

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.055

煤矿井下综采面用矿用乳化液泵站泵头压力模糊控制方法

段江飞¹, 欧阳敏²

(1. 榆北煤业涌鑫矿业公司, 陕西 榆林 719407; 2. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 由于煤矿井下环境复杂多变, 使得乳化液泵站存在供液流量波动、压力损失大, 进而影响液压支架的支护效果。针对这一问题, 提出煤矿井下综采面用矿用乳化液泵站泵头压力模糊控制方法。分析乳化液泵站的运行特性, 计算乳化液泵站的流量和压力, 再计算其泵站功率, 建立乳化液泵站数学模型。基于此, 计算泵站的压力误差和压力变化率, 利用隶属度函数将其进行模糊化处理, 再制定相应模糊规则。建立模糊推理机制, 对输入变量进行去模糊化处理, 再计算控制误差, 设计相应的控制器, 实现对泵头压力的有效控制。实验结果表明: 所设计的控制方法在实际应用中压力超调量为 6.25%, 控制性能较好。

关键词: 矿井; 煤矿综采面; 乳化液泵站; 乳化液泵头; 压力控制; 模糊控制; 模糊规则; 隶属度函数

中图分类号: TD82 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0299-06

Fuzzy Control Method for Pump Head Pressure of Mining Emulsion Pump Station Used in Coal Mine Underground Comprehensive Mining Face

DUAN Jiangfei¹, OUYANG Min²

(1. Yongxin Mining Company of Yubei Coal Industry, Yulin 719407, China;

2. China Coal Mining Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In response to the impaired support effect of hydraulic supports affected by fluctuating supply flow and large pressure losses emulsion in pump stations due to complex and ever-changing environment underground in coal mines, a fuzzy control method for the pump head pressure of the emulsion pump station used in coal mine underground comprehensive mining face is proposed. The operating characteristics of the emulsion pump station is analyzed, the flow rate and pressure of the emulsion pump station is calculated, and calculation of its pump station power is conducted to establish a mathematical model of the emulsion pump station. Based on this, the pressure error and pressure change rate of the pump station are calculated, fuzzified using the membership function, and corresponding fuzzy rules are formulated. A fuzzy inference mechanism is established to fuzzify input variables, control errors are calculated and corresponding controllers are designed to achieve effective control of pump head pressure. The experimental results show that the designed control method has a pressure overshoot of 6.25% with good control performance in practical applications.

Keywords: mine; coal mine comprehensive mining face; emulsion pumping station; emulsion pump head; pressure control; fuzzy control; fuzzy rules; membership function

0 引言

乳化液泵站作为煤矿综采面的核心设备之一, 其泵头压力的稳定控制对于保障液压支架的支护效果和综采面的安全作业至关重要。然而, 在实际生产过程中, 由于井下环境复杂多变, 乳化液泵站面临着诸多挑战, 如供液流量波动、压力损失大、系统响应滞后等问题^[1]。这些问题不仅影响了液压支架的支护效果, 还可能导致设备故障和安全事故的发生^[2]。因此, 研究一种更加智能、高效的乳化液泵站泵头压力控制方法, 对于提升煤矿生产效率和作业安全性具有重要意义。

在该研究背景下, 不少研究学者针对压力控制展开研究, 并提出了自己的观点。文献[3]构建湿式离合器驱动执行机构的数学模型, 针对系统的非线性、时变特性、不确定性等特点, 设计模糊控制器, 处理系统运行中的模糊信息, 并利用免疫算法提高系统的鲁棒性和自适应性, 实现对离合器压力的控制。该方法设计的控制器对参数过于敏感, 若参数存在偏差, 将会直接导致方法的控制精度差。文献[4]分析启动容腔的动态特性和静态特性, 建立启动容腔的数学模型, 将偏差变化率作为输入变量, 将 PWM 占空比指令作为输出变量, 制定模糊规则库, 并根据系统状态建立模式

第一作者简介: 段江飞(1990—), 男, 陕西佳县人, 本科, 研究方向为采矿工程, djngfubeil@163.com。

切换机制,由此设计 PWM 控制策略,通过调整多个参数,实现对启动容腔压力的实时控制。该方法应用的 PWM 控制信号可能产生电磁噪声和机械振动等不利因素,导致方法的控制精度较低。文献[5]分析管道机器人推进装置的工作环境和需求,分析其支撑腿与管道壁之间的相互作用,设计支撑腿压力稳定控制方案,引入模糊 PID 控制算法,制定模糊集和模糊规则,建立模糊推理机制,调整控制参数,进一步完善压力控制方案。该方法制定的模糊规则需要根据以往经验进行制定,导致其存在一定的主观性,方法的控制结果存在一定偏差。文献[6]建立均衡风缸压力的数学模型,分析其压力变化特性,根据风缸的工况和故障情况,设计容错机制,引入神经网络控制算法,计算风缸的压力值,由此制定平衡性较好的控制策略。该方法风缸压力容易受到外界因素的影响,导致其控制效果不稳定。文献[7]先收集大马力拖拉机湿式离合器的详细参数,利用数字孪生技术,建立湿式离合器的虚拟模型,引入物联网技术,确保虚拟模型与物体实体之间的数据能够实时同步,明确压力控制的目标,设计合理的压力控制算法,通过多次迭代,优化算法参数,直到达到满意的控制效果。该方法需要保持数据的实时同步,若保持不当,将会导致控制结果出现偏差。

在多个研究学者的研究基础上,本文设计了煤矿井下综采面用矿用乳化液泵站泵头压力模糊控制方法来显著提升煤矿综采面的生产效率和作业安全性,降低设备故障率和维护成本,为煤矿企业的可持续发展提供有力支持。

1 矿用乳化液泵站泵头压力模糊控制方法设计

1.1 煤矿井下综采面用矿用乳化液泵站数学模型建立

煤矿井下综采面是指在煤矿开采过程中专门用于煤炭开采作业的具体区域,通常位于矿井地下,形成一个开放的工作空间^[8]。综采面能够有效提高煤炭产量,充分利用煤炭资源,降低煤炭生产成本。矿用乳化液泵站在综采面有非常关键的作用,能够根据采煤工作的实际需求,灵活控制乳化液的压力和力量,确保液压支架能够稳定支撑顶板^[9],是综采面安全作业的保障。

为了确保乳化液泵站能够稳定发挥作用,需要对其泵头压力进行控制。在这个过程中,通过

分析煤矿井下综采面矿用乳化液泵站的运行特性^[10],结合液压支架的支撑需求和煤矿井下的具体环境,建立乳化液泵站数学模型。

在建立模型时,需要计算多个乳化液泵站参数。在考虑液压支架需求和管路损失的前提下,计算乳化液泵站的流量^[11]。其具体计算过程如下所示。

$$Q = \sum_{i=1}^m \frac{q_i}{1 + \alpha_i} \quad (1)$$

式中: Q 表示乳化液泵站的流量值; q_i 表示乳化液泵站中第 i 个液压缸所需要的流量; α_i 表示第 i 段的损失系数; m 表示液压缸的数量。

再计算乳化液泵站的压力值,其需要考虑克服液压支架的阻力,计算公式如下:

$$P = \frac{F_{\max}}{A + F} \quad (2)$$

式中: P 表示乳化液泵站的压力值; $F_{\max}$ 表示综采面液压支架所能承受的最大压力; A 表示乳化液泵站中液压缸的横截面积; F 表示管路损失压力^[12]。

为满足乳化液泵站的压力和流量,需要计算相应的理想压力值,计算公式如下:

$$P_m = \frac{P}{Q} \times \eta \quad (3)$$

式中: P_m 表示乳化液泵站的功率值; η 表示乳化液泵站的效率。

基于式(1)一式(3),计算出多个乳化液泵站参数,由此建立相应的乳化液泵站数学模型,其数学模型如下:

$$f_m = \kappa_m(Q, P, P_m) \quad (4)$$

式中: f_m 表示乳化液泵站数学模型; κ_m 表示乳化液泵站的变量函数。

根据建立的数学模型,分析乳化液泵站的运行特性^[13],为后续制定乳化液泵站泵头压力模糊控制规则奠定基础。

1.2 制定矿用乳化液泵站泵头压力模糊控制规则

利用压力传感器实时采集矿用乳化液泵站泵头压力数据。为避免工作环境对采集数据的影响,在获取数据后,通过均值滤波的方式处理数据,通过平均多个采样点的值,可以减小单个采样点因噪声或干扰而产生的误差,从而提高整体数据的准确性。

基于上述建立乳化液泵站数学模型得到的理

想压力值,对比压力数据采集结果与理想压力值之间的误差和误差变化率,并将计算的泵站压力误差作为后续设计模糊控制器的输入变量,参数调整量作为输出变量^[14]。在此基础上,利用隶属度函数,将输入变量转化为模糊集合的隶属度函数值^[15],其设定的隶属度函数如下:

$$L=e^{-\frac{(x-c_x)^2}{2\sigma_x^2}} \tag{5}$$

式中: L 表示隶属度函数; x 表示输入的泵站压力误差; c_x 表示输入误差 x 的均值; σ_x 表示输入误差 x 的标准差。

利用该隶属度函数,将输入变量转换为模糊变量,定义相应的模糊集。在定义时,将两个变量划分为7个模糊等级^[16],分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,由此制定相应的模糊规则。在制定模糊规则时,需要考虑泵站的运行特性,确保制定的规则符合实际,其具体的模糊规则如表1所示。

表1 泵头压力模糊规则

误差模糊量	误差变化率模糊量						
	负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
负大	正小	正小	正中	正中	正中	正小	正小
负中	负小	零	零	正小	零	零	负小
负小	负中	负小	负小	负小	负小	负小	负中
零	负中	负中	负中	负中	负中	负中	负中
正小	负中	负小	负小	负小	负小	负小	负中
正中	负小	零	零	正小	零	零	负小
正大	正小	正小	正中	正中	正中	正小	正小

表1中:

1)误差模糊量的区间划分如下:

负大:误差小于-15%;

负中:误差在-15%~-5%;

负小:误差在-5%~0%;

零:误差在0%附近;

正小:误差在0%~5%;

正中:误差在5%~15%;

正大:误差大于15%;

2)误差变化率模糊量的区间划分如下:

负大:误差变化率小于-0.5%;

负中:误差变化率在-0.5%~-0.1%;

负小:误差变化率在-0.1%~0%;

零:误差变化率接近0%;

正小:误差变化率在0%~0.1%;

正中:误差变化率在0.1%~0.5%;

正大:误差变化率大于0.5%。

根据输入的变量,输出相应的模糊结果,由此展现出不同的模糊状态^[17]。基于该状态,执行相应的模糊操作,为后续设计泵头压力控制器奠定基础。

1.3 矿用乳化液泵站泵头压力控制器设计

基于表1中制定的模糊规则,实现矿用乳化液泵站泵头压力控制。完整的控制思路如图1所示。

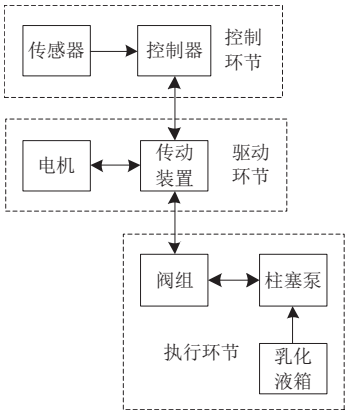


图1 矿用乳化液泵站泵头压力控制思路

图1中:

1)驱动环节:电机为乳化液泵站提供动力源,驱动泵站工作;传动装置(如曲轴、连杆等)将电机的旋转运动转化为柱塞的往复运动,从而驱动乳化液泵工作。

2)执行环节:柱塞泵作为乳化液泵站的核心部件,通过柱塞的往复运动将乳化液加压输出;控制阀组包括安全阀、卸载阀等,用于调节乳化液泵站的输出压力和流量,确保泵站在安全、稳定的状态下工作;乳化液箱储存乳化液,为柱塞泵提供足够的液源,同时起到缓冲、冷却等作用。

3)控制环节:控制器根据泵头压力的实际值与设定值的偏差,通过模糊控制算法计算控制量,实现对泵头压力的智能控制;传感器用于实时监测乳化液泵站的流量和压力等参数,为控制器提供反馈信息;模糊控制软件包含模糊规则库、隶属度函数等,用于实现模糊控制算法,是控制环节的核心部分。

上述设计思路中,控制器的设计是一个重点环节。下面将针对矿用乳化液泵站泵头压力控制器展开具体设计。

在设计模糊控制器时,根据模糊规则及输入变量,建立模糊推理机制^[18],得到相应的输出变量。本次研究中建立的模糊推理机制以模糊合成主要应用规则,其模糊合成的具体过程如下所示:

$$G = \max_{y \in [1, +\infty)} (\min(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_y)) \quad (6)$$

式中: G 表示模糊合成结果; μ_y 表示第 y 组输出变量的动态合成结果。

在此基础上,结合式(5)中的隶属度函数,对输入变量进行去模糊化处理,其具体的去模糊化如下所示。

$$w = \frac{\sum_{i=1}^n k_i(L) \times p_i^2}{\sum_{i=1}^n k_i(L) \times G} \times h \quad (7)$$

式中: w 表示去模糊化函数; k_i 表示输入变量的关联系数; p_i 表示输入变量的逻辑参数; h 表示去模糊化参数; n 表示模糊计算次数。

考虑到在去模糊化的过程中,由于多种因素的影响,导致控制过程出现偏差。为此,需要计算泵头压力的控制误差^[19],并由此设计相应的控制器,其具体设计过程如下:

$$K = \beta \times \gamma + \gamma \times q + \varepsilon \quad (8)$$

式中: K 表示乳化液泵头压力控制结果; β 表示控制参数; γ 表示增益系数; γ 表示随机变化量; q 表示加权函数; ε 表示泵头压力控制误差^[20],其计算方式如下:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \times (l_1 - l_2) \times (1 - \gamma) \times w \quad (9)$$

式中: N 表示迭代次数; l_1 表示实际控制结果; l_2 表示模糊控制结果; γ 表示随机常数。

根据设计的控制器,实现对乳化液泵站泵头压力的有效控制,由此保证对液压支架的有效支撑,和矿井采煤作业的稳定开展。至此,煤矿井下综采面用矿用乳化液泵站泵头压力模糊控制方法的设计完成。

2 实验与结果分析

2.1 矿井环境及相关参数设定

实验以某矿井为研究对象,该矿井位于东部偏远地区,其煤矿含量丰富,现已开采煤矿量为2 000 t,未开采量为50 000 t。为此,在该矿井内部,搭建综采面,提高煤矿开采效率。

实验环境包括如下内容。

1)煤矿井下综采面:其为实验系统的应用场景,指在煤矿开采过程中专门用于煤炭开采作业的具体区域,位于矿井地下。

2)矿用乳化液泵站:其为实验的核心部分,能够根据采煤工作的实际需求,灵活控制乳化液的压力和力量,确保液压支架能够稳定支撑顶板。

3)泵头压力模糊控制系统:通过分析乳化液泵站的运行特性,计算乳化液泵站的流量和压力,再计算其泵站功率,建立乳化液泵站数学模型。基于建立的数学模型,计算泵站的压力误差和压力变化率,利用隶属度函数将其进行模糊化处理,再制定相应模糊规则。建立模糊推理机制,对输入变量进行去模糊化处理,再计算控制误差,设计相应的控制器,实现对泵头压力的有效控制。

4)液压支架:其为煤矿井下综采面的重要设备,用于支撑顶板,确保工作面的安全。在实验中,液压支架的支撑需求和阻力变化是制定模糊控制规则的重要考虑因素。

5)实验监测与数据采集系统:该系统用于实时监测乳化液泵站的运行参数,如流量、压力、功率等,并采集相关数据用于分析和验证模糊控制方法的性能。

具体的矿井环境如图2所示。

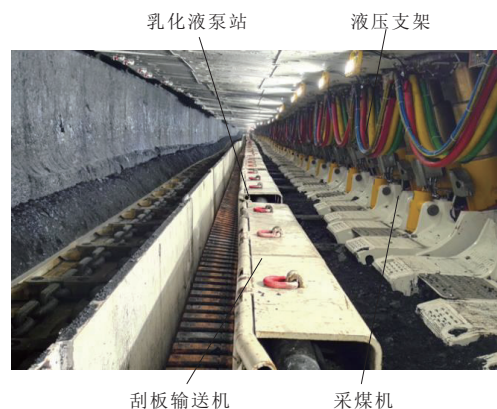


图2 煤矿环境

如图2所示,该综采面长度为350 m,连续推进长度3 000 m。在该综采面中,选用的采煤机型号为MG150/375,其功率为150 kW,切入煤壁的深度为0.8 m。刮板输送机的型号为SGZ630/500,其输送能力为500 t/h。液压支架用于支撑工作面顶板,确定煤矿作业空间,乳化液泵站则为液压支架提供动力和润滑。

选用的乳化液泵站型号为BRW80/31.5,该泵站的具体参数如表2所示。

表2 乳化液泵站的具体参数

参数	数值
额定工作压力/MPa	31.5
额定流量/(L/min)	80
柱塞直径/mm	32
柱塞行程/mm	70
曲轴转速/(r/min)	425
电机转速/(r/min)	1 480
电机功率/kW	55
外形尺寸/mm	1 873×760×880
质量/kg	1 000
泵站效率	0.9
乳化液箱容积/L	2 500
安全阀工作压力/MPa	40
卸载阀工作压力/MPa	40

将表2所示参数设定的乳化液泵站作为本次实验研究对象,由此展开后续实验测试。

2.2 实验过程

实验中,根据表1所示的研究对象参数,统计乳化液泵站在实际运行中的各项参数。该液压泵站的流量和压力变化如图3所示。

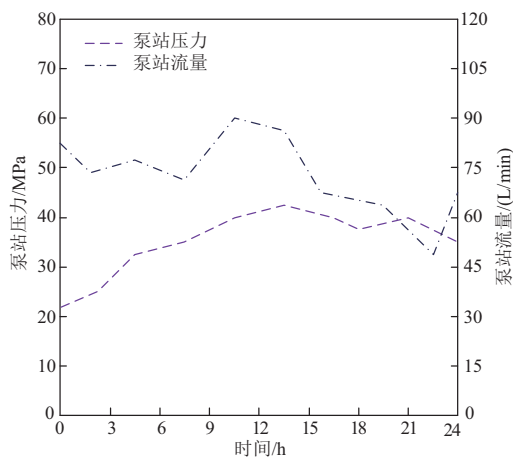


图3 乳化液泵站的流量和压力

由图3可知,在采样的24 h内,乳化液泵站的压力和流量均在不断变化中,波动范围较大,且存在部分时刻高于额定值。基于此,计算乳化液泵站的运行功率,由此建立相应的乳化液泵站数学模型。

根据该数学模型,设定乳化液泵站泵头在模糊控制器中的输入变量。基于此,设定隶属度函数,将原本的输入变量转化为模糊值,其设定的隶属度函数如图4所示。

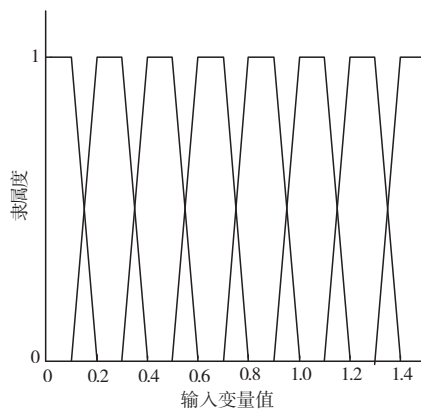


图4 隶属度函数

由图4可知,该隶属度函数为梯形,基于此,将输入变量转换成相应的模糊值,并制定相应的模糊规则。在此基础上,建立模糊推理机制,并对输出变量进行去模糊处理,由此计算相应的控制误差,实现对泵头压力的有效控制。

此外,本文进行了对比实验。其中,本文设计的控制方法为方法1,基于FIPID的PST湿式离合器压力控制方法为方法2,模式切换结合模糊PWM的气动容腔压力控制方法为方法3。

2.3 泵头压力控制结果分析

实验中,利用3种方法对泵头压力进行控制,统计其控制后的泵头压力波动范围,并将其与设定的压力波动范围进行对比,验证本文设计的方法的控制性能,其具体控制结果如图5所示。

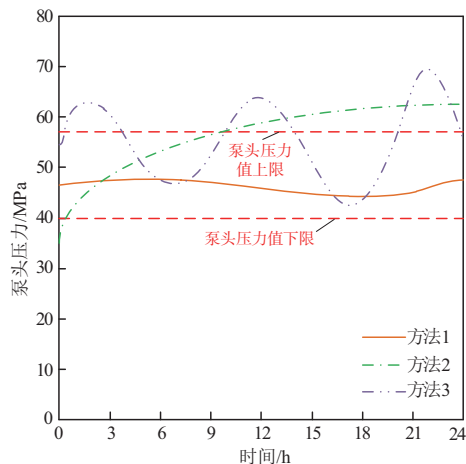


图5 3种方法的泵头压力控制结果

由图5可知,方法1泵头压力的波动范围相对较小,且其波动均在泵头压力的目标范围内;方法2的泵头压力虽然波动较少,但其处于持续上升中,且存在不符合压力范围内的时刻;方法3的泵头压力波动较为频繁,且存在泵头压力远超目

标值的情况。因此,本文设计的方法在实际应用中控制效果较好。

2.4 压力超调量对比分析

以压力超调量为评价指标,对比3种方法在实际应用中的控制性能。3种方法的统计结果如图6所示。

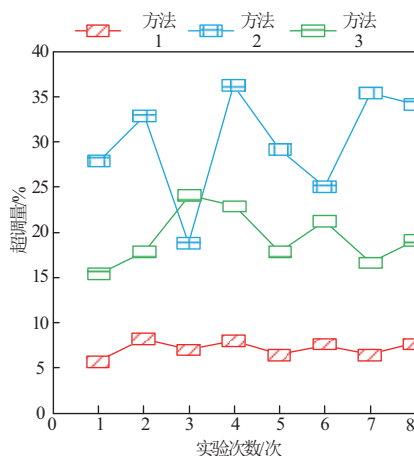


图6 3种方法的超调量

由图6可知,方法1的超调量在多次实验中的均值为6.25%,方法3的超调量均值为20.12%,方法2的超调量均值为30.63%。因此,本文设计的方法在实际应用中控制性能较好。

3 结语

本文采用模糊控制方法对泵头压力进行智能调节,有效应对了井下环境的多样性和不确定性。在设计中,该方法先建立了精确的模糊控制模型,将泵头压力的变化趋势及外界干扰因素纳入考量,通过模糊推理机制实时调整控制策略。在实际操作中,系统能够迅速响应压力波动,自动调整输出流量,确保泵头压力始终维持在设定范围内,避免了传统控制方法中的超调与振荡问题。该方法不仅显著提升了乳化液泵站的工作效率和稳定性,还降低了能耗和维护成本。它有效解决了煤矿井下综采面因压力控制不当导致的设备损坏、生产中断等风险,为煤矿安全生产提供了有力保障。

参考文献:

- [1] 赵旭,崔耀,潘占仁,等. 基于边缘控制器的智能泵站控制系统应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(增刊2):327-332.
- [2] 王凯. 土压平衡式盾构用主驱动密封气动压力控制系统及其控制方法[J]. 液压气动与密封, 2024, 44(2):97-105.
- [3] 杨富超,周杰,蔡志洲,等. 轴流泵装置泵模式及反向

发电模式压力脉动分析[J]. 大电机技术, 2023(5): 57-69.

- [4] 孙国鑫,李帅鹏,虞启辉,等. 模式切换结合模糊 PWM 的气动容腔压力控制方法[J]. 液压与气动, 2024, 48(2):78-84.
- [5] 罗继曼,刘士恒,马思源,等. 管道机器人推进装置的支撑腿压力稳定性控制方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2023, 39(5):939-946.
- [6] 张茂松,郝保磊,夏军,等. 机车制动控制系统均衡风缸压力控制方法研究[J]. 铁道机车与动车, 2023(8):12-14,30,5.
- [7] 张延安,杜岳峰,毛恩荣,等. 基于数字孪生的大马力拖拉机湿式离合器压力控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(13):268-279.
- [8] 魏列江,赵保才,孙辉,等. 基于 BP 神经网络的独立节流口阀流量-压力复合控制方法[J]. 液压与气动, 2023, 47(8):58-65.
- [9] 蔺春乐,李春玉,叶健,等. 薄煤层一体移动式乳化液泵站的研制与应用[J]. 煤矿机械, 2025, 46(6):164-167.
- [10] 刘志强. 乳化液泵站系统及关键技术研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(3):13-15.
- [11] 赵继云,曹超,王浩,等. 液压支架大功率供液系统的现状与智能化发展趋势[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1):676-693.
- [12] 王寒庆,陈仁建,赵亮亮,等. 考虑响应滞后的矿用乳化液泵站泵头压力稳定模糊控制方法[J]. 煤矿机械, 2024, 45(11):98-102.
- [13] 云俊文,王博,倪伟强,等. 矿用乳化液泵站泵头供液流量匹配控制研究[J]. 煤矿机械, 2024, 45(11):52-55.
- [14] 丁超. 综采工作面乳化液泵远程集中智能供液系统研究[J]. 能源与节能, 2024(8):64-67.
- [15] 张恒武,章建平,郭达明,等. 基于 T-S 模糊故障树的液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断方法[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(6):268-273.
- [16] 钱振环,谢辉,佟强,等. 基于模型的船用柴油机双泵协同共轨压力控制方法研究[J]. 内燃机工程, 2021, 42(3):100-108.
- [17] 程洪涛,宋少云. 基于变动供给压力控制方法的电液伺服系统节能方法[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(2):142-147.
- [18] 朱叶艇,龚卫,秦元,等. 基于目标总推力矢量的盾构推进油缸压力闭环控制技术[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5):170-178.
- [19] 马艳伟. 乳化液泵站变频控制技术应用研究[J]. 机械工程与自动化, 2024(1):205-207.
- [20] 王清科. 综采乳化液泵站的负载与变频恒压供液分析[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(9):89-92.

收稿日期:2024-10-16