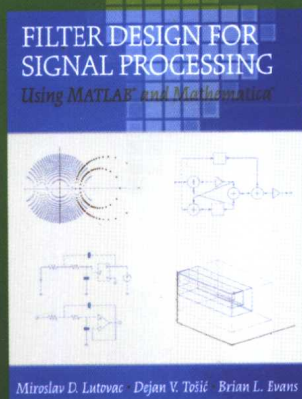


国外电子与通信教材系列

信号处理 滤波器设计

——基于MATLAB和Mathematica的设计方法

**Filter Design for Signal Processing
Using MATLAB and Mathematica**



Miroslav D. Lutovac
Dejan V. Tošić 著
Brian L. Evans
朱义胜 董辉 等译

PEARSON
Prentice
Hall



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

模拟与数字滤波器设计在电子工程、应用数学和计算机科学领域都是非常重要的内容。本书全面系统地介绍了基于椭圆函数的现代模拟和数字滤波器设计理论与实现技术,其中包括成熟的滤波器算法以及MATLAB和Mathematica设计实例。全书分为两部分,首先讲述了传统滤波器的设计技术,汇集了大量设计实例,然后重点讨论了现代滤波器设计理论,对椭圆函数滤波器进行了独特处理。本书的优点在于,介绍了模拟与数字IIR滤波器设计的最新知识,深入浅出地阐述了椭圆函数理论,提供了运用MATLAB和Mathematica设计滤波器的实例。

本书适合作为高等院校电子工程及相关专业本科高年级学生和研究生的教材及教学参考书。

Simplified Chinese edition Copyright © 2004 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Filter Design for Signal Processing Using MATLAB and Mathematica, ISBN: 0201361302 by Miroslav D. Lutovac, Dejan V. Tošić, Brian L. Evans. Copyright © 2001.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。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Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-0361

图书在版编目(CIP)数据

信号处理滤波器设计——基于MATLAB和Mathematica的设计方法/卢特威(Lutovac, M. D.)等著;
朱义胜等译. —北京:电子工业出版社, 2004.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Filter Design for Signal Processing Using MATLAB and Mathematica

ISBN 7-5053-8710-3

I. 信... II. ①卢... ②朱... III. 信号处理-滤波器-设计-高等学校-教材 IV. TN713

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第124309号

责任编辑:陶淑毅

印 刷:北京兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:38.5 字数:986千字

印 次:2004年1月第1次印刷

定 价:59.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师 移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	阮秋琦	北方交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员
	徐重阳	华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、教材建设委员会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社副社长

译者序

人类正在进入信息时代,信号处理与滤波器设计是信息科学技术领域中一个不可或缺的重要内容。在我国高校电子信息类专业的教学计划中,一般把“信号处理”和“滤波器设计”分为两门课程。由于数字化是信息技术发展的方向,因此“数字信号处理”已经纳入电子信息类专业本科或研究生的教学计划中。虽然“网络综合和滤波器设计”已有 80 年的发展史,是信息科学的基础课程,其内容已渗透到电子信息类专业的各门课程中,但目前只有部分高校有条件在研究生阶段独立设置该课程。

传统滤波器设计都是按照固定的模式进行的,即根据给定的技术指标,通过查阅滤波器设计手册或运行相应的计算机程序,确定 s 域或 z 域的传递函数和滤波器的拓扑结构,最后选择实现该滤波器的元件并计算元件值。然而这种设计模式往往只给出一种设计结果,大量的可实现方案被掩盖了。

本书三位作者多年来一直从事信号处理与滤波器设计的教学与研究工作,他们把信号处理和滤波器设计(包括无源 LCR 滤波器、有源 RC 滤波器和数字滤波器的设计)有机地结合起来,提出了滤波器设计的新算法及其在 MATLAB 或 Mathematica 中的实现,用这些新算法可以获得不同条件下的最优解,且能给出多种设计方案,而这些解在常规算法中经常被忽略。

本书内容翔实,论证严谨,具有很强的系统性。全书共分 13 章:第 1 章至第 3 章复习了信号与系统的基本理论和滤波器设计所用到的重要变换的定义及主要性质;第 4 章至第 7 章回顾了经典模拟滤波器设计基础,提出了模拟滤波器设计的新算法;第 8 章至第 11 章讨论了经典数字滤波器设计基础,提出了数字滤波器设计的新算法;第 12 章和第 13 章介绍了滤波器设计新算法中用到的一些数学内容。除给出大量的设计实例外,每章后面还附有大量习题和 MATLAB 及 Mathematica 练习。书中的 MATLAB 或 Mathematica 程序可从本书前言中提供的网站下载。本书既可作为高年级本科生教材,也可作为研究生教材,可根据教学计划灵活安排教学内容,是一本很好的信号处理与滤波器设计教材。

参加全书翻译的人员有:董辉(序、前言、第 1 章、第 2 章),李汝来(第 3 章和附录),于全明、孟怀军(第 4 章),林茂生(第 5 章至第 7 章),张云峰(第 8 章),沈红林(第 9 章至第 11 章),桑士伟(第 12 章和第 13 章),以及徐明、郑紫薇、周文胜、朱丽平、门华江、荆建、李作洲等。全书译文经董辉统一加工后,朱义胜教授对全部译稿进行了详细的审校。在翻译过程中,虽然我们已尽了最大努力,但由于专业知识和英语水平有限,译文中一定还有不当和疏漏之处,敬请读者批评指正。

序 言

半个世纪以来,滤波器设计的基本理论一直没有改变,现有的技术都只支持一种滤波器实现方法,像无源 LCR 滤波器、有源 RC 滤波器、数字滤波器及开关电容滤波器,从指标要求到实际设计的第一步,都基于 O. J. Zobel, R. M. Foster, W. Cauer, O. Brune, S. Darlington 等许多前人的基础工作。由此而产生的设计理论(其中主要是插入衰减理论)导致了滤波器初始设计的程式化:把给定的指标(如最大通带和最小阻带损耗、过渡带、阻抗电平等)转化为 s 域或 z 域的传递函数(取决于滤波器是工作在连续时间系统还是离散时间系统),或转化为 LC 滤波器结构。进行这一步时,设计者可以选择滤波器类型,如切比雪夫(Chebyshev)滤波器、巴特沃思(Butterworth)滤波器、椭圆滤波器、贝塞尔(Bessel)滤波器或其他类型。选择什么类型由以下因素决定:滤波器阶数(通常与滤波器成本有关)、群延迟、带内波纹、边带选择性、易于调试性及其他一些与应用有关的要求。考虑了这些因素及给定的指标后,设计者就可以查阅滤波器方面的书或相应的计算机程序,从而获得前面提到的传递函数或滤波器的拓扑结构,至此“初始设计模式”结束,这时设计者必须根据现有技术或按照所设计系统的技术要求在下列设计方案中做出艰难的选择,如 IC 设计、分立元件有源 RC 或 LC 设计、数字信号处理器(DSP)、单片晶体、表面声波器件(SAW)、机械装置等。

这本关于现代滤波器设计的教材摒弃了所谓的“初始设计模式”,为基本滤波器设计打开了一个全新的视野,且不必考虑技术问题。作者指出,对于一组给定的指标,常规滤波器(如切比雪夫滤波器、巴特沃思滤波器、椭圆滤波器)不是惟一的解决方案,更准确地说,它们是一系列解决方案中的特例,当满足指标要求时,所有方案允许在各种优化中进行平衡,而这在过去被认为是决不可能的。例如,满足一定增益和相位要求的椭圆滤波器的极点和零点,在过去被认为是不可改变的,而本书介绍的最小 Q 值法则可以提供一组新的极点和零点(可能增加一阶滤波器,但很少增加两阶),其极点不在椭圆上而是在一个半圆上(与巴特沃思滤波器相似),并且其主极点比原始椭圆滤波器的主极点要低很多。最小极点 Q 是指对元件容差有较低的灵敏度,通常也有较低的热噪声。当然这只是本书涉及的许多优化方法之一,书中还提供了多种不同的优化方法(直到满足指标要求,但很少需要增加滤波器阶数)。比如,本书提出了线性相位最小偏差法,及保证滤波器为最小阶数时的群延迟指定法,在离散时间滤波器的设计中,介绍了零相位法和无乘法器 IIR 椭圆滤波器结构。这本书的独到之处是,第一次提出了滤波器设计的多样性,这一点从前面提到的算法可见一斑。本书的精髓在于根据选择和优化,放宽了前面所说的“初始设计模式”中所要求的苛刻条件,因此书中讲解的技术对后面的各种滤波器实现(如 LC 滤波器、有源 RC 滤波器、数字滤波器或开关电容滤波器)都可以作为一种新的多功能的初始设计方法。毋庸置疑,这本书阐述了一些全新的对各种滤波器都适用的设计技术。

那么作者是如何成功地摆脱经典初始设计模式桎梏的呢?答案非常简单,除了非常巧妙地创造性地运用了数学技巧[如用包括多项式、平方根和对数的函数精确地代替雅可比(Jacobi)椭圆函数]外,他们还应用了以前不曾有的功能强大的计算机程序及优化方法,其中最重要的是用 Mathematica 通过符号分析法进行的优化和用现代 MATLAB 软件进行的滤波器设计。

这本书把对数学与算法的准确认识和对经典与现代滤波及信号处理技术的精深理解,绝妙地融入极先进的、成熟的程序设计中,从而产生出一种全新的,毫不夸张地说,甚至是革命性的滤波器设计方法,这必将对未来的滤波器设计另域产生深远的影响。这里毫无贬低前人在网络理论和滤波器设计中所做出的巨大成就之意,只是想说明这样一个事实:如今的现代计算工具当掌握在数学、算法及网络理论专家手中时,可以使像滤波器理论与设计这样的以前被认为是完整的、不可改变的学科发生戏剧性的变化。幸运的是,本书的三位作者结合现代计算机技术与算法(如 MATLAB 和 Mathematica),推出了也许将彻底改变滤波器设计领域的这本书和计算机软件,而这在几年前是无法预料的。随着本书的问世,滤波器设计恐怕永远不会再是单一模式的了。

George S. Moschytz
Zurich

前 言

模拟滤波器与数字滤波器的设计对工程、应用数学及计算机科学都是非常重要的。对设计人员来说,滤波器是控制、信号处理和通信领域的重要组成部分,广泛地用于各种系统中,如化学处理设备、科学仪器、悬挂系统、调制解调器和数字蜂窝电话等。

当设计人员应用常规技术和软件设计滤波器时,只得到了满足一组指标的其中一种滤波器,而实际上可能存在无限多的设计方案。本书介绍的技术和软件可产生大量的满足指标要求的滤波器设计方案,给读者提供了无限的设计空间。这些滤波器具有如下特点:最小阶数、最小品质因数、最低复杂度、对零极点位置的最小灵敏度、与给定群延迟有最小偏差、近似线性相位和最小过冲峰值。对于数字滤波器,设计空间也包括二次系数滤波器。这些灵活的设计方案对于评价滤波器在模拟电路、数字硬件或软件中的综合性能是至关重要的。

本书解决了滤波器理论与实践相脱节的问题,提出了在过去五年里开发的新算法和新设计方案,包括成熟的滤波器设计算法以及这些算法在 MATLAB 或 Mathematica 中的实现。为了使本书既适合专业人员又适合研究人员使用,全书分为两部分:第一部分回顾了常规的滤波器设计技术,提出了几种成熟的新算法,并讨论了许多实例,这些实例给出了一些无法用常规技术设计而可以用现代方法设计的滤波器;第二部分讨论了现代设计方法的理论基础。附录 A 中给出了一些在 MATLAB 和 Mathematica 中应用现代滤波器设计软件的例子,每章还附有一些习题供读者练习。

在设计模拟和数字 IIR 滤波器时,人们一般依赖于现有的软件程序或需要大量表格的呆板方法,这一“黑盒子”方法源于作为滤波器设计基础的逼近理论,其中包含复杂的数学问题。遗憾的是,这种常规的方法只能得到一种设计方案,其后还隐藏着大量的可供选择的滤波器设计方案,这些设计方案在模拟电路、数字硬件和软件中实现时更具鲁棒性。

本书提供的先进方法可获得满足用户指标要求的多种设计方案,这些现代滤波器设计方案的基本特点是:

- 许多设计方案满足同一用户指标要求。
- 巴特沃思和切比雪夫 IIR 滤波器是椭圆 IIR 滤波器的特例。
- 最小阶滤波器与某些高阶滤波器相比可能不是最有效的实现。

我们的方法是寻求各种设计指标,使其既满足用户的指标要求又不超出实现技术的限制。这里提供的算法可以获得下面的设计:

- 最小的滤波器阶数:
 - 最大阻带损耗裕量
 - 最大通带损耗裕量
 - 最窄过渡带(常规设计)
 - 最宽过渡带
- 最小的最大品质因数
- 最小的实现成本
- 与给定群延迟的最小偏差

- 与线性相位的最小偏差
- 具有二次系数的椭圆 IIR 滤波器
- 零相位椭圆 IIR 滤波器
- 无乘法器的椭圆半带 IIR 滤波器
- 无乘法器的希尔伯特变换器
- 鲁棒性低灵敏度锐截止开关电容滤波器

例如,为微控制器和其他具有定点算术运算及无硬件乘法器的体系结构设计有选择性的椭圆 IIR 滤波器。

现代技术的理论基础是用于逼近滤波器幅频响应的雅可比椭圆函数,它们是非常复杂的超越函数。然而,对一些多阶次的滤波器,我们仅仅用多项式、平方根和对数就可以获得椭圆滤波器设计的闭式解,这一突破使我们获得了用户技术指标、约束条件与零极点位置间的精确关系,这样,就可以将 IIR 滤波器的设计空间从椭圆函数逼近理论转换到设计者用代数知识就可以理解的多项式理论,此外,最终表达式也很简单,可精确设计大多数椭圆滤波器,比用经典方法设计要快 10 到 100 倍。

本书具有许多优点。首先,书中提供了模拟和数字 IIR 滤波器设计在算法和软件方面的最新进展情况,运用这些先进技术可以设计许多种常规技术不能设计的滤波器;其次,书中汇集了大量运用现代技术设计滤波器的实例;最后,书中对椭圆函数滤波器进行了独特处理。

全书共分为 13 章,内容如下:

第 1 章回顾了连续时间信号和离散时间信号的基本分类,讨论了信号的数学表达式,介绍了两种用于分析和处理信号的计算机环境——MATLAB 和 Mathematica。

第 2 章介绍了线性系统的基础理论,并定义了系统的基本特性,提出了本书用到的基本定义和数学基础。虽然许多读者熟悉这部分内容,但我们旨在强调本书的逻辑连贯性而非数学严密性。

第 3 章复习了本书研究滤波器设计所用到的重要变换的定义和重要特性,主要有相量变换、傅里叶级数和谐波分析、傅里叶变换、拉普拉斯变换、离散傅里叶变换和 z 变换,并给出在变换域中分析 LTI 系统的详细步骤。

第 4 章复习了经典模拟滤波器设计基础,给出了传递函数的分类、主要特性和灵敏度,提出了最重要的模拟滤波器的实现方法,并对各种传递函数的实现给出了详细的实例研究。

第 5 章复习了模拟滤波器设计的基本定义,介绍了把滤波器技术指标映射到设计空间的简单步骤,根据给定准则找出最佳方案的设计空间,并通过一个应用实例总结了本章,该实例根据市场已有的集成电路,设计了一个鲁棒性和高选择性的模拟滤波器。

第 6 章提出了(1)用经典技术不能设计的最佳模拟滤波器的实例研究和(2)基于这些设计方案的数学框架,本章还提出了模拟滤波器设计算法的详细步骤。

第 7 章为模拟滤波器设计提出了一个广义框架(这些滤波器由电路实现后表现出几种理想特性)。在该框架中,为有约束的非线性优化问题建立了顺序二次编程问题的模型,并得到了可同时优化幅频响应、相频响应和过冲峰值特性以及品质因数实现特性的可微约束和加权可微目标函数。

第 8 章复习了经典数字 IIR 滤波器设计基础,给出了 z 域传递函数的分类、主要特性和灵敏度,提出了一些最重要的数字滤波器实现,每个实现都有完整的设计方程和步骤,以便使该

设计易于应用到各种数字滤波器设计问题中。

第9章复习了数字 IIR 滤波器的基本定义,介绍了把滤波器指标映射到设计空间的简单步骤,根据给定的准则找出最佳方案的设计空间,通过几个重要应用实例对全章做了总结。这些例题中有低灵敏度选择性无乘法器 IIR 滤波器、二次 IIR 滤波器、半带 IIR 滤波器、1/3 带滤波器、窄带 IIR 滤波器、希尔伯特变换器和零相位 IIR 滤波器,每个实例设计都有计算滤波器系数的详细步骤。

第10章提出了(1)用经典技术不能设计的最佳数字滤波器实例研究和(2)作为这些最佳滤波器设计基础的标准数学框架,以及数字滤波器设计算法的详细步骤。

第11章提出了可同时优化数字滤波器多个特性的广义框架,该框架优化了幅频响应和相频响应特性的零极点分布与品质因数的实现特性及对这些特性的主要约束,把有约束的非线性优化问题用公式表示为顺序二次编程问题。

第12章介绍了基本的雅可比椭圆函数并复习了它们之间的重要关系,给出了在一般教材中没有的几个相关定理,提供了各种有用的近似公式以便得出椭圆有理函数,且导出了雅可比椭圆函数的嵌套特性,还提出了一种新的椭圆滤波器设计方法,该方法运用了基于嵌套特性的精确的闭式表达式。

第13章介绍了作为切比雪夫多项式一般推广的椭圆有理函数和前面几章用到的一些特殊函数的数学理论,对于椭圆有理函数的基本特性,我们希望给读者一个直观的理解。尽管没有涉及雅可比椭圆函数,但我们运用简单的代数方法建立了椭圆有理函数的概念。

每一章后面都附有习题,主要是提供了与书中提到的概念及技术相关的重要练习,几乎所有的问题都适合用 MATLAB 和 Mathematica 来解决。本书及滤波器设计软件、Mathematica 手册和 MATLAB 程序由下述网站支持:

<http://galeb.etf.bg.ac.yu/~lutovac>

本书的另外一个支持网站是:

<http://www.prenhall.com/lutovac>

那么本书如何用于教学呢?

正如书名所示,本书强调用软件(MATLAB 和 Mathematica)进行滤波器自动设计,而不是强调研究滤波器的一般理论。

随着滤波器设计和实现技术的近期及未来发展,掌握适合于分析和设计连续时间和离散时间滤波器的计算机辅助技术变得越来越重要,书中的全部方法都以此为出发点。

我们试图留给每一位读者(包括学生、教师、研究人员或工程师)一套用于解决实践中重要滤波器设计问题的软件工具——Mathematica 手册和 MATLAB 程序。

本书的显著特点是给出了运用变换方法或在时域进行滤波器分析的详细步骤,并以自带的 Mathematica 手册作为实例。学生可利用这些手册(1)用软件进行自动符号滤波器的分析和设计,(2)获得传递函数的近似表达式和(3)深刻理解与滤波器有关的参数和系数。

本书是为那些希望将基于计算机的学习工具与学生课程相结合的教学人员设计的,我们旨在为学习现代滤波器设计理论与解决问题的技巧的学生提供一个有效的环境,为此,本书较偏重计算机方法,使计算机方法与理论相互加强,而不是厚此薄彼。

我们认为学生通过使用 MATLAB 和 Mathematica 再做一遍习题会使学习更加有效,有利于抓住关键概念的精髓。

由于滤波器分析和设计直接应用于工程,特别是电子工程中,所以它是许多学生的基础课程,它所植入的概念和运用的分析技术远在电子工程基础之上。

滤波器设计的内容非常丰富,在介绍性课程或现代滤波器设计课程中各种方法都可采用。本书对滤波器设计和分析做了全面的处理,其内容足以满足一学期或两学期的课程要求。学习本书时学生应具备微积分、复数和差分方程的知识。

为大学二年级学生开设一学期的滤波设计简介课程可包含以下内容:(1)第1章至第3章;(2)第4章;(3)从第5章中选择有关技术指标和逼近问题的内容;(4)第8章;(5)从第9章中选择关于数字技术指标和近似问题的内容。把课本内容与 MATLAB 信号处理工具箱和 Mathematica 信号与系统包结合起来,说明经典滤波器设计步骤,接下来略讲 Mathematica 实例手册和 MATLAB 滤波器设计工具箱。

为大学二年级学生开设一学期的模拟滤波器设计简介课程应包含以下内容:(1)第1章至第3章;(2)第4章、第5章和第7章;(3)利用 MATLAB 信号处理工具箱和 Mathematica 信号与系统包,说明经典模拟滤波器设计,接下来略讲 Mathematica 实例手册和 MATLAB 模拟滤波器设计工具箱。

为大学二年级学生开设一学期的数字滤波器设计简介课程可包含以下内容:(1)第1章至第3章;(2)第8章、第9章和第11章;(3)利用 MATLAB 信号处理工具箱和 Mathematica 信号与系统包,说明经典数字滤波器设计;(4)接下来讲解 Mathematica 实例手册和 MATLAB 数字滤波器设计工具箱。

除以上几种安排外,本书还可做连续两学期的滤波器设计课程的教材,本书在滤波器设计简介课程中未讲到的部分与其他课程一起,可组成高年级的基础选修课。作为两学期的课程,建议前11章要全部覆盖,接下来略讲第12章和第13章。第5章和第9章要详细讲解,因为这两章引入了滤波器设计中设计空间的概念。

本书还可作为高年级本科生或一年级研究生的模拟和数字滤波器设计教材,分两个学期讲授:(1)复习第1章至第3章;(2)第4章和第5章;(3)主要讨论模拟滤波器设计算法(第6章),强调应用而不是公式推导;(4)第7章深入讲解;(5)第8章和第9章;(6)主要讨论数字滤波器算法(第10章),强调应用而不是公式推导;(7)第11章深入讲解;(8)根据今后课程的方向,从第12章和第13章中选择一些内容。

本书的结构允许仅对模拟滤波器设计感兴趣的学生跳过有关数字滤波器的内容学习而不会失其连贯性,反过来也一样。应该指出,课堂上不一定要覆盖所有章节,教师可适当取舍。根据自己的情况,学生可利用第1章至第3章复习或扩展其连续时间系统和离散时间系统的线性系统理论知识。

硕士或博士研究生的课程也可从第12章和第13章中选择一些内容。

从本书各章中精选的主题也可用于电子学和电子电路理论课程。

书中包括了含有70多个实例的 Mathematica 手册以及大量的 MATLAB 程序,每一章后面还附有许多习题和练习,这将有助于教师为适应不同学生的特殊要求而提供相当灵活的作业组合,书中提出的许多滤波器实现,既有模拟的又有数字的,可帮助教师为学生组织形式多样的作业、课外自修项目和测试,此外,滤波器设计算法(第6章和第10章)可直接用一些计算机语言和环境编程,如 Visual BASIC, Visual C, Maple, DERIVE 或 MathCAD。

在本书的编写过程中, Ljiljana Milić教授提出了宝贵的改进意见, Marija Hribšek 教授、An-

tonije Djordjević教授和 Veljko Milutinović教授给予了极大的鼓励,我们深表感谢。第一作者还特别感谢 Siniša Davitkov 总经理所提供的滤波器设计方面的工作机会,同时感谢 George S. Moschytz 教授在本书撰写过程中给予的鼓励和支持。

特别指出 Prentice Hall 尤其是 Alice Dworkin 不断给予的鼓励和技术支持,对本书的出版起到了重要的作用。

这里还要感谢 Akron 大学的 Igor Tsukerman 教授以及加利福尼亚大学洛杉矶校区的 Michael J. Werter 教授,感谢他们给予的有益建议和宝贵意见。

作者 Miroslav D. Lutovac 是贝尔格莱德大学电信电子研究所(IRITEL)的首席科学家、电子与计算机工程学院的副教授,主要研究有源、无源和数字网络与系统,滤波器逼近,数字滤波器的符号分析与综合,以及无乘法器的数字 IIR 滤波器设计的理论与实现,在这些领域已发表论文 100 多篇。Lutovac 教授在贝尔格莱德大学获得了电子工程学士学位(于 1981 年)、硕士学位(于 1985 年)和博士学位(于 1991 年)。现正致力于多芯片模块设计和声音 δ 编码器几个国家项目的研究。在教学方面,他主要讲授电子学、计算机辅助设计、数字信号处理和滤波器分析与设计等课程。

Dejan V. Tošić是贝尔格莱德大学电子与计算机工程学院的副教授,主要研究电路理论与分析、滤波器设计与综合、神经网络、微波电路和计算机辅助设计,在这些领域已发表论文 100 多篇,目前正致力于为线性电路与系统的符号分析建立一个一般性框架,使其适合于科研、工业和教育等各方面的应用,他正在运用这一框架开发优化模拟和数字滤波器设计与合成的自动设计工具。Tošić教授在贝尔格莱德大学获得了电子工程学士学位(于 1980 年)、硕士学位(于 1986 年)和博士学位(于 1996 年)。1992 年他获得了贝尔格莱德大学电子与计算机工程学院的教师年度奖。讲授的课程有电路理论、微波工程和数字图像处理。

Brian L. Evans 是美国奥斯汀得州大学电子与计算机工程系的副教授,嵌入信号处理实验室的主任,该实验室是电信与信号处理中心及视觉与图像处理中心的一部分。他主要研究实时嵌入系统,信号、图像和视频处理系统,系统设计,电子设计自动化,符号计算和滤波器设计,在这些领域已发表权威性的会议和期刊论文达 75 篇之多。他还致力于多维数字信号处理、嵌入软件系统和线性系统与信号等方面的研究,同时从事这些方面的教学工作。1987 年在 Rose-Hulman 技术学院获得电子工程理学学士学位,并分别于 1988 年和 1993 年在乔治亚技术学院获硕士和博士学位,从 1993 年到 1996 年在加利福尼亚大学伯克利校区做托勒密(Ptolemy)项目的博士后研究工作。托勒密是一个关于信号处理、通信和控制系统的设计方法论的研究项目和软件环境。除托勒密项目外,他还在开发和发布另外 6 个计算机辅助设计框架的工作中起到了重要的作用,包括 Mathematica 的信号与系统包,这一成果已在 1995 年秋投放市场。Evans 教授是 IEEE 图像处理学报的副主编、IEEE 信号处理学会系统技术委员会信号处理系统设计与实现小组的成员,并且是 IEEE 的高级会员,以及 1997 年国家自然科学基金 CAREER 奖的获得者。

Miroslav D. Lutovac

Dejan V. Tošić

Brian L. Evans

目 录

第 1 章 信号	1
1.1 信号的分类	1
1.2 采样定理	7
1.3 基本连续时间信号——函数	10
1.4 基本离散时间信号——序列	14
1.5 MATLAB 中的连续时间信号	16
1.6 MATLAB 中的序列	18
1.7 Mathematica 中的连续时间信号	20
1.8 Mathematica 中的序列	24
习题	26
MATLAB 练习	29
Mathematica 练习	29
第 2 章 系统	31
2.1 基本定义	31
2.2 方框图	33
2.3 系统特性	34
2.4 线性时不变系统	38
习题	43
MATLAB 练习	47
Mathematica 练习	47
第 3 章 变换	49
3.1 相量变换	49
3.2 傅里叶级数与谐波分析	64
3.3 傅里叶变换	68
3.4 拉普拉斯变换	80
3.5 离散傅里叶变换	84
3.6 z 变换	92
3.7 用变换法分析 LTI 系统	96
习题	105
MATLAB 练习	107
Mathematica 练习	108

第 4 章 经典模拟滤波器设计	109
4.1 模拟滤波器简介	109
4.2 基本滤波器转移函数	111
4.3 转移函数的分解	118
4.4 零极点配对	119
4.5 最佳级联顺序	119
4.6 灵敏度	120
4.7 模拟滤波器的实现	127
4.8 运算放大器有源 RC 滤波器	128
4.9 开关电容(SC)滤波器	147
4.10 无源 RLC 滤波器	160
4.11 运算跨导放大器(OTA)滤波器	173
4.12 电流传输器(CC)滤波器	179
习题	182
MATLAB 练习	184
Mathematica 练习	185
第 5 章 现代模拟滤波器设计实例研究	187
5.1 基本定义	187
5.2 模拟滤波器的技术指标	188
5.3 逼近问题	192
5.4 设计空间	193
5.5 基本设计方案的选择	196
5.6 可视化设计空间	203
5.7 SC 现代滤波器设计实例	205
习题	210
MATLAB 练习	212
Mathematica 练习	213
第 6 章 现代模拟滤波器设计算法	214
6.1 引言	214
6.2 符号一览	214
6.3 设计方程和步骤	216
6.4 设计 D1	224
6.5 设计 D2	225
6.6 设计 D3A	226
6.7 设计 D3B	226
6.8 设计 D4A	227
6.9 设计 D4B	227
6.10 设计 D5	228

6.11 时间响应和频率响应	229
6.12 高通滤波器	230
6.13 带通滤波器	231
6.14 带阻滤波器	232
6.15 结论	233
第 7 章 模拟滤波器设计的多准则优化	234
7.1 引言	234
7.2 符号	235
7.3 目标函数	236
7.4 约束条件	240
7.5 滤波器设计实例	241
7.6 自动框架的检验和修正	247
7.7 结论	249
第 8 章 经典数字滤波器设计	250
8.1 数字滤波器概述	250
8.2 基本滤波器转移函数	256
8.3 转移函数的分解	268
8.4 零极点配对	269
8.5 最佳级联顺序	269
8.6 有限字长效应	269
8.7 数字滤波器的实现	281
8.8 各种实现方案的比较	291
习题	294
MATLAB 练习	297
Mathematica 练习	298
第 9 章 现代数字滤波器设计实例研究	301
9.1 基本定义	301
9.2 数字滤波器的技术指标	302
9.3 函数逼近	306
9.4 设计空间	307
9.5 基本设计方法	310
9.6 可视化设计空间	317
9.7 椭圆半带 IIR 滤波器	320
9.8 希尔伯特变换	330
9.9 无乘法器的椭圆 IIR 滤波器	333
9.10 线性相位 IIR 滤波器	349
习题	356
MATLAB 练习	358
Mathematica 练习	359

第 10 章 现代数字滤波器设计算法	361
10.1 引言	361
10.2 符号一览	361
10.3 设计方程和步骤	363
10.4 设计 D1	372
10.5 设计 D2	373
10.6 设计 D3a	373
10.7 设计 D3b	374
10.8 设计 D4a	374
10.9 设计 D4b	375
10.10 设计 D5	376
10.11 频率响应	377
10.12 高通滤波器	377
10.13 带通滤波器	378
10.14 带阻滤波器	379
10.15 结论	380
第 11 章 数字滤波器设计的多准则优化	381
11.1 简介	381
11.2 符号	382
11.3 目标函数	383
11.4 约束条件	385
11.5 实例	385
11.6 结论	386
第 12 章 椭圆函数	387
12.1 勒让德椭圆积分	387
12.2 雅可比椭圆函数	388
12.3 椭圆函数的周期	390
12.4 级数表示和模常数	391
12.5 切比雪夫多项式	395
12.6 椭圆有理函数	400
12.7 雅可比椭圆函数的嵌套特性	410
12.8 归一化转移函数的极点	419
12.9 椭圆有理函数零点的精确公式	428
12.10 阶数方程	432
12.11 最小 Q 值椭圆滤波器	436
习题	438
MATLAB 练习	438
Mathematica 练习	439