

基于大规模化工过程的快速分布式 MPC 算法研究

姚莉娟, 李丽娟*, 胡蓓蓓

(南京工业大学电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

摘要:针对目前化工过程复杂,在分布式模型预测控制(MPC)的实施中会面临强耦合以及慢速收敛的问题,提出了改进全局性能指标的快速分布式 MPC 算法。首先在每个采样时刻分别求解子系统自身的局部优化问题,同时考虑关联子系统之间的相互作用,然后在协调过程中对全局最优性能指标进行改进以减少迭代次数。该方法降低了控制问题的复杂度,减少了迭代时间,有效地改善了收敛速度。最后分别对二元精馏塔过程和苯乙烯聚合反应过程进行了仿真,验证了所提算法的有效性。

关键词:大系统;分布式模型预测控制;子系统协调;全局性能指标;迭代时间

中图分类号:TP13

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)03-0164-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.03.042

Fast distributed MPC algorithm based on large-scale chemical process

YAO Li-juan, LI Li-juan*, HU Bei-bei

(College of Electrical Engineering and Control, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Combined with the characteristics of current complex chemical process, there will be some problems in the process of DMPC such as the strong interaction effects and the slow convergence. To solve these problems, the fast distributed MPC algorithm for improving global performance index is proposed. Firstly, the optimal control of each subsystem is obtained at each sampling time and the interaction between interconnected subsystems should also be considered at the same time. Then, the global optimal performance index is improved to reduce the number of iterations in the process of coordination. This method reduces the complexity and iterations time of the control problem. It also improves the convergence speed effectively. In the end, the simulation in a distillation column process and styrene polymerization reaction process shows the validity of the proposed algorithm.

Key words: large scale system; distributed model predictive control; system coordination; global performance index; iterative time

分布式模型预测控制(MPC)作为一种先进的过程控制方法已被广泛地应用在工业过程中^[1-3],但由于大系统规模复杂,通常需要将大系统进行分解^[4],这样可以在一定程度上降低问题的复杂度,并且整个系统的控制效果也得到相应地改善。但实际的过程系统大都是多变量控制系统^[5],分解后的子系统之间仍然存在强耦合、收敛速度较慢的现象,如何解决这一问题得到了广大研究者的关注。蔡星等^[6]提出一种基于串联结构的非迭代的分布式预测控制算法,减少了计算量;魏善碧等^[7]提出一种动态协调的混杂分布式预测控制算法,在代价函数中引入布尔函数项,缩短算法实施时间;安爱民等^[8]提出一种鲁棒区域控制策略,在每个子系统的

目标函数中加入松弛因子,达到系统的稳定性。但上述方法存在系统稳定差、控制精度不高或者算法实施对象比较局限等缺点。对此,本文中提出了一种改进的分布式预测控制算法,在子系统协调阶段对全局最优性能指标进行改进,在保证系统控制性能的前提下,减少了迭代时间,同时改善了收敛速度。

1 分布式 MPC 基本原理

分布式 MPC 算法来源于多智能体的思想,将复杂工业系统分解成各个单独的智能体,同时它们之间可以通过网络交换信息,这样大系统的控制效果可以得到改善^[9]。首先根据各个子系统的性质,建

收稿日期:2015-08-24;修回日期:2016-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61203072);江苏省六大人才高峰项目(DZXX-042)

作者简介:姚莉娟(1991-),女,硕士生;李丽娟(1976-),女,博士,副教授,主要从事建模优化、先进控制方面的研究,通讯联系人,ljli@njtech.edu.cn。

立不同时刻的优化性能函数,并经过反复迭代计算,获得最优解。然后,求取当前时刻的最优解与前一时刻偏差,并将当前的最优解和偏差传输到网络上,这样便于信息交互。在求偏差时,若2次结果在给定的误差精度范围内,则优化过程结束。最后,将当前时刻的最优控制律作用于各子系统,进行预测控制。上述过程完成后,时间顺次延续到下一时刻,再重复上面的操作,直到整个系统的优化任务完成^[10]。子系统的基本控制结构如图1所示。

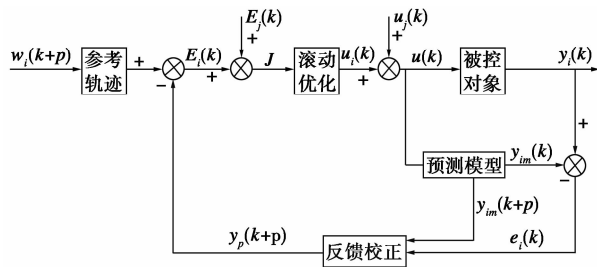


图1 子系统的分布式 MPC 系统结构图

2 改进全局性能指标的快速分布式 MPC 算法

为了在不影响系统全局性能的前提下加快分布式 MPC 算法实施的收敛速度,本文中在全局最优控制的基础上,在子系统协调阶段对全局最优性能指标进行改进,对邻域子系统的目标函数进行简化,求解其控制律,以此来减少迭代时间并有效地改善收敛速度。基于此本文中提出一种改进全局性能指标的快速分布式 MPC 算法。

假设一个线性离散大系统由 n 个线性离散的子系统 $S_i (i=1, \dots, n)$ 构成,每个子系统不仅能够相对独立地进行自身局部控制和工作,而且可以与其他子系统通过通信交流协调出最佳的控制策略。

设每子系统 S_i 的状态空间模型为:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_i(k)x_i(k) + B_{ii}(k)u_i(k) + w_i(k), (i=1, \dots, n) \\ y_i(k) &= C_i(k)x_i(k) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $x_i \in R^{x_i}$ 为子系统 S_i 的状态变量, $u_i \in R^{u_i}$ 为子系统的 S_i 输入变量, w_i 为相互作用量:

$$w_i(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^n B_{ij}(k)u_j(k) \quad (2)$$

其中, $u_j (j \neq i, j=1, \dots, m)$ 是相邻子系统的输入变量。

基于子系统协调的快速分布式 MPC 协调策略如图2所示。

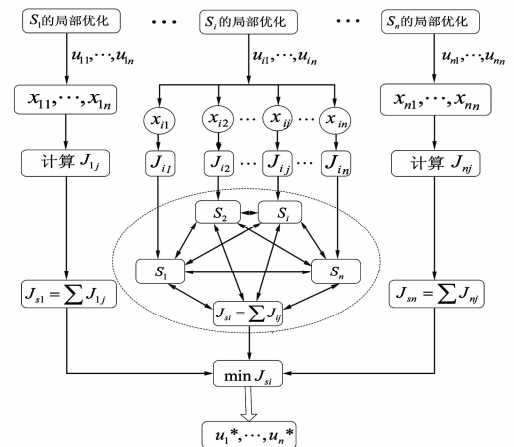


图2 基于子系统协调策略的 DMPC

(上接第163页)

4 结语

通过 Aspen Plus 构建芳烃精馏模型并进行模拟,结果与国内大部分芳烃生产相吻合。运用灵敏度分析,得到操作变量与回流比的关系,使塔板数、回流比、进料位置、操作压力达到最优,且降低了塔的热负荷。既调节了精馏效果,又提高了工作效率,使工业生产中能源消耗降低,为获得更大的经济效益创造了条件。

参考文献

- [1] 李峰,赵新堂,万宝峰. 流程模拟软件 Aspen Plus 在精馏塔设计中的应用[J]. 浙江化工,2014,45(9):48-51.
- [2] 张治山,高军,李敏. Aspen Plus 在精馏操作分析中的应用[J]. 中国教育技术装备,2011,95(15):95-96.

- [3] 孙兰义. 化工流程模拟实训——Aspen Plus 教程[M]. 北京:化学工业出版社,2012:88-110.
- [4] 赵仁殿,金彰礼,陶志华. 芳烃工学[M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- [5] 何西涛,于爱华,陈宁. 分壁精馏塔分离苯/甲苯/二甲苯的模拟工艺研究[J]. 化学工业与工程,2012,29(2):51-57.
- [6] 周灵丹,汤立新. 精馏过程节能技术浅谈[J]. 山东化工,2009,38(7):28-36.
- [7] Hao Ling, William L Luyben. Temperature control of the BTX divided-wall column[J]. Ind Chem,2010,49(1):189-203.
- [8] Yuan-Hao Fu, Hasan Orbey, Stanley I Sandler. Prediction of vapor-liquid equilibria of associating mixtures with UNIFAC models that include association[J]. Ind Eng Chem Res,1996,35(12):4656-4666.
- [9] 李绍军,钱锋. 丁二烯第一萃取精馏塔操作参数的优化[J]. 华东理工大学学报:自然科学版,2006,32(5):592-595.
- [10] 李恒. 芳烃联合装置 B/T 分馏单元扩产改造研究[D]. 大连:大连理工大学,2006. ■

每个子控制器的局部优化性能指标为:

$$J_i(k) = \sum_{k=0}^{N-1} [x_i(k)Q_i x_i(k) + u_i(k)R_i u_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^m u_j(k)R_j u_j(k)] \quad (3)$$

状态和输入约束条件为:

$$\begin{aligned} \text{s. t. } & x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \\ & u_i^{\min} \leq u_i \leq u_i^{\max}, (i = 1, \dots, n) \end{aligned}$$

其中, $Q_i > 0, R_i > 0, R_j > 0; Q_i, R_i$ 是子系统 S_i 权重系数矩阵; R_j 是其邻域子系统 S_j 的权重系数矩阵。

在满足以上状态约束和输入约束的条件下,求解上述优化问题,并且使得子系统的局部性能指标都能达到最小,则可得当前子系统的最优序列为:

$$\{U_i(k)\} = \text{argmin} J_i(k) \quad (4)$$

由此可以计算出所有子系统的性能指标值 J_{ij} ($j = 1, \dots, m$)。当时就 $j = i, J_{ij}(k)$ 值由式(3)计算得到。 $j \neq i$ 时,由于在求解子控制器 S_i 的局部优化控制问题时,已经考虑了控制律 $U_i(k)$ 的作用,使它在当前采样时刻取到了最小值,并且贡献作用也达到最小。所以每一个子控制器通过局部性能优化指标的计算得到了和自身相互关联的子系统的控制序列。因此在计算其关联子系统的目标函数时,其控制律的作用可以不需要再考虑。

$$J_{ij} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{ij}(k)Q_j x_{ij}(k) (j \neq i, j = 1, \dots, m) \quad (5)$$

计算在优化 S_i 子系统情况下的全局目标函数值为:

$$J_{S_i}(k) = \sum_{j=0}^m J_{ij} (j = 1, \dots, m) \quad (6)$$

计算所有子系统的全局目标函数 $J_{S_i}(k)$ ($i = 1, \dots, n$), 取最小值:

$$J^* = \min [J_{S_1}(k), J_{S_2}(k), \dots, J_{S_n}(k)] \quad (7)$$

取 J^* 最小时对应的子系统,其最优控制序列 $U_i^*(k)$ 的第一项即作为当前时刻整个系统的最优控制律,作用到被控对象上。

$$u_i^* = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times m} U_i^*(k) (i = 1, \dots, n) \quad (8)$$

其中, M 为控制步长, $U_i^*(k)$ 表示如下:

$$U_i^*(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) & u_2(k) & \dots & u_n(k) \\ u_1(k+1) & u_2(k+1) & \dots & u_n(k+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_1(k+M-1) & u_2(k+M-1) & \dots & u_n(k+M-1) \end{bmatrix}_{M \times n}$$

通过上述算法求解的过程,一个复杂的大规模系统优化问题被分解到各子系统,进行分布式 MPC

算法求解;由于网络的交互,各子系统之间可以进行信息交换,从而达到全局最优控制;再通过简化邻域子系统的目标函数,避免了其控制律的求解;最终使得控制系统的迭代时间减少,收敛速度变快。

3 算法流程

通常情况下,网络通讯存在延迟^[11],这使得对子系统进行求解时,其关联子系统的信息将无法及时获取。因此假定网络环境下,信息之间的交互需要一步延迟,并且每个子控制器在优化求解时是同步进行的。

Step 1: 在 k 时刻,各个子系统 S_i , 根据上一时刻的最优控制序列和状态空间模型来求解式(1)当前时刻状态变量 $x_i(k)$ 。

Step 2: 对各个子系统的局部优化问题式(3)进行求解最小优化性能指标 $J_i(k)$, 并计算式(4)得到当前最优控制作用 $\{U_i(k)\}$ 。

Step 3: 每一个子系统 S_i , 根据当前时刻控制序列 $\{U_i(k)\}$ 与状态变量 x_{ij} , 利用式(5)计算邻域目标函数 J_{ij} 。

Step 4: 根据式(6)计算每一个子系统的全局目标函数 $J_{S_i}(k)$ 。

Step 5: 计算式(7), 从所有子系统的全局目标函数值中选择最小的目标函数值作为整个系统的全局目标函数值,相应的控制序列 U_i^* 即为最优控制序列,滚动移位到下一步。

Step 6: 控制序列中的第一个控制行为将被作用到被控对象上,根据式(8)计算 u_i^* 。

Step 7: 滚动优化,返回至 Step1, 直至整个采样时间结束。

4 实验仿真

案例 1: 对二元精馏塔模型控制问题进行仿真研究,它的传递函数矩阵模型为:

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11} = \frac{32.63}{(99.6s + 1)(0.35s + 1)} & G_{12} = \frac{-33.89}{(98.02s + 1)(0.42s + 1)} \\ G_{21} = \frac{34.84}{(110.5s + 1)(0.03s + 1)} & G_{22} = \frac{-18.85}{(74.43s + 1)(0.3s + 1)} \end{bmatrix}$$

整个系统描述如下:

$$\begin{bmatrix} T_{21} \\ T_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ L \end{bmatrix}$$

系统的输入变量 L 和 V 分别表示回流量和精馏塔的塔顶蒸汽流量,输出 T_{21} 和 T_7 分别表示第 21 塔

板和第7塔板的温度。DMPC 控制器输入变量 L 、 V 的约束条件是 $-1.5 \leq V \leq 1.5$ 、 $-2 \leq L \leq 2$ 。

对该精馏塔模型分别进行普通分布式 MPC 和改进全局性能指标的分布式 MPC, 控制时域 $N=5$, 预测时域 $P=25$, 输出权值 $Q_i = \text{diag}(50, 50)$, 控制变量权值 $R_i = \text{diag}(1, 1)$ 。采样时间为 0.5 s。输出设定值分别为 $(-1, 1)$, 系统从离散采样点 25 开始对系统施加控制作用。仿真结果如图 3 和图 4 所示。图中 DMPC 表示普通的分布式 MPC 算法, GDMPC 表示改进后的算法。

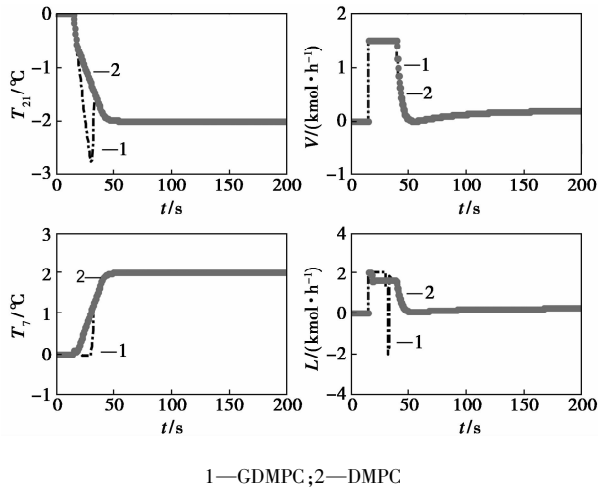


图 3 普通 DMPC 和改进的 DMPC 输入输出曲线

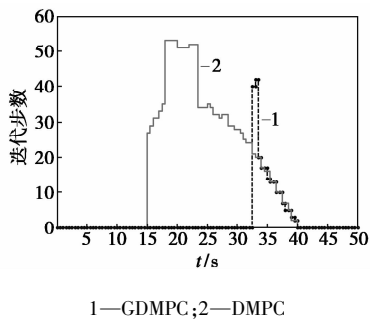


图 4 普通 DMPC 和改进 DMPC 的迭代次数轨迹图

从图 4 中可以看出,改进性全局性能指标的分布式 MPC 和普通的分布式预测控制迭代步数分别是 218 和 1 481, 在控制性能上改进性全局性能指标的分布式 MPC 比普通的分布式预测控制迭代次数大大减小, 从而可知改进全局性能指标的分布式 MPC 在控制性能损失很小的情况下, 大大减少了迭代次数, 有效地改善了收敛速度, 算法的有效性得到了验证。

为了进一步说明所提出的改进全局性能指标的分布式 MPC 算法的有效性, 分别对普通的分布式

MPC、改进的分布式 MPC 和集中式 MPC 计算时间进行对比, 3 种控制算法时间对比如表 1 所示。

表 1 3 种控制算法时间对比

控制时域	普通的分布式 MPC	改进的分布式 MPC	集中式 MPC
$N=10$	0.3822	0.3125	0.5622
$N=25$	0.6895	0.5862	1.1261
$N=40$	1.1963	1.0217	1.7850

从表 1 中可以得出, 本文中提出的新方法在控制性能损失很小的情况下大大减小了分布式预测控制的迭代时间, 提高算法的收敛速度, 控制器的控制效率更高。

案例 2: 苯乙烯聚合反应过程分别由 2 个连续搅拌反应釜和 1 个后续非隔热闪蒸塔串联构成, 分离装置非隔热闪蒸塔把顶部蒸馏物进行回流, 将未反应完全 A 物质送至反应釜 1 继续进行反应。最后从后续非隔热闪蒸塔底部流出的液相主要包括期望产生的产物聚苯乙烯 B 和副产物 C。该化工反应过程的结构图如图 5 所示。

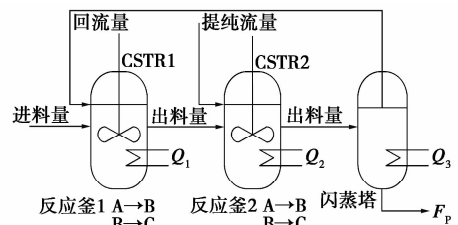


图 5 苯乙烯聚合反应过程

苯乙烯聚合反应过程 3 个单元的数学模型都由物料平衡方程和能量平衡方程构成, 系统机理模型及方程中各变量定义见参考文献[12]。

苯乙烯聚合反应过程分解为 3 个子系统, 分别是反应釜 1、2 和闪蒸塔, 每一个子系统都包含 3 种输出, 分别为 A、B 的质量分数和相应的装置温度, 系统的控制输入分别是进入装置 1、2、3 的热量, 即 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 。

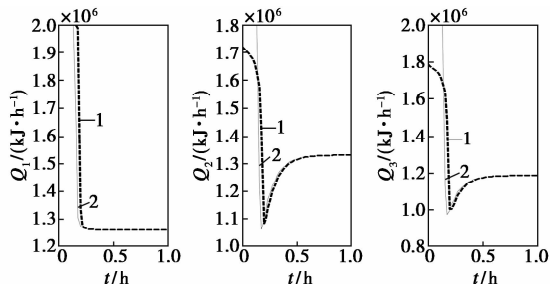
对整个系统采用改进的分布式 MPC 算法, 采样时间设为 0.02 h, 控制时域设为 $N=6$, 预测时域设为 $P=25$ 。每个子系统的权重矩阵分别设置如下:

$$Q_i = \text{diag}(5.2 \times 10^{12} [2000, 2000, 25, 2000, 2000, 25, 2000, 2000, 25]), (i = 1, 2, \dots, N)$$

$$R_i = \text{diag}([1, 1, 1]), (i = 0, 1, \dots, N-1)$$

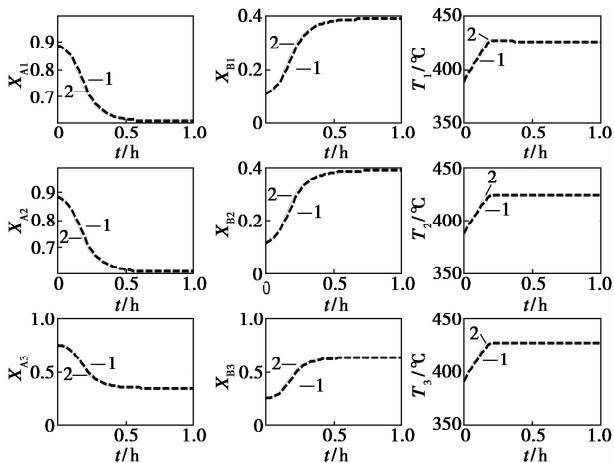
同时为了验证所提出算法的有效性, 依然采用

普通分布式 MPC 算法进行对比实验,分别得到各自的控制输入曲线和输出曲线如图 6 和图 7 所示,图 8 为 2 种控制算法的迭代次数轨迹图。



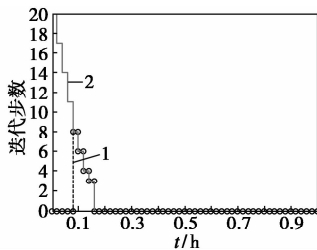
1—GMPC;2—DMPC

图 6 普通 DMPC 和改进的 DMPC 输入曲线



1—GMPC;2—DMPC

图 7 普通 DMPC 和改进的 DMPC 输出曲线



1—GMPC;2—DMPC

图 8 普通 DMPC 和改进 DMPC 迭代次数轨迹图

从图 7、图 8 中可以看出,改进全局最优性能指标的分布式 MPC 在控制性能与普通的分布式预测控制性能相比几乎没有下降,但迭代次数相比却明显地减少,分别是 83 和 21。从而可得改进全局性能指标的分布式 MPC 能有效地减少迭代次数,改善收敛速度,算法的有效性得到了验证。

5 结语

提出了一种改进全局性能指标的快速分布式 MPC 算法,在全局最优控制的基础上,在子系统协调阶段对全局最优性能指标进行改进,对邻域子系统的目标函数进行简化,不再考虑求解其控制律,以此来减少迭代时间并有效地改善收敛速度。最后以一个二元精馏塔和苯乙烯聚合反应过程为背景,进行实验仿真,仿真结果表明,本文中所提出的算法在控制性能几乎没损失的情况下,迭代计算时间大大减小,有效地改善了收敛速度,从而验证该算法的有效性。

该算法有效改善了系统的性能,提高了系统的快速性,但是系统的稳定性还需要进行证明,迭代速度优化下的系统稳定性则是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] 花新峰,魏正泽. 分布式预测控制在空气分馏塔中的应用[J]. 工业控制计算机,2014,27(5):62-63.
- [2] 尚继良,王禅禅. 啤酒发酵温度分布式预测控制应用研究[J]. 酿酒科技,2014,(6):95-97.
- [3] 杨辉,张芳,张坤鹏,等. 基于分布式模型的动车组预测控制方法[J]. 自动化学报,2014,40(9):1912-1921.
- [4] Necoara I, Nedelcu V, Dumitrache I. Parallel and distributed optimization methods for estimation and control in networks[J]. Journal of Process Control,2011,21(5):756-766.
- [5] 刘雨波,罗雄麟,许锋. 分布式预测控制全局协调及稳定性分析[J]. 化工学报,2013,64(4):1318-1329.
- [6] 蔡星,谢磊,苏宏业,等. 基于串联结构的分布式模型预测控制[J]. 自动化学报,2013,39(5):510-518.
- [7] 魏善碧,胡友强,柴毅,等. 采用动态协调的混合分布式预测控制方法[J]. 重庆大学学报,2012,33(12):103-108.
- [8] 安爱民,赵超,李绍勇,等. 提高分布式多预测控制器协调及稳定性的鲁棒区域控制[J]. 计算机与应用化学,2012,29(7):808-811.
- [9] Maestre J M, Murioz D. Distributed model predictive control based on agent negotiation[J]. Journal of Process Control,2011,(21):685-697.
- [10] 王争,何玉庆,韩建达. 一种基于相对模型的分布式预测控制算法研究[J]. 系统仿真学报,2013,25(2):280-292.
- [11] 曾静,薛定宇,袁德成. 分布式模型预测控制算法的研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(21):5898-5902.
- [12] Christofides P D, Liu J, De La Pena D M. Networked and distributed predictive control methods and nonlinear process network applications[M]. Springer-Verlag London,2011. ■