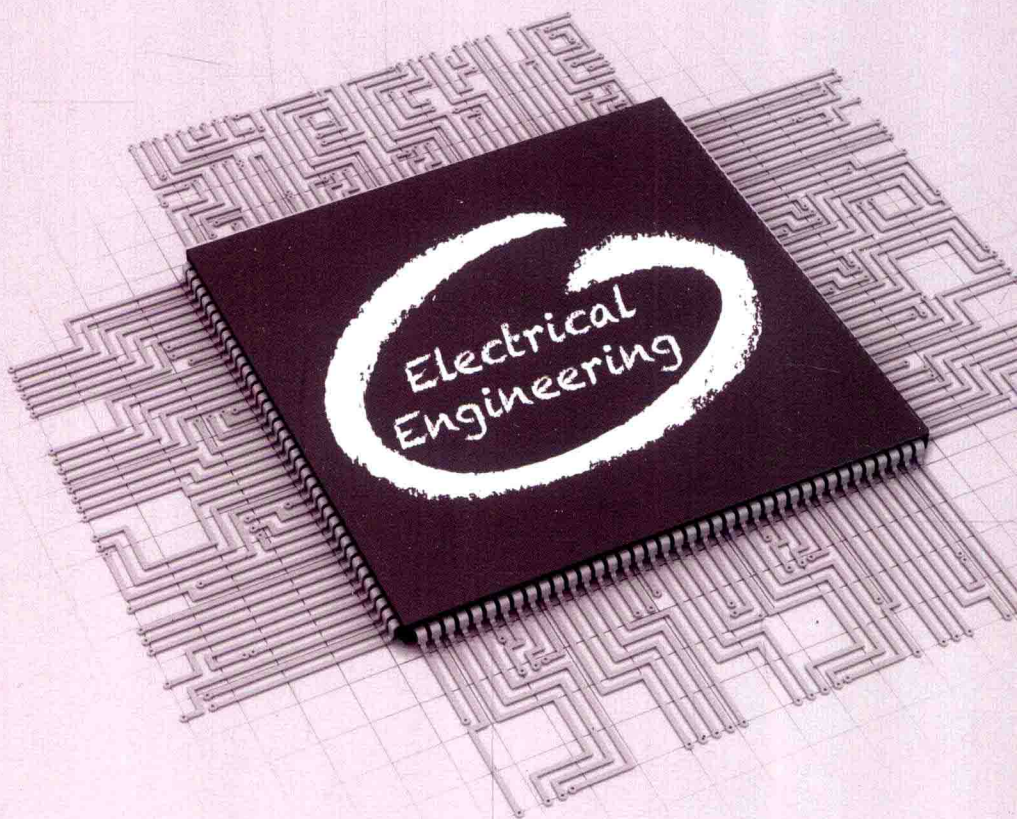




普通高等教育“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材



电工学(上册)

—— 电工技术基础

■ 孔庆鹏 主编 ■ 辛 青 查丽斌 李自勤 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电工学（上册）

——电工技术基础

孔庆鹏 主编

辛 青 查丽斌 李自勤 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍电工技术的基础知识。全书共 8 章, 主要内容包括: 直流电路、一阶动态电路的暂态分析、正弦稳态电路的分析、供配电技术基础、磁路与变压器、电动机、继电器接触器控制系统、可编程控制器及应用等。本书配备大量例题和习题, 并提供配套多媒体电子课件、习题详解和 MOOC 网络课程。

本书可与《电工学(上册)习题及实验指导——电工技术基础》、《电工学(下册)——电子技术基础》和《电工学(下册)习题及实验指导——电子技术基础》等书配套使用。

本书可作为高等学校非电类专业的本科生教材, 也可作为自学考试和成人教育的自学教材, 还可供电工电子工程技术人员学习参考。

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

电工学. 上册, 电工技术基础 / 孔庆鹏主编. — 北京: 电子工业出版社, 2015.8

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-25841-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 072571 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

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: 13.25 字数: 339 千字

版 次: 2015 年 8 月第 1 版

印 次: 2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 29.90 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 zltz@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

“电工学”(电工技术基础与电子技术基础)课程是高等学校非电专业一门重要的专业基础课,通过本门课程的学习,学生可以获得电路、电子技术及电气控制等领域必要的基本理论、基本知识和基本技能。该课程内容涉及电工电子学科的各个领域,并有很强的实践性。为适应科学技术的迅猛发展,配合高等学校新的课程体系和教学内容改革,以及教学学时压缩的实际需要,作者在总结多年从事电工学教学工作经验的基础上,针对电工和电子技术课程教学的基本要求和学习特点,编写了本套教材。全套教材包括《电工学(上册)——电工技术基础》、《电工学(上册)习题及实验指导——电工技术基础》、《电工学(下册)——电子技术基础》和《电工学(下册)习题及实验指导——电子技术基础》共4本书。本套书的编写思路是:保证基础、注重应用、讲清概念、力求精练;以基础知识为重点,用心安排,使得知识易懂、易学,做到语言精练,便于自学。

在内容的安排上,本书具有以下特点。

● 保基础、重实践、少而精

突出基本概念、基本原理和基本分析方法,着重于定性分析,尽量减少过于复杂的分析和计算,电路部分习题与例题的选用尽量降低计算难度,减少需要列写复杂方程进行求解的题目,因为复杂的电路分析都可以借助于仿真软件进行,这样有助于学生对电路基本理论和基本分析方法等重点知识的掌握。对于电阻器、电容器和电感器等实际元件的容量、容差和标称系列等进行了介绍,以使学生了解在设计中如何选用实际器件的知识,突出电工学的工程应用。

● 强调“设计仿真”,鼓励自主探索学习

本书基本上每章都有设计仿真的题目,要求完成设计,采用仿真软件进行仿真,附录A介绍了Multisim软件,在不增加总学时的情况下,建议在教学中利用2~4学时进行软件的介绍,主要让学生自学,完成设计题目的设计和仿真,将结果以邮件的形式发送给老师。在计算机和网络技术如此普及的今天,这一点应该是完全可以做到的。设计题目的内容要求不拘泥于课本的内容,鼓励学生查找资料,自主探索学习,解决设计问题。

● 正确处理基础知识与知识更新的关系

电工学课程的基本内容是工科非电类专业所需要的电工电子技术基础内容,随着电工电子技术的发展和非电类专业的需求不同,基础内容在不同时期有不同的要求和侧重点。本书前3章是电路基础理论,第4章介绍供电系统与安全用电,第5章介绍基本电磁理论与变压器,第6章电动机部分重点介绍企业最常用的三相异步电动机,第7章介绍目前使用比较多的继电器控制系统,第8章基于市场流行的FX系列,介绍成为工业控制领域的主流控制设备的PLC。

《电工学(上册)习题及实验指导——电工技术基础》是本书的配套教材,该指导书既可以作为学生的实验指导书,也可以作为学生的作业本和习题指导手册来使用。指导书共9章,第1~8章与本书对应,每章包括本章内容的知识要点总结、本章重点与难点、重点分析方法

与步骤、填空题和选择题、习题等 5 部分内容。习题部分供学生做作业时使用，可以省去抄题目和画图的时间，提高课后学习的效率，也可以减轻教师的负担。第 9 章提供了 9 个电工技术的实验内容，每个实验均给出实验内容和实验电路的设计方法，不针对具体的实验板设计，通用性较强。

该套教材适应总学时在 60~110 学时、实验学时在 20~50 学时的教学要求，适宜分两学期开课的情况，由于涉及内容较多，有些内容可以在教师指点下让学生利用 MOOC 网络视频进行自学，以提高教学质量和效率。

本套教材包含大量例题，每章后附有习题，这些例题和习题与教材内容紧密配合，深度适当。书末给出部分习题参考答案，以供读者参考。本书向使用本套书作为教材的教师提供多媒体电子课件和习题答案，请登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 注册下载。本教材提供 MOOC 网络课程，进入华信慕课频道可观看本书 MOOC 课程。

本书由孔庆鹏策划、组织和统稿，第 1、2 章及附录 A 由李自勤编写，第 3、4 章由辛青编写，第 5、6 章由查丽斌编写，第 7、8 章由孔庆鹏编写。王宛苹参与了第 1、2、3 章部分内容的编写，王勇佳、吕幼华、汪洁、胡体玲和李付鹏等老师都参与了本教材的编写、本书习题的解答及设计题目的模拟仿真工作，在结构和内容方面提出了很多重要的意见，张凤霞和钱文阳参与了本书的部分校对工作，钱梦楠与钱梦菲参与了本书部分书稿和图的录入工作。在本书编写的过程中，许多兄弟院校的教师提出了诸多中肯的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢！

本书在编写过程中，参考了一些已经出版的图书和文献，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限且编写时间仓促，书中难免存在错误和不妥之处，诚恳地希望读者提出宝贵意见和建议，以便今后不断改进。

作者
2015 年 8 月

目 录

第 1 章 直流电路	1	2.2 换路定则与初始条件	38
1.1 电路及电路模型	1	2.2.1 换路定则	38
1.1.1 电路的作用及组成	1	2.2.2 初始条件的求取	39
1.1.2 电路元件和电路模型	1	2.3 一阶电路的零输入响应	40
1.2 电路的基本物理量	2	2.3.1 RC 电路的零输入响应——电容 放电过程	40
1.2.1 电流及其参考方向	2	2.3.2 RL 电路的零输入响应	42
1.2.2 电压及其参考方向	3	2.4 一阶电路零状态响应	44
1.2.3 电功率	4	2.4.1 RC 电路的零状态响应——电容 充电过程	44
1.3 基尔霍夫定律	5	2.4.2 RL 电路零状态响应	45
1.3.1 几个术语	5	2.5 一阶电路完全响应	47
1.3.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)	5	2.5.1 一阶电路的完全响应	47
1.3.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)	6	2.5.2 三要素法求一阶电路响应	48
1.4 电阻元件	6	2.6 积分电路和微分电路	51
1.4.1 欧姆定律	7	2.6.1 方波激励下 RC 电路的响应	51
1.4.2 电阻的串并联等效	10	2.6.2 积分电路和微分电路	53
1.5 电压源与电流源	13	习题 2	54
1.5.1 电压源模型与电流源模型	13	第 3 章 正弦稳态电路的分析	58
1.5.2 理想电源	15	3.1 正弦电压与电流	58
1.5.3 电源的等效变换	15	3.1.1 正弦量的三要素	58
1.6 电位的计算	17	3.1.2 有效值与相位差	59
1.7 支路电流分析法	19	3.2 正弦量的相量表示	60
1.8 叠加定理	20	3.2.1 正弦量的相量表示法	61
1.9 等效电源定理	22	3.2.2 基尔霍夫定律的相量表示	62
1.9.1 戴维南定理	22	3.3 单一参数的交流电路	63
1.9.2 诺顿定理	23	3.3.1 电阻电路	63
1.10 含受控源的电阻电路	25	3.3.2 电感电路	64
1.10.1 受控源	25	3.3.3 电容电路	64
1.10.2 含受控源电阻电路的分析	26	3.4 RLC 串联交流电路	65
习题 1	29	3.5 正弦稳态交流电路的分析	67
第 2 章 一阶动态电路的暂态分析	35	3.5.1 阻抗的串并联	67
2.1 电容元件与电感元件	35	3.5.2 正弦稳态电路的分析	69
2.1.1 电容元件及其性质	35		
2.1.2 电感元件及其性质	37		

3.6 正弦稳态电路的功率·····	71	5.4.4 特殊变压器·····	118
3.6.1 瞬时功率·····	71	习题 5·····	119
3.6.2 有功功率、无功功率和视在功率·····	72	第 6 章 电动机 ·····	122
3.6.3 功率因数的提高·····	74	6.1 三相异步电动机的结构与工作原理·····	122
3.7 交流电路的频率特性·····	75	6.1.1 三相异步电动机的结构和组成·····	122
3.7.1 RC 滤波电路·····	75	6.1.2 三相异步电动机的工作原理·····	124
3.7.2 串联谐振·····	80	6.2 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性·····	127
3.7.3 并联谐振·····	82	6.2.1 三相异步电动机的电路分析·····	127
习题 3·····	83	6.2.2 三相异步电动机的电磁转矩·····	129
第 4 章 供配电技术基础 ·····	89	6.2.3 三相异步电动机的机械特性·····	129
4.1 供配电系统概述·····	89	6.3 三相异步电动机的使用·····	131
4.1.1 电力系统·····	89	6.3.1 三相异步电动机的额定数据·····	131
4.1.2 供配电系统·····	90	6.3.2 三相异步电动机的启动·····	133
4.1.3 电力系统的额定电压·····	92	6.3.3 三相异步电动机的调速·····	135
4.1.4 供电质量·····	93	6.3.4 三相异步电动机的制动·····	136
4.2 三相电源·····	94	6.4 单相异步电动机·····	138
4.3 三相电路中负载的连接·····	96	6.5 直流电动机·····	140
4.3.1 负载星形连接的三相电路·····	97	6.5.1 直流电动机的基本结构和工作原理·····	140
4.3.2 负载三角形连接的三相电路·····	99	6.5.2 直流电动机的工作特性·····	141
4.4 三相电路中的功率·····	100	6.5.3 直流电动机的启动和调速·····	142
4.5 安全用电技术·····	100	习题 6·····	143
4.5.1 安全用电常识·····	100	第 7 章 继电器接触器控制系统 ·····	145
4.5.2 防触电安全技术·····	101	7.1 常用低压电器·····	145
习题 4·····	102	7.1.1 手动电器·····	145
第 5 章 磁路与变压器 ·····	105	7.1.2 自动电器·····	147
5.1 磁路的基本概念·····	105	7.2 三相异步电动机的直接启动控制·····	152
5.1.1 磁场的基本物理量·····	105	7.2.1 点动控制·····	152
5.1.2 铁磁材料特性·····	106	7.2.2 直接启停连续运转控制·····	153
5.1.3 磁路欧姆定理·····	107	7.2.3 顺序控制·····	154
5.2 交流铁心线圈电路·····	108	7.3 三相异步电动机的正反转控制·····	155
5.2.1 基本电磁关系·····	109		
5.2.2 功率损耗·····	110		
5.3 电磁铁·····	111		
5.4 变压器·····	112		
5.4.1 变压器的分类与结构·····	112		
5.4.2 变压器的工作原理·····	113		
5.4.3 变压器的使用·····	116		

7.4 开关自动控制	156	8.3 PLC 的内部编程元件和指令 系统	172
7.4.1 行程控制	156	8.3.1 PLC 的内部编程元件	172
7.4.2 时间控制	157	8.3.2 PLC 的指令系统	175
习题 7	158	8.4 PLC 的梯形图程序设计方法和 应用	179
第 8 章 可编程控制器及应用	163	8.4.1 经验设计法	179
8.1 可编程控制器的组成和工作 原理	163	8.4.2 应用实例	182
8.1.1 可编程控制器的基本结构	163	习题 8	185
8.1.2 可编程控制器的工作原理	166	附录 A Multisim 软件简介	188
8.2 可编程控制器的编程	168	附录 B 部分习题答案	199
8.2.1 可编程控制器的编程语言	168	参考文献	204
8.2.2 可编程控制器梯形图的编程 原则	170		

第1章 直流电路

本章在介绍电路的基本物理量——电压、电流和功率的基础上，结合直流电路，重点讨论电路的基本定理和基本分析方法，为后续课程的学习打下基础。

1.1 电路及电路模型

1.1.1 电路的作用及组成

电路是一种由导线连接的包含各种电路元件的闭合回路。规模较大或结构较复杂的电路也称为电网络（简称为电网或网络）。图 1.1.1 所示为两个典型电路的示意图。

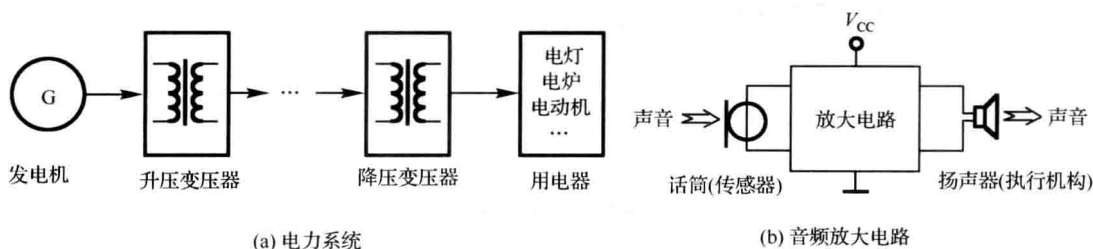


图 1.1.1 电路示意图

电路的作用可总结为两个方面：（1）实现电能的传输与转换，如图 1.1.1(a)所示的电力系统，它将发电机产生的电能传输至用电器，并转换为光能、热能、机械能等；（2）传递和处理信号，如图 1.1.1(b)所示的音频放大电路，它通过话筒接收载有声音信息的电磁波信号后，经过选频、放大和处理，最后由扬声器复原出原信号。

通常电路包含三个组成部件：电源或信号源，负载，连接电源（信号源）和负载的中间环节。

图 1.1.1(a)中的发电机是产生电能的设备，在电路中充当电源的作用；电灯、电炉等用电器则是消耗电能的设备，是电路中的负载，它们把电能转换为光能、热能等；中间环节则是升压/降压变压器和输电线等设备。

图 1.1.1(b)中的话筒将声音信号转换为微弱电信号，在电路中起信号源的作用；扬声器将电信号转换为声音信号，是电路的负载；中间环节是放大电路，它将微弱电信号放大为推动扬声器发声的大功率电信号。

1.1.2 电路元件和电路模型

组成实际电路的元器件通常呈现多种电磁性质。例如，线圈在通有电流时不光表现出其最主要的电磁性质——电感性，还会表现出消耗电能的特性——电阻性，同时，线圈的匝与

匝之间还存在着分布电容。此外,线圈还有体积、线径等物理特性。所以要对实际电路进行精确的分析研究,是一件非常困难的事情。

为便于对电路进行分析计算,在一定条件下,对实际元器件加以近似、理想化,即只保留元器件最主要的电磁特性,而忽略其次要因素。将这种理想化后的元器件称为理想元件,简称为元件。任何实际电路元器件均可以用这些理想化元件模型或它们的组合来表示。如小灯泡,只用一个电阻元件 R_L 作为它的模型;而以上提到的线圈,在其消耗的电能可以忽略时,用一个电感元件 L 作为其模型,如果不能忽略其电能消耗作用,则用电感元件 L 串联电阻元件 R 作为其模型(对于低频线路通常可以忽略线圈的分布电容)。当电路工作时的波长远远大于电路的尺寸时,可以将该电路看做集中(总)电路,它是实际电路的模型。电路理论分析的是电路模型,而不是实际电路。实际电路与电路模型如图 1.1.2 所示。

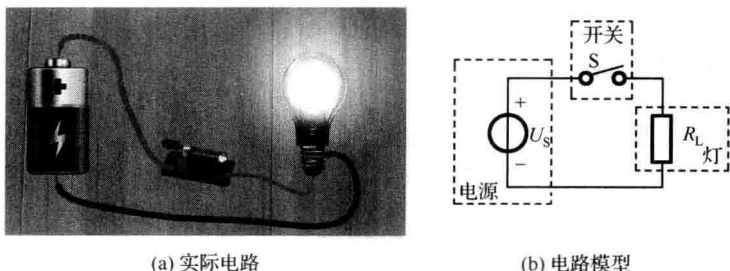


图 1.1.2 实际电路与电路模型

1.2 电路的基本物理量

在分析各种电路之前,先介绍电路中的基本物理量,包括电流、电压和功率。所谓的电路分析,大多数时候就是分析电路中的这几个物理量。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷有规则地定向运动可形成电流,其大小用电流强度(大多数时候也简称为电流)表示,即单位时间内通过导体横截面的电量,用符号 $i(t)$ 表示,其数学表达式为

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.1)$$

电流方向规定为正电荷运动的方向。如果电流大小及方向都不随时间变化,则称恒定电流,简称直流(简称为 DC),用大写的斜体字母 I 表示。如果电流是时间 t 的函数,称为时变电流,简称为 i ,如果电流的大小和方向都随时间做周期性变化,则称为交流电流(简称为 AC)。

在国际单位制(SI)中,电荷的单位是库仑(C),时间的单位是秒(s),电流的单位是安培(A),则有 $1(\text{A}) = \frac{1(\text{C})}{1(\text{s})}$ 。

通常还可在 A 前面添加表示比例因子的前缀 k、m 等来表示电流的单位,如 kA(千安)、mA(毫安)等。常用的物理单位前缀如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 常见的物理单位前缀

前 缀	G	M	k	m	μ	n	p	f
中文名字	吉	兆	千	毫	微	纳	皮	飞
比例因子	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}

在对电路进行分析时,很多时候并不能预先知道电流的实际方向,此时可先任意设定一个方向,称为电流的参考方向(或正方向),在电路中用实线箭头来表示,如图 1.2.1 所示。该图中的方框表示一个二端元件。电流的方向除了用实线箭头表示外,也可用双下标表示,如 i_{ab} 表示电流方向为由 a 到 b,显然有 $i_{ab} = -i_{ba}$ 。

图 1.2.1(a)中,电流的参考方向与实际方向一致, $i > 0$, 电流为正值;图 1.2.1(b)中,电流的参考方向与实际方向相反, $i < 0$, 电流为负值。所以只有在选定了参考方向后,电流才有正、负之分。电路图中标明的电流方向均为参考方向,一般不标实际方向。

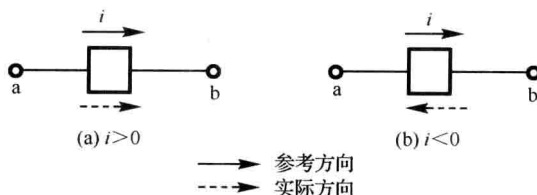


图 1.2.1 电流的实际方向和参考方向与数值的关系

1.2.2 电压及其参考方向

电压也称电位差。电路中 a、b 两点间的电压用 u_{ab} 表示,在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。其数学表达式为

$$u_{ab}(t) = V_a - V_b = \frac{dW}{dq} \quad (1.2.2)$$

式中, V_a 表示 a 点电位, V_b 表示 b 点电位, W 表示能量。在国际单位制(SI)中,能量的单位是焦耳(J),电荷的单位是库仑(C),电压的单位是伏特(V),则有 $1(V) = \frac{1(J)}{1(C)}$, 此

外,电压的常用单位还有千伏(kV)和毫伏(mV)等。

电路中电压的实际方向为由高电位指向低电位,即电位降的方向。电压的方向用+、-极性表示,也可用箭头或双下标来表示,如图 1.2.2 所示。 u_{ab} 表示 a 为正极性, b 为负极性,而 u_{ba} 正好相反,并且有 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。同电流一样,在进行电路分析前,无法预知实际方向的电压,可先任意假定一个电压的参考方向(或正方向)。当电压的实际方向与参考方向一致时,电压值为正,反之则为负。

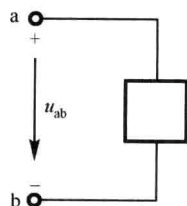


图 1.2.2 电压的方向

如果电压的大小和极性都不随时间变化,则称恒定电压或直流电压,用大写的斜体字母 U 表示。如果电压是时间 t 的函数,则称为时变电压,用小写的斜体字母 u 表示。

在电路中,如果某个元件电压和电流的参考方向相同,则称该元件为关联参考方向(简称关联方向),如图 1.2.3(a)所示;反之,则称非关联参考方向(简称非关联方向),如图 1.2.3(b)所示。在对电路进行分析时,应尽可能选用关联参考方向。

确定是关联方向还是非关联方向,必须要明确研究的对象,如图 1.2.3(c)所示电路,同样的一对 u 和 i ,对于元件 1 来讲是关联方向,而对于元件 2 来讲则是非关联方向。

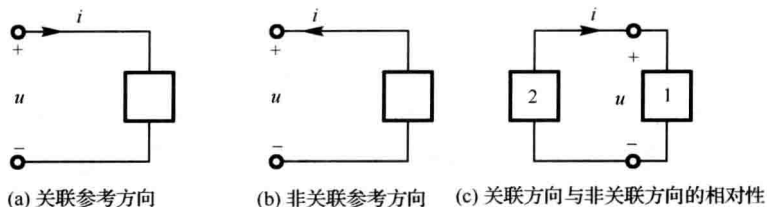


图 1.2.3 关联和非关联参考方向

在进行电路分析前,需先标出各个量的参考方向。引入关联参考方向后,只需在电路图中标出电流参考方向或电压参考极性中的任何一项就可以了。

1.2.3 电功率

电功率(简称功率)用来反映电能转换的快慢,定义为:单位时间内吸收(或产生)的电能量,即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{dw}{dq} = u(t)i(t) \quad (1.2.3)$$

在直流电路中

$$P = UI \quad (1.2.4)$$

当电压、电流为关联参考方向时,计算功率时采用式(1.2.3),若为非关联参考方向时,则 $p(t) = -u(t)i(t)$ 。计算结果中,若 $p(t) > 0$,表明该元件吸收电功率,起负载作用;若 $p(t) < 0$,表明该元件提供功率或产生功率,起电源作用。对一个电路而言,通常有吸收功率 = -产生功率,即满足能量守恒定律。

在国际单位制(SI)中,能量的单位是焦耳(J),时间的单位是秒(s),功率的单位是瓦特(W),则有 $1(W) = \frac{1(J)}{1(s)}$,功率的常用单位还有毫瓦(mW)、千瓦(kW)和兆瓦(MW)等。

根据式(1.2.3)可求得能量

$$w(t) = \int_{-\infty}^t P(\lambda) d\lambda \quad (1.2.5)$$

在 $t_1 \sim t_2$ 时间内元件的能量变化为 $\int_{t_1}^{t_2} P(\lambda) d\lambda$ 。

【例 1.2.1】 图 1.2.4 所示电路由 5 个元件组成,已知 $U_1 = 2V$, $U_2 = 3V$, $U_3 = 1V$, $U_4 = U_5 = 4V$, $I_1 = 3A$, $I_2 = 1A$, $I_3 = 2A$; 求每个元件的功率,并指出哪些是电源,哪些是负载。

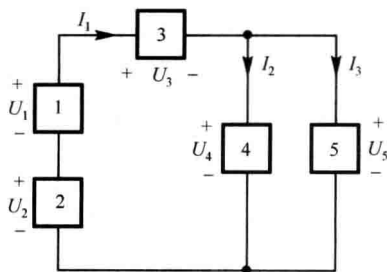


图 1.2.4 例 1.2.1 电路图

解: 元件 1 为非关联方向

$$P_1 = -U_1 I_1 = -2 \times 3 = -6(W) \quad (\text{产生}) \text{起电源作用;}$$

元件 2 为非关联方向

$$P_2 = -U_2 I_1 = -3 \times 3 = -9(W) \quad (\text{产生}) \text{起电源作用;}$$

元件 3 为关联方向

$$P_3 = U_3 I_1 = 1 \times 3 = 3(W) \quad (\text{吸收}) \text{起负载作用;}$$

元件 4 为关联方向

$$P_4 = U_4 I_2 = 4 \times 1 = 4(\text{W}) \quad (\text{吸收}) \text{ 起负载作用};$$

元件 5 为关联方向

$$P_5 = U_5 I_3 = 4 \times 2 = 8(\text{W}) \quad (\text{吸收}) \text{ 起负载作用};$$

显然有 $-(P_1 + P_2) = P_3 + P_4 + P_5$ ，即电路中电源提供的功率等于负载吸收的功率。

1.3 基尔霍夫定律

前面探讨了电路中的电压、电流和功率的概念。在电路中，每个元件都会有对应的电压和电流，因此，电路中会存在多个电压和电流。这些电压与电压之间、电流与电流之间存在什么样的关系呢？这就是本节的基尔霍夫定律所解决的问题。

1.3.1 几个术语

在讲解基尔霍夫定律前，先介绍电路中常用到的几个术语。

(1) 支路：每个二端元件可视为一个支路，流过元件的电流称为支路电流，而元件两端的电压称为支路电压。

在实际分析电路时，常把流过同一个电流的分支称为一个支路。图 1.3.1 所示电路有 5 条支路，图中标出了每条支路的支路电流和每个元件两端的支路电压。

(2) 节点：三条或三条以上支路的连接点称为节点。

图 1.3.1 所示电路有三个节点。注意：图中标注的 c 和 d 为一个节点。

(3) 回路：由支路围成的闭合路径。图 1.3.1 所示电路有 6 个回路。

(4) 网孔：内部不含任何其他支路的回路称为网孔。显然网孔只对平面电路有效。如图 1.3.1 所示电路中有三个网孔：a1c2a，a2cdba 和 bd65b。

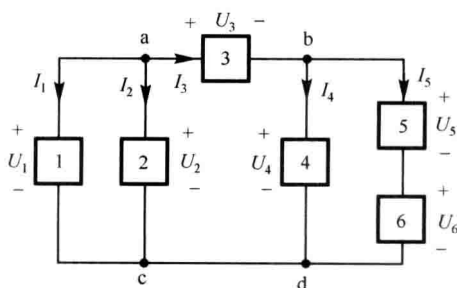


图 1.3.1 电路举例

1.3.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律 (KCL: Kirchhoff's Current Law) 描述节点处各支路电流之间的关系。它指出：在集总参数电路中，任一时刻，对任一节点，其流入（或流出）电流的代数和为零。即

$$\sum I = 0 \quad (1.3.1)$$

对于 KCL，可以从以下三个方面来把握。

- (1) 成立的前提：集总参数电路；
- (2) 研究的对象：与某节点相关联的各支路电流；
- (3) 得出的结论：这些支路电流的代数和为零。

KCL 也可以描述为在任一节点流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和，即反映了电路的电荷守恒。

$$\sum I_{\text{in}} = \sum I_{\text{out}} \quad (1.3.2)$$

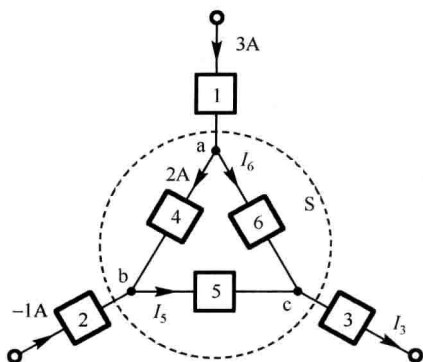


图 1.3.2 例 1.3.1 电路图

KCL 除了对节点适用外, 还可推广至广义节点——闭合的曲面, 即流入某闭合曲面的支路电流的代数和为零。

【例 1.3.1】求图 1.3.2 所示电路的电流 I_3 。

解: 设流入节点的电流为正, 由 KCL 得到

节点 a $3 - 2 - I_6 = 0$, 求得 $I_6 = 1(\text{A})$;

节点 b $(-1) + 2 - I_5 = 0$, 求得 $I_5 = 1(\text{A})$;

节点 c $I_5 + I_6 - I_3 = 0$, 即 $1 + 1 - I_3 = 0$, 求得 $I_3 = 2(\text{A})$ 。

本例也可以采用广义节点 S 来计算, 设流入 S 的电流为正, 得到 $3 + (-1) - I_3 = 0$, 求得 $I_3 = 2(\text{A})$ 。

1.3.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律 (KVL: Kirchhoff's Voltage Law) 描述回路中各支路电压之间的关系。它指出: 在集总参数电路中, 任一时刻, 对任一回路, 沿某指定方向绕行一周, 其支路电压的代数和为零。即

$$\sum U = 0 \quad (1.3.3)$$

对于 KVL, 可以从以下三个方面来把握。

- (1) 成立的前提: 集总参数电路;
- (2) 研究的对象: 与某回路相关联的各支路电压;
- (3) 得出的结论: 这些支路电压的代数和为零。

KVL 也可以描述为在任一回路上电位的抬升和电位的降低相等, 即反映了电路的能量守恒。

$$\sum U_{\text{up}} = \sum U_{\text{down}} \quad (1.3.4)$$

在应用 KVL 时, 与绕行方向相一致的支路电压取正, 反之取负。KVL 除了对回路适用外, 还可推广至广义回路——非闭合回路。

【例 1.3.2】求图 1.3.3 所示电路的电压 U_{cd} 。

解: 对回路①取图中虚线所示的绕行方向, 由 KVL 得 $(-1) + 3 - U_3 = 0$, 求得 $U_3 = 2(\text{V})$;

对广义回路②取虚线所示绕行方向, 由 KVL 得 $-4 + U_3 + 5 - U_{cd} = 0$, 即 $-4 + 2 + 5 - U_{cd} = 0$, 求得 $U_{cd} = 3(\text{V})$ 。

本例也可以取大的广义回路③, 由 KVL 得 $-4 + (-1) + 3 + 5 - U_{cd} = 0$, 求得 $U_{cd} = 3(\text{V})$ 。

由本例可以看出, 求电路中两点间的电压, 就是求以这两点为端点的任一路径上的支路电压之和。

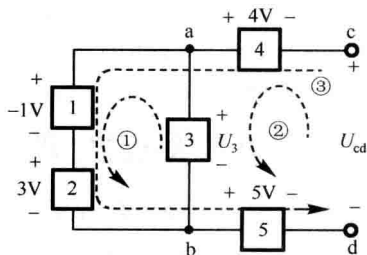


图 1.3.3 例 1.3.2 电路图

1.4 电阻元件

1.3 节讲解了电路中支路电压与支路电压之间、支路电流与支路电流之间的关系, 一个

自然会产生问题就是：一个元件两端的支路电压和流过该元件的支路电流之间有什么关系？元件两端的电压和流过它的电流之间的关系就是元件的伏安特性（VAR: Volt-Ampere Relation），也称为电压电流特性（VCR: Voltage-Current Relationship），如果把这个关系绘制于 $u-i$ 平面，得到的这条曲线称为元件的伏安特性曲线（简称特性曲线）。认识一个元件，就是从认识它的伏安特性开始的，众所周知的欧姆定律就是对电阻元件伏安特性的描述。

1.4.1 欧姆定律

电阻元件是从实际的电阻器抽象出来的模型，电阻器是对电流有阻碍作用的器件。将这种对电流的阻碍特性称为电阻特性，用 R 表示。同时，也用 R 表示电阻元件。

线性电阻两端的电压和流过的电流在关联参考方向下，如图 1.4.1(a)所示，满足欧姆定律，即有

$$u = Ri \quad (1.4.1)$$

式中， R 为常数，称为电阻值（简称电阻），单位为欧姆（ Ω ）。常用的电阻单位还有千欧（ $k\Omega$ ）和兆欧（ $M\Omega$ ）等。

若 u 与 i 为非关联参考方向，则欧姆定律应改为 $u = -Ri$ 。

将欧姆定律绘制于 $u-i$ 平面，则得到了一条经过坐标原点的直线，如图 1.4.1(b)所示，这条直线就是线性电阻的伏安特性曲线，斜率的倒数即为该电阻的阻值。

电阻元件还可使用另一个参数——电导表示，电导 $G = 1/R$ ，单位为西门子（S）。电导表征了元件对电流的导通能力。用电导表征时，欧姆定律为

$$i = Gu \quad (1.4.2)$$

线性电阻有两个特殊情况——开路和短路。当 $R \rightarrow \infty$ 时，电阻元件呈现开路状态，此时无论电压为何值，其上的电流恒等于零，如图 1.4.1(c)所示。当 $R \rightarrow 0$ 时，电阻元件呈现短路状态，此时无论电流为何值，其上电压恒等于零，如图 1.4.1(d)所示。

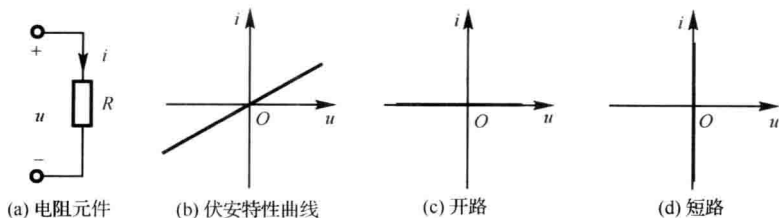


图 1.4.1 电阻元件及其伏安特性

如果电阻元件的特性曲线不是过原点的一条直线，则称为非线性电阻，如二极管。图 1.4.2(a)所示为二极管的电路符号，伏安特性曲线如图 1.4.2(b)所示。

通常没有特别说明时，本书所说的电阻均指线性电阻。

由前面的功率计算公式，很容易得出关联参考方向下电阻元件的功率

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1.4.3)$$

通常 R 和 G 均为正实常数，所以功率 $p \geq 0$ ，说明电阻元件消耗能量、吸收功率，是一个耗能元件。

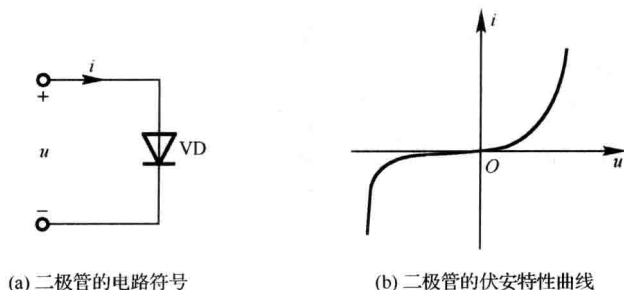


图 1.4.2 二极管

电阻器分为固定式和可调式两种,大多数电阻器是固定的,如图 1.4.3 所示,其电阻值是一个常数,固定式电阻的电路符号如图 1.4.1(a)所示。可调式电阻器常称为电位器,如图 1.4.4 所示。电位器是一个三端元件,可以通过滑动可变端来改变阻值。

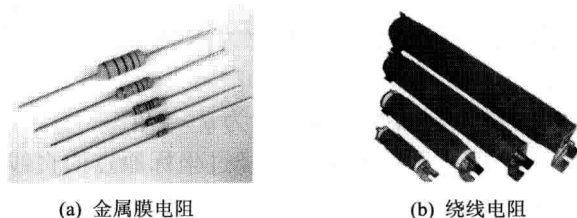


图 1.4.3 固定式电阻

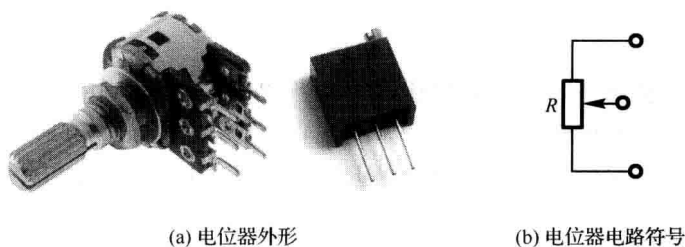


图 1.4.4 电位器外形及符号

电阻器在电路中常用做电压调整、电流调整和作为负载电阻,电阻器的主要参数包括:电阻值、允许偏差、额定功率等。

(1) 标称阻值和容许误差

标称阻值是指电阻器上标出的名义阻值。而实际阻值往往与标称阻值有一定的偏差,这个偏差与标称阻值的百分比叫做容许误差,简称容差,容差越小,电阻器精度越高。电阻的标称阻值分为 E6、E12、E24、E48、E96、E192 这 6 大系列,分别适用于允许偏差为 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 的电阻器。其中 E24 系列为常用数系, E48、E96、E192 系列为高精密度电阻数系。

E6 系列的标称值,对应允许偏差为 $\pm 20\%$,每挡相差 $\sqrt[3]{10} \approx 1.5$ 倍,有 6 种取值:1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8。它表示元器件的有效数字必须从这个系列中选取,具体值可以放大或缩小 10 的整数倍。例如,有效数字 2.2,放大可以得到 22Ω 、 220Ω ……的电阻标称值,缩小可以得到 $220\text{m}\Omega$ 、 $22\text{m}\Omega$ ……的标称值。

E12 系列的标称值, 每挡相差 $\sqrt[3]{10} \approx 1.21$ 倍, 有 12 种取值; E24 系列的标称值, 每挡相差 $\sqrt[4]{10} \approx 1.10$ 倍, 有 24 种取值; E48 系列的标称值, 每挡相差 $\sqrt[5]{10} \approx 1.05$ 倍, 有 48 种取值。具体取值如表 1.4.1 所示。

表 1.4.1 电阻标称值

系 列 号	标 称 值											
E6	10	15	22	33	47	68						
E12	10	12	15	18	22	27	33	39	47	56	68	82
E24	10	11	12	13	15	16	18	20	22	24	27	30
	33	36	39	43	47	51	56	62	68	75	82	91
E48	100	105	110	115	121	127	133	140	147	154	162	169
	178	187	196	205	215	226	237	249	261	274	287	301
	316	332	348	365	383	402	422	442	464	487	511	536
	562	590	619	649	681	715	750	787	825	866	909	953

(2) 额定功率

额定功率是指一个电阻可以耗散的最大功率。小型电阻器的外形尺寸及体积反映了其额定功率的大小, 通常额定功率有 1/20W、1/16W、1/8W、1/4W、1/2W、1W、2W、5W、10W 等。常用的 AXIAL 封装色环电阻和贴片电阻的功率规格如表 1.4.2 和表 1.4.3 所示。最常见的色环电阻有金属膜和碳膜两种, 通常金属膜为 5 个环 (E96), 底色为蓝色 (金属膜) 或灰色 (金属氧化膜); 碳膜为 4 个环 (E24), 底色为土黄色或其他颜色。

表 1.4.2 色环电阻尺寸与额定功率

名 称	型 号	最大直径/mm	最大长度/mm	额定功率/W
超小型碳膜电阻	RT13	1.8	4.1	0.125
质量认证碳膜电阻	RT14	2.5	6.4	0.25
小型碳膜电阻	RTX	2.5	6.4	0.125
碳膜电阻	RT	5.5	18.5	0.25
碳膜电阻	RT	5.5	28.0	0.5
碳膜电阻	RT	7.2	30.5	1
碳膜电阻	RT	9.5	48.5	2
金属膜电阻	RJ	2.2	7.0	0.125
金属膜电阻	RJ	2.8	8.0	0.25
金属膜电阻	RJ	4.2	10.8	0.5
金属膜电阻	RJ	6.6	13.0	1
金属膜电阻	RJ	8.6	18.5	2

表 1.4.3 贴片电阻封装与额定功率

英制/mil	公制/mm	长/mm	宽/mm	额定功率/W
201	603	0.60±0.05	0.30±0.05	1/20
402	1005	1.00±0.10	0.50±0.10	1/16
603	1608	1.60±0.15	0.80±0.15	1/10
805	2012	2.00±0.20	1.25±0.15	1/8
1206	3216	3.20±0.20	1.60±0.15	1/4
1210	3225	3.20±0.20	2.50±0.20	1/3
1812	4832	4.50±0.20	3.20±0.20	1/2
2010	5025	5.00±0.20	2.50±0.20	3/4
2512	6432	6.40±0.20	3.20±0.20	1