

DIAN ZI XIAN LU JI CHU

# 电子线路基础

余敏

华中理工大学出版社

DIAN ZI XIAN LU JI CHU

电子线路基础

电子

782

I

TN7  
Y82

440914

# 电子线路基础

余 敏

华中理工大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

电子线路基础/余敏

武汉:华中理工大学出版社, 1997年2月

ISBN 7-5609-1469-1

I. 电…

I. 余…

Ⅱ. 电子线路-基础理论

IV. TN710

**电子线路基础**

**余 敏**

责任编辑:叶见欣

封面设计:丽 子

责任校对:郭有林

监 印:熊庆瑜

出版发行:华中理工大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

经销:新华书店湖北发行所

录排:华中理工大学出版社照排室

印刷:武汉测绘科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:13

字数:315 000

版次:1997年2月第1版

印次:1999年9月第4次印刷

印数:10 501—15 000

ISBN 7-5609-1469-1/TN·42

定价:15.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

## 内 容 简 介

本书共分八章。第一章至第二章为电路原理部分,主要包括电路的基本概念和基本定律、直流电路以及交流电路的分析方法。第三章至第八章为模拟电子技术部分,主要包括半导体管的原理和特性、放大器基础、负反馈放大器、功率放大器、场效应管放大器以及直流放大器和集成运算放大器。各章均附有例题、思考题和习题。

本书概念清晰、循序渐进、内容组织新颖、例题丰富、通俗易懂,是为高等学校计算机专业的学生编写的,也可作为相近专业的学生的教材以及有关人员的自学参考用书。

DV60/37 03

## 前 言

本书是为高等学校计算机专业的学生编写的,并且注意到教材的通用性,力求适应计算机及其相近专业的教学需要。

全书共八章,可分为两大部分。

第一部分(第1、2章)为电路原理部分,主要介绍电路的基本概念和基本定律,并在此基础上详细讨论了直流电路及交流电路的分析方法。

第二部分(第3章~第8章)为模拟电子技术部分,主要通过对各种半导体器件及其放大电路的分析,阐述电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。这一部分主要以定性分析和定量估算为主。

书中每章均附有一定数量的例题、思考题和习题,以达到学生复习和巩固所学内容的目的。

本书除了基本内容之外,为了适应电子技术发展的需要,对部分章节内容进行了充实和提高,并在标题前注有星号(\*),可供选学。

考虑到计算机及其相近专业的学生并非以设计电路为主,本书着重于讲清基本概念以及分析方法,从基本原理讲起,努力贯彻少而精的原则,注重理论联系实际,加强应用,书中还配有一定的电路实例。

在本书的编写过程中,得到了江西师范大学计算机系领导及有关老师和同志的大力支持与帮助。在此,表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,本书错误及不妥之处在所难免,请不吝指正。

编 者  
1996年9月

# 目 录

第一章 电路的基本概念和直流电路 .....	(1)
§ 1-1 电路模型 .....	(1)
§ 1-2 电路的基本概念 .....	(1)
1-2-1 电路的基本物理量和参考方向 .....	(1)
1-2-2 元件的伏安关系 .....	(4)
1-2-3 电源 .....	(4)
§ 1-3 基尔霍夫定律 .....	(9)
§ 1-4 等效二端网络 .....	(13)
1-4-1 等效二端网络 .....	(14)
1-4-2 利用等效的概念分析电路 .....	(17)
* § 1-5 电路的一般分析方法 .....	(19)
1-5-1 概述 .....	(20)
1-5-2 回路分析法 .....	(20)
1-5-3 节点分析法 .....	(23)
* § 1-6 线性网络定理 .....	(26)
1-6-1 叠加定理 .....	(27)
1-6-2 等效电源定理 .....	(28)
习题一 .....	(31)
第二章 正弦交流电路 .....	(36)
§ 2-1 正弦交流电的基本概念 .....	(36)
2-1-1 正弦电压、电流 .....	(36)
2-1-2 正弦量的有效值 .....	(38)
2-1-3 相位差 .....	(39)
§ 2-2 相量法 .....	(40)
2-2-1 复数 .....	(40)
2-2-2 相量 .....	(43)
§ 2-3 KCL、KVL 的相量形式 .....	(45)
§ 2-4 R、L、C 伏安关系的相量形式 .....	(46)
2-4-1 电阻元件 .....	(46)
2-4-2 电感元件 .....	(48)
2-4-3 电容元件 .....	(50)
2-4-4 阻抗与导纳 .....	(52)
§ 2-5 二端网络和复功率 .....	(54)
2-5-1 二端网络的阻抗和导纳 .....	(54)
2-5-2 复功率 .....	(57)
§ 2-6 正弦交流电路的分析 .....	(60)

* § 2-7 互感耦合电路 .....	(61)
2-7-1 耦合电感 .....	(61)
2-7-2 理想变压器 .....	(63)
习题二 .....	(66)
第三章 半导体管的原理和特性 .....	(70)
§ 3-1 半导体的导电方式 .....	(70)
3-1-1 本征半导体 .....	(70)
3-1-2 杂质半导体 .....	(71)
3-1-3 PN 结及单向导电性 .....	(73)
§ 3-2 半导体二极管 .....	(74)
3-2-1 二极管的结构 .....	(74)
3-2-2 二极管的伏安特性 .....	(75)
3-2-3 二极管的主要参数 .....	(77)
3-2-4 稳压二极管 .....	(78)
§ 3-3 半导体三极管 .....	(79)
3-3-1 三极管的工作原理 .....	(79)
3-3-2 三极管的特性曲线 .....	(83)
3-3-3 三极管的主要参数 .....	(85)
习题三 .....	(88)
第四章 放大器基础 .....	(89)
§ 4-1 放大器的基本组成及工作原理 .....	(89)
4-1-1 共射基本放大器的组成 .....	(89)
4-1-2 放大器的静态工作点估算与静态工作情况 .....	(90)
4-1-3 放大器输入正弦波交流信号时的动态工作情况 .....	(91)
§ 4-2 放大器的图解分析法 .....	(92)
4-2-1 静态工作点和直流负载线 .....	(93)
4-2-2 交流负载线和动态分析 .....	(94)
4-2-3 波形失真及其改进 .....	(97)
§ 4-3 放大器的微变等效电路分析法 .....	(98)
4-3-1 $H$ 参数等效电路 .....	(98)
4-3-2 用 $H$ 参数等效电路分析共射基本放大电路 .....	(100)
§ 4-4 静态工作点的稳定 .....	(105)
4-4-1 温度对放大器静态工作点的影响 .....	(105)
4-4-2 分压式电流负反馈偏置稳定电路 .....	(106)
4-4-3 电压负反馈偏置稳定电路 .....	(110)
§ 4-5 多级电压放大器 .....	(111)
4-5-1 级间耦合方式 .....	(111)
4-5-2 多级放大器的电压放大倍数 .....	(112)
4-5-3 增益的分贝表示法 .....	(114)
* § 4-6 放大器的频率特性 .....	(115)
4-6-1 频率响应和通频带 .....	(115)

4-6-2	放大器的频率特性分析 .....	(116)
4-6-3	多级放大器的频率响应 .....	(121)
习题四	.....	(123)
第五章	负反馈放大器 .....	(126)
§ 5-1	反馈的基本概念 .....	(126)
5-1-1	反馈放大器的构成 .....	(126)
5-1-2	反馈放大器的基本关系式 .....	(127)
§ 5-2	反馈放大器的四种基本类型 .....	(128)
5-2-1	反馈放大器的四种基本类型及判别 .....	(128)
5-2-2	串联电流负反馈 .....	(129)
5-2-3	并联电压负反馈 .....	(130)
5-2-4	串联电压负反馈 .....	(131)
5-2-5	并联电流负反馈 .....	(131)
§ 5-3	负反馈对放大器性能的影响 .....	(132)
5-3-1	提高放大倍数的稳定性 .....	(132)
5-3-2	减少非线性失真 .....	(133)
5-3-3	抑制内部噪声 .....	(133)
5-3-4	扩展通频带 .....	(134)
5-3-5	负反馈放大器的输入电阻和输出电阻 .....	(134)
§ 5-4	负反馈放大器的分析 .....	(136)
5-4-1	串联电流负反馈放大器 .....	(136)
5-4-2	并联电压负反馈放大器 .....	(138)
5-4-3	射极输出器 .....	(140)
5-4-4	共基放大电路 .....	(142)
5-4-5	四种基本类型负反馈放大电路的特点比较 .....	(144)
习题五	.....	(146)
第六章	功率放大器 .....	(148)
* § 6-1	功率放大器的特点和分类 .....	(148)
6-1-1	功率放大器的特点 .....	(148)
6-1-2	功率放大器的分类 .....	(148)
* § 6-2	互补对称功率放大器 .....	(150)
6-2-1	乙类互补对称电路 .....	(150)
6-2-2	甲乙类互补对称电路 .....	(152)
6-2-3	单电源互补对称电路 .....	(153)
* § 6-3	变压器耦合推挽功率放大器 .....	(154)
6-3-1	最佳负载的概念 .....	(154)
6-3-2	利用变压器实现阻抗变换 .....	(154)
6-3-3	变压器耦合推挽功率放大器 .....	(155)
习题六	.....	(157)
第七章	场效应管放大器 .....	(158)
* § 7-1	结型场效应管 .....	(158)



7-1-1	结型场效应管的结构和工作原理 .....	(158)
7-1-2	结型场效应管的特性曲线及参数 .....	(161)
* § 7-2	绝缘栅场效应管 .....	(163)
7-2-1	耗尽型场效应管的工作原理和特性曲线 .....	(164)
7-2-2	增强型场效应管的工作原理和特性曲线 .....	(164)
* § 7-3	场效应管的特点 .....	(165)
* § 7-4	场效应管放大器 .....	(166)
7-4-1	场效应管的直流偏置电路及静态分析 .....	(166)
7-4-2	场效应管放大器的微变等效电路分析法 .....	(169)
习题七	.....	(172)
第八章	直流放大器和集成运算放大器 .....	(174)
* § 8-1	直流放大器的特点 .....	(174)
8-1-1	级间耦合问题 .....	(174)
8-1-2	零输入和零输出的问题 .....	(175)
8-1-3	零点漂移问题 .....	(175)
* § 8-2	差动式直流放大器 .....	(176)
8-2-1	差动式直流放大器的工作原理 .....	(176)
8-2-2	差动放大电路的其它形式 .....	(180)
* § 8-3	运算放大器 .....	(182)
8-3-1	运算放大器的组成及电压传输特性 .....	(183)
8-3-2	反相和同相输入比例运算放大器 .....	(184)
* § 8-4	运算放大器的应用电路 .....	(186)
习题八	.....	(190)
附录	.....	(192)
参考文献	.....	(197)

# 第一章 电路的基本概念和直流电路

直流电路,通常是指由直流电源(其电压或电流的大小和方向均保持不变的电源)和电阻元件组成的纯电阻电路。本章将在介绍电路的基本概念和基本定律的基础上,详细地讨论直流电路的基本分析方法和一般分析方法。这些分析方法亦是分析交流电路、电子线路的重要基础。

## § 1-1 电路模型

实际电路是由电源、电阻器、电容器、电感器、半导体管等电路元、部件按照一定的方式通过导线连接起来构成的电流通路。电路中的这些电路元、部件称为电路元件。它们既可以组成简单的电路,亦可以组成复杂的电路。因此,电路的形式和作用是多种多样的。

实际电路元件的电磁性质是非常复杂的,很难用数学表达式对它们进行描述,这给分析电路带来了很大困难。如果电路元件的功能一般只是进行电磁能量的传递和转换,例如:电阻器是将电能转换成热能;电容器是储存电能;而电感器则是储存磁能,那么就可将实际的电路元件加以近似化、理想化,用一个抽象的足以表征其主要特性的“模型”来表示。这种电路元件称为理想元件。今后,电路分析中所涉及的各种电路元件都是指理想元件。理想元件都是用一定图形符号表示的,如图 1-1 所示。由理想元件组成的电流通路就是电路模型,简称电路,如图 1-2 所示。

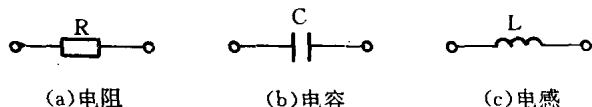


图 1-1 元件的符号

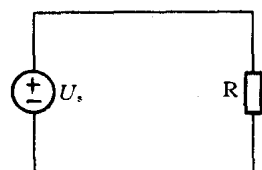


图 1-2 电路模型

由于在电路中,每个理想元件都可以用数学表达式来精确定义,因而可以非常方便地建立起描述电路的数学关系式,并用数学的方法分析、计算电路,从而掌握电路的特性。

电路一般由电源、负载和导线三部分组成,如图 1-2 所示。电源是提供电能的元件,它将其其它形式的能量转换成电能。负载是消耗电能的元件,它将电能转换成其它形式的能量。在直流电路中,只讨论电阻负载。导线则用于将电源和负载连接成闭合回路,起着传输和分配电能的作用。一般在连接导线不太长的情况下,导线的电阻很小,所以在分析电路时,常常将它的电阻值视为零。

## § 1-2 电路的基本概念

### 1-2-1 电路的基本物理量和参考方向

电路的基本物理量主要有电流、电压和功率。在这一小节中,不仅要讨论这些基本物理量

的定义和物理意义,而且还将引入电路分析中的一个重要概念——参考方向。

### 1. 电流

在自然界存在着两种电荷,即正电荷和负电荷。电流是正电荷或负电荷在外电场力的作用下,沿着一定的方向移动而形成的。

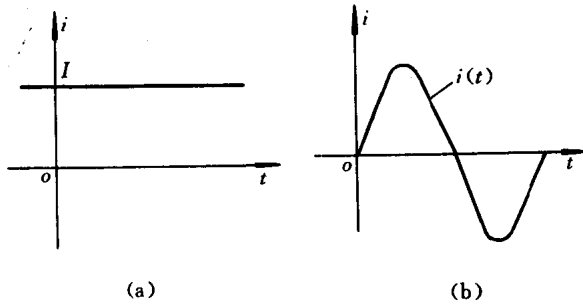


图 1-3 电流波形图

电流的大小定义为:单位时间内通过导体横截面的电荷量,或者说,是电荷对时间的变化率,即

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

式中,电荷  $q$  的单位为库仑(C);时间  $t$  的单位为秒(s);电流  $i$  的单位为安培(A)。

习惯上,规定正电荷的运动方向为电流的方向。当电流的大小和方向都不随时间变化时,该电流称为直流电流。用大写字母  $I$  表示,如图 1-3a 所示。当电流的大小和方向随时间而变化时,该电流称为时变电流。用小写字母  $i$  表示,如图 1-3b 所示。

虽然已规定正电荷的运动方向为电流方向,但当电路中电流的实际方向未知,或电流的方向随时间变化时,在电路分析中可任意选定一个方向作为电流的正方向。这一任意选定的方向称为电流的参考方向。如图 1-4 所示,箭头表示假定电流自端钮 a 流入,经过元件,从端钮 b 流出。

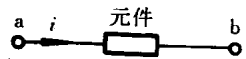


图 1-4 电流参考方向

如果电流的参考方向与电流的实际方向一致,则电流为正值。如果电流的参考方向与电流的实际方向相反,则电流为负值。

### 2. 电压

电压的定义是:电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,称为 a、b 两点之间的电压,即

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

式中, $dw$  是电场力将正电荷从 a 点移到 b 点所做的功,单位为焦耳(J); $dq$  是被移动的正电荷的电量,单位为库仑(C); $u$  是电路中 a、b 两点之间的电压(有时也写成  $u_{ab}$ ),单位为伏特(V)。

电压又称电位差。a、b 两点之间的电压就等于 a 点电位  $v_a$  与 b 点电位  $v_b$  之差,即

$$u_{ab} = v_a - v_b \quad (1-3)$$

电压的方向规定由高电位点指向低电位点,即电位降低的方向。大小和方向不随时间变化的电压称为直流电压,用大写字母  $U$  表示。而大小和方向都随时间变化的电压称为时变电压,用小写字母  $u$  表示。

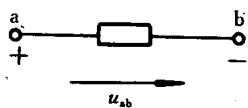


图 1-5 电压参考方向

由于在电路中,常常难以判断元件两端电压的真实方向,所以分析电路时和电流一样,可以为电压选定参考方向。电压的参考方向又称参考极性,用“+”、“-”或箭头表示。“+”代表高电位,称正极,“-”代表低电位,称负极;或用箭头表示从高电位指向低电位。例如在图 1-5 中,元件两端电压的参考方向从 a 点至 b 点,即假定 a 点为

高电位, b 点为低电位。当 a 点的实际电位高于 b 点电位时, 即电压的实际方向和参考方向一致, 电压  $u_{ab}$  为正值; 反之则为负值。

分析电路时, 应为电压和电流任意选定参考方向。为了分析方便, 一般规定采用关联性参考方向, 即将元件上的电压参考方向和电流参考方向取为一致。在这种规定下, 只需标注其中一个电量的参考方向即可。

### 3. 功率

功率定义为: 单位时间内能量的变化率, 即

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1-4)$$

式中,  $w$  是能量, 单位为焦耳(J);  $t$  是时间, 单位为秒(s);  $p$  是功率, 单位为瓦特(W)。

元件的功率也可表示成电压和电流的乘积。假设电压和电流取关联性参考方向, 则:

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui \quad (1-5a)$$

在直流情况下,

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

当元件上的电压和电流的参考方向不一致, 即为非关联性参考方向时, 元件的功率可表示成:

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

在直流情况下则为:

$$P' = -UI \quad (1-6b)$$

分析计算功率时, 如果  $P < 0$ , 表示该元件为电源, 产生功率; 若  $P > 0$ , 则表示该元件为消耗元件, 吸收功率。

[例 1-1] 计算图 1-6 中各元件的功率, 并指出是产生功率还是吸收功率。

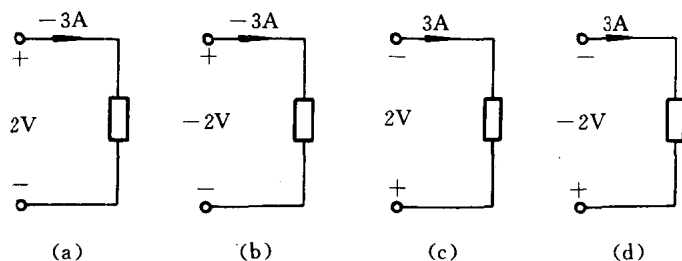


图 1-6 例 1-1 电路

[解] 在图 a 中, 电压、电流为关联性参考方向, 故:

$$P = UI = 2 \times (-3) \text{W} = -6 \text{W}, P < 0 \text{ 产生功率。}$$

在图 b 中, 电压、电流为关联性参考方向, 故:

$$P = UI = (-2) \times (-3) \text{W} = 6 \text{W}, P > 0 \text{ 吸收功率。}$$

在图 c 中, 电压、电流为非关联性参考方向, 故:

$$P = -UI = -2 \times 3 \text{W} = -6 \text{W}, P < 0 \text{ 产生功率。}$$

在图 d 中, 电压、电流为非关联性参考方向, 故:

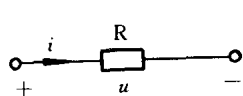
$$P = -UI = -(-2) \times 3 \text{W} = 6 \text{W}, P > 0 \text{ 吸收功率。}$$

## 1-2-2 元件的伏安关系

在电路中,组成电路的电路元件种类繁多,不同的元件具有不同的作用和性质。电路元件的性质决定了元件的伏安关系,即指元件两端的电压及流过元件的电流之间的关系。可以用数学表达式来描述元件的伏安关系,这种伏安关系式又称元件的约束方程,它表明了元件电压和电流所必须遵守的规律。

如果电路元件的参数不随电压或电流的变化而变化,这样的电路元件称为线性元件,反之,为非线性元件。由线性元件组成的电路称为线性电路。本课程中涉及到的所有元件的伏安关系会在后续章节中陆续予以介绍。

直流电路中,负载主要是电阻元件。电阻元件可分为线性电阻元件和非线性电阻元件。在这里只讨论线性电阻元件。



假设电阻上的电压和电流取关联性参考方向,如图 1-7 所示。线性电阻元件是由中学物理课中学过的欧姆定律来定义的,即

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

图 1-7 线性电阻元件 式中, $u$  是电阻元件两端的电压,单位为伏特(V); $i$  是流过电阻元件的电流,单位为安培(A); $R$  是电阻,单位为欧姆( $\Omega$ )。电阻的倒数  $G = \frac{1}{R}$ ,称为电导,单位为西门子(S)。

式(1-7)是表征电阻元件电压、电流伏安关系的约束方程。画在  $u, i$  平面上,伏安特性曲线就是一条斜率为  $R$ 、通过原点的直线。 $R$  为一常数,如图 1-8 所示。

由式(1-7),电阻消耗的功率可表示为:

$$p = ui = Ri^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-8a)$$

或

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

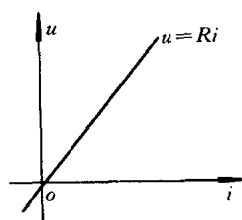


图 1-8 线性电阻的伏安特性

[例 1-2] 有一个  $10\Omega$  的电阻,电阻两端的电压为  $5V$ ,求电阻上流过的电流  $I$  和功率  $P$ 。

[解] 由欧姆定律可得:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{10}A = 0.5A$$

由功率计算公式,  $P = \frac{U^2}{R}$  得

$$P = \frac{5 \times 5}{10}W = 2.5W$$

## 1-2-3 电源

电源是提供电能的元件。一般分为独立源和受控源两大类型。独立源是指能对外电路独立地提供能量,并在电路的各支路中产生电压和电流的电源。通常独立源又称为激励;而它在各支路中产生的电压和电流称为响应。如果一个电路中无任何独立源存在,则此电路的各支路也不会存在电压和电流。受控源也是一种电源,其特点是它所提供的电压或电流受电路中其它支路电压或电流的控制,所以不能独立地向外电路提供能量,故又称非独立源。电源按照其提

供的电压或电流的波形,又可分为直流电源、交流电源及其它。下面首先讨论的是独立源,并主要介绍直流电源。

### 1. 独立源

独立源有电压源和电流源两种形式。这里指的电源元件是指理想电源元件。

电压源是指它接入任一电路后,其两端的电压总能保持规定的值  $u_s$ ,而与通过它的电流大小无关的元件。电压源的符号如图 1-9a 所示。如果电压源的数值  $u_s$  为一常数  $U_s$  或  $E$ ,就称为直流电压源,也可用图 1-9b 所示的符号表示,它的伏安特性曲线如图 1-9c 所示,为一与  $i$  轴平行的直线。

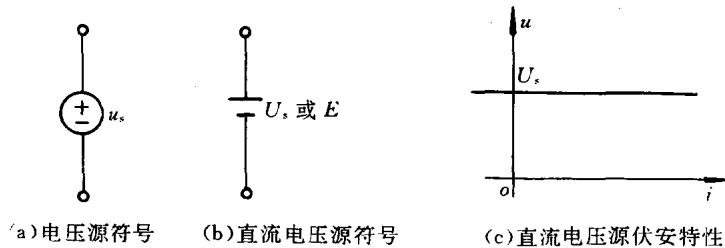


图 1-9 电压源

电流源是指它接入任一电路后,其流入电路的电流总能保持规定的值  $i_s$ ,而与它两端的电压无关的元件。电流源的符号如图 1-10a 所示。如果电流源的数值  $i_s$  为一常数  $I_s$ ,就称为直流电流源,它的伏安特性曲线如图 b 所示,为一与  $u$  轴平行的直线。

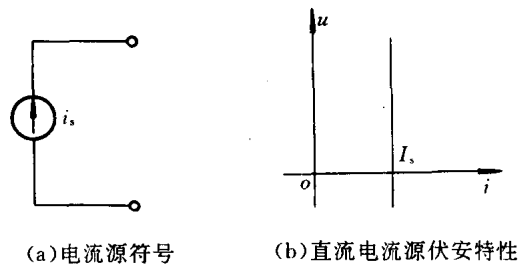


图 1-10 电流源

由上可知:① 直流电压源具有恒压特性。它两端电压的大小与和它相联接的外电路无关;而流过它的电流的大小却取决于与其相联接的外电路。如果电压源的数值  $U_s=0$ ,此电压源相当于短路。应当注意的是,两个不同大小的电压源不允许并联。② 直流电流源具有恒流特性。流过它的电流的大小与和它相联接的外电路无关;而它两端电压的大小却取决于与其相联接的外电路。如果电流源的数值  $I_s=0$ ,此电流源相当于开路。应当注意的是,两个不同大小的电流源不允许串联。

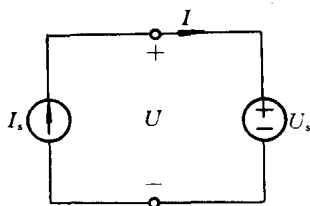


图 1-11 例 1-3 电路

一般来说,电源在电路中都是提供能量。即在电源内部,电流的实际方向是由电源的负极流向正极,也就是说电源两端的电压与电流方向不一致。但根据其在电路中的作用不同,电源既可能产生功率,也可能作为负载吸收功率。

究竟电源是产生功率,还是吸收功率,可以根据电源的电压和电流的参考方向,应用功率计算公式,由算得的功率是正值还是负值来决定。

[例 1-3] 电路及选定的参考方向如图 1-11 所示。已知电路中  $I_s=2A$ ,  $U_s=3V$ ,试求电路中各电源的功率;并说明是产生功率还是吸收功率。

[解] 根据电源的特性,可知电路中:

$$U = U_s = 3V, \quad I = I_s = 2A$$

对于电流源来说,其上的电压和电流为非关联性参考方向,所以

$$P = -UI = -3 \times 2\text{W} = -6\text{W} \quad P < 0, \text{产生功率};$$

而对于电压源来说,其上的电压和电流为关联性参考方向,所以

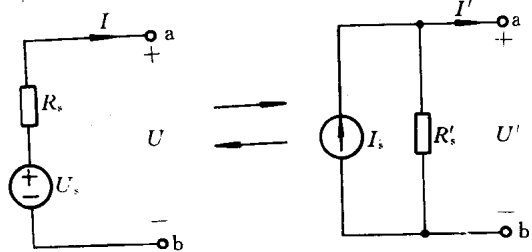
$$P = UI = 3 \times 2\text{W} = 6\text{W} \quad P > 0, \text{吸收功率}.$$

## 2. 两种实际电源模型及等效互换

前面讨论了电压源和电流源的特性,事实上这种理想电源是不存在的,因为所有的实际电源都有内电阻。

### (1) 实际电源模型

以发电机为例,它有一定的内电阻。因此,当有电流流过电源端钮时,由于内电阻的存在,必然在电源内部产生电压降,于是电源两端电压就要下降,因而不能保持固定的端电压。流过电源端钮的电流越大,电源两端的电压下降就越厉害。为了表达实际电源的端电压随电流而变化的外特性,可用一个电压源  $U_s$  和内电阻  $R_s$  串联作为实际电压源模型,如图 1-12a 所示。可以看出,串联的内电阻  $R_s$  反映了电源内部的分压效应,使其端电压随电流变化而变化。



(a) 实际电压源模型

(b) 实际电流源模型

图 1-12 等效互换

由图 1-12a 可得出实际电压源的伏安关系式:

$$U = U_s - R_s I \quad (1-9)$$

式中,  $U$  为电源的端电压;  $I$  为输出电流。

理想电流源也是不存在的。以光电池为例,被光激发产生的电流,并不全部外流,其中的一部分将在光电源内部流动而不能输送出来。可以用一个电流源  $I_s$  和内电阻  $R_s'$  相并联作为实际电流源模型,如图 1-12b 所示。可以看出,并联的内电阻  $R_s'$  反映了电源内部的分流效应,使电源的输出电流随电压变化而变化。

由图 1-12b 可得出实际电流源的伏安关系式:

$$U' = R_s' (I_s - I') \quad (1-10)$$

式中,  $U'$  为电源的端电压;  $I'$  为输出电流。

### (2) 两种电源模型的等效互换

上面给出了实际电源的两种模型,那么一个实际电源可否同时用两种模型来表示呢?只要比较一下图 1-12a、b 就可以知道,当满足一定条件时,实际电压源模型和实际电流源模型都可以对与其相连接的外部电路输出相同的电压和相同的电流。所以,从它们对外电路的作用来说,这两种电源模型是可以等效互换的。

假设图 1-12a 和 b 是等效的,即二者对外部电路的输出具有相同的端电压和相同的输出电流。

#### ① 如果外部电路短路,则

在图 a 中,  $U=0$ , 由式(1-9)得短路电流  $I_{sc} = \frac{U_s}{R_s}$ ;

在图 b 中,  $U'=0$ , 由式(1-10)得短路电流  $I'_{sc} = I_s$ ;

因为  $I_{sc} = I'_{sc}$ , 得

$$I_s = \frac{U_s}{R_s} \quad (1-11a)$$

② 如果外部电路开路,则

在图 a 中,  $I=0$ , 由式(1-9)得开路电压  $U_{oc}=U_s$ ;

在图 b 中,  $I'=0$ , 由式(1-10)得开路电压  $U'_{oc}=R'_s I_s$ ;

因为  $U_{oc}=U'_{oc}$ , 得

$$U_s = R'_s I_s \quad (1-11b)$$

由式(1-11a)、(1-11b)可推导得出:

$$R_s = R'_s \quad (1-11c)$$

综合起来,两种电源模型等效互换的条件为:  $R_s = R'_s$ 、 $U_s = R_s I_s$  或  $I_s = \frac{U_s}{R_s}$ 。所以,一个实际电源既可以用实际电压源模型来表示,也可以用实际电流源模型来表示。

但应当注意的是:① 对于外部电路来说,这两种电源模型可等效,但对于内部,则不等效。例如:外部电路开路时,实际电压源无电流,内电阻不消耗功率,而实际电流源内部却有电流存在,内电阻消耗功率。② 理想电源之间不能等效互换。③ 凡是和电压源相串联的电阻,不管是不是电源内电阻,都可以把它作为内阻来一起进行等效变换,而和电流源并联的电阻也可一样处理。

[例 1-4] 求图 1-13 所示各电路的等效电流源模型。

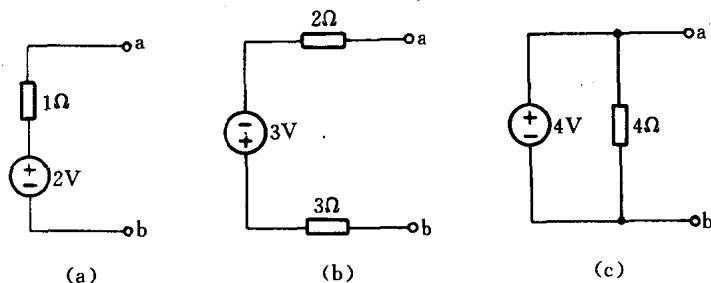


图 1-13 例 1-4 电路

[解] 由式(1-11)可知,等效电流源的电流  $I_s = \frac{U_s}{R_s}$ , 内阻  $R'_s = R_s$ , 应当注意的是,  $I_s$  的方向是由原电路中的电压源的负极流向正极。

在图 1-13a 中,  $I_s = \frac{2}{1} \text{A} = 2\text{A}$ ,  $R_s = 1\Omega$ , 故等效电流源模型如图 1-14a 所示。

在图 1-13b 中,  $I_s = \frac{3}{2+3} \text{A} = 0.6\text{A}$ ,  $R_s = (2+3)\Omega = 5\Omega$ , 故等效电流源模型如图 1-14b 所示。

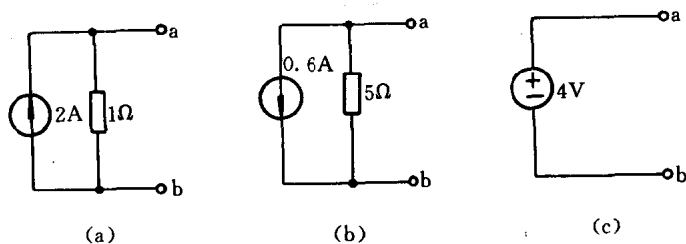


图 1-14 例 1-4 电源模型变换图

在图 1-13c 中,电压源和电阻并联,不是一个实际电压源模型,故其不能等效变换为电流源模型。因和电压源相并联的元件不影响电压源两端的电压,而端钮电流取决于与它相联的外电路,因此图 1-13c 所示电路可等效变换为如图 1-14c 所示电路。



[例 1-5] 求图 1-15 所示各电路的等效电压源模型。

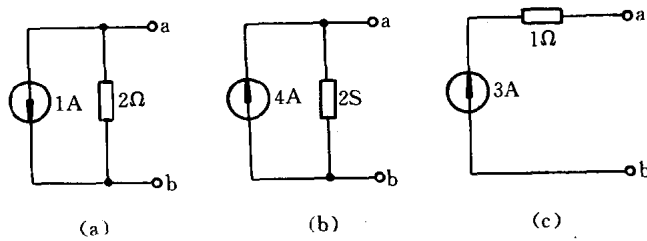


图 1-15 例 1-5 电路

[解] 由式(1-11)可知,等效电压源的电压  $U_s = R'_s I_s$ , 内阻  $R_s = R'_s$ , 等效变换时要注意  $U_s$  的方向,正好与原电路中  $I_s$  的方向相反。

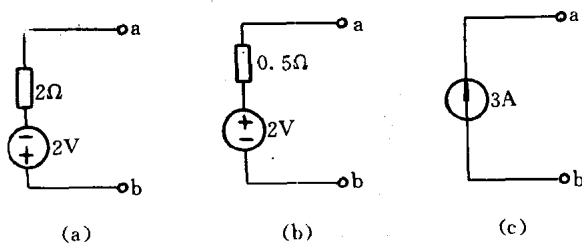


图 1-16 例 1-5 电源模型变换图

在图 1-15a 中,  $U_s = 2 \times 1\text{V} = 2\text{V}$ ,  $R_s = 2\Omega$ , 故其等效电压源模型如图 1-16a 所示。

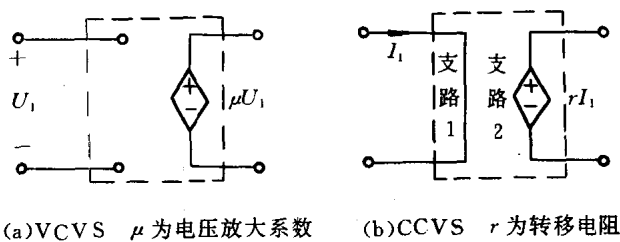
在图 1-15b 中,  $U_s = \frac{I_s}{G_s} = \frac{4}{2}\text{V} = 2\text{V}$ ,  $R_s = \frac{1}{G_s} = \frac{1}{2}\Omega = 0.5\Omega$ , 故其等效电压源模型如图 1-16b 所示。

在图 1-15c 中电流源和电阻串联,不是一个实际的电流源模型,故其不能等效变换为电压源模型。因和电流源串联的元件不影响端钮电流,端电压又取决于与它相联的外电路,因此图 1-15c 所示电路可等效变换为图 1-16c 所示电路。

### 3. 受控源

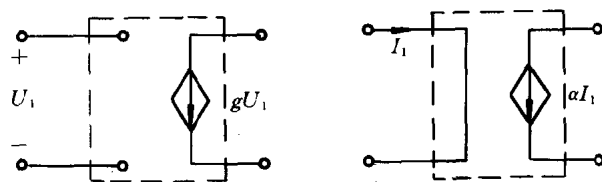
随着电子技术的发展,出现了众多的电子器件,为了反映这些电子器件的工作特性,因此引入一个新的理想元件——受控源。

受控源也是一种电源,但不能独立地对外电路提供能量,它的电压、电流受电路中其它支路电压、电流的控制。受控源是包含两个支路的双端口元件,支路 1(控制支路)用开路或短路来表示;支路 2 是一个受控电压源或受控电流源,它的电压或电流受支路 1 的电压或电流控制。



(a) VCVS  $\mu$  为电压放大系数

(b) CCVS  $r$  为转移电阻



(c) VCCS  $g$  为转移电导

(d) CCCS  $\alpha$  为电流放大系数

图 1-17 受控源的四种形式