

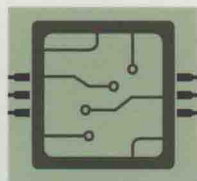
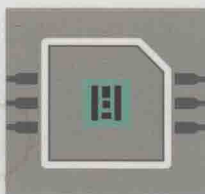


高等教育规划教材

电工电子技术

DIANGONG DIANZI JISHU (第2版)

主 编 董 毅



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

五”普通高等教育规划教材

电工电子技术

(第2版)

主 编 董 毅
副主编 张 文 霍英杰
主 审 吴 宁



广益教育“九斗”
APP 操作说明

北京邮电大学出版社
• 北京 •

内 容 简 介

本教材适用于普通高等学校工科非电类专业的电工电子基础教学,教材中包含电路分析基础、正弦交流电路、三相电路、一阶电路的暂态分析、变压器与三相异步电动机、继电-接触控制系统、二极管及整流电路、晶体管及放大电路、反馈放大电路、集成运算放大电路、组合逻辑电路与时序逻辑电路的教学内容。教学内容覆盖了电工电子系统的主要方面,教材中打*号的内容可以根据具体授课学时进行筛选。

本教材可以作为普通高等学校工科非电类专业的教科书,也可以供其他工科专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术/董毅主编. —2 版. —北京:北京邮电大学出版社,2017.11

ISBN 978-7-5635-5160-6

I. ①电… II. ①董… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM ②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 183713 号

书 名	电工电子技术(第 2 版)
主 编	董 毅
策 划 人	韩 霞
责任编辑	韩 霞
出版发行	北京邮电大学出版社
社 址	北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真	010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址	www.buptpress3.com
电子信箱	ctrd@buptpress.com
经 销	各地新华书店
印 刷	北京泽宇印刷有限公司
开 本	787 mm×1 092 mm 1/16
印 张	23.5
字 数	600 千字
版 次	2017 年 11 月第 2 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5160-6

定价: 54.00 元

如有质量问题请与发行部联系

版权所有 侵权必究

前言

《电工电子技术》是普通高等院校工科非电类专业的电工电子课程教材,教材以教育部高等教育司 1995 年颁布的高等学校工科本科基础课程“电工技术(电工学 I)课程教学基本要求”和“电子技术(电工学 II)课程教学基本要求”作为编写依据。教材编写时,在满足课程教学基本要求的前提下,根据工科非电类专业的特点,有针对性地对课程教学内容进行了编写,在详细讲解电工电子基本理论的基础上,注重电工电子理论的系统性、逻辑性、理论与实践的紧密结合性,注重培养学生通过阅读掌握基本理论的能力,注重培养学生实际动手解决问题的能力。教材在介绍基础理论的同时,强调理论的实际应用,力求处理好电工电子理论的基础性与应用性之间的关系。

由于目前普通高等院校“电工电子技术”课程的授课学时通常在 70~90 学时,所以本教材在保证基本理论教学的基础上,对部分教学内容进行筛选,并重新编排了部分教学内容的顺序。本教材中安排了电路分析、电动机与控制电路、模拟电路和数字电路四个主要模块,全书内容共分为 13 章。

为加强电工电子基础理论教学,本教材第二版在电路分析部分详细介绍了电路的基本概念和基本定律,强调了基础理论的严谨性与系统性,在正弦交流电路中加强了相量运算方法的介绍,在三相电路中强调了工业供电系统的应用,介绍了安全用电的基础知识,删去了二阶电路的分析与非正弦周期电路的内容。在电动机与控制电路部分,重点讲解了变压器、三相异步电动机与继电-接触控制系统,简要介绍了特种电动机和可编程控制器的基础知识。在模拟电路部分,对电子电路的基础知识、放大电路的动态分析、电子电路中的反馈等内容作了详细的介绍。在数字电路部分,删去了分立元件电路,直接介绍集成电路芯片的功能及使用方法、逻辑电路的分析与设计方法,教材中以 * 号标注的内容可以作为课程的选讲内容。

本教材是在第一版以及教学应用的基础上进行了总结和提高,并根据国家教委高等教育司颁布的高等学校工科本科基础课程“电工技术”(电工学 I)和“电子技术”(电工学 II)课程的教学基本要求对教材进行了修订。在修订过程中,教材保持第一版原有的教学特点,保证课程教学要求的足够的信息量,增加了电工技术与电子技术在实际应用方面的内容,使教材能够更好地为课程教学服务。

本教材为“互联网+”立体化教材,书中包括 AR 扫描和二维码。通过广益教育“九斗”APP,扫描带有标的图片,可以进行互动操作学习;扫描二维码,可以查看重要知识点的微课、动画视频以及相关内容的扩展阅读。其中,带有标的二维码是微课和动画视频;带有标的二维码是拓展阅读;带有标的二维码是习题答案。广益教育“九斗”APP 操作说明,请扫描扉页中的二维码查看。

本次教材修订重点做了下述工作。第一,在数字电路部分扩大了教学信息量,增加了对部分逻辑电路工作过程的介绍,增加了逻辑器件逻辑功能转换的分析方法和部分常用逻辑电路的分析与设计,使得数字电路的教学内容更加饱满。第二,在模拟电路部分,增加了反馈放大电路的分析方法和直流放大电路中电路参数的分析与计算方法。第三,增加了教材中的例题和习题量,突出教学内容在应用方面的介绍,并且重新修订各章的概述和小结等内容。第四,在教材中增加了 APP 动画演示、微课视频和扩展阅读。在 APP 演示中,用实物电路对电工电子电路的工作方式和电路参数的测量进行了验证,以方便读者以直观的方式学习、理解教学重点;微课视频帮助学生更好地理解重、难点知识;扩展阅读开阔学生的视野,提高学习本课程的兴趣。

本教材由董毅任主编并负责全书的统稿,参加编写的人员还有张文、霍英杰、郭永新。本教材由西安交通大学吴宁教授主审,吴宁教授以严谨的科学态度和高度负责任的精神,仔细、认真地审阅了书稿,提出了许多宝贵的修改意见,对提高教材的质量起到了很好的作用,谨在此向吴宁教授表示衷心的感谢。

由于科学技术的快速发展和编者的学识能力有限,书中难免有疏漏,部分内容的编排也可能不够妥善,希望使用本书的广大师生、读者积极提出批评和改进意见,以便今后修订提高。

编 者

本书常用符号表

$I(i)$	直流(交流)电流	U_C	晶体管集电极电位
I_S	电流源发出电流、场效应管源极电流	$u_i(u_o)$	放大电路输入(输出)电压瞬时值
I_1	三相电路线电流	$U_1(U_o)$	输入输出电压有效值
I_φ	三相电路相电流	U_{DD}	场效应管电源电压
I_{SC}	二端网络短路电流	U_{th}	增强型场效应管开启电压
I_{DSS}	场效应管漏极饱和电流	U_{off}	耗尽型场效应管夹断电压
I_D	场效应管漏极电流	$U_{DS(BR)}$	场效应管漏-源击穿电压
I_0	电流初始值	u_{id}	差模输入电压
I_F	二极管最大整流电流	u_{ic}	共模输入电压
I_R	二极管反向漏电流	u_+	集成运算放大器同相输入端电位
I_Z	稳压管稳定电流	u_-	集成运算放大器反相输入端电位
I_B	晶体管基极电流	U_{IO}	集成运算放大器输入失调电压
I_C	晶体管集电极电流	U_T	阈值电压
I_E	晶体管发射极电流	U_{OH}	输出高电平
I_{CBO}	晶体管集-基极间反向漏电流	U_{OL}	输出低电平
I_{CEO}	晶体管集-射极间反向漏电流	U_{OFF}	夹断电压
$i_i(i_o)$	放大电路输入(输出)电流瞬时值	U_{ON}	开启电压
$I_i(I_o)$	输入(输出)电流有效值	p	瞬时功率、磁极对数
I_{IO}	集成运放输入失调电流	P	平均功率
$U(u)$	直流(交流)电压	P_{ZM}	稳压管最大耗散功率
$E(e)$	直流(交流)电动势	P_{CM}	晶体管最大耗散功率
U_1	三相电路线电压	Q	无功功率、品质因数
U_φ	三相电路相电压	$\cos \varphi$	功率因数
$U_{0'0}$	三相电路零点漂移电压	S	复功率、脉动系数
U_0	电压初始值、二端网络开路电压	s	视在功率、电容器极板面积
U_j	PN 结电压	S_r	稳压管稳压系数
U_{DRM}	二极管最大反向工作电压	S	开关
U_{BR}	二极管反向击穿电压	SB	按钮开关
U_Z	稳压管稳定电压	SQ	行程开关
U_{CC}	晶体管正电源电压	R	电阻元件、电阻值
U_{EE}	晶体管负电源电压	R_0	二端网络等效入端电阻
U_{BE}	晶体管基-射极电压	r_Z	稳压管动态电阻
U_{CE}	晶体管集-射极电压	R_E	发射极电阻
$U_{CEO(BR)}$	晶体管集-射极反向击穿电压	R_C	晶体管集电极电阻
U_B	晶体管基极电位	R_B	晶体管基极电阻

R_L	放大电路负载电阻	t_{p2}	多谐振荡器的充电时间
R'_L	放大电路等效负载电阻	T_S	变压器
R_f	反馈电阻	β	晶体管共射极电流放大倍数
R_s	信号源内阻	g_m	场效应管低频跨导
R_S	源极电阻	$\dot{A}$	开环放大倍数
R_D	漏极电阻	$\dot{A}_f$	闭环放大倍数
R_G	栅极电阻	$\dot{A}_u$	电压放大倍数
r_i	放大电路等效输入电阻	$\dot{A}_{us}$	考虑信号源内阻的电压放大倍数
r_o	放大电路等效输出电阻	$\dot{A}_{uf}$	闭环电压放大倍数
r_{be}	晶体管等效输入电阻	A_d	差模放大倍数
r_{ce}	晶体管等效输出电阻	A_e	共模放大倍数
R_p	调零电位器	α	稳压管电压温度系数
G	电导元件、电导值	q	电子电量、矩形脉冲信号的占空比
G_{11}	节点 1 的本导	l	导线长度、线圈长度
G_{12}	节点 1、2 之间的互导	μ	介质磁导率
L	电感元件、电感值	K_{CMRR}	共模抑制比
M	互感、计数器的模(计数长度)	KA	继电器
C	电容元件、电容值	KM	接触器
C_j	PN 结电容	KT	时间继电器
C_1, C_2	耦合电容	HA	蜂鸣器
C_E	旁路电容	VD	二极管
C_o	导线分布电容	LED	发光二极管
C_f	反馈电容	VT	晶体管
X	电抗	MOS	绝缘栅型场效应管
X_L	感抗	CMOS	互补绝缘栅型场效应管
X_C	容抗	IC	集成电路
Z	复阻抗	G	逻辑门
z	阻抗	TTL	双极性晶体管逻辑电路
φ	阻抗角	FF	触发器
f	频率	RSFF	RS 触发器
Δf	通频带宽度	JKFF	JK 触发器
f_H	通频带上限截止频率	DFF	D 触发器
f_L	通频带下限截止频率	TFF	T 触发器
f_0	谐振频率	CP	时钟脉冲
$\dot{F}$	反馈系数	N_0	扇出系数
FU	熔断器	N	线圈匝数、集成电路闲置管脚
FR	热继电器	$\downarrow$	时钟脉冲信号的下降沿
ω	角频率	$\uparrow$	时钟脉冲信号的上升沿
t	时间	Q^n	触发器的现态
τ	时间常数	Q^{n+1}	触发器的次态
T	周期、温度	$\overline{LD}$	触发器的预置端
t_p	脉冲宽度	$\overline{S_D}$	触发器置位控制端
t_{pl}	多谐振荡器的放电时间	$\overline{R_D}$	触发器复位控制端

第 1 章 电路的基本概念	1	* 2.2.2 三节点及三节点以上电路	31
1.1 电路与电路图	1	2.3 叠加原理	33
1.2 电路的基本物理量	3	2.4 等效电源定理	35
1.2.1 电流 I	3	2.4.1 二端网络	35
1.2.2 电压	4	2.4.2 戴维南定理	35
1.2.3 电位	5	* 2.4.3 诺顿定理	39
1.2.4 电动势	6	* 2.5 含受控源电路的分析	40
1.2.5 电能与电功率	6	* 2.6 非线性电阻电路	42
1.3 电路元件	7	本章小结	43
1.3.1 电阻与电导	7	习题 2	44
1.3.2 电感元件	8	第 3 章 正弦交流电路	48
1.3.3 电容元件	10	3.1 正弦电压与电流	48
1.3.4 电压源	11	3.1.1 频率与周期	48
1.3.5 电流源	12	3.1.2 幅值与有效值	49
1.3.6 电源的等效互换	12	3.1.3 相位与相位差	50
1.4 电路基本定律	16	3.2 正弦量的相量表示法	51
1.4.1 欧姆定律	16	3.2.1 旋转矢量的建立	51
1.4.2 基尔霍夫定律	18	3.2.2 矢量的复数表示方式	52
1.5 电路的工作状态	20	3.2.3 相量与相量图	53
1.6 元件的串联与并联	21	3.3 R 、 L 、 C 元件正弦交流电路	55
1.6.1 电阻元件的串联与并联	21	3.3.1 R 元件正弦交流电路	55
1.6.2 电感元件的串联与并联	22	3.3.2 L 元件正弦交流电路	56
1.6.3 电容元件的串联与并联	23	3.3.3 C 元件正弦交流电路	57
1.7 电位的计算	24	3.4 RLC 元件串联正弦交流电路	59
本章小结	25	3.4.1 电压三角形	59
习题 1	26	3.4.2 阻抗三角形	60
第 2 章 电路的分析方法	28	3.4.3 功率三角形	62
2.1 支路电流法	28	3.4.4 RLC 并联电路	63
2.2 节点电位法	30	3.4.5 正弦交流电路的分析	63
2.2.1 两节点电路	30	3.5 谐振	65
		3.5.1 串联谐振	66

* 3.5.2 并联谐振	68	6.1.1 铁磁材料的磁特性	108
3.6 功率因数的提高	69	6.1.2 交流铁芯线圈的电-磁关系	108
本章小结	71	6.1.3 交流铁芯线圈的功率损耗	110
习题 3	72	6.1.4 交流铁芯线圈的等效电路	110
第 4 章 三相电路	75	6.2 单相变压器	110
4.1 三相电压	75	6.2.1 变压器的电磁关系	111
4.1.1 三相感应电动势	75	6.2.2 变压器的电压变换	112
4.1.2 三相供电系统	76	6.2.3 变压器的电流变换	112
4.2 三相电路参数的计算	77	6.2.4 变压器的阻抗变换	114
4.2.1 负载星形连接三相电路	77	6.2.5 变压器的外特性	114
* 4.2.2 负载不对称无中线星形连接三相电路	80	6.3 特种变压器	115
4.2.3 负载三角形连接三相电路	81	6.3.1 自耦变压器	115
4.3 三相功率	82	6.3.2 电流互感器	115
* 4.4 安全用电	83	6.4 三相异步电动机的结构与转动原理	116
4.4.1 触电对人体的伤害	84	6.4.1 电动机的结构与转动原理	116
4.4.2 电气设备的接地与接零	84	6.4.2 三相异步电动机的转速与转差率	117
本章小结	86	6.5 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	118
习题 4	86	6.5.1 三相异步电动机的电磁转矩	118
第 5 章 一阶电路的暂态分析	88	6.5.2 三相异步电动机的机械特性	119
5.1 换路定律	88	6.5.3 电动机的稳定工作区与不稳定工作区	119
5.1.1 换路与换路定律	88	6.5.4 转子回路电阻 R_2 与电源电压 U_1 对电动机机械特性的影响	120
5.1.2 C 、 L 元件的特性	89	6.6 三相异步电动机的启动	121
5.1.3 电路参数的初始值	90	6.6.1 三相异步电动机的启动特性	121
5.2 RC 电路的暂态分析	92	6.6.2 鼠笼式电动机的降压启动	122
5.2.1 RC 电路的零输入响应	92	6.6.3 绕线式电动机的串 R_2 启动	123
5.2.2 RC 电路的零状态响应	95		
5.2.3 RC 电路的全响应	96		
5.3 一阶电路的三要素分析方法	98		
5.4 微分电路与积分电路	100		
5.4.1 微分电路	100		
5.4.2 积分电路	101		
* 5.5 RL 电路的暂态分析	102		
本章小结	104		
习题 5	105		
第 6 章 变压器与三相异步电动机	108		
6.1 交流铁芯线圈	108		

6.7 三相异步电动机的调速	124	* 7.5 时间继电器与时间控制	146
6.7.1 鼠笼式电动机的调速	124	7.5.1 时间继电器	146
6.7.2 绕线式电动机的调速	124	7.5.2 时间控制	146
6.8 三相异步电动机的制动	125	* 7.6 可编程控制器简介	148
6.8.1 能耗制动	125	7.6.1 PLC 的结构	148
6.8.2 反接制动	125	7.6.2 PLC 的工作方式	149
6.8.3 发电反馈制动	126	7.6.3 PLC 的应用简介	149
6.9 电动机的铭牌数据	126	本章小结	150
* 6.10 单相异步电动机	128	习题 7	151
6.10.1 单相异步电动机的脉动磁场	128	第 8 章 二极管及整流电路	153
6.10.2 单相异步电动机的启动方式	128	8.1 半导体基础	153
6.10.3 三相异步电动机的缺相运行	129	8.1.1 半导体	153
* 6.11 特种电动机	129	8.1.2 半导体的导电机理	154
6.11.1 同步电动机	129	8.1.3 本征半导体	155
6.11.2 步进电动机	130	8.1.4 杂质半导体	155
6.11.3 伺服电动机	132	8.2 PN 结	156
本章小结	133	8.2.1 阻挡层的形成	156
习题 6	133	8.2.2 PN 结的单向导电特性	157
第 7 章 继电器-接触控制系统	135	8.2.3 PN 结的伏-安特性	159
7.1 常用控制电器	135	8.3 半导体二极管	160
7.1.1 刀闸开关与组合开关	135	8.3.1 二极管的结构与分类	161
7.1.2 按钮开关	135	8.3.2 二极管的伏-安特性	161
7.1.3 接触器与继电器	136	8.3.3 二极管的主要参数	162
7.1.4 热继电器	136	8.3.4 二极管应用电路	163
7.1.5 熔断器	137	* 8.3.5 特种二极管	164
7.1.6 空气断路器	137	8.4 单相整流电路	166
7.2 电动机的单向连续运转控制电路	138	8.4.1 单相半波整流电路	166
7.2.1 电动机的保护	138	8.4.2 单相全波整流电路	168
7.2.2 电动机的主电路与控制电路	139	8.4.3 单相桥式整流电路	169
7.2.3 电动机的顺序控制	141	8.5 滤波电路	171
7.3 电动机的正反转控制电路	142	8.5.1 电容滤波电路	172
7.4 行程开关与行程控制	144	8.5.2 电感滤波电路	174
7.4.1 行程开关	144	* 8.5.3 多级滤波电路	175
7.4.2 行程控制	145	8.6 稳压电路	176
		8.6.1 稳压管稳压电路	176
		* 8.6.2 串联稳压电路	177
		8.6.3 集成稳压器	178
		本章小结	178
		习题 8	179

第9章 晶体管及交流放大电路	183	* 9.9.3 复合管	231
9.1 晶体管	183	* 9.10 场效应管放大电路	232
9.1.1 晶体管的结构	183	9.10.1 绝缘栅型场效应管	232
9.1.2 晶体管的电流放大原理	184	9.10.2 场效应管放大电路	236
9.1.3 晶体管的特性曲线	186	9.11 放大电路的频率特性	238
9.1.4 晶体管的主要参数	189	9.11.1 幅频特性与相频特性	238
9.2 基本放大电路	191	9.11.2 通频带宽度	240
9.2.1 放大电路的组成	191	本章小结	241
9.2.2 放大电路的直流通路与交流通路	193	习题9	242
* 9.3 放大电路的图解分析法	194	第10章 反馈放大电路	247
9.3.1 静态分析	194	10.1 反馈的基本概念	247
9.3.2 动态分析	195	10.2 反馈类型的判别方法	248
9.3.3 非线性失真	199	10.2.1 电压反馈与电流反馈的判别	249
9.4 放大电路的估算分析方法	201	10.2.2 并联反馈、串联反馈的判别	250
9.4.1 静态分析	202	10.2.3 正反馈、负反馈的判别	250
9.4.2 微变等效电路	202	* 10.3 几种类型的负反馈放大电路	251
9.4.3 动态分析	204	10.3.1 电流串联负反馈	251
9.5 静态工作点的稳定	208	10.3.2 电压并联负反馈	253
9.5.1 温度对静态工作点的影响	208	10.4 负反馈对放大电路性能参数的影响	255
9.5.2 分压式偏置放大电路	209	10.5 振荡电路	258
9.6 射极输出器	211	10.5.1 自激振荡的建立	258
9.6.1 静态分析	212	10.5.2 LC振荡电路	259
9.6.2 动态分析	212	10.5.3 RC振荡电路	261
9.7 多级放大电路	215	本章小结	263
9.7.1 多级放大电路的级间耦合方式	216	习题10	263
9.7.2 阻容耦合多级放大电路的分析	217	第11章 集成运算放大电路	268
9.8 差动放大电路	220	11.1 集成运算放大器	268
9.8.1 基本差动放大电路	220	11.1.1 集成运算放大器的电路结构	268
9.8.2 长尾差动放大电路	222	11.1.2 理想集成运算放大器	269
9.8.3 差动放大电路的分析	223	11.1.3 集成运算放大器的电压传输特性	270
9.8.4 共模抑制比 K_{CMRR}	226		
9.9 功率放大电路	228		
9.9.1 功率放大电路的工作状态	228		
9.9.2 互补对称功率放大电路	229		

11.1.4 集成运算放大器的主要参数	271	本章小结	319
11.2 集成运算放大器的信号运算 ...	271	习题 12	319
11.2.1 反相运算电路	271	第 13 章 触发器与时序逻辑电路	324
11.2.2 同相运算电路	274	13.1 双稳态触发器	324
11.2.3 减法器	276	13.1.1 基本 RS 触发器	324
11.2.4 积分与微分运算电路	277	13.1.2 同步 RS 触发器	326
11.3 集成运算放大器的信号处理 ...	279	13.1.3 主从 JK 触发器	328
11.3.1 电压比较器	279	13.1.4 维持阻塞 D 触发器	330
* 11.3.2 滞回比较器	281	13.1.5 T 触发器	330
* 11.3.3 有源滤波器	281	* 13.1.6 触发器逻辑功能的转换	331
* 11.4 集成运算放大器构成的非正弦波形发生器	283	13.2 寄存器	332
11.4.1 矩形波发生电路	283	13.2.1 数码寄存器	333
11.4.2 三角波发生电路	284	13.2.2 移位寄存器	333
本章小结	285	13.3 计数器	334
习题 11	286	13.3.1 二进制计数器	334
第 12 章 门电路与组合逻辑电路	290	13.3.2 十进制计数器	336
12.1 数字信号与数字电路	290	13.3.3 N 进制计数器	337
12.2 基本逻辑关系与逻辑门电路 ...	291	* 13.4 555 定时器及其应用	339
12.2.1 逻辑关系的基本概念	291	13.4.1 555 定时器	339
12.2.2 基本逻辑门电路	291	13.4.2 由 555 定时器构成的应用电路	341
12.2.3 基本逻辑门电路的组合 ...	294	13.5 应用举例	343
12.3 逻辑代数	296	* 13.6 模拟量与数字量的转换	345
12.3.1 逻辑代数的运算法则	296	13.6.1 D/A 转换	345
12.3.2 逻辑函数的表示方式	298	13.6.2 A/D 转换	347
12.3.3 逻辑函数的化简	300	本章小结	348
12.4 组合逻辑电路	305	习题 13	349
12.4.1 组合逻辑电路的分析	305	附录	353
12.4.2 组合逻辑电路的设计	306	附录 A 半导体器件命名方法	353
12.5 常用组合逻辑电路	308	附录 B 部分半导体器件主要参数 ...	354
12.5.1 加法器	308	附录 C 半导体集成器件型号命名与分类	357
12.5.2 编码器	309	附录 D 常用集成芯片管脚图	358
12.5.3 译码器与数字显示电路 ...	311	参考文献	364
12.5.4 数据选择器与多路分配器	315		
12.6 应用举例	317		

第 1 章 电路的基本概念

本章提要

电工电子理论研究的对象是电路,电路的基本概念、电路的分析方法是电工电子理论的基础知识,只有掌握电学理论的基本知识,才能对工程应用电路进行分析与计算。本章重点介绍电路的结构、电路的基本物理量及电路的基本定律,这些内容是电路分析与计算的基础。

1.1 电路与电路图

电路是电工设备的总体,将电路元件按照一定的方式连接起来,使得电流可以在其中流动,也就是说电路是电流的通路。电路的作用有两个:第一,电路能够进行能量的转换,电路可以将发电机或是蓄电池提供的电能传输给用户转换成为其他形式的能量使用,这就是电力系统的工作方式,如工业供电与民用电器的的工作方式;第二,电路能够进行信号的处理及信号的传递,原始信号经传感器采集后输送给电子电路进行信号的转换与处理,处理后的信号通过相应的转换器还原为原始信息,这就是电子系统的工作方式,如收音机与电视机的工作方式。

电路的组成包括三个部分:电源、负载及中间设备。电路中的电源提供用电器所需的电能,常见的电源有发电机与蓄电池;电路中的负载取用电能,即负载将电源送来的电能转换为其他形式的能量,如日光灯、电动机、电炉可以将从电源中取用的电能分别转换为光能、机械能和热能;电路的中间设备是指电路中的连接线、开关及继电器等控制器件,中间设备连接着电路中的电源与负载,中间设备的作用是进行能量的传输与分配。上述三个部分就构成了电路的整体。

如图 1-1 所示为手电筒的等效电路模型,图中的 E 与 R_0 分别表示手电筒中电池的电动势与内阻,即手电筒电路中的电源与电源内阻;图中的导线及开关是中间设备,它控制电池能量的传输与关断;图中的灯泡 R 是负载,在开关闭合电路接通后,灯泡可以将电源提供的电能转换为光能。图 1-1 所示电路中画出了电源、开关

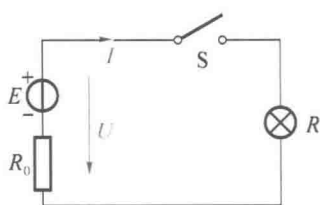


图 1-1 手电筒的等效电路模型

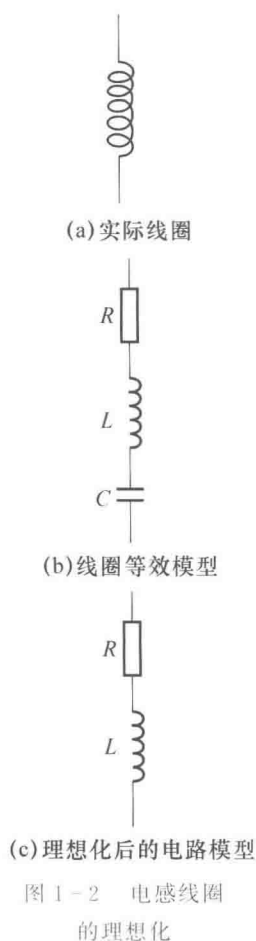


图 1-3 导线连接的表示方式

与负载的电路符号,这些符号代表着电路中出现的不同类型元件,这些符号所表示的电路元件均为理想元件,理想元件是指仅包含一种电参数的元件。

电路的实际元件与理想元件不一样,在实际元件中,由于元件的制造工艺使得制成后的实际元件在电路使用时会出现多种等效电参数,如果进行电路分析时,一个元件具有多种电参数,电路的分析与计算就不容易进行了。所以,当需要将实际元件转换为电路图中的电路符号时,要首先将实际元件理想化。所谓元件的理想化是指:保留元件的主要电特性,而将元件中对电路分析影响很小的次要特性忽略不计,并将元件的主要特性由单一参数元件来表示。例如,图 1-2(a) 画出了一个实际的电感线圈,这样一个线圈是用导线绕制而成的,其目的是为了获得足够的电感量,但是绕制线圈的导线是有电阻的,密绕线圈的每匝之间也存在着等效电容,所以一个实际的电感线圈具有三种不同的电路参数:线圈电感 L 、线圈内阻 R 及线圈的匝间电容 C ,如图 1-2(b) 所示。

在将一个实际电感线圈理想化时,应当保留电感线圈的主要特性电感量,当线圈的匝数比较多,线圈内阻 R 的数值较大不能忽略时,内阻 R 也应当保留,并且在电路作图时将线圈内阻 R 用理想电阻元件表示,而线圈的匝间电容 C 是一个很微小的参数,在进行工程电路分析时,匝间电容对电路的影响很小,可以忽略不计。图 1-2(c) 画出了一个实际电感线圈理想化后由理想元件构成的电路模型,其中 R 代表线圈的内阻, L 代表线圈的电感。

由理想电路元件连接成的平面或立体图形称为电路图,电路图中包含构成电路的三个要素,即电源、负载及导线,出现在电路图中的所有电路元件均使用规定的电路符号来表示,如图 1-1 中的电阻 R 和电压源 E 。电路图上的导线连接有两种表示方式:第一种表示方式如图 1-3(a) 所示,两线相交并在交点处标出黑点,表示两条导线在交点处连接在一起,两线相交而又没有标出黑点,表示这两条导线在交点处是跨接状态,这种表示方式常见于印刷符号;第二种表示方式如图 1-3(b) 所示,如果两条导线在交点处是跨接状态,则使用跨接符号来表示,两线相交而又没有画出跨接符号,表示在交点处两条导线连接在一起,这种表示方式常见于手写符号。

电路图中有一些电路分析的专用名词。首先,无分支的一段电路称为支路,在支路中多个元件顺序相连,每个元件中流过的电流数值相同,如图 1-2(b) 所示。若支路中连接有电源元件,该支路就称为含源支路,若支路连接的元件中没有电源,则称为无源支路。其次,三条或三条以上支路的连接点称为节点,各个支路流过的电流在节点处要重新分配。第三,由几条支路构成的闭合通路称为回路,从电路中的某一点出发,沿几条支路绕行一周能够回到出发

点,就构成了一个回路,构成回路时可以使用多个支路。在回路绕行的路径中,每次加入一条新的支路,这样的回路称为电路中的独立回路。第四,中间不包含其他支路的回路称为网孔,网孔是具有特殊要求的回路,在网孔中一定没有其他支路从中间穿过,同时网孔数也就是独立回路数。建立了这些基本概念后,就可以正确地解读电路图了。

例 1-1 电路如图 1-4 所示,判断电路中的支路数、节点数、回路数及网孔数。

解 按照支路、节点、网孔的定义,确定电路图有 6 条支路、4 个节点、3 个网孔。3 个网孔均是回路,网孔 1 与网孔 2 构成第 4 个回路,网孔 1 与网孔 3 构成第 5 个回路,网孔 2 与网孔 3 构成第 6 个回路,第 7 个回路是由电路的外围支路构成的大回路。由此可见,电路中的网孔数容易确定,但电路中的回路数不容易确定。

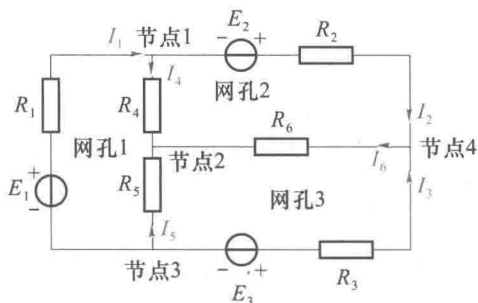


图 1-4 例 1-1 电路

1.2 电路的基本物理量

电路分析的对象是电路的基本物理量,电路的基本物理量是电路中要求解的主要参数,了解了电路基本物理量的定义,就可以应用于工程电路的分析。

1.2.1 电流 I

电流的定义:单位时间内通过导体截面的电量,电流的表示字母为 $I(i)$,根据电流的定义,可以写出电流的定义式:

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad I = \frac{Q}{t}$$

按照工程电学理论的规定,电路中电参量的表示字母有大、小写之分,大写字母表示电路中电参量的数值与时间无关,电参量的数值是恒定数值,不随时间的变化而变;小写字母表示电路中电参量的数值与时间有关,电参量的数值随时间的变化而变。根据上述规定,当电流的数值与时间变化没有关系,是恒定量时,使用大写

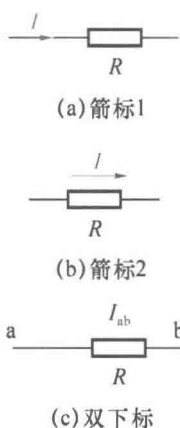


图 1-5 电流参考方向的标注方法

字母 I 表示,这就是直流参数的表示方式;当电流的数值随时间的变化而变化时,就使用小写字母 i 表示,这就是交流参数的表示方式。

电流的方向规定为正电荷移动的方向,但是在大多数情况下电路中电流的实际方向是未知的,而且也很难判定。在电路分析中实际使用的是电流的参考方向,参考方向是指假设的电参量的正方向。引入了参考方向的概念后,电路的物理量就从算术量扩展成为代数量,电路运算后电参数的数值都将有正数与负数之分,如果电路运算后得到的电流数值大于零,是正数,表示电流的实际方向与假设的参考方向一致;如果电路运算后得到的电流数值小于零,是负数,则表示电流的实际方向与假设的参考方向相反。

在进行电路分析时,应当将电路物理量的参考方向标注在电路图中。电流参考方向的标注有两种方式,箭标表示法与双下标表示法。图 1-5(a)、(b) 是箭标表示法,表示电流参考方向的箭头可以标在该支路的导线上,也可以标在元件旁。图 1-5(c) 的标注方法是双下标表示法,使用双下标表示法时,应在电路图相应的位置上标出字母,同时在电流的表示字母 I 旁加注下标,电流的参考方向即为下标中前一个字母指向后一个字母的方向。在使用双下标表示法时应注意,如果改换了电流下标字母的顺序,即表示改换了电流的参考方向,有关系式:

$$I_{ab} = -I_{ba}$$

电流的单位是 A(安培),常用的单位有 mA(毫安)、 μ A(微安)、nA(纳安),其换算关系为

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

1.2.2 电压

电压的定义:电场力在外电路把单位正电荷从一点移到另一点所做的功,电压的表示字母为 $U(u)$ 。由于电场力在外电路沿路径 l 所做的功 w 为

$$w = \int_l \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = \int_l q\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = q \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

所以该段路径电压 u_l 的定义式为

$$u_l = \frac{w}{q} = \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

电压的方向规定为电场力做功的方向,同电流一样,在进行电路分析时,标注在电路图中的电压方向也是参考方向。电压参考方向的标注方法有三种,箭标表示法、双下标表示法与正、负号表示法,图 1-6(a) 是箭标表示法,表示电压参考方向的箭头应标注在元件的旁边,图 1-6(b)、(c) 分别是电压参考方向的正、负号表示法与双下标表示法。确定了电压的参考方向后,电压就由算术量扩

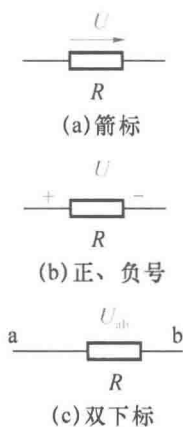


图 1-6 电压参考方向的标注方法

展成为代数量,当某个元件上的电压数值大于零时,表示该元件电压的实际方向与参考方向一致;当元件上的电压数值小于零时,则表示该元件电压的实际方向与参考方向相反。

当电流与电压均扩展成为代数量后,电路运算的结果中将会出现负号,这个负号表示电路中电压或电流的实际方向与参考方向不一致。为了使电路运算结果中出现的负号不要太多,在实际的电路分析时经常采用关联参考方向标注法。关联参考方向标注是指在电路图中标注电压与电流的参考方向时遵循下述原则:负载元件的电压与电流标同方向,电源元件的电压与电流标反方向,采用关联参考方向标注法可以使电路运算中出现的负号比较少。

电压的单位是 V(伏特),常用的单位有 kV(千伏特)、mV(毫伏特),其换算关系为

$$1 \text{ kV} = 1 \times 10^3 \text{ V} = 1 \times 10^6 \text{ mV}$$

1.2.3 电位

电位的定义:电路中任意一点到电位参考点之间的电压。按照电位的定义,电位是具有特殊条件的电压。在计算电路中某点的电位前,应先确定电路中的电位参考点,规定电位参考点的电位数值是零,所以电位参考点也称为零电位点,电路中的电位参考点用接地符号“ $\perp$ ”来标注。

由于电位就是电路中某点到电位参考点之间的电压,所以电位的表示字母与电压一样,也为 $U(u)$,与电压不同的是电位采用单下标表示方法,按照电位的定义,电路中 A 点电位的定义式为

$$u_A = \int_A^0 \boldsymbol{\varepsilon} \cdot d\boldsymbol{l}$$

在电路分析时,若电路中某点的电位数值大于零,表示该点电位的参考方向与实际方向一致,该点的电位高于电位参考点的电位;若该点的电位数值小于零,则表示该点电位的参考方向与实际方向不一致,该点的电位低于电位参考点的电位。电路中某点电位的数值与电位参考点的位置设定有很大的关系,当电位参考点设定的位置不同时,该点的电位数值就不同,只有当电位参考点的位置确定后,电路中各点电位的数值才是唯一的,这个特性称为电位的多值性。

建立了电位的概念后,电路中两点之间的电压可以表示为两点之间的电位差,也就是说,电路中 A、B 两点之间电压的表示式 u_{AB} 可以转换为

$$\begin{aligned} u_{AB} &= \int_A^B \boldsymbol{\varepsilon} \cdot d\boldsymbol{l} = \int_A^0 \boldsymbol{\varepsilon} \cdot d\boldsymbol{l} + \int_0^B \boldsymbol{\varepsilon} \cdot d\boldsymbol{l} = \int_A^0 \boldsymbol{\varepsilon} \cdot d\boldsymbol{l} - \int_B^0 \boldsymbol{\varepsilon} \cdot d\boldsymbol{l} \\ &= u_A - u_B \end{aligned}$$

电位的单位与电压的单位相同,也是 V(伏特)。