

循环流化床锅炉燃烧系统的控制研究

傅彩芬, 谭文

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘 要: 针对 CFBB(循环流化床锅炉)燃烧系统分别选择了分散、集中多变量及部分分散 3 种控制方案。首先基于模型预测控制的 PID 方法,在分析分散控制结构的基础上设计了分散控制器,并与集中多变量控制器进行比较。结果表明 CFBB 燃烧系统具有较强耦合性,分散控制不能取得较好的效果。为了克服集中控制器结构复杂,参数不宜整定的问题,采用部分分散控制结构对该系统进行调整。在采用 Gramian 方法对模型进行部分分散控制分析基础上,对可选的两种部分分散控制结构进行了控制器设计,并与集中多变量控制进行了比较。结果表明:部分分散控制方法能够取得比分散控制更好的性能,可以达到与集中多变量控制相近的控制性能,而且结构更简单,便于工程实践,具有较好的应用价值。

关 键 词: 循环流化床锅炉; 控制结构; 分散控制; 部分分散控制; 集中控制

中图分类号: TK222 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2016.02.011

引 言

CFBB(循环流化床锅炉)具有锅炉效率高、燃料适应性广、锅炉负荷调节范围宽等优点,其结构复杂,为具有大时滞、参数时变、多变量耦合的控制对象。目前其控制方法主要有智能解耦控制器、自抗扰控制、模糊神经网络、模糊控制等^[1-4]。虽然先进的控制算法可能在仿真研究中得到很好的控制性能,但它们的结构通常很复杂,待整定参数较多,在实践中难以推广。因此 CFBB 燃烧系统设计时应注重实用性问题。

控制系统实用性问题的研究通常包含两方面内容:工业应用级的控制器和简单实用的控制结构。PID 控制器以其简单实用性在工业生产中得到了广泛应用,而对于控制系统结构的分析与设计尚未有共识性的方法。在所有的结构中,分散控制是工程

中最先尝试采用的控制结构,但由于它忽视了系统变量间的耦合,有时并不能满足高性能要求。而完全集中控制尽管能够得到满意的性能,但其结构复杂、维护困难。一种实用的解决办法是采用部分分散控制结构,期望以少量控制器得到与集中多变量控制相似的高性能。目前部分分散控制结构分析方法还较少,主要有 Gramian 方法^[5]和 HIIA 方法^[6]。Gramian 方法是从能控能观性方面进行结构分析;HIIA 方法是与 Gramian 方法相类似的一种交互度量方法。

对于部分分散控制器的设计目前广泛采用的方法都是基于内模原理^[7]。IMC(内模法)不可避免的要涉及到非方系统求逆,并通过引入伪逆因子来解决,使得伪逆因子也成为有待整定参数。本研究采用基于 DMC(动态矩阵控制)的部分分散控制器设计方法,并采用 PID 形式实现。该方法可以有效地避免伪逆因子的引入,而且这种基于 DMC 的 PID 参数整定方法不仅适用于部分分散控制器的调整,也适合分散及集中多变量控制结构。

本研究对文献[8]中提出的循环流化床锅炉燃烧系统模型,分别采用分散、集中多变量及部分分散控制结构进行设计,控制器设计均基于 DMC 的方法,并采用频域降阶的方法转化为工程上广泛应用的 PID 形式来实现。

1 基于模型预测控制的 PID 控制

DMC 作为一种经典的预测控制,既可以处理有时延对象,又可以处理非方对象,因此近年来在电力、化工、钢铁等领域得到广泛应用。由于 DMC 采用滚动优化,在 DCS(分布式控制系统)上不易实

收稿日期: 2014-12-12; 修订日期: 2015-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助(61573138、61174096、61403137); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014MS20、2015MS28)

作者简介: 傅彩芬(1979-),女,辽宁朝阳人,华北电力大学博士研究生。

$$\begin{bmatrix} P(s) \\ T(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{pm} & G_{pv} \\ G_{tm} & G_{tv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M(s) \\ V(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: M —燃料量, kg/s; V —送风量, m^3/s ; P —主蒸汽压力, MPa; T —床层温度, K。 G_{pm} 、 G_{pv} 、 G_{tm} 、 G_{tv} —这些量之间的传递函数, 其具体形式为:

$$\begin{cases} G_{pm} = \frac{K_{p1}}{(1 + T_{p1}s)^3} e^{-\tau_{p1}s}, \\ G_{pv} = \frac{K_{p2}}{(1 + T_{p2}s)^3} e^{-\tau_{p2}s}, \\ G_{tm} = \frac{K_{\theta1}}{(1 + T_{\theta1}s)^3} e^{-\tau_{\theta1}s}, \\ G_{tv} = -\frac{K_{\theta2}}{(1 + T_{\theta2}s)^3} e^{-\tau_{\theta2}s}. \end{cases} \quad (17)$$

T 和 P 控制回路之间存在着较强耦合, 整个系统的时间常数和纯延迟均比较大。

各参数的取值范围为:

$$K_{\theta1} = 5 - 10, T_{\theta1} = 100 - 200 \text{ s}, \tau_{\theta1} = 30 - 60 \text{ s},$$

$$K_{\theta2} = 3 - 5, T_{\theta2} = 80 - 180 \text{ s}, \tau_{\theta2} = 30 - 50 \text{ s},$$

$$K_{p1} = 4 - 6, T_{p1} = 150 - 300 \text{ s}, \tau_{p1} = 60 - 100 \text{ s},$$

$$K_{p2} = 5 - 8, T_{p2} = 80 - 150 \text{ s}, \tau_{p2} = 20 - 40 \text{ s}。$$

本研究取其工况点如表 1 所示。

表 1 循环流化床 3 种工况下的参数列表

Tab. 1 The parameter list of circulating fluidized bed under 3 operating conditions

参 数	数 值		
	F_0	F_1	F_2
$K_{\theta1}$	7.5	10	5
$T_{\theta1}/s$	150	200	100
$\tau_{\theta1}/s$	45	60	30
$K_{\theta2}$	4	5	3
$T_{\theta2}/s$	130	180	80
$\tau_{\theta2}/s$	40	50	30
K_{p1}	5	6	4
T_{p1}/s	225	300	150
τ_{p1}/s	80	100	60
K_{p2}	6.5	8	5
T_{p2}/s	115	150	80
τ_{p2}/s	30	40	20

由表 1 可见, F_1 为各参数取最大值工况, F_2 为各参数取最小值工况。 F_0 为标称情况, 此时被控对

象标称模型为:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{5}{(225s + 1)^3} e^{-80s} & \frac{6.5}{(115s + 1)^3} e^{-30s} \\ \frac{7.5}{(150s + 1)^2} e^{-45s} & \frac{-4}{130s + 1} e^{-40s} \end{bmatrix} \quad (18)$$

这里考虑两种类型实验来分别验证控制系统的动态性能, 解耦性能及鲁棒性能。

(1) 阶跃实验: 标称情况下主蒸汽压力 P 及床层温度 T 对设定值的阶跃响应实验。

(2) 适应性实验: 对工况区间内的最大值工况 F_1 和最小值工况 F_2 进行上述主蒸汽压力 P 及床层温度 T 对设定值的阶跃变化实验。

3 CFBB 燃烧系统的分散与集中多变量控制

3.1 分散控制

首先, 采用基于 RGA 方法对系统进行控制结构分析, 选取合适的分散控制策略。

CFBB 燃烧系统在标称情况下相对增益矩阵为:

$$\text{RGA} = \begin{matrix} & P & T \\ \begin{matrix} M \\ V \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.2909 & 0.7091 \\ 0.7091 & 0.2909 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (19)$$

根据 RGA 配对原则, 系统具有较强耦合。在采用分散控制策略时, 较好的变量配对方案为: 主蒸汽压力 P 由送风量 V 控制, 床层温度 T 由燃料量 M 控制。

采用本研究提出的基于 DMC 的 PID 控制策略, 选取控制器参数为: $T_s = 15$; $N = 100$; $P = 50$; $M = 1$; $q_1 = 1$; $r_1 = 80$; $q_2 = 1$; $r_2 = 1$ 得到的 PID 控制器为:

$$C_1(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0.1213 + \frac{0.00044}{s} + 3.582 \\ 0.08633 + \frac{0.000367}{s} & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3.2 集中多变量控制

由 RGA 分析可知, CFBB 燃烧系统变量间耦合

严重,通常的做法是采用集中多变量控制,因为其考虑了变量之间的耦合,可以期望获得比分散控制优越的性能。

采用本研究提出的基于 DMC 的 PID 控制策略,选取设计参数为: $T_s = 15$; $N = 100$; $P = 50$; $M = 1$; $q_1 = q_2 = 1$; $r_1 = 1$; $r_2 = 80$,得到的 PID 控制器为:

$$C_2(s) = \begin{bmatrix} 0.051 + \frac{0.0001}{s} + 2.499s & 0.1061 + \frac{0.00034}{s} + 2.919s \\ 0.08453 + \frac{0.00029}{s} & -0.01335 - \frac{0.0003}{s} - 1.046s \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.3 方案比较

对以上设计的分散控制器 C_1 及集中多变量控制器 C_2 进行仿真实验比较。以下图中输出幅值量纲为一。

3.3.1 标称性能

标称情况下系统响应曲线如图 2(a)、(b)所示。显然 C_2 比 C_1 具有更好的解耦性能。

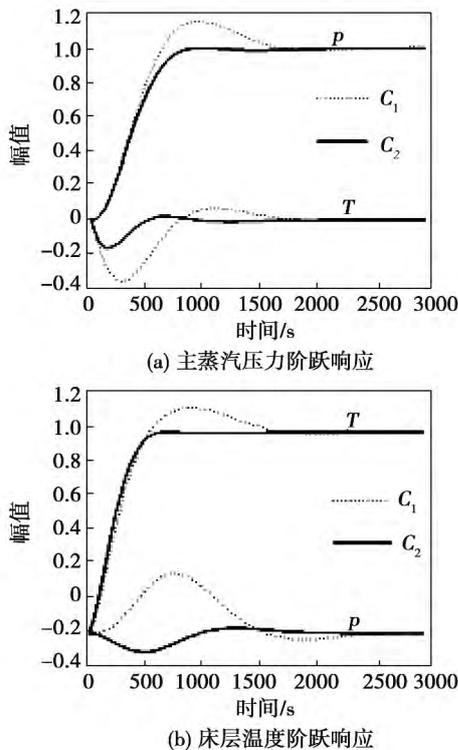


图 2 C_1 和 C_2 在标称工况 F 阶跃响应
Fig.2 Step responses at nominal operating point for C_1 and C_2

3.3.2 鲁棒分析

采用文献 [11] 提出的鲁棒度对所得分散与集中多变量控制器进行分析。结果如图 3 所示,最大值分别小于 3.4 和 2.2,表明以上所设计两个控制系统都具有较好的鲁棒性,且集中控制具有更大的鲁棒性。

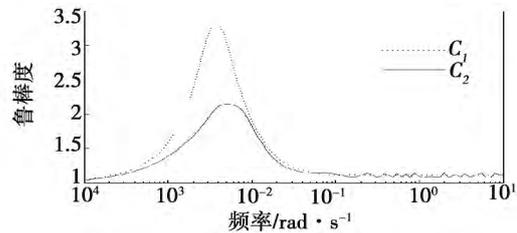


图 3 循环流化床锅炉燃烧系统的两种鲁棒度分析

Fig.3 Robustness measure of the proposed C_1 and C_2 for CFBB combustion system

3.3.3 鲁棒适应性

变工况下的响应曲线如图 4、图 5 所示。可以看出两种控制结构在 F_1 下,响应均出现超调,在 F_2 工况下响应缓慢,响应变化趋势一致。而且极值工况下 C_2 在响应时间、解耦及鲁棒性方面明显优于 C_1 ,与鲁棒度分析的结果一致。

4 CFBB 燃烧系统的部分分散控制

集中多变量控制器 C_2 能取得很好的解耦及动态性能,然而其结构复杂,参数调试及维护困难。为此,本研究将考虑 CFBB 燃烧系统的部分分散控制,这是介于两种极端控制结构之间的一种结构形式。基于 Gramian 分析的变量配对方法是确定部分分散控制结构的简单有效方法。

4.1 Gramian 分析

Gramian 分析是从能控能观性角度合理选择控制结构的一种方法。其分析步骤如下:

- (1) 将一般 MIMO 系统模型转换为状态空间描述式 (A, B, C, D) 。对应于输入 u_i 、输出 y_j 的各子系统状态空间描述为 (A, B_i, C_j^T, D) ,其 Gramian 能控阵 P_i 、Gramian 能观阵 Q_j 分别满足:

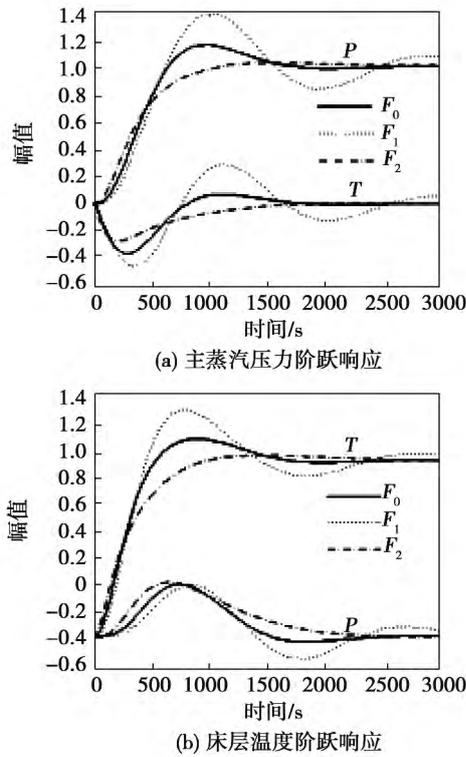


图 4 C_1 在不同工况下阶跃响应

Fig. 4 Step response at different operation conditions for C_1

$$AP_i + P_i A^T + b_i b_i^T = 0 \quad A^T Q_j + Q_j A + c_j c_j^T = 0 \quad (22)$$

式中: b_i — B 的第 i 列; c_j — C^T 的第 j 列。因此 (P_i, Q_j) 表示 (u_i, y_j) 配对子系统的能控能观性,能控能观性越强 配对时应优先考虑。

(2) 定义判别矩阵:

$$\Phi = [\varphi_{ij}] \quad (23)$$

式中:

$$\varphi_{ij} = \frac{\text{trace}[P_i Q_j]}{\text{trace}[PQ]} \quad (24)$$

而 P, Q 为原系统的能控阵、能观阵。

$$PQ = \left(\sum_{i=1}^n P_i \sum_{j=1}^n Q_j \right) = \sum_{i=1}^n P_i Q_i \quad (25)$$

可得:

$$\sum_{i,j=1}^n \varphi_{ij} = 1 \quad (26)$$

基于 Gramian 法的控制结构选取要求选择使对应的 ϕ_{ij} 值总和和尽量接近于 1 的控制结构,从而使选

择控制结构更接近原来的系统。

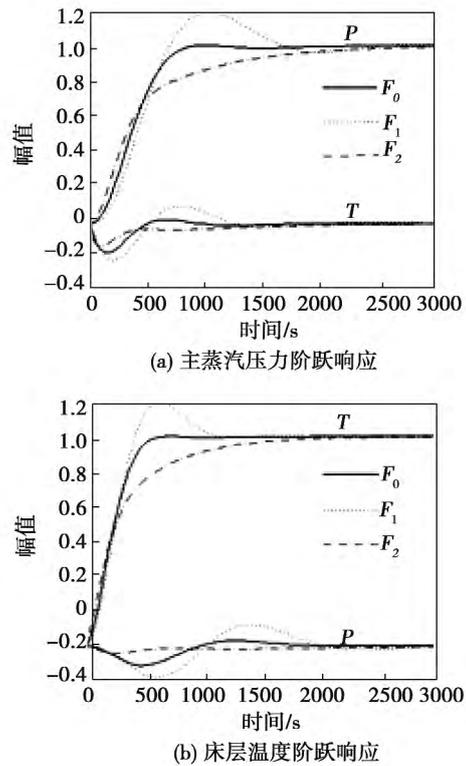


图 5 C_2 在不同工况下阶跃响应图

Fig. 5 Step response at different operation conditions for C_2

4.2 部分分散控制的非方扩展设计

部分分散控制通常采用将被控对象扩展成非方对象进行分散控制(12),以 2×2 系统式(27)为例:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (27)$$

假设所选控制器为:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ 0 & c_{22} \end{bmatrix} \quad (28)$$

则在此控制系统中,控制器输出 u_1 由控制器输入 e_1, e_2 控制,控制器输出 u_2 由控制器输入 e_2 控制。控制器输出 u_1 可分为 u_1^1 和 u_1^2 两部分如式(29)所示:

$$u_1 = c_{11} e_1 + c_{12} e_2 \stackrel{def}{=} u_1^1 + u_1^2 \quad (29)$$

如果把 u_1^1 和 u_1^2 作为独立信号,那么控制器式(29)可以扩展为如下非方分散结构形式如式(30)

所示:

$$C' = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{12} \\ 0 & c_{22} \end{bmatrix} \quad (30)$$

过程对象的输出 y_1 和 y_2 可以表示成如式 (31)

所示:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_1^2 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中 G' 为非方对象, 如式 (32) 所示:

$$G' = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} \quad (32)$$

控制器式 (30) 的设计可转化为式 (32) 的分散控制器设计, 如图 6 所示。

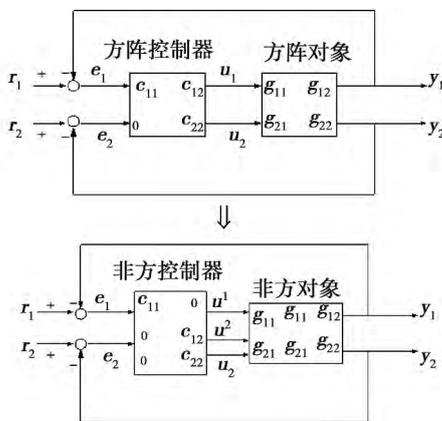


图 6 部分分散控制系统结构图及扩展形式的结构图

Fig. 6 Partially decentralized control system and its equivalent structure

上述扩展步骤可以直接应用于 $n \times n$ 部分分散控制系统设计中。

4.3 基于 DMC 的部分分散控制设计

由于 DMC 可以直接处理非方对象, 所以将其推广应用到部分分散控制系统设计上来(推导过程如本研究第一节), 其推导过程可直接扩展到 n 入 m 出非方系统。相比于分散控制策略, 部分分散更能提高系统的控制性能。

利用 Gramian 方法对式 (17) 进行能控能观性分

析, 其判别阵为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2007 & 0.3282 \\ 0.3790 & 0.0921 \end{bmatrix} \quad (33)$$

因此此时控制系统部分分散控制可选择为:

$$C_3 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & 0 \end{bmatrix} \text{ 或 } C_4 = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (34)$$

相应的对象模型分别为:

$$G_3(s) = \begin{bmatrix} \frac{5}{(225s+1)^3} e^{-80s} & \frac{6.5}{(115s+1)^3} e^{-30s} \\ \frac{7.5}{(150s+1)^2} e^{-45s} & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

或

$$G_4(s) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{6.5}{(115s+1)^3} e^{-30s} \\ \frac{7.5}{(150s+1)^2} e^{-45s} & \frac{-4}{130s+1} e^{-40s} \end{bmatrix} \quad (36)$$

针对 G_3 , 采用基于 DMC 的部分分散控制器设计方法, 选取设计参数为: $T_s = 15; N = 100; P = 50; M = 1; q_1 = 1; r_{1-1} = 80; r_{1-2} = 80; q_2 = 1; r_2 = 1$, 得到的 PID 控制器为:

$$C_3(s) = \begin{bmatrix} 0.02614 + \frac{0.000068}{s} & 0.1213 + \frac{0.000444}{s} + 3.582s \\ 0.08641 + \frac{0.000312}{s} & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

针对 G_4 , 采用基于 DMC 的部分分散控制器设计方法, 选取设计参数为: $T_s = 15; N = 100; P = 50; M = 1; q_1 = 1; r_1 = 80; q_2 = 1; r_2 - 1 = 1; r_2 - 2 = 50$, 得到的 PID 控制器为:

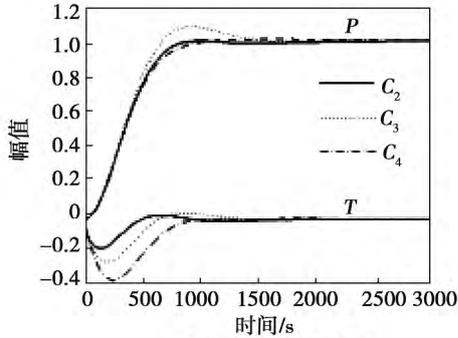
$$C_4(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0.1081 + \frac{0.00036}{s} + 3.872s \\ 0.08633 + \frac{0.000367}{s} & -0.01238 - \frac{0.000267}{s} \end{bmatrix} \quad (38)$$

4.4 仿真实验

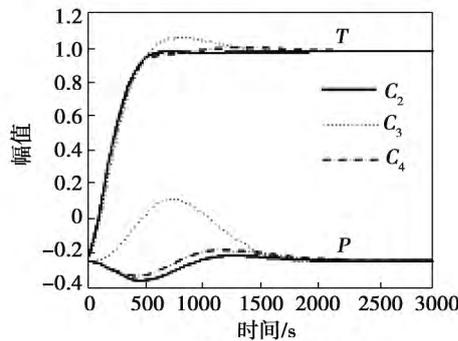
为便于比较说明, 针对 CFBB 燃烧系统控制问题, 采用本研究所得的部分分散控制器 C_3 、 C_4 与集中多变量控制器 C_2 进行仿真实验比较。

4.4.1 标称性能

系统响应如图 7 (a)、(b) 所示。可以看出采用部分分散控制下的 CFBB 燃烧系统响应无论从解耦效果还是从调节时间来看,都优于分散控制情况,而且 C_4 优于 C_3 ,与集中多变量控制下的响应结果更接近。



(a) 主蒸汽压力阶跃响应



(b) 床层温度阶跃响应

图 7 C_2 、 C_3 和 C_4 标称工况 F 阶跃响应曲线

Fig. 7 Step responses at nominal operating point for C_2 , C_3 and C_4

4.4.2 鲁棒分析

采用文献 [11] 中提出的鲁棒度对所得部分分散控制器进行分析,如图 8 所示。可以看到最大值分别小于 3 和 2.5,这意味着以上所设计两个控制系统都具有较好的鲁棒性,且 C_4 更强。

4.4.3 鲁棒适应性

变工况下采用部分分散控制的响应结果分别如图 9、图 10 所示。可以看出在 F_1 下,响应均出现超调,在 F_2 情况下均响应缓慢。与两种极端控制情况下变化趋势一致。特别是 C_4 在响应时间、解耦及鲁棒性方面均优于 C_3 ,与 C_2 控制效果接近,与鲁棒度分析的结果一致。

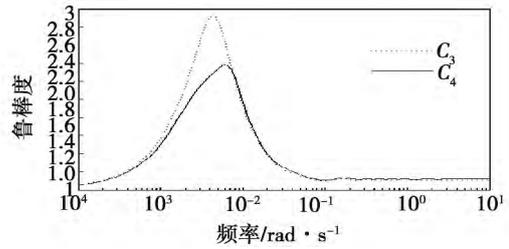
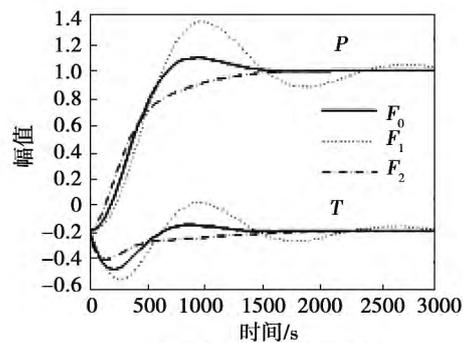
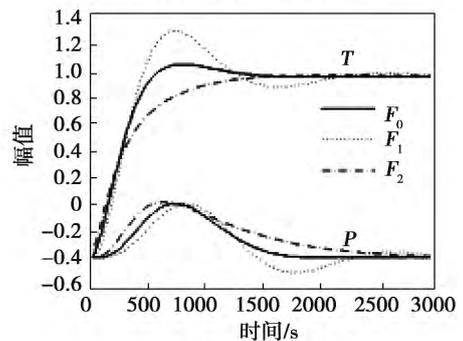


图 8 循环流化床锅炉燃烧系统的部分分散控制器的鲁棒度曲线

Fig. 8 Robustness measure of the proposed PDC for CFBB combustion system



(a) 主蒸汽压力阶跃响应



(b) 床层温度阶跃响应

图 9 C_3 在不同工况下阶跃响应曲线

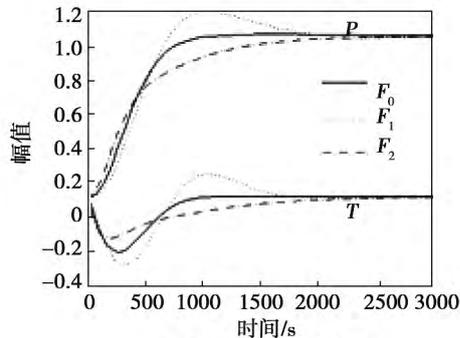
Fig. 9 Step response at different operation conditions for C_3

仿真实验表明,采用基于 DMC 设计的部分分散 PID 控制器具有良好的鲁棒性、适应性和解耦特性。

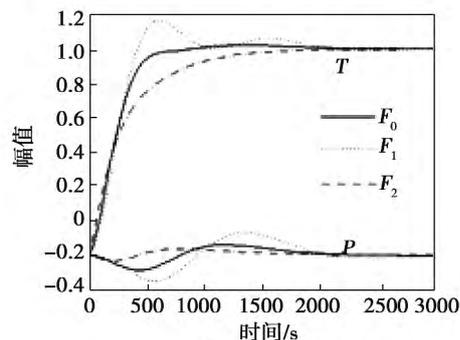
5 结 论

本研究针对强耦合、大时滞多变量循环流化床锅炉燃烧系统模型,采用分散、集中多变量及部分分

散 3 种控制结构进行了分析设计。仿真实验结果表明部分分散控制系统比分散控制更好的动态性能。相比于集中多变量控制结构,部分分散控制结构能够取得相近性能,且结构简单,便于工程实践,具有较好的应用价值。



(a) 主蒸汽压力阶跃响应



(b) 床层温度阶跃响应

图 10 C_4 在不同工况下阶跃响应曲线Fig. 10 Step response at different operation conditions for C_4

参考文献:

- [1] 王万召,王红阁,谭文. 智能解耦控制器在循环流化床锅炉燃烧系统中的应用[J]. 动力工程, 2009, 29(8): 757-760.
WANG Wan-zhao, WANG Hong-ge, TAN Wen. Application of intelligent decoupling controller in circulating fluidized bed boiler combustion system [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(8): 757-760.
- [2] 席学军,姜学智,李东海,等. 循环流化床锅炉燃烧系统的自抗扰控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(11): 1575-1579.
XI Xue-jun, JIANG Xue-zhi, LI Dong-hai, et al. Auto disturbance rejection control for circulating fluidized bed boiler combustion system [J]. Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2004, 44(11): 1575-1579.
- [3] 黄博南. 循环流化床锅炉燃烧系统的模糊神经网络控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
HUANG Bo-nan. Research on fuzzy neural network control in combustion system of circulating fluidized bed boiler [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [4] 陈明淑. 模糊控制在循环流化床锅炉燃烧系统中的应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
CHEN Ming-shu. Fuzzy control applications in the combustion system of circulating fluidized bed boilers [D]. Xian University of Architecture and Technology, 2013.
- [5] Conley A, Salgado M E. Gramian based interaction measure [C]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, 2000: 12-15.
- [6] Salgado ME, Conley A. MIMO interaction measure and controller structure selection. International Journal of Control, 2004, 77(4): 367-83.
- [7] Lee TK, Shen JX, Chiu MS. Independent design of robust partially decentralized controllers [J]. Journal of Process Control, 2001, 11: 419-428.
- [8] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 43-52.
XI Yu-geng. Predictive control [M]. Beijing: National defense industry press, 1993: 43-52.
- [9] Tan W. Tuning of PID load frequency controller for power systems [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50: 1465-1472.
- [10] 牛培峰. 国产驯化流化床锅炉燃烧过程动态控制模型[J]. 华东电力, 2000, 19(12): 54-57.
NIU Pei-feng. Dynamic control model of combustion process for circulating fluidized bed boilers of domestic manufacture [J]. East China Electric Power, 2000, 19(12): 54-57.
- [11] Tan W, Chen T, Marquez HJ. Robust controller design and PID tuning for multivariable processes [J]. Asian Journal of Control, 2002, 4(4): 439-451.

(刘瑶 编辑)

trifugal pump at shut off condition and can improve the efficiency of the pump to a certain extent. The radial force distribution of impeller and volute is periodic. In $\delta_2 = 10$ mm scheme ,the overall distribution and peak of volute radial force are relatively desirable ,outperforming the other two schemes. In $\delta_2 = 5$ mm scheme ,the overall distribution and peak of impeller radial force under three operating conditions are better than the other two schemes. The increase in blade outlet actual thickness will escalate the Von Karman vortex effect at impeller outlet ,and also result in evident secondary fluctuations in the monitoring point pressure ,volute and impeller radial forces. **Key words:** Ultra-low Specific-speed Centrifugal Pump ,blade thickness ,radial force ,numerical simulation

正交面齿轮副动力学仿真及疲劳寿命分析 = **Dynamic Simulation and Fatigue Life Analysis of Orthogonal Face Gear Pair** [刊 汉]LEI Jian-bo (Navy Chongqing Bureau ,Chongqing ,China ,Post Code: 402263) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2) . -199 -205

Based on the theory of gear meshing theory ,both tooth face and tooth root equations of face gear were deduced. The solid and assembly models of face gear were generated through Matlab ,Imageware and UG. By constructing and solving rigid-body dynamics model in Adams program ,the transient contact force of face gear pair was obtained ,and used as fatigue load spectrum. Then the fatigue life and safety factor of face gear was obtained in FE-SAFE by using maximum principle stress algorithm and S-N curves of face gear calculated based on GL criterion and stress-strain of gear pair under static load. And also studied were the effects of tooth surface roughness and stress concentration factor on fatigue life of face gear. The results indicate that the fluctuation of transient contact force of face gear pair exceeds 50 percent of theoretical value ,and the life of face gear extends with the decreases in tooth surface roughness and stress concentration factor. Fatigue life decreases rapidly with a larger tooth surface roughness ,and is sensitive to stress concentration factor. **Key words:** meshing theory ,face gear ,load spectrum ,fatigue life

循环流化床锅炉燃烧系统的控制研究 = **Analysis and Design for Circulating Fluidized Bed Boiler Combustion Control System** [刊 汉]FU Cai-fen ,TAN Wen (School of Control & Computer Engineering ,North China Electric Power University ,Beijing 102206 ,China) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2) . -206 -213

This paper investigated the decentralized ,centralized ,and partially decentralized control structures for circulating

fluidized bed boiler (CFBB) combustion system. A PID design method was first proposed based on model predictive control method, and then a decentralized PID controller was designed after RGA analysis. Compared to centralized PID controller, the decentralized controller is inferior in decoupling and robustness performance. To overcome the difficulty in implementation and tuning of centralized controller, partially decentralized controllers were designed. Two partially decentralized control structures were determined based on Gramian method, and the corresponding performance and robustness were compared with both centralized and decentralized controllers. Simulation results show that partially decentralized controllers are superior to the decentralized one and also can achieve comparable performance as the centralized one. Furthermore, it has a simpler structure and is easier to implement and tune, and thus more applicable in practice. **Key words:** circulating fluidized bed boiler (CFBB) analysis and design, decentralized control, partially decentralized control, centralized control

关于过滤燃烧非平衡性和火焰结构特性的研究 = **Study on the Non-equilibrium and Flame Structure Characteristics of Filtration Combustion** [刊, 汉] GU Cong-wei, SHI Jun-rui, LI Zhi, XIA Yong-fang (Key Laboratory of Clean Combustion for Electric Generation & Heating Technology of Liaoning Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning, Post Code: 110136) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(2). - 214 - 219

In order to study the premixed combustion characteristics and flame structure of filtration combustion in a packed bed of pellets, a simplified two-dimensional model for porous media was established. The effect of the heat transfer of gas-solid convection and solid radiation in porous media during combustion process were taken into account, after the flame propagation speed and temperature distribution in the packed bed were obtained and examined. The chemical reaction rates were then used to represent flame structure characteristics and propagation speeds in the pores, and the predicted flame speeds were validated by experimental results and a satisfying agreement was achieved. The simulation results show evident nonequilibrium in the reaction zone of filtration combustion, and a large difference between gas and solid temperatures in the reaction zone. Furthermore, the thermal nonequilibrium even exists within pellet. Gas velocity and equivalence ratio have significant effects in flame structures. Increase in the gas velocity leads to the increased bending of flame front, which has clearly parabolic shape. The flame structure, however, becomes more regular with equivalence ratio. **Key words:** filtration combustion, flame front, porous media, flame propagation, nonequilibrium