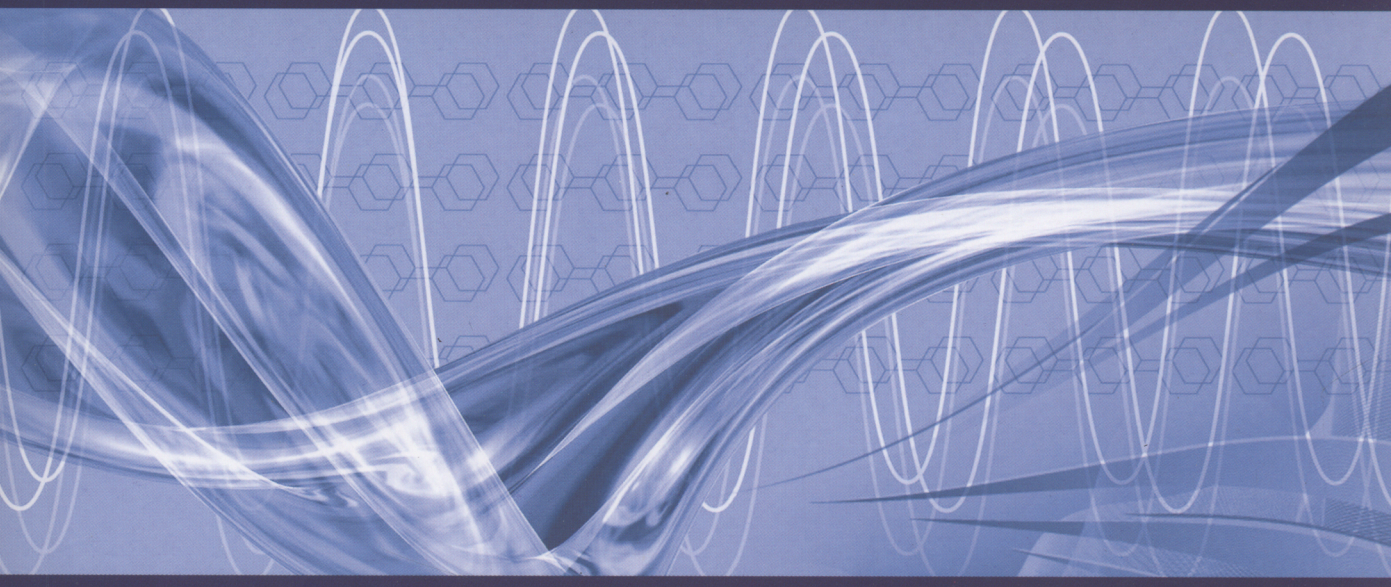
普通高等教育“十二五”规划教材



信号分析与处理

（第二版）

杨育霞　许　珉　廖晓辉
朱　榕　李志辉　编

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

信号分析与处理

(第二版)

杨育霞　许　珉　廖晓辉
朱　榕　李志辉　编
崔光照　主审

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分九章，主要内容为信号分析与处理的基本概念、连续时间信号的分析与处理、离散时间信号的分析与处理基础、离散傅里叶变换、数字滤波器、信号分析与处理的应用和实现以及 MATLAB 仿真实验。本书在章节的编排上采用先信号分析再信号处理，先连续后离散，先基本理论后工程实现及应用的顺序，重点突出，便于自学；注重联系实际提出问题，讲清推导思路，给出必要的证明，并注意结合物理意义帮助对基本理论的理解和掌握；理论计算与使用 MATLAB 计算相结合。每章末附有思考题与习题，书后附有习题参考答案。

本书可作为电气工程及其自动化、自动化或相近专业本科生的教学用书，也可以作为有关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

信号分析与处理/杨育霞等编. —2 版. —北京：中国电力出版社，2011.12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-2419-0

Ⅰ.①信… Ⅱ.①杨… Ⅲ.①信号分析－高等学校－教材 ②信号处理－高等学校－教材 Ⅳ.①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 258710 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版

2012 年 2 月第二版 2012 年 2 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 444 千字

定价 **32.00** 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前　言

《信号分析与处理》一书于2007年作为普通高等教育“十一五”规划教材出版。为了适应当前学科发展和教学内容改革的需要，编者对原教材内容进行了部分修改与调整，作为第二版出版，并列入了普通高等教育“十二五”规划教材。

对于非通信类各电专业，信号分析与处理是经常要面对的具有共性的问题，特别是数字信号处理的理论与技术已经渗透进了各个工程应用领域，因此，“信号分析与处理”已成为大专院校相关专业的一门必修课程。原书在吸收了以往教材的长处、有关参考文献和作者多年教学经验及应用成果的基础上编写而成；同时，在教学实践中征求和听取了教师和学生对本教材的意见，认为基本能满足当前的教学需要。鉴于此，本次修订对原教材的整体格局未做大的修改，仅对教材的部分内容作了修订、调整和补充。

第二版保持了原教材的编写思路和体系结构，在章节的编排上采用先信号分析再信号处理、先连续后离散、先基本理论后工程实现及应用的顺序。第二版修订的内容主要有以下几个方面：

（1）在第2章增加了连续信号傅里叶变换各种性质的证明，第4章增加了离散信号z变换和傅里叶变换各种性质的证明、离散周期信号的傅里叶变换、离散时间傅里叶变换与连续信号傅里叶变换的关系，以求数学上的完美，使学生深刻理解这些性质。

（2）在第3章增加了连续系统的框图表示、时域卷积的图解和连续系统的稳定性，以此和第5章离散系统框图表示、卷积和的图解和离散系统的稳定性形成对应，以便于学生把握连续系统和离散系统的联系与区别。

（3）在第8章增加了数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用和数字信号处理实现两个应用内容，删除了信号分析与处理在生物医学中的应用和电动机PID数字控制应用两个内容。在加窗DFT插值算法及应用一节中增加了加四项余弦窗插值FFT算法和相位差校正法算法。

（4）在第9章更新了实验1、实验7、实验8和实验9的编程实例，使实验更加实用，更有利于学生对信号分析与处理的理解。

（5）对全书例题和习题进行了补充和修订。

（6）为方便任课教师和学生使用本教材，作者免费提供电子教案和课后习题详解，如有需要请发电子邮件至yangyx@zzu.edu.cn索取，或从http://jc.cepp.sgcc.com.cn下载。

本书由杨育霞进行统稿工作。其中，第1章由杨育霞编写，第6、7章和第8章部分章节由许珉编写，第2、3、4章和第5章部分章节由廖晓辉编写，第8章部分章节和第9章部分章节由朱榕编写，第5章部分章节、第9章部分章节和附录由李志辉编写。

本书由崔光照教授主审，并提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。此外，也对给本书的修订提供帮助和支持的所有专家、老师、学生及参考文献的作者，一并表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中疏漏及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

编　者

2011年11月

第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

近年来，由于电子技术和集成电路技术的迅速发展，电子计算机已成为信号处理的重要手段。信号处理（特别是数字信号处理）技术的理论研究与应用成果已经深入到了工程、医学、军事和生活等各个领域。在高等学校中，不仅通信专业和电子信息类专业需要信号分析与处理的知识，电气工程类、生物医学类和控制类以及一些非电类专业也迫切要求学习这方面的知识。本书是为了满足这种需要，在吸收了以往教材的长处、有关参考文献和作者多年教学经验及应用成果的基础上编写而成。

本书具有以下特点：

（1）在章节的编排上采用先信号分析再信号处理，先连续后离散，先基本理论后工程实现及应用的顺序。原因是：①为了使概念清晰，各章直接写明与本书的书名相一致的主要内容。这样使读者能更清楚地理解信号分析和信号处理的概念，前 5 章是信号分析与处理的理论基础，第 6 章、第 7 章是数字信号处理的基本内容。②为了课程体系的完整性，本书内容涵盖“信号与系统”和“数字信号处理”两门课程，在处理上不是简单的课程拼接，而是有机地结合，主线就是信号分析与信号处理。③为了节省学时，对于非通信类专业，本书的编排方式使内容紧凑，篇幅压缩，学时减少。例如对连续信号处理中解微分方程的多种方法在一起集中介绍，而不是把这些方法分散在几个不同的章节分别介绍。

（2）重点突出。许多连续信号的分析和处理内容在数学等课程中已经学习过，本书对这部分内容只是简单归纳，起承上启下的作用。本书重点在离散信号的分析与处理，在对基本理论进行系统阐述后，对数字信号处理的计算机实现方法，例如 DFT 的快速算法和数字滤波器的设计等进行了详细地介绍，最后还简要介绍了信号分析与处理在不同领域中的应用。

（3）便于自学。前 5 章介绍信号分析与信号处理的基础，涵盖了“信号与系统”课程的基本内容，这部分内容是作者根据多年教学经验，充分考虑到学生在学习过程中可能遇到的困难，用工程实例和深入浅出的语言，使同学们在很短授课学时的情况下，通过自学本教材就可以为顺利学习后面的数字信号处理内容铺平道路。数字信号处理内容力求讲清学生不易搞清的问题，易于自学。

（4）注重联系实际提出问题，讲清推导思路，给出必要的证明，并注意结合物理意义帮助对基本理论的理解和掌握；还给出了信号处理的实现实例及程序框图，甚至程序。本书后半部分中的部分实例是作者近几年的应用成果。

（5）理论计算与使用 MATLAB 计算相结合。本书的最后一章通过仿真实验的形式，介

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

绍本门课程使用的 MATLAB 的最基本用法和应用实例。

（6）每章后都有思考题和习题。以思考题的形式为引线，引导学生自己做每一章的小结，培养学生正确的思维方法和积极的学习态度。习题计算量不大，着重于巩固基本理论和概念，并附有习题答案。

本书由杨育霞进行统稿工作，她编写了第 1、4、5 章和第 8 章的第 3、4、5 节及附录，第 6、7 章和第 8 章的第 1、2 节由许珉编写，第 2、3、9 章由廖晓辉编写。本书由崔光照教授主审，他提出了许多宝贵意见和建议，谨此表示衷心的感谢。此外，也对给予本书帮助和支持的所有专家、老师及参考文献的作者一并表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中疏漏及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

编　者

2007 年 5 月

目　录

前言
第一版前言
第 1 章　信号分析与处理的基本概念 …… 1
1.1　信号的概念 …… 1
1.2　信号处理的概念 …… 5
1.3　信号分析与处理方法 …… 15
思考题 …… 18
习题 …… 19
第 2 章　连续时间信号的分析 …… 22
2.1　连续时间信号的时域分析 …… 22
2.2　周期信号的傅里叶分析 …… 28
2.3　非周期信号的傅里叶变换 …… 32
2.4　周期信号的傅里叶变换 …… 42
2.5　连续信号的拉普拉斯变换 …… 44
思考题 …… 49
习题 …… 49
第 3 章　连续时间信号处理 …… 54
3.1　线性时不变连续系统的时域数学模型——微分方程 …… 54
3.2　计算零状态响应的卷积积分法 …… 58
3.3　系统函数 …… 65
3.4　信号的频域处理 …… 71
思考题 …… 79
习题 …… 80
第 4 章　离散时间信号的分析 …… 84
4.1　连续时间信号的时域采样 …… 84
4.2　离散时间信号的 z 域分析 …… 90
4.3　离散信号的傅里叶分析 …… 102
思考题 …… 113
习题 …… 113
第 5 章　离散时间信号处理基础 …… 117
5.1　线性时不变离散系统的时域数学模型——差分方程 …… 117
5.2　卷积和 …… 122
5.3　离散系统的系统函数 …… 130
思考题 …… 136

习题 …… 137
第 6 章　离散傅里叶变换 …… 140
6.1　离散傅里叶变换 …… 140
6.2　离散傅里叶变换的性质 …… 143
6.3　用DFT计算线性卷积 …… 147
6.4　频率域采样 …… 148
6.5　DFT 的应用 …… 149
6.6　快速傅里叶变换（FFT） …… 156
思考题 …… 163
习题 …… 164
第 7 章　数字滤波器 …… 166
7.1　数字滤波器的概念 …… 166
7.2　IIR 数字滤波器的设计 …… 173
7.3　FIR 数字滤波器的设计 …… 192
思考题 …… 203
习题 …… 204
第 8 章　信号分析与处理的应用和实现 …… 205
8.1　加窗 DFT 插值算法及应用 …… 205
8.2　相关分析及其应用 …… 217
8.3　数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用 …… 220
8.4　音频信号的数字录音与回放 …… 225
8.5　数字信号处理实现 …… 228
第 9 章　MATLAB仿真实验 …… 235
9.1　信号的产生及运算与图示 …… 235
9.2　微分和差分方程的求解 …… 241
9.3　信号的线性卷积与线性相关分析 …… 244
9.4　连续时间信号的复频域分析 …… 247
9.5　离散时间信号的复频域分析 …… 251
9.6　连续时间信号的频谱分析 …… 253
9.7　离散时间信号的频谱分析 …… 257
9.8　IIR 数字滤波器的设计 …… 260
9.9　FIR 数字滤波器的设计 …… 266

附录 A　常用傅里叶变换表 …… 272
附录 B　常用信号单边 z 变换表 …… 274

习题参考答案 …… 275

参考文献 …… 282

第 1 章　信号分析与处理的基本概念

本章从工程中的实例入手，介绍了信号的基本概念及其描述、信号的分类，然后介绍信号处理的概念，包括信号的运算、系统的基本概念及其分类，并在此基础上讨论了信号的分析方法和信号处理的方法。通过本章的学习，读者能够建立信号分析与处理的总体概念和数学语言的描述方法，为后续章节的学习奠定基础。

1.1　信 号 的 概 念

凡是物质的形态、特性在时间或空间上的变化，以及人类社会的各种活动都会产生信息。千万年来，人类用自己的感觉器官从客观世界获取各种信息，如语言、文字、图像、颜色、声音、自然景物信息等。可以说，我们是生活在信息的海洋之中，因此获取信息的活动是人类最基本的活动之一。而且从某种意义上说，信息交换也是人类得以成为人类的重要原因。

人们要获取信息，首先要获取信号，信号中包含着人们未知的信息。但取得信号并不等于就获取了信息，必须通过对信号做进一步的分析与处理才能从信号中提取所需信息，所以说信号是便于传载信息的物理形式。

1.1.1　典型信号举例

医生通过心电图获取心脏病人的信息。心电图是与人的心脏跳动有关的生物电位信号。图 1-1 所示为心电图信号波形的一个周期，它表示血液从心脏到动脉传输的一个循环。这部分波形由来源于心脏右心房的窦房结的电冲激产生。冲激引起心房收缩，使得心房中的血液被压到对应的心室里，产生的信号称为 P 波。窦房结的冲激激励延时直到血液从心房到心室的传送完成，得到心电图波形的 P—R 间隔。然后冲激激励引起心室的收缩，压迫血液到动脉，从而产生了心电图波形的 QRS 部分，在这个阶段心房松弛并充入血液。波形的 T 波表示心室的松弛。整个过程周期性地重复，就产生了心电图迹线。

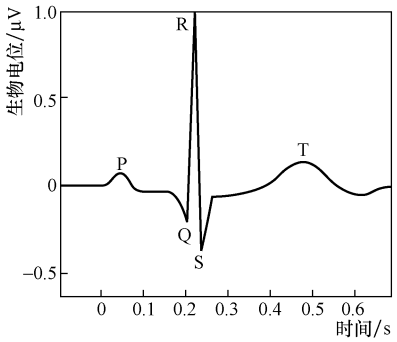


图 1-1　心电图信号波形的一个周期

心电图波形的每一部分携带着不同类型的信息，用于医生分析患者的心脏状况。例如，P 和 QRS 部分的振幅和时间表明心肌块的状况。振幅降低表明肌肉受损，而振幅升高表示心率异常。很长的 P—R 间隔表示房室结中过长的延时。同样，部分或所有收缩冲激的阻滞由 P 和 QRS 波之间的间歇同步反映。大多数这些异常都可以用不同的药物治疗，通过进一步观察药物治疗后的心电图波形，可以重新控制药物的效力。

每一个工厂、企业都有它不同的用电特点和规律。要做到经济合理地用电，就需要掌握这些特点和规律。图 1-2 所示为某工厂的典型日负荷曲线，代表某一天 24h 实际使用电力

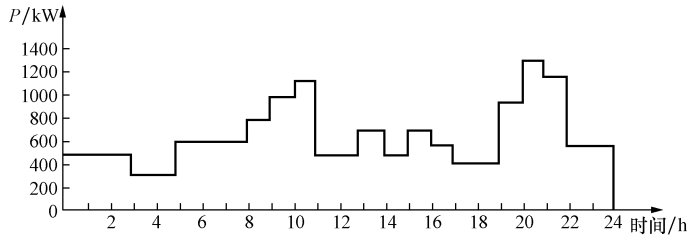


图 1-2　某工厂的典型日负荷曲线

负荷的信号。从这条曲线可以得到一天中的最大负荷和时间，最小负荷和时间，以及平均负荷。工厂的管理人员根据这条负荷曲线和供电条件可以作出切实可行的、合理的用电计划。

每个钢琴键弹奏的音对应一个基波频率和许多谐波频率。图 1-3 所示为钢琴 CEG 和弦位置和对应的和弦信号的频谱。该频谱中有 3 个尖峰，信号中每个音对应一个，中央 C 的尖峰位于 262Hz，右边的 E 和 G 对应的尖峰位于较高频率处，分别为 330Hz 和 392Hz。这种情况下，用信号频域的频谱比用信号时域的波形更能直观、清晰地体现信号的信息。

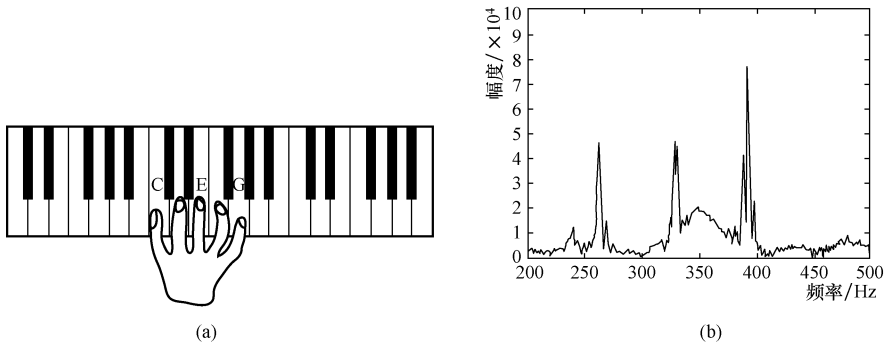


图 1-3　钢琴 CEG 和弦位置和对应的和弦信号的频谱

（a）钢琴 CEG 和弦位置示意图；（b）CEG 和弦信号的频谱

1.1.2　信号的描述

信号是信息的物理表现形式，或说是传递信息的函数，而信息则是信号的具体内容。例如，交通红绿灯是信号，它传递的信息是：红灯停，绿灯行。根据载体的不同，信号可以是电的、磁的、声的、光的、热的、机械的等。如“语言文字”这种信息载体是用“红”这个汉字来表达红色概念；“图像”这种信息载体是用“红颜色”来刺激人的视觉神经，从而形成红色概念；“声音”这种信息载体是用“hong”这个语音来表达红色的概念；而景物则用朝阳与落日的色彩来表达红色的概念等。

从数学的观点来说，信号都是自变量的函数。自变量可以是时间、频率、空间或其他的物理量，函数旨在突出变量间的数学描述和运算关系；而信号则是为了突出其物理属性。在本书中，“信号”与“函数”这两个术语是互相通用的。对于语音类和电类的一维信号，常用时间自变量的函数 $x(t)$、$y(t)$ 来表示；对于平面图像类的二维信号，常用函数 $f(x,y)$ 来表示。本书只讨论一维信号。一维信号除可以用解析表达式描述之外，还常用波形图来形象直观地描述。随时间变化的信号还可以用其各种变换（如傅里叶变换、拉普拉斯变换和 z 变换）来描述。

表示信号的时间函数包含了信号的全部信息量。信号的特性首先表现为它的时间特性。时间特性主要指信号随时间变化快慢幅度变化的特性。同一形状的波形重复出现的周期长

短，信号波形本身变化的速率（如脉冲信号的脉冲持续时间，脉冲上升和下降边沿陡直的程度），以时间函数描述信号的图像称为时域图，图 1 - 1 所示的就是一个时域图。在时域上分析信号称为时域分析。

信号还具有频率特性，可用信号的频谱函数来表示。频谱函数中也包含了信号的全部信息量。频谱函数表征信号的各频率成分及其振幅和相位。以频谱描述信号的图形称为频域图，图 1 - 3（b）所示的就是一个频域图。在频域上分析信号称为频域分析。

在各种信号中，电信号是最便于传输、控制与处理的信号，而且许多非电信号（如温度、压力、光强、位移、转矩、转速等）的物理量都可以由相应的传感器变换为电信号。如果对信号进行以计算机为核心的数字处理，就必须要先转变为电信号。因此研究电信号具有普遍的、重要的意义。在本书中，除非特别说明，我们都把信号视为随时间变化的电压或电流信号。

1.1.3　信号的分类

为了对信号进行处理，必须要先搞清楚信号有哪些种类，每类信号各有什么特点，各适合于如何处理。通过这些分类，可以更清楚地认识到本门课程是用于处理哪些信号的，对实际信号应该采用哪种处理方法。

1. 确定性信号和随机信号

根据信号取值是否确定来分类，可分为确定性信号和随机信号。

如果信号可以用确定的数学表达式来表示，或可用确定的信号波形来描述，则称此类信号为确定性信号，如正弦信号、指数信号等。在工程上，有许多物理过程产生的信号都是确定性信号，如卫星在轨道上运行，电容器通过电阻放电时电路中的电流变化等。

如果信号只能用概率统计方法来描述，其取值具有不可预知的不确定性，则称此类信号为随机信号。随机信号不是一个确定的时间函数，对于某一时刻，信号值无法确定，只能知道它取某一值的概率。随机信号也是工程中的一类应用广泛的信号，如在通信传输中引入的各种噪声，海面上海浪的起伏等。在一定的条件下，某些随机信号也会表现出某种确定性，例如音乐表现为某种周期性变化的波形；数据通信中的编码虽然受扰畸变，但总体上还保持着某种规律的脉冲波形。除实验室发生的有规律的信号外，通常的信号都是随机的，因为确定性信号对受信者不可能载有信息。

研究确定性信号是十分重要的，因为它不仅广泛应用于系统分析和设计中，同时也是进一步研究随机信号的基础。本书只讨论确定性信号。

2. 连续信号与离散信号

根据信号自变量取值是否连续来分类，可分为连续信号和离散信号。

若 t 是定义在时间轴上的连续自变量，那么，我们称 $x(t)$ 为连续时间信号，若信号的幅值也是连续的，又称为模拟信号。若 t 仅在时间轴的离散点上取值，那么，我们称 $x(t)$ 为离散时间信号，这时应将 $x(t)$ 改记为 $x(nT_s)$。式中，T_s 表示相邻两个点之间的时间间隔，又称采样周期；n 取整数表示序号。为简明起见，一般用 $x(n)$ 来表示离散信号 $x(nT_s)$。

$x(n)$ 在时间上是离散的，其值域可以连续取值。但在用计算机处理信号时，由于计算机只能利用有限的二进制位数来表示数据，因此其信号值也必须“量化”为离散的数。在时间（自变量）上和函数值（因变量）上都被离散化的信号称为数字信号。计算机只能处理数

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

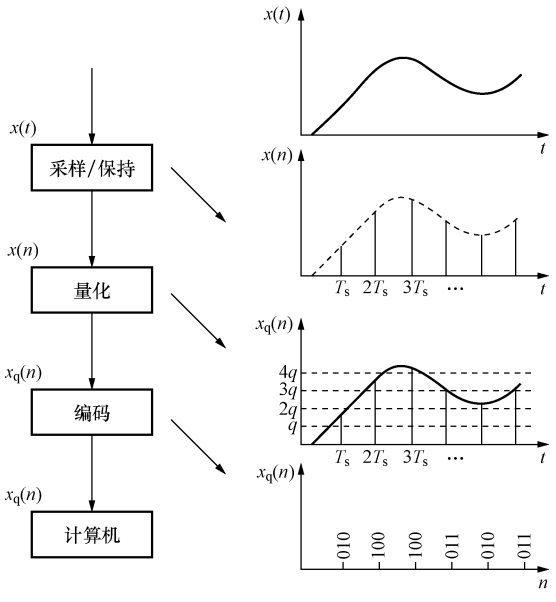


图 1－4　连续信号转化为数字信号的过程

字信号。

连续信号转化为离散信号和数字信号的过程如图 1－4 所示。对连续的模拟信号 $x(t)$ 按一定的时间间隔 T_s 抽取相应的瞬时值，这个对时间离散化的过程称为采样。经采样后的离散信号为图中的 $x(n)$，它是一个时间离散、函数值连续的信号。图 1－4右边第 3 个图是把 $x(n)$ 的函数值以某个最小数量单位 q 的整数倍进行离散化，这个过程称为量化。经量化后的数字信号为图中的 $x_q(n)$。把 $x_q(n)$ 经过编码后转化为数字序列才能进入计算机的存储器中以备处理。本课程只研究仅对时间离散化的离散信号 $x(n)$，数字信号在计算机类课程中学习。

3．周期信号与非周期信号

根据信号在某一区间内是否重复出现来分类，可分为周期信号和非周期信号。

若信号按照一定的时间间隔 T 周而复始且无始无终，则称此类信号为周期信号。周期信号的表达式可以写为

$$x(t) = x(t+nT) \qquad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots) \tag{1-1}$$

式中：nT 称为 $x(t)$ 的周期，而满足关系式的最小 T 值称为信号的基本周期。

为叙述方便，如不做特别强调，后面将把“基本周期”简称为“周期”。由于周期信号在一个周期内的波形完整、准确地提供了其随时间变化的信息特征：振幅、周期、初相、变化快慢等，所以只要给出其在一个周期内的变化过程，便可知道该信号在任意时刻的信号值。

周期信号是由振动、旋转等物理现象产生的，是以无限、持续的时间波形出现的。虽然这种理想状况在现实中几乎不存在，但周期信号具有很好的特性，是信号频域分析的基础，所以是本课程非常重要的一类信号。

若信号在时间上不具有周而复始的特性，或者说信号的周期趋于无限大，则此类信号称为非周期信号。周期信号可以由非周期信号周而复始地进行重复而得到。严格数学意义上的周期信号，是无始无终地重复着某一变化规律的信号。实际应用中，周期信号只是指在较长时间内按照某一规律重复变化的信号。

实际上周期信号与非周期信号之间没有绝对的差别，当周期信号的周期 T 无限增大时，则此信号就转化为非周期信号。

当周期分别为 T_1 和 T_2 的两个周期信号相加时，如果它们是整数倍的关系，则取其最小周期；如果它们不是整数倍的关系，则设 n_1 和 n_2 是互为质数的整数，当 $n_1 T_1 = n_2 T_2$，即 T_1/T_2 是一个有理数时，所得的合成信号的最小公共周期是 $T = n_1 T_1 = n_2 T_2$，它是单个信号周期的最小公倍数。

【例 1-1】　已知信号 $x_1(t)=\cos 20t$，$x_2(t)=\cos 22t$，$x_3(t)=\cos t$ 和 $x_4(t)=\cos\sqrt{2}t$，问 $x_1(t)+x_2(t)$ 和 $x_3(t)+x_4(t)$ 是否为周期信号？若是，求其周期。

解　$x_1(t)$ 的周期为 $T_1=2\pi/20=\pi/10$，$x_2(t)$ 的周期为 $T_2=2\pi/22=\pi/11$，由于 $T_1/T_2=11/10$ 是有理数，所以 $x_1(t)+x_2(t)$ 仍是周期信号，其公共周期 $T=10T_1=11T_2=\pi$。

$x_3(t)$ 的周期为 $T_3=2\pi$，$x_4(t)$ 的周期为 $T_4=2\pi/\sqrt{2}=\sqrt{2}\pi$，由于 $T_3/T_4=\sqrt{2}$ 是无理数，所以 $x_3(t)+x_4(t)$ 不是周期信号。

4. 能量信号与功率信号

根据信号的能量或功率是否有限来分类，可分为能量信号和功率信号。

在研究过程中，我们有时需要知道信号的能量特性和功率特性。任何信号通过系统时都伴随着一定能量或功率的传输，表明信号具有能量或功率特性。

将信号施加于 1Ω 电阻上，它所消耗的瞬时功率为

$$p=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}|x(t)|^2\mathrm{d}t,\quad p=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{2N+1}\sum_{n=-N}^{N}|x(n)|^2 \tag{1-2}$$

信号的能量为

$$W=\int_{-\infty}^{\infty}|x(t)|^2\mathrm{d}t,\quad W=\sum_{n=-\infty}^{\infty}|x(n)|^2 \tag{1-3}$$

若信号的能量有限，即 $W<\infty$，则称之为能量有限信号，简称能量信号。具有有限幅值的时限信号都是能量信号，如单个脉冲信号，指数衰减信号等。这是一类具有时空局域局限性的信号。

若信号的功率有限，即 $P<\infty$，则称之为功率有限信号，简称功率信号。功率信号是在时间或空间上无限延续，但在一定时间范围内的平均能量有限的信号。因此具有重复性的有限值周期信号都是功率信号。

有的信号的能量太大了，研究能量没太大意义。有些信号的能量变化实在太快了，这时研究它的功率就没有意义。所以，能量和功率各有所长所短，应根据需要来使用。

1.2　信号处理的概念

在我们的周围存在着为数众多的“信号”，如从茫茫宇宙中的天体发出的微弱电波信号，移动电话发出的数字信号等，这些都属于我们直接感觉不到的信号，还有诸如交通噪声、人们说话声以及电视图像等人们能感觉到的各种各样的信号。这些众多的信号中，有的是含有有用信息的信号，有的只是应当除掉的噪声。

所谓“信号处理”，就是要把记录在某种媒体上的信号进行处理，以便抽取出有用信息的过程，它是对信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称。

信号处理的目的是：①去伪存真。去除信号中冗余和次要的成分，包括不仅没有任何意义反而会带来干扰的噪声；②特征提取。把信号变成易于分析、识别的形式，以便进行后续的其他处理；③编码与解码（或调制与解调）。将信号变换成容易传输、交换与存储的形式（编码），或从编码信号中恢复出原始信号（解码）等。

按键式电话拨号系统就是一个典型的信号处理例子。当按下每一个按键时，会产生一组特定的双音信号，这称为双音多频信号。电话交换机对该信号进行处理，根据两个基音频率

来识别所按下的号码。如图 1-5 所示，电话上的键排列成行和列，通过按键产生的双音与键所在的行和列有关。键所在的行确定了它的低音频，所在的列确定了它的高音频，例如，按“6”键产生频率为 770Hz 和 1477Hz 的基音信号。图 1-5（b）给出了拨号的音频检测方案。这里，两个基音首先由一个低通和一个高通滤波器分开，低通滤波器的通带截止频率略高于 1000Hz，高通滤波器的截止频率略低于 1200Hz，然后每个滤波器的输出被一个限幅器转变成一个方波，并经过一个具有很窄通带的带通滤波器组处理。低频通道的 4 个带通滤波器的中心频率分别是 697、770、852Hz 和 941Hz，而高频通道的 3 个带通滤波器的中心频率分别是 1209、1336Hz 和 1477Hz。如果某个键被按下，低音群和高音群就会各有一个对应的带通滤波器输出高于某个阈值的电信号，其后面的检波器就会产生所需要的直流转换信号，进而可以判断按下的是哪个键位。关于按键式电话拨号系统的数字信号处理内容，本书在 8.3 节中有较详细的说明。

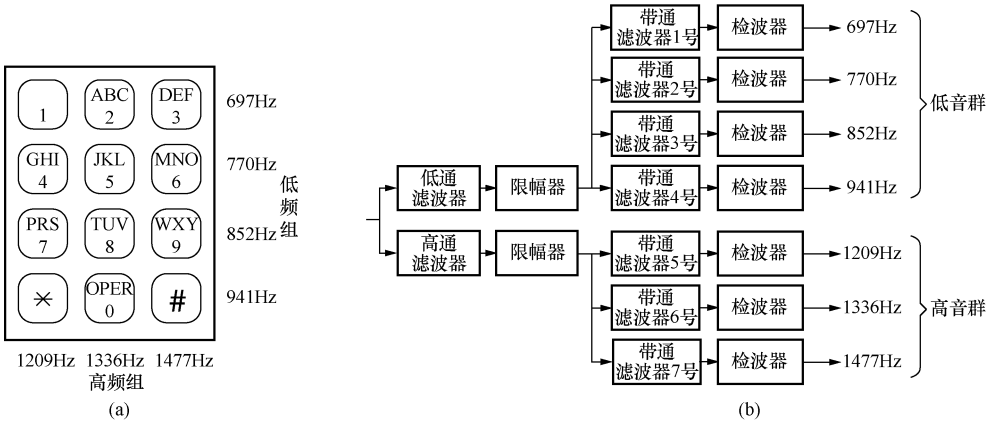


图 1-5　按键式电话拨号系统

（a）拨号的音频频率分配；（b）拨号的音频检测方案

由上例可以看到，信号处理是利用一定的部件或设备对信号进行分析、变换、综合、识别等加工，以达到提取有用信息和便于利用的目的。对信号处理的部件或设备称为系统。用模拟系统处理模拟信号称为模拟处理，若用数字系统处理数字信号即为数字处理。

人们最早处理的信号局限于模拟信号，所使用的处理方法也是模拟信号处理方法，例如上述的电话拨号电路。在用模拟信号处理方法进行处理时，对“信号处理”技术没有太深刻的认识。这是因为在过去，信号处理和信息抽取是一个整体，从物理制约角度看，满足信息抽取的模拟处理受到了很大的限制。随着数字计算机技术的飞速发展，信号处理的理论和方法也得以发展。在我们的面前出现了不受物理制约的纯数学的加工，即算法，并确立了数字信号处理的领域。现在，对于模拟信号的处理，人们通常是先把模拟信号变成数字信号，然后利用高效的数字信号处理器（Digital Signal Processor，DSP）或计算机对其进行数字信号处理。处理完毕后，如果需要，再转换成模拟信号。这种处理方法称为模拟信号数字处理方法。

例如，仪器仪表随着信号处理技术的发展而更新换代。第一代为模拟式（指针式）仪器仪表，它基于电磁测量原理并使用指针来显示最终的测量结果。第二代为用电路硬件实现的数字式仪器仪表，它的基本结构中离不开 A/D 转换环节，并以数字的形式显示或

打印测量结果。第三代是智能式仪器仪表，它是计算机技术和测量技术相结合的产物，含有微型计算机或微处理器，因此拥有对数据进行存储、运算、逻辑判断及自动化操作等功能。

1.2.1　信号的简单处理

最基本也是最简单的信号处理就是对信号进行各种数学运算。信号的基本运算包括信号的自变量运算（平移、尺度变换和反转）、加减乘除运算、积分和微分运算。对于连续信号的这些运算，可以由电路和电子课程中学过的加法器、减法器、微分器、积分器、乘法器、比例器等模拟系统来实时实现，对于数字信号，可以用计算机直接进行数学运算。因此我们需要用数学的方法来表示信号的运算及其对应的波形变化，并理解这些运算的物理背景。

1. 信号的自变量运算

有三种基本的自变量运算：时延、反转和尺度变换。

（1）时延。时延运算产生一个原信号的延时复制信号。图 1-6（a）所示信号 $x(t)$ 在传输后如果波形的形状保持不变，仅仅是延迟了 t_0 时间（$t_0>0$），则延迟后的信号为 $x(t-t_0)$，其波形相当于将 $x(t)$ 的波形沿时间轴方向移位 t_0 时间，如图 1-6（b）所示；类似地，$x(t+t_0)$ 的波形相当于把 $x(t)$ 的波形向时间轴的相反方向移位 t_0 时间，如图 1-6（c）所示。

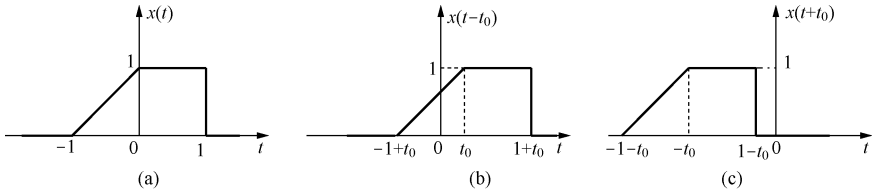


图 1-6　连续时间信号的移位

（a）原始信号；（b）右移 t_0；（c）左移 t_0

离散时间信号 $x(n-n_0)$ 和 $x(n+n_0)$（n_0 为正整数）则分别相当于将 $x(n)$ 右移和左移 n_0 个序号，如图 1-7 所示。

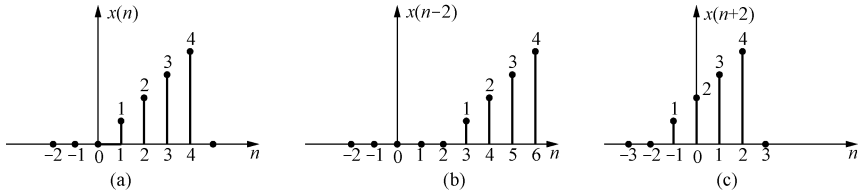


图 1-7　离散时间信号的移位

（a）原始序列；（b）右移 n_0；（c）左移 n_0

（2）反转。反转运算产生一个原信号对纵轴的对称复制信号。如果将信号 $x(t)$ 的自变量用 $-t$ 替换，信号 $x(-t)$ 的波形为 $x(t)$ 以 $t=0$ 为轴的反转。对图 1-6（a）和图 1-7（a）所示的信号，反转后 $x(-t)$ 和 $x(-n)$ 的波形如图 1-8 所示。

（3）尺度变换。如果把 $x(t)$ 的变量 t 置换为 at，a 为一正系数，信号 $x(at)$ 的波形为

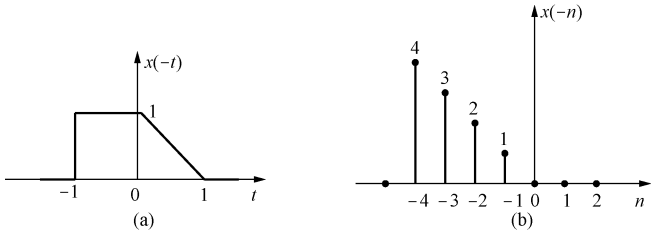


图 1 - 8　信号的反转

（a）$x(-t)$ 的波形；（b）$x(-n)$ 的波形

$x(t)$ 波形的时间轴压缩（$a>1$）或扩展（$0<a<1$），该运算称为尺度变换，如图 1 - 9 所示。

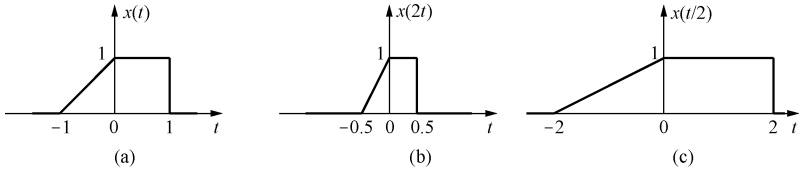


图 1 - 9　信号的尺度变换

（a）原始波形；（b）波形压缩；（c）波形扩展

当 $x(t)$ 是一盘录像带录制的信号时，$x(-t)$ 表示将此录像带倒放处理的反转信号，$x(2t)$ 相当于以 2 倍速度快镜头播放处理的压缩信号；而 $x\left(\frac{t}{2}\right)$ 相当于以降至一半的速度慢镜头播放处理的扩展信号。另外，为了快速传输信号，往往需要把原信号先压缩，到达输出端后再扩展还原。

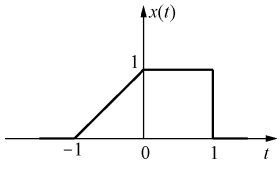


图 1 - 10　例 1 - 2 图

在信号简单处理过程中常有时延、反转和尺度变换综合的情况，这时相应的波形分析可分步进行。分步的次序可以有所不同，但因为在处理过程中，坐标轴始终是时间 t，因此，每一步的处理都应针对时间 t 进行。

【例 1 - 2】　$x(t)$ 的波形如图 1 - 10 所示，画出 $x(-2t+1)$ 的波形。

解　若依次采用移位—反转—尺度变换顺序，首先画出 $x(t+1)$ 的波形，然后进行反转得到 $x(-t+1)$，最后进行尺度变换即可得到 $x(-2t+1)$ 的波形，如图 1 - 11 所示。

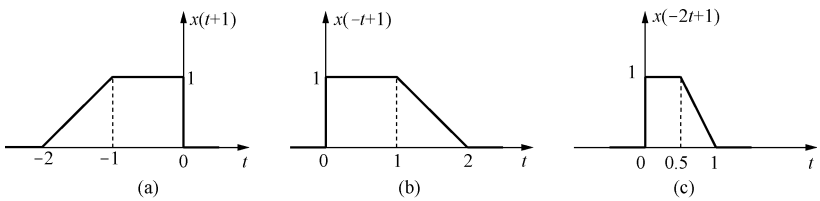


图 1 - 11　移位—反转—尺度变换

（a）移位；（b）反转；（c）尺度变换

也可以采用其他顺序进行变换。例如，先做尺度变换画出 $x(2t)$ 的波形，其次进行移位，将 $x(2t)$ 左移 0.5 得 $x[2(t+0.5)]=x(2t+1)$，最后对 $x(2t+1)$ 作时间反转，得 $x(-2t+1)$ 的波形，如图 1-12 所示。

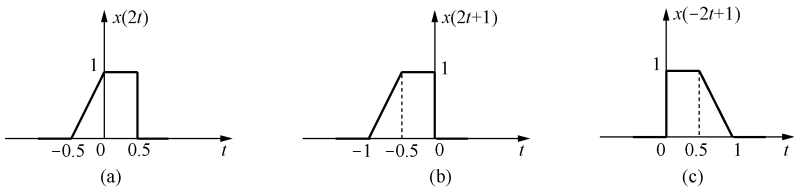


图 1-12　尺度变换—移位—反转

（a）尺度变换；（b）移位；（c）反转

2. 连续信号的微分与积分运算

微分就是对信号 $x(t)$ 求导数的运算 $\frac{\mathrm{d}x(t)}{\mathrm{d}t}$。信号经过微分后突出了变化部分，如图 1-13所示。利用对信号微分的突出变化作用，可以检测异常状况发生的时间和特征。

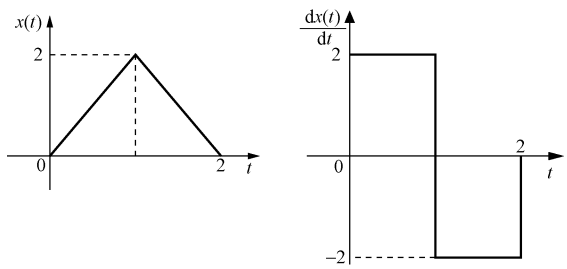


图 1-13　信号的微分

积分是对信号 $x(t)$ 在 $(-\infty,t)$ 区间内的定积分 $\int_{-\infty}^{t}x(\tau)\mathrm{d}\tau$。信号经过积分后平滑了变化部分，如图 1-14 所示。利用对信号积分的平滑作用可以削弱信号中混入的毛刺（噪声）的影响。

信号的微分和积分运算在信号处理中的应用很多。如自动控制系统中的 PID（比例、积分、微分）控制方法，就是通过对被控信号的比例运算（数乘），实现信号的增强（放大）与弱化（衰减）；通过对被检控信号的微分运算，来检测其变化速率是否跃出给定的范围；对输出量的误差信号进行积分运算，可以做到一旦发现累积误差达到设定值就立即做反馈校正，以提高控制精度。

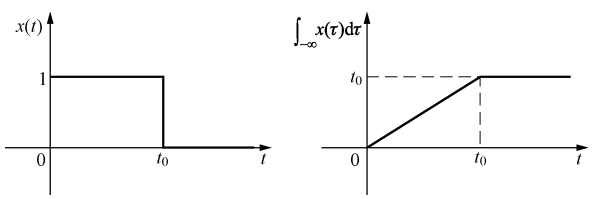


图 1-14　信号的积分

3. 信号的加（减）乘（除）运算

信号处理的任务之一是产生合成信号，它是由对多个基本信号的各种运算完成的。

两个信号进行加（减）乘（除）运算得到一个新的信号，它在任意时刻（序号）的值等于两个信号在该时刻（序号）的值进行加（减）乘（除）运算。也就是说，若两个信号相加，则结果信号的取值是参与运算的两信号对应点取值相加；若是相乘运算，则是对应点取值相乘。以此类推。

一个通信信道（电缆、光缆）中通常传输若干个信号，这些信号是以叠加合成的形式传输的。通过混频器，一根视频电缆可以同时传输数十个频道的电视信号。无线电广播和通信

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com