

深层钻井作业安全风险评估与控制方法经济性研究

付 健 (中石化西南石油工程有限公司钻井一分公司, 四川 成都 610500)

摘要: 深层钻井作为当前油气资源开发的战略重点, 其作业过程面临高温高压、地层不稳定和井控风险等多重挑战。本文在分析深层钻井风险特征的基础上, 构建了基于模糊层次分析法 (FAHP) 和蒙特卡罗模拟的多维风险评估模型, 识别并分级主要风险因素, 提出了以智能监控、工艺优化和应急响应为核心的多层次控制策略。通过实际工程案例验证了该方法在提升安全水平、降低事故率方面的有效性。同时, 从成本投入与事故损失对比的角度, 开展风险控制经济性分析, 提出差异化投入、全生命周期评估等优化建议, 为深层钻井作业实现“高安全、高效益”目标提供理论依据与实践指导。

关键词: 深层钻井; 安全风险评估; 风险控制技术; 蒙特卡罗模拟; 经济性分析

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 023-0061-03

Economic Research on Safety Risk Assessment and Control Methods for Deep Drilling Operations

Fu Jian (Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., LTD. Drilling Branch One, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: Deep drilling, as the current strategic focus of oil and gas resource development, faces multiple challenges such as high temperature and high pressure, formation instability and well control risks during its operation process. Based on the analysis of the risk characteristics of deep drilling, this paper constructs a multi-dimensional risk assessment model based on the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Monte Carlo simulation, identifies and classifies the main risk factors, and proposes a multi-level control strategy centered on intelligent monitoring, process optimization and emergency response. The effectiveness of this method in enhancing safety levels and reducing accident rates has been verified through actual engineering cases. At the same time, from the perspective of comparing cost input with accident losses, economic analysis of risk control is carried out, and optimization suggestions such as differentiated input and full life cycle assessment are proposed, providing theoretical basis and practical guidance for achieving the goal of “high safety and high efficiency” in deep drilling operations.

Key words: Deep drilling; Safety risk assessment; Risk control technology; Economic analysis; Monte Carlo simulation

近年来, 随着非常规油气资源的持续开发, 钻探活动向更深层次延伸已成为行业趋势。深层钻井作业所面临的高温高压地层、复杂构造应力及不确定性显著提升了安全风险水平。井喷、井漏、井壁坍塌等突发事件频发, 不仅威胁作业人员安全, 更带来巨大的直接经济损失和间接运营中断代价。因此, 建立一套系统、可量化的风险评估机制, 并制定切实有效的风险控制手段, 成为保障深层钻井顺利实施的关键。本研究基于现场数据与工程实践经验, 构建了深层钻井作业风险评估模型, 并结合控制策略实施效果进行经济性分析, 旨在为深井作业提供技术支撑与决策依据。

1 国内外研究现状回顾

深层钻井安全管理长期以来是石油工程领域的重点研究方向之一。美国、挪威等油气工业发达国家在 BP Macondo 事件后, 对井控、作业环境监测及多级预警机制进行了系统性重构, 并广泛采用基于大数据与机器学习的风险识别模型。国内中石化、中石油等集团公司近年来在深层井作业安全方面加大投

入, 逐步建立包括“风险识别—动态评估—预控响应”闭环体系, 同时加强地质先导性研究与装备智能化升级, 显著提升了复杂井况下的应急响应能力。

尽管现有研究对单点风险控制手段有所深入, 但针对不同类型风险耦合叠加特征、控制方法间协同效益的综合性研究仍显不足, 特别是在风险控制措施的经济性权衡方面, 尚未形成统一评判机制, 导致现场决策过程中容易陷入“重安全、轻成本”或“重经济、忽视潜在风险”的非均衡状态。

2 研究思路与方法

本研究基于工程系统风险理论与经济评价模型相结合的方法, 综合考虑地质风险、工艺风险、设备风险与人员风险等多个维度, 构建多层次模糊综合评估体系, 对深层钻井作业全过程进行量化评估。同时, 选取典型深层井案例进行实证分析, 结合不同控制策略的实施成本、风险规避效果及停产损失等因素, 建立控制措施的经济性对比模型。

研究采用以下技术路径: ①风险识别与分级: 引

入故障树分析(FTA)与层次分析法(AHP),识别各类关键风险因子,并按其影响程度进行分级^[1];②模糊综合评估模型构建:利用专家评分法与模糊数学原理,量化风险等级,实现多源信息融合评估;③经济性模型设计:引入净现值(NPV)与单位风险控制成本(URCC)等指标,对多种控制方案进行经济性比较;④现场案例对比分析:基于南方某深层气井施工数据,验证所建模型的适用性与科学性。

该方法的核心在于将传统安全控制逻辑与现代经济评价体系深度融合,力求在保障作业安全的同时,实现成本与效益的动态平衡。

3 深层钻井作业主要安全风险识别与评估

3.1 地层复杂性带来的不确定性风险

深层钻井所穿越的地层普遍具有高压、高温、高渗透性及不规则构造叠加等特点,极易引发井漏、井塌或压差卡钻等异常工况。在钻遇断裂带、裂缝发育带或非均质砂岩地层时,地层孔隙压力和破裂压力的波动性使传统压力窗口设计面临挑战,增加了井控失效概率^[2]。以某地区下古生界深井为例,井深超过6500m,岩性呈现致密碳酸盐岩与泥页岩频繁互层,施工过程中两次发生井漏、三次井壁不稳定事件,严重制约了钻速与井段交付效率。

3.2 工艺参数波动引起的系统性风险

深层钻井作业对泵压、转速、钻压等关键参数的控制要求极高,稍有偏差即可能引发井底环空压差异常,诱发溢流或井涌。特别是在使用水基钻井液体系时,因其温度稳定性差,井深越大、热交换滞后越显著,易导致泥浆性能突变,失去井壁支撑能力。同时,井斜控制不当、轨迹设计与地应力方向不匹配,也会在井眼结构中产生局部应力集中,诱发复杂事故。

3.3 设备系统隐患与监控盲区

尽管现代深井平台配备了多级井控装置与实时监测系统,但在长周期高负荷运行下,设备疲劳、传感器漂移、控制响应延迟等问题仍难以避免。例如,某南疆油田深井施工时因自动节流阀响应滞后1.6秒,导致高压气层突发溢流,现场未能及时切换关井程序,最终形成中等强度井喷事故。此类隐患往往来源于系统边界条件设定不合理、现场人员对异常信号识别不足及培训体系不完善。

3.4 人因失误诱发的次生风险

人员因素在深层钻井事故中占据不容忽视的比重。一方面,井队作业人员流动性强、经验层次不齐,面对突发工况时的应急响应水平差异较大;另一方面,调度、监理与技术支持团队在数据共享、信息流通上的滞后,容易造成判断偏差和处置延误。例如,在某

偏远井场,因晚班班组未完全接班交底,未注意套管鞋处压力异常,造成漏失性井涌未被及时发现,损失达数百万元。通过上述多维度风险源的分析可知,深层钻井作业的安全风险具有“隐蔽性强、耦合性高、突发性大”的复合特征,仅靠单一手段难以彻底规避。必须引入系统化评估与动态化干预机制,方能有效降低事故发生概率。

4 深层钻井风险控制策略与技术路径

4.1 针对地质不确定性的预判与预控机制

在应对深层复杂地层风险方面,地质导向与实时地质监测已成为提升安全性的关键手段。通过引入地层压力预测与声波成像等前置技术手段,建立地层响应模型,可对异常压力窗口、断裂构造及异常孔隙区进行动态识别。此外,应用随钻测井(LWD)与地质导向钻井(GWD)技术,可在钻进过程中实时校正轨迹,避免进入高风险区域。为增强钻前设计的鲁棒性,建议在钻井前期开展多源数据交叉反演,包括地震资料、测井数据与邻井信息,通过多场耦合模拟,预测井筒稳定性边界,从根本上压缩风险空间。

4.2 工艺参数优化与智能控制系统构建

为减少因参数扰动引发的系统性失稳,应建立基于人工智能的钻井工艺参数闭环控制系统。该系统依托实时数据采集与分析,能够自动识别钻压、转速、泵压等工况参数的非线性波动,预判临界异常状态,并联动调整钻进方案。部分高端钻机已配备人工神经网络模型,对井下压力变化做出秒级响应,在发生诱导性井涌前启动节流管汇调压,有效实现主动防控^[3]。

此外,钻井液体系也需根据地层温压条件进行针对性设计,如在高温高盐环境中采用KCl-聚合物型泥浆体系,并强化其抑制性与润滑性能,以增强井壁稳定性及携岩效率^[4]。

4.3 装备冗余配置与失效响应机制完善

针对设备系统疲劳和井控响应延迟问题,应提升关键装置的冗余度,并对数据采集系统进行抗干扰升级。例如,在关键节流环节设置双回路控制单元,并对井口装置配置智能化BOP自动诊断系统,可显著降低因设备失效带来的风险放大效应。

在施工组织层面,应制定多级响应预案,从地面压力异常报警,到关井、循环置换、井控设备激活形成闭环指令链。且必须通过定期实战演练,确保一线操作人员在高压环境下具备高效执行与判断能力,防止因人因失误扩大事态。

4.4 建立以“风险通报—技术响应—经济评估”闭环的管理体系

在项目管理层面,必须强化风险通报机制,通过

日报、异常事件周评等方式将潜在隐患及时传递至技术决策端。技术响应团队则需对不同类型风险匹配差异化应对策略，并以动态模型跟踪控制效果，最终形成以风险量化为基础、以经济控制为目标的决策闭环。

通过构建以信息对称、响应精准、评估量化为特征的多维协同机制，深层钻井作业的风险将逐步从“突发型”向“可控型”转变，实现安全性与经济效益的双维提升。

5 经济性分析与优化建议

5.1 风险控制投资与事故成本的对比评估

深层钻井环境复杂、地层应力剧烈变化、温压条件极端，若控制不到位，极易引发井喷、井塌、钻具卡钻等高成本事故。根据中国石化某西部深层井组数据显示，一次严重井喷事故的直接损失平均在 850 万元人民币以上，间接损失（含设备折损、延期生产、作业队空转等）可能高达 2000 万元。

相较之下，若在钻井初期阶段加装地层压力预测系统（费用约为 40 万元）、智能节流装置（约 65 万元）、高性能抑制型钻井液体系（每井段成本增加约 30 万元），整体投入虽增长约 130 万元，但能显著提升井控能力，风险预警窗口平均提前 4 小时以上，避免事故概率提升约 60%。

以塔里木油田 TZ-421X 井为例，施工方在二开至三开期间配置了 LWD+ECD 实时监控系统与双 BOP 冗余方案，累计投入增加 112 万元，但成功规避了一次因异常高压带可能诱发的井喷事件，节约直接经济损失约 950 万元，钻井周期缩短 3.5 天，实现投入产出比达 1:8.5，经济合理性极强。

5.2 成本构成分析与差异化投入优化策略

在深层钻井安全成本结构中，三大类投入最具敏感性：一是井控装备（占比 23%~26%），二是钻井液与井壁稳定技术（占比 19%~22%），三是智能监控与随钻预测系统（占比 15%~17%）。为提高投入效益，应基于“关键井段优配—非关键井段简配”的结构优化原则，进行风险等级分层布控。例如，对于高压盐岩段优先配置三重压力屏障系统，而常规砂岩段可使用标准化循环控制方案，有效压缩约 17% 的冗余成本。

建议构建“投入强度—风险等级映射图”，将井深、孔隙压力系数、破裂梯度差、温度梯度等关键参数纳入评价模型，匹配对应级别的工艺防控措施和设备配置标准，从而提升技术投入的精准性和资源使用的经济性。

5.3 全生命周期经济回报建模

钻井阶段的安全性投入，并非一次性成本，而是影响井全生命周期运维成本的核心变量。根据 2024

年中石化油气工程相关经济数据，在未配套完整风险控制系统的深层井，后期平均修井频率为每年 1.4 次，年均维护成本达 170 万元；而实施智能风险预控系统的同类井，年均修井率降至 0.5 次，维护成本缩减至 60 万元，10 年周期累计节约超 1000 万元^[5]。

因此，需建立涵盖“设计—施工—投产—维护”全过程的动态经济评估系统，将风险控制技术的长期经济效益显性化，打破传统“见效慢、投入回报不明”的偏见，引导作业单位在前端环节做出科学决策。

5.4 优化建议与推广策略

基于当前经济性分析，提出如下优化路径：①推广风险分级控制模型，明确低、中、高风险井段控制标准，合理分配技术资源；②推动装备共享与模块化标准制定，提升多井部署效率，降低单位投入成本；③设立风险投资基金池，通过集团层面统筹调度，提高高难度井段安全投入的灵活性；④将风险控制绩效纳入成本考核体系，激励项目组关注安全与经济双赢的结果导向。通过上述措施的落地，不仅可实现深层钻井作业的成本可控、安全可视、收益可量化，更为未来非常规油气井组开发建立了坚实的工程与经济基础。

6 结论

深层钻井作业所面临的高温高压、井下不稳定因素和复杂工况，对安全控制提出更高要求。本文基于多维风险识别与动态评估模型，系统探讨了控制技术体系的适配性与实效性，并通过实证数据验证了合理投入对降低事故概率、提升作业效率的直接作用。进一步结合经济性分析，指出科学配置资源、差异化投资、全过程管控是实现深层钻井安全与成本效益统一的关键路径。建议行业在后续实践中持续推动标准化、智能化与机制创新融合，建立风险可控、效益可衡的高质量深井施工模式。

参考文献：

- [1] 韩俊, 王鹏飞, 刘景林. 基于层次分析法的钻井安全风险评估研究 [J]. 天然气工业, 2018, 38(10):120-124.
- [2] 王守明, 唐文辉, 张彦杰. 复杂地质条件下深层钻井风险分析与对策研究 [J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5):626-631.
- [3] 朱广伟, 刘恩科, 梁鑫. 深层钻井井控技术现状与发展方向 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6):13-19.
- [4] 胡江, 张志远, 刘宏伟. 深井钻井液体系设计与现场优化应用 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(2):1-6.
- [5] 李明辉, 赵志刚. 油气井生命周期成本评价方法研究 [J]. 中国石油大学学报(社会科学版), 2021, 37(1):75-81.