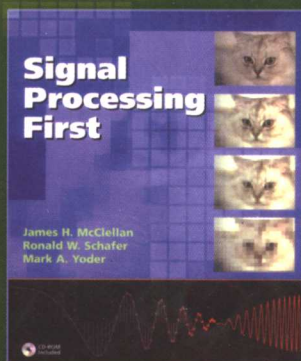


国外电子与通信教材系列

# 信号处理引论

## Signal Processing First



James H. McClellan  
[美] Ronald W. Schafer 著  
Mark A. Yoder

周利清 等译

PEARSON  
Prentice  
Hall



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

国外电子与通信教材系列

# 信号处理引论

Signal Processing First

James H. McClellan

[美] Ronald W. Schafer 著

Mark A. Yoder

周利清 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书力求透彻地讲解信号处理的基本原理,其结构是:从简单的连续时间正弦信号到离散时间信号和系统,然后再返回到连续时间信号。本书前八章详细讨论了连续时间正弦信号和它们的复指数表达式;引入频谱和傅里叶级数的概念;研究抽样正弦信号的方法,阐述离散信号和离散系统的特性;由FIR滤波器引出最基本的线性系统概念;导出并阐述了频率响应这一关键概念;然后引出 $z$ 变换和IIR系统。之后又回到了连续时间信号和系统,引出卷积以及连续时间系统的频率响应,进行关于傅里叶变换的讨论。最后讨论了信号处理在线性滤波、调制和频谱分析等方面的应用。本书非常重视实验,包含许多新的实验课题,如滤波、傅里叶级数以及模拟和数字通信,特别是多媒体方面的课题;还采用了很多新的论证方法,具有可视性;本书纳入了数以百计的课后作业习题和解答;并且包含MATLAB编程和许多新的计算机演示实例。随书附带的光盘记录了本课程的全部内容,包括书中的练习、实验、例题以及课堂上使用的演示程序和动画制作、实验室测试工具和课后作业的解答,这些资料提供了超越公式概念的直观的新方法,能够很好地帮助我们理解信号处理的原理及方法。

本书是作者根据他们近十年的教学和研究工作成果写成的,可以作为许多高校电气和计算机工程专业二年级本科生的教科书,同样适合在科学和技术等领域从事信号处理工作的科技人员阅读。

Simplified Chinese edition Copyright © 2005 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Signal Processing First. ISBN: 0130909998 by James H. McClellan, Ronald W. Schafer, Mark A. Yoder. Copyright © 2003. 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:01-2003-2160

### 图书在版编目(CIP)数据

信号处理引论/(美)麦克莱伦(McClellan, J. H.)等著;周利清等译.-北京:电子工业出版社,2005.4  
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Signal Processing First

ISBN 7-121-00637-5

I. 信... II. ①麦... ②周... III. 信号处理-教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第010753号

责任编辑:杜闽燕

印 刷:北京智力达印刷有限公司

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:32.25 字数:909千字

印 次:2005年4月第1次印刷

定 价:48.00元(附光盘1张)

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。

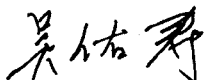
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版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

为作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,我们通过与作者联络、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 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师                                              |
|     | 杨千里 | 总参通信部副部长, 中国电子学会会士、副理事长<br>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<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员  |
|     | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系主任<br>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<br>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<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员                  |
|     | 阮秋琦 | 北京交通大学教授、博士生导师<br>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、电子信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员   |
|     | 郑宝玉 | 南京邮电学院副院长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                    |
|     | 朱世华 | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员    |
|     | 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<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员    |
|     | 毛军发 | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长<br>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、《中国邮电高校学报(英文版)》编委会主任                                  |
|     | 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 | 电子工业出版社原副社长                                                    |
|     | 王志功 | 东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员 |
|     | 张中兆 | 哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长                                    |
|     | 范平志 | 西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长                                    |

## 译 者 序

信号处理是当前信息时代非常重要的一门学科,它在许多领域中都有着广泛的应用。本书就是三位作者从这些前提出发所进行的近十年的工作成果。在作者所在的大学以及美国的许多高校,都将信号处理作为电子、电气、通信、计算机等专业的首选专业基础课程。

本书的主要译者北京邮电大学的周利清教授多年来一直从事信号处理方面的教学和科研工作,在本书的翻译过程中,深切体会到对于从事信号处理的教学、研究、开发、应用等方面工作的人员来说,这的确是一本关于信号处理基础的很好的教材和参考书。本书对于信号处理所涉及到的数学基础知识做了透彻、详细的说明,深入分析了连续时间信号和系统与离散时间信号和系统之间的关系,严谨地阐述了 $z$ 域、频域、时域相互间的区别和联系。对于信号处理的基本原理和基本概念,不但在理论上进行了深入的讲解,而且通过许多例子和演示做了形象的说明。本书对实验非常重视,随书附带的CD-ROM中包含许多实验课题,都是教学内容的不可分割的部分。作者主张学生们亲手用实际信号做实验,在本书的实验课题中,学生们将正弦波综合成为音乐,也可以听到并看见他们对声音和图像信号进行的滤波操作而产生的效果,还可以认识到正弦波正是他们通常在接入Internet时所用到的调制解调器的基础,从而对信号处理的基本概念产生直接而深刻的印象。本书还由浅入深地列出了大量习题,并且在CD-ROM上附有详细的解答。此外,教学内容与MATLAB这一非常好的工具相结合是本书的一大特色,MATLAB使快速开发演示程序成为可能,而演示程序可以使复杂的数学概念变得直观和清晰。

参与本书翻译工作的还有高级工程师许钧,他承担了前言和附录的翻译工作;工程师许燕宾承担了有关MATLAB内容的翻译工作;周利清教授负责全书的翻译和整理工作。

# 前 言

信号处理是学习电气工程和计算机工程最好的起点,本书就是作者从上述前提出发所进行的近十年的工作成果。在1993年夏季,James H. McClellan 和 Ronald W. Schafer 开发了一门四分之一学期的课程,该课程后来成为佐治亚理工学院计算机工程专业学生的首选课程。而当时这些学生正在单独学习与ECE学校电气工程专业学生所学内容重叠的课程。作者认为把数字信号处理(DSP)作为计算机工程专业的首位课程是非常有利的:它能够为学生介绍如何把数学作为思考工程问题的语言;它将给后续课程打下有用的基础;它将作为实现系统的一种方法与数字计算建立起紧密的联系;同时它能够提供一种有益于应用的可能性,从而推动工程师去完成为解决实际问题而把数学与计算联系起来的艰巨工作。

我们并不是有上述想法的第一人,普林斯顿大学的Ken Steiglitz教授的两本书对我们有较大的影响<sup>①</sup>。1993年在佐治亚理工学院进行了“DSP First”方法的尝试,该方法可行的主要理由有:(1)易于访问日益强大的个人计算机;(2)MATLAB的可用性,一个强大而且易于使用的数值计算的软件环境。的确,Steiglitz于1972年出版的书在当时是领先的,因为那时DSP很少有实际应用,即使对当时所用的批处理计算机所需的有效编程进行简单模拟也没有。然而,到了20世纪90年代早期,DSP的应用就像CD唱片、高速调制解调器和蜂窝电话那样广泛普及,其原因就在于可实时进行大规模运算的低成本DSP芯片的应用,使得集成电路技术成为了既能够提供便捷的基于PC的学习DSP的实验环境又能够创造推动研究DSP的应用氛围的驱动力。

从一开始我们就相信能够亲手用实际信号做实验是具有决定意义的,这种实验是由在PC机上运行的基于MATLAB软件的“实验室”提供的。在该实验室的课题中,学生们通过听到并看见对声音和图像信号执行的滤波操作的效果而得到直接的强烈印象。学生们用正弦波来综合音乐,他们也看到,那些正弦波正是他们在按常规接入Internet时所用的调制解调器的基础。我们还发现,MATLAB使快速开发演示程序成为可能,而演示程序可使复杂的数学概念变得直观和清晰。在1995年,我们在课程中曾经写了一个包含上述课题的注释,同时我们积累了大量基于计算机的支持素材。当时离开Rose-Hulman理工学院去休假的Mark Yoder有了一个想法:把所有的资料以一种为其他老师和学生易于接受的形式共享,这个想法后来变成记录了我们的课程网站全部内容的CD-ROM,其中包括课堂上使用的演示程序和动画制作、实验室测试工具和课后作业的题解。对于教师来说,这份资料已经改变了我们现有的思维方式,因为它提供了超越公式概念的直观的新方法。过去这些年,我们的网站在不断地发展。可以预见,网站的发展将继续下去,这份资料的使用者将看到一种新的思想在形成,它是以增加演示和实验的形式出现的。在1998年,所有的资料打包成为一种教材(及光盘),并且将其命名为“DSP First: A Multimedia Approach”。

“DSP First: A Multimedia Approach”这本书刚一完成,佐治亚理工学院就把课程从四分之一学年改为二分之一学年,同时我们把课程扩展为信号处理引论,成为计算机工程师和电气工程的首选课程。然而,我们自己发现一本书只能包含一学期所需教材的三分之二,在一学期的教学计划

<sup>①</sup> *An Introduction to Discrete Systems*, John Wiley & Sons, 1972.

*A Digital Signal Processing Primer: With Applications to Computer Music*, Addison-Wesley Publishing Company, 1996.



中要求有信号与系统的核心课程<sup>①</sup>。这就使我们又花费了4年时间开发出包括新的4章内容的教材,其中包括:连续时间信号处理和傅里叶变换;许多新的实验室课题,如滤波、傅里叶级数以及模拟和数字通信;许多新的论证和可视方法;数以百计的课后作业习题和解答;以及原来许多计算机演示的更新。

本书是我们致力于扩充基本原理的版本,具有显著的特点,就是将信号处理这门课提高到能够作为ECE首位课程的水平,即典型的大学二年级的水平。本书涉及的课题并不令人意外,但由于我们必须把信号处理的概念同某些已引入的想法结合起来,所以课题的进展会给某些教师异乎寻常的冲击,其中的部分原因是,在电气工程课程表中,信号与系统以及DSP在线性电路和线性系统的传统背景下已经作为低、高年级共有的课程。我们始终相信有充分的理由去改变这种顺序,因为信号处理课程的提前学习将给电气和计算机工程专业的学生一个极好的机会,使他们认识到数学和数字运算是理解应用工程的关键。进一步说,这种方法使学生更容易接受其他的主课(如计算机科学)以及其他工程领域的课程。由于非专业人士开始在科学和技术等多方面经常运用数字信号处理技术,这一点变得越来越重要。

本书的组成是从简单的连续时间正弦信号到离散时间信号和系统,然后再返回到连续时间信号,最终将离散和连续时间信号混合在一起,在实际工程系统中经常是这样的。由本书的目录可以看出,本书一开始非常简单(参见第2章),它详细讨论了连续时间正弦信号和它们的复指数表示式,这是线性电路课程中传统的题目;进而,我们着手引进谱的概念(参见第3章),通过简要地引进傅里叶级数来研究正弦信号的和;在第4章中,我们用研究抽样正弦信号的方法,转移到离散时间信号上,这就避免了傅里叶变换所增加的复杂性,而引出了抽样这一重要概念。直到本书的这个章节,我们只是依赖于最简单的正弦和余弦函数。然后,用简单的FIR滤波器引出最基本的线性系统概念(参见第5章),由FIR滤波器导出并阐述了一个关键的概念——频率响应(参见第6章),然后引出 $z$ 变换(参见第7章)和IIR系统(参见第8章)。本书前八章与“DSP First: A Multimedia Approach”的内容非常相似。接着,我们引出了卷积,回到了连续时间信号和系统(参见第9章),以及连续时间系统的频率响应(参见第10章)。然后很自然地进行了作为连续时间信号的普遍表达的傅里叶变换的讨论(参见第11章)。本书最后两章通过对前面章节所涉及的概念的应用进行讨论而对全书做了总结。至此,如果一个学生认真阅读了本书,完成了课后作业,并且做了与本书前面章节有关的各类实验室课题,将会获得理解线性滤波、调幅、抽样原理和离散时间滤波以及频谱分析等方面内容及其应用的能力。

在佐治亚理工学院的二年级,15周的课程包括了本书第2章到第12章的绝大部分内容。课程安排是:每周两节1小时的授课,一次1.5小时的复习加深课和一次1.5小时的实验课。正如前面所提到的,我们的重点放到了实验上,因为我们深信实验能够激发学生去学习信号处理的数学方法并且能够引导学生在工程分析和设计中运用功能强大的软件。在Rose-Hulman理工学院的低年级讲授信号处理基础,10周课程覆盖了本书的第4章到第13章,课程安排为每周4节1小时的授课,学生们在整个课程中都使用MATLAB软件,但没有单独的实验时间。

从前面的讨论可以看出,这不是一本通常的关于信号和系统的书,不同点是本书包含了大量的正弦和复向量的表达式,而在传统的电气工程课程中,在学习信号与系统之前,这些概念都包括在“线性电路”课程中。确实,本书课题的选择和本书的宗旨就是着重于与传统的分离,重要的是讲授信号处理基础也开辟了讲授线性电路的新途径,因为有许多内容将考虑到电路课程中已经改变的

<sup>①</sup> 已经出版的“DSP First: A Multimedia Approach”一书仍然适合于四分之一学年的课程或者在非ECE(电气和计算机工程)领域作为信号处理课程,这本书目前正在按照本书第1章到第8章中相应的变化进行修订。

重点。在佐治亚理工学院,我们根据学生已经明白了向量和正弦稳态响应这一事实,可以更快地从电阻电路讲到交流电路。此外,学生在学习线性电路之前也了解频率响应以及零点-极点等重要概念,这就可以将重点更多地放在作为线性系统的电路上。例如,将拉普拉斯变换作为一种工具用于电路课程中,以解决与线性电路有关的特定系统的问题,这方面的内容已经编成了一本由 Russell Mersereau 教授和 Joel Jackson 教授共同写作的附带 CD-ROM 的新书<sup>①</sup>。

与通常的信号与系统教材的第二个区别在于,本书强调依赖于“频域”概念的课题,这就意味着诸如拉普拉斯变换、状态空间和反馈控制等课题不包括在书中。在佐治亚理工学院,这些课题包含在初级“tier two”的关于控制系统的课程所要求的线性电路课中。虽然我们的教材已经形成了一种特有的观点,但这并不意味着本书只能像佐治亚理工学院那样来使用。例如,在 Rose-Hulman 理工学院,在低年级的课程中就跳过了关于正弦信号和复指数等内容,这是因为学生们在电路课程中已经学习了这些内容,这就允许我们用四分之一的时间讲完教材的后面部分。的确,如果适当地选择课题,对于从频域观点出发以通信和信号处理应用为重点的信号与系统课程,我们的教材既可以用四分之一学期讲完,也可以花一学期的时间讲完。对于大多数的电气工程课程表,面向控制的课题将不得不包含在其他课程里。对于其他的课程表,例如计算机科学和计算机工程,本书把重点放在那些与多媒体计算密切相关的课题上,而面向控制的课题一般来说在课程表中并不作为要求。对于其他那些数据获得和频域分析在工程分析和设计中起重要作用的工程领域,情况也可能如此<sup>②</sup>。

本书附带的 CD-ROM 包含我们当前讲授电气和计算机工程专业大二学生整个学期的首选课程所用的全部资料,这些基于计算机的新的媒体形式提供了强有力的手段。我们将继续用不同的表达模式来进行实验,比如在所附带的 CD-ROM 上伴有所解答问题的大量文档的讲解和动画。对于原来的“DSP First: A Multimedia Approach”的 CD-ROM,我们发现在其中找到所需的材料比较困难,于是就在现在的 CD-ROM 上提供了一个搜索引擎,这便可以根据关键字搜索很容易地找到相关材料。例如,如果你想知道“firfilt.m”为什么在“SP-First Toolbox”中,只需要搜索“firfilt.m”,就可以看见所有使用它的实验室课题和课后作业。

本书及所附 CD-ROM 包含了三位作者以及许多学生和同事无法计算的工作量,我们有幸动员了一些非常有才能的学生参加这一工作。在这些参加者中,作为获奖助教的五位学生经多个学期为 CD-ROM 提供了基本的材料。Jeff Schodorf 做了最初的命名并且重新构造了第 4 章的演示,还同 Mark Yoder 一起为所有“DSP First: A Multimedia Approach”的 CD-ROM 演示做了许多早期的编排工作。David Anderson 同 Jeff 一起来实习然后承担了该课程的第一次助教工作,David 还给出了新的实验并且重新设计了“DSP First”的实验格式,使得 CD-ROM 更容易使用。Jordan Rosenthal 开发了编写 GUI 的一种相容的方法,该方法现在已经用于我们的所有示例之中。Greg Krudysz 写了“CON2DIS 演示”,他在开发 GUI 中起到主要作用。

此外,许多本科生实现了 MATLAB 程序、图形用户界面(GUI),以及作为 CD-ROM 重要部分的演示。特别是 Craig Ulmer 开发了作为多年来本科生研究课题的 PeZ,并给出了一些实验中用到的其他 GUI。Koon Kong 在 MATLAB 版本更新后对 PeZ 做了大量修改。Joseph Stanley 制作了我们的第一个动画,即音叉动画。Amer Abufadel 为第 6 章开发了图像滤波演示。Emily Eaton 写了音乐 GUI 并为实验中的歌曲提供了许多音乐记录和钢琴演奏。Rajbabu Velmurugan 改进了音乐 GUI 并对所有 GUI 实验进行了最后的修改。Janak Patel 为 GUI 写了许多 help 文件。Greg Slabaugh 写了傅

① *Circuits: A Systems Perspective*, R. M. Mersereau and J. R. Jackson, Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc.

② 注意,本书后面的章节需要微积分基础,而“DSP First: A Multimedia Approach”并不需要。

里叶级数演示作为 JAVA applet, 而 Mustayeen Nayeem 将它变换成为 MATLAB 傅里叶级数演示。Budyanto Junus 写了第一个 LTI 演示。Mehdi Javaramand 开发了几部分的“Phasor Races GUI”。Sam Li 参加了许多实验的开发, 他和 Arthur Hinson 以及 Ghassan Al-Regib 还为实验的预习和复习开发了许多习题。Kathy Harrington 为搜索课后作业题创建了关键字表并为实验编辑了一个常见问题的扩展集。Bob Paterno 录制了大量关于 MATLAB 的指导短片。

在过去几年间中, 许多教授加入了佐治亚理工学院二年级的 ECE-2025 课程, 授课或者进行复习指导, 他们中的许多人已经写了问题解答, 这些解答包含在 CD-ROM 中。感谢以下允许我们录入他们的解答的教师: Randy Abler, Yucel Altunbasak, John Bordelon, Giorgio Casinovi, Russ Callen, Kate Cummings, Richard Dansereau, Steve De Weerth, Michael Fan, Bruno Frazier, Faramarz Fekri, Elias Glytsis, Monty Hayes, Bonnie Heck, Mary Ann Ingram, Paul Hasler, Chuanyi Ji, Aaron Lanterman, Russell Mersereau, Geofferey Li, Steve McLaughlin, Mohamed Moad, Bill Sayle, Mark Smith, Whit Smith, David Taylor, Erik Verriest, Doug Williams, Tony Yezzi 和 Tong Zhou。

我们要感谢 Wayne Padgett 和 Bruce Black, 他们在 Rose-Hulman 理工学院讲授 ECE-280 并且给出了许多好的想法。

我们还要感谢出版商, Pearson Prentice Hall 的 Tom Robbins, 他在很早之前就购入了“DSP First: A Multimedia Approach”的项目并在这个计划及其进程的每一步都支持和鼓励我们, 他还安排了一些很有创见并且细心的评论者, 包括 Filson Glantz, S. Hossein Mousavinezhad, Geoffre Orsak, Mitch Wilkes, Robert Strum, James Kaiser, Victor DeBrunner, Timothy Schultz 和 Anna Baraniecki 等人来评阅本书和 CD-ROM。

最后, 我们要感谢我们的夫人 (Carolyn McClellan, Dorothy Schafer, Sarah Yoder) 的理解和支持, 当这个似乎没有终点的项目不断地消耗着精力和时间的时候, 她们耐心地支持我们。的确, 除了现有的课本和 CD-ROM 以外还有太多的思想需要去挖掘, 这个项目还将继续下去, 并且能够逐渐与其他人将要提供的修正方法相结合。

James H. McClellan

Ronald W. Schafer

Mark A. Yoder

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第 1 章 引言 .....             | 1  |
| 1.1 信号的数学表示 .....          | 1  |
| 1.2 系统的数学表示 .....          | 3  |
| 1.3 关于系统的思考 .....          | 5  |
| 1.4 下一步 .....              | 5  |
| 第 2 章 正弦信号 .....           | 6  |
| 2.1 音叉实验 .....             | 6  |
| 2.2 正弦和余弦函数回顾 .....        | 8  |
| 2.3 正弦信号 .....             | 9  |
| 2.3.1 频率与周期的关系 .....       | 10 |
| 2.3.2 相移和时移 .....          | 12 |
| 2.4 正弦信号的抽样和重构 .....       | 13 |
| 2.5 复指数和复振幅矢量 .....        | 15 |
| 2.5.1 复数的回顾 .....          | 15 |
| 2.5.2 复指数信号 .....          | 16 |
| 2.5.3 旋转复振幅描述 .....        | 17 |
| 2.5.4 逆欧拉公式 .....          | 19 |
| 2.6 复振幅矢量相加 .....          | 20 |
| 2.6.1 复数的加法 .....          | 21 |
| 2.6.2 复振幅加法规则 .....        | 21 |
| 2.6.3 复振幅加法规则举例 .....      | 23 |
| 2.6.4 复振幅的 MATLAB 演示 ..... | 24 |
| 2.6.5 复振幅加法规则小结 .....      | 24 |
| 2.7 音叉的物理学 .....           | 25 |
| 2.7.1 物理学定律的公式 .....       | 25 |
| 2.7.2 微分方程的一般解 .....       | 27 |
| 2.7.3 听音调 .....            | 28 |
| 2.8 时间信号 .....             | 28 |
| 2.9 小结和要点 .....            | 29 |
| 2.10 习题 .....              | 29 |
| 第 3 章 频谱表示 .....           | 35 |
| 3.1 正弦信号之和的频谱 .....        | 35 |

|              |                       |           |
|--------------|-----------------------|-----------|
| 3.1.1        | 符号变化 .....            | 36        |
| 3.1.2        | 频谱的图形描绘 .....         | 37        |
| 3.2          | 拍音 .....              | 38        |
| 3.2.1        | 正弦信号相乘 .....          | 38        |
| 3.2.2        | 拍音波形 .....            | 38        |
| 3.2.3        | 幅度调制 .....            | 40        |
| 3.3          | 周期波形 .....            | 42        |
| 3.3.1        | 合成元音 .....            | 43        |
| 3.3.2        | 非周期信号的例子 .....        | 45        |
| 3.4          | 傅里叶级数 .....           | 46        |
| 3.4.1        | 傅里叶级数: 分析 .....       | 47        |
| 3.4.2        | 傅里叶级数推导 .....         | 47        |
| 3.5          | 傅里叶级数的频谱 .....        | 49        |
| 3.6          | 周期信号的傅里叶分析 .....      | 51        |
| 3.6.1        | 方波 .....              | 52        |
| 3.6.2        | 方波的频谱 .....           | 53        |
| 3.6.3        | 方波的综合 .....           | 54        |
| 3.6.4        | 三角波 .....             | 55        |
| 3.6.5        | 三角波的综合 .....          | 56        |
| 3.6.6        | 傅里叶综合的收敛性 .....       | 56        |
| 3.7          | 时间-频率谱 .....          | 57        |
| 3.7.1        | 分级频率 .....            | 59        |
| 3.7.2        | 谱图分析 .....            | 59        |
| 3.8          | 频率调制: 线性调频信号 .....    | 60        |
| 3.8.1        | 线性调频或线性扫频 .....       | 60        |
| 3.8.2        | 对瞬时频率的进一步考察 .....     | 61        |
| 3.9          | 小结和要点 .....           | 62        |
| 3.10         | 习题 .....              | 63        |
| <b>第 4 章</b> | <b>抽样和混叠 .....</b>    | <b>70</b> |
| 4.1          | 抽样 .....              | 70        |
| 4.1.1        | 抽样正弦信号 .....          | 72        |
| 4.1.2        | 混淆的概念 .....           | 73        |
| 4.1.3        | 离散时间信号的频谱 .....       | 75        |
| 4.1.4        | 抽样定理 .....            | 75        |
| 4.1.5        | 理想的重构 .....           | 76        |
| 4.2          | 抽样和重构的频谱观察 .....      | 77        |
| 4.2.1        | 由抽样得到的离散时间信号的频谱 ..... | 77        |
| 4.2.2        | 过抽样 .....             | 78        |
| 4.2.3        | 欠抽样所引起的混叠 .....       | 79        |

|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 4.2.4        | 欠抽样所引起的折叠 .....           | 80         |
| 4.2.5        | 最大重构频率 .....              | 81         |
| 4.3          | 频闪灯演示 .....               | 82         |
| 4.3.1        | 频谱解释 .....                | 85         |
| 4.4          | 离散到连续的转换 .....            | 87         |
| 4.4.1        | 用脉冲进行内插 .....             | 87         |
| 4.4.2        | 零阶保持内插 .....              | 87         |
| 4.4.3        | 线性内插 .....                | 89         |
| 4.4.4        | 立方样条内插 .....              | 89         |
| 4.4.5        | 过抽样辅助内插 .....             | 90         |
| 4.4.6        | 理想的限带内插 .....             | 91         |
| 4.5          | 抽样定理 .....                | 92         |
| 4.6          | 小结和要点 .....               | 93         |
| 4.7          | 习题 .....                  | 94         |
| <b>第 5 章</b> | <b>FIR 滤波器 .....</b>      | <b>100</b> |
| 5.1          | 离散时间系统 .....              | 100        |
| 5.2          | 运行平均滤波器 .....             | 101        |
| 5.3          | 一般的 FIR 滤波器 .....         | 103        |
| 5.3.1        | FIR 滤波的一个图解 .....         | 104        |
| 5.3.2        | 单位冲激响应 .....              | 105        |
| 5.3.3        | 卷积与 FIR 滤波器 .....         | 108        |
| 5.4          | FIR 滤波器的实现 .....          | 110        |
| 5.4.1        | 结构单元 .....                | 110        |
| 5.4.2        | 框图 .....                  | 111        |
| 5.5          | 线性时不变系统 .....             | 114        |
| 5.5.1        | 时不变性 .....                | 114        |
| 5.5.2        | 线性 .....                  | 115        |
| 5.5.3        | FIR 情况 .....              | 116        |
| 5.6          | 卷积与 LTI 系统 .....          | 117        |
| 5.6.1        | 卷积和的导出 .....              | 117        |
| 5.6.2        | LTI 系统的一些性质 .....         | 119        |
| 5.7          | 级联的 LTI 系统 .....          | 121        |
| 5.8          | FIR 滤波的例子 .....           | 123        |
| 5.9          | 小结和要点 .....               | 125        |
| 5.10         | 习题 .....                  | 125        |
| <b>第 6 章</b> | <b>FIR 滤波器的频率响应 .....</b> | <b>130</b> |
| 6.1          | FIR 系统的正弦响应 .....         | 130        |
| 6.2          | 叠加与频率响应 .....             | 132        |

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 6.3   | 稳态和暂态响应 .....                | 134 |
| 6.4   | 频率响应的性质 .....                | 136 |
| 6.4.1 | 冲激响应与差分方程的关系 .....           | 136 |
| 6.4.2 | $H(e^{j\omega})$ 的周期性 .....  | 137 |
| 6.4.3 | 共轭对称性 .....                  | 138 |
| 6.5   | 频率响应的图像表示 .....              | 138 |
| 6.5.1 | 延迟系统 .....                   | 139 |
| 6.5.2 | 一阶差分系统 .....                 | 139 |
| 6.5.3 | 一个简单的低通滤波器 .....             | 141 |
| 6.6   | 级联的 LTI 系统 .....             | 143 |
| 6.7   | 运行平均滤波 .....                 | 145 |
| 6.7.1 | 描绘频率响应 .....                 | 146 |
| 6.7.2 | 幅度和相位的级联 .....               | 149 |
| 6.7.3 | 实验: 平滑一幅图像 .....             | 149 |
| 6.8   | 对抽样的连续时间信号滤波 .....           | 152 |
| 6.8.1 | 例子: 低通平均器 .....              | 153 |
| 6.8.2 | 对延迟的解释 .....                 | 155 |
| 6.9   | 小结和要点 .....                  | 157 |
| 6.10  | 习题 .....                     | 158 |
| 第 7 章 | $z$ 变换 .....                 | 164 |
| 7.1   | $z$ 变换的定义 .....              | 164 |
| 7.2   | $z$ 变换和线性系统 .....            | 166 |
| 7.2.1 | FIR 滤波器的 $z$ 变换 .....        | 166 |
| 7.3   | $z$ 变换的性质 .....              | 168 |
| 7.3.1 | $z$ 变换的叠加性质 .....            | 168 |
| 7.3.2 | $z$ 变换的时延性质 .....            | 169 |
| 7.3.3 | 一般的 $z$ 变换公式 .....           | 170 |
| 7.4   | 作为一种运算符的 $z$ 变换 .....        | 170 |
| 7.4.1 | 单位延迟算符 .....                 | 170 |
| 7.4.2 | 算子符号 .....                   | 171 |
| 7.4.3 | 框图中的算子符号 .....               | 171 |
| 7.5   | 卷积与 $z$ 变换 .....             | 171 |
| 7.5.1 | 级联系统 .....                   | 174 |
| 7.5.2 | $z$ 多项式的因式分解 .....           | 175 |
| 7.5.3 | 反卷积 .....                    | 176 |
| 7.6   | $z$ 域与 $\omega$ 域之间的关系 ..... | 176 |
| 7.6.1 | $z$ 平面与单位圆 .....             | 177 |
| 7.6.2 | $H(z)$ 的零点和极点 .....          | 177 |
| 7.6.3 | $H(z)$ 的零点的意义 .....          | 179 |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 7.6.4        | 无效滤波器                        | 179        |
| 7.6.5        | $z$ 与 $\hat{\omega}$ 之间的图形关系 | 180        |
| 7.7          | 有效滤波器                        | 183        |
| 7.7.1        | $L$ 点运行 - 和滤波器               | 183        |
| 7.7.2        | 复数带通滤波器                      | 184        |
| 7.7.3        | 实系数带通滤波器                     | 186        |
| 7.8          | 实际的带通滤波器设计                   | 187        |
| 7.9          | 线性相位滤波器的性质                   | 189        |
| 7.9.1        | 线性相位条件                       | 190        |
| 7.9.2        | FIR 线性相位系统的零点的位置             | 190        |
| 7.10         | 小结和要点                        | 191        |
| 7.11         | 习题                           | 192        |
| <b>第 8 章</b> | <b>IIR 滤波器</b>               | <b>197</b> |
| 8.1          | 一般的 IIR 差分方程                 | 197        |
| 8.2          | 时域响应                         | 198        |
| 8.2.1        | IIR 滤波器的线性和时不变性              | 200        |
| 8.2.2        | 一阶 IIR 系统的冲激响应               | 200        |
| 8.2.3        | 对有限长度输入的响应                   | 202        |
| 8.2.4        | 一阶递归系统的阶跃响应                  | 203        |
| 8.3          | IIR 滤波器的系统函数                 | 205        |
| 8.3.1        | 一般的一阶情况                      | 205        |
| 8.3.2        | 系统函数和框图结构                    | 206        |
| 8.3.3        | 与冲激响应的关系                     | 210        |
| 8.3.4        | 方法的小结                        | 210        |
| 8.4          | 极点和零点                        | 211        |
| 8.4.1        | 在原点或者无穷远点的极点或零点              | 211        |
| 8.4.2        | 极点位置和稳定性                     | 212        |
| 8.5          | IIR 滤波器的频率响应                 | 213        |
| 8.5.1        | 用 MATLAB 来得到频率响应             | 214        |
| 8.5.2        | 系统函数的三维图像                    | 215        |
| 8.6          | 三个域                          | 217        |
| 8.7          | $z$ 反变换和一些应用                 | 218        |
| 8.7.1        | 再谈一阶系统的阶跃响应                  | 218        |
| 8.7.2        | $z$ 反变换的一般过程                 | 220        |
| 8.8          | 稳态响应和稳定性                     | 222        |
| 8.9          | 二阶滤波器                        | 225        |
| 8.9.1        | 二阶滤波器的 $z$ 变换                | 225        |
| 8.9.2        | 二阶 IIR 系统的结构                 | 226        |
| 8.9.3        | 极点和零点                        | 228        |



|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 8.9.4  | 二阶 IIR 系统的冲激响应 .....    | 230 |
| 8.9.5  | 复数极点 .....              | 231 |
| 8.10   | 二阶 IIR 滤波器的频率响应 .....   | 234 |
| 8.10.1 | 通过 MATLAB 来得到频率响应 ..... | 235 |
| 8.10.2 | 3 dB 带宽 .....           | 237 |
| 8.10.3 | 系统函数的三维图像 .....         | 237 |
| 8.11   | 一个 IIR 低通滤波器的例子 .....   | 240 |
| 8.12   | 小结和要点 .....             | 241 |
| 8.13   | 习题 .....                | 242 |
| 第 9 章  | 连续时间信号和 LTI 系统 .....    | 249 |
| 9.1    | 连续时间信号 .....            | 249 |
| 9.1.1  | 两边都有无限长度的信号 .....       | 250 |
| 9.1.2  | 单边信号 .....              | 250 |
| 9.1.3  | 有限长度信号 .....            | 252 |
| 9.2    | 单位冲激 .....              | 252 |
| 9.2.1  | 冲激的抽样性质 .....           | 254 |
| 9.2.2  | 数学严密性 .....             | 256 |
| 9.2.3  | 工程实际性 .....             | 256 |
| 9.2.4  | 单位阶跃信号的导数 .....         | 256 |
| 9.3    | 连续时间系统 .....            | 258 |
| 9.3.1  | 一些基本的连续时间系统 .....       | 259 |
| 9.3.2  | 连续时间输出 .....            | 259 |
| 9.3.3  | 类比离散时间系统 .....          | 259 |
| 9.4    | 线性时不变系统 .....           | 260 |
| 9.4.1  | 时不变性 .....              | 260 |
| 9.4.2  | 线性 .....                | 261 |
| 9.4.3  | 卷积积分 .....              | 262 |
| 9.4.4  | 卷积的性质 .....             | 264 |
| 9.5    | 基本的 LTI 系统的冲激响应 .....   | 265 |
| 9.5.1  | 积分器 .....               | 265 |
| 9.5.2  | 微分器 .....               | 265 |
| 9.5.3  | 理想的延迟 .....             | 266 |
| 9.6    | 冲激的卷积 .....             | 266 |
| 9.7    | 计算卷积积分 .....            | 268 |
| 9.7.1  | 延迟的单位阶跃输入 .....         | 268 |
| 9.7.2  | 离散卷积的计算 .....           | 271 |
| 9.7.3  | 方形脉冲输入 .....            | 273 |
| 9.7.4  | 很窄的方形脉冲输入 .....         | 274 |
| 9.7.5  | 关于卷积例子的讨论 .....         | 275 |