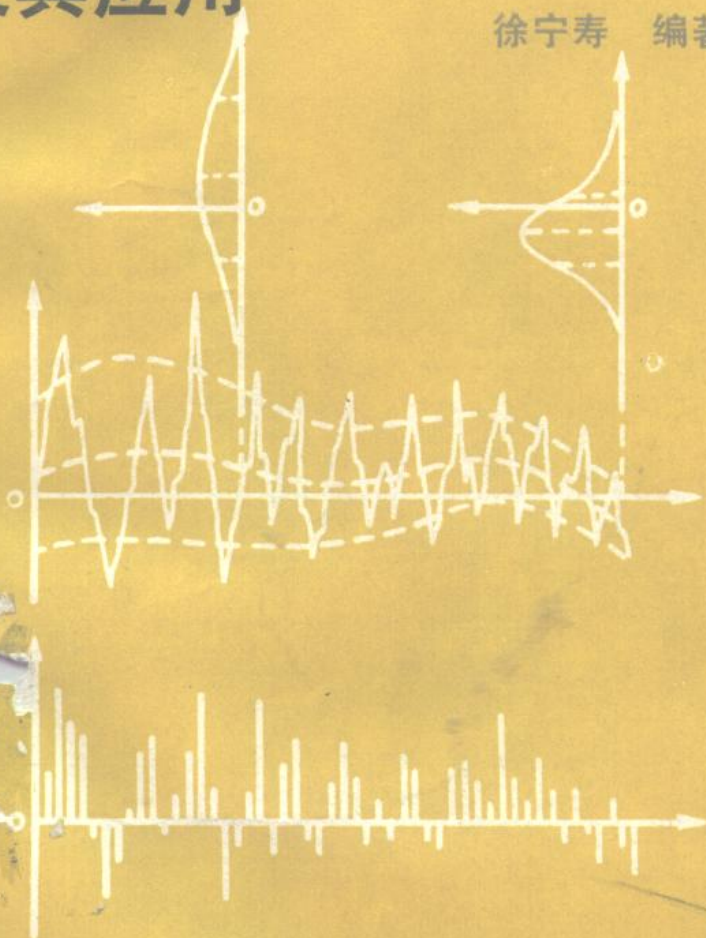


机械工业自动化技术丛书

系统辨识技术 及其应用

徐宁寿 编著



机械工业出版社

73-022
5-17

机械工业自动化技术丛书

系统辨识技术及其应用

徐宁寿 编著



机械工业出版社

系统辨识技术是当前控制工程领域中发展最活跃的一个重要分支，其应用范围已遍及各个工业部门，成效日见显著。目前，系统辨识已成为一项从事现代自动化实际工作所必须掌握的新技术。

本书较系统地介绍各种主要辨识方法的基本原理和工业应用实况。全书共分十章，第一、二章为辨识工作需用的确定性及随机性信号分析、估计方法和线性系统模型的基本知识；第三至六章分别为经典辨识方法、相关分析法、最小二乘法和最大似然法的原理、步骤和算法；第七章介绍各种辨识方法在应用中的共同性实际问题；第八至十章以大量典型实例说明系统辨识技术在机械产品动态性能的试验研究、机械制造工艺设备和其他工业生产机械装置自动化中的应用。

本书适用于机械工业和其他工业自动化专业的工程技术人员，也可供高等院校有关专业师生参考。

系统辨识技术及其应用

徐宁寿 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

河北省永清县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $14 \frac{3}{8}$ · 字数 314 千字
1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷
印数 0,001—3,130 · 定价 3.00 元

*

统一书号：15033·5758

出版者的话

随着我国社会主义工业的发展，自动化技术在机械工业中的应用范围已由机械加工过程扩展到设计、生产准备、工艺准备、检验试验、装配及生产管理等各个方面，涉及到计算机应用、人工智能、现代控制理论和系统工程等许多领域。

为适应机械工业自动化技术飞速发展的需要，满足从事机械工业自动化的工程技术人员、管理干部知识更新的迫切要求，我们决定出版这套《机械工业自动化技术》丛书。

本丛书各分册书名分别为：《机械工业自动化》、《机械加工自动化》、《物料搬运自动化》、《计算机辅助电路分析》、《计算机辅助设计》、《计算机辅助企业管理》、《自动化装置及其应用》、《工业机器人及其应用》、《微型计算机及其应用》、《计算机网络及其应用》、《图象识别技术及其应用》、《系统辨识技术及其应用》等，将陆续出版。

本丛书主要由机械工业自动化学会和机械工业自动化情报网共同组织，并得到中国机械工程学会和北京机械工业自动化研究所领导和有关同志的大力支持。

本丛书编委会对丛书的列选、组稿、审稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对审稿工作给予了热情帮助，在此一并表示感谢。

由于组织出版这类丛书是初步尝试，缺点和错误在所难免，希批评指正。

机械工业出版社

编委会成员

主任委员：王良楣

副主任委员：严筱钧 顾绳谷

蔡福元 段扬泽

委员(按姓氏笔划序)：

刘兆新 卢庆熊 朱逸芬 阳含和

吕林 李仁 李忠德 陈家彬

杜祥瑛 严蕊琪 周斌 李瑞芝

张岫云 张弟元 唐璞山 章以钧

裘为章

前 言

系统辨识技术现已成为自动控制领域中重要分支之一，这是因为它既有较高的理论性、又有较强的实践性和实用性。本书主要介绍系统辨识方法的基本概念和原理，以及国内外将系统辨识技术作为有效手段应用于机械产品动态性能的试验研究、机械制造工艺设备自动化和其他工业生产机械自动化等方面的概况。

系统辨识技术的发展与整个控制理论的发展是密切相关的，在早期侧重于频域法，而近期则以时域法为主；但这两种方法不是互相排斥、而是互相补充的，特别是在机械工业中至今仍大量应用频域法。因此，本书对一些重要问题尽量注意从频域和时域两方面结合起来加以分析说明。

全书各章安排如下：在绪论中介绍系统辨识技术的发展概貌及基本工作内容。第一章简要叙述从事系统辨识工作必备的（确定性和随机性）信号分析知识以及统计估计知识；第二章介绍系统辨识工作寻求的目标——动态数学模型的分类、性质和相互关系等。第三章到第六章分别阐述时域和频域响应法、相关分析法、最小二乘法、最大似然法等四大类辨识方法的基本原理、步骤和算法，其中第四章和第五章为重点；第七章作为辨识技术工作由基本原理到实践应用之间必经的桥梁；第八章到第十章分别有选择地介绍了在机械行业的各个主要领域中灵活应用系统辨识方法的典型实例（在引用原作时，大都作了不同程度的加工修改，有的还作了进一步的数据处理），书末还列有附录。

本书由蔡福元同志主审，张志方、王振钧教授及李清泉等同志参加了审稿工作，提出很多宝贵的建议。在本书编写过程中得到了郑维敏教授的关心和鼓励，黄世霖教授热情提供了大量原始资料并协助处理数据；田承骏同志审阅了部分原稿，提出了中肯的意见；毛士艺、张其善、诸家晋、郭尚来等多位同志也曾给予热心支持和帮助。在此一并致以衷心的感谢。

由于笔者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

作 者

目 录

绪论	1
第一节 系统辨识技术发展概况	1
第二节 辨识问题的提法和基本工作步骤	3
参考文献	6
第一章 信号分析及统计估计知识	7
第一节 确定性信号的频域分析	7
一、傅立叶变换与功率谱密度	7
二、连续时间信号的拉普拉斯变换	15
三、离散时间信号的 z 变换	16
四、三种变换之间的关系	19
第二节 随机性信号的统计分析	21
一、随机过程的概率分布和统计函数	22
二、遍历性平稳随机过程(序列)	25
三、自回归滑动和序列(ARMA序列)	32
第三节 统计估计的基本概念和方法	33
一、基本概念	34
二、基本估计方法	35
参考文献	43
第二章 线性定常系统的数学模型	44
第一节 连续时间系统的数学模型	45
一、微分方程	45
二、传递函数	47
三、频率响应特性	49
四、冲激响应函数(权函数)	52
五、阶跃响应函数(飞升曲线)	53
六、状态微分方程	54

第二节 离散时间系统的数学模型	59
一、差分方程	59
二、脉冲传递函数	59
三、冲激响应序列	62
四、阶跃响应序列	64
五、状态差分方程	66
六、状态微分方程与状态差分方程的关系	69
第三节 参数模型与非参数模型之间的相互转换关系	69
一、连续时间系统的两类模型之间的关系	70
二、离散时间系统的两类模型之间的关系	79
第四节 多变量系统模型特点	83
一、多变量连续时间系统模型的特点	83
二、多变量离散时间系统模型的特点	85
第五节 线性系统对随机输入信号的响应	89
一、连续时间系统的响应	90
二、离散时间系统的响应	93
第六节 考虑观测噪声情况下线性系统模型的特点	98
一、单变量离散时间系统模型的特点	99
二、多变量离散时间系统模型的特点	102
参考文献	104

第三章 辨识线性定常系统动态特性的时域响应法

和频域响应法

第一节 时域响应特性测试方法	105
一、施加阶跃信号直接测取阶跃响应曲线	105
二、施加方波信号间接测取阶跃响应曲线	107
三、施加脉冲信号近似地直接测取冲激响应曲线	109
第二节 频域响应特性测试方法	110
一、施加波形已知的周期信号测试法	110
二、施加非周期信号测试法	115

参考文献	124
第四章 辨识线性定常系统动态特性的相关分析法	125
第一节 相关分析法(COR法)的基本原理	125
一、基本关系式	125
二、采用相关分析法进行在线辨识的基本方案	127
第二节 最大长度伪随机双电平信号(M 序列)	131
一、 M 序列的生成方法	131
二、 M 序列的基本特征和性质	135
第三节 用 M 序列信号测试系统冲激响应的具体步骤	138
一、第一次预备试验	139
二、选择参数适当的 M 序列作测试信号	140
三、第二次预备试验	143
四、正式试验	143
五、数据处理	144
第四节 逆重复 M 序列	152
一、逆重复 M 序列的生成方法和基本性质	153
二、消除直流漂移干扰误差的原理	157
第五节 多变量系统冲激响应的辨识方法要点	159
小结	164
参考文献	165
第五章 线性系统参数估计的最小二乘法	166
第一节 最小二乘参数估计法(LS法)原理	166
一、基本关系式	166
二、在白噪声假设下最小二乘参数估计的统计性质	170
三、加权最小二乘估计	172
第二节 最小二乘参数估计中的病态问题	173
第三节 采用渐消记忆法时最小二乘参数估计的递推算法	175
第四节 多变量系统参数的最小二乘估计	182
一、差分方程模型参数估计	182

二、状态差分方程模型参数估计	183
第五节 普通最小二乘法所得参数估计的有偏性	186
第六节 辅助变量法(IV法)	188
第七节 广义最小二乘法(GLS法)	192
一、基本原理与迭代算法	192
二、估计偏差校正算法	198
第八节 增广最小二乘法(ELS法)	200
第九节 多级最小二乘法(MSLS法)	203
第十节 相关分析-最小二乘两步法(COR-LS法)	206
一、直接拟合法	207
二、利用任意给定的输入数据平滑法	208
三、利用平稳输入、输出数据平滑法	210
第十一节 ARMA模型参数的最小二乘估计法的特点	212
一、非线性最小二乘估计法	213
二、线性最小二乘估计法	220
小结	221
参考文献	221
第六章 线性系统参数估计的最大似然法	223
第一节 最大似然估计法(ML法)的基本原理	223
一、似然函数的推导	223
二、最优化方法的应用	227
三、最大似然参数估计的统计性质	230
第二节 最大似然参数估计的递推算法	232
参考文献	238
第七章 系统辨识工作中的一般性实际问题	239
第一节 先验知识的利用与辨识方法的选择	239
第二节 输入信号的选择	242
一、非参数模型情况	242
二、参数模型情况	244

第三节 观测数据的采集和预处理	246
一、采样间隔的选择	246
二、观测记录长度的选择	247
三、不良数据的剔除	248
四、直流分量的辨识	249
五、高频和低频噪声的消除	250
第四节 阶和时延的检验	251
一、纯时延的检验	252
二、阶的检验	252
三、零参数的检验	255
四、阶与时延的联合检验	257
第五节 闭环状态下系统的可辨识条件	258
一、直接辨识法情况	258
二、间接辨识法情况	260
参考文献	261
第八章 系统辨识技术在各种机械产品动态性能试验	
研究中的应用	262
第一节 辨识技术用于动力机械性能的试验研究	262
第二节 辨识技术用于交通运输机械性能的试验研究	275
一、汽车振动舒适性研究中车身悬挂系统和人/椅系统动态模型的辨识	275
二、船舶转向驾驶动态特性的辨识	285
第三节 辨识技术用于农业机械性能的试验研究	295
一、谷物装卸用螺旋式输送机临界转速的测定	295
二、谷物卸料用斜溜槽动态特性辨识	300
第四节 辨识技术用于轴承性能的试验研究	302
第五节 辨识技术用于机床结构部件的动态响应特性测试	311
一、辨识技术用于机床总体结构频率响应特性和振型的测定	311

二、辨识技术用于机床滑动部件摩擦力动态阻尼特性的测定	324
参考文献	332
第九章 系统辨识技术在机械制造工艺设备自动化中的应用	335
第一节 机床切削力动态特性的辨识	335
第二节 机床切削加工颤振模型的辨识	345
第三节 机床走刀切削工艺系统的辨识	348
第四节 机床电气传动系统的辨识	356
一、晶闸管-直流电动机 (SCR-D) 自动调速系统的辨识	356
二、具有自适应能力的直接数字控制 (ADDC) 直流电机传动系统的在线辨识	363
第五节 加热设备动态特性的辨识	367
一、加热炉动态特性的辨识	368
二、高温持久试验机加热炉温控数学模型辨识	376
参考文献	383
第十章 系统辨识技术在其他工业生产机械装置自动化中的应用	385
第一节 轧钢机械系统的辨识	385
一、连轧机的在线辨识	387
二、冷轧机恒张力调节系统的在线辨识与在线调整	393
第二节 造纸机械的辨识	397
第三节 发电机械的辨识	407
一、水轮发电机组的在线辨识	408
二、汽轮发电机组的在线辨识	411
参考文献	421
附录 1 矩阵知识纲要	421
附录 2 概率论知识纲要	432
附录 3 曲线拟合或参数估计用非线性最小二乘算法	442

绪 论

第一节 系统辨识技术发展概况

系统辨识是自动控制学科的重要分支，它所研究的基本问题是如何通过运行或试验数据来建立控制对象（或试验对象）的数学模型。目前，这项技术无论在理论研究或实际应用上都正处于兴旺发展时期。

如所周知，在实现工业装置或生产过程的自动控制（特别是现代计算机控制）和预报工作中，以及在某些重要工业产品的动态性能试验研究工作中，第一步要解决的问题就是如何用恰当的数学模型描述被控或被试对象的动态特性。所谓动态就是指对象的工况相对于某一静平衡点发生变化时的运动状态。因此，描述动态特性的数学模型一般是以微分方程和差分方程或它们的特定解答为基本形式。只有掌握了数学模型，才可能进行对象本身动态特性的深入分析和最优控制器的精确设计。显然，控制或试验的精度要求愈高，对所用数学模型的精度要求也愈高。固然，机理比较简单的对象，很容易根据有关的物理、化学定律用理论分析的方法建立其动态模型，然后再用实验方法进行校验。但当对象内部的机理复杂或不清时，仅靠分析法来建模便相当困难，所得结果往往过于复杂，有时甚至根本得不出结果。在这种情况下就只能依靠实验研究的方法了。以上便是系统辨识技术产生的客观基础。

但是，在30年代到50年代的经典控制理论阶段，系统辨

S710177

识（即被控对象动态特性测定）工作只不过是附属于整个控制系统设计任务中的先行步骤。当时所研究的被控对象也比较简单，一般可看成是单输入、单输出线性定常系统，通过简单的实验，施加阶跃信号或频率不同的正弦信号作为输入，即可测定其飞升曲线（阶跃响应）或频率响应等动态特性曲线（这类用曲线而不是用参数表征的数学模型，称作非参数模型）。与控制系统设计的经典方法——频域法相呼应，在早期的系统辨识工作中大量采用频域分析方法（如傅立叶变换、拉普拉斯变换等）。此外，这种建模方法往往适合于在被试对象脱离正常运行的条件、即所谓离线方式下进行，从而给生产带来不便；又由于在输入、输出测量数据的处理中，一般不考虑采用统计方法克服测量中仪表或传感器的随机误差、即观测噪声的影响，因而所得模型的精度势必受到限制。

自50年代后期开始，相关分析技术逐步引入系统辨识工作中，这反映了生产实际对进行在线（即对象处于正常运行条件下）测试和克服随机测量误差的迫切需要，同时也使系统辨识逐步成为整个控制学科中一项独特的、引人注目的专门技术。特别是60年代以来，现代控制理论、计算机控制技术和统计估计理论都取得了长足的进展，这对系统建模工作来说，既提出了新的更高要求，又提供了新的有力手段。于是，系统辨识技术便以崭新的面貌突飞猛进地发展了起来，并构成成为现代控制理论的重要部分。

现今的系统辨识技术水平已达到了对多种控制对象（单输入、单输出的或多输入、多输出的；连续型的或离散型的；参数定常的或慢时变的）以在线方式进行测试，并且能从受到较严重噪声干扰的测量结果中足够准确地提取对象数学模型

的信息。此外，在算法选用恰当及计算机内存和运算速度满足要求的情况下，还能做到实时处理（即一面采集数据，一面即时给出辨识结果），从而为随时调整控制策略以实现自适应控制创造了前提条件。

当前，系统辨识技术的发展正方兴未艾，虽然已经出现了多种方法，但理论上还未形成统一完整的体系，还有许多问题有待深入探讨。在实际应用上，其领域仍在向各个工程技术部门（如航天、航空、航海、交通运输、化工、冶金、核能、电力、机械、造纸、水泥、玻璃等）的纵深方向扩展，在医学、生物、生态以致社会经济系统等方面的应用，也已初步取得了可喜的成效。

就机械行业来说，经典的频域法辨识技术很早就应用于机械产品或设备的动态性能研究中，并且随着快速傅立叶变换技术的发展，其应用日益扩大。可以预期，随着机械工业自动化水平的不断提高，现代系统辨识技术也必将在机械行业中获得愈益广泛的应用。

第二节 辨识问题的提法和基本工作步骤

简单地讲，现代系统辨识问题的较确切提法是，从特定的一类模型中选出一个与被控对象输入、输出实测数据拟合得最好的模型^[1]。就此分三点说明如下：

（1）系统的模型种类繁多，为了减少辨识的工作量，必须尽量缩小模型的选择范围。为此，上述“特定的一类模型”应充分反映出关于被控对象已掌握到的一些基本特征（例如是否线性、是否时变、是否多变量、是否带时延等），模型的表达形式应便于控制中应用（例如经典PID控制中多用非参数模型，而现代计算机控制中多用差分方程和微分

方程等参数模型)。

(2) “输入、输出实测数据”是辨识工作的基础。但对于动态模型辨识来说,最有用的是本身包含有扰动的输入和相应的输出记录数据,而不是两者的稳态值。当正常运行条件下的输入不包含有足以持久激发被控系统动态行为的自然扰动因素时,必须另作试验设计,施加恰当的人工扰动输入。

(3) 在工业生产现场通过测量仪表或传感器获取的输入、输出数据,不可避免地会带有观测噪声,因而不可能找到一个与这些数据完全拟合的确定性模型,而只可能找到一个“拟合得最好的模型”。为此,除了在设计试验方案时,应当尽量考虑到减小观测噪声对模型辨识结果造成的不良影响外,在数据处理时,还应选取能够恰当反映拟合误差大小的损失函数(或指标函数) J ,并以 J 取极小值作为拟合得最好的判别准则。例如实际中有时采用输出误差平方和最小准则,即取模型输出 $y_m(t)$ 与实测输出 $y(t)$ 之间的误差 $e(t) = y(t) - y_m(t)$ 在整个观测区间中所有均匀采样值 $e(t_k)$, $k = 1, 2, \dots, N$ 的平方和作为损失函数 J ,并令 J 取极小值

$$J = \sum_{k=1}^N e^2(t_k) = \min$$

如图0-1所示。于是,待求模型即可用最优化方法解出。如果有两个模型对同一批观测数据得到的拟合误差指标函数值相等,则称这两个模型是等价的。

综上所述,可归纳出现代系统辨识工作的一般步骤,如图0-2所示。