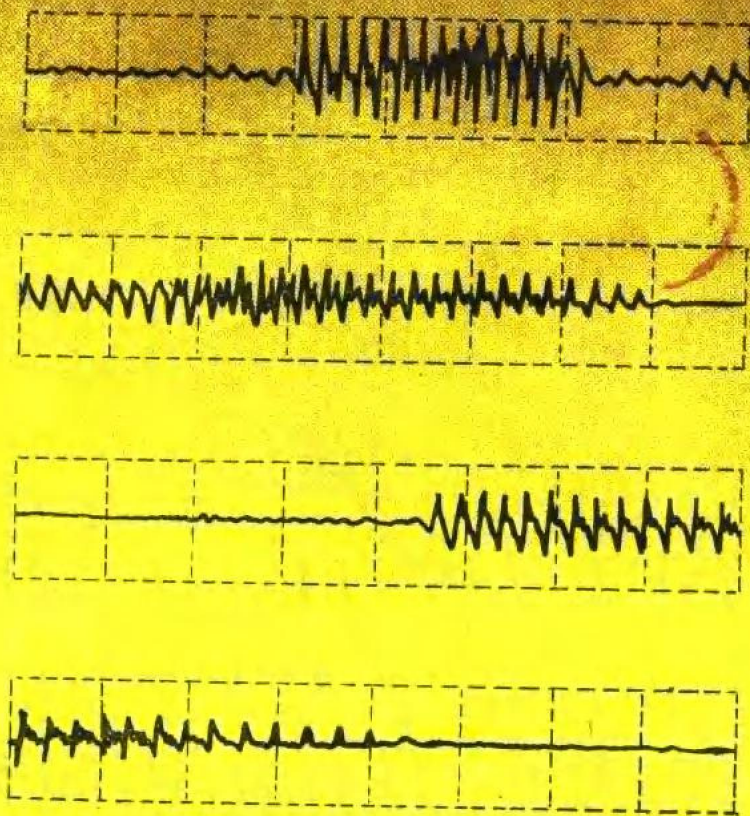


ALAN V. OPPENHEIM
ALAN S. WILLSKY

SIGNALS and SYSTEMS

信号与系统

[美]A.V.奥本海姆 等著 刘树棠 译



西安交通大学出版社

信 号 与 系 统

[美] A.V. 奥本海姆 等著

刘 树 棠 译

西 安 交 通 大 学 出 版 社

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。全书共十一章，内容包括：绪论，信号与系统，线性时不变系统，连续时间信号与系统的傅里叶分析，离散时间信号与系统的傅里叶分析，滤波，调制，抽样，拉普拉斯变换， z 变换以及线性反馈系统。每章都附有大量精选的习题。

本书结构新颖，选材得当，论述严谨，条理清楚，堪称反映信号与系统分析当代水平的一部佳作。

本书可作为无线电技术和自动化类有关专业信号与系统课程的教材，也可供从事信息传输、信息处理工作的广大科技人员及高等学校有关专业的学生、研究生和教师参考。

A. V. Oppenheim A. S. Willsky
with
I. T. Young
SIGNALS AND SYSTEMS

Prentice-Hall, Inc., 1983

信 号 与 系 统

[美] A. V. 奥本海姆 等著

刘 树 棠 译

责任编辑 阎鸿森 早 雪 房立民

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路 28 号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 38.75 字数 950 千字

1985 年 11 月第一版 1985 年 11 月第一次印刷

印数 1—5,000 册

统一书号 15340·039 定价 8.20 元

译 者 的 话

本书是美国麻省理工学院(M. I. T.)电气工程与计算机科学系二年级本科生用的教材。它既可作为线性系统课程两学期的基本教材,也可取其中的某些部分作为一学期的基本教材,同时还可以用其它剪裁方式组成高年级选修课的基本教材。总之,这本教材的适用范围较宽。

本书是 M. I. T. 自六十年代以来,对电路、信号与系统的理论教学进行了多次重大改革尝试后形成的成果之一,也是作者长期从事科学研究和教学实践的结晶。目前,这门课程在该系已被列为四门主干课程之一(其余三门为:基本电路与电子学、计算机硬件和计算机软件),普遍认为本书代表了该课程现代的较高水平。

本书的最大特点是将连续时间和离散时间信号与系统置于完全同等的重要地位而并行地展开讨论,且取得了成功。诚如作者所说的,这样做的目的是考虑到“根据信号与系统设计和实现方法的新近进展及对将来的展望,迫切需要人们对连续时间和离散时间系统的分析与综合技术都很熟悉”。早在七十年代,就如何在教材中恰如其份地反映离散时间信号与系统的内容和正确处理连续时间和离散时间这两部分内容的关系,不少作者曾做过尝试,并引起过较大的争论。对于并行讨论的做法,由于各种原因,似乎当时未被大多数人所肯定。本书作者在这一方面所做的努力和尝试,则普遍认为是很成功的。我们在使用本书的教学过程中也充分体会到作者在这一方面的处理颇具匠心,很有独到之处。本书对许多基本内容及相互关系的提炼、组织、叙述和处理都十分得体和周到,并且配有大量经过精心挑选,类型各异的习题(注1)。

我们以该书作为基本教材,已使用过两遍(注2)。目前,由于受全国统一大纲的限制,只使用了全书的前十章,而另用状态变量分析来替换第十一章线性反馈系统的内容。这样,讲课用了约 80 个学时,其中本书前十章约需 72 学时。如果再考虑实验和设若干习题课,总共有 100 学时较为适宜。这样,一学期可以完成这门课的教学任务。按照全国无线电技术专业《信号与系统》统编大纲的要求,状态变量分析的内容应在本门课中列入,而本门课一般不设习题课。我们认为,将状态变量分析的内容从本门课中抽出,将其放在诸如《反馈与控制》等类课程中,进行更为深入的讨论似更合适。此外,《信号与系统》这门课还应增加适当的习题课学时,以便做课堂讨论之用(这一点对使用本教材尤其需要)。如果这样,那么本书就完全可以作为无线电技术、通讯、信号处理、自动控制等专业的有关《信号与系统》课的基本教材。

我们还认为,《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类专业跨出去,部分电子学类专业,电机类专业,乃至部分机械、动力、力学类专业都

(注1) 关于该书的详细书评可参阅: 1. IEEE "Circuits and systems Magazine" Vol. 5, No. 3, Sept. 1983, p.p.14-16. 2) 赫慈辉, 吴景棠 "A. V. 奥本海姆等著《信号与系统》一书简介" 1984, 9. 教育部工科电工教材会议资料。

(注2) 详见“工科电工教学”1984年第28期, pp.14-18.

可以不同深度开设这门课。因为信号处理，尤其是数字信号处理的理论和技术已经广泛应用到各个学科领域，而本书的内容正是从事任何信号处理工作所必备的基础理论知识，并且直接与数字信号处理的基本理论和方法相衔接。因此，本书对于这些专业来说，经过适当选择和剪裁，作为基本教材或主要参考书也是合适的。

最后，对于那些对离散时间系统理论尚不熟悉的工程技术人员来说，这也是一本很好的自学参考书，可以帮助读者很快进入这一领域。

本书除习题部分外，全部由刘树棠译。邹理和副教授对前言、绪论和第四章的引言部分进行了仔细的校阅，对其余部分章节和段落进行了重点校阅，并提出了宝贵修改意见。译者对此表示诚挚的谢意。

本书习题丰富多彩，篇幅较大，部分习题系正文部分的补充和扩展。全部习题由阎鸿森译，刘树棠校。除此之外，阎鸿森为本书的出版还做了很多工作。

本文在翻译过程中还得到蒋大宗教授、邱关源教授、万家翔副教授等人的帮助，在此表示深深谢意。

虽然在使用本书过程中，对于原书疏漏和错误都一一做了勘正(注)，但由于全书篇幅大，时间仓促，加之译者水平有限，错误和不妥之处，恳望读者批评指出。

译 者

一九八五年五月于西安交通大学

(注) 本书系根据1933年5月的原版书译出。1985年初见到国内影印版。我们将两者做了仔细的对照，发现原书的个别章节的某些错误与疏漏之处已在影印版中作了勘正。但绝大部分仍保持原样(包括疏漏和印刷错误)。特此说明——译者注。

目 录

前 言	(1)
第一章 绪论	(5)
第二章 信号与系统	(8)
2.0 引言	(8)
2.1 信号	(8)
2.2 自变量的变换	(11)
2.3 基本连续时间信号	(13)
2.4 基本离散时间信号	(18)
2.5 系统	(25)
2.6 系统的性质	(27)
2.7 小结	(32)
习 题	(33)
第三章 线性时不变系统	(52)
3.0 引言	(52)
3.1 用冲激函数表示信号	(52)
3.2 离散时间 LTI 系统: 卷积和	(56)
3.3 连续时间 LTI 系统: 卷积积分	(64)
3.4 线性时不变系统的性质	(68)
3.5 用微分和差分方程描述的系统	(73)
3.6 由微分方程和差分方程描述的 LTI 系统的方框图表示	(81)
3.7 奇异函数	(87)
3.8 小结	(91)
习 题	(92)
第四章 连续时间信号与系统的傅里叶分析	(124)
4.0 引言	(124)
4.1 连续时间 LTI 系统对复指数信号的响应	(127)
4.2 周期信号的表示: 连续时间傅里叶级数	(129)
4.3 周期信号的傅里叶级数近似与傅里叶级数的收敛	(137)
4.4 非周期信号的表示: 连续时间傅里叶变换	(142)
4.5 周期信号与连续时间傅里叶变换	(149)
4.6 连续时间傅里叶变换的性质	(152)
4.7 卷积性质	(161)

4.8	调制性质	(166)
4.9	傅里叶变换与傅里叶级数的性质及基本傅里叶变换对列表	(169)
4.10	连续时间傅里叶变换的极坐标表示	(172)
4.11	用线性常系数微分方程表征的系统的频率响应	(177)
4.12	一阶与二阶系统	(182)
4.13	小结	(189)
	习 题	(191)
第五章 离散时间信号与系统的傅里叶分析		(224)
5.0	引言	(224)
5.1	离散时间 LTI 系统对复指数信号的响应	(225)
5.2	周期信号的表示: 离散时间傅里叶级数	(226)
5.3	非周期信号的表示: 离散时间傅里叶变换	(235)
5.4	周期信号与离散时间傅里叶变换	(241)
5.5	离散时间傅里叶变换的性质	(247)
5.6	卷积性质	(251)
5.7	调制性质	(256)
5.8	傅里叶变换与傅里叶级数的性质及基本傅里叶变换对列表	(257)
5.9	对偶性	(261)
5.10	离散时间傅里叶变换的极坐标表示	(265)
5.11	由线性常系数差分方程表征的系统的频率响应	(266)
5.12	一阶和二阶系统	(271)
5.13	小结	(280)
	习 题	(282)
第六章 滤波		(313)
6.0	引言	(313)
6.1	理想频率选择性滤波器	(315)
6.2	非理想频率选择性滤波器	(318)
6.3	用微分方程描述的连续时间频率选择性滤波器举例	(320)
6.4	用差分方程描述的离散时间频率选择性滤波器举例	(323)
6.5	Butterworth 频率选择性滤波器	(329)
6.6	小结	(333)
	习 题	(334)
第七章 调制		(349)
7.0	引言	(349)
7.1	连续时间正弦幅度调制	(350)
7.2	正弦幅度调制的某些应用	(357)

7.3	单边带幅度调制	(361)
7.4	脉冲幅度调制和时分多路复用	(363)
7.5	离散时间幅度调制	(366)
7.6	连续时间频率调制	(369)
7.7	小结	(375)
	习 题	(376)
第八章 抽样		(395)
8.0	引言	(395)
8.1	用信号的样本表示连续时间信号: 抽样定理	(395)
8.2	利用内插从样本重建信号	(400)
8.3	欠抽样(Undersampling)的效果: 混迭现象	(404)
8.4	连续时间信号的离散时间处理	(407)
8.5	频域抽样	(413)
8.6	离散时间信号抽样	(415)
8.7	离散时间抽取与内插	(419)
8.8	小结	(422)
	习 题	(424)
第九章 拉普拉斯变换		(438)
9.0	引言	(438)
9.1	拉普拉斯变换	(438)
9.2	拉氏变换的收敛域	(442)
9.3	拉普拉斯反变换	(448)
9.4	傅里叶变换的几何求值: 零极点图	(451)
9.5	拉氏变换的性质	(456)
9.6	常用拉氏变换对	(461)
9.7	利用拉氏变换分析和表征 LTI 系统	(462)
9.8	单边拉氏变换	(470)
9.9	小结	(471)
	习 题	(473)
第十章 z 变换		(483)
10.0	引言	(483)
10.1	z 变换	(483)
10.2	z 变换的收敛域	(487)
10.3	z 反变换	(492)
10.4	由零极点图对傅里叶变换进行几何求值	(496)
10.5	z 变换的性质	(498)

10.6	常用 z 变换对	(502)
10.7	利用 z 变换分析与表征 LTI 系统	(503)
10.8	连续时间和离散时间系统之间的变换	(506)
10.9	单边 z 变换	(512)
10.10	小结	(514)
	习 题	(515)
第十一章	线性反馈系统	(529)
11.0	引言	(529)
11.1	线性反馈系统	(531)
11.2	反馈的某些应用及结果	(532)
11.3	线性反馈系统的根轨迹分析法	(539)
11.4	奈奎斯特稳定性判据	(549)
11.5	增益和相位裕度	(556)
11.6	小结	(562)
	习 题	(563)
附录	部分分式展开	(593)
A.0	引言	(593)
A.1	部分分式展开和连续时间信号与系统	(594)
A.2	部分分式展开和离散时间信号与系统	(598)
	文献目录	(603)

前 言

本书系用于大学本科信号与系统课程的教科书。虽然这类课程通常是电气工程系的课程，但是，作为该课程核心的一些基本概念和方法，对于所有工程专业来说也都是很重要的。随着工程师们面临着需要对一些复杂的过程进行分析与综合的新挑战，事实上，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，信号与系统课程不仅是工程教学中一门非常基本的课程，而且也成为工科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，是在麻省理工学院(M. I. T.)电气工程与计算机科学系讲授该方面第一门课讲稿的基础之上形成的。总的来说是考虑到这样一点，即：根据信号与系统设计和实现方法上的新近进展及对将来的展望，迫切需要对连续时间和离散时间系统分析和综合技术都很熟悉。为了实现这一目的而选择了对连续时间和离散时间信号与系统采用并行的分析方法。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概念和观点；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，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、调制、抽样、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。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，本书的编排也体现了这一点。因此，在每一章末都收集了几种类型、总数达到 350 多题的课外习题。当然，其中许多是对各章所涉及到的基本方法的训练；但也有不少习题是要求学生应用这些方法去解决一些重要的实际问题；另外一些则是要求学生进行深入的思考以扩大本书所获得的概念。习题种类的多样化和提供的数量都希望能够给教师有相当大的灵活性来进行合理的剪裁以满足各类学生的需要。教师可从出版社(Prentice-Hall, Inc.——译者注)得到习题解答。另外，与本书配套的包括一套讲课录像带和学习指南在内的一种自修教程也将一并发行。

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、傅里叶分析或拉氏变换和 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理论课，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意

义。

简短绪论这一章是概述有关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。第二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。第二章还介绍了系统互联的方框图表示，并讨论了从因果性到线性、时不变性等几个基本的系统性质。第三章就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，以及连续时间时不变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，第三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来求解将更为方便，而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。讨论中包括了利用相加器、系数相乘器和延时单元(离散时间下)或积分器(连续时间下)等以方框图形式来表示由差分和微分方程描述的LTI系统，后续的章节再回到这一问题上来并借助于变换法来建立系统的级联和并联结构。这些系统的表示方法所包涵的内容不仅仅给学生提供了如何图示一个系统的方法，并且还对LTI系统某些数学性质的含义(同一系统可用完全不同的结构来实现)给出了具体的例子。最后，第三章以简短讨论奇异函数(阶跃、冲激、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些信号，例如利用LTI系统对这些理想化信号的响应来理解这些奇异信号。

第四章完整地建立了连续时间信号和系统的傅里叶分析方法，而第五章则是以并行的方式来讨论离散时间的情况。在这两章的开头都包括了有关傅里叶分析历史演变的一些情况，并且藉此给学生就这些方法的应用领域有一些感性认识以及对傅里叶分析的某些数学方面有一个正确的理解。在这两章的具体讨论中，傅里叶分析在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)一个LTI系统对复指数输入信号的响应就是同一个复指数信号乘以该系统的复数特征值。按此，每一章都首先导出周期信号的傅里叶级数表示，然后把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。这种观点强调了傅里叶级数和傅里叶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讨论。这两章都讨论了傅里叶变换和傅里叶级数的很多重要性质，并且特别突出了卷积和调制性质。这两个性质是稍后几章中将要详细讨论的滤波、调制和抽样等问题的基础。第四、五两章的最后两节是应用变换法来分析由微分和差分方程表征的LTI系统，为了补充这些讨论(以及后面拉氏变换与 z 变换的讨论)，书末列有附录，包括有关部分分式展开法的讨论。第四、五章都分别用了几个例子来说明如何利用这一方法来很容易地求得由微分和差分方程描述的LTI系统的响应。同时，我们还介绍了这类系统的级联和并联实现，并从这种系统的表示中引出和研究这些系统的基本构造单元，即一阶和二阶系统。

我们采用并行处理的办法来处理这两章傅里叶分析。具体说，在第五章的讨论中，我们

可以利用许多在第四章对连续时间情况下所获得的概念和细节，而到第五章末尾时，我们则着重突出连续时间和离散时间傅里叶表示法的完全对称的性质；同时，也用对比两者的不同点来加深对各自特殊性质的认识。

第六、七和八章分别讨论滤波、调制和抽样问题。这些问题的讨论不仅仅是为了给学生介绍傅里叶分析方法的某些重要应用方面，而且也是为了有助于加深对频域分析法的理解和直观认识。第六章对连续时间和离散时间的滤波问题作了入门性介绍，其中包括讨论了理想频率选择性滤波器；几个由微分和差分方程描述的滤波器例子；通过诸如汽车减震系统和巴特沃兹 (Butterworth) 滤波器等例子，简述了在滤波器设计中遇到的许多定性和定量问题，以及特性之间的权衡和折衷等问题。在本章习题中还讨论了许多滤波的其它方面问题。

第七章讨论的调制包括一定深度地讨论了连续时间正弦幅度调制 (AM)，这是从直接利用调制性质来叙述调制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。依此，在调制性质的基础上讨论了几个另外的问题和应用，诸如：同步与非同步解调，可变中心频率的频率选择性滤波器的实现，频分多路复用和单边带调制等。在习题内还将涉及到更多的例子和应用。第七章还包括了三个其它的论题，第一是脉冲幅度调制和时分多路复用，这是沟通第八章抽样问题的桥梁。第二是离散时间幅度调制，在连续时间幅度调制的基础上很容易建立起离散时间幅度调制的概念，有关该方面的很多应用将在习题中给出。第三是频率调制 (FM) 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 系统的分析不象 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。

第八章抽样问题的处理主要着重在抽样定理及其含义上。然而，为了正确地提出这一问题，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着手。在利用频域方法导出抽样定理以后，对欠抽样 (指抽样过疏——译者注) 下的混迭现象既从频域又从时域的角度都作了直观的解释。抽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，本章在这一问题的阐述上花了一定的篇幅。连续时间抽样的讨论以时域抽样在频域的对偶即频域抽样而告结束，然后把问题转到离散时间信号的抽样上来。用完全并行与在连续时间下讨论所采用的方式来建立离散时间抽样的基本结果，以及这些基本结果在抽取、内插和混合调制等问题中的应用。连续和离散时间抽样的其它各种应用将在习题中提到。

第九、十两章分别讨论拉氏变换和 z 变换。虽然也简要地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：拉氏变换和 z 变换与傅里叶变换的关系；有理函数的变换与零极点概念；变换的收敛域与被变换信号性质的关系；利用部分分式展开求反变换；根据零极点图，来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其系统函数的确定，以及利用系统函数的代数关系来构成 LTI 系统的内部联接等。最后，在第十章利用拉氏变换和 z 变换方法，讨论了把一个有理系统函数的连续时间系统映射到有理系统函数的离散时间系统的变换方法，其中列举了三种这种变换的重要例子并研究了它们的用处和各种特性。

拉氏变换和 z 变换工具是研究第十一章反馈系统的基础。本章以反馈系统的几个重要应用及其性质着手，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，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，这些是：根轨迹分析法，奈奎斯特图、奈奎斯特准则以及对数幅/相图和稳定的反馈系统相位、增益余度概念。

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。我们写成的这本书就是为了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，就有必要略去另外一些内容，比如随机信号和状态空间方法的讨论（常常也把这些内容放在信号与系统的第一门课中）。很多学校（包括 M. I. T）传统上是不把这些内容包括在这种基础性的课程中的，而宁愿放在专门研究这些问题的课程中去作更深入一些的讨论。例如状态空间方法是放在更为一般的多输入/多输出和时变系统方面的课程中去处理，而且在掌握了本书内容的坚实基础之后，这种一般性处理是最合适的了。即便本书没有包括状态空间内容的介绍，讲授教师如有需要还是可以很容易把这一内容吸收到本书第二到五章有关微分方程和差分方程的内容中去的。

适当深度地选用本书的第二、三、四和五章（各章有些内容可根据教师本人意见作些删除）的有关内容，再从余下的各章节中挑选一些问题就可以构成二、三年级程度的一学期课程的典型内容，例如，一种可能作法是从第六、七和八章中选取几个基本问题，再带上拉氏变换和 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。还有其它的各种可能组成方式，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面向连续时间系统（这时可把第五和十章以及第六、七、八、十一各章中的离散时间部分放在次要地位）等都是可能的。我们还发现，在讨论傅里叶分析基本内容的同时，介绍一些第六、七和八章中的某些应用也是很有用的，这在本课程的早期阶段帮助学生形成对这一学科的直观了解和正确评价都是很有价值的。

除了上面提到的那些可能剪裁方式以外，这本书还可用作两学期的线性系统课的基本教材。或者，在信号与系统第一门课中本书没有被使用过的部分，再结合一些别的内容就可以形成一门高年级选修课的基础。例如本书的不少内容都是可以同数字信号处理方面的课程相衔接的^(注)。因此，使用在离散时间系统方面较深的一些内容作为数字信号处理课的入门，就可以形成一门大学高年级的课程。除此以外，也可以加上用状态空间方法来描述和分析线性系统的内容而形成一门课。

在我们形成本书材料的过程中，一直有幸得到很多同事、学生和朋友们的帮助、建议和支持。构成本书核心部分的想法和观点是作者在 M. I. T 讲授信号与系统课的十年时间中形成的，在这期间与我们一起共事的很多同事和学生对形成本书的原讲稿的演变都给予了很大的影响。Jon Delatizky 和 Thomas Slezak 帮助我们设计了很多插图，Hamid Nawab 和 Naveed Malik 作了与本书配套的习题解答，Carey Banks 和 David Rossi 帮助汇总了书末的参考文献目录，作者对此均表示衷心地感谢。另外，很多学生花费了不少时间为本书作了大量的清样校对工作，对此也表示诚挚的谢意。

[以下致谢部分略]

(注) 例如 A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer "Digital Signal Processing" (Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall Inc., 1975).

第一章 绪 论

信号与系统概念出现在范围极为广泛的各种领域中，与这些概念有关的方法在很多科学和技术领域起着重要的作用，例如在通讯、航空与宇航、电路设计、声学、地震学、生物工程、能源产生和分配系统、化学过程控制及语言处理等方面。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，即信号总是一个或几个独立变量的函数，该函数一般都包含了关于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。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的光源和物体反射回来的光信号而产生一幅照片。

在出现的这些信号与系统的许多方面，有很多问题可以研究。在某些情况下，对某个特定的系统关注的是如何详细地知道系统对各种输入的响应。例如，人的听觉系统就是人们长期以来从事研究的属于该方面的一个例子；另一个例子就是对某一特定地理区域经济系统特性的研究，当一些诸如庄稼欠收，新油田的发现等潜在的、不能事先预计的情况出现时，更好地预测在经济上带来的影响。

信号与系统分析的另一个范畴不是分析已有的系统，而是把重点放在系统的设计上，实现以某种特定的方式来处理信号。经济预测是这方面的一个常见的例子，例如，有一组过去经济上的数据（如一组股票市场的平均价格），要是能够从过去提供的数据中预测出将来的趋势显然是有好处的。现在，很多这样的系统都已研制并精选出来（一般都是用计算机程序形式给出的），用以实现对股票市场作出详尽的分析以及作其它种类的经济预测。虽然大多数这样的信号都是不能完全预测的，但有趣而重要的是，对于许多这类信号来说，都可以借助过去的记录对未来的趋向作出一定程度的预测，或者说，其未来至少是可以近似地由其过去外推出来的。

第二类最常见的应用是对已受某种形式污损了的信号的恢复。这种情况在背景噪声很强的语言通讯中往往就会遇到，例如当领航员与地面空中交通控制塔通话时，通话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（至少是近似的）不需要的信号，即噪声。在这一方面，另一个有用的例子是关于旧式唱片的恢复技术。在声音录制系统中，根据欲录制的信号（例如某艺术家的声音）在唱片上刻出深浅不同的槽纹，而在早期的录制系统中采用的是一种机械录音喇叭，这种系统会引入相当大的失真。对于一套旧式唱片，若能将它们恢复到其质量能与当今的录制效果相媲美的话，这当然是很有意义的。适当设计一个信号处理系统，就有可能使原唱片得到明显的增晰。

第三个应用方面是在图像恢复和图像增晰方面，这里要求以某种处理信号的方式来进行系统设计。由于摄像设备的限制、可能的大气层影响、以及在信号传回到地面过程中引起的误差等等因素，在大气深层空间所摄取的物景照片会受到污损，因此照例总是要对从空间返回的图像信号进行一定的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等。完成这一处理任务就成为系统设计的范畴。

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。化学工厂的控制（一般统称为过程控制）就是说明这类应用的例子，在这种应用中，典型的是传感器测量出各种物理信号，如温度、湿度、化学成分比等等，然后根据测得的信号，某种调节系统就产生一些控制信号去调整正在进行的化学过程。第二个例子是与某些高性能的飞行器呈现出的固有不稳定性问题有关的，这些飞行器的空气动力学特性在缺乏精心设计的控制信号下是不可能飞行的。在这两个例子中，称之为反馈这样一种重要概念起着主要的作用，这也是本书将要讨论的重要课题之一。

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的许多问题。它的发展可以追溯到很多个世纪以前，虽然大部分工作是由某些具体问题促成的，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十八、十九世纪在数学物理学方面的研究，而更近一些，这些概念和方法一直在涉及到从调幅（AM）和调频（FM）发射和接收机设计到计算机辅助图像恢复等领域中的应用。从所有这些方面的工作，已经对信号与系统的表示、分析和综合形成了一个完整的体系和一些强有力的数学工具。

上面提到的某些例子中，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所值。例如在旧唱片的恢复中，我们涉及的就是随时间作连续变化的音频信号；而另一方面，每月股票市场的收盘值（即每日停业前的值）就是一个在离散时间点上变化的信号。不象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，因此，自然导致两种并行的信号与系统分析范畴。其一就是以**连续时间**描述的现象和过程，而另一个则是以**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多少都是独自进行的。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讯系统方面的应用有很深的渊源，而离散时间信号与系统技术却在数值分析，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找到了它的根基。但是，在近几年内，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、集成电路和尖端高密度器件制造技术等所取得的难以置信的飞速发展，已经使得考虑用等间隔样本来表示和处理连续时间信号（即转换为离散时

间信号)具有越来越多的好处。正如我们将在第八章中详细讨论的那样,一个重要的事实是:在相当松弛的某些条件下,一个连续时间信号完全可以用它的一组样本值来代表。

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,并行地处理可以作到在概念和观点上两者互为分享,而能更好地把注意力放在它们之间的类同点和不同点上。再者,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,就可简而易之地把这些概念用到另一系统中去。

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,对信号与系统的性质仅能作一些笼统的介绍,也只能在最基本的方面讨论它们的一些性质。不过,我们在处理信号与系统问题时,有一种重要而基本的办法,那就是精心地选择一些系统,其中每一种系统都具有若干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。

正如在前面已经指出过的,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;同时,从不断发展中的集成电路及其应用中可以看到,信号与系统分析一直在不断地演变和发展着,以响应各种新问题、新技术和新的机遇的挑战。我们完全可以期望,随着技术的进步,使得日益增长着的复杂系统和信号处理技术的实现成为可能,一定会加速这一进程。将来,我们定会看到信号与系统分析方法和概念能够应用到更为广阔的领域中去。其中某些方面证明这些方法有其直接的应用;而在另一方面,则远远超出通常认为是隶属于常规的科学和工程技术的领域。这一点就说明:寓意在这些方法中的思想要比这些具体方法本身重要得多,即使是这些方法在分析和解决许多复杂问题中证明是很有价值的。为此,我们感到,信号与系统这门课是科学家和工程师都应关注的。我们认为,本书几经精选的一组内容、这些内容的组织、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了一个坚实的基础;对其在滤波、调制、抽样和反馈系统分析等最重要和最基本的应用方面有所了解;培养具有把某些观点演变成描述和解决问题的一种很有效的方法的能力,以及对这一方法广泛的实际应用和可能的应用方面作出评价。

第二章 信号与系统

2.0 引言

为了讨论信号与系统分析方法，有必要先建立一种分析体系，而这种体系能够抓住在前一章中给出的有关信号与系统的一些直观概念。本章就是从引入信号与系统的数学描述及表示入手，并利用这些数学表示阐述隐含在信号与系统分析之中的基本概念，从而建立起这样一个分析体系。这样，我们将会对信号与系统的性质和它们的表示有一个深入而直观的理解。

2.1 信号

正如在第一章中所讨论到的，信号可以描述范围极为广泛的一类物理现象。虽然信号可以用许多方式来表示，但是在所有情况下，信号所含的信息总是寄寓在某种形式的变化波形之中。例如，人的声道系统所产生的语音信号就是一种声压的起伏变化，图 2.1 示出一个语言信号的录音波形，它是通过拾音器来感受到声压的变化，然后再转换成电的信号。由图可见，不同的语音相应有不同的声压变化波形，声道系统产生的可懂语言就对应着一串特定的波形。另一个例子是图 2.2 所示的一幅黑白照片，这时照片上各点的亮度变化波形才是重要的。

在数学上，信号可以表示为一个或者多个变量的函数。例如，一个语音信号就可以表示为声压随时间变化的函数；一张黑白照片就可以用亮度随二维空间变量变化的函数来表示。本书的讨论范围仅限于单一变量的函

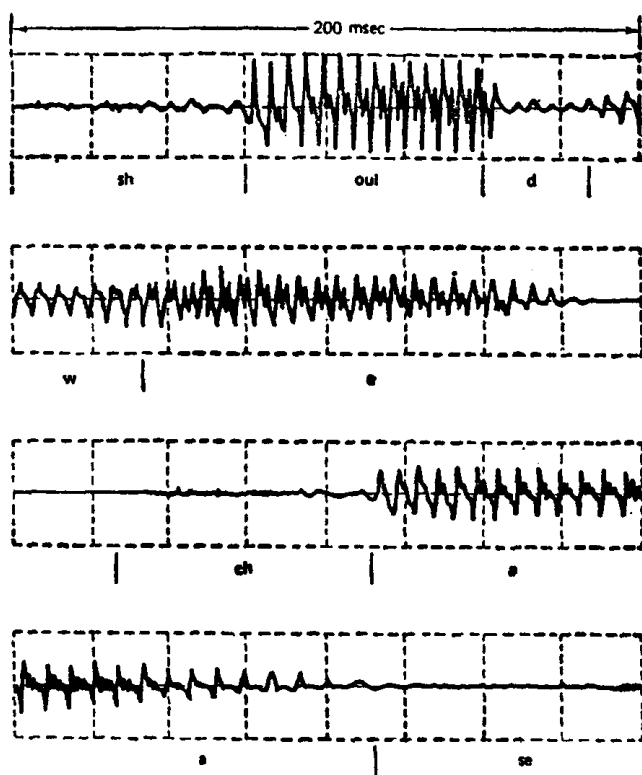


图 2.1 一个语言信号的波形。（摘自“*Applications of Digital Signal Processing*”，A. V. Oppenheim, ed. (Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, Inc., 1978), p. 121.) 该信号代表“should we chase”这句话的声压随时间的变化波形。图的上部相应于字“should”，第二行是字“we”，最后两行是“chase”。（图中还大致标出了每个字中逐个音的起始部位）。