

## 锅炉-汽轮机系统的模糊经济模型预测控制

崔靖涵, 刘向杰<sup>†</sup>, 孔小兵

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 现代电厂的优化控制通常采用双层控制结构, 上层通过优化经济性能指标获得稳态设定值, 传递到下层实现设定值跟踪。然而, 传统的控制结构往往会忽略动态跟踪过程中的经济性能。本文针对锅炉-汽轮机系统设计了基于模糊模型的经济模型预测控制策略。通过离线设计稳定的线性反馈控制律和可行域, 来保证优化问题的递推可行性和稳定性。通过在线求解双模态经济模型预测控制优化问题, 实现锅炉汽轮机系统动态过程中经济性能的提高。大范围和小范围负荷变化情况下的仿真结果表明了本文提出的模糊经济模型预测控制的有效性。

**关键词:** 经济模型预测控制; 模糊模型; 锅炉-汽轮机系统; 稳定性; 可行性

**引用格式:** 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. 控制理论与应用, 2018, 35(3): 308–316

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Fuzzy economic model predictive control of boiler-turbine system

CUI Jing-han, LIU Xiang-jie<sup>†</sup>, KONG Xiao-bing

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Traditionally, the economy of the boiler-turbine system has been handled in a multi-layer hierarchical architecture where the upper-layer obtains an economical optimal steady state and sends it to the lower-layer for tracking purpose. However, traditional control structures tend to ignore the economic performance of the dynamic tracking process. To improve the transient economy, the economic model predictive control strategy based on fuzzy model for the boiler-turbine system is proposed in this paper. The feasibility and stability of the controller is guaranteed through designing the linear feedback control law and the feasible region off-line. Then, the optimization problem of economic model predictive control is solved on-line with two modes, i.e., dynamic economic optimization mode and guaranteeing stability mode, so as to realize improving the economic of the dynamic process. Simulation results under large and small range load variations show the effectiveness of the proposed fuzzy economic model predictive control.

**Key words:** economic model predictive control; fuzzy model; boiler-turbine system; stability; feasibility

**Citation:** CUI Jinghan, LIU Xiangjie, KONG Xiaobing. Fuzzy economic model predictive control of boiler-turbine system. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 308–316

### 1 引言(Introduction)

模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种先进控制策略, 近年来广泛应用于电力生产过程<sup>[1]</sup>。现有的MPC方法通过对过程变量构造有效的优化控制策略, 实现发电厂的跟踪控制并提高运行效率。文献[2]针对大型火力发电机组协调控制, 构造了基于模糊神经网络模型的约束预测控制策略; 文献[3]针对锅炉汽包水位设计了适用于积分过程的动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)算法; 文献[4]针对蒸汽过热汽温控制设计了基于T-S模糊模型的稳定模

糊模型预测控制方法。

现代电厂的控制已不再是单纯的工程问题, 而需要更多考虑经济和环境问题。实现电厂的经济优化性能, 可构造分层控制结构的设定调度策略, 即双层结构模型预测控制(two-layered model predictive control)<sup>[5]</sup>。文献[6]构造了超超临界机组的非线性双层结构模型预测控制, 设计包括经济指标优化层和跟踪性能优化层的双层控制结构。文献[7]基于模糊模型构造了锅炉-汽轮机系统的双层结构模型预测控制策略, 通过Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优化条件求得

收稿日期: 2017-04-25; 录用日期: 2017-11-22。

<sup>†</sup>通信作者: liuxj@ncepu.edu.cn。

本文责任编辑: 李少远。

国家自然科学基金项目(61673171, 61603134, 61533013), 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2017MS033, 2017ZZD004, 2017XS065)资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61673171, 61603134, 61533013) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017MS033, 2017ZZD004, 2017XS065).

优化问题的最优解, 使得经济性能达到全局最优。

然而, 通常情况下系统的稳态经济最优点和全局经济最优点是不同的<sup>[8]</sup>, 如图1所示。采用传统的分层结构对锅炉-汽轮机系统进行控制时, 其本质是通过上层优化经济性指标得到稳态最优点。因此, 传统的分层结构只能保证系统的稳态达到经济最优, 忽略整个动态过程中的经济性, 丢失了系统内在的经济信息, 从而无法达到全局经济最优。

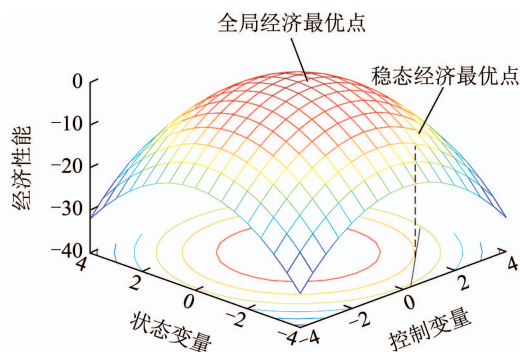


图1 稳态经济最优点和全局经济最优点

Fig. 1 Economic steady-state and economic global optimum

近年来, 经济模型预测控制(economic model predictive control, EMPC)受到了广泛关注, 其本质是将上层的相关经济信息带到下层, 在动态跟踪的过程中直接考虑经济性的问题。但因此其可行性和闭环稳定性无法得到有效保证。有关EMPC的性能分析以及闭环稳定性成为研究热点: 文献[9]提出带有终端等式约束的EMPC控制策略, 并且基于强对偶性条件证明了该算法的稳定性和可行性, 首次找到了EMPC的Lyapunov函数。文献[10]引入关于经济最优平衡点的正定辅助函数, 利用辅助函数的最优值函数定义原始EMPC优化问题的稳定性约束。文献[11]提出了基于Lyapunov技术的EMPC控制算法, 通过两种模态, 即经济优化模态和稳定性保证模态来实现动态经济性能的最优化, 同时保证闭环系统稳定性。文献[12]提出了基于经验模型的EMPC控制策略, 考虑有界干扰和模型失配问题, 证明了在线优化问题的可行性和稳定性。随着其理论体系深入的研究和发展, EMPC也逐渐在建筑的加热和冷却系统<sup>[13]</sup>以及电力生产<sup>[14]</sup>等工业过程上取得一定研究成果。

由于火电机组是大范围变工况的复杂耦合系统, 负荷的循环变换导致系统动态过程变化的非线性, 这使得经济模型预测控制成为复杂的非凸优化问题, 且计算量庞大。然而, 火电机组的动态特性仍然遵循一定的规律, 即动态特性依赖于负荷变化。由此, 本文依据火电机组实时运行工况建立模糊模型, 使得该EMPC的求解成为凸优化问题。基于此模型构造稳定的EMPC策略, 实现火电厂负荷跟踪的控制目标, 并且提高跟踪动态过程中的经济性能。

## 2 问题描述(Problem description)

160 MW锅炉-汽轮机发电机组的动态模型可由如下三阶非线性方程描述<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3, \\ \dot{x}_2 = (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9/8} - 0.1x_2, \\ \dot{x}_3 = (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85, \\ y_1 = x_1, \\ y_2 = x_2, \\ y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100\alpha_s + q_e/9 - 67.975), \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $u = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T$  分别为燃料流量调节阀开度、蒸汽流量调节阀开度、给水流量调节阀开度; 模型的输出量  $y = [y_1 \ y_2 \ y_3]^T$  分别为汽包压力  $P$ 、输出功率  $E$ 、汽包与设定值水位的偏差  $L$ ; 状态变量  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  分别为汽包压力  $P$ 、输出功率  $E$ 、系统内的流体密度  $\rho_f$ 。  $q_e$  和  $\alpha_s$  表达式为

$$\begin{aligned} q_e &= (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.51u_3 - 2.096, \\ \alpha_s &= \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)}. \end{aligned}$$

控制量  $u_1, u_2, u_3$  要满足如下增量和幅值约束:

$$\begin{cases} -0.007 \leq \frac{du_1}{dt} \leq 0.007, & 0 \leq u_1 \leq 1, \\ -2.0 \leq \frac{du_2}{dt} \leq 0.02, & 0 \leq u_2 \leq 1, \\ -0.05 \leq \frac{du_3}{dt} \leq 0.05, & 0 \leq u_3 \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

锅炉-汽轮机系统的经济性能通常需要考虑负荷跟踪、燃料量使用、主蒸汽阀门和给水阀门的节流损失等指标<sup>[16]</sup>, 定义为

$$\begin{cases} l_{e1}(x, u) = (\text{Euld} - x_2)^2, \\ l_{e2}(x, u) = u_1, \\ l_{e3}(x, u) = -u_2, \\ l_{e4}(x, u) = -u_3, \end{cases} \quad (3)$$

其中: Euld是单元负荷需求(MW),  $l_{e1}(x, u)$  表示负荷跟踪误差,  $l_{e2}(x, u)$  表示燃料量阀门开度, 反映燃料量的消耗,  $l_{e3}(x, u)$  和  $l_{e4}(x, u)$  分别表示主蒸汽阀门和给水阀门的节流损失。阀门开度越大, 节流损失越小, 能量损耗越小。

通过将负荷跟踪、燃料量使用、节流损失等指标线性加权可获得锅炉-汽轮机的经济阶段成本函数

$$l_e(x, u) = \beta_1 l_{e1} + \beta_2 l_{e2} + \beta_3 l_{e3} + \beta_4 l_{e4}, \quad (4)$$

其中  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  为权重系数。

与传统跟踪MPC不同, EMPC直接将其经济阶段成本函数作为优化函数, 旨在保证稳定性的前提下提高系统的动态经济性能。构造一般的带有终端等式约束的EMPC优化问题:

$$\min_{u(k+i|k), i=0, \dots, N-1} \sum_{i=0}^{N-1} l_e(\tilde{x}(k+i|k), u(k+i)), \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } \tilde{x}(k+i+1|k) = f(\tilde{x}(k+i|k), u(k+i|k)), \quad (5b)$$

$$\tilde{x}(k|k) = x(t_k), \quad (5c)$$

$$u_{\min} \leq u(k+i|k) \leq u_{\max}, \quad (5d)$$

$$\Delta u_{\min} \leq u(k+i+1|k) - u(k+i|k) \leq \Delta u_{\max}, \quad (5e)$$

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

$$x(k+N|k) = x_s, \quad (5f)$$

其中:  $N$ 表示EMPC的预测时域.  $\tilde{x}(k+i|k)$ 表示系统未来时刻的预测状态. 式(5b)为锅炉汽轮机系统的非线性离散化模型.  $x(t_k)$ 为 $t_k$ 时刻实际测得的状态变量.  $u_{\min}, u_{\max}, \Delta u_{\min}, \Delta u_{\max}$ 为控制量幅值约束和增量约束的下界和上界. 式(5f)为保证稳定性的终端等式约束,  $x_s$ 为基于经济阶段成本函数(4)求得的最优稳态.

上述带有终端约束的EMPC优化问题, 由于终端约束的引入导致每一次寻优过程, 其状态轨迹最终都需达到稳态设定值, 这严重影响了经济寻优的自由度<sup>[17]</sup>, 即: 终端约束的引入缩小了EMPC优化问题的可行域, 使得动态过程中锅炉-汽轮机系统的燃料量消耗和节流损失不能达到最优. 因此需构造一种双模EMPC, 即能够找到一个可行域, 使其最大限度地进行经济寻优, 又能保证在有限时间内将锅炉汽轮机系统状态驱动到期望的设点值, 就可以实现在保证稳定性的前提下最大程度提高其动态经济性能.

电厂EMPC控制策略的另一个难点是系统的非线性问题. 由于锅炉-汽轮机模型含有强非线性项 $x_1^{9/8}$ , 使得无法获得式(5b)的准确表达式, 即很难利用该非线性模型获得未来时刻预测状态量 $x(k+j+1|k)$ 与控制量 $u(k+j|k)$ 间的显式关系, 使得优化问题(5)成为一个非凸优化问题, 难于获得最优解. 由于锅炉-汽轮机系统的动态特性依赖于负荷变化, 因此本文构造锅炉-汽轮机的模糊模型, 基于该模型, 设计稳定的EMPC控制策略.

### 3 锅炉-汽轮机系统的经济模型预测控制 (EMPC of boiler-turbine system)

#### 3.1 锅炉-汽轮机系统的模糊模型 (The fuzzy model of boiler-turbine system)

由于锅炉-汽轮机系统的动态特性依赖于负荷变化, 因此在模糊建模中选取输出功率 $x_2$ 作为唯一的前提变量. 采用如下离散的模糊模型来近似锅炉-汽轮机系统的动态:

$$R^i : \text{if } x_2(k) \text{ is } f^i,$$

$$\text{then } x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k), \quad (6)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, m\},$$

其中:  $R^i$ 表示第 $i$ 条模糊推理规则,  $m$ 为模糊规则的个数,  $f^i$ 为模糊集.  $A_i, B_i$ 状态矩阵通过文献[18]提出的基于最小二乘拟合的线性化方法求得.

通过间隙测度来度量锅炉-汽轮机系统的非线性程度可得, 锅炉-汽轮机模型的非线性程度随功率的增加而增大. 更多的模糊规则需要分布在非线性程度强的运行区域<sup>[19]</sup>, 因此选择线性化操作点为20 MW, 50 MW, 90 MW, 110 MW和130 MW, 其隶属度函数如图2所示,  $\mu$ 表示隶属度. 通过单点模糊化、乘积模糊推理和中心平均去模糊化方法<sup>[20]</sup>可得锅炉-汽轮机系统的模糊离散模型为

$$x(k+1) = A_\mu x(k) + B_\mu u(k), \quad (7)$$

$$\text{其中: } A_\mu = \sum_{i=1}^5 \mu_i(k) A_i, \quad B_\mu = \sum_{i=1}^5 \mu_i(k) B_i.$$

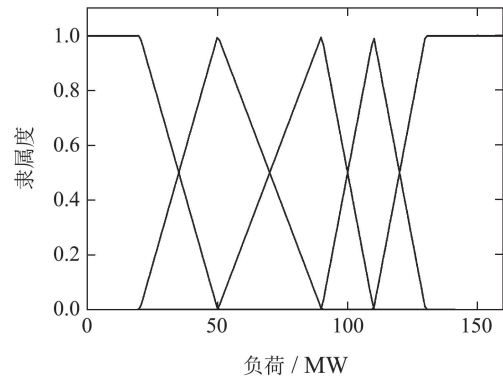


图2 锅炉-汽轮机系统模糊模型隶属度函数

Fig. 2 Membership function of boiler-turbine system

#### 3.2 经济模型预测控制策略 (EMPC strategy)

不失一般性, 将最优稳态转移至零点, 构建基于模糊模型的经济模型预测控制策略. 其在线优化问题表示为

$$\min_{u(k+i|k), i=0, \dots, N-1} \sum_{i=0}^{N-1} l_e(\tilde{x}(k+i|k), u(k+i)), \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } \tilde{x}(k+i+1|k) =$$

$$\sum_{j=1}^5 \mu_j(k) A_j \tilde{x}(k+i|k) + \sum_{j=1}^5 \mu_j(k) B_j u(k+i|k), \quad (8b)$$

$$\tilde{x}(k|k) = x(t_k), \quad (8c)$$

$$|u_j(k+i|k)| \leq u_{j,\max}, \quad (8d)$$

$$|u_j(k|k) - K_j x(k|k)| \leq \Delta u'_{j,\max}, \quad (8e)$$

$$|u_j(k+i+1|k) - K_j \tilde{x}(k+i+1|k)| \leq \Delta u'_{j,\max}, \quad (8f)$$

$$i = 0, 1, \dots, N-1, \quad j = 1, 2, 3,$$

$$\text{Mode 1 : } \tilde{x}(k+i|k)^T P \tilde{x}(k+i|k) \leq \gamma,$$

$$i = 1, \dots, N, t_k < t', \quad (8g)$$

$$\begin{aligned} \text{Mode 2: } & \tilde{x}(k+1|k)^T P \tilde{x}(k+1|k) \leq \\ & x(k)^T (A(k) + B(k)K)^T P (A(k) + \\ & B(k)K) x(k), t_k \geq t', \end{aligned} \quad (8h)$$

其中: 式(8b)为当前 $t_k$ 时刻锅炉-汽轮机系统的模糊模型. 式(8d)为操作变量的幅值约束, 式(8e)–(8f)为修正的操作变量的增量约束.  $K$ 为离线设计的稳定的线性反馈控制律增益矩阵,  $K_j$ 表示其第 $j$ 行. 通过模糊建模, 得到系统未来时刻状态量和控制量的显式表达式(8b), 使得上述EMPC优化问题成为凸优化问题, 从而可通过二次规划方法求得全局最优解.

上述EMPC优化问题分为两个运行模态,  $t'$ 为时间分离点. 当 $t_k < t'$ 时, EMPC运行在第1模态, 此时经济性能优化为主要目标, 将锅炉-汽轮机系统的状态变量控制在可行域 $\Omega_\gamma = \{x \in \mathbb{R}^{n_x} | x^T P x \leq \gamma\}$ 内, 优化其经济阶段成本函数. 当 $t_k \geq t'$ , EMPC运行在第2模态, 收缩性约束(8h)保证了锅炉-汽轮机闭环系统的稳定性, 使得闭环状态轨迹收敛到最优稳态.

为了保证上述EMPC控制策略的稳定性, 需离线设计一个稳定的线性反馈控制律 $u = Kx$ 和可行域 $\Omega_\gamma$ . 首先定义Lyapunov函数 $V(x) = x^T P x$ , 其中 $P$ 为对称正定矩阵. 针对初始时刻测得的状态量 $x_0$ 构建基于锅炉-汽轮机模糊模型的一次离线min-max预测控制器.

$$\min_{\gamma, Q, Y} \gamma, \quad (9a)$$

$$\text{s.t. } \begin{bmatrix} 1 & x_0^T \\ x_0^T & Q \end{bmatrix} \geq 0, \quad (9b)$$

$$\begin{bmatrix} Q & Q A_i^T + Y^T B_i^T & Q q^{0.5} & Y^T r^{0.5} \\ A_i Q + B_i Y & Q & 0 & 0 \\ q^{0.5} Q & 0 & \gamma I & 0 \\ r^{0.5} Y & 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \geq 0, \quad (9c)$$

$$i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Q \end{bmatrix} \geq 0, X_{jj} \leq u_{j,\max}^2, j = 1, 2, 3, \quad (9d)$$

其中: 正定矩阵 $q, r$ 为传统跟踪目标函数的权重系数. EMPC控制策略中的反馈增益 $K$ 和正定对称矩阵 $P$ 表示为

$$K = YQ^{-1}, \quad (10)$$

$$P = Q^{-1}\gamma. \quad (11)$$

由于利用线性矩阵不等式求解min-max预测控制器时很难同时考虑锅炉-汽轮机系统的控制量增量约束和幅值约束, 因此为了保证反馈控制律 $u = Kx$ 为在线优化问题(8)的可行解, 需对控制量增量约束进行修正. 在当前时刻考虑未来控制变量的增量约束形式,

表示为

$$|u_j(k|k) - u_j(k-1|k-1)| \leq \Delta u_{j,\max}, \quad (12)$$

$$|u_j(k+i+1|k) - u_j(k+i|k)| \leq \Delta u_{j,\max}, \quad (13)$$

其中:  $i=0, 1, \dots, N-1, j=1, 2, 3$ . 由于锅炉-汽轮机系统的连续性, 因此对于所有的状态 $x(k+i|k), x(k+i-1|k) \in \Omega_\gamma, i=0, 1, \dots, N-1$ , 存在 $M>0$ 使得下面不等式成立:

$$|x(k+i|k) - x(k+i-1|k)| \leq MT, \quad (14)$$

其中:  $T$ 为采样时间间隔,  $x(k-1|k)$ 为 $t_{k-1}$ 时刻状态变量. 则存在 $\Delta u'_{j,\max}$ 满足下述不等式:

$$\Delta u'_{j,\max} \leq (\Delta u_{j,\max} - |K_j|MT)/2, j = 1, 2, 3. \quad (15)$$

通过上式求得修正后的控制量增量的上界, 构造在线EMPC优化问题中的修正控制量增量约束(8e)–(8f), 保证了 $u = Kx$ 为优化问题(8)的可行解.

### 3.3 稳定性及可行性分析(Stability and feasibility analysis)

同时考虑锅炉-汽轮机系统的控制量增量约束和幅值约束, 对本文设计的基于稳定线性反馈控制律的经济模型预测控制的可行性和稳定性进行详细分析.

**定理1** 考虑EMPC控制策略下, 系统(7)的闭环状态轨迹. 若不等式(15)成立, 则EMPC优化问题(8)存在递推可行解, 且使得锅炉-汽轮机闭环系统渐近稳定.

**证** 该证明包含两个部分. 首先证明控制策略对任意的 $x \in \Omega_\gamma$ , EMPC优化问题始终存在可行解. 然后证明运行在第2模态时, EMPC控制策略使得锅炉-汽轮机模糊系统闭环状态渐进稳定到最优稳态.

第1部分: 利用线性矩阵不等式, 离线设计一个可行域 $\Omega_\gamma$ 和一个稳定的反馈控制律 $u = Kx$ . 基于不等式(14)–(15)和修正后的增量约束(8e)–(8f), 利用三角不等式和Cauchy-Schwartz不等式, 可得实际的控制量增量约束(13)–(14)的上界

$$\begin{aligned} & |u_j(k|k) - u_j(k-1|k-1)| = \\ & |u_j(k|k) - u_j(k-1|k-1) - K_j x(k|k) + \\ & K_j x(k-1|k-1)| \leq |u_j(k|k) - K_j x(k|k)| + \\ & |u_j(k-1|k-1) - K_j x(k-1|k-1)| + \\ & |K_j| |x(k|k) - x(k-1|k-1)| \leq \\ & 2\Delta u'_{j,\max} + |K_j|MT, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & |u_j(k+i+1|k) - u_j(k+i|k)| = \\ & |u_j(k+i+1|k) - u_j(k+i|k) - K_j \tilde{x}(k+i+1|k) + \\ & K_j \tilde{x}(k+i+1|k) - K_j x(k+i|k) + K_j x(k+i|k)| \leq \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& |u_j(k+i+1|k) - K_j \tilde{x}(k+i+1|k)| + \\
& |u_j(k+i|k) - K_j x(k+i|k)| + |K_j| \cdot \\
& |\tilde{x}(k+i+1|k) - \tilde{x}(k+i|k)| \leq \\
& 2\Delta u'_{j,\max} + |K_j|MT, \quad (17)
\end{aligned}$$

其中:  $i = 0, 1, \dots, N$ ,  $j = 1, 2, 3$ . 对于锅炉-汽轮机系统的实际增量约束  $\Delta u_{\max}$ , 始终存在  $\Delta u'_{\max}$  使得  $2\Delta u'_{j,\max} + |K_j|MT \leq \Delta u_{j,\max}$  成立. 因此EMPC控制策略满足锅炉-汽轮机系统的实际增量约束(12)–(13).

综上, 当  $x(t_k) \in \Omega_\gamma$ , 存在离线设计的稳定反馈控制律  $u(k+i) = K\tilde{x}(k+i|k)$ ,  $i = 0, \dots, N-1$  满足控制量幅值约束(8d), 并且满足修正之后的控制量增量约束(8e)–(8f), 同时满足模态1与模态2中的约束. 因此, 得到EMPC优化问题的一个可行解

$$u(k+i) = K\tilde{x}(k+i|k), \quad i = 0, \dots, N-1.$$

在模态1下, 由于存在约束(8g), 使得锅炉-汽轮机模糊模型的预测状态量  $\tilde{x}(k+1|k) \in \Omega_\gamma$ , 又由于当前时刻的模糊模型可以代替当前实际锅炉汽轮机系统的动态特性, 在不考虑干扰的情况下, 下一时刻的实际状态量  $x(t_{k+1}) \in \Omega_\gamma$ . 因此, EMPC优化问题具有递推可行性.

第2部分: 假设EMPC控制策略运行在模态2, 需证明当  $x(t_k) \in \Omega_\gamma$ , 有  $V(x(t_{k+1})) \leq V(x(t_k))$  成立, 且系统的状态最终稳定到最优设定值. 根据约束(8h)和稳

$F =$

$$\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\sum_{j=1}^5 \mu_j(k)B_j & 0 & 0 & \dots & 0 \\
\sum_{j=1}^5 \mu_j(k)A_j \sum_{j=1}^5 \mu_j(k)B_j & \sum_{j=1}^5 \mu_j(k)B_j & 0 & \dots & 0 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
(\sum_{j=1}^5 \mu_j(k)A_j)^{N-2} \sum_{j=1}^5 \mu_j(k)B_j & (\sum_{j=1}^5 \mu_j(k)A_j)^{N-3} \sum_{j=1}^5 \mu_j(k)B_j & (\sum_{j=1}^5 \mu_j(k)A_j)^{N-4} \sum_{j=1}^5 \mu_j(k)B_j & \dots & 0
\end{bmatrix}_{N \times N},$$

$$E = [I \quad \sum_{j=1}^5 \mu_j(k)A_j \quad \dots \quad (\sum_{j=1}^5 \mu_j(k)A_j)^{N-1}]^T.$$

将上述状态预测方程带入优化问题(8)中, 整理得到如下带有二次约束的二次规划问题:

$$\min_U J_N(U) = U^T F^T \psi F U + 2x(k|k)^T E^T \psi F U, \quad (21a)$$

$$\text{s.t. } x(k|k) = x(t_k), \quad (21b)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} U_{\max} \\ -U_{\min} \end{bmatrix}, \quad (21c)$$

$$\begin{bmatrix} I - \bar{K}F \\ \bar{K}F - I \end{bmatrix} U \leq \begin{bmatrix} \Delta U'_{\max} \\ -\Delta U'_{\min} \end{bmatrix}. \quad (21d)$$

定的反馈控制律  $u = Kx$  可得

$$\begin{aligned}
& \tilde{x}(k+1|k)^T P \tilde{x}(k+1|k) \leq \\
& x(k)^T (A(k) + B(k)K)^T P (A(k) + B(k)K) x(k) \leq \\
& x(k)^T P x(k), \quad (18)
\end{aligned}$$

由此可得

$$x(t_{k+1})^T P x(t_{k+1}) \leq x(t_k)^T P x(t_k) \quad (19)$$

成立. 其中  $V(x) = x^T P x$  为Lyapunov函数. 证毕.

**注1** 在EMPC在线优化问题中, 采用锅炉-汽轮机当前时刻的模糊线性模型作为预测模型具有一定的保守性, 但当前时刻的线性模型可以代表实际锅炉-汽轮机系统此刻的动态特性, 且本文设计的EMPC控制器可以保证其闭环系统的稳定性.

### 3.4 优化问题的求解 (Optimization problem solving)

定义向量:

$$\tilde{X} =$$

$$[x^T(k|k) \quad \tilde{x}^T(k+1|k) \quad \dots \quad \tilde{x}^T(k+N|k)]^T,$$

$$U =$$

$$[u^T(k|k) \quad u^T(k+1|k) \quad \dots \quad u^T(k+N-1|k)]^T,$$

可得整个预测时域上的状态预测值为

$$\tilde{X} = F U + E \tilde{x}(k|k), \quad (20)$$

其中:

Mode 1 :

$$\begin{aligned}
& U^T F^T w(i)^T P w(i) F U + \\
& 2x(k)^T E^T w(i)^T P w(i) F U + \\
& x(k)^T E^T w(i)^T P w(i) E x(k) \leq \gamma, \quad (21e)
\end{aligned}$$

Mode 2 :

$$\begin{aligned}
& U^T F^T w(1)^T P w(1) F U + \\
& 2x(k)^T E^T w(1)^T P w(1) F U + \\
& x(k)^T E^T w(1)^T P w(1) E x(k) \leq \eta, \quad (21f)
\end{aligned}$$

其中:

$$\psi = \begin{bmatrix} \beta_1 \alpha^T \alpha & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \beta_1 \alpha^T \alpha & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \beta_1 \alpha^T \alpha \end{bmatrix}_{3N \times 3N},$$

$$\alpha = [0 \ 1 \ 0],$$

$$U_{\min} = \begin{bmatrix} u_{\min} \\ u_{\min} \\ \vdots \\ u_{\min} \end{bmatrix}, \quad U_{\max} = \begin{bmatrix} u_{\max} \\ u_{\max} \\ \vdots \\ u_{\max} \end{bmatrix},$$

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & K \end{bmatrix},$$

$$\Delta U'_{\min} = \begin{bmatrix} \Delta u'_{\min} \\ \Delta u'_{\min} \\ \vdots \\ \Delta u'_{\min} \end{bmatrix}, \quad \Delta U'_{\max} = \begin{bmatrix} \Delta u'_{\max} \\ \Delta u'_{\max} \\ \vdots \\ \Delta u'_{\max} \end{bmatrix},$$

$$w(i) = [\mathbf{0} \cdots I_{3 \times 3} \cdots \mathbf{0}]_{3 \times 3N},$$

$\uparrow i$

$$\eta = x(k)^T \left( \sum_{j=1}^m \mu_j(k) A_j + \sum_{j=1}^m \mu_j(k) B_j K \right)^T P.$$

$$\left( \sum_{j=1}^m \mu_j(k) A_j + \sum_{j=1}^m \mu_j(k) B_j K \right) x(k),$$

$I$ 为单位矩阵,  $i = 1, \dots, N$ .

综上, 优化问题(8)可转化为上述带有二次约束的二次规划问题(21), 采用文献[21]中的方法, 对该优化问题进行求解. 在 $t_k$ 时刻, 将基于模糊模型求得的最优解定义为

$$U^*(t_k) = \{u^*(k|k) \cdots u^*(k+N-1|k)\}. \quad (22)$$

MPC控制策略归纳为:

**离线部分**

**步骤1** 建立锅炉-汽轮机系统的模糊模型.

**步骤2** 基于负荷指令, 求解离线优化问题(9)得到可行域 $\Omega_\gamma$ 和稳定控制律 $u = Kx$ .

**在线部分**

**步骤1** 在 $t_k$ 时刻, 得到锅炉-汽轮机系统状态 $x(t_k)$ 和当前时刻的模糊模型. 转到步骤2.

**步骤2** 如果 $t_k < t'$ , 转到步骤3. 否则, 转到步骤4.

**步骤3** 将系统状态控制在可行域 $\Omega_\gamma$ 内, 最小化其成本函数, 得到EMPC控制器. 转到步骤5.

**步骤4** EMPC控制器将系统状态驱动到最优稳态, 保证闭环系统的稳定性. 转到步骤5.

**步骤5** 采样时刻 $k = k + 1$ , 返回步骤1.

## 4 仿真研究(Simulation study)

锅炉-汽轮机系统控制的基本任务是实现负荷跟踪, 并在此基础上提高系统的经济性能. 仿真中, 考虑EMPC控制策略在系统小范围变工况和大范围变工况下对设定值的跟踪情况以及动态过程中的经济性, 并与传统的MPC控制策略进行比较. 采样时间为1 s. 仿真使用的是MATLAB优化工具箱, 运行机器为Intel i5 3.4 GHz计算机.

为了检验EMPC的有效性, 将本文所构造的EMPC与传统的双层MPC进行比较. 在双层结构模型预测控制中, RTO层采用文献[16]提出的针对锅炉-汽轮机实际系统的多目标优化方法, 计算得到最优的稳态设定值 $(x_s, u_s)$ , 然后传递给调节层的跟踪MPC实施设定值跟踪. 跟踪MPC的阶段成本函数为标准的二次型形式, 表示如下:

$$l_{\text{tra}} = \|x - x_s\|_q^2 + \|u - u_s\|_r^2. \quad (23)$$

EMPC与双层MPC控制器设计采用相同的预测时间 $N=15$ . 经济阶段成本函数的加权系数选取

$$\beta_1 = 0.08, \beta_2 = 40, \beta_3 = 40, \beta_4 = 80.$$

EMPC在线优化问题中模式切换时间选为 $t' = 15$  s. Lyapunov函数中 $P$ 矩阵选取为 $P = \text{diag}\{0.1, 0.01, 0.005\}$ . 传统MPC控制器中加权矩阵选取为

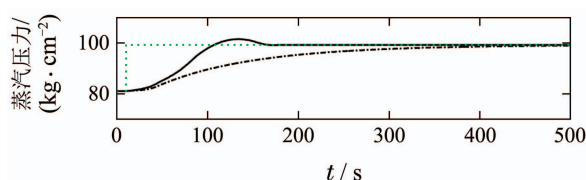
$$q = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}, \quad r = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}.$$

为了验证在EMPC控制策略下不同变负荷情况被控系统的动态性能. 将负荷变化分为以下两种情况.

**仿真1** 小范围功率负荷变化.

初始负荷为50 MW, 小范围升负荷至Euld = 80 MW. 为了验证控制器的有效性, 假设初始时刻锅炉-汽轮机系统处于稳定状态, 在第10步采样时刻, 负荷指令阶跃升至80 MW.

图3-4为小范围变工况下采用EMPC和双层MPC两种控制策略, 锅炉-汽轮机系统输出量和输入量的仿真曲线. 由图可知, EMPC和双层MPC控制器均可使锅炉-汽轮机系统稳定在最优设定值. 且均满足控制量的物理约束.



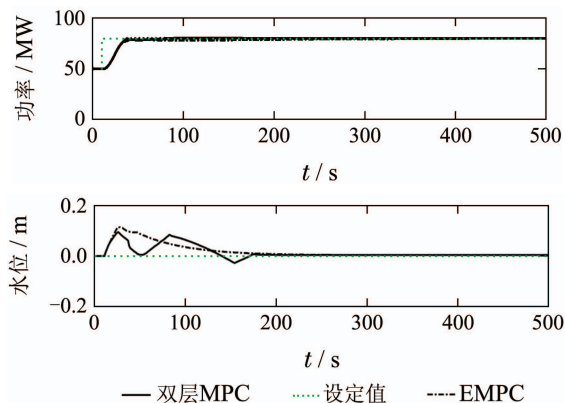


图3 负荷由50 MW升80 MW时EMPC与跟踪MPC两种控制器下锅炉-汽轮机输出量

Fig. 3 Responses of the boiler-turbine system under load demand changes from 50 MW to 80 MW with EMPC and tracking MPC controller

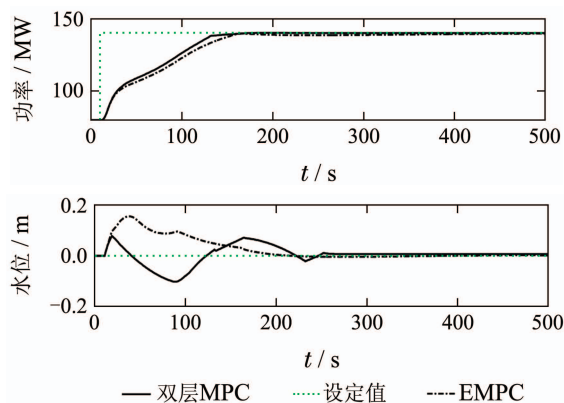


图5 负荷由80 MW升140 MW时EMPC与跟踪MPC两种控制器下锅炉-汽轮机输出量

Fig. 5 Responses of the boiler-turbine system under load demand changes from 80 MW to 140 MW with EMPC and tracking MPC controller

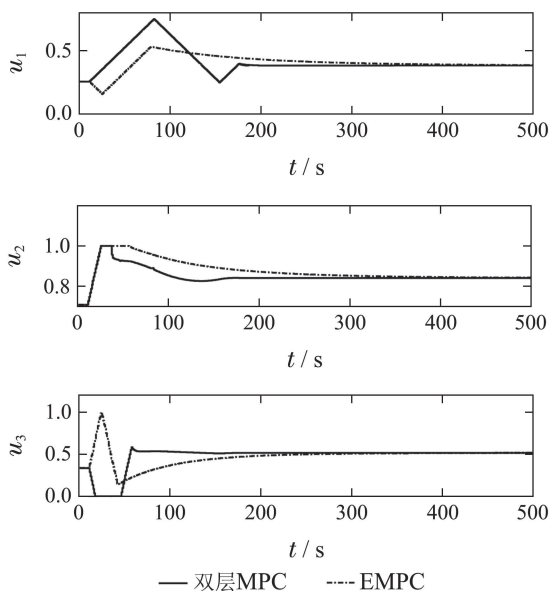


图4 控制变量

Fig. 4 Control variables

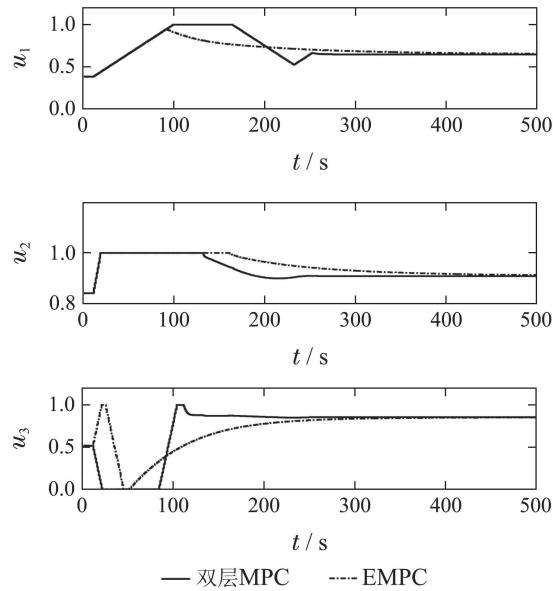


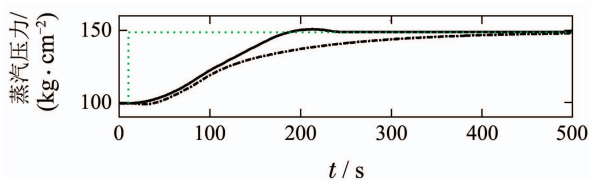
图6 控制变量

Fig. 6 Control variables

## 仿真2 大范围功率负荷变化.

初始负荷为80 MW,大范围升负荷至Euld = 140 MW.验证大范围变工况下基于模糊模型的EMPC控制器的有效性.

图5-6为大范围变工况下系统的输出量和输入量的仿真曲线.由图可知,在这种情况下,EMPC和传统双层MPC控制器仍可使锅炉-汽轮机系统稳定在最优设定值,保证了控制器的稳定性.



在EMPC控制器下,当响应时间小于15 s时,经济性能为控制器优化的主要目标,大于15 s时,切换到设定值跟踪.因此,EMPC控制器下系统输出量响应时间大于传统MPC控制器.同时,由两种情况的系统输入量仿真曲线可以看出,EMPC控制器下动态响应过程中 $u_1$ 阀门开度减小,动态响应过程燃料量的消耗降低. $u_2$ 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,经济性能提高.

在大范围变工况和小范围变工况两种情况下EMPC控制器和双层MPC控制器均可使闭环系统渐近稳定,且从仿真图中可以看出,前者动态过程中的经济性能有明显提高.

为了定量分析系统动态过程中的经济性能,定义一个瞬态时间窗口 $[0, T_w]$ ,  $T_w$ 为稳定时间.同时定义

一个瞬态经济成本函数 $J_{Tw}$ <sup>[22]</sup>:

$$J_{Tw} = \sum_{i=0}^{T_w/T} (l_e(x(k+i), u(k+i)) - l_e(x_s, u_s)). \quad (24)$$

$J_{Tw}$  (I) 和  $J_{Tw}$  (II) 分别表示仿真1和仿真2的瞬态经济性能. 表1给出了传统双层MPC、带终端约束的EMPC<sup>[9]</sup>和本文设计的双模EMPC3种控制器下的瞬态经济成本以及稳定时间. 可以看出, 两种EMPC控制器的动态经济性能均优于传统双层MPC控制器, 且本文的双模EMPC的动态经济性能优于带有终端约束的EMPC. 这是因为终端约束会导致优化可行域的缩小从而导致优化自由度的降低, 使得无法达到经济性的最优点. 本文的双模态EMPC控制器, 通过切换时间扩大了经济优化的可行域, 从而提高了动态过程中的经济性. 然而, 从表1可以看出, EMPC控制器的稳定时间均长于传统MPC控制器, 且两种EMPC控制器稳定时间几乎相同. 由此可知, EMPC通过牺牲一定的跟踪性能来提高动态过程中的经济性, 且仍能保证稳定于最优稳态.

表1 瞬态成本函数

Table 1 The transient economic performance

|            | $J_{Tw}$ (I)/<br>( $\times 10^3$ ) | $J_{Tw}$ (II)/<br>( $\times 10^3$ ) | 稳定时间/s |
|------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| 双层MPC      | 2.59                               | 7.98                                | 159    |
| 带终端约束的EMPC | 2.47                               | 7.64                                | 198    |
| 本文设计的EMPC  | 2.15                               | 7.23                                | 202    |

图7显示大范围变工况下, 双模态EMPC和传统双层MPC两种控制器的闭环动态响应.

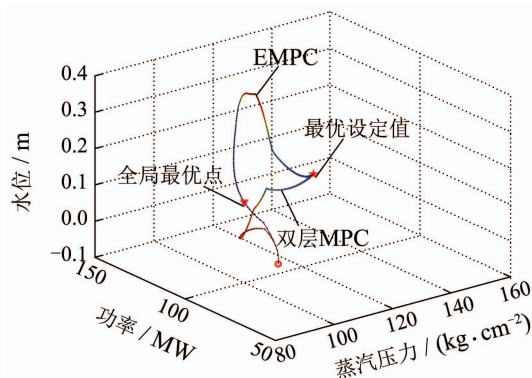


图7 大范围变工况下, EMPC和跟踪MPC两种控制器的闭环动态响应三维图

Fig. 7 The dynamic response trajectories with EMPC and tracking MPC controller under wide range load changing condition

图7中, 三维图中的颜色代表该时刻经济阶段成本, 其成本随着颜色的加深而减小. 红色的圆圈代表初始状态值, 红色的三角代表全局经济最优点, 红色

的五星代表稳态经济最优点. 由图可以清晰的看到, EMPC可以到达全局经济最优点, 而传统的双层MPC只能到达最优的稳态设定值, 验证了EMPC控制策略对闭环系统动态过程经济性的提高.

## 5 结论(Conclusions)

本文针对160 MW锅炉-汽轮机模型构造了考虑减少负荷跟踪过程中的阀门损耗以及能源消耗的动态过程经济性的EMPC策略. 由于火电机组的动态特性随负荷变化, 建立160 MW 锅炉-汽轮机的模糊模型, 基于模糊模型设计一次离线min-max控制器. 利用求得的线性反馈控制律和可行域保证EMPC控制策略的稳定性和递推可行性. 仿真表明, 在小范围变负荷和大范围变负荷情况下, EMPC采取一条经济最优的动态路径. 因此EMPC控制策略更加适用于锅炉-汽轮机系统的工业应用以提高动态过程的经济性能.

## 参考文献(References):

- [1] LIU Xiangjie, KONG Xiaobing. Present situation and prospect of model predictive control application in complex power industrial process [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(5): 79–85. (刘向杰, 孔小兵. 电力工业复杂系统模型预测控制-现状与发展 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5): 79–85.)
- [2] LIU X J, GUAN P, CHAN C W. Nonlinear multivariable power plant coordinate control by constrained predictive scheme [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(5): 1116–1125.
- [3] ZOU Tao, LIU Hongbo, LI Shaoyuan. Dynamic matrix control algorithm on the boiler level integral process [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(3): 386–390. (邹涛, 刘红波, 李少远. 锅炉汽包水位非自衡系统的预测控制 [J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(3): 386–390.)
- [4] WU X, SHEN J, LI Y, et al. Fuzzy modeling and predictive control of superheater steam temperature for power plant [J]. *ISA Transactions*, 2014, 56(2): 241–251.
- [5] ZOU Tao, PAN Hao, DING Baocang. Research development of two-layered predictive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(10): 1327–1337. (邹涛, 潘昊, 丁宝苍. 双层结构预测控制研究进展 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(10): 1327–1337.)
- [6] KONG X B, LIU X J, LEE K Y. An effective nonlinear multivariable H MPC for USC power plant incorporating NFN-based modeling [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(2): 555–556.
- [7] KONG X, LIU X, LEE K Y. Nonlinear multivariable hierarchical model predictive control for boiler-turbine system [J]. *Energy*, 2015, 93(1): 309–322.
- [8] AMRIT R. *Optimizing process economic in model predictive control* [D]. Madison: the University of Wisconsin-Madison, 2011.
- [9] DIEHL M, AMRIT R, RAWLINGS J B. A Lyapunov function for economic optimizing model predictive control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(3): 703–707.
- [10] HE Defeng. Stabilizing economic model predictive control of constrained nonlinear systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(11): 1680–1690. (何德峰. 约束非线性系统稳定经济模型预测控制 [J]. *自动化学报*, 2016, 42(11): 1680–1690.)

- [11] HEIDARINEJAD M, LIU J, CHRISTOFIDES P D. Economic model predictive control of nonlinear process systems using Lyapunov techniques [J]. *Aiche Journal*, 2012, 58(3): 855 – 870.
- [12] ALANQAR A, ELLIS M, CHRISTOFIDES P D. Economic model predictive control of nonlinear process systems using empirical models [J]. *Aiche Journal*, 2014, 61(3): 4953 – 4958.
- [13] MA J, QIN J, SALSURY T, et al. Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 67(1): 92 – 100.
- [14] BROOMHEAD T, MANZIE C, HIELD P, et al. Economic model predictive control and applications for diesel generators [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(2): 388 – 400.
- [15] BELL R, ÅSTRÖM K. *Dynamic Models for Boiler-Turbine-Alternator Units: Data Logs and Parameter Estimation for a 160 MW Unit* [M]. Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH), 1987.
- [16] GARDUNO-RAMIREZ R, LEE K Y. Multiobjective optimal power plant operation through coordinate control with pressure set point scheduling [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2001, 16(2): 115 – 122.
- [17] HUANG Jingwen, LI Hongguang. Switching control – based economic model predictive control [J]. *Control & Decision*, 2016, 31(1): 137 – 142.  
(黄静雯, 李宏光. 基于切换控制的经济模型预测控制 [J]. 控制与决策, 2016, 31(1): 137 – 142.)
- [18] TEIXEIRA M C M, ZAK S H. Stabilizing controller design for uncertain nonlinear systems using fuzzy models [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(2): 133 – 142.
- [19] LI Y, SHEN J, LEE K Y, et al. Offset-free fuzzy model predictive control of a boiler-turbine system based on genetic algorithm [J]. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2012, 26(1): 77 – 95.
- [20] JIANG Di, LIU Xiangjie. Fuzzy model predictive level control of U-tube steam generator based on the off-line invariant set [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(12): 1705 – 1712.  
(姜嶝, 刘向杰. 核电站蒸汽发生器水位模糊预测控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1705 – 1712.)
- [21] LE T H A. An efficient algorithm for globally minimizing a quadratic function under convex quadratic constraints [J]. *Mathematical Programming*, 2000, 87(3): 401 – 426.
- [22] HE D, SUN J, YU L. Economic MPC with a contractive constraint for nonlinear systems [J]. *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2016, 26(18): 4072 – 4087.

#### 作者简介:

崔靖涵 (1992–), 女, 博士研究生, 主要研究方向为经济模型预测控制, E-mail: 15501166951@163.com;

刘向杰 (1966–), 男, 博士生导师, 主要从事非线性预测控制理论、方法及应用、复杂工业系统的智能化控制、电站节能与优化控制等方面的研究, E-mail: liuxj@ncepu.edu.cn;

孔小兵 (1987–), 女, 讲师, 主要研究方向为预测控制理论及其在能源电力系统控制中的应用, E-mail: kongxiaobing@ncepu.edu.cn.