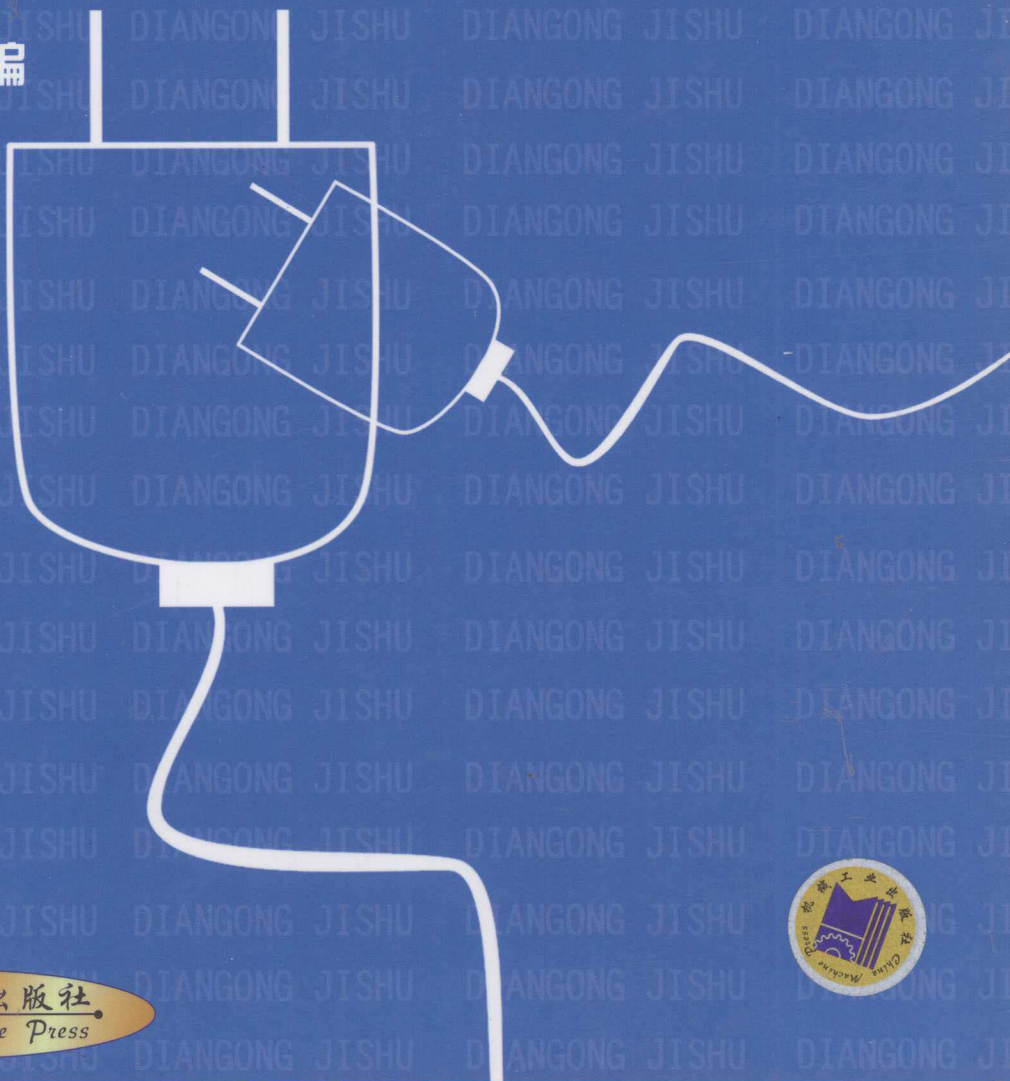


高 职 高 专 规 划 教 材

电 工 技 术

薛涛 主编



机械工业出版社
China Machine Press

高职高专规划教材

电 工 技 术

主编 薛 涛

参编 刘妹英 田名义

王占元 姜 萌

林 曦

主审 蔡金锭



机 械 工 业 出 版 社

本教材是根据机械职业教育基础课教学指导委员会电工及电子技术学科组的决定编写的。基本内容符合原国家教委“高等学校工程专科电工学课程教学基本要求”。全书分电路基础、电机与控制、供电用电与测量三个模块,内容包括直流电路、正弦交流电路、磁路与变压器、电动机、常用低压电器与继电-接触器控制电路、可编程控制器、供电及安全用电、电工仪表与测量基本知识等八章。每章末有思考题与习题,附录中给出了习题参考答案。

本书内容新颖、深浅适度、文字简洁、流畅,注重工程应用。适用于高职高专工科非电类专业学生使用,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/薛涛主编. —北京:机械工业出版社, 2002. 8

高职高专规划教材

ISBN 7-111-10002-6

I. 电... II. 薛... III. 电工技术—高等学校:技术学校—教材
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 044108 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:于奇慧 王保家 卢若薇 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:陈 沛 责任印制:杨 曦

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 8 月第 1 版第 4 次印刷

787mm×1092mm $1/16$ · 11.75 印张 · 287 千字

定价:17.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

本套教材分为《电工技术》与《电子技术》两本书，是机械职业教育基础课教学指导委员会电工及电子技术学科组 2001 年 11 月在福建职业技术学院召开的会议上决定编写的，并作为机电类高职教育“十五”规划教材。

本套教材是在本学科组组编的《电工学》（丁承浩主编）与《工业电子学》（刘继平主编）的两本书基础上，根据机械职业教育机械类专委会制订的高职教学计划中对本课程的要求而重新编写的，可作为工科高职院校“机械制造”、“数控加工技术”、“机电技术应用”、“汽车制造与维修”、“机械设备维修与管理”、“模具设计与制造”、“铸造”、“金属热处理”、“焊接”等机械类专业的“电工技术”、“电子技术”课程教材使用，也可供其他非电类高职专业作为教材选用。

“电工技术”作为机类专业一门重要的技术基础课，其任务是使学生具有第一线工程技术人员必备的分析基本电路的能力；选择和使用电动机、低压电器及有关电气控制线路的能力；分析基本控制线路及维护电气控制线路的能力。并为专业后续内容的学习打下必备的基础。

本书编写的指导思想是理论知识以必须、够用为度，突出工程应用，强调工程意识的培养。因此在改编时，对定理不作严格的证明，公式、重要的结论只作必要的推导，把大部分篇幅放在讲清物理概念与应用上，尤其注意精选一些工程中的应用作为例子。考虑到作为面向 21 世纪的新教材，改编时压缩、兼并和删除了一部分比较陈旧的内容，对传统内容进行精选，保证了必须的基础知识，并注意更新内容，力图反映新技术、新工艺、新产品。例如介绍了控制电机、新型低压电器，增加了可编程序控制器内容等。

本教材教学学时数建议为 60 学时，打 * 号的章节为选学内容。

本教材第一、三章由福建工程学院刘妹英编写，第二章由常州机械学校田名义编写，第四章由河北省机电学校王占元编写，第五、六章由杭州职业技术学院姜萌编写，第七、八章由福建工业学校林曦编写。福建工程学院薛涛担任主编，并负责全书的统稿。

本教材由福州大学蔡金铎教授担任主审，福建工程学院李建兴老师协助审校第六章。在本教材编写过程中，福建工程学院吕金莲、邱剑萍两位同志协助录入部分文字、绘制部分插图，在此一并表示诚挚的谢意。

教材中不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

编者

2002 年 4 月

目 录

前言

第一篇 电路基础

第一章 直流电路	1
第一节 电路的基本概念	1
第二节 电阻的联接	6
第三节 电压源、电流源及其等效变换	12
第四节 基尔霍夫定律与应用	16
第五节 叠加定理	20
第六节 戴维南定理	22
第七节 直流电源作用下的电感与电容 元件	24
思考题与习题	30
第二章 正弦交流电路	34
第一节 正弦交流电的基本概念	34
第二节 正弦量的相量表示法	37
第三节 单一元件接入正弦交流电路	40
第四节 电阻、电感、电容串联的交流 电路	46
第五节 电感性负载与电容并联的交流 电路	50
第六节 三相交流电	54
第七节 三相负载的联接与计算	56
思考题与习题	63
第三章 磁路与变压器	65
第一节 磁路的基本概念与定律	65
第二节 铁磁材料的磁性能	67
第三节 单相变压器	70
第四节 常见变压器及其应用	77
思考题与习题	81

第二篇 电机与控制

第四章 电动机	83
第一节 直流电动机的工作原理、结构 及分类	83
第二节 直流电动机的使用	87

第三节 三相异步电动机的分类、用途 及基本结构	89
第四节 三相异步电动机的工作原理	93
第五节 三相异步电动机的电磁转矩和 机械特性	97
第六节 三相异步电动机的起动	100
第七节 三相异步电动机的调速、反转 和制动	104
第八节 三相异步电动机的铭牌与选择 ..	107
第九节 单相异步电动机	110
* 第十节 常见的控制电动机	114
思考题与习题	117
第五章 常用低压电器与继电-接触器 控制电路	119
第一节 常用低压电器	119
第二节 三相异步电动机的直接起动控 制	129
第三节 三相异步电动机的正、反转控 制	132
第四节 三相异步电动机的减压起动控 制	135
第五节 三相异步电动机的调速和制动 控制	138
第六节 单相电动机的控制	141
思考题与习题	144
第六章 可编程控制器及其应用	145
第一节 概述	145
第二节 PLC 的结构及工作原理	146
第三节 PLC 的基本指令	148
第四节 PLC 程序设计	152
第五节 PLC 应用举例	156
思考题与习题	162

* 第三篇 供电、用电与测量

第七章 供电及安全用电	164
第一节 供电与配电	164

第二节 安全用电	165	第三节 常用电工仪表工作原理	172
思考题与习题	168	思考题与习题	177
第八章 电工仪表与测量基本知识	169	附录 习题参考答案	178
第一节 电工测量基本知识	169	参考文献	181
第二节 电工仪表基本知识	171		

第一篇 电路基础

第一章 直流电路

在物理课程中已经学过简单直流电路的分析和计算方法。本章是在物理学的基础上进一步研究复杂直流电路。故在本章的开始,讨论电路的基本物理量、电路的工作状态以及电阻的联接等,并以直流电阻电路为例,讨论求解这类电路的基本定律——欧姆定律和基尔霍夫定律;根据电路的结构特点和不同要求,介绍求解这类电路的一些基本方法,如叠加法、电压源与电流源的等效变换、戴维南定理等几种主要方法。

第一节 电路的基本概念

一、电路

电路就是电流所通过的路径,它是为了某种需要由某些电工设备及元件按一定方式组合起来的一个整体。

电路的复杂程度不同,结构形式和所能完成的任务是多种多样的。

电路的一种作用是实现电能的传输与转换,其典型的例子为电力系统。电力系统包括电源、负载和中间环节这三个组成部分,其电路示意图如图 1-1a 所示。

在电力系统中,发电机是电源,是供应电能的设备。不同类型的发电机组,可以把热能、水的势能、风能或原子能转换为电能。除发电机外,电池也是常用的电源。在电力系统中电灯、电动机、电炉等用电器称为负载,它们是消耗电能的设备。这些不同类型的负载分别把电能转换为光能、机械能和热能等。在电源与负载之间,变压器和输电线以及必要的控制与保护电器构成了电路的中间环节,它们起到传输与分配电能的作用。

电路的另一种作用是传递与处理信号,典型的例子如扩音机,其示意图如图 1-1b 所示。话筒把语言或音乐转换为相应的电压与电流,形成一定的电信号。而后通过电路传递到扬声器,把电信号还原为语言或音乐。由于话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发音,所以中间必须用放大器进行放大。信号的这种转换和放大,称为信号的处理。

在扩音机电路中,话筒是输出信号的设备,称为信号源。信号源相当于电源,但与上面

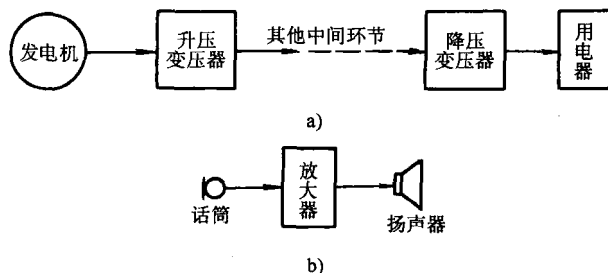


图 1-1 电路示意图

a) 电力系统 b) 扩音机

所说的发电机、电池等电源不同,信号源输出的电信号的变化规律是取决于所加的信息的。扬声器是接受和转换信号的设备,称为负载。

随着现代科技的发展,电路日益广泛地应用于信号传递与处理,如视听设备、微机系统、自动控制系统、数控加工设备等都是应用电路来传递与处理信号的比较复杂的例子。

由实际电路元件组成的电路,如电动机、变压器、晶体管以及电阻器和电容器等,由于其电磁性能比较复杂,所以很难进行定量的分析与计算。

为了便于对实际电路进行定量的分析与计算,需要将实际元件作理想化处理,即在一定的条件下突出其主要的电磁特性,忽略其次要因素,把它近似地看作某个理想电路元件或几个理想电路元件的组合。例如一个白炽灯,它除了具有电阻性、消耗电能外,当通过电流时还会产生磁场,就是说它还具有电感性,但电感很小,一般可以忽略不计,所以在直流或工业频率的交流电源作用下,白炽灯就可以视为一个理想电阻元件。所谓理想电路元件是指具有单一的、确定的电磁性能的电路元件,是对实际元件电磁性能的科学抽象与概括。理想电路元件主要有电阻元件、电感元件、电容元件、电源元件等。这些元件分别由相应的图形符号和相应的文字标注及参数来表征,见图 1-2a。

由理想元件组成的电路,称为电路模型。图 1-2b 是一个最简单的电路模型,灯泡为理想电阻元件 R ,实际电源用电动势 E 和内电阻 R_0 表示,导线和开关组成中间环节,导线视为无电阻的理想导体。本教材中以后所分析的电路均为电路模型,简称电路,像图 1-2b 这样用标准图形符号绘制的电路模型称为电路图。电路图与实际电路的几何尺寸无关,复杂的电磁过程也被理想化、简单化了。人们在电路图上可以方便地进行分析研究,找出各种电路的工作规律。

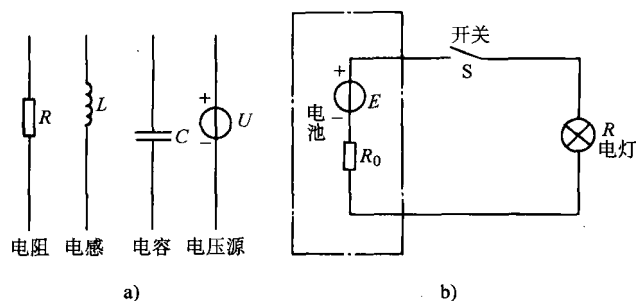


图 1-2 理想电路元件和电路模型

a) 理想电路元件 b) 电路模型

二、电路的基本物理量

1. 电流

电荷有规律的定向运动形成电流。金属导体中的自由电子带负电荷,在电场力的作用下,自由电子逆着电场方向定向运动就形成电流;同样,电解液中的正离子带正电荷,在电场力的作用下,正离子沿着电场方向作定向移动也形成电流。

电流的强弱用电流强度来表示,简称电流。电流在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量。设在极短的时间 dt 内,通过导体横截面的电荷量为 dq ,则电流为

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

如果电流的大小和方向不随时间变化,即 $\frac{dq}{dt} = \text{常数}$,则这种电流称为恒定电流,简称直流。直流电流常用大写字母 I 表示,则此时电流为

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

式中, q 是在时间 t 内通过导体横截面的电荷量, 单位为库仑 (C), 时间 t 的单位为秒 (s), 电流的单位用安培表示, 简称安 (A)。如果 1 秒 (s) 内通过导体截面的电荷量是 1 库仑 (C), 则此导体中的电流为 1 安 (A)。计量微小的电流时, 以毫安 (mA) 或微安 (μA) 表示。

$$1\text{mA}=10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。电流的实际方向是客观存在的, 但在分析较复杂的电路时, 往往难以事先判断某电路中电流的实际方向。例如图 1-3 中 R_5 中的电流实际上是由 A 流向 B, 还是由 B 流向 A, 无法判断。为此, 在分析和计算电路时, 可任意选定某一方向作为电流的正方向, 或称为参考方向, 依此对整个电路进行分析和计算。若该电流计算结果为正值, 则表示参考方向就是该电流的实际方向; 若计算结果为负值, 则表示参考方向与该电流的实际方向相反。因此, 在参考方向选定后, 电流的值才有正负之分。今后电路图上所标的电流方向均为参考方向。

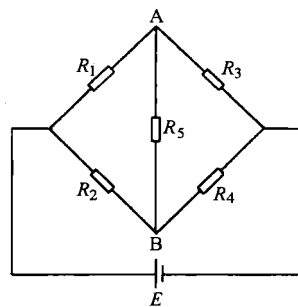


图 1-3 电桥电路

2. 电位与电压

电荷在电路中某一点具有一定的电位能, 电位能大小等于电场力将电荷由该点移到参考点时所做的功, 电荷在参考点处电位能设为零。

单位正电荷在电路中某点 (如 a 点) 所具有的电位能在数值上为该点的电位, 记为 V_a 。

$$V_a = \frac{W_a}{q} \quad (1-3)$$

式中, V_a 的单位为伏特 (V); W_a 为电荷在 a 点所具有的电位能, 单位为焦耳 (J), q 为该电荷的量, 单位为库仑 (C)。

电路中某点电位的高低是相对于参考点而言的, 参考点不同, 则各点电位的大小也不同。但参考点一经选定, 则电路中各点的电位就为一定值。参考点的电位一般设为零, 所以参考点又称零电位点。在电路中电位比参考点高的点, 其电位为正值; 电位比参考点低的点, 其电位为负值。

电路中任意两点间的电位差, 称为该两点间的电压。例如 a、b 两点间的电压为 U_{ab} , 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

电压是衡量电场力做功能力的物理量, 它在数值上等于电场力将单位正电荷由 a 点移到 b 点所做的功, 即

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} = V_a - V_b \quad (1-5)$$

式中, U_{ab} 表示单位正电荷由 a 移到 b 时电场力所作的功, 单位为伏特 (V)。

计量较大的电压时用千伏 (kV); 计量较小的电压时用毫伏 (mV) 或微伏 (μV)。

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

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点, 即电压的方向为电位降低的方向。

在复杂电路中, 有时很难确定某两点间电压的实际方向, 这时可在这两点间画一箭头作为两点间电压的参考方向。箭头所指就是电位降低的方向。分析计算后, 根据计算结果的正、负和电压的参考方向, 便可确定两点间电压的实际方向。所以, 只有在参考方向选定后, 电

压的正负才有其实际意义。

应该注意，两点间的电压大小与参考点的选择无关。

3. 电动势

为了维持电流不断地在闭合电路中流通，必须要有电源。电源内有一种外力（非静电力），它能把由电源“+”极经负载流回到“-”极的正电荷搬运到电源的“+”极，从而使正电荷沿电路不断地循行。

在发电机中，这种外力由导体切割磁力线时导体中的正、负电荷受电磁力的作用而产生；在电池中，则由电极与电解液接触处的化学反应而产生。

用电动势这个物理量来衡量外力对电荷做功的能力。

电源的电动势 E_{ba} 在数值上等于外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，如图 1-4 所示，也就是单位正电荷从 b 点（低电位）移到 a 点（高电位）所获得的电位能。在电源内部外力不断地把其他形式的能量转换为电能。

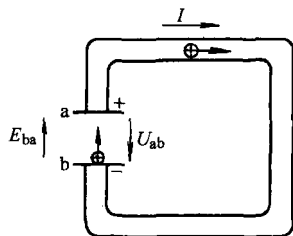


图 1-4 电动势的含义

电动势的实际方向，规定为从低电位点指向高电位点，即电动势指向电位升的方向。电动势的方向总是与电压的方向相反。电动势的单位与电位、电压的单位相同，也是伏特（V）。

三、电路的工作状态

下面以图 1-5 所示的最简单电路为例，分别讨论电路在有载工作、开路与短路时的电压、电流和功率，以及电气设备额定值的概念。

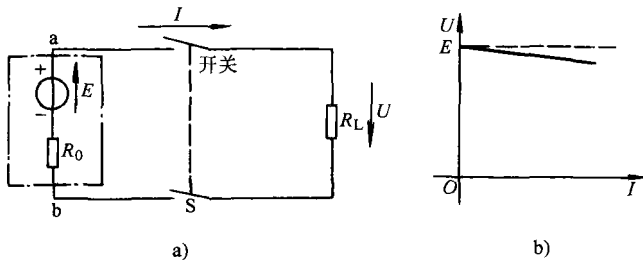


图 1-5 电源有载工作电路及其外特性曲线

a) 电源有载工作电路 b) 电源的外特性曲线

1. 有载工作

将图 1-5a 中开关 S 接通，电路便处于有载工作状态。此时电源输出的电流 I 大小取决于负载电阻 R_L 的大小。当负载电阻 R_L 变动时，电源输出的电流和功率将随之改变，因而电源端电压的高低也随之而略有变化。电源端电压 U 随输出电流 I 的变化关系，即 $U = f(I)$ ，称为电源的外特性，如图 1-5b 所示。如果电源输出的电流逐渐增大时，而端电压下降很少，这说明电源的外特性较好，即电源保持端电压恒定的能力较强；反之，则较差。

在闭合电路中，根据能量守恒定律，电源提供的电能（从非电能转换来的） W_E 和外电路取用的电能（电源输出电能） W 以及内电路消耗的电能 W_0 之间的关系为

$$W_E = W + W_0$$

从非电能转换来的电能等于电源的电动势与被移动的电荷量 q 的乘积，即

$$W_E = Eq = EIt$$

外电路取用的电能等于外电路两端的电压 U 与受电场力作用而移动的电荷量的乘积, 即

$$W = Uq = UI t$$

内电路损耗的电能等于 W_E 与 W 之差, 即

$$W_0 = W_E - W = (E - U) I t = U_0 I t$$

式中 $(E - U) = U_0$ 称为电源内部电压降。

因此电路的能量平衡方程式为

$$EI t = UI t + U_0 I t$$

等式两边同除以 t , 得

$$EI = UI + U_0 I \quad (1-6)$$

即

$$P_E = P_L + \Delta P$$

式中, $P_E = EI$ 是电源产生的总功率, $P_L = UI$ 是负载消耗的功率; $\Delta P = U_0 I$ 是电源内阻消耗的功率。

可见, 在一个电路中, 电源产生的功率和负载消耗的功率以及内阻上所损耗的功率是平衡的。

功率的单位是瓦特 (W) 或千瓦 (kW), 电能的单位是焦耳 (J)。

$$1 \text{ 焦耳 (J)} = 1 \text{ 瓦特 (W)} \cdot 1 \text{ 秒 (s)}$$

在实际应用中常用千瓦小时作为电能的单位

$$\begin{aligned} 1 \text{ 千瓦小时} &= 1 \text{ 千瓦 (kW)} \cdot 1 \text{ 小时 (h)} \\ &= 1000 \text{ 瓦 (W)} \times 3600 \text{ 秒 (s)} \\ &= 3600000 \text{ 焦耳 (J)} \end{aligned}$$

各种电气设备的电压、电流和功率都有一个额定值。例如一盏电灯上标注的电压 220V、功率 60W, 就是它的额定值。额定值是指电器设备在给定的工作条件下正常运行的允许值。

大多数电气设备 (如电灯、电炉、电动机等) 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, 由于发热的速度远远大于散热速度, 设备的温度将很快升高, 以至使绝缘迅速老化、损坏; 而当所加电压超过额定值过多时绝缘材料可能被击穿。对电灯、电炉和电阻器来说, 当电压过高或电流过大时, 其灯丝或电阻丝也将被烧毁; 反之, 如果电压和电流远低于其额定值时, 电器设备将不能在正常的情况下工作, 就不能充分发挥设备的自身潜力。

电气设备或元件的额定值常标在铭牌上或写在说明书中, 在使用时必须充分考虑额定数据。额定电压、额定电流、额定功率和额定电阻分别用 U_N 、 I_N 、 P_N 和 R_N 表示。习惯上, 电气开关标注 U_N 和 I_N ; 而电烙铁、电炉等标注 U_N 和 P_N ; 一般金属膜电阻和线绕电阻则标注 P_N 和 R_N ; 而电机专用的铸铁调速电阻则标 I_N 和 R_N 。

特别注意, 电气设备使用时, 电压、电流和功率的实际值不一定等于额定值, 但应该保证它不超过额定值。

例 1-1 有一额定值为 220V、60W 的灯泡, 接在 220V 电压的电源上, 如果每晚使用 3h (小时), 问一个月消耗电能多少度 (kW · h)?

解 一个月用电

$$\begin{aligned} W &= P t = (60 \times 10^{-3}) \text{ kW} \times (3 \times 30) \text{ h} = 0.06 \text{ kW} \times 90 \text{ h} \\ &= 5.4 \text{ kW} \cdot \text{h} = 5.4 \text{ 度} \end{aligned}$$

2. 开路

如图 1-5 所示的电路在开关 S 断开时, 电路便处于开路 (空载) 状态, 如图 1-6a 所示。开路又称为断路, 此时外电路的电阻对电源来说相当于无穷大, 因此电路中电流为零。断路处两点间的电压就是电源端电压, 称为开路电压或空载电压 U_0 。此时电源的端电压等于电动势, 电源不输出功率。电路开路时的特征如下:

$$I=0$$

$$U=U_0=E$$

$$P_E=0, P=0$$

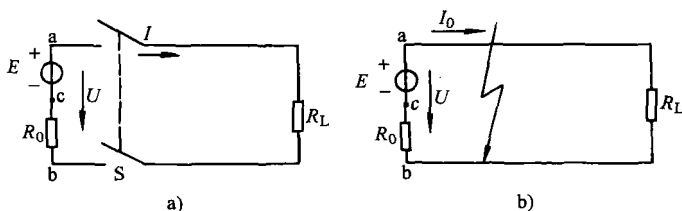


图 1-6 电路的开路与短路

a) 开路 b) 短路

3. 短路

在图 1-5 所示的电路中, 当电源的两端 a 与 b 由于某种原因而连在一起时, 电源被短路, 如图 1-6b 所示。电源短路时, 外电路的电阻可视为零, 电流从电阻为零的短路线通过, 不再流经负载。此时, 在电流的回路中仅有阻值很小的电源内阻 R_0 , 所以电流很大, 此电流称为短路电流 I_s 。短路电流可能使电源及输电装置遭受电磁力与热的损伤或毁坏。由于短路时电源所产生的电能全部被内阻消耗, 足以使电源的绝缘烧毁。

电源短路时, 由于外电路的电阻为零, 所以电源的端电压也为零。这时电源的电动势全部成为内阻压降。电源短路时的特征如下:

$$U=0$$

$$I=I_s=\frac{E}{R_0}$$

$$P=0, P_E=\Delta P=I^2 R_0$$

电源短路通常是一种严重的事故, 应该尽量预防。为了防止短路事故所引起的严重后果, 通常在电路中接入熔断器 (俗称保险丝) 或自动断路器, 以便发生短路时, 能迅速切断故障电路, 避免电源或电气设备的毁坏。

但是, 有时为了某种需要, 可以用短路方法将某一元件或某段电路从整个回路中切除掉, 这种情况与电源短路是完全不同的, 一般将这种短路称为短接。

第二节 电阻的联接

一、欧姆定律

通过电阻的电流与电阻两端的电压成正比, 这就是欧姆定律。它是分析与计算电路的基

本定律之一。图 1-7 所示的电路中电压电流参考方向一致，欧姆定律的表达式为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-7)$$

或者

$$U = IR \quad (1-8)$$

由上式可见，当所加电压 U 一定时，电阻值愈大，电流 I 愈小。这说明电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。

电阻的单位是欧姆 (Ω)。当电阻两端的电压为 1V，通过的电流为 1A 时，则该电阻为 1Ω 。计量阻值高的电阻时，则以千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 为单位。

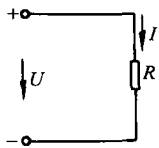


图 1-7 欧姆定律

$$1k\Omega = 10^3\Omega; 1M\Omega = 10^6\Omega$$

电阻的倒数 $1/R = G$ ，称为电导，它的单位为西门子 (S)。因此，欧姆定律也可以表示为

$$I = GU \quad (1-9)$$

例 1-2 有一额定值为 10W、 10Ω 的电阻元件，问：

- (1) 当加在电阻两端的电压为 20V 时，该电阻能否正常工作？
- (2) 若要使该电阻正常工作，外加电压不得超过多少？

解 (1) 当电压为 20V 时流过电阻的电流

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20}{10} A = 2A$$

此时电阻消耗的功率为

$$P = UI = (20 \times 2) W = 40W$$

由于 P 大于 P_N ，该电阻将被烧毁。

(2) 根据式 (1-7) 和式 (1-6) 可得

$$P = UI = U \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

则

$$U = \sqrt{P_N R} = \sqrt{10 \times 10} V = 10V$$

因此，要使该电阻正常工作，外加电压不得超过 10V。

二、电阻元件的伏安特性

式 (1-7) 中所表示的电流与电压的关系，可以通过实验得到。测量电阻元件两端的电压值和流过电阻的电流值，以电压为横坐标，电流为纵坐标，画出它的电压和电流关系曲线，这是一条通过坐标原点的直线，该直线称为电阻元件的伏安特性，如图 1-8a 所示。

遵循欧姆定律的电阻元件称为线性电阻元件，其电阻值是一个常数，与元件两端电压和流过的电流无关，其图形符号如图 1-8b 所示。

如果某电阻元件的伏安特性是一条曲线，则称此电阻元件为非线性电阻。显然非线性电阻元件的电压与电流关系是不能用式 (1-7) 欧姆定律来表示的。图 1-9a 表示半导体二极管的伏安特性，由图可见半导体二极管中的电流与加在它两

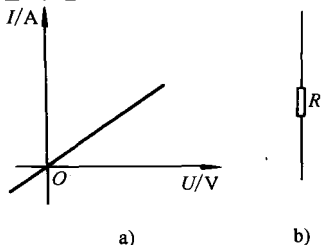


图 1-8 线性电阻元件的伏安特性和图形符号

a) 元件伏安特性 b) 图形符号

端的电压不成正比关系,不遵循欧姆定律,所以它是一个非线性电阻元件。图 1-9b 表示普通白炽灯的伏安特性。它也是一种非线性电阻元件。实际上包括电阻器在内的所有电阻元件,它们的伏安特性都不是直线,也就是在严格意义上说它们都是非线性电阻元件。但是,有些元件在一定的工作范围内,它们的伏安特性近似为直线,所以在一定的使用区间内这些电阻元件尤其是各种金属膜电阻、线绕电阻等均可认为是线性电阻。非线性电阻的图形符号如图 1-9c 所示。

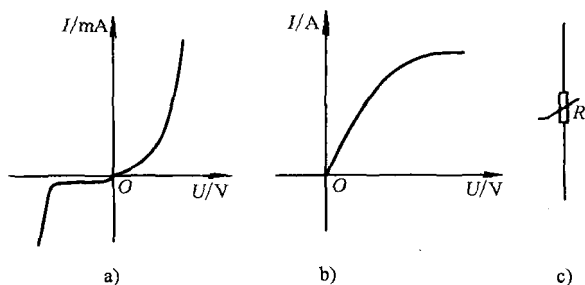


图 1-9 非线性电阻元件的伏安特性和图形符号

a) 二极管伏安特性 b) 白炽灯伏安特性 c) 图形符号

由非线性电阻元件组成的电路称为非线性电路,对非线性电路的分析与计算本书中没有涉及。本书中所研究的电路,全部由线性元件组成,即本书中所讨论的全部为线性电路。

三、电阻的联接

为便于对电路进行分析和计算,需要将复杂的电路化简为简单电路,因此必须研究电阻的串联、并联和混联等基本联接方式。

1. 电阻的串联

若干个电阻一个接一个地顺序相联,并且通过同一电流,则这样的联接方式称为电阻的串联。图 1-10 所示的串联电路有如下特点:

- 1) 串联电路中电流处处相同。
- 2) 串联电路中总电压等于各个电阻的电压之和。即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-10)$$

式中, U 为总电压, U_1 、 U_2 、 U_3 分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 上的电压。

- 3) 串联电路中总电阻等于各个串联电阻之和。即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-11)$$

通常将总电阻称为该串联电路的等效电阻。

- 4) 串联电路中各个电阻吸收的功率与该电阻阻值成正比。

由 $P_1 = I^2 R_1$, $P_2 = I^2 R_2$, $P_3 = I^2 R_3$

得

$$P_1 : P_2 : P_3 = R_1 : R_2 : R_3 \quad (1-12)$$

式中 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 吸收的功率。

- 5) 串联电路中任一电阻两端的电压与总电压的关系

由 $I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3}$

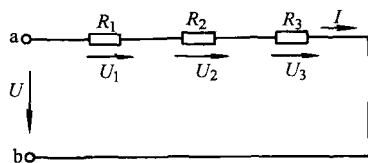


图 1-10 电阻的串联

得

$$\begin{cases} U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} U \\ U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} U \\ U_3 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U \end{cases} \quad (1-13)$$

对于两个电阻的串联,也可以表示为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1-14)$$

式(1-13)、式(1-14)表明,串联电路各电阻上的电压与该电阻成正比,串联电阻具有分压作用。在实际工作中可用这个结论来扩大电压表的量程。

例 1-3 现有一个量程为 $U_g = 3\text{V}$ 的电压表,表头内阻 $R_g = 300\Omega$,如图 1-11 所示。若要测量 300V 的电压,应在电压表上串联多大的分压电阻?

解 用量程为 $U_g = 3\text{V}$ 的电压表直接测量 300V 的电压,电压表会损坏。解决的办法是在表头串联一个分压电阻 R_1 ,使得 R_1 上分到的电压 $U_1 = (300 - 3)\text{V} = 297\text{V}$,而电压表两端的电压仍为 3V 。

根据公式(1-14)

$$\frac{R_1}{R_g} = \frac{U_1}{U_g}$$

得

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{U_1}{U_g} R_g = \frac{U - U_g}{U_g} R_g = \frac{300 - 3}{3} \times 300\Omega \\ &= 29700\Omega = 29.7\text{k}\Omega \end{aligned}$$

2. 电阻的并联

将若干个电阻的两端分别并接在一起,并且承受同一个电压,这种联接方式称为电阻的并联。图 1-12 所示的并联电路有如下特点:

- 1) 各并联电阻两端的电压相同。
- 2) 并联电路中总电流等于各支路电流之和。

即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-15)$$

式中, I 为总电流; I_1 、 I_2 、 I_3 为各并联支路电流。

- 3) 总电阻等于各并联电阻倒数和的倒数。

由

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U_1}{R_1}, I_2 = \frac{U_2}{R_2}, I_3 = \frac{U_3}{R_3} \\ I &= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \end{aligned}$$

得

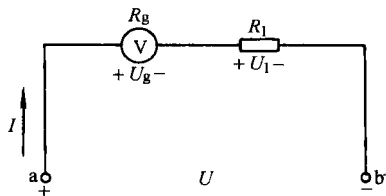


图 1-11 例 1-3 的图

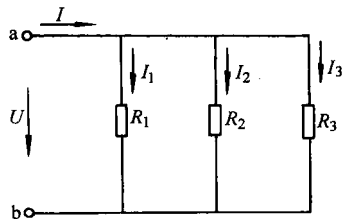


图 1-12 电阻的并联

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} \quad (1-16)$$

4) 并联电路中各个电阻吸收的功率与该电阻阻值的倒数 (即电导) 成正比。

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}, P_2 = \frac{U^2}{R_2}, P_3 = \frac{U^2}{R_3}$$

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} = G_1 : G_2 : G_3 \quad (1-17)$$

5) 并联电路中任一电阻中的电流与总电流的关系, 由

$$I = G_1 U + G_2 U + G_3 U = (G_1 + G_2 + G_3) U$$

$$U = \frac{I}{G_1 + G_2 + G_3}$$

得

$$\begin{cases} I_1 = G_1 U = \frac{G_1}{G_1 + G_2 + G_3} I \\ I_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2 + G_3} I \\ I_3 = \frac{G_3}{G_1 + G_2 + G_3} I \end{cases} \quad (1-18)$$

式中, $G_1 = 1/R_1$, $G_2 = 1/R_2$, $G_3 = 1/R_3$ 。

当只有两个电阻并联时, 也可以表示为

由
$$U = R_1 I_1 = R_2 I_2 = RI = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} I = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I$$

得
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1-19)$$

或
$$\begin{cases} I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases} \quad (1-20)$$

式 (1-19)、式 (1-20) 表明, 并联电路流过各电阻的电流与该电阻成反比, 并联电阻具有分流作用。这个结论可以用来扩大电流表的量程。

例 1-4 有一个电流表, 其量程 $I_g = 200 \mu A$, 表头内阻 $R_g = 0.8 \Omega$, 如图 1-13 所示。现将量程扩大到 1 mA , 并联电阻 R_1 应多大?

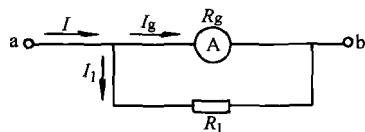


图 1-13 例 1-4 的图

解 用量程为 $I_g = 200 \mu A$ 的电流表直接测量 1 mA 的电流, 电流表会损坏。解决的办法是在表头两端并联一个分流电阻 R_1 , 使得 R_1 上分到的电流 $I_1 = (1000 - 200) \mu A = 800 \mu A$, 而流过电流表的最大电流仍为 $200 \mu A$ 。

根据分流公式 (1-19)

$$\frac{I_1}{I_g} = \frac{R_g}{R_1}, R_1 = \frac{R_g I_g}{I_1} = \frac{R_g I_g}{I - I_g}$$

得

$$R_1 = \frac{R_g I_g}{I - I_g} = \frac{0.8 \times 200}{1000 - 200} \Omega = 0.2 \Omega$$

实际生产和生活中负载多数是并联使用的。负载并联运用时,如果忽略输电线上电阻,则并联的负载均处于同一电压之下,任何一个负载的工作状态基本上不受其他负载的影响。并联的负载电阻愈多(负载增加),则总电阻值愈小,电路中总电流和总功率也愈大。但是每个负载的电流和功率却基本不变。

3. 电阻的混联

既有电阻串联又有电阻并联的电路叫混联电路。串联部分具有串联特点,并联部分具有并联的特点。只要能准确判断电路某一部分各电阻的串、并联关系,根据串、并联电路的特点,混联电路的问题是不难解决的。

求解混联电路时应采用逐步解决的办法,就是先将串联或并联部分的等效电阻求出,而后再求总的等效电阻,使电路一步步简化。

例 1-5 如图 1-14 所示电路,求开关 S 断开与闭合时 R_{ab} 各等于多少?

解 S 断开时 R_1 与 R_2 串联, R_3 与 R_4 串联,两组串联的结果最后并联。

$$R_{ab} = \frac{(36+24)(36+24)}{(36+24) + (36+24)} \Omega = 30 \Omega$$

S 闭合时 R_1 与 R_3 并联, R_2 与 R_4 并联,两组并联的结果最后串联。

$$R_{ab} = \left[\frac{36 \times 36}{36 + 36} + \frac{24 \times 24}{24 + 24} \right] \Omega = 30 \Omega$$

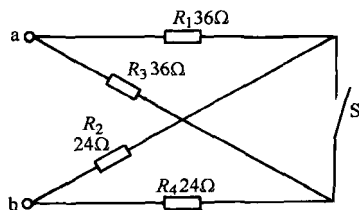


图 1-14 例 1-5 的图

例 1-6 如图 1-15a 所示的电路,电阻值如图中所示,求等效电阻 R_{AB}

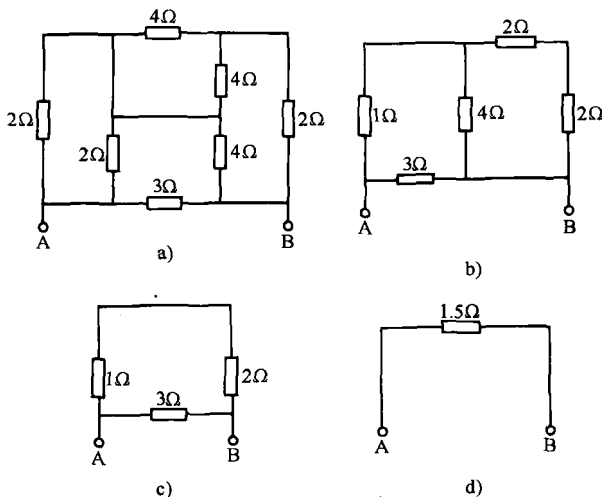


图 1-15 例 1-6 的图

解 将电路图中间无电阻导线缩为一个点后,可看出左侧两个 2Ω 电阻为并联关系,上面两个 4Ω 电阻为并联关系,将并联后的等效电阻替换图 a 后,结果如图 b 所示。图 b 中右侧两个 2Ω 电阻串联后与中间 4Ω 电阻并联等效为一个 2Ω 电阻,如 c 图。