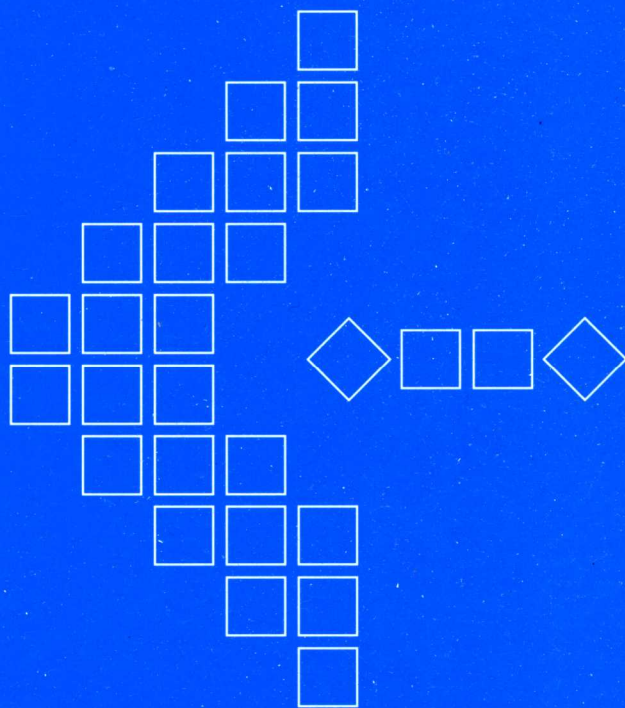


可编程逻辑器原理 与程序设计



王志鹏 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

可编程逻辑器原理与 程序设计

王志鹏 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

可编程逻辑器原理与程序设计 / 王志鹏编著. —北京:
国防工业出版社, 2005.1

ISBN 7-118-03672-2

I. 可... II. 王... III. 可编程序逻辑器件—基本
知识 IV. TP332.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 108625 号

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 21½ 531 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

20 世纪 90 年代是可编程逻辑器件和 EDA 技术发展最快的时期。随着深亚微米半导体制造技术的进步,可编程逻辑器件向着高密度、高速度、低价格方向迅速发展,计算机技术的普及也加速了电子设计自动化技术的进程。各半导体制造商以及第三方软件商近些年推出了各种版本的 EDA 开发系统。这些 EDA 开发系统的自动化和智能化程度也日臻完善,在过去被认为是梦想的事情,如软件实现硬件化、硬件设计软件化、用户自制大规模和超大规模集成电路等,而今都变成了现实。

数字系统和数字电路设备已广泛应用于各个社会领域,它使各种仪器设备获得众多的功能,满足智能化的要求。因此电子技术领域的工程师和技术员必须掌握数字电子系统的基础知识。

目前,大规模和超大规模的可编程逻辑器件得到了越来越广泛的实际应用。对它们的设计采用的是计算机辅助设计技术,使电子系统的研制时间大大缩短,特别是系统可编程逻辑器件,可以在不改变硬件设置的情况下,在现场对系统进行组态,并可实现电子系统的遥控升级。

集成电路技术和计算机辅助技术的迅猛发展改变了电子系统的传统设计方法,它使电子设计自动化(EDA)和电子系统设计自动化(ESDA)成为现代电子系统设计和制造中的主要技术手段,使电子系统的设计从传统的单纯硬件设计方法变成为计算机软硬件协同设计的方法,由此可设计制造出实现各种功能的专用集成电路(ASIC)。

随着电子技术的发展,芯片的复杂程度越来越高,人们对数万门乃至数百万门的电路设计的要求也越来越多。仅仅依靠原理图输入方式已经不能满足设计人员的要求,采用硬件描述语言 HDL 的设计方式就应运而生。设计工作从行为、功能级开始,并向着设计的高层次发展。这样,就出现了第三代 EDA 技术,其特点就是高层次设计的自动化(HLDA, High Level Design Automation)。

第三代 EDA 系统中除了引入硬件描述语言——VHDL 语言,还引入了行为综合和逻辑综合工具。采用较高的抽象层次进行设计,并按层次方法进行管理,这样就能大大提高处理复杂设计的能力,缩短设计周期。综合优化工具的采用使芯片的品质获得了优化,因此第三代 EDA 系统得到了迅速的推广。

本书假定读者都已经了解数字硬件设计的基本知识,并熟悉如 C 语言等高级编程语言。对 VHDL 有初步了解的读者,阅读本书之后将会产生较好的效果。读者在阅读本书的某些章节时,必须事先分别对 80C51 单片机、ATA(ATAPI)总线操作和 PCI 总线操作有充分的了解。

本书是 VHDL 用于数字电路设计的中高级读本,实用性强是本书的一个鲜明特色。书中通过大量实例介绍了该语言的基本内容和结构以及利用该语言在各种层次上对数字系统的建模方法,而且它对实际数字系统设计也极有帮助。

可编程逻辑器件及 EDA 技术的学习和应用在国外已经相当普及。但与国外相比,我国尚有较大差距。为了适应电子系统设计技术的发展,培养电子科技人才,本书对原数字逻辑电路

方面的内容做了较大改变,除了讲述必要的数字逻辑设计原理的基础知识外,对小规模电路的内容作了精简,加强了中大规模组件方面的内容,特别是对系统可编程逻辑器件的编程及使用做了较详细的介绍,使读者能掌握具体技术。

书中通过大量的实例介绍了该语言的基本内容和结构,这些实例不仅对读者掌握语言本身和建模方法有很大的帮助,而且对实际数字系统设计也有帮助。

希望此书的出版对推动我国集成电路设计水平的提高有所促进,对高等学校的教学和课程改革有所帮助。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误和不足,敬请广大读者予以批评指正。

编者
2005.1

目 录

第一章 电路信号与晶体管	1
1.1 模拟电路系统	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 信号及其频谱	1
1.1.3 模拟信号和数字信号	1
1.2 放大电路的基本知识	3
1.2.1 模拟信号放大	3
1.2.2 放大电路模型	5
1.2.3 放大电路的主要性能指标	8
1.3 数字逻辑电路	10
1.3.1 概述	10
1.3.2 数字电路的特点	11
1.3.3 数字电路的基本逻辑关系	12
1.3.4 数字电路与逻辑设计的基本方法	12
1.4 数字信号和数字电路	13
1.5 半导体及晶体管	14
1.5.1 半导体	14
1.5.2 本征半导体	15
1.5.3 杂质半导体	17
1.5.4 PN 结	18
1.6 晶体二极管	20
1.6.1 二极管的伏安特性曲线分析	20
1.6.2 晶体三极管	25
1.6.3 晶体管共发射极的特性曲线及主要参数	27
1.7 场效应管晶体管	31
1.7.1 场效应管特点	31
1.7.2 结型场效应管	32
1.7.3 绝缘栅场效应管	37
第二章 放大器与放大电路	43
2.1 放大器的基本概念	43
2.1.1 放大器的用途和分类	43
2.1.2 放大器主要性能指标	43
2.2 基本放大器	46

2.2.1	基本放大器电路组成和工作原理	46
2.2.2	放大器的两种工作状态	47
2.2.3	放大器的直流通路和交流通路	47
2.3	放大器的三种组态	48
2.3.1	共基极电路	48
2.3.2	共集电极电路(射极输出器)	49
2.4	集成运算放大器	51
2.4.1	集成运放的发展史	51
2.4.2	集成电路的特点	52
2.4.3	组成方框图	52
2.4.4	工作原理	53
2.5	集成运放的主要参数	55
2.5.1	输入直流参数	55
2.5.2	差模特性参数	57
2.5.3	共模特性参数	57
2.5.4	其他参数	58
2.6	理想运放及三种基本输入方式	58
2.6.1	理想运放模型	58
2.6.2	理想运放工作在线性区时的结论	58
2.6.3	理想运放工作在非线性区时的结论	59
2.7	反馈的基本概念与分类	60
2.7.1	反馈的定义	60
2.7.2	反馈的分类	61
2.7.3	反馈放大电路方框图	64
2.7.4	负反馈的四种组态	66
2.8	负反馈电路的改善	71
2.8.1	提高稳定性	71
2.8.2	减小非线性失真	72
2.8.3	频带扩展	73
2.8.4	负反馈的影响	74
第三章	电子系统概述及可编程逻辑器件	77
3.1	概述	77
3.1.1	电子系统	77
3.1.2	有代表性的电子系统	77
3.1.3	电子系统的设计	79
3.1.4	电子系统设计的一般步骤	81
3.1.5	设计文档的作用	82
3.2	数字电路中的逻辑器件	83
3.2.1	PLD 概述	84
3.2.2	基本门电路的 PLD 表示方式	85

3.2.3	PLD 电路表示法	86
3.3	可编程阵列逻辑器件	87
3.3.1	现场可编程逻辑阵列器件	87
3.3.2	PAL 器件的基本结构	89
3.3.3	PAL 器件的输出和反馈结构	89
3.3.4	PAL 器件编号与典型 PAL 器件介绍	95
3.3.5	PAL 器件的应用	96
3.4	通用逻辑阵列器件	98
3.4.1	GAL 器件的基本类型	98
3.4.2	PAL 型 GAL 器件	98
3.5	片上系统(SOC)的设计流程	105
3.6	电子设备热设计	107
3.6.1	功率器件的散热	107
3.6.2	可靠性设计	108
第四章	微型计算机应用系统设计	110
4.1	微型计算机的系统板组成	111
4.2	PC/AT 总线与时序	112
4.2.1	总线周期	112
4.2.2	PC/AT 总线结构	113
4.3	系统存储器空间和 I/O 地址分配	114
4.3.1	存储器空间分配	114
4.3.2	I/O 地址分配	115
4.4	PC/AT 系统的 I/O 通道	116
4.5	系统接口部件	117
4.5.1	并行 I/O 接口	117
4.5.2	定时/计数器 8254	118
4.5.3	中断控制	118
4.6	外部设备接口	121
4.6.1	键盘接口	121
4.6.2	视频显示接口	123
4.6.3	打印机并行接口	124
4.6.4	磁盘驱动器接口	125
4.6.5	异步串行通信接口	127
第五章	智能型电子系统的设计	129
5.1	概述	129
5.1.1	智能型电子系统的描述	129
5.1.2	典型微型计算机应用系统的组成与分类	131
5.1.3	微型计算机系统组成和接口扩展部分	133
5.1.4	微型计算机应用系统设计内容	135
5.1.5	微型计算机实用器件与电路介绍	136

5.2 智能型电子系统设计方法与过程	138
5.2.1 系统设计方法	139
5.2.2 微机应用系统硬件设计与调试原则	142
5.2.3 微机应用系统软件开发	144
5.3 单片机应用系统设计	153
5.3.1 单片机基本系统设计	153
5.3.2 单片机系统扩展	156
5.3.3 应用系统通道设计	163
第六章 硬件描述语言	177
6.1 硬件描述语言 HDL	177
6.2 硬件描述语言的优点	178
6.3 VHDL 语言程序的结构	178
6.3.1 VHDL 语言程序设计的基本单元	178
6.3.2 VHDL 语言程序设计的基本构成	184
6.3.3 VHDL 语言程序的数据对象	187
6.3.4 VHDL 数据类型	189
6.3.5 VHDL 语言的运算操作符	193
6.3.6 VHDL 语言构造体的描述方式	194
6.3.7 VHDL 语言的主要描述语句	196
6.3.8 基本电路设计实例	204
6.4 ABEL 硬件描述语言	233
6.4.1 用户源文件的基本结构	234
6.4.2 模块开头语句	235
6.4.3 标志语句	235
6.4.4 标题语句	235
6.4.5 声明语句	235
6.4.6 逻辑描述语句	239
6.4.7 测试矢量语句	243
6.4.8 结束语句	244
6.5 ABEL 语言的语法规则	244
6.5.1 字符和数	244
6.5.2 字符和数的使用语法规则	245
6.5.3 运算符、表达式与方程式	245
6.5.4 输出使能控制语句	251
6.6 ABEL 语言处理程序简介	252
6.7 编写测试矢量技巧	254
第七章 MAX + plus II 简介	256
7.1 MAX + plus II 系统简介	256
7.2 MAX + plus II 设计入门	258
7.2.1 设计输入	258

7.2.2	编译设计项目	267
7.2.3	设计校验	272
7.2.4	器件编程	281
7.3	MAX + plus II 系统设计技巧	282
7.3.1	创建元件符号	282
7.3.2	元件库使用	285
7.3.3	宏向导	286
第八章	VHDL 程序举例	289
8.1	时序逻辑电路	289
8.1.1	用状态机实现的计数器	289
8.1.2	模 16 计数器(使用 JK)	290
8.1.3	带 load,clr 功能的寄存器	292
8.1.4	8 位大小比较器	294
8.1.5	地址译码器	295
8.2	其他举例	296
8.2.1	电子密码锁控制电路	296
8.2.2	数字钟设计	302
8.2.3	一个简单的 UART	317
8.2.4	布斯乘法器	325
8.2.5	伪随机比特发生器	328
8.2.6	步进电机控制器	329

第一章 电路信号与晶体管

1.1 模拟电路系统

1.1.1 系统

系统在字典上定义为“由不同单元（人为地或自然地）组合成的一个整体，能够协调一致地按照某种控制方式去运转、操作或行动”。此定义也可用于电子系统，其最一般的形式为：由一组元件（通常是电子元件）连成一个整体，能够按特定的控制信号去执行所设想的功能。例如：从单级放大器到复杂的计算机都是一个电子系统。作为电子系统的设计者来说，他们所关心的是系统的功能和输入输出特性，即外特性；而对于系统内部的功能与结构（通常所说的黑匣子）只做一些粗略的了解。一个比较复杂而完善的电子系统往往是由多个子系统所构成，它可能是两级或多级的，前面所提的黑匣子是基层的集成电路系统。

在许多情况下，电子系统必须与其他系统相结合，才能构成完整的实用系统，例如我们熟悉的 VCD 系统，在光盘上记录的声音和图像信号，是通过光传感系统转化为电信号的，而光盘的同步旋转和激光探头的移动则是通过电子系统控制的精密机械系统实现的。

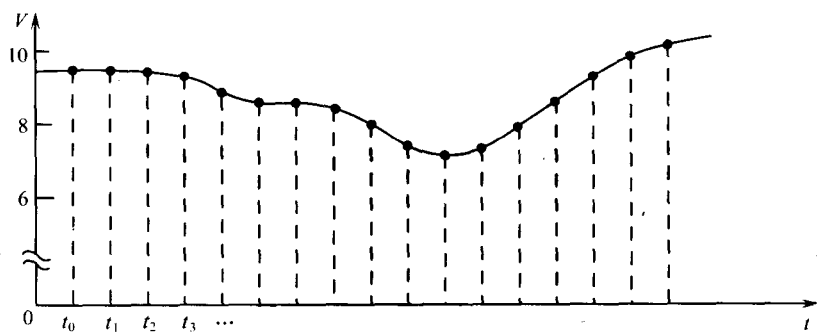
1.1.2 信号及其频谱

信号是信息的载体，如声音信号可传达语言、音乐或其他信息，图像信号可以传达人类视觉范围内所能接受的图像信息。实际物理世界的各种非周期信号，随角频率上升到一定程度，其频谱函数总趋势是衰减的。当选择适当的 ω_c （截止角频率）点把频率高端截断时，它只不过影响的是信号的特性。我们通常把保留的部分称为信号的带宽。

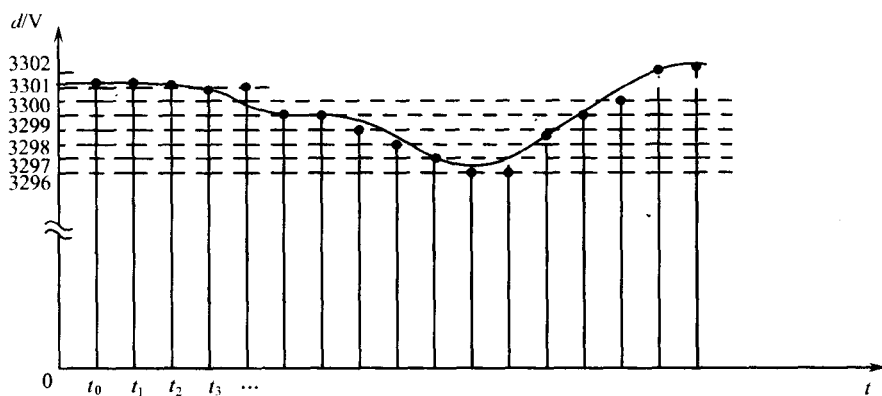
确定一个任意非周期信号的频谱在计算机普及应用之前并非易事。自从快速傅里叶变换（FFT）算法出现后，人们可以用计算机将非周期时间函数信号的频谱函数迅速求出。在 PSPICE 程序中就包含有 FFT 软件，供读者分析信号和电路频谱特性。在某些现代电子设备中，甚至把 FFT 软件装入其中，可在程序控制下向实际电路输入端注入已知波形的非周期信号，如矩形单脉冲，然后通过比较电路输出端和输入端的频谱函数，直接计算出电路的频率响应特性。这种快速测试电路频率响应的方法经常用于电子装置的自动生产线上，也可以安装在所谓智能仪器中，用于对仪器本身的自校正和故障诊断。

1.1.3 模拟信号和数字信号

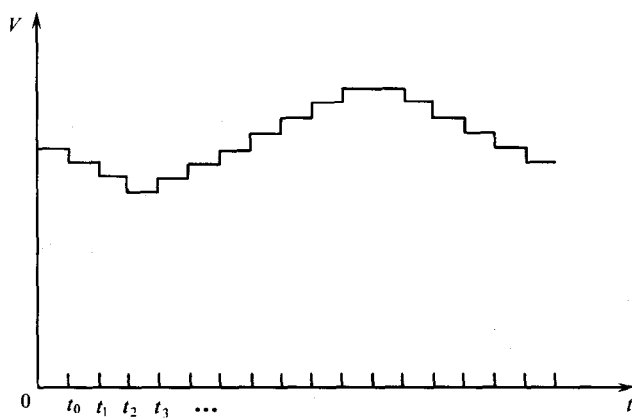
模拟信号的特点是，在时间和幅值上均是连续的，在一定动态范围内可能取任意值。



(a)



(b)



(c)

图 1-1 取样信号示意图

(a)时间离散、数值连续信号(取样信号); (b)时间离散、数值离散信号(模数转换器输出信号);

(c)时间连续、数值离散信号(数模转换器输出信号)。

压仅有毫伏量级，而细胞电生理实验所检测到的细胞膜离子单通道电流甚至只有皮安（ pA ， 10^{-12}A ）量级。对这些能量过于微弱的信号，既无法直接显示，一般也很难作进一步分析处理。通常必须把它们放大到数百毫伏量级，才能用数字式仪表或传统的指针式仪表显示出来。若对信号进行数字化处理，则须把信号放大到数伏量级才能被一般的模数转换器所接受。某些电子系统需要输出较大的功率，如家用音响系统往往需要把声频信号功率提高到数瓦或数十瓦。针对不同的应用，需要设计不同的放大电路，其细节将在本书后续各章中讨论，这里作为引导，只对有关放大电路的基本概念作简要的介绍。

放大电路的一般符号如图 1-3 所示， V_S 为信号源电压， R_S 为信号源内阻， V_i 和 I_i 分别为输入电压和输入电流， R_L 为负载电阻， V_o 和 I_o 分别为输出电压和输出电流。

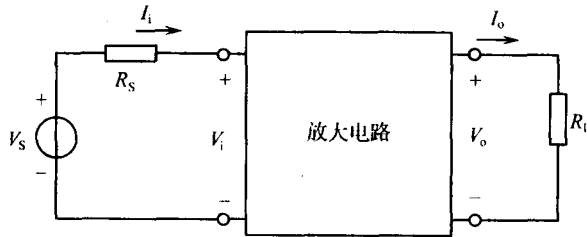


图 1-3 放大电路的一般符号

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，如果只需考虑电路的输出电压 V_o 和输入电压 V_i 的关系，则可表达为

$$V_o = A_v V_i$$

公式中 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。图 1-2 中对高温计输出电压信号的放大，就是使用了这种放大电路。

同样，若只考虑图 1-3 中放大电路的输出电流 I_o 和输入电流 I_i 的关系，则可表达为

$$I_o = A_i I_i$$

公式中 A_i 为电流增益，这种电路称为电流放大电路。当需要把电流信号转换为电压信号，如前述细胞电生理技术中，需要检测细胞膜离子通道的微弱电流时，则可利用所谓互阻放大电路，其表达式为

$$V_o = A_R I_i$$

公式中 I_i 为放大电路的输入电流， V_o 为输出电压， $A_R = V_o / I_i$ 为互阻增益，其量纲为 Ω ，这里把信号放大的概念延伸了，与前述无量纲的电压增益和电流增益不同。

与前述相反，有时要求把电压信号转换为与之相应变化的电流输出。例如图 1-2 中数模转换所输出的石英预制棒加热炉温度控制信号是电压信号，必须使用电压 / 电流转换电路将此电压信号转换为随之变化的强大电流，才能驱动炉中一个电阻值仅有 $1\text{m}\Omega$ 左右的石墨加热电极，转换电路输出电流达数千安，输出功率达数十千瓦之巨。该转换电路中输入信号取 V_i ，输出信号取 I_o ，输出对输入信号的关系可表达为

$$I_o = A_G V_i$$

公式中 $A_G = I_o / V_i$ 称为放大电路的互导增益，它具有导纳的量纲 S 。相应地，这种放大电路得名为互导放大电路。

1.2.2 放大电路模型

如上所述, 根据实际的输入信号和所需的输出信号是电压或者电流, 放大电路可分为四种类型, 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 4 种放大电路的性能指标, 可以建立起四种不同的双口网络作为相应类型放大电路模型, 如图 1-4~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器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 1-4 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 $A_{vo}V_i$ 三个基本元件构成, 其中 V_i 为输入电压, A_{vo} 为输出开路 ($R_L=\infty$) 时的电压增益。所谓受控电压源是一种非独立的电压信号源, 它的输出受另一信号控制, 在本例中则受 V_i 信号的控制, 并随 V_i 线性变化如 $A_{vo}V_i$ 。图中放大电路模型与电压信号源 V_s 、信号源内阻 R_s 以及负载电阻 R_L 的组合, 可在 R_L 两端得到对应于 V_s 的输出信号 V_o 。

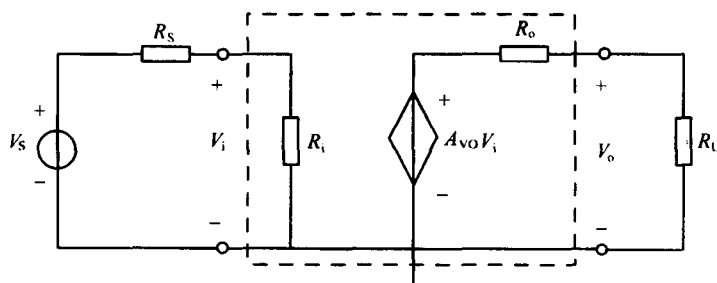


图 1-4 一般化的电压放大电路模型

从图 1-4 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 V_o 小于受控电压源的信号幅值, 即

$$V_o = A_{vo}V_i \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

可见, 其电压增益为

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

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努力使 $R_o \ll R_L$, 以尽量减少信号的衰减。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电路, 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

$$V_i = V_s \frac{R_i}{R_s + R_i}$$

显然, 只有当 $R_i \gg R_s$ 时, 才能使 R_s 对信号的衰减作用大为减小。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, $V_i = V_s$, 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 放大的场合。

图 1-5 的虚线框内是电流放大电路模型。

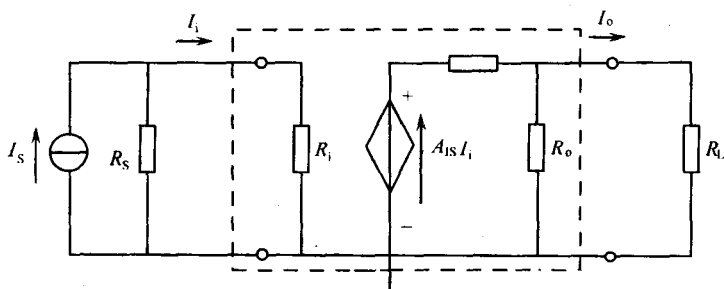


图 1-5 电流放大电路模型

与电压放大电路模型在形式上不同之处在于输出回路, 它是由受控电流源 $A_{IS}I_i$ 和输出电阻 R_o 并联而成。其中 I_i 为输入电流, A_{IS} 为输出短路 ($R_L=0$) 时的电流增益。受控电流源是另一种受控信号源, 本例中控制信号是输入电流 I_i , 电流放大电路与外电路相连同样存在信号衰减问题。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 1-5 可知, 在输出端, R_L 和 R_o 有如下的分流关系:

$$I_o = A_{IS}I_i \frac{R_o}{R_L + R_o}$$

带负载 R_L 时的电流增益为:

$$A_I = \frac{I_o}{I_i} = A_{IS} \frac{R_o}{R_L + R_o}$$

在电路输入端, R_s 和 R_i 有如下的分流关系:

$$I_i = I_s \frac{R_s}{R_s + R_i}$$

由此可见, 只有当 $R_o \ll R_L$ 和 $R_i \ll R_s$ 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 1-6 和图 1-7 的虚线框内分别为互阻放大和互导放大电路模型。

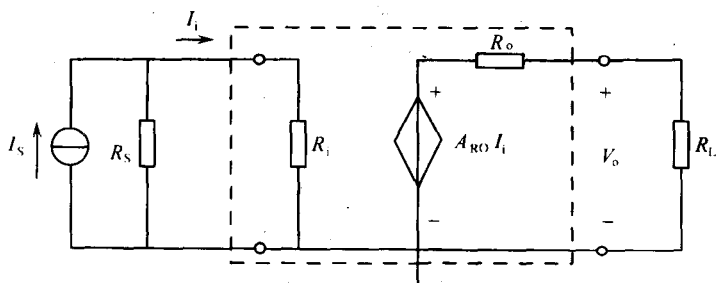


图 1-6 互阻放大电路模型

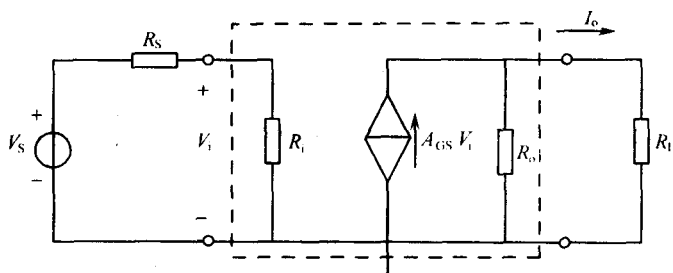


图 1-7 互导放大电路模型

两电路的输出信号分别由受控电压源 $A_{RO}I_i$ 和受控电流源 $A_{GS}V_i$ 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 A_{RO} 称为输出开路时的互阻增益， 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，上述四种电路模型相互之间可以实现任意转换。例如图 1-4 电压放大电路模型的开路输出电压为 $A_{VO}V_i$ ，而根据电流放大电路模型可得开路输出电压为 $A_{IS}I_i$ 且 $I_i=V_i/R_i$ ，令两电路等效，于是有如下公式：

$$A_{VO}V_i = A_{IS} \frac{V_i}{R_i} R_o$$

即可得 $A_{VO}=A_{IS}R_o/R_i$ ，同理可得 $A_{VO}=A_{RO}/R_i$ 和 $A_{VO}=A_{GS}R_o$ 两式。这样其他 3 种电路模型都可转换为电压放大电路模型，同理可实现其他放大电路模型之间的转换。换言之，一个实际的放大电路原则上可以取 4 种电路模型中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的要求，一般只有其中一种模型在电路设计成分析中概念最明确，运用最方便。例如，信号源为低内阻的电压源，要求输出为电压信号时，以选用电压放大电路模型为宜。而在某种场合上需要将来自高阻抗传感器的电流信号变换为电压信号时，则可以采用互阻放大电路模型较合适。

从图 1-4 到图 1-7 中所有电路模型的下部，输入回路和输出回路之间都有一根连线，并标以“1”符号，这是作为电路输入与输出信号的共同端点或参考电位点。这个参考点对于分析电子电路是必要的，而且是很方便的。

然而，当前有许多工业控制设备及医疗设备，为了提高安全性和抗干扰能力，在前级信号预放大中，普遍采用所谓的隔离放大，即放大电路的输入与输出电路（包括供电电源）相互绝缘，输入与输出信号之间不存在任何公共参考点。这种类型的电压放大电路模型如图 1-8 所示。

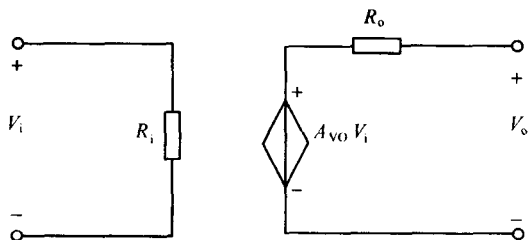


图 1-8 隔离型放大电路模型

输入和输出之间有无公共参考点对所有内容的讨论没有影响。