

Mc  
Graw  
Hill

Education



国外名校最新教材精选

# 基于运算放大器和模拟集成电路的 电路设计

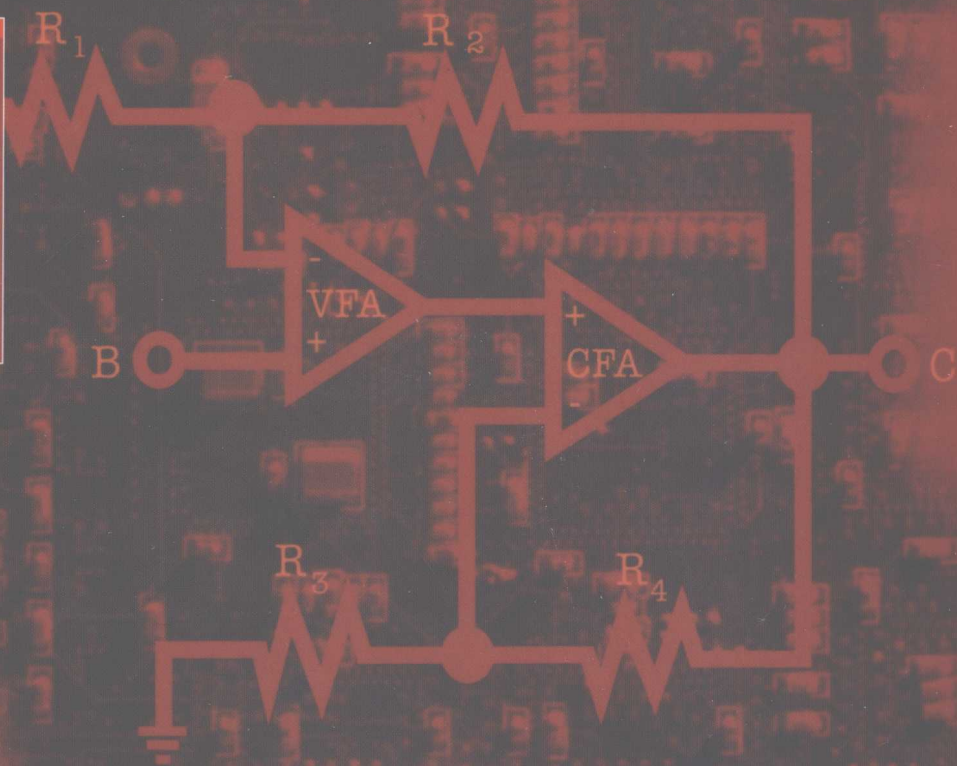
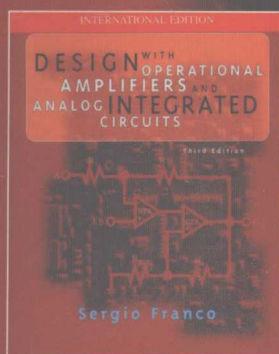
Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits

〔美〕赛尔吉欧·佛朗哥 著

刘树棠 朱茂林 荣玫 译


刘树棠 审校

(第3版)



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



 国外名校最新教材精选

Design with Operational Amplifiers and  
Analog Integrated Circuits

基于运算放大器和模拟集成电路的  
**电路设计**

(第3版)

[美] 赛尔吉欧·弗朗哥 著

Sergio Franco  
Professor of Electrical Engineering  
San Francisco State University

刘树棠 朱茂林 荣玫 译  
刘树棠 审校



**西安交通大学出版社**  
Xi'an Jiaotong University Press

## 内容提要

本书全面阐述以运算放大器和模拟集成电路为主要器件构成的电路原理、设计方法和实际应用。电路设计以实际器件为背景,对实现中的许多实际问题尤为关注。全书共分13章,包含三大部分。第一部分(第1~4章),以运算放大器作为理想器件介绍基本原理和应用,包括运算放大器基础、具有电阻反馈的电路和有源滤波器等。第二部分(第5~8章)涉及运算放大器的诸多实际问题,如静态和动态限制、噪声及稳定性问题。第三部分(第9~13章)着重介绍面向各种应用的电路设计方法,包括非线性电路、信号发生器、电压基准和稳压电源、D-A和A-D转换器以及非线性放大器和锁相环等。

本书可用作通信类、控制类、遥测遥控、仪器仪表等相关专业本科高年级及研究生有关课程的教材或主要参考书,对从事实际工作的电子工程师们也有很大参考价值。

Sergio Franco

Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits, 3rd Edition

ISBN: 0-07-232084-2

Copyright©2002 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Sia) Co. and Xi'an Jiaotong University Press.

本书中文简体字翻译版由西安交通大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2003-005号

## 图书在版编目(CIP)数据

基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计:第3版/  
(美)弗朗哥(Franco, S.)著;刘树棠等译. —西安:西安  
交通大学出版社,2004.8

书名原文:Design with Operational Amplifiers and  
Analog Integrated Circuits

ISBN 7-5605-1884-2

I. 基… II. ①佛… ②刘… III. ①运算放大器—电路设计  
②模拟集成电路—电路设计 IV. ①TN722.7②TN431.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第080854号

书 名:基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计(第3版)

著 者:[美]赛尔吉欧·弗朗哥

译 校 者:刘树棠 朱茂林 荣 玫 译 刘树棠 审校

出版发行:西安交通大学出版社

地 址:西安市兴庆南路25号(邮编:710049)

电 话:(029)82668357 82667874(发行部)

(029)82668315 82669096(总编部)

电子邮件:xjtupress@163.com

印 刷:西安东江印务有限公司

字 数:896千字

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:36.75

印 次:2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷

印 数:0 001~4 000册

书 号:ISBN 7-5605-1884-2/TN·77

定 价:65.00元

版权所有 侵权必究

## 作者简介

---

SERGIO FRANCO(赛尔吉欧·佛朗哥)现为美国旧金山州立大学(San Francisco State University)电气工程教授。他生于意大利的弗里矣雷(Friuli),获伊利诺伊大学(University of Illinois at Urbana-Champaign)博士学位。在就任现职之前,Franco博士已有过很广泛的工业方面的经历,在诸如固态物理学、模式识别、电子音乐、集成电路(IC)设计、医学电子、日用电子和汽车电子等领域工作过,发表论文颇丰。Franco博士还是 Electric Circuit Fundamentals (Oxford University Press, 1995)这本教科书的作者。除了从事教学工作外,他还在工业界从事咨询顾问工作。

# 译者前言

---

尽管近 30 多年来以大规模集成工艺为依托的各种数字电路的问世,逐渐代替了各种传统的模拟电路的应用领域,但是物理世界毕竟还是模拟的,与物理世界各种现象的接口仍然需要靠模拟电路来承担。即便在某一功能块中,模拟电路所占份量可能很少,但是这一少部分或许是整个系统就设计和实现来说最具挑战性的部分,而且往往在系统性能上起着关键作用。尤其是当速度和功率成为至关重要的因素时,模拟电路就更显突出。总之,模拟电路并未因数字电路的兴起而被淘汰出局,因此在大学本科阶段,有关模拟电路内容的教学不应偏废或误导,它仍然是电子工程类专业的核心课程内容之一。

运算放大器和各种模拟集成电路是应用最为广泛的一类模拟器件。随着集成度的提高、性能的改善,愈来愈受到人们的青睐;在工业控制、遥控遥测、仪表仪器等领域成为不可或缺的器件。本书以此为背景全面系统地论述了由运算放大器和模拟集成电路构成的各种电路原理和实现方法,特别是讨论到在实际电路实现时出现的各种实际问题及其解决方法,并给出不少具有实际参考价值的经验设计关系;这些在国内同类型的参考书中不太多见。这是一本在涉及运算放大器应用方面相当好的参考书。

本书的中译本由于笔者的原因延误了半年多,甚感愧疚。后来幸得朱茂林、荣玫二位同学的帮助才得以同读者见面,否则还要继续拖延下去。从第 3 章 3.3 节起至第 9 章结束由朱茂林翻译出初稿,荣玫则承担了从第 10~13 章的译文初稿。在接受这项工作,他们都还是应届毕业班的在读学生(他们均于 2003 年 9 月进入西安交通大学研究生院直接攻读博士学位),第一次接触译书工作,难免会有这样或那样的问题。但是总的来说,他们的英语水平和专业水平都是很不错的。笔者对译文初稿逐字逐句作了校勘和修改,如果译文中仍有错误或不妥之处,当属笔者责任。

从翻译角度来看,本书所涵盖的专业领域相当广,涉及不少专有名词、专业术语或习惯叫法。这些对于译者不是很熟悉的一些领域(如 IC 制造与工艺)会有相当大的困难。尽管译者在遇到类似问题时,多方请教同行专家,但是还是对有些译名不是很有把握。为避免误导,凡此种种均在译名后将原文注明。若读者发现任何错译,敬请不吝指出。在这方面要特别感谢西安交通大学电子科学与技术系的邵志标和陈贵灿两位教授,译者曾多次向他们求教,并获得有效帮助。

还需说明的是:因为中文方正系统排版的英文字母 v 的形体与国外的有些差别,而本书的图全是扫描的,阅读时请注意!

最后再次向西安交通大学出版社赵丽萍编审表示深切歉意;对朱茂林、荣玫二位同学的有效帮助和辛勤劳动表示衷心感谢;对老伴孙漪教授为该中译本所付出的艰辛致以诚挚的谢意。

刘树棠

2004 年 1 月于西安交通大学

# 前 言

---

在近 10 多年内,由于数字电子学的盛行,有很多关于几乎不再需要模拟电路的预言。在远没有证实这种预言是否正确之前,这一论点已经挑起了相反的辩驳;这可以概括为这样一句话:“倘若你无法用数字的方法来实现的话,它就可以用模拟的方式来完成。”更为甚者,一般都有这样一种误解,比起数字设计来说,相对于一种有规则的科学,似乎模拟设计是一种更为玄乎和捉摸不定的艺术。对于受困惑的学生来说如何来理解这一争论?继续选修某些模拟电子学方面的课程值得吗?抑或最好还是就集中在数字电路方面?

毋庸置疑,传统上隶属于模拟电子学领域的很多功能,今天都用数字形式给予实现了。其中最为常见的例子就是数字音响,这里由拾音器和其他的声音传感器产生的模拟信号利用一些放大器和滤波器经适当地处理,然后转换为数字形式以作进一步处理,譬如混合、编辑和产生某些特殊效果,以及更多为了传输、存储和提取而同样重要的琐碎工作。最后,将数字信号转换回到模拟信号经由扬声器播放出来。之所以想用数字方法实现尽可能多的功能的主要理由之一就是缘于数字电路的高可靠性和高灵活性。然而,物理世界本来就是模拟的;这表明,总是需要模拟电路去适应这些物理信号,像与传感器相连的电路,以及把模拟信息转换为数字信息供进一步处理,和从数字转换回模拟供物理世界再利用等这样一些电路都还需要用到模拟电路。再者,考虑到速度和功率的因素采用模拟前端电路更具优势,新的应用领域不断出现;无线通信就是一个很好的例子。

的确如此,当今的许多应用最好是由混合模式的集成电路(混合模式 IC)和系统来提出,它依赖模拟电路与物理世界接口,而数字电路则用作处理和控制。即便这个模拟电路或许仅占这块整个芯片面积的一小部分,但它往往却是设计中极具挑战性的部分,并且在整个系统的性能上起着关键作用。在这一方面,通常所谓的模拟设计师就要用明确的数字工艺为实现模拟功能的任务构思出独创性的解决方案;在滤波中的开关电容技术和在数据转换中的  $\Sigma\text{-}\Delta$  技术就是为大家所熟知的例子。由于以上原因,对于有能力的模拟设计师们还是继续具有很强的需求。即使是纯数字电路,当将它们推向运算极限时,还是要呈现模拟的特性行为的。因此,对于模拟设计原理和技术的牢固掌握在任何 IC(无论是纯数字或纯模拟的 IC)设计中都

是一笔宝贵的财富。

## 关于这本教科书

这本书的目的是利用实际的器件和应用说明一般的模拟原理和设计方法学。本书旨在用作本科生和研究生在用模拟集成电路(模拟 IC)设计和应用方面课程的一本教科书,以及为实际工程师们用作一本参考书。读者在电子学方面应有初步基础,熟悉频域分析方法,并在 PSpice 应用方面具有基本训练。尽管本书包括的内容足够用作两个学期的课程,但是经适当挑选之后也能用作一个学期课程的基础。由于本书及其每一章一般都是按从简到繁,先易后难的次序写就的,所以挑选过程是极易完成的。

在旧金山州立大学(San Francisco State University),我们使用这本书作为两个一学期课程的系列课对待;一个是在本科高年级,另一个是在研究生层次上。在高年级的课程中,包括了第 1~3 章,第 5~6 章,以及第 9~10 章的大部分;在研究生的课程中则包括全部余下的部分。在高年级的课程中是与模拟 IC 制造和设计课程并行的。为了更为有效地使用模拟 IC,用户略知一点它们内部的工作原理(即便至少是定性的)是很重要的。为了满足这种需要,本书在一种设计判断上给出了工艺和电路因素方面的直观说明。

第 3 版保留了第 2 版不同于第 1 版的那些特点,即在教学法方面大的加强,包含了 PSpice 仿真,并扩充了主要内容,其中有电流反馈放大器、开关调节器、 $\Sigma$ - $\Delta$  转换器以及锁相环。另外,负反馈概念得到进一步的清晰和加强,各章末的习题数量增加了 10%,使总数达到 579 道题。虽然很多读者都毫无疑问地愿意使用 PSpice 的 Windows 版本,在经仔细斟酌之后,考虑到教学法方面的优点,决定还是保留了第 2 版中的 netlist(网表)版本。然而,有兴趣的读者还是可以在附设的网站 <http://www.mhhe.com/franco> 上找到本书 netlist 例子的 Windows 版本。

为了将一般性和最基本的原理用一种超脱于最新的工艺趋势来写就的目的,精选了业已确立并广泛形成文件的器件和工艺作为载体来阐明这样一些原理。然而,只要有必要,还是要让读者了解一些更为现代的器件,以及参考的资源并在何处找到它们。

## 本书内容梗概

尽管没有明确指出,本书实际上是由三个部分组成的。第一部分(第 1~4 章)基于将运算放大器作为一种理想器件介绍基本概念和应用。我们觉得在学生着手处理并评价实际器件限制的后果以前需要对理想(或接近理想)运算放大器的情况树立足够的自信。各种运算放大器的限制是第二部分(第 5~8 章)的主要内容,在这一版中有关这方面的内容要比前两版更为系统和详细。最后,第三部分(第 9~13 章)利用读者在前两部分所获得的成熟和判断力致力于面向设计的各种应用。下面是各章内容的简要描述。

第 1 章复习基本放大器概念,包括负反馈概念。大部分重点是放在环路增益  $T$  作为电路性能的一种度量标准上。向学生介绍简化的 PSpice 模型,这一模型将随着本书的进程愈渐复杂和精确。如果有些教师发现环路增益的处理是过早的话可以跳过一部分,而在稍后某个更为合适的时机再重新回到这一论题上来。由于各节和各章都尽可能安排成互为独立的,所以这样一类内容的重新组织是方便易行的;加之,章末习题也是按节组成的。

第 2 章与各种仪器仪表和传感器放大器一起处理  $I$ - $V$ ,  $V$ - $I$  和  $I$ - $I$  转换器。这一章将重点



放在各种反馈拓扑结构和环路增益  $T$  的作用上。

第 3 章包含一阶滤波器,音频滤波器和常用的二阶滤波器,像 KRC、多重反馈、状态变量和双二阶拓扑结构等二阶滤波器。本章重点在复平面系统的概念,并以滤波器灵敏度的讨论结束。

欲想在有关滤波器专题方面作较深入了解的读者会发现第 4 章是有用的。这一章包括了用级联和直接的方法讨论了高阶滤波器的综合。另外,这些方法既是对有源 RC 滤波器,又是对开关电容(SC)滤波器的情况提出的。

第 5 章专注于由输入端引起的运算放大器误差,诸如  $V_{OS}$ ,  $I_B$ ,  $I_{OS}$ , CMRR, PSRR 和漂移,并与它们的运行极限一起讨论。向学生们介绍技术指标和性能参数的说明,PSpice 的宏模型,以及不同的工艺和拓扑。

第 6 章着重讨论在频域和时域的动态根限,并研究它们对电阻性电路和在第 I 部分主要利用理想运算放大器模型所讨论的滤波器上的影响。详细地对电压反馈和电流反馈进行比较,并广泛应用 PSpice 对有代表性的电路例子在频率响应和暂态响应上作可视化展示。在已经掌握了利用理想或接近理想运算放大器的前 4 章内容之后,现在学生们就处在一个更加好的位置去鉴赏和评价实际器件的限制所造成的结果。

将在第 5 和第 6 章所学到的原理结合起来,自然而然地就紧跟着第 7 章有关交流噪声的内容。噪声计算和估计代表着另一个领域,其中 PSpice 证明是一种最有用的工具。

第 II 部分以第 8 章的稳定性专题结束。这些内容均是以便于论题的选取来安排的,并将重点放在面向一个系统的方式上。还是大量应用 PSpice 来观察已给出的不同频率补偿技术得到的效果。

从第 9 章开始的第 III 部分涉及非线性应用。这里,非线性特性行为要么源自没有反馈(电压比较器),要么是存在反馈但属于正反馈类型(施密特触发器),或是负反馈但是应用了像二极管和开关(精密整流器、峰值检波器、跟踪保持放大器)这样一类非线性元件。

第 10 章包含各种信号发生器,其中有文氏桥式和正交振荡器、多谐振荡器、定时器、函数发生器,以及  $V-F$  和  $F-V$  转换器。

第 11 章专注于调节器。由电压基准开始,从线性电压调节器到开关调节器。最后这个论题(开关调节器)自 20 世纪 80 年代以来一直是最受关注和工业界活动的中心,并且关于这一专题已经写出了多本专著。必然地,这一章仅能让学生接触到这一最为重要领域的若干基础知识。

第 12 章处理数据转换。用系统的方式处理数据转换器的技术要求,并给出各种多重 D-A 的应用。本章以过采样转换原理和  $\Sigma-\Delta$  转换器作为结束。关于这一专题也有大量专著写就,所以这一章必然地也是仅能让学生接触一点最基本的东西。

第 13 章是本书用各种非线性电路作为结束,其中有对数/反对数放大器,模拟乘法器,以及用一种简要接触  $g_m-C$  滤波器的方式构成的运算跨导放大器。本章以介绍锁相环达到顶点而告终;这是一个将前面各章讨论的各个方面的内容组合在一起的专题。

## 网址

与本书配套的有一个网址(<http://www.mhhe.com/franco>),它含有各种教师和学生使用的资源,以及其他有用的链接。在本书一些页码的边缘均配置了网址标志,这些表明属于网

址资源最有用的地方。教师资源由习题解答、可下载软件、PSpice 例题的 Windows 版本和 PageOut(链接到 McGraw-Hill 课程 Website Development Tools)组成。学生资源由可下载软件和 PSpice 例题的 Windows 版本组成。作者欢迎经由电子邮件 sfranco@sfsu.edu 的各种反馈信息。

## 致谢

在第 3 版中所作的某些变化是对从工业界和学术界接收到许多读者反馈意见的一种回应,我仅对那些花去宝贵时间给我发电子邮件的所有的人表示诚挚的谢意。另外,下面提到的评阅人曾对以前的版本给过详细的评阅并对当前的修订版提出过宝贵的建议。全部建议都经仔细斟酌过,倘若仅有一部分被兑现的话,这绝不是麻木不仁或熟视无睹,而是由于出版上的限制,或者是个人看法的缘故。对所有的评阅者致以深深地感谢:J. Alvin Connelly, Georgia Institute of Technology; Dragan Maksimovic, University of Colorado-Boulder; Philip C. Munro, Youngstown State University; Thomas G. Owen, University of North Carolina-Charlotte; Dr. Guillermo Rico, New Mexico State University; Mahmoud F. Wagdy, California State University-Long Beach; Subbaraya Yuvarajan, North Dakota State University. 在 PSpice 工作中, Richard C. Jaeger, Auburn University 也曾给过帮助。

我仍然要对前两个版本的评阅者表示感谢,他们是: Stanley G. Burns, Iowa State University; Michael M. Cirovic, California Polytechnic State University-San Luis Obispo; J. Alvin Connelly, Georgia Institute of Technology; William J. Eccles, Rose-Hulman Institute of Technology; Amir Farhat, Northeastern University; Ward J. Helms, University of Washington; Frank H. Hielscher, Lehigh University; Richard C. Jaeger, Auburn University; Franco Maddaleno, Politecnico di Torino, Italy; Dragan Maksimovic, University of Colorado-Boulder; 和 Arthur B. Williams, Coherent Communications Systems Corporation。最后,对我的太太 Diana May 对我的鼓励和坚定不移的支持表示衷心的感谢。

Sergio Franco  
San Francisco, California, 2001

赛尔吉欧·佛朗哥  
2001 年于加州旧金山市

采用该书作教材的教师可向 McGraw-Hill 公司北京代表处联系索取教学课件资料  
传真:(010)6263 8354 电子邮件:webmaster@mcgraw-hill.com.cn

# 目 录

---

作者简介

译者前言

前言

## 第 1 章 运算放大器基础

1.1 放大器基础 .....	(2)
1.2 运算放大器 .....	(5)
1.3 基本运算放大器结构 .....	(7)
1.4 理想运算放大器电路分析 .....	(13)
1.5 负反馈 .....	(19)
1.6 运算放大器电路中的反馈 .....	(25)
1.7 环路增益 .....	(31)
1.8 运算放大器的供电 .....	(35)
习题 .....	(41)
参考文献 .....	(49)
附录 1A 标准电阻值 .....	(49)

## 第 2 章 电阻性反馈电路

2.1 电流-电压转换器 .....	(52)
2.2 电压-电流转换器 .....	(54)
2.3 电流放大器 .....	(61)
2.4 差分放大器 .....	(62)
2.5 仪器仪表放大器 .....	(67)
2.6 仪器仪表应用 .....	(73)
2.7 传感器桥式放大器 .....	(78)
习题 .....	(84)
参考文献 .....	(89)

## 第 3 章 有源滤波器( I )

3.1 传递函数 .....	(93)
3.2 一阶有源滤波器 .....	(97)

3.3	音频滤波器应用 .....	(104)
3.4	标准二阶响应 .....	(108)
3.5	KRC 滤波器 .....	(114)
3.6	多重反馈滤波器 .....	(121)
3.7	状态变量和双二阶滤波器 .....	(124)
3.8	灵敏度 .....	(129)
	习题 .....	(132)
	参考文献 .....	(137)
<b>第 4 章 有源滤波器( II )</b>		
4.1	滤波器近似 .....	(139)
4.2	级联设计 .....	(144)
4.3	通用阻抗转换器 .....	(152)
4.4	直接设计 .....	(157)
4.5	开关电容 .....	(163)
4.6	开关电容滤波器 .....	(168)
4.7	通用 SC 滤波器 .....	(174)
	习题 .....	(180)
	参考文献 .....	(184)
<b>第 5 章 静态 Op Amp 的限制</b>		
5.1	简化 Op Amp 电路图 .....	(187)
5.2	输入偏置电流和输入失调电流 .....	(192)
5.3	低输入偏置电流 Op Amp .....	(195)
5.4	输入失调电压 .....	(199)
5.5	低输入失调电压 Op Amp .....	(204)
5.6	输入失调误差补偿 .....	(207)
5.7	最大额定值 .....	(212)
	习题 .....	(215)
	参考文献 .....	(218)
	附录 5A $\mu$ A741 Op Amp 数据清单 .....	(220)
<b>第 6 章 动态 Op Amp 的限制</b>		
6.1	开环响应 .....	(230)
6.2	闭环响应 .....	(234)
6.3	输入和输出阻抗 .....	(239)
6.4	暂态响应 .....	(244)
6.5	有限增益带宽乘积(GBP)对积分器电路的影响 .....	(251)
6.6	有限 GBP 对滤波器的影响 .....	(257)

6.7 电流反馈放大器 .....	(261)
习题 .....	(269)
参考文献 .....	(275)

## 第7章 噪声

7.1 噪声特性 .....	(277)
7.2 噪声动态特性 .....	(281)
7.3 噪声源 .....	(286)
7.4 Op Amp 噪声 .....	(291)
7.5 光电二极管放大器噪声 .....	(298)
7.6 低噪声 Op Amp .....	(301)
习题 .....	(304)
参考文献 .....	(307)

## 第8章 稳定性

8.1 稳定性问题 .....	(310)
8.2 常数 GBP Op Amp 电路的稳定性 .....	(317)
8.3 内部频率补偿 .....	(325)
8.4 外部频率补偿 .....	(333)
8.5 电流反馈放大器的稳定性 .....	(339)
8.6 复合放大器 .....	(343)
习题 .....	(348)
参考文献 .....	(353)

## 第9章 非线性电路

9.1 电压比较器 .....	(355)
9.2 比较器应用 .....	(363)
9.3 施密特触发器 .....	(370)
9.4 精密整流器 .....	(375)
9.5 模拟开关 .....	(380)
9.6 峰值检测器 .....	(384)
9.7 采样保持放大器 .....	(388)
习题 .....	(393)
参考文献 .....	(397)

## 第10章 信号发生器

10.1 正弦波发生器 .....	(401)
10.2 多谐振荡器 .....	(406)
10.3 单片定时器 .....	(413)

10.4	三角波发生器	(418)
10.5	锯齿波发生器	(423)
10.6	单片波形发生器	(424)
10.7	V-F 和 F-V 转换器	(431)
	习题	(436)
	参考文献	(441)
<b>第 11 章 电压基准与稳压电源</b>		
11.1	性能要求	(443)
11.2	电压基准	(448)
11.3	电压基准应用	(454)
11.4	线性稳压电源	(460)
11.5	线性稳压电源应用	(467)
11.6	开关稳压电源	(474)
11.7	单片开关稳压电源	(482)
	习题	(489)
	参考文献	(493)
<b>第 12 章 D-A 和 A-D 转换器</b>		
12.1	性能要求	(496)
12.2	D-A 转换技术	(502)
12.3	倍乘式 DAC 应用	(513)
12.4	A-D 转换技术	(517)
12.5	过采样转换器	(525)
	习题	(532)
	参考文献	(534)
<b>第 13 章 非线性放大器和锁相环</b>		
13.1	对数/反对数放大器	(536)
13.2	模拟乘法器	(543)
13.3	运算跨导放大器	(547)
13.4	锁相环	(554)
13.5	单片锁相环	(561)
	习题	(567)
	参考文献	(570)

---

# 第 1 章

## 运算放大器基础

---

- 1.1 放大器基础
- 1.2 运算放大器
- 1.3 基本运算放大器结构
- 1.4 理想运算放大器电路分析
- 1.5 负反馈
- 1.6 运算放大器电路中的反馈
- 1.7 环路增益
- 1.8 运算放大器的供电
- 习题
- 参考文献
- 附录 1A 标准电阻值

术语运算放大器(operational amplifier),或简称为 op amp,是在 1947 年由 John R. Ragazzini 命名的,用于代表一种特殊类型的放大器,经由恰当选取的外部元件,它能够构成各种运算,如放大、加、减、微分和积分。运算放大器的首次应用是在模拟计算机中。实现数学运算的能力是将高增益与负反馈结合起来的結果。

早期的运算放大器是用真空管实现,因此笨重,耗电大并很昂贵。运算放大器第一次显著小型化是由于双极性结型晶体管(BJT)的出现,这导致了用分立 BJT 实现运算放大器模式的整个一代。然而,真正的突破出现在集成电路(IC)运算放大器的开发,它的元件是以单片的形式制造在只有针尖头那么大的硅芯片上。第一个这样的器件在 20 世纪 60 年代初由神童半导体公司(Fairchild Semiconductor Corporation)的 Robert J. Widlar 研制出。在 1968 年,Fairchild 推出了运算放大器从而成为工业标准,这就是普遍流行的  $\mu\text{A}741$ 。从此运算放大器的各

种系列和制造商急剧涌现出。无论竞争如何激烈,从价格优势而不是从高性能上来看,741 仍然是最为流行的一种。由于它的应用普及经久不衰,再加上它又是在文献中引用最为广泛的运算放大器,所以将它作为载体来阐明一般运算放大器原理,并作为一种尺度来评价其他运算放大器系列的相对优值程度。当然,如果身边有其他的运算放大器证明是更适合于应用的话,将毫不含糊地转向其他的运算放大器类型。

事实上运算放大器已经持续不断地渗透到模拟和混合模拟-数字电子学的每个领域。如此广泛的应用是得益于价格的急剧下降促成的。今天,批量采购一块运算放大器的价格可与大多传统的和稍欠高档的元件(如微调电容器,质量好的电容器和精密电阻器)的价格相比拟。事实上,最普遍的态度是就将运算放大器作为另一种元件来看待,这样一种观点对当今我们思考模拟电路以及在设计模拟电路的方式上都产生了深远的影响。

在第 5 章末的附录中,图 5A.2 示出 741 运算放大器的内部电路图。这张图或许是相当使人惧怕的,特别是如果你对 BJT 的理解还不是足够深的话。然而,尽可放心,设计出大量的运算放大器电路而无需详细了解运算放大器的内部工作机理是可能的。确实如此,不论其内部如何复杂,运算放大器适合于在输出和输入之间用一种非常简单的关系由一个方框(“黑匣子”)来表示。你将会看到,这种简化的框图对于大多数情况已够用了。当不是这种情况时,将借助于技术数据,并由给定的技术参数预期电路性能,这同样还是免去了对内部工作的详细考虑。

为了提升他们的产品,运算放大器的制造商们一直将应用部门与确认产品应用领域的效果维系在一起,并在商业期刊上利用应用手记和文章将它们公布出来。竭力鼓励你从现在开始就着手构建你自己的有关数据资料和应用笔记方面的资料室,在空闲时间浏览它们,你将会为它们所提供的如此丰富的信息而感到吃惊。为方便起见,我们将一直保持有一个不断更新的主要运算放大器制造商名录。通过访问网站 <http://www.mhhe.com/franco> 可以获得这份名录。

运算放大器原理的这种学习应该被实际试验所证实。你可以在实验室里在一块面包板上组装出你的电路并将它们调试出来,你也可以采用现在的各种 CAD/CAE 软件包(如 SPICE)用一台个人电脑对它们进行仿真。最好的效果是两者都做。

简要复习基本放大器概念之后,这一章要介绍运算放大器,以及适合于研究各种基本运算放大器电路的分析方法。这些电路工作的核心是负反馈概念。尤其是要向读者引入环路增益是负反馈电路最为重要的特性。本章最后用某些实际考虑结束,如运算放大器的供电问题,输出饱和,以及内部功耗等。

## 1.1 放大器基础

在着手研究运算放大器之前,值得复习一下有关放大和负载的基本概念。我们知道,放大器是一种二端口器件,它接受一个称为输入的外加信号,产生一个称为输出的信号并使输出 = 增益  $\times$  输入,这里增益是某一种合适的比例常数。满足于这一定义的器件称为线性放大器,以区别于具有非线性输入-输出关系的器件(如二次和对数/反对数放大器)。除非特别说明,此处术语放大器指的就是线性放大器。

一个放大器接受来自上面某个源的输入,并将它的输出向下输送到某个负载。决定于输



人和输出信号的属性,可有不同类型的放大器。最普遍的就是电压放大器,它的输入  $v_I$  和输出  $v_O$  都是电压。这个放大器的每一端口都能用戴维南等效给予建模,它由一个电压源和一个串联电阻组成。输入端口通常起一个纯无源的作用,所以只用一个电阻  $R_i$  来建模称之为该放大器的输入电阻。输出端口用一个表明与  $v_I$  有关的电压控制电压源(VCVS)  $v_O$  和一个称为输出电阻  $R_o$  的串联电阻来建模。这种情况如图 1.1 所表示。图中  $A_{oc}$  称为电压增益因子,用伏/伏表示。值得注意的是,输入源也是用戴维南等效给予建模的,它由源电压  $v_s$  和串联电阻  $R_s$  构成;输出负载起无源的作用,用电阻  $R_L$  建模。

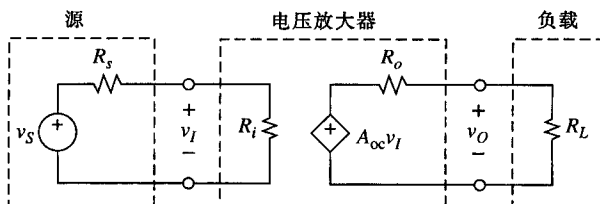


图 1.1 电压放大器

现在希望导出一个利用  $v_s$  的  $v_O$  表达式。在输出端口应用电压分压器公式得出

$$v_O = \frac{R_L}{R_o + R_L} A_{oc} v_I \quad (1.1)$$

注意到,当不存在任何负载( $R_L = \infty$ )时,就有  $v_O = A_{oc} v_I$ 。所以  $A_{oc}$  称为无载或开路电压增益。在输入端口应用电压分压器公式得出

$$v_I = \frac{R_i}{R_s + R_i} v_s \quad (1.2)$$

消去  $v_I$  并经整理得到源电压-负载增益为

$$\frac{v_O}{v_s} = \frac{R_i}{R_s + R_i} A_{oc} \frac{R_L}{R_o + R_L} \quad (1.3)$$

当信号从源向负载传播时,首先在输入端口受到某些衰减,然后在放大器内部放大  $A_{oc}$ ,最后在输出端口又有额外的衰减。这些衰减统称之为加载效应。很明显,由于加载之后,(1.3)式给出的  $|v_O/v_s| \leq |A_{oc}|$ 。

**例题 1.1** (a) 一放大器有  $R_i = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $A_{oc} = 100 \text{ V/V}$  和  $R_o = 1 \text{ }\Omega$ , 被一个  $R_s = 25 \text{ k}\Omega$  的源驱动,负载  $R_L = 3 \text{ }\Omega$ 。计算总电压增益,以及输入和输出的加载量。(b) 在源的  $R_s = 50 \text{ k}\Omega$  和负载  $R_L = 4 \text{ }\Omega$  下重做(a)。

**题解**

(a) 根据(1.3)式,总增益是  $v_O/v_s = [100/(25+100)] \times 100 \times 3/(1+3) = 0.80 \times 100 \times 0.75 = 60 \text{ V/V}$ , 由于加载的缘故它小于  $100 \text{ V/V}$ 。输入加载引起源电压降低到无载值的  $80\%$ ; 输出加载引入附加的衰减再下降  $75\%$ 。

(b) 利用同一式子,  $v_O/v_s = 0.67 \times 100 \times 0.80 = 53.3 \text{ V/V}$ 。现在情况是在输入端口负载加重,而在输出端口负载减轻了,但总的增益还是变化到从  $60 \text{ V/V}$  到  $53.3 \text{ V/V}$ 。