

火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法

李益国¹, 沈 炯¹, 薛景岩², 吕震中¹

(1. 东南大学 动力系, 江苏 南京 210096; 2. 中国电能成套设备有限公司, 北京 100011)

摘 要: 提出一种火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法。该方法首先对负荷区间进行模糊划分, 然后在每个模糊子区间建立相应的结构参数摄动模型, 并使用鲁棒预见控制方法设计控制器, 最后总的控制量为多个子控制器输出的加权平均。仿真研究表明, 该方法能够使负荷系统获得良好的全局控制性能。

关 键 词: 多模型控制; 保性能控制; 预见控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TK323; TM621.4 文献标识码: A

1 引 言

目前, 由于电网峰谷差日益增大, 大多数大、中型机组不得不承担调峰任务, 机组的的负荷增减相当频繁, 从而引起机组动态特性的大范围、快速变化。常规的自适应控制方法, 由于辨识器难以跟随系统参数的实际变化, 因此往往导致控制器性能不佳。

多模型方法是解决上述问题的一种有效方法^[1~2], 它首先在若干典型的工作点建立多个固定模型, 并设计相应的控制器; 而在运行过程中根据系统工况变化选择相应的控制器输出, 以达到满意的控制效果。但是该方法存在固定模型的选取问题, 模型选择得太少, 调节效果不够理想; 而选择得太多, 则针对每个模型设计控制器, 大大增加了计算量和系统的复杂性。

针对上述问题, 同时为进一步有效提高火电机组的负荷跟踪性能, 本文提出一种多模型鲁棒负荷预见控制方法。该方法通过对负荷区间进行模糊划分, 并在每个模糊子区间使用鲁棒预见控制方法设计控制器, 从而有效的减少了控制器的数量。仿真研究表明, 该方法能够使负荷系统获得良好的全局控制性能。

文中首先介绍鲁棒预见控制方法, 它是实现整个算法的关键; 然后结合多模型控制的思想, 提出了

火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法; 最后进行了仿真研究。

2 鲁棒预见控制方法

鲁棒预见控制方法的基本思想是: 采用奇异值分解将不同工作点得到的系统线性模型, 统一变换为一个具有范数限制的结构参数摄动模型; 针对该模型, 引入最优保性能控制的思想折衷处理稳定性和性能鲁棒性问题, 最后, 鲁棒预见控制器设计归结为求解线性矩阵不等式约束下的凸优化问题。

2.1 不确定离散系统的最优保性能控制问题

线性二次型最优控制理论揭示了一个适当的二次型性能指标可以反映系统的许多性能要求, 但是线性二次型最优控制理论是建立在被控对象精确模型的基础上, 其结果对模型参数不确定性的鲁棒性很差。为此 Chang 和 Peng 提出了不确定系统的保性能控制问题, 其主要思想是对具有参数不确定性的系统, 设计一个控制律, 不仅使得闭环系统稳定, 而且使得闭环系统的性能不超过某个确定的上界。由于适应了工程控制的需要, 这种控制方法一直受到许多研究者的关注^[3~4]。

考虑以下状态方程描述的不确定离散系统:

$$x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) \quad (1)$$

式中: $x(k)$ 为 $n \times 1$ 维状态向量; $u(k)$ 为 $m \times 1$ 维输入向量; $A(n \times n)$ 、 $B(n \times m)$ 分别为相应的系数矩阵; ΔA 、 ΔB 为适当维数的不确定矩阵, 并假定:

$$[\Delta A \quad \Delta B] = DF[E_1 \quad E_2] \quad (2)$$

式中: D 、 E_1 、 E_2 是适当维数的常数矩阵, 它们反映了不确定性的结构; F 为满足 $F^T F \leq I$ 的未知矩阵。

对式(1)定义如式(3)的性能指标:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)\} \quad (3)$$

式中: Q, R 是给定的加权矩阵。

定义[3]: 对式(1)和式(3), 若存在一个矩阵 $K \in R^{m \times n}$ 和一个对称正定矩阵 $P \in R^{n \times n}$, 使得对所有非零的 $x(k) \in R^n$ 和所有满足 $F^T F \leq I$ 的 F , 式(4)成立, 则控制律 $u(k) = Kx(k)$ 称为式(1)的一个具有性能矩阵 P 的保性能控制律。

$$x^T(k)[A + BK + DF(E_1 + E_2K)]^T P[A + BK + DF(E_1 + E_2K)]x(k) - x^T(k)Px(k) + x^T(k)(Q + K^T R K)x(k) < 0 \quad (4)$$

2.2 不确定离散系统的最优保性能控制的改进

目前, 关于不确定系统的保性能控制问题的研究大多局限于连续系统。文献^[3]对不确定离散系统的最优保性能控制问题进行了研究, 并给出了系统最优保性能控制律的设计方法, 但是该方法要求性能指标中的加权矩阵必须都是正定的, 这在一定程度上限制了其结果的应用。

通过分析保性能控制与二次稳定以及和闭环性能指标之间的关系, 我们发现性能指标中的加权矩阵只需要半正定, 而不要求必须正定; 并给出和证明了性能指标中的加权矩阵为半正定时最优保性能控制律的设计方法, 即定理 1。定理 1 的详细分析和证明见文献[5]。

定理 1^[5]: 对于式(1)和式(3), 如果以下的优化问题

$$\begin{aligned} \min_{\epsilon, X, S, W} Z &= tr(S) \\ s. t. & \begin{bmatrix} \Phi D^T - X & AX + BW & 0 & 0 & 0 \\ (AX + BW)^T & -X & (E_1 X + E_2 W)^T & XQ^{\frac{1}{2}} & WR^{\frac{1}{2}} \\ 0 & E_1 X + E_2 W & -I & 0 & 0 \\ 0 & Q^{\frac{1}{2}} X & 0 & -I & 0 \\ 0 & R^{\frac{1}{2}} W & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} X & I \\ I & S \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

有一个最优解 (ϵ, S, X, W) , 则 $u(k) = WX^{-1}x(k)$ 是系统的最优保性能控制律, 相应闭环系统的保性能 $J^* = tr(X^{-1})$ 。

2.3 鲁棒负荷预见控制方法的推导

设被控过程可以用以下带不确定性参数的离散状态方程描述:

$$\begin{cases} x(k+1) = (A + \Delta A)x(k) + (B + \Delta B)u(k) \\ y(k) = (C + \Delta C)x(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $x(k)$ 为 $n \times 1$ 维状态向量; $y(k)$ 为 $m \times 1$ 维输

出向量; $u(k)$ 为 $r \times 1$ 维输入向量; $A(n \times n)$ 、 $B(n \times r)$ 、 $C(m \times n)$ 分别为相应的系数矩阵; ΔA 、 ΔB 、 ΔC 为适当维数的不确定矩阵。假定系统可控、可观测, 并设 $r \geq m$ 。

为通过引入保性能控制提高预见控制的鲁棒性, 并能够利用定理 1 的结果, 需对式(6)进行一定的变形。

设目标值为 $r(k)(m \times 1)$, 定义 $e(k) = r(k) - y(k)$; $\Delta x(k) = x(k+1) - x(k)$;

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k+1) - u(k); \Delta r(k) \\ &= r(k+1) - r(k), \text{ 可得:} \\ \Delta x(k+1) &= (A + \Delta A)\Delta x(k) + (B + \Delta B)\Delta u(k) \end{aligned} \quad (7)$$

$$e(k+1) = e(k) - (C + \Delta C)\Delta x(k) + \Delta r(k) \quad (8)$$

假设从当前时刻开始到未来 M_R 步的目标值信号为已知, 超过 M_R 步的目标值信号用 M_R 步的目标值信号来近似, 即:

$$r(k+i) = r(k+M_R), i \geq M_R + 1 \quad (9)$$

定义如式(10)的二次型性能指标:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ e^T(k)Q_e e(k) + \Delta u^T(k)H\Delta u(k) \right\} \quad (10)$$

式中: Q_e, H 为正定加权矩阵。

根据式(9), 定义如下向量:

$$x_r(k) = [\Delta r^T(k), \Delta r^T(k+1) \dots \Delta r^T(k+M_R - 1)]^T \quad (11)$$

由式(11)可得:

$$x_r(k+1) = A_r x_r(k) \quad (12)$$

$$\text{式中: } A_r = \begin{bmatrix} 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & \\ & & \ddots & I \\ 0 & \dots & & 0 \end{bmatrix} \in R^{(m \times M_R) \times (m \times M_R)}$$

定义如下, 新的状态向量:

$$\xi(k) = [e^T(k) \Delta x^T(k) x_r^T(k)]^T \quad (13)$$

由式(7)、(8)和(12)可得:

$$\xi(k+1) = (M + \Delta M)\xi(k) + (N + \Delta N)\Delta u(k) \quad (14)$$

$$\text{式中: } M = \begin{bmatrix} \Phi & G_{PR} \\ 0 & A_r \end{bmatrix}; \Delta M = \begin{bmatrix} \Delta \Phi & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; N = \begin{bmatrix} 0 \\ B \\ 0 \end{bmatrix}; \Delta N = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta B \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} I & -C \\ 0 & A \end{bmatrix}; \Delta\Phi = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta C \\ 0 & \Delta A \end{bmatrix};$$

$$G_{PR} = \begin{bmatrix} I_m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta M \quad \Delta N] = D'F'[E'_1 \quad E'_2], \text{ 其中, } F'F' \leq I$$

$$\text{设 } Q_1 = \begin{bmatrix} Q_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ 则二次型性能指标 (10)}$$

可以表示为式(15)的形式:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \xi^T(k) Q_1 \xi(k) + \Delta u^T(k) H \Delta u(k) \right\} \quad (15)$$

因此对象(6)在性能指标(10)下的最优预见控制问题可以转化为增广对象(14)在性能指标(15)下的最优预见控制问题。

利用定理 1, 可得以下关于鲁棒预见控制设计方法的定理 2。

定理 2: 对于对象(6)及性能指标(10), 假设 \$(\epsilon, S, X, W)\$ 是优化问题(16)的最优解, \$\min_{\epsilon, S, X, W} Z = \text{tr}(S)\$

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} \epsilon D^T - X & MX + MW & 0 & 0 & 0 \\ (MX + MW)^T & -X & (E'1X + E'2W)^T & XQ1^{\frac{1}{2}} & W^{\frac{1}{2}} \\ 0 & E'1X + E'2W & -\epsilon I & 0 & 0 \\ 0 & Q1^{\frac{1}{2}} X & 0 & -I & 0 \\ 0 & \frac{1}{H^2} W & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \\ \text{s. t.} \end{matrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & S \end{bmatrix} > 0$$

则可得以下鲁棒预见控制算法:

$$u(k) = K_x x(k) + K_e \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + \sum_{i=1}^{M_R} (i)r \times (k+i-1) \quad (17)$$

$$K = [K_e \quad K_x \quad K_r(1) \cdots K_r(M_R)] = WX^{-1} \quad (18)$$

由定理 2 可以看出鲁棒预见控制器由三部分组成: 第一部分为状态反馈; 第二部分是对跟踪误差信号的积分项, 用于保证受控信号与目标值的稳态偏差为 0; 第三部分为基于未来目标值信号的预见前馈补偿项。

鲁棒预见控制方法结构图如图 1 所示。

2.4 基于奇异值分解确定模型结构不确定性的有关描述参数

由定理 2 看出, 实现鲁棒预见控制的关键在于

求解线性矩阵不等式约束下的优化问题(16), 而要求解该问题必须首先确定模型结构不确定性的有关描述参数 \$D', E'_1, E'_2\$。本文采用文献[6]提出的基于奇异值分解的方法。

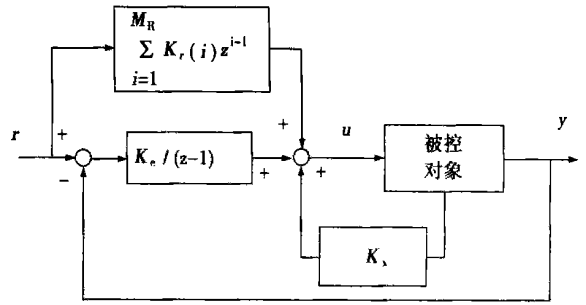


图 1 鲁棒预见控制方法结构图

3 多模型鲁棒负荷预见控制方法

分析单元机组动态特性变化的原因, 大致可以分为两类: 一类为与机组负荷无关的因素, 如煤种、煤质的变化以及结焦、结垢等。这一类因素引起机组动态特性的变化较慢, 变化幅度也较小; 而另一类则与机组负荷密切相关, 如蒸汽流量, 调节阀开度等。由于第二类因素均属系统的状态量或控制量。由此引起的参数变化是快速的, 变化幅度也较大。因此引起机组参数变化的主要原因是负荷及其相关量。为此对负荷区间进行以下模糊划分, 提出一种多模型鲁棒负荷预见控制方法。其步骤如下:

(1) 把整个负荷区间分为低负荷(L)、中低负荷(ML)、中负荷(M)、中高负荷(MH)、高负荷(H)5个相交的模糊子区间, 如图 2 所示。

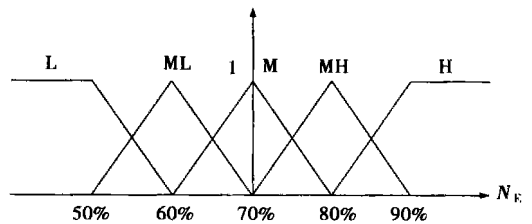


图 2 负荷区间划分示意图

(2) 在每个子区间中, 分别以 50% ~ 90% 负荷时的系统模型为标称模型, 另外选取附近负荷点模型作为参数摄动, 根据第 2 节提出的鲁棒预见控制方法设计控制器 \$u_L(k), u_{ML}(k), u_M(k), u_{MH}(k)\$ 和 \$u_H(k)\$。对于强非线性的负荷系统, 可以适当增加子区间的个数, 在每个子区间中也可以适当多选取几个负荷点模型作为参数摄动模型。

(3) 总的控制量 $u(k)$ 为:

$$u(k) = m_1 u_L(k) + m_2 u_{ML}(k) + m_3 u_M(k) + m_4 u_{MH}(k) + m_5 u_H(k) \quad (19)$$

式中: $\sum_{i=1}^5 m_i = 1$; m_i 为负荷模型对 5 个模糊子区间的隶属度。

多模型鲁棒负荷预见控制方法的本质是将全局非线性系统通过模糊划分建立多个简单的结构参数摄动模型, 对每个结构参数摄动模型再分别利用鲁棒预见控制算法设计控制器, 最后总的控制量为这多个子控制器输出的加权平均, 从而保证了控制器的平稳切换, 并能获得良好的全局控制性能。

4 仿真研究

以某 300 MW 直流再热机组为研究对象。假定模型参数由负荷完全确定, 且随负荷作线性变化, 文献 [7] 得到以下对象在不同的负荷工作点上的变参数模型:

$$\begin{bmatrix} N_E \\ P_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{NT}(s) & W_{NB}(s) \\ W_{PT}(s) & W_{PB}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_T \\ u_B \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中:

$$W_{NT}(s) = (-5.924 + 10.607L)s[1 + (263.5 - 164.5L)s] / [1 + (16.7 + 33.3L)s + (74.7 - 16.7L)^2 s^2] [1 + (-0.6 + 4.7L)s]$$

$$W_{PT}(s) = (0.553 - 1.973L)[1 + (-3.3 + 6.1L)s / 1 + (160 - 90L)s]$$

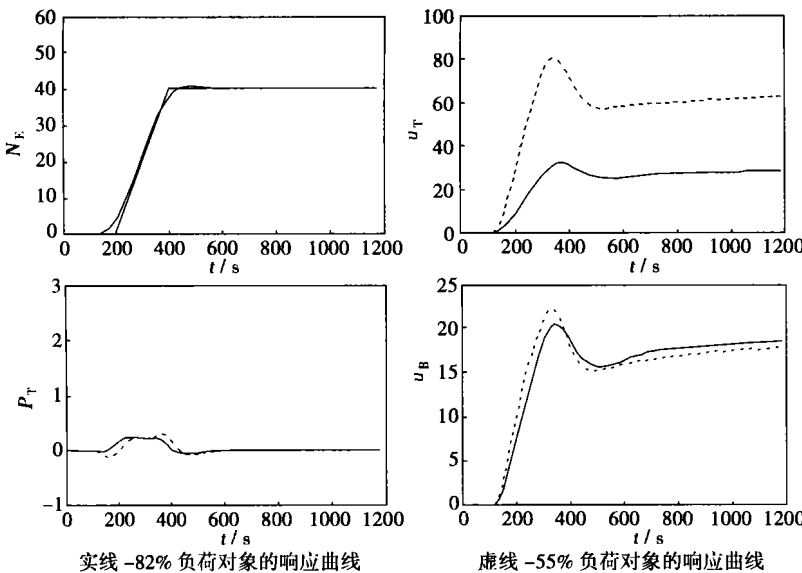


图 3 多模型鲁棒负荷预见控制在不同负荷工作点的响应曲线

$$W_{NB}(s) = (2.226 - 0.157L) \times [1 + (797.7 - 486.7L)s] / \{ [1 + (389 - 240L)s]^2 [1 + (20.4 + 2L)s] \}$$

$$W_{PB}(s) = (2.545 - 1.28L) \times [1 + (438.3 - 233.3L)s] / \{ [1 + (261.3 - 133.3L)s]^2 [1 + (11.03 + 0.67L)s] \}$$

式中: N_E 、 P_T 分别为发电机实发功率(MW)及汽轮机机前主蒸汽压力 (10^{-1} MPa); u_T 、 u_B 分别为汽轮机调门指令(%)和锅炉燃烧率指令 t/h, L 为实际输出功率与额定功率之比, 即 $L = N/300$ 。

针对被控对象 (20), 分别以 50% ~ 90% 负荷的系统模型为标称模型, 另外分别选取 (40%, 60%)、(50%, 70%)、(60%, 80%)、(70%, 90%)、(80%, 100%) 的模型作为参数摄动, 根据第 2 节提出的鲁棒负荷预见控制方法分别设计控制器 $u_L(k)$ 、 $u_{ML}(k)$ 、 $u_M(k)$ 、 $u_{MH}(k)$ 和 $u_H(k)$, 相关参数设置为: 采样周期 $T = 20$ s, 预见步数 $M_R = 4$, 权矩阵 $Q_e = \text{diag}\{1, 10\}$, $H = \text{diag}\{1, 10\}$ 。以低负荷(L) 模糊子区间为例, 可以求得:

$$K_{eL} = \begin{bmatrix} 1.3938 & -3.7991 \\ 0.6048 & 0.5187 \end{bmatrix};$$

$$K_{xL} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0270 & -0.0120 & -0.3899 & -0.0988 & \dots \\ 0 & -0.0096 & -0.0046 & 0.0295 & -0.0406 & \dots \\ -0.6727 & -0.0702 & 0.0554 & 0.6961 & & \\ -0.2454 & -0.0258 & -0.0075 & -0.0441 & & \end{bmatrix};$$

$$K_{rL} = \begin{bmatrix} 1.3938 & -3.7991 & 1.4620 & -2.4889 & \dots \\ 0.6048 & 0.5187 & 0.5693 & 0.3337 & \dots \\ 1.3454 & -1.3358 & 1.1029 & -0.6721 & \dots \\ 0.4582 & 0.0457 & 0.3642 & -0.1348 & \dots \end{bmatrix}$$

利用以上结果, 采用多模型鲁棒负荷预见控制方法, 分别针对 55% 负荷模型和 82% 负荷模型进行仿真试验。

$$u_{55\%}(k) = 0.5u_L(k) + 0.5u_{ML}(k);$$

$$u_{82\%}(k) = 0.8u_{MH}(k) + 0.2u_H(k);$$

假设 $t = 200$ s 时, 负荷预发曲线以每分钟 4% 满负荷的速率上升 40 MW(仅为说明多模型鲁棒预见控制方法的有效性)。仿真曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 采用多模型鲁棒负荷预见控制方法, 对不同负荷工作点(55% 负荷和 82% 负荷)的负荷对象都取得了令人满意的控制效果, 功

率的跟踪速度较快,并使机前压力的变化较小。另外,由于采用了预见前馈补偿(预见信息是作为前馈补偿使用的,因此不影响整个系统的稳定性),使锅炉燃率提前动作,有效地补偿了锅炉的延迟和惯性;同时使汽轮机调门提前动作,充分利用了机组的内部蓄热,从而大大提高火电机组的负荷跟踪性能。与现有的火电单元机组负荷控制方法相比,该方法在负荷跟踪性能上具有明显的优点。

5 结 论

多模型鲁棒负荷预见控制方法通过对负荷区间进行模糊划分,然后在每个模糊子区间使用鲁棒预见控制方法设计控制器。由于每个鲁棒预见控制器都可以兼顾标称模型及其附近的多个线性模型,从而有效地减少了控制器的数量,降低了多模型方法中模型选择问题的难度。通过仿真研究可以看出,

该方法能够使负荷系统在全局范围内都获得良好的跟踪性能。

参考文献:

[1] 王东风, 翟永杰. 多模型自适应广义控制及其在电厂汽温系统中的应用仿真[J]. 工业仪表与自动化装置, 2001(1): 34-39.
 [2] 袁向阳, 施颂椒. 一种多模型自校正控制算法及其在醋酸蒸发器液位控制中的应用[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 187-192.
 [3] 俞立. 不确定离散系统的最优保性能控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 639-642.
 [4] 薛安克, 孙优贤. 不确定线性系统保代价控制的鲁棒分析[J]. 自动化学报, 2001, 27(3): 346-352.
 [5] 李益国, 沈炯, 吕震中. 不确定离散系统最优保性能控制的改进[J]. 东南大学学报, 2002 32(3): 424-426.
 [6] 吕跃飞, 黎中伟. 航空发动机多变量 PI 型鲁棒控制器[J]. 航空学报, 1997, 18(4): 412-416.
 [7] 胡克定, 汪自勤, 钱钟韩. 单元机组协调控制的一种频域设计方法[J]. 东南大学学报, 1989 19(1): 69-77.

(渠源 编辑)

(上接第 136 页)

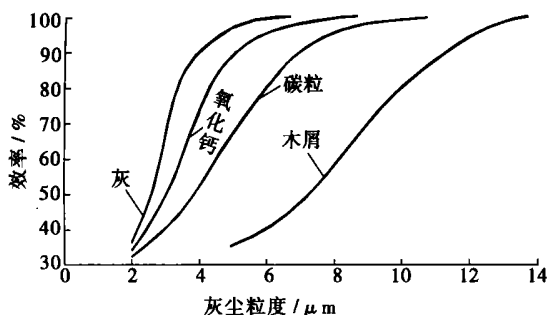


图 8 颗粒密度、粒径与除尘效率变化关系

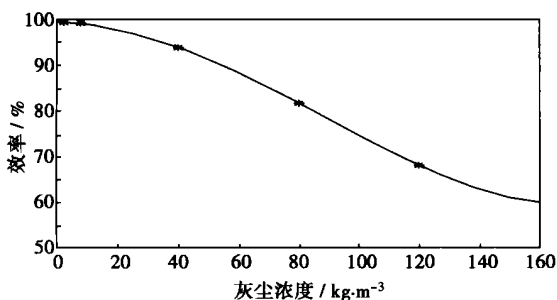


图 9 灰尘浓度与除尘效率变化关系

图 9 为气流中含尘浓度对除尘效率的影响,当含尘浓度较大时,由于在环栅处空气对灰尘颗粒的轴向携带能力减弱,颗粒惯性减弱,使得除尘效率下降。

我们在理论计算的基础上,开发出了阻力较小、除尘效率高的 CRM-250A 型环栅式动力除尘器。

实验室的测定结果表明,该型除尘器具有理想的除尘效果。实验用灰包括燃烧热电厂烟道粉尘,玉米粉及卷烟厂灰等。

3 结 语

环栅式动力除尘器作为一种惯性除尘器,在对其进行结构参数的优化设计后,可具有较高的除尘效率,同时具有结构简单、阻力低的优点。运用现代流体力学计算技术对其进行两相流数值模拟,是进行优化设计的必备和有效手段。

参考文献:

[1] FASHOLA A ADENIJI, CHEN C P. Modeling of confined turbulent fluid particle flows using eulerian and lagrangian schemes[J]. Int J Heat Mass Transfer. 1990, 33(4): 691-701.
 [2] 周力行. 气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学技术出版社, 1994.
 [3] 刘大有. 二相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
 [4] SHANG H M. Numerical studies of droplet turbulence interactions[J]. Appl Math Comput 1994, 65(1-3): 63-78, 15.
 [5] 张殿印, 张学义. 除尘技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
 [6] 谭天佑, 梁凤珍. 工业通风除尘技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

(渠源 编辑)

火电机组负荷多模型鲁棒预见控制方法 = **Multi-model Robust Forecast Control of Thermal Power Plant Loads** [刊, 汉] / LI Yi-guo, SHEN Jiong, LU Zhen-zhong (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), XUE Jing-yan (China Power Complete Equipment Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100011) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 186 ~ 190

A multi-model robust forecast control method is presented for the load control of thermal power plants. Under this method at first the fuzzy division of a load zone is conducted. Then, in each fuzzy sub-zone a corresponding structural-parameter perturbation model is set up, and a controller designed by using a robust forecast control method. The total control quantity is a weighted average of the output of these individual sub-controllers. Simulation results indicate that the above method makes it possible to let the load system obtain a good overall control performance. **Key words:** multi-model control, guaranteed performance control, forecast control, linear matrix inequalities

叶片数量和一次风率对双调风旋流燃烧器流场的影响 = **The Impact of the Blade Quantity and Primary-air Flow Rate on the Flow Field of a Dual-register Vortex Burner** [刊, 汉] / CHEN Zhi-chao, LI Zheng-Qi, SUN Rui (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), GAI Jian-yong (Xibaipao Power Generation Co. Ltd., Shijiazhuang, China, Post Code: 050021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 191 ~ 194

On a cold-state test rig and two 1025t/h boilers a cold-state test was conducted of the aerodynamic characteristics of a dual-register vortex burner with the use of a isothermal modeling method. The results of the test indicate that the ratio between the maximum diameter and length of the recirculation zone of the above-mentioned burner (which has 12 inner secondary air blades) on the one side and the outermost layer diameter on the other side is respectively higher than 1.38 and 1.48. The expansion angle is found to be greater than 80° . This results in a suction of sufficient high-temperature gas essential for the ignition of pulverized coal. When the burner is fitted with 8 inner secondary air blades, there is no recirculation zone and the expansion angle is between 61.9° and 69.5° . This condition is unfavorable to the achievement of a stable combustion. The adoption of a lower primary-air flow rate will result in a relatively large recirculation zone, which can be conducive to achieving a stable combustion. **Key words:** dual-register vortex burner, blade, primary-air flow rate, aerodynamic characteristics

水煤浆燃烧飞灰含碳量的影响因素及控制 = **Factors Having an Influence on Carbon Content in Fly Ash During the Combustion of Coal-water Slurry and Their Control** [刊, 汉] / YU Hai-miao, ZHAO Xiang, CAO Xin-yu (Education Ministry Key Laboratory of Clean Energy Utilization and Environmental Engineering, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(2). — 195 ~ 197

Coal-water slurry is a kind of clean fuel with promising market demand. During its combustion the control of carbon content in fly ash remains a problem calling for due attention. Through a combustion test of coal-water slurry in Boiler No. 2 of Maoming Thermal Power Plant the authors have analyzed the various factors, which are believed to have an impact on the carbon content in fly ash. Such factors include concentration of coal-water slurry, atomization conditions, fuel characteristics, combustion modes, boiler load, excess air factor, etc. **Key words:** coal-water slurry, fly ash, carbon content, combustion, atomization

基于数据融合的球磨机最佳负荷工作点判断 = **Data Merging-based Determination of the Optimal-load Operating Point of a Ball Mill** [刊, 汉] / TIAN Liang, ZENG De-liang, LIU Xin-ping, LIU Ji-zhen (Automation Department,