

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

信号处理原理

郑方 徐明星 编著
吴文虎 审

清华大学出版社

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。

书 名: 信号处理原理

作 者: 郑 方 徐明星 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www .tup .tsinghua .edu .cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

印刷者: 北京市顺义振华印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张:20 25 字数: 465 千字

版 次: 2000 年 9 月第 1 版 2003 年 6 月第 7 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04039-7/ TN·114

印 数: 31001~35000

定 价: 26.00 元

序

我们正处在跨越世纪的门槛上,人类社会在一股股变革性力量的推动下发生着根本性的变化。知识经济时代的到来向我们显示,一个国家最重要的资源已经不再是土地、劳动力或资本,而是其国民的知识和创造力;国与国的竞争虽然常常表现为政治、经济或军事实力的较量,但归根到底已是一场教育和科技的竞争。换言之,国家的综合实力将主要由其国民的教育水平来决定。一时间,世界各国的校长们、跨国企业的巨头们乃至许多的政府首脑们都在纷纷议论 21 世纪的教育,以迎接知识经济的挑战。我们中华民族有着蜿蜒几千年的文明,为在世界民族之林重振雄风,再展辉煌,发出了时代的特强音:实施科教兴国,提高全民素质。从中央领导到广大群众,都对教育提出了更高的要求,寄予了更大的希望,同时也给予了更多的支持。人们在这方面的思想观念和实践探索正在以空前的速度发展着。

中国的高等教育已经走完了一个世纪的路程。已经过去的 20 世纪正是它从无到有、从小到大、由产生到发展的一段百年历史。中国人民在短短的数十年时间里构筑了资本主义国家好几百年才形成的高等教育体系,涌现出一批高水平的学校,培养了一大批高层次优秀人才,取得了辉煌的成就。但是在新时期,教育不适应现代化建设需要的矛盾不断显露,我国劳动者受教育水平普遍较低的现象无法面对新世纪的机遇和挑战,我国高等教育的发展现状也难以满足广大人民群众空前强烈的受教育愿望。一代伟人邓小平早在十年前就一针见血地指出,我们的最大失误是教育,一是放松了对青少年的思想道德教育,二是教育规模发展不够快。现在看来,这两个问题依然是症结所在。一个十二亿人口的泱泱大国,高等学校的毛入学率仅 10% 左右,实在很不相称。我国的高等教育已经面临着大力发展、高速发展、从根本上改变落后状态的紧迫问题。

令人欣慰和鼓舞的是中国有一所全世界最大的大学——中国广播电视大学,上百万的学生遍布在九百六十万平方公里的辽阔土地上。它突破传统教育在空间上的限制,不断减弱时间上的束缚,以覆盖面广、全方位为各类社会成员提供教育服务的优势,成为中国高等教育体系中的一个重要组成部分。二十多年来,它为实现高等教育大众化,为提高我国劳动者的整体素质,为变巨大的人口包袱为巨大的人力资源,以形成浩浩荡荡的高水平建设大军,发挥了不可磨灭的作用。最近,中央电大又有重大改革举措,进一步面向社会开展了“开放教育”等项试点工作,在教育思想、招生对象、培养模式、管理机制方面进行新的探索。尤其引人注目的是中央电大与国内的一些重点高校形成了紧密的合作关系,携手为我国现代远程教育开拓新路。重点高校有学科和教学上的优势,它们的加盟有利于电大提高教学质量、办出特色;而中央电大有很丰富的教育资源,有完整的办学系统,有一支富有经验的教学与管理队伍,特别是有较强的社会服务意识和人才市场意识,这对于需要进一步向社会开放的普通高校而言,又有许多值得学习和借鉴之处。我们完全有理由相信,中央电大和重点高校的结合,不仅可以在现阶段实现优势互补、资源共享,而且有

可能成长出一种符合我国国情发展教育的最具潜力的新型教育模式。

现在摆在我们面前的这套中央广播电视大学本科(专科起点)“计算机科学与技术”专业教材,就是中央电大和清华大学合作的产物。在开放教育试点启动之际,在计算机及其网络技术日新月异、其爆炸式发展和神话般应用使人们眼花缭乱、不知所措之时,在我国至少缺乏数十万计算机软件及网络技术人才的当口,这套教材像雪里送炭,像清风送爽,终于在人们的企盼和惊喜中问世了。它确实及时和解渴。教材的编者是清华大学计算机系一批学术水平高、教学经验丰富的教授,他们以知识、能力和素质的全面训练为目标,将教材的先进性、实用性和可读性融为一体。教材纲目清楚,重点突出,深入浅出,便于自学。书中每章有小结,章章有习题,有的还配有实验指导和习题解答,不仅对计算机专业学生适用,其他专业的学生也可以此入门。清华大学的老师们还准备为这套教材制作多媒体导读光盘和网络辅导教材,指明教学基本要求,区分应该熟练掌握和只需一般了解的内容,并进行重点难点分析和讲解。这全套的教材称得上是难得的好书。

对于中国广播电视大学我是颇有感情的,不只是因为它过去的功绩和带给人们未来的曙光,还因为我本人二十年前也曾参与过中央电大《电子技术基础》课程的教学工作。那时我收到许多电大学生热情洋溢的来信,强烈感受到他们对知识与教育的渴求,感受到他们学习的艰辛和坚韧不拔的毅力,同时也感受到了广大学生对我的信任和鼓励。当年的电大学生如今多数已成为我国经济建设和社会发展中的骨干,一些人后来获得了博士学位,有的已成为我国重点大学的教授。中央电大的成功实践已在社会上赢得了很好的声誉,而当前扩大教育规模、构建终身学习体系的社会呼唤又给电大今后的发展提供了新的难得的机遇。近年来,信息网络与多媒体技术突飞猛进,也使电大的远程教育形式跃上了现代化的新台阶。这次中央电大和清华大学合作,共同在计算机专业开放教育改革试点中付出了辛勤的劳动,播下了希望的种子。我期待着中央电大有更多的创新,更大的发展,更加充满活力。我也殷切希望电大的学生们为中华民族的强盛而自强不息,学有所成。

努力吧,中国广播电视大学一定能成为中国教育界一颗璀璨的明珠。

清华大学副校长、教授

二 年八月于北京

前 言

《信号处理原理》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,如在图象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非常活跃的分析 and 处理方法——卷积同态分析、梅林变换、时频分析和小波变换等。从内容安排上,本书可供非通讯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。书中打“*”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。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讯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

目 录

序	()
前言	()
第 1 章 基本概念	(1)
学习目标	(1)
内容摘要	(1)
教学建议	(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)	(7)
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 $G(t)$	(9)
1.3.9 符号函数 $\text{sgn}(t)$	(9)
1.4 单位冲激信号(函数)及其性质.....	(10)
1.4.1 函数的定义	(10)
1.4.2 函数的性质	(11)
1.4.3 奇异函数	(14)
1.5 信号的基本运算.....	(15)
1.5.1 四则运算	(15)
1.5.2 反褶运算	(15)
1.5.3 时域平移(时移)运算	(16)
1.5.4 时域压扩运算	(16)
1.5.5 微分和积分运算	(17)

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.....	(31)
	小结.....	(33)
	自我评测.....	(34)
	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)
	教学建议.....	(38)
2 1	引言.....	(39)
2 2	周期信号的频谱分析——傅里叶级数(FS)	(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(FT)	(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	(54)
2 5 1	冲激信号	(54)
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	(56)
2.6.3	反褶和共轭性	(58)
2.6.4	对偶性	(58)
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	(73)
2.8.2	时域抽样定理	(75)
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)
	自我评测	(87)
	习题	(87)

第 3 章	拉普拉斯变换简介	(94)
	学习目标.....	(94)
	内容摘要.....	(94)
	教学建议.....	(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)
	自我评测	(115)
	习题	(115)
第 4 章	Z 变换	(117)
	学习目标	(117)
	内容摘要	(117)
	教学建议	(117)
4.1	引言	(118)
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(DTFT).....	(149)
4 7 7	离散系统的频率响应.....	(157)
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)
	自我评测.....	(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)
	教学建议.....	(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	(204)
5.5.3	反褶和共轭性	(205)
5.5.4	对偶性	(205)
5.5.5	时移性	(206)
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	(208)
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)
	自我评测	(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)
	教学建议	(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(2D-CFT)	(230)
6.2.2	二维离散傅里叶变换(2D-DFT)	(235)
6.3	离散余弦变换	(239)
6.3.1	一维离散余弦变换(1D-DCT)	(239)
6.3.2	二维离散余弦变换(2D-DCT)	(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	(258)
	小结	(258)
	习题*	(258)
附录 1	连续傅里叶变换表	(260)
附录 2	双边拉普拉斯变换表	(262)
附录 3	双边 Z 变换表	(263)
附录 4	有理分式的部分分式展开法	(265)
附录 5	经典的模拟低通滤波器	(268)
附录 6	思考题参考答案	(274)
附录 7	习题参考答案	(286)
	参考文献	(294)
	概念和术语索引	(296)

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(函数)的定义,并重点介绍函数的性质;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。

教学建议

预备知识:高中数学中函数的基本运算。

课内学时:7学时。

教学进度:信号及其描述和分类、信号处理:1课时;

典型信号:1课时;

单位冲激信号及其性质:1课时;

信号的基本运算:2课时;

信号的分解、用完备正交函数集表示信号:2课时。

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、图象、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,图象信号含有丰富的图象信

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,或者信号的波形是唯一确定的,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,我们可以唯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

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

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

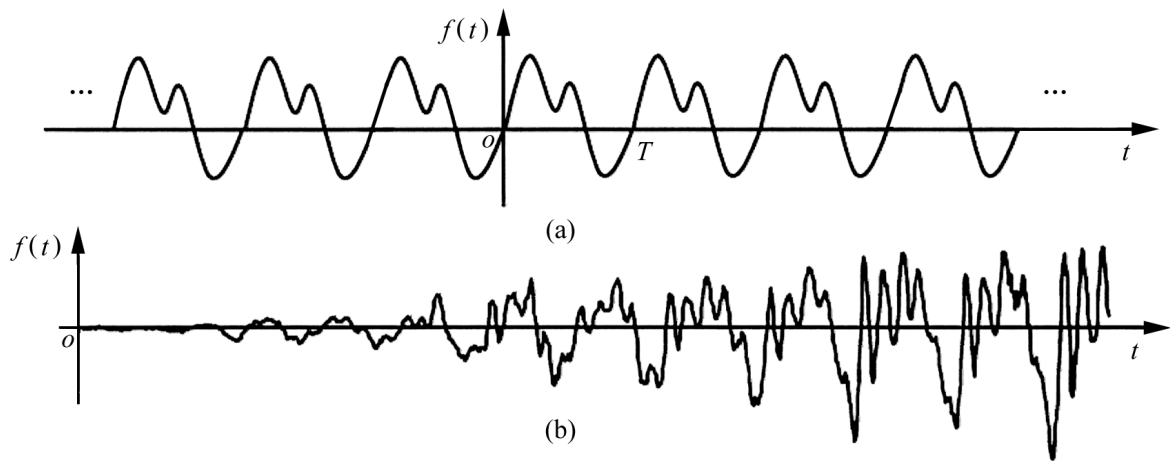


图 1-1 一个周期信号(a)和一个准周期信号(b)的波形图

信号), 满足

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

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 8 000 个样点(即采样率为 8kHz)或每秒 16 000 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。

本书中,为统一起见,把一维时间连续信号(含模拟信号)的自变量记为 t ,相应离散信号(含数字信号)的自变量记为 n ;把二维时间连续信号(含模拟信号)的自变量记为 x 和 y ,相应离散信号(含数字信号)的自变量记为 m 和 n 。

由于幅度的量化对数字信号处理的影响不是本书的重点,故本书只涉及与幅值量化无关的连续信号和离散信号。

5. 因果信号与非因果信号

如果一个信号只在自变量的非负半轴左闭区间 $[0, \infty)$ 才取非零值,而在 $(-\infty, 0)$ 开区间内取值均为 0,那么这样的信号就称为“因果信号(**causal signal**)”,否则就称为“非因果信号”。使用“因果”这一术语的目的,主要是为了表明我们无法产生一个信号,它甚至在无穷远的过去都有值。

为叙述方便,我们称在自变量的正半轴开区间 $(0, \infty)$ 取值均为 0 的信号为“反因果信号(**anticausal signal**)”。显然,一个在整个自变量区间都存在非零值的信号,可以表示成为一个因果信号和一个反因果信号的和。

特别地,对于离散时间信号,我们可以将因果信号、非因果信号和反因果信号分别改称为“因果序列”、“非因果序列”和“反因果序列”等。

6. 能量信号和功率信号

对连续信号 $f(t)$ 和离散信号 $f(n)$ 我们分别定义它们的“能量(**energy**)”为

$$E[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (1-3)$$

$$E[f(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |f(n)|^2 \quad (1-4)$$

其中 $|\cdot|$ 表示取模运算,显然对于实数的取模等于实数的绝对值 $|\cdot|$,而对复数的取模可以表示为它本身与其共轭的乘积的平方根,即

$$|C| = \sqrt{C \cdot C^*}, \text{ 或 } |C|^2 = C \cdot C^* \quad (1-5)$$

如果一个信号其能量是有限的,即 $E[\cdot] < \infty$,则称之为“能量有限信号(**energy-limited signal**)”,简称能量信号。

对于能量无限的信号,如非零周期信号,我们往往研究它的功率。信号的功率分别定义为:

$$P[f(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (1-6)$$

$$P[f(n)] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |f(n)|^2 \quad (1-7)$$

若信号的功率是有限的,即 $P[\cdot] < \infty$,则称之为“功率有限信号(**power-limited signal**)”,简称功率信号。

考虑到数学上 $|\cdot|$ 与 $|\cdot|$ 都可以表示数的取模运算,本书常常把两者混同使用。