

铁路职业教育铁道部规划教材

电工基础

| 雷锡绒◎主编 |

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI
DIANGONG JICHU

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

(中专)

电 工 基 础

雷锡绒 主 编

雷雪芳 主 审

中 国 铁 道 出 版 社

2007年·北 京

内 容 简 介

本书是根据铁道信号专业教学指导委员会衡阳会议讨论通过的铁道信号专业高职和中职课程《电工基础》教学大纲编写的教材。为铁路职业教育铁道部规划教材系列丛书中的一本。

主要内容有:直流电路、单相交流电路、三相交流电路、互感电路、非正弦周期电路、电路的过渡过程、磁路,共7章。每一章后附有小结和习题。

本书主要作为高等职业学院和中等职业学校铁道信号专业学生《电工基础》课程的通用教材,还可作为铁道信号专业成人教育以及其他电工培训教材或参考资料。也可供现场的技术人员使用。(带*号的内容为中职学生的选学内容,在书中用楷体编排。)

图书在版编目(CIP)数据

电工基础/雷锡绒主编. —北京:中国铁道出版社,2007.8

铁路职业教育铁道部规划教材

ISBN 978-7-113-08231-4

I. 电… II. 雷… III. 电工学 - 职业教育 - 教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 129930 号

书 名:电工基础

作 者:雷锡绒 主编

责任编辑:刘红梅 电话:010-51873134 电子信箱:mm2005@tom.com

封面设计:陈东山

责任校对:张玉华

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社

地 址:北京市宣武区右安门西街8号

邮政编码:100054

网 址:www.tdpress.com

电子信箱:发行部 ywk@tdpress.com

印 刷:中国铁道出版社印刷厂印刷

总编办 zbb@tdpress.com

版 次:2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:8.75 字数:215 千

书 号:ISBN 978-7-113-08231-4/TP·2547

定 价:19.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前言

本书是根据铁道信号专业教学指导委员会 2007 年衡阳会议讨论通过的铁道信号专业高职和中专课程《电工基础》教学大纲编写的教材。为铁路职业教育铁道部规划教材系列丛书中的一本。

本书主要作为高等职业学院和中等职业学校铁道信号专业学生《电工基础》课程的通用教材,还可作为其他电工培训教材或参考资料使用。同时也可作为铁路系统接受安置的复退军人中职和高职学历教育中《电工基础》课程的通用教材使用。

本书编写的基本要求是:体现职业教育的特色,注重电工基本概念、基本定律等基础知识的介绍,强化理解和应用能力的培养,结合职业教育的特点,在课程内容设置上力求降低理论深度,在叙述上尽量避免烦琐的数学推导和论证,力求删繁就简,易于理解和掌握,满足教学需求,为后续专业课的学习奠定好基础。

本教材的主要特点:

1. 教材的编写特点:结合教材编写要求和授课对象的实际情况。教材编写注重文字简练、深入浅出、通俗易懂;编排做到了既讲原理、又辅之以图例和例题讲解应用;每章内容之前提出了学习目标、重难点内容所在章节之后还附有疏理归纳的结论,各章之后都附有小结和习题;全书内容丰富实用、层次清晰、版面设计合理、图文并茂。

2. 教材的结构特点:结合职业教育要求,在结构上注重做到较完整全面,又独立成章;既突出基础性,又强调系统性。各章节之间、各知识点之间基本做到了由易到难、由浅入深的递进关系,构成了一个完整的教材整体。

3. 教材的内容特点:本着基础培训教学“必需、够用”的原则,在每章内容的设置上做到了有针对性的选择,对重点内容多举例或细讲(如谐振、变压器、磁路的知识等),对非重点内容概略简讲(有些章节的内容只作简单介绍或只讲公式、定律的应用而不讲公式的推导及定律的证明),对专业无关内容省略不讲(如受控源电路的分析、三相交流电路中的不对称电路的分析计算等内容)。

4. 作为高职和中职的通用教材,高职和中专课程内容的主要区别在于:带*号的内容为中职课程选学内容,在书中用楷体编排。

本书由西安铁路职业技术学院雷锡绒担任主编,马仲智参编。其中雷锡绒编写了第1章、第2章、第3章、第4章,马仲智编写了第5章、第6章、第7章,全书由雷锡绒统稿。

本教材由西安铁路职业技术学院副教授雷雪芳主审,提出了许多宝贵意见;同时还得到了本校李玉冰老师、张玮老师等其他同事的帮助和支持,在此一并表示诚挚的谢意。

因时间仓促,加之编写经验和水平所限,书中难免有不妥、疏漏之处,恳请广大师生批评指正。

编者

2007年6月于西安

目 录

第1章 直流电路	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路的基本物理量	2
1.3 电阻元件和欧姆定律	7
1.4 理想电源元件	9
1.5 基尔霍夫定律	10
1.6 电阻的串联、并联和混联	12
1.7 电阻的星形连接与三角形连接的等效变换 *	16
1.8 电源的连接及两种实际电源模型的等效变换	18
1.9 叠加定理	22
1.10 戴维南定理	23
本章小结	24
习题一	26
第2章 单相正弦交流电路	33
2.1 正弦交流电的基本概念	33
2.2 正弦量的有效值	36
2.3 正弦量的相量表示法	38
2.4 正弦电路中的电阻元件	41
2.5 正弦电路中的电感元件	44
2.6 正弦电路中的电容元件	47
2.7 基尔霍夫定律的相量形式	52
2.8 复阻抗与复导纳	53
2.9 RLL 串联电路	55
2.10 RLL 并联电路	57
2.11 谐振	59
2.12 正弦交流电路的功率	62
2.13 功率因数的提高	64
本章小结	66
习题二	68
第3章 三相正弦交流电路	73
3.1 三相电源	73
3.2 三相负载	76
3.3 对称三相电路的分析计算 *	80

3.4 三相电路的功率 *	82
本章小结	84
习题三	86
第4章 互感电路	88
4.1 互感及互感电压	88
4.2 互感线圈的同名端	90
4.3 具有互感电路的计算	92
4.4 变压器	95
本章小结	98
习题四	99
第5章 非正弦周期电流电路 *	101
5.1 非正弦周期量的产生与分解	101
5.2 非正弦周期量的有效值、平均值和平均功率	103
5.3 非正弦周期电流电路的计算	105
本章小结	106
习题五	107
第6章 电路的过渡过程 *	109
6.1 换路定律	109
6.2 一阶电路的零输入响应	111
6.3 一阶电路的零状态响应	113
6.4 一阶电路的三要素法	115
本章小结	118
习题六	118
第7章 磁 路	122
7.1 磁场的基本物理量及基本性质	122
7.2 铁磁物质的磁化	124
7.3 磁路、磁路定律及磁路的计算 *	127
7.4 交流铁心线圈的电压、电流和磁通 *	129
本章小结	131
习题七	133
参考文献	134

第1章

直流电路

直流电路是交流电路、电子电路的基础。本章主要介绍直流电路的基本概念及分析计算方法等内容。通过本章有关内容的学习,应理解电路、电路模型、电路的主要物理量、电流电压的参考方向等概念;学会电阻电路的串并联计算;复杂电阻电路的等效化简及两种实际电源的等效变换;掌握电路基本定律(欧姆定律、基尔霍夫定律)、基本定理(叠加定理、戴维南定理)的内容及应用。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电 路

电路是将一些电气设备或电气器件按一定方式组合起来,以实现某一特定功能的电流的通路。我们的日常生活、工农业生产和科研实验中,广泛应用着各种各样种类繁多、功能各异的电路。例如,各种家用电器和工农业生产设备的控制电路;传输、分配电能的电力电路;铁路运输系统中使用的各种通信、信号控制电路等等。电路的作用:一是实现能量的转换和传输;二是实现信号的传输和处理。

电路的组成可分为三部分:电源、负载和传输控制器件。即电路是通过传输控制器件将电源和负载连接起来而构成的。电路中提供电能的设备或器件称为电源或信号源;将电能加以利用的设备或器件称为负载;在电源与负载之间有传输控制器件,如导线、开关等。电路在电源作用下,才会产生电压、电流,因此有时也把电源或信号源称为激励,由激励所产生的电压和电流称为响应。例如图1-1为一只手电筒的实用直流电路,它由干电池、开关、小灯泡和连接导线组成。干电池为电源,小灯泡为负载。导线和开关是传输控制器件,用来连接电源和负载,为电流提供通路,把电源的能量供给负载,并根据负载需要接通和断开电路。

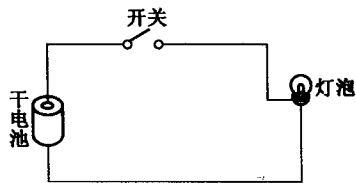


图1-1 手电筒电路图

1.1.2 电路模型

组成实际电路的电器件是多种多样的,其电磁性能的表现也是相互交织在一起,非常复杂。例如,一个实际的电阻器有电流流过时主要是将电能转化为热能,电阻器主要是一个消耗电能的器件,但通电时其周围还会产生磁场(部分电能转换为磁能),且交流时磁场会随着流过的电流的频率不同而变化,因而还兼有电感的性质;一个实际电源总有内阻,就存在内部损耗,因而在使用时不可能总保持恒定的端电压;连接导线总有一点电阻,会发热,甚至周围还产生磁场。

由此可见,任何一个实际电路器件在电路中总是同时发生多种电磁效应,这样就给分析电路带来困难。但是,电阻主要是消耗电能,电感线圈主要储存磁场能量,电容器主要储存电场能量,电池和发电机等主要提供电能。为了分析研究电路方便起见,一般在一定条件下对实际电路的器件加以近似化、理想化,只考虑其中起主要作用的电磁性质,而忽略其次要性质,用足以表征实际器件主要电磁性质的“模型”来代替实际器件,即用理想元件来表示实际电路器件。这种由一个或若干个理想电路元件经理想导体连接起来构成的电路,就称为实际电路的“电路模型”。例如,上述手电筒电路中,开关接通时,灯泡发热发光消耗电能是主要的,周围产生磁场较弱,可以忽略不计,因此可把灯泡看作一个理想的电阻元件;一个新的干电池,由于其内阻和灯泡相比很小,其内部的电能损耗可忽略不计,可把干电池看作一个电压恒定的理想电压源;连接导线很短的情况下,电阻小,损耗的电能可忽略不计,只考虑其导电性能,可把连接导线看作理想导线。这样,理想电阻元件就构成了灯泡的模型,理想电压源就构成了干电池的模型,理想导线则构成了连接导线的模型。图 1-2 为图 1-1 的电路模型。

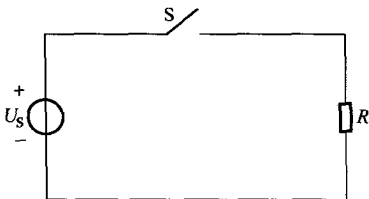


图 1-2 手电筒电路模型

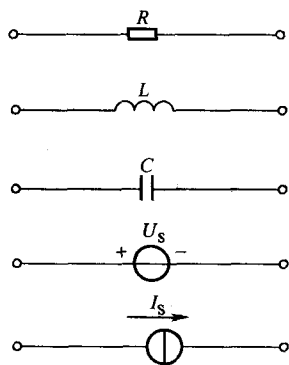


图 1-3 5 个理想电路元件的电路模型

注意:电路理论分析的对象是电路模型而不是实际电路。以后书中未加特殊说明时,所说的电路均指这种抽象的电路模型,所说元件均指理想元件。

在实际中,我们希望制作一个电阻是要利用它对电流的阻碍性能;制作一个电源是要利用它的两极间能保持有恒定电压的性质;制作连接导线是要利用它的优良导电性能。但是不可能制造出只表现出某一性质的器件,即理想器件是不可能制造出来的。

需要说明的是,实际器件和电路的种类繁多,情况复杂,而理想电路元件只有有限的几种。图 1-3 为几个常用的理想电路元件的电路模型。分别为电阻元件、电感元件、电容元件、电压源元件、电流源元件。用理想电路元件建立电路模型的目的是为了电路的研究简化。建立电路模型时应使其外部特性与实际电路的外部特性尽量近似。

1.2 电路的基本物理量

电路分析中常用到的物理量有电流、电压、功率等。本节对这些物理量的有关概念进行简单介绍。

1.2.1 电 流

电流是由电荷的定向移动而形成的。如金属导体处于电场之内时,自由电子要受到电场力的作用,逆着电场的方向作定向移动,这就形成了电流。

电流的实际方向规定为正电荷移动的方向。在外电路,电流由正极流向负极;在电源内部,电流由负极流向正极。

电流分为两类:大小和方向均不随时间变化的电流称为直流电流,简称直流,用英文大写

字母 I 表示;大小和方向随时间变化的电流称为交流电流,用英文小写字母 i 表示。本章只研究直流电路。

电流的大小用电流强度来表示。对于直流,电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

式中, I 为电流, Q 为电荷量, t 为时间。

在国际单位制(SI)中,电流的单位是安[培],符号为 A。在 1 秒(s)内通过导体横截面的电荷[量]为 1 库[仑](C)时,其电流则为 1A。在实际应用中有时感到使用安培太大或太小,使用不便。所以常用的还有千安(kA)、毫安(mA)、微安(μ A)等单位。它们与安[培](A)的换算关系为:

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

虽然我们习惯上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。但是,在分析电路时,电流的实际方向有时事先难以确定。例如,直流复杂电路中,电流的实际方向事先难以确定,交流电路中电流的实际方向还随时间的变化而不断的改变,不可能用一个固定的箭头来表示实际方向。为了解决这个问题,我们便引入了电流的“参考方向”这一概念。

在电路中事先假定的电流方向,称为电流的参考方向,电流的参考方向又称为电流的正方向。参考方向可以人为任意假定,当然,所假定的电流参考方向并不一定就是电流的实际方向。

电流的参考方向有两种表示方法

1. 在电路图中用实线箭头表示,这种方式画电路图时常用。如图 1-4 所示电路。

2. 用电流符号加双下标表示,这种方式在文字叙述时常用。如 I_{ab} 表示其参考方向是由 a 指向 b; I_{ba} 表示其参考方向是由 b 指向 a。显然,两者相差一个负号,即 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。

图 1-4 电流参考方向的表示

规定了电流的参考方向以后,电流就是一个代数数量了,也就是说,在假定参考方向以后,电流值才有正负之分,如果电流的实际方向与参考方向一致,则电流值为正,即 $I > 0$;如果电流的实际方向与参考方向相反,则电流值为负,即 $I < 0$ 。这样,就可以利用电流的参考方向和电流的正、负值判断电流的实际方向。

电流的实际方向需要在图上标出时,一般用虚线箭头表示。

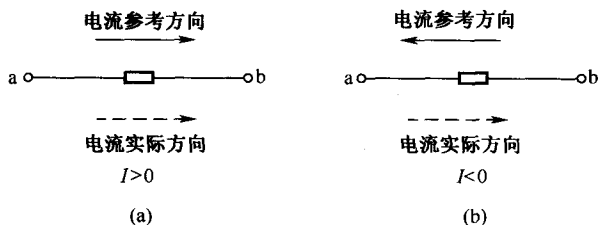


图 1-5 电流参考方向与实际方向的关系

图 1-5 所示电路,表示电流的参考方向(图中实线所示)与实际方向(图中虚线所示)的关系。其中(a)图为电流的实际方向与参考方向一致, $I > 0$; (b)图为电流的实际方向与参考方向相反, $I < 0$ 。

电流的参考方向是电路分析计算的一个重要概念,在对电路进行分析计算时,要首先标定电流的参考方向,在此基础上再根据标定的参考方向进行计算,若计算得到的结果为正值,说明电流的实际方向与标出的参考方向

相同;若计算得到的结果为负值,说明电流的实际方向与标出的参考方向相反。在未标定电流参考方向的情况下,谈电流的正负是没有意义的。

1.2.2 电压和电位

1. 电压

电压是衡量电场力做功能力的物理量。电场力把单位正电荷从电场中 a 点移到 b 点所做的功称为 a、b 间的电压。

直流电压用大写字母 U 表示,即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-2)$$

式中, U 为电压, Q 为电荷量, W 为功(电能)。

在国际单位制(SI)中,电压的单位为伏[特],符号为 V。如果电场力把 1 库[仑](C)电荷[量]从点 a 移到点 b 所作的功是 1 焦[耳](J),则 a 与 b 两点间的电压就是 1 V。常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)等。它们与伏[特](V)的换算关系为:

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}$$

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

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点。

电压的参考方向也是电路分析计算的一个重要概念,在电路分析时,也要标定电压的参考方向,通常用三种方式表示:

(1)采用参考极性表示,即在元件或电路两端用“+”“-”符号表示。

“+”表示高电位叫正极,“-”表示低电位叫负极,从正极指向负极的方向就是电压的参考方向。如图 1-6(a)所示。

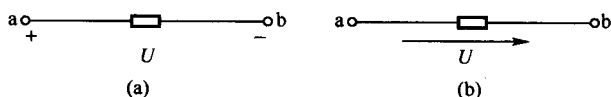


图 1-6 电压参考方向的表示

(2)采用实线箭头表示。如图 1-6(b)所示。

(3)采用双下标表示,如电压 U_{ab} 表示电压的参考方向由 a 点指向 b 点。

电压的实际方向是客观存在的,它决不会因该电压的参考方向的不同选择而改变,由此可知: $U_{ab} = -U_{ba}$ 。电压的参考方向标定后,电压就是代数量了,也就是说,在标定电压参考方向以后,电压值才有正负之分。当标定的电压参考方向与电压实际方向相同时,电压为正值,即 $U > 0$;当标定的电压参考方向与电压实际方向相反时,电压为负值,即 $U < 0$ 。

图 1-7 所示电路,表示电压的参考方向(图中实线所示)与实际方向(图中虚线所示)的关系。(a)图为电压的实际方向与参考方向相同, $U > 0$; (b)图为电压的实际方向与参考方向相反, $U < 0$ 。

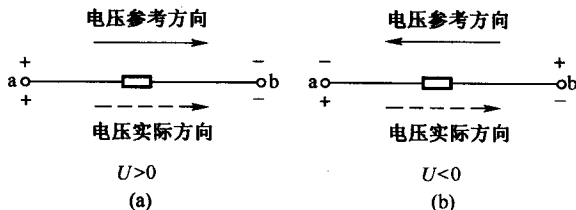


图 1-7 电压参考方向与实际方向的关系

应当注意:在电路分析计算时,首先应该标定各电流、电压的参考方向,然后才能根据标定的参考方向列出方程进行分析计算。当然,参考方向是可以人为任意标定的,如果标定的参考方向不同,求出的电流、电压大小相同,符号相反。

在电路分析时,电流的参考方向和电

压的参考极性都是可以各自独立地任意标定。两者是独立无关的。但是,为了分析方便,对一段电路或一个元件,通常采用关联参考方向,即电流从标电压“+”极性的一端流入,从标电压“-”极性的另一端流出,这种电流参考方向与电压参考方向一致的关系称为关联参考方向。如图1-8所示。电流参考方向与电压参考方向不一致的关系称为非关联参考方向。如图1-9所示。

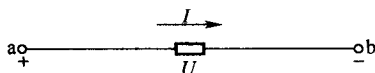


图1-8 电流与电压为关联参考方向

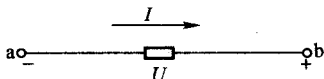


图1-9 电流与电压为非关联参考方向

例1-1 如图1-10所示,电路中电流、电压的参考方向已选定,各电流、电压的数值为: $I_1 = -3\text{A}$, $I_2 = 3\text{A}$, $U_1 = 5\text{V}$, $U_2 = -5\text{V}$,试指出电流、电压的实际方向。

解: $I_1 < 0$, I_1 的实际方向与参考方向相反,实际电流 I_1 由 b 流向 a, 大小为 3 A。

$I_2 > 0$, I_2 的实际方向与参考方向相同,实际电流 I_2 由 a 流向 b, 大小为 3 A。

$U_1 > 0$, U_1 的实际方向与参考方向相同,实际电压 U_1 由 a 指向 b, 大小为 5 V。

$U_2 < 0$, U_2 的实际方向与参考方向相反,实际电压 U_2 由 b 指向 a, 大小为 5 V。

2. 电位

在电路分析时,有时选择电路中的某一点作为一些电压公共的参考负极(即参考点),而把各点对参考点的电压叫做该点的电位。并用符号“V”表示。

参考点的图形符号为“⊥”。

参考点又叫零电位点。参考点本身的电位为零。若选电路中的 O 点为参考点,则

$$V_o = 0$$

电位实质上就是电压,其单位也是伏[特](V)。

如图1-11所示,以电路中的 O 点为参考点,则 a、b 点的电位分别为

$$V_a = V_{ao}, V_b = V_{bo}$$

则 a、b 两点间的电压为

$$U_{ab} = U_{ao} + U_{ob} = U_{ao} - U_{bo} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

(1-3)式表明,电路中 a 点到 b 点的电压等于 a 点电位与 b 点电位之差。所以电压又叫电位差。

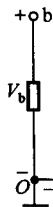


图1-11 电位表示

参考点可以任意选定,但一个电路中只能选一个参考点,一旦参考点选定后,电路中各点的电位就确定了。参考点选的不同,电路中同一点的电位就不同,即确定电路中各点电位值时必须先选定参考点。但任意两点之间的电压是不变的,即电压与参考点的选择无关。

1.2.3 电功率和电能

1. 电功率

在电路中,传递转换电能的速率叫电功率,简称功率。或者说,功率是单位时间内元件吸收或发出的电能,功率用符号 P 表示,即

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-4)$$

式中, P 为功率, W 为电能, t 为时间。

在国际单位(SI)中, 功率的单位是瓦[特], 符号为 W。常用的单位还有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。它们与瓦[特](W)的换算关系为

$$1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 10^{-3} \text{ W}$$

在直流情况下, 电流、电压选择关联参考方向时, 则

$$P = UI \quad (1-5)$$

电流、电压选择非关联参考方向时, 则

$$P = -UI \quad (1-6)$$

这样规定之后, 若计算结果 $P > 0$, 说明该元件吸收电能; 若计算结果 $P < 0$, 说明该元件发出电能。

根据能量守恒定理, 在电路中, 一部分元件发出的功率一定等于其他部分元件吸收的功率, 或者说, 整个电路的功率代数和为零, 即

$$\sum P = 0 \quad (1-7)$$

这个结论叫做“电路的功率平衡”。

2. 电能

根据(1-4)式得电能为

$$W = Pt = P(t_1 - t_0) \quad (1-8)$$

在国际单位制(SI)中, 电能的单位为焦[耳], 符号为 J。实用单位是度, 1 度指 1 千瓦的用电 1 小时所吸收的电能。即 1 度 = 1 千瓦 × 1 小时 = 1 千瓦时(kW · h)。度与焦[耳]的换算关系为

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

例 1-2 在图 1-12 所示电路中, 方框代表电源或电阻, 各电压、电流的参考方向已在图中标定。已知 $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = 1 \text{ A}$, $I_3 = -1 \text{ A}$, $U_1 = -7 \text{ V}$, $U_2 = 3 \text{ V}$, $U_3 = -4 \text{ V}$, $U_4 = 8 \text{ V}$, $U_5 = -4 \text{ V}$ 。求各元件吸收或发出的功率。并验证功率平衡。

解: 元件 3、4、5 的电压、电流为关联参考方向

$$P_3 = U_3 I_2 = -4 \times 1 = -4 \text{ W (发出)}$$

$$P_4 = U_4 I_3 = 8 \times (-1) = -8 \text{ W (发出)}$$

$$P_5 = U_5 I_3 = -4 \times (-1) = 4 \text{ W (吸收)}$$

元件 1、2 的电压、电流为非关联参考方向

$$P_1 = -U_1 I_1 = -(-7) \times 2 = 14 \text{ W (吸收)}$$

$$P_2 = -U_2 I_1 = -3 \times 2 = -6 \text{ W (发出)}$$

电路发出的总功率为

$$4 + 8 + 6 = 18 \text{ W}$$

电路吸收的总功率为

$$4 + 14 = 18 \text{ W}$$

计算结果符合能量守恒原理, 因此是正确的。

例 1-3 某教室有 40 W 的日光灯 6 只, 平均每天用电 6 h, 一月按 30 天计算, 求每月用

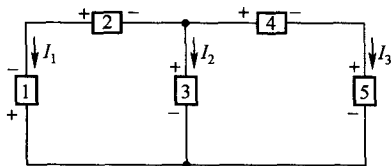


图 1-12 例 1-2 电路图

电多少度? 若每度电费 0.50 元, 一月应交多少电费?

解: 一个月消耗的电能

$$W = Pt = 40 \times 10^{-3} \times 6 \times 6 \times 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 43.2 \text{ 度}$$

一月应交电费

$$43.2 \times 0.5 = 21.6 \text{ 元}$$

1.3 电阻元件和欧姆定律

1.3.1 电阻元件及其伏安特性

物体对电流的阻碍作用称为电阻。

电阻元件是代表电路中消耗电能这一物理现象的理想二端元件。用符号 R 表示。

对于电阻元件, 只要有电流通过, 其两端就会产生电压。即电阻元件的电压和电流总是同时存在、同时消失, 它们的实际方向总是一致的。

在温度一定的条件下, 电阻元件的电流与电压的关系可以用电流为横坐标、电压为纵坐标的直角坐标平面上的曲线来表示, 这个曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。如果电阻元件上的电压和电流的大小成正比, 这样的电阻元件称为线性电阻元件, 其电阻值为常数。线性电阻元件的伏安特性曲线为通过坐标原点的一条直线。如图 1-13 所示。如果电阻元件上的电压与电流的比值不是常数, 其电阻值随电压和电流的变化而变化, 这类电阻称为非线性电阻, 例如, 半导体二极管的正向电阻就是非线性的。非线性电阻元件的伏安特性曲线为一条曲线。

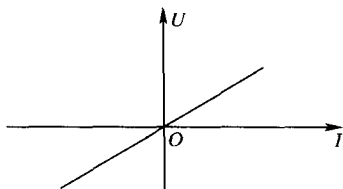


图 1-13 电阻元件的伏安特性曲线

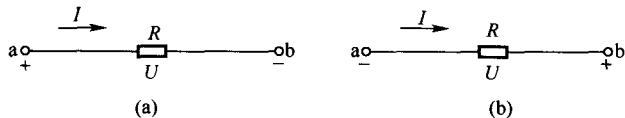


图 1-14 电阻元件电压与电流的关系

实际中使用的电器件的电阻严格地说都是非线性的。但在一定范围工作时, 可近似把它看成线性电阻。今后如果没有特别说明, 本书中所有电阻元件都指线性电阻元件。

线性电阻元件在电压、电流为关联参考方向时, 如图 1-14(a) 所示, 其电压与电流符合约束关系, 即

$$U = IR \quad (1-9)$$

(1-9) 式就是著名的欧姆定律。其中, R 是一个与电压和电流均无关的常数, 称为元件的电阻。

在国际单位制(SI)中, 电阻的单位为欧[姆], 符号为 Ω 。常用的单位还有千欧($\text{k}\Omega$), 兆欧($\text{M}\Omega$)等。它们和欧[姆](Ω)的换算关系是:

$$1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$$

$$1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$$

电阻的倒数称为电导, 用符号 G 表示, 其公式为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-10)$$

在国际单位制(SI)中, 电导的单位是西[门子], 符号为 S 。

电导也是表征电阻元件特性的参数,它反映的是元件的导电能力,用电导表征电阻元件时,欧姆定律可写成

$$I = GU \quad (1-11)$$

或

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

如果线性电阻元件在电压、电流为非关联参考方向时,如图 1-14(b)所示,则欧姆定律应写为

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

或

$$I = -GU \quad (1-13)$$

注意:欧姆定律只适用于线性电阻元件。非线性电阻元件的伏安特性曲线不是过原点的一条直线,因此,欧姆定律不适用于非线性电阻元件。

1.3.2 电阻元件的功率

在电压、电流关联参考方向下,线性电阻元件消耗的功率为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-14)$$

电阻 R 为正实常数,故功率 P 恒为正值,与电压、电流的参考方向无关。因为电阻元件是耗能元件,只要有电流通过它,无论电流的方向如何,它都要消耗电能。因此,电阻元件即使选择电压、电流的参考方向非关联,上式仍适用。这是电阻元件耗能性质的真实体现。

线性电阻元件有两种特殊情况值得注意:一种情况是电阻值 R 为无限大,电压为任何有限值时,其电流总是零,这时把它称为“开路”;另一种情况是电阻为零,电流为任何有限值时,其电压总是零,这时把它称为“短路”。

1.3.3 电阻元件的额定值

实际中各种以消耗电能为其基本性能的电热设备,通常情况下,都可以用电阻元件作为模型来分析其工作情况,但使用各种电阻器时必须注意,它们工作时的功率都有一个限额。一旦实际功率超过这个限额,设备将会由于过热而烧毁。这个功率限额叫做额定功率。

额定功率、额定电压、额定电流等,都叫做额定值。额定值是产品的生产厂家为产品规定的正常运行时的允许值。各种电器产品在额定值工作时最经济合理,安全可靠,使用寿命长。电气设备的额定值常标在铭牌上或写在说明书中,使用时必须遵守。例如,白炽灯泡上标出 220 V、40 W,是指灯泡在 220 V 额定电压工作时,消耗的功率为额定功率 40 W。若将该灯泡接在 380 V 的电源上,则会因电流过大将灯丝烧毁;反之,若电源电压低于额定值,虽能发光,但灯光暗淡。

例 1-4 有一只碳膜电阻为 100Ω , 50 W。求它的最大工作电压 U_m 。若误接到 100 V 的直流电源上,会产生什么后果?

解:由 $P_m = \frac{U_m^2}{R}$ 得

$$\text{最大工作电压为 } U_m = \sqrt{P_m R} = \sqrt{50 \times 100} = 71 \text{ V}$$

由于所加电压 100 V 大于 U_m , 所以该电阻将烧坏。

1.4 理想电源元件

常用电源中有各类电池、发电机和各种信号源,它们都是二端元件。电源中能够独立向外提供电能的电源,称为独立电源,它包括电压源和电流源,不能独立向外电路提供电能的电源称为非独立电源,又称受控源。

本节介绍直流独立源。

1.4.1 理想电压源

如果电源输出恒定的电压,即电压的大小与电流无关,我们把这种电源叫理想电压源。

理想电压源是实际电源的一种理想模型。其图形符号如图 1-15 所示,其中 U_s 为电压源电压,“+”、“-”为电压的参考极性。

理想电压源具有两个特点:

1. 理想电压源对外提供的电压为恒定值(交流时为一定的时间函数),与通过它的电流无关。
2. 通过电压源的电流随外接电路的不同而不同。

直流电压源的电压是定值 U_s ,其波形曲线如图 1-16 所示。

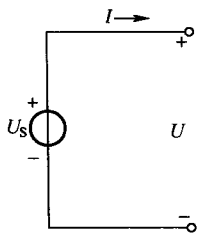


图 1-15 理想电压源图形符号

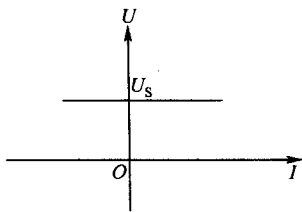


图 1-16 直流电压源的伏安特性

电压为零的电压源相当于短路线。

如果选择理想电压源上电压与电流为关联参考方向,则其功率为

$$P = U_s I \quad (1-15)$$

如果 $P > 0$ 时,电压源实际上是接受功率。此时,电压源在电路中起负载作用。实际电池充电时就是这种状态。

如果 $P < 0$ 时,电压源实际上是发出功率。此时,电压源在电路中起电源的作用。

如果 $P = 0$ 时,电压源处于开路状态,既不吸收功率,也不发出功率。

1.4.2 理想电流源

如果电源输出恒定的电流,即电流的大小与端电压无关,我们把这种电源叫理想电流源。

理想电流源也是一种理想二端元件,其图形符号如图 1-17 所示:其中 I_s 为电流源输出的电流,箭头标出了它的参考方向。

理想电流源具有两个特点:

1. 理想电流源对外供出的电流为恒定值(交流时为一定的时间函数),而与它的端电压无关。

2. 电流源的端电压随外接电路的不同而不同。

直流电流源的电流是定值 I_s , 其波形曲线如图 1-18 所示。

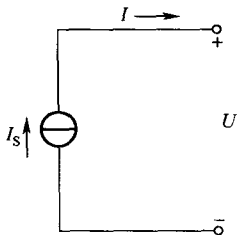


图 1-17 理想电流源图形符号

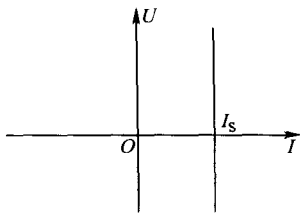


图 1-18 直流电流源伏安特性

如果选择理想电流源上电压与电流为关联参考方向, 则其功率为

$$P = UI_s \quad (1-16)$$

如果 $P > 0$ 时, 电流源实际上是接受功率。此时, 电流源在电路中起负载作用。

如果 $P < 0$ 时, 电流源实际上是发出功率。此时, 电流源在电路中起电源的作用。

例 1-5 计算图 1-19 所示电路中 5Ω 电阻两端的电压 U_2 和电流源、电阻、电压源的功率 P_1 、 P_2 、 P_3 。

解: 通过 5Ω 电阻的电流为电流源的电流, 故 $U_2 = RI_s = 5 \times 2 = 10\text{ V}$, 电流源的电流、电压为非关联参考方向, 所以

$$P_1 = -U_1 I_s = -13 \times 2 = -26\text{ W (发出)}$$

5Ω 电阻的电流、电压为关联参考方向, 所以

$$P_2 = -U_2 I_s = 10 \times 2 = 20\text{ W (接受)}$$

电压源的电流、电压为关联参考方向, 所以

$$P_3 = U_3 I_s = 3 \times 2 = 6\text{ W (接受)}$$

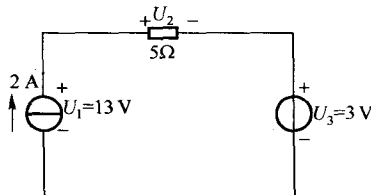


图 1-19 例 1-5 电路图

1.5 基尔霍夫定律

前面介绍了电阻元件、理想电源元件, 了解了电路中元件特性对其电压和电流的约束关系, 这一节介绍电路中各元件互联后存在的互联约束关系, 表示这类互联约束关系的是基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律是德国科学家基尔霍夫在 1845 年论证的。它阐明了任意电路中电压和电流的内在关系, 它包括电流定律和电压定律。电流定律反映了电路中各节点电流间联系的规律, 电压定律反映了电路中各回路电压之间联系的规律。基尔霍夫定律是分析和计算电路的

理论基础。

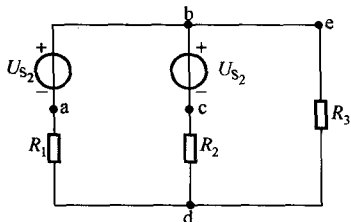


图 1-20 电路名词用图

1.5.1 几个有关电路的名词

1. 支路: 电路中流过同一电流的一个分支称为一条支路。图 1-20 中, bad、bcd、bed 均为支路, bad、bcd 中有电源, 称为有源支路, bed 中无电源, 称为无源支路。

2. 节点: 三条或三条以上支路的连接点称为节点。图 1

-20 中, b 点和 d 点是节点, a、c、e 不是节点。

3. 回路: 由若干支路构成的闭合路径称为回路。图 1-20 中, bcdab、bedcb、bedab 都是回路。

4. 网孔: 内部不含支路的回路称为网孔。网孔是回路的一种。图 1-20 中, bcdab、bedcb 都是网孔, bedab 不是网孔。

5. 网络: 电路的总称。一般把较复杂的电路称为网络。

1.5.2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律, 英文缩写为 KCL, 它反映了电路中任一节点所连接的各支路电流之间的约束关系。该定律的内容为: 在电路中, 任何时刻, 流入任一节点的支路电流之和恒等于流出该节点的支路电流之和。或者说: 任何时刻, 流入(或流出)电路中任一节点的支路电流的代数和恒等于零。即

$$\sum I = 0 \quad (1-17)$$

如图 1-21 所示, 对于节点 a, 在图示各电流参考方向下, 由 KCL 得

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

即

$$I_1 + I_3 + I_5 - I_2 - I_4 = 0 \quad (1-18)$$

$$\sum I = 0$$

在(1-18)式中, 流入节点的电流前取正号, 流出节点的电流前取负号。当然也可以做相反的规定。而电流是流出节点还是流入节点均按电流的参考方向判定。

基尔霍夫电流定律是电荷守恒定律的体现, 也是电流连续性原理在电路节点上的体现。

KCL 原是适用于节点的, 也可以把它推广运用于电路的任一假设的封闭面。如图 1-22 所示, 由 KCL 得

$$\text{节点 1} \quad I_1 + I_6 - I_4 = 0$$

$$\text{节点 2} \quad -I_5 - I_2 + I_4 = 0$$

$$\text{节点 3} \quad I_3 + I_5 - I_6 = 0$$

将以上三式相加, 得

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

可见对于闭合封闭面, 电流的代数和也是零, KCL 同样成立。

1.5.3 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律, 英文缩写为 KVL, 它反映了电路中任一回路内各段电压之间的约束关系。该定律的内容为: 在电路中, 任何时刻, 任一闭和回路内各元件上的电压升之和等于电压降之和。或者说: 任何时刻, 沿电路中任一闭和回路内各段电压的代数和恒为零。即

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

用(1-19)式列写回路电压方程时, 先要任意规定回路绕行的方向(顺时针或逆时针), 凡

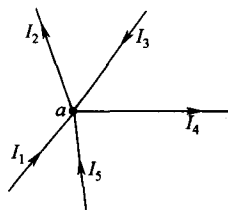


图 1-21 KCL 说明用图

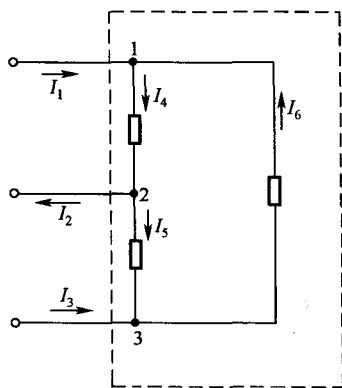


图 1-22 基尔霍夫电流定律的推广