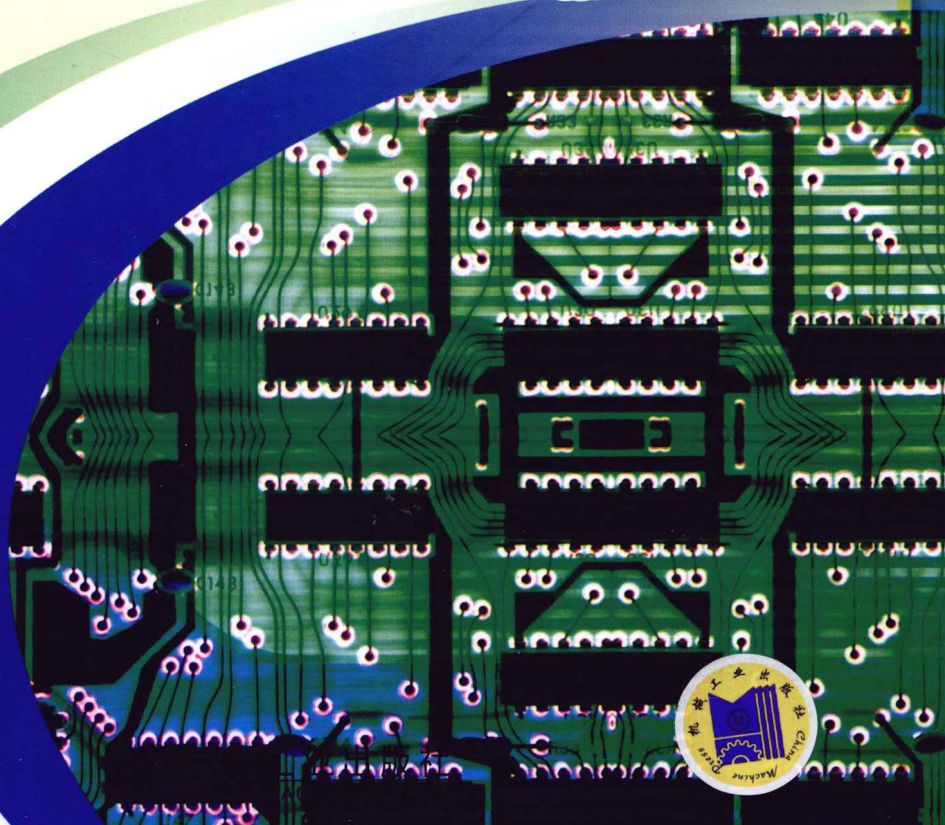


普通高等教育规划教材

电工与电子技术

主 编 焦 阳

副主编 马献果 刘红伟



本书是根据教育部高等院校电子基础课程教学指导分委员会最新制定的“电工学（电工技术、电子技术）课程教学基本要求”，并参照编者主编的《电工电子技术》和《电子技术（电工学Ⅱ）》两部教材，在系统地总结作者多年教改和教学经验的基础上编写的。

全书分电工技术和电子技术两篇，共14章。其内容为：电路及其分析方法、交流电路、变压器、电动机、电动机的控制系统、工业企业供电与安全用电、半导体器件基础、放大电路基础、集成运算放大器、直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、数-模与模-数转换，Multisim10.1简介。部分章节穿插有例题，各章有适当数量的习题，并附有答案。

本书内容简明扼要，深浅适度，重点突出，联系实际，并有一定的知识面。本书可作为高等院校非电类专业本科的电工学课程教材，也可供其他读者阅读。

图书在版编目（CIP）数据

电工与电子技术/焦阳主编. —北京：机械工业出版社，2011.12

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-36337-8

I. ①电… II. ①焦… 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（2011）第226072号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：王雅新 责任编辑：王雅新

版式设计：霍永明 责任校对：肖琳

封面设计：鞠杨 责任印制：杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2012年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22印张·598千字

标准书号：ISBN 978-7-111-36337-8

定价：35.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的“电工学（电工技术、电子技术）课程教学基本要求”编写的，可作为高等院校非电类专业本科电工学课程的基本教材。

电工学是研究电工技术和电子技术的理论和应用的技术基础课。为了适应非电类专业对电工学课程的教学要求，课程教材应力求涉及面广、内容精练、知识新颖，以克服学时少、内容多的矛盾。本书对教材内容进行了提炼，从系统的角度对基本理论进行阐述，重视外部特性的研究，力求结构化、积木式，以便于选用，扩大了对不同专业的覆盖面。本书还突出了思维方法的训练，注重应用研究，以利于培养学生分析和解决实际问题的能力。

本书主要有以下特点：

第一，对于电工电子技术基础理论部分，本着少而精的原则，力求概念准确、清楚，阐述简明扼要；定理推导从简，突出分析方法和应用。

第二，减少了模拟电子技术内容，加强了数字电子技术内容。例如，大大删减了分立元器件组成放大器的定量计算，重点介绍放大器的基本概念和性能指标；增加了由中规模集成电路构成的组合逻辑电路的分析与设计等内容。

第三，在大部分章节的最后都介绍了与该章内容相关的典型实例，将电工电子技术应用到工业生产和日常生活中，有利于激发学生学习该课程的兴趣和积极性，并能解决一些实际问题。

第四，作者皆为从事该课程教学的一线教师，具有丰富的教学经验，将多年教学经验融入教材编写中，使教材内容更贴近课程教学。

本书由河北科技大学信息科学与工程学院教师编写，全书共14章，具体编写分工如下：第1、4章由朱玉冉编写；第2、5章由马献果编写；第3、8、13章由刘红伟编写；第7、9章由周芬萍编写；第10章、第11章11.1~11.3节、第14章及附录由张敏编写；第6章、第11章11.4~11.8节、第12章由焦阳编写，全书由焦阳统稿。标“*”号的章节为选学内容。

本书由郭立炜教授主审，在审阅过程中，郭教授对本书提出了许多宝贵意见和建议。本书在编写过程中，得到赵桂英、孙玉杰、齐宝林、郝战存、赵玲玲、段辉娟、王彦朋、张会莉等同行的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，殷切希望使用本书的师生以及其他读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

上篇 电工技术

第1章 电路及其分析方法 2

1.1 电路的基本物理量 2

1.1.1 电路与电路模型 2

1.1.2 电流与电压及其参考方向 3

1.1.3 电功率 4

1.2 电路元件 5

1.2.1 电阻元件 5

1.2.2 电感元件 6

1.2.3 电容元件 7

1.2.4 电源元件 8

1.2.5 两种电源模型的等效互换 10

1.3 基尔霍夫定律 11

1.3.1 基尔霍夫电流定律 11

1.3.2 基尔霍夫电压定律 12

1.4 电路中电位的计算 13

1.5 电路的两种基本分析方法 13

1.5.1 支路电流法 13

1.5.2 节点电压法 15

1.6 线性电路的两个重要定理 16

1.6.1 叠加定理 16

1.6.2 戴维南定理 18

1.7 电路的暂态分析 20

1.7.1 换路定律及初始值计算 20

1.7.2 一阶电路的暂态分析 21

1.7.3 微分电路和积分电路 25

本章小结 26

习题 27

第2章 交流电路 32

2.1 正弦量的概念 32

2.1.1 正弦量的三要素 32

2.1.2 正弦量的有效值 33

2.1.3 相位差 34

2.2 正弦量的相量表示法 35

2.2.1 正弦量与旋转矢量的关系 35

2.2.2 正弦量的相量表示方法 36

2.3 电路定律及单一参数的正弦交流电路 37

2.3.1 基尔霍夫定律的相量形式 38

2.3.2 单一参数的正弦交流电路 38

2.3.3 阻抗的概念及相量形式的欧姆定律 41

2.4 RLC 串联交流电路的分析 42

2.5 阻抗的串联与并联 44

2.5.1 阻抗的串联电路 44

2.5.2 阻抗的并联电路 45

*2.6 复杂正弦交流电路的分析 45

2.7 交流电路的功率及功率因数的提高 47

2.7.1 功率 47

2.7.2 功率因数的提高 49

2.8 交流电路中的谐振 51

2.8.1 串联谐振 51

2.8.2 并联谐振 54

2.9 三相电路 54

2.9.1 三相电源 55

2.9.2 三相负载的连接 56

*2.10 非正弦周期电压与电流 59

2.10.1 非正弦周期信号分解为傅里叶级数 60

2.10.2 非正弦周期量的有效值 61

2.10.3 非正弦周期电流电路的平均功率 62

2.10.4 非正弦周期电流电路的计算 63

本章小结 63

习题 65

第3章 变压器 69

3.1 变压器的基本结构与工作

原理	69	本章小结	101
3.1.1 变压器的基本结构	69	习题	102
3.1.2 变压器的工作原理	70	第5章 电动机的控制系统	103
3.2 变压器的外特性、效率与 极性	73	5.1 常用低压电器	103
3.2.1 变压器的外特性	73	5.1.1 刀开关和熔断器	103
3.2.2 变压器的损耗与效率	74	5.1.2 组合开关	104
3.2.3 变压器绕组的极性及其测定	74	5.1.3 按钮	104
3.3 其他类型的变压器	75	5.1.4 行程开关	105
3.3.1 三相变压器	75	5.1.5 交流接触器	105
3.3.2 特种变压器	76	5.1.6 继电器	107
本章小结	78	5.1.7 低压断路器	108
习题	78	5.2 电动机继电接触控制的基本 电路	109
第4章 电动机	80	5.2.1 电气控制原理图的绘制与读图 方法	109
4.1 三相异步电动机的结构	80	5.2.2 三相异步电动机继电接触控制 的基本电路	109
4.1.1 定子	80	*5.3 电动机继电接触控制应用 举例	113
4.1.2 转子	80	5.3.1 笼型三相异步电动机的Y- Δ 减压起动控制电路	113
4.2 三相异步电动机的工作原理	81	5.3.2 加热炉自动上料控制电路	114
4.2.1 旋转磁场	81	5.4 可编程序控制器	115
4.2.2 工作原理	84	5.4.1 PLC的基本结构	115
4.3 三相异步电动机的电磁转矩和 机械特性	85	5.4.2 PLC的基本工作过程	116
4.3.1 电磁转矩	85	5.4.3 PLC的主要性能指标	116
4.3.2 机械特性	86	5.4.4 PLC的编程语言	117
4.4 三相电动机的铭牌	87	5.4.5 PLC的指令系统	120
4.5 三相异步电动机的使用	89	5.4.6 PLC应用举例	122
4.5.1 起动	89	本章小结	124
4.5.2 调速	90	习题	125
4.5.3 制动	91	第6章 工业企业供电与安全用电	126
4.6 单相异步电动机	92	6.1 电力系统	126
4.6.1 电容分相式异步电动机	92	6.1.1 电力系统的组成	126
4.6.2 单相罩极式异步电动机	93	6.1.2 电力系统的基本参量	128
4.6.3 单相异步电动机应用实例	93	6.1.3 电力系统的电压	128
*4.7 直流电动机	94	6.2 工业企业供配电	129
4.7.1 基本结构及励磁方式	94	6.2.1 工业企业供配电系统的组成	129
4.7.2 工作原理及运行分析	95	6.2.2 低压配电线路	130
4.7.3 起动和调速	96	6.3 安全用电	131
*4.8 控制电动机	98		
4.8.1 伺服电动机	98		
4.8.2 步进电动机	100		

6.3.1 电流对人体的伤害	131	8.2 单管共发射极放大电路	162
6.3.2 触电的形式	132	8.2.1 电路组成	163
6.3.3 接地和接零	134	8.2.2 工作分析	163
6.3.4 低压配电系统的接地形式	136	8.2.3 放大电路静态工作点的稳定	167
本章小结	138	8.3 射极输出器	169
下篇 电子技术			
第7章 半导体器件基础	140	8.3.1 电路组成	169
7.1 半导体的基础知识	140	8.3.2 工作分析	170
7.1.1 半导体的导电特性	140	8.4 多级放大电路	171
7.1.2 PN结	141	8.4.1 耦合方式	172
7.2 半导体二极管	143	8.4.2 工作分析	174
7.2.1 基本结构	143	8.5 差动放大电路	174
7.2.2 伏安特性	144	8.5.1 电路组成	175
7.2.3 主要参数	144	8.5.2 工作分析	175
7.2.4 应用举例	145	8.5.3 典型的差动放大电路	176
7.3 稳压管	146	8.5.4 恒流源差动放大电路	176
7.3.1 伏安特性	146	8.6 功率放大电路	177
7.3.2 主要参数	147	8.6.1 功率放大电路的特点和工作 状态	177
7.4 晶体管	148	8.6.2 乙类互补对称功率放大电路	178
7.4.1 基本结构	148	8.6.3 甲乙类互补对称功率放大 电路	179
7.4.2 工作原理	148	本章小结	179
7.4.3 特性曲线	150	习题	180
7.4.4 主要参数	151	第9章 集成运算放大器	181
7.5 场效应晶体管	152	9.1 集成运算放大器简介	181
7.5.1 结构与工作原理	152	9.1.1 基本组成	181
7.5.2 特性曲线	154	9.1.2 主要参数	182
7.5.3 主要参数	155	9.1.3 电压传输特性	183
7.5.4 场效应晶体管与晶体管的比较及 使用的注意事项	156	9.1.4 理想运算放大器	183
7.6 半导体光电器件	157	9.2 放大电路中的反馈	184
7.6.1 发光二极管	157	9.2.1 反馈的基本概念	184
7.6.2 光敏二极管	157	9.2.2 正反馈与负反馈的判断	185
7.6.3 光敏晶体管	158	9.2.3 负反馈的类型	185
本章小结	158	9.2.4 负反馈对放大电路性能的 影响	188
习题	159	9.3 集成运算放大器在信号运算方面 的应用	190
第8章 放大电路基础	161	9.3.1 比例运算电路	190
8.1 放大电路概述	161	9.3.2 加法运算电路	192
8.1.1 放大的概念	161	9.3.3 减法运算电路	192
8.1.2 放大电路的主要性能指标	161	9.3.4 积分运算电路	193

9.3.5 微分运算电路	194	11.1.2 数字信号	236
9.4 集成运算放大器在信号处理方面 的应用	195	11.1.3 数字电路	236
9.4.1 电压比较器	195	11.2 分立元器件门电路	237
9.4.2 有源滤波器	197	11.2.1 二极管与门电路	237
9.4.3 仪用放大器	199	11.2.2 二极管或门电路	238
*9.5 集成运算放大器在波形产生方面 的应用	200	11.2.3 晶体管非门电路	239
9.5.1 RC 正弦波振荡电路	201	11.3 集成门电路	240
9.5.2 矩形波发生器	202	11.3.1 TTL 与非门电路	240
9.5.3 三角波发生器	203	11.3.2 CMOS 或非门电路	243
*9.6 集成运算放大器在使用时的注意 事项	204	11.3.3 其他逻辑功能的门电路	244
9.6.1 合理选用集成运算放大器 型号	204	11.4 逻辑代数	246
9.6.2 消振和调零	204	11.4.1 逻辑代数的运算规则和常用 公式	247
9.6.3 保护	204	11.4.2 逻辑函数的表示方法	248
本章小结	205	11.4.3 逻辑函数的化简	252
习题	205	11.5 组合逻辑电路的分析与 设计	255
第10章 直流稳压电源	211	11.5.1 组合逻辑电路的分析	255
10.1 整流电路	211	11.5.2 组合逻辑电路的设计	256
10.1.1 单相半波整流电路	211	11.6 常用的组合逻辑电路	257
10.1.2 单相桥式整流电路	213	11.6.1 加法器	257
10.2 滤波电路	215	11.6.2 编码器	259
10.2.1 电容滤波电路	215	11.6.3 译码器和数字显示器	261
10.2.2 电感电容滤波电路	217	*11.7 半导体存储器及可编程逻辑 器件	266
10.2.3 π 形滤波电路	218	11.7.1 半导体存储器	266
10.3 稳压电路	218	11.7.2 可编程逻辑器件	270
10.3.1 稳压管稳压电路	218	*11.8 应用举例	274
10.3.2 串联型稳压电路	220	11.8.1 电子密码锁电路	274
10.3.3 集成稳压电路	221	11.8.2 交通信号灯故障检测电路	275
*10.3.4 开关型稳压电源	223	11.8.3 故障报警电路	276
*10.4 晶闸管和可控整流电路	225	本章小结	277
10.4.1 晶闸管	225	习题	277
10.4.2 可控整流电路	228	第12章 触发器与时序逻辑电路	280
本章小结	230	12.1 触发器	280
习题	230	12.1.1 RS 触发器	280
第11章 门电路与组合逻辑电路	233	12.1.2 JK 触发器	283
11.1 数字电路概述	233	12.1.3 D 触发器	285
11.1.1 数制	233	12.1.4 T 触发器和 T' 触发器	287
		12.2 寄存器	287

12.2.1 数码寄存器	288	指标	316
12.2.2 移位寄存器	288	本章小结	316
12.3 计数器	290	习题	316
12.3.1 二进制加法计数器	291	第14章 Multisim10.1 简介	317
12.3.2 十进制加法计数器	296	14.1 基本界面	317
12.3.3 任意进制计数器	297	14.2 元器件库	319
12.4 555 定时器及其应用	299	14.3 虚拟仪器仪表	320
12.4.1 555 定时器	299	14.4 仿真分析方法	323
12.4.2 555 定时器的典型应用	300	14.5 基本操作方法	324
* 12.5 应用举例	303	14.6 仿真实验范例	328
12.5.1 冲床保安电路	303	本章小结	330
12.5.2 四人抢答器	303	附录	331
12.5.3 数字显示电子钟	304	附录 A 部分 Y 系列 (IP44 封闭式)	
本章小结	304	三相异步电动机技术	
习题	305	数据	331
第13章 数-模与模-数转换	308	附录 B 国产半导体分立器件型号	
13.1 概述	308	命名法	332
13.2 数-模转换器	309	附录 C 部分半导体器件的型号和	
13.2.1 倒 T 形电阻网络数-模		参数	333
转换器	309	附录 D 国产模拟集成电路的命名	
13.2.2 数-模转换器的主要技术		方法	335
指标	311	附录 E 部分模拟集成电路的主要	
13.3 模-数转换器	311	参数	336
13.3.1 模-数转换的一般步骤和		附录 F 格雷码对照表	336
采样定理	311	部分习题答案	337
13.3.2 逐次渐近型模-数转换器	313	参考文献	341
13.3.3 模-数转换器的主要技术			

上 篇

电 工 技 术

第1章 电路及其分析方法

本章主要介绍电路的基本物理量、基尔霍夫定律、电路元件、电路的两种基本分析方法和两个重要定理，最后是电路的暂态分析。这些概念、分析方法和定理不仅适用于直流电路，也适用于交流电路及其他线性电路，因此本章内容是后续章节的重要基础。

1.1 电路的基本物理量

1.1.1 电路与电路模型

1. 电路的组成和作用

电路是电流的通路，由一些电气设备和元器件按一定方式连接而成。在现代生活和生产实践中，功能不同的电路种类繁多，但结构上都可看作由三部分组成，即电源、负载和中间环节。电源是提供电能的装置，可以将其他形式的能量转换成电能，如电池把化学能转换为电能、发电机把机械能转换为电能等；负载是取用电能的装置，将电能转换为其他形式的能量，如电炉将电能转换为热能、灯泡将电能转换为光能、电动机将电能转换为机械能等；中间环节是连接电源和负载的部分，还有控制和保护电路等作用，如导线、开关、变压器、熔断器等均属于中间环节。

根据实际电路的作用，可以将其划分为两大类。其中一类为电力电路，主要实现电能的产生、传输和转换，如发电、供电系统、电力拖动、电气照明等。另一类为电子电路，主要实现信号的传递和处理，如各种电信号的产生、放大、整形，数字信号的运算、存储等。

2. 电路模型

实际电路常应用的电气设备或元器件，如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管，以及电阻、电感和电容器等，它们的电磁特性较为复杂。例如，当电池与白炽灯连接的电路通有电流时，不仅会消耗电能，有电阻性质，还会产生磁场，具有电感性质，若导线之间存在分布电容，还具有电容性质。各种性质交织在一起，其表现程度也不相同。

分析实际电路时，为了避免将问题复杂化，在工程设计允许的情况下，可以忽略次要因素，突出主要电磁特性，将实际元件理想化和近似化，用足以表征其主要特性的单一理想电路元件或其组合来代替。理想电路元件有电阻元件、电感元件、电容元件、电流源和电压源等，其电路图形及文字符号如图 1.1.1 所示。

由理想电路元件构建成的电路，称为实际电路的电路模型。本书涉及的电路皆为电路模型，简称电路；同时把理想电路元件简称为电路元件。图 1.1.2a 是一个简单的手电筒电路，其电路模型如图 1.1.2b 所示。图中，电阻元件 R_L 表示灯泡，考虑电池的内阻，用理想电压源 U_S 和理想电阻 R_0 的串联组合来表示电池。

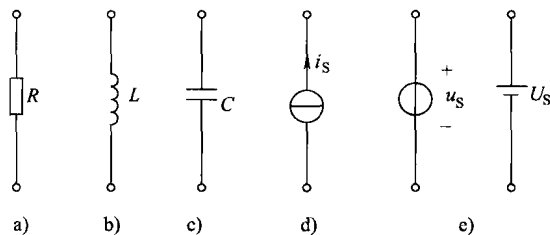


图 1.1.1 理想电路元件图形及文字符号

a) 电阻元件 b) 电感元件 c) 电容元件
d) 电流源 e) 电压源

1.1.2 电流与电压及其参考方向

1. 电流

电流的大小是单位时间内通过导体横截面的电荷量, 即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

国际单位制中, 电流的单位为 A (安培)。常用单位还有 mA 和 μA 。

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流的实际方向。有些电路容易判断出电流的实际方向, 对于复杂电路就不容易判断。为了分析电路方便, 引入了参考方向 (或称正方向) 的概念, 电流参考方向是任意选定的。参考方向一旦选定, 电流就成为代数量了。若电流的实际方向和所选的参考方向一致, 则此电流为正值; 若实际方向与参考方向相反, 则电流为负值。

电路图上常用箭头标注电流的参考方向。有时也用双下标标注, 例如, i_{ab} 表示参考方向是由 a 到 b。

若电流的大小和方向不随时间变化, 则这种电流叫做恒定电流, 简称直流 (常用 dc 或 DC 表示), 用大写字母 I 表示, 对应的电路为直流电路。若电流的大小和方向都随时间周期性变化, 则称为交变电流, 简称交流 (常用 ac 或 AC 表示), 用小写字母 i 表示, 对应的电路为交流电路。如图 1.1.3 所示, 方框表示某电路元件, 流过元件的电流为 2A, 由 a 流向 b。图 1.1.3a 中 $I_1 = 2\text{A}$, 因为 I_1 的参考方向与实际方向一致, 图 1.1.3b 中 $I_2 = -2\text{A}$, 因为 I_2 的参考方向与实际方向相反。



图 1.1.3 电流的参考方向

a) $I_1 = 2\text{A}$ b) $I_2 = -2\text{A}$

2. 电压

电压是对电路中两点而言的, a、b 两点间的电压为电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功, 即

$$u = \frac{dw}{dq}$$

国际单位制中, 电压的单位是 V (伏特)。常用单位还有 mV、kV 等。

习惯上规定电压的实际方向是从高电位指向低电位, 即电位下降的方向, 电压表示两点之间的电位差。电压的参考方向也是任意选定的, 当实际方向与参考方向一致时, 电压为正值, 当实际方向与参考方向相反时, 电压为负值。

直流电路中电压用大写字母 U 表示, 交流电路中电压用小写字母 u 表示。

在电路图中电压的参考方向可以用箭头来表示, 也可以用 “+” 和 “-” 极性来表示, 如图 1.1.4 所示, 表示元件电压参考方向为高电位 a 指向低电位 b。电压参考方向还可以用双下标表示, 如 U_{ab} 表示电压参考方向是由 a 指向 b。 $U_{ab} = 2\text{V}$ 时, 说明电压实际方向与参考方向相同, a 点电位高于 b 点电位。

电路图上所标出的电压或电流的方向都是参考方向。当同一电路元件或支路上的电压和电流的参考方向选取的一致时, 称为关联参考方向。否则称为非关联参考方向。当采用关联参考方

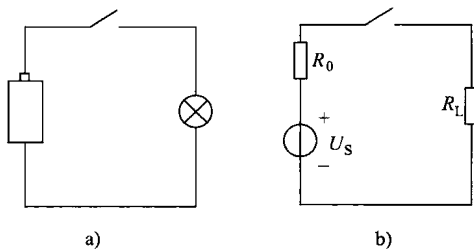


图 1.1.2 手电筒电路及其电路模型

a) 手电筒电路 b) 手电筒电路模型

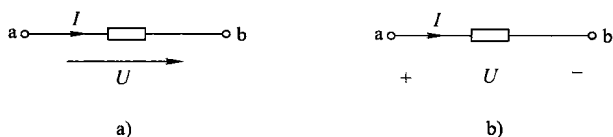


图 1.1.4 电压的参考方向

a) 用箭头表示 U 的参考方向 b) 用极性表示 U 的参考方向

向时, 在电路元件或支路上只标出电压 (或电流) 一个参考方向就可以了。图 1.1.4 所示元件上电压与电流的方向即为关联参考方向。

电源的电动势 E 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的负极经电源内部移动到电源正极所做的功。电动势 E 的实际方向规定为电源负极指向电源正极, 即电位上升的方向。电动势的实际方向与电压的实际方向相反。电动势的参考方向是任意选定电位上升的方向。

电动势的单位也是 V (伏特)。

1.1.3 电功率

电路中的电路元件在单位时间内发出或吸收的电能为电功率, 简称功率, 用 p 表示。功率单位为 W (瓦特)。即

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1.1.1)$$

如果某一电路元件上的电压 u 和电流 i 采用关联参考方向: $p = ui$ 表示元件吸收功率, $p > 0$ 时表示元件确实吸收功率, 作为负载使用; $p < 0$ 时表示元件发出功率, 作为电源使用。相反的, 如果元件上电压 u 和电流 i 采用非关联参考方向: $p = ui$ 表示元件发出功率, $p > 0$ 时表示元件确实发出功率, 作为电源使用; $p < 0$ 时表示元件吸收功率, 作为负载使用。

元件吸收或发出功率是相对的, 若一个元件吸收功率 100W, 也可以认为它发出功率 -100W, 说法是一致的。

例 1.1.1 如图 1.1.5 所示电路, 五个元件代表电源或负载。通过测量可知: $I_1 = -4A$, $I_2 = 6A$, $I_3 = 10A$, $U_1 = 140V$, $U_2 = -90V$, $U_3 = 60V$, $U_4 = -80V$, $U_5 = 30V$ 。

(1) 试指出各电压和电流的实际方向;

(2) 计算各元件的功率并判断元件是电源还是负载。

解 (1) 电压实际方向: U_1 向下, U_2 向上, U_3 向上, U_4 向右, U_5 向左。

电流实际方向: I_1 向上, I_2 向下, I_3 向上。

(2) 图中五个电路元件上的电压和电流都是关联参考方向。

元件 1: $P_1 = U_1 I_1 = 140 \times (-4)W = -560W$, 发出功率 560W, 是电源;

元件 2: $P_2 = U_2 I_2 = (-90) \times 6W = -540W$, 发出功率 540W, 是电源;

元件 3: $P_3 = U_3 I_3 = 60 \times 10W = 600W$, 吸收功率 600W, 是负载;

元件 4: $P_4 = U_4 I_1 = (-80) \times (-4)W = 320W$, 吸收功率 320W, 是负载;

元件 5: $P_5 = U_5 I_2 = 30 \times 6W = 180W$, 吸收功率 180W, 是负载。

电路中 $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 0$, 电源发出的功率等于负载吸收的功率, 所以功率是平衡的。

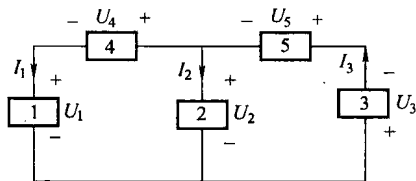


图 1.1.5 例 1.1.1 图

1.2 电路元件

电路元件是构成电路的基础,本节介绍电路中常用的电阻元件、电感元件、电容元件和电源元件,还介绍两种电源模型的等效变换。

1.2.1 电阻元件

实际的电阻元件,如电灯泡、电阻炉、电烙铁等,当忽略其电感等作用时,可以认为是只具有消耗电能特性的二端线性电阻元件。习惯上把线性电阻元件简称为电阻,用 R 表示。 R 既表示电路元件,又表示元件的参数。 R 是一个正实常数。国际单位制中,电阻的单位为 Ω (欧姆)。常用单位还有 $k\Omega$ 、 $M\Omega$ 。电阻上通过的电流和两端所加电压的实际方向是一致的。

电阻的电路图形符号如图1.1.1a所示。当电阻两端的电压和电流采取关联参考方向时,任何时刻,电阻两端的电压和电流都遵循欧姆定律

$$u = Ri \quad \text{或者} \quad i = Gu \quad (1.2.1)$$

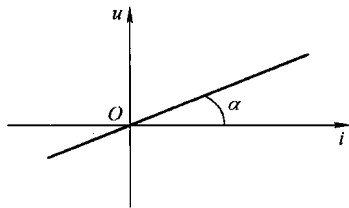
当电阻的电压和电流采取非关联参考方向时,则得

$$u = -Ri \quad \text{或者} \quad i = -Gu \quad (1.2.2)$$

式(1.2.1)和式(1.2.2)中 $G=1/R$,称为电导,单位为S(西门子,简称西)。

线性电阻的电压、电流关系(VAR)曲线是一条直线,简称伏安特性,特性曲线如图1.2.1所示,其中 $\tan \alpha = R$ 。

若元件的电阻 R 不是常数,电压 u 与电流 i 不成正比,元件的伏安特性是一条曲线,这样的电阻称为非线性电阻。如晶体管、白炽灯灯丝等都是非线性电阻。非线性电阻的电压和电流不再服从欧姆定律。



电阻元件总是吸收功率,所以电阻元件是耗能元件。电阻图1.2.1 线性电阻的伏安特性曲线两端电压与通过的电流为关联参考方向时,电阻元件吸收的功率为

$$p = ui = i^2 R = \frac{u^2}{R} = u^2 G \quad (1.2.3)$$

当一个线性电阻 $R = \infty$,端电压不论为何值时,电流恒为零值,称为“开路”,伏安特性曲线如图1.2.2a所示。电流为零的元件可视为开路。当一个线性电阻 $R = 0$,电流不论为何值时,端电压恒为零值,称为“短路”,伏安特性曲线如图1.2.2b所示。电压为零的元件可视为短路。

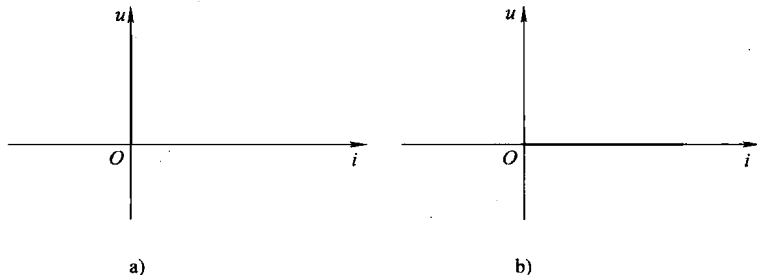


图 1.2.2 开路和短路的伏安特性曲线

a) 开路 b) 短路

实际电路中常用电阻器来实现限流、分压和分流。在选用电阻器时,应注意工作电流、电压

和功率不要超过它们的限额值,这个限额值称为额定值。按照额定值使用元件及电气设备,可以安全可靠地工作,充分发挥其效能,并且保证正常的使用寿命。额定值常用 I_N 、 U_N 、 P_N 等表示,这些额定值常标记在设备的铭牌上。电气设备和元器件工作在额定状态时,称为满载或满负荷状态。电流和功率低于额定值的工作状态叫轻载状态;高于额定值的工作状态叫过载状态,这种工作状态是不允许的。

1.2.2 电感元件

在工程中广泛应用导线绕制的线圈,当线圈通以电流后产生磁场,磁场的方向可以用右手螺旋定则判断,如图 1.2.3 所示。

当电流 i 通过单匝线圈时,产生的磁通为 Φ 。如果 N 匝线圈绕得比较集中,可认为通过各匝的磁通相同,且磁通总和称为磁通链 Ψ ,即 $\Psi = N\Phi$ 。 Φ 、 Ψ 的单位为 Wb (韦伯)。当线圈中没有铁磁材料时, Ψ 与电流 i 成正比关系,即

$$\Psi = Li \quad (1.2.4)$$

式中, L 为线圈的电感系数,也常称为自感,单位为 H (亨利)。

当空心线圈的电阻非常小,可忽略不计时,它就是一个理想的线性电感元件 (简称电感元件)。

电感元件的电路图形符号如图 1.1.1b 所示。

电感元件的磁链与电流关系是一条直线,称为韦安特性曲线,如图 1.2.4 所示,其中 $\tan \alpha = L$ 。

当线圈或者电感元件通过的电流变化时,形成变化的磁场,在线圈或电感元件中产生感应电压。如果感应电压 u 的参考方向与磁链 Ψ 成右手螺旋关系 (即端子 a 沿导线到 b 的方向与 Ψ 成右手螺旋关系),则根据电磁感应定律,有

$$u = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1.2.5)$$

因此,电感的电压与电流关联参考方向时

$$u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.2.6)$$

式 (1.2.6) 表明:

1) 任何时刻,电感的电压与该时刻电流的变化率成正比,而与电流的大小无关,这一特性称为电感元件的动态特性。如果通入电感的是直流电流,则电感两端的电压等于零。也可以认为电感在直流电路中相当于短路。

2) 如果电感上的电压为有限值,则电感中的电流不能跃变。

将式 (1.2.6) 两边积分,便可得出电感元件上电压—电流积分关系式,即

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1.2.7)$$

式中, i_0 是初始值,即在 $t=0$ 时电感元件中通过的电流。

电感是动态元件。

当电感的电压和电流为关联参考方向时,电感的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1.2.8)$$

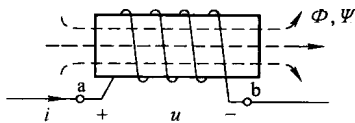


图 1.2.3 电感线圈

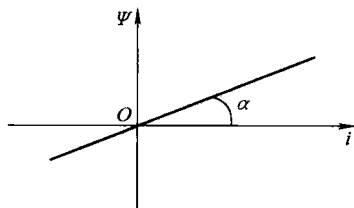


图 1.2.4 电感元件的韦安特性曲线

对式 (1.2.8) 从 $-\infty \sim t$ 进行积分, 得电感的储能为

$$w_L(t) = \frac{1}{2}Li^2(t) - \frac{1}{2}Li^2(-\infty) \quad (1.2.9)$$

一般认为 $i(-\infty) = 0$, 所以电感元件的储能为

$$w_L(t) = \frac{1}{2}Li^2(t) \quad (1.2.10)$$

当电感电流增大时, 储存磁场能; 当电流减小时, 释放磁场能。可见, 电感不产生能量, 也不消耗能量, 是一个储能元件。

1.2.3 电容元件

任何两个互相靠近而又彼此绝缘的金属导体, 都可看成是一个电容器。金属导体就是电容器的两个极板。当在两个极板上加上电压源后, 两极板上分别聚集等量的正负电荷, 并在介质中建立电场。当电源移去后, 电荷继续聚集, 电场继续存在。实际的电容器可近似看成理想的线性电容元件, 简称电容元件或电容。电容具有储存电荷的作用, 其储存的电荷 q 与两极板间的电压 u 成正比, 即

$$q = Cu \quad (1.2.11)$$

式 (1.2.11) 中的 C 称为电容量, 简称电容。国际单位中, 电容的单位是 F (法拉)。由于 F 单位太大, 工程上多应用 μF (微法) 或 pF (皮法)。 $1\text{F} = 10^6\mu\text{F} = 10^{12}\text{pF}$ 。

电容元件的电路图形符号如图 1.1.1c 所示。

电容元件的电荷与电压关系是一条直线, 称为库伏特性曲线, 如图 1.2.5 所示, 其中 $\tan \alpha = C$ 。

当电容元件两端的电压 u 或者极板上聚集的电荷 q 发生变化时, 电路中出现电流 i 。当电容电压和电流为关联参考方向时

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.2.12)$$

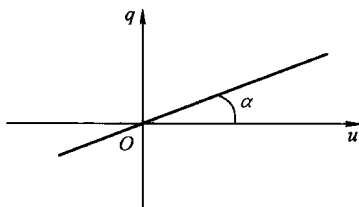


图 1.2.5 电容元件的库伏特性曲线

式 (1.2.12) 表明:

1) 任何时刻, 电容的电流与该时刻的电压的变化率成正比, 而与电压的大小无关, 这一特性称为电容元件的动态特性。如果电容两端加直流电压, 则电容电流等于零。也可以认为电容在直流电路中相当于开路, 有隔断直流的作用。

2) 如果电容上的电流为有限值, 则电容中的电压不能跃变。

将式 (1.2.12) 两边积分, 便可得出电容元件上电压—电流积分关系式, 即

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1.2.13)$$

式中, u_0 是初始值, 即在 $t=0$ 时电容两端的电压。

电容是动态元件, 是属于有“记忆”的元件。

当电容的电压和电流为关联参考方向时, 电容的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1.2.14)$$

对式 (1.2.14) 从 $-\infty \sim t$ 进行积分, 得电容的储能为

$$w_C(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) - \frac{1}{2}Cu^2(-\infty) \quad (1.2.15)$$

一般认为 $u(-\infty) = 0$, 所以电容元件的储能为

$$w_c(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) \quad (1.2.16)$$

当电容电压增大时, 储存电场能; 当电压减小时, 释放电场能。可见, 电容不产生能量, 也不消耗能量, 是一个储能元件。

1.2.4 电源元件

电源元件是电路中提供能量的元件, 具有电源性质, 在电路中起“激励”作用, 给电路提供电压, 产生电流, 由激励引起的电流和电压称为“响应”。

电源元件按其特性分为两大类, 即理想电压源和理想电流源。理想电压源简称为电压源, 理想电流源简称为电流源。

1. 电压源

电压源的端电压 u 为

$$u = u_s \quad (1.2.17)$$

式中, u_s 是给定的时间函数, 称为电压源的激励电压。当 u_s 为恒定值时, 这种电压源称为恒定电压源或直流电压源, 用 U_s 表示。

图 1.2.6a 所示为直流电压源的电路图形符号。图 1.2.6b 示出电压源 U_s 接外电路的情况。端子 a、b 之间的电压 U 等于 U_s , 不受外电路影响, 即电压源的电压是固有的函数, 而流过电压源的电流 I 是由外电路确定的。图 1.2.6c 示出直流电压源 U_s 的伏安特性曲线, 是一条平行于电流轴的直线。

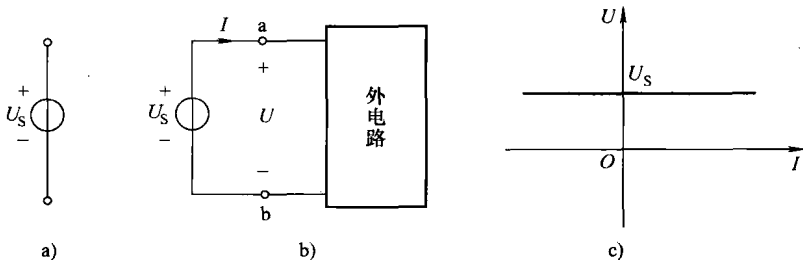


图 1.2.6 直流电压源电路图形符号、电路及伏安特性曲线

a) 电路图形符号 b) 直流电压源电路 c) 伏安特性曲线

图 1.2.6b 中电压源的电压和电流为非关联参考方向, 电压源发出的功率为

$$P = U_s I \quad (1.2.18)$$

实际电源都含有内阻, 可以用电压源与内阻 R_0 串联组合来模拟, 称为电压源模型, 如图 1.2.7a 所示。图 1.2.7b 电压源模型的伏安特性曲线。

电压源模型的电压—电流关系为

$$U = U_s - IR_0 \text{ 或 } I = \frac{U_s}{R_0} - \frac{U}{R_0} \quad (1.2.19)$$

电压源模型的内阻一般较小, 内阻愈小, 其模型特性愈接近理想电压源。当电源内阻 $R_0 = 0$ 时, 端电压 $U = U_s$; 内阻 R_0 增大时, 电源端电压 U 就会降低。电压源模型的伏安特性如图 1.2.7b 所示。电路的这种工作状态称为有载工作状态。电路有载工作时, 由于电源内阻 R_0 的存在, 当电路电流增大时电源端电压会降低。若电路不接负载电阻 R_L (或由 a 点断开), 如图