 高等学校“十三五”规划教材



- 主要包括电路原理、电机学、电气控制、工业企业供配电与安全用电、模拟电路、数字电路
- 适用于机械设计制造自动化、材料科学与工程、车辆工程、能源与动力工程等专业

# 电工电子学

(第二版)



主 编 王智忠  
副主编 杨章勇  
主 审 蒋 军



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校“十三五”规划教材

# 电工电子学

(第二版)

主 编 王智忠  
副主编 杨章勇  
主 审 蒋 军

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书涵盖了电工电子学的基本内容, 共分为 15 章, 主要包括电路模型和电路定律、线性电阻电路的分析方法、正弦交流电路、动态电路的时域分析、磁路与铁心线圈电路、交流电动机、电气控制系统、工业企业供配电与安全用电、半导体二极管和晶体管、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、数字电路基础、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路等内容, 附录中介绍了仿真软件 EWB 在电工电子学中的应用等。每章后都有习题, 并于书末附有部分参考答案。

本书可作为高等院校非电类各本科专业的教材, 也可供有关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工电子学/王智忠主编. —2 版. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2017. 11  
高等学校“十三五”规划教材  
ISBN 978 - 7 - 5606 - 4713 - 5

I. ① 电… II. ① 王… III. ① 电工 ② 电工学 IV. ① TM ② TN01

### 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 244109 号

策 划 秦志峰  
责任编辑 秦志峰  
出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)  
电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071  
网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com  
经 销 新华书店  
印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司  
版 次 2017 年 11 月第 2 版 2017 年 11 月第 4 次印刷  
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 25  
字 数 592 千字  
印 数 5301~7300 册  
定 价 53.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4713 - 5/TM

**XDUP 5005002 - 4**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

# 前 言

“电工电子学”是我国高等院校非电类各专业学生学习电的基本知识的一门很重要的课程。目前不论强电还是弱电都已普及到我们日常工作和生活的方方面面，作为当代大学生，特别是各非电类专业的学生，都应该掌握一定的电的相关知识，全面提升自身的能力和素质。

本书主要内容包括电路原理、电机学、模拟电路、数字电路等，现有教材多注重知识体系的完整性，但在实际教学过程中，对于不同专业、不同教学学时很难按照教材完全实施，以达到预期的教学目的和效果。本书依据授课对象的不同，以最基本的原理、定理和方法为主导，以应用为目的，精选教学内容，删繁就简，够用为止，以利于学生在有限的时间内尽快掌握课程的精髓。

本书是在第一版教材的基础上，吸取各位同仁及学生们使用后所提出的意见和建议，做了进一步的完善和补充，主要体现在以下几个方面：

(1) 优化了课程内容。非电类专业学生是通过“电工电子学”课程的教学来使他们获得必备的电工与电子技术的基本理论知识，培养他们实际用电技能的。为适应我国经济建设和世界科技产业的迅猛发展，保证“电工电子学”教学能紧跟电子、电力、信息等领域的发展步伐，本书在编写过程中融合了电类学科的5门基础课程，并对教材内容体系进行了调整，减少了同类教材中偏难的部分，以必需、够用为度，略去了一些复杂的数学推导过程。这样全书结构合理，能使学生在有限的课时内学习到更多实用的电学知识。

(2) 注重实用性。书中增加了一些工程实例，使学生能够轻松掌握所学内容，同时培养了学生的工程意识和工程应用能力，因此本书更适用于地方工科院校应用型人才培养的教学要求。

(3) 适用性广泛。本书内容编写系统、全面，适用于机械设计制造及其自动化、材料科学与工程、车辆工程、能源与动力工程等专业，并且根据各学校不同课时的需要进行一定的取舍，即可达到各专业的培养目标。

(4) 体现了新颖性。本书更新了教材内容，紧跟时代步伐，及时引入了计算机仿真软件，使较复杂的电工电子电路硬件设计软件化。

(5) 便于自学。每章都精心挑选出了大量的例题和习题，其中包括一些考研真题，题型丰富，难易程度循序渐进，内容覆盖全书的知识点，学生通过习题的完成，可大大增强学习效果。书后还附有习题参考答案。

基于以上特点，主要从以下几个方面做了修订：

(1) 对一些内容做了调整，删除了原来的第8章电工测量和第16章模拟量与数字量的转换，还有第3章的3.8节非正弦周期电流电路，第4章的4.6节二阶电路内容。

(2) 由于用电安全的重要性，新增加了第8章工业企业供配电与安全用电内容，从而加强学生的用电安全意识。

(3) 对书中的错误进行了改正,对课后习题参考答案进行了修正和补充。从而使教材内容结构更加紧凑,而且也照顾了学时上的限制。

陕西理工大学王智忠老师担任本书主编并负责统稿,杨章勇老师担任副主编。第1、2、5~8、13、14章由杨章勇老师编写,其他内容均由王智忠老师编写。

陕西理工大学蒋军教授在百忙之中对全书进行了审定,并提出了修改意见,在本书的编写过程中,单位同事和领导给予了大力支持,西安电子科技大学出版社的编辑也给予了热情的帮助,在此向他们表示衷心的感谢。在编写过程中参考了一些优秀教材,也向这些作者表示谢意。

由于编者水平有限,书中难免还有疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年8月

# 第一版前言

“电工电子学”课程是高等院校非电类各专业重要的一门专业技术基础课程，通过学习使学生能够掌握电路分析原理、模拟电子技术、数字电子技术、电机及电气控制等方面的基本理论，并获得一定的实践基本技能。随着现代科学技术的迅速发展和高等教育改革的不断深入，当今信息社会对人才素质的要求越来越高，使得“电工电子学”这门重要的技术基础课日益体现出其应用和推广的价值，也为该课程与不同专业学科领域的技术相互融合奠定了基础。我们编写此书的目的是为了密切配合高等院校素质教育计划，努力提高教育质量，深化课程改革，注重内涵建设，着力于提高学生的综合素质。

本书在编写过程中力求适用、通俗易懂，以必需够用为度，略去了一些复杂的数学推导过程。本书介绍了电路的基本概念和定律、直流电阻电路的分析方法、正弦交流电路、动态电路的时域分析、磁路和铁心线圈、交流电动机、电气控制系统、电工测量、半导体二极管和晶体管、基本放大电路、集成运算放大器及应用、直流稳压电源、逻辑代数与集成门电路、组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、模拟量和数字量之间的转换等内容，还简要介绍了仿真软件 EWB 的应用。

本书的参考课时为 90 课时。但由于非电类专业甚多，各专业对本课程的要求不一，学时也不尽相同，为了使教材更具有灵活性，课时少的专业采用此书时，教师可根据专业特点和学时数进行适当取舍，加有 \* 的章节可以选择不讲，或供学生自学。考虑到实际教学和自学的需要，每章的后面都给出了一定数量的习题，并附有部分习题的参考答案或提示。

本书由陕西理工学院王智忠老师和杨章勇老师编写。全书由王智忠老师担任主编并负责统稿，杨章勇老师为副主编。各章节的编写具体分工如下：王智忠编写了第 3、4 章，第 9~12 章，第 15、16 章和附录；杨章勇编写了第 1、2 章，第 5~8 章，第 13、14 章。

陕西理工学院蒋军教授在百忙之中对全书进行了认真细致的审定，并提出了许多宝贵的意见和建议；在本书的编写过程中，单位同事和领导给予了极大的帮助；西安电子科技大学出版社的秦志峰编辑为本书的出版给予了热情帮助和大力支持。在此，向以上人员一并表示衷心的感谢。此外，本书编写时参考了许多优秀的教材，在此向这些作者表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2013 年 4 月

# 目 录

<b>第 1 章 电路模型和电路定律</b> .....	1	2.7 叠加定理 .....	36
1.1 电路和电路模型 .....	1	2.8 戴维南定理与诺顿定理 .....	38
1.1.1 电路的基本知识 .....	1	2.8.1 戴维南定理 .....	38
1.1.2 电路模型 .....	2	2.8.2 诺顿定理 .....	40
1.2 电路中的基本物理量 .....	2	2.9 受控电源电路的分析 .....	41
1.2.1 电流及其参考方向 .....	2	习题 2 .....	43
1.2.2 电压及其参考极性 .....	3	<b>第 3 章 正弦交流电路</b> .....	46
1.2.3 功率和能量 .....	5	3.1 正弦量及其相量表示 .....	46
1.3 欧姆定律 .....	6	3.1.1 正弦量的三要素 .....	46
1.3.1 欧姆定律的表达式 .....	6	3.1.2 正弦量的相量表示 .....	48
1.3.2 线性电阻的伏安特性曲线 .....	6	3.2 单一参数的正弦交流电路和基尔霍夫定律的相量形式 .....	50
1.4 电压源和电流源 .....	7	3.2.1 电阻元件的交流电路 .....	50
1.4.1 独立电压源 .....	7	3.2.2 电感元件的交流电路 .....	51
1.4.2 独立电流源 .....	8	3.2.3 电容元件的交流电路 .....	54
1.5 电源的有载工作、开路与短路 .....	9	3.2.4 基尔霍夫定律的相量形式 .....	56
1.5.1 电源的有载工作 .....	9	3.3 阻抗与导纳 .....	57
1.5.2 电源开路 .....	11	3.3.1 阻抗与导纳的概念 .....	57
1.5.3 电源短路 .....	11	3.3.2 阻抗与导纳的串联和并联 .....	58
1.6 受控源 .....	12	3.4 RLC 串并联交流电路 .....	61
1.7 基尔霍夫定律 .....	13	3.4.1 RLC 串联交流电路 .....	61
1.7.1 基尔霍夫电流定律(KCL) .....	13	3.4.2 RLC 并联交流电路 .....	63
1.7.2 基尔霍夫电压定律(KVL) .....	14	3.5 正弦稳态电路的分析 .....	64
1.8 电路中电位的概念与计算 .....	16	3.5.1 正弦稳态电路的电压、电流分析 .....	64
习题 1 .....	19	3.5.2 正弦稳态电路的功率 .....	65
<b>第 2 章 线性电阻电路的分析方法</b> .....	22	3.5.3 功率因数的提高 .....	66
2.1 电阻串、并联连接的等效变换 .....	22	3.6 谐振电路 .....	68
2.1.1 电阻的串联 .....	22	3.6.1 串联谐振电路 .....	68
2.1.2 电阻的并联 .....	23	3.6.2 并联谐振电路 .....	70
2.1.3 电阻的混联 .....	24	3.7 三相电路 .....	72
2.2 电阻星形连接与三角形连接的等效变换 .....	25	3.7.1 三相电路概述 .....	72
2.3 实际电源的两种模型之间的等效变换 .....	27	3.7.2 三相电路的分析 .....	76
2.3.1 电压源和电流源的模型及外特性曲线 .....	27	3.7.3 三相电路的功率 .....	79
2.3.2 电压源与电流源的等效变换 .....	28	3.7.4 不对称三相电路 .....	80
2.4 支路电流法 .....	30	习题 3 .....	81
2.5 节点电压法 .....	32	<b>第 4 章 动态电路的时域分析</b> .....	84
2.6 网孔电流法 .....	34	4.1 换路定则及初始值的计算 .....	84
		4.1.1 过渡过程的概念 .....	84

4.1.2 换路定则及初始值的确定	84	6.3 三相异步电动机的电路分析	133
4.2 一阶电路的零输入响应	86	6.3.1 定子电路	134
4.2.1 RC 电路的零输入响应	86	6.3.2 转子电路	134
4.2.2 RL 电路的零输入响应	89	6.4 三相异步电动机的转矩与机械特性	135
4.3 一阶电路的零状态响应	91	6.4.1 电动机的电磁转矩公式	135
4.3.1 RC 电路的零状态响应	92	6.4.2 机械特性曲线	136
4.3.2 RL 电路的零状态响应	93	6.5 三相异步电动机的起动、制动与调速	137
4.4 一阶电路的全响应	95	6.5.1 三相异步电动机的起动	138
4.5 一阶电路的三要素法	98	6.5.2 三相异步电动机的调速	141
习题 4	102	6.5.3 三相异步电动机的制动	143
<b>第 5 章 磁路与铁心线圈电路</b>	<b>106</b>	6.6 三相异步电动机的铭牌数据	144
5.1 磁场的基本物理量	106	6.7 三相异步电动机的选择	147
5.1.1 磁感应强度 $B$	106	习题 6	149
5.1.2 磁通 $\Phi$ 及其连续性原理	106	<b>第 7 章 电气控制系统</b>	<b>151</b>
5.1.3 磁导率 $\mu$	107	7.1 低压控制电器	151
5.1.4 磁场强度 $H$	107	7.1.1 按钮	151
5.2 磁性物质的磁性能	107	7.1.2 刀开关	151
5.2.1 导磁性	108	7.1.3 组合开关	152
5.2.2 磁饱和性	108	7.1.4 熔断器	152
5.2.3 磁滞性	108	7.1.5 低压断路器	153
5.3 磁路及基本定律	110	7.1.6 热继电器	154
5.3.1 磁路的欧姆定律	110	7.1.7 交流接触器	155
5.3.2 磁路的计算	111	7.1.8 中间继电器	156
5.4 交流铁心线圈电路	113	7.2 继电器控制电路	156
5.4.1 电磁关系	113	7.2.1 笼型电动机直接起动控制电路	156
5.4.2 电压电流关系	113	7.2.2 笼型电动机正、反转控制电路	157
5.4.3 功率损耗	114	7.3 笼型电动机控制电路	158
5.5 电磁铁	115	7.3.1 行程控制	158
5.6 变压器	117	7.3.2 时间控制	159
5.6.1 变压器的基本结构	117	7.4 可编程控制器	161
5.6.2 变压器的工作原理	118	习题 7	172
5.6.3 变压器的外特性、损耗和效率	121	<b>第 8 章 工业企业供配电与安全用电</b>	<b>174</b>
5.6.4 变压器的额定值	122	8.1 电力系统	174
5.6.5 变压器绕组的极性	123	8.1.1 电力系统的组成	174
5.6.6 特殊变压器	124	8.1.2 电力系统的基本参量	176
习题 5	125	8.1.3 电力系统的电压	176
<b>第 6 章 交流电动机</b>	<b>128</b>	8.2 工业企业供配电	177
6.1 三相异步电动机的结构	128	8.2.1 工业企业供配电系统的组成	177
6.1.1 定子	128	8.2.2 低压配电线路	178
6.1.2 气隙	129	8.3 安全用电	181
6.1.3 转子	129	8.3.1 触电事故	181
6.2 三相异步电动机的工作原理	130	8.3.2 电流对人体的危害	181
6.2.1 旋转磁场	130	8.3.3 触电方式	182
6.2.2 异步电动机的转子转动原理	133		



8.3.4 接地和接零 .....	183	10.6.1 多级放大电路的耦合方式 .....	233
8.4 节约用电 .....	186	10.6.2 多级放大电路的分析方法 .....	236
习题 8 .....	187	10.7 差分放大电路 .....	238
<b>第 9 章 半导体二极管和晶体管</b> .....	<b>188</b>	10.7.1 差分放大电路的工作原理 .....	238
9.1 PN 结 .....	188	10.7.2 长尾式差分放大电路 .....	240
9.1.1 半导体的基本知识 .....	188	10.7.3 差分放大电路的静态分析 .....	241
9.1.2 本征半导体 .....	188	10.7.4 差分放大电路的动态分析 .....	242
9.1.3 杂质半导体 .....	189	10.7.5 差分放大电路输入、输出的连接 方式 .....	243
9.1.4 PN 结的形成及特性 .....	190	10.7.6 共模抑制比 .....	243
9.2 半导体二极管 .....	192	10.8 功率放大电路 .....	244
9.2.1 二极管的基本结构 .....	192	* 10.9 场效应管放大电路 .....	249
9.2.2 二极管的伏安特性与温度特性 .....	193	10.9.1 静态分析 .....	249
9.2.3 二极管的主要参数 .....	194	10.9.2 动态分析 .....	250
9.3 特殊二极管 .....	195	习题 10 .....	251
9.3.1 稳压二极管 .....	195	<b>第 11 章 集成运算放大器及其应用</b> .....	<b>256</b>
9.3.2 发光二极管 .....	196	11.1 集成运算放大电路简介 .....	256
9.3.3 光电二极管 .....	197	11.1.1 集成运算放大电路的组成 .....	256
9.4 双极晶体管 .....	198	11.1.2 集成运算放大器的技术指标 .....	257
9.4.1 双极晶体管的结构 .....	198	11.1.3 理想运算放大器及其特性 .....	258
* 9.4.2 双极晶体管的工作原理 .....	198	11.2 集成运算放大器的线性应用 .....	259
9.4.3 双极晶体管的特性曲线 .....	201	11.2.1 基本运算电路 .....	259
9.4.4 双极晶体管的主要参数 .....	202	11.2.2 运算放大器在信号处理方面的 应用 .....	265
9.4.5 温度对参数的影响 .....	204	11.2.3 测量放大器 .....	267
9.5 场效应晶体管 .....	205	11.3 放大电路中的负反馈 .....	268
9.5.1 结型场效应管 .....	205	11.3.1 反馈的基本概念 .....	268
9.5.2 绝缘栅型场效应管 .....	208	11.3.2 负反馈的类型及判别方法 .....	269
9.5.3 场效应管的主要参数 .....	210	11.3.3 负反馈对放大电路性能的 影响 .....	271
9.5.4 场效应管和晶体三极管的比较 .....	210	11.4 运算放大器的非线性应用 .....	273
习题 9 .....	211	11.4.1 电压比较器 .....	273
<b>第 10 章 基本放大电路</b> .....	<b>214</b>	11.4.2 矩形波和三角波发生电路 .....	274
10.1 基本放大电路简介 .....	214	11.5 使用运算放大器应注意的问题 .....	275
10.2 放大电路的静态分析 .....	216	习题 11 .....	277
10.3 放大电路的动态分析 .....	218	<b>第 12 章 直流稳压电源</b> .....	<b>280</b>
10.3.1 图解分析法 .....	218	12.1 单相整流电路 .....	280
10.3.2 微变等效电路法 .....	220	12.1.1 单相半波整流电路 .....	280
10.3.3 放大电路的非线性失真 .....	225	12.1.2 单相全波整流电路 .....	282
10.4 放大电路静态工作点的稳定 .....	226	12.1.3 单相桥式整流电路 .....	283
10.4.1 稳定静态工作点的原理 .....	226	12.2 滤波电路 .....	285
10.4.2 分压式偏置电路的计算 .....	228	12.2.1 电容滤波电路 .....	285
10.4.3 稳定静态工作点的措施 .....	230	12.2.2 电感滤波电路 .....	287
10.5 射极输出器 .....	231	12.3 稳压电路 .....	287
10.5.1 静态分析 .....	231		
10.5.2 动态分析 .....	232		
10.6 多级放大电路 .....	233		

12.3.1 并联硅稳压管稳压原理	287	14.4.3 集成 TTL 编码器	325
12.3.2 稳压系数 $S_r$	288	14.5 译码器	325
12.3.3 稳压电路的输出电阻 $R_o$	288	14.5.1 2—4 线译码器	325
12.4 串联型线性直流稳压电源	290	14.5.2 七段字形显示译码器	328
12.5 集成稳压电源	291	14.6 数据选择器	329
12.5.1 三端集成稳压电源的组成	292	14.7 数据分配器	331
12.5.2 三端集成稳压电源的应用 电路	292	习题 14	332
* 12.6 开关型直流稳压电源	294	<b>第 15 章 触发器和时序逻辑电路</b>	335
习题 12	296	15.1 双稳态触发器	335
<b>第 13 章 数字电路基础</b>	299	15.1.1 RS 触发器	335
13.1 概述	299	15.1.2 JK 触发器	339
13.1.1 电子电路的分类	299	15.1.3 维持阻塞型 D 触发器	341
13.1.2 数字电路的特点	299	15.1.4 T 触发器和 T' 触发器	342
13.1.3 脉冲信号(数字信号)	300	* 15.1.5 不同逻辑功能触发器的相互 转换	343
13.2 数制	300	15.2 寄存器	344
13.2.1 进位计数制	300	15.2.1 数码寄存器	344
13.2.2 数的位置表示法和多项式 表示法	301	15.2.2 移位寄存器	345
13.2.3 二进制的运算规则	302	15.3 计数器	348
13.2.4 数制转换	302	15.3.1 二进制计数器	349
13.3 基本逻辑门电路	304	15.3.2 十进制计数器	353
13.3.1 逻辑门电路的基本概念	304	15.3.3 集成计数器及其应用	355
13.3.2 分立元件门电路	305	15.3.4 任意 N 进制计数器	357
13.4 逻辑代数	307	15.4 脉冲信号的产生及整形	359
13.4.1 逻辑代数运算法则	307	15.4.1 555 定时器	359
13.4.2 逻辑函数的表示方法	308	15.4.2 多谐振荡器	360
13.4.3 逻辑函数的化简	309	15.4.3 单稳态触发器	362
13.5 TTL 门电路	312	习题 15	365
13.5.1 TTL 与非门	312	<b>参考答案</b>	368
13.5.2 TTL 集电极开路与非门 (OC 与非门)	314	<b>附录 A 仿真软件 EWB 在电工电子学中的 应用</b>	377
13.5.3 TTL 三态门	315	A.1 EWB 软件简介	377
习题 13	315	A.2 电路设计及分析流程	378
<b>第 14 章 组合逻辑电路</b>	318	A.2.1 创建电路图	378
14.1 组合逻辑电路的分析	318	A.2.2 运用虚拟仪器观察实验结果	380
14.2 组合逻辑电路的设计	319	<b>附录 B 电阻器和电容器的命名方法及 性能参数</b>	382
14.3 加法器	321	<b>附录 C 半导体分立器件命名方法及 性能参数</b>	385
14.3.1 半加器	321	<b>附录 D 半导体集成电路器件型号命名 方法及分类</b>	388
14.3.2 全加器	321	<b>参考文献</b>	390
14.4 编码器	322		
14.4.1 二进制编码器	323		
14.4.2 8421BCD 码编码器	323		

# 第1章 电路模型和电路定律

电路是电工技术和电子技术的基础,学好电路的基本理论,特别是掌握电路的基本分析方法和基本定理,可对后续所要学习的电子电路、电机电路以及电气控制、电气测量等内容打下坚实的基础。本章主要介绍电路模型和电路定律,主要内容包括电流和电压的参考方向、欧姆定律、电压源和电流源、基尔霍夫定律以及电路中电位的概念与计算。

## 1.1 电路和电路模型

### 1.1.1 电路的基本知识

电路是电流流通的闭合路径,是应某种需要而由若干电气元件按一定方式组合起来的整体,主要用来实现能量的传输和转换,或实现信号的传递与处理。

电路的结构形式,按所实现的任务不同而多种多样,但无论是哪种电路,基本上都包括电源、负载和必要的中间环节这三个最基本的组成部分。电源是提供电能的设备,如发电机、干电池、信号源等;负载就是消耗电能的设备,如日光灯、电动机、冰箱、空调、电磁炉等;中间环节通常是一些连接导线、开关、接触器等辅助设备,用来连接电源与负载。

图1-1所示为电路分别在强电和弱电中的应用。图1-1(a)是发电厂的发电机把热能、水能或原子能等转换成电能,通过变压器、传输线等中间设备输送至各用电设备;图1-1(b)通过话筒把所接收的信号经过变换(放大)和传递,再由扬声器输出。

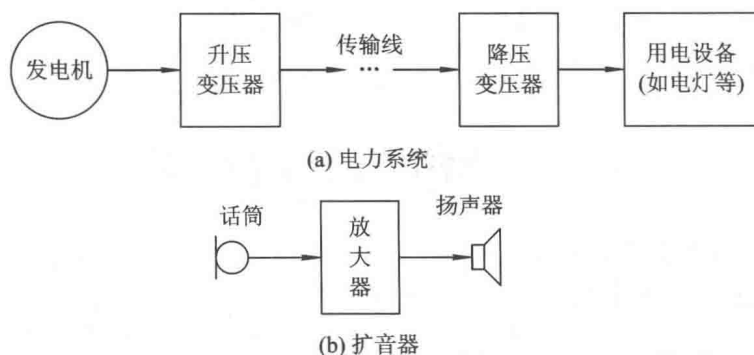


图1-1 电路在两种典型场合的应用示意图

无论是电能的传输和转换电路,还是信号的传递和处理电路,其中输入端的电源或信号源的电压、电流称为激励,用来推动电路的正常工作;由激励在电路各部分输出端所产生的电压和电流称为响应。分析电路,其实质就是分析激励和响应之间的关系。

### 1.1.2 电路模型

实际电路都是由一些起不同作用的电路元件或器件所组成的,诸如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管以及各种电阻器和电容器等,这些元件或器件的电磁性质较为复杂。最简单的如一个白炽灯,它除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,当通有电流时还会产生磁场,这就说明了它还具有电感的性质。但由于白炽灯的电感微小,可以忽略不计,于是可以认为白炽灯就是一个电阻元件。

为了便于对实际电路进行分析和数学描述,可以将实际电路元件理想化(或称模型化),即在一定的条件下突出其主要的电磁性质,忽略其次要因素,把它近似地看做理想电路元件。由一些理想电路元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型。电路模型是对实际电路电磁性质的科学抽象和高度概括。在实际的电路分析中主要有三种最基本的模型元件:只表征将电能转换成热能的电阻元件;只表征电场现象的电容元件;只表征磁场现象的电感元件。每一种理想化元件都有其各自的数学模型并有精确的数学定义。用抽象的理想化元件及其组合近似地替代实际电路,从而构成了与实际电路相应的电路模型,本书后文所提到的电路一般均指电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元件必须用规定的图形符号来表示。

例如,日常生活中所用的手电筒电路就是一个最简单的电路。如图 1-2 所示的电路是由干电池、小灯珠、手电筒壳(连接导体)组成的。干电池是一种电源,对电路提供电能;小灯珠是用电的器件,称为负载;连接导体可使电流构成通路。根据电路模型的定义,可以得到手电筒的电路模型,如图 1-2(b)所示。

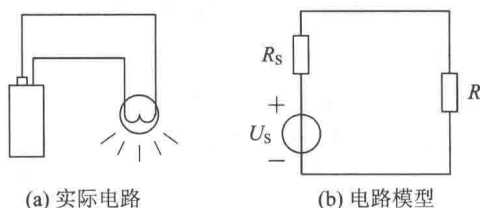


图 1-2 手电筒电路

## 1.2 电路中的基本物理量

电路中涉及的物理量很多,诸如电荷、磁链、电压、电位、电流、时间、功率、能量等等,但是在电路问题分析中人们最关心的物理量是电流、电压、功率和能量。在具体展开分析、讨论电路问题之前,首先建立并深刻理解与这些物理量有关的基本概念是很重要的。

### 1.2.1 电流及其参考方向

#### 1. 电流的基本概念

带电粒子或电荷在电场力作用下的定向运动形成电流,其大小用物理量电流来表示。电流在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

在国际单位制(SI)中,时间  $t$  的单位是秒(s),电荷量  $q$  的单位是库仑(C),电流  $i$  的单位是安培(A),电流的辅助单位还有毫安(mA)、微安( $\mu\text{A}$ )、纳安(nA)等,它们之间的关系为

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 10^6 \mu\text{A} = 10^9 \text{ nA}$$

## 2. 电流的参考方向

关于电流的方向,人们把正电荷运动的方向规定为电流的实际方向。当负电荷或电子运动时,电流的实际方向就是负电荷运动方向的相反方向。

电流的实际方向是客观存在的,但在分析复杂电路时,很难用实际方向进行分析计算,原因之一是分析计算之前很难事先判定某支路中电流的实际方向,原因之二是当电流是交流量时,电流的实际方向随时间不断变化。解决的方法就是引入参考方向的概念。对于电流这种具有两个可能方向的物理量,可以任意选定一个方向作为某支路电流的参考方向,用箭头表示在电路图上。以此参考方向作为电路计算的依据,计算完毕后,就可以利用电流的正、负值结合电路图上原先指定的电流参考方向来反映电流的实际方向。

对于某一条支路,若在设定的参考方向下计算出  $i > 0$ ,则表明电流的实际方向与设定的参考方向一致;反之,若计算出  $i < 0$ ,则表明电流的实际方向与参考方向相反。图 1-3(a)和(b)表明了参考方向与实际方向的关系,图的上方为参考方向,下方为实际方向。

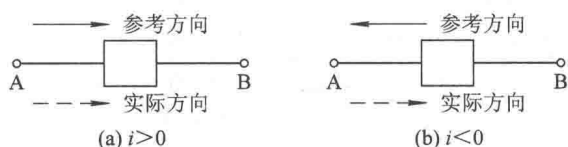


图 1-3 电流的参考方向和实际方向

参考方向一般用箭头(标在连接线旁)表示,也可以用双下标表示,如  $i_{AB}$  表示参考方向从 A 指向 B,显然,  $i_{AB} = -i_{BA}$ 。

注意:此后在电路图上所标定的全是电流的参考方向,参考方向一经标定,列写方程分析电路时就以该方向为准,在整个计算过程中不能随意改变。电流值的正与负只有在设定参考方向的前提下才有意义。

## 1.2.2 电压及其参考极性

### 1. 电压的基本概念

在电路中,如果设正电荷由 a 点移动到 b 点时电场力所作的功为  $d\omega$ ,则 a、b 两点间 a 点到 b 点的电压为

$$u_{ab} = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

换句话说,电场力把单位正电荷由 a 点移动到 b 点所作的功在数值上等于 a、b 两点间的电压。如果  $u_{ab} > 0$ ,由式(1-2)可知,当  $dq > 0$  时,  $d\omega > 0$ ,表明这时电场力作正功,做功的结果是正电荷在 a 点具有的电位能  $W_a$  减去在 b 点的电位能  $W_b$ ,差值  $W_a - W_b$  等于这段电路所具有的能量。若取电场或电路中的任一点为参考点,则由某点 a 到参考点的电压

$u_{a0}$ 称为 a 点的电位  $V_a$ ，其中电位参考点可以任意选取，工程上常选择大地、设备外壳或接地点作为参考点。参考点电位为零。

电压与电位的关系为：对于同一参考点而言，a、b 两点之间的电压等于这两点之间的电位差，即

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

参考点选的不同，各点的电位也随之改变，但是不会影响两点之间的电压。在电路分析计算中，参考点一经选定，则不再改变。

在国际单位制(SI)中，能量  $W$  的单位是焦耳(J)；电荷量  $q$  的单位是库仑(C)；电压  $u$  的单位是伏特(V)，它的辅助单位有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏( $\mu$ V)等，它们之间的关系为

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V}, \quad 1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV}, \quad 1 \text{ V} = 10^6 \mu\text{V}$$

## 2. 电压的参考方向

电压的实际方向是由高电位点指向低电位点的方向。习惯上把高电位点规定为正极性点，低电位点规定为负极性点。如同讨论电流的方向一样，也引用参考方向的概念。电压的参考方向就是假定的电压方向。如图 1-4 所示，图中方框代表一个元件或一段电路，实线箭头表示电压的参考方向，虚线箭头表示电压的实际方向。在设定的参考方向下，电压为正值时，参考方向与真实方向一致；反之电压为负值时，参考方向与真实极性相反。因此，在参考方向下，电压值的正或负可以反映电压的真实方向。同电流一样，两点间电压数值的正与负，只有在设定参考方向的条件才有意义。

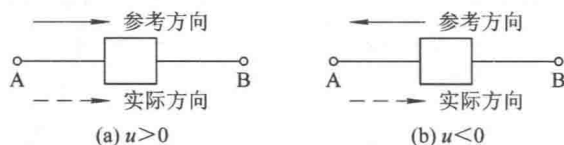


图 1-4 电压的参考方向和实际方向

电压的参考方向也可以用极性符号“+”和“-”标注在电路的两端，表示电压的参考方向为“+”端指向“-”端；也可用双下标表示，如用  $u_{AB}$  表示参考方向为由 A 指向 B，显然， $u_{AB} = -u_{BA}$ 。

另外，电动势则是指在电源内部非电场力把单位正电荷由低电位端移动到高电位端所作的功。

一般地讲，同一段电路的电流和电压的参考方向可以各自选定，不必强求一致。但为了分析方便，常选定同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致，即电流流动方向和电压降方向一致。这样选择的某一段电路的电压和电流的参考方向，称为关联参考方向，如图 1-5(a)所示；否则，称为非关联参考方向，如图 1-5(b)所示。

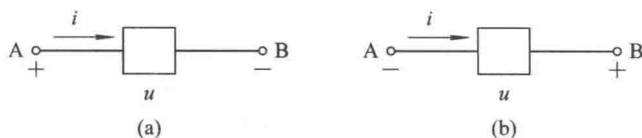


图 1-5 电压、电流的关联和非关联参考方向

### 1.2.3 功率和能量

在电路的分析和计算中,能量和功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的相互交换;另一方面,电气设备、电路部件本身都有功率的限制,在使用时要注意其电流值或电压值是否超过额定值,过载会使设备或部件损坏,或是不能正常工作。

电功率是电路中能量转换的速率,用符号  $p$  表示,即

$$p(t) = \frac{dw}{dt} = u(t)i(t) \quad (1-4)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦特(W),能量的单位是焦耳(J)。

对于某元件而言,在元件的电压、电流关联参考方向下,意味着正电荷从电压的“+”极经元件到“-”极,电荷失去能量而元件获得能量。因为电压  $u$  表示单位电荷从“+”极流向“-”极失去的能量,电流  $i$  表示单位时间内流经元件的正电荷量,所以,二者的乘积就是元件吸收的功率。图 1-6 中  $p$  的箭头表示元件吸收的功率。

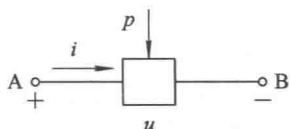


图 1-6 某元件的功率

由此可见,当  $u$ 、 $i$  取关联参考方向时,若求得  $p > 0$ ,则电路实际吸收功率;若  $p < 0$ ,则电路吸收负功率,即实际发出功率。当  $u$ 、 $i$  取非关联参考方向时,若求得  $p > 0$ ,则电路实际发出功率;若  $p < 0$ ,则电路实际吸收功率。

总之,电路中任一元件的功率等于该元件电压、电流的乘积,而元件实际上是吸收功率还是产生功率,可由电压、电流参考方向的关联性和功率值的正或负两者结合来确定。

另外,能量是功率对时间的积分,在  $t_0$  至  $t$  这段时间内电路吸收的能量可由下式来表示:

$$w = \int_{t_0}^t p \, dt = \int_{t_0}^t ui \, dt \quad (1-5)$$

当式(1-5)中  $p$  的单位为瓦时,能量  $w$  的单位为焦[耳],符号为 J,它等于功率为 1 W 的用电设备在 1 s 内消耗的电能。工程和生活中还常用千瓦时(kW·h)作为电能的单位,1 kW·h 俗称 1 度(电)。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$$

**【例 1-1】** 图 1-7 所示元件中,  $i = -5 \sin \omega t \text{ A}$ ,  $u = 10 \sin \omega t \text{ V}$ , 试求解该元件吸收的功率。

**解** 由于图中元件的电压和电流的参考方向为关联参考方向,则该元件吸收的功率为

$$p = ui = -5 \sin \omega t \times 10 \sin \omega t = -50 \sin^2 \omega t \text{ W}$$

计算结果表明,该元件的功率是随时间变化的,但始终是负值,表示该元件是一个电源元件,并始终是发出功率的。

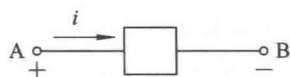


图 1-7 例 1-1 图

## 1.3 欧姆定律

### 1.3.1 欧姆定律的表达式

电阻器、灯泡、电炉等在一定条件下可以用电阻元件作为其模型。线性电阻元件是这样的理想元件；在电压和电流取关联参考方向下，在任何时刻它两端的电压和电流关系符合欧姆定律，即有

$$u(t) = R \cdot i(t) \quad (1-6)$$

式中， $u$ 、 $i$  是电路变量， $R$  是表征电阻元件上电压、电流关系的参数，称为电阻。在国际单位制中，电阻的单位为欧姆，简称欧( $\Omega$ )。因此，字母符号  $R$  既表示电阻元件，又是电路的参数。

在并联电路计算中，为了计算的方便，还可用另外一个参数——电导来表征电阻元件。电导用符号  $G$  来表示，它是电阻的倒数，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

在国际单位制中，电导的单位为西门子，简称西(S)。所以欧姆定律还可以表示为

$$i(t) = Gu(t) \quad (1-8)$$

如果电阻元件的电压、电流取非关联参考方向，则欧姆定律应表示为

$$u(t) = -Ri(t) \quad \text{或} \quad i(t) = -Gu(t) \quad (1-9)$$

因此，应用欧姆定律时必须注意电阻元件的电压、电流参考方向是否关联。

### 1.3.2 线性电阻的伏安特性曲线

线性电阻元件的图形符号如图 1-8(a)所示，其伏安特性曲线如图 1-8(b)所示，是一条通过坐标原点的直线，其斜率就是元件的电阻  $R$ ，即  $R = \tan\alpha$ 。

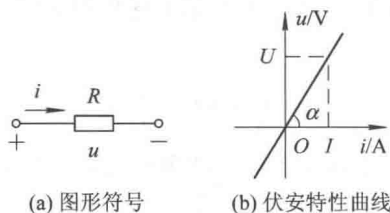


图 1-8 线性电阻元件

另外，电阻元件上的电压、电流在任何瞬间总是同时出现的，与该瞬间以前的电压、电流是无关的，所以电阻元件属于“无记忆”元件或“即时性”元件。

电阻元件在电压、电流的关联参考方向下，任意时刻线性电阻元件吸收的电功率为

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = Gu^2(t) \quad (1-10)$$

电阻  $R$  和电导  $G$  是正实常数，故  $p \geq 0$ ，任何时刻的功率恒为非负值。这表明任何时刻电阻元件都不可能向外提供电能，它总是吸收电能并全部消耗掉。所以，线性电阻元件不仅是无源元件，还是耗能元件。

**【例 1-2】** 求一只额定功率为 50 W、额定电压为 220 V 的灯泡的额定电流及其电阻值。



解 由

$$P = UI = \frac{U^2}{R}$$

得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{50}{220} = 0.227 \text{ A}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{50} = 968 \text{ } \Omega$$

线性电阻还有两种值得注意的特殊情况——开路和短路。一个二端元件不论其电压  $u$  是多大其电流恒等于零，则此电阻元件称为开路(断路)。在  $i-u$  平面上，其特性曲线的斜率为无限大，即  $R=\infty$ 。类似地，一个二端电阻元件不论其电流  $i$  是多大，其电压恒等于零，则此电阻元件称为短路。在  $u-i$  平面上，特性曲线的斜率为无限大，即  $G=\infty$ ；在  $i-u$  平面上，其特性曲线的斜率为零，即  $R=0$ 。

## 1.4 电压源和电流源

电路中的耗能元件流过电流时，会不断消耗能量，因此，电路中必须有提供能量的装置，电路中的电源便是这一装置。常用的电源模型有两种，即电压源模型和电流源模型。

### 1.4.1 独立电压源

此处的“独立”二字是相对于后面将要介绍的受控电源的“受控”二字而言的，简单地讲，所谓独立电源，是指其对外特性由本身的参数决定，而不受外电路控制的电源。

#### 1. 理想电压源

理想电压源是由内部损耗很小，以至于可以忽略的实际电源抽象得到的理想化二端电路元件。如果一个实际电源的输出电压与外接电路无关，即电压源输出电压的大小和方向与流经它的电流无关，也就是说无论接什么样的外电路，输出电压总保持为某一个给定值或某一个时间函数，则该电压源称为理想电压源。如果干电池的内阻为零，则无论外接负载如何，此干电池的端电压总保持为常数，可见内阻可以忽略的干电池就是一个最简单的理想电压源。

图 1-9(a)为理想电压源的电路符号，图 1-9(b)为直流理想电压源及其伏安特性曲线。它是一条与电流轴平行的直线，其纵坐标为直流理想电压源的电压参数  $U_S$ 。

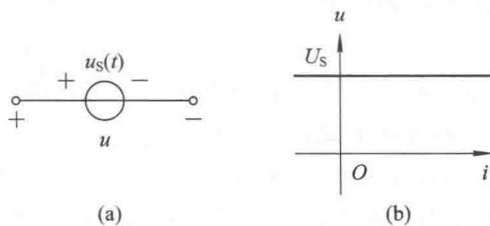


图 1-9 理想电压源及其伏安特性曲线

由理想电压源的特性可知，当它与外电路相接时，流经它的电流及电源的功率由外电路确定。如果它的电压  $U_S=0$ ，则此电压源的伏安特性曲线与电流轴重合，相当于短路，即电压为零的电压源相当于短路。电压源作为一个电路元件，可以向外电路发出功率，也可以从