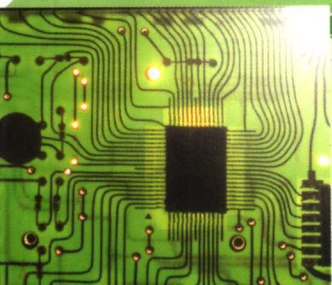


▶ 高职高专电子信息类规划教材



电路分析基础

刘连新 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高职高专电子信息类规划教材

电路分析基础

主 编 刘连新

副主编 李国利 王红梅 韩秋静

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书共 7 章, 内容包括电路与电路定律、电路的等效变换、电路的基本分析方法、正弦交流电路、互感电路的分析、动态电路时域分析、EWB 5.0 电路仿真软件介绍。

本书充分体现了高职高专教育特点, 力求叙述简明, 重点突出, 内容深入浅出, 通俗易懂; 例题、习题丰富, 书后附有各章习题参考答案。

本书可供高职高专和成人高校电气类、电子类、电工类、通信类各专业作为教材使用, 也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路分析基础 / 刘连新主编. —北京: 中国铁道出版社,
2007. 7

高职高专电子信息类规划教材

ISBN 978-7-113-08286-4

I. 电… II. 刘… III. 电路分析—高等学校: 技术学校—
教材 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 135210 号

书 名: 电路分析基础

作 者: 刘连新 等

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

策划编辑: 严晓舟 秦绪好

责任编辑: 陈 宏

特邀编辑: 韩玉彬

责任校对: 王春霞

封面设计: 付 巍

封面制作: 白 雪

印 刷: 三河市国英印务有限公司

开 本: 797×1092 1/16 印张: 11 字数: 251 千

版 本: 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 1~3 000 册

书 号: ISBN 978-7-113-08286-4/TP·2565

定 价: 18.00 元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签, 无标签者不得销售

凡购买铁道版的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 请与本社计算机图书批销部调换。

本书是根据教育部最新制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》，结合当前高职高专机电类专业《电路分析基础》课程实际教学需要编写的一本专业技术基础课教材。全书共分7章，其主要内容有：电路与电路定律、电路的等效变换、电路的基本分析方法、正弦交流电路、互感电路的分析、动态电路时域分析、EWB 5.0 电路仿真软件简介。

本书充分考虑高职层次学生教学基础的实际，按照循序渐进、理论联系实际、便于自学的原则编写，教材的内容以适量、实用为度，适当降低难度；编写力求叙述简练，概念清晰，通俗易懂。对电路的分析求解，做到步骤清楚，举例具有典型性。每章都精心选配了大量习题，覆盖了本书中要求理解和掌握的全部内容，以巩固基本概念及加强分析电路能力的培养，且课后习题附有答案，便于自学。

本书为高职高专相关专业电路分析理论课的教材。本书在编写过程中参考了许多同行们编写的优秀教材，从中受到了不少教益和启发，在此对各位作者表示衷心的感谢。

本书由刘连新同志任主编，负责全书的组织策划和定稿工作，并编写了第1、2、3章；李国利、王红梅、韩秋静任副主编，李国利编写了第4、7章，王红梅编写了第5章，韩秋静编写了第6章。李祥臣教授、曲世光副教授在百忙中审阅了本书的初稿，并提出了许多宝贵意见，王艳、杨学风等同志审阅并演算了全书的例题与习题，并结合自己多年教学经验提出了许多建议，编者谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥和错误之处，欢迎读者批评指正。

编者

2007年5月

第 1 章 电路与电路定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.1.1 电路及其组成	1
1.1.2 电路模型	1
1.1.3 电路的工作方式	1
1.2 电流、电压及其参考方向	2
1.2.1 电流及其参考方向	2
1.2.2 电压及其参考方向	3
1.3 欧姆定律、电阻及电导	4
1.3.1 电阻元件	4
1.3.2 线性电阻及欧姆定律	4
1.4 电功率和电能	5
1.4.1 电功率	5
1.4.2 电能	6
1.5 电压源和电流源	7
1.5.1 电压源	7
1.5.2 电流源	8
1.5.3 受控源	9
1.6 基尔霍夫定律	9
1.6.1 几个常用的电路术语	9
1.6.2 基尔霍夫电流定律	10
1.6.3 基尔霍夫电压定律	11
1.7 用电位的概念分析电路	11
本章小结	12
习题 1	13
第 2 章 电路的等效变换	16
2.1 电路等效的概念	16
2.2 电阻的串、并、混联	16
2.2.1 电阻的串联	16
2.2.2 电阻的并联	17
2.2.3 电阻的混联	18
2.3 $\triangle$ 形和 Y 形电阻电路的等效变换	19
2.4 两种组合电路的等效变换	20
2.4.1 两种组合电路的等效互换	20
2.4.2 电压源、电流源的串联与并联	21

2.4.3 受控源及其等效变换	23
本章小结	24
习题 2	26
第 3 章 电路的基本分析方法	28
3.1 支路电流法	28
3.1.1 分析线性电路的一般方法	28
3.1.2 支路电流法	28
3.2 网孔电流法	29
3.3 节点电压法	34
3.3.1 节点电压法	34
3.3.2 弥尔曼定理	38
3.4 叠加定理	39
3.5 替代定理	42
3.6 戴维南定理和诺顿定理	43
3.6.1 戴维南定理	44
3.6.2 诺顿定理	46
3.6.3 等效电阻	47
3.7 含有受控源的简单电路的分析计算	48
本章小结	50
习题 3	51
第 4 章 正弦交流电路	56
4.1 正弦交流电的基本概念	56
4.1.1 正弦交流电的三要素	56
4.1.2 相位差	57
4.1.3 有效值	58
4.2 电感元件和电容元件	59
4.2.1 电感元件	59
4.2.2 电容元件	61
4.3 正弦交流电的相量表示法	62
4.3.1 复数	62
4.3.2 正弦量的相量表示	64
4.3.3 用相量求正弦量的和与差	65
4.4 正弦交流电路中的电阻、电感和电容元件	66
4.4.1 电阻元件	66
4.4.2 电感元件	68
4.4.3 电容元件	70
4.5 基尔霍夫定律的相量形式	72
4.5.1 基尔霍夫电流定律的相量形式	72

4.5.2 基尔霍夫电压定律的相量形式.....	73
4.6 RLC 串联电路	73
4.6.1 电压和电流的关系	73
4.6.2 复阻抗	74
4.6.3 电路的性质	75
4.7 RLC 并联电路	76
4.7.1 电压与电流的关系	76
4.7.2 电路的性质	78
4.7.3 复阻抗与复导纳的等效变换	78
4.8 用相量法分析正弦交流电路	79
4.8.1 复阻抗混联电路的分析计算	79
4.8.2 用相量法分析正弦交流电路	81
4.9 正弦交流电路的功率	85
4.9.1 瞬时功率	85
4.9.2 有功功率、无功功率和视在功率	85
4.9.3 功率因数的提高	87
4.10 交流电路中的谐振	89
4.10.1 串联谐振	89
4.10.2 并联谐振	91
4.11 三相正弦电路	94
4.11.1 对称三相正弦电源	94
4.11.2 三相电源的连接	95
4.11.3 三相负载的连接	96
4.11.4 三相电路的功率	100
本章小结	101
习题 4	104
第 5 章 互感电路的分析	109
5.1 互感元件	109
5.1.1 互感的基本概念	109
5.1.2 互感电压与同名端	110
5.1.3 耦合电感线圈上的电压电流关系	112
5.2 具有互感的正弦电流电路分析	114
5.2.1 互感线圈的串联	114
5.2.2 互感线圈的并联	116
5.3 空心变压器	119
5.4 理想变压器	122
5.4.1 理想变压器的变压作用	123
5.4.2 理想变压器的变流作用	123
5.4.3 理想变压器的阻抗变换	125

本章小结	126
习题 5	127
第 6 章 动态电路的时域分析	130
6.1 换路定理及初始值计算	130
6.1.1 暂态过程的概念	130
6.1.2 换路定律及初始值的计算	130
6.2 一阶 RC 电路的响应	133
6.2.1 RC 电路的零输入响应	133
6.2.2 RC 电路的零状态响应	134
6.3 一阶电路的全响应	136
6.4 求解一阶电路动态响应的三要素法	139
本章小结	142
习题 6	143
第 7 章 EWB 5.0 电路仿真软件简介	146
7.1 概述	146
7.2 EWB 5.0 基本界面	146
7.2.1 主窗口	146
7.2.2 菜单栏	147
7.2.3 工具栏	147
7.2.4 元器件与仪器库	148
7.3 EWB 5.0 基本操作	149
7.3.1 电路设计与编辑的基本方法	149
7.3.2 虚拟仪器的使用	151
7.3.3 电路的仿真过程	153
7.4 应用举例	154
7.4.1 电阻串-并联电路分析	154
7.4.2 叠加定理	155
7.4.3 戴维南定理	155
7.4.4 含受控源电路分析	156
7.4.5 正弦交流电路分析	156
7.4.6 RC 电路零输入响应	158
参考文献	159
附录 A 部分习题参考答案	160

第 1 章 电路与电路定律

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路及其组成

电路是电流流通的路径，是为某种需要由若干电气元件按一定方式组合起来的整体，主要用来实现能量的传输和转换，或实现信号的传递和处理。

电路由电源、负载和中间环节三部分组成。

- 电源是提供电能的设备，如发电机、电池、信号源等。
- 负载是指用电设备，如电灯、电动机、空调、电热器等。
- 中间环节是指将电源与负载连接成闭合电路的导线、开关设备、保护设备等。

无论是电能的传输和转换电路，还是信号的传递和变换电路，其中电源或信号源的电压、电流输入称为激励，它推动电路工作；激励在电路各部分所产生的电压和电流输出称为响应。分析电路，其实质就是分析激励和响应之间的关系。

1.1.2 电路模型

电路模型是由理想电路元件组成的电路。理想电路元件是单参数元件，每种元件只有一个参数，且只有少数几种，如理想电阻、理想电感、理想电容、理想电压源、理想电流源等。而实际电路元件则是多参数元件，种类繁多，成千上万，且在不断推陈出新。显然，实际电路复杂，电路模型简单。但是，理想电路元件的组合却可以在任意精度上模拟任何实际的电路元件。这就是说，人们可以花费较少的时间和精力去学习理想电路元件和由它们组成的电路模型，但却可以讨论任何复杂的实际电路问题，而不必考虑种类繁多且在不断推陈出新的实际电路元件。例如，人们可以用一个理想电压源和一个理想电阻的串联组合模拟任何实际电压源，理想电压源的源电压表示实际电压源的开路电压，理想电阻的阻值表示实际电源的内阻。显然，用这样的电路模型去描述实际电压源时，理想电阻元件的阻值的大小必须符合实际电源内阻的数值，不能很大。如果用一个理想电流源和一个理想电阻的并联组合则可模拟任何实际的电流源，这时，模型中并联电阻的阻值则必须很大而不能很小。

《电路分析基础》课程主要讨论理想电路元件和电路模型，一方面具有鲜明的基础性，同时又丝毫不影响它应用的普遍性、广泛性和实用性。

1.1.3 电路的工作方式

电路在工作时，对于电源来说，通常处于下列三种方式之一：负载、空载和短路。

负载工作方式时，负载与电源接通，负载中有电流通过，该电流称为负载电流，负载电流的大小与负载电阻有关。通常负载都是并联的，它们的两端接在一定的电压下，因此当负载增加时，负载电阻减小，负载电流增大，即功率增大。一般所说的负载的大小，指的是负载电流或功率的大小，而不是指负载电阻的大小。

空载时, 负载与电源未接通, 电路不通, 电路中电流为零。这时电源的端电压叫做空载电压或开路电压。

短路是指由于某种原因使电源两端直接接通, 这时电源两端的外电阻等于零, 电源输出的电流仅由电源内阻限制, 此电流称为短路电流。一般内阻很小, 所以此电流将很大, 以至烧毁电源、导线等。短路通常是一种严重事故。为了避免短路的发生, 一般在电路中接入熔断器或其他自动保护装置, 一旦发生事故, 它们能迅速将故障电路自动切断。

1.2 电流、电压及其参考方向

1.2.1 电流及其参考方向

电流 (current) 是由电荷作定向运动形成的。习惯上把正电荷运动的方向定为电流的实际方向。

计算电流大小的物理量称为电流强度, 简称电流。瞬时电流强度定义为: 流过导体横截面的电荷量 q 随时间 t 的变化率, 即电荷量 q 对时间 t 的一阶导数。其表达式为:

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

在一般情况下电流是随时间而变化的, 对于变化的电流而言, i 为瞬时电流值, 是时间的函数。如果电流不随时间而变, 即 $dq/dt = \text{常数}$, 则这种电流称为恒定电流, 简称直流, 直流电流所通过的路径称为直流电路。在直流电路中, 电流强度为单位时间内流过导体横截面的电荷量, 式 (1-1) 可写成

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位是安培, 简称安 (A)。实用中还有毫安 (mA), 微安 (μA) 和纳安 (nA) 等单位, 它们的关系是:

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

在分析简单的直流电路时, 电路中的电流方向, 可以根据电源的极性判断出来。然而, 当分析较为复杂的电路时, 往往很难知道电流的实际流动方向, 特别是交流电路, 电流的实际流动方向是随时间变化的, 更无法确定某一时刻电流的实际方向。另外, 在定量计算电路中的电流时, 往往需要根据电路定律建立代数方程, 解出的电流值可能为正值, 也可能为负值。欲知电流正、负的物理意义, 必须事先对电流的方向与其正、负值的对应关系做出规定。因此, 人们要引入电流“参考方向”的概念, 它是分析和计算电路的前提和基础。

在分析与计算电路时, 可以任意假定某一个方向作为电流的参考方向。电流的参考方向是指电流为正值时的电流方向。若计算结果电流为正值, 表明电流的实际方向与参考方向一致; 若电流为负值, 则表明电流实际方向与参考方向相反, 如图 1-1 所示。

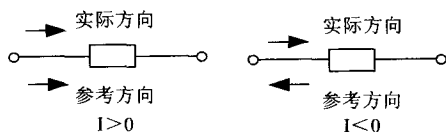


图 1-1 电流的参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

电路中 a、b 两点之间的电压 (voltage) 在数值上等于把单位正电荷从 a 点移到 b 点时, 单位正电荷所失去 (或获得) 的电势能。瞬时电压可以表示为电势能 w 随电量 q 的变化率。瞬时电压用 u 表示, 其表达式为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad (1-3)$$

式中 dq 为由 a 点移到 b 点的电荷量, dw 为移动电荷 dq 所失去 (或获得) 的电势能。若电压的大小和极性都不随时间变化, $dw/dq = \text{常数}$, 这种电压称为直流电压, 用 U 表示, 式 (1-3) 可写成 $U = W/Q$ 。电压的单位是伏特, 简称伏 (V)。实用中还有千伏 (kV), 毫伏 (mV) 和微伏 (μV) 等。

电压也常用电位差来表示, 即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

式中 V_a 和 V_b 分别为 a、b 两点的电位。

在分析电路时, 也要选择电压的参考方向 (或参考极性)。习惯上, 将电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点的方向, 即电位降的方向。在分析电路时, 选取电压的参考方向后, 若计算结果: 电压值为正 ($U > 0$), 表明电压的实际方向与参考方向一致; 若电压值为负 ($U < 0$), 则表明实际方向与参考方向相反, 如图 1-2 所示。

在电路图中, 电压参考方向可用极性 “+”、“-” 表示。“+” 表示高电位, “-” 表示低电位。也可用箭头表示, 箭头由高电位指向低电位。电压参考方向 (或参考极性) 也可用带有双下标的字母表示, 如 U_{ab} , 表示 $U_{ab} = V_a - V_b$, 而 U_{ba} , 则表示 $U_{ba} = V_b - V_a$ 。

在分析电路时, 电压和电流的参考方向都可以各自独立地任意设定。但是对于同一段电路或同一个元件来说, 通常将电压的参考方向和电流的参考方向关联在一起, 即电流参考方向沿电位降落的方向, 如图 1-3 (a) 所示, 称电压和电流采用关联参考方向。另一种情况, 如图 1-3 (b) 所示, 电流的参考方向不是沿电位降方向, 则称电压和电流采用非关联参考方向。但为了方便, 通常采用关联参考方向, 即元件上电流参考方向从高电位指向低电位。事实上, 在物理学中, 电压、电流的正方向就是这样规定的。在分析计算电路前, 不需要考虑各个电流、电压的实际方向, 只需在图中标出 (设定) 它们的参考方向, 由最终计算结果的正、负值来反映它们的实际方向是否与参考方向相同。

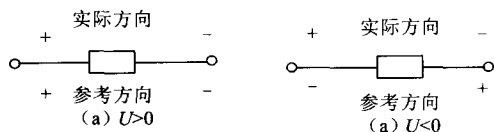


图 1-2 电压的参考方向

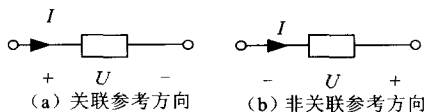


图 1-3 电压和电流的关联参考方向

【例 1-1】在图 1-4 所示电路中, 方框表示电源或电阻, 各元件的电压和电流的参考方向, 如图 1-4 (a) 所示。今通过测量可知: $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = -1\text{A}$, $U_1 = 4\text{V}$, $U_2 = -4\text{V}$, $U_3 = 7\text{V}$, $U_4 = -3\text{V}$ 。试标出各电流和电压的实际方向。

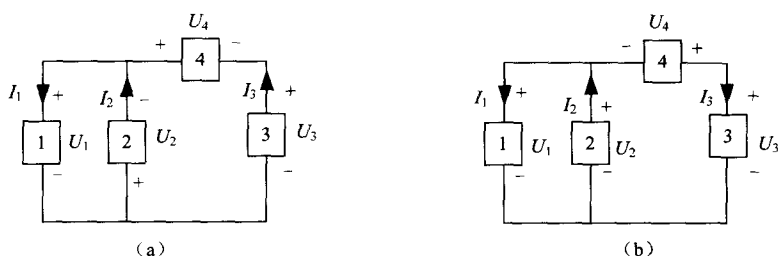


图 1-4 例 1-1 电路

【解】电流和电压为正值时，其实际方向和参考方向一致；为负值时其实际方向和参考方向相反。按照上述原则，得到各电流和电压实际方向，如图 1-4 (b) 所示。

1.3 欧姆定律、电阻及电导

1.3.1 电阻元件

在导体中，电荷作定向运动时会受到一定的阻力，反映导体对电流运动呈现阻碍作用的电路参数称为电阻。电阻元件 (resistor) 是经过科学抽象后定义出的三种元件中最基本的理想元件之一，它是一种消耗电能、阻碍电流流动的理想电路元件。在国际单位制中，电阻的单位为欧姆 (Ω)，简称欧。实用中还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 等，它们的换算关系为：

$$1M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$$

电阻元件的特性可用元件电压与元件电流的代数关系表示，这种关系称为电压电流关系 (缩写为 VCR)。由于电压、电流的 SI (国际单位制) 单位是伏特和安培，所以电压电流关系也称为伏安特性。

1.3.2 线性电阻及欧姆定律

当流过电阻的电流或加在电阻两端的电压发生变化时，电阻的阻值恒定不变，则称该电阻为线性电阻，其伏安特性曲线为一条通过坐标原点的直线，如图 1-5 所示。若电阻的阻值随电压、电流的不同而改变，则称为非线性电阻元件，如图 1-6 所示为二极管的伏安特性曲线，显然，二极管是一个非线性电阻元件。由电源和线性电阻元件组成的电路称为线性电阻电路。

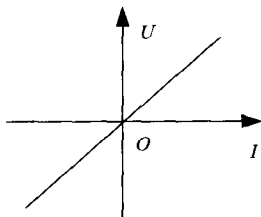


图 1-5 线性电阻的伏安特性

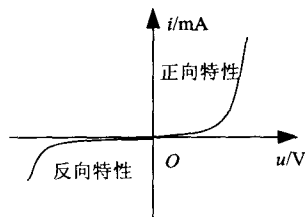


图 1-6 二极管的伏安特性曲线

欧姆定律是电路分析中最基本定律之一。可表述为：流过线性电阻的电流与该电阻两端的电压成正比。表示式如下

$$u = iR \quad (1-5)$$

式(1-5)中, R 为电路中的线性电阻。

应用欧姆定律, 需特别注意以下两点:

(1) 式(1-5)适用于电流和电压设为关联参考方向的情况。当两者设为非关联参考方向时, 欧姆定律的公式前要加负号。

(2) 欧姆定律仅适用于线性电阻电路, 不适用于非线性电阻电路。

电阻的倒数称为电导, 用 G 表示

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-6)$$

电导的国际单位为西门子(S)。在电流、电压参考方向一致时, 欧姆定律也可表示为

$$i = Gu \quad (1-7)$$

【例 1-2】测得某电路中一电阻两端的电压为 36V, 通过电阻的电流为 10mA。

(1) 求此电阻 R 的大小;

(2) 若将电阻两端的电压增加到 72V, 问流过该电阻的电流 I 是多少?

【解】根据欧姆定律

$$(1) \quad R = \frac{U}{I} = \frac{36}{10 \times 10^{-3}} \Omega = 3.6 \text{ k}\Omega$$

$$(2) \quad I = \frac{U}{R} = \frac{72}{3.6} \text{ mA} = 20 \text{ mA}$$

1.4 电功率和电能

1.4.1 电功率

功率是电路分析中的一个常用物理量, 功率用 p 或 P 表示。在国际单位制中, 当电压和电流的单位分别为伏特和安培时, 功率的单位为瓦特, 简称瓦(W)。功率的其他单位还有千瓦(kW)和毫瓦(mW)等。

当电压和电流采用关联参考方向时, 计算瞬时功率的公式为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{u dq}{dt} = u \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-8)$$

在直流情况下

$$P = UI \quad (1-9)$$

若电压和电流采用非关联参考方向时, 计算功率的表达式为

$$p = -ui \text{ 或 } P = -UI \quad (1-10)$$

可见, 由于电压、电流关联参考方向与非关联参考方向的两种选择, 导致欧姆定律和功率表达式两种不同形式。由式(1-8)、式(1-9)或式(1-10)计算出功率值的正、负号, 可以判定该段电路是吸收功率还是发出功率。即当 $p > 0$ (或 $P > 0$) 时, 表示该段电路吸收(消耗)功率; 当 $p < 0$ (或 $P < 0$) 时, 表示该段电路发出(产生)功率。

【例 1-3】试计算例 1-1, 如图 1-4 (a) 所示电路中每个元件的功率, 并判断其是电源还是负载?

【解】元件 1: 因其电压与电流为关联参考方向, 故

$$P_1 = U_1 I_1 = 4 \times 1 \text{ W} = 4 \text{ W} > 0, \text{ 该元件吸收功率, 为负载。}$$

元件 2: 因其电压与电流为关联参考方向, 故

$$P_2 = U_2 I_2 = (-4) \times 2 \text{ W} = -8 \text{ W} < 0, \text{ 该元件发出功率, 为电源。}$$

元件 3: 因其电压和电流为非关联参考方向, 故

$$P_3 = -U_3 I_3 = -7 \times (-1) \text{ W} = 7 \text{ W} > 0, \text{ 该元件吸收功率, 为负载。}$$

元件 4: 因其电压和电流为非关联参考方向, 故

$$P_4 = -U_4 I_3 = -(-3) \times (-1) \text{ W} = -3 \text{ W} < 0, \text{ 该元件发出功率, 为电源。}$$

根据能量守恒定律, 若计算整个电路功率的代数和为

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = (4 - 8 + 7 - 3) \text{ W} = 0$$

说明在同一个电路中, 电源提供的功率与负载消耗的功率总是相等的。人们可以利用这个功率相等关系来验证计算结果正确与否。

为了保证电器设备和器件 (包括电线、电缆) 安全、可靠和经济地工作, 每种电器设备、器件在设计时, 都规定了工作时允许的电流、电压和功率值等, 它们分别用 I_N 、 U_N 和 P_N 表示。这些数值统称为额定值, 如额定电流、额定电压、额定功率等。人们在使用电器设备、器件时, 应使其工作时的电流、电压、功率不超过额定值, 但一般也不要低于它。如通过设备的电流过大, 将会由于过热而加速老化, 缩短设备寿命, 甚至使其烧毁。若电压过高, 一方面会引起电流增大, 另一方面还可能使其绝缘被击穿。反之, 若工作时电流、电压值低于额定值, 设备往往不能正常工作, 或者不能充分地被利用。电器设备工作在额定情况下, 称为额定工作状态。当电流和功率超过额定值时, 称为过载, 过载一般是不允许的。

1.4.2 电能

当瞬时功率 p 为时间 t 的函数时, 根据式 (1-8), 在 $t_0 \sim t$ 时间内, 电路消耗的电能是功率与时间的累积。可用定积分表示为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1-11)$$

在直流情况下, 功率 $P = \text{常数}$, 在 t_0 到 t 时间内, 电路消耗的电能

$$W = P(t - t_0) = UI t \quad (1-12)$$

其中 t 为通电时间。电能的 SI 单位是焦耳 (J), 它等于功率为 1W 的用电设备在 1s 内消耗的电能。工程上, 常用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 表示电能 (或电功) 的单位, 一个 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 又称为 1 度电。

【例 1-4】一盏 220V/60W 的日光灯，每天点亮 4h，问每月（按 30 天计算）消耗多少度电？

【解】 $W = Pt = 0.06 \times 4 \times 30 \text{ kW} \cdot \text{h} = 7.2 \text{ kW} \cdot \text{h}$

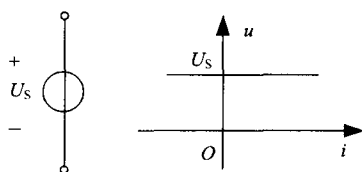
1.5 电压源和电流源

1.5.1 电压源

1. 理想电压源

理想电压源的特点：不管外部电路状态如何，其两端电压总保持定值 U_S 或者确定的时间函数关系，而与流过它的电流无关。理想电压源的一般符号及直流伏安特性，如图 1-7 所示。

根据所连接的外电路，电压源电流（从电源内部看）的实际方向，可以从电压源的低电位端流入，从高电位端流出，也可以相反。前者电压源提供功率；后者电压源吸收（消耗）功率，此时电压源将作为负载出现，如蓄电池的充电。



(a) 一般符号 (b) 伏安特性
图 1-7 理想电压源

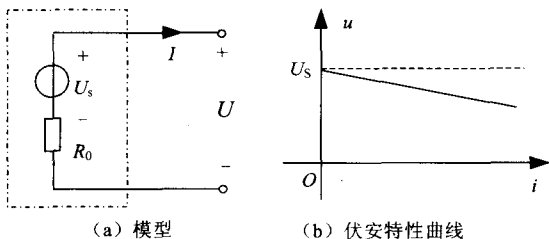
2. 实际电压源

理想电压源实际上是不存在的。实际的电压源，其两端电压会随着流过它的电流的变化而有所变化。例如，当电池接上电阻性负载后，其端电压会下降，这是因为电池有内阻的原因。因此，实际的电压源可以用一个理想电压源和电阻相串联的模型来表征，如图 1-8 所示。电阻 R_0 称为电压源的内阻，从电压源模型可求出电压源的端电压为

$$U = U_S - IR_0 \quad (1-13)$$

【例 1-5】某电压源的开路电压为 30V，当外接电阻 R 后，其端电压为 25V，此时流过的电流为 5A，求 R 及电压源内阻 R_0 。

【解】用实际电压源模型表征该电压源，可得电路如图 1-9 所示。



(a) 模型 (b) 伏安特性曲线
图 1-8 实际电压源

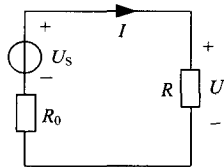


图 1-9 例 1-5 图

设电流及电压参考方向如图中所示，根据欧姆定律可得

$$R = \frac{U}{I} = \frac{25}{5} \Omega = 5 \Omega$$

根据 $U = U_S - IR_0$ 可得

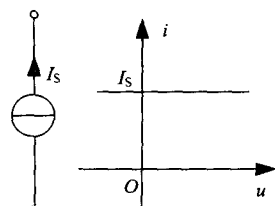
$$R_0 = \frac{U_S - U}{I} = \frac{30 - 25}{5} \Omega = 1 \Omega$$

1.5.2 电流源

1. 理想电流源

理想电流源的特点：不管外部电路状态如何，其输出电流总保持定值 I_S 或确定的时间函数关系，而与端电压无关。理想电流源的一般符号及直流伏安特性，如图 1-10 所示。

理想电流源的大小和方向是给定的，但其两端电压的实际极性和大小则与外部电路有关。当理想电流源实际电压降的方向与电流源的箭头指向相反时（即非关联方向），电流源提供（发出）功率，起电源作用；当理想电流源实际电压降的方向与电流源箭头指向相同时（即关联方向），则电流源吸收（消耗）功率，作负载。



(a) 符号 (b) 伏安特性

图 1-10 理想电流源

2. 实际电流源

理想电流源实际上是不存在的。实际电流源内部也有能量消耗，可以用一个理想电流源和电阻并联的模型来表征实际电流源，如图 1-11 (a) 所示，电阻 R_0 为电流源的内阻。

当电流源两端接上电阻 R 后，如图 1-11 (b) 所示，此时可求出电流源向外输出的电流为

$$I = I_S - U/R_0 \quad (1-14)$$

由式 (1-14) 可见，电流源向外输出的电流是小于 I_S 的。 R_0 越小，分流越大，输出的电流就越小。因此实际电流源内阻越大，其特性也就越接近理想电流源。实际电流源的伏安特性，如图 1-11 (c) 所示。

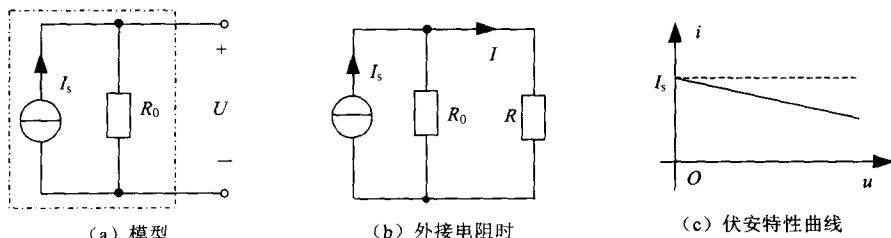


图 1-11 实际电流源

实际电流源的短路电流 I_{SC} 就等于 I_S ，因此用短路电流 I_{SC} 和内阻 R_0 这两个参数就可以表征实际电流源。

【例 1-6】 电路如图 1-12 所示，试求：(1) 电阻两端的电压；(2) 1A 电流源两端的电压及功率。

【解】 (1) 由于 5Ω 电阻与 1A 电流源相串联，因此流过 5Ω 电阻电流就是 1A 而与 2V 电压源无关，即 $U_1 = RI = 5 \times 1V = 5V$

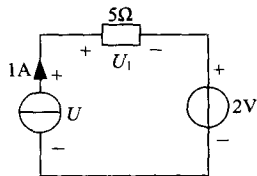


图 1-12 例 1-6 图

(2) 1A 电流源两端的电压包括 5Ω 电阻上的电压和 2V 电压源，因此

$$U = U_1 + 2 = (5 + 2)V = 7V$$

$$P = -UI = -7 \times 1W = -7W \quad (\text{提供功率})$$

1.5.3 受控源

以上介绍的电压源和电流源都是独立电源，以电压源为例，独立电源的含义在于：这种电源的电压一定，与流过的电流无关，与其他支路的电流、电压无关。还有一种电源叫做受控源，受控电压源的电压受其他支路的电压或电流的控制；受控电流源的电流受其他支路的电压或电流的控制。受控源又称为非独立源。根据控制量的不同，受控源可以分为以下四种：电压控制电压源（VCVS）、电压控制电流源（VCCS）、电流控制电压源（CCVS）、电流控制电流源（CCCS）。它们的电路符号分别如图 1-13（a）、（b）、（c）、（d）所示。上述四个受控源的特性方程分别为

$$u_2 = \mu u_1 \quad i_2 = -g u_1 \quad u_2 = r i_1 \quad i_2 = \beta i_1$$

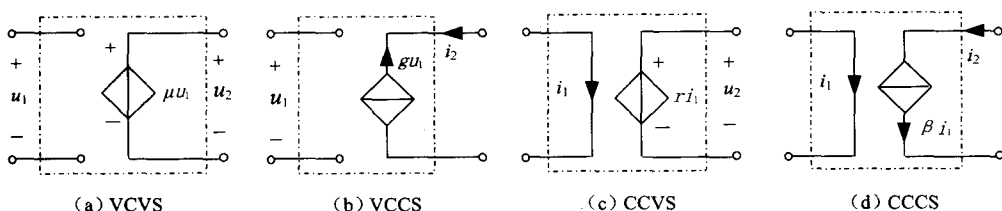


图 1-13 受控源

图 1-13 中菱形符号表示受控电压源和受控电流源，采用的参考方向的表示方法与独立电源的方法相同。每个受控源的另一条支路的电压或电流称为控制量， μ 、 r 、 g 、 β 都是有关的控制系数。如果这些系数为常数，就称这类受控源为线性受控源。其中， μ 称为电压转移比，也称为电压放大系数，它是一个无量纲的常数； r 称为转移电阻，它是一个具有电阻量纲（ Ω ）的常数； g 称为转移电导，它是一个具有电导量纲（S）的常数； β 称为电流转移比，也称电流放大系数，它是一个无量纲的常数。

必须指出，受控源与独立源不同，独立源在电路中起着“激励”的作用，是能量的提供者；而受控源则不同，它的电压或电流受电路中其他支路的电压或电流所控制，当这些控制电压或电流为零时，受控源的电压或电流也就为零。因此，受控源只不过是用来反映电路中某处的电压或电流能控制另一处的电压或电流这一现象，它本身不直接起“激励”作用。

1.6 基尔霍夫定律

基尔霍夫是 19 世纪德国物理学家。基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。它描述了电路中各部分电流之间的关系及各部分电压之间的关系，适用于各种线性及非线性电路的分析计算。在叙述基尔霍夫定律之前，我们先介绍有关电路的几个术语。

1.6.1 几个常用的电路术语

- （1）支路：电路中流过相同的电流，不具有任何分支的一段电路称为支路（branch）。
- （2）节点：三条或三条以上支路的结合点称为节点（node）。
- （3）回路：电路中任意一条或多条支路组成的闭合路径称为回路（loop）。
- （4）网孔：电路中不包含其他任何支路的回路称为网孔（mesh）。