

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目

高等院校信息与电子技术类规划教材

---



# 电路与电子学基础

(修订版)

周树南 张伯颐 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

“电路与电子学基础”是计算机、信息、电子、自动控制、光电类等专业的一门理论性、实践性都比较强的技术基础课。本着理念和技术“创新、先进、应用”的指导思想，体系更新、保证基础、立足应用，全书内容包括线性电路分析方法、模拟电子技术基础及集成运算放大器的应用两大部分。书中着重基本概念、基本理论和方法、基本电路的分析和应用。重点突出，要点明确。丰富的例题和习题，除围绕上述着重点外，还注意思考性、启发性和一定的延伸性，使读者增强分析问题和解决问题的能力。

本书兼顾了深度和广度，适合用作高等院校计算机、信息、电子、自动控制、光电类等专业的教材，也适合于各种类型的成人教育和相关专业科技人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电路与电子学基础(修订版)/周树南等编著. —北京: 科学出版社, 2006

(高等院校信息与电子技术类规划教材)

ISBN 7-03-007737-7

I. 电… II. 周… III. 电子电路-高等学校-教材 IV. TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 67035 号

责任编辑: 赵卫江/责任校对: 刘彦妮

责任印制: 吕春珉/封面设计: 飞天创意

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2000 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2006 年 9 月第六次印刷 印张: 21 3/4

印数: 12 001—14 000 字数: 468 000

定价: 29.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

## 前 言

---

在 2000 年第一版大学本科计算机专业用书的基础上,本修订版增加了对计算机专业来讲可选(以“\*”号标记)的内容,以适应不同类型院校信息、电子、控制、光电及机电类专业不同设课类型的教学需要。非“\*”号内容仍是按本科计算机专业一学期(60~70 学时)课程安排的。修订围绕教学内容、体系、手段更新的要求和贯彻“少而精、学到手、用得上”的教学原则,注重基本概念、原理、分析方法的理解和应用,减少复杂的教学推导,简化定量分析,注重定性分析,并丰富例题和引导。从内容安排、组织形式和教学方式上,注意突出重点、突破难点、前呼后应、举一反三,以及精讲多练、练和讨论结合,促进与激发学生学习的能动作用,帮助他们建立、提高科学的思维方法和归纳、总结能力,增强综合运用知识以及分析问题和解决问题的能力。全文阐述步骤明确,说理比较细致,文字叙述力求简明扼要、深入浅出、思路清晰,便于课后复习或自学。

参加本书编写的还有周晨华、张悦、张恩、孙鲁,全书由周树南统稿。本书的出版得到了北京理工大学沈世瑞教授、张砚春女士和北京邮电大学白中英教授、方维副教授的很大帮助和支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平、经验有限,时间又较紧,书中存在疏漏与不妥之处,热忱希望读者予以指正。

编 者

2006 年 7 月

# 第一版前言

为了适应计算机技术的飞速发展和面向 21 世纪的高等教育的需要，随着对计算机类学科现专业结构、课程体系和教学内容进行系统的、整体的改革，早在全国《计算机学科教学计划 1993》中就要求：改变长期以来多门技术基础课分设，学时多且内容较庞杂陈旧，与专业结构、课程体系的改革不配套的情况。为此，根据《计划》建议的“基本电路与电子学”课程大纲，我们编写了这本教材。该教材包含了原“电路分析”和“模拟电子技术基础”两门课程，压缩、优化了教学计划中有关课程的总学时，而且考虑了专业结构中课程设置和体系改革的需要。在“模拟电子电路”里，不仅着眼于打好学生正确使用模拟集成电路的基础，讨论了集成电路元件、器件、基本单元电路的概念和分析方法，加强了集成运算放大器及其组成的各类应用电路，还涵盖了原“数字电子技术基础”课程中有关电路级的内容（如集成逻辑门电路、脉冲波形的产生与处理电路、A/D 与 D/A 转换电路等），使“数字逻辑与数字系统”课程侧重在数字逻辑系统的设计和应用上。

在编写过程中，编著者认真总结了多年来的教学实践经验，并学习参考了国内外不少同类教材和有关文献，以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标，注重基本概念、基本原理、基本分析处理方法的论述，使学生既能打好基础，又能开阔视野。在文字叙述方面，力求简明扼要、深入浅出、思路清晰、便于自学。

全书的内容和体系是按照 60 个学时安排的，共分 12 章，3 个部分。第 1 章到第 5 章是电路分析，第 6 章到第 9 章是模拟电子技术基础，第 10 章到第 12 章是基本数字逻辑电路部分。在实际教学过程中，书中有些内容（如带“\*”号的可选部分）可以节略或由学生自学。

本书第 1、2、3、5、6 章由周树南编写，第 7、8、10、11 章由张砚春编写，方维编写了第 4、12 章，张素全编写了第 9 章。全书由周树南统稿。本书从酝酿到完稿自始至终得到了北京邮电大学白中英教授的关注、支持和帮助，并审阅了全稿。在编写过程中，石义彬、张素全还帮助完成了本书的大部分插图和录入，上海 Lattice 半导体有限公司也对本书的出版给予了很大支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中难免有许多缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编 者

2000 年 1 月

# 目 录

<b>第 1 章 电路分析导论</b> .....	1
1.1 电路及其模型 .....	1
1.1.1 电路的作用、组成与模型 .....	1
1.1.2 电路分析的基本变量 .....	2
1.2 电路基本元件 .....	5
1.2.1 电阻元件 .....	6
1.2.2 电感元件 .....	7
1.2.3 电容元件 .....	8
1.2.4 电源元件和实际电源模型 .....	9
1.2.5 受控源 .....	12
1.3 基尔霍夫定律 .....	14
1.3.1 基尔霍夫电流定律 (KCL) .....	14
1.3.2 基尔霍夫电压定律 (KVL) .....	15
1.4 等效变换 .....	18
1.4.1 等效和等效变换 .....	18
1.4.2 等效分析法 .....	19
习题 .....	29
<b>第 2 章 电路分析方法和定理</b> .....	33
2.1 支路电流法 .....	33
* 2.2 网孔电流法 .....	34
* 2.3 回路电流法 .....	36
2.4 节点电压法 .....	37
2.5 线性电路的叠加性和齐次性 .....	41
2.6 等效电源定理 .....	42
2.6.1 戴维南定理 (等效电压源定理) .....	42
2.6.2 诺顿定理 (等效电流源定理) .....	46
2.7 电路中的对偶 .....	48
习题 .....	48
<b>第 3 章 正弦电路的稳态分析</b> .....	53
3.1 正弦量的基本概念 .....	53
3.1.1 正弦量的特征量 .....	53
3.1.2 同频率正弦量的相位差 .....	54
3.1.3 周期信号的有效值 .....	55
3.2 正弦量的相量表示 .....	56

3.2.1	复数及其运算 .....	56
3.2.2	相量和相量图 .....	58
3.2.3	基尔霍夫定律的相量形式 .....	60
3.2.4	电阻、电感、电容元件伏安关系的相量形式 .....	61
3.3	阻抗和导纳 .....	64
3.3.1	欧姆定律的相量形式, 阻抗与导纳 .....	64
3.3.2	阻抗和导纳的等效变换 .....	67
3.4	正弦稳态电路的分析 .....	71
3.5	正弦稳态电路的功率 .....	74
3.5.1	瞬时功率 .....	74
3.5.2	平均功率 .....	75
3.5.3	无功功率 .....	75
3.5.4	视在功率 .....	76
3.5.5	功率因数的提高 .....	77
3.6	电路中的谐振 .....	79
3.6.1	$RLC$ 串联谐振电路 .....	80
3.6.2	$RLC$ 并联谐振电路 .....	82
* 3.7	耦合电感电路 .....	84
3.7.1	耦合电感的伏安关系 .....	84
3.7.2	含耦合电感电路的计算 .....	87
3.7.3	理想变压器 .....	92
* 3.8	三相电路 .....	94
3.8.1	对称三相电源 .....	94
3.8.2	三相电路的连接 .....	95
3.8.3	三相电路的功率 .....	98
	习题 .....	99
* 第 4 章	非正弦周期电流电路 .....	105
4.1	非正弦周期信号 .....	105
4.2	非正弦周期函数的谐波分析 .....	106
4.3	平均值、有效值和平均功率 .....	108
4.3.1	平均值 .....	108
4.3.2	有效值 .....	109
4.3.3	平均功率 .....	109
4.4	非正弦周期电流电路的计算 .....	109
	习题 .....	111
第 5 章	电路的动态分析 .....	114
5.1	换路定律、初始值、稳态值 .....	114
5.1.1	换路定律 .....	114
5.1.2	初始值、稳态值的确定 .....	115
5.2	$RC$ 电路的动态分析 .....	116
5.2.1	$RC$ 电路的零输入响应 .....	117

5.2.2	$RC$ 电路的零状态响应 .....	118
5.2.3	$RC$ 电路的全响应 .....	119
5.3	微分电路和积分电路 .....	120
5.3.1	微分电路 .....	120
5.3.2	积分电路 .....	121
5.4	一阶电路的三要素法 .....	122
5.5	$RL$ 电路的动态分析 .....	124
5.5.1	$RL$ 电路的零输入响应 .....	124
5.5.2	$RL$ 电路的零状态响应和全响应 .....	125
*5.6	阶跃信号和阶跃响应 .....	128
*5.7	二阶电路的动态分析 .....	132
5.7.1	$RLC$ 串联电路的零输入响应 .....	132
5.7.2	$RLC$ 串联电路的全响应 .....	135
5.7.3	$GLC$ 并联电路的动态分析 .....	136
	习题 .....	136
<b>*第 6 章</b>	<b>双口网络</b> .....	<b>141</b>
6.1	双口网络及其端口条件 .....	141
6.2	双口网络参数方程及其等效电路 .....	142
6.2.1	导纳参数 .....	142
6.2.2	阻抗参数 .....	144
6.2.3	混合 (或称 $H$ ) 参数 .....	145
6.2.4	传输方程和 $A$ 、 $B$ 参数 .....	146
6.3	双口网络的连接 .....	148
	习题 .....	151
<b>第 7 章</b>	<b>半导体器件基础</b> .....	<b>153</b>
7.1	半导体的基本知识 .....	153
7.2	半导体二极管 .....	154
7.2.1	二极管的结构 .....	154
7.2.2	二极管的伏安特性、电路模型和参数 .....	154
7.2.3	特殊二极管 .....	156
7.3	双极型晶体管 .....	159
7.3.1	晶体管的结构、工作状态和电路组态 .....	159
7.3.2	晶体管的特性曲线 .....	161
7.4	晶体管的主要参数 .....	162
7.5	场效应晶体管 .....	164
7.5.1	结型场效应管 (JFET) .....	164
7.5.2	绝缘栅场效应管 (IGFET) .....	166
7.5.3	场效应管的主要参数 .....	167
	习题 .....	168
<b>第 8 章</b>	<b>放大器基础</b> .....	<b>172</b>
8.1	基本放大电路 .....	172

8.1.1	基本交流放大电路的组成	172
8.1.2	放大电路的静态分析	173
8.1.3	放大电路的动态分析	174
8.2	放大电路中静态工作点的稳定	183
8.2.1	温度对静态工作点的影响	183
8.2.2	分压式偏置电路	184
8.3	三种基本组态放大电路	187
8.3.1	共集电极放大电路	188
8.3.2	共基极放大电路	191
8.3.3	三种基本组态特性的比较	193
8.4	放大电路的频率特性	193
8.4.1	频率特性和频率失真	193
*8.4.2	阻容耦合共射极放大电路的频率特性	195
*8.5	组合放大电路	200
8.5.1	共射-共基放大电路	200
8.5.2	共射-共集和共集-共射组合放大电路	200
8.5.3	共集-共基放大电路	201
8.6	多级放大电路	201
8.6.1	多级放大电路的组成	202
8.6.2	阻容耦合多级放大电路	202
8.6.3	直接耦合	206
8.6.4	变压器耦合	207
8.7	差动放大电路	208
8.7.1	差动放大电路的基本工作原理	209
8.7.2	典型差动放大电路的分析	211
*8.7.3	具有恒流源的差动放大器	215
*8.8	电流源与有源负载	217
8.8.1	镜像电流源电路	217
8.8.2	微电流源电路	218
8.8.3	多路电流源	218
8.8.4	电流源的主要应用	219
8.9	功率放大电路	219
8.9.1	功率放大电路的特点与工作状态	220
8.9.2	互补对称功率放大电路	221
8.9.3	集成功率放大电路的应用	227
8.10	场效应管放大电路	230
8.10.1	自给偏压电路	230
8.10.2	分压式偏置共源极放大电路	231
8.10.3	源极输出放大电路	233
	习题	235
<b>第9章 负反馈放大器</b>		246
9.1	反馈放大器的基本概念	246
9.1.1	反馈放大器的组成和反馈极性	246



9.1.2 负反馈放大器基本方程 .....	246
9.2 反馈放大电路的分析 .....	247
9.2.1 反馈类型及其判别 .....	247
9.2.2 负反馈放大器分析举例 .....	250
9.3 负反馈对放大器性能的影响 .....	253
*9.4 负反馈放大器的稳定性 .....	257
9.4.1 自激振荡产生的原因及条件 .....	257
9.4.2 自激振荡的判断方法 .....	258
9.4.3 清除自激振荡的方法 .....	259
习题 .....	259
<b>第 10 章 集成运算放大器</b> .....	<b>263</b>
10.1 集成运算放大器基础 .....	263
10.1.1 集成电路 .....	263
10.1.2 集成运算放大器的组成 .....	263
10.1.3 集成运算放大器的类型 .....	264
10.1.4 集成运算放大器的主要参数 .....	266
10.1.5 理想运算放大器 .....	268
10.2 运算放大器的线性应用 .....	269
10.3 运算放大器的非线性应用 .....	285
10.3.1 电压比较器 .....	286
10.3.2 正弦波发生器 .....	292
10.3.3 方波发生器 .....	298
10.3.4 三角波发生器和锯齿波发生器 .....	301
*10.4 使用集成运算放大器应注意的几个问题 .....	303
习题 .....	305
<b>第 11 章 直流稳压电源</b> .....	<b>315</b>
11.1 整流与滤波电路 .....	315
11.2 直流稳压器 .....	318
11.2.1 直流稳压器的主要性能指标 .....	318
11.2.2 串联型稳压器 .....	319
11.2.3 集成稳压器 .....	321
*11.2.4 开关型稳压电路 .....	322
习题 .....	324
<b>附录</b> .....	<b>327</b>
附录 A 电阻器、电容器的标称系列值 .....	327
附录 B 半导体分立器件型号命名方法 .....	328
附录 C 常用半导体分立器件的参数 .....	328
附录 D 半导体集成电路型号命名方法 .....	331
附录 E 常用半导体集成电路的参数和符号 .....	332
<b>习题参考答案</b> .....	<b>333</b>
<b>主要参考文献</b> .....	<b>338</b>

# 第 1 章 电路分析导论

## 1.1 电路及其模型

### 1.1.1 电路的作用、组成与模型

通俗地讲,电路就是电流流通的路径。实际电路装置由于所完成的任务不同,其结构形式各种各样,但都是由各种电气器件、设备按一定方式连接起来的总体。通常,将其中提供电能的装置称为电源,取用电能的用电设备称为负载,两者由导线连接成闭合电路。电路的功能是实现电能的传输与分配,如在电力系统里;而电子电路的作用是进行电信号的传输与处理。例如日常使用的收音机和电视机,能把接收到的微弱的无线电信号进行加工处理,最后给出人们需要的声音和图像;又如计算机可对输入的数据进行指定的计算或对各种机械进行控制等等。

如同任何工程学科一样,电路分析也建立在模拟概念的基础上。因此,它分析的对象不是由电气器件、设备构成的实际电路,而是由电路元件构成的电路模型。电路元件具有单一电磁现象,是理想化了的器件,所以也称理想电路元件。任何电路器件都可用电路元件的适当组合来模拟。例如,日常工作、生活中使用的电烙铁、电炉、电热锅……里的电热器,都可以用图 1.1(a)所示的电阻元件来模拟,来作为这些电气器具的电路模型。

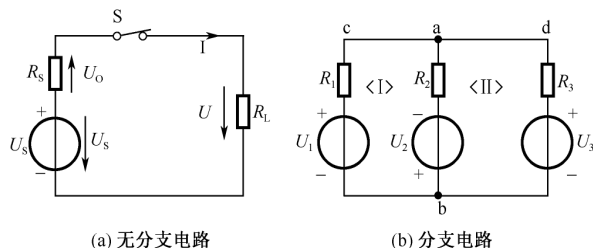


图 1.1 电路模型

电路模型具有实际电路的主要电磁性能,由模型得出的电路各物理量之间的关系反映了实际电路的基本物理规律,这就在保证工程实践要求的基础上简化了分析。当然,实际电路用模型近似表示是有条件的。一种模型只在一定条件下适用,条件变了,电路模型需做相应的改变。如何根据实际电路做出其模型,这称为建模。本书只对电路模型进行分析,不考虑建模过程。

图 1.1(a)所示是手电筒电路的模型。其中电池看作是能提供恒定电压  $U_s$  的理想电压源和具有内电阻值  $R_s$  的电阻元件组成的串联组合,小电珠的灯丝用电阻值为  $R_L$  的电阻元件表示,连接导线则是无电阻的理想导线, $S$  是开关。图 1.1(b)表示的是分支电路模型。其中分支的每一段电路称为支路。在图 1.1(b)中共有三条支路。三条或三条以

上的支路相连接的点称为节点。在图 1.1(b)中共有两个节点:a 和 b。各支路组成的闭合路径称为回路。图 1.1(b)中共有三个回路:adbca、abca 和 adba。电路中的每一个网孔(即未被其他支路分割的最简单的回路)称为网孔。在图 1.1(b)中只有Ⅰ、Ⅱ两个网孔。

### 1.1.2 电路分析的基本变量

电路中基本的物理量(简称电量)是电流、电压及电功率。一般情况下,它们都是时间  $t$  的函数,分别用  $i(t)$ 、 $u(t)$  及  $p(t)$  表示,简写成  $i$ 、 $u$  及  $p$ 。电路分析的基本内容是已知电路的结构及元件参数,要确定电路各部分的电压和电流。即在给定激励下,求给定电路的响应。这里的所谓“激励”,可理解为电源的作用,所谓“响应”,则可理解为电路各部分对电源作用的反应。电流和电压作为电路分析的基本变量,它们是分析电路的主要求解对象。此外,有时还要分析电路中的功率和能量问题。

#### 1. 电流

电路运行时,电荷在电路中的定向运动便形成电流。电流的大小用电流强度表示。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

式中, $t$  的单位为秒(s), $q$  的单位是库仑(C), $i$  的单位是安培(A)。习惯上,常常将电流强度称为电流。

大小和方向随时间变化的电流称为交流电流,用小写字母  $i$  表示。不随时间变化的电流则称为恒定电流或直流电流,用大写字母  $I$  表示。

电流是有方向的,电流的实际方向规定为正电荷定向运动的方向。然而分析问题时,电路中流过各元件的电流的实际方向往往很难预知。如交流电路中电流的方向是变化的。即使在直流电路中,要预先确定较复杂电路里某一元件通过的电流方向也很困难。为此,分析电路时,首先要给电流一个假定方向,以便列出电路方程,然后才能对电路进行分析计算。这个假定方向称为参考方向,并在电路图中将它用箭头标出。参考方向可以任意选择。一经选定,就不再改变。经过计算,电流值为负,说明参考方向与实际方向相反;电流值为正,则表示参考方向与实际方向一致,即说明参考方向就是实际方向。所以,参考方向又称为正方向。这样,根据计算值的正或负,结合参考方向就能确定电流的实际方向(见图 1.2)。电流是代数量,既有数值又有方向,才有明确的物理意义。

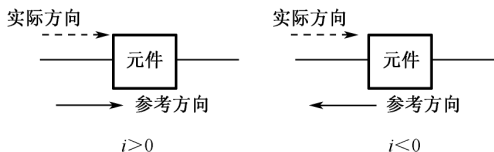


图 1.2 电流参考方向与实际方向之间的关系

## 2. 电压与电位

电路上 a、b 两点间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移动到 b 点所做的功,也就是单位正电荷从 a 点(高电位)移到 b 点(低电位)所失去的能量,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中,  $q$  的单位是库仑(C),  $W$  的单位是焦耳(J),  $u$  的单位是伏特(V)。

大小和极性随时间变化的电压称为交流电压,用小写字母  $u$  表示。不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压,用大写字母  $U$  表示。

电压是有极性的,高电位点定为正极,标以“+”号,低电位点定为负极,标以“-”号。有时也用电压的方向表示,电压的方向规定为由高电位端指向低电位端,即电位降低的方向(也有用双下标表示的,如  $u_{ab}$ ,其方向由 a 指向 b)。和电流方向判断的情况一样,分析问题时往往很难预先确定电压的实际方向,我们同样采用参考方向(参考极性)假定电压的极性。如图 1.3 所示,“+”、“-”表示参考极性,箭头表示参考方向(若用双下标表示为  $u_{ab}$ )。电压的参考方向一经选定,就不再变更。经过计算,电压值为正,说明实际方向与参考方向一致,“+”极为高电位,“-”极为低电位;电压值为负,则情况与前述相反。由此可见,只有标定了参考方向后的电压数值才有明确的物理意义。

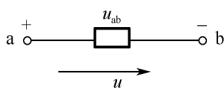


图 1.3 电压参考方向

电流和电压的参考方向都是任意选定的,二者彼此独立,相互无关。但为了分析电路的方便,常使电流和电压的参考方向关联起来选成一致,即电流参考方向是从电压参考正极流入,负极流出,并称之为关联参考方向。采用关联参考方向时,只要标出两者中任何一个的参考方向,则另一电量的参考方向也就同时给定了。

电压有时也叫电位差。如图 1.3 中, a、b 两点间的电压  $u$ , 就是 a、b 两点的电位差。

电路中某点的电位,是将单位正电荷沿电路中任一路径移到参考点时,电场力所做的功。参考点的电位为零,所以某点的电位,就是该点到参考点的电压。电位的单位也是伏特(V)。讨论电路中各点的电位时,必须先选定一个参考点,否则是无意义的,因为电位与参考点的选择有关,而电压与参考点的选择无关。物理学中一般选择参考点为无穷远处。而实际电气设备一般常有一个连接到机壳的电路公共端,工程上常以这个公共点为参考点,即使它并不真正接地,习惯上也称该点为“接地点”。电子电路图中经常采用电位电路的画法。如图 1.4 所示,“⊥”标为参考地,  $V_{S1}$ 、 $V_{S2}$  表示电位。

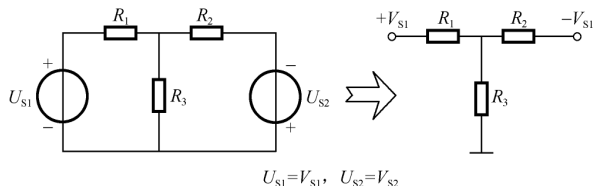


图 1.4 电位电路图

### 3. 功率与能量

功率是电场力在单位时间内移动电荷所做的功。从图 1.3 看到,当通过这段电路的电流  $i$  与电压  $u$  取关联参考方向时,在  $dt$  时间内从  $a$  点移到  $b$  点的正电荷量为  $dq$ ,因  $a$ 、 $b$  两点间电压为  $u$ ,故  $dq$  从  $a$  点移到  $b$  点过程中失去的能量为

$$dW = u \cdot dq \quad (1-3)$$

这些能量被这段电路吸收。因此,电路在单位时间内吸收的能量,即它吸收的功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-4)$$

上式指出:任意时刻,元件(或电路)吸收的功率等于该时刻元件(或电路)两端的电压与通过它的电流的乘积。在直流情况下,上式写为

$$P = UI \quad (1-5)$$

功的单位是焦耳(J),功率的单位是焦/秒,又称瓦特(W)。

应该注意的是:用上式计算功率时,因  $u$ 、 $i$  采用关联参考方向,则规定:若算得的功率值  $p > 0$ ,表示元件(或电路)吸收的功率;若  $p < 0$ ,表示元件(或电路)发出的功率。当  $u$ 、 $i$  采用非关联参考方向时,仍规定吸收功率时  $p$  值为正,发出功率时  $p$  值为负,则计算功率的公式应改为

$$p = -ui \quad (1-6)$$

或

$$p = -UI \quad (1-7)$$

上述规定的依据是:一个元件(或电路)实际发出功率时,它两端的电压和通过它的电流的实际方向必定相反;而若是吸收功率,则两者的实际方向应相同。这点显然可由图 1.1(a)所示简单电路中各部分功率的情况看出。图中  $U_s$  是实际极性,箭头所示的便是电流和电路中各处电压的实际方向。其中理想电压源发出功率,其  $U_s$  和  $I$  反向;而电源内阻  $R_s$  及负载电阻  $R_L$  都吸收功率, $I$  和  $U_o$  同向, $I$  和  $U$  也同向。整个电路中,吸收功率的总和恒等于发出功率的总和,这就是直流电路里的功率平衡关系。

设元件吸收的功率为  $p(t)$ ,则从  $t_0$  到  $t$  时刻元件吸收的总能量为

$$W(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi \quad (1-8)$$

式中,积分上限为  $t$ ,为了区别,积分式内的时间变量改用  $\xi$ 。当  $p$  的单位为瓦特(W)时,能量  $W$  的单位为焦耳(J),简称焦。

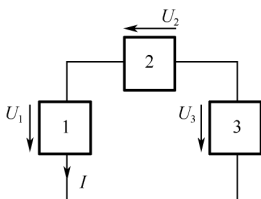


图 1.5

**例 1-1** 在图 1.5 中,电流和各元件两端电压的正方向如图中所示。今测得:  $I = -4\text{A}$ ,  $U_1 = 140\text{V}$ ,  $U_2 = -80\text{V}$ ,  $U_3 = 60\text{V}$ 。试说明电流和各电压的实际方向,并计算各元件的功率,指明哪些元件是电源,哪些是负载。

**解** 电流  $I$  和电压  $U_2$  的实际方向与图 1.5 所示正方向相反,  $U_1$  和  $U_3$  的实际方向则与正方向相同。

元件 1 的功率为:  $P_1 = IU_1 = (-4) \times 140 = -560(\text{W})$ , 元件 1 发出功率,所以元件 1 是电源。

元件 2 的功率为:  $P_2 = IU_2 = (-4) \times (-80) = 320(\text{W})$ , 元件 2 吸收功率, 所以元件 2 是负载。

元件 3 的功率为:  $P_3 = -IU_3 = -(-4) \times 60 = 240(\text{W})$ , 元件 3 吸收功率, 所以元件 3 也是负载。

**例 1-2** 电路中各元件的情况如图 1.6 所示。

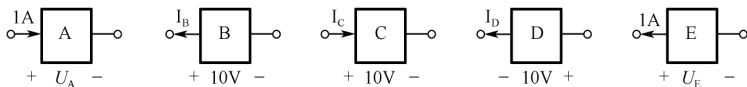


图 1.6

(1) 若元件 A 吸收的功率为  $10\text{W}$ , 求  $U_A$ ;

(2) 若元件 B 吸收的功率为  $10\text{W}$ , 求  $I_B$ ;

(3) 若元件 C 吸收的功率为  $-10\text{W}$ , 求  $I_C$ ;

(4) 若元件 D 发出的功率为  $10\text{W}$ , 求  $I_D$ ;

(5) 若元件 E 发出的功率为  $-10\text{W}$ , 求  $U_E$ 。

**解** (1) 因为 A 吸收功率  $P_A = 1\text{A} \cdot U_A > 0$ , 即  $1\text{A} \cdot U_A = 10\text{W}$ , 所以  $U_A = 10\text{V}$ ;

(2) 因为  $P_B = (-I_B) \cdot 10\text{V} > 0$ , 即  $(-I_B) \cdot 10\text{V} = 10\text{W}$ , 所以  $I_B = -1\text{A}$ ;

(3) 因为吸收负的功率等于发出正的功率, 即  $P_C = I_C \cdot 10\text{V} < 0$ , 即  $I_C \cdot 10\text{V} = -10\text{W}$ , 所以  $I_C = -1\text{A}$ ;

(4) 因为  $P_D = I_D \cdot 10\text{V} < 0$ , 即  $I_D \cdot 10\text{V} = -10\text{W}$ , 所以  $I_D = -1\text{A}$ ;

(5) 因为 E 实际吸收功率  $P_E = (-1\text{A}) \cdot U_E > 0$ , 即  $(-1\text{A}) \cdot U_E = 10\text{W}$ , 所以  $U_E = -10\text{V}$ 。

## 1.2 电路基本元件

电路元件按其对外提供还是不提供能量分为有源元件和无源元件。按其对外引出端钮的数目还可分为二端元件和多端元件。具有两个端钮的二端元件有电阻、电感、电容及电压源、电流源等。多端元件具有三个或三个以上端钮, 如受控源、理想变压器和运算放大器等。

本书只讨论由集中参数元件构成的所谓集中参数电路, 如以后所述的电路基本定律均是在这一前提下才能使用。集中参数元件的电磁过程认为都是集中在元件内部进行, 因此元件特性可集中用一个或有限个分立的参数表征。工程中遇到的大量电路都可作为集中参数电路来处理。能这么处理的准则是: 若电路元件及其连接成的电路尺寸远小于电路最高工作频率所对应的波长, 则电路的实际尺寸可以忽略不计而看作是集中参数电路。例如, 若计算机电路工作频率高达  $500\text{MHz}$ , 对应的波长为  $0.6\text{m}$ 。因采用大规模和超大规模集成电路, 器件及电路被集成在几毫米的硅片上, 这时电路就属于集中参数电路。

### 1.2.1 电阻元件

电阻元件简称电阻,其特性由通过它的电流  $i$  和它两端电压  $u$  之间的关系,即  $i=f(u)$  表征。这个关系表现在  $u-i$  平面上是电阻的伏安特性曲线。若伏安特性是通过坐标原点的直线,则称为线性电阻;若伏安特性是通过坐标原点的曲线,则称为非线性电阻。

电阻又可分为时变电阻和时不变(定常)电阻。前者的特征是其伏安特性随时间变化,而后的伏安特性不随时间变化。线性定常电阻的伏安特性为一条通过坐标原点的直线,而线性时变电阻的伏安特性为一族过原点的直线。

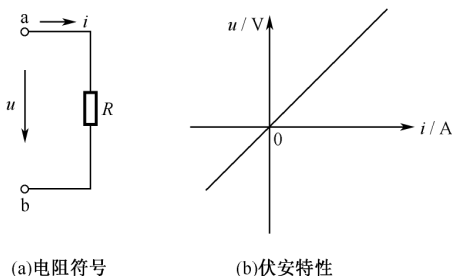


图 1.7 线性定常电阻

线性定常电阻的电路符号和特性如图 1.7 所示。这种电阻有如下特点:

(1) 端电压  $u$  与通过的电流  $i$  成正比,即满足欧姆定律

$$u = iR \quad (1-9)$$

式中,  $u$  与  $i$  采用关联参考方向。元件参数就是电阻值  $R$ ,反映了对电流的阻碍作用。它是常数,与通过它的电流和作用在它两端的电压大小无关。它也就是伏安特性曲线的斜率。当  $u$  与  $i$  取非关联参考方向时,欧姆定律的表示形式则为  $u = -iR$ 。

(2) 双向性:伏安特性以原点对称,即对不同方向电流和电压,伏安特性完全相同,故元件两个端钮没有区别,可任意连接。

(3) 耗能性:它的功率  $p = iu = i^2 R = \frac{u^2}{R} > 0$ ,即总是消耗功率。说明电阻不仅是无源元件,而且是一种耗能元件。若时间  $t$  从 0 到  $T$ ,则在这段时间内电阻所消耗的电能为

$$W = \int_0^T p dt$$

这些电能全部变成热散发掉。所以,电阻消耗电能是不可逆的能量转换过程。而且,发热使电阻的温度升高。若温度过高,电阻就有烧坏的危险。为此,实际电阻器上通常除标明阻值外,还要标明它长期运行时所规定的功率限额,称为额定功率。

(4) 无记忆性:由式(1-9)可见,任一时刻电阻的电压(或电流)完全由同一时刻的电流(或电压)决定,而与该时刻以前的电流(或电压)值无关。也就是说,线性电阻的电压(或电流)不能“记忆”电流(或电压)在“历史”上所起的作用,故它是无记忆元件。

以后如不特殊说明,一般均用线性定常电阻(包括后述的电感、电容)。这种元件的参数还可用电导  $G$  表示,即

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

式中,当  $u$  的单位为伏特(V),  $i$  的单位为安培(A)时,  $R$  的单位为欧姆( $\Omega$ ),  $G$  的单位为西门子(S)。

附带说一下,由式(1-9)确定的电阻  $R$  两端(a和b)的电压  $u$ ,也就是 a、b 两点的电位差。这种电流通过电阻时产生的电位下降,习惯上常称为电压降。

## 1.2.2 电感元件

电感元件简称电感,其物理原形是如图 1.8(a)所示的电感线圈。当电流  $i$  流过线圈时,周围就会有磁场产生。线圈内磁通  $\phi$  与电流  $i$  的方向符合右手螺旋定则。磁力线是发散的,因而与线圈各匝交链的磁通不等。各匝磁通的总和,即全磁通或称磁链  $\psi$  为

$$\psi = \sum_{j=1}^N \phi_j$$

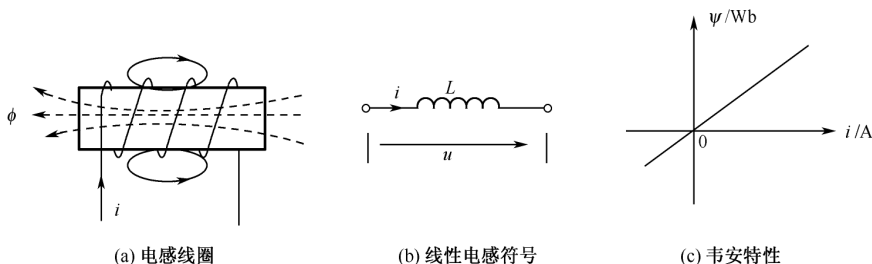


图 1.8 线性电感

式中,  $\phi_j$  为与第  $j$  匝线圈交链的磁通。如果线匝绕得很紧凑或采取其他措施,使得与各匝线圈交链的磁通都相同且为  $\phi$ , 则有

$$\psi = N\phi$$

式中,  $N$  为线圈匝数。磁通和磁链的单位为韦伯(Wb)。这样,一个电感元件的特性用函数  $\psi = f(i)$  来表示。这个关系表现在  $\psi$ - $i$  平面上是电感的韦安特性曲线。若韦安特性是通过坐标原点的直线,则为线性电感。线性电感有如下特点:

(1) 其磁链  $\psi$  正比于产生磁链的电流  $i$ , 即

$$\psi = Li \quad (1-11)$$

式中,  $\psi$  与  $i$  参考方向之间遵守右手螺旋定则,比例系数  $L$  是一个正实常数。它与  $\psi$ 、 $i$  无关,是电感元件本身固有的物理量,称为电感(或自感),单位是亨利(H)。它也是韦安特性曲线的斜率。

线性电感的电路符号和磁特性如图 1.8(b)、(c)所示。电感  $L$  既是元件名称又表示元件的参数。

(2) 双向性: 韦安特性以原点对称,故也是一种与端钮接法无关的元件。

(3) 动态性: 当电感的电流  $i$  随时间变化时,  $\psi$  也随之变化,因而在它的两端将产生感应电压  $u$ 。由电磁感应定律可知



$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

式中,  $u$  和  $i$  采用关联参考方向。此式说明, 线性电感的电压与该时刻电流的变化率有关(成正比), 而与该时刻的电流无关。所以, 称它是动态元件。如果电流不随时间变化(直流电流), 则电压为零, 电感相当于一根无电阻的短接导线(称电感短路)。

(4) 记忆性: 由式(1-12)可得电感电流与电压关系的积分形式

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \\ &= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-13)$$

上式表明, 电感在  $t$  时刻的电流值与  $t$  时刻以前电感电压的全部历史有关。电感电流有“记忆”电感电压的作用, 故电感是一个记忆元件。式中  $i(t_0)$  为电感在初始时刻  $t_0$  的状态, 称为初始状态。

(5) 储能性: 它的功率为

$$p = ui = L \frac{di}{dt} \cdot i = Li \frac{di}{dt} \quad (1-14)$$

可见, 当  $u$ 、 $i$  的实际方向一致时  $p > 0$ , 表明电感吸收功率, 其磁场增强, 磁场能量随电流的增加而增加; 反之, 则  $p < 0$ , 电感把吸收了的能量释放出来, 输出功率。所以电感是一种储能元件。从  $t = t_0$  到任意时间  $t$  供给电感的能量为

$$\begin{aligned} w_L &= \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t \left[ L \frac{di(\xi)}{d\xi} \right] i(\xi) d\xi = L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i di \\ &= \frac{1}{2} L [i^2(t) - i^2(t_0)] \end{aligned}$$

如果初始电流  $i(t_0) = 0$ , 则电流为  $i(t)$  时, 电感吸收并全部转化为它的磁场能量

$$w_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-15)$$

上式说明, 磁场能量只决定于电流, 与电感的电压无关。而且, 在任意时刻  $w_L > 0$ , 与元件在电路中的连接方式无关。所以, 电感仍是一个无源元件。

### 1.2.3 电容元件

电容元件简称电容, 是实际电容器的理想化模型。任何两个彼此绝缘而又互相靠近的导体就可构成一个电容器。这两个导体就是电容器的两个极, 极间用绝缘介质隔开。电容的特性由两个极板上所加电压  $u$  和极板上储存电荷  $q$  之间的关系表征。这个关系表现在  $q-u$  平面上是电容的库伏特性曲线。该特性若是通过坐标原点的直线, 则元件为线性电容, 否则称其为非线性电容。线性电容有如下特点:

(1)  $q$  正比于  $u$ , 即

$$q = Cu \quad (1-16)$$

式中  $C$  是一个常量, 称为电容量, 单位为法拉(F)。它与  $q$  和  $u$  无关, 也是库伏特性曲线的斜率。其电路符号和特性如图 1.9 所示。

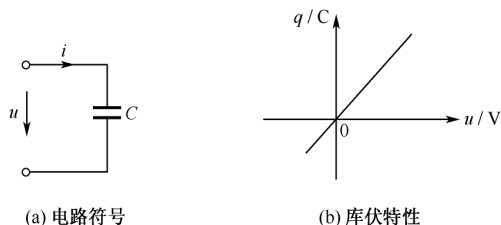


图 1.9 线性电容

(2) 双向性: 库伏特性以原点对称, 说明特性与端钮接法无关。

(3) 动态性: 若作用于电容两端的电压是直流电压, 则极板上的电荷是稳定的。这时极板间没有电荷的移动, 即没有电流。电容相当于断开(称为开路), 所以电容有隔断直流作用。但若加在电容上的电压  $u$  随时间变化, 则极板上的电荷会随之变化, 在极板间的介质中会产生位移电流, 从而在导线上形成传导电流。如图 1.9(a) 所示, 当  $u, i$  为关联参考方向时

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

可见, 任一时刻通过电容的电流取决于该时刻电容两端电压的变化率, 而与该时刻的电压值无关, 这反映了电容的动态性。

(4) 记忆性: 由式(1-17)可得电容电压与电流关系的积分形式

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= u(b) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-18)$$

上式表明, 电容在  $t$  时刻的电压与  $-\infty$  到  $t$  这一段时间内所有的电流都有关。可见, 电容电压有“记忆”电容电流的作用。

(5) 储能性: 当  $u, i$  参考方向关联时, 电容吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-19)$$

上式中  $p$  可能为正, 也可能为负。这意味着电容可能吸收功率, 也可能供出功率。和电感的能量分析类似, 此处不再推导。电容  $C$  在  $t$  时刻储存的电场能量为

$$w_c = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-20)$$

所以, 电容是储能元件, 也是一无源元件。

#### 1.2.4 电源元件和实际电源模型

电源元件有理想电压源和理想电流源二种, 它们都是理想二端有源元件。

##### 1. 理想电压源、电流源

理想电压源是其端电压  $u$  总是保持为一定的时间函数  $u_s(t)$ , 而与通过它的电流无关

的元件。其电路符号如图 1.10(a)所示,图中通过它的电流  $i$  完全由电源以外的电路(称为外电路)的工作情况决定。电源既可以对外电路提供能量,也可以从外电路吸收能量,视电流  $i$  的方向而定。

若  $u_s(t) = U_s$  为一常量,则称它为恒定电压源(简称恒压源),其伏安特性为  $u-i$  平面上平行于  $i$  轴的一条直线,如图 1.10(b)所示。若  $u_s$  是时间  $t$  的函数,则称为时变理想电压源,其伏安特性是  $u-i$  平面上平行于  $i$  轴的一族直线。

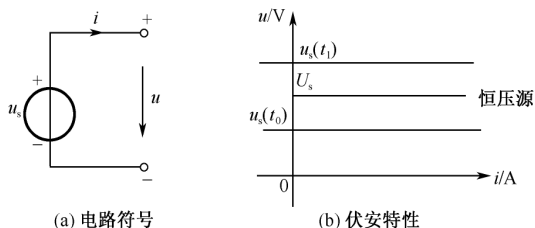


图 1.10 理想电压源

理想电流源是在其端钮上总能向外提供一定的电流  $i_s(t)$ ,而与它的端电压无关的元件。其电路符号如图 1.11(a)所示,图中它的端电压  $u$  的大小和方向(极性),在  $i_s(t)$  给定时,完全由外电路的工作情况决定。 $u$  的方向(极性)决定了它是否向外电路提供能量。

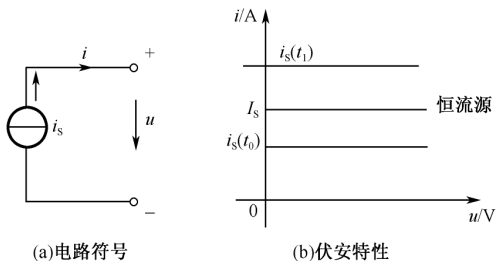


图 1.11 理想电流源

若理想电流源的端电流  $i_s(t) = I_s$  为一常量,则称它为恒定电流源(简称恒流源),其伏安特性为  $u-i$  平面上平行于  $u$  轴的一条直线,如图 1.11(b)所示。若  $i_s(t)$  为时间  $t$  的函数,则称为时变理想电流源,其伏安特性是  $u-i$  平面上平行于  $u$  轴的一族直线。

## 2. 实际电源模型

由于实际电源的功率总是有限的,而且内部存在内阻,内阻损耗能量。为了模拟这一实际现象,实际电源可以用一个理想电压源  $u_s$  和电阻  $R_s$  的串联组合形成的实际电压源模型(简称电压源)表示,也可表示成理想电流源  $i_s$  和电阻  $R_s$  并联而成的实际电流源(简称电流源)形式,分别如图 1.12 和图 1.13 所示。图中电压源的伏安特性为

$$u = u_s - iR_s \quad (1-21)$$

式中,  $u_s$  是电压源的电压,  $R_s$  是电压源的内阻。当外电路断开,输出电流  $i=0$  时,称为输

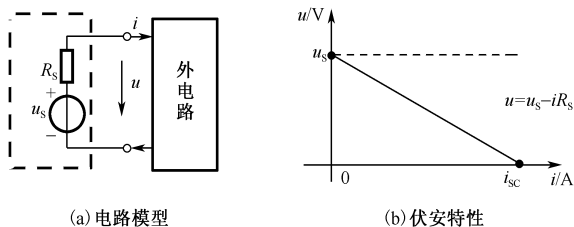


图 1.12 实际电压源

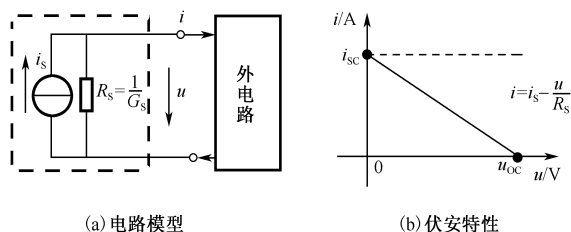


图 1.13 实际电流源

出端开路,这时的输出电压称为开路电压,用  $u_{oc}$  表示。由式(1-21)可见

$$u_{oc} = u_s$$

当输出端用一根无电阻导线短接,输出端电压  $u=0$  时,称为输出端短路,这时的输出端电流称为短路电流,用  $i_{sc}$  表示。由式(1-21)可见

$$i_{sc} = \frac{u_s}{R_s} = \frac{u_{oc}}{R_s}$$

这样,根据电源所带外电路(负载)的不同,电路的工作状态分三种:负载开路状态(也称空载状态)、短路状态和负载状态。前两种状态是故障状态,因为这时电源不向负载提供功率,负载不工作。而且,如果实际电源的内阻  $R_s$  很小的话,短路状态时,电路中可能产生很大的短路电流  $i_{sc}$ ,从而可能损伤电源或其他电路设备。负载状态是正常工作状态。这时,负载电压  $u$ 、电流  $i$  间的关系依从于式(1-21)。而且,无论是电源还是负载设备,都注意遵从它们正常使用时的电压、电流、功率的限额,即所谓电气设备的额定值。

电流源的伏安特性为

$$i = i_s - \frac{u}{R_s} \quad (1-22)$$

式中,  $i_s$  为电流源的电流,  $R_s$  为其内阻。类似上述电压源中分析可得:电流源的开路电压  $u_{oc} = i_s R_s$  (这时输出电流  $i=0$ , 见图 1.13(a)), 短路电流  $i_{sc} = i_s$  (这时输出电压  $u=0$ )。

由伏安特性可见,实际电压源的内阻越小,就越接近理想电压源。例如干电池、蓄电池、稳压电源及市电电源设备,这些是能提供比较稳定的电压的电源装置。而实际电流源的内阻越大,就越接近于理想的电流源。例如在一定的电压范围内具有恒流特性的晶体三极管或硅光电池。在处理工程问题时,当实际电源内阻远大于负载电阻时,就可以将实际电源近似为电流源;反之,若内阻与外接的负载电阻相比可以忽略不计时,就可以

将实际电源近似为电压源。

式(1-21)和式(1-22)表示的伏安特性有时又称为电源的外特性。还需说明的是,开路或短路状态,并不局限于负载端出现。一个含(独立)源的复杂电路中,各部分都可能发生开路或短路。但是不管哪里开路,开路处必无电流但有开路电压;短路处有短路电流但电压必为零。

### 1.2.5 受控源

以上讨论的电压源和电流源,其源电压或源电流都不受外电路的影响而独立存在,所以称作独立电源或独立源。在电子电路中,还常常遇到不独立的电源,即受控电源或受控源。受控源的源电压或源电流不独立存在,而受控于电路某部分的电压或电流,但它也像独立电源那样能输出电流、电压和电功率。

受控源有两对端钮,一对输出端钮,一对输入端钮。输入端钮是用来控制输出电压或电流的,它构成一个口(单口的概念见 1.4 节),称为输入口。输出端钮用来对外提供电压或电流,它构成的单口称为输出口。可见,受控源电路模型是一个双口(或二端口)网络(双口的概念可见 6.1 节)。

根据受控源所输出的是电压还是电流,以及其输入端的控制量是电压还是电流,受控源可分为四种形式(见图 1.14):(a)为电压控制电压源(VCVS),控制量为电压  $u_1$ ; (b)为电压控制电流源(VCCS),控制量为电压  $u_1$ ; (c)为电流控制电压源(CCVS),控制量为电流  $i_1$ ; (d)为电流控制电流源(CCCS),控制量为电流  $i_1$ 。图中用菱形符号表示受控源,以便与独立源的符号相区别; $\mu$ 、 $r$ 、 $g$ 、 $\beta$ 为有关的控制系数,这些系数在具体的器件中具有一定的物理意义。当这些控制系数为常数时,则为线性受控源。每一种线性受控源电压与电流之间的伏安关系,是用两个线性方程来描述的,即

$$\text{VCVS: } i_1 = 0, \quad u_2 = \mu u_1$$

$$\text{VCCS: } i_1 = 0, \quad i_2 = g u_1$$

$$\text{CCVS: } u_1 = 0, \quad u_2 = r i_1$$

$$\text{CCCS: } u_1 = 0, \quad i_2 = \beta i_1$$

受控源是电路器件在一定条件下的理想化模型,与它对应的实际器件不一定唯一。

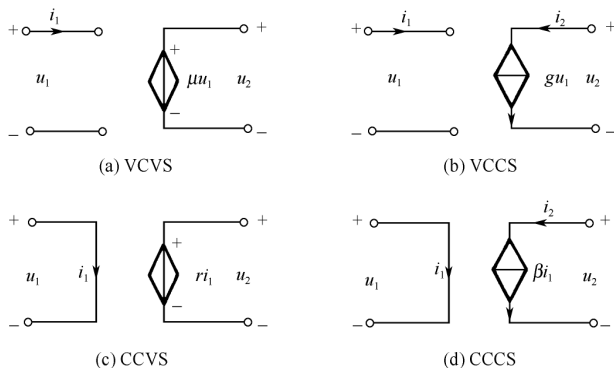


图 1.14 理想线性受控源

图 1.15 表示工作于放大状态的晶体三极管用一个 CCCS 来模拟的情况。其中电流源的输出为集电极电流  $i_c$ ，它受基极电流  $i_b$  的控制，即  $i_c = \beta i_b$  或  $\beta = \frac{i_c}{i_b}$ ， $\beta$  称电流放大系数， $r_{bc}$  为三极管的输入电阻。

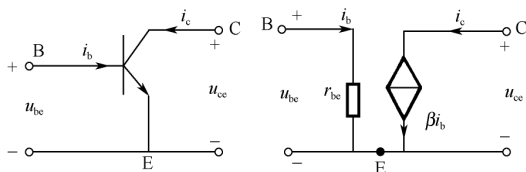


图 1.15 晶体三极管及其电路模型

受控源虽然也是电源，在分析电路时其处理方法也与独立源相同，但它们在电路中的作用完全不同。受控源主要用来模拟器件在电路中所发生的现象，即表示器件在电路中某处电压或电流控制别处电压或电流的能力和相互关系。另外，只有在独立源作用下，受控源才同样起激励作用。所以，受控源不能作为电路的一个独立的激励。道理很明显，如果电路中无独立源激励，则各处就没有电压和电流，控制量为零，受控源的电压或电流也就为零。

**例 1-3** 电路如图 1.16(a)所示，电容电压  $u$  为图 1.16(b)所示的三角波， $C=1\mu\text{F}$ ，试求电流  $i$  的波形。

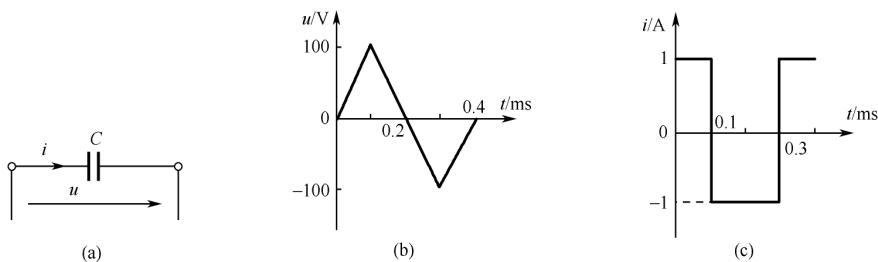


图 1.16

**解** 按式(1-17)可分段算出电流  $i$  如下：

$$i = C \frac{du}{dt} \begin{cases} 1 \times 10^{-6} \times \frac{100 - 0}{0.1 \times 10^{-3}} = 1 \text{ A} & (0 \leq t \leq 0.1 \text{ ms}) \\ 1 \times 10^{-6} \times \frac{-100 - 100}{(0.3 - 0.1) \times 10^{-3}} = -1 \text{ A} & (0.1 \leq t \leq 0.3 \text{ ms}) \\ 1 \times 10^{-6} \times \frac{0 - (-100)}{(0.4 - 0.3) \times 10^{-3}} = 1 \text{ A} & (0.3 \leq t \leq 0.4 \text{ ms}) \end{cases}$$

由上式画出电流  $i$  的波形如图 1.16(c)所示。由此例可见，电容电流与其电压的变化率成正比。电容电压不能跃变，而电流是可以跃变的。

**例 1-4** 已知通过  $L=2\text{mH}$  的电感元件的电流  $i$  波形如图 1.17 所示。试求其端电压  $u$  的波形。

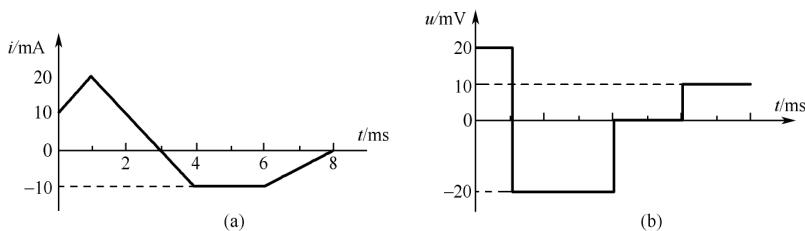


图 1.17

解 按式(1-12)可分段算出电压  $u$  如下:

$$u = L \frac{di}{dt} \begin{cases} 2 \times 10^{-3} \times \frac{(20 - 10) \times 10^{-3}}{1 \times 10^{-3}} = 20 \text{ mV} & (0 \leq t \leq 1 \text{ ms}) \\ 2 \times 10^{-3} \times \frac{(-10 - 20) \times 10^{-3}}{(4 - 1) \times 10^{-3}} = -20 \text{ mV} & (1 \leq t \leq 4 \text{ ms}) \\ 2 \times 10^{-3} \times \frac{[-10 - (-10)] \times 10^{-3}}{(6 - 4) \times 10^{-3}} = 0 & (4 \leq t \leq 6 \text{ ms}) \\ 2 \times 10^{-3} \times \frac{[0 - (-10)] \times 10^{-3}}{(8 - 6) \times 10^{-3}} = 10 \text{ mV} & (6 \leq t \leq 8 \text{ ms}) \end{cases}$$

由上式画出电压  $u$  的波形如图 1.17(b)所示。由此例可知,电感电压与电流的变化率成正比。电感电流不能跃变,而电压是可以跃变的。当电流的大小和方向不变时(例中  $4 \text{ ms} \leq t \leq 6 \text{ ms}$  时),电感电压  $u$  为零。所以,电感元件在直流电路中就相当于短路。

### 1.3 基尔霍夫定律

电路不论多么复杂,电路中的电流电压关系总是与元件的特性有关,即受到所谓元件约束;又与电路的连接方式有关,即受到电路结构的制约或称拓扑约束。这两种约束关系是分析电路的基本依据。拓扑约束关系可由基尔霍夫定律来确定。

#### 1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL)

KCL 指出:任一集中参数电路中,在任一时刻,通过任一节点的电流的代数和恒等于零。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

例如对于图 1.18(a)所示电路,如果规定参考方向指向节点的电流取负号,则背着节点的电流就取正号(相反规定也可以),对于节点 A 有

$$i_1 - i_2 - i_3 + i_4 + i_5 = 0$$

上式可改写为

$$i_2 + i_3 = i_1 + i_4 + i_5$$

上式指出,任意时刻流入节点的电流总和等于流出该节点的电流总和。这样,KCL 的另一表达式为

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}}$$

基尔霍夫电流定律是电荷守恒法则和电流连续性原理在节点上的具体反映。因为,在任一时刻,流入节点的电荷之和必然等于流出该节点的电荷之和,在任何节点上都不能有电荷的积累或消失。

KCL 通常用于节点,但对电路任一假设的闭合面也是适用的。在图 1.18(b)所示电路中有三条支路穿过由虚线框起的闭合面。闭合面可看成一个广义节点,对它应用 KCL,三个支路电流之间满足关系

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

这里参考方向假定三个电流都是流入广义节点的,这时支路电流的真实值必然包含有负值或零值在内,否则它们的和不可能为零。

KCL 给出了各支路电流间的线性约束关系。它仅与元件的连接方式有关,而与元件的性质无关,适用于任何集中参数电路。

### 1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL)

基尔霍夫电压定律说明了电路中支路电压间的线性约束关系。它指出:对于任一集中参数电路中的任一回路,在任一时刻,沿着回路的所有支路电压的代数和为零。其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^m u_k = 0$$

应用 KVL 列方程时,首先要指定每一条支路电压的参考方向,然后先定回路的绕行方向(如图 1.19 表示某电路中的一个回路,其绕行方向选为顺时针方向)。当支路电压的参考方向与回路的绕行方向相同时,支路电压前取正号,否则支路电压前取负号。于是,图 1.19 所示回路的电压方程为

$$-u_1 + u_2 - u_3 + u_4 = 0$$

上式也可改写成

$$u_1 + u_3 = u_2 + u_4$$

此式表明,任何时刻,任一回路内电位升之和应该等于电位降之和,这也就是 KVL 的另一表达形式。

KVL 是能量守恒定律和电位单值性原理在电路里的反映。因为单位正电荷从一点出发,沿任意路径绕行一周又回到原出发点,电荷所获得的电位能应等于电荷所失去的电位能,该点的电位是不会发生变化的,即各支路电压的代数和为零。

KVL 不仅适用于具体回路,而且对任一

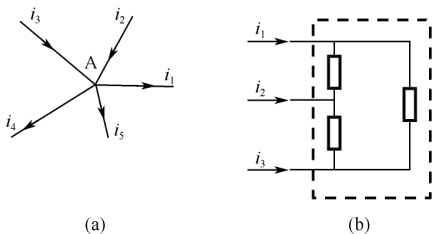


图 1.18 节点电流

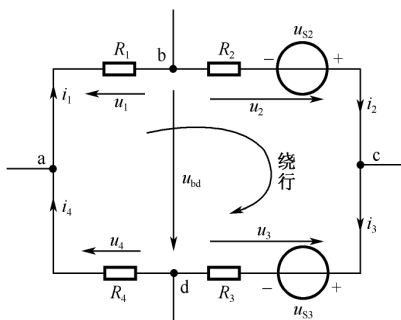


图 1.19 回路电压



虚回路也有效,如图 1.19 中 b、d 间无支路,对 abda 虚回路有

$$-u_1 + u_{bd} + u_2 = 0$$

又因电路中两点间电压与计算路径无关,故在图 1.19 中,如要求 b、d 间电压  $u_{bd}$ ,则有

$$u_{bd} = u_1 - u_2 = u_2 - u_3$$

沿 bad 绕行                      沿 bcd 绕行

进一步,由于

$$\begin{aligned} u_1 &= -i_1 R_1 \\ u_2 &= i_2 R_2 - u_{S2} \\ u_3 &= -u_{S3} - i_3 R_3 \\ u_4 &= i_4 R_4 \end{aligned}$$

所以

$$u_{bd} = -i_1 R_1 - i_4 R_4 = u_{S3} - u_{S2} + i_2 R_2 + i_3 R_3$$

上式表明,电路中任意两点间的电压,等于这两点间任意路径上各段电压的代数和。这种列写两点间电压方程的方法,在电路分析中经常用到。列写时,要注意各段电压前的正号或负号的取决。另外,一段含有电源的电路(如图 1.19 中 bc 或 dc 支路)中的电流和电路两端间电压(如  $u_2$  和  $i_2$  或  $u_3$  和  $i_3$ )的关系式,有时又称为一段含源电路的欧姆定律。

KVL 同样与元件的性质无关,只和电路的结构有关,只要是集中参数电路,它是普遍适用的。

**例 1-5** 图 1.20 表示某复杂电路的一部分,已知  $i_2 = 2\text{A}$ ,  $i_3 = -3\text{A}$ ,  $i_5 = 5\text{A}$ ,  $i_6 = -4\text{A}$ ,试求流过元件 A 和 B 的电流  $i_1$ 、 $i_4$ 。

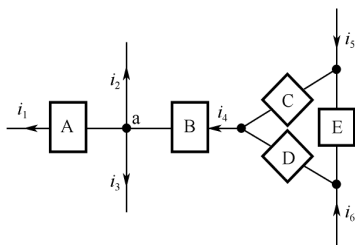


图 1.20

**解** 在列写 KCL 方程时,应先标出所有电流的参考方向。已知电流的参考方向是给定的,未知电流的参考方向则可任意假定。在写方程时,即以这些参考方向为准。设  $i_1$ 、 $i_4$  的参考方向如图 1.20 所示,对于该图右边三角形部分构成的广义节点,由 KCL 可得

$$i_4 = i_5 + i_6 = 5 - 4 = 1(\text{A})$$

对于节点 a,由 KCL 便得

$$i_1 = i_2 - (i_3 + i_4) = 1 - (2 - 3) = 2(\text{A})$$

**例 1-6** 图 1.21 所示电路中  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,其他已知电流、电压如图中标出,试求  $I$ 、 $R$  和  $U_{ac}$ 。

**解** 设  $I_2$  的参考方向如图 1.21 所示,而通过  $R_1$  的电流  $I_1$  的方向由  $R_1$  两端的电压极性决定。显然

$$I_1 = \frac{2}{1} = 2(\text{A})$$

对于节点 a,由 KCL 可得

$$I_2 = 2 + 2 + 2 = 6(\text{A})$$

对于节点 b,由 KCL 可得

$$I = 6 - (2 + 1 + 2) = 1(\text{A})$$

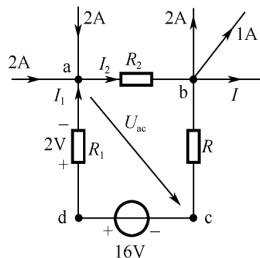


图 1.21

为求  $R$ , 对 abcda 回路列 KVL 方程有

$$I_2 R_2 + I_1 (R_1 + R) - 16V = 0$$

于是

$$R = \frac{16 - 6 \cdot 2 - 2 \cdot 1}{2} = 1(\Omega)$$

对虚回路 abca 列 KVL 方程有

$$I_2 R_2 + I_1 R - U_{ac} = 0$$

对虚回路 acda 列 KVL 方程有

$$U_{ac} - 16V + 2V = 0 \quad \text{或} \quad U_{ac} = 14V$$

可见, 电路中两点间电压与计算路径无关, 因为从 abca 虚回路看, 有

$$U_{ac} = I_1 R + I_2 R_2 = 14V$$

**例 1-7** 求图 1.22 所示电路的  $U$  和电路中电源发出的总功率。

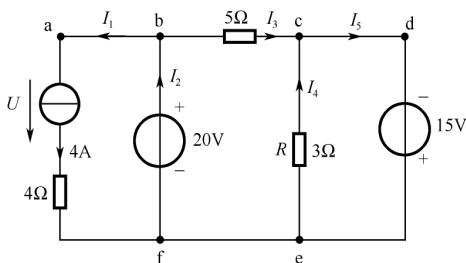


图 1.22

**解** 本题图示电路, 虽是多支路的复杂电路, 但计算前围绕要求分析一下电路结构特点可知, 由于  $U_{ec}$  实际上给出, 所以通过  $3\Omega$  中电流、 $5\Omega$  中电流, 以至各支路实际通过的电流等, 都能便捷地求出, 计算还是简单的。图上标出的各电流方向, 都是按上述思路推算出的电流实际流向。

ec 支路中电流

$$I_4 = \frac{U_{ec}}{R} = \frac{15}{3} = 5(\text{A})$$

从 bcedfb 回路看,  $U_{bc} = 20 + 15 = 35\text{V}$ ,  $I_3 = \frac{35}{5} = 7(\text{A})$ 。

分别对节点 b 和 c 列 KCL 方程可得

$$I_2 = I_1 + I_3 = 4 + 7 = 11(\text{A}), \quad I_5 = I_3 + I_4 = 7 + 5 = 12(\text{A})$$

对 abfa 回路列 KVL 方程可得

$$U = 20 - 4 \cdot 4 = 4(\text{V})$$

根据各电源电压和通过它的电流的方向可知, 电路中只有电压源发出功率, 故电路中电源发出的总功率为

$$P_{\text{发出}} = -(11 \cdot 20 + 12 \cdot 15) = -400(\text{W})$$

**例 1-8** 图 1.23 为含 CCCS 电路,  $U = 2.5\text{V}$ , 求  $U_s$ 。

**解** 由欧姆定律可知

$$U = 0.5I \times 5 = 2.5I = 2.5(\text{V}), I = 1\text{A}$$

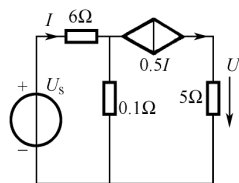


图 1.23

由 KCL 可知流过  $0.1\Omega$  的电流应为

$$I - 0.5I = 1 - 0.5 = 0.5(\text{A})$$

$0.1\Omega$  电阻的端电压为

$$0.1 \times 0.5 = 0.05(\text{V})$$

由 KVL 可得

$$U_s = 6 \times I + 0.05 = 6 + 0.05 = 6.05(\text{V})$$

**例 1-9** 在图 1.24(a) 所示电路中, 在开关 S 断开和闭合的两种情况下试求 A 点的电位  $V_A$ 。如以 B 点为参考点, 再求 S 两种状态下的  $V_A$ 。

**解** 将图 1.24(a) 所示电位电路画成图 1.24(b) 的形式。

(1) 当 S 断开时有

$$V_A = U_{S2} - IR_3 = 12 - \frac{(12+12) \times 14}{4+6+14} = -2(\text{V}), \text{ 而 } U_{AB} = IR_2 = 6(\text{V})$$

(2) 当 S 闭合时有

$$V_A = U_{S2} - IR_3 = 12 - \frac{12 \times 14}{20} = 12 - 8.4 = 3.6(\text{V}), \text{ 而 } U_{AB} = IR_2 = 3.6(\text{V})$$

如以 B 点为参考点, 由上所得  $U_{AB}$  值可得, S 断开时,  $V_A = 6\text{V}$ ; S 闭合时,  $V_A = 3.6\text{V}$ 。

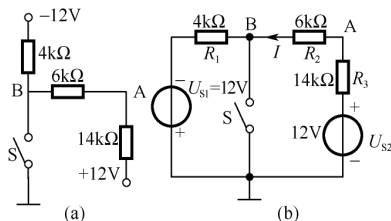


图 1.24

## 1.4 等效变换

一个电路, 除独立电源外所有的电路元件都是线性元件(或含线性受控源), 这样的电路称线性电路, 否则就称非线性电路。以后如不特殊说明, 分析的都是线性电路。

### 1.4.1 等效和等效变换

电路分析中, 常把具有两个引出端钮的一组元件的组合看作一个整体(如图 1.25 中的 N)。当它与外电路连接时, 若进出两端钮(A 和 B)的电流相同, 则称该整体为单口(网络), 称一端口(网络)或二端网络。两个端钮间的电压( $u$ )称端口电压, 流经端钮的电流( $i$ )称端口电流, 这两者之间的关系曲线称单口伏安特性。图 1.25 中虚线框及外电路都是单口。通常, 内部含有独立电源的单口, 称有源单口, 比如用 N 表示。内部不含有独立电源(但可以有受控源)的则称无源单口, 比如用  $N_0$  表示。

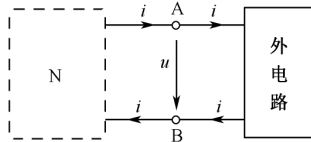


图 1.25 单口和端口

如果两个单口的端口电压和端口电流相等, 即单口的伏安特性相同, 则称这两个单口是等值的或等效的。等效和等效变换是电路分析中一个很重要的概念。

等效变换是指, 当电路中的某一部分用一个新的电路结构(称为等效电路)代替后, 未被代替部分的电压和电流均应保持不变, 即等效电路以外部分电压、电流的伏安关系不变, 也即对等效电路外部伏安特性等效。如图 1.26 所示, 图(a)所示电路中单口  $N_1$ , 变换

为它的一个等效电路  $N_2$ , 这就是等效变换。变换是等效的条件是, 必须保持  $N_1$  和  $N_2$  的 A-B 端口上(接同一个外电路时的)  $u-i$  关系完全相同, 即“对(等效电路)外等效”的概念。显然, 等效电路  $N_2$  的结构与外电路无关, 也不能用  $N_2$  来计算  $N_1$  内部的电量。

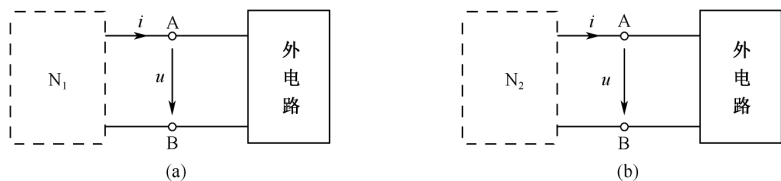


图 1.26 等效变换

等效变换是电路理论研究的一个重要方面。从应用角度看, 等效变换是为了简化电路的分析计算。以图 1.26 所示电路为例, 一个复杂的有源单口  $N_1$  对外电路的作用问题, 可以用简单的、易于计算的等效电路  $N_2$  代替  $N_1$  后, 去简化分析计算。下面介绍几种常用的无源单口和有源单口的等效变换。

### 1.4.2 等效分析法

运用等效和等效变换概念分析电路的方法就是等效分析法。

#### 1. 电阻的串联和并联

各电阻通过同一电流时的连接形式, 称为电阻的串联, 几个电阻串联时的等效电阻等于各个电阻之和。

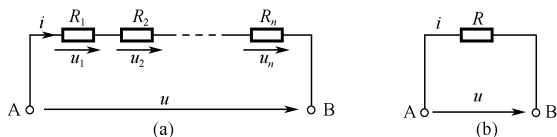


图 1.27 电阻的串联

如图 1.27 所示, 应用 KVL 和欧姆定律有

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 + \cdots + u_n = iR_1 + iR_2 + \cdots + iR_n \\ &= i(R_1 + R_2 + \cdots + R_n) = i \cdot \sum_{k=1}^n R_k = iR \end{aligned} \quad (1-23)$$

所以, 图 1.27(b) 是图 1.27(a) 的等效电路, 等效电阻  $R = \sum_{k=1}^n R_k$ 。显然, 等效电阻必大于任意一个串联的电阻。

电阻串联时, 各电阻上的电压遵从以下分压公式

$$u_k = iR_k = \frac{R_k}{R} u, \quad k = 1, 2, \cdots, n \quad (1-24)$$

若将式(1-23)中各项乘以  $i$ , 则得

$$p = iu = iu_1 + iu_2 + \cdots + iu_n = i^2 R_1 + i^2 R_2 + \cdots + i^2 R_n = p_1 + p_2 + \cdots + p_n \quad (1-25)$$

即等效电阻  $R$  吸收的功率等于各电阻吸收的功率之和。

由式(1-23)及(1-25)可知,串联时各电阻上电压及功率的分配均与电阻成正比,即

$$p_1 : p_2 : \dots : p_n = R_1 : R_2 : \dots : R_n = u_1 : u_2 : \dots : u_n \quad (1-26)$$

各电阻两端受到同一电压时的连接形式,称为电阻的并联。如图 1.28 所示,总电流  $i$  根据 KCL 有

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n = u G_1 + u G_2 + \dots + u G_n = u \cdot \sum_{k=1}^n G_k = u G \quad (1-27)$$

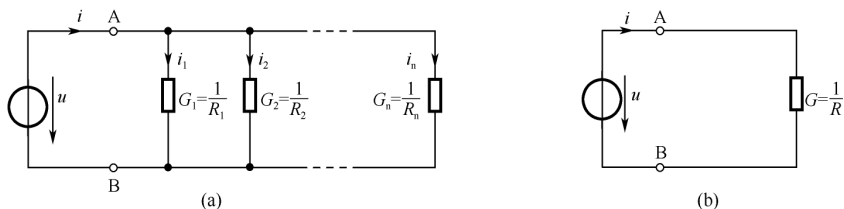


图 1.28 电阻的并联

所以,图 1.28(b)是图 1.28(a)的等效电路,等效电导  $G = \frac{i}{u} = \sum_{k=1}^n G_k$ ,等效电阻  $R$  为

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n G_k} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}} \quad \text{或} \quad \frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}$$

可见,等效电阻小于任意一个并联的电阻。

电阻并联时,各电阻中电流遵从以下分流公式

$$i_k = u G_k = \frac{G_k}{G} i \quad (1-28)$$

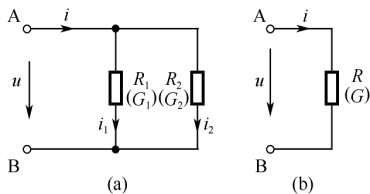


图 1.29 2 个电阻并联

当  $n=2$ (即 2 个电阻并联)时,如图 1.29 所示,等效电阻  $R$  为 2 个电阻  $R_1$ 、 $R_2$  的“积以和除”

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

分流的电流  $i_1$ 、 $i_2$  分别为

$$i_1 = \frac{G_1}{G} i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i, \quad i_2 = \frac{G_2}{G} i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

若将式(1-27)中各项乘以  $u$ ,则得

$$p = iu = i_1 u + i_2 u + \dots + i_n u = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (1-29)$$

即等效电阻吸收的功率等于各电阻吸收的功率之和。

由式(1-27)及(1-29)可知,并联时各电阻中电流及功率的分配均与电导成正比,即

$$i_1 : i_2 : \dots : i_n = p_1 : p_2 : \dots : p_n = G_1 : G_2 : \dots : G_n \quad (1-30)$$

兼有串联及并联的电路称为混联电路。

**例 1-10** 求图 1.30 所示电路的等效电阻  $R_{AB}$ 。

**解** 电路等效变换的过程用箭头表示则有

$$R_{AB} = 4 + \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 5(\Omega)$$

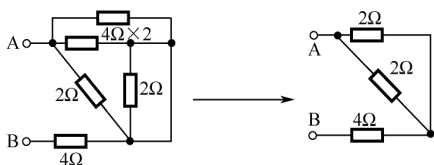


图 1.30

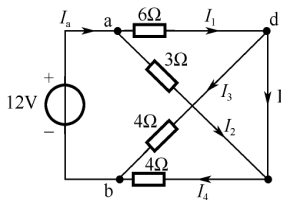


图 1.31

**例 1-11** 求图 1.31 所示电路的电流  $I$ 。

**解** 先假定总电流  $I_a$  和各支路电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$  的参考方向如图 1.31 中所示。以 a-b 为端口,其右边电路的等效电阻  $R_{ab}$  为

$$R_{ab} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} + \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 4(\Omega)$$

于是有

$$I_a = \frac{12}{4} = 3(\text{A})$$

$$I_1 = \frac{3}{6 + 3} \cdot 3 = 1(\text{A})$$

$$I_2 = \frac{6}{6 + 3} \cdot 3 = 2(\text{A})$$

$$I_3 = I_4 = \frac{4}{4 + 4} \cdot 3 = 1.5(\text{A})$$

对节点 d,根据 KCL 有

$$I = I_1 - I_3 = 1 - 1.5 = -0.5(\text{A})$$

**例 1-12** 试求图 1.32(a)、(b)所示电路中电流  $I$ ,并问:(a)、(b)两种情况下,电阻吸收(并消耗)的功率由哪个电源提供? 提供多少?

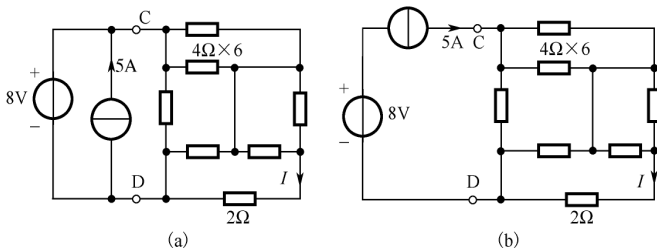


图 1.32

**解** 先求以 C-D 为端口,其右边电路的等效电阻  $R_{CD}$ ,等效变换的过程以箭头示出,如图 1.33 所示,可得

$$R_{CD} = \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} = 2(\Omega)$$