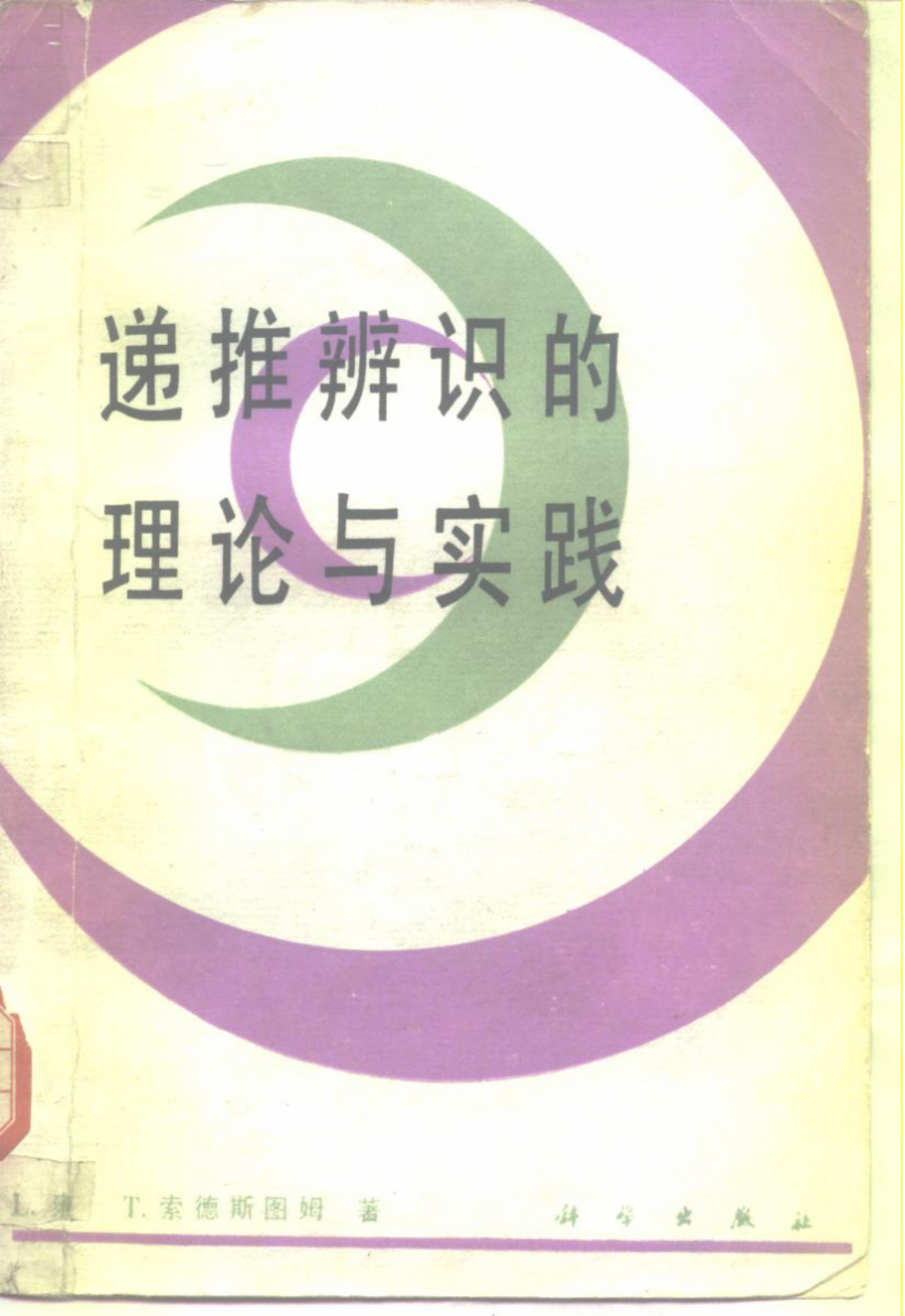




递推辨识的 理论与实践

L. 康 T. 索德斯图姆 著

科学出版社

412
763

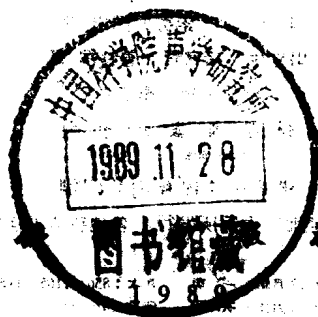
0660/05

递推辨识的理论与实践

〔美〕L. 雅, T. 索德斯图姆 著

田立生 褚家晋 善铁军 译

THEORY AND PRACTICE OF
RECURSIVE IDENTIFICATION



1014037

内 容 简 介

数学模型是控制、信号与系统中的基本问题,递推辨识是实时地在线建立模型的技术,因而它是自适应系统与自适应信号处理的核心内容。

本书是一本论述系统辨识和参数估计的优秀著作,它给当前充满了大量不同处理方法、观点和技术的递推辨识领域,勾划出了一幅清晰的图画,从而清楚地介绍了递推辨识的概念和方法。对于非专业人员,这是一本关于递推辨识的入门书,书中专门为从事实际应用的人们编写了“用户小结”,以便“用户”在设计递推辨识算法时对所涉及到的各种因素作出恰当的选择。

本书可作为信息、控制和系统工程,信号处理以及应用数学各专业高年级大学生、研究生和教师的教学参考书。也可供从事上述专业应用的工程技术人员和从事气象、能源、经济、社会、生物医学和地震勘探的系统建模和预测以及数据处理的广大科技工作者自学参考。

Lennart Ljung Torsten Söderström
**THEORY AND PRACTICE OF RECURSIVE
IDENTIFICATION**
The MIT Press, 1983

递推辨识的理论与实践

L 著 L. 索德斯图姆 著

田立生 靖家晋 善铁军 译

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京 4 景城街北街 16 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989 年 12 月第 1 版 开本: 850 × 1168 1/32

1989 年 12 月第一次印刷 印张: 16 3/4

印数: 0001—1 130 字数: 433,000

ISBN 7-03-001183-X/TP·74

定价: 18.60 元

译 者 的 话

递推辨识的方法在过去二十年有很大的发展,它的发展可以从大量的各种递推算法的名字上看出,如 AML, RML, LS, ELS, RLS, RGLS, LMS, PLR, PEM, RPEM, EKF, IV, Refined IV, Symmetric IV, Nonsymmetric IV, IVAML, SA, SG, SN 等等。这一方面反映了这个领域的研究工作的活跃与繁荣,但也使初学者对于这种多少有点混乱的状况感到茫然。雍和索德斯图姆在本书中认为(请看 1.5 节)“仅有一种递推辨识算法,它包含有若干由用户来选择的设计变量”。他们把各种递推辨识方法统一起来的作法,给递推辨识领域勾划出了一幅清晰的图画,从而可以清楚地介绍递推辨识的概念和方法,它是近二十年发展的及时总结,因此受到各国同行的普遍欢迎,这是本书的第一个特点。

本书作者利用这种一般体制算法,在这个科学领域中对递推辨识算法得到的估计量的特性(收敛性与渐近分布性质等)进行分析。理论分析是建立在雍提出的相伴微分方程方法的基础上,因此本书的理论内容始终带有其自己的特色,作者把读者带到这个学科的研究前缘并且向读者强调了值得注意的理论研究课题和分析方法。这一特点也使得本书是一本值得长期保留的参考文献。

本书的第三个特点是作者对递推辨识的应用给以很大的注意。它在理论分析中始终十分注意揭示递推算法选择和设计的关键问题,并向读者提供简单的比较标准,以使读者能了解和比较众多的各种递推算法之间的异同,从而作出折衷的选择。作者用了差不多一半的篇幅讨论递推辨识应用中的各种问题,因为他们认为,在现实世界中推广应用递推辨识方法比把它写成书更重要。任何理论分析仅仅只能给出一种框架,究竟如何应用还得由“用户”来解决,“用户”应从他们的具体应用实践中,积累经验来解决这个

问题。

近十年来,系统辨识与参数估计的理论研究与具体应用在我国都有很大的发展。在这一研究领域,我国已接近和赶上世界先进水平。我国广大科研和工程应用工作者,在国际自动控制联合会(IFAC)所组织的三年一次的系统辨识与参数估计会议上,宣读和被录用的文章逐届增加,我国主办的第八届(1988年8月在北京)系统辨识与参数估计会议就是一个例证。

我们希望本书的翻译出版会促进我国这个领域的研究与应用工作的发展。

我们相信本书将给对系统辨识,自适应控制与信号系统有兴趣的读者们的书架上增加一本很有价值的参考书。

在翻译过程中,凡我们认为原书有谬之处都进行了订正。关于名词术语,我们尽量采用目前已经流行的译法,至于少数无统一译名的词的译法,仅是我们的一种浅见,限于译者学识水平,译文中定有许多不妥之处,敬请读者批评指正。

本书前言,第一、二、三章及附录由田立生翻译,第四章由褚家晋翻译,第五、六、七章由善铁军翻译。最后由田立生对全书进行统一校对。

译 者

丛 书 序 言

信号处理、最优化和控制等这些领域,已经发展成为日臻成熟的学科,并已有了牢固的理论基础和方法论基础。它们中每一个学科的向前发展固然都有着重要意义,然而许多未来的问题还要求所有这些学科领域的研究人员们通力合作来解决。这些未来的难题有庞大的或复杂的系统的分析、设计和最优化,有充分利用现代数字技术发展所提供的能力来设计高性能的控制系统和信号处理系统,以及把系统的概念与方法应用于各种各样的实际场合,如运输系统、地震信号处理和数据通信网等。

本丛书适合于多方面的用途。它不仅包括了每个学科领域处在该学科研究前缘和尖端内容的书籍,而且还着重强调各学科工作人员都值得注意的理论研究、分析方法和各种应用。通过这些书将会帮助他们了解每一学科领域内的学术研究情况、熟悉其他学科领域的观点和方法,为他们在每个学科内发展新研究领域,以及进行跨学科的研究提供牢固的基础知识。

伦·雍 (L.Ljung) 和托·索德斯图姆 (T. Söderström) 的著作《递推辨识的理论与实践》,是一本论述系统辨识和参数估计的优秀著作。该书所讨论的正是本丛书的一个主要课题,因为参数估计问题在信号处理和控制这两个领域中都是极为重要的课题。此外,人们如今对这个课题的兴趣愈来愈浓,因为现在已经有了价格低廉、计算能力很强的数字式信号处理器,有可能把先进而复杂的自适应算法应用于各种领域中去,在这些领域中人们过去从未用过、甚至从未想到过使用这些算法。因此,雍和索德斯图姆的书出版是非常适时的。

正如作者在前言中所指出的,递推辨识领域中充满了大量的各种不同的处理方法、不同的观点和不同的技术,要想指出它们的

相互联系、评价它们的优缺点和相对水平是很困难的。因此,对于这个领域的初学者来说,或是对非本行专业人员来说,想搞选出和学到递推辨识的基本概念和基本方法,或是想得到某种特定方法的足够的感性知识,以便能在实践中有效地应用它,都不是一件轻而易举的事。正是由于这个原因,雍和索德斯图姆的书是一部格外受人欢迎的书,因为它的宗旨是给递推辨识勾画出一幅清晰而又有条理的图画,清楚地介绍雍提出的递推辨识的概念与方法。在这方面作者们作出了杰出的贡献,他们建立并介绍了一种统一的体制这种体制不仅揭示出了在线辨识算法选择和设计的关键问题,还向读者们提供了既合乎逻辑又简单的思路和参考标准,以使读者能了解和比较众多的各种递推算法之间的相似之处和相异之处。此外,承蒙作者们精心组织安排,这本令人瞩目的书得以问世。对于研究生和非专业人员来说,这本书是关于递推辨识这个课题的优秀入门向导。而对那些兴趣偏重于辨识算法实际应用的人们来说,本书为他们把算法设计的各个关键方面以及算法设计中所涉及到的各种因素之间的折衷权衡等问题都作了全面详尽的讨论,并为他们写了“用户小结”,即在有关各章中把对从事实际工作的人员来说是至关重要的内容挑出来汇集在该章的“用户小结”中。本书为偏重理论的人们提供了递推辨识算法的收敛性分析和详细推导。最后,对所有关心辨识问题的人们来说,无论是专业人员还是非专业人员,本书都将在多年之内表明它是一部很有价值的参考书。

A. S. 威尔斯基

前 言

递推辨识这一学科领域曾被称为“无聊者的乐园”[请看 Åström 和 Eykhoff (1971)的文章],人们常常把它的内容看成是冗长的、令人茫然的表格,表格上开列了各种解题方法和秘诀。在 Åström 和 Eykhoff 写他们那篇综述文章的时代,上述说法无疑是正确的,但是,我们确信向这种看法提出挑战的时刻已经到来,现在可以对这个学科领域作出全面综合的、条理清晰的论述了。这就是我们写本书的动机。

对递推辨识领域来说,条理性和统一性并不是轻而易举一下子就可以实现的。原因之一就是各种辨识方法和算法都一直是在不同的部门、为了各种不同的应用目的而研究开发出来的。“递推辨识”这一名词取自于控制方面的文献。而在统计学中,通常称这个学科为“序贯参数估计”,在自适应信号处理中称这种算法为“自适应算法”。

近三十年来,所有上述学科领域,都一直在开发和研究着各种算法。近来,从专业人员到工业“用户”,对这门学科的兴趣显著增加。这是因为建造比较复杂的系统,可能要利用或是离不开自适应技术(自适应控制,自适应信号处理);同时,也是由于微处理机的出现,使得许多比较高级的算法易于实现。因此,递推辨识应当列入大学生和研究生的课程中去。鉴于这个原因,本丛书的主编 A. 威尔斯基鼓励我们写就这本水平适中、大多数人可以接受理解的书,以飨广大读者。这个目标与我们的宏愿——对递推辨识作全面综合的论述与研究可能是相悖的。在本书中我们力图解决这个矛盾,尽量回避过多地作技术性讨论(请看 1.4 和 4.1 节)。我们还增加了一章(即第二章)对递推辨识作初步介绍,使读者能循序渐进地学习。

本书的原稿曾多次作过教材经受了教学的检验。它曾在美国斯坦福大学用作一年级研究生的辨识课教材,在劳伦斯·利弗莫尔(Lawrence Livermore)实验室用作用户培训课的教材。本书若作教材用,附录部分可以不学。第四章至第六章也可以进一步考虑略去不学,这要看课程的重点是理论还是实践。对于以实践为主的课程,可按图 4.1 画出的“充分路径”的说明来阅读第四章。而对以理论为主的课程,可以把第五章当作实例来讲解,而第六章的算法可以略去不学。本书没有给出习题。我们认为,要想学会和熟悉递推辨识,最好的办法是去实现和仿真不同的算法,这种编制程序的实际练习要比简单地做习题和做形式上的练习更有价值。

上面已经说过,这个学科领域中的现有文献非常之多,很难列出一个综合广泛、包罗万象的参考文献目录,因此本书仅限于列出一些有关的原始文献和“深入阅读”有关各种问题详细内容所必要的文献。

L. 雍

瑞典,林彻平大学电气工程系,自动控制组

T. 索德斯图姆

瑞典,乌普萨拉大学工学院,自动控制和系统分析系

致 谢

对大多数系统来说,初始条件起着重要的作用。我们荣幸地感谢瑞典隆德(Lund)工程技术学院的 K. J. 阿斯图姆教授及其领导的小组提供给我们的有效的初始条件。他们对我们的整个研究工作,尤其是对本书的写作有着深远的影响。

本书的结构是在经历过许多次学术讨论班和雍在世界各地教授短期课程后逐渐形成的。这些讨论班和短期班上的听众和学生的意见和反应,对我们有很大的帮助。

在写作本书的各个阶段,许多研究人员对本书的手稿提出了许多宝贵意见,使我们受益匪浅。首先应当提到的是本书的主编 A. 威尔斯基博士,他在本书的整个写作过程中提出了许多非常细致的和最中肯的意见。我们也感谢许多同事和朋友们,他们提出了许多宝贵意见,帮助澄清了一些问题。我们要特别提到的是 G. 比尔曼 (Bierman), T. 波林 (Bohlin), J. 坎迪 (Candy), B. 埃加特 (Egardt), A. 内霍莱 (Neholai), P. 哈根德尔 (Hagander), M. 莫夫 (Morf), G. 奥尔森 (Olsson), U. V. 雷迪 (Reddy), J. 萨尔兹 (Salz), C. 萨姆森 (Samson), S. 沙 (Shah), B. 威朱 (Widrow) 和 B. 威顿马克 (Wittenmark) 等人,感谢他们提出了许多重要而中肯的意见。

F. 宋 (Soong) 博士提供了图 5.12, 该图是从他的论文中复制的。

从计划写这本书到写成,共花了七年的时间。如果不是雍荣幸地于 1980—1981 年在斯坦福大学度过他的学术公假年,恐怕这本书至今尚不能问世。雍借此机会对 T. 凯拉斯 (Kailath) 教授表示感谢,感谢他提供了这个宝贵机会和学术空气活跃的工作环境。

本书手稿曾多次修改。I. 斯坦伦德 (Stenlund) 太太, I. 林加德 (Ringård) 小姐和 M. 哈伦伯格 (Hallenberg) 太太都以她们高超的技术打印过手稿, 正是因为她们自觉自愿加班加点, 我们才能如期交稿。对她们的协助我们表示衷心的感谢。

我们还向 M. 安斯-伦德伯格 (Anse-Lundberg) 太太表示衷心的感谢, 她熟练而迅速地绘制了本书的插图。

最后我们向 I. 古斯塔夫森 (Gustavsson) 博士表示感谢, 他参与了与本书一些内容有关的研究工作并参与制订了本书的写作计划。他原定是本书的作者之一, 参与本书的大部分工作。我们非常遗憾, 由于他在工业界的工作, 使他不能完成他的著作部分。但是我们确信他正在完成着更重要的工作任务: 在现实世界中推广应用这种方法, 而不仅仅是把它们写成书。

符号、缩写词和习惯表示

符 号

$A \sim N$	渐近正态分布
d	参量向量 θ 的维数
D_c	描述收敛点的参数向量集合
D_μ	描述模型集合的参数向量集合
D_s	描述具有稳定预测器的模型之参数向量集合
$\bar{E}$	$\bar{E}f(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t E f(k)$, 其中 E 是期望算子
$e(t)$	白噪声(互相独立随机变量的序列)
F, G, H	状态空间模型的系数矩阵
$g_A(, ,)$	预测器函数
$K_i(t)$	反射系数(请看 6.4 节)
$L(t)$	算法增益
$l(, ,)$	亏损函数
$\mathcal{M}$	模型集合, 模型结构
$\mathcal{M}(\theta)$	对应于参数 θ 的模型
n	模型阶数
N	数据游程长度(请看第五章)
$N(m, P)$	正态(高斯)分布, 其均值为 m , 协方差矩阵为 P
$O(x)$	当 $x \rightarrow 0$ 时, $O(x)/x$ 有界
$o(x)$	当 $x \rightarrow 0$ 时, $o(x)/x \rightarrow 0$
$P(t)$	$\bar{R}^{-1}(t)$
p	输出向量 $y(t)$ 的维数
$p(\theta z^*)$	后验概率密度函数
R^*	n 维欧几里德空间

R_1, R_2, R_{12}	协方差矩阵	
$R(i)$	高斯-牛顿算法中的赫斯近似	
$\bar{R}(i)$	$iR(i)$	
R_D	在相伴微分方程中对应于 $R(i)$ 的矩阵	
r	输入向量 $u(i)$ 的维数	
$r(i)$	随机梯度算法的标量因子	
$\mathcal{S}$	真实系统	(2.1.1)
$S(q^{-1})$	数据的预滤波器	(2.1.2)
$[]^T$	转置	(2.1.3)
$T(q^{-1})$	数据的预滤波器	(2.1.4)
tr	矩阵的迹	(2.1.5)
t	整数值时间变量	(2.1.6)
$u(i)$	输入信号 (r 维列向量)	(2.1.7)
$V_i(\theta)$	时刻 i 的亏损函数	(2.1.8)
$w(i)$	白噪声 (互相独立的随机变量的序列)	(2.1.9)
$\mathcal{X}$	实验条件	(2.1.10)
$y(i)$	输出信号 (p 维列向量)	(2.1.11)
$y_F(i)$	滤波后的输出	(2.1.12)
$\hat{y}(i)$	利用运行中估计的预测器	(2.1.13)
$\hat{y}(i \theta)$	固定模型参数 θ 时的上述预测器	(2.1.14)
$z(i)$	时刻 i 的测量数据 $(y^T(i)u^T(i))^T$	(2.1.15)
z^N	由 $z(1), \dots, z(N)$ 组成的数据集	(2.1.16)
$\bar{\beta}(N, i)$	由 (2.1.15), (2.1.17) 式定义的遗忘曲线	(2.1.17)
$\beta(N, i)$	由 (2.1.18) 式定义的遗忘曲线	(2.1.18)
$\gamma(i)$	增益 (序列)	(2.1.19)
$\delta_{i, j}$	克罗内克 δ 函数	(2.1.20)
$\varepsilon(i)$	运行中估计的预测误差	(2.1.21)
$\varepsilon(i, \theta)$	固定模型参数时的上述预测误差	(2.1.22)
$\varepsilon(i)$	残差 (后验预测误差)	(2.1.23)
$\zeta(i)$	辅助变量法中用作梯度近似的辅助变量向量	(2.1.24)

$\zeta(t, \theta)$	固定模型参数 θ 时的上述辅助变量向量	9.89
$\eta(t)$	利用运行中估计的一般梯度近似(实际算法中它由 φ, ψ 或 ζ 代替)	10
$\eta(t, \theta)$	固定模型参数 θ 时的上述梯度近似	10
θ	未知系数构成的参数向量(d -维列向量)	11
$\hat{\theta}(t)$	根据到时刻 t 为止的数据得到的 θ 之递推估计	11
θ_D	相伴微分方程中对应于 $\hat{\theta}(t)$ 的向量	11
θ_0	参数向量 θ 的真值	11
θ^*	$\hat{\theta}(t)$ 的极限值	11
$\hat{\theta}_t$	根据到时刻 t 为止的数据得到的 θ 之离线估计	11
Λ_0	预测误差的协方差矩阵($p \times p$ 维矩阵)	11
$\hat{\Lambda}(t)$	估计的预测误差协方差阵	11
λ	遗忘因子	11
$\xi(t)$	利用运行中估计作预测和梯度计算时的状态向量	11
$\xi(t, \theta)$	固定模型参数 θ 时的上述状态向量	11
$\varphi(t)$	利用运行中估计由观测数据形成的向量(用于 PLR 法中的梯度近似)	11
$\varphi(t, \theta)$	固定模型参数 θ 时的上述向量	11
$\varphi_F(t)$	由滤波和延迟后的数据构成的向量	11
$\phi(t)$	利用运行中估计计算得到的预测梯度($d \times p$ 矩阵)	11
$\phi(t, \theta)$	固定模型参数 θ 时的上述梯度	11
$\triangleq$	定义为	11
$:=$	赋值算子	11
$[x]_D$	x 在 D 中的投影	11

缩 写 词

AR	自回归
ARMA	自回归移动平均
ARMAX	带有局外变量的自回归移动平均
d.e.	微分方程

EKF	推广的卡尔曼滤波器
ELS	推广的最小二乘
GLS	广义的最小二乘
IV	辅助变量
LS	最小二乘
MA	移动平均
MLE	最大似然估计
PLR	伪线性回归
PRBS	伪随机二元序列
RGLS	递推广义最小二乘
RIV	递推辅助变量
RLS	递推最小二乘
RML	递推最大似然
RPE	递推预测误差
RPEM	递推预测误差法
SISO	单输入单输出系统
w.p.1	依概率 1
w.r.t	关于

习 惯 表 示

$H^{-1}(q^{-1})$	$[H(q^{-1})]^{-1}$
$\varphi^T(t)$	$[\varphi(t)]^T$
A^{-T}	$[A^{-1}]^T$
l_θ	l 关于 θ 的一阶导数
$l_{\theta\theta}$	l 关于 θ 的二阶导数
V'	V 关于其自变量的一阶导数

目 录

译者的话

丛书序言

前言

致谢

符号、缩写词和习惯表示

第一章 绪论	1
1.1 系统和模型	1
1.2 如何得到一个系统的模型	2
1.3 为什么要进行递推辨识?	3
1.4 递推辨识算法	7
1.5 本书纲要和读者指南	8
1.6 本书的起步点	10
第二章 研究递推辨识的几种方法	12
2.1 引言	12
2.2 根据离线辨识算法导出的递推辨识算法	16
2.3 递推辨识的非线性滤波法(贝叶斯法)	32
2.4 随机逼近法	41
2.5 伪线性回归法和参考模型法	48
2.6 跟踪时变系统	54
2.7 用户小结	61
2.8 参考文献	62
第三章 模型和方法: 一般体制	65
3.1 引言	65
3.2 系统和模型	66
3.3 离线辨识的几个问题	79
3.4 二次准则下的递推高斯-牛顿算法	85

3.5	一般准则下的递推预测误差辨识算法	93
3.6	应用于线性回归模型	96
3.7	应用于一般的 SISO 模型	106
3.8	应用于状态空间模型	121
3.9	用户小结	129
3.10	参考文献	133
第四章	解析法	135
4.1	引言	135
4.2	递推辨识方法的渐近性质: 展望	137
4.3	收敛性分析的方法	143
4.4	递推预测误差算法的分析	176
4.5	伪线性回归法的分析	202
4.6	辅助变量法的分析	231
4.7	用户小结	246
4.8	参考文献	247
第五章	算法的选择	248
5.1	引言	248
5.2	模型集合的选择	251
5.3	在一般的 SISO 模型族内选择模型集合	253
5.4	实验条件的选择	263
5.5	准则函数的选择	265
5.6	增益序列的选择	270
5.7	搜索方向的选择	287
5.8	初值的选择	294
5.9	利用伪线性回归法逼近梯度	298
5.10	利用辅助变量法逼近梯度	305
5.11	梯度向量中残差和预测误差之间的选择	311
5.12	小结	314
5.13	参考文献	315
第六章	实现	317
6.1	引言	317
6.2	高斯-牛顿算法中增益向量的计算	318