

UZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



信号变换与处理

XINHAO BIANHUAN YU CHULI

邹云屏 李 潇 编著

华中理工大学出版社

TN911.1

442089

信号变换与处理

邹云屏 李 潇 编著

华中理工大学出

(鄂)新登字第10号

信号变换与处理

邹云屏 李 潇 编著

责任编辑 叶见欣

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮政编码 430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/32 印张:13.375 插页:4 字数:290 000

1994年10月第1版 1996年10月第2次印刷

印数:1 001—3 000

ISBN 7-5609-1032-7/TN·31

定价:10.80元

(本书若有印装质量问题,请向承印厂调换)

内 容 提 要

本书系统地介绍了信号之间的相互变换,数字信号处理的基本理论和方法,并介绍了高速 Laplace 反变换法。全书共分七章,主要内容包括:模拟信号和数字信号及其转换,离散时间信号和 Fourier 变换, Laplace 变换和 Z 变换,离散 Fourier 变换,快速 Fourier 变换,高速 Laplace 反变换,数字滤波器等。

本书可作为高等工科院校应用电子技术和自动化技术类专业的教材,也可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

前 言

本书可作为高等院校工科应用电子技术和自动化技术类专业高年级学生的教材，亦可作其他有关专业师生和工程技术人员的参考书。

本书在编写过程中，充分考虑到学生先修课程的情况，注意了内容的系统性、连贯性，力图精选内容，突出重点，对基本概念和基本方法力求讲深讲透。本书主要介绍了信号之间的相互变换，数字信号处理的基本理论和方法，并介绍了高速 Laplace 反变换法。每一章之后均编有习题，供复习和作业时选用。

本书由邹云屏主编。李潇参加了编写的全部工作，并执笔第七章，其余各部分均由邹云屏执笔。

本书由哈尔滨工业大学王宝祥教授主审，提出了宝贵的修改意见。本书初稿由陈坚教授审阅。书稿由全国高等学校（船电）自动化教材委员会审查通过。教材委员会由如下单位组成：哈尔滨船舶工程学院、哈尔滨工业大学、大连理工大学、清华大学、上海交通大学、华东船舶工业学院、华南理工大学、海军工程学院、武汉交通科技大学、华中理工大学。评审会上承兄弟院校的代表们提出宝贵修改意见，谨致以衷心的感谢。本书在编写过程中，得到了船舶工业总公司教材编审室的领导和有关同志的帮助，得到了我校应用电子技术教研室的老师和同志们的大力支持和热情帮助，在此一并表示感谢。

目 录

绪论	(1)
第一章 模拟信号与数字信号	(4)
§ 1.1 信号与系统	(4)
一、信号	(4)
二、系统	(5)
§ 1.2 采样和量化过程	(8)
一、采样过程	(9)
二、采样定理	(11)
三、采样保持	(12)
四、量化及量化误差	(15)
§ 1.3 模/数转换器	(19)
一、分类	(19)
二、模/数转换原理	(20)
三、模/数转换器的主要技术参数	(24)
四、模/数转换器与微处理器的接口	(26)
§ 1.4 数/模转换器	(32)
一、数/模转换器的工作原理	(32)
二、数/模转换器的主要技术参数	(45)
三、集成数/模转换器	(46)
习题一	(50)
第二章 离散时间信号和 Fourier 变换	(52)
§ 2.1 连续时间 Fourier 级数及其变换	(52)
一、周期信号的表示——连续时间 Fourier 级数	(52)

二、非周期信号的表示——连续时间 Fourier 变换	(59)
三、周期信号与连续时间 Fourier 变换	(64)
§ 2.2 离散时间信号——序列	(68)
一、序列	(68)
二、序列之间的运算	(68)
三、常用的典型序列	(71)
四、序列的周期性和能量	(74)
五、序列的一般表示方法	(75)
§ 2.3 离散时间系统	(76)
一、线性时不变离散时间系统	(76)
二、卷积	(78)
三、系统的稳定性和因果性	(83)
§ 2.4 常系数线性差分方程	(88)
一、差分方程	(88)
二、常系数线性差分方程	(90)
§ 2.5 离散系统的频率响应	(98)
一、系统的频率响应	(98)
二、系统频率响应的两个特性	(100)
§ 2.6 离散信号(序列)的 Fourier 变换	(102)
一、Fourier 变换	(102)
二、输出序列与输入序列 Fourier 变换间的关系	(103)
三、Fourier 变换的对称性	(104)
习题二	(108)

第三章 Laplace 变换和 Z 变换

§ 3.1 Laplace 变换	(112)
一、Laplace 变换的定义	(112)
二、Laplace 变换的收敛	(114)
§ 3.2 Laplace 变换的性质	(116)
§ 3.3 用 Laplace 变换法分析电路	(120)

一、Laplace 变换的优点——微分积分方程的变换	(120)
二、电路及元件的 Laplace 变换	(122)
§ 3.4 Z 变换	(125)
一、Z 变换的定义	(125)
二、Z 变换的收敛域	(127)
三、几种常见的典型序列的 Z 变换及收敛域	(129)
§ 3.5 Z 反变换	(138)
一、Z 反变换公式	(138)
二、常用的 Z 反变换法	(139)
§ 3.6 Z 变换的性质与定理	(148)
§ 3.7 Laplace 变换、Fourier 变换与 Z 变换的关系	(158)
一、Z 变换与 Laplace 变换的关系	(158)
二、Z 变换与 Fourier 变换的关系	(161)
三、序列的 Fourier 变换与 Laplace 变换的关系	(162)
§ 3.8 利用 Z 变换和系统函数解差分方程	(163)
一、利用 Z 变换解线性常系数差分方程	(163)
二、系统函数和差分方程的关系	(166)
习题三	(167)
第四章 离散 Fourier 变换(DFT)	(171)
§ 4.1 离散 Fourier 级数及其性质	(171)
一、离散 Fourier 级数	(171)
二、离散 Fourier 级数的性质	(173)
§ 4.2 离散 Fourier 变换及其性质	(178)
一、离散 Fourier 变换	(178)
二、离散 Fourier 变换的性质	(181)
§ 4.3 用 DFT 计算线性卷积	(190)
§ 4.4 频域采样	(194)

一、DFT 和 Z 变换与 Fourier 变换的关系	(194)
二、频域采样	(196)
习题四	(200)
第五章 快速 Fourier 变换(FFT)	(204)
§ 5.1 FFT 的基本思想	(204)
一、直接计算 DFT 的问题	(204)
二、改善 DFT 运算的基本方法	(205)
§ 5.2 按时间抽取(DIT)的 FFT 算法	(206)
一、算法原理	(207)
二、蝶形运算公式	(209)
三、DIT 的 FFT 计算特点	(216)
§ 5.3 按频率抽取(DIF)的 FFT 算法	(222)
一、算法原理	(223)
二、DIT 的 FFT 算法与 DIF 的 FFT 算法的比较	(228)
三、频率抽取 FFT 算法的 FORTRAN 程序	(229)
§ 5.4 IFFT 计算方法	(231)
§ 5.5 快速 Fourier 变换的应用	(234)
一、利用 FFT 对信号进行谱分析	(234)
二、利用 FFT 计算线性卷积——快速卷积	(238)
三、利用 FFT 求相关——快速相关	(242)
习题五	(245)
第六章 高速 Laplace 反变换(FILT)	(247)
§ 6.1 概述	(247)
§ 6.2 Laplace 反变换	(249)
一、部分分式展开法求 Laplace 反变换	(249)
二、留数定理法求解 Laplace 反变换	(255)
三、数值法	(256)
四、Laplace 变换的困难所在	(258)

§ 6.3 高速 Laplace 反变换	(262)
一、FILT 的理论推导	(262)
二、复数实部与虚部的求法	(264)
三、交错级数求和的方法	(267)
§ 6.4 Euler 变换	(272)
一、Euler 变换	(272)
二、Euler 变换系数	(274)
三、Euler 变换的截止误差	(279)
§ 6.5 FILT 的计算程序	(283)
一、复杂交错级数的求和	(283)
二、FILT 的计算程序及误差分析	(285)
§ 6.6 高速数值 Laplace 反变换的应用	(298)
一、过渡过程问题	(298)
二、不稳定系统和 FILT	(313)
习题六	(321)
第七章 数字滤波器	(324)
§ 7.1 模拟滤波器	(325)
一、模拟滤波器的原理	(325)
二、模拟滤波器的分类	(326)
§ 7.2 模拟滤波器的设计	(327)
一、低通模拟滤波器的设计	(327)
二、巴特沃思滤波器	(330)
三、切比雪夫滤波器	(337)
四、模拟滤波器的频率变换	(346)
§ 7.3 数字滤波器	(353)
一、数字滤波器的原理	(353)
二、FIR 数字滤波器	(355)
三、IIR 数字滤波器	(356)
§ 7.4 IIR 数字滤波器的设计	(358)

一、用模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器的步骤	(358)
二、冲激不变 (impulse invariance) 法	(359)
三、双线性变换 (bilinear transformation) 法	(366)
四、直接变换法	(374)
五、数字频率变换法	(377)
§ 7.5 FIR 数字滤波器的设计	(382)
一、线性相位 FIR 数字滤波器的特性	(382)
二、用窗函数法设计 FIR 数字滤波器	(389)
习题七	(403)
附录	(406)
附录一 Laplace 变换	(406)
附录二 典型信号的 Fourier 变换及频谱图	(409)
参考文献	(414)

绪 论

信号是随时间变化的某种物理量,可以表示为一种运载信息的函数,在科学研究和工程技术等领域中,往往需要对信号进行处理。所谓信号处理,就是采用某种计算方法并按预定的规则对信号进行运算。有时,为便于运算和应用,还必须对其进行必要的变换。信号可分为模拟信号和数字信号。模拟信号是指在时间上和幅度上都是连续的信号,数字信号是指在时间上是离散的、在幅度上也是离散的信号,并且可以用有限长序列来表示。对信号进行处理,包括对模拟信号和数字信号的处理。而对模拟信号进行处理,既可以使用模拟系统的基本理论,也可以使用数字系统的基本理论。在本世纪 60 年代以前,对信号的处理,绝大多数情况都是用模拟方法实现的,例如对模拟信号进行滤波是使用模拟滤波器等。到 60 年代,用数字方法进行信号处理得到了较快的发展。其原因:一是数字信号处理技术具有显著的优越性,如抗干扰能力强,表现出高稳定性;系统调试方便,表现出高灵活性;特别是 LSI、VLSI 的出现,使电子计算机技术得到了飞速的发展,提高了数字信号处理的速度,表现出高速性。二是在经济上比较合理,因而用数字方法来处理信号的领域越来越扩大。三是数字信号处理的理论和技术不断的发展和更新,使模拟信号用数字方法处理变得十分方便。模拟信号用数字方法处理的过程是,先将模拟信号数字化,进行 A/D 变换,使之成为数字信号,然后用数字系统的方法进行处理,得到一个处理后的数字信号,再经 D/A 变换得到所需要的模拟信号。可见,模拟信

号数字化处理,除增加 A/D、D/A 变换以外,实际上亦为数字信号处理。从这点出发,本书被定名为《信号变换与处理》。

目前国内外出版的数字信号处理类的教材,大都内容过多,篇幅过大,而且多数教材又是针对无线电技术类和信息工程专业类的。而本书是为没有学过“信号与系统”这一课程的应用电子技术专业和自动化类专业本科生编写的,也可供有关人员参考。因而与现有的教材相比较,具有明显的不同之处。下面就本书的内容组成作一些说明。

第一章模拟信号和数字信号,是考虑到工程上需要对模拟信号进行处理而编写的。在本章中介绍了信号与系统、采样和量化的基本概念,并重点介绍了 A/D、D/A 变换的原理及 A/D、D/A 变换器。

第二章离散时间信号和 Fourier 变换,是数字信号处理的基本理论。本章对连续时间 Fourier 级数和 Fourier 变换、离散时间信号、离散时间系统的基本内容进行了讨论,对线性时不变系统的数学模型(差分方程)、时域和变换域(频域)的响应等作了必要的介绍。然后重点介绍离散信号的 Fourier 变换。

第三章 Laplace 变换和 Z 变换,这二种变换分别在分析连续时间系统和离散时间系统中起着很重要的作用。在本章中,首先介绍 Laplace 变换及其性质, Laplace 变换法在分析电路中的应用。然后重点介绍 Z 变换及其性质, Z 反变换的方法;并就 Laplace 变换、Fourier 变换与 Z 变换的关系,利用 Z 变换和系统函数解差分方程作了必要的讨论。

第四章离散 Fourier 变换(DFT),是数字信号处理中的重要理论和计算方法。在第二章介绍的各种信号的 Fourier 变换的基础上,引出离散 Fourier 级数,进而引出 DFT,讨论 DFT 的性质和应用,并重点介绍求循环卷积和计算线性卷积的方法。

第五章快速 Fourier 变换(FFT),是 DFT 的快速算法。本章只对基-2 算法作重点介绍,对时间抽取(DIT)和频率抽取(DIF)的 FFT 进行了详细的讨论。FFT 的应用范围很广,限于篇幅,只对信号频谱分析、快速卷积和快速相关作简要的介绍。并对快速 Fourier 反变换(IFFT)进行适当的讲述。

第六章高速 Laplace 反变换(FILT)。Laplace 变换在科学技术各领域中广泛地被使用,但从像函数变换为原函数(即反变换)时存在着困难。本章所讨论的 FILT,是将求原函数的运算转化为求一无限交错级数之和与一因子乘积的运算。为加快无限交错级数求和的速度,在满足精度要求的前提下,将求和运算分为:交错级数的前 K 项用普通求和,第 K 项以后用 Euler 变换求和来进行计算,即 FILT 是一种利用计算机进行计算的高速数值计算方法。本章中重点介绍了 FILT 的理论推导,交错级数求和的方法,Euler 变换和 Euler 变换截止误差的分析。并介绍了 FILT 的计算程序及 FILT 的应用。

第七章数字滤波器。鉴于数字滤波器的设计需要用到模拟滤波器的设计理论,而许多读者并没有学过这方面的有关理论,所以本章首先详细介绍了模拟滤波器的原理,各种设计方法。在此基础上,重点介绍了数字滤波器的原理,无限冲激响应(IIR)数字滤波器的设计和有限冲激响应(FIR)数字滤波器的设计。

第一章 模拟信号与数字信号

§ 1.1 信号与系统

一、信号

广义地说,信号是随时间变化的某种物理量,可以表示为一种运载信息的函数。信号所含的信息总是寄寓在某种形式的波形之中,数学上可以表示为一个或者多个变量的函数,且常以时间作函数的自变量。例如正弦函数,STEP(阶跃)函数等,都可以作为一种信号。当然尽管通常是以时间作函数的自变量,但有时也不一定非以时间作自变量不可,也不一定只限于一个自变量。对于信号,可以从不同角度进行分类。信号常分为:

(一)模拟信号

模拟信号是指在连续时间范围内,其幅度是连续的信号。例如通常讲的三相交流电压,交流电流都是模拟信号。

(二)连续时间信号

连续时间信号是指在规定的连续时间内,信号的幅值可以是连续值,也可以是离散值(其幅度随时间 t 作跳跃式的变化)的信号。如图 1-1a 所示。

值得指出的是,连续时间信号与模拟信号常用来说明同一信号,可以通用。常常把模拟信号看作为连续时间信号的一个特例,因而一般都采用连续时间信号这一名字。但是,当谈及数字

信号时,往往采用模拟信号这个名字。

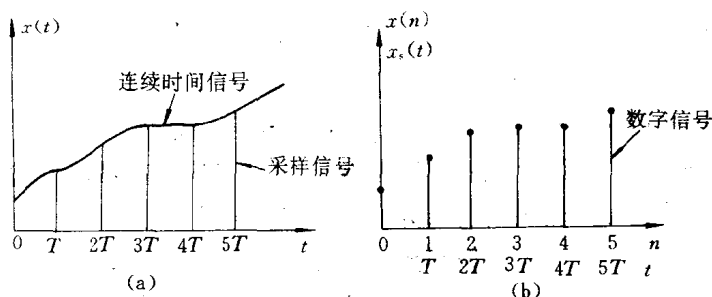


图 1-1 连续时间信号及其采样与量化

(三) 离散时间信号

离散时间信号是指在一组离散的时间下的信号。最常见的离散时间信号是模拟信号在时间上以一定的间隔的采样信号,因而离散时间信号又称为采样信号或序列。如图 1-1a 所示的采样信号。

(四) 数字信号

数字信号通常是将模拟信号在时间上和幅值上都经过量化所得到的信号。所谓量化,是利用一组数值来表示变量的过程。所以,数字信号可以用一序列的数来表示,如图 1-1b 所示。

同样,离散时间信号与数字信号也经常用来说明同一信号,因而离散时间信号的一些理论也适用于数字信号。

二、系统

几乎在科学技术的每一领域,为了简化信号的提取,都必须进行信号处理。所谓信号处理,可以理解为对信号进行某种加工或变换。其目的是削弱信号中的多余内容;滤除噪声和干扰;或者将信号变换成容易分析和识别的形式,便于估计和选择其特

征参量。将凡是反映信号处理因果关系的设备或运算都称为系统,或者讲,系统可以看成是产生信号变换的任何过程。因而信号处理系统可与信号具有相同的分类方法。

连续时间系统:将连续时间输入信号变换成连续时间输出信号,即输入与输出信号皆为连续时间信号的系统。

离散时间系统:将离散时间输入信号变换为离散时间输出信号,即输入与输出信号皆为离散时间信号的系统。

同样,对于模拟系统和数字系统,前者是输入与输出信号都是模拟信号的系统,后者是输入与输出信号都是数字信号的系统。而本书主要研究数字(离散)信号和系统。

(一)系统间相互联结

当两个系统在相互联结时,如果系统1的输出是系统2的输入,整个系统首先是按系统1、然后再按系统2来变换输入的,这种联结方式叫做级联。当然,系统的级联也可以是两个或更多个系统依次联结起来的。如果两个系统的输入信号是相同的,并且相加,整个系统的输出为两个系统的输出之和,则这种联结方式叫做并联。当然系统的并联也能在两个以上的系统中进行。也可以将级联与并联结合在一起而得到一种更为复杂的系统,叫做级联/并联联结系统。此外还有另一种重要类型,就是反馈联结。例如,系统1的输出是系统2的输入,而系统2的输出反馈回来与外加的信号一起组成系统1的真正输入,这种方式叫做反馈联结方式。

(二)系统的性质

在这里,对连续时间系统和离散时间系统的一些基本性质作简单介绍,其他性质在以后的一些章节中再详细讨论。

1. 可逆性

一个系统如果在不同的输入下,有不同的输出,换言之,按