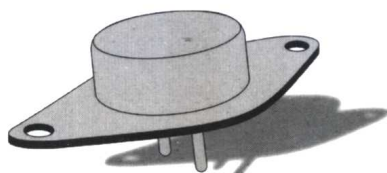


//

毕淑娥 主编 丁继盛 主审

电 工 学

本科少学时



哈尔滨工业大学出版社

电 工 学

毕淑娥 主 编
丁继盛 主 审

哈尔滨工业大学出版社

哈 尔 滨

内 容 提 要

本书为高校本科生电工理论与技术的少学时教材,其内容包括电路基础、变压器与电机控制、模拟电子电路、数字电子电路、常用电子电源五大部分。每章有简明的小结,且例题、习题、思考题较多,非常便于教学。

本书可作为高等工科大学机械、化工、管理、动力和计算机应用等专业的本科生教材,也可作为大专院校、职工大学、函授大学相应专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工学/毕淑娥主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.3

ISBN 7-5603-1593-3

I. 电... II. 毕... III. 电工学-高等学校-教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 72833 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451-6414749

印 刷 地矿部黑龙江测绘印制中心印刷厂印刷

开 本 787×1092 1/16 印张 27.75 字数 706 千字

版 次 2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1593-3/TM·34

印 数 1~4 000

定 价 33.80 元

前 言

根据 21 世纪人才的需求,按照原国家教育委员会 1995 年颁发的“电工技术(电工学 I)”和“电子技术(电工学 II)”两门课程的教学基本要求,并结合“九五”期间电工技术和电子技术课程教学内容和课程体系改革的研究成果,我们编写了这本少学时电工学教材。

本书是一本阐述用电理论与技术的本科教材,可供高等院校的机械、动力、化工、管理和计算机应用等各类专业使用,按 60~80 学时组织教学(不含实验)。本书也可作为大专院校、职工大学及函授大学相应专业的教材。

本书的形成经历了一个较漫长的过程,首先由丁继盛、赵焕庆编写了《电工与电子技术基础》(哈尔滨工业大学校内教材),并进行了多年的教学实践。1996 年由毕淑娥主编,丁继盛主审,哈尔滨工业大学出版社出版。该书出版 5 年来,先后 4 次修订再版,受到了高校广大师生和其他作者的好评。考虑到教改形势的变化和实施教学的需要,又在毕淑娥主编、丁继盛主审《电工与电子技术基础》一书的基础上,写成了电工学一书。

本次编写对基础知识的应用进行了适当的拓宽;并适当地增加了控制电机、可编程序控制器、开关电源等部分新内容,使教材在使用上具有灵活性和选择性,在内容上具有实用性和先进性。

本教材在保证系统性的同时,注重理论联系实际,叙述深入浅出,章节之间联系紧密,每章有简明的小结,例题与思考题较多,论例配合,便于自学。教材中打“*”的部分可根据专业的需要选用。

参加本教材编写的教师是:姜三勇(第一、二、三、四、六、八章);王卫(第五、七、十六、十八章);张继红(第九、十五、十七章及附录);毕淑娥(第十、十一、十二、十三、十四章)。全书由毕淑娥主编。

本教材在编写过程中,哈尔滨工业大学电工学教研室的老师们给予了不少支持,尤其是丁继盛教授,对本教材的编写提出了许多指导性的意见,并主审了部分书稿,在此一并表示衷心的感谢。

受编者学识水平和时间所限,书中不足和疏漏之处在所难免,恳切希望使用本教材的师生和其他读者提出宝贵意见。

编 者

2000 年 9 月

目 录

第一部分 电路基础

第一章 直流电路	(1)
1.1 电路的作用及其基本组成	(1)
1.2 电路的基本物理量	(2)
1.3 电路的基本定律	(6)
1.4 电路的基本连接方式	(9)
1.5 电路的基本工作状态	(12)
1.6 电路的基本分析方法	(16)
*1.7 含受控源电路的分析	(27)
本章小结	(29)
习题	(31)
第二章 正弦交流电路	(36)
2.1 正弦交流电的基本物理量	(36)
2.2 正弦交流电的相量表示法	(41)
2.3 电阻元件的交流电路	(45)
2.4 电感元件的交流电路	(46)
2.5 电容元件的交流电路	(50)
2.6 RLC 串联交流电路	(52)
2.7 交流电路的复数运算	(56)
2.8 交流电路的频率特性	(63)
2.9 功率因数的提高	(68)
*2.10 非正弦周期信号电路的分析	(71)
本章小结	(73)
习题	(75)
第三章 三相电路	(80)
3.1 三相电源	(80)
3.2 三相负载	(83)
3.3 三相功率	(88)
*3.4 安全用电	(89)
本章小结	(92)

习题	(93)
第四章 电路的过渡状态	(95)
4.1 换路定则及电压电流的初始值	(95)
4.2 RC 串联电路的充电过程	(97)
4.3 RC 串联电路的放电过程	(100)
4.4 一阶电路的三要素法	(101)
4.5 RL 串联电路的过渡状态	(104)
本章小结	(106)
习题	(107)

第二部分 变压器、电动机及其控制

第五章 变压器	(110)
5.1 变压器的基本结构	(110)
5.2 变压器的基本工作原理	(111)
5.3 变压器绕组的极性与连接	(117)
5.4 特殊变压器	(118)
本章小结	(119)
习题	(119)
第六章 三相异步电动机	(121)
6.1 三相异步电动机的转动原理和基本构造	(121)
6.2 三相异步电动机的定子旋转磁场	(123)
6.3 三相异步电动机的极数与转速	(125)
6.4 三相异步电动机的机械特性	(127)
6.5 三相异步电动机的使用	(132)
* 6.6 绕线式三相异步电动机的启动和调速	(139)
* 6.7 单相异步电动机	(141)
本章小结	(144)
习题	(145)
第七章 直流电动机	(146)
7.1 直流电动机的基本构造	(146)
7.2 直流电动机的基本工作原理	(147)
7.3 他励电动机的机械特性	(148)
7.4 他励电动机的使用	(150)
本章小结	(154)
习题	(155)
* 第八章 控制电机	(156)
8.1 伺服电动机	(157)
8.2 步进电动机	(162)

8.3 直线电动机	(165)
8.4 测速发动机	(168)
本章小结	(171)
习题	(171)
第九章 继电-接触器控制	(173)
9.1 常用低压控制电器	(173)
9.2 鼠笼式异步电动机直接启动的控制线路	(176)
9.3 鼠笼式异步电动机正反转的控制线路	(178)
9.4 行程控制	(179)
9.5 时间控制	(180)
9.6 电动机的顺序控制	(182)
本章小结	(182)
习题	(183)
第十章 可编程序控制器的工作原理与应用	(185)
10.1 可编程序控制器的基本结构与工作原理	(185)
10.2 可编程序控制器的编程语言与编程规则	(189)
10.3 可编程序控制器的基本指令	(191)
10.4 可编程序控制器的应用举例	(212)
本章小结	(219)
习题	(220)

第三部分 模拟电子电路

第十一章 常用半导体器件	(227)
11.1 半导体的导电特性	(227)
11.2 半导体二极管	(232)
11.3 半导体稳压管	(235)
11.4 半导体三极管	(237)
11.5 光电耦合器	(245)
本章小结	(248)
习题	(249)
第十二章 基本放大电路	(251)
12.1 交流电压放大电路的组成和信号放大概述	(251)
12.2 交流电压放大电路的分析方法	(253)
12.3 典型交流电压放大电路	(258)
12.4 多级电压放大电路	(261)
12.5 放大电路中的负反馈	(265)
12.6 差动放大电路	(270)

12.7 功率放大电路	(273)
* 12.8 场效应管放大电路	(276)
本章小结	(278)
习题	(279)
第十三章 集成运算放大电路	(285)
13.1 集成运放及其理想模型	(285)
13.2 集成运放的基本运算电路	(288)
13.3 集成运放的其它应用	(297)
本章小结	(302)
习题	(303)
 第四部分 数字电子电路	
第十四章 门电路和组合逻辑电路	(309)
14.1 数字电路概述	(309)
14.2 晶体管的开关特性	(311)
14.3 基本逻辑门电路	(313)
14.4 组合逻辑电路的分析与综合	(321)
14.5 加法器	(331)
14.6 译码电路和显示器	(334)
本章小结	(340)
习题	(341)
第十五章 双稳态触发器和时序逻辑电路	(345)
15.1 双稳态触发器	(345)
15.2 触发器逻辑功能的转换	(352)
15.3 寄存器	(353)
15.4 计数器	(357)
本章小结	(368)
习题	(369)
第十六章 数字量和模拟量的转换	(373)
16.1 数 - 模转换器	(373)
16.2 模 - 数转换器	(377)
本章小结	(380)
习题	(381)

第五部分 常用电子电源

第十七章 振荡电路	(382)
17.1 正弦波振荡电路	(382)
17.2 非正弦波振荡电路	(386)
本章小结	(389)
习题	(390)
第十八章 整流电源与开关电源	(392)
18.1 二极管整流电源	(392)
18.2 可控硅整流电源	(399)
18.3 高频开关电源	(404)
本章小结	(409)
习题	(410)
附录	(412)
附录 I 国际制单位(部分)	(412)
附录 II 常用导电材料的电阻率和电阻温度系数	(412)
附录 III 常用电机与电器的图形符号	(413)
附录 IV 常用电阻器件与电容器件的型号和主要参数	(414)
附录 V 常用半导体分立器件的型号与主要参数	(415)
附录 VI 常用半导体集成电路器件	(419)
部分习题答案	(424)
参考文献	(433)

第一部分 电路基础

第一章 直流电路

直流电路的一些内容已在物理课中学过,这是学习本章的基础。在此起点上,本章将综合性地讨论电路的基本概念、基本定律和基本分析方法,以便对直流电路有比较完整而系统的认识。直流电路具有典型意义,它的基本理论和分析方法也适用于其它电路。因此,本章是学习本课程后续各章的基础。

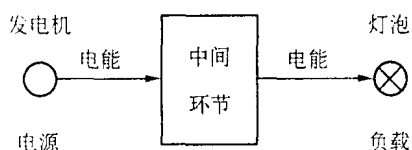
1.1 电路的基本作用及其组成

一、电路的作用

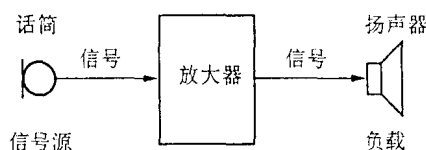
电流的路径叫做电路。电路是由一些电气设备和元件(例如,发电机、电动机、电炉、电阻、电感和电容等)或电子器件(例如,晶体管和集成电路等)按一定方式连接而成的。电路的种类繁多,用途各异,但其基本作用可以概括为两大类,我们通过实例说明如下。

1. 电路能够实现电能的输送和转换

电路实现电能的输送和转换的应用极为广泛,其作用可由图 1.1(a)所示的例子说明。电源发出电能,通过中间环节(导线、开关及其它设备)将电能送给电灯负载,用以照明,将电能转化为光能,实现了电能的输送与转换。



(a) 电能的输送和转换



(b) 信号的传递和转换

图 1.1 电路的作用

电源是电路的能源。电源有多种形式(例如,发电机、蓄电池和光电池等),它们可以把各种形式的能量(例如,机械能、化学能和光能等)转化为电能,供给负载。负载是用电设备(例如,电动机、电炉和电灯等),它们将电能转化成人们需要的其它形式的能量。

2. 电路能够实现信号的传递和转换

电路实现信号的传递和转换的应用也相当广泛,其作用可由图 1.1(b)所示的例子说明。这是扩音机的工作示意图。话筒将声音(信息)转换为电信号(以下简称信号),经过中间环节(导线与放大器等),信号被放大,并传递到扬声器负载,还原为原来的声音。这里,在声音的作用下,话筒源源不断地发出信号,因而叫做信号源。

信号源也是一种电源,但它不同于发电机和蓄电池等产生电能的一般电源,其主要作用是产生电压信号和电流信号。

各种非电的信息和物理量(例如,语言、音乐、图像、温度、压力、位移、速度与流量等等)均可通过相应的变换装置或传感器变换为电信号进行传递和转换。电路的这一作用广泛应用于电子技术、测量技术、无线电技术和自动控制技术等许多领域。

二、电路的基本组成

无论电路的结构和作用如何,都可以看成是由实际的电源、负载和中间环节三个基本部分组成。但是实际电路元件的电磁性质比较复杂,难以用简单的数学关系表达它们的物理特性(例如,一只简单的白炽灯通过电流时,它除有电阻特性外,还会产生磁场,具有电感的性质)。为研究电路的一般规律,我们将实际的电路元件理想化,即在一定的工程条件下将其近似看做理想的电路元件。理想电路元件具有单一的电或磁的性质,可用简单的数学关系予以描述(例如,白炽灯在通常条件下,它的主要作用是消耗电能,呈现电阻特性,而产生的磁场很微弱,可以近似地看成纯电阻元件)。

最简单的电路如图 1.2 所示,由电源和负载组成,中间环节为连接导线。图中的电源和负载都是理想电路元件。若无特殊说明,电源是泛指,既可以是一般电源,也可以是信号源;负载也是泛指,既可以是一般用电设备,也可以是传递信号的某种装置。

连接导线的作用是把电源与负载连成通路,以达到输送电能和传递信号的目的。常用的导线有铜质和铝质两种,它们都有一定的电阻。一般情况下,连接导线较短,其电阻比负载电阻小得多,因而往往忽略不计,予以理想化。除特殊说明外,本书中讨论的电路均不计导线电阻。

为了控制电路的通断,常在电路的某处装上开关。完善的电路还具有保护装置,例如,为防止短路事故及烧毁电气设备,通常在电路中接入熔断器(保险丝)或自动断路器。

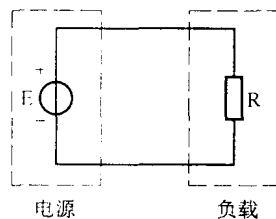


图 1.2 最简单的电路

1.2 电路的基本物理量

电路中有许多物理量,其中电源的电动势 E 和电路中的电流 I 、电压 U 及电位 V 是电路的基本物理量。物理学中已讨论过它们的具体定义,这里不再重复。为计算的需要,在此给出它们的单位及其换算关系。

在国际单位制中^①,电流的单位是安培(A),简称安。对于较小的电流可以毫安(mA)或微安(μA)为单位。其关系为

$$\begin{cases} 1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} \\ 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A} \end{cases}$$

电压、电位和电动势的单位为伏特(V),简称伏。当电压、电位和电动势的数值较大时,可用千伏(kV),数值较小时可用毫伏(mV)和微伏(μV)。其关系为

$$\begin{cases} 1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} \\ 1 \text{ mV} = 10^{-3} \text{ V} \\ 1 \mu\text{V} = 10^{-6} \text{ V} \end{cases}$$

① 本书采用国际单位制,见附录 1。

本节的主要内容有两个方面:一是讨论电位及其与电压的关系;二是通过复习讨论电流、电动势和电压的实际方向,引入一个新的概念,即电流、电动势和电压的参考方向。参考方向的概念对电路的理论分析具有重要意义,为各种电路的计算提供了方便条件,必须正确理解和运用。

一、电位和电压

电位在物理学中称为电势。电位是一个相对物理量,即某点电位的极性和大小是相对于参考点而言的。参考点的电位称为参考电位,一般设参考电位为零,所以参考点又叫零电位点。通常,人们认为大地的电位为零。这是因为大地容纳电荷的能力极大,电位稳定,其电位不会因局部电荷量的变化而受影响。电路中参考点可以任意选取,用“接地”符号表示,如图 1.3(a)所示。所谓“接地”,并不一定真的与大地相联。在电子电路中常取公共点或机壳为参考点。

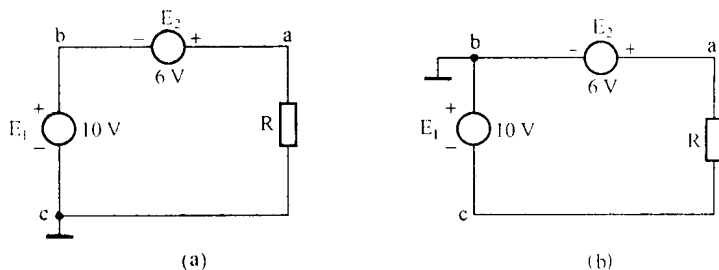


图 1.3 参考点与电位

在图 1.3(a)中,根据需要,如果选 c 点为参考点,即 $V_c = 0$,则 b、a 点的电位分别为

$$V_b = E_1 = 10 \text{ V}$$

$$V_a = V_b + E_2 = 10 + 6 = 16 \text{ V}$$

在图 1.3(b)中,如果选取 b 点为参考点,即 $V_b = 0$,则 c、a 两点的电位分别为

$$V_c = -E_1 = -10 \text{ V}$$

$$V_a = E_2 = 6 \text{ V}$$

显然,参考点选得不同,电路中各点相应的电位也不同。但是参考点一经选定,则电路中各点的电位就被惟一地确定了。所以,电路中某点电位的高低是相对的。

电路中任意两点电位之差称为电位差,又叫电压。

在图 1.3(a)中,a、c 两点间的电压

$$U_{ac} = V_a - V_c = 16 - 0 = 16 \text{ V} \quad (\text{c 点为参考点})$$

在图 1.3(b)中,a、c 两点间的电压

$$U_{ac} = V_a - V_c = 6 - (-10) = 16 \text{ V} \quad (\text{b 点为参考点})$$

由此可见,电路中两点间的电压值不会因选取不同的参考点而改变,电压是一个绝对量。

电位虽是对某一点而言,但实质上还是指两点间的电位差,只是其中一点(参考点)的电位预先被指定为零而已。

二、电流、电动势和电压的实际方向

由物理学可知,电流是带电粒子的定向运动。电流的方向被规定为正电荷的运动方

向。在图 1.4 所示电路中,根据电源的已知实际极性(正负极符号“+”与“-”)可知,正电荷是从电源的正极 a(高电位端)经过外电路流向电源的负极 b(低电位端)。这就是电流的实际方向。

电源内部的电源力(在发电机中是电磁力,在化学电池中是化学力)把回到负极的正电荷再推向正极,保持正电荷源源不断地定向流动。电动势是反映电源力把正电荷由负极推向正极这种能力的物理量,因此就把电源力推动正电荷的方向(由低电位端指向高电位端)规定为电源电动势的实际方向。

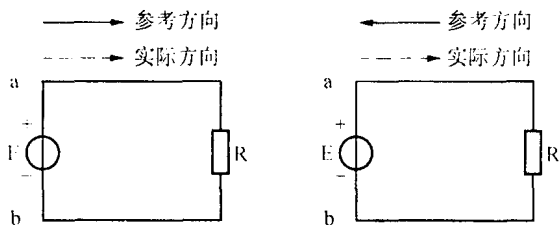
电源正负极之间的电位差也叫做电源的端电压,我们把电位降低的方向(由高电位端指向低电位端)规定为电源端电压的实际方向。显然,电源电动势的实际方向和电源端电压的实际方向刚好相反,前者是电位升高的方向,后者是电位降低的方向。

电流通过负载时,产生电位降(也叫电压降)。图中负载上的电位实际极性是上正下负。同样,我们把这个电位降低的方向规定为负载电压降的实际方向。因为忽略了导线电阻,电阻上的电压降等于电源的端电压。电流、电动势和电压的实际方向用虚线箭头表示,如图 1.4 所示。

规定上述各物理量实际方向的目的,是为了对电路进行分析计算。对图 1.3 所示电路来说,若已知电源的实际极性,电流与电压的实际方向很容易确定,计算也是很简单的。可是,我们通常遇到的一些实际电路,往往比较复杂,虽然已知电源的实际极性,但电路中某些支路电流实际方向却很难判断,使分析计算难于进行。可见,只有电流、电动势和电压的实际方向的概念是不够的。为此,我们需要引入参考方向的概念。

三、电流、电动势和电压的参考方向

所谓电流的参考方向,顾名思义,就是不管电流的实际方向如何,可以任意选定一个方向作为电流的参考方向。当然,选定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($I > 0$);当电流的参考方向与实际方向相反时,电流为负值($I < 0$)。如图 1.5 所示。



(a) 参考方向与实际方向一致($I > 0$) (b) 参考方向与实际方向相反($I < 0$)

图 1.5 电流的参考方向

采用了电流的参考方向以后,电流就变为代数量(有正有负)。电路图上有了电流的参考方向,就可根据电流数值的正与负知道它的实际方向。

电源电动势和端电压的参考方向,原则上也可以任意选定。如果电动势 E 和电压 U

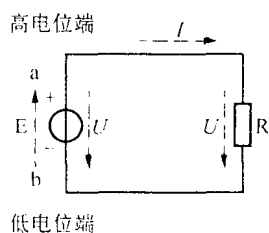


图 1.4 电流、电动势和电压的实际方向

的极性与实际方向已知,一般可选其参考方向与实际方向一致,如图 1.6 所示。

负载电压降的参考方向也可以任意选定,为了简单,使其参考方向与通过电流的参考方向一致,如图 1.6 中所示。

【例 1.1】在图 1.7 所示电路中,已知电动势为 3 V(其实际极性如图所示),电阻为 1.5Ω 。若电动势 E 、电流 I 和负载电压降 U 的参考方向按图示方向选定,试问它们数值的正负?

【解】在图示电路中,电动势的参考方向与其实际方向一致,所以为正值,即

$$E = 3 \text{ V}$$

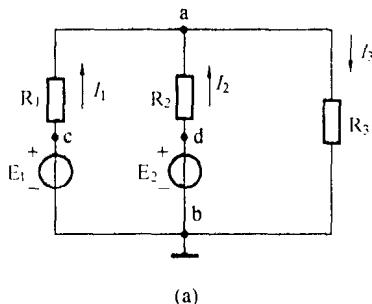
电流 I 的参考方向与其实际方向一致,所以也为正值,即

$$I = \frac{E}{R} = \frac{3}{1.5} = 2 \text{ A}$$

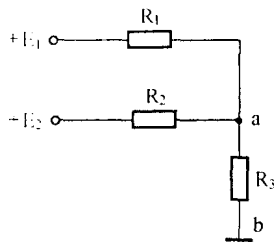
负载电压降 U 的参考方向与所通过的电流 I 的参考方向相反, I 为正值,所以 U 为负值,即

$$U = -IR = -2 \times 1.5 = -3 \text{ V}$$

【例 1.2】在图 1.8(a)中,已知 $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $E_1 = 72 \text{ V}$, $E_2 = 120 \text{ V}$, $I_1 = 18 \text{ A}$, $I_2 = -4 \text{ A}$, $I_3 = 14 \text{ A}$ 。各电动势的极性和各电流的参考方向如图(a)所示。若设 b 点为参考点,试求 a 点电位。



(a)



(b)

图 1.8 例 1.2 的电路

【解】由前所述,电路中某点电位的数值与所选参考点有关。

本例中,因已设 b 点为参考点,所以

$$V_a = V_c - I_1 R_1$$

式中 V_c 为 c 点的电位

$$V_c = E_1 = 120 \text{ V}$$

$I_1 R_1$ 为电阻 R_1 上的电压降(也叫电位降)

$$I_1 R_1 = 18 \times 2 = 36 \text{ V}$$

于是

$$V_a = V_c - I_1 R_1 = E_1 - I_1 R_1 = 120 - 36 = 84 \text{ V}$$

当然,a 点电位也可通过另外两条支路计算出来,即

$$V_a = V_d - I_2 R_2 = E_2 - I_2 R_2 = 72 - (-4) \times 3 = 84 \text{ V}$$

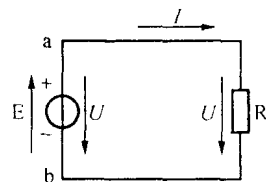


图 1.6 电源电动势、端电压及负载电压降的参考方向

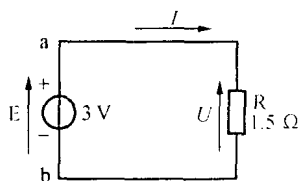


图 1.7 例 1.1 的电路

或者

$$V_a = I_3 R_3 = 14 \times 6 = 84 \text{ V}$$

可见,通过三条支路计算出来的结果是相同的。这就是说,电路中某点电位的数值虽然与所选参考点有关,但与所选的计算路径无关。因此,实际计算时应选取最简捷的计算路径。

顺便指出,利用电位概念,可将图 1.8(a)所示电路画成图 1.8(b)所示的电路,省略电源,只标出它们相应的电位值即可。

思 考 题

- 1.1 在电路中,电位与电压、电位降与电位升,各有什么关系?
- 1.2 电流的实际方向是怎样规定的? 为什么要选择电流的参考方向?
- 1.3 某电路中, $U_{ab} = -10 \text{ V}$, 试问 a、b 两点哪点电位高?
- 1.4 在电路中,为什么说某点电位的高低是相对的,而两点间的电压却是绝对的。
- 1.5 在图 1.8(a)中,若选 c 点为参考点, a 点电位和 b 点电位各为多少?

1.3 电路的基本定律

欧姆定律和克希荷夫定律是电路的基本定律,此二定律揭示了电路基本物理量之间的关系,是电路分析计算的基础和依据。

一、欧姆定律

对一个电阻元件来说,其中流过的电流与其两端的电压成正比。在图 1.9 所标定的电流参考方向的情况下,可以表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

或

$$R = \frac{U}{I}$$

这就是欧姆定律,它确定了电阻元件的电流(I)与电压(U)的关系。电阻(R)的单位是欧姆(Ω),简称欧。电阻数值很大时,则以千欧($\text{k}\Omega$)或兆欧($\text{M}\Omega$)为单位,即

$$\begin{cases} 1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega \\ 1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega \end{cases}$$

下面,我们顺便介绍一下电阻元件。

多数金属的电阻值是不随电流电压而变的(电阻为定值),用这类金属材料制成的电阻元件叫做线性电阻元件。线性电阻元件中电流与其端电压的关系,如图 1.10(a)所示,是直线关系,直线上每一点都遵循式(1.1)所表示的欧姆定律。图中两个坐标轴分别表示电压 U (单位为 V)和电流 I (单位为 A),所以叫做伏安特性。实验证明,导体电阻的大小决定于导体材料的成分、几何尺寸和导体的温度等因素。对于一根材料均匀、截面积为 S (mm^2)、长度为 l (m)的导体来说,它的电阻 $R(\Omega)$ 按下式计算,即

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.2)$$

式中, ρ 为材料的电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

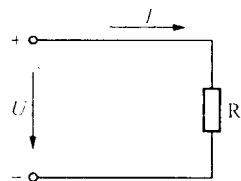
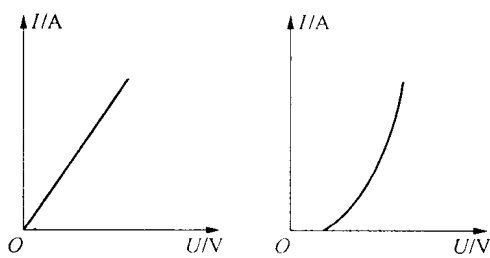


图 1.9 欧姆定律

还有一类电阻元件,叫做非线性电阻元件。当流过不同的电流或加上不同的电压时,它们就有不同的电阻值(电阻不为定值)。

非线性电阻元件中的电流和端电压不是直线关系,不遵循欧姆定律,因而不能应用式(1.1),通常表示成 $I = f(U)$ 的形式。图 1.10(b)所示曲线就是半导体二极管加正向电压时的伏安特性曲线(半导体二极管可认为是非线性电阻元件)。



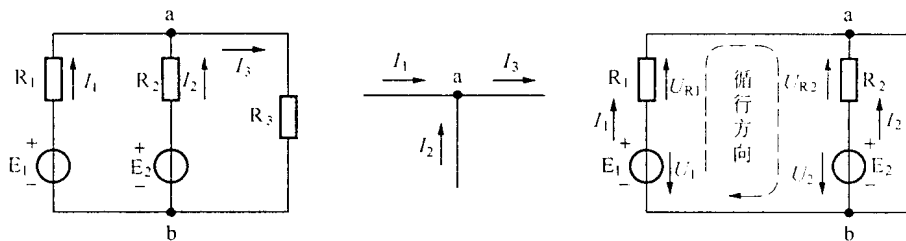
(a)线性电阻 (b)非线性电阻

图 1.10 电阻的伏安特性

关于非线性电路的分析与计算,将在本书后续的有关电子电路章节中讨论。

二、克希荷夫定律

电路从结构上看,可分为无分支电路(即单一的闭合电路)和有分支电路(简称分支电路)。图 1.11(a)所示电路就是一个分支电路。它有三个支路,分别流过电流 I_1 、 I_2 、 I_3 (图上所标均为参考方向);两个节点(a 和 b);三个回路(左右两个小回路和外围一个大回路)。



(a)分支电路

(b)分支电路的一个节点

(c)分支电路的一个回路

图 1.11 克希荷夫定律

克希荷夫定律包括克希荷夫电流定律和克希荷夫电压定律两部分内容。前者是针对节点的,确定了流入、流出某节点的各电流之间的关系;后者是针对回路的,确定了某回路各部分电压之间的关系。

1. 克希荷夫电流定律(KCL)

在一个节点上,各支路的电流有大有小。然而,对任何一个节点而言,流入电流之和等于流出电流之和。这就是克希荷夫电流定律。以图 1.11(b)为例,由于电流通过节点时电荷不会发生堆积现象,流入节点 a 的电荷总量必等于同一时间流出节点 a 的电荷总量。这就是克希荷夫电流定律的物理依据。对节点 a,可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

即

$$\sum I = 0 \quad (1.3)$$

由式(1.3),克希荷夫电流定律又可表述为:任何一个节点,流入电流的代数和恒等于

零。所谓代数和,就是要考虑各电流的正负号。如果规定流入节点的电流取正号,那么流出节点的电流就取负号。

【例 1.3】在图 1.12 所示电路中,电路 A 和电路 B 是两个独立的电路系统。现用两条导线把它们连接起来,试分析导线中电流 I_1 和 I_2 的关系。

【解】我们设想把电路 B 用一封闭面 S 包围起来,把 S 看成一个节点,有

$$I_1 - I_2 = 0$$

所以

$$I_1 = I_2$$

图 1.12 例 1.2 的电路

即两条连接导线中的电流相等。如果其中一条断线,例如下

面一条, $I_2 = 0$, 则根据克希荷夫节点电流定律 $\sum I = 0$ 可知, $I_1 = 0$ 。这就是我们经常说的不构成回路电流等于零的道理。

上例说明,克希荷夫电流定律可推广应用于包围部分电路的假设封闭面。

2. 克希荷夫电压定律(KVL)

在一个回路中,各点电位有低有,各元件有电位升,有电位降。然而,对任何一个回路而言,按一定方向循环一周,则电位降之和等于电位升之和。这就是克希荷夫电压定律。我们先看一个简单的例子,如图 1.13 所示。以 A 为起点,按顺时针方向(或者逆时针方向)沿回路循环一周。电流经过 R_1 到 B 点,电位下降 $U_1 = IR_1 = 4 \times 1 = 4 \text{ V}$;再经过 R_2 到 C 点,电位又下降 $U_2 = IR_2 = 4 \times 2 = 8 \text{ V}$,共下降 12 V。由 C 点到 D 点,电位升高 $E_1 = 3 \text{ V}$;由 D 点回到 A 点,电位又升高 $E_2 = 9 \text{ V}$ 。共升高 12 V。沿回路循环一周,电位有降有升,总和都是 12 V,所以沿回路 ABCDA 的电位降之和等于电位升之和。这一结论对分支电路中的回路也是适用的。我们反过来再看图 1.11(c)所示回路,从电源 E_1 的正极开始按顺时针方向沿回路循环一周,有两处电位降低,即 $I_1 R_1$ 和 E_2 ;有两处电位升高,即 $I_2 R_2$ 和 E_1 。因而可以写为

$$\underbrace{I_1 R_1 + E_2}_{\text{电位降}} = \underbrace{I_2 R_2 + E_1}_{\text{电位升}}$$

根据电源的极性和电阻两端电位的极性,上式中的各项又可一律写成电压降的形式,即

$$E_1 = U_1$$

$$E_2 = U_2$$

$$I_1 R_1 = U_{R1}$$

$$I_2 R_2 = U_{R2}$$

于是前式可以表示为

$$U_{R1} + U_2 = U_{R2} + U_1$$

$$U_{R1} + U_2 - U_{R2} - U_1 = 0$$

即

$$\sum U = 0 \quad (1.4)$$

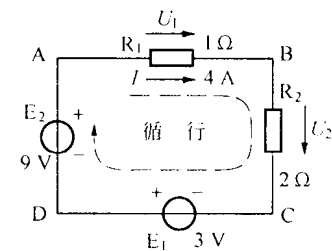
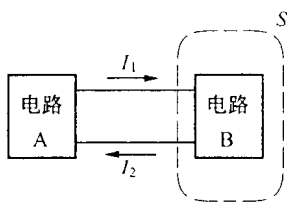


图 1.13 无分支电路中电位降与电位升的关系