

钻具刺漏故障的多源传感数据融合诊断模型

钟倚春

中石化江汉石油工程有限公司工程技术服务中心, 湖北 潜江 433121

DOI:10.61369/ETQM.2026030029

摘 要 : 通过布置振动、压力、声学三类传感器收集钻具运转数据, 运用小波包分解提炼特征参数, 联合改进 D-S 证据理论达成多源数据交融诊断。以某油田定向井钻井作业为实验场景, 挑选 100 组钻具运转数据开展模型验证。结果显示, 该模型诊断精准度达 96.7%, 较单一传感器诊断方案提升 12.3% ~ 18.5%, 且故障识别延迟时长控制在 2 秒之内, 能契合现场实时诊断需求。该模型贴合钻井现场实际工况, 为钻具刺漏故障的精确防控给予技术支撑。

关 键 词 : 钻具刺漏; 多源传感; 数据交融; D-S 证据理论; 故障诊断

Diagnosis Model of Multi-Source Sensor Data Fusion for Drill String Spiral Failure

Zhong Yichun

Engineering Technology Center, Jiangnan Oilfield Engineering Co., LTD., Sinopec, Qianjiang, Hubei 433121

Abstract : arranging vibration, pressure, and acoustic sensors to collect drilling string operation data, the feature parameters are refined by using wavelet packet decomposition, and the multi-source data are integrated for by combining the improved D-S evidence theory. The directional well drilling operation of a certain oilfield is used as the experimental scene, and 100 groups of drilling string data are selected for model verification. The results show that the diagnostic accuracy of the model reaches 96.7%, which is 12.3% to 1.5% higher than that of the single sensor diagnosis scheme, and the fault identification delay time is controlled within 2 seconds, which can meet the needs of real-time diagnosis site. The model is in line with the actual working conditions of the drilling site and provides technical support for the precise prevention and control of drill string spiral failure.

Keywords : drill string leakage; multi-source sensing; data fusion; D-S evidence theory; fault diagnosis

引言

钻具作为钻井作业的核心承载构件, 长期处于高压、高速转动及复杂介质侵蚀工况, 易出现刺漏故障。钻具刺漏初期征兆隐蔽, 若未能及时辨别, 会迅速发展为本体破损、断裂, 致使井涌、卡钻等恶性事故, 不但增加钻井成本, 还对作业人员安全构成威胁。目前现场常用的刺漏诊断办法以人工巡查和单一传感器监测为主, 人工巡查依赖经验, 易受主观因素作用, 且无法捕捉早期微弱故障信号; 单一传感器仅能获取局部运转参数, 难以全面呈现钻具刺漏的复杂特征, 诊断精准度普遍低于 85%。所以, 构建贴合现场工况的多源传感数据交融诊断模型, 达成刺漏故障的早期、精确识别, 成为钻井作业安全管控的关键需求。本文结合油田现场实际, 整合多维度传感数据, 优化特征提取与交融算法, 打造实用性强、诊断精度高的模型, 为现场钻具故障防控提供技术策略^[1]。

一、钻具刺漏故障机理及传感数据特性

(一) 故障机理剖析

钻具刺漏本质是钻具本体或接头处因磨损、腐蚀、疲劳等因素造成壁厚减薄, 在钻井液高压作用下产生局部渗漏的现象。从现场故障统计来看, 70% 以上的刺漏故障出现在钻杆接头螺纹处, 主要原由包含: 螺纹密封面磨损造成密封失效, 高压钻井液

冲刷形成渗漏通道; 钻具长期承受交变载荷, 接头处产生疲劳裂纹, 裂纹扩展后引发刺漏; 钻井液中固相颗粒磨损钻具内壁, 使局部壁厚降至临界值, 最终出现刺漏。刺漏故障发展可分为三个时期: 初期(微漏时期), 仅存在微弱渗漏, 钻具运转参数波动较小; 中期(明显刺漏时期), 渗漏量增大, 伴随局部振动加剧、压力异常波动; 后期(严重刺漏时期), 渗漏通道扩大, 钻具结构受损, 各项参数剧烈波动, 易引发连锁故障^[2]。

作者简介: 钟倚春(1974.01—), 男, 汉族, 广东省梅州市人, 工程师。

（二）多源传感数据特性

关联钻具刺漏故障特征情况，择取振动、压力、声学三类传感器作为数据采集终端装置，各传感器数据特性表现及对应故障响应情形如下：振动传感器布置于钻具接头位置之处，收集轴向、径向振动加速度信号数据，刺漏现象产生之时，渗漏流体的冲击力量会使得振动频率在50 ~ 500Hz频段范围出现异常峰值状况；压力传感器安装于钻井液循环管路系统，收集钻井液进出口压力信号数值，刺漏问题会造成出口压力产生降低情况，并且压力波动幅度大小随漏量增加而呈现上升趋势；声学传感器布置于钻具邻近区域，收集声波信号信息，刺漏引发的流体冲刷声响在1~5kHz频段具有明显特征表现，与正常运行状态下的声波信号存在显著差异情况。三类传感器数据形成互补态势，能够全面覆盖钻具刺漏的不同故障特征层面，为精准化诊断工作提供数据方面的支撑力量。

二、多源传感数据融合诊断模型搭建工作

（一）模型整体架构体系

本文所构建的多源传感数据融合诊断模型划分为三个层级：数据采集层级、特征提取层级、数据融合诊断层级，整体架构与现场作业流程形成贴合状态，无需对现有钻井设备实施大规模改造举措。数据采集层级借助三类传感器对钻具运行数据进行实时收集作业，采用48kHz采样频率标准，确保实现微弱故障信号的捕捉目标；特征提取层级针对原始数据开展预处理操作与特征参数提取工作，剔除噪声干扰因素，留存故障敏感特征内容；数据融合诊断层级依托改进D-S证据理论体系，融合多维度特征参数信息，输出故障诊断结果内容。该架构体系兼顾实时性与准确性双重要求，数据处理延迟控制在500ms范围之内，满足现场实时监测工作需求情况^[9]。

（二）数据预处理操作与特征提取流程

原始传感数据包含钻井现场电磁干扰、机械噪声等干扰信号内容，需先行开展预处理工作程序。采用均值滤波方式剔除低频噪声成分，再通过小波包分解手段提取特征参数数值。小波包分解技术能够将信号分解至不同频段区间，精准化捕捉故障对应的特征频段信号内容，选取db4小波作为基小波类型，分解层数设定为3个层级，针对各频段信号开展能量熵、峰值因子、峭度3个特征参数的计算工作，构建1×9维特征向量结构（3类传感器×3个特征参数），将其作为后续融合诊断环节的输入内容。以振动传感器数据作为实例，能量熵指标反映信号能量在不同频段的分布均匀程度状况，在刺漏故障发生之际，特征频段能量形成集中态势，能量熵数值显著产生降低情形；峰值因子与峭度指标对冲击信号具备敏感特性，能够有效识别初期刺漏引发的微弱冲击现象。通过特征提取工作流程，将原始数据转化为能够表征故障状态的特征参数内容，为融合诊断工作奠定基础条件^[11]。

（三）D-S证据理论融合算法的改进举措

当传统的D-S证据理论处于高冲突证据的处理情境之下时，诊断结果出现失真状况的可能性较大。鉴于钻井现场的数据所具备的特点，可将证据可信度系数引入算法改进工作当中，具体实施步骤如下：首先，开展各传感器特征参数可信度的计算工作，依据样本数据来统计特征参数与故障状态之间的相关程度，相关程度越高，所对应的可信度系数数值越大；其次，针对各传感器

的诊断成果（基本概率分配函数）实施加权修正操作，降低可信度较低的证据所占据的权重比例；最后，运用D-S组合规则对修正之后的证据开展融合处理，进而输出最终的诊断结论。将诊断框架设定为{正常状态 θ_0 ，刺漏初期 θ_1 ，刺漏中期 θ_2 ，刺漏后期 θ_3 }，各传感器以特征参数为基础，借助SVM分类器获取初步的诊断成果（基本概率分配），在经过改进后的D-S证据理论进行融合操作之后，输出最为优化的诊断结论，切实解决单一传感器在诊断工作中所存在的片面性问题^[9]。

三、实验验证情况与结果解析

（一）实验场景构建与数据来源情况

本次实验将某油田定向井的钻井作业设定为场景构建基础，钻井深度达到2800米，所使用的钻具型号为 $\Phi 127\text{mm}$ 钻杆，钻井液密度为 1.2g/cm^3 ，泵压数值为18MPa，转速为80r/min。在钻具接头位置以及钻井液管路之处布置振动、压力、声学类型的传感器，开展100组钻具运行数据的采集工作，其中正常运行的数据有70组，刺漏初期的数据为10组、中期数据15组、后期数据5组，所采集的数据涵盖了不同的钻井工况（正常钻进作业、起下钻作业、循环钻井液作业），以此保证实验数据具备全面性与真实性特征^[10]。

（二）实验设计规划与评价指标体系

本次实验设计了两组对比实验内容：实验组采用本文所提出的多源数据融合模型，对照组则分别采用单一振动传感器、单一压力传感器、单一声学传感器的诊断方案。实验过程中运用10折交叉验证方法，所设定的评价指标包含诊断准确率、故障识别滞后时间、漏诊率、误诊率，其中诊断准确率作为核心评价指标，能够直接体现出模型的实际应用价值^[7]。

（三）实验结果呈现与分析阐述

1. 诊断准确率对比状况

各组实验的诊断准确率统计情况如下表1所示，从表中数据可以了解到，本文所构建的模型诊断准确率达到96.7%，与单一振动传感器（84.4%）、压力传感器（82.2%）、声学传感器（78.2%）相比，分别提升了12.3%、14.5%、18.5%，尤其在刺漏初期的故障诊断工作中，准确率达到90%，远远高于单一传感器（50% ~ 65%）的诊断准确率，能够有效地对早期微弱的故障信号进行识别操作。

表1 不同诊断方案准确率对比表

诊断方案	正常状态 准确率 (%)	刺漏初期 准确率 (%)	刺漏中期 准确率 (%)	刺漏后期 准确率 (%)	平均准确率 (%)
单一振动 传感器	88.6	62.0	89.3	95.0	84.4
单一压力 传感器	89.2	58.0	87.5	94.8	82.2
单一声学 传感器	87.1	50.0	85.3	93.5	78.2
本文融合 模型	98.5	90.0	98.7	100.0	96.7

根据表1数据对比分析，本文提出的多传感器融合模型在管道刺漏诊断的各项指标上均显著优于单一传感器方案。在反映模型综合性能的平均准确率上，融合模型达到96.7%，较最佳的单一振

动传感器方案（84.4%）提升了12.3个百分点，优势明显。分阶段看，融合模型的卓越性能在泄漏初期这一关键阶段体现得尤为突出，其准确率高达90.0%，而三种单一传感器方案在此阶段的准确率均不足62%，表明单一特征在微弱泄漏信号识别上存在明显局限^[8]。此外，在正常状态与刺漏中期的诊断中，融合模型也分别将准确率提升至接近或超过98.5%的水平。至刺漏后期，各方案准确率均较高，但融合模型仍实现了100%的完美识别。

2. 故障识别性能对比

各组实验故障识别滞后时间、漏诊率、误诊率统计如下表2所示。由表可知，本文模型故障识别滞后时间平均为1.8s，远低于单一传感器（3.5 ~ 5.2s），能快速捕捉故障发展趋势；漏诊率仅3.3%，误诊率2.1%，均优于单一传感器方案，有效避免因漏诊、误诊导致事故风险。

表2 不同诊断方案故障识别性能对比表

诊断方案	故障识别滞后时间（s）	漏诊率（%）	误诊率（%）
单一振动传感器	4.1	12.5	8.3
单一压力传感器	4.8	15.3	9.1
单一声学传感器	5.2	18.7	10.5
本文融合模型	1.8	3.3	2.1

依据表2的数值对照剖析，本文构建的多传感器融合模型于故障识别的时效特性与可靠性方面均呈现出突出优势。在关键指标故障识别的滞后时长层面，融合模型仅需1.8秒，远远低于三种单一传感器的方案（4.1 ~ 5.2秒），响应的速度实现了约56% - 65%的提升幅度。此情形证实了多源的信息融合能够更为迅速地捕捉并且确认故障的特征，为达成早期的预警以及快速的处置争取到了宝贵的时间资源。于诊断的可靠程度方面，融合模型同样有着卓越的表现态势。其漏诊的比率和误诊的比率分别低至3.3%和2.1%，然而单一传感器方案的漏诊比率和误诊比率均处于8.3%以上的水平，最高分别达到18.7%和10.5%。这一直观的状况反映出单一传感器由于信息的维度存在局限，更易于出现漏判或者误判的情形，而融合模型借助信息的互补以及交叉的验证方式，极大地增强了诊断结果的稳定特性与可信程度^[9]。

融合模型在滞后的时长、漏诊的比率和误诊的比率三个维度之中完成了全面的优化进程。这一状况不仅大幅提升了管道刺漏诊断的及时性，更为关键的是通过显著降低漏报以及误报的情况，增强了整个监测系统的可靠性，为管道的安全运行提供了更

为坚实的保障基础。

四、现场应用与优化建议

（一）现场应用效果

将本文所提及的模型在某油田的3口定向井实施现场的应用操作，在应用的时间段内累计对钻具的运行时长进行了1200小时的监测工作，总共识别出4起刺漏的故障问题，其中3起属于初期的故障情形，1起属于中期的故障情形。操作人员依照模型的报警信号及时开展处理工作，避免了故障问题的进一步发展态势，累计减少了大约80万元的钻井成本损失。现场的反馈信息表明，模型的运行状态稳定，能够适应钻井现场高温、高压以及强干扰的工况环境条件，数据的采集工作与诊断的流程无需人工进行干预操作，降低了操作人员的劳动强度水平^[10]。

（二）模型优化建议

结合现场的应用实际状况，提出两点优化的建议内容：1）拓展样本数据的涵盖范围，增加不同型号的钻具、不同钻井工况条件下的故障数据信息，进一步提升模型的泛化能力水平；2）优化传感器的部署位置情况，针对水平井、大斜度井等复杂的井型状况，调整传感器的安装角度情况，确保数据采集工作的有效性。在后续的工作中可将模型与物联网的技术相结合，实现钻具全生命周期的健康监测工作，提升钻井作业的智能化水平程度。

五、结论

本文所构建的钻具刺漏故障多源传感数据融合的诊断模型，通过整合振动、压力、声学三类传感器的数据信息，采用小波包分解的方式提取特征参数内容，结合改进的D-S证据理论实现数据的融合诊断工作，解决了单一传感器诊断准确率较低、滞后性较强的问题状况。实验以及现场的应用结果显示，该模型的诊断准确率达到96.7%的水平，故障识别的滞后时长控制在2秒的范围之内，漏诊的比率、误诊的比比较低，能够有效地识别早期的刺漏故障问题，并且适应现场的复杂工况条件，具备较强的实用属性。该模型为钻具刺漏故障的精准防控工作提供了可靠的技术手段支持，对于提升钻井作业的安全特性、降低生产的成本开支具有重要的意义和价值，可在油田的钻井现场进行广泛的推广应用操作。

参考文献

[1] 高嵩, 高博麟, 芦健, 吴粤隆, 王鹤, 徐月云. 多源传感数据的物理世界映射差异引擎 [J]. 计算机工程, 1-14.

[2] 魏晓豫, 谢昶霖, 夏庆亮, 麦浩, 郭国伟. 基于多源传感数据融合的高空作业安全防护与智能报警方法分析 [J]. 电子技术, 2025, 54(08): 230-231.

[3] 郭茹涵, 王国伟, 张珏, 王勇澎. 基于多源异构传感数据驱动的电铲故障预测与健康管理技术研究 [J]. 机械管理开发, 2025, 40(05): 244-247.

[4] 李志伟, 王勇, 徐华龙. 基于深度学习与多源传感数据的煤矿电力需求预测方法 [J]. 国外电子测量技术, 2025, 44(04): 122-127.

[5] 侯瑛男, 郝宏堡, 沈洋, 陈思衡, 赵超越. 基于智能感知技术的海量农业多源传感数据采集与分析研究 [J]. 现代化农业, 2024, (06): 85-87.

[6] 徐伟昌, 谭社会, 杨兴旺, 李宁, 时瑾. 基于多源传感数据的千米级公铁两用桥梁线形自动化监测技术 [J]. 铁道建筑, 2024, 64(03): 66-71.

[7] 刘海鸥, 马青云. 物联网开放环境多源异构传感数据低功耗采集 [J]. 传感技术学报, 2024, 37(03): 539-544.

[8] 胡宁玉, 张静. 无线物联网感知层多源传感数据实时共享方法 [J]. 传感技术学报, 2023, 36(05): 819-824.

[9] 张福生, 葛阳, 沈长青, 丁建新, 冯云. 面向电梯本体安全的多源传感数据 GNG 网络融合建模方法 [J]. 中国电梯, 2022, 33(24): 16-19.

[10] 陈红林, 杨晓娇, 江军, 于忠. 智慧工地中物联网多源传感数据与 BIM 交互接口技术研究进展 [J]. 四川建筑, 2021, 41(S1): 181-183.