

基于粒子群算法参数自我调整的罐区液位 自动化控制方法设计

顾玉娥

(苏州信息职业技术学院 电气与电子工程系, 江苏 苏州 215200)

摘要: 由于采集的罐区液位信号存在大量的干扰信号, 导致控制器输出的操作量不准确, 从而使得液位控制值与目标值的偏差较大, 控制精度偏低。为此, 提出基于粒子群算法参数自我调整的罐区液位自动化控制。依据罐区的结构特点与液位控制目标, 求取液位变化率与液位二阶加时滞函数, 进而设计罐区模型结构, 结合预设的控制逻辑和液位传感器提供的实时数据构造液位自动化控制器, 并通过对罐区液位输入信号进行采样和滤波, 以剔除干扰信号, 由此计算输出操作量, 基于此, 引入粒子群算法参数自我调整方法对控制器的参数进行自适应整定, 从而优化控制器参量, 实现罐区液位的控制。实验结果表明, 利用所提方法对罐区液位进行控制后, 输出的控制值与目标值基本相符, 控制精度较高。

关键词: 粒子群算法; 参数调整; 罐区结构; 控制器; 参数整定; 液位控制

中图分类号: TB486

文章编号: 1000-0682(2024)06-0013-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.003

Design of automatic control method for tank level based on particle swarm optimization algorithm parameter self adjustment

GU Yu'e

(Department of Electrical and Electronic Engineering Suzhou College of Information Technology, Jiangsu Suzhou 215200, China)

Abstract: Due to the presence of a large number of interference signals in the collected tank area liquid level signals, the controller outputs inaccurate operating quantities, resulting in a large deviation between the liquid level control value and the target value, and a low control accuracy. To this end, a tank level automatic control based on particle swarm optimization algorithm parameter self adjustment is proposed. Based on the structural characteristics and liquid level control objectives of the tank area, the liquid level change rate and the second-order time-delay function of the liquid level are calculated. Then, the tank area model structure is designed, and a liquid level automation controller is constructed by combining the preset control logic and real-time data provided by the liquid level sensor. By sampling and filtering the input signal of the tank area liquid level, interference signals are eliminated, and the output operation quantity is calculated. Based on this, a particle swarm optimization algorithm parameter self adjustment method is introduced to adaptively adjust the controller parameters, thereby optimizing the controller parameters and achieving the control of the tank area liquid level. The experimental results show that after using the proposed method to control the liquid level in the tank area, the output control value is basically consistent with the target value, and the control accuracy is high.

Keywords: particle swarm optimization algorithm; parameter adjustment; tank farm structure; controller; parameter tuning; liquid level control

收稿日期: 2024-03-01

基金项目: 2022 年江苏高校“青蓝工程”资助项目(苏教师函[2022]29 号); 2023 年江苏省高等教育教改研究立项课题(2023JSJG574)

第一作者: 顾玉娥(1982—), 女, 江苏苏州人, 汉族, 硕士, 副教授, 主要从事电气控制、自动化技术研究。

0 引言

罐区液位作为储存和输送液体介质的重要设施,其控制精度和实时性直接影响生产效率和产品质量^[1]。然而,传统的液位控制方法往往依赖于手动操作和经验调节,存在控制精度低、响应速度慢等问题,难以满足现代工业对液位控制的高要求。因此,对罐区液位进行精准控制具有重要的实际意义。

文献[2]首先对灰狼算法进行了改进,主要是利用欧氏距离变化率动态调整收敛因子,以平衡算法的全局搜索能力;同时引入了动态自适应权值,并采用改进的灰狼算法调整 PID 控制器参数,实现了精确的液位控制。该方法能够适应啤酒灌装过程中液位变化的复杂性,实现液位的稳定控制。但算法的性能受参数设置的影响很大,参数设置不当可能导致控制结果不佳。文献[3]根据储罐的结构、容量、使用场景以及液位变化的预期范围,确定垂直挡板的数量、位置、尺寸和形状等参数。当液位变化时,挡板会引导液体在子空间之间流动,减少液体的直接冲击和波动。通过合理设计挡板的结构和布局,可以实现对液位变化的被动最优控制,确保液位在预期范围内稳定波动,降低溢流和干燥的风险。该方法不需要外部能源和控制系统,仅通过物理结构设计实现液位控制,具有节能环保的优点。然而,尽管这种方法可以实现被动控制,但其控制效果受到挡板设计和储罐结构的限制,可能无法完全满足所有液位控制要求。文献[4]通过对压水堆蒸汽发生器进行数学建模,描述其动态特性和输入输出关系,根据实际工况和安全要求,设置液位控制的约束条件,并在 GPC 算法的基础上,引入自适应机制,根据系统的实时运行状态调整控制参数,实现液位的控制。该方法可以在满足安全要求的情况下进行液位控制,避免控制过多或控制不足导致的安全问题。但该算法的性能在很大程度上受系统模型精度的影响。如果模型中存在重大误差或不确定性,可能会导致控制有效性下降。

针对以上分析,为切实提高罐区液位的精准控制,该文结合粒子群算法参数自我调整方法提出了一种罐区液位自动化控制技术,旨在通过参数自调整实现液位的稳定、准确控制。

1 罐区液位自动化控制方法设计

1.1 设计罐区模型结构

罐区模型结构设计是液位自动控制系统的基

础和前提。一个合理、优化的罐区模型结构设计可以为液位自动控制系统提供稳定、可靠的工作环境,确保其正常运行和准确控制^[5]。通过对罐区模型结构的设计和优化,可以进一步提高液位自动控制系统的性能和稳定性。

罐区在存储介质上,具有粘度大、流动性差以及介电常数较小等特点,其结构特性也和罐的大小、形状、材质以及液体的性质、流量和温度等参数有关。因此,根据液位控制目标,结合罐区特点^[6],对罐区的结构进行分析,由此设计罐区模型结构。

基于罐区的动态物料平衡关系,可以得到下式:

$$Q_1 = A_0 \frac{dh}{dt} + Q_2 \quad (1)$$

式中: A_0 表示罐区横截面面积; Q_2 表示出口的流出量; Q_1 表示入口的流入量; d 表示偏导数符号; h 表示初始液位高度,其计算公式如下:

$$h = \frac{f(s)}{d_s} \quad (2)$$

式中: $f(s)$ 表示转换函数; s 表示传感器读数; d_s 表示监测时间。

基于流量传感器测量的数据,计算液体的液位变化率^[7],即:

$$\Delta h = \frac{Q_1 \times t_1}{g_0 / k_0} \quad (3)$$

式中: t_1 表示时间常数; g_0 表示尺度因子; k_0 表示平移矩阵。

结合罐区的基本结构与工作原理,在液位变化过程中引入时滞项,构造液位的二阶加时滞函数^[8],表达式为:

$$F(x) = \frac{\Delta h + 1}{\sqrt{s_0 \times p_1}} \times \frac{\|w_s \times y_0\|^2}{v_p} \quad (4)$$

式中: s_0 表示罐区的开环增益; p_1 表示属性约束; w_s 表示松弛变量; y_0 表示罐区总存储能力; v_p 表示第 p 个罐区的体积。

进而可推导出罐区的模型结构公式,表示为:

$$G_0 = F(x) \times \exp\left(-\frac{k_r}{H_c / m_0}\right) \quad (5)$$

式中: k_r 表示液位报警阈值; H_c 表示安全液位高度; m_0 表示允许的液位波动范围。

依据罐区的结构特点与液位控制目标,求取液位变化率与构造液位二阶加时滞函数,进而设计罐区模型结构,为进一步的研究工作创造条件。

1.2 构造罐区液位自动化控制器

通过构造液位自动化控制器可以根据预设的控

制逻辑来实现液位控制,结合液位传感器提供的实时数据,计算出控制输出^[9],从而调节液体的流入和流出,使液位保持在设定值附近。

为实现对罐区液位的自动化控制,引入IMC-PID控制器。首先建立液位高度与压力之间的关系式^[10],即:

$$F = \frac{h \times r_1}{|B_c|} \quad (6)$$

式中: r_1 表示罐区的液阻; B_c 表示拉普拉斯方程; F 表示压力; h 表示初始液位高度。

通过傅里叶变换方法,将时域压力变换到频域内,得到阀门节流系数^[11],计算公式为:

$$b_0 = \frac{G_0 \times F}{e_s \times q_0} / V_k \quad (7)$$

式中: G_0 表示罐区模型结构; e_s 表示传递函数增益; q_0 表示距离权值; V_k 表示多变量非线性函数。

基于结构图等等效变换原则,将罐区典型内模控制结构图转换为经典反馈控制结构图,以此得到控制器中的滤波参数^[12],公式为:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{b_0 \times \alpha_p}{\sqrt{\|D_s\|}} \\ c_2 = b_0 \sum_{i=1}^n \frac{\beta_c}{m_1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_p 表示采样序号; D_s 表示采样数值; n 表示采样次数; β_c 表示极短的时间间隔; m_1 表示离散系数; c_1 和 c_2 分别表示高通滤波参数和低通滤波参数。

引入径向基函数对控制器的基宽向量进行迭代运算,以获得被控对象的输入量^[13],表达式为:

$$R(s) = \frac{w_p(c_1 + c_2)}{|\kappa_j|} \quad (9)$$

式中: w_p 表示权值矩阵; κ_j 表示动量因子。

由此可计算得到控制器的控制律为:

$$E_p = R(s) \times \varepsilon_0 \times n' / f_d \quad (10)$$

式中: ε_0 表示控制器的放大系数; n' 表示一阶惯性环节的响应曲线; f_d 表示控制增量。

通过对罐区液位输入信号进行采样和滤波,以剔除干扰信号,并与设定值比较后运算输出操作量,从而达到调节液位平衡的目的。控制器的控制算法表达式为:

$$H' = \frac{K_p \times K_d \times E_p}{v_0} \quad (11)$$

式中: v_0 表示液位输入信号的采样周期; K_p 和 K_d 分别表示控制器的积分系数和微分系数。

根据上式可知,构造的罐区液位控制器只与被控参数 K_p 和 K_d 有关,即只有合理确定 K_p 和 K_d 这两个参量,才可得到具备优异性能的控制,进而实现罐区液位的最佳控制。因此,接下来该文采用智能优化算法对控制器的参量进行整定。

1.3 基于粒子群算法参数自我调整的控制器参数整定

由于罐区液位控制器是时滞的、时变系统,传统的优化方法对系统的动态变化的适应能力不是很好,因此,该研究选择粒子群算法参数自我调整方法对控制器的参数进行自适应整定,从而实现罐区液位的自动化监测与控制。具体实现流程如图1所示。

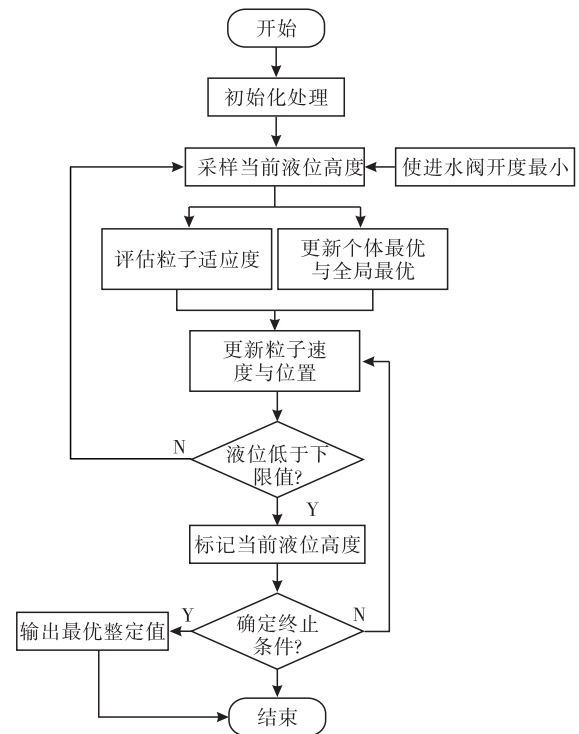


图1 基于粒子群算法参数自我调整的控制器参数整定流程

首先初始化处理算法的参数,包括搜索空间范围 I 和搜索维度 L 。并在进水阀开度最小时,对当前液位高度进行采样^[14],式为:

$$h'' = y_i / b_e \quad (12)$$

式中: y_i 表示粒子的初始速度; b_e 表示粒子权重向量。

评估局部最优粒子和全局最优粒子的适应度值,即:

$$\begin{cases} J_1 = h'' \times \varphi_y / I \\ J_2 = L \times v_d \end{cases} \quad (13)$$

式中: φ_g 表示粒子曾经达到的最优位置; v_d 表示粒子的最大速度。

对每个粒子的位置与速度进行更新, 并从 T 迭代到 $T+1$ 代^[15-16], 表达式为:

$$\begin{cases} P' = \vartheta_g (J_1 + J_2) \\ V' = P' \times \theta_k \end{cases} \quad (14)$$

式中: ϑ_g 表示加速度因子; θ_k 表示混合系数; P' 和 V' 分别表示粒子的最新位置与速度。

若当前罐区液位低于下限值时, 标记当前液位高度, 并判定此时是否满足终止条件, 若满足, 则输出控制器的最优整定值, 计算公式为:

$$\begin{cases} K_p = \frac{V'}{W_\gamma} \\ K_d = V' \times Z_\mu \end{cases} \quad (15)$$

式中: W_γ 表示粒子数量; Z_μ 表示粒子动态范围。

将粒子群算法找到的最优参数 K_p 和 K_d 应用于控制器中, 输出罐区液位的控制值 H' , 由此实现对罐区液位的自动化控制。

2 实例论证分析

为验证该文设计的基于粒子群算法参数自我调整的罐区液位自动化控制方法在实际应用中的效果, 将该文方法应用在某罐区油品计量作业中, 并对其液位控制, 根据实验结果分析该方法的控制效果。

2.1 实验准备

该罐区位于一家大型石化企业内, 主要用于储存和运输各类油品。罐区占地广阔, 布局合理, 有多个大型储罐, 分别用于储存汽油、柴油、航空煤油等不同油品。每个储罐的容量在 5000 ~ 10 000 m³ 之间不等, 根据储存的油品种类和需求进行配置。罐区的基本概况与环境布局如图 2 所示。



(a) 罐区基本概况

(b) 罐区环境布局

图 2 罐区的基本概况与环境布局

罐区共包含 10 个储罐, 每个储罐均有唯一的编号标识, 其具体储罐信息如表 1 所示。

表 1 储罐信息表

编号	类型	直径/m	设计压力/MPa
T01	立式金属内浮顶罐	20	1.0
T02	立式金属拱顶罐	25	0.8
T03	卧式金属罐	10	0.6
T04	立式金属外浮顶罐	30	1.2
T05	立式混凝土罐	22	0.9
T06	球形金属罐	15	0.7
T07	卧式金属内浮顶罐	8	0.5
T08	立式玻璃钢罐	12	0.8
T09	卧式玻璃钢罐	6	0.4
T10	地下金属罐	20	1.1

考虑到在罐区液位实际控制中, 可能会受到信号干扰、环境因素影响等问题, 导致控制结果不准确。因此, 为保证实验结果的真实性与有效性, 在测试前, 建立控制终端与罐区之间的良好连接, 以排除相关条件对液位控制结果的影响。实验终端连接硬件框图如图 3 所示。

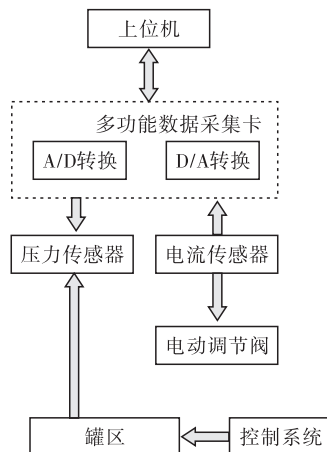


图 3 实验终端连接硬件框图

实验平台采用先进的工业自动化控制系统, 集成多功能数据采集卡、上位机软件、传感器和执行器等关键设备。数据采集卡负责实时采集罐区液位相关数据; 上位机软件用于显示数据采集卡采集的数据和执行控制算法; 电动调节阀作为执行机构, 根据上位机发出的控制信号调节开度, 从而控制罐区液体的流入和流出。

设置液位传感器测量范围为 0% ~ 100%, 压力传感器测量范围为 0 ~ 1.0 MPa, 电控阀开启范围为 0% ~ 100%。粒子群优化算法参数中, 粒子数量 30, 迭代次数 100, 惯性重量 0.9 ~ 0.4 (线性下降), 加速度系数 2.0。

首先通过数据采集卡实时采集罐区参数, 并将数据传输到上位机; 其次, 上位机接收数据后, 运行粒子群优化算法, 对控制器参数进行自调整。根据

调整后的控制参数,计算控制信号并将其发送至电动控制阀;最后,电动控制阀根据接收到的控制信号调节开度,控制罐区液体的流入和流出,从而调节液位。

根据以上实验准备与过程,对该文提出的方法进行性能测试与分析。

2.2 罐区液位自动控制结果与分析

采用文献[2]控制方法(方法1)、文献[3]控制方法(方法2)作为对比组,该文方法为实验组,以便于更加清楚地展示该文提出方法的优势。并分别采用3种方法对该罐区液位进行控制,实验结果如图4所示。

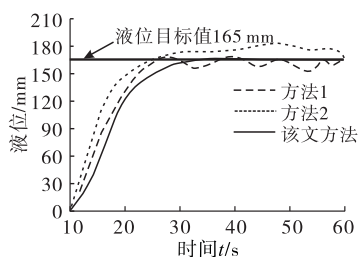


图4 罐区液位自动控制结果

通过分析图4可知,在所提方法的应用下,罐区液位的控制值与设定的目标值基本吻合,控制性能较好,这主要是由于该文方法采用的粒子群自我参数调整优化算法能够实现对控制器参数的实时调整,达到控制器优化的目的,保证了罐区液位在较短时间内趋于稳定,从而实现罐区液位的稳定精准控制。而方法1和方法2输出的液位控制值与目标值之间存在显著偏差,上下波动的幅度较大,整体控制效果不佳。由此可以说明,该文提出的方法在罐区液位自动化控制中具有更加优异的控制性能。

2.3 对比实验与分析

在上述实验基础上,为进一步体现该文方法的有效性,采用超调量指标对不同方法的控制效果进行定性评价。超调量表征是罐区液位在达到稳定状态后,控制方法的输出值超过预期值的最大幅度。超调量越小,控制方法就可以越精确地调整到所需的液位值,而不会出现过大的波动。对比结果如表2所示。

表2 基于不同方法的控制超调量结果

时间/s	控制超调量/%		
	方法1	方法2	该文方法
1000	9.6	11.3	3.2
2000	7.7	11.8	2.1
3000	10.2	12.6	4.0
4000	8.0	14.5	3.6
5000	13.7	15.0	2.5
6000	9.0	12.7	2.4

由表2中展示的数据可以看出,在不同时间步长条件下,利用该文方法进行罐区液位控制后,得到的控制超调量始终保持在5.0%以下,且远低于对照组方法。进而说明该文方法在罐区液位自动化控制方面表现更优,控制精度较高。

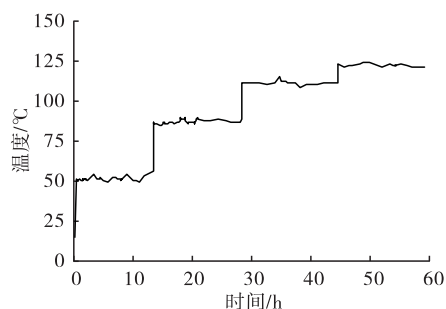
3 结束语

该文提出的基于粒子群算法参数自我调整的罐区液位自动化控制方法实现了PID控制器参数的动态优化和自整定,从而完成了罐区液位的准确控制。该研究成果为复杂系统的参数优化提供了一种新的方法,并为相关领域的研究和应用提供了有益的参考和启示。

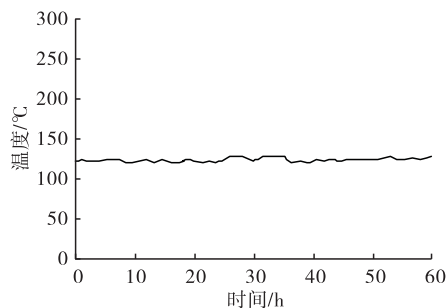
参考文献:

- [1] 张诗琳. 啤酒灌装贮液缸液位控制方法研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(01): 166-169.
- [2] 步同杰,王亚刚. 基于改进灰狼算法的啤酒灌装PID液位控制[J]. 包装工程, 2023, 44(21): 245-252.
- [3] VERN S, SHRIMALI M K, BHARTI S D, et al. Attaining optimum passive control in liquid-storage tank by using multiple vertical baffles[J]. Practice periodical on structural design and construction, 2023, 41(22): 236-239.
- [4] 叶章林,张雨飞. 基于带约束自适应GPC的压水堆蒸汽发生器液位控制研究[J]. 核科学与工程, 2022, 42(06): 1345-1353.
- [5] 王超锋,司呈勇,沈建强. 改进差分进化算法及啤酒灌装液位控制PID参数整定[J]. 包装工程, 2022, 43(19): 310-319.
- [6] 蒋帆,张宪. 基于BP神经网络的连铸结晶器液位模糊PID优化控制研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(05): 77-79+83.
- [7] 钱虹,邹明耀. 变论域自适应模糊非线性控制在蒸汽发生器液位控制中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(01): 116-126.
- [8] 张华伟,吕宝占. 一种用于双输入双输出液位控制系统的状态估计控制器的设计[J]. 机床与液压, 2022, 50(12): 100-105.
- [9] 高兴泉,肖新宇,王子硕,等. 基于WinCC的水箱液位控制系统实时仿真平台开发[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(01): 93-97.
- [10] 张栋梁,周佳磊. 基于动态故障树的核电站蒸汽发生器液位控制系统可靠性研究[J]. 原子核物理评论, 2021, 38(04): 479-486.
- [11] 蔡国良. 基于浮选过程的液位控制系统研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(05): 67-72+78.

(下转第38页)



(a) 逐渐增加温度实验



(b) 最大量程保持实验

图 10 温度测试实验

6 结论

该文设计了一套煤层气排采参数实时探测系统,该系统由井下探头和上位机软件两部分组成,其中井下探头所采集的井筒环空流速、压力及温度数据,经电缆线实时传输到上位机软件进行显示及存储。探测系统设计及加工完成后进行了实验验证,结果显示探测压力、流量及温度的量程分别为 0 ~ 10 MPa, 0 ~ 5.8 m/s 及 -55 ~ 125 °C,所对应的测量误差分别为 0.5%、3% 及 0.5 °C。煤层气排采参数实时探测系统的研制,为煤层气排采工艺的制定提供了必要的支撑及科学依据,具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 杨方亮,许红娜.“十四五”煤炭行业生态环境保护与资源综合利用发展路径分析[J].中国煤炭,2021,47

(05): 73-82.

- [2] 丁远.一种便携式瓦斯抽采管道多参数测定仪研制[J].煤矿安全,2023,54(12):199-203.
- [3] 袁亮.我国煤层气开发利用的科学思考与对策[J].科技导报,2011,29(22):3.
- [4] 徐凤银.“深部煤层气勘探开发理论与技术论文专辑”特约主编寄语[J].石油学报,2023,44(11):1750-1751.
- [5] 田忠斌,马玉龙,李貅,等.煤层采空区内煤层气储气构造半航空瞬变电磁探测——以沁水煤田为例[J].地球物理学报,2022,65(11):4495-4503.
- [6] 张松航,唐书恒,孟尚志,等.煤储层含水性及其对煤层气产出的控制机理[J].煤炭学报,2023,48(S1):171-184.
- [7] 韦波,马君慧,胡永,等.大倾角储层煤层气多层合采产量控制地质与工程因素[J].科学技术与工程,2023,23(31):13350-13360.
- [8] 郭晨,秦勇,易同生,等.基于生产特征曲线的煤层气合采干扰判别方法——以黔西地区织金区块为例[J].石油勘探与开发,2022,49(05):977-986.
- [9] 丁聪聪,苏生,方晓蕾,等.祁东井田 W 型煤层气井排采特征及排采工艺优化研究[J].中国煤炭地质,2023,35(10):23-27.
- [10] 李林,张培河,武英俊,等.沁北盆地太原组煤层地面垂直井抽采储层改造技术研究[J].煤炭技术,2023,42(06):88-91.
- [11] 张芬娜,宋云飞,朱洪迎,等.深部煤层气直井井筒液携煤粉颗粒特性分析[J].中国矿业大学学报,2021,50(06):1060-1066.
- [12] 刘谨嘉,冯堃,祝捷,等.压裂煤储层气水两相流模型及煤层气产量分析[J].中国煤炭地质,2023,35(06):9-13.
- [13] 熊至宜,张云,张丽稳,等.煤层气井筒气液两相流数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(02):153-159.

(上接第 17 页)

- [12] 钱琳琳,张福贵,王德政.基于 PCS7 的蒸发器控制优化和抗干扰策略设计[J].实验室研究与探索,2021,40(08):52-56+189.
- [13] 梁豪杰,赵翠莲.基于标准金属量器建模的液位控制方法[J].电子测量技术,2021,44(16):31-36.
- [14] 李磊,李俊红,顾菊平,等.双容水箱基于 QPSO 算法

的 PID 控制研究[J].控制工程,2021,28(08):1553-1558.

- [15] 李红旗.多槽浮选机液位差研究与液位调整机构设计[J].煤炭工程,2022,54(10):22-25.
- [16] 李捷,王毫旗.基于遗传萤火虫算法的液压挖掘机铲斗控制研究[J].计算机仿真,2022,39(8):262-267+290.