



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



模拟电子电路及技术基础

(第二版)

孙肖子 主编

孙肖子 张企民

编著

赵建勋 朱天桥 顾伟舟



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

模拟电子电路及技术基础

(第二版)

孙肖子 主编

孙肖子 张企民

赵建勋 朱天桥 顾伟舟 编著

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书分两篇,共11章。第一篇(一~三章)以系统应用为出发点,介绍放大器模型及其主要指标、负反馈概念;集成运算放大器在线性运算及变换领域的应用,有源滤波器以及运放的非理想特性对实际应用的限制;电压比较器、弛张振荡器以及模拟开关。第二篇(四~十一章)侧重介绍器件和电路原理,包括半导体器件、基本放大器、集成电路原理、频率响应、反馈、功率放大器、直流稳压电源、模拟集成电路设计新技术等。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程、生物医学工程、测控工程及仪器、自动化、电气工程、电子科学与技术、微电子等有关专业本、专科生“电子线路基础”或“电子技术基础”课程的教材和教学参考书,也可作为广大工程技术人员的参考书。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路及技术基础/孙肖子主编. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5606-1971-2

I. 模... II. 孙... III. 模拟电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第000802号

策 划 云立实

责任编辑 王 瑛 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2001年1月第1版 2008年1月第2版 2008年1月第11次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张25

字 数 593千字

印 数 56 001~60 000册

定 价 35.00元

ISBN 978-7-5606-1971-2/TN·0404

XDUP 2263002-11

如有印装问题可调换

本书图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

第一版前言

教材改革是教育改革的重要内容，重编电工电子系列课程教材要为实现下述目标而付出不懈的努力：

从电子信息学科发展的态势出发，适应“学科突出集成”和“学科互相渗透”的大趋势，突出“发展学术优势”和“强化工程实践”两条主线，站在知识、能力和素质三维空间中构建电工电子系列课程体系和优化教学内容，增强学生的自主学习、创新意识和工程实践能力。

“模拟电子技术基础”是一门重要的电子信息类专业技术基础平台课程，虽然数字化是当今技术转移的重点，但基本器件和基本电路仍是电子技术的基础，它们在电子设备中也具有不可替代的作用。

模拟集成电路的设计在近年来有了长足的进步。计算机仿真工具和模型库的不断完善，模拟电路硬件描述语言的出现，为模拟电路的自动化设计开辟了新的道路。作者在编写本书时作了如下考虑：基础更扎实些，思路更开阔些，分析方法更简洁些、先进些，设计性和综合性更加强些，启发性和创新性更突出些。与作者过去所编的教材相比较，本书有如下不同点：

- 器件与电路的结合更为紧密。
- 将集成运算放大器电路的内容提前，便于后续各章更多地涉及集成电路的内容，以加强集成电路在全书中的比重。
- 引入了计算机仿真与虚拟实验。
- 强调晶体管和场效应管特性最本质的表述——电流方程，突出跨导 g_m 的概念，并将晶体管和场效应管放大器参数表达式统一起来。
- 在“频率响应”一章中，着重加强频率失真和频率响应的概念，减少了波特图画法的内容和一些繁杂的计算和公式，扩展了改善频率响应的思路和方法。
- 在“反馈”一章中，将深反馈条件下分立元件和集成电路的分析方法统一起来。
- 在“模拟集成电路系统”一章中扩展了“有源滤波器”的内容，因为作者认为滤波器是最重要的一类模拟电路。将非理想运放带来的误差分析放到附录中供学生参考，而专门增加了“集成运算放大器选择指南”一节，从工程实际出发，引导学生正确选择和使用集成运算放大器芯片。
- 在“现代模拟集成电路技术”一章中，简要介绍了电流模法、开关电流电路、电流反馈式运放、跨导放大器和模拟可编程器件及开发软件平台等内容，以进一步拓宽学生的视野和想象力。
- 在“功率电路及系统”一章中，加强了开关稳压电源和能隙基准的原理和特点。
- 在附录中，介绍了集成电路工艺、波特图和非理想运放误差分析等内容。

本书是西安电子科技大学国家工科基础课程电工电子教学基地规划教材之一，作者以极大的热情编写了该书，期望能够为电子技术和线路课程教学内容的改革注入新意和活力。

本书第一、二、四章以及全部附录由张企民老师编写，第三、五、六、七、八、九章由孙肖子老师编写；江晓安教授审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见；西安电子科技大学出版社云立实编辑担任本书的责任编辑，为本书的出版付出了许多努力。在此，对江晓安教授、云立实编辑以及所有帮助过我们的同志表示深深的敬意和感激。

由于时间和水平所限，本书仍存在许多问题和遗憾之处，望尊敬的老师、同学和广大读者批评指正。

编 者

2000年10月于西安

第二版前言

“模拟电子电路及技术基础”课程是电子、电气、信息工程类专业的主干课程，是最重要的学科技术基础课之一。该课程的实施宗旨是“打好基础，学以致用”。所谓“打好基础”，是指“模拟电子电路及技术基础”课程要为后续课程(如“通信电子线路”、“数字电路”等)做好准备；所谓“学以致用”，是指众多的电子器件和电路，特别是集成电路要“直面应用”，即直接为工程应用服务。

经过多年的教学改革，“模拟电子电路及技术基础”课程有了不少进步，但目前仍存在许多问题，主要是学生普遍感到“困难”，新概念、新方法难以建立，内容多，影响学习兴趣和创新意识以及工程实践能力的培养。

究其原因之一是与“电路分析基础”课程的衔接出现了问题。“电路分析基础”课程重模型、重拓扑结构、重线性分析，而“模拟电子电路及技术基础”课程引进了实际的非线性器件，其电流方向、电源电压、元件取值、电路结构都有颇多的限制和实际讲究，再加上工程估算法，对于习惯于严格数学运算的学生来说摸不到头绪，很难适应。“模拟电子电路及技术基础”课程一开始，就呈现给学生太多的“微观”、太多的“细节”，以“阻容耦合放大器”为主要分析对象又将重点紧固在分立元件电路上，人们一直在强调“削弱分立，加强集成”，而实际上真正学到集成运算放大器应用时，课程也接近尾声，学生要想深入研究集成电路应用已失去许多宝贵的时间，而加强“集成”也仅仅是成为一种“愿望”而已。

针对以上问题，我们的改革方案是“先集成，后分立”，“先宏观，后微观”，“先外部，后内部”。从系统应用入手，与“电路分析基础”课程接口，让学生首先掌握集成电路的外部特性及其应用，然后再带着问题去追究集成电路内部元器件及电路的实现原理。

依据改革新方案，我们在原《模拟电子技术基础》一书(西安电子科技大学出版社，2001年1月第1版)的基础上，设计和规划了新教材的构架。新教材分两篇，共11章。第一篇(一~三章)为“模拟集成电路系统——应用基础篇”，主要介绍电子系统的基本框图及若干模拟信号处理系统实例，以“受控源”为基础的放大器模型及重要性能指标，负反馈概念；集成运算放大器的传输特性及理想模型，集成运放在线性运算、变换和有源滤波中的应用；电压比较器和弛张振荡器、模拟开关等。

实验课积极配合，也实行“先集成，后分立”的原则，让学生首先掌握模拟集成电路的应用，以及综合、设计、测试的方法和技能。

在掌握集成电路应用的基础上，带着问题学习第二篇。第二篇(四~十一章)为“半导体器件及集成电路——原理基础篇”，着重介绍半导体器件原理、基本放大器原理、集成电路组成原理、频率响应、反馈、功率放大器、稳压电源以及模拟集成电路设计新技术等。通过第二篇的教学，可为创造性地应用集成电路提供更加宽厚的理论基础。

对“模拟电子电路及技术基础”课程的这种设计，会真正地将重点移到集成电路上来，对集成电路内部及基础性知识不仅不会削弱，而且会有所加强。

在国内，将该课程和教材分为“电子技术”和“电子线路”，实际上区别不大。本书将二者合一，对于有些专业，第一篇、第二篇都可作为重点；对于另一些专业，第一篇是重点，第二篇可选择部分内容教学；而对于设有“高频电子线路”课程的学校，有关“模拟乘法器”和“正弦波振荡器”的内容可略去。

孙肖子提出《模拟电子电路及技术基础》教材及该课程的改革方案，负责总策划，提出各章的修订意见，并编写了第一、二、三、十一章；张企民编写了第五、六章及附录 A；赵建勋编写了第四章；朱天桥编写了第七、八章；顾伟舟编写了第九、十章。孙肖子负责全书统稿和修改工作。江晓安教授在百忙中审阅了本书，并提出许多宝贵意见。云立实副编审担任本书的策划编辑，为本书出版付出了努力。在此，向所有帮助过我们的同志表示深深的敬意和感谢。

由于时间和水平所限，书中仍存在许多不足之处，望尊敬的老师、同学和广大读者批评指正。

作者

2007年11月16日于西安

目 录

第一篇 模拟集成电路系统——应用基础篇

第一章 绪论	3
1.1 模拟信号和数字信号	3
1.2 电子系统及信号处理	4
1.3 分析与综合(设计)	6
1.4 模拟信号处理、放大器模型和放大器的主要性能指标	6
1.5 改善放大器性能的重要手段——负反馈	13
本章小结	16
习题	16
第二章 集成运算放大器的线性应用基础	18
2.1 集成运算放大器的符号、模型和电压传输特性	18
2.2 扩展线性放大范围——引入深度负反馈	20
2.3 由集成运放构成的基本运算电路	23
2.4 集成运算放大器用于信号处理——有源 RC 滤波器	42
2.5 集成运算放大器的非理想特性对实际应用的限制	57
本章小结	66
习题	67
第三章 电压比较器、弛张振荡器及模拟开关	79
3.1 电压比较器	79
3.2 弛张振荡器	86
3.3 单片集成专用电压比较器	89
3.4 模拟开关	91
本章小结	94
习题	95

第二篇 半导体器件及集成电路——原理基础篇

第四章 常用半导体器件原理	101
4.1 半导体物理基础	101
4.2 PN 结	105
4.3 晶体二极管	110
4.4 双极型晶体管	125
4.5 场效应管	134
本章小结	147
习题	147

第五章 基本放大电路	156
5.1 基本放大器的组成原理及直流偏置电路	156
5.2 放大器图解分析法	160
5.3 放大器的交流等效电路分析法	164
5.4 共集电极放大器和共基极放大器	171
5.5 场效应管放大器	177
5.6 放大器的级联	183
本章小结	188
习题	189
第六章 集成运算放大器电路原理	197
6.1 集成运算放大器的电路特点	197
6.2 电流源电路	198
6.3 差动放大电路	202
6.4 集成运算放大器的输出级电路	215
6.5 集成运放电路举例	217
6.6 MOS 集成运算放大器	219
6.7 集成运算放大器的主要性能指标	226
本章小结	227
习题	228
第七章 频率响应	233
7.1 频率响应的基本概念	233
7.2 晶体管的高频小信号模型和频率参数	235
7.3 运用快速估算法分析频率响应的预备知识	237
7.4 单级共射放大器的高频响应分析	238
7.5 共集电路的高频响应	245
7.6 共基电路的高频响应	246
7.7 场效应管放大器的高频响应	248
7.8 放大器的低频响应	249
7.9 多级放大器的频率响应	253
7.10 建立时间 t_r 与上限频率 f_H 的关系	254
本章小结	255
习题	256
第八章 反馈	260
8.1 反馈的基本概念及基本方程	260
8.2 反馈放大器的分类	262
8.3 负反馈对放大器性能的影响	265
8.4 反馈放大器的分析和近似计算	272
8.5 反馈放大器稳定性讨论	281
8.6 正反馈的应用——正弦波振荡器	287
本章小结	294
习题	294

第九章 功率放大电路	304
9.1 功率放大电路的一般问题	304
9.2 互补跟随对称功率放大电路	306
9.3 D类功率放大电路	314
9.4 集成功率放大电路	315
9.5 功率器件	317
本章小结	321
习题	321
第十章 电源电路	325
10.1 直流稳压电源组成框图	325
10.2 整流电路	325
10.3 滤波电路	326
10.4 稳压电路	330
本章小结	342
习题	342
第十一章 模拟集成电路设计新技术	346
11.1 模拟集成电路设计——电流模法	346
11.2 电流反馈型集成运算放大器	350
11.3 开关电容网络	353
11.4 开关电流——数字工艺的模拟集成技术	356
11.5 跨导运算放大器(OTA)及其应用	359
11.6 在系统可编程模拟器件(ispPAC)原理及其软件平台举例	364
本章小结	369
习题	369
附录 A 波特(Bode)图	371
附录 B 专用名词汉英对照	378
附录 C 部分习题答案	383
参考文献	389

第 一 篇

模拟集成电路系统 ——应用基础篇

人们观察某一事物时，总是从外部特性入手，由粗犷到细微。首先学会认识它，运用它，用它来解决所要解决的问题，实现所要实现的功能，然后再去追究内部的细节。我们正是遵循认识事物的这一常理，去学习模拟电路，从系统入手、从应用入手，掌握最重要的技术和知识。对于模拟集成电路的外部特性及应用技术，要求打好基础，举一反三，灵活运用。将这部分内容提前教学，就是要将其置于最重要的位置，为融会贯通、举一反三、灵活运用创造时间和空间的条件。

第一章 绪 论

本章主要介绍模拟信号与数字信号，电子系统组成和信号处理，模拟信号的放大、放大器模型和主要性能指标的描述等基本概念，并简单介绍当前仍为改善放大器性能的重要手段——负反馈方法的应用。

1.1 模拟信号和数字信号

“信号”是“信息”的载体，也可以说“信号”是“信息”的表现形式。“信息”则是“信号”的具体内容。例如：音频信号可以传达语言、音乐等信息，图像信号可以传达人类视觉系统所反应的图像信息。“信号”有非电物理量信号和电信号之分，如光、温度、压力、流量、位移、速度、加速度等属非电物理量信号，而电信号一般指的是随时间变化的电流或电压，也包括电容器的电荷、线圈的磁通，以及空间的电磁波等。非电物理量信号可借助“传感器”转换为电信号，以便于进一步加工、处理和传输。

电信号可分为模拟信号、采样数据信号和数字信号。所谓模拟信号，是指时间和数值（幅度）上都是连续变化的信号。自然界大部分信号都属模拟信号，如图 1.1.1 所示。采样数据信号是时间离散、幅度仍为连续变化（不量化）的信号，如图 1.1.2(a)、(b)所示。图中 T_c 为采样周期， $x(nT_c)$ 为对应时间 $t=nT_c$ 时的函数 $x(t)$ 的样品值。数字信号则不仅时间离散而且幅度也为离散量，即幅度“量化”的信号，通常将某一时刻的时间离散信号 $x(nT_c)$ 量化为用“0”、“1”表示的序列码信号，如图 1.1.3 所示。采样数据信号由于幅度连续变化（不量化），因此人们往往也将其归于模拟信号一类中。

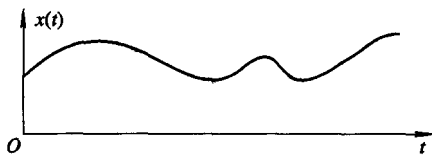
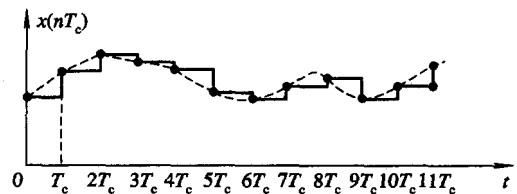
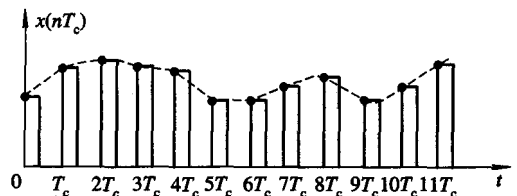


图 1.1.1 模拟信号(时间、幅度均为连续变化的信号)



(a)



(b)

图 1.1.2 采样数据信号(时间离散、幅度连续变化的信号)

$$\begin{aligned}
 x(0) & 01101100 \quad \underline{011} \underline{011} \underline{00} \\
 x(T_s) & 10110011 \quad \underline{101} \underline{100} \underline{11} \\
 x(2T_s) & 11011001 \quad \underline{110} \underline{110} \underline{001} \\
 x(3T_s) & 10101011 \quad \underline{101} \underline{010} \underline{101}
 \end{aligned}$$

图 1.1.3 数字信号(时间离散、幅度也离散(量化)的信号)

1.2 电子系统及信号处理

“电子系统”有多种描述方法。一般来说,将若干个单元电路或功能模块组合成的规模较大的、能够完成特定功能的完整的装置称为“电子系统”。图 1.2.1 给出由“信号获取”、“信号处理”、“信号执行”、“控制电路”、“电源”等诸多部分组成的电子系统示意图(具有 A/D 的是模/数混合系统,不具有 A/D 的是纯模拟系统)。

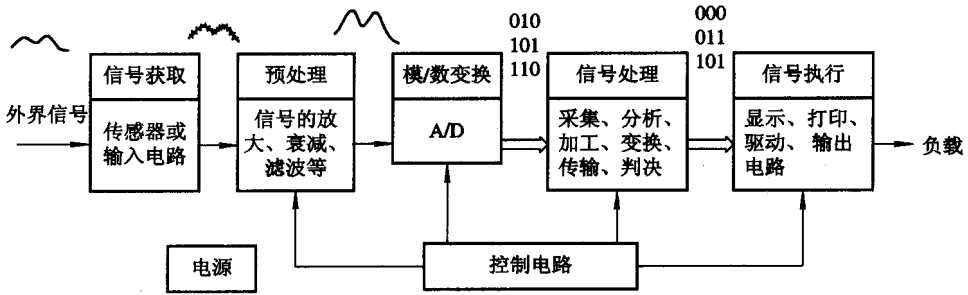


图 1.2.1 一般电子系统的组成框图

图 1.2.1 中各部分的作用简述如下:

信号获取: 主要是通过传感器或输入电路,将外界待观察的信号(通常为模拟信号)转换为电信号,或实现系统与信源间的耦合、匹配。

预处理: 主要是解决信号的放大、衰减、滤波等,即通常所说的“信号调理器”,经预处理后的信号,在幅度和其他方面都比较适合做进一步的分析或数字化处理。这一部分的信号仍多为模拟信号。

信号处理: 主要完成信号的采集、分析、加工、变换、传输和判决等功能。有的系统,直接将模拟信号进行处理,但大部分现代电子系统都是先将预处理后的模拟信号经模/数变换(A/D)变换为数字信号,然后进行数字信号处理。因为数字化处理有许多优点,如功能强大、易集成化、抗干扰能力强等。

信号执行: 主要包括处理结果的显示、打印、负载的驱动(如驱动电机)以及其他输出电路。这一部分大多为数字信号,如果需要模拟信号,则可通过数/模变换(D/A)将处理后的数字信号重新变换为模拟信号。可见, A/D、D/A 是“模拟—数字—模拟”的桥梁,是数/模混合电子系统中的关键部件之一。

控制电路: 主要负责对各部分动作的控制,使各部分能协调、有序地工作。

电源: 给系统中各部分电路提供电源,是任何电子系统中必不可少的组成部分。

系统有大有小，有简单的，也有很复杂的。下面举几个较为简单的系统的例子，这些例子基本上不涉及数字化处理。

(1) 滤波器。如图 1.2.2(a)所示， $x(t)$ 是被噪声污染了的信号， $x(t)=s(t)+n(t)$ ，其中 $s(t)$ 为待确定的信号， $n(t)$ 为干扰(加性噪声)。我们希望找到一个系统 L ，使得当 $x(t)$ 为其输入时，能够得到的输出 $y(t)$ 等于 $s(t)$ ，这个系统 L 就是“滤波器”。

(2) 均衡器。如图 1.2.2(b)所示，信号 $s(t)$ 通过信道 C (如电话电缆)后，在信道接收到的信号 $x(t)$ 已是失真的 $s(t)$ ，我们需要设计一个系统 L ，使其对 $x(t)$ 的响应恢复为 $s(t)$ ，这个系统 L 就是所谓的“均衡器”。

(3) 直流稳压电源。如图 1.2.2(c)所示，系统输入为一正弦波 $\sin\omega_0 t$ ，要设计一个系统 L_1 ，使其输出为单极性电压 $|\sin\omega_0 t|$ ；再设计一个系统 L_2 ，使其对 $|\sin\omega_0 t|$ 的响应为一直流电压；若要求最终得到的直流电压不随输入电压或负载电流而变化，则必须设计另一个系统 L_3 。为达到此目的， L_1 为“整流器”， L_2 为“滤波器”， L_3 为“稳压器”，故该系统 L 由整流器、滤波器、稳压器三部分组成。

(4) 扩音器。如图 1.2.2(d)所示，语音信号通过话筒(传感器)转换为微弱的电信号，我们希望设计一个系统，将微弱的音频信号放大，并供给最终负载扬声器(喇叭)以足够大的功率，那么该系统应该是一个音频电压放大器 L_1 和音频功率放大器 L_2 ，而且为改进该系统的性能，在放大器中引入“负反馈” F 。

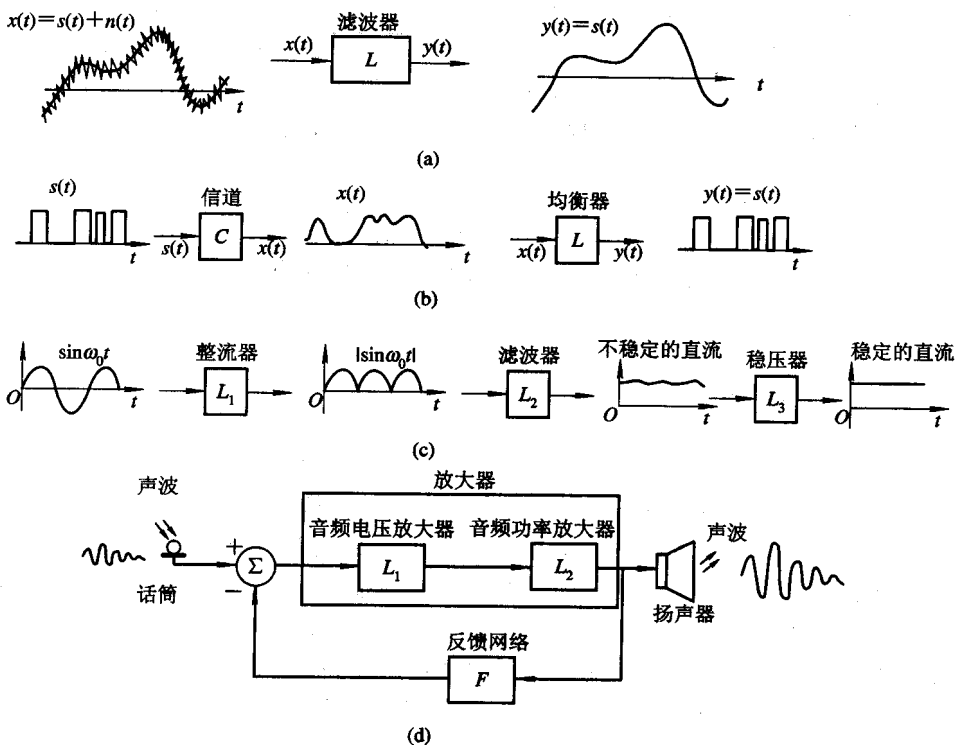


图 1.2.2 简单系统举例

(a) 滤波器；(b) 均衡器；(c) 直流稳压电源；(d) 扩音器

1.3 分析与综合(设计)

“分析”是计算给定系统对各种输入响应并确定它们的性质的过程。分析过程就是一个找出系统特性的过程。分析的途径有所不同,但答案和特性往往是惟一的,如图 1.3.1(a)所示。

“综合”或“设计”是另一种过程,即从要求的特性出发,找出满足这些特性的电路和系统结构。对“综合”或“设计”来说,方案和结果并不是惟一的,从而为设计者提供了更多创造力的机会,如图 1.3.1(b)所示。

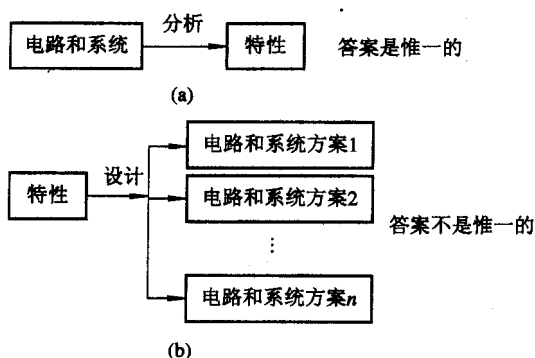


图 1.3.1 分析与设计(综合)

“分析”是“设计”的基础,“分析”为“设计”提供重要依据。只有掌握了基本分析方法,深刻理解和掌握许多电路和系统的基本特性,不断积累,才可以创造性地提出设计方案,综合和设计出性能优异的新的电路和系统。在“分析”的基础上,要更注重综合与设计,将知识学活。

1.4 模拟信号处理、放大器模型和放大器的主要性能指标

1.4.1 模拟信号处理

自 20 世纪 80 年代初以来,数字信号处理和数字集成电路迅猛发展,信号处理领域转移到数字领域不仅是大趋势,而且已经是现实。但在现代许多系统中,包括复杂高性能系统中,模拟电路从根本上已被证明是必需的。模拟电路的作用很难甚至不可能被相应的数字电路所取代。这是因为自然界产生的信号大多是模拟信号,如高品质麦克风接收到的乐队的音频信号、地震仪接收到的地震波信号、传感器转换的许多非电物理量信号、生物电信号等,这些信号往往比较微弱,而且受干扰和噪声污染,需要放大和滤波。就是用数字化处理,也必须将这些信号放大到模/数(A/D)转换器所能接受的幅度大小,一般为数百毫伏到数伏。即使在数字通信、光通信、无线收发器,甚至是微处理器和存储器等设备中都不可避免地涉及到模拟技术。人们经常说,“高速数字电路设计实质上是模拟电路设计”。

由于模拟设计要在速度、功耗、增益、精度、电源电压等多种因素间进行折衷,模拟电路对串扰、噪声等远比数字电路敏感,电阻、电容数值和器件的二级效应对模拟电路的影响远比数字电路严重,因而在一个数/模混合的硅片系统中,模拟电路占的比重并不大,但占的硅片面积却很大,特别是在那些包含射频收发器的集成芯片中,模拟电路的设计和制作往往会成为整机设计的瓶颈。高性能的模拟电路设计很少能依靠计算机自动完成,在一定程度上仍依赖于设计者的经验和直觉。正如毕查德·拉扎维(美)教授所说的那样,“好的模拟电路设计需要直觉、严密和创新。作为模拟电路设计者,必须以工程师的眼光快速而直觉地理解一个大的电路,以数学家的智慧量化那些在电路中难以捉摸的而又重要的效应,以艺术家的灵感发明新的电路结构。”

1.4.2 放大器模型

放大器是模拟信号处理中最重要的、也是最基本的部件。放大电路不仅具有独立地完成信号放大的功能,而且也是其他模拟电路,如振荡器、滤波器、稳压器、调制解调器的基础和基本的组成部分。

放大器是一个有源二端口网络,其一般符号如图 1.4.1 所示。放大器的输入端口连接“待放大的信号源”,其中 \dot{U}_s 为信号源电压(复数相量), R_s 为信号源内阻, \dot{U}_i 和 \dot{I}_i 分别是放大器的输入电压和输入电流。放大器的输出端口接相应的负载电阻 R_L (也可以是一般的阻抗 Z_L), \dot{U}_o 和 \dot{I}_o 分别是放大器的输出电压和输出电流。通常输入端口与输出端口有一个公共的电位参考点,称之为“地”(如图 1.4.1 所示),隔离放大器除外。

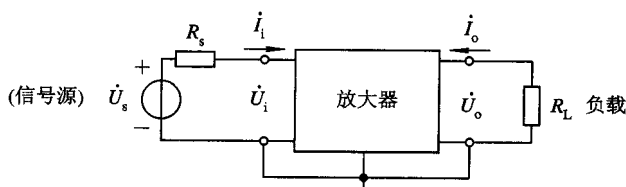


图 1.4.1 放大器视为有源二端口网络

放大器的基本任务是不失真地放大信号,故人们最关心的是放大倍数 \dot{A} 。放大倍数又称为“增益”,它表达放大器输出量与输入量的关系。根据输入量和输出量是电压或是电流,放大倍数(增益)有以下 4 种定义,即

$$\text{电压放大倍数 } \dot{A}_u \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \quad (\text{输出电压与输入电压之比}) \quad (1.4.1a)$$

$$\text{电流放大倍数 } \dot{A}_i \quad \dot{A}_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} \quad (\text{输出电流与输入电流之比}) \quad (1.4.1b)$$

$$\text{互阻放大倍数 } \dot{A}_r \quad \dot{A}_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} (\Omega) \quad (\text{输出电压与输入电流之比}) \quad (1.4.1c)$$

$$\text{互导放大倍数 } \dot{A}_g \quad \dot{A}_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i} (1/\Omega) \quad (\text{输出电流与输入电压之比}) \quad (1.4.1d)$$

其中, \dot{A}_u 和 \dot{A}_i 都是无量纲的,而 \dot{A}_r 的量纲同电阻(Ω), \dot{A}_g 的量纲同电导($1/\Omega = S$, 西门子)。在实际应用中,人们对输入量和输出量的侧重点和感兴趣的程度会有所不同,那么相应的电路结构也有所不同,故有电压放大器、电流放大器、互阻放大器、互导放大器之分。