

文章编号: 1003-7837(2005)04-0063-04

集员辨识综述*

宁志刚^{1,2}, 汪仁煌¹, 谭义¹

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510090; 2. 南华大学电气工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:介绍了集员辨识的相关信息。集员辨识是一种新的辨识方法,在噪声未知但有界的情况下,能确定可能出现的系统参数可行解集。

关键词:集员; 辨识; 综述

中图分类号: TP15

文献标识码: A

目前,研究系统辨识的绝大部分文献都假定系统的噪声是随机分布且满足某种假设,在这种情况下,可以证明估计参数是收敛的。事实上,很难验证实际系统的噪声满足这一假定。这是因为模型类和噪声类型都是人为假定的,在这种情况下所有系统都能通过辨识获得与实际系统非常接近的模型。由于实际系统的噪声是随机的,故我们得到的系统模型与实际系统存在差异。而且,实际系统是非常复杂的,不能用简单的系统模型作为其数学模型。鲁棒控制器是人们根据集员估计器给出的参数或传递函数集合中最不利情况,设计适用于某集合的系统的控制器。在鲁棒控制过程中,控制器必须使存在不确定参数的系统稳定工作。一些鲁棒控制方法要求得到该系统模型相关参数和一些影响模型不确定参数测量值。这些不确定参数可以用一组包含所有可能出现参数变量的可行解集 FSS (Feasible Solution Set) 来表示,这些可行解可以采用集员辨识方法进行辨识。集员辨识只需知道系统噪声的上界,不需要对系统噪声的统计分布特性作假定,这给系统辨识带来巨大的方便。集员辨识作为系统辨识的一种,已成为许多科研单位和院校的研究课题。

1 集员辨识及发展

集员辨识是假设在噪声或噪声功率未知但有界 UBB (Unknown But Bounded) 的情况下,利用数据提供的信息给参数或传递函数确定一个总是包含真参数或传递函数的成员集(例如椭球体、多面体、平行六面体等)。不同的实际应用对象,集员成员集定义也不同。例如,集员成员集可定义为公司职员级别;可定义为电路中不同对象所对应的电流值;可定义为系统故障所对应的系统参数集。集员成员集的具体内容直接关系集员辨识的成败。

集员辨识中系统噪声或观察噪声是非随机的,即假设噪声或噪声功率未知但有界,即满足 UBB 假设。集员辨识的结果不是一个标称值(点),而是一个集合(称为成员集)。在一定的条件下,随着样本容量增大,成员集所包含的范围逐渐缩小。当样本容量趋于无穷时,成员集最终收敛系统的真实参数。在 UBB 假设成立时,真实参数或真实传递函数必属于成员集。集员辨识成员集的边界是确定性的,而不是概率性的,因此这称为硬界(Hard bond)估计。

在 1979 年集员辨识首先出现于 Fogel^[1] 撰写的文献中,1982 年 Fogel 和 Huang 又对其作了进一步的改进^[2]。集员辨识是估计线性系统参数的一类方

收稿日期: 2004-12-02

* 基金项目: 国家自然科学基金(60272051)

作者简介: 宁志刚(1975-),男,湖南衡阳人,讲师,在读博士。

法. 参数集员估计方法主要有外界椭球算法、参数不定区间估计(PIE)算法(或称外界盒子算法)、平行多面体描述算法、精确或限制复杂性多面体描述算法和参数不定区间估计的对偶线性规划法. 集员辨识使线性系统的所有解处于某一确定集内. 这个集合包括所有测量参数值和外在噪声信号集. 外在噪声紧集在许多实例中得到应用, 具有十分重要的现实意义. 最优集 S^* 对应于一个凸多面体, 它是有限数量点的凸集. 常用的凸多面体有椭球体、平行六面体、平行于主轴的长方体和以主轴为对称轴的长方体. 寻找最优集 S^* 的计算复杂、难度大, 许多科研单位和院校对此开展了广泛的椭球体近似值算法研究, 找到了很多递归表达式.

椭球体近似值算法最先出现在文献[2]中, 后来在文献[8]中出现有关这种算法的研究. 1990年, Belfort 等人提出可采用多面体对集员进行研究. 在多数情况下, 平行六面体的解集和椭球体近似值的集合需要通过大量计算才能得到. 文献[17]针对参数成员集的精确多面体描述算法给出了多面体相对容积最大化准则, 文中证明了在噪声渐近独立条件下该选择方法的强相容性. 由于该方法运算比较复杂, 鲁棒性较差, 因而实用比较困难. 文献[8]的椭球体算法被认为是一种典型的最小平方误差化的方法. 具有有限复杂性多面体近似值算法在文献[9]和[10]中给予了说明. 在计算多面体近似值的过程中, 缺乏一种评价近似值域复杂程度和对它进行优化估计的系统标准. 文献[11]给予了一种计算平行六面体近似值的递归程序法, 该方法与椭球体近似值算法计算复杂程序差不多. 文献[1]研究系统噪声在能量约束的情况下系统参数的集员辨识. 文献[3]将文献[1]中的结果推广到多输入多输出(MIMO)系统参数的集员辨识. 文献[4]将最小体积优化算法和最小迹优化算法应用到 MIMO 系统参数的集员辨识, 与文献[3]最小二乘法相比, 该方法具有两点优越性: (1) 给出比最小二乘法更小的参数估计区间和更小包含真参数的椭球. (2) 在参数估计区内, 20%~30%的数据为有用数据, 其余为冗余数据, 减少计算量. 文献[5]给出了双线性系统参数的集员估计递推形式, 并讨论了其收敛性. 文献[6]讨论了具有未建模动态系统的集员辨识, 基于小波变换提出了分频集员辨识, 以获得较精确的模型集估计. 文献[7]应用数理统计中的 Bayes 理论对含有干扰的 CAR 模型参数进行集员辨识, 得到一个大概率

包含参数真值的集合. Jaulin 和 Walter 用区间分析法较好地描述了 FSS 的形状, 这种方法的计算量随着未知参数的增加以及精度要求的提高而迅速增加, 而且这种方法需要预先知道包含函数以及 FSS 的子集^[14]. 文献[15]指出, 找到适当的输入信号, 使得在相同的样本容量下, 辨识得到的椭球在一定意义下最小. 文献[18]对文献[17]中的方法进行了改正, 给出了基于参数集员辨识的重复递推椭球外界算法的一种结构选择准则, 即椭球轴信息阵行列式相对值最大化准则. 由于椭球外界算法具有一定的鲁棒性, 运算简单. 在文献[16]中, 设过程噪声向量和观测向量的元素均匀分布, 用椭球体 E_k 的几何中心作为 k 时刻的点估计, 分别用平行多面体递归状态约束法 ROBP(recursive state bounding by parallelotope)、最小体积法 OBE1(min-volume)、最小迹法 OBE2(min-trace)和 Kalman 法对噪声进行滤波. OBE1 法和 OBE2 法, 比 ROBP 法的滤波效果好, 与 Kalman 法的滤波效果接近.

2 集员辨识数学描述

集员辨识是在输入有效信号和 UBB 假定误差前提下, 估计模型可行集的一种有效方法. 模型可行集的大小是通过最小化可行集价值函数来进行选择. 可行集的大小是根据模型不确定信号向量维数来确定. 该方法数学描述为: 设 $S(u)$ 是系统估计的预定结果, y 是输出量的测量值, 则系统可行解 $FSS = \{S \in K : \|y - S(u)\| \leq \delta\}$, 辨识模型误差的表达式为: $E(G_0) = \sup_{S \in FSS} \|S - G_0\|$, 式中 G_0 为系统传递函数. 根据最大误差 $E(G_0)$ 的值, 即最坏情况, 考察 G_0 能否完全反映系统性能. 在辨识过程中, 系统模型必须简化, 例如降维、线性参数化等. 所以系统典型结构为 $G_0(\theta) = \sum_{i=1}^n B_i \theta_i$, 式中 θ_i 是被定义的基本函数, 定义 μ 为 $G_0(\theta)$ 对应的系统模型集. 根据 $E(G_0)$ 和 $G_0(\theta)$ 表达式, 最佳系统模型的表达式为: $G_0^* = \arg \inf_{G^* \in \mu \in FSS} \sup \|S - G^*\|$. 在实际应用中, 由于寻找满足 G_0^* 最小最大优化问题的准确解法十分困难. 所以, 欠最佳估计器被考虑, 此时 $\theta^* = \arg \inf_{\theta \in K^n} \|y - \sum_{i=1}^n B_i \theta_i u\|$, $G_0(\theta^*)$ 为系统欠最佳传递函数.

3 OBE 算法

在集员辨识中, 约束集常采用椭球体表示. 这是

因为椭球法已经找到了相应的递归算法, 在鲁棒控制设计过程中, 许多设计者希望采用多面体表示不确定集, 但是采用多面体表示约束集, 还没有理想的算法, 故没有被大量采用。椭球体算法采用矩阵乘法, 多面体算法采用线性程序来实现。在诸多集员辨识算法中, OBE 算法是最广泛采用的算法。这类算法的一个主要特征是其辨识结果为参数向量 θ 的成员集 Θ_k 。OBE 算法是在误差未知但有界情况下探讨其收敛性的。

在研究 OBE 过程中, 研究人员得到递归最优椭球算法 ROBE(recursively optimal bounding ellipsoid)和全局优化椭球算法 GOBE(globally optimal bounding ellipsoid)。与 Dasgupta 和 Huang 在 1987 年提出的 ROBE 算法相比, Tan 等人在 1997 年提出的 ROBE 算法计算容易, 收敛速度快。基于 ROBE 算法的 GOBE 算法适合系统预测。神经网络算法采用 GOBE 后, 实时性能更佳。

OBE 算法可用数学表达式来说明。 $y_k = \Phi_k^T \theta + e_k$, $\|e\|_\infty \leq \delta$, 其中 e_k 是测量噪声, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$ 是待估计参数向量, 而 $y_k \in R$, $\Phi_k \in R^n$ 是第 k 时刻可得到的观测数据。 θ 的先验知识是属于空间 R^n 的一个子集 Θ_0 , $\theta \in \Theta_0 = \{\theta : \theta^T P_0^{-1} \theta \leq 1; \theta \in R^n\}$ 。第 k 时刻子集为 Θ_k , $\Theta_k = \{\theta : (\theta - \theta_k)^T P_k^{-1} (\theta - \theta_k) \leq \sigma_k^2; \theta \in R^n\}$, 寻找这个 Θ_k 就是集员辨识算法。其中, P_k , θ_k 和 σ_k 由递推算法求得。 k 时刻观测参数集定义为 $S_k = \{\theta \in R^n : |y_k - \Phi_k^T \theta| \leq \delta\}$, k 时刻待估计参数集的集合定义为 $\theta_k \in \Theta_k$, $\bigcap_{i=1}^k S_i$, 则 $\max\{|y_i|^2, \|\Phi_i\|^2\} \leq M$, 其中 M 为大于 0 的常数。

4 自适应鲁棒控制器

集员辨识 SMI(set membership identification)、随机嵌入 SE(stochastic emedding)和模型误差建模 MEM(model error modeling)是鲁棒辨识的三种有效方法。随机嵌入法和模型误差建模法属于统计方法范畴, 集员辨识则是在 UBB 误差假定前提下得到的方法。在实际应用中, 采用集员估计器的自适应鲁棒控制器主要包括以下两个部分, (1)集员估计器: 它能识别每一个时间 k 对应的可行最优参数集, 提供紧的不确定参数集。(2)鲁棒控制器: 它能稳定系统和优化一些价值函数。该控制器必须与集员估计器识别不确定参数的速度同步, 它能够有效使用集员

辨识数据。图 1 是采用集员估计器和鲁棒控制器的离散线性时变系统。

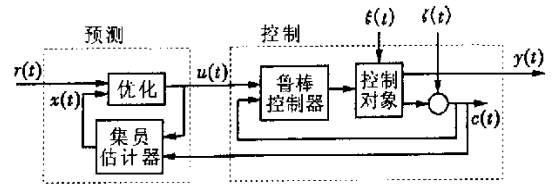


图 1 离散线性时变系统

Fig. 1 Discrete-time, linear, time-invariant system

在系统中, $r(t) \in R^n$ 是输入信号, $x(t) \in R^n$ 是中间状态向量, $y(t) \in R^n$ 是能够测量的输出信号, $\xi(t)$ 和 $\zeta(t)$ 是干扰信号, $c(t) \in R^n$ 是约束向量, 它满足集合 $C = \{c; A_c \leq B\}$, 则整个闭环系统的表达式如 (1)~(3) 式。

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + \xi(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + \zeta(t) \quad (2)$$

$$c(t) = Ex(t) + Gu(t) + L\zeta(t) \quad (3)$$

5 应用及前景

集员辨识理论已广泛应用到多传感器信息融合处理、软测量技术、通讯、信号处理、鲁棒控制及故障检测等方面。在实际应用中, 飞行器系统是一个较复杂的非线性系统, 噪声统计分布特性难以确定, 要较好地描述未知参数的可行解, 用统计类的辨识方法辨识飞行器气动参数很难达到理想效果。采用集员辨识可解决这种问题。先用迭代法给出参数的中心估计, 然后对参数进行集员估计(即区间估计)。这种方法能处理一般非线性系统参数的集员辨识, 已成功应用于飞行器气动参数的辨识^[12]。当系统数学模型精确已知, 模型参数具有明显的物理意义或者物理参数具有明确的对应关系时, 一般的辨识方法能够快速有效地进行故障检测与隔离(FDI)。然而实际系统复杂, 所建数学模型的未建模动态和统计特性未知噪声的存在, 常用的参数辨识方法不能达到故障检测与隔离的效果, 采用集员辨识则能达到较好的效果。所给检测方法可快速且有效地检测出传感器故障、参数跳变故障和参数缓变故障等。该方法具有一定的适用性, 它不需要知道数学模型参数的先验信息, 未建模动态和未知噪声均可当作有界误差来处理^[13]。

常规辨识法不能解决辨识中的许多已出现的问

题. 集员辨识、集成辨识方法(IIM)、辨识误差的边界估计等方法构成了新一代辨识理论. 新一代辨识理论更适应鲁棒控制的发展.

集员辨识在 20 世纪 90 年代重新得到重视. 它的辨识参数范围更广泛,除了数量因子参数外,还有质量因子参数. 当然,数量因子参数的辨识仍旧是一个重要辨识因素. 集员辨识的研究方兴未艾,其中包括大量的理论和应用问题. 例如,小波变换分频集员辨识方法,能够获得较精确的模型集估计,但是有关小波选择和模型集估计精度的关系还有待研究^[6]. 根据数理统计中 Bays 原理,文献[7]给出了一种集员辨识方法,但该方法受随机干扰分布的限制,具有一定的局限性. 在集员辨识的研究中,对线性系统研究较多,对非线性系统研究较少. 而在实际应用中,大多数系统呈现为非线性. 集员辨识的成员集如何确定,直接影响集员辨识的结果. 另外,集员辨识的递归算法以及最小成员集的边界如何确定还有待进一步研究,恰当的递归算法和最小成员集的边界,可以使计算简化. 这样就可以快速地找到包含真实参数或传递函数的最小成员集(如包含系统真实参数的最小椭球体)的方法. 所以,集员辨识还有许多问题值得我们研究.

参考文献:

- [1] Fogel E. System identification via membership set constraints with energy constrained noise IEEE[J]. Transactions, Automatic Control, 1979,24(5):752-758.
- [2] Fogel E, Huang Y F. On the value of information in system identification-bounded noise case[J]. Automatica, 1982,18(2):229-238.
- [3] 袁震东,徐桥南. 多输入多输出系统的集员辨识[J]. 控制理论与应用, 1994,11(4):404-412.
- [4] 王文正,袁震东. MIMO 系统参数的集员辨识的优化计算[J]. 控制理论与应用, 1997,14(3):402-406.
- [5] 李代甜,袁震东. 双线性系统参数的集员辨识[J]. 控制与决策, 1994,9(5):321-326.
- [6] 徐长江,宋文忠. 基于小波变换的分频集员辨识[J]. 控制与决策, 1999,14(1):48-52.
- [7] 李勇智,周建忠. 离散线性系统参数的集员辨识[J]. 江苏理工大学学报, 1997,18(5):93-96.
- [8] Deller J J R, Nayri M, Oden S F. Least-square identification with error bounds for real-time signal processing and control[J]. Proceedings of the IEEE, 1993,81(6):815-849.
- [9] Broman V, Shensa M. A compact algorithm for the intersection and approximation of n-dimensional polytopes [J]. Comput Simulation, 1990,32(8):69-480.
- [10] Bauser P H, Premarature K, Duran J. A necessary and sufficient condition for robust asymptotic stability of time-varient discrete systems[J]. Automatic Control, 1993,36(9):571-592.
- [11] Vicino A, Zappa G. Sequential approximation of feasible parameter sets for identification with set membership uncertainty[J]. Automatic Control, 1996,41(9):774-785.
- [12] 王文正,蔡金狮. 飞行器气动参数的集员辨识[J]. 宇航学报, 1998,19(2):31-36.
- [13] 孙先仿,范跃祖,宁文如. 故障检测的集员辨识方法[J]. 航空学报, 1998,19(3):371-374.
- [14] Jaulin L, Walter E. Set inversion via interval analysis for nonlinear bounded error estimation[J]. Automatica, 1993, 1053-1064.
- [15] 岳振军. 集员辨识的最优输入设计[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001,2(2):96-98.
- [16] 何青,王耀南,姜燕,等. 基于 OBE 的自适应集员状态估计[J]. 自动化学报, 2003, 29(2):312-317.
- [17] Veres S M, Norton J P. Structure identification for bounded-parameter models: consistency conditions and selection criterion[J]. IEEE Trans Autom Control, 1991, AC-36(4):474-481.
- [18] 孙先仿,范跃祖,宁文如. 有界误差模型的一种结构辨识方法[J]. 自动化学报, 1999, 25(2):242-246.

Survey of set membership identification

NING Zhi-gang^{1,2}, WANG Ren-huang¹, TAN Yi¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China; 2. College of Electrical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China)

Abstract: The information concerning set membership identification is introduced in the paper. Set membership identification is one of new identification ways. The impossible feasible solution set of the system can be ensured under unknown but bounded disturbances.

Keywords: set membership; identification; survey