

21 世纪电工电子学课程系列教材

模拟电子技术实用教程

(机电类)

主 编 王英健 宋学瑞
副主编 寻小惠 李颖



中南大学出版社

21 世纪电工电子学课程系列教材

模拟电子技术实用教程

(机电类)

主 编 王英健 宋学瑞
副主编 寻小惠 李颖

中南大学出版社
2003 · 长沙

21 世纪电工电子学课程系列教材
模拟电子技术实用教程
(机电类)

主 编 王英健 宋学瑞
副主编 寻小惠 李小额

☐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

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 中南大学湘雅印刷厂

☐开 本 787×960 1/16 ☐印张 16.5 ☐字数 299 千字

☐版 次 2003 年 8 月第 1 版 ☐2003 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-558-0/TN·001

☐定 价 21.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

21 世纪电工电子学课程系列教材编委会

主 任 陈明义 宋学瑞

成员(以姓氏笔划为序):

文援朝 王英健 李义府 肖梓高 陈明义

宋学瑞 余明扬 罗桂娥 赖旭芝

前 言

随着电子技术、计算机技术、通信技术和自动控制技术的飞速发展,机械制造领域也越来越依赖这些技术以满足高性能系统设计的需要,形成机械与电子紧密结合的技术趋势。该书作为21世纪电工电子学系列教材之一,正是为了满足机电类专业的需要而编写的。在现代科学技术中,电子技术是基础,计算机、通信及其他技术都从电子技术中获得技术支持。机械运动的控制在电子技术应用方面有它自己的特点和侧重点。该书本着好教好学的思想,在内容选择上,以满足机电类专业的需要为前提,尽量展现现代电子新技术。全书以集成电路应用为主线,概念简明扼要,重在应用,并结合创新能力的培养。在写作处理上以集成电路的应用为主线,将基本概念融入主体中进行讲解;对元器件的处理,以外特性和功能介绍为主,够用为度。整体内容上不贪大求全,但强调知识链的逻辑性和完整性。该书引入EDA技术,介绍Workbench电子线路设计与仿真软件的使用,使读者能应用该软件进行各种电子电路的设计和仿真,引导读者对电子电路进行深入研究,从而加深对电子电路基本理论和技术的理解,同时也为读者完成作业提供了有效的软件手段。该书选用的电子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。

该书的写作提纲由21世纪电工电子学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、赖旭之副教授及长沙理工大学王英健副教授等。该书由王英健副教授、宋学瑞副教授担任主编。全书共分9章,由王英健编写第1章、第2章、第4章和第8章;宋学瑞编写第7章和第9章;李小红编写第5章和第6章;寻小惠编写第3章。全书由王英健和宋学瑞进行统稿。

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,以便不断改进该书的质量。

编 者

2003年5月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 信号与电子系统	(1)
1.2 放大电路基本知识	(5)
1.3 放大电路的主要性能指标	(8)
本章小结	(13)
复习思考题	(13)
第2章 半导体器件	(14)
2.1 半导体材料及PN结	(14)
2.2 半导体二极管	(19)
2.3 半导体三极管	(28)
2.4 复合管	(38)
2.5 场效应管	(39)
本章小结	(53)
复习思考题	(54)
第3章 基本放大电路	(58)
3.1 放大电路的工作原理	(58)
3.2 放大电路的静态分析	(60)
3.3 放大电路的动态分析	(63)
3.4 静态工作点的稳定	(70)
3.5 射极输出器	(76)
3.6 多级放大电路及其级间耦合方式	(80)
3.7 差动放大电路	(85)
3.8 互补对称功率放大电路	(94)
3.9 场效应管及其放大电路	(100)
本章小结	(106)
复习思考题	(107)
第4章 集成运算放大器	(110)
4.1 通用型集成运算放大器的结构及特点	(110)

4.2	集成运算放大器简介	(112)
4.3	运算放大器的主要技术指标	(114)
4.4	理想运算放大器及其分析特征	(117)
4.5	专用集成运算放大器简介	(120)
	本章小结	(121)
	复习思考题	(122)
第5章	负反馈放大电路	(124)
5.1	负反馈的基本概念	(124)
5.2	负反馈方框图和一般表达式	(126)
5.3	反馈类型的判别方法	(128)
5.4	负反馈对放大电路的影响	(132)
5.5	负反馈放大电路的分析方法	(141)
	本章小结	(144)
	复习思考题	(144)
第6章	信号运算与处理电路	(149)
6.1	信号运算电路	(149)
6.2	有源滤波电路	(158)
6.3	预处理放大器	(167)
	本章小结	(172)
	复习思考题	(173)
第7章	波形发生和信号转换电路	(176)
7.1	正弦波发生电路	(176)
7.2	电压比较器	(194)
7.3	非正弦波发生电路	(204)
7.4	信号转换电路	(207)
	本章小结	(209)
	复习思考题	(211)
第8章	直流稳压电源	(219)
8.1	概述	(219)
8.2	单相桥式整流电路	(220)
8.3	滤波电路	(222)
8.4	串联型稳压电路	(225)
8.5	集成稳压器及其应用	(228)
8.6	开关型稳压电路简介	(232)

本章小结	(235)
复习思考题	(235)
第9章 可编程模拟电子技术设计简介	(239)
9.1 概述	(239)
9.2 在系统可编程模拟电路的结构及原理	(240)
本章小结	(246)
复习思考题答案	(248)

第1章 绪论

由于物理学的重大突破,在20世纪下半叶以微电子技术为标志的现代电子技术取得了惊人的进步,导致自动控制、计算机、通信和全球网络等技术的全面发展。21世纪的世界已进入信息时代,作为信息技术发展基础之一的电子技术必将以更快的速度进步。

电子技术就是采用半导体器件组成的各种电子电路来产生、传输和处理信号的技术。要很好地完成对信号的加工任务,必须对电子器件、电子电路、电子系统的性能进行深入的研究。按照电子电路中流经信号的类型、电路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、基本分析方法和基本应用。

本章首先简要地介绍信号与电子系统的基本概念,然后讨论放大电路的基本概念和放大电路的主要性能指标。

1.1 信号与电子系统

1.1.1 信号及其分类

在社会生活中,人们总要不断地以某种方式发出消息和接收消息,即传递和交换消息。古代,人们用火光、击鼓鸣金等声光方式来传递情报和战斗命令。19世纪后,人类开始使用电信号传送信息,技术飞速发展。在现代通信技术中,我们利用变换设备,把语言、文字、图像等各种不便于直接传输的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。当电信号传送到目的地后,再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信号,即全电视信号,再由天线将这些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来获取电磁波的很小一部分能量并送入电视接收机,接收机的作用与发射机相反,它能将接收到的电磁波转换成高频

电信号进行处理,从而恢复出原来的图像和伴音信号,并分别送入显像管和喇叭,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 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,把电信号转换为景物和声音的装置(如显像管和喇叭等)。

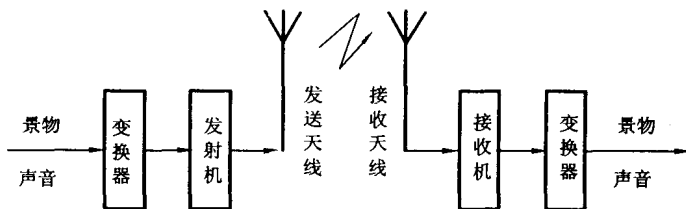


图 1-1 电视收发系统图

综上所述,在电子技术中谈到“信号”时,指的是用于描述和记录图像、声音等信息的电压、电流,即随图像、声音等信息变化的电压或电流,也就是所谓的电信号。

电信号是现代信息的主要载体,它可以用多种方式来描述,如数学表达式、波形图等。我们可以从不同的角度对电信号进行分类:

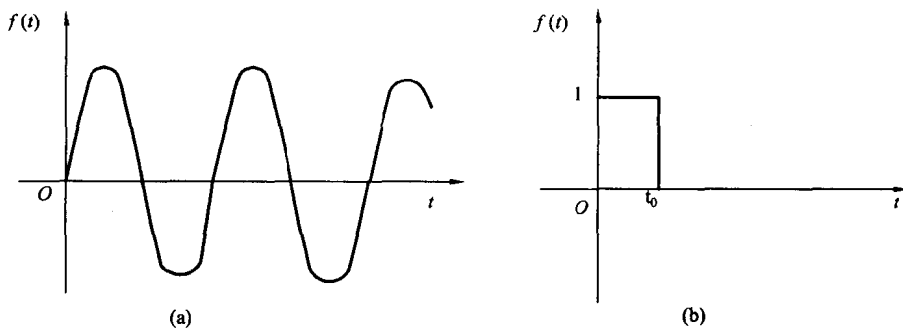


图 1-2 连续时间信号图

1. 确定信号与随机信号

当信号是一确定的时间函数时,给定某一时间值,就可以确定出一相应的函数值,这样的信号就是确定信号或称规则信号。有些信号往往具有不可预知的不确定性,这种信号称随机信号或不确定信号,如各种干扰和噪声信号,这类信号的特点是不可表达为确切的时间函数,只能用统计方法来进行研究。

2. 周期信号与非周期信号

在确定信号中又可分为周期信号和非周期信号。所谓周期信号就是依一定时间间隔无始无终地重复某一变化规律的信号,其表达式为:

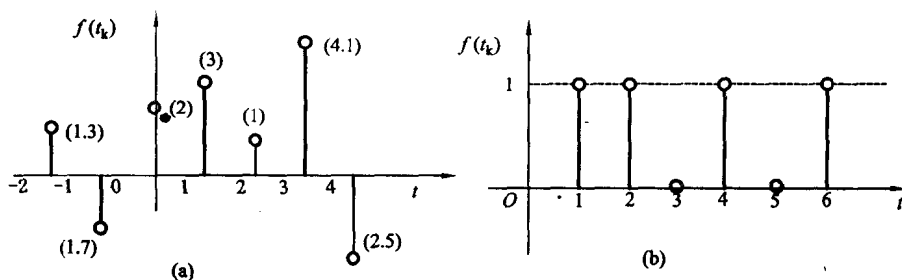


图 1-3 离散时间信号

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-1)$$

其中 T 称为信号的周期。非周期信号在时间上不具有周而复始变化的特性, 它没有周期 T (或认为周期 T 为无穷大)。

3. 连续信号与离散信号

如果在某一时间间隔内, 对于任意时间值 (除若干不连续点外) 都给出确定的函数值, 则此信号就称为连续信号。图 1-2 所示的正弦波和矩形波都是连续信号。其中图 1-2(a) 所示信号的波形的幅值和时间都连续变化, 称为模拟信号。与连续信号相对应的是离散信号。代表离散信号的时间函数, 只在某些不连续的规定瞬间给出函数值, 在其他时间, 函数没有定义。在图 1-3(a) 中函数只在离散的时间点上有定义, 但它的幅值是连续的, 这种信号称采样信号, 它是离散信号的一种形式。如果离散信号的幅值只能取某些规定数值, 如图 1-3(b) 所示, 即时间、幅值都离散, 则成为数字信号。

电信号还有其他分类方式, 在此不多叙述。

模拟语音的音频信号, 模拟图像的视频信号, 模拟温度、压力这些物理量变化的信号都是模拟信号。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, 像电灯的“亮”和“灭”, 工厂产品数量的统计等都是数字信号。传输、产生和处理模拟信号的电路称为模拟电子电路, 如交直流放大电路, 音频信号产生电路等; 产生和处理数字信号的电路称为数字电路, 如各种门电路、触发器、计数器等。

1.1.2 电子系统概述

所谓电子系统是由若干相互关联的单元电子电路组成的, 用来实现信号产生、传输或信号处理的电路整体。由于大规模集成电路和模拟-数字混合集成电路的出现, 在单个芯片上可能集成许多不同类型的电路, 从而自成一个系统。对电子系统设计者而言, 可以从生产厂家给出的产品手册了解到这些单片系统的

内部功能与结构,但更要关心的是芯片的引脚功能和输入输出特性,以便应用芯片组成电子电路和与多个芯片之间的互联,而将芯片内部结构当做黑箱来处理。一个功能完善的复杂电子系统往往由多个电子系统构成。一般来说,电子系统必须与其他物理系统结合,才能构成完整的实用系统。例如,日常用的VCD系统,在光盘上记录声音和图像信号,是通过激光传感系统转化为电信号的,而光盘的同步旋转和激光头的移动则是通过电子系统控制精密机械系统来实现的。电子系统是多种多样的,下面给出几个典型的例子,以使读者对电子系统有大致的了解。

(1)热电偶温度测量系统。图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 u_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差,所以放大器的输出电压要通过线性补偿器加一个小的校正电压进行补偿,以使热电偶电压正比于温差。最后,把信号送往显示器(如指针式仪表或数字仪表)显示出来。

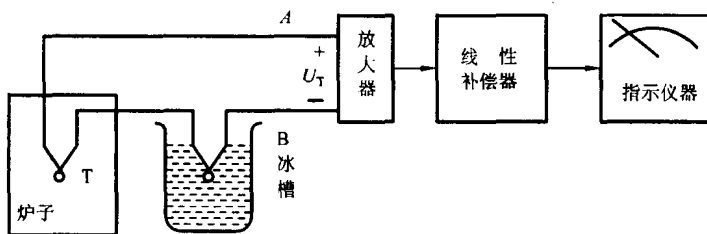


图 1-4 热电偶温度计的方框图

(2)炉温自动控制系统。图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 u_1 表示,热电偶两端的电压 u_T 可近似认为与炉温成正比。当炉温低于希望值时 u_T 小于 u_1 , u_T 与 u_1 比较后产生一偏差电压 $u_D = (u_1 - u_T)$,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。

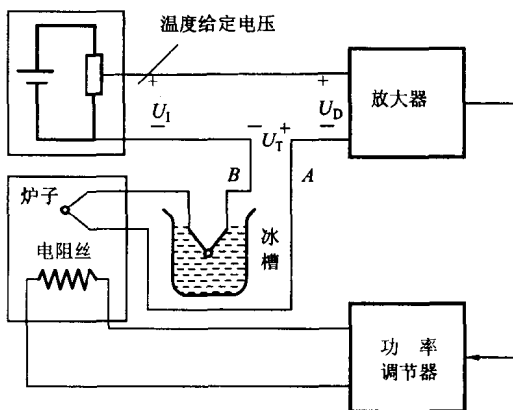


图 1-5 炉温自动控制系统

1.2 放大电路基本知识

1.2.1 模拟信号的放大

通过传感器检测各种物理量,其输出的模拟电信号通常都很微弱,通常只有毫伏级或更小。这种微弱的信号一般不能直接利用,因为很难对它进行进一步的分析处理。因此对电信号的放大就成为模拟电子技术的一种最基本的处理形式,而且许多其他处理电路都是以放大电路为基础的。对于放大电路的设计、应用是本书的重点之一,详情会在后续章节中讨论。

放大电路的一般符号如

图1-6所示, $\dot{V}_s$ 为信号源电压, R_s 为信号源内阻, $\dot{V}_i$ 和 $\dot{I}_i$ 分别为输入电压和输入电流, R_L 为负载电阻, $\dot{V}_o$ 和 $\dot{I}_o$ 分别为输出电压和输出电流。

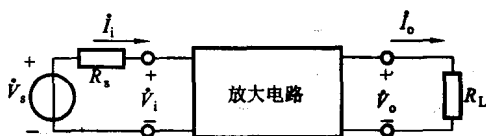


图1-6 放大电路的表示方法

在实际应用中,根据放大电路输入信号的条件和对输出信号的要求,若只需考虑电路的输出电压和输入电压之间的关系,则可表达为:

$$\dot{V}_o = A_v \dot{V}_i \quad (1-2)$$

式中 A_v 为电路的电压增益,这种只考虑电压增益的电路称为电压放大电路。

同样,若只考虑电子电路的输出电流 $\dot{I}_o$ 和输入电流 $\dot{I}_i$ 之间的关系,则可表达为:

$$\dot{I}_o = A_i \dot{I}_i \quad (1-3)$$

式中 A_i 为电流增益,这种电路称为电流放大电路。

当需要将电流信号转换成电压信号时,可使用所谓互阻放大电路,其表达式为:

$$\dot{V}_o = A_R \dot{I}_i \quad (1-4)$$

式中 $\dot{I}_i$ 为放大电路的输入电流, $\dot{V}_o$ 为输出电压, $A_R = \dot{V}_o / \dot{I}_i$ 为互阻增益,其量纲为欧姆,而前叙的电压增益和电流增益都是无量纲的。

有时也需要将电压信号转换成电流输出。输出与输入的关系可表达为:

$$\dot{I}_o = A_G \dot{V}_i \quad (1-5)$$

式中 $\dot{A}_c = \dot{i}_o / \dot{V}_i$ 称为互导增益,它具有导纳的量纲西门子,这种电路也称为互导放大电路。互阻放大和互导放大是对信号放大概念的延伸。

1.2.2 放大电路模型

根据实际的输入信号和所需的输出信号是电压还是电流,放大电路可以分为四种类型,即:电压放大、电流放大、互阻放大和互导放大。为了进一步讨论这四类放大电路的性能指标,可以建立起4种不同的双口网络作为相应类型放大电路的模型,如图1-7所示。这些模型采用一些基本的元件来构成电路,只是为了等效放大电路的输入和输出特性,而忽略各种实际放大电路的内部结构。若将模型与实际电路相联系,其中各元件参数值可以通过对电路和元件在工作状态下的分析来确定,也可以通过对实际电路的测量而得到。

图1-7(a)虚线框内的电路是一般化的电压放大电路模型,它由输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 和受控电压源 $\dot{A}_{vo}\dot{V}_i$ 三个基本元件构成,其中 $\dot{V}_i$ 为输入电压, $\dot{A}_{vo}$ 为输出开路($R_L = \infty$)时的电压增益。图中放大电路模型与信号源 $\dot{V}_s$ 、信号源内阻 R_s

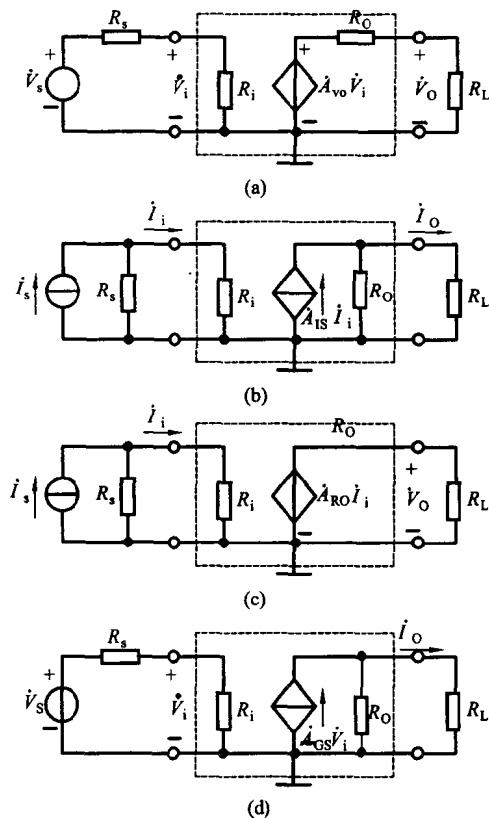


图1-7 四种类型的放大电路模型

以及负载电阻 R_L 的组合,可以在 R_L 两端得到对应 $\dot{V}_s$ 的输出电压 $\dot{V}_o$ 。

从图1-7可以看出,由于 R_o 与 R_L 的分压作用,使负载电阻 R_L 上的电压信号 $\dot{V}_o$ 小于受控电压源信号的幅值,即:

$$\dot{V}_o = \dot{A}_{vo} \dot{V}_i R_L / (R_L + R_o) \quad (1-6)$$

可见,其电压增益:

$$\dot{A}_v = \dot{V}_o / \dot{V}_i = \dot{A}_{vo} R_L / (R_L + R_o) \quad (1-7)$$

$\dot{A}_v$ 的恒定性受到 R_L 变化的影响, 随 R_L 的减小而降低, 这就要求在电路设计时要努力使 $R_o \ll R_L$, 以尽量减小信号的衰减。理想电压放大电路的输出电阻应为 $R_o = 0$ 。

信号衰减的另一个环节在输入回路。信号源内阻 R_s 和放大电路输入电阻 R_i 的分压作用, 致使到达放大电路输入端的实际电压只有:

$$\dot{V}_i = \dot{V}_s R_i / (R_s + R_i) \quad (1-8)$$

显然, 只有当 $R_i \gg R_s$ 时, 才能使 R_s 对信号的衰减作用减小, 这就要求设计电路时, 应尽量设法提高电压放大电路的输入电阻 R_i 。理想电压放大电路的输入电阻应为 $R_i = \infty$, 此时, $\dot{V}_i = \dot{V}_s$, 信号免受衰减。

从上述分析可知, 电压放大电路适用于信号源内阻 R_s 较小且负载电阻 R_L 较大的场合。

图 1-7(b) 的虚线框内是电流放大电路的模型。与电压放大电路模型在形式上不同之处在输出回路, 它是由受控电流源 $\dot{A}_{is} \dot{I}_i$ 和输出电阻 R_o 并联而成, 其中 $\dot{I}_i$ 为输入电流, $\dot{A}_{is}$ 为输出短路 ($R_L = 0$) 时的电流增益。电流放大电路与外电路相联同样存在信号衰减的问题。与电压放大电路相对应, 衰减发生是由于放大电路输出电阻 R_o 和信号源内阻 R_s 分别在电路输出和输入端对信号电流的分流。由图 1-7(b) 可知, 在输出端, R_L 和 R_o 有如下的分流关系:

$$\dot{I}_o = \dot{A}_{is} \dot{I}_i R_o / (R_L + R_o) \quad (1-9)$$

带负载 R_L 时的电流增益为:

$$\dot{A}_i = \dot{I}_o / \dot{I}_i = \dot{A}_{is} R_o / (R_L + R_o) \quad (1-10)$$

在电路输入端, R_s 和 R_i 有如下的分流关系:

$$\dot{I}_i = \dot{I}_s R_s / (R_s + R_i) \quad (1-11)$$

由此可见, 只有当 $R_o \gg R_L$, $R_s \gg R_i$ 时, 才可使电路具有较理想的电流放大效果。

从电路特性可知, 电流放大电路一般适用于信号源内阻 R_s 较大而负载电阻 R_L 较小的场合。

图 1-7(c) 和图 1-7(d) 的虚线框内分别为互阻放大和互导放大电路模型。两电路的输出信号分别由受控电压源 $\dot{A}_{ro} \dot{I}_i$ 和受控电流源 $\dot{A}_{gs} \dot{V}_i$ 产生。在理想状态下, 互阻放大电路要求输入电阻 $R_i = 0$ 且输出电阻 $R_o = 0$, 而互导放大电路则要求输入电阻 $R_i = \infty$, 输出电阻 $R_o = \infty$ 。电路中的 $\dot{A}_{ro}$ 称为输出开路时的互阻增益, $\dot{A}_{gs}$ 称为输出短路时的互导增益。两模型的详细情况读者可自行分析。

根据信号源的戴维宁—诺顿等效变换原理,上述4种电路模型相互之间可以实现任意转换,也就是说一个实际的放大电路原则上可以取四类电路模型中的任意一种作为它的电路模型,但是根据信号源的性质和负载要求,一般只有一种模型在电路设计和分析中概念最明确、运用最方便。例如信号源为低内阻,要求输出电压信号时,选用电压放大电路模型最适宜,其他情况可能选用其他模型最合适。

1.3 放大电路的主要性能指标

放大电路的质量好坏必须用一些性能指标来衡量,这些指标是围绕放大能力和失真等方面的要求提出的。所制定的指标除了能衡量放大电路的优劣之外,还必须便于测量,所以常用正弦信号作为实验和测试信号。

1.3.1 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

放大电路的输入端要接信号源(该信号源可能是前级放大电路),输出端要接负载(该负载可能是下级放大电路的输入阻抗),当放大电路与信号源、负载或其他放大电路连接时,衡量其相互影响的重要参数就是输入电阻和输出电阻。其情形如图1-8所示。

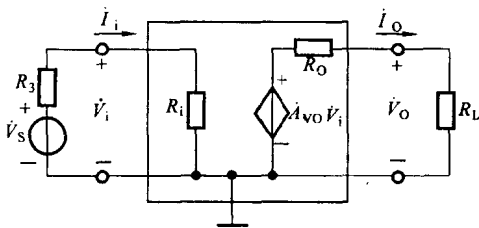


图 1-8 放大电路的输入电阻和输出电阻

(1) 输入电阻 R_i 。在放大电路的输入端加信号电压 $\dot{V}_i$ 时,就会产生一定的信号电流 $\dot{I}_i$,因而放大电路的输入端呈现出阻抗特性,其等效阻抗就是放大电路的输入阻抗。当信号频率不高不低时,输入电流与输入电压基本相同,可以用输入电阻表示,即:

$$R_i = \dot{V}_i / \dot{I}_i \quad (1-12)$$

由图1-8可见, R_i 越大,放大电路从信号源中汲取的电流越小,放大电路输入端所得信号电压 $\dot{V}_i$ 就越接近信号源电压 $\dot{V}_s$,即:

$$\dot{V}_i = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \dot{V}_s \quad (1-13)$$

所以输入电阻 R_i 是衡量放大电路对信号源影响程度的参数。

(2) 输出电阻。放大电路的输出端可等效为一个非理想的电压源,如图1-8所示。放大后的信号电压输出给负载,对负载 R_L 而言,放大电路可视为信号源,其电压 $\dot{V}_o$ 成为负载 R_L 开路用(即 $i_o = 0$)时的输出电压。实验表明,放大电路接上负载 R_L 的输出电压 $\dot{V}_o$ 要比空载(负载 R_L 开路)的输出电压 $\dot{V}_o$ 小。因此,从放大电路输出端看进去有一等效内阻用放大电路的输出电阻 R_o 。由图1-8有:

$$\dot{V}_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot \dot{A}_{vo} \dot{V}_i \quad (1-14)$$

可见, R_o 越小,放大电路带负载前后的输出电压相差就越小,即放大电路受负载影响的程度就越小。因此,输出电阻 R_o 是衡量放大电路带负载能力的参数。理想电压放大电路的输出电阻 $R_o = 0$ 。

输出电阻 R_o 既可用实验方法测出,也可通过理论分析求出。如图1-9所示,在负载 R_L 开路及将信号源 $\dot{V}_s$ 短路(保留信号源内阻 R_s)下,若在放大电路的输出端外加一正弦

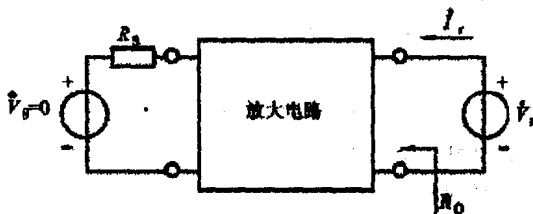


图 1-9 放大电路输出电阻求取电路

测试电压 $\dot{V}_T$, 在输出回路将产生相应的正弦电流 $\dot{I}_T$:

$$R_o = \left. \frac{\dot{V}_T}{\dot{I}_T} \right|_{R_L = \infty, V_s = 0} \quad (1-15)$$

1.3.2 增益

增益又称为放大倍数,是衡量放大电路放大能力的参数。对于图1-8所示放大电路,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,可用前述4种不同的增益表示。

(1) 电压增益 $\dot{A}_v$ 。它表示输出电压变化量 $\dot{V}_o$ 与输入电压变化量 $\dot{V}_i$ 之比,即:

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \quad (1-16)$$

(2) 电流增益 $\dot{A}_i$ 。它表示输出电流变化量 $\dot{i}_o$ 与输入电流变化量 $\dot{i}_i$ 之比,即: