



21世纪普通高等教育规划教材

电 工 学 (土 建 类)

李柏龄 主编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育规划教材

电工学（土建类）

主编 李柏龄

参编 严洁 尚伟

潘爱先 张冬梅

主审 高礼魁



机械工业出版社

本书是根据全国高等学校土建类专业电工学教学的实际情况和课程改革的需要,并参照“少学时电工技术(电工学 I)课程教学基本要求”编写的一本新型教材。具有紧密结合土建类专业和满足该专业实际需要的特点。其内容分为基础篇和应用篇两大部分,前者包括直流电路、交流电路、变压器、电动机及控制,后者包括建筑供配电、电气照明、建筑弱电系统、安全用电与防雷。全部内容可在 48 学时内教完,对于学时更少的院校可以应用篇为主讲授。

本书为土建类专业学生编写,亦可作为相关专业的建筑电气课程的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电工学(土建类)/李柏龄主编. —北京:机械工业出版社, 2004.8

21 世纪普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14853-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 065949 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王保家 责任编辑:刘丽敏 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:张静 责任印制:李妍

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·15 印张·368 千字

定价:21.00 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) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是根据全国高等学校土建类专业电工学课程教学改革的实际情况，并总结了编者近年来在该专业教学的经验。编写过程中参照了2004年制订的少学时电工技术（电工学Ⅰ）教学基本要求。

本教材内容分为基础篇与应用篇两大部分。基础篇力求少而精，以够用为度，基本内容包括直流电路、交流电路、变压器、异步电动机及控制；应用篇为建筑电气，紧密结合土建专业，以强电为主，兼顾弱电。其内容包括建筑供配电、建筑电气照明、建筑弱电系统、安全用电与建筑防雷，这部分本着迎接新世纪进行教学改革的精神，还将建筑电气发展性与拓宽性内容编入教材。

上述内容覆盖了少学时电工技术（电工学Ⅰ）的教学基本要求（其中电工测量在实验教学中，故未写入本教材），同时又满足了土建类及相关专业的特殊需要。本教材主要作为土建类专业本科电工学教材，亦可作为相关专业建筑电气教材。

本书每章末尾都附有小结，以帮助学生了解该章基本内容和要点之所在。为了培养学生分析和解决问题能力，每章都有一定数量的习题，供教学时选用。

土建类电工学课程参考学时为32~48，对于学时较多的学校能教完全部内容。学时少者教师可根据情况对本书内容有所取舍，以应用篇为主进行教学。

本书由西安建筑科技大学李柏龄任主编，负责全书策划与定稿。其中第一章由青岛建工学院张冬梅编写，第二、七章由青岛建工学院潘爱先编写，第四章由李柏龄编写，第三、五章由长安大学尚伟编写，第六、八章由西安建筑科技大学严洁编写。另外，严洁还协助主编做了很多工作。

全书承西安建筑科技大学高礼魁教授主审，并于2004年3月在西安召开了本书审稿会。参加审稿会的还有西安交通大学王采堂教授、机械工业出版社高等教育分社王保家同志等。他们对本书提出了许多宝贵意见和有益的建议，谨此致以衷心的感谢。

本书的编写得到参编院校的大力支持与帮助，特别是编者所在学校西安建筑科技大学对本书以重点教材给予扶持，在此顺致谢意。

由于我们水平有限，疏漏与错误在所难免，恳请使用本书的教师和读者不吝指正。意见寄西安建筑科技大学电工与电子技术教研室。

编 者

20004年4月于西安

目 录

前言

基 础 篇

第一章 直流电路	1	第五节 阻抗的串联与并联	41
第一节 电路的组成与物理量	1	一、阻抗的串联	41
一、电路的作用与组成	1	二、阻抗的并联	41
二、电路的物理量	2	第六节 串联谐振与并联谐振	43
第二节 电路的基本状态	5	一、串联谐振	43
一、有载状态	5	二、并联谐振	45
二、开路状态	7	第七节 功率因数的提高	46
三、短路状态	7	第八节 三相电路	48
第三节 电压源和电流源	8	一、三相电压的产生	48
一、电压源	8	二、三相电源的星形(Y形)联结	50
二、电流源	9	第九节 三相负载的连接	51
第四节 基尔霍夫定律	10	一、三相负载的星形(Y形)联结	51
一、基尔霍夫电流定律(KCL)	10	二、三相负载的三角形(Δ 形)联结	54
二、基尔霍夫电压定律(KVL)	11	第十节 三相负载的功率	56
第五节 支路电流法	12	本章小结	57
第六节 叠加原理	14	习题二	60
第七节 戴维南定理	16	第三章 变压器	65
本章小结	19	第一节 变压器的用途及结构	65
习题一	20	一、变压器的用途	65
第二章 正弦交流电路	24	二、变压器的结构	65
第一节 正弦交流电的基本概念	24	第二节 单相变压器的工作原理	67
一、正弦量的特征量	25	一、空载运行与电压变换	67
二、正弦量的有效值	25	二、有载运行与电流变换	69
三、同频率正弦量的相位差	26	第三节 变压器的运行特性	71
第二节 正弦量的相量表示法	28	一、变压器的外特性	71
一、复数与复平面上的矢量	28	二、变压器的损耗和效率	72
二、相量的概念与正弦量的相量表示法	30	第四节 三相变压器	73
第三节 电阻、电感和电容的正弦交流	33	一、三相变压器的连接方式	73
电路	33	二、变压器的额定值	74
一、电阻的正弦交流电路	33	第五节 特殊变压器	76
二、电感的正弦交流电路	34	一、单相自耦变压器	76
三、电容的正弦交流电路	36	二、仪用互感器	77
第四节 RLC 串联交流电路	38	三、电焊变压器	79
		本章小结	79
		习题三	80
		第四章 异步电动机及其控制	82
		第一节 三相异步电动机的构造	82

一、定子	82
二、转子	82
第二节 异步电动机的工作原理	83
一、旋转磁场的产生	83
二、转子的转动原理	85
第三节 异步电动机的机械特性	86
一、异步电动机的电磁转矩	86
二、异步电动机的机械特性	88
第四节 异步电动机的起动和调速	90
一、异步电动机的起动	90
二、异步电动机的调速	92
第五节 异步电动机的铭牌数据和选择	94
一、异步电动机的铭牌	94
二、异步电动机的技术数据	95
三、异步电动机的选择	96
第六节 常用低压电器	98
一、刀开关与组合开关	99
二、主令电器	100
三、熔断器和热继电器	101
四、交流接触器与中间继电器	102
五、低压断路器和漏电保护开关	103
第七节 常用电动机控制电路	105
一、单向旋转控制线路	105
二、正反转控制线路	106
三、两地控制	107
四、顺序控制	107
五、行程控制	108
六、电气控制线路图绘制	109
七、PLC 控制器	110
本章小结	110
习题四	111

应 用 篇

第五章 建筑供配电	113
第一节 电力系统概述	113
一、电力系统	113
二、电力系统的电压	115
三、民用建筑供电系统	116
第二节 电力负荷的计算	116
一、基本公式(确定用电设备组计算负荷)	116
二、设备容量 P 的确定	117

三、多组用电设备计算负荷的确定	118
第三节 变配电所的主要电气设备	121
一、高压一次设备	121
二、变压器的选择	124
第四节 变配电所及其主结线	125
一、变配电所的类型与结构	125
二、变配电所的主结线图	126
三、变配电所的布置、结构及对土建的要求	129
第五节 低压配电线路	132
一、低压配电线路的结线方式	132
二、低压配电线路的结构	132
三、配电导线截面的选择	134
第六节 建筑供配电设计简介	138
一、设计内容及步骤	138
二、设计图例	139
本章小结	141
习题五	143
第六章 建筑电气照明系统	144
第一节 照明工程中的几个光学概念	144
一、光的基本概念	144
二、光的度量单位	145
三、照度	146
第二节 照明质量	149
一、合理的照度	149
二、照度的均匀性	150
三、适宜的亮度分布	151
四、限制眩光	151
五、光源的显色性和色温	152
六、照明的稳定性	153
七、阴影	154
八、节能	154
第三节 照明种类	154
一、正常照明	154
二、应急照明系统	155
三、值班照明	155
四、警卫照明	155
五、障碍照明	156
六、装饰照明	156
七、艺术照明	156
第四节 电光源种类和选择	156
一、电光源的种类	156
二、电光源的特性	160

三、电光源的选择.....	162	四、联动控制器.....	199
四、电光源的命名方法.....	162	五、灭火系统及其控制.....	200
第五节 灯具的选择与布置.....	163	第二节 安全防范系统.....	204
一、照明灯具的特性.....	163	一、安全防范系统概述.....	204
二、照明灯具的分类.....	165	二、入侵防范系统.....	205
三、其他照明装置.....	167	三、闭路监控系统.....	205
四、照明灯具的选择.....	168	第三节 闭路电视系统.....	208
五、照明灯具的布置.....	169	一、闭路电视的功能.....	208
第六节 照明计算.....	171	二、闭路电视系统的组成.....	209
一、利用系数法.....	171	第四节 综合布线.....	210
二、单位容量法.....	173	一、综合布线系统的特点.....	210
第七节 照明供电线路.....	174	二、综合布线系统的运用场合.....	211
一、照明供电系统.....	174	三、综合布线的系统.....	212
二、照明配电系统.....	176	本章小结.....	213
三、照明控制.....	177	习题七.....	213
四、照明负荷计算.....	178	第八章 安全用电与建筑防雷.....	214
五、照明导线和电缆的选择.....	181	第一节 电气安全.....	214
六、控制与保护电器的选择.....	182	一、电流对人体的危害.....	214
七、照明线路的敷设.....	183	二、触电形式.....	214
第八节 照明设计举例.....	185	三、电气安全措施.....	216
一、设计所需的资料.....	185	第二节 过电压及防雷.....	216
二、设计的要素.....	185	一、过电压.....	216
三、设计的主要内容.....	186	二、雷电的概念.....	217
四、设计方案形成的步骤.....	186	三、民用建筑物的防雷等级.....	219
五、建筑 CAD 软件.....	186	四、建筑物的防雷措施.....	219
六、电气施工图识图.....	186	五、建筑物的防雷装置.....	220
七、照明设计举例.....	189	六、等电位联结.....	224
本章小结.....	194	第三节 电气设备的接地与接零.....	224
习题六.....	195	一、接地与接零的类型.....	225
第七章 建筑弱电系统.....	196	二、接地与接零的要求.....	226
第一节 火灾报警控制系统.....	196	三、按接地方式构成的低压配电系统.....	227
一、火灾报警控制系统的工作原理.....	196	本章小结.....	230
二、火灾探测器.....	197	习题八.....	231
三、火灾报警控制器.....	199	参考文献.....	232

基 础 篇

第一章 直 流 电 路

随着科学技术发展, 电工学已广泛应用于包括土木建筑在内的各个生产领域。虽然电器设备种类繁多, 功能也不尽相同, 但大多数电器设备都是由各种基本电路组成的, 因此掌握电路的分析与计算方法十分重要。本章在介绍直流电路各种元件的伏安关系 (或伏安特性) 与基尔霍夫两定律的基础上, 重点讨论了支路电流法、叠加原理和戴维南定理等电路的基本分析与计算方法。

应该指出, 本章虽然讲的是直流电路, 但上述基本规律与分析方法同样适用交流电路。

第一节 电路的组成与物理量

一、电路的作用与组成

就构造性而言, 按一定任务将若干电气设备和器件按一定方式相互连接, 构成电流通路的总体称为电路。就功能性而言, 电路就是以电流为媒介, 实现能量转换和电信号 (反映语音、文字、图像、电码等信息特征的电压或电流称为电信号) 处理的集合体。

在实际电路中, 存在着各种形式能量间的相互转换, 如电能与机械能间的转换, 电场能与磁场能间的转换, 电能与热能、声能、化学能间的转换。各种形式能量间相互转换的过程就成为实际电路中电能或电信号的产生、传输、转换、控制的过程。

为表征电能与其他能量间相互转换的特性, 可引入电源与负载的概念。这样, 构成实际电路的各种电气设备与器件, 按其在电路中的作用分为三部分:

(1) 电源 电源是产生电能或电信号的设备。电源设备可以将其他形式的能量转换为电能, 例如发电机将机械能转换为电能; 蓄电池将化学能转换为电能; 光电池将光能转换为电能。电源设备也可将一种波形的信号变换为另一种波形的信号, 例如各种信号发生器, 在通信、无线电技术及控制技术中常称为信号源。

(2) 负载 负载是利用电能或接收电信号的设备。负载设备将电能转换为其他形式的能量, 例如电动机将电能转换为机械能; 电灯将电能转换为光能; 电炉将电能转换为热能; 扬声器将电信号转换为声音等。

(3) 传输线 传输线是将电能或信号从电源输送到负载的中间设备。例如架空传输线、电缆、连接导线等都可以用来传输电能或电信号。

在电工技术中, 组成电路的实际元件种类繁多, 它们的电磁性质也比较复杂, 难以用统

一的简单数学公式描述,为研究电路的一般规律,可将实际电路元件进行科学地抽象,即在一定条件下可将其近似等效为理想电路元件(或理想电路元件的组合)。理想电路元件具有单一的电磁性质,因而可用简单数学公式描述。与实际电路相对应,由理想电路元件所组成的电路就是电路模型。

图 1-1a 所示为含有一个电源即干电池,一个负载即小灯珠和两根连接导线的简单照明电路,其电路模型如图 1-1b 所示。该图中的电阻元件 R 作为小灯珠的电路模型,干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为模型,连接导线用理想导线(设其电阻为 0)表示。

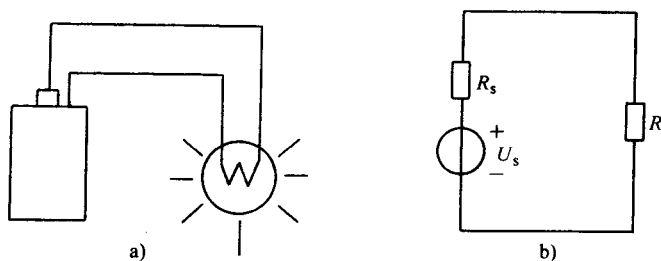


图 1-1 实际电路与电路模型

用理想电路元件或它们的组合模拟实际器件就是建立电路模型(简称建模)。建模时必须考虑工作条件,并按不同精确度的要求把给定工作情况下的主要物理现象及功能反映出来。例如,在直流情况下,一个线圈的模型可以是一个电阻元件。在较低频率下,就要用电阻元件和电感元件的串联组合来模拟,在较高频率下,则用电阻元件、电容元件和电感元件的组合来模拟。可见在不同条件下,同一实际元件可能采用不同的模型。模型取得恰当,对电路的分析及计算就较准确,否则会造成很大的误差。如果模型取得太复杂会造成分析的困难;如果模型取得太简单,就不足以反映所需求解的真实情况。因此建模必须准确恰当。

在电路的分析计算中,直接的对象不是实际的电路,而是实际的电路的理想化模型。今后在电路的分析与计算时,一般均指这种理想化的模型,同时将理想电路元件简称为电路元件。

以后还会遇到“网络”一词,“网络”是电路的泛称,二者可以通用,但“网络”具有复杂的含义,所以在分析计算复杂电路或研究一般性普遍的规律时常用“网络”一词。

二、电路的物理量

线性电路的基本物理量有电压、电动势和电流,复合物理量有功率和能量等。

1. 电流及其参考方向

带电粒子(电子或离子)的定向运动形成了电流,规定正电荷运动的方向为电流方向。为了从数量上衡量电流的大小,引入电流这一物理量。一般情况下,电流是随时间变化的,即是时间函数,用符号 $i(t)$ 表示。若在 dt 时间内通过任意导体截面的电量是 dQ ,则通过该导体的电流 $i(t)$ 为

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

或者说,电流是运动电荷对时间的变化率。

若电流不随时间变化,即任意瞬时电流的大小和方向都相同,这种电流称为恒定电流,简称直流,用大写字母 I 表示。设在 t 秒内通过任意导体截面的电量是 Q ,上式(1-1)可写为

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

式中, 电量 Q 的单位是库仑 (C); 时间 t 的单位是秒 (s); 电流 I 的单位是安培 (A)。

安培 (A) 的简称为安 (A), 是国际单位制 (SI) 中的基本单位之一。若电流较小, 也可用毫安 (mA) 或微安 (μA) 作单位, 它们之间的关系是

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

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

在电路分析中, 一段电路电流的实际方向很难预先判断, 尤其是交变电流的实际方向不断地变化, 难于在电路中标明电流的实际方向, 因此引入了电流参考方向的概念。

任意选定某一方向作为电流的参考方向, 也就是计算正值方向 (简称为正方向)。当计算出的电流为正值 ($i > 0$) 时, 表示实际方向与任意选定的方向相同。反之, 若计算出的电流为负值 ($i < 0$) 时, 表示实际方向与任意选定的方向相反。这样,

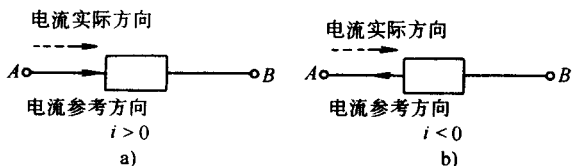


图 1-2 电流的参考方向与实际方向的关系

在指定电流参考方向的前提下, 电流被视为代数量, 电流数值的正和负, 则反映了电流的实际方向。在电路中, 电流的参考方向用箭头表示, 如图 1-2 所示, 也可用双下标表示, 如 i_{AB} 表示参考方向由 A 指向 B。

图 1-2 中框图表示任意的电路元件。

2. 电压及其参考极性

当电荷在电路中运动时, 电场力将对这些电荷做功, 为了表征电场力的做功本领, 引入了电压这一物理量, 它是电场力做功本领的量度。电路中任意两点 a 、 b 之间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力将单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功, 电压 U_{ab} 可表示为

$$U_{ab} = \frac{A}{Q} \quad (1-3)$$

式中, A 为电场力将电荷 Q 从 a 点移到 b 点所作的功, 其单位为焦耳 (J); Q 为电荷量, 单位为库仑 (C); U_{ab} 为 a 、 b 两点间的电压, 单位为伏特 (V)。

伏特 (V) 简称伏。作为电压的单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 等, 它们之间的关系是

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

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

$$1\text{mV} = 10^3\mu\text{V}$$

电压又称电位差, U_{ab} 就是电路中 a 点电位与 b 点电位之差。电压的方向规定为从高电位指向低电位, 即两点间的电压就是指这两点之间的电位降落。

在一般情况下, 电压是任意的时间函数, 用小写字母 $u(t)$ 表示两点间的瞬时电压。如果电压的大小和方向均与时间无关, 为一恒定量, 则称为直流电压, 用大写字母 U 表示。

同理, 在电路的分析与计算中, 也要先假定某一方向为电压的参考方向, 也就是计算正值方向 (简称为正方向)。当计算出的电压为正值 ($u > 0$) 时, 表示实际方向与假定的方向相同, 反之, 若计算出的电压为负值 ($u < 0$) 时, 表示实际方向与假定的方向相反。这样,

在指定电压参考方向的前提下,电压也被视为代数量,电压数值的正和负,则反映了电压的实际方向。在电路中,电压的参考方向可用正 (+)、负 (-) 极性表示其高低电位,由高电位指向低电位,有时也用箭头表示或用双下标表示,如 u_{AB} 表示电压参考方向由 A 指向 B。电压参考方向如图 1-3 所示。

在电路分析中,无源元件内部常取电流与电压的参考方向相同,称为关联参考方向,即只给一个参考方向;对有源元件则常取电流与电压的参考方向相反,称为非关联参考方向。

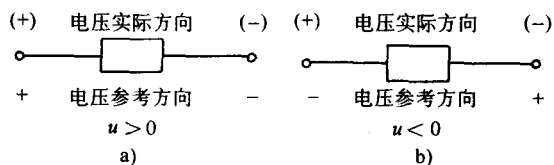


图 1-3 电压的参考方向与实际方向的关系

3. 电动势

为了表征电源内部局外力做功的本领,引入电动势这一物理量。所谓电源的电动势是指电源内部的局外力推动单位正电荷从其负极(低电位端)移到正极(高电位端)所作的功,电动势用字母 E 表示,即

$$E = \frac{A}{Q} \quad (1-4)$$

式中, A 为局外力推动正电荷所作的功,单位是焦耳 (J); Q 为被推动的正电荷量,单位为库仑 (C)。

电动势的单位与电压的单位相同。它的方向规定为低电位端(负极)指向高电位端(正极),即电位升高的方向。

一般情况下,电动势也是时间的函数,可用小写字母 $e(t)$ 表示。如果电动势的大小与方向与时间无关而为一常数时,则此电动势为直流电动势,用大写字母 E 表示。

电动势的参考方向可用正 (+)、负 (-) 极性表示其高低电位,由低电位指向高电位,与电压的参考方向相反。在指定电动势的参考方向下,电动势也被视为代数量,电动势数值的正和负,则反映了电动势的实际方向。

在电路的分析与计算中,常会遇到电位的计算问题。电位用 V 表示,计算电位时,应首先假定其一点为电位参考点,即零电位点。计算电路某一点的电位,就是计算该点与参考点的电位。在电工技术中,常将电气设备的机壳与大地相连,即接地,接地点用符号 “ $\perp$ ” 表示,故常选大地为参考点;电子电路中,一般都有一公共点与机壳或底板相连,用符号 “ $\perp$ ” 表示,也可选公共连接点为参考点。

4. 电功率

电功率简称功率,它与电压和电流密切相关。在关联参考方向下,元件吸收的功率为

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-5)$$

当 $p > 0$ 时,表示元件吸收功率,相当于负载; $p < 0$ 时,表示元件发出功率,相当于电源。功率的单位为瓦特 (W),简称为瓦。

在非关联参考方向下,元件吸收的功率为 $p(t) = -u(t)i(t)$ 。

5. 能量

从 $t_0 \sim t$ 时间内,元件吸收的能量为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi \quad (1-6)$$

能量的单位为焦耳 (J)。若 $W \geq 0$, 该元件为有源元件, 否则为无源元件。在工程实际中, 用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 作电能单位, $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 为一度, 即一个电字。

例 1-1 电路如图 1-4 所示, 已知 $E_1 = 20\text{V}$, $E_2 = 10\text{V}$, $R_1 = 8\Omega$, $R_2 = 7\Omega$ 。试分别以 b 、 d 为参考点, 计算电路中各点的电位。

解 由欧姆定律得

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 + 10}{8 + 7}\text{A} = 2\text{A}$$

如选 b 为参考点, 即 $V_b = 0$, 则其余各点的电位为

$$V_a = U_{ab} = IR_1 = (2 \times 8)\text{V} = 16\text{V}$$

$$V_c = U_{cb} = -IR_2 = (-2 \times 7)\text{V} = -14\text{V}$$

$$V_d = U_{db} = E_2 - IR_2 = (10 - 2 \times 7)\text{V} = -4\text{V}$$

若选 d 为参考点, 即 $V_d = 0$, 则其余各点的电位为

$$V_a = U_{ad} = E_1 = 20\text{V}$$

$$V_b = U_{bd} = -IR_1 + E_1 = (-2 \times 8 + 20)\text{V} = 4\text{V}$$

$$V_c = U_{cd} = -E_2 = -10\text{V}$$

由此例可看出, 电位的计算与参考点有关, 参考点选得不同, 相应的各点电位也不同。在这个例子中, 当参考点由 b 点换成 d 点后, 电路中各点的电位都随之改变了, 如 V_a 的电位由 16V 升到 20V , 其余各点的电位也同时增加 4V 。

例 1-2 电路如图 1-5 所示, $u = 5\text{V}$, $i = -2\text{A}$, 计算元件的功率, 并说明元件是吸收还是发出功率?

解 由电路知此题的电流和电压为关联参考方向, 有

$$p = ui = 5 \times (-2)\text{W} = -10\text{W} < 0$$

所以, 元件发出功率, 相当于电源。

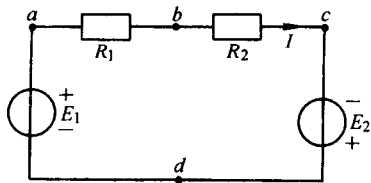


图 1-4 例 1-1 图

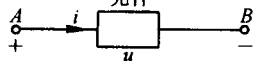


图 1-5 元件的功率

第二节 电路的基本状态

实际电路在使用过程中, 可能处于有载、空载或短路三种不同的基本状态。熟悉电路各种不同状态的特点对于正确使用和安全用电都是很重要的。下面以简单直流电路为例具体讨论这一问题, 本节还将介绍电源的伏安特性以及电气设备的额定值等重要概念。

一、有载状态

简单直流电路如图 1-6 所示, 其中具有电动势 E 的理想电压源与电阻 R_0 串联表示实际电源, R_L 表示负载电阻。

若开关 S 闭合, 就会有电流 I 通过负载电阻, 电路就处于有载状态。此时, 电路中的电流 I 为

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-7)$$

电源的端电压为

$$U = E - IR_0 \quad (1-8)$$

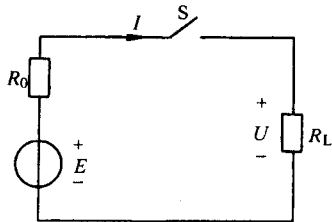


图 1-6 简单直流电路

式 (1-8) 表明了电源的端电压与其电流的关系, 即电源的端电压等于电源的电动势与其内阻上电压降之差。当电流 I 增加时, 电源的端电压 U 将随之有所下降。若将式 (1-8) 用曲线表示, 则称此曲线为电源的伏安特性或电源的外特性。在图 1-7 中, 用纵坐标表示电源的端电压 U , 横坐标表示电流 I , 显然当电源的电动势 E 与其内阻 R_0 为常数时, 电源的伏安特性为一向下倾斜的直线。

如果电压源的内阻 R_0 为 0, 则有 $U = E$, 即电压源的端电压等于电源的电动势, 为一恒定值, 这时的电源就是理想电压源, 简称电压源。电压源是一个理想电路元件, 它的端电压可以保持为恒定值, 也可以随时间按某一规律变化 (如按正弦规律变化)。前者称为直流电压源, 图 1-8 画出了直流电压源的伏安特性, 它是一条平行于横轴的直线。此特性表明, 电压源的端电压是固定的, 而电流则随外电路的不同而不同, 即通过电压源的电流取决于与之连接的负载的大小。

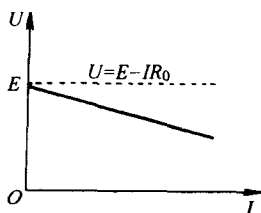


图 1-7 实际电压源的伏安特性

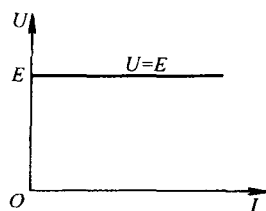


图 1-8 理想电压源的伏安特性

由式 (1-8) 得

$$UI = EI - I^2 R_0$$

即

$$P = P_E - \Delta P \quad (1-9)$$

$$P_E = P + \Delta P$$

式中, P_E 为电源产生的功率, 其值为 EI ; P 为电源提供给负载的功率, 其值 UI ; ΔP 为内阻上的功率损耗, 其值为 $I^2 R_0$ 。

式 (1-9) 称为功率平衡方程式, 此式表明, 电源产生的全部功率中一部分输送给负载, 而另一部分则损耗在内阻上。

电路处于有载工作状态时, 电源向负载提供功率和输出电流。对电源来讲, 我们一般希望它尽可能多地供给负载功率和电流, 那么, 它提供给负载的功率和电流有无限制? 另外, 对于负载而言, 它能承受的电压、允许通过的电流以及功率又如何确定? 因此, 为了表明电气设备的工作能力与正常工作条件, 在电气设备铭牌上标有额定电流 (I_N)、额定电压 (U_N)、额定功率 (P_N)。额定值是根据绝缘材料在正常寿命下的允许温升, 且考虑电气设备在长期连续运行或规定的工作制下允许的最大值, 同时兼顾可靠性、经济效益等因素规定的电气设备的最佳工作状态。

在使用电气设备时, 应严格遵守额定值的规定。如果电流超过额定值过多或时间过长, 由于导线发热、温升过高会引起电气设备绝缘材料损坏, 若电压超过额定值, 绝缘材料也可能被击穿。当设备在低于额定值下工作, 不仅其工作能力没有得到充分利用, 而且设备不能正常工作, 甚至损坏设备。例如一白炽灯的电压为 220V, 功率为 60W, 这表示该灯泡在正常使用时应把它接在 220V 的电源上, 此时它的功率为 60W, 并能保证正常的使用寿命, 而

不能把它接在 380V 的电源上 (为什么?)。又如某直流发电机的铭牌上标有 2.5kW、230V、10.9A, 这些都是额定值。发电机实际工作时的电流和其发出的功率取决于负载的需要, 而不是铭牌上的标注。通常发电机等电源设备可以近似为电压源, 即其端电压基本不变。负载是与电源并联的, 当负载增加时 (指并联负载数目的增加), 负载电流就会增加; 反之, 当负载减小时 (指并联负载数目的减小), 负载电流就会减小。

二、开路状态

开路状态又称断路状态。如图 1-8 所示电路, 当开关 S 断开时, 电路中的电流为零, 电路则处于开路状态, 对电源来讲, 叫做空载。由式 (1-8) 可知

$$U = U_{\infty} = E \quad (1-10)$$

上式表明, 在开路状态下, 电源的端电压即开路电压, 等于电源的电动势。式中 U_{∞} 表示开路电压。

电路处于开路状态时, 电源不产生功率, 负载与电源内部均不消耗功率, 即

$$P_E = P = \Delta P = 0 \quad (1-11)$$

三、短路状态

当两根供电线在某一点由于绝缘损坏而接通时, 电源就处于短路状态, 如图 1-9 所示。此时电流不再流过负载, 而直接经短路连接点流回电源, 由于在整个回路中只有电源内阻和部分导线电阻, 电流数值较大, 叫做短路电流 I_{sc} 。最严重的是电源两端被短路, 短路电流为

$$I_{sc} = \frac{E}{R_0} \quad (1-12)$$

短路时, 外电路的电阻为 0, 电源的端电压也为 0, 故电源输送给负载的功率

$$P = UI_{sc} = 0 \quad (1-13)$$

由式 (1-9) 得

$$P_E = \Delta P = I_{sc}^2 R_0 = \frac{E^2}{R_0} \quad (1-14)$$

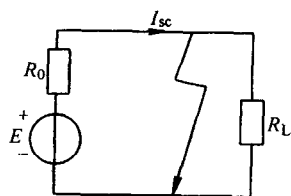


图 1-9 电压源短路状态

此式表明, 电源短路时, 电源产生的功率全部消耗在内阻上。

由于电源的内阻很小, 所以电源短路时将产生很大的短路电流, 短路电流远远超过电源和导线的额定电流, 如不及时切断, 将引起剧热而使电源、导线以及仪器、仪表等设备烧坏。为了防止短路所引起的事故, 通常在电路中接入熔断器或断路器, 一旦发生短路事故, 它能迅速将事故电路自动切断。

必须指出, 有时也为了某种需要, 将电路的某一部分人为地短接, 但这与电源短路是两回事。

例 1-3 某直流发电机: $E = 230V$, $R_0 = 0.5\Omega$, 负载电阻 $R_L = 11\Omega$ 。试求:

- 1) 直流发电机的端电压;
- 2) 电源产生的功率、内阻消耗的功率和负载取用的功率。

解 1) 电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} = \frac{230}{0.5 + 11} A = 20A$$

发电机的端电压为

$$U = E - IR_0 = (230 - 20 \times 0.5) \text{V} = 220 \text{V}$$

2) 电源产生的功率为

$$P_E = EI = (230 \times 20) \text{W} = 4600 \text{W} = 4.6 \text{kW}$$

内阻消耗的功率为

$$\Delta P = I^2 R_0 = (20^2 \times 0.5) \text{W} = 200 \text{W} = 0.2 \text{kW}$$

负载取用的功率为

$$P = UI = (220 \times 20) \text{W} = 4400 \text{W} = 4.4 \text{kW}$$

例 1-4 测量电源电动势和内阻的电路如图 1-10 所示。当开关 S 位于位置 1 时, 电压表读数为 2.2V; 开关 S 位于位置 2 时, 电流表读数为 1A。已知电阻 $R = 2\Omega$, 试求电源的电动势 E 与内阻 R_0 。

解 当开关 S 位于位置 1 时, 电压表内阻相当大, 因此 $I = 0$, 故

$$U_{oc} = E = 2.2 \text{V}$$

当开关 S 位于位置 2 时, 由于电流表内阻很小, 故

$$I = \frac{E}{R_0 + R}$$

由此可解得

$$R_0 = \frac{E}{I} - R = \left(\frac{2.2}{1} - 2 \right) \Omega = 0.2 \Omega$$

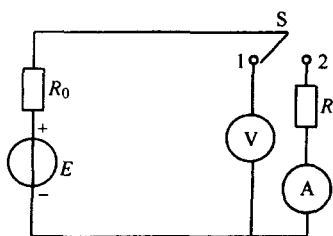


图 1-10 例 1-4 图

第三节 电压源和电流源

实际电源有电池、发电机、信号源等。电压源和电流源是从实际电源抽象得到的电路模型, 它们是二端有源元件。

一、电压源

电压源是一个理想电路元件, 它的端电压 $u(t)$ 为

$$u(t) = u_s(t)$$

式中, $u_s(t)$ 为给定的时间函数, 而电压 $u(t)$ 与通过元件的电流无关, 总保持为给定的时间函数。电压源中电流的大小由外电路决定。电压源的图形符号如图 1-11a 所示, 直流电压源有时用图形符号如图 1-11b 所示, 电压值为 U_s 。

电压源接外电路的情况如图 1-12a 所示, 图 1-12b 是它的伏安特性, 为平行于电流轴的一条直线。当 $u_s(t)$ 随时间改变时, 这条平行于电流轴的直线也随之改变其位置。图 1-12c 是直流电压源的伏安特性, 它不随时间改变。

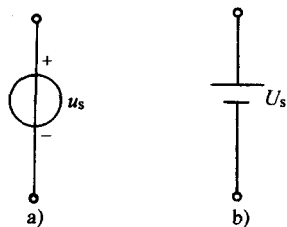


图 1-11 电压源符号

从图 1-12a 可见, 电压源的电压和通过电压源的电流的参考方向通常取为非关联参考方向, 此时, 电压源发出的功率为

$$p(t) = u_s(t)i(t)$$

它也是外电路吸收的功率。

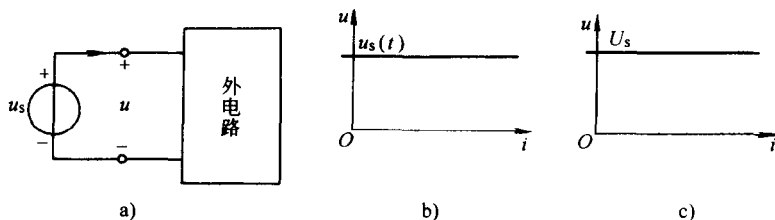


图 1-12 电压源的伏安特性

电压源不接外电路时, 电流值总为 0, 即前面介绍的开路状态。若令电压源的电压为 0, 则此电压源的伏安特性为 $i-u$ 平面上的电流轴, 它相当于前面介绍的短路, 电压源“短路”是无意义的。

二、电流源

电流源是另一种理想电源, 它发出的电流为 $i(t)$

$$i(t) = i_s(t)$$

式中, $i_s(t)$ 为给定的时间函数, 而电流 $i_s(t)$ 与元件的端电压无关, 总保持为给定的时间函数。电流源中的端电压大小由外电路决定。电流源的图形符号如图 1-13a 所示, 图 1-13b 是电流源接外电路的情况, 图 1-13c 是它的伏安特性, 为平行于电压轴的一条直线。当 $i(t)$ 随时间改变时, 这条平行于电压轴的直线也随之改变其位置。图 1-13d 是直流电流源的伏安特性, 它不随时间改变。

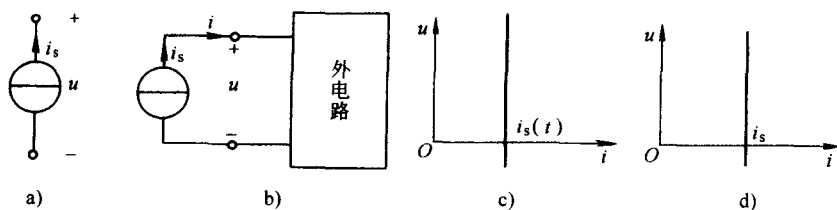


图 1-13 电流源及其伏安特性

从图 1-13b 可见, 电流源的电流和电压的参考方向是非关联的, 所以, 电流源发出的功率为

$$p(t) = i_s(t)u(t)$$

它也是外电路吸收的功率。

电流源两端短路时, 其端电压值为 0, 而 $i = i_s$, 电流源的电流即为短路电流。如果令电流源的电流为 0, 则此电流源的伏安特性为 $i-u$ 平面上的电压轴, 它相当于前面介绍的开路, 电流源“开路”是无意义的。

常见的实际电源 (如发电机、蓄电池等) 的工作机理比较接近电压源, 其电路模型是电压源与电阻的串联组合。像光电池一类的器件, 工作时的特性比较接近电流源, 其电路模型是电流源与电阻的并联组合, 另外有专门设计的电子电路可以作实际电流源使用。

上述的电压源和电流源也常被称为独立电源。

第四节 基尔霍夫定律

本节介绍电路中通过任一节点的各支路电流之间与任一回路中各部分电压之间所遵循的规律, 即基尔霍夫定律, 它是电路分析和计算的基本依据。

在介绍基尔霍夫定律之前, 首先介绍所涉及的名词或术语:

支路: 电路中的任一分支叫作支路, 支路可以由单个元件构成, 也可由若干个元件的串联组合构成。如图 1-14 所示电路, 有 $a-c-b$ (E_1 和 R_1 的串联组合)、 $a-d-b$ (E_2 和 R_2 的串联组合)、 $a-b$ (R_3) 三条支路。

节点: 三条或三条以上支路的连接点叫节点, 如图 1-14 所示电路中的 a 和 b 点。

回路: 电路中任一闭合路径称为回路, 如图 1-14 所示电路中的 $a-c-b-d-a$ 、 $a-d-b-a$ 、 $a-c-b-a$ 。

网孔: 内部不包含支路的回路称为网孔。如图 1-14 所示电路中的 $a-c-b-d-a$ 、 $a-d-b-a$ 是网孔, 而 $a-c-b-a$ 则不是网孔, 因为它内部包含支路 $a-d-b$ 。

以下分别介绍基尔霍夫两个定律。

一、基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律适用于节点。其内容为: 在任何时刻, 对任一节点, 通过它的所有支路电流代数和恒等于零。该定律可写成如下形式:

$$\sum i = 0 \quad (1-15)$$

通常我们定义流入节点的电流为正, 将流出该节点的电流定义为负。

对于图 1-15 所示节点 a , 有

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$$

或

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4$$

此式表明, 在任何时刻, 流出任一节点的支路电流等于流入该节点的支路电流。

基尔霍夫电流定律不仅适用于任一节点, 还可以推广应用于任意的由一封闭面包围的部分电路。例如如图 1-16a 所示的一部分电路用封闭面包围起来, 构成一个所谓的广义节点, 则有

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

对于 1-16b 所示的用两条导线连接的任意两个电路, 有

$$I_1 - I_2 = 0$$

或

$$I_1 = I_2$$

即流过两条导线的电流相等。若将其中的一条导线断开, 另一条导线中的电流也将为零。

基尔霍夫电流定律 (KCL) 表明了电流的连续性, 它是电荷守恒的体现。这里标注的电

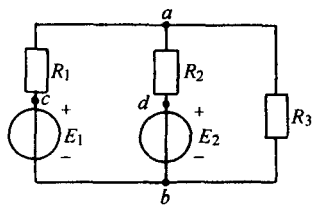


图 1-14 电路举例

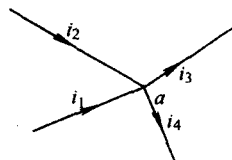


图 1-15 基尔霍夫电流定律