

SIGNALS AND SYSTEMS



信号与系统

[美] A.V. 奥本海姆等著
高等学校 翻译教材
浙江科学技术出版社

信号与系统

(美)A.V.奥本海姆等 著

钱忠良 徐建勋 陈孝榕等 译

戚诒孙 梁慧君 校

浙江科学技术出版社

责任编辑 周伟元
封面设计 赵 晓

SIGNALS AND SYSTEMS

A. V. Oppenheim, A. S. Willsky
with Ian T. Young
Prentice-Hall, Inc., 1983

信号与系统

[美]A.V. 奥本海姆等 著
钱忠良 徐建勋 陈孝榕等 译
戚诒孙 梁慧君 校

*

浙江科学技术出版社出版
浙江新华印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

开本787×1092 1/16 印张29.5 字数1,010,000

1991年8月第 一 版

1991年8月第一次印刷

印数: 1—1,700

ISBN 7-5341-0135-2/TN·2

定 价: 20.00 元

内 容 提 要

本书全面系统地论述了确定性信号通过线性时不变系统的基本理论、概念和分析方法，重点讨论了单输入输出系统分析的时域法和变换法。

全书共11章，第1章至第3章讨论了信号与系统的一般概念和时域分析法，第4、5、9、10章分别讨论了连续时间和离散时间信号与系统的傅里叶分析、拉普拉斯变换和Z变换分析法，第6、7、8章分别介绍滤波、调制和抽样的一般理论和概念，第11章讨论了一类重要的线性时不变系统——反馈系统。每章除有精选的例题外，还附有大量不同类型的习题，以适合不同教学要求和学习的需要。

本书内容新颖丰富，深入浅出，分析严谨，理论联系实际，是目前信号与系统这一学科中一本好的基础理论教科书。

本书可用作无线电工程、计算机科学、控制工程、信息工程等有关各专业的教材，以及其他有关专业的教师、研究生、工程技术人员的学习参考书。

2560/35

7

译者序

70年代末以来,首先在理工科大学的无线电技术专业开设了信号与系统这门课程,由于这一课程本身内容的重要性,近年来,不少学校的信息工程、自动控制、计算机科学与工程等有关专业,也都开设了信号与系统课或选修课。

信号与系统的许多概念和分析方法,不仅广泛应用于通信、雷达、电视、广播等无线电技术的各个领域,而且在电路设计、声学、地震学、生物工程、过程控制等许多领域也有着广泛的应用。由于这些领域的日新月异发展,特别是大规模集成电路、微处理机和计算机科学技术的发展,使信号与系统这一学科的内容不断更新,迅速发展。在这种情况下,如何选择和编排最基本、最重要的有关专题,以组成更合适的信号与系统课程的内容,是目前讲授该课程教师们所关注的问题。现在国内外已出版了不少这方面的新教科书,本书是其中比较优秀并受到普遍欢迎的一本。

这本书有以下几个显著特点:(1)连续时间信号与系统和离散时间信号与系统并重,把连续时间和离散时间两方面的内容并行展开,始终强调两者的相似点,适当指出两者的差别,强调两种内容的内在联系。这样,可使基本概念得到统一,起到互相启发、融汇贯通、精简内容的作用。(2)系统的分析和综合兼顾。(3)理论与实际结合较好,不但在第6、7、8章专门介绍了实际应用方面的内容,而且各章精选了一定数量的例题。全书附有350多道习题,这些习题基本上可分为三种类型,第一类是基本概念和基本计算的训练,第二类是选自实际应用的课题,第三类是一些更深入的重要概念的探讨和推演。在深入阅读课文的基础上,适当选做各类习题,才能更好地掌握本书内容,使读者获得信号与系统分析这一学科的坚实基础。

与国内统一教学大纲比较,本书多了反馈系统这一章,而少了状态空间分析的内容。在教学实践中,根据各校课程设置的不同情况,可以选择适当的状态空间分析的材料,以取代第11章的反馈系统的内容。然而,反馈系统是信号与系统课程的重要内容之一,对于那些计划学时数较多的学校,或对于大部分学生要选修自动控制原理的学校来说,也可以讲授反馈系统这一章,而把状态空间分析有关内容划归自动控制原理课程中去讲授。

我们曾采用本书原版作教材，在无线电技术专业进行过两届信号与系统课的教学实践，计划学时数是80学时。我们感到，采用原版书作教材时，部分学生由于英语阅读方面的原因，占用学习时间较多，因此出版本书的译著是非常必要的。另外，对于第二和第三种类型的习题，学生会感到难以入手，因此，在课堂上选讲一些习题，或视计划许可，每周上一学时习题课是很有必要的。由于书中习题丰富，适当的选做1/3，已足以满足教学要求。

本书除可作为无线电技术类（包括通信、雷达、电视、广播、电子测量及仪器等）各专业的大学教科书外，也可作为信息与电子工程、控制工程、计算机科学等有关专业的教材。此外，广义而言，信号作为独立变量的函数，除可用于描述随时间而变化的电现象以外，也可用于描述随长度、高度、速度、压力等而变化的物理过程与状态。因此，本书所论述的各种概念、理论和方法，也可用于机械、土木、光学、天文、气象、社会经济等方面的各种广义的信号与系统的分析中。因此，对于许多专业的大学生和工程技术人员，本书也很有参考价值。

参加本书翻译的有徐建勋（前言，第2、5章），钱忠良（第1、8、11章及附录），陈孝榕（第3、7章），练益群（第4、9章）和齐佩芳（第6、10章）。戚治孙和梁慧君对译稿进行了仔细校对。在翻译过程中，尽可能修正了原书的一些差错，其中重要之处还加了注释。此外，对个别与课文内容关系不大的叙述作了适当删节。由于我们水平所限，译文中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

1985年6月

前 言

这是一本为大学生编写的关于信号与系统课程的教科书。虽然在电气工程系的课程设置中，这是一门常设课程，但组成该课程核心内容的各种概念和技术，在所有工程学科中都具有十分重要的价值。实际上，随着工程师们面临着需要对各类复杂过程进行分析和综合的新挑战，使得信号与系统各种分析方法的现实的和潜在的应用范围一直在不断扩大。因此，信号与系统这门课程不仅是工科教学计划中的基本组成部分，而且也是工科大学生们最感兴趣、最能获益和最有用处的课程之一。

本书对信号与系统这一主题的论述，是以麻省理工学院(MIT)电气工程与计算机科学系讲授这方面课题的第一门课程的讲稿为基础的。随着信号与系统设计和实现方法上的最新和未来发展，迫切需要全面地熟悉连续时间和离散时间系统的各种分析与综合技术。为此，我们决定对连续时间和离散时间信号与系统采用并行的分析方法。这种并行阐述方法在教学上也很具优点。我们可凭借连续时间和离散时间的相似性，共享各自领域发展起来的理论概念和实际技术。同时，也可以利用它们之间的差异来加深对它们各自特性的理解。

在材料组织方面，我们考虑必须向学生介绍一些本书所讨论的基本方法的某些重要应用。这不仅可使学生对所学技术的应用范围和进一步研究的方向有所了解，而且也有助于加深对所学课程的理解。为了达到这个目的，我们在书中引入了滤波、调制、抽样、连续时间信号的离散时间处理以及反馈等有关内容的初步介绍。此外，书末还附有参考文献目录，可供有兴趣的学生查阅，以便帮助他们对信号与系统分析的方法和应用领域进行更广泛、深入地研究。

本书在编排结构上还反映了这样一种考虑，即：如果没有足够数量的练习作为应用本书所述基本方法的实践环节，就不可能达到完全掌握这门课程的目的。因此，本书收集了总数达350多道不同类型的课外习题。当然，大部分习题是用于练习各章所介绍的基本方法。还有一部分习题是要求学生把基本方法用于解决重要的实际问题。其余一些习题则要求学生对本书论述的概念作进一步地研究开拓。提供如此大量和多种类型的练习题，是希望为任课教师带来更多的灵活性，使他们可以针对不同类型学生的具体需要，选配恰当的课外习题。

使用本书时，假定学生已具有微积分的基础知识，并且已有复数运算的某些经验和求解微分方程的初步能力。有了这些基础，本书就自成体系了。本书不要求学生预先掌握系统分析、卷积、傅里叶分析或拉普拉斯变换和 z 变换等内容。在学习信号与系统这门课之前，大多数学生一般应学过一门电气工程或机械工程方面的基础课，如基本电路理论课或动力学基础课。这些课程所涉及到的某些基本概念，在本书内都将得到更深入的讨论。显然，这些基础对于学生深入钻研本书内容，都具有很大的帮助。

第1章是简短的绪论，它概括介绍了信号与系统课程的目的与发展前景，并详细介绍了对它的处理方法。第2章从介绍信号与系统数学表示法的一些基本概念入手，着重讨论了信号独立变量的变换(如时间移位和尺度变换等)。接着介绍了一些最基本、最重要的连续时间和离散时间信号，如实指数和复指数信号、连续时间及离散时间单位阶跃和单位冲激信号。第2章还介绍了系统互连方框图表示法，并讨论了因果性、线性和时不变性等与系统有关的几种基本性质。第3章从上一章最后两个系统性质出发，并联系到单位冲激信号的筛选特性，推导出离散时间线性时不变(LTI)系统的卷积和表示式，以及连续时

间LTI系统的卷积积分表示式。在以上讨论中，是借助于离散时间情况下得到的直观认识，来推导并理解连续时间情况下的对应结果。然后，转入用线性常微分方程和差分方程表征系统的讨论。在这一初步讨论中，复习了求解线性常微分方程的一些基本概念（大多数学生对此都已具有初步解题能力），并且也讨论了线性差分方程的类似解法。然而，本章的重点并非解题方法，因为在以后的章节中还要利用变换法导出更方便的解法。而在此主要考虑的是，使学生对以上所述的重要系统具有某些初步了解，因为这些系统在以后的章节中会经常碰到。在本章讨论中，还介绍了用方框图表示由差分方程和微分方程描述的LTI系统的方法。该系统可利用加法器、系数乘法器、延时单元（对离散时间系统）或积分器（对连续时间系统）等来实现。在后面的章节中，借助变换法研究系统的级联和并联结构时，还要回到这一问题上来。方框图表示法不仅向学生提供了一种系统形象化的表示方法，而且提供了LTI系统的某些数学性质含意（同一系统可用任何可能的完全不同的结构来实现）的具体例子。最后，以奇异函数（包括阶跃、冲激和冲激偶函数等等）在描述和分析连续时间LTI系统中所起作用的简短讨论作为第3章的结束。特别是，在讨论中强调了在卷积情况下如何定义和解释这些信号，例如，利用LTI系统对这些理想化信号的响应来描述它们。

第4章完整详尽地介绍了连续时间信号与系统的傅里叶分析方法，第5章则以并行的方式讨论了离散时间情况下的相应内容。4、5两章开始部分都介绍了有关傅里叶分析方法的若干历史发展情况，并以此向学生介绍了傅里叶分析法应用学科领域的感性认识以及有关傅里叶分析的某些数学观点。在这两章的具体讨论中，首先强调并说明了在信号与系统的研究中傅里叶分析所起重要作用的两个主要原因，即：（1）绝大多数信号都可以表示为复指数信号的加权和或复指数信号的加权积分；（2）一个LTI系统对复指数输入信号的响应可以简单地表示为该系统的复数特征函数乘以相同的复指数信号。据此，每一章都先讨论周期信号的傅里叶级数表示式；然后，再把周期信号的周期任意拓长并求其傅里叶级数的极限以导出非周期信号的傅里叶变换表示式。上述观点强调了傅里叶级数和傅里叶变换之间的密切关系，这一关系在以后各节中还要进一步讨论。这两章还对傅里叶级数和傅里叶变换的许多重要性质进行了讨论，其中特别强调了卷积和调制性质，而这两个重要性质形成了以后各章将要详细讨论的滤波、调制和抽样等课题的基础。4、5两章的最后两节，研究如何利用变换法分析由微分和差分方程表示的LTI系统。作为上述讨论（以及后面的拉普拉斯变换和 z 变换的讨论）的补充，书末附了一个关于部分分式展开法的附录。这两章中还以若干例子来说明利用部分分式展开法可以相当容易地计算由微分和差分方程描述的LTI系统的响应。此外，还介绍了上述系统的级联和并联结构，并由此自然引出对这些系统（即一阶和二阶系统）的基本结构单元的研究。

4、5两章对于傅里叶分析方法的论述，完全采用我们已经确定的并行论述的方式。也就是说，我们可以借助第4章研究连续时间信号时所建立的许多理论基础展开第5章的讨论，并在第5章的末尾强调了连续时间和离散时间傅里叶表达式的完全对偶性。此外，还通过对对比连续时间和离散时间傅里叶分析之间的差别来突出它们各自的特殊性质。

第6、7和8章分别论述了滤波、调制和抽样等课题。通过这些内容的讨论，不仅是为了向学生介绍傅里叶分析方法的某些重要应用，而且也有助于加深对频域分析法的理解和直观认识。第6章介绍了连续时间和离散时间滤波的初步内容，包括：理想频率选择滤波器的讨论；用微分和差分方程描述各种滤波器的例子；以及通过诸如自动悬置系统和巴特沃兹滤波器之类的例子，介绍了滤波器设计中出现的一些定性和定量问题和有关的折衷方案。还有许多

关于滤波的其他方面的问题，留待本章习题中去研究。

在第7章的调制技术讨论中，从介绍调制性质的最简单应用着手，首先深入地讨论连续时间正弦信号的幅度调制(AM)，接着描述了频域调制效应，并讨论了怎样恢复原始调制信号的问题。此后，还讨论了一些附加的问题和以调制性质为依据的各种具体应用。例如，同步和非同步解调；具有可变中心频率的频率选择滤波器的实现；频分多路复用和单边带调制等。还有许多其他的应用和例子，将在习题中叙述。这一章还包括三个附加的课题：第一个课题是脉冲幅度调制和时分多路复用，这就自然过渡到第8章抽样课题的讨论。第二个课题是离散时间的幅度调制，它可以在上述连续时间幅度调制讨论的基础上方便地推论出来，其他各种离散时间调制的应用将在习题中讨论。最后一个课题是频率调制(FM)，它为读者提供了一个了解非线性调制概念的机会。虽然频率调制系统的分析不像幅度调制情况那样简单，但是通过本章的初步讨论可得到如何利用频域法来获得对频率调制信号与系统特性的足够理解。

第8章主要讨论抽样定理及其有关含意。为了正确地理解这一课题，我们从如下一般性概念开始讨论，即连续时间信号可用它的抽样值表示，并可利用内插法获得恢复。在用频域法导出抽样定理之后，进而用频域和时域法介绍了由欠抽样所引起的混迭现象的直观概念。抽样技术的一个非常重要的应用，是连续时间信号的离散时间处理，这是本章要详细阐述的一个课题。我们以频域抽样的对偶来结束连续时间抽样的讨论。此后，转向离散时间信号抽样的讨论。首先，用完全并行于连续时间情况下讨论问题的方式导出了离散时间抽样的基本结果；然后叙述了这些基本结果应用于抽取、内插和调制变换等问题。另外，还有其他各种连续时间和离散时间抽样的应用，这些将在习题中叙述。

9、10两章分别论述了拉普拉斯变换和 z 变换。讨论的重点是这两种变换中的双边变换，但也简略地讨论了单边变换的问题，以及在非零初始条件下把它用于求解微分和差分方程。这两章具体包括如下几方面的讨论：拉普拉斯变换和 z 变换与傅里叶变换之间的密切关系；有理函数的变换和极点零点的概念；拉普拉斯变换或 z 变换的收敛域和与其有关的信号特性之间的关系；利用部分分式展开式求取逆变换；根据极点—零点图，进行频率响应和系统函数的几何计算；以及各种基本变换性质等。此外，每一章还讨论了LTI系统的系统函数的性质与应用，包括确定由微分和差分方程表征的系统函数，以及互连的LTI系统的系统函数的代数解法。第10章的末尾，还应用拉普拉斯变换和 z 变换的方法讨论了由连续时间系统映射到离散时间系统的变换，这两个系统均为有理的系统函数。同时，描述了这种变换的三个重要的例子，并研究了它们的特性和应用。

拉普拉斯变换和 z 变换方法，为第11章线性反馈系统的研究建立了基础。在第11章中，首先叙述了反馈系统若干重要性质和应用，包括改善系统的稳定性，设计跟踪系统和降低系统的灵敏度等。接着，利用上述各章已经确定的分析方法，研究了对连续时间和离散时间反馈系统都很重要的三个课题，即根轨迹分析、奈奎斯特图和奈奎斯特判据以及对数幅度—相位曲线和稳定反馈系统的增益余量和相位余量概念等。

信号与系统这一学科具有非常丰富的内容，因而可以采用各种方法组成不同形式的教材。编写这本书的目的是想给教师在组织课程内容时提供更多的灵活性。为了获得这种灵活性，并使本书对教师来说能获得最大的效益，我们对组成信号与系统这一课程核心内容的一些关系密切的课题，进行深入详尽的介绍。为了实现这一目的，本书略去某些其他内容，例如随机信号和状态空间模型等，通常把这些内容放到信号与系统的另一门课程中去介绍。按照传统习惯，许多学校(包括麻省理工学院)都不把这些内容包括在本课程中，而是放在专

门研究它们的课程中作更深入的讨论。例如,通常都是在多输入/多输出和时变系统等更一般的课程中对状态空间方法进行详尽讨论,而且在本书各课题中打好坚实基础以后,上述状态空间的一般化概念往往就可得到很好的解决。虽然本书没有介绍状态空间的内容,但讲授本课的教师可以相当容易地把它插入到本书2~5章微分和差分方程的论述中去。

就内容的合理深度而言,本书用作大学二三年级一个学期的教材时,应包括第2、3、4和5章(而且每章的有些内容还可由任课教师酌情删除),加上从其余各章精选的一些内容(例如从第6、7和8章选出若干基本课题),再加上拉普拉斯变换和 z 变换的论述,还可添加一点利用系统函数的概念分析反馈系统的内容等。也可能有另外的各种组成方案,包括引入状态空间的介绍,或者把重点更集中于连续时间系统(这时可削减第5、10章的内容和第6、7、8及11章中的离散时间内容)。此外还应指出,在阐述傅里叶分析的基本内容时,介绍第6、7、8章的某些应用是有益的,这对帮助学生尽早对本课程内容建立直观认识和理解均具有很大的价值。

除了上述作为一个学期的课程安排之外,本书还可作为两个学期的线性系统课程的基本教材。或者,把书中属于信号与系统第一门课程的部分未用到的内容抽出来,再补充一些其他资料,即可形成高年级选修课的基础。例如,本书的许多内容可直接与A.V.奥本海姆和R.W.谢弗合著的《数字信号处理》一书^①所论述的内容相衔接。因此,利用离散时间系统中较深的内容作为数字信号处理课的入门,即可构成一门高年级课程。此外,还可引入描述和分析线性系统的状态空间方法作为主要内容。^②

^① A.V. Oppenheim and R.W. Schaffer, Digital Signal Processing (Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, Inc., 1975).

^② 以下是致谢部分内容,从略。

目 录

第一章	绪论	1
第二章	信号与系统	4
2.0	引言	4
2.1	信号	4
2.2	独立变量的变换	8
2.3	基本连续时间信号	11
2.4	基本离散时间信号	17
2.5	系统	25
2.6	系统的性质	28
2.7	小结	33
	习题	33
第三章	线性时不变系统	52
3.0	引言	52
3.1	用冲激表示信号的方法	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	65
3.4	线性时不变系统的性质	70
3.5	用微分方程和差分方程描述的系统	75
3.6	由微分方程和差分方程所描述的 LTI 系统的框图表示法	83
3.7	奇异函数	90
3.8	小结	94
	习题	94
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 系统对复指数的响应	127
4.2	周期信号的表示法——连续时间傅里叶级数	128
4.3	用傅里叶级数近似周期信号、傅里叶级数的收敛	137
4.4	非周期信号的表示法: 连续时间傅里叶变换	142
4.5	周期信号和连续时间傅里叶变换	150
4.6	连续时间傅里叶变换的性质	154
4.7	卷积性质	163
4.8	调制性质	168
4.9	傅里叶性质、基本傅里叶变换和傅里叶级数对的表格	172
4.10	连续时间傅里叶变换的极坐标表示	175
4.11	由线性常系数微分方程表征的系统的频率响应	180
4.12	一阶和二阶系统	185
4.13	小结	193

习题	194
第五章 离散时间信号与系统的傅里叶分析	227
5.0 引言	227
5.1 离散时间 LTI 系统对复指数信号的响应	228
5.2 周期信号的表示法: 离散时间傅里叶级数	229
5.3 非周期信号的表示法: 离散时间傅里叶变换	239
5.4 周期信号和离散时间傅里叶变换	246
5.5 离散时间傅里叶变换的性质	251
5.6 卷积性质	255
5.7 调制性质	260
5.8 傅里叶性质及基本傅里叶变换和傅里叶级数对的列表	261
5.9 对偶性	266
5.10 离散时间傅里叶变换的极坐标表示	268
5.11 用线性常系数差分方程表征的系统频率响应	271
5.12 一阶与二阶系统	276
5.13 小结	285
习题	285
第六章 滤波	314
6.0 引言	314
6.1 理想频率选择滤波器	317
6.2 非理想频率选择滤波器	321
6.3 由微分方程描述的连续时间频率选择滤波器的例子	322
6.4 由差分方程描述的离散时间频率选择滤波器的例子	327
6.5 巴特沃兹频率选择滤波器	333
6.6 小结	337
习题	338
第七章 调制	352
7.0 引言	352
7.1 连续时间正弦幅度调制	353
7.2 正弦幅度调制的某些应用	361
7.3 单边带幅度调制	365
7.4 脉冲幅度调制和时分复用	369
7.5 离散时间幅度调制	373
7.6 连续时间频率调制	377
7.7 小结	383
习题	384
第八章 抽样	404
8.0 引言	404
8.1 用信号的抽样值表示连续时间信号: 抽样定理	404
8.2 用内插法由抽样值恢复信号	410
8.3 欠抽样效应: 混迭	415
8.4 连续时间信号的离散时间处理	417
8.5 频域抽样	423
8.6 离散时间信号的抽样	426

8.7	离散时间抽选和插入	430
8.8	小结	434
	习题	434
第九章	拉普拉斯变换	449
9.0	引言	449
9.1	拉普拉斯变换	449
9.2	拉普拉斯变换的收敛域	453
9.3	拉普拉斯逆变换	460
9.4	根据极点—零点图进行傅里叶变换的几何求值	462
9.5	拉普拉斯变换的性质	467
9.6	一些拉普拉斯变换对	473
9.7	利用拉普拉斯变换进行LTI系统的分析和表征	473
9.8	单边拉普拉斯变换	480
9.9	小结	482
	习题	482
第十章	Z变换	492
10.0	引言	492
10.1	z 变换	492
10.2	z 变换的收敛域	496
10.3	z 逆变换	502
10.4	根据极点—零点图进行傅里叶变换的几何求值	505
10.5	z 变换的性质	507
10.6	常用的 z 变换对	511
10.7	利用 z 变换进行LTI系统的分析和表征	512
10.8	连续时间和离散时间系统之间的变换	514
10.9	单边 z 变换	521
10.10	小结	523
	习题	524
第十一章	线性反馈系统	536
11.0	引言	536
11.1	线性反馈系统	538
11.2	反馈的一些应用和结果	539
11.3	线性反馈系统的根轨迹分析法	546
11.4	奈奎斯特稳定性判据	557
11.5	增益余量和相位余量	565
11.6	小结	572
	习题	572
附录	部分分式展开式	601
A.0	引言	601
A.1	部分分式展开式和连续时间信号与系统	602
A.2	部分分式展开式和离散时间信号与系统	606
参考书目	611

第一章 绪 论

信号与系统的概念在非常广泛的领域中都有出现，而与这些概念有关的许多思想和方法，在通讯、航空学、宇航学、电路设计、声学、地震学、生物工程、能量的产生与分配系统、化学过程控制和语音处理等各种科学技术领域里都起着重要的作用。虽然，在各个学科中的信号与系统的物理本质可能大不相同，但他们都有两个非常基本的共同点。信号是单个或多个独立变量的函数，而且一般来说，含有关于某种现象变化过程和特征的信息，而系统则对特定信号响应而产生另外一些信号。一个电路中的电压和电流作为时间的函数，是信号的一个例子，而这一电路本身则是系统的一个例子，在这种情况下，系统对所施加的电压和电流产生响应。另一个例子，当驾驶员压下加速踏板时，汽车以增加车速为响应，在这种情况下，系统就是汽车，加速踏板上的压力则是系统的输入，汽车的速度是响应。一个心电图计算机自动诊断程序，也可看做一个系统，它以数字化的心电图作为其输入，而产生如心率这样的一些参数的估计值作为系统的输出。一架照相机也是一个系统，它接收来自不同光源和被目标反射的光而产生出一幅照片。

在出现信号与系统的许多场合，可以有各种各样的研究课题和论题。有时，我们面对的是一个特定的系统，而感兴趣的是要详细地表征这一系统，以搞清楚它如何对各种输入作出响应。一个例子就是已有悠久历史的关于人类听觉系统的研究工作。另一个例子是对某个特定地区的经济系统的认识和描述的研究，以便能更好的预测对诸如农作物歉收、新油田发现等潜在的或者是不可预料的输入会产生什么响应。

在另一些信号和系统分析的场合，我们的兴趣不在于分析现有的系统，而在于系统的设计问题，以使用它们以各种特定方式来处理信号。经济预测系统是代表这种情况的一个极为普通的例子。例如，设有一组像证券市场平均价格一类的经济时序的记录，把这种记录看做信号，要是能根据过去记录去预测将来的状态显然是有用的。许多这样的系统已经精心研制成功，这些系统一般是计算机程序形式的，用这些系统可以求得证券市场平均价格的详细分析，还可进行其他类型的经济预报。虽则大多数这样的信号并不是全部可预测的，但有趣而重要的事实是，根据这些信号的许多过去的记录，其将来状态或多或少是可以预测的，换句话说，至少它们可近似地被外推。

第二种常见的应用，是恢复由于某些原因而恶化了的信号。在强背景噪声条件下进行语音通信时，就经常出现这种情况。例如，当飞机驾驶员同空运交通管制塔台通讯时，通信会因驾驶舱的高背景噪声电平而恶化。在这种情况和其他类似情况下，设计各种系统，以保留需要的信号（现在是驾驶员的声音）而排除（至少近似地排除）不需要的信号（在此是噪声）是有可能的。从已恶化信号中恢复原信号的另一个成功的例子，是老唱片的修复系统。在录音时，采用一个根据输入信号而在唱片上刻出纹路形的录音系统，这一输入信号就是艺术家的声音。早期的录音，一般是采用角形机械录音筒录制的，而这种系统会在唱片上引入严重的失真。若能修复一些老唱片，使之达到符合现代录音技术的质量标准，是很有价值的。如果用一个适当设计的信号处理系统，就有可能大大改善老唱片的质量。

设计一个按一定方式处理信号的系统之第三种有价值的应用，是一般的图像恢复和图像增强领域。在接收来自深空探测火箭的图像时，一般来说，由于成像设备的缺陷，以及可能存

在的大气影响，或许还由于图像送回地球时信号传输的种种误差，收到的图像是所摄景物恶化了的变形。因此，按常规，来自空间的图像要由图像处理系统进行处理，以补偿某些恶化。另外，这种图像通常还要经过处理，以增强某些特征，诸如线条（例如，这对应于河床或断层）或区域边界，在这些地方，色彩或暗度存在着强烈的对比。于是，实现这种处理的各种系统的开发，成为系统设计的一个任务。

另一类涉及信号与系统分析的各种概念和方法的非常重要的应用，出现在如下一些情况，当我们希望修正一个给定系统的特性时，可以通过选择特定的输入信号，或者通过该系统与另一系统的组合来实现。说明这类应用的例子是化工厂的控制，它属于一般称做过程控制的领域。在这类应用中，传感器一般可测量如温度、湿度、化学比等这样一些物理信号，在这些测得信号的基础上，调节系统产生控制信号，用于调节正在进行中的化学过程。第二个例子与某些高性能的飞行器自身本来就相当于一个不稳定的物理系统这一事实有关，换句话说，它们的空气动力学特性是这样的，若无仔细设计好的控制信号，它们就不能飞行。在本例及上述过程控制的例子中，反馈概念起着重要的作用，反馈概念也是本书中要加以阐述的重要内容之一。

以上所述的一些例子，只是有关信号与系统概念的广泛应用中的很小一部分。这些概念的重要性，不仅是由于出现这些概念的现象和过程的多样性，还由于已有的及正在开发用来解决涉及信号与系统种种问题的思想、分析技术和方法的积累。这一发展的历史可追溯许多个世纪，虽然大多数发展工作是由各种特殊问题所推动的，然而，其中许多概念已被证明对更多的应用问题具有十分重要的作用，其应用范围较原来所设想的要广泛得多。例如，傅里叶分析的各种方法形成了信号与系统的频域分析基础，这是本书中要详细研究的。它可以追溯到从古代巴比伦人研究的天文学问题到18、19世纪的数学物理研究。在近代，这些概念和方法已应用于各种问题，其范围从调频和调幅发射机与接收机的设计问题到图像的计算机辅助恢复。还由于那些已经形成体系的种种课题，以及某些信号与系统的表示、分析和综合的各种有力的数学工具的有关课题的研究工作。

在以上所述的某些例子中，信号随时间连续地变化，而在另一些例子中，信号的演变仅在离散的时间点上被描述。例如，在老唱片的修复处理中，就涉及到连续变化的高频信号。另一方面，如每天收盘证券平均价格，按其本质来说是在离散时间点上演变的信号（即每天营业结束时刻）。因此，与连续时间变量函数是一条曲线不同，收盘证券平均价格是与指定的离散时间瞬刻有关的一个数的序列。这种信号演变的基本描述上的差别，以及响应或处理这两类信号的系统的基本描述上的区别，自然地导致信号与系统分析的两种并行的体系。一种是描述连续时间上的现象和过程，另一种是描述离散时间上的现象和过程。同连续时间信号与系统以及离散时间信号与系统两者有关的概念和技术，有着丰富的历史记载，并且在概念上是密切相关的。然而在历史上，由于它们在过去的应用上大不相同，而且大部分研究和开发工作是多少有点独立的。连续时间信号和系统在与物理有关的学科中有着深厚的根源，而在当代，则与电路和通信有关的课题有密切的关系。离散时间信号与系统的各种方法，在数值分析、统计以及与经济和人口统计数据等应用有关的时间序列分析方面，有着深厚的根基。近几十年来，连续时间和离散时间信号与系统在学科上日益互相渗透，它们的应用已变得密切相关。促进这种相互关系的强大推动力，是系统的实现和信号产生技术的惊人发展。尤其是高速数字计算机、集成电路以及复杂的高密度器件制造技术的惊人发展，使得用连续时间信号的等时间间隔抽样值来表示和处理连续时间信号愈来愈有利（即把连续时间信号变换为离散时间信号）。正如我们要在第8章中详细阐述的那样，在比较弱的约束

下，连续时间信号完全可以由这样的一组抽样值来表示，这是一个值得重视的事实。

由于连续时间信号与系统和离散时间信号与系统之间日益增长的相互联系，以及与它们有关的概念和方法之间的密切关系，我们在本书中采用并行的方式来阐述连续时间和离散时间信号与系统的概念。因为许多概念是类似的（但并不相同），对这些概念并行地阐述，可对两者的理解与直觉知识相互对照，并可更清楚的看到两者的相似点和差别。此外，若我们通读全书就会明白，有些概念在一种体系中较之在另一种体系中本来就更易理解，而一旦在一种体系中得到理解之后，对问题的认识就容易推广到另一种体系中去。

如同我们迄今所作的描述那样，信号与系统的概念是一个非常普遍的概念。然而，在一般性讨论阶段，关于信号与系统的本质仅可作最概括的叙述，而它们的性质仅可用最初步的术语加以讨论。另一方面，在信号与系统的研究中一个重要而基本的思想是，仔细地选择一些小类，使每一小类具有可供利用的特殊性质，然后加以发挥，则我们就可非常深入地分析和表征这些信号与系统。本书主要着重于一类特殊的系统，这就是所谓线性时不变系统。根据定义这一类系统的线性性质和时不变性质，可引伸出一组值得注意的概念和方法，这些概念和方法，不仅具有实际的重要性，而且理论上也是令人满意的。

正如我们在本绪论中已指出的，信号与系统分析有一漫长的发展历史，在这一发展过程中，已经显示出具有广泛应用领域的某些基本方法和基本原理。此外，以集成电路技术及其应用的不断发展为例，说明信号与系统分析正随着新问题、新技术和新时机而持续不断地演变和发展。我们完全可以预期，由于技术的进步定会加速这种发展，使得日益复杂的信号与系统与信号的处理技术有可能实现。在将来，我们会看到信号与系统分析的方法和概念将被运用于更广阔的应用领域。在其中某些领域，信号与系统的分析方法具有直接的应用。而在远远超出那些传统上被认为是属于科学和工程范畴以外的其他领域中，正是这些方法中所包含的一套概念，远较这些特定的方法本身，在复杂系统的分析和处理中被表明是更有价值的。因为这些原因，我们认为信号与系统分析这一论题，为科学家和工程师们提供了非常重要的知识基础。本书包含了我们选定的一组课题，并选定了编排方式和每章的习题。我们认为，这样做对读者是有帮助的：可使读者获得信号与系统分析原理的坚实基础；了解这些基本原理在滤波、调制、抽样和反馈系统分析等各种课题中的一些非常重要的基本应用；学会把某些观点发展成表示问题和求解问题的有效方法，以及对这些方法的广泛的现实应用和潜在应用作出评价。

第二章 信号与系统

2.0 引言

为了研究信号与系统的分析技术，需要建立一种分析体系，该体系应能吸取第1章给出的有关信号与系统的直观概念。为此，我们通过引进信号与系统的数学描述和表达式，来着手建立这一分析体系，并且利用这些表达式去研究信号与系统分析中的某些基本概念。这样，我们就可获得对于信号与系统的特性以及它们的表达式的某些直观认识和深刻理解。

2.1 信号

如同第1章已讨论的那样，信号可以描述极为广泛的物理现象。虽然可用许多方法来表示信号，但在所有情况下，信号中的信息总是包含在某种形式的变化模式之中。例如，人类发音机理，就是通过形成声压起伏来产生语音的。图2.1是这种语音信号的录音波形，它是通过微音器传感声压变化，然后再将这种变化转为电信号而获得的。如图所示，不同的声音对

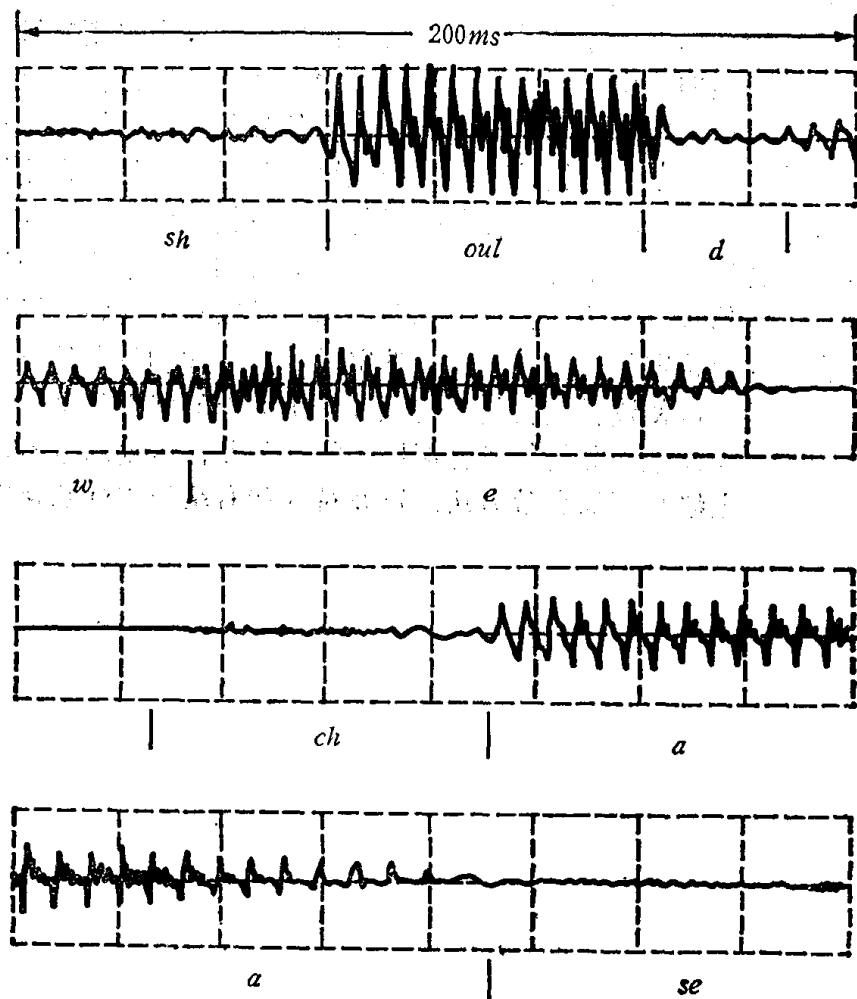


图2.1 语音信号的波形〔选自 Applications of Digital Signal Processing, A.V. Oppenheim, ed. (Englewood Cliffs, N.J.; Prentice-Hall, Inc., 1978), P.121.〕,该信号表示口述语句“should we chase”作为时间函数的声压变化。图中顶上的一条线相应于单词“should”，第二条线相应于单词“we”，最下面两条线相应于单词“chase”（图中已标出每个单词发音的始、终点大致位置）