

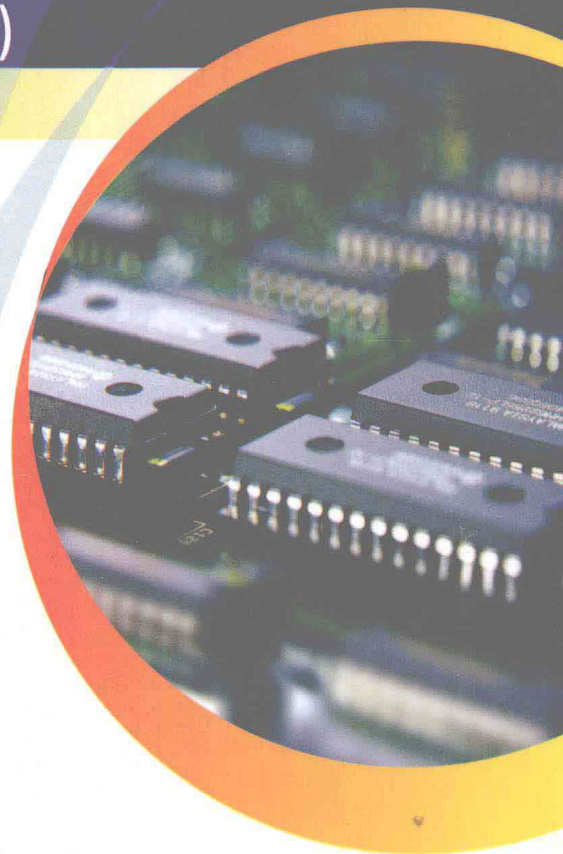
21
CENTURY

高等学校信息工程类专业规划教材

信号与系统

(第二版)

张小虹 编著
胡建萍 主审



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业规划教材

信号与系统

(第二版)

张小虹 编著

胡建萍 主审

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书以三大变换(拉普拉斯变换、傅里叶变换和 z 变换)为主线,描述了信号与系统的基本理论和分析方法。同时将经典理论与现代计算技术相结合,提高了授课效率,以期增强和加快读者对本课程知识点的理解与掌握。本书在原版的基础上进行了修订,新增了 MATLAB 内容,以增强读者尽快掌握和应用 MATLAB 知识,提高计算和作图能力。

本书概念清楚、系统性强、特色鲜明,符合当前强调素质教育的教学改革要求。全书叙述流畅、深入浅出,使用方便,利于自学。

本书可作为高校通信、自动控制、电子信息类专业本科或大专教材,对相关专业的工程技术人员也是一本有益的自学教材和参考用书。

★ 本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/张小虹编著. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2008.8

面向21世纪高等学校信息工程类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-1313-0

I. 信… II. 张… 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(2008)第 033138 号

策 划 马乐惠

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2008年9月第2版 2008年9月第5次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 25.25

字 数 593千字

印 数 18 001~22 000册

定 价 37.00元

ISBN 978-7-5606-1313-0/TN·0246

XDUP 1584012-5

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入21世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电大学、西安邮电学院、重庆邮电大学、吉林大学、杭州电子科技大学、桂林电子科技大学、北京信息科技大学、深圳大学、解放军电子工程学院等10余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类专业教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映21世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

高等学校计算机、信息工程类专业 规划教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电大学校长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电大学通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子科技大学计算机学院教授）

孙力娟（南京邮电大学计算机学院副院长、教授）

李秉智（重庆邮电大学计算机学院教授）

孟庆昌（北京信息科技大学教授）

周娅（桂林电子科技大学计算机学院副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、教授）

胡建萍（杭州电子科技大学信息工程学院院长、教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子科技大学通信与信息工程学院副教授）

章坚武（杭州电子科技大学通信学院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电大学自动化学院院长、教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

第二版前言

信号与系统的概念及分析方法广泛地应用于通信、自动控制、航空航天、电子信息、地震学、生物工程等领域，因此“信号与系统”是理工科院校相关专业的重要基础课。

“信号与系统”的主要内容是传统经典的，现有信号与系统教材注重教材的严谨完美，且加有不少相关专业的内容。在实际教学过程中，尤其在授课时数有限的情况下，很难按照教材完全实施，达到预期目的。在目前的教改实践中，根据编者多年的教学实践，在课时偏少的情况下，编写一本符合通信、控制、电子信息等专业教学实际要求的通用教材是非常必要的。

本书以基本原理、方法为主导，以三大变换为主线，精选课程的基本内容，删繁就简，突出物理概念，并注意与后续专业课的衔接，凡是后续专业课要涉及的部分一般不安排，突显其在通信、控制、电子信息等专业的基础地位与作用，以利于学生尽快掌握本课程的基本概念、基本理论、基本方法。

第二版除了对第一版的错误作了修订外，重点在经典理论与现代计算技术结合上作了进一步的完善和补充。因为随着计算机知识的普及，更多的学生拥有自己的计算机，为此第二版教材扩大了 MATLAB 应用的范围。从信号产生、信号分析到系统响应等每一章都有涉及。考虑到传统教学的习惯，为了更加突出基础知识、基本概念，并保持结构的相对完整，把与 MATLAB 相关的部分大多放在每章最后一节，主要还是通过例题验证的方式引入，帮助读者掌握并应用 MATLAB 工具，提高增强读者计算及作图能力。有条件的读者通过做练习为学会和掌握这个强大的工具打下基础，增强和加快对本课程知识点的理解与掌握。利用通用计算工具验证复杂结论，节省手工运算的时间，把主要精力用在对课程内容和基本概念的理解与巩固上，体现了时代特色，符合素质教育的要求，这也是编者的初衷。

编者在编写过程中考虑到了接受对象的不同，采取了宽口径的处理原则，书中打 * 的部分可供有不同教学要求的学校或教师选用。若还需深入了解相关专业知识可以参阅有关专业书籍。

本书概念清楚、系统性强、特色明显，尤其是将现代教学思想与工具的引入，使本书不仅非常适合作为电子信息类专业本科及大专学生的教材，也可作为自控专业、计算机科学与应用等相关专业学生的教材。对相关专业的工程技术人员来说也是一本自学教材和参考用书。

本书在编写过程中得到了山东省科学院计算中心高级工程师张伟蔚，解放军理工大学苏晓冰、邓元庆、关宇教授，陆士元、郑绪东、王丽娟、王友军、李宁、郭艳副教授以及张为民、贾永兴、余远德等同志的鼎力协助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些疏漏，恳请广大读者不吝赐教。

编者

2008年6月

第一版前言

信号与系统的概念及分析方法广泛应用于通信、自动控制、航空航天、电子信息、地震学、生物工程等领域，因此“信号与系统”是许多理工院校相关专业的重要专业基础课。

“信号与系统”的主要内容是传统经典的，现有的信号与系统教材注重教材的严谨、完美，且加有不少相关专业的内容。在实际教学过程中，尤其在授课时数有限的情况下，很难按照教材完全实施而达到预期的目的。编者根据多年的教学实践认为，在课时偏少的情况下，编写一本符合通信、控制、电子信息等专业教学实际要求的通用教材是非常必要的。本书编写的目的是想通过精选课程的基本内容，删繁就简，突出物理概念，使学生尽快掌握本课程的基本概念、基本理论和基本方法。

本书以基本原理和基本方法为主导，以三大变换为主线安排教材内容，并注意与后续专业课的衔接，凡是后续专业课要涉及的部分就不再叙述，突显其在通信、控制、电子信息等专业基础方面的地位与作用。

编者还尝试将具有强大计算功能的 MATLAB 软件引入本课程，使经典理论与现代计算技术相结合。但考虑到传统教学的习惯，为了更加突出基础知识、基本概念，只是通过例题验证的方式，引入 MATLAB 这种现代计算工具，以期帮助读者在应用 MATLAB 方面尽快入门。有条件的读者可通过做练习学会和掌握这个强大的工具，增强和加快对本课程知识点的理解。利用通用计算工具验证复杂结论，节省手工运算的时间，把主要精力用在对课程内容和基本概念的理解与巩固上，体现了时代的特色，符合素质教育的要求，这也是编者的初衷。

编者在编写过程中考虑到接受对象的不同专业，采取了宽口径的处理原则，书中打 * 的部分可作为任选部分。还需深入了解相关专业知识的读者和工程技术人员可以参阅有关专业书籍。

本书概念清楚、系统性强、特色明显，尤其是将现代教学思想与工具的引入，使本书不仅适合作为电子信息类专业本科及大专教材，也可作为自控专业、计算机科学与技术等相关专业的教材。对相关专业的工程技术人员来说，也是一本有益的自学教材和参考用书。

本书在编写过程中得到了山东省科学院计算中心高级工程师张伟蔚，解放军理工大学教授岳振军、副教授陆士元、王丽娟，以及孙镇、许胜华、李宁、郭艳、张为民等同志的鼎力协助。特别是杭州电子工业学院的胡建萍副教授在主审时，提出了许多宝贵的修改意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些错误，恳请广大读者不吝赐教。

编者

2003年10月

目 录

第一章 信号与系统	1
1.1 信号与系统概述	1
1.2 信号及其分类	1
1.3 典型信号	4
1.3.1 常用连续信号	4
1.3.2 阶跃信号与冲激信号	7
1.4 连续信号的运算	12
1.4.1 时移、折叠、尺度	12
1.4.2 微分与积分	15
1.4.3 信号的加(减)、乘(除)	15
1.5 连续信号的分解	17
1.5.1 规则信号的分解	17
1.5.2 信号的直流与交流分解	18
1.5.3 奇偶信号的分解	18
1.5.4 任意信号的脉冲分解	19
1.6 系统及其响应	21
1.6.1 系统的定义	21
1.6.2 系统的初始状态	21
1.6.3 系统的响应	22
1.7 系统的分类	24
1.7.1 动态系统与静态系统	24
1.7.2 因果系统与非因果系统	24
1.7.3 连续时间系统与离散时间系统	25
1.7.4 线性系统与非线性系统	25
1.7.5 时变系统与非时变系统	27
1.8 LTI系统分析方法	28
1.8.1 LTI系统模型	28
1.8.2 LTI系统分析方法	28
1.8.3 LTI系统的微、积分性质	29
1.9 基于 MATLAB 的信号描述及其运算	29
1.9.1 常用信号的 MATLAB 程序	29
1.9.2 信号运算的 MATLAB 程序	36
习题	41
第二章 连续时间信号和系统的时域分析	47
2.1 LTI系统的数学模型与传输算子	47
2.1.1 建立 LTI系统的数学模型	47
2.1.2 用算子符号表示微分方程	48

2.1.3	用算子电路建立系统数学模型	50
2.1.4	传输(转移)算子 $H(p)$	52
2.2	LTI 因果系统的零输入响应	53
2.2.1	零输入响应	53
2.2.2	初始条件标准化	56
2.3	LTI 因果系统的零状态响应	58
2.3.1	单位冲激响应 $h(t)$	58
2.3.2	系统的零状态响应 $y_{zs}(t)$	60
2.4	卷积及其性质	61
2.4.1	卷积	61
2.4.2	任意函数与 $\delta(t)$ 、 $u(t)$ 卷积	62
2.4.3	卷积的性质	63
2.4.4	卷积的图解法	64
2.4.5	卷积的微分与积分性质	65
2.5	LTI 因果系统的全响应及其经典方法求解	67
2.5.1	全响应	67
2.5.2	全响应及其分解	69
* 2.5.3	经典法求解系统微分方程	69
2.6	基于 MATLAB 的时域分析	71
2.6.1	求系统的冲激响应与阶跃响应	71
2.6.2	利用扩展函数 convwtn 求时域卷积	72
2.6.3	响应时域求解的 MATLAB 程序	74
	习题	75
第三章 连续时间信号和系统的频域表示与分析		81
3.1	周期信号的傅里叶级数分析	81
3.1.1	三角形傅里叶级数	82
3.1.2	指数形式的傅里叶级数	84
3.1.3	周期矩形脉冲频谱	86
3.1.4	周期 T 及脉冲宽度 τ 对频谱的影响	88
3.1.5	周期信号的频谱特点	88
* 3.2	周期信号的对称性	89
3.2.1	信号对称性与傅里叶级数系数关系	89
3.2.2	坐标轴的影响	94
3.3	非周期信号的频谱——傅里叶变换	96
3.3.1	从傅里叶级数到傅里叶变换	96
3.3.2	常用函数的傅里叶变换对	98
3.3.3	傅里叶系数 F_n 与频谱函数 $F(\omega)$ 的关系	102
3.4	傅里叶变换性质及定理	103
3.5	LTI 系统的频域分析	118
3.5.1	系统的频响函数	118
3.5.2	系统的频域分析	121
3.6	无失真传输系统	123
* 3.7	理想低通滤波器与物理可实现系统	126

3.7.1	理想低通滤波器及其冲激响应	126
3.7.2	理想低通滤波器的阶跃响应	127
3.7.3	频带宽度	131
3.7.4	物理可实现系统	132
3.8	时域采样与恢复(插值)	133
3.8.1	时域采样	134
3.8.2	采样定理	136
3.8.3	原信号的恢复	137
* 3.9	相关	139
3.9.1	相关系数	139
3.9.2	相关函数	140
3.9.3	相关函数的性质	141
3.9.4	相关函数的计算	142
3.9.5	相关定理	144
* 3.10	能量谱和功率谱	145
3.10.1	能量谱密度函数	146
3.10.2	功率谱密度函数	147
3.11	基于 MATLAB 的频域分析	149
3.11.1	周期信号的傅里叶级数展开与合成	149
3.11.2	常用信号傅里叶正、反变换 MATLAB 程序	152
3.11.3	傅里叶变换性质的 MATLAB 程序	156
3.11.4	时域采样与恢复的 MATLAB 程序	160
3.11.5	连续信号相关的 MATLAB 程序	161
	习题	163
第四章	连续时间信号和系统的复频域表示与分析	175
4.1	拉普拉斯变换	175
4.1.1	单边拉普拉斯变换	175
4.1.2	常用函数的单边拉普拉斯变换	177
4.1.3	双边拉普拉斯变换	179
4.1.4	拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系	181
4.2	拉普拉斯变换的性质与定理	181
4.3	拉普拉斯反变换	192
4.3.1	部分分式展开法	192
4.3.2	留数法	196
4.4	LTI 系统的拉普拉斯变换分析法	199
4.4.1	用拉普拉斯变换求解线性微分方程	199
4.4.2	s 域的网络模型——运算电路法	202
4.5	系统函数与复频域分析法	206
4.5.1	系统函数 $H(s)$	207
4.5.2	系统函数的零、极点	208
4.5.3	零、极点分布与时域特性	209
4.5.4	零、极点与各响应分量	210
4.5.5	零、极点分布与系统频域特性	211

* 4.5.6	全通系统与最小相移系统的零、极点分布	214
* 4.5.7	其他形式的频响特性	215
4.6	连续时间系统的模拟及信号流图	216
4.6.1	连续时间系统的模拟(仿真)	216
4.6.2	系统模拟的直接(卡尔曼)形式	218
4.6.3	其他形式的模拟	220
4.6.4	连续系统的信号流图表示	223
4.6.5	梅森公式	224
4.7	LTI 连续系统的稳定性	226
4.7.1	系统稳定性分类	227
4.7.2	$H(s)$ 中 m 、 n 之间的限制	227
4.7.3	稳定系统与系统函数分母多项式系数的关系	228
4.7.4	罗斯稳定性准则	230
4.8	基于 MATLAB 的复频域分析	231
4.8.1	拉氏变换的 MATLAB 程序	231
4.8.2	拉氏反变换的 MATLAB 程序	231
4.8.3	部分分式展开的 MATLAB 程序	232
4.8.4	求系统零极点的 MATLAB 程序	234
4.8.5	系统频响作图的 MATLAB 程序	235
4.8.6	系统模拟的 MATLAB 程序	237
4.8.7	反馈系统的 MATLAB 程序	239
4.8.8	根轨迹的 MATLAB 程序	239
	习题	240
第五章	离散时间系统的时域分析	249
5.1	离散序列与基本运算	249
5.1.1	离散时间信号——序列的描述	249
5.1.2	常用典型序列	250
5.1.3	序列的运算	253
5.2	LTI 离散时间系统的数学模型及其求解方法	255
5.2.1	LTI 离散系统	256
5.2.2	LTI 离散系统的数学模型——差分方程	257
5.2.3	线性差分方程的求解方法	259
5.3	离散时间系统的零输入响应	259
5.3.1	一阶线性时不变离散系统的零输入响应	260
5.3.2	N 阶线性时不变离散系统的零输入响应	260
5.4	离散时间系统的零状态响应	263
5.4.1	离散系统的转移(传输)算子	263
5.4.2	单位脉冲响应 $h(n)$	264
5.4.3	零状态响应	267
5.5	离散序列卷积(和)	267
5.5.1	卷积的性质	267
5.5.2	卷积的运算	268
5.6	离散时间系统的完全响应与系统特性	270

5.6.1	系统完全响应的时域求解方法	270
5.6.2	用经典法求解完全响应	271
5.6.3	系统完全响应分解	273
5.6.4	系统特性	275
5.7	基于 MATLAB 的离散时域分析	275
5.7.1	序列的 MATLAB 程序	275
5.7.2	序列运算的 MATLAB 扩展程序	280
5.7.3	序列运算的 MATLAB 程序	281
5.7.4	序列能量的 MATLAB 程序	283
5.7.5	系统响应求解的 MATLAB 程序	283
	习题	286
第六章	\mathcal{Z}变换与离散系统的频域分析	294
6.1	\mathcal{Z} 变换的定义	294
6.2	\mathcal{Z} 变换收敛区及典型序列 \mathcal{Z} 变换	295
6.2.1	\mathcal{Z} 变换的收敛区	295
6.2.2	典型序列的 \mathcal{Z} 变换	299
6.3	\mathcal{Z} 变换的性质与定理	300
6.4	逆 \mathcal{Z} 变换	306
6.4.1	留数法	306
6.4.2	幂级数展开法	307
6.4.3	部分分式法	308
6.5	离散系统的复频域分析	310
6.5.1	利用 \mathcal{Z} 变换求解差分方程	310
6.5.2	\mathcal{Z} 变换与拉普拉斯(傅里叶)变换的关系	313
* 6.6	离散序列的傅里叶变换	314
6.6.1	序列傅里叶变换的定义	314
6.6.2	$X(e^{j\theta})$ 与 $X(j\omega)$ 的关系	315
6.6.3	序列傅里叶变换的性质	316
6.7	系统函数与系统特性	317
6.7.1	系统函数	317
6.7.2	$H(z)$ 的零、极点分布与时域特性	318
6.7.3	系统的因果稳定性	320
* 6.7.4	$H(z)$ 的零、极点与系统频响	321
6.8	离散系统的模拟与信号流图	324
6.8.1	IIR 系统的直接(卡尔曼)形式	324
6.8.2	IIR 系统的级联形式	326
6.8.3	IIR 系统的并联形式	328
6.8.4	FIR 系统的直接形式(横截型、卷积型)	329
6.8.5	FIR 系统的级联形式	329
6.9	基于 MATLAB 的离散频域分析	330
6.9.1	\mathcal{Z} 变换的 MATLAB 程序	330
6.9.2	\mathcal{Z} 反变换的 MATLAB 程序	330
6.9.3	求解系统响应及作图的 MATLAB 程序	331

6.9.4	求系统零极点及作图的 MATLAB 程序	333
6.9.5	系统频响及作图的 MATLAB 程序	334
6.9.6	系统模拟的 MATLAB 程序	335
	习题	338
*	第七章 状态变量分析法	344
7.1	连续系统状态方程与输出方程的建立	344
7.1.1	由系统的直接形式信号流图建立状态方程	344
7.1.2	由系统的级联或并联形式信号流图建立状态方程	351
7.1.3	由电路建立状态方程	352
7.2	连续时间系统状态方程的 s 域分析法	354
7.2.1	由 s 域分析法求解状态方程	354
7.2.2	参数矩阵与系统函数	357
7.2.3	参数矩阵与系统的特性	358
7.3	离散系统状态方程与输出方程的建立	358
7.3.1	由流图建立状态方程与输出方程	359
7.3.2	参数矩阵的物理意义	363
7.4	离散系统状态方程的 z 域分析法	365
7.4.1	由 z 域分析法求解状态方程	365
7.4.2	参数矩阵与系统函数	367
7.4.3	参数矩阵与系统的特性	368
7.5	系统的可控制性与可观测性	369
7.5.1	系统的可控性及其判别法	370
7.5.2	系统的可观性及其判别法	371
7.5.3	系统函数与系统的可控、可观性	372
7.6	基于 MATLAB 的状态变量分析	376
7.6.1	基于 MATLAB 的连续系统的状态方程建立	376
7.6.2	基于 MATLAB 的连续系统的状态变量分析	377
7.6.3	基于 MATLAB 的离散系统的状态方程建立	378
7.6.4	基于 MATLAB 的离散系统的状态变量分析	379
7.6.5	基于 MATLAB 的系统可观与可控性计算	380
	习题	382
	参考文献	390

第一章 信号与系统

1.1 信号与系统概述

现代的人每天都会与各种各样载有信息的信号密切接触。例如，听广播、看电视是接收带有信息的消息；发短信、打电话是为了把带有信息的消息借助一定形式的信号传送出去。信号是各类消息的运载工具，是某种变化的物理量，如电话铃声，交通红绿灯，收音机、电视机、手机收到的电磁波等，这些信号分别称之为声信号、光信号、电信号。不同的声、光、电信号都包含有一定的意义，这些意义统称为信息。消息中有意义或实质性的内容可以用信息量度量。

在自然科学、社会等诸多领域中，系统的概念与方法被广泛应用。系统泛指由若干相互作用、相互关联的事物组合而成的，具有特定功能的整体。通信、控制系统是信息科学与技术领域的重要组成部分，它们还可以组合成更复杂的系统。

本书所研究的是信号通过系统进行传输、处理的基本理论和基本分析方法，通常可由图 1.1-1 所示的方框图表示。其中 $f(\cdot)$ 是系统的输入(激励)， $y(\cdot)$ 是系统的输出(响应)， $h(\cdot)$ 是系统特性的一种描述。“ \cdot ”是信号的自变量，可以是连续变量 t ，也可以是离散变量 n 。

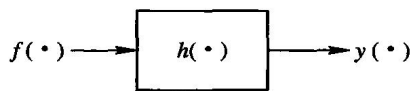


图 1.1-1 信号与系统分析框图

图 1.1-1 所示信号与系统分析框图中，有激励、系统特性、响应三个变量。描述它们的有时域、频域、复频域三种方法。研究各变量的不同描述方法之间的转换关系以及三个变量之间的关系(已知其中两个求解出第三个)，是“信号与系统”课程研究的主要问题。

因为存在连续与离散两类不同的信号的描述，所以有连续与离散两类不同的传输、处理系统。本书采用先连续信号与系统分析，后离散信号与系统分析的顺序编排。

1.2 信号及其分类

人们用来传递信息的信号主要是电信号。电信号有许多众所周知的优点，传播速度快、传播方式多：有线、无线、微波、卫星等。日常许多非电的物理量如压力、流速、声音、图像等都可以利用转换器变换为电信号进行处理、传输。本书讨论的电信号，一般是指随时间变化的电压或电流，有时也可以是电荷或磁通。

为了对信号进行处理或传输，要对信号的特性进行分析研究。这既可以从信号随时间变化的快、慢、延时来分析信号时间特性，也可以从信号所包含的主要频率分量的振幅大小、相位的变化来分析信号的频率特性。当然，不同的信号具有不同的时间特性与频率特性。

信号随时间变化的关系,可以用数学上的时间函数来表示,所以有时亦称信号为函数 $f(t)$, 离散信号为序列 $x(n)$ 。因此本书中信号与函数、序列这几个名词通用。信号的函数关系可以用数学表达式、波形图、数据表等表示,其中数学表达式、波形图是最常用的表示形式。

各种信号可以从不同角度进行分类,常用的有以下几种。

1. 确定性信号与随机信号

信号可以用确定的时间函数来表示的是确定性信号,也称规则信号。如正弦信号、单脉冲信号、直流信号等。

信号不能用确定的时间函数来表示,只知其统计特性(如在某时刻取某值的概率)的是随机信号。

从常识上讲,确定性信号不包括有用的或新的信息。但确定性信号作为理想化模型,其基本理论与分析方法是研究随机信号的基础,在此基础上根据统计特性可进一步研究随机信号。本书只涉及确定性信号。

2. 周期信号与非周期信号

周期信号是依一定的时间间隔周而复始、无始无终的信号,一般表示为

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \dots \quad (1.2-1)$$

其中 T 为最小重复时间间隔,也称周期。不满足式(1.2-1)这一关系的信号为非周期信号。如果若干周期信号的周期具有公倍数,则它们叠加后仍为周期信号,叠加信号的周期是所有周期的最小公倍数;其频率为周期的倒数。只有两项叠加时,若 T_1 、 T_2 与 ω_1 、 ω_2 分别是两个周期信号的周期与角频率。叠加后信号的角频率、周期的计算为

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{N_1} = \frac{\omega_2}{N_2}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{N_2}{N_1}, \quad T = N_1 T_1 = N_2 T_2 \quad (1.2-2a)$$

其中 N_1 、 N_2 为不可约的正整数。若是大于两项叠加时,信号的角频率、周期的计算为

$$\omega_1 = \frac{N_1}{N_0}, \omega_2 = \frac{N_2}{N_0}, \dots, \omega_n = \frac{N_n}{N_0}, \quad T = N_1 T_1 = N_2 T_2 = N_3 T_3 \dots = N_n T_n$$

其中, N_1, N_2, \dots, N_n 为正整数。若 N_1, N_2, \dots, N_n 无公因子,则

$$\omega_0 = \frac{1}{N_0} \quad (1.2-2b)$$

若有正整数公因子 N , 则

$$\omega_0 = \frac{N}{N_0} \quad (1.2-2c)$$

例 1.2-1 判断下列信号是否为周期信号? 若是, 求出其周期。

(1) $e_1(t) = a \sin 5t + b \cos 8t$;

(2) $e_2(t) = 3 \cos 1.2t - 5 \sin 5.6t$ 。

解 (1) 方法一:

$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{5}{8}$ 为有理数, 且无公因子, 所以,

$$\omega_0 = \frac{5}{5} = \frac{8}{8} = 1, \quad T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi$$

方法二：

$$T_1 = \frac{2\pi}{5}, T_2 = \frac{2\pi}{8}$$

$$5T_1 = 8T_2 = 2\pi = T$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 1$$

(2) 方法一：

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1.2}{5.6} = \frac{3}{14} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\omega_0 = \frac{1.2}{3} = \frac{5.6}{14} = 0.4, \quad T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 5\pi$$

方法二：

$$T_1 = \frac{2\pi}{1.2}, T_2 = \frac{2\pi}{5.6}, 3T_1 = 14T_2 = 5\pi = T$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2}{5} = 0.4$$

3. 连续时间信号与离散时间信号

按函数的独立变量(自变量)取值的连续与否,可将信号分为连续信号与离散信号。本书默认独立变量(自变量)为时间,实际工程应用中可为非时间变量。

连续时间信号在所讨论的时间内,对任意时间值(除有限不连续点外)都可以给出确定的函数值。连续时间信号的幅值可以是连续的(也称模拟信号),也可以是离散的(只取某些规定值),如图 1.2-1 所示。

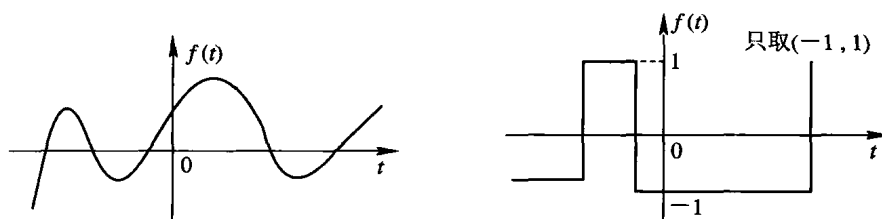


图 1.2-1 连续时间信号

离散信号亦称序列,其自变量 n 是离散的,通常为整数。若是时间信号(可为非时间信号),它只在某些不连续的、规定的瞬时给出确定的函数值,其它时间没有定义,其幅值可以是连续的也可以是离散的,如图 1.2-2 所示。

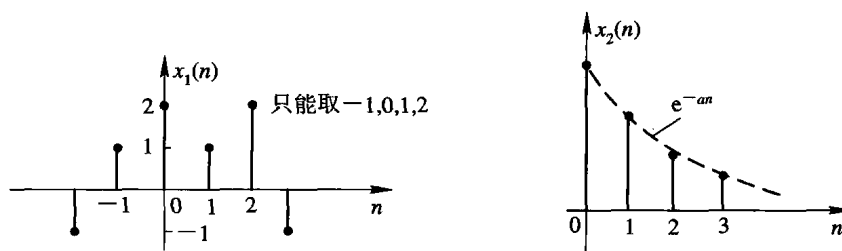


图 1.2-2 离散时间信号

图 1.2-2 中,

$$x_1(n) = \begin{cases} -1 & n = -2, 3 \\ 1 & n = -1, 1 \\ 2 & n = 0, 2 \\ 0 & n \text{ 为其它} \end{cases}, \quad x_2(n) = \begin{cases} e^{-an} & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$$

$x_1(n)$ 还可简写为

$$x_1(n) = [-1 \quad 1 \quad 2 \quad 1 \quad 2 \quad -1]$$

↑

式中小箭头标明 $n=0$ 的位置。

离散信号的幅值被量化, 即只能取某些规定值(并被编码)时, 称为数字信号, 例如图 1.2-2 中的 $x_1(n)$ 。本书如不特别说明, 一般离散信号与数字信号通用。

4. 能量信号与功率信号

为了了解信号能量或功率特性, 常常研究信号 $f(t)$ (电压或电流) 在单位电阻上消耗的能量或功率。

在 $(-\infty, \infty)$ 区间信号的平均功率 P 为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f^2(t) dt \quad (1.2-3)$$

在 $(-\infty, \infty)$ 区间信号的能量 E 为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (1.2-4)$$

如果信号 $f(t)$ 的能量有界, 即 $0 < E < \infty$, 而平均功率 $P=0$, 则它就是能量信号, 例如单脉冲信号。如果信号 $f(t)$ 的平均功率有界, 即 $0 < P < \infty$, 而能量 E 趋于无穷大, 那么它就是功率信号, 例如周期正弦信号。如果有信号能量 E 趋于无穷大, 且功率 P 趋于无穷大, 那么它就是非能量非功率信号, 例如 e^{-at} 信号。也就是说, 按能量信号与功率信号分类并不能包括所有信号。

5. 因果信号与非因果信号

按信号所存在的时间范围, 可以把信号分为因果信号与非因果信号。当 $t < 0$ 时, 连续信号 $f(t)=0$, 信号 $f(t)$ 是因果信号, 反之为非因果信号; 当 $n < 0$ 时, 离散信号 $x(n)=0$, 则信号 $x(n)$ 是因果信号, 反之为非因果信号。

1.3 典型信号

1.3.1 常用连续信号

1. 实指数信号

实指数信号如图 1.3-1 所示, 其函数表达式为

$$f(t) = Ae^{at} \quad (1.3-1)$$

式中, $a > 0$ 时, $f(t)$ 随时间增长; $a < 0$ 时, $f(t)$ 随时间衰减; $a = 0$ 时, $f(t)$ 不变。常数 A