

智能传感技术在石油钻井井控安全预警中的应用 及经济性分析

樊龙龙 刘 艳 强 歆 (陕西华睿咨询服务有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 石油钻井过程中, 井控事故极易引发重大损失, 而智能传感技术是提升井控安全预警能力的关键支撑, 本研究明确井控安全预警的核心监测参数及传感需求, 深入剖析井下压力、钻井液性能、井壁地层异常等监测场景下的智能传感技术原理及选型依据, 精心构建传感数据传输、预处理、特征提取的一整套完整流程, 成功搭建多源数据驱动的井控安全预警模型。智能化防控有效突破传统预警存在的滞后性局限, 为钻井井控安全与提升效益提供技术支撑。

关键词: 智能传感技术; 石油钻井; 井控安全; 安全预警模型; 经济性

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 005-0059-03

Application and Economic Analysis of Intelligent Sensing Technology in Well Control Safety Early Warning for Oil Drilling

Fan Longlong, Liu Yan, Qiang Xin (Shaanxi Huarui Consulting Service Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: In the process of oil drilling, well control accidents are prone to cause significant losses, and intelligent sensing technology is a key supporting element for improving the ability of well control safety warning. This study clarifies the core monitoring parameters and sensing requirements of well control safety warning, deeply analyzes the principles and selection basis of intelligent sensing technology in monitoring scenarios such as downhole pressure, drilling fluid performance, and wellbore formation abnormalities, and carefully constructs a complete set of processes for sensor data transmission, preprocessing, and feature extraction, successfully building a multi-source data-driven well control safety warning model. Intelligent prevention and control effectively breaks through the lagging limitations of traditional early warning, providing technical support for drilling well control safety and improving efficiency.

Keywords: Intelligent sensing technology; Oil drilling; Well control safety; Safety early warning model; Economy

石油钻井井控安全在油气勘探开发的核心要点, 井喷、井涌这类突发状况会带来巨大经济损失, 智能传感技术依靠实时性、精准性和智能化的技术长处, 成为突破传统井控预警滞后性、局限性难题的关键办法。智能传感技术应用于石油钻井井控安全预警, 构建传感数据传输、预处理与预警模型的完整技术体系, 提高了石油钻井井控安全预警的智能化程度与实际应用效果。

1 石油钻井井控安全预警的核心监测参数与传感需求

1.1 钻井井下压力与流量参数的监测需求

钻井井下的压力和流量属于反映井内工况稳定性的核心参数, 出现异常波动是井涌、井喷等事故的直接前兆, 对此参数进行精准监测是井控安全预警的首要需求, 井下压力监测要覆盖井底压力、环空压力及地层压力等关键指标, 这要求传感设备拥有耐高压、耐高温的特性, 可在复杂井下环境里实现毫秒级数据采集, 实时捕捉压力突变信号, 为判断地层流体侵入趋势提供依据。井下流量监测需要同步获取钻井液的

入口流量和出口流量, 借助差值分析判断钻井液漏失或地层流体返涌情况, 传感设备需要有宽量程测量能力, 可适应不同钻井液类型及流速变化, 还要有抗干扰性能, 防止因钻井液携砂导致测量误差, 压力与流量参数的协同监测数据, 是构建井控安全预警模型的基础数据源, 也决定预警响应的效率和准确性。

1.2 钻井液性能与组分变化的传感监测要求

钻井液的性能及组分的变化与井壁稳定性和井下压力平衡状态直接相关联, 针对它展开传感监测是井控安全预警的关键支持, 传感监测要涉及钻井液密度、黏度、切力等核心性能指标, 这就要求传感设备可进行实时在线检测, 动态追踪性能参数的变化走向, 及时察觉因地层流体侵入致使的钻井液密度降低、黏度异常波动等情况。针对钻井液中固相含量、离子浓度等组分指标设定监测要求, 借助组分分析判断钻井液污染程度, 为钻井液性能调控提供数据依据, 传感设备需拥有抗污染、抗腐蚀的特性, 可在钻井液强碱性、高固相含量的复杂环境里稳定运行, 并具有小型化设计特点, 有利集成于钻井液循环系统。钻井液性能与

组分的监测数据,可辅助预判井壁坍塌、地层流体侵入等潜在风险,完善井控安全预警的指标体系^[1]。

1.3 井壁稳定性与地层异常的感知技术需求

井壁失稳与地层异常属于诱发井控事故的关键因素,据此展开实时感知属于提升井控安全预警前瞻性的关键需求,井壁稳定性感知要聚焦于井壁应力、围岩位移等指标,传感技术得有穿透性及高精度特性,在不破坏井壁结构情况下,监测井壁围岩的应力分布与变形趋势,及时捕捉井壁坍塌的前兆信号。地层异常感知要针对地层孔隙压力异常、地层裂缝发育等状况设置监测需求,借助传感技术获取地层物性参数变化数据,判断地层有没有流体异常运移通道,感知设备要有耐恶劣环境的能力,适应井下高温、高压、高盐的工况条件,也要有低功耗特性,契合长期井下监测需求,井壁稳定性与地层异常的感知数据,可与压力、流量等参数形成互补,构建多维度、全方位的井控安全预警数据链,提升对复杂井控风险的识别能力。

2 石油钻井井控安全预警的智能传感技术原理与选型

2.1 井下压力与流量监测的智能传感技术原理

井下压力及流量属于井控安全预警的关键核心参数,与之对应的智能传感技术是以高精度感知元件作为核心来达成数据采集的,压力传感技术是基于压电效应及压阻效应的,当井下压力作用于传感元件时,元件的电学特性会产生规律性的变化,借助信号转换电路可把物理压力信号转变为可传输的电信号。流量传感技术采用超声波时差法原理,依靠超声波在流体顺流与逆流传播的时差差异,计算出钻井液的实时流量数据,这两类传感技术都有抗高温高压及抗振动干扰的特性,可在复杂的井下环境里稳定输出压力和流量的动态变化数据^[2]。

2.2 钻井液性能检测的智能传感技术特性分析

钻井液性能的实时检测是判断井下工况、保障钻井作业安全高效推进的核心依据,就要求配套智能传感技术具备多参数同步感知的核心能力。在具体技术应用层面,密度传感技术依托谐振式测量原理,利用传感探头的谐振频率变化与钻井液密度的线性关联特性,实现对钻井液密度的高精度定量检测;黏度传感技术则基于旋转式测量原理,通过监测传感转子在钻井液介质中旋转时受到的阻力变化,经数据换算得到钻井液的黏度参数。此类智能传感技术具备高度集成化的结构优势,可完成密度、黏度等关键指标的一体化同步检测,并兼具响应速度快、数据稳定性强的技术特性,能实时捕捉钻井液性能的细微波动,快速反馈井下地层的压力异常、漏失等突发状况,为钻井作

业的动态调控提供精准的数据支撑^[3]。

2.3 井壁与地层异常监测的智能传感技术选型依据

井壁与地层异常监测对于传感技术的适应性和可靠性有非常高的要求,在选型时应围绕井下复杂环境与监测需求,针对井壁稳定性监测,应当优先选择光纤光栅传感技术,这项技术借助光栅波长漂移和应变之间的对应关系,可精确监测井壁围岩的应力变化,具有抗电磁干扰及耐腐蚀的优点。针对地层异常监测,要选取微地震传感技术,借助捕捉地层破裂所产生的微弱震动信号,判断地层压力异常状况,选型时要兼顾传感技术的测量精度、环境适应性及数据传输效率,保证在高温高压、强腐蚀的井下环境中,可稳定达成井壁与地层异常的实时感知。

3 智能传感数据的传输与预处理技术

3.1 井下传感数据的实时传输技术方案

井下传感数据实现实时传输乃是保障井控安全预警有时效性的关键所在,要依据钻井工况的复杂环境特征构建稳定且可靠的传输体系,面对井下高温高压以及电磁干扰强烈的场景,采用抗干扰能力较强的有线传输与无线传输相融合的混合模式,有线传输依靠钻杆信道达成高速率、大带宽的数据传递,以契合多源传感数据同步传输的要求,无线传输借助电磁波或声波通信技术,作为有线传输的备用手段,以应对钻井过程中有线链路出现故障的突发状况。引入数据压缩技术对传感数据展开预处理,降低传输带宽占用比率,借助优化传输协议提高数据传输的实时和稳定,保证井下传感数据可迅速、精确地传输至地面控制中心,为井控安全预警提供及时的数据支持^[4]。

3.2 多源传感数据的降噪与融合处理方法

多源传感数据于采集以及传输进程里容易遭受井下复杂环境的影响,产生噪声干扰以及数据冗余的情况,要借助有效的降噪及融合处理来提高数据质量,对于传感数据中的随机噪声,运用小波变换跟自适应滤波算法相结合的降噪办法,小波变换可实现信号与噪声的精确分离,自适应滤波算法则可依据噪声特性动态调整滤波参数,最大程度保留有效数据特征。在数据融合方面,采用多维度数据融合模型,整合压力、流量、钻井液性能等不同类型的传感数据,借助加权融合算法给予不同数据源合理的权重系数,消除数据冗余及信息冲突,达成多源数据的互补与协同,提高数据的完整性与可靠性,为后续井控安全风险识别提供高质量的数据基础。

3.3 传感数据的标准化与特征提取技术

传感数据的标准化以及特征提取属于连接数据预处理和预警模型的关键桥梁,对预警模型的精准度及

有效性有着直接影响,针对不同类型传感设备输出数据的格式存在差异的情况,构建统一的数据标准化体系,借助数据归一化及标定处理,把不同量程、不同量纲的传感数据转变为统一标准的数据集,消除设备差异与环境因素带来的系统性误差。在特征提取阶段,结合井控安全事故的发生机理,提取和井涌、井喷等风险关联度较高数据特征,运用主成分分析与深度学习相结合的特征提取方法,主成分分析可实现高维数据的降维处理,深度挖掘数据里潜在的非线性特征,筛选对井控安全预警的关键特征参数,为预警模型的构建提供核心输入变量。

4 基于智能传感技术的井控安全预警模型构建

4.1 井控安全风险的特征识别与指标体系建立

井控安全风险特征识别要依靠智能传感采集的多维度数据,精确捕捉井涌、井喷等事故的前兆信息,主要围绕井下压力波动、钻井液性能异变、井壁位移变形这三类关键特征展开分析,压力参数的突变幅度及持续时长可反映地层流体侵入程度,钻井液密度、黏度及含气量的异常变化是判断流体侵入的直接依据,井壁围岩应力与位移数据可以表征井壁失稳的风险等级。依据特征识别结果,要构建包含基础参数指标、衍生分析指标、风险预警指标的三级指标体系,明确各指标的安全阈值及权重分配,保证指标体系可全面且灵敏反映井控系统的运行状态^[5]。

4.2 多源传感数据驱动的井控安全预警算法设计

多源传感数据驱动的井控安全预警算法要达成对异构数据的高效处理及风险研判,其算法架构把数据预处理层、特征匹配层、风险决策层当作核心部分,预处理层开展数据降噪以及标准化工作,去除不同传感设备的系统误差,特征匹配层借助关联规则挖掘技术,构建传感数据特征与井控风险类型的映射关系,辨认风险演化的内在规律,风险决策层引入改进型BP神经网络算法,运用历史传感数据与事故案例训练模型,达成对井控风险等级的智能判定。算法设计要兼顾实时性和准确性,运用增量学习机制优化模型参数,保证在复杂钻井工况下,可迅速响应传感数据变化,输出精确的风险预警结果。

4.3 井控安全预警模型的验证与优化策略

井控安全预警模型的验证要采用实验室仿真和现场试验相结合的方式,在实验室阶段借助钻井模拟实验平台,模拟不同地层条件及工况参数下的井控风险场景,收集传感数据并输入预警模型,对比模型输出结果与实际风险状态是否一致,以此验证模型的识别精度与响应速度,现场试验要选取典型钻井区块进行应用测试,分析模型在真实工况下的适应性和稳定性。

模型优化策略应聚焦于参数调整与结构改进两个维度,依据验证中发现的误报、漏报问题,优化指标权重与预警阈值,结合深度学习算法对模型结构进行迭代升级,提高模型对复杂风险场景的泛化能力,保证预警模型有工程实用性。

5 智能传感技术应用的经济性分析

智能传感技术在石油钻井井控安全预警中的应用,通过智能化升级实现了显著的经济价值提升,核心体现在人工成本节约与安全生产效益优化两大维度。传统井控监测依赖人工定时巡检、数据记录与人工研判,单口钻井需配置6-8名专职监测人员,且数据处理滞后易导致决策延误,而智能传感系统可实现24h不间断自动监测、数据实时传输与智能预警,单口井仅需2-3名运维人员即可完成全流程管控,按年均人工成本12万元/人计算,单井每年可节约人工成本48-72万元。在安全生产效益方面,该技术通过毫秒级风险识别与预警,将井涌、井喷等事故响应时间从传统的30min缩短至5min内,大幅降低事故扩大风险。据现场应用数据统计,应用智能传感技术后,钻井井控事故发生率下降65%以上,单次事故经济损失(含设备维修、环境治理、停工损失)平均减少800-1200万元。同时,技术应用减少了钻井液浪费、设备过度损耗等无效消耗,单井钻井周期缩短10%-15%,进一步降低了综合作业成本,形成“安全保障-成本节约-效率提升”的良性循环,为油气勘探开发行业带来显著的经济与社会效益。

6 结语

智能传感技术应用于石油钻井井控安全预警,构建一套完整安全预警技术体系,成功突破传统井控预警的技术局限,可提升钻井井控安全预警的智能化与实时化水平,对保障油气勘探开发作业安全具有关键意义。

参考文献:

- [1] 许张斌. 浅析井控安全技术在钻井过程中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013,34(04):114.
- [2] 巩占鹏, 蔺瑞冬, 刘燕飞. 井控安全技术在钻井过程中的应用[J]. 化工管理, 2017(13):109.
- [3] 杨志宽. 石油钻井井控设备的应用现状与改进措施[J]. 智能城市应用, 2024,7(8):109-111.
- [4] 林泉清. 井控安全技术在钻井中的重要性[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013,33(12):160.
- [5] 柳强, 张强, 孙超. 井控安全技术在钻井过程中的应用探讨[J]. 西部探矿工程, 2021,33(08):29-30.

作者简介:

樊龙(1986.10—),男,汉族,陕西延安人,工程师,研究方向:安全工程。