的电压，显然为零，所以参考点又叫零电位点。

参考点是可以任意选定的，但一经选定之后，各点电位的计算即以该点为准。如果换一个参考点，则各点电位也就不同，即电位随参考点的选择而异。

在工程中常选大地作为参考点，即认为大地电位为零。在电子线路中常取机壳或公共点作为电位的参考点。接地与接机壳（或公共点）的表示符号如图 1.4 所示。

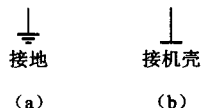


图 1.4 接地与接机壳（或接公共点）的表示符号

必须指出，当所选的参考点变动时，各点的电位值也相应变动，但两点间的电压则不改变。即电压与参考点的选择无关。

电位的单位也是伏（V）。

2. 电路中的电位计算

电位虽然是指某一点而言，但实际上还是指两点之间的电压，只不过这第二点是规定了的，是指参考点。因此，会计算电路中两点的电压，也就会计算电位，方法完全一样。下面举例说明。

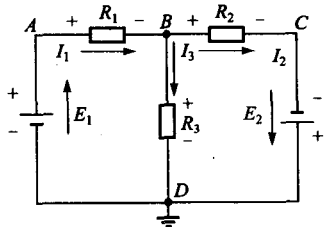


图 1.5 电位分析举例

以图 1.5 所示电路为例，计算电路中各点的电位。

(1) 首先选定 D 点为参考点，若电路中无已知的接地点，则可任意选取一点为参考点。

(2) 选定参考方向：设电源的正负极已经标定，任意选择电流的参考方向，将负载的电流流入端标为正极，流出端标为负极，如图 1.5 所示。对每一个负载和电源而言，正极

是其高电位端, 负极是低电位端。

(3) 求某点电位时, 选定一条从该点到参考点的路径 (尽可能选最简单的路径)。从该点出发沿此路径“走”到参考点, 一路上经过的无论是电源还是负载, 只要是从元器件的正极到负极, 就取该电位降为正值, 反之就取为负值。然后将经过的全部电位降相加 (代数和), 就得到该点的电位。求 A 点的电位时, 可选定 $A \rightarrow E_1 \rightarrow D$ 这条最简单的路径, 只经过一个元器件即电源 E_1 。显然, A 点电位就等于正的 E_1 , 则

$$V_A = E_1$$

再求 B 点的电位, 选取路径 $B \rightarrow R_3 \rightarrow D$, 也是从正极到负极, 故此电压 $R_3 I_3$ 也取正值, 得

$$V_B = R_3 I_3$$

最后求 C 点的电位, 选取路径 $C \rightarrow E_2 \rightarrow D$, 经过 E_2 时是从负极“走”到正极, 即 C 点电位低于 D 点的电位, 故此电位降应取负值, 即

$$V_C = -E_2$$

必须指出: 参考点选定后, 电路中各点电位就有了确定值, 而与计算电位时选择的路径无关。因此, 上面求 A 、 B 、 C 三点电位也可经过其他路径来计算, 结果完全相同。例如 C 点电位可通过三条不同的路径求出:

$$V_C = -E_2 = -R_2 I_2 + R_3 I_3 = -R_2 I_2 - R_1 I_1 + E_1$$

例 1.1 如图 1.6 所示三极管电路, $E_C = 15 \text{ V}$, $R = 3 \text{ k}\Omega$, 电源内阻忽略不计。若 $I = 4 \text{ mA}$, 求 A 、 C 两点的电位。

解 求 A 点电位, 选路径 $A \rightarrow E_C \rightarrow E$, 经过 E_C 时由负极到正极, 故 $V_A = -E_C = -15 \text{ V}$ 。求 C 点电位时, 可将 C 、 A 间的电压 U_{CA} 加到 V_A 上求得

$$\begin{aligned} V_C &= U_{CA} + V_A = RI + V_A \\ &= 3 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-3} - 15 \text{ V} \\ &= -3 \text{ V} \end{aligned}$$

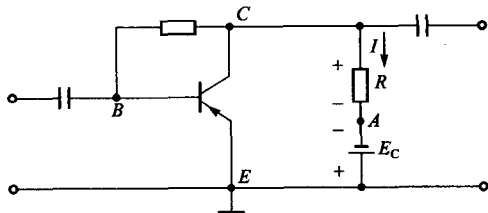


图 1.6 例 1.1 附图

可见 A 、 C 两点的电位都比参考点 (E) 的电位低。

1.2 基尔霍夫定律

电路的基本定律, 除物理课中学过的欧姆定律外, 主要的还有基尔霍夫定律。

凡运用欧姆定律和电阻串、并联公式就能求解的电路称为简单电路; 否则, 就是复杂电路。基尔霍夫定律不仅适用于简单电路, 也适用于复杂电路。

1.2.1 几个有关的电路名词

(1) 支路：一个复杂电路由许多分支构成，电路中的每个分支称做支路。支路可能是一个元器件，也可能是几个元器件串联而成，但无论支路中有几个元器件，只要通过它们的电流是一个，那它们就属于一条支路。如图 1.7 中 $efab$ 就是一条支路，它由两个元器件串联而成。 be 也是一条支路，也是由两个元器件串联而成的。 $bcde$ 又是一条支路，由一个元器件构成。 $efab$ 称为有源支路， $bcde$ 称为无源支路。

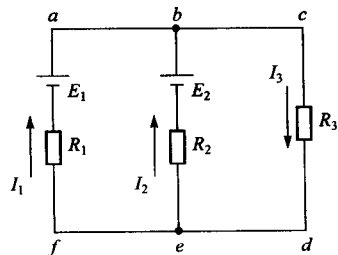


图 1.7 电路名词定义用图

(2) 节点：三个或三个以上支路的汇接点称做节点。如图 1.7 中的 b 点和 e 点都是节点。

(3) 回路：电路中任何一个闭合路径称为回路。如图 1.7 中有三个回路，它们分别为 $befab$ 、 $bedcb$ 、 $abcdefa$ 。构成一个电路至少要有有一个闭合回路，只有一个简单的回路的电路，称做单回路电路。

1.2.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL) 用以确定节点处各电流间的关系。即在任一时刻，流入一个节点的电流总和等于从该节点流出的电流的总和。如图 1.7 所示电路中，流进节点 b 的电流有 I_1 和 I_2 ，它们的总和是 $I_1 + I_2$ ，而由节点 b 流出的电流只有 I_3 ，根据基尔霍夫电流定律，可写出节点 b 的电流方程

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.6)$$

这个定律的理论基础是电流的连续性原理和电荷守恒定律。

上述节点电流方程可改写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1.7)$$

式 (1.7) 说明了汇聚于某节点的诸电流的代数和等于零。

在列节点电流方程以前，先要选定各支路电流的参考方向，通常把流进节点的电流前面取正号，而流出节点的电流前面取负号。图 1.8 所示电路有五条支路的电流汇聚于一个节点，参考方向均已选定，其中 I_1 、 I_2 、 I_4 是流进节点，应取正号，而电流 I_3 、 I_5 是由节点流出，应取负号，则该节点的电流方程为

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

基尔霍夫电流定律对于包围着几个节点的封闭面也是适用的。如图 1.9 中虚线所示的封闭面内有三个节点，各支路电流的参考方向已选定如图所示，则三个节点的电流方程为

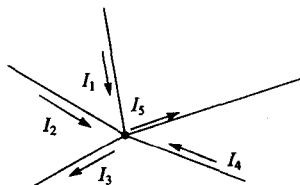


图 1.8 基尔霍夫电流定律的说明

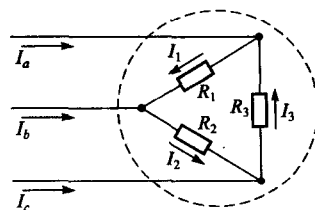


图 1.9 基尔霍夫电流定律的推广

$$I_a = I_1 - I_3$$

$$I_b = I_2 - I_1$$

$$I_c = I_3 - I_2$$

将上面三式相加便得

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

或者写成

$$\sum I = 0$$

可见通过任一封闭面的电流代数和也等于零。

1.2.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 (KVL) 用以确定一个回路中各支路电压间的关系。如图 1.10 (a) 所示的闭合电路中, 假定 $E_1 > E_2$, 则回路电流为

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R + R_1 + R_2} \quad (1.8)$$

把式 (1.8) 改写成电压的形式为

$$E_1 = E_2 + IR + IR_1 + IR_2 \quad (1.9)$$

式 (1.9) 表明了在一个闭合电路内, 从闭合回路的任意点起始, 沿回路环绕一周, 再回到该点, 电位升高的总和等于电位降低的总和, 这就是基尔霍夫电压定律所表示的内容。

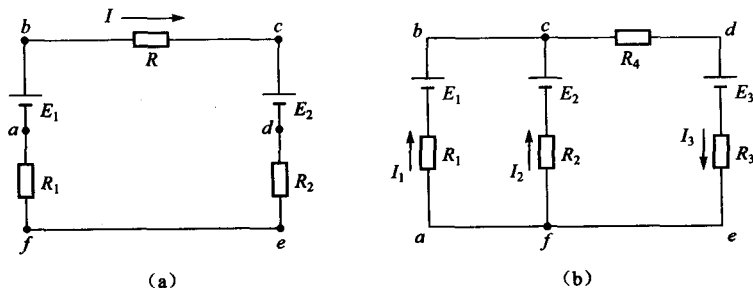


图 1.10 基尔霍夫电压定律的说明

(a) 简单电路; (b) 复杂电路

电阻两端的电位是升高还是降低是根据电流方向来确定的。顺电流的方向是电位降低,降低的数值等于电阻两端电压的数值,即 $U = IR$,逆电流的方向是电位升高,即 $U = -IR$,式中的负号表示电位升高(显然电位降低取正号)。

对于回路中的电源,其正极电位总是高于负极电位,其数值为电源电动势的数值 E ,电动势的实际方向由负极指向正极。在闭合回路中电源的电位是升高还是降低也可以根据其电流的方向来确定。当电动势的方向与回路中电流的方向相同时,该电源处于电源状态下工作,输出电能,电位升高。若电动势的方向与回路中电流方向相反,则该电源处于负载状态下工作,非但不输出电能,反而吸收电能,所以电位降低。无论是电位升高还是降低,其数值都等于电源电动势的数值 E 。

如图 1.10 (a) 所示,沿回路 $abcdefa$ 环绕一周,电位升高的总和为 E_1 ,即从 a 到 b 是电位升高,其值为 E_1 ,因为回路电流的方向与电动势 E_1 的方向相同。电动势 E_2 的方向与回路电流的方向相反,因此从 c 到 d 是电位降低,其值为 E_2 。又三个电阻上的电位降低之和为 $IR + IR_1 + IR_2$,可见电位升高的总和等于电位降低的总和,即为式 (1.9) 所示。

对于复杂电路中的某一回路而言,也完全可以根据电位升高的总和等于电位降低的总和列出如式 (1.9) 形式的回路方程,但是,有时由于电流的实际方向难以确定,因而回路中的实际电位的升高或降低也就难以确定。在这种情况下,可以预先假定电流的方向,根据所假定的电流方向来确定回路中某处电位是升高还是降低,列出回路方程。

现在以图 1.10 (b) 所示的复杂电路为例,图中已标明了电流的参考方向。在 $abcfa$ 回路中,从任意一点出发,取顺时针的方向循行一周,则在这个方向上 E_1 和 $I_2 R_2$ 为电位升高, E_2 和 $I_1 R_1$ 为电位降低,回路方程为

$$E_1 + I_2 R_2 = E_2 + I_1 R_1 \quad (1.10)$$

或者写为

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 \quad (1.11)$$

从式 (1.11) 得出的结论是:在电路的任意一个闭合回路中,电动势的代数和等于各电阻上电位降的代数和。即

$$\sum E = \sum IR \quad (1.12)$$

这就是基尔霍夫电压定律的数学表达式。

电动势的正、负是根据预先选定回路的环绕方向来确定,即与回路的环绕方向相同的电动势为正,与环绕方向相反的电动势为负。

对于电阻上的电位降的正负,同样也根据预先选定的环绕方向来确定,即电流方向与回路的环绕方向相同时,该电流在电阻上的电位降为正,电流方向与回路的环绕方向相反时,该电流在电阻上的电位降为负。

将式 (1.11) 移项可得