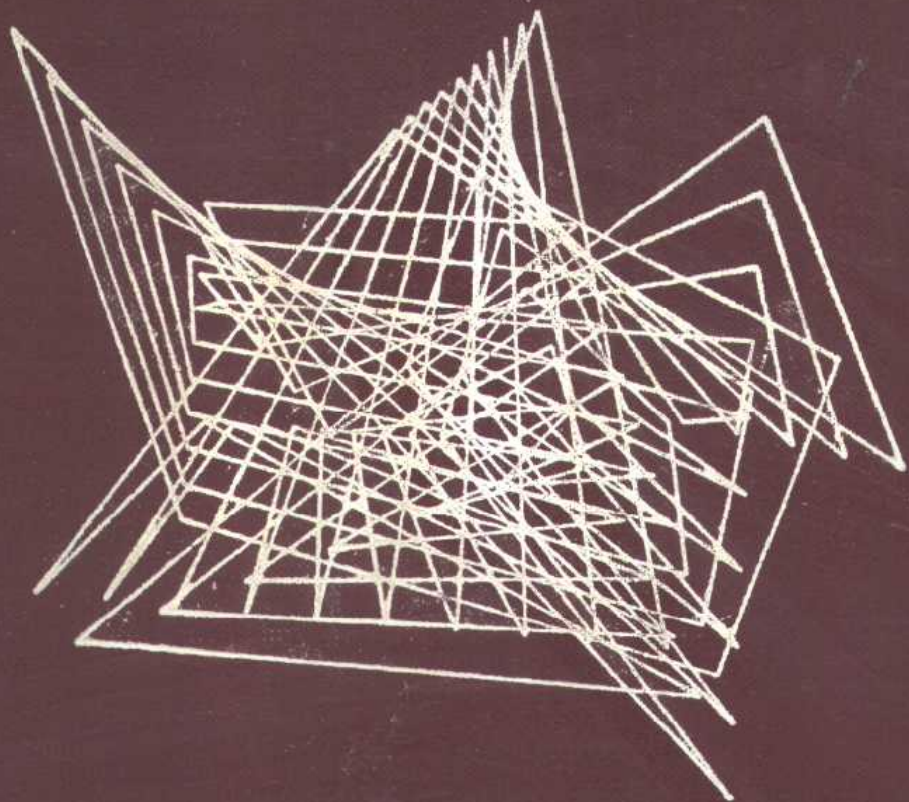


工程信号处理

黄世霖 著



人民交通出版社

TP14
34

GONGCHENG XINHAO CHULI

工 程 信 号 处 理

黄世霖 著

人 民 交 通 出 版 社

内 容 简 介

本书介绍了工程信号处理技术的基本理论概念，列举了大量解决工程问题的实例，其中绝大部分是作者在科研实践中处理的结果，很有实际参考价值，并在一些章节中提供了一批实用的、颇有启发性的计算机程序例子。

本书可作为机械、交通、土建、航空、国防等工程技术人员和从事信号处理研究工作人员的参考用书，也适合作为专业进修班和高等院校有关专业的参考书。

JS450/09

工程信号处理

黄世霖 著

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

人民交通出版社印刷厂印

开本：850×1168 1/32 印张：12.25 字数：304 千

1986年10月 第1版

1986年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3,000册 定价：4.90元

科技新书目 [124—133]

统一书号：15044·4747

目 录

序言	1
第一章 数字信号处理机的组成及其功能	4
§1-1 低通滤波器 (抗混淆滤波器)	12
§1-2 输入放大器	15
§1-3 采样系统	18
§1-4 处理与计算系统	21
第二章 信号处理技术的几个问题	24
§2-1 采样问题	24
§2-2 平均计算 (Average)	27
§2-3 窗函数的应用	30
§2-4 细化 (ZOOM) 或可选频带傅里叶变换 (BSFA)	37
§2-5 平滑处理技术	41
§2-6 物理量的换算	43
第三章 概率统计的应用	47
§3-1 概率分布图及其数学特征	47
§3-2 定时间间隔采样的幅值概率统计法(PDF法)的 应用	50
§3-3 峰值概率统计法 (AH 法) 的应用	53
§3-4 雨流法 (RF 法) 及其应用	55
第四章 相关分析的应用	58
§4-1 自相关函数及其应用	58
§4-2 互相关函数及其应用	62
第五章 频谱分析的应用	66
§5-1 频谱分析的基本概念	66
§5-2 自功率谱的应用	69

§5-3	功率谱场的应用	76
§5-4	倍频程分析及其应用	78
§5-5	倒频谱及其应用	91
§5-6	瞬态冲击谱分析	94
第六章	传递函数及其应用	99
§6-1	传递函数的基本特性	99
§6-2	相干函数	104
§6-3	传递函数的测定方法	107
§6-4	振动台或激振器激振法	108
§6-5	脉冲法激振	109
§6-6	随机输入法	116
§6-7	传递函数在一些方面的应用	121
第七章	二次处理与曲线拟合	129
§7-1	二次处理系统	129
§7-2	一般的数据二次处理	137
§7-3	线性回归拟合	152
§7-4	傅里叶回归拟合	161
§7-5	高斯-牛顿最小二乘法非线性曲线拟合	171
§7-6	麦夸尔特 (MARQUARDT) 最小二乘法非线性 曲线拟合	184
§7-7	三次样条 (SPLINE) 拟合	198
第八章	模态分析技术的应用	208
§8-1	模态分析试验	209
§8-2	设置阶段	215
§8-3	测量阶段	217
§8-4	模态参数识别阶段	221
§8-5	打印阶段	229
§8-6	显示阶段	239
§8-7	模态分析应用实例	245
§8-8	模态分析应用技术的发展	258

§8-9	摄动灵敏度分析与结构动特性修改	271
第九章	ITD 时域模态分析法	281
§9-1	ITD 方法基本理论推导	281
§9-2	虚拟测点信号	288
§9-3	虚拟模态	289
§9-4	最小二乘拟合特征矩阵	291
§9-5	模态置信因子计算	294
§9-6	数据矩阵形成方法	297
§9-7	数字仿真计算结果	303
第十章	随机减量技术	307
§10-1	随机减量处理	307
§10-2	激励信号的随机减量曲线	309
§10-3	响应信号的随机减量曲线	311
§10-4	实际信号的随机减量处理	313
§10-5	合理选择前导信号	314
§10-6	实验验证	315
第十一章	时间序列法及其应用	324
§11-1	时间序列法概述	324
§11-2	ARMA 模型的特性	335
§11-3	最佳预测	347
§11-4	建立数学模型	354
§11-5	模型参数的估计	360
§11-6	具有趋向性的时序的建模	376
§11-7	Marple 程序	378
	参考文献	384

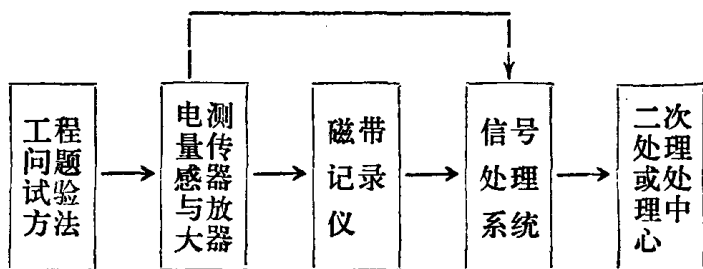
序 言

信号处理技术发展迅速，特别是七十年代以来计算技术的发展、数字信号处理系统的小型化以及信号处理理论的发展更为迅速。现在信号处理技术已广泛地应用于机械工程、土建工程、生物医学工程、声学工程等方面，而且取得愈来愈多的成果。

国内信号处理的理论发展得很快，其基本内容已普及到大学生的课程内容中；信号处理系统也有很多单位研制或正在试生产，同时已经进口了相当数量的先进系统，在各行各业中已经初步发挥作用。目前有不少单位，基本理论也学习了，信号处理系统也有了，但是尚不能充分发挥作用，原因是没有掌握工程信号处理的应用技术。

信号处理技术的应用，要求具有工程专业理论和实验知识、测量技术理论与实践、数学基础、振动理论、随机数据处理理论、信号处理理论与实践以及计算机硬件和软件等，缺少一个环节，就不能正常运行。所以信号处理应用技术的研究，越来越得到重视。本书的目的就是给学过一些基本理论，而想在工程上解决实际问题的人员提供必要的知识和解决实际工程问题的实例。

应用信号处理技术解决工程上的问题，一般有以下几个步骤和内容：



1.工程问题的性质与内容及其试验方法与信号应该如何处理,是紧密相关的。有时应根据试验方法,确定其处理方法;但有时应根据处理方法,确定其试验方法。因此,如果不了解工程问题的性质和试验方法,处理数据往往是搞不好的,所以要求搞信号处理人员最好熟知工程问题和试验方法。

2.电测量是将被测的参数转换成模拟电量,这里需要各种传感器及放大器等,在信号处理整个系统中,精度的关键之一就在于此。信号的来源不准确或误差很大,精确的信号处理就没有意义。关于这个问题有专门课程和教材,如“非电量的电测法”等,可参阅有关书籍。

3.磁带记录仪 将各种变化的参数转换成模拟电量后,也可以直接输给信号处理机处理。这样就要求信号处理机设置在试验现场。但是试验现场的条件一般较差(灰尘、温度、振动),信号处理机应尽量避开这种场合,所以常用磁带机记录。

4.信号处理机(或系统) 数字信号处理机本身是个专用计算机,配有其他外围设备,如低通滤波器、前置放大器、模数转换器、时钟采样设备、触发系统、中央处理器、内存、外存、数模转换器、示波器、接口等。一般可作概率统计分析、相关分析、频谱分析、传递特性分析,也可根据需要使用配以特殊的软件,例如进行心电分析、脑电分析等,有关这部分内容将作详细介绍。

5.二次处理系统 进行了信号处理以后,有的已经达到了分析的目的,但有的需转入二次处理系统再进行深入的分析。例如根据试验结果进行曲线拟合,找出经验公式;有的则需要进行系统参数识别或模态参数识别,根据试验结果和系统的数学模型,计算出系统的参数,有的在进行了模态分析后将各阶振型用三维图象动态显示出来;有的二次处理可进行故障判别等工作。实际上二次处理功能是没有限制的,只要根据专业或工程需要,可以自编软件,进行分析处理。本文将介绍一些常用的二次处理方法,并着重介绍模态分析等有关问题。

近年来,除了常用频域法识别模态参数外,时域法也发展很快,而且种类繁多,大多处于研究发展阶段,但已显示出一定优点,值得加以推广使用。第九、十章将介绍 ITD 时域法和随机减量法的一些研究工作,经作者指导,具体由陈赣同志执笔。第十一章将介绍时间序列法的基本理论与应用,这章由华中工学院杨叔子同志执笔。

在信号处理工作中得到清华大学汽车工程系有关同志的协助和支持,在此表示感谢。

第一章 数字信号处理机的组成及其功能

数字信号处理机实际上是个专用计算机，配置许多外围设备。在图1-1上表示的是一种典型的7T08S处理机系统。图1-2是美国的 HP5451C 系统，该系统处理数据速度快，功能比较多，除了能做一般的信号处理外，尚能做模态分析、特征分析和振动实时控制。近年来又配置了一批软件能做模态灵敏度分析、进行结构动态优化设计、阻尼层优化选择、子结构模态综合，以及声强分析等，在国际上具有先进的水平。

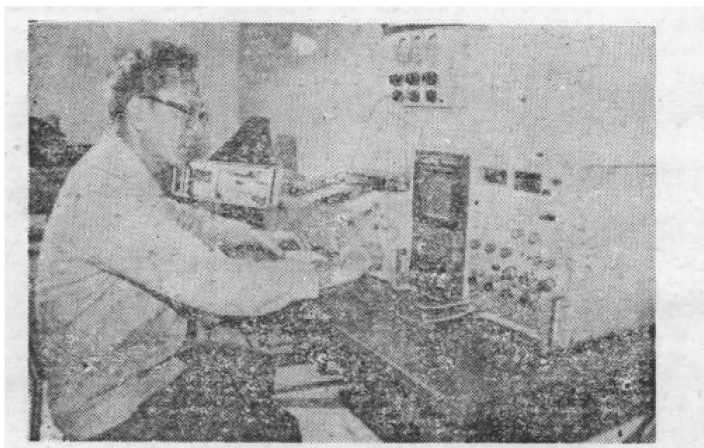


图1-1 日本7T08S信号处理机

为了介绍信号处理机的组成，用典型的7T08S 信号处理机的框图来加以说明（图1-3）。

数字信号处理机的基本原理是将模拟电压信号输入低通滤波器，首先滤掉不需要的高频成分，然后再输到前置放大器，将信号放大或者衰减到合适的电压，再通过模数转换器和多路扫描



图1-2 美国HP5451C系统

器，对各通道的信号进行轮流采样，也就是根据人工或程序来确定，使脉冲处理单元定时间间隔 ΔT 发出脉冲信号，而模数转换器接受到脉冲信号时就把当时的电压转换成数字量，并输送到运算器。根据输入的程序（或硬化的程序）控制运算器进行各种运算，计算结果储存在内存里，最后可由电传打印机打印出计算结果，或经数模转换器将计算出的数据，重新换算成模拟电量，在示波器上或 X-Y 记录仪上输出图象结果。

HP5451C 的框图表示在图1-4上。低通滤波器 54440A 计算机可编程控制。模数转换器 5466B 分辨率高、速度快。54470 预处理器是一个硬件细化设备，在进行频谱分析时能够达到实时细化256倍，提高了频率分辨精度。54451B 计算机是以 HP1000 为主体的小型计算机，运算速度较快。内存最少 128K 字节，可扩充到一兆以上。主机上带有16个输出输入插口（还可以接扩展器），计算机可同时用2648A 图象终端和5475A键盘控制器控制。2648A 同时具有独立的字符和图象存储器（字符8K、图象32K字节）。5475A 可用键码来直接调动软件，并且编制自己所需要的处理信号的软件，可作各种信号的加、减、乘、除、积分、微分等预处理，十分方便。通过磁盘控制器可控制7906A 驱动器（最多达 8 个），每个驱动器可储存20兆字节，每秒钟可传输 1 兆字

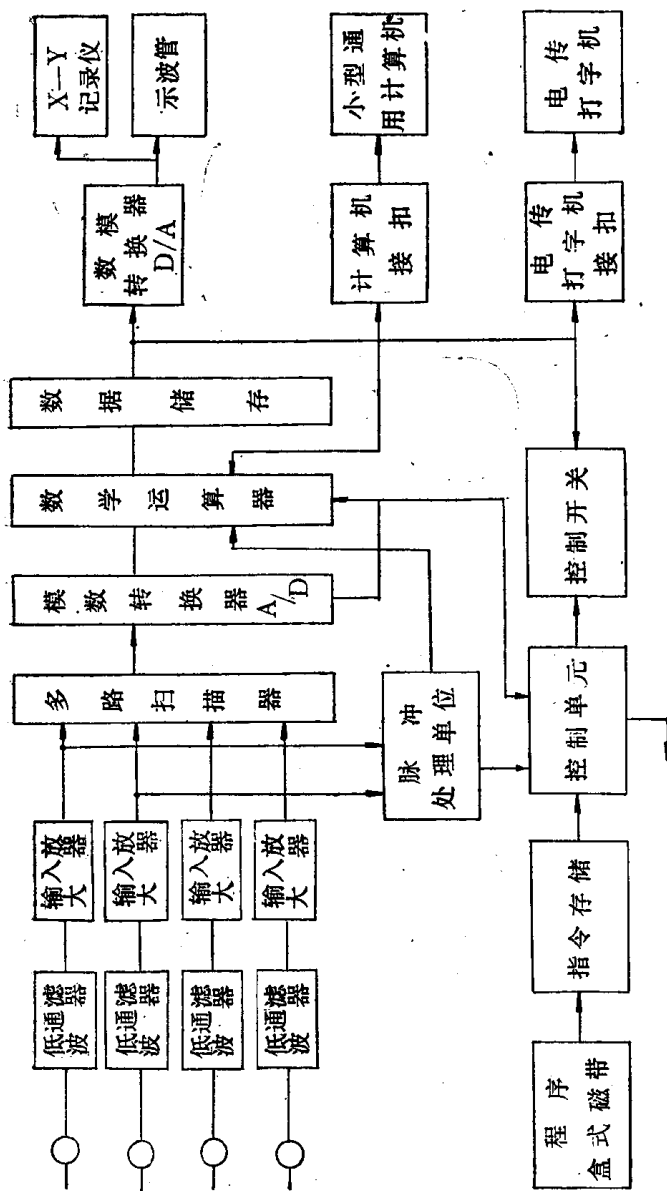


图1-3 信号处理专用计算机7T08S框图

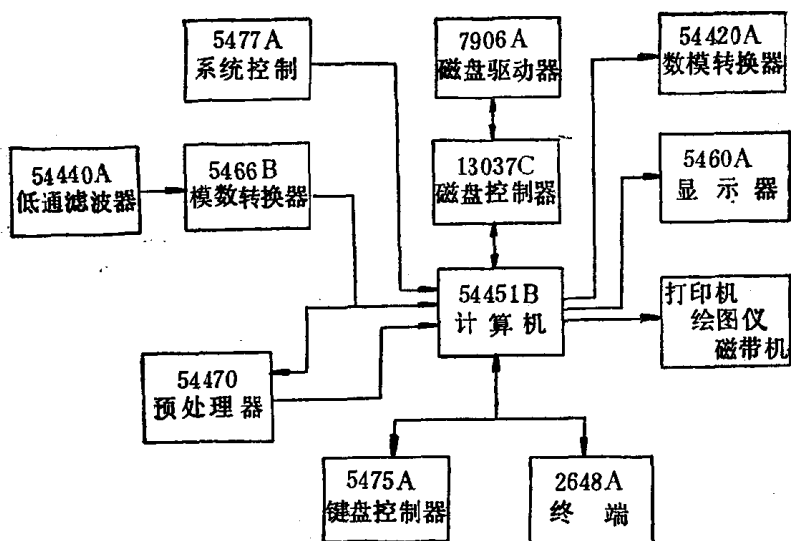


图1-4 HP5451C框图

节。最后结果可在显示器上显示，或在打印绘图仪上输出。并可通过54420A数模转换器直接控制激振。

目前，信号处理机发展很快，特点是向快速小型化、扩大内存、多功能方面不断改进。现将常用的国内外信号处理机系统的性能指标和功能列入表1-1中。

在应用信号处理机时必须充分了解和掌握各组成部分的特性和功能，否则就不可能得到准确的分析处理。下面逐节进行介绍。

现代信号处理机型

型 号	CF300 (小野)	SD345 (潜动力 公司)	TR9405 (武田理研)	7T17S (三荣)	HAI(天 津电子仪 器厂)	626 (西北 工大)	CHFZ-1 (北京 宣武仪器 厂)
频率范围 (kHz)	DC~20 (14档)	DC~100 (16档)	DC~100 (16档)	DC~100 (16档)	DC~ 10.24 (10档)	DC~100	5~26
通道数	1	1	2	4(高速) 16(低速)	2	2	2
实时频率 (kHz)	0.2	3			5		
动态范围 (dB)	70	65	70			60	60
频率分 辨 率	200FS点 (128倍 ZOOM)	400点FS (100倍 ZOOM)	800点双 道400点 (128倍 ZOOM)	512× 768(纵)	1024点	512点	5Hz带宽 晶体滤波
A/D 变换器	12bit	10 bit	12 bit	12 bit 2μs	10 bit	9	模拟+ 数 字
抗混淆 滤波器	5Hz档以上 自动联接 -120dB/ oct	10Hz以上 自动抗混	20Hz以上 自动抗混 -140dB/ oct	4通道自 动抗混 (50~ 25K) -100dB/ oct	自动抗混 -42dB/ oct		
平均方式	2 ¹ ~2 ¹⁰ , 10档线性 或指数	2 ⁰ ~2 ¹⁰ 线性或指数	时频域线 性或指数 平均 1~2 ¹⁸ 次		线性或 指 数 2 ⁰ ~2 ¹⁰ 次		
FFT实现 方式处理 时 间	16 bit 硬件	硬 件 135 μs			512点 FFT 33ms	1024点 FFT 5 ms	
时域功能 幅域功能	时间平均 振幅概率 密度 哈宁窗	时域流程 时域平均 哈 宁 窗	时域平均 自互相关 概率密度 触发捕捉 哈 宁 窗	时域平均 概率统计	数字滤波 卷积 自互相关 概率密度 瞬态捕捉	自相关 互相关 概率密度 加窗 时域平均	相位差 跟踪滤波

(单机或系统) 性能表

表1-1

7T08S (三荣)	JEF16 (无线电 公司)	HP5451C (HP公司)	GR2503 (通用雷 达公司)	HP5423A (HP公司)	SD375 (SD公司)	CF910 (小野)
DC~50	DC~100	DC~50 (18档)	DC~25	0.016~ 22.5	1~100	100
4	2	2 (可增4)	4	2	2	2
2		9				
	60	75	70	75	70	72
1024点	1024点	1024点 或4096点 (400倍 ZOOM)	64~1600点	自动选择带 宽(1024点) 10μHz ~100Hz	400 ZOOM	2048 ZOOM 256
10 bit 4μs	10 bit 1μs	12 bit	10 bit	12 bit	12 bit	12 bit
-18dB/oct (外加)	无 (外加)	-90dB/oct	程控滤波器 -96dB/oct	1阶椭圆 滤波器 -90dB/oct	-70~-120 dB/oct	-140dB /oct
指数或线性 1~99999次	指数或线性	时频域线性 或指数平均		线性指数平 均值保持	线性或指数	线性或指数
1024点 100ms	750 ms	FFT<50 ms 硬 件	硬 件	硬 件	硬 件	硬 件
时域平均 自互相关 相关系数 峰值变程 统计 雨流统计 概率,触发	时域平均 自互相关 卷积 概率密度 概率分布 相位谱	时域平均 自互相关 概率密度 概率分布 瞬时扑捉	波形平均 自互相关 概率密度 概率分布 瞬时扑捉	稳态平均 指数平均 峰值保持 转速跟踪 瞬态扑捉 自抑与自停	时域平均 自互相关 概率密度 瞬态扑捉	基本全

型 号	CF300 (小野)	SD345 (谱动力 公司)	TR9405 (武田理研)	7T17S (三荣)	HAI(天 津电子仪 器厂)	626 (西北工 大)	CHFZ-1 (北京宣 武仪器 厂)
频域功能	线谱 相位谱 16线谱阵 1/3倍频程	功率谱 谱加减除 谱面积统计 阶次谱分析	自互功率谱 传递函数 相干函数 脉冲响应 加减乘除 积分 微分	正逆傅氏 变换 自互谱 传递函数 相干函数 积分 微分等	正逆傅氏 变换 自互功率 谱	FFT频 谱 自功率谱 互功率谱 传递函数 相干函数	机械阻抗 传递函数 频谱分析 矢量分析 振动分析 噪声分析
特殊功能	32k时序存 贮 16线谱阵 $M_1 - M_2$, M_1/M_2	运算程序 工程单位 标尺换算 自检程序	细化 采样保持	二次处理 自编程序 模态分析	1/3倍频	高速实时	机械阻抗 传递函数 分析仪
内 存 (字节)	96 K		16 K 缓冲 存储	512K (外1M)	4K×17 bit	3K	
长×宽× 高(mm)	400×320× 200	480×320× 220	500×420× 220	820×520 ×440	柜 式	柜 式	多机组合
重量(kg)	12.5	22.68	26	60			

续上表

7T08S (三荣)	JEF 16 (无线电 公司)	HP5451C (HP公司)	GR 2503 (通用雷 达公司)	HP5423A (HP公司)	SD 375 (SD公司)	CF910 (小野)
自互功率谱 Nyquist 传递函数 相干函数 功率谱阵 转速跟踪	自互功率谱 传递函数 相干函数 复数乘除 积分 微分	自互功率谱 传递函数 相干函数 冲击响应谱	线谱 自互功率谱 传递函数 相干函数 冲击响应谱 1/3倍频程 分析	模态识别 残余计算 模态参数 子结构分 析各种谱 相干统计	频谱 互谱 传递 相干 1/3倍频程	基本全
雨流法 心电脑电 统计 工程与生 物两用	信号处理与 科学运算两 用	模态分析 特征分析 振动控制等 多用途 (HP软件)	模态分析 (SDRC 软件)	动态分析 曲线拟合 (HP软件)	可配模态 分析	可配模态 分析 (HP)
40K × 16bit	32K	128K × 8bit (外20M)				128K (外280K)
550 × 430 × 330 40	柜 式	762 × 533 × 1631 197.5		641 × 425 × 406 52.16	432 × 433 × 267 25	430 × 250 × 500 21