

高等专科学校机电一体化专业系列教材

电 路 与 电 机

主 编 张安泰
副主编 王书城
参 编 罗桂娥
张淑丽
主 审 张品福



机 械 工 业 出 版 社

序

随着微处理器和微型计算机的问世,电子计算机已深深介入机械制造的各个领域,一系列机、电、计算机一体化的新产品诞生。为适应这个变化,迫切需要高等工业专科学校培养制造、调试、使用、维修机电一体化产品的技术人才。有鉴于此,不少高等工业专科学校在多年探索机制专业改造并取得经验的基础上正在创办机电工程(机电一体化)专业,以满足社会的需要,但各校对新开专业缺乏经验,缺少教材和师资,在此形势下,1995年3月机械工业部教材编辑室在全国机制专业教材编审委员会和全国高等工业专科学校机制专业协会的协助下于南京召开了高等工业专科学校机电一体化教学与教材研讨会,研讨了机械行业技术发展的大趋势,认为办好机、电、计算机紧密结合的新机电工程专业,培养制造、调试、使用、维修机电一体化产品的机电一体化人材是非常必要的。为给机电一体化专业奠定物质基础,会议决定立即组织第一批急需的机电一体化专业系列教材,初步确定了各教材的主编、协编和主审人员。1995年4月机械工业部教材编辑室又在长沙召开了各课程编写大纲会,并进一步调整、落实了编审班子。会后各参编教师立即行动,认真撰写,在1995年9月威海召开的审稿会的基础上,历经了一年左右时间,这一套统编教材终于陆续交稿出版。

这批教材的出版是我们对机电工程(机电一体化)专业教学的一种尝试,希望它能满足各校的教学所需,这套教材在组织编写过程中得到了众多学校和老师的热心帮助,在这里特向吴善元、盛善权、黄鹤门、易泳可等老师表示衷心的感谢。

前 言

本书是高等工程专科学校机电一体化专业系列教材，是根据全国高等工程专科学校机电工程专业教材编写大纲研讨会确定的“电路与电机”课程教学大纲编写的，也可供职业大学、业余大学使用。

全书共十章，包括电路和电机两部分，主要内容有电路的基本概念和分析方法、一阶电路的动态分析、正弦交流电路、变压器、直流电机、感应电动机、控制电机等。为了照顾机类专业“电工学”课程选用，本书还增加了电动机的继电接触控制和安全用电常识的内容。

本书在编写过程中，按照教学的要求，同时考虑到后续课程的需要，电机部分尽力照顾到电机拖动的基本知识，以便更好地为专业培养目标服务。

本书着重基本原理及工程计算方法的阐述和应用，编写中力求物理概念清楚。每章开始均有内容提要，章后附有习题，便于读者理解和掌握各章的主要内容。

本书由河南机电高等专科学校张安泰副教授主编，南京机械高等专科学校王书城同志为副主编。书中第一、二、十章由哈尔滨工业高等专科学校张淑丽同志编写，第三、四、五章由王书城同志编写，第六、八章由长沙工业高等专科学校罗桂娥同志编写，第七、九章和安全用电由张安泰同志编写。

全书由天津职业大学张品福副教授主审，张副教授认真地参加了本书教学大纲和编写大纲的讨论、制订，又细致反复地对本书原稿进行了审阅，并主持召开了审稿会，提出了许多宝贵的修改意见。

由于编者水平有限，书中可能有不少缺点和错误，诚恳地希望读者批评指正。

编 者

1995 年 12 月

目 录

序

前言

第一章 电路的基本概念与基本定律	1
第一节 电路与电路模型	1
第二节 电路的基本物理量及其参考方向	2
第三节 欧姆定律	6
第四节 电路的工作状态	7
第五节 基尔霍夫定律	9
第六节 电路中电位的概念及计算	13
习题	16
第二章 电路的分析方法	19
第一节 电阻的串并联及其等效电路	19
第二节 电压源与电流源及其等效变换	24
第三节 支路电流法	27
第四节 叠加原理	29
第五节 戴维南定理	31
习题	34
第三章 一阶动态电路分析	38
第一节 换路定律和电压电流初始值的确定	38
第二节 RC 电路的动态响应	42
第三节 RL 电路的动态响应	48
习题	52
第四章 单相正弦交流电路	56
第一节 正弦交流电的基本概念	56
第二节 正弦量的相量表示法	59
第三节 单一参数元件的交流电路	62
第四节 RLC 串联交流电路	67
第五节 RLC 并联交流电路及功率因数的提高	71
第六节 阻抗的串联和并联	74
习题	78
第五章 三相电路	83
第一节 三相电源	83
第二节 三相负载	86

第三节 三相电路的功率	91
习题	93
第六章 磁路和变压器	96
第一节 磁路的基本概念	96
第二节 交流铁心线圈电路	102
第三节 变压器的构造与分类	104
第四节 变压器的工作原理	106
第五节 变压器的铭牌数据	109
第六节 特殊变压器	112
习题	115
第七章 直流电机	117
第一节 直流电机的结构与工作原理	117
第二节 直流电机的励磁方式	126
第三节 直流发电机	127
第四节 他励直流电动机的机械特性	130
第五节 他励直流电动机的起动、制动和反转	137
第六节 他励直流电动机的调速	140
第七节 铭牌数据与主要系列	145
习题	146
第八章 感应电动机	148
第一节 三相感应电动机的构造	148
第二节 三相感应电动机的工作原理	150
第三节 感应电动机的功率与电磁转矩	154
第四节 三相感应电动机的机械特性和运行特性	158
第五节 三相感应电动机的起动	162
第六节 三相感应电动机的电气制动	166
第七节 三相感应电动机的调速	168
第八节 三相感应电动机的铭牌数据	169
第九节 三相感应电动机的选择	173
第十节 单相感应电动机	176
习题	180
第九章 控制电机	182
第一节 伺服电动机	182
第二节 测速发电机	189

第三节 步进电动机	193	第六节 速度控制	214
第四节 直线电动机	196	习题	215
习题	199	附录	218
第十章 电动机的继电接触控制	200	附录 A 常用电路元件的符号	218
第一节 常用低压电器	200	附录 B 安全用电	221
第二节 笼型感应电动机的点动与单向 起动控制	205	第一节 人体触电	221
第三节 笼型感应电动机的正、反转 控制	207	第二节 接地与接零	222
第四节 行程控制	208	第三节 保护用具与安全用电	225
第五节 时间控制	211	第四节 触电的急救处理	225
		习题答案 (供参考)	229
		参考文献	235

第一章 电路的基本概念与基本定律

本章在物理课程的基础上主要讨论电路的基本物理量,电压和电流参考方向的概念,电路的基本定律以及电路的工作状态和电路中各点电位的计算,这些内容是分析和计算电路的基础。

第一节 电路与电路模型

电路就是电流所通过的路径。它是为了实现某一功能由一些电气设备或元件按一定方式组合起来的。实际的电路组成方式多种多样,但按电路的作用分,常见的有两大类,一类是用于电能的传输与转换,即将电能转换成热、光和机械能等形式的能量;另一类用于信号的传递与处理,如放大、数据采集、声音与图象信息的处理以及存储等。

图 1-1a 是典型的电力系统电路示意图,它的作用是实现电能的传输与转换。它包括电源、负载和中间环节三部分。发电机是电源,它是提供电能的设备。在发电厂内可把热能、水能或原子核能等转换成为电能。除发电机外,电池也是常用的电源。电灯、电动机等都是负载,是取用电能的设备,它们分别把电能转换为光能和机械能。变压器和输电线等是中间环节,它们是联结电源和负载的部分,起到传输与分配电能的作用。

图 1-1b 所示扩音机的电路示意图,是一个典型的信号处理的电路示意图。其中话筒的作用是将声音转换成微弱的电信号,经过放大器,将信号放大,而后通过电路传递到扬声器,把电信号还原为语言或音乐。信号的这种转换和放大,称为信号处理。

在图 1-1b 中,话筒是输出电信号的设备,称为信号源,扬声器是接受和转换电信号的设备,也就是负载,而放大器部分称为中间环节。对于一个完整的电路来说,电源(或信号源)、负载和中间环节是三个基本组成部分,它们是缺一不可的。

以上所述,无论是电力系统电路还是信号处理系统的电路,它们都是由各种不同的电气设备或电路元件组成的,而这些实际的电路元件或器件往往比较复杂,其电磁性能的表现可能是多方面的。例如,实际的日光灯镇流器线圈周围不但存在着磁场,而且要发热,还有一定的电场;白炽灯除了消耗电能外,当通过电流时也会产生微弱的磁场。在我们研究一些器件的电磁性质时,常常只考虑其中起主要作用的某些电磁现象,抓主要矛盾和矛盾的主要方面,而将其其他次要现象忽略(这样做所得结果与实际情况相差不大,在工程上是允许的)。即在一定条件下,突出电路元件主要的电磁性质,忽略其次要因素,把它近似地看作理想电路元件,用理想电

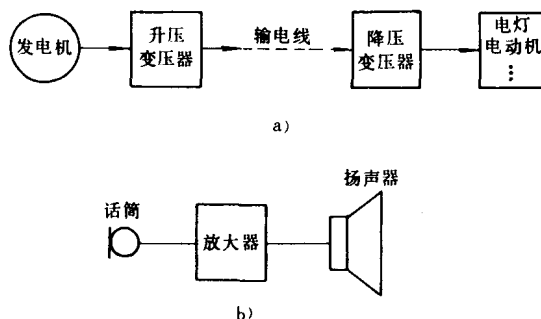


图 1-1 电路示意图

a) 电力系统 b) 扩音机

路元件及其组合来代替实际的电路元件。例如,白炽灯耗用电能的电磁性质可用理想电阻元件来表示;日光灯镇流器的磁场效应可用理想电感元件来表示,当考虑它发热而消耗电能时,日光灯镇流器可用理想电感元件与理想电阻元件的串联来表示。这种用理想化电路元件来表示的实际电路称为电路模型,简称电路。后面我们分析的电路都是指这种电路模型。在电路图中,各种电路元件用规定的图形符号表示。本书常用的电路元件图形符号见附录 A。

图 1-2a 是手电筒的实际电路,其电路元件有干电池、灯泡、开关和导线(筒体),它的电路模型如图 1-2b 所示。干电池是电源元件,可用理想电压源 E 和电阻 R_0 串联来表示;灯泡(电珠)是负载,可用电阻元件 R 来表示;开关和筒体是联结电源与负载的中间环节,其电阻可忽略不计,认为是一种无电阻的理想导体和理想开关。

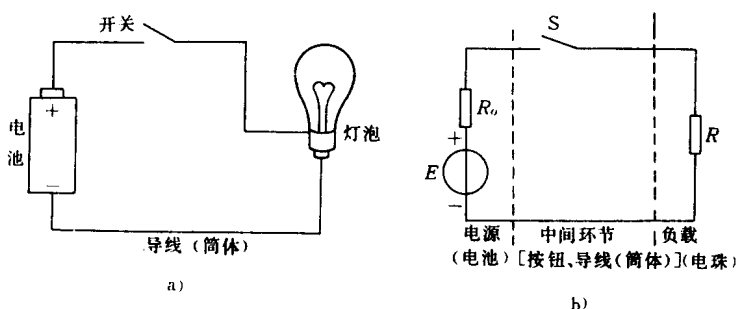


图 1-2 手电筒的电路及电路模型

a) 实际电路 b) 电路模型

第二节 电路的基本物理量及其参考方向

一、电流

电流是由电荷有规则的定向运动而形成的。电流的大小用物理量电流来度量,在数值上它等于单位时间内通过导体某一横截面的电荷量。

设在 dt 时间内通过导体某一横截面 S 的电荷量为 dq (图 1-3),则通过该导体的电流为

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

式中 i ——表示电流,它是时间的函数。

因此,电流既表示了电荷定向移动这一物理现象,又表示了电流这一物理量。如果电流不随时间而变化,即 $dq/dt = \text{常数}$,则这种电流就称为恒定电流,简称直流。直流常用大写字母 I 表示,所以式(1-1)可写成

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中 q ——是在时间 t 内通过导体横截面 S 的电荷量。

我国的法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础的。在国际单位制中,电荷量的单位是库仑(C),时间的单位是秒(s),电流的单位是安培(A)。在计量微小电流时,通常以毫安(mA)或微安(μA)为单位,它们的关系是

$$1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$$

$$1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

电流不但有大小,而且有方向。习惯上规定正电荷移动的方向或负电荷移动的相反方向为电流的实际方向,如图 1-3 所示。

电流的实际方向是一种客观存在,但在分析较为复杂的直流电路时,往往难于事先判断某支路中电流的实际方向;对交流而言,其方向随时间而变,在电路图上也无法用一个箭头来表示它的实际方向。为了解决这一问题,引入电流参考方向的概念,参考方向又称正方向。

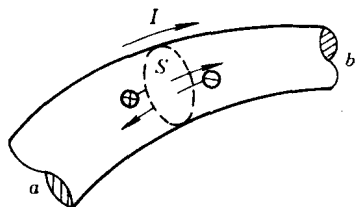


图 1-3 导体中的电流

参考方向可以任意选定,在电路图中用箭头表示,也可用双下标 I_{ab} 表示。电流 I_{ab} 表示参考方向由 a 指向 b 的电流。如果选取的参考方向相反,两者之间差一个负号,即 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。在电路的分析计算中,参考方向与实际方向是否一致是无关紧要的,电流的参考方向不一定是电流的实际方向。当电流的参考方向与实际方向一致时,电流为正值;当电流的参考方向与实际方向相反时,电流为负值。这样,在选定电流参考方向的条件下,根据电流的正负,电流的实际方向也就知道了(如图 1-4 所示)。这里要注意,当电流为负值时,不应该也没必要去改变原来选定的参考方向。

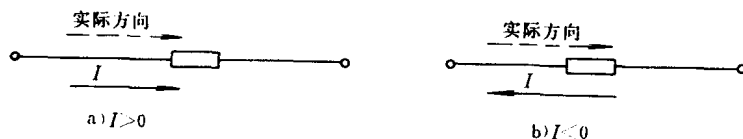


图 1-4 电流的参考方向与实际方向

a) $I > 0$ b) $I < 0$

在分析计算电路时,必须首先选取电流的参考方向,并以此为准去分析计算电路。只有在选定电流参考方向的条件下,电流的正负值才有意义。本书中电路图上所标的电流方向都是指参考方向。

二、电压与电动势

如图 1-5 所示, a 和 b 是电源的两个电极, a 带正电, b 带负电, 因而 a、b 两极间存在电场, 其方向由 a 指向 b。如果用导体将 a、b 两极联结起来, 则在电场力 F_e 的作用下, 正电荷由 a 经导体运动到 b (其实是自由电子由 b 运动到 a, 两者等效), 这时电场力对电荷做功。这种电场力对电荷做功的能力是用电压来度量的。

a、b 两电极间的电压 U_{ab} 在数值上等于把单位正电荷从 a 电极移到 b 电极电场力所做的功, 也就是单位正电荷从高电位端(a 极)移到低电位端(b 极)所失去的电能。

电路中两点之间的电压也称两点间的电位差, 如

$$U_{ab} = v_a - v_b \quad (1-3)$$

式中 v_a —— 为 a 点的电位;

v_b —— 为 b 点的电位。

在国际单位制中, 电压、电位的单位都是伏特, 简称伏(V)。

电压也有方向。电压的实际方向规定为电场力作用下正电荷移动的方向,由高电位端指向低电位端,也就是和电流的实际方向是一致的。但在分析计算电路时,电压的实际方向往往也是未知的,因此在分析计算之前,也必须选取电压的参考方向。当电压的参考方向与实际方向一致时,其值为正;相反时,其值为负。电压的参考方向常用箭头表示,也可用双下标 U_{ab} 或“+”、“-”极性来表示,如图 1-6 所示。和电流的参考方向一样,电压参考方向的选取也是任意的,但通常电压、电流选取一致的参考方向,称为关联参考方向。同样,只有在规定了参考方向以后,电压的正负值才有意义。电压、电流等数学表达式都是对应于一定参考方向的,在学习和应用电路公式和定律时应充分注意,同一电压(或电流)在参考方向不同时,其数学表达式差一个负号。

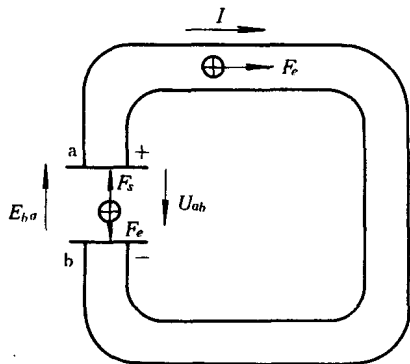


图 1-5 电压与电动势

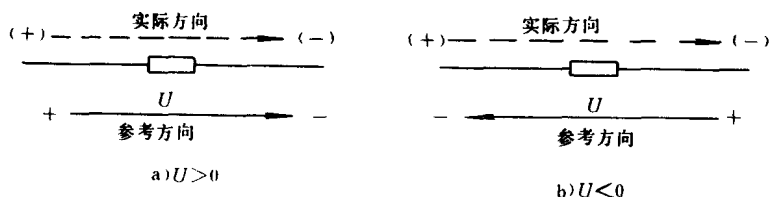


图 1-6 电压的参考方向与实际方向

a) $U > 0$ b) $U < 0$

在图 1-5 所示的电路中,电荷在电场力作用下,从高电位端向低电位端移动。这样,电极 a 因正电荷的减少而使电位逐渐降低,电极 b 因正电荷的增多而使电位逐渐升高,其结果是 a 和 b 两极间的电位差逐渐减小到等于零;联结导线中的电流也相应地减小到等于零。

由于电场力的作用,电极 b 上的正电荷不能逆着电场而上,为了维持导线中的电流,就必须使 a、b 两极间保持一定的电压,这必然要借助于非电场力使运动到 b 极的正电荷经过电源内部流向 a 极。电源就能产生这种力,我们称它为电源力 F_e 。

为了衡量电源力对电荷做功的能力引出了电动势这个物理量。电动势在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所做的功,用字母 E 表示。电动势的方向规定为在电源内部由负极指向正极,即从低电位端指向高电位端。电动势的单位与电压单位相同。

三、电能与电功率

在电流通过电路的同时,电路内发生了能量的转换。

图 1-7 所示电路中,在电源内,非电场力不断地克服电场力对正电荷做功,从而使正电荷的电位能升高。正电荷在电源内获得能量,把非电能转换成电能。在外电路,正电荷在电场力作用下,不断地通过负载,从而使正电荷的电位能降低。正电荷在外电路放出能量,通过负载把电能转换成其他形态的能。由此可见,在电路中,电荷只是一种转换和传输能量的媒介,它本身并不产生或消耗任何能量。我们通常所说的用电,就是指取用电荷所携带的能

量。

根据电动势的定义, 从非电能转换来的电能就等于电源电动势与被移送的电量 Q 的乘积, 即

$$W_E = EQ = EIt \quad (1-4)$$

此电能可分为两部分: 其一是外电路取用的电能 W , 其二是电源内部消耗的电能 ΔW , 根据能量守恒定律,

$$W_E = W + \Delta W$$

根据电压的定义, 外电路取用的电能等于外电路两端的电压 U (也就是电源的输出电压) 与受电场力作用而移动的电量 Q 的乘积, 即

$$W = UQ = UIt \quad (1-5)$$

电荷在内电路中移动时, 把一部分电能转换成热能, 这不仅是一部分能量的损耗, 而且致使电源发热, 严重时影响电源的安全。根据上面的公式, 内电路能量损失为

$$\Delta W = W_E - W = (E - U)It = \Delta UIt \quad (1-6)$$

式中 ΔU ——称为电源内部电压降。

由此可得电路的能量平衡方程

$$EIt = UIt + \Delta UIt$$

等式两边同除以 It , 可得

$$E = U + \Delta U \quad (1-7)$$

上式称为电路的电压平衡方程。

单位时间内产生或消耗的电能称为电功率 (简称功率), 用字母 P 表示。

电源转换的功率

$$P_E = \frac{EIt}{t} = EI \quad (1-8)$$

负载取用的功率, 也就是电源的输出功率

$$P = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-9)$$

内电路损耗的电功率

$$\Delta P = \frac{\Delta UIt}{t} = \Delta UI \quad (1-10)$$

这三者之间的关系为

$$P_E = P + \Delta P \quad (1-11)$$

式 (1-11) 称为功率平衡方程。

在国际单位制中, 能量的单位是焦耳, 简称焦 (J); 功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W)。在电工技术中, 电功率也常用千瓦 (kW) 来表示, 电能常用千瓦小时 (kWh) 表示, 1kWh 俗称 1 度电。

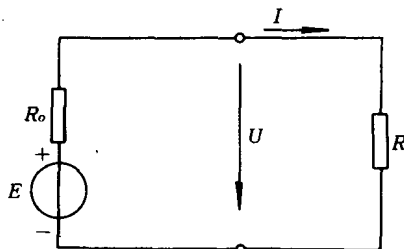


图 1-7 电能与电功率

第三节 欧姆定律

一、一段电阻电路的欧姆定律

图 1-8a 是一段仅含有电阻的电路。设 R 为线性电阻，当有电流通过电阻时，电阻两端的电压为

$$U = RI \quad (1-12)$$

或写成

$$I = \frac{U}{R} = GU \quad (1-13)$$

式 (1-12) 或式 (1-13) 称为电阻电路的欧姆定律。它是分析电路的最基本定律之一。式 (1-13) 中的 $G = 1/R$ 称为电导。欧姆定律表明：流过电阻的电流 I 与电阻两端的电压 U 成正比，与电阻 R 成反比。当所加电压一定时，电阻越大，则电流越小。显然，电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。

在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 (Ω)，常用单位还有千欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$)。电导的单位是西门子，简称西 (S)。

应当注意，式 (1-12) 是在图 1-8a 所选电压和电流参考方向的条件上得出的，当电压和电流的参考方向选取的不一致时，如图 1-8b 所示，则欧姆定律的表达式为

$$U = -RI \quad \text{或} \quad I = -GU \quad (1-14)$$

例 1-1 应用欧姆定律对图 1-9 的电路列出式子，并求电阻 R 。

解

图 1-9a 中，电压与电流的参考方向不一致，所以欧姆定律表示为

$$U = -IR$$

$$\text{电阻 } R \text{ 为} \quad R = -\frac{U}{I} = -\frac{10}{-2} \Omega = 5 \Omega$$

其中 I 为负值，表明电流的实际方向与所选定的参考方向相反。

图 1-9b 中，电压与电流的参考方向也不一致，所以欧姆定律表示为

$$U = -RI$$

电阻 R 为

$$R = -\frac{U}{I} = -\frac{-10}{2} \Omega = 5 \Omega$$

从本例可以看出，欧姆定律式中的正负号有两种不同的含义。一是由电阻两端电压与电流的参考方向引起的，如两者参考方向一致，用公式 (1-12)；如两者方向选取不一致，则用

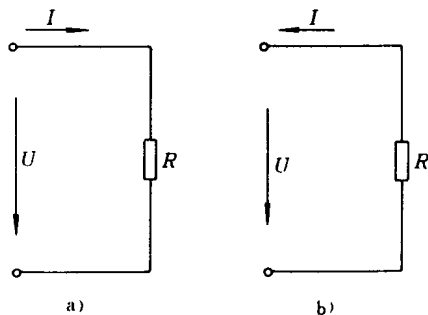


图 1-8 欧姆定律

a) 参考方向一致 b) 参考方向相反

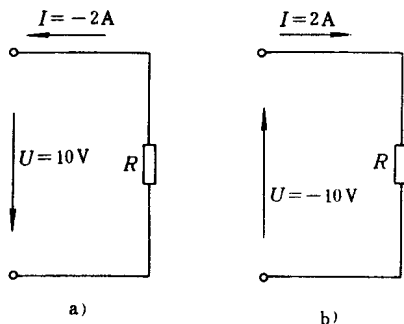


图 1-9 例 1-1 的图

式 (1-14)。二是电压或电流本身的参考方向与它们的实际方向引起的, 当电压 (或电流) 的参考方向与实际方向一致时, U (或 I) 用正值代入式 (1-12) 或式 (1-14), 当参考方向与实际方向相反时, U (或 I) 用负值代入式 (1-12) 或式 (1-14)。应当说明的是, 对于电阻性电路, 尽管电压和电流的参考方向可以选择得不一致, 但实际方向始终是一致的。也就是说, 在将 U 和 I 的值代入式 (1-14) 时, 它们之中必有一个为负值。

二、全电路欧姆定律

图 1-10 所示是一个简单的闭合电路, E 是电动势, R_0 是其内阻, R 是负载电阻。

若选取电流的参考方向如图中所示, 根据电压平衡方程有

$$E = U + \Delta U$$

负载电阻两端的电压为

$$U = RI$$

电源内电阻上的电压降为

$$\Delta U = R_0 I$$

所以

$$E = RI + R_0 I$$

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-15)$$

上式称为全电路欧姆定律, 其含义是电路中流过的电流, 其大小与电源的电动势成正比, 而与电路中的全部电阻之和成反比。

若单回路电路中含多个电压源时, 回路中的电流等于沿回路电流方向上所有电压源电位升之和除以回路中所有电阻之和。

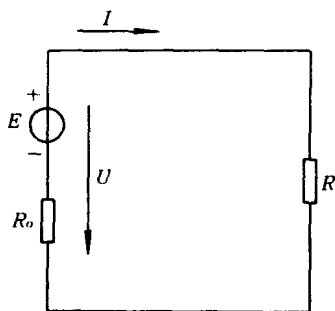


图 1-10 全电路欧姆定律

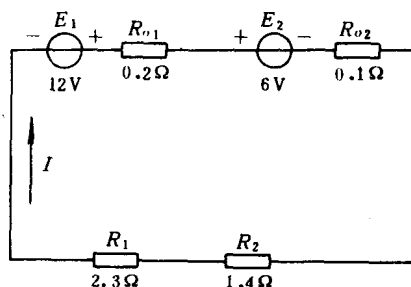


图 1-11 例 1-2 的图

例 1-2 已知电路如图 1-11 所示, 求电流 I 。

解 这是一个单回路电路, 应用全电路欧姆定律, 可得

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_{01} + R_{02} + R_1 + R_2} = \frac{12 - 6}{0.2 + 0.1 + 2.3 + 1.4} \text{ A} = 1.5 \text{ A}$$

第四节 电路的工作状态

电路的工作状态分为开路 (空载)、短路和负载 (通路) 三种情况, 下面我们以图 1-12

所示的照明电路为例来分析这三种状态下电路中的电流、电压和功率关系。

一、开路状态（空载状态）

图 1-12 电路中，当所有的电灯开关 S_1 、 S_2 、 S_3 都断开时，电源的输出电流等于零，此时称电路处于开路状态。电路开路可能是电源开关未闭合，这是正常开路；也可能是线路上的某个地方接触不良，导线已断或熔断器熔丝熔断等原因造成的，这些情况属于事故开路。在开路状态下，电源的端电压（称为开路电压或空载电压）等于电源的电动势，显然此时电源的输出功率为零。

如上所述，电路开路时具有下列特征：

$$\left. \begin{aligned} I &= 0 \\ U &= U_o = E \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

二、负载状态

图 1-12 电路中，当部分或全部电灯开关接通时，电路处于负载状态。设照明负载总等效电阻为 R_L ，电源内电阻为 R_o ，此时电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_o + R_L}$$

一般电源的内阻都很小 ($R_o \ll R_L$)，电流在内电阻 R_o 上产生的内压降也很小，在负载情况下，电源的输出电压接近于电源电动势，即

$$U \approx E$$

所以

$$I = \frac{U}{R_L} \approx \frac{E}{R_L}$$

电源的输出功率（即负载取用的功率）

$$P = UI$$

电源内电阻的能量损耗

$$\Delta P = \Delta UI = I^2 R_o$$

电源转换的电功率

$$P_E = EI$$

一般用电设备都是并联于供电线上，因为电源的端电压是近似不变的，所以接入的电灯数越多，负载电阻 R_L 越小，电路中电流便越大，负载功率也越大。在电工技术上把这种情况叫做负载增大。显然，所谓负载的大小指的是负载电流或功率的大小，而不是负载电阻的大小。就是说，电源输出的功率和电流决定于负载的大小。

既然电源输出功率和电流决定于负载的大小，电源制造好后，是不是就可以无限制地接负载呢？对负载来讲，它的电压、电流和功率又是怎样确定的呢？为回答这个问题，下面引出额定值这个术语。

任何一个实际的电气设备，为了达到最好的技术经济效能，制造厂对它的工作能力、应用性能和使用条件都要用一组技术数据来加以限制和规定，这些技术数据就称为电气设备的额定值。电气设备或元件的额定值常标在铭牌或写在产品说明中，常见的额定电压、额定电流和额定功率分别用 U_N 、 I_N 和 P_N 表示。如一盏白炽灯，标在玻璃灯泡上的额定功率为 40W，额定电压为 220V，表明该灯泡应在 220V 电压下使用，消耗的功率为 40W，发光正常，保证

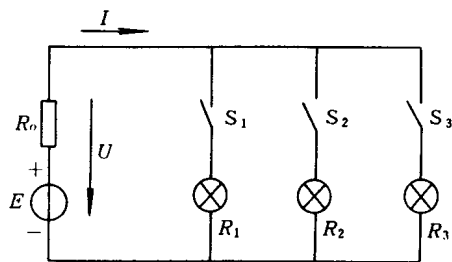


图 1-12 照明供电电路

有规定的使用寿命。若违反额定值使用,如供电电压超过 220V,电灯会亮些,但寿命会大大缩短,甚至钨丝烧断而报废;供电电压过低时,发光不正常,效率低,灯泡的效能得不到充分发挥,所以也是不经济、不合理的。大多数电气设备(如电机、变压器等)的寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当电流超过额定值过多时,由于发热过甚,绝缘材料将遭受损坏;当所加电压超过额定值过多时,绝缘材料可能被击穿。反之,如果电压和电流远低于其额定值,不仅得不到正常合理的工作情况,而且也不能充分利用设备的能力。

因此,电气设备的额定值是由制造厂根据设备使用时经济合理、安全可靠和一定的使用寿命等进行全面综合考虑,通过设计计算而得出的。使用者必须按制造厂给定的额定值来使用设备,绝不允许随意,尤其是超值运行,这对初学电工技术的读者要特别注意。

若设备按额定值运行,就称为额定工作状态,也称满载运行。由于电源电压经常波动,使电气设备使用时的实际值不一定等于额定值。另外,在一定电压下,电源输出的功率和电流取决于负载的大小。

三、短路状态

图 1-12 电路,当两根供电线由于绝缘损坏而接通时,电流不再流过负载,只经连接导线直接流回电源,此时称电路处于短路状态。由于短路处电阻为零,且电源内阻很小,所以短路电流 I_s 极大。短路时电源所产生的电能全部被电源内阻所消耗,此时电源对外呈现的端电压也为零。电源短路时的特征如下:

$$\left. \begin{aligned} I &= I_s = \frac{E}{R_0} \\ U &= 0 \\ P_E &= \Delta P = I_s^2 R_0 \\ P &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

电源短路是十分危险的,因为短路电流太大,以致电源本身和短路电流所经过的线路都不能承受而被毁坏。为避免和减轻这种短路事故的危害,一种最简单的措施就是在电源开关后安装熔断器。一旦发生短路,熔断器将在极短的时间内切断故障电路,以保护电气设备的安全和保证其他用电设备的正常运行。

第五节 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路分析中的最基本定律。它反映了电路中各个电压、电流之间存在的约束关系,它包含两条定律,分别称为基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

为了说明基尔霍夫定律,首先我们以图 1-13 为例,介绍与定律有关的几个电路名词。

支路 无分支的电路称为支路。支路中流过同一电流。当支路中含有电源时称为含源支路;支路中不含有电源时称为无源支路。图 1-13 所示电路共有三条支路,其中 $adcb$ 和 agb 为含源支路, $aefb$ 为无源支路。

节点 三条或三条以上支路的联结点叫做节点。图 1-13 所示电路共有两个节点 (a 和 b)。

回路 由一条或多条支路组成的闭合电路叫做回路。图 1-13 所示电路共有三个回路 ($agbcda$ 、 $aefbga$ 、 $aefbcda$)。

网孔 回路平面上不包含支路的回路叫做网孔。图 1-13 电路中 $agbcda$ 和 $aefbga$ 二个回路是网孔，而回路 $aefbcda$ 所在平面中含有支路 agb ，故不是网孔。

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律是反映电路中任一节点的各支路电流之间相互关系的规律，它的内容如下：

对于电路中的任一节点，在任一瞬间，流入该节点的电流之和必等于从该节点流出的电流之和。

用数学公式表示，即

$$\sum I_{in} = \sum I_{out} \quad (1-18)$$

在图 1-13 电路中，对节点 a 可列出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

或将上式改写成

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1-19)$$

因此，基尔霍夫电流定律也可以表述为：对任一节点，在任一瞬时，流入（或流出）该节点的电流代数恒等于零。

该定律应用于电路中的某一节点时，必须首先假定各支路电流的参考方向，当假定流入节点的电流为正时，则流出节点的电流就为负。这里流入或流出都是根据参考方向来说的。

基尔霍夫电流定律的依据是电流的连续性原理，即电路中任意一点，包括节点，均不能堆积电荷，流入某一节点的电荷总量，必定等于流出该节点的电荷总量。

基尔霍夫电流定律通常应用于节点，但也可将其推广应用于电路中任一假定的闭合面。例如如图 1-14 中 A 电路系统和 B 电路系统是两个独立的电路系统，现用两条导线把它们连接起来，设想用一闭合面 S 包围 A 电路，并把 S 看作一个节点，于是可列出

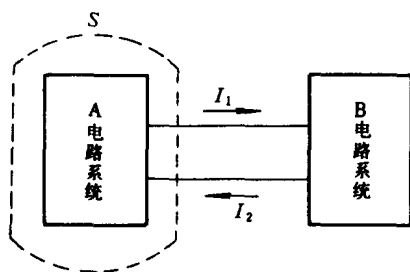


图 1-14 基尔霍夫电流定律的推广应用

$$I_1 - I_2 = 0$$

所以

$$I_1 = I_2$$

即两导线中的电流相等。如果其中一导线（例如下面一条）断线，根据基尔霍夫电流定律，流入节点的电流 $\sum I = 0$ ，故 $I_1 = 0$ 。这就是我们常说的不构成回路的电流等于零的道理。

又例如，一个晶体管有三个电极，各极电流的方向如图 1-15 所示。如果把晶体管看成一

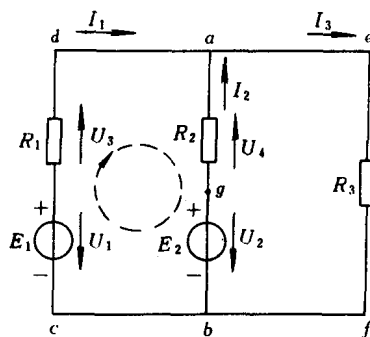


图 1-13 基尔霍夫定律

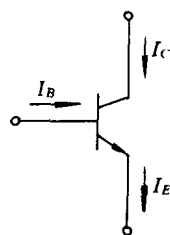


图 1-15 晶体管

个节点, 则应用基尔霍夫电流定律可列出

$$I_B + I_C - I_E = 0$$

可见, 在任一瞬时, 通过任一闭合面的电流的代数和也恒等于零。

例 1-3 在图 1-16 所示电路中, 已知 $I_1 = 0.27\text{A}$, $I_2 = -0.18\text{A}$, $I_3 = -0.09\text{A}$, 求 I_4 。

解 由 KCL 可列出

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

$$0.27 - (-0.18) + (-0.09) - I_4 = 0$$

故

$$I_4 = 0.36\text{A}$$

由本例可以看出, 在应用 KCL 列出的方程中, 有两种正负符号。一种是电流本身的正负号, 这由所选定的参考方向与其实际方向的关系确定; 另一种是由所选定的参考方向是进入该节点, 还是流出该节点来确定的, 二者不可混淆。

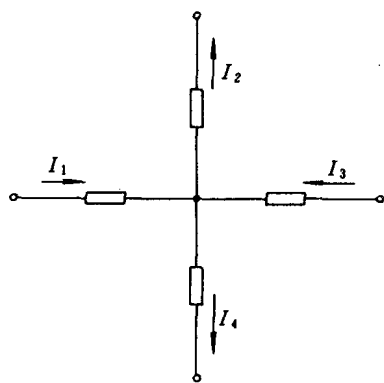


图 1-16 例 1-3 的图

二、基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律是用来确定任一回路中各段电压之间相互关系的定律。它的内容如下:

对于电路中的任一回路, 在任一瞬时, 沿着该回路循环一周, 则在这个方向上的电位升之和必等于电位降之和。

用数学公式表示, 即

$$\sum U_{\text{UP}} = \sum U_{\text{down}} \quad (1-20)$$

以图 1-13 所示的回路为例, 图中电源电动势、电流和各段电压的参考方向均已标出。按照虚线所示的方向循环一周, 可列出

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3$$

或将上式改写成

$$U_1 + U_4 - U_2 - U_3 = 0$$

即

$$\sum U = 0 \quad (1-21)$$

因此, 基尔霍夫电压定律也可表述为: 在任一瞬时, 沿任一回路循环一周, 回路中各段电压的代数和恒等于零。如果规定电位升取正, 则电位降取负。

图 1-13 所示的电路是由电源电动势和电阻构成的, 上式可改写成

$$E_1 - E_2 - I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0$$

或

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

即

$$\sum E = \sum (IR) \quad (1-22)$$

这就是基尔霍夫电压定律的另一种表达形式, 可叙述为: 任一瞬时, 电路中任一回路各电阻电压降的代数和恒等于这个回路内各电动势的代数和。凡电动势、电流与回路方向一致者取正号, 相反者取负号。

基尔霍夫电压定律的依据是电路中电位的单值性原理。电路中参考点的电位为零, 参考

点选定之后, 其余任何一点的电位也就确定, 于是从电路中任何一点出发, 沿任一闭合回路循行一周, 当回到原来的出发点时, 该点电位不会改变, 与回路的循环路径无关。

基尔霍夫电压定律不仅应用于闭合回路, 也可以把它推广应用于开口电路。例如图 1-17 电路, 根据基尔霍夫电压定律列出式子

$$U - E + IR = 0$$

或

$$U = E - IR$$

这也就是一段有源 (含电源) 电路的欧姆定律的表达式。

应该指出, 图 1-13 所举的是直流电路, 但是基尔霍夫两个定律具有普遍性, 它们适用于由各种不同元件所构成的电路, 也适用于任何变化的电流和电压。

列方程时, 不论是应用基尔霍夫定律或欧姆定律, 首先都要在电路图上标出电压、电流或电动势的参考方向, 因为所列方程中各项前的正负号是由它们的参考方向决定的。如果参考方向选得相反, 则会相差一个负号。

例 1-4 如图 1-18 所示电路, 求 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_x 及 U_x 和 U_{ac} 。

解 (1) 根据 KCL 可求出各电流

$$\text{对节点 } a \quad I_1 + 2 = 8$$

$$I_1 = 8 - 2 = 6\text{A}$$

$$\text{对节点 } b \quad 4 = I_1 + I_2$$

$$I_2 = 4 - I_1 = 4 - 6 = -2\text{A}$$

$$\text{对节点 } c \quad I_2 + I_3 = 6$$

$$I_3 = 6 - I_2 = 6 - (-2) = 8\text{A}$$

$$\text{对节点 } d \quad -2 - I_x - I_3 = 0$$

$$I_x = -2 - I_3 = -2 - 8$$

$$= -10\text{A}$$

(2) 根据 KVL 可求出各电压

若沿 $abcd$ 回路循环, 得

$$E - I_2 R_1 + I_3 R_2 + U_x = 0$$

$$U_x = -E + I_2 R_1 - I_3 R_2$$

$$= (-10 + (-2) \times 5 - 8 \times 1)\text{V}$$

$$= -28\text{V}$$

若沿 $abca$ 回路循环, 得

$$E - I_2 R_1 + U_{ac} = 0$$

$$U_{ac} = -E + I_2 R_1 = (-10 + (-2) \times 5)\text{V} = -20\text{V}$$

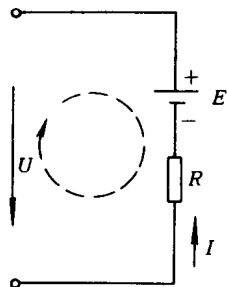


图 1-17 基尔霍夫电压定律的推广应用

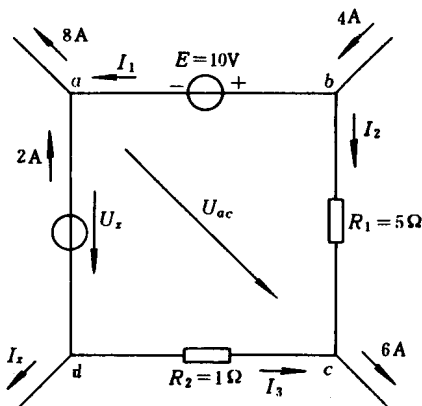


图 1-18 例 1-4 的图

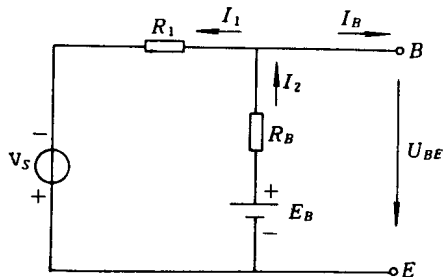


图 1-19 例 1-5 的图