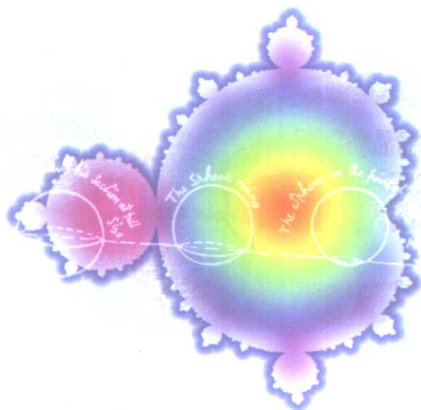


国家“九五”重点图书

高科技与工程计算丛书

非线性 与多变量系统 相关辨识

胡德文 著



国防科技大学出版社

★ 国家“九五”重点图书

高科技与工程计算丛书

国防科技大学
学术著作专项
经费资助出版

非线性与多变量系统 相 关 辨 识

胡德文 著

国防科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

非线性与多变量系统相关辨识/胡德文著. —长沙:国防科技大学出版社, 2000. 12

(国家“九五”重点图书·高科技与工程计算丛书)

ISBN 7-81024-689-5

I. 非… II. 胡… III. ①非线性系统(自动化)—研究②多变量系统—研究 IV. TP27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 56448 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:何晋 责任校对:罗青

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

850mm×1168mm 1/32 印张:8.625 字数:213千

2001年11月第1版第1次印刷 印数:1—1000册

定价:25.00元

目 录

绪论

§ 0.1 系统辨识的发展	(1)
§ 0.2 系统辨识的现有方法比较	(4)
§ 0.3 本书的研究内容与安排	(6)

第一章 用于辨识的伪随机序列

§ 1.1 引言	(10)
§ 1.2 m 序列的产生与性质	(10)
§ 1.2.1 m 序列的产生	(10)
§ 1.2.2 m 序列的性质	(13)
§ 1.3 逆重复 m 序列的产生与性质	(14)
§ 1.3.1 逆重复 m 序列的产生	(14)
§ 1.3.2 逆重复 m 序列的性质	(15)
§ 1.4 m_3 序列的产生与性质	(16)
§ 1.4.1 m_3 序列的产生	(16)
§ 1.4.2 m_3 序列的性质	(17)
§ 1.5 m_5 序列的产生与性质	(18)
§ 1.5.1 m_5 序列的产生	(18)
§ 1.5.2 m_5 序列的性质	(18)
§ 1.6 非线性 M 序列	(19)
§ 1.7 循环差集序列	(21)
§ 1.8 改良型差集序列	(23)
§ 1.9 伪随机连续信号的自相关函数	(25)

§ 1.10 伪随机连续信号的功率谱	(29)
--------------------------	------

第二章 伪随机整数串的产生与性质

§ 2.1 引言	(33)
§ 2.2 全循环小数序列的产生	(34)
§ 2.3 伪随机整数串概率特性	(39)
§ 2.4 伪随机整数串游程特性	(41)
§ 2.5 伪随机整数串自相关函数特性	(44)
§ 2.6 全循环小数序列的综合	(47)
§ 2.7 广义全循环小数的产生与特性	(48)
§ 2.8 最佳正、余弦型伪随机序列	(54)
§ 2.9 结论	(59)

第三章 脉冲响应函数相关辨识与精度分析

§ 3.1 引言	(62)
§ 3.2 FIR 模型辨识的相关分析法	(62)
§ 3.3 m 序列输入时相关辨识的精度分析	(65)
§ 3.4 相关辨识的精度上界和下界	(69)
§ 3.4.1 误差下界	(69)
§ 3.4.2 误差上界	(70)
§ 3.4.3 白噪声情形	(72)
§ 3.4.4 一般噪声情形	(73)
§ 3.5 初值测量误差的影响与消除	(74)
§ 3.5.1 初值测量误差影响分析	(74)
§ 3.5.2 最小二乘法消除初值影响	(76)
§ 3.6 逆重复 m 序列输入相关辨识与精度分析	(79)
§ 3.6.1 相关辨识	(79)
§ 3.6.2 误差下界	(82)

§ 3.6.3 误差上界	(83)
§ 3.6.4 白噪声情形	(83)
§ 3.6.5 一般噪声情形	(84)
§ 3.7 白噪声输入相关辨识精度分析	(85)
§ 3.8 实例分析与结论	(88)

第四章 脉冲响应函数辨识的最优输入设计

§ 4.1 引言	(95)
§ 4.2 问题的描述与有效算法	(96)
§ 4.2.1 问题的描述	(96)
§ 4.2.2 有效算法与 Fisher 信息矩阵	(97)
§ 4.3 最优输入设计	(100)
§ 4.4 相关分析与统计特性	(105)
§ 4.5 黑箱辨识的精度分析	(111)
§ 4.6 实例分析与结论	(115)

第五章 连续系统脉冲响应辨识

§ 5.1 连续系统相关分析 Wiener - Hopf 方程	(120)
§ 5.2 连续系统脉冲响应精确辨识算法	(123)
§ 5.2.1 白噪声情形	(123)
§ 5.2.2 三角形自相关函数情形	(123)
§ 5.2.3 一般情形	(126)
§ 5.3 采用伪随机信号辨识的近似算法	(128)
§ 5.3.1 m 序列情形	(128)
§ 5.3.2 其他伪随机序列情形	(131)
§ 5.3.3 初值测量误差的影响与消除	(132)
§ 5.3.4 输入直流分量的影响	(133)
§ 5.4 利用伪随机信号作频域辨识	(134)

§ 5.4.1 精确法	(134)
§ 5.4.2 近似法	(136)
§ 5.5 连续型伪随机信号的参数选择	(137)
§ 5.5.1 信号周期的选择	(138)
§ 5.5.2 时钟周期的选择	(138)
§ 5.5.3 信号幅度的选择	(139)

第六章 传递函数辨识的阶跃响应法

§ 6.1 引言	(140)
§ 6.2 一阶惯性滞后环节的辨识	(142)
§ 6.2.1 切线法	(142)
§ 6.2.2 两点法	(143)
§ 6.3 二阶自衡对象的辨识	(143)
§ 6.3.1 切线法	(144)
§ 6.3.2 两点法	(145)
§ 6.3.3 二阶欠阻尼自衡对象的辨识	(148)
§ 6.4 高阶自衡对象的辨识	(149)
§ 6.5 自衡等容对象的辨识	(151)
§ 6.5.1 切线法	(151)
§ 6.5.2 两点法	(154)
§ 6.6 无自衡对象的传递函数辨识	(155)
§ 6.7 面积法	(156)
§ 6.8 其他辨识用输入信号	(158)
§ 6.8.1 矩形脉冲输入	(158)
§ 6.8.2 冲激输入信号	(159)

第七章 ARMAX 模型的全结构辨识

§ 7.1 引言	(161)
----------------	-------

§ 7.2	系统的描述	(162)
§ 7.3	系统的纯时滞、大纯时滞辨识	(163)
§ 7.4	AR 部分辨识及偏差补偿算法	(164)
§ 7.4.1	基本算法	(164)
§ 7.4.2	偏差分析与补偿	(166)
§ 7.5	ARMAX 模型 AR 部分偏倚校正递推辨识	(168)
§ 7.6	MA 部分辨识	(169)
§ 7.7	观测噪声自相关函数估计	(169)
§ 7.8	观测噪声模型的辨识	(171)
§ 7.9	全结构辨识的十步快速算法	(172)
§ 7.10	计算结果及分析	(174)
§ 7.10.1	大纯时滞辨识的仿真	(175)
§ 7.10.2	基本算法与偏差补偿算法仿真与比较	(176)
§ 7.10.3	带噪声估计的偏差补偿算法仿真	(179)
§ 7.11	结论	(182)

第八章 传递函数辨识的频率特性拟合

§ 8.1	频率特性拟合法	(184)
§ 8.1.1	Levy 法	(185)
§ 8.1.2	迭代法	(187)
§ 8.1.3	山下法	(188)
§ 8.2	无自衡对象参数拟合	(190)
§ 8.3	频域数据拟合法的统一格式	(191)
§ 8.4	获取频率特性的其他方法	(195)
§ 8.4.1	矩形波方法	(195)
§ 8.4.2	冲激响应法	(197)
§ 8.5	仿真结果	(199)

第九章 非线性系统 Wiener 模型辨识

§ 9.1 引言	(200)
§ 9.2 问题描述与预备结果	(201)
§ 9.2.1 问题描述	(201)
§ 9.2.2 预备结果	(202)
§ 9.3 线性子系统的辨识	(204)
§ 9.4 非线性增益环节的辨识	(206)
§ 9.4.1 偶次项系数的辨识	(206)
§ 9.4.2 奇次项系数的辨识	(207)
§ 9.5 辨识的统计特性	(208)
§ 9.6 计算结果与分析	(212)
§ 9.7 结论	(214)

第十章 非线性系统 Hammerstein 模型辨识

§ 10.1 引言	(218)
§ 10.2 H-模型线性子系统的辨识	(219)
§ 10.3 H-模型非线性增益的辨识	(223)
§ 10.4 H-模型的 m3 序列辨识法	(224)
§ 10.4.1 非线性环节偶次项系数的辨识	(224)
§ 10.4.2 非线性环节奇次项系数的辨识	(225)
§ 10.4.3 线性子系统脉冲响应函数辨识	(227)
§ 10.5 计算结果与分析	(227)
§ 10.6 结论	(230)

第十一章 多变量控制系统 Fisher 信息矩阵结构

§ 11.1 问题描述	(233)
§ 11.1.1 有关前提条件	(233)

§ 11.1.2	有关矩阵运算	(234)
§ 11.1.3	Fisher 信息矩阵	(236)
§ 11.2	一般情形的 Fisher 信息矩阵结构	(237)
§ 11.3	特殊情形的 Fisher 信息矩阵结构	(241)
§ 11.3.1	控制系统 Markov 参数矩阵辨识精度	(241)
§ 11.3.2	MA 模型时序参数 Fisher 信息矩阵	(243)
§ 11.3.3	AR 时序模型参数 Fisher 信息矩阵	(245)
§ 11.3.4	噪声强度参数的 Fisher 信息矩阵	(247)

第十二章 随机 MIMO 系统的结构与参数不变量辨识

§ 12.1	引言	(249)
§ 12.2	MIMO 系统 Markov 参数矩阵辨识	(250)
§ 12.3	状态空间描述的结构辨识	(251)
§ 12.4	结构与参数不变量计算步骤	(257)
§ 12.5	仿真结果与分析	(259)
§ 12.5.1	无噪声时的辨识结果	(259)
§ 12.5.2	噪声干扰下参数不变量辨识结果	(260)
§ 12.5.3	结构不变量辨识的抗噪能力	(261)
§ 12.6	结论	(263)

绪 论

§ 0.1 系统辨识的发展

马克思说过:一门科学只有当它应用到了数学时,才算是真正发展了.要应用数学的工具对系统或过程进行定量的分析、综合与设计,就必须建立起数学模型.

建模的方法有两种.一是分析法建模,即利用系统或过程中所遵守的定理、定律或规律,如物理定理、化学定理、能量守恒、质量守恒、物质不变等原则、电磁场的麦克斯韦方程、电路中的基尔霍夫定律等,推导出系统的数学模型.这样所建立的数学模型称为机理模型.其优点是模型中的各参数物理意义明确.但是随着各门科学的迅速发展,对数学模型的要求也不断增加.在此过程中,遇到了许多用机理分析解决不了的问题,如系统或过程本身的机理不清楚,或者只能知道系统的结构,而具体的参数值未知等等.

建模的另一条途径就是系统辨识的方法,即:通过试验或运行数据,确定出一个在某种意义上代表系统或过程特性的数学模型^[1-3].

美国控制界的著名学者 Zadeh (1962)曾给辨识 (Identification) 下过这样的定义^[4]:“辨识是在输入和输出的基础上,从一组系统中确定出一个与所测系统等价的系统.”这个定义较好地描述了系统辨识的内涵.但从严格意义来讲,与实际系统完全等价的系统是找不到的,因此,Eykhoff (1974) 这样定义^[5]:“辨识问题可以归结为用一个模型来表示的客观系统(或将要构造的系统)本质特征的

一种演算,并用这个模型把客观系统的理解表示成为实用的形式”。这个定义表明了系统辨识的哲学意义。Ljung (1978) 给辨识下的定义则要直观得多^[6]:“辨识就是按照一个准则,在一组模型类中,选择一个与数据拟合得最好的模型”。

系统辨识最早是作为控制理论的一门分支发展起来的,目前已成为非常活跃的学科。国际自动控制联合会 (IFAC) 于 1967 年开始,每 3 年召开 1 次辨识与系统参数估计的专题学术会议。这个专题会议的规模不断扩大,目前已成为国际自控联 (IFAC) 最有影响的系列会议之一。为什么系统辨识能引起国际控制界如此浓厚的研究兴趣呢? 这与控制理论本身的发展是密切相关的。

在现代控制理论问世之前,大多数的控制对象都是采用传递函数来描述的单输入单输出定常系统。古典控制理论之所以获得巨大成功,并保持着顽强的生命力,其原因之一就在于能够运用十分有效的实验方法测定系统的传递函数。因此,在一定意义上讲,系统辨识在经典控制中已广泛地应用。

20 世纪 60 年代,随着航空、航天技术以及工业过程控制技术的迅速发展,以状态空间方法, Kalman 滤波理论, Bellman 动态规划方法和 Pantryagin 极大值原理为骨干内容的现代控制理论相应地发展起来。与经典控制理论强调控制系统的稳定性相对照,现代控制理论更进一步地将控制系统的设计建立在某种最优化指标上,如航天飞行器的最少燃料控制或最短时间控制等等。应该说现代控制理论的出现是适应当时工程技术的要求的。但是,现代控制理论并没有像人们所期望的那样得到广泛的应用。在一些工程领域如化工过程、热工过程的控制中,经典控制理论仍占据十分重要的地位。这是为什么呢? 造成这一现象的最重要的原因就在于最优控制理论建立在受控系统的数学模型是绝对精确知道的前提下,有时甚至还要求过程噪声的统计特性和数学模型是已知的,这种假设往往与实际相脱节。中国有句谚语叫做“皮之不存,毛将焉

附”,其意思是比喻事物失去了借以生存的基础,就不能存在.为了寻找这一基础,控制理论工作者们把兴趣从最优控制方案的设计(这种设计在线性定常系统中已经十分完善了)转到了系统辨识的研究上来.

系统辨识与时间序列分析属于姐妹学科.从时间上看,时间序列分析起步略早一些.20世纪初,许多数学家开始注意到气象、天文现象的时序特性,从而将用静态模型参数估计的概率论和数理统计(主要是回归方法)移到了离散时间序列的参数估计上来.从研究内容上看,时间序列分析相当于估计具有白噪声输入的控制系统.输入信号是不可测量的,使用的信息只有系统或过程的输出观测值.较之时序分析,系统辨识的内容则更为广泛些.从狭义的意义讲,主要目的是针对与控制系统或过程本身有关的参数,利用的信息除了输出信号外,还有测量的输入控制信号,要求辨识的结果尽可能不受观测噪声或过程噪声的影响.从更广泛的角度来看,可以说系统辨识包含了时间序列分析以及实验设计的全部内容.数理统计学家的大量深入的理论工作,为系统辨识奠定了扎实的理论基础.

计算机技术的不断发展和普及,为系统辨识的广泛应用提供了技术上的保证,这也正是系统辨识发展的基础之一.可以说,系统辨识的研究者几乎不用担心提出的算法在计算上的可操作性问题.计算机具有强大的硬件支持、丰富的软件资源和高速的运算能力,可以在人不干预的情况下,在线实时地完成系统的辨识,为控制策略的设计直接提供出数学模型.

20世纪70年代中期发展起来的自适应控制理论对系统辨识研究提出了挑战.自适应控制的目的是使控制器能适应被控对象参数缓慢变化或对象特性难以确知的情况,主要有自校正控制(STC)、模型参考自适应控制(MRAC)和直接自适应控制,它们都是根据输入输出数据,在线地调整控制器.其中,STC是一边辨识

对象的参数,一边利用这些参数调整控制器的参数来控制.参数的收敛性分析成为了 STC 研究的主题,是至今一直研究的课题. MRAC 是在系统中引入参考模型,比较实际对象与动态响应的差别来调整控制器.而直接自适应控制则试图在没有对象的数学模型的前提下,直接地进行控制.20 多年的发展历史表明,直接自适应控制这条路并没有走通,直到人工神经网络研究的再度兴起才稍有起色.自适应控制并没有将数学模型抛弃,而是大大地刺激了系统辨识理论的深入发展.

目前,控制系统的辨识、状态估计和最优控制构成了现代控制理论的三个互相渗透、互相依赖的分支.状态估计与最优控制理论的实际应用离不开被控对象的数学模型的建立,同时又为系统辨识理论提供了新的要求与方法.

系统辨识也像控制论本身一样,吸引了许多其他科学领域的学者们的注意,正成为一种方法论的学科.这是由于各种学科研究定量化所致.系统辨识的研究目的除了进行动态系统的控制与设计以外,还包括系统分析、系统仿真、预测与决策、故障诊断以及验证机理模型等方面,已广泛应用到生物、医学工程、经济、社会、人口、生态环境、水文等各个领域.

至 20 世纪 90 年代,系统辨识的理论还在进一步发展.在一般干扰噪声下的随机多变量控制系统的辨识问题至今还没有得到很好的解决.而非线性动态系统的辨识已成为当前国际系统辨识界的研究主题之一.

§ 0.2 系统辨识的现有方法比较

系统辨识的内容包括:明确目标,建立目标函数,实验设计,确定模型类与模型结构,参数估计,模型验证等.其中,参数估计的研究是系统辨识最主要的部分.近 40 年的研究提供了丰富的方法,

20 世纪 70 年代称之为“一口袋技巧”,至 20 世纪 80 年代这些方法系统化.通过计算机的仿真和具体应用,各种方法的优缺点也逐渐明朗.

在众多的方法中,最小二乘法(LS)是最基本的一种,它的提出和应用可追溯到 1795 年,K. Gauss 根据望远镜观测到的数据,对描述天体运动的 6 个参数值作出了估计.此后,这种方法被广泛应用,成为许多方法的思想基础.这种方法易于理解和掌握,估计结果具有很好的统计特性.但是,当应用到动态系统辨识时,问题就出现了.如果模型噪声不是白噪声,这种方法得到的参数估计不再是无偏一致的.

为了解决这个问题,从 20 世纪 70 年代开始提出了许多改进的最小二乘类方法.主要有:广义最小二乘(GLS),辅助变量法(IV),增广最小二乘法(ELS),偏差补偿算法和相关分析-最小二乘两步法、多步法等.

GLS 法采用动态滤波器对数据进行白化处理,在迭代过程中不断地调整滤波器模型,使得参数估计成为一致无偏估计.当噪声比较小时,GLS 法具有较高的辨识精度.但噪声比较高时,Söderstrom^[9]证明,目标函数可能具有多个局部最小点,参数估计往往也是有偏的.GLS 法在计算上比 LS 法复杂得多.

IV 方法(亦称工具变量法),其基本思想是在辨识过程中构造一种新的变量,它与过程中的有用信号密切相关而与过程噪声是不相关的.由此构造出数据矩阵,可得到参数的一致无偏估计,且计算量与 LS 法一样简单,收敛速度快,能适应较广范围的噪声特性.根据 Söderstrom 和 Stoica^[10]的研究,这种方法的精度要较有效估计的精度低.

ELS 法是把方程中的噪声项参数增列到待估参数向量中.这样可将方程误差进行白化处理,利用 LS 法得到增广参数向量的一致无偏估计,但噪声模型参数往往不能估计得很准.

相关分析 - 最小二乘两步法最早是由 Isermann 和 Bauer^[11] 于 1974 年提出的。两步法首先采用相关分析法, 计算出输入输出的互相关函数或脉冲响应函数; 接着, 采用 LS 法, 利用第一步得到的非参数模型估计值作为数据基础, 进一步估计出系统的参数模型。作为第一步的相关分析具有很强的抗干扰能力, 对有色噪声也能得到无偏估计, 只要输入与噪声不相关即可。在系统辨识的文献中, 这是一种普遍推崇的方法。但对这种方法的理论研究恰恰是缺乏的。本书将作进一步深入的研究。

除了上述最小二乘类估计算法以外, 还有极大似然估计、随机逼近法和预报误差法等方法。其中极大似然法 (ML) 是建立极大似然函数, 求取极大值时的参数估计。它可以在方程误差是有色噪声的情况下获得参数的一致估计, 具有许多良好的统计特性, 估计精度比 LS 法的高, 但需要事先知道干扰噪声的概率密度函数, 可通过松弛型算法获得。预报误差法不需要噪声概率分布, 可构造松弛算法进行迭代运行。

综上所述, 我们认为相关分析 - 最小二乘两步法是一种良好的辨识算法, 值得我们作进一步的研究和应用。

§ 0.3 本书的研究内容与安排

本书主要研究单变量线性系统、非线性系统 Wiener 模型和 Hammerstein 模型的线性子系统的脉冲响应函数的辨识, 差分模型的全结构与参数的辨识, 以及线性随机多变量系统的结构不变量与全部参数不变量的辨识。

第一章专门介绍用于辨识的伪随机序列的产生及其性质。为下续章节作好准备。主要介绍 m 序列、逆重复 m 序列、 m^3 序列、 m^5 序列、差集序列、改良型差集序列等, 以及它们在连续时间域和频率域的性质。

第二章提出产生伪随机整数串的一种新方法——全循环小数序列(F-序列)方法.研究这类序列的伪随机整数串概率性质、游程性质和自相关函数等性质.得出具有最佳自相关函数的正余弦型伪随机序列.这是基础性的研究成果,在系统辨识等领域将具有广泛的应用性.

为仔细弄清相关辨识的精度问题,并为进一步比较最优输入信号的辨识效果,第三章专门分析伪随机 m 序列和逆重复 m 序列激励下 FIR 模型的辨识精度,得出有色噪声干扰下辨识精度的显式表达式,这是目前文献中所没有的结果.

第四章首先研究线性 SISO 系统脉冲响应函数的最优辨识,给出在辨识误差达到 Cramer - Rao 下界情况下最优输入设计(OID)的显示表达式,以此作为比较基础.接着,引入相关分析法,研究脉冲响应函数辨识的高精度和简洁方法,重点讨论在 A - 最优输入设计(A - OID)情况下,辨识的无偏性、均方收敛性、强一致收敛性以及渐近正态性.同时,采用组合数学的差集理论,给出 A - OID 辨识信号的具体实现.为后续各章的研究打下基础.

第五章专门讨论连续系统的脉冲响应函数的辨识问题.第六章叙述现有经典的传递函数测定的阶跃响应法,为相关辨识提供一定的先验信息.

第七章提出能够确定 SISO 系统差分模型的纯时滞、大纯时滞的准则;推导出能够同时辨识 ARMAX 模型 AR 的阶数和参数、MA 部分的阶数和参数的超定的依阶次递推的基本算法;这种超定算法利用全部已获得的脉冲响应函数的估计值,因而具有较高的估计精度.分析在二次数据矩阵和向量中由于原始样本的有限而存在的偏差,提出基于基本算法的偏差补偿递推算法,进一步提高参数估计的精度和定阶准则在极高噪信比下的检测能力.在辨识 ARMAX 模型控制部分全结构与参数的同时,分离出观测噪声的自相关函数的一致估计值,从而为噪声模型的估计奠定了基础,得到