

自适应信号处理

Adaptive Signal Processing

(美) Bernard Widrow 著
Samuel D. Stearns

王永德 龙宪惠 译

ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING

Bernard Widrow
Samuel D. Stearns

PEARSON HALL SIGNAL PROCESSING SERIES
© 1987 PEARSON EDUCATION, INC.



电子与电气工程丛

TN911.7/68

2008

自适应信号处理

Adaptive Signal Processing

(美) Bernard Widrow 著
Samuel D. Stearns

王永德 龙宪惠 译



机械工业出版社
China Machine Press

本书是系统介绍自适应信号处理的一本专业性教科书,内容包括自适应信号处理的原理、算法和结构,及其在各个领域的应用。全书在理论方面侧重讨论自适应系统的基本结构形式、线性组合器和重要的自适应算法——LMS(最小均方)算法;在应用方面,重点讨论了自适应信号处理在系统辨识、解卷积、信道均衡、自动控制、干扰对消及空间阵列处理等方面的应用。本书的特点是由浅入深、系统性强、概念清楚、论述严谨,既有理论分析又有对物理概念的阐述,以及对复杂而抽象的概念和算法作出直观形象的几何解释。本书每章末均附有大量带启发性的习题和部分习题答案,以及大量的参考文献。

本书可作为高等院校通信、雷达、声纳以及信号处理等相关专业的高年级学生和研究生教材,也可作为工程技术人员的参考资料。本书最后一部分应用篇中包含有大量引导性的应用举例,对科研院所研发人员和工程技术人员解决实际的工程技术问题,也很有参考价值。

Simplified Chinese edition copyright © 2008 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press.

Original English language title: *Adaptive Signal Processing* (ISBN 0-13-004029-0) by Bernard Windrow, Samuel D. Stearns. Copyright © 1985.

All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR.

本书封面贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2007-0363

图书在版编目(CIP)数据

自适应信号处理/(美)威德罗.(Winrow, B.), (美)斯蒂恩(Stearns, S. D.)著;王永德,龙宪惠译. —北京:机械工业出版社,2008.1

(电子与电气工程丛书)

书名原文: *Adaptive Signal Processing*

ISBN 978-7-111-22792-2

I. 自… II. ①威… ②斯… ③王… ④龙… III. 自适应控制—信号处理—教材
IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第175559号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:王璐

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张

定价:45.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

译者序

本书是一本有关自适应信号处理的专业性教科书，也是自适应信号处理方面的一部经典著作。作者 B. Widrow 是自适应信号处理的鼻祖。自适应信号处理是一门涉及面宽、应用面广、属于现代信号处理的新兴学科，也是一门学习起来有一定难度的课程，一般要求读者具有数字信号处理和随机信号分析与处理的专业基础知识。与国内外其他同类书籍相比，本书的起点低，只要读者具有信号与系统方面的基础，就可通过学习，逐步掌握自适应信号处理的基本原理、结构和算法。对于希望用自适应信号处理解决实际问题的研发人员和工程技术人员，本书特别设计了一条捷径，即在学习时可以跳过书中理论性较强的部分章节(见第二篇)，直接进入第三篇和第四篇，找到感兴趣的学习内容，这有利于加快用自适应信号处理的方法解决工程实际问题的进度。全书内容由浅入深、条理清楚、层次分明，篇章安排较为科学；每章末附有大量的习题，以便于初学者加深对内容的理解和消化；部分习题给出答案，便于自学者检查。对于大家学习、掌握或应用自适应信号处理技术来说，它是一本难得的好书。

本书主要内容包括自适应信号处理的原理、算法和结构以及在各种领域的应用。全书在理论方面侧重讨论线性组合器这种基本的自适应结构形式，以及 LMS(最小均方)算法这种重要且基本的自适应算法；在应用方面，重点讨论自适应信号处理在系统辨识、解卷积、信道均衡、自动控制、干扰对消及空间阵列处理等方面的应用。本书既有理论分析，又有物理概念阐述，以及对复杂而抽象的概念和算法做出的直观形象的几何解释。每章有大量启发性的习题和部分答案，以及大量的参考文献，很适合作为通信、雷达、声纳以及信号处理相关专业高等院校高年级学生和研究生的教材，也可作为工程技术人员的自学用书。本书最后一部分为应用篇，包含大量带引导性的应用举例，对研发人员和工程技术人员解决实际的技术问题很有参考价值。

本书的第 11、12 章由龙宪惠翻译，其余各章由王永德翻译并负责全书的校订。在翻译过程中，对原文中明显的错误与不妥之处做了订正。

在本书的翻译过程中，承蒙成都电子科技大学肖先赐教授指教，为本书的翻译工作提出有价值的建议，使译者获益良多，同时感谢肖教授在百忙中对全书译稿进行了审阅，译者在此深表感谢。

由于译者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者不吝赐教。

译者

2007 年 10 月

前 言

本书是作者在自适应信号处理领域近 30 年的教学与科研活动的结晶，可作为自适应信号处理的教科书。可以确信，到本书出版时，它仍是这个主题少有的—本基础性教程，或者至少在本书目录中所概括的主题上，是唯一的一本教科书。

本书是作者在斯坦福大学、新墨西哥大学、桑地亚(Sandia)国家实验室给本科生高年级或研究生—、二学期讲解自适应信号处理的相关课程的授课讲稿基础上整理而成。除了第 1 章外，每章末均有习题，这是采用本书作为教材很重要的一点。这些习题能让读者更透彻地理解基本概念，或者提出一些与正文中基本想法不同的应用。

读者从本书目录中可以看到，本书总共分为四篇。前三篇分别为导论、平稳信号的自适应理论和自适应算法与结构，这部分占了全书近一半的篇幅，内容属于基本理论，是任何有关自适应信号处理入门课程均应具备的基础知识。第四篇，即应用篇，由自适应信号处理在各种工程技术中的应用概括而成，共 6 章。对这部分内容，教师可以把重点放在一些特别令人感兴趣的主题上。然而，如果要在—学期内讲完本书，也可把每一章的第一节作为讲授的重点。

学习本课程的学生至少应具有工程与数学类高等专科学校以上的学历，并具有编写代码和运行程序的能力，后者对完成本书的某些习题来讲是重要的。有关线性系统分析的课程，特别是用 z 变换分析离散系统的课程，是非常有用的(即使不是必不可少的)基础。同时，如果学习过工程应用统计与概率或类似的课程，也会对学习本书提供有用的基础。

在第一篇中，第 1 章依据工程上特定系统的特征或性质，引入了自适应的概念。第 2 章介绍了自适应线性组合器，它是一种最简单，也是使用最广泛的自适应结构。在这章中，还描述了几何空间的“性能表面”的概念，它对分析任何自适应系统都是有用的。

第二篇为“平稳信号自适应理论”，包括了性能表面及其性质的分析，这种分析始于第 3 章。第 4 章中，自适应过程被视为对性能表面最小点的搜索过程。第 5 章包含了性能表面梯度估值的统计分析及几种搜索方法的比较等内容。

在第三篇“自适应算法与结构”中，第 6 章引出并讨论了最小均方误差算法。第 7 章介绍了学习后面各章所需要的信号处理的基本概念，它包括了联系时域与频域的 z 变换关系。本篇的最后一章，即第 8 章介绍了 LMS 算法以外的其他算法；以及线性组合器以外的其他自适应结构，例如自适应格型(lattice)结构。在编写本书时，自适应格型(lattice)结构是一个发展得十分迅速的技术，因而这里的介绍并不像我们所希望的那样全面。

本书第四篇涵盖了自适应信号处理的主要应用领域。当学完了第 1~8 章的基础内容之后，可以有选择地从第四篇中学习—些课题。第 9、10 两章介绍了对未知系统的正向或逆向的自适应模拟，以及在多径通信、地球物理勘探、数字滤波器设计及电话信道均衡等方面的应用。自适应控制系统在第 11 章介绍。第 12 章讨论了自适应干扰对消，并给出了几个应用举例。第 13 章与第 14 章包括了自适应阵及波束形成器等内容。

撰写这本书时，我们收到许多来自同行专家们的批评、评论与建议，真是受益匪浅。我们十分珍惜这些评论与意见，还通过这项工作增进了彼此的友谊，对此我们深表谢意。在这里要向以下学者致谢，他们是 Robert D. Fraser、Dennis R. Morgan、Dae H. Youn、Eugene Walach、Richard

Gooch、Ruth A. David、Sharon K. Fletcher、Claude S. Lindquist、Daksheesh Parikh、Delores M. Etter、Edward S. Angel、Lloyd J. Griffiths、Nasir Ahmed、John R. Treichler、C. Richard Johnson, Jr. , Michael G. Larimore、Glenn R. Elliott、John M. McCool、John M. Gioffi 和 T. C. Hsia。没有这些亲密朋友们的帮助与奉献，这本书不可能像现在这个样子。

我们也要感谢上面提到的学习自适应信号处理课程的学生们。事实上，他们校订、修改了这本书，这是我们力所不及的。在此对他们的耐心、兴趣和热忱深表感谢。

最后还要感谢桑地亚国家实验室的 Dedra Shepperd 女士和斯坦福大学的 Mieko Parker 女士，她们坚持不懈地以极大的耐心为我们反复打印了这本书的书稿。

Bernard Widrow

Samuel D. Stearns

常用符号

符号	在本书中的用法
a	(1)在线性滤波器中的前馈权 (2)在遗传优化算法中的码位
b	(1)在线性滤波器中的递归权 (2)在遗传优化算法中的码位
c	(1)被控系统输出信号 (2)信号传播速度
d	(1)期待响应 (2)天线单元间隔
e	自然对数的底 2.71828...
$f()$	连续函数
g	被控系统的输出信号
h	冲激响应
j	$\sqrt{-1}$
k	样本数
l	(1)权数 (2)单元间隔
n	(1)通用指标 (2)噪声样值
p	输入白噪声总功率
r	(1)梯度搜索算法收敛率 (2)在(0, 1)区间的均匀分布随机数 (3)参考输入信号
s	(1)格型滤波器中的信号 (2)输入信号
t	连续时间
u	(1) z 的逆 (2)被控系统输入信号
v	平移权 $w - w^*$
v'	主轴坐标系中的权值
w	权值
x	输入信号

y	输出信号
z	z 变换中的变量
z^{-1}	z 的逆(单位延时)
A	(1) a 的 z 变换 (2) 振幅增益
B	b 的 z 变换
C	(1) 格型变换中所用的函数 (2) 恒值信号振幅
D	信号畸变
$E[\]$	期望(均值)
F	传输函数
G	传输函数
H	传输函数
I	单位阵, $\text{diag}[111\dots 1]$
J	(1) 传输函数 (2) 干扰信号
K	波束形成器单元数
L	最后一个滤波权的指标
M	(1) 失调 (2) 反馈权数
N	(1) 每个周期的样元数 (2) 从扰动后的权值取得的误差样本数 (3) 离散频率
N	梯度噪声, $\hat{\nabla} - \nabla$
N'	在主轴坐标系中的 N
P	(1) 由微商测量引起的扰动 (2) 估计的信号功率 (3) 被控系统的传输函数
P	输入与期待信号之间的相关向量
PS	伪滤波器的传输函数
Q	滤波器品质因数
Q	(1) R 的特征矢量矩阵 (2) 与 R 矩阵估值成比例的矩阵
R	输入 x 的相关矩阵
S	(1) 用在 SER 算法中的矩阵 (2) 自适应阵中的信号向量
T	(1) 向量或矩阵的转置 (2) 样本之间以秒计的时间步长

T	自适应时间常数
U	增广信号向量
V	平移后的权向量, $W - W^*$
V'	在主轴坐标系中的权向量
W	权向量
X	x 的 z 变换
X	输入信号向量
Y	y 的 z 变换
$Z^{-1}[\]$	逆 z 变换
α	(1) 指数衰减常数 (2) 输出信号的微商 (3) 在 SER 和格型算法中的遗忘因子
α_r	ϵ_k 的 r 阶矩
$\hat{\alpha}_r$	α_r 的估值
β	(1) 输出信号微商 (2) 可调增益因子
γ	(1) 性能损失 (2) 泄漏因子
δ	(1) 在权值上的小扰动 (2) 平移后格型滤波器权 (3) 波束控制延迟
ϵ, ϵ	误差信号
κ	格型滤波器权
λ	(1) 特征值 (2) 波长
μ	在梯度搜索算法中的收敛参数
ν	(1) 收敛参数 (2) 格型滤波器权
ν^2	输入噪声功率
ξ	均方误差 (MSE) 性能函数
$\hat{\xi}$	ξ 的估值
π	3.14159265...
ρ	信噪比
σ^2	信号方差或功率
τ	权收敛的时间常数
ϕ	(1) 随机信号平均功率 (2) 相关函数
ω	以弧度计的角频率 (取样频率 = 2π)

Δ	延时量
Θ	相角(弧度)
θ	信号到达角
Λ	特征值矩阵, $\text{diag}[\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_L]$
Φ	功率谱密度(ϕ 的 z 变换)
ψ	(1)输入信号 (2)信号到达角
Ω	以弧度/秒计的角频率(取样频率 $=2\pi/T$)
*	表示最佳值, 如 W^*
∇	性能函数的梯度向量
$\hat{\nabla}$	∇ 的估值

目 录

译者序
前言
常用符号

第一篇 导 论

第 1 章 自适应系统	2
1.1 定义与特征	2
1.2 应用领域	3
1.3 一般性质	3
1.4 开环与闭环自适应	4
1.5 闭环自适应的应用	5
1.6 自适应系统举例	7
1.7 其他章节内容概述	8
第 2 章 自适应线性组合器	9
2.1 引论	9
2.2 输入信号与权向量	9
2.3 期待响应与误差	11
2.4 性能函数	12
2.5 梯度与最小均方误差	13
2.6 性能表面的例子	14
2.7 梯度的另一种表示法	15
2.8 误差与输入分量的去相关	16
习题	17
参考文献与补充读物	19

第二篇 平稳信号自适应理论

第 3 章 二次型性能表面的性质	22
3.1 输入相关矩阵的正则形式	22

3.2 输入相关矩阵的特征值与特征向量	23
3.3 具有两个权的例子	24
3.4 特征向量与特征值的几何意义	25
3.5 第二个例子	27
习题	29
参考文献与补充读物	31

第 4 章 性能表面的搜索	32
4.1 性能表面的搜索方法	32
4.2 梯度搜索法的基本思想	32
4.3 一个简单的梯度搜索算法与它的解	33
4.4 稳定性与收敛率	34
4.5 学习曲线	35
4.6 牛顿法梯度搜索	36
4.7 多维空间中的牛顿法	38
4.8 最速下降法梯度搜索	39
4.9 学习曲线的比较	42
习题	44
参考文献与补充读物	45

第 5 章 梯度估值及其对自适应过程的影响	46
5.1 用微商法估计梯度分量	46
5.2 性能损失	47
5.3 多权系统的微商测量与性能损失	48
5.4 梯度估值的方差	49
5.5 对权向量解的影响	52
5.6 超量均方误差与时间常数	56
5.7 失调	61
5.8 牛顿法与最陡下降法性能的比较	62
5.9 总失调及其他一些实际考虑	63
习题	64
参考文献与补充读物	66

第三篇 自适应算法与结构

第 6 章 LMS 算法	68
6.1 LMS 算法的导出	68
6.2 权向量的收敛	69
6.3 收敛性的例子	71
6.4 学习曲线	73
6.5 权向量解的噪声	75
6.6 失调	76
6.7 性能	77
习题	79
参考文献与补充读物	80
第 7 章 自适应信号处理中的 z 变换 ..	81
7.1 z 变换	81
7.2 右序列与左序列	82
7.3 传输函数	83
7.4 频率响应	84
7.5 冲激响应与稳定性	86
7.6 逆 z 变换	87
7.7 相关函数与功率谱	89
7.8 性能函数	91
7.9 性能表面举例	93
习题	95
参考文献与补充读物	98
第 8 章 其他自适应算法与结构	99
8.1 一种理想算法: LMS/Newton 算法 ..	99
8.2 LMS/Newton 算法的特性	101
8.3 序贯回归算法	103
8.4 自适应递归滤波器	108
8.5 随机搜索算法	113
8.6 格型结构	115
8.7 自适应格型预测器	122
8.8 采用正交信号的自适应滤波	128
习题	131
参考文献与补充读物	134

第四篇 自适应信号处理的应用

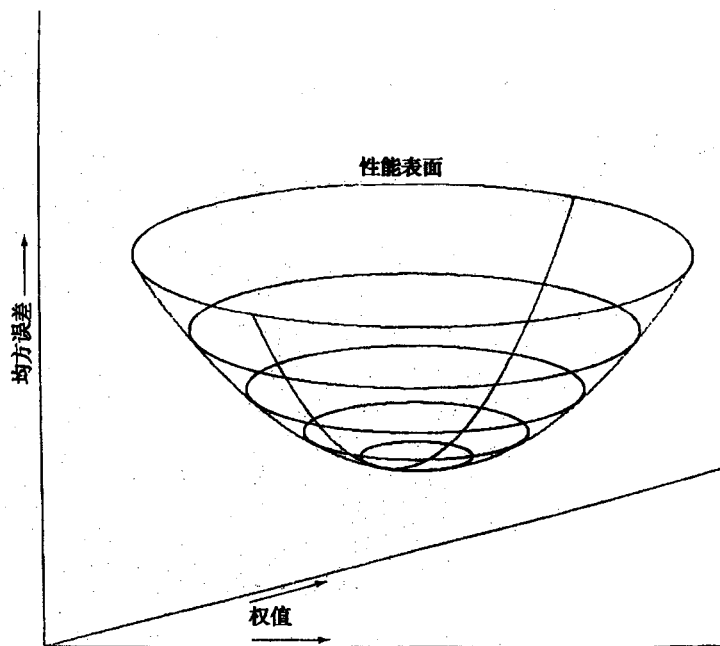
第 9 章 自适应模拟与系统辨识	138
9.1 概述	138
9.2 多径通信信道的自适应模拟	142
9.3 在地球物理勘探中的自适应模拟 ..	147
9.4 FIR 滤波器综合的自适应模拟	149
习题	158
参考文献与补充读物	161
第 10 章 自适应逆模拟、均衡与解 卷积	163
10.1 逆模拟的一般描述	163
10.2 某些理论例子	167
10.3 电话信道的自适应均衡	172
10.4 IIR 滤波器综合的零极点配置	176
习题	186
参考文献与补充读物	189
第 11 章 自适应控制系统	191
11.1 自适应模型控制	192
11.2 自适应逆控制	198
11.3 自适应逆控制的例子	202
11.4 被控系统噪声及过滤后 x -LMS 算法	204
11.5 使用过滤后 x -LMS 算法进行逆 控制	208
11.6 参考模型控制	209
习题	211
参考文献与补充读物	214
第 12 章 自适应干扰对消	215
12.1 自适应干扰对消的早期工作	215
12.2 自适应噪声对消的原理	216
12.3 平稳噪声对消解	218
12.4 参考输入中信号分量的影响	221
12.5 用做凹口滤波器的自适应干扰对 消器	225

12.6	用做高通滤波器的自适应干扰对消器	230	13.3	空间配置	274
12.7	有限长度和因果性的影响	230	13.4	自适应算法	276
12.8	多参考噪声对消	232	13.5	窄带实验	278
12.9	心电图中的 60Hz 干扰的对消	233	13.6	宽带实验	281
12.10	心脏移植心电图移植心脏干扰的对消	235	习题	285	
12.11	胎儿心电图母体心电图的对消	237	参考文献与补充读物	287	
12.12	语音信号中的噪声对消	239	第 14 章 自适应波束形成器的分析		
12.13	长途电话线路中的回声对消	240	14.1	接收阵的性能特征	289
12.14	天线旁瓣干扰的对消	244	14.2	格里菲思 LMS 波束形成器	291
12.15	用自适应预测器对消周期干扰	246	14.3	弗罗斯特自适应形成器	293
12.16	自适应自调谐滤波器	247	14.4	具有零点与极点的自适应波束形成器	297
12.17	自适应谱线增强器	249	14.5	信号的对消与畸变	302
12.18	结论	253	14.6	跳频扩频技术	311
习题	254	14.7	超分辨波束形成器	314	
参考文献与补充读物	256	习题	320	参考文献与补充读物	322
第 13 章 自适应阵与自适应波束形成导论			附录 A 可移植的随机数发生器		
13.1	旁瓣对消	260	索引		
13.2	采用引导信号的波束形成	270	331		

第一篇 导 论

第一篇的研究对象

本书的前两章属于第一篇，它有三个目的，首先介绍在工程意义上“自适应”(或“适应”)的基本含义，并将自适应信号处理归入一般信号处理的范畴；其次是讲解一种最简单、也是最广泛应用的自适应处理器——自适应线性组合器。它是一种最基本的自适应器件，对它的讨论占去了本书整整六章的内容，在本书的其余各章中也多次出现；第三个目的则是让读者对整个自适应过程建立起几何概念。我们希望把自适应过程想像成是沿 $L+1$ 维空间中的 L 维“性能表面”(performance surface) 下坡移动的一种方法。这个性能表面示于下面的图中，它是将均方误差作为自适应系统参数的函数而绘制出来的。在第2章中，我们将讨论这些几何概念与术语。



1

2

第 1 章 自适应系统

1.1 定义与特征

在《Random House》字典(1971年版)中,对自适应(adapt)有如下注释:动词,1)去适合某些需要或某些条件;通过调整或修正去拟合……;2)针对不同的条件或环境等,去调节自身。

近年来,“自适应系统”是一个蓬勃发展的研究领域,已经研究出一大类在某种受限的条件下,类似于有生命系统与生物适应过程的自适应自动机。同样,参照《Random House》字典,对名词“自适应”(adaptation)赋予更多的含义:

1)适应性动作;2)被适应的状态;调整;3)生物学:a)生物体或它的某些部分的结构或功能,经自然选择发生改变,以更好地适应环境而生存与繁殖;b)一种组织或构造的修改,以适合环境的变化;4)生理学:感觉器官,如视觉、触觉、冷热、味觉、听觉与痛觉反应减弱,以不断地去适应变化了的环境条件;5)眼科:瞳孔调节进入眼睛光通量的大小;6)社会学:人或社会团体受周围环境文化的影响而产生一种缓慢的潜移默化。

上述定义原来主要用以说明生物体对环境的自适应。同样的定义将推广至人工或人造的自适应系统,而这种系统正是本书讨论的核心。

自适应自动机是一种结构可以改变或调整的系统,而且这种改变与调整是通过系统本身与外界环境的接触,来改善(按照某个期望的准则)系统自身的性质或性能的。一个最简单的自动机或自适应系统的例子,是用在收音机或电视接收机中的自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)。AGC电路的作用是按输入信号的平均强度,反比例地调整接收机的灵敏度。因而这样的接收机能适应于宽范围的输入电平,而得到一个窄范围的输出信号强度。

3

本书的目的是:提出自适应的基本原理;阐明基本形式的自适应系统的设计、工作特性和应用;描述物理实现的方法。讨论的系统类型主要包括那些用来作为自适应控制与自适应信号处理的系统,这样一些系统通常具有如下所有的或部分的特性:

1)它们能够自动地适应(自最优)变化(非平稳)的环境与变化的系统要求。

2)它们能够训练成去完成特定的滤波或判决任务。具有这些能力的系统综合是通过训练自动完成的。在某种意义上,自适应系统可认为是通过学习过程“编程了的”系统。

3)由上可知,自适应系统不需要精确的综合方法,这对非自适应系统则往往是必须的。自适应系统试图“自行设计”。

4)它们经过有限的、通常是少量的训练信号或模式训练,就能够外推至一个新的性能模型,用以应对新的环境。

5)在有限的范围内它们能够自我检测;即是说,它们能适应于一定类型的内部故障。

6)它们通常被描述成是一种具有时变参量的非线性系统。

7)与非自适应系统相比,通常自适应系统更复杂、更难以分析,但是当输入信号特性

是未知或时变的时候，它们从本质上提供了改善系统性能的可能性。

1.2 应用领域

在今天，由于微电子技术的飞速发展，已经可以设计并制造出容量大、体积小、性能可靠的信号处理器。这种处理器甚至可以在体积上与生物神经系统相匹敌，而在速度上则明显地占优势。于是，包括自适应信号处理在内的各种类型的信号处理技术，得到愈来愈广泛的应用。对于自适应系统，最通常的应用领域是通信、雷达、声纳、地震学、机械设计、导航系统及生物医学电子学。

本书的第四篇将讨论有关的应用。该篇前言部分将给出各种应用领域的—个粗略的轮廓。第9章涉及到有关自适应系统模拟与辨识，即用一个自适应系统去模拟一个未知的系统或被控系统(plant)，它可以是随时间缓慢变化的系统。对于给定的输入信号，自适应系统试图去“匹配”这个未知系统的输出。自适应模拟在机电系统的设计与试验方面有用。

4

第10章讨论逆向模拟(简称逆模拟)、均衡与解卷积。所有这些术语如同“逆向滤波”(简称逆滤波)一样，是与消除器件或媒质对信号的影响过程有关。例如，可以让声频系统对所有的话音频率有相同的增益，或者消除传输线对雷达脉冲的影响。

第11章是关于控制系统，讨论的问题是：假设控制系统的特性是随时间变化的，如何让它适应环境。一个典型的例子是，飞机控制系统的传动比与响应时间是随着空气密度的变化而变化的。在第12章中讨论的自适应噪声对消器，已在语音通信、心电图仪及地震信号处理等领域得到了应用。由于真实客观环境中噪声的特性常常不是平稳的，因而自适应噪声对消器实际上在信号增强方面有广阔的应用前景。第13、14章描述一个新的应用领域，即自适应阵(array)。在这个领域内，自适应信号处理的概念特别有用。

1.3 一般性质

自适应系统最基本、最主要的性质是它的时变、自调整性能。从对具有这种性能的系统的需求中容易看出，如果设计者采用固定参数的设计方法研制出一种他们认为是最佳的系统，就预示着设计者事先知道了一切可能的(至少在统计意义上)输入条件，而且他们知道系统在这些条件下应该怎样动作。然后设计者选择了一个借以判断性能好坏的准则，例如，真实系统的输出与某些选定的或“理想”系统输出之间误差的大小。最后，设计者按照性能准则选择了一个看来是最好的系统，一般说来，这个系统是从预先加以约束的一类系统(如线性系统)中选出来的。

然而，在很多情况下，输入条件的整个范围哪怕是从统计意义上说，也可能是未知的，或者说它是随时间改变的。对于这样的环境，采用一种有序的搜索过程，在一类允许的可能范围内不断寻找的最佳值的自适应系统，比之于固定设计的系统将具有更优越的性能。

就其本性而言，自适应系统必须是时变、非线性系统，特别是其特性与其输入信号有关。如果输入 x_1 加在自适应系统上，自适应系统将适应于这个输入并产生相应的输出 y_1 ，如果再加上另外一个输入信号 x_2 ，系统又将去适应第二个信号并再产生一个输出 y_2 。一般说来，这个自适应系统针对两个不同的输入的形态或结构的调整是不同的。如果两个输入的和加在自适应系统上，系统将适应于这个新的输入，而且产生一个新的输出，这个输出—

5

般地不同于 $y_1 + y_2$ ，输出的和取决于输入值 x_1 和 x_2 。这种情况下，在如图 1-1 所示的系统中，对于线性系统所满足的叠加原理一般不再成立。如果一个信号加在自适应系统的输入以测量其响应特性，则这个系统将适应于这个特定的输入并将改变自身的特性。因此，用通常的方式去表述自适应系统的特性，从本质上说是困难的。

在非线形系统类型中，自适应系统并不明显地属于某一类。然而，它具有两个特征，可以将它与其他形式的非线形系统区分开来。第一，自适应系统是可以调整的，而且它们的调整通常是与有限长度信号的时间平均特性有关，而不是取决于信号或内部系统状态的瞬时值。第二，自适应系统的调整是有目的的，通常是为了优化某个确定的性能测度。

当适应过程结束、自适应调整不再进行时，有一类自适应系统成为线性系统，并称之为“线性自适应系统”。这种类型的自适应系统特别有用，易于进行数学处理，并且比其他形式的自适应系统更便于设计。

1.4 开环与闭环自适应

在各种文献中，已提出几种方式以对自适应方案进行分类。我们从考虑开环自适应与闭环自适应开始比较合适。开环自适应系统的工作包含以下几步：对输入或环境特性进行测量；用测量得到的信息形成一个公式或算法；用此结果去建立自适应系统的调整。另一方面，闭环自适应则包含了用这些调整和结果的有关知识去优化一个可量度的系统性能的自动试验。后面的过程称之为采用“性能反馈”的自适应。

6

开环与闭环自适应的原理示于图 1-2 和图 1-3。在两种情况下，可以假想自适应过程均由“操纵者”或“监督人员”来完成。在图 1-2a 与图 1-3a 中所示的监督人员，按照由预先选定的性能准则度量的读数来调整处理器的旋钮。对于开环系统，准则仅仅是输入信号或其他一些数据的特征；然而，对于闭环系统，它还与输出信号有关。在图 1-3 中，调整过程既不要求操纵者具有任何关于处理器内部结构的知识或各个旋钮所具功能的知识，也不必对输入过程进行任何处理。他(她)们仅仅需要按照预先选定的性能准则调整处理器以保持性能最优即可。因而操作者的作用单纯是监督。在真正的自适应系统中，如图 1-2b 与图 1-3b 所示，操作者被计算机或“自适应”算法所代替。图中“其他数据”可以是自适应系统所处的环境，或者是在闭环情况下对输出信号所期待的形式。

当具体设计一个自适应系统时，到底选择开环或闭环自适应，取决于很多因素。其中输入信号及性能标志信号的可利用性，是一个最主要的考虑。计算容量及用于具体实现的计算机类型，对开环与闭环自适应系统是不相同的。某些算法要求使用通用数字计算机，而另一些算法则采用专用芯片或其他一些器件来实现更为经济。这样一类结构性问题的讨论，将在后面一些章节给出。但是，想要导出一个一般的原则来指导这样的选择是困难的。在这里需要对本书重点讨论的闭环自适应总结几条主要的优点，并指出不足。

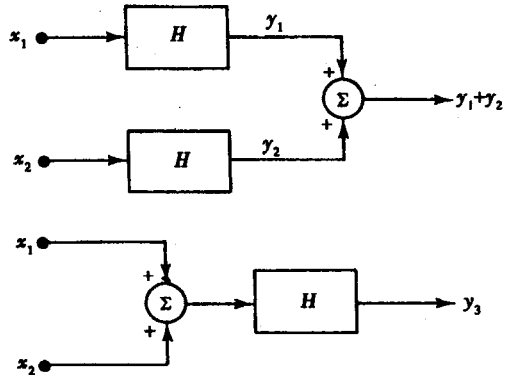


图 1-1 如果 H 是一个线性系统，下面的输出 y_3 等于 $y_1 + y_2$ ；如果 H 是自适应系统，则 y_3 通常与 $y_1 + y_2$ 不同