

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
电子信息

信号与线性系统

曾喆昭 编著



清华大学出版社

高等学校教材

电子信息

信号与线性系统

曾喆昭 编著

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书共 8 章,即信号与系统的基本概念,连续时间信号与系统的时域分析、频域分析和复频域(S 域)分析,离散信号与系统的时域分析、频域分析和复频域(Z 域)分析,系统的状态空间分析。此外,在第 6 章分别介绍了基于 MATLAB 语言的 FFT 库函数使用方法、应用实例以及基于神经网络算法的频谱分析方法,以培养学生的创新能力。

本书全部习题精选自国内 20 余所重点高校的近年考研真题。此外,作者编写了与本书配套的习题解答《信号与线性系统习题集与考研真题解析》(曾喆昭等编),包括部分大学近年的十余套考研真题解析,配套使用会有更好的学习效果。

本书可以作为高等学校电气信息类各专业的本科教材,还可作为电气信息类专业学生报考硕士研究生的复习参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

信号与线性系统/曾喆昭编著. —北京:清华大学出版社,2007.10

(高等学校教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-15758-8

I. 信… II. 曾… III. ①信号理论—高等学校—教材 ②线性系统—高等学校—教材
IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 112891 号

责任编辑:付弘宇 李玮琪

责任校对:梁 毅

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京嘉实印刷有限公司

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:20.5 字 数:495 千字

版 次:2007 年 10 月第 1 版 印 次:2007 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:27.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:026361-01

高等学校教材·电子信息

编审委员会成员

东南大学
南京大学
南京航空航天大学
解放军理工大学

上海大学
上海交通大学

华中科技大学

武汉理工大学

宁波大学
天津大学

中国科学技术大学

苏州大学
山东大学
山东科技大学
东北师范大学
沈阳工业学院
长春大学
吉林大学
湖南大学
长沙理工大学
华南理工大学
西南交通大学

重庆工学院
重庆通信学院

王志功 教授
王新龙 教授
王成华 教授
邓元庆 教授
刘景夏 副教授
方 勇 教授
朱 杰 教授
何 晨 教授
严国萍 教授
朱定华 教授
刘复华 教授
李中年 教授
蒋刚毅 教授
王成山 教授
郭维廉 教授
王煦法 教授
郭从良 教授
徐佩霞 教授
赵鹤鸣 教授
刘志军 教授
郑永果 教授
朱守正 教授
张秉权 教授
张丽英 教授
林 君 教授
何怡刚 教授
曾喆昭 教授
冯久超 教授
冯全源 教授
金炜东 教授
余成波 教授
曾凡鑫 教授

重庆大学
重庆邮电学院

西安电子科技大学

西北工业大学

集美大学

云南大学

东华大学

曾孝平	教授
谢显中	教授
张德民	教授
彭启琮	教授
樊昌信	教授
何明一	教授
迟 岩	教授
刘惟一	教授
方建安	教授

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制定的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合新世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻

性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过二十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会
E-mail:dingl@tup.tsinghua.edu.cn

早在 20 世纪 60 年代,“信号与系统”、“基本电路与电子学”、“计算机硬件”、“计算机软件”就构成了美国麻省理工学院(MIT)电气工程与计算机科学系的 4 门主干课程。我国的许多学者也都普遍认为“信号与系统”课程是电气信息类专业学生在大学本科教育阶段所修课程中受益最广、最有应用价值的课程之一,目前它也是电气信息类研究生入学考试的必考科目。

“信号与系统”课程以“高等数学”、“工程数学”及“电路分析”等课程为基础,同时又是“数字信号处理”、“通信原理”、“随机信号与系统分析”等课程的先修基础课程,在电气信息类专业教学环节中起着承上启下的作用。该课程无论从教学内容还是教学目的来看,都是一门理论性和实践性较强的课程,其基本方法和原理广泛应用于信息处理的各个领域。

在本书的编写过程中,编者广泛参考了国内外相关教材,扬长避短,突出了各章节的衔接性。在内容体系方面,按照先时域后变换域、先连续后离散、先信号分析后系统分析的顺序进行论述。在内容介绍方面,尽量避免过多的数学推导,删去了时域分析和复频域分析的经典分析方法,重点突出了复频域分析的现代分析方法。为了避免与“数字信号处理”、“随机信号与系统分析”等后续课程内容的重叠,本书压缩了快速傅里叶变换的内容,删去了随机信号与系统分析的内容,并补充了信号频谱分析的神经网络方法。为了体现理论与应用的有机结合,本书在信号运算方面补充了相应的运算电路的内容,使本课程从纯数学的教学环境中解脱出来。

为了有效加深和加强学生对信号与系统的基本概念、基本理论方法和基本应用的理解和灵活运用,本书特别选择了近 10 年来全国 20 余所重点大学的考研试题作为书中的习题,并配套完整的习题解答作为辅助教材,以方便学生练习参考。

在编写过程中,编者承担了全书的编写工作,王小华博士对本书提出了许多宝贵意见。此外,刘立彦、裴源、吕振梅、黄丹等研究生为本书做了大量的绘图工作,编者在此深表谢意!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。如果读者在本书的使用中有任何问题或建议,请发邮件至:fuhy@tup.tsinghua.edu.cn。

编者

2007 年 4 月

第 1 章 信号与系统的基本概念	1
1.1 信号的描述和分类	2
1.1.1 信号的描述	2
1.1.2 信号的分类	3
1.2 信号的基本特性	6
1.3 信号的基本运算	7
1.3.1 相加和相乘	7
1.3.2 信号的翻转、平移和展缩	8
1.3.3 信号的微分和积分	10
1.3.4 差分和迭分	11
1.3.5 信号的分解	12
1.4 奇异信号	12
1.4.1 连续时间单位阶跃信号 $\varepsilon(t)$	12
1.4.2 连续时间单位冲激信号 $\delta(t)$	13
1.4.3 广义函数和 δ 函数的性质	13
1.4.4 阶跃序列和脉冲序列	14
1.5 系统的描述	16
1.5.1 系统模型	16
1.5.2 系统的输入输出描述	16
1.5.3 系统的状态空间描述	18
1.6 系统的特性和分类	19
1.6.1 系统的定义和表示	19
1.6.2 系统的特性	20
1.6.3 系统的分类	23
1.7 信号与系统的分析方法	24
1.7.1 信号的分析方法	24
1.7.2 系统的分析方法	25

习题 1	27
第 2 章 连续信号与系统的时域分析	30
2.1 连续时间基本信号	30
2.1.1 奇异信号	30
2.1.2 正弦信号	30
2.1.3 指数信号	31
2.1.4 抽样信号	32
2.1.5 单位阶信号	33
2.1.6 三角形信号	33
2.1.7 符号信号	33
2.1.8 单位斜坡信号	33
2.2 卷积积分	34
2.2.1 卷积的定义	34
2.2.2 卷积的图解机理	34
2.2.3 卷积的性质	36
2.2.4 常用信号的卷积公式	39
2.3 信号的相关分析	40
2.3.1 相关系数	40
2.3.2 相关函数	43
2.3.3 相关定理	46
2.4 连续时间系统的零输入响应	46
2.4.1 系统的初始条件	46
2.4.2 连续时间系统的零输入响应的求解	47
2.5 连续时间系统的零状态响应	48
2.5.1 连续信号 $f(t)$ 的 $\delta(t)$ 分解	48
2.5.2 基本信号 $\delta(t)$ 激励下的零状态响应	48
2.5.3 一般信号 $f(t)$ 激励下的零状态响应	49
2.5.4 连续系统的阶跃响应	50
习题 2	54
第 3 章 连续信号与系统的频域分析	57
3.1 信号的正交分解	57
3.1.1 矢量的正交分解	57
3.1.2 信号的正交分解	59
3.2 周期信号的连续时间傅里叶级数	62
3.2.1 三角形式的傅里叶级数	62
3.2.2 指数形式的傅里叶级数	65
3.3 周期函数信号的频谱	66

3.3.1	周期信号的频谱	67
3.3.2	周期信号频谱的特点	68
3.3.3	周期信号的功率	70
3.4	非周期信号的连续时间傅里叶变换	71
3.4.1	傅里叶变换	71
3.4.2	非周期信号的频谱函数	72
3.4.3	典型信号的傅里叶变换	74
3.5	傅里叶变换的性质	79
3.6	周期信号的傅里叶变换	87
3.7	连续时间信号的抽样定理	89
3.7.1	信号的时域抽样定理	90
3.7.2	周期脉冲采样(实际采样)	94
3.7.3	频域抽样	95
3.8	连续系统的频域分析	97
3.8.1	基本信号 e^{st} 激励下的零状态响应	97
3.8.2	一般信号 $f(t)$ 激励下的零状态响应	98
3.8.3	无失真传输条件	103
3.8.4	理想低通滤波器的特性	104
3.9	相关函数与能谱密度函数	105
习题 3		107
第 4 章	连续信号与系统的复频域分析	113
4.1	拉普拉斯变换	113
4.1.1	从傅里叶变换到拉普拉斯变换	113
4.1.2	双边拉氏变换的收敛域	114
4.1.3	单边拉氏变换	116
4.1.4	常用信号的单边拉氏变换	117
4.2	单边拉氏变换的性质	117
4.3	单边拉氏逆变换	122
4.3.1	意义	122
4.3.2	部分分式展开法	122
4.4	连续时间系统的复频域分析	126
4.5	系统微分方程的复频域解	128
4.6	RLC 系统的复频域分析	131
4.6.1	KCL、KVL 的复频域形式	131
4.6.2	系统元件的复频域模型	132
4.7	连续系统的表示和模拟	135
4.7.1	连续系统的方框图表示	135
4.7.2	连续系统的信号流图表示	139

4.7.3 连续系统的模拟	141
4.8 系统函数与系统特性	142
4.8.1 $H(s)$ 的零点和极点	143
4.8.2 $H(s)$ 的零、极点与时域响应	143
4.8.3 $H(s)$ 与系统的频率特性	145
4.8.4 $H(s)$ 与系统的稳定性	146
4.8.5 拉普拉斯变换与傅里叶变换的关系	148
习题4	149
第5章 离散信号与系统的时域分析	153
5.1 离散时间基本信号	153
5.1.1 离散时间信号	153
5.1.2 离散时间基本信号	154
5.2 卷积和	158
5.2.1 卷积和的定义	158
5.2.2 卷积和的图解机理	160
5.2.3 卷积和的矩阵算法	161
5.2.4 卷积和的性质	162
5.2.5 常用序列的卷积和公式	164
5.3 离散时间系统的基本概念	164
5.4 离散时间系统的响应	166
5.4.1 离散系统零输入响应 $y_x(k)$	166
5.4.2 离散系统零状态响应 $y_f(k)$	167
习题5	169
第6章 离散信号与系统的频域分析	172
6.1 周期信号的离散时间傅里叶级数	172
6.1.1 周期信号的离散时间傅里叶级数	173
6.1.2 离散时间周期信号的频谱	174
6.2 非周期信号的离散时间傅里叶变换	176
6.2.1 离散时间傅里叶变换	176
6.2.2 常用信号的离散时间傅里叶变换	179
6.3 周期序列的离散时间傅里叶变换	184
6.4 离散时间傅里叶变换的性质	186
6.5 离散傅里叶变换	191
6.5.1 离散傅里叶变换的引入	192
6.5.2 DFT 的计算	194
6.5.3 DFT 的性质	195
6.6 离散系统的频域分析	199

6.6.1	基本信号 $e^{j\omega t}$ 激励下的零状态响应	199
6.6.2	一般信号 $f(k)$ 激励下的零状态响应	201
6.7	快速傅里叶变换简介	206
6.7.1	直接计算 DFT 的特点及减少运算量的基本途径	206
6.7.2	按时间抽取的 FFT	207
6.7.3	按频率抽取的 FFT	210
6.7.4	基于 MATLAB 语言的 FFT 库函数	212
6.8	基于神经网络算法的频谱分析方法	213
6.8.1	频谱分析的神经网络模型	213
6.8.2	频谱分析实例	217
6.8.3	总结	218
习题 6		218
第 7 章	离散信号与系统的复频域分析	223
7.1	Z 变换	223
7.1.1	从拉普拉斯变换到 Z 变换	223
7.1.2	双边 Z 变换的定义和收敛域	224
7.1.3	常用序列的双边 Z 变换	226
7.2	双边 Z 变换的性质	227
7.3	Z 域逆变换	234
7.3.1	双边 Z 逆变换的定义	235
7.3.2	双边 Z 逆变换的计算	235
7.4	单边 Z 变换	241
7.4.1	单边 Z 变换的定义和收敛域	241
7.4.2	常用序列的单边 Z 变换	242
7.4.3	单边 Z 变换的性质	242
7.4.4	单边 Z 逆变换的计算	245
7.5	离散系统的 Z 域分析	247
7.5.1	离散信号的 Z 域分解	247
7.5.2	基本信号 z^k 激励下的零状态响应	247
7.5.3	一般信号 $f(k)$ 激励下的零状态响应	248
7.6	离散系统差分方程的 Z 域解	249
7.6.1	差分方程的 Z 域解	249
7.6.2	离散系统的频率响应	252
7.7	离散系统的表示和模拟	255
7.7.1	离散系统的方框图表示	255
7.7.2	离散系统的信号流图表示	258
7.7.3	离散系统的模拟	259
7.8	系统函数与系统特性	262

7.8.1	$H(z)$ 的零点和极点	262
7.8.2	$H(z)$ 的零、极点与时域响应	262
7.8.3	$H(z)$ 与离散系统频率响应	263
7.8.4	$H(z)$ 与离散系统的稳定性	265
7.8.5	Z 域与 S 域的映射关系	268
习题 7		269
第 8 章	系统的状态空间分析	275
8.1	状态方程的建立	276
8.1.1	连续时间系统状态方程的建立	276
8.1.2	离散时间系统状态方程的建立	281
8.2	状态方程的求解	284
8.2.1	连续时间系统状态方程的解法	284
8.2.2	离散时间系统状态方程的解法	296
8.3	系统的可控性和可观性	301
8.3.1	系统的可控制性	304
8.3.2	系统的可观测性	306
习题 8		307
参考文献		310

信号与系统的基本概念

信号与系统是相互关联的两个方面,它们的侧重面不同,采用的手段也不同,但它们又是密不可分的,只有通过信号的分析,充分了解信号的特征性,才能有效地对它进行处理和加工,由此可见,信号分析是信号处理的基础。另一方面,系统通过对信号的一定加工和变换,可以突出信号的特征,便于有效地认识信号的特性。从这个意义上说,系统实现信号处理又可认为是信号分析的手段。但是,认识信号(信号分析)也好,改造信号(信号处理)也好,目的都是为了充分地从信号中获取有用信息并实现对这些信息的有效利用。例如,在通信领域如何实现可靠、经济和快速的信息传输交换;在自动控制领域如何获取系统输出信号的最佳动态、静态性能。图 1.1~图 1.3 分别是系统框图、典型的无线广播系统框图和自动控制系统框图。

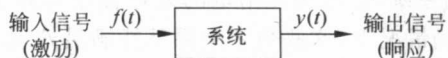


图 1.1 激励、系统与响应

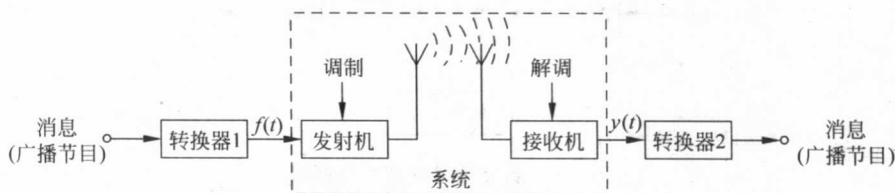


图 1.2 无线电广播系统的组成

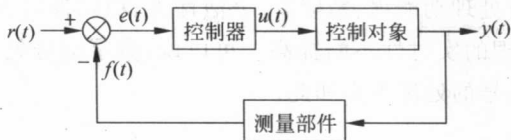


图 1.3 典型自动控制系统框图

信号是信息的载体,为了有效地获取信息以及利用信息,就必须对信号进行分析与处理。可以说,对信息的利用程度在一定意义上取决于信号的分析与处理技术。

信号分析最直接的意义在于通过解析法或测试法找出信号的特征,从而了解其特性,掌握它随时间或频率变化的规律。通过信号分析,可以将一个复杂信号分解成若干简单信号分量之和,或者用有限的一组参量去表示一个复杂波形的信号,并从这些分量的组成情况或

这组有限的参量去考察信号的特性；另一方面，信号分析是获取信号源（主要指被研究的系统）特征信息的重要手段，人们往往可以通过对信号特征的详细了解，得到信号源的特性、运行情况甚至故障等信息，这正是故障分析和故障诊断的基础。

信号处理是指系统通过对信号的加工和变换，把一个信号变换成另一个信号的过程。例如，为了有效地利用信息中包含的有用信息，采取一定的手段（滤波）剔除原始信号中混杂的噪声，削弱多余的内容，这个过程是最基本的信号处理过程。

信号处理系统根据对信号分析处理方法的不同，分为模拟处理系统和数字处理系统两大类。

模拟信号处理系统通过模拟元件 RLC 和模拟电路构成的模拟系统对输入的模拟信号进行加工处理，输出的信号也是模拟信号。比如常用的模拟滤波器就是一个最典型的模拟信号处理系统，如图 1.4 所示。

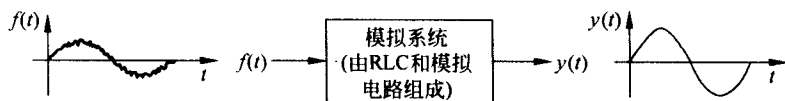


图 1.4 模拟信号处理系统

数字信号处理系统是 20 世纪 60 年代发展起来的技术，它依赖于大规模集成电路和数字处理算法的发展，其核心是用数字计算机的运算功能代替模拟电路装置，达到信号加工和变换的目的。图 1.5 表示了数字信号处理系统的基本结构。系统首先通过模拟-数字转换器(ADC)把原始模拟信号转换成数字信号。数字系统是通用数字计算机或专用数字硬件（如单片机、DSP 等）构成的系统，它按预先给定的处理程序对数字信号进行运算处理，处理结果是数字形式的。在某些情况下，这些数字结果就能满足处理的要求，直接可用。在另一些情况下，将数字输出经过数字-模拟转换器(DAC)即可得到模拟输出。

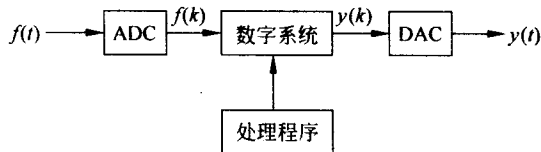


图 1.5 数字信号处理系统框图

数字信号处理系统以数学运算的形式对信号实现分析处理，摒弃了传统的模拟电路处理信号的形式，因而具有处理功能强、精度高、灵活性大、稳定性好等突出优点，特别是近年来高速 DSP 的出现，处理的实时性不断提高。可以说，数字信号处理是信号处理的发展趋势，特别是对一些复杂信号的处理更是如此。

1.1 信号的描述和分类

1.1.1 信号的描述

信号是携带信息（如声音、图像、数据等）的随时间变化的物理量或物理现象（如声、光、电等）。如果信号是单个独立变量的函数，则称这种信号为一维信号。一般情况下，信号为

n 个独立变量的函数时,就称为 n 维信号。本书只讨论一维信号。并且,为了方便起见,一般都将信号的自变量设为时间 t 或序号 k 。

信号的描述主要有 3 种:解析式描述、图形描述、测量数据或统计数据描述。

1.1.2 信号的分类

信号的形式多种多样,可以从不同的角度进行分类,而且通常与系统有关。常用的信号类主要有确定性信号与随机性信号、连续信号与离散信号、周期信号与非周期信号、实信号与复信号、功率信号与能量信号、奇信号与偶信号、因果信号与反因果信号。

1. 确定性信号与随机性信号

(1) 确定性信号

任一由确定时间函数描述的信号称为确定信号或规则信号。对于这种信号,给定某一时刻后,就能确定一个相应的信号值。如衰减振荡信号 $f(t) = 5e^{-20t} \sin(100\pi t)$ 就是一个典型的确定信号,如图 1.6 所示。

(2) 随机性信号

在某一时刻的取值具有不确定性,只能通过大量试验测出它在某一时刻取值的概率分布。通常,实际系统工作时,总会受到来自系统内部或周围环境的各种噪声和干扰的影响。由于噪声和干扰的影响,任一系统的输出信号都不可能是确定信号。研究随机信号要用到概率统计的方法,尽管如此,研究确定信号仍是十分重要的,它不仅广泛应用于系统分析设计,同时也是进一步研究随机信号的基础。如某随机信号如图 1.7 所示。

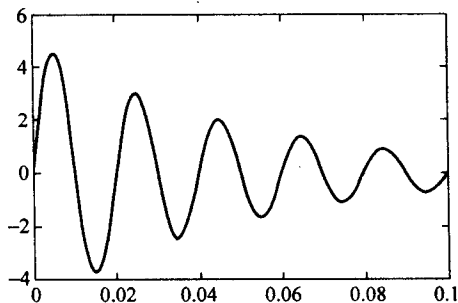


图 1.6 确定信号波形

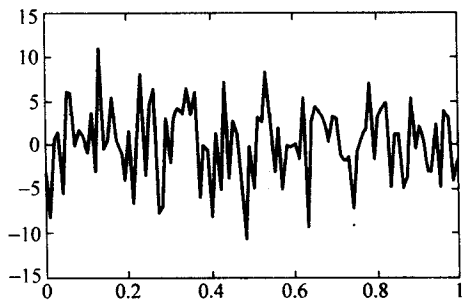


图 1.7 随机信号波形

2. 连续信号与离散信号

(1) 连续时间信号

在连续时间范围内有定义的信号称为连续时间信号,简称为连续信号。

(2) 离散时间信号

只有在一些离散时刻才有定义的信号称为离散时间信号,简称为离散信号或序列。离散时间信号通常通过采样保持器对模拟信号采样得到。

(3) 数字信号

如果离散时间信号不仅在时间上是离散的,而且在幅度上是量化的信号则称为数字信