

造纸过程横向控制策略及其并行实现^{*}

宋执环 李 平 孙优贤

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 工业控制技术研究所以·杭州, 310027)

摘要:本文提出了造纸过程定量横向分布的并行控制策略, 采用多变量 GPC 实现了多执行器协调控制, 为克服多变量 GPC 在高维情况下实时性差的缺陷, 引入并行处理机制, 将控制算法分解在多台处理机系统上并行实现. 计算机仿真验证了其有效性.

关键词:广义预测控制; 并行处理; 造纸过程; 定量; 横向控制

1 引言

定量是造纸过程控制的主要对象, 其变化量由三种成分构成: 机器方向分量、横向分量和随机分量. 机器方向控制技术已经成熟, 但横向控制由于不确定因素多, 输入/输出维数高, 以及执行机构等硬件条件的限制, 一直没能取得满意结果. 近年来, 随纸张宽度的增加和质量要求的提高, 横向控制及其实现方案的研究受到广泛重视^[1]. 文[2]提出以巡回扫描方式调节执行器的自适应控制方案, 文[3, 4]采用正交函数辨识纸机的横向动态特性, 并给出变换域的控制设计方法, 文[5]从鲁棒性能角度研究了横向控制的容错策略.

本文将 GPC 策略应用于定量横向分布控制, 针对高维多变量情况下 GPC 控制算法在线计算量太大, 实时性差的特点, 引入并行处理机制, 根据模型结构特征将控制算法进行分解, 并给出了控制算法的多处理机系统并行实现结构. 最后, 给出计算机仿真结果.

2 系统描述

2.1 系统结构

定量横向分布控制系统结构如图1所示. 扫描传感器测得的是包含三种分量的复合定量, 经过预处理, 分离出横向变化量 $y(t)$, 与期望值 $w(t)$ 进行比较, 控制器按一定的控制规律, 给出相应的控制量 $u(t)$, 经执行器接口平滑后, 驱动执行机构调节唇板位置, 以减小误差, 得到均匀的横向定量分布.

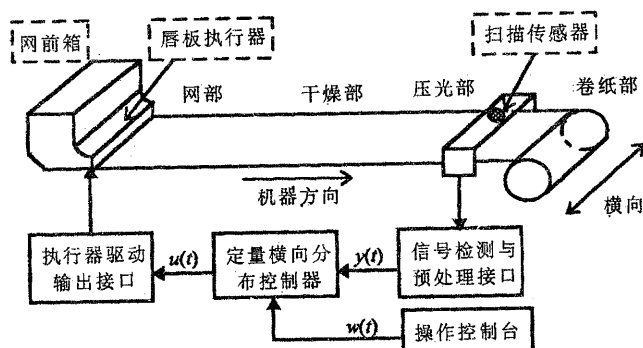


图1 定量横向分布控制系统结构

2.2 过程建模

造纸过程中, 影响定量横向分布的因素很多, 一般通过改变网前箱唇板的形状来调节喷射到网上的纸浆流量分布, 将其它因素作为扰动进行补偿和抑制, 达到调节定量横向分布目的. 执行机构由沿横向均匀分布在唇板上的一排可调螺栓构成, 由于存在耦合作用, 调整某个执行器不仅改变其相应位置的定量, 还会影响到其相邻执行器区段的定量分布.

定量横向分布变化量 $Y(t)$ 与唇板调节控制量 $U(t)$ 的关系可表示为如下形式^[2, 6]:

^{*} 浙江省自然科学基金资助项目 (No. 694028).

本文于 1996 年 1 月 29 日收到, 1996 年 11 月 18 日收到修改稿.

$$Y(t) = Y_0 + GU(t - \tau). \quad (1)$$

其中 $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_i(t), \dots, y_n(t)]^T$ 是 n 维定量横向变化量, 下标 $i = 1, 2, \dots, n$ 表示横向位置, n 为横向测量点的总数, Y_0 是 n 维初始偏差, $U(t)$ 是 m 维控制向量 ($m \leq n$), m 为执行器数目, τ 为纯滞后, G 为 $n \times m$ 维带状对称系数矩阵^[6], 反映各横向位置的耦合关系, 其带状宽度体现了耦合的强度. 式(1)描述了横向定量的空间分布特性.

由于纸机对唇板调节作用的响应非常快, 因而定量横向分布对唇板设定值的动态响应主要取决于执行器本身的动态特性. 假定每个执行器的动态特性相同, 可用下式表示:

$$y(t) = g_a(q^{-1})u(t). \quad (2)$$

那么, 考虑横向耦合关系, 得到如下动态方程:

$$y(t) = g_a(q^{-1})GU(t - \tau) + E(t). \quad (3)$$

其中 $E(t) = [\epsilon_1(t), \epsilon_2(t), \dots, \epsilon_n(t)]^T$, $\epsilon_i(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 是噪声序列, 包括初始偏差、随机变化量、过程漂移及传感器噪声等.

3 多变量 GPC 算法及其并行实现

3.1 多变量 GPC 算法

目前, 定量横向控制方案多数都是基于低分辨率 ($m < n$)^[1], 不利于充分利用过程信息 and 提高控制精度, 本文将整个横向分布作为一个多变量系统, 在高分辨率下 ($m = n$) 采用 GPC 实现多执行器协调控制. 为此, 需将式(3)转换为 CARIMAX 模型:

$$A(q^{-1})Y(t) = B(q^{-1})GU(t - \tau) + C(q^{-1}) \frac{E(t)}{\Delta(q^{-1})}. \quad (4)$$

其中 $A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1})$ 都是 q^{-1} 的多项式, q^{-1} 为后移算子, $\Delta = 1 - q^{-1}$ 为差分算子.

极小化目标函数形式如下:

$$J = E \left\{ \sum_{k=1}^{N_p} \|P(q^{-1})Y(t+k) - W(t+k)\|^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \|R(q^{-1})\Delta U(t+k-1)\|^2 \right\}. \quad (5)$$

其中 $W(t+k) = \alpha W(t+k-1) + (1-\alpha)Y_r$ 为 n 维参考输入向量, N_p, N_u 分别为优化时域和控制时域, $N_p > N_u$, $P(q^{-1})$ 为可调加权因子, 起预滤波作用, 有益于噪声干扰抑制, $R(q^{-1})$ 为控制增量的加权矩阵. 可得到预测输出的大范围预测公式和广义预测控制律如下^[7]:

$$\Psi(t) = HU(t) + \Psi_0(t), \quad (6)$$

$$U(t) = (K^T K + F)^{-1} K^T [W(t) - \Psi_0(t)]. \quad (7)$$

其中 $\Psi_0(t) = P(q^{-1})Y(t)$, K, H, F 及 $\Psi_0(t)$ 可从系统参数矩阵 $A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1}), G$ 及加权矩阵 $P(q^{-1}), R(q^{-1})$ 计算.

3.2 参数估计

多变量系统(4)的参数估计分为两步进行: 耦合系数矩阵 G 根据式(1)预先离线辨识, 参数矩阵 $A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1})$ 在线辨识. 从方程(4)可得

$$A(q^{-1})\Delta y_i(t) = \sum_{k=i-p}^{i+p} B(q^{-1})g_k \Delta u_k(t - \tau) + C(q^{-1})\epsilon_i(t). \quad (8)$$

改写成最小二乘格式:

$$\Delta y_i(t) = \tilde{A}(q^{-1})\Delta y_i(t) + \sum_{k=i-p}^{i+p} B(q^{-1})g_k \Delta u_k(t - \tau) + C(q^{-1})\epsilon_i(t), \quad (9)$$

$$\Delta y_i(t) = \varphi_i^T(t)\theta(t) + \epsilon_i(t). \quad (10)$$

其中 $\theta(t) = [a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}, c_1, \dots, c_{n_c}]^T$, $\varphi(t) = [-\Delta y_i(t-1), \dots, \Delta y_i(t-n_a), \Delta u_i(t-$

$\tau), \dots, \Delta v_i(t - \tau - n_b), \varepsilon_i(t - 1), \dots, \varepsilon_i(t - n_c)]^T, \Delta v_i(t - \tau) = \sum_{k=i-p}^{i+p} g_k \Delta u_k(t - \tau), g_k$ 是系数矩

阵 G 的元素, $\tilde{A}(q^{-1}) = A(q^{-1}) - 1$, 可用渐消记忆的最小二乘法估计上式参数^[7].

3.3 多变量 GPC 算法的并行实现

在上述优化求解中, 涉及到高维矩阵的求逆, 当 n 较大时计算量太大, 给在线实现带来困难. 设横向耦合宽度为 p (施加在横向位置 i 的控制 u_i 影响一侧相邻区段的个数), 沿对角线把系数矩阵 G 分解成 $q \times q$ 分块矩阵, 每块为 $(2p + 1) \times (2p + 1)$ 维子阵:

$$G = \begin{bmatrix} G_0 & G_1^T & 0 & \cdots & 0 \\ G_1 & G_0 & G_1^T & \ddots & \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & G_1 & G_0 & G_1^T \\ 0 & \cdots & 0 & G_1 & G_0 \end{bmatrix}_{q \times q}, \quad G_1 = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & g_p & \cdots & g_1 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \ddots & g_p \\ \vdots & & & \ddots & & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{(2p+1) \times (2p+1)}$$

其中 G_0 是 $(2p + 1) \times (2p + 1)$ 维带状对称矩阵, $q = \left\lceil \frac{n}{2p + 1} \right\rceil$, $[h]$ 表示取大于 h 的最小整数. 这样把 n 维系统 (4) 分解成 q 个低阶系统 ($(2p + 1)$ 维), 子系统 j 的 CARIMAX 模型可表示为:

$$A(q^{-1})Y_j(t) = B(q^{-1})[G_0 U_j(t - \tau) + G_1 U_{j-1}(t - \tau) + G_1^T U_{j+1}(t - \tau)] + C(q^{-1}) \frac{E(t)}{\Delta(q^{-1})}. \quad (11)$$

显然, 每个子系统中有 p 个变量与其前、后继子系统相关联. 为了便于实现并行化分散控制, 必需消除各子系统之间的关联. 对每个子系统控制输入 U_j 给出表 1 所示的约束:

表 1 子系统控制输入 U_j 的形式

时刻	控制输入 U_1	控制输入 U_2	...	控制输入 U_{q-1}	控制输入 U_q
t	$[u_1, 0, \dots, 0]^T$	$[0, \dots, 0, u_p, 0, \dots, 0]^T$	...	$[u_1, 0, \dots, 0]^T$	$[0, \dots, 0, u_p, 0, \dots, 0]^T$
$t + 1$	$[0, u_2, 0, \dots, 0]^T$	$[0, \dots, 0, u_{p+1}, 0, \dots, 0]^T$	...	$[0, u_2, 0, \dots, 0]^T$	$[0, \dots, 0, u_{p+1}, 0, \dots, 0]^T$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t + p + 1$	$[0, \dots, 0, u_p, 0, \dots, 0]^T$	$[0, \dots, 0, u_{2p+1}]^T$	...	$[0, \dots, 0, u_p, 0, \dots, 0]^T$	$[0, \dots, 0, u_{2p+1}]^T$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$t + 2p + 1$	$[0, \dots, 0, u_{2p+1}]^T$	$[u_1, 0, \dots, 0]^T$	...	$[0, \dots, 0, u_{2p+1}]^T$	$[u_1, 0, \dots, 0]^T$

这样, 通过合理安排相邻子系统中不为零的控制量的循环次序, 使

$$G_1 U_{j-1}(t - \tau) = G_1^T U_{j+1}(t - \tau) = 0, \quad (12)$$

$$A(q^{-1})Y_j(t) = B(q^{-1})G_0 U_j(t - \tau) + C(q^{-1}) \frac{E(t)}{\Delta(q^{-1})}. \quad (13)$$

消除了子系统间的相互关联作用, 以式 (13) 为预测模型, 将多变量 GPC 算法应用到 q 个 $2p + 1$ 维的子系统, 使模型失配、扰动及不可避免的关联影响得到补偿和抑制. 子系统 GPC 的优化时域应满足: $N_p > 2p + 1$. 图 2 给出了并行控制算法的示意图. 控制作用可由 q 个扫描机械手实现, 每个机械手巡回调节 $2p + 1$ 个执行器.

4 仿真研究

仿真实验用的多处理机系统由一台 PC486 微机和三块 TMS320 系列 DSP 板构成, DSP 板上带有 512K 共享存储器. 每个子系统的多变量 GPC 算法由下级处理器 DSP 独立完成, PC486 微机完成参数估计、模型修正、信息交换、反馈校正及过程数据输入/输出等任务, 上下级处理机之间通过 PC 总线 and 共享存储器交换信息.

仿真数据从现场采集得到, 白噪声序列方差 $\sigma^2=0.16$, 横向控制点数 $n=24, m=n$, 耦合宽度 $p=4$, 模型阶次 $n_a=n_b=n_c=2$. 仿真结果如图 3~6 所示.

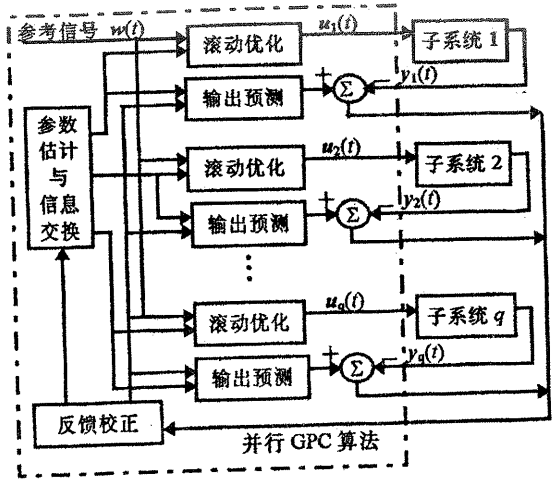


图 2 并行 GPC 算法结构框图

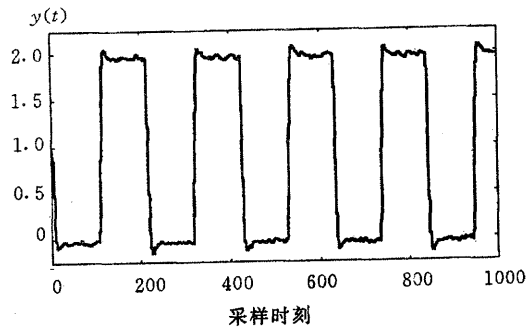


图 3 子系统之间无关联时横向位置 i 的跟踪曲线

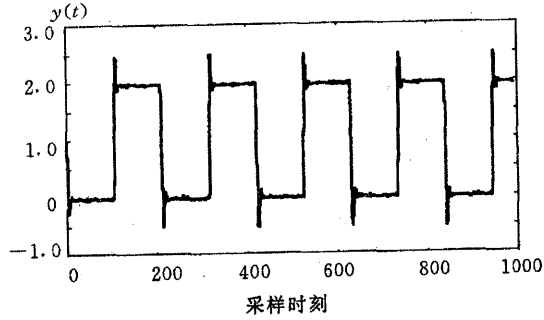


图 4 子系统之间存在关联时横向位置 i 的方波曲线

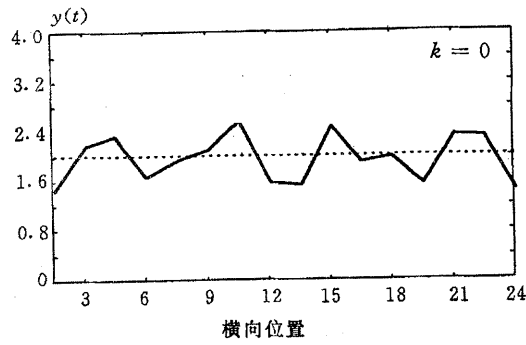


图 5 初始 $k=0$ 时的定量横向分布

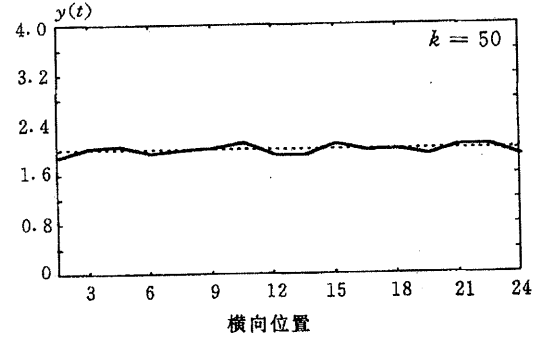


图 6 施加控制后 $k=50$ 时的定量横向分布

5 结束语

本文把多变量 GPC 算法应用于纸机定量横向分布控制系统, 使多执行器协调控制, 有效地抑制了模型失配、扰动等不确定性的影响. 采用分散控制结构, 使高维多变量控制算法分解在多处理机系统中并行实现, 运行时间大约只有单机运行的 30%, 大大提高了控制算法的实时性, 降低对工业控制计算机和执行机构性能的要求, 便于物理实现, 有利于进一步工业应用.

参 考 文 献

- 1 Heaven, E. M., Jonsson, I. M., Kean, T. M., Manness, M. A. and Vyse, R. N.. Recent advances in cross machine profile control. IEEE Control System Magazine, 1994, 13(5): 35—46
- 2 Halouskova, A., Karny, M. and Nagy, I.. Adaptive cross-direction control of paper basis weight. Automatica, 1993, 29(2): 425—429
- 3 Kjaer, A. P., Heath, W. P. and Wellstead, P. E.. Identification of cross-directional behavior in web production: techniques and experience. Control Engineering Practice, 1995, 3(1): 21—29
- 4 Kristinsson, K. and Dumont, G. A.. Cross directional control on paper machines using gram polynomials. Automatica, 1996, 32(4): 533—548
- 5 Laughlin, D. L., Morari, M. and Braatz, R. D.. Robust performance of cross-directional basis weight control in paper machines. Automatica, 1993, 29(6): 1395—1410
- 6 李平, 孙优贤, 王慧. 造纸过程的定量横向分布控制. 中国造纸学报, 1993, 8(1): 67—71
- 7 孙优贤. 造纸过程建模与控制. 杭州: 浙江大学出版社, 1993, 273—276

Cross-Directional Control Strategy and Its Parallel Implementation of Paper-Making Processes

SONG Zhihuan, LI Ping and SUN Youxian

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

Abstract: This paper proposes a novel parallel control scheme for the cross-directional basis weight profile in paper-making processes. The multiple actuator coordination is realized by using multivariable GPC. The parallel processing technique is used for multivariable GPC in order to improve the real-time performance. A high dimensional GPC algorithm is decomposed into parallel algorithms, which can be implemented in a multi-processor system. Computer simulation results verify that the control strategy is effective.

Key words: generalized predictive control; parallel processing; paper-making processes; basis weight; cross-directional control

本文作者简介

宋执环 1962年生. 讲师, 博士后. 1986年毕业于合肥工业大学电气工程系, 获工学硕士学位. 1996年在浙江大学工业控制技术研究所获工学博士学位. 主要研究兴趣为工业过程建模与控制, 小波分析在系统辨识和控制理论中应用, 神经网络控制、预测控制理论及应用.

李平 见本刊1997年第1期第72页.

孙优贤 见本刊1997年第1期第41页.