



北京市高等教育精品教材立项项目

测试信号处理技术

周浩敏 王 睿 编著

CESHI XINHAO CHULIJISHU



北京航空航天大学出版社

华北水利水电学院图书馆



208316017

TN911-43

Z764



北京市高等教育精品教材立项项目

测试信号处理技术



编著

北京航空航天大学出版社

831601

内 容 简 介

本书主要介绍了信号分析与处理的理论知识,包括:连续和离散时间信号的频谱分析、模拟和数字滤波器的设计原理及方法;同时介绍了随机信号分析、现代信号处理技术的基本概念及基本分析方法。

全书共8章,包括:连续周期信号的傅里叶级数、连续非周期信号与抽样信号的傅里叶变换、离散时间序列与 z 变换、离散时间信号分析、数字滤波基础、数字滤波器、随机信号分析和现代信号处理技术等内容。

本书可作为测控技术与仪器、自动化、电器工程和机电工程等大学本科专业的教科书,也可作为相关专业工程硕士的教材以及工程技术人员学习信号分析与处理技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

测试信号处理技术/周浩敏等编著. — 北京:北京航空航天大学出版社, 2004. 9

ISBN 7-81077-496-4

I. 测… II. 周… III. ①信号分析—高等学校—教材②信号处理—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 045097 号

测试信号处理技术

周浩敏 王 睿 编著

责任编辑 韩文礼

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpres@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:28.75 字数:644 千字

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-81077-496-4 定价:38.00 元

103188

前言

随着信息技术的迅速发展,为了适应科学技术发展和学科建设的需要,北京航空航天大学出版社于 2001 年正式出版了《信号处理技术基础》一书。由于这本教材针对自动化、测控技术与仪器和机电工程等专业的学生没有学过“信号与系统”课程的具体情况,取材合理,内容深入浅出,重点安排得当,受到学生的欢迎。随着学科专业的改革和发展,以及新的教学大纲的实施,对仪器科学学科专业本科生来说,信息的获取和有关信号的处理技术显得愈来愈重要了,无论在内容的深度和广度上都需要对《信号处理技术基础》作较大调整。为此,除个别章节外,我们对《信号处理技术基础》重新进行了编写,增加了许多新的包括现代信号处理技术的内容,习题部分给出了参考答案,增加并调整了部分例题,名称也相应改为《测试信号处理技术》。当然,本书仍保持了《信号处理技术基础》中既重视数学原理的系统性和逻辑性,又强调概念的物理意义的风格和特色。

这本新教材仍然不要求学生先修“信号与系统”课程,并仍以确定性信号的分析与处理为主要研究对象;但内容更为精炼,深度和要求作了相应的调整,增加了“求逆卷积”一节。另外,随机信号的分析、现代信号处理技术的内容相比《信号处理技术基础》的分量明显增加,这对于学习或从事信息的获取、分析处理知识和技术的人们来说,是有用的,也是需要的。由于 MATLAB 软件平台的信号处理功能强大,根据我们在教学中的体会,其普及程度比前几年有了明显提高,因此要求大部分学生应能使用 MATLAB 编程,解决学习和实践中有关信号分析和处理方面的问题。为此本书增加了对 MATLAB 符号运算工具箱中有关傅里叶变换、拉氏变换和 z 变换计算的应用以及数字滤波器设计和分析工具 FDATool 的介绍。

在教材编写过程中,考虑了我校专业调整后的特点,参考了国内外许多新出版的相关教材与参考书,总结了近年来从事信号分析与处理课程的教学实践。全部内容中包括三次上机作业,大约需要 60 课内学时。选用本教材的教师应根据实际需要与可能组织安排教学。

全书共分 8 章,内容安排如下:

第 1 章 概 论。介绍信号、信号分析和处理和信号运算等相关概念。

第 2 章 信号分析和处理基础。讲述连续时间信号的时域和频域分析,重点是频域分析,包括周期信号、非周期信号、抽样信号的傅里叶分析、信号的能量谱和功率谱等,以建立信号频谱分析的基本概念,为全书的学习奠定基础。

第 3 章 离散时间序列及其 z 变换。进一步讨论离散时间信号的基础知识。

第 4 章 离散时间信号分析。本章实际上是数字信号分析的基本内容,是本书的重点之

一,包括:序列的傅里叶变换 DTFT、离散傅里叶级数 DFS 和离散傅里叶变换 DFT,信号的拉氏变换、傅里叶变换和 z 变换之间的关系,快速傅里叶变换 FFT 及其应用,逆卷积的求解方法。

第 5 章 数字滤波基础。主要包括:离散时间系统的基础知识、模拟滤波器的设计方法及其实现。

第 6 章 数字滤波器。主要讨论数字滤波器的特性、数字滤波器的设计方法及其结构实现。讨论了无限冲激响应数字滤波器设计的冲激响应不变法和双线性变换法、有限冲激响应滤波器的窗口法和频率抽样法,适当介绍了等波纹优化设计的方法。

第 7 章 随机信号分析基础。介绍连续和离散时间随机信号的基本概念,时、频域中数字特征;通过线性系统的分析、最小均方误差滤波技术的简介,确定性信号的相关分析和检测。

第 8 章 现代信号处理技术导论。专门介绍了短时傅里叶变换及时-频域分析、小波变换及小波分析基础、实时信号处理系统及相关技术。

其中,第 5 章和第 6 章由王睿副教授编写;其余各章由周浩敏教授编写,并负责统编定稿。

本书承蒙北京航空航天大学电子信息工程学院的殷瑞教授审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议;根据他的意见和建议,编者对本书作了认真的修改,在此谨表示衷心的感谢。李新同学对书稿电子文档的录入、修改和打印做了许多工作,也在此表示感谢。

由于编者水平有限,对于书中的错误,恳请读者指正。

编 者

2004 年 3 月

目录

第1章 概 论

1.1 信 号	1
1.2 信号分析、信号处理	4
1.3 基本的连续信号	10
1.4 连续时间信号的运算	16
思考与练习题	18

第2章 信号分析和处理基础

2.1 系统分析与信号	20
2.1.1 连续时间系统的线性非移变特性	21
2.1.2 连续信号的时域分解	22
2.1.3 卷积法求系统零状态响应与卷积的性质	23
2.2 周期信号的频谱分析——傅里叶级数	25
2.2.1 正交函数	25
2.2.2 三角函数形式的傅里叶级数	27
2.2.3 指数形式的傅里叶级数	29
2.2.4 信号的重构和吉伯斯现象	38
2.2.5 周期信号的功率谱	42
2.3 非周期信号频谱分析——傅里叶变换	43
2.3.1 傅里叶变换	43
2.3.2 典型非周期信号的频谱	46
2.3.3 傅里叶变换的性质	50
2.4 周期信号的傅里叶变换	66
2.4.1 复指数、正弦、余弦信号的傅里叶变换	67
2.4.2 一般周期信号的傅里叶变换	68
2.4.3 周期信号与单周期脉冲信号频谱间的关系	69
2.5 能量谱	70
2.6 抽样信号的傅里叶变换	74

2.6.1 时域抽样	74
2.6.2 频域抽样	77
2.6.3 抽样定理	78
思考与练习题	85

第3章 离散时间序列及其 z 变换

3.1 离散时间信号——序列	90
3.1.1 序列	90
3.1.2 基本序列	91
3.1.3 序列的运算	95
3.2 序列的 z 变换	97
3.2.1 z 变换的定义	97
3.2.2 z 变换的收敛域	98
3.2.3 典型离散时间信号(序列)的 z 变换	105
3.3 z 变换的性质	107
3.4 z 反变换	112
3.4.1 围线积分法	112
3.4.2 幂级数展开法	113
3.4.3 部分分式展开法	115
思考与练习题	121

第4章 离散时间信号分析

4.1 序列的傅里叶变换	124
4.2 信号的傅氏变换、拉氏变换与 z 变换的关系	128
4.3 离散傅里叶级数	131
4.3.1 傅里叶变换在时域和频域中的对称规律	132
4.3.2 离散傅里叶级数 DFS	134
4.4 离散傅里叶变换	137
4.4.1 离散傅里叶变换 DFT 定义式	137
4.4.2 离散傅里叶变换 DFT 与序列傅里叶变换的关系	139
4.5 离散傅里叶变换的性质	140
4.6 快速傅里叶变换	145
4.6.1 DFT 直接运算的问题和改进思路	145
4.6.2 基2按时间抽取的 FFT 算法(时析型)	147

4.7 IDFT 的快速算法	153
4.8 FFT 的软件实现	153
4.9 离散傅里叶变换的应用	159
4.9.1 用 FFT 实现快速卷积	159
4.9.2 连续时间信号的数字谱分析	165
4.9.3 FFT 在动态测试数据处理中的应用	173
4.10 逆卷积	177
4.10.1 时域逆卷积	177
4.10.2 基于同态系统的逆卷积	179
4.10.3 信号的倒谱分析	183
思考与练习题	185
 第 5 章 数字滤波基础	
5.1 线性非移变离散系统时域分析	191
5.1.1 线性非移变离散系统	191
5.1.2 离散系统的数学模型——差分方程的建立	191
5.1.3 离散系统时域分析	193
5.2 离散系统的 z 域分析	202
5.2.1 差分方程的 z 变换解法	202
5.2.2 离散系统的系统函数	203
5.2.3 离散系统的频率响应	206
5.3 模拟滤波器的基本概念及其设计方法	215
5.3.1 基本概念	215
5.3.2 信号通过线性系统无失真传输的条件	218
5.3.3 滤波器的理想特性与实际特性	219
5.3.4 模拟滤波器的一般设计方法	223
5.4 模拟滤波器的设计	227
5.4.1 巴特沃思滤波器	227
5.4.2 切比雪夫滤波器	235
5.4.3 频率变换	244
思考与练习题	249
 第 6 章 数字滤波器	
6.1 数字滤波器的基本原理	252

6.2 IIR 数字滤波器设计	256
6.2.1 冲激响应不变法	256
6.2.2 双线性变换法	263
6.2.3 其他类型(高通、带通、带阻)IIR 数字滤波器设计	271
6.2.4 IIR 滤波器峰值最小的最佳设计	277
6.3 FIR 数字滤波器设计	279
6.3.1 FIR 数字滤波器的基本特征	280
6.3.2 窗口法设计 FIR 数字滤波器	287
6.3.3 频率抽样法	293
6.3.4 最优等波纹滤波器设计	302
6.4 滤波器设计和分析工具 FDA Tool	308
6.5 数字滤波器的实现	314
6.5.1 软件实现与硬件实现	315
6.5.2 数字滤波器的结构	318
6.5.3 有限字长对数字滤波器实现的影响	330
6.5.4 数字滤波器类型选择原则	331
思考与练习题	332

第7章 随机信号分析基础

7.1 随机信号及其在时域的数字特征	334
7.1.1 随机信号	334
7.1.2 连续随机信号的数字特征	335
7.1.3 各态历经连续随机信号的数字特征	340
7.1.4 离散随机信号的数字特征	341
7.1.5 各态历经离散随机信号的数字特征	344
7.2 随机信号的频域描述	347
7.2.1 连续时间随机信号的功率谱分析	347
7.2.2 离散时间随机序列的功率谱分析	350
7.2.3 功率谱估计	355
7.3 平稳随机信号通过线性系统的分析	361
7.3.1 平稳随机信号通过线性连续系统	361
7.3.2 平稳随机序列通过线性离散系统	365
7.3.3 相干检测	368
7.3.4 相关辨识	369

7.4 非平稳状态的系统分析	373
7.5 确定性信号的相关分析与检测	374
7.5.1 确定性信号的相关函数	374
7.5.2 信号的相关检测技术	379
7.6 最小均方误差滤波技术简介	383
7.6.1 维纳滤波	383
7.6.2 卡尔曼滤波器	385
7.6.3 自适应滤波	387
思考与练习题	392
第8章 现代信号处理技术导论	
8.1 短时傅里叶变换及其时-频域分析	394
8.2 小波变换基础及小波分析	398
8.2.1 连续小波分析	399
8.2.2 离散小波变换	402
8.2.3 多分辨率分析	406
8.3 实时信号处理及其系统概述	419
8.3.1 实时的概念	419
8.3.2 实时信号处理的结构	421
8.3.3 折中设计	425
思考与练习题	440
练习题参考答案	
参考文献	

第 1 章 概 论

基本内容:

- 信息·信号
- 信号分析·信号处理
- 基本连续时间信号
- 信号的运算

1.1 信 号

目前,人们普遍认为:物质、能量和信息是人类社会和自然界的三大支柱,是科学历史上三个最重要的概念。当前人类正逐渐进入信息社会,获取、传输、交换和利用信息成为人类基本的社会活动。什么是“信息”?如何获取并进行信息的传输、交换和利用?这些成为必须研究的大问题。

1. 定 义

关于信息的定义,有人曾统计过,到目前为止,国内外约有 100 多种说法,这些说法或多或少都存在一些局限性,还没有一个统一的为人们普遍认同的定义。下面介绍两种比较有代表性的定义:

① 控制论的创始人之一,美国科学家维纳(N. Wiener)指出:“信息就是信息,不是物质,也不是能量”。后来他又在另一篇论文中指出:“信息是人们在适应外部世界并且使这种适应反作用于外部世界的过程中,同外部世界进行互相交换的内容的名称”。但人们在与外部世界相互作用的过程中,还进行着物质与能量的交换,这样的定义在某种程度上又把信息与物质、能量的概念混同了起来。

② 信息论的奠基人,美国科学家香农(C. E. Shnnon)则认为:信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述。这个定义的出发点是假定事物状态都可以用一个概率模型来描述,这样的模型是否任何情况下都存在,值得探讨。另外香农对信息的定义排除了信息的主观含义,实际上,信息有很强的主观性和实用性,例如,两个音乐修养不同的人听同一首音乐,获得的信息量就会有很大的不同。因此,信息具有两个特征:广泛性和抽象性。

在这里我们不对信息的定义作深入的探讨,为便于理解,不妨认为:信息是反映一个系统的状态或特性的预先未知的报道。预先未知是强调新的消息、新的知识,即一个“新”字。简而

言之,信息就是新的知识,就是人类对外界事物的感知。人们需要正确地获取、有效地传递并可靠地交换科技、教育、文化、社会和经济等各种信息,但信息本身不具备传输和交换的能力,而必须通过信号来实现。

信号是随时间变化的物理量(电、光、文字、符号、图像、数据等),可以认为它是一种转载信息的函数。这就是说,信号是指一个实际的物理量(最常见的是电量),数学上可以表示为一个数学函数,例如:

$$x = A \cos(\Omega_0 t + \varphi) \quad (1.1)$$

它既是正弦信号,也是正弦函数。在信号理论中,信号和函数是通用的。

人们要获取信息,首先要获取信号,再通过适当的信号分析与处理,才能取得需要的信息。例如:“飞行中的飞机”,飞行员想要知道“飞行是否正常”的信息,必须先获得有关飞机飞行状态的参数,如高度 H 、速度 v 、航向 ψ 等随时间变化的函数关系,以及表征发动机工作状态的参数,如温度 t 、压力 p 、转速 n 、流量 Q 等随时间变化的情况。在飞机上,上述物理参数的情况(包含了飞行是否正常的信息)通过相应的传感器变换为电压或电流随时间变化的信号,驾驶员和机务人员(或者自动驾驶仪)得到相应的信号后,依据相应的专业知识对这些信号进行分析和处理,可以得出飞行正常与否的信息,并作出相应的响应和处理。

上面的例子清楚地说明了信号与信息有着密切的关系,概括起来,可以认为:

- ① 信号是物理量或函数;
- ② 信号中包含着信息,是信息的载体;

注意:在通信中,通常把符号、文字、数字或语音组成的序列称为“消息”,即一个手机短消息、一句话、一段文字或报纸上登载的新闻均为消息。这里未引出这一概念。

③ 信号不是信息,必须对信号进行分析和处理后,才能从信号中提取出信息,这是学习和应用信号分析与处理的根本目的。

2. 信号表示

信号可以用数学解析式描述,也可以用图形来表示。

客观存在的信号是实数,但为了便于进行数学上的处理和分析,还经常用复数或矢量形式表示。

如正弦信号的实数形式为

$$x(t) = A \cos(\Omega_1 t + \varphi) \quad (1.2)$$

对应的复数形式为

$$s(t) = A e^{j(\Omega_1 t + \varphi)} = A e^{j\varphi} e^{j\Omega_1 t} = \dot{A} e^{j\Omega_1 t} \quad (1.3)$$

其中,

$$\dot{A} = A e^{j\varphi} \quad (1.4)$$

为复振幅,则 $s(t)$ 的实部就是原来的实信号,即

$$x(t) = \operatorname{Re} s(t) \quad (1.5)$$

又如彩色电视信号是由红(r)、绿(g)、蓝(b)三个基色不同比例合成的结果,可用矢量来描述

$$I(x, y, t) = \begin{bmatrix} I_r(x, y, t) \\ I_g(x, y, t) \\ I_b(x, y, t) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

信号也可用图形表示。

常见的信号可通过三个参数描述:频率、幅度和相位。而频率和幅度是最重要的,直接影响信号的主要特性。例如声波信号,当其频率 $f < 20$ Hz,为次声波,一般人耳听不到,声强(和信号幅度相关)足够大,能够被人感觉到; $20 < f < 20$ kHz,为声波,能够被人听到; $f > 20$ kHz,为超声波,人耳听不到,但具有方向性,可以成束,在测量中有着重要应用。

可见,频率不同,信号的特性会有显著的差别。最简单的信号是正弦信号,只有单一的频率,称为“单色”信号;具有许多不同频率正弦分量的信号,称为“复合”信号。大多数应用场合是复合信号,复合信号的一个重要参数是频带宽度,简称带宽。例如高音质的音响信号的带宽是 20 kHz,而一个视频信号带宽有 6 MHz。

3. 信号分类

可以有多种分类方法:

① 按信号的自变量 t (多表示时间,也可以是空间等参数)和函数的取值不同,可分为连续时间和离散时间信号,进而根据函数值取值是否连续,可分别称之为模拟信号、量化信号、抽样信号和数字信号,分类参见表 1.1 和图 1.1。

表 1.1 信号的分类

自变量 t (多为时间)	函数值 $f(t)$	信号分类
连续(连续时间信号)	连续	模拟信号
	离散	量化信号
离散(离散时间信号)	连续	抽样(采样)信号
	离散	数字信号

② 按信号性质,可分为确定性和随机信号两类。

所谓确定性信号是指:在相同试验条件下,能够重复实现的信号。根据信号是否具有周期性,又有周期和非周期信号之分。

随机信号是在相同试验条件下,不能够重复实现的信号。

③ 按信号自变量时间和频率定义的范围,可分为时限和频限信号。

时限信号:如果信号在有限区间 (t_1, t_2) 内为有限值,在区间之外恒等于零,则称为时域有限信号,简称时限信号,例如矩形脉冲、正弦脉冲等。而周期信号、指数信号、随机信号等,则为时域无限信号。

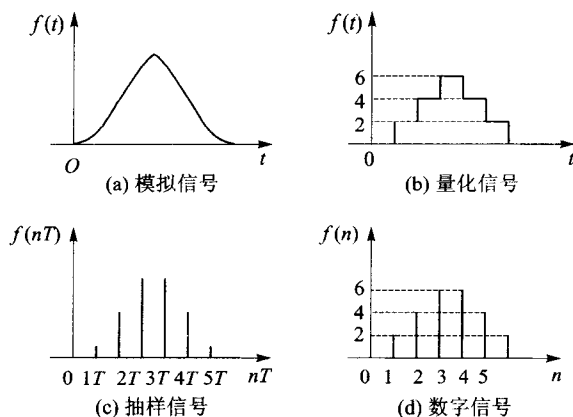


图 1.1 信号的分类

频限信号:如果信号在频率域内只占据有限的带宽(f_1, f_2),在这一带宽之外,信号恒等于零,则称为频域有限信号,简称频限信号,例如正弦信号、限带白噪声等。而冲激函数、白噪声、理想抽样信号等,则为频域无限信号,即其信号带宽无限宽。

顺便指出,在信号理论中,时、频域间普遍存在着对称性关系,时限信号在频域上是频域无限信号,而频限信号则对应时域无限信号。这种对称关系表明:一个信号不可能在时域和频域上都是有限的。

另外,按自变量的维数,还可分为一、二、三或多维信号等,本课程重点研究一维确定性信号,这是进一步研究其他信号的基础。

1.2 信号分析、信号处理

前面指出:要对信号进行分析和处理才能获得信息,测试和控制系统与信号分析、信号处理密切相关。什么是信号分析?什么是信号处理?这些都是首先必须明确的问题。

1. 信号分析

信号分析是将一复杂信号分解为若干简单信号分量叠加,并以这些分量的组成情况去考察信号的特性。这样的分解,可以抓住信号的主要成分进行分析、处理和传输,使复杂问题简单化。实际上,这也是解决所有复杂问题最基本、最常用的方法。

信号分析中一个最基本的方法是:把频率作为信号的自变量,在频域里进行信号的频谱分析。信号的频谱主要有两类谱:幅度和相位谱。对它们进行分析和研究,是本书的基本内容之一。

在测量与控制工程领域,信号分析技术有广泛的应用。现代的测试技术中,动态测试的地位越来越重要,在动态测试过程中,首先要解决传感器的频率响应的正确选择问题,为此必须

通过对被测信号的频谱分析,掌握其频谱特性,才能较好地做到这一点;而且传感器本身动态频率响应的标定,也需要用到频谱的分析和计算以及快速傅里叶变换(FFT)。自然界的声音信号都有“特征频谱”,称为“声纹”。人的“声纹”可用作身份识别,根据特定人的声音做成“语音锁”,非常安全方便。声纹也可以用于机器部件的故障诊断。当机器部件产生疲劳或裂缝时,其振动谱发生改变,与正常振动谱比较,即可实现故障的诊断,避免事故发生。相类似,也可用于人体疾病的监测和诊断。下面是谱分析在测试中一个应用实例。

硅谐振微传感器是当前最先进的传感技术之一,与传统的谐振传感器工作特性相同,即把被测参数的变化变换为传感器敏感元件谐振频率的变化,传感器的输出为频率量。微传感器的敏感元件尺寸是微米量级的硅梁。于是出现了一系列所谓的“微尺度效应”,其中之一是:需要检测的信号微弱,输出电压的量级在微伏或微伏以下,而比输出信号至少大 10^3 倍以上的同频强干扰直接耦合到传感器的输出端。这就出现了所谓的“同频耦合干扰”,例如在某硅谐振微传感器激励端加上 33 kHz 带直流偏置的交流信号,使用锁相放大器检测传感器的输出端信号,图 1.2 是测量的结果。由图可明显看出,出现两个信号的峰值:一个是 65.66 kHz,另一个是 33.36 kHz,两者成倍频关系,后者与激励信号同频。有用信号与激励信号同频,表明同频耦合干扰确实存在,与理论分析的结果一致。如果直接采用加直流偏置的 33.36 kHz 的信

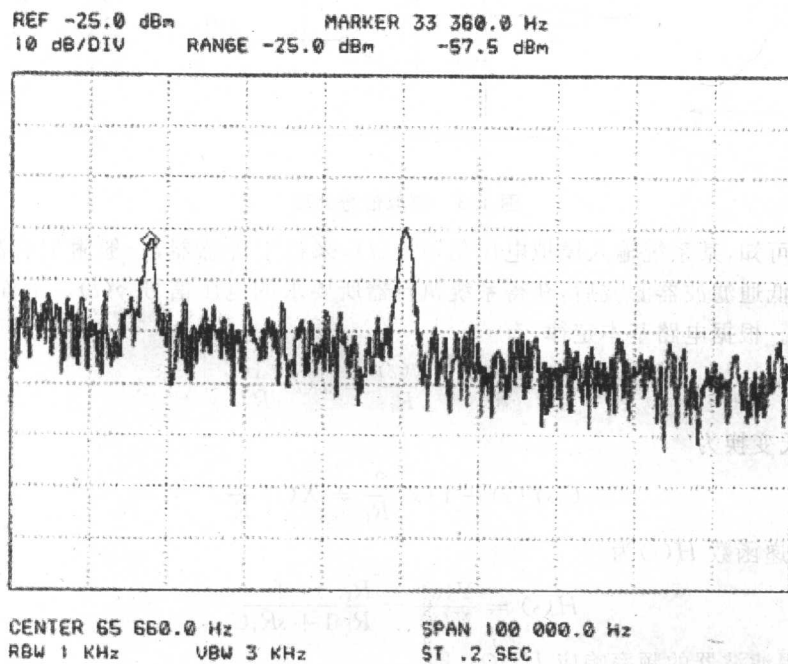


图 1.2 微传感器中同频耦合干扰的实验结果

号对谐振传感器进行激励,传感器将无法进入闭环谐振工作状态,因此这一谱分析的结果对硅谐振微传感器的研究具有关键性的指导意义。

2. 信号处理

所谓“信号处理”是指对信号进行某种加工变换或运算(滤波、相关、卷积、变换、增强、压缩、估计、识别等),来获取信息或变换为人们希望的另一种信号形式。广义的信号处理可把信号分析也包括在内。

信号处理包括时域和频域处理。时域处理中最典型的是波形分析,示波器就是一种最常用的波形分析和测量仪器。而把信号从时域变换到频域进行分析和处理,可以获得更多的信息,因而频域处理更为重要。在测试领域中,信号的频域处理主要指滤波,即把信号中感兴趣的部分(有效信号)提取出来,抑制(削弱或滤除)不感兴趣的部分(干扰或噪声)的一种处理。

图 1.3 为一有源模拟低通滤波器对某传感器输出附加噪声的滤波处理情况。

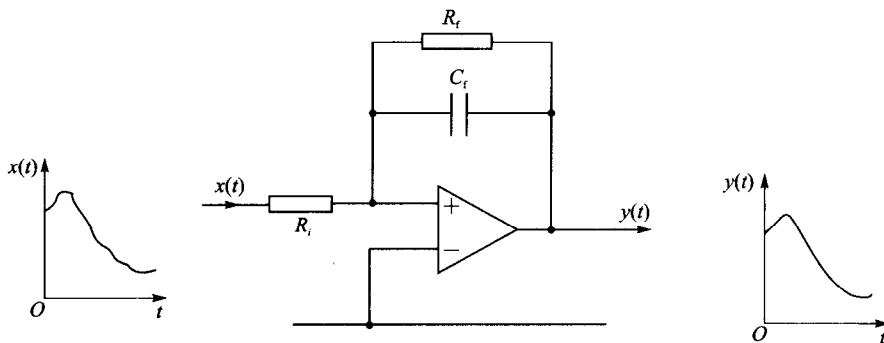


图 1.3 模拟信号处理

由图 1.3 可知,某系统输入模拟电压信号 $x(t)$,来自于传感器,一般附加有高频噪声,通过一有源模拟低通滤波器滤波后,获得系统执行器所要求的电压信号 $y(t)$ 。下面来分析这一模拟滤波过程。根据电路基本定律,有

$$C_f \frac{dy(t)}{dt} + \frac{y(t)}{R_f} = x(t) \frac{1}{R_i} \quad (1.7)$$

式(1.7)的拉氏变换为

$$C_f sY(s) + Y(s) \frac{1}{R_f} = X(s) \frac{1}{R_i} \quad (1.8)$$

该滤波器的传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{R_f}{R_i} \frac{1}{1 + sR_f C_f} \quad (1.9)$$

由式(1.9)可得滤波器的频率响应 $H(j\Omega)$,即

$$H(j\Omega) = \frac{R_f}{R_i} \left(\frac{1}{1 + j\Omega R_f C_f} \right) \quad (1.10)$$

也可对式(1.7)直接进行傅里叶变换得出式(1.10)。由式(1.10)画出滤波器的幅频特性如图 1.4(b)所示,图中的角频率 Ω 改用频率 f 表示, f_c 为截止频率。

显然,当图 1.3 中的 $x(t)$ 经过具有图 1.4(b)幅频特性的有源滤波器的处理,高频噪声被抑制,传感器的低频有效信号顺利通过,得到作用于系统执行器较为干净的信号 $y(t)$,这是模拟滤波的过程。但当温度变化、器件老化、电源的波动以及器件精度等因素影响滤波效果时,如果想通过改变电路器件参数来调整、校正模拟滤波器特性是非常困难的。若应用计算机(典型的如数字信号处理器 DSP)来实现与上述模拟滤波等效的数字滤波则要灵活得多,数字滤波器的幅频特性如图 1.4(c)所示。实际上,这是对模拟滤波器幅频特性的模仿。图 1.4(a)为滤波器的理想特性。

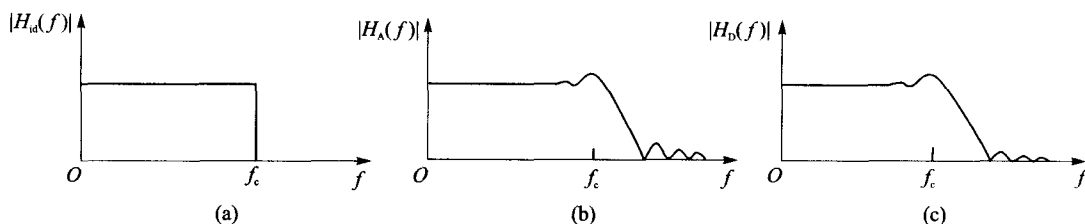


图 1.4 滤波器的各种幅频特性

如果系统的输入/输出均为模拟信号,进行滤波的数字滤波器应包括 A/D、DSP 和 D/A 三个部分。若输入为频带无限信号,通过今后的学习,我们会进一步知道,根据抽样定理,在 A/D 前还需要设置抗混叠滤波器。由 DSP 实现数字滤波的原理框图如图 1.5 所示。

图 1.5 中,输入的模拟信号通过 A/D 变换为数字信号,送入 DSP 进行数字滤波处理。这种滤波与上述模拟滤波不同,不需要复杂的硬件电路进行解算,而是通过计算来实现。这里是采用有限冲激响应(FIR)数字滤波,DSP 的输出通过 D/A 变换为模拟滤波的幅频特性,实现模拟信号输入—数字滤波—模拟信号输出的系统。许多情况下,数字滤波能完成的处理,模拟技术也一样能实现;但像自适应滤波器,采用模拟的方法极其困难。

数字滤波本质上是算法的实现,如图 1.5 中的 FIR 数字滤波,其算法表达式为

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c(k)x(n-k) \quad (1.11)$$

式(1.11)中的 $c(k)$, $x(n-k)$ 为两个有限长序列, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 涉及到大量的乘法和加法运算,当然,用一般的单片机和 PC 机也能完成;但如果是大量数据的实时运算,也包括如数字信号处理与控制系统中经常会遇到的相关、卷积等方面的处理要求,那么显然采用具有高速运算能力(尤其是乘法)的 DSP 就要优越得多。图 1.5 虽然是针对数字滤波器的,但实际上,所有的数字信号处理系统原理基本上就是这个样子。