



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



锅炉-汽轮机系统事件触发多目标经济预测控制

田宇, 何德峰, 穆建彬

引用本文:

田宇,何德峰,穆建彬. 锅炉-汽轮机系统事件触发多目标经济预测控制[J]. *控制与决策*, 2024, 39(11): 3690–3698.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1232>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

输入约束不确定系统的点对点迭代学习控制与优化

Point-to-point iterative learning control and optimization for uncertain systems with constrained input
控制与决策. 2021, 36(6): 1435–1441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0908>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation
控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 H_∞ 故障检测

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays
控制与决策. 2020, 35(12): 3059–3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

锅炉-汽轮机系统事件触发多目标经济预测控制

田宇, 何德峰[†], 穆建彬

(浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310000)

摘要: 针对160 MW 锅炉-汽轮机系统的多目标控制问题和计算负担, 提出一种事件触发多目标经济模型预测控制(multi-objective economic model predictive control, MO-EMPC)策略. 结合字典序方法和生产过程的需求, 将锅炉-汽轮机补给燃料的调节控制作为最高优先级控制目标, 主蒸汽调控作为第2层优先级控制目标, 给水阀调控作为第3层优先级控制目标, 构建分层滚动时域优化控制问题. 引入锅炉-汽轮机经济最优平衡点定义辅助正定函数的最优值函数, 并利用该最优值函数设计收缩约束条件, 通过松弛收缩约束条件设计触发机制, 建立具有稳定性和经济性能最优的轻量化多目标预测控制方案. 对比时间触发下的字典序MO-EMPC算法, 所提方法不仅通过降低求解频次减少了计算量, 同时保证了锅炉-汽轮机系统的经济性能.

关键词: 锅炉-汽轮机系统; 事件触发; 经济预测控制; 多目标控制; 稳定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1232

引用格式: 田宇, 何德峰, 穆建彬. 锅炉-汽轮机系统事件触发多目标经济预测控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3690-3698.

Event-triggered multi-objective economic predictive control of boiler-turbine systems

TIAN Yu, HE De-feng[†], MU Jian-bin

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Zhejiang 310000, China)

Abstract: For the multi-objective control problem and computational burden of 160 MW boiler-turbine systems, this paper proposes an event-triggered multi-objective economic model predictive control (MO-EMPC) strategy. Combining with the lexicographic method and the production process requirements, boiler refueling is taken as the highest priority control objective, the main steam control is taken as the second priority control objective, and feed valve control is taken as the third priority control objective. A hierarchical receding horizon optimal control problem is formulated accordingly. The auxiliary positive-definite functions at boiler-turbine systems economic optimal equilibrium points are defined, which are used to design the contraction constraint condition. The triggered mechanism is then designed by relaxing contraction constraint. A lightweight multi-objective predictive control scheme with guaranteed stability and economic performance is established. Compared with the time-triggered lexicographic MO-EMPC, the proposed method decreases the calculation amount by reducing the solution frequency, and realizes the economic performance of the boiler-turbine system.

Keywords: boiler-turbine system; event-triggered control; economic model predictive control; multi-objective control; stability

0 引言

生物质发电技术因其具有零碳排、污染物排放低等优点得到广泛关注^[1-3]. 锅炉-汽轮机系统是其重要组成部分, 通过锅炉侧的燃料量和汽轮机侧的蒸汽流量配合来提高发电机组的经济效益和安全性^[4-6]. 研究人员提出机器学习^[7-8]、神经网络控制^[9]、模糊

控制^[10]、自适应控制^[11-13]等先进控制方法, 实现对锅炉-汽轮机系统的高性能优化控制.

目前, 电厂对发电机组运行的主要关注点已从单纯的跟踪控制问题转向经济和环境综合问题研究, 进而提高能源转换率. 根据锅炉燃烧实际控制的要求^[14], 发电机组运行控制的本质是通过控制多个调

收稿日期: 2023-08-29; 录用日期: 2023-12-03.

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(2023ZY1045).

责任编辑: 毛志忠.

[†]通讯作者. E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn.

节流开度,进行能源的多目标优化管理.针对多目标问题,相关学者提出通过权系数将多目标控制问题转换为单目标问题^[15].然而,权系数的选择通过试错来完成,且不同权重比的控制目标并不能反映真实的性能要求.文献[16]提出理想点多目标模型预测控制(multi-objective model predictive control, MO-MPC)在线最小化其成本向量到稳定点向量的距离,自动权衡到折衷解.为了解决不可公度问题,文献[17]将目标按照优先级排序,构建一组按顺序排列的单目标优化问题.在上述基础上,有学者推广到以经济目标为最重要准则的多目标经济预测控制(multi-objective economic model predictive control, MO-EMPC),如文献[18]对字典序MO-EMPC施加收缩约束^[19],建立闭环系统渐近稳定性.但随着约束集的规模扩大,寻找可行解计算时间会变长.

现有模型预测控制(model predictive control, MPC)通常是时间驱动的,在每个采样时间计算出一组控制序列,只有第1个元素应用于系统,而其余元素被丢弃.可以从尽可能长时间使用序列的角度解决MPC计算量问题^[20-22],即优化问题的控制量仅在某些规定的“事件”发生时更新,通过降低MPC更新频率达到减少平均计算量的效果.如文献[23-24]提出具有稳定性能保证的自触发MPC,并应用到跟踪分段常数参考信号;文献[25]提出约束非线性系统的事件触发经济模型预测控制,降低求解频次的同时保证经济性能.

本文从160 MW 锅炉-汽轮机系统经济燃烧控制和减少计算负担的角度出发,提出一种事件触发的MO-EMPC控制策略,实现锅炉-汽轮机系统快速的经济调度.根据机组控制过程要求,离线计算锅炉-汽轮机系统期望经济运行工况,并将锅炉-汽轮机补给燃料的调节控制构建为分层滚动时域优化控制问题.定义关于该经济最优平衡点的辅助正定函数,利用该最优值函数设计收缩约束条件,通过松弛收缩约束条件设计性能触发条件,从优化问题内部触发时间最大化的角度降低求解频次的同时保证系统经济性能.通过终端三要素条件构建优化问题的递推可行性和锅炉汽轮机系统的闭环稳定性.最后将时间触发下的MO-EMPC和所提方法进行对比,并仿真验证.

1 锅炉-汽轮机系统描述

考虑火电站锅炉-汽轮机系统的动态模型,采用如下连续时间非线性方程^[26]描述:

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{1.125} + 0.9u_1 - 0.15u_3,$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{1}{10}[(0.73u_2 - 0.16)x_1^{1.125} - x_2], \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{85}[141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]. \end{aligned} \quad (1)$$

其中:状态变量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 分别为汽包蒸汽压力 P (kg/cm^2)、输出功率 E (MW)、蒸汽水密度 ρ_f (kg/cm^3);控制变量 $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T$ 三个元素分别为燃料流量、蒸汽和给水流量调节阀开度.以采样时间 T_s 离散化连续时间方程(1),得到锅炉-汽轮机系统经济燃烧过程的离散时间非线性状态方程

$$\begin{cases} x(k+1) = f(x(k), u(k)), \\ y(k) = h(x(k), u(k)). \end{cases} \quad (2)$$

其中: k 是采样时间; y 是输出变量,定义为

$$\begin{cases} y_1 = x_1, \\ y_2 = x_2, \\ y_3 = \\ 0.05 \left(0.13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \left(\frac{q_e}{9} - 67.975 \right) \right). \end{cases} \quad (3)$$

蒸汽质量 α_{cs} 和蒸汽蒸发速率 q_e 分别为

$$\begin{aligned} \alpha_{cs} &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)}, \\ q_e &= \\ &(0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096. \end{aligned} \quad (4)$$

注意,锅炉-汽轮机系统的汽包蒸汽压力和电功率很容易测量,但蒸汽密度难以测量,所以用汽包水位构建与蒸汽密度有关的代数方程.

根据实际生产条件,考虑锅炉-汽轮机系统以下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq u_d \leq 1, \quad d = 1, 2, 3; \\ -0.007 \leq \Delta u_1 \leq 0.007; \\ -2.0 \leq \Delta u_2 \leq 0.02; \\ -0.05 \leq \Delta u_3 \leq 0.05. \end{cases} \quad (5)$$

输出变量 $y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$ 分别为汽包蒸汽压力 P (kg/cm^2)、输出功率 E (MW)和汽包水位偏差 h (m).进一步,考虑锅炉-汽轮机系统的经济性能指标

$$\begin{cases} L_1 = u_1, \\ L_2 = -u_2, \\ L_3 = -u_3. \end{cases} \quad (6)$$

其中: L_1 为燃料量阀门开度,反映燃料消耗; L_2 为蒸汽阀开度,与蒸汽阀节流损失负相关; L_3 为给水阀开度反映的百分比.锅炉-汽轮机系统经济最优平衡点

表示为 (x_s, u_s) , 定义该系统跟踪经济最优性能指标

$$L_a(x, u) = (x - x_s)^T Q(x - x_s) + (u - u_s)^T R(u - u_s). \quad (7)$$

在保证锅炉-汽轮机系统稳定运行的前提下, 负荷决定燃料流量, 根据生产过程需求优先控制燃料流量; 冷水吸收热量变成蒸汽, 再调整主蒸汽阀扩大开度, 减少进汽节流损耗; 随着大量主蒸汽和再热蒸汽进入中低压罐, 维持蒸汽温度, 进一步减少热量损耗; 最后, 调大给水阀补偿锅炉侧水量损失, 协调压力控制与功率响应, 实现机组能量平衡。

考虑锅炉-汽轮机系统(2), 定义有限预测时域为 N 的跟踪经济最优目标函数

$$V_a(x(k), \mathbf{u}(k)) = E_a(x(N|k)) + \sum_{i=0}^{N-1} L_a(x(i|k), u(i|k)), \quad (8)$$

其中阶段代价函数 L_a 和终端函数 E_a 是关于锅炉汽轮机系统经济最优平衡点 (x_s, u_s) 的正定函数。目标函数(7)是传统代价函数。

依据生产流程, 考虑锅炉-汽轮机系统关于调控阀的经济目标函数(6), 这组性能指标的下标越小, 优先级越高。约定目标函数矢量 $J(x(k), \mathbf{u}(k)) = \{J_1(x(k), \mathbf{u}(k)), J_2(x(k), \mathbf{u}(k)), J_3(x(k), \mathbf{u}(k))\}$ 。定义 k 时刻有限预测时域为 N 的经济目标函数

$$J_p(x(k), \mathbf{u}(k)) = \sum_{i=0}^{N-1} L_p(x(i|k), u(i|k)), \quad p \in \mathbf{I}_{1:3}. \quad (9)$$

定义对应的 MO-EMPC 最优控制问题

$$\mathbf{u}^*(k) = \arg \min_{\mathbf{u}} J(x(k), \mathbf{u}(k)). \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } x(i+1|k) = f(x(i|k), u(i|k)); \quad (10b)$$

$$(x(i|k), u(i|k)) \in X \times U, \quad i \in \mathbf{I}_{0:N-1}; \quad (10c)$$

$$x(0|k) = x(k), \quad x(N|k) \in X_T; \quad (10d)$$

$$V_a(x(k), \mathbf{u}(k)) \leq \eta(x(k), \alpha). \quad (10e)$$

其中: $x(k) \in X \subseteq \mathcal{R}^n$ 和 $u(k) \in U \subseteq \mathcal{R}^m$ 是 k 时刻锅炉-汽轮机系统状态和控制变量, $f: \mathcal{R}^n \times \mathcal{R}^m \rightarrow \mathcal{R}^n$ 是关于 (x, u) 的连续函数, $\mathbf{u}^*(k) = \{u^*(0|k), \dots, u^*(N-1|k)\}$ 是当前 k 时刻锅炉-汽轮机系统的最优解。假设系统状态完全可测, 经济最优平衡点 (x_s, u_s) 为其内点。 $x(0|k) = x(k)$ 是初始条件, $X_T \subseteq X$ 是终端约束集, 不等式(10e)是稳定性约束, 存在 $\eta(x(k), \alpha) \geq 0$, 收缩因子 $0 \leq \alpha < 1$ 。

为计算函数 $\eta(x(k), \alpha)$, 求解辅助优化问题

$$\mathbf{u}^o(k) = \arg \min_{\mathbf{u}} \{V_a(x(k), \mathbf{u}(k)) | \text{式}(10b) \sim (10d)\}, \quad (11)$$

其中 $\mathbf{u}^o(k)$ 为 k 时刻优化问题(11)的最优解。定义收缩函数

$$\eta(x(k), \alpha) = V_a^o(x(k)) + \alpha(V_a^*(x(k-1)) - V_a^o(x(k))), \quad (12)$$

其中将 $\mathbf{u}^o(k)$ 和 $\mathbf{u}^*(k-1)$ 代入式(8)得到对应值函数 $V_a^o(x(k)) = V_a(x(k), \mathbf{u}^o(k))$ 和 $V_a^*(x(k-1)) = V_a(x(k-1), \mathbf{u}^*(k-1))$ 。

2 事件触发 MO-EMPC

2.1 事件触发经济预测控制策略

定义 1^[27] 如果对于系统(2)所有状态 $x \in S$, $x^+ = f(x, u(x)) \in S$, 则集合 $S \in X$ 为闭环系统的正不变集。

定义 2^[28] 给定锅炉-汽轮机系统多经济目标优化问题(10)的一个可行解 $\mathbf{u}^*(k)$, 当且仅当不存在其他可行解 $\mathbf{u}(k)$, 使得 $J_q(k)|_{\mathbf{u}(k)} \neq J_q(k)|_{\mathbf{u}^*(k)}$ ($q = 1, 2, 3$) 成立, 且不等式组内至少有一个是严格的, 则 $\mathbf{u}^*(k)$ 称为该优化问题的一个 Pareto 最优解。

定义 3^[28] 给定锅炉-汽轮机系统多经济目标优化问题(10)的一个可行解 $\mathbf{u}^*(k)$, 当且仅当不存在其他可行解 $\mathbf{u}(k)$ 和标量 $q^* = \min\{q : J_q(k)|_{\mathbf{u}(k)} \neq J_q(k)|_{\mathbf{u}^*(k)}, q = 1, 2, 3\}$, 使得 $J_{q^*}(k)|_{\mathbf{u}(k)} \neq J_{q^*}(k)|_{\mathbf{u}^*(k)}$, 则 $\mathbf{u}^*(k)$ 称为该优化问题的一个字典序最优解。

根据上述定义, 多目标优化问题(10)的 Pareto 最优解总是存在, 且对应的最优值函数不唯一, 而字典序最优解也是 Pareto 最优解且总是存在, 对应的最优值函数是唯一的。

令 $N \in \mathbf{I}_{\geq 1}$ 为预测时域, $\{k_j : k_j \in \mathbf{I}_{\geq 0}\}$ 为触发时间序列, 满足 $k_{j+1} > k_j$, $k_{j+1} - k_j < N$, 并用 $N_{k_j} \in \mathbf{I}_{\geq 1}$ 表示触发 k_j 时刻下的预测间隔。在触发 k_j 时刻, 给定初始状态 $x(k_j) = x(0|k_j) \in X$, 重新定义优化问题(10)的字典序多目标经济优化控制问题, 即

$$J_1^*(k_j) = \min_{\mathbf{u}} \{J_1(k_j) | \text{式}(10b) \sim (10d), V_a(x(k_j), \mathbf{u}(k_j)) \leq \eta_1(x(k_j), \alpha)\}, \quad (13a)$$

$$J_2^*(k_j) = \min_{\mathbf{u}} \{J_2(k_j) | \text{式}(10b) \sim (10d), V_a(x(k_j), \mathbf{u}(k_j)) \leq \eta_1(x(k_j), \alpha), J_1(k_j) \leq J_1^*(k_j)\}, \quad (13b)$$

$$J_3^*(k_j) = \min_{\mathbf{u}} \{J_3(k_j) | \text{式}(10b) \sim (10d), V_a(x(k_j), \mathbf{u}(k_j)) \leq \eta_1(x(k_j), \alpha), J_q(k_j) \leq J_q^*(k_j), \forall q \in \mathbf{I}_{1:2}\}. \quad (13c)$$

在 $k_j \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 触发时刻, 优化问题(13)得到预测时域为 N 的控制序列

$$\mathbf{u}^*(k_j) = \{u^*(0|k_j), u^*(1|k_j), \dots, u^*(N-1|k_j)\}, \quad (14)$$

其中收缩值函数 $\eta_1 : X \times \mathcal{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathcal{R}_{\geq 0}$ 和松弛值函数 $\eta_r : X \times \mathcal{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathcal{R}_{\geq 0}$ 将在后续设计, 以适应 MO-EMPC 的稳定性. 根据滚动时域控制原理, 将事件触发的 MO-EMPC 律定义为

$$u^{\text{MO-EMPC}}(k) = u^*(i|k_j), \quad i \in \mathbf{I}_{0:N_{k_j}-1}, \quad (15)$$

对应的闭环系统为

$$x(k+1) = f(x(k), u^{\text{MO-EMPC}}(k)). \quad (16)$$

注 1 在 $k_j \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 触发时刻, 锅炉-汽轮机系统的初始状态 $x(k_j) \in X$, 重新定义跟踪经济最优稳态的优化问题

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^o(k_j) = \\ \arg \min_{\mathbf{u}} \{V_a(x(k_j), \mathbf{u}(k_j)) | \text{式(10b)} \sim \text{(10d)}\}. \end{aligned} \quad (17)$$

在 k_j 触发时刻下, 即 $k_j = k$, 用于设计收缩约束的相应值函数 $\eta_1(x(k_j), \alpha)$ 表示为

$$\begin{aligned} \eta_1(x(k_j), \alpha) = \\ V_a^o(x(k_j)) + \alpha(V_a^*(x(k_j-1)) - V_a^o(x(k_j))), \end{aligned} \quad (18)$$

其中参数 $\alpha \geq 0$.

令 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 和 $\mathbf{u}^o(k_j)$ 为 $k_j \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 触发时刻优化问题 (13) 的经济最优控制序列和优化问题 (17) 的最优控制序列. 接下来, 分别定义 $i \in [1, N_{k_j} - 1]$ 的候选控制序列 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + i)$ 和 $\tilde{\mathbf{u}}(k_j + i)$, 表示为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}}(k_j + i) = \\ \{u^*(i|k_j), \dots, u^*(N-1|k_j), \\ \mu^*(x(N|k_j)), \dots, \mu^*(x(N+i-1|k_j))\}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{u}}(k_j + i) = \\ \{u^o(i|k_j), \dots, u^o(N-1|k_j), \\ \mu^o(x(N|k_j)), \dots, \mu^o(x(N+i-1|k_j))\}, \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $\mu(x)$ 为在某些区域稳定系统 (1) 的局部控制律. 将 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + 1)$ 和 $\tilde{\mathbf{u}}(k_j + 1)$ 分别代入值函数 V_a , 得到

$$\hat{V}_a(x(k_j + i)) = V_a(x(k_j + i), \hat{\mathbf{u}}(k_j + i)), \quad (21)$$

$$\tilde{V}_a(x(k_j + i)) = V_a(x(k_j + i), \tilde{\mathbf{u}}(k_j + i)), \quad (22)$$

其中 $i \in [1, N_{k_j} - 1]$.

用于设计松弛收缩约束的相应值函数 $\eta_r(x(k_j + i), \alpha)$ 表示为

$$\begin{aligned} \eta_r(x(k_j + i), \alpha) = \tilde{V}_a(x(k_j + i)) + \alpha(\hat{V}_a(x(k_j + \\ i - 1)) - \tilde{V}_a(x(k_j + i))). \end{aligned} \quad (23)$$

值得注意的是, $i = 0$ 时, $\hat{V}_a(x(k_j)) = V_a^o(x(k_j))$.

考虑最优控制问题 (13), 事件触发条件设计为

$$\begin{aligned} V_a(x(k_j + i), \hat{\mathbf{u}}(k_j + i)) > \eta_r(x(k_j + i), \alpha), \\ i \in \mathbf{I}_{1:N-1}. \end{aligned} \quad (24)$$

如果在 k_j 触发时刻条件 (24) 成立, 则问题 (17) 和 (13) 按照顺序被求解, 在控制序列 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 中选择一个控制量.

算法 1 事件触发 MO-EMPC 算法.

step 1: 初始化. 输入仿真步长 T_{sim} 、预测步长 N , 锅炉-汽轮机系统的经济性能指标 $L_p(x, u)$ ($p \in \mathbf{I}_{1:3}$), 跟踪经济最优性能指标 $L_a(x, u)$, 终端代价函数 $E_a(x, u)$ 和参数 α . 设 $j = 1, k = k_j = 1, \eta_1(x(k_j), \alpha) = \infty$. 测量初始时刻 k_j 锅炉-汽轮机系统的状态 $x(k_j)$.

step 2: 求解问题 (13), 代入以下过程:

- 1) 求解第 1 层子问题 (13a), 得到对应最优序列 $\mathbf{u}_1^*(k_j)$;
- 2) 对于所有 $q \in \mathbf{I}_{2:3}$, 求解第 q 层问题 (13b) 和 (13c), 得到对应最优序列 $\mathbf{u}_q^*(k_j)$;
- 3) 确定整个问题 (13) 的字典序最优序列 $\mathbf{u}^*(k_j) = \mathbf{u}_3^*(k_j)$.

step 3: 测量 k_j 时刻状态量 $x(k_j)$, 并在线求解式 (17) 得到最优控制序列 $\mathbf{u}^o(k_j)$, 用 $\mathbf{u}^o(k_j)$ 和 $\mathbf{u}^*(k_j - 1)$ 更新值函数 $\eta_1(x(k_j), \alpha)$ 和 $\eta_r(x(k_j), \alpha)$.

step 4: 如果 $k = 1$, 则将控制序列中第 1 个元素代入到系统 (16), 更新时刻 $k = k_j + 1, j = j + 1$, 返回到 step 2; 否则, 控制序列 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 中分量依次代入系统 (16).

step 5: 如果触发条件 (24) 成立或 $i > N$, 则更新时间 $k = k_j + i, j = j + 1$; 返回到 step 2; 否则, 应用控制序列 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 中第 $i + 1$ 个元素, 令 $i = i + 1$, 返回到 step 4.

2.2 稳定性及可行性分析

定义 4^[18] 如果锅炉-汽轮机系统的第 $p \in \mathbf{I}_{1:2}$ 层优化子问题的可行性意味着第 $p + 1$ 层优化子问题的可行性, 则在 k 时刻锅炉-汽轮机系统的 MO-EMPC 优化问题 (13) 具有层间可行性.

定义 5^[18] 如果锅炉-汽轮机系统的 MO-EMPC 优化问题 (13) 在 k 时刻可行意味着在 $k + 1$ 时刻也可行, 则在 $k \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 时刻 MO-EMPC 优化问题 (13) 具有时域递推可行性.

假设 1 考虑系统 (2), 在终端约束集 X_T 内存在局部控制律 $u(k) = \mu(x(k))$ 满足 $\mu(x(k)) \in U$ 和 $E_a(x(k), \mu(x(k))) - E_a(x(k)) \leq -L_a(x(k), \mu(x(k))), \forall x \in X_T$.

注 2 假设 1 是传统 MPC 稳定性研究中常采用的三要素 (E_a, X_T, μ) 条件, 可利用平衡点线性化、线性矩阵不等式和 Lyapunov 函数等方法求

解^[27,29-31], 对应局部控制律 $\mu(x(k)) = -Kx(k) + u_s$, $V_a(x, u)$ 是 (x_s, u_s) 的正定函数, 而 X_T 定义为 $E_a(x)$ 的水平集, 则表明 X_T 是闭环系统 (16) 的一个不变集^[27].

触发机制从最大化优化问题触发间隔的角度减少求解频次. 在假设 1 的基础上, 上述过程中沿用控制序列中的解, 并代入系统 (16), 在触发区间内的状态始终在不变集 $S \subseteq X_T$ 内, 保证系统可行.

如果对于 $i \in \mathbf{I}_{0:N-1}$, 存在 $u(i) \in U$, $\varphi(i+1; \xi, \mathbf{u}(0)) \in X$, $x(N) \in X_T$, 则控制序列 $\mathbf{u}(0) = \{u(0), \dots, u(N-1)\}$ 为一组可行解. 所有可行控制序列构成的集合表示为 $\phi_u(\xi)$. 闭环系统 (16) 的 N 步可行状态集合定义为

$$\Theta_N := \{\xi \in X : \phi_u(\xi) \neq \emptyset\}. \quad (25)$$

对于任意 $N \geq 0$, $\Theta_N \subseteq \Theta_{N+1}$ 都成立.

定理 1 考虑定义 4 和定义 5 在正不变集 Θ_N 内的锅炉-汽轮机系统 (2), 如果假设 1 成立, 存在参数 $\alpha \geq 0$, 则 MO-EMPC 优化问题 (13) 在正不变集 Θ_N 内递归可行.

证明 1) 层间可行性证明. 针对 $k_j \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 时刻, 如果第 1 层问题 (13a) 初始可行, 并设其最优解为 $\mathbf{u}^*(k_j)$. 对于 $p \in \mathbf{I}_{2:3}$ 层级, 都满足约束 (10b) ~ (10d), 字典序约束 $J_q(x(k_j), \mathbf{u}^*(k_j)) \leq J_q^*(k_j), \forall q \in \mathbf{I}_{1:2}$, 收缩约束 $V_a(x(k_j), \mathbf{u}^*(k_j)) \leq \eta_1(x(k_j), \alpha)$. 因此, $\mathbf{u}^*(k_j)$ 是 k_j 时刻的第 3 层子问题的可行解.

2) 时域递归可行性证明. ① 在集合 Θ_N 内 $i \in [1, N_{k_j} - 1]$, 由式 (19) 定义的每个 $k_j + i \in [k_j + 1, k_j + N_{k_j} - 1]$ 时刻候选 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + i)$ 都满足式 (13) 的约束, 故候选 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + i)$ 是优化问题 (13) 的可行解. ② 在下一个触发时刻 $k_{j+1} = k_j + N_{k_j}$, 锅炉-汽轮机系统优化问题 (17) 和优化问题 (13) 同时可行. 根据触发条件 (24) 和假设 1 可知, $\hat{\mathbf{u}}(k_{j+1})$ 是优化问题 (13) 的可行解. 为验证 $\mathbf{u}^o(k_{j+1})$ 在收缩约束中的适应性, 将 $\mathbf{u}^o(k_{j+1})$ 和 $\hat{\mathbf{u}}(k_{j+1} - 1)$ 分别代入式 (8), 得到

$$\begin{aligned} & \eta_r(x(k_{j+1}), \alpha) - V_a^o(x(k_{j+1})) = \\ & V_a^o(x(k_{j+1})) - V_a^o(x(k_{j+1})) + \\ & \alpha(\hat{V}_a(x(k_{j+1} - 1), \hat{\mathbf{u}}(k_{j+1} - 1)) - V_a^o(x(k_{j+1}))) = \\ & \alpha(\hat{V}_a(x(k_{j+1} - 1)) - V_a^o(x(k_{j+1}))) \geq \\ & \alpha(\hat{V}_a(x(k_{j+1} - 1)) - \hat{V}_a(x(k_{j+1}))) \geq \\ & \alpha L_a(x(k_{j+1} - 1), \mathbf{u}^*(k_{j+1} - 1)). \end{aligned} \quad (26)$$

显然, 如果存在参数 $\alpha \geq 0$, $L_a(x(k_j), u(k_j)) \geq 0$, 意味着收缩约束不等式 $V_a^o(x(k_{j+1})) \leq \eta_r(x(k_{j+1}), \alpha)$

成立, 序列 $\mathbf{u}^o(k_{j+1})$ 是 k_{j+1} 时刻优化问题 (12) 的一个可行解.

根据上述两个部分, 任意状态 $x \in \Theta_N \subseteq X$ 对应闭环系统 (16) 下一个状态都满足 $x^+ \in \Theta_N \subseteq X$, 则根据定义 1 可知, 集合 Θ_N 是系统 (16) 的正不变集. \square

注 3 为了最大化触发间隔, 沿用 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 序列中的后续元素更新 (18), 得到 $\eta(x(k_j), \alpha) \leq \eta_r(x(k_j), \alpha)$, 利用松弛后的收缩函数 (23) 设计触发机制 (24). 可见, $\eta(x(k_j), \alpha)$ 是应用 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 序列中第 1 个元素的情况, $\eta_r(x(k_j), \alpha)$ 是应用 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 序列中沿用其他元素的情况, $\eta(x(k_j), \alpha)$ 是 $\eta_r(x(k_j), \alpha)$ 的一个情况, 故 $V_a(x(k_j)) \leq \eta_r(x(k_j), \alpha)$ 约束包含 $V_a(x(k_j)) \leq \eta(x(k_j), \alpha)$. 这样的优势是在触发 k_j 时刻求解优化问题 (13) 保证优化问题至少有一个解, 避免芝诺行为.

定理 2 考虑在正不变集 Θ_N 内的锅炉-汽轮机系统 (2), 如果假设 1 成立, 且优化问题 (13) 在初始时刻 $k = k_j = 0$ 可行, 给定参数 $0 \leq \alpha < 1$, 则闭环系统 (16) 在吸引域 Θ_N 内关于经济最优平衡点 (x_s, u_s) 渐近稳定.

证明 1) 在每个 $k \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 时刻优化问题 (13) 都可行. 考虑 k_j 和 $k_j + 1$ 时刻的最优 $\mathbf{u}^*(k_j)$ 和 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + 1)$, 并代入 V_a 得到值函数 (21) 和 (22), 沿闭环系统 (16) 轨迹做差分运算, 得

$$\begin{aligned} \Delta V_a(x(k_j)) &= \\ V_a(x(k_j + 1), \hat{\mathbf{u}}(k_j + 1)) - V_a(x(k_j), \mathbf{u}^*(k_j)) &= \\ E_a(x(N + 1|k_j)) - E_a(x(N|k_j)) + \\ L_a(x(N|k_j)) - L_a(x(0|k_j), \mathbf{u}^*(0|k_j)) &= \\ - L_a(x(0|k_j), \mathbf{u}^*(0|k_j)) \leq 0. \end{aligned} \quad (27)$$

2) 考虑在 $[k_j + 1, k_j + N_{k_j} - 2]$ 范围内的控制序列 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + i)$. 与第 1) 部分类似, 得到

$$\begin{aligned} \Delta V_a(x(k_j + i)) &\leq \\ - L_a(x(k_j + i - 1), \mathbf{u}^*(k_j + i - 1)) &\leq 0, \end{aligned} \quad (28)$$

其中 $i \in [1, N_{k_j} - 2]$.

3) 考虑 $k_j + N_{k_j} - 1$ 和 k_{j+1} 时刻的控制序列 $\hat{\mathbf{u}}(k_j + N_{k_j} - 1)$, $\mathbf{u}^o(k_{j+1})$ 和 $\mathbf{u}^*(k_{j+1})$. 值得注意的是, $k_{j+1} = k_j + N_{k_j}$, 将其代入 V_a 并沿闭环系统 (16) 轨迹做差分运算, 得

$$\begin{aligned} \Delta V_a(x(k_j + N_{k_j} - 1)) &= \\ V_a^*(x(k_{j+1})) - \hat{V}_a(x(k_j + N_{k_j} - 1)) &\leq \\ \eta_r(x(k_{j+1}), \alpha) - \hat{V}_a(x(k_j + N_{k_j} - 1)) &= \\ (1 - \alpha)(V_a^o(x(k_{j+1})) - \hat{V}_a(k_j + N_{k_j} - 1)) &\leq \end{aligned}$$

$$-(1 - \alpha)L_a(x(k_{j+1} - 1), u^*(k_{j+1} - 1)) \leq 0. \quad (29)$$

结合3个部分,对于 $j \in \mathbf{I}_{\geq 0}$,任意 $i \in [1, N_{k_j} - 1]$ 时刻存在 $\Delta V_a(x(k_j + i)) \leq 0$. 这意味着 $\hat{V}_a(x(k_j))$ 沿着闭环系统(16)轨迹严格单调递减, $k_j \in \mathbf{I}_{\geq 0}$ 时刻满足 $\hat{V}_a(x(k_j + i)) \leq \hat{V}_a(x(k_j))$ 和 $x(k_j + i) \in \Theta_N$.

对于所有 $x(k_j + i) \in \Theta_N$,考虑 $\hat{V}_a(x(k_j))$ 有界,都满足 $\hat{V}_a(x(k_j)) \geq L_a(x(k_j), u(k_j))$. 另外,对于所有满足 $x(k_j) \in \Theta_N$,目标函数 $\hat{V}_a(x(k_j))$ 都存在上界. 因此, $\hat{V}_a(x(k_j))$ 是闭环系统(16)的李雅普诺夫函数, x_s 是闭环系统(16)在 Θ_N 内的渐近稳态平衡点. 又因为 Θ_N 是闭环系统(16)的不变集,故 Θ_N 是闭环系统的一个吸引域. □

3 仿真结果与分析

考虑锅炉-汽轮机系统(2),选择分层结构保证稳定燃烧,同时对经济性实施在线优化. 比较本文策略与时间触发字典序MO-EMPC策略的锅炉-汽轮机经济燃烧的控制效果. 仿真中,选取 $(x_s, u_s) = (138.0663, 90, 359.5161, 0.4536, 0.7015, 0.5695)$ 作为锅炉-汽轮机系统稳定运行的预期平衡点. 进一步取矩阵 $Q = \text{diag}\{0.1, 0.001, 0.01\}$ 和 $R = \text{diag}\{100, 100, 10\}$,仿真时长为100,采样时间 $T_s = 1\text{ s}$,预测时域 $N = 7$. 为确定终端条件,利用锅炉-汽轮机系统模型(2)在平衡点 (x_s, u_s) 的线性化模型,采用Matlab中的线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)计算得到正定矩阵 P 和局部增益 K 为

$$P = \begin{bmatrix} 2.7915 & 0.0109 & 0.0945 \\ 0.0109 & 0.0047 & 0.0021 \\ 0.0945 & 0.0021 & 0.1871 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 0.0251 & 0.0001 & 0.0009 \\ -0.0125 & 0.0008 & -0.0034 \\ -0.0262 & 0.0002 & 0.0296 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

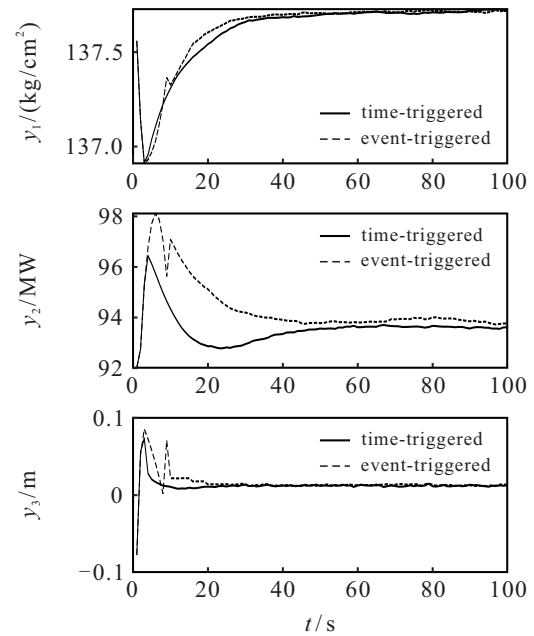
构造终端代价函数 $E(x) = (x - x_s)^T P (x - x_s)$ 和局部控制律 $\mu(x) = -K(x - x_s) + u_s$.

设计两组仿真实验验证事件触发MO-EMPC策略的优越性,仿真实验1将事件触发MO-EMPC与时间触发MO-EMPC进行在线计算量对比,仿真实验2分析收缩参数 α 对事件触发MO-EMPC策略的性能影响.

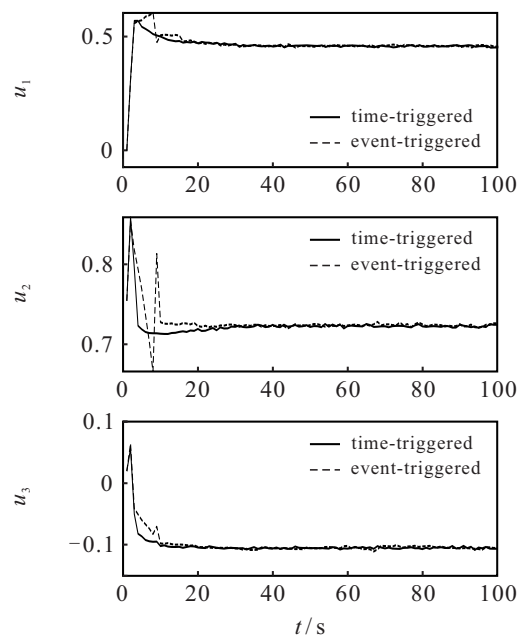
3.1 仿真实验1

选取系统初始状态 $(137.5589\text{ kg/cm}^2, 92\text{ MW}, 357.5906\text{ kg/cm}^3)$,参数 $\alpha = 0.3$. 运行算法1,仿真结果如图1所示. 其中:实线为时间触发算法(time-

triggered)下的仿真结果,虚线为事件触发算法(event-triggered)下的仿真结果. 由图1可知,具有时间触发和事件触发机制的MO-EMPC都可以稳定锅炉-汽轮机系统,但存在一些不同的瞬态行为,即事件触发的MO-EMPC比时间触发的MO-EMPC获得的瞬态行为波动更大. 造成这种差异的原因是收缩约束在保证系统稳定的前提下允许损失一部分经济性能,从而充分利用控制序列中的控制量来减少计算时间. 动态过程中受燃料流量影响,引发锅炉燃烧发热量波动,汽包水位和压力受影响. 为保证汽包在安全水位,调控水量使系统维持在稳定工况. 如图1所示,汽



(a) 输出变量



(b) 控制轨迹

图1 仿真实验1的输出变量、控制曲线

包蒸汽压力 y_1 和输出功率 y_2 有明显损失,但汽包中水位偏差保持在0m,可见算法能维持机组内部平衡.此外,事件触发条件下输出功率 y_2 在40s左右开始稳定.从仿真图1看出,在维持稳定工况的情况下, u_1 给料减少,燃料量的消耗降低, u_2 和 u_3 阀门开度增大,降低了蒸汽阀门和给水阀门的节流损失,提高了经济性能.

所有的计算和仿真都是在Intel 2.6GHz Lenovo笔记本电脑使用Matlab R2019b进行的.对比两个算法的平均计算时间(average computation time, ACT)如图2所示.时间触发机制的MO-EMPC算法需要100次MO-EMPC更新,总计算时间为60.725s.事件触发MO-EMPC方案的总计算时间仅为11.841s,触发机制的MO-EMPC算法更新18次.可见,该策略通过降低求解频次减少计算量.

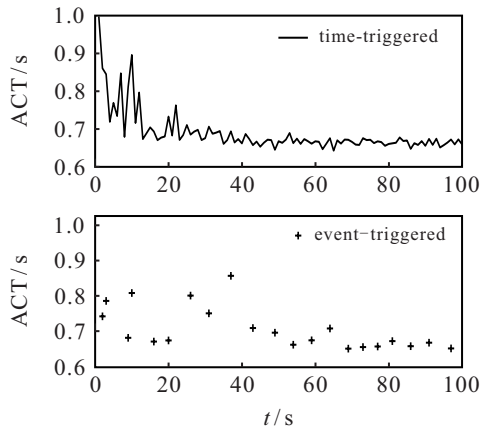
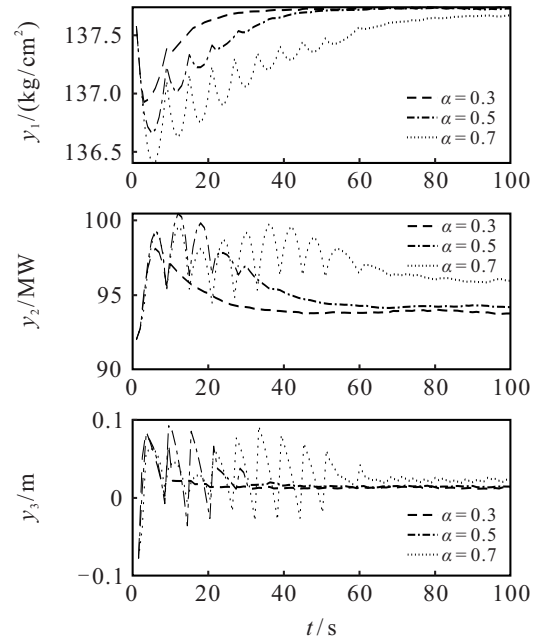


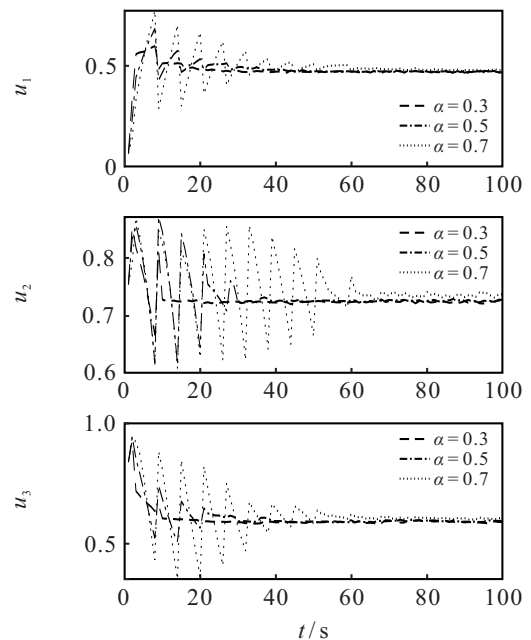
图2 时间触发和事件触发下平均计算时间对比

3.2 仿真实验2

验证 α 对锅炉-汽轮机系统的稳定性和经济燃烧性能的影响.根据实验1的仿真设置,分别选取 α 为0.3、0.5和0.7,下述仿真图显示了闭环状态量、控制量、平均计算时间(ACT)和触发频次的仿真结果,虚线、点虚线和点线分别与因子 α 取0.3、0.5和0.7相关.参数 α 影响收缩约束和触发机制范围,导致MO-EMPC的求解频次发生变化,燃料流量和经济燃烧在某些时刻与稳定工况的实际值存在大幅度的波动,参数 α 较小的取值能够一定程度上反映本文算法对系统的控制.如图3(a)和3(b),燃料进入系统分布不均匀,进入炉内的燃烧程度不同,导致炉内燃烧不稳定,蒸汽压力发生快速、大幅度波动,输出功率偏离稳定值.根据功率偏差作为锅炉前馈信号调节汽机蒸汽阀,进一步改变燃料输入量,补充锅炉蓄热的变化,使系统控制效果得到改善.



(a) 输出变量



(b) 控制轨迹

图3 仿真实验2的输出变量、控制曲线

针对锅炉-汽轮机系统控制过程,时间触发算法是在每个 k 时刻下求解优化问题(13)得到控制序列 $\mathbf{u}^*(k)$,利用 $\mathbf{u}^*(k)$ 的第1个控制元素 $u^*(0|k)$ 作用到锅炉-汽轮机系统.事件触发方法利用触发机制(24),沿用 $\mathbf{u}^*(k)$ 中的控制元素作用到锅炉-汽轮机系统,同时保证系统性能,加快锅炉-汽轮机整体的运行速度.

如图4所示,事件触发方法下的MO-EMPC随着参数 α 变小,触发频次变小,触发间隔变大,降低整体计算量.结合图3所示,参数 $\alpha = 0.3$ 对比其他参数仿真结果更好,性能损失更小,锅炉-汽轮机系统更稳定,且整体计算量更快.

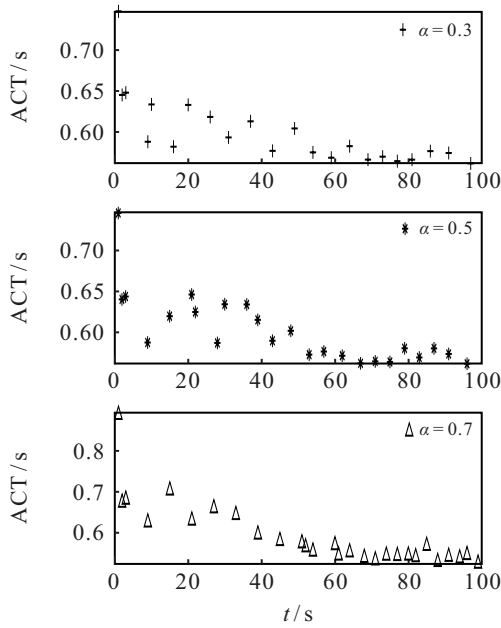


图4 不同 α 下事件触发MPC的ACT

如表1所示, $\alpha = 0.3$ 时,时间触发下MO-EMPC更新次数是100. $N = 5$ 时,ACT是561.7 ms; $N = 7$ 时,ACT是607.2 ms; $N = 9$ 时,ACT是630.4 ms. 可见预测时域 N 越长,ACT越长. 对比事件触发下的MO-EMPC, $N = 5$ 时,触发14次,ACT是548.1 ms; $N = 7$ 时,触发18次,ACT是657.8 ms; $N = 9$ 时,触发30次,ACT是689.6 ms. 预测时域越短,触发频次越低,事件触发算法能够通过减少求解频次,明显减少计算时间. 在实际工业过程中,锅炉-汽轮机系统整体运行存在延迟,会影响系统平衡,导致时间触发下求解优化问题(13)得到的控制指令会滞后控制锅炉-汽轮机系统. 本文算法沿用控制序列,及时控制锅炉-汽轮机系统的同时保证系统性能,对锅炉-汽轮机系统具有更快的控制速率,更符合实际工况.

表1 不同 N 下时间触发和事件触发MO-EMPC的ACT(ms)与触发次数

	$N = 5$	$N = 7$	$N = 9$
时间触发	561.7, 100	607.2, 100	630.4, 100
事件触发	548.1, 14	657.8, 18	689.6, 30

4 结论

本文提出了一种锅炉-汽轮机系统事件触发MO-EMPC策略,实现了锅炉-汽轮机系统在经济燃烧过程中的快速控制,同时保证系统稳定,降低性能损失. 该策略设计收缩约束条件,通过松弛约束设计触发条件,扩大触发间隔,减少计算量,并利用终端三要素条件构建了锅炉-汽轮机系统触发过程中的递推可行性和锅炉-汽轮机闭环系统关于经济最优平衡点的收敛性. 仿真结果表明,本文提出的锅炉汽轮机系

统的MO-EMPC控制器,在触发机制的作用下,算法能够很好地减少计算量,同时为维持锅炉-汽轮机系统的稳定控制提供了可行方案.

参考文献(References)

- [1] 陈雨蝶, 干宏程, 程亮. “双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1951-1959.
(Chen Y D, Gan H C, Cheng L. Cold chain logistics model based on joint distribution and its optimization algorithm under the background of double carbon[J]. Control and Decision, 2023, 38(7): 1951-1959.)
- [2] 张开萍, 高明明, 龙江, 等. 生物质直燃式循环流化床锅炉燃烧系统建模及预测研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(4): 452-460.
(Zhang K P, Gao M M, Long J, et al. Modeling and prediction of biomass direct fired circulating fluidized bed boiler combustion system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(4): 452-460.)
- [3] 袁小芳, 王耀南, 孙炜, 等. 发电机组汽门系统的多模型自学习控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(7): 769-773.
(Yuan X F, Wang Y N, Sun W, et al. Multi-model self-learning control for turbine valving control[J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 769-773.)
- [4] 董乐, 辛亚飞, 李娟, 等. 660 MW超超临界循环流化床锅炉水动力及流动不稳定特性计算分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1545-1554.
(Dong L, Xin Y F, Li J, et al. Computational analysis on thermal-hydraulic characteristics and flow instability of a 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1545-1554.)
- [5] 曹丽华, 赵都都, 司和勇. 超超临界汽轮机补汽结构流动特性与损失分布[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3894-3904.
(Cao L H, Zhao D D, Si H Y. Flow characteristics and loss distribution of overload valve in supercritical steam turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3894-3904.)
- [6] Kong X B, Liu X J, Lee K Y. Nonlinear multivariable hierarchical model predictive control for boiler-turbine system[J]. Energy, 2015, 93: 309-322.
- [7] 杨奎河, 单甘霖, 赵玲玲. 基于最小二乘支持向量机的汽轮机故障诊断[J]. 控制与决策, 2007, 22(7): 778-782.
(Yang K H, Shan G L, Zhao L L. Steam turbine fault diagnosis based on least squares support vector machine[J]. Control and Decision, 2007, 22(7): 778-782.)
- [8] 刘向杰, 牛丽霞, 何文广. 基于关联存储网络的非线性约束监督预测控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1230-1236.
(Liu X J, Niu L X, He W G. Constraint multivariable nonlinear supervisory predictive control using associate memory network[J]. Control and Decision, 2010, 25(8):

- 1230-1236.)
- [9] Liu X J, Cui J H. Economic model predictive control of boiler-turbine system[J]. *Journal of Process Control*, 2018, 66: 59-67.
- [10] 崔靖涵, 刘向杰, 孔小兵. 锅炉-汽轮机系统的模糊经济模型预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(3): 308-316.
(Cui J H, Liu X J, Kong X B. Fuzzy economic model predictive control of boiler-turbine system[J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 308-316.)
- [11] 苏志鹏, 王东风. 基于自适应神经模糊系统的锅炉汽轮机建模[J]. *仪器仪表用户*, 2019, 26(11): 99-102.
(Su Z P, Wang D F. Modeling of boiler and steam turbine based on adaptive neural fuzzy system[J]. *Instrumentation*, 2019, 26(11): 99-102.)
- [12] 吴永明, 陈琳升, 李少波. 基于改进GNG算法的燃煤锅炉数据动态特征分析与控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1855-1861.
(Wu Y M, Chen L S, Li S B. Dynamic characteristics analysis and control of coal-fired boiler based on improved GNG algorithm[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(8): 1855-1861.)
- [13] 丁永辉. 直流锅炉-汽轮机协调系统自适应控制算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
(Ding Y H. Adaptive control for once-through boiler turbine coordinated system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.)
- [14] 崔靖涵. 稳定经济模型预测控制及其在电力生产过程中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
(Cui J H. Research on stable economic model predictive control and its application in power generation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.)
- [15] Ramasamy V, Sidharthan R K, Kannan R, et al. Optimal tuning of model predictive controller weights using genetic algorithm with interactive decision tree for industrial cement kiln process[J]. *Processes*, 2019, 7(12): 938.
- [16] Zavala V M, Flores-Tlacuahuac A. Stability of multiobjective predictive control: A utopia-tracking approach[J]. *Automatica*, 2012, 48(10): 2627-2632.
- [17] He D F, Yu S M, Ou L L. Lexicographic MPC with multiple economic criteria for constrained nonlinear systems[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2018, 355(2): 753-773.
- [18] He D F, Sun J, Yu L. Economic MPC with a contractive constraint for nonlinear systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2016, 26(18): 4072-4087.
- [19] He D F, Li H P, Du H P. Lexicographic multi-objective MPC for constrained nonlinear systems with changing objective prioritization[J]. *Automatica*, 2021, 125: 109433.
- [20] Sun Z Q, Dai L, Liu K, et al. Robust self-triggered MPC with adaptive prediction horizon for perturbed nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(11): 4780-4787.
- [21] Xie H H, Dai L, Luo Y, et al. Robust MPC for disturbed nonlinear discrete-time systems via a composite self-triggered scheme[J]. *Automatica*, 2021, 127: 109499.
- [22] Sun Z Q, Li C, Zhang J H, et al. Dynamic event-triggered MPC with shrinking prediction horizon and without terminal constraint[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(11): 12140-12149.
- [23] Lu L, Limon D, Kolmanovsky I. Self-triggered MPC with performance guarantee for tracking piecewise constant reference signals[J]. *Automatica*, 2022, 142: 110364.
- [24] Lu L, Maciejowski J M. Self-triggered MPC with performance guarantee using relaxed dynamic programming[J]. *Automatica*, 2020, 114: 108803.
- [25] He D F, Tian Y, Du H P. Event-triggered economic MPC with relaxed contractive constraints[J]. *Journal of Process Control*, 2023, 127: 102992.
- [26] Zhu J Z. Nonlinear dynamic investigation and anti-bifurcation control of a boiler-turbine unit via dual-mode fuzzy model predictive control strategy[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(15): 7365-7393.
- [27] Mayne D Q. Model predictive control: Recent developments and future promise[J]. *Automatica*, 2014, 50(12): 2967-2986.
- [28] 何德峰, 宋秀兰, 黄骅. 优先级多目标稳定化约束模型预测控制[J]. *控制与决策*, 2013, 28(12): 1831-1836.
(He D F, Song X L, Huang H. Stabilizing constrained model predictive control with prioritized multiobjectives[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(12): 1831-1836.)
- [29] Chen H, Allgöwer F. A quasi-infinite horizon nonlinear model predictive control scheme with guaranteed stability[C]. 1997 European Control Conference. Brussels, 1997: 1421-1426.
- [30] 于树友, 陈虹, 张鹏, 等. 一种基于LMI的非线性模型预测控制终端域优化方法[J]. *自动化学报*, 2008, 34(7): 798-804.
(Yu S Y, Chen H, Zhang P, et al. An LMI optimization approach for enlarging the terminal region of MPC for nonlinear systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(7): 798-804.)
- [31] He D F, Yu L, Song X L. Optimized-based stabilization of constrained nonlinear systems: A receding horizon approach[J]. *Asian Journal of Control*, 2014, 16(6): 1693-1701.

作者简介

田宇(1993—), 女, 博士生, 从事模型预测控制的研究, E-mail: 1112003016@zjut.edu.cn;

何德峰(1979—), 男, 教授, 博士, 从事智能预测与最优控制、智慧网联系统与综合能源系统运行优化等研究, E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn;

穆建彬(1991—), 男, 讲师, 博士, 从事分布式系统控制与优化、预测控制等研究, E-mail: jianbinmu@zjut.edu.cn.