

文章编号: 1000-8152(2010)01-0094-05

多座不对称焦炉集气管压力模糊解耦控制

吴 敏, 周国雄, 雷 琪, 曹卫华

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 某钢铁企业多座不对称焦炉具有容量不同、管道布局不同等特点, 使得基于传统解耦控制方法的集气管压力控制效果欠佳. 为此本文提出了一种多座不对称焦炉集气管压力模糊解耦控制方法. 从降低解耦控制器输入维数的角度出发, 采用动态耦合度方法可以实时确定多座不对称焦炉集气管的耦合关系; 并采用模糊解耦控制器对动态耦合度分析后的集气管压力进行实时解耦控制, 该方法从理论上证明了模糊控制的解耦原理, 实现了焦炉集气管压力的解耦. 对于具有不对称特性的被控对象提供了一定的理论和实际应用价值.

关键词: 不对称; 集气管压力; 耦合度分析; 模糊解耦

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fuzzy decoupling control for gas pressure of collector for coke-ovens with asymmetry

WU Min, ZHOU Guo-xiong, LEI Qi, CAO Wei-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: To control the pressure of a gas collector for coke-ovens with different capacity and via different channels which make it difficult to control by using decoupling control based on the traditional methods, we develop a fuzzy decoupling control approach for gas pressure of collector for coke-ovens with asymmetry. From the perspective of reducing the inputs dimension of the decoupling controller, we distinguish in real-time the coupling relationship of the asymmetrical gas collector pressure by using dynamic coupling analysis method, and then fuzzy decoupling controller is employed to decouple and control the gas pressure of collector. The proposed method validates the decoupling principle of fuzzy control in decoupling the gas pressure of collector, providing theoretical and practical basis for the control of asymmetrical objects.

Key words: asymmetry; gas pressure of collector; coupling analysis; fuzzy decoupling

1 引言(Introduction)

焦炉集气管过程属于一个多变量、时变、强耦合和具有分布参数的动态非线性系统^[1], 影响集气管压力的因素主要包括荒煤气发生量的变化、鼓风机前吸力和外送压力的变化等, 而要建立集气管压力对象的精确数学模型极其困难, 采用常规控制, 其控制效果难以满足工艺要求, 即使用Smith预估控制和Dahlin算法, 同样需要知道被控制对象的精确数学模型, 所以很难取得较好的控制效果.

目前应用于多座焦炉集气管压力的控制方法主要有PID控制、模糊控制、前馈补偿解耦控制等^[2~4]. 例如: 文[2]提出了一种基于相关性分析的解耦控制方案; 文[3]设计了一种专家规则与模糊控制相结合的智能控制器来实现焦炉之间的补偿解耦; 文[4]提出了一种基于PID神经网络和RBF模糊神经网络的

多变量解耦控制方案. 上述控制方法对解耦问题提供了较好的思路, 取得了一定的控制效果, 但是它们都只是针对对称的焦炉集气管进行控制, 难以解决具有焦炉容量不同、管道布局不同等不对称特性的焦炉集气管压力控制问题.

耦合度的概念最早由Bristol于1966年提出^[5], 主要用来根据输入输出间的不同耦合度来确定输入输出的变量配对问题, 对于系统分析、解耦设计有极其重要的作用. 为了降低系统的耦合度, 文[6]提出将支路耦合度最大的那一个支路从系统中分离出来. 文[7]介绍了多变量系统动态耦合度的定义以及与之相关的变量配对原则, 并对已解耦和未解耦系统的动态耦合度进行了仿真比较.

模糊解耦是在经典解耦理论的基础上发展起来的鲁棒解耦方法, 它不需要建立被控对象精确的数

学模型, 模糊解耦规则表是一个专家系统, 将控制专家的解耦经验与专家知识事先存在规则中. 当进行解耦控制时, 当前的测量数据以及事实、证据、情况等存入数据库, 规则应用模型对规则进行选择与执行, 进行模糊推理, 实现解耦. 关于模糊解耦的应用, 文[8]针对酒精粗溜过程的多变量控制问题, 利用模糊补偿实现模糊解耦控制, 较好的实现了具有一定可变性对象的模糊解耦控制; 文[9]根据火电单元机组工况多变的特点, 提出一种基于模糊解耦的火电单元机组负荷控制方案, 以提高控制系统适应负荷变化的能力; 文[10]提出一种熔体温度与机头压力的模糊解耦控制算法, 通过在聚合物精密挤出成型加工过程中应用, 验证了模糊解耦控制算法.

借鉴耦合度分析和模糊解耦不需要精确的数学模型的特点, 针对某钢铁企业多座不对称焦炉集气管压力控制系统, 提出一种多座不对称焦炉集气管压力的模糊解耦控制方法. 实际运行情况说明了该方法的有效性.

2 对象描述(Description of the object)

某钢铁企业焦化厂有1#, 2#和3#座焦炉, 且为不对称分布. 1#和2#焦炉相距较近(约60 m), 3#焦炉与1#和2#焦炉相距较远(约600 m), 3#焦炉生产的荒煤气与1#和2#焦炉生产的荒煤气在汇合管中央处汇合, 经初冷器和鼓风机, 最后送往用户. 分析调节对象的动态特性, 可得到对象的特性方程^[1]. 由文[11]可知系统是一个多输入多输出系统, 各压力与机前吸力以特定的传递函数相联系, 因此3座焦炉之间输入输出是存在着耦合关系的. 针对该情况, 文[12]提出采用静态耦合度分析的方法确定焦炉的分组情况, 但由于在实际生产过程中, 3座焦炉荒煤气产量随着生产需求会发生变化, 这种变化将造成焦炉集气管系统的耦合组的关系会发生变化, 因此采用静态耦合度并不能较好的保证焦炉间的正确分组. 针对多座不对称焦炉集气过程具有耦合度不均、强非线性及时变特点, 在单座焦炉集气管控制器^[1]的基础上, 将文[12]的静态耦合度进行改进, 对多座焦炉集气管蝶阀开度和经数据处理后的集气管压力提出采用动态耦合度分析, 并对集气管耦合系统进行动态分组以降低模糊解耦控制器的输入; 并采用相应的模糊解耦控制器对分组后的焦炉集气管压力进行解耦控制. 控制系统的整体结构如图1所示.

图1中, U_1, U_2, U_3 分别代表1#, 2#和3#集气管单管控制输出蝶阀开度增量; Z_1, Z_2, Z_3 分别表示采用模糊解耦控制器后蝶阀最终实际开度增量, y_1, y_2, y_3 分别表示1#, 2# 和3#集气管压力实际输出. 单座焦炉集气管控制器的设计可参考文[11], 本文

重点介绍耦合度分组以及模糊解耦控制器的实现原理.

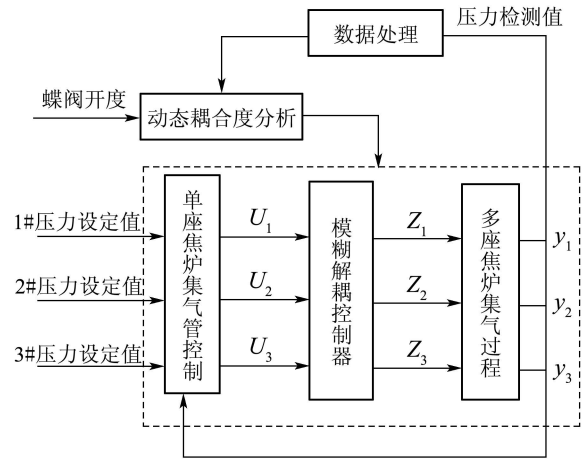


图 1 不对称焦炉集气管压力控制系统结构

Fig. 1 Control system structure for gas collector pressure

3 耦合度分析 (Coupling analysis)

以某钢铁企业的3座不对称焦炉集气管为研究对象, 并对该不对称焦炉集气管压力进行耦合度分析. 以24小时数据单位不断对耦合度分析数据进行更新, 选择输入数据为蝶阀开度, 输出为集气管压力检测值, 利用概率统计法计算3座焦炉集气管蝶阀开度与各集气管压力检测值的耦合度, 对焦炉集气管进行分组, 分为强耦合组和弱耦合组. 以2007年6月17号24小时采集的数据为例, 通过对3座焦炉集气管压力进行耦合度分析, 可得到表1. 由表1可见, 根据耦合度的定义, 可以将1#与2#集气管分为强耦合组, 对其进行强模糊解耦控制, 然后将其与3#集气管进行弱解耦控制, 从而实现多座焦炉的并联解耦. 在这里, 由于3座焦炉荒煤气产量随着生产需求会发生变化, 强弱耦合组之间的成员并不是固定的, 因此必须每24个小时进行一次耦合度更新, 进行重新分组, 方便后续的模糊解耦.

表 1 蝶阀开度与压力耦合度表

Table 1 Coupling degrees between butterfly valves opening and gas collector pressure

蝶阀开度	1#压力	2#压力	3#压力
1#蝶阀开度	0.713	0.211	0.016
2#蝶阀开度	0.211	0.713	0.016
3#蝶阀开度	0.016	0.016	0.713

4 模糊解耦(Fuzzy decoupling)

在计算各焦炉集气管蝶阀开度与各集气管压力之间耦合度的基础上, 根据耦合度的强弱对某钢铁

企业3座焦炉集气管进行分组, 本文利用模糊控制对过程参数的不灵敏性, 将模糊控制应用到解耦控制中, 设计强模糊解耦控制器和弱模糊解耦控制器, 消除该钢铁企业3座焦炉并联生产时各集气管蝶阀开度与各集气管压力间的耦合影响.

4.1 模糊解耦算法(Fuzzy decoupling algorithm)

以某天采集数据为例, 通过对3座焦炉集气管压力进行耦合度分析, 1#和2#集气管压力可以作为强耦合组进行分析, 1#, 2#和3#集气管之间作为弱耦合组. 通过耦合度分析, 降低了模糊控制器的输入个数, 简化了运算. 本文通过采用模糊解耦控制算法对强、弱耦合组进行解耦.

设 $W_1 = U_1$ (1#蝶阀开度增量), $W_2 = U_2$ (2#蝶阀开度增量), V_1 为1#蝶阀控制增量的修正量, V_2 为2#蝶阀控制增量的修正量. 图2为强模糊解耦控制器, 此系统是一个2输入2输出的多变量模糊控制器. 本文首先利用模糊控制器本身的解耦性, 通过模糊关系方程求解, 在结构上实现解耦. 本文将一个MIMO的模糊控制器分解成若干个MISO的模糊控制器, 将2输入2输出的模糊控制器等效成2个2输入1输出的模糊控制.

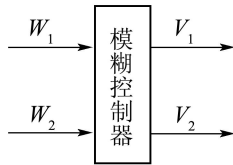


图2 强模糊解耦控制器

Fig. 2 Strong fuzzy controller

图2中, 模糊控制器的输入为 W_1 和 W_2 , 输出为 V_1 和 V_2 , 其模糊关系可以表示为

$$R_M = \{R_{M1}, R_{M2}, \dots, R_{ML}\}, \quad (1)$$

其中第 i 条规则为

$$R_M^i: \text{if } (W_1 \text{ is } \tilde{A}_{1i} \text{ and } W_2 \text{ is } \tilde{A}_{2i}) \\ \text{then } (V_1 \text{ is } \tilde{B}_{1i} \text{ and } V_2 \text{ is } \tilde{B}_{2i})$$

表示成模糊蕴含式为 $R_M^i: (\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i}) \rightarrow (V_1 + V_2)$ 其中: $+$ 表示并运算, \times 表示笛卡尔积.

$$R_M = \left\{ \bigcup_{i=1}^l R_M^i \right\} = \\ \left\{ \bigcup_{i=1}^l [\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i}] \rightarrow V_1, \bigcup_{i=1}^l [\tilde{A}_{1i} \times \tilde{A}_{2i}] \rightarrow V_2 \right\} = \\ \{RB_{MS}^1, RB_{MS}^2\}, \quad (2)$$

式中 l 为规则总数.

根据式(2)计算结果, 2输入2输出多变量控制器

规则库由子规则库 RB_{MS}^1 和 RB_{MS}^2 组成, 每一条子规则库有 l 条模糊规则构成. 其中子规则库 RB_{MS}^1 , RB_{MS}^2 中的第 i 条规则可表示为:

$$RB_{MS}^1: \\ \text{if } (W_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } W_2 \text{ is } A_{2i}) \text{ then } (V_1 \text{ is } B_i), \quad (3)$$

$$RB_{MS}^2: \\ \text{if } (W_1 \text{ is } A_{1i} \text{ and } W_2 \text{ is } A_{2i}) \text{ then } (V_1 \text{ is } B_i). \quad (4)$$

由式(3)和(4)可以看出, 一个多输入多输出可转化为多输入单输出模糊控制器的多变量组合结构, 也就是一个多输入多输出的模糊控制器可通过其本身的解耦变成 n 个多输入单输出的模糊控制器, 实现了多变量之间的解耦.

因为多输入—多输出(MIMO)模糊控制器可转变成多输入—单输出(MISO)模糊控制器设计, 因此, 下面对多输入单输出模糊控制器的设计问题进行讨论. 多输入单输出(MISO)控制器的模糊关系定义为

$$R = \bigvee_{i=1}^l \{W_{1i} \wedge W_{2i} \wedge u\}, \quad (5)$$

式中: l 为模糊规则数; u 为控制系统的输出; R 的维数 $\dim R = d_1 \times d_2 \times d_u$, $d_1 \sim d_4$ 分别为输入 $W_1 \sim W_2$ 的论域量化等级数; d_u 为输出 u (本文 u 分别代表1#蝶阀控制增量的修正量和2#蝶阀控制增量的修正量)的论域量化等级数, 所以控制量的输出可表示为

$$u = W_1 \circ W_2 \circ R. \quad (6)$$

设

$$u = W_1 \circ R_1 \Delta W_2 \circ R_2, \quad (7)$$

式中 R_1 和 R_2 为二维模糊关系, 仅有 $(d_1 + d_2)d_u$ 个元素. 在某些近似条件下, 可用 \vee 代替运算表示, 即

$$u = W_1 \circ R_1 \vee W_2 \circ R_2, \quad (8)$$

其中模糊关系定义为

$$R_k = \bigvee_{i=1}^l \{W_{ki} \wedge V_{1i}\}, k = 1, 2, \quad (9)$$

$$R_k = \bigvee_{i=1}^l \{W_{ki} \wedge V_{2i}\}, k = 1, 2, \quad (10)$$

上式表示构成MIMO模糊器的子控制器的关系矩阵算法. 算法克服了式(1)只用一个模糊关系 R_M 进行模糊控制器设计分析的困难, 实现了理论意义上的解耦, 增强了实现的可能性和实用性. 实现解耦后可用MISO系统构成解耦后的MIMO系统, 其输出表达式为

$$V_1 = W_1 \circ \tilde{R}_{11} \wedge W_2 \circ R_{21}, \quad (11)$$

$$V_2 = W_1 \circ \tilde{R}_{12} \wedge W_2 \circ \tilde{R}_{22}, \quad (12)$$

其中模糊关系为

$$R_{kj} = \bigvee_{i=1}^l \{W_{ki} \wedge U_{ji}\}, k = 1, 2; j = 1, 2. \quad (13)$$

根据上述结论, 设计模糊解耦控制的关键是确定模糊关系 $R_{11}, R_{21}, R_{12}, R_{22}$. 模糊关系确定后, 根据式(11)和(12)便可求出模糊控制器的输出.

4.2 模糊关系的确定方法(Determination of fuzzy relations)

该节以强模糊解耦控制器的 R_{11} 为例来说明模糊关系的确定方法. 其中 R_{11} 为输入变量 W_1 (1#蝶阀开度增量)到被控制输出 V_1 (1#蝶阀控制增量的修正量)的模糊关系, 确定步骤如下:

步骤 1 考虑到强模糊解耦控制器中, 集气管之间耦合度高, 因此要求其解耦强度大. 文中将1#蝶阀开度增量 W_1 分为7级, 其增量论域 $W_1 = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$. 考虑到该处耦合度较高, 要实现强解耦, 因此语言值取7个 $A_i (i = 1, 2, \dots, 7)$, 其含义分别为PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB. A_i 是论域 W_1 上的模糊集.

步骤 2 将 W_1 进行模糊化, 此处根据强耦合度组集气管的特点, A_i 隶属函数选取较精确的三角形隶属函数.

步骤 3 确定模糊控制规则. 当得到一个1#蝶阀开度增量 W_1 , 就对1#蝶阀控制增量的修正量 V_1 进行调节. 根据控制系统的实际情况和专家经验将 V_1 分为7级, 其论域 $V_1 = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$. 此处也取7个语言值 $B_i (i = 1, 2, \dots, 7)$, 其含义分别为PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB. 隶属度函数也选取三角形函数.

根据焦炉集气管压力系统的耦合特点, 此处模糊解耦控制规则的确立就是基于以下耦合关系方向分析:

a) 当1#集气管的压力高于2#集气管的压力时, 假设仅采用单管模糊控制时阀门输出增量为 W_1, W_2 . 但由于此时1#的煤气还要流向2#集气管, 使1#管压力下降, 2#管压力上升, 因而要在 W_1 的基础上加上一个小于零的修正量 V_1 , 在 W_2 的基础上加上一个大于零的修正量 V_2 ;

b) 当1#集气管的压力低于2#集气管的压力时, 假设仅采用单管模糊控制时阀门输出增量为 W_1, W_2 . 但由于此时2#的煤气还要流向1#集气管, 使2#管压力下降, 1#管压力上升, 因而要在 W_1 的基础上加上一个大于零的修正量 V_1 , 在 W_2 的基础上加上一个小于零的修正量 V_2 . 表2为其控制规则表.

表 2 控制规则表

Table 2 Fuzzy control rules

if	A_7	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1
then	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7

最后可以得到模糊关系

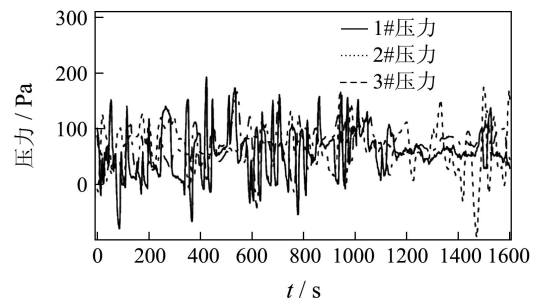
$$R_{11} = A_7 \times B_1 \cup A_6 \times B_2 \cup A_5 \times B_3 \cup A_4 \times B_4 \cup A_3 \times B_5 \cup A_2 \times B_6 \cup A_1 \times B_7. \quad (14)$$

根据同样方法可求出强模糊解耦控制器中的 R_{21}, R_{12}, R_{22} ; 然后根据式(11)和(12)便可求出控制量为 V_1 和 V_2 .

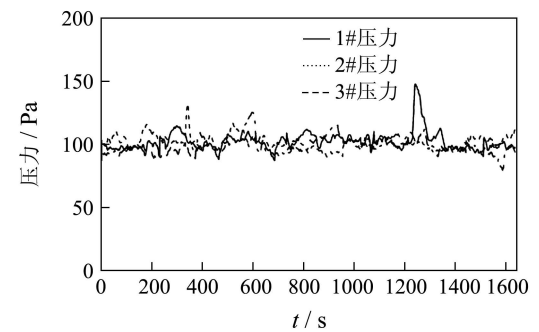
弱模糊解耦控制器的模糊关系的确定主要根据弱模糊耦合组的特点, 其输入论域个数选择为5个, 隶属度函数也选择精度较低的梯形函数, 以实现模糊解耦. 通过采用强、弱模糊解耦控制器对集气管压力进行解耦控制, 即可较好的解除集气管压力的耦合关系, 保证集气管压力的稳定.

5 系统运行情况(Running instance)

本文提出的控制方法在该钢铁企业得到实际应用, 系统运行前后3座焦炉集气管压力曲线如图3所示.



(a) 系统运行前集气管压力运行曲线



(b) 系统运行后集气管压力运行曲线

图 3 系统运行前后集气管压力运行曲线

Fig. 3 Pressure curves before and after applying the control system

3座焦炉集气管压力设定值均为100 Pa. 从图(a)中可知, 未采用本系统之前, 3座焦炉集气管压力耦

合严重,集气管压力波动剧烈.其中所采集数据部分1#集气管压力和2#集气管压力耦合程度严重,通过耦合度分析,可将其划分为强耦合组,1#,2#和3#集气管压力之间的耦合较弱,因此将其划分为弱耦合组.而在采用本文所提出的控制方法后,通过耦合度分析,在单座焦炉集气管控制器的基础上,确定3座焦炉的强、弱耦合组,并通过模糊解耦控制算法对其解耦,较好的解除了3座焦炉集气管压力的耦合关系,保证了3座焦炉集气管压力的稳定.从图(b)可以看出,3座焦炉集气管压力运行稳定,有99%的时间能稳定在设定值 ± 20 Pa之内.

6 结论(Conclusion)

借鉴耦合度分析和模糊解耦不需要精确的数学模型的特点,针对某钢铁企业焦炉容量不同、管道布局不同等不对称特性的焦炉集气管压力控制系统,提出一种基于耦合度分析的模糊解耦控制方法.以不对称焦炉集气过程为典型对象,从概率统计的角度出发,提出一种无需知道对象的传递函数,只根据输入输出数据就可确定系统耦合度,该方法将不对称焦炉集气管进行实时分组,得以确定了不对称焦炉的强、弱耦合组焦炉,并降低了后续控制的输入维数;然后采用模糊解耦方法对耦合度分析后的焦炉进行解耦控制,该方法从理论上证明了解耦性的实现,实现了焦炉集气管压力的解耦.该方案具有控制简单灵活、快速性好、可靠性高等优点,能够为具有不对称特性的被控对象提供一定的理论和实际应用价值.

参考文献(References):

- [1] CHAICHENKO V I, LAVROV K G. Pressure stabilization of direct coke oven gas in the gas collectors of coke batteries[J]. *Coke & Chemistry (USSR)*, 2001, 64 (7): 72 – 76.
- [2] 潘海鹏. 焦炉集气管压力综合控制算法研究与应用[J]. *控制工程*, 2003, 10(6): 529 – 531.
(PAN Haipeng. Research and application of the mixed control for coke oven collector pressure control systems[J]. *Control Engineering of China*, 2003, 10(6): 529 – 531.)
- [3] YANG C, WU M, SHEN D, et al. Hybrid intelligent control of gas collectors of coke ovens[J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(7): 725 – 733.
- [4] HUNT K J. Extending the functional equivalence of radial basis function networks and fuzzy inference system[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1996, (3): 776 – 781.
- [5] BRISTOL E H. On a new measure of interaction for multivariable process control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1966, 11(1): 133 – 134.
- [6] 王启志, 王晓霞, 吴文得, 等. 系统耦合度及其弱化方法[J]. *仪器仪表学报*, 2000, 21(2): 218 – 220.
(WANG Qizhi, WANG Xiaoxia, WU Wende, et al. The coupling degree of system and its decreasing method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(2): 218 – 220.)
- [7] 谭功全. 动态耦合度的定义与表示[J]. *四川轻化工学院学报*, 2002, 15(2): 10 – 13.
(TAN Gongquan. Definition and representation of dynamic coupling degree[J]. *Journal of Sichuan Institute of Light Industry and Chemical Technology*, 2002, 15(2): 10 – 13.)
- [8] 刘骏跃. 模糊解耦理论在酒精蒸馏过程中的应用[J]. *西安科技学院学报*, 2001, 21(1): 65 – 69.
(LIU Junyao. Application of fuzzy decoupling theory in the process of alcoholic distillation[J]. *Journal of Xi'an University of Science & Technology*, 2001, 21(1): 65 – 69.)
- [9] 王庆利, 王丹, 井元伟. 基于模糊解耦的火电单元机组负荷控制[J]. *控制与决策*, 2006, 21(4): 435 – 439.
(WANG Qingli, WANG Dan, JING Yuanwei. Load control based on fuzzy decoupling for fossil-fired electric single generating units[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(4): 435 – 439.)
- [10] 文生平, 赵国平, 瞿金平. 精密挤出成型过程中的多变量模糊解耦控制[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(12): 1 – 4.
(WEN Shengping, ZHAO Guoping, QU Jinping. Multivariable fuzzy decoupling control of precise extrusion processing[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(12): 1 – 4.)
- [11] 周国雄, 吴敏, 曹卫华, 等. 焦炉集气管压力的变结构模糊控制研究[J]. *信息与控制*, 2007, 36(6): 732 – 738.
(ZHOU Guoxiong, WU Min, CAO Weihua, et al. Variable structure fuzzy control for gas collector pressure in coke oven[J]. *Information and Control*, 2007, 36(6): 732 – 738.)
- [12] 阎瑾, 吴敏, 曹卫华. 基于耦合度的集气管压力智能解耦控制[J]. *冶金自动化*, 2008, 32(2): 9 – 14.
(YAN Jin, WU Min, CAO Weihua. Intelligent decoupling control based on coupling degree for gas collector pressure[J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2008, 32(2): 9 – 14.)

作者简介:

吴敏 (1963—), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 目前研究方向为过程控制、鲁棒控制与智能系统, E-mail: min@csu.edu.cn;

周国雄 (1980—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为复杂工业过程的控制技术及应用, E-mail: zhougx01@163.com;

雷琪 (1974—), 女, 博士, 讲师, 目前研究方向为过程控制和智能控制, E-mail: leiqi@mail.csu.edu.cn;

曹卫华 (1972—), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为过程控制、智能机器人和智能控制, E-mail: caowh@mail.csu.edu.cn.