

高等职业教育电子信息类贯通制教材（电子技术专业）

电 路 基 础

韩春光 主编

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

《电路基础》是电子信息类专业的一门基础课教材。全书共分9章，主要内容有：电路的基本概念、电路的基本分析方法、动态电路、单相正弦稳态电路分析、三相交流电路、非正弦周期信号电路分析、耦合电路、二端口电路。第9章为本教材的实验指导。

本书在编写过程中充分考虑到学生实际情况，按照深入浅出、循序渐进、理论联系实际、便于学生自学和教师施教的原则编写，叙述简练、清楚、通俗易懂。教材中编入的例题较为典型，例题、习题、实验与各章节内容配合密切，以便于学生能较好地掌握基本概念和理论知识。

本书可作为高职电子信息类、通信技术类、机电类、计算机类等专业的电路基础理论课教材，也可作为其他院校相关专业的教材，并对从事电子信息行业的工程技术人员及电子爱好者有一定的参考价值。

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

电路基础/韩春光主编. —北京：电子工业出版社，2004.1

高等职业教育电子信息类贯通制教材（电子技术专业）

ISBN 7-5053-9372-3

I. 电… II. 韩… III. 电路理论—高等学校：技术学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆CIP数据核字（2003）第113839号

责任编辑：刘文杰 特约编辑：王银彪

印 刷：北京牛山世兴印刷厂

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

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：11.25 字数：285千字

印 次：2004年1月第1次印刷

印 数：5000册 定价：15.50元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。
联系电话：（010）68279077。质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言



根据教育部高职高专电子与信息类专业培养目标, 全国五年制高职电子与信息类教材编委会先后多次召开了相关教材教学大纲及编写工作研讨会, 并精心组织教学经验丰富的教师编写高职高专电子与信息类专业系列教材。《电路基础》便是这一系列教材之一。

本书共分为 9 章, 主要内容有: 第 1 章电路的基本概念; 第 2 章电路的基本分析方法; 第 3 章动态电路; 第 4 章单相正弦稳态电路分析; 第 5 章三相交流电路; 第 6 章非正弦周期信号电路分析; 第 7 章耦合电路; 第 8 章二端口电路; 第 9 章为本教材的实验指导。

本书的编写过程中, 充分考虑五年制高职高专层次学生文化基础的实际情况, 按照理论联系实际、循序渐进、便于自学和教师施教的原则编写。教材内容的取舍严格按照高职“必须”、“够用”和“实用”的原则进行, 力求文字叙述简练, 通俗易懂, 把基本概念阐述清晰; 对于电路的分析, 做到步骤清楚, 结论正确, 结合实际并具有实用性; 在例题和习题内容安排方面, 强调基本概念和方法, 尽量避免繁琐的计算, 以期培养学生分析问题和解决问题的能力。

为了便于巩固学生所学的知识 and 理论, 本书结合各章的理论教学内容编写了 11 个实验, 各学校教师可根据各校实际情况选做。为了便于自学, 我们对每个实验的内容、要求和操作方法均做了详细的叙述。

本书由贵州电子信息职业技术学院韩春光副教授担任主编, 负责全书的组织策划、修改和统稿工作, 并编写第 3, 4 章, 实验 1, 5, 6, 7; 重庆电子科技职业学院周英老师编写了第 1, 8 章, 实验 2, 11; 贵州电子信息职业技术学院李华老师编写了第 5, 7 章, 实验 8, 9, 10; 新疆机电职业技术学院张遥副教授编写了第 2, 6 章, 实验 3, 4。

本书在编写出版过程中, 得到贵州电子信息职业技术学院及其他院校领导的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

本书还配有教学指南、电子教案及习题答案(电子版), 请有此需要的教师与电子工业出版社联系, 我们将免费提供。E-mail: ve@phei.com.cn

由于编者水平有限, 书中难免存在缺陷和不足之处, 希望广大读者不吝赐教, 给予批评指正。

编 者
2003 年 8 月



目 录



第 1 章 电路的基本概念	1
1.1 电路的模型	1
1.1.1 电路的组成及作用	1
1.1.2 负载的模型	2
1.1.3 电源的模型	5
1.2 电路的基本物理量	9
1.2.1 电流	9
1.2.2 电压	10
1.2.3 电位	11
1.2.4 电功率	12
1.2.5 电能	13
1.3 电路的工作状态	13
1.3.1 通路	13
1.3.2 短路	13
1.3.3 开路	14
1.4 串、并联等效电路	14
1.4.1 等效电路的定义	14
1.4.2 电阻的串、并联等效电路	14
1.4.3 电源的串、并联等效电路	17
1.5 基尔霍夫定律	18
1.5.1 几个有关的电路名词	18
1.5.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)	18
1.5.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)	19
1.5.4 基尔霍夫定律的应用举例	20
1.6 含受控源的电路分析	21
习题 1	22
第 2 章 电路的基本分析方法	26
2.1 支路电流法	26
2.2 网孔电流分析法	28
2.2.1 网孔电流的概念	28
2.2.2 网孔电流方程	28
2.2.3 网孔电流法的解题步骤	29

2.3	叠加原理	30
2.4	戴维南定理	33
2.4.1	戴维南定理的内容	33
2.4.2	戴维南定理的应用	33
2.4.3	负载获得最大功率的条件	35
	习题 2	37
第 3 章	动态电路	40
3.1	动态的基本概念	40
3.1.1	动态电路及动态的定义	40
3.1.2	换路定律	40
3.1.3	动态电路的微分方程及其解	42
3.1.4	零输入响应、零状态响应与完全响应的概念	44
3.1.5	暂态响应与稳态响应	45
3.2	一阶动态电路三要素分析法	46
3.2.1	直流一阶电路的过渡过程	46
3.2.2	三要素分析法	48
3.2.3	解题举例	49
3.3	二阶暂态电路	51
	习题 3	54
第 4 章	单相正弦稳态电路分析	57
4.1	正弦信号的基本概念	57
4.1.1	正弦信号三要素	57
4.1.2	正弦量的相量表示	61
4.2	正弦电路的相量分析	70
4.2.1	R, L, C 串联电路的分析	70
4.2.2	阻抗的串联	73
4.2.3	R, L, C 并联电路的分析	74
4.2.4	阻抗与导纳的等效互换	78
4.3	正弦稳态电路的分析	79
4.4	正弦交流电路的功率	81
4.4.1	电路基本元件的功率	81
4.4.2	正弦稳态电路的功率	84
4.4.3	功率因数的提高和最大功率传输条件	87
4.5	谐振电路	91
4.5.1	串联谐振	91
4.5.2	并联谐振	97
	习题 4	100
第 5 章	三相交流电路	104
5.1	三相电源	104

5.1.1	三相电源的概念	104
5.1.2	三相电源的Y形联接	105
5.1.3	三相电源的 Δ 形联接	106
5.2	三相负载的星形联接	107
5.3	三相负载的三角形联接	109
5.3.1	相电流	110
5.3.2	线电流	110
5.4	三相电路的功率	111
5.4.1	对称三相电路的功率	111
5.4.2	不对称三相电路的功率	113
	习题5	114
第6章	非正弦周期信号电路分析	116
6.1	非正弦周期信号的概念	116
6.1.1	常见的非正弦周期信号	116
6.1.2	非正弦周期信号的分解	117
6.1.3	波形的对称性与所含谐波成分的关系	117
6.1.4	波形的光滑程度与所含谐波成分的关系	118
6.2	非正弦周期信号的频谱	118
6.3	非正弦周期信号的有效值与平均值	119
6.3.1	非正弦周期信号的有效值	119
6.3.2	非正弦周期信号的平均值	119
6.4	非正弦周期信号电路分析	120
	习题6	123
第7章	耦合电路	125
7.1	耦合的基本概念	125
7.1.1	互感与耦合	125
7.1.2	互感线圈的同名端	126
7.1.3	耦合系数 k	127
7.2	互感耦合电路	128
7.2.1	耦合电感的伏安特性	128
7.2.2	去耦等效电路	130
7.3	变压器	134
7.3.1	理想变压器	134
7.3.2	全耦合变压器	135
7.3.3	实际变压器的模型及电路计算	136
	习题7	141
第8章	二端口电路	143
8.1	二端口电路的一般概念	143
8.2	二端口电路的方程和参数	143

8.2.1	阻抗方程和 Z 参数	143
8.2.2	导纳方程与 Y 参数	144
8.2.3	传输方程与 A 参数	145
8.2.4	混合方程与 H 参数	145
8.3	二端口电路的等效	146
8.3.1	无源线性二端口电路的等效 T 形电路	146
8.3.2	无源线性二端口电路的等效 Π 形电路	146
8.4	二端口电路的联接	147
8.4.1	二端口电路的级联	147
8.4.2	二端口电路的串、并联	148
习题 8	149
第 9 章	电路基础实验	151
实验 1	直流电路中电位与电压的关系	151
实验 2	基尔霍夫定律	152
实验 3	叠加原理	153
实验 4	电压源外特性与戴维南定理	154
实验 5	一阶电路响应特性	156
实验 6	R, L, C 元件在直流和交流电路中的特性	157
实验 7	R, L, C 元件在正弦交流电路中的特性	159
实验 8	改善功率因数	161
实验 9	三相交流电路中电压与电流的关系	162
实验 10	互感电路	164
实验 11	二端口电路参数的测定	166
参考文献	168

第1章 电路的基本概念



1.1 电路的模型

1.1.1 电路的组成及作用

1. 电路

随着社会的发展，在我们的日常生活、工农业生产、国防、科技等领域都用到电，电与我们越来越密切。用电就要涉及电路，电路是多种多样，不管电路的具体形式和复杂程度如何，它们都由一些最基本部件组成。

图 1.1 所示为电路的组成，图 (a) 为干电池、开关、灯组成的实际电路；图 (b) 为符号表示的电路。

由电器设备和元器件按一定方式联接起来，为电流流通提供路径的总体称为电路，也叫网络。所有电路从本质上来说都由三部分组成：电源、负载、中间环节。

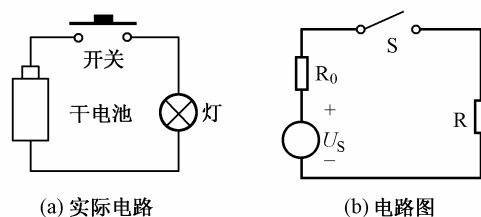


图 1.1 电路的组成

(1) 电源。它是给电路提供能源的设备、器件，其作用是把化学能、光能、机械能等非电能转换为电能。常见的电源有蓄电池、干电池、太阳能电池和发电机等。

(2) 负载。通常也称为用电器，它是将电能转换成其他形式能的元器件或者设备，如电灯、电动机、扬声器等。

(3) 中间环节。其作用是将电源和负载联接起来形成闭合电路，并对整个电路实行控制、保护及测量。它主要包括：联接导线、控制电器（如开关、插头、插座等）、保护电器（如熔断器等）、测量仪表（如万用表等）。

电路的基本作用是实现电能与非电能之间的转换。根据其侧重点不同，可将其按功能概括为两个方面：其一，实现电能的传输和转换。例如电力网络将电能从各个发电厂输送到各工厂、农村和千家万户，供各种电气设备使用；其二，实现电信号的传输、处理和存储。例如电视机接收含有声音和图像信息的高频电视信号通过高频传输线送到电视机中，这些信号经过选择、变频、放大和检波等处理，恢复出原来的声音和图像信息，在扬声器中发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。

2. 单位制

1984 年国务院发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，明确规定国际单位制 (SI) 是我国法定计量单位的基础。1986 年修订后，国务院再次发布命令，要求全面执行。



在国际单位制中有 7 个基本单位，其中，长度以米 (m) 为单位；质量以千克 (kg) 为单位；时间以秒 (s) 为单位；电流以安培 (A) 为单位；热力学温度以开尔文 (K) 为单位；物质的量以摩尔 (mol) 为单位；发光强度以坎德拉 (cd) 为单位。其他物理量的单位可以根据其定义从这些基本单位导出。表 1.1 中列出了部分国际单位制 (SI) 的单位。

表 1.1 部分国际单位制 (SI) 的单位

量的名称	单位名词	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m	电荷[量]	库[仑]	C
时间	秒	s	电位、电压	伏[特]	V
电流	安[培]	A	电容	法[拉]	F
频率	赫[兹]	Hz	电阻	欧[姆]	Ω
能量、功	焦[耳]	J	电导	西[门子]	S
功率	瓦[特]	W	电感	亨[利]	H

除了 SI 主单位之外，有时需要用 SI 单位的十进制倍数单位和分数单位，则在原单位上加词头。常用国际单位制词头如表 1.2 所示。

表 1.2 常用国际单位制词头

因数	词头中文名称	符号	因数	词头中文名称	符号
10^{12}	太	T	10^{-1}	分	d
10^9	吉	G	10^{-2}	厘	c
10^6	兆	M	10^{-3}	毫	m
10^3	千	k	10^{-6}	微	μ
10^2	百	h	10^{-9}	纳	n
10^1	十	da	10^{-12}	皮	p

1.1.2 负载的模型

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等电气器件和设备联接而成的电路称为实际电路。实际的元器件在电路中所发生的物理现象十分复杂，若把它们所有电磁特性全部考虑进去，将会使电路的分析变得十分繁琐，甚至难以进行。把组成电路的实际元器件加以理想化、近似化，用一个足以反映主要性质的模型——理想化元件来表示每一种电路中的实际元器件。用理想化的电阻、电感、电容等电路元件近似模拟实际电路中每个电气器件和设备，再根据这些器件的实际联接方式，用理想导线将这些电路元件联接起来，就得到实际电路的电路模型。将一个实际电路抽象为简单而精确的电路模型的工作，有时是很复杂和困难的。本课程只涉及一些简单的情况，其目的是为了牢固地树立“电路模型”的概念。今后所说的电路均指这种抽象的电路模型。

1. 电阻的模型

如果一个二端元件在任何时刻的电压 u 与其电流 i 的关系由 u - i 平面上一条曲线确定，则此二端元件称为二端

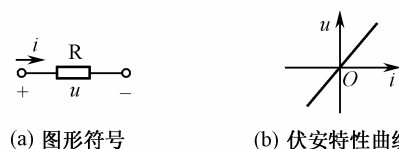


图 1.2 线性电阻元件图形符号及伏安特性曲线

图 1.2 线性电阻元件图形符号及伏安特性曲线

电阻元件, 用 R 表示。线性电阻元件的图形符号及伏安特性曲线如图 1.2 所示。伏安特性曲线表明了电阻的电压与电流间的约束关系, 简称 VCR。由线性电阻的伏安特性曲线可知, 电压与电流的约束关系称为欧姆定律。在电压、电流参考方向关联下 (如图 1.2 所示的参考方向), 其数学表达式为

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

电阻元件的特点是电压与电流存在一种确定的代数约束关系。其物理现象是电阻元件只能消耗电能, 即不储存电能也不储存磁能。如白炽灯、电阻器、电热器等电器设备, 在一定条件下, 可认为是电阻元件。电阻元件的单位是欧姆, 符号为 Ω , 还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 等。电阻元件简称电阻。这样, 电阻一方面表示一个电阻元件, 另一方面表示这个元件的参数。

令 $G = \frac{1}{R}$, 则式 (1-1) 变为

$$i = Gu \quad (1-2)$$

式中, G 称为电阻元件的电导, 单位是西门子, 符号为 S 。

如果线性电阻元件的电压、电流参考方向非关联下, 则欧姆定律的表达式为

$$u = -Ri \quad (1-3)$$

或

$$i = -Gu \quad (1-4)$$

【例 1.1】 一电阻元件, 电压和电流的参考方向相同, 当外加电压 $U = 10V$ 时, 其电流 $I = 2mA$, 求其电阻和电导。

解: $R = \frac{U}{I} = \frac{10}{2 \times 10^{-3}} = 5 \times 10^3 \Omega = 5k\Omega$

$$G = \frac{1}{R} = 0.2 \times 10^{-3} S$$

2. 电感的模型

电感元件是电感器的 (理想的) 电路模型。线性电感元件是一个二端理想化元件。假设线圈是由无电阻的导线绕制而成的, 且周围无铁磁物质。线圈通以电流, 其中便产生磁通 Φ 。如果有 N 匝线圈, 则线圈的磁链为

$$\Psi = N\Phi$$

如果线圈的电流与磁链的参考方向符合右手螺旋法则, 则线圈的磁链 Ψ 与电流 i 的关系为

$$\Psi = Li \quad (1-5)$$

式中, L 称为线圈的自感或电感, 它是与电流、磁链无关的正实常数。这种理想化的线圈就是线性电感元件, 参数是自感或电感 L 。自感的单位是亨利, 单位符号为 H , 还有毫亨 (mH)、微亨 (μH)。电感元件简称电感, 它既代表电感元件, 也表示电感参数。

理想的电感元件只储存磁能, 既不消耗电能, 也不储存电能。磁场中储存着能量。用理想电感来反映储存磁能的特征, 其图形符号和韦安特性曲线如图 1.3 所示。

当通过电感的电流变化时, 若电感元件两端电流与磁链的参考方向符合右手螺旋法则, 电压与电流采用如图 1.3 所示的关联参考方向时, 则感应电压为

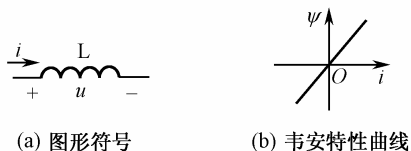


图 1.3 线性电感元件图形符号及韦安特性曲线



$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

上式表示为电感元件的伏安关系。由此可见，电感元件的电压与电流的大小和方向无关，只与电流的变化率有关，只有变化的电流才能产生电压。也就是说，即使电感元件上的电流不为零，若该电流为常数（直流），感应电压也为零。这种特性表明电感是一种动态元件。在直流稳定状态电路中，电感相当于短路。

当电感元件两端电压与电流取关联参考方向时，电感元件的瞬时吸收功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

电感元件某一时刻的瞬时储能是瞬时吸收功率的累积，即

$$W_L = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{d\tau} d\tau = \frac{1}{2} L[i^2(t) - i^2(-\infty)]$$

设 $i(-\infty) = 0$ ，则电感元件的瞬时储能为

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} \frac{\psi^2}{L}$$

这表明任意时刻电感元件的瞬时储能总是大于或等于零，电感属于无源元件。

3. 电容的模型

在实际应用中，电容器的应用很广泛，它是由绝缘介质隔开的两块金属极板构成的。电容器加上电源后，极板上分别聚集起等量异号电荷。此时，在介质中建立起电场，并储存电场能量。带正电荷的极板称为正极板，带负电荷的极板称为负极板。当电源断开后，电荷仍然能在极板上聚集一段时间，内部电场继续存在。因此，电容是一种能储存电场能量的元件。

当电容元件上电压的参考方向由正极板指向负极板时，则任何时刻极板上的电荷量 Q 与极板间电压 u 的关系为

$$Q = Cu \tag{1-6}$$

式中， C 称为电容元件的电容。它是与电荷 Q 、电压 u 无关的正实数。电容的单位是法拉，单位符号为 F。在实际中往往用微法（ μF ）、皮法（ pF ）等单位。

$$1\text{F} = 10^6\mu\text{F} \quad \text{F} = 10^{12}\text{pF}$$

电容元件简称电容，这样电容既代表电容元件，也代表电容参数。

理想的电容元件只储存电能，既不消耗电能，也不储存磁能。用理想电容来反映储存电能特征，其图形符号及库伏特性曲线如图 1.4 所示。电容元件有两个重要的参数：电容量和工作电压。

当电容进行充、放电时，电容的电压将发生变化，极板上电荷的数量也相应地改变，这时与电容相连的电路中就会形成电流。电容两端电压与电流采用如图 1.4 所示的关联参考方向时，电容元件的伏安关系为

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

由此可见，电容元件的电流与其端电压的大小和方向无关，只与电压的变化率有关，只有电压发生变化才能产生电流。也就是说，即使电容元件两端的电压不为零，若该电压为常数（直流），流过电容的电流也为零。这种特性表明电容也是一种动态元件。在直流稳定状态

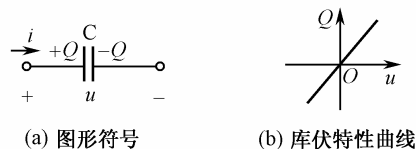


图 1.4 线性电容元件符号及库伏特性

电路中，电容相当于开路。

当电容两端电压与电流取关联参考方向时，电容元件的瞬时吸收功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

与电感元件的瞬时储能类似，电容元件某一时刻的瞬时储能也是瞬时吸收功率的累积，即

$$W_C = \int_{-\infty}^t Cu \frac{du}{d\tau} d\tau = \frac{1}{2} C[u^2(t) - u^2(-\infty)]$$

设 $u(-\infty) = 0$ ，则电容元件的瞬时储能为

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

这表明任意时刻电容元件的瞬时储能总是大于或等于零，电容属于无源元件。

1.1.3 电源的模型

常用的直流电源有干电池、蓄电池、直流发电机、直流稳压电源和直流稳流电源等。常用的交流电源有电力系统提供的正弦交流电源、交流稳压电源和产生多种波形的各种信号发生器等。这些实际的电源有一个共同的特点是向电路输出电压、电流。

1. 理想电源的模型

(1) 理想电压源的模型。在正常供电情况下，不管外部电路如何变化，其端电压基本保持常量或确定的时间函数的电源称为理想电压源。理想电压源的模型如图 1.5 (a) 与 (b) 所示。图中的“+”与“-”号代表理想电压源的极性（参考方向）。图 1.5 (a) 为交流理想电压源的模型， $u_S(t)$ 是理想电压源的输出电压。当 $u_S(t)$ 不随时间变化时，即 $u_S(t)$ 为常量时，电源为直流理想电压源，如图 1.5 (b) 所示。

电源元件的特性可以用它的输出电压与输出电流之间的关系来表示。此关系称为电源的外特性，如图 1.6 所示。理想直流电压源输出的电压是一常量，这一常量是相对电流而言的。

理想的电压源具有两个特点：

① 它的电源输出的电压表现为确定的时间常数，即 $u_S(t) = u_S(t_1), u_S(t_2), \dots, u_S(t_n)$ ，此函数与电流无关，即 $u_S(t)$ 是一个固定的函数，与所联接的外电路无关；

② 通过它的电流随着与它联接的外电路不同而改变。

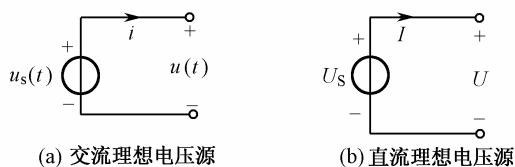


图 1.5 理想电压源的模型

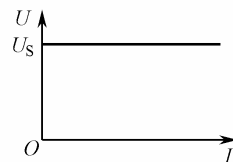


图 1.6 理想直流电压源外特性

(2) 理想电流源的模型。在正常供电情况下，不管外部电路如何变化，输出电流基本保持常量或确定的时间函数的电源称为理想电流源。理想电流源的模型如图 1.7 所示，理想电流源的外特性曲线如图 1.8 所示，曲线是一条平行电压轴的直线。理想电流源输出电流 $i_S(t)$ ，当 $i_S(t)$ 为常数时，电源为直流理想电流源，其输出电流值为 I_S 。



理想电流源的特点:

- ① 通过电流源的电流是定值或是一定的时间函数 $i_S(t)$ ，而与端电压无关;
- ② 电流源的端电压是随着与它联接的外电路的不同而不同。

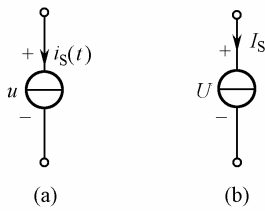


图 1.7 理想电流源的模型

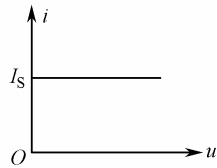


图 1.8 理想电流源外特性曲线

2. 实际电源的电路模型

(1) 实际电压源的模型。实际电源的电压或电流往往会随着电源电流或电压的增加而下降，如干电池、蓄电池等。此时我们用一个电阻 R_0 和一理想电压源（输出电压 U_S ）串联来表示实际电压源模型，如图 1.9 (a) 所示。此时实际电压源的端电压为

$$U = U_S - R_0 I \quad (1-7)$$

实际电压源的端电压即输出电压将不再是恒量，而是受到输出电流的影响。图 1.9 (b) 为实际电压源的伏安特性曲线。由式 (1-7) 可看出， I 越大，内阻 R_0 上电压降越大，输出电压 U 越低。

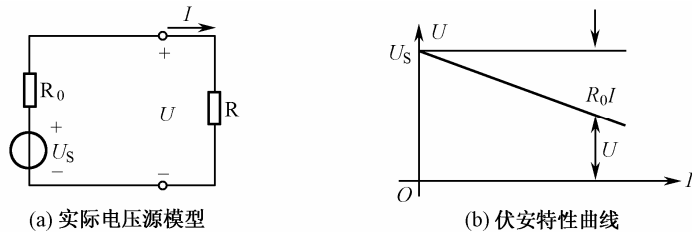


图 1.9 实际电压源的模型及伏安特性

(2) 实际电流源的模型。如果电流源输出电流是随着端电压的变化而变化的，这就是实际电流源。实际电流源可以用一个理想电流源 I_S 和内电阻 R_S 相并联的模型来表示。图 1.10 (a) 所示为实际电流源的模型；图 1.10 (b) 为实际电流源的伏安特性曲线。

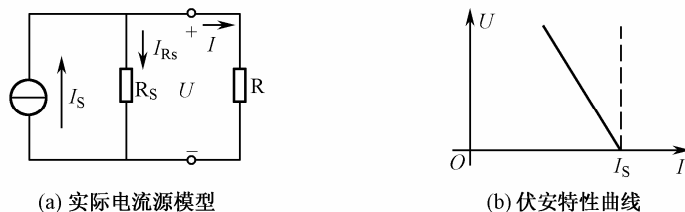


图 1.10 实际电流源的模型及伏安特性

当与外电阻相联接时，实际直流电源的输出电流 I 为

$$I = I_S - \frac{U}{R_S} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可知，端电压 U 越大，内部分流也越大，输出的电流

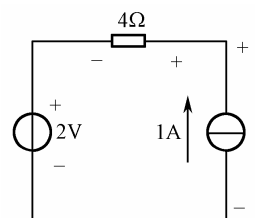


图 1.11 【例 1.2】图

就越小。

【例 1.2】 试求图 1.11 所示电路中电流源的端电压。

解： 根据电流源的特性，其输出电流为定值，与外电路无关，故流过 4Ω 电阻的电流应为 1A ，电阻上电压为 4V ，极性如图中所示。

电流源的端电压则由与之相联接的外电路决定。设端电压极性如图 1.11 所示，可得电流源的端电压为

$$U = 4 + 2 = 6\text{V}$$

(3) 实际电源之间的等效互换。实际电源的两种电路模型：电压源与电流源模型。同一个实际电源的外特性可以通过以上两种模型来表示，因而实际电源的这两种模型是可以相互等效互换的。实际电源的等效互换关系只是对外电路而言的，而对电源内部，则是不等效的。

实际电压源与实际电流源之间相互等效互换的条件为：

① 由实际电压源转换为实际电流源时： $I_S = \frac{U_S}{R_i}$ ， $R_S = R_0$ 。

② 由实际电流源等效为实际电压源时： $U_S = I_S \times R_S$ 。

图 1.12 所示为实际电压源与实际电流源之间的等效互换电路。

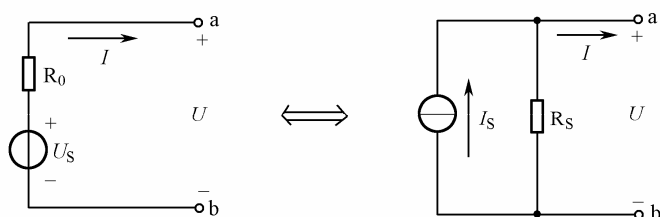


图 1.12 【例 1.2】图

在处理实际电源等效变换的问题时，还要注意以下几点：

- ① 实际电源之间可以进行等效变换，而理想电压源与理想电流源之间不能等效变换。
- ② 实际电源等效时要保证等效前后电源的方向一致。如 a 点是电压源的参考正极性，变换后电流源其电流的参考方向应指向 a 点，如图 1.12 所示。
- ③ 凡是与理想电压源并联的电路元件（包括理想电流源），等效时均可省去；同样凡是与理想电流源串联的电路元件（包括理想电压源），等效时均可省去。

【例 1.3】 试求图 1.13 所示电路的等效变换。

解： 图 1.13 (a) 图 $I_S = \frac{U_S}{R_0} = \frac{10}{2} = 5\text{A}$

$$R_S = R_0 = 2\Omega$$

根据原来 U_S 的极性，可知电流源 I_S 的箭头方向向下。

图 1.13 (b) 图 $U_S = I_S R_S = 6 \times 10 = 60\text{V}$

$$R_0 = R_S = 10\Omega$$

因为 I_S 箭头向上，所以 U_S 参考极性是上为“+”，下为“-”。

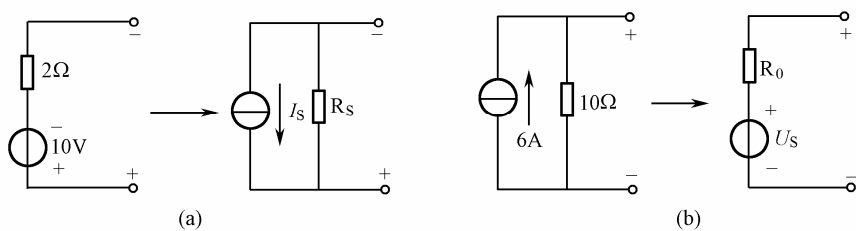


图 1.13 【例 1.3】图

【例 1.4】将如图 1.14 电路等效为电流源的模型。

解：如图 1.14 (a) 图所示，由于 1A 的电流源与 5Ω 的电阻串联，所以此 5Ω 电阻等效时省去。电压源与 5Ω 电阻串联，可等效为电流源与一个电阻并联，电流源的电流及电阻为

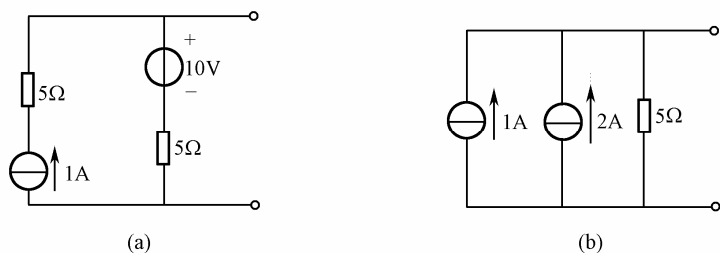


图 1.14 【例 1.4】图

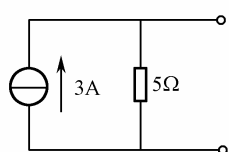


图 1.15 等效电路

$$I_S = \frac{10}{5} = 2A \quad R_S = 5\Omega$$

I_S 的方向如图 1.14 (b) 图所示，所以整个电路等效（如图 1.15 所示）时的电流源电流、电阻为

$$1A + 2A = 3A \quad R_S = 5\Omega$$

3. 受控源的模型

前面介绍的电源都是独立源，它们的电压或电流是一定值或是一个固定的时间函数。在电路分析中还会遇到另一类电源，它们的电压或电流受电路中其他的电压或电流的控制，称为受控源。

独立源与受控源在电路中的作用不同。独立源作为电路的输入，反映了外界对电路的作用；受控源是用来表示电路的某一器件中所发生的物理现象，反映了电路中某处的电压或电流能控制另一处的电压或电流。当受控源的电压或者电流发生变化，受控的电压或者电流也发生变化，所以受控源又称非独立源。如晶体三极管基本上是一个电流控制元件，场效应管基本上是一个电压控制元件，运算放大器既是电压控制元件，又是电流控制元件。

根据控制量是电压还是电流，受控的是电压源还是电流源，受控源分成四种：电压控制电压源（VCVS）、电压控制电流源（VCCS）、电流控制的电压源（CCVS）、电流控制电流源（CCCS）。四种受控源的模型如图 1.16 (a), (b), (c), (d) 所示。四种受控源在受控端与控制端之间的转移关系分别用 μ , g_m , r_m , β 来表示。常常把受控源表示成具有两对端钮的电路模型，控制量为一对端钮之间的电压与电流，被控制量存在于另一对端钮之间，这样常会带来方便。

对于含有受控源的线性电路，也可以用电路的基本定律和分析方法，但考虑到受控源的

特性，在分析与计算时，需要注意几点：

(1) 受控源也是电源，它和其他电路元件一样，也按 KVL 与 KCL 列方程。在遇到节点或封闭联接有受控电流源时，可将受控源当做独立源看待，列出 KVL 与 KCL 方程，但要注意受控源的特点。

(2) 遇到受控电压源与电阻串联，或受控电流源与电阻并联时，同样可以进行电源等效互换。受控电压源串联，受控电流源并联等效均可仿效独立电压源与独立电流源等效的办法进行。但要注意：控制量所在支路不要变掉。

(3) 对于含有受控源的二端网络，在求二端网络的输入电阻时，不能简单地用电阻的串联和并联等效方法，而是要在端子间加电源的方法来求：加电压 U 求电流 I ；加电流 I 求 U ，则等效电阻 $R=U/I$ 。 R 的值可以为正也可以为负，当然也可以为零。

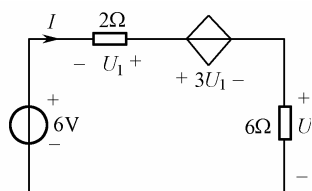


图 1.17 【例 1.5】图

【例 1.5】试求图 1.17 电路中电流 I 的值。

解：根据 KVL 列方程

$$-U_1 + 3U_1 + U_2 = 6$$

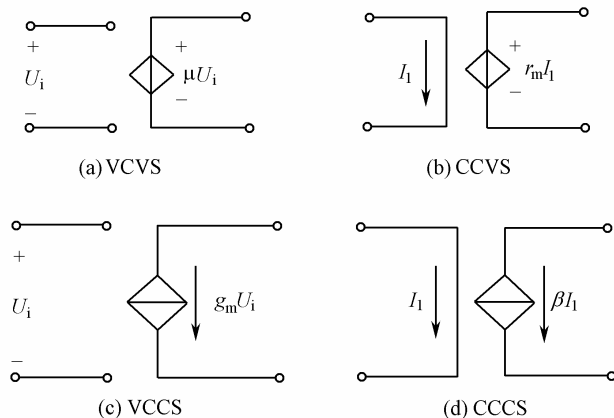
$$U_1 = -2I, \quad U_2 = 6I$$

$$-(-2I) + 3(-2I) + 6I = 6$$

$$I = 3\text{A}$$

由图可知
代入得

图 1.16 四种受控源的模型



1.2 电路的基本物理量

电路的特性由电流、电压和电功率等物理量描述。电路的基本物理量有四个：电流、电压、电荷和磁通。其中常用的有两个：电流和电压。电功率和电能（量）为基本复合量。

1.2.1 电流

在物理学中讲过，电荷（电子或离子）在电场力或其他外力（电磁力，化学力等）作用下，电荷的定向运动形成电流。电流的实际方向习惯上指正电荷运动的方向，电流的大小常用电流强度来表示。电流强度指单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度习惯上又简称为电流，用 i 来表示。

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-9)$$

电流在电路中的产生通常有两个条件：一是有电源供电，二是电路必须是闭合的。

电流主要分为两类：一类是大小及方向均不随时间改变的电流称为直流电流，常写成 dc 或者 DC，其电流强度用符号 I 来表示；另一类是大小及方向随时间改变的电流称为交流电流，常写成 ac 或者 AC。

电流的单位是安培，SI 的符号为 A。它表示 1 秒 (s) 内通过截面的电荷为 1 库[仑] (C)。有时也用到千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA)，其关系如下：



$$1 \text{ kA} = 1000 \text{ A} = 10^3 \text{ A}$$

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

在分析电路时，对复杂电路中某一段电路里电流的实际方向有时很难立即判断，有时电流的实际方向还在不断地变化，因此在电路中很难标明电流的实际方向。为了解决这样的问题，引入了电流的“参考方向”的概念。

在一段电路或一个电路元件中事先选定一个方向，这个选定的电流方向就叫做电流的参考方向。参考方向可以任意选定，当然所选定的参考方向并不一定是电流的实际方向，如图

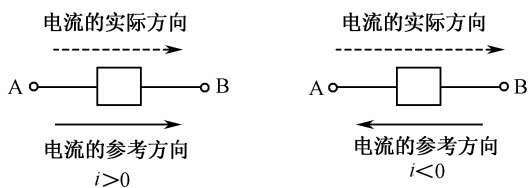


图 1.18 电流的参考方向

1.18 所示。

我们规定：若电流的实际方向与任意选定的电流参考方向一致，则电流值为正值，即 $i > 0$ ；若电流的实际方向与任意选定的电流参考方向相反，则电流值为负值，即 $i < 0$ 。这样，我们就可以在选定的电流参考方向下，根据电流值的正、负来确定出某一时刻电流的实际方向。

电流的参考方向是有关电路分析计算的一个重要概念。不规定参考方向而谈论一个电流 i 的值是讨论一个不确定的事物。因此电流的表示既要有大小也要有方向。

【例 1.6】 已知某段电路如图 1.19 (a) 与 (b) 所示，试确定通过电阻 R 上的电流实际方向。

解： 图 1.19 (a) 与 (b) 中 I 的方向均为参考方向。

因为图 1.19 (a) 中 $I = -0.5 \text{ A} < 0$ ，说明 I 的参考方向与实际方向相反，故图 1.19 (a) 中电流实际方向为： $B \rightarrow A$ 。

图 1.19 (b) 中 $I = 0.5 \text{ A} > 0$ ，说明 I 的参考方向与实际方向一致，故图 1.19 (b) 中电流实际方向为： $A \rightarrow B$ 。

测量电流的大小用电流表，对直流电路用电流表测量时，要将电流表串联在被测电路中，并要保证电流从电流表正极流入，负极流出。

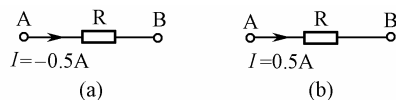


图 1.19 【例 1.6】图

1.2.2 电压

电荷在电路中移动，就会有能量的交换发生。单位正电荷由电路中 a 点移到 b 点所获得或失去的能量，称为 ab 两点的电压，即

$$U = \frac{W}{Q} \quad (1-10)$$

式中， Q 为由 a 点移到 b 点的电荷量，单位为库[仑]； W 为电荷移动过程中所获得或失去的能量，单位为焦[耳] (J)；电压的 SI 单位为伏[特] (V)，还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV)。

将电路中任意一点作为参考点，把 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位，用符号 V_a 表示。电路中任意两点的电位大小与参考点的选择有关。当参考点选择不同时，则同一点的电位值也将随之改变。两点之间的电位差称为两点的电压，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-11)$$