



普通高等教育规划教材

信号与系统

孙贵根 主编

普通高等教育规划教材

信号与系统

孙贵根 主 编
杨冬云 李俊生 参 编
赵长奎 主 审



机械工业出版社

本书系统地论述了信号与系统的基本理论、基本概念和基本分析方法。全书从时域到变换域、从连续到离散共分七章，第一章到第三章为连续和离散信号与系统的时域分析，第四章、第五章为连续时间信号与系统的频域和复频域分析，第六章为 z 变换、离散信号与系统的 z 域分析，第七章为离散信号与系统的傅里叶变换和频域分析。本书以通信和控制工程为应用背景，既注重理论阐述又注重联系实际，叙述深入浅出。每章配有适量习题，书后附录备有参考答案。

本书可以作为通信工程、电子信息工程、自动化、测控技术与仪器、计算机等专业本、专科学生的教材或教学参考书，也可供相关专业师生和科技人员的自学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

信号与系统/孙贵根主编. —北京: 机械工业出版社,
2004.7

普通高等教育规划教材

ISBN 7-111-14623-9

I. 信… II. 孙… III. 信号系统-高等学校-教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 054239 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王保家 闫晓宇

责任编辑: 王保家 版式设计: 霍永明 责任校对: 程俊巧

封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·19.5 印张·479 千字

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

普通高等教育应用型人才培养规划教材 编审委员会

主任：刘国荣 湖南工程学校
副主任：左健民 南京工程学院
陈力华 上海工程技术大学
鲍 泓 北京联合大学
王文斌 机械工业出版社

委员：(按姓氏笔画排序)

刘向东 华北航天工业学院
任淑淳 上海应用技术学院
何一鸣 常州工学院
陈文哲 福建工程学院
陈 峻 扬州大学
苏 群 黑龙江工程学院
娄炳林 湖南工程学院
梁景凯 哈尔滨工业大学(威海)
童幸生 江汉大学

电子与通信类专业分委员会

- 主任：鲍 泓 北京联合大学
- 副主任：张立臣 常州工学院
- 李国洪 华北航天工业学院
- 委 员：(按姓氏笔画排序)
- 邓 琛 上海工程技术大学
- 叶树江 黑龙江工程学院
- 李金平 北京联合大学
- 沈其聪 总参通信指挥学院
- 杨学敏 成都理工大学
- 秘书长：何希才 北京联合大学

序

工程科学技术在推动人类文明的进步中一直起着发动机的作用。随着知识经济时代的到来,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。特别是随着经济全球化发展和我国加入WTO,世界制造业将逐步向我国转移。有人认为,我国将成为世界的“制造中心”。有鉴于此,工程教育的发展也因此面临着新的机遇和挑战。

迄今为止,我国高等工程教育已为经济战线培养了数百万专门人才,为经济的发展作出了巨大的贡献。但据IMD1998年的调查,我国“人才市场上是否有充足的合格工程师”指标排名世界第36位,与我国科技人员总数排名世界第一形成很大的反差。这说明符合企业需要的工程技术人员特别是工程应用型技术人才市场供给不足。在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养工程应用型本科人才为主的高等院校,并于2001年、2002年两次举办了“应用型本科人才培养模式研讨会”,对工程应用型本科教育的办学思想和发展定位作了初步探讨。本系列教材就是在这种形势下组织编写的,以适应经济、社会发展对工程教育的新要求,满足高素质、强能力的工程应用型本科人才培养的需要。

航天工程的先驱、美国加州理工学院的冯·卡门教授有句名言:“科学家研究已有的世界,工程师创造未有的世界。”科学在于探索客观世界中存在的客观规律,所以科学强调分析,强调结论的惟一性。工程是人们综合应用科学(包括自然科学、技术科学和社会科学)理论和技术手段去改造客观世界的实践活动,所以它强调综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和判断。这就是科学与工程的主要不同之处。这也就要求我们对工程应用型人才的培养和对科学研究型人才的培养应实施不同的培养方案,采用不同的培养模式,采用具有不同特点的教材。然而,我国目前的工程教育没有注意到这一点,而是:①过分侧重工程科学(分析)方面,轻视了工程实际训练方面,重理论,轻实践,没有足够的工程实践训练,工程教育的“学术化”倾向形成了“课题训练”的偏软现象,导致学生动手能力差。②人才培养模式、规格比较单一,课程结构不合理,知识面过窄,导致知识结构单一,所学知识中有一些内容已陈旧,交叉学科、信息学科的内容知之甚少,人文社会科学知识薄弱,学生创新能力不强。③教材单一,注重工程的科学分析,轻视工程实践能力的培养;注重理论知识的传授,轻视学生个性特别是创新精神的培养;注重教材的系统性和完整性,造成课程方面的相互重复、脱节等现象;缺乏工程应用背景,存在内容陈旧的现象。④老师缺乏工程实践经验,自身缺乏“工程训练”。⑤工程教育在实践中与经济、产业的联系不密切。要使我国工程教育适应经济、社会的发展,培养更多优秀的工程技术人才,我们必须努力改革。

组织编写本套系列教材,目的在于改革传统的高等工程教育教材,建设一套富有特色、有利于应用型人才培养的本科教材,满足工程应用型人才培养的要求。

本套系列教材的建设原则是：

1. 保证基础，确保后劲

科技的发展，要求工程技术人员必须具备终生学习的能力。为此，从内容安排上，保证学生有较厚实的基础，满足本科教学的基本要求，使学生日后具有较强的发展后劲。

2. 突出特色，强化应用

围绕培养目标，以工程应用为背景，通过理论与工程实际相结合，构建工程应用型本科教育系列教材特色。本套系列教材的内容、结构遵循如下9字方针：知识新、结构新、重用。教材内容的要求概括为：“精”、“新”、“广”、“用”。“精”指在融会贯通教学内容的基础上，挑选出最基本的内容、方法及典型应用；“新”指将本学科前沿的新进展和有关的技术进步新成果、新应用等纳入教学内容，以适应科学技术发展的需要。妥善处理好传统内容的继承与现代内容的引进。用现代的思想、观点和方法重新认识基础内容和引入现代科技的新内容，并将这些内容按新的教学系统重新组织；“广”指在保持本学科基本体系下，处理好与相邻以及交叉学科的关系；“用”指注重理论与实际融会贯通，特别是要注入工程意识，包括经济、质量、环境等诸多因素对工程的影响。

3. 抓住重点，合理配套

工程应用型本科教育系列教材的重点是专业课（专业基础课、专业课）教材的建设，并做好与理论课教材建设同步的实践教材的建设，力争做好与之配套的电子教材的建设。

4. 精选编者，确保质量

遴选一批既具有丰富的工程实践经验，又具有丰富的教学实践经验的教师担任编写任务，以确保教材质量。

我们相信，本套系列教材的出版，对我国工程应用型人才培养质量的提高，必将产生积极作用，会为我国经济建设和社会发展作出一定的贡献。

机械工业出版社颇具魄力和眼光，高瞻远瞩，及时提出并组织编写这套系列教材，他们为编好这套系列教材做了认真细致的工作，并为该套系列教材的出版提供了许多有利的条件，在此深表衷心感谢！

编委会主任 刘国荣教授
湖南工程学院院长

前 言

进入 21 世纪以来, 信息科学与技术的发展更加迅猛, 新的信号处理和分析技术不断涌现, 微电子集成技术和计算机的广泛应用, 极大地促进了生产力的发展。国际和国内新一轮太空探索成果, 更是激发了人类开发和利用太空资源的巨大热情和无限遐想。有线的、无线的、近程的、远程的信号检测、传输与控制技术日益普及和成熟, 遥测、遥控、遥感、遥信的应用成果, 极大地丰富并推动了信息论、系统论、控制论三大学科的发展。信息科学与技术的教育和普及程度、应用与研究的成果和深度已经成为衡量综合国力的重要指标之一, 科教兴国战略的实施, 迅速促进了高等教育大众化的进程, 根据本科电子与通信类专业人才培养目标和层次, 编写一套应用型本科电子与通信类专业教材是非常必要的。本书是该系列教材中的一本。

本书是根据普通高等教育应用型本科电子与通信类专业规划教材编审委员会审定的编写大纲编写的。全书共分七章。第一章介绍连续和离散信号与系统的基本概念, 第二、三章为连续和离散信号与系统的时域分析, 第四、五章为连续时间信号与系统的频域和复频域分析, 第六章为 z 变换、离散信号与系统的 z 域分析, 第七章为离散信号与系统的傅里叶变换和频域分析。配合正文, 全书选编了较多例题, 每章的最后配备了相当数量的习题以供练习, 巩固学生对概念、方法的理解和掌握。全书以通信和控制工程为应用背景, 既注重理论阐述又注重联系实际, 深入浅出地论述了信号与系统的基本理论、基本概念和基本分析方法。

信号与系统是现代信息学科的基础主干课程, 其核心内容是用系统理论的基本概念和方法研究信号的描述、获取、产生、分解、变换、运算、传输、再现、辨识的基本原理, 需要扎实的高等数学、工程数学和电路分析知识基础, 理论性和实践性都很强。本着面向未来、把握定位和学时尺度, 结合国内外教材和教学改革的实践成果, 符合教学基本要求的原则, 本教材力求体现如下特色:

1) 在教材体系结构上, 建立以信号与系统、数字信号处理的基本核心体系。总体上按先时域后变换域, 先连续后离散, 先信号分析后系统分析的方式进行论述。因为任何信号都表现为时间、空间的存在和运动, 人们有直观感受而较为熟悉。所以, 前三章先讨论连续和离散信号与系统的时域分析, 在深刻理解时域分析方法和理论及了解其优缺点之后, 又用系统的单位冲激响应和传输算子与变换域分析法建立了内在联系。接着, 第四、五两章讨论连续信号与系统的频域(傅里叶变换 FT)分析法和复频域(拉普拉斯变换 LT)分析法, 转而在第六、七两章讨论离散信号与系统的 z 变换和频域(离散傅里叶变换 DFT、快速傅里叶变换 FFT)分析方法。展现变换域分析方法是从不同角度、用不同的基本函数来揭示 LTI 系

统处理确定性信号的物理功能，揭示被处理前后信号时空特性发生变化的内在本质。由时域分析法和三大变换分析法架构了信号与系统、数字信号处理的基本核心体系。而把状态空间分析、随机信号与系统的分析、滤波器理论等内容分散到相关课程中，不过于追求内容体系的完整和全面，便于本课程与模拟电子技术、数字电子技术、计算机结构与逻辑设计、软件设计基础等课程衔接，避免难点内容和讲授时间的高度集中以及内容深度的单科突进。

2) 在教材内容的组织方面，突出一条主线两个重点。一条主线是指系统处理信号的时域变换和运算功能。系统对单输入信号的数乘、倒相、平移、反转和尺度展缩五种简单处理，由于信号的时域特征未发生本质性改变，称为时域变换；而把系统对单输入信号的微分、积分运算，对两个及两个以上信号的加法、乘法和卷积五种高级处理，称为时域运算。卷积运算虽因其内容丰富、对于求解系统的零状态响应有特别的重要意义而专设较大篇幅讨论，但它本质上又同乘法器类似，是一种双输入单输出的基本系统模型。于是，时域分析中这十种变换和运算的系统框图模型，使得 FT、LT、ZT 三大变换性质的讨论，不再是枯燥、乏味的数学定理、推论和证明，每一个性质的讨论都有对应的输入输出模型，突出了求解象函数的又一条路径，生动地显示出原信号的物理特性变化，系统对信号时域变换和运算的功能特征在频域、复频域、 z 域分别得以彰显。这条主线贯穿于 FT、LT、ZT 性质的讨论中，阅读时通过类比可以领会。

两个重点分别是系统的单位冲激响应和卷积运算。系统的单位冲激响应与其在频域、复频域、 z 域中三种系统函数的对应关系，充分说明了系统的单位冲激响应在信号分析和系统分析理论中的重要地位。任意输入信号与系统单位冲激响应作卷积运算，即可求得该系统对应激励的零状态响应，但如果以为卷积运算仅仅是用来求解系统的零状态响应，则过于狭隘。一个信号与单位冲激信号的卷积实际上是再现、复制该信号的系统模型。选择两个信号输入卷积器，可以输出、产生、创造出一个新的目标信号；改变其中一个信号的时空特性（波形），可以修改、调理输出的目标信号。从这个意义上说，卷积运算器还是信号发生器、信息注入器，具有广泛的应用和开发前景，本教材对这两个重点内容都作了详细论述。

3) 在阐述基本理论、概念和方法的过程中，力求符合认知规律，体现训练和培养逻辑思维能力的教育思想。信号与系统学科理论性很强，实践和应用很广，而又不局限于讨论具体电路和器件，具有高度概括和较为抽象的特点。为此，在描述信号特性、论述系统对信号变换和运算的数学定义、推导证明和例题演算方面都采取了严肃的、严谨的科学态度；而在阐述系统的数学模型、方程、公式所表达的物理含义方面，则更强调用系统的观念、宏观的视野、广义的角度来解释，注重联系实际设备、仪器、装置等硬件或软件系统的整体功能，跳出具体电路和器件的技术性分析方法的束缚。一些释义和例喻，可能显得笼统或不尽缜密，但其目的旨在激发学习兴趣、提高学习热情、启迪联想、培养逻辑性、发散性、创造性思维能力，培植分解和互联大系统的认知能力。

4) 体现时代气息，辩证处理经典与现代、连续与离散、信号与系统的知识内容模块。信息化、数字化科学技术的迅猛发展和广泛应用，不断地丰富和充实信号与系统学科的内

容, 出现了很多用信号与系统理论描述、分析的交叉学科和分支, 业已成熟应用的理论技术必须反映, 部分高端内容的下移、普及日渐必要。在把握读者定位、学时尺度、内容篇幅的基础上, 适当反映 IT 的新理论和新技术实属必然。为此, 在第三章的离散信号卷积和、系统的零状态响应中, 简要介绍了反卷积和、系统辨识的概念。在第四章讨论了傅里叶变换在通信系统中的应用, 介绍调制与解调、频分复用 (FDM) 与时分复用 (TDM)、码分复用 (CDM) 与码分多址 (CDMA), 以及综合业务数字网 (ISDN) 等内容。在第七章讨论了离散信号的傅里叶变换、快速傅里叶变换、离散系统的频域分析和数字滤波器的基本概念, 为后续课程的学习打下基础。本书除第一章并行介绍连续和离散信号与系统的基本概念, 为避免混淆, 其余各章则将连续与离散分开讨论: 从连续时域分析到拉氏变换 (LT) 域分析、傅里叶变换 (FT) 域分析; 从离散时域分析到 z 变换 (ZB) 域分析、离散傅里叶变换 (DFT) 域分析。形成内容体系较为完整而又相对独立, 从基本概念到分析方法都具有并行、可对照的特色。在每一章中, 先信号分析后系统分析, 体现信号分析为基础, 系统分析为桥梁, 变换域分析为手段, 信号与系统的匹配设计为目标的指导思想。科技应用软件 Matlab 是国际流行的计算机仿真软件, 也是信号与系统的优秀教学辅助工具, 学生尽早熟悉、应用, 可以提高学习效率, 提高应用理论解决实际问题的能力。Matlab 在信号与系统中的应用作为上机实验内容, 将和学习指导、部分习题解答内容, 限于篇幅另行成集。

本教材第一、二、三章由扬州大学孙贵根编写, 第四、五章由黑龙江工程学院杨冬云编写, 第六、七章由常州工学院李俊生编写。孙贵根任本教材的主编并统稿。

本教材由北京联合大学赵长奎教授主审, 任力颖副教授审阅了书稿, 并提出了许多宝贵的意见和建议, 王毓银教授、李金平教授给予了许多有益的指导和具体的帮助。在本教材的编写过程中, 得到了扬州大学出版基金的资助, 扬州大学信息工程学院陈峻教授、殷新春教授的支持和关心, 还得到了扬州大学同仁的帮助, 特别是陈虹、杨鹏、蒋步军老师的具体支持和帮助。在此表示衷心感谢。

限于水平, 书中错误及不妥之处在所难免, 恳请读者批评指正。

编 者

目 录

序	
前言	
第一章 信号与系统的基本概念	1
第一节 信号与系统概述	1
第二节 信号的分类、描述和典型信号	2
一、信号的类型	2
二、常用基本信号	5
三、奇异信号	7
第三节 信号的变换与运算	14
一、信号的平移	14
二、信号的反转	15
三、信号的尺度展缩	16
四、信号的相加和相乘运算	18
五、信号的微分和积分运算	19
六、离散信号的差分 and 迭分运算	20
第四节 系统的描述	22
一、系统的数学模型	23
二、系统的框图模型	24
第五节 系统的特性和分类	28
一、动态系统与即时系统的特性	28
二、因果系统与非因果系统的特性	29
三、时变系统与时不变系统的特性	29
四、线性系统与非线性系统的特性	31
五、稳定与不稳定系统的特性	32
第六节 LTI 系统分析方法概述	33
习题一	34
第二章 连续时间系统的时域分析	40
第一节 LTI 连续系统的响应	40
一、微分方程的经典解	40
二、关于 0_- 到 0_+ 系统状态的跳变	44
三、零输入响应、零状态响应和全响应	46
第二节 冲激响应和阶跃响应	48
一、单位冲激响应和单位阶跃响应	48
二、LTI 系统的冲激响应和阶跃响应	52
第三节 卷积积分	53
一、卷积积分的定义及信号的时域分解与再现	54
二、卷积与零状态响应	55
三、卷积的图解法	57
四、卷积的数值计算	59
第四节 卷积的性质	61
一、卷积的代数运算性质	61
二、 $f(t)$ 与奇异信号的卷积性质	63
三、卷积的微分和积分性质	64
四、卷积的时移性质	66
第五节 LTI 系统的微分算子符号	
分析法简介	70
一、微分方程的算子表示	70
二、微分算子符号的基本运算性质	71
三、传输算子的概念	72
四、用算子符号描述和分析电路、信号与系统	73
习题二	74
第三章 离散时间系统的时域分析	80
第一节 LTI 离散系统的响应	80
一、离散时间信号及其基本变换与运算	80
二、LTI 离散系统差分方程的求解	84
三、系统差分方程的经典解	85
四、零输入响应和零状态响应	89
五、离散系统差分算子法简述	92
第二节 离散系统的单位序列 (单位冲激) 响应	93
一、离散系统的单位序列响应 $h(k)$	93

二、单位阶跃序列响应 $g(k)$	98	的应用	155
第三节 离散信号卷积、系统的零状态 响应	100	一、调制与解调	155
一、卷积和	100	二、频分复用(FDM)与时分复用 (TDM)	157
二、图解卷积和	102	三、码分复用与码分多址(CDMA)	159
三、卷积和的性质	104	四、窄带综合业务数字网(N-ISDN)到 宽带综合业务数字网(B-ISDN)	160
四、反卷积和、系统辨识的概念	107	习题四	162
习题三	109	第五章 连续时间系统的 s 域分析	168
第四章 连续时间信号与系统的 频域分析	113	第一节 拉普拉斯变换的定义、 收敛域	168
第一节 周期信号的频谱分析—— 傅里叶级数	113	一、从傅里叶变换到拉普拉斯变换	168
一、三角形式的傅里叶级数	113	二、收敛域的概念	170
二、指数形式的傅里叶级数	114	三、常用函数的拉氏变换	170
三、周期矩形脉冲信号的频谱	115	第二节 拉普拉斯变换的基本性质	172
四、周期信号的功率	119	一、线性性质	172
第二节 傅里叶级数的性质	119	二、时域平移性质	173
一、时移特性	120	三、复频域平移性质	173
二、奇偶特性	120	四、尺度变换性质	174
三、微分特性	120	五、卷积性质	174
第三节 非周期信号的频谱分析—— 傅里叶变换	121	六、时域微分性质	175
一、从傅里叶级数到傅里叶变换	121	七、时域积分性质	176
二、常用信号的傅里叶变换	123	八、复频域微分性质	177
三、傅里叶变换的性质	128	九、复频域积分性质	177
第四节 周期信号的傅里叶变换	138	十、初值定理	178
一、正弦、余弦信号的傅里叶变换	139	十一、终值定理	178
二、周期信号的傅里叶变换	139	第三节 拉普拉斯反变换	179
第五节 抽样定理——信号抽样与 信号的再现	142	一、部分分式分解法	179
一、时域抽样	142	二、围线积分法	183
二、频域抽样	144	第四节 连续时间 LTI 系统的复频域 分析	184
三、抽样定理	145	一、电路的 s 域模型及其解	186
第六节 LTI 连续系统的频域分析	147	二、LTI 系统的网络函数 $H(s)$ 计算	190
一、利用系统函数 $H(j\omega)$ 求响应	147	三、 $H(s)$ 的零、极点分布决定系统 $h(t)$ 的时域特性	193
二、无失真传输	149	第五节 线性系统的稳定性	195
三、理想低通滤波器	152	一、系统的稳定性	195
第七节 傅里叶变换在通信系统中			

二、 $H(s)$ 的零、极点分布与系统的稳定性	196	三、 z 域与 s 域的关系	231
第六节 $H(s)$ 与系统频率特性的关系	197	四、 $H(z)$ 与离散系统的频率响应	232
一、用 $H(s)$ 分析系统的正弦稳态响应	197	习题六	233
二、 $H(s)$ 的零、极点分布与频率特性的关系	198	第七章 离散傅里叶变换与离散系统的频域分析	238
习题五	202	第一节 离散时间序列的傅里叶变换 (DTFT)	238
第六章 z 变换、离散时间系统的 z 域分析	208	一、定义、收敛条件	238
第一节 z 变换的定义、常用序列的 z 变换	208	二、基本性质	240
一、抽样信号的拉氏变换	208	第二节 离散时间系统的频率响应特性	242
二、 z 变换的定义	208	一、离散时间系统的频响特性的意义	242
三、常用序列信号的 z 变换	209	二、频响特性的几何确定法	245
第二节 z 变换的收敛域	210	第三节 傅里叶变换的离散性与周期性	246
一、有限长序列	210	一、连续时间与连续频率	247
二、右边无限长序列	211	二、连续时间与离散频率	247
三、左边无限长序列	211	三、离散时间与连续频率	248
四、双边无限长序列	212	四、离散时间与离散频率	248
第三节 逆 z 变换	213	第四节 从离散傅里叶级数到离散傅里叶变换	250
一、幂级数展开法	213	一、离散时间傅里叶级数 (DFS) 及其系数	251
二、部分分式展开法	214	二、从离散时间傅里叶级数 (DFS) 到离散傅里叶变换 (DFT)	251
* 三、围线积分法	217	三、离散傅里叶变换 (DFT) 与频率抽样的关系	255
第四节 z 变换性质	219	第五节 离散傅里叶变换的性质	257
一、线性	220	一、线性性质	257
二、移位 (移序) 特性	220	二、时移特性 (圆周移位)	257
三、序列乘 a^k (z 域尺度变换)	221	三、圆周卷积	258
四、序列乘 k (z 域微分)	222	四、有限长序列的线性卷积与圆周卷积	258
五、序列除 $(k+m)$ (z 域积分)	223	五、共轭对称性	259
六、 k 域卷积定理	223	六、帕斯瓦尔定理	261
七、 k 域反转	224	第六节 离散傅里叶变换的应用简介	261
八、 k 域求和性质	225	一、离散时间 LTI 系统的频域分析	261
九、初值定理和终值定理	225		
第五节 离散时间 LTI 系统的 z 域分析	226		
一、利用 z 变换分析离散系统	226		
二、离散系统的系统函数 $H(z)$	228		

二、数字滤波器的一般概念	262	附录 B 卷积和表	274
* 三、快速傅里叶变换 (FFT) 简述	265	附录 C 常用信号的傅里叶变换	275
习题七	270	附录 D 序列的 z 变换表	276
附录	274	习题参考答案	278
附录 A 常用信号的卷积积分表	274	参考文献	296

第一章 信号与系统的基本概念

本章介绍信号与系统的概念和分类方法，常用信号的数学描述；深入地研究了阶跃信号和冲击信号及其特性，并引入了信号的基本变换与运算；讨论了LTI系统的模型、分类及其特性，初步建立了信号与系统的分析体系，为以后各章的展开奠定基础。

第一节 信号与系统概述

在自然科学、社会科学以及工程、经济等许多领域中，系统概念已得到广泛应用，如通信系统、控制系统、电力系统、机械系统、化工系统、计算机系统、政治结构系统、经济组织系统、生产管理系统等等。一般认为，系统是指由若干相互关联、相互作用的事物组成的具有特定功能的整体。系统可具有不同的属性和规模，可以是物理的，也可以是非物理的；可以是无生命的，也可以是有生命的（如动物的神经网络系统）；可以是人工的，也可以是自然的；自然系统的例子小至原子核，大至太阳系；人工物理系统的例子小至一个电阻，中至一台复印机，大至因特网。

人们要表达的感觉、思想、意见、语言、文字、图像、声音、数据、指令等等，统称为消息。显然，同一消息可以用不同的媒体来表达。至于常用的“信息”一词，是信息论中的一个术语，是消息的一种度量，是特指消息中有意义的数字、文字、语音、图形和图像。严格说来，数据是进位制代码，是传递信息的载体，是事物的表现形式；而信息是这些数据的解释和内容，但数据本身也是消息。故本书将不对信息、消息加以严格区分。为了有效地传播和利用消息，常常需要将消息转换成为便于传输的和处理的信号，可见，信号是消息的表现形式，消息则是信号的具体内容。

在各种信号中，电信号是一种最便于传输、控制与处理的信号。实际应用中，许多非电信号（如温度、压力、光强、位移、转矩、流速、高程等）的物理量都可以通过适当的传感器变换为电信号。因此，研究电信号具有重要的、普遍的意义。在本书中，若无特殊说明，“信号”一词均指电信号。

由于集成化技术的发展，使得电路、网络 and 系统这些名词的划分也发生了困难，有时近乎是同义词。就电路和系统而言，一般认为系统是比较电路功能更复杂、规模更大的组合体。然而，确切地说，差异更在于两者观察事物的着眼点和处理问题的角度不同。电路分析主要关心的是支路电流或节点电压等局部问题，着重于实现该功能的电路应具有怎样的结构和参数；而系统分析更注意全局，着重于实现对给定信号的处理要求，系统特性能否与信号特性相匹配。

信号与系统在功能和特性方面是紧密关联的整体，信号是运载消息的工具，而系统是为传输信号或对信号进行加工处理的组合体，离开了信号，系统将失去意义。在分析属性相异的各类系统时，常常抽去具体系统物理的或社会的含义，抽象为理想化的模型；将系统中运动、变化的各种物理量（电压、电流、光强、压力、位移、生物数量等）统称为信号，系统

对输入信号进行“加工”、“处理”，并产生输出信号，如图 1-1 所示，图中的方框表示系统。输入信号常称为激励，它代表外部因素对系统的作用；输出信号常称为响应，响应是激励和系统共同作用的结果，系统特性是变换信号、产生响应的内部因素。

本教材以通信系统和控制系统的基本问题为背景，主要讨论信号分析和系统分析。信号分析部分讨论信号的描述与特性、变换与运算；系统分析则研究系统的模型与描述，系统特性（系统函数）对信号传输、处理的性能。信号分析和



图 1-1 信号与系统

系统分析的概念和方法是继续深入研究信号的设计、处理和识别，研究系统的综合、测试和诊断的基础性知识，对学习后续专业课程极其重要。为应用和发展现代信息技术、现代控制技术，应该认真学好本课程。

第二节 信号的分类、描述和典型信号

事物总是表现为时间和空间的存在及其运动过程。电信号的时空特征，表现为信号的值（空间）随时间 t 的变化关系，可以粗略地分为连续信号和离散信号，等间隔的离散信号又称为序列。从数学的观点来说，信号都是独立的自变量 t 的函数，称为“函数”旨在突出变量间的数学描述和运算关系，而“信号”则旨在突出其物理属性。在本书中，“信号”与“函数”两个词常互相通用、选用。

对于语音类的一维信号，常用函数 $f(t)$ 表示；对于平面图像类的二维坐标 (x, y) 信号，常用函数 $f(x, y, t)$ 表示；一维信号可以看成是二维信号的一行或一列，满行满列的二维图像信号为一帧。本书只讨论一维信号，但后面将看到，信号与冲激函数的卷积运算等于复制该信号，引伸至二维图文信息的逐行、逐列和逐帧扫描、读取，实现图文样本的复制、放大、缩小更为形象，更易理解。

与函数一样，实用的一维信号 $f(t)$ 除用解析表达式描述以外，还常用波形图来形象直观地描述。随着问题的深入，还需要用多种变换(FT、LT、ZT)、数学工具以及其他方式来描述、分析和研究信号与系统。

一、信号的类型

根据信号值随时间 t 变化关系的不同函数特征，常用信号有下面几种方式分类。

1. 确定性信号与随机信号

确定性信号可以用确定的时间函数来描述，给定一个指定的时刻，就有其规律所确定的函数值。例如我们熟知的正弦信号、指数衰减信号。随机信号不能给出确定的时间函数，具有未可预知的不确定性。如语音通信中，接收者应能确知对方发送的信息，否则就失去了通信的意义；信号在传输过程中，不可避免地要受到各种干扰和噪声的影响，这些干扰和噪声都具有随机性，所以广义地说来，实际通信系统传送的是随机信号。严格定义的随机信号是指只能用概率统计的方法来描述、分析的一类信号。但在一定的条件下，某些随机信号也会表现出某种确定性，例如音乐表现为某种周期性变化的波形；数据通信中的编码虽然受扰畸变，但总体上还保持着某种规律的脉冲波形。因此，研究确定信号是十分重要的，因为它不仅广泛应用于系统分析和设计中，同时也是进一步研究随机信号的基础。随机信号及随机信

号通过线性系统的内容安排在后续的一系列教材中, 本书只研究确定性信号, 即各种连续的、离散的、周期的、非周期的确定性信号的分析及其应用。

信号所蕴涵的时间特性、频率特性、能量特性、和信息特性, 是我们所要分析揭示、综合利用的。

确定性信号的解析式和波形体现了信号的时间特性, 例如, 信号持续的时间长短、变化速率的快慢、幅值大小的变化规律等等。实际工程中的确定信号可以分解成众多不同频率正弦分量的线性组合, 信号的频率特性是要揭示这些分量的振幅、相位在频域的含量和分布——频谱, 以及能量较为集中的主部——频带宽度, 以便设计能采集、传输、变换、增强、压缩、再现该信号并为之匹配的系统。信号总是携带或含有一定的信息, 识别其中的信息特性, 以便加入自己的信息, 并进行开发和利用。本书主要讨论信号与系统的时间特性和频率特性, 能量特性和信息特性将在相关的专业课程中讨论。

2. 连续时间信号与离散时间信号

连续时间信号是在所讨论的时间定义域内, 对于任意时间值 t (有限个间断点除外) 都可以给出确定值的函数 $f(t)$, 简称连续信号。连续信号的取值, 在值域内可以是连续的, 也可以是跳变的, 如图 1-2 所示。时间域和值域都为连续值的信号称为模拟信号。

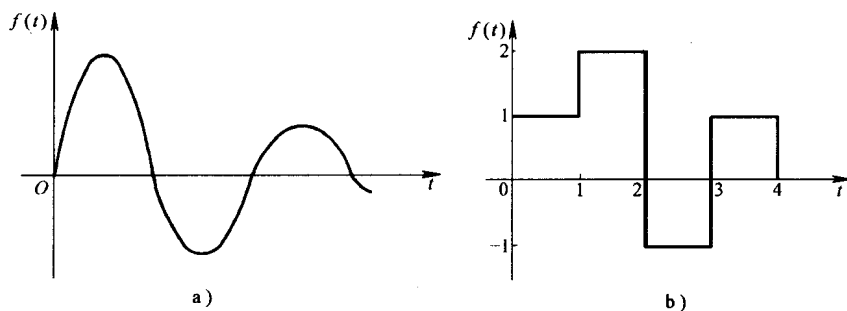


图 1-2 连续时间信号

离散时间信号在时间上是离散的, 只在某些不连续的规定整数值 k 时刻给出函数值 $f(k)$, 在其他时间没有定义, 简称离散信号。相邻离散时刻的点可以是等间隔的, 也可以是不等间隔的; 信号的值域可以是连续的, 也可以是不连续的, 如图 1-3 所示。

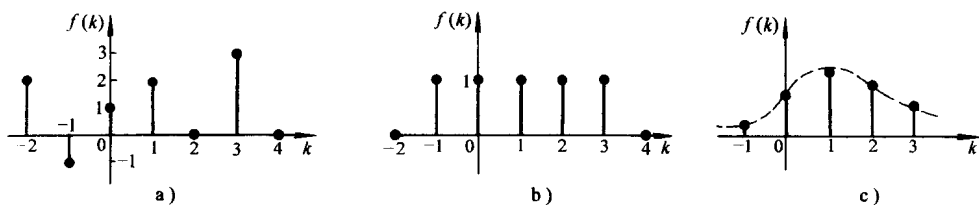


图 1-3 离散时间信号

定义在等间隔(Δt)离散时刻点上的离散信号称为序列, k 称为序号, 与序号 k 相应的序列值 $f(k)$ 称为信号的第 k 个样值。如果离散时间信号由连续时间信号抽样而来, 它的幅值仍然为连续信号的相应时刻的幅度, 它可能有无穷多个, 尚未简化为数码, 则称为抽样