



不确定系统的鲁棒辨识

Robust Identification of Uncertain Systems

张 颖



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



不确定系统的鲁棒辨识

Robust Identification of Uncertain Systems

张 颖



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

不确定系统的鲁棒辨识 / 张颖. —北京:高等教育出版社, 2003. 3

ISBN 7-04-011053-9

I. 不... II. 张... III. 不确定系统-系统辨识
IV. N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 096795 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街55号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
排 版	高等教育出版社排版中心		
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
开 本	850×1168 1/32	版 次	2003年4月第1版
印 张	5.125	印 次	2003年4月第1次印刷
字 数	120 000	定 价	8.80 元
插 页	1		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介



张颖,1967年出生于山东省济南市,1985年保送到南京工学院(现在的东南大学)读本科,1989年毕业于东南大学自动控制系,获学士学位。之后被东南大学自动化研究所免试录取为研究生,分别于1992年和1995年获硕士和博士学位。1996年至1997年在新加坡南洋理工大学从事博士后研究,现任新加坡精迪机械技术与制造科学院研究员。目前的研究方向包括自适应系统的控制与建模,图像处理及计算机视觉,信息处理及融和技术、光学及光纤信号处理等方面。在国内外著名期刊上发表论文40余篇。

导师简介

冯纯伯,1928年出生于江苏省金坛,1950年毕业于浙江大学电气工程系,1958年于列宁格勒工业大学获博士学位,现为东南大学自动化研究所教授。他在系统辨识及自适应控制领域贡献颇多。基于对系统的输入输出的预滤波,他提出了一种新的系统建模方法。对于包括并联、串联及反馈的复合动态系统,他做了深入研究,利用泛函分析的方法,提出了一种度量系统的方法,进而推广了定理及稳定定理。由于他在自动控制领域的贡献,1995年被遴选为中国科学院院士,同时他也是俄罗斯科学院外籍院士。

内 容 提 要

本书研究了含不确定性系统的鲁棒辨识问题,提出了一种能够消除随机噪声引起的系统辨识偏差的统一方法。理论分析及仿真实验证明,这种方法有以下特点:(1) 其辨识过程不需要对随机噪声建模;(2) 它可用于开环条件也可用于闭环条件的系统辨识;(3) 能用于含未建模动态系统的辨识;(4) 可用于连续系统的辨识;(5) 具有很好的收敛性;(6) 可在有限含噪声数据时实现高精度的辨识。全书由四部分组成。第一部分研究了开环系统参数的一致估计问题,实现了有色噪声扰动下的AR模型系统、一般SISO动态系统、线性多变量系统、时变量参数系统及一类可参数化非线性系统的参数一致估计。第二部分研究了闭环系统参数的一致估计问题,取得了以下结果:(1) 改善了以往闭环直接辨识方法的一致性条件,允许一个通道的噪声是未被建模的;(2) 利用偏差补偿的原理提出了一个间接闭环辨识的新方法,它不要求对噪声建模也不要求反馈通道的传递函数已知。第三部分研究了存在未建模动态时如何消除噪声对有差建模的影响问题。提出了一种新的集员辨识方法,它比以往的方法可获得保守性小的参数未建模的界。第四部分给出了本文所提方法的完整的描述,并证明了在辨识一般的动态变量误差系统和连续系统时,应用本文方法同样可消除噪声对辨识的影响。仿真实验结果验证了本文中的理论分析。

ABSTRACT

This dissertation studies robust identification of systems with uncertainties. A unified approach to eliminate the noise effect on system modelling is developed. This method has been proven to be of favourable merits. It can obtain satisfactory identification results without modelling the noise. Besides, since it is established directly upon the asymptotical analysis, it's convergence and consistency are guaranteed. It has been shown that this method can achieve consistent parameter estimators for discrete-time systems and continuous-time systems, which may operate either under open-loop condition or under closed-loop condition. It can also

eliminate the noise-induced identification biases even in the presence of unmodelled dynamics. The research of this thesis consists of four parts. In the first part, the problem of consistent parameter estimation of open-loop systems is thoroughly studied. The second part of the thesis treats the problem of eliminating the noise-induced identification biases in the presence of unmodelled dynamics. The third part treats the problem of consistent parameter estimation of closed-loop systems. Finally, the proposed approach is extended to robust identification of continuous-time systems in the fourth part. The theoretical analysis in this dissertation is justified by simulation results.

前 言

人们在认识自然的过程中,总希望能利用所观测的数据获得被研究对象(往往被看成一个系统)内在运动规律的定量描述,从而更好地进行预测、控制和决策,为此必须建立被研究对象的数学模型。系统辨识就是根据测量系统产生的各种信号去构造系统的模型,它是联系现实世界和数学模型世界的纽带。可以说,每当把理论应用于实际系统时,采用某种形式的辨识技术是不可缺少的一步。另外,现代飞速发展的计算机技术为处理大量数据提供了物质基础,因此系统辨识的理论与实践得到越来越多的重视,经历了三十多年的发展,其研究内容已涉及到控制理论、信号处理、时间序列分析、故障诊断及统计学等等诸多领域,被广泛地应用在科研和生产中并发挥着越来越大的作用。

然而,由于实际系统的复杂性,一个真实的系统往往不可能由数学模型精确描述,它和所建的数学模型之间不可避免地存在建模误差等不确定性。本书研究了含不确定性系统的辨识问题,提出了一种能够消除随机噪声引起的系统辨识偏差的统一方法。理论分析及仿真实验证明,这种方法有以下特点:(1) 其辨识过程不需要对随机噪声建模;(2) 它可用于开环条件也可用于闭环条件的系统辨识;(3) 能用于含未建模动态系统的辨识;(4) 可用于连

续系统的辨识;(5)具有很好的收敛性;(6)可在有限含噪声数据时实现高精度的辨识。全书由四部分组成。第一部分研究了开环系统参数的一致估计问题,实现了有色噪声扰动下的AR模型系统、一般SISO动态系统、线性多变量系统、时变量参数系统及一类可参数化非线性系统的参数一致估计。第二部分研究了闭环系统参数的一致估计问题,取得了以下结果:(1)改善了以往闭环直接辨识方法的一致性条件,允许一个通道的噪声是未被建模的;(2)利用偏差补偿的原理提出了一个间接闭环辨识的新方法,它不要求对噪声建模也不要求反馈通道的传递函数已知。第三部分研究了存在未建模动态时如何消除噪声对有差建模的影响问题。提出了一种新的集员辨识方法,它比以往的方法可获得保守性小的参数未建模的界。第四部分给出了本文所提方法的完整的描述,并证明了在辨识一般的动态变量误差系统和连续系统时,应用本文方法同样可消除噪声对辨识的影响。仿真实验结果验证了本文中的理论分析。

本书的内容来自作者在东南大学自动化研究所攻读博士学位时所做的研究工作。在此书出版之际,我想利用这个机会感谢那些对此书出版做出贡献的人。首先要感谢的是我的博士生导师冯纯伯教授。是冯先生将我引入到系统辨识的研究领域,文中的许多研究结果也都受助于他的启迪。没有他的指导,本文是无法完成的。其次,我要感谢我的父母。是他们鼓励我从事科学研究并给予我精神和生活上的支持。最后,我还要感谢我的妻子张悦悦女士,感谢她在此书成书过程中所表现的忍耐、理解和给予的全力支持。最后,作者在此还要衷心感谢张杰女士为本书出版所作的繁重的打字工作。

策	划	刘激扬
编	辑	章浩平
封面设计		张楠
责任绘图		尹文军
版式设计		史新薇
责任校对		刘莉
责任印制		韩刚

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》。行为人将承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

现公布举报电话及通讯地址:

电 话:(010) 84043279 13801081108

传 真:(010) 64033424

E-mail:dd@hep.com.cn

地 址:北京市东城区沙滩后街 55 号

邮 编:100009

目 录

第 1 章	绪论	1
§ 1.1	引言	1
§ 1.2	系统辨识误差的来源	4
§ 1.3	具有不确定性系统辨识的研究和发展	5
§ 1.4	本文研究的主要内容	10
第 2 章	有色噪声干扰下开环系统参数的无偏辨识	13
§ 2.1	带观测噪声的 $AR(p)$ 、 $ARMA(p, q)$ 模型参数的 无偏估计	14
§ 2.2	一般 SISO 动态系统参数的无偏估计	31
§ 2.3	线性多变量系统参数的无偏估计	46
§ 2.4	时变参数系统参数的无偏估计	56
§ 2.5	Hammerstein 型非线性系统的参数一致估计	62
第 3 章	具有未建模动态系统的辨识	70
§ 3.1	具有参数化未建模动态系统的辨识	71
§ 3.2	具有非参数化未建模动态系统的辨识	80
第 4 章	闭环系统辨识	93
§ 4.1	直接辨识方法一致性条件的改善	94
§ 4.2	利用预滤波的间接辨识方法	102
§ 4.3	直接消除间接辨识闭环系统时噪声引起的辨识	

偏差	112
第 5 章 相关噪声下系统参数无偏估计的统一方法	121
§ 5.1 问题的描述	122
§ 5.2 获得参数无偏估计的新方法	125
§ 5.3 一致性分析	131
§ 5.4 连续系统参数的一致估计	133
§ 5.5 仿真研究	135
§ 5.6 结论	140
第 6 章 结论	141
§ 6.1 本文取得的主要结果	141
§ 6.2 尚待研究的问题	143
参考文献	144

第1章 绪 论

§ 1.1 引 言

人们在认识自然的过程中,总希望能利用所观测的数据获得被研究对象(往往被看成一个系统)内在运动规律的定量描述,从而更好地进行预测、控制和决策,为此必须建立被研究对象的数学模型。系统辨识就是根据测量系统产生的各种信号去构造系统的模型,它是联系现实和数学模型的纽带。可以说,每当把理论应用于实际系统时,采用某种形式的辨识技术是不可缺少的一步^[20]。另外,现代飞速发展的计算机技术为处理大量数据提供了物质基础,因此系统辨识的理论与实践得到越来越多的重视,经历了三十多年的发展,其研究内容已涉及到控制理论、信号处理、时间序列分析、故障诊断及统计学等等诸多领域,被广泛地应用在科研和生产中并发挥着越来越大的作用。

然而,由于实际系统的复杂性,一个真实的系统往往不可能由数学模型精确描述,它和所建的数学模型之间不可避免地存在建模误差等不确定性,引起这些不确定性的原因主要有:

(1) 未被建模的动态。由于系统的复杂性,系统中某些反映系统特征的物理量之间相互作用的机理难以精确分析,获得它们之间的解析表达式几乎是不可能的。此外,有些辨识任务要求降阶建模,其建立的数学模型只能反映系统的部分动态特征。例如,在一个锅炉的温度控制问题中,我们不可能也没有必要对锅炉这个对象建立几百阶的模型,如果那样我们将很难设计控制器。可见,不管是客观因素还是人为因素都不可避免地引入未建模动态。未建模动态的存在在一定情况下会制约系统的动态性能,甚至使系统失稳。

(2) 随机噪声。由于被研究对象是与周围环境中其他系统相联系的,不可避免地受到周围环境的干扰,系统内部也可能由于某些元件状态发生变化产生内部干扰。此外,因传感器及执行机构的偏差造成的信号测量误差等也构成一大类随机噪声信号。

实际系统中存在的这些不确定性决定了我们对一个系统只能进行有差建模。但这不等于说我们可以任意选一个模型或者是不需要模型,相反,我们不仅应该尽可能克服不确定性的影响,给出一个适合我们辨识目的同时又能反映系统主要特征的模型,而且还应该给出这个模型与真实系统之间的差距的一种度量,尽可能地使这二者结合在一起给出真实系统的最近似的描述。这就要求系统辨识方法应具有处理系统中各种不确定性的能力,即具有鲁棒性。具体地讲,衡量一种系统辨识方法的鲁棒性,主要包括以下几个方面:

(1) 对噪声水平的鲁棒性,即在信噪比很低的情况下,辨识算法仍能给出令人满意的估计。

(2) 对噪声形式的鲁棒性,即不要求指定特殊的噪声模型形式。

(3) 对噪声特性的鲁棒性,即不要求相关噪声模型满足特殊性质,不要求噪声与观测信号之间的相关性。

(4) 对未建模动态的鲁棒性,在存在未建模动态时,辨识方法

不仅能给出满足要求的模型而且能给出此模型引起的未建模动态的最小上界。

发展具有这些方面性质的辨识方法,就构成了鲁棒辨识的主体。这也是实际生产过程和理论本身不断完善发展的需要。首先,在许多应用领域中,如气象预报,尽管人们明白存在着多种复杂的不确定性因素,但为了可以更好地进行预测、控制和决策,人们仍希望能克服不确定性的影响,得到被观测系统近似的估计。其次,现代控制理论的发展也要求系统辨识方法对不确定性具有鲁棒性。由于在一般的生产过程中,被控对象及其受到的干扰往往难以准确建模,不考虑未建模动态的控制方法难以实用,于是引发了鲁棒控制理论的研究。为了能应付复杂的控制对象,人们进行了大量的鲁棒控制研究,迄今为止几乎所有鲁棒控制器都是在假定“系统标称模型和此模型引起的未建模动态的界准确已知”的先决条件下设计出来的,它没有关心这些先验信息在实际中是如何得到,是否能得到等问题。这些问题都有待在系统辨识中得到回答。一方面控制要求系统辨识能够提供这些先验信息;另一方面,如果系统辨识不能提供满足控制要求的信息,那么我们就应该重新考虑控制方案,发展基于可达信息基础上的控制。因此在存在未建模动态的情况下,尽可能提高系统辨识精度有利于鲁棒控制和系统辨识的结合,形成实用的控制理论。再者,系统辨识理论本身的不断完善,也需要正视鲁棒性问题,人们早就发现不少传统辨识方法的鲁棒性差强人意,这一点我们将在第1.3节中详细论述。

总之,正是由于这种实际和理论的需要推动了鲁棒辨识的研究,近年来这一领域的研究引起了国内外众多学者的极大兴趣。许多国际权威期刊如 *Automatica* 和 *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL* 等相继发表了鲁棒辨识专辑。自1989年以来,在控制、数学和信号处理等领域的权威刊物,及每年的美国控制年会(ACC)、控制与决策年会(CDC)和其他领域

的国际大会上也越来越多地展开了鲁棒辨识的讨论。在我国,也有很多学者从事鲁棒辨识的研究,发表了不少这方面的研究成果^{[101]~[103]、[108]~[110]、[118]~[119]}。目前鲁棒辨识的研究仍在继续深入,针对上述鲁棒性中某一方面的研究已取得了进展,但具有上述鲁棒性质的辨识方法仍存在困难,而这一问题的解决在理论和实际上都有十分重要意义。

本论文的主要工作就是发展一种具有上述鲁棒性质的统一的系统辨识方法。这一章中我们将首先分析不确定性对系统辨识影响的机理,以此阐明我们研究工作的基点,然后综述目前系统鲁棒辨识方法的研究现状、存在的问题,最后描述本论文的主要工作。

§ 1.2 系统辨识误差的来源

如前所述,不确定性的存在必然引起辨识结果与真实系统之间存在误差。为了处理不确定性引起的建模误差,我们首先必须弄清楚这些误差的起因及性质,这样我们才能有的放矢,针对不同的误差采取不同的处理方式,应消除的予以消除,不能消除的应给出一个关于它的界。

系统的建模误差主要包括二个部分,分别为方差误差(Variance Error)和偏差误差(Bias Error)。方差误差主要是由于在进行系统辨识实验时观测数据中的随机噪声引起的。偏差误差则是降阶建模时模型复杂程度的有限性带来的。在传统辨识中,计算方差误差的关键工具是计算估计参数的 Cramer-Rao 下界,在精确建模时,这时不存在未建模动态,Cramer-Rao 下界可以给出合理的方差误差的描述^{[29]、[64]}。当观测数据长度趋于无穷时,这部分误差以几何级数的速率衰减,也就是说,它是可以被渐近消除的。在降阶建模时,模型参数实际上是没有意义的,当 N 趋于无穷的参数估计值可能收敛到一个与真实系统毫不相干的值,这时讨论模型参数应当考虑未建模的影响,得到的只能是一个关于被估计

参数的集合,在这个过程中,Cramer-Rao 下界不能刻画噪声的影响,尽管如此,参考文献^[30]中的研究表明这时噪声影响也应是可去除的。

与此同时,偏差误差只在降阶建模时才存在。当观测数据没有被随机噪声污染时,偏差误差本身可用函数逼近论中逼近误差分析的方法描述。其实只要选择足够高的模型阶次 N ,就可以使模型任意接近真实系统。正因如此,控制中所采用的低阶模型所引起未建模动态的界经常可以同样获得,首先用一个高阶的模型逼近真系统,其次以这个高阶模型和所建低阶模型之差近似描述误差。在用有限复杂程度的模型建模时这部分误差本质上是不可消除的,只能得到关于它的变化的界。当观测数据中含有噪声时,刻画偏差误差更加困难。我们只能设想先将噪声的影响去掉后,再用和无噪声观测时一样的手段得到偏差误差的界。

总之,我们由二类误差的性质可以得到这样的结论,随机噪声对系统辨识的影响本质上是可渐近去除的,而未建模动态的影响是固有的,不可去除的,我们只能得到它的界。这些性质启发本文在处理系统辨识中不确定性因素时应区分对待,争取消除噪声的影响,于是我们把发展实用鲁棒辨识方法的出发点放在了如何在各种情形下消除噪声对辨识影响的问题上。这样既可提高传统辨识方法对噪声的鲁棒性,又可以在偏差误差和方差误差同时存在时消除方差误差,精确刻画偏差误差,从而提高有差建模的质量。

§ 1.3 具有不确定性系统辨识的研究和发展

其实,在系统辨识发展的整个过程中,如何对付不确定性因素的影响,始终是一个受到关注的重要问题^{[15],[64],[85]}。可以说,传统的系统参数辨识研究都是围绕着这一问题展开的。不过在传统辨识中着重考虑了随机干扰(噪声)对系统辨识的影响,只是随着