

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.07.017

浓密机耙架扭矩双重模糊PID控制系统研究与应用

王增加^{1,2}, 寇云鹏^{1,2}, 吴再海^{1,2}, 盛宇航^{1,2}, 王鹏涛^{1,2}

(1. 山东黄金矿业科技有限公司充填工程实验室分公司, 山东 莱州 261400)

(2. 山东省深海深地金属矿智能开采重点实验室, 山东 莱州 261400)

摘要:深锥耙架浓密机脱水工艺机理复杂,具有非线性、大滞后、系统稳定性低的问题,难以实现耙架扭矩及底流浓度的稳定自动控制,耙架改进安装压水旋喷装置,建立浓密机耙架扭矩关系模型,建立双重模糊神经网络PID扭矩、底流浓度控制算法,仿真验证其参数指标优于神经网络PID和传统PID,算法稳定调节时间1709.32s,超调量2.55%,工程应用表明,浓度控制更加稳定,连续高浓度充填时间延长0.7h。

关键词:深锥浓密机;旋喷装置;模糊神经网络;扭矩控制

中图分类号:TD462.5

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2023)07-0128-06

Research and Application of Double Fuzzy PID Control System for Rake Rack Torque of Thickener

WANG Zengjia^{1,2}, KOU Yunpeng^{1,2}, WU Zaihai^{1,2}, SHENG Yuhang^{1,2}, WANG Pengtao^{1,2}

(1. Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd. Filling Engineering Laboratory Branch, Laizhou 261400, China;

2. Shandong Key Laboratory of Deep-sea and Deep-earth Metallic Mineral Intelligent Mining, Laizhou 261400, China)

Abstract: The dewatering mechanism of deep-cone rake thickener is complex, which has the problems of non-linearity, large delay and low system stability, in order to improve the performance of the rake, the hydraulic jet equipment is installed, and the torque relation model of rake of thickener is established, and the PID torque and underflow concentration control algorithm based on double fuzzy neural network is established. Simulation results show that the parameters of the algorithm are better than those of neural network PID and traditional PID. The algorithm has a stable adjustment time of 1709.32s and an overshoot of 2.55%. The application of the algorithm in engineering shows that the concentration control is more stable, the continuous high concentration filling time was prolonged by 0.7 hour.

Key words: deep cone thickener; rotary spray device; fuzzy neural network; torque control

深锥耙架浓密机在矿山充填工艺中起到缓存尾矿、沉缩浓密、溢流清水的作用,是一种典型的复杂过程工业设备,过程工业设备控制一直是工业界、学术界研究的热点问题^[1]。浓密机底流浓度是影响充

填质量的关键指标,受泥层高度、料浆停留时间、耙架运转方式影响,耦合关系复杂,难以建立准确的控制模型,实际生产中大部分采用人工根据经验进行操作控制^[2],难以控制底流浓度的稳定性,甚至出现

收稿日期:2023-03-08

基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY05);国家“十三五”重点研发计划项目(2018YFC0604600)

Fund: Supported by Shandong Provincial Major Science and Technology Innovation Project(2019SDZY05); National Key R&D Program of the 13th Five-Year Plan(2018YFC0604600)

作者简介:王增加(1988—),男,主要从事矿山充填技术方面研究。

引用格式:王增加,寇云鹏,吴再海,等. 浓密机耙架扭矩双重模糊PID控制系统研究与应用[J]. 有色金属工程,2023,13(7):128-133.

WANG Zengjia, KOU Yunpeng, WU Zaihai, et al. Research and Application of Double Fuzzy PID Control System for Harrow Rack Torque of Thickener[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(7): 128-133.

压耙现象。

国内外诸多学者采用多种方法,建立浓密机沉降模型及控制算法对底流浓度进行控制,王旭等^[3]提出了基于底流浓度软测量模型的浓密脱水过程智能控制系统;周旭等^[4]通过研究网络化泥床压缩屈服应力及脱水速度影响规律,建立了泥层高度、停留时间和底流浓度的预测模型;TAN 等^[5]提出了带有浓密机耙架约束的浓密机底流浓度预测控制。浓密机底流浓度控制具有非线性、大滞后、时变性等复杂动态特性^[6],通过先进的专家系统、神经网络、模糊控制等算法与 PID 控制相结合^[7],已经成为解决复杂过程设备控制的主要方法,其中模糊控制能够利用规则推理,实现非线性控制^[8]。李志清等^[9]通过优化遗传算法对车辆空气悬架进行模糊 PID 控制,为解决此类问题提供参考。

本文以山东地区某金矿充填用有动力深锥浓密机为研究对象,通过增加耙架旋喷装置,建立浓密机耙架扭矩模型,利用模糊神经网络单输出特性,设计

了基于 PID 结构的浓密机耙架扭矩的双重模糊神经网络控制算法,采用 PLC 现场控制,解决浓密机底流浓度难以控制的问题,提高浓密脱水过程浓度控制的精准性。

1 浓密机扭矩关系模型

某金矿采用全尾砂充填工艺,选矿厂全尾砂经深锥浓密机浓密至约 72% 浓度后混合胶凝材料进行充填,实际使用过程中发现浓密机底流浓度较难控制,连续放砂浓度不稳定,甚至出现压耙的问题,料浆高度在 3~3.5 m 时会发生扭矩急速上升导致停转,主要原因为底部料浆浓度过高,屈服应力急剧上升,达到耙架停机扭矩值。为解决这一问题,在耙架底部平均分布安装压水旋喷装置,旋喷方向与耙架转向相同,浓度过高时稀释底部料浆浓度,活化料浆状态。

开展基础试验,建立浓密机扭矩模型进行分析并控制,全尾砂性质见表 1,深锥浓密机设定参数见表 2。

表 1 尾砂性质

Table 1 Properties of tailings

Name	True density/(t · m ⁻³)	Porosity/%	+150 μm/%	-37 μm/%
Full tailings	2.6	53.2	15	42.5

表 2 深锥浓密机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of deep cone thickener

Parameter	Value
Diameter/m	16
Height of side wall/m	8
Cone angle of pool floor/rad	30
Designed rake rack torque/N · m	1 875 000
Normal operating torque/N · m	468 750
Rake speed/(r · min ⁻¹)	0.199
Processing capacity/(t · h ⁻¹)	90
Slurry volume/(m ³ · h ⁻¹)	163
Feed concentration/%	41
Underflow concentration/%	72 ± 1.5%
Clarity of overflow water/(r · min ⁻¹)	Solid content ≤ 300
Transmission mode	Center drive, hydraulic drive

正常工作状态下,浓密耙架扭矩与料浆高度,料浆屈服应力和耙架结有关,浓密机耙架扭矩 T ^[10-11] 计算公式如下:

$$T = \sum_{i=1}^4 T_{Ei} = \sum_{i=1}^4 (2\pi r_i h (r_1^2 + r_2^2) + \frac{4}{3} \pi \tau (r_2^3 - r_1^3)) \quad (1)$$

式中, τ 为矿浆屈服应力, Pa, r_1 和 r_2 分别为立柱内、外侧面扫过的圆柱面半径, m; 参考浓密机结构耙架扭矩为 4 个立柱扭矩之和。

深锥浓密机为研究对象代入参数进行工程分析, $r_2 = 8$ m 代入上式得:

$$T = (1\,607.68h + 8\,574.29) \cdot \tau \quad (2)$$

式中, T 为浓密机耙架扭矩, N · m。

根据高通等提出的关于浓度与流变参数影响规律^[12-14],开展浓密机底流浓度与屈服应力关系试验,拟合了浓密机底流浓度与屈服应力函数关系见图 1。

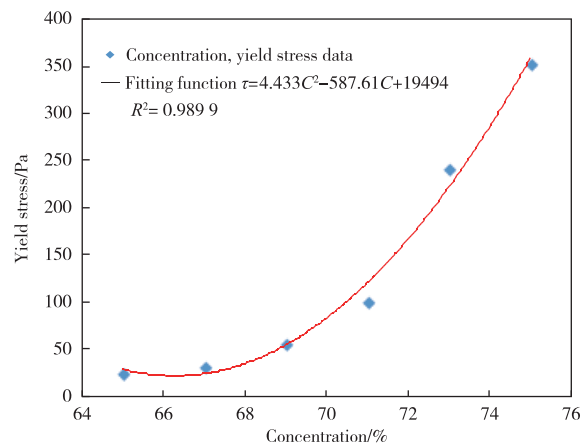


图 1 底流浓度与屈服应力函数关系

Fig. 1 Relationship between underflow concentration and yield stress function

旋喷装置工作时对料浆产生稀释作用和增加反向扭矩,现场安装供水流量为 $20 \text{ m}^3/\text{h}$ 水泵进行供水,且仅对浓密机底部 1.5 m 范围内料浆进行稀释作用,稀释后的浓度可由式(3)求得:

$$C_2 = \frac{20t(1 - 0.615C_1)}{301.44C_1} \quad (3)$$

式中, C_2 为稀释后的浓度,%; C_1 为初始浓度,%; t 为喷水时间, h。

开启旋喷装置后浓度与屈服应力关系见式(4)。

$$\tau = 4.433C_2^2 - 587.61C_2 + 19494 \quad (4)$$

式中, τ 为屈服应力, Pa。

开启旋喷装置时产生反向扭矩公式见式(5)。

$$N = l \cdot m \cdot v \cdot \epsilon(t) \quad (5)$$

式中, N 为扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; l 为距离中心点力臂长度, m; m 为旋喷质量, kg; v 为喷水流量 m/s ; $\epsilon(t)$ 为引入阶跃函数,由式(5)可知开启旋喷时产生反向扭矩为定值。

参照式(2)增加旋喷装置后的耙架扭矩公式见式(6),其中旋喷增大扭矩,稀释作用降低扭矩。

$$T = (1607.68h + 8574.29) \cdot \tau + N \quad (6)$$

取旋喷 1 h、流量 $20 \text{ m}^3/\text{h}$,利用 Python 绘制扭矩、料浆高度函数图像见图 2,引入旋喷后耙架扭矩降低,选择合适的流量和对旋喷时间的有效控制,可改变浓度急速上升造成耙架扭矩急速增大的情况。

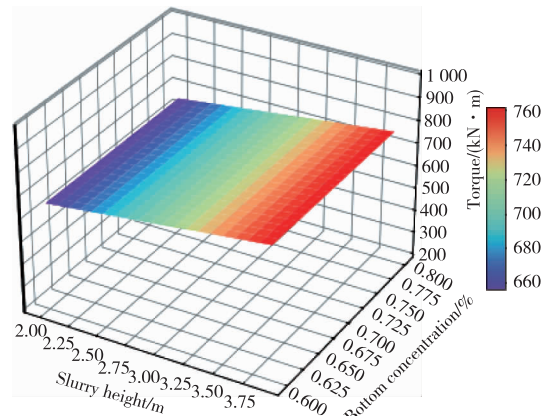


图 2 料浆高度、初始底流浓度与扭矩关系

Fig. 2 The relationship between slurry height, initial underflow concentration and torque

2 扭矩智能模糊神经网络 PID 模型建立

2.1 双重模糊控制网络结构

以旋喷装置工作时间,泥层高度为模糊控制变量,控制底流浓度和扭矩稳定。将 T-S 型模糊推理系统与神经网络结合起来,将输出作为输入的线性表达式,利用神经网络对模糊系统的隶属函数参数等进行在线自学习^[15-16],利用其单输出特性,扩展至 2 重网络。利用上节模型进行在线调节参数,实现浓密机耙架扭矩的自适应控制调节,控制原理见图 3。

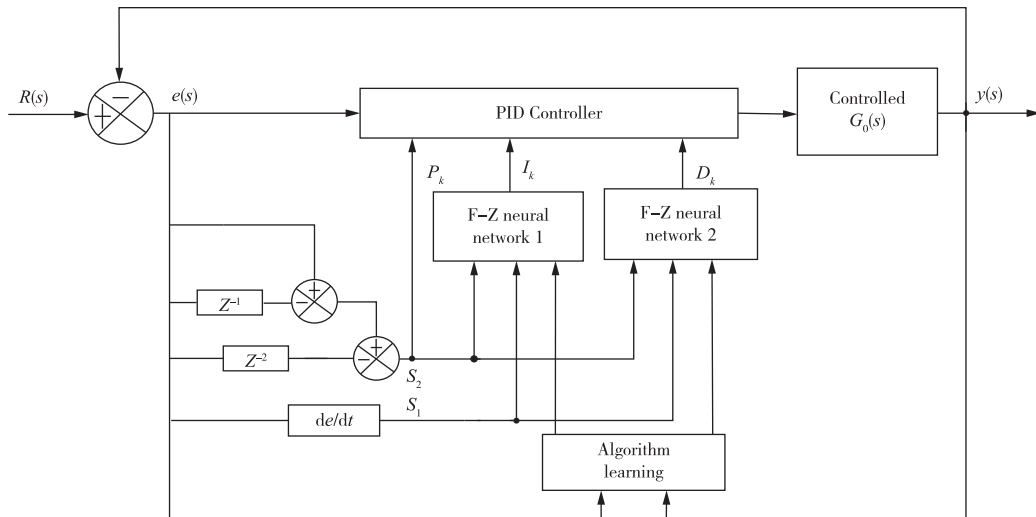


图 3 模糊神经网络 PID 控制系统

Fig. 3 Fuzzy neural network PID control system

将变量 S_1 、 S_2 同时送入网络 1、网络 2 进行数据模型训练,两个网络分别输出 PID 参数 I_k 、 D_k 进行实时调节,双重网络均采用 5 层基本结构,每个输入

变量取 7 个模糊语言变量,根据模糊子集的个数生成 49 条模糊控制规则^[17],采用神经网络学习算法,其神经元数学模型见图 4。

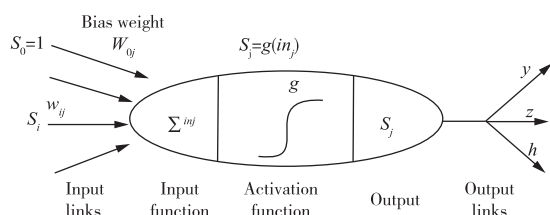


图4 神经元数学模型

Fig. 4 A mathematical model of neurons

2.2 神经网络算法规则

一阶模糊推理规则表达式为:

$$\begin{cases} y_m = p_{L0} + p_{L1} s_1 + p_{L2} s_2 (S_1 = A \cap S_2 = B) \\ m = 1, 2, \dots, N = 49 \end{cases} \quad (7)$$

式中, S_1 、 S_2 为系统输入; A 、 B 为模糊语言变量; p_{L0} 、 p_{L1} 、 p_{L2} 为常数; N 为网络节点序号。

I_k 、 D_k 两个参数求解网络具有相同的结构, 首先, 需要消除多层网络中的次要复杂性, 网络有多个输出时认为网络实现了一个向量函数 h 而不是单值函数, 目标输出也是向量, 对于网络中任何误差向量的分量之和 $y - h_w(x)$ 的损耗函数可由式(8)表示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial w} \text{Loss}(W) &= \frac{\partial}{\partial w} |y - h_w(x)|^2 = \\ &= \sum_k \frac{\partial}{\partial w} (y_k - a_k)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, k 为所有输出层的结点。式(8)可将 m -输出学习问题分解为 m 个独立学习问题, 主要的复杂性来源于隐藏层, 可以用反向传播误差更新权重。

反向传播过程, 首先, 用观察到的误差, 计算输出单元的 Δ 值; 从输出层开始, 重复下述步骤, 直到达到最早的隐藏层; 将 Δ 值传播回其前一层, 更新这两层之间的权重。

网络1的第一层为传递层, 即:

$$\begin{cases} C^{[1]}_i = S_i \\ i = 1, 2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, C_i 为第1层第 i 个节点的输出, 上标 $[\]$ 表示网络层数。

第二层为常规隶属度函数, 选择7个变量作为模糊子集合, 采用高斯函数隶属度函数作为激活函数, 隶属度函数用 $u^{[2]j}$ 表示。

第三层为规则层, 输入输出相乘, 每个节点表示一条模糊规则, 第四层进行归一化计算, 第五层为接模糊层, 计算每个模糊规则归一化后的值, 利用加权系数平均法, 计算系统输出, 参考式(7)可知:

$$\begin{cases} z_L^{[5]} = \sum_{r=0}^2 p_{Lr}^{[5]} S_r \\ I_k = C^{[5]} = \sum_{L=1}^N \overline{C_L^{[4]}} z_L^{[5]} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} h_L^{[5]} = \sum_{r=0}^2 p_{Lr}^{[5]'} S_r \\ D_k = \sum_{L=1}^N \overline{C_L^{[4]}} h_L^{[5]} \end{cases} \quad (11)$$

式中, I_k 、 D_k 为PID控制参数, $z_L^{[5]}$ 、 $h_L^{[5]}$ 为每个规则的自适应值, 即第4层到第5层的连接权; $p_{Lr}^{[5]}$ 、 $p_{Lr}^{[5]'}$ 为两者的权值参数。

模糊神经网络输入输出可线性表达保证了输出的连续性, 逼近性更好, 控制精度更高。系统误差函数为式(12)。

$$J = \frac{1}{2} [R(k) - Y(k)]^2 \quad (12)$$

式中, $R(k)$ 为期望输出, 表示目标浓度值, $Y(k)$ 为实际输出, 表示浓度反馈值。

由式(10)、(11)可知利用模糊神经网络单输出特性, 建立2个PID参数 I_k 、 D_k 的双重网络模型, 每个模型中参数各自独立, 能够使控制系统每个参数独立快速学习, 更平滑的接近目标值, 具有超调量小, 相应快的特点。

3 算法仿真分析

浓密机耙架旋喷底流浓度控制可以看成由惯性环节和积分环节组成的带有滞后的二阶惯性系统, 其传递函数为式(13)。

$$G(S) = \frac{K}{(T_{1s} + 1)(T_{2s} + 1)} e^{-\tau_0 s} \quad (13)$$

式中, S 为复变量, K 为静态增益, T_{1s} 、 T_{2s} 为时间常数; s 、 τ_0 为滞后时间, s 。

设料浆高度3.5 m, 耙架目标扭矩为470 kN·m, 浓密机底流浓度71.5%, 在扭矩600 kN·m、底流浓度73.5%时开始采用全自动旋喷造浆降低扭矩, 根据公式和模型, 仿真模型具体参数取值 $K=1$, $T_{1s}=200$ 、 $T_{2s}=150$ 、 $\tau_0=70$, 由时间参量比值看出属于典型大滞后过程。将双重网络模糊神经PID、神经网络PID、常规PID的学习率设为 $\eta=0.004$, 动量系数设为 $\alpha=0.004$, 选取仿真时间4 000 s, 采样周期1 s, 通过传统方法计算PID控制参数 $P_k=2.0$ 、 $I_k=0.016$ 、 $D_k=140$, 通过MATLAB仿真出系统响应曲线见图5, 3种算法性能指标参数见表3。

由图5和表3可知, 双重模糊神经网络和神经网络PID相比, 虽然下降调节时间较长, 但是超调量、调节时间、延迟时间较小稳定性更高, 模糊自适应

应性更强,实际应用时扭矩及浓度控制更稳定,传统PID具有较大超调量,调节时出现大幅变化,系统稳定性最差,甚至出现发散现象。

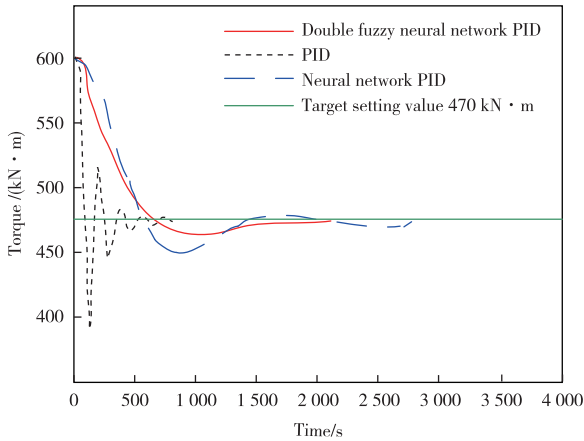


图5 3种算法输出响应曲线

Fig. 5 Three algorithms output response curves

表3 算法性能指标参数

Table 3 Algorithm performance parameters

Parameter indicators	Control algorithm		
	Double fuzzy neural network	Neural network PID	PID
Overshoot/%	2.55	4.26	19.15
Adjust time/s	1 709.32	2 820.39	96.25
Delay time/s	112.57	179.17	6.18
Drop time/s	675.35	537.54	87.58

4 工程应用

控制主单元采用西门子 PLC1215C,旋喷及液压站电机选择软启方式。智能防压耙程序架构见图6,主要包括状态分析、过程控制、事件处理、数据通信、程序加密5部分。

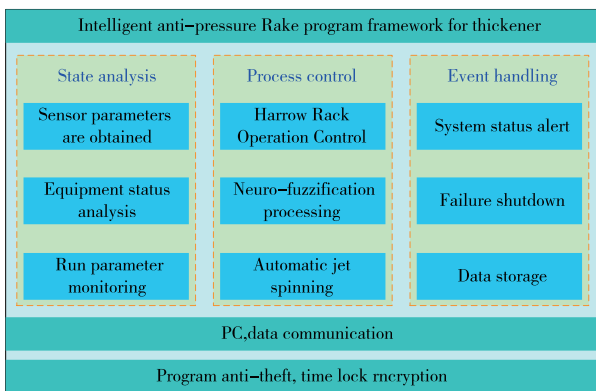


图6 防压耙程序架构

Fig. 6 Anti-pressure rake program architecture

安装旋喷装置、使用神经模糊PID算法改造后统计一个月时间每班底流浓度充填时间数据平均值,统计浓密机改造之前一个月每班平均浓度充填

时间数据,底流浓度大于68.3%以上开始统计,绘制充填时浓密机底流浓度时间比较曲线见图7,改造后浓密机底流浓度控制更加稳定波动更小,充填期间浓度数据标准差1.44%,改造前浓度数据标准差1.81%,连续充填时长延长0.7 h,且改造之后未出现压耙现象。

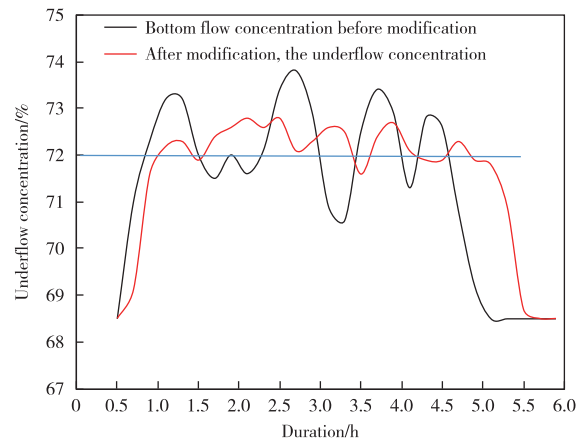


图7 改造前后底流浓度时间趋势图

Fig. 7 Concentration time trend before and after modification

5 结论

1)通过旋喷装置对耙架扭矩影响关系模型可知,旋喷装置工作时对料浆产生稀释作用和增加反向扭矩,能有效改变浓密机料位在3~3.5 m时扭矩突然升高问题。

2)采用5层基本结构,建立了双重模糊神经网络PID控制算法,按照浓密机实际扭矩调节进行仿真,双重模糊神经网络PID算法超调量2.55%,调节时间1 709.32 s;神经网络PID算法超调量4.26%,调节时间2 820.39 s;传统PID超调量19.15%,调节时间96.25 s。传统PID控制算法稳定性最差,甚至出现发散现象,双重模糊神经网络PID算法稳定性最高,可进一步提高充填底流浓度稳定性。

3)工程应用表明,耙架底部安装旋喷装置、采用双重神经模糊PID算法后浓度标准差为1.44%,较之前1.81%浓度控制更稳定,不会出现扭矩急剧增大现象,连续高浓度充填时间延长0.7 h,且改造之后未出现压耙现象。

参考文献:

- [1] 袁兆麟,何润姿,姚超,等.基于强化学习的浓密机底流浓度在线控制算法[J].自动化学报,2021,47(7): 1558-1571.
YUAN Zhaolin, HE Runzi, YAO Chao, et al. Online reinforcement learning control algorithm for concentration

- of thickener underflow[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021,47(7):1558-1571.
- [2] 丁亮亮,冯建,高大林,等.白象山铁矿一键充填智能化系统研究与应用[J].*现代矿业*,2022,38(12):18-21.
DING Liangliang, FENG Jian, GAO Dalin, et al. Research and application of one-key filling intelligent system in Baixiangshan iron mine[J]. *Modern Mining*, 2022,38(12):18-21.
- [3] 王旭,赵博实.浓密脱水过程智能控制系统设计与应用[J].*中国矿业*,2019,28(增刊2):205-208,213.
WANG Xu, ZHAO Boshi, Design and application of intelligent control system for thickening and dewatering processes [J]. *China Mining Magazine*, 2019,28(Suppl. 2):205-208,213.
- [4] 周旭,金晓刚,刘培正,等.基于动态浓密试验的深锥浓密机底流浓度预测模型[J].*金属矿山*,2017,46(12):39-43.
ZHOU Xu, JIN Xiaogang, LIU Peizheng, et al. Prediction model for underflow concentration of deep cone thickener based on dynamic thickening experimentation[J]. *Metal Mine*,2017,46(12):39-43.
- [5] TAN C K, BAO J, BICKERT G. A study on model predictive control in paste thickeners with rake torque constraint[J]. *Minerals Engineering*,2017,105:52-62.
- [6] LI H, LI R, WU F. A New control performance evaluation based on lqg benchmark for the heating furnace temperature control system [J]. *Processes*, 2020,8(11):1428. DOI:10.3390/pr8111428.
- [7] ZHAO H, ZHENG J. Design and research on temperature control system of electric furnace based on PLC touch screen integrated machine [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020,914(1):012034(6pp). DOI: 10.1088/1757-899X/914/1/012034.
- [8] HUO H W. Research on unmanned ship control system based on fuzzy PID[J]. *Journal of Physics:Conference Series*,2021,1852(2):022066. DOI:10.19693/j.issn.1673-3185.01518-en.
- [9] 李志清,李美,付丽荣,等.遗传算法优化的空气悬架模糊PID控制[J].*机械设计与制造*,2023,386(4):22-25,33.
LI Zhiqing, LI Mei, FU Lirong, et al. Fuzzy-PID control of air suspension based on genetic algorithm optimization[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023,386(4):22-25,33.
- [10] 王勇,那庆.深锥浓密机底流质量分数与停留时间关系研究[J].*黄金*,2022,43(2):33-36.
WANG Yong, NA Qing. Study on relationship between mass fraction and residence time of underflow in deep cone thickener[J]. *Gold*,2022,43(2):33-36.
- [11] 杨莹,吴爱祥,王洪江,等.基于泥层高度的耙架扭矩力学模型及机理分析[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2019,50(1):165-171.
YANG Ying, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Mechanics model of rake torque based on sludge height and its mechanism analysis [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(1):165-171.
- [12] 高子明.膏体充填料浆流变特性试验研究及其参数预测[D].上海:上海海洋大学,2021.
GAO Ziming. Experimental research on rheological properties of paste filling slurries and prediction of parameters[D]. Shanghai:Shanghai Ocean University,2021.
- [13] 高通,孙伟,彭朝智,等.云南某锡矿全尾砂充填料浆流变参数研究[J].*有色金属工程*,2022,12(3):129-137.
GAO Tong, SUN Wei, PENG Chaozhi, et al. Study of rheological parameters of full tailing filling slurry in a tin mine in Yunnan[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2022,12(3):129-137.
- [14] 李广波,盛宇航,宋泽普,等.某矿不同级配尾砂高浓度料浆流变特性研究及优化[J].*矿业研究与开发*,2021,41(4):55-59.
LI Guangbo, SHENG Yuhang, SONG Zepu, et al. Study and optimization on rheological parameters of tailing slurry with different gradations in a mine[J]. *Mining Research and Development*,2021,41(4):55-59.
- [15] 张皓,涂雅培,高瑜翔,等.基于多重模糊神经网络的PID温度控制算法[J/OL].*西华大学学报(自然科学版)*, 1-8 [2023-02-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1686.N.20221104.1821.002.html>.
ZHANG Hao, TU Yapei, GAO Yuxiang, et al. PID temperature control algorithm based on multiple fuzzy neural networks[J/OL]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 1-8 [2023-02-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1686.N.20221104.1821.002.html>.
- [16] 张居正,王沉,朱获天,等.基于Fuzzy-TOPSIS的金矿床采矿方法优选[J].*有色金属工程*,2023,13(1):114-120.
ZHANG Juzheng, WANG Chen, ZHU Huotian, et al. Mining method optimization of gold deposit based on Fuzzy-TOPSIS [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2023,13(1):114-120.
- [17] 王增加,郭加仁,吴再海,等.基于模糊算法的充填不满管控制系统研究[J].*有色金属工程*,2022,12(10):126-130.
WANG Zengjia, GUO Jiaren, WU Zaihai, et al. Research and application of backfill empty pipe control system based on fuzzy algorithm [J]. *Nonferrous Metals Engineering*,2022,12(10):126-130.

(编辑 郭文晶)