



21 世纪大学新型参考教材系列

信号分析

(日) 臼井支朗 编著

Inter
University



科学出版社

OHM 社

21 世纪大学新型参考教材系列

信号分析

[日] 臼井支朗 编著

何希才 译

卢乃洪 校



科学出版社

OHM 社

2001. 北京

EP05/06

图字:01-2000-3668 号

Original Japanese edition

Interuniversity Shingou Kaiseki

by Shirou Usui et al.

Copyright © 1998 by Shirou Usui

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

インターユニバーシティ

信号解析

臼井支朗 オーム社 1998

图书在版编目(CIP)数据

信号分析/[日]臼井支朗编著;何希才译. - 北京:科学出版社,2001

(21 世纪大学新型参考教材系列)

ISBN 7-03-009262-7

I. 信… II. ①臼… ②何… III. 信号分析 - 高等学校 - 教材

IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 13563 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 6 月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2001 年 6 月第一次印刷 印张:6 1/4

印数:1—5 000 字数:182 000

定 价:12.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

作为诺依曼电子计算机的原型,电子管计算机 ENIAC 研制开发已经 50 多年了,面向 21 世纪的高度信息化社会,从日常生活到航空航天,将要迎来真正意义上的数字通信与信息处理的时代。对于当今的通信与信息处理技术,若要寻根溯源,可以认为始于以牛顿与傅里叶为代表的,以数理分析作为基础的前辈们的研究。而 1949 年日本与美国同时提出的 采谷-山农 (Shannon) 采样定理,架起了从模拟信号处理通向计算机擅长的数字信号处理的桥梁,由此出现了支撑当今科学技术与信息社会的多种成果。

另外,在任何时候,人们对未知事物都会产生兴趣,科学正是解开未知事物奥秘的钥匙。人们通过观察由对象生成的信号,使用各种方法对其进行分析,从而获得对未知事物的理解。可以认为,用于观察和测量的信号分析,是使解释系统的方法论系统化的科学。其基本组态是通过时间、空间或者频率在不同坐标轴上进行变换,以便更容易地掌握其特征。然而,实际上大部分信号都是不确定的,需要采用概率与统计的方法进行处理;大部分物理事件的发生过程都是动态的而不是恒定不变的,而且,在其生成阶段也大多是进行非线性变换。另外,如何处理复杂的信号,洞察其本质,用于工程学,由此进行信号分析是非常有趣的事情。

这个领域在 1950 年前后为启蒙阶段,代表性的工作有维纳 (Wiener) 的调和分析以及莱斯 (Rice) 的噪声分析等。其后随着计算机与半导体技术等相关领域的飞速发展,使信号分析或数字信号处理向更宽领域发展。其间由于很多研究人员的努力,进行了理论体系化以及高速实用算法的开发,从当时考虑,这是真正地引起社会变革的技术革命,现已应用于各领域。特别是最近,对于传统的复杂事件的处理,以及非线性、非正态性、非定常性等复杂问题的处理提出多种新的方法论,随即能处理的内容也由基本框架发展到重构。而从这种观点出发来重新考察信号分析与处理的领域,它已从简单的方法与技术的结合发展到基于各自的高级数学背景(称之为信号分析学),从而形成了相应的学科。

在这样的背景下,我们试图超越传统的信号分析概念而按照新的框架进行编写。但我们很难说本书的编写已经非常体系化,编著者认为重要的是吸引更多的年轻研究人员的参与。为此,需要一本表现形成这种体系观点的入门书,本书按照这条线索展开。因此,若与普通的教科书相比,也有稍难的地方,若要处理更多的对象,就必须考虑更加抽象化的基础知识所需要的一般原理,这是非常自然的事,殷切期望读者花些时间认真仔细地阅读本书。

最后,在本书出版之际,特向提供编写机会的丛书编辑委员会主任家田正之先生,向将复杂问题写得通俗易懂的各位执笔者,向为本书的出版给予通力协作的户田尚宏先生,以及提供帮助的欧姆社出版局的有关各位表示深切的谢意。

白井支朗

为了适应21世纪的要求

面向21世纪,日本各大学进行了系与学科的改编、研究生院的调整、导入两期制等。伴随着这些调整,现有的教材已不能适应现代学生的水平和兴趣要求。因此就要求有一套从版面到内容都更新颖的教科书。

本系列正是考虑到这种新的要求,经过不断深入考察和讨论,按照全新的整体编排形式制作完成的新型教材。曾荣获第七届日本工科教育协会奖「业绩奖」。

电气能源基础
等离子体电子工程学
电力系统工程学
电气电子材料
高电压/绝缘工程学
电动机器
电力电子学

逻辑电路与自动机械
计算机工程学
程序语言设计
信息传送和符号的理论
信息通信工程学
信息网络

电气能源

信息通信

公共基础

电磁学A
电磁学B
电气电路A
电气电路B
电子电路A
电子电路B
电气数学
信息数学
程序设计

测量·控制

系统与控制
信号分析
传感测量
柔性信息处理
机器人控制

电子器件

电子物性
半导体工程学
电子器件
集成电路A
集成电路B
光电子学

21世纪大学新型参考教材系列 编辑委员会

主任委员: 家田正之 (爱知工业大学)
编辑: 稻垣康善 (名古屋大学)
白井支朗 (丰桥技术科学大学)
梅野正义 (名古屋工业大学)
大熊 繁 (名古屋大学)
绳田正人 (名城大学)

目 录

1	信号分析的学习方法	1
1.1	信号分析的目的与意义	2
1.2	利用信号分析的场合	3
1.3	本书的结构	6
	练 习 题	8
2	信号的变换与表示法	10
2.1	信号表示的基本问题	10
2.2	线性系统的表示法	15
2.3	信号变换	17
	练 习 题	26
3	信号的数字处理	30
3.1	数字信号	30
3.2	z 变换与离散的输入输出系统	32
3.3	离散傅里叶变换及其计算方法	35
3.4	数字滤波器	42
	练 习 题	53
4	随机信号的处理方式	56
4.1	随机信号实例	56
4.2	随机信号的概率描述	57
4.3	随机信号的期望值	59
4.4	随机信号的分类与模型	62
4.5	频谱的估计	72

练习 题	81
5 信号的统计处理	
5.1 信号的模型	84
5.2 参数的估计	87
5.3 模型选择	94
5.4 信号的特征分析	102
练习 题	107
6 时变信号的分析	
6.1 如何跟踪变化的频率分量	110
6.2 小波变换	115
6.3 多重分辨率近似	119
6.4 多重分辨率近似与小波变换的结合点	122
练习 题	131
7 从信号分析到图像分析及处理	
7.1 数字图像处理	134
7.2 从信号分析到图像分析	135
7.3 模拟图像与数字图像	137
7.4 改善图像品质的图像分析方法	145
7.5 用于图像特征提取的图像分析	154
练习 题	163
练习题解答	165
参考文献	179

篇外话

信号分析的黎明时期	8
人体内的傅里叶变换	14
倒频谱分析的应用	25
预加重 (pre-emphasis)	47
无序信号	60
用于频谱估计的预处理	74
模型选择标准 BIC · MDL	96
更灵活的回归模型及其模型选择标准	98
子带滤波器	125
小波变换与信号的数据压缩	130
模拟与数字	136
空间频率的物理、数学理论及重要术语	141
混叠误差与图像体验	143

1

信号分析的学习方法

最近,随着计算机的高速化、大容量化、小型化、低成本化以及宽带信息网的飞速发展与普及,说到文字、语音、动态图像等的传输、处理、存储和管理,以前,只是一部分专业技术人员需要牢固掌握信号分析与处理技术,现在不仅是从事信息与通信领域工作的专业人员,而且一般的技术人员也要学习这方面的知识。计算机与网络是处理信息的工具,没有哪一家社会机构是与这些信息工具无关的,因此,今后在所有领域都要引入信号分析方法,可以说这是时代发展的趋势。本章介绍在这样的背景下,如何获取信息、对信息进行分析以及具体采用何种形式。

1.1 信号分析的目的与意义

数字信息设备中,一般只是进行简单的比特运算。然而,这样的比特序列的确反映着现实世界中的一些事件。在某些场合下,也不知道这些比特序列是语音信息的一部分,或者是机密文件的文字代码。而且在某种情况下也可能是对信息进行处理程序的一部分。

向计算机外面看去,若是用时刻变化的气压来传播气象信息的场合,则是利用声音进行人与人之间的通信。作为这些数据,代表着现实世界中的什么事件,如何存储,如何处理,这些环节都要牢牢抓住,或者根据不同的应用目的,将信息处理分为语音处理、文字处理、图像处理等不同领域加以研究。

这样,世界上所有事件都可以称为不同使用目的的信息,本书作为处理对象的意义是不明确的。因此,本书所处理的信息仅限于能够进行数字化的信息,称之为“信号”。而且,认为信号分析是将给定的信号变换为“需要提取的信息”的方法群。

这种“需要提取的信息”本身在多数情况下是由其它领域提供。首先举出的例子是语音处理领域,需要将讲话者的语音信号变换为符号序列。这时,若要回答如何变换为正确的符号序列的问题,就必须解决各种问题。

另外,为了构成尽可能低成本、低噪声的最佳传输线路应采取何种策略,这也成为有待解决的问题。在信号处理的场合中,知道“想要做什么(目的)”,不知道“如何去做(方法)”时,回答“在这样的制约条件下是不可能的”或者“达到此目的采用这种方法也可”问题的方法论,换句话说,将多彩的现实生活中产生的共同问题加以抽象化以及体系化,由此就能得到解决问题的最佳手段。

体系化的优点除了上述的以外,还可以举出以下几点。即,甚至连“必须去做什么”都不明确时,换言之,在处理的目的都不清楚的场合,在假定应用体系化方法所得出的结论中的某一种方法的基础上,通过试处理给定的信号,可以反过来得出“如果这样做,由该信号就可明白这些问题”这样的结论。在以说明未知对象为目的的自然科学领域内,例如,观测脑电波等

复杂生物系统的信号时,以“由于在这种信号中含有这样信息,请把它们提取出来”的形式提出问题的情况较少。多数情况是以下述形式提出,即“若偶然发生,一定含有这样的信息”,或者“作为由该系统获取的知识仅是该信号,到底从哪里能获取关于该系统的知识呢”。

作为科学的方法论,稍许超脱这样的想法,但在这样的状况下,基于有关对象的知识与经验的洞察力直观地发挥作用。本书的部分读者面临这样的问题,有此书在手会有意识或无意识地寻找到体系的获取方式并从中得到启示。

1.2 利用信号分析的场所

作为进行信号分析的目的,大概需要什么样的具体对象。这里,从信号处理的各个领域,举出日常生活中无意识利用信号处理的几个实例,说明如何有效运用在各章中学习的概念,并对信号处理进行说明和展望。

1.2.1 数字音频

现在人们已能简便地利用光盘(CD: Compact Disc),数字音频磁带(DAT: Digital Audio Tape),以及最近的小型唱片(MD: Mini Disc)等多种数字录音与放音装置。此外,一般也能通过因特网等广域信息网将语音及音乐信息作为文件进行存储或传送(播放)。

图 1.1 是数字音频中信号处理流程简图。由传声器将声波变换为电信号,经 A/D 转换器进行采样与量化变为数字信号。这里的模拟滤波器是为了除去高频分量,防止伴随着将在第 3 章中介绍的瞬时的离散化所带来的混叠噪声。

经过 A/D 转换后的信号加上数字处理的手段,根据场合的不同也可以添加混响等效果。再经过编码与压缩后,通过 CD 与 MD 等记录媒体或信息网络等进行传送。

在放音方进行相反的解码过程,并根据需要通过数字处理获得补偿后进行 D/A 转换,仍然要除去不需要的高频分量,通过模拟滤波器后由扬声器变为声波。

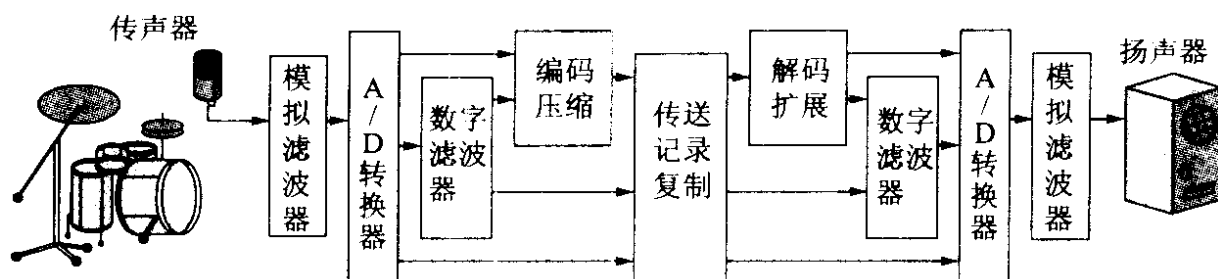


图 1.1 数字音频中的信号处理

这样的基本变换处理及数字化过程中需要进行的事项等通过傅里叶变换、拉普拉斯变换、 z 变换等可在时间轴、频率轴上进行,这是系统分析与设计的指南。详细情况将在第 2 章和第 3 章中介绍。

1.2.2 语音识别

近年来,在很多个人计算机中安装了具有语音输入输出功能的标准装置,只要装入软件并且输入非常正确的语音就能使计算机执行命令。其详细情况从略,但其基本概念仍然是以频率为中心的信号变换理论。表示信号中含有何种程度的频率分量的量称为**频谱**。通过寻找给定信号的频谱,能将信号进行分类与特性化。例如,语音频谱的特征对于每个人来说当然是同一个人每次发声都会有所变动。为了从这样的特征中减少变动分量、提取单词固有的或说话者固有的特征,利用第 2 章介绍的倒频谱非常有效。

1.2.3 数据预测

资本主义社会中物价等经济指标的变动对社会与经济活动的影响很大。此外,太阳黑子数与海水温度的变动等对全球范围的自然现象产生巨大影响是个重大课题。对这种随时间变化的量的未来值进行预测和研究对策等需要解决的问题很多。在这些场合,经常采用图 1.2 所示的称为线性预测法的方法。

用线性预测法通过 p 个数据的线性组合来预测当前值。即由比 p 足够的过去观测的数据递推估计预测系数参数 $\{a_i\}$,因为是基于过去的数据来预测未来值,所以也称为**自回归 (AR: Auto Regressive) 模型法**。

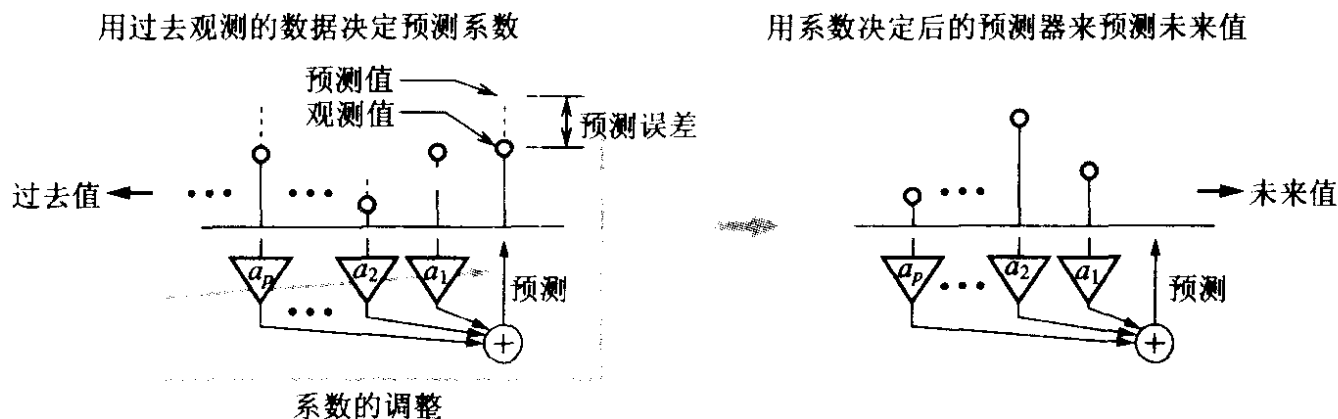


图 1.2 数据的线性预测

在这样的线性预测法中,若给定信号,就能决定与之相对应的 p 个系数。若状态发生改变,也就是说用具有 p 个参数的时间序列生成模型来集中体现给定信号的性质,则在带有时间序列数据特征的前提下,这成为基本的考虑方法。在这里,为了对次数 p 进行选择以及对适当的系数作出估计,有必要进行统计学上的考察。有关详细情况、随机信号的获取方式以及信号统计处理方式等将在第 4 章和第 5 章中介绍。

1.2.4 除去反射波

对于形成复杂线路的电话线等,由于各种终端阻抗不匹配等原因,会出现自己说话的声音产生“回声”那样的反射问题。此外,在混响较大的房间内进行的音乐等,有时也需要从中除去一定程度的混响。这时,反射与混响可看作是一种线性系统,通过对产生的反射与混响进行仿真,可采用从信号中除去反射与混响只提取直接声音的方法。如在第 2 章和第 3 章中介绍的那样,对于线性系统,若已知其脉冲响应,则由于对所有输入的响应可用卷积来表示,所以其特性归结为从输入输出数据中估计出时域的脉冲响应,或者频域的传递函数。

信号分析中很多问题与这样的传递函数估计问题是等效的,未知系统可用模型来表示,因此,称为系统辨识问题。前面介绍的线性预测模型的估计也是系统辨识的一种方法。一般来说,通信线路的反射路径以及由于人员进出所导致的房间内的混响特性是时刻变化的。即,在脉冲响应与传递函数不是平稳的场合所获得的信号的性质也是非平稳的。第 6 章阐述了在这样的时变信号的系统辨识中,基本的处理方法及小波变换等理论。

1.2.5 医疗信息处理

在医疗信息领域,从开始于家用血压计的民用装置到随时都能遇到的手术等中使用的高精度设备,都需要从隐藏在噪声中的复杂生物信号中提取必要的信息。此外,开始于 X 射线的各种射线构成的图像、超声波回波图像等各种医疗图像都为诊断提供了多种重要的信息,今后期待着发展到更广泛的领域。

给这种医疗图像领域带来革命的当然是计算机断层扫描术(CT:Computed Tomography)¹⁾的出现。根据多方位的 X 射线投影数据,能清晰地描绘出将人体切成圆形断层的图像时,不仅是医疗工作者,甚至众多的人们都惊叹不已。这里采用的是以 2 维傅里叶变换为主的信号分析的基本理论。第 7 章开始学习 CT 的原理,还学习关于图像重构、图像处理以及特征提取等有关的基本事项。

1.3 本书的结构

本书中所讨论的有关信号分析基本事项的整体及相互关系如图 1.3 所示。图中的箭头指的是理论推导的大致情况,但未必与本书中叙述的顺序一一对应。例如,图像处理与分析在结构上属于第 7 章,但内容如图中那样接在第 3 章,这是很自然的事情。总之,各章及各项目之间的相互关系比较复杂。作者认为,如果在学习时经常意识到这种关系,就能更深刻地理解其内容。

1) 计算机断层扫描术 CT 的英文表述应为:Computerized Tomography。——校者注

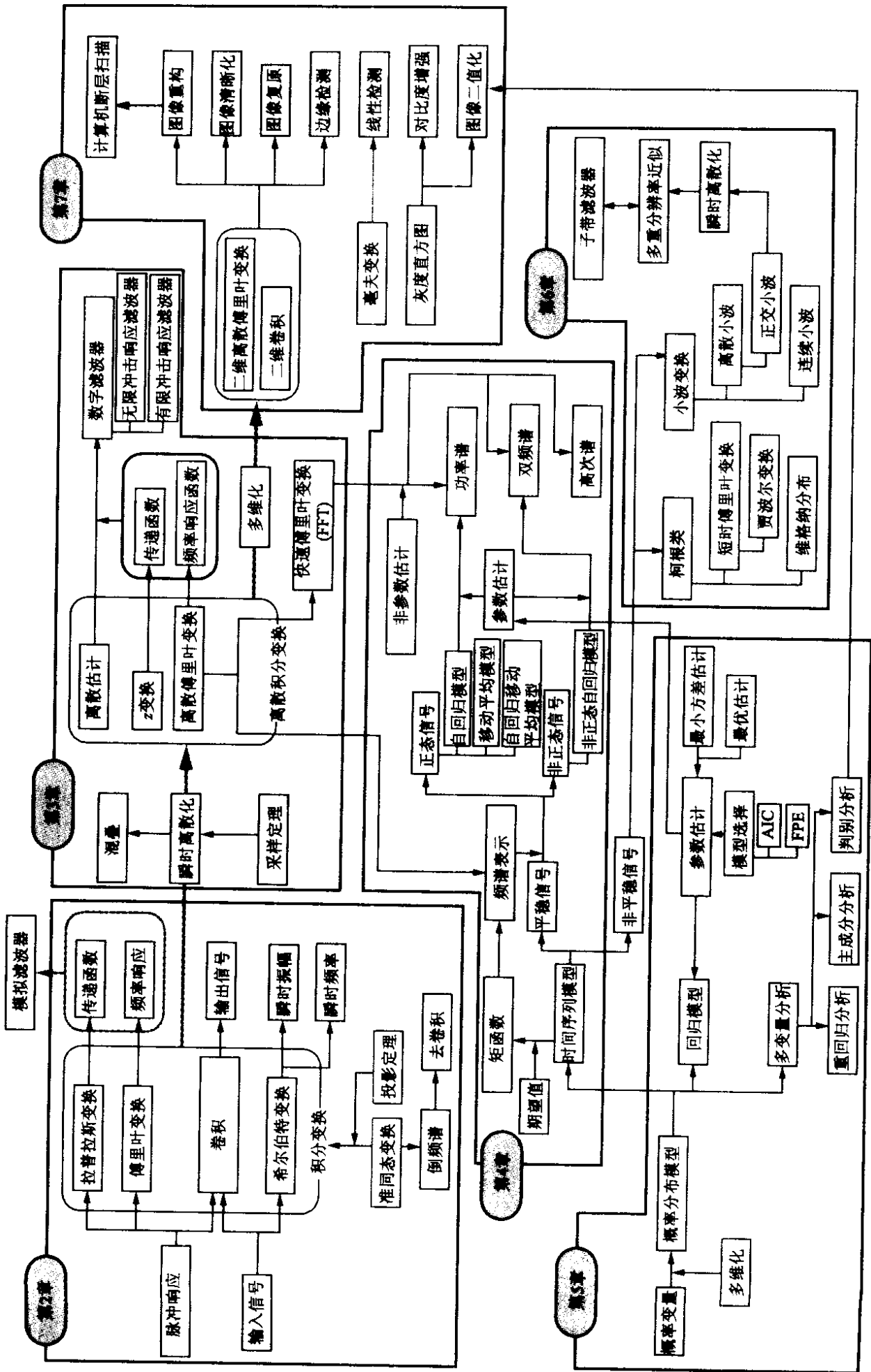


图 1.3 各章的项目及相互关系

信号分析的黎明时期

在编辑本书的过程中,不由得回想起学生时代进行有关肌电图及手动控制系统之研究时的兴奋劲。当时,考虑到肌电图几乎都是噪声状的信号,为了对此进行统计分析、频谱和相关分析等,住进当时安置有最新式的日立计算机 HIPAC103 的豪华冷气设备的电子计算机室中,用眼睛盯着程序计数器的动作,日夜奋战。此外,到图书馆看到新出的文献速报也非常高兴。

那时,看到了库雷-图克(Cooley-Tukey)关于采用快速傅里叶变换(FFT)的论文,立刻邮购并开始阅读,能理解其算法时兴奋到极点。到那时简单的数值积分的傅里叶变换仅用十几行程序就可写成,当然,在维纳(Wiener)控制论中这种概念的新颖性也很有魅力(调和与分析较难处可适当跳过)。由此,与信号分析有关的领域令人产生特别兴趣。详细情况请参阅书末所附的参考文献。

首先,在第二次世界大战结束前后是莱斯(Rice)的噪声分析(1944年)、染谷-山农(Shannon)的采样定理(1949年)、都布(Doob)的概率过程(1953年)、戈德曼(Goldman)的信息论(1953年)、布力克曼-图克(Blackman-Tukey)的频谱分析(1958年)、达尔泼-鲁特(Davenport-Root)(1958年)与李(Lee)(1960年)的随机信号分析等,可以说这是出现大量的早期研究成果的黎明时期。此外,当今的诺依曼电子计算机的原型电子管计算机 ENIAC 研制开发是在 1946 年,战后经过一段时期进入 20 世纪 60 年代,出现了卡尔曼滤波器(Kalman Filter)(1960年),乍得-狄索尔(Zadeh-Desoer)的线性系统理论(1963年),朱里(Jury)的 z 变换理论(1964年),库雷-图克(Cooley-Tukey)的快速傅里叶变换(FFT)算法(1965年),其后出现了戈德-雷德尔(Gold-Rader)(1969年)等的数字信号处理。进入 20 世纪 70 年代以后,出现了 FPE 与 AIC 的所谓赤池信息量基准(1972年)与时间序列分析、系统理论与系统辨识等,在所有领域内有关量的信号分析与处理的理论和应用研究,时至今日正在不断地在宽广范围中展开。

或许是出于个人的见解,作者认为若回过头来看看与这样的信号分析相关的各个领域的背景及相互联系,重温历史的流程,这将有助于我们更深刻地理解其内容。

练习题

- 1 从信号处理的观点出发,试考察研究收音机与电视机、移动电话等日常生活中常用的信息设备的原理,以及基于其结构的工作情况。
- 2 复习并理解有关傅里叶级数、傅里叶变换、拉普拉斯变换、 z 变换的相互关系的基本知识。