



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 电工与电子技术

(第三版) (上册)

■ 段玉生 王艳丹 王鸿明

高等教育出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 电工与电子技术

(第三版) (上册)

■ 段玉生 王艳丹 王鸿明



高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,作者所在的清华大学“电工技术与电子技术”课程,2008年被评为国家精品课程。本书是为工科非电类专业本科学子编写的,用于讲授电工学基本原理及其应用的教材。本书参照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会制定的“电工学”课程教学基本要求和教学学时的需求,并结合了作者多年的教学实践编写而成,内容丰富,适用面广。本书的特点是在加强基础前提下增强应用,注重理论联系实际,力求达到学以致用,反应电工学课程的最终目的是应用的实质。本书上册为电工技术部分,主要内容包括电路元件与电路定律,电路分析方法,正弦交流电路,周期性非正弦电流电路,电路中的谐振与电路的频率响应,三相交流电路,电路的瞬态过程,磁路、交流铁心线圈与变压器,异步电动机,继电器控制,可编程控制器,电路仿真软件Multisim及应用。下册的内容为电子技术部分,内容包括半导体二极管、晶体管,基本放大电路,差分放大、功率放大和集成运放,放大电路中的负反馈,集成运放的应用,电源,逻辑代数,组合逻辑电路,时序逻辑电路,脉冲信号的产生与整形等。

本书可以作为高等学校工科非电类专业的本科、专科教学用教材或者教学参考书,也可以作为相关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术.上册/段玉生,王艳丹,王鸿明  
编.--3版.--北京:高等教育出版社,2017.11  
ISBN 978-7-04-048872-2

I. ①电… II. ①段… ②王… ③王… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV.  
①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 280500 号

策划编辑 金春英 责任编辑 金春英 封面设计 于文燕 版式设计 童丹  
插图绘制 杜晓丹 责任校对 刁丽丽 责任印制 尤静

出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷	北京明月印务有限责任公司		<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本	787mm×1092mm 1/16		<a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>
印 张	21.25	版 次	2005 年 4 月第 1 版
字 数	520 千字		2017 年 11 月第 3 版
购书热线	010-58581118	印 次	2017 年 11 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	39.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 48872-00

## 第三版前言

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,作者所在的清华大学“电工技术与电子技术”课程,2008年被评为国家精品课程。本书是参照教育部高等学校电子电气基础课程指导分委员会制定的“电工学”课程教学基本要求和近几年的教学实践,对第二版教材进行适当的修改和增删后完成的。

1. 根据第二版教材的实际内容使用情况,删除了上册中的“电工测量”内容,以及上册附录的内容。目前这些内容一般会在电工电子技术实验教材或讲义中介绍。

2. 根据目前大多数学校能够给予电工学课程的教学学时情况,删除了部分非重点内容,比如介绍 VDMOS 的内容。

3. 对于大规模集成电路和可编程器件的内容,由于学时的限制,在中等学时和少学时的课程中,不会有太多时间介绍,因此本版教材中删除了这些内容。

4. 根据近几年电路仿真软件的使用流行情况,将第二版中介绍 TINA 的内容,换成了介绍 Multisim 的内容。本书将 Multisim 电路仿真的内容集中放在了第 12 章介绍,这样比较利于教师选择是否讲授电路仿真内容。如果在课堂教学中不介绍 Multisim 电路仿真的内容,可以直接忽略第 12 章。如果课堂教学中要介绍电路仿真的内容,应该将第 12 章的内容分阶段揉到电工技术和电子技术的教学内容中,并安排适当的仿真练习。另外,根据课程的进度安排学生自学第 12 章也是不错的选择。

电路仿真工具已经成为从事电工电子相关工作的技术人员不可或缺的软件工具,也是电工学课程的必备内容。建议学生在学习本课程时要掌握 Multisim 这个仿真工具,并多做电路仿真练习。因此,不管课堂教学中是否介绍第 12 章,学生详细阅读第 12 章,并进行电路仿真练习是

十分必要的。本书还有配套的多媒体教学课件,可扫二维码阅读。



本书修订的目的是使之更适合目前中等学时(48+64 学时、48+48 学时)和少学时(64 学时)的电工学课程使用。限于编者的教学体会和学识水平有限,书中内容编写和内容安排必然存在问题 and 不足,诚请读者提出宝贵意见。

编者  
2017 年 6 月

## 第二版前言

“电工与电子技术”教材第二版是以国家电工课程教学指导委员会制定的“电工学教学基本要求(草案)”为依据,并根据本教材第一版使用时的教学实践及近年来电工、电子技术发展和应用的情况,对第一版教材进行了适当的修改和增删后完成的。

修改情况如下:

1. 对第一版教材中一些较深、较难的内容,如复杂正弦交流电路的分析、磁路分析、继电器控制电路设计、放大电路综合等内容进行了删减。此外,还对一些次要内容进行了精简,降低难度,从而使第二版教材能为更多的院校接受,适用面将会更广。

2. 对部分内容进行了优化组合,目的是使读者能具有较好的理论基础和分析问题的能力。例如,将第一版教材的第15章基本放大电路,第16章集成运算放大器,重新组合成4章内容。即,第15章基本放大电路;第16章差分放大、功率放大和集成运放;第17章放大电路中的负反馈;第18章集成运放的应用。进行重新组合后,基本概念更清晰,问题分析更明确,使读者能更好地理解各种放大电路的工作特点,为理解和应用集成运放电路打下良好的基础。

3. 节能环保是世界的一件“大事”,本书第二版中凡涉及电能应用之处,编者均强调了这一概念,并从节能环保的角度介绍了可再生能源应用和节能灯等常识。增加这些内容的目的是让每个人在工作和生活中都树立节能的意识。

4. 考虑到目前业界可编程控制器(PLC)产品的市场占有率和应用情况,对可编程控制器一章进行了重新编写。采用西门子S7-200系列PLC作为学习PLC的典型机型,并增加了利用顺序功能图编程的方法。

5. 增加了电子设计自动化(Electronics Design Automation, EDA)的内容。随着电工电子技术的飞速发展,掌握和应用EDA技术,已经成为每位工程技术人员需要具备的一种必备的技能。为此,本书引入了EDA技术。

EDA技术以计算机为工作平台,以硬件描述语言为电路和器件设计的基础,结合相应的开发软件,使电子系统的设计产生了质的飞跃。在EDA技术中,最为基础的硬件描述语言是Spice(Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis,即:针对IC设计的仿真程序)。Spice是20世纪70年代由Berkeley大学开始设计的,目前已经发展到Spice 3F5版本。商业化的电路仿真软件都是基于Spice的扩充,如TINA、Multisim、PSPICE等。其功能从最初的只能进行数模混合电路仿真,扩充到了可以进行VHDL仿真、单片机(MCU)仿真、PCB设计等功能。除此之外,每种仿真软件都有自己的特点。

本书在电工技术及模拟电路中采用TINA进行电路仿真。TINA是完全汉化的电路仿真软件,除具有电路图输入、Spice仿真功能、VHDL仿真、MCU仿真、PCB设计等这些电路仿真软件共有的功能外,还具有符号分析、输出相量图、三维实况仿真等特有功能。具有功能强大、容易入门、运行流畅、模型正确的特点,很适合电工电子技术的教学使用。在“中国高校电子电气课程

网(<http://ee.cncourse.com>)本书的配套资源中提供了免费的 TINA V8 评估版供读者试用。

TINA 的功能是十分强大的,本书只利用了其中很基本的功能。它不但适合教育使用,也适合于电子系统的设计使用,相信读者利用其在线帮助经过练习,可以熟练使用 TINA 的各种功能。

硬件描述语言(VHDL)是目前应用可编程逻辑器件设计数字系统的基本语言,但是鉴于本教材的应用范围和教学学时,只对可编程逻辑器件的原理、硬件描述语言(VHDL)及其使用环境进行了简要介绍。

本书由王鸿明、段玉生和王艳丹共同完成,段玉生负责编写本书上册的第 11 章和第 13 章,王艳丹负责编写下册的第 24 章,其余各章及附录由王鸿明编写。段玉生编写了与本教材配套的“电工与电子技术”电子教案,王艳丹编写了《电工与电子技术学习指导与习题解答》一书。通过这些与本教材配套的教材,将能帮助读者更深入地理解和掌握本教材的核心知识点,并为进一步学习有关内容提供有力帮助。

本书(上、下册)仍由北京理工大学刘蕴陶教授主审,刘蕴陶教授在长达一年的时间里,以严谨的科学态度和高度认真负责的精神,仔细审阅了书稿,提出了许多修改意见和建议。这些意见和建议为提高本书的质量起到了很好的作用。编者对刘蕴陶教授的辛勤劳动和贡献表示衷心的感谢。

本书在编写过程中受到高等教育出版社的热情帮助和支持,编者在此表示感谢。

由于教材引入新内容较多,而编者的学识和水平有限,教材中必然会存在问题和不足,请使用本书的读者提出宝贵意见。

编 者

2008 年 12 月 20 日

# 第一版前言

本书是为工科非电类专业本、专科生,学习电工技术、电子技术课程而编写的教材。书中内容以教育部 1995 年颁发的电工技术、电子技术课程教学基本要求为依据,并在此基础上有扩展和加深,目的是使教材能更好地适应现代宽口径人才培养的需要和工科非电类专业对电工技术、电子技术课程教学的要求。为达此目的,编写时作者对书中内容遵循如下两个原则:

(1) 考虑到电工技术、电子技术是一门技术基础课程,课程的这个性质决定了课程的内容应具有基础性和普遍适用性,特别是近年来许多非电类专业的专业技术与电工技术、电子技术和计算机技术结合得日益紧密,为了能给专业用电打下良好基础,本教材在编写时力求将基本概念、基本理论、基本知识和分析方法的讲述作为各章、节的重点,以便使读者能具有较扎实的理论基础和分析问题的能力,使读者能在电工技术、电子技术方面具有继续学习的能力,为此,本书中所讨论的问题均本着道理应讲清楚、原因应说明白,事件的过程应有一个清楚的交代。叙述过程要力求做到简明、易懂,准确无误。

(2) 由于电工技术、电子技术课程又是一门应用类型的课程,因此,加强应用知识的介绍,学以致用是本教材编写时着重考虑的另一个问题。为了使读者能更好地理解基本概念、基本理论和能运用基本知识与分析方法去解决一些问题,本教材中根据不同的章、节,不同的要求引入了一些“案例”、即“阅读电路图”;“选择电气元件”;“分析电路原理或功能”;“设计电路”等。安排这样一些内容的目的是使读者能够将所学的一个个知识点,汇集成一个知识链,从而能建立起完整的系统(或工程)的概念,有利于提高分析问题和综合问题的能力。

教材内容较教育部颁发的课程教学基本要求有扩展和加深,对于这部分内容标有\*号,可按需要选讲。

本教材(上、下册)由北京理工大学刘蕴陶教授审稿。刘蕴陶教授对本书进行了详细的审阅,提出了宝贵的意见和修改建议,并与作者还就一些问题进行了讨论。作者对刘蕴陶教授的工作表示衷心的感谢。

本书使用的一些文字符号前、后章节不尽统一,主要是考虑教学的习惯性和连续性。

由于电工技术、电子技术的内容广泛,作者学识有限,因而在理解和掌握上定有认识不足和理解错误之处,期盼使用本书的教师和读者提出批评和指正。

编者

2004年9月

# 目 录

第 1 章 电路元件与电路定律 .....	1	2.2.2 结点电位(压)法 .....	27
1.1 电路组成 .....	1	2.2.3 叠加定理 .....	31
1.1.1 电路元件 .....	1	2.2.4 等效电源定理 .....	33
1.1.2 电路图 .....	2	2.2.5 负载获得最大功率的条件 .....	36
1.2 电路的基本物理量及其参考方向 .....	3	2.3 含受控源电路的分析 .....	37
1.2.1 电流及其参考方向 .....	3	2.3.1 受控源模型 .....	37
1.2.2 电压及其参考方向 .....	3	2.3.2 含受控源电路的分析 .....	38
1.2.3 关联参考方向 .....	4	习题 .....	41
1.2.4 功率、电能与提高能效 .....	4	第 3 章 正弦电流电路 .....	45
1.2.5 电气设备的额定值 .....	5	3.1 正弦电流的基本知识 .....	45
1.3 电阻 .....	6	3.1.1 正弦量的特征量 .....	46
1.3.1 线性电阻与非线性电阻 .....	6	3.1.2 相位和相位差 .....	46
1.3.2 电阻元件的阻值、功率和额定值 .....	7	3.1.3 交流电的有效值 .....	48
1.4 电源 .....	9	3.2 正弦交流电的相量表示法 .....	49
1.4.1 电源的电压源模型 .....	9	3.2.1 复数的表示方法 .....	50
1.4.2 电源的电流源模型 .....	10	3.2.2 复数的运算 .....	50
1.4.3 电源模型的等效变换 .....	10	3.2.3 正弦电压、电流的复数表示法 .....	51
1.5 基尔霍夫定律 .....	13	3.2.4 相量图 .....	53
1.5.1 基尔霍夫电流定律 .....	13	3.3 正弦电流电路中的元件 .....	53
1.5.2 基尔霍夫电压定律 .....	14	3.3.1 电阻元件 .....	53
习题 .....	16	3.3.2 电感元件 .....	55
第 2 章 电路分析方法 .....	20	3.3.3 电容元件 .....	59
2.1 简单电路的分析与计算 .....	20	3.4 正弦电路电压、电流计算 .....	64
2.1.1 电阻串联电路 .....	20	3.4.1 电阻 $R$ 、电感 $L$ 和电容 $C$ 的串联电路 .....	64
2.1.2 电阻并联电路 .....	21	3.4.2 并联电路 .....	67
2.1.3 电阻混联 .....	23	3.4.3 阻抗的串联与并联 .....	70
2.1.4 近似计算 .....	24	3.4.4 复杂正弦电流电路的计算 .....	73
2.1.5 电阻星形联结与三角形联结的等效变换 .....	25	3.5 正弦电流电路的功率与功率因数 .....	75
2.2 复杂电路的分析与计算 .....	26	3.5.1 功率 .....	75
2.2.1 支路电流法 .....	27	3.5.2 功率因数 $\cos \varphi$ 的提高 .....	79
		习题 .....	80



第 4 章 周期性非正弦电流电路 .....	84	7.1 换路定律 .....	139
4.1 周期性非正弦波形及其频谱 .....	84	7.2 一阶电路的瞬态过程 .....	141
4.1.1 周期性非正弦波形 .....	84	7.2.1 一阶 RC 电路 .....	141
4.1.2 周期性非正弦信号的分解 .....	85	7.2.2 一阶 RL 电路 .....	150
4.1.3 周期性非正弦信号的频谱 .....	87	7.3 三要素法 .....	153
4.2 周期性非正弦电流、电压的 有效值和平均值 .....	89	7.4 脉冲激励下的一阶 RC 电路及含 有两个电容的特殊一阶电路 .....	157
4.2.1 有效值 .....	89	7.4.1 脉冲信号下的一阶 RC 电路 .....	157
4.2.2 平均值 .....	90	7.4.2 含有两个电容元件的特殊一阶 RC 电路 .....	160
4.2.3 波形系数 .....	90	习题 .....	166
4.3 周期性非正弦电流电路的计算 .....	91	第 8 章 磁路、交流铁心线圈与变 压器 .....	170
4.3.1 电压、电流计算 .....	91	8.1 磁路 .....	170
4.3.2 周期性非正弦电路的功率 .....	98	8.1.1 磁感线、磁感应强度和磁通量 .....	170
习题 .....	99	8.1.2 磁场强度、安培环路定律和磁路 欧姆定律 .....	171
第 5 章 电路中的谐振与电路的频率 响应 .....	102	8.1.3 磁性材料的主要特性 .....	173
5.1 电路中的谐振 .....	102	8.2 交流铁心线圈 .....	177
5.1.1 串联谐振 .....	103	8.2.1 交流励磁下铁心线圈的电压 关系式 .....	177
5.1.2 并联谐振 .....	109	8.2.2 交流励磁下电压、电流与磁通 的关系 .....	177
5.2 电路的频率特性 .....	114	8.3 变压器 .....	181
5.2.1 转移函数 .....	114	8.3.1 变压器的结构 .....	181
5.2.2 幅频特性和相频特性 .....	115	8.3.2 变压器的工作分析 .....	182
5.2.3 波特图 .....	117	8.3.3 变压器的外特性与效率 .....	186
5.2.4 滤波电路(滤波器) .....	120	8.3.4 一些特殊变压器 .....	187
习题 .....	122	8.3.5 变压器的额定值及型号 .....	189
第 6 章 三相交流电路 .....	124	习题 .....	191
6.1 三相交流电源 .....	124	第 9 章 异步电动机 .....	193
6.1.1 对称三相电源 .....	124	9.1 三相交流异步电动机 .....	193
6.1.2 三相电源的连接 .....	125	9.1.1 三相交流异步电动机的结构 .....	193
6.2 三相电路分析 .....	127	9.1.2 三相交流异步电动机的转动 原理 .....	195
6.2.1 三相对称负载星形联结(Y-Y 系统) 电路分析 .....	127	9.1.3 三相交流异步电动机的转矩和 机械特性 .....	199
6.2.2 三相对称负载三角形联结(Y- $\Delta$ 系 统)电路分析 .....	130	9.1.4 三相交流异步电动机的型号与	
6.2.3 一些常见三相电路分析 .....	132		
6.3 三相电路的功率 .....	135		
习题 .....	136		
第 7 章 电路的瞬态过程 .....	139		

额定数据 .....	204	10.5 继电器控制电路电气原理图的	
9.1.5 三相交流异步电动机的使用——起		阅读 .....	241
动、反转、调速和制动 .....	206	10.5.1 阅读电气原理图的注意事项 .....	241
9.1.6 同步电动机简介与电动机节		10.5.2 继电器控制电路(读图)举例 .....	241
能运行 .....	210	习题 .....	245
9.2 单相交流异步电动机 .....	211	<b>第 11 章 可编程控制器</b> .....	247
9.2.1 单相交流异步电动机的结构 .....	211	11.1 可编程控制器的结构与工作	
9.2.2 分相式单相交流异步电动机的		方式 .....	247
工作原理 .....	212	11.1.1 PLC 的组成 .....	247
9.2.3 分相式单相交流异步电动机的		11.1.2 PLC 的工作方式 .....	250
类型 .....	213	11.1.3 西门子 S7-200 可编程	
9.2.4 单极式单相交流异步电动机 .....	213	控制器 .....	250
9.2.5 三相交流异步电动机的单相		11.2 可编程控制器的编程语言与	
运行 .....	214	程序结构 .....	251
习题 .....	215	11.2.1 可编程控制器的编程语言 .....	251
<b>第 10 章 继电器控制</b> .....	217	11.2.2 可编程控制器的程序结构 .....	252
10.1 低压电器 .....	217	11.3 S7-200 PLC 存储器 .....	253
10.1.1 刀开关 .....	217	11.3.1 数据在存储器中存取的方式 .....	253
10.1.2 熔断器 .....	218	11.3.2 S7-200 PLC 的寄存器 .....	253
10.1.3 自动空气开关 .....	220	11.4 S7-200 PLC 的基本指令 .....	255
10.1.4 主令电器 .....	221	11.4.1 位逻辑指令 .....	255
10.1.5 接触器 .....	224	11.4.2 定时器指令 .....	258
10.1.6 控制继电器 .....	227	11.4.3 计数器指令 .....	259
10.2 起-保-停控制电路与电气控制		11.5 小型 PLC 控制系统设计 .....	261
原理图 .....	227	11.5.1 PLC 程序的经验设计方法 .....	262
10.2.1 异步电动机起-保-停控制 .....	227	11.5.2 利用顺序控制继电器指令编写	
10.2.2 控制电路原理图 .....	228	程序 .....	264
10.2.3 热继电器与电动机过载保护 .....	229	11.6 STEP7-MicroWIN 编程软件	
10.3 继电器控制电路的逻辑函数		使用指南 .....	268
表达式 .....	231	11.6.1 STEP7-MicroWIN 编程软件的	
10.3.1 基本逻辑关系式 .....	231	窗口界面介绍 .....	268
10.3.2 继电器控制电路的逻辑函数		11.6.2 项目的组成 .....	268
表示式 .....	232	11.6.3 程序的编写与下载 .....	270
10.4 典型控制环节 .....	232	11.6.4 监视与调试程序 .....	271
10.4.1 异步电动机正、反转控制 .....	233	习题 .....	271
10.4.2 行程控制 .....	234	<b>第 12 章 电路仿真软件 Multisim 及</b>	
10.4.3 时间控制 .....	236	应用 .....	274
10.4.4 其他一些常见的控制环节 .....	239	12.1 简介 .....	274

12.2 Multisim 用户界面介绍 .....	274	12.6 Multisim 的分析功能 .....	298
12.3 菜单及工具栏功能介绍 .....	276	12.6.1 直流分析(DC Operating Point...) ...	300
12.3.1 主菜单和工具栏列表 .....	276	12.6.2 交流分析(AC Analysis) .....	300
12.3.2 弹出式菜单 .....	285	12.6.3 瞬态分析(Transient Analysis...) ...	300
12.3.3 仪表工具栏 .....	285	12.6.4 傅里叶分析(Fourier Analysis...) ...	302
12.3.4 Multisim 元件库介绍 .....	285	12.6.5 直流扫描分析(DC Sweep...) .....	302
12.4 电路偏好设置 .....	289	12.6.6 参数扫描分析 (Parameter Sweep...) .....	302
12.4.1 全局偏好设置 .....	289	12.6.7 直流小信号的传递函数分析 (Transfer Function...) .....	304
12.4.2 电路图窗口设置 .....	289	12.7 应用举例 .....	305
12.4.3 定制用户界面 .....	292	习题 .....	316
12.5 编辑电路 .....	292	部分习题答案 .....	318
12.5.1 选择与放置元件,旋转与移动 元件 .....	292	参考文献 .....	324
12.5.2 连线 .....	295		
12.5.3 增加文本、注释和标题栏 .....	297		

# 第 1 章

## 电路元件与电路定律

本章将就与电路有关的问题与定律进行研讨。

### ► 1.1 电路组成

一个电路通常由三个部分组成,即由电源、用电设备(负载)和连接导线(及开关、熔断器)等组成。用电设备(负载)将电源提供的电能转换成工作所需要的能量;连接导线、开关及熔断器等用于传送、控制电能向负载的传送,熔断器可在发生短路事故时保护电源和负载免受损坏。

图 1.1.1 是一个供电电路,电源提供的电能变为光能。

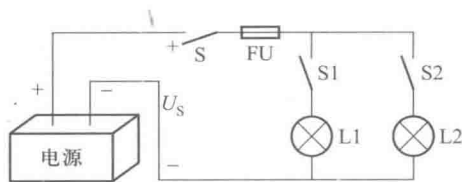


图 1.1.1 供电电路(L1、L2—负载,FU—熔断器)

电路的种类很多,但构成电路的目的一般而言不外乎进行电能的传输、分配与转换或进行信息的传递、处理与运算。不管是哪类电路,其基本部分仍然是电源、负载(用电设备)及其连接。

#### ►► 1.1.1 电路元件

电路的种类与功能是多种多样的,电路中使用的电气设备也是品种繁多且电磁特性也比较复杂,因此,要建立电路模型,以便找出问题的本质,简化问题,便于对电路进行分析与计算。

电气元件的模型根据电气元件在电路内工作时表现出的电磁特性来建立。一个电气元件工作时可能表现出的电磁特性不外乎有以下几种情况:向电路提供电能;元件工作时发热(消耗电能转换而来);具有磁场或电场(储存能量)。根据每一个具体电气元件的电磁特性建立的模型称为理想电路元件,每一种理想电路元件只具有一种物理特性。这样,实际的电气元件工作时表

现出的电磁特性就可以用理想电路元件或其组合来反映。理想电路元件简称电路元件,它分为理想电源元件和理想负载元件两类。

理想电源元件用于表示各种实际电源在电路中的作用,即向电路提供电能的作用。理想电源元件(模型)有两个,一个称为理想电压源,其符号及特性如图 1.1.2(a)所示;另一个称为理想电流源,其符号及特性如图 1.1.2(b)所示。

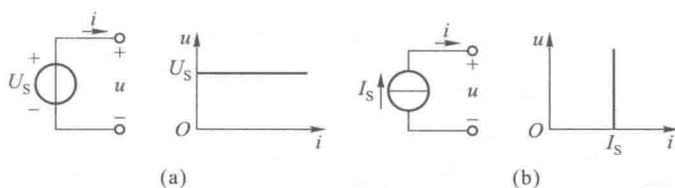


图 1.1.2 理想电源元件符号

(a) 理想电压源的文字及图形符号与特性; (b) 理想电流源的文字及图形符号与特性

电气元件工作时发热、产生磁场或电场的特性分别用电阻元件、电感元件和电容元件表示。

电阻元件的文字及图形符号如图 1.1.3 所示,电阻元件用于反映用电设备(负载)将电能转换成其他形式的能量且不可逆转换,即通常所说的消耗电能的特性。因此,电阻元件又称为耗能元件。

电感元件的文字及图形符号如图 1.1.4 所示,电感元件用于反映用电设备(负载)将电能转变成磁场能,即产生磁场、存储磁场能的特性。

电容元件的文字及图形符号如图 1.1.5 所示,电容元件用于反映用电设备(负载)将电能转变成电场储能,即产生电场、存储电场能的特性。



图 1.1.3 电阻元件文字及图形符号



图 1.1.4 电感元件文字及图形符号

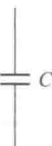


图 1.1.5 电容元件文字及图形符号

由于电感元件和电容元件具有储能的特性,这两个元件又称为储能元件。

## ▶▶ 1.1.2 电路图

图 1.1.1 所示的实体电路中的相关部分,均用能表示其电磁特性的模型元件替代,并适当地连接后得到了图 1.1.6 所示的电路,该电路称为实体电路的模型。

在图 1.1.6 中, $R_s$  用于表示电源内部的发热损耗, $R_l$  用于表示输电线导线电阻, $R_{L1}$  和  $R_{L2}$  分别表示白炽灯的耗能作用。实际的电气设备用反映其电磁特性的电路元件替代后就得到了电路模型。电路模型又称为实体电路的电路图。电路分析就是对电路模型(电路图)进行分析。

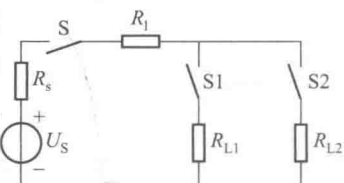


图 1.1.6 图 1.1.1 的电路模型

在图 1.1.6 中,导线电阻、白炽灯灯丝电阻分别用集总电阻

$R_1$ 、 $R_{L1}$  和  $R_{L2}$  表示,因此,在电路图上的导线不再具有电阻,所以电路图上的导线可以根据画图的需要任意地画得长一些或短一些,即电路图只反映该电路中元件相互连接关系,并不反映元件的实际空间位置,换句话说,同一个电路可以画出多种不同形状的电路图。

实际电气元件用集总电阻、电感和电容元件表示,因此,理想电路元件又被称为集总参数元件,由集总参数元件构成的电路又称为集总参数电路。

将实际电路用集总参数元件表示是有条件限制的,其条件就是电路的尺寸应远小于电路工作频率所对应的波长。例如,我国工业用电频率为 50 Hz,对应的波长为 6 000 km(电磁波传播速度  $v = \text{电磁波长} \times \text{频率} = 30 \times 10^4 \text{ km/s}$ )。因此,在电路尺寸远小于波长的情况下用集总参数来研究电路问题是完全可以的,但是对于远距离输电电路或高频电路用集总参数研究就不合适了,这时应使用分布参数模型。有关分布参数电路问题可参阅参考文献[1]。

## ► 1.2 电路的基本物理量及其参考方向

电路的工作是以电路中的电压、电流、功率和磁通等物理量来描述的,在进行电路分析时不仅要求出电压、电流等物理量的数值,还要确定它们的实际方向。电压、电流等物理量的实际方向依靠设定参考方向(或称正方向)的方法来确定。

### ►► 1.2.1 电流及其参考方向

电荷的定向运动形成电流。电流即单位时间内穿过某一横截面  $S$  的电荷量  $q$  的总和。对于恒定电流  $I$ ,其表示式为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2.1)$$

若电荷  $q$  的单位是库[仑](C),时间  $t$  的单位是秒(s),则电流  $I$  的单位是安[培](A)。

对于变化的电流其表示式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2.2)$$

在电路中,每个电路元件中的电流均具有两种可能的流动方向,为表明电流的实际方向,采用设定参考方向的方法加以明确,方法是,在电流的两个可能流动方向中任选一个方向作为参考方向,并用箭头表示,如图 1.2.1 所示。

若电流实际方向与所选定的参考方向一致时,该电流即为正值;若相反,则电流为负值。通过电流的正、负及其参考方向可判断出电流的实际方向。

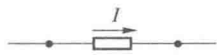


图 1.2.1 电流的参考方向

### ►► 1.2.2 电压及其参考方向

电流是电荷受电场力的作用而形成的。将电荷由电场中的 A 点移至 B 点时电场对电荷做功,为衡量电场力做功的大小引入电压这一物理量。电场中 A、B 两点间的电压  $U_{AB}$  等于将电荷  $q$  从 A 点移至 B 点电场力所做的功  $W_{AB}$  与该电荷  $q$  的比值,即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1.2.3)$$

式中,  $W_{AB}$  的单位是焦[耳](J),  $q$  的单位是库(C),  $U_{AB}$  的单位是伏[特](V)。

在对电路进行分析时,常取电路中的接地点 N(或任意一点亦可)作为参考点,并设该点电位为零。因此,电场中 A 点至参考点间的电压  $U_{AN}$  就等于 A 点的电位,并记为  $V_A$ ,即  $V_A = U_{AN}$ ,这样电路中任意两点 A、B 间的电压为

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1.2.4)$$

在分析电路中某个元件两端的电压时,同样需要知道它的大小,又要确定它的方向,即哪端电位高、哪端电位低。为此,在电压两个可能的方向上任意取一个方向作为参考方向,电压的参考方向可以用“+”、“-”符号表示,也可用双下标表示。如图 1.2.2 所示电路, A、B 间电压标示为  $U_{AB}$  时,即假设 A 点电位高于 B 点。

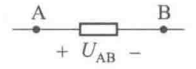


图 1.2.2 电压参考方向

在图 1.2.2 中,若元件 A 点电位确实高于 B 点,则电压  $U_{AB}$  为正值,即电压实际方向与参考方向一致;相反,若 A 点电位低于 B 点电位,则  $U_{AB}$  为负值,即电压实际方向与参考方向相反。

### ▶▶ 1.2.3 关联参考方向

一个元件的电压、电流的参考方向可以任意选定,若元件的电压、电流参考方向的选择如图 1.2.3(a) 所示,即电流从电压的“+”端流入,从电压的“-”端流出,这样选取的参考方向称为  $U$ 、 $I$  参考方向一致,或称  $U$ 、 $I$  参考方向关联,即关联参考方向。相反,若  $U$ 、 $I$  参考方向选取如图 1.2.3(b) 所示,则称参考方向不一致,或称参考方向不关联。



图 1.2.3 关联参考方向

(a) 关联; (b) 不关联

### ▶▶ 1.2.4 功率、电能与提高能效

构成电路的最终目的还是要将一定数量的电能传送给负载,使之转换成工作所需要的那种形式的能量。因此,在电工和电子电路中,电能和电功率的计算是个很重要的问题。在使用电能时,尽量想办法节能。对于使用能源的人而言,亦是一个重要的问题。

#### 1. 功率

电路元件在单位时间内输出或消耗的电能称为电功率,简称为功率。根据电压、电流的定义可知功率  $P$  的表示式为

$$P = UI \quad (1.2.5)$$

式中,电压  $U$  的单位为伏[特](V)、电流  $I$  的单位为安[培](A)时,功率  $P$  的单位是瓦[特](W)。

在应用式(1.2.5)计算电路元件的功率时,若式中的  $U$ 、 $I$  取关联参考方向,在  $U$ 、 $I$  值的符号

相同时,则功率  $P$  值为正,这表明所讨论的元件吸收电功率(即它将电能变为其他形式的能量);若  $U, I$  参考方向关联,但  $U, I$  值符号不同,则功率  $P$  值为负,这表明所讨论的元件没有吸收电功率而是向外部输出功率。

如果元件上的  $U, I$  参考方向选择不一致,计算功率时应在式(1.2.5)前增加一个负号,即

$$P = -UI \quad (1.2.6)$$

由式(1.2.6)计算出的功率值为正时,表示该元件吸收电功率;若计算出的功率值为负时,表示该元件向外部输出功率。

## 2. 电能

电能( $W$ )的计算公式为

$$W = Pt = UIt \quad (1.2.7)$$

式中, $P$  的单位为瓦[特](W)、 $t$  的单位为秒(s)时, $W$  的单位是焦[耳](J)。

工程上通常使用  $\text{kW} \cdot \text{h}$  (千瓦·时)作为电能单位, $\text{kW} \cdot \text{h}$  即通常所说的度。

**例 1.2.1** 图 1.2.3(a) 所示电路, A 点电位  $V_A = 100 \text{ V}$ , B 点电位  $V_B = -20 \text{ V}$ , 电流  $I = 2 \text{ A}$ 。求电压  $U_{AB}$  及它的实际方向。求所示元件的功率及 8 h 内消耗的电能是多少千瓦时。

解:由式(1.2.4)可得

$$U_{AB} = V_A - V_B = [100 - (-20)] \text{ V} = 120 \text{ V}$$

电压  $U_{AB}$  的实际方向与所示参考方向一致。

由于  $U_{AB}, I$  的参考方向一致,所以元件的功率

$$P = U_{AB}I = 120 \times 2 \text{ W} = 240 \text{ W} = 0.24 \text{ kW}$$

$P$  为正值表明该元件吸收电功率,是负载。

元件 8 h 消耗的电能

$$W = Pt = 0.24 \times 8 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1.92 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

**例 1.2.2** 一居民住宅楼有 40 户住家,若照明均使用白炽灯,每户平均以 100 W 计、每日用电平均 5 h,一个月(以 30 天计)用电多少  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ? 如果改用节能灯,每户平均用电降为 20 W,与使用白炽灯相比,一个月节能多少  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ? 如果每  $\text{kW} \cdot \text{h}$  收取 1 元电费,这栋居民楼每月节省电费多少元?

解:使用白炽灯时,每月用电能为

$$40 \times 100 \times 5 \times 30 \text{ W} \cdot \text{h} = 600 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

改用节能灯后,每月用电能为

$$40 \times 20 \times 5 \times 30 \text{ W} \cdot \text{h} = 120 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

因此,每月节电  $(600 - 120) \text{ kW} \cdot \text{h} = 480 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,则节省电费 480 元。

## ►► 1.2.5 电气设备的额定值

电气设备都有一个由生产厂规定的正常使用的工作电压、工作电流或功率值,称为额定值。电气设备按额定值要求使用则不会产生过热、绝缘击穿等问题。按额定值工作时,工作安全可靠、经济合理并可达到规定的使用寿命。大多数电气设备的使用寿命均与其使用的绝缘材料耐热性能及耐电击穿强度有关,若电气设备较长时间在超额定值的情况下运行,由于损耗增加、发热增多造成绝缘材料老化,从而降低了使用寿命,严重时会使设备损坏造成重大事故。



电气设备的额定值确定了它的经济合理使用条件,使用时不能超出但也不宜长期低于额定值情况下运行,因为低于额定值运行的电气设备得不到充分利用,效率降低同样造成浪费。对于某些电气设备(如异步电动机)低于额定值运行会出现问题,也是不允许的。因此,掌握设备的额定值,根据给出的额定值正确使用电气设备是非常重要的。

电气设备的额定值一般有额定电压  $U_N$ 、额定电流  $I_N$ 、额定功率  $P_N$  等。电路中使用的电阻元件,一般给出额定功率  $P_N$ (习惯上称为电阻的瓦数)及电阻值,电感元件的额定值为电流和元件的电感量,电容元件的额定值为额定电压和电容量。

对于电动机、变压器等设备,由于它们的负载是变化的,在使用时其电流值(或功率等)一般并不等于给定的额定值,实际电流的大小要由负载决定。因此,应尽可能合理选择这类设备,使它们能经常在接近额定值的状态下工作。

### ►1.3 电阻

对电路进行分析时,将实际电气设备分别用电阻元件、电感元件和电容元件表示或用这三种元件的组合来反映其电磁特性。在这一节只讨论电阻元件的问题,电感和电容元件将在第3章中讨论。

电阻元件在电工、电子电路中被广泛地应用,如电加热炉、金属丝白炽灯及各种电阻器等均是电阻元件的典型示例。

#### ►►1.3.1 线性电阻与非线性电阻

电阻元件依其电压、电流关系曲线的不同分为两类:若作用于电阻元件两端的电压与通过电阻的电流的比值为常数时,这样的电阻元件称为线性电阻;若电压、电流比值不为常数时则称为非线性电阻。

线性电阻的符号及其电压、电流关系(称伏安特性)曲线,如图1.3.1所示。线性电阻元件的伏安(V-A)特性曲线为过坐标原点的一条直线,该直线的斜率的倒数即是它的电阻值。线性电阻的电压、电流关系式可由欧姆定律确定。当电阻元件的电压  $U$ 、电流  $I$  的参考方向如图1.3.1(a)所示,即取关联参考方向时,其电压  $U$ 、电流  $I$  的关系式为

$$U = RI \quad (1.3.1)$$

若  $U$ 、 $I$  参考方向不关联时,其关系式应当为

$$U = -RI \quad (1.3.2)$$

式(1.3.1)和式(1.3.2)中,电压  $U$  的单位是伏[特](V)、电流  $I$  的单位是安[培](A)时,电阻  $R$  的单位是欧[姆]( $\Omega$ )。

式(1.3.1)又可写成

$$I = GU \quad (1.3.3)$$

式(1.3.3)中,参数  $G$  称为电阻元件的电导,电导的单位是西[门子](S)。电阻  $R$  与电导  $G$  互为倒数,即

$$R = \frac{1}{G} \quad \text{或} \quad G = \frac{1}{R}$$