

生物质循环流化床锅炉燃烧过程多目标经济预测控制^①

何德峰^{②*} 张永达^{*} 徐 山^{*} 李廉明^{**}

(^{*} 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

(^{**} 嘉兴新嘉爱斯热电有限公司 嘉兴 314016)

摘 要 针对生物质循环流化床锅炉(CFBB)燃烧过程的多变量耦合、约束、非线性等复杂特性及多目标经济优化控制要求,提出一种生物质循环流化床锅炉燃烧过程的多目标经济模型预测控制策略。燃烧过程中将维持锅炉预期工况运行作为最重要控制目标,将燃烧经济性能作为次重要控制目标。通过引入字典序多目标优化和滚动时域控制原理,实现两个不同优先级燃烧控制目标的多目标经济模型预测控制器设计。最后通过仿真验证本文提出方法的有效性。

关键词 生物质,循环流化床锅炉(CFBB),模型预测控制,多目标控制,字典序优化

0 引 言

生物质能源是一种可再生的清洁能源,种类丰富,如建筑废料、农作物秸秆等^[1]。我国作为一个农业大国,近年来年秸秆产量约有 9 亿吨,除去部分用作动物饲料和还田外,剩下的大部分被随意丢弃、堆放或直接燃烧,间接地造成了经济损失,而且易污染环境。因此,寻求秸秆资源的合理利用方式既是经济效益的追求,更是解决环境污染问题的重要举措^[2]。由于循环流化床锅炉(circulating fluidized bed boiler, CFBB)具有燃料适应性广、燃烧效率高和环保等优点^[3-5],可以实现秸秆等生物质资源的高效利用。

生物质 CFBB 燃烧过程需要稳定床温,否则会导致燃烧不完全而造成熄火,降低脱硫效率而造成大气污染^[3,4],而且对于秸秆等生物质燃料,控制床温能在一定程度上抑制床料黏结^[1]。锅炉的输入量为燃料添加速率、一次风风速和二次风风速,可通过控制三者的大小来调节床温,然而随着锅炉炉膛

中燃烧的进行,燃料量和氧含量会发生变化^[6,7],可能引起床温波动,难以稳定在期望数值,另外输入量的调整还受到风煤比限制。对于整个锅炉燃烧过程,需要考虑生产成本,包括燃料消耗和风机耗电,但这可能会与锅炉的稳定运行要求产生冲突。因此,如何选择合适的控制策略满足 CFBB 燃烧过程的多目标控制要求,是待解决的问题与难点。

随着工业化进程和科学技术的不断发展,越来越多的先进控制方法用于 CFBB 的控制与优化。对于 CFBB 燃烧过程的非线性、时变、强耦合问题,不少学者运用了模糊控制方法。文献[8]采用改进后的遗传算法设计床温模糊控制器,制定了一种新的床温调节策略。文献[9]提出了一种针对床温动态特性的模糊控制器,具有很强的鲁棒性。文献[10]在研究了一次风和回料阀开度对床温影响的基础上,设计了 CFBB 燃烧模糊控制器,增强了系统的稳定性,减少了耦合对系统的影响。预测控制十分适用于 CFBB 这类复杂的工业过程^[11,12],文献[13]采用了系统辨识方法建立锅炉模型,并结合模型预测控制(model predictive control, MPC)算法实现了锅

① 国家自然科学基金(61773345),浙江省自然科学基金(LR17F030004)和浙江省重点研发计划(2017C01073)资助项目。

② 男,1979 年生,教授,博士;研究方向:模型预测控制理论与应用;联系人,E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn
(收稿日期:2018-10-18)

炉床温、蒸汽压力控制。文献[14]提出了一种基于多模型的预测控制策略,通过离线辨识获得多个工况点的模型,来逼近整个过程的动态特性,成功实现了锅炉床温控制。此外,自适应控制和神经网络控制也在实践中取得了成功,主要实现了床温和主蒸汽压力的解耦控制^[15,16]。许多文献侧重于实现 CFBB 的床温和(或)主蒸汽压力控制,通过结合一些先进控制方法,来解决锅炉运行过程的非线性、时变、强耦合等问题,然而很少有文献引入一些具体的多目标方法,实现锅炉燃烧过程的优化控制。

本文从锅炉持续运行的角度出发,分析了其中存在的控制要求。一方面当锅炉状态偏离预期生产工况时,需要及时恢复,另一方面希望恢复过程的生产成本尽可能小。为此,本文提出了一种字典序模型预测控制(lexicographic model predictive control, LMPC)策略,以实现锅炉燃烧过程的控制优化,并通过与传统的加权模型预测控制(weighted model predictive control, WMPC)策略的对比,验证了 LMPC 策略的有效性,同时表明了该策略能避免

WMPC 策略依赖权重调整的缺点。

1 生物质 CFBB 燃烧过程描述

1.1 燃烧过程建模

循环流化床锅炉主要由炉膛、分离器、返料器、排渣装置、省煤器、过热器等组成,如图 1 所示。其燃烧过程的基本原理是:(生物质)燃料和脱硫剂粉碎后,通过给料机送入炉膛,然后被炉膛中的流化态物料加热燃烧;同时从炉膛底部和侧墙分别送入一次风和二次风,使得物料随着上升气流朝着炉膛上部运动,其中粗颗粒在炉膛下部的密相区燃烧,细颗粒在炉膛上部的稀相区燃烧,燃烧产生的热量被炉膛四周布置的水冷壁吸收。另外,有一部分细小颗粒被气流带出炉膛后由分离器捕捉收集,再经返料器送回炉膛继续燃烧,烟气则进入尾部烟道,与过热器、省煤器和空气预热器等完成换热过程,最后经除尘器处理后由烟囱排向大气。

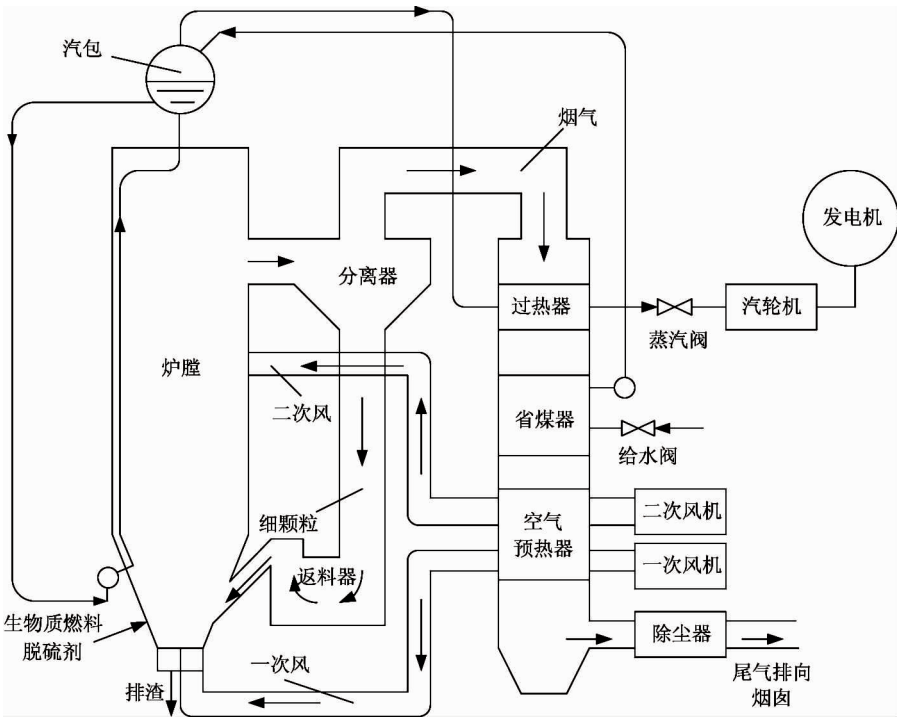


图 1 循环流化床锅炉燃烧过程示意图

通常为了保证锅炉安全运行和脱硫效率,需对锅炉床温实施控制,使其维持在 850 ℃ 左右,同时需

要监测烟气氧含量以保证锅炉热效率,烟气氧含量过低则燃料燃烧不充分,过高则通风量过大,热量损

失多,一般烟气氧含量要求在3%~6%的范围内。根据质量与能量守恒定律,文献[7]利用了机理建模方法建立如下锅炉炉膛的动力学方程:

$$\begin{cases} \frac{dW_C(t)}{dt} = (1 - V)Q_C(t) - \frac{W_C(t)C_B(t)}{t_C C_1} \\ \frac{dC_B(t)}{dt} = \frac{1}{V_B} [C_1 F_1(t) - \frac{W_C(t)C_B(t)}{t_C C_1} X_C - C_B(t)F_1(t)] \\ \frac{dC_F(t)}{dt} = \frac{1}{V_F} \{C_B(t)F_1(t) + C_2 F_2(t) - VQ_C(t)X_V - C_F(t)[F_1(t) + F_2(t)]\} \\ \frac{dT_B(t)}{dt} = \frac{1}{c_l W_l} \{ \frac{W_C(t)C_B(t)}{t_C C_1} H_C + c_l F_1(t) T_1 - a_{Bl} A_{Bl} [T_B(t) - T_{Bl}] - c_F F_1(t) T_B(t) \} \\ \frac{dT_F(t)}{dt} = \frac{1}{c_F V_F} \{ VQ_C(t)H_V - a_{Fl} A_{Fl} [T_F(t) - T_{Fl}] + c_F F_1(t) T_B(t) + c_2 F_2(t) T_2 - c_F [F_1(t) + F_2(t)] T_F(t) \} \\ \frac{dP_T(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{mix}} [\frac{W_C(t)C_B(t)}{t_C C_1} H_C + H_V VQ_C(t) - P_T(t)] \end{cases} \quad (1)$$

其中锅炉炉膛的输入量 Q_C 、 F_1 和 F_2 分别为給料速率、一次风风速和二次风风速;锅炉炉膛的状态量 W_C 、 C_B 、 C_F 、 T_B 、 T_F 和 P_T 分别为燃料剩余量、床氧含量、稀相区氧含量、床温、稀相区温度和热功率;剩下的模型参数为燃料挥发分比例 V ,固体燃料燃烧时间 t_C ,床体积 V_B ,一次风氧含量 C_1 ,固体燃料耗氧系数 X_C 、床料比热 c_l 和质量 W_l ,固体燃料热值 H_C ,一次风比热 c_1 和温度 T_1 ,床水冷壁传热系数 a_{Bl} 、面积 A_{Bl} 和温度 T_{Bl} ,烟气比热 c_F ,稀相区体积 V_F ,二次风氧含量 C_2 ,挥发分耗氧系数 X_V ,挥发分热值 H_V ,稀相区水冷壁传热系数 a_{Fl} 、面积 A_{Fl} 和温度 T_{Fl} ,二次风比热 c_2 和温度 T_2 ,时间常数 τ_{mix} ,具体取值见文献[7]。

对于锅炉燃烧过程模型式(1),定义状态变量 $\mathbf{x} = [W_C, C_B, C_F, T_B, T_F, P_T]^T$ 和控制变量 $\mathbf{u} = [Q_C, F_1, F_2]^T$,可以得到锅炉燃烧过程状态方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2)$$

由于考虑预测控制器,以采样时间 T_s 离散化连续时间模型式(2),得到离散时间非线性系统:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + T_s f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) =: F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \quad (3)$$

1.2 优化目标与约束

在循环流化床锅炉持续运行时,一方面要防止锅炉状态偏离预期工况,另一方面希望锅炉运行的生产成本低,可以归纳得到:

(1) 根据模型式(1)分析炉膛内的平衡关系,结合床温、烟气氧含量等实际经济性控制要求,可以离线计算得到适合锅炉长时间稳定运行的工况,且经济性能最佳。然而实际中存在着一些难以避免的因素,如锅炉的热量散失、投料设备控制不精确、风机风压波动等,有可能使锅炉运行状态偏离预期工况,甚至偏离程度会随时间进一步扩大,因此,需要及时调节给料机和一、二次风机的运行情况,以便恢复锅炉的运行状态,因此考虑如下设定值跟踪性能目标:

$$L_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)^T \mathbf{Q} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) + (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s)^T \mathbf{R} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为状态偏差的正定加权矩阵和控制偏差的正定加权矩阵, $\mathbf{x}_s$ 为期望的锅炉运行状态, $\mathbf{u}_s$ 为锅炉稳定运行时給料速率和一、二次风速。

(2) 锅炉燃烧过程会不断消耗燃料,同时需要风机持续供风,因此生产成本由燃耗和风机耗电组成,由于这两部分物理意义有所区别,参考文献[17]的方法,将耗电量转化为发电所需煤耗,另外根据秸秆和煤的价格差异,将燃耗折算为煤耗,可以得到如下经济性能函数:

$$L_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = p_1 u_1 + p_2 u_2 + p_3 u_3 \quad (5)$$

其中 L_2 表示折算后的每秒锅炉煤耗量, $p_1 > 0$, $p_2 > 0$ 和 $p_3 > 0$ 为折算系数。

此外,锅炉燃烧过程需要满足一些约束,除了设备物理条件和炉膛状态的限制外,还需要控制风机和投料机的运行状态,将风煤比维持在一定区间范围内,以保证锅炉高效燃烧,并降低氮氧化物对环境的污染,整理得到如下约束:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{\min} &\leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_{\max} \\ \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}_{\max} \\ \alpha_{\min} &\leq \frac{u_2 + u_3}{u_1} \leq \alpha_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\mathbf{x}_{\min}$ 、 $\mathbf{u}_{\min}$ 和 $\alpha_{\min}$ 分别表示状态量、控制量和风煤比的下限, $\mathbf{x}_{\max}$ 、 $\mathbf{u}_{\max}$ 和 $\alpha_{\max}$ 分别表示状态量、控制量和风煤比的上限。

2 生物质 CFBB 多目标经济预测控制

2.1 加权多目标非线性预测控制

为了实现锅炉运行过程的多目标优化,本文考虑两种多目标 MPC 策略。第一种是加权模型预测控制(WMPC),根据加权求和法,将性能指标式(4)和(5)组合成一个新的性能指标 L_w ,并以权值 w_1 和 w_2 表示性能指标的相对重要性,然后求解如下单目标有限时域最优控制问题:

$$\min_{\mathbf{u}_k} J_w(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \sum_{t=0}^{N-1} L_w(\mathbf{x}_{t|k}, \mathbf{u}_{t|k}) \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \text{s. t. } \mathbf{x}_{t+1|k} &= F(\mathbf{x}_{t|k}, \mathbf{u}_{t|k}), \mathbf{x}_{0|k} = \mathbf{x}_k \\ \mathbf{x}_{t+1|k} &\in \mathbf{X}, \mathbf{u}_{t|k} \in \mathbf{U}, t = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (7b)$$

其中 $L_w = w_1 L_1 + w_2 L_2$, 约束式(7b)包括系统约束式(3)和边界约束式(6),对应的最优解为

$$\mathbf{u}_k^* = \arg \min_{\mathbf{u}_k} \{J_w(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \mid (7b)\} \quad (7c)$$

再根据滚动时域控制原理,得到相应的预测控制律如下:

$$\mathbf{u}_k^{\text{mpc}} = \mathbf{u}_{0|k}^*, k = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

其中 $\mathbf{u}_{0|k}^*$ 是 $\mathbf{u}_k^*$ 的第一个分量,对应的闭环系统为

$$\mathbf{x}_{k+1} = F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k^{\text{mpc}}), k = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

此外,对于锅炉运行过程的两个性能指标, L_1 优先级高于 L_2 , 因此权值调整需满足 $0 < w_2 < w_1 < 1$ 。

由上述过程,WMPC 算法如下:

步骤 1 选择预测时域 N , 调整权值 w_1 、 w_2 , 设置目标函数 J_w 。

步骤 2 测量 k 时刻状态 $\mathbf{x}_k$, 求解优化问题式(7), 得到最优控制序列 $\mathbf{u}_k^*$ 。

步骤 3 将 $\mathbf{u}_k^*$ 的首个分量作用于系统式(3), 更新状态。

步骤 4 令 $k = k + 1$, 并返回步骤 2。

2.2 字典序多目标非线性预测控制

加权求和法可以近似地处理多目标优化控制问

题,但需要反复调整权重,对于锅炉这类复杂非线性系统,权重选择困难且实际控制效果可能不理想。因此,考虑字典序方法设计锅炉燃烧过程预测控制器。

根据字典序优化方法原理,先优化锅炉稳定运行目标 J_1 , 再优化经济性目标 J_2 。为了得到锅炉运行过程的字典序最优解,在每个时刻求解如下顺序的单目标有限时域最优控制问题^[18]:

$$J_1^*(\mathbf{x}_k) = \min_{\mathbf{u}_k} \{J_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \mid (7b), \mathbf{x}_{N|k} \in \Omega\} \quad (10a)$$

$$J_2^*(\mathbf{x}_k) = \min_{\mathbf{u}_k} \left\{ J_2(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \left| \begin{array}{l} J_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \leq J_1^*(\mathbf{x}_k), \\ (7b), \mathbf{x}_{N|k} \in \Omega \end{array} \right. \right\} \quad (10b)$$

其中, Ω 是终端约束集, $\mathbf{x}_{N|k} \in \Omega$ 是终端约束条件, $J_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$ ($J_1^*(\mathbf{x}_k)$) 是字典序约束,用于保证目标 J_1 的最优性,最终得到的字典序最优解为

$$\mathbf{u}_k^* = \arg \min_{\mathbf{u}_k} \left\{ J_2(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \left| \begin{array}{l} J_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) \leq J_1^*(\mathbf{x}_k), \\ (7b), \mathbf{x}_{N|k} \in \Omega \end{array} \right. \right\} \quad (10c)$$

其中稳定运行目标和经济性目标分别为

$$J_1(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \sum_{t=0}^{N-1} L_1(\mathbf{x}_{t|k}, \mathbf{u}_{t|k}) + E_1(\mathbf{x}_{N|k}) \quad (11a)$$

$$J_2(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = \sum_{t=0}^{N-1} L_2(\mathbf{x}_{t|k}, \mathbf{u}_{t|k}) \quad (11b)$$

其中 E_1 为关于某一平衡点的正定终端代价函数。

再根据滚动时域控制原理,得到相应的字典序多目标非线性预测控制律:

$$\mathbf{u}_k^{\text{mpc}} = \mathbf{u}_{0|k}^*, k = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

其中 $\mathbf{u}_{0|k}^*$ 是 $\mathbf{u}_k^*$ 的第一个分量,对应的闭环系统为

$$\mathbf{x}_{k+1} = F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k^{\text{mpc}}), k = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

由式(10)~(12),LMPC 算法如下:

步骤 1 选择预测时域 N 和终端代价函数 $E_1(x)$, 设置目标函数 $J_i (i=1, 2)$ 。

步骤 2 测量 k 时刻状态 $\mathbf{x}_k$, 再按如下过程求解最优控制序列 $\mathbf{u}_k^*$ 。

步骤 2.1 求解第一层优化问题(10a), 获得最优序列 $\mathbf{u}_k^{1*}$ 。

步骤 2.2 求解第二层优化问题(10b), 获得最

优序列 $\mathbf{u}_k^{2*}$ 。

步骤 2.3 确定整个优化问题(式(10))的字典序最优序列, $\mathbf{u}_k^* = \mathbf{u}_k^{2*}$ 。

步骤 3 将 $\mathbf{u}_k^*$ 的首个分量作用于系统式(3), 更新状态。

步骤 4 令 $k = k + 1$, 并返回步骤 2。

在字典序多目标非线性预测控制算法设计中, 需要离线求解终端代价函数 E_1 和终端域 Ω 及其定义在 Ω 上的局部虚拟控制律 $\mathbf{u}_{loc}$, 根据三要素 (E_1 , $\Omega, \mathbf{u}_{loc}$) 可以保证字典序多目标非线性预测控制闭环系统式(13)的渐近稳定性^[18]。

考虑锅炉系统式(3)中相关变量的平衡关系^[7] 和实际生产过程中床温、烟气氧含量、风煤比等经济性控制要求, 离线计算经济性能最佳的稳态系统的平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$:

$$(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s) = \arg \min_{(\mathbf{x}, \mathbf{u})} \{L_2(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \mid (6), \mathbf{x} = F(\mathbf{x}, \mathbf{u})\} \quad (14)$$

再考虑锅炉系统式(3)在平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ 的离散时间线性化模型:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (15)$$

其中, $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 是系统式(3)在平衡点的雅可比矩阵:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_6} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_6}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_6}{\partial x_6} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial u_1} & \frac{\partial F_1}{\partial u_2} & \frac{\partial F_1}{\partial u_3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_6}{\partial u_1} & \frac{\partial F_6}{\partial u_2} & \frac{\partial F_6}{\partial u_3} \end{bmatrix} \quad (17)$$

考虑设定值跟踪性能函数式(4), 对局部线性化系统式(15)采用 LQR 方法得正定矩阵 $\mathbf{P}$ 和反馈增益矩阵 $\mathbf{K}_{loc}$, 则构建终端代价函数 $E_1(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)^T \mathbf{P}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$ 和局部控制律 $\mathbf{u}_{loc}(\mathbf{x}) = -\mathbf{K}_{loc}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) + \mathbf{u}_s$ 以及终端域 $\Omega = \{\mathbf{x} (R^6: E_1(\mathbf{x}) (a, a > 0)\}$ 。注意局部控制律 $\mathbf{u}_{loc}(\mathbf{x})$ 不会用于 CFBB 燃烧过程控制, 而仅是用于计算终端域 Ω 以确保字典序多目标非线性预测控制问题式(10)的递推可行性。

3 仿真比较与分析

考虑 CFBB 燃烧过程非线性连续时间模型式(1), 以采样时间 $T_s = 1\text{s}$ 离散化得对应离散时间非线性模型式(3), 分别应用 WMPC 和 LMPC 算法作对比仿真研究。

在仿真研究中, 令预测时域 $N = 5$, 约束条件为 $\mathbf{x}_{\min} = [221, 0.03, 0.03, 1116.9, 1000, 32.4]^T$, $\mathbf{x}_{\max} = [223, 0.06, 0.06, 1117.1, 1004, 32.6]^T$, $\mathbf{u}_{\min} = [3.5, 4.1, 14.5]^T$, $\mathbf{u}_{\max} = [4.3, 5.9, 15.7]^T$, $\alpha_{\min} = 4.0$ 和 $\alpha_{\max} = 6.0$ 。经济性能函数式(5)的折算系数分别为 $p_1 = 4.3 \times 10^{-1}$, $p_2 = 2.6 \times 10^{-4}$ 和 $p_3 = 1.4 \times 10^{-5}$ 。通过离线试差法选取设定值跟踪控制目标式(4)中加权对角矩阵 $\mathbf{Q} = \text{diag}\{0.1, 10, 1, 10, 0.001, 1\}$ 和 $\mathbf{R} = \text{diag}\{1, 1, 1\}$ 。求解稳态优化问题式(14), 得最佳经济性能的稳态系统平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s) = (221.49, 0.048, 0.0501, 1117.008, 1001.70, 32.412, 4.0, 5.0, 15.0)$ 。为求三要素 (E_1 , Ω , $\mathbf{u}_{loc}$), 在最佳经济平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ 处考虑线性系统式(15), 应用 LQR 方法得正定对称矩阵:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 2.6839 & 200.8649 & 0.0177 \\ 200.8649 & 5.7207 \times 10^4 & 0.8053 \\ 0.0177 & 0.8053 & 3.4733 \\ 26.5395 & 6.1603 \times 10^3 & 0.1086 \\ -0.1815 & -16.9538 & 3.8709 \times 10^{-4} \\ -10.7904 & -1.3701 \times 10^3 & 0.0027 \\ 26.5395 & -0.1815 & -10.7904 \\ 6.1603 \times 10^3 & -16.9538 & -1.3701 \times 10^3 \\ 0.1086 & 3.8709 \times 10^{-4} & 0.0027 \\ 686.9424 & -2.0857 & -168.9290 \\ -2.0857 & 0.0716 & -0.1074 \\ -168.9290 & -0.1074 & 140.9422 \end{bmatrix}$$

和局部控制器反馈增益矩阵:

$$\mathbf{K}_{loc} = \begin{bmatrix} 0.3018 & 10.1547 & -0.0088 \\ -0.1148 & 28.3580 & -7.3451 \times 10^{-4} \\ 0.0192 & 1.7960 & 0.0036 \\ 1.7149 & 0.0035 & 0.0345 \\ 2.3764 & 0.0040 & 0.2371 \\ 0.2210 & -0.0075 & 0.0114 \end{bmatrix}$$

进而计算终端域 $\Omega = \{x(R^6; E_1(x)(0.09)\}$ 。

令仿真实验的系统初始状态为(222.5, 0.050, 0.055, 1116.95, 1003.78, 32.446), 分别运行 WMPC 和 LMPC 算法, 结果如图 2~4 所示。其中, 图 2 是锅炉炉膛各个状态量的响应曲线, 图 3 是各控制量变化的曲线, 实线为运行 LMPC 的结果, 虚线和点划线为运行 WMPC 的结果, 对应的权值(w_1, w_2)分别为(0.6, 0.4)和(0.9, 0.1)。从图中可以看出, 各控制算法作用下的 CFBB 燃烧过程的状态变量和控制变量都满足燃烧过程给定的约束条件。

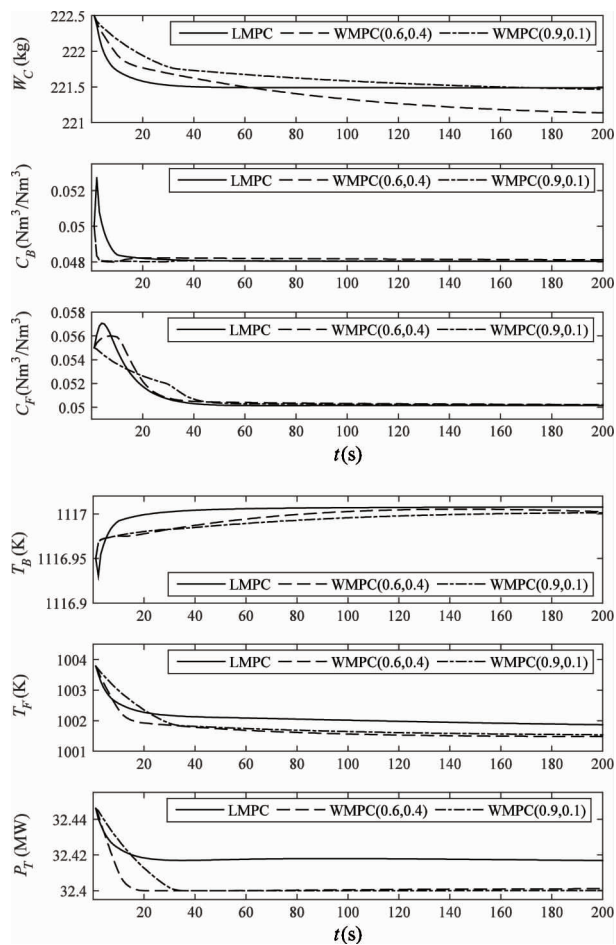


图 2 状态轨迹曲线

在图 4 中, 以 L_1 的变化衡量锅炉是否恢复预期工况运行, 以 J_{l2} ($J_{l2} = (L_2)$) 的大小表示仿真时间内累加的燃耗成本。从图 2~图 4 可知, 在 LMPC 控制器作用下, 锅炉运行状态快速变化, 并且在 180 s 后基本稳定到经济平衡点即预期工况; 在 WMPC 控制器作用下, 权值(0.9, 0.1)的最终控制结果与

LMPC 相近, 但锅炉各状态变化速度较慢, 达到稳定的时间需要 200 s 左右, 而且热功率(P_T)和稀相区温度(T_F)略低于经济平衡点; 权值(0.6, 0.4)的燃耗虽然最低, 但锅炉运行状态未能稳定到经济平衡点, 并且存在个别状态逐渐偏离预期工况的现象, 不满足锅炉稳定运行的控制要求。因此, LMPC 策略更符合控制要求。上述对比结果表明, WMPC 策略的控制效果依赖于决策者的权值选择, 具有主观性, 需要大量的试凑实验, 而 LMPC 策略通过本身的优化结构, 避免了权值选择操作, 从这个意义上说, 本文提出的 LMPC 算法比传统 WMPC 算法在 CFBB 燃烧控制中更具优势。

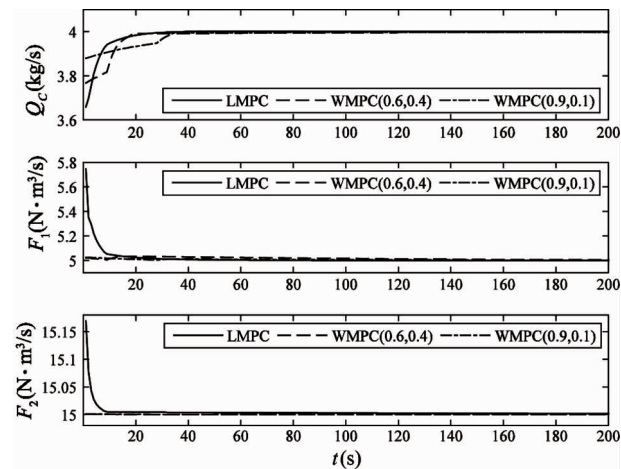


图 3 控制输入曲线

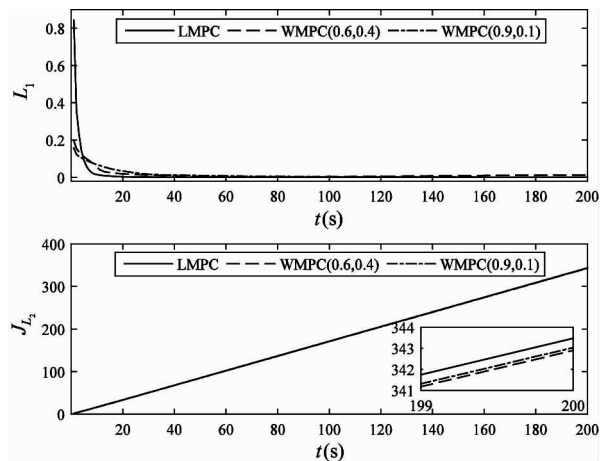


图 4 累计性能曲线

4 结 论

针对具有状态和控制约束的生物质循环流化床

锅炉燃烧非线性过程,本文提出了一种字典序多目标非线性预测控制算法。考虑生物质循环流化床锅炉燃烧过程的设定值跟踪控制目标和燃烧经济性目标,结合字典序规划法和滚动时域优化原理,设计字典序多目标燃烧非线性预测控制算法。仿真结果表明,与传统加权多目标燃烧非线性预测控制算法相比,本文所提出的燃烧非线性预测控制算法能更有效地维持生物质循环流化床锅炉的稳定运行,同时保证生物质循环流化床锅炉的燃烧经济性。

参考文献

[1] 李诗媛,吕清刚,矫维红,等. 生物质成型燃料循环流化床燃烧试验研究[J]. 燃烧科学与技术,2009, 15 (1): 54-58

[2] 伊晓路,刁立璋,彭亮,等. 秸秆原料对循环流化床燃烧的影响[J]. 能源工程,2006(4): 70-72

[3] 谢磊,毛国明,金晓明,等. 循环流化床锅炉燃烧过程预测控制与经济性能优化[J]. 化工学报,2016, 67 (3): 695-700

[4] 李官鹏,程世庆,韩奎华. 循环流化床锅炉的发展和特点[J]. 电站系统工程,2004, 20(2): 23-24

[5] 骆仲泮,何宏舟,王勤辉,等. 循环流化床锅炉技术的现状及发展前景[J]. 动力工程学报,2004, 24(6): 761- 767

[6] Zhang T, Feng G, Lu J, et al. Robust constrained fuzzy affine model predictive control with application to a fluidized bed combustion plant [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1047-1056

[7] Ikonen E, Najim K. *Advanced Process Identification and Control*[M]. New York: Marcel Dekker, 2002. 285-287

[8] 马宝萍,司凤琪,徐治皋,等. 基于遗传算法的循环流化床锅炉床温模糊控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 69-73

[9] 胡益民,张国忠,陈宇峰. 循环流化床锅炉床层温度的模糊控制[J]. 自动化技术与应用,2001(4): 3-4

[10] 张雨飞,许立伟,陈需,等. 循环流化床锅炉燃烧系统的模糊控制[J]. 东南大学学报,2012, 42(s2): 308-313

[11] 何德峰,丁宝苍,于树友. 非线性系统模型预测控制若干基本特点与主题回顾[J]. 控制理论与应用,2013, 30(3): 273-287

[12] 马孝纯,朱亚波. 模型预测控制在电站锅炉控制中的应用可行性分析[J]. 电站系统工程,2018, 34(3): 59-60

[13] 曹磊,由世俊. 循环流化床锅炉的模型预测控制[J]. 燃烧科学与技术,2013, 19(2): 145-150

[14] 董湛波,向文国,王新. 基于多模型的循环流化床锅炉床温预测控制[J]. 动力工程学报,2011, 31(3): 181-186

[15] 牛培峰. 循环流化床锅炉汽温自适应解耦控制系统[J]. 自动化学报,1999, 25(1): 127-132

[16] 王万召,赵兴涛,谭文. 流化床燃烧系统模糊-神经元PID解耦补偿控制[J]. 中国电机工程学报,2008, 28 (8): 94-98

[17] 童一飞,金晓明. 基于广义预测控制的循环流化床锅炉燃烧过程多目标优化控制策略[J]. 中国电机工程学报,2010, 30(11):38-43

[18] He D, Wang L, Sun J. On stability of multiobjective NMPC with objective prioritization [J]. *Automatica*, 2015, 57: 189-198

Multi-objective economic predictive control of biomass CFBB combustion processes

He Defeng*, Zhang Yongda*, Xu Shan*, Li Lianming**

(* College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(** Jiaxing Newjies Thermal Power Co., Ltd., Jiaxing 314016)

Abstract

For the multi-objective economy optimization requirement of combustion processes of industrial circulating fluidized bed boiler (CFBB) with multivariable coupling, constraints and nonlinearity, a multi-objective economic model predictive control algorithm of biomass CFBB combustion processes is proposed. In biomass combustion processes, maintaining the expected operating conditions of the boiler is generally viewed as the most important control objective and combustion economic performance is viewed as the second important control objective. By combining the principle of lexicographic multi-objective optimization and receding horizon optimization control, the multi-objective economic model predictive controller is designed to balance the two conflictig combustion control objectives with different priorities. Finally, the simulation experiments are conducted to illustrate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: biomass, circulating fluidized bed boiler (CFBB), model predictive control, multi-objective control, lexicographic optimization