

名师策划 名师主理 教改结晶 教材精品



新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

丛书主编 邹逢兴

信号处理

与系统分析

高政 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

信号处理与系统分析

高 政 编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部非计算机专业计算机基础课程教学指导分委员会提出的《关于进一步加强高校计算机基础教学的意见》中有关“大学计算机基础”课程教学要求编写的。

本书系统地介绍了信号处理与系统分析的基本原理和方法。全书共分12章,内容包括:信号与系统的基本概念、线性时不变系统、傅里叶级数傅里叶变换、离散时间傅里叶变换、滤波、采样、通信、拉普拉斯变换、z变换、数字滤波器、随机信号处理初步。书中包含很多 Matlab 实例、例题和习题。

本书可以作为自动控制、电子工程、通信等电类专业的信号处理及系统分析原理的本科生教材,也可以供信号处理、模式识别等专业的研究生、教师和科技工作者参考。

本书所配电子教案可以从中国水利水电出版社网站上免费下载,网址为:
<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>。

图书在版编目(CIP)数据

信号处理与系统分析 / 高政编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2005

(新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材)

ISBN 7-5084-2931-1

I. 信… II. 高… III. ①信号处理—高等学校—教材②信号系统—系统分析—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 086391 号

书 名	信号处理与系统分析
作 者	高政 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京市天竺颖华印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 14 印张 337 千字
版 次	2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	22.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

编审委员会

顾问:

冯博琴 (西安交通大学教授, 第一届国家级教学名师)

蔡自兴 (中南大学教授, 第一届国家级教学名师)

蔡惟铮 (哈尔滨工业大学教授, 第一届国家级教学名师)

主任委员:

邹逢兴 (国防科学技术大学教授, 第一届国家级教学名师)

副主任委员:

刘甘娜 (大连海事大学教授, 教育部非计算机专业计算机基础课程
教学指导分委员会委员)

胡德文 (国防科学技术大学教授, 国家杰出青年科学基金获得者)

龚沛曾 (同济大学教授, 国家级精品课程负责人)

王移芝 (北京交通大学教授, 国家级精品课程负责人)

委员:

孙即祥	陈怀义	叶湘滨	马宏绪	张湘平	高 政
李 革	刁节涛	卢启中	潘孟春	陆 勤	黄爱民
宋学瑞	李云钢	陈立刚	彭学锋	徐晓红	杨益强
陈贵荣	王成友	史美萍	李 迅	徐 欣	王 浩

新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材

总 序

电子信息与自动化系列课程是专业适用面很广的课程系列。随着电子信息时代的到来,特别是进入 21 世纪之后,我国各级各类本科院校相当多的理工科专业都或多或少地开设了该系列课程中的课程。因此,提高该系列课程的教学水平、教学质量,对于提高我国高等教育水平和质量,增强当代大学生应用先进的信息技术解决专业领域问题的能力和业务素质,具有特殊重要的意义。而教材是课程内容和课程体系的知识载体,对课程改革和建设既有龙头作用,又有推动作用,所以要提高课程教学水平和质量,关键是要有高水平、高质量的教材。

正是基于上述认识,中国水利水电出版社推动成立了“新世纪电子信息与自动化系列课程改革教材”编审委员会,在经过近两年时间的深入调查研究的基础上,策划提出了本系列教材的编写、出版计划。

本系列教材总的定位是面向各级各类高等院校的本科教学,重点是一般本科院校的教学。整个教材系列大体分为电子信息与通信、计算机基础教育和测控技术与自动化三类,共约 50 本主体教材,它们既自成体系,具有信息类学科的系统性、完整性,又有相对独立性。参加本系列教材编写的作者全部是一些重点大学长期从事相关课程教学的教授、副教授,大多是所在单位的学科学术带头人或学术骨干,不少还是全国知名专家教授、国家级教学名师和教育部有关“教指委”专家、国家级精品课程负责人等,他们不仅有丰富的教学经验,而且有丰富的相关领域的科研经验,对有关课程的内涵、特点、内容相关性及应用等都有较深刻的认识和切身体验。这对编写、出版好本系列教材是十分有利的条件。

本系列教材在编写时均遵循了以下指导思想:

(1) 正确处理先进性和基础性的关系,努力实现两者的统一。

作为进入新世纪的新编信息类教材,既注意在原有同类教材的基础上推陈出新,努力反映学科技术的最新成就,使之具有鲜明的时代特征和先进水平,又注重符合教学规律、教学特点,突出基本原理、基本知识、基本方法和基本技术技能的阐述,着力培养学生应用基础知识分析、解决问题的创新思维能力和将来独立获取、掌握新知识,跟踪相关学科技术发展的能力。

(2) 正确处理理论与实践的关系,切实贯彻理论与实践紧密结合的原则。

本系列教材绝大多数都是理论与实际结合紧密、实用性很强的课程教材,因此特别强调从应用的角度组织内容,在重视理论系统性的同时,尤其突出实践性、应用性,使学生学了以后懂得有什么用、怎么用。在教材内容阐释时,积极引入“案例”,将基本知识单元、知识点的讲解融入典型案例的解决和研究过程中,以培养学生解决工程实际问题的能力作为突破口。

(3) 遵循“宽编窄用”的内容选取原则和模块化的内容组织原则。

凡教育部课程“教指委”制定了教学基本内容及要求的课程,所编教材均覆盖基本内容,

满足基本要求；其他教材的内容选取也都尽量符合多数学校和国内外同行专家的共识。在此基础上再改革创新，努力从继承与发展的结合上来准确把握（取舍）内容。模块化的内容组织主要有利于适应不同专业、不同层次、不同学时数的教学组织和安排。

（4）努力贯彻素质教育与创新教育的思想，尽量采用“问题牵引”、“任务驱动”的编写方式，融入启发式教学方法。

各知识单元尽量以实际问题、工程实例引出相关知识点，在启发学生分析、解决问题及实例的过程中，讲清原理和概念，提炼解决问题的思路和方法，着力培养学生的创新思维意识、习惯和能力，提高学生思考、分析、解决工程实际问题的素质和能力。

（5）注重内容编排的科学严谨性和文字叙述的准确生动性，务求好教好学。

在内容组织上，除条理清晰、逻辑严谨外，还尽量做到重点突出、难点分散、循序渐进，使学生易于理解。在文字叙述上，不仅概念准确、语言流畅，而且力求富有启发性、互动性、感染性、思想性，重视运用形象思维方法和通俗易懂语言，深入浅出地叙述复杂概念，说明难点问题。

（6）立足于形成立体配套的教材体系，以适应现代化教育教学方法手段的需要。

每本教材编写出版后都配套制作有 Powerpoint 电子教案，可从中国水利水电出版社网站上免费下载。大部分主教材出版后还将相继出版配套的辅助教材（包括教学辅导、习题解答、实验教程等），有的还将推出相应的多媒体教学资源库、CAI 课件和课程网站，为教师备课、教学和学生自主性、个性化学习提供更多更好的支持。

总之，本系列教材是近年来各位作者及所在学校、学科课程教学改革和科学研究成果的结晶，在内容上、体系上、模式上有一定创新。我相信，它的出版将对推动我国高校电子信息与自动化系列课程的改革发挥积极的作用。

但是，由于电子信息与自动化类学科的内涵十分丰富，课程覆盖面很广，在组织策划本系列教材时难免有挂一漏万和不妥之处，所编教材质量也未必都能如愿，恳请广大读者多提宝贵意见，以使本系列教材渐趋合理、完善。

邹逢兴
2005年6月

前 言

本书是用于大学本科信号处理与系统分析课程的教科书,是在多年本科生教学实践的基础上形成的。对于电类专业来说,信号处理与系统分析是经常遇到的问题,是电类专业要面临的具有共性的问题。同时,本书的一些分析问题和解决问题的方法也可以为非电类专业提供参考。本书的主要对象是高等院校工科专业的本科生,参考学时为 50~80 学时。

使用本书的学生,应该学过了微积分、复变函数、概率论与数理统计、线性代数、电路分析等课程。

信号是一个广泛的概念。如果只限于讨论确定性信号,那么信号就是一个或者几个独立变量的函数。信号在自动控制、电子系统、通信、航空航天、计算机、生物工程、地震学、声学、机器人等领域都有广泛的应用。许多随时间变化的物理量就是典型的信号,例如,电压、电流、功率、速度、加速度、位移、密度、场强等。还有一些随位置变化的物理量也是信号,例如,灰度、密度、色度等。

许多先修课程,例如,电路分析基础、模拟电路等,讲述了电信号一些简单的处理原理和方法。这门课程进一步系统地学习信号处理的一般性理论和方法。信号是一个更加广泛的概念,并不专指电信号。

我们把诸如电路这样的载体抽象成“系统”,那么,系统的作用就是对信号的变换。注意,这里的“系统”,有些是电路实体,有些可能是看不见摸不着的,比如说,一段计算机程序或者代码就可能是一个系统,一个规则或一个过程也可以认为是一个系统。以前,与本课程类似的课程是“信号与系统”或“电路、信号与系统”,也就是说,处理信号的系统具有一个比较重要的地位,这是因为,在模拟信号处理阶段,处理信号的实体一般是一个电路。但是近年来,数字信号处理技术占据了主流。处理信号的系统往往是一个计算机软件。因此,对信号的处理方法而不是它的实现方式具有了更大的比重。

本书的第 1 章引出了一些信号与系统的基本概念;第 2 章讨论了一种基本的系统:线性时不变系统;第 3 章以周期信号的傅里叶级数为先导,引入了傅里叶分析方法,并且简要介绍了快速傅里叶变换 FFT;第 4 章介绍了连续时间信号的傅里叶变换;第 5 章介绍了离散时间信号的傅里叶变换;第 6 章介绍了频率滤波的一些基本概念;第 7 章介绍了采样,这是连接连续时间信号及系统和离散时间信号及系统的一个基本概念;第 8 章简要地介绍了通信的基本原理及系统;第 9 章介绍了拉普拉斯变换;第 10 章介绍了 z 变换;第 11 章介绍了数字滤波器的原理及其设计方法;第 12 章介绍了随机信号处理的一些基本概念。

本书中,连续时间傅里叶变换和离散时间傅里叶变换分别用 $X(j\omega)$ 和 $X(e^{j\omega})$ 来表示,而有些文献中,连续时间傅里叶变换和离散时间傅里叶变换是分别用 $X(\omega)$ 和 $X(\Omega)$ 来表示的。应该说这些符号的选择都是可行的,只不过本书选择了更加通用的表达方式,以便于读者参阅其他文献。应用广泛的工程计算软件 Matlab 的选择与本书的选择也是一致的。

信号处理专业领域的应用范围非常广泛。在系统建模与辨识方面,信号处理的理论和技术可以用于证券市场的行情预测、电子芯片的解密和黑箱估计理论等;信号滤波是信号处理的一个应用,例如,在音响的扬声器系统的设计中,由于不同材质的振动发声体对不同的频率范围的信号有不同的表现。为了使得声音的不同部分都得到完美的再现,选择钛合金的扬声器来表现高音部分,选择碳纤维扬声器来表现低音部分。这样就有一个将信号的高频部分和低频部分分开的问题,这就需要用到信号处理的手段来进行滤波;在微弱信号检测方面,信号处理技术将微弱的被淹没在背景噪声中的有用信号提取出来,这样的背景噪声一般是电磁干扰和器件中电荷的无规则运动造成的,这种噪声可以模型化为白噪声,利用信号处理的技术就可以将有用的信号从背景噪声中分离出来;图像处理是信号处理的一个重要方面,例如,医学图像处理,计算机断层成像(CT)等都得到了广泛的应用;信息压缩是信号处理的一个典型应用,例如,JPEG、DVD、MPEG和卫星图像压缩都是成功的应用。以前,卫星对地面拍摄的照片是记录在胶片上的,通过回收卫星获得照片,但是这样做成本高,信息不及时。后来采用数码摄像,但是高清晰度照片所包含的信息量也是很大的,因此在图像的下行传递中必须采用图像压缩技术;通信是人类对信号处理技术提出的最早的需求,直到现在这种需求仍然十分旺盛。在信号的发射与接收过程中,必须对信号进行各种方式的变换;模式识别技术的发展对于信号处理不断提出新的需求,声纹、指纹、面像识别、眼虹膜识别都是模式识别技术的典型应用。信号特征的提取、用超声波进行金属探伤、油田勘探等应用都需要在信号中提取特征。

本书包含了大量的 Matlab 实例,采用的是 Matlab 6.1 版本。Matlab 为本课程提供了很好的软件实验平台,同时,Matlab 还以 COM 组件的形式提供了大量的函数库,可以连接到 C/C++、VB、Dephi 等高级语言开发出来的应用软件中,极具应用价值。

信号处理与系统分析课程是一门专业基础课,它为解决上述应用问题提供了坚实的基础。如果专注于基础理论时,本课程甚至可以看成是一门应用数学课,也就是说,尽管工程实例有利于概念的理解,但本课程并不完全依赖于具体的工程背景,因而具有更广泛的适用性。

在本书的编写过程中,谢红卫教授和胡德文教授给予了很大的指导和帮助,对本书提出了很多很好的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,本书难免存在缺点和不足,望同仁批评指正。

作者

2005年6月

目 录

总序

前言

第 1 章 信号与系统的基本概念	1
1.1 信号的概念	2
1.2 自变量变换	4
1.2.1 时间反转	4
1.2.2 时间的尺度变换	5
1.2.3 时间移位	6
1.3 信号的周期性和奇偶性	7
1.3.1 周期信号	7
1.3.2 奇信号与偶信号	8
1.4 复指数信号	8
1.4.1 连续时间复指数信号	8
1.4.2 离散时间复指数信号	10
1.5 单位冲激与单位阶跃信号	12
1.5.1 离散时间单位阶跃信号和单位冲激信号	12
1.5.2 连续时间单位阶跃信号和单位冲激信号	13
1.6 系统	16
1.7 系统的基本性质	18
1.7.1 记忆性质	18
1.7.2 可逆性	19
1.7.3 因果性	20
1.7.4 稳定性	20
1.7.5 时不变性	21
1.7.6 线性	22
思考题与习题	22
第 2 章 线性时不变系统	25
2.1 离散时间 LTI 系统的卷积分析	26
2.1.1 用单位冲激函数表示离散时间信号	26
2.1.2 卷积和	26
2.2 连续时间 LTI 系统的卷积分析	30
2.2.1 用冲激函数表示连续时间信号	30

2.2.2	卷积积分	30
2.3	卷积的性质	32
2.3.1	交换律	32
2.3.2	分配律	34
2.3.3	结合律	34
2.4	LTI 系统的性质	35
2.4.1	LTI 系统的记忆性质	35
2.4.2	LTI 系统的可逆性	36
2.4.3	LTI 系统的因果性	38
2.4.4	LTI 系统的稳定性	38
2.5	单位阶跃响应	38
	思考题与习题	39
第 3 章	傅里叶级数	41
3.1	傅里叶分析引论	42
3.2	连续时间周期信号的傅里叶级数展开	43
3.2.1	谐波复指数信号集	43
3.2.2	傅里叶级数系数的确定	46
3.3	傅里叶级数的收敛问题	48
3.4	连续时间傅里叶级数的性质	49
3.4.1	线性	49
3.4.2	时间平移性质	50
3.4.3	时间反转性质	50
3.4.4	时域尺度变换性质	50
3.4.5	相乘性质	50
3.4.6	共轭及共轭对称性质	50
3.4.7	帕斯瓦尔 (Parseval) 定理	51
3.5	离散时间周期信号的傅里叶级数展开	52
3.5.1	谐波复指数信号集	52
3.5.2	确定傅里叶级数的系数	53
3.6	离散傅里叶变换	56
3.7	快速傅里叶变换 (FFT)	57
3.7.1	计算复杂性	57
3.7.2	时间抽取 FFT 算法	57
	思考题与习题	59
第 4 章	傅里叶变换	61
4.1	非周期信号的傅里叶分析	62
4.1.1	傅里叶变换的引出	62

4.1.2	傅里叶变换	63
4.1.3	傅里叶变换的收敛问题	65
4.2	周期信号的傅里叶变换	67
4.3	傅里叶变换的性质	69
4.3.1	线性	69
4.3.2	时移性质	69
4.3.3	共轭及共轭对称性质	70
4.3.4	微分性质	71
4.3.5	时频尺度性质	71
4.3.6	对偶性质	72
4.3.7	帕斯瓦尔 (Parseval) 定理	73
4.4	卷积性质	73
4.5	相乘性质	74
	思考题与习题	76
第 5 章	离散时间傅里叶变换	79
5.1	离散时间非周期信号的傅里叶变换	80
5.2	离散时间周期信号的 DTFT	82
5.3	DTFT 的性质	84
5.3.1	周期性	84
5.3.2	线性	84
5.3.3	时移和频移性质	85
5.3.4	共轭与共轭对称性质	85
5.3.5	差分性质	85
5.3.6	时间反转性质	85
5.3.7	时域扩展性质	86
5.3.8	频域微分性质	86
5.3.9	帕斯瓦尔定理	87
5.3.10	卷积性质	87
5.3.11	相乘性质	87
	思考题与习题	88
第 6 章	滤波	89
6.1	周期信号与 LTI 系统	90
6.2	频率响应	91
6.3	频率滤波的基本概念	93
	思考题与习题	97
第 7 章	采样	99
7.1	奈奎斯特定理	100

7.2	零阶保持采样	102
7.3	利用内插从样本值重建连续时间信号	104
7.3.1	带限内插	104
7.3.2	零阶保持内插	105
7.3.3	线性内插	105
7.4	欠采样	106
7.5	用离散时间系统处理连续时间信号	107
7.6	对离散时间信号进行的采样	114
7.6.1	脉冲串采样	114
7.6.2	抽取与内插	117
7.7	连续时间信号的频谱分析	119
	思考题与习题	120
第 8 章	通信	123
8.1	正弦幅度调制	124
8.2	正弦幅度调制的解调	126
8.2.1	同步解调	126
8.2.2	非同步解调	128
8.3	频分复用	129
8.4	单边带幅度调制	130
8.5	频率调制	131
8.6	脉冲幅度调制	132
8.7	离散时间信号的调制	133
8.7.1	离散信号的正弦幅度调制	134
8.7.2	离散信号的调制转换	136
	思考题与习题	137
第 9 章	拉普拉斯变换	139
9.1	拉普拉斯变换的导出	140
9.2	收敛域	143
9.3	拉普拉斯反变换	146
9.4	拉普拉斯变换的性质	147
9.4.1	线性	147
9.4.2	时间移位性质	148
9.4.3	s 域平移性质	148
9.4.4	时间尺度变换性质	149
9.4.5	卷积性质	150
9.4.6	时域微分性质	150
9.4.7	s 域微分性质	151

9.4.8	时域积分性质	151
9.4.9	初值与终值定理	151
9.5	基于拉氏变换的 LTI 系统分析	152
9.6	频率响应的几何求解	154
	思考题与习题	156
第 10 章	z 变换	157
10.1	z 变换的导出	158
10.2	z 变换的收敛域	160
10.3	z 反变换	163
10.4	z 变换的 Matlab 分析	165
10.5	z 变换的性质	167
10.5.1	线性	167
10.5.2	时域平移性质	167
10.5.3	z 域尺度变换	168
10.5.4	时间反转性质	169
10.5.5	时间扩展性质	170
10.5.6	共轭性质	170
10.5.7	卷积性质	170
10.5.8	z 域微分性质	171
10.5.9	初值定理	172
10.6	离散时间 LTI 系统的系统函数	172
10.6.1	因果性	172
10.6.2	稳定性	173
10.6.3	因果而且稳定	173
10.6.4	由线性常系数差分方程表征的系统	173
	思考题与习题	174
第 11 章	数字滤波器	177
11.1	离散时间系统及其信号流图表示	178
11.2	无限冲激响应滤波器	180
11.2.1	直接形式	180
11.2.2	级联形式	182
11.2.3	转置形式	182
11.3	有限冲激响应滤波器	183
11.3.1	直接形式	183
11.3.2	级联形式	183
11.4	从模拟滤波器到数字滤波器	184
11.4.1	冲激不变法 (impulse invariance method)	184

11.4.2 双线性变换 (bilinear transformation)	186
11.5 用 Matlab 设计滤波器	188
11.5.1 近似滤波器	188
11.5.2 计算滤波器的阶数	189
11.5.3 设计滤波器	192
思考题与习题	196
第 12 章 随机信号处理初步	197
12.1 随机过程	198
12.2 随机过程的统计特征	199
12.3 统计特征的频域表示	201
12.4 随机信号激励 LTI 系统	202
12.5 谱估计	204
思考题与习题	208
参考文献	209

第 1 章

信号与系统的基本概念

在进入本课程的正式学习之前，有必要先建立一些信号与系统的基本概念。本章介绍信号与系统的一些基本概念，介绍一些典型的信号，例如，正弦信号、指数信号、冲激信号和阶跃信号等，分析一些信号的基本性质，例如，周期性、奇偶性等。本章的后两节讨论系统的概念，分析系统的基本性质。

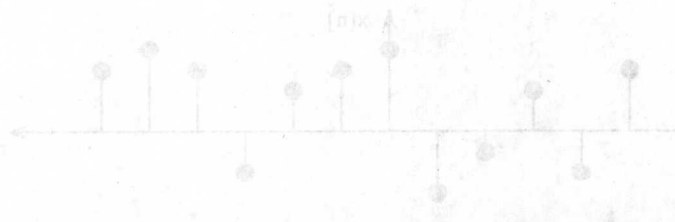


图 1-1-1 离散时间信号

1.1 信号的概念

信号 (signal) 分为确定性信号和随机信号。所谓确定性信号 (determinate signal) 就是一个函数, 该函数的独立变量 (independent variable) 或者说自变量可能是一个也可能是几个。所谓随机信号 (random signal) 就是一个随机过程。在本书中, 除第 12 章以外, 如果没有特别声明, 信号就是指确定性信号。

数学上, 信号即函数。它可能有一个独立变量, 或者多个独立变量。电压、电流作为时间 (独立变量) 的函数是典型的信号, 这是信号最常见的形式。语音信号、电压信号 $v(t)$ 和电流信号 $i(t)$ 都是一维信号 (one dimension signal), 可以用一元函数表示; 平面图像是二维信号 (two dimensions signal), 可以用二元函数表示, 图像的灰度值 $f(i,j)$ 作为直角坐标 (i,j) 的函数; 视频信号是三维信号, 可以用三元函数表示, 图像的灰度值 $f(i,j,t)$ 作为直角坐标 (i,j) 和时间 t 的函数。

本课程主要讨论一维信号的处理, 如果没有特别声明, 信号就是指一维信号。虽然信号的自变量决不局限于时间, 但是若无特殊声明, 函数的自变量都可以理解为时间变量。

进一步地, 时间信号还可以分为连续时间信号和离散时间信号。如果信号的自变量的定义域是实数域 R (本书中用 R 表示实数域), 那么, 所表示的信号就称为连续时间信号 (continuous-time signal), 或者称为模拟信号 (analog signal 或 simulated signal), 记为 $x(t)$, $t \in R$, 这就意味着, 做为自变量的时间 t 是从负无穷大到正无穷大变化的实数。将信号以时间 t 为横轴, 数值 $x(t)$ 为纵轴做出的图示, 称为信号的波形 (wave profile)。图 1-1 展示的就是一种连续时间信号 $x(t)$ 的波形。

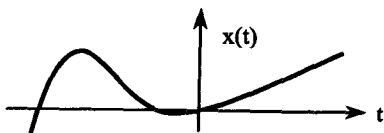


图 1-1 连续时间信号的波形

自然界中的信号大都为连续时间信号, 例如, 语音信号、温度信号、图像信号等。

如果用来表示信号的函数的自变量的定义域是整数域 Z (本书中用 Z 表示整数域), 那么, 所表示的信号称为离散时间信号 (discrete-time signal), 或者称为序列 (sequence), 记为 $x[n]$, $n \in Z$, 这就意味着, 做为自变量的时间 n 是从负无穷大到正无穷大变化的整数。图 1-2 是一个离散时间信号的波形。

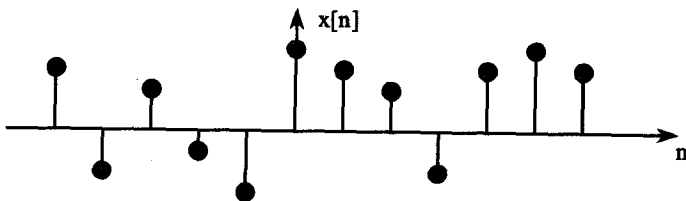


图 1-2 离散时间信号

因为离散时间信号的自变量的定义域是整数域, 因此在非整数点上, 信号的值 $x[n]$ 是无意义的, 例如, 在图 1-2 中, $x[3/2]$ 无意义。注意, 不能将无意义理解为 0。如果没有特殊说明, 在本书中, $x(t)$ 和 $x[n]$ 的值域为复数域 C (本书中用 C 表示复数域)。

特别要注意的是, 这里的“连续”只是“离散”的反义词, 与数学分析里面函数连续的概念

不一样。

许多情况下离散时间信号是由连续时间信号等间隔取样得来的，例如，数字电路中 A/D 转换器的输出就是离散时间信号。但是现实生活中，有些信号本身就是离散信号，例如，股市行情。并且，离散时间信号也并不总是要求在实际时间上等间隔。由于星期六、星期天、节假日休息，股市行情在时间上就不是等间隔的。

离散信号适合于数字化处理。但是，严格地说，离散时间信号与常说的数字信号是有区别的。这里所定义的离散时间信号的定义域是离散的，但是它的值域却可以是复数域 C 。如果将离散时间信号的值域进一步量化，并且按照某种方式进行编码，就会得到数字信号。量化所造成的误差，在有些文献中，被作为量化噪声来处理。严格地讲，最基础的数字信号是指值域为 $\{0, 1\}$ 的离散时间信号，最底层的数字硬件记录和处理的就是这种数字信号。例如，CD 光盘利用凹凸的反射性质来保存数字信号。在图 1-3 中，(a) 是数字信号、(b) 是离散时间信号、(c) 是连续时间信号。



图 1-3 不同形式的信号

在数学上，任意的两个实数之间都存在无穷多个实数。严格地讲，并不是所有的实数都可以被数字系统处理或者存储，例如，很多无理数就不行。这是由于数字系统或者数字计算机的字长是有限的。因此从严格的数学意义上来讲，本书所定义的离散时间信号，是无法在数字系统里面实现的。然而，在工程上，在量化误差可以被忽略的情况下，用计算机来处理信号时，可能意识不到这一点。往往用一个一维数组来保存一段一维信号，例如 `int MyVoice[1024]`。总之，工程上的信号处理是理论上的信号处理的一个逼近。

下面讨论一下信号的能量和功率。电信号的功率和能量的概念是十分明确的，在电路分析课程里面，当电阻上的电流和电压分别为 $i(t)$ 和 $u(t)$ 时，其消耗的功率为：

$$p(t) = u(t)i(t) = Ri^2(t) = \frac{1}{R}u^2(t) ; \text{它在时间} [t_1, t_2] \text{内消耗的能量为: } \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} Ri^2(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{R}u^2(t)dt ; \text{它在时间} [t_1, t_2] \text{内的平均功率为: } \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Ri^2(t)dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{R}u^2(t)dt .$$

借用电信号的功率和能量的概念，对于一个一般性的信号，也可以引入能量和功率的概念，这种概念已经超出了物理上的能量和功率概念的范畴。

一个连续时间信号 $x(t)$ 在时间 $[t_1, t_2]$ 内的能量 (energy) 定义为：

$$E = \int_{t_1}^{t_2} |x(t)|^2 dt \quad (1-1)$$

其中， $| \cdot |$ 是复数的模。可以将 E 理解为电压信号或者电流信号 $x(t)$ 在 1 欧姆的电阻上消耗的能量。一个离散时间信号 $x[n]$ 在区间 $[n_1, n_2]$ 内的能量定义为：

$$E = \sum_{n=n_1}^{n_2} |x[n]|^2 \quad (1-2)$$