

文章编号: 1001-0920(2004)06-0647-04

## 一类串联生产过程的分布式解耦预测控制

陈庆, 李少远, 席裕庚

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

**摘要:** 研究一类由多个子过程串联而成的生产过程的预测控制, 提出了在分布式通信模式下的预测控制算法. 该算法由两部分组成: 一部分利用其他子过程在上一时刻的控制策略, 对子过程间的弱耦合进行前馈补偿; 另一部分通过顺序求解对强耦合进行解耦控制. 在线性无约束情况下, 得到了分布式解耦动态矩阵控制律. 最后通过仿真验证了算法的有效性.

**关键词:** 多变量预测控制; 分布式模型预测控制; 解耦控制; 串联过程

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Distributed decoupling predictive control of a kind of cascade processes

CHEN Qing, LI Shaoyuan, XI Yurong

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: CHEN Qing, E-mail: king@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** A model predictive control of a kind of cascade processes, which is made up of several sub-processes, is studied. A decoupling predictive control algorithm in distributed communication mode is proposed. The algorithm is composed of two parts. One is forward compensation for the weak interaction using the control strategy of the previous time. The other is decoupling control for the strong interaction by sequential solving control action for each sub-process. Distributed decoupling dynamic matrix control strategy is obtained for linear unconstrained systems. Simulation results show the efficiency of the algorithm.

**Key words:** multivariable predictive control; distributed model predictive control; decoupling control; cascade process

### 1 引言

在炼钢、轧钢、造纸等生产过程中, 钢的成分、钢板的厚度和板型、纸张质量等最终目标, 往往不是过程物理量的直接反映, 而是经历了一系列过程控制后的最终结果. 这类控制问题其实质仍是多变量控制. 本文研究的串联生产过程, 各子过程在空间上依次相连. 由于工艺的原因, 各子过程间的耦合在空间方向上的强弱不同, 沿一个方向的耦合较强, 沿相反

方向的耦合较弱. 如在步进式加热炉温度控制系统中, 燃气从均热段向预热段流动, 使得这个方向上的耦合占主导地位.

本文研究这类串联生产过程的预测控制问题. 对于多变量预测控制的研究, 已取得了许多成果<sup>[1~3]</sup>. 传统的做法是将系统作为一个整体进行多步预测, 对未来控制增量序列进行集中优化. 这种控制算法的不足之处是待调参数选取复杂, 计算量过

收稿日期: 2003-06-09; 修回日期: 2003-08-11.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(69934020); 高等学校博士点专项科研基金项目(20020248028).

作者简介: 陈庆(1975—), 男, 福建平潭人, 博士生, 从事预测控制、大系统优化控制的研究; 席裕庚(1946—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、智能机器人等研究.

大. 杜晓宁等<sup>[3]</sup>提出了基于纳什最优的分布式预测控制算法, 但需通过多次信息交换进行迭代计算, 通信量和计算量都较大.

针对串联生产过程在空间上耦合强弱不同的特性, 本文设计了分布式解耦预测控制算法: 子过程间通过分布式通信获得历史控制增量信息, 对弱耦合进行前馈补偿; 通过依次求解控制律对子过程间的强耦合进行解耦控制. 这种控制结构大大减小了计算量和通信量, 并增强了参数设计的灵活性.

### 2 一类串联生产过程

如图 1 所示, 串联生产过程由  $n$  个子过程构成, 这  $n$  个子过程在空间上依次相连. 在箭头所指的方向上, 各子过程间存在强耦合; 在箭头的反方向上, 各子过程间的耦合相对较弱.

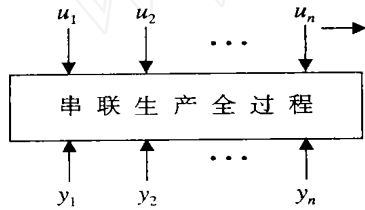


图 1 串联生产全过程

串联生产过程内部各子过程间存在耦合, 从整体上看, 是一个多变量生产过程. 用传递函数描述该多变量系统, 有

$$\begin{bmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \\ \dots \\ y_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & \dots & G_{1n}(s) \\ G_{21}(s) & \dots & G_{2n}(s) \\ \dots & \ddots & \dots \\ G_{n1}(s) & \dots & G_{nn}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \\ \dots \\ u_n(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $G_{ij}$  表示子过程间的弱耦合. 符号  $\rightarrow$  是为区分箭头方向上的强耦合, 说明该耦合项传递函数增益较弱. 对于第  $i$  个子过程, 有

$$y_i(s) = G_{i1}(s)u_1(s) + \dots + G_{ii}(s)u_i(s) + G_{i,i+1}(s)u_{i+1}(s) + \dots + G_{in}(s)u_n(s). \quad (2)$$

即在传递函数矩阵中, 其下三角阵表示箭头方向的强耦合, 其余部分表示箭头相反方向的弱耦合.

对于式 (1) 描述的多变量系统的预测控制, 可采用传统的集中优化和集中控制的方法<sup>[1]</sup>. 还有一种做法是忽略弱耦合的影响, 实施解耦控制, 但由于忽略了全过程的部分信息, 控制效果不够理想. 另外, 可采用分散控制<sup>[4]</sup>的结构, 对每个子过程设计分散预测控制算法<sup>[5-7]</sup>.

本文提出一种在分布式通信模式下串联生产

过程的解耦预测控制算法. 该算法考虑了各子过程间的弱耦合, 在每个采样控制周期开始时, 获得前一时刻各子过程的控制增量序列, 对该时刻子过程间的弱耦合进行前馈补偿; 然后通过顺序求解控制律, 对强耦合进行解耦控制.

### 3 分布式解耦预测控制算法

考虑图 1 所示的串联生产全过程, 该多变量离散时间系统可用输入输出形式描述为

$$Y(k+1) = f(Y(k), u_1(k), \dots, u_n(k)). \quad (3)$$

其中:  $Y(k) = [y_1 \dots y_n]^T$  为全过程的输出,  $u_i(k)$  为第  $i$  个子过程的控制输入增量,  $f$  为输入输出映射函数. 在  $k$  时刻, 全过程未来  $P$  个时刻的预测输出方程可写成

$$Y_{PM}(k) = F(Y_{P0}(k), u_{1,M}(k), \dots, u_{n,M}(k)). \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} u_{i,M} &= [u_i(k/k) \dots u_i(k+M-1/k)]^T, \\ Y_{PM}(k) &= [Y(k+1/k) \dots Y(k+P/k)]^T, \\ Y_{P0}(k) &= [Y_0(k+1/k) \dots Y_0(k+P/k)]^T, \\ F &= [f^T \dots f^T]^T, i = 1, \dots, n; \end{aligned}$$

$P$  为预测时域,  $M$  为控制时域,  $Y_{PM}(k)$  和  $Y_{P0}(k)$  分别为未来时刻系统的输出预测值和  $k$  时刻的初始预测值,  $u_{i,M}(k)$  为第  $i$  个子过程在未来  $M$  个时刻的控制增量.

系统的输入输出变量满足如下约束条件:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(\cdot) \leq u_{\max}, \\ u_{\min} \leq Y(\cdot) \leq Y_{\max}, \\ u(k+1) = u(k) + \Delta u(k). \end{cases} \quad (5)$$

对于每个子过程, 在优化求解时考虑其他子过程对它的耦合关系, 分别进行分布式求解控制律. 取第  $i$  个子过程的性能指标

$$J_i = \sum_{j=1}^P L_i[y_i(k+j/k), u_{i,M}(k)]. \quad (6)$$

第  $i$  个子过程的预测输出为

$$y_{i,PM}(k) = f_i[y_{i,P0}(k), u_{1,M}(k), \dots, u_{n,M}(k)], \quad i = 1, \dots, n. \quad (7)$$

假设各子过程输入的作用可分, 将第  $i$  个子过程的预测输出分为两部分, 即

$$\begin{aligned} y_{i,PM}(k) &= f_i^1[y_{i,P0}(k), u_{1,M}(k), \dots, u_{i,M}(k)] + \\ & f_i^2[y_{i,P0}(k), u_{i+1,M}(k), \dots, u_{n,M}(k)] = \end{aligned}$$

$$y_{i, PM}^1(k) + y_{i, PM}^2(k). \tag{8}$$

其中：第 1 部分  $y_{i, PM}^1(k)$  是第  $i$  个子过程及与它有强耦合关联的子过程控制增量序列的作用结果；第 2 部分  $y_{i, PM}^2(k)$  是与第  $i$  个子过程有弱耦合关联的子过程控制增量序列的作用结果。

在每个采样控制周期开始的通信中，获取其他子过程在前一时刻的控制策略，对式(8)中第 2 项弱耦合部分进行前馈补偿。令

$$u_{j, M}(k) = S u_{j, M}(k - 1), \tag{9}$$

$$j = i + 1, \dots, n;$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{M \times M}. \tag{10}$$

则式(8)中待优化的未知控制增量序列为  $u_{1, M}(k), \dots, u_{i, M}(k)$ 。这时， $n$  个子过程完全解耦，可依次求出  $k$  时刻从第 1 个到第  $n$  个子过程的控制增量序列。具体描述如下：

在  $k$  时刻，第 1 个子过程的预测方程为

$$y_{1, PM}(k) = f_1^1[y_{1, P0}(k), u_{1, M}(k)] + f_1^2[y_{1, P0}(k), u_{2, M}(k), \dots, u_{n, M}(k)]. \tag{11}$$

由式(8)和(9)可得

$$y_{1, PM}(k) - f_1^2[y_{1, P0}(k), S u_{2, M}(k - 1), \dots, S u_{n, M}(k - 1)] = f_1^1[y_{1, P0}(k), u_{1, M}(k)]. \tag{12}$$

这时，优化变量为第 1 个子过程的控制增量序列  $u_{1, M}(k)$ 。将优化求解得到的控制增量序列的第 1 个值作为即时控制增量，作用于系统。

同理，可依次求出第 2 个直到第  $n$  个子过程的控制增量序列。在求解第  $i$  个子过程控制增量时，已求得第 1 个直到第  $i - 1$  个子过程的控制增量序列，由式(8)可知，待优化的变量只有  $u_{i, M}(k)$ 。这样，对于第  $i$  个子过程，其预测控制算法可归结为：在预测方程为(8)、约束方程为(5)的情况下，求解使性能指标(6)最小的控制增量序列  $u_{i, M}(k)$ 。

本文所提出的分布式解耦预测控制算法可描述如下：

步骤 1：在  $k$  时刻，各子过程将前一时刻已优化的控制增量序列  $u_{i, M}(k - 1)$ ，发送给与该子过程输入具有弱耦合关联的子过程，并接收来自其他子过程前一时刻的最优控制增量序列  $u_{j, M}(k - 1)$ 。令  $u_{j, M}(k) = S u_{j, M}(k - 1), j = i + 1, \dots, n$ 。

步骤 2：各子过程按解耦控制律依次分别求解各自的子优化问题，得到当前时刻的最优控制序列  $U_i^*(k)$ 。

步骤 3：取  $k$  时刻的即时控制律  $u_i(k) = 1 \ 0 \ \dots \ 0 \ U_i^*(k)$ ，并将其作用于各子过程。

步骤 4：滚动移位到下一时刻，即  $k + 1 \ k$ ，并返回到步骤 1，重复以上过程。

#### 4 线性无约束分布式预测控制算法及分析

对于串联生产过程，若采用动态矩阵控制(DMC)算法<sup>[1]</sup>，则第  $i$  个子过程的预测方程可写成

$$y_{i, PM}(k) = y_{i, P0}(k) + \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} u_{j, M}(k) + \sum_{j=i+1}^n A_{ij} S u_{j, M}(k - 1). \tag{13}$$

性能指标为

$$\min J_i = w_i(k) - y_{i, PM}(k) \frac{2}{Q_i} + u_{i, M}(k) \frac{2}{R_i}, i = 1, \dots, n.$$

求得第  $i$  个子过程的控制律

$$u_{i, M}(k) = (A_{ii}^T Q_i A_{ii} + R_i)^{-1} A_{ii}^T Q_i [w_i^*(k) - y_{i, P0}(k)]. \tag{14}$$

其中

$$w_i^*(k) = w_i(k) - \sum_{j=1}^{i-1} A_{ij} u_{j, M}(k) - \sum_{j=i+1}^n A_{ij} S u_{j, M}(k - 1).$$

设  $D_{ii} = (A_{ii}^T Q_i A_{ii} + R_i)^{-1} A_{ii}^T Q_i$ ，则有

$$u_{i, M}(k) = D_{ii} [w_i(k) - y_{i, P0}(k)] + \sum_{j=1}^{i-1} [-D_{ii} A_{ij} u_{j, M}(k)] + \sum_{j=i+1}^n [-D_{ii} A_{ij} S u_{j, M}(k - 1)]. \tag{15}$$

其中：等式右边第 1 项和第 2 项分别为忽略弱耦合影响的解耦控制律，第 3 项为利用前一时刻的控制增量序列进行弱耦合的前馈补偿。文献[1]中的解耦算法是将控制律事先离线设计好，在实施过程中不再考虑耦合的影响。本文的控制算法不同于文献[1]，在滚动求解的每一步都要考虑其他子过程的影响。文献[3]算法需要进行迭代计算，计算量较大；本文算法直接利用前一时刻的控制策略，无需进行迭代。

在这种控制结构中,存在两条通信通道:一条对应集中通信模式,在每个采样控制周期内,实时交换各子过程优化计算得到的控制增量,对强耦合方向进行解耦;另一条对应分布式通信模式,表示各子控制器间的分布式通信,在实施该分布式策略时,每个子过程只需同与其具有弱耦合关联的子过程进行信息交换,通信量大大降低.

### 5 实例仿真

考虑由 3 个子过程组成的串联生产全过程,该系统可用传递函数矩阵描述为

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{5}{50s+1} & \frac{1}{100s+1} & \frac{0.5}{200s+1} \\ \frac{4}{100s+1} & \frac{6}{50s+1} & \frac{1}{100s+1} \\ \frac{2}{200s+1} & \frac{4}{100s+1} & \frac{4.5}{50s+1} \end{bmatrix}$$

各子过程的局部性能指标取为如下的二次型指标:

$$J_i = \int_0^{\infty} (r_i(k) - y_{i,PM}(k))^2 Q_i + u_{i,M}(k)^2 R_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

采样周期取为 10 s,3 个子过程的期望输出设定值为 (0.5, 2, 1), 仿真时间为 400 s,从第 200 s 后,将子过程 2 的期望设定值从 2 变为 1,仿真结果如图 2 所示.从仿真结果可以看出,每个子过程输出均能很好地跟踪期望设定值.

在上述期望值变化下,对忽略弱耦合的预测控制算法与本文的控制算法进行比较.图 3 给出了第 1 个子过程的输出和控制输入

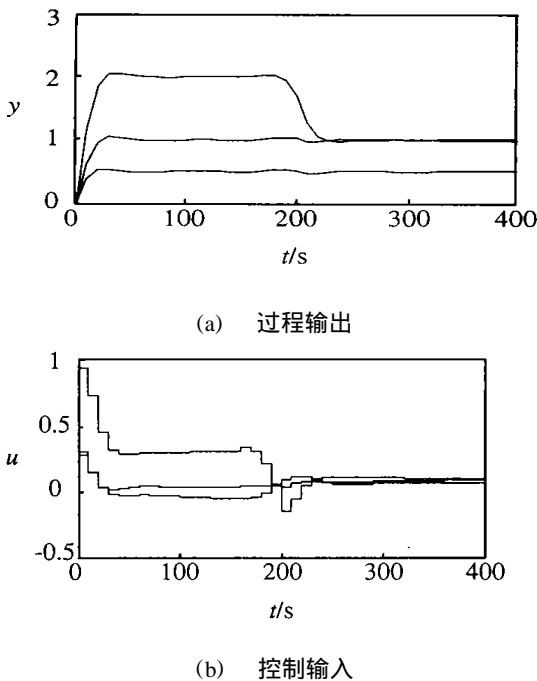


图 2 各子过程的输出和控制输入

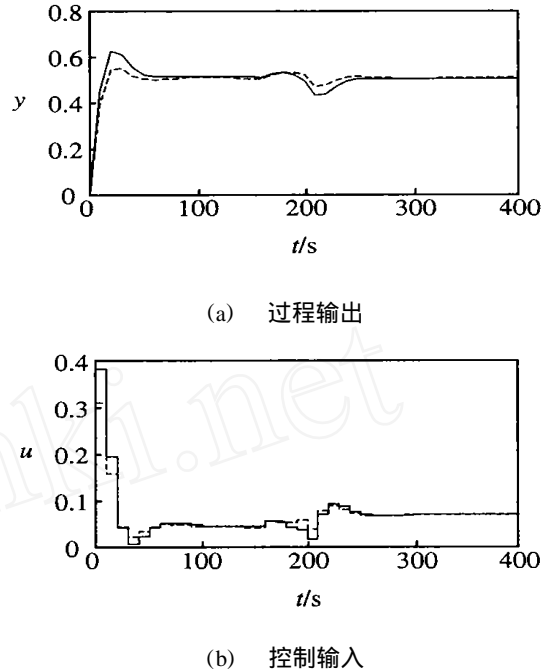


图 3 第 1 个子过程的输出和控制输入

个子过程的输出和控制增量的变化.图中实线为忽略弱耦合算法的控制效果,虚线为本文算法的控制效果.可以看出,控制效果得到了较大改善.

### 6 结 论

本文研究一类串联生产过程的分布式解耦预测控制.这类串联生产过程由多个子过程依次相连,各子过程在一个方向上具有强耦合,在相反方向上具有弱耦合.本文利用前一时刻的控制增量序列,对子过程间的弱耦合进行前馈补偿,然后在空间顺序上依次对各子过程进行解耦控制.通过实例仿真验证了该算法的有效性.

#### 参考文献 (References):

[1] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社,1993.  
 [2] Rahul S, Douglas J C. A novel tuning strategy for multi-variable model predictive control[J]. *ISA Trans*,1998,36(4):273-280.  
 [3] 杜晓宁,席裕庚,李少远. 分布式预测控制算法的性能分析[J]. *控制与决策*,2002,17(2):226-229.  
 (Du Xiaoning, Xi Yugeng, Li Shaoyuan. Performance analysis of distributed model predictive control algorithm [J]. *Control and Decision*,2002,17(2):226-229.)  
 [4] Robinson Derek, Rong Chen, Thomas Mcavoy, et al. An optimal control based approach to designing plantwide control system architectures[J]. *J of Process Control*,2001,11(2):223-236.

(下转第 654 页)

确的反应.

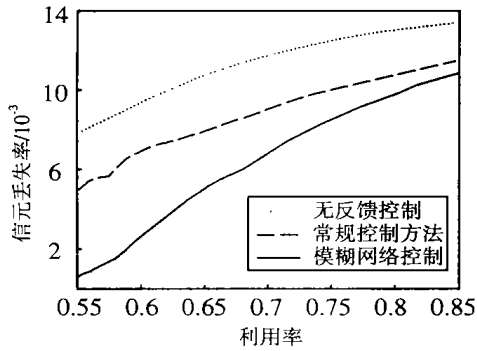


图 4 不同利用率对应的信元丢失率 (单业务源)

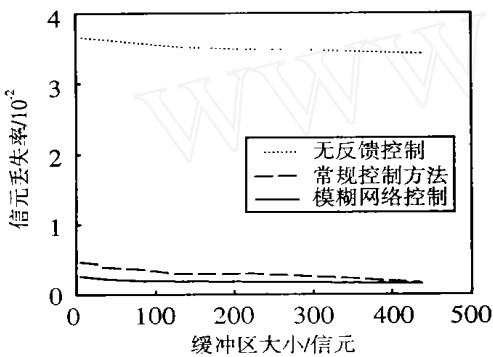


图 5 不同缓冲区对应的信元丢失率 (多业务源)

在图 5 中, 3 个视频业务源进入网络, 信元离开队列的速率为 14.625 Mb/s. 正如所预期的那样, AMFNN 控制器的性能是最好的. 这一结果也表明, 使用这种控制技术来控制几个具有高峰值信源速率的业务源, 不会导致效率的降低, 反而使复用的性能得到明显的提高.

### 6 结 论

本文讨论了拥塞控制的基本特性, 提出了基于 AMFNN 模糊神经网络的拥塞控制策略, 它对于 ATM 的速率调整和降低信元丢失率十分有效. 模

糊神经网络是神经网络与模糊逻辑的有机结合, 它能准确地捕捉业务流随时间变化的特征, 所以能更好地进行拥塞控制. 另外, 本文提出的方法是在源节点执行, 不受传播延迟的限制. 如果与基于智能方法的流量预测和复用、路由、带宽分配相结合, 则能更有效地改进 ATM 网络的性能.

### 参考文献 (References) :

- [1] 孙增圻. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [2] Chen X Q, Leslie I M. Neural adaptive congestion control for broadband ATM network[J]. *IEEE Proc Communications*, 1992, 139(3) :233-240.
- [3] Durand R, Liu Y C, Douligieris C. Neural network based congestion for single and multiple source in ATM network [J]. *IEEE Network*, 1995, 9(2) :49-56.
- [4] 戚文芽, 程时昕. 一个利用模糊预测的 ATM 广域网流控制算法[J]. *电子学报*, 1999, 27(1) :109-111.  
(Wen-ya Qi, Shi-xin Cheng. A new flow control scheme for wide area ATM networks using fuzzy predictions[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(1) :109-111.)
- [5] 陈增强, 郑涛, 袁著祉. 基于 T-S 模糊神经网络的 ATM 网络拥塞控制[J]. *通信学报*, 2002, 23(8) :39-44.  
(Chen Zeng-qiang, Zheng Tao, Yuan Zhu-zhi. Congestion control in ATM networks using T-S fuzzy neural network [J]. *J of China Institute of Communications*, 2002, 23(8) :39-44.)
- [6] 翟东海. 模糊推理的神经网络实现方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- [7] Wang L X, Mendel M. Fuzzy basis function, universal approximation and orthogonal least-square learning[J]. *IEEE Trans on Neural Network*, 1992, 3(5) :807-814.
- [8] Mars P, Fan Z. Access flow control scheme for ATM network using neural-network-based traffic prediction [J]. *IEEE Proc Communications*, 1997, 144(5) :295-300.

(上接第 650 页)

- [5] Dong Jia, Bruce H Krogh. Distributed model predictive control[A]. *Proc of the American Control Conf*[C]. Arlington, 2001. 25-27.
- [6] Pomerleau Dominique. A procedure for the design and evaluation of decentralised and model-based predictive multi-variable controllers for a pellet cooling process[J]. *Com-*

- puters and Chemical Engineering*, 2003, 27(2) :217-233.
- [7] El Adel M, Makoudi M, Radouane L. Decentralized adaptive control of linear interconnected systems based on Laguerre series representation [J]. *Automatica*, 1999, 35(11) :1873-1881.