



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

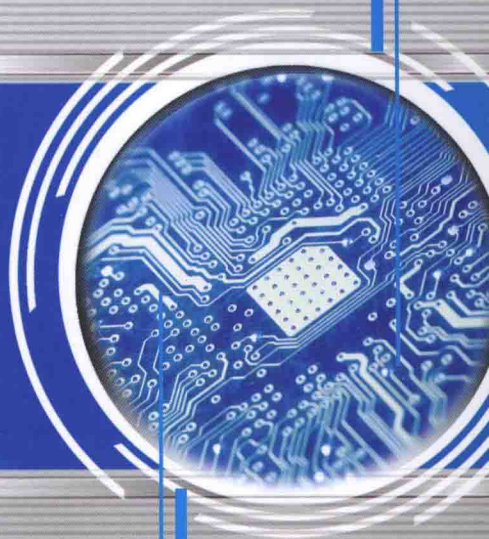
电工学

(土建类)

Diangongxue
Tujianlei

第3版

李柏龄 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工学（土建类）

第 3 版

主编 李柏龄

参编 严 洁 尚 伟 潘爱先
张冬梅 刘沛津 孙长飞
任继红

主审 高礼魁 翟俊祥



机械工业出版社

本书是高等学校土建类专业的电工学教材,它是在2011年第2版的基础上,在当前电光源和照明技术飞速发展的时代背景下,根据目前土建类专业电工学课程改革的实际需要和近年来编者的教学实践进行了修订。修订时参照了少学时电工学课程教学基本要求和该专业注册工程师基础考试中电工学部分复习大纲。

全书内容分为基础篇和应用篇,基础篇包括直流电路、正弦交流电路、变压器、异步电动机及其控制、半导体二极管与直流稳压电源、半导体三极管与放大电路,应用篇包括建筑供配电、建筑电气照明系统、安全用电与建筑防雷。上述内容可在48学时内教完,对于学时较少的院校可酌情取舍。

本书内容精练,注重应用,切合土建类专业特点与实际需要,是一本实用性较强的教材。它除可作为土建类专业本科电工学教材外,还适用于高职高专、职工大学的同类专业,也可供建筑行业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工学:土建类/李柏龄主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2015.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-50838-0

I. ①电… II. ①李… III. ①电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第154689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:刘丽敏 责任编辑:刘丽敏 臧程程

责任校对:樊钟英 封面设计:张静

责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2015年9月第3版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·435千字

标准书号:ISBN 978-7-111-50838-0

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第3版前言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。自2011年第2版出版以来,电工与电子技术取得长足进步,尤其是高效光源层出不穷,照明技术日新月异;土建类专业电工学课程改革也在不断深化。因此,有必要对原教材进行修订,以适应时代的需要。

第3版保持第2版内容精练、重点突出、注重应用和结合专业的特点,并在以下方面进行了更新、增补和充实:

1. 由于照明技术发展十分迅速,第2版教材中该部分内容已显陈旧,因此对“建筑电气照明系统”一章进行了全面修改,将“高效、节能、环保、健康”的绿色照明设计理念贯穿本章始终,突出新光源、新技术的推广和应用,全部采用我国近年颁布的最新标准和规范,体现了教材的新颖性。

2. 为了帮助报考结构、土木注册工程师的考生进行本课程的考前复习,本书选编了历年电工学部分的考题,并作了精辟的分析和解答。此内容作为附录B列在书末。

3. 在“异步电动机及其控制”一章增补了时间控制的内容。

全书分基础篇和应用篇两部分。基础篇内容包括直流电路、正弦交流电路、变压器、异步电动机及其控制、半导体二极管与直流稳压电源、半导体三极管与放大电路;应用篇内容包括建筑供配电、建筑电气照明系统、安全用电与建筑防雷。

土建类专业电工学各院校的学时数有所差异,学时宽裕者能教完上述内容,学时少者可有所取舍,由任课老师灵活掌握。

本书由西安建筑科技大学李柏龄担任主编,全面负责本书修订。第一章和第二章分别由青岛理工大学张冬梅和潘爱先编写,第三章和第七章由长安大学尚伟编写,第四章由李柏龄编写,第五章和第六章分别由西安建筑科技大学刘沛津和孙长飞编写,第八章和第九章由李柏龄与西安建筑科技大学严洁合编,书末的全国注册结构、土木工程师资格考试基础试卷电工学部分考题选编和解析由西安建筑科技大学任继红编写,孙长飞还承担了全部修改稿的计算机录入和插图绘制工作。

本书全体编者向担任主审的西安建筑科技大学高礼魁、翟俊祥教授致以崇高的敬意,他们给编者很多支持和指导,90岁高龄的高礼魁教授审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的意见和有益的建议,谨此表示衷心感谢。

编者

第2版前言

本教材是《电工学（土建类）（978-7-111-14853-1）》的第2版。它是根据目前土建类专业电工学课程改革的实际需要和编者近年来教学实践，经过总结、提高和修改而成的。修订过程中参照了少学时电工学课程教学基本要求和该专业注册工程师基础考试中电工学复习大纲。

本书保持了第1版文字精练和紧密联系专业实际的特色，在内容上作了适当的充实、删减和增补，以加强教材的基础性、针对性和应用性，进一步适应当前教学改革的需要。与第1版相比，主要变化有：①新增加“半导体二极管与直流稳压电源”“半导体三极管与放大电路”两章；②删去了“建筑弱电系统”一章；③改写“正弦交流电路”一章中三相电路部分；④在“直流电路”和“变压器”两章中分别增补了 RC 电路与 RL 电路的暂态过程和变压器的阻抗变换作用。

修订后，本书内容分为基础篇和应用篇两部分。基础篇精选内容，深入浅出。基本内容包括直流电路、正弦交流电路、变压器、异步电动机及其控制、半导体二极管与直流稳压电源、半导体三极管与放大电路；应用篇为建筑电气的主要内容，紧密结合土建专业。内容包括建筑供配电、建筑电气照明系统、安全用电与建筑防雷。

土建类专业课程繁重，电工学相比其他专业学时较少，参考学时为32~48。对于学时宽裕的学校能教完上述内容，学时少者教师可酌情取舍，灵活掌握，既可以基础篇为主，也可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，负责全书修订与定稿。其中第一章和第二章分别由青岛理工大学（原青岛建工学院）张冬梅和潘爱先编写，第四章由李柏龄编写，第三章和第七章由长安大学尚伟编写，第五章和第六章分别由西安建筑科技大学刘沛津和孙长飞编写，第八章和第九章由西安建筑科技大学严洁编写。

全书承西安建筑科技大学高礼魁和翟俊祥教授审阅，两位教授一贯的严谨治学态度使编者受益匪浅，谨此致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，错误与疏漏难以避免，恳请使用本书的师生和读者不吝指正。

编 者

第 1 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的。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，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中教学，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的能力，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，可以基础篇为主，也可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和翟俊祥教授主审，两位教授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

目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

基 础 篇

第一章 直流电路	1
第一节 电路的组成与物理量	1
第二节 电路的基本状态	5
第三节 电压源和电流源	8
第四节 基尔霍夫定律	10
第五节 支路电流法	12
第六节 叠加原理	14
第七节 戴维南定理	16
第八节 RC 电路和 RL 电路的暂态过程	18
本章小结	24
习题一	26
第二章 正弦交流电路	31
第一节 正弦交流电的基本概念	31
第二节 正弦量的相量表示法	35
第三节 电阻、电感和电容的正弦交流电路	40
第四节 RLC 串联交流电路	45
第五节 阻抗的串联与并联	48
第六节 串联谐振与并联谐振	50
第七节 功率因数的提高	53
第八节 三相电源	55
第九节 三相负载的联结	57
第十节 三相负载的功率	62
本章小结	63
习题二	65
第三章 变压器	69
第一节 变压器的用途及结构	69
第二节 单相变压器的工作原理	71
第三节 变压器的运行特性	76
第四节 三相变压器	78
第五节 特殊变压器	81

本章小结	85
------------	----

习题三	86
-----------	----

第四章 异步电动机及其控制

第一节 三相异步电动机的构造	87
第二节 异步电动机的工作原理	88
第三节 异步电动机的机械特性	91
第四节 异步电动机的起动和调速	95
第五节 异步电动机的铭牌数据和选择	99
第六节 常用低压电器	104
第七节 常用电动机控制线路	110
本章小结	118
习题四	119

第五章 半导体二极管与直流稳压电

源	120
第一节 半导体的基础知识	120
第二节 半导体二极管	122
第三节 二极管整流电路	124
第四节 滤波电路	126
第五节 稳压二极管及其稳压电路	128
本章小结	130
习题五	131

第六章 半导体三极管与放大电路

第一节 半导体三极管	134
第二节 分立元件基本放大电路	138
第三节 集成运算放大器	147
本章小结	153
习题六	154

应 用 篇

第七章 建筑供配电

第一节 电力系统概述	157
第二节 电力负荷的计算	160
第三节 变配电所的主要电气设备	165
第四节 变配电所及其主接线	169
第五节 低压配电线路	176

第六节 建筑供配电设计简介	182	第九章 安全用电与建筑防雷	243
本章小结	185	第一节 电气安全	243
习题七	187	第二节 建筑物的防雷	246
第八章 建筑电气照明系统	188	第三节 接地	254
第一节 照明工程中的几个光学概念	188	本章小结	258
第二节 照明质量	192	习题九	259
第三节 照明的方式和种类	195	附录	260
第四节 电光源的种类和选择	197	附录 A 基础篇部分习题答案	260
第五节 灯具的选择与布置	203	附录 B 全国注册结构、土木工程师资格	
第六节 照度计算	211	考试基础试卷电工学部分考题选编	
第七节 照明供电线路	217	和解析	262
第八节 照明设计举例	231	参考文献	274
本章小结	242		
习题八	242		

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。虽然电气设备种类繁多,功能也不尽相同,但大多数电气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。

本章在最后一节还将简要介绍 RC 和 RL 电路的暂态过程,这一内容本不属于直流电路,但由于本课程学时有限,又因分析上述过程仍然依据基尔霍夫定律,故将此内容放在本章。

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元器件按一定方式相互连接,构成电流路径的总体称为电路。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元器件,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,组成电路的实际元器件种类繁多,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,可将实际电路元器件进行科学的抽象,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。

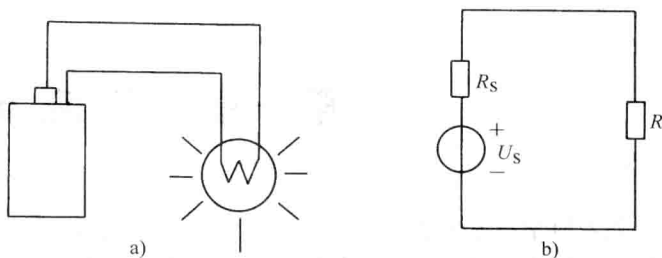


图 1-1 实际电路与电路模型

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 ,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, 难以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, 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 点所做的功, 电压 U_{ab} 可表示为

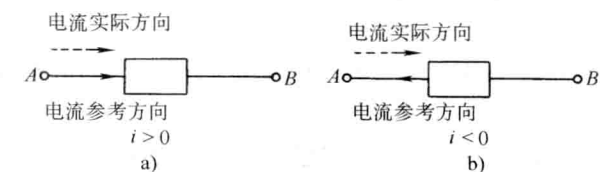


图 1-2 电流的参考方向与实际方向的关系

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

式中, A 为电场力将电荷 Q 从 a 点移到 b 点所做的功, 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。

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）所做的功，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做的功，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. 电能

从 $t_0 \sim t$ 时间内，元件吸收的电能为

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

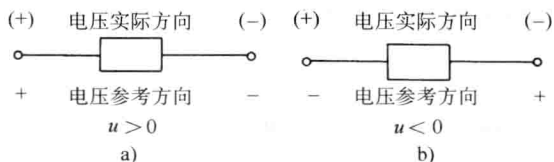


图 1-3 电压的参考方向与实际方向的关系

电能是时间的函数, 并且也是代数量。它的单位为焦耳 (J)。在工程实际中, 用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 作电能单位, $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 俗称一度, 即一个电度。

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。

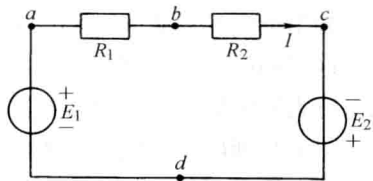


图 1-4 例 1-1 图



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

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

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

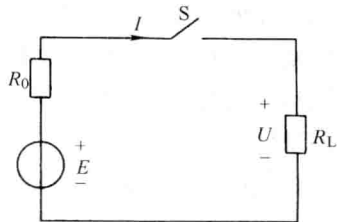


图 1-6 简单直流电路

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。

如果电源的内阻 R_0 为 0, 则有 $U = E$, 即电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。

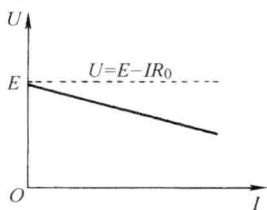


图 1-7 实际电压源的伏安特性

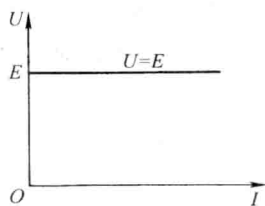


图 1-8 理想电压源的伏安特性

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, 其值为 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, 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时, 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 1-6 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，叫作空载。由式 (1-8) 可知

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

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_{oc} 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，叫作短路电流 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

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

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： $E = 230\text{V}$ ， $R_0 = 0.5\Omega$ ，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

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

发电机的端电压为

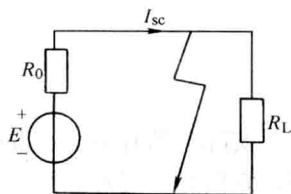


图 1-9 电压源短路状态

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

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

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

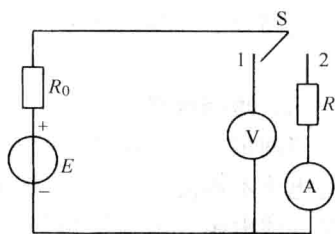


图 1-10 例 1-4 图

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

$$u(t) = e(t)$$

式中, $e(t)$ 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 E 。

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 $e(t)$ 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。

由图 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

$$p(t) = e(t)i(t)$$

它也是外电路吸收的功率。

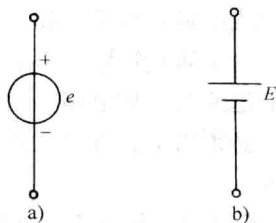


图 1-11 电压源符号

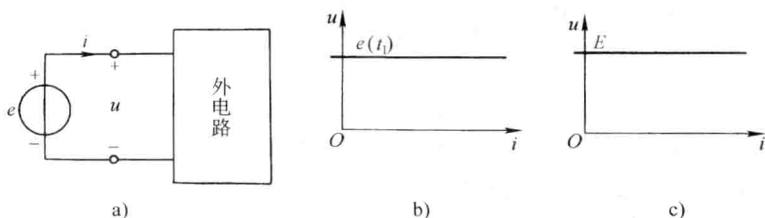


图 1-12 电压源的伏安特性

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。

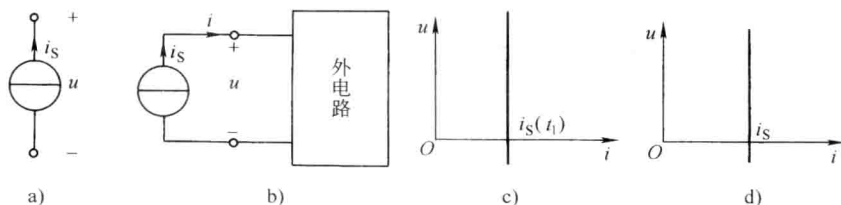


图 1-13 电流源及其伏安特性

由图 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。

工程中常用的稳压电源和大型电力线路其输出电压基本不随外电路变化而改变，可以近似视为电压源；光伏电池是利用光生电压（亦称为光生伏特）效应工作的新型电源，其工作特性则比较接近电流源。一般情况下实际电源的电路模型有两种：一种是电压源与电阻的串联组合；另一种是电流源与电阻并联组合。

上述的电压源和电流源也常被称为独立电源。