

高 等 学 校 教 材

# 模拟电子 技术基础

(第二版)

华中理工大学电子学教研室  
主 编 陈大钦 副主编 杨 华



高等教育出版社

高等学校教材

# 模拟电子技术基础

(第二版)

华中理工大学电子学教研室

陈大钦 杨 华 邹韬平

张 林 秦 臻 编

主 编 陈大钦

副主编 杨 华

高等教育出版社

## 内容简介

本书第二版是参照原国家教委 1993 年颁布的《高等工业学校电子技术基础教学基本要求》和 1995 年颁布的《高等工程专科电子技术基础教学基本要求》，并考虑面向 21 世纪教学改革的需要而修订的，内容的广度和深度可根据本科、专科和专业不同的要求进行选择（书中有“\*”部分内容为选讲内容，且相对独立，删去这部分内容对教学影响不大）。

第二版全书包括 14 章及一个附录，除保留了第一版的基本内容和特点外，为适应电子技术的迅速发展和电子电路的计算机仿真与设计自动化，新版教材增加了 BiCMOS 等一类新型集成电路器件、电流模电路基础知识和电子电路计算机辅助分析与设计。为便于读者加深理解教材内容，教材中的重点、难点内容都有相应例题，力求做到通俗易懂，便于教学。为进一步加强学生分析问题和解决问题的能力，新书中增加了具有启发意义的和综合应用的思考题和习题。习题量、内容和难易程度覆盖了不同层次学校的教学要求。书末附有自我检验题和部分习题答案，以供校核。

本书可作为高等学校本科和高等工程专科电气类、自控类、电子类及其他相近专业电子技术基础课程教材，还可供从事电子技术的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/陈大钦主编. —2 版. —北京:

高等教育出版社, 2000

ISBN 7-04-007984-4

I. 模… II. 陈… III. 模拟电路—电子技术  
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 14295 号

模拟电子技术基础 (第二版)

华中理工大学电子学教研室

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 煤炭工业出版社印刷厂

版 次 1991 年 5 月第 1 版

开 本 787×1092 1/16

2000 年 6 月第 2 版

印 张 27.75

印 次 2000 年 6 月第 1 次印刷

字 数 680 000

定 价 22.00 元

---

凡购买高等教育出版社图书，如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请在所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 1 绪 论

**引言** 自本世纪下半叶,由于以微电子技术为标志的现代电子技术得到了空前的发展,推动了自动控制、计算机、个人电脑、通信和全球网络等技术的发展,人类已进入信息时代。今天,信息的处理已离不开电子技术,人们每天都要同各种电子器件和电子设备打交道。电子技术在科学研究、国防、工业、医学、通信及文化生活等各个领域中都起着巨大的作用。

电子技术的基本任务可称之为“信号的产生、信号的传输、信号的处理”,任务的完成取决于对电子器件、电子电路、电子系统的性能的研究。按照功能和构成原理的不同,电子电路可分为模拟电路和数字电路两大类。本书着重讨论模拟电路的基本概念、基本原理、基本分析方法及基本应用。

作为绪论,本章首先简要地介绍信号与电子系统的基本概念,接着讨论模拟电子系统中应用最普遍的基本电路——放大器(模型)及其性能,然后回顾电子系统分析中常用的网络定理,最后分析简单  $RC$  电路的频率响应。这样安排的意图:一是使初学者对本课程的概貌有个初步了解,二是为后续各章的讨论提供必要的基础知识。

## 1.1 信号与电子系统

### 1.1.1 信号及其分类

信号可以用来传输信息。信息可用语言、文字、图像等来表达,也可以用人们事先规定好的编码来表达。但在很多情况下,这些表达信息的语言、文字、图像、编码等不便于直接传输。因此,在近代科学技术中,常用电信号来传送各种信息,即利用一种变换设备把各种信息转换为随时间作相应变化的电压或电流进行传输。这种随信息作相应变化的电压或电流就是电信号。当电信号传递到目的地后,再利用一种与上述相反的变换设备,把电信号还原成原来的信息。

例如,在电视广播系统中,传输配有声音的景物时,先利用电视摄像机把景物的光线、色彩转变成图像信号(电压或电流),并利用话筒把声音转变成伴音信号(电压或电流),这些就是电视要传输的带有信息的电信号。然后把这些信号送入电视发射机进行处理,产生一种反映信息变化的便于传输的高频电信号,再由天线将这高频电信号转换为电磁波发射出去,在空间传播。电视观众用接收天线截获了电磁波的很小一部分能量送入电视接收机,接收机的作用与发射机相反,它能对接收到的由电磁波转换得到的高频电信号进行处理,从而恢复出原来的图像和伴音信号,并分别送入显像管与喇叭,供观众欣赏。这个过程可用一个简明的方框图表示,如图 1.1.1 所示。其中,变换器指的是把表达信息的景物和声音转换为电信号的装置(如摄像管和话筒),或者反过来,是把电信号转换为景物和声音的装置(如显像管和喇叭等)。

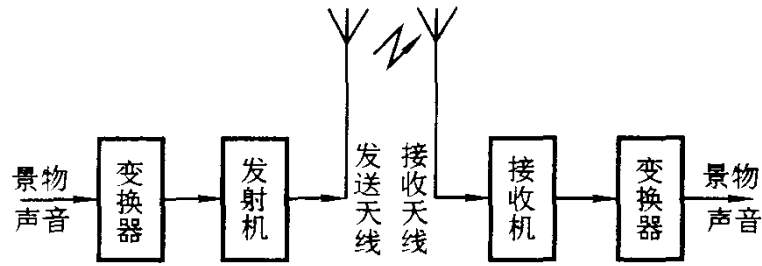


图 1.1.1 电视系统方框图

综上所述,在电子技术中谈到“信号”时,指的就是变化的电压或电流——电信号。根据电信号随时间的变化规律,可将电信号分为两大类:模拟信号和数字信号。

图 1.1.2 所示的电压波形有三角波、正弦波、阻尼振荡波、指数衰减波和振幅调制波等等,均

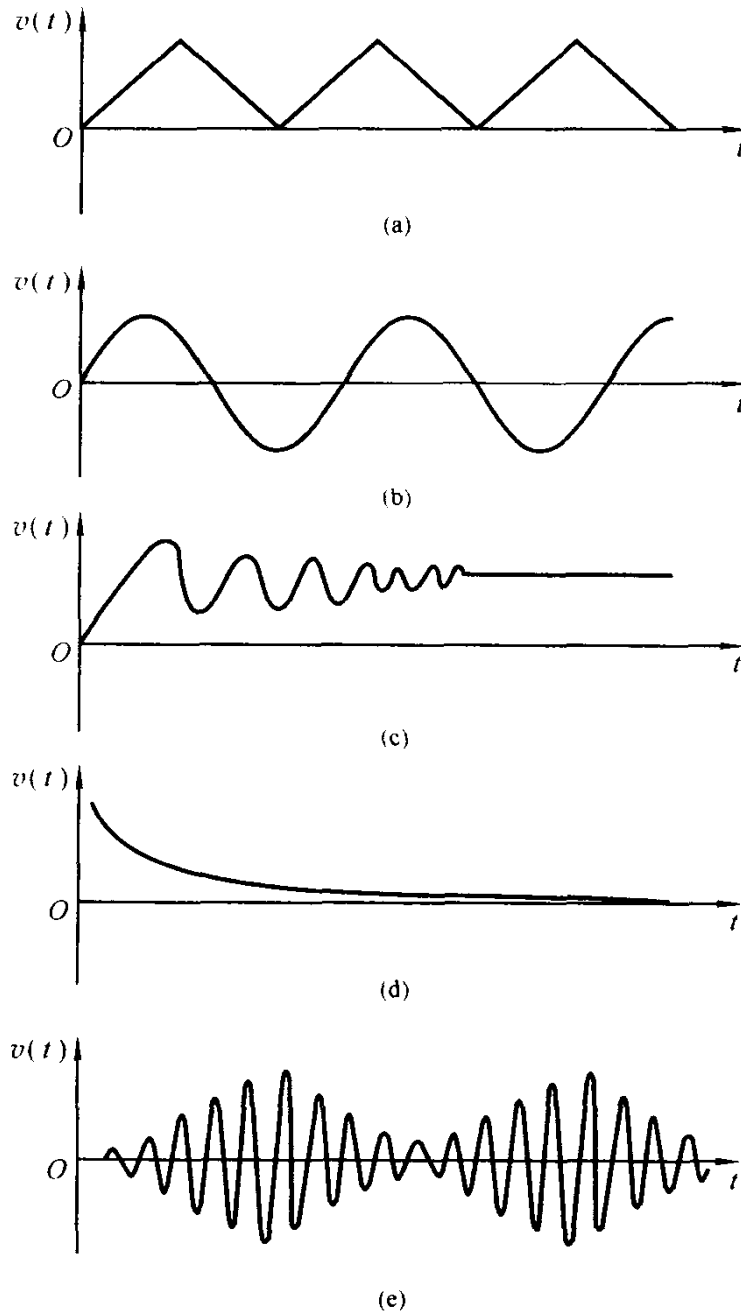


图 1.1.2 模拟信号波形举例

(a) 三角波 (b) 正弦波 (c) 阻尼振荡波 (d) 指数衰减波形 (e) 振幅调制波形

为复杂的数学函数。它们随时间的变化规律是不同的,但它们都是模拟信号。模拟信号的幅值随时间呈连续变化,波形上任意一点的数值均有其物理意义。在前面介绍的电视系统中模拟语音的音频信号,模拟图像的视频信号都是模拟信号,自然界中大部分物理参数都属于模拟量,如温度、压力、位置、速度和重量等等,在电子技术中,为了测量和分析的需要,常常将这些物理量转换为模拟信号。产生和处理模拟信号的电路称为模拟电子电路,如交、直流放大器、音频信号发生器等。

与模拟信号相对应的是数字信号,它只在某些不连续的瞬时给出函数值,其函数值通常是某个最小单位的整数倍,小于这个最小单位的数是没有意义的。象电灯的“亮”和“灭”,工厂产品数量的统计等都是数字信号。图 1.1.3 所示的方波信号就是典型的数字信号。产生和处理数字信号的电路称为数字电子电路,如各种门电路、触发器、计数器等。

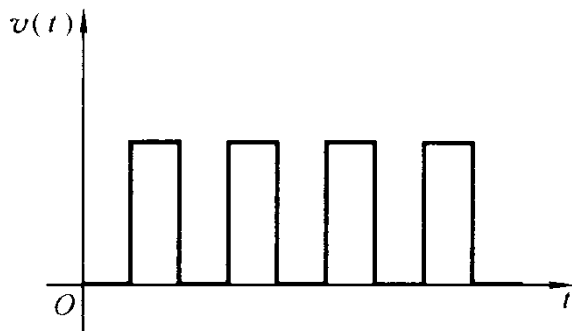


图 1.1.3 数字信号波形举例

### 1.1.2 电子系统举例

从前面所举电视广播系统一例可以看出,电子系统由若干相互关联的单元电子电路组成,用来实现信号的传输或信号的处理。电子系统的种类很多,下面再举两例说明。

#### 1. 一个电子测量系统

图 1.1.4 所示的热电偶温度计是电子测量系统的一个例子。一对热电偶的两个结,一个与待测温度的物体接触,另一个浸于冰槽的冰水中,以产生稳定的参考温度。当热电偶的两个结点间存在温差时,两端就会产生相应的模拟电压信号  $v_T$ ,将此电压送往放大器进行放大。因为热电偶的电压不可能很准确地正比于温度,所以放大器输出的电压要通过线性补偿器加一个小的校正电压进行补偿,以使获得的测量电压正比于温差。最后,把信号送往显示器(指针式仪表或数字仪表)显示出来。

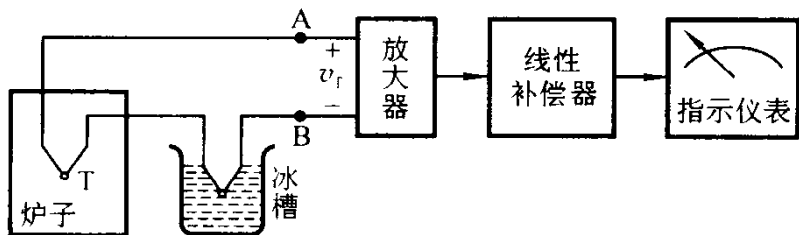


图 1.1.4 热电偶温度计的方框图

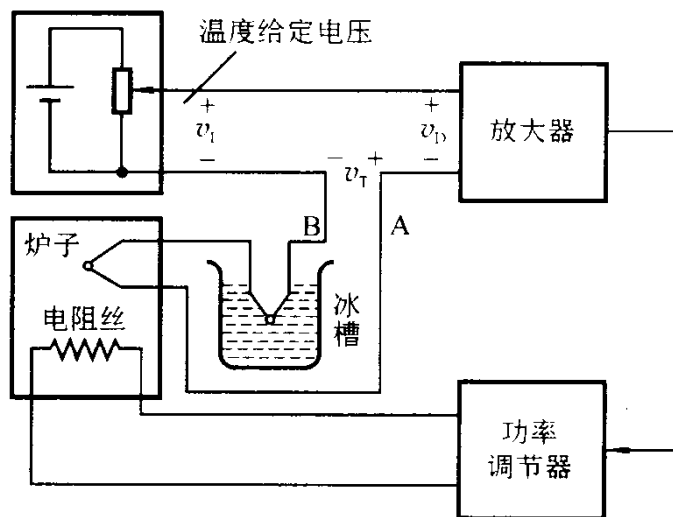


图 1.1.5 炉温自动控制系统

#### 2. 一个自动控制系统

图 1.1.5 所示电路是一个炉温自动控制系统。炉温的希望值转换为用“温度给定电压  $v_1$ ”表示,热电偶两端的电压  $v_T$  可近似认为与炉温成正比。当炉温低于希望值时, $v_T$  小于  $v_1$ , $v_T$  与  $v_1$

比较后产生一个偏差电压  $v_D = v_I - v_T$ , 经放大电路放大后驱动功率调节器, 调整电阻丝功率, 使炉温上升到希望值。

## 1.2 放大器的基本概念

在电子系统中, 放大器是信号处理的基本电路, 其作用是将微弱信号增强(放大)到所需的数值。放大器的应用非常广泛, 如电视机、收录机、精密测量仪器和复杂的自动控制系统中都含有各式各样的放大器。基本放大电路是电子设备中最普通的基本单元电路之一, 是组成各种复杂电路的单元和基础, 因此也是模拟电子技术课程研究的基本内容之一。这一节将初步介绍放大器的基本概念及主要性能指标。

### 1.2.1 放大器电路符号说明

放大器是由半导体三极管(或场效应管、或电子管)、电阻、电容及电源等元器件构成的二端口网络, 可用图 1.2.1 所示的电路符号表示。其中输入端口(1-1')接信号源, 端口输入电压为  $v_I$ 、输入电流用  $i_I$  表示; 输出端口(2-2')接负载, 输出电压为  $v_O$ , 输出电流用  $i_O$  表示。图中各电压、电流的正方向是按照二端口网络的习惯规定标出的。在放大器输入端口和输出端口之间有一个输出和输入的公共端“O”, 用来作为零电位参考点, 称作放大器的“地”。

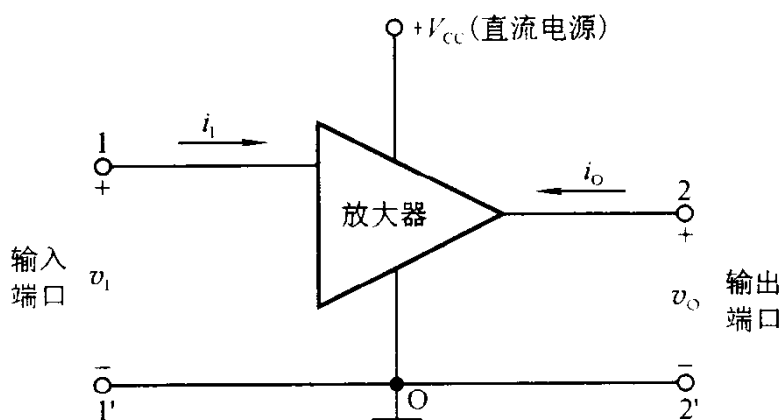


图 1.2.1 放大器的电路符号

电子技术里的“放大”有两方面的含义: 一是能将微弱的电信号增强到人们所需要的数值(即放大电信号)。二是要求放大后的信号波形与放大前波形的形状相同或基本相同, 即不失真的要求。由于放大器的输出功率有所增加, 而增加的功率不是来自输入端的信号源, 而是来自电路中的直流电源。因此, 放大的实质是用较小的能量来控制较大的能量。

扩音机就是应用放大器的一个例子, 其框图如图 1.2.2(a) 所示。当人们对着话筒讲话时, 话筒把声音转变成频率和振幅随之变化的微弱的电信号(电压或电流), 利用电路中放大元件的控制作用和直流电源供给的能量, 由放大器把微弱的电信号增强为足够大的电信号, 再经过喇叭转换成放大的声音。从扩音机的工作过程看, 话筒的作用可与一个内阻为  $R_s$  的信号源  $v_s$  的作用等效, 它为放大器提供输入信号电压  $v_I$ 。喇叭可等效为电阻  $R_L$ , 作为放大器的负载电阻, 如

图 1.2.2(b)所示。

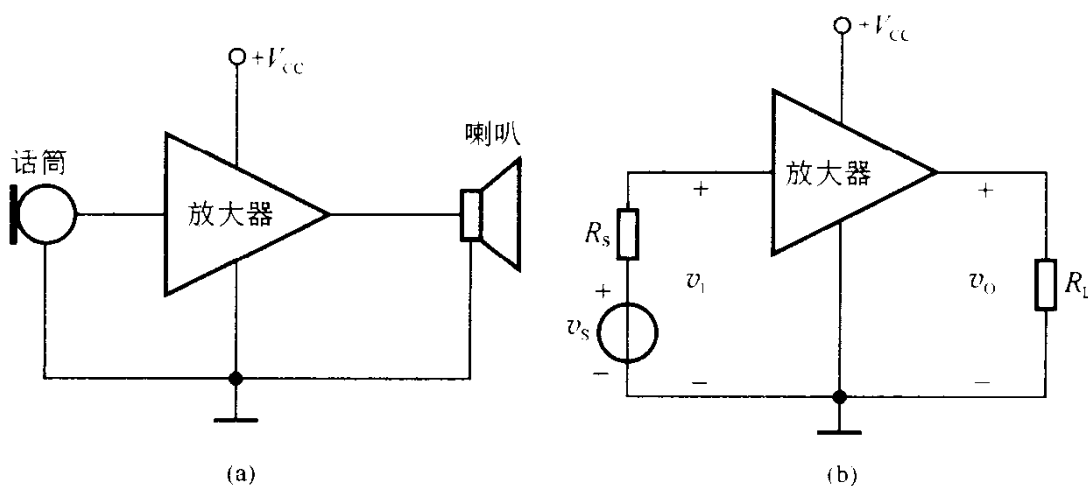


图 1.2.2 扩音机原理简图  
(a) 原理框图 (b) 等效电路

在不考虑放大器内部电路的具体结构时,一般放大器电路都可用图 1.2.2(b)所示电路表示。为了能够在电子系统中象积木块一样地使用放大器,必须用适当方式来表征放大器两个端口的特性。为此,我们将先介绍放大器的主要性能指标,然后给出简单而有效的放大器模型。

### 1.2.2 放大器的主要性能指标

放大器的质量好坏必须用一些性能指标来衡量,这些指标主要是围绕放大能力和不失真等方面的要求提出的。但所制定的指标除了能衡量放大器的优劣之外,还必须便于测量,所以常用正弦信号作为实验和测试信号。正弦信号有两个主要参数,一个是幅值,一个是频率。通过这两个参数的配合,就可以定出放大器的主要性能指标(可分为三种类型)。

第一种类型的指标:放大器对应一个幅值和频率已定的正弦输入信号的性能,这是放大器的基本性能。

#### 1. 增益

增益是衡量放大器放大能力的参数,定义为输出变化量的幅值与输入变化量的幅值之比(也称为放大倍数)。对于图 1.2.1 所示放大器,由于输出和输入信号都有电压和电流量,所以当研究的对象不同时,可用四种增益来表示。

(1) 电压增益  $A_v$ : 输出电压变化量  $v_o$  与输入电压变化量  $v_i$  之比,即

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \quad (1.2.1)$$

由于输入常用正弦信号,故在正弦稳态分析中,信号电压、电流均可用复数表示。需要注意的是,若输出波形出现明显的失真,则增益就失去了意义。放大器的其他指标也是如此。

(2) 电流增益  $A_i$ : 输出电流变化量  $i_o$  与输入电流变化量  $i_i$  之比,即

$$A_i = \frac{i_o}{i_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (1.2.2)$$

(3) 跨阻增益  $A_r$ : 输出电压变化量  $v_o$  与输入电流变化量  $i_i$  之比,即

$$A_r = \frac{v_o}{i_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_r = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_i} \quad (1.2.3)$$



(4) 跨导增益  $A_g$ : 输出电流变化量  $i_o$  与输入电压变化量  $v_i$  之比, 即

$$A_g = \frac{i_o}{v_i} \quad \text{或} \quad \dot{A}_g = \frac{\dot{i}_o}{\dot{V}_i} \quad (1.2.4)$$

在工程上, 增益常用分贝 (dB) 表示, 如电压增益定义为

$$A_v(\text{dB}) = 20 \lg A_v \quad (1.2.5)$$

采用分贝表示增益的一大优点在于, 可以十分方便地化增益数值的相乘为增益数值的相加。

## 2. 输入电阻和输出电阻

放大器的输入端要接信号源(该信号源也可能是前级放大器), 输出端要接负载(该负载可能是下一级放大器), 当放大器与信号源、负载或其他放大器级连时, 衡量其相互影响的重要参数就是输入电阻和输出电阻。

### (1) 输入电阻 $R_i$

放大器的输入端要从信号源汲取电流。汲取电流的大小表明了放大器对信号源的影响程度, 因此放大器的输入端呈现出阻抗特性, 其等效阻抗就是放大器的输入阻抗。当信号频率不高不低时, 输入电流与输入电压基本同相, 可用输入电阻来表示, 定义为:

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} \quad (1.2.6)$$

由图 1.2.3 可见,  $R_i$  越大, 放大器从信号源汲取的电流越小, 输入端所得到的电压  $v_i$  越接近信号源电压  $v_s$ , 即

$$v_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot v_s \quad (1.2.7)$$

理想电压放大器的输入电阻  $R_i = \infty$ 。所以输入电阻  $R_i$  是衡量放大器对信号源影响程度的参数。

### (2) 输出电阻 $R_o$

放大器的输出端可等效为一个非理想的电压源, 如图 1.2.3 所示。放大后的信号输出给负载, 对负载  $R_L$  而言, 放大器可视为“信号源”, 该“信号源”不是独立的, 它受输入电压  $v_i$  的控制, 故称受控电压源, 其电压  $A_{vo}v_i$  为负载  $R_L$  开路(即  $i_o = 0$ )时的输出电压, 称为开路输出电压(也可用  $v'$  表示),  $A_{vo}$  为放大器的开路电压增益。实验证明, 放大器接上负载时的输出电压  $v_o$  要比空载(负载  $R_L$  开路)时的输出电压  $v'$  小, 说明放大器输出端的“受控电压源”是非理想的。因此, 从放大器输出端看进去有一个等效内阻, 即放大器的输出电阻  $R_o$ 。由图 1.2.3 可求得带负载时的输出电压

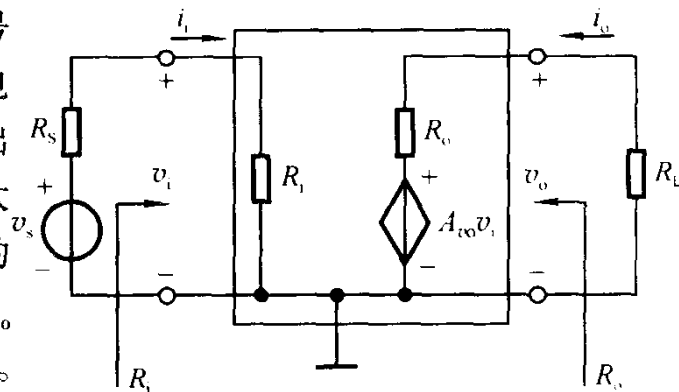


图 1.2.3 放大器的输入电阻和输出电阻

① 其它增益的计算与式(1.2.5)相似, 但功率增益的计算为  $A_p(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_o}{P_i} = 10 \lg(A_v A_i)$ 。

$$v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} \cdot v'_o \quad (1.2.8)$$

可见,  $R_o$  越小, 放大器带负载前后的输出电压相差越小, 即放大器受负载影响的程度越小。理想电压放大器的输出电阻  $R_o = 0$ 。因此, 输出电阻是衡量放大器带负载能力的参数。

输出电阻可由实验测得: 在放大器的输入端加一正弦信号, 测出负载  $R_L$  开路时的输出电压  $v'_o$ , 再测出接入负载  $R_L$  时的输出电压  $v_o$ , 由式(1.2.8)可求得

$$R_o = \left( \frac{v'_o}{v_o} - 1 \right) \cdot R_L \quad (1.2.9)$$

求输出电阻  $R_o$  的另一种方法将在本书 4.3 节中介绍。

第二种类型的指标: 放大器对应幅值不变而频率改变的正弦输入信号的性能。

### 3. 频率响应

放大器的输入信号往往不是单一频率的正弦信号, 而是由许多频率成分组合而成的复杂信号。由于放大器中一般都含有电抗性元件(电容、电感), 它们对不同频率的信号呈现不同的电抗值, 从而使放大器对不同频率的信号具有不同的放大能力, 输出波形的相位也会发生变化。因此, 放大器的电压增益应该用复数表示, 即

$$\dot{A}_v = A_v(f) \angle \varphi(f) \quad (1.2.10)$$

式中,  $A_v(f)$  表示电压增益的幅值与频率的关系, 称为幅频响应; 而  $\varphi(f)$  表示放大器输出电压与输入电压之间的相位差  $\varphi$  与频率  $f$  的关系, 称为相频响应。图 1.2.4 表示放大器的幅频响应, 图 1.2.4(a) 为  $RC$  耦合交流放大器的幅频响应曲线。由图可见, 在一个较宽的频率范围内曲线是平坦的, 即电压增益的幅值不随信号的频率而变。我们把这个频率范围称为中频区, 对应的电压增益称为中频区的增益, 用  $A_{vm}$  表示。在中频区以外, 信号的频率升高或降低时, 电压增益都将下降, 当频率升高而使电压增益下降为中频区增益  $A_{vm}$  的 0.707 时, 对应的频率称为上限截止频率, 用  $f_H$  表示。同样, 使电压增益下降为  $A_{vm}$  的 0.707 时的低频信号频率称为下限截止频率, 用  $f_L$  表示。 $f_H$  与  $f_L$  之间的频率范围(中频区)通常又称为放大器的通频带, 用  $BW$  表示, 即

$$BW = f_H - f_L \quad (1.2.11)$$

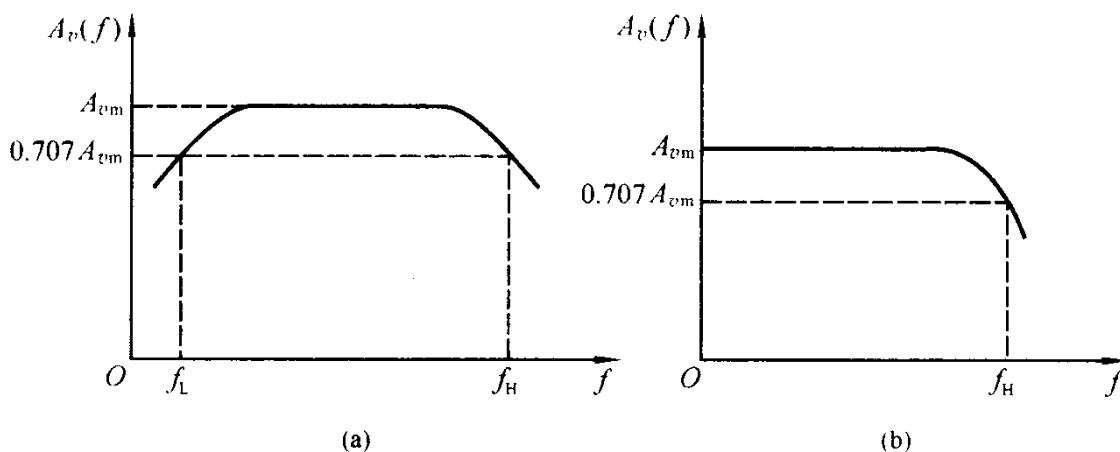


图 1.2.4 放大器的幅频响应

(a)  $RC$  耦合放大器的幅频响应 (b) 直接耦合放大器的幅频响应

通频带越宽, 表明放大器对信号频率的适应能力越强。但对通频带的要求, 要视放大器的用

途、信号的特点及允许的失真度来确定。例如,对于收录机、扩音机来说,通频带宽意味着可以将原乐曲中丰富的高、低音都能表现出来。而有些情况下,则希望通频带较窄,以减小干扰和噪声。

有些放大器的电压增益只在高频范围内下跌,如图 1.2.4(b)所示,其通频带  $BW = f_H$ 。

第三种类型的指标:放大器对应频率不变而幅值改变的正弦输入信号的性能。

#### 4. 非线性失真

理想放大器具有线性传输特性,如图 1.2.5 所示。传输特性的斜率(即增益)应是常数。输入单一频率的正弦波值时,输出应是同频率的正弦波,且  $v_o$  应正比于  $v_i$ 。然而,实际放大器的传输特性是非线性的,如图 1.2.6 所示。这是因为放大器是由半导体三极管等具有非线性特性的器件组成的。当输入信号过大,超出三极管特性工作区进入非线性区时,放大器的输出信号不再是与输入信号成正比的正弦波,而是非正弦波,它除了基波外,还含有许多谐波分量,即在输出信号中产生了输入信号中没有的新的频率分量,这是非线性失真的基本特征。

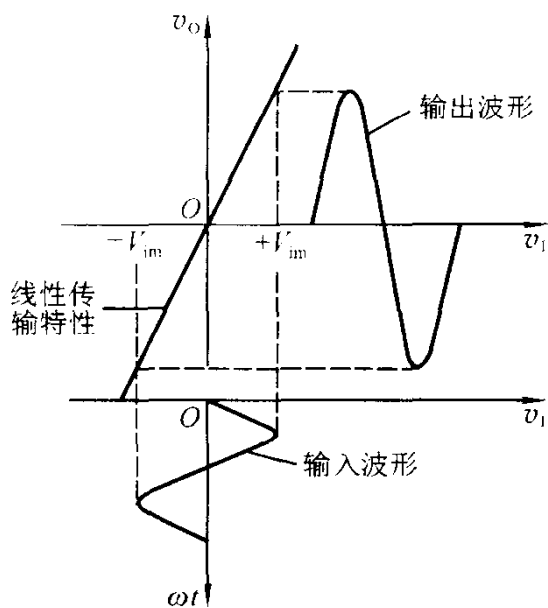


图 1.2.5 线性传输特性与线性放大

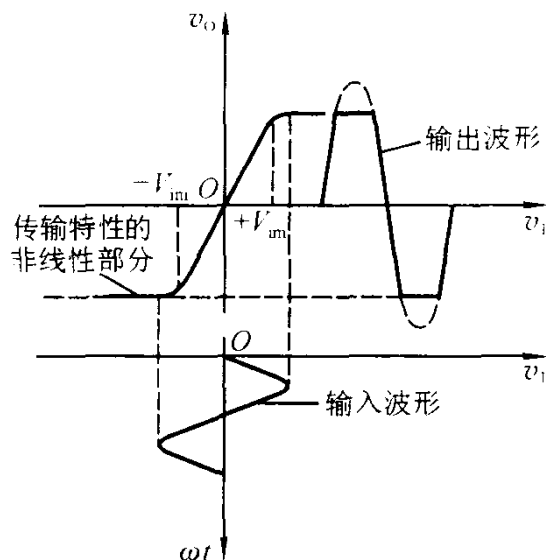


图 1.2.6 非线性传输特性与非线性失真

放大器的非线性失真的程度可用非线性失真系数  $D$  来表示,定义为:

$$D = \sqrt{\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{A_3}{A_1}\right)^2 + \dots} \quad (1.2.12)$$

式中  $A_1, A_2, A_3, \dots$  分别为基波和各次谐波的幅值。

#### 5. 最大输出幅值

在图 1.2.6 中传输特性出现了弯曲。这说明实际放大器只在允许的范围  $(-V_{im} \sim +V_{im})$  内与理想放大器相同,输出电压与输入电压成线性关系,超出这个范围,输出波形将出现失真。也就是说,实际放大器的输入信号、输出信号最大值是受限制的。

通常把非线性失真系数达到某一规定值(例如 5%)时的输出幅值称为最大输出幅值,用  $(V_{om})_{max}$  或  $(I_{om})_{max}$  来表示。

#### 6. 最大输出功率与效率

最大输出幅值是输出不失真时的单项(电压或电流)指标。此外还应该有一个综合性的指标即最大不失真功率。它是在输出信号基本不失真的情况下能输出的最大功率,记作  $P_{om}$ 。

在放大器中,输入信号的功率是很小的,经过放大后可得到较大的输出功率,这些多出来的

能量是由直流电源提供的。放大的实质是能量的控制和转换,因此就存在转换效率问题。效率定义为:

$$\eta = \frac{P_o}{P_V} \quad (1.2.13)$$

式中,是  $P_o$  输出信号功率,  $P_V$  为直流电源提供的平均功率。

### 1.2.3 放大器模型

在讨论了放大器的主要性能指标后,就可以给出放大器的模型。

#### 1. 电压放大器

图 1.2.7(a) 给出了一个电压放大器的电路模型,它由输入电阻  $R_i$ 、受控电压源  $A_{v_o} v_i$  和输出电阻  $R_o$  组成。其中  $A_{v_o}$  为放大器的开路电压增益。图 1.2.7(b) 表示带信号源和负载电阻的电压放大器模型。

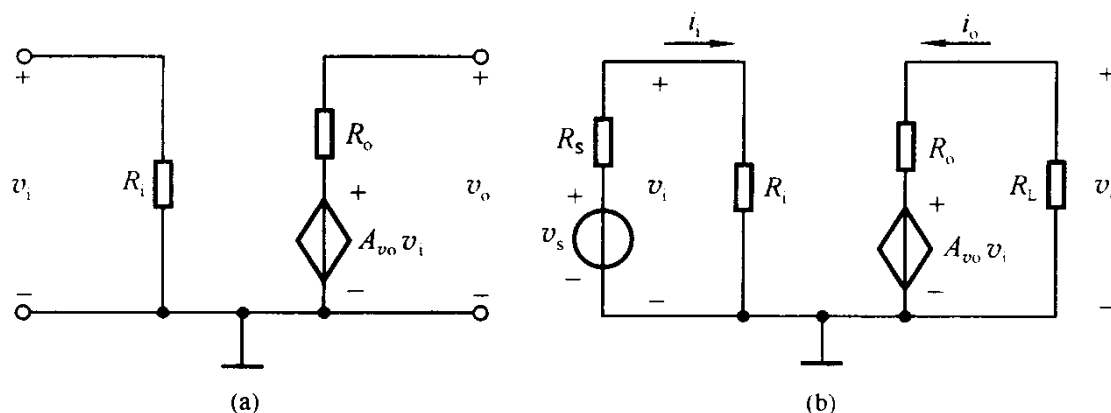


图 1.2.7 电压放大器模型

(a) 电压放大器模型 (b) 带信号源及负载的电压放大器模型

#### 2. 电流放大器

电流放大器的模型如图 1.2.8(a) 所示,  $A_{i_s} i_i$  为“受控电流源”。  $A_{i_s}$  为放大器在负载电阻  $R_L$  短路(即  $R_L = 0$ )时的电流增益。带信号源和负载电阻  $R_L$  的电流放大器模型如图 1.2.8(b) 所示。

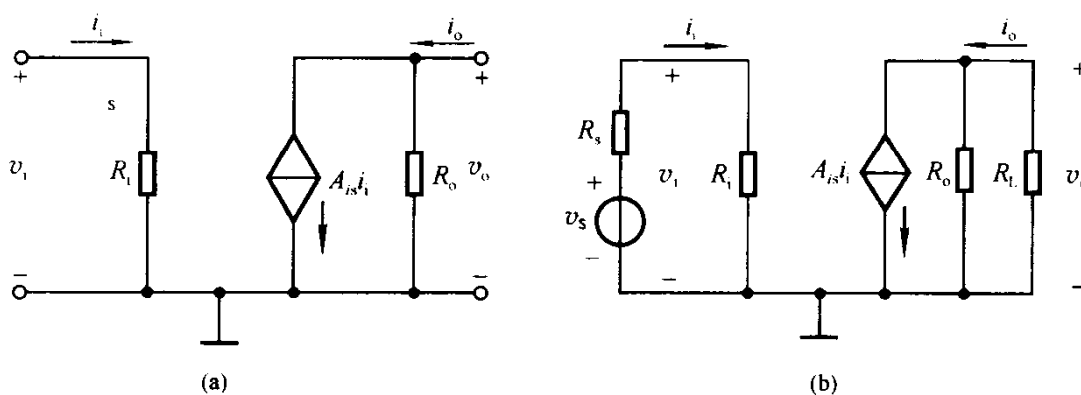


图 1.2.8 电流放大器模型

(a) 电流放大器模型 (b) 带信号源及负载的电流放大器模型

### 3. 跨阻放大器和跨导放大器

跨阻放大器和跨导放大器的模型如图 1.2.9 所示。

图中,  $A_{r_o} i_i$  为“受控电压源”。 $A_{r_o}$  为跨阻放大器在负载电阻  $R_L$  开路(即  $R_L = \infty$ )时的跨阻增益;  $A_{g_s} v_i$  为“受控电流源”。 $A_{g_s}$  为跨导放大器在负载电阻  $R_L$  短路(即  $R_L = 0$ )时的跨导增益。

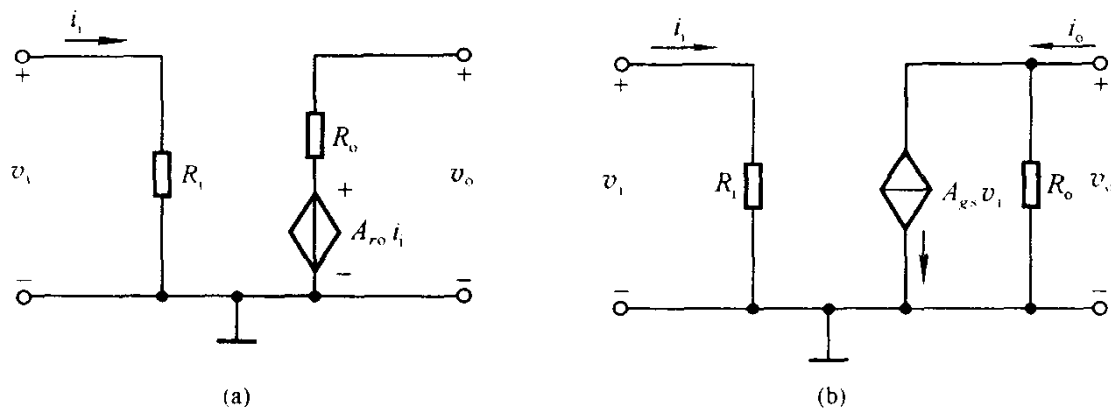


图 1.2.9 跨阻放大器和跨导放大器的模型

(a) 跨阻放大器模型 (b) 跨导放大器模型

上述四种模型是可以互相转换的。例如,一个放大器既可以用图 1.2.7(a)中的电压放大器模型表示,也可以用图 1.2.8(a)中的电流放大器模型表示。这两种模型间的内在联系可由  $A_{v_o}$  和  $A_{i_s}$  之间的关系反映出来。由图 1.2.7(a)所示电路给出的开路输出电压是  $A_{v_o} v_i$ ,图 1.2.8(a)所示电路给出的开路输出电压是  $-A_{i_s} i_i R_o$ ,令这两个输出电压数值相等,并注意到  $i_i = v_i / R_i$ ,这样就有

$$A_{v_o} v_i = -A_{i_s} i_i R_o = -A_{i_s} \frac{v_i}{R_i} R_o$$

即

$$A_{v_o} = -\frac{R_o}{R_i} A_{i_s}$$

## \* 1.3 常用的网络定理

电子电路往往比较复杂,常需要利用“电路原理”中的一些重要定理对电子电路进行等效变换,使电路的分析和计算得以简化,为此,下面对一些常用的网络定理进行复习、回顾。

### 1.3.1 叠加原理

叠加原理是分析计算线性电路的一个重要原理,下面从图 1.3.1 所示的电路入手加以说明。设  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R$  均为已知,求电流  $I_1$ 、 $I_2$  及  $I$ 。

根据基尔霍夫两个定律。由图 1.3.1(a)可列出三个独立方程如下:

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 & (1.3.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 R_1 - I_2 R_2 = V_1 - V_2 & (1.3.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_2 R_2 + IR = V_2 & (1.3.3) \end{cases}$$

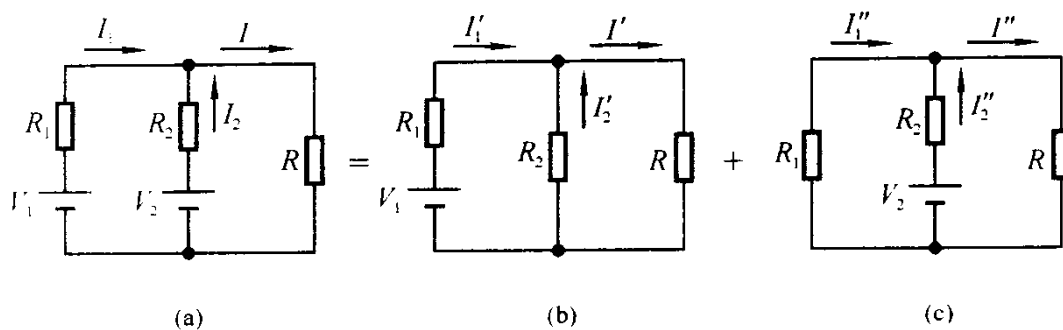


图 1.3.1 叠加原理举例

(a)  $V_1$ 、 $V_2$  同时作用时的电路 (b)  $V_1$  单独作用时的电路

(c)  $V_2$  单独作用时的电路

这三个独立方程含有三个未知数  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I$ ，对它们联立求解可得  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I$ 。现将式(1.3.1)代入式(1.3.3)，并与式(1.3.2)联立方程组得

$$\begin{cases} I_1 R_1 - I_2 R_2 = V_1 - V_2 \\ I_2 R_2 + I_1 R + I_2 R = V_2 \end{cases}$$

解此方程组并经代数变换得

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}} - \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}} \cdot \frac{R}{R_1 + R} \quad (1.3.4)$$

$$I_2 = \frac{-V_1}{R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}} \cdot \frac{R}{R_2 + R} + \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}} \quad (1.3.5)$$

将  $I_1$ 、 $I_2$  的结果代入式(1.3.1)，得

$$I = \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R} + \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R} \quad (1.3.6)$$

仔细观察式(1.3.4)~(1.3.6)，发现  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I$  中任一电流都是两项的代数和，并且每项正好与而且仅与一个独立电源成比例，这说明任一电流都是电路中各个电源单独作用时在该支路中产生的电流的代数和。可进一步分析如下：

当  $V_2$  为零(令  $V_2$  短路)， $V_1$  单独作用时，电路如图 1.3.1(b)，各支路电流为

$$I_1' = \frac{V_1}{R_1 + R_2 // R} = \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}}$$

$$I_2' = -I_1' \cdot \frac{R}{R_2 + R} = -\frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}} \cdot \frac{R}{R_2 + R}$$

$$I' = I_1' \cdot \frac{R_2}{R_2 + R} = \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R}$$

当  $V_1$  为零(令  $V_1$  短路)， $V_2$  单独作用时，电路如图 1.3.1(c)，各支路电流为

$$I_2'' = \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}}$$

$$I_1' = -I_2'' \cdot \frac{R}{R_1 + R} = -\frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}} \cdot \frac{R}{R_1 + R}$$

$$I'' = I_2'' \cdot \frac{R_1}{R_1 + R} = \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R}{R_1 + R}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R}$$

当  $V_1$  和  $V_2$  共同作用时,各支路的电流为

$$I_1 = I_1' + I_1'' \quad (1.3.7)$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' \quad (1.3.8)$$

$$I = I' + I'' \quad (1.3.9)$$

同理,电路中任意两点间的电压,也是等于电路中各个独立电源单独作用,在这两点间所产生的电压的代数和。如图 1.3.1(a)中电阻  $R$  上的电压为

$$V_R = IR = (I'R + I''R) = V_R' + V_R''$$

线性电路的这一性质称为叠加原理。如果线性电路中有  $n$  个独立电源(电压源或电流源、直流电源或交流电源)同时作用,叠加原理仍适用。需要指出的是,使用叠加原理时,电路的连接及电路中所有电阻都不能变动。所谓电压源不作用,即将其短路,电流源不作用,即将其开路。另外,叠加原理不能用来求线性电路中的功率。

### 1.3.2 戴维宁定理和诺顿定理

#### 1. 戴维宁定理

在图 1.3.2(a)所示的网络中,输出端口(A - A')的左边是一个由电源和电阻组成的线性网络,称为含源一端口网络。

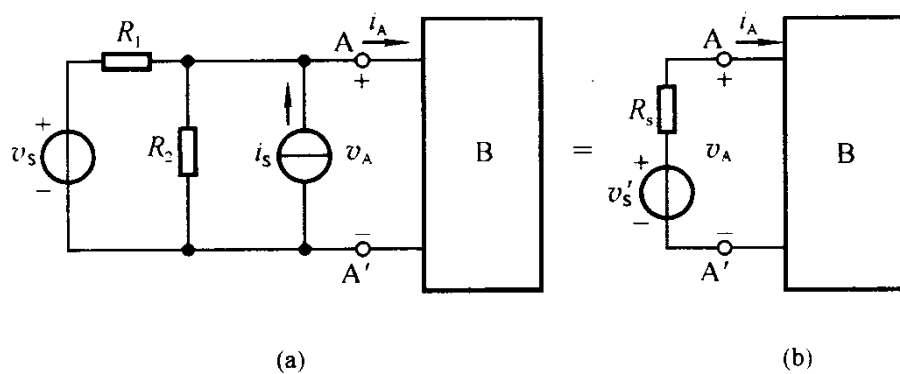


图 1.3.2 戴维宁定理

(a) 一个已知网络 (b) 用戴维宁定理变换后的网络

A - A'端口右边的 B 网络可以是电阻,也可以是放大器的输入电路,还可以是其他元件。在许多情况下,对 A - A'端口左边网络,关心的只是端口电压  $v_A$  和电流  $i_A$  间的关系,即只关心含源一端口网络对外部网络 B 的影响,此时,不必把含源一端口网络内部的各电流和电压也算出来。如果能够用一个最简单的等效电路替代含源一端口网络,那么分析计算就简便多了。含源

一端口网络的等效电路是什么呢?

戴维宁定理指出:任何一个线性含源一端口网络可以用一个电压源  $v'_s$  和一个串联电阻  $R_s$  替代,该电压源电压  $v'_s$  等于含源一端口网络的开路电压,串联电阻  $R_s$  等于含源一端口网络化成无源(不含有电源)网络后的入端电阻。

应用戴维宁定理的关键,在于正确理解和求出含源一端口网络的开路电压和入端电阻。以图 1.3.2(a)为例,所谓含源一端口网络的开路电压,就是把外部网络 B 断开后端口 A - A' 间电压。我们可以利用叠加原理求得开路电压为

$$v'_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_s + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \cdot i_s$$

等效电阻  $R_s$  如何求呢?仍以图 1.3.2(a)为例,将含源一端口网络内部所有的电压源短路(若电压源有内阻则保留其内阻),所有的电流源开路(保留其内阻),则原网络变为一个无源一端口网络。所谓入端电阻,就是在这种情况下从 A - A' 端口向左看进去的等效电阻,这时求得

$$R_s = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

**【例 1.3.1】** 电路如图 1.3.3(a)所示,用戴维宁定理将虚线框内的电路简化。

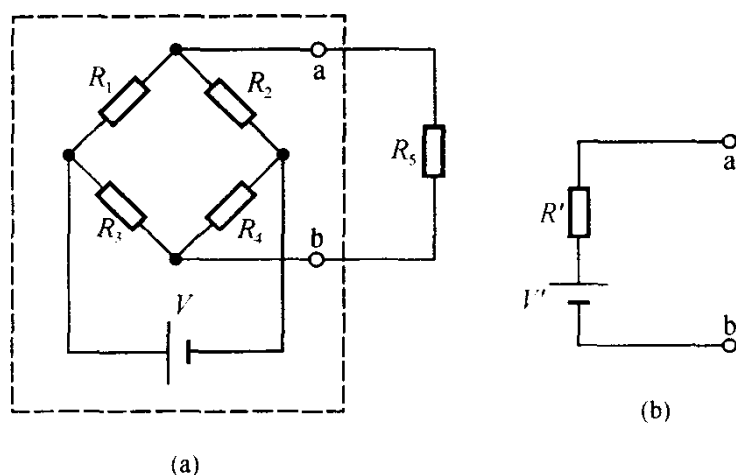


图 1.3.3 例 1.3.1 的电路

(a) 已知电路 (b) 图 1.3.3(a) 电路中虚线框内的戴维宁等效电路

**解:**用戴维宁定理简化图 1.3.3(a)中虚线内的电路,即将该电路用电压源  $V'$  和电阻  $R'$  的串联支路替代,如图 1.3.3(b)所示,其中  $V'$  为当原电路在  $a$ 、 $b$  两点开路时,这两点间的开路电压,即

$$V' = V_a - V_b = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V - \frac{R_4}{R_3 + R_4} V$$

电阻  $R'$  为电源短路后,从  $a$ 、 $b$  两点向左看进去的等效电阻,即

$$R' = (R_1 // R_2) + (R_3 // R_4) = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

## 2. 诺顿定理

在“电路原理”中,已经学过电源的等值变换,即一个与电阻  $R$  串联的电压源  $V_s$  可以用一个与电阻  $R$  并联的电流源  $I_s$  代替,该电流源的电流  $I_s$  等于电压源的短路电流,即  $I_s = V_s/R$ 。反之亦然。



根据电源的等值变换原理,把用戴维宁定理求出的等效含源支路变换为一个电流源和一个电阻的并联组合,则获得诺顿定理。它指出:任何一个线性含源一端口网络对外电路来说,可以用一个电流源  $I_S$  和一个并联阻抗  $R_s$  代替,电流源电流  $I_S$  等于该网络的短路电流,并联阻抗等于该网络内部电源均为零(即电压源短路,电流源开路)时,网络的入端电阻。

【例 1.3.2】用诺顿定理简化图 1.3.3(a)中虚线框内的电路。

解:用诺顿定理简化图 1.3.3(a)中虚线内的电路,即将该电路用电流源  $I_S$  和电阻  $R'$  的并联支路代替,如图 1.3.4 中虚线内部分。其中  $I_S$  为原电路在 a、b 两点间短路时的短路电流,即

$$I_S = \frac{V}{(R_1 // R_2) + (R_3 // R_4)} = \frac{V}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}}$$

电阻  $R'$  为电源  $V$  短路后,从 a、b 两点向左看进去的等效电阻,即

$$R' = (R_1 // R_2) + (R_3 // R_4) = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

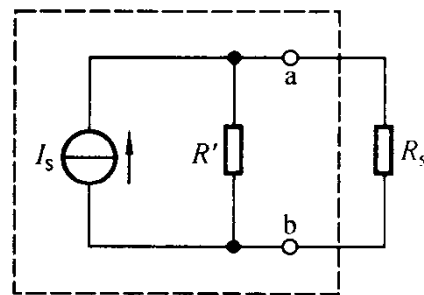


图 1.3.4 图 1.3.3(a)的诺顿等效电路

### 1.3.3 密勒定理

一个含有  $N+1$  个节点的网络如图 1.3.5(a)所示,其中节点 0 为参考点,即该点电位为零。在节点 1 和节点 2 之间接有一阻抗  $Z$ ,节点 1、节点 2 对参考点 0 的电压分别为  $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$ ,设两节点的电压之比为

$$K = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} \quad (1.3.10)$$

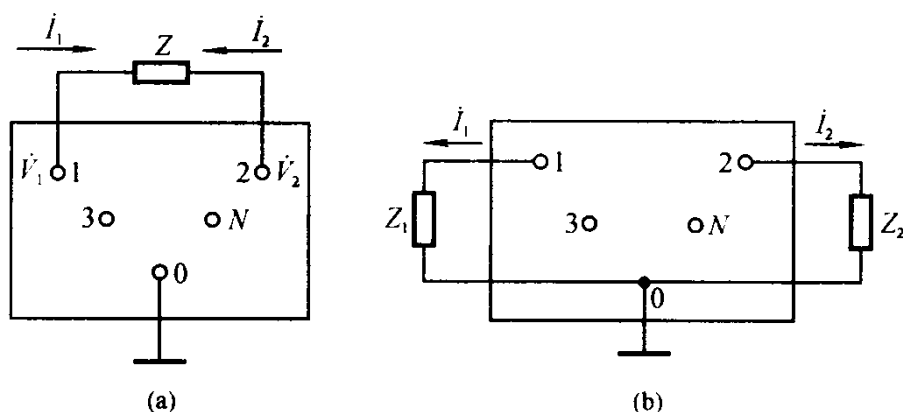


图 1.3.5 用密勒定理对网络进行变换

(a) 有  $N+1$  个节点的网络 (b) 经过密勒变换后的电路

图中由节点 1 流出通过  $Z$  的电流  $i_1$  可由下式求得:

$$i_1 = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{Z} = \frac{\dot{V}_1 - K\dot{V}_1}{Z} = \frac{\dot{V}_1(1-K)}{Z} = \frac{\dot{V}_1}{\frac{Z}{1-K}} = \frac{\dot{V}_1}{Z_1} \quad (1.3.11)$$

式中

$$Z_1 = \frac{Z}{1-K} \quad (1.3.12)$$

式(1.3.11)和式(1.3.12)说明,由节点 1 流出通过  $Z$  的电流  $i_1$  等于由节点 1 流过  $Z_1$  到达参