

石油机械自动化设备故障预警方法研究

高天宇

东营职业学院 山东 东营 257000

摘要：石油机械自动化设备是石油勘探开发、油气集输的核心，但多系统耦合导致故障诱因复杂、定位难，潜伏性故障易通过常规巡检遗漏，引发停机与安全风险。本文针对石油机械自动化设备故障预警展开研究。分析了设备特性，总结故障特征；阐述了预警基础理论，包括“状态监测-异常识别-故障诊断-预警输出”流程及阈值设定的科学、动态、实用原则；随后设计基于数据驱动、机理分析及二者融合三类预警方法，涵盖数据处理、模型构建、融合框架等关键环节；开发分层架构的故障预警系统，实现数据监测、模型分析与预警推送功能。研究有效将故障管理从“事后维修”转向“事前预防”，为设备安全运行提供技术支持。

关键词：石油机械；自动化设备；故障预警方法；

引言：当前石油机械自动化设备故障单一预警方法适配性差、精度不足，难以满足石油生产复杂工况对“事前预警”的需求。基于此，本文从设备概述与故障特征切入，结合预警基础理论，设计多元预警方法并开发系统，旨在解决设备故障预警痛点，提升运维效率，助力石油工业向智能化运维转型。

1 石油机械自动化设备概述及故障特征

1.1 石油机械自动化设备概述

石油机械自动化设备是石油勘探开发、油气集输等全产业链的核心技术载体，其集成了机械结构、电气控制、传感检测、信息传输等多系统功能，旨在实现石油生产流程的智能化调控、无人化作业与高效化运行。从功能维度划分，该类设备可覆盖勘探钻井、油气开采、管道输送、炼化处理等关键环节，核心特征体现为“感知-决策-执行”的闭环控制能力——通过各类传感器实时采集工况参数，经控制系统分析处理后，驱动执行机构自动调整运行状态，减少人工干预并提升操作精度。

1.2 石油机械自动化设备故障特征

石油机械自动化设备的故障具有以下复杂性、关联性与潜伏性三大核心特征。（1）复杂性源于设备多系统耦合的结构特点，故障诱因可能涉及机械磨损、电气元件老化、控制程序异常、外部工况波动等多个维度，单一故障现象往往对应多重潜在原因，增加了故障定位难度；（2）关联性体现为各子系统间的相互影响，某一组件的故障可能通过信号传递或能量传输引发连锁反应，导致故障范围扩大，例如电气回路故障可能导致执行机构卡滞，进而引发机械结构过载损坏；（3）潜伏性则表现为故障发展过程的渐进性，多数故障并非突然发生，而是在长期运行中因参数缓慢偏移、部件性能逐渐劣化

积累形成，初期无明显异常现象，仅通过常规人工巡检难以发现，待故障显性化时已可能造成设备停机或安全风险^[1]。

2 石油机械自动化设备故障预警基础理论

2.1 故障预警概念与流程

石油机械自动化设备故障预警的核心是通过主动监测与分析，在设备故障发生前识别潜在风险并发出警示，核心概念包含“状态监测”“异常识别”“故障诊断”“预警输出”四个关键环节。其标准流程遵循以下闭环逻辑：（1）对设备运行状态进行持续监测，获取反映设备健康状况的关键参数；（2）通过数据处理与分析，识别参数中的异常波动或趋势偏离；（3）结合设备特性与故障规律，诊断异常对应的潜在故障类型及发展阶段；（4）根据故障危害等级，输出不同级别的预警信号，为运维决策提供依据。该流程的核心目标是将故障管理从“事后维修”转向“事前预防”，缩短故障响应时间，降低设备停机损失。

2.2 预警阈值设定原则

预警阈值是触发预警信号的关键判定标准，其设定要遵循以下三大原则。（1）科学性要求阈值基于设备设计参数、运行历史数据及故障统计规律确定，避免主观经验判断导致阈值过高或过低；（2）动态性指阈值需根据设备工况变化（如负载调整、环境波动）进行适应性修正，而非采用固定不变的静态阈值，以减少误报与漏报；（3）实用性则强调阈值设定需结合运维场景，区分不同故障危害等级对应不同阈值，例如对可能引发安全事故的故障设定严格阈值，对轻微性能劣化故障设定宽松阈值，确保预警信号既能有效提示风险，又不会过度干扰正常生产^[2]。

3 石油机械自动化设备故障预警核心方法设计与融合研究

3.1 基于数据驱动的故障预警方法设计

基于数据驱动的故障预警方法以设备运行过程中产生的多源数据为核心,通过数据处理与模型分析实现故障风险识别,其设计流程要围绕以下三个关键环节展开。(1)在数据采集环节,根据石油机械自动化设备的运行特性与预警需求,确定关键监测参数与采集方案。监测参数需覆盖设备机械、电气、控制等多系统运行状态,包括振动、温度、压力、电流、电压及控制信号等,同时结合设备工况特点选择适配的传感器类型,确保参数采集的准确性与实时性;数据传输需采用抗干扰能力强的通信协议,适配石油生产现场复杂的电磁环境与远距离传输需求,避免数据丢失或延迟;数据存储则需构建分布式数据库,兼顾数据容量与访问效率,为后续分析提供稳定的数据支撑。(2)数据预处理是消除噪声干扰、提升数据质量的关键步骤,需针对采集数据的特点设计多步骤处理流程。首先进行数据清洗,通过异常值检测算法识别并剔除因传感器故障或传输干扰产生的异常数据,采用插值法填补数据缺失值,确保数据完整性;其次开展数据标准化处理,将不同量纲、不同范围的参数转化为统一尺度,消除量纲差异对模型分析的影响;最后进行特征提取,通过时域、频域分析等方法从原始数据中提取能反映设备运行状态的特征指标,减少数据维度,提升模型运算效率,为后续模型构建奠定基础。(3)模型构建要结合石油机械自动化设备数据的时序性与非线性特征,选择适配的算法并完成模型训练与优化。模型选择需综合考虑数据规模、预警精度与实时性要求,常用算法包括神经网络、支持向量机、决策树等,其中神经网络适用于处理高维度、非线性数据,能通过多层网络结构自主学习数据特征与故障间的映射关系;模型训练需划分训练集、验证集与测试集,采用交叉验证法避免模型过拟合,同时通过超参数调优工具调整模型参数,提升模型的泛化能力;模型部署前需进行性能测试,验证模型在不同工况下的预警准确性与响应速度,确保模型能稳定适配设备实际运行场景。

3.2 基于机理分析的故障预警方法设计

基于机理分析的故障预警方法以石油机械自动化设备的结构原理、运行规律为基础,通过建立物理模型揭示故障发生的内在机制,其设计核心在于以下机理建模、模型修正与预警指标计算,确保方法能精准反映设备故障演化规律。(1)机理建模要以设备的物理结构与工作原理为依据,构建设备运行状态与故障间的定量

关系模型。建模过程需梳理设备各子系统的功能逻辑与能量、物质、信号传递路径,明确各部件的力学、热力学、电学特性,通过理论推导建立数学方程,描述设备正常运行与故障状态下的参数变化规律;建模需区分设备不同运行阶段的特性差异,考虑负载变化、环境因素对设备运行状态的影响,确保模型能覆盖设备全工况运行范围;同时简化模型复杂度,在保证模型精度的前提下,减少冗余参数,提升模型运算效率,适配现场实时预警需求。(2)模型修正环节要结合设备实际运行数据,调整模型参数以缩小理论模型与实际工况的偏差。由于理论建模过程中存在假设条件,模型计算结果可能与设备实际运行状态存在差异,因此需采集设备长期运行的历史数据,通过参数辨识算法对比模型计算值与实际测量值的偏差,调整模型中的关键参数,如摩擦系数、阻尼系数等;修正过程需分阶段进行,先基于设备出厂参数完成初始修正,再结合现场运行数据进行动态调整,确保模型能随设备老化、工况变化持续适配实际运行状态;建立模型修正评估指标,通过偏差率、拟合优度等指标验证修正效果,确保修正后的模型能准确反映设备实际运行规律。(3)预警指标计算要基于修正后的机理模型,确定能表征故障风险的定量指标与判定标准。首先根据模型推导结果,筛选对故障敏感的参数作为预警指标,这些指标需能在故障发生前呈现明显变化趋势,且与故障严重程度呈正相关;其次通过理论分析确定各预警指标的正常范围,结合设备设计标准与安全运行要求,设定不同故障风险等级对应的指标阈值;最后设计预警指标计算流程,通过实时采集的设备运行参数代入机理模型,计算预警指标当前值,并与设定阈值进行对比,实现故障风险的定量评估,为预警信号输出提供依据。

3.3 数据驱动与机理分析融合的预警方法

数据驱动与机理分析融合的预警方法结合两种方法的优势,通过互补性融合解决单一方法在石油机械自动化设备预警中的局限性,其设计要围绕以下四个核心环节展开。(1)融合框架构建要明确两种方法的协同逻辑,形成“机理引导-数据验证-融合决策”的闭环流程。框架需以机理分析为基础,通过机理模型确定设备运行的理论边界与故障演化方向,为数据驱动方法提供分析范围与特征选择依据,避免数据驱动模型因数据噪声或样本偏差导致的分析方向偏离;同时以数据驱动方法为补充,通过实际运行数据验证机理模型的准确性,捕捉机理模型未涵盖的复杂工况下的故障特征,丰富预警分析维度。框架需划分数据层、分析层、融合层三个

层级,数据层实现多源数据的统一整合与共享,分析层分别通过数据驱动与机理分析方法输出初步预警结果,融合层对两种结果进行综合处理,输出最终预警结论,确保各环节衔接顺畅,提升方法的系统性。(2)权重分配是融合方法的关键,要根据设备工况与预警需求动态调整两种方法的贡献度,避免固定权重导致的融合偏差。权重分配需基于两种方法的可靠性评估结果,当设备运行工况稳定、机理模型成熟时,提升机理分析方法的权重,利用其理论严谨性确保预警准确性;当设备工况复杂多变、机理模型难以覆盖所有场景时,增加数据驱动方法的权重,依靠其数据适应性捕捉复杂故障特征。权重计算可采用模糊层次分析法、熵权法等客观赋权方法,结合设备历史故障数据与预警效果反馈,建立权重动态调整机制,实时更新两种方法的权重占比,确保融合结果能适应不同工况下的预警需求,提升方法的灵活性。(3)协同优化要通过持续的反馈与调整,提升融合方法的预警性能,确保方法长期适配设备运行状态变化。优化过程需建立融合方法性能评估体系,通过预警准确率、误报率、预警提前量等指标,定期评估融合方法的运行效果;根据评估结果,若预警准确率偏低,需检查机理模型参数是否需修正、数据驱动模型是否需重新训练,若误报率过高,则需调整权重分配策略或优化预警阈值;结合设备维护记录与故障处理结果,更新融合方法的训练数据与机理模型假设条件,实现方法的迭代优化;(4)建立融合方法与设备运维系统的联动机制,将预警结果与运维决策结合,通过运维反馈进一步验证方法有效性,形成“预警-运维-反馈-优化”的持续改进循环,确保融合方法能长期稳定服务于石油机械自动化设备故障预警工作^[3]。

4 故障预警系统开发与实现

(1)系统总体架构采用分层设计:硬件层以传感器、数据采集终端、边缘计算节点为核心,负责实时采集设备运行参数,通过抗干扰通信模块传输数据,依托边缘节点完成初步预处理,保障数据实时性与稳定性;软件层构建分布式数据存储与计算平台,集成数据

管理、模型部署、阈值管理功能,支持多源数据统一处理,提供模型迭代接口适配不同算法;应用层面向运维场景,开发可视化监控、预警管理、报表生成模块,三层通过标准化接口衔接,确保扩展性与兼容性。(2)核心功能模块设计:数据监测模块具备多参数实时采集、质量校验与异常标记功能,支持自定义监测参数与频率;模型分析模块集成三类预警模型,自动分析数据并输出故障风险等级与类型,支持模型性能评估与调优;预警推送模块按风险等级设多级机制,通过多渠道推送预警信息,附带诊断结果与应急建议,保障运维响应效率。(3)系统界面与操作流程:界面采用模块化布局,含设备监控总览、数据趋势图、预警列表等区域,支持筛选定位设备;操作流程遵循“监测-分析-处置-记录”逻辑,用户可查看设备状态、调取报告、确认预警并录入处置结果,系统自动记录日志并生成报表,实现全流程可视化^[4]。

结束语:本文完成石油机械自动化设备故障预警全流程研究,明确设备与故障特征,构建三类预警方法,开发的系统实现全流程可视化,提升了预警准确性与响应速度。但研究未充分验证极端工况下模型适配性,系统抗干扰能力待提升。后续可结合数字孪生构建设备虚拟场景,引入AI大模型优化算法,完善预警体系,增强环境适应性,为石油机械自动化设备长期稳定运行提供更全面保障。

参考文献

- [1]张敏,刘飞.基于传感器的机械设备故障诊断方法研究[J].机械工程学报,2022,58(12):72-80.
- [2]赵晓明,孙涛.基于机器学习的石油机械设备故障诊断与预测[J].石油设备工程,2023,42(6):15-22.
- [3]张文,王良玉,李占柱,杜永军,刘阳.基于石油钻井工程中钻机电气设备漏电故障自动预警方法分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(2):092-095.
- [4]陈荣毅.石油化工仪表自动化设备的故障分析方法[J].石油石化物资采购,2025(7):10-12.