doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2021.10.012

CFBB 燃烧过程变经济性能多目标预测控制^①

何德峰②* 李海平* 王青松* 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 针对具有非线性、耦合和约束等复杂特性的循环流化床锅炉(CFBB)燃烧过程, 考虑经济性能指标可变情况下其多目标优化控制问题,提出一种变经济性能多目标经济 模型预测控制(MPC)策略。为了保证经济性能指标发生改变后 CFBB 燃烧过程在稳态工 况下的稳定性和燃烧经济性,首先引入关于最优经济稳态点的正定辅助函数作为最高优 先级目标,其次考虑床温设定值跟踪目标和经济性目标。进一步,应用广义终端约束、字 典序多目标优化和滚动时域控制原理,设计 CFBB 燃烧过程变经济性能多目标经济预测 控制器。最后,通过仿真验证了本文提出策略的可行性和有效性。

关键词 循环流化床锅炉(CFBB);多目标控制;模型预测控制(MPC);变经济性能

0 引言

循环流化床锅炉(circulation fluidized bed boiler,CFBB)是一种靠燃料燃烧生产蒸汽的动力装备, 相比于普通煤粉锅炉具有适用燃料种类多、燃烧效 率高和污染排放量少等优势^[14]。特别是近年来, 以农作物秸秆为燃料的生物质循环流化床锅炉的兴 起,在提高废弃资源利用率的同时,降低了企业成本 和环境污染,因此 CFBB 在电力、化工及供热等领域 受到广泛推广和应用。然而,同普通煤粉锅炉相比, CFBB 燃烧反应机理更复杂,既要满足热负荷需要, 又要保证锅炉在稳态工况长期运行和燃烧的经济性 等诸多条件。随着 CFBB 技术日益大型化和参数 化,其复杂的过程控制和以节能减排为主的多目标 优化控制问题越来越受到关注,并日益成为热电控 制领域的热点课题^[56]。

国内外学者针对 CFBB 燃烧过程优化和节能降 耗问题已经开展了大量工作,一些先进优化控制算 法不断被应用。考虑到 CFBB 过程的时变、强耦合 特性,文献[7]提出一种基于改进遗传算法的循环 流化床锅炉床温模糊控制器,能够有效地对锅炉床 温进行调节。文献[8]先采用自适应神经模糊推理 系统建立 CFBB 过程模型,再通过强化学习算法进 行控制优化,能够有效提高锅炉的燃烧效率。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算法,广 泛应用于工业过程控制^[9]。文献[10]考虑风煤比 对燃烧过程的影响,提出一种基于模型预测控制的 循环流化床锅炉燃烧优化方法,并与传统 PID 控制 方法进行对比仿真表明所提方法的有效性。针对 CFBB 燃烧过程中的多目标优化问题,文献[11]以 提高燃烧效率和减少污染物排放量为优化目标,利 用支持向量机构建 CFBB 燃烧过程模型,设计非线 性 MPC 算法,实现了燃烧过程的多目标优化控制。

随着实际需求的提升,如何在保证锅炉燃烧 效率的同时提高经济效益也越来越受到关注。文 献[12]提出一种基于广义预测控制的CFBB燃烧过 程多目标经济优化策略,实现了锅炉主要工艺参数

① 国家自然科学基金(61773345)和浙江省自然科学基金(LR17F030004)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:2020-06-22)

的区域动态控制和经济性能指标优化。文献[13] 考虑锅炉燃烧过程中主要工艺参数的平稳性和经济 性问题,提出了一种基于模型预测控制的双层控制 策略,在保证工艺参数的稳定性的基础上进行第二 层的经济性能指标优化,实际测试结果表明该策略 能提高经济性能。文献[14]提出了一种 CFBB 燃烧 过程多目标优化方法,应用终端约束集、终端代价函 数和局部控制器三要素设计多目标模型预测控制 器,保证了系统在最优经济平衡点(稳态工况)处的 稳定性。然而上述涉及到经济性能优化的研究工作 均没有考虑经济性能指标可变这一关键问题。经济 性能指标改变意味着系统稳态工况的改变,因此如 何设计控制器保证 CFBB 燃烧系统在经济性能指标 改变后在新的稳态工况长期稳定运行是一个新的研 究方向。

本文考虑在经济性能指标可变情况下循环流化 床锅炉燃烧过程的多目标优化控制问题。引入关于 最优经济稳态点的正定辅助函数作为最高优先级目 标,再考虑床温设定值跟踪目标和经济目标,构建多 层字典序优化控制结构,实现了变经济性能情况下 CFBB燃烧过程的稳定运行和经济性。在文献[14] 工作的基础上,结合广义终端约束、字典序多目标优 化和滚动时域控制原理,设计循环流化床锅炉燃烧 系统变经济性能多目标模型预测控制器。

相比文献[14],本文做出的改进体现在两个方 面:(1)考虑可变的经济性能指标,这意味着燃烧过 程的最优经济稳态点会发生改变,因此如何保证循 环流化床锅炉在最优经济稳定工况下稳定运行是本 文在设计控制器时解决的主要问题;(2)设计控制 器时引入广义终端约束和关于最优经济稳态点的正 定跟踪辅助目标函数,能够保证在经济最优稳态点 发生改变后控制器的可行性和闭环系统的稳定性。

1 CFBB 燃烧过程描述与建模

1.1 CFBB 燃烧过程描述

CFBB 燃烧系统装置主要组成部分包括炉膛、 分离器、过热器、省煤器、返料器和除尘器等。CFBB 燃烧过程可简述为^[15]:生物质燃料和脱硫剂的混合 物进入炉膛后,在流化状加热物料的加热作用下燃烧,同时一、二次风机分别向炉膛鼓入一次风和二次风供给燃料燃烧;在上升气流的作用下,燃料向炉膛上部运动,粗燃料颗粒被带入炉膛密相区燃烧,细颗粒随烟气在稀相区悬浮燃烧。部分被夹带出的细颗粒在分离器作用下进入返料器,然后被送回炉膛循环进行二次燃烧利用。烟气通过过热器与尾部的受热面完成热交换后经除尘器净化处理排出。整个燃烧过程产生的热量被热交换器捕获用于发电和供热等。

1.2 CFBB 燃烧过程建模

CFBB 燃烧系统建模方法分为两种:一种是根 据实际测量得到的输入输出数据,经系统辨识^[16]或 学习^[17]方法得到;另一种是通过描述 CFBB 燃烧过 程中的传质、传热和燃烧等物理和化学过程,结合质 量和能量守恒定律建立的机理模型。本文考虑机理 建模。

燃料的燃烧速率 Q_B 主要取决于炉膛内的氧含量和燃料特性,具体计算如下:

$$Q_{B}(t) = \frac{W_{C}(t)C_{B}(t)}{t_{C}C_{1}}$$
(1)

式中, W_c 为炉膛内燃料剩余量, C_B 和 C₁ 分别为炉 膛和一次风中的氧气含量, t_c 表示燃料的平均燃烧 时间。由质量守恒定律可以得到炉膛内燃料剩余量 的变化为

$$\frac{\mathrm{d}W_c(t)}{\mathrm{d}t} = (1 - V)Q_c(t) - Q_B(t) \tag{2}$$

式中,V为燃料挥发比,Qc为燃料供给速率。

炉膛内氧气含量是保证燃烧效率的关键指标, 其主要取决于一次风中的氧含量和燃料耗氧量。炉 膛氧含量和稀相区氧含量 C_F 的动态变化可以分别 表示为

$$\frac{\mathrm{d}C_B(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{V_B} \left[C_1 F_1(t) - X_C Q_B(t) - C_B(t) F_1(t) \right]$$
(3)

$$\frac{\mathrm{d}C_F(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{V_F} \{ C_B(t)F_1(t) + C_2F_2(t) - VX_VQ_C(t) - C_F(t)[F_1(t) + F_2(t)] \}$$
(4)

式中,*V_B*和*V_F*分别为炉膛和稀相区的体积,*F*₁和 *F*₂分别为一和二次风的供给速率,*C*₂为二次风中的 — 1109 — 氧气含量, X_c 和 X_v 分别为燃料和燃料中挥发物的耗氧系数。

床温和稀相区温度是保证燃料燃烧效率的关键 工艺参数,根据 CFBB 燃烧过程中的热量转化和能 量守恒定律可以得到炉床温度 T_B 和稀相区温度 T_F 的平衡关系分别为

$$\frac{\mathrm{d}T_B(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{c_I W_I} \{ Q_B(t) H_C + c_1 F_1(t) T_1 - c_F F_1(t) T_B(t) - a_{Bt} A_{Bt} [T_B(t) - T_{Bt}] \}$$
(5)

$$\frac{\mathrm{d}T_F(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{c_F V_F} \{ VQ_C(t)H_V - a_{Ft}A_{Ft} [T_F(t) - T_{Ft}] + c_F F_1(t)T_B(t) + c_2 F_2(t)T_2 - c_F T_F(t) [F_1(t) + F_2(t)] \}$$
(6)

式中, c_1 和 W_1 分别为炉床材料的比热系数和质量, H_c 和 H_v 分别为燃料和燃料中挥发物的比热, c_1 和 T_1 分别为一次风的比热系数和进风温度, a_{Bl} 和 A_{Bl} 表示炉床水冷壁的传热系数和炉床水冷壁面积, T_{Bl} 为炉床冷水的温度, c_F 表示烟气的比热, a_{Fl} 和 A_{Fl} 表 示稀相区水冷壁的传热系数和稀相区炉床水冷壁面 积, T_{Fl} 为稀相区冷水的温度, c_1 和 T_1 分别为一次风 的比热系数和进风温度。

此外,CFBB 燃烧过程的热功率 *P_T* 可以采用简 单的一阶动态模型表示为

$$\frac{\mathrm{d}P_{T}(t)}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau_{\mathrm{mix}}} \left[H_{C}Q_{B}(t) + VH_{V}Q_{C}(t) - P_{T}(t) \right]$$
(7)

其中, T_{mix}为时间常数。

结合式(1) ~式(7),选取 CFBB 燃烧过程的状态变量为 $\mathbf{x} = [W_c, C_B, C_F, T_B, T_F, P_T]^T$ 和控制输入变量 $\mathbf{u} = [Q_c, F_1, F_2]^T$,可以得到 CFBB 燃烧过程的连续时间系统模型:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = f(\boldsymbol{x}(t), \boldsymbol{u}(t))$$
(8)

为了便于控制器设计,以采样时间 T_s 对连续系 统式(8)进行离散化处理得到离散时间的 CFBB 系 统模型。

$$\mathbf{x}(k+1) = T_s f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + \mathbf{x}(k):$$
$$= F(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$$
(9)

为了提高燃烧效率、保证系统安全稳定运行以 及燃烧过程的环保性,系统的状态量和控制量要满 足如下约束条件:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}_{\min} &\leq \boldsymbol{x}(k) \leq \boldsymbol{x}_{\max} \\ \boldsymbol{u}_{\min} &\leq \boldsymbol{u}(k) \leq \boldsymbol{u}_{\max} \\ \boldsymbol{\alpha}_{\min} &\leq \boldsymbol{\alpha} = \frac{u_2 + u_3}{u_1} \leq \boldsymbol{\alpha}_{\max} \end{aligned} \tag{10}$$

式中,一般符号 s_{min} 和 s_{max} 分别表示对应物理量约束的上和下限; α 为风煤比,保证其在合理范围内能最大限度减小氮氧化物的排放,提高燃烧过程的环保性。

2 CFBB 燃烧过程多目标描述

CFBB 燃烧过程中的主要控制目标可以归纳为 以下 3 个方面。

(1)稳定运行目标。要保证 CFBB 燃烧过程的 稳定和经济性运行,防止系统状态偏离预期稳态工 况,造成不稳定和安全问题,需要控制系统状态量和 控制量在某些经济稳态平衡点。设计稳态跟踪目标 函数为

$$L_1(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}(k)) = \|\boldsymbol{x}(k) - \boldsymbol{x}_s\|_{\boldsymbol{Q}}^2 + \|\boldsymbol{u}(k) - \boldsymbol{u}_s\|_{\boldsymbol{R}}^2$$
(11)

式中, x_s 和 u_s 分别表示 CFBB 锅炉燃烧过程的经济 最优稳定状态和控制输入, $Q_x R$ 分别为状态量偏差 和控制输入偏差的正定加权矩阵,一般性矩阵 ψ 加 权范数 $\|s\|_{\psi}^2 = s^{T}\psi s$ 。

(2)床温控制目标。炉床温度 T_B 是一个关键 性参数,直接影响到燃料燃烧效率和机组的经济安 全运行。通常保证锅炉运行的炉床温度需要控制在 1073.15~1173.15 K 范围内的某些期望值。因此, 设计炉床温度期望值跟踪控制目标函数如下:

 $L_2(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) = \|x_4(k) - T_B^{des}\|$ (12) 其中, T_B^{des} 为锅炉燃烧过程中期望的床温。

(3) 经济性目标。CFBB 燃烧过程的能耗主要 来自于燃料的消耗量,燃料传输装置的耗电量和风 机的送风耗电量。而传输装置的耗电量与风机耗电 量量级相差很大,因此前者可忽略不计^[12-13]。本文 的经济成本主要考虑燃料消耗量、一次风机耗电量 和二次风机耗电量。参考文献[16]的方法,结合 一、二次风机的实际送风速率和燃料消耗之间的关 系,经济性能目标函数可以折算为系统每秒的燃料

— 1110 —

消耗量,具体如下:

 $L_3(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{M}) = \mathbf{M}^{T}\mathbf{u}(k)$ (13) 其中, $\mathbf{M} = [m_1, m_2, m_3]^{T}$ 为经济折算系数。考虑 燃料价格发生改变或者由于峰谷电等因素导致电价 发生变化等因素, \mathbf{M} 会发生改变,即经济性能指标 是可变的。

考虑上述 3 个控制目标, CFBB 燃烧过程的多 目标模型预测控制问题可以描述为

$$\min_{F(k)} J(k) = \{J_{1}(k), J_{2}(k), J_{3}(k)\}$$
(14)
$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1|k) = F(\mathbf{x}(t|k), \mathbf{u}(t|k)) \\ \mathbf{x}(t+1|k) \in \mathbf{X}, \mathbf{u}(t|k) \in \mathbf{U} \\ \mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k), t = 0, 1, \dots, N-1 \\ J_{i}(k) = \sum_{t=0}^{N-1} L_{i}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)), i = 1, 2, 3 \end{cases}$$
(15)

式中,s.t.表示约束,k为当前采样时刻,N为预测时域,一般符号s(t|k)表示当前k时刻对未来k+t时刻的预测值, $X \subseteq R^6$ 和 $U \subseteq R^3$ 分别表示状态量和控制量约束集合。注意多目标优化问题式(14)的最优解是定义在 Pareto 最优性意义下的,通常 Pareto 最优解不唯一,它们共同构成了多目标值域空间的 Pareto 前沿。令当前时刻的一个 Pareto 优化控制解 序列 $\Gamma(k)$ 为

 $\boldsymbol{\Gamma}(k) = \{ \boldsymbol{u}^{*}(0 \mid k), \, \boldsymbol{u}^{*}(1 \mid k), \cdots, \, \boldsymbol{u}^{*}(N - 1 \mid k) \}$ (16)

极小化每个目标函数,若优化问题式(14)可行,即 序列式(16)存在,则由 MPC 滚动时域原理可以得 到预测控制器为

$$\boldsymbol{u}^{\mathrm{mpc}}(k) = \boldsymbol{u}^{*}(0 \mid k) \tag{17}$$

其中,u*(0|k)为序列式(16)的第一个元素。

传统的保证系统在最优经济平衡点处渐近稳定 性的控制器设计依赖于终端三要素条件,即终端代 价函数、终端约束集和终端局部状态反馈控制 器^[18]。在每次优化过程中,通过终端局部状态反馈 控制器将系统的终端状态 *x*(*N*1*k*)驱使到终端约束 集内,结合 Laypunov 稳定性理论可以保证系统在平 衡点的渐近稳定性。终端三要素条件需要根据给定 的系统稳态点离线计算,然后用于控制器设计,相 关设计方法见文献[14]。然而当经济性能指标 式(12)变化时系统的最优经济稳态点随之改变。 这意味着保证系统稳定性的终端三要素条件不再适 用于新的稳态点,导致控制器的可行性和稳定性丢 失。

本文旨在设计一种经济性能可变的 CFBB 燃烧 过程多目标模型预测控制算法,在由于燃料价格发 生改变或者由于峰谷电等因素导致经济性能指标发 生改变的情况下,保证控制器的可行性和稳定性,进 而实现 CFBB 燃烧系统在不同稳态工况下长期稳定 运行和经济性运行。

3 变经济性能 Mo-MPC 控制器设计

通常,控制目标 J₁ ~ J₃ 具有矛盾冲突性和不同 优先级,字典序优化方法是处理优先级多目标问题 的有效方法之一^[19-22]。本文主要基于字典序多目 标优化方法设计控制器。

首先定义 CFBB 燃烧过程的最优经济稳态点考 虑 CFBB 燃烧系统式(9)中各状态变量之间的平衡 关系和主要目标控制要求,燃烧系统的最优经济平 衡点可以通过求解以下优化问题:

$$L_{2}^{*} = \min_{(x, u)} \{ L_{2}(x, u) \mid x = F(x, u), (10) \}$$
(18a)

$$L_{3}^{*} = \min_{(x, u)} \left\{ L_{3}(x, u) \middle| \begin{array}{l} x = F(x, u), (10) \\ L_{2}(x, u) \leqslant L_{2}^{*} \end{array} \right\}$$
(18b)

得到 CFBB 燃烧过程的最优经济稳态点为

$$(\boldsymbol{x}_{s}, \boldsymbol{u}_{s}) = \arg \min_{(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})} \left\{ L_{3}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \middle| \begin{array}{l} \boldsymbol{x} = F(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}), (10) \\ L_{2}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) \leqslant L_{2}^{*} \end{array} \right\}$$

$$(18c)$$

为了提高字典序优化的计算效率,常规字典序 约束 $L_i = L_i^*$ 通常被松弛为 $L_i \leq L_i^* + \varepsilon_i$, $\varepsilon_i \geq 0$ 为 小的常数松弛因子,在上述稳态优化和后续的字典 序优化过程中的字典序约束已简记为 $L_i \leq L_i^*$ 。由 式(18b)可知,稳态点优化求解依赖折算系数 M,当 M 变化时,CFBB 燃烧过程的稳态工况随之改变,导 致基于终端三要素的设计的控制器的可行性和系统 稳定性丢失。因此本文在控制器设计时,考虑广义 终端约束^[23],即 x(N-1|k) = x(N|k)。定义燃烧 过程的可行控制输入集如下:

— 1111 —

$$C(k) = \begin{cases} \Gamma(k) \in U^{N} | \mathbf{x}(t+1|k) = F(\mathbf{x}(t|k), \mathbf{x}(t|k)) \\ \mathbf{x}(t+1|k) \in \mathbf{X}, \mathbf{u}(t|k) \in \mathbf{U} \\ \mathbf{x}(0|k) = \mathbf{x}(k), t = 0, 1, \dots, N-1 \\ \mathbf{x}(N|k) = \mathbf{x}(t-1|k) \end{cases} \end{cases}$$
(19)

式中, U^N 表示 N 与集合 U 的乘积。

重新设计稳态跟踪目标函数为

$$L'_{1}(k) = \| \mathbf{x}(t \mid k) - \mathbf{x}(N - 1 \mid k) \|_{\mathbf{\Phi}}^{2} + \| \mathbf{x}(N \mid k) - \mathbf{x}_{s} \|_{\mathbf{\Phi}}^{2}$$
(20)

其中,**Φ**和**Θ**均为正定矩阵。基于字典序优化方法,CFBB 燃烧过程可变经济性能 Mo-MPC 优化控制策略,描述如下:

$$J_{1}^{'*} = \min_{\Gamma(k)} \{ J_{1}^{'}(x) \mid \Gamma(k) \in C(k) \}$$
(21a)

$$J_{2}^{*} = \min_{\Gamma(k)} \left\{ J_{2}(k) \middle| \begin{array}{c} \Gamma(k) \in C(k) \\ J_{1}^{'}(k) \leqslant J_{1}^{'*}(k) \end{array} \right\}$$
(21b)

$$J_{3}^{*} = \min_{F(k)} \left\{ J_{3}(k) \middle| \begin{array}{c} I'(k) \in C(k) \\ J_{1}^{'}(k) \leqslant J_{1}^{'*}(k) \\ J_{2}(k) \leqslant J_{2}^{*}(k) \end{array} \right\}$$
(21c)

其中,*J*^{*}_{*i*}(*i*=1,2,3)表示目标函数的最优值函数。 根据字典序优化原理,上述优化策略得到的字典序 最优解为

$$\boldsymbol{\Gamma}_{lex}^{*}(k) = \arg\min_{\boldsymbol{\Gamma}(k)} \left\{ J_{3}(k) \middle| \begin{array}{l} \boldsymbol{\Gamma}(k) \in \boldsymbol{C}(k) \\ J_{1}^{'}(k) \leq J_{1}^{'*}(k) \\ J_{2}(k) \leq J_{2}^{*}(k) \end{array} \right\}$$
(22)

由字典序最优解^[24]的定义可知,字典序最优解序列 式(22)本质上是一个考虑了各目标优先级的 Pareto 最优解,它可能是不唯一的,但目标最优值是 Pareto 前沿上的唯一点。

根据 MPC 滚动优化原理,变经济性能 Mo-MPC 控制器设计为

$$\boldsymbol{u}^{\mathrm{mpc}}(k) = \boldsymbol{u}^{*}_{\mathrm{lex}}(0 \mid k)$$
(23)

其中,**u**_{lex}(01k)为字典序最优控制序列式(22)的第一个元素,得到对应的 CFBB 燃烧过程的闭环控制系统:

法归纳如下。

步骤1 设定参数 $(N, \boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Theta})$;令 $k = 0_{\circ}$

步骤2 判断当前时刻*M* 是否需要调整,如是, 求解问题式(18)得到对应的(*x*_s, *u*_s),并更新目标 函数 *J*₁ 和 *J*₃;否则转步骤3。

步骤3 测量当前状态 *x*(*k*),按如下步骤进行 字典序优化问题求解:

步骤 3.1 求解第一层优化问题式(21a),得 到控制序列 $\Gamma_1^*(k)$;

步骤 3.2 求解优第二层优化问题式(21b),得 到控制序列 $\Gamma_{2}^{*}(k)$;

步骤 3.3 求解优化问题式(21c),得到控制序 列 Γ₃^{*}(k);

步骤 3.4 确定 Mo-MPC 优化问题式(21)的字 典序最优解序列, $\Gamma_{lev}^{*}(k) = \Gamma_{3}^{*}(k)$ 。

步骤4 将(^{*}_{lex}(*k*)的首个元素作用于 CFBB 燃 烧实际系统式(9)。

步骤5 令 *k* = *k* + 1, 返回步骤2。

得到的 CFBB 燃烧系统变经济性 Mo-MPC 控制器结构如图 1 所示。



图 1 变经济性能 Mo-MPC 控制器结构示意图

4 仿真结果与分析

采用文献[25]中的 CFBB 燃烧系统模型,模型 参数见表1。

以采样时间 $T_s = 1 \text{ s}$ 对连续时间系统式(8)进行离散化处理;预测时域 $N = 8; J_1$ 中的正定加权矩阵

— 1112 —

参数	取值	参数	取值
V/kg/kg	128.1	T_{Bl}/K	573
t_c/s	50	$c_F/\mathrm{J/m^3/K}$	1305
V_B/m^3	26.3	V_F/m^3	128.1
$C_1/\mathrm{Nm}^3/\mathrm{Nm}^3$	0.21	$C_2/\mathrm{Nm}^3/\mathrm{Nm}^3$	0.21
$X_c/\mathrm{Nm}^3/\mathrm{~kg}$	1.886	X_V /Nm ³ /kg	1.225
$c_I/J/kg/K$	800	$H_V/10^7/$ J/ kg	3.0
W_I/kg	2.5×10^{4}	$a_{_{Ft}}/\mathrm{W/m^2/K}$	210
$H_c/{\rm J/kg}$	3.0×10^{7}	A_{Ft}/m^2	130.7
$c_1/\mathrm{J/m^3/K}$	1305	$T_{_{Ft}}/\mathrm{K}$	573
T_1/K	328	$c_2/\mathrm{J/m^3/K}$	1305
$a_{Bt}/W/m^2/K$	210	T_2/K	328
A_{Bt}/m^2	26.8	${ au_{ m mix}}/{ m s}$	300

表1 CFBB 模型参数取值

25,25};锅炉燃烧过程中床温设定值 T_B^{des} 为1117.0 K; 考虑 CFBB 燃烧过程的安全、稳定和经济性,需对锅 炉的状态量和控制量施加约束,炉膛内燃料剩余量 Wc 需要控制在 221~223 kg 范围内, 炉膛内氧含量 C_B 和稀相区氧含量 C_F 均应保持在 0.03 ~ 0.06 Nm^3/Nm^3 范围内;炉床和稀相区温度 T_R , T_F 分别应 控制在1169.8~1171.2K和998.5~1004.5K范围 内;热功率 P 的约束为 32~33 MW;同时控制输入 应满足约束条件,供给燃料速率 Qc 限制在 3.5~ 4.5 kg/s范围内;一次风机的鼓风速率限制在4.0~ 6.0 Nm³/s之间;二次风机的鼓风速率须在14.0~ 16.0 Nm³/s 范围内:为了尽可能减少氮氧化物 NO. 的生成量,风煤比须控制在4.0~6.0范围内。仿真 时间为 T_{sim} = 1600 s;在 800 s 时经济性能指标发生 改变,经济折算系数和对应的 CFBB 系统稳态工况 见表2。

表 2 燃烧过程的不同稳态工况

参	不同时刻取值			
数	$(1/2(1)T_{\rm sim})$	$0 \sim 1/2 T_{sim}$		
M	$[0.43, 2.6 \times 10^{-4}, 1.4 \times 10^{-5}]^{T}$	$[0.78, 3.76 \times 10^{-3}, 106.7]^{T}$		
r	[221.49, 0.048, 0.05,	[222.9, 0.047, 0.048,		
\boldsymbol{x}_{s}	1117.01, 1001.7, 34.41] ^T	$1119.93, 1003.96, 32.42]^{T}$		
\boldsymbol{u}_{s}	$[4.0, 5.0, 15.0]^{\mathrm{T}}$	$[3.8, 4.9, 14.5]^{\mathrm{T}}$		

仿真中取 CFBB 燃烧系统的初始状态 *x*(0) = [222.5,0.05,0.055,1116.95,1003.78,32.446]^T, 分别运行本文的算法 A 和文献[14]中的算法 B,其 中运行算法 B 时的终端三要素条件与文献[14]相同。图 2 和图 3 分别给出了两种控制器控制下的 CFBB 燃烧系统的 6 个状态量变化响应曲线和控制 量变化响应曲线。图中,实线对应的是运行算法 A 得到的响应曲线,虚线对应的是运行算法 B 得到的响应曲线。

由图 2 和图 3 可以看出,2 种算法运行得到的 状态量和控制量均满足约束条件。在稳态工况发生 改变之前,在算法 A 的控制作用下,大约 200 s 后 CFBB 燃烧系统基本能够稳定到稳态工况,且均能 保证锅炉的炉床温达到设定值;在算法 B 作用下, 大约 180 s 后燃烧过程也能达到稳态工况,但是部 分状态量和控制量出现明显的波动,控制的平稳性 较差。当经济指标发生改变导致稳态工况改变后,





本文设计的控制器仍然能够保证 CFBB 燃烧系统在 新的稳态工况稳定运行,床温基本能稳定在期望值 附近。但在控制器 B 的控制作用下锅炉的各状态 量出现明显的抖动,不能保证新的稳态工况下锅炉 的稳定运行要求,并且床温也无法稳定在期望值。 这主要是因为在经济性能指标发生改变后,新的最 优经济稳态点不满足保证算法 B 稳定运行的终端 三要素条件。

图 4 给出的是 2 种算法运行后 CFBB 燃烧过程 中的风煤比变化情况。由图可知,两种控制器作用 下系统均满足风煤比约束,但当经济性能指标发生 变化后,控制器 B 作用下燃烧系统的风煤比出现波 动,这意味着燃料不充分燃烧,导致生成的 NO_x 增 加,不利于提高锅炉燃烧的环保性。因此,本文提出 的算法控制作用下风煤比能稳定在一个合理取值, 更利于燃料的充分燃烧,更符合环保性控制要求。





$$Av(\boldsymbol{M}_{1}) = \frac{\sum_{k=0}^{T_{sim}/2} 2 \times L_{3}(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}^{mpc}(k))}{T_{sim}}$$

$$(25)$$

$$Av(\boldsymbol{M}_{2}) = \frac{\sum_{k=T_{sim}/2}^{T_{sim}} 2 \times L_{3}(\boldsymbol{x}(k), \boldsymbol{u}^{mpc}(k))}{T_{sim}}$$

$$(26)$$

两种控制策略下 CFBB 燃烧过的平均经济性能见表3。

表3 2种算法的平均经济性能

算法	$Av(\boldsymbol{M}_1)$	$Av(\boldsymbol{M}_2)$	总计
А	0.0179	15.5025	15.5204
В	0.0172	16.0682	16.0854
A 改进量	-4.01%	3.52%	3.51%

由表3结果可知,0~800 s时间范围内,本文 提出的算法相比较于算法B改进平均经济性能 -4.01%;800~1600 s时间范围内,本文提出的算 法相比较于算法B改进3.52%;整个仿真时长内本 文算法改进3.51%。整体而言,本文提出的算法在 提高燃烧经济性方面优于算法B。

总之,相比于算法 B,本文提出的算法既能够保 证 CFBB 燃烧系统在不同稳态工况下的稳定运行, 又能够提高燃烧过程的平均经济性能经济性和环保 性。针对一些需要进行稳态工况调整的 CFBB 燃烧 过程,本文提出的算法更具有优势。

5 结论

考虑循环流化床锅炉燃烧过程在经济性能多变 化条件下的目标优化问题,本文提出一种变经济性 能 Mo-MPC 控制算法。将引入的关于最优经济稳态 点的正定辅助函数作为最高优先级目标,将床温设 定值跟踪目标和燃烧经济目标作为次级优先目标, 结合广义终端约束、字典序多目标优化和控制原理, 设计循环流化床锅炉燃烧系统变经济性能多目标预 测控制器。仿真结果表明,与传统字典序多目标优

— 1114 —

化算法相比,本文提出的算法既能够保证 CFBB 燃烧过程在变化后的稳态工况下长期稳定运行,又能够提高燃烧过程中的经济性和环保性。

参考文献

- [1] 鲍冲.火力发电厂锅炉节能降耗的对策与措施[J].节 能,2020,39(2):34-35
- [2] 陈亮, 王春波, 闫广精. 循环流化床锅炉内石灰石脱 硫研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(5): 2451-2460
- [3] 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
- [4] 赵旭东,吴少华,马春元,等.新型循环流化床烟气 悬浮脱硫中试装置的研制[J].高技术通讯,2002,12
 (6):88-91
- [5] Pettersson A, Zevenhoven M, Steenari B M, et al. Application of chemical fractionation methods for characterization of biofuels, waste derived fuels and CFB co-combustion fly ashes[J]. Fuel, 2008, 87(15-16): 3183-3193
- [6] Shi Y, Zhong W Q, Shao Y J, et al. Energy efficiency analysis of pressurized oxy-coal combustion system utilizing circulating fluidized bed[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 1104-1115
- [7] 马宝萍,司凤琪,徐治,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
- [8] Cojbašic Ž, Stephan V, Gross H M, et al. Intelligent control of complex combustion processes [J]. Mechanical Engineering, 2003, 1(10): 1393-1406
- [9]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
- [10] Havlena V, Findejs J. Application of model predictive control to advanced combustion control[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(6): 671-680
- [11]朱玉璧,程相利,陶新建,等.智能控制在锅炉燃烧 优化中的应用[J].中国电机工程学报,2008,28 (11):82-86
- [12] 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
- [13] 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, 3

(67): 695-700

- [14] 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
- [15] Gungor A, Eskin N. Two-dimensional coal combustion modeling of CFB [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(2): 157-174
- [16] 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
- [17] Li G Q, Chen B, Qi X B, et al. Circular convolution parallel extreme learning machine for modeling boiler efficiency for a 300MW CFBB[J]. Soft Computing, 2019, 23: 6567-6577
- [18] He D F, Wang L, Sun J. On stability of multiobjective NMPC with objective prioritization [J]. Automatica, 2015, 57: 189-198
- [19] Khosravani S, Jalali M, Khajepour A, et al. Application of lexicographic optimization method to integrated vehicle control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(12): 9677-9686
- [20] Anilkumar M, Padhiyar N, Moudgalya K. Lexicographic optimization based MPC: simulation and experimental study[J]. Computers and Chemical Engineering, 2016, 88(8):135-144
- [21] Yadollah R, Iman F, Amir K. Autonomous driving motion planning with obstacles prioritization using lexicographic optimization [J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 77(8): 235-246
- [22] 何德峰,张永达,李廉明,等.循环流化床燃烧系统 无终端约束字典序经济预测控制[J].化工学报, 2020,71(3):1210-1216
- [23] Lorenzo F, Andrew R T. Generalized terminal state constraint for model predictive control [J]. Automatica, 2013,49(9): 2622-2631
- [24] Kerrigan E C, Maciejowski J M. Designing model predictive controllers with prioritised constraints and objectives [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design, Glasgow, UK, 2002: 33-38
- [25] Ikonen E, Najim K. Advanced Process Identification and Control[M]. New York: Marcel Dekker, 2002: 285-287

Multi-objective predictive control of CFBB combustion processes with changing economic criterion

He Defeng*, Li Haiping*, Wang Qingsong*, Li lianming**

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

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

Abstract

Aiming at the combustion process of circulation fluidized bed boiler (CFBB) with complex characteristics such as non-linear, multivariable coupling and constraints, considering its multi-objective optimization control problem with changing economic criterion, a multi-objective model predictive control (MPC) strategy with changing economic criterion is proposed. In order to ensure the stability of the CFBB combustion process under steady-state conditions and the economy of combustion after the economic performance criterion changes, the positive definite auxiliary functions at the optimal economic steady-state points are introduced and viewed as the highest priority goal, and then the set-points tracking target of the boiler bed temperature and the goal of combustion economy are considered. Furthermore, applying the generalized terminal constraints, lexicographic multi-objective optimization and predictive control principles, a multi-objective model predictive controller with changing economic performance is designed for CFBB system. Finally, the feasibility and effectiveness of the strategy proposed in this paper are verified by simulations.

Key words: circulation fluidized bed boiler(CFBB), multi-objective control, model predictive control(MPC), changing economic criterion