

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.050

# 重载刮板机伺服驱动液压缸负载口独立调平控制方法

李晓围<sup>1</sup>, 李维<sup>1</sup>, 陈峰<sup>2</sup>

(1. 国能神东煤炭布尔台煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017200;

2. 常州科研试制中心有限公司, 江苏 常州 213023)

**摘 要:** 重载刮板机的伺服驱动系统在负载变化时, 面临阻尼比和闭环刚度较低的挑战, 且这些特性会随负载质心位移和平台倾斜角度的变化而波动。提出采用负载口独立调平控制技术, 通过精确、实时地控制油源压力和液压泵输出流量, 以适应重载刮板机运行中的复杂负载工况。构建数学模型来模拟运行状态和确定吸空临界条件; 设计基于扩展状态观测器的油源压力控制器和自适应流量控制器。实验结果表明: 采用该技术后, 重载刮板机在各种负载和控制条件下均表现出良好的控制性能和稳定性。特别是在控制过程中, 比例阀位移量显著降低, 表明该方法在精确控制的同时, 还能有效降低液压系统的能耗和磨损。

**关键词:** 重载刮板机; 液压缸负载口; 独立调平控制; 状态观测器; 油源压力; 输出流量

**中图分类号:** TH137      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-5276(2025)05-0257-05

## Independent Leveling Control Method of Load Port of Servo Driven Hydraulic Cylinder for Heavy Duty Scraper

LI Xiaowei<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>2</sup>

(1. Guoneng Shendong Coal Bultai Coal Mine, Ordos 017200, China;

2. Changzhou Research and Trial Production Center Co., Ltd., Changzhou 213023, China)

**Abstract:** The servo drive system of heavy-duty scraper faces challenges of low damping ratio and closed-loop stiffness when the load changes, and these characteristics will fluctuate with the displacement of the load center of gravity and the tilt angle of the platform. Load port independent leveling control technology is adopted to accurately control the oil source pressure and hydraulic pump output flow rate in real time, so as to adapt to the complex load conditions during the operation of heavy-duty scraper machines. A mathematical model is constructed to simulate the operating state and determine the critical suction conditions, and an oil source pressure controller and an adaptive flow controller based on an extended state observed are designed. The experimental results show that the heavy-duty scraper machine exhibits good control performance and stability under various loads and control conditions by adopting the technology. Especially during the control process, the displacement of the proportional valve is significantly reduced, indicating that this method not only achieves precise control but also effectively reduces the energy consumption and wear of the hydraulic system.

**Keywords:** heavy-duty scraper; hydraulic cylinder load port; independent leveling control; state observer; oil source pressure; output flow

## 0 引言

重载刮板机在运行过程中, 由于负载的变化和物料分布的不均匀, 往往会导致刮板机各部位受力不均<sup>[1-2]</sup>, 进而产生振动和倾斜。因此, 如何实现重载刮板机的精确调平控制, 成为当前工业控制领域亟待解决的重要问题<sup>[3-5]</sup>。

关锋等<sup>[6]</sup>聚焦于截割部升降油缸的负载口独立控制, 实现了刮板机局部位置的精准调整, 但在流量控制策略下, 负载剧烈变化时可能引发流量

供应不足和压力分布不均的问题, 影响调整精度。程敏等<sup>[7]</sup>通过引入非线性滤波技术, 有效抑制了负载口独立控制系统中的振动, 但在负载剧烈变化或外部干扰下, 该技术仍难以避免由吸空现象导致的压力和流量波动, 进而影响控制精度。陈正等<sup>[8]</sup>基于容腔压力规划, 实现了非模式切换下的负载口独立电液系统运动控制, 提升了系统动态性能, 但在负载剧烈变化时, 系统可能无法平稳过渡到新压力状态, 同样面临控制精度下降的问题。KOGLER<sup>[9]</sup>研究了液压缸驱动系统的动态控

**基金项目:** 内蒙古关键技术攻关项目(2023YY0315)

**第一作者简介:** 李晓围(1987—), 男, 陕西榆林人, 工程师, 本科, 研究方向为矿井辅助运输无人驾驶, mmims283@163.com。

制,尽管控制算法能应对复杂多变的工作环境和负载条件,但频繁的压力波动和液压元件故障仍是系统稳定运行的隐患。

对此,本文提出重载刮板机伺服驱动液压缸负载口独立调平控制方法。

## 1 重载刮板机伺服驱动液压缸负载口独立调平控制方法

### 1.1 负载口独立调平控制系统设计

为有效实现重载刮板机伺服驱动液压缸负载口独立调平控制,本文深入研究了负载口独立调平控制系统。该系统通过引入两个独立的电液比例阀,如图1所示,实现了对液压缸两个工作腔(通常指有杆腔和无杆腔)节流面积的精确控制<sup>[10]</sup>。相较于传统的阀控缸系统,这一设计显著的优势在于能够分别对液压缸两腔的压力或流量进行独立调节,提供了更为灵活和精确的控制方式。

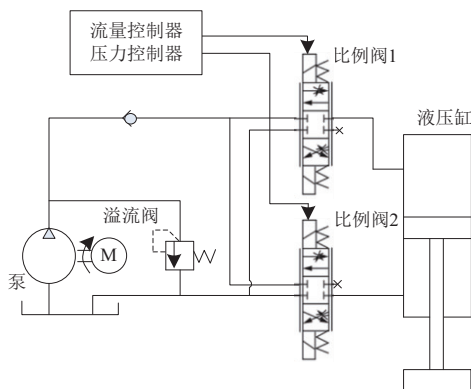


图1 负载口独立调平控制系统原理

在负载口独立调平控制系统的控制器中,采用压力-流量复合控制策略。具体控制策略如图2所示。

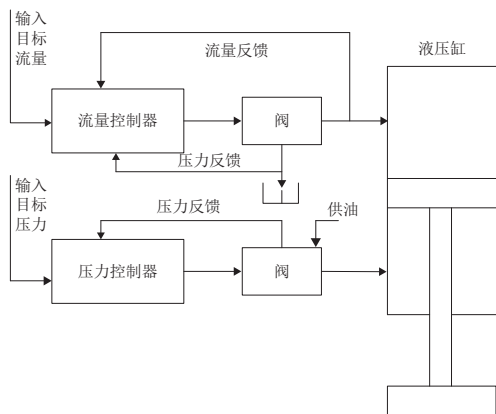


图2 压力-流量复合控制策略

对于无杆腔,实施流量控制策略,以精确调控液压缸的运动速度,确保调平过程的平稳与高效。同时,对于有杆腔,则采用了压力控制策略,从而有效预防因压力过低而导致的吸空现象,降低负载波动,进而显著提高负载口独立调平控制系统的整体稳定性和调平精度。

### 1.2 控制系统数学模型构建

为了深入探究负载变化对系统的影响,本文构建了一个包含电液比例阀流量特性方程、液压缸力平衡方程等关键要素的数学模型,融入阻尼系数和刚度参数,有效体现负载变化。在模型中分析在不同工况(如负载突变等)下,当有杆腔压力降低到不足以维持液压油的正常流动,即低于某一临界值时,就会判定为吸空临界条件。

设比例阀的阀芯运动过程中入口压力  $P_A$  和出口压力  $P_B$  保持恒定,控制腔压力  $P_C$  为恒定值<sup>[11]</sup>。基于这些假设以及液压系统的基本原理,建立先导阀平均流量  $Q_p$  如下:

$$Q_p = S \cdot J_p \cdot \sqrt{P_C - P_B} \quad (1)$$

式中:  $S$  为 PWM 控制信号的占空比,  $S \in [0, 1]$ ;  $J_p$  为通过先导阀液传导系数;  $P_C$  和  $P_B$  分别为控制腔压力和主阀出口压力<sup>[12]</sup>。流过主阀芯反馈槽的可变节流口流量  $Q_s$  为

$$Q_s = J_s \cdot \sqrt{P_A - P_C} \quad (2)$$

式中  $J_s$  为通过反馈槽液传导系数,其由反馈槽流量系数  $c_{ds}$ 、面积梯度  $w_s$ 、主阀芯位移  $x_M$  和预开口量  $x_0$  组成,具体为  $J_s = c_{ds} \cdot w_s \cdot (x_0 + x_M)^2 \cdot \sqrt{\rho}$ 。流过主阀的流量  $Q_M$  可以表示为

$$Q_M = J_M \cdot \sqrt{P_A - P_B} \quad (3)$$

式中  $J_M$  为通过主阀芯的液传导系数。该参数由主阀芯流量系数  $c_{dM}$ 、面积梯度  $w_M$  和主阀芯位移  $x_M$  组成<sup>[13]</sup>,即  $J_M = c_{dM} \cdot w_M \cdot x_M^2 \cdot \sqrt{\rho}$ 。

稳态流量放大倍数:当负载口独立调平控制系统处于稳态运行时,主阀对先导阀的流量放大倍数  $g$  为

$$g = \frac{Q_M}{Q_p} = \sqrt{2} \cdot \frac{J_M}{S \cdot J_p} \quad (4)$$

总阀出口流量:通过先导阀流量和主阀流量之和计算负载口独立调平控制系统总阀出口流量。

活塞杆力平衡方程:在负载口独立调平控制系统运行过程中,活塞杆的力平衡方程可表示为

$$A_1 \cdot P_1 - A_2 \cdot P_2 = \xi \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k_h \cdot x + F_1 \quad (5)$$

式中:  $\xi$  为活塞及负载质量;  $F_l$  为外负载;  $b$  为阻尼系数;  $k_h$  为弹性负载刚度。

### 1.3 负载口独立调平控制器设计

基于上述数学模型,即可展开对控制器的研究。本文设计压力-流量复合控制策略,分别设计压力控制器与流量控制器,以确保液压缸在面临超越负载时能够保持平稳、高效的运行状态。

#### 1) 基于 ESO 的油源压力控制器设计

定义最小油源压力  $P_{s-\min}$  为满足液压缸所需的最小压力,可通过式(6)计算。

$$P_{s-\min} = P_l + \Delta P_s = \left( \frac{P_2 A_2 + F_d + m \ddot{x}_L}{A_1} \right) + \Delta P_s \quad (6)$$

式中:  $F_d$  为扰动力;  $m$  为负载质量;  $\ddot{x}_L$  为负载的加速度;  $\Delta P_s$  为油源压力余量。

定义状态变量为  $x = [x_1, x_2] = [x_L, \dot{x}_L]$ ,  $x_L$  为负载的位移,  $\dot{x}_L$  为负载的速度。将控制输入  $u$  定义为  $P_1 A_1 - P_2 A_2$ , 控制输入增益定义为  $b = 1/m$ , 控制输出满足  $y = x_1$ 。

将系统的总扰动  $f(x_1, x_2, t, w(t))$  扩展为  $x_3 = f(x_1, x_2, t)$  [14], 并定义其导数为  $\dot{x}_3 = f(x_1, x_2, t)$ , 从而获取一个三阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = g(x_1, x_2, t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7)$$

为实现更精确的压力控制,特别是在接近吸空临界条件时能够动态调整油源压力的输出流量,本研究引入了扩展状态观测器(extended state observer, ESO)。通过 ESO,能够实时估算系统中的未知状态和干扰,包括负载力的变化。定义状态变量  $z_1, z_2, z_3$  分别对应  $x_1, x_2, x_3$  的观测量。此时,ESO 的动态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \vartheta_1 e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \vartheta_2 h(e_1, \alpha_1, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_3 = -\vartheta_3 h(e_1, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $e_1 = z_1 - y$  为输出观测误差;  $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$  为 ESO 的可调增益参数,  $\alpha_1, \alpha_2, \delta$  为可调滤波参数 [15];  $h(\cdot)$  为一个非线性函数,用于处理观测误差。

通过 ESO 得到负载力的估计值  $F'_d = z_3$ 。可以进一步确定所需的油源压力  $P_s$ :

$$P_s = k_d |F'_d| + k_e |\ddot{x}_L|_{\max} + \Delta P'_s \quad (9)$$

式中:  $k_d, k_e$  分别为油源压力的扰动力和速度影响因子;  $|\ddot{x}_L|_{\max}$  表示负载运动的最大加速度;  $\Delta P'_s = P_2 A_2 / A_1 + \Delta P_s$ 。油源压力和流量存在一定关系,调整油源压力可间接动态调整输出流量。当检测到负载加速度突然增大接近吸空临界条件时,扩展状态观测器(ESO)估算负载力变化,依据式(9)算出需增加油源压力,随着压力升高,按照液压系统特性,输出流量相应调整,从而满足负载需求,避免吸空现象。

#### 2) 液压泵流量控制器设计

基于上述的数学模型,在流量控制器中定义重载刮板机伺服驱动液压缸液压泵的输出流量,即油源流量  $q_{Vs}$ ,其可以通过式(10)表示。

$$q_{Vs} = nV - O_p P_s \quad (10)$$

式中:  $n$  为电机转速;  $V$  为液压泵的排量;  $O_p$  为液压泵泄漏系数 [16]。根据式(10),若获取到油源流量和油源压力,即可得到电机的期望转速,进而对电机进行有效控制。为了实现这一目标,本文设计一个自适应流量预测器。

在接近吸空临界条件时,系统需要快速响应负载变化来调整液压泵输出流量。预测负载速度  $\dot{x}'_{k+1}$  是关键的第一步。这可以通过建立一个预测模型来实现。

$$\dot{x}'_{k+1} = a\dot{x}_{k-\lambda} + b\dot{x}_{k-\lambda-1} + c\dot{x}_{k-\lambda-2} + e_{k+1} \quad (11)$$

式中:  $a, b, c$  为模型参数,可以通过最小二乘法等辨识方法得到 [17];  $\lambda$  为引入的延迟项系数,用于提高预测的精准度;  $e_{k+1}$  为预测误差。

接近吸空临界条件时,系统状态处于较为敏感的状态。此时,模型会根据系统的实时状态进行调整,以更精准地预测负载速度。当获取预测的负载速度后,就可以根据负载速度与负载流量之间的关系计算出负载流量  $\hat{q}_{VL}$  [18]。

$$\hat{q}_{VL} = \begin{cases} A_1 \dot{x}'_{k+1}, & \dot{x}'_{k+1} > 0 \\ 0, & \dot{x}'_{k+1} = 0 \\ A_2 \dot{x}'_{k+1}, & \dot{x}'_{k+1} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

如果负载出现突然增大的趋势(这可能导致接近吸空临界条件),系统会更频繁地更新负载速度的预测值,从而更及时地调整负载流量的计算结果。

在接近吸空临界条件时,系统会根据当前的负载流量以及其他系统状态,动态调整流量安全裕量等参数,以确保准确计算油源流量 [19]。根据计算出的油源流量,通过式(13)获取电机期望转速  $n_R$ 。

$$n_R = \begin{cases} n_0 & (q_{Vs} + O_p P_s)/V \leq n_0 \\ (q_{Vs} + O_p P_s)/V & (q_{Vs} + O_p P_s)/V > n_0 \end{cases} \quad (13)$$

式中  $n_0$  为电机最低稳定转速。

在接近吸空临界条件时,系统会根据当前的电机状态(如电机的温度、当前转速等)以及计算出的油源流量,自动调整控制策略<sup>[20]</sup>。通过这一自适应流量控制器,可以有效地控制液压泵输出流量,从而满足重载刮板机伺服驱动液压缸负载口流量控制。

## 2 实验分析

实验平台搭载了负载口独立调平控制系统,其中包括精密的油源压力控制器和自适应流量控制器。这两个控制器均基于扩展状态观测器设计,能够实时监测并响应系统状态。实验平台还配备了高精度的传感器和数据采集系统,用于实时记录油源压力、液压泵输出流量、负载变化等关键参数。实验平台如图3所示。

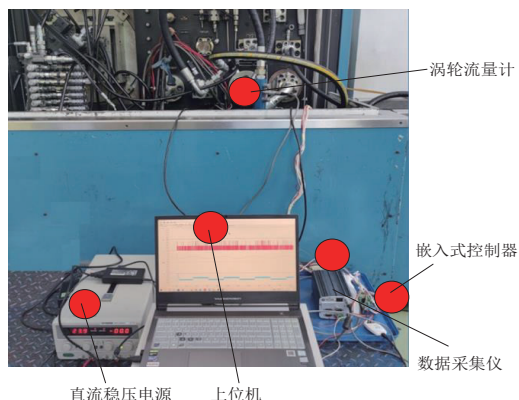


图3 实验平台设计

实验中,ESO的可调增益参数为10、20、30,可调滤波参数为0.1、0.2、0.3,自适应流量预测器延迟项系数为0.5。

### 1) 流量跃阶控制实验

将初始输入流量设定为20 L/min,当重载刮板机伺服驱动液压缸运行至5 s时,将流量迅速调整至60 L/min。实验结果如图4所示。

分析图4可知,在目标流量由20 L/min迅速提升至60 L/min的过程中,控制流量紧密跟随目标值,展现了出色的控制性能和稳定性。这是因为本文方法通过为负载口独立调平系统建立的数学模型,精确模拟了系统运行及负载变动情况。基于此模型,自适应流量控制器能实时监控系统状态,依据负载和系统需求灵活调整液压泵输出流量,确保了系统在流量突变时的快速响应能力,

从而保持了流量的稳定与精确。

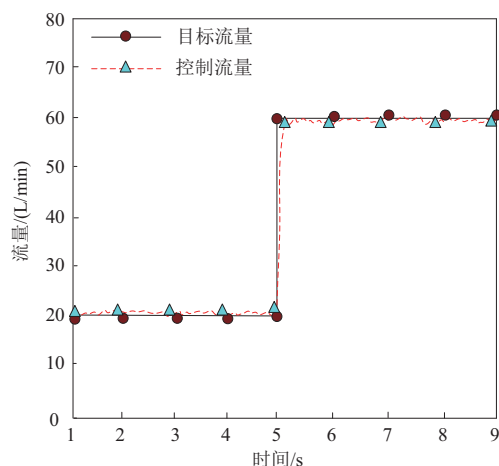


图4 流量控制能力分析

### 2) 压力变化控制实验

设置初始输入压力为2.0 MPa,当运行时间达到3 s时,上调压力至5.0 MPa,并在该压力下持续运行直至7 s时,恢复压力为2.0 MPa状态。实验结果如图5所示。

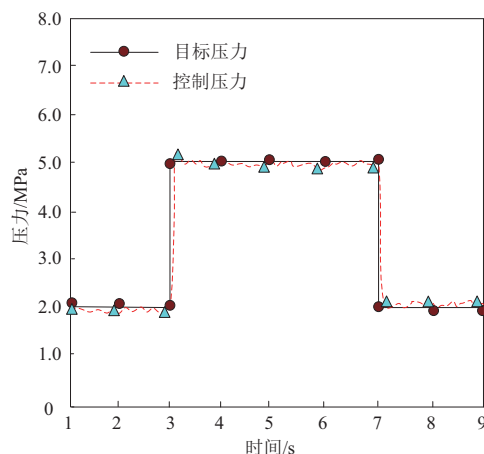


图5 压力变化控制能力分析

分析图5可知,本文方法在应对输入压力波动时,压力的波动被有效限制,与目标压力的偏差维持在允许范围内,表明该方法具有高度稳定性。这是因为本文方法构建负载口独立调平系统数学模型的精确性,模拟了系统行为和负载动态。基于此模型,油源压力控制器实时监控系统压力并依据负载需求灵活调整油源压力,确保了系统在压力变化时的快速响应和稳定控制。

### 3) 复合控制实验

设定目标压力为恒定的5 MPa,目标流量为恒定的20 L/min。通过分析运行过程中比例阀1和比例阀2的阀芯位移量,评估本文控制方法的控制效果。实验结果如图6所示。

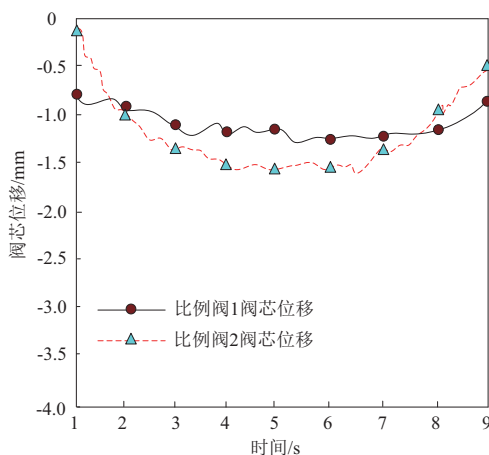


图6 本文方法阀芯位移量控制能力分析

分析图6可知,比例阀1的阀芯位移波动小,且整体位移显著小于比例阀2,同时比例阀2的最大位移也被限制在2.0 mm内。证明了本文控制方法不仅实现了压力和流量的稳定控制,还有效降低了阀芯位移,增强了液压缸的稳定性和效率。这得益于油源压力控制器实时监测系统压力,并根据负载需求动态调整压力,确保压力稳定。同时,自适应流量控制器根据系统状态和负载动态调整液压泵流量,维持流量恒定。两者协同工作,实现了系统压力和流量的精准控制,从而减少了阀芯位移,提升了液压缸性能。

### 3 结语

本文针对重载刮板机伺服驱动系统,深入研究了负载口独立调平控制技术,并开发了相应的控制系统。该系统采用实时调控油源压力与液压泵输出流量的策略,针对负载多变特性进行优化,显著提升了系统稳定性和负载适应能力。实验结果表明,本文方法在流量阶跃响应、压力调控及复合控制条件下均表现优异,实现了快速、准确的流量跟踪和低波动、高精度的压力控制。同时,本文方法降低了阀芯位移量,提高了液压缸运行效率和稳定性。本文提出的控制策略为重载刮板机提供了高效、稳定的运行方案,优化了伺服驱动系统性能。

### 参考文献:

- [1] 刘凯磊,顾秀琴,强红宾,等. 出口压差补偿的负载口独立控制系统防气穴特性研究[J]. 农业机械学报, 2024,55(10):467-480.
- [2] 王瑶,李建德,刘志奇,等. 基于二通插装阀的液压系统标准控制单元设计与研究[J]. 中国工程机械学报, 2024,22(3):331-336.
- [3] 魏列江,都志航,李娜娜,等. 具有变超越负载的液压

调平系统负载口独立控制方法[J]. 液压与气动, 2024,48(8):1-10.

- [4] 李泽龙,杨敬. 模糊PID进出口独立控制装载机摇臂液压系统[J]. 液压与气动, 2022,46(6):33-43.
- [5] 曾亿山,黄河,刘常海,等. 基于回油补偿的负载口独立系统节能特性分析[J]. 机床与液压, 2022,50(13):1-6.
- [6] 关锋,季清华. 截割部升降油缸负载口独立控制研究[J]. 机床与液压, 2023,51(1):183-188.
- [7] 程敏,侯严迪,丁孺琦. 负载口独立控制系统非线性滤波振动抑制方法[J]. 西安交通大学学报, 2024,58(4):200-210.
- [8] 陈正,吕立彤,王飞,等. 基于容腔压力规划的非模式切换负载口独立电液系统运动控制[J]. 机械工程学报, 2024,60(2):302-312.
- [9] KOGLER H. High dynamic digital control for a hydraulic cylinder drive[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2022,236(2):382-394.
- [10] 马昂,王南,刘昱杰. 锅炉蛇形管弯管机液压系统同步性能仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2024,53(5):180-182.
- [11] 庞义辉,刘新华,王泓博,等. 基于千斤顶行程驱动的液压支架支护姿态与高度解析方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2023,40(6):1231-1242.
- [12] 高斌斌,赵瑞峰. 基于PLC的本安型液压支架控制器设计[J]. 煤炭技术, 2023,42(6):225-227.
- [13] 王和欣,于鑫丽,魏枫,等. 驱动机械多缸液压系统协同控制方法设计[J]. 液压气动与密封, 2024,44(2):62-66.
- [14] 张鑫,刘长润,李旭,等. 液压支架顶梁焊接机械臂的运动学分析与仿真[J]. 机床与液压, 2024,52(13):169-175.
- [15] 许志鹏,刘婵,冯红翠. 基于有限元和RBF神经网络的液压支架前连杆疲劳寿命预测[J]. 机械设计, 2024,41(1):110-116.
- [16] 梁敬梅,李翠花. 基于神经网络逼近器的液压支架多缸协同控制[J]. 煤炭技术, 2023,42(5):223-225.
- [17] 赵丽娟,张展鹏,曹正,等. 50000 kN 液压支架试验台垂直加载液压缸同步控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024,43(2):195-201.
- [18] 曾庆良,徐鹏辉,孟昭胜,等. 冲击载荷下四柱支撑掩护式液压支架动态响应特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2023,51(1):437-445.
- [19] 李少飞,王云飞. 液压支架群多缸推移系统自适应控制方法研究[J]. 煤矿机械, 2025,46(4):203-207.
- [20] 黄德民,秦立果,曾朝晖,等. 基于AMESim的液压缸抖动爬行影响因素分析[J]. 液压气动与密封, 2025,45(3):105-111.

收稿日期:2025-01-15