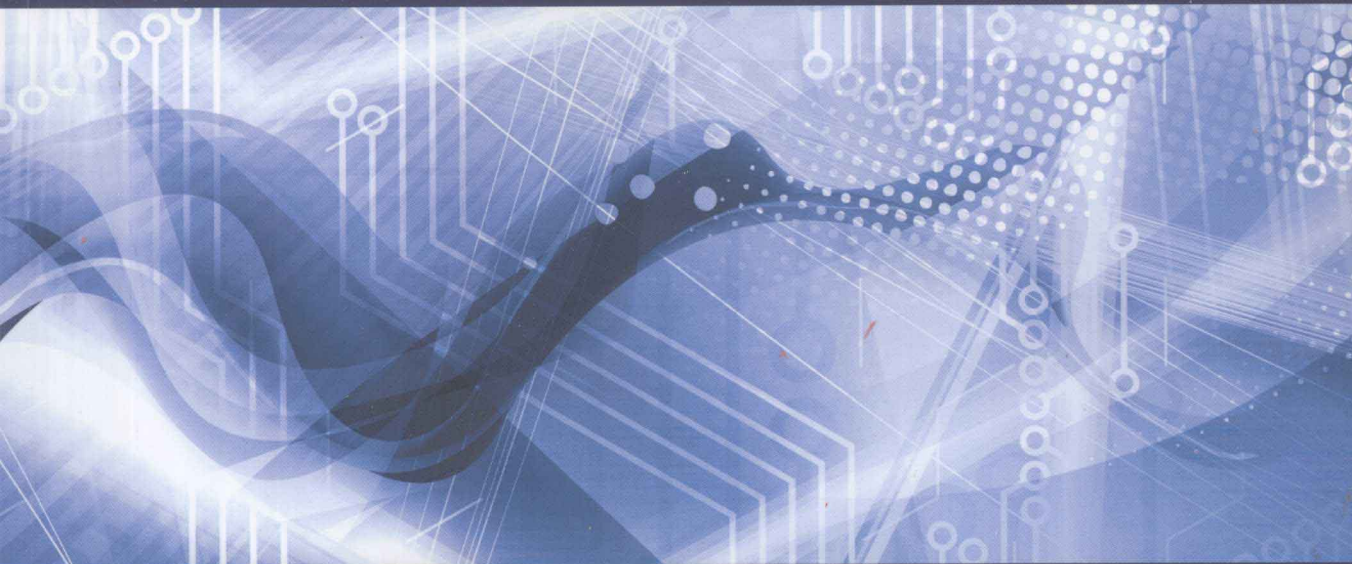




普通高等教育“十二五”规划教材



电子电气基础课

# 电工电子技术简明教程

高玉良 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规



# 电工电子技术简明教程

主 编 高玉良  
副主编 刘 焰 付青青  
编 写 孙士平  
主 审 唐 介



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。本书对传统电子技术部分的教学内容作了重大调整：模拟电子技术部分大幅压缩了分立元件放大电路的内容，对三极管放大电路只作了简单的介绍，较系统地介绍以集成运算放大器为基本元件的放大、运算、信号处理、信号产生等模拟电路；数字电子技术部分压缩了门电路、触发器和计数器内部结构的内容，注重各种数字集成电路的外特性和应用，使教材内容对非电类专业学生更具实用性，也降低了课程的学习难度。为了让读者了解电子技术的最新发展，第12章专门介绍了EDA技术、EWB电子电路仿真和可编程器件的应用。

本书可作为普通高等学校本科非电类专业电工学或电工电子技术课程（3~4学分）的教材，也可供相关工程技术人员和一般读者自学使用。

### 图书在版编目（CIP）数据

电工电子技术简明教程/高玉良主编. —北京：中国电力出版社，2012.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3553-0

I. ①电… II. ①高… 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（2012）第228208号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012年11月第一版 2012年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.25印张 464千字

定价 35.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

本书参照 2011 年教育部颁布的“电工学课程教学基本要求”编写。

全书分电工技术和电子技术两部分。电工技术部分包括电路的基本定律和基本分析方法、正弦交流电路、磁路与变压器、交流异步电动机及控制等 4 章；电子技术部分包括常用半导体器件、放大电路初步、信号运算放大与处理电路、直流稳压电源、组合逻辑电路、时序逻辑电路、信号产生与转换电路等 7 章。为了让读者了解电子技术的最新发展，第 12 章专门介绍了 EDA 技术、EWB 电子电路仿真、模拟及数字可编程器件的应用。

与国内同类教材相比，本教材对电子技术部分的内容作了重大调整：模拟电子技术部分大幅压缩了分立元件放大电路的内容，对三极管放大电路只作了简单的介绍，较系统地介绍以集成运算放大器为基本元件的放大、运算、信号处理、信号产生等模拟电路；数字电子技术部分压缩了门电路、触发器和计数器内部结构的内容，注重各种数字集成电路的外特性和应用，使教材内容对非电类专业学生更具实用性，也降低了课程的学习难度。

本书第 1、2 章由刘焰编写；第 3、4 章由孙士平编写；第 5~8 章及 12 章由高玉良编写；第 9~11 章由付青青编写。全书由高玉良统稿。本书在编写过程中得到了吴爱平、扬友平、覃红英等老师的帮助，在此表示感谢。

大连理工大学唐介教授审阅了本书的全稿，提出了不少很好的修改意见，对此谨致以衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请使用本书的教师和学生提出意见和建议，以便今后不断改进。

作者 E-mail: gao-yuliang@yangtzeu.edu.cn

编 者

2012 年 7 月



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 电路的基本定律和基本分析方法</b> .....	1
1.1 电路的组成及基本物理量 .....	1
1.2 电路的基本元件 .....	5
1.3 基尔霍夫定律 .....	11
1.4 基本元件的串联与并联 .....	14
1.5 电路的工作状态 .....	18
1.6 电路的基本分析方法 .....	20
1.7 一阶电路的暂态分析 .....	26
1.8 习题 .....	34
<b>第 2 章 正弦交流电路</b> .....	40
2.1 正弦交流电的基本概念和相量表示 .....	40
2.2 正弦电路中的电阻、电感、电容元件 .....	47
2.3 基尔霍夫定律的相量形式 .....	52
2.4 阻抗的串联与并联 .....	54
2.5 正弦交流电路的功率 .....	56
2.6 谐振电路 .....	60
2.7 三相交流电路 .....	64
2.8 非正弦交流电路 .....	71
2.9 习题 .....	76
<b>第 3 章 磁路与变压器</b> .....	80
3.1 磁路的基础知识 .....	80
3.2 交流铁心线圈电路 .....	83
3.3 变压器 .....	85
3.4 习题 .....	90
<b>第 4 章 交流异步电动机及控制</b> .....	92
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理 .....	92
4.2 三相异步电动机的电路分析 .....	97
4.3 三相异步电动机的转矩与机械特性 .....	99
4.4 三相异步电动机的起动 .....	102
4.5 三相异步电动机的调速 .....	105
4.6 三相异步电动机的制动 .....	108
4.7 三相异步电动机的铭牌数据 .....	109
4.8 三相异步电动机的选择 .....	112

4.9	单相异步电动机	114
4.10	继电器接触控制系统	116
4.11	习题	128
<b>第5章</b>	<b>常用半导体器件</b>	129
5.1	半导体基础知识	129
5.2	半导体二极管	132
5.3	稳压二极管	134
5.4	半导体三极管	136
5.5	场效应管	140
5.6	光电器件	143
5.7	习题	144
<b>第6章</b>	<b>放大电路初步</b>	146
6.1	放大电路概述	146
6.2	三极管放大电路	148
6.3	集成运算放大器	154
6.4	放大电路中的负反馈	158
6.5	习题	163
<b>第7章</b>	<b>信号运算放大与处理电路</b>	165
7.1	运算放大电路	165
7.2	测量放大与采样保持电路	169
7.3	有源滤波电路	171
7.4	电压比较器	175
7.5	习题	177
<b>第8章</b>	<b>直流稳压电源</b>	181
8.1	单相整流电路	181
8.2	滤波电路	183
8.3	串联型稳压电路	184
8.4	集成稳压器	186
8.5	开关型稳压电路	188
8.6	晶闸管及可控整流电路	189
8.7	习题	191
<b>第9章</b>	<b>组合逻辑电路</b>	193
9.1	逻辑代数	193
9.2	逻辑门电路	200
9.3	组合逻辑电路的分析和设计	202
9.4	常用组合逻辑功能器件	205
9.5	习题	216
<b>第10章</b>	<b>时序逻辑电路</b>	218
10.1	双稳态触发器	218

10.2	寄存器	224
10.3	计数器	226
10.4	时序逻辑电路应用实例	232
10.5	习题	234
<b>第 11 章</b>	<b>信号产生与转换电路</b>	<b>236</b>
11.1	模拟信号产生电路	236
11.2	脉冲信号产生电路	242
11.3	数字信号与模拟信号的相互转换	249
11.4	习题	255
<b>第 12 章</b>	<b>EDA 技术基础</b>	<b>257</b>
12.1	EDA 技术概述	257
12.2	EWB 及其应用	259
12.3	在系统可编程模拟器件及其应用	271
12.4	可编程逻辑器件及应用	277
<b>参考答案</b>		<b>288</b>
<b>参考文献</b>		<b>297</b>



## 第1章 电路的基本定律和基本分析方法

电路理论是电工技术和电子技术的基础,它的研究对象是电路模型。本章首先介绍电路模型的概念及电路的一些基本物理量,引入电流、电压的参考方向的概念。然后介绍电阻、电感、电容、电压源和电流源等常用的电路元件,给出电路的基本定律——基尔霍夫定律。在此基础上,介绍分析电路的一些基本方法。最后介绍一阶电路的过渡过程分析。

### 1.1 电路的组成及基本物理量

#### 1.1.1 电路和电路模型

##### 1. 电路

电路是指为了某种需要由若干电气器件按一定方式连接起来的电流的通路。

电路的结构形式及所具有的功能是多种多样的。按电路的功能,电路可分为两大类。第一类是实现电能的传输和转换的电路。最简单的电路就是手电筒电路,它由干电池、电珠、连接导线及开关组成,如图1.1.1(a)所示。

干电池是一种电源,它将化学能转换成电能,在其正、负极间保持一定的电压,为电路提供电能;电珠由电阻丝制成,当电流流过电阻丝时,电阻丝会发热而使电珠发光,它是一种消耗电能的器件。通常把消耗电能的用电器件或设备称为负载。连接导线构成电流的通路,开关则起控制电路接通和断开的作用,开关和导线是连接电源和负载的中间环节。

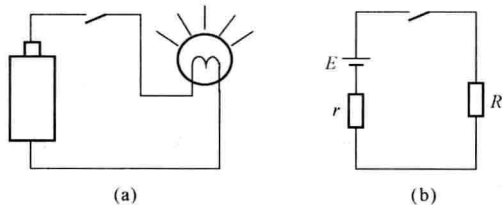


图 1.1.1 手电筒电路及其电路模型

(a) 手电筒电路; (b) 电路模型

第二类电路是实现信号的传递和处理的电路。常见的电路如扩音机。扩音机由话筒、放大电路、扬声器组成。话筒将声音变成电信号,经过放大电路的放大,送到扬声器再变成声音输出。这里话筒是输出信号的设备,称为信号源,它相当于电源;扬声器是接受和转换信号的设备,也就是负载。由于话筒输出的电信号很微弱,不足以推动扬声器发音,因此需要采用中间环节对信号进行放大和处理。

由此可见,电路主要由电源、负载及从电源到负载的中间环节三部分组成。电源是提供电能或电信号的设备,负载是用电或输出电信号的设备,中间环节用于传输电能或传输、处理电信号。从以上所举的两个例子可以看出,中间环节可以是简单的两根导线,也可以是一个复杂的系统。在电路分析中,为了方便,常把信号源或电源输出的电压或电流称为激励,把由激励而在电路中产生的电压或电流称为响应。有时,根据激励和响应的因果关系,把激励称为输入,把响应称为输出。

##### 2. 电路模型

组成电路的实际器件,其电磁性能的表现往往是多方面交织在一起的。如常用的电阻



器，它不仅有消耗电能的功能，还会在其周围产生一定的磁场；再如电容器，它不仅有储存电场能的功能，还会因其介质不是百分之百的绝缘体而产生漏电，从而消耗电能。这样用数学来描述电阻器或电容器时就会很复杂，不利于对电路进行深入的分析。而人们在使用电阻器和电容器时，只利用电阻器消耗电能的功能，利用电容器储存电场能的功能，忽略其他次要的性能。

基于上述考虑，可以定义一些理想化的电路元件，每一种电路元件只体现一种基本电磁现象，具有精确和简单的数学定义，这些元件称为理想元件。电路分析中常用的理想元件包括电阻、电感、电容、恒压源和恒流源等，它们将在后面几节中分别介绍。

定义了理想元件后，在一定条件下，电路中的实际器件就可以用理想元件及它们的组合来表示，这就是元件模型。一个实际器件可以有多个元件模型，视电路分析要求的精度和工作条件选择一种模型。一般来说，模型越复杂，精度就越高，分析就越困难。如一个电感线圈，一般情况下可以看作是理想电感（简称电感），如图 1.1.2 (a) 所示。当通过的电流频率较低时，就应考虑线圈的能量损耗，这时可把线圈看作是电感和电阻的串联，如图 1.1.2 (b) 所示。如果电流的频率很高，要求的精度也较高时，则应考虑电场的影响，电路模型如图 1.1.2 (c) 所示。

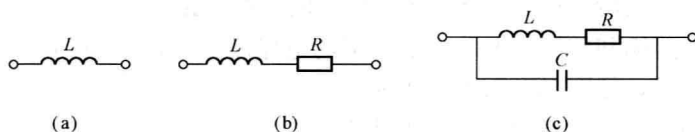


图 1.1.2 电感线圈模型

(a) 常用模型；(b) 低频模型；(c) 高频模型

一个实际器件用元件模型来表示，总是在一定的假设条件下，即器件的尺寸远小于正常工作频率所对应的波长，这就是集总假设。因此理想元件也称为集总参数元件。例如，我国电力用电的频率是 50Hz，对应的波长为 6000km，对以此为工作频率的实验室设备来说，其尺寸与该波长相比可忽略不计，因而用集总参数的概念是完全可以的。但对高压电力传输线来说，其传输距离常达到上千公里，这时就必须考虑电场、磁场沿线路分布的情况，不能用集总参数描述，而只能用分布参数描述，并通过电磁场理论求解。

当电路中的实际器件都用理想元件或理想元件的组合表示后，由理想元件构成的电路图就称为实际电路的电路模型。在手电筒电路中，电珠用电阻表示，干电池用电压源表示，开关和导线可视为理想导体，这样手电筒电路的电路模型就如图 1.1.1 (b) 所示。

电路理论研究的对象是由理想元件构成的电路模型，目的是找出电路中具有普遍意义的规律和电路分析的一般方法。

### 1.1.2 电流、电压和电位

电路中的基本物理量包括电流、电压及功率。

#### 1. 电流

带电粒子有规律的运动形成电流。电流的大小用电流表示，其定义为：单位时间内通过导体截面积的电荷量。用符号  $i$  表示电流，则表示式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1.1)$$

如果电流不随时间变化,则表示式为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1.1.2)$$

在国际单位制中,电流的单位是安培(A),习惯上将正电荷运动的方向规定为电流的方向,电流的方向是客观存在的。

在简单的电路中,可以很容易地直接确定电流的方向,但在较复杂的电路中,就很难预先判定电流的方向。特别是在交流电路中,电流的大小和方向均随时间变化,很难表示出实际方向。在这种情况下,可以事先任意假定某一方向为电流的正方向,亦即参考方向,并用箭头标出,根据假定的电流正方向进行计算,若求得的电流为正值,说明

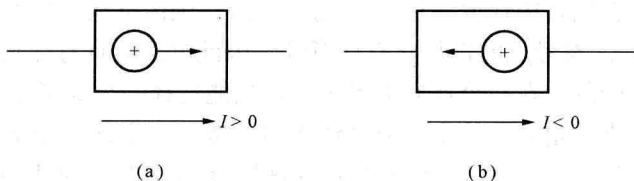


图 1.1.3 电流的实际方向与参考方向

(a) 电流实际方向与参考方向一致; (b) 电流实际方向与参考方向相反

说明电流的实际方向与参考方向一致,如图 1.1.3 (a) 所示;若求得的电流是一个负值,则说明实际方向与参考方向相反,如图 1.1.3 (b) 所示。

## 2. 电压

电荷之所以能在电路中流动,是由于电荷在电路中受电场力的作用,即电场力对电荷做了功。为了衡量电场力做功的本领,引入电压这一物理量,将单位正电荷从 a 点移到 b 点时电场力做的功称为 ab 两点间的电压,表达式为

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.1.3)$$

如果电压不随时间变化,则表达式为

$$U_{ab} = \frac{W}{Q} \quad (1.1.4)$$

在国际单位制中,电压的单位是伏特(V)。

式(1.1.3)中,  $dW$  为  $dq$  从 a 点移至 b 点时电场力做的功,也就是  $dq$  在运动过程中失去的电势能。按电磁学理论,电荷在电场中某一点的电势能等于该点的电位与电量的乘积。因此,在  $dq$  为正值时,若  $dW > 0$ ,则表示 a 点的电位比 b 点高,故电压又称为电位差。

一般规定电压的方向由高电位点指向低电位点,即电位降低的方向。在电路分析中,往往由于难于事先判定元件两端电压的实际方向,因此也要像电流一样先任意设定某一方向为电压的正方向,即参考方向。若计算结果电压为正值,则说明电压的实际方向与参考方向一致;若为负值,则说明实际方向与参考方向相反。电压的参考方向可采用极性表示,在元件

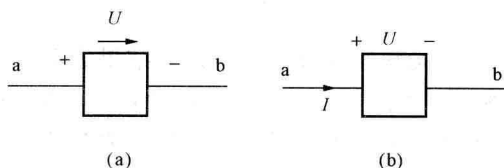


图 1.1.4 电压的参考方向和关联参考方向

(a) 电压的参考方向; (b) 电压电流关联参考方向

两端标出正(+)、负(-)极性,从正极经元件指向负极的方向就是元件上电压的参考方向,也可采用箭头表示,在元件旁标上箭头,箭头的方向就是电压的参考方向,如图 1.1.4 (a) 所示。电压的参考方向还可用双下标表示,如  $U_{ab}$  表示电压的参考方向是由 a 指向 b。显然  $U_{ab} = -U_{ba}$ 。这里有一点需要特别指出,

尽管电压和电流的参考方向可以任意指定，但一经确定，在整个分析计算过程中就不能变更，否则会引起混乱而导致计算错误。

电流和电压的参考方向可独立地设定，但为了分析方便，常采用关联参考方向，即把同一元件的电压参考方向和电流参考方向取为一致，电流从电压的正极流向负极，如图 1.1.4 (b) 所示。

在电路中任取一点 O 作为参考点，则由某点 a 到参考点的电压  $U_{a0}$  称为 a 点的电位，记为  $V_a$ 。参考点的选择具有任意性，因此电位也具有任意性，但任意两点间的电压（电位差）是不变的。在一个连通的系统中，只能选择一个参考点，参考点的电位等于零。在电子电路中，常选定一条特定的公共线作为参考点。这条公共线一般是很多元件的汇集处，而且常常是电源的一个极，这条线虽不直接接地，但有时也称为地线，参考点用接地符号“⊥”表示。

有了电位的概念后，电路中任意两点之间的电压，可以用它们之间的电位差表示，如

$$U_{ab} = V_a - V_b$$

若  $U_{ab} > 0$ ，表示 a 点电位比 b 点电位高；若  $U_{ab} < 0$ ，则表示 a 点电位比 b 点电位低。在电子电路中常采用一种习惯画法，当电源有一端与参考点相连时，电源不再用电源符号表示，只需将电源另一端相对参考点的电压数值和极性标出就可以了，如图 1.1.5 所示。

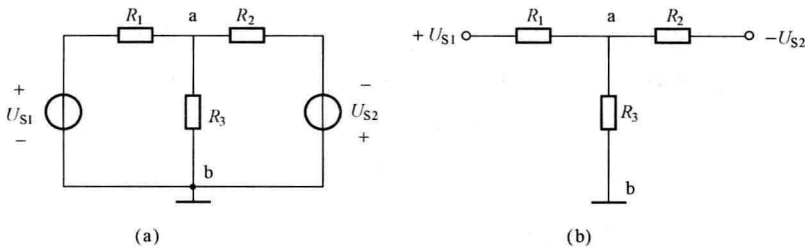


图 1.1.5 电子电路的习惯画法

(a) 一般画法；(b) 习惯画法

### 1.1.3 电功率和电能

功率的定义为单位时间内转换的能量，即

$$p = \frac{dW}{dt}$$

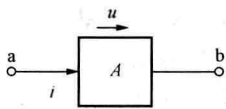


图 1.1.6 元件的电功率

在图 1.1.6 中，设正电荷  $dq$  从 a 点经元件 A 移到 b 点，ab 间的电压为  $u$ ，则  $dq$  从 a 移到 b 减少的电势能为  $udq$ ，这就是被元件 A 吸收的能量  $dW$ ，这样，元件 A 的电功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1.1.5)$$

这里  $u$  为元件上的电压降， $i$  为元件中的电流， $u$ 、 $i$  为关联参考方向。若计算结果表明  $u$ 、 $i$  同为正值或同为负值，则  $p > 0$ ，表明元件吸收功率或消耗功率；若  $u$ 、 $i$  互为异号，则  $p < 0$ ，表明元件释放功率或提供功率。若电路中的电压与电流为非关联参考方向，则功率的表达式为

$$P = -ui \quad (1.1.6)$$

此时,若求得  $u$ 、 $i$  互为异号,则  $p > 0$ , 表明元件吸收功率;若  $u$ 、 $i$  同为正值或同为负值,则  $p < 0$ , 元件释放功率。

对于直流电路,在关联参考方向下,功率的表达式为

$$P = UI \quad (1.1.7)$$

在国际单位制中,功率的单位是瓦特 (W)。

**【例 1.1.1】** 在图 1.1.7 所示电路中,已知  $I = 2\text{A}$ ,  $U_1 = 4\text{V}$ ,  $P_2 = 16\text{W}$ ,  $U_3 = 6\text{V}$ , 求  $P_1$ 、 $P_3$ 、 $U_2$ 、 $U_{ab}$  及这部分电路的总功率。

解 元件 1 的电压、电流为关联参考方向,故

$$P_1 = U_1 I = 4 \times 2 = 8(\text{W}) \text{ (吸收功率)}$$

元件 2 和元件 3 的电压和电流为非关联参考方向,故

$$P_3 = -U_3 I = -6 \times 2 = -12(\text{W}) \text{ (释放功率)}$$

$$U_2 = -\frac{P_2}{I} = -\frac{16}{2} = -8(\text{V})$$

$U_{ab} = U_a - U_b = U_a - U_c + U_c - U_d + U_d - U_b = U_1 - U_2 - U_3 = 4 - (-8) - 6 = 6(\text{V})$   
电路的总功率为

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 8 + 16 + (-12) = 12(\text{W}) \text{ (吸收功率)}$$

根据式 (1.1.5), 在  $t_0$  到  $t$  时间内, 元件 A 吸收 (消耗) 的电能为

$$W = \int_{t_0}^t p dt \quad (1.1.8)$$

如  $p < 0$ , 即  $W < 0$ , 则表明元件释放电能。直流时为

$$W = P(t - t_0) \quad (1.1.9)$$

在国际单位制中,电能的单位是焦耳 (J), 在实际中常采用千瓦小时 ( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ) 作为电能的单位,  $1\text{kW} \cdot \text{h}$  简称一度电, 它与焦耳的换算关系如下:

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 10^3 \text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$$

## 1.2 电路的基本元件

电路中的元件可分为有源元件和无源元件两大类。电压源、电流源称为有源元件, 它们向电路提供电能。电阻元件只能消耗电能, 电感和电容元件尽管能释放电能, 但不能释放出多于它吸收或储存的电能, 因此电阻、电感和电容元件称为无源元件。下面分别讨论各元件上的电压—电流关系 (简称伏安关系) 及它们的能量消耗及储存。

### 1.2.1 电阻元件

当元件上的电压  $u$  与电流  $i$  由代数关系联系时, 这种元件就称为电阻元件。电阻元件的电压、电流关系在  $u-i$  平面上是一条曲线, 这条曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。当伏安特性曲线是一条过原点的直线时, 这种电阻元件就称为线性电阻元件, 简称电阻; 否则, 称为非线性电阻, 如图 1.2.1 所示。电路中通常说的电阻都是指线性电阻, 用  $R$  表示。

当在电阻上加上电压或通以电流时, 在关联参考方向下, 电阻上的电压和电流满足关系

$$u = Ri \quad (1.2.1)$$

这就是读者熟悉的欧姆定律。  $R$  称为线性电阻元件的电阻值, 简称电阻。显然这是一常数,

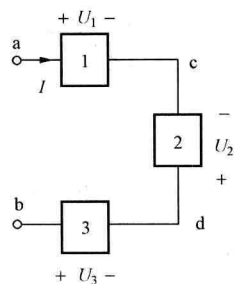


图 1.1.7 [例 1.1.1] 图

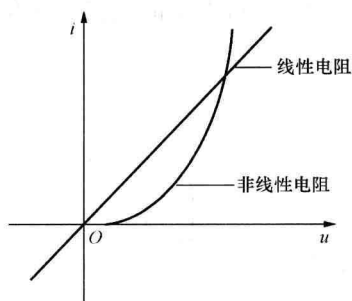


图 1.2.1 电阻元件的伏安特性

与电流、电压的大小无关。在国际单位制中，电阻的单位是欧姆 ( $\Omega$ )。

当电压与电流为非关联参考方向时，电阻上的电压与电流的关系则为

$$u = -Ri \quad (1.2.2)$$

在电路分析中，有时也用另一个参数——电导来表示电阻元件的性质，电导定义为电阻的倒数，用  $G$  表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.2.3)$$

在国际单位制中，电导的单位是西门子 (S)。用电导表示

的欧姆定律为

$$i = Gu \quad (1.2.4)$$

由功率的表达式 (1.1.5)，可得电阻的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1.2.5)$$

由于  $R$  是正值，因此电阻的功率恒大于零，即电阻总是吸收功率，是耗能元件。

### 1.2.2 电感元件

具有存储磁场能量特性的元件称为电感元件，如线圈，当电流通过它时，线圈内部就会产生磁场，从而产生磁通，并存储磁场能量。忽略电阻的电感线圈称为理想电感。设线圈中的电流为  $i$ ，单匝线圈的磁通为  $\Psi$ 、 $N$  匝线圈的总磁通——磁链为  $N\Psi$ ，记作  $\Psi$ 。

当电流  $i$  与磁通  $\Psi$  满足右手关系时 [见图 1.2.2 (a)]，定义

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1.2.6)$$

为线圈的电感。若  $\Psi$  与  $i$  成线性关系，电感元件称为线性电感。一般的空心线圈可视为线性电感，含有铁心的线圈则是非线性电感。以后除非特别说明，本书所说的电感都是指线性电感元件。在国际单位制中磁通的单位是韦伯 (Wb)，电感的单位是亨利 (H)，因此电感元件的电流与磁链的关系曲线称为韦安特性。线性电感的韦安特性在  $\Psi$ - $i$  平面中是一条通过原点的直线，如图 1.2.2 (b) 所示。

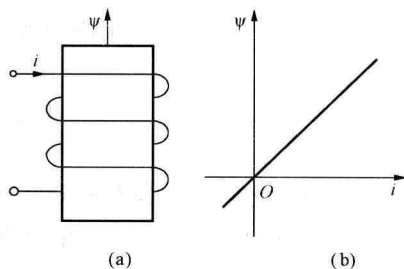


图 1.2.2 电感元件及其韦安特性

(a) 右手关系；(b) 韦安特性

根据法拉第一楞次定律，电感中电流变化时，会产生阻止电流变化的感应电动势，感应电动势的大小

为  $\left| \frac{d\Psi}{dt} \right| = L \left| \frac{di}{dt} \right|$ ，取电感上的电压与电流为关联参考方向，如图 1.2.3 所示，则

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1.2.7)$$

当  $i > 0$  时，若  $i$  增大，即  $\frac{di}{dt} > 0$ ，则  $u > 0$ ，感应电动势产生的电压阻止电流的增加；反之，

若  $i$  减小，即  $\frac{di}{dt} < 0$ ，则  $u < 0$ ，电感中的感应电动势在回路中产生与  $i$  相同方向的电流，以

阻止电流的减小。

对  $i < 0$  的情况，读者可作类似的分析。

由式 (1.2.7) 可以看出，任一时刻的电感电压，取决于该时刻电感电流的时间变化率。电流的时间变化率越大，电感电压也就越大。如果电感电流不随时间变化，即电流是恒定不变的直流，则电感电压为零，电感元件就可视为一段理想导线。

另外，式 (1.2.7) 也表明了电感与电阻元件的区别。电阻元件上电压与电流有确定的对应关系，而电感元件上的电压与电流没有确定的对应关系，只与电流的时间变化率有确定的对应关系。

在电感上的电压和电流为关联参考方向时，电感的功率为

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

在  $dt$  时间内，电感中磁场能量的增加量为

$$dW = p dt = Li di$$

电流为零时，磁场能量为零。当电流由 0 增大到  $i$  时，电感储存的磁场能为

$$W = \int_0^i Li di = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1.2.8)$$

由此可见，电感中储存的能量只与最终的电流值有关，而与电流建立的过程无关。

### 1.2.3 电容元件

具有储存电场能量特性的元件称为电容元件。两块中间隔有绝缘介质的金属板就构成一个电容器。当在电容器的极板上加上电压后，极板上就会积聚等量异号电荷，电容器内就产生电场并储存电场能量。

实际电容器中的介质并不是理想的绝缘体，因此必然存在一定的漏电现象。忽略漏电现象的电容器称为理想电容器，简称电容。

设在电容器的极板上加上电压  $u$ ，极板的电量为  $q$ ，定义

$$C = \frac{q}{u} \quad (1.2.9)$$

为电容器的电容。

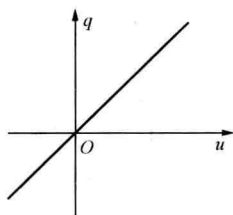


图 1.2.4 电容元件的库伏特性

若  $q$  与  $u$  成线性关系，即  $C$  与外加电压无关，则电容器称为线性电容器。一般所讲的都是线性电容器。按照线性电容器的定义，电容器上电量与电压的关系曲线在  $q-u$  平面上是一条通过原点的直线，也称电容的库伏特性，如图 1.2.4 所示。

在国际单位制中，电荷的单位为库仑 (C)，电容的单位为法拉 (F)。法拉的单位太大，一般用微法 ( $\mu\text{F}$ ) 或皮法 (pF)。

设电容器上的电压为  $u$ ，通过电容器的电流为  $i$ ，当  $i$  与  $u$  为关联参考方向时，如图 1.2.5 所示，电流为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.2.10)$$

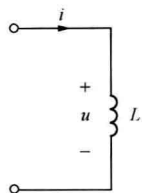
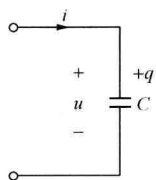


图 1.2.3 电压感上的电压与电流



由上式可看到，任意时刻流过电容的电流取决于该时刻电容电压的时间变化率。电压的变化率越大，电流就越大；如果电容电压不随时间变化，即  $u$  是直流电压，则  $i=0$ ，电容相当于开路。

当电容上的电压和电流为关联参考方向时，电容的功率为

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

在  $dt$  时间内，电容中电场能量的增加量为

$$dW = p dt = C u du$$

电压为零时，电场能为零。当电压由 0 增大到  $u$  时，电容存储的电场能为

$$W = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1.2.11)$$

由此可见，电容中存储的能量只与最终的电压值有关，而与电压建立的过程无关。

#### 1.2.4 电压源

一个元件如果其端电压或流出的电流保持为一恒定值或确定的时间函数，则称其为电源。电源分为电压源和电流源两种形式。凡是能独立地对外电路提供电压或电流的电源称为独立源，不能独立地向外电路提供电压或电流的电源称为受控源。

如果电源的端电压与流过的电流无关，则称这种电源为理想电压源，其符号表示如图 1.2.6 (a) 所示。 $u_s$  为电压源的电压，“+”、“-”是其参考极性。 $u_s$  为定值的电源称为恒压源，电压值用  $U_s$  表示。恒压源的伏安特性是一条不通过原点且与电流轴平行的直线，如图 1.2.6 (b) 所示。

由于流过恒压源的电流与电压值无关，由外电路决定，其实际方向既可与电压的实际方向相反，也可相同，所以恒压源既可以作为电源向外电路提供电能，又可以作为负载从电路吸收电能，读者熟知的充电电池就具有这两种工作状态。

恒压源是从实际电源中抽象出来的一种理想电源。而实际电源两端的电压总是随着输出电流的变化而变化的，这是由于实际电源内部有一定的电阻，电阻上所产生的压降降低了电源的输出电压，所以一个实际电源可以看成是一个恒压源  $U_s$  和一个电阻  $R_s$  的串联， $U_s$  为电源的开路电压，称为电源的电动势， $R_s$  称为电源的内阻，这种电源模型称为电压源模型，简称电压源，如图 1.2.7 (a) 所示。

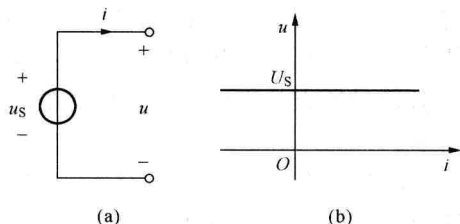


图 1.2.6 理想电压源的符号及伏安特性  
(a) 理想电压源符号；(b) 伏安特性

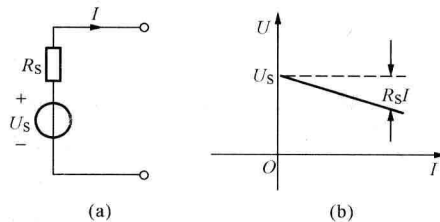


图 1.2.7 电压源及其伏安特性  
(a) 实际电压源模型；(b) 伏安特性

当电压源与外电路相连，电源的输出电流是  $I$  时，电压源两端的电压为

$$U = U_s - IR_s \quad (1.2.12)$$



因此,电压源的伏安特性如图 1.2.2 (b) 所示。 $R_S$  越小,电压源就越接近于恒压源。

### 1.2.5 电流源

若从电源流出的电流与电源两端的电压大小无关,则称这种电源为理想电流源,其符号表示如图 1.2.8 (a) 所示, $i_S$  为电流源的电流,箭头是其参考方向。 $i_S$  为定值的电流源称为恒流源,电流值用  $I_S$  表示。恒流源的伏安特性是一条不通过原点且与电压轴平行的直线,如图 1.2.8 (b) 所示。光电池就是一种电流源,在一定照度的光线照射下,光电池将产生一定值的电流,电流大小只与照度有关且成正比,与其他因素无关。

由于恒流源两端的电压与电流无关,由外电路决定,既可以是正值,也可以是负值,所以恒流源与恒压源相同,可以作为电源向外电路提供电能,也可以作为负载从电路吸收电能。

在实际中,理想电流源是不存在的,它的输出电流通常随着其端电压的增大而减小,所以一个实际电源可以看成是一个恒流源  $I_S$  和一个电阻  $R_S$  的并联, $I_S$  为电源的短路电流, $R_S$  为电源的内阻。这种电源模型称为电流源模型,简称电流源,如图 1.2.9 (a) 所示。当电流源与外电路相连,电源的端电压为  $U$  时,电流源的输出电流为

$$I = I_S - \frac{U}{R_S} \quad (1.2.13)$$

因此,电流源的伏安特性如图 1.2.9 (b) 所示。 $R_S$  越大,电流源就越接近于恒流源。

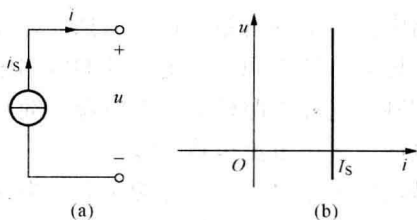


图 1.2.8 理想电流源的符号及伏安特性  
(a) 理想电流源符号; (b) 伏安特性

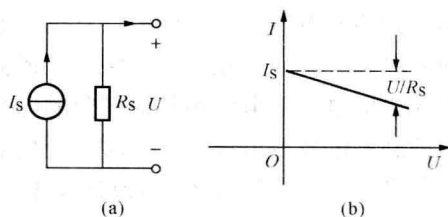


图 1.2.9 电流源及其伏安特性  
(a) 实际电流源模型; (b) 伏安特性

电压源模型和电流源模型是从实际电源中抽象出来的,对于一个实际的电源来说,其电路模型既可采用电压源模型,也可采用电流源模型,这要视电源的外部电压或电流的特性而定。

**【例 1.2.1】** 在图 1.2.10 所示电路中,  $I_S=2\text{A}$ ,  $U_S=4\text{V}$ , 求  $R$  分别为  $4\Omega$ 、 $2\Omega$ 、 $1\Omega$  时电阻和电流源上的电压,并计算各元件的功率。

**解** 电路中的电流为

$$I = I_S = 2\text{A}$$

$$U_R = IR = 2R$$

$$U_I = U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = U_R - U_S = 2R - 4$$

考虑到电源上电压与电流为非关联参考方向,故

$$P_I = -I_S U_I = -2U_I$$

$$P_U = -IU_S = -2 \times 4 = -8(\text{W})$$

$$P_R = I^2 R = 4R$$

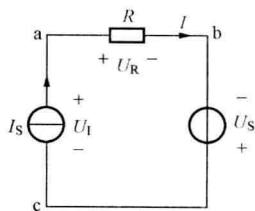


图 1.2.10 [例 1.2.1] 图

$$R = 4\Omega$$

$$U_I = 2 \times 4 - 4 = 4(\text{V})$$

$$P_I = -2 \times 4 = -8(\text{W}) \text{ (释放功率)}$$

$$P_R = 4 \times 4 = 16(\text{W})$$

$$R = 2\Omega$$

$$U_I = 2 \times 2 - 4 = 0$$

$$P_I = -2 \times 0 = 0 \text{ (不吸收也不释放功率)}$$

$$P_R = 4 \times 2 = 8(\text{W})$$

$$R = 1\Omega$$

$$U_I = 2 \times 1 - 4 = -2(\text{V})$$

$$P_I = -2 \times (-2) = 4(\text{W}) \text{ (吸收功率)}$$

$$P_R = 4 \times 1 = 4(\text{W})$$

可见，随着外电路的变化，电流源上的电压随之变化，不仅数值改变，方向也会改变，电流源在电路中的作用也随之变化。 $R=4\Omega$ 时，电流源释放功率，起电源的作用；而在 $R=1\Omega$ 时则吸收功率，起负载的作用。但不管何种情况，容易验证，电路的功率是平衡的，即电路中提供电能的元件产生的功率等于消耗电能的元件吸收的功率。

### 1.2.6 受控源

前面介绍的电压源和电流源，其输出电压或输出电流不受外电路的控制而独立存在，故称为独立电源。此外，在电子电路中，还会遇到另一种类型的电源，其电压源的输出电压或电流源的输出电流受电路中其他部分的电流或电压控制，这种电源称为受控电源，简称受控源。当控制的电流或电压等于零时，受控源的输出电压或输出电流也将为零。

根据受控源是电压源还是电流源，以及控制量是电压还是电流，受控源可分为电压控制电压源（VCVS）、电流控制电压源（CCVS）、电压控制电流源（VCCS）和电流控制电流源（CCCS）四种类型，根据国家标准，受控源用菱形符号表示，如图 1.2.11 所示。其中  $\mu$ 、 $\gamma$ 、 $g$ 、 $\beta$  称为控制系数，当这些系数为常数时，受控源称为线性受控源。本书所涉及的受控源都指线性受控源。

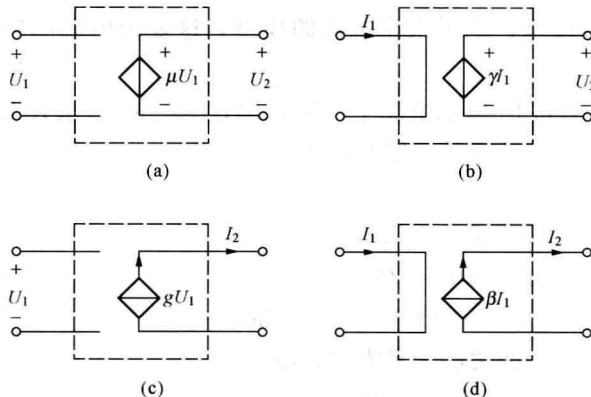


图 1.2.11 受控源的四种类型

(a) VCVS; (b) CCVS; (c) VCCS; (d) CCCS