

文章编号: 1001-506X(2004)01-0083-04

基于模糊内模的自适应控制算法的并行处理

刘瞰东¹, 钟 诚², 宋 健³, 漆随平⁴, 方廷健⁵

- (1. 厦门大学自动化系, 福建 厦门 361005; 2. 广西大学计算机与信息工程学院, 广西 南宁 530004;
3. 兰州理工大学现代网络教育学院, 甘肃 兰州 730050; 4. 浙江大学控制科学与控制工程学系,
浙江 杭州 310027; 5. 中国科学院合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对非线性系统, 在 PRAM 计算模型上, 探讨基于模糊内模自适应控制算法的并行处理。利用 TSK 建模方法, m 个处理器并行地在线辨识出模糊内部模型, 并采用内模控制理论并行求出 H_2 最优控制器。仿真实验表明, 并行处理方法达到亚线性加速, 可以较好地满足实时在线辨识内部模型的应用需求。

关键词: 模糊辨识; 自适应控制; 并行处理

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Parallel processing for adaptive control algorithm based on fuzzy internal model

LIU Tun-dong¹, ZHONG Cheng², SONG Jian³, QI Sui-ping⁴, FANG Ting-jian⁵

(1. Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. College of Computer and Information Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Network Education College, Lanzhou University of Science & Technology, Lanzhou 730050, China;

4. Department of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

5. Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Based on PRAM computing model, the parallel processing for adaptive control algorithm based on fuzzy internal model, which aimed at nonlinear system, is discussed. By applying TSK-modeling scheme, the m processors identify fuzzy internal model on-line and design linear quadratic optimal (H_2) is obtained in parallel by using the internal model control theory. The simulation experiment shows that the parallel processing method obtains sub-linear speedup, and the requirement for real-time identification of internal model on-line is basically satisfied.

Key words: fuzzy identification; adaptive control; parallel processing

1 引言

1982年, Garcia 和 Morari 建立了内模控制理论^[1], 提出两步控制器设计方法。由于其原理简单, 鲁棒性和控制性能可直接调整, 参数整定直观明了, 因而引起控制界的广泛关注。内模控制器设计的首要任务是建立对象的模型。系统建模方法大致分为3类: 传统建模^[2], 模糊建模^[3-7], 和神经网络建模^[8,9]。近年来, 模糊辨识建模方法逐步成为模糊逻辑理论研究的新热点, 其辨识方法主要有模糊语言辨识, 模糊关系辨识, TSK 辨识等。由于这些方法基本上是离线进行的, 因此辨识速度难以满足实时控制的需要。本文引入并行算法的理论^[10]和动态数据结构的思想^[11], 基于并行随机存取机器(PRAM)计算模型, 利用 TSK 建模方法, 使用 m 个处理器并行地在线辨识出模糊内部模型, 并利用内模控制理论并

行求得 H_2 最优控制器。

2 基于内部模型的 H_2 最优控制器设计

针对 IMC 控制器的设计, Morari 和 Zafiriou 给出了一个两步设计过程^[12], 它可以对最优解给出一个较好的工程逼近。首先忽略存在的模型不确定性, 选择 \hat{q} 使标称性能 H_2 最优; 其次引入一个低通滤波器 f 使 $q = \hat{q} * f$, 逐渐调节 f 使控制器在系统性能和鲁棒性之间取得折衷。图 1 为单输入单输出内模控制结构, 输入与输出的传递函数为

$$y = \frac{pq}{1+q(p-\hat{p})}r + \frac{1-\hat{p}q}{1+q(p-\hat{p})}d \quad (1)$$

图中 y 为被控对象输出量, u 为控制器输出量, r 为给定输入量, \hat{y} 为被控对象数学模型输出量, d 为外部不可测干扰量, p 为被控对象, \hat{p} 为内部模型, \hat{q} 为内模控制器。

收稿日期: 2002-11-14; 修回日期: 2003-06-23。

作者简介: 刘瞰东(1970-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为智能信息处理与控制。All rights reserved. <http://www.cnki.net>

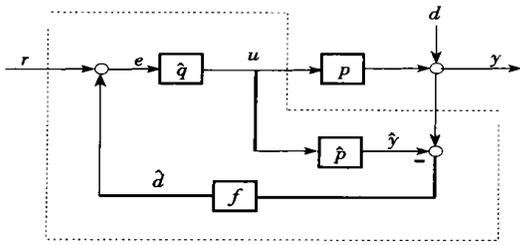


图1 内模控制结构

2.1 线性二次(H₂-)最优控制器

最优控制器的选取应使误差的二次积分最小

$$\min_{\hat{q}} \|e\|_2 = \min_{\hat{q}} \|(1 - \hat{p}\hat{q})v\|_2 \quad (2)$$

要使式(2)为零, 控制器应选取为内模的逆。

$$\hat{q} = \frac{1}{\hat{p}} \quad (3)$$

此时, 完全控制得以实现, 即

$$e(t) = 0 \quad \forall r, d, t \quad (4)$$

显然, 只有在对象可逆时, 完全控制才可实现。对于最小相位系统, 模型的逆存在且可实现; 而对于非最小相位系统, 模型的逆不稳定^[1], 因而闭环系统的稳定性得不到保证。

为解决上述问题, 假设 \hat{p} 是稳定的, 将 \hat{p} 分解为两部分

$$\hat{p} = \hat{p}_A \hat{p}_M \quad (5)$$

式中: \hat{p}_A 包括 \hat{p} 的所有右半平面零点和时延, 而 \hat{p}_M 是 \hat{p} 的最小相位部分, 通常 \hat{p}_A 也可表示为如下形式

$$\hat{p}_A(s) = e^{s\tau} \prod_i \frac{-s + \zeta_i}{s + \zeta_i^H} \quad \text{Re}(\zeta_i), \tau > 0 \quad (6)$$

同样, 将输入 v 分解为两部分。

$$v = v_A v_M \quad (7)$$

因而最优控制器 \hat{q} 可由式(8) 求解, 证明见文献 [2]。

$$\hat{q} = (\hat{p}_M v_M)^{-1} \{ \hat{p}_A^{-1} v_A \} \quad (8)$$

式中: 操作符 $\{ \cdot \}^*$ —— 运算对象展成部分分式后, 省略包含 \hat{p}_A^{-1} 极点的所有项后的部分。通常情况下, 最优控制器 \hat{q} 为非真分有理式, 这可通过 IMC 设计过程的第二步(低通滤波器的设计) 得到解决。

2.2 IMC 滤波器

为了减小内模控制对建模误差的敏感性, 提高系统的鲁棒性, 通常需要在反馈回路中引入低通滤波器 f , 使得 $q = \hat{q} * f$, 如图 1 所示。原则上, 滤波器 f 的结构和参数的选择将使得最优控制在系统性能和鲁棒性之间取得折衷; 为简化设计, 一般只定义滤波器中有一个参数 λ ; 逻辑上, f 的选取应使闭环系统达到渐近稳定的跟踪特性。

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (9)$$

由于滤波器 f 的存在, 内模控制闭环系统特征方程式为

$$1 + \hat{q}f(p - \hat{p}) = 0 \quad (10)$$

对于给定的模型与对象的失配, 可以通过选择 f 使得方程式(10)的所有根都在单位圆内。

3 PRAM 并行计算模型

PRAM 是一种共享存储器的并行计算模型, 系统中 m 个处理机可以异步并发地执行进程以完成计算功能, 处理机之间的通信通过共享存储器交换数据来实现^[10], 如图 2 所示。

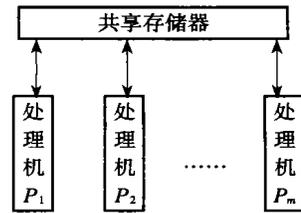


图2 PRAM 机器模型

4 基于模糊内模的自适应控制的并行处理

将一组模糊规则构成的模糊模型作为非线性对象的内部模型, 每条模糊规则表示一个局部线性系统, 每个局部系统由一个处理机利用 TSK 模型的参数辨识方法进行在线辨识。在模糊辨识过程中, 每个处理机调整其对应的局部系统的参数到最优值, 使模糊模型的输出能够自适应跟踪对象输出。针对每一个局部线性系统, 利用 H_2 最优控制器设计一条最优模糊规则, 所有 m 个处理机处理的模糊规则构成 H_2 最优模糊控制器, 如图 3 所示。

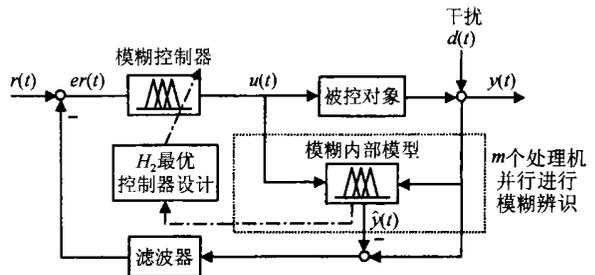


图3 基于模糊内模的自适应控制并行处理系统

4.1 模糊模型的在线并行辨识

模糊内部模型既可采用智能化的模糊预估器来实现^[13], 又能通过模糊辨识方法获得。Takagi 和 Suge-no 于 1985 年提出了模糊线性函数模型^[5], 对非线性对象进行模型参数的离线辨识。1999 年 Xie W F 等针对 SISO 系统提出一种串行的模糊辨识算法^[7]。本文提出一种基于 TSK 模糊辨识的并行处理方法, 如图 4 所示。

其中, 处理机 P_i 处理第 $(i-1) \lfloor \frac{n}{m} \rfloor + 1 \sim i \lfloor \frac{n}{m} \rfloor$ 个局部子系统, $i = 1 \sim (m-1)$; 处理机 P_m 处理第 $(m-1) \lfloor \frac{n}{m} \rfloor + 1 \sim n$ 个局部子系统。

4.1.1 模糊模型

非线性系统的模糊模型描述如下

$$R^l: \text{if } u(t) \text{ is } A^l \text{ and } y(t) \text{ is } B^l \text{ then}$$

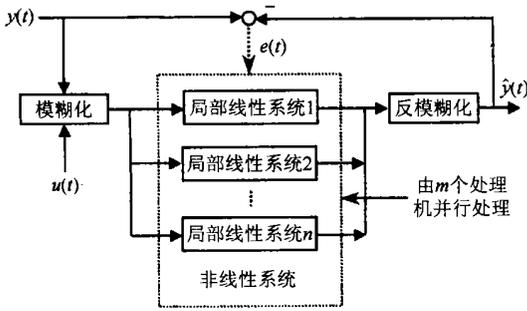


图 4 模糊在线并行辨识

local system l output $\hat{y}^l(s) = p^l(s) * u(s)$

式中: $P^l(s)$ ——第 l 个局部线性系统传递函数。传递函数序列 $\hat{p}^l(s)$ 构成模糊动态模型 ($1 \leq l \leq n$)。这样整个非线性系统的辨识问题转化为线性传递函数的辨识问题。 $p^l(s)$ 的形式为

$$p^l(s) = \frac{\hat{y}^l(s)}{u(s)} = \frac{b_n^l s^{n-1} + b_{n-1}^l s^{n-2} + \dots + b_1^l}{s^n + a_n^l s^{n-1} + a_{n-1}^l s^{n-2} + \dots + a_1^l} \quad (11)$$

为了辨识上式参数, 要求输入输出的高阶导数存在, 故引入 n 阶 Hurwitz 多项式。

$$\chi(s) = (s + \lambda)^n = s^n + \lambda_n s^{n-1} + \dots + \lambda_1 \quad (12)$$

由式(11)和式(12)容易推导出第 l ($1 \leq l \leq n$) 个局部线性系统输出表达式

$$\hat{y}^l(s) = \frac{\beta^l \varphi(s)}{\chi(s)} u(s) + \frac{\alpha^l \varphi(s)}{\chi(s)} y(s) \quad (13)$$

式中: $\varphi(s) = [1 \ s \ \dots \ s^{n-1}]^T$, $\beta^l = [b_1^l \ b_2^l \ \dots \ b_n^l]$, $\alpha^l = [\lambda_1 - a_1^l \ \lambda_2 - a_2^l \ \dots \ \lambda_n - a_n^l]$ 。为讨论方便, 取 $\theta^l = [\beta^l, \alpha^l] \in R^{2n}$ 。因此, 第 l ($1 \leq l \leq n$) 个局部线性系统模糊规则可表示为

R^l : if $u(t)$ is A^l and $y(t)$ is B^l then

local system l output is

$$\hat{y}^l(t) = \beta^l W^{(u)}(t) + \alpha^l W^{(y)}(t) = \theta^l W^T(t) \quad (14)$$

式中: $W^T(t) = [W^{(u)}(t) \ | \ W^{(y)}(t)]^T \in R^{2n}$, θ^l ——待辨识参数。

4.1.2 并行模糊辨识

模糊模型可以近似表达非线性对象, 模糊模型的在线辨识问题也就可转化为由第 i 个处理机对第 l 个局部线性系统模型在线辨识问题, 即参数向量 θ^l 的在线最优求解问题

$$l = (i - 1) \left[\frac{n}{m} \right] + 1 \sim i \left[\frac{n}{m} \right], \quad i = 1 \sim m$$

完成各子系统的并行在线辨识之后, 下一步的工作是将子解组合成整个系统的解。采用输出误差的平方来表示性能指标, 对于第 l 个局部线性系统有

$$\begin{aligned} j(\theta^l) &= e^2(\theta^l) = \\ &= (y^l(t) - \hat{y}^l(t))^2 = \\ &= (\theta^l - \theta^{*l})(\theta^l - \theta^{*l})^T W^T(t) W(t) = \\ &= \theta \theta^T * W^T(t) W(t). \end{aligned} \quad (15)$$

在线辨识的目标为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \theta^l = \theta^{*l} \quad \text{即} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| = 0 \quad (16)$$

故

$$\frac{\partial j(\theta^l)}{\partial \theta^l} = \frac{\partial ((e^2 \theta^l))}{\partial \theta^l} = 2e(\theta^l) \frac{\partial ((e^2 \theta^l))}{\partial \theta^l} = 2e(\theta^l) * W(t) \quad (17)$$

要使性能指标 j 为最小

$$\dot{\theta}^l = -k * e^l(t) * W^T(t), \quad k > 0 \quad (18)$$

式中: k ——常数, $l = 1, 2, \dots, n$ 。显然, 辨识参数 θ^l 可以根据对象输入输出测量值在线计算得到。

采用单值模糊化、乘积推理以及中心平均反模糊化方法, 容易求出整个非线性系统的输出

$$\hat{y}(t) = \frac{\sum_{l=1}^n \mu_V(\hat{y}^l(t)) * \hat{y}^l(t)}{\sum_{l=1}^n \mu_V(\hat{y}^l(t))} \quad (19)$$

$$\mu_V(\hat{y}^l(t)) = \mu_{A^l}(u(t)) \mu_{B^l}(y(t)) \quad (20)$$

将式(19)简化成式(21), 它表示模糊模型输出与非线性对象输入输出值之间的关系

$$\hat{y}(t) \sum_{l=1}^n p^l * \hat{y}^l(t) = \sum_{l=1}^n p^l * \theta^l W(t) = P * \Theta * W(t) \quad (21)$$

式中:

$$p^l = \frac{\mu_V(\hat{y}^l(t))}{\sum_{l=1}^n \mu_V(\hat{y}^l(t))} \quad (22)$$

$$P = [p^1 \ p^2 \ \dots \ p^n] \in R^n \quad (23)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \\ \vdots \\ \theta^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_2^1 & \dots & b_n^1 & \lambda_1 - a_1^1 & \dots & \lambda_n - a_n^1 \\ b_1^2 & b_2^2 & \dots & b_n^2 & \lambda_1 - a_1^2 & \dots & \lambda_n - a_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1^n & b_2^n & \dots & b_n^n & \lambda_1 - a_1^n & \dots & \lambda_n - a_n^n \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: Θ ——整个非线性对象的待辨识参数。

4.2 并行 H_2 最优控制器设计

在线辨识得到被控对象的模糊模型后, 根据 H_2 -最优控制器设计原则, 每个局部线性系统的最优控制器的选取应使误差的二次积分最小

$$\min_{\hat{q}} \|e^l\|_2 \min_{\hat{q}^l} \|(1 - p^l \hat{q}^l)\|_2 \quad (25)$$

如果被控对象为非最小相位系统, 模型的逆不稳定, 故将 p^l ($1 \leq l \leq n$) 分解为两部分

$$p^l = p_A^l p_M^l \quad (26)$$

p_A^l 包括 p^l 的所有右半平面零点和时延, 而 p_M^l 是 p^l 的最小相位部分。由 4.2.1 节和 4.2.2 节分析可知

$$\hat{q}^l = \frac{1}{p_M^l} f \quad (27)$$

式中: f ——IMC 滤波器。

$$f = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (28)$$

由图 3 可知, 任意一条控制规则可以表示为

$$\begin{aligned}
 & C^l: \text{if } u(t) \text{ is } A^l \text{ and } y(t) \text{ is } B^l \text{ then} \\
 & \text{controller signal of the local system } l \text{ is} \\
 & \hat{u}^l(s) = \hat{q}^l(s) * e^l(s) \\
 & = \frac{1}{p_M^l(s)} f(s) * e^l(s) \\
 & = \frac{1}{p_M^l(s)(\lambda s + 1)^n} (r(s) - e^l(s)) \\
 & = \frac{1}{p_M^l(s)(\lambda s + 1)^n} (r(s) + y^l - y^l(s)) \quad (29)
 \end{aligned}$$

这样, 并行模糊控制器由所有控制规则 C^l 组成, $l = 1 \sim n$. 因为 C^l 与 R^l 的蕴涵关系一致, 所以利用单值模糊化、乘积推理以及中心平均反模糊化方法, 同样可以得出模糊控制器的输出

$$u(t) = \frac{\sum_{l=1}^n \mu_{V^l}(\hat{u}^l(t)) * \hat{u}^l(t)}{\sum_{l=1}^n \mu_{V^l}(\hat{u}^l(t))} = \sum_{l=1}^n p^l * \hat{u}^l(t) \quad (30)$$

式中:

$$\mu_{V^l}(\hat{u}^l(t)) = \mu_{A^l}(u(t)) \mu_{B^l}(y(t)) \quad (31)$$

$$p^l = \frac{\mu_{V^l}(\hat{u}^l(t))}{\sum_{l=1}^n \mu_{V^l}(\hat{u}^l(t))} = \frac{\mu_{V^l}(y^l(t))}{\sum_{l=1}^n \mu_{V^l}(y^l(t))} \quad (32)$$

5 仿真实验

选择蒸汽型热交换器为被控对象。设热交换器出口水温与蒸汽流量的传递函数为

$$p(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{3 \cdot 5e^{-3s}}{10s + 1} \quad (33)$$

应用并行 Pascal 语言^[14, 15] 编程对基于模糊内模的自适应控制并行处理进行了数字仿真实验。并行处理所需的运行时间与串行处理所需的时间如图 5 所示, 其相应的加速比如图 6 所示。

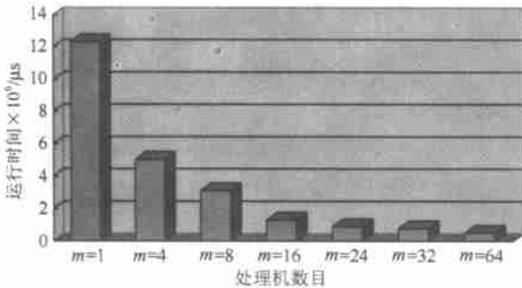


图 5 基于模糊内模的自适应控制串/并行处理系统的仿真实验时间

图 5 和图 6 中 $m=1$ 的情形表示通常的串行处理。从图 5 可以看到, 使用的处理机数目越多, 整个处理过程所需的时间也相应地减少。而图 6 表明并行处理只达到亚线性加速而没有达到理想的线性加速, 究其原因主要是系统各处理机之间花费了一定的时间进行通信。

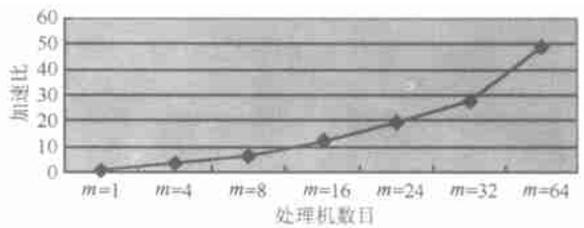


图 6 基于模糊内模的自适应控制并行处理的加速比

6 结束语

本文利用 TSK 建模方法, 引入并行算法的理论, 探讨在共享存储器的并行计算模型上并行地对模糊内部模型进行在线辨识, 并利用内模控制理论并行求出 H_2 最优控制器。然后, 针对非线性对象的自适应实时控制问题, 进行仿真实验, 结果表明, 并行处理方法可以达到亚线性加速, 能够较好地满足实时在线辨识及控制的需求。

参考文献:

- [1] Garcia C E, Morari M. Internal Model Control. 1. A Unifying Review and Some New Results[J]. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 1982, 21(2): 308-323.
- [2] Johansson R. System Modeling and Identification[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [3] Zadeh L A. The Concept of A Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning[J]. Inform.Sci., 1975, 8(4): 199-257.
- [4] Czogala E, Pedrycz W. On Identification in Fuzzy Systems and Its Applications in Control Problems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1981, 6(1): 73-83.
- [5] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control[J]. IEEE Trans. on Systems, Man, Cybernetics, 1985, 15(1): 116-132.
- [6] Cao S C, Rees N W. Identification of Dynamic Fuzzy Models[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 74(3): 307-320.
- [7] Xie W F, Rad A B. Fuzzy on-line Identification of SISO Nonlinear Systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1999, 107(3): 323-334.
- [8] Bha N, Mcavoy T J. Use of Neural Nets for Dynamic Modeling and Control of Chemical Process Systems[J]. Comput. Chem. Eng., 1990, 14(4): 573-583.
- [9] Jang J S R, Sun C T. Neuro-Fuzzy Modeling and Control[J]. Proc. IEEE, 1995, 83: 378-406.
- [10] 陈国良. 并行算法的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [11] 钟诚. 基于映射和二分树的动态查找算法及程序[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 19(5): 51-52, 68.
- [12] Morari Manfred, Zafiriou Evangelos. Robust process Control[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- [13] 刘敬东, 杨智, 方廷健. 一种新的模糊内模预估控制器及应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 607-610.
- [14] Lester B P. The Art of Parallel Programming[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [15] 钟诚. 并行程序设计与实践[J]. 计算机与数字工程, 1994, 22(5): 14-16, 36.