

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.053

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

张恒武¹, 章建平², 郭达明², 周卓², 刘永宽², 马小珑²

(1. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410029;

2. 湖南省送变电工程有限公司, 湖南 长沙 410021)

摘要:为了准确、高效地识别液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障,提出基于 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。分析液压旋挖钻机缓冲平衡阀结构,建立运动学方程,对其旋挖运动特性展开分析。设计 T-S 模糊门,根据液压旋挖钻机缓冲平衡阀现场的故障数据,结合专家经验,在平衡阀旋挖动力特点的基础上建立 T-S 模糊故障树,将缓冲阀状态异常作为故障树的顶层事件。利用 T-S 模型得到故障事件的故障程度,实现液压旋挖钻机缓冲平衡阀的故障诊断。实验结果表明:所提方法诊断效率高、诊断精度高。

关键词:液压旋挖钻机;缓冲平衡阀;T-S 模糊故障树;故障诊断

中图分类号:TP277 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0268-06

Fault Diagnosis Method for Buffer Balance Valve of Hydraulic Rotary Drilling Rig Based on T-S Fuzzy Fault Tree Analysis

ZHANG Hengwu¹, ZHANG Jianping², GUO Daming², ZHOU Zhuo², LIU Yongkuan², MA Xiaolong²

(1. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410029, China;

2. Hunan Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Changsha 410021, China)

Abstract:In order to identify the fault of hydraulic rotary drilling rig buffer balance valve with accuracy and efficiency, a fault diagnosis method of hydraulic rotary drilling rig buffer balance valve based on T-S fuzzy fault tree analysis is proposed. The structure of the buffer balance valve of the hydraulic rotary drilling rig is analyzed, the kinematics equation is established, and the motion characteristics of the rotary drilling rig are analyzed. T-S fuzzy gate is designed. According to the on-site fault data of buffer balance valve of hydraulic rotary drilling rig and expert experience, T-S fuzzy fault tree analysis is established based on the dynamic characteristics of rotary drilling of balance valve, and the abnormal status of buffer valve is regarded as the top event of the fault tree analysis. The T-S model is applied to obtain the fault severity of the fault event and achieve fault diagnosis of the buffer balance valve of the hydraulic rotary drilling rig. The experimental results show that the proposed method has high diagnostic efficiency and accuracy.

Keywords:hydraulic rotary drilling rig; buffer balance valve; T-S fuzzy fault tree; fault diagnosis

0 引言

尽管现代社会的科技水平足以支撑电网塔等大型机具的安装,但一些偏远地区,如湖南省部分山区,仍因地形地貌复杂而存在沿线桩位交通运输条件差,导致旋挖施工钻机的施工难度较高。液压旋挖钻机因具有性能好、效率高、污染小等优势,被先后应用于多种领域的钻孔工作中^[1]。液压旋挖钻机上的回转液压系统简称液压系统^[2],是驱动发动机输出机械能,并将机械能传递至钻机各部位元件的自动化仪表系统。

该系统由结合缓冲平衡阀的恒功变量自动控制器和先进的监控仪表组成。其中,缓冲平衡阀是辅助液压旋挖钻机循环作业的重要机械部件,也是极易受内外因素影响导致液压旋挖钻机运作停滞的关键部件。液压旋挖钻机的缓冲平衡阀故障特征和类型多种多样。缓冲平衡阀常见的故障特征包括液压系统油温过高、液压缸无法稳定运动或运动速度不均匀以及工作装置抖动等。根据具体故障表现,可以将缓冲平衡阀的故障类型分为泄漏、阀芯卡阻、压力不稳以及阀芯磨损等。了解这些故障特征和类型,有助于及时发现

基金项目:国网湖南电力科技创新项目(5216A721003H)

第一作者简介:张恒武(1967—),男,湖南长沙人,高级工程师,本科,研究方向为输变电工程,2827480772@qq.com。

问题并采取适当的维修措施,以确保液压旋挖钻机的正常运行和安全性能。

为了推动我国偏远地区电力工程建设,提高液压旋挖钻机在山区等复杂环境的整机稳定性,相关人员展开对液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断方法的研究。王佳晨等^[3]通过贝叶斯网络建立液压系统几何模型,并采集模型运转途中缓冲平衡阀数据,利用 K2 评分搜索策略预测该数据存在故障的概率,实现液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断,但该方法存在诊断效率低的问题。王正幸等^[4]通过分析液压系统在滑摩和非滑摩两种状态下形成故障的机制,利用 AMESim 搭建液压系统故障模型并提取模型时域特征输入粒子群优化 BP 神经网络中,实现液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断。冯蕴雯等^[5]通过收集液压系统缓冲平衡阀典型故障运行数据,建立直观反映缓冲平衡阀故障形成原因的逻辑图,实现液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断。但上述两种方法存在诊断精度低的问题。

以上问题主要因为液压旋挖钻机缓冲平衡阀的故障特征受到旋挖运动过程的影响,很难形成线性的故障树结构,特征出现模糊化倾向,导致故障诊断效率和精度降低。本文提出基于 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,以提高诊断效率及精度。

1 液压旋挖钻机动力学特性分析

液压旋挖钻机缓冲平衡阀的结构如图 1 所示。

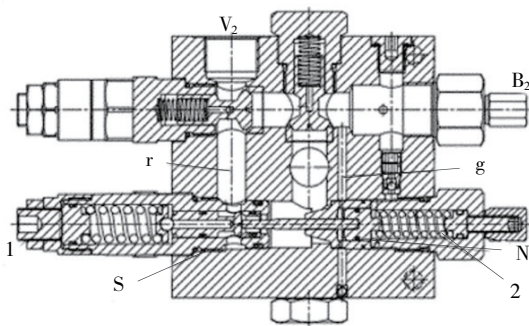


图 1 缓冲平衡阀结构图

对缓冲平衡阀^[6]的结构展开分析,当系统处于启动状态时,压力油会顺着 B_2 进入缓冲平衡阀系统,依次通过 V_2 口,到达系统马达处,先导油管 g 中流过压力油时会对阀芯 N 产生作用,阀芯

S 会受到反馈油道 r 的影响。建立 r 的旋挖动力学方程如下:

$$\begin{cases} A_1 D_N - \xi_2 = m_2 \frac{d\theta_2^2}{dt^2} + N_B \frac{d\theta_2}{dt} + l_2 \theta_2 \\ A_1 D_S - \xi_1 = m_1 \frac{d\theta_1^2}{dt^2} + N_B \frac{d\theta_1}{dt} + l_1 \theta_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_1 表示马达进油口在缓冲平衡阀中受到的压力; D_N 、 D_S 、 m_1 、 m_2 分别表示两侧阀芯对应的有效受力面积和质量; ξ_1 、 ξ_2 表示两侧弹簧对应的预紧力^[7]; N_B 表示黏性阻尼; θ_1 、 θ_2 表示两侧弹簧在缓冲平衡阀运行过程中产生的位移; l_1 、 l_2 表示两侧弹簧对应的刚度。缓冲平衡阀参数如表 1 所示。

表 1 缓冲平衡阀参数

参数	数值
受力面积/ cm^2	1.75
弹簧预紧力/N	10
黏性阻尼/($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$)	1.5
缓冲位移/cm	0.75
弹簧刚度/(N/m)	50

压力油在液压旋挖钻机缓冲平衡阀制动状态下进入缓冲平衡阀的初始点为马达出油口,阀芯 S 在此状态下会受到压力油产生的作用,此时阀芯 S 的旋挖动力学特性^[8]如下:

$$A_2 D_S + \xi_2 - \xi_1 = m_1 \frac{d\theta_1^2}{dt^2} + N_B \frac{d\theta_1}{dt} + l_1 \theta_1 \quad (2)$$

上述动力学分析结果可作为后续建立液压旋挖钻机缓冲平衡阀 T-S 模糊故障树的依据。

2 液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断

由上述动力学分析结果可知,其信号特征存在明显的非线性和模糊性。本文设计基于 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,采用 T-S 模糊故障树展开故障诊断。T-S 模型属于一种非线性函数,通常情况下由 IF-THEN 模糊规则构成,同时也属于模糊推理模型。

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,结合专家经验与液压旋挖钻机缓冲平衡阀的现场故障数据,根据平衡阀的动力学方程建立 T-S 模糊故障树,如图 2 所示。

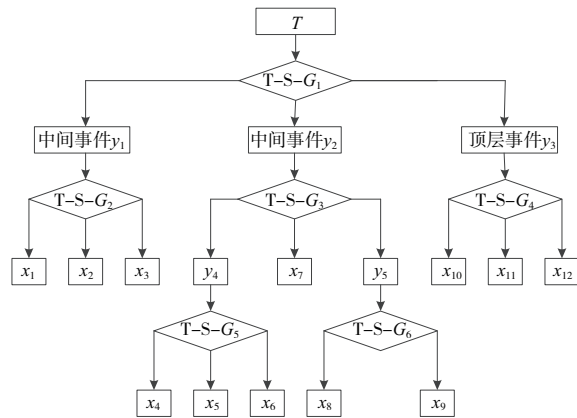


图2 液压旋挖钻机缓冲平衡阀 T-S 模糊故障树

图2中, G_1, G_2, G_3 表示T-S模糊门; x_i 为缓冲平衡阀的底层故障事件, $i=1,2,\dots,12$; y_j 为中间故障事件, $j=1,2,\dots,5$; T 为故障事件。图2所示的故障树中存在的各类故障事件具体解释如表2所示。

表2 事件明细

顶层事件	中间事件	底层事件
液压旋挖钻机缓冲平衡阀状态异常 T	液压系统内漏 y_1	内部串油 x_1
		管道漏气 x_2
		密封损坏 x_3
	柱塞泵无法排油 y_2	油黏度过高 x_7
		安全阀开启压力低 x_{10}
	安全阀溢流故障 y_3	安全阀阀芯卡死 x_{11}
		密封圈损坏 x_{12}
		吸油过滤器堵塞 x_4
	过滤器异常 y_4	回油滤油器堵塞 x_5
		空气滤清器堵塞 x_6
	电机泵组异常 y_5	电机转向错误 x_8
		油泵磨损过渡 x_9

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,通过模糊数 $(y_1, y_2, \dots, y_{ij})$ 、 $(x_1, x_2, \dots, x_l)$, $\dots$, $(x_1, x_2, \dots, x_{li})$ 描述上级事件 y_j 和底层事件 x_i 的故障程度:

$$\begin{cases} 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_l \leq 1 \\ \vdots \\ 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq 1 \\ 0 \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_j \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

采用 T-S 模糊故障树诊断液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障的规则如下。

液压旋挖钻机缓冲平衡阀的故障程度是根据故障的表现、对系统性能的影响、故障的频率以及

维修代价等因素进行评估。故障程度的评估旨在确定故障的严重程度,并为修复和预防故障提供指导。通过观察故障特征,分析故障对机器性能的影响,考虑故障频率以及评估修复的时间和费用,可以确定故障程度。评估结果有助于采取适当的维修措施,改善系统可靠性和性能。已知规则 $l(l=1,2,\dots,m)$,当底层事件 x_i 的故障程度为 x_{li} ,则上级事件 y_j 的故障程度为 y_{lj} 的概率为 $P^l(y_{lj})$ 。

设 $P(x_{11}), P(x_{12}), \dots, P(x_{li})$ 表示液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障的底层事件各种故障程度的模糊概率,在故障诊断过程中执行规则 l 的模糊概率为 $P_0^l = (P(x_{11}), P(x_{12}), \dots, P(x_{li}))$ 。通过计算模糊概率获得上级事件属于不同故障程度的模糊概率,以此实现液压旋挖钻机缓冲平衡阀的故障诊断。此时上级事件发生的概率可通过下述公式计算得到:

$$\begin{cases} P(y_1) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y_1) \\ P(y_2) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y_2) \\ \vdots \\ P(y_{ij}) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

当底层事件 x 在液压旋挖钻机缓冲平衡阀运行过程中的故障程度为 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_i)$ 时,上级事件属于不同故障程度的模糊概率可通过 T-S 模型计算得到:

$$\begin{cases} P(y_1) = \sum_{l=1}^m \alpha_l^*(x') P^l(y_1) \\ P(y_2) = \sum_{l=1}^m \alpha_l^*(x') P^l(y_2) \\ \vdots \\ P(y_{ij}) = \sum_{l=1}^m \alpha_l^*(x') P^l(y_{ij}) \end{cases} \quad (5)$$

式中模糊参数 $\alpha_l^*(x')$ 的计算公式如下:

$$\alpha_l^*(x') = \prod_{j=1}^i \nu_{x_i}^{ij}(x'_i) / \sum_{l=1}^m \prod_{j=1}^i \nu_{x_i}^{ij}(x'_i) \quad (6)$$

式中 $\nu_{x_i}^{ij}(x'_i)$ 为在第 l 条规则中缓冲平衡阀故障程度 x'_i 对应的模糊集隶属度。根据式(5)即可获得上级事件属于不同故障程度的模糊概率,以此实现液压旋挖钻机缓冲平衡阀的故障诊断。

3 实验

为了验证基于 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的整体有效性,需要对其进行测试。

3.1 实验对象

随机选择两台液压旋挖钻机作为验证算法诊断性能实验的实验对象,两个实验对象如图 3 所示,实验对象的参数设定如表 3 所示。



图 3 实验对象

表 3 实验对象参数设定

实验对象	液压旋挖钻机型号	最大工作半径/m	最大钻孔深度/m
对象 1	XY-100	25	30
对象 2	ZR-200	35	40

3.2 实验方法

1) 阀帽预紧力

灰尘污染是导致缓冲平衡阀间隙增大的主要原因之一。当阀帽预紧力下降时,会进一步增加缓冲平衡阀的间隙,从而导致其故障。这种故障可能会导致液压马达和液压缸的压力骤升,给系统带来不稳定的情况。为了模拟阀帽预紧力下降的情况,进行了人为实验。在实验对象 1 和实验对象 2 原有设定的基础上,每隔 1 s,将阀帽的预紧力降低 2 N。通过这个实验,观察液压马达和液压缸压力的变化情况,以便更好地理解其对系统的影响,并探索如何避免或解决因此引起的液压系统故障。因此,分别采用所提方法、文献[3]基于信息熵的液压状态监测系统故障诊断方法和文献[4]湿式离合器换挡过程液压系统故障机制分析与诊断方法来诊断液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障。

2) 石墨活塞环直径

缓冲平衡阀内部温度升高是导致石墨活塞环直径增大的主要原因之一。当石墨活塞环直径增大时,将引发缓冲平衡阀的故障并导致液压马达和液压缸的压力骤升。这种情况给液压系统带来了严重的不稳定性。

为了模拟石墨活塞环直径增大的情况,在原有设定的基础上,每隔 1 s,将石墨活塞环的直径提升 1 mm。通过这个实验,观察液压马达和液压缸压力的变化,以更好地了解其对系统的影响。在诊断液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障方面,采用 3 种不同的方法进行比较:所提方法、文献[3]和文献[4]中提到的方法。通过对比和分析这 3 种方法的结果,可以评估其在诊断液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障方面的有效性和准确性。

3) 故障诊断时间

为了进一步验证本文方法的适用性,分别采用所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法诊断实验对象 1 缓冲平衡阀故障,记录故障诊断时间和不同方法故障诊断时间对比结果。

4) 现场工程实验

以湖南省某丘陵和山脉过渡地带为实验区域,运用实验对象 1 就当地地质条件展开钻孔,监测并记录实验对象 1 完成直径 200 mm,孔深 703 m,总进尺 911 m 钻孔的作业情况及实际发生的故障。现场工程如图 4 所示。



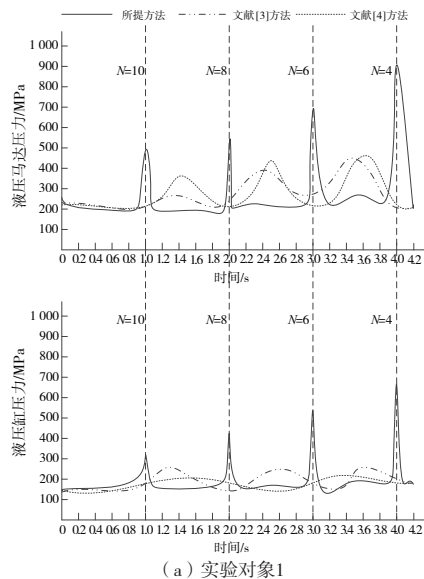
图 4 现场工程

分别采用所提方法、文献[4]方法和文献[5]方法诊断实验对象 1 缓冲平衡阀故障,并将不同方法的诊断结果与排查结果对比。

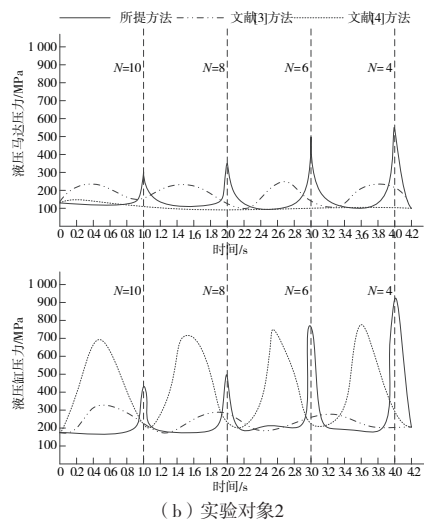
3.3 实验结果分析

1) 阀帽预紧对故障诊断效率的影响

阀帽预紧力下降引发故障时不同方法下压力变化情况如图 5 所示。



(a) 实验对象1



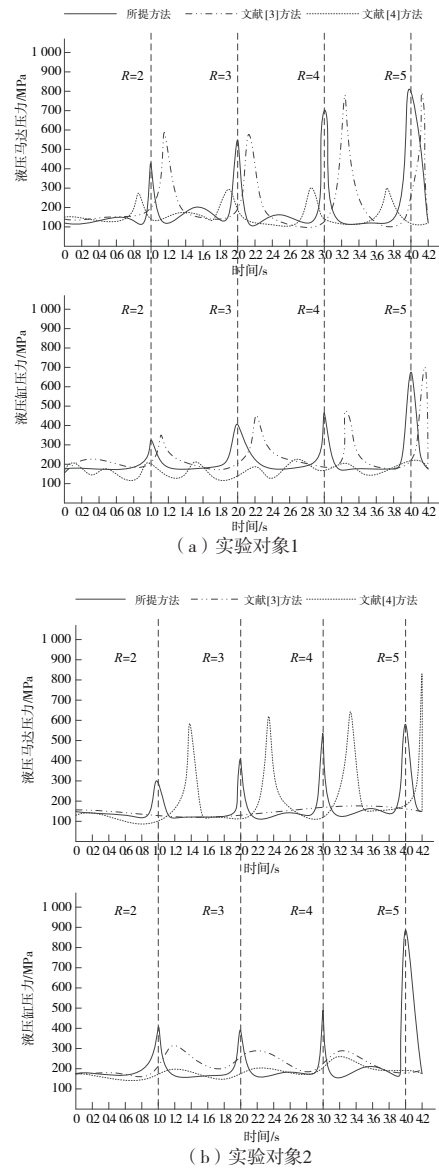
(b) 实验对象2

图5 阀帽预紧力下降引发故障时
不同方法的压力变化情况

分析图5可知,采用所提方法诊断液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障,在阀帽预紧力骤然下降的时间点,液压马达和液压缸压力均升高明显,说明所提方法对阀帽预紧力下降这一故障现象的敏锐度较高。由此可知,所提方法能够快速诊断缓冲平衡阀故障。采用文献[3]和文献[4]方法诊断液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障,在阀帽预紧力骤然下降的时间点,液压马达和液压缸压力均未出现明显升高,说明文献[3]方法和文献[4]方法对阀帽预紧力下降这一故障现象的敏锐度较低。由此可知,文献[3]方法和文献[4]方法无法快速诊断缓冲平衡阀故障。经上述对比可知,所提方法对液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障的诊断效率明显优于传统方法。

2) 石墨活塞环直径对故障诊断效率的影响

石墨活塞环直径增大引发故障时不同方法下压力变化情况如图6所示。



(b) 实验对象2

图6 石墨活塞环直径增大引发故障时
不同方法的压力变化情况

分析图6可知,所提方法下石墨活塞环直径增大和液压马达、液压缸压力升高在同一时刻发生,说明所提方法对缓冲平衡阀故障的诊断速度较快。文献[3]方法和文献[4]方法下石墨活塞环直径增大和液压马达、液压缸压力升高不在同一时刻发生,说明文献[3]方法和文献[4]方法对缓冲平衡阀故障的诊断速度慢。经上述对比,进一步验证了所提方法的诊断效率。

3) 故障诊断时间情况分析

不同方法故障诊断时间对比结果如表4所示。

表 4 不同方法的故障诊断时间对比情况 单位:s

项目	本文方法	文献[4]方法	文献[5]方法
故障诊断时间	5	12	15

分析表 4 可知,所提方法的诊断时间与其他两种方法相比,时间最短,仅需 5 s。因此可以得出,本文方法在进行故障诊断时效率最高。

4) 缓冲平衡阀的诊断精度分析

不同方法的诊断精度对比情况如表 5 所示。

表 5 不同方法诊断精度的对比情况

试验日期	液压旋挖钻机停机时间	缓冲平衡阀故障排查结果	所提方法	文献[4]方法	文献[5]方法
3月1日	11:23am	过度磨损	过度磨损	疲劳断裂	制动力不足
	10:51am	垫片破裂漏油	垫片破裂漏油	塑性变形	传动齿轮松旷
3月2日	4:05pm	内部串油	内部串油	磨粒磨损	内部串油
	15:00pm	油液黏度过高	油液黏度过高	表面疲劳磨损	油路堵塞
3月3日	11:27am	油泵排量不足	油泵排量不足	油泵排量不足	塑性变形

由表 5 可见,所提方法的诊断结果与缓冲平衡阀故障排查结果一致,说明所提方法对缓冲平衡阀的故障诊断精度高。文献[4]方法和文献[5]方法诊断结果与缓冲平衡阀故障排查结果不一致,说明文献[4]方法和文献[5]方法对缓冲平衡阀的故障诊断精度低。经上述对比,可知所提方法对缓冲平衡阀的诊断精度明显优于传统方法。

4 结语

为了准确高效地识别液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障,对液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断方法进行了研究。如何在保证液压旋挖钻机缓冲平衡阀故障诊断性能的同时,对缓冲平衡阀故障诊断过程实时监控,则是研究人员下一步工作的重点。

参考文献:

[1] 黄会荣,贺明辉,张希. 旋挖钻机桅杆瞬态动力学与疲劳研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(3):445-451.

[2] 李永涛,杨波,木合塔尔·克力木. 液压系统流体脉动抑制方法综述[J]. 机械工程学报,2022,58(16):344-359.

[3] 王佳晨,张宇来,岑岗. 基于信息熵的液压状态监测系统故障诊断方法[J]. 计算机工程与设计,2021,42(8):2257-2264.

[4] 王正幸,鲁植雄,陈元. 湿式离合器换挡过程液压系统故障机理分析与诊断方法研究[J]. 机械科学与技术,2022,41(6):849-856.

[5] 冯蕴雯,潘维煌,路成,等. 基于逻辑图的国产民机液压系统故障诊断与定位[J]. 西北工业大学学报,2022,40(4):732-738.

[6] 沈伟,刘帅,武毅. 基于网络的液压马达伺服位置系统自适应鲁棒积分控制[J]. 上海理工大学学报,2021,43(4):325-331.

[7] 郝付祥,穆安乐. 液压缸磁流体密封的有限元分析及实验研究[J]. 西安理工大学学报,2022,38(1):27-31,47.

[8] 刘若君,张幼振,姚克. 基于 T-S 模糊故障树的煤矿坑道钻机液压动力系统故障诊断研究[J]. 煤田地质与勘探,2022,50(12):194-202.

收稿日期:2023-06-07