

## 基于扩张状态观测器的分散模型预测控制

刘安东, 张荣超, 俞立, 张文安

(浙江工业大学 a. 信息工程学院, b. 浙江省嵌入式系统联合重点实验室, 杭州 310023)

**摘要:** 针对复杂关联系统中分散控制方法无法有效解决子系统间的耦合和干扰问题, 提出一种基于扩张状态观测器的分散模型预测控制算法. 首先将复杂关联系统分解为多个状态维数较低、控制变量较少的子系统, 并为每个子系统设计本地预测控制器; 然后, 采用扩张状态观测器对子系统的耦合项以及干扰项进行估计, 进而利用估计值对子系统进行前馈补偿, 从而降低复杂关联系统的计算复杂度, 提高系统的稳定性和抗干扰能力; 最后, 利用液位控制系统验证了所提出算法的有效性.

**关键词:** 扩张状态观测器; 分散控制; 模型预测控制; 液位控制系统

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Extended state observer-based decentralized model predictive control

LIU An-dong, ZHANG Rong-chao, YU Li, ZHANG Wen-an

(a. College of Information Engineering, b. Zhejiang Provincial United Key Laboratory of Embedded Systems, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China. Correspondent: LIU An-dong, E-mail: lad@zjut.edu.cn)

**Abstract:** A decentralized model predictive control scheme is proposed for complex interconnected systems by using extended state observer (ESO) to deal with the coupling between subsystems and disturbance. Firstly, the considered system is decomposed into several lower-order subsystems with the local model predictive controller. In order to improve the stability and disturbance rejection performance, the ESO is introduced into the local model predictive controller. The coupling and interference of the subsystem are estimated by the proposed ESO and compensated by using a feedforward compensation strategy. Finally, a liquid level control system is given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** extended state observer; decentralized control; model predictive control; liquid level control system

### 0 引言

模型预测控制作为一种先进的过程控制算法, 具有易于建模、控制性能较好、鲁棒性强、逻辑结构简单等特点, 因而在工业过程中获得了越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>. 随着覆盖区域广、结构复杂的复杂关联系统的出现, 如城市供水系统、农业灌溉系统、化工冶炼系统等<sup>[3]</sup>, 使得实时控制算法不能局限于传统的集中预测控制方式<sup>[4-5]</sup>. 近年来, 具有分布结构的分散模型预测控制(分散MPC)<sup>[6-11]</sup>和分布式模型预测控制(分布式MPC)<sup>[12-14]</sup>越来越受到人们的关注.

在分散MPC中, 每个子系统拥有独立控制器, 各个控制器之间不进行信息交互, 不依赖于其他子系统信息<sup>[6]</sup>. 文献[7]提出了一种基于状态观测器和输出反馈控制的分散MPC算法, 用于解决在没有信息交互的情况下非线性系统的轨迹跟踪问题. 文献[8]

针对具有有界扰动的非线性系统, 提出了一种分散MPC算法, 并通过不断缩小的约束集来保证系统的稳定性, 但是由于子系统间不存在信息交互, 该控制算法具有很大的保守性. 文献[9]中, 通过将系统分解为多个具有约束耦合的子系统, 并假设子系统可以得到邻居子系统的期望状态轨迹, 以此来构建具有鲁棒性的本地MPC控制器, 从而保证具有状态耦合的子系统的稳定性. 文献[10]提出了利用子系统之间共享耦合状态来降低动态耦合关系给系统带来的影响. 然而, 分散MPC设计的子系统控制器不进行信息交互, 不能有效处理子系统之间的耦合关系, 因而不能保证系统的抗干扰能力和稳定性<sup>[11]</sup>. 在分布式MPC中, 各个控制器之间存在信息交互, 并利用得到的信息计算最优控制输入<sup>[12-13]</sup>. 分布式MPC虽然可以通过子系统间的多次信息交互来解决子系统之间的耦合问题,

**收稿日期:** 2015-04-30; **修回日期:** 2015-11-23.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61273117, 61403344); 钱江人才计划D类项目(QJD1302012).

**作者简介:** 刘安东(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事网络控制系统、分布式预测控制的研究; 张荣超(1991—), 男, 硕士生, 从事分布式预测控制的研究.

但其控制器计算负荷重,不能保证系统的实时性<sup>[6]</sup>.同时,复杂关联系统中子系统通信往往受到地域和通信成本的限制,因此,分布式 MPC 在实际使用中存在很大的局限性.

扩张状态观测器(ESO)<sup>[14-15]</sup>是一种干扰误差集估计方法,它将系统的扰动作为系统的一组新状态,同时估计出系统状态以及系统扰动.文献[16]中提出利用 ESO 对一阶永磁电机控制系统进行扰动估计,并利用估计值对系统进行补偿,以提高系统的性能.文献[17]中利用 ESO 对系统的扰动量进行估计,并利用扰动估计值对系统的状态量进行部分补偿,以此来提升系统的性能.

为了降低复杂关联系统的计算复杂度,降低通信约束带来的性能影响,同时保证系统的稳定性和抗干扰能力,本文提出基于 ESO 的分散 MPC 算法,利用 ESO 估计系统受到的扰动量,设计具有前馈补偿的组合控制器,用于处理复杂关联系统的控制问题.本文的主要贡献在于:1)提出的基于 ESO 的分散 MPC 算法,可用于解决受外界环境干扰且各个子系统间有耦合关系的复杂关联系统的分散控制问题;2)利用 ESO 对多输入多输出系统的耦合量和受到的扰动进行估计,并利用估计值设计组合控制器对系统进行前馈补偿,以提高系统的性能;3)证明了系统观测误差方程具有输入状态稳定(ISS).最后,利用液位控制系统仿真验证了所提出算法的有效性.

## 1 问题描述

针对具有  $n$  个子系统的复杂关联系统,子系统  $i$  由以下模型描述:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= \\ & A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + \sum_{j \in h_i} A_{i,j} x_j(k) + \\ & \sum_{j \in h_i} B_{i,j} u_j(k) + w_i(k); \\ \text{s.t. } x_i &\in X_i, \\ u_i &\in U_i. \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $A_i \in R^{n_i \times n_i}$ ,  $B_i \in R^{n_i \times m_i}$  分别为子系统  $i$  的状态矩阵和输入矩阵;  $h_i$  为与子系统  $i$  有耦合关系的子系统集合;  $A_{i,j} \in R^{n_i \times n_j}$ ,  $B_{i,j} \in R^{n_i \times m_j}$  分别为子系统  $j$  对于子系统  $i$  的状态耦合系数矩阵和输入耦合系数矩阵;  $x_i \in R^{n_i}$ ,  $u_i \in R^{m_i}$  分别为子系统  $i$  的状态和输入;  $w_i$  为子系统  $i$  受到的外界有界干扰;  $X_i, U_i$  分别为系统状态量和输入量的可行域.

根据模型(1),子系统  $i$  的预测模型可由以下名义系统描述:

$$x_{i,m}(k+1) = A_i x_{i,m}(k) + B_i u_{i,m}(k);$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } x_{i,m} &\in X_i, \\ u_{i,m} &\in U_i. \end{aligned} \quad (2)$$

其中:  $x_{i,m} \in R^{n_i}$ ,  $u_{i,m} \in R^{m_i}$  分别为子系统  $i$  预测模型的状态和输入.

定义子系统  $i$  的性能指标为

$$\begin{aligned} J_{i,m}(k) &= \\ & \sum_{j=1}^P \|x_{i,m}(k+j|k) - x_{i,r}(k+j)\|_{Q_i} + \\ & \sum_{j=0}^{M-1} \|u_{i,m}(k+j|k)\|_{R_i}; \\ \text{s.t. } x_{i,m} &\in X_i, \\ u_{i,m} &\in U_i. \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $\|\cdot\|$  表示欧氏范数;  $P, M$  分别为子系统的预测时域和控制时域,且  $P \geq M$ ;  $Q_i \in R^{n_i \times n_i}$ ,  $R_i \in R^{m_i \times m_i} \geq 0$  分别为权重矩阵;  $x_{i,m}(k+j|k)$ ,  $u_{i,m}(k+j|k)$  分别为子系统(2)在  $k$  时刻预测  $k+j$  时刻的状态和输入;  $x_{i,r}(k+j)$  为子系统  $i$  在  $k+j$  时刻的状态期望值.分散 MPC 中根据各自子系统的预测模型以及本地性能指标计算本地控制器<sup>[5,11]</sup>.本文中,根据预测控制原理可知,子系统  $i$  的优化目标为

$$\min_{u_{i,m}(k|k) \dots u_{i,m}(k+M-1|k)} J_{i,m}(k). \quad (4)$$

因此,可以得到名义系统下子系统  $i$  的最优输入量序列  $\tilde{u}_{i,m}^*(k)$ .其中

$$\tilde{u}_{i,m}^*(k) = \begin{bmatrix} u_{i,m}^*(k|k) \\ \vdots \\ u_{i,m}^*(k+M-1|k) \end{bmatrix}.$$

采用控制序列  $\tilde{u}_{i,m}^*(k)$  中当前时刻控制量  $u_{i,m}^*(k|k)$  对各个子系统进行控制时,由于本地控制器之间不进行信息通信,各个控制器无法得到其他子系统的状态信息和输入信息,不能有效地处理子系统之间的耦合和扰动给系统带来的影响,从而不能对系统进行有效控制.本文针对分散 MPC 无法有效处理子系统间的耦合关系以及抗干扰能力弱的问题,提出基于 ESO 的组合控制器设计方法,即在本地控制量  $u_{i,m}^*(k|k)$  的基础上,利用 ESO 对子系统间的耦合量和子系统受到的干扰进行估计,并利用估计值对子系统进行前馈补偿,以提高系统的稳定性和抗干扰能力.

## 2 基于 ESO 的分散 MPC 组合控制器设计

本节通过引入 ESO,利用 ESO 对系统的总和扰动进行估计(本文中总和扰动包括子系统之间的耦合以及外界干扰),并利用得到的估计值对子系统进行前馈补偿.基于 ESO 的分散 MPC 控制方法的系统结构如图 1 所示,其中子系统  $i$  的模型如式(1)所示.

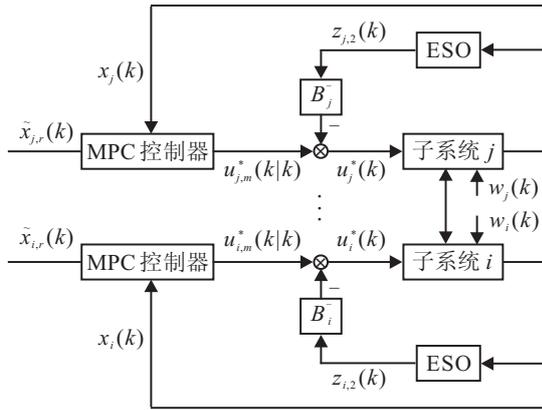


图 1 基于 ESO 的分散 MPC

根据图 1, 子系统  $i$  在  $k$  时刻组合控制器形式可表示为

$$u_i^*(k) = u_{i,m}^*(k|k) - B_i^- z_{i,2}(k);$$

$$\text{s.t. } B_i B_i^- = I. \quad (5)$$

其中:  $u_{i,m}^*(k|k)$  为最优化性能指标 (4) 得到的当前时刻的控制量,  $B_i^-$  为  $B_i$  的右伪逆,  $z_{i,2}(k)$  为子系统  $i$  总和扰动  $d_i(k)$  的估计值. 根据模型 (1), 定义子系统  $i$  的总和扰动为

$$d_i(k) = \sum_{j \in h_i} A_{i,j} x_j(k) + \sum_{j \in h_i} B_{i,j} u_j(k) + w_i(k). \quad (6)$$

由系统模型 (1) 知,  $d_i(k)$  为有界扰动, 由式 (1) 和 (6) 可得子系统  $i$  的扩张状态方程为

$$\begin{cases} x_i(k+1) = A_i x_i(k) + d_i(k) + B_i u_i(k), \\ d_i(k+1) = d_i(k) + v_i(k), \end{cases} \quad (7)$$

其中  $v_i(k)$  为一有界的未知函数.

为了得到总和扰动估计值, 针对扩张状态方程 (7) 设计如下  $2n_i$  阶线性 ESO:

$$\begin{bmatrix} z_{i,1}(k+1) \\ z_{i,2}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & I \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{i,1}(k) \\ z_{i,2}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} u_i(k) + L_i \left( x_i(k) - \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{i,1}(k) \\ z_{i,2}(k) \end{bmatrix} \right). \quad (8)$$

其中:  $z_{i,1}(k)$  为子系统状态  $x_i(k)$  的估计值,  $L_i = \begin{bmatrix} L_{i,1} \\ L_{i,2} \end{bmatrix}$  为观测器增益矩阵,  $L_{i,1} \in R^{n_i \times r_i}$ ,  $L_{i,2} \in R^{n_i \times r_i}$ . 进一步可得子系统  $i$  的观测误差系统

$$e_i(k+1) = A_{e,i} e_i(k) + f_i(k). \quad (9)$$

其中

$$e_i(k) = \begin{bmatrix} e_{i,1}(k) \\ e_{i,2}(k) \end{bmatrix}, \quad A_{e,i} = \begin{bmatrix} A_i - L_{i,1} & I \\ -L_{i,2} & I \end{bmatrix},$$

$$f_i(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ v_i(k) \end{bmatrix}, \quad e_{i,1}(k) = x_i(k) - z_{i,1}(k),$$

$$e_{i,2}(k) = d_i(k) - z_{i,2}(k).$$

**定理 1** 针对误差系统 (9), 如果存在连续函数  $V_i : R^{2n_i} \rightarrow R^+$ , 使得以下两个条件成立:

1) 存在  $K_\infty$  类函数  $\alpha_1, \alpha_2$ , 满足

$$\alpha_1(|e_i|) \leq V(e_i(k)) \leq \alpha_2(|e_i|), \quad \forall e_i \in R^{2n_i}; \quad (10)$$

2) 存在  $K_\infty$  类函数  $\alpha_3$  和  $K$  类函数  $\delta$ , 满足

$$V(e_i(k+1)) - V(e_i(k)) \leq -\alpha_3(|e_i|) + \delta(|f_i|),$$

$$\forall e_i \in R^{2n_i}, \forall f_i \in R^{2n_i}. \quad (11)$$

则  $V_i$  是输入状态稳定李雅普诺夫函数 (ISS-Lyapunov 函数), 且该系统具有 ISS.

**证明** 根据文献 [18], 对于观测误差系统 (9), 给定一个正定矩阵  $S_i \in R^{2 \times n_i}$ , 通过选取合适的观测器增益  $L_i$ , 使得误差系统 (9) 的状态矩阵  $A_{e,i}$  的特征值均在单位圆内, 进而通过求解等式

$$A_{e,i}^T P_i A_{e,i} - P_i = -S_i$$

得到对称正定矩阵  $P_i$ , 从而得到误差系统 (9) 的 ISS-Lyapunov 函数

$$V_i(e_i) = e_i^T P_i e_i. \quad (12)$$

当

$$\alpha_1(r) = \lambda_{\max}(P_i) r^2, \quad \alpha_2(r) = \lambda_{\min}(P_i) r^2$$

时,  $V_i(e_i)$  满足式 (10); 当

$$\alpha_3(r) = \frac{1}{2} \lambda_{\min}(S_i) r^2, \quad \delta(r) = \left( \frac{2|A_{e,i}^T P_i|^2}{\lambda_{\min}(S_i)} + |P_i|^2 \right) r^2$$

时,  $V_i(e_i)$  满足式 (11). 因此, 函数 (12) 是误差系统 (9) 的 ISS-Lyapunov 函数, 误差系统 (9) 具有 ISS, 从而可知观测误差是有界的.  $\square$

**注 1** ISS 系统的输出不会收敛到原点, 而是收敛于原点的某一邻域内; 同时, 系统的 ISS 可以通过寻找系统的一个 ISS-Lyapunov 函数得到确保 [19].

**注 2** ESO 的作用是将邻居子系统的耦合和外部扰动造成的实际对象与名义模型输出的差异等效到控制输入端, 即观测出总和扰动的等效干扰; 然后采用前馈补偿方式在控制中引入等效干扰的补偿, 实现对干扰的完全抑制. 而对于分散 MPC, 由于子系统  $i$  无法获得当前时刻邻居子系统的控制信息, 而需要采用上一时刻的预测值, 上一时刻的预测值仅为当前时刻的可行解而非最优解, 分散 MPC 无法完全抑制子系统耦合带来的影响. 另一方面, 当系统具有未知但有界的外部扰动干扰时, 分散 MPC 一般结合鲁棒控制方法设计控制器, 而鲁棒控制器仅仅保证具有一定的扰动抑制水平. 基于 ESO 的分散 MPC 能够观测出扰动的等效干扰, 实现对干扰的完全抑制. 该算法不仅可以降低本地控制器的计算负荷, 还可以保证系统具有良好的稳定性和抗干扰能力.

基于 ESO 的分散 MPC 组合控制器的设计步骤如下(算法 1).

1) 初始化. 对于子系统  $i$ , 在  $k = 0$  时刻, 给出子系统的初始状态  $x_i(k)$ 、参考轨迹  $\tilde{x}_{i,r}(k)$  和子系统的性能指标  $J_{i,m}(k)$ .

2) 构建预测控制器. 根据性能指标 (4) 求解  $k$  时刻的子系统  $i$  的最优预测控制器  $\tilde{u}_{i,m}^*(k)$ .

3) 估计总和扰动  $d_i(k)$ . 通过选取合适的观测器增益矩阵  $L_i$ , 使得矩阵  $A_{e,i}$  的特征值均在单位圆内, 由式 (8) 得到  $k$  时刻子系统  $i$  的总和扰动的估计值  $z_{i,2}(k)$ .

4) 设计组合控制器. 根据式 (5) 设计子系统  $i$  的组合控制器, 得到经过补偿的组合控制器  $u_i^*(k)$ .

5)  $k = k + 1$ , 回到步骤 2).

### 3 仿真示例

本节以具有四容水箱的液位控制系统作为对象, 其结构如图 2 所示. 整个液位控制系统有 4 个输入(水泵的电磁阀开度), 水泵 1 和 水泵 2 分别向水箱 1 和水箱 2 供水, 水泵 3 同时向水箱 2 和水箱 3 供水, 水泵 4 同时向水箱 1 和水箱 4 供水. 两个位于上层的水箱在重力的作用下向位于他们下方的水箱注水, 同时下方水箱中的水也会在重力的作用下流入水池中. 每个水箱中的液位都可以通过水箱中的压力传感器测得, 每个水泵的电磁阀开度均可调. 利用基于 ESO 的分散 MPC 方法对上述液位控制系统的每个电磁阀开度进行调控, 以保证液位系统的每个水箱的液位保持在平

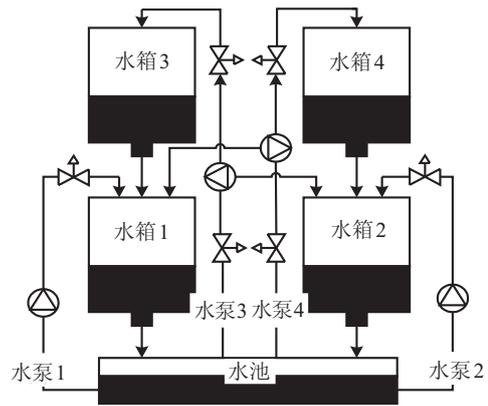


图 2 液位控制系统

衡点.

根据文献 [20] 可得图 2 所示的液位控制系统模型如下:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{s_1}{S_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{s_3}{S_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{k_1}{S_1} v_1 + \\ &\quad \frac{\gamma_4 k_4}{S_1} v_4 + \frac{d_1}{S_1}, \\ \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{s_2}{S_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{s_4}{S_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{k_2}{S_2} v_2 + \\ &\quad \frac{\gamma_3 k_3}{S_2} v_3 + \frac{d_2}{S_2}, \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{s_3}{S_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_3)k_3}{S_3} v_3 + \frac{d_3}{S_3}, \\ \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{s_4}{S_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_4)k_4}{S_4} v_4 + \frac{d_4}{S_4}, \end{aligned}$$

其中的参数及其物理意义如表 1 所示.

表 1 液位控制系统参数值

符号	物理意义	参数值
$h_1, h_2, h_3, h_4/\text{cm}$	系统达到平衡点时的水箱液位高度	11.4, 11.6, 5.3, 4.0
$s_i/\text{cm}^2$	水箱 $i$ 底部排水管截面积	2.10, 2.14, 2.2, 2.3
$S_i/\text{cm}^2$	水箱 $i$ 横截面积	730
$\gamma_3$	水泵 3 流向上水箱 2 的水流比率	0.30
$\gamma_4$	水泵 4 流向上水箱 1 的水流比率	0.35
$k_j/(\text{cm}^3/\text{s})$	水泵 $j$ 的水流速度与电磁阀输出的比例系数	6.75, 6.80, 4.2, 3.6
$g/(\text{cm}/\text{s}^2)$	重力加速度常数	981
$v_1, v_2, v_3, v_4$	系统达到平衡点时的电磁阀输出	33.4, 42.1, 29.5, 45.2

将水箱 1、水箱 3、水泵 1 和 水泵 3 划分为子系统 1, 水箱 2、水箱 4、水泵 2 和 水泵 4 划分为子系统 2, 两个子系统之间存在输入耦合. 该液位控制系统是一个非线性系统, 对其在系统工作平衡点处线性化, 并以采样时间  $T = 0.2\text{s}$  对系统离散化. 代入参数后可得到系统模型如下:

$$\begin{bmatrix} h_1(k+1) \\ h_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.996 & 0.006 \\ 0 & -0.994 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1(k) \\ h_3(k) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.0013 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(k) \\ v_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0006 \\ 0 \end{bmatrix} v_4(k) + d_1(k),$$

$$\begin{bmatrix} h_2(k+1) \\ h_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.996 & 0.007 \\ 0 & -0.993 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_2(k) \\ h_4(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.0014 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2(k) \\ v_4(k) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0.0014 \end{bmatrix} v_3(k) + d_2(k).$$

选取参数

$$M = P = 4,$$

$$Q_1 = Q_2 = \text{diag}(100, 100),$$

$$R_1 = R_2 = \text{diag}(0.1, 0.1),$$

$$x_1 = [h_1, h_3]^T, x_{1,r} = [11.4, 5.3]^T,$$

$$x_2 = [h_2, h_4]^T, x_{2,r} = [11.6, 4.0]^T,$$

$$u_1 = [v_1, v_3], u_2 = [v_2, v_4].$$

配置两个子系统的ESO增益矩阵分别为

$$L_{11} = \begin{bmatrix} 1.19 & 0 & 0.30 & 0 \\ 0.0058 & 1.35 & 0 & 0.46 \end{bmatrix}^T,$$

$$L_{12} = \begin{bmatrix} 1.19 & 0 & 0.30 & 0 \\ 0.0058 & 1.35 & 0 & 0.46 \end{bmatrix}^T,$$

使得子系统ESO的极点均在

$$p_{1, \text{ESO}} = p_{2, \text{ESO}} = [0.35, 0.15, 0.15, 0.25].$$

根据算法1, 设计基于ESO的分散MPC组合控制器, 并与文献[5]中提出的不具有ESO的分散MPC算法(该算法中, 使用测量所得的状态值对系统进行反馈控制)进行仿真比较, 系统的状态响应曲线如图3~图5所示。

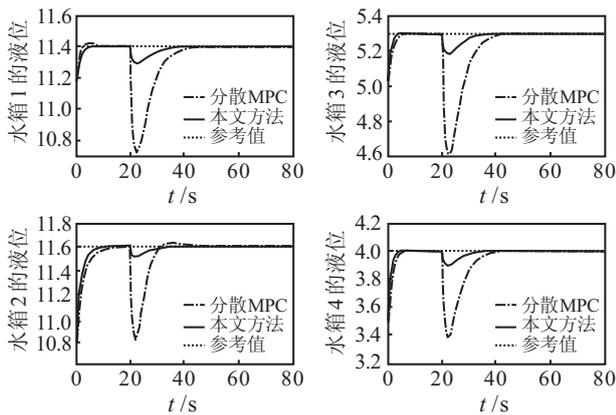


图3 系统的状态响应曲线

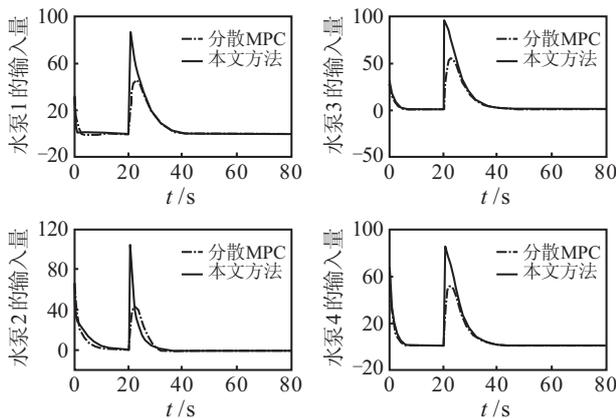


图4 系统的控制量响应

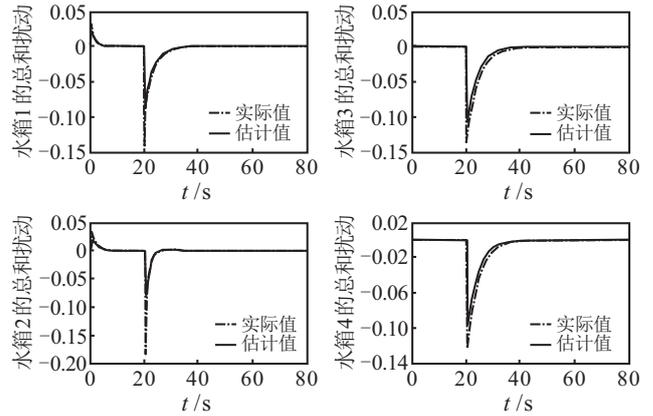


图5 系统的总和扰动真实值和估计值

从图2可以看出, 水箱1和水箱2的液位分别受到水箱3和水箱4的影响. 设定系统的初始位置偏离平衡点, 图3和图5分别给出了系统的状态响应曲线和系统受到的总和扰动的真实值和ESO对总和扰动的估计值比较. 从中可以看出, ESO能够将水箱1和水箱2受到的耦合量当成扰动估计出来, 然后利用组合控制器对系统进行前馈补偿. 相对于不具有ESO的分散MPC, 本文方法能使系统更快地稳定, 同时超调量也更小, 因此, 本文方法能有效处理复杂系统中子系统间的耦合问题. 在  $t = 20\text{s}$  处分别给水箱1~水箱4施加外界干扰  $0.15e^{5-t/4}$ ,  $0.15e^{5-t/4}$ ,  $0.15e^{5-t/4}$ ,  $0.19e^{5-t/4}$ , 由图3和图5可以看出, ESO能够对子系统受到的总和扰动进行有效的估计, 并且估计值最终收敛于实际值, 可见, 正是基于ESO对子系统受到的总和扰动的准确估计, 才能利用组合控制器保证各个子系统具有良好的系统性能. 在本文所设计的控制方法中, 利用ESO对系统受到的总和扰动进行估计, 并利用估计值对系统进行前馈补偿, 不仅降低了子系统之间的输入耦合带来的影响, 而且能够提高系统的抗干扰能力. 对于文献[5]中所提出的不具有ESO的分散MPC算法, 由于子系统间不进行信息交互, 各个控制器得不到其他子系统的输入信息, 不能及时消除子系统间耦合量带来的影响, 同时不能保证系统的抗干扰性能。

### 4 结论

本文提出了一种基于ESO的分散MPC算法, 用于处理子系统之间具有耦合且受外界扰动影响的复杂关联系统的控制问题. 利用ESO对子系统的总和扰动进行估计, 有效解决了子系统间耦合以及外界扰动给系统控制带来的影响, 进一步证明了子系统的观测误差方程具有ISS. 值得指出的是, 在本文所提出的方法中, 控制器间无需进行通信, 从而降低了系统控制成本, 也不需要迭代计算, 降低了控制器的计算量. 最后通过液位控制系统的仿真检验了所提出算法

的有效性.

### 参考文献(References)

- [1] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222-236.  
(Xi Y G, Li D W, Lin S. Model predictive control—Status and challenges[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(3): 222-236.)
- [2] 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 X N, Xi Y G, Li S Y. Performance analysis of distributed model predictive control algorithm[J]. Control Decision, 2002, 17(2): 226-229.)
- [3] Negenborn R R, De Schutter B, Hellendoorn J. Multi-agent model predictive control for transportation networks: Serial versus parallel schemes[J]. Engineering Application Artificial Intelligent, 2008, 21(3): 353-366.
- [4] Camacho E, Bordons C. Model predictive control[C]. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2004: 1-12.
- [5] Rawlings J B, Mayne D. Model predictive control: Theory and design[M]. Madison: Nob Hill Publishing, 2009: 421-437.
- [6] Scattolini R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control—A review[J]. J of Process Control, 2009, 19(5): 723-731.
- [7] Jiang Z P. Decentralized disturbance attenuating output feedback trackers for large scale nonlinear systems[J]. Automatica, 2002, 38(8): 1407-1415.
- [8] Magni L, Scattolini R. Stabilizing decentralized model predictive control of nonlinear systems[J]. Automatica, 2006, 42(7): 1231-1236.
- [9] Richards A, How J. A decentralized algorithm for robust constrained model predictive control[C]. Proc of American Control Conf. Boston: IEEE, 2004: 4261-4266.
- [10] Alessio A, Barcelli D, Bemporad A. Decentralized model predictive control of dynamically coupled linear systems[J]. J of Process Control, 2011, 21(5): 705-714.
- [11] 刘苏, 冯毅萍, 荣冈. 分散 MPC 经济性能评估[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1778-1786.  
(Liu S, Feng Y P, Rong G. Economic performance assessment of decentralized model predictive control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1778-1786.)
- [12] Negenborn R R, Schutter B D, Hellendoorn H. Multi-agent model predictive control for transportation networks[C]. Proc of the 2006 IEEE Int Conf on Networking, Sensing and Control. Lauderdale: IEEE, 2006: 296-301.
- [13] Zhang Y, Li S Y. Networked model predictive control based on neighborhood optimization for serially connected large-scale processes[J]. J of Process Control, 2007, 17(1): 37-51.
- [14] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.  
(Han J Q. The extended states observer of a class of uncertain systems[J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.)
- [15] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [16] Liu H X, Li S H. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 59(2): 1171-1183.
- [17] Li S H, Yang J, Chen W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4792-4802.
- [18] Jiang Z P, Wang Y. Input-to-state stability for discrete-time nonlinear systems[J]. Automatica, 2001, 37(6): 857-869.
- [19] 黄骅, 何德峰, 俞立. 基于多面体描述系统的鲁棒非线性预测控制[J]. 自动化学报, 2012, 38(12): 1906-1912.  
(Huang H, He D F, Yu L. Robust nonlinear predictive control based on polytopic description systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(12): 1906-1912.)
- [20] Mercangoz M, Franci, Doyle J. Distributed model predictive control of an experimental four-tank system[J]. J of Process Control, 2007, 17(3): 297-308.

(责任编辑: 李君玲)