

# 基于模糊控制理论的重介质选煤过程控制

胡娟<sup>1</sup>, 王振种<sup>1</sup>, 王福忠<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 河南理工大学, 河南焦作 454191)

**摘要:** 针对重介质选煤过程存在的时变、非线性和强耦合等特征, 采用模糊控制理论, 建立了重介质选煤过程控制模型, 该模型由模态识别器和 3 个模糊控制器组成, 协同调节主选分流阀、加介阀和清水阀。侧重描述了模糊控制模型的结构原理、模态识别器和模糊控制的实现方法, 并进行了工业运行试验。结果表明: 对于介质悬浮液密度和介质桶的液位, 采用模糊控制算法, 其控制精度较高, 响应速度较快, 可满足生产工艺的控制要求。

**关键词:** 重介质选煤; 模糊控制算法; 介质悬浮液密度; 介质桶液位

**中图分类号:** TD94      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2336(2011)03-0116-04

## Control of Heavy Medium Coal Preparation Process Based on Fuzzy Control Theory

HU Juan<sup>1</sup>, WANG Zhen-chong<sup>1</sup>, WANG Fu-zhong<sup>2</sup>

(1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Henan Polytechnic University, Jiaozhuo 454191, China)

**Abstract:** According to the time variation, nonlinear and strong coupling and other features existed in the heavy medium coal preparation process, the fuzzy control theory was applied to establish a control model of the heavy medium coal preparation process. The model was consisted of a modal identifier and three fuzzy controllers and could coordinate with the shunt valve, medium feeding valve and clean water valve. The paper in detail described the structure principle of the fuzzy control model, and the realization method of the modal identifier and the fuzzy control. An industrial operation trial was conducted. The results showed that the fuzzy control algorithm was applied to the medium suspension density and the medium barrel level. The control accuracy could be high, the response speed could be relatively quick, thus the fuzzy control algorithm could meet the control requirements of the production technique.

**Key words:** heavy medium coal preparation; fuzzy control algorithm; density of medium suspension liquid; liquid level of medium barrel

在重介质选煤过程中, 合格介质的悬浮液密度和介质桶液位是保证精煤质量的重要工艺参数。传统控制方法是采用 PID 控制算法, 将液位和密度分开独立控制。由于液位和密度相互耦合, 使得 PID 控制效果不理想, 且由于重介质选煤过程是一个大滞后系统, 而主选分流阀、加介阀和清水阀等执行机构的特性参数也是非线性的, 因此传统的 PID 控制算法难以满足越来越高的控制精度要求<sup>[1-2]</sup>。为此, 笔者利用模糊控制理论, 构建了重介质选煤过程模糊控制模型。

### 1 介质悬浮液的基本控制原理<sup>[3-4]</sup>

重介质三产品选煤工艺中, 精煤弧形筛脱介得到的介质经分流箱部分分流到稀介质桶, 其流量的大小由主选分流阀  $U_1$  的开度来控制。而稀介质则经回收净化(磁选机), 磁铁矿粉返回合格介质

桶。为实现对合格介质悬浮液的控制, 在合格介质管路上安装了密度计和磁性物含量计, 在合格介质桶安装了液位计, 在精煤产品输送带上安装了灰分仪<sup>[5-6]</sup>。

重介分选过程中, 介质悬浮液密度要求控制在某一确定值, 重介质悬浮液的密度给定值理论上由精煤灰分指标确定。一般来说, 当入选原煤的性质波动造成精煤灰分偏高时, 应降低悬浮液密度给定值; 相反, 当精煤灰分偏低时, 应提高悬浮液的密度。在实际的煤炭分选中, 悬浮液密度的调节是通过分流阀  $U_1$ , 加介阀  $U_2$  和清水阀  $U_3$  实现的。密度低时, 提高主选分流器  $U_1$  开度, 加大主选分流量, 使更多密度过低的稀释介质进入稀介质桶, 并经磁选回收净化后返回合格介质桶。如果仍不能提高介质悬浮液的密度, 可适当打开加介阀  $U_2$ , 向合格介质桶中加高浓度的介质悬浮液; 密度过高时, 打

开清水阀  $U_3$ , 降低合格介质桶中的介质悬浮液的密度。合格介质桶液位的高低反映分选系统中磁铁矿粉的总量, 液位过低, 说明磁铁矿粉总量过少, 应增加  $U_2$  开度以增加高浓度的介质悬浮液或磁铁矿粉。另一方面, 合格介质桶的液位有最高和最低限位, 低位用于保证介质泵的进料压力, 高位用于保证停车时, 系统中介质的回流容量。对于合格介质桶的液位控制应与介质悬浮液密度的控制统一考虑, 如密度偏低且液位过低时, 应选择增加高浓度的介质。

## 2 重介质选煤过程模糊控制模型的实现

### 2.1 模糊控制模型的构成<sup>[1-2,7-8]</sup>

由于模糊控制不需要建立被控对象的精确数学模型。为此, 利用模糊控制理论, 构建了如图 1 所示的重介质选煤过程模糊控制模型。该模型由模态识别器和 3 个模糊控制器组成, 其中模态识别器根据合格介质桶的液位高低变化, 选择不同的介质悬浮液密度模糊控制器, 综合调节主选分流阀  $U_1$ 、加介阀  $U_2$  和清水阀  $U_3$  的开度, 将介质悬浮液密度控制在设定值附近, 同时保证液位在规定范围内。

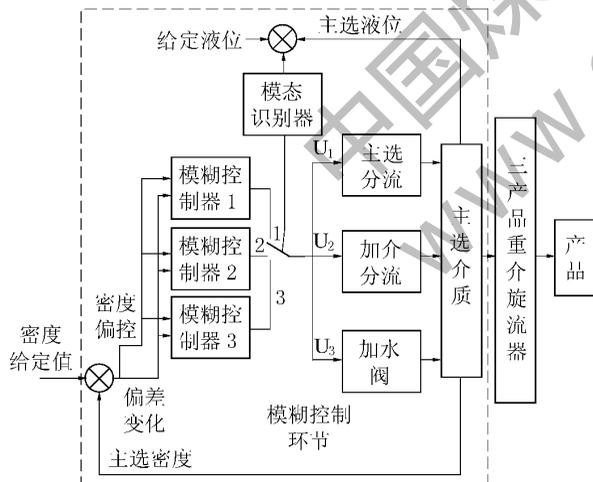


图 1 重介质选煤过程模糊控制模型

### 2.2 模态识别器的设计

由于对液位控制仅要求正常、高限与低限 3 种状态, 因此为减少执行机构的动作频度, 模态识别器仅进行 3 种状态判断, 其算法如下: 当液位偏差  $e > 10\%$  (高液位) 时, 选择模糊控制器 1; 当  $10\% \geq \text{偏差 } e \geq -10\%$  (液位适中) 时, 选模糊控制器 2; 当偏差  $e < -10\%$  (低液位) 时, 选模糊控制器 3。其中, 液位偏差  $e$  为液位测量值与液位

给定值的差值。

### 2.3 模糊控制的实现

设计的 3 个模糊控制器均采用二维结构。即以介质悬浮液密度偏差  $e$  和密度偏差变化率  $ec$  作为输入量, 以主选分流阀  $U_1$ 、加介阀  $U_2$  和清水阀  $U_3$  的开度为输出量, 其取值范围为  $0 \sim 100\%$ 。介质悬浮液密度偏差的计算式<sup>[9]</sup>为

$$e(k) = y(k) - y_R \quad (1)$$

式中:  $e(k)$  为当前密度偏差;  $y(k)$  为第  $k$  次实际密度测量值;  $y_R$  为给定密度。

为简化计算, 密度偏差的变化率  $ec$  用系统 2 次采样所得的密度偏差的差值来代替, 其计算式<sup>[9]</sup>为

$$ec(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

式中:  $ec(k)$  为当前密度偏差的差值;  $e(k-1)$  为上次密度偏差。

#### 2.3.1 语言变量的取值与模糊论<sup>[9]</sup>

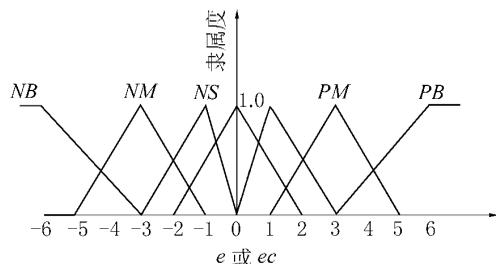
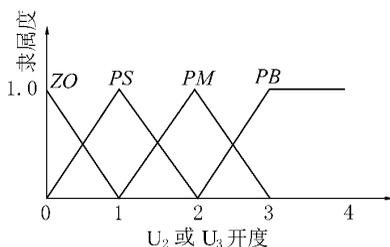
根据试验分析, 设计的 3 个模糊控制的语言变量取值与模糊论域如下所述。密度偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  的语言值皆取  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  7 个模糊量, 即正大 ( $PB$ )、正中 ( $PM$ )、正小 ( $PS$ )、零 ( $ZO$ )、负小 ( $NS$ )、负中 ( $NM$ )、负大 ( $NB$ ), 其模糊论域为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  13 个等级。主选分流阀  $U_1$  开度值的语言值取  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  7 个模糊量, 其模糊论域为  $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$  15 个等级。加介阀  $U_2$  开度和加清水阀  $U_3$  开度的语言值取  $\{ZO, PS, PM, PB\}$  4 个模糊量, 分别代表阀门关, 开度较小、开度较大和全开, 其模糊论域为  $\{0, 1, 2, 3, 4\}$  5 个等级。

#### 2.3.2 隶属度函数<sup>[9]</sup>

通过试验分析和推理计算, 3 个模糊控制器的各个输入输出量的语言变量均采用三角形隶属度函数。采用三角形隶属度函数的特点是, 其曲线形状尖锐, 分辨率高, 控制灵敏度也高。图 2 为密度偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  的隶属度函数。图 3 为加介阀  $U_2$  开度和清水阀  $U_3$  开度的隶属度。主选分流阀  $U_1$  开度值的隶属函数与密度偏差  $e$  的隶属函数相似。

#### 2.3.3 模糊控制规则<sup>[1-2,7-10]</sup>

根据运行经验, 通过试验分析得出介质悬浮液

图2 密度偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$  的隶属度图3 加介阀  $U_2$  开度和清水阀  $U_3$  开度的隶属度

密度的模糊控制规则，其表示形式为

IF  $e = A_i$  AND  $ec = B_j$  THEN  $G_1 = C_{1k}$  and

$G_2 = C_{2k}$  and  $G_3 = C_{3k}$

( $i = 1, 2, 3, \dots, N_1; j = 1, 2, 3, \dots, N_2;$

$k = 1, 2, 3, \dots, N_3$ ) (3)

其中， $A_i$ 表示介质悬浮液密度论域  $e$  中的模糊子集； $B_j$ 表示介质悬浮液密度变化率论域  $ec$  中的模糊子集； $C_{1k}$ 、 $C_{2k}$ 、 $C_{3k}$ 分别表示输出  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 的模糊子集； $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 分别表示模糊子集  $A_i$ 、 $B_j$ 、 $C_{1k}$ 、 $C_{2k}$ 、 $C_{3k}$ 的个数。

3个模糊控制器的具体控制规则如下所述。

1) 模糊控制器1: 以主选分流阀  $U_1$  为主控制器，清水阀  $U_3$  和加介阀  $U_2$  全关。当介质悬浮液密度的偏差  $e$  负大，且偏差变化率  $ec$  负大时，即介质悬浮液密度过低，且有继续快速下降的趋势，应加大主选分流阀  $U_1$  的开度，加大分流量， $U_1$  开度值取正大，使更多密度过低的不合格介质进入稀介质桶，经磁选回收净化后再返回合格介质桶。当偏差  $e$  负大，偏差变化率  $ec$  正大时，系统密度虽低但有快速上升的趋势，主选分流阀  $U_1$  的开度为正小。当偏差  $e$  负中，偏差变化率  $ec$  为零时，应尽快消除系统中的误差，主选分流阀  $U_1$  的开度值取正中。当偏差  $e$  负小，偏差变化率  $ec$  正小时，系统密度低，且有上升的趋势，为了避免超调，主选分流阀  $U_1$  的开度为零。偏差为正时的控制规则与偏差为负时的控制规律相反，如当介质悬浮液密度

过高时，减小主选分流阀  $U_1$  的开度，降低主选分流流量，利用稀释后的回流介质降低介质密度。

2) 模糊控制器2: 协调控制主选分流阀  $U_1$ 、加介阀  $U_2$  和清水阀  $U_3$ ，保证介质悬浮液密度在设定值附近。其控制规则为当介质悬浮液密度过高时，为了降低密度，将加介阀  $U_2$  全关，同时，关闭主选分流阀  $U_1$ ，利用稀释后的回流介质来降低介质密度，并将清水阀  $U_3$  的开度调节到最大。如果介质悬浮液密度过低，将清水阀  $U_3$  关闭，同时增加主选分流阀  $U_1$  的开度，加大主选分流量，使更多的密度过低的不合格介质进入稀介质桶，经磁选回收净化后返回主选介质桶，并且适当加大加介阀  $U_2$  的开度，加一定量的高浓度介质。

3) 模糊控制器3: 当液位降低到10%时，说明介质悬浮液密度过低，为了保证快速升高液位，在调节过程中，将主选分流阀  $U_1$  全关，分选后的回流介质全部直接回到合格介质桶，为了使介质悬浮液密度稳定在给定值，加介阀  $U_2$  和清水阀  $U_3$  协调工作。当密度偏差  $e$  负大，偏差变化率  $ec$  负大时，介质悬浮液密度有继续快速下降的趋势，应加大加介阀  $U_2$  的开度，加大介质量，而清水阀  $U_3$  全关。当密度偏差  $e$  正大，偏差变化率  $ec$  正大时，介质悬浮液密度高，且有继续快速上升的趋势，加介阀  $U_2$  应全关，加介量为零，而清水阀  $U_3$  全开。当密度偏差  $e$  为零，偏差变化率  $ec$  为零时，介质悬浮液密度适中，说明加介量与加水量平衡，加介阀  $U_2$  和清水阀  $U_3$  的开度取适中。

3个模糊控制器根据以上控制规则，经模糊推理运算得到相应控制量。

### 3 运行试验结果

采用3NWXI200/850型无压给料三产品重介质旋流器进行了工业运行试验，分别进行了高低液位下密度控制、以及密度给定值不变的情况下其液位改变后的试验。

图4为合格介质桶液位保持在中间位置，密度设定值为  $1.4 \text{ g/cm}^3$  时，实测的重介悬浮液密度控制曲线。为了检验控制算法的精度与响应速度，进行了阶跃响应测试。将密度给定值由  $1.4 \text{ g/cm}^3$  突变到  $1.6 \text{ g/cm}^3$ ，实测调节时间为13 s，同时，在密度调整过程中重介悬浮液的液位保持平稳。液位控制试验是在密度给定值不变，将液位降到液位范

围的20%进行的。将液位调整到50%需要的时间为4 s,且在调整过程中重介悬浮液密度能够保持不变。

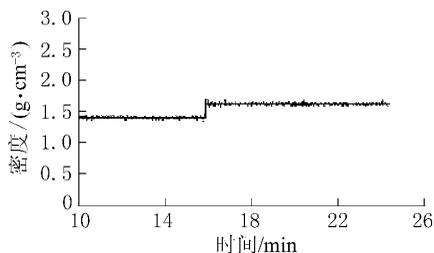


图4 密度控制试验曲线

试验中,密度的调节时间为13 s,液位的调节时间为4 s,其时间较长的原因为重介分选系统中,密度与液位调节是一个大滞后环节,自动控制指令下达后,密度与液位总是要经过一定时间才能到达设定值,设计控制器时应充分考虑这一特征<sup>[10]</sup>。

## 4 结 语

1) 重介质选煤过程采用3个模糊控制器,可以在系统不同的运行情况下大幅增加系统的稳定性,保证了介质悬浮液密度的控制精度,同时避免了各执行机构频繁动作,其实用性强。

2) 文中采用的控制算法,仅保证了介质悬浮液密度的控制精度,而合格介质桶的液位存在一定的波动。因此,应该建立由密度和液位偏差及其变化率为输入量的多变量输入输出模糊控制器,同时保证密度和液位的控制精度。

3) 对于介质悬浮液的密度和介质桶液位等强耦合、非线性控制对象,采用模糊控制是对其进行控制是合理有效的。但隶属函数与模糊控制规则是根据运行人员的经验和试验分析得到的,受人为因素影响大,如果将其与遗传算法相结合,使其具有在线学习功能,在线调整模糊控制决策规则,将会更好地提高该控制方法的精确性。

### 参考文献:

- [1] 孟凡芹,王耀才,姜建国,等.重介工艺悬浮液密度和液位的多变量模糊控制方法研究[J].中国矿业大学学报,2005,34(2):252-255.
- [2] 赵春祥,叶桂森.重介质选煤过程控制模型及控制算法的研究[J].煤炭学报,2000,25(S):196-200.
- [3] 祁泽民,符东旭.选煤重介质悬浮液稳定性分析[J].煤

炭科学技术,2008,36(6):107-109.

- [4] 杜振宝,路迈西.重介选煤厂介质回收系统的自动控制[J].选煤技术,2009(4):79-83.
- [5] 陈开玲,石云江,钱坤.重介质旋流器分选工艺参数分析[J].煤炭加工与综合利用,2009(6):11-13.
- [6] 解国辉,梁茂彬.重介旋流器选煤工艺的改进与实践[J].煤炭科学技术,2007,35(1):62-64.
- [7] 王海,李艳娟,巩亚东,等.基于PLC的Fuzzy-PID分选密度控制研究[J].控制工程,2006,13(5):474-477.
- [8] 邹文杰,张吉,张雪丽.基于LabVIEW虚拟仪器技术的重介选自动监控系统设计[J].选煤技术,2008(3):56-60.
- [9] 何平,王鸿绪.模糊控制器的设计及应用[M].北京:科学出版社,1997:182-208.
- [10] 尹春荣,范明栋,王忠青,等.重介选煤悬浮液密度及液位模糊控制方法的研究[J].矿山机械,2009,37(15):97-100.

作者简介:胡娟(1979—),女,安徽寿县人,工程师,博士研究生,从事选煤过程控制的研究。Tel:13681426440, E-mail: hujuan16897168@sina.com

收稿日期:2010-10-20;责任编辑:代艳玲

## 第一届行为安全与安全管理国际会议信息

第一届行为安全与安全管理国际会议将于2011年9月23—26日在北京西郊宾馆举行,会期3天。此次会议是由中国矿业大学(北京)主办,中国职业安全健康协会、清华大学公共安全研究院为支持单位。组委会专家由国家安全生产监督管理总局、中国神华集团公司、中国石油天然气集团公司、清华大学、中国安全生产科学研究院、美国国家职业安全与健康研究院、荷兰戴尔夫特大学、澳大利亚昆士兰大学等国内外政府、大学、科研机构的专家代表组成。

大会的主要议题分为4个方面:①安全学科基础理论;②组织安全行为方面的安全文化、安全管理体系、安全管理组织结构、安全体系和内容的培训、安全风险、安全绩效管理、安全立法与安全监管、社会责任管理;③个人行为安全方面的行为习惯纠正(BBS);④行为安全应用方面的虚拟现实安全训练、行为在生产企业的应用、行为安全在采矿行业的应用。会议期间安排有工业展览及工业参观。

本次会议是我国主流学术机构首次举办的行为安全与安全管理领域的高层次学术会议,目的在于促进此领域的学术研究继续走向深入,吸收国际经验,促进行为安全在企业的深度应用,大幅度提高事故预防效果。

会议语言为英文,所投论文一经为论文集收录,将被EI/ISTP检索,热忱欢迎各界学者参加会议并提交论文,论文请提交至:BSMinChina@cumtb.edu.cn。投稿截止日期为2011年4月30日,鼓励先投摘要。会议更多信息,请随时关注会议网站: <http://bsminchina.cumtb.edu.cn>。