

高等学校教材

信号与系统

Signals and Systems

何子述



高等教育出版社
Higher Education Press

高等学校教材

信号与系统

Signals and Systems

何子述



高等教育出版社
Higher Education Press

内容提要

本书系统地介绍了信号与系统的基本理论和基本分析方法。内容安排上深入浅出,注意概念和理论与工程应用背景相结合。全书共分7章,内容包括:信号的概念与分类;系统的定义和系统的性质;线性时不变系统的数学描述;基于卷积的系统响应计算和系统特性描述;信号的傅里叶级数表示和傅里叶变换;信号的采样、滤波、调制及实信号的复数表示理论;连续时间信号的拉普拉斯变换;离散时间信号的 z 变换;系统的状态变量描述。每章最后均有一节综合应用例题,注重概念和理论的综合应用。

本书可作为与信号处理相关的电子、通信、自动控制等专业的本科生、大专生以及成人自学者的教材和教学参考书,也可作为相关工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/何子述. —北京:高等教育出版社,
2007.5

ISBN 978-7-04-021472-7

I. 信… II. 何… 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(2007)第 049166 号

策划编辑 杜 炜 责任编辑 孙 薇 封面设计 张 楠 责任绘图 尹文军
版式设计 余 杨 责任校对 殷 然 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京明月印务有限责任公司

开 本 787×960 1/16
印 张 30.25
字 数 550 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007年5月第1版
印 次 2007年5月第1次印刷
定 价 28.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 21472-00

作者声明

未经作者和高等教育出版社允许,任何单位或个人不得以任何形式将《信号与系统》的习题解答后出版,不得翻印或在出版物中抄录本书的内容。否则,将依照《中华人民共和国著作权法》追究责任。

前言

本书是根据作者在电子科技大学长期从事“信号与系统”课程的教学讲义,结合近年来信号处理技术的发展,并参考国内外相关文献资料写作而成,在内容取舍和安排上有下面一些考虑。

1. 注重基本概念和基本计算方法的介绍

本书在内容组织上,注意强调基本概念的描述,在对概念给出严格定义的同时,尽量使用通俗易懂的语言,并结合生活中和工程应用中的实例给予解释说明。在内容的介绍过程中,穿插了较多的例题,这些例题通常不强调解题的技巧性,而是关注计算的基本过程和方法,强调基本概念的应用。

2. 连续时间信号和离散时间信号在本书中并行进行讨论

随着高速数字信号处理器件(DSP、FPGA等)的发展,离散时间信号处理理论在实际工程中的应用越来越广泛,为适应技术发展和应用的需要,本书在内容安排上,将离散时间信号放在与连续时间信号同等的地位进行介绍。

3. 信号分解的思想是贯穿全书的基本脉络

本书从第2章开始,都是限于对线性时不变系统的讨论。其基本思想是,将一个复杂的信号分解为多个(或无穷多个)简单信号的和,然后利用系统的线性和时不变性求得系统响应。在这一基本思想框架下,从对信号不同的分解出发,展开后续各章相关内容的讨论。

4. 安排了部分数字信号处理的基本内容

考虑到部分读者在后续课程中不会再进行“数字信号处理”课程的学习,本书特意在第6章离散时间信号的傅里叶变换中安排了离散时间信号的采样和抽取,连续时间信号的离散时间处理,离散傅里叶变换(DFT)等内容,使读者对数字信号处理理论有初步的认识。

5. 将与系统内部结构有关的内容集中进行介绍

为使内容更紧凑,本书将与系统内部结构有关的内容相对集中地进行介绍,内容包括系统的方框图实现、系统的信号流图和系统的状态方程描述,这些内容被安排在连续时间信号的拉普拉斯变换和离散时间信号的 z 变换两章的最

后部分。

基于上面的考虑,全书各章内容安排如下:

第1章介绍信号与系统的基本概念。内容包括信号的定义和基本运算,奇异信号的概念和运算性质,系统的定义和系统的性质等。

第2章介绍线性时不变系统的差分方程描述,微分方程描述,系统冲激响应的概念,卷积和,卷积积分及卷积的运算性质等。

第3章介绍的主要内容包括,连续时间周期信号的傅里叶级数分解,连续时间非周期信号的傅里叶变换,傅里叶变换的性质等。

第4章介绍连续时间信号傅里叶变换在信号处理中的典型应用。内容包括连续时间系统频率响应的概念,信号的滤波、调制,信号的采样及采样定理,实信号的复数表示等。

第5章介绍连续时间信号的拉普拉斯变换。内容包括拉普拉斯变换的概念和性质,连续时间系统函数的概念,连续时间系统的方框图和信号流图描述,系统状态变量和状态方程等。

第6章介绍离散时间信号的傅里叶变换。内容包括离散时间信号的傅里叶级数和傅里叶变换,线性时不变离散时间系统频率响应,离散时间信号的采样和抽取,DFT,连续时间信号的离散时间处理等。

第7章介绍离散时间信号的 z 变换。包括 z 变换的定义及性质,线性时不变离散时间系统函数,离散时间系统的方框图描述,离散时间系统的状态变量和状态方程等。

本书在强调基本概念和基本运算能力的同时,为了培养学生综合应用知识的能力,每章的最后一节为综合应用例题,精选了5个左右与本章内容紧密相关的典型例题,建议该内容以学生自学为主。

本书在习题安排上分为基本概念与基本运算习题和综合应用习题两类。前者是针对初学者对基本概念的理解和对基本运算能力的掌握而设置的,应该说,如果读者能熟练地完成这些基本运算题,说明读者已掌握了信号与系统的基本内容。综合应用习题是为提高读者对信号与系统内容的综合应用能力而设置的,解题时有一定的技巧和计算难度。需注意的是,初学者切不可好高骛远,不重视基本运算习题的练习而直接去做综合应用习题。

根据不同的教学大纲和学时安排,具体讲授时可对本书各章节内容进行取

舍。对于第6章,如果在后续课程中将开设“数字信号处理”课程,则建议仅讲授第6章的6.1~6.5节就可以了。如果后续课程中不开设“数字信号处理”课程,则建议适当多讲授第6章的内容。

本书的完成得到了电子科技大学教务处、电子工程学院等部门及程庆等同志的热情帮助和支持;电子科技大学电子工程学院何茜、邓小炜、熊科、张锐等同志为本书的文字编纂提供了帮助,唐婷、成芳、蔡步晓、范占春同志解算了本书全部习题,李建平同志为本书描绘了全部插图;在此对他们的帮助和辛勤付出深表感谢!

全书承西安电子科技大学张永瑞教授审阅,张教授提出了许多宝贵意见,谨致以衷心感谢!

限于作者水平,书中定有不当和错误之处,恳请读者批评指正。

何子述

2006年秋于成都沙河畔

目 录

第 1 章 信号与系统的概念	1
1.1 信号的概念	1
1.1.1 信号的定义	1
1.1.2 因果信号、逆因果信号的概念	3
1.2 信号的分类	5
1.2.1 确定信号与随机信号	5
1.2.2 连续时间信号与离散时间信号	6
1.2.3 实信号与复信号	7
1.2.4 周期信号与非周期信号	9
1.2.5 能量信号与功率信号	10
1.3 信号的自变量变换	13
1.3.1 信号的时移	13
1.3.2 信号的时间反转	13
1.3.3 信号的时间尺度变换	14
1.4 信号的基本运算	17
1.4.1 两信号相加	17
1.4.2 两信号相乘	18
1.4.3 连续时间信号的导数和积分	18
1.4.4 离散时间信号的差分 and 累加	19
1.4.5 信号的奇、偶分解	20
1.5 单位冲激信号和单位阶跃信号	21
1.5.1 离散时间单位冲激信号和单位阶跃信号	21
1.5.2 连续时间单位冲激信号和单位阶跃信号	23
1.5.3 单位冲激信号的性质	25
1.6 系统的概念	29
1.6.1 系统的定义	29
1.6.2 系统的相互连接	30
1.7 系统的性质	32

1.7.1 系统的记忆性或动态特性	32
1.7.2 系统的因果性	32
1.7.3 系统的可逆性	33
1.7.4 系统的稳定性	33
1.7.5 系统的时不变性	34
1.7.6 系统的线性	34
1.8 综合应用例题	37
习题 1	40
基本概念与基本运算习题	40
综合应用习题	45
第 2 章 线性时不变系统的系统描述和系统响应	48
2.1 线性时不变离散时间系统的差分方程描述	48
2.1.1 LTI 离散时间系统的差分方程	48
2.1.2 离散时间系统零输入响应和零状态响应的概念	50
2.2 线性时不变离散时间系统响应——卷积和	53
2.2.1 离散时间系统的冲激响应	54
2.2.2 卷积和	56
2.2.3 卷积和计算例题	57
2.3 线性时不变连续时间系统的微分方程描述	63
2.3.1 线性时不变连续时间系统的微分方程	63
2.3.2 连续时间系统零输入响应和零状态响应的概念	64
2.4 线性时不变连续时间系统响应——卷积积分	66
2.4.1 连续时间系统冲激响应	67
2.4.2 卷积积分	68
2.4.3 卷积积分计算例题	70
2.5 基于冲激响应的 LTI 系统特性描述	73
2.5.1 冲激响应与系统记忆性	73
2.5.2 冲激响应与系统因果性	74
2.5.3 冲激响应与系统稳定性	75
2.6 卷积的运算性质与系统特性	76
2.6.1 卷积的交换律	77
2.6.2 卷积的分配律	77
2.6.3 卷积的结合律	78

2.6.4 可逆系统的冲激响应	81
2.6.5 连续时间信号卷积的微分和积分	82
2.6.6 LTI 系统的单位阶跃响应	86
2.7 综合应用例题	87
习题 2	92
基本概念与基本运算习题	92
综合应用习题	96

第 3 章 连续时间信号的傅里叶变换 99

3.1 LTI 连续时间系统对复指数信号的响应	99
3.2 连续时间周期信号的复指数分解——傅里叶级数	101
3.2.1 周期信号的傅里叶级数表示	101
3.2.2 傅里叶系数与信号对称性的关系	105
3.2.3 实周期信号的三角函数分解	107
3.2.4 傅里叶级数的收敛条件与吉布斯现象	108
3.2.5 周期信号通过 LTI 连续时间系统的响应	111
3.3 连续时间非周期信号的复指数分解——傅里叶变换	114
3.3.1 傅里叶变换	114
3.3.2 常用信号的傅里叶变换	118
3.3.3 傅里叶变换的收敛条件	123
3.4 傅里叶变换的性质	124
3.4.1 线性	124
3.4.2 时移特性	124
3.4.3 频移特性	125
3.4.4 时间和频率标度	127
3.4.5 共轭对称性	129
3.4.6 对偶性	132
3.4.7 时域卷积特性	134
3.4.8 时域微分特性	137
3.4.9 时域积分特性	139
3.4.10 能量定理——帕斯瓦关系	141
3.4.11 幅度调制(时域相乘)特性	142
3.4.12 频域微分和积分特性	144
3.5 周期信号的傅里叶变换	145

3.6 傅里叶变换性质和常用傅里叶变换对列表	147
3.6.1 傅里叶变换性质列表	147
3.6.2 常用傅里叶变换对列表	148
3.7 综合应用例题	149
习题3	157
基本概念与基本计算习题	157
综合应用习题	161
第4章 连续时间信号与系统的傅里叶分析	164
4.1 LTI 连续时间系统的频率响应	164
4.1.1 系统频率响应	164
4.1.2 用傅里叶变换求系统响应	166
4.1.3 无失真传输系统的概念	167
4.1.4 线性相位系统与系统的群时延	168
4.2 滤波和理想滤波器	170
4.2.1 滤波的概念	170
4.2.2 几种理想滤波器	171
4.3 幅度调制和解调	175
4.3.1 复指数信号载波的调制与解调	176
4.3.2 正弦信号载波的调制与解调	176
4.4 采样与采样定理	179
4.4.1 信号的采样	179
4.4.2 采样信号的恢复——内插	181
4.4.3 采样定理	183
4.4.4 具有零阶保持电路的信号采样与恢复	185
4.5 实信号的复数表示	188
4.5.1 实信号的复数表示——解析信号	188
4.5.2 希尔伯特变换	189
4.5.3 窄带信号的复数表示——复包络	191
4.6 综合应用例题	195
习题4	203
基本概念与基本运算习题	203
综合应用习题	207

第 5 章 拉普拉斯变换	211
5.1 拉普拉斯变换的定义	211
5.2 拉普拉斯变换的收敛域	214
5.2.1 拉普拉斯变换收敛域的概念	214
5.2.2 拉普拉斯变换的零极点	215
5.2.3 拉普拉斯变换收敛域的性质	216
5.2.4 傅里叶变换与拉普拉斯变换的关系	220
5.3 拉普拉斯变换的性质	221
5.3.1 线性	221
5.3.2 时移特性	222
5.3.3 s 域移位特性	223
5.3.4 尺度变换特性	225
5.3.5 共轭特性	226
5.3.6 时域卷积特性	227
5.3.7 时域微分特性	229
5.3.8 时域积分特性	229
5.3.9 s 域微分特性	231
5.3.10 初值定理和终值定理	233
5.4 拉普拉斯变换性质和常用拉普拉斯变换对列表	235
5.4.1 拉普拉斯变换性质列表	235
5.4.2 常用拉普拉斯变换对列表	236
5.5 拉普拉斯逆变换的计算方法	237
5.5.1 复变函数积分(留数)法	237
5.5.2 部分分式分解法	237
5.6 LTI 连续时间系统的 s 域描述	241
5.6.1 系统函数的概念	241
5.6.2 系统因果性与系统函数收敛域的关系	243
5.6.3 系统可逆性与逆系统的系统函数	243
5.6.4 系统稳定性与系统函数收敛域的关系	244
5.6.5 系统频率响应与系统零极点位置	247
5.6.6 全通系统的概念	249
5.6.7 最小相位系统的概念	249
5.7 单边拉普拉斯变换	249

5.7.1	单边拉普拉斯变换的定义	249
5.7.2	单边拉普拉斯变换的时域微分特性	251
5.8	用拉普拉斯变换求 LTI 连续时间系统响应	252
5.8.1	用双边拉普拉斯变换求 LTI 连续时间系统响应	252
5.8.2	用单边拉普拉斯变换求 LTI 连续时间系统全响应	253
5.8.3	复指数信号通过 LTI 连续时间系统的响应	255
5.8.4	用拉普拉斯变换求系统响应方法小结	257
5.9	LTI 连续时间系统的方框图描述	258
5.9.1	相互连接 LTI 连续时间系统的系统函数	258
5.9.2	LTI 连续时间系统的基本实现部件	260
5.9.3	方框图的直接、并联、级联实现形式	261
5.9.4	系统的信号流图表示	267
5.10	LTI 连续时间系统的状态变量描述	269
5.10.1	系统的状态变量和状态方程	269
5.10.2	系统状态方程和输出方程的建立	271
5.10.3	系统函数矩阵的概念	274
5.11	综合应用例题	276
习题 5		283
	基本概念与基本运算习题	283
	综合应用习题	287
第 6 章	离散时间信号的傅里叶变换	292
6.1	LTI 离散时间系统对复指数信号的响应	292
6.2	离散时间周期信号的复指数分解——傅里叶级数	293
6.2.1	离散时间周期信号的傅里叶级数表示	293
6.2.2	离散时间信号的周期卷积及其傅里叶级数	296
6.3	离散时间非周期信号的复指数分解——傅里叶变换	299
6.3.1	离散时间信号傅里叶变换的概念	299
6.3.2	离散时间信号傅里叶变换举例	301
6.4	离散时间信号傅里叶变换的性质	305
6.4.1	周期性	305
6.4.2	线性	306
6.4.3	时移特性	306
6.4.4	频移特性	306

6.4.5 时域展宽特性	308
6.4.6 共轭对称性	310
6.4.7 时域卷积特性	311
6.4.8 时域差分特性	312
6.4.9 时域累加特性	313
6.4.10 能量定理——帕斯瓦关系	314
6.4.11 时域相乘(幅度调制)特性	315
6.4.12 频域微分特性	317
6.5 离散时间信号傅里叶变换性质和常用傅里叶变换对列表	318
6.5.1 离散时间信号傅里叶变换性质列表	318
6.5.2 离散时间信号常用傅里叶变换对列表	320
6.6 LTI 离散时间系统的频率响应与理想滤波器	321
6.6.1 离散时间系统频率响应	321
6.6.2 离散时间理想滤波器	322
6.7 离散时间信号的采样与抽取	325
6.7.1 离散时间信号的采样及采样定理	325
6.7.2 离散时间信号的抽取和内插	328
6.8 连续时间信号的离散时间处理	333
6.8.1 连续时间信号的离散化及其频谱	333
6.8.2 连续时间信号角频率与离散时间信号角频率的关系	335
6.9 离散傅里叶变换(DFT)	337
6.9.1 离散傅里叶变换的概念	337
6.9.2 DFT 与离散时间信号的循环卷积和卷积	339
6.10 综合应用例题	341
习题 6	348
基本概念与基本运算习题	348
综合应用习题	353
第 7 章 z 变换	357
7.1 z 变换的定义	357
7.2 z 变换的收敛域	360
7.2.1 z 变换收敛域的概念	360
7.2.2 z 变换的零极点	361
7.2.3 z 变换收敛域的性质	362

7.2.4 离散时间信号的傅里叶变换与 z 变换的关系	365
7.3 z 变换的性质	366
7.3.1 线性	367
7.3.2 时移特性	367
7.3.3 z 域尺度变换	369
7.3.4 时域反转特性	370
7.3.5 时域展宽特性	371
7.3.6 共轭特性	372
7.3.7 时域卷积特性	373
7.3.8 时域差分与累加特性	374
7.3.9 z 域微分特性	375
7.3.10 初值定理和终值定理	378
7.4 z 变换性质与常用 z 变换对列表	379
7.4.1 z 变换性质列表	380
7.4.2 常用 z 变换对列表	380
7.5 逆 z 变换的计算方法	381
7.5.1 复变函数积分(留数)法	382
7.5.2 部分分式分解法	382
7.5.3 长除法	385
7.6 LTI 离散时间系统的 z 域描述	387
7.6.1 LTI 离散时间系统函数	387
7.6.2 离散时间系统因果性与系统函数收敛域的关系	388
7.6.3 系统可逆性与逆系统的系统函数	389
7.6.4 系统稳定性与系统函数收敛域的关系	389
7.6.5 系统频率响应与系统零极点位置	392
7.6.6 离散时间全通系统和最小相位系统的概念	394
7.7 单边 z 变换	396
7.7.1 单边 z 变换的定义	396
7.7.2 单边 z 变换的时移特性	397
7.8 用 z 变换求 LTI 离散时间系统响应	398
7.8.1 用双边 z 变换求 LTI 离散时间系统响应	398
7.8.2 用单边 z 变换求 LTI 离散时间系统全响应	399
7.8.3 复指数信号通过 LTI 离散时间系统的响应	402
7.9 LTI 离散时间系统的方框图描述	403

7.9.1 LTI 离散时间系统的基本实现部件	403
7.9.2 LTI 离散时间系统的方框图实现	404
7.10 LTI 离散时间系统的状态变量描述	408
7.10.1 离散时间系统的状态方程和输出方程	408
7.10.2 离散时间系统状态方程的建立	409
7.11 综合应用例题	411
习题 7	418
基本概念与基本运算习题	418
综合应用习题	423
答案	427
索引	455
参考文献	463

第 1 章 信号与系统的概念

本章将对信号与系统相关概念和术语进行详细描述,这些概念和术语是后续内容的基础和出发点。本章将首先介绍信号的定义,讨论信号的基本类型和基本运算,引入奇异信号的概念。然后将给出系统的定义,介绍系统间的相互连接,详细讨论系统的各种性质,并举例说明这些性质的应用。

1.1 信号的概念

1.1.1 信号的定义

自然界的许多物理过程和物理现象,通常可以用随时间变化的函数进行描述(也可以是其他自变量的函数),由于这些函数表征了物理过程或物理现象的某些状态信息,经常称这些函数为信号。如某地区一天的天气状况可以用温度随时间变化的函数(曲线)、湿度随时间变化的函数、风力随时间变化的函数等进行描述。

信号(signal)是运载信息的工具,在数学上表示为一个或多个自变量的函数,自变量通常是时间 t ,信号表示为函数 $f(t)$ 。

例如,路口的交通信号灯可用信号 $f(t)$ 表示为

$$f(t) = \begin{cases} 0, & 0 < t < t_1, \quad t_2 < t < t_3 \\ 1, & t_1 < t < t_2, \quad t_3 < t < t_4 \end{cases} \quad (1.1.1)$$

上式中,当信号 $f(t) = 1$ 时代表绿灯,其包含(运载)的信息为“允许通行”;而当信号 $f(t) = 0$ 时代表红灯,其包含(运载)的信息为“禁止通行”。若将信号 $f(t)$ 传输到交通信息中心,则可通过观察信号 $f(t)$ 为“1”还是“0”,而得到路口是“允许通行”,还是“禁止通行”的信息。

实际工程中,经常将自变量是时间的信号(函数)曲线 $f(t)$,称为信号 $f(t)$ 的波形(waveform),式(1.1.1)的交通信号 $f(t)$ 的波形如图 1.1.1 所示。

正弦信号是电子系统和信号处理技术领域常用到的一种信号,其形式为

$$f(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1.1.2)$$

式中角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。根据不同的应用场合和背景,正弦信号的振幅 A 、角频率 ω_0 、初相位 φ_0 均可代表(运载)不同的信息。