



新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材

· 通信技术专业

数字信号处理

蒋正萍 主 编 李 新 副主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·通信技术专业

数字信号处理

蒋正萍 主 编

李 新 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对数字信号处理基本知识和 DSP 系统及其应用做了简明扼要的介绍；同时，对数字信号处理理论（离散傅里叶变换和快速傅里叶变换）及 FFT 算法、离散傅里叶反变换的快速算法及基-4FFT 算法进行了讨论；介绍了数字滤波器基本结构、IIR 滤波器和 FIR 滤波器的设计及数字滤波器计算机辅助设计；基于 TMS320C54X 系列数字信号处理器，详细阐述了 DSP 系统开发工具的使用和 DSP 系统的开发及应用；在实训部分，通过介绍 DSP 实现的例子，对实现各种数字信号处理算法的 DSP 程序做了详细的注释和说明及数字滤波器的 DSP 实现，以帮助读者了解和掌握实现处理算法和数字滤波器的 DSP 实现方法和技巧。

本书可作为高职高专电子信息类和通信类专业教材，也可作为各领域内从事信号处理的工程技术人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

数字信号处理/蒋正萍主编. —北京：电子工业出版社，2004.1

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材·通信技术专业

ISBN 7-5053-9507-6

I. 数… II. 蒋… III. 数字信号—信号处理—高等学校：技术学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2003）第 120526 号

责任编辑：周光明

印 刷：北京京科印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1 092 1/16 印张：12.25 字数：312 千字

印 次：2004 年 1 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：16.00 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。
联系电话：（010）68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

出版说明

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分。其根本任务是培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型人才。近年来，高等职业教育发展迅猛，其宏观规模发生了历史性变化。为适应我国社会进步和经济发展的需要，高等职业教育的教学模式、教学方法需要不断改革，高职教材也必须与之相适应，进行重新调整与定位，突出自身的特色。为此，在国家教育部、信息产业部有关司局的支持、指导和帮助下，电子工业出版社在全国范围内筹建成立“全国高职高专教育教材建设领导小组”，下设“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等专业的多个编委会。各专业编委会成员由电子信息战线辛勤耕耘、功绩卓著的专家、教授、高工和富有高职教学经验的一线优秀教师组成。

2002年10月，“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等四个专业的编委会精心组织全国范围内的优秀一线教师编写了《新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材》60余种。这批教材的主要特点是：

1. 在编写方法上打破了以往教材过于注重“系统性”的倾向，摒弃了一些一般内容和烦琐的数学推导，采用阶跃式、有选择的编写模式，强调实践和实践属性，精炼理论，突出实用技能，内容体系更加合理；

2. 注重现实社会发展和就业需求，以培养职业岗位群的综合能力为目标，充实训练模块的内容，强化应用，有针对性地培养学生较强的职业技能；

3. 教材内容的设置有利于扩展学生的思维空间和学生的自主学习；着力于培养和提高学生的综合素质，使学生具有较强的创新能力，促进学生的个性发展；

4. 教材内容充分反映新知识、新技术、新工艺和新方法，具有超前性、先进性。

首批教材共有60余种，将于2003年8月陆续出版。所有参加教材编写的高职院校都有一个共同的愿望：希望通过教材建设领导小组、编委会和全体作者的共同努力，使这批教材在编写指导思想、编写内容和编写方法上具有新意，突出高等职业教育的特点，满足高职学生学习和就业的需要。

高等职业教育改革与教材建设是一项长期的任务，不会一蹴而就，而是要经历一个发展过程。这批高职教材的问世，还有许多不尽人意之处。随着教育的不断深化，我国经济和科学技术的不断发展，高职教材的改革与开发将长期与之相伴而行。在教育部和信息产业部的指导和帮助下，我们将一如既往地依靠本行业的专家，与科研、教学第一线的教研人员紧密联系，加强合作，与时俱进，不断开拓，逐步完善各类专业课教材、专业基础课教材、实训指导书、电子教案、电子课件及配套教材，为高等职业教育提供优质的教学资源和服务。

电子工业出版社高职高专教育教材事业部的全体成员殷切地希望全国高职高专院校的教师们能够踊跃投稿，提出选题建议，并对已出版的教材从多方面提出修改建议。除以上四个专业外，我们还设立了“计算机技术”、“电子商务”、“物流管理”、“会计类”、“金融类”、“环保类”等专业的编委会。我们衷心欢迎更多的志士仁人加入到各个编委会中来。

电子工业出版社的全体员工将竭诚为教育服务，为高等职业教育战线的广大师生服务。

全国高职高专教育教材建设领导小组
电子工业出版社

参加“新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材”

编写的院校名单（排名不分先后）

桂林工学院南宁分院

江西信息应用职业技术学院

江西蓝天职业技术学院

吉林电子信息职业技术学院

保定职业技术学院

安徽职业技术学院

杭州中策职业学校

黄石高等专科学校

天津职业技术师范学院

福建工程学院

湖北汽车工业学院

广州铁路职业技术学院

台州职业技术学院

重庆工业高等专科学校

济宁职业技术学院

四川工商职业技术学院

吉林交通职业技术学院

连云港职业技术学院

天津滨海职业技术学院

杭州职业技术学院

重庆职业技术学院

重庆工业职业技术学院

广州大学科技贸易技术学院

湖北孝感职业技术学院

江西工业工程职业技术学院

四川工程职业技术学院

广东轻工职业技术学院

西安理工大学

辽宁大学高职学院

天津职业大学

天津大学机械电子学院

九江职业技术学院

包头职业技术学院

北京轻工职业技术学院

黄冈职业技术学院

郑州工业高等专科学校

泉州黎明职业大学

浙江财经学院信息学院

南京理工大学高等职业技术学院

南京金陵科技学院

无锡职业技术学院

西安科技学院

西安电子科技大学

河北化工医药职业技术学院

石家庄信息工程职业学院

三峡大学职业技术学院

桂林电子工业学院高职学院

桂林工学院

南京化工职业技术学院

湛江海洋大学海滨学院

江西工业职业技术学院

江西渝州科技职业学院

柳州职业技术学院

邢台职业技术学院

漯河职业技术学院

太原电力高等专科学校

苏州工商职业技术学院

金华职业技术学院

河南职业技术师范学院

新乡师范高等专科学校

绵阳职业技术学院

成都电子机械高等专科学校

河北师范大学职业技术学院

常州轻工职业技术学院

常州机电职业技术学院

无锡商业职业技术学院

河北工业职业技术学院

天津中德职业技术学院

安徽电子信息职业技术学院

浙江工商职业技术学院

河南机电高等专科学校

深圳信息职业技术学院

河北工业职业技术学院

湖南信息职业技术学院

江西交通职业技术学院

沈阳电力高等专科学校

温州职业技术学院

温州大学

广东肇庆学院

湖南铁道职业技术学院

宁波高等专科学校

南京工业职业技术学院

浙江水利水电专科学校

成都航空职业技术学院

吉林工业职业技术学院

上海新侨职业技术学院

天津渤海职业技术学院

驻马店师范专科学校

郑州华信职业技术学院

浙江交通职业技术学院

前 言

本书是根据教育部高职高专培养目标,结合全国高等职业技术教育电子信息类专业教材研讨会精神编写的一本关于数字信号处理(DSP)原理、实现和应用的高职高专类教程。全书概述了数字信号与系统的基本概念、定义和处理实例,详细讨论了差分方程、数字卷积、 z 变换、离散时间傅里叶变换和傅里叶级数、数字滤波器、传输函数、频率响应、频谱、无限和有限脉冲响应数字滤波器的设计以及离散和快速傅里叶变换等基本概念和基本理论,并以较大篇幅介绍了DSP的硬件实现和编程、DSP在声音和图像处理以及小波分析中的应用。书中涉及的数学知识以简明形式给出。

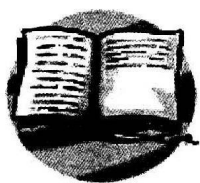
全书共分5章,第1章绪论,概述了信号与系统的基本知识、时域离散系统的基本概念、信号的数字化处理和DSP系统的组成及应用。第2章介绍了数字信号处理中一种重要的离散傅里叶变换、两种离散傅里叶变换的快速算法FFT、离散傅里叶反变换的快速算法和基-4FFT算法。第3章详细讨论了数字滤波器的基本结构、数字滤波器设计理论,又基于MATLAB语言对数字滤波器进行了包含计算机辅助设计在内的各种设计方法和设计举例的阐述。第4章介绍了数字信号处理器,其中包括了TMS320系列及TMC2310等、DSP芯片的构成、DSP系统开发工具的说明及使用和DSP系统的开发及应用。第5章详细介绍了实时数字信号处理系统的软、硬件实现;并列出了系列的数字信号处理的实验,以期使本书在内容上强调内在联系与实际应用中需注意的问题,从而将理论方法与技术实现相结合,软件实现与硬件实现并重。全书行文流畅,概念清晰,论述系统透彻,深入浅出,易于理解,便于自学。

本书第1,2章由蒋正萍(成都电子机械高等专科学校)编写,第3,4,5章由李新(广西桂林职业技术学院)编写。蒋正萍负责全书的组织、修改和定稿。感谢张玉平、张霆、焦根昌、陆绮荣、牛秦洲、刘宏波、刘电霆等同志给予的支持。

本书概念清晰,图文并茂,将DSP基础理论与硬件实现、工程应用很好地结合在一起,汇集了DSP的新技术和新理论,具有系统性、先进性和实用性特点,可作为高等职业学校、高等工程专科学校信息类、通信类专业的专业课程教材,也可以作为各个领域内从事信号处理的科研和工程技术人员的参考书。

由于编者水平所限,书中难免不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2003年10月



Contents

第1章 绪论	(1)
1.1 信号与系统的基本知识	(1)
1.1.1 信号的概念及分类	(1)
1.1.2 系统的概念及描述	(4)
1.2 线性时不变系统	(5)
1.2.1 线性系统	(5)
1.2.2 时不变性、时不变系统与时变系统	(6)
1.3 信号的抽取与插值	(7)
1.4 DSP 系统组成及应用	(12)
本章小结	(14)
习题 1	(14)
第2章 离散傅里叶变换 (DFT) 和快速傅里叶变换 (FFT)	(16)
2.1 傅里叶变换的四种可能形式	(16)
2.1.1 连续时间、连续频率的傅里叶变换	(16)
2.1.2 连续时间、离散频率的傅里叶变换	(17)
2.1.3 离散时间、连续频率的傅里叶变换	(17)
2.1.4 离散时间、离散频率的傅里叶变换	(17)
2.2 周期序列离散傅里叶级数 DFS	(19)
2.3 有限长序列离散傅里叶变换 DFT	(20)
2.4 离散傅里叶变换的性质	(22)
2.4.1 周期性	(22)
2.4.2 线性	(22)
2.4.3 对称性	(23)
2.4.4 时移和频移特性	(25)
2.4.5 卷积特性	(25)
2.4.6 帕塞伐尔 (Parseval) 定理	(25)
2.5 按时间抽取的 FFT 算法	(26)
2.6 按频率抽取的 FFT 算法	(32)
2.7 离散傅里叶反变换的快速算法	(35)
2.8 基-4FFT 算法	(37)
本章小结	(40)



习题 2	(41)
第 3 章 基于 MATLAB 语言的滤波器设计	(43)
3.1 数字滤波器基本结构	(43)
3.1.1 无限长脉冲响应 (IIR) 滤波器的基本结构	(43)
3.1.2 有限长脉冲响应 (FIR) 滤波器的基本结构	(46)
3.2 无限长 $H(n)$ 数字滤波器设计	(48)
3.3 有限长 $h(n)$ 数字滤波器设计	(54)
3.3.1 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点	(54)
3.3.2 线性相位 FIR 数字滤波器的设计	(56)
3.4 MATLAB 语言简介	(63)
3.4.1 认识 MATLAB 的工作环境及简单使用	(63)
3.4.2 MATLAB 实用技巧	(71)
3.4.3 MATLAB 编程环境	(74)
3.5 数字滤波器设计的 MATLAB 实现	(77)
3.5.1 基于 MATLAB 语言的滤波器设计指标	(77)
3.5.2 基于 MATLAB 的滤波器设计函数	(78)
3.6 数字滤波器设计实例	(84)
3.6.1 MATLAB 设计 IIR 数字滤波器	(84)
3.6.2 MATLAB 设计 FIR 数字滤波器	(89)
本章小结	(92)
习题 3	(93)
第 4 章 数字信号处理器及应用	(95)
4.1 TMS320C54X 系列数字信号处理器	(95)
4.1.1 TMS320 系列 DSP 简介	(95)
4.1.2 TMS320C54X 器件的结构	(98)
4.1.3 TMS320C54X 寻址方式	(111)
4.2 DSP 系统开发工具的使用	(114)
4.2.1 XDS5410 系统板	(115)
4.2.2 DSK 程序开发平台	(116)
4.3 DSP 系统的开发与应用	(130)
4.3.1 软件开发技术	(135)
本章小结	(140)
习题 4	(141)
第 5 章 实训	(142)
5.1 XDS54X-EPP 型 DSP 实验开发系统	(142)
5.2 DSP 应用实验	(144)
5.2.1 离散系统 I/O 实验	(144)
5.2.2 IIR 滤波器的设计	(146)



5.2.3 FIR 滤波器的设计	(154)
5.2.4 数据压缩实验	(157)
5.2.5 离散余弦变换 DCT 的 DSP 实现	(161)

附录 C54XDSP 器件的指令系统	(173)
--------------------------	-------

参考文献	(184)
------------	-------

第1章 绪论



内容提要

- 信号、系统的基本概念
- 信号的常见类型
- 线性时不变系统
- 信号的采样分析
- DSP 芯片的结构特征及其主要应用

1.1 信号与系统的基本知识

1.1.1 信号的概念及分类

在自然界中,信息一词是被广泛应用的。通常我们把存在于客观世界的一切事物现象,包括指令、数据、情报等相关周围环境的知识都称为信息。也就是说,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。同时,获取信息的活动也是人类最基本的活动之一。

如果我们把表达信息的某种客观现象独立出来,信息的这种客观对象就演变成了消息。比如电报中的电文,电话中的声音,电视中的图像,雷达的目标距离、高度、方位等参量都是消息。在我们得到一个消息后,可能得到一定数量的信息,而我们所得到的信息,显然与我们在得到消息前对某一事件的无知程度以及得到后对同一事件无知的程度有关。而信息和消息在含义上的区别为:信息是消息中不确定性的消息(也就是该消息给予受信者的新知识),消息就是知道了的信息。

如果我们再将消息转化成为带有信息的某种物理量,比如电信号、光信号、声信号等,这样就演变成了信号。也就是说,信号是消息的物理表现形式。

所谓信号,是指消息的表现形式,是带有信息的某种物理量,如因为消息的传送一般不是直接的,而必须借助于一定形式的信号才能便于远距离快速传输和进行各种处理。由于信号是带有信息的某种物理量,这些物理量的变化包含着信息。因此信号是可以随时间变化或随空间变化的物理量。在数学上,信号可以用一个或几个独立变量的函数表示,也可以用曲线、图形等表示。

在对信号进行处理时,我们往往要考虑信号的类型,即它的幅度、形状和时间持续变化的过程。根据信号时间函数的性质,从不同研究角度出发,可将信号大致分为:连续时间信号与离散时间信号(模拟信号与数字信号)、确定性信号与随机信号、实信号与复信号、周期信号



与非周期信号、能量信号与功率信号、奇异信号与普通信号等。

确定性信号是指能够用明确的数学表示式描述的信号,即对于指定的某一时刻,可以确定一个响应的函数值。如卫星在轨道上的运行、电容器通过电阻放电时电路中电流的变化、机器工作时各个构件的运动等,它们产生的信号都属于确定性信号。

而与之相对应的是随机信号,它是随机的,不可预测的,不能以明确的数学表达式表示,只能用概率统计方法描述信号。如在通信传输过程中引入的各种噪声、汽车行驶时乘客座椅的震动、海面上海浪的起伏、窗外树叶的摆动等,描述这类运动状态的信号均是随机信号。

按照信号在时间轴上取值是否连续,又将信号分成连续时间信号和离散时间信号,如图 1.1 所示。连续时间信号是指在连续时间范围内有定义的信号。若对于幅值和时间都是连续的信号,又称为模拟信号。

离散时间信号是指时间(其定义域为一个整数集)是离散的信号(或称序列),如果离散时间信号不仅在时间上是离散的,而且在幅度上又是量化的,则称为数字信号。

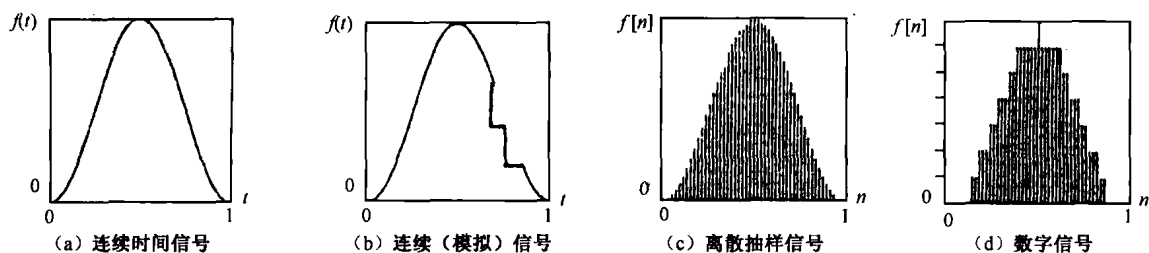


图 1.1 连续时间信号和离散时间信号

实信号是物理可实现的信号,都是时间的实函数,它在各时刻的函数值均为实数,统称为实函数。例如,图 1.2 示出的无线电信号、电视信号(黑和白)等均为实信号。复信号由实部和虚部组成,它在实际中不能产生,只是为了便于理论分析而采用的。在连续信号中最常用的是复指数信号,即

$$f(t) = e^{st} \quad -\infty < t < +\infty$$

式中,复数 $s = \sigma + j\omega$, σ 是 s 的实部,常记做 $\text{Re}\{s\}$, ω 是 s 的虚部,常记做 $\text{Im}\{s\}$ 。根据欧拉公式,上式可展开为

$$f(t) = e^{(\sigma + j\omega)t} = e^{\sigma t} \cos \omega t + j e^{\sigma t} \sin \omega t = f_1(t) + f_2(t)$$

可见,一个复指数信号可分解为实、虚两部分,它们分别是增长(或衰减)的余弦、正弦信号。指数因子的实部 σ 表征了余弦和正弦函数的振幅随时间变化的情况。若 $\sigma > 0$, 它们是增幅振荡;若 $\sigma < 0$, 则是衰减振荡; $\sigma = 0$, 则是等幅振荡。指数因子的虚部 ω 表示余弦和正弦函数的角频率。当 $\omega = 0$ 时复指数信号就成为实指数信号。当 $\sigma = \omega = 0$ 时,则 $f(t) = 1$, 就成为直流信号。可见一个复指数信号可概括许多常用的信号。

与连续时间情况一样,一种重要的离散时间复信号是复指数信号(序列)

$$f[n] = \alpha^n$$

这里 α 一般为复数,若令 $\alpha = e^{\beta}$, 则有另一种表示形式为

$$f[n] = e^{\beta n}$$

这里 β 一般也为复数。从形式上看,似乎上式更加类似于连续时间复指数信号的表达式,



但在离散时间的情况下,往往把离散复指数序列写成 $f[n]=\alpha^n$ 更为方便和实用些。当其中的 α 为复数时,与连续时间情况完全一样,可以用实指数序列和正弦型序列来表示一个复数序列。若将 α 写成极坐标形式

$$\alpha = \rho e^{j\Omega}$$

其中 $\rho=|\alpha|$, 则有

$$f[n]=\alpha^n = \rho^n \cos[\Omega n] + j\rho^n \sin[\Omega n]$$

上式中,若 $\rho=1$,则复指数序列的实部和虚部都是正弦型序列;若 $\rho<1$,则其实部和虚部为正弦型序列乘上一个指数衰减因子的序列;反之,在 $\rho>1$ 时,则乘上一个按指数增长因子的序列;若 α 是实数,则复指数序列就成为实指数序列;在 $|\alpha|>1$ 时,信号随 n 指数增长;在 $|\alpha|<1$ 时,随 n 指数下降;若 α 为正值,则 α^n 所有值都具有同一符号;若 α 为负值,则 α^n 的值符号交替变化;若 $\alpha=1$,则 α^n 是一常数;若 $\alpha=-1$,则 α^n 的值在+1和-1之间交替改变。可见它们同样可概括许多信号。

所谓周期信号 $f(t)$,就是依一定的时间间隔,周而复始出现,而且是无始无终的信号。周期的连续时间信号 $f(t)$ 可写成

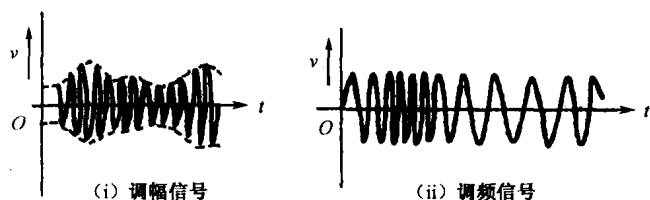
$$f(t)=f(t+kT) \quad k=0,\pm 1,\pm 2,\pm 3,\dots \quad (1.1)$$

周期离散时间信号 $f[n]$ 可写成

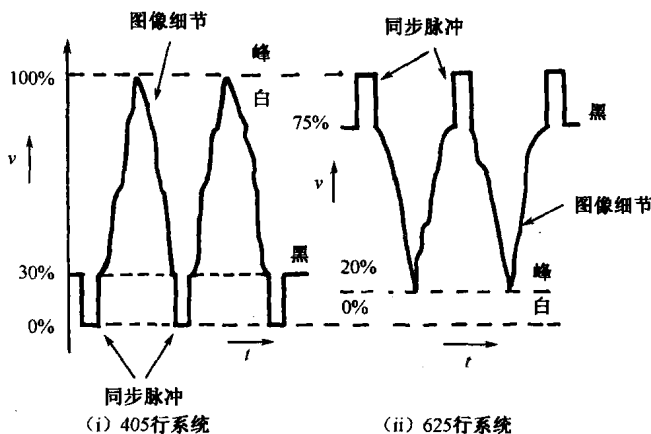
$$f[n]=f[n+mN] \quad m=0,\pm 1,\pm 2,\pm 3,\dots \quad (1.2)$$

满足式 (1.1) 和式 (1.2) 的最小 T 和 N 值,称为该信号的重复周期,简称周期。

只要给出周期信号在任一周期内的函数式或波形,便可确知它在任一时候的数值。



(a) 无线电通信中的调制载波信号波形



(b) 电视中的信号波形

图 1.2 实信号和复信号



1.1.2 系统的概念及描述

系统通常是一个比较宽泛的概念,我们这里把物理上对信号进行处理的装置或技术统称为系统。比如以后我们将要学的用窄带数字滤波器对信号进行频谱分析,这种装置或设备就被称为系统。同样的,利用计算机软件进行 FFT (快速傅里叶变换) 处理,FFT 这种快速运算技术也被称为系统。

系统按照处理方式及功能的不同,可以分为模拟系统和数字系统、连续时间系统和离散时间系统等。

模拟系统是指输入信号和输出信号都是模拟信号的系统。

数字系统是指输入信号和输出信号都是数字信号的系统。

连续时间系统是指输入信号和输出信号都是连续时间信号的系统。通常情况下,我们把连续时间系统称为模拟系统。

离散时间系统是指输入信号和输出信号都是离散时间信号的系统。

在实际中,为了能够分析一个系统,通常要建立描述该系统基本特性的数字模型,这样才能用数学方法对它进行解答,并对所得结果赋予物理意义。

根据系统的分类不同,描述系统的数学方法也各不相同。通常情况下,对于连续时间系统,我们采用微分方程的数学模型来描述;而对于离散时间系统,则采用差分方程的数学模型来描述。

例如,图 1.3 所示的 RLC 串联电路,若把电压源 $u_s(t)$ 作为系统的激励。把流经的电流 $i_L(t)$ 作为系统的响应,则描述该系统的微分方程为

$$u_C''(t) + \frac{R}{L} u_C'(t) + \frac{1}{LC} u_C(t) = \frac{1}{LC} u_s(t)$$

连续时间系统和离散时间系统除了用数学方程进行描述外,还可以用模拟框图来描述系统的激励与响应之间的数学运算关系。

对于上例中 RLC 串联电路,如果用系统框图来描述,则其系统框图如图 1.4 所示。

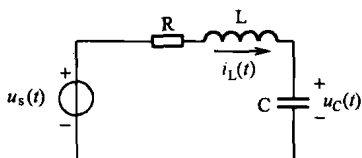


图 1.3 RLC 串联电路

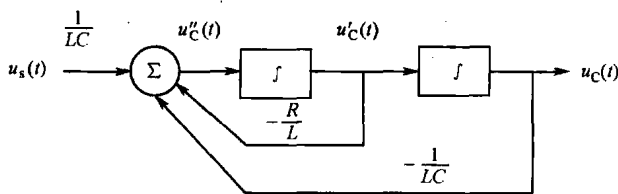


图 1.4 系统框图



1.2 线性时不变系统

前面我们已经介绍了系统的基本概念。对于连续的或离散的动态系统来讲,按照系统的基本特性可以分为线性系统 and 非线性系统,时变系统和时不变系统等等。

1.2.1 线性系统

所谓线性系统是指系统的性能是线性的,它包括系统的齐次性与可加性。

齐次性的公式化定义如下:

如果对于任一连续时间系统的激励 $f(t)$ 与响应 $y(t)$ 之间的关系记为

$$f(t) \rightarrow y(t)$$

则系统的齐次性定义为

$$af(t) \rightarrow ay(t)$$

式中, a 为任意实常数,系统的齐次性又可分为比例性,它意味着当系统的输入变化 a 倍时,其输出也改变 a 倍。

系统的可加性定义如下

若 $f_1(t) \rightarrow y_1(t), f_2(t) \rightarrow y_2(t)$

则 $f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$

系统的可加性又称为叠加性,它意味着当有多个输入一起作用于同一系统时,该系统的总输出可以这样来确定:每次只考虑一个输入(此时应该假设其他输入都为零不对输出造成影响),这样每次得到一个单一的输出,然后再将各个单一的输出相加即可得到系统总的输出。

把齐次性和可加性结合在一起,就可得到线性性质的定理。

如果 $f_1(t) \rightarrow y_1(t), f_2(t) \rightarrow y_2(t)$

则 $a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) \rightarrow a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t)$

式中 a_1, a_2 为任意实常数。

类似地,对离散时间系统,线性性质的定义为

如果 $x_1(n) \rightarrow y_1(n), x_2(n) \rightarrow y_2(n)$

则 $a_1 x_1(n) + a_2 x_2(n) \rightarrow a_1 y_1(n) + a_2 y_2(n)$

式中 a_1, a_2 为任意实常数。

具有上述线性性质的系统就称为线性系统。否则,称为非线性系统。下面我们进一步讨论线性系统的完整定义。

(1) 系统的分解性。它是指当初始状态不为零的系统在外加输入激励的作用下,该系统的总输出(即系统的全响应)可分解为只由初始状态引起的系统零输入响应(对连续系统通常记为 $y_x(t)$, 对离散系统通常记为 $y_o(n)$) 和只由外加输入激励引起的系统零状态响应(对连续系统通常记为 $y_f(t)$, 对离散系统通常记为 $y_x(n)$) 之和,即

$$y(t) = y_x(t) + y_f(t)$$

$$y(n) = y_o(n) + y_x(n)$$

(2) 系统的零状态线性,即当系统的初始状态为零时,输入与零状态响应之间呈线性关系。



(3) 系统的零输入线性, 即当系统外加输入激励为零时, 系统的初始状态与零输入响应之间呈线性关系。

凡是具有分解性、零输入线性和零状态线性的系统就被称为线性系统。线性系统的这三个条件是缺一不可的, 否则该系统就是非线性系统。

例 1.1 判断下述方程所表示的系统中哪些是线性系统? (其中 $f(t)$ 和 $x(n)$ 代表系统输入, $y(0)$ 代表系统惟一的初始状态, $y(t)$ 和 $y(n)$ 代表系统输出。)

$$(1) \quad y(t) = y(0) + f(t) + y(0)f(t); \quad (2) \quad y(t) = y^2(0) + f(t); \quad (3) \quad y(t) = y(0) + |f(t)|;$$

$$(4) \quad y(t) = 2y(0) + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau; \quad (5) \quad y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k); \quad (6) \quad y(n) = \frac{1}{2M+1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(n-k).$$

解: 按照线性系统的定义, 方程 (4), (5), (6) 所表示的系统是线性系统。而方程 (1), (2), (3) 所表示的系统分别不具有分解性、零输入线性、零状态线性, 从而都是非线性系统。

例 1.2 已知一线性连续时间系统, 当输入 $f(t)$ 为零, 初始状态 $y(0) = 5$ 时, 系统响应为 $5e^{-2t}$, 在 $y(0) = 10$ 和 $f(t)$ 的共同作用下, 系统全响应为 $y(t) = 1 + 9e^{-2t}$ 。求 $y(0) = 25$ 和 $2f(t)$ 共同作用下的系统全响应。

解: 已知 $f(t) = 0$, $y(0) = 5 \rightarrow 5e^{-2t}$ 。

根据系统的线性性质, 有

$$f(t) = 0, y(0) = 10 \rightarrow 10e^{-2t}, \quad f(t) = 0, y(0) = 25 \rightarrow 25e^{-2t}$$

而

$$f(t), y(0) = 10 \rightarrow 1 + 9e^{-2t}$$

由线性, 有

$$y(0) = 0, f(t) \rightarrow 1 + 9e^{-2t} - 10e^{-2t} = 1 - e^{-2t}$$

从而有

$$y(0) = 0, 2f(t) \rightarrow 2 - 2e^{-2t}$$

于是

$$y(0) = 25, 2f(t) \rightarrow 2 + 23e^{-2t}$$

即 $y(0) = 25$ 和 $2f(t)$ 共同作用系统产生的全响应为 $2 + 23e^{-2t}$ 。

1.2.2 时不变性、时不变系统与时变系统

系统的时不变性是指系统的各项参数都不随时间变化的常数, 即系统的输出响应形式与输入激励信号的接入时间无关。也就是说, 对于连续时间系统, 当激励 $f(t)$ 作用于系统所引起的响应为 $y(t)$, 则当激励延迟一定时间 t_0 接入该系统时, 它所引起的系统响应也将延迟相同的时间, 即

$$\text{如果 } f(t) \rightarrow y(t), \text{ 则 } f(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0)$$

而对于离散时间系统有

$$\text{如果 } x(n) \rightarrow y_n(n), \text{ 则 } x(n-n_0) \rightarrow y_n(n-n_0)$$

其中 t_0, n_0 是实常数, 可正可负。具有上述时不变性的系统就称为时不变系统, 否则称为时变系统。

如图 1.5 所示为时不变连续系统的示意图。

如果系统同时具有线性性质和时不变性, 该系统称为线性时不变系统, 通常用常系数线性微分方程 (组) (对于连续系统) 和常系数线性差分方程 (组) (对于离散系统) 来对系统进行

描述, 而线性时变系统则是用时变系数方程(组)来描述。

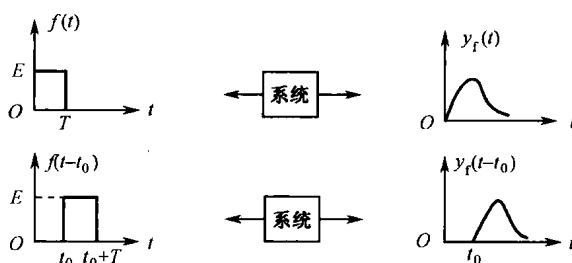


图 1.5 时不变连续系统示意图

例 1.3 下述方程描述的系统, 哪些是时不变系统? 其中 $y(t)$ 和 $y(n)$ 代表系统输出, $f(t)$ 和 $x(n)$ 代表系统输入。

- (1) $y(t) = \cos[f(t)]$; (2) $y(t) = \cos t \cdot f(t)$; (3) $y(n) = nx(n)$ 。

解: 对方程(1)代表的系统有

$$f(t-t_0) \rightarrow \cos[f(t-t_0)] = y(t-t_0)$$

对方程(2)代表的系统有

$$f(t-t_0) \rightarrow \cos t \cdot f(t-t_0) \neq \cos(t-t_0) \cdot f(t-t_0) = y(t-t_0)$$

对方程(3)代表的系统有

$$x(n-n_0) \rightarrow nx(n-n_0) \neq (n-n_0)x(n-n_0) = y(n-n_0)$$

因此方程(1)代表的系统是时不变系统, 方程(2)和方程(3)代表的系统是时变系统。

1.3 信号的抽取与插值

前面我们已经介绍了信号与系统的基本概念及线性时不变系统, 而作为数字信号处理的一个环节——信号的抽取即采样也是非常重要的, 它是将连续时间信号转变成为离散时间信号的一个重要途径。下面我们就来讨论采样原理。首先, 我们应该考察一下一个连续时间信号经过采样以后, 将会发生一些什么变化呢? 例如, 信号频谱将发生怎样变化, 信号内容会不会有丢失, 以及反变换应该怎样进行才能保证不失真, 即由离散信号恢复成连续信号应该具备哪些条件等。采样的这些性质对离散信号和系统的分析都是十分重要的。要了解这些性质, 让我们首先从采样过程分析开始。

采样器一般由电子开关组成, 其工作原理可由图 1.6 来说明。开关每隔 T 秒短暂地闭合一次后, 将连续信号接通, 从而实现一次采样。如果开关每次闭合时间为 τ 秒的话, 那么采样器的输出将是一串重复周期为 T , 宽度为 τ 的脉冲。而脉冲的幅度, 却是重复着这段 τ 时间内信号的幅度。如果我们以 $x_a(t)$ 代表输入的连续信号, 以 $x_p(t)$ 表示采样输出信号, 如图 1.6 (b), (d) 所示。显然, 这个过程我们可以把它看做是一个脉冲调幅过程。被调的脉冲载波是一串周期为 T 、宽度为 τ 的矩形脉冲信号 $x_s(t)$, 如图 1.6 (c) 所示, 则 $x_a(t)$ 与 $x_p(t)$ 的关系为

$$x_p(t) = x_a(t)x_s(t)$$