



普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电工与电子技术

(第2版)

■ 毕淑娥 主编 ■ 徐秀平 副主编
■ 姜三勇 主审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电工与电子技术

(第2版)

毕淑娥 主编 徐秀平 副主编
姜三勇 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

全书共 17 章,分四个部分。第一部分电工技术,内容包括电路的基本概念和基本定律、电路的分析方法、正弦交流稳态电路、电路的谐振、三相电路、电路的暂态过程、非正弦交流电路、变压器、电动机及其控制。第二部分模拟电子技术,内容包括常用的半导体器件、基本放大电路、放大电路的负反馈、集成运算放大器。第三部分数字电子技术,内容包括集成门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、数模和模数转换电路。第四部分电子电源,内容包括正弦波振荡电路、非正弦波振荡电路、直流线性稳压电源电路。

全书各章有本章主要内容、引例、例题、思考题、引例分析和小结。部分章节有电路仿真分析,每章配有适量的习题,书后附有习题答案。

本书是高等工科院校电工与电子技术课程的本科教材,可供非电类各专业使用,也可作为其他各类院校电工与电子技术课程的教材或参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术 / 毕淑娥主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2016.4

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-28338-3

I. ①电… II. ①毕… 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(2016)第 053654 号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 李佩乾 李宪强 宋 薇

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21 字数: 672 千字

版 次: 2011 年 2 月第 1 版

2016 年 4 月第 2 版

印 次: 2016 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 49.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

第 2 版前言

“电工与电子技术”是高等工科院校非电类专业的必修基础课之一。参照教育部电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的教学基本要求，根据目前我国高校的教学改革状况和实际的教与学的情况，我们编写了此书。

本书在内容编排上有利于唤起读者的求知欲望；即每章开头有引例，结尾有引例分析；每节之后有思考题。随着每章的内容展开，可加深读者对应用电路原理的理解，为读者进行自主研究打下良好的基础。

本书在保证基础理论的同时，注重理论联系实际，结合工程应用给出许多实际应用电路，以及元器件的外形图片、常用元器件参数、集成器件的引脚图等，力图使教材内容与工程应用相融合。

这次修订，在内容上做了如下调整：（1）在原来的框架基础上，将原来的五部分整合为四部分；（2）修改和补充了部分引例、例题和习题；（3）在部分章节中，增加了一节电路仿真分析；（4）删掉了一部分内容。

修订后的本书结合实际工程应用更紧密，各部分教学内容相对完整，且前后呼应，有利于教师对教学内容的取舍，因材施教，从而进行多层次和不同学时的教学。

本书的例题和习题数量及难度适中，便于读者自学。教材中加*号的章节，教师可根据学时和专业要求进行取舍。

本书是高等工科院校“电工与电子技术”课程的本科教材，可供非电类专业使用，按 36~80 学时组织教学（不含实验）。本书也可以作为其他各类院校“电工与电子技术”课程的教材或参考书。

参加本书修订的教师有华南理工大学毕淑娥（第 1、2、3、11、12、16 章），张廷锋（第 9 章及附录），靳贵平（第 17 章），文小琴（第 5、10 章）；广东五邑大学徐秀平（第 13、14、15 章），黄东（第 7、8 章）；华南理工大学广州学院刘希（第 4、6 章）。全书由毕淑娥统稿。哈尔滨工业大学姜三勇教授审阅了本书。在本书修订过程中还得到一些师生的支持，编者在此一并表示衷心的感谢。

编者

目 录

第一部分 电工技术

第 1 章 电路的基本概念与基本定律	1	3.2 正弦量的相量表示法	36
1.1 电路作用与电路模型	1	3.2.1 正弦量的相量表示	37
1.2 电路的物理量	2	3.2.2 正弦量的相量形式	37
1.2.1 电流、电压和电位的概念	2	3.3 电路元件的相量模型	39
1.2.2 电流和电压的实际方向	3	3.3.1 电阻元件的相量模型	39
1.2.3 电流和电压的参考方向	4	3.3.2 电感元件的相量模型	40
1.3 欧姆定律	5	3.3.3 电容元件的相量模型	43
1.4 电路中的功率	7	3.3.4 基尔霍夫定律的相量形式	45
1.5 基尔霍夫定律	8	3.4 阻抗及其串并联	46
1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)	8	3.4.1 阻抗	46
1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)	9	3.4.2 阻抗的串联	47
1.6 电阻电路的等效变换	10	3.4.3 阻抗的并联	48
1.6.1 电阻的串联与并联	10	3.5 正弦稳态电路的分析	49
*1.6.2 电阻的星形连接和 三角形连接	11	3.6 正弦稳态电路的功率	51
1.7 电源及其等效变换	13	3.7 功率因数的提高	53
1.7.1 理想电压源和理想电流源	13	3.8 串联谐振与并联谐振	55
1.7.2 电压源与电流源的等效变换	14	3.8.1 串联谐振	55
*1.8 电桥电路	15	*3.8.2 并联谐振	56
本章小结	16	3.9 RLC 串联电路的仿真	58
习题	18	本章小结	59
第 2 章 线性电路分析方法	20	习题	60
2.1 支路电流法	20	第 4 章 三相电路	62
2.2 节点电压法	21	4.1 三相电源	62
2.3 叠加定理	23	4.1.1 三相电源电压的产生	62
2.4 戴维南定理	25	4.1.2 三相电源的连接及 提供的电压	63
*2.5 含有受控电源的电路分析	28	4.2 负载星形连接的三相电路	64
2.5.1 受控电源	28	4.2.1 三相四线制电路	65
2.5.2 电路分析	28	4.2.2 负载 Y 接的三相三线制电路	67
本章小结	30	4.3 负载三角形连接的三相电路	68
习题	31	4.4 三相电路的功率	69
第 3 章 正弦交流稳态电路	33	本章小结	71
3.1 正弦量的基本概念	33	习题	72
3.1.1 正弦量	33	*第 5 章 非正弦周期电流电路	73
3.1.2 正弦量的三要素	34	5.1 非正弦周期信号及其分解	73

5.2 非正弦周期量的有效值和平均功率	75	7.5 自耦变压器	100
5.2.1 非正弦周期电流的有效值	75	本章小结	101
5.2.2 非正弦周期电流电路的平均功率	76	习题	102
5.3 非正弦周期电流电路的计算	76	第 8 章 电动机	103
本章小结	78	8.1 直流电动机	103
习题	79	8.1.1 直流电动机的工作原理	103
第 6 章 线性电路的暂态过程	80	*8.1.2 直流电动机的使用	105
6.1 暂态过程的基本概念	80	*8.1.3 永磁式直流电动机	107
6.1.1 暂态过程	80	8.2 三相异步电动机	107
6.1.2 换路定则	81	8.2.1 三相异步电动机的结构	107
6.1.3 电路的初始值	82	8.2.2 三相异步电动机的工作原理	109
6.2 一阶 RC 电路的响应	83	8.2.3 三相异步电动机的机械特性	111
6.2.1 RC 电路的零状态响应	83	8.2.4 三相异步电动机的使用	114
6.2.2 RC 电路的零输入响应	85	8.3 单相电动机	118
6.2.3 RC 电路的全响应	87	本章小结	120
6.3 一阶电路的三要素法	87	习题	120
6.4 一阶 RL 电路的响应	89	第 9 章 继电器控制电路	122
本章小结	92	9.1 常用低压控制电器	122
习题	92	9.1.1 手动电器	122
第 7 章 变压器	94	9.1.2 自动电器	123
7.1 变压器的结构	94	9.2 常用低压控制电路	126
7.2 变压器的工作原理	95	9.2.1 直接启动控制电路	126
7.3 变压器的功能	96	9.2.2 正反转控制电路	127
7.3.1 电压变换	96	9.3 顺序控制	129
7.3.2 电流变换	97	9.4 行程控制	130
7.3.3 阻抗变换	98	9.5 时间控制	132
7.4 变压器绕组的连接	99	本章小结	133
		习题	133

第二部分 模拟电子技术

第 10 章 常用半导体器件	135	10.5 场效应晶体管	149
10.1 半导体的导电特性	135	10.5.1 N 沟道增强型 MOS 管	150
10.1.1 本征半导体	135	10.5.2 N 沟道耗尽型 MOS 管	151
10.1.2 N 型半导体和 P 型半导体	136	10.6 半导体二极管伏安特性的仿真	152
10.1.3 PN 结	137	本章小结	153
10.2 半导体二极管	139	习题	154
10.3 特殊二极管	142	第 11 章 基本放大电路	156
10.4 半导体三极管	144	11.1 共发射极交流电压放大电路	156
10.4.1 基本结构	144	11.1.1 放大电路的基本组成	156
10.4.2 载流子分配及电流放大原理	145	11.1.2 放大电路的放大原理	156
10.4.3 特性曲线	146	11.1.3 放大电路的分析方法	158
10.4.4 主要参数	147	11.1.4 放大电路的非线性失真	162
		11.1.5 放大电路的温度稳定性	163

11.1.6 放大电路的频率特性	165	12.3 集成运算放大器的线性应用	184
11.2 共集电极放大电路	166	12.3.1 比例运算电路	184
11.2.1 静态分析	166	12.3.2 加法运算电路	186
11.2.2 动态分析	167	12.3.3 减法运算电路	188
11.3 多级电压放大电路	169	12.3.4 微分运算电路	190
11.3.1 阻容耦合电压放大电路	169	12.3.5 积分运算电路	191
11.3.2 直接耦合电压放大电路	171	12.3.6 其他线性应用电路	193
11.4 差分电压放大电路	172	12.4 集成运算放大器的非线性应用	195
11.4.1 静态	172	12.4.1 电压比较器	195
11.4.2 动态	173	12.4.2 过零比较器	196
11.4.3 输入-输出方式	174	12.4.3 限幅器	197
11.5 晶体管放大电路的仿真	175	12.5 集成运算放大电路中的负反馈	198
本章小结	177	12.5.1 反馈的基本概念	198
习题	178	12.5.2 反馈的判别	198
第 12 章 集成运算放大器	181	12.5.3 负反馈对放大电路工作 性能的改善	201
12.1 集成运算放大器的基本组成、 传输特性和主要参数	181	12.6 集成运算放大器的使用	203
12.2 集成运算放大器的理想模型 和分析依据	183	12.7 低通滤波电路的仿真	204
12.2.1 集成运放的理想模型	183	本章小结	206
12.2.2 分析依据	184	习题	206

第三部分 数字电子技术

第 13 章 组合逻辑电路	210	第 14 章 时序逻辑电路	239
13.1 概述	210	14.1 双稳态触发器	239
13.2 逻辑运算及门电路	211	14.1.1 概述	239
13.2.1 基本逻辑运算及其门电路	211	14.1.2 基本 RS 触发器	240
13.2.2 复杂逻辑运算及其门电路	212	14.1.3 时钟触发器	241
13.3 逻辑函数及其化简	214	14.1.4 时钟双稳态触发器逻辑 功能的描述	251
13.3.1 逻辑代数基本公式、常用 定律及运算规则	214	14.2 时序逻辑电路的分析	253
13.3.2 逻辑关系的描述方法	215	14.2.1 概述	253
13.3.3 逻辑函数的化简	217	14.2.2 同步时序逻辑电路的分析	253
13.4 组合逻辑电路的分析与设计	221	*14.2.3 异步时序逻辑电路的分析	255
13.4.1 组合逻辑电路的分析	221	14.3 常用时序逻辑电路	256
13.4.2 组合逻辑电路的设计	222	14.3.1 寄存器	256
13.5 常用中规模组合逻辑电路	224	14.3.2 计数器	258
13.5.1 运算电路	224	本章小结	267
13.5.2 编码器	226	习题	268
13.5.3 译码器	229	*第 15 章 数字量与模拟量的转换	271
13.5.4 数据选择器	234	15.1 数模转换器 (D/A 转换器)	271
本章小结	237	15.1.1 D/A 转换器的工作原理	271
习题	237	15.1.2 集成 D/A 转换器简介	273

15.2	模数转换器 (A/D 转换器)	275
15.2.1	A/D 转换器的工作原理	275
15.2.2	集成 A/D 转换器简介	276

本章小结	278
习题	278

第四部分 电子电源

第 16 章	线性直流稳压电源	279
16.1	整流电路	279
16.1.1	单相半波整流电路	279
16.1.2	单相桥式全波整流电路	280
16.2	滤波电路	282
16.3	稳压电路	283
16.3.1	稳压二极管稳压电路	283
16.3.2	晶体管串联型稳压电路	285
16.3.3	三端集成稳压器	286
16.4	直流稳压电路的仿真	288
	本章小结	290
	习题	290
第 17 章	振荡电源	292
17.1	正弦波振荡电源	292
17.1.1	自激振荡的条件	293
17.1.2	RC 振荡电路	294
17.1.3	LC 振荡电路	296
17.2	非正弦波振荡电源	298
17.2.1	矩形波振荡电路	298

17.2.2	三角波振荡电路	302
本章小结	304	
习题	304	
附录 A	Multisim 仿真软件简介	
	与应用	306
A.1	Multisim 仿真软件的基本使用方法	306
A.2	应用仿真软件分析电路	312
附录 B	色环电阻	316
附录 C	常用电动机的型号及主要参数	317
附录 D	常用半导体分立器件的型号及主要参数	318
附录 E	常用集成运算放大器的型号及主要参数	319
附录 F	常用数字电路集成芯片的型号及引脚图	320
习题答案	322	
参考文献	328	

第一部分 电工技术

第 1 章 电路的基本概念与基本定律

【本章主要内容】本章主要介绍电路的概念，电路定律和电路功率，电阻电路的等效变换，电源及其等效变换，电桥电路的平衡条件。

【引例】提起电路，人们既熟悉又陌生。熟悉的是电路的应用在日常生活中随处可见，例如人们使用的计算机、手机、电话、各种家用电器、房间的照明装置等，以及人们乘坐的电梯、汽车、火车、飞机等，都离不开电路。那么电路是由什么组成的呢？这就是我们要在这里讨论的问题。例如，某电子门铃如图 1.0-1 所示，其中，图(a)是一种电子门铃的外形，图(b)是电子门铃内部的电路板，图(c)是电子门铃的电路图。那么电子门铃的电路是由哪些电子元件组成的呢？电路是怎么工作的呢？学完本课程，读者应能初步分析和设计各种电子电路和电子产品了。

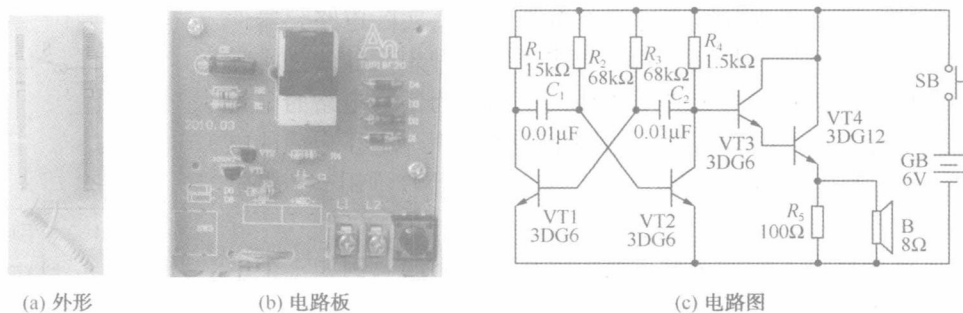


图 1.0-1 电子门铃

1.1 电路作用与电路模型

1. 电路的作用与组成

电路是由电源和一些电子元器件通过导线连接而成的电流通路。电路的作用分为两类，一类是将电能进行传输与转换，另一类是进行信号传递和处理。

图 1.1-1(a)是电力系统输送电能的电路示意图。其中发电机发出电能，经过升压变压器升压、输电线路传输，再经过降压变压器降压等过程，最后到达用户，将电能转换为光能、机械能、热能等。图 1.1-1(b)是扩音机电路的示意图。其中话筒将声音信号转换为电信号，然后经过放大器放大和处理后传递给扬声器，再由扬声器将电信号还原为原来的声音信号。

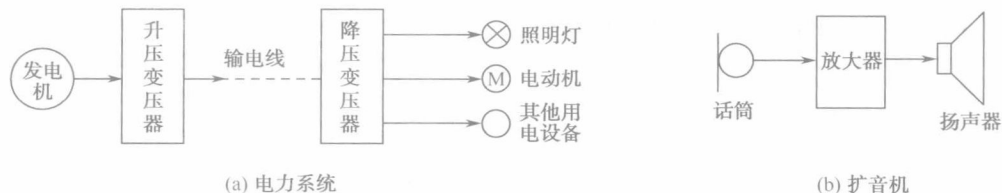


图 1.1-1 电路的作用

由以上分析可见,不论是电力系统还是扩音机,其电路都是由三部分组成的,即电源、负载和中间转换环节。在图 1.1-1(a)中,发电机是电源,照明灯、电动机和其他用电设备是负载,变压器和输电线是中间转换环节。在图 1.1-1(b)中,话筒是电源(信号源),扬声器是负载,放大器是中间转换环节。

电源是发电设备,其作用是将其他形式的能量转换为电能,向负载提供电压或电流;负载是用电设备,其作用是将电能转换为其他形式的能量消耗掉;中间转换环节是转换电路,其作用是进行电能的传输和分配,保证用电负载正常工作。

2. 电路模型

由前面的两个例子可知,实际电路是由电源、负载和各种电子元器件组成的,如发电机、变压器、信号源、电池、电动机、照明灯、电阻、电感、电容、二极管、三极管等。这些实际设备和元器件的电磁性质一般比较复杂,若全部考虑这些电磁现象,难以用简单的数学关系式表示它们的工作特性。所以在工程实际应用中,将电路中的元器件进行理想化处理,即突出元器件的主要电磁特性,忽略其次要电磁特性。例如手电筒中的小灯泡,当它点亮时,除了消耗电能外,其周围还会有磁场,但是其磁场很弱,不影响小灯泡的亮度,所以在电路分析中,可将磁场的作用忽略不计。因此可认为小灯泡是一个电阻元件,即小灯泡是理想元件,小灯泡的电路模型就是一个电阻,可用简单的数学关系式表示小灯泡的工作特性。

综上所述,为便于对实际电路进行分析,需将实际电路元器件用能够代表其主要电磁特性的理想元件来表示,理想元件就是实际电路元器件的模型。由理想元件所组成的电路称为实际电路的电路模型,简称电路。图 1.1-2 是手电筒的电路模型。其中,手电筒的电池用电压源 U_S 和内阻 R_S 串联作为模型来表示,小灯泡用一个电阻元件 R_L 表示,手电筒的开关用 S 表示。

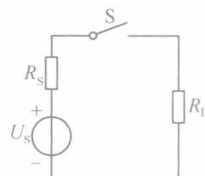


图 1.1-2 手电筒的电路模型

实际电路元件在不同的条件下其电路模型也不同。例如一个电感线圈,在外加直流电源的电路中,可视为一个小电阻;在外加低频交流电源的电路中,可视为一个电感和这个小电阻的串联;在外加高频交流电源的电路中,电感线圈绕线之间的电容效应就不能忽略。因此,要建立合适的电路模型,才能保证电路模型分析的结果与实际电路的测量结果基本一致。

本教材所讨论的电阻、电感、电容元件和电源器件都是理想元器件,所讨论的电路都是电路模型。

思考题

1.1-1 实际电路和电路模型有何不同?理论分析的电路是什么电路?

1.2 电路的物理量

电路中的基本物理量是电流、电压(电位差)和电位。下面分别讨论它们的定义及参考方向。

1.2.1 电流、电压和电位的概念

1. 电流

当闭合电源开关时,照明灯就会发光,电风扇就会转动,电热器就会发热,这是因为在照明灯、电风扇、电热器中有电流流过。若在电路中接入电流表,电流表就能测出电流的数值。那么什么是电流呢?物理学中定义,电流是正电荷有规则的定向运动。电流的大小为单位时间

内通过导体横截面的电量，即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2-1)$$

式中， i 表示电流， q 表示电荷量(电量)， t 表示时间，单位为秒(s)。在国际单位制中， q 的单位为库仑(C)，电流的单位为安培，简称安，用符号 A 表示。如果 1 秒时间内有 1 库仑的电量通过导体的横截面，这时的电流就是 1 安培。对于较小的电流，可以用毫安(mA)和微安(μA)为单位，其换算关系为

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

当电流的大小和方向不随时间变化时，称其为直流电流(Direct Current, 简称 DC)。直流电流用大写字母 I 表示，而随时间变化的电流用小写字母 i 表示，称为交流电流(Alternating Current, 简称 AC)。

2. 电压和电位

在图 1.1-2 中，当开关 S 闭合后，手电筒的小灯泡发光，若将电压表接在小灯泡两端，电压表就有读数，我们称其读数为电压。那么电压的定义是什么呢？物理学中定义，电场力将单位正电荷 q 由电场中的 a 点通过电源以外的某条路径移动到 b 点所做的功，就称之为这两点之间的电压，即

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1.2-2)$$

式中， u 表示电压， w 为电场力所做的功，单位为焦耳(J)； q 的单位为库仑(C)；电压的单位为伏特(V)。对于较高的电压，可用千伏(kV)为单位，对于较低的电压，可用毫伏(mV)和微伏(μV)为单位，其换算关系为

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

当电压的大小和方向不随时间变化时，称其为直流电压。直流电压用大写字母 U 表示，而随时间变化的电压用小写字母 u 表示。

由电压的定义可知，电压数值的大小与电场中 a 点和 b 点的位置有关，而与所选取的路径无关。为了方便比较电场中 a 点和 b 点位能的差别，我们引出电位的概念。那么什么叫电位呢？根据物理学中的定义，设电场中的某点 o 为参考点，电场力将单位正电荷 q 由电场中的 a 点移动到参考点所做的功，就称为 a 点的电位，用 V_{ao} 表示；同理，电场力将单位正电荷 q 由电场中的 b 点移动到参考点所做的功，就称为 b 点的电位，用 V_{bo} 表示。在此规定下，参考点本身的电位为零，即 $V_o = 0$ ，则

$$\begin{cases} V_{ao} = V_a \\ V_{bo} = V_b \end{cases} \quad (1.2-3)$$

根据电压的定义有，a、b 两点之间的电位差就是 a、b 两点之间的电压，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1.2-4)$$

式(1.2-4)说明，电压也称之为电位差。

1.2.2 电流和电压的实际方向

在直流电路中，一般电源的电压值和实际极性都是已知的，因此在只有一个电压源作用的电路中，电流的实际方向也是已知的。那么电流流过电源和负载时的实际方向是怎么样的呢？我们来看一个最简单的电路。图 1.2-1 是一个由直流电压源 U_S 和负载电阻 R_L 接通的电路。在电路中，已知直流电压源 U_S 的实际极性如图所示，a 点为电压源的正极，用“+”表示，b 点

为电压源的负极，用“-”表示。这种“+”、“-”极性也表示了 a 点的电位比 b 点的电位高。可见，负载电阻 R_L 两端电压的实际极性也是上“+”下“-”。

由电流、电压的定义可知，在电场力的作用下，正电荷从电压源的 a 点(电压源的正极)，经过负载电阻 R_L 移动到 b 点(电压源的负极)。所以电流 I 的实际方向就是正电荷的运动方向，即从负载电阻的高电位流到低电位。为了维持负载电流不变，保证负载正常工作，电压源通过其内部的电源力将堆积在负极上的正电荷经过电源内部送回到电源的正极。

可见，电流的实际方向为：电流流过负载时，是从负载的高电位到低电位；电流流过电压源时，是从电压源的负极到正极。

电压的实际方向为：负载两端电压 U 和电压源两端电压 U_S 的实际方向都是从高电位到低电位。

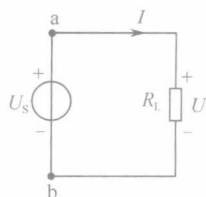


图 1.2-1 电流和电压的实际方向

1.2.3 电流和电压的参考方向

1. 电流、电压参考方向的设定

在分析简单电路时，可由电压源的实际极性判断出电路中电流的实际方向，但在分析复杂电路时，一般情况下很难判断出某个元件中的电流和两端电压的实际方向。例如，图 1.2-2 是两个电压源供电的复杂电路，电阻 R_3 中的电流是从 a 点流向 b 点还是从 b 点流向 a 点，是很难判断的。

因此在分析复杂电路时，要先假设各元件的电流或电压的方向，这个假设的方向称为电流或电压的参考方向。在电流或电压的参考方向下，根据电路的基本定律和分析方法求解出各元件中的电流或电压。

若求出的电流或电压为正值，说明电流或电压的参考方向与实际方向相同；若为负值，说明电流或电压的参考方向与实际方向相反。

在图 1.2-3 中，电流的参考方向用箭头表示。在图(a)中， $I = 1A$ ，说明电流的参考方向与实际方向相同，即电流的实际方向是从 a 点流向 b 点；在图(b)中， $I = -2A$ ，说明电流的参考方向与实际方向相反，即电流的实际方向是从 b 点流向 a 点。电流的参考方向也可用双下标表示，如 I_{ab} 表示其参考方向由 a 点指向 b 点。

在图 1.2-4 中，电压的参考方向可用箭头或极性表示。在图(a)中， $U = 3V$ ，说明电压的参考方向与实际方向相同，即电压的实际方向是从 a 点指向 b 点；在图(b)中， $U = -6V$ ，说明电压的参考方向与实际方向相反，即电压的实际方向是从 b 点指向 a 点。电压的参考方向也可用双下标表示，如 U_{ab} 表示其参考方向是由 a 点指向 b 点。

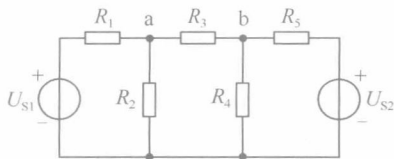


图 1.2-2 判断 R_3 中电流的实际方向

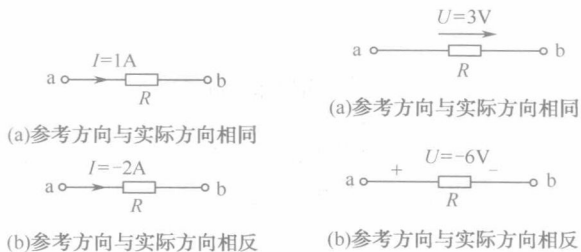


图 1.2-3 电流的参考方向

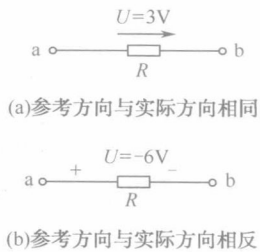


图 1.2-4 电压的参考方向

需要注意的是，(1) 参考方向一旦设定，在计算过程中就不能改变；(2) 电流或电压的数值有正有负，是参考方向所致；(3) 不论参考方向如何，电流或电压的实际方向是不变的。

有了参考方向的概念后，在以后分析的所有电路中，电压或电流的方向均为参考方向。

2. 电流和电压的关联参考方向

为了分析方便，在假设电压、电流的参考方向时，对于同一电路元件，其电压和电流的参考方向应该设置一致。电压和电流的参考方向相同称为关联参考方向，如图 1.2-5(a) 所示；电压和电流参考方向相反称为非关联参考方向，如图 1.2-5(b) 所示。

【例 1.2-1】 已知元件 A 和 B 的电压、电流的参考方向如图 1.2-6(a) 和 (b) 所示。当 $U=10\text{V}$ ， $I=-1\text{A}$ 时，判断元件 A 和元件 B 在电路中起电源作用还是起负载作用。

【解】 根据电压、电流的实际方向判断元件 A 和元件 B 的性质。

由于 $U=10\text{V}$ ， $I=-1\text{A}$ ，在 1.2-6(a) 和 (b) 中，电压 U 的实际方向与参考方向相同，而电流的实际方向与参考方向相反。在 1.2-6(a) 中，电流的实际方向是从元件 A 的负极流向正极，所以元件 A 起电源作用；在 1.2-6(b) 中，电流的实际方向是从元件 B 的正极流向负极，故元件 B 起负载作用。

思考题

1.2-1 在电路分析中为什么要设电压、电流的参考方向？如何根据参考方向判断出电压、电流的实际方向？

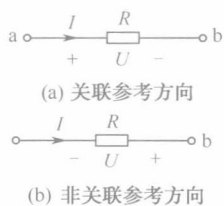


图 1.2-5 关联参考方向与非关联参考方向

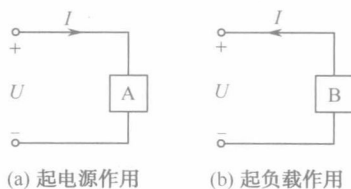


图 1.2-6 例 1.2-1 图

1.3 欧姆定律

1. 电阻元件

电路中常用的电阻元件分为线性电阻、非线性电阻及热敏电阻等。线性电阻用 R 表示，其阻值不随外加电流、电压改变。线性电阻的阻值由其制作的材料决定，对于长度为 l 、横截面积为 s 的均匀介质，其电阻为

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1.3-1)$$

其中 ρ 是导体的电阻率，单位为 $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ； l 为导体的长度，单位为 m ； s 为导体的横截面积，单位为 mm^2 。在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 (Ω)。此外，电阻的单位还有千欧 ($\text{k}\Omega$)、兆欧 ($\text{M}\Omega$)，其换算关系为 $1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$ ， $1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$ 。

线性电阻的类型和符号如图 1.3-1 所示。



图 1.3-1 线性电阻

图 1.3-1 中的电阻都是阻值固定不变的电阻, 实际应用中还常用到可调式的电阻, 也称为电位器。电位器是三个端子的元件, 其中的一个端子可以滑动, 用来改变其电阻值。电位器及其符号如图 1.3-2 所示。

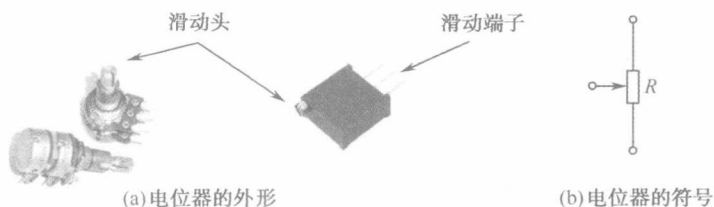


图 1.3-2 电位器

2. 欧姆定律

在图 1.3-3(a)中, 当电阻两端外加电压时, 其流过电阻的电流与电压成正比。在电压、电流取关联参考方向时, 线性电阻的电压与电流之间的关系为

$$U = RI \quad (1.3-2)$$

式(1.3-2)即为欧姆定律。

当电流、电压取非关联参考方向时, 如图 1.3-3(b)所示, 式(1.3-2)增加一负号, 即

$$U = -RI$$

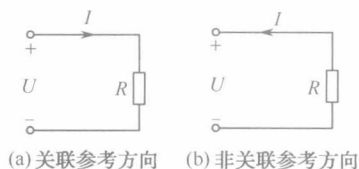


图 1.3-3 欧姆定律

线性电阻元件的伏安特性如图 1.30-4(a)所示。可见, 线性电阻的伏安特性曲线是一条通过原点的直线。

应当注意的是, 只有线性电阻的伏安关系满足欧姆定律。由于非线性电阻的阻值随电压、电流变化, 例如二极管就是非线性电阻, 其伏安关系不满足欧姆定律, 其伏安特性曲线如图 1.3-4(b)所示。

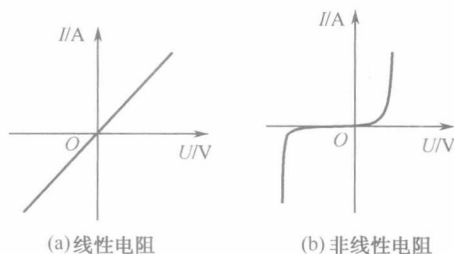


图 1.3-4 电阻的伏安特性曲线

【例 1.3-1】 在图 1.3-3 中, 已知 $U = 10\text{V}$, $R = 5\Omega$ 。求电流 I 。

【解】 在图 1.3-3(a)中, 由欧姆定律, 得 $I = U/R = 10/5 = 2\text{A}$

在图 1.3-3(b)中, 由欧姆定律, 得 $I = -U/R = -10/5 = -2\text{A}$

负号表示电流的参考方向与实际方向相反。

思考题

1.3-1 在图 1.3-3(a)中, 若设电压、电流的参考方向与图示相反, 写出欧姆定律的关系式。

1.4 电路中的功率

当电路和电源接通之后, 电路中发生能量转换过程, 电源向负载发出电能, 负载吸收电能。根据能量守恒定律, 若不考虑电源内部和传输导线中的能量损失, 那么电源输出的电能就应该等于负载所消耗的电能。电能的定义是在一段时间内, 电场力或电源力所做的功。所以对电能的计算, 主要是记录发电厂一天或一年能发出多少电能, 记录各个用户一个月或几个月的用电情况。对于日常生活中用户使用的各种电气设备, 其用电情况不是用电能计算, 而是用功率计算, 如电饭煲、电炒锅等用电设备的铭牌上都标有额定功率: 500W 或 800W 或 1000W 等。功率的定义是在单位时间内, 电场力或电源力所做的功, 其瞬时功率的表达式为

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1.4-1)$$

其中, p 表示瞬时功率, 功率的单位为瓦特(W), w 表示电能, 单位为焦耳(J)。

因为 $u = \frac{dw}{dq}$, $i = \frac{dq}{dt}$, 故瞬时功率又可表示为

$$p = \frac{dw}{dt} = ui \quad (1.4-2)$$

上式表明: (1) 一段电路的功率等于电压与电流的乘积; (2) 功率可正可负。若 $p > 0$, 表明一段电路吸收功率; 若 $p < 0$, 表明一段电路发出功率。

在图 1.4-1 中, 直流电源与负载接通, 电源发出功率为 P_1 , 负载吸收功率为 P_2 。由能量守恒定律可知, 在电路中, 电源发出的功率等于负载吸收的功率, 即

$$P_1 = P_2 \quad (1.4-3)$$

在图中的参考方向下, 电源的功率为

$$P_1 = -U_s I = -UI \quad (1.4-4)$$

负载的功率为

$$P_2 = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1.4-5)$$

【例 1.4-1】 在图 1.4-1 中, 已知 $U_s = 10V$, $R_L = 5\Omega$ 。计算电源发出的功率与负载吸收的功率。

【解】 由于电源的电压与电流的参考方向为非关联参考方向, 则

$$P_1 = -U_s I = -10 \times \frac{10}{5} = -20W$$

由于负载的电压与电流的参考方向为关联参考方向, 则

$$P_2 = UI = 10 \times 2 = 20W$$

可见, $P_1 < 0$, 即电源发出功率; $P_2 > 0$, 即负载吸收功率。

【例 1.4-2】 用计算功率的方法判断例 1.2-1 中元件 A 和元件 B 是电源还是负载。已知 $U = 10V$, $I = -1A$ 。

【解】 在图 1.2-6(a) 中, 电压 U 的参考方向与电流的参考方向相同, 则

$$P_A = UI = 10 \times (-1) = -10W$$

可见, $P_A < 0$, 即元件 A 发出功率, 起电源作用。

在图 1.2-6(b) 中, 电压 U 的参考方向与电流的参考方向相反, 则

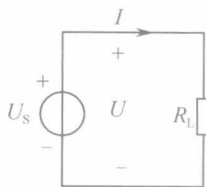


图 1.4-1 电源和负载的功率

$$P_B = -UI = -10 \times (-1) = 10W$$

可见, $P_B > 0$, 即元件 B 吸收功率, 起负载作用。

【例 1.4-3】 为保证某种负载正常工作, 在电路中要串入一个分压电阻。已知串入的分压电阻两端电压 $U_R = 20V$, 流过负载的电流 $I = 100mA$ 。请选择分压电阻的参数。

【解】 设分压电阻两端电压的参考方向与电流的参考方向相同, 根据欧姆定律, 有

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{20}{100 \times 10^{-3}} = 200\Omega, \quad P_R = U_R I = 20 \times 100 \times 10^{-3} = 2W$$

选择电阻时, 电阻的功率要留有余量, 所以选 200Ω 、 $3W$ 的分压电阻。

思考题

1.4-1 如何用功率的计算结果说明一段电路是发出功率还是吸收功率?

1.5 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路分析中的重要基本定律, 它包括基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, 简称 KCL)和基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, 简称 KVL)。基尔霍夫电流定律描述的是各支路电流之间的关系, 基尔霍夫电压定律描述的是回路中各段电压之间的关系。

1.5.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

以图 1.5-1 的电路为例, 首先介绍支路、节点和回路的概念。

(1) 支路是指电路中的每一个分支。一条支路流过一个电流, 称为支路电流。图 1.5-1 中有三条支路, 即 acb 、 ab 和 adb 。

(2) 节点是指三条支路或三条以上支路连接的点。图 1.5-1 中有两个节点, 即节点 a 和节点 b 。

(3) 回路是指由支路组成的闭合电路。图 1.5-1 中有三个回路, 即 $cabca$ 、 $adbda$ 和 $cadbc$ 。

基尔霍夫电流定律描述的是各支路电流之间的关系, 其内容为: 对于电路中的任一节点, 任一瞬时流入该节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。

在图 1.5-1 中, 对节点 a 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.5-1)$$

上式也可写成 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$, 即

$$\sum I = 0 \quad (1.5-2)$$

KCL 也可这样描述: 对于电路中的任一节点, 任一瞬时流入或流出该节点电流的代数和为零。若流入节点的电流取正号, 那么流出节点的电流就取负号。

KCL 不仅适用于电路中的任一节点, 也可推广应用到包围部分电路的任一闭合面。例如, 在图 1.5-2 中, 若只考虑电流 I_1, I_4, I_8 之间的关系, 不考虑虚线所包围的部分电路时, 可将这部分电路用一个闭合面表示, 这个闭合面就相当于一个节点, 由 KCL, 得

$$I_1 + I_4 + I_8 = 0$$

上式的正确性证明如下: 由于闭合面包围的电路有 4 个节点, 应用 KCL 可列出

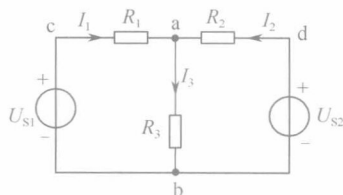


图 1.5-1 电路举例

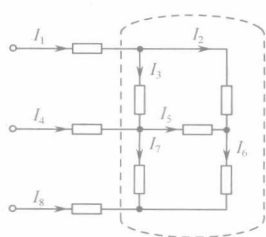


图 1.5-2 KCL 的推广应

$$I_1 = I_2 + I_3 = I_6 - I_5 + I_3$$

$$I_4 = I_5 + I_7 - I_3$$

$$I_8 = -I_6 - I_7$$

将上面的三式相加, 得

$$I_1 + I_4 + I_8 = 0$$

可见, 在任一瞬时, 流入一闭合面的电流的代数和也为零。

【例 1.5-1】 在图 1.5-2 中, 若 $I_1 = 6\text{A}$, $I_3 = 4\text{A}$, $I_4 = 2\text{A}$, $I_7 = 3\text{A}$ 。求 I_2 、 I_5 、 I_6 、 I_8 。

【解】 根据 KCL, 得

$$I_2 = I_1 - I_3 = 6 - 4 = 2\text{A}, \quad I_5 = I_4 + I_3 - I_7 = 2 + 4 - 3 = 3\text{A}$$

$$I_6 = I_2 + I_5 = 2 + 3 = 5\text{A}, \quad I_8 = -I_6 - I_7 = -5 - 3 = -8\text{A}$$

1.5.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律描述的是回路各段电压之间的关系, 其内容为: 对于电路中的任一回路, 在任一瞬时沿回路绕行一周, 在回路绕行方向上的电位降之和等于电位升之和。

在图 1.5-3 中, 回路 1 和回路 2 的绕行方向都设为顺时针方向。对于回路 1 和回路 2, 有

$$R_1 I_1 + R_3 I_3 = U_{S1} \quad (1.5-3)$$

$$U_{S2} = R_3 I_3 + R_2 I_2 \quad (1.5-4)$$

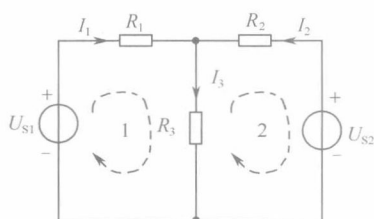


图 1.5-3 回路举例

对于回路 1 中的 $R_1 I_1$ 、 $R_3 I_3$ 是沿着回路绕行方向上电位是降落的, 而 U_{S1} 是电位升高的; 对于回路 2 中的 $R_2 I_2$ 、 $R_3 I_3$ 是沿着回路绕行方向上电位是升高的, 而 U_{S2} 是电位降落的。可见, 回路各段电压是电位升还是电位降是相对回路的绕行方向而言的。

式(1.5-3)或式(1.5-4)也可写成

$$\sum U_s = \sum (RI) \quad (1.5-5)$$

式(1.5-5)是 KVL 的另一种表达式。其中, $\sum U_s$ 表示电压源电压的代数和, 若电压源的电压参考方向与回路绕行方向相反, 则取正号, 相同则取负号; $\sum (RI)$ 表示电阻上的电压降的代数和, 若支路电流的参考方向与回路绕行方向一致, 该支路电流在电阻上所产生的电压降取正号, 相反取负号。

设式(1.5-3)中的 $R_1 I_1 = U_1$ 、 $R_3 I_3 = U_3$, 式(1.5-4)中的 $R_2 I_2 = U_2$, 则式(1.5-3)和式(1.5-4)还可写成

$$U_1 + U_3 - U_{S1} = 0, \quad U_{S2} - U_3 - U_2 = 0$$

$$\text{即} \quad \sum U = 0 \quad (1.5-6)$$

KVL 也可这样描述: 对于电路中的任一回路, 在任一瞬时沿回路绕行一周, 在回路绕行方向上各段电压的代数和恒等于零, 即为式(1.5-6)。若电位降取正号, 那么电位升就取负号。

KVL 不仅适用于闭合回路, 也可推广到开口电路, 即可求解电路中任意两点之间的电压。

【例 1.5-2】 在图 1.5-4 中, $U_{S1} = 10\text{V}$, $U_{S2} = 4\text{V}$, $R_1 = 4\Omega$, $R_2 = 6\Omega$ 。求 U_{ab} 。

【解】 此题先根据 KCL 求出电流 I , 然后再由 KVL 求出 U_{ab} 。

由式(1.5-3)列出 cadbc 的回路电压方程, 即

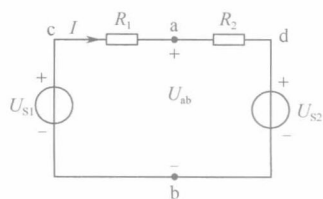


图 1.5-4 例 1.5-2 图