

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.051

比例-积分-微分-滑模的装载机液压系统伺服变频控制

郭云飞, 张乐文

(国能榆林能源有限责任公司郭家湾煤矿分公司, 陕西 榆林 719300)

摘要: 防爆电动装载机液压系统非线性特征显著, 不确定性因素耦合, 导致系统供给流量与转矩难平衡、高频抖振频发。为此提出比例-积分-微分(PID)-滑模伺服变频控制方法, 构建数学模型与平衡方程, 结合 PID 与滑模控制优势, 设计切换函数并引入指数趋近律。实验表明: 该方法在不同负载下减小了误差, 提升了系统精度与稳定性。

关键词: 防爆电动装载机; 液压系统; 伺服变频控制; PID 控制器; 滑模变控制

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0271-06

PID-Sliding Mode Servo Variable Frequency Control for Loader Hydraulic System

Guo Yunfei, Zhang Lewen

(Guojiawan Coal Mine Branch of Guoneng Yulin Energy Co., Ltd., Yulin 719300, China)

Abstract: The hydraulic system of explosion-proof electric loaders exhibits significant nonlinear characteristics and coupled uncertainties, making it difficult to balance the system supply flow and torque and leading to frequent high-frequency chattering. To address this, a proportional-integral-derivative (PID)-sliding mode servo variable frequency control method is proposed. A mathematical model and balance equation are constructed, and by combining the advantages of PID and sliding mode control, a switching function is designed and an exponential reaching law is introduced. Experiments show that this method reduces errors under different loads and improves system accuracy and stability.

Keywords: explosion-proof electric loader; hydraulic system; servo variable frequency control; PID controller; sliding mode variable control

0 引言

防爆电动装载机是井下作业核心设备, 其液压系统要满足防爆安全与复杂工况要求, 需防爆电机驱动并集成监测保护机制。但系统存在非线性耦合难题, 液压泵等相互影响导致供给流量与转矩失衡, 引发高频抖振。伺服变频控制结合多种优势, 可保证运行稳定、效率提升; 但极端复杂环境下, 其可靠性与精度难以保证。

针对防爆电动装载机液压系统的非线性与不确定性耦合问题, 现有研究提出多种控制策略, 但均存在局限性。鄂东辰等^[1]提出以阀口压差和电流为自变量的伺服阀流量计算模型, 通过比例积分控制实现位移误差反馈与速度前馈复合控制。然而, 该模型依赖线性或简化假设, 难以全面描述防爆工况下液压泵体积模量、油液黏度变化及蓄能器动态耦合的非线性特性, 导致模型参数在实际应用中精度不足, 尤其在装载机铲掘冲击载荷

下控制误差显著。杨郅贤等^[2]利用扩张观测器补偿外部负载力波动, 结合线性 ADRC 实现叶片摆动缸的力矩闭环控制。但扩张观测器对液压泵体积模量、流量波动及蓄能器状态等内部耦合因素的动态响应较慢, 无法及时补偿快速变化的负载扰动, 尤其在装载机举升、转向等瞬态工况下, 控制精度下降明显。Sheng 等^[3]通过频域法设计 ADRC 电流环, 优化系统频率响应特性以实现转矩跟踪。然而, 防爆电动装载机液压系统的非线性与不确定性更多体现在时域动态特性中, 频域法难以捕捉参数时变、耦合干扰等时域特征, 导致控制器参数适应性不足, 难以应对井下复杂工况。Shen 等^[4]结合贪婪算法与粒子群优化算法, 动态调整 PID 参数并补偿位移误差。但该方法未充分考虑液压系统内部耦合因素的动态影响, 位移补偿可能引入高频抖振, 尤其在防爆电机高频切换或蓄能器充放能过程中, 系统稳定性下降。

综上所述, 现有方法在应对防爆电动装载机

基金项目: 陕西省科技攻关计划项目(20230230025)

第一作者简介: 郭云飞(1987—), 男, 陕西榆林人, 工程师, 本科, 研究方向为工机电管理, zhangzhaohong6@163.com。

液压系统的复杂非线性特性和不确定性因素耦合影响时,均存在不同程度的局限性。因此,提出比例-积分-微分(proportional integral derivative, PID)滑模的防爆电动装载机液压系统伺服变频控制方法。该方法通过等效控制与切换控制的双重机制,确保系统在抗扰的同时,实现液压系统伺服变频的高性能调节。

1 装载机液压系统供给流量和转矩平衡调控

防爆电动装载机在井下易燃易爆环境作业,液压系统靠防爆电机驱动,其供给流量与转矩平衡关乎作业效率和防爆安全,流量不足、转矩失衡会引发一系列问题甚至爆炸风险。为此要建立供给流量和转矩平衡方程,前者描述液压泵输出与系统需求流量关系,后者反映动力平衡状态,研究二者能分析系统稳定性,保障其可靠运行,提升装载机性能。防爆电动装载机的液压系统复杂,为了便于准确描述系统中供给流量和转矩的关系及其平衡状态,确保系统稳定可靠运行,利用基于Park变换的 $d-q$ 旋转坐标系为其构建矢量控制数学模型^[5]

$$u_d = R_s i_d + s \varphi_d - \omega_r \varphi_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + s \varphi_q - \omega_r \varphi_d \quad (2)$$

$$\varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \quad (3)$$

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_e = 1.5s(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (5)$$

式中: u_d 、 i_d 分别表示 d 轴的定子电压、电流分量; u_q 、 i_q 分别表示 q 轴的定子电压、电流分量; L_d 、 L_q 分别表示定子直轴、交轴电感; φ_d 、 φ_q 分别表示 d 轴、 q 轴定子磁链^[6]; T_e 表示电磁转矩; s 表示极对数; φ_f 表示液压系统中隔爆型伺服电机产生的磁链; ω_r 表示转子角速度; R_s 表示定子绕组电阻。模型中,定子电感 L_d 、 L_q 、磁链 φ_d 、 φ_q 及转子角速度 ω_r 等参数需结合防爆电机隔爆结构特性进行修正,以表征井下高温、高湿环境对电机电磁性能的影响。

为了描述防爆液压泵输出流量与系统需求流量之间的关系,保证系统在工作过程中获得稳定的液压能,为装载机的各项工作提供持续、稳定的动力支持,给出防爆液压泵的流量平衡方程,如式(6)所示

$$Q_p = \frac{\omega_r}{2\pi} D_p - \rho_p C_p \frac{1}{\mu} - \rho_p \frac{\omega_r}{2\pi} D_p \frac{1}{\beta_e} \quad (6)$$

式中: π 表示圆周率; D_p 、 ρ_p 分别表示防爆液压泵

的排量 and 出口压力^[7-8]; C_p 表示泄漏系数; β_e 表示油液弹性模量; μ 表示油液的动力黏度。该方程需考虑防爆装载机液压系统的高压特性及油液黏度 μ 随温度的变化,确保在铲掘冲击载荷下仍能稳定供给液压能。

防爆液压泵驱动轴主要用来控制油液供给压力,为了反映防爆液压泵驱动轴上的动力平衡状态,评估系统驱动力矩与负载力矩是否匹配,避免因动力不平衡导致系统故障或性能下降,对驱动轴构建了转矩平衡方程如式(7)所示

$$E_L = J_p \frac{d\omega_r}{dt} + B_p \omega_r + \frac{V}{S\pi} \rho_p \quad (7)$$

式中: J_p 、 $J_p \frac{d\omega}{dt}$ 分别表示防爆液压泵的转动惯量和惯性转矩; V 、 B_p 分别表示防爆液压泵的排量和粘滞阻尼系数; $\frac{V}{S\pi} \rho_p$ 表示油液压力产生的转矩。其中转动惯量 J_p 、粘滞阻尼系数 B_p 及油液压力转矩 $\frac{V}{S\pi} \rho_p$ 需结合装载机负载特性如铲斗质量、物料密度进行动态校准,以匹配井下瞬态工况下的驱动力矩需求。

在伺服变频控制中,需依据系统的实际需求调节变频器的输出频率与电压,以此控制电机的转速和转矩。而基于供给流量和转矩平衡方程所构建的数学模型,为这一控制过程提供了关键基础,它精确描述了液压系统的动态特性,包括流量变化、转矩响应以及它们之间的相互作用,是变频控制算法设计和实现伺服变频控制的重要依据。

2 防爆电动装载机液压系统PID-滑模的伺服变频控制

防爆电动装载机在井下作业时,需频繁应对铲掘冲击、举升负载突变及转向瞬态工况,其液压系统需满足防爆安全规范与动态响应需求。基于上节平衡方程分析,防爆电动装载机的液压系统是一个极为复杂的非线性系统,存在诸多不确定性因素。例如,液压泵的体积模量^[9]和流量会发生变化,蓄能器的状态也会产生被动,这些因素都大幅提升实现液压泵供给流量 Q_p 与转矩平衡平衡 E_L 的难度。传统PID控制因固定增益难以适应液压泵体积模量变化、蓄能器状态波动及负载突变等非线性因素,易造成流量-转矩平衡关系失稳,甚至引发防爆电机过载或液压元件损坏。为此,提出基于PID-滑模复合控制的伺服变频策

略。具体步骤如下。

将液压泵与隔爆型伺服电机视为离散时间系统^[10-11],基于供给流量和转矩平衡方程所构建的数学模型,用公式表示为

$$x(k) = \sum_{E_L}^{Q_p} \|Ax(k-1) + Fu(k-1)\| \quad (8)$$

式中: A 、 F 分别表示大小为 $n \times n$ 和 $n \times m$ 的输入矩阵; $x(k-1)$ 表示转斗/动臂油缸的状态变量; $u(k-1)$ 表示隔爆型伺服电机的输入变量。

基于 PID-滑模复合控制,设计液压系统控制信号^[12],表达式为

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + u_1(t) \quad (9)$$

式中: $e(t)$ 表示控制器输出值与期望值之间的误差, $de(t)$ 表示 $e(t)$ 的变化率; K_p 、 K_i 、 K_d 分别表示比例增益、积分增益、微分增益^[13]; $u_1(t)$ 表示滑模控制项。防爆装载机根据井下负载特性动态调整增益矩阵 K_p 、 K_i 、 K_d ,例如在铲掘阶段增大比例增益以快速响应负载突变,在举升阶段增强积分项以消除稳态误差。

将完成参数增益后的 PID 控制器与滑模变结合在一起,为避免滑模抖振引发防爆风险,给出 PID 控制和滑模变控制之间的切换函数^[14]

$$w(k) = \|Dx(k)U(t)\| \quad (10)$$

式中 D 表示系数矩阵。

引入指数趋近律,对 PID 控制和滑模变控制进行优化和改进,使二者可以达到切换面的运动品质,在保证系统状态趋近滑模面的同时,有效抑制滑模抖振。通过调整指数趋近律的参数,可以在保证系统鲁棒性的前提下,减小滑模抖振的幅度。表达式为

$$w(k+1) = w(k) - \varepsilon T \text{sat}(w(k)) - rTw(k) \quad (11)$$

式中: $\text{sat}(w(k))$ 表示饱和函数; T 表示采样周期; ε 、 r 分别表示趋近律参数^[15]。通过标定 ε 、 r 以平衡鲁棒性与抖振抑制,如在井下瓦斯浓度较高时,优先减小 ε 以降低高频抖振对防爆电机绝缘性能的影响^[16-22]。

由于 T 是一个有限值,通常情况下,液压驱动伺服变频控制量在 2 个采样点间是不会发生改变的,所以存在条件和到达条件会有所差异。当采样周期 T 较小时,离散滑模的存在条件和到达条件分别表示为

$$\begin{cases} [w(k+1) - w(k)] \text{sgn}(w(k)) \leq 0 \\ [w(k+1) - w(k)] \text{sgn}(w(k)) > 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $\text{sgn}(w(k))$ 为符号函数,当状态变量 $w(k)$ 为正值时取+1,为负值时取-1,为零时取 0。

存在条件可以使控制器在理想时间内进入滑模面,到达条件可以使防爆电动装载机的供给流量 Q_p 和驱动轴转矩 E_L 围绕滑模面做穿越运动,同时保证每次运动的幅值逐渐减少。

在实际应用中,控制器开关在切换状态时存在一定的滞后现象,在离散状态下到达切换面并滑动的可能性较低,同时还会发生抖动^[23]。因此,控制器通常还具备等效控制 $U_{ep}(k)$ 和切换控制功能,在滑模面附近维持液压泵流量-转矩平衡,确保装载机铲斗举升速度稳定,而在负载突变,通过滑模项快速补偿转矩误差,避免防爆电机过载^[24]。

在液压系统中,液压泵的供给流量 Q_p 和驱动轴转矩 E_L 随着工作状态的改变而改变, $U_{ep}(k)$ 和 $U_{ves}(k)$ 会随着二者的改变作出相应的调整,在抵御状态参数扰动和外界干扰的同时^[25],实现对防爆电动装载机液压驱动伺服变频控制。

3 实验测试

将本文方法与引言中提到的复合控制策略和自抗扰电流环控制方法展开了对比实验测试。在 MATLAB 仿真平台上进行防爆电动装载机液压系统的模拟,仿真结构如图 1 所示。

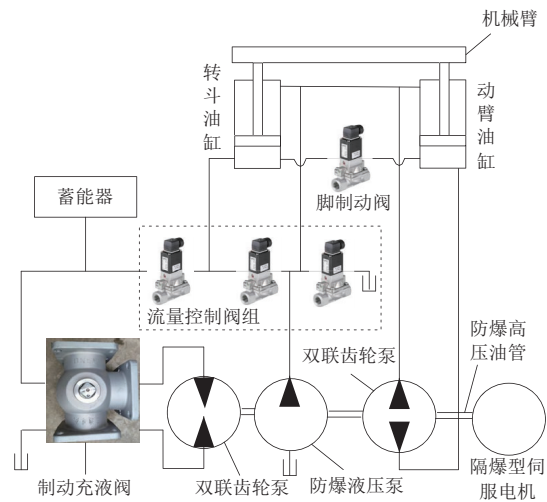


图 1 防爆电动装载机液压系统仿真结构图

液压系统主要参数及数值如表 1 所示。其中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 10、0.5、0.1。滑模变控制系数矩阵为对角矩阵,对角线元素为[1, 1],趋近律参数 ε 、 r 分别为 0.1、0.05。采样周期为 0.01 s。

表 1 液压系统主要参数及数值

参数	数值
伺服电机功率/kW	2.3
伺服电机静转矩/(N·m)	10
伺服驱动器过载倍数	1.4
伺服电机转动惯量/(kg·m ²)	1.5×10 ⁻³
液压泵转动惯量/(kg·m ²)	4.5×10 ⁻⁵
液压泵排量/(mL/r)	4.36
液压泵泄漏系数/(m ³ ·s ⁻¹ /Pa)	5.5×10 ⁻¹⁴
涡轮流量计响应时间/s	5
液压油黏温系数	4.25×10 ⁻²
弹性联轴器转动惯量/(kg·m ²)	3.5×10 ⁻³
液压油体积模量/(N/m ²)	1.5×10 ⁹
液压油动力黏度/(Pa·s)	2.478×10 ⁻²

利用所提方法、自抗扰电流环控制方法和复合控制策略进行伺服变频控制,对比 3 种方法控制后防爆液压泵油液流量变化情况,具体如图 2 所示。

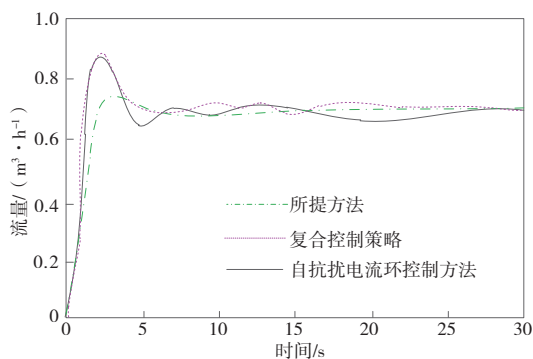
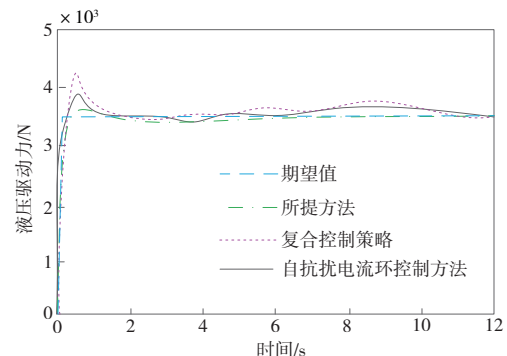


图 2 3 种方法控制后液压泵油液流量变化曲线

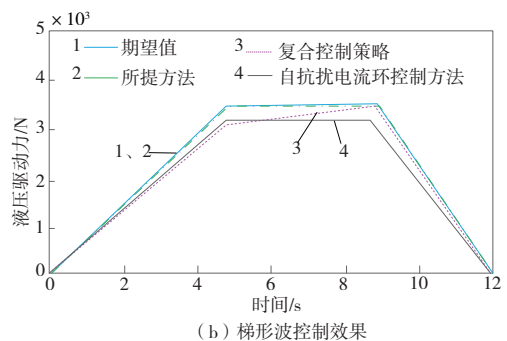
分析图 2,所提方法应用于防爆电动装载机的防爆液压泵控制后成效显著。在实际井下作业中,面对瓦斯、粉尘等复杂环境及频繁的铲掘、举升等动态工况,该方法使油液流量超调幅度仅 0.06 m³/h,波动幅度为±0.02 m³/h,流量极为稳定。这充分表明该方法能够有效抵御外界干扰,使用该方法的防爆电动装载机作业时,即便周边设备频繁启停产生干扰,液压系统也能稳定输出动力,保障铲斗精准、有力地完成物料铲装与举升,作业效率大幅提升。而另外两种方法在防爆电动装载机液压泵控制中的效果欠佳,液压泵油液流量超调较大,波动明显,未能达到理想的控制

效果。这是因为所提方法融合 PID 控制与滑模控制优势,引入指数趋近律优化参数,结合等效与切换控制双重机制,可有效应对系统不确定性因素与外界干扰,让防爆电动装载机在复杂工况下能够实现高性能调节,确保稳定运行。

假设实验环境中不存在任何的干扰因素,设定防爆电动装载机液压系统信号有阶跃波和梯形波两类,将 3 种方法控制后的液压驱动力与期望值进行对比,结果如图 3 所示。



(a) 阶跃波控制效果



(b) 梯形波控制效果

图 3 3 种方法控制后液压驱动力与期望值对比图

分析图 3,在应对阶跃波和梯形波工况信号时,所提方法应用于防爆电动装载机后,液压驱动力与期望值高度贴合,偏差仅 89 N,而另两种算法偏差明显。在实际煤矿作业场景中,装载机常面临复杂多变的负载情况,类似阶跃波和梯形波的工况频繁出现。采用所提方法的装载机,在铲装坚硬矿石时,面对负载的突然增大(类似阶跃波),能迅速精准调整液压驱动力,使铲斗平稳有力地深入矿石堆;在举升过程中,面对负载的渐变(类似梯形波),也能让驱动力紧密跟随期望值,确保举升动作流畅。这都得益于该方法将 PID 与滑模变结构控制结合,使控制器能自动调参,保障了装载机稳定高效作业。

设置防爆电动装载机运行在不同的负载下,利用所提方法、自抗扰电流环控制方法和复合控

制策略分别对其进行伺服变频控制,对比3种方法控制误差,结果如图4所示。

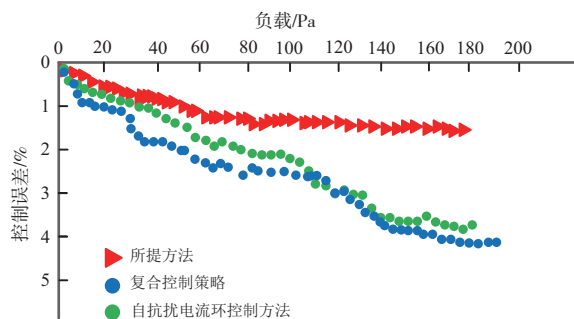


图4 3种方法控制误差对比图

分析图4,不同负载工况下,所提方法控制液压泵输出误差极小,在1.4%以内,远优于另两种方法,这充分彰显其对负载变化的超强适应力。在实际的井下作业场景中,防爆电动装载机常面临复杂多变的负载状况。比如在铲装不同硬度和密度的矿石时,负载会瞬间大幅变化;在举升过程中,随着物料高度的改变,负载也会逐渐改变。所提方法凭借PID控制的误差渐进调节特性,能精准依据误差调整控制量,使系统输出贴近期望值。同时,滑模控制的强鲁棒性可抵御系统参数变化和外界干扰。二者协同作用,让装载机在复杂多变的负载工况下,依然能稳定、可靠、高效地完成各项作业任务。

4 结语

本文针对防爆电动装载机液压系统,建立了供给流量和转矩平衡方程,提出了基于PID-滑模复合控制的伺服变频策略。实验结果表明,该方法在控制防爆液压泵油液流量、提供液压驱动力以及应对不同负载工况时,均展现出显著优势;能够有效抵御外界干扰、维持系统稳定,且对负载变化具有强适应能力,提高了防爆电动装载机的作业效率和整机可靠性。然而,本研究仍存在一定局限,例如在模型构建过程中,对部分参数的修正和校准主要基于理论分析和经验,缺乏更深入的现场实验验证。未来研究方向将聚焦于进一步优化模型参数,结合更多实际井下作业经验对数据进行修正完善。

参考文献:

[1] 鄂东辰,董兴华,蔡玉强,等. 非对称液压缸位移伺服系统的复合控制策略与试验研究[J]. 机床与液压, 2024,52(3):131-135.

[2] 杨郅贤,张军辉,纵怀志,等. 基于自抗扰控制方法的双叶片式摆动缸转矩控制[J]. 液压与气动, 2023, 47(12):147-153.

[3] Sheng C Y, Wang Q H, Su T, et al. Induction motor torque closed-loop vector control system based on flux observation and harmonic current suppression [J]. Control Engineering Practice, 2024, 142:105755.

[4] Shen Y Y, Guo Y Q, Zha X M, et al. Real-time hybrid test control research based on improved electro-hydraulic servo displacement algorithm [J]. Sensors, 2023, 23(10):4765.

[5] 赵强,刘传卫,朱宝全,等. 基于粒子群优化的主动稳定杆系统自抗扰控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(6):52-61.

[6] 刘琛华. 基于S型速度曲线的液压伺服绞车自抗扰控制[J]. 现代制造工程, 2023(10):145-154.

[7] 陶静,栗昌鹏,薛寒,等. 基于伺服电机的PE管全自动热熔焊机控制系统研制[J]. 焊接, 2024(6):9-16, 25.

[8] 赵文帅,王曦,龙一夫,等. 液压机械式压差伺服系统的差分进化H ∞ 优化设计方法[J]. 推进技术, 2024, 45(10):257-267.

[9] 郑长明,阳佳峰,高昂,等. 永磁同步电机长线变频驱动系统定频滑模预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4):915-924.

[10] 林子豪,方成刚. 具有同步带伺服传动系统的振动误差控制策略[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(1):61-66.

[11] 王忠阳,梁丽,王友清. 永磁同步电动机速度伺服系统最优输出反馈控制器设计[J]. 自动化学报, 2024, 50(9):1794-1803.

[12] 赵希梅,李德豪,金鸿雁. 基于扰动观测器和改进自适应二阶快速终端滑模的PMLSM伺服系统控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4):41-49.

[13] 叶月影,吴瑕,林添良. 电动装载机电液复合制动协同控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6):442-450.

[14] 翁卢晖,姚太克,张玄,等. 分布式电推进飞机双永磁电动机系统控制策略[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5):1259-1269.

[15] 邢艺馨,蓝益鹏,雷城. 电励磁直线电动机磁悬浮系统的非线性自适应反步控制[J]. 制造技术与机床, 2023(2):104-108.

[16] 邵志元. 振动干扰下大负载DJ型架桥机机臂升降液压稳态控制[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(1):251-255.

[17] 吴新平,赵千里. 挖掘机单杆油缸液压执行器控制优化研究[J]. 中国工程机械学报, 2025, 23(3):400-404.

[18] 王珊珊,江政国. 管道智能封堵机器人减速运动控制

- 收稿日期:2025-06-27

制, 2021, 49(5): 81-90.

- 收稿日期:2024-12-05