



高等教育“十二五”规划教材
·工科专业平台基础课程系列·



电工电子学

DIANGONG DIANZIXUE

李 光 主 编

樊 伟 佟海侠 副主编



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.com.cn>

高等教育“十二五”规划教材·工科专业平台基础课程系列

电工电子学

李 光 主 编
樊 伟 佟海侠 副主编

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据教育部电工学课程指导组拟定的电工电子技术系列课程教学基本要求编写。全书共 13 章, 涉及电工基础、电机学、工程供电、电气控制、模拟和数字电子电路等方面的内容。本书文字简练, 叙述深入浅出, 通俗易懂。知识点有机整合、循序渐进, 逻辑严密, 注重实践和理论教学相结合。

本书可作为高等职业院校、应用型本科院校、成人高校的电工电子学教材, 也可供相关工程技术人员参考。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子学 / 李光主编. —北京: 北京交通大学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5121-0722-9

I. ①电… II. ①李… III. ①电工学 ②电子学 IV. ①TM1 ②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 015854 号

策划编辑: 刘 辉 刘建明

责任编辑: 刘 辉

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京交大印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 17.25 字数: 431 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-0722-9/TM·64

印 数: 1~2 000 册 定价: 38.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

电工电子技术是工科非电专业的一门重要的技术基础课，培养学生掌握一些必要的电学知识，具有较强的实用性和技术性。

本书内容是根据教育部电工学课程指导组拟定的电工电子技术系列课程教学基本要求编写的。编者为长期从事教学一线工作的高校教师。在多年教学实践的基础上，针对以往教材学科型教学模式学时长、实用性差的弊端，我们在编写过程中主要注意了以下几个方面：

(1) 在编写过程中以实用性为原则，以知识够用为度作为标准来编写本教材，突出学生重点掌握内容。

(2) 以基础知识为基本，以专业培养为方向，注重实践教学和理论教学相结合，删除复杂的理论推导。

(3) 本书涉及电工基础、电机学、工程供电、电气控制、模拟和数字电子电路等方面的内容，力求做到精选内容，有机整合，循序渐进，前后知识相连贯。

(4) 全书文字简练，叙述深入浅出，通俗易懂。并编入一些工程应用实例及习题，针对性、应用性较强，以培养学生理论联系实际的能力。

本书由李光担任主编，樊伟、佟海侠任副主编。具体分工如下：李光编写第1、2、9~11章，樊伟编写第4~7章，佟海侠编写第3、12章和附录，艾丽娜编写第8、13章。全书由李光负责统稿。在编写过程中，得到石家庄铁道大学王金明副教授的大力支持，在此表示衷心的感谢！

同时，本书在编写过程中参考了许多相关方面的书籍，借本书出版之际，对所参考书籍的作者表示感谢！

由于编者水平所限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者
2014 年 11 月

目 录

第 1 章 电路分析的基础知识	1
1.1 电路和基本物理量	1
1.1.1 电路和电路模型	1
1.1.2 基本物理量	2
1.2 理想电路元件	4
1.2.1 电阻元件	4
1.2.2 电容元件	5
1.2.3 电感元件	5
1.3 电路的工作状态	6
1.3.1 开路状态(空载状态)	6
1.3.2 短路状态	6
1.3.3 负载状态(通路状态)	7
1.4 电压源与电流源	8
1.4.1 理想电压源	8
1.4.2 理想电流源	9
1.4.3 实际电源的模型	9
1.5 基尔霍夫定律	12
1.5.1 几个相关的电路名词	12
1.5.2 基尔霍夫电流定律(KCL)	12
1.4.3 基尔霍夫电压定律(KVL)	13
1.5.4 支路电流法	15
1.6 叠加定理	16
1.7 戴维南定理	17
1.7.1 二端网络	17
1.7.2 戴维南定理及其应用	18
习题	20
第 2 章 正弦交流电路	25
2.1 正弦交流电路的基本概念	25
2.1.1 正弦量及其三要素	25
2.1.2 相位差	26
2.1.3 有效值	27

2.2 正弦量的相量表示法	28
2.2.1 复数及其表示形式	28
2.2.2 复数运算	29
2.2.3 正弦量的相量表示法	29
2.3 单一参数正弦交流电路	31
2.3.1 电阻元件	31
2.3.2 电感元件	33
2.3.3 电容元件	36
2.4 基尔霍夫定律的相量形式	38
2.5 正弦交流电路的相量分析	39
2.5.1 电阻、电感和电容串联电路及复阻抗	39
2.5.2 电阻、电感和电容并联的电路及复导纳	42
2.5.3 阻抗的连接	44
2.6 用相量法分析复杂交流电路	47
2.7 正弦交流电路中的功率及功率因数的提高	49
2.7.1 有功功率、无功功率、视在功率和功率因数	49
2.7.2 功率因数的提高	50
2.8 正弦交流电路负载获得最大功率的条件	52
习题	53
第3章 三相正弦交流电路	58
3.1 三相电源	58
3.1.1 三相电动势的产生	58
3.1.2 相序	60
3.2 三相电源的连接	60
3.2.1 三相电源的星形连接	60
3.2.2 三相电源的三角形连接	62
3.3 对称三相电路	62
3.3.1 负载Y连接的对称三相电路	63
3.3.2 负载 Δ 连接的对称三相电路	66
3.4 不对称三相电路	68
3.5 三相电路的功率	71
习题	72
第4章 变压器	73
4.1 变压器的基本结构	73
4.1.1 变压器的用途	73
4.1.2 变压器的基本结构	73

4.2 变压器的基本原理	74
4.2.1 变压器空载运行及电压变换	75
4.2.2 变压器负载运行及电流变换	76
4.2.3 阻抗变换	77
4.3 变压器的外特性、功率和效率	78
4.3.1 变压器的铭牌	78
4.3.2 变压器的外特性	80
4.3.3 变压器的功率	81
4.3.4 变压器的效率	81
4.4 变压器绕组的极性	82
4.5 三相变压器	83
4.5.1 三相变压器的磁路系统	83
4.5.2 三相变压器绕组的接法	85
4.6 其他用途变压器	86
4.6.1 自耦变压器	86
4.6.2 电焊变压器	87
习题	88
第5章 三相异步电动机	89
5.1 三相异步电动机的基本结构	89
5.2 旋转磁场	90
5.2.1 旋转磁场的产生	90
5.2.2 旋转磁场的转向	92
5.2.3 旋转磁场的极数	92
5.2.4 旋转磁场的转速	93
5.3 三相异步电动机的工作原理	93
5.3.1 三相异步电动机工作原理	93
5.3.2 转差率	94
5.4 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	94
5.4.1 电磁转矩	95
5.4.2 机械特性	95
5.5 三相异步电动机的使用	97
5.5.1 铭牌数据	97
5.5.2 三相异步电动机的启动、调速和制动	99
5.5.3 三相异步电动机的选择	102
习题	104

第 6 章 电气控制技术	106
6.1 常用的低压电器	106
6.1.1 刀开关、主令电器和熔断器.....	106
6.1.2 交流接触器	109
6.1.3 热继电器和时间继电器	111
6.2 电气控制原理图及基本控制环节	113
6.2.1 电气控制原理图	113
6.2.2 电气控制的基本环节	113
6.3 三相异步电动机的常用控制电路	116
6.4 可编程控制器的概述	120
6.4.1 可编程控制器的定义及特点	120
6.4.2 可编程控制器的组成	121
6.4.3 可编程控制器的工作原理	123
6.5 可编程控制器的编程	124
6.5.1 FX _{2N} 系列 PLC 的面板	125
6.5.2 可编程控制器的编程语言	128
6.5.3 FX 系列 PLC 的编程元件	129
6.5.4 FX 系列 PLC 的基本指令	130
6.6 可编程控制器的应用举例	133
6.6.1 PLC 控制系统设计的基本原则	133
6.6.2 PLC 控制系统设计的基本内容	134
6.6.3 PLC 控制系统设计的一般步骤	134
6.6.4 应用设计举例	134
习题.....	137
第 7 章 道桥工程供电设计	139
7.1 三相供电系统	139
7.1.1 发电	139
7.1.2 电能的输送和分配	139
7.1.3 配电	140
7.2 变压器的选择	140
7.2.1 变压器的选择原则	140
7.2.2 工程用电量的估算	140
7.2.3 变压器容量的选择	141
7.2.4 变压器安装位置的确定	142
7.3 配电导线的选择	142
7.3.1 选择导线截面的原则	142

7.3.2 选择导线截面积的方法	142
7.4 道桥施工工程供电设计	144
7.4.1 概述	144
7.4.2 绘制施工现场电力供应平面布置图	144
7.4.3 供电设计实例	148
习题	149
第8章 安全用电	151
8.1 触电	151
8.2 保护接地和保护接零	152
8.2.1 保护接地	152
8.2.2 保护接零	153
8.2.3 三孔插座和三极插头	153
8.3 防止触电的措施	153
8.3.1 安全用电常识	153
8.3.2 安全技术措施	154
8.4 防雷保护	155
8.4.1 雷电的危险	155
8.4.2 防雷设备	156
8.4.3 防雷保护	157
8.4.4 防雷常识	158
习题	158
第9章 直流稳压电源	159
9.1 半导体基本知识	159
9.1.1 本征半导体	159
9.1.2 杂质半导体	160
9.2 PN 结	161
9.2.1 PN 结的形成	161
9.2.2 PN 结的单向导电性	161
9.3 半导体二极管	162
9.3.1 二极管结构	162
9.3.2 二极管的伏安特性	163
9.3.3 二极管的主要参数	163
9.4 整流电路	163
9.4.1 概述	163
9.4.2 单相半波整流电路	164
9.4.3 单相桥式整流电路	165

9.5 滤波与稳压电路	166
9.5.1 滤波电路	166
9.5.2 稳压电路	168
习题	171
第 10 章 晶体管放大电路	174
10.1 晶体三极管	174
10.1.1 基本结构	174
10.1.2 晶体三极管的电流放大作用	175
10.1.3 晶体三极管的特性曲线及三个工作区域	176
10.1.4 晶体管的主要参数	177
10.2 晶体管放大电路	178
10.2.1 概述	178
10.2.2 电路及各元件的作用	179
10.2.3 工作原理	180
10.3 放大电路的微变等效电路分析法	183
10.3.1 晶体管的微变等效电路	184
10.3.2 放大电路性能指标分析	185
10.4 分压式偏置电路	187
10.5 射极输出器	188
10.5.1 电路的组成	188
10.5.2 电路分析	189
10.6 多级放大器	191
10.6.1 阻容耦合	191
10.6.2 变压器耦合	192
10.6.3 直接耦合	192
10.6.4 多级放大器的性能参数	193
习题	193
第 11 章 集成运算放大电路	198
11.1 集成运算放大器	198
11.1.1 运算放大器的基本结构	198
11.1.2 集成运算放大器的主要参数	199
11.1.3 运算放大器的 3 种输入方式	200
11.1.4 运算放大器的理想化模型	201
11.2 运算放大器的输入方式	201
11.2.1 反相输入放大电路	201
11.2.2 同相输入放大器	202

11.2.3 双端输入放大电路·····	203
11.3 运算放大器的应用·····	203
11.3.1 加法电路·····	203
11.3.2 减法电路·····	204
11.3.3 积分电路·····	205
11.3.4 微分电路·····	206
11.3.5 电压比较器·····	207
11.4 使用集成运放时应注意的几个问题·····	208
习题·····	209
第 12 章 门电路和组合逻辑电路 ·····	212
12.1 数制与码制·····	212
12.1.1 数制·····	212
12.1.2 码制·····	214
12.2 逻辑门电路·····	214
12.2.1 基本逻辑关系·····	215
12.2.2 复合逻辑关系·····	216
12.3 逻辑代数基础·····	217
12.3.1 基本公式·····	218
12.3.2 基本定律·····	218
12.3.3 逻辑函数的公式化简法·····	219
12.4 组合逻辑电路的分析与设计·····	219
12.4.1 组合逻辑电路的分析·····	220
12.4.2 组合逻辑电路的设计·····	221
12.5 常用的组合逻辑电路·····	222
12.5.1 编码器·····	222
12.5.2 译码器·····	224
12.5.3 数据选择器·····	226
习题·····	227
第 13 章 触发器和时序逻辑电路 ·····	229
13.1 触发器·····	229
13.1.1 基本 RS 触发器 ·····	229
13.1.2 同步 RS 触发器 ·····	230
13.1.3 主从 JK 触发器 ·····	231
13.1.4 D 触发器·····	233
13.1.5 T 触发器·····	234
13.2 计数器·····	234

13.2.1 同步二进制加法计数器·····	235
13.2.2 十进制计数器·····	236
13.3 寄存器·····	237
13.3.1 数码寄存器·····	237
13.3.2 移位寄存器·····	238
13.4 波形产生与变换电路·····	239
13.4.1 555 定时器的结构及其工作原理·····	239
13.4.2 555 定时器的典型应用·····	240
习题·····	244
附录 A 相关技术数据·····	248
参考文献·····	261

第 1 章 电路分析的基础知识

本章要点

1. 了解电路的作用与组成部分。
2. 掌握基尔霍夫定律,会用支路电流法求解简单的电路。
3. 理解电压源、电流源概念,了解电压源、电流源的连接方法,并掌握其等效变换法。
4. 会用叠加定理、戴维南定理求解复杂电路中的电压、电流、功率等电量。

1.1 电路和基本物理量

1.1.1 电路和电路模型

电路就是电流所经过的路径,由各种元件按一定方式连接而成的。其特征是提供了电流流动的通道。电路元件通常是用规定的图形符号来表示实际的电路元件,并用连线表示它们之间的连接关系。

根据电源提供的电流不同,电路还可以分为直流电路和交流电路两种。

图 1-1(a)手电筒电路就是一个最简单的实用直流电路,它由电源(干电池)、负载(小灯泡)、开关和连接导线 4 部分组成。电源是提供电能和电信号的设备,它把其他形式的能量转换为电能;负载是消耗电能的设备,它把电能转换为其他形式的能量;电源与负载之间通过导线相连接。一个完整的电路这 4 个基本组成部分是缺一不可的。

一个实际电路是由电源、负载等各种电路元件所组成。对于每一个电路元件来说,其电磁性能都比较复杂,不是单一的。例如白炽灯这一负载,它在通电工作时能把电能转变为热能,消耗电能,但其电压和电流还会产生电场和磁场,也具有电容和电感的性质。在分析电路中,如果对一个电路元件要考虑所有的电磁性质,将是十分困难的。为此,对于组成电路的元件,我们忽略次要因素,只抓住主要电磁特性,即把元件理想化。这样用一个或几个具有单一电磁特性的理想电路元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型。

如图 1-1(b)所示电路为图 1-1(a)手电筒电路的电路模型。图中 E_s 是干电池模型的电动势, R_0 是它的内阻, R_L 是灯泡的模型。今后我们所画的电路图都是电路模型,简称

电路。

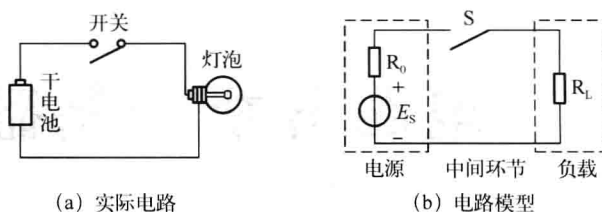


图 1-1 手电筒电路

电路元件有线性和非线性之分,线性元件的参数是常数,与所施加的电压和电流无关。由线性元件组成的电路就是线性电路,本书所研究的电路均为线性电路。

1.1.2 基本物理量

1. 电流

电流的大小由电流强度表示。电流分为两类:一是大小和方向均不随时间变化,称为恒定电流,简称直流,用 I 表示。二是大小和方向均随时间变化,称为交变电流,简称交流,用 i 表示。

对于直流电流,单位时间内通过导体截面的电荷量是恒定不变的,其大小为

$$I = \frac{Q}{T} \quad (1-1)$$

对于交流,设在极短的时间 dt 内通过导体某一横截面的电荷量为 dq ,则电流强度为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

电流的单位是库仑每秒(库仑/秒),即安培,简称“安”,用符号“A”表示。有时也用千安(kA)、毫安(mA)、微安(μA)作为电流的计量单位,它们之间的关系是

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} \quad 1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} \quad 1 \text{ mA} = 10^3 \mu\text{A}$$

一般规定正电荷移动的方向或负电荷移动的反方向为电流的实际方向,如图 1-2 所示。

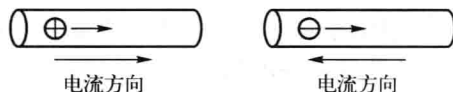


图 1-2 电流的方向

在复杂电路中,电流的实际方向有时难以确定。为了便于分析计算,便引入电流参考方向的概念。电流的参考方向,也称为正方向,可以任意选定。在电路中一般用箭头表示。当电流的参考方向与实际方向一致时,电流为正值($I > 0$);当电流的参考方向与实际方向相反时,电流为负值($I < 0$),如图 1-3 所示。

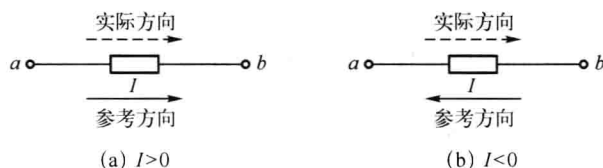


图 1-3 电流的参考方向与实际方向

2. 电压

在电路中,电场力把单位正电荷(q)从 a 点移到 b 点所做的功(W)就称为 a 、 b 两点间的电压,也称电位差,记为

$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

对于直流,则为

$$U_{AB} = \frac{W}{Q} \quad (1-4)$$

电压的单位是焦耳每库仑(焦耳/库仑),即伏特,简称“伏”,用符号“V”表示。有时用千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)为计量单位;它们之间的换算关系是

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

电压的实际方向习惯上规定为从高电位点指向低电位点,即电压降的方向。和电流的参考方向一样,也需设定电压的参考方向。电压的参考方向也是任意选定的。电压的参考方向可用箭头“ $\rightarrow$ ”表示,也可用双下标($U_{ab} = -U_{ba}$)表示,还可用极性“+”、“-”表示,“+”表示高电位,“-”表示低电位。多数情况下采用双下标和极性表示法。

当电压的参考方向与实际方向一致时,电压为正($U > 0$);当电压的参考方向与实际方向相反时,电压为负($U < 0$),如图 1-4 所示。

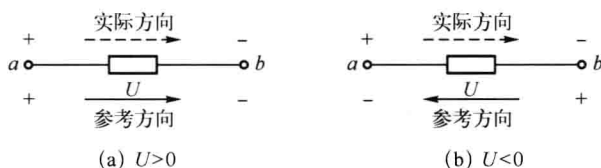


图 1-4 电压的参考方向与实际方向

为了分析电路的方便,电压和电流常取一致的参考方向,称为关联参考方向;反之,称为非关联参考方向,如图 1-5 所示。

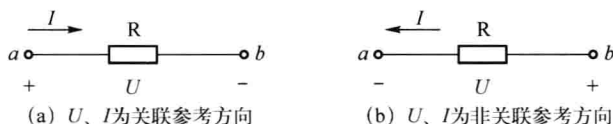


图 1-5 关联参考方向与非关联参考方向

3. 电功率

在电流通过电路时,电路中发生了能量的转换。在电源内部,把非电能转换成电能。

在外电路中,把电能转换为其他形态的能量,即负载要消耗电能而做功。

负载在单位时间内消耗的电能称为电功率,简称功率,用 P 表示,单位为瓦(W)或千瓦(kW)、毫瓦(mW)。

根据欧姆定律,其计算公式为

$$P=UI \quad (1-5)$$

或

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

4. 电能

负载在整个工作时间内消耗的电能与电路两端电压 U 、通过的电流 I 及通电的时间成正比,用公式表示为:

$$W=UIt=Pt \quad (1-6)$$

电能的单位是焦耳(J),另一个单位是千瓦·时(kW·h),即人们常说的1度电,写成
1度=1 kW·h

【例 1-1】 某一生产车间有 100 W, 220 V 的电烙铁 50 把,每天使用 5 小时,问一个月(按 30 天计)能用多少度电?

解:车间 50 把电烙铁总计功率为

$$50 \times 100 \text{ W} = 5\,000 \text{ W}$$

一个月用电量为

$$5\,000 \times 5 \times 30 = 750 \text{ kW} \cdot \text{h} = 750 \text{ 度}$$

1.2 理想电路元件

用来表征电路的基本理想电路元件分别为理想电阻元件、理想电感元件和理想电容元件。

1.2.1 电阻元件

像灯泡、电阻炉和电烙铁,可将它们抽象为只具有消耗电能性质的电阻元件。

在图 1-6(a)中,电压 u 和电流 i 的参考方向相同, R 是理想电阻元件,由欧姆定律可知,电阻元件的伏安特性为

$$u=Ri \quad (1-7)$$

电阻的单位是欧姆,用字母“ Ω ”表示。功率为

$$p=ui=Ri^2=\frac{u^2}{R} \quad (1-8)$$

从上式可以看出不论 u 、 i 是正值还是负值, p 总是大于零,说明电阻元件总是消耗电功率的,与电压、电流的实际方向无关,故电阻是耗能元件。

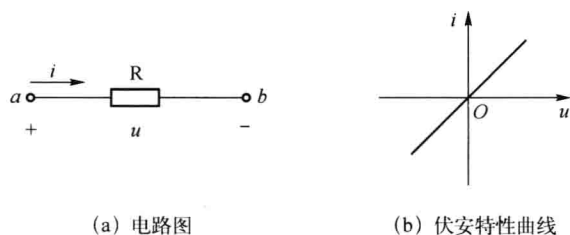


图 1-6 电阻元件

1.2.2 电容元件

实际电容通常由两块金属极板中间充满介质(如空气、云母、绝缘纸、塑料薄膜和陶瓷等)构成。当忽略电容器的漏电阻和电感时,可将其抽象为只具有储存电场能性质的电容元件。

电容上储存的电量 q ,与外加电压 u 成正比,即

$$q = Cu \quad (1-9)$$

上式中,比例系数 C 称为电容,是表征电容元件特性的参数。

在国际单位制中,电容的单位是法拉,简称“法”,用字母“F”表示。

工程上一般采用微法(μF)或皮法(pF)作为电容的单位。

当电容的端电压和通过电流的参考方向一致时,如图 1-7 所示,则有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

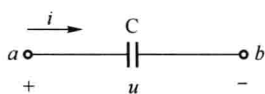


图 1-7 电容元件

上式表明,电容元件上通过的电流,与元件两端的电压对时间的变化率成正比。电压变化越快,电流就越大。当电容元件两端加上恒定电压时 $i=0$,电容元件相当于开路,故电容元件有隔直流的作用。

将上式两边乘上 u 并积分,可得电容元件极板间储存的电场能量为

$$W_C = \int_0^t ui \, dt = \int_0^u Cu \, du = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-11)$$

上式说明,电容元件在某时刻储存的电场能量与元件在该时刻所承受的电压的平方成正比。理想电容元件不消耗能量,故称为储能元件。

1.2.3 电感元件

当电感线圈中通以电流后,将产生磁通,在其内部及周围建立磁场,储存能量。可将