

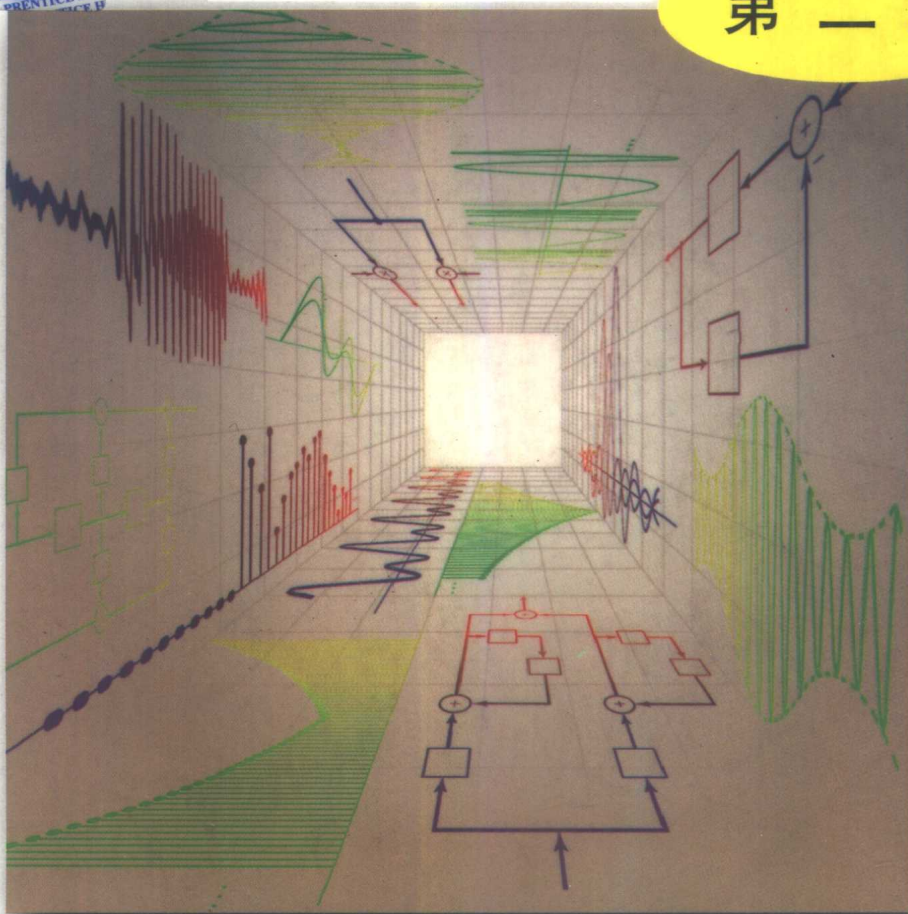
# 信号与系统

# SIGNALS & SYSTEMS



SECOND EDITION

第二版



**ALAN V. OPPENHEIM**  
**ALAN S. WILLSKY**  
WITH S. HAMID NAWAB

刘树棠 译

# 信号与系统

ALAN V. OPPENHEIM

ALAN S. WILLSKY

WITH S. HAMID NAWAB

刘树棠译

西安交通大学出版社

Prntice-Hall, Inc.

## 内容简介

本书全面系统地论述了信号与系统分析的基本理论和方法。全书共 11 章,内容包括:信号与系统、线性时不变系统,周期信号的傅里叶级数表示,连续和离散时间傅里叶变换,信号与系统的时域和频域特性,采样,通信系统,拉普拉斯和  $z$  变换以及线性反馈系统。每章都有足够数量的例题和大量精选的习题;并将习题分列为 4 种栏目,分属 3 种不同的层次,便于使用。

本书是在第 1 版基础之上经重新组织,重新改写并作补充而成,除保留原书结构新颖,选材得当,论述严谨,条理清楚等特色外,在某些方面更有所加强,恰似锦上添花,堪称反映信号与系统分析当代水平的一部佳作。

本书可作为通信与电子系统类,自动化类以及全部电类专业信号与系统课程的教材,也可以供任何从事信息获取、转换、传输及处理工作的其它专业研究生,教师和广大科技工作者参考。

**Alan V. Oppenheim Alan S. Willsky with S. Hamid Nawab: Signals and Systems**

Authorized translation from the English language edition published by Prentice-Hall.

Copyright © 1997 Prentice-Hall.

All rights reserved. For sale in Mainland China only.

本文中文简体字版由西安交通大学出版社和美国西蒙与舒斯特国际出版公司合作出版,未经出版者书面许可,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 Prentice-Hall 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,翻印必究。

**(陕)新登字 007 号**

### 信号与系统

ALAN V. OPPENHEIM

ALAN S. WILLSKY

WITH S. HAMID NAWAB

刘树棠 译

责任编辑 白居易

\*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编号 710049 电话:(029)3268316)

西安交通大学印刷厂印装

各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:44.5 字数:1075 千字

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—6 000

ISBN 7-5605-0970-3/TN·53 定价:58.00 元

**陕版出图字:25—1997—036 号**

---

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)3268357,3267874

## 译者前言

美国 MIT(麻省理工学院)著名教授 Alan V. Oppenheim 等所著“Signals and Systems”一书早已为我国广大读者所熟悉。它的第 1 版自 1983 年问世以来,在许多国家已产生了广泛的影响,获得很高的声誉。经过 14 年的普遍使用之后,1997 年又推出了第 2 版;这正是广大从事该方面教学的同仁们早已翘首以待所祈盼的了!相信该书第 2 版的出版,对目前我国各高校正在从事的面向 21 世纪课程体系和内容改革起到一定的借鉴作用。

诚如作者在第 2 版前言中所指出的,第 2 版是在该书第 1 版的基础上之,经过重新组织、重新改写,并作补充而成的;想必这是经过 14 年广泛使用之后,吸收考虑了各方面意见的结果。全书结构仍为 11 章,变动较大的是前 6 章。这就是:将原书第 1 章(绪论)抽出,另作新版的序言处理;原书的第 4~6 章,重新组织为新版的第 3~6 章。在内容上则是将原书第 4、5 章的傅里叶级数表示部分单独抽出另立为新版的第 3 章,同时将原书的第 6 章(滤波)的内容拆开,分别融入有关章节中,并将信号与系统的时域和频域特性之间的关系这一重要概念另立一章(第 6 章)作专门论述。另外,还将第 1 版第 7 章(调制)和第 8 章(采样)的次序作了交换,并将章名“调制”改为“通信系统”。以上就是第 2 版所反映的“重新组织”的主要方面。由于在前 6 章中结构上有较大的变化,加之各章内容都有新的补充,因此全书重新改写也就是必然的了。全书在正文内容上,除了第 11 章外,都有不同程度的补充。个别地方也有删除(如原书第 10 章第 8 节“连续时间和离散时间系统之间的变换”,在第 2 版正文中被删除),但补充的内容仍多于删除的。第 2 版补充最多的当属正文中的例题和各章末的习题部分。全书例题由原来的 99 个增加到 195 个,而习题则由原来的 382 道题增加到现在的 668 道题。并且,将数量大、类型各异、难易差别悬殊的习题分成 4 种栏目:基本题(附答案)、基本题、深入题和扩充题;分属 3 种不同的层次。最后,第 2 版在符号上也作了相应的变化,不再在符号上区分连续域和离散域中的频率(除 7.4 节外),而仅以  $X(j\omega)$  与  $X(e^{j\omega})$  和  $H(j\omega)$  与  $H(e^{j\omega})$  来区分两类信号与系统。

第 2 版作者为什么要作这样的重组和变化,读者可从该版前言中略见其详。有一点是肯定的,经重组、重写和补充的结果,总是要比第 1 版更趋于合理和完善,犹如锦上添花,更加便于教和学;但具体到每一处的变动,仍然有一个“仁者见仁,智者见智”的问题。

总的来说,第 2 版仍保留了第 1 版的基本特色(连续与离散并行,将基本理论和方法着重在通信、采样、连续时间信号的离散时间处理以及控制系统等方面的应用),涉及的主要内容和该书的适用范围均无大的变化。根据译者多年使用第 1 版所积累的经验,再结合第 2 版翻译过程所得到的体会来看,第 2 版至少在以下几个方面得到了进一步地加强。首先,部分内容的增删和调整是合适的。例如,将第 1 版中第 6 章(滤波)的内容不再另辟一章是明智的。这样做既紧密结合了有关内容,又避免了原书第 6 章内容的单薄;单边拉普拉斯和  $z$  变换都适当加强,解决了第 1 版该方面内容易教不易学的矛盾;在通信系统应用中,适当地增加了数字通信和码间干扰的基本概念,也是符合当前发展趋势的。第二,由于例题和习题的大量增加和分类,使该书在教与学两方面都更便于使用。例题的增加,一方面是紧密结合基本内容(概念与方法)的应用;另一方面也减缓了对某些较抽象概念理解上的梯度。因此,例题的增加使教材的可读性增强。习题的分类,是所有使用过第 1 版的教师和同学所期盼的。最后,作为核心

(主干)课程的教材,第2版的基础性得到进一步地加强。例如,信号与系统的时域和频域特性之间的关系单立一章是很有创见性的;在引入码间干扰概念中,从最一般的机理上阐述了为消除码间干扰而进行信道均衡的基本原理,而不只是就事论事。

译者曾在10多年前就建议过,“‘信号与系统’这门课的开设对象与涉及的内容,应该从传统的所谓无线电技术专业跨出去,部分电子学类专业、电机类专业、及至部分机械、动力和力学类专业都应该在不同深度上开设这门课。”今天,我们高兴地看到,传统的无线电技术专业名称早已不复存在,清华大学早就在全部电类专业开设了这门课,西安交通大学也于两年前在全部电类各专业开设此课,并作为院定必修课。在目前进行的面向21世纪的教学改革中,加强素质培养,淡化专业,拓宽基础,提倡不同专业领域的交叉与渗透等已成了不可扭转的大趋势。深信该书第2版中译本的正式出版定会起到应有的作用。

第2版的篇幅比第1版增加了20%,其中正文部分和习题的篇幅几乎各增加了20%。除最后索引部分外,都按原著译出。考虑到英文索引的编制与中文有很大的不同,加之目录已十分详尽,再另编中文索引似无必要。为节省篇幅,征得出版社同意,将索引部分略去。原书共有标以图号的图567幅,均由计算机做成,原图清晰、美观,但图中坐标、符号等标注,均用正体字母给出,与正文中使用的斜体字母不一致,不符合我国出版规定。由于图量大,时间紧,重新描图或在原图上贴以斜体字母都难以确保质量,出版社经慎重研究,除图中英文说明贴以汉字外,其余均不作改动。以上两点,在此特作说明。

该书中译本由西安交通大学出版社与 **Prentice-Hall, International Ltd.** 联合出版发行。在中译本即将出版之际,应该特别提及西安交通大学出版社社长杨鸿森教授,没有他的远见卓识,富于开拓进取和始终不渝地支持,该书中译本是难以如此快地与中国读者见面的,译者对此表示诚挚地谢意。在该书的编辑过程中,始终得到了责任编辑白居宪副编审的大力支持和有效帮助,合作得十分和谐。西安交通大学人文学院副院长,英语系王监龙教授,常常在关键时刻指点迷津。西安交通大学电子与信息工程学院信息与通信工程系朱世华教授也给予过帮助。我的研究生崔吉青及王红光同学在译稿的准备过程中都做了不少有益的工作。译者谨对所有曾给予过支持和提供帮助的同志表示深深地谢意。最后应该特别提起的是,这是一部工作量极大的译作,没有我的老伴,西安交通大学信息与通信工程系孙漪教授的支持、鼓励、帮助和忍耐精神是不可能完成的,感谢她在1997年那个令人难熬而又漫长的酷暑始终与我同行,做了大量的工作。

在本书的翻译过程中,已经发现原书有80多处错误,但其中绝大部分属录入和排版中的疏漏,因此在中译本中未给予标注。但也有少量错误,这些都在译文中以“译者注”标出。译者已将发现的各种错误汇集成表格,分别用电子邮件和传真发给 **Alan V. Oppenheim** 教授,并得到他的积极响应。

由于全书篇幅太大,时间仓促,加之译者水平又有限,错误和不妥之外,当属难免,恳望读者批评指正。

刘树棠

1997年11月于西安交通大学

## 前 言

本书是用于大学本科信号与系统课程教科书的第二版。虽然这类课程通常属于电气工程类的课程,但是,作为该课程核心的一些基本概念和方法,对于所有工程类的专业来说也都是很重要的。事实上,随着工程师们面临着需要对一些复杂的过程进行分析或综合的新挑战,信号与系统分析方法潜在的和实际的应用范围都一直在扩大着。为此感到,信号与系统方面的课程不仅是工程教学中一门最基本的课程,而且也能够成为工程类学生在大学教育阶段所修课程中最有得益而又引人入胜和最有用处的一门课。

关于信号与系统课程的处理和论述的基本宗旨和看法,第二版与第一版相同,但是在内容的组织和选取上有较大的变化,基本上属于重写和重新组织,并有较多的补充。这些变化的目的在于有助于教师讲授这门课和学生掌握这门课的内容。在第一版的前言中曾提到过,由于在信号与系统设计和实现手段上的持续不断地发展,对于学生来说,需要对连续时间和离散时间系统的分析与综合技术都很熟悉,这一点是日益显得更重要。当我们来写第二版前言的时候,这样一个看法和指导原则甚至比以前更加确信无疑。这样,学习信号与系统的学生就不仅要在基于物理学定律的那些课程上应该具有坚实的基础,而且在使用计算机进行现象分析和系统及算法的实现上也必须具备扎实的基础。结果,在现在的工程类课表中就反映出一些混杂的课程,有些是涉及连续时间模型的,而另一些又主要是针对计算机应用和离散表示的。因此,在工程类学生的教育中以及在他们所选定的领域,为现在和将来的发展作准备上,以一种统一的方式,在信号与系统课中将离散时间和连续时间的概念揉合在一起显得日益重要。

正是本着这些目的,该书以并行的方式建立了连续时间和离散时间信号与系统的分析方法。这一途径在教学上也是十分可取的,它可以利用连续和离散时间方法之间的共同点来分享各自所获得的理性和感性认识;而两者之间的差异又可用来加深理解各自不同的独特性质。

在材料组织方面(无论是第一版还是第二版),我们还认为本书所论述的基本方法在某些重要方面的应用也应该作为基本的东西介绍给学生。这样做不仅是让学生了解到目前所学内容的某些应用方面和进一步研究的方向,而且还有助于加深对问题本身的理解。为此,就滤波、通信、采样、连续时间信号的离散时间处理,以及反馈等方面的内容都作了入门性介绍。事实上,第二版的主要变化之一就是频域滤波概念更早地在傅里叶分析中就给以引入。其目的既是为了给出讨论傅里叶分析这一重要论题的初衷,又可以对这一论题加深理解。另外,为了帮助愿意继续在信号与系统分析方法和应用方面深入学习的学生,书末还附有最新的参考文献目录。

我们相信,要全面掌握这门课,没有一定数量且能应用这些基本方法的练习是不可能完成的。因此,在第二版中大大增加了各章例题的数量。同时,还将第一版所具有的最为珍贵的一点——各章末丰富多彩、类型各异的习题,作了进一步加强,使得习题的总数多达 600 多道,其中大多数习题都是新的。这样就为教师安排课外作业提供了更多的灵活性。另外,为了对学生和教师更好地使用这些习题,对这些习题的组织安排上作了一些变化。特别是把各章末的习题分成几种类型,其中每种类型的题都覆盖了全章的内容,但具有不同的目的。前两部分习题是着重于各章基本概念和方法的应用,其中的第一类标以“基本题(附答案)”,答案(不是题解)在书末给出。这些答案以一种简单而即时的方式给学生验证一下他们对内容的理解程度。

这部分题一般是适合于作为课外作业布置的。另外,为了给教师布置课外作业有某些灵活性,还提供了另一套不附给答案的基本题。

各章末标以“**深入题(Advanced Problems)**”的是第三种类型的题。这部分题是根据教材内容的基本原理和真正内涵进行深入钻研和进一步发挥的题。这些题往往涉及一些数学推导以及在各章中所提到的概念和方法的更深层次的应用。在某些章中还列了称之为“**扩充题(Extension Problems)**”这样一种类型的题,这类题要么是涉及本章内容的扩充,或者是其他方面的应用(例如一些更高级的电路或机械系统),而这些都是超出课程内容的。在习题方面总的变化都是希望给学生提供一些途径来加深理解各章的内容;同时也为教师布置课外作业提供更多的灵活性,并对不同要求的学生提供因材施教的余地。对于讲授本门课的教师可以通过出版社获得习题的题解。

第二版另一个突出的特点是为其提供了一本与之配套的书《**Exploration in Signals and Systems Using MATLAB**》(由 Buck, Daniel 和 Singer 编写)。这本书包括了课文中每个专题的计算机作业 **MATLAB™**。这本书无论对教师或是学生来说都应有很大的帮助。

使用本书的学生,假定已具有基本微积分学方面的基础,有进行复数运算的能力,以及在微分方程方面也有某些接触。有了这些基础以后,本书就自成体系了,尤其是不需要事先具备系统分析、卷积、傅里叶分析或拉普拉斯变换和  $z$  变换等方面的知识。在学习信号与系统课之前,大多数学生或许都上过适合于电气工程师们所要求的基本电路课,或者是针对机械工程师们所用的动力学原理这样的课;这些课都多少接触一些本书将要给予深入讨论的那些基本概念。在学习本书时,这些基础很显然对于学生深入理解本书内容都会有很大的帮助。

紧接着前言的是简短的绪论。它是要给读者概述一下有关对信号与系统课的出发点和看法,特别是我们对这一问题的观点和处置。第 1 章从介绍与信号和系统的数学表示有关的某些基本概念入手,特别是讨论了一个信号独立变量的某些变换(如时移和尺度变换),接着介绍了某些最重要的基本连续时间和离散时间信号,即实指数和复指数信号、连续时间和离散时间单位阶跃和单位冲激信号等。第 1 章还介绍了系统互联的方框图表示,并讨论了几个基本的系统性质,如因果性、线性和时不变性。第 2 章是在上述最后两个性质的基础上,再结合单位脉冲的移位性质来建立离散时间线性时不变(LTI)系统的卷积和表示,以及连续时间 LTI 系统的卷积积分表示。在这里,我们是采用从导出离散时间情况所得到的直观认识,来导出并理解在连续时间情况下所对应的结论的。然后把问题转到讨论由线性常系数微分及差分方程所表征的因果 LTI 系统上来。在初步讨论中复习了涉及解线性微分方程的一些基本方法(大多数学生对此都会有某些接触),并对线性差分方程的类似解法作了讨论。然而,第 2 章讨论这些问题的主要着眼点不是在求解的具体方法上,因为稍后将要讨论的利用变换法求解将更为方便。我们的意图是首先让学生对于这个极为重要的系统具有某些了解,因为在以后的各章中将会经常遇到这类系统。最后,第 2 章以简短讨论奇异函数(阶跃、冲激和冲激偶等等)及其在描述和分析连续时间 LTI 系统中的作用作为结束。在讨论中特别强调如何在卷积的意义下定义并解释这类信号,也就是说利用 LTI 系统对这些理想化信号的响应来理解这些奇异信号。

第 3 章到第 6 章完整地建立了连续和离散时间的傅里叶分析方法。这一部分在第二版中做了很大的重新组织和改写。尤其是在前面已经指出的,把频域滤波的概念比较早地作了介绍,这是为了给傅里叶方法的讨论提供具体应用背景和初衷。正如在第一版中所提到的,在

第3章一开始就指出傅里叶分析在连续和离散时间信号与系统研究中所起的重要作用都是从强调并说明如下两个基本理由入手的:(1) 相当广泛的一类信号都可以表示成复指数信号的加权和或加权积分;(2) LTI系统对复指数输入信号的响应就是同一复指数信号乘以该系统的复数特征值。然而,与第一版不同是,第3章关注的焦点是放在连续时间和离散时间周期信号的傅里叶级数表示上。这样做的结果,我们就不仅介绍并研究了傅里叶表示的许多性质而勿需要另外数学上的一般化以得到非周期性信号的傅里叶变换,而且还能够在更早的时候引入在滤波方面的应用。尤其是利用复指数是LTI系统的特征函数这一点,可以引入LTI系统频率响应,并利用它来讨论频率选择性滤波的概念,介绍理想滤波器以及由微分和差分方程描述的几个非理想滤波器的例子。以这种方式就可以用最少的数学准备给学生关于傅里叶表示的内涵,以及对为什么它是如此有用的一个概念得到较深入的理解。

第4章和第5章是建立在第3章讨论的基础之上的。首先在第4章研究了连续时间傅里叶变换,并以平行的方式在第5章研究了离散时间傅里叶变换。在这两章中都是采用将一个周期信号的周期任意趋大时求其傅里叶级数的极限来导出非周期信号的傅里叶变换表示的。这种观点强调了傅里叶级数和傅里变换之间的密切关系,这种关系将在后续的几节中作进一步地讨论。这样就能够把在第3章所得到的傅里叶级数的直观认识转移到更为一般的傅里叶变换上来。这两章都讨论了傅里叶变换的很多性质,并且特别强调了卷积性质和相乘的性质。特别是卷积性质给频率选择性滤波这样的论题提供了另一个审视的角度,而相乘的性质则是后续各章有关处理采样和调制的出发点。最后,第4和第5章的最后一节都是利用变换法来确定由微分和差分方程所描述的LTI系统的频率响应,并用几个例子来说明傅里叶变换是如何用来计算这样一些系统的响应的。为了补充这些讨论(以及后面拉普拉斯变换与 $z$ 变换的讨论),再次将部分分式展开法的讨论作为附录放在书末。

在这两章中是以并行的方式来处理傅里叶分析的。具体地说,在第5章的讨论中可以利用许多在第4章对连续时间情况下所获得的概念和细节,直到第5章结束都强调了连续时间和离散时间傅里叶表示的完全对偶关系;同时,也用对比两者的不同点来加深对各自特殊性质的理解。

熟悉第一版的人会注意到,第二版中第4章和第5章的篇幅是大大地少于第一版中所对应的两章。这不仅仅是由于现在把傅里叶级数放在单独一章来讨论,而且还将几个内容移到了第6章。我们相信这样的安排有几个明显的好处。首先,在三个较短的章中讲授傅里叶分析的基本概念和结果,再与频率选择性滤波概念的引入结合在一起,应该有助于学生总结他们对这些内容掌握和理解的程度,建立有关对频域的某些直观认识及其潜在的应用价值。有了第3章到第5章的基础,就可以更详细地讨论几个重要的问题和应用。第6章比较深入地研究了LTI系统的时域和频域特性。例如介绍了频率响应的幅相特性及波特图表示,并讨论了频率响应中的相位特性对LTI系统输出时域特性上的影响。另外,还研究了理想和理想滤波器的时域和频域特性,以及在两者之间如何求得折衷,而这一点在实际应用中是必须要给予重视的。我们还仔细地分析了一阶与二阶系统,以及它们在连续和离散时间复杂系统的综合和分析中作为基本构造单元所起的作用。最后,分别在连续时间和离散时间系统中讨论了几个较为复杂的滤波器例子。这些例子再与本章习题中所用的很多其它滤波方面的问题结合在一起,就能够给学生呈现出这样一个重要的领域是多么丰富多彩和饶有趣味。虽然在第6章所提出的问题在第一版中都提到了,但是我们相信在紧接着傅里叶分析基本建立之后将它们



重新组织到单独一章中,既可简化在第3章到第5章引入这一重要论题的麻烦,又可以把时域和频域这一重要论题在第6章以一种更为紧密的关系呈现出来。

根据大多数使用第一版教材用户的意见和偏爱,这一版在傅里叶变换讨论中所用的符号已作了一些修改,以便与大多数在连续时间和离散时间傅里叶变换中所用的符号取得更为一致。具体地说,在第3章一开始就将连续时间傅里叶变换记作 $X(j\omega)$ ,离散时间傅里叶变换记作 $X(e^{j\omega})$ 。但是,就符号选取而言,对傅里叶变换用什么符号表示并不存在唯一的最好选择。不过,我们以及我们的大多数同行都感到这一版所用的符号更为可取。

第7章采样问题的处理主要着重在采样定理及其含义上。然而,为了正确提出这一问题,采用了从讨论连续时间信号的样本来表示信号和利用内插来重建信号的一般概念入手。在利用频域方法导出采样定理以后,对欠采样(Undersampling)下的混叠现象既从频域又从时域的角度都作了直观的解释。采样的一种很重要应用是在连续时间信号的离散时间处理上,本章在这一问题上的阐述花了一定的篇幅。紧接着把问题转向离散时间信号的采样上来,并用在连续时间下讨论所采用的相同方式来建立离散时间采样的基本结果,以及这些基本结果在抽取和内插问题中的应用。连续时间和离散时间采样的其它各种应用仍将在习题中给出。

熟悉第一版的读者再次注意到这一版的另一个变化,这就是将采样与通信系统提出次序颠倒了一下。在第二版中将采样放在通信系统之前,一方面是由于能够借助于采样的直观性来提出并描述采样过程和样本重建过程;另一方面也是由于这样的安排便于在第8章中更容易地谈及通信系统的类型,因为它们是与采样密切相关的,或者是基本上依赖于利用要被传送信号的采样结果。

第8章讨论的通信系统包括一定深度地讨论了连续时间正弦幅度调制(AM)。这是从直接利用相乘性质来叙述正弦AM在频域中的效果入手的,并讨论了如何能把原始调制信号恢复出来的原理。接着,讨论了与正弦调制有关的几个问题,其中包括频分多路复用和单边带调制。在习题中还涉及到更多的例子和应用。在第8章中还包括了其它几个论题。其中之一是脉冲串幅度调制和时分多路复用,这些是与第7章采样问题有直接联系的。的确,我们将这种联系弄得更加明显,并且通过介绍和简短地讨论脉冲幅度调制(PAM)和码间干扰,初步涉猎到数字通信这一重要领域。最后讨论了频率调制问题,这只是使读者对非线性调制问题有一个初步的接触。虽然FM系统的分析不像AM系统那样来得直接,但是对FM的初步讨论指出了如何能够利用频域的方法来获得对FM信号和系统特性的实质有足够的了解。通过这些讨论,以及在本章习题中所用到的很多其它调制和通信系统方面的问题,我们相信,学生能够对于通信领域的丰富内容以及信号与系统分析方法在其中所起的核心作用得出应有的评价。

第9和第10两章分别讨论拉普拉斯变换和 $z$ 变换。虽然在这两章的最后一节也讨论了这两种变换的单边形式,及其在非零初始条件下求解微分和差分方程中的应用,但是大部分篇幅都是集中在双边变换上。其内容包括:拉普拉斯变换和 $z$ 变换与傅里叶变换之间的关系;有理函数一类的变换及其用零极点的表示;变换的收敛域与被变换信号特性的关系;利用部分分式展开求反变换;根据零极点图对系统函数和频率响应作几何求值以及变换的基本性质等等。另外,在每一章还分别利用这两种变换对LTI系统的系统函数的性质和应用进行了讨论,其中包括由微分和差分方程表征的系统及系统函数的确定;利用系统函数的代数关系来构成LTI系统的互联以及具有有理系统函数的系统,其级联型、并联型和直接型方框图表示的构成

等。

拉普拉斯变换和  $z$  变换工具是研究第 11 章反馈系统的基础。本章以反馈系统的几个重要应用及其性质入手,其中包括稳定一个不稳定的系统,设计跟踪系统和降低系统灵敏度等方面的应用。在随后的几节中,将利用前面各章所获得的方法来研究在连续时间和离散时间反馈系统中具有重要意义的三个问题。它们是:根轨迹分析法,奈奎斯特图和奈奎斯特准则,以及对数幅/相图和稳定的反馈系统相位和增益裕度的概念。

信号与系统这一学科的内容极为丰富,有各种可能的途径和方式来进行取材以形成该方面一门基本课程的内容。第二版和第一版一样,我们的意图就是要给教师在组织该方面课程教学时有很大的灵活性。为使该书对教师具有这样的灵活性和最大的可用性,我们对大多数在信号与系统方面的基本课程中的核心内容都作了全面而深入的讨论。为达到此目的,就有必要删去另外一些内容,譬如随机信号和状态空间方法的讨论,而这些内容有时也放在信号与系统方面的第一门课中。很多学校传统上是不把这些内容放在这类基础性质的课程中的,而宁可放在大学本科生的后续课程,或者是专门研究这些问题的课程中去作更深入的讨论。虽然本书没有包括状态空间内容的介绍,但是讲授此类课程的教师可以很容易地将它们吸收到有关微分和差分方程问题的讨论中去。特别是,在第 9 和第 10 章有关有理系统函数系统的方框图表示的讨论,以及具有非零初始条件下单边变换在解微分和差分方程上的应用的讨论中,都可以很自然地引进状态空间表示的内容。

适当深度地选用本书第 1 到第 5 章的有关内容(其中有些内容可根据教师本人的意见作些删除),再从余下的各章节中挑选一些专题就可以构成二、三年级程度的一学期课程的典型内容。例如,一种可能的作法是从第 6 到第 8 章选取几个基本问题,再带上拉普拉斯变换和  $z$  变换的内容,或许再加一点有关系统函数的概念在分析反馈系统中的应用等。还有其它的各种组成方式,其中包括把状态空间的简单介绍吸收进来,或者更多的侧重点是放在连续时间系统上,而把第 5 章和第 10 章以及第 3,7,8 和第 11 章中有关离散时间的内容均放在次要地位都是可能的。

除了上面提到的那些可能的剪裁方式以外,这本书还可用作两学期的线性系统课的基本教材。或者,在信号与系统方面第一门课中本书没有使用过的部分,再结合一些别的内容就可以形成一门后续课程的基本内容。例如本书的很多内容都是可以和诸如状态空间分析、控制系统、数字信号处理、通信系统及统计信号处理等方面的课程直接相衔接的。因此,一门后续课程就可以使用本书的某些内容,再结合某些补充材料来组成,以便作为一门或多门高年级课程的入门课。事实上,在 MIT 一直就是这样做的;并且已经证明,这类新的课程在我们的学生当中不仅仅成为一门受欢迎的课程,而且还是我们信号与系统类课程中关键的一部分。

和第一版一样,在我们写这本书的过程中一直有幸得到很多同事、学生和朋友们帮助、建议和支持。构成本书核心部分的想法和观点一直是我们在讲授信号与系统课的亲身经历中和很多与我们共事的同事和学生们的影响下演变而成的。感谢 Ian T. Young 教授对本书第一版所作出的贡献,感谢并欢迎 Hamid Nawab 教授在第二版中例题和习题的重新组织、完善和扩充中所作的一切。对 John Buck, Michael Danial 和 Andrew Singer 也表示深深地谢意,他们为本教材写了配套的 MATLAB 教材。感谢 Jason Oppenheim 为本书提供了他的一张原始照片和 Vivian Berman 为封面设计的完成所提供的设想和帮助。同样如在致谢页中所列出的,对于许多学生和同事为第二版的出版在多个方面付出的巨大努力表示深深地谢意。

Ray Stata 先生和 Analog Devices 公司通过“电气工程杰出教授席位(Distinguished Professor Chair in Electrical Engineering)”基金对信号处理和本书所作出的慷慨而持续不断地支持表示最诚挚地感谢。感谢 MIT 所提供的支持,并为我们创造灵感提供了一个令人鼓舞的氛围。

来自 Prentice-Hall 特别是 Marcia Horton, Tom Robbins, Don Fowley 及其他的前任, TKM Productions 的 Ralph Pescatore 及 Prentice-Hall 的全体生产成员的鼓励、技术支持和热忱帮助一直是这本第二版得以付诸实现的关键。

Alan V. Oppenheim (A. V. 奥本海姆)  
Alan S. Willsky (A. S. 威斯基)  
Cambridge, Massachusetts (马省 . 剑桥)

## 致 谢

在第二版的出版过程中,非常荣幸地得到很多同事、学生和朋友们帮助,费去了他们大量的宝贵时间,对此表示深深地谢意。他们是:

**Jon Maira** 和 **Ashok Papot** 帮助制了很多图和照片翻版。

**Babak Ayazifar** 和 **Austin Frakt** 帮助更新和重新编汇了参考文献。

**Ramamurthy Mani** 做了本书的题解并帮助制作了不少图。

**Michael Daniel** 协调、管理和操作了 **LaTeX** 文件,该文件存放了在第二版形成和修改过程中的各种原稿。

**John Buck** 全部阅读了第二版的原稿。

**Robert Becker**, **Sally Bemus**, **Maggic Beucler**, **Ben Halpern**, **Jon Maira**, **Chirag Patel** 和 **Jerry Weinstein** 为本书完成了各种 **LaTeX** 原稿。

以下各位帮助仔细校对了清样

<b>Babak Ayazifar</b>	<b>Christina Lamarre</b>
<b>Richard Barron</b>	<b>Nicholas Laneman</b>
<b>Rebecca Bates</b>	<b>Li Lee</b>
<b>George Bevis</b>	<b>Sean Lindsay</b>
<b>Sarit Birzon</b>	<b>Jeffrey T. Ludwig</b>
<b>Nabil Bitar</b>	<b>Seth Pappas</b>
<b>Anne Findlay</b>	<b>Adrienne Prahler</b>
<b>Austin Frakt</b>	<b>Ryan Riddols</b>
<b>Siddhartha Gupta</b>	<b>Sekhar Tatikonda</b>
<b>Christoforos Hadjicostis</b>	<b>Shawn Verdout</b>
<b>Terrence Ho</b>	<b>Kathleen Wage</b>
<b>Mark Ibanez</b>	<b>Alex Wang</b>
<b>Seema Jaggi</b>	<b>Joseph Winograd</b>
<b>Patrick Kreidl</b>	

## 绪 论

信号与系统概念出现在范围广泛的各种领域中,与这些概念有关的思想和方法在很多科学和技术领域起着重要的作用,例如在通信、航空与宇航、电路设计、声学、地震学、生物工程、能源产生与分配系统、化学过程控制及语音处理等方面。虽然在各个不同的领域中所出现的信号与系统的物理性质是很不相同的,但全都具有两个基本的共同点:即作为一个或几个独立变量函数的信号都包含了有关某些现象性质的信息;而系统总是对给定的信号作出响应而产生出另外的信号,或是产生某些所需要的特性。电路中作为时间函数的电压和电流就是信号的例子,而一个电路本身就是一个系统的例子,这时该电路就是对外加电压和电流作出响应。另一个例子就是当汽车驾驶员踏油门时,汽车的反应就是加速,这时系统就是这部汽车,油门板上的压力就是系统的输入,汽车的速度就是响应。自动诊断心电图的计算机程序也可以看作是一个系统,该系统的输入是数字化了的心电图数据,而输出就是参数估值如心跳率等等。一架照相机也是一个系统,该系统接受来自不同光源和物体反射回来的光信号而产生一幅照片。一个机器人手臂也是一个系统,它的动作就是控制输入的响应。

在出现的这些信号与系统的很多方面,存在有各种各样具有重要意义的问题。在某些情况下,对某个特定的系统关注地是如何详细地知道系统对各种不同输入的响应。例如某一电路的分析是为了对该电路对不同的电压和电流源给出定量的响应;而一个飞行器是既要要对飞行员的各种命令,又要对不同的风力大小确定响应。

信号与系统分析的另一个问题不是分析已有的系统,而是把重点放在系统的设计上,所设计的系统要求以特定的方式来处理信号。出现这样问题的一个最普遍的场合是要设计一个系统以便增强或恢复以某种方式被污损了的信号。例如,当领航员与地面空中交通控制塔通讯时,通讯就可能受到驾驶舱内严重背景噪声的影响。在这种或很多其它类似情况下,有可能设计出一种系统用来保留所要求的信号(这时就是领航员的声音),而抑制掉(至少是近似地)不需要的信号,即噪音。在一般图像恢复和图像增晰的领域也能找到类似的目的。例如,由于摄像设备的限制、大气层的影响、以及在信号传回到地面过程中引起的误差等因素,来自大气深层空间或地球观测卫星所摄取的物景照片就会受到污损,因此照例总是要对从空间返回的图像信号进行处理以补偿某些被污损的部分。另外,有时需要对这些照片的某些特征予以增强,例如增强河床或断层的线条,以及增强那些在颜色上或黑白程度上有较明显差别的区域边界等。

除了增晰和恢复外,在许多应用中需要设计一个系统用来提取信号中某种特定的信息。从心电图估计心率就是其中一个例子,经济形势预测则是另一种例子。例如,有一组以往经济上的数据(如一组股票市场的平均值),希望从分析这组数据来预测将来的趋势和其它一些特性,如周期性的变化,而这些变化可以用来对将来的走向作出预测。而在另外一些应用中,重点可能是放在具有某些特别性质的信号设计上。具体地说,在通信应用中,相当大的注意力是放在设计信号上以满足可靠传输所提出的限制和要求。例如经由大气层的远距通信就要求使用电磁波频谱中某一特别部分频率的信号。通信信号的设计还必须考虑在经由大气层传输引起的失真和由其他用户发射的其它信号的干扰同时存在的条件下可靠接收的问题。

信号与系统分析概念和方法的另一类重要应用是用来改变或控制某一已知系统的性能,

这或许是通过选择特定的输入信号,或者利用该系统与其它系统的组合来完成的。用于调节化学处理工厂的控制系统的设计就属于这类应用的例子。这种类型的工厂安装了各种传感器用来检测诸如温度、湿度、化学成分等这些物理信号,控制系统根据测得的这些传感器信号,调节像流速和温度这些量以控制正在进行中的化学过程。飞机自动驾驶仪的设计和计算机控制系统代表了另一类例子。在这种情况下,飞机控制系统利用测得的飞行速度、高度和航向等这些信号来调节油门大小、方向舵和副翼的位置等这样一些变量,以保证飞机沿着指定的航线平稳地飞行并增强对驾驶员命令的反应程度。在以上两个例子中,称之为反馈这样一个重要概念起了重要的作用,因为已测得的信号被回授并用来调节一个系统的响应特性。

以上所提到的只是信号与系统概念极为广泛应用的几个方面。这些概念的重要性不仅仅来自于它们存在于各种各样的现象和过程中,而且也由于这一整套概念、分析技术和方法论一直是并仍在继续不断地发展着用来解决涉及各种信号与系统方面的许多问题,它的发展历史可以追溯到很多个世纪以前。虽然大部分工作都是由某些具体应用促成的,但是,其中很多概念已在远比当初所预计的应用领域要大得多的范围内证明是头等重要的。例如,作为信号与系统频域分析的基础,本书拟将详细讨论的傅里叶分析方法,其发展可以追溯到从古代巴比伦人(**Babylonians**)对天文学的研究直到 18,19 世纪在数学物理学方面的研究。

上面提到的例子中,有些信号是随时间连续变化的,而另一些则仅仅在离散时间点上有价值。例如,在电路分析和机械系统中遇到的信号都是随时间连续变化的;而另一方面,每天股票市场的收盘值(即每日停业前的值)就是一个在离散时间点上变化的信号。不像一个连续变量函数的曲线那样,每日收盘的股票值是在给定的离散时间点上的一串序列值。由于对这两类信号的描述以及对这些信号作出响应或处理的系统的描述,都有着明显的不同,这就自然导致了两种并行的信号与系统的分析范畴,其一就是以连续时间描述的现象和过程,另一个则是以离散时间描述的现象和过程。

有关连续时间信号与系统和离散时间信号与系统的概念和方法都有着悠久的历史,而且在概念上是戚戚相关的。然而在历史上由于两者在应用上各行其道,因此它们大部分的研究和发展在一定程度上都是独自进行的。连续时间信号与系统在物理学方面,以及近代电路理论和通信系统方面的应用有很深的渊源,而离散时间信号与系统方法却在数值分析、统计学,以及与经济学和人口统计学等数据分析应用有关的时间序列分析中有很深的根基。然而,在近几十年内,连续时间和离散时间信号与系统变得日益交织在一起,而在应用上也日益结合。造成这种变化的强大动力是来自于在系统实现和信号产生技术上取得的惊人进展。特别是高速数字计算机、集成电路和尖端高集成度器件制造技术等继续取得进展,使得考虑用时间样本(即转换为离散时间信号)来表示和处理连续时间信号具有越来越多的好处。作为一个例子,一架近代高性能飞机的计算机控制系统就是将传感器输出的量(如速度)数字化,以产生一组已采样测量值的序列,然后交由控制系统来处理的。

鉴于连续时间信号与系统和离散时间信号与系统之间的相互关系日益密切,以及与各自有关的一些概念和方法之间的紧密联系,因此,本书就选择了以并行的方式来讨论这两种类型的信号与系统。由于两者在很多概念上是类似的(但不是完全一样的),因此,并行地处理可以做到在概念和观点上两者互为分享,而又能更好地把注意力放在它们之间的类同点和不同点上。另外,从以后的讨论中可以明显看到,某些概念从一种系统引入要比从另一种系统来得容易接受;而一旦在一种系统中被理解之后,就很容易地把它们用到另一系统中去。再者,这种

并行处理也大大地方便于理解在连续时间和离散时间结合在一起应用时很多重要的实际问题,这指的就是连续时间信号的采样和用离散时间系统来处理连续时间信号这种情况。

正如到目前为止我们已经叙述过的,信号与系统是一个极为普遍的概念。在这样的普遍意义下,对于信号与系统的本质仅能作一些概括性的介绍,也只能在最基本的方面讨论它们的一些性质。另一方面,在处理信号与系统时,一种重要而基本的想法是精心地挑选一类子系统,它们都具有若干个特别的性质可资利用,并且可以深入地分析与表征这类信号与系统。本书的重点就是放在一种称之为线性时不变的系统上,由定义这类系统的线性和时不变性引出的一套概念和方法不仅在实践上具有重要意义,而且在理论上也是完整的。

正如在本绪论中已经强调过的,信号与系统分析已经有了一段很长的历史,并且从中产生出应用领域极为广泛的一套基本方法和基本理论。的确,面对着新问题、新的技术和新的机遇的挑战,信号与系统分析一直在不断地演变和发展着。我们完全可以期望,随着技术的进步,使日益增长着的复杂系统和信号处理技术的实现成为可能,而且一定会加速这一进程。将来,我们一定会看到信号与系统分析方法和概念能够应用到更为广泛的领域中去。为此,我们感到信号与系统分析这一论题代表了科学家和工程师都必须关注的一整套知识。我们认为,本书所精选的一组内容、这些内容的提出和组织、以及每章习题的考虑,都会最有效地帮助读者在信号与系统方面打下一个坚实的基础;对其在滤波、采样、通信和反馈系统分析等最重要和最基本的应用方面有所了解;以及对于形成和解决复杂问题中采用某一种最为有力和广泛适用的方法作出明智的选择。

# 目 录

译者前言

前言

致谢

绪论

## 第 1 章 信号与系统

1.0 引言 .....	(1)
1.1 连续时间和离散时间信号 .....	(1)
1.1.1 举例与数学表示 .....	(1)
1.1.2 信号能量与功率 .....	(4)
1.2 自变量的变换 .....	(6)
1.2.1 自变量变换举例 .....	(6)
1.2.2 周期信号 .....	(9)
1.2.3 偶信号与奇信号 .....	(10)
1.3 指数信号与正弦信号 .....	(11)
1.3.1 连续时间复指数信号与正弦信号 .....	(11)
1.3.2 离散时间复指数信号与正弦信号 .....	(16)
1.3.3 离散时间复指数序列的周期性质 .....	(19)
1.4 单位冲激与单位阶跃函数 .....	(23)
1.4.1 离散时间单位脉冲和单位阶跃序列 .....	(23)
1.4.2 连续时间单位阶跃和单位冲激函数 .....	(24)
1.5 连续时间和离散时间系统 .....	(28)
1.5.1 简单系统举例 .....	(29)
1.5.2 系统的互联 .....	(30)
1.6 基本系统性质 .....	(32)
1.6.1 记忆系统与无记忆系统 .....	(32)
1.6.2 可逆性与可逆系统 .....	(33)
1.6.3 因果性 .....	(35)
1.6.4 稳定性 .....	(36)
1.6.5 时不变性 .....	(37)
1.6.6 线性 .....	(39)
1.7 小结 .....	(42)
习 题 .....	(42)

## 第 2 章 线性时不变系统

2.0 引言 .....	(55)
2.1 离散时间 LTI 系统:卷积和 .....	(55)
2.1.1 用脉冲表示离散时间信号 .....	(55)
2.1.2 离散时间 LTI 系统的单位脉冲响应及卷积和表示 .....	(56)
2.2 连续时间 LTI 系统:卷积积分 .....	(66)



2.2.1	用冲激表示连续时间信号	(66)
2.2.2	连续时间 LTI 系统的单位冲激响应及卷积积分表示	(69)
2.3	线性时不变系统的性质	(75)
2.3.1	交换律性质	(75)
2.3.2	分配律性质	(76)
2.3.3	结合律性质	(77)
2.3.4	有记忆和无记忆 LTI 系统	(78)
2.3.5	LTI 系统的可逆性	(79)
2.3.6	LTI 系统的因果性	(80)
2.3.7	LTI 系统的稳定性	(81)
2.3.8	LTI 系统的单位阶跃响应	(83)
2.4	用微分和差分方程描述的因果 LTI 系统	(83)
2.4.1	线性常数微分方程	(84)
2.4.2	线性常数差分方程	(87)
2.4.3	用微分和差分方程描述的一阶系统的方框图表示	(89)
2.5	奇异函数	(91)
2.5.1	作为理想化短脉冲的单位冲激	(91)
2.5.2	通过卷积定义单位冲激	(94)
2.5.3	单位冲激偶和其它的奇异函数	(95)
2.6	小结	(97)
	习题	(98)

### 第 3 章 周期信号的傅里叶级数表示

3.0	引言	(124)
3.1	历史回顾	(124)
3.2	LTI 系统对复指数信号的响应	(128)
3.3	连续时间周期信号的傅里叶级数表示	(130)
3.3.1	成谐波关系的复指数信号的线性组合	(130)
3.3.2	连续时间周期信号傅里叶级数表示的确定	(133)
3.4	傅里叶级数的收敛	(137)
3.5	连续时间傅里叶级数性质	(143)
3.5.1	线性	(143)
3.5.2	时移性质	(143)
3.5.3	时间反转	(144)
3.5.4	时域尺度变换	(144)
3.5.5	相乘	(144)
3.5.6	共轭及共轭对称性	(145)
3.5.7	连续时间周期信号的帕斯瓦尔定理	(145)
3.5.8	连续时间傅里叶级数性质列表	(146)
3.5.9	举例	(146)
3.6	离散时间周期信号的傅里叶级数表示	(150)
3.6.1	成谐波关系的复指数信号的线性组合	(150)
3.6.2	周期信号傅里叶级数表示的确定	(151)