

清华大学计算机系列教材

信号处理 原理

郑方 编著
徐明星

吴文虎 审

清华大学出版社

清
华
大
学
计
算
机
系
列
教
材

清华大学计算机系列教材

信号处理原理

郑 方 徐明星 编著
吴文虎 审

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书按非通讯专业信号处理原理基本要求,介绍信号处理的基本原理和方法。内容包括:信号的基本概念和运算,傅里叶变换、拉普拉斯变换和 Z 变换,系统及其分析方法,数字滤波器基本原理及设计方法以及其他方法简介。

图书在版编目(CIP)数据

信号处理原理/郑方,徐明星编著. 北京:清华大学出版社,2003

(清华大学计算机系列教材)

ISBN 7-302-06915-8

I. 信… II. ①郑… ②徐… III. 信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 059070 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

责任编辑:马瑛珺

印 刷 者:北京振华印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:20.5 字数:467 千字

版 次:2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-06915-8/TP·5119

印 数:1~6000

定 价:26.00 元

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

作者简历



郑方：博士，清华大学计算机科学与技术系副教授，智能技术与系统国家重点实验室语音技术中心主任。从1988年开始从事信号处理、语音识别与理解等方面的研究，负责或作为骨干人员参与研发过二十余项国家重点项目和国际合作项目，并获得科技部(委)、教育部(委)、北京市奖励和其他奖励十余次。迄今为止，他在国内外知名刊物和学术会议上发表了110余篇学术论文，其中有多篇获优秀论文奖，编著和翻译论著10余本。

曾服务于一些国际著名会议、刊物和组织，包括：中国计算机学会人工智能与模式识别专业委员会委员、中文信息学报编委、2000年ISCSLP程序委员会联席主席、2000年ISCSLP技术委员会委员、2000年东方COCOSDA国际会议的组织委员会委员、2001年全国人机语音通讯学术会议程序委员会委员、2002年ISCA的PMLA国际会议科学委员会委员、2002年SNLP-O-COCOSDA联合国际会议的组织委员会委员和国际顾问、2003年东方COCOSDA国际会议总主席、东方COCOSDA核心成员、IEEE会员、ISCA会员等。是IEEE Trans. on SAP、J. of Computer Science & Technology、中国计算机学报、声学学报、软件学报、中文信息学报、计算机研究与发展、Association of Computational Linguistics(ACL)等的审稿人。

曾应邀于2000年在美国Johns Hopkins University作访问学者，还应邀赴国际一流大学Carnegie Mellon University、Massachusetts Institute of Technology和著名研究机构及公司Analog Devices Inc., Microsoft Co., IBM Watson Research Center、Lucent Technologies Bell Laboratories等进行访问和做学术报告十余次。

从1992年开始教授“信号处理原理”，获清华大学青年教师教学优秀奖，曾任清华大学校聘骨干讲员、清华大学计算机科学与技术系教学指导委员会委员、清华大学教学指导委员会委员等。已指导了数十名博士生和硕士生，其中数名获奖，被评为系优秀研究生指导教师。是1997年北京市爱国立功标兵、1999年全国霍英东教育基金会优秀青年教师奖获得者、2000年北京市高等教育教学成果一等奖获得者和2001年北京市科技进步二等奖获得者。拥有6项发明专利和2项软件著作登记，并成功开发出许多产品。

序

清华大学计算机系列教材已经出版发行了近 30 种,包括计算机专业的基础数学、专业技术基础和专业等课程的教材,覆盖了计算机专业大学本科和研究生的主要教学内容。这是一批至今发行数量很大并赢得广大读者赞誉的书籍,是近年来出版的大学计算机教材中影响比较大的一批精品。

本系列教材的作者都是我熟悉的教授与同事,他们长期在第一线担任相关课程的教学工作,是一批很受大学生和研究生欢迎的任课教师。编写高质量的大学(研究生)计算机教材,不仅需要作者具备丰富的教学经验和科研实践,还需要对相关领域科技发展前沿的正确把握和了解。正因为本系列教材的作者们具备了这些条件,才有了这批高质量优秀教材的出版。可以说,教材是他们长期辛勤工作的结晶。本系列教材出版发行以来,从其发行的数量、读者的反映,已经获得的许多国家级与省部级的奖励以及在各个高等院校教学中所发挥的作用上,都可以看出本系列教材所产生的社会影响与效益。

计算机科技发展异常迅速、内容更新很快。作为教材,一方面要反映本领域基础性、普遍性的知识,保持内容的相对稳定性;另一方面,又需要跟踪科技的发展,及时地调整 and 更新内容。本系列教材都能按照自身的需要及时地做到这一点,如《计算机组成与结构》一书十年中共出版了三版,其他如《数据结构》等也都已出版了第二版,使教材既保持了稳定性,又达到了先进性的要求,本系列教材内容丰富、体系结构严谨、概念清晰、易学易懂,符合学生的认识规律,适合于教学与自学,深受广大读者的欢迎。系列教材中多数配有丰富的习题集和实验,有的还配备多媒体电子教案,便于学生理论联系实际地学习相关课程。

随着我国进一步的开放,我们需要扩大国际交流,加强学习国外的先进经验。在大学教材建设上,我们也应该注意学习和引进国外的先进教材。但是,计算机系列教材的出版发行实践以及它所取得的效果告诉我们,在当前形势下,编写符合国情的具有自主版权的高质量教材仍具有重大意义和价值。它与前者不仅不矛盾,而且是相辅相成的。本系列教材的出版还表明,针对某个学科培养的要求,在教育部等上级部门的指导下,有计划地组织任课教师编写系列教材,还能促进对该学科科学、合理的教学体系和内容的研究。

我希望今后有更多、更好的我国优秀教材出版。

清华大学计算机系教授,中科院院士

张钹

2002 年 6 月 28 日

· III ·

前言

本书主要介绍信号的基本概念及信号处理的基本方法。内容包括:信号的基本概念和基本运算、连续和离散时间傅里叶变换、离散傅里叶变换及其快速算法、拉普拉斯变换、Z 变换,并对连续时间和离散时间系统及其分析方法、数字滤波器的基本原理及其设计以及其他方法等进行了简单介绍。

本书采用了理论推导和应用分析相结合的方法,着重让学生掌握信号处理基本原理、分析和处理方法;配以一定量的习题和实验,通过让学生对实际的信号和系统进行变换域分析,训练学生解决实际问题的能力;通过介绍一些最新的信号处理方法,培养学生运用已掌握的信号处理知识来学习、理解和掌握新方法与新技术的能力。

本书在内容选取上,作了一番取舍。比如:考虑到以 Matlab 为代表的一批优秀的信号处理工具的出现,本书没有介绍 s 域分析中的波特图方法,因为使用 Matlab 可以方便地给出其更加准确的波形图;又比如沃尔什变换在本书也没有介绍。本书增加了对其他一些信号处理方法的简单介绍,如在图像压缩中发挥着很大作用的离散余弦变换,以及近年来信号处理领域中研究得非常活跃的分析和处理方法——卷积同态分析、梅林变换、时频分析和小波变换等。本书可供非通信专业的教学和研究参考。

本书要求的先修课程有高等数学、复变函数等课程。为了方便读者阅读,书中在为数不多的用到复变函数的地方专门做了简单的说明和解释。书中有“*”的章节属于选学部分,可根据具体要求选学。书中配有一定难度的思考题,它们对理解概念很有帮助,是专为巩固概念学习而设置的,书后附详细的参考答案。每章后附有数量和难度适中的习题(带“*”的为选做题,其余为必做题),书后附习题答案。另外,为了帮助读者快速查找本书的关键概念和术语,书后附有相关索引。

本书全文由郑方博士编写,习题由徐明星博士编写。《信号处理原理》是清华大学计算机科学与技术系的专业必修课的教材。郑方博士自 1991 年始参加该教学组并承担部分教学,从 1993 年起全面承担本课程的教学。1994 年本课程被定为清华大学信息科学与技术学院平台课。本书是作者在多年教学经验和科研工作的基础上根据非通信专业的具体要求编写而成的。清华大学郑君里教授在作者教学期间,不断给予指导和帮助,并在本书编写过程中还不断给作者以关怀、指导和鼓励,对本书的结构和内容提出了中肯的建议。清华大学吴文虎教授在作者的教学和科研中一直悉心指导,对全书进行了认真审阅,提出了宝贵的修改意见。本书的评审专家也提出了许多宝贵的建议。在此向他们表示衷心感谢。

由于作者水平有限,编写时间紧,书中错误和不当之处在所难免。诚恳希望读者不吝指正。联系地址:{fzheng,xumx}@sp.cs.tsinghua.edu.cn。

作者

2000 年 5 月·清华园

清华大学计算机系列教材

计算机操作系统教程(第2版)	张尧学 等
计算机操作系统教程(第2版)习题解答与实验指导	张尧学
PASCAL 程序设计(第2版)	郑启华
PASCAL 程序设计习题与选解(新编)	郑启华
IBM PC 汇编语言程序设计(第2版)	沈美明 等
IBM PC 汇编语言程序设计例题习题集	温冬婵 等
IBM PC 汇编语言程序设计实验教程	沈美明
计算机图形学(新版)	孙家广 等
微型计算机技术及应用(第3版)	戴梅萼
微型计算机技术及应用——习题与实验题集	戴梅萼
微型计算机技术及应用——微型机软硬件开发指南	戴梅萼
计算机组成与结构(第3版)	王爱英 等
计算机组成与设计	王 诚 等
计算机组成与设计实验指导	王 诚 等
计算机系统结构(第2版)	郑纬民 等
数据结构(第2版)	严蔚敏 等
数据结构题集	严蔚敏 等
图论与代数结构	戴一奇 等
数字逻辑与数字集成电路(第2版)	王尔乾 等
数字系统设计自动化(第2版)	薛宏熙 等
计算机图形学基础	唐泽圣 等
编译原理	吕映芝 等
数据结构(用面向对象方法与C++描述)	殷人昆 等
数据结构习题解析	殷人昆 等
计算机网络与Internet教程	张尧学 等
多媒体技术基础(第2版)	林福宗
多媒体技术基础实验指南	谢霄艳 等
数理逻辑与集合论(第2版)	石纯一 等
数理逻辑与集合论(第2版)精要与题解	王 宏 等
计算机局域网(第3版)	胡道元
信号处理原理	郑 方 等

目 录

第 1 章 基本概念	(1)
学习目标	(1)
内容摘要	(1)
预备知识	(1)
1.1 信号及其描述和分类	(1)
1.1.1 信号的概念	(1)
1.1.2 信号的描述方法	(2)
1.1.3 信号的分类	(2)
1.2 信号处理	(5)
1.2.1 数字信号处理	(5)
1.3 典型信号	(6)
1.3.1 指数信号	(6)
1.3.2 正弦、余弦信号	(6)
1.3.3 复指数信号	(6)
1.3.4 Sa 函数(抽样函数)	(6)
1.3.5 高斯信号(钟形脉冲信号)	(7)
1.3.6 单位斜变信号 $R(t)$	(8)
1.3.7 单位阶跃信号 $u(t)$	(8)
1.3.8 单位矩形脉冲信号 $G_{\tau}(t)$	(9)
1.3.9 符号函数 $\text{sgn}(t)$	(9)
1.4 单位冲激信号(δ 函数)及其性质	(10)
1.4.1 δ 函数的定义	(10)
1.4.2 δ 函数的性质	(10)
1.4.3 奇异函数	(14)
1.5 信号的基本运算	(14)
1.5.1 四则运算	(14)
1.5.2 反褶运算	(15)
1.5.3 时域平移(时移)运算	(15)
1.5.4 时域压扩运算	(16)
1.5.5 微分和积分运算	(16)
1.5.6 卷积运算	(17)
1.5.7 相关运算	(22)
1.6 信号的分解	(25)

1.6.1	直流分量与交流分量	(25)
1.6.2	偶分量与奇分量	(26)
1.6.3	实部分量与虚部分量	(27)
1.6.4	脉冲分量	(27)
1.6.5	正交函数分量	(28)
1.7	用完备正交函数集表示信号	(32)
	小结	(33)
	习题	(34)
第2章	连续时间傅里叶变换	(38)
	学习目标	(38)
	内容摘要	(38)
	预备知识	(38)
2.1	引言	(39)
2.2	周期信号的频谱分析——傅里叶级数	(39)
2.2.1	三角形式的 FS	(40)
2.2.2	复指数形式的 FS	(41)
2.2.3	奇偶信号的 FS	(42)
2.2.4	周期信号的傅里叶频谱	(43)
2.2.5	周期信号的功率	(46)
2.3	非周期信号的频谱分析——傅里叶变换	(47)
2.3.1	周期信号的频谱与非周期信号的频谱密度	(47)
2.3.2	FT 的定义	(49)
2.3.3	FT 存在的充分条件	(50)
2.3.4	FS 与 FT 比较	(50)
2.3.5	FT 及 IFT 在赫兹域的定义	(50)
2.4	典型非周期信号的 FT 频谱	(51)
2.4.1	单边指数信号	(51)
2.4.2	偶双边指数信号	(51)
2.4.3	矩形脉冲信号	(52)
2.4.4	符号函数	(54)
2.5	冲激信号和阶跃信号的 FT	(55)
2.5.1	冲激信号	(55)
2.5.2	阶跃信号	(55)
2.6	FT 的性质	(56)
2.6.1	线性性	(56)
2.6.2	奇偶虚实性	(57)
2.6.3	反褶和共轭性	(58)

2.6.4	对偶性	(59)
2.6.5	尺度变换特性	(60)
2.6.6	时域平移(时移)特性	(61)
2.6.7	频域平移(频移)特性	(63)
2.6.8	微分特性	(65)
2.6.9	积分特性	(66)
2.6.10	卷积定理	(66)
2.6.11	时域相关性定理	(68)
2.6.12	帕斯瓦尔定理	(69)
2.7	周期信号的 FT	(69)
2.7.1	正余弦信号的 FT	(70)
2.7.2	一般周期信号的 FT	(70)
2.8	抽样信号的 FT 及抽样定理	(73)
2.8.1	抽样信号的 FT	(74)
2.8.2	时域抽样定理	(74)
2.8.3*	矩形脉冲抽样	(76)
2.8.4*	频域抽样定理	(78)
2.9*	因果实信号的傅里叶变换及希尔伯特变换	(78)
2.10*	连续时间系统及其频域分析	(79)
2.10.1	连续时间系统	(79)
2.10.2	LTI 连续时间系统的频率响应	(81)
2.10.3	无失真传输与群时延	(84)
2.10.4	模拟滤波器及理想低通滤波器	(85)
	小结	(87)
	习题	(88)
第 3 章	拉普拉斯变换简介	(94)
	学习目标	(94)
	内容摘要	(94)
	预备知识	(94)
3.1	引言	(94)
3.2	拉普拉斯变换(LT)的定义	(95)
3.3	LT 的收敛域(ROC)	(97)
3.4	LT 的基本性质	(100)
3.5	拉氏变换的逆变换——逆拉氏变换	(104)
3.6	周期信号与抽样信号的 LT	(105)
3.6.1	周期信号的 LT	(105)
3.6.2	抽样信号的 LT	(106)

3.7*	LT 与 FT 的关系	(106)
3.7.1	由双边 LT 求 FT	(107)
3.7.2	由单边 LT 求 FT	(107)
3.8*	连续时间系统的 s 域分析	(108)
3.8.1	系统的传递函数及其零极点	(108)
3.8.2	系统的传递函数与系统的频率响应	(110)
3.8.3	系统传递函数的零极点分布对系统性能影响	(111)
3.8.4	全通系统与最小相位系统	(113)
	小结	(115)
	习题	(115)

第 4 章	Z 变换	(117)
	学习目标	(117)
	内容摘要	(117)
	预备知识	(117)
4.1	引言	(117)
4.2	Z 变换的定义	(118)
4.3	ZT 收敛域	(119)
4.3.1	有限长序列的 ROC	(120)
4.3.2	右边序列的 ROC	(121)
4.3.3	左边序列的 ROC	(121)
4.3.4	双边序列的 ROC	(122)
4.3.5	ZT 的 ROC 及其零极点	(123)
4.4	常用序列及其 ZT	(123)
4.4.1	单位冲激序列 $\delta(n)$	(124)
4.4.2	单位阶跃序列 $u(n)$	(124)
4.4.3	矩形脉冲序列 $G_N(n)$	(124)
4.4.4	单位斜变序列 $nu(n)$	(125)
4.4.5	单边指数序列 $a^n u(n)$	(125)
4.4.6	单边正、余弦序列	(126)
4.4.7	利用已知序列的 ZT 求解一般序列的 ZT	(126)
4.5	ZT 的性质	(127)
4.5.1	线性性	(127)
4.5.2	时域平移性	(128)
4.5.3	时域扩展性	(129)
4.5.4	时域共轭性	(130)
4.5.5	z 域尺度变换(或序列指数加权)性	(130)
4.5.6	z 域微分(或序列线性加权)性	(131)

4.5.7	初值定理	(131)
4.5.8	终值定理	(132)
4.5.9	时域卷积定理	(133)
4.5.10	z 域卷积定理	(134)
4.5.11	帕斯瓦尔定理	(135)
4.5.12	ZT 性质总结	(136)
4.6	逆 Z 变换的求解	(137)
4.6.1	部分分式展开法	(138)
4.6.2	幂级数展开法	(139)
4.6.3	留数法	(140)
4.7	离散时间系统	(143)
4.7.1	离散时间系统及其分类	(143)
4.7.2	LTI 离散时间系统的表示方法	(143)
4.7.3	离散时间系统响应的 ZT 法求解	(144)
4.7.4	离散时间系统的传递函数	(145)
4.7.5	传递函数零极点分布对特性的影响	(147)
4.7.6	序列的傅里叶变换——离散时间傅里叶变换	(149)
4.7.7	离散系统的频率响应	(158)
4.7.8*	无失真传输系统、全通系统与最小相位系统	(164)
4.8	数字滤波器	(168)
4.8.1	数字滤波器的基本原理	(168)
4.8.2	数字滤波器的分类	(169)
4.8.3*	数字滤波器的设计	(172)
	小结	(183)
	习题	(184)
第 5 章	离散傅里叶变换及其快速算法	(191)
	学习目标	(191)
	内容摘要	(191)
	预备知识	(191)
5.1	引言	(191)
5.2	离散傅里叶变换(DFT)的推导	(192)
5.2.1	时域抽样	(192)
5.2.2	时域截断	(193)
5.2.3	时域周期延拓	(193)
5.2.4	时域处理后信号的连续时间傅里叶变换	(194)
5.3	离散傅里叶变换及其逆变换的定义	(197)
5.4	离散谱的性质	(199)

5.4.1	W_N 的性质	(199)
5.4.2	离散谱的性质	(199)
5.4.3	DFT 的总结	(201)
5.5	DFT 的性质	(203)
5.5.1	线性性	(203)
5.5.2	奇偶虚实性	(203)
5.5.3	反褶和共轭性	(205)
5.5.4	对偶性	(205)
5.5.5	时移性	(205)
5.5.6	频移性	(206)
5.5.7	时域离散圆卷积定理	(206)
5.5.8	频域离散圆卷积定理	(207)
5.5.9	时域离散圆相关定理	(207)
5.5.10	IDFT 的另一种形式	(207)
5.5.11	帕斯瓦尔定理	(207)
5.6*	有限长序列的 DFT、ZT 及 DTFT 的关系	(208)
5.7	快速傅里叶变换	(212)
5.7.1	直接 DFT 计算的复杂度	(212)
5.7.2	FFT 的推导	(212)
5.7.3	FFT 算法特点及流程	(215)
5.7.4	FFT 复杂度分析	(216)
5.7.5*	FFT 算法的进一步改进	(217)
5.7.6	DFT 应用中的实际问题	(218)
	小结	(223)
	习题	(223)

第 6 章*	二维傅里叶变换及其他分析方法	(228)
	学习目标	(228)
	内容摘要	(228)
	预备知识	(228)
6.1	引言	(228)
6.2	二维傅里叶变换	(229)
6.2.1	二维连续傅里叶变换	(230)
6.2.2	二维离散傅里叶变换	(235)
6.3	离散余弦变换	(239)
6.3.1	一维离散余弦变换	(239)
6.3.2	二维离散余弦变换	(243)
6.4	卷积同态系统和倒谱分析	(247)

6.5	梅林变换	(249)
6.6	时频表示	(253)
6.7	小波变换	(255)
6.7.1	连续小波变换	(255)
6.7.2	多分辨率分析	(256)
6.7.3	小波变换在语音信号处理中的应用	(257)
	小结	(258)
	习题*	(258)
参考文献		(260)
附录 1 连续傅里叶变换表		(262)
附录 2 双边拉普拉斯变换表		(264)
附录 3 双边 Z 变换表		(265)
附录 4 有理分式的部分分式展开法		(267)
附录 5 经典的模拟低通滤波器		(270)
附录 6 思考题参考答案		(276)
附录 7 习题参考答案		(288)
附录 8 教学建议		(296)
概念和术语索引		(297)

第1章 基本概念

学习目标

掌握信号和信号处理的基本概念,为学习后续章节打下基础。

内容摘要

本章介绍信号和信号处理的基本概念;介绍信号的描述方法和分类体系;介绍一些经典的信号(包括指数信号、正余弦信号、复指数信号、Sa函数、高斯函数、单位斜变信号、单位阶跃信号、矩形脉冲信号、符号函数等)以及单位冲激信号(δ 函数)的定义,并重点介绍 δ 函数的性质;复习一些信号的基本运算[包括四则运算、反褶、时移、压扩(时间比例性)、微分和积分、卷积、相关等],并重点学习卷积和相关运算的重要性质;复习信号的一些分解方法(包括直流交流分解、奇偶分量分解、脉冲分量分解、虚实部分解),引出函数的正交函数分量分解方法;最后,给出完备正交函数集的定义、实例和用它们表示信号的方法。

预备知识

高中数学中函数的基本运算。

1.1 信号及其描述和分类

1.1.1 信号的概念

一个信号(signal) $f(t)$ 或 $f(n)$,它可以代表一个实际的物理信号,也可以是一个数学上的函数(function)或序列(sequence)。比如 $f(t) = K \sin(\omega t)$,它既是正弦信号,也是正弦函数;而数字化了的语音信号序列 $f(n)$ 则是蕴含了人类语音信息的语音信号,同时在数学上也可以看成是一个序列。因此本书也常常把“信号”与连续情形下的“函数”或离散情形下的“序列”等同起来。

现实世界中的信号有两种:一种是自然和物理信号,如语音、图像、地震信号、生理信号等;另一种是人工产生信号经自然的作用和影响而形成的信号,如雷达信号、通讯信号、医用超声信号和机械探伤信号等。

不管是哪种形式的信号,它总是蕴含一定的信息。比如,图像信号含有丰富的图像信息,包括物体、颜色、明暗等。又比如,人们通过研究地震波信号,可以推断出震源、震级等信息。因此可以这样说:信号是信息的表现形式,信息(information)则是信号的具体内容。

1.1.2 信号的描述方法

数学上,信号可以描述为一个或若干个自变量的函数或序列的形式。比如信号 $f(t)$, 其中 t 是抽象化了的自变量,它可以是时间,也可以是空间。为叙述方便,本书称单自变量的一维(或称一元)信号为时间信号,而两个自变量的二维(或称二元)信号为空间信号。需要指出的是,这里的时间和空间是抽象化了的概念。

信号的另外一种描述方式是波形(waveform)描述。按照函数随自变量的变化关系,可以把信号的波形画出来。和信号的函数或序列表达式描述方式相比,波形描述方式更具一般性。有些信号,虽然无法用某个闭式数学函数或序列描述,但却可以画出它的波形图。

随着本书内容的深入,我们还可以发现,频谱也是信号的描述方法之一,它是频率的函数,可以与表示信号的函数或序列一一对应。如果信号的频谱不是恒定的而是随时间变化的,那么可以用“时频表示”更加准确地描述信号的频谱分布和变化,它是时间和频率的二元函数。但是,我们更愿意称这种描述方法为分析方法或处理方法。

1.1.3 信号的分类

对于信号,我们可以从几个不同的角度进行分类。

1. 确定性信号与随机信号

若信号可以由一确定的数学表达式所表示,或者信号的波形是惟一确定的,这种信号就是确定性信号。反之,如果信号具有不可预知的不确定性,则称之为随机信号或不确定性信号。任意给定一个自变量的值,对确定性信号,我们可以惟一确定其信号的取值;而对随机信号,其取值却是不确定的。随机信号不在本书的讨论范围之内,本书以后所说的信号一般都是指确定性信号。

2. 周期信号与非周期信号

若一个信号 $f(t)$ 满足下面的关系

$$f(t) = f(t + T), \quad \forall t \in R \quad (1-1)$$

则称之为周期信号(periodic signal),其中满足式(1-1)的正的最小 T 值称为该信号的基波周期(fundamental period),简称周期。显然,周期信号的波形是按宽度 T 周期重复的,周期信号是无始无终信号。图 1-1(a)是周期信号的一个例子。

如果一个信号不是周期信号,那么它就是非周期信号(aperiodic signal)。非周期信号可以看成是周期信号在周期趋于无穷大时的特例。

有一类特殊的非周期信号,我们称之为准周期信号(quasi-periodic signal),它们并不是周期信号,但是在一定的时间范围内,其波形具有一定的周期性,只不过周期是变化的,而且两个周期内的波形也只是相似而不是完全相同。比如汉语拼音“a”,如果把它的波形画出来,可以看出它具有一定的准周期性,图 1-1(b)中是汉语拼音“a”开始部分的波形。事实上,元音都表现出这种准周期性。

同样,若一个只在整数点取值的信号 $f(n)$ (即序列,这是后面将要介绍的时间离散

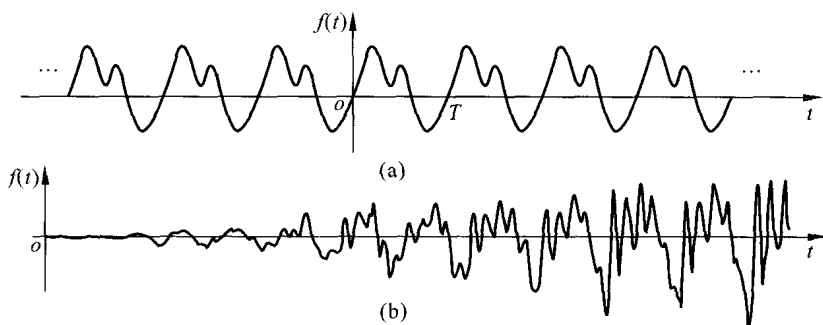


图 1-1 一个周期信号(a)和一个准周期信号(b)的波形图

信号), 满足

$$f(n) = f(n + N), \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (1-2)$$

则 $f(n)$ 是周期信号(周期序列), 其中满足式(1-2)的正的最小 N 值称为该信号的基波周期, 简称周期。

3. 时间连续信号与时间离散信号

在自变量的整个连续区间内都有定义的信号是时间连续信号或连续时间信号(continuous-time signal), 简称连续信号。需要说明的是, 这里的“连续”指的是定义域, 信号的值域可以是连续的, 也可以不是连续的。例如 $f(t) = 5 \cos t$ 就是时间连续信号, 且其定义域 $(-\infty, \infty)$ 和值域 $[-5, 5]$ 都是连续的。

仅在一些离散的点上才有定义的信号称为时间离散信号或离散时间信号(discrete-time signal), 简称离散信号。同样, 这里的“离散”指的是定义域, 其值域可以是连续的, 也可以是不连续的。

一个时间离散信号 $f(n)$, 其信号源可能本来就是离散的。例如 $f(n)$ 表示某个人在年龄 n 时的平均体重, 显然这里自变量 n 只能是离散的整数。但在大部分情况下, 时间离散信号是由时间连续信号经过采样后得到的。比如, 对连续信号 $f(t)$, 我们每间隔 T_s 取一个值, 就可以得到 $\tilde{f}(n) = f(nT_s)$ ($n \in \mathbb{Z}$)。正如 1.1.1 节所述, 通常, 时间离散信号也可以称为序列。当然时间连续信号(函数)和时间离散信号(序列)都可以称为信号。

4. 模拟信号与数字信号

模拟信号(analog signal)是指定义域和值域均连续的信号, 因此模拟信号肯定是时间连续信号。

而数字信号(digital signal)是指定义域和值域均离散的信号, 因此数字信号肯定是时间离散信号。数字信号一般都是通过把模拟信号经过模数转换(analog-to-digit conversion, ADC)后得到。通常, ADC 每隔一个时间间隔 T_s 取模拟信号 $f(t)$ 的一个采样 $f(nT_s)$, 再把该取值量化成为一些离散的数值。例如, 计算机中的声卡就是按每秒 8000 个样点(即采样率为 8kHz)或每秒 16000 个样点(采样率为 16kHz)等的速率把声音电信号的取值转换为 16b 或 8b 宽度的整数。