

Safety Monitoring and Fault Early Warning Technology for Complex Petroleum Drilling Equipment

Xiaolong Liu

Fourth Engineering Project Department Changqing Drilling Corporation Sinopec Chuanqing Drilling Company, Xi 'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract

With China's rapid economic growth in recent years, the demand for petroleum across various sectors has surged, leading to a continuous increase in domestic oil production. This has raised the bar for the performance of petroleum drilling equipment. Professional drilling equipment is indispensable for oil extraction, and any malfunction in such equipment would inevitably impact production output. Therefore, it is crucial to implement rigorous maintenance and management protocols, ensuring the equipment operates efficiently and reliably. By adopting comprehensive measures, we can maintain optimal performance, enhance operational safety, and ultimately boost oil extraction efficiency.

Keywords

oil extraction; drilling equipment; safety maintenance; safety management

复杂地层石油钻井设备安全监测与故障预警技术

刘晓龙

中石油川庆钻探公司长庆钻井总公司第四工程项目部，中国·陕西 西安 710018

摘要

近年来，中国经济快速发展，各领域对于石油的需求大幅上涨，中国的石油开采量也不断上升，而这对于石油钻井设备的使用提出了更高的要求。石油开采离不开专业的石油钻井设备，一旦石油钻井设备发生故障，必然会影响石油开采量，因此应做好石油钻井设备的维护和管理，从多方面严格落实有效的维护和管理措施，使其处于良好运行状态，确保石油钻井设备的安全性和稳定性，提高石油开采效率。

关键词

石油开采；钻井设备；安全维护；安全管理

1 引言

能源作为工业重要的基石之一，是工业发展不可或缺的要素，石油是能源体系的主体，在勘探开发过程中相对困难，而钻井设备是钻井工作的主要载体，若钻井设备的安全出现故障将直接影响到整个施工进度以及人员安全，但目前传统钻井作业主要依赖于人工的巡检以及定期的维护，这种具有被动性的事后弥补方式无法及时应对复杂的地层动态变化所带来的各类风险问题，由此本文根据复杂地层的特点，从失效机理出发，对钻井设备实行全链条的技术分析，并归纳出了关键技术的应用障碍与优化道路，以期对于提高复杂地层钻井设备的安全管理水平做出一定的贡献。

2 复杂地层环境特性及对钻井设备的风险作用机制

2.1 复杂地层的典型环境特征

随着全球能源勘探工作不断向深层开展，复杂的地层成为油气开发的主要地区，在钻井工程的运行当中，环境特性对于工程是否安全运行有着重要的作用。复杂的地层构造，不同层次的岩层混杂分布都会对钻井工程产生重要影响，在钻井作业的过程当中，通常会面临温度和压力的同向递增，一旦钻入超过 3000m 的地层以后，温度将随着深度的增加而呈直线递增，平均地温梯度为 $2 \sim 5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，有的深井井底温度已远远大于 200°C 、甚至超过 300°C ，远超出常规作业钻机所能承受的温度极限。同时温度也会影响到金属材料本身力学性能。地层压力大也是钻井工程的重要难题，孔隙压力一般大于 70MPa ，有些超深井压力甚至可以达到 100MPa ，会持续作用在钻杆、井口装置等部位，会使钻杆及其他焊接部位受到极大的考验，导致整个钻井系统结

【作者简介】刘晓龙（1981-），男，中国甘肃宁县人，本科，从事石油工程、钻井现场安全管理研究。

构强度不足。

并且在复杂地层中存在大量的硫化氢、二氧化碳等酸性气体以及高矿化度的地层水，当硫化氢与金属接触时会产生电化学腐蚀和氢脆现象，使钻杆、套管的韧度降低，在交变应力的作用下易发生裂纹。二氧化碳溶于钻井液后生成碳酸，会使钻井液液流经过的泥浆泵、钻头等部分产生均匀腐蚀，使其壁厚逐渐减薄，在遇到井下高压环境时，有可能会导致突然失效。

2.2 钻井设备的风险响应与失效机理

风险响应机制是每个企业管理中必备的管理措施，钻井设备需要与风险控制挂钩，将风险控制融入进风险管理之中，通过风险控制，进一步提升钻井的使用效率和功能。钻井设备除了要面对复杂的地形条件，还需要面临设备故障的问题。在钻井的过程当中，设备的更新和维护也间接影响着作业安全，复杂地层环境会对钻井设备产生“直接作用 + 间接耦合”方式的影响，钻杆在高扭矩、高弯曲应力的作用下产生疲劳裂纹，裂纹在复杂地层的扩展速率会比在常规环境的要快 2 ~ 3 倍，钻头在非均质地层中的磨损相比正常地层严重，使用寿命缩短 40% 以上。井口防喷器橡胶密封件由于受到高温以及 H₂S 腐蚀老化加剧，密封失效几率大幅上升，导致井控的风险大大提高。动力系统故障，钻井泵使用含有高于 5% 砂的钻井液工作时，叶轮的磨损率要比正常情况下高出 3 倍左右，导致流量下降和压力波动大，柴油发电机组高温散热不良，致使柴油机缸体过热导致功率衰减甚至停机。控制系统异常，井下传感器受高温高压的影响零点发生漂移，测量误差达到 10% 以上。液压系统受钻井液污染发生阀组卡滞，导致钻压、转速等控制参数无法达到预设值。

3 复杂地层钻井设备安全监测技术体系构建

3.1 多维度感知网络布局

石油钻井设备维护和管理是一项非常专业且重要的工作，其需要相关部门成立专门的维护管理和监督机构，需要基于标准规范的石油钻井设备管理制度，配合相关奖励和惩罚措施，开展高效的钻井设备维护和管理。但是当前很多石油开采企业都缺少健全的管理制度，而石油钻井作业从前期准备工作、开展钻井作业到完成钻井工艺，整个石油钻井过程往往需要较长的时间，这对于石油钻井设备维护和管理提出了更高的要求。同时，有些企业不重视石油钻井设备的维护和管理，在实际工作中缺乏责任心，相关维护和管理措施落实不到位，使得很多石油钻井设备往往得不到有效的维护和管理，造成石油钻井设备带故障运行，埋下严重的安全隐患。为满足多场景复杂地层作业过程中，钻井设备状态和环境参数全面感知的需求，采用耐温 200℃、耐压 140MPa 的传感器，光纤光栅传感器，植入钻杆本体来实时监测钻杆应变、温度及扭矩情况和微机电系统，采集、传输至井上电脑

端集中监控并预警。通过集成于钻头和 BHA 上采集钻压、转速、振动加速度、井眼轨迹参数，将电化学传感器置入井底短节内实测 H₂S 浓度（量程 0 ~ 2000ppm）及钻井液 pH 值，以预警是否出现腐蚀隐患。注重关键设备工作状况，采集钻井泵、绞车、转盘等旋转部位振动信号的压电式加速度传感器，判定轴承的磨损程度和齿轮的啮合情况。用红外热像仪、热电偶测量电机绕组、轴承座、液压油箱的温度，在线铁谱仪监测润滑油中大于等于 5 μm 的磨粒浓度及黏度变化情况，分析评估出设备的磨损程度。进行环境与井况监测层，关联地层环境与设备状态，包括井口压力传感器、钻井液性能传感器及可燃气体探测器，实现“设备 - 环境”耦合分析。

3.2 数据传输与预处理技术

随着技术的提升，数字化技术逐渐应用到企业的各个模块之中，复杂地层监测的数据是“海量、异构、高噪声”的数据，所以必须要有效传输以及预处理才能保证数据的质量。构建数据传输架构，利用“井下无线 + 地面有线”的方式，井下数据通过 MWD 随钻测量系统泥浆脉冲或者电磁传输上行，速率为 10kbps。地面数据经过工业以太网、5G 边缘计算节点传送到高速以太网上，时延小于毫秒级，保证实时性。基于振动信号、扭矩信号等信号利用 db4 小波基，分解六层的小波阈值去噪算法，把信噪比提高到了大于 40dB。进行数据对齐，基于时间戳的同步和插值方法解决井下及地面数据时空差（小于 ± 1s）。运用主成分分析 (PCA) 和独立成分分析 (ICA)，把 500 余种监测参数降低到 20 ~ 30 个关键特征，减少计算量。

4 复杂地层钻井设备故障预警技术与模型构建

4.1 基于机理与数据融合的预警模型

为了应对复杂地层，需要进一步对于钻井设备进行安全检测和故障预警，根据钻井设备的情况进行混合模型分析，通过力学与故障物理理论来建设设备失效阈值模型，钻杆疲劳寿命模型 $\sigma \cdot N \cdot v$ 公式中将应力幅值 σ 、循环次数 N 及腐蚀速率 v 相乘，得到的乘积反映腐蚀条件下强度损耗劣化程度。利用公式计算出剩余寿命，并在实际运行条件下估算其工作时间，在达到某一目标值后自动报警。建立数据驱动模型，利用机器学习算法挖掘数据和故障之间的映射关系。应用孤立森林算法对正常运行数据进行训练，将偏离正常运行模式的状态判定为异常状态，达到未知故障预警的效果，准确率大于等于 92%。使用随机森林 (RF) 及梯度提升树 (GBDT)，利用历史故障数据进行训练，以达到故障类型、故障严重程度分类的目的，F1-score 达 0.85。使用了长短期记忆网络，将输入时序监测数据作为输入参数，对于寿命预测的均方根误差小于等于 5%，辅助决策维修。

4.2 分级预警与动态阈值调整

在钻井设备安全监测和故障管理当中，风险控制是整个安全体系的重要环节，做好风险防控与预警能够降低钻井

设备的故障发生率，便于工作人员及时处理故障设备，在实际中钻井设备需要进行分级预警和动态调整，以便能够更好的满足安全检测和故障预警的需求，结合复杂地层风险的不同程度动态发展，设置四级预警体系和动态调整阈值。进行预警阈值设定。动态调整机制基于 Q-learning 算法和强化学习方法，根据实时地层参数、设备状态参数作为校正输入，实时自动调整阈值修正量。在高于 150 ℃的地层中，将电机温度报警阈值下浮 10%。破碎带钻进时，适当提高振动预警阈值设定值，使预警提前 5~10 min 触发。以声光报警、终端推送到手机 App、设备联动等方式实现感知 - 决策 - 执行闭环，响应时间不超过 30s。

5 应用瓶颈与优化策略

5.1 现存技术瓶颈

现如今钻井设备极端环境适应性不足，在超过 200℃ 高温和大于 100MPa 的压力环境下的井下传感器容易损坏失灵，使用寿命不到 100h，无法满足深井测井的需求。并且设备数据孤岛现象，不同的设备厂家的检测系统协议不统一，共享率小于 30%，多源异构数据无法实现融合分析。设备误报率较高，复杂地层引起的强烈干扰使预警的误报率高达 15% ~ 20%，降低了现场工作人员的信任度。边缘计算能力有限，钻井平台算力资源有限，不能支持过于复杂的模型实现运行。目前，安全管理模式僵化，存在过多地使用固化程序以及层层审批的过程，应对突发事件应变缺乏灵活性，突发安全情况需要层层上报，这样往往延误处置时间，并且联动技防设备和相关规章制度的措施较少，大多都是散落的技术设备，并且不能形成联动分析数据，因而也不能发挥风险预警的作用。

5.2 优化策略

钻井设备需要依托先进技术，进行传感器技术升级，根据需要建立钻井设备监测数据接口标准，实现不同系统的数据互通互用，共享率大于 80%，建设云上数据中台，汇聚各井场数据并进行分析汇总。应用自适应滤波算法利用地层干扰特征库，提升钻井设备的使用效率，将误报率控制到 5% 以下，不断完善预警逻辑。整合大数据模式，将实时预警简单分析部署到平台边缘节点，复杂模型训练和全局优化在云端，使用 5G 切片技术保证数据传输的带宽与时延。另

外，模型不断向“轻量化、可解释性”发展，解决数据隐私及算力不足的问题，钻井过程中预警系统与钻井设备深度融合，实现预测性维护 + 自适应控制的智能闭环。依靠不断创新的技术攻克复杂地层钻机设备故障多等难题，在钻进的施工过程中，利用高科技的监测仪器，可以判定地层的高压变动情况，当出现特殊情况的时候，工作人员可以手动完成输入工作的指令，这样便会马上提供高密度钻井液，以满足工作泵的运转需求，最终可以减少一半以上的复杂地层钻井设备故障发生概率，为中国安全开采能源提供有力的技术支撑。目前钻井设备技术人员参差不齐，应当进一步完善相关的福利保障制度，向保安人员提供合理的报酬及社会保障，以福利吸引并留住人才，打造科学合理的绩效考评体系，用考评激励人员奋发向前，针对人员工作表现好的方面进行肯定和奖励，对于存在问题的则应当做好督促和改正工作。绩效考核结果应该与工资待遇、职务晋升紧密相关，充分调动人员工作的积极性、主动性的有效方式。同时考核也要具有公信力。

6 结语

中国的石油钻井设备在保养及维护上经常产生问题的根本原因是技术水平的相对落后和自主研发过程的缺失，因此，各石油企业应在提高设备保养及维护水平的基础上，进一步向前探索，以提高设备使效率为途径，促进石油钻井设备的维护及保养更加便捷、有效。随着修井作业标准的提升，钻井设备安全管理需以“评价先行、风险导向、防控结合”为原则，通过构建科学的评价体系、精准识别风险因素、实施技术与管理协同控制，可有效降低完整性失效概率。未来，随着人工智能、数字孪生等技术的发展，钻井设备风险控制将实现“预测性维护”，为油气田安全开发提供更智能、更高效的保障。

参考文献

- [1] 徐威.关于石油钻井设备的维护与管理探讨[J].化工设计通信, 2016(4):30+51.
- [2] 张云, 尚庆录, 王志军, 谭贺文.石油钻井设备的维护与管理 [J].经营管理者, 2015(22):351.
- [3] 陈蛟.如何做好石油钻井机械设备的管理与维护[J].民营科技, 2015(9):100.