

基于粒子群优化的生物质燃烧过程环保经济预测控制^①

何德峰^② 岑江晖 陈 龙 王秀丽

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 考虑包含状态约束与控制约束的生物质非线性循环流化床锅炉(CFBB)燃烧过程的多目标控制问题,提出一种环保经济模型预测控制(EMPC)算法。采用机理建模方法建立约束生物质非线性燃烧过程模型。为了在系统稳定的前提下,优化生物质燃烧过程经济性能和环保性能,结合字典序方法与收缩约束关联优化问题,通过粒子群优化算法(PSO)求解优化问题,并结合滚动时域控制原理,设计 CFBB 燃烧过程环保型经济模型预测控制算法。最后仿真验证本文控制算法的有效性与优越性。

关键词 生物质循环流化床锅炉(CFBB);模型预测控制(MPC);多目标控制;粒子群优化算法(PSO);经济最优

0 引言

生物质能是可再生能源,蕴含量丰厚,且开发利用价值巨大。生物质燃烧过程是利用生物质能的一种方式,是将经过一定处理的生物质燃料在锅炉中直接燃烧。相较于其他燃烧过程,生物质燃烧能够缓解温室效应,同时可以回收利用燃烧产物,并且生物质燃料成本低廉^[1-2]。目前生物质燃烧过程中应用较为广泛的高效清洁燃烧技术为循环流化床锅炉(circulating fluidized bed boiler, CFBB)技术。CFBB 是一种依靠循环燃烧燃料产生蒸汽,并转化为动力的设备。相比于传统工业过程使用的燃煤锅炉,CFBB 具有燃料适应性广、燃烧效率高和环保等优点^[3],近年来在供热和化工等控制领域得到了广泛关注。由于生物质 CFBB 燃烧过程耦合性和非线性强的特性,对锅炉燃烧系统设计稳定经济的控制策略具有重要意义和研究前景^[4]。目前研究表明,CFBB 燃烧系统的燃烧效率与一次/二次风量、给料量、燃料种类相关,而衡量燃烧系统是否高效稳定运行的指标有炉温、炉膛压力、NO_x 混合物及其他有害

物质的排放量和燃烧功率^[5],其中稳定的温度与压力是 CFBB 燃烧系统稳定运行的必要条件,而 NO_x 混合物和其他有害物质的排放量则用以衡量 CFBB 是否达到经济环保的要求。

针对 CFBB 燃烧系统复杂特性,许多学者研究并设计了一系列控制策略。例如,文献[6]设计了一种基于二阶加时滞模型的预测滑模控制器来处理时滞、模型参数不确定性和外部扰动,并作为局部控制器。文献[7]提出的分层模糊双曲正切静态模型控制方案可以明显提高负荷燃料控制系统的控制性能,明显减弱主蒸汽压力和床温的波动,使控制系统更加稳定。文献[8]基于传热计算的多模型切换控制系统成功解决了主蒸汽温度的惯性大和延时大的问题,并且该控制系统能够适应锅炉负荷的变化。近年来,国家“碳达峰碳中和”战略等一系列节能低碳政策的相继出台,许多学者对 CFBB 燃烧系统的环保控制目标展开了诸多研究,特别是使用先进工业控制技术追求更加环保的生物质燃烧控制效果^[9]。在 CFBB 燃烧尾气中,会排放大量的 NO_x 混合物和其他有害气体,因此如何在经济稳定的同时,

^① 国家自然科学基金(62173303)资助项目。

^② 男,1979 年生,博士,教授;研究方向:智能系统预测控制理论与应用;联系人,E-mail: hdfzj@zjut.edu.cn。
(收稿日期:2022-03-17)

提高 CFBB 燃烧过程的环保性能值得研究。在早期的研究中,文献[10]采用反向传播(back propagation, BP)神经网络对 CFBB 的 NO_x 混合物排放量进行预测建模。文献[11]在模糊自适应比例、积分和微分(proportional integral derivative, PID)控制的基础上,引入动态论域的思想,利用随工况自适应变化的伸缩因子调整模糊论域范围,对 PID 控制器的比例、积分和微分参数进行更精准的在线整定。文献[12]设计了采用空分装置、二氧化碳压缩净化装置和二氧化碳循环的含氧循环流化床电站,在仿真软件中对其进行设计与建模,以研究循环烟气对燃烧效率及环保的影响,对比前人的二氧化碳循环装置,在不降低燃烧效率的前提下,该设计具有更好的环保性能。

此外,在生物质燃烧系统先进工业控制技术研究方面,模型预测控制(model predictive control, MPC)作为一种能够处理目标优化和约束问题的先进控制策略,近年来广泛应用于各种工业控制过程^[13]。在 CFBB 控制领域,文献[14]提出了一种具有煤质校正功能的循环流化床锅炉新型协调控制方法。为应对循环流化床锅炉的大迟延和强耦合特性,该方法采用基于扩增状态空间模型的多变量预测控制算法设计控制器。采用 MPC 对锅炉燃烧过程实现稳定控制的例子还有很多^[15-16]。随着实际工业需求的提升,研究人员开始兼顾 CFBB 燃烧过程的稳定性与经济性优化。文献[17]提出了一种基于广义 MPC 技术的 CFBB 燃烧过程多目标优化控制策略,对其实现稳定控制和经济优化。然而,上述研究多是针对 CFBB 燃烧过程的稳定性与经济性,或是单独针对环保性能,没有同时针对经济性与环保性进行优化控制,因此如何设计控制策略使其实现稳定经济环保的运行具有实际意义。此外,非线性 MPC 由于需要在线计算一个非凸的非线性规划问题,通常在线计算量很大^[13],限制了非线性 MPC 的应用范围。

粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)是一种基于粒子群的随机优化技术,该算法模拟动物的社会行为,包括昆虫、兽群、鸟类和鱼类。这些群以合作的方式寻找食物,群中的每

个成员都根据自己和其他成员的学习经验不断改变搜索模式^[18]。根据不同的求解要求,许多学者研究了各种改进粒子群优化算法。文献[19]提出了一种改进的多元粒子群优化算法来求解单目标优化问题,为每个粒子提出了一个数学模型和新的位置向量,以增强粒子向全局最佳值的运动。文献[20]提出了一种粒子相似度函数,并在此基础上提出了一种参数自适应粒子群优化算法,该方法对 PSO 的权重和加速度系数进行了动态调整,与 MPC 相结合,解决了轧机系统的控制问题。文献[21]把处理约束条件的一个外点方法和改进的粒子群优化算法相结合,提出了一种求解非线性约束优化问题的混合粒子群优化算法,对算法迭代过程中出现不可行粒子时,利用外点法处理后产生可行粒子。通过粒子群优化算法求解 MPC 的优化问题具有应用价值。

本文针对 CFBB 燃烧过程污染物排放指标,设计环保性能函数,同时结合锅炉床温、气压的稳定控制与经济性能优化的需求,提出了一种多目标 MPC 控制算法;其次通过字典序方法与收缩约束^[22-23]建立各目标优化问题之间的可行性;最后利用粒子群优化算法在线求解燃烧过程非线性预测控制优化问题,设计循环流化床锅炉燃烧过程环保型经济预测控制算法,并通过数值仿真验证该控制策略的有效性与优越性。

1 生物质 CFBB 燃烧控制问题描述

生物质 CFBB 燃烧系统主要有炉膛、分离器、过热器、省煤器、返料器和除尘器等核心单元组成。其主要燃烧过程简述如下^[24]:生物质燃料结合脱硫剂从锅炉底部送入,此时锅炉内有处于流化状态的大量燃烧物料将燃料进行快速燃烧;接着一次和二次风分别从锅炉底部和侧墙进入锅炉,风在炉内呈上升趋势,在上升气流作用下,物料向锅炉上部运动;燃料中质量较大的部分在密相区加剧燃烧,较小的部分则与烟气一起送出密相区,在稀相区以一种漂浮状态燃烧,燃烧对锅炉内部的受热面以及水冷壁放热,使其温度升高;稀相区的物料在其重力及外力作用下运动状态改变,速度持续减小,运动方向与主

气流越来越远,形成附壁降落的粒子流,被气流送出锅炉的物料进入分离器然后被收集,由返料器送回锅炉进行二次燃烧,以此往复,进行多次循环之后,最终达到完全燃烧;还有一部分及其细微的粒子则进入尾部烟道,并对锅炉尾部的受热面例如过热器、省煤器等部分进行放热;烟气通过冷却到一定温度后经过除尘、脱硫等环保处理,最终排放到空气中,完成整个燃烧过程。

考虑生物质 CFBB 燃烧过程,根据质量和能量守恒定律,可得燃烧动力学方程^[25]:

$$\begin{cases} \frac{dW_c(t)}{dt} = (1 - V)Q_c(t) - Q_B(t) \\ \frac{dC_B(t)}{dt} = \frac{1}{V_B}[C_1F_1(t) - X_CQ_B(t) - C_B(t)F_1(t)] \\ \frac{dC_F(t)}{dt} = \frac{1}{V_F}\{C_B(t)F_1(t) + C_2F_2(t) - VX_VQ_C(t) - C_F(t)[F_1(t) + F_2(t)]\} \\ \frac{dT_B(t)}{dt} = \frac{1}{c_1W_1}\{Q_B(t)H_C + c_1F_1(t)T_1 - c_F F_1(t)T_B(t) - \alpha_{Bt}A_{Bt}[T_B(t) - T_{Bt}]\} \\ \frac{dT_F(t)}{dt} = \frac{1}{c_FV_F}\{VQ_C(t)H_V - \alpha_{Ft}A_{Ft}[T_F(t) - T_{Ft}] + c_F F_1(t)T_B(t) + c_2F_2(t)T_2 - c_F T_F(t)[F_1(t) + F_2(t)]\} \\ \frac{dP_T(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{mix}}[H_CQ_B(t) + VH_VQ_C(t) - P_T(t)] \end{cases} \quad (1)$$

其中, t 为时间变量,燃料燃烧速率 $Q_B = W_c C_B / t_c C_1$, W_c 为炉膛内剩余燃料量, C_B 为炉膛含氧量, C_1 为一次风含氧量, t_c 为燃料平均燃烧时间, V 为燃料挥发比, Q_c 为燃料供给速率, V_B 为炉膛体积, C_F 为稀相区含氧量, V_F 为稀相区体积, F_1 和 F_2 分别为一次和二次风供给速率, C_2 为二次风含氧量, X_C 和 X_V 分别为燃料和挥发物的耗氧系数, T_B 为床温, T_F 为稀相区温度, c_1 和 W_1 分别为炉床的比热系数与质量, H_C 和 H_V 分别为燃料和挥发物的比热容, c_1 和 T_1 分别为一次风的比热系数与温度, c_F 为废气的比热系数, α_{Bt} 和 A_{Bt} 分别为炉膛水冷壁传热系数与面积, T_{Bt} 为炉膛冷水温度, α_{Ft} 和 A_{Ft} 分别为稀相区水冷壁传热系数与面积, T_{Ft} 为稀相区冷水温度, c_2 和 T_2 分

别为二次风的比热系数与温度, P_T 为燃烧过程热功率, τ_{mix} 为时间常数。由燃烧机理分析^[25]可知,燃烧热功率与环保性能相关,剩余燃料量与燃料挥发比和燃料供给速率相关,炉膛含氧量和稀相区含氧量是保证燃烧效率的关键指标,床温和稀相区温度是稳定燃烧的关键衡量指标。

选取生物质燃烧过程的状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [W_c, C_B, C_F, T_B, T_F, P_T]^T$, 控制变量 $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T = [Q_c, F_1, F_2]^T$, 则由式(1)可得对应的连续时间非线性模型:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = F(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), t \geq 0 \quad (2)$$

其中 $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 表示方程(1)的非线性函数。显然, $F(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 是关于 (\mathbf{x}, \mathbf{u}) 的连续函数。在生物质 CFBB 燃烧系统中,为保证燃烧过程的安全稳定运行,燃烧系统需满足一定安全约束,即燃烧过程状态变量和控制变量满足约束:

$$x_{\min} \leq \mathbf{x}(t) \leq x_{\max}, u_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq u_{\max}, t \geq 0 \quad (3)$$

其中, $x_{\min} \geq 0$ 和 $u_{\min} \geq 0$ 分别为状态量和控制量的低限值, $x_{\max} > 0$ 和 $u_{\max} > 0$ 分别为状态量和控制量的高限值。限值可根据生物质 CFBB 燃烧过程的工艺要求确定。进一步,为保证生物质燃料在 CFBB 内稳定燃烧,需要控制 CFBB 燃烧系统风机和投料机的运行状态,将风煤比维持在合理的区间范围内,即

$$\alpha_{\min} \leq \alpha(t) = \frac{u_2(t) + u_3(t)}{u_1(t)} \leq \alpha_{\max}, t \geq 0 \quad (4)$$

其中, α 为风煤比, $\alpha_{\min} > 0$ 和 $\alpha_{\max} > 0$ 分别为风煤比的低限值和高限值,可根据生物质 CFBB 燃烧过程的工艺要求确定限值。

考虑生物质 CFBB 燃烧过程控制目标。由燃烧机理分析^[25]可知,床温和稀相区温度是稳定燃烧的关键衡量指标,故定义如下稳态性能指标函数:

$$L_s(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)^T \mathbf{Q}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) + (\mathbf{u} - \mathbf{u}_s)^T \mathbf{R}(\mathbf{u} - \mathbf{u}_s) \quad (5)$$

其中,加权矩阵 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为正定对称矩阵, \mathbf{x}_s 和 \mathbf{u}_s 分别为燃烧过程平衡点即稳定燃烧的期望状态量与控制量。为了节约燃烧过程的资源消耗量,考虑由燃料消耗和风机耗电组成的经济性能指标函数。由于

燃料消耗和风机耗电物理意义不同,本文将耗电折算为燃料消耗后与实际燃料消耗叠加^[17],即

$$L_e(\mathbf{u}) = a_1 u_1 + a_2 u_2 + a_3 u_3 \quad (6)$$

其中 $\alpha_i > 0$ 为对应控制量的经济参数。环保性能指标与经济性能指标类似,在满足燃烧热功率的条件下尽可能降低污染物排放量,采用热功率的多项式^[26]描述生物质燃烧过程在各个时刻的污染物排放量

$$L_p(\mathbf{x}) = \beta_1 x_6^1 + \beta_2 x_6^2 + \beta_3 x_6^3 \quad (7)$$

其中 $\beta_i > 0$ 为污染物特性参数。经济参数 α_i 和污染物特性参数 β_i 可通过现场数据辨识得到^[26]。

在生物质 CFBB 燃烧过程中,锅炉需要保证燃烧工况稳定安全运行,在此基础上,降低燃烧过程的单位消耗量和污染物(如硫化物、氮氧化物等)超低排放指标,实现生物质 CFBB 燃烧过程的安全稳定、经济和低碳多指标优化运行控制。本文融合燃烧动力学方程和多目标滚动优化原理,设计实现上述燃烧优化控制目标的生物质燃烧过程环保经济预测控制策略。

2 燃烧环保经济 MPC 策略设计

考虑生物质燃烧系统连续时间非线性模型式(2),令采样周期为 $T_s > 0$ 。为便于设计燃烧过程环保经济预测控制器,采用欧拉近似法离散化模型式(2),可得对应的离散时间非线性模型:

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)), \quad k \geq 0 \quad (8)$$

其中, k 为采样时刻,函数 $f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) = \mathbf{x}(k) + T_s F(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$, 则 $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 是关于 (\mathbf{x}, \mathbf{u}) 的连续函数。

令预测时域为 $N \geq 1$, $\mathbf{x}(j|k)$ 和 $\mathbf{u}(j|k)$ 分别为当前时刻 k 对未来时刻 $k+j$ 的状态和控制量的预测值,则考虑离散时间非线性燃烧模型式(8),分别定义有限预测时域 N 内的燃烧稳定、经济和环保目标函数为

$$J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) = E(\mathbf{x}(N|k)) + \sum_{j=0}^{N-1} L_s(\mathbf{x}(j|k), \mathbf{u}(j|k)) \quad (9)$$

$$J_e(\mathbf{u}(k;N)) = \sum_{j=0}^{N-1} L_e(\mathbf{u}(j|k)) \quad (10)$$

$$J_p(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) = \sum_{j=1}^N L_p(\mathbf{x}(j|k)) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{x}(k)$ 为当前时刻 k 的状态测量值,状态预测值 $\mathbf{x}(j+1|k) = f(\mathbf{x}(j|k), \mathbf{u}(j|k))$, $\mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k)$, 控制序列 $\mathbf{u}(k;N) = \{\mathbf{u}(0|k), \dots, \mathbf{u}(N-1|k)\}$, 正定函数 $E(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)^T P (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)$ 为终端罚函数, P 为对称正定函数。

考虑离散时间非线性燃烧模型式(8),构造生物质燃烧过程有限时域环保最优控制问题:

$$\mathbf{u}^{*p}(k;N) = \arg \min_{\mathbf{u}(k;N)} J_p(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) \quad (12a)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \mathbf{x}(j+1|k) = f(\mathbf{x}(j|k), \mathbf{u}(j|k)), \mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k) \\ & x_{\min} \leq \mathbf{x}(j+1|k) \leq x_{\max}, u_{\min} \leq \mathbf{u}(j|k) \leq u_{\max} \\ & \alpha_{\min} \leq [u_2(j|k) + u_3(j|k)]/u_1(j|k) \leq \alpha_{\max} \\ & \mathbf{x}(N|k) \in X_N, \quad \forall j = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned}$$

$$J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) \leq \eta(\mathbf{x}(k), \lambda) \quad (12b)$$

其中, $\mathbf{u}^{*p}(k;N)$ 表示环保优化问题式(12a)的最优解; X_N 为终端约束集, $\mathbf{x}(N|k) \in X_N$ 为优化问题的终端约束,将保证优化问题的递推可行性;不等式 $J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) \leq \eta(\mathbf{x}(k), \lambda)$ 将设计为收缩约束,系数 $\lambda > 0$ 为收缩因子。

考虑生物质燃烧过程经济目标函数式(10)和环保优化问题式(12)的最优解 $\mathbf{u}^{*p}(k;N)$, 构造生物质燃烧过程有限时域经济最优控制问题:

$$\mathbf{u}^{*e}(k;N) = \arg \min_{\mathbf{u}(k;N)} J_e(\mathbf{u}(k;N)) \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \mathbf{x}(j+1|k) = f(\mathbf{x}(j|k), \mathbf{u}(j|k)), \mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k) \\ & x_{\min} \leq \mathbf{x}(j+1|k) \leq x_{\max}, u_{\min} \leq \mathbf{u}(j|k) \leq u_{\max} \\ & \alpha_{\min} \leq [u_2(j|k) + u_3(j|k)]/u_1(j|k) \leq \alpha_{\max} \\ & \mathbf{x}(N|k) \in X_N, \quad \forall j = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned}$$

$$J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) \leq \eta(\mathbf{x}(k), \lambda)$$

$$J_p(\mathbf{u}(k;N)) \leq J_p(\mathbf{u}^{*p}(k;N)) + \rho(k) \quad (13b)$$

其中, $\mathbf{u}^{*e}(k;N)$ 表示经济优化问题式(13a)的最优解,约束式(13b)中最后一个不等式为字典序约束,非负常数 $\rho(k)$ 为松弛项。通过引入松弛项可以提高该优化问题的求解效率。注意,约束式(13b)中除字典序约束外,其他约束同约束式(12b)。

进一步考虑生物质燃烧过程稳定目标函数式(9),定义生物质燃烧过程有限时域稳定最优控

制问题:

$$\mathbf{u}^{*s}(k;N) = \arg \min_{\mathbf{u}(k;N)} J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k;N)) \quad (14a)$$

s. t. $\mathbf{x}(j+1|k) = f(\mathbf{x}(j|k), \mathbf{u}(j|k)), \mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k)$

$$x_{\min} \leq \mathbf{x}(j+1|k) \leq x_{\max}, u_{\min} \leq \mathbf{u}(j|k) \leq u_{\max}$$

$$\alpha_{\min} \leq [u_2(j|k) + u_3(j|k)]/u_1(j|k) \leq \alpha_{\max}$$

$$\mathbf{x}(N|k) \in X_N, \forall j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (14b)$$

则定义环保优化问题式(12)和经济优化问题式(13)的收缩约束函数 $\eta(\mathbf{x}(k), \lambda)$ 为

$$\begin{aligned} \eta(\mathbf{x}(k), \lambda) = & J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}^{*s}(k;N)) \\ & + \lambda [J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}^{*e}(k-1;N)) \\ & - J_s(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}^{*s}(k;N))] \quad (15) \end{aligned}$$

如果经济优化问题式(13)在 k 时刻存在可行解,则根据滚动时域优化原理,定义环保经济预测控制律为

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}^{\text{mpc}}(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{u}^*(0|k), k \geq 0 \quad (16)$$

其中 $\mathbf{u}^*(0|k)$ 是优化问题式(13)在 k 时刻最优解 $\mathbf{u}^{*e}(k;N)$ 的第一个分量,对应生物质燃烧过程闭环系统为

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}^{\text{mpc}}(\mathbf{x}(k))), k \geq 0 \quad (17)$$

为保证优化问题式(12)~(14)存在递推可行性和生物质燃烧过程闭环系统的稳定性,需要设计终端约束集 X_N 和终端罚函数 $E(\mathbf{x})$ 。对此,引入如下离线设计条件:

$$\begin{cases} X_N = \{\mathbf{x} \in R^6 : E(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s)^T P (\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) \leq r\} \\ \pi(\mathbf{x}) = \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) + \mathbf{u}_s \in U, \forall \mathbf{x} \in X_N \\ E(f(\mathbf{x}, \pi(\mathbf{x}))) - E(\mathbf{x}) \leq -L_s(\mathbf{x}, \pi(\mathbf{x})), \forall \mathbf{x} \in X_N \end{cases} \quad (18)$$

其中,椭圆终端集 X_N 半径 $r > 0$, 控制约束集 $U = \{\mathbf{u} \in R^3 : \text{式(3)~(4)}\}$, \mathbf{K} 为局部反馈控制器 $\pi(\mathbf{x})$ 的增益矩阵。考虑非线性函数 $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 的连续性,在平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ 线性化后应用线性二次型最优控制理论可以计算得到终端三要素 $\{E(\mathbf{x}), \pi(\mathbf{x}), X_N\}$ 。离线调试半径 r 直到条件式(18)满足,则根据多目标经济预测控制理论^[27]可知,当优化问题式(12)~(14)的终端约束集 X_N 和终端罚函数 $E(\mathbf{x})$ 满足条件式(18)时,环保经济预测控制律式(16)在初始时

刻存在的条件下各个时刻都在可行解,即优化问题式(12)~(14)具有递推可行性,且生物质燃烧过程闭环系统式(17)关于平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ 是渐近稳定的^[28]。

注1 通过增大 N 可以扩大终端约束集 X_N , 进而改善稳定性条件式(18),但会使得优化问题式(12)~(14)的决策变量增加,进而导致优化问题在线计算量的增加。因此,在实际应用中需要折衷调整 N 的取值。其次,平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ 可以根据生物质燃烧工艺要求确定,在实际应用中可取为燃烧稳态过程的经济性操作平衡点。最后,稳定环保经济燃烧过程本质是一个具有优先级控制要求的多指标动态优化问题,通过融合字典序分层优化和滚动优化控制原理^[29-30],实现了生物质燃烧过程的优先级驱动燃烧多目标优化控制,在保证稳定燃烧的条件下实现生物质燃烧过程的经济性和污染物超低排放。

3 基于粒子群优化的控制量计算

粒子群优化算法是一种通过若干粒子在搜索空间中不断迭代搜索最优解的算法。根据每个粒子的适应度函数来判断当前所处位置的优劣。结合稳定最优控制问题式(14),粒子群优化算法描述如下。假设粒子群的规模为 M , 搜索空间维数为预测时域 N , 令稳定最优控制问题中需求解的控制序列 $u_i(k;N) = \{u_i(0|k), \dots, u_i(N-1|k)\}, 1 \leq i \leq M$, 为粒子的位置,粒子的速度为 $v_i(N) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}), 1 \leq i \leq M$, 每一个粒子的位置和速度需要随机初始化。令稳定目标函数式(9)为粒子适应度函数。在迭代过程中,根据测量所得 $\mathbf{x}(k)$, 计算每个粒子的适应度函数 $J_s(\mathbf{x}(k), u_i(k;N))$, 通过比较每个粒子迭代前后适应度函数的大小,选取适应度函数小的粒子位置为当前粒子最优位置,并记录为 $u_i^{pb}(k;N) = \{u_i^{pb}(0|k), \dots, u_i^{pb}(N-1|k)\}$, 比较当前所有粒子最优位置对应的适应度函数,选取适应度函数最小的粒子位置为当前群体最优位置为 $u^{gb}(k;N) = \{u^{gb}(0|k), \dots, u^{gb}(N-1|k)\}$ 。对于每个粒子,更新如下:

$$v_i(N; j + 1) = \omega v_i(N; j) + c_1 r_1 (u_i^{pb}(k; N) - u_i(k; N; j)) + c_2 r_1 (u_i^{gb}(k; N) - u_i(k; N; j)) \quad (19)$$

$$u_i(k; N; j + 1) = u_i(k; N; j) + v_i(N; j + 1) \quad (20)$$

其中, j 为迭代次数, ω 为惯性权重, 决定了历史速度对当前速度的影响, 平衡算法的全局和局部搜索能力; c_1 和 c_2 为学习因子, 调节搜索步长; r_1 和 r_2 为 $0 \sim 1$ 间随机数, 速度存在速度边界即 $v(N)_{\min} \leq v_i(N) \leq v(N)_{\max}$ 。

式(19)是粒子群优化算法的核心, 用来更新每次迭代粒子的速度。粒子的速度受到 3 方面因素影响, 分别是粒子的上次迭代速度、与个体最优位置的距离、与群体最优位置的距离。通过对这 3 方面的权重调整来得到最优的速度。根据更新的速度更新粒子的位置。

通过对历史速度中添加与最优位置间的偏差, 可以在迭代过程中逐步调整粒子的速度方向和大小。而大量粒子的存在, 减少了粒子陷入局部最优的情况。

对于迭代过程中产生违反约束的粒子 $u_i(k; N)$, 以粒子位置为初始点, 利用外点法求解得到满足约束的位置 u_{sub} 来替代 $u_i(k; N)$ 。

注 2 粒子群优化算法中惯性权重可以根据线性递减权值策略来达到最佳平衡, 针对粒子群的早熟现象可以加入随机变异策略来调整^[21]。

综上所述, 基于粒子群优化的生物质燃烧过程环保经济预测控制算法总结如算法 1 所示。

算法 1 基于粒子群优化的生物质燃烧过程环保经济预测控制算法

(1) 设置预测时域(粒子群维度) N , 粒子群规模 M ; 设置惯性权重 ω , 学习因子 c_1 和 c_2 ; 设置参数 $\rho(k)$ 和 λ ; 设置 CFBB 各目标函数。

(2) 考虑 CFBB 初始状态 $\mathbf{x}(0)$, 令收缩约束中 $\eta(\mathbf{x}(k), \lambda)$ 充分大且 $k=0$ 。

(3) 求解环保优化问题式(12), 得到最优控制量 $u^{*p}(k; N)$, 构造式(13b)中的字典序约束。

(4) 求解经济优化问题式(13), 得到最优控制量 $u^{*e}(k; N)$ 。

(5) 取 $u^{*e}(k; N)$ 的第一个分量 $u^*(0|k)$ 作用于系统式(8), 更新系统状态, 令 $k = k + 1$ 。

(6) 测量 k 时刻 CFBB 状态 $\mathbf{x}(k)$, 通过粒子群优化算法求解稳定性优化问题式(14), 得到优化问题式(14)的最优控制量 $u^{*s}(k; N)$ 。

1) 随机初始化每个粒子位置 $u_i(k; N)$ 和速度 $v_i(N)$, 并得到群体最优位置 $u^{gb}(k; N)$, $j = 1$;

2) 引入状态 $\mathbf{x}(k)$, 判断每个粒子位置 $u_i(k; N; j)$ 是否满足优化问题约束条件, 是则进入第 3) 步, 否则根据外点法求解可行位置 $u_{\text{sub}}(j)$ 代替对应位置 $u_i(k; N; j)$ 再进入第 3) 步;

3) 判断是否满足终止条件, 是则得到群体最优位置 $u^{gb}(k; N)$, 即最优控制量 $u^{*s}(k; N)$, 并进入第(7)步, 否则进入第 4) 步;

4) 评估粒子的适应度函数 $J_i(\mathbf{x}(k), u_i(k; N; j))$, 更新每个粒子最优位置 $u_i^{pb}(k; N)$ 和群体最优位置 $u^{gb}(k; N)$;

5) 根据式(19)和(20)更新每个粒子的位置 $u_i(k; N; j + 1)$ 和速度 $v_i(N; j + 1)$, 令 $j = j + 1$, 并返回第 2) 步。

(7) 利用 $u^{*s}(k; N)$ 更新收缩约束 $\eta(\mathbf{x}(k), \lambda)$, 返回第(3)步。

算法 1 通过分层的思想, 分别对于不同的优化问题进行求解, 以上一个优化问题的最优解作为约束来求解下一个优化问题。其中粒子群优化算法用来求解优化问题的最优解, 需要在内部进行多次迭代, 是算法计算过程中较为耗时的部分, 整体算法的运行时间复杂度为 N 的平方阶。

4 仿真实验

生物质 CFBB 燃烧系统式(8)的各模型参数^[25]如表 1 所示。控制算法参数取值如下: 采样时间 $T_s = 1$ s, 预测时域 $N = 6$, 各加权对角矩阵 $\mathbf{Q} = \text{diag}\{0.1, 10.0, 1.0, 10.0, 0.001, 1.0\}$ 和 $\mathbf{R} = \text{diag}\{1.0, 1.0, 1.0\}$, 经济性能函数参数 $\alpha = [0.43, 0.00026, 0.000014]$, 环保性能函数参数 $\beta = [0.02, 0.0006, 0.00004]$, 收缩约束参数 $\lambda = 0.1$, 字典序约束松弛变量 $\rho(k) = 0.1$ 。考虑状态初始点 \mathbf{x}_0 、终端三要素 $\{E(\mathbf{x}), \pi(\mathbf{x}), X_N\}$ 和状态变量与控制变量约束及风煤比约束取值与文献[22]相同, 其中平衡点的求解考虑系统式(8)相关变量的平衡关系和实际生产需求, 离线计算优化问题式(21)得到稳态燃烧系统

的经济操作平衡点 $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$ 。

$$(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s) = \arg \min_{(\mathbf{x}, \mathbf{u})} \{L_e(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \mid (3), (4), \mathbf{x} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u})\} \quad (21)$$

表 1 生物质 CFBB 燃烧模型参数表

参数	取值	参数	取值
V	128.1 kg/kg	T_{Bt}	573 K
t_C	50 s	c_F	1305 J/m ³ · K
V_B	26.3 m ³	V_F	128.1 m ³
C_1	0.21 Nm ³ /Nm ³	C_2	0.21 Nm ³ /Nm ³
X_C	1.886 Nm ³ /kg	X_V	1.225 Nm ³ /kg
c_1	800 J/kg	H_V	3.0 × 10 ⁷ J/kg
W_1	25 000 kg	α_{Ft}	210 W/m ² · K
H_C	3.0 × 10 ⁷ J/kg	A_{Ft}	130.7 m ²
c_1	1305 J/m ³ · K	T_{Ft}	573 K
T_1	328 K	c_2	1305 J/m ³ · K
α_{Bt}	210 W/m ² · K	T_2	328 K
A_{Bt}	26.8 m ²	τ_{mix}	300 s

根据多次实验结果分析,设定粒子群优化算法的参数,初始化种群个数 $M = 100$,迭代次数 $I = 20$,惯性权重 $w = 0.8$,自我学习因子 $c_1 = 0.5$,群体学习因子 $c_2 = 0.5$ 。

运行算法 1 后,燃烧系统状态量响应曲线如图 1 和 2 所示,控制输入量曲线如图 3 所示。从图 1 ~ 3 中可以看到,在运行本文提出的控制算法 1 后,生物质 CFBB 燃烧过程的状态变量和控制变量都满足燃烧约束条件,并且最终能够达到稳态点。

若干次运行,记录粒子群优化算法的运算时间,通过分析计算,得到平均运算时间为 0.5026s,同

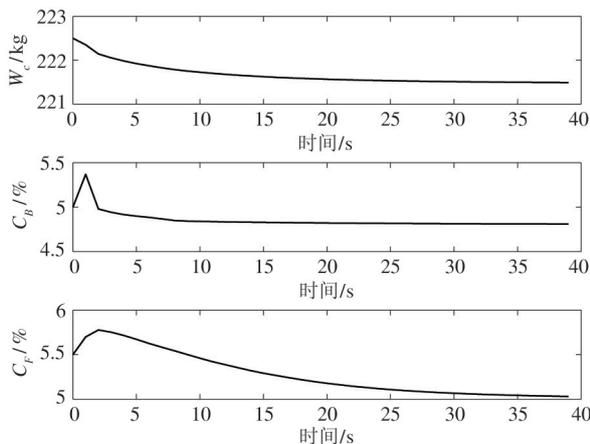


图 1 CFBB 燃烧过程状态响应曲线 (a)

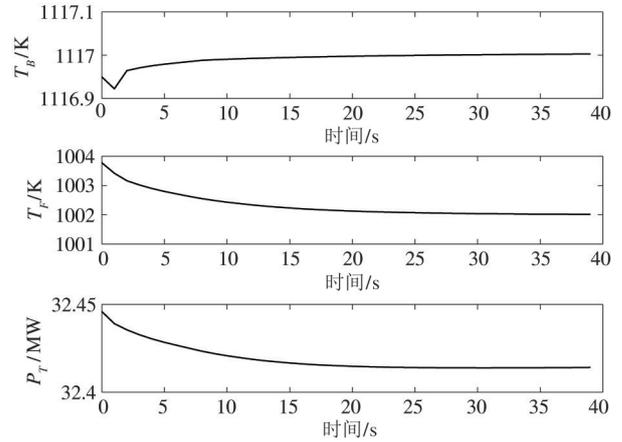


图 2 CFBB 燃烧过程状态响应曲线 (b)

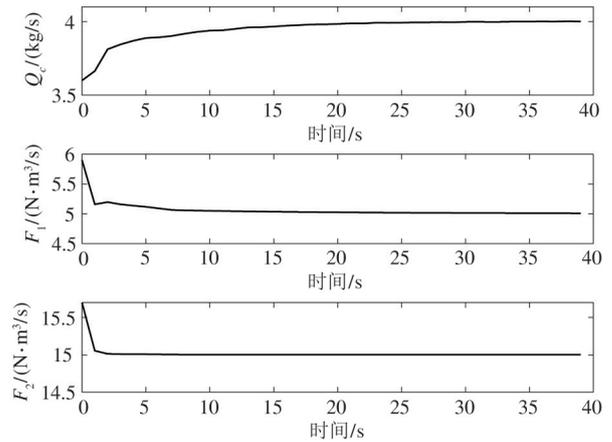


图 3 CFBB 燃烧过程控制输入响应曲线

时,在相同的初始条件下,通过序列二次规划 (sequential quadratic programming, SQP) 算法进行计算,得到平均运算时间为 0.5083 s。对比发现,在实验结果相近的情况下,粒子群优化算法相较于序列二次规划算法消耗时间更少,计算效率提高了 1.12%。

再考虑不同数值优化算法对系统初始条件的适用范围,取初始条件 $\mathbf{A} = [222.5, 0.05, 0.055, 1116.95, 1003.78, 32.446]$ 、 $\mathbf{B} = [222, 0.045, 0.045, 1117.0, 1002.0, 32.5]$ 、 $\mathbf{C} = [222.4, 0.049, 0.054, 1116.94, 1003.7, 32.47]$ 、 $\mathbf{D} = [221.5, 0.051, 0.056, 1116.96, 1003.8, 32.43]$ 和 $\mathbf{E} = [222.2, 0.049, 0.05, 1116.95, 1003.7, 32.45]$,分别利用粒子群优化算法和序列二次规划 (SQP) 法对优化问题式 (12) ~ (14) 进行求解,结果如表 2 所示。由表 2 可知, SQP 法求解环保经济预测控制优化问题较大程度上受限于初始点的选取,因此当初始点选择不当时,会造成优化问题

式(12)~(14)在初始时刻不可行,进而导致预测控制器运行失败。相比而言,本文采用的粒子群优化算法能够有效地扩大初始点选择的范围。

表 2 不同初始点对算法求解的影响

初始点	粒子群优化算法	常规算法(SQP)
A	可行	可行
B	可行	不可行
C	可行	不可行
D	可行	不可行
E	可行	不可行

最后为验证本文提出的算法 1 的优越性,在同一燃烧控制仿真工况下,采用常规的加权多目标预测控制算法实施生物质燃烧过程控制。在加权多目标预测控制中,对经济性能指标和稳定性目标函数加权求和后目标函数为

$$J_{\Sigma}(x, u) = \gamma_1 J_s(x, u) + \gamma_2 J_p(x, u) + \gamma_3 J_e(x, u) \quad (22)$$

其中系数 $\gamma_1 > 0$ 、 $\gamma_2 > 0$ 和 $\gamma_3 > 0$ 分别为对应目标函数的权重值。在实际应用中,通常采用试错调试法选择这些权重值,这里分别取 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$ 为 $(0.1, 0.1, 0.8)$ 和 $(0.2, 0.2, 0.6)$ 2 种情况。分别运行加权多目标预测控制和本文提出的算法后,记录每时刻下最优经济性能指标 J_e , 并进行时间累加,对应结果如图 4 所示;同时记录每时刻稀相区排放物含氧量指标,对应结果如图 5 所示。在图 4 和 5 中,实线为本文算法运行结果,叉线和点虚线分别为不同权值下加权多目标预测控制算法的控制结果。

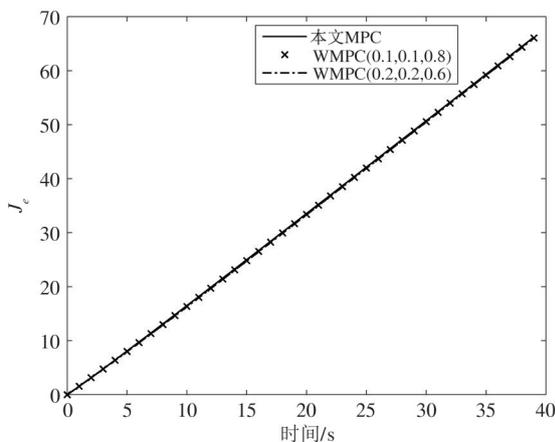


图 4 不同算法下经济能耗累加

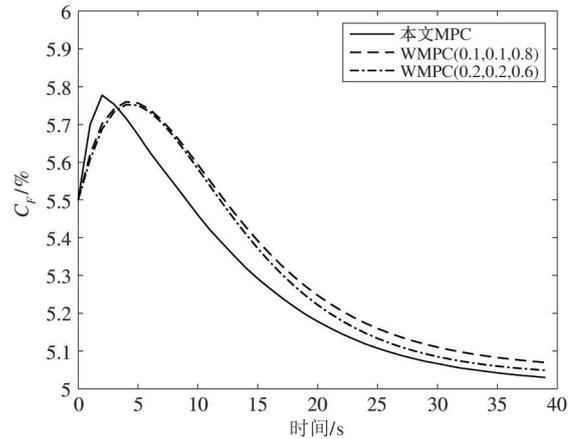


图 5 不同算法下稀相区含氧量

由图 4 可知,就考虑经济性能,则各预测控制算法的经济性能累加值无明显差异,但根据图 5 显示结果可知,相比于加权多目标预测控制算法,本文的环保经济预测控制策略能够在一定程度上减少生物质 CFBB 稀相区含氧量,因此燃烧系统取得的环保性能更优。进一步分析图 5 可知,加权多目标预测控制算法的控制效果在很大程度上取决于决策者选取的权值,但目前缺少统一的调试定量规律,在实际应用中通常需要大量的试凑。因此,本文提出的生物质燃烧系统环保经济预测控制策略则更具有应用灵活性和普适性。

5 结论

考虑具有状态约束和控制约束的生物质循环流化床锅炉(CFBB)燃烧过程的稳定、经济和环保多目标控制问题,提出了一种环保经济预测控制策略。通过分析生物质燃烧过程的性能指标,分别建立了稳定、经济和环保优化最优控制问题,结合收缩约束和字典序约束关联优化问题,通过粒子群优化算法求解优化问题,设计生物质燃烧过程环保经济模型预测控制策略。仿真结果表明,与传统加权多目标预测控制策略相比,本文提出的结合粒子群优化算法的环保经济模型预测控制策略能够在保证锅炉稳定运行和经济性能不变的前提下,减少稀相区含氧量,提高燃烧过程环保性能。本文后续将进一步研究生物质燃烧过程环保经济预测控制算法的稳定性综合方法。

参考文献

- [1] TAO J Y, HOU L A, LI J, et al. Biomass combustion: environmental impact of various precombustion processes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 261:121217.
- [2] HAN K H, GAO J, QI J H. The study of sulphur retention characteristics of biomass briquettes during combustion[J]. *Energy*, 2019, 186:115788.
- [3] 王鹏程, 邓博宇, 蔡晋, 等. 超临界循环流化床锅炉深度调峰技术难点及控制策略[J]. *中国电力*, 2021, 54(5):206-212.
- [4] XIN S W, AN F X, BAI J L. Development and prospect of lignite burning power generation in circulating fluidized bed boiler[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 675:012140.
- [5] XIN S W, LI Y P, ZHANG P. Study on ultra-low NOX emission technology of 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 467:012172.
- [6] ZHU H X, SHEN J Y, LEE K. Multi-model based predictive sliding mode control for bed temperature regulation in circulating fluidized bed boiler[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 101:104484.
- [7] ZHUO X S, LOU C, ZHOUH C. Hierarchical Takagi-Sugeno fuzzy hyperbolic tangent static model control for a circulating fluidized bed boiler thermal power unit [J]. *Energy*, 2018, 162:910-917.
- [8] 周帅. 循环流化床锅炉主蒸汽多模型切换温度控制系统及仿真[J]. *工业锅炉*, 2021(3):38-40.
- [9] ABDULLAH A, AHMED A, AKHTER P, et al. Bioenergy potential and thermochemical characterization of lignocellulosic biomass residues available in Pakistan [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2020, 37(11): 1899-1906.
- [10] 白建云, 朱竹军, 张培华. 基于 BP 神经网络的循环流化床锅炉生成 NO_x 质量浓度在线软测量[J]. *热力发电*, 2016, 45(12): 78-83.
- [11] 李丰泽, 马素霞. 基于动态论域的循环流化床锅炉燃烧系统的模糊自适应 PID 控制[J]. *动力工程学报*, 2021, 41(3):195-200.
- [12] 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.
- [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] 何鹏, 陆琳辉, 刘西陲, 等. 带煤质校正的循环流化床锅炉新型协调控制方法[J]. *动力工程学报*, 2018, 38(1):29-35.
- [15] 吴俊博. 循环流化床锅炉系统的非线性建模与预测控制[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2018.
- [16] WANG G L, DING B C, YAN W W. Steam pressure control of 1000MW ultra-supercritical coal-fired power unit based on multi-model predictive control [J]. 2019, 24:86-93.
- [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] WANG D, TAN D, LIU L. Particle swarm optimization algorithm: an overview [J]. *Soft Computing*, 2018, 22: 387-408.
- [19] FAKHOURI H N, HUDAIB A, SLEITA. Multivector particle swarm optimization algorithm [J]. *Soft Computing*, 2020, 24:11695-11713.
- [20] FENG L H, YANG F, ZHANG W, et al. Model predictive control of duplex inlet and outlet ball mill system based on parameter adaptive particle swarm optimization [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(6): 1-10.
- [21] 高岳林, 李会荣. 非线性约束优化问题的混合粒子群算法[J]. *计算数学*, 2010, 32(2):135-146.
- [22] 何德峰, 张永达, 徐山, 等. 生物质循环流化床锅炉燃烧过程多目标经济预测控制[J]. *高技术通讯*, 2019, 29(7):668-674.
- [23] 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.
- [24] GUNGOR A, ESKIN N. Two-dimensional coal combustion modeling of CFB [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47(2):157-174.
- [25] IKONEN E, NAJIM K. *Advanced process identification and control* [M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [26] 刘吉, 刘炳含, 张月, 等. 基于大数据技术的火电厂节能环保多目标负荷优化分配[J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(1):29-38.
- [27] MAREE J P, IMSLAND L. On multi-objective economic predictive control of cyclic process operation [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(8):1328-1336.
- [28] HE D F, WANG L, SUN J. On stability of multiobjective

- NMPC with objective prioritization [J]. *Automatica*, 2015,57:189-198.
- [29] HE D F, LI H P, DUH P. Lexicographic multi-objective MPC for constrained nonlinear systems with changing objective prioritization[J]. *Automatica*, 2021,125:109433.
- [30] HE D F, ZHANG Y D, YU S M. Prioritized multi-objective model predictive control without terminal constraints and its applications to nonlinear processes[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2021;42:1030-1044.

Particle swarm optimization based ecological economic predictive control of biomass combustion processes

HE Defeng, CEN Jianghui, CHEN Long, WANG Xiuli

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

Abstract

Considering the multi-objective control problem of biomass nonlinear circulating fluidized bed boiler (CFBB) combustion process with state and control constraints, an ecological economic model predictive control (EMPC) strategy is proposed. Based on the mechanism modeling method, a constrained biomass nonlinear combustion process model is established. In order to optimize the economic and ecological performance of the biomass combustion process and ensure the stability of the process system, an ecological EMPC controller for the biomass combustion process is designed by combining lexicographic algorithm with a contraction constraint, particle swarm optimization algorithm (PSO) and receding horizon control method. Finally, the simulation results verify the effectiveness and superiority of the control strategy.

Key words: biomass circulating fluidized bed boiler (CFBB), model predictive control (MPC), multi-objective control, particle swarm optimization algorithm (PSO), economic optimization