



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



西安交通大学国家精品课程“电工电子技术（电工学）”主教材

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

电工技术

(电工学 I)

西安交通大学电工学教研室 编
刘 晔 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

西安交通大学国家精品课程“电工电子技术(电工学)”主教材

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

电工技术 (电工学 I)

西安交通大学电工学教研室

编

刘 晔 刘晓晖 陈国联 王建华

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也是西安交通大学国家精品课程“电工电子技术(电工学)”主教材。

本书包括电路的基本概念和基本定理、电路的分析方法、正弦交流电路、供配电技术基础、电路的暂态分析、磁路与变压器、电机、继电器接触器控制、可编程序控制器、电气测量共 10 章内容。各章配有丰富的例题、习题、练习题和思考题,本书最后提供了部分习题的参考答案,便于教师教学和学生自学。为方便教师教学,本书配有免费电子教学课件。

本书可与我校王建华主编的《电子技术(电工学Ⅱ)》配套使用,可作为高等学校工科非电类专业本科生、大专生及成人教育相关专业的教材和教学参考书,也可供工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术. 电工学. 1/ 刘晔主编. —北京: 电子工业出版社, 2010.3

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-10411-4

I. 电… II. 刘… III. ①电子技术—高等学校—教材②电工学—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 028281 号

策划编辑: 冯小贝

责任编辑: 冯小贝

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26.25 字数: 795 千字

印 次: 2010 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

本教材是西安交通大学电工电子教学实验中心在开展国家工科基础课程电工电子教学基地、国家级电工电子实验教学示范中心和“电工电子技术(电工学)”国家精品课程建设工作的基础上,依据教育部制定的工科高校“电工电子技术”课程教学的基本要求,为适应高等学校工科非电类专业“电工电子技术”课程改革的需要而编写的。教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,与我校王建华主编的《电子技术(电工学Ⅱ)》配套使用。

编写本教材的指导思想是:

1. 电工技术是研究物质的电磁客观规律并用于实践的科学技术。教材体现我校电工电子技术课程教学“保基础、重实践、少而精”的传统,教学内容紧扣教学大纲,在介绍基本概念、基本原理、基本分析方法的基础上加强和突出工程应用,满足较少学时教学的需要。

2. 整合课程内容,注重系统概念和系统特性的介绍和论述。“电工电子技术”课程的教学时数有限,又要不断引入新的教学内容,当然存在教学体系中有限课程容量与无限膨胀的课程内容之间的尖锐矛盾。教材在编写中,从课程内容系统的观点出发,重视外部特性,重视应用技术;基础知识的引出“重神轻形”,力求理论形象直观。

3. 电磁现象的普遍性决定了电气工程学科与其他学科之间存在着广泛的、必然的和内在的联系,电工技术具有基础性,同时具有极强的交叉性和渗透性。为了满足不同专业学生利用与电气工程学科交叉、渗透、融合来促进其本身学科的学习和开拓新学科领域的需要,教材在发展上下工夫,内容涵盖了电气工程学科的大多数研究领域,例如电路与系统、电机与电器、电力系统、供电与用电、测量技术、控制技术等。

4. 力求反映电气工程学科的新成就和新进展。为了适应电工技术的迅猛发展,课程的教学内容要努力把握学科发展的脉搏和特征,力求反映学科前沿和具有时代特征。教材论述了各种电机的应用领域和发展方向,基于 S7-200 系列可编程序控制器介绍可编程序控制器的应用方法,引入了 PSpice 通用电路分析软件、电力系统中性点的运行方式、光学电流互感器、软测量技术、虚拟仪器、模糊传感器等发展和探索性的内容。

教材共 10 章,参考学时为 60~80。第 1、2、5、10 章由刘晓晖编写,第 3、6、7 章由刘晔编写,第 4 章由王建华编写,第 8、9 章由陈国联编写。全书由刘晔统稿。西安交通大学电工学教研室夏建生、杨振坤、唐胜安和常弘等老师参加了编写大纲的制定。本书配有免费电子课件,任课教师可以登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册下载。

哈尔滨工业大学吴建强教授仔细审阅了教材的全稿,提出了宝贵的修改意见。教材的编写工作得到西安交通大学教务处的大力支持。在编写过程中,编者借鉴了有关参考文献。研究生杨新伟、张璐、王斌、师丹、孙培培、惠培智、单诗阳和藺晓姣为书稿的录入、绘图及习题解答做了许多工作。在此,编者表示衷心的感谢!

现代电工技术的发展日新月异,限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,欢迎使用教材的教师、学生和工程技术人员提出意见和建议,以便改进和提高。

编 者

2010 年 2 月于西安交通大学

目 录

第 1 章 电路的基本概念和基本定理	(1)
1.1 电路的基本概念	(1)
1.1.1 电路及其功能	(1)
1.1.2 电流、电压及其参考方向	(1)
1.1.3 电路中的功率	(3)
1.2 基尔霍夫定律	(4)
1.2.1 基尔霍夫电流定律	(5)
1.2.2 基尔霍夫电压定律	(5)
1.3 无源电路元件	(7)
1.3.1 电阻元件	(7)
1.3.2 电感元件	(12)
1.3.3 电容元件	(14)
1.4 有源电路元件	(15)
1.4.1 电压源	(15)
1.4.2 电流源	(16)
1.4.3 电源等效变换	(17)
1.4.4 受控源	(19)
1.5 电路中的电位	(20)
1.6 电路的工作状态	(23)
1.6.1 电气设备的额定值	(23)
1.6.2 电路的工作状态	(23)
小结	(26)
习题 1	(27)
第 2 章 电路的分析方法	(30)
2.1 支路电流法	(30)
2.2 结点电压法	(32)
2.3 叠加原理	(37)
2.3.1 齐次性原理	(37)
2.3.2 叠加原理	(38)
2.4 等效电源定理	(42)
2.4.1 戴维宁定理	(42)
2.4.2 诺顿定理	(45)
2.4.3 等效电源定理用于含受控源线性二端网络	(47)
2.5 PSpice 例题分析	(50)
2.5.1 PSpice 软件简介	(50)
2.5.2 电路模拟分析的过程	(51)

小结	(54)
习题 2	(55)
第 3 章 正弦交流电路	(59)
3.1 正弦量的基本概念	(59)
3.1.1 正弦量变化的快慢	(59)
3.1.2 正弦量变化的大小	(60)
3.1.3 正弦量变化的进程	(60)
3.2 正弦量的相量表示	(61)
3.2.1 复数	(62)
3.2.2 相量	(63)
3.2.3 基尔霍夫定律的相量形式	(65)
3.3 单一参数的正弦交流电路	(66)
3.3.1 电阻元件的正弦交流电路	(66)
3.3.2 电感元件的正弦交流电路	(68)
3.3.3 电容元件的正弦交流电路	(69)
3.4 RLC 组合的交流电路	(72)
3.4.1 阻抗与导纳	(72)
3.4.2 RLC 串联的交流电路	(74)
3.4.3 RLC 串并联的交流电路	(76)
3.5 正弦交流电路的功率	(80)
3.5.1 交流电路的功率	(80)
3.5.2 最大功率传输	(81)
3.5.3 功率因数的提高	(82)
3.6 复杂正弦交流电路的分析与计算	(86)
3.6.1 分析方法	(86)
3.6.2 相量图的应用	(89)
3.7 交流电路的频率特性	(91)
3.7.1 RC 电路的频率特性	(92)
3.7.2 电路中的谐振	(96)
3.8 非正弦周期电流电路	(104)
3.8.1 周期信号的傅里叶级数	(104)
3.8.2 非正弦周期信号的平均值、有效值和功率	(105)
3.8.3 非正弦周期信号电路的谐波分析法	(108)
3.9 PSpice 例题分析	(110)
小结	(117)
习题 3	(118)
第 4 章 供配电技术基础	(126)
4.1 供配电系统概述	(126)
4.1.1 电力系统的基本概念	(126)
4.1.2 供配电系统	(127)
4.1.3 电力系统的额定电压	(127)

4.1.4	供电质量	(129)
4.2	三相电源的电压	(130)
4.2.1	三相电动势的产生	(130)
4.2.2	三相电源的连接	(131)
4.3	三相负载的连接	(133)
4.3.1	三相负载的星形连接	(133)
4.3.2	三相负载的三角形连接	(137)
4.4	三相电路的功率	(138)
4.5	供配电系统的网络结构	(139)
4.5.1	供配电网的接线方式	(139)
4.5.2	导线和电缆截面选择与校验	(141)
4.5.3	电气二次回路的概念	(142)
4.6	接地的基本概念	(143)
4.6.1	触电的危险及防护	(143)
4.6.2	电力系统中性点的运行方式	(144)
4.6.3	保护接地和保护接零	(146)
4.6.4	静电防护和电气防火防爆	(148)
4.7	节约用电	(149)
4.8	PSpice 例题分析	(149)
	小结	(151)
	习题 4	(151)
第 5 章	电路的暂态分析	(154)
5.1	电路的暂态及换路定则	(154)
5.1.1	电路的暂态	(154)
5.1.2	换路定则	(155)
5.1.3	电路初始值的确定	(156)
5.2	一阶电路的暂态响应	(158)
5.2.1	一阶电路的零输入响应	(158)
5.2.2	一阶电路的零状态响应	(163)
5.2.3	一阶电路的全响应	(165)
5.3	三要素法	(166)
5.4	RC 电路的脉冲响应	(169)
5.4.1	$\tau \ll T_p$	(169)
5.4.2	$\tau \gg T_p$	(170)
5.5	RLC 电路的暂态分析	(172)
5.6	PSpice 例题分析	(174)
	小结	(176)
	习题 5	(178)
第 6 章	磁路与变压器	(181)
6.1	磁路	(181)
6.1.1	磁路基本概念	(181)

6.1.2	磁性材料的磁性能	(182)
6.1.3	磁路基本定律	(184)
6.2	交流铁心线圈电路	(187)
6.2.1	电磁关系	(187)
6.2.2	功率损耗	(188)
6.2.3	等效电路	(189)
6.3	电磁铁	(192)
6.3.1	直流电磁铁	(192)
6.3.2	交流电磁铁	(193)
6.4	变压器	(195)
6.4.1	变压器的分类与结构	(196)
6.4.2	变压器的工作原理	(198)
6.4.3	变压器的使用	(204)
6.4.4	三相变压器与特殊变压器	(210)
小结		(217)
习题 6		(219)
第 7 章	电机	(222)
7.1	概述	(222)
7.1.1	电机的种类	(222)
7.1.2	电机的用途	(223)
7.1.3	电机的发展	(224)
7.2	三相异步电动机的结构与原理	(227)
7.2.1	三相异步电动机的结构	(228)
7.2.2	三相异步电动机的原理	(231)
7.3	三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	(234)
7.3.1	三相异步电动机的电磁转矩	(234)
7.3.2	三相异步电动机的机械特性	(237)
7.4	三相异步电动机的使用	(240)
7.4.1	三相异步电动机的铭牌数据	(240)
7.4.2	三相异步电动机的启动	(243)
7.4.3	三相异步电动机的调速	(251)
7.4.4	三相异步电动机的制动	(257)
7.5	单相异步电动机	(261)
7.5.1	单相异步电动机的工作原理	(261)
7.5.2	常见类型的单相异步电动机	(263)
7.6	三相同步电机	(265)
7.6.1	三相同步发电机	(267)
7.6.2	三相同步电动机	(270)
7.7	直流电机	(274)
7.7.1	直流发电机	(276)
7.7.2	直流电动机	(278)

7.8	控制电机	(283)
7.8.1	伺服电动机	(283)
7.8.2	测速发电机	(288)
7.8.3	步进电动机	(291)
	小结	(295)
	习题 7	(298)
第 8 章	继电器接触器控制	(301)
8.1	常用低压电器	(301)
8.1.1	刀开关与组合开关	(301)
8.1.2	按钮与行程开关	(302)
8.1.3	接触器	(303)
8.1.4	继电器	(304)
8.1.5	熔断器	(306)
8.1.6	空气断路器	(306)
8.2	三相异步电动机的直接启动控制	(307)
8.2.1	点动控制	(307)
8.2.2	连续运转控制	(308)
8.2.3	多地点控制	(309)
8.2.4	顺序控制	(310)
8.3	三相异步电动机的正反转控制	(311)
8.4	开关自动控制	(313)
8.4.1	行程控制	(313)
8.4.2	时间控制	(313)
	小结	(316)
	习题 8	(316)
第 9 章	可编程序控制器	(321)
9.1	可编程序控制器的组成与工作原理	(321)
9.1.1	可编程序控制器的硬件组成	(321)
9.1.2	可编程序控制器的工作原理	(324)
9.2	S7-200 系列 PLC 的编程元件与编程指令	(327)
9.2.1	S7-200 系列 PLC 的编程元件	(327)
9.2.2	S7-200 系列 PLC 的基本编程指令	(330)
9.3	PLC 梯形图控制程序的设计方法	(348)
9.3.1	经验设计法	(348)
9.3.2	顺序功能图法	(353)
9.4	STEP7-Micro/WIN32 V4.0 编程软件简介	(358)
9.4.1	软件安装及硬件连接	(358)
9.4.2	程序的编辑与下载	(360)
9.4.3	程序的运行与监控	(362)
	小结	(363)
	习题 9	(364)

第 10 章 电气测量	(369)
10.1 测量的基本概念	(369)
10.1.1 测量仪表的基本性能	(369)
10.1.2 测量误差	(371)
10.2 模拟式基本电工仪表	(373)
10.2.1 磁电式仪表	(374)
10.2.2 电磁式仪表	(376)
10.2.3 电动式仪表	(377)
10.3 电压、电流、功率和阻抗的测量	(379)
10.3.1 电流的测量	(379)
10.3.2 电压的测量	(380)
10.3.3 功率的测量	(380)
10.3.4 电阻的测量	(383)
10.3.5 阻抗的测量	(385)
10.4 万用表	(386)
10.4.1 模拟式万用表	(386)
10.4.2 数字式万用表	(389)
10.5 非电量电测技术	(389)
10.5.1 电位器式位移传感器	(390)
10.5.2 电阻应变式传感器	(391)
10.5.3 热电偶传感器	(392)
10.5.4 光电转速表	(392)
10.6 现代测量技术	(393)
10.6.1 数字化测量仪表	(393)
10.6.2 微计算机仪器仪表	(394)
10.6.3 现代测量技术新进展	(397)
小结	(400)
习题 10	(401)
部分习题参考答案	(402)
参考文献	(408)

第1章 电路的基本概念和基本定理

本章在物理课程电学内容的基础上,针对电路的基本物理量(电流、电压和电动势)引入参考方向的概念,讨论了功率的概念及其计算,重点论述了基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律,给出了电路元件(电阻、电感、电容、电压源和电流源)的模型及其伏安特性,介绍了电路中电位的概念和额定值的概念。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路及其功能

电路是电气设备或器件为了某种需要按一定的方式组成的系统,电路为电流提供了通路。

电路的结构形式是多种多样的,从电路的组成和功能上来看,可将电路分为两大类。一类用于电能的传输和转换,典型的例子就是电力系统。一般电力系统包括发电厂、输变电环节和负载三个组成部分。在各类发电厂中,发电机组分别把热能(热电厂)、水能(水电厂)和原子能(核电厂)转换为电能,并通过输变电环节将电能经济、安全地输送给用户,用户的电灯、电动机、电炉等用电设备作为负载,再把电能转化为其他所需的能量。这类电路具有电压高(如我国电力系统的运行电压已达750 kV)、电流大、功率强的特点,所以称为强电系统。另一类电路用于传递和处理信号,如电视机电路、计算机电路及各类测量电路等。就测量电路而言,它包括以下三个环节:把被测量转化为相应电信号的信号转换环节,对信号进行放大、转换、滤波等处理的信号调理环节和显示环节。由于这类电路所涉及的电压和电流都较小,所以称为弱电系统。

1.1.2 电流、电压及其参考方向

电路的基本物理量包括电流、电压和电动势等,无论是电能的传输和转换,还是信号的传递和处理,都要通过电流、电压和电动势来实现。由于这些基本概念在物理课程中已经学习了,因此根据电工电子技术课程的特点和需要,引入电流、电压和电动势参考方向的概念。

1. 电流

电荷的定向运动形成电流,习惯上把电流看成是正电荷运动形成的,并且规定正电荷运动的方向为电流方向。在导体中电流的方向总是沿着电场的方向,从高电位流向低电位。

通过导体任一横截面的电荷量对时间的变化率称为电流,以 i 表示。所以

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.1)$$

电流的基本单位是安培,简称安(A)。

2. 电压、电动势

在电场中把单位正电荷从 a 点移至 b 点,电场力所做的功定义为 a 、 b 两点的电位差,或称为 a 、 b 间的电压,用 u_{ab} 表示,即

$$u_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.1.2)$$

电压的基本单位为伏特, 简称伏(V)。

电源的电动势 E 定义为在电源内部把单位正电荷由负极移至正极, 非电场力做的功。在非电场力的作用下, 电源不断地把其他形式的能量转换为电能。电源的电动势是表征电源本身特征的量, 与外电路的性质无关。电动势的单位与电压的单位相同, 为伏(V)。

3. 电流、电压的参考方向

对于简单的电路(如单回路电路, 或者虽然有多个回路, 但是用元件串并联的方法可化简为单回路的电路), 各元件两端的电压及流经各元件电流的方向可直接看出。所以, 在分析时可以不考虑电压与电流的方向, 仅计算大小, 也就是说, 把它们作为算术值来考虑。

对于复杂电路(多回路电路, 并无法通过元件的串并联化简为单回路的电路)情况却不同, 这些电路的某些电压和电流的方向是未知的, 必须经过一定的分析和计算才能判定。而这类电路的计算往往需要以电流、电压为变量对电路列方程, 求解电路的各变量。但是列电路方程又要考虑到电压、电流的方向, 这就要求假设电压、电流的方向。此外, 在分析交流电路时, 由于电流、电压的实际方向是随时间变化的, 为了能够简洁地使用一个函数, 或者通过一个波形图来描述它们随时间的变化规律, 也需要假设电流、电压的方向。

在图1.1.1所示的电路中, 如果不知道电流的真实方向, 可以先假设电流的方向是由左向右, 这个假设的方向就称为电流的参考方向。由于参考方向是可以依习惯或方便任意选定, 所以它可能与电流的真实方向相同, 也可能与电流的真实方向相反。当电流的参考方向与电流的真实方向一致时, 电流取正值; 反之, 如果电流的参考方向与真实方向相反时, 电流取负值。相应地, 在规定了某一电流的参考方向, 并在此规定下求得了该电流的值(大于零或小于零)时, 那么它的真实方向就可由此确定了。在图1.1.1所示的电路中, 如果算出的电流大于零, 表明电流的真实方向与电流的参考方向一致, 也是由左向右; 如果算出的电流值小于零, 则表明电流的真实方向与电流的参考方向相反, 应是由右向左。可见, 利用电流值的正、负并结合参考方向, 就能够确定电流的真实方向。

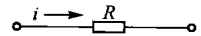


图 1.1.1 电流的参考方向

同理, 当电路中某两点电压的真实方向未知时, 也可对电压的方向进行假设。只有在规定了电压的参考方向后, 才能代入方程进行计算, 最后再根据电压值(大于零或小于零)来确定电压的真实方向。

以后, 如果没有特殊说明, 在电路分析中所涉及的电流、电压方向一般都指的是参考方向, 电压、电流的值均为代数值。在电路分析中, 人们习惯于把同一元件或同一部分电路的电压和电流的参考方向取为一致, 这样设定的参考方向称为关联参考方向或关联方向。采用关联参考方向可以使我们在电路分析中避免由于电流、电压参考方向不一致所带来的有关正、负号的麻烦, 使电路的分析过程更加简洁、明了, 也不容易出错。

对于电动势来说, 同样可以设定它的参考方向。但是应当注意, 电动势的真实方向是由电源的低电位端指向高电位端(如图1.1.2中箭头所示), 恰好与电压的真实方向相反。所以对于一个处于开路状态的电源(或虽不处于开路状态, 但电源内阻上的压降可以忽略)来说, 当电压的参考方向与电动势的参考方向设定为相反时(如图1.1.2中箭头所示), 则

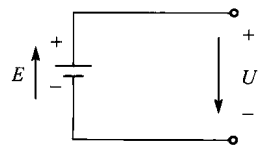


图 1.1.2 电压与电动势的参考方向

$$U = E$$

当电压的参考方向与电动势的参考方向设定为一致时, 则

$$U = -E$$

以后统一使用“+”、“-”号表示电压的参考方向, 用箭头表示电流的参考方向。

1.1.3 电路中的功率

根据物理学对功率的定义, 电路中某一元件或某一部分电路的功率为

$$p = ui \quad (1.1.3)$$

式中, u 是此元件或部分电路的端电压, i 是流经此元件或部分电路的电流。当电压 u 和电流 i 随时间 t 变化时, 功率 $p = ui$ 也随时间变化, 称为瞬时功率。工程上则更常用平均功率的概念。如果电压 u 和电流 i 是时间 t 的周期函数, 则平均功率为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (1.1.4)$$

式中, T 为电压 u 和电流 i 变化的周期。

在直流情况下, 电压和电流都是常数, 则

$$P = UI \quad (1.1.5)$$

按照式(1.1.4)或式(1.1.5)计算得到的功率, 表示的是吸收功率还是发出功率呢? 对图 1.1.3 所示电路中的电源 E 来说, 它明显是发出功率 P , 其电压 U 和电流 I 的参考方向相反。相对电阻 R , P 是其吸收的功率, 电阻 R 的电压 U 和电流 I 的参考方向相同。所以 P 对我们所考虑的电路来说, 究竟是表示吸收功率还是发出功率, 关键要看电压和电流的参考方向。如果电压和电流的参考方向为关联参考方向, 则 $P = UI$ 表示吸收功率(如图 1.1.3 中电阻 R 的情况)。这时若

$$P > 0$$

表示电路元件或部分电路吸收功率; 若

$$P < 0$$

表示电路元件或部分电路发出功率。

如果电压和电流的参考方向为非关联方向, 则 $P = UI$ 表示发出功率(如图 1.1.3 中电源 E 的情况)。即

$$P > 0$$

表示电路元件或部分电路发出功率; 若

$$P < 0$$

表示电路元件或部分电路吸收功率。

例 1.1.1 图 1.1.4 所示电路, 已知电阻 $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, 电池 E_1 的电压为 10 V , E_2 的电压为 6 V 。求各电路元件的电流、电压和功率。

解: 先设定各个电压和电流的参考方向, 如图 1.1.5 所示。这样

$$U_1 = 10 \text{ V}$$

$$U_{E2} = 6 \text{ V}$$

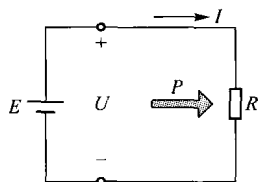


图 1.1.3 电路中的功率

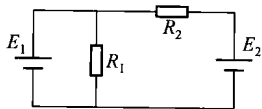


图 1.1.4 例 1.1.1 图

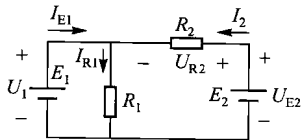


图 1.1.5 设定电压和电流的参考方向

$$U_{R2} = U_{E2} - U_1 = 6 - 10 = -4 \text{ V}$$

$$I_{R1} = \frac{U_1}{R_1} = \frac{10}{10} = 1 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{-4}{2} = -2 \text{ A}$$

$$I_{E1} = I_{R1} - I_2 = 1 - (-2) = 3 \text{ A}$$

$$P_{E1} = U_1 I_{E1} = 10 \times 3 = 30 \text{ W} \quad (\text{发出功率})$$

$$P_{R1} = U_1 I_{R1} = 10 \times 1 = 10 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_{E2} = U_{E2} I_2 = 6 \times (-2) = -12 \text{ W} \quad (\text{发出功率负的功率, 吸收功率})$$

$$P_{R2} = U_{R2} I_2 = (-4) \times (-2) = 8 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

[练习与思考]

1.1.1 为什么在电路分析中通常采用关联参考方向, 如果采用非关联参考方向会带来什么麻烦? 试写出两种情况下欧姆定理的表达式。

1.1.2 电压与电动势有何区别? 对一个电源来说, 它的电动势和它的端电压有何关系, 它们的参考方向是否可以任意假设?

1.1.3 当一辆汽车的电池用完时, 可以通过与另一辆汽车的电池相连发动汽车, 如图 1.1.6 所示, 正极对正极, 负极对负极。假设图中电流 i 的值为 30 A。问: (1) 哪一辆车的电池用完了; (2) 如果连接持续了 1 分钟, 转移的能量是多少?

1.1.4 图 1.1.7 所示电路在开关 S 打开的短暂时间内, 电感 L 和电阻 R_2 中是有电流的, 而且 i_L 是正的。试判断电压和电流的真实方向, 哪个元件吸收功率, 哪个元件发出功率?

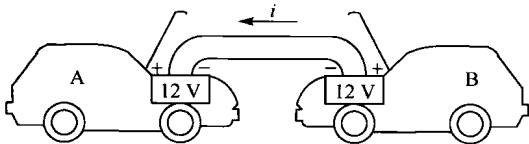


图 1.1.6 题 1.1.3 图

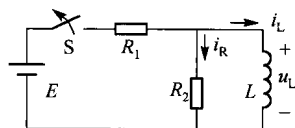


图 1.1.7 题 1.1.4 图

1.2 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律(Kirchhoff's Law)于1845年由德国物理学家 G. R. 基尔霍夫提出, 它是电路理论最基本的定律, 是阐明集总参数电路(集总参数电路是指电路本身的最大线性尺寸远小于电路中电流或电压波长的电路, 反之则为分布参数电路)中流入和流出结点的电流间及沿回路的各段电压间的约束关系的定律。基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律(又称第一定律, KCL)及基尔霍夫电压定律(又称第二定律, KVL)。为了描述基尔霍夫定律, 首先介绍几个名词术语。

- (1) 支路: 电路中的每一条分支称为一条支路, 一条支路中各元件流过同一电流。
- (2) 结点: 三条或三条以上支路的交汇点(连接点)称为结点。
- (3) 回路: 电路中的任一闭合路径称为回路。
- (4) 网孔: 网孔是最简单的回路。在这一回路中, 除了构成回路所必需的支路以外, 不含有其他的支路。

在图1.2.1所示的电路中, bae、be、bd、cf、cd和df都是支路; e、f间没有电路元件, 而连线又认为是理想的, 所以e和f是同一个点, ef不是支路。同理b和c是同一个点, bc不是支路。b(c)、d和e(f)为三个结点。abea、bcfeb、cdfc、bdcdb、abcfea、bcdfeb、abcdfea、bdfcb、bdcfeb、bdfcb、bdfeab和bdfcd都是回路。而abea、bcfeb、cdfc和bdcdb都是网孔。

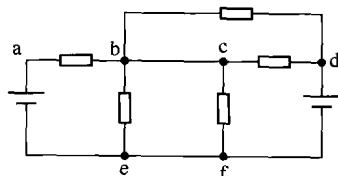


图 1.2.1 支路、结点和回路

1.2.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 KCL 指出: 对于电路中任意的一个结点, 由于它不能产生、消灭和积累电荷, 所以任意一个时间段流进结点的电荷一定等于流出结点的电荷, 即流进结点的电流之和一定等于流出结点的电流之和。

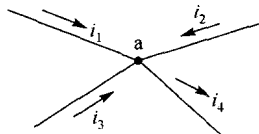


图 1.2.2 结点的电流关系

如图1.2.2所示, 图中的结点a连接有四条支路, 电流 i_1 、 i_2 和 i_3 是流进结点的, 有一条支路的电流 i_4 是从结点a流出的, 所以有

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_4$$

如果将上式中的 i_4 移到等号左边, 则有

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

这样, KCL 则可以叙述为: 流进任一结点的电流的代数和为零。即

$$\sum i = 0 \quad (1.2.1)$$

KCL 不仅对任意一个结点来说是成立的, 而且还可以推广到包围一部分电路的闭合线和闭合面(称为广义结点)。例如, 在图1.2.3所示电路中, 闭合线S包围着三个结点a、b和c, 对这三个结点应用KCL列方程, 得

$$I_1 - I_{12} + I_{31} = 0$$

$$I_2 + I_{12} - I_{23} = 0$$

$$I_3 + I_{23} - I_{31} = 0$$

将上列三个方程相加, 得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

可见, 基尔霍夫电流定律对闭合线S是适用的。

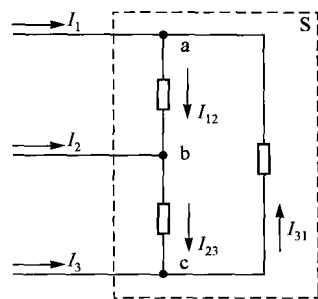


图 1.2.3 闭合线作为广义结点

1.2.2 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律 KVL 指出: 对于电路中任意的一个闭合回路, 各段电压的代数和为零。即

$$\sum u = 0 \quad (1.2.2)$$

式(1.2.2)的具体含义是: 对回路任意选择一个绕行方向, 规定回路中各段电压的参考方向, 凡是参考方向与回路的绕行方向一致的取正号, 凡是参考方向与回路的绕行方向相反的取负号。在这样的原则下, 回路中各段电压的代数和为零。

在图 1.2.4 所示的回路中, 选取顺时针方向为回路的绕行方向, 根据 KVL 可列出电路的回路电压方程

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} - U_{AD} = 0$$

式中, U_{AB} 、 U_{BC} 和 U_{CD} 的参考方向与回路的绕行方向是一致的, 取正值; 而 U_{AD} 的参考方向与回路的绕行方向相反, 所以取负值。上式可以改写为

$$U_{AB} + U_{BC} = U_{AD} - U_{CD} \quad (1.2.3)$$

等号左边为

$$U_{AB} + U_{BC} = U_{AC}$$

等号右边为

$$U_{AD} - U_{CD} = U_{AD} + (-U_{CD}) = U_{AC}$$

则式(1.2.3)的含义为: 由路径 ABC 计算得到的 A 点和 C 点之间的电压 U_{AC} , 与由路径 ADC 计算得到的电压 U_{AC} 是一样的, 就是说两点间的电压与计算路径的选取无关。因而, 基尔霍夫电压定律是“电压与路径无关”这一原理的体现。

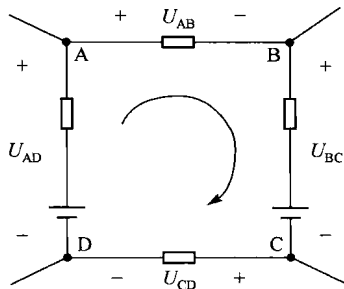


图 1.2.4 回路的电压关系

既然电路中任意两点间的电压与计算路径无关, 电压是一个与计算路径无关的确定值, 这就意味着可以在电路中引入电位的概念。反过来说, 如果在电路中引入了电位的概念, 那么任意两点间的电压也就是电位差, 与路径无关, 基尔霍夫电压定律也就自动满足了。

例 1.2.1 图 1.2.5 所示电路, 测得电源 E_1 的端电压 $U = 10 \text{ V}$, 电流 $I = 10 \text{ A}$ 。求流过电阻 R 的电流 I_3 。

解: 由题意

$$I_1 = \frac{10}{5} = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{10}{2} = 5 \text{ A}$$

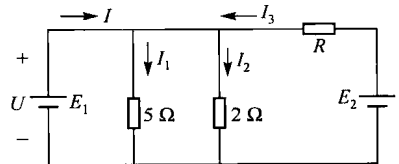


图 1.2.5 例 1.2.1 图

由 KCL 有

$$I - I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

所以

$$I_3 = I_1 + I_2 - I = 2 + 5 - 10 = -3 \text{ A}$$

例 1.2.2 求图 1.2.6 中的未知电压 U_1 、 U_2 和 U_3 。

解: 由题意, 根据 KVL 得

$$U_1 = 2 + 6 = 8 \text{ V}$$

$$U_2 = 2 - 12 = -10 \text{ V}$$

$$U_3 = 12 + 6 = 18 \text{ V}$$

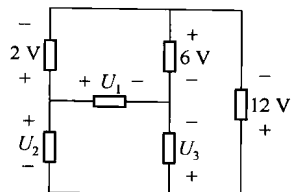


图 1.2.6 例 1.2.2 图

[练习与思考]

1.2.1 试说明基尔霍夫定律对电压或电流的参考方向和真实方向都成立。

1.2.2 求图 1.2.7 中的电流 I_1 和 I_2 。

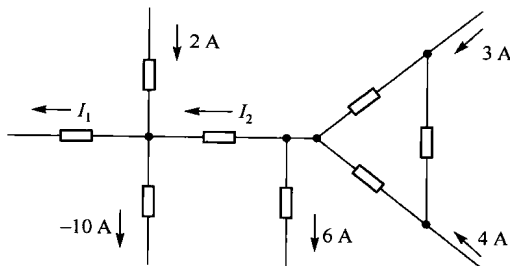


图 1.2.7 题 1.2.2 图

1.3 无源电路元件

电工技术和电子技术中所涉及的电子元件、电路器件和电工设备是多种多样的。在电路分析中, 常用几种理想化的基本电路元件的组合来等效这些真实的电路器件。根据某一元件的等效电路中是否含有电源, 可以把元件分为有源电路元件和无源电路元件两大类, 理想化的基本电路元件也从属于这两类。

基本的无源电路元件有电阻、电感和电容。这三种元件都是两端元件。了解元件的特性, 也就是要了解它两端的电压与流经它的电流之间的关系, 把这种关系称为元件的伏安特性。伏安特性决定了元件在电路中的表现。

1.3.1 电阻元件

根据电阻元件的伏安特性, 可以把电阻元件分为线性电阻和非线性电阻。

1. 线性电阻

电压和电流的关系满足欧姆定律的电阻称为线性电阻, 即线性电阻的端电压与流经它的电流成正比。当电压和电流的参考方向如图 1.3.1 (a) 所示 (采用关联参考方向) 时, 线性电阻 R 的伏安特性可表示为

$$u = iR \quad (1.3.1)$$

在直流情况下,

$$U = IR \quad (1.3.2)$$

在以电流 i 为横坐标, 电压 u 为纵坐标的平面直角坐标系中, 线性电阻的伏安特性曲线为过原点的一条直线, 如图 1.3.1 (b) 所示。直线的斜率为