

Mc
Graw
Hill
Education

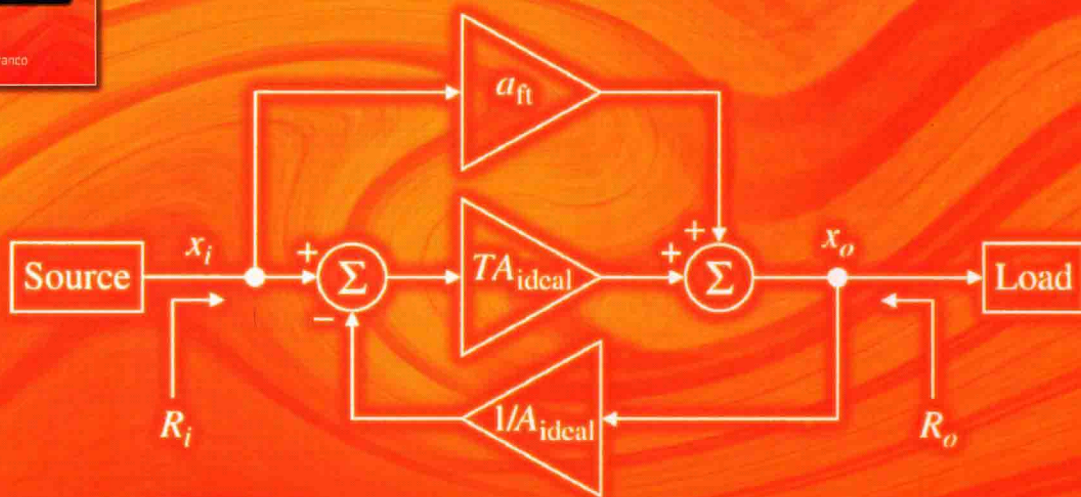
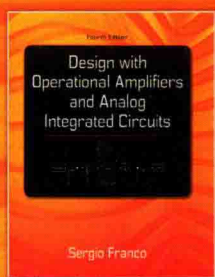
国外名校最新教材精选

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

(第4版)

[美] 赛尔吉欧·弗朗哥 著
荣 玫 刘树棠 朱茂林 译
刘树棠 审校




SERGIO FRANCO



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4版)

[美] 赛尔吉欧·弗朗哥 著

Sergio Franco

Professor of Electrical Engineering
San Francisco State University



荣玫 刘树棠 朱茂林 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, 4th Edition

ISBN: 978-0-07-802816-8

Copyright©2015 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Xi'an Jiaotong University Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2017 by McGraw-Hill Education 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:25-2016-0246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/(美)赛尔吉欧·弗朗哥(Sergio Franco)著;荣玫,刘树棠,朱茂林译.—4版.—西安:西安交通大学出版社,2017.9

书名原文:Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits,4ed
ISBN 978-7-5605-9736-2

I.基… II.①赛…②荣…③刘…④朱… III.①运算放大器-电路设计②模拟集成电路-电路设计 IV.①TN722.702②TN431.102

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第129554号

书 名	基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计(第4版)
著 者	[美]赛尔吉欧·弗朗哥
译 者	荣玫 刘树棠 朱茂林
审 校 者	刘树棠

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315(总编办)

传 真 (029)82668280
印 刷 西安明德印务有限公司

开 本	787mm×1092mm 1/16	印 张	39.5	字 数	954千字
印 次	2017年11月第1版		2017年11月第1次印刷		
印 数	0001~3000册				
书 号	ISBN 978-7-5605-9736-2				
定 价	89.00元				

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

第4版译者前言

2003年我见到这本书 *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits* (Sergio Franco) 的时候已经是第3版了。西安交通大学出版社编审赵丽萍同志来征询我的意见是否可出中译本,我大致浏览了一下就给了肯定的意见:值得出中译本!当初看中这本书是它的广泛实用性。可以毫不夸张地说,凡是要采用电子技术手段来实现某种功能的地方都或多或少离不开运算放大器,或以运算放大器为基础构成的某种功能块。

本书第3版自2004年第一次印刷到目前为止已连续印刷了12次,累计发行量超过3万余册。作为一本非主流教材,这是一个很不错的业绩了,能让3万多从业的工程师们受益,感到很欣慰,也说明当初的决策是正确的。当今的时代是一个数字技术占绝对地位的时代,即便如此,诚如本书作者在前言中提到的,仍然需要模拟电子技术,因为客观物理世界是模拟的。

本书第4版虽在总体框架方面没有太大的变化,但在各节次的内容上都有或多或少的删改、补充和增加。这主要体现在三个方面:1. 深化和扩展了运算放大器的基础知识,这能让读者在使用中裕度更大;2. 由于运算放大器在制造过程中有很多实际问题,在使用中如果你不知道或疏忽可能会达不到预期的效果。作者在这方面总是由简到繁、由浅入深、分门别类地给予阐述;3. 习题部分有较大的增加。这里要特别指出的是,作者在阐述制造过程中的许多实际问题时涉及到微电子学领域中的诸多工艺性知识。这方面内容已大大超出我们的专业领域,译文可能会有这样或那样的不妥和错误,如果读者发现了恳求给我们指出并帮助我们更正。

2003年笔者带着两位即将本科毕业、但都分别被保送或通过国家考试进入西安交通大学研究生院直接攻读博士学位的优秀学生朱茂林和荣玫来做这件事。在英语水平方面,他(她)们都通过了国家6级,应该没有问题。在业务方面,书中内容都是他们

所学专业的基础知识,也不存在多少障碍。笔者的本意是让他们能通过翻译这本书在严谨的科学态度、认真负责的精神和一丝不苟的作风等方面受到锻炼,这些都应该是在他们攻读博士学位和以后的工作中必须具备的优良品质。笔者在长期的教学生涯和翻译十多本国外专业教材的过程中深切感到要真正翻译好一本专业教材,让读者满意,不留骂名并非易事!由于他们初次做这件事,难免会存在这样或那样的问题,我几乎都是逐字逐句地进行校对和更正。我相信他们都应该从中得到锻炼。

朱茂林是一位优秀的学生,他的方向是网络安全。他在做完两年研究生后,审时度势,已经规划好了自己的未来,主动提出申请中止攻读博士学位,转为攻读硕士学位。取得硕士学位后立即应聘到北京百度,现在已是顺风顺水、游刃有余、小有成就,无暇顾及第4版的工作了。而我已进入耄耋之年,已无力再做第4版的任务了。

荣玫同样是一位优秀的学生,她在取得博士学位后立即供职于长安大学。完成第4版的任务就责无旁贷地落在了荣玫老师的肩上。经过博士阶段的千锤百炼,她已是今非昔比了,完全有能力独自担负起这一重任。虽说是修订版,但做起来工作量仍然不小,琐碎、繁杂,要非常细心。再加上有些增加部分已超出了我们的业务范围,难度很大。荣玫老师在教学任务繁重、还有独立的课题要做的情况下很好地完成了。另外,为照顾我年长,她还把全书所有增删、补充、修改等变动的地方在样稿中都一一标出,便于我审校。本书第4版能够与读者见面,要非常感谢荣玫老师。本书如果将来还有第5版问世的话(我是不可能再见到了),就全权交给荣玫老师处理了。

最后应该提到,朱茂林先生虽然没有参加第4版的工作,但在第3版中他做了主要的工作,不能忘记他对本书的贡献。

感谢本书责任编辑鲍媛的辛勤工作,在整个本书出版过程中,她总是处处照顾我,为我提供方便。谢谢!

但愿本书第4版能让广大读者获益。

刘树棠

2017年4月于西安交通大学

第3版译者前言

尽管近30多年来以大规模集成电路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。在接受这项工作时,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,凡此种均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 4 版的新内容

新版的主要特点包括:(a)负反馈的完整修订,(b)大量运算放大器动态和频率补偿的强化处理,(c)开关稳压电源范围的扩展,(d)双极性和 CMOS 技术间更为平衡的表述,(e)大幅增加的行间 PSpice 应用,以及(f)重新设计的例题和大约 25%的章末习题都体现了这些修订。

本书以往的版本均从运算放大器使用者的角度来探讨负反馈,而第 4 版中则给出了一个更为广阔的视角,这一方法也有益于其他内容的讨论,例如开关稳压电源和锁相环。新版本中给出了双端口分析和返回比分析,强调了它们之间的异同,并尝试消除一直以来存在的对二者的混淆(为了保持其差异,我们在双端口分析中将回路增益和反馈因子表示为 L 和 b ,而在返回比分析中将它们表示为 T 和 β)。

必然地,对反馈的修改使得运算放大器动态特性和频率补偿部分的大量内容也需要改写。针对这一关联性,第 4 版中大量采用了由 R. D. Middlebrook 在测量回路增益时首次提出的电压/电流注入技术。

鉴于目前便携式电源管理在模拟电子中的重要性,本版给出了更大范围的开关稳压电源。我们更多地关注了电流控制和斜率补偿以及稳定性问题,例如右半平面零点和误差放大器设计。

书中对 SPICE 的大量使用(原理图捕获代替了旧版中的网表)不但用于验证计算,还用于研究更高阶的效应,而后者由于过于复杂,无法采用纸笔进行分析。由于 SPICE 目前可用版本很多,并且一直在持续更新,所以我决定不针对某一版本,而是将例子设计得尽可能简单,以便学生可以在他们所选用的 SPICE 版本上快速生成和运行。

和以往各版一样,精心设计的例题和章末习题可以促进对于所介绍内容的直观感受、物理意义的理解,以及工程师们在日常工作中所需的解决问题的各种方法。

对于获得在一定程度上超越现有技术趋势的一般性和永久性原理的渴望促使我们选用完善的、有详尽记录的设备作为工具。尽管如此,在必要的时候,应使学生注意到更新型的替代

设备,并鼓励他们上网查找。

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。我们通过双端口分析和返回比分析来探讨回路增益,对二者之间的异同都给予了应有的关注。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。

第二部分以第8章的稳定性专题结束。负反馈内容的扩展使得我们对频率补偿部分进行了大量修订,包括运算放大器内部和外部频率补偿。第4版中大量采用了由 R. D. Middlebrook 在测量回路增益时首次提出的电压/电流注入技术。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章开始的第三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。由电压基准开始,从线性稳压电源到更大范围的开关稳压电源。我们更多地关注了电流控制和斜率补偿以及稳定性问题,例如误差放大器设计和升压斩波电路中的右半平面零点效应。

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所涉及的重要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>),它含有任课教师所需的有关本书的信息和各种有用的资源。教师资源包括习题解答、一套 Power Point 幻灯片课件和勘误表链接。

本书在 www.CourseSmart.com 有可用的电子书。CourseSmart 可以使你大大节约书本印刷的成本,减轻对环境的影响,并且可以利用强大的网络工具帮助学习。CourseSmart 电子书既可在线阅读,也可以下载到计算机上。读者可以在电子书上全文检索,标示重点并给予注释,还可以与他人分享你的心得与体会。无论在何处,CourseSmart 都拥有最大的电子书库可供选择。访问 www.CourseSmart.com 获得更多信息并尝试体验章节。

致谢

在第 4 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: Aydin Karsilayan, Texas A&M University; Paul T. Kolen, San Diego State University; Jih-Sheng (Jason) Lai, Virginia Tech; Andrew Rusek, Oakland University; Ashok Srivastava, Louisiana State University; S. Yuvarajan, North Dakota State University。

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; 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; Arthur B. Williams, Coherent Communications Systems Corporation; 和 Subbaraya Yuvarajan, North Dakota State University。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, 2014

赛尔吉欧·弗朗哥
2014 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)59575582 电子邮件:instructorchina@mheducation.com

目 录

第 4 版译者前言

第 3 版译者前言

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 返回比与布莱克曼公式	(32)
1.8 运算放大器的供电	(40)
习题	(45)
参考文献	(55)
附录 1A 标准电阻值	(55)

第 2 章 电阻性反馈电路

2.1 电流-电压转换器	(58)
2.2 电压-电流转换器	(60)
2.3 电流放大器	(67)
2.4 差分放大器	(69)
2.5 仪器仪表放大器	(74)
2.6 仪器仪表应用	(80)
2.7 传感器桥式放大器	(84)
习题	(90)
参考文献	(96)

第 3 章 有源滤波器(I)

3.1 传递函数	(100)
3.2 一阶有源滤波器	(105)
3.3 音频滤波器应用	(111)

3.4	标准二阶响应	(115)
3.5	KRC 滤波器	(121)
3.6	多重反馈滤波器	(128)
3.7	状态变量和双二阶滤波器	(131)
3.8	灵敏度	(137)
	习题	(140)
	参考文献	(146)
第 4 章 有源滤波器(II)		
4.1	滤波器近似	(148)
4.2	级联设计	(153)
4.3	通用阻抗转换器	(160)
4.4	直接设计	(165)
4.5	开关电容	(171)
4.6	开关电容滤波器	(176)
4.7	通用 SC 滤波器	(182)
	习题	(187)
	参考文献	(193)
第 5 章 静态 Op Amp 的限制		
5.1	简化 Op Amp 电路图	(195)
5.2	输入偏置电流和输入失调电流	(201)
5.3	低输入偏置电流 Op Amp	(205)
5.4	输入失调电压	(209)
5.5	低输入失调电压 Op Amp	(214)
5.6	输入失调误差补偿	(217)
5.7	输入电压范围/输出电压摆动	(222)
5.8	最大额定值	(227)
	习题	(229)
	参考文献	(234)
	附录 5A μ A741 Op Amp 数据清单	(235)
第 6 章 动态 Op Amp 的限制		
6.1	开环频率响应	(245)
6.2	闭环频率响应	(249)
6.3	输入和输出阻抗	(255)
6.4	暂态响应	(259)
6.5	有限增益带宽乘积(GBP)对积分器电路的影响	(266)
6.6	有限 GBP 对滤波器的影响	(273)

6.7	电流反馈放大器	(278)
	习题	(287)
	参考文献	(293)
第7章 噪声		
7.1	噪声特性	(296)
7.2	噪声动态特性	(300)
7.3	噪声源	(304)
7.4	Op Amp 噪声	(309)
7.5	光电二极管放大器噪声	(315)
7.6	低噪声 Op Amp	(319)
	习题	(322)
	参考文献	(326)
第8章 稳定性		
8.1	稳定性问题	(328)
8.2	相位和增益裕度的测量	(337)
8.3	运算放大器的频率补偿	(342)
8.4	有反馈极点的运算放大器电路	(353)
8.5	输入滞后和反馈超前补偿	(361)
8.6	电流反馈放大器的稳定性	(366)
8.7	复合放大器	(369)
	习题	(373)
	参考文献	(382)
第9章 非线性电路		
9.1	电压比较器	(384)
9.2	比较器应用	(391)
9.3	施密特触发器	(397)
9.4	精密整流器	(403)
9.5	模拟开关	(408)
9.6	峰值检测器	(412)
9.7	采样保持放大器	(415)
	习题	(420)
	参考文献	(425)
第10章 信号发生器		
10.1	正弦波发生器	(428)
10.2	多谐振荡器	(433)

10.3	单片定时器	(440)
10.4	三角波发生器	(445)
10.5	锯齿波发生器	(450)
10.6	单片波形发生器	(451)
10.7	V-F 和 F-V 转换器	(458)
	习题	(463)
	参考文献	(469)
第 11 章 电压基准与稳压电源		
11.1	性能要求	(472)
11.2	电压基准	(476)
11.3	电压基准应用	(482)
11.4	线性稳压电源	(486)
11.5	线性稳压电源应用	(491)
11.6	开关稳压电源	(498)
11.7	误差放大器	(506)
11.8	电压模式控制	(508)
11.9	峰值电流模式控制	(513)
11.10	升压型稳压电源的峰值电流模式控制	(524)
	习题	(529)
	参考文献	(535)
第 12 章 D-A 和 A-D 转换器		
12.1	性能要求	(538)
12.2	D-A 转换技术	(543)
12.3	倍乘式 DAC 应用	(554)
12.4	A-D 转换技术	(558)
12.5	过采样转换器	(566)
	习题	(573)
	参考文献	(575)
第 13 章 非线性放大器和锁相环		
13.1	对数/反对数放大器	(578)
13.2	模拟乘法器	(584)
13.3	运算跨导放大器	(588)
13.4	锁相环	(595)
13.5	单片锁相环	(602)
	习题	(608)
	参考文献	(611)

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 返回比与布莱克曼公式
- 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成果。

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 $\mu A741$ 。从此运算放大器的各