

鲁棒辨识问题评述

冯旭 孙优贤

(浙江大学工业控制技术研究所·杭州, 310027)

摘要: 本文综述了一类新的辨识问题——鲁棒辨识问题的研究进展. 首先介绍了鲁棒辨识问题产生的背景, 然后对各种不同的辨识方法进行了评述, 并指出了各自的特点. 最后总结了今后的研究方向.

关键词: 鲁棒辨识; 鲁棒控制; 自适应控制; 模型不确定性

1 引言

控制就是有目的地修正动力学系统的行为, 以达到预期的目标. 控制问题的解决, 要求能用反映内在物理本质的精确数学术语描述系统的动态规律, 然后运用适当的数学工具求取问题的解, 也就是说, 必须先建模再控制. 但是, 绝大多数系统本身存在着不确定性, 有的甚至本质上是不可完整地认识的, 给建模带来特殊的困难. 幸运的是, 实际系统的“非完整”的数学模型的使用, 未必会成为解决控制问题的真正障碍. 反馈的思想, 之所以会成为控制理论的基石, 根本原因在于能在存在一定程度不确定性的情况下, 达到控制目的^[1].

随着控制要求的提高, 简单的反馈已越来越不能满足解决不确定性问题的需要, 一些新的方法, 如自适应控制^[2~5]、鲁棒控制^[6,7]等应运而生.

自适应控制和鲁棒控制的目的, 都是要解决模型的不确定性问题. 在处理方法上, 两者却有所不同. 自适应控制的基本思想是独立地进行模型参数的辨识和控制器的设计, 控制器参数的调整依赖于模型参数估计的更新. 自适应控制策略对模型不确定性的利用是“被动的”, 在设计控制器时没有把模型的不确定性纳入考虑范围. 对于不确定性信息, 它唯一的企图就是通过辨识器, 把不确定性映射到模型参数空间, 利用模型参数的形式把不确定性确定下来, 并希望在系统发生突变时, 辨识器能够及时察觉, 以模型参数随之改变的形式反映出来, 再相应调整控制器以保证闭环系统的稳定. 已经证明, 自适应控制系统在一定条件下确实能达稳定^[8~10], 但条件过于理想, 如要求无扰动存在、系统的阶不比模型的阶高等. 自从 Rohrs et al 的反例(见[11])提出以来, 自适应控制的鲁棒性问题, 即存在未建模动态、有界扰动、时变特性、失配延时及非线性特性等非理想情况时, 系统的稳定性如何得以保持的问题, 得到人们的充分重视和深入研究^[12~15], 一个基本的结论是持续激励单独不足以保证系统的鲁棒稳定性^[16].

鲁棒控制利用模型不确定性的原则, 与自适应控制策略正好相反. 鲁棒控制对系统不确定性的利用是“主动的”, 可以在设计控制器时尽量地利用不确定性提供的附加信息. 鲁

棒控制问题认为系统的不确定性可用模型集描述,系统的模型并不唯一,可以是模型集里的任一元素.鲁棒控制的目的是设计一个控制器,使得模型集里的任一元素在该控制器作用下都满足一定的性能指标要求.利用模型的不确定性为控制器的设计提供参考,已经有了一些系统的方法^[17~20].

于是,自然产生了如下的

问题 如何从系统的输入输出数据及一定的验前信息,得到体现系统不确定性的模型集估计?我们把这一问题称为鲁棒辨识问题.这里,“鲁棒”并非对辨识算法本身的性能而言,而是指能够为后续的鲁棒控制器的设计服务.

在大多数有关鲁棒控制的文献中,对于鲁棒辨识问题,都是予以回避的,一般认为所需的模型集已通过某种方法事先得到.然而,只有在鲁棒辨识问题得到了真正的解决之后,鲁棒控制理论的价值才能得到充分的发挥.近年来,鲁棒辨识问题已引起人们的极大关注,最近几界美国控制年会(ACC)都有一个专题,讨论“为了控制的辨识”问题,重点就是这里的鲁棒辨识问题.

2 模型集的描述方法

“传统”的辨识问题,模型结构通常事先给定,待确定的只是模型的参数,不直接考虑系统的不确定性,辨识结果是某一准则下最优的单一模型^[21~23].鲁棒辨识,则要求获取待辨识系统的一个模型集估计,保证真实系统落在该模型集内.因此,面临的首要问题就是选择适当的模型集描述方法.针对各种模型集描述,运用不同的分析手段,已发展了许多不同的辨识算法和理论结果.

2.1 参数模型

最自然的想法是利用直接描述系统动态的参数模型,在参数空间里确定一个体现该系统动态(包括不确定性因素)的子集^[24,25].一个明显的好处是可以明确地以具有确定物理意义的模型参数的变化范围直接反映系统的不确定性,但这种方法要求事先对系统有相当的了解,且模型的阶一旦固定,就不能改变.

2.2 非参数模型

时域的脉冲响应和频域的频率响应(Bode 曲线或 Nyquist 曲线),是最基本的非参数模型.由于频率响应具有明确的工程意义,非参数模型的不确定性通常用名义系统的传递函数及其误差界描述,可十分明了地反映出各频段的不确定性^[26~31].不过,在还掌握一些附加信息(如相位信息)的情况下,这样的表示一般过于保守^[32].

2.3 算子模型

算子模型把系统输入到输出的映射关系用算子描述,通常与参数模型或非参数模型结合使用.如与参数模型结合,可写成

$$y = f(\theta, \Delta)u. \quad (1)$$

其中 θ 为模型参数, Δ 表示不确定性.若把对任意输入 u , 都存在 Δ 满足(1), 且有

$$\|\Delta\| \leq 1 \quad (2)$$

的 θ , 看成是系统的可行参数, 那么由于 Δ 的不确定性, 这样的 θ 不唯一, 这就定义了系统的一个可行参数集^[25,33,34]. (2)中, $\|\cdot\|$ 为某种适当定义的范数.这种模型的优点是可以考虑一定程度的非线性因素.

3 参数模型集的构造

参数模型集的构造,都是从一个特定的参数模型出发,进行直接处理. 较有代表性的方法,当属 Kosut 基于辨识的方法^[24]和 Younce et al 结合算子模型的方法^[25].

Kosut^[24]假定模型为

$$y(t) = \frac{b_1 q^{-1} + \dots + b_m q^{-m}}{1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}} L_0(q) u(t) + d(t). \quad (3)$$

这里 $\theta^T = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]$ 为待辨识参数, $L_0(q)$ 为满足一定条件的非结构动态. 通过极小化(3)的一步预测误差, 求出 θ 的最小二乘解 $\hat{\theta}$, 再由 Parseval 定理和 Schwarz 不等式导出参数估计误差的一个界 δ , 构成参数集

$$\Theta = \{\theta: \|\theta - \hat{\theta}\| < \delta\}, \quad (4)$$

并保证真实参数 $\theta_0 \in \Theta$. 可以看出, 估计的最后结果式(4)中, 除包含 θ 的一个最小二乘估计 $\hat{\theta}$ 外, 还包含反映该估计有效性的一个界 δ . 正是这一点, 体现了鲁棒辨识与传统辨识相比的独特之处.

Younce et al^[25]结合算子模型直接构造参数集. 假设模型为

$$G(z) = \frac{B(z) + \Delta(z)D(z)}{1 - A(z)}. \quad (5)$$

待辨识参数 θ 为名义系统模型

$$G_\theta(z) = \frac{B(z)}{1 - A(z)} \quad (6)$$

中多项式 $A(z), B(z)$ 的系数, $\Delta(z)$ 为不确定项, $D(z)$ 可看成是一个滤波器, 事先选择置定. 由(5), (6), 有

$$\Delta(z) = \frac{B(z)}{D(z)} \left(\frac{G(z)}{G_\theta(z)} - 1 \right). \quad (7)$$

上式表明: 对于参数空间的不同的名义系统模型, 有不同的不确定项与之对应. 这意味着把 $G(z)$ 分解成名义模型与不确定项(如式(5)), 是不唯一的; 在存在着不确定性的情况下, 不能希望得到唯一的名义模型. Younce et al 定义理想参数集为

$$S^* = \{\theta: \|\Delta\|_{H_\infty} \leq 1\}, \quad (8)$$

给出了 S^* 的一个椭球形估计 $S[n]$, 并保证 $S^* \subset S[n]$. 值得注意的是, $S[n]$ 具有十分明确的几何意义: 椭球的球心恰好是 θ 的最小二乘解 $\hat{\theta}$. 这里, 椭球形估计的求取, 采用了集合隶属关系辨识算法(Set-Membership Identification Algorithm)^[35, 36]. SM 辨识算法基于式(8)的理想参数集定义, 递推地实现椭球形估计的更新, 计算十分方便.

参数模型集构造方法的有效性, 建立在可用如(3), (5)等模型合理地描述真实系统的基础上. 如果情况确实如此, 这类方法求出的模型集估计能较好地反映系统的动态特性, 由此设计的鲁棒控制器可望具有满意的性能. 然而, 模型类型的假定, 要求对系统有相当深入的了解; 实际存在的系统, 尤其是一些化工过程, 动力学特性十分复杂, 很多变量无法测量, 影响因素严重耦合, 反应机理也不十分明了, 对它们的了解程度不足以建立如(3), (5)等的模型. 这种情况下, 用这类模型描述过程的合理性, 并无丝毫的把握, 得到的模型集估计也必然不是十分可信^[37], 由此设计的鲁棒控制器可能导致很差的结果.

基于此, 非参数模型的鲁棒辨识问题得到了广泛的研究.

4 非参数模型集的构造

非参数模型集的构造,一般都在复频域里进行,要求不仅得到传递函数在虚轴(或单位圆)上的有限点或所有点估计,还要求取一条包络线,保证真实系统为包络线所围.由于连续系统与离散系统的鲁棒控制理论并不平行,对这两类系统的鲁棒辨识,在处理方法上也有较大的不同.

Bai^[30]建议采用一独立的不确定性辨识器直接对真实系统与名义系统模型之差

$$\Delta(s) = G_T(s) - G_0(s) \quad (9)$$

进行估计.考虑到在 $G_T(s)$, $G_0(s)$ 都为有理分式时, $\Delta(s)$ 也为有理分式,采用了有理分式来逼近 $\Delta(s)$. 待逼近的 $\Delta(s)$ 是未知的,但可从真实系统与名义系统在同一输入作用下输出的差间接体现出来.基于使该差为最小的准则,[30]给出了两套分别在 L_2 和 L_∞ 逼近的意义下收敛的辨识算法.值得注意的是,该算法的有效性建立在可用有理分式表示真实系统的传递函数的基础上,而实际系统大多并非如此.

如果对不确定性的所有可能情况都一视同仁,那么最坏但不太可能出现的情况必将使得估计结果过于保守,依此设计的控制器通常不能具备令人满意的性能.基于此考虑,Goodwin et al^[31]从随机嵌入的角度讨论连续系统的鲁棒辨识问题.不同于[30],[31]假设式(9)中的 $\Delta(j\omega)$ 为某一随机过程的实现,即对任一确定的 ω , $\Delta(j\omega)$ 是在某概率空间上的随机变量.随机嵌入的思想,使得在统计意义下估计不确定性对模型的平均影响效果成为可能.[31]给出了

$$E|G_T(j\omega) - \hat{G}(j\omega)|^2 \quad (10)$$

的界估计,这里 E 表示与随机过程 Δ 有关的概率空间上的数学期望, $\hat{G}(j\omega)$ 为最小二乘估计.这种界估计的一个突出的优点是不致于过分保守:小概率事件由于其较小的权重,自然地在(10)式中产生较小的影响,从而使得界估计尽可能地“紧”.但该方法的困难在于如何得到体现不确定性分布的验前信息,因为这类信息的准确程度将直接影响估计结果的有效性.

连续系统的稳定的不确定项,进行采样离散化后,并不总能维持稳定性^[38].因此,离散系统的鲁棒辨识,往往直接从离散模型出发,利用离散的输入输出数据.

Ljung^[39]研究了线性系统的传递函数估计问题.考虑

$$y(k) = h(k) * u(k) + v(k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

[39]讨论了如下称之为 ETFE(Empirical Transfer Function Estimate)的估计

$$\hat{G}_N(e^{j\omega}) = \frac{Y_N(\omega)}{U_N(\omega)} \quad (12)$$

在统计意义下的误差分布特性(如无偏性、收敛性),其中

$$Y_N(\omega) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N y(k) e^{-j\omega k}, \quad 0 \leq \omega < 2\pi \quad (13)$$

为离散 Fourier 变换(DFT).十分重要, [39]证明了 ETFE 是无偏的,且方差与信噪比有关. [39]的结果从理论上证明了基于输入输出数据估计传递函数的可能性.

不同于[39], Parker et al^[28]给出了传递函数估计的确定性误差界. [28]利用 Kalman 滤波器,并基于最小方差准则从输入输出数据递推计算传递函数在单位圆上的 n 个点估

计,然后利用 IDFT 在单位圆上进行插值,求得传递函数 $G(z)$ 的一个 FIR 估计 $\bar{G}(z)$. [28] 还导出了如下误差的 L_∞ 范数界

$$\|G(z) - \bar{G}(z)\|_\infty = \sup_{\omega \in (-\pi, \pi)} |G(e^{j\omega}) - \bar{G}(e^{j\omega})|. \quad (14)$$

这个界的表达式表明,存在一个最优的 n , 使该界为最小. 也就是说,当超过一定值时, n 的增大将使得该界随之增大. 显然,这与我们的直观想法相悖: 因为 n 越大,意味着我们拥有的频域点信息量越多,由此估计的误差界应该越小才是. [28] 认为这是由插值本身的特性引起的. 下节我们将看到,这一悖论可借助于其它辨识方法解决.

LaMaire et al^[29] 采用 FFT 计算传递函数在单位圆上的 n 个点估计. 为了递推计算和更新信息, FFT 只用了输入输出的最新 n 点信息. [29] 还给出了传递函数估计在该 n 点处的确定性误差界,并针对一仿真实例,研究了基于这个界估计来在线调整的控制器的设计方案,对该控制器的控制效果进行了考察. 仿真结果表明,控制效果十分令人满意. [29] 的工作初步揭示了自适应的鲁棒控制器设计方法的诱人前景.

由于传递函数模型工程意义直观明确,现有的鲁棒控制器设计方法更多地都基于这类模型. 在这点上,基于非参数模型的鲁棒辨识算法的研究更为受人重视. 因为鲁棒辨识的目的,最终还是要为鲁棒控制器的设计服务. 不考虑算法的复杂性,理论上讲,如果鲁棒辨识的结果可得到在线的更新,由此设计的鲁棒控制器也能得到在线的调整. 可以预料,这样的“自适应鲁棒控制系统”将比自适应控制系统具有更好的稳定性,也比鲁棒控制系统能更好地适应运行环境的变化. 当然,这里还有一个鲁棒辨识算法的有效性问题: 过于保守的估计将导致控制系统性能的变差,而过于乐观的估计可能会使得控制系统根本不能实现预期的目标.

5 H_∞ 辨识

最近出现的 H_∞ 辨识算法^[40,41], 从全新的角度研究离散系统的鲁棒辨识问题. 它的目的,是基于传递函数在单位圆上的 n 个噪声一致有界的点估计,构造一种辨识算法,使对于噪声与未知系统在最差情况下的 H_∞ 范数辨识误差界,随噪声的消减和 n 的增大而趋于零. 可见,这是一种最差情况下的误差收敛的辨识算法,解决了 [28] 中提出的悖论: 估计误差界随 n 的增大而增大. 并且, H_∞ 辨识问题的描述,十分自然地与 H_∞ 控制理论在最差情况下满足一定性能指标的要求想衔接. 基于这个理由, H_∞ 辨识也被称为“面向控制的辨识”.

[40] 中, Helmicki et al 在单位圆上进行分段线性插值,把辨识误差的 L_∞ 误差界中由噪声和未知系统引起的误差,分离为互不相关的两项. [40] 的分析表明,由于线性插值函数的 Fourier 级数的低次项系数与原始数据的 DFT 系数,只相差一个特定的衰减因子^[42], 线性插值在这里仅仅提供了一个分析工具,在辨识算法的具体实现时并无做插值的必要,这就大大方便了实际计算.

[41] 中, Gu et al 认为 [40] 中由分段线性插值导出的衰减因子起着类似于数学信号处理中窗函数的作用,建议采用不同的窗函数以适应不同情况的需要. Gu et al 利用 Abel 变换^[43], 分析辨识算法的误差特性和鲁棒性. 他们的分析表明: 即使对于鲁棒收敛的辨识算法,辨识误差的减小也存在着一个极限,不能无限进行; 不同窗函数的选取可以反映出不同来源的误差之间的折衷. 他们的结果进一步揭示了 H_∞ 辨识问题的特点: 在由噪声引起

的误差和由逼近造成的误差之间进行折衷。

应该肯定, [40, 41]提出的 H_∞ 辨识具有十分重要的理论意义. 然而, [41]中对原始数据做 DFT 的点数为 $O(n)$, 得到的逼近式的次数也是 $O(n)$, [40]中这两者都为 $O(n^3)$; 对算法的鲁棒性考察, 都着眼于分析 n 趋于无穷时的性态. 因此, 从实用的角度看, 这样的算法计算量过大, 是不可行的. 退一步讲, 当 n 趋于无穷时, 不管是用 FFT 分析的方法, 还是 Helmicki et al 建议的对每一频率点做一次鲁棒频率点估计的实验方法, 来获取传递函数在单位圆上的 n 个点估计, 都是不现实的.

6 结论与展望

鲁棒辨识是一个很新的研究领域, 目前的工作大多处于理论研究阶段. 可见的应用性成果还不多, 仅有 Bayard et al^[44]报道的用在在线的鲁棒频域辨识结果设计鲁棒控制器, 对大型空间结构进行控制的少数几个实例.

就现有的这些方法来看, 各有其特点. 基于参数模型的鲁棒辨识, 与传统的系统辨识理论密切相关, 理论基础完备成熟, 但方法与结果受到所选取模型的限制; 基于非参数模型的鲁棒辨识, 建立在传递函数估计的基础上, 工程意义明确直观, 但往往有过于保守的倾向; H_∞ 辨识的数学描述十分新颖, 理论结果漂亮严谨, 从实用的角度看却不甚理想.

我们认为, 鲁棒辨识问题的完美解决, 应该是一种能与现今成熟的鲁棒控制理论框架紧密衔接的辨识机制: 辨识过程是递推实现的, 辨识结果(名义系统模型及其误差界)可在线得到更新, 控制器可根据辨识结果间歇地进行调整. 这一目标(我们称之为自适应鲁棒控制系统), 从目前的情况看, 还不甚现实, 还有大量的理论问题有待于人们去研究.

我们相信, 朝着这一目标的逼近, 可从研究如下问题着手, 就是搞清在鲁棒辨识与鲁棒控制之间存在着何种形式的折衷关系. 对于一个存在不确定性因素的系统(大多数实际系统都如此), 标准的控制方案是由一辨识器和一控制器组成: 辨识器对其进行辨识, 控制器则基于辨识结果对其进行控制. 当系统运行得较为平稳时, 对辨识器而言, 有效的新的信息量不足以激发出更好的辨识结果, 对不确定性的掌握程度将逐渐减弱, 使控制器的控制效果变差, 从而系统的运行出现波动; 这样一来, 对辨识器有效的激励信息量反而将大大增加, 辨识器又可逐步恢复对不确定性的掌握, 控制器的有效控制又将使得系统的运行恢复平稳. 我们相信这样一种循环往复的过程是在线调整的自适应鲁棒控制系统的特征, 也就是说, 在有效的鲁棒辨识和有效的鲁棒控制之间存在着一定程度的折衷关系. 对这种关系的研究人们还未曾涉足, 我们相信这一问题的澄清将会有助于对辨识和控制之间关系的深入了解.

参 考 文 献

- [1] Bode, W. H.. Feedback Network Analysis. Springer-Verlag, New York, 1945
- [2] Astrom, K. J.. Computer Control of a Paper Machine-an Application of Linear Stochastic Control Theory. IBM J. Res. & Dev., 1967, 11, 389—405
- [3] Astrom, K. J.. Theory and Applications of Adaptive Control; a Survey. Automatica, 1983, 19, 471—486
- [4] Astrom, K. J.. Adaptive Feedback Control. Proc. IEEE, 1987, 75(2), 185—217
- [5] Landau, I. D.. Adaptive Control-the Model Reference Approach. Marcel Dekker, New York, 1979

- [6] Zames, G. . Feedback and Optimal Sensitivity; Model Reference Transformations, Multiplicative Seminorms, and Approximate Inverses. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1981, AC-26;301—320
- [7] Kwakernaak, H. . Minimax Frequency Domain Performance and Robustness Optimization of Linear Feedback Systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1985, AC-30;994—1004
- [8] Edarht, B. . Stability of Adaptive Controllers. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer, Berlin, 1979
- [9] Morse, A. S. . Global Stability of Parameter Adaptive Control Systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1980, AC-25; 433—440
- [10] Narendra, K. S. , Lin, Y. H. and Valavani, L. S. . Stable Adaptive Controller Design-Part II : Proof of Stability. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1980, AC-25;440—448
- [11] Rohrs, C. E. , Athans, M. and Stein, G. Robustness of Continuous-Time Adaptive Control Algorithms in the Presence of Unmodeled Dynamics. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1985, AC-30;881—889
- [12] Narendra, K. S. and Annaswamy, A. M. . Robust Adaptive Control in the Presence of Bounded Disturbances. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1986, AC-31;306—315
- [13] Narendra, K. S. and Annaswamy, A. M. . *Stable Adaptive Systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989
- [14] Kosut, R. L. and Friedlander, B. . Robust Adaptive Control; Conditions for Global Stability. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1985, AC-30;610—624
- [15] Riedle, B. and Kokotovic, P. V. . A Stability-Instability Boundary for Disturbance-Free Slow Adaptation and Unmodeled Dynamics. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1985, AC-30;1027—1029
- [16] Ortega, R. and Tang, Y. . Robustness of Adaptive Controllers-a Survey. *Automatica*, 1989, 25;651—677
- [17] Kimura, H. . Robust Stabilizability for a Class of Transfer Functions. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1984, AC-29; 788—793
- [18] Doyle, J. C. . Structured Uncertainty in Control System Design. *Proc. 24th Conf. on Decision and Control*, 1985, 260—265
- [19] Vidyasagar, M. . *Control System Synthesis; A Factorization Approach*. MIT Press, Cambridge, Mass, 1985
- [20] Francis, B. A. . *A Course in H_{∞} Control Theory*. Springer, New York, 1987.
- [21] Astrom, K. J. and Eykhoff, P. . System Identification-a Survey. *Automatica*, 1971, 7;123—167
- [22] Ekyhoff, P. . *System Identification*. Wiley, New York, 1974
- [23] Ljung, L. . *System Identification; Theory for the User*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987
- [24] Kosut, R. L. . Adaptive Robust Control via Transfer Function Uncertainty Estimation. *Proc. American Control Conference*, 1988;349—354
- [25] Younce, R. C. and Rohrs, C. E. . Identification with Nonparametric Uncertainty. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1992, AC-37;715—728
- [26] Doyle, J. C. and Stein, G. . Multivariable Feedback Design; Concepts for a Classical/Modern Synthesis. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1981, AC-26;4—16
- [27] Lehtomaki, N. A. , Castanon, D. A. , Levy, B. C. , Stein, G. , Sandell, N. R. , Jr. and Athans, M. . Robustness and Modelling Error Characterization. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1984, AC-29;212—220
- [28] Parker, P. J. and Bitmead, R. R. . Adaptive Frequency Response Identification. *Proc. 26th Conf. on Decision and Control*, 1987, 348—353
- [29] LaMaire, R. O. , Valavani, L. , Athans, M. , and Stein, G. . A Frequency-Domain Estimator for Use in Adaptive Control System. *Automatica*, 1991, 27;23—38
- [30] Bai, E. W. . Adaptive Quantification of Model Uncertainties by Rational Approximation. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1991, AC-36;441—453
- [31] Goodwin, G. C. and Salgado, M. E. . Quantification of Uncertainty in Estimation Using an Embedding Principle. *Proc. American Control Conference*, 1989, 1416—1421

- [32] Freudenberg, J. S. and Looze, D. P.. Frequency Domain Properties of scalar and Multivariable Feedback Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, New York, 1988, 104
- [33] Doyle, J. C.. Analysis of Feedback Systems with Structured Uncertainty. IEE Proceedings, Part D, 1982, 129:242-250
- [34] Krause, J. M. and Khargonekar, P. P.. Parameter Identification in the Presence of Non-Parametric Dynamic Uncertainty. Automatica, 1990, 26:113-123
- [35] Fogel, E. and Huang, Y. F.. On the Value of Information in System Identification-Bounded Noise Case. Automatica, 1982, 18:229-238
- [36] Belforte, G., Bona, B. and Cerone, V.. Parameter Estimation Algorithms for a Set-Membership Description of Uncertainty. Automatica, 1990, 26:887-898
- [37] Yuan, Z. D. and Ljung, L.. Unprejudiced Optimal Open Loop Input Design for Identification of Transfer Functions. Automatica, 1985, 21:697-708
- [38] Bai, E. W. and Dasgupta, S.. Uncertainties in Sampled Data Systems. Proc. American Control Conference, 1989, 1446-1451
- [39] Ljung, L.. On the Estimation of Transfer Function. Automatica, 1985, 21:677-696
- [40] Helmicki, A. J., Jacobson, C. A. and Nett, C. N.. Control Oriented System Identification: A Worst-Case/Deterministic Approach in H_∞ . IEEE Trans. Automat. Contr., 1991, AC-36:1163-1176
- [41] Gu, G. and Khargonekar, P. P.. A Class of Algorithms for Identification in H_∞ . Automatica, 1992, 28:299-312
- [42] Henrici, P.. Applied and Computational Complex Analysis, Wiley, New York, 1986
- [43] Zygmund, A.. Trigonometric Series, Cambridge University Press, Cambridge, 1959
- [44] Bayard, D. S., Hadaegh, F. Y., Yam, Y., Scheid, R. E., Mettler, E. and Milman, M. H.. Automated On-Orbit Frequency Domain Identification for Large Space Structures. Automatica, 1991, 27:931-946

A Survey on Robust Identification Problem

FENG Xu and SUN Youxian

(Institute of Industrial Control Technology, Zhejiang University • Hangzhou, 310027, PRC)

Abstract: This paper summarizes the advance in the study of a class of new identification problem, i.e., the robust identification problem. First, the background of the problem is surveyed. Then, several different approaches to tackle the problem, and their merits and shortcomings, are analyzed. Finally, some proposals for further research are made.

Key words: robust identification; robust control; adaptive control; model uncertainty

本文作者简介

冯旭 1968年生。1988年毕业于西北工业大学计算机科学与工程系, 1991年获该校自动控制理论及应用专业硕士学位。现为浙江大学工业控制技术研究so博士研究生。主要研究兴趣为新的辨识算法和控制策略在工业过程控制中的应用。

孙优贤 见本刊1993年第3期第345页。