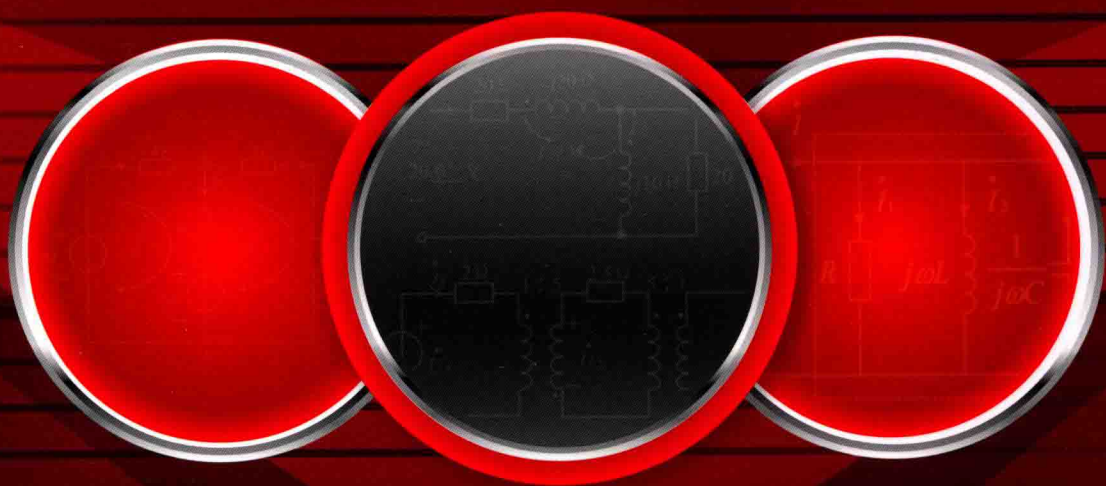


普通高等教育“十三五”规划教材

电工与电子技术

于宝琦 于桂君 陈亚光 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

电工与电子技术

于宝琦 于桂君 陈亚光 主编

王 静 李 玲 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书对传统电工与电子技术的内容进行了调整和拓宽,突出了实践技能与实际应用,以及相关的创新技术;正确处理理论与实践的关系,使学生在电工与电子技术方面获得基本知识和基本技能,同时,为以后学习各专业课程打下良好的基础。

本书共 11 章,主要内容包括:电路的基本概念和分析方法,单相正弦交流电路,三相正弦交流电路,电路的暂态过程,磁路及变压器,三相异步电动机及其控制,常用半导体器件,基本放大电路,集成运算放大器,门电路和组合逻辑电路,触发器和时序逻辑电路。为了使读者更好地掌握和理解课程内容,书中各章有应用举例、实验及习题,本书的最后还附有部分习题的参考答案。

本书可作为高等学校工科非电类专业本科生、专科生的教材或参考书,也可供有关工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术/于宝琦,于桂君,陈亚光主编.

北京:化学工业出版社,2017.1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-28389-4

I. ①电… II. ①于…②于…③陈… 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(2016)第 259778 号

责任编辑:王听讲

文字编辑:张绪瑞

责任校对:陈 静

装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京云浩印刷有限责任公司

装 订:三河市岷发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17½ 字数 467 千字 2017 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电工与电子技术是高等学校工科非电专业的一门重要的技术基础课程。为了更好地促进应用型本科的教育教学改革,培养应用型专门人才,本书在内容编排上以“必需、够用、实用、好用”为原则,克服理论课内容偏深、偏难的弊端,对传统电工与电子技术的内容进行了调整和拓宽,注重实践技能与实际应用,突出创新技术;正确处理理论与实践的关系,使学生在电工与电子技术方面获得基本知识和基本技能,并为以后学习各专业课程和接受更高层次的学习打下良好的基础。

本书共 11 章,主要内容包括:电路的基本概念与分析方法,单相正弦交流电路,三相正弦交流电路,电路的暂态过程,磁路与变压器,三相异步电动机及其控制,常用半导体器件,基本放大电路,集成运算放大器,门电路和组合逻辑电路,触发器和时序逻辑电路。为了使读者更好地掌握和理解课程内容,书中各章有应用举例、实验及习题,本书的最后还附有部分习题的参考答案。

本书内容简明、语言流畅、通俗易懂,可作为高等学校工科非电类专业本科生、专科生的教材或参考书,也可供有关工程技术人员学习使用。我们还将为使用本书的教师免费提供电子教案等教学资源,需要者可以到化学工业出版社教学资源网站 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载使用。

本书由辽宁科技学院于宝琦、于桂君、陈亚光担任主编,共同负责全书内容的组织和定稿,辽宁科技学院王静、李玲担任副主编,辽宁科技学院李响参与编写。第 1、4、11 章由于桂君编写;第 2、3、7 章由于宝琦编写;第 5、6 章由陈亚光编写;第 8、10 章由王静编写;第 9 章由李响编写;实验部分由李玲编写。

辽宁科技学院符永刚和辽东学院的王殿学老师审阅了全书,并对全书的内容提出许多宝贵意见。此外,本书在编写过程中得到了辽宁科技学院和辽东学院领导及相关老师的支持和帮助,在此一并表示感谢。

编者虽然在主观上力求严谨,但由于水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请使用本书的师生和广大读者给予批评指正,以便帮助我们不断改进和提高。

编 者

目 录

第 1 章 电路的基本概念和分析方法 ... 1

1.1 电路的基本概念	1
1.1.1 电路的组成与作用	1
1.1.2 电路模型	1
1.1.3 电路的主要物理量及参考方向	2
1.1.4 电路中常用元件	5
1.1.5 实际电源模型及其等效变换	10
1.2 基尔霍夫定律	12
1.2.1 基尔霍夫电流定律	12
1.2.2 基尔霍夫电压定律	13
1.3 电路的分析方法	14
1.3.1 支路电流法	14
1.3.2 节点电压法	16
1.3.3 叠加定理	17
1.3.4 戴维南定理和诺顿定理	18
1.4 应用举例	21
实验项目一 叠加定理	22
实验项目二 戴维南定理	24
本章小结	26
习题 1	27

第 2 章 单相正弦交流电路 31

2.1 正弦交流电的基本概念	31
2.1.1 正弦量的三要素	31
2.1.2 正弦量的相量表示法	34
2.2 单一参数电路元件的正弦交流电路 ...	37
2.2.1 电阻元件的交流电路	37
2.2.2 电感元件的交流电路	38
2.2.3 电容元件的交流电路	40
2.3 RLC 串联电路	42
2.3.1 正弦电压与电流的关系	42
2.3.2 RLC 串联电路的功率	44
2.4 阻抗的串联和并联	45
2.4.1 阻抗的串联	45
2.4.2 阻抗的并联	46
2.5 正弦交流电路的分析	47
2.5.1 基尔霍夫定律的相量形式	47
2.5.2 正弦交流电路的分析	48
2.6 功率因数的提高	50

2.6.1 提高功率因数的意义	50
2.6.2 提高功率因数的方法	50
2.7 电路中的谐振	51
2.7.1 串联谐振	52
2.7.2 并联谐振	53
2.8 应用举例	54
实验项目三 交流参数的测定	54
实验项目四 感性负载功率因数的提高	57
本章小结	58
习题 2	59

第 3 章 三相正弦交流电路 62

3.1 三相电源	62
3.1.1 三相电源的产生及特点	62
3.1.2 三相电源的连接	63
3.2 三相电路的分析	66
3.2.1 三相负载的星形连接	66
3.2.2 三相负载的三角形连接	67
3.3 三相电路的功率与测量	68
3.3.1 三相功率的计算	68
3.3.2 三相功率的测量	70
3.4 应用举例	71
本章小结	72
习题 3	72

第 4 章 电路的暂态过程 76

4.1 换路定律及初始值的计算	76
4.1.1 换路定律	76
4.1.2 初始值的计算	77
4.2 一阶 RC 电路的暂态分析	77
4.2.1 RC 电路的零输入响应	78
4.2.2 RC 电路的零状态响应	79
4.2.3 RC 电路的全响应	81
4.3 一阶 RL 电路的暂态分析	83
4.3.1 RL 电路的零输入响应	83
4.3.2 RL 电路的零状态响应	84
4.3.3 RL 电路的全响应	86
4.4 一阶电路的三要素法	86
4.5 应用举例	87

本章小结	89	第 7 章 常用半导体器件	139
习题 4	90	7.1 半导体器件的基础知识	139
第 5 章 磁路及变压器	93	7.1.1 半导体的特点	139
5.1 磁路	93	7.1.2 本征半导体	139
5.1.1 磁路的基本概念	93	7.1.3 N 型半导体和 P 型半导体	140
5.1.2 磁路的主要物理量	93	7.1.4 PN 结及其单向导电性	141
5.1.3 磁路欧姆定律	94	7.2 半导体二极管	142
5.1.4 交流铁芯线圈电路	95	7.2.1 二极管的结构和特性	142
5.2 变压器	96	7.2.2 二极管的主要参数	143
5.2.1 变压器的基本结构	97	7.2.3 二极管的应用	143
5.2.2 变压器的工作原理	97	7.3 稳压二极管	145
5.2.3 变压器的外特性	99	7.3.1 稳压二极管的伏安特性	145
5.2.4 变压器的额定值	100	7.3.2 稳压二极管的主要参数	146
5.3 其他用途变压器	100	7.4 半导体三极管	146
5.3.1 自耦变压器	100	7.4.1 三极管的结构	147
5.3.2 仪用互感器	101	7.4.2 三极管的电流放大作用	147
5.4 应用举例	102	7.4.3 三极管的特性曲线	148
本章小结	103	7.4.4 三极管的主要参数	149
习题 5	104	7.5 场效应管	150
第 6 章 三相异步电动机及其控制 ...	105	7.5.1 场效应管的特性曲线	150
6.1 三相异步电动机的结构	105	7.5.2 场效应管的主要参数	151
6.1.1 定子	105	7.6 应用举例	152
6.1.2 转子	105	实验项目六 常用电子仪器的使用	152
6.2 三相异步电动机的工作原理	106	实验项目七 二极管应用电路调试与 分析	154
6.2.1 定子的旋转磁场	107	本章小结	156
6.2.2 转差率	108	习题 7	157
6.2.3 三相异步电动机的电量	109	第 8 章 基本放大电路	159
6.3 三相异步电动机的机械特性	110	8.1 放大电路的概念和主要性能指标	159
6.3.1 三相异步电动机的电磁转矩	110	8.1.1 放大的概念	159
6.3.2 三相异步电动机的机械特性	111	8.1.2 放大电路的性能指标	159
6.4 三相异步电动机的使用	112	8.2 共射极放大电路	161
6.4.1 三相异步电动机的启动	112	8.2.1 共射极放大电路的组成和工作 原理	161
6.4.2 三相异步电动机的调速	116	8.2.2 静态分析	162
6.4.3 三相异步电动机的制动	117	8.2.3 动态分析	164
6.5 三相异步电动机的铭牌数据	119	8.3 静态工作点稳定的放大电路	166
6.6 继电-接触器控制系统	121	8.3.1 稳定静态工作点的必要性及 条件	166
6.6.1 常用低压电器	122	8.3.2 分压式偏置放大电路的分析	167
6.6.2 三相异步电动机常用控制电路 ...	128	8.4 射极输出器	170
6.7 应用举例	131	8.5 多级放大电路	172
6.7.1 顺序控制电路	132	8.5.1 多级放大电路的耦合方式	172
6.7.2 多地控制电路	133	8.5.2 多级放大电路的性能指标	173
实验项目五 异步电动机实验	133	8.6 应用举例	174
本章小结	136		
习题 6	137		

本章小结	175	10.3.1 逻辑代数的公式、定理和规则	216
习题 8	175	10.3.2 逻辑函数的表示方法	217
第 9 章 集成运算放大器	178	10.3.3 逻辑函数的化简	219
9.1 集成运算放大器概述	178	10.4 组合逻辑电路的分析与设计	222
9.1.1 集成运放电路的基本知识	178	10.4.1 组合逻辑电路的分析	223
9.1.2 集成运算放大器的组成	179	10.4.2 组合逻辑电路的设计	223
9.1.3 集成运算放大器的参数	179	10.5 集成组合逻辑电路	224
9.1.4 集成运算的理想化及分析方法	180	10.5.1 加法器	224
9.2 放大电路中的负反馈	181	10.5.2 编码器	226
9.2.1 反馈的基本概念	181	10.5.3 译码器	228
9.2.2 负反馈的四种组态	182	10.5.4 数据选择器	232
9.2.3 负反馈对放大电路性能的影响	184	10.6 应用举例	235
9.3 集成运放在信号运算方面的应用	186	实验项目九 译码器测试及应用	236
9.3.1 比例运算	186	本章小结	237
9.3.2 加法运算	188	习题 10	237
9.3.3 减法运算	190	第 11 章 触发器和时序逻辑电路 ...	239
9.3.4 积分运算	191	11.1 触发器	239
9.3.5 微分运算	192	11.1.1 基本 RS 触发器	239
9.4 集成运放在信号处理方面的应用	193	11.1.2 同步 RS 触发器	240
9.4.1 有源滤波器	193	11.1.3 JK 触发器	242
9.4.2 电压比较器	195	11.1.4 D 触发器	243
9.5 应用举例	198	11.1.5 T 触发器	245
实验项目八 集成运算放大电路设计与测试	199	11.2 时序逻辑电路分析	245
本章小结	202	11.2.1 时序逻辑电路的组成及分类	245
习题 9	202	11.2.2 时序逻辑电路的分析	246
第 10 章 门电路和组合逻辑电路 ...	208	11.3 常用时序逻辑电路	247
10.1 数字电路基础知识	208	11.3.1 寄存器	247
10.1.1 数字电路的特点	208	11.3.2 计数器	250
10.1.2 常用数制和码制	208	11.4 应用举例	259
10.2 基本的逻辑关系及逻辑门电路	211	本章小结	260
10.2.1 与逻辑和与门电路	211	实验项目十 集成计数器测试及应用	260
10.2.2 或逻辑和或门电路	212	习题 11	261
10.2.3 非逻辑和非门电路	213	部分习题参考答案	266
10.2.4 复合逻辑和复合逻辑门电路	214	参考文献	272
10.3 逻辑代数基础	216		

第 1 章

电路的基本概念和分析方法

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成与作用

电路是由一些电气设备和电路元件按一定方式连接而成的，能够实现一定功能的电流通过的闭合路径。电路一般包括电源、负载、中间环节三个部分。

电路中将其他形式的能转换为电能的装置称为电源，如电池、发电机等，它们向外电路提供能量。电路中将电能转换为其他形式能的装置称为负载，如电灯、电动机等，它们在电路中消耗电能。连接电源和负载的部分称为中间环节，如导线、开关、保护装置等，它们在电路中起传输电能、分配电能、保护或传递信息的作用。

电路根据功能不同，可以分为两大类。一类是实现电能的传输、转换和分配，如电力系统中，发电机将其他形式的能转换为电能，经变压器及传输线进行传输和分配给负载，负载将电能转化为光能、热能、机械能等其他形式的能，如图 1-1 所示。由于这类电路电压较高、电流较大，所以常称为“强电”电路。另一类是实现信号的传递和处理，如无线电通信电路和测控电路。这类电路电压较低，电流、功率较小，常称为“弱电”电路。

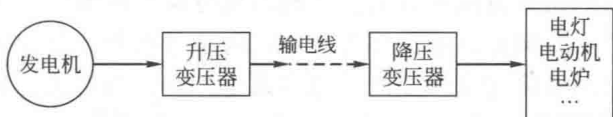


图 1-1 电力系统电路示意图

1.1.2 电路模型

实际电路元器件的电磁性质是比较复杂的。例如，给一个实际电感线圈通入交流电时，线圈将电能转换为磁场能量储存，同时又会发热，线圈匝间还存在电容，即线圈不仅具有电感性质，而且具有电阻、电容性质。为了简化对实际电路的分析和计算，在一定条件下，必须突出实际器件的主要电磁性质，忽略次要性质，将其用理想电路元件来代替。例如，电路消耗电能的电磁性质用电阻元件来表征；电路储存磁场能量的电磁性质用电感元件来表征；电路储存电场能量的电磁性质用电容元件来表征；用电源元件（电压源和电流源）来反映电能量，这些元件分别如图 1-2 所示。

由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。电路模型是实际电路的抽象和近似，模型取得恰当，对电路的分析和计算的结果与实际情况越接近。理想电路元件及其组合虽然与实际电路元件的性能不完全一致，但在一定条件下，工程允许的近似范围内，实际电

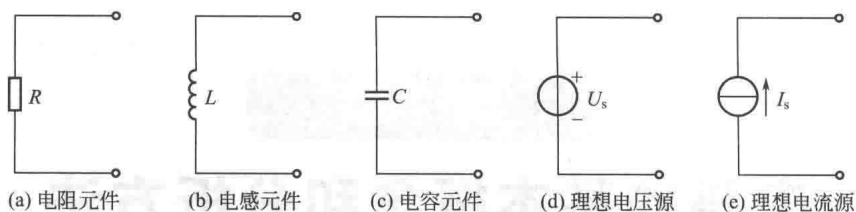


图 1-2 理想电路元件的电路模型

路完全可以用理想电路元件组成的电路代替，从而使电路的分析和计算得到简化。若无特殊说明，本书中所提到的元件均为理想电路元件，电路即为电路模型。

1.1.3 电路的主要物理量及参考方向

电路中的基本物理量包括电流、电位、电压和电功率等，下面分别讨论它们的定义及参考方向等问题。

1) 电流

电荷的定向移动形成电流。通常用电流强度来衡量其大小，其定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量 Q 。电流强度简称电流。若电流的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流（DC），用大写字母 I 来表示，即

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

式(1-1)中，电荷量 Q 的单位为（库仑）（C），时间的单位为秒（s）；电流 I 的单位为（安培）（A）。在 1 秒内通过导体横截面的电荷为 1C（库仑）时，其电流则为 1A。

若电流大小和方向随时间变化，则称为交流电流（AC），用小写字母 i 来表示，即

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

在国际单位制（SI）中，电流的单位是安培（A），简称安。计算微小电流时，以毫安（mA）或微安（ μA ）为单位，其换算关系为 $1A = 10^3 mA = 10^6 \mu A$ 。

习惯上规定正电荷的运动方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。在分析与计算复杂电路时，电流的实际方向有时难于事先确定，为了分析和计算方便，常常任意假定一个方向为电流的方向，称为电流的参考方向，也称为正方向。当电流的参考方向与实际方向一致时电流为正值，如图 1-3(a) 所示；当电流的参考方向与实际方向相反时电流为负值，如图 1-3(b) 所示。

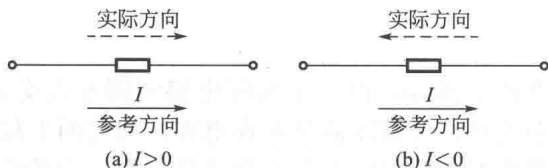


图 1-3 电流的参考方向与实际方向

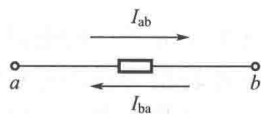


图 1-4 电流的表示方法

在分析电路时，首先要假定电流的参考方向，然后根据参考方向进行电路的分析和计算。今后，本书电路图上所标的电流方向都是指参考方向。

电流的参考方向可以用箭头表示，也可以用双下标表示。如图 1-4 所示， I_{ab} 表示参考方向是由 a 指向 b ， I_{ba} 表示参考方向是由 b 指向 a ，且 I_{ab} 与 I_{ba} 的关系为 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。

2) 电位、电压及电动势

(1) 电位。电场力把单位正电荷从电场中某点移动到参考点所做的功，称为该点的电

位，用 V 来表示，单位是（伏特）。工程上常选与大地相连的部件（如机壳等）作为参考点。没有与大地相连部分的电路，则选许多导线的公共点为参考点，并称为“地”。在电路分析中，可选任一点作为各电位的参考点，用“ $\perp$ ”表示。参考点的电位为零。电路中 A 点电位记为 V_A 。

电位是对某一参考点而言的，具有相对性，即对同一电路，参考点选择不同，各点电位值不同。

(2) 电压。电场力把单位正电荷从电场中点 A 移到点 B 所做的功 W_{AB} 称为 A 、 B 间的电压，用 U_{AB} 表示，即

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \tag{1-2}$$

在国际单位制（SI）中，电压的单位为（伏特）（V），简称伏。如果电场力把 $1C$ 电量从点 A 移到点 B 所做的功是 $1J$ （焦耳），则 A 与 B 两点间的电压就是 $1V$ 。

计算较大的电压时用千伏（kV），计算较小的电压时用 mV（毫伏），其换算关系为：

$$1kV = 10^3 V \quad 1V = 10^3 mV$$

电压的实际方向为从高电位点指向低电位点，即电位降的方向。

电路中任意两点之间的电压等于这两点之间的电位差。即：

$$U_{AB} = V_A - V_B \tag{1-3}$$

与电位值不同，电压值具有绝对性，任意两点间的电压值与参考点的选择无关。

在分析复杂电路时，电压的实际方向很难判断，为便于分析计算，常任意假定某一方向作为电压的方向，称为电压的参考方向。当电压的参考方向与实际方向一致时，电压为正值（ $U > 0$ ）；当电压的参考方向与实际方向相反时，电压为负值（ $U < 0$ ）。如图 1-5 所示。

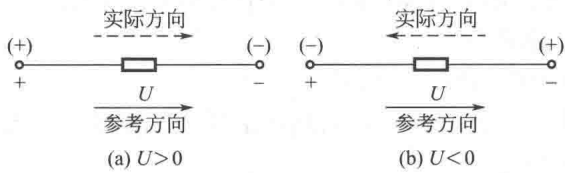


图 1-5 电压的参考方向与实际方向

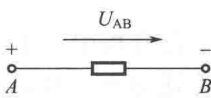


图 1-6 电压的表示方法

电压的参考方向可用箭头表示（外箭头），由假定的高电位指向假定的低电位；可用双极性表示，“+”表示假定的高电位，“-”表示假定的低电位；可用双下标表示，前一个下标表示假定的高电位，后一个下标表示假定的低电位，如图 1-6 所示。

若 $U_{AB} > 0$ ，则表示 A 点实际电位高于 B 点实际电位；反之， $U_{AB} < 0$ ，表示 A 点实际电位低于 B 点实际电位。

一个元件的电流、电压的参考方向可以独立地任意假定，如果流过元件的电流参考方向与电压的参考方向一致，则称电流、电压取了关联参考方向，否则为非关联参考方向，如图 1-7 所示。对于电阻、电感、电容等无源元件的电压电流通常取关联参考方向；对于电压源、电流源这样的有源元件习惯取非关联参考方向。

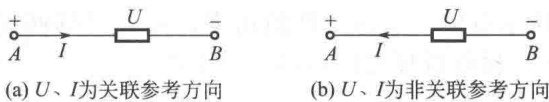


图 1-7 关联参考方向与非关联参考方向

电流和电压的参考方向是电路分析中一个十分重要的概念，在对电路进行分析和计算之前，必须先在电路中标出参考方向。没有参考方向的情况下，电流和电压数值的正负没有任

何意义。

(3) 电动势。在电源内部电源力（非电场力）将单位正电荷从电源负极（低电位）移动到电源正极（高电位）所做的功，称为电动势，用字母 E 表示，单位为伏特。

电动势的实际方向在电源内部由从低电位指向高电位，即电位上升的方向。由“—”极指向“+”极。对于一个电源设备，若 E 与 U 的参考方向相反，如图 1-8(a) 所示，当电源内部没有其他能量转换（如不计内阻）时，应有 $U=E$ ；若参考方向相同，如图 1-8(b) 所示，则 $U=-E$ 。本书在以后论及电源时，一般用其端电压 U 来表示。

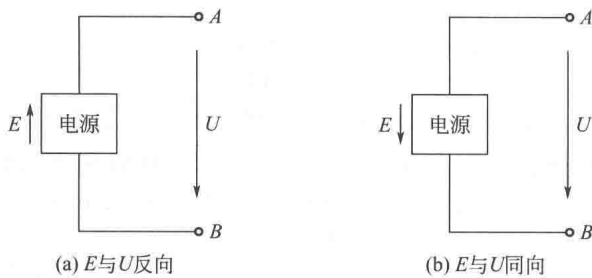


图 1-8 电源的电动势 E 与端电压

3) 电功率

电流通过负载时，电场力在单位时间内对电荷所做的功，称为电功率，简称功率，用字母 $p(P)$ 表示。在直流电路中，根据电压的定义，电场力所做的功是 $W=QU$ 。则有

$$P=\frac{W}{t}=\frac{QU}{t}=UI$$

在 SI 中，功率的单位是瓦特，简称瓦，用字母 W 表示。对于大功率，采用 kW（千瓦）作单位；对于小功率，则用 mW（毫瓦）作单位。

$$1\text{kW}=10^3\text{W}\quad 1\text{W}=10^3\text{mW}$$

在电路分析中，不仅要计算功率的大小，有时还要判断功率的性质，即该元件是产生功率还是消耗功率。对功率计算公式做如下规定。

当电流、电压取关联参考方向时，

$$P=UI \tag{1-4}$$

当电流、电压取非关联参考方向时，

$$P=-UI \tag{1-5}$$

不论是上述哪种情况，当计算结果 $P>0$ 时，表示元件吸收（消耗）功率，该元件为负载性；反之，当 $P<0$ 时，表示元件发出（产生）功率，该元件为电源性。在一个电路中，根据能量守恒定律，整个电路的功率代数和为零，或者说发出的功率和吸收的功率是相等的，即功率平衡。

当已知设备的功率为 P 时，在 t 秒内消耗的电能为 $W=Pt$ ，电能就等于电场力所做的功，单位是 J（焦耳）。在电工技术中，往往直接用 $\text{W}\cdot\text{s}$ （瓦特秒）作单位，实际上则用 $\text{kW}\cdot\text{h}$ （千瓦时）作单位，俗称 1 度电。 $1\text{kW}\cdot\text{h}=3.6\times 10^6\text{W}\cdot\text{s}$ 。

【例 1-1】 如图 1-9 所示电路，求各元件的功率，并说明哪些元件是电源性，哪些元件是负载性，电源发出的功率和负载吸收的功率是否平衡。

解：A 元件 $P_A=60\times(-2)=-120(\text{W})$ ， $P<0$ ，是电源，发出功率；

B 元件 $P_B=-20\times(-2)=40(\text{W})$ ， $P>0$ ，是负载，消耗功率；

C 元件 $P_C=-40\times(-2)=80(\text{W})$ ， $P>0$ ，是负载，消耗功率；

$P_A+P_B+P_C=-120+40+80=0$ ，电源发出的功率等于负载取用的功率，整个电路

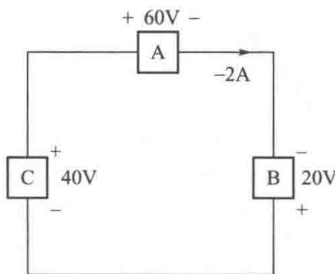


图 1-9 例 1-1 图

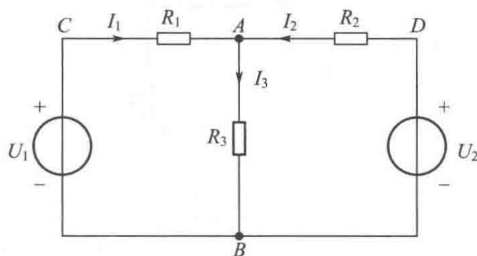


图 1-10 例 1-2 图

功率是平衡的。

【例 1-2】 在图 1-10 所示电路中，若 $R_1 = 5\Omega$ ， $R_2 = 10\Omega$ ， $R_3 = 15\Omega$ ， $U_1 = 180\text{V}$ ， $U_2 = 80\text{V}$ ， $I_1 = 12\text{A}$ ， $I_2 = -4\text{A}$ ， $I_3 = 8\text{A}$ 。若以点 B 为参考点，试求 A 、 B 、 C 、 D 四点的电位 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D ，同时求出 C 、 D 两点之间的电压 U_{CD} ，若改用点 D 作为参考点再求 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 和 U_{CD} 。

解：若以点 B 为参考点，则 $V_B = 0\text{V}$

$$V_A = I_3 R_3 = 8 \times 15 = 120(\text{V})$$

$$V_C = U_1 = 180\text{V}$$

$$V_D = U_2 = 80\text{V}$$

$$U_{CD} = V_C - V_D = 180 - 80 = 100(\text{V})$$

若以点 D 为参考点，则 $V_D = 0\text{V}$

$$V_A = -I_2 R_2 = -(-4) \times 10 = 40(\text{V})$$

$$V_B = -U_2 = -80\text{V}$$

$$V_C = I_1 R_1 - I_2 R_2 = 12 \times 5 - (-4) \times 10 = 100(\text{V}) \quad U_{CD} = V_C - V_D = 100 - 0 = 100(\text{V})$$

综上所述，可得出如下两点结论：

- ① 电路中任意一点的电位等于该点与参考点之间的电压。
- ② 参考点选得不同，电路中各点的电位值不同，但是任意两点间的电压是不变的。所以各点电位的高低是相对的，而两点间的电压是绝对的。

1.1.4 电路中常用元件

电路元件是电路的基本组成单元，按元件与外部连接的端子数目可分为二端、三端、四端元件等，按其可否向电路提供能量分为有源元件和无源元件。各元件电压、电流间的关系称为伏安关系特性，是本节讨论的重点。

1) 电阻元件

(1) 电阻元件的基本概念。用于反映电能消耗特性的理想元件称为电阻元件，它是从实际电阻器抽象出来的理想模型，像电灯泡、电阻炉、电烙铁等这类实际电阻器件，当忽略其电感、电容作用时，可将它们抽象为只具有消耗电能性质的电阻元件。电阻元件的符号为“ R ”，图形如图 1-11(a) 所示。电阻元件的伏安关系遵从欧姆定律，在关联参考方向下，表达式为

$$u = iR \quad (1-6)$$

在非关联参考方向下，表达式为

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

如果电阻元件的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线，如图 1-11(b) 所示，则称为线性电阻，否则为非线性电阻。习惯上称电阻元件为电阻，故电阻即表示电路元件，又表示元件的参数。

在 SI 中，电阻单位是欧姆 (Ω)，较大的单位有千欧 ($\text{k}\Omega$)、兆欧 ($\text{M}\Omega$)，其换算关系为 $1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$ 。

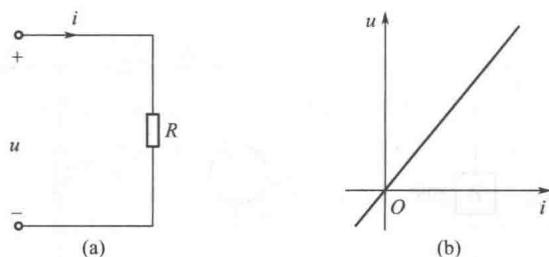


图 1-11 电阻元件

电阻元件也可用电导参数来表征，它是电阻 R 的倒数，用字母 G 表示，即

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位是西门子 (S)。电阻元件消耗的功率为

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

式(1-8) 中的负号对应于非关联参考方向。该式表明：无论是关联参考方向，还是非关联参考方向，电阻元件的功率 p 总是正值，所以电阻元件总是吸收功率，因此电阻元件是一种耗能元件和无源元件。

在实际应用时，所选电阻的额定功率必须大于所要消耗的最大功率，否则电阻会因为过热而损坏，导致电阻开路或发生大幅度阻值变化。一般情况下电阻额定功率应该为其实际可能消耗功率的两倍。

(2) 电阻元件的串并联

① 电阻的串联。多个电阻首尾顺次相连，则称为电阻的串联，如图 1-12(a) 所示。串联电路各电阻中通过同一电流，其端电压是各电阻元件电压之和。串联电路的等效电阻 R 等于各串联电阻之和，如图 1-12(b) 所示。即

$$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1-9)$$

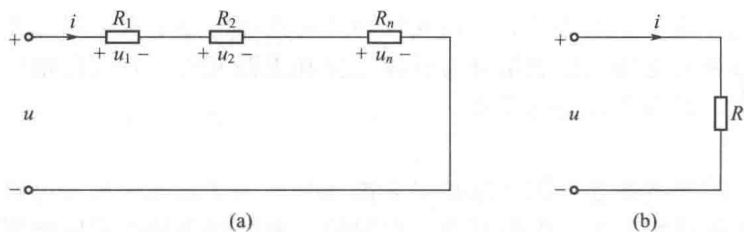


图 1-12 电阻的串联及其等效电路

第 k 个电阻元件的端电压为 (元件的电压电流取关联参考方向)

$$u_k = R_k i = R_k \frac{u}{R} = \frac{R_k}{R} u \quad (1-10)$$

式(1-10) 说明串联电阻上的电压与电阻成正比。当某个电阻较其他电阻小很多时，其上分配的电压也低很多，因此，在工程估算中，小电阻的分压作用可以忽略不计。

当两个电阻串联时，有

$$\begin{cases} u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u \\ u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u \end{cases} \quad (1-11)$$

② 电阻的并联。两个或多个电阻连接在两个公共的结点之间的连接方式，称为电阻的并联，如图 1-13(a) 所示。并联电路中，各并联电阻承受同一电压作用，总电流是各支路电流之和。并联电路的等效电阻 R 的倒数等于各并联电阻倒数之和，如图 1-13(b) 所示，即

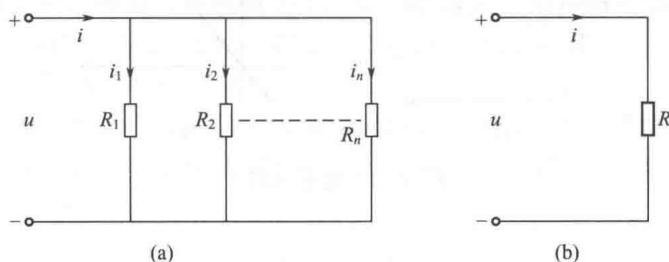


图 1-13 电阻的并联及其等效电路

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (1-12)$$

若用电导表示，则为

$$G = G_1 + G_2 + \cdots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k \quad (1-13)$$

流过第 k 个电阻的电流为

$$i_k = \frac{u}{R_k} = G_k u = \frac{G_k}{G} i \quad (1-14)$$

式(1-14)说明并联电阻上电流的分配与电阻的大小成反比。当其中的某个电阻较其他电阻大很多时，通过它的电流就较其他电阻上的电流小很多，在工程估算中，大分流电阻的分流作用可以忽略不计。

当两个电阻并联时，有

$$\begin{cases} i_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i \\ i_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i \end{cases} \quad (1-15)$$

一般负载都是并联使用的。由于并联负载同处于一个电压下，任何一个负载的工作情况基本不受其他负载的影响。

2) 电感元件

用于反映磁场储能特性的理想化元件称为电感元件。它是从实际电感线圈抽象出来的理想化模型。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，当忽略导线电阻及线圈匝与匝之间的电容时，可将其抽象为只具有储存磁场能性质的电感元件。电感元件的书写符号为“ L ”，图形如图 1-14(a) 所示。

当电感的电流 i 的参考方向与它产生的磁通 ϕ 的参考方向符合右手螺旋定则时，电感元件的韦安关系为

$$\phi = Li \quad (1-16)$$

如果电感元件的韦安曲线是一条通过坐标原点的直线，如图 1-14(b) 所示，则该电感称为线性电感，此时电感 L 为一个常数。如果线圈中的电流 i 所产生的磁通 ϕ 与线圈的匝数 N 全部交链，则有

$$\phi = N\phi \quad (1-17)$$

电压和电流取关联参考方向、电流和磁通的参考方向符合右手螺旋法则，根据电磁感应

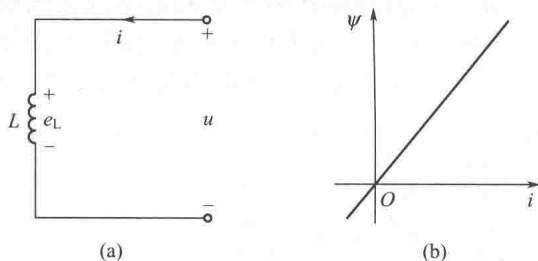


图 1-14 电感元件

定律有

$$u = -e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-18)$$

将式(1-16)代入式(1-18)可得, 电感元件的伏安关系为

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-19)$$

式(1-19)表明, 电感元件的端电压在任意瞬间与电流对时间的变化率成正比。在直流电路中, 由于电流不随时间变化, 故电感元件的端电压为 0, 所以电感元件相当于短路。

在 SI 中, 电感单位是亨利 (H)。常用的还有毫亨 (mH) 和微亨 (μH), 其换算关系为 $1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$ 。

习惯上称电感元件为电感, 它既表示电路元件, 又表示元件参数。

电感是一个储存磁场能量的元件, 当通过电感元件的电流为 i 时, 它所储存的磁场能量为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-20)$$

式(1-20)表明, 电感元件在某时刻的储能与该时刻流过电感的电流平方成正比, 而与电流的过去变化进程无关。

3) 电容元件

用于反映电场储能特性的理想元件称为电容元件。它是从实际电容器中抽象出来的理想化模型。实际电容器加上电压后, 两块极板上将出现等量异号电荷, 并在两极间形成电场, 储存电磁场。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磁能性质的电容元件。电容元件的书写符号为 C , 图形如图 1-15(a) 所示。

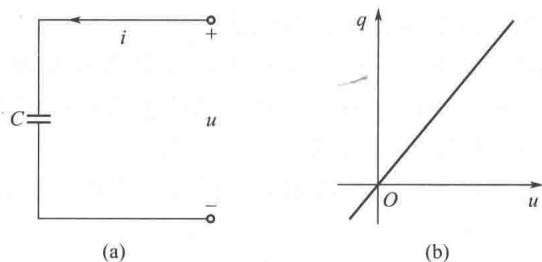


图 1-15 电容元件

电容器极板上储存的电量 q 与两端的电压 u 之间有以下关系

$$q = Cu$$

如果电容元件的库伏曲线是一条通过坐标原点的直线, 如图 1-15(b) 所示, 则该电容称为线性电容, 此时电容 C 为一个常数。当电压、电流的参考方向为关联参考方向时, 有

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-21)$$

式(1-21)表明, 电容的电流在任意瞬间与电压对时间的变化率成正比。在直流电路中, 由于电压不随时间变化, 故电容的电流为 0, 所以电容元件相当于开路。

在 SI 中, 电容单位是法拉 (F)。常用的还有微法 (μF) 和皮法 (pF), 它们之间的换算关系为: $1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$ 。

习惯上称电容元件为电容, 它既表示电路元件, 又表示元件参数。

和电感类似, 电容也是一个储能元件, 当电容元件两端的电压为 u 时, 它所储存的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-22)$$

式(1-22)表明: 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, 而与电压的过去变化进程无关。

4) 理想电压源

能够向外电路提供恒定或按规律变化电压的元件称为理想电压源。符号及其参数如图 1-16(a) 所示。其中 “+” “-” 号表示电压源电压的参考极性, u_S 称为电压源的参数, 即电压源的数值。当电压源的电压为恒定值时, 称为恒压源或直流电压源, 直流电压源也可采用图 1-16(b) 所示符号, 其伏安特性如图 1-16(c) 所示, 为平行于 i 轴的直线。

理想电压源具有以下两个基本性质:

- ① 电压源的电压恒定或是一定的时间函数, 而与通过它的电流无关;
- ② 电压源的电流由与它连接的外电路决定。

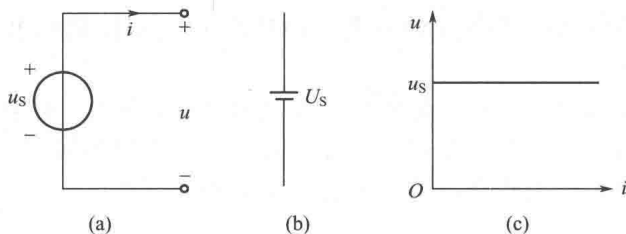


图 1-16 理想电压源符号与外特性

5) 理想电流源

能够向外电路提供恒定或按规律变化电流的元件称为理想电流源, 其符号及其参数如图 1-17(a) 所示。其中箭头表示电流源电流的参考极性, i_S 称为电流源的参数, 即电流源的数值。当电流源的电流为恒定值时, 则称为恒流源或直流电流源, 其伏安特性如图 1-17(b) 所示, 为平行于 u 轴的直线。

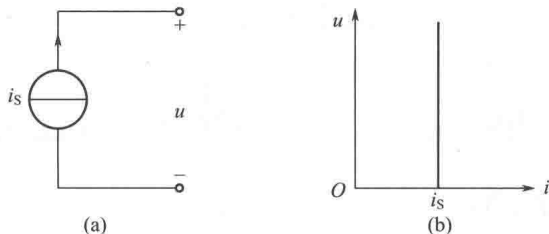


图 1-17 理想电流源符号与外特性

理想电流源具有以下两个基本性质:

- ① 电流源的电流恒定或是一定的时间函数，而与其两端的电压无关；
- ② 电流源的电压由与它所连接的外电路决定。

6) 受控源

在其他支路电压或电流的控制下，能够向外电路提供电压或电流的元件，称为受控源。为了区别于独立源，受控源用菱形符号表示。受控源的符号及其参数如图 1-18 所示。其中 μ 、 r 、 g 和 β 称为受控源的控制系数， u_1 、 i_1 称为受控源的控制量，控制系数和控制量的乘积称为受控源的参数，即受控源的数值。

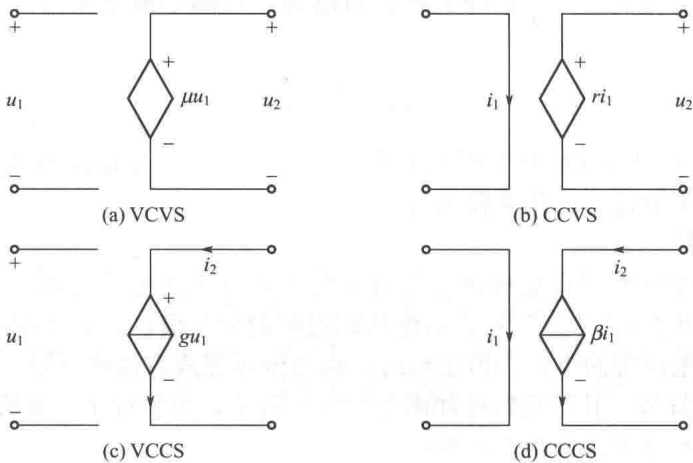


图 1-18 受控源的符号及其参数

根据控制变量是电压、电流，受控的是电压源还是电流源，受控电源可分为四种：电压控制的电压源（VCVS）；电流控制的电压源（CCVS）；电压控制的电流源（VCCS）；电流控制的电流源（CCCS）。

控制系数 μ 和 β 无量纲， r 和 g 分别具有电阻和电导的量纲。控制系数为常数的受控源称为线性受控源，简称为受控源。受控源与独立源不同，当控制量消失或等于 0 时，受控源的电压或电流也将为零，即受控源不能脱离控制量而独立存在。

1.1.5 实际电源模型及其等效变换

理想电源实际并不存在。实际电源不仅对负载产生电能，而且在能量转换过程中有功率损耗，即存在内阻。因此实际电源的电路模型应由理想电源和内阻两部分组成，因为理想电源有两种，故实际电源模型也有两种，即电压源模型和电流源模型。

1) 实际电压源模型

实际电压源的电路模型可用一个理想电压源 u_S 和电阻 R_0 的串联组合来表示。如图 1-19(a)所示，此时端口的伏安关系为

$$u = u_S - R_0 i \tag{1-23}$$

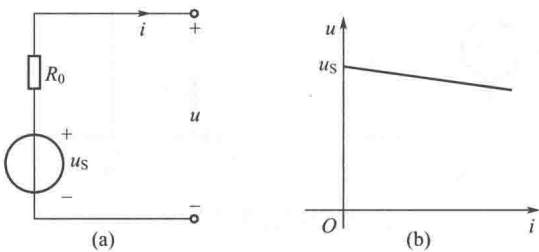


图 1-19 电压源模型及其伏安特性