

深海采矿管线提升系统故障诊断技术

许豪轩^{1,2}, 刘振冲², 严传续², 邢博闻^{1,2*}

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海中船船舶设计技术国家工程研究中心有限公司, 上海 201114)

摘要: [目的]为应对深海采矿管线提升系统在复杂海洋环境下缺乏有效的系统级故障诊断方法, 难以应对多组件耦合与连锁故障风险的问题。[方法]提出一种多参数融合故障诊断策略。采用集中质量法建立流速-挠度-应力耦合动力学模型, 以描述系统的动态行为; 在此基础上, 针对扬矿管、提升泵、中继站及采矿车, 设定涵盖流体参数、结构参数与运动状态的多维关键参数诊断阈值, 并引入防抖算法与故障代码库, 构建一套系统级实时监测与诊断系统。[结果]仿真验证表明: 该策略能有效监控扬矿管挠度、提升泵效率、中继站应力及采矿车位姿等关键状态变量, 实现对包括扬矿管形变疲劳、提升泵堵塞磨损、中继站堵塞/偏移及软管缠绕在内的 15 类典型故障的精准识别; 在极端海况及多故障耦合场景下, 该策略仍能保持可靠的诊断性能。[结论]构建的故障诊断框架及验证结果, 为提升深海采矿系统的运行安全性与可靠性提供有效的理论依据与工程参考。

关键词: 深海采矿; 故障诊断; 管线提升系统; 多参数融合

中图分类号: U671.99 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.06.19

Fault Diagnosis Technology for Deep-Sea Mining Pipeline Lifting Systems

XU Haoxuan^{1,2}, LIU Zhenchong², YAN Chuanxu², XING Bowen^{1,2*}

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Zhongchuan NERC-SDT Co., Ltd., Shanghai 201114, China)

Abstract: [Purpose] To address the problem that the deep-sea mining pipeline lifting system lacks an effective system-level fault diagnosis method in complex marine environments, making it difficult to cope with the risks of multi-component coupling and cascading failures. [Method] A multi-parameter fusion fault diagnosis strategy is proposed. A coupled velocity-deflection-stress dynamic model is established using the lumped mass method to characterize the dynamic behavior of the system. On this basis, multi-dimensional key parameter diagnosis thresholds covering fluid parameters, structural parameters, and motion states are set for the rigid pipe, lifting pump, buffer, and mining vehicles. Additionally, an anti-jitter algorithm and a fault code library are introduced to build a system-level real-time monitoring and diagnosis system. [Result] Simulation verification shows that the strategy can effectively monitor key states such as the deflection of the rigid pipe, the efficiency of the lifting pump, the stress of the buffer, and the position and posture of mining vehicles. It achieves accurate identification of 15 typical faults, including deformation fatigue of the rigid pipe, lifting pump blockage and wear, buffer blockage and offset, and hose entanglement. The strategy still maintains reliable diagnostic performance under extreme sea conditions and in scenarios with multiple coupled faults. [Conclusion] The fault diagnosis framework and verification results constructed provide an effective theoretical basis and engineering reference for improving the

收稿日期: 2025-08-19; 修回日期: 2025-11-24

基金项目: 上海市青年科技启明星计划 (NO.24QB2707000)

作者简介: 许豪轩 (2001—), 男, 硕士研究生。研究方向: 故障诊断。

通信作者: 邢博闻 (1989—), 男, 博士研究生、副教授。研究方向: 智能检测。E-mail: bwxing@shou.edu.cn

operational safety and reliability of deep-sea mining system.

Key words: deep-sea mining; fault diagnosis; pipeline lifting system; multi-parameter fusion

0 引言

深海采矿是应对陆地资源枯竭的重要战略途径^[1], 而其管线提升系统(Pipeline Lifting System, PLS)在复杂作业环境下, 关键组件极易因机械疲劳、堵塞或外部扰动而引发连锁故障^[2]。目前, 该领域仍缺乏有效的系统级故障诊断策略。

在早期研究中, 有学者提出了一种基于动态故障诊断结果的可靠性评价方法, 并以海底泥浆提升系统为例验证了该方法的有效性。该研究考虑了传感器信号退化与设备状态衰减对诊断结果的影响, 为PLS故障诊断策略研究提供了思路^[3]。

在组件层面, 现有研究虽已取得一定进展, 但仍存在局限: 针对扬矿管, 研究多集中于流体力学特性与动力学响应分析, 如采用计算流体力学-离散元法(Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method, CFD-DEM)方法模拟固液两相流动特征^[4]、基于有限元方法探讨洋流与结构参数对管道动力性能的影响^[5-8], 然而上述研究均未能形成有效的故障判断策略; 针对提升泵, 已有研究尝试利用声信号结合智能算法进行状态识别^[9], 但尚未扩展至系统级的多参数融合诊断层面; 针对中继站, 相关立管动力学模型为耦合故障分析提供了理论依据^[10]; 针对采矿车, 软管防缠绕方法为运动状态监测提供了技术方向^[11-12]。

由上述文献可知, 现有研究多聚焦局部组件或单一物理量分析, 缺乏涵盖扬矿管、提升泵、中继站与采矿车的全局诊断架构, 更未能建立适用于工程实际的多参数融合、防误报及可视化故障诊断系统。为此, 本文提出一种面向PLS的多参数融合故

障诊断策略, 旨在通过耦合建模、阈值设定与防抖算法, 实现系统级实时监测与精准预警。

深海采矿系统结构见图1。本文设定的深海采矿作业水深为5 000 m, 扬矿管总长度为4 900 m, 中继站安装于扬矿管末端, 并在水深500 m处配置一台提升泵。采矿车采集的多金属结核(指在深海环境中形成的富含锰、铁、镍、铜等金属元素的沉积矿物)通过软管输送至中继站, 再经扬矿管和提升泵输送至采矿船。系统组件包括扬矿管、提升泵、中继站及4辆采矿车。

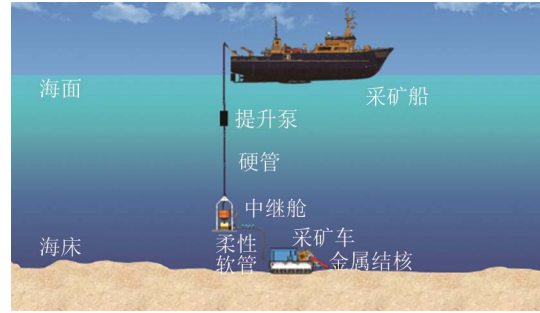


图1 深海采矿系统结构图

Fig. 1 Schematic Diagram of Deep-Sea Mining System

1 数学模型与指标分析

1.1 流体动力学指标分析

内外流扰动对扬矿管的影响十分显著, 因此有必要对其力学特性进行分析, 并据此确定故障诊断的参考指标。Morison方程^[13]适用于模拟扬矿管在外部洋流扰动下的动态响应过程。根据Morison方程, 洋流水动力的水平分力可表示为

$$F_x = \rho_w \pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 a_m + C_a \rho_w \pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \frac{du_w}{dt} + \frac{1}{2} C_d \rho_w D_o u_w |u_w| \quad (1)$$

$$F_y = \rho_w \pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 a_m + C_a \rho_w \pi \left(\frac{D_o}{2} \right)^2 \frac{dv_w}{dt} + \frac{1}{2} C_d \rho_w D_o v_w |v_w| \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: F_x 和 F_y 均为水动力; ρ_w 为海水密度; D_o 为扬矿管外径; a_m 为流体相对地球的加速度; C_a 为惯性系数; C_d 为阻力系数; u_w 和 v_w 分别为洋流沿扬矿管x和y方向的速度分量。

随着海水深度的增加, 洋流速度逐渐降低。JANARTHANAN等^[14]表明, 洋流通过中国矿区海域时最大速度可达1.7 m/s。然而, 该文献并未阐明洋流速度随海水深度变化的规律。采用CHEN等^[15]提供的洋流速度变化趋势见图2。

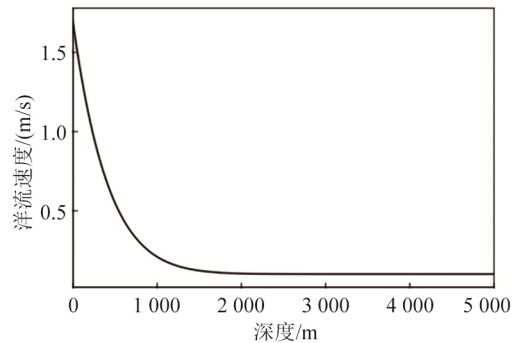


图2 洋流速度分布

Fig. 2 Distribution of Ocean Current Velocity

进行计算, 则洋流速度 u 与海水深度 z 的关系为

$$u = 0.1 + 1.6 \left(\frac{5\,000 - z}{5\,000} \right)^{12} \quad (3)$$

根据张明等^[16]对深海采矿系统的设计需求, PLS应能稳定输送多金属结核, 输送量 ≤ 43 t/h。此外, 系统应能处理粒径 ≤ 20 mm、体积浓度为5%的多金属结核。多金属结核的提升速度应达到其沉降速度的3~5倍^[17], 才能保证矿石颗粒在扬矿管中垂直向上输送。流速过快或过慢都会导致系统故障。不规则形状多金属结核颗粒的沉降速度表达式^[16]为

$$W_l = 1.529 S_f^{0.815} \sqrt{gd \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} \quad (4)$$

式中: W_l 为多金属结核颗粒的沉降速度; S_f 为形状系数, 天然多金属结核形状系数取0.8; g 为重力加速度; d 为多金属结核粒径; ρ_s 为多金属结核密度; ρ_w 为海水密度。

经计算提升速度 V_m 理论为1.62 m/s~2.71 m/s。为保证采矿效率, 本文取2.71 m/s作为多金属结核的额定提升速率。

提升泵是维持矿浆稳定提升的关键设备, 其运行状态会直接决定系统流量是否稳定^[18]。泵的实际工作点由其特性曲线与管路系统特性共同决定。在转速恒定的情况下, 泵的输出流量是其运行状态最直接的反映。流量过低无法满足输送要求; 流量过高可能意味着增压不足、扬程下降, 同样阻碍矿物提升。若仅将体积流量 Q_v 作为诊断指标, 虽能反映部分异常, 但难以区分故障根源。如, 流量下降既可能由管路堵塞引起, 也可能由叶轮磨损或泵内泄漏所致。为实现精准诊断, 本文引入轴向推力 F_{axial} 、效率 η 与轴功率 P 等参数, 这些参数会综合影响提升泵的安全性能。通过解析其耦合响应特征, 可实现对不同故障的精准辨识。提升泵的扬程 H ^[19]为

$$H = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + z_d - z_s + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} \quad (5)$$

式中: p_d 和 p_s 分别为出口和入口处的压力; v_d 和 v_s 分别为检查点处的内部流速和距离; z_d 和 z_s 分别为出口和入口处的高度; ρ 为矿浆密度。

轴向推力是影响提升泵可靠性的核心力学参数。 F_{axial} 与 Q_v 呈负相关。在低流量工况下, 叶轮产生的压头更高, 导致作用于叶轮前后盖板的压力差增大, 从而产生更大的轴向推力。平衡孔是平衡此推力的关键结构, 其直径增大会通过泄漏流量降低后泵腔压力, 从而显著减小轴向推力, 但同时也因容积损失而导致 η 下降。提升泵的 η 是衡量其能量转换品质的核心指标, 定义为有效功率 N_e 与轴功率 P 之比, 即

$$\eta = \frac{N_e}{P} = \frac{\rho g Q_v H}{P} \quad (6)$$

该式综合反映了介质属性、输送能力及增压性

能, 任何由叶轮磨损、堵塞或内泄漏引起的能量损失都会导致在恒定轴功率下有效功率下降, 最终表现为 η 的异常, 因此效率可作为诊断泵内部状态变化的敏感参数。

1.2 结构动力学指标分析

洋流会显著激发扬矿管的振动与形变, 进而诱发金属疲劳风险。扬矿管在海洋环境中的挠度可通过欧拉-伯努利梁方程进行计算。

$$E_l \frac{\partial^4 y_d}{\partial z^4} - \frac{\partial}{\partial z} \left(T_e \frac{\partial y_d}{\partial z} \right) + m \frac{\partial^2 y_d}{\partial t^2} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (7)$$

式中: E_l 为扬矿管的抗弯刚度; y_d 为扬矿管在深度 z 、时间 t 处的横向挠度; T_e 为扬矿管在深度 z 、时间 t 处的有效张力; m 为扬矿管单位长度的质量。

为评估该风险, 应持续记录扬矿管的挠度及其大幅偏移频次。

$$\begin{cases} T_e = T_w + P_o A_o - P_i A_i \\ T_w = E_A \varepsilon - 2\mu(P_o A_o - P_i A_i) + E_A C L' L_0 \\ \varepsilon = \lambda \cdot L / L_0 - 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: T_w 为截面轴向力; P_o 和 P_i 分别为扬矿管外部和内部的压力; A_o 和 A_i 分别为扬矿管外部和内部的横截面积; E_A 为扬矿管的轴向刚度; ε 为总平均轴向应变; μ 为泊松比; L_0 为扬矿管未拉伸时的长度; C 为阻尼系数; λ 为扬矿管的膨胀系数; L 为扬矿管当前长度; L' 为扬矿管长度变化率。

对于系统的弯曲响应, 弯曲力矩 M 的表达式为

$$M = E_l \kappa + \eta_b \dot{\kappa} \quad (9)$$

式中: E_l 为扬矿管的抗弯刚度; η_b 为弯曲阻尼系数; κ 为单元曲率。

中继站安装在扬矿管的末端, 主要受扬矿管端点效应的影响^[10], 其受力包括重力、浮力、水动力和扬矿管拉力。4种力的计算方式为

$$G_b = m_b g \quad (10)$$

式中: G_b 为中继站重力; m_b 为中继站质量。

$$F_b = \rho_w g V \quad (11)$$

式中: F_b 为中继站受到的浮力; V 为中继站排开海水的体积。

$$F_D = -\frac{1}{2} \rho_w C_d A \Delta v |\Delta v| - C_a \rho_w A \frac{d\Delta v}{dt} \quad (12)$$

式中: F_D 为中继站受到的水动力; A 为流体直接冲击的面积; Δv 为洋流相对中继站的速度。

当系统稳定时, T_e 应通过式(5)进行计算。重力 G_b 与浮力 F_b 的差值仅反映装置的有效质量, 实际张力还须考虑压力差对扬矿管的轴向作用。应力传感器布设于中继站与扬矿管的连接处, 其读数可作为评估中继站工作状态的重要依据。若该读数持续异常偏高, 同时扬矿管内部流速降低, 通常预示着中继站内部存在矿浆堆积或堵塞风险; 此外, 若中继站被观测到出现异常的横向位移(其主要诱因包

括强洋流冲击或输送软管缠绕），则表明整个采矿系统可能已发生姿态倾斜。上述两种工况均严重威胁采矿系统的安全。

采矿车与中继站通过软管连接，两者水平距离过远会导致软管断裂，危及系统安全。采矿车路径规划不合理也可能导致软管缠绕，进而引发事故^[20]。

综上所述，本文对PLS各组件的故障诊断指标需求归纳如下：扬矿管的运行状态由内部流速、横向挠度及其大幅偏移频次进行表征；提升泵的健康状况通过体积流量、轴向推力、运行效率与轴功率等多维参数综合评估；中继站的稳定性由其横向偏移量、连接处应力以及关联的扬矿管内部流速共同判定；采矿车的安全监控则依赖于其实时坐标与软管缠绕状态。

1.3 集中质量法建模原理

对于较长的立管系统，集中质量法是一种高效的数值求解方法，其原理见图3。该方法是将连续弹性体离散化的高效数值模拟技术，核心原理如下：将一定长度的连续管道离散为 N 个无质量的弹性单元，并由 $(N+1)$ 个集中质量的节点相连接。所有分布参数，包括管道结构质量、内部流体质量、附连水质量以及外部浮力等，均被凝聚到相应的节点上。而单元本身仅提供轴向和弯曲刚度，通过弹簧-阻尼器模型模拟其弹性与耗散特性。在该模型中，每个节点的运动遵循牛顿第二定律，其三维空间中的运动控制方程为

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i = \sum \mathbf{F}_{ci} \quad (13)$$

式中： m_i 为节点 i 的集中质量； $\ddot{\mathbf{r}}_i$ 为节点加速度； $\mathbf{F}_{ci}$ 为作用于该节点上外力，外力主要包括相邻单元传递的有效张力、弯曲力矩等效力及流体动力载荷。

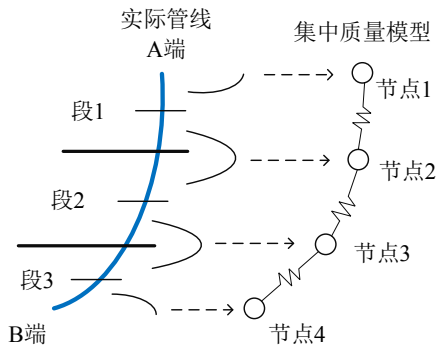


图3 集中质量法原理

Fig. 3 Principles of Centralized Quality Method

当获得所有节点的受力时，采用显式数值积分方法求解该耦合的常微分方程组，通过迭代更新每个节点的速度与位置

$$\dot{\mathbf{r}}_i^{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{r}}_i^t + \ddot{\mathbf{r}}_i^t \cdot \Delta t \big|_{\Delta t \rightarrow 0} \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{r}_i^t + \dot{\mathbf{r}}_i^t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{r}}_i^t \cdot \Delta t^2 \big|_{\Delta t \rightarrow 0} \quad (15)$$

2 系统建模与仿真实验

2.1 流速-挠度-应力耦合模型构建

对PLS状态的精准诊断，须厘清其内部矿浆流动、外部洋流与管道结构变形之间的耦合机制。为此，本文建立了“流速-挠度-应力”耦合模型，以系统描述上述多物理场之间的相互作用。该耦合模型的核心机理基于欧拉-伯努利梁方程，见式（7）。式中的 F_x 、 F_y 为洋流驱动力，将其转化为作用于扬矿管的水动力分量，由洋流流速 u 计算得到；有效张力 T_e 则由扬矿管内部流体压力、管道自重及浮力共同决定。该模型求解的核心输出为扬矿管的横向挠度，从而实现了流速、挠度与应力之间的耦合。

基于实际系统的连接关系，本耦合模型的边界条件设定：扬矿管顶端与采矿船铰接，因此简化为随船舶运动的位移约束；扬矿管底端通过柔性软管与采矿车刚性连接，中继站位于该连接处，其运动简化为由洋流载荷驱动的力边界条件。在本文关注的工况中，采矿船的运动参数作为输入，而中继站则在洋流和所连扬矿管的作用下产生运动。

$$\begin{cases} u(0, t) = S(t) \\ E_1 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \bigg|_{z=0} = 0 \\ u(z_b, t) = B(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中： $S(t)$ 为采矿船的运动； z_b 为中继站所在深度； $B(t)$ 为中继站的运动。

2.2 模型验证

基于理论框架，本文开发一套基于Modelica的自主计算模型。为验证所建模型的有效性与准确性，选取DENG等^[21]和JIN等^[22]的试验数据作为验证基准。DENG等^[21]计算了扬矿管在无洋流、无内流状态下的有效张力，扬矿管长为5 500 m，外径为406.4 mm，壁厚为12.7 mm，结构中布置浮力模块，分别取中继站质量为25 t、50 t、75 t和100 t进行试验，试验结果见图4。

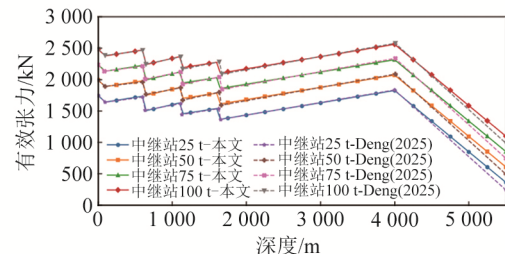


图4 不同中继站质量下的扬矿管张力对比

Fig. 4 Comparison of Rigid Pipe Tension Under Different Relay Station Qualities

JIN等^[22]模拟了立管在水流冲击下的管道形变情况，试验采用管长为13.12 m、外径为28.00 mm、壁厚为2.40 mm、抗弯刚度为29.9 N·m²的柔性立管，

其结构阻尼比为0.003 3。试验中将管道下部45%区段置于流速为0.85 m/s的均匀流中, 上部55%区段处于静水环境, 对比结果见图5。数值仿真结果与参考试验数据基本吻合, 表明本文采用的集中质量法耦合模型能较好地复现实际结构的动态响应行为, 具有较高的计算精度。因此, 该模型可用于后续故障诊断策略的可靠性验证。

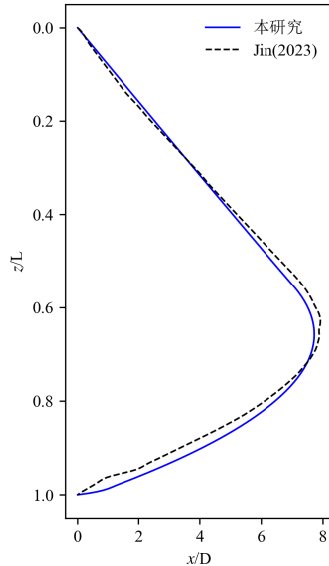


图5 特性流速下的管道偏移情况
Fig. 5 Pipe Offset Conditions Under Characteristic Flow Velocities

3 基于多参数融合的故障诊断策略设计

基于所确立的参考指标进行多参数融合的故障诊断策略设计。由于传感器信号易受环境干扰而产生误差抖动(流速真实值与检测值的偏差见图6), 为避免误报警, 本文引入了防抖动算法, 旨在确保系统仅在参数持续超越阈值、确认为真实故障时触发相应的故障码。为确保诊断系统的可靠性, 本文参考CCS^[23]提供的相关指标, 将关键参数故障阈值的总体安全裕量确定为±20%。

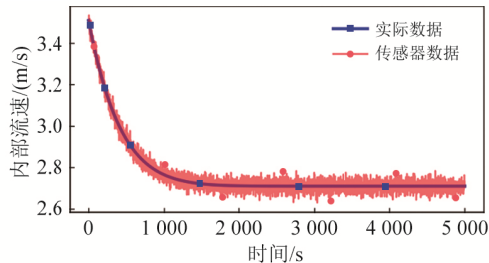


图6 传感器真实值与检测值对比
Fig. 6 Comparison of Sensor True Values and Detected Values

故障类别使用故障码进行区分, 本文设置了15类故障码, 具体描述见表1。

表1 故障代码及其含义

Tab. 1 Fault Codes and Their Meanings

故障码	说明
E1000	扬矿管低流速故障
E1001	扬矿管高流速故障
E1002	扬矿管大形变故障
E1003	扬矿管疲劳故障
E2000	提升泵入口堵塞故障
E2001	提升泵叶轮磨损/气蚀故障
E2002	提升泵平衡孔故障
E2003	提升泵内漏故障
E3000	中继站偏移故障
E3001	中继站堵塞故障
E4000	软管缠绕故障
E4001	1号采矿车驶离采矿区域
E4002	2号采矿车驶离采矿区域
E4003	3号采矿车驶离采矿区域
E4004	4号采矿车驶离采矿区域

3.1 扬矿管多参数故障诊断

扬矿管的故障诊断基于流速、挠度及大幅偏移频次3项指标。其中, 流速的有效诊断需以满足提升泵正常运行作为前提, 以避免系统待机或停机时产生无效报警。合理的流速范围参考DAI等^[5]的研究, 以2.71 m/s为均值, 结合安全裕量设定为2.2 m/s~3.0 m/s。当监测到流速持续<2.2 m/s时, 触发故障码E1000; 当监测到流速持续>3 m/s时, 触发故障码E1001。最大挠度的计算表达式为

$$Y_{\max} = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (17)$$

式中: q 为扬矿管所受的均布荷载; l 为扬矿管长度; E 为扬矿管材料的弹性模量; I 为扬矿管截面的惯性矩。

通过计算, 扬矿管最大挠度的理论值为6.55 m。考虑安全裕量, 当扬矿管的最大挠度>5.24 m时, 系统触发故障码E1002。为获取扬矿管的实时最大横向偏移量, 本文假设沿扬矿管每间隔10 m布设一个位移传感器, 同步采集不同深度处的偏移数据。最大挠度由同一时刻所有传感器读数的最大值确定。

每当检测到故障码E1002的上升沿时, 算法内部计数器加一。管道疲劳故障基于疲劳累积损伤理论判定, 其疲劳寿命通常介于数万次到数百万次循环应力之间。对于扬矿管, 本文以SAE 1015钢为例, 其疲劳性能数据^[24]表明, 在高应力幅下, 其最大循环次数可达 1.241×10^6 。考虑到深海环境较为复杂和安全裕量, E1002故障事件的累积预警阈值设定为 9.928×10^5 次。

3.2 提升泵多参数故障诊断

提升泵的故障诊断参考指标为体积流量、轴向推力、效率与轴功率。根据理论分析,扬矿管内的流速应为2.2 m/s~3.0 m/s。考虑到矿液体积浓度为5%,且扬矿管的横截面积为3 864.5 mm²,提升泵的理论流量为30.46 m³/h~41.54 m³/h。结合一定的安全裕量,本文将提升泵的合理流量保守设定为32 m³/h~40 m³/h,并基于多参数融合设定量化阈值,阈值设定参考了KANG等^[25]的研究内容。轴承允许的轴向推力为30 kN,考虑安全裕量,本文将24 kN和28 kN作为故障诊断的预警值。提升泵的故障诊断策略如下:

若 $Q_v < 32 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $F_{\text{axial}} > 24 \text{ kN}$ 且 P 超过额定值的1.2倍,则说明提升泵可能发生入口堵塞,此时触发故障码E2000;若 $Q_v < 32 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $F_{\text{axial}} < 24 \text{ kN}$ 且 η 低于额定值的80%,则说明提升泵可能出现叶轮磨损或气蚀,此时触发故障码E2001;若 $F_{\text{axial}} > 28 \text{ kN}$ 且 Q_v 、 η 均为正常值,则说明提升泵内平衡孔可能堵塞或磨损,导致轴向推力平衡系统失效,进而使 F_{axial} 增大,此时触发故障码E2002;若 η 低于额定值的80%且 Q_v 、 P 均为正常值,则说明提升泵内部可能存在泄漏,导致效率降低,此时触发故障码E2003。

3.3 中继站多参数故障诊断

由于中继站刚性连接于扬矿管末端,其横向位移与管道末端的动力学响应强耦合。本文沿用扬矿管的安全策略:当监测到的中继站横向位移持续>5.24 m时,表明管道系统已处于大挠度危险状态,中继站存在因强洋流冲击或软管缠绕而失稳的风险,此时系统触发故障码E3000。

当提升泵的扬程不足时,无法维持多金属结核在扬矿管中的正常悬浮与输送,导致结核沉降并逐渐堆积于中继站料仓内,进而引发堵塞。随着堆积物增多,料仓底部及连接结构所承受的载荷相应增大,反映在应力传感器上即为检测值的持续上升。本文设定的中继站系统总质量约8 t^[26],最大设计承载量约6 t多金属结核,理论最大承载载荷为140 kN。考虑20%的安全裕量,设定诊断逻辑:若监测到扬矿管提升速度持续低于多金属结核临界悬浮速度1.62 m/s,中继站连接处应力检测值>112 kN,则系统判定中继站存在堵塞风险,并触发故障码E3001。

3.4 采矿车多参数故障诊断

采矿车故障诊断的技术指标包括采矿车坐标及软管缠绕情况。本系统包含4辆采矿车,通过软管与中继站相连。以中继站为中心,设定了一个宽100 m的方形区域作为采矿车的活动边界见图7。采矿车每10 s更新一次坐标 (x_i, y_i) ,一旦某辆采矿车离开该采矿区,系统将触发对应的故障码E4001~E4004。

采矿车之间的相对运动可能导致软管缠绕,影

响系统安全。为检测软管的缠绕情况,本文设计了一种基于角度判定方法,该方法利用多辆采矿车的位置参数进行计算。

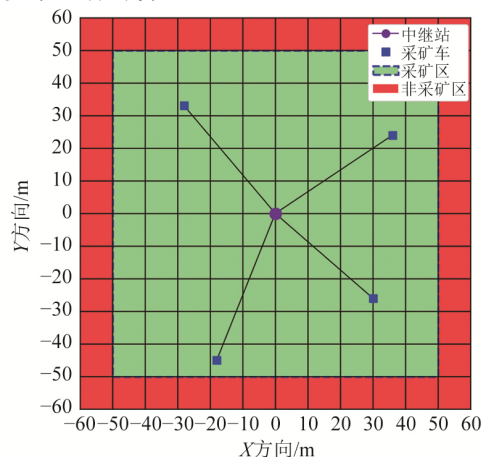


图7 采矿车工作区域

Fig. 7 Working Area of Mining Vehicle

首先,选定一辆采矿车作为中心点,利用反正切函数计算出其余目标点 $P_i(x_i, y_i)$ 相对于该中心点 $C(x_c, y_c)$ 的角度。这些角度表示从中心点到目标点的向量与x轴正方向之间的夹角,并被转换为 $0^\circ \sim 360^\circ$,从而精确表示每个目标点相对于中心点的位置。角度计算方法为

$$\theta_i = \arctan(y_i - y_c, x_i - x_c) \times \frac{180}{\pi} \quad (18)$$

$$\theta_i = (\theta_i + 360) \% 360 \quad (19)$$

式(18)和式(19)中: θ_i 为上次检测到的角度。

其次,算法持续跟踪这些角度的变化。对每一对中心点与目标点,都维护一个角度变化累计和数组,记录自上次检测以来的角度变化累计值。通过不断更新数组并比较当前与上次的角度差异。当任意一对点的角度变化累计和的绝对值>360°,或单次角度变化>90°时,算法即判定为发生缠绕。同时,算法还利用另一数组记录角度变化的方向和次数,以准确识别缠绕的发生与解除。

$$\text{anglesum}[i] = \text{anglesum}[i] + (\theta'_i - \theta_i) \quad (20)$$

式中: θ'_i 为当前检测到的角度。

当系统检测到此故障时,系统触发故障码E4000。

4 故障诊断策略验证

基准系统参数设定如下:扬矿管总长为4 900 m,沿长度均匀划分为100段;管道外径为100 mm,内径为70 mm;管内输送矿浆密度为1 088 kg/m³,其余参数依据具体验证工况另行给定。

4.1 组件动态工况验证

为验证扬矿管的故障诊断策略,本文通过在仿真中模拟2种动态工况进行测试:1)管道内流速以

正弦波形在 $2.0\text{ m/s}\sim 3.5\text{ m/s}$ 变化; 2) 管道自身存在幅值为 6 m 的预定义周期性振动。在模拟过程中, 当E1003故障达到触发条件后, 输入复位信号。工况1的试验结果见图8。在提升泵开启的状态下, 当扬矿管流速 $<2.2\text{ m/s}$ 时, 触发故障码E1000; 当流速 $>3\text{ m/s}$ 时, 触发故障码E1001。提升泵关闭后硬管低流量状态不会误报警。

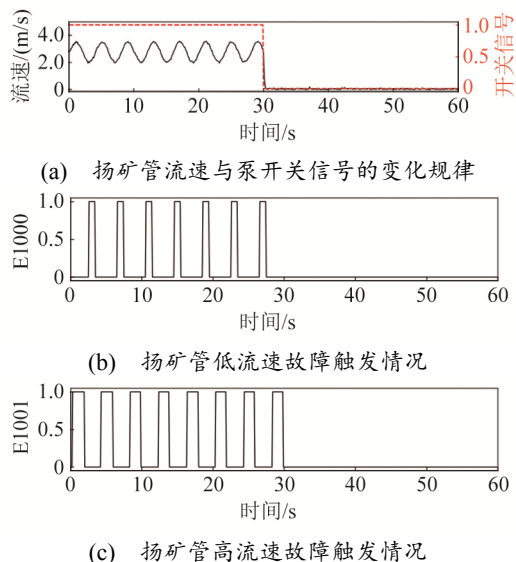


图8 扬矿管流速故障诊断试验结果

Fig. 8 Experimental Results of Rigid Pipe Flow Velocity Fault Diagnosis

实际E1003的触发条件所需的循环次数极大, 为验证策略的有效性, 在验证过程中将E1002的上升沿触发次数阈值设定为1000。工况2的试验结果见图9。当扬矿管的最大偏移量 $>5.24\text{ m}$ 时, 触发故障码E1002。在E1002触发1000次后, 故障码

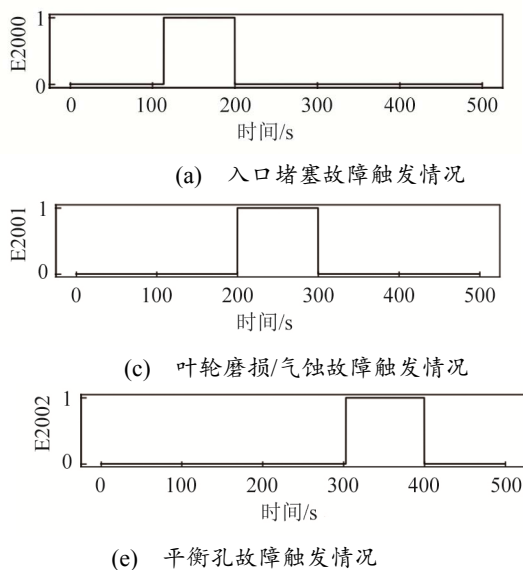


图10 提升泵故障诊断试验结果

Fig. 10 Experimental Results of Lifting Pump Fault Diagnosis

E1003被触发。输入复位信号后, 故障码E1003被解除。

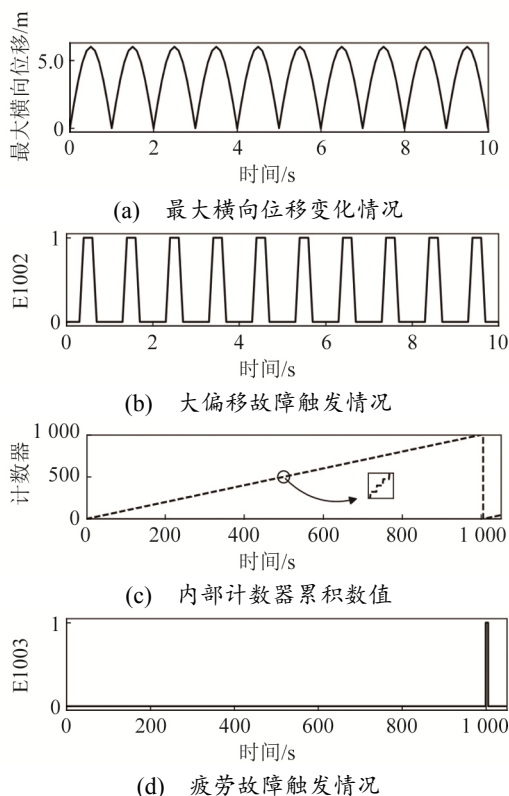
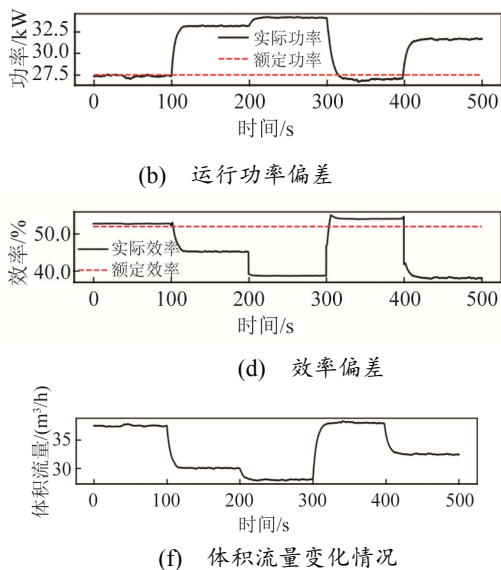


图9 扬矿管位移与疲劳故障诊断试验结果

Fig. 9 Experimental Results of Rigid Pipe Displacement and Fatigue Fault Diagnosis

为验证提升泵的故障诊断策略有效, 本文将试验划分为5个工况, 分别测试无故障、E2000、E2001、E2002和E2003的故障触发情况。故障采用人工注入的方式, 试验结果见图10。



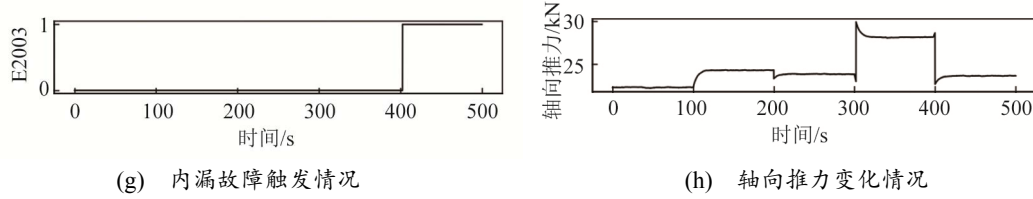


图 10 提升泵故障诊断试验结果 (续)

Fig. 10 Experimental Results of Lifting Pump Fault Diagnosis (Continued)

从结果来看,前100 s内,提升泵正常运行,各项参数状态正常;100 s~200 s,手动设置流量下降, F_{axial} 随之上升, P 因叶轮与流体的摩擦加剧而增加,导致工作点偏离高效区, η 下降,满足阈值条件后触发E2000;200 s~300 s,模拟叶轮故障导致的 η 下降工况,流量因做功能力不足而继续降低, F_{axial} 因叶轮前后压力差减小而降低,满足阈值条件后触发E2001;300 s~400 s,模拟平衡孔故障工况,先将流量恢复正常值,然后注入故障。平衡孔失效后,其减压作用减弱或丧失,导致后泵腔压力回升,此时 F_{axial} 急剧增大,而工作效率几乎不受影响。由于该故障对主流通路影响间接, Q_v 和 P 基本维持正常,各指标满足阈值条件后触发E2002;400 s~500 s,

手动增大泄漏量,导致泵的容积效率大幅下降,而泵的主流流量几乎不变,说明提升泵可能发生了泄露故障,此时触发E2003。

为验证中继站故障诊断策略的有效性,设定中继站横向运动幅值为6.55 m,并在仿真开始100 s后,将扬矿管流速由初始值逐渐降低至0.5 m/s,同时维持采矿车以43 t/h的额定能力持续作业。试验结果见图11。图11(a)与图11(c)显示,当中继站横向位移>5.24 m的安全阈值时,系统准确触发偏移故障码E3000;图11(b)与图11(d)进一步表明,在监测到扬矿管流速异常下降与顶部张力异常升高的联合工况下,系统能可靠识别中继站堵塞风险,并正确触发故障码E3001。

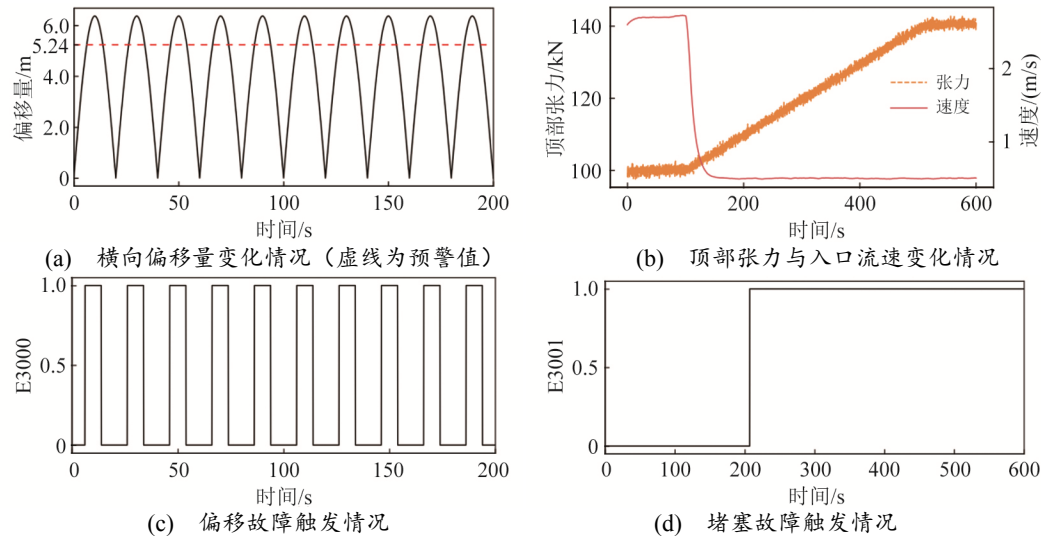


图 11 中继站位移与应力故障诊断试验结果

Fig. 11 Experimental Results of Relay Station Displacement and Stress Fault Diagnosis

为验证采矿车故障诊断策略的有效性,本文为每台采矿车构建了预设运动轨迹。鉴于深海矿区地形复杂、障碍物众多,所设轨迹模拟了在规避海床障碍物后规划的最优路径。每辆采矿车的运动过程见图12,图12中的点为定位器检测到的坐标。故障特性的试验结果见图13。

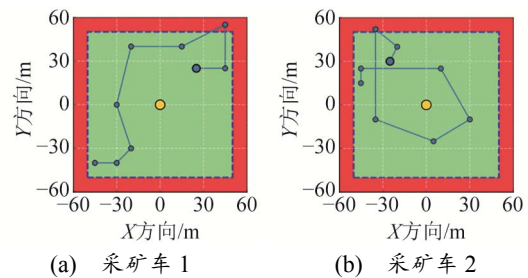


图 12 采矿车运动轨迹

Fig. 12 Trajectory of Mining Vehicle

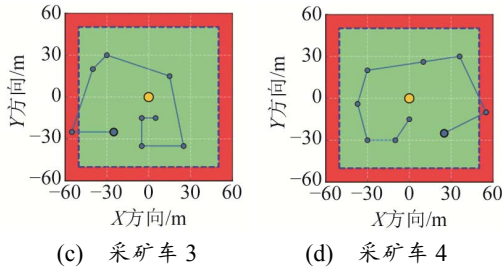


图 12 采矿车运动轨迹 (续)

Fig. 12 Trajectory of Mining Vehicle (Continued)

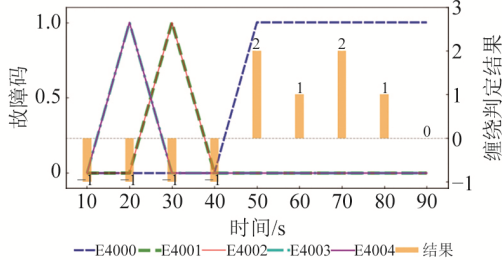
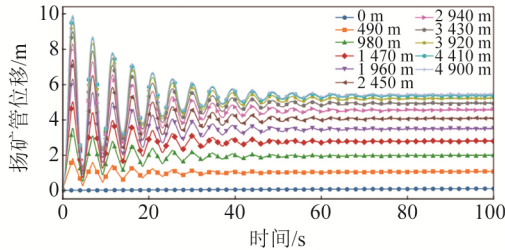


图 13 采矿车故障诊断特性试验结果

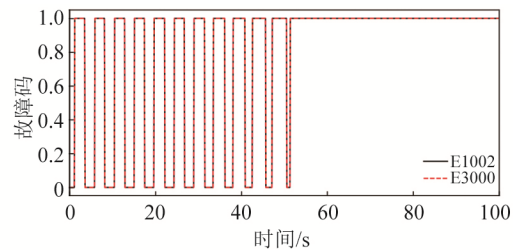
Fig. 13 Experimental Results of Mining Vehicle Fault Diagnosis Characteristics

由结果可知:

- 1) 在20 s, 采矿车3和采矿车4离开合法区域, 此时故障码E4003与E4004被触发。
- 2) 在30 s, 采矿车1和采矿车2离开合法区域, 此时故障码E4001与E4002被触发。



(a) 扬矿管在不同深度下的横向位移情况



(b) 扬矿管大形变故障与中继站偏移故障触发情况

图 14 极端海况下扬矿管位移响应与故障诊断结果

Fig. 14 Displacement Response and Fault Diagnosis Results of Rigid Pipe Under Extreme Sea Condition

试验结果表明, 当扬矿管局部最大挠度 > 5.24 m的安全阈值时, 故障码E1002被立即触发; 系统的总体位移极值出现在中继站处, 当中继站横向位移持续 > 5.24 m时, 关联的故障码E3000均能准确触发。这验证了针对管道局部形变与中继站整体偏移的独立诊断逻辑有效且可靠。

4.3 多故障耦合验证

为评估诊断系统对故障链的辨识能力, 本文构建了一种多故障耦合仿真场景。系统承受的动态环境载荷如下: 仿真初始洋流速度由式(3)确定; 第20 s时, 流速阶跃至2.5 m/s的极端条件; 第80 s时, 回落至2.0 m/s。同时, 泵组在前100 s内按预设程序运行, 其流量每20 s切换一次, 依次经历零流量、

3) 第30 s之后, 采矿车不再进入非法区域, 故障码E4001~E4004被解除。

4) 第40 s之后, 故障码E4000被触发;

5) 从10 s~40 s, 计算结果为-1, 说明没有采矿车发生缠绕故障。

6) 在50 s, 计算结果为3, 说明采矿车4发生缠绕故障。

7) 从60 s~70 s, 计算结果为2, 说明采矿车3发生缠绕故障。

8) 在80 s, 计算结果为0, 说明采矿车1发生缠绕故障。

9) 在90 s, 计算结果为1, 说明采矿车2发生缠绕故障。

试验结果表明, 此方法可实现采矿车位置故障和缠绕故障的诊断。

4.2 极端工况验证

为检验诊断策略在超设计基准极端海洋环境下的适应性, 本文构建强洋流冲击工况: 将JANARTHANAN等^[14]给出的1.7 m/s~0.1 m/s典型流速剖面整体提升至2.2 m/s的极端均匀流场, 并假设采矿船通过动力定位完全抵消洋流冲击, 保持位置固定。在此条件下, 重点观测扬矿管的空间位移及故障触发情况, 试验结果见图14。扬矿管位移于40 s后渐趋于稳定。

正常流量、高流量、低流量及停机状态, 以模拟多种工作与故障模式。采矿车始终以43 t/h的额定速率进行采集。该工况下的系统响应与诊断结果见图15~图17。

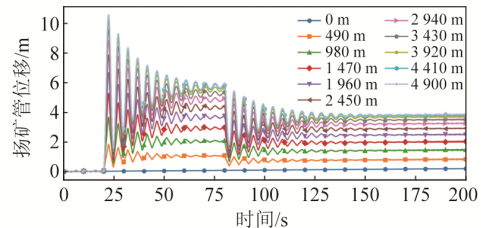


图 15 时变洋流中扬矿管位移响应情况

Fig. 15 Displacement Response of Ore-Lifting Pipe in Time-Varying Ocean Currents

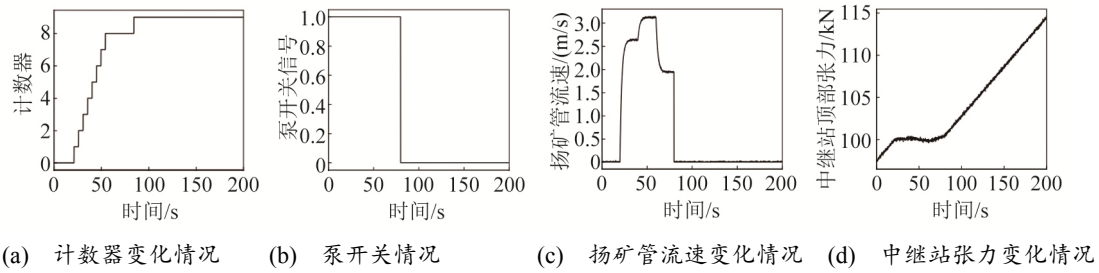


图 16 耦合试验关键指标

Fig. 16 Key Indicators of Coupling Experiments

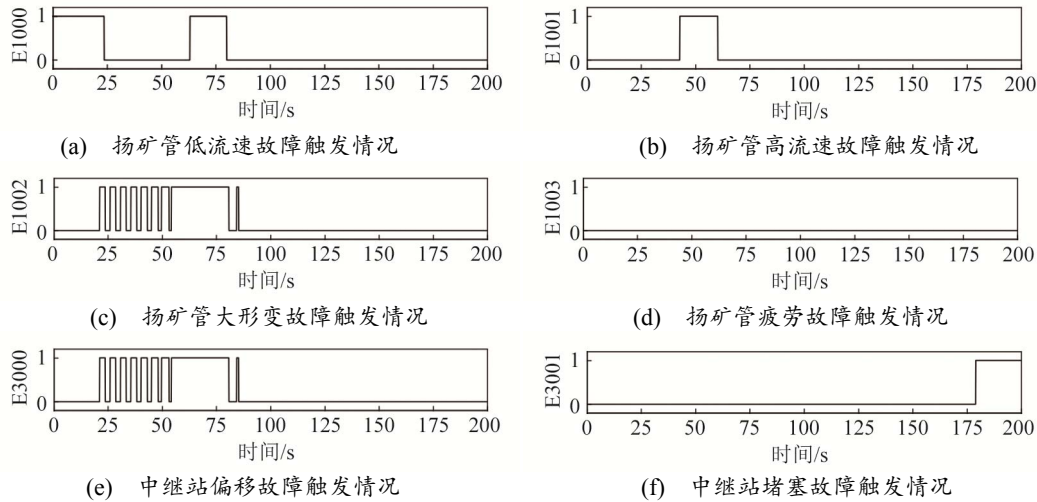


图 17 多耦合工况故障诊断结果

Fig. 17 Fault Diagnosis Results Under Multi-Coupling Working Conditions

从试验结果来看,在初始海况下,扬矿管保持稳定竖立状态,横向位移很小。当洋流速度第20 s增至2.5 m/s时,管道系统受到显著动力激励,产生最大达10.6 m的横向位移,且中继站成为整个扬矿管中位移响应最为显著的部位。当第80 s洋流速度回落至2.0 m/s时,管道整体振动逐渐收敛,位移幅值显著减小。在此过程中,系统准确触发了故障码E1002(扬矿管大形变)与E3000(中继站偏移)。用于评估疲劳寿命的E1003计数器随E1002上升沿正常累积,但因未达到预设阈值,E1003未被触发。内部流态变化对扬矿管横向位移的影响不显著,但对流速相关故障判断产生影响:泵开启期间,低流速与高流速工况分别触发了E1000(低流速故障)与E1001(高流速故障);泵关闭后,系统未因低流速产生误报。此外,在假定采矿速率恒定为43 t/h的条件下,中继站内矿物质量持续积累,导致连接处应力持续上升,并在>112 kN后成功触发E3001(中继站堵塞)。

5 可视化界面设计

将所提出的诊断策略集成于同一界面内,深海采矿故障诊断系统界面见图18。界面上方左侧显示故障诊断系统各组件的技术指标(特性曲线);右

上方显示采矿车的实时坐标数据。当实时数据出现异常时,下方对应设备的图标会触发相应的故障码;若某一设备无故障,则显示为“Ready”状态。

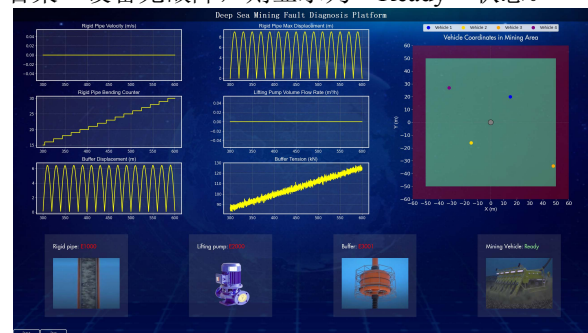


图 18 故障诊断系统界面

Fig. 18 Interface of Fault Diagnosis System

6 结论

本文针对深海采矿管线提升系统缺乏系统级故障诊断方法的问题,提出了一种多参数融合的故障诊断策略。首先,采用集中质量法建立流速-挠度-应力耦合动力学模型,能精确表征系统在复杂海洋环境下的动态行为。在此基础上,为扬矿管、提升泵、中继站及采矿车设定了涵盖流体、结构与运动状态的多维关键参数诊断阈值,并构建了相应的故

障代码库。同时, 引入防抖动算法以抑制误报, 确保诊断的可靠性; 开发了集成化的可视化监测界面, 提升了系统的工程实用性。

在构建的仿真平台上开展了常规组件、极端工况及多故障耦合工况的验证试验。结果表明, 本文所提策略能够实现对扬矿管大形变与疲劳、提升泵堵塞与磨损、中继站偏移与堵塞、采矿车越界与软管缠绕等共计15类故障的精准识别与预警, 有效验证了该策略的全面性与鲁棒性。研究成果可为深海采矿系统的安全运行提供参考方案。

参考文献:

- [1] RONA P A. Changing Vision of Marine Minerals[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 33(3/4): 618-666.
- [2] LODGE M W, VERLAAN P A. Deep-Sea Mining: International Regulatory Challenges and Responses[J]. Elements: an International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology, 2018, 14(5): 331-336.
- [3] WANG C, LIU Y, WANG D, et al. Reliability Evaluation Method Based on Dynamic Fault Diagnosis Results: a Case Study of a Seabed Mud Lifting System[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 214: 107763.
- [4] DAI Y, LI X, YIN W, et al. Dynamics Analysis of Deep-Sea Mining Pipeline System Considering Both Internal and External Flow[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2021, 39(4): 408-418.
- [5] DAI Y, ZHANG Y, LI X. Numerical and Experimental Investigations on Pipeline Internal Solid-Liquid Mixed Fluid for Deep Ocean Mining[J]. Ocean Engineering, 2021, 220: 108411.
- [6] WU Q, YANG J, LU H, et al. Effects of Heave Motion on the Dynamic Performance of Vertical Transport System for Deep Ssea Mining[J]. Applied Ocean Research, 2020, 101: 102188.
- [7] WU Q, YANG J, GUO X, et al. Influence of Irregular Waves on the Dynamic Response of a Vertical Transport System for Deep Sea Mining[J]. Ocean Engineering, 2021, 229: 108443.
- [8] SONG Q H, JIANG H Y, SONG Q J, et al. Analysis of Longitudinal Coupling Dynamic Characteristics of Deep Sea Mining Vessel and Stepped Lifting Pipe[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 19190.
- [9] JIANG W, WANG H, LIU G, et al. A Novel Method for Mechanical Fault Diagnosis of Underwater Pump Motors Based on Power Flow Theory[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-17.
- [10] WANG Z, ZOU L. Natural Frequency Analysis of Deep-Sea Mining Riser Considering Varying Tension and Buffer Station[J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112372.
- [11] XING B, WANG X, LIU Z. The Wide-Area Coverage Path Planning Strategy for Deep-Sea Mining Vehicle Cluster Based on Deep Reinforcement Learning[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(2): 316.
- [12] XING B, WANG X, LIU Z. An Algorithm of Complete Coverage Path Planning for Deep-Sea Mining Vehicle Clusters Based on Reinforcement Learning[J]. Advanced Theory and Simulations, 2024, 7(4): 2300970.
- [13] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The Force Exerted by Surface Waves on Piles[J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(5): 149-154.
- [14] JANARTHANAN C, CHANDRAN V, SUNDARAMOORTHY V, et al. System Preparations for Deep Water Locomotion Trials of Deep Sea Mining Crawler[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. 2019.
- [15] CHEN W, XU H L, PENG N, et al. Linkage Characteristics of Deep-Sea Mining Lifting System[J]. Ocean Engineering, 2021, 233: 109074.
- [16] 张明, 郑皓, 李满红, 等. 深海采矿水下输送系统扬矿管选型及水动力校核研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5): 37-41.
ZHANG M, ZHENG H, LI M, et al. Research on the Selection of Rigid Lifting Pipes and Hydrodynamic Verification for Deep-Sea Mining Underwater Conveyance Systems[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5): 37-41.
- [17] KANG Y, WANG K, HU Q, et al. Research on a Coupled System Design for Mineral Lifting and Wastewater Drainage in Deep-Sea Mining Applications[J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117260.
- [18] GOPPELT F, HIENINGER T, SCHMIDT-VOLLUS R. Modeling Centrifugal Pump Systems From a System-Theoretical Point of View[C]//2018 18th International Conference on Mechatronics-Mechatronika. 2018.
- [19] JOHANN F G. Centrifugal Pumps[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] PARK S J, YEU T K, YOON S M, et al. A Study of Sweeping Coverage Path Planning Method for Deep-Sea Manganese Nodule Mining Robot[C]//OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. 2011.

(下转第192页)