

21 世纪电工电子学课程系列教材

电工技术实用教程

(工科类)

主 编 王英健

副主编 李中华 刘曼玲 汤放奇

中 南 大 学 出 版 社

21 世纪电工电子学课程系列教材

电工技术实用教程(工科类)

主 编 王英健

副主编 李中华 刘曼玲 汤放奇

中南大学出版社

电工技术实用教程(工科类)

主 编 王英健

☐责任编辑 肖梓高

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 730 × 960 1/16 ☐印张 16.25 ☐字数 293 千字

☐版 次 2004 年 12 月第 1 版 ☐2004 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-831-8/TM · 014

☐定 价 21.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

本教材作为面向 21 世纪非电类系列教材之一,是为了满足工科类专业的需要而编写的。

电工技术是一门历史悠久、内容丰富的学科,随着电子技术、计算机技术和控制技术的发展,又给这一古老的学科增添了许多新的内容,这些新的技术是工科类学生必须要了解和掌握的。本教材本着好教好学的思想,在内容选择上,一方面强调电工基本技术和基本分析方法,如直流、交流电路分析、磁路与变压器、交流电动机的继电接触控制等内容,同时又尽量展现现代电工新技术,如控制电机、可编程控制器原理及应用、单片机原理及应用和脉宽调制原理及应用。试图让学生对电工技术有一个比较全面的认识。

全书概念简明扼要,在处理传统电工技术方面的内容时重原理,而处理电工新技术内容时主要强调基本概念和应用方法。本书注重学生创新能力的培养,有些习题是设计性的,必须根据本书知识并参考其他资料才能完成。在写作处理上将基本概念融入主体中进行讲解,整体内容上不贪大求全,但强调知识的系统性和完整性。本教材采用紧凑压缩的方法进行章节编排,以增强某类知识的整体性和完整性。例如,在电路分析方法一章中融合了等效电路分析方法,一般电路分析方法、非线性电路分析方法和电路暂态分析方法等;其他章节也采用了类似的处理方法。本教材选用的电路例子具有典型性,重点、难点的处理做到合理分散、通俗易懂。

本教材的写作提纲是由面向 21 世纪非电类系列教材编写委员会共同讨论制定。参加讨论的主要有中南大学陈明义教授、李义府教授、宋学瑞副教授,赖旭芝副教授及长沙理工大学王英键副教授和汤放奇副教授等。本教材由王英键副教授担任主编。全书共分 7 章,汤放奇编写第 1 章和第 2 章;刘曼玲编写第 3 章;李中华编写第 4 章和第 5 章;王英键编写第 6 章和第 7 章。全书由王英键进行统稿。

由于我们的水平有限,书中一定存在不少错误和欠妥之处,敬请读者给予批评指正,以便不断改进本教材的质量。

编 者

2004 年 5 月

目 录

第1章 电路的基本概念与基本定律	(1)
1.1 电路的作用和组成	(1)
1.2 电流和电压及其参考方向	(2)
1.3 电功和电功率	(4)
1.4 理想电路元件	(4)
1.5 基尔霍夫定律	(11)
1.6 电路中电位的概念及计算	(14)
本章小结	(15)
复习思考题	(16)
第2章 电路分析方法	(19)
2.1 等效电路分析方法	(19)
2.2 复杂电路分析方法	(29)
2.3 电路分析基本定理	(33)
2.4 非线性电阻电路分析方法	(41)
2.5 电路的暂态分析方法	(44)
本章小结	(60)
复习思考题	(60)
第3章 正弦与非正弦稳态电路分析	(66)
3.1 正弦量三要素	(66)
3.2 正弦量的相量表示	(69)
3.3 相量法分析基础	(73)

3.4 阻抗的串联与并联 ✓	(79)
3.5 正弦稳态电路分析	(85)
3.6 正弦电路的功率	(86)
3.7 功率因数的提高 ✓	(93)
3.8 正弦电路的谐振 ✓	(96)
3.9 三相交流电路的分析	(105)
3.10 非正弦周期电流电路的分析	(120)
本章小结	(125)
复习思考题	(126)
第4章 磁路与变压器	(131)
4.1 磁路	(131)
4.2 变压器	(138)
本章小结	(147)
复习思考题	(148)
第5章 交流电动机及其继电接触控制	(150)
5.1 三相异步电动机的结构和工作原理 ✓	(151)
5.2 三相异步电动机的电路分析	(156)
5.3 三相异步电动机的转矩与机械特性 ✓	(158)
5.4 三相异步电动机的铭牌数据与选择	(161)
5.5 三相异步电动机的使用	(166)
5.6 交流电动机的继电接触控制 ✓	(173)
5.7 单相异步电动机	(186)
本章小结	(188)
复习思考题	(189)
第6章 控制电机与电机智能控制	(192)
6.1 控制电机	(192)

6.2 可编程序控制器电路	(199)
6.3 单片机控制电路	(214)
6.4 PWM 控制电路	(222)
本章小结	(231)
复习思考题	(231)
第7章 工业用电和安全用电	(232)
7.1 发电与输电概述	(232)
7.2 工业企业配电	(233)
7.3 安全用电与触电防护	(235)
7.4 静电的危害及防护	(241)
7.5 雷电防护	(243)
7.6 节约用电	(244)
本章小结	(244)
复习思考题	(245)
复习思考题答案	(246)
参考文献	(250)

第1章 电路的基本概念与基本定律

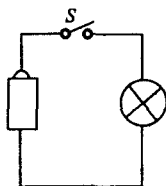
本章主要讨论电路模型、电流和电压及其参考方向、理想电路元件的伏安特性和基尔霍夫定律；并介绍电路中电位的概念与计算。

1.1 电路的作用与组成

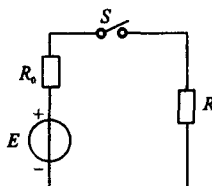
实际电路是由各种电气器件按一定的方式组合而成，它构成了电流流通的路径。较复杂的电路又称为网络。

电路的组成方式很多，作用也各不相同，按其功能，可分为两类。

一类是用于实现能量的传输与转换。例如，各种电气电路。典型例子是图1-1(a)所示手电筒电路。它由于电池、灯泡、开关和连接导线所组成。开关闭合时，这个闭合的电路中有电流流过，灯泡发光。其中，干电池为电源，其作用是向电路提供电能；灯泡为用电设备，称为负载，开关和连接导线为传输设备。



(a) 手电筒电路



(b) 理想电路模型

图1-1 手电筒电路及电路模型

另一类电路是用于实现信号的传递和处理。最常见的例子是扩音机，话筒把声音转换成电信号，通过放大器放大后，传递到扬声器，再还原为声音输出。信号的这种转换和放大，称为信号的处理。话筒是输出电信号的设备，称为信号源，相当于电源；扬声器是接受和转换电信号的设备，也就是负载。

不论电能的传输和转换，或者信号的传递与处理，其中电源或信号源的电压或电流称为激励，它推动电路工作；由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。

实际组成电路的电气器件往往比较复杂，可能具有多种电磁性能。在电路分析中为了简化分析和计算，通常在一定的条件下，突出实际电路元件的某一主要电磁性能，忽略其他次要性能，这样，便得到理想电路元件。例如白炽灯主要具有消耗电能的性质（电阻性），但通有电流时还会在其周围产生磁场（具

有电感性)。由于磁场较弱,可将其忽略,将白炽灯看做一理想电阻元件。

理想电路元件主要有电阻元件、电感元件和电容元件,以及电压源、电流源元件,它们具有两个对外连接的端纽,称为二端理想电路元件。

由理想电路元件组成的电路称为实际电路的电路模型,如图 1-1(a)所示手电筒电路,将电池用电动势 E 和内电阻 R_0 的组合代替;灯泡用电阻元件 R 代替,连接导线用无电阻的理想导线代替,便得到其电路模型如图 1-1(b)所示。

今后所分析的都是电路模型,简称为电路。在电路图中,各种电路元件用规定的图形符号表示。

1.2 电流和电压及其参考方向

1.2.1 电流及其参考方向

带电粒子(电子,离子等)的定向运动形成电流。习惯上规定正电荷运动的方向为电流的实际方向。电流的实际方向是客观存在的。但在分析较复杂的电路时,往往难于事先判断某支路电流的实际方向;对交流来讲,其实际方向随时间而变,也无法用一个固定方向来表示它的实际方向。为了解决这一问题,需引入参考方向概念。参考方向是假定方向。电流的参考方向可任意选定。在电路图中,一般用箭头表示,也可用双下标表示。参考方向选定后,电流就成了代数量。当电流的实际方向与其参考方向一致时[图 1-2(a)],电流为正值;电流的实际方向与其参考方向相反时[图 1-2(b)],电流为负值。这样,在选定的参考方向下,根据电流的正负,就可以确定电流的实际方向。

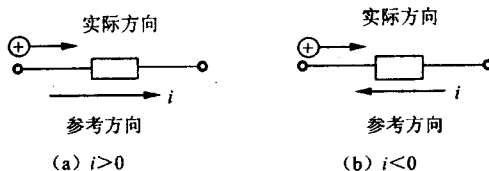


图 1-2 电流及其参考方向

1.2.2 电压、电动势的参考方向

电压和电动势都是标量,但在分析电路时,和电流一样,我们也说它具有方向。电压的实际方向规定为从高电位端指向低电位端,即电位降低的方向;电源电动势的实际方向规定为在电源内部由低电位端指向高电位端,亦即电位

升高的方向。

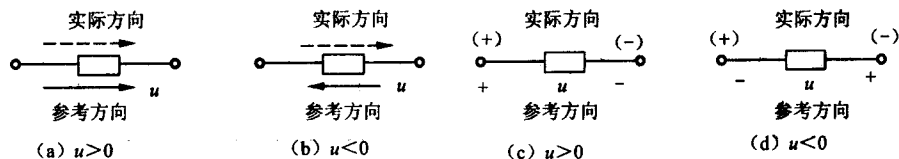


图 1-3 电压及其参考方向

为分析方便起见,我们也需要选取电压和电动势的参考方向,它们的参考方向可用参考“+”“-”极性表示,也可用箭头或双下标表示。如图 1-3(a)和(c)中,电压的实际方向与参考方向一致,电压为正, $u > 0$; 在图 1-3(b)和(d)中, u 的实际方向与参考方向相反,电压为负, $u < 0$ 。

当电源开路时,电源内部没有电压损耗,电压 u 与电动势 e 大小相等。

当 u 和 e 的参考方向选为相反时[图 1-4(a)],有 $u = e$ 。

当 u 和 e 的参考方向选为一致时[图 1-4(b)],有 $u = -e$ 。

在分析和计算电路时,电压和电流的参考方向可以分别独立规定。但为了分析方便,常使同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致,称为关联参考方向;反之称为非关联参考方向,如图 1-5 所示。

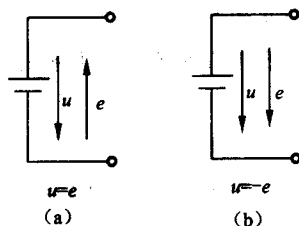


图 1-4 电压与电动势的关系

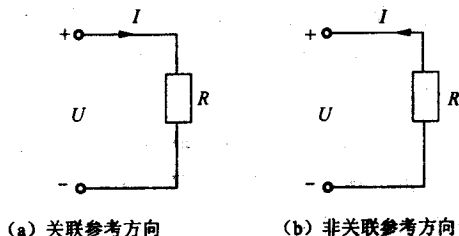


图 1-5 电压和电流的参考方向

我国法定计量单位是以国际单位制(SI制)为基础的。在国际单位制中,电流的单位是安[培](A)。当 1 秒(s)内通过导体横截面的电荷[量]为 1(库[仑])(C)时,电流为 1A;电压和电动势的单位为伏[特](V)。当电场力把 1C 的电荷[量]从一点移动到另一点所做的功为 1J(焦耳)时,该两点间的电压为 1V;电动势则是电源内部电源力做功的体现。

将电流和电压的主单位冠以 SI 词头(表 1-1),即可得到它们的十进制倍数单位和分数单位。

表 1-1 常用 SI 词头

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

1.3 电功和电功率

在直流电路中, 设 A, B 两点间的电压为 U , 在时间 t 内, 电荷 Q 在电场力的作用下, 从 A 点经过负载移动到 B 点时, 电场力所做的功为:

$$A = UQ = UIt \quad (1-1)$$

这就是在 t 时间内, 负载所消耗(或吸收)的电能。

单位时间内消耗的电能称为电功率(简称为功率), 即:

$$P = \frac{A}{t} = UI \quad (1-2)$$

功率的 SI 主单位为瓦[特](W), 功率的十进制倍数和分数单位常用的有千瓦(kW), 兆瓦(MW)和毫瓦(mW)等。功的单位是焦耳(J)。

元件在电路中究竟是发出功率还是吸收功率, 在电路分析中, 常根据 P 的正负来判断。

当元件中 U, I 取关联参考方向时, 若 $P = UI$ 为正值, 表明 U, I 的实际方向相同, 该元件吸收(消耗)功率, 属负载性质; 当 P 为负值时, 表明 U, I 实际方向相反, 该元件发出(产生)功率, 属电源性质。

如果 U, I 取非关联参考方向, 则依 $P = -UI$ 计算, 得到的结论与前相同。

1.4 理想电路元件

理想电路元件有无源元件和有源元件之分。无源元件包括理想电阻元件、理想电感元件和理想电容元件; 有源元件指理想电压源和理想电流源。

理想电路元件的端电压与通过它的电流之间都有确定的关系, 这种关系称为元件的伏安特性。

1.4.1 电阻元件与欧姆定律

理想电阻元件简称为电阻元件, 它是从实际电阻器抽象出来的理想模型。

若电阻元件的阻值不随其端电压或流过的电流的变化而变化,则称为线性电阻(本教材只讨论线性电阻)。

线性电阻元件的电路符号如图1-6(a)所示,在图示电压、电流的关联参考方向下,其伏安特性如图1-6(b)所示。

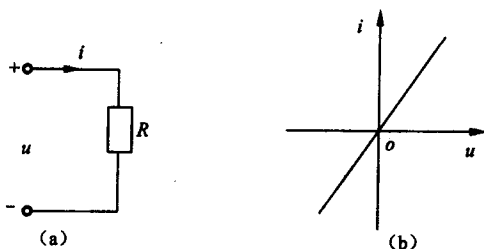


图1-6 线性电阻及其伏安特性曲线

电阻元件的伏安特性遵循欧姆定律。在 u 、 i 关联参考方向下,

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

它表示电阻元件的端电压与通过它的电流成正比。式中, R 为元件的电阻值,是表示电阻元件特性的参数。

在国际单位制中,电阻的单位是欧[姆](Ω),当电路两端的电压为1V,通过的电流为1A时,该段电路的电阻为1 Ω 。电阻的常用十进制倍数单位有千欧(k Ω),兆欧(M Ω)等。

电阻元件也可用另一个参数来表征,这就是电导,用符号 G 表示,为:

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-4)$$

关联参考方向下,欧姆定律也可表示为:

$$i = Gu \quad (1-5)$$

电导的SI主单位是西门子(S)。

电阻元件有两个特殊情况,一种是:电阻值为无限大,则当电压为有限值时,其电流总是零,这种情况称为“开路”;另一种情况是:若电阻元件的电导为无限大(电阻为零),则当电流为有限值时,其端电压总是零,称其为短路。

电阻元件吸收的功率可由式(1-2)计算,在关联参考方向下,

$$P = ui = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-6)$$

由于通过电阻的电流与其端电压的实际方向总是相同,故上式计算得到的功率恒为正值。这说明,电阻元件总是消耗电功率的,故电阻元件为耗能元件。

例1 有一个500 Ω 的电阻,通过它的直流电流为20mA。问电阻两端电压为多少?消耗的功率是多少?每分钟发热量是多少?

解 电阻两端电压为: $U = RI = 500 \times 20 \times 10^{-3} = 10(\text{V})$

消耗的功率为: $P = UI = 10 \times 20 \times 10^{-3} = 0.2(\text{W})$

每分钟产生的热量(即消耗的电能)为: $Q = PT = 0.2 \times 60 = 12(\text{J})$

1.4.2 电感元件

线性电感元件是一个二端理想元件,它是从实际线圈中抽象出来的理想化模型。

当线圈中通以电流 i 时,线圈中产生磁通,建立磁场,储存磁场能量。当忽略导线电阻及线圈匝与匝之间的电容时,便抽象为只具有储存磁场能量性质的电感元件。其电路符号如图 1-7 所示。

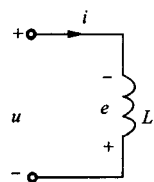


图 1-7 电感元件

当电感线圈中电流 i 变化时,磁场也随之变化,根据电磁感应定律,在线圈中将产生自感电动势 e ,线圈两端有自感电压 u ,当 i 、 e 、 u 三者参考方向一致时,有:

$$u = -e = L \frac{di}{dt} \quad (1-7)$$

这就是电感元件的伏安关系。它表明:任何时刻,线性电感元件两端的感应电压与电流的变化率成正比。电流变化快,感应电压高;电流变化慢,感应电压低;当电流不随时间变化时(直流电流),感应电压为零,这时,电感元件相当于短路。

式(1-7)中,比例系数 L 称为自感系数,简称为电感。它是表示电感元件特性的参数。在国际单位制中,电感的单位是亨利(H),常用的有毫亨(mH),或微亨(μH)。

在电压、电流的关联参考方向下,线性电感元件吸收的功率为:

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

电感元件在任一时刻 t 所储存的磁场能量为:

$$W_L = \int_0^t P dt = \int_0^t u \cdot i dt = \int_0^t L i di = \frac{1}{2} L i^2 \quad (1-8)$$

上式说明,电感元件在某时刻储存的磁场能量,与该时刻流过它的电流平方成正比(设 $t=0$ 时,流过 L 的电流为零)。

当电流的绝对值增加时,电感元件吸收磁场能量;当电流的绝对值减小时,电感元件释放磁场能量。可见,电感元件并不把吸收的能量消耗掉,而是

以磁场能量的形式储存在磁场中,所以,电感元件是一种储能元件。同时,它也不会释放出多于它所吸收或储存的能量,因此,它又是一种无源元件。

1.4.3 电容元件

将两块金属极板用绝缘介质隔开,就构成了一个电容器。加上电源后,电容器极板上分别聚集起等量异号的电荷,在介质中建立起电场,并储存有电场能量。电源移去后,电荷可以继续聚集在极板上,电场继续存在。如果忽略电容器的介质损耗,它可以用一个只储存电场能量的理想电容元件来作为电路模型。

线性电容元件在电路中的图形符号如图1-8所示。若规定电容元件上电压参考方向由正极板指向负极板,则任何时刻极板上电荷 q 与其两端的电压 u 成正比,即:

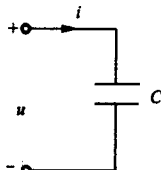


图1-8 电容元件

$$q = Cu$$

$$\text{或} \quad C = \frac{q}{u} \quad (1-9)$$

式中, C 定义为该电容元件的电容,是表征电容元件特性的参数。

电容的SI主单位是法[拉](F)。当将电容器充上1V的电压时,极板上若储存了1C的电量,则该电容器的电容就是1F。

由于法拉的单位太大,工程上一般采用微法(μF)或皮法(pF)作为单位。

当极板间的电压 u 变化时,极板上的电荷也随之改变,于是,电容器电路中出现电流,在图1-8所示电压、电流的关联参考方向下,有:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

上式即为电容元件的伏安特性。它表明,电容元件上通过的电流,与元件两端的电压对时间的变化率成正比。电压变化越快,电流越大。当电容元件两端加恒定电压时, $i=0$,电容元件相当于开路,故电容元件有隔断直流的作用。

在任一时刻 t ,电容元件极板间储存的电场能量为:

$$W_c = \int_0^t u \cdot i dt = \int_0^u C u du = \frac{1}{2} C u^2 \quad (1-11)$$

上式说明:电容元件某时刻储存的电场能量与该元件两端电压的平方成正比。

电容元件不消耗能量,它是一种储能元件,同时它也是一种无源元件。

1.4.4 理想电压源

理想电压源是一个二端理想元件。它有两个基本性质：

- (1) 它的端电压为某给定值(直流)或给定的时间函数(交流),与流过的电流无关;
- (2) 流过它的电流是任意的,与外电路有关。

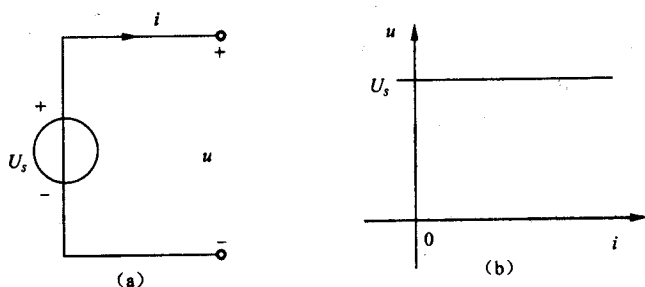


图 1-9 直流理想电压源(a)及伏安特性曲线(b)

直流理想电压源在电路中的图形符号和伏安特性曲线如图 1-9 所示。其伏安关系为：

$$u = u_s \quad (1-12)$$

理想电压源实际上是不存在的,但是如果实际电源的内阻远小于负载电阻,则端电压基本恒定,就可以忽略内阻的影响,用一个理想电压源来近似。通常,稳压电源和新干电池都可近似认为是理想电压源。

如果一个电压源的电压 $U_s = 0$,则此电压源的伏安特性为与电流轴重合的直线,它相当于短路,电压为零的电压源相当于短路。

1.4.5 理想电流源

理想电流源也是一个二端理想元件。它有两个基本性质：

- (1) 它输出的电流为给定值(直流)或给定的时间函数(交流),与两端电压无关;
- (2) 它的端电压是任意的,与外电路有关。

直流理想电流源的图形符号与伏安特性曲线如图 1-10 所示,其伏安关系为：

$$I = I_s \quad (1-13)$$

同样,理想电流源实际上也是不存在的,但如果实际电源的内阻远大于负载电阻,则电流基本恒定,可认为是理想电流源。通常,光电池和在一定条件

下工作的晶体管可近似认为是理想电流源。

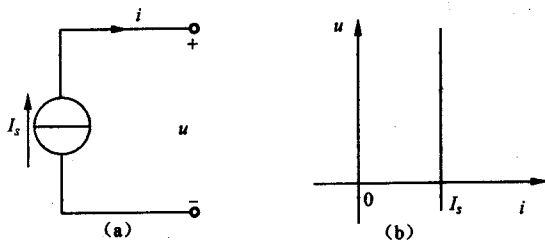


图 1-10 直流理想电流源(a)及伏安特性曲线(b)

如果一个电流源的电流 $I_s = 0$, 则此电流源的伏安特性曲线为与电压轴重合的直线, 它相当于开路。电流为零的电流源相当于开路。

理想电压源和理想电流源都是从实际电源抽象出来的模型, 简称为电压源和电流源。电压源的电压和电流源的电流都不受外电路的影响。它们作为电源或信号源时, 在电路中起激励的作用, 将在电路中产生电流和电压响应。这类电源称为独立电源。

例 2 电路如图 1-11 所示, 求理想电流源的端电压 U 和两个电源的功率。

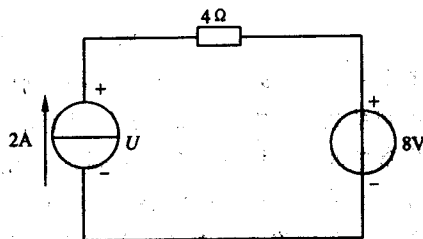


图 1-11 例 2 的电路

解 $U = 2 \times 4 + 8 = 16(\text{V})$

理想电流源的功率为:

$$P_1 = -2U = -2 \times 16 = -32(\text{W}) \quad \text{发出功率}$$

理想电压源的功率为:

$$P_2 = 2 \times 8 = 16(\text{W}) \quad \text{吸收功率}$$

1.4.6 受控电源

受控电源又称为“非独立”电源。受控电压源的电压和受控电流源的电流受电路中某部分电压或电流控制, 不能独立存在。

例如, 晶体管的集电极电流受基极电流控制; 运算放大器的输出电压受输入电压控制, 它们的电路模型都可用受控源来描述。

受控电压源或受控电流源因控制量是电压或电流, 可分为电压控制电压源 (VCVS)、电压控制电流源 (VCCS)、电流控制电压源 (CCVS) 和电流控制电流

源(CCCS)^①,这4个受控源的图形符号见图1-12。为了和独立电源相区别,用菱形符号表示其电源部分。

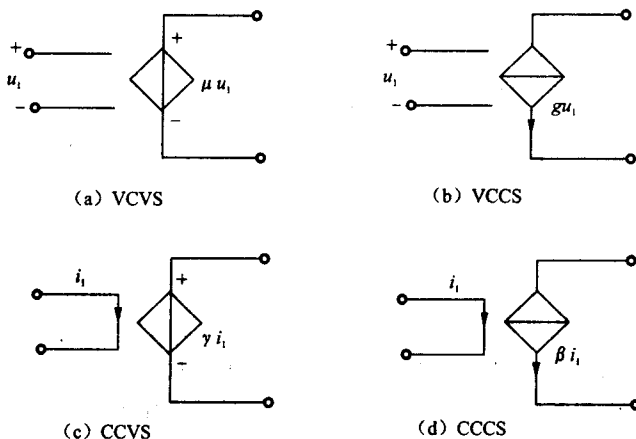


图1-12 受控电源

图1-12中, u_1 和 i_1 分别表示控制电压和控制电流。 μ 、 γ 、 g 和 β 分别为有关的控制系数,其中, γ 和 g 分别具有电阻和电导的量纲, μ 和 β 无量纲。这些系数为常数时,被控制量和控制量成正比,这种受控源为线性受控源。本书只考虑线性受控源,故一般将略去“线性”二字。

图1-12中将受控源表示为具有4个端子的电路模型,其中受控电压源或受控电流源具有一对端子,另一对控制量所在的端子分别为开路或短路。而将控制量用开路电压或短路电流表示。这样处理有时会带来方便。但一般情况下,并不一定要在图中专门标出控制量所在处的端子,控制量也不一定是开路电压或短路电流。

独立电源是电路中的“输入”,在电路中起“激励”的作用。有了它,电路中才有电流和电压响应。受控源不同,它们的电压或电流反而受电路中其他电压或电流的控制,当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,受控源只是用来反映电路中某处的电压或电流能控制另一处电压或电流的这一现象,或表示一处的电路变量与另一处电路变量之间的一种耦合关系。

在求解含受控源的电路时,可将受控电压(电流)源作为电压(电流)源处理,但必须注意,受控源的电压(电流)是取决于控制量的。

① VCVS—Voltage Controlled Voltage Source
VCCS—Voltage Controlled Current Source
CCVS—Current Controlled Voltage Source
CCC—Current Controlled Current Source