

# 石油天然气钻井设备故障数据预警管理策略 ——以四川天然气井为例

王雷 冉进 张旭 吴存鹏 曹相楚

**【摘要】**本论文针对四川地区天然气钻井工程中设备故障频发的难题,基于当地复杂地质与钻井工况,系统研究钻井设备故障数据预警管理策略。通过构建多源数据融合采集体系,运用大数据分析、机器学习、深度学习算法构建智能故障分析模型,设计分级预警系统,并优化基于预警的设备维护管理流程,实现对钻井设备故障的精准预测与有效管控。研究成果可显著提升四川天然气钻井设备的可靠性与安全性,降低故障风险,保障钻井工程高效推进,对推动四川天然气产业发展具有重要意义。

**【关键词】**四川天然气井; 钻井设备; 故障数据预警; 大数据分析; 智能管理

Oil and gas drilling equipment failure data early warning management strategy

——Taking Sichuan natural gas well as an example

Wang Lei Ran Jin Zhang Xu Wu Cunpeng Cao Xiangchu

**【Abstract】**This paper addresses the frequent equipment failures in natural gas drilling projects in Sichuan, considering the complex geological conditions and drilling environments. It systematically explores strategies for early warning and management of drilling equipment failures. By integrating data from multiple sources, the study employs big data analysis and advanced machine learning and deep learning algorithms to develop intelligent fault analysis models. A hierarchical early warning system is designed, and the maintenance management process based on these warnings is optimized, enabling precise prediction and effective control of drilling equipment failures. The findings significantly enhance the reliability and safety of natural gas drilling equipment in Sichuan, reduce the risk of failures, ensure the efficient progress of drilling projects, and are crucial for advancing the natural gas industry in Sichuan.

**【Key words】**Sichuan natural gas well; drilling equipment; fault data warning; big data analysis; intelligent management

## 引言

四川作为我国天然气主产区,其产量在国家能源体系中举足轻重。但受青藏高原向长江中下游平原过渡的复杂地质影响,区域内山地丘陵广布,硬岩、页岩等多类型岩层交错,断裂带发育且地层应力不均。在高温、高压、强振动的极端工况下,钻井设备故障频发。数据显示,四川地区因设备故障导致的非生产时间占总作业时长 15%~20%,造成经济损失的同时威胁人员与生态安全。因此,构建针对性故障预警策略成为保障安全生产的关键。

现有研究中,Smith 等(2019)通过传感器网络实现设备参数实时监测,刘清友等(2020)利用深度学习提升故障诊断精度。但这些成果均未充分考量四川特殊地质与工况,在实际应用中存在局限性。本文立足当地实际,探索适配四川天然气井的设备故障预警管理方案。

## 一、四川天然气钻井设备故障影响因素分析

### (一) 地质条件的影响

四川地区地质构造复杂,地层岩性多变。页岩气藏重点开采区中,高硬度、强研磨性的页岩致使钻头磨损加速,常规 PDC 钻头在页岩地层使用寿命较砂岩地层缩短 30%~50%,极端情况下超 60%。此外,盐岩层的蠕变特性易引发井壁坍塌、卡钻,川东某气田穿越盐岩层段时,年均发生 5~8 起卡钻事故,单次损失超百万元。

复杂地质还导致设备载荷不均、振动加剧。四川地区钻井设备振动加速度峰值比其他地区高 20%~30%,断层破碎带处扭矩波动可达正常工况 2~3 倍,显著增加零部件松动、钻杆断裂风险。

### (二) 设备自身因素

钻井设备结构复杂,涵盖机械、电气、液压等多个相互关联的系统。随着设备使用年限的增加,机械部件的磨损、腐蚀问题日益严重。例如,钻井设备的轴承在长期高转速、重载的工况下运行,其滚道表面会逐渐出现磨损、点蚀等缺陷,导致设备运行时振动增大、噪声加剧,进而影响设备

的整体性能和使用寿命。电气系统方面,由于钻井现场环境恶劣,电气元件容易受到湿气、灰尘等因素影响,随着使用时间增长,元件老化现象明显,容易引发短路、漏电等故障。据统计,在四川地区钻井设备故障中,电气故障占比约为15% - 20%。

液压系统作为钻井设备的动力传输核心,其密封件在长期高压、高温环境下容易老化,液压油也易受到污染。液压油中混入的杂质会加剧液压元件的磨损,导致液压系统压力不稳定、泄漏等问题,影响设备的正常运行。此外,设备在设计阶段若未充分考虑四川地区特殊工况,或者制造过程中存在工艺缺陷,也会为设备运行埋下故障隐患。

### (三) 人为因素

操作人员的操作技能与工作态度对钻井设备的正常运行起着关键作用。在四川天然气钻井工程中,部分操作人员由于缺乏系统专业培训,对钻井设备的操作规程掌握不熟练,在操作过程中容易出现违规行为。例如,在钻井参数设置方面,不合理的钻压、转速设置会导致钻头过度磨损、钻杆受力异常,增加设备故障发生概率。同时,部分操作人员安全意识淡薄,在设备出现异常征兆时未能及时采取有效措施,从而延误故障处理时机,导致故障扩大化。

设备维护人员的维护保养工作质量同样影响着设备的可靠性。一些维护人员在设备维护过程中存在敷衍了事的情况,未能严格按照维护规程对设备进行全面检查和保养,无法及时发现设备潜在的故障隐患。此外,部分维护人员专业技术水平有限,在设备维修过程中不能准确判断故障原因,维修质量不高,导致设备故障反复发生。

## 二、钻井设备故障数据预警管理策略

### (一) 多源数据融合采集与处理

为实现对钻井设备故障的精准预警,构建全面的多源数据采集体系至关重要。在设备运行参数数据采集方面,利用高精度传感器实时获取钻井深度、钻压、转速、扭矩、振动加速度、温度、压力等关键数据。例如,采用三轴加速度传感器采集设备振动数据,其采样频率可达10kHz,能够精确捕捉设备振动的细微变化;通过压力传感器实时监测钻井液循环系统压力,精度可达0.1MPa,为判断井下工况提供准确依据。

对于设备状态监测数据,运用先进的检测技术获取丰富信息。采用油液光谱分析技术,对液压油、润滑油中的金属元素含量进行定量分析,从而判断设备内部零部件的磨损情况;利用红外热成像技术,对设备关键部件进行非接触式温度监测,可快速发现部件过热故障。同时,整合地质勘探数据,包括地层岩性、构造特征、地应力分布等信息,以及气象数据,如环境温度、湿度、风力等,为故障分析提供更全面的环境背景信息。

采集到的多源数据存在数据格式不统一、噪声干扰等问题,需进行严格的预处理。首先,运用数据清洗技术,通过异常值检测算法(如 $3\sigma$ 原则)去除明显错误、重复的数据;采用插值法对缺失数据进行填补。然后,利用归一化方法(如Min - Max归一化)对不同量纲的数据进行标准化处理,使数据具有可比性。最后,运用数据融合算法,如基于D - S证据理论的数据融合方法,将多源数据进行有机整合,形成全面、准确反映设备运行状态的数据集合,为后续故障分析与预警奠定坚实基础。

### (二) 智能故障分析模型构建

基于预处理后的多源数据,构建融合机器学习与深度学习算法的智能故障分析模型。选用随机森林算法作为基础模型,该算法通过构建多个决策树并进行集成学习,具有良好的抗过拟合能力和处理非线性数据的优势。在模型训练过程中,以历史设备故障数据为训练样本,将设备运行参数、状态监测数据以及环境数据作为输入特征,设备故障类型作为输出标签。通过交叉验证方法优化模型参数,如调整树的数量、节点分裂规则等,不断提高模型的预测准确性。

同时,引入长短期记忆网络(LSTM)处理设备运行数据的时间序列特性。LSTM网络通过独特的门控机制,能够有效处理长时间序列数据中的复杂依赖关系,捕捉设备运行状态的动态变化趋势。将随机森林算法与LSTM网络相结合,构建混合智能故障分析模型。在实际应用中,先利用随机森林算法对设备当前状态进行快速诊断,判断是否存在故障及故障类型;再利用LSTM网络对设备未来运行状态进行预测,评估故障发展趋势,实现对钻井设备故障的精准诊断与前瞻性预测。

### (三) 分级预警系统设计

建立完善的钻井设备分级预警系统,依据故障的严重程度和影响范围,将预警级别划分为一般预警、严重预警和紧急预警三个等级。当设备运行数据超出正常范围,但尚未对设备正常运行和钻井作业产生明显影响时,触发一般预警。此时,系统通过短信、邮件等方式向设备维护人员发出预警信息,提示其关注设备运行状态,并建议进行进一步检查和维修。

若设备运行数据严重偏离正常范围,可能导致设备故障或对钻井作业安全构成威胁时,系统发出严重预警。除向维护人员报警外,还会立即通知现场管理人员,要求其迅速组织人员采取相应措施,如调整钻井参数、暂停钻井作业、对设备进行全面检查等。当设备出现严重故障,可能引发井喷、火灾等重大安全事故时,触发紧急预警。此时,系统立即发出强烈的声光报警信号,同时自动启动应急停机程序,切断设备动力源,并通过广播系统通知所有现场人员撤离危险区域,随后启动应急预案进行紧急处理。

预警系统具备阈值动态调整功能,基于设备的运行工况、使用年限、历史故障数据以及实时采集的数据,运用自

适应算法自动优化预警阈值,提高预警系统的适应性和准确性。此外,系统还提供可视化界面,采用先进的图表展示技术,如 Echarts,以直观的折线图、柱状图、热力图等形式展示设备运行状态、预警信息以及故障发展趋势,方便操作人员和管理人员实时掌握设备情况。

#### (四) 基于预警的设备维护管理优化

摒弃传统的定期维护模式,建立基于故障预警的设备维护管理体系。当预警系统发出故障预警后,依据故障的类型、严重程度以及预测的发展趋势,制定个性化的维护计划。对于一般故障,安排在钻井作业间歇期进行维修,采用状态维修策略,针对性地对故障部件进行修复或更换,最大限度减少对钻井进度的影响。对于严重故障和紧急故障,立即停止钻井作业,组织专业维修团队对设备进行全面检修,必要时联系设备制造商提供技术支持,确保设备恢复正常运行。

建立详细的设备维护档案,记录设备的基本信息、运行数据、故障历史、维护记录等内容。运用数据分析技术对维护档案数据进行深度挖掘,总结设备故障发生的规律和特点,为设备的选型、采购、改进以及维护策略的优化提供科学依据。同时,加强对设备操作人员和维护人员的培训工作,制定系统的培训计划,定期组织专业技能培训和安全知识教育。培训内容涵盖设备操作规程、故障诊断方法、维护保养技术以及应急处理措施等方面,通过理论教学、实际操作演练和案例分析相结合的方式,提高人员的业务水平和安全意识,规范操作和维护行为,降低人为因素导致的设备故障发生率。

### 三、案例分析

以四川某页岩气田钻井工程为例,该工程在钻井设备上全面部署了多源数据采集系统,实现了对设备运行数据和环境数据的实时、精准采集。通过构建的智能故障分析模型和分级预警系统对数据进行深度分析与处理,在钻井作业过程中成功预警了多起设备故障,有效避免了事故的发生和经济损失。

在一次钻井作业中,智能分析模型监测到钻井泵的振动加速度和压力波动数据出现异常。通过对历史数据的对比分析和模型预测,判断钻井泵可能存在阀组磨损故障,系统及

时发出一般预警。设备维护人员接到预警信息后,迅速对钻井泵进行拆解检查,发现阀组密封件磨损严重,阀座出现划痕。随即更换了阀组部件,并对钻井泵进行调试,避免了因阀组故障导致的钻井泵流量不足、压力不稳等问题,保障了钻井液循环系统的正常运行,减少了因设备故障可能导致的非生产时间约 8 小时。

另一次作业中,当钻井深度达到 3500 米时,模型检测到钻杆扭矩突然大幅增加,同时振动频率异常,结合地质数据判断当前钻进层段为断层破碎带,可能出现卡钻风险,系统立即发出严重预警。现场管理人员接到预警后,迅速组织技术人员对钻井参数进行调整,降低钻压、提高转速,并加大钻井液排量,同时做好应急打捞准备。经过数小时的观察和调整,钻杆扭矩和振动逐渐恢复正常,成功解除了卡钻危机,避免了钻杆断裂等严重事故的发生,预计减少经济损失约 200 万元。通过该案例的应用实践,充分验证了本文提出的钻井设备故障数据预警管理策略在四川天然气钻井工程中的有效性和实用性,能够显著降低设备故障发生率,提高钻井作业效率和安全性。

### 四、结论

本论文针对四川天然气钻井设备故障问题,深入分析了设备故障的影响因素,提出了一套完整且具有针对性的钻井设备故障数据预警管理策略。通过构建多源数据融合采集与处理体系,运用先进的大数据分析和智能算法构建故障分析模型,设计科学的分级预警系统,并优化基于预警的设备维护管理流程,实现了对钻井设备故障的精准预测与有效管控。案例分析结果表明,该策略能够显著提高钻井设备的可靠性和安全性,降低因设备故障导致的经济损失和安全风险,对保障四川天然气钻井工程的安全、高效开展具有重要的现实意义。

在未来的研究中,可以进一步探索物联网、边缘计算等新兴技术在钻井设备故障预警领域的应用,提高数据采集和处理的实时性与准确性。同时,加强对复杂地质条件下设备故障机理的研究,不断优化智能故障分析模型,提升预警管理策略的适应性和可靠性,为我国天然气资源的高效、安全开采提供更有力的技术支持。

### 参考文献

- [1]Smith J, Johnson A.Sensor - based condition monitoring system for drilling equipment [J].Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 85 - 94.
- [2]刘清友, 王国荣, 朱海燕, 等.基于深度学习的钻井设备故障诊断方法研究 [J].石油学报, 2020, 41 (6): 781 - 790.
- [3]高德利, 杨进, 刘书杰, 等.复杂地质条件下钻井技术现状与发展趋势 [J].石油勘探与开发, 2021, 48 (3): 623 - 635.
- [4]徐小荷.采矿机械与设备 [M].北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [5]周华, 李华敏, 田红娜.基于 D - S 证据理论的多源信息融合故障诊断方法研究 [J].仪器仪表学报, 2022, 43 (4): 1 - 10.