



● 普通高等学校信息与计算科学专业系列丛书



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

数字信号处理 简明教程

程乾生 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等学校信息与计算科学专业系列丛书

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

数字信号处理简明教程

程乾生 编著

高等教育出版社

内容提要

本书主要讲述数字信号处理的最基本的概念、原理及方法,内容精简,道理明晰。全书主要内容包括:信号频谱和傅氏变换、离散信号和抽样定理、滤波与褶积及Z变换、线性时不变滤波器和系统、有限离散傅氏变换、有限长脉冲响应滤波器和窗函数、递归滤波器及其设计等。

本书系统性强,论证严谨,富有启发性,并且叙述深入浅出,通俗易懂,例题丰富,问题都有详细解答,既便于教师教学,又便于读者自学。

本书可以作为高等院校信息与计算科学专业本科生的教材或参考书,也可供电子信息科学类的师生以及与信号处理相关的科研与工程技术人员使用或参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理简明教程/程乾生编著. —北京:高等教育出版社, 2007. 3

ISBN 978-7-04-020459-9

I. 数… II. 程… III. 数字信号-信号处理-高等学校-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第012861号

策划编辑 张长虹 责任编辑 董达英 封面设计 赵阳 责任绘图 吴文信
版式设计 马静如 责任校对 朱惠芳 责任印制 尤静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京四季青印刷厂		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2007年3月第1版
印 张	15.25	印 次	2007年3月第1次印刷
字 数	280 000	定 价	19.40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 20459-00

信息与计算科学专业系列教材编委会

顾 问 李大潜 刘应明

主 任 徐宗本

副主任 王国俊 马富明 胡德焜

委 员 (以姓氏笔画为序)

韦志辉 叶中行 白峰杉 羊丹平 孙文瑜

吕 涛 阮晓青 陈发来 沈世镒 陈 刚

张志让 吴 微 柳重堪 凌永祥 徐 刚

徐树方 黄象鼎 雍炯敏

秘 书 李水根 王 瑜

总 序

根据教育部 1998 年颁布的普通高等学校专业目录,“信息与计算科学”专业被列为数学类下的一个新专业(它覆盖原有的计算数学及其应用软件、信息与运筹控制等专业)。这一新专业的设置很好地适应了新世纪以信息技术为核心的全球经济发展格局下的数学人才培养与专业发展的需要。然而,作为一个新专业,对其专业内涵、专业规范、教学内容与课程体系等有一个自然的认识与探索过程。教育部数学与统计学教学指导委员会数学类专业教学指导分委员会(下称教指委)经过过去两年艰苦细致的工作,对这些问题现在已有了比较明确的指导意见,发表了《关于信息与计算科学专业办学现状与专业建设相关问题的调查报告》及《信息与计算科学专业教学规范》(讨论稿)(见《大学数学》第 19 卷 1 期(2003))。为此,全国高等学校教学研究中心在承担全国教育科学“十五”国家级规划课题——“21 世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,根据教指委所颁布的新的教学规范,组织国内各高校的专家教授,进行其子项目课题“21 世纪中国高等学校信息与计算科学专业教学内容与课程体系的创新与实践”的研究与探索。为推动本专业的教材建设,该项目课题小组与高等教育出版社联合成立了“信息与计算科学专业系列教材编委会”,邀请有多年教学和科研经验的教师编写系列教材,由高等教育出版社独家出版,并冠以教育科学“十五”国家规划课题研究成果。

按照新的《信息与计算科学专业教学规范》(讨论稿),信息与计算科学专业是以信息技术和计算技术的数学基础为研究对象的理科类专业。其目标是培养学生具有良好的数学基础和数学思维能力,掌握信息与计算科学基础理论、方法与技能,受到科学研究的训练,能解决信息技术和科学与工程计算中的实际问题的高级专门人才。毕业生能在科技、教育、信息产业、经济与金融等部门从事研究、教学、应用开发和管理工 作,能继续攻读研究生学位。根据这一专业目标定位和落实“强基础、宽口径、重实际、有侧重、创特色”的办学指导思想,我们认为,本专业在数学基础、计算机基础、专业基础方面应该得到加强,各学校在这三个基础方面可大体一致,但专业课(含选修课)允许各校自主选择、体现各自特点。考虑到已有大量比较成熟的数学基础与计算机基础课程教材,本次教材编写主要侧重于专业基础课与专业课(含选修课)方面。

信息与计算科学,就其范畴与研究内容而言,是数学、计算机科学和信息工

程等学科的交叉,已远远超出数学学科的范畴。但作为数学学科下的一个理科学专业,信息与计算科学专业则主要研究信息技术的核心基础与运用现代计算工具高效求解科学与工程问题的数学理论与方法(或更简明地说,研究定向于信息技术与计算技术的数学基础),这一专业定位明显地与计算机科学与信息工程专业构成区别。基于这一定位,信息与计算科学专业可包括信息科学与科学计算(计算数学)两个大的方向。科学计算方向在我国已有长期的办学经验,通常被划分为偏微分方程数值解、最优化理论与方法、数值逼近与数值代数、计算基础等学科子方向。然而,对于信息科学,它到底应该怎样划分学科子方向?应该怎样设置专业与专业基础课?所有这些都仍是正在探索的问题。

任何技术都可以认为是延伸与扩展人的某种功能的方式与方法,所以信息技术可以认为是扩展人的信息器官功能的技术。人的信息器官主要包括感觉器官、传导器官(传导神经网络)、思维器官和效应器官四大类型,其功能则主要是信息获取、信息传输、信息处理和信息应用(控制),因而感测技术、通信技术、智能技术与控制技术通常被认为是最基本的信息技术(常称之为信息技术的四基元),其他信息技术可认为是这四种基本技术的高阶逻辑综合或分解衍生。所以可以把信息科学理解为是“有关信息获取、信息传输、信息处理与信息控制基础的科学”。从这个意义上,我们认为:信息处理(包括图像处理、信号分析等)、信息编码与信息安全、计算智能(人工智能、模式识别等)、自动控制等可构成信息科学的主要学科子方向。这一认识也是教指委设置信息与计算科学专业信息科学方向课程的基本依据。

本系列教材正是基于以上认识,为落实新的《信息与计算科学专业教学规范》(讨论稿)而组织编写的。我们相信,该系列教材的出版对缓解本专业教材的紧缺局面,对推动信息与计算科学专业的快速与健康发展会大有裨益。

从长远的角度看,为适应不同类型院校和不同层次要求的课程需求,本系列教材编委会还将不断组织教材的修订和编写新的教材,从而使本专业的教学用书做到逐步充实、完善和多样化。我们诚恳地希望使用本系列教材的教师、同学们及广大读者对书中存在的问题及时指正并提出修改意见和建议。

信息与计算科学专业系列教材编委会

2003年8月31日

前 言

信号处理作为信息科学的一个分支,已经渗透到科学技术的各个领域,甚至渗透到社会科学的许多领域。信号处理作为一门课程,也渗透到高等学校的许多专业领域,因此,信号处理方面的教材也随之大量涌现。在我国大学本科的许多专业中,信号处理只是一学期的课程,而且学时还不多。虽然教材品种很多,但质量参差不齐,在这种情况下,出版一本数字信号处理简明教程就是非常必要的了。

简明教程的简明应体现在哪里呢?应体现在:内容简,道理明。

内容简的“简”不是简单的“简”,而是精简的“简”。在内容选取上,要选择最基础、最重要的概念、理论和方法,以便为进一步的研究和应用打下基础。我们选择傅里叶分析(或称频谱分析)和滤波两个内容为线索贯穿全书始终。这样的内容选择对于大学本科的数字信号处理课程是合适的。

道理明是力求让读者知其然,也知其所以然。要做到这一点很不容易,除了在写法上要深入浅出、通俗易懂外,更重要的是了解读者的知识背景,在他们已有的知识基础上,把问题分析清楚。我们要求读者所具备的数学知识并不高,只要有大学工科本科生所具有的高等数学知识就行了。例如,有许多教材用一种广义函数——冲激函数来分析抽样问题,这些教材包括了如奥本海姆等的最新著名教材^[1],当然国内的教材也不少^{[2]-[7]}。然而在一般工科高等数学的教材里是不包含冲激函数内容的,所以我们坚持在一般高等数学知识背景下分析抽样问题。

如果说1965年快速傅氏变换算法(FFT)的出现(参见第五章)标志着数字信号处理作为一门学科的诞生,那么它已经历了四十年的历程了。然而奇怪的是,在本书写作过程中,我们发现,对于信号处理的一些基本问题,如奈奎斯特抽样定理,由于缺乏严格论述,以至于国内外许多教材对其的论述都是存在问题的。对带限信号而言,最大频率是一个重要概念,然而国内外所有教材没有一本给出严格的定义,有的只用图形显示,而且语言笼统,例如文献[3]和[5],除图形外,只是说带限信号的频谱“只占据 $-\omega_m \sim +\omega_m$ 的范围”(其中 $\omega_m = 2\pi f_m$),至于在频率点 ω_m 上频谱的状况如何没有交代。文献[10](国家精品课程主教材,北京市高等教育精品教材)阐述得更明确一些,即当 $|\omega| > \omega_m$ 时频谱皆为0。但是以此作为最大频率的定义又产生了一个逻辑问题,即任何大于 ω_m 的频率都

是最大频率。我们在本书中给出了严格的最大频率的定义。[10](p200), [8](p130)和[9](p84)给出如下的抽样定理:带限信号 $x(t)$ 的频谱 $X(f)$ 满足当 $|f| > f_m$ 时 $X(f) = 0$,则 $x(t)$ 可唯一地从抽样信号 $x(n\Delta)$ 中恢复,如果 $\frac{1}{2\Delta} \geq f_m$ 。然而这个抽样定理的叙述是不严谨的,因为它对正弦信号 $x(t) = A\sin(2\pi f_0 t + \varphi)$,其中 $f_0 > 0$,就不成立。显然正弦信号 $x(t)$ 的最大频率 $f_m = f_0$ 。我们用初等数学方法证明了:只有当 $\frac{1}{2\Delta} > f_m$ 时才能由 $x(n\Delta)$ 恢复 $x(t)$ (参见第二章§2正弦波抽样定理)。文献[3]至[19]中的抽样定理存在同样的问题([3]p117, [4]p112, [5]p158, [6]p96, [7]p31, [11]p107, [12]p127, [13]p7, [14]p31, [15]p136, [16]p22, [17]p167, [18]p29, [19]p21)。奈奎斯特频率是信号处理中常出现的名词,但是在不同的书中定义却不一样。[5]把 $2f_m$ 称为奈奎斯特频率。[3]却把抽样频率(抽样间隔分之一)称为奈奎斯特频率,因为就一般的抽样频率而言,没有反映信号频谱的特点,所以这种定义不可取。按照国际上一些著名教材,如[20]p518-519,我们可以约定: f_m 为奈奎斯特频率(Nyquist frequency), $2f_m$ 为奈奎斯特率(Nyquist rate)。最后我们指出,奥本海姆的最新著作[1]中关于奈奎斯特抽样定理的描述是正确的,但是用以定义奈奎斯特频率的不等式(见该文献p146公式(4.14a))是不恰当的(参见本书第二章§3例1)。

为了让读者更好地了解概念、理论和方法,我们增加了例题,并给出了各章问题的解答。我是北京大学上世纪五六十年代严格科班教育培养出来的大学生,那时老师严格要求学生要做到独立钻研、独立思考,严禁出什么习题解答。就这样,数学分析习题集上的习题、实变函数书上的习题我们也一个不少地做完了。20世纪80年代初,市面上出现了数学分析和实变函数的习题解,我们看了不屑一顾,学生都能给出的解答哪有什么学术水平嘛,对出习题解的作用不能理解。前几年,我的一个学生到哥伦比亚大学攻读博士学位。他有一门必修课,讲课的是一位美国工程院院士,还有一名助教。助教每周给他们上一次习题课,内容就是解答教授上周留的作业。学生可以在下周助教的网页上下载本周讲的习题解答。然而事实证明,这样的教学模式并未影响哥伦比亚大学学生的独立思考,每年的博士生资格考试要至少淘汰百分之二十的学生,只留下基础好又善于独立思考的学生。美国人对博士生教育之重视、对做习题作业之重视远远超出了我的想象。有鉴于此,我决定把习题解答和教材内容放在一本书里,以便于读者自学和独立思考。同时建议读者在每一章、每一节,先看明白内容,弄清概念、理论和方法,再自己独立做例题、做问题,先不要看答案。如果自己做出来了,再看答案,分析一下是否还有更好的方法。如果自己实在做不出来,可看答案,但一定要分析做不出来的原因,以提高自己分析问题、解决问题的能力。

本简明教程是在作者以前著作[21]、[22]的基础上写成的,但是有两点不同:一、内容不同,本简明教程选材突出基本概念和方法,简明适当,便于本科生理解和掌握。二、例题习题更丰富,而且配有提示和答案,这是对教材正文很好的补充,兼顾了教学和自学两方面的需要,有利于教师的教学和学生的学习。由于本书是简明教程,所以在内容和深度上就不能顾及太多。对内容和深度有进一步探索要求的读者,我建议参看文献[22]。

本书的章节是按两条线索安排的。按傅里叶分析这条线索,有第一章连续信号的频谱和傅氏变换、第二章离散信号和抽样定理、第五章有限离散傅氏变换。按滤波这条线索,有第三章滤波与褶积及 Z 变换、第四章线性时不变滤波器与系统、第六章有限长脉冲响应滤波器和窗函数、第七章递归滤波器设计。我们希望读者能掌握好每章的概念、内容和方法,并以例题和问题作为检验。另外,信号处理课程不仅是理论课程,也是应用课程。因此,我们希望在有条件的学校,做些模拟数据和实际数据的频谱分析和滤波试验。MATLAB是一个包含信号处理功能的软件,只要掌握本书的概念和方法,查阅有关MATLAB的手册,就可以上机试验了。

由于水平和能力有限,作者诚恳希望读者在发现书中错误时能直接提出来,以便改进。

好奇心、兴趣是一切创造的原动力。愿你以快乐的心情讲授或学习这本书。

程乾生

(qcheng@math.pku.edu.cn)

北京大学承泽园

2006年10月

参考文献

- [1] A. V. Oppenheim, R W. Schaffer, with J. R. Buck. Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [2] 程佩青. 数字信号处理教程. 北京:清华大学出版社,2001.
- [3] 胡广书. 数字信号处理(第二版). 北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 胡广书. 数字信号处理导论. 北京:清华大学出版社,2006.
- [5] 郑君里,应启珩,杨为理. 信号与系统(上册). 北京:高等教育出版社,2001.
- [6] 高西全,丁玉美,阔永红. 数字信号处理. 北京:电子工业出版社,2006.
- [7] 姚天任,江太辉. 数字信号处理(第二版). 武汉:华中科技大学出版社,2004.

- [8] S. K. Mitra. Digital Signal Processing. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2005.
- [9] M. H. Hayes. Digital Signal Processing. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1999. (中译本:[美]M. H. 海因斯著,张建华,卓力,张延华译.数字信号处理.北京:科学出版社,2002.)
- [10] 陈后金,胡健,薛健.信号与系统(第2版).北京:清华大学出版社,2006.
- [11] 潘建寿,高宝健.信号与系统.北京:清华大学出版社,2006.
- [12] 刘明,徐洪波,宁国勤.数字信号处理——原理与算法实现.北京:清华大学出版社,2006.
- [13] 王朝英,冯新喜.信号处理原理.北京:清华大学出版社,2005.
- [14] 赵健,李勇.数字信号处理.北京:清华大学出版社,2006.
- [15] 余成波,张莲,邓力.信号与系统.北京:清华大学出版社,2004.
- [16] 阎毅,黄联芬.数字信号处理.北京:北京大学出版社,2006.
- [17] 华容,隋晓红.信号与系统.北京:北京大学出版社,2006.
- [18] 王凤文,舒冬梅,赵宏才.数字信号处理.北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [19] 唐向宏.数字信号处理.杭州:浙江大学出版社,2006.
- [20] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, with S. H. Nawab. Signals and Systems. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [21] 程乾生.信号数字处理的数学原理.北京:石油工业出版社,第一版1979,第二版1993.
- [22] 程乾生.数字信号处理.北京:北京大学出版社,2005.

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

绪论 1

参考文献 4

第一章 连续信号的频谱和傅里叶变换 6

§1 有限区间上连续信号的傅里叶级数和离散频谱 6

§2 傅里叶变换, 连续信号与频谱 12

问题 22

参考文献 25

第二章 离散信号和抽样定理 26

§1 离散信号 26

§2 连续信号的离散化, 正弦波的抽样问题 31

§3 带限信号与奈奎斯特频率 35

§4 离散信号的频谱和抽样定理 40

§5 由离散信号恢复连续信号的问题 45

§6 抽样与假频, 抽样或重抽样的注意事项 47

问题 49

参考文献 50

第三章 滤波与褶积, Z 变换 52

§1 连续信号的滤波与褶积 52

§2 离散信号的滤波与褶积 56

§3 信号的能谱与能量等式, 功率谱与平均功率等式 59

§4 离散信号与频谱的简化表示 64

§5 离散信号的 Z 变换 67

§6 作为罗朗级数的 Z 变换 73

问题 78

参考文献 80

第四章 线性时不变滤波器与系统 82

- §1 线性时不变系统及其时间响应函数 82
- §2 线性时不变系统的因果性和稳定性 86
- §3 系统的组合——串联、并联及反馈 89
- §4 有理系统及其时间响应函数 92
- §5 差分方程的单边 Z 变换解法 95
- 问题 100
- 参考文献 103

第五章 有限离散傅里叶变换 104

- §1 有限离散傅里叶变换、有限离散频谱所引起的假信号 104
- §2 快速傅里叶变换(FFT) 109
- §3 有限离散傅里叶变换的循环褶积 115
- §4 应用快速傅里叶变换进行频谱分析 124
- 问题 129
- 参考文献 134

第六章 有限长脉冲响应滤波器与时窗函数 136

- §1 理想滤波器及其存在的问题 136
- §2 时窗函数 141
- §3 广义线性相位滤波器,有限长脉冲响应滤波器设计的其他方法 154
- 问题 158
- 参考文献 160

第七章 递归滤波器的设计 162

- §1 递归滤波及其稳定性 162
- §2 模拟滤波器的设计 168
- §3 数字递归滤波器的设计 175
- 问题 181
- 参考文献 183

问题答案 185

- 第一章问题答案 185

第二章问题答案	191
第三章问题答案	194
第四章问题答案	204
第五章问题答案	211
第六章问题答案	219
第七章问题答案	225

绪 论

一、什么是信号？

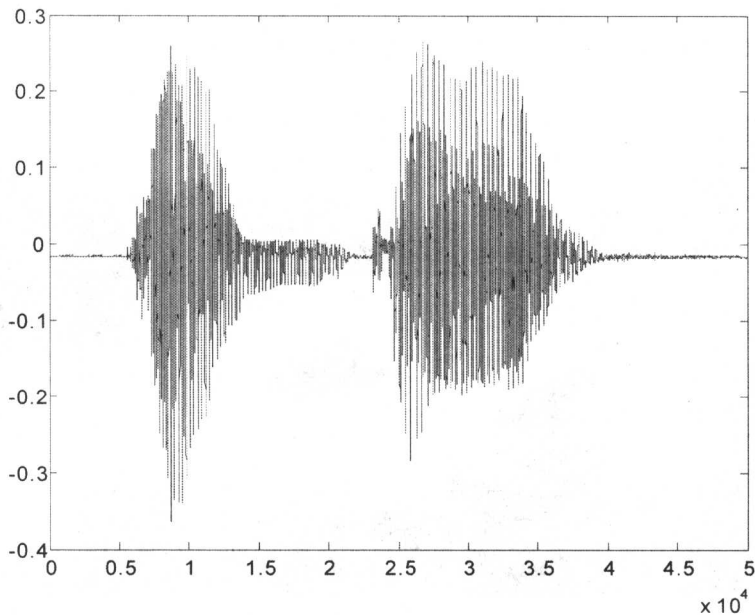
信号是人人都熟悉、日常生活中常用的一个名词。但是，它的确切含意是什么呢？

美国最著名的一本信号处理著作称，“术语信号通常用于代表携带信息的某个东西”（见文献[1]第8页）。这和一本美国英语词典所说的相似，“信号是传递信息的一个行动或一个东西：通常不用文字来表示”（见文献[2]第1418页）。上述说法太泛泛了，以至于还是不能了解信号的确切含意。

在现代汉语词典里，对信号的解释稍为具体些，“信号：① 用来传递消息或命令的光、电波、声音、动作等；② 电路中用来控制其他部分的电流、电压或无线电发射机发出的电波。”（见文献[3]第1272页）。

在信号处理这门学科里，要研究的信号究竟是什么呢？我们先看一些具体的例子。

声音（见图0-1），心电图，地震记录，气象温度记录，……——一元函数 $f(t)$ ；



(a) 男青年

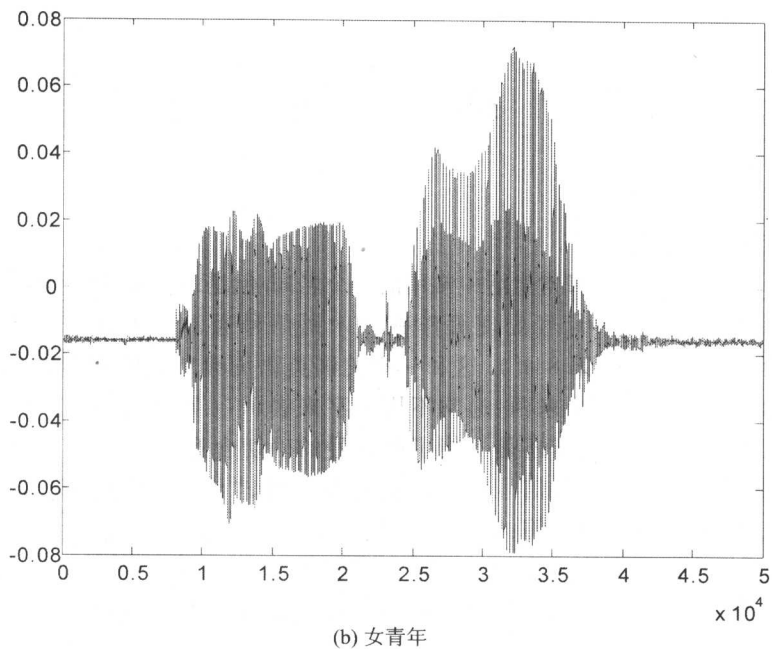


图 0-1 “中国”两字的声记录

图像(见图 0-2),文字,……——二元函数 $f(x,y)$;



图 0-2 图像.北京大学未名湖

电视,电影,……——三元函数 $f(x, y, t)$;

地下构造,人体构造,建筑模型,地形地貌,……三元函数 $f(x, y, z)$.

由上可知,在信号处理学科中的信号,指的是携带信息的一元函数或多元函数.

在信号的表达式中,自变量可以是连续的,也可以是离散的.自变量为连续的信号称为连续信号,通常又称作模拟信号.自变量为离散的信号称为离散信号,或称离散信号序列,又简称时间序列.除了自变量可以是连续的或离散的之外,信号取值也可以是连续的或是离散的.

数字信号是在自变量和信号取值两方面都是离散的信号.为了在计算机里能存储数字信号,要求数字信号的取值为有限长二进制数.

如何获得数字信号呢?如果原始信号是连续信号,如声音信号、心电图等,需要通过两步才能变成数字信号:1. 将连续信号变成离散信号,即抽样(见第二章);2. 将离散信号的取值变为有限长二进制信号,即量化处理.整个过程称为模数转换.

在实际生活中,有许多信号本身就是数字信号.例如,某医院每天看病的人数,中国每个月新增加的艾滋病人数,太阳每年的黑子数,等等.

二、什么是信号处理?

既然信号处理和数学分析研究的都是函数,二者又有什么区别呢?

数学分析以极限理论作为理论基础,研究函数的局部性质(连续性和微分)和整体性质(积分).例如,在数学分析中常研究的一类问题是:已知物体移动的距离是时间的函数,如果已知该函数,求此物体在任意时刻的速度和加速度;反之,已知物体运动的加速度,求出速度和距离(见文献[4]第2页).

信号处理以傅里叶分析(或称频谱分析)为理论基础,研究信号的变换、滤波和特征提取.我们要特别指出,傅里叶分析,或者频谱分析,对信号分析和信号处理是至关重要的.古诗云,“不识庐山真面目,只缘身在此山中”.信号是时间的函数,频谱分析为我们提供了新的角度来看信号,即从频率角度看信号,把时间信号变换成频率的函数.我们举几个信号处理要研究的问题:如何恢复被噪音干扰的信号?如何突出信号或图像中的细节?如何区别两个不同的信号?这些问题的解决,都和频谱分析有关.利用信号和噪音频谱的不同,特别当信号与噪音频谱是分离的时候,可用滤波方法恢复被噪音干扰的信号.信号中的细节是由频谱中的高频成分确定的,增强高频成分可以突出信号的细节.为了区别不同的信号,要从时间域、频率域或其他的变换域,提取信号的特征,利用这些特征来区分信号.

信号处理分为模拟信号处理和数字信号处理.模拟信号处理是通过电子线路实现的,而数字信号处理是通过计算机来实现的.因此,数字信号处理要灵活得多,应用也要广泛得多.