

网络信息模式下分布式系统协调预测控制

郑毅^{1,3} 李少远^{1,2}

摘要 工业系统中广泛存在一类由多个相互关联的子系统组成的大系统. 尽管分布式控制结构的性能没有集中式控制好, 但由于其具有较高的灵活性和容错性, 相对于集中控制更加适合控制上述系统. 在保持容错性的情况下如何提高系统的整体性能是分布式控制的一个难点问题. 本文提出了一种分布式预测控制 (Distributed model predictive control, DMPC) 方法, 该方法通过在各子系统预测控制器的性能指标中加入输入变量对其下游子系统的影响的二次函数, 来扩大分布式预测控制的协调度, 进而在不增加网络连通度, 不改变系统容错性的前提下, 提高系统的性能. 另外, 本文给出了基于该协调策略的带输入约束的分布式预测控制器的设计方法, 在初始可行的前提下, 该方法相继可行并可保证系统渐近稳定.

关键词 预测控制, 分布式系统, 分布式预测控制, 大系统, 协调控制

引用格式 郑毅, 李少远. 网络信息模式下分布式系统协调预测控制. 自动化学报, 2013, 39(11): 1778–1786

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.01778

Networked Cooperative Distributed Model Predictive Control for Dynamic Coupling Systems

ZHENG Yi^{1,3} LI Shao-Yuan^{1,2}

Abstract For the control of a class of large-scale systems, which consists of many individual subsystems, the distributed control framework is more suitable because of its good flexibility and error tolerant, despite the fact that its performance is not as good as that of centralized control. How to improve the performance of the entire system and, at the same time, maintain the flexibility and error tolerance characteristics under the distributed framework is an important problem. In this paper, a novel distributed model predictive control (DMPC) is proposed, which enlarges the coordinate degree of DMPC through adding a quasi-function of the impact of control input to its downstream subsystems to the performance index of each subsystem-based model predictive control (MPC). Then, the performance of the entire system is improved with unchanged network connectivity. In addition, a design method with this coordination strategy and inputs constraints is provided, which guarantees the recursive feasibility of the designed DMPC and asymptotic stability of the closed-loop system.

Key words Model predictive control (MPC), distributed system, distributed model predictive control (DMPC), large-scale system, cooperative control

Citation Zheng Yi, Li Shao-Yuan. Networked cooperative distributed model predictive control for dynamic coupling systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1778–1786

收稿日期 2013-08-13 录用日期 2013-08-31
Manuscript received August 13, 2013; accepted August 31, 2013
国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2013CB035500), 国家自然科学基金 (61233004, 61221003) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (20120073130006) 资助
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB035500), National Natural Science Foundation of China (61233004, 61221003), and Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20120073130006)

庆祝《自动化学报》创刊 50 周年专刊约稿
Invited Articles for the Special Issue for the 50th Anniversary of *Acta Automatica Sinica*

1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240 2. 信息与系统教育部重点实验室 上海 200240 3. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室 上海 200240

1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 2. Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240 3. Key Laboratory of Power Transmission and Power Converter, Ministry of Edu-

在工业过程中, 广泛地存在着的一类系统, 如城市交通系统、分布式能源系统、城市供水网络等, 这类系统由多个子系统组成, 系统之间通过能量、质量相互耦合作用, 系统模型复杂、约束多、目标多. 对于这类系统的控制, 如果采用集中控制, 会受到计算速度和装置规模的限制, 尤其是当一个或几个子系统出现故障时, 集中式控制方式还会出现工作失效的情况, 灵活性、容错性相对较弱^[1-2]. 而全分散的控制方法, 虽然具有较强的灵活性, 各局部控制器根据各自的目标自主控制, 但由于控制器之间互不通信、没有有效的协调机制, 对子系统间的耦合作用考虑的较少, 也就造成了全分散控制方法难以保证系统的鲁棒性和全局动态性能, 尤其是对强耦合系统问题更为突出.

cation of China, Shanghai 200240

随着计算机技术、网络通信技术、现场总线技术、无线网络技术、智能化传感器、智能仪表技术的发展, 控制算法可以直接在底层的控制单元和智能仪表中实现, 并且这些单元之间可以通过网络进行有效的通信. 这为分布式控制的实现提供了良好的硬件条件, 并促进了分布式控制的广泛关注和迅速发展^[3-4]. 由于模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 采用反馈矫正、滚动优化的策略, 有很强的处理约束的能力和优越的动态性能^[5-8], 同时, 预测控制能够预测系统未来控制输入和状态序列, 进而能够有效地估计分布式系统各子系统间的相互作用, 作为各子系统的前馈量来提高系统控制性能. 因此, 兼具分布结构和预测控制特点的分布式预测控制 (Distributed MPC, DMPC)^[9] 应运而生, 并成为上述分布式系统控制优化问题的一个重要研究方向^[2, 10]. 然而, 分布式预测控制得到的整体优化性能仍不如集中式预测控制^[1-2].

国际上众多学者对分布式预测控制方法进行了深入的研究, 并得到了很多有益的结果^[2]. 涉及到系统分解^[11-12]、针对不同性能要求设计的协调策略^[13-14]、性能分析^[15-16] 和实际应用^[17-19] 等各个方面. 为了提高系统性能, 最早也是最为简单的方式是, 每个子系统控制器优化各自对应子系统的性能, 利用前一时刻其他子系统的未来状态序列求解当前 MPC 控制律^[9]. 随后文献 [20] 给出了带有输入约束的保稳定性控制器设计方法, 文献 [21] 进一步给出了带有输入输出约束的稳定化 DMPC 设计方法. 这类方法结构简单、应用方便. 为了进一步提高系统的性能, 文献 [22] 提出采用一种迭代方法求解控制率, 当系统收敛时, 这种方法得到的解纳什最优 (Nash optimality). 另外一种协调方法是各子系统控制器优化系统的整体性能^[23-24], 文献 [24] 给出了无约束时, 系统的解析解和稳定条件, 并定性分析了其能够提高性能的原因; 文献 [25] 进一步给出了非迭代情况下, 带有输入约束的稳定化控制器的设计方法; 文献 [26-27] 给出了含输入约束的该协调策略下迭代算法稳定化控制器的设计方法, 并证明了当系统收敛时, 所得到的解为帕累托最优 (Pareto optimality). 这种方法的优点是能够得到较好的整体性能, 但该方法要求子系统控制器必须获得全局信息, 网络需要全连通. 这是在分布式控制结构中不希望出现的. 因为它会破坏分布式控制结构容错性、灵活性好这一重要特征. 因此, 考虑到各子系统的控制作用对其直接相关联的下游子系统的性能影响最大, 文献 [25] 给出了一种不需要全局信息的协调策略和该协调策略下稳定化控制器的设计方法. 该方法中每个子系统控制器在求解控制律时, 不仅考虑其自身子系统的性能, 而且优化其直接关联的下

游子系统的性能. 实践和仿真验证了该方法相对只优化自身性能的协调策略, 能够获得更好的整体优化性能^[18, 28]. 由上可知, 这几种协调策略主要是通过扩大子系统控制器优化的子系统范围来提高系统的整体性能的, 但同时也增加了网络的连通度, 降低了容错性. 这一点在文献 [15, 29] 已明确指出. 因此, 能否找到一种分布式预测控制协调策略, 在不扩大系统网络连通度的前提下提高闭环系统整体性能呢?

本文针对此问题, 提出了一种新的分布式预测控制协调策略, 该方法在各子系统预测控制器的性能指标中加入输入变量对其下游子系统的影响的二次函数, 使得在不增加网络连通度的前提下, 扩大分布式预测控制的协调度, 进而提高系统的性能. 另外, 本文给出了基于该协调策略的带输入约束的分布式预测控制器的设计方法, 该方法设计的控制器在初始可行的前提下, 相继可行并可保证被控系统渐近稳定.

本文第 1 节对控制问题进行了详细描述; 第 2 节对分布式预测控制协调策略进行了简单的回顾; 第 3 节给出了本文提出的网络信息模式下分布式预测控制的数学描述, 并设计了求解算法; 第 4 节对该算法进行可行性和稳定性分析; 最后, 总结全文.

1 问题描述

如图 1 所示, 分布式控制结构中控制对象由多个相互耦合子系统组成的, 每个子系统由一个独立的控制器控制, 控制器与控制器之间通过网络交换信息, 并采用一定的协调策略达到某一共同的控制目标或整体性能. 如果子系统控制器所运行的控制算法为模型预测控制, 则称为分布式预测控制.

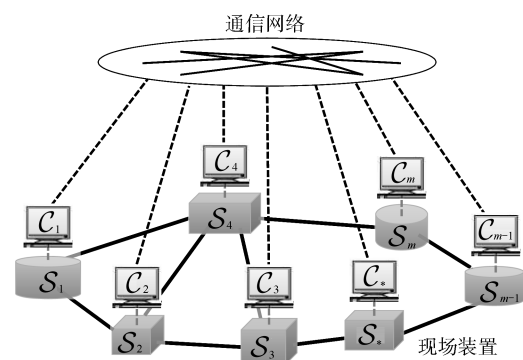


图 1 分布式预测控制示意图
Fig. 1 The schematic of distributed model predictive control

为了描述清楚, 设系统有 m 个相互关联的离散时间线性子系统 $S_i, i \in \mathcal{P} = \{1, 2, \dots, m\}$ 和 m 个控制器 $C_i, i \in \mathcal{P}$. 令子系统之间通过状态相互耦合.

如果子系统 $\mathcal{S}_i$ 受子系统 $\mathcal{S}_j, \forall j \in \mathcal{P}$ 的影响, 称子系统 $\mathcal{S}_j$ 为子系统 $\mathcal{S}_i$ 的上游子系统, 子系统 $\mathcal{S}_i$ 为子系统 $\mathcal{S}_j$ 的下游子系统. 定义子系统 $\mathcal{S}_i$ 的所有上游子系统的序号集合为 $\mathcal{P}_i^u$, 所有下游子系统的序号集合为 $\mathcal{P}_i^d$. 则各子系统动态可用如下方程描述:

$$x_{i,k+1} = A_{ii}x_{i,k} + B_{ii}u_{i,k} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ij}x_{j,k} \quad (1)$$

其中, $x_{i,k}, u_{i,k}$ 分别为第 i 个子系统在 k 时刻的状态和输入. A_{ii}, B_{ii}, A_{ij} 和 B_{ij} 为系数矩阵. 把所有子系统模型综合在一起, 则可得到全系统模型:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} x_k &= [x_{1,k} \ x_{2,k} \ \cdots \ x_{m,k}]^T \\ u_k &= [u_{1,k} \ u_{2,k} \ \cdots \ u_{m,k}]^T \\ A &= \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m,1} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix}^T \\ B &= \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{m,1} & \cdots & B_{mm} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

本文的研究目标为: 设计分布式预测控制, 在不增加网络连通度的情况下, 使得闭环系统整体性能指标 $J(k)$ 最小. $J(k)$ 定义如下:

$$J(k) = \sum_{l=0}^{N-1} \left(\|x_{k+l|k}\|_Q + \|u_{k+l|k}\|_R \right) + \|x_{k+N|k}\|_P \quad (3)$$

其中, $\hat{x}_{k+l|k}$ 和 $u_{k+l|k}$ 分别表示在第 k 时刻计算得到的第 $k+l$ 时刻系统的状态预估值和优化输入值. 权重系数矩阵 $Q > 0, P > 0$ 和 $R > 0$ 为正定对角矩阵.

2 现有分布式预测控制的协调策略

目前, 已有许多不同的分布式预测控制算法, 可按不同的方式进行分类. 按每个控制周期内控制器之间交换信息的次数分类, 可分为迭代算法和非迭代算法; 按网络连通度分类, 可分为全连通算法和非全连通算法; 按系统的性能指标进行分类可分为基于全局性能指标、基于局部性能指标或基于邻域(作用域)性能指标的分布式预测控制方法. 一般情况下采用迭代算法, 全系统的优化性能要好于非迭代算法, 而非迭代方法通信次数和优化问题求解次数

少, 计算效率相对较高. 非全连通方法获取的信息范围小, 不利于协调策略提高系统整体优化性能, 但该方法相对全连通算法容错性灵活性高, 更符合分布式控制的特点^[1].

由于本文重点讨论分布式预测控制的协调策略, 因此, 这里按各子系统 MPC 的性能指标的分类方式进行介绍:

1) 基于局部性能指标的 DMPC: 每个子控制器利用上游子系统提供的未来状态序列和子系统模型, 预测当前子系统的状态演化, 通过优化求得控制器最优解, 使得自身的局部性能指标 (5) 最小. 令 P, Q 为对角块矩阵, 满足

$$\begin{aligned} Q &= \text{block-diag}\{Q_1, Q_2, \cdots, Q_m\} \\ P &= \text{block-diag}\{P_1, P_2, \cdots, P_m\} \\ R &= \text{block-diag}\{R_1, R_2, \cdots, R_m\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, Q_i, R_i 和 P_i 为正定矩阵. 则每个子系统的性能指标可写成:

$$J_i(k) = \sum_{l=0}^{N-1} \left(\|x_{i,k+l|k}\|_{Q_i} + \|u_{i,k+l|k}\|_{R_i} \right) + \|x_{i,k+N|k}\|_{P_i} \quad (5)$$

这类控制器需要接收上游子系统的信息并发送信息到下游子系统, 在网络结构上需要每个子控制器与其直接关联的上下游子系统控制器连接. 对网络的连通度要求不高, 系统的灵活性、容错性好, 且结构简单、便于应用. 但这种方法各个子系统只关注其自身的性能, 得到的系统整体性能还有待提到. 因此, 文献 [22] 提出一种迭代求解方法来提高该类分布式预测控制的全局性能. 采用这种方法后, 系统可达到纳什最优 (Nash optimality).

2) 基于全局性能指标的 DMPC: 子系统控制器 C_i 与所有子系统控制器进行信息交换, 获得其他子系统前一次计算得到的输入序列, 利用全系统动态模型预测未来状态序列, 优化全局性能指标:

$$\begin{aligned} \bar{J}_i(k) &= \sum_{j=1}^m J_j(k) = \\ &= \sum_{j=1}^m \left(\sum_{l=0}^{N-1} \left(\|x_{j,k+l|k,i}\|_{Q_i} + \|x_{j,k+N|k,i}\|_{P_i} \right) + \sum_{l=0}^{N-1} \|u_{i,k+l|k}\|_{R_i} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $x_{k+l|k,i}$ 为在控制器 C_i 中计算得到的 $k+l$ 时刻全系统的状态预估值.

这种协调策略, 每个子系统需要得到全系统的信息, 子系统之间必须相互连通. 相对基于局部性

能指标的 DMPC, 该方法对网络的可靠性要求高, 灵活性和容错性降低. 优点是能够得到较好的全局最优性. 当采用迭代方法求解时, 如果满足收敛性条件, 所得到的解为帕累托最优 (Pareto optimality).

3) 基于邻域性能指标的 DMPC: 考虑到子系统 $\mathcal{S}_i$ 的控制量不仅对其本身的性能产生影响, 而且对其下游子系统 $\mathcal{S}_j$, $j \in \mathcal{P}_i^d$ 的优化性能产生影响. 因此, 文献 [26–27] 给出了一种协调策略, 其中每个子系统控制器 $\mathcal{C}_i$ 的性能指标中不仅包含其相应子系统 $\mathcal{S}_i$ 的性能, 而且包含其直接影响的子系统 $\mathcal{S}_j$, $j \in \mathcal{P}_i^d$ 的性能, 称为邻域优化或作用域优化. 优化目标函数为

$$\begin{aligned} \tilde{J}_i(k) = \sum_{j \in \{\mathcal{P}_i^d, i\}} J_j(k) = \\ \sum_{j \in \{\mathcal{P}_i^d, i\}} \left(\sum_{l=0}^{N-1} \|x_{j,k+l|k}\|_{Q_j} + \|x_{j,k+N|k}\|_{P_j} \right) + \\ \sum_{l=0}^{N-1} \|u_{i,k+l|k}\|_{R_i} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 这种协调策略能够明显改善系统的整体性能, 同时不需要全局信息. 但每个子系统需要与其上下游系统和所有下游子系统的上游系统进行通信, 网络结构上每个子系统控制器与所有上下游系统和上下游子系统的上下游系统连接, 相对于第一种方法, 增加了网络的连通度.

由上面分析知, 以上方法主要是通过增加子系统的优化的性能指标所涉及的子系统的范围来提高系统性能. 一般情况下, 系统协调度 (子系统的优化范围) 越大, 系统的整体性能越好, 但同时需要增加每个子系统获取信息的范围, 增加网络的连通度, 牺牲了系统的部分灵活性和容错性. 因此, 需要一种能够在相同网络连通度的条件下, 提高系统整体性能的协调分布式预测控制方法. 为解决这个问题, 本文第 3 节提出了一种网络化分布式系统的协调预测控制方法.

3 网络信息模式下协调预测控制

在本节中主要给出 m 个子系统 MPC 的优化问题及求解算法. 该方法通过在性能指标中加入当前输入对下游子系统的影响实现对相应子系统和下游子系统的性能的优化, 扩大 DMPC 协调度. 令所有子 MPC 采用相同的预测时域 N , $N \geq 1$, 且同步运行. 在每个控制周期, 各子 MPC 在网络上获得对应子系统的上下游子系统的未来预估状态, 优化各子 MPC 相应子系统和下游子系统的性能 (加入当前输入对下游子系统的影响的性能指标). 在介绍提出的

控制方法前, 首先, 做如下在非全局信息条件下设计稳定化分布式预测控制中经常用到假设.

假设 1. 子系统 $\mathcal{S}_i$, $\forall i \in \mathcal{P}$, 存在反馈控制律 $u_{i,k} = K_i x_{i,k}$, 使得 $A_{di} = A_{ii} + B_{ii}K_i$ 的特征值在单位圆内, 且系统 $x_{k+1} = A_c x_k$ 渐近稳定. 其中, $A_c = A + BK$, $K = \text{block-diag}\{K_1, K_2, \dots, K_m\}$.

假设 2. 矩阵

$$\begin{aligned} A_d &= \text{block-diag}\{A_{d1}, A_{d2}, \dots, A_{dm}\} \\ A_o &= A_c - A_d \end{aligned}$$

满足不等式

$$A_o^T P A_o + A_o^T P A_d + A_d^T P A_o < \frac{\hat{Q}}{2}$$

其中, $\hat{Q} = Q + K^T R K > 0$. P_i 满足:

$$\begin{aligned} A_{di}^T P_i A_{di} - P_i &= -\hat{Q}_i \\ \hat{Q}_i &= Q_i + K_i^T R_i K_i \end{aligned}$$

同时

$$A_d^T P A_d - P = -\hat{Q}$$

由系统模型 (1) 可知, 对 $\forall i \in \mathcal{P}$, 有如下预测模型:

$$\begin{aligned} x_{i,k+l|k} &= f_{i,k+l|k} = \\ &A_{ii}^l x_{i,k} + \sum_{h=1}^l A_{ii}^{l-h} B_{ii} u_{i,k+h-1|k} + \\ &\sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} \sum_{h=1}^l A_{ii}^{l-h} A_{ij} x_{j,k+h-1|k} \end{aligned} \quad (8)$$

对上式求偏导有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_{i,k+l|k}}{\partial u_{j,k+h-1|k}} &= \sum_{h=1}^l \frac{\partial f_{i,k+l|k}}{\partial x_{j,k+h|k}} \frac{\partial x_{j,k+h|k}}{\partial u_{j,k+h-1|k}} = \\ &\sum_{h=1}^{l-1} A_{ii}^{l-h-1} A_{ij} B_{jj} \end{aligned} \quad (9)$$

由于子控制器 $\mathcal{C}_i$ 的控制律不仅影响子系统 $\mathcal{S}_i$ 的性能, 也影响其下游子系统的性能, 控制器 $\mathcal{C}_i$ 应同时优化这两部分性能. 另外, 考虑到 k 时刻子系统 $\mathcal{S}_i$ 的上游子系统的状态序列 $x_{j,k+l|k}$ 未知, 可采用 $k+1$ 时刻得到的输入和状态序列作为估计值. 定义

性能指标:

$$J_i^N(k) = \sum_{l=0}^{N-1} \left(\|x_{i,k+l|k}\|_{Q_i} + \|u_{i,k+l|k}\|_{R_i} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^d} \|x_{j,k+l|k-1} + \omega_i S_{ji,k+l|k}\|_{Q_j} \right) + \|x_{i,k+N|k}\|_{P_i} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^d} \|x_{j,k+N|k-1} + \omega_i S_{ji,k+N|k}\|_{P_j} \quad (10)$$

其中

$$S_{ji,k+l|k} = A_{jj}^{l-h-1} A_{ji} B_{ji} (u_{i,k+l|k} - u_{i,k+l|k-1})$$

加入加权系数 ω_i 主要是为了提高优化问题的收敛性.

预测模型为

$$x_{i,k+\frac{l}{k}} = A_{ii}^l x_{i,k} + \sum_{h=1}^l A_{ii}^{l-h} B_{ii} u_{i,k+h-1|k} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} \sum_{h=1}^l A_{ii}^{l-h} A_{ij} x_{j,k+h-1|k-1} \quad (11)$$

在预测控制中系统的相继可行性和系统的稳定性是一个很重要的命题^[30], 同样在分布式预测控制中, 也是非常重要的问题. 为了保证系统稳定, 考虑在优化问题中加入终端约束.

引理 1. 如果假设 1 和 2 成立, 则对于任意标量 c , 集合

$$\Omega(c) = \{x \in \mathbf{R}^{n_x} : \|x\|_P \leq c\}$$

是闭环系统 $x_{k+1} = A_c x_k$ 的正不变吸引域. 且存在足够小的标量 ε , 使得对任意 $x \in \Omega(\varepsilon)$, Kx 为可行输入, 即 $\mathcal{U} \subset \mathbf{R}_{n_u}$.

证明. 定义 $V_k = \|x_k\|_P^2$. 沿闭环系统 $x_{k+1} = A_c x_k$ 对 V_k 做差分, 有:

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= x_k^T A_c^T P A_c x_k - x_k^T P x_k = \\ &= x_k^T (A_d^T P A_d - P + A_o^T P A_o + A_o^T P A_d + A_d^T P A_o) x_k \leq \\ &= -x_k^T \hat{Q} x_k + \frac{1}{2} x_k^T \hat{Q} x_k \leq \\ &= \frac{1}{2} x_k^T \hat{Q} x_k < 0 \end{aligned}$$

对所有 $x_k \in \Omega(c) \setminus \{0\}$ 成立. 即所有起始于 $\Omega(c)$ 的状态轨迹会始终保持在 $\Omega(c)$ 内, 并渐近趋于原点. 由于 P 正定, $\Omega(\varepsilon)$ 可缩小至 0. 因此, 存在足够小的 $\varepsilon > 0$, 使得对于所有 $x \in \Omega(\varepsilon)$, $Kx \in \mathcal{U}$. $\square$

子系统 $\mathcal{S}_i$ 的 MPC 终端约束可以定义为

$$\Omega_i(\varepsilon) = \left\{ x_i \in \mathbf{R}^{n_{x_i}} : \|x_i\|_{P_i} \leq \frac{\varepsilon}{\sqrt{m}} \right\}.$$

显然, 如果 $x \in \Omega_1(\varepsilon) \times \cdots \times \Omega_m(\varepsilon)$, 那么系统将渐近稳定, 这是因为

$$\|x_i\|_{P_i}^2 \leq \frac{\varepsilon^2}{m}, \quad \forall i \in \mathcal{V}$$

说明

$$\sum_{i \in \mathcal{V}} \|x_i\|_{P_i}^2 \leq \varepsilon^2$$

因此, $x \in \Omega(\varepsilon)$. 假设在 k_0 时刻, 所有子系统的状态都满足 $x_i(k_0) \in \Omega_i(\varepsilon)$, 并且 $\mathcal{C}_i$ 采用控制律 $K_i x_i(k)$. 那么, 根据引理 1, 系统渐近稳定.

由上可知, 只要设计的 MPC 能够把相应子系统 $\mathcal{S}_i$ 的状态推到集合 $\Omega_i(\varepsilon)$ 中, 那么就可以通过反馈控制律使得系统稳定到原点. 另外, 在分布式预测控制中, 子系统控制器预测未来时刻状态时, 用到 $k-1$ 时刻计算的预估值, 与基于当前时刻的预测值存在一定偏差, 这个偏差使得构造 k 时刻 MPC 的可行解变得困难. 因此, 需要加入一致性约束来限制这个偏差. 下面给出本文提出的分布式预测控制方法各子 MPC 的优化问题.

问题 1. 在子系统 $\mathcal{S}_i$ 中, 令 ε 满足引理 1, $k > 1$. 已知 $x_{i,k}$, $x_{-i,k}$, $u_{i,k+l-1|k-1}$, $x_{+i,k+l|k-1}$ 和 $x_{-i,k+l|k-1}$, $l = 1, 2, \cdots, N$. 搜索控制序列 $u_{i,k:k+l-1|k}$, 最小化性能指标:

$$\min_{u_{i,k:k+l-1|k}} J_i^N(k)$$

满足约束 (11) 和

$$\sum_{s=1}^l \alpha_{l-s} \|x_{i,k+s|k} - x_{i,k+s|k-1}\|_2 \leq \frac{\xi \kappa \varepsilon}{2\sqrt{m m_1}}, \quad (12)$$

$$l = 1, 2, \cdots, N-1$$

$$\|x_{i,k+N|k} - x_{i,k+N|k-1}\|_{P_i} \leq \frac{\kappa \varepsilon}{2\sqrt{m}} \quad (13)$$

$$\|x_{i,k+l|k}\|_{P_i} - \|\tilde{x}_{i,k+l|k}\|_{P_i} \leq \frac{\varepsilon}{\mu N \sqrt{m}}, \quad (14)$$

$$l = 1, 2, \cdots, N$$

$$u_{i,k+l-1|k} \in U_i \quad (15)$$

$$x_{i,k+N|k} \in \Omega_i\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \quad (16)$$

在上面的约束中

$$m_1 = \max_{i \in \mathcal{P}} \{\text{number of elements in } \mathcal{P}_i^u\} \quad (17)$$

$$\alpha_l = \max_{i \in \mathcal{V}} \max_{j \in \mathcal{P}_i} \left\{ \lambda_{\max}^{\frac{1}{2}} (\bar{A}_i^l A_{ij})^T P_j \bar{A}_i^l A_{ij} \right\}, \quad (18)$$

$$l = 0, 1, \dots, N-1$$

$0 < \kappa < 1$ 和 $0 < \xi \leq 1$ 为设计参数, 将在第 4 节详细说明.

以上优化问题中约束 (12) 和 (13) 为一致性约束, 主要是保证系统的相继可行性. 它需要 k 时刻系统的预测状态与 $k-1$ 时刻的预测状态相差不大.

约束 (14) 为稳定性约束, 在证明系统稳定时需要. 其中, $\mu > 0$ 为设计参数, 需要满足式 (26); $\tilde{x}_{i,k+l|k}$ 为在 $u_{i,k+l-1|k-1}$, $l = 1, 2, \dots, N-1$; $u_{i,k+N-1|k} = K_i x_{i,k+N-1|k}$ 和 $x_{j,k+1:k+N-1|k-1}$, $j \in \mathcal{P}_i^u$ 作用下的状态轨迹. 并令 $x_{i,k+N|k-1} = A_{di} x_{i,k+N|k-1}$.

值得一提的是, 为了保证系统的可行性, 这里的定义的终端约束集为 $\Omega_i(\varepsilon/2)$ 而不是 $\Omega(\varepsilon)$.

假设 3. 在初始时刻 k_0 , 所有子系统 $\mathcal{S}_i, i \in \mathcal{P}$ 存在可行控制律 $u_{i,k_0+l|k_0} \in \mathcal{U}_i, l = 1, 2, \dots, N-1$, 使得 $x_{i,k_0+l|k_0} \in \Omega_i(\varepsilon/2)$, 且 $\tilde{J}_i(k_0)$ 有界.

如果假设 3 成立, 那么可得到如下网络信息模式下稳定化的分布式预测控制算法.

算法 1.

1) 初始化

初始化 $x_{k_0}, u_{i,k_0+l|k_0}, l = 1, 2, \dots, N$, 满足假设 3.

在 k_0 时刻, 如果 $x_{k_0} \in \Omega(\varepsilon)$, 那么对所有 $k \geq k_0$, 采用反馈控制 $u_{i,k} = K_i x_{i,k}$, 否则, 计算 $x_{i,k_0+l+1|k_0}$ 并发送给上下游子系统.

2) 在 k 时刻更新控制律

接收 $x_{i,k}, x_{j,k+l|k-1}, j \in \mathcal{P}_i$, 如果 $x_k \in \Omega(\varepsilon)$, 那么应用终端控制 $u_{i,k} = K_i x_{i,k}$, 否则, 解优化问题 1, 得到 $u_{i,k:k+N-1|k}$, 并应用 $u_{i,k|k}$ 到系统 $\mathcal{S}_i$.

计算 $x_{i,k+l+1|k}$ 并发送给 $\mathcal{S}_i$ 的上下游子系统.

3) 在 $k+1$ 时刻更新控制律

令 $k+1 \rightarrow k$, 重复步骤 2).

算法 1 中, 如果 $\Omega_i(\varepsilon)$ 足够小, 可以一直采用 MPC 进行控制, 这时控制器可以把状态推进一个小的 $\Omega(\varepsilon)$ 集合中. 下一节中将详细分析该分布式控制算法的可行性和稳定性.

4 性能分析

在预测控制中系统初始可行, 则相继可行性和系统的稳定性是一个很重要的命题^[30]. 同样在分布式预测控制中, 也是一个重要的问题. 相对于集中式

预测控制, 设计稳定化的分布式预测控制更为复杂和具有挑战性. 下面分析本文设计的控制器的可行性和稳定性.

4.1 可行性

这部分主要结果是: 如果系统在 $k-1, k > 1$ 时刻可行, 那么在 k 时刻 $u_{i,k:k+N-1|k} = u_{i,k:k+N-1|k-1}$ 为问题 1 的可行解. 即, $u_{i,k:k+N-1|k}, x_{i,k+1:k+N|k}$ 满足系统可行性约束 (12) 和 (13)、稳定性约束 (14)、输入约束 (15) 和终端约束 (16).

另外, 由于 $u_{i,k:k+N-1|k} = u_{i,k:k+N-1|k-1}$, 有

$$\|x_{i,k+l|k}\|_{P_i} - \|\tilde{x}_{i,k+l|k}\|_{P_i} = 0$$

满足稳定性约束. 因此, 只要证明 $u_{i,k:k+N-1|k}$ 满足约束 (12)~(15) 即可.

引理 2. 如果假设 1 和假设 2 成立, 且在任意 $k-1 \geq 0$ 时刻, 问题 1 存在可行解, 满足 $x_{i,k+N-1|k-2} \in \Omega_i(\varepsilon/2)$. 则:

$$x_{i,k+N|k-1} \in \Omega_i\left(\frac{\varepsilon'}{2}\right) \quad (19)$$

的充分条件为 P, Q 满足:

$$\max_{i \in \mathcal{P}} (\rho_i) \leq (1 - \kappa)^2 \quad (20)$$

其中, $\varepsilon' = (1 - \kappa)\varepsilon$.

证明. 由 $x_{i,k+N|k-1} = A_{di} x_{i,k+N|k-1}$ 知, 当

$$\rho_i = \lambda_{\max}(A_{di}^T A_{di}) \leq (1 - \kappa)^2$$

时, 有 $\|x_{i,k+N|k-1}\|_{P_i} < (1 - \kappa)\|x_{i,k+N|k-1}\|_{P_i}$ □

引理 3. 如果假设 1 和假设 2 成立, 对任意 $k \geq 0, \mathcal{S}_i, i \in \mathcal{P}$, 问题 1 在 $1, 2, \dots, k-1$ 时刻都有解, 且

$$\frac{m_1}{\lambda_{\min}(P)} \sum_{h=0}^l \alpha_{l-h} \leq 1$$

成立. 则对所有 $l = 1, 2, \dots, N$,

$$\|\tilde{x}_{i,k+l|k} - x_{i,k+l|k}\|_{P_i} \leq \frac{\kappa \varepsilon}{2\sqrt{m}} \quad (21)$$

成立, 且 $x_{i,k:k+N-1|k-1}$ 满足约束 (12) 和 (13).

证明. 首先证明当 $k-1$ 时刻存在可行解时, 式 (21) 成立.

1) 当 $l = 1, 2, \dots, N$ 时, 根据式 (11) 有:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{i,k+l|k} = & A_{ii}^l \left(A_{ii}x_{i,k-1} + B_{ii}u_{i,k-1} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ij}x_{j,k-1} \right) + \\ & \sum_{h=1}^l A_{ii}^{l-h} B_{ii}u_{i,k+h-1|k-1} + \\ & \sum_{h=1}^l \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ii}^{l-h} A_{ij}x_{j,k+h-1|k-1} \end{aligned} \quad (22)$$

和

$$\begin{aligned} x_{i,k+l|k-1} = & A_{ii}^l (A_{ii}x_{i,k-1} + B_{ii}u_{i,k-1} + \\ & \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ij}x_{j,k-1|k-2}) + \\ & \sum_{h=1}^l A_{ii}^{l-h} B_{ii}u_{i,k+h-1|k-1} + \\ & \sum_{h=1}^l \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ii}^{l-h} A_{ij}x_{j,k+h-1|k-2} \end{aligned} \quad (23)$$

式 (23) - 式 (22) 有:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+l|k) - x_i(k+l|k-1) = & \\ & \sum_{h=0}^l \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ii}^{l-h} A_{ij} (x_{j,k+h-1|k-1} - x_{j,k+h-1|k-2}) \end{aligned} \quad (24)$$

考虑在 $k-1$ 时刻 $x_{i,k+1:k+N-1|k-1}$ 可行, 满足约束 (12), 显然式 (21) 成立.

2) 当 $l = N$ 时, 有:

$$\tilde{x}_{i,k+N|k} = A_{d,i}\tilde{x}_{i,k+N-1|k} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ij}x_{j,k+N-1|k-1}$$

$$x_{i,k+N|k-1} = A_{d,i}x_{i,k+N-1|k-1} + \sum_{j \in \mathcal{P}_i^u} A_{ij}x_{j,k+N-1|k-1}$$

相减可得:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{i,k+N|k} - x_{i,k+N|k-1} = & \\ & A_{d,i}(\tilde{x}_{i,k+N-1|k} - x_{i,k+N-1|k-1}) \end{aligned} \quad (25)$$

式 (21) 成立.

其次证明当式 (21) 成立时, $x_{i,k:k+N-1|k-1}$ 满足约束 (12) 和 (14).

1) 当 $l = 1, 2, \dots, N-1$ 时, 把 $x_{i,k+l|k}$ 代入

约束条件 (12) 中, 并考虑式 (21) 有:

$$\begin{aligned} & \sum_{s=0}^l \alpha_{l-s} \|x_{i,k+h|k} - x_{i,k+h|k-1}\|_2 \leq \\ & \frac{1}{\lambda_{\min}(P_i)} \sum_{h=0}^l \alpha_{l-h} \|x_{i,k+h|k} - x_{i,k+h|k-1}\|_{P_i} \leq \\ & \frac{1}{\lambda_{\min}(P)} \sum_{h=0}^l \alpha_{l-h} \frac{\kappa \varepsilon}{2\sqrt{m}} \end{aligned}$$

显然, 当

$$\frac{m_1}{\lambda_{\min}(P)} \sum_{h=0}^l \alpha_{l-h} \leq 1$$

时, $x_{i,k+l|k}$ 满足约束条件 (12).

2) 当 $l = N$ 时, 由式 (25) 知, $x_{i,k+N|k}$ 满足约束条件 (13). $\square$

引理 4. 当假设 1 和假设 2 成立, 且问题 1 在 $0, 1, \dots, k-1, k > 0$ 时刻有解, 则 $u_{i,k+l-1|k-1} \in \mathcal{U}, l = 1, 2, \dots, N, i \in \mathcal{P}$.

证明. 由于 $k-1$ 时刻有解, $u_{i,k+l-1|k-1} \in \mathcal{U}, l = 1, 2, \dots, N-1$. 因此, 只需证明 $u_{i,k+N-1|k-1} \in \mathcal{U}$.

根据引理 2 和引理 3, 采用三角不等式, 有:

$$\begin{aligned} & \|\tilde{x}_{i,k+N-1|k}\|_{P_i} \leq \\ & \|\tilde{x}_{i,k+N-1|k} - x_{i,k+N-1|k-1}\|_{P_i} + \\ & \|x_{i,k+N-1|k-1}\|_{P_i} \leq \\ & \frac{(1-\kappa)\varepsilon}{2\sqrt{m}} + \frac{\varepsilon}{2\sqrt{m}} = \frac{\varepsilon}{\sqrt{m}} \end{aligned}$$

因此, $x_{i,k+N-1|k} \in \Omega_i(\varepsilon)$. 根据引理 1, $u_{i,k+N-1|k-1} = K_i x_{i,k+N-1|k} \in \mathcal{U}$. $\square$

引理 5. 当假设 1 和假设 2 成立, 且问题 1 在 $0, 1, \dots, k-1, k > 0$ 时刻有解, 则对 $\forall i \in \mathcal{P}$ 有 $\tilde{x}_{i,k+N|k} \in \Omega_i(\varepsilon/2)$.

证明. 由三角不等式有:

$$\begin{aligned} & \|\tilde{x}_{i,k+N|k}\|_{P_i} \leq \\ & \|\tilde{x}_{i,k+N|k} - x_{i,k+N|k-1}\|_{P_i} + \|x_{i,k+N|k-1}\|_{P_i} < \\ & \frac{\kappa \varepsilon}{2\sqrt{m}} + \frac{(1-\kappa)\varepsilon}{2\sqrt{m}} = \frac{\varepsilon}{2\sqrt{m}} \end{aligned}$$

由此可见 $\tilde{x}_{i,k+N|k}$ 满足终端约束. $\square$

定理 1. 如果假设 1 和假设 2 成立, 则在 $k, k > 0$ 时刻, 对 $\forall i \in \mathcal{P}, u_{i,k+l-1|k-1}, \tilde{x}_{i,k+l|k}, l = 1, 2, \dots, N$ 为问题 1 的可行解.

证明. 由引理 1~5 可以直接得到定理 1. $\square$

至此, 证明了提出 DMPC 算法的相继可行性, 下面证明系统的稳定性.

4.2 稳定性

定理 2. 如果假设 1~3 成立, 且控制率满足约束条件 (12)~(16), 设计参数满足条件:

$$\frac{(N-1)\kappa}{2} + \frac{1}{\mu} - \frac{1}{2} < 0 \quad (26)$$

则, 应用算法 1, 系统 (1) 渐近稳定到原点.

证明. 根据算法 1, 当 x_k 进入 $\Omega(\varepsilon)$ 时, 采用反馈控制, 且反馈控制渐近稳定. 因此, 这里证明当 $x_k \in \mathcal{X} \setminus \Omega(\varepsilon)$ 时, 系统渐近稳定.

定义 Lyapunov 函数

$$V_k = \sum_{l=1}^N \|x_{k+l|k}\|_P$$

由约束 (15) 知:

$$\|x_{i,k+l|k}\|_P - \|\tilde{x}_{i,k+l|k}\| \leq \frac{\varepsilon}{\mu N}$$

有

$$V_k \leq \sum_{l=1}^N \|\tilde{x}_{i,k+l|k}\| + \frac{\varepsilon}{\mu}$$

对 $V(k)$ 求差分有:

$$\begin{aligned} V_k - V_{k-1} &\leq \\ &- \|x_{k|k-1}\|_P + \frac{\varepsilon}{\mu} + \|\tilde{x}_{k+N|k}\|_P + \\ &\sum_{l=1}^{N-1} (\|\tilde{x}_{k+l|k}\|_P - \|x_{k+l|k-1}\|_P) \end{aligned} \quad (27)$$

考虑 $x(k) \in \mathcal{X} \setminus \Omega(\varepsilon)$, 有:

$$\|x_{k|k-1}\|_P > \varepsilon \quad (28)$$

由定理 1 知:

$$\|\tilde{x}_{k+N|k}\|_P \leq \frac{\varepsilon}{2} \quad (29)$$

由引理 3 知:

$$\sum_{l=1}^{N-1} (\|\tilde{x}_{k+l|k}\|_P - \|x_{k+l|k-1}\|_P) \leq \frac{(N-1)\kappa\varepsilon}{2} \quad (30)$$

把式 (28)~(30) 代入式 (27) 有:

$$V_k - V_{k-1} \leq \varepsilon \left(-1 + \frac{(N-1)\kappa}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{\mu} \right)$$

因此, 当

$$\frac{(N-1)\kappa}{2} + \frac{1}{\mu} - \frac{1}{2} < 0$$

时, $V_k - V_{k-1} < 0$, 系统渐近稳定. $\square$

由上分析可知, 当采用本文提出的控制器控制系统 (1) 时, 如果在初始时刻存在可行解, 那么控制器的优化问题在后续时刻将始终存在可行解, 并可把系统渐近稳定到原点.

5 结论

本文首先对离散时间线性耦合大系统的分布式预测控制协调策略进行了回顾, 在此基础上提出了一种新的协调控制方法. 该方法不同于以往通过增加子系统利用的信息范围或网络连通度来提高系统协调度, 从而提高系统全局性能的协调策略, 它通过在性能指标中加入当前输入对其下游子系统的敏感度的二次函数, 实现了在不增加网络连通度的前提下, 控制器的协调度的扩大. 同时给出了该协调策略下稳定化控制器的设计方法. 该方法设计的控制器在系统初始可行时, 可保证在后续时刻都有可行解存在, 并能够使系统状态渐近稳定至原点. 针对非线性系统, 设计该协调策略下稳定化的分布式预测控制器是准备进一步开展的研究工作.

References

- Scattolini R. Architectures for distributed and hierarchical model predictive control — a review. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(5): 723–731
- Christofides P D, Scattolini R, Muñoz de la Peña D, Liu J F. Distributed model predictive control: a tutorial review and future research directions. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, **51**: 21–41
- Min Hai-Bo, Liu Zhi-Guo, Liu Yuan, Wang Shi-Cheng, Yang Yan-Li. Coordination control of networked Euler-Lagrange systems with possible switching topology. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(7): 1003–1010
(闵海波, 刘志国, 刘源, 王仕成, 杨艳丽. 切换网络拓扑下 Euler-Lagrange 系统的分布式协调控制. 自动化学报, 2013, **39**(7): 1003–1010)
- Chai Tian-You, Li Shao-Yuan, Wang Hong. Networked modeling and control for complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 469–470
(柴天佑, 李少远, 王宏. 网络信息模式下复杂工业过程建模与控制. 自动化学报, 2013, **39**(5): 469–470)
- Xi Yu-Geng. *Model Predictive Control*. Beijing: National Defence Industry Press, 1993
(席裕庚. 预测控制. 北京: 国防工业出版社, 1993)
- Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 2003, **11**(7): 733–764
- Yang Jian, Xi Yu-Geng, Zhang Zhong-Jun. Time decomposition for moving horizon optimization in predictive control. *Acta Automatica Sinica*, 1995, **21**(5): 555–561
(杨健, 席裕庚, 张钟俊. 预测控制滚动优化的时间分解方法. 自动化学报, 1995, **21**(5): 555–561)
- Kong Xiao-Bing, Liu Xiang-Jie. Nonlinear model predictive control for DFIG-based wind power generation. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 636–643
(孔小兵, 刘向杰. 双馈风力发电机非线性模型预测控制. 自动化学报, 2013, **39**(5): 636–643)

- 9 Camponogara E, Jia D, Krogh B H, Talukdar S. Distributed model predictive control. *IEEE Control Systems*, 2002, **22**(1): 44–52
- 10 Li Shao-Yuan. *Model Predictive Control for Global Operating Condition System and Its Implementation*. Beijing: Science Press, 2008
(李少远. 全局工况系统预测控制及其应用. 北京: 科学出版社, 2008)
- 11 Doan M D, Keviczky T, De Schutter B. An iterative scheme for distributed model predictive control using Fenchel's duality. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(5): 746–755
- 12 Al-Gherwi W, Budman H, Elkamel A. A robust distributed model predictive control based on a dual-mode approach. *Computers & Chemical Engineering*, 2013, **50**: 130–138
- 13 Maestre J M, Muñoz de la Peña D, Camacho E F, Alamo T. Distributed model predictive control based on agent negotiation. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(5): 685–697
- 14 Scheu H, Marquardt W. Sensitivity-based coordination in distributed model predictive control. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(5): 715–728
- 15 Al-Gherwi W, Budman H, Elkamel A. Selection of control structure for distributed model predictive control in the presence of model errors. *Journal of Process Control*, 2010, **20**(3): 270–284
- 16 Al-Gherwi W, Budman H, Elkamel A. A robust distributed model predictive control algorithm. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(8): 1127–1137
- 17 Morosan P D, Bourdais R, Dumur D, Buisson J. A distributed MPC strategy based on Benders' decomposition applied to multi-source multi-zone temperature regulation. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(5): 729–737
- 18 Zheng Y, Li S Y, Wang X B. Distributed model predictive control for plant-wide hot-rolled strip laminar cooling process. *Journal of Process Control*, 2009, **19**(9): 1427–1437
- 19 Mc Namara P, Negenborn R R, De Schutter B, Lightbody G. Optimal coordination of a multiple HVDC link system using centralized and distributed control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(2): 302–314
- 20 Dunbar W B, Murray R M. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization. *Automatica*, 2006, **42**(4): 549–558
- 21 Farina M, Scattolini R. Distributed predictive control: a non-cooperative algorithm with neighbor-to-neighbor communication for linear systems. *Automatica*, 2012, **48**(6): 1088–1096
- 22 Li S Y, Zhang Y, Zhu Q M. Nash-optimization enhanced distributed model predictive control applied to the Shell benchmark problem. *Information Sciences*, 2005, **170**(2–4): 329–349
- 23 Stewart B T, Venkat A N, Rawlings J B, Wright S J, Panocchia G. Cooperative distributed model predictive control. *Systems & Control Letters*, 2010, **59**(8): 460–469
- 24 Zheng Y, Li S Y, Qiu H. Networked coordination-based distributed model predictive control for large-scale system. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, **21**(3): 991–998
- 25 Zheng Y, Li S. The stabilization of coordinated distributed model predictive control. In: Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Large Scale Complex Systems: Theory and Applications. Shanghai, China: IFAC, 2013
- 26 Zheng Y, Li S Y, Li N. Distributed model predictive control over network information exchange for large-scale systems. *Control Engineering Practice*, 2011, **19**(7): 757–769
- 27 Zheng Y, Li S Y, Wu J, Zhang X X. Stabilized neighborhood optimization based distributed model predictive control for distributed system. In: Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. Hefei, China: IEEE, 2012. 4212–4217
- 28 Zheng Y, Li S Y, Wang X B. Optimization target resetting distributed model predictive control for accelerated cooling process. In: Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation. Beijing, China: IEEE, 2012. 2764–2769
- 29 Alvarado I, Limon D, Muñoz de la Peña D, Maestre J M, Ridao M A, Scheu H, Marquardt W, Negenborn R R, De Schutter B, Valenciad F, Espinosad J. A comparative analysis of distributed MPC techniques applied to the HD-MPC four-tank benchmark. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(5): 800–815
- 30 Mayne D Q, Rawlings J B, Rao C V, Scokaert P O M. Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 2000, **36**(6): 789–814



郑 毅 上海交通大学电子信息与电气工程学院助理研究员。2010 年于上海交通大学获得控制理论与控制工程博士学位。主要研究方向为工业过程的建模, 控制与优化。E-mail: yizheng@sjtu.edu.cn
(ZHENG Yi Assistant professor at the School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University. He received his Ph.D. degree of control theory and engineering from Shanghai Jiao Tong University in 2010. His research interest covers modeling, control and optimization of industrial processes.)



李少远 上海交通大学电子信息与电气工程学院自动化系教授。1997 年于南开大学计算机与系统科学系获得博士学位, 2000 年在上海交通大学控制科学与工程博士后出站后留校。主要研究方向为自适应控制, 满意优化控制, 预测控制。本文通信作者。

E-mail: syli@sjtu.edu.cn

(LI Shao-Yuan Professor in the School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University. He received his Ph.D. degree from the Department of Computer and System Science, Nankai University in 1997. He has been a postdoctor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University from 2000 to 2002. His research interest covers adaptive control, satisfying optimization, and predictive control. Corresponding author of this paper.)