



经典译丛

人工智能与智能系统

System Identification

系统辨识

System Identification

【瑞典】 Torsten Söderström 著
Petre Stoica

陈曦 姜月萍 牟必强 译
方海涛 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·人工智能与智能系统

系统辨识

System Identification

[瑞典] Torsten Söderström 著
Petre Stoica

陈曦 姜月萍 牟必强 译
方海涛 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是系统辨识领域的经典著作,内容包括该领域的基本概念和研究成果,以及该领域专家、学者的介绍。全书共12章,包括引言、概论、非参数方法、线性回归、输入信号、模型的参数化、预报误差法、辅助工具变量法、递推辨识方法、闭环工作下的系统辨识、模型验证与模型结构的确定、实际应用。本书在介绍理论的过程中辅以实例,每章末均带有习题。

本书可作为高等院校电气、自动化及相关专业高年级本科生和硕士研究生的教学用书,也可供从事自动控制理论研究及技术开发人员阅读参考。

Original English language edition copyright ©1989 by Prentice Hall International (UK) Ltd.

Chinese language edition copyright © 2017 by Publishing House of Electronics Industry.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

版权贸易合同登记号 图字:01-2016-0417

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识/(瑞典)托尔斯滕·瑟德斯特伦(Torsten Soderstrom),(瑞典)彼得·斯托伊卡(Petre Stoica)著;陈曦,姜月萍,牟必强译.—北京:电子工业出版社,2017.4

(经典译丛·人工智能与智能系统)

书名原文: System Identification

ISBN 978-7-121-29605-5

I. ①系… II. ①托… ②彼… ③陈… ④姜… ⑤牟… III. ①系统辨识—研究 IV. ①TN945.14

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第179695号

策划编辑:杨 博

责任编辑:桑 昀

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:28.75 字数:736千字

版 次:2017年4月第1版

印 次:2017年4月第1次印刷

定 价:79.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: yangbo2@phei.com.cn。

译者序

系统辨识广泛地应用于工程的各个领域。T. Söderström 教授及 P. Stoica 教授都是系统辨识领域著名的学者，对系统辨识的发展有着重要的贡献。由他们合著的 *System Identification* 是学习系统辨识理论的几本经典著作之一，也曾是我进入系统辨识领域的一本重要参考书。

本书的前 6 章包含了系统辨识重要的基础内容，非常精炼但很全面，有助于初学者快速地获取从事系统辨识工作的基本知识；后 6 章则涉及了系统辨识的几个重要专题，包括至今常用的两个重要方法：预报误差法、辅助变量法，以及递推辨识、闭环辨识、模型结构验证及应用的准则。这些专题至今依然在不断地发展丰富中，本书所提出的思想及一些准则依然影响着现在的研究及工程应用，可以说本书为从事相关专题研究及应用的读者提供了很好的入门材料。

这本书虽然写成于 20 多年前，但由于其内容充分包含了系统辨识在 20 世纪 70 ~ 80 年代发展史上最为黄金时代所取得的重要成果，因此在今天看来，也依然是进入系统辨识这个领域的一本非常好的入门书。

本书的符号正斜体部分与原书保持一致，书末提供部分习题答案及提示。

如今，在 Stoica 教授及电子工业出版社的努力下，由陈曦博士等几位年轻人将这本书翻译成中文，我相信这将方便我国相关领域的研究及应用人员更为快速地获取系统辨识的相关基础知识，推动我国在相关领域的发展。

因时间仓促，错误在所难免，望读者谅解。如有疑问或勘误，请联系本书的编辑杨博（yangbo2@phei.com.cn），她将转交给原作者或译者处理。

方海涛

2016 年 3 月

前 言

系统辨识是研究用实验数据对系统进行数学建模的领域，在许多其他领域中都有广泛应用。在控制和系统工程中，系统辨识方法用来对调节器的合成、设计预测算法或模拟数据等问题给出适合的模型。在信号处理的应用中（如通信、地球物理工程学及机械工程学），系统辨识得到的模型用来进行频谱分析、故障检测、模式识别、适应滤波、线性预测等。在生物、环境科学、计量经济学等非技术领域，系统辨识方法还可以用于建立合适的模型，从而对辨识对象进一步获得科学性的认识，或进行预测和控制。

本书可以作为高年级的本科生和研究生阶段的系统辨识课程教材。它能够方便读者对系统辨识领域有一个深入的理解；为方便对该领域进行研究它还给出了必要的背景知识。本书主要为课堂学习而撰写，但也可作为自学材料。

为了既能成为系统辨识领域中的基础教材，还可以作为高级课程的课本，同时适用于学生和研究者，本书将做如下安排。每章都包含适于研究生和高年级本科生的教材。大多数章节增添额外的小节，称为补充内容，用来进一步介绍相关内容（通常是更具体的、层次更高的内容）。对于短期课程或本科生课程来说，可以跳过这些补充内容。对于其他程度的课程来说，教师可以根据情况做选择，目的是能够让学生对具体方法和算法实现进行深入理解。整本书中，至关重要的结果都用实心框圈了起来；一些将会在后文中引用到的结论都用虚线框圈了起来；一些较复杂的推导过程或计算安排在当前章节的末尾，作为本章节的附录。在本书末尾还安排了一些关于线性代数、矩阵论、概率论以及统计知识的背景知识，集结成了附录 A 和附录 B。除了第 1 章外，所有章后面都安排了习题供读者思考。其中，一些习题是对本章结论的说明，并不太难；还安排了一些较复杂的习题给出了新的结论和观点。因此，习题不仅可作为家庭作业，也会给读者带来一些更高层次的挑战。每一章中简单习题安排在较难习题的前面。对于这些习题，书未附有部分习题的解答可供参阅。

本书不包含计算机上的练习。然而，我们觉得读者能够真正会用辨识方法十分重要，以真实数据为基础更好。实际操作可以使得读者对系统辨识方法的实用价值做深入理解，仅仅靠阅读图书不容易获得这些体验。正如我们在第 12 章中所提到的，计算机中有许多好的程序包能够方便使用。

为了能够给出一些提示，方便进一步阅读，我们给出了一些关键的参考文献。找到所涉及领域的所有参考文献会是一个巨大的工程，可能也并非必要。

我们假设阅读本书的读者已经有了一些相关的知识背景，至少已经在电气工程等领域有过高水平的学习经历，包括一些基本的概率论常识、统计估计理论，以及时间序列分析（或离散时间随机过程）和动态系统模型等。在本书末尾的附录我们给出了一些必要的背景知识。

本书已初步在不同方式下为读者所使用过，包括常规的研究生和本科生课程，研究生和相关业内人士的强化课程，以及研究生课程和自主学习的课外阅读。本书课程内容以多种方式在 Uppsala University, Polytechnic Institute of Bucharest, Lund Institute of Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Yale University, INTEC, Santa Fe, Argentina 等院校做过实验，从中获得的经验对最后成书十分有用。

在本书的撰写过程中，我们得到了许多友人不同程度的帮助，在此致以最诚挚的谢意。

要感谢我们的同事 Professor Karl Johan Åström, Professor Pieter Eykhoff, Dr. Ben Friedlander,

Professor Lennart Ljung, Professor Arye Nehorai, Professor Mihai Tertișto, 他们直接或间接地对我们研究成果有过帮助。

有不少友人阅读了这本书的初稿, 并给出了许多非常有用的改进建议, 尤其要感谢 Professor Randy Moses, Professor Arye Nehorai, Dr. John Norton 的精彩评论。我们还要感谢来自 Uppsala University, Polytechnic Institute of Bucharest, INTEC at Santa Fe, Yale University 的同学们, 他们提出了许多宝贵建议。

撰写这本书的缘由是 Dr. Greg Meira 邀请了本书第一作者于 1983 年在 INTEC, Santa Fe 讲授一个短期研究生课程。那门课程所讲授的材料逐渐被我们扩展、修改, 最终形成了现在的版本。

这本书的准备和出版经过了相当长的一段时间。多亏了 Ylva Johansson, Ingrid Ringård, Maria Dahlin, Helena Jansson, Ann-Cristin Lundquist, Lis Timner 的耐心和坚持, 承担了烦琐的打字输入、修订工作, 在此对他们多年的付出表示衷心感谢。

文中的一些图是用某些软件做的, 其中某些参数估计用了 IDPAC 软件包 (由 Lund Institute of Technology 公司开发), 还有一些一般性的图是用 BLAISE (由法国 INRIA 开发) 制作的。

我们也非常高兴能与 Prentice Hall International 合作, 感谢 Professor Mike Grimbale, Andrew Binnie, Glen Murray, Ruth Freestone 的鼓励和支持。此外, 要特别感谢 Richard Shaw 对本书装帧设计方面提供的宝贵意见。

Torsten Söderström

Uppsala

Petre Stoica

Bucharest

目 录

第1章 引言	1
第2章 概论	7
2.1 相关概念 $\mathcal{L}$, $\mathcal{M}$, $\mathcal{F}$, $\mathcal{H}$	7
2.2 一个基本例子	7
2.3 非参数方法	8
2.4 一个参数化方法	10
2.5 偏差、相容性和近似模型	13
2.6 一个退化的实验条件	17
2.7 反馈的作用	19
总结与展望	20
习题	22
推荐文献	23
第3章 非参数方法	24
3.1 介绍	24
3.2 瞬态分析	24
3.3 频率分析	28
3.4 相关性分析	30
3.5 谱分析	31
小结	35
习题	36
推荐文献	39
附录 A3.1 协方差函数、谱密度、线性滤波	39
附录 A3.2 相关性分析的精度	41
第4章 线性回归	43
4.1 最小二乘估计	43
4.2 最小二乘估计分析	47
4.3 最优线性无偏估计	48
4.4 确定模型维数	51
4.5 相关计算	54

小结	56
习题	56
推荐文献	60
补充内容 C4.1 线性约束下的最优线性无偏估计	60
补充内容 C4.2 在线估计线性回归模型的参数	62
补充内容 C4.3 协方差矩阵容许非奇异时线性回归模型的最优线性无偏估计	64
补充内容 C4.4 某类非线性回归模型参数的渐进最优相容估计	66
第5章 输入信号	70
5.1 常用输入信号	70
5.2 频谱特性	73
5.3 低通滤波	80
5.4 持续激励	84
小结	88
习题	89
推荐文献	91
附录 A5.1 周期信号的频谱性质	91
补充内容 C5.1 关于持续激励输入的差分方程模型	94
补充内容 C5.2 滤波白噪声的协方差矩阵的条件数	96
补充内容 C5.3 最长伪随机二进制序列	97
第6章 模型的参数化	104
6.1 模型的分类	104
6.2 一般的模型类	105
6.3 唯一性	114
6.4 可辨识性	119
小结	119
习题	120
推荐文献	122
附录 A6.1 谱分解	122
补充内容 C6.1 完全多项式模型的唯一性	130
补充内容 C6.2 参数化的唯一性以及输入/输出协方差矩阵的正定性	131
第7章 预报误差方法	132
7.1 最小二乘法回顾	132
7.2 预报误差方法的具体描述	134
7.3 最佳预报	137
7.4 预报误差方法和其他辨识方法的联系	141
7.5 理论分析	144
7.6 计算方面	151
小结	154
习题	155

附录 A7.1 多变量系统 PEM 估计的协方差矩阵	162
补充内容 C7.1 依赖于估计所用损失函数的模型近似	163
补充内容 C7.2 ARMA 过程的多步预报	164
补充内容 C7.3 全多项式形式模型的最小二乘参数估计	167
补充内容 C7.4 增广最小二乘法	169
补充内容 C7.5 输出误差方法	172
补充内容 C7.6 ARMA 过程的 PEM 损失函数的单峰性	178
补充内容 C7.7 AR 和 ARMA 过程参数的精确极大似然估计	180
补充内容 C7.8 输入、输出数据带噪声的极大似然估计	184
第 8 章 辅助变量法	188
8.1 辅助变量法描述	188
8.2 理论分析	191
8.3 计算方面	200
小结	202
习题	203
推荐文献	205
附录 A8.1 IV 估计的协方差矩阵	206
附录 A8.2 最佳 IV 与预报误差估计的比较	207
补充内容 C8.1 Yule – Walker 方程	209
补充内容 C8.2 Levinson – Durbin 算法	211
补充内容 C8.3 一种求解非对称 Yule – Walker 系统方程的 Levinson 型算法	216
补充内容 C8.4 最小 – 最大最佳 IV 方法	220
补充内容 C8.5 最优加权扩展 IV 方法	221
补充内容 C8.6 Whittle – Wiggins – Robinson 算法	225
第 9 章 递推辨识方法	233
9.1 引言	233
9.2 递推最小二乘法	234
9.3 实时辨识	235
9.4 递推辅助变量方法	238
9.5 递推预报误差方法	239
9.6 理论分析	243
9.7 实践方面	251
小结	253
习题	253
推荐文献	258
补充内容 C9.1 递推扩展辅助变量方法	259
补充内容 C9.2 AR 模型的快速最小二乘格型算法	261
补充内容 C9.3 多变量回归模型的快速 LS 格型算法	270

第 10 章 闭环工作下的系统辨识	276
10.1 介绍	276
10.2 可辨识性	276
10.3 直接辨识	281
10.4 非直接辨识	286
10.5 输入/输出联合辨识	287
10.6 精确性	290
小结	293
习题	294
推荐文献	298
附录 A10.1 联合输入/输出辨识的分析	298
补充内容 C10.1 预报误差方法运用到运行在一般线性反馈下的 ARMAX 系统的可辨识性质	300
第 11 章 模型验证与模型类的确定	305
11.1 介绍	305
11.2 模型足够灵活吗	305
11.3 模型太复杂吗	312
11.4 精简原则	316
11.5 模型类的比较	318
小结	325
习题	325
推荐文献	329
附录 A11.1 协方差函数检验的分析	330
附录 A11.2 准则函数相对减小的渐近分布	333
第 12 章 实际应用	338
12.1 介绍	338
12.2 实验条件 $\mathcal{L}$ 的设计	338
12.3 处理非零均值和干扰的漂移	342
12.4 模型类 $\mathcal{M}$ 的确定	347
12.5 时间延迟	352
12.6 初始条件	353
12.7 辨识方法 $\mathcal{J}$ 的选择	354
12.8 局部极小点	355
12.9 稳健性	356
12.10 模型检验	359
12.11 软件方面	361
12.12 结束语	361
习题	362
推荐文献	366

附录 A 关于矩阵的结果	368
A.1 分块矩阵	368
A.2 线性方程的最小二乘解, 伪逆以及奇异值分解	373
A.3 QR 方法	380
A.4 矩阵范数和数值精度	385
A.5 幂等矩阵	388
A.6 Sylvester 矩阵	391
A.7 Kronecker 积	393
A.8 关于正定矩阵的一个优化问题	394
推荐文献	395
附录 B 关于概率论和统计的相关结果	396
B.1 随机变量的收敛性	396
B.2 高斯及相关分布	399
B.3 极大后验和极大似然参数估计	405
B.4 Cramér - Rao 下界	406
B.5 最小方差估计	409
B.6 条件高斯分布	410
B.7 Kalman - Bucy 滤波	412
B.8 渐进	413
B.9 Monte Carlo 分析的精度	417
推荐文献	419
参考文献	421
部分习题答案及提示	437
术语表	447

第 1 章 引 言

对动态系统建模的必要性

系统辨识是利用实验数据对动态系统进行建模的领域。从概念上讲，一个动态系统可如图 1.1 所示，由输入变量 $u(t)$ 和干扰 $v(t)$ 驱动，其中 $u(t)$ 能够进行调节和控制，而干扰 $v(t)$ 未知。在一些信号处理的实际应用中， $u(t)$ 也可能不存在。输出信号能够反映系统的内部信息。对于一个动态系统而言， t 时刻的控制变量 $u(t)$ 只会影响 t 时刻以后的输出 $y(s)$ ， $s > t$ 。

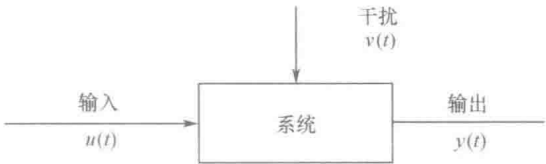


图 1.1 输入为 $u(t)$ 、输出为 $y(t)$ 、干扰为 $v(t)$ 的动态系统， t 记为时间
以下是几个用数学模型来描述动态系统的例子。

例 1.1 搅拌槽

在一个搅拌槽（如图 1.2 所示）的两边注入两股液态流体，它们的浓度能通过阀门开关控制流体 F_1 和 F_2 的注入多少而发生变化。 $F_1(t)$ ， $F_2(t)$ 分别是系统的输入。输出 $F(t)$ 和槽内流体的浓度 $c(t)$ 是系统的输出变量。输入液态流的浓度 $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ 不能控制，可以视为干扰。

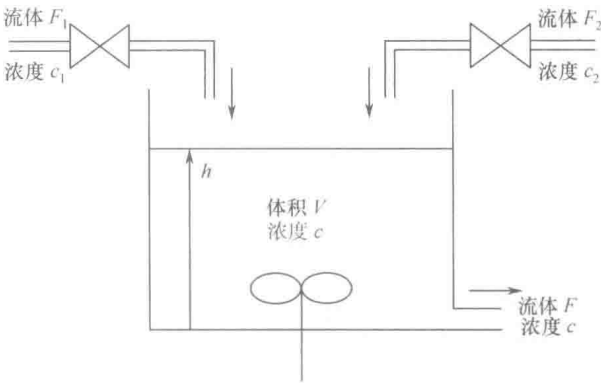


图 1.2 一个搅拌槽

假定我们要利用测量数据 $F(t)$ 和 $c(t)$ ，设计一个装在 $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 上的调控器，即使浓度 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ 变化幅度很大，也尽可能使得 $F(t)$ 和 $c(t)$ 保持恒定。对于这样的设计，我们需要一个数学模型描述输入、输出和干扰之间的关系。

例 1.2 工业机器人

工业机器人可以看作是一种高级伺服系统。机器人的胳膊需要完成特定的动作，如在某个固定位置做焊接。自然地我们会将机器人的这个位置作为模型的输出。机器人的胳膊由电动马达控制。进入这些马达的电流可以看作控制输入。机器人的动作还会受胳膊的负重和摩擦的影

响。这些变量可以看作干扰。在没有几何约束冲突的情况下，机器人会以快速、可靠的方式移动到指定位置。为了设计这样的伺服系统，我们有必要设计一个模型，研究机器人的行为如何受到输入和干扰的影响。

例 1.3 飞机动力学

飞机一般被看作是比较复杂的动态系统。问题是要确保飞行器保持恒定的高度和速度，它们可看作输出变量。升降机位置和发动机推力是输入。飞机的状态也受到其负载重量和大气状况影响。这些变量可看作干扰。要设计一个自动驾驶仪使飞机保持恒定速度和航线，我们需要一个数学模型来描述飞行器的状态如何受输入和干扰的影响。飞机的动态性质（如速度和高度）变化非常大，因此需要用辨识方法跟踪这些变化。

例 1.4 药物的影响

药物一般需要作用于身体的某个部位。药物一旦服下，需要一段时间才能经过胃部，被肠道吸收，然后经过更长的时间到达指定器官，如肺部或心脏。经过代谢作用的药物浓度下降，被身体分泌排出。为了说明药物对指定器官产生的影响，从而设计一个服用药物的时刻表，我们需要建立一个模型，描述药物性质的动态变化。

上面的例子说明了工艺和非工艺领域建立动态模型的必要性。

许多工业生产，如纸、铁、玻璃或化合物，整个生产流程需要进行严格控制，以保证安全、高效的生产。为了设计控制调节器，需要对流程建立相关模型，可以建立不同类型、不同复杂度的模型。有时可以画 Bode 图辨认出交叉频率、相位裕度。此外，在设计最优控制器时还需要一个尽可能具体的模型，描述干扰对系统的影响。

在大多数信号处理如预测、数据通信、语音处理、雷达装置、声呐系统和心电图分析等实际应用中，要对记录数据进行滤波，一个好的滤波设计应反映信号的性质（如高通特性、低通特性、共振特性等），为了描述这些谱的性质，需要建立信号的模型。

在很多情形下，建模的最基本目标是有助于设计。在其他情形下，建模本身得到的模型信息就是建模的目的，如表示药物作用的例 1.4。在生态学中，通常会建立描述某种现象，如捕食者和被捕食者间的关系，这样相对简单的模型。如果模型可以恰当地解释观测数据，那么它也许能够解释观察的现象。从更一般的意义上讲，在很多科学分支上，建立模型可以帮助理解和说明现实世界。

有时可能要对一个并不存在的技术上的系统进行建模，不过这种系统未来也许可以创建出来。在这种情况下，建模是为了得到相关知识，深入了解动态系统。举个例子，受地球上的引力和大气的影 响，大型空间结构的动态行为不能通过在地球上进行的研究推断出来。当然，在这样的例子中，由于不能得到实验数据，建模必须基于理论和先验信息。

模型类型

动态系统的模型可以分成很多类型，包括：

- 意识、心智、语言模型。例如我们在开车时（“转动方向盘使汽车转弯”、“踩刹车减速”等）用到的模型。
- 图形和表格。伺服系统的 Bode 图是用图形建模的一个典型例子。阶跃响应，即阶梯信号作为输入驱动的输出，是另一类用图形建模的典型例子。我们将在第 2、3 章中讨论这类模型。
- 数学模型。虽然图形也可以称为“数学”模型，这里我们所指的数学模型是用微分和差分方程表示的模型。这样的模型便于进行分析、预测，以及设计动态系统、调节器和滤

波器。第6章将从系统辨识的角度介绍这类模型及其性质。

这里需要强调的是,虽然一般我们所指的系统都包含输入、输出,但这里是在一个较大范围内的实际应用中进行讨论的,所以也包括时间序列分析。那么我们所指的信号可能就是一列离散时间序列。在时间序列分析中,系统是不包含任何输入信号的。时间序列的模型能在谱估计、预测、滤波的设计中起很大的作用。

数学建模以及系统辨识

由上面的讨论可知,动态系统的数学模型在很多领域及其应用中都非常常用。总的来说,建立数学模型有两种方法。

- 数学建模:这是一种分析方法。例如用物理中的基本定律(如牛顿定律和平衡方程)描述一个现象或过程。
- 系统辨识:这是一种实验方法。在系统上进行实验,利用记录的数据,通过给参数分配恰当的数值的方式得到一个合理的模型。

例 1.5 搅拌槽的建模

考虑例 1.1 中的搅拌槽。假设流体不可压缩,则其密度恒定;假设两股流体注入搅拌槽后混合得非常快,两股流体溶解后溶解物浓度均匀,记为 c 。为了得到数学模型,我们用平衡方程:

$$\text{净变} = \text{流入} - \text{流出}$$

将它用于搅拌槽的体积 V

$$\frac{dV}{dt} = F_1 + F_2 - F \quad (1.1)$$

将它用于搅拌槽中的溶解物

$$\frac{d}{dt}(cV) = c_1 F_1 + c_2 F_2 - cF \quad (1.2)$$

完成建模有若干方面。若没有阀门控制,流体 F 可能依赖于搅拌槽的高度 h 。在理想情形下,流体可以用 Torricelli 法

$$F = a \sqrt{(2gh)} \quad (1.3)$$

式中, a 是流体的有效面积; $g \approx 10 \text{ m/sec}^2$ 。可以看到式 (1.3) 是理想情形,用它来表示可能不够准确甚至不适用。若搅拌槽的面积 A 不依赖于其高度 h , 则用简单的几何知识可得

$$V = Ah \quad (1.4)$$

总的来说,联合式 (1.1) 至式 (1.4), 我们得到了搅拌槽的一个简单模型。检验式 (1.3) 的有效性并不容易。搅拌槽的几何属性测量起来不难,但是式 (1.3) 中的常数 a 较难确定。

比较数学建模和系统辨识这两种建模方法可以发现,在许多情形中,过程十分复杂,不可能只靠纯物理的观点(如第一定律、平衡方程等)来解释和建立模型。在这样的情形下,我们常常不得不使用系统辨识的方法。在基于纯物理理论建模时我们会发现,即使运用物理定律得到系统的结构,最后得到的模型还是包含许多未知参数。这时就可以用系统辨识的方法估计未知参数。

与纯粹用数学建模方法(用纯物理观点)得到的模型相比,运用系统辨识方法得到的模型有以下几个性质:

- 模型的有效性是有限的(只对某个特定的工作点,某一类输入,某一种过程等)。
- 由于大多数情形下模型的参数不直接给出物理意义,所以系统辨识方法本身并不解释物理观点。参数只是用来描述系统整体状态的工具。

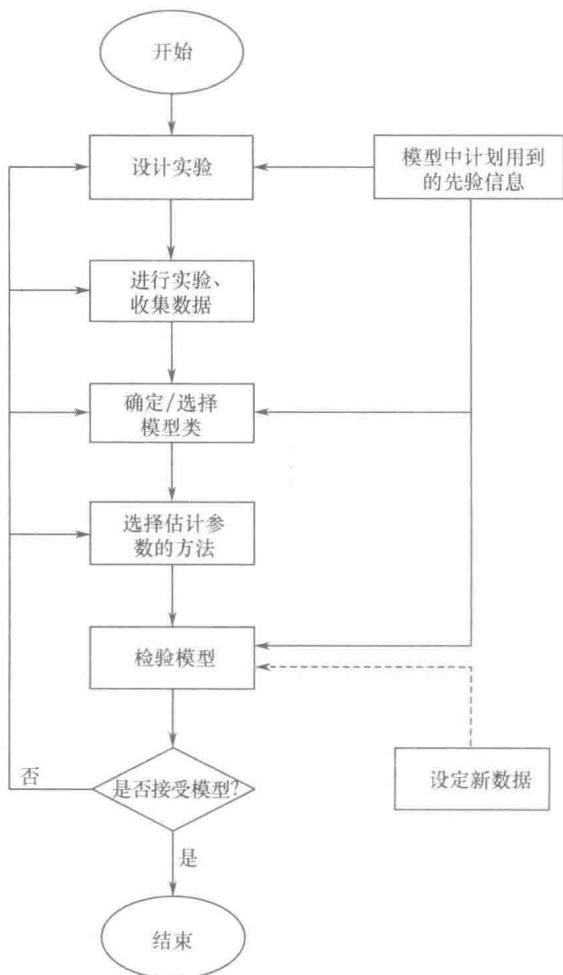
- 相对而言，构建和使用并不难。

若缺少和使用者间的互动，系统辨识便不是一种万无一失的方法，原因包括：

- 首先需要选择合适的模型类，尤其对于非线性动态系统，这是一个较困难的问题。
- 显然，在现实环境中不可能存在百分百完美的数据。事实上，在辨识中我们常常要考虑到所记录的数据包含噪声干扰的问题。
- 过程可能随时间变化，如果用不变的模型来描述系统就会引起不少问题。
- 模型中的某些关键的变量或信号较难观测到或观测不到。

系统辨识是如何应用的

在一般情况下，系统辨识是通过驱动系统（用某种输入信号如阶跃信号、正弦信号或随机信号）并记录在某个时间区间上的输入、输出进行的。通常先将这些信号用计算机海量存储记录下来，为后续的“信号处理”做准备。接着我们试图用记录的输入输出序列拟合一个参数模型。拟合步骤：第一步是确定恰当的模型形式（通常用一定阶次的线性差分方程），第二步是用某些统计方法估计模型中的未知参数（如差分方程的系数）。在实际应用中，一般采用迭代方式估计结构和模型。这意味着可以先尝试性地选一个结构，再估计相应的参数，还要对得到的模型做检验，看它是否能够恰当地表示系统。如果不符合，还要考虑采用更复杂的模型类，估计其参数，检验新的模型是否有效，等等。整个流程步骤如图 1.3 所示。我们可以注意到模型检验后的重新开始形成了一个迭代流程。



本书包含的内容

下面是本书内容的简要概述（完整版也可参见第2章的“总结和展望”）：

- 第2章给出了非参数和参数方法的一些介绍性的例子和一些初步分析；具体还给出了整本书的组织结构。
- 本书重点关注一些线性动态系统的主要辨识方法，这也是第3、4、7~10章的主题，其中给出了在线和离线辨识方法，还探讨了开环和闭环实验。
- 选择合理的模型类并验证模型，也就是说，确定是否能接受它作为实验过程的描述。这些问题将在第6章和第11章进行讨论。
- 本书还进一步提供了怎样设计好的辨识实验的方法，这些将在第5、10、12章中进行介绍。重要的是，如果实验过程没能按计划顺利完成，数据将不能使用（如数据不足以包含动态系统的相关信息）。显然，好的模型不能通过较差的实验得到。

本书不包含的内容

这里我们指出不包含在本书中的系统辨识领域中的内容。

- 不涉及分布参数系统的系统辨识方法。这部分内容可以参阅综述文章，如 Polis (1982)、Polis and Goodson (1976)、Kubrusly (1977)、Chavent (1979)、Banks 等人 (1983)。
- 非线性系统的辨识仅略提一二，如例 6.6 讨论了所谓的 Hammerstein 模型。关于非线性系统黑盒模型的综述文章可参阅 Billings (1980)、Mehra (1979)、Haber and Keviczky (1976)。
- 系统辨识和近似模型。当系统辨识中所选择的模型类不适用于描述真实动态系统时，则系统辨识只能看作是模型近似或降阶。除了现有的模型近似方法外，如今基于部分实现的系统辨识引起了研究者的极大兴趣。例如，Glover (1984) 对这样的方法做了综述；Wahlberg (1985, 1986, 1987) 展示了模型近似的技巧与系统辨识的紧密联系。
- 连续时间模型的参数估计仅在第2、3章中的部分小节做了讨论，其他章节（如例 6.5）也有间接提到。在许多情形下，如数字控制器的设计、数据模拟、预测等，离散时间模型已经足够了。只是，相比较连续时间模型中的参数，离散时间模型中的参数给出的物理意义不太明显。
- 本书中仅简单涉及了频域中的问题（参见 3.3 节和例 10.1、例 10.2、例 12.1）。关于在频域中如何刻画和评价估计模型，甚至近似模型的相关结果还可参见 Ljung (1985b, 1987)。

推荐文献

系统辨识领域中有不少可参考的著作和文献。如 Åström and Eykhoff (1971) 较早时间发表的一篇现如今读起来仍十分优秀的综述性论文。还有 Ljung (1987)、Norton (1986)、Eykhoff (1974)、Goodwin and Payne (1977)、Kashyap and Rao (1976)、Davis and Vinter (1985)、Unbehauen and Rao (1987)、Isermann (1987)、Caines (1988)，以及 Hannan and Deistler (1988) 等研究者所发表的论文。后期的文献还包括 Mehra and Lainiotis (1976)、Eykhoff (1981)、Hannan 等人 (1985)，以及 Leondes (1987)。文献 Ljung and Söderström (1983) 给出了对递推辨识方法一个综合性的结果，而 Söderström and Stoica (1983)，以及 Young (1984) 关注的是所谓的辅助变量辨识方法。还有 Mendel (1973)、Hsia (1977) 和 Isermann (1974) 发表的一些相关文献。

数学建模领域出版了一些著作，具体参见 Aris (1978)、Nicholson (1980)、Wellstead

(1979)、Marcus Roberts and Thompson (1976)、Burghes and Borrie (1981)、Burghes 等人 (1982), 以及 Blundell (1982)。

国际自动控制联合会 (International Federation of Automatic Control, IFAC) 在系统辨识和系统参数估计方面举办了不少研讨会 (Prague 1967、Prague 1970、Hague 1973、Tbilisi 1976、Darmstadt 1979、Washington DC 1982、York 1985、Beijing 1988), 在会议的论文集中涌现了许多相关论文, 讨论理论和应用方面的相关成果。IFAC 杂志 *Automatica* 还就系统辨识的内容出版过特别版块 (Vol. 16, Sept. 1980) 和特别版次 (Vol. 18, Jan. 1981); 新的特别版次安排在 1989 年 9 月期。另外, *IEEE Transactions on Automatic Control* 也就系统辨识和时间序列分析开设过特别版 (Vol. 19, Dec. 1974)。