

# 基于 Fluent 的旋流器分级控制系统设计

李慧妹

(山西能源学院 计算机与信息工程系, 太原 030001)

**摘要:** 目前, 应用重介旋流器分选过程智能控制策略、极群组破碎分离水力旋流器参数化方法局限于单参数优化, 无法兼顾旋流器内压力、流场速度的控制, 导致微小尺寸变形难以控制, 基于该问题, 设计了基于 Fluent 的旋流器分级控制系统; 使用开关型交流稳压电源, 为系统提供可靠电能; 利用 Q941F 电动调节球阀, 执行对应区间动作; 使用 BST6800 系列压力变送器, 实现底流流量控制; 采用上装式气动阀门开关结构, 增强阀门可靠性; 通过人机交互模块, 显示执行任务; 根据基于 Fluent 的数值模拟原理, 计算进入旋流器的颗粒直径, 根据颗粒直径控制旋流器流场压强; 结合 Gambit 模型和网格划分方法, 仿真模拟分析切向速度、横向速度和径向速度 3 个方向分量分布情况; 使用两套控制输出量调节旋流器进料速度, 获取最佳分级尺寸, 保证旋流器分级过程的稳定性; 由实验结果可知, 该系统最高分级效率为 98%, 最低为 90%, 具有高效分级效果。

**关键词:** Fluent; 旋流器; 分级控制; Gambit 模型; 颗粒直径

## Design of Cyclone Classification Control System Based on Fluent

LI Huishu

(Department of Computer and Information Engineering, Shanxi Institute of Energy, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** At present, the application of the intelligent control strategy of the heavy medium cyclone sorting process and the parameterization method of the pole group crushing separation hydrocyclone are limited to the single-parameter optimization, which cannot take into account the control of the pressure and flow field velocity in the cyclone, resulting in small size deformation is difficult to control. Based on this problem, a cyclone hierarchical control system based on the Fluent is designed. The switch-type AC regulated power supply is used to provide reliable power for the system. The Q941F electric regulating ball valve is used to perform corresponding interval action. The BST6800 series pressure transmitter is used to realize underflow flow control. The top-loading pneumatic valve switch structure is adopted to enhance the reliability of the valve. Through the human-computer interaction module, the execution tasks are displayed. According to the numerical simulation principle based on the Fluent, the diameter of the particles entering the cyclone is calculated, and the flow field pressure of the cyclone is controlled according to the particle diameter. Combined with the Gambit model and the meshing method, the distribution of three components of tangential velocity, lateral velocity and radial velocity is simulated and analyzed. Two sets of control output are used to adjust the cyclone feeding speed to obtain the best classification size and the stability of the cyclone classification process is ensured. It can be seen from the experimental results that the highest classification efficiency of the system is 98%, and the lowest is 90%, which has a high efficiency classification effect.

**Keywords:** Fluent; cyclone; hierarchical control; Gambit model; grain diameter

## 0 引言

旋流器是将多相混合料进行分离的一种设备, 其结构简单, 设备紧凑, 占地面积小, 设备成本低, 适用于液体澄清, 浆液浓缩, 固相颗粒洗涤, 固相颗粒分级, 液相脱气除砂及两种不相混合液体的分离过程中<sup>[1]</sup>。随着流体力学理论和分析方法受到了越来越多的重视, 大大推动了旋流器的结构 and 应用范围的扩展<sup>[2]</sup>。将离心法应用于旋流器加速轻相和重相分离过程中, 是一种高效的分离方式, 其特点是结构紧凑, 分离效率高, 流场稳定, 不容易产生循环和短路流, 尤其适合于低油、油水混合物的分离。因此, 对旋流器分级控制, 优化旋流器结构参数, 成为人们研究的重点问题<sup>[3-5]</sup>。

近几年, 研究者在重介质旋流器分离过程中采用了

智能控制策略, 使用多输入、两输出控制算法, 即以输出数量效率为研究目标, 重介分选出来的多个输入变量网络算法。邓建军<sup>[6]</sup>等人提出重介旋流器分选过程智能控制策略, 使用 Python 语言编制方式采集并分析了输入数据, 并以此进行旋流器控制的仿真模拟; 王焯堃<sup>[7]</sup>等人提出了针对极群组破碎分离的水力旋流器参数化方法, 在建立固液分离旋流器湍流模型的基础上, 利用正交试验对其进行分析, 并选择最优参数, 构建旋流器数值模型。Y. Sun<sup>[8]</sup>等人提出旋流器分离控制方法, 采用雷诺应力模型 (RSM) 进行研究, 颗粒相采用离散相模型 (DPM) 进行模拟。仿真结果表明, 开槽涡流器能有效抑制涡流器中心向下涡流的产生, 降低涡流器底部和外涡流的湍流强度, 从而降低能量损失, 增加分离效率。

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-03-04。

作者简介: 李慧妹(1981-), 女, 山西天镇人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事计算机软件与理论方向的研究。

引用格式: 李慧妹. 基于 Fluent 的旋流器分级控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 128-133, 154.

以上方法均采用的是基于控制变量的单尺寸优化方式, 在深入研究旋流器结构优化问题的基础上, 对旋流器的分离效率没有进一步提高。另外, 采用单粒径优化方法很难对其局部形状进行精准控制。为此, 提出了基于 Fluent 的旋流器分级控制系统设计方法。

## 1 系统硬件结构设计

按照旋流器的基本功能要求, 确定基于 Fluent 的旋流器分级控制系统设计的性能特点, 由此制定系统硬件结构设计方案, 如图 1 所示。

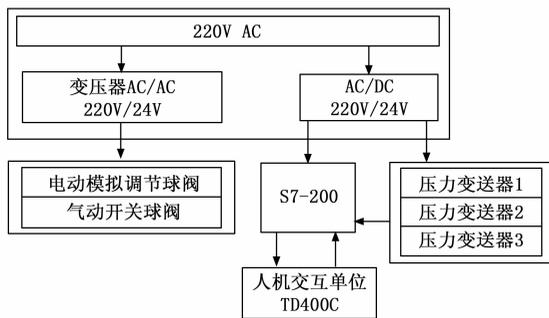


图1 系统硬件结构图

由图 1 可知, 该系统硬件结构主要包括 5 个模块, 通过电源模块为系统提供电力, 利用核心控制模块控制溢流口压差, 通过信息采集模块采集溢流口压力值。最后通过执行模块和人机交互模块完成系统硬件结构设计。

### 1.1 电源模块

电源模块为系统提供可靠电力, 这是保证系统能够持续运行的前提。使用交流调压式的电源模块, 能够保证电压输出、输入、输出频率一致, 且交流电压相位一致。电源模块主要包括两个部分, 分别是发电机和干电池, 因为发电机和干电池本身是不带电的, 它通过电极的正负电荷方向移动, 导线就会带电<sup>[9]</sup>。其中发电机可将机械能转化为电能, 干电池可将化学能变成电能。向发电机和干电池都施加一个电压, 如果导线直接与电池正负极相连, 发电机和干电池就会通过释放正负电荷产生电流<sup>[10]</sup>。

### 1.2 核心控制模块

在核心控制模块中设置一个电动调节阀, 该调节阀通过分析采集到的电压数据, 可直接控制溢流口压差<sup>[11]</sup>。为此, 选择了 Q941F 型号电动调节阀, 该装置由调节电动执行器和球阀组成, 适用于两种调节、切断的场合, 其结构如图 2 所示。

由图 2 可知, 将伺服系统置于电动执行机构中, 直接连接阀门和执行机构, 不需附加伺服放大器, 可以输入 4~20 MA 电流信号和 220 V 交流电压信号。可通过按键的控制, 实现了对执行器动作范围的相应控制<sup>[12]</sup>。

### 1.3 信息采集模块

信息采集模块采用单片机作为核心, 支持 32 比特的指令集和 16 比特的指令集, 并且在单片机中实现了对 32 比特

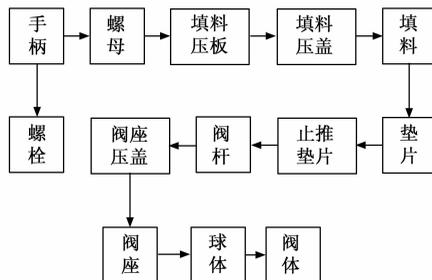


图2 Q941F 电动调节阀结构示意图

数据的高速传输和存储。在传统传输数据处理器的基础上, 嵌入一个模数转换芯片, 采用过采样、数字滤波等手段提高 ADC 的有效解析度。该模数转换器与高通滤波器相当, 可有效地降低基带内部的噪音, 使基带信号的信噪比得以改善。数字滤波器的主要作用是对高速数据进行数字滤波, 并对其进行数据提取<sup>[13]</sup>。因为在一个信号循环中, 过度取样会导致数百个分立的点值, 因此, 要从常规的取样频率中选取资料, 而在重新取样前, 必须先进行数位去伪滤波, 才能避免误频或混淆。

在信息采集模块中设置了 BST6800 系列的压力变送器, 可将传感器采集到的气体、液体物理压力参数转换成电信号形式, 可为系统提供预警信号<sup>[14]</sup>。

BST6800 系列压力变送器结构如图 3 所示。

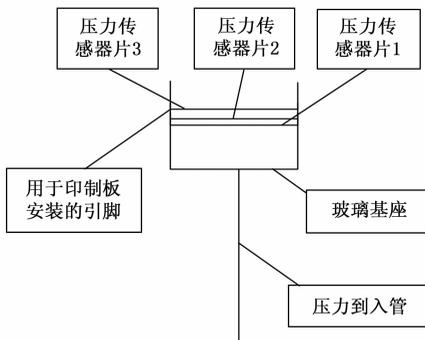


图3 BST6800 系列压力变送器结构示意图

由图 3 可知, 该过程使用了 3 个压力传感器片, 其中 1、2 片负责采集进料口和溢流口的压力值, 3 片负责采集底孔压力<sup>[15]</sup>。

IP 协议在传输数据包前无需与目标主机建立可靠的连接, 并且彼此之间可以进行数据的传输和接收。在一条源主机与目标主机之间建立了连接之后, 依据端口号的差异来区别应用程序间的通讯。只有建立好了连接, 才能把数据流分成 TCP 包, 然后按照 TCP 包的顺序进行编码。接收者 TCP 在相同的过程中等候不同的 TCP 包, 然后对没有错误的单位进行检验, 然后把它们作为一个数据流交给接收处理。在完成了全部的资料传输之后, 将此连接关闭。面向连接的传送都要求有一个确认的反馈机制, 以筛选错误信息。在 TCP 的限制下, 采用三次握手方式实现了传输

连接的创建与解除。

BST6800 系列压力变送器的工作原理如图 4 所示。

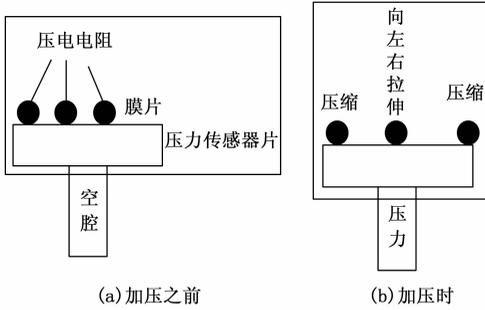


图 4 压力变送器工作原理

由图 4 可知，利用 Fluent 进行数值模拟，通过 Fluent 进行底孔气动球阀的开/关状态控制。

### 1.4 系统电路设计

针对系统的时钟电路和复位电路两个部分进行优化设计，其中时钟电路的优化目的是保证系统中的所有硬件设备均处于相同的运行频率。选用 12 MHz 频率的石英晶体和取值 30 pF，且可微调的电容器<sup>[16]</sup>。时钟电路中，定义 XTAL1 为振荡电路信号输入端，XTAL2 为信号输出端<sup>[17]</sup>。另外，复位电路的基本功能是在系统运行发生不可预测危险时，用于恢复系统的正确运行。系统电路的优化结果如图 5 所示。

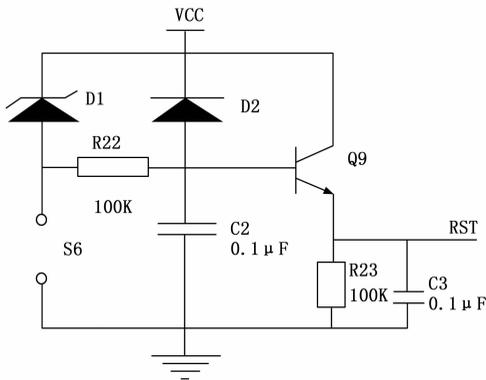


图 5 系统优化电路图

最终将电路的优化设计结果连接到各个硬件设备中。除了上述硬件设备之外，其他硬件与电路均沿用传统 5G 通信下行信道传输控制系统设备元件<sup>[18]</sup>。

### 1.5 执行模块

阀作为气动开关的执行模块，即使在高压、大直径情况下，只要改变阀门本身的大小，就能改善阀门可靠性，克服其重量对阀门所造成的影响<sup>[19]</sup>。

气动阀门开关的结构如图 6 所示。

如图 6 所示，当压力气体进入膜室的上腔时，隔膜向下运动，推杆、阀杆和阀芯也向下运动，促使阀芯和阀座关闭，进而也就关闭了阀门<sup>[20]</sup>。在阀门失压时，弹簧使滑

阀向上运动，滑阀和阀座形成间隙，阀门导通。通过电磁阀的断电控制活塞在汽缸内的行程，同时还需要一个气源来提供驱动气缸的动力<sup>[21]</sup>。主阀滑阀是一种球阀，当球阀滑阀转动时，阀门关闭或开启。滑阀座的传动杆通过丝杆或其它部件连接到油缸，汽缸中的气体充满并释放后，活塞将四处运动，通过丝杠连杆改变球阀的开度<sup>[22]</sup>。

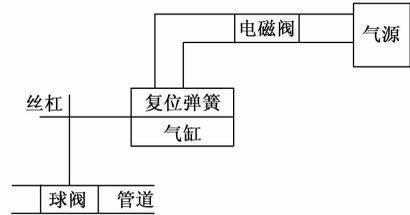


图 6 气动阀门开关结构

### 1.6 人机交互模块

人机交互模块主要是通过功率模块为键盘和液晶显示器供电，其中键盘是通过按键操作实现转换、选择、确认、删除、输入等功能，液晶屏能够显示大写字母，小写字母，数字，常用标点及汉字。输入形式由键盘操作选择，根据操作者的开关，选择相应的 LCD 形式。操作人员需要根据相应的数据库格式，在 LCD 显示中表达内容<sup>[23]</sup>。

### 1.7 旋流器自动控制模块

旋流器控制的关键目的就是为了保证溢流粒度能够得到精细化处理，在结构参数固定情况下，将系统给矿压力和浓度作为旋流器控制的对象。旋流器自动控制模块主要是由两个子模块组成的，分别是给矿浓度控制子模块和给矿压力控制子模块。

#### 1.7.1 给矿浓度控制子模块

在旋流器压力一定情况下，如果给矿浓度较高，则说明矿浆浓度高，粒子在旋流器中旋转的阻力也随之增加，这就导致分离的粒度变粗。反之，如果给矿浓度较低，则说明矿浆浓度低，粒子在旋流器中旋转的阻力也随之减少，这就导致分离的粒度变细。因此，设计给矿浓度控制子模块对于浓度控制是具有必要性的。

选用 XC-CD 生阻的抗浆浓度计实时检测给矿浓度，通过调节旋流器池中水的含量来控制给矿浓度，进而提高旋流器的分离效率。

#### 1.7.2 给矿压力控制子模块

旋流器中设计的给矿压力控制子模块是控制给浆压力的关键因素，能直接影响旋流器的分级粒度。采用 YJM 型液体压力密度计，对给浆液的密度进行实时监测，并将给浆液中的气体向外挤压，以减少混合在给浆池中的空气对浆料的重量测量的影响。

使用该设备利用液柱自身重量产生的压力制成的压力计，其是由一根直径较小的玻璃管固定在刻度板上制作而成的。为了避免表面张力带来的误差，玻璃管内径要小于等于 5 mm，且管道的上端开口及时通气，下端使用橡皮管

固定。当下端与需要测量压力的位置相连时，给浆会在试管内上升到一定高度。

给矿浓度和给矿压力都是影响旋流器溢流粒度的关键性指标，当指标发生变化时，需充分考虑给浆泵池的液体高度和设备负荷变化，及时调节给矿浓度和压力，使大部分介质直接从溢流管中排出，并形成溢流<sup>[24]</sup>。

## 2 系统软件部分设计

Fluent 以有限体积法为基础，采用有限体积法进行数值模拟，使其在无需大量人工干预的情况下智能地找到最优控制点，可以很好地解决旋流器分级控制问题。旋流器分级控制系统软件部分通过 Fluent 软件数值模拟旋流器的颗粒直径，对压强和浓度参数进行调整与控制。结合 Gambit 模型和网格划分方法模拟旋流器切向速度、横向速度及径向速度，通过控制输出来调节旋流器的进料速度，可以得到最优的分级粒度，实现旋流器分级控制。

### 2.1 旋流器分级计算

进入旋流器的物质是底流和溢流分配比为 1 : 1 的颗粒直径，根据基于 Fluent 的数值模拟原理，可计算进入旋流器的颗粒直径，公式为：

$$d = \frac{D}{P\rho \cdot C} \quad (1)$$

式 (1) 中， $D$  表示旋流器筒体直径， $P$  表示压强， $\rho$  表示物质密度， $C$  表示液体物质体积浓度。由公式 (1) 可看出，旋流器分离粒度与旋流器的压强和浓度有关，因此，为了保证物质在生产过程中旋流器分级参数固定，则需对压强和浓度参数进行调整与控制。压强和浓度对直径影响是呈反比例关系的，压强增大就会导致颗粒直径缩小，反之则增大<sup>[25-27]</sup>。综上所述，采用公式 (1) 计算进入旋流器的颗粒直径，据此调整旋流器压强，实现旋流器压强的分级控制。

### 2.2 基于 Fluent 数值模拟的分级控制原理

利用 Fluent 强大的数值仿真功能，结合 Gambit 模型和网格划分方法，对 3 个方向的速度场分布图进行了仿真分析。

#### 2.2.1 切向速度模拟与分析

切向速度模拟如图 7 所示。

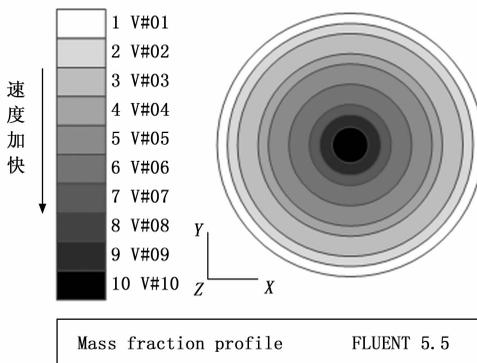


图 7 切向速度模拟示意图

由图 7 可知，在强湍流各向异性条件下，其切向速度并非绝对轴对称，且空气柱存在偏心，其切向速度随着半径的减小而逐渐增大。产生这一现象的主要原因是：分离出油相在溢流孔内不停地聚集，推动着油相的流动。在靠近溢流口处，其流阻较小，内部压力较大，从而导致旋流器沿溢流口切线方向的流速持续增大<sup>[28-30]</sup>。

#### 2.2.2 横向速度模拟与分析

横向速度模拟如图 8 所示。

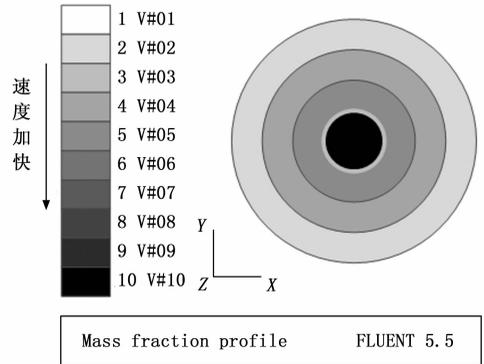


图 8 横向速度模拟示意图

由图 8 可知，在轴心区域存在一个高速区，在轴心附近也存在一个较高速的区域，这两个区域的横向速度方向和数值是一样的，而在边界层附近存在低速区。

通过大锥段的长度仿真得出了大锥段的长度变化对大锥段和小锥截面的影响。在锥段内部，外旋流轴速度的变化不显著。大锥段的长度增大，那么在锥段内旋转的轴向溢流速率会减小，从而使分离出的油相流向溢流的速度降低，使其由外旋牵引至底部流动。长度改变对锥截面外旋轴向流速的影响较小。

#### 2.2.3 径向速度模拟与分析

径向速度模拟如图 9 所示。

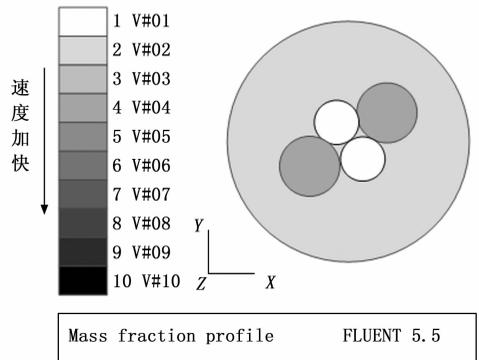


图 9 径向速度模拟示意图

由图 9 可知，螺旋门和溢流口附近的气柱径向速度存在一个高速区，并且径向速度很小，且与井壁的流速为零。

#### 2.2.4 旋流器分级控制过程

基于上述分析的旋流分离器 3 个方向内部速度场，设计旋流器分级控制过程。

1) 旋流器的工作参数一般包括入口浓度闭环控制和入口压力闭环控制, 在旋流器分级工作过程中, 通过控制这两个参数能够获得理想的溢流粒度。

2) 充分考虑工况异常情况, 在控制系统中引入旋流器进口压力闭环控制机制和浆罐液位闭环控制机制, 由此实现自动切换。

3) 合适的溢流粒度是旋流器控制的最终目标, 旋流器必须在规定的操作参数下才能正常工作。

4) 旋流器的工作参数除了进口压力外, 还应考虑进口浓度和物料粒度。物料的粒度取决于磨机的工作状态, 对溢流颗粒大小的影响很小, 不能用旋流器进行调节。

5) 为得到理想的溢流粒度, 旋流器运行参数控制环不仅引入了入口浓度和压力参数, 而且还引入了泵池液位和给矿量。

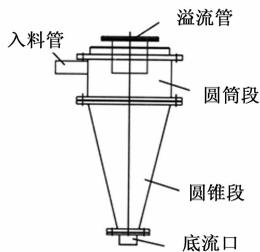
在旋流器生产过程中, 采用两套控制输出量调节旋流器进料速度, 获取最佳分级尺寸, 从而保证了旋流器分级过程的稳定性。

### 3 实验分析

为验证本文设计的基于 Fluent 的旋流器分级控制系统的应用性能, 设计对比实验。采用重介旋流器分选过程智能控制策略、极群组破碎分离水力旋流器参数化方法作为实验对比方法。实验采用的是 FX-250 型旋流器, 物料压力 0.3 MPa, 在旋流器分级控制系统平台装置下对基于 Fluent 的旋流器分级控制系统设计方法进行实验分析。

#### 3.1 实验设备及装置

旋流器装置及其分级控制系统如图 10 所示。



(a) 旋流器装置

(b) 旋流器分级控制系统示意图

图 10 实验设备

实验平台装置如图 11 所示。

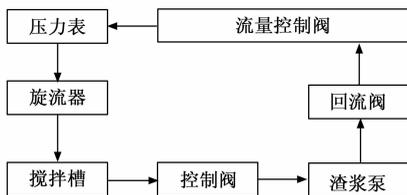


图 11 实验平台装置

由图 11 可知, 混合均匀后, 渣浆泵送至旋流器中的颗粒, 经溢流管排出, 送至搅拌桶内。这些粗颗粒从底部溢

流管转移到搅拌筒, 形成闭环系统。取样管设在实验平台入口处, 进行采样分析。

#### 3.2 实验方法

以 90 μm 直径的细石英砂为介质, 与水以 2 : 8 的比例混合, 对混合物搅拌, 相关参数如表 1 所示。

表 1 混合物搅拌物参数

参数	数值
入料口压力	0.25 MPa
溢流口压力	0.15 MPa
底流口压力	0.02 MPa
底流含水量	13.0%
溢流含水量	85%

滤液称量法是用来分析所采集样品浓度和计算分离产率的。采用激光粒度仪分析粒度组成, 型号为马尔文 Mastersizer 2000, 其粒径测试范围在 0.1~2 000 μm 之间, 并按下列公式计算分数效率:

$$\eta = \frac{(m_a - m_\theta)(m_\beta - m_a)}{m_a(m_\beta - m_\theta)(100 - m_a)} \times 100\% \quad (2)$$

式 (2) 中,  $m_a$  表示物料中分离级别的含量,  $m_\beta$  表示溢流中分离级别的含量,  $m_\theta$  表示沉底物质中分离级别的含量。

#### 3.3 实验结果与分析

分别使用重介旋流器分选过程智能控制策略、极群组破碎分离水力旋流器参数化方法和基于 Fluent 的旋流器分级控制系统, 对比分析溢流浓度和底流浓度, 如图 12 所示。

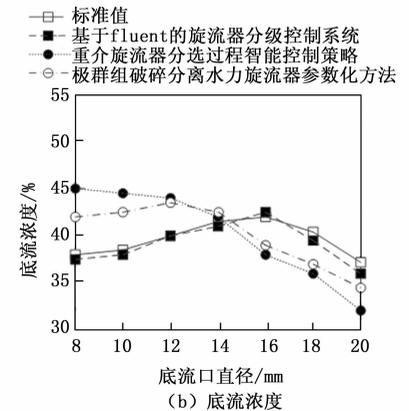
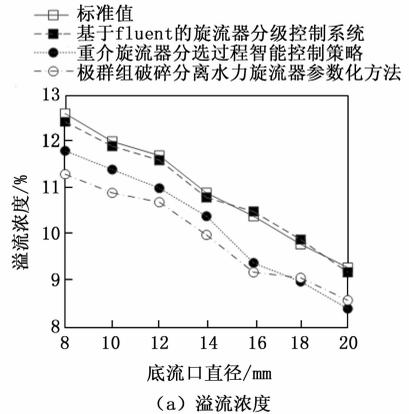


图 12 3 种方法溢流浓度和底流浓度对比

由图 12 可知, 使用重介旋流器分选过程智能控制策略和极群组破碎分离水力旋流器参数化方法, 溢流浓度和底流浓度均与标准值相差较大, 而使用基于 Fluent 的旋流器分级控制系统, 溢流浓度和底流浓度与标准值相差较小, 其中最大误差为 1.5%。由此可见, 本文方法对旋流器分级控制系统溢流浓度和底流浓度的旋流控制效果均较好, 能够保证旋流器的分离效果。

在此基础上, 分别使用这 3 种方法对比分析分级效率, 对比结果如图 13 所示。

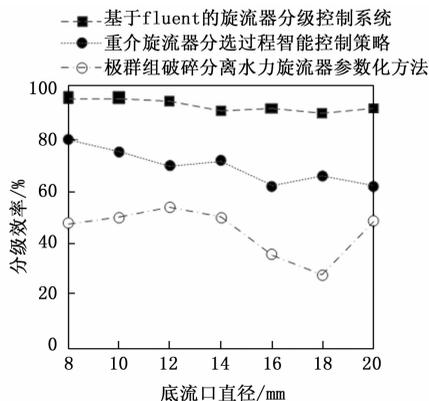


图 13 3 种方法分级效率对比

由图 13 可知, 使用重介旋流器分选过程智能控制策略, 最高分级效率为 80%, 最低为 62%。使用极群组破碎分离水力旋流器参数化方法, 最高分级效率为 55%, 最低为 29%。使用基于 Fluent 的旋流器分级控制系统, 最高分级效率为 98%, 最低为 90%。由此可知, 使用基于 Fluent 的旋流器分级控制系统分级效率较高。本文方法采用 Fluent 软件分析旋流器内部流场的速度及压力, 调节控制输出量及旋流器进料速度, 获取最佳分级尺寸, 由此保证了旋流器分级过程的稳定性, 提升了旋流器分级效率。

#### 4 结束语

针对提出的基于 Fluent 的旋流器分级控制系统设计方法, 利用 Fluent 数值模拟方式, 从切向、横向、径向三个方面对旋流器速度场分布特征进行了模拟研究。为了进一步完善系统, 使泵不抽空不溢出, 保证旋流器工作稳定, 应对旋流器物料浓度和入口压力进行优化设计, 由此保证旋流器的产品质量和分级效率。

#### 参考文献:

- [1] 魏可峰, 赵强, 崔晓亮, 等. 锥角对水力旋流器流场及分离性能影响的数值试验研究 [J]. 金属矿山, 2019 (4): 147-153.
- [2] 郑明亮, 冯鲜, 邓斌. 基于随机过程的固液分离旋流器磨损可靠性研究 [J]. 应用力学学报, 2020, 37 (3): 1272-1275, 1405.
- [3] 隋元伟, 贾广如, 许高洁, 等. 水力旋流器研究现状及其在煤化工废水处理中的应用前景 [J]. 过程工程学报, 2019, 19

(2): 235-245.

- [4] 樊盼盼, 董连平, 刘翼洲, 等. 磁力煤泥重介旋流器分选密度强化作用研究 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (3): 227-231.
- [5] 罗时磊. 无压三产品旋流器在晋城地区无烟煤分选的应用研究 [J]. 煤炭工程, 2020, 52 (6): 62-65.
- [6] 邓建军, 匡亚莉, 赵建章, 等. 重介旋流器分选过程智能控制策略研究与实现 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48 (3): 624-632.
- [7] 王焯堃, 杨金堂, 于善良, 等. 针对极群组破碎分离水力旋流器参数化研究 [J]. 机械设计与制造, 2020 (9): 140-143, 148.
- [8] SUN Y, YU J, WANG W, et al. Design of vortex finder structure for decreasing the pressure drop of a cyclone separator [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2020, 37 (5): 743-754.
- [9] 徐冬林, 王长艳, 傅国辉, 等. 溢流管直径对旋流器流场和分离影响研究 [J]. 矿产保护与利用, 2019, 39 (1): 64-68.
- [10] 赵振龙, 陈佳丽, 王晓锋, 等. 旋流器与直线脱水筛在首钢水厂尾矿干排系统中的应用 [J]. 矿产综合利用, 2019 (2): 120-123.
- [11] 袁惠新, 吴敏浩, 付双成, 等. 微型旋流器溢流口结构参数对 SCR 废催化剂分离性能的影响 [J]. 机械设计与制造, 2020 (8): 159-162.
- [12] 李峰, 刘培坤, 杨兴华, 等. 渐变出口旋流器内部流场的数值模拟 [J]. 流体机械, 2020, 48 (12): 43-48, 57.
- [13] 王勇, 曾涛, 徐银香, 等. 固体颗粒对水力旋流器冲蚀磨损特性的影响 [J]. 流体机械, 2019, 47 (5): 50-55, 6.
- [14] 吕秀丽. 水力旋流器湍流场特性分析研究 [J]. 煤炭技术, 2020, 39 (12): 144-147.
- [15] 付双成, 贾俊贤, 张亚磊, 等. 磁力旋流器磁系的磁场分析 [J]. 化工进展, 2019, 38 (5): 2150-2157.
- [16] 张波, 张朋坤, 王长江, 等. 多路水听器参数扫描测试分析设备的研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 146-149, 158.
- [17] 段荣华. 基于专家-模糊 PID 控制的松散回潮出口水分控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 85-91.
- [18] 李枫, 刘海龙, 邢雷, 等. 进气量对气举式同向出流旋流器性能的影响研究 [J]. 石油机械, 2021, 49 (8): 100-106, 141.
- [19] 刘志涛, 田洋阳, 宋伟, 等. 基于响应面法的旋流器直径与处理量关系研究 [J]. 石油机械, 2021, 49 (12): 89-97.
- [20] 张智宸, 张悦刊, 刘培坤, 等. 旋流器底流口直管段长度对分离性能的影响研究 [J]. 金属矿山, 2021 (11): 158-164.
- [21] 花晓中. 重介旋流器智能控制系统及其应用研究 [J]. 机械管理开发, 2020, 35 (11): 261-262.
- [22] 王勇, 曾涛, 徐银香, 等. 固体颗粒对水力旋流器冲蚀磨损特性的影响 [J]. 流体机械, 2019, 47 (5): 50-55, 6.

(下转第 154 页)