



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

信号与系统分析和应用

李泽光 编著



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

信号与系统分析和应用

Xinhao yu Xitong Fenxi he Yingyong

李泽光 编著

内容简介

本书按照先连续后离散的顺序讨论了确知信号与系统分析的基本原理、方法和应用(个别应用涉及随机信号)以及信号的时域运算和频谱分析;并从时域、频域、复频域、 z 域讨论了线性时不变(LTI)连续和离散系统的特性以及对信号的作用特性;在阐述上尽量使涉及的运算公式具有清晰的物理意义,在内容上力求与实际应用相结合。

全书共分十二章,分别为信号与系统基础、连续时间信号与信号运算、LTI连续时间系统的时域分析、连续周期信号的傅里叶级数与信号的频谱、傅里叶变换、滤波器和信号滤波、信号传输与信号分析中的几个典型问题、拉普拉斯变换及其在连续时间系统分析中的应用、离散时间信号与离散系统的时域分析、 z 变换及其在离散信号与系统分析中的应用、系统函数与信号流图、信号分析应用案例(轴承故障诊断)等。部分章节配有数字资源,读者可扫描二维码或登录相应的网页进行查看。各章还安排了适量的例题、思考题和习题。

本书可作为高等学校电子信息类以及其他相关专业“信号与系统”课程教材,也可供教师、广大科技工作者以及其他相关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统分析和应用 / 李泽光编著. — 北京: 高等教育出版社, 2015.11

ISBN 978-7-04-044033-1

I. ①信… II. ①李… III. ①信号分析 - 高等学校 - 教材 ②信号系统 - 系统分析 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 247187 号

策划编辑 王楠 责任编辑 王楠 封面设计 王琰 版式设计 马敬茹
插图绘制 杜晓丹 责任校对 殷然 责任印制 刘思涵

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	山东省高唐印刷有限责任公司	网上订购	http://www.landaco.com
开本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印张	27	版次	2015年11月第1版
字数	610千字	印次	2015年11月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	39.10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 44033-00

前 言

对信号进行分析的目的是要了解 and 掌握信号的本质和特性,最终是为了获取信号中含有的信息,以便于人们更好地利用、传输、处理和存储信号。系统分析的目的是要了解系统特性以及系统对信号的作用特性,这些特性可以帮助人们设计出满足需要并能有效传输和处理信号的系统。

信号与系统分析是建立在数学基础上的。本书的宗旨是在讨论信号与系统分析理论和分析方法的同时,建立起高等数学和工程数学与实际应用的联系纽带,努力做到理论与实际应用相结合。

“信号与系统”课程主要讲述信号与系统分析的基础理论和分析方法,它以高等数学、工程数学以及电路理论为基础;“信号与系统”课程所学的内容是其后续基础课程(如通信原理、数字信号处理、随机信号分析和处理、自动控制原理等)的基础。“信号与系统”课程是通信、电子信息、自动化等专业的重要专业基础理论课程,在专业课程体系中起着承上启下的作用,学好这门课对后续课程的学习意义重大。信号与系统的基本概念与分析方法具有广泛的应用范围,如通信、雷达、声呐、控制、微电子、机械、声音处理、图像处理等领域,甚至其他的专业领域如生物、化学、地质、经济领域等。

本书按照先连续后离散的顺序,采取逐次推进、由浅入深以及前后呼应的方式,加强基础理论和实际应用相结合;对信号与信息、信号运算和分解、系统响应、卷积、信号频谱、确知函数的傅里叶变换、冲激函数等概念和作用都做了较详细的讨论;本书改进了系统零输入响应的定义,提出了换路时刻系统状态跳变的判断方法,指出了冲激函数在函数表示中的作用。

对于信号来说,在对“信号”进行运算时,可将其分成无时限信号(理想)和有时限信号(非理想),注意这两类信号在计算中的差别以及实际信号运算时出现的问题。当信号作用于系统并求系统响应时,需要考虑的问题有:第一,信号是无时限信号还是有时限信号(换路时刻加入);第二,当有时限信号作用于系统或系统换路时,要将作用于系统的信号进行分段处理,将信号分为换路前时刻信号 $x(0_-)$ 、换路时刻信号 $[x(0_+) - x(0_-)]\Delta u(t)$ 信号以及换路后 $t > 0$ 的信号 $x(t)$;第三,信号波形和表达式都是按信号各个幅度出现的时间先后次序进行表述的。

在 LTI 系统分析方面,从滤波器的角度来看,可将系统分成理想滤波系统和非理想滤波系统。非理想的连续时间系统和递归型离散时间系统在确知信号激励下的响应都可以在时域以及变换域里进行求解,它们的系统函数都是有理分式,系统特性都是由系统函数的零、极点决定的,系统都可以用框图或信号流图表示。

除了上述对信号与系统的整体把握外,本书对众多数学公式的物理意义进行了诠释并且列

II 前 言

举了相应的应用实例,力争能使读者了解学习“信号与系统”课程的目的,也使“信号与系统”通俗易懂,有利于读者学习和自学,这也是我编写本书的一个主要目的之一。

在内容安排上,本书除了第7章外,在绝大多数章节中对信号与系统的中心内容都进行了较深入的讨论,而在第7章安排了较宽应用领域的讨论,同时还指出了本书没有解决的诸多问题,以便读者在后续专业基础课程以及专业课程中继续深入学习。

本书重视理论与工程实践相结合。在讨论基础理论知识的基础上,本书安排了两个实际应用案例,这两个应用案例体现了本书所讨论的两个最重要的内容,即卷积(信号滤波)和信号的傅里叶分析。一个应用案例是两个同频率正弦信号相位差的计算,本书在附录中安排了相位差计算的C语言源程序,可作为学生的课外练习或由教师组织学生进行课程设计,通过这个应用案例能使读者了解和掌握在计算机上进行信号离散化、滤波器参数设置、信号滤波(卷积计算)以及如何实现参数计算等过程;另一个应用案例为第12章的信号分析应用案例(轴承故障诊断),设立这一章的目的是通过轴承信号分析和轴承故障诊断案例把本书已讨论的信号分析以及信号傅里叶分析方法应用于实际中,使读者能充分认识到傅里叶变换的重要性和实用性。同样,书中给出的信号分析源程序可供学生课外练习或由教师组织学生进行课程设计训练。

附录中还安排了幂级数及其在数值计算方面的应用,供读者参考。

为帮助读者巩固知识,书中各章节都配备了一定数量的例题、思考题和习题。

根据各专业不同的教学大纲和学时安排,具体教授时可对本书各章节进行适当取舍。本人目前教学的主要对象是大连大学电子信息工程专业的学生,开设“信号与系统”课程的学时安排为72学时理论课和16学时实验课,由于此专业后续还开设“自动控制原理”课程,因此“信号与系统”课程只讲授本书的前10章。

根据我个人的教学经验,本书各章学时安排大致为(可根据具体情况来调整)

第1章 信号与系统基础(4学时)

第2章 连续时间信号与信号运算(6学时)

第3章 LTI连续时间系统的时域分析(8学时)

第4章 连续周期信号的傅里叶级数与信号的频谱(6学时)

第5章 傅里叶变换(10学时)

第6章 滤波器和信号滤波(8学时)

第7章* 信号传输与信号分析中的几个典型问题(4学时)

第8章 拉普拉斯变换及其在连续时间系统分析中的应用(10学时)

第9章 离散时间信号与离散系统的时域分析(8学时)

第10章 z 变换及其在离散信号与系统分析中的应用(8学时)

第11章* 系统函数与信号流图(4学时)

第12章* 信号分析应用案例(轴承故障诊断)

本书用符号“*”注明的章节可作为任选内容,也可以供学生自学。

目前,国内高校相关专业开设信号与系统课程的理论课学时大致有两种情况,第一种是48~56学时,第二种是64~72学时。对于第一种学时安排,可讲授1~8章(可根据需要安排9~11章);对于第二种学时安排,可讲授1~11章(可根据需要安排第7章和第11章)。

如果专业后续课程没有设“自动控制原理”课程,则需讲授第11章。如果在后续课程中开设“数字信号处理”课程,则可以只讲授前8章内容,离散部分可以放在“数字信号处理”课程中。在教学过程中,个别章节也可以安排学生自学,如第7章、第11章以及第12章等。

本书的完成得益于三十多年来我的学习与工作经历,得益于导师的帮助,得益于单位领导和同事们的支持和帮助以及我对问题的不断思考和探索。

本人有幸于1981—1985年在长春邮电学院(现在的吉林大学通信工程学院)电信工程专业度过4年的大学学习生活,并在毕业后的3年里成为学院通信原理教研室一名助教。从那时起,余弦(或正弦)信号“三参数”的概念就深深地扎根于我的脑海里(知道余弦信号的三参数,就知道这个余弦信号的全部信息了),是我更好地理解傅里叶级数、信号频谱以及傅里叶变换物理意义的基础,“三参数”的概念实际上是信号与系统中最核心的灵魂之一。

1988年开始,我有幸到西安电子科技大学电子工程研究所(目前是雷达信号处理国家重点实验室)度过3年的研究生学习生活,并深受学校严谨的学术和科研风格熏陶,特别是得到导师张守宏教授的谆谆教诲和无私的帮助,这为我后来的科研和教学工作打下了坚实的基础。

1991年研究生毕业后进入中船重工第715研究所和第760研究所,研究所良好的科研平台使我有幸能将所学的知识与工程实践相结合。经过不懈的努力,我的科研工作取得了多项成果,并在1997年获得国内贸易部科技进步二等奖和海军科技进步三等奖,在同一年还获得第七研究院优秀青年称号,这些科研成果也成为本书的重要内容和应用案例。

2000年我又回到另一个熟悉的岗位,成为大连大学的一名教师,大连大学素有重视教学的优良传统,本人在工作中有幸为本科生和研究生主讲了模拟电子技术基础、数字电子技术基础、信号与系统、数字信号处理、随机信号检测和处理、单片机原理和应用、电子系统设计、高级语言编程课程设计等多门课程,同时还指导学生参加多项大学生学科竞赛。作为主要参与人,获得了2012年辽宁省教学成果一等奖(地方院校应用型人才培养教育实施途径的探索与实践)。在教学中我始终坚持将科研成果与理论相结合、与教学相结合。通过多门课程的教学使我对课程之间的联系更加清楚,对信号与系统课程内容有了更加深入的理解,科研与教学的经历也促使我能顺利编写完这部教材。

谨以此书献给我的母校、我的导师、715研究所、760研究所、大连大学,感谢所有培养和关爱我的领导、老师、同事和同学。

本书的完成得到了清华大学郑君里教授、教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会秘书长东南大学孟桥教授的大力支持和帮助;得到了大连大学校领导、信息工程学院及教务处领导和同事的支持和帮助;大连海事大学白桂欣副教授对本书第5章内容、大连大学杜秀丽教授对本书第11章内容的完成提出了宝贵意见和建议。在此对他们的支持和帮助深表感谢!对参考文献中各位著、编、译者同样深表感谢!

IV 前 言

全书承蒙清华大学郑君里教授、江南大学燕庆明教授审阅,郑君里教授和燕庆明教授都提出了许多宝贵意见和建议,我在此表示衷心的感谢!

本书得到辽宁省普通高等学校本科工程人才培养模式改革试点专业建设项目的支持。

限于作者水平,书中难免有错误与不当之处,恳请读者批评指正。作者邮箱:li1790@163.com。

李泽光

2015年5月于大连

目 录

第 1 章 信号与系统基础	1	2.2.5 单边衰减指数信号	24
1.1 信号	1	2.2.6 单边正(余)弦信号	24
1.1.1 信号、信息与信号分析	1	2.2.7 单位冲激信号 $\delta(t)$	25
1.1.2 信号的描述	3	2.2.8 冲激偶信号及其 $\delta'(t)$ 的高阶 导数	27
1.1.3 信号的分类	4	2.3 信号的基本运算	29
1.1.4 不同频率无线电信号的传播与 应用(数字资源)	8	2.3.1 信号的相加与相减运算	29
1.2 系统及其分类	9	2.3.2 信号的相乘运算	29
1.2.1 系统基本概念	9	2.3.3 信号的微分与积分运算	30
1.2.2 系统研究的主要内容	9	2.3.4 典型奇异信号的微分以及它们 之间的关系	31
1.2.3 系统分类	10	2.4 信号的平移、反褶和尺度 变换	33
1.3 线性时不变(LTI)系统	13	2.4.1 信号的平移	33
1.3.1 线性时不变系统的性质	13	2.4.2 信号的反褶	34
1.3.2 LTI 连续时间系统的描述	14	2.4.3 信号的尺度变换	34
1.3.3 线性时不变系统分析	15	2.5 相关系数与相关函数	37
习题 1	15	2.5.1 相关系数与信号的正交	37
第 2 章 连续时间信号与信号运算	18	2.5.2 相关函数	38
2.1 典型无时限连续时间信号	18	2.5.3* 相关函数的应用案例	42
2.1.1 直流信号	18	2.6 信号的分解	44
2.1.2 指数信号	18	2.6.1 直流分量与交流分量	45
2.1.3 正弦信号	19	2.6.2 偶分量与奇分量	45
2.1.4 复指数信号	20	2.6.3 实部分量与虚部分量	46
2.1.5 $\text{Sa}(t)$ 信号(抽样信号)	20	习题 2	47
2.1.6 钟形信号(高斯信号)	21	第 3 章 LTI 连续时间系统的时域 分析	49
2.2 奇异信号	22	3.1 系统模型(常系数微分方程)的 建立	50
2.2.1 单位斜变信号(单边)	22		
2.2.2 单位跃变信号 $\Delta u(t)$	22		
2.2.3 单位阶跃信号 $u(t)$	23		
2.2.4 符号信号 $\text{sgn}(t)$	23		

II 目 录

3.2 经典法求解微分方程(求系统全响应)	52
3.2.1 常微分方程的一般形式及其解(系统响应)的形式	52
3.2.2 微分方程特解(强迫响应)的形式与求解	53
3.2.3 微分方程齐次解(自由响应)的形式与求解	54
3.2.4 自由响应中系数 A_k 的求解	56
3.2.5 起始点的跳变判断方法与跳变量的求解	57
3.2.6 经典法求解系统全响应举例	58
3.3 零输入响应和零状态响应	62
3.3.1 经典法求解零输入响应 $y_{zi}(t)$	63
3.3.2 经典法求解零状态响应 $y_{zs}(t)$	64
3.4 特殊激励下的系统零状态响应——单位冲激响应和单位阶跃响应	67
3.4.1 经典法求系统的单位冲激响应 $h(t)$	67
3.4.2 系统单位冲激响应的特点与作用	69
3.4.3 经典法求系统的单位阶跃响应 $g(t)$	70
3.5 卷积	72
3.5.1 信号波形的分解和表示	72
3.5.2 系统零状态响应与卷积	73
3.5.3 卷积运算(公式法和图解法)	77
3.5.4 卷积的性质	80
3.5.5 卷积与相关函数	83
3.6* 系统响应及激励的相关函数与系统单位冲激响应的关系(数字资源)	85
习题 3	85

第 4 章 连续周期信号的傅里叶级数与信号的频谱	89
4.1 信号的傅里叶分析背景和分析类型	89
4.2 连续周期信号的傅里叶级数	90
4.2.1 我们关心的问题	90
4.2.2 周期信号的三角函数形式傅里叶级数	91
4.3 求解各频率分量公式的物理意义	94
4.3.1 三角函数正交函数集	94
4.3.2 各频率分量求解公式的物理意义	95
4.4 无穷多个余弦信号的表示与信号的频谱	96
4.4.1 单一频率余弦信号的表示	96
4.4.2 三角函数形式的傅里叶级数与信号的频谱	97
4.4.3 复指数形式的傅里叶级数与信号的频谱	100
4.4.4 周期信号的功率与功率谱	103
4.4.5 周期信号频谱的特点	103
4.5 周期信号的对称性与傅里叶级数的关系	108
4.6 傅里叶级数有限项与信号波形的关系	111
习题 4	112
第 5 章 傅里叶变换	114
5.1 连续非周期确知信号的傅里叶变换	114
5.1.1 非周期确知信号的傅里叶变换	114
5.1.2 傅里叶逆变换	117
5.1.3* 傅里叶变换的解析(数字资源)	117

5.2 典型非周期信号的傅里叶变换	118	5.6 相关函数的傅里叶变换	155
5.2.1 单边衰减指数信号	118	5.6.1 互相关函数和自相关函数的傅里叶变换	155
5.2.2 双边偶对称衰减指数信号	118	5.6.2 信号能量及能量谱	156
5.2.3 双边奇对称衰减指数信号	119	5.6.3 信号功率及功率谱	157
5.2.4 矩形脉冲信号	120	5.6.4 随机信号的频谱	159
5.2.5 符号信号 $\text{sgn}(t)$	121	习题 5	161
5.2.6 单位冲激信号和冲激偶信号	121	第 6 章 滤波器和信号滤波	164
5.2.7 单位阶跃信号	123	6.1 滤波器的频率响应与滤波器的分类	164
5.2.8 钟形脉冲信号	123	6.1.1 滤波器(系统)的频率响应	164
5.2.9 三角脉冲信号	124	6.1.2 滤波器的信号滤波特性和滤波器的分类	165
5.3 傅里叶变换性质	125	6.1.3 理想滤波系统概述	166
5.3.1 线性性质	125	6.1.4 非理想滤波系统及性能指标	167
5.3.2 对称性质	125	6.1.5 因果稳定 LTI 连续时间系统频率响应 $H(\omega)$ 的求解	168
5.3.3 奇偶虚实性质	126	6.2 系统响应	171
5.3.4 尺度性质	127	6.2.1 系统的正弦稳态响应	171
5.3.5 时移性质	128	6.2.2 绝对可积的单边非周期信号激励下的系统零状态响应	174
5.3.6 频移特性	130	6.3 失真和无失真传输	177
5.3.7 时域卷积定理	132	6.3.1 信号失真	177
5.3.8 频域卷积定理	133	6.3.2 无失真传输	177
5.3.9 时域微分特性	134	6.4 低通滤波器	179
5.3.10 频域微分特性	135	6.4.1 理想低通滤波器及其频率响应	179
5.3.11 时域积分特性	135	6.4.2 理想低通滤波器的单位冲激响应	180
5.4 周期信号的傅里叶变换及 $\delta(f)$ 函数的作用	138	6.4.3 理想低通滤波器的阶跃响应	182
5.4.1 周期信号的傅里叶变换	139	6.4.4 滤除直流分量的低通滤波器	184
5.4.2 典型周期信号的傅里叶变换	139	6.5 从抽样信号中恢复原信号	185
5.4.3 周期信号的频谱及 $\delta(f)$ 函数的作用	143	6.6 带通滤波器	188
5.5 抽样信号的傅里叶变换及抽样定理	145	6.6.1 理想带通滤波器	188
5.5.1 信号抽样与抽样类型	145	6.6.2 具有可变中心频率或带宽的	
5.5.2 时域抽样信号的傅里叶变换	147		
5.5.3 时域抽样定理	150		
5.5.4 频域抽样和频域抽样定理	151		

IV 目 录

带通滤波器	189	8.4.1 线性(叠加)	225
6.7 * 系统零状态响应的能量谱或 功率谱与系统频率响应的关系 (数字资源)	190	8.4.2 时移(延时)特性	226
习题 6	190	8.4.3 尺度性质	227
第 7 章 * 信号传输与信号分析中的几个 典型问题	195	8.4.4 s 域频移特性	227
7.1 调制与解调	195	8.4.5 时域微分特性(定理)	227
7.2 希尔伯特变换和单边带调制 ..	197	8.4.6 时域积分定理	228
7.2.1 时域希尔伯特变换	198	8.4.7 s 域微分定理	229
7.2.2 时域希尔伯特变换的性质	200	8.4.8 s 域积分定理	230
7.2.3 单边带调制	201	8.4.9 初值定理	230
7.2.4 因果稳定系统的频率响应	202	8.4.10 终值定理	231
7.3 信号叠加与信号检测	203	8.4.11 时域卷积定理	231
7.3.1 多路复用	203	8.5 拉普拉斯逆变换	232
7.3.2 干扰与反干扰	208	8.6 单边拉普拉斯变换与傅里叶 变换的关系	237
7.3.3 信号和信息检测	208	8.7 双边拉普拉斯变换	239
7.4 信号的截短	208	8.8 单边拉普拉斯变换应用概述 ..	240
7.4.1 信号的截短问题	208	8.9 电路响应的 s 域求解	241
7.4.2 提高频率分辨率的方法	211	8.9.1 电路基本元件的 s 域模型	241
7.5 信号的延时与两个同频率正弦信号 之间相位差的计算	212	8.9.2 电路响应的求解	243
习题 7	215	8.10 求解微分方程	245
第 8 章 拉普拉斯变换及其在连续时间 系统分析中的应用	217	8.11 系统函数 $H(s)$ 与连续时间系统 分析	247
8.1 引言	217	8.11.1 系统函数(网络函数)	247
8.2 拉普拉斯变换的定义和 收敛域	219	8.11.2 系统函数 $H(s)$ 的求解	247
8.2.1 从傅里叶变换到单边拉 普拉斯变换	219	8.11.3 利用系统函数求解系统响应 ..	252
8.2.2 单边拉普拉斯变换的收敛域	221	8.11.4 系统函数零、极点分布决定系统 时域特性	257
8.3 常用单边信号的拉普拉斯 变换	222	8.11.5 线性系统稳定性分析	261
8.4 单边拉普拉斯变换的基本 性质	225	8.11.6 系统函数零、极点分布决定系统 频域特性	263
		8.11.7 全通系统与最小相移系统	267
		习题 8	269
		第 9 章 离散时间信号与离散系统的 时域分析	273
		9.1 引言	273

9.2 离散时间信号(序列)	273	10.2 常用序列的 z 变换	313
9.2.1 离散时间信号的定义和表示	273	10.3 z 变换的收敛域	315
9.2.2 典型序列	274	10.4 z 变换的基本性质	320
9.2.3 离散时间信号的运算与时域变换	278	10.4.1 线性	320
9.3 离散时间系统与系统模型	280	10.4.2 位移性	321
9.3.1 线性时不变离散时间系统	280	10.4.3 因果序列线性加权(z 域微分)	322
9.3.2 离散时间系统模型	281	10.4.4 因果序列指数加权(z 域尺度变换)	323
9.3.3 离散时间系统类型与差分方程	283	10.4.5 时域卷积定理	324
9.4 递归型系统的常系数线性差分方程的时域求解	285	10.4.6 初值定理	325
9.4.1 迭代法	285	10.4.7 终值定理	325
9.4.2 时域经典法求解差分方程	285	10.5 z 逆变换	327
9.4.3 离散时间系统全响应的分解	289	10.5.1 幂级数展开法(长除法)	327
9.5 递归型离散时间系统的单位样值响应 $h(n)$	291	10.5.2 部分分式展开法	329
9.5.1 单位样值响应 $h(n)$ 的求解	291	10.5.3* 反演积分法(留数法)	333
9.5.2 单位样值响应 $h(n)$ 表征离散系统特性	294	10.6 z 变换与拉普拉斯变换的关系	335
9.6 卷积(卷积和)	295	10.7 序列 z 变换与序列离散时间傅里叶变换(DTFT)的关系	337
9.6.1 从卷积积分到卷积和	295	10.8 递归型系统差分方程的 z 域求解	340
9.6.2 卷积和的运算	296	10.9 离散系统函数与系统分析	343
9.6.3 有限长单位样值响应低通系统的 $h(n)$ 的获得	299	10.9.1 系统函数与系统零状态响应	343
9.6.4 值得注意的几个问题	302	10.9.2 系统函数的零、极点分布对系统特性的影响	344
9.7* 反卷积	304	10.9.3 离散系统的频率响应	347
9.8* 两个同频率正弦信号相位差的估计	305	习题 10	354
习题 9	308	第 11 章* 系统函数与信号流图	357
第 10 章 z 变换及其在离散信号与系统分析中的应用	311	11.1 系统函数与系统框图	357
10.1 z 变换	311	11.1.1 连续时间系统函数与系统框图	357
10.1.1 z 变换的定义	311	11.1.2 离散时间系统函数与系统框图	360
10.1.2 z 平面	312	11.2 信号流图与梅森公式	362

VI 目 录

11.2.1 信号流程图	362	诊断	388
11.2.2 梅森公式	367	12.3.5 计算倒谱源程序代码(数字 资源)	395
11.3 系统结构	369	附录一 卷积积分表	396
习题 11	373	附录二 典型的连续周期信号的傅里叶 级数表	397
第 12 章 * 信号分析应用案例(轴承 故障诊断)	375	附录三 常用信号的傅里叶变换表	400
12.1 引言	375	附录四 基于正交双通道算法的 正弦信号相位差估计源 程序(数字资源)	404
12.2 随机变量与随机过程	376	附录五 常用幂级数及其在数值计算中 的应用	405
12.2.1 随机变量与随机过程概述	376	附录六 轴承振动信号样值数据文件: 6310.dat (数字资源)	407
12.2.2 平稳随机过程和各态历经 过程	379	习题答案	408
12.3 轴承信号分析与轴承故障 诊断	381	参考文献	418
12.3.1 引言	381		
12.3.2 轴承信号的时域和幅值分析	381		
12.3.3 离散傅里叶变换简介	386		
12.3.4 信号频谱分析与轴承故障			

第 1 章

信号与系统基础

在人类进入信息社会的今天,国民经济各个领域以及人们日常生活中几乎都涉及信号与系统的问题,诸如雷达、声呐、通信、控制、机械、声音与图像处理等领域,以及生物、化学、地质、经济等其他专业领域。人们通过手机实现与外界的联系,手机可传递语音、文字、图片以及视频等信号,人们通过这些信号来获取和传递各种信息。

本书的主要内容是信号与系统的分析,并通过案例来展现信号与系统分析方法的应用。对信号进行分析和运算的目的之一是要了解和掌握信号的特性,通过对信号进行分析,人们可以获得相关信息并能更加有效地传递、处理和存储含有信息的信号;而通过对系统进行分析可以让我们了解和掌握系统的类型、特性以及系统对信号的作用情况等。

本章从“信号”和“系统”两个方面分别讨论它们的各自基本要素,但是,两者之间并不是孤立的,对信号进行传输、分析、处理以及存储都需要相应的系统来完成。

1.1 信 号

1.1.1 信号、信息与信号分析

信号是用来传递某种消息或信息的物理形式,从一般意义上讲,信号是信息的载体,而信息是人们要了解或掌握的某种事物的属性。获取、传输、分析、处理以及存储信号的真正目的是要了解或掌握相关事物的属性。

在教室里,学生们听到的是教师讲课发出的语音信号,每个学生会根据其各自的需要从这个语音信号中提取出对自己有用的知识信息;用手敲打墙壁并分析所听到的声音信号,能判断出此墙是空心墙还是实心墙;通过双方的约定,可视距离内的信号兵用旗语信号可以传递相应信息。

在上述例子中,每个信号都含有人们所需要的不同信息,这些信号都可以通过感官直接获得,并且由大脑对所获得的信号进行分析和判断,从而获取信号中含有的相应信息。但是,在许多实际应用中,人们往往很难凭自己的感官直接从信号中获取所需要的信息,同时,所获得的信号还经常伴随着强噪声或干扰。这就要求人们利用其所掌握的知识从多个方面和角度对信号

进行分析和计算,进而提取所需要的相关信息,而电子系统和计算机则被用来对信号进行处理和计算。所以,掌握信号分析理论和处理方法是获取信息的先决条件。

在信号处理和计算过程中常需要简化算法以减少运算量,进而减少运算时间。为了把含有信息的信号传递出去,还需要采取各种信号传输技术和手段。

当然,信号是否有用则是相对的,例如,在军事上,电磁干扰信号的施加方将干扰信号看作有用信号,而被施加方则将此信号看作噪声(干扰)信号。

本书将从多个角度对确知信号(或函数)进行分析和计算。尽管在实际应用中所涉及的信号一般都是随机信号,但是本书所讨论的确知信号(或函数)的分析方法具有普遍性。下面通过一个轴承振动信号来简单说明信号的分析问题。

组成一个球轴承的主要部件有内圈、外圈、滚珠和保持架等,人们利用传感器以及信号检测系统对轴承旋转时产生的轴承振动信号进行检测,假设一个好轴承的振动信号 $x_1(t)$ 波形如图 1.1.1(a) 所示;而某个部件上出现划痕或点蚀的轴承振动信号 $x_2(t)$ 波形如图 1.1.1(b) 所示。可以看到,轴承内部部件上出现划痕或点蚀的轴承振动信号具有脉动性。

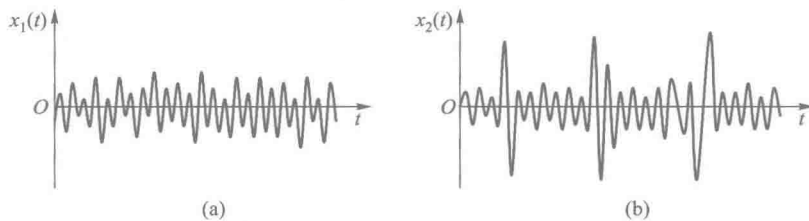


图 1.1.1 轴承振动信号

可以采用如下方法对上述两个信号进行分析。首先,从信号波形上就可以判断出两个轴承状态的不同;其次,我们可以通过计算信号的“峰值因子”来判断轴承内部是否出现划痕或点蚀。其中

$$\text{峰值因子} = \frac{\text{信号峰值}}{\text{信号有效值}} \quad (1.1.1)$$

一个好的轴承振动信号的“峰值因子”大约为 2.5~3.5,而内部有划痕或点蚀的轴承振动信号(此信号出现脉动)的“峰值因子”一般要大于 3.5,有的甚至会达到 7 左右。当然,要想更进一步地知道此轴承内部的哪个部件出现了问题,则需要对信号 $x_2(t)$ 进行频谱分析(在本书后续章节中将讨论信号的频谱问题)。

尽管图 1.1.1 所示的信号是随机信号,但是通过本例可以帮助读者大致了解信号分析的目的,同时也可以看出,为了获取相关信息,往往需要采用多种信号分析方法和手段。

通常,信号理论涉及许多内容,如信号分析、信号传输、信号检测与处理、信号综合等。信号分析主要讨论信号的描述方法或信号数学模型的建立、信号的基本特性分析以及信号运算等;信号综合则是根据具体的要求来设计、产生所需要的信号。本书只对信号的一般规律和特性进

行分析,更多的知识还要在通信原理、数字信号处理、自动控制原理、信息论与编码、随机信号分析与处理等课程中学习。

1.1.2 信号的描述

通常,可以通过数学函数式、图形(波形)或其他形式来描述信号。

1. 数学表达式或函数式

用数学函数式(也称为数学表达式)表示信号时,信号可以表示为“单个自变量”或“多个自变量”的函数,信号的自变量可以是时间、空间位置或其他物理量。具有单个自变量的信号称为“一维自变量”信号(用波形图表示为二维波形)。例如,指数信号表达式为 $x(t) = 2e^{-3t}$,它是一维自变量信号,自变量是时间 t (单位:秒), $x(t)$ 表示此信号在 t 时刻的信号幅度。具有多个自变量的信号称为“多维自变量”信号,例如,黑白图片是亮度随空间位置变化的二维自变量信号。

对于不同的学科领域,信号还具有不同的物理形式,常见的形式有:电信号、声信号、光信号等。由于声音、振动、光、温度、湿度等信号都可以经过相应传感器变成电信号,以方便信号传输、处理、存储和结果输出等,因此本书主要讨论电信号,描述电信号的基本物理量通常是随时间 t 而变化的电压、电流、电场或磁场等。

对电信号进行“传输”、“加工”和“处理”的工作主要由“电系统”来完成,例如,在通信系统中,先将被传输的语音、图象、文字、数据等信号转化为随时间变化的电压或电流信号,再通过适当的信道,如传输线、电缆、空间、光缆(电信号转为光信号后)等将这些电信号进行传输。由于电系统易于实现和设计,实际中多采用电系统进行信号传输、处理和存储。

2. 信号波形或图形

信号图形也称为信号的波形。信号随时间变量 t 变化的曲线称为信号的波形,如图 1.1.2 所示。信号的波形可以简单而直观地表达出信号的变化趋势,在许多应用中常常可以简化问题的求解。

从图 1.1.2 中可以了解到下面几个信息:

(1) 一维自变量信号 $x(t)$ 波形是二维图形,任意时刻 t_0 的信号幅度值是 $x(t_0)$ (注意: $x(t_0)$ 只表示在 $t=t_0$ 时刻的函数值,而没有时间位置信息), t_0 时刻的信号波形坐标点为 $(t_0, x(t_0))$,所以信号 $x(t)$ 又是所有坐标点 $(t, x(t))$ 的集合。

(2) 实际上,信号波形是按幅度值出现的先后顺序记录下来的,从图 1.1.2 中看出,函数值 $x(0)$ 要比 $x(t_0)$ 先出现。所以,所谓的“信号波形”还可以被称之为“按时间顺序记录的信号波形”。例如,在地震发生时,地震记录仪会按时间的先后次序记录下地震波的波形,如图 1.1.3 所示。理解有关信号值出现的先后顺序的问题对于理解本书后续章节中信号作用于系统以及“卷积”等问题会有很大帮助。

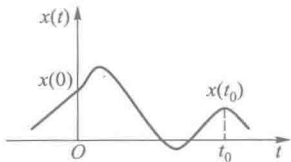


图 1.1.2 信号的波形

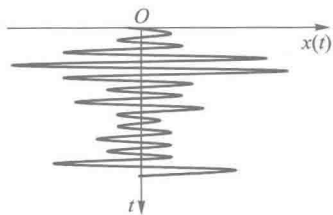


图 1.1.3 地震仪记录的地震信号波形

1.1.3 信号的分类

根据信号的形式和特征,可以将信号分成不同类型。

1. 无时限信号与时限信号以及因果与非因果信号

若在有限时间区间($t_1 < t < t_2$)内信号 $x(t)$ 存在,而在此时间区间以外,信号 $x(t) = 0$,则此信号为时限信号,否则为无时限信号。理想余弦信号,如 $x(t) = \cos(\omega_0 t)$ 是无时限信号,其时间范围是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 。实际上,人们通常从某一时刻开始工作或在这一时刻将信号作用于系统,我们通常将这个时刻定义为 $t = 0$ 时刻,如图 1.1.4 所示。若 $t < 0$ 时 $x(t) = 0$,而 $t \geq 0$ 时 $x(t)$ 存在,则 $x(t)$ 称为因果信号。若 $t \geq 0$ 时 $x(t) = 0$, $t < 0$ 时 $x(t)$ 存在,则 $x(t)$ 为非因果信号。

2. 连续时间信号和离散时间信号

根据信号自变量的连续与否,可将信号划分为连续时间信号与离散时间信号。如果信号的自变量是连续的,则该信号是连续时间信号(简称连续信号);如果自变量是离散的,则此信号是离散时间信号(简称离散信号)。

为了区分连续信号和离散信号,本书用时间 t 来表示连续时间变量,用 $x(t)$ 表示连续信号;用整数 n 来表示离散时间变量,用 $x(n)$ 表示离散信号,仅当 n 为整数时 $x(n)$ 才有意义。

应当注意,本书中“信号”与“函数”在概念的内涵与外延上是有区别的。时间 t 或整数 n 作为自变量时,“信号”与“函数”可相互通用;而以时间延时 τ 、频率 f (或角频率 ω)、复频率 s 、复数 z 作为自变量时,如 $X(\omega)$,只能称为“函数”,这些函数的曲线图形不能称为“波形”而应称为“曲线”。

尽管连续信号的自变量是连续的,但其函数值可以是连续的任意值也可以是不连续的离散值。如图 1.1.5 所示的信号,其自变量(时间)和幅值都是连续的,这种信号又称为“模拟信号”;而图 1.1.6 所示的脉冲信号,其自变量是连续的,但幅度是离散的。

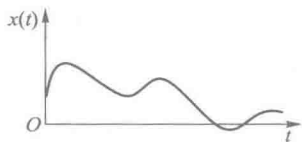


图 1.1.4 因果信号波形

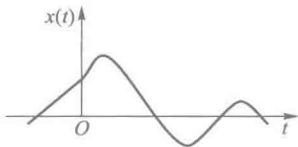


图 1.1.5 模拟信号波形

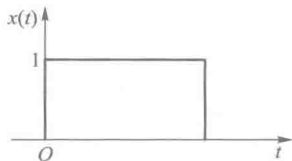


图 1.1.6 脉冲信号