

石油钻井井控先进工艺技术的成本效益分析与优化策略

杨国梁 胡建平 马永安（中国石油西部钻探吐哈钻井公司，新疆 吐鲁番 838200）

摘要：石油钻井作业中，井控安全至关重要，推动各类先进工艺技术相继问世。本研究基于石油行业降低成本、提高效益的需求，旨在深入剖析此类技术成本效益，探寻优化策略。通过梳理工艺技术、搭建效益评估体系，提出协同推进技术创新、实施全生命周期成本管控、革新管理模式等优化举措，以期提升先进井控工艺技术成本效益，有力推动石油行业可持续发展。

关键词：石油钻井；井控先进工艺技术；成本效益；成本优化

中图分类号：TE2 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)016-0094-03

Cost-benefit analysis and optimization strategy of advanced well control technology for petroleum drilling

Yang Guoliang, Hu Jianping, Ma Yongan (China Petroleum West drilling Tuha drilling Company Shanshan County, Turpan Xinjiang 838200, China)

Abstract: In oil drilling operation, well control safety is very important, which promotes the advent of various advanced technology. Based on the oil industry's need to reduce costs and improve efficiency, this study aims to deeply analyze the cost-effectiveness of such technologies and explore optimization strategies. By sorting out the process technology, establishing the benefit evaluation system, and proposing optimization measures such as collaborative promotion of technological innovation, implementation of full life cycle cost control, and innovation management model, we hope to improve the cost efficiency of advanced well control technology and effectively promote the sustainable development of the oil industry.

Key words: oil drilling; Advanced well control technology; Cost-effectiveness; Cost optimization

石油作为全球至关重要的能源，其开采作业的安全与高效备受关注。在石油钻井过程中，井控技术是保障安全生产的关键，当井喷失控，将引发严重的人员伤亡、环境污染。面对能源市场的激烈竞争以及可持续发展的迫切需求，先进井控工艺技术不断推陈出新，但此类新技术在实际应用中，成本效益状况错综复杂。因此，深入剖析其成本效益并探索优化策略，对提升石油钻井作业综合效益、推动行业稳健前行具有重要意义。

1 石油钻井井控先进工艺技术

1.1 智能压力监测与自适应控制系统

该系统根据一套精密调校的传感器网络，此类传感器压力测量精度可达 $\pm 0.02\text{MPa}$ ，能够敏锐捕捉井底压力细微变化。凭借高速低延迟数据传输模块，数据从井底至地面控制中心传输延迟控制在0.05秒内，确保地面操作人员即时获取井下实时压力信息。

1.2 高效井控装备新材料应用技术

井控装备关键部件制造中，应用新型材料能够促使性能大幅提升，以防喷器为例，采用新型钛合金复合材料制造，该材料综合性能出色，抗拉强度超900MPa，相较于传统合金钢材料提升约40%，其承受更高压力负荷。同时，该材料在复杂化学腐蚀环境下，

尤其在含高浓度硫化氢等腐蚀性介质环境中，年腐蚀速率低于0.03mm，能够充分延长防喷器使用寿命与可靠性。防喷器密封件采用全新研发的高性能橡胶复合材料，该材料柔韧性与密封性俱佳，可在180MPa超高压环境下保持良好密封性能，适用温度范围广，由-60℃低温至250℃高温环境均可保障稳定工作^[1]。

1.3 一体化钻井液井控协同技术

一体化钻井液井控协同技术通过精准调控钻井液性能、深度融合井控作业流程，实现高效井控效果。钻井液配方设计添加具备特殊功能的智能流变调节剂，当正常钻进时，其能够精确控制调节剂添加量，可使钻井液塑性粘度稳定维持在18~22MPa·s，动切力保持在10~15Pa，该流变性能够确保钻井液有效悬浮、携带岩屑，防止岩屑在井底堆积引发卡钻等问题。

2 石油钻井井控先进工艺技术的成本效益评估体系

2.1 成本结构精细化拆解

2.1.1 设备购置成本

智能压力监测与调控系统作为核心设备，其构成复杂，高精度压力传感器采购单价因品牌及精度等级不同，在4000~7000元/个范围浮动。一口约3000m深度的标准油井，根据测量要求，需配备10

~ 15 个传感器，设备采购成本约 4 ~ 10.5 万元区间。当数据传输设备选用高速低延迟无线传输模块，考虑信号覆盖范围与稳定性，一套成本约 2.5 ~ 4 万元；控制中心硬件，如工作站运算能力较强，采购费用约为 8 ~ 12 万元，配套专业控制软件初次授权费用每年约 2 ~ 6 万元。在高效井控装备新材料应用技术方面，以新型复合材料制造的旋转防喷器为例，相较于传统钢制防喷器，其购置成本提高约 40 ~ 60%。传统防喷器价格普遍在 40 ~ 70 万元，新型防喷器约 56 ~ 112 万元。同时，基于特殊橡胶材料与先进制造工艺的配套高性能密封组件，每套售价约 4 ~ 8 万元。

2.1.2 安装调试投入

一套智能压力监测与调控系统安装工作，需 6 ~ 9 名专业技术工人，整体安装流程结合油井现场条件，耗时约 4 ~ 6 天。按照行业平均薪酬，技术工人日薪 800 ~ 1200 元，安装阶段人力成本总计约 1.92 ~ 6.48 万元。调试环节需 2 ~ 4 名经验丰富的工程师，调试周期约 3 ~ 4 天，工程师日薪约 1500 ~ 2500 元，此部分人力成本约 0.9 ~ 3 万元。在实际安装期间，各类连接线缆、固定配件等辅助材料成本约 0.8 ~ 1.5 万元。为确保安装调试准确性，需租赁专业压力检测与校准设备，此类设备日租金 2500 ~ 4000 元，租赁时长约 2 ~ 3 天，租赁费用总计约 0.5 ~ 1.2 万元。

2.1.3 运营维护开销

智能压力监测与调控系统日常维护工作，每月需安排 2 ~ 3 次定期巡检，每次巡检需 2 ~ 3 名技术人员，每次巡检成本约 4000 ~ 7000 元。每年需针对传感器进行专业校准，单个传感器校准费用约 1500 ~ 2500 元，整套系统传感器校准成本约 1.5 ~ 3.75 万元。以新型复合材料制造的防喷器为例，其平均故障间隔时间约 4500 ~ 5500 小时，当出现故障，其维修成本较高，单次维修平均费用约 8 ~ 12 万元，其中零部件更换费用（如关键的复合材料零部件单价约 1.5 ~ 4 万元）占比较大；维修人工成本，每次维修需 3 ~ 5 名专业维修人员，维修时长约为 2 ~ 3 天，人工成本约 2.4 ~ 6 万元^[2]。

2.2 效益多元维度评估

2.2.1 直接经济效益

智能压力监测与调控系统凭借实时精准监测井底压力的能力，能够有效减少因压力异常导致的起下钻操作频次，充分压缩非生产耗时。以某处于复杂地质条件的油田项目为例，在引入该系统前，每口井平均钻井周期为 35 天。采用该系统后，钻井周期显著缩短至 30 天，钻井效率提升幅度约达 14.3%。若每日钻井作业成本为 60 万元，每口井由此可节省成本 300

万元（60 万元 × 5 天）。

一体化钻井液井控协同技术通过对钻井液性能的优化，充分增强其携带岩屑的能力，进而显著提高机械钻速。在某区块实践中，应用该技术前，平均机械钻速为 12m/h，应用后提升至 16m/h，升幅高达 33.3%，当井深 3500m，应用技术前钻井时长为 291.67 小时，应用后缩短至 218.75 小时，节省时长约 73 小时，当每小时钻井成本为 3500 元，则每口井可节约成本约 25.55 万元。

在高效井控装备新材料应用技术方面，采用新型材料制造的防喷器等装备，使用寿命得以大幅延长。传统钢制防喷器平均使用寿命为 4 年，而采用新型复合材料制造的防喷器，使用寿命可达 6 年，提升幅度达 50%。以单个防喷器采购成本 80 万元计算，传统防喷器每年分摊成本为 20 万元，新型防喷器每年分摊成本降至约 13.33 万元，每年每口井可节约成本约 6.67 万元^[3]。

智能压力监测与调控系统能够实时监控钻井液性能，精准调控添加剂用量，有效避免材料浪费。针对油田作业中，当应用该系统后，钻井液添加剂用量相较于之前减少月 15%，设每口井原本钻井液添加剂费用为 60 万元，应用后可节省 9 万元。

2.2.2 安全效益

智能压力监测与自适应控制系统能够实时监测井底压力，提前察觉异常情况并及时发出预警，最大程度降低井涌、井喷等事故发生概率。根据统计，采用该系统的井队，井控事故发生率相较于传统作业方式降低约 75%。当一次井喷事故平均损失高达 6000 万元，应用该系统后，每口井因避免事故发生平均可减少损失 4500 万元。当井控事故发生，将造成大范围人员伤亡情况，同时涵盖随之而来高昂赔偿费用。借助先进工艺技术保障井控安全，可显著降低人员伤亡风险。

2.2.3 动态成本效益模型构建

2.2.3.1 成本模块构建

①设备采购成本动态计算：设备采购成本并非固定不变，受市场供需、技术更新等因素影响，以智能压力监测与调控系统为例，设初始采购成本为 C_0 ，每年因技术进步导致设备价格下降率为 r_1 。则第 n 年的设备采购成本 C_{n1} 计算公式为： $C_{n1}=C_0(1-r_1)^n$ 。

当初始智能压力监测与调控系统采购成本为 100 万元，每年价格下降率为 5%，则第三年采购成本约为 85.74 万元。

②安装调试成本动态调整：安装调试成本与当年的人力成本、辅助材料价格等相关，设初始安装调试成本为 I_0 ，人力成本年增长率为 r_2 ，辅助材料价格年

增长率为 r_3 。则第 n 年的安装调试成本 I_n 计算公式为：
 $I_n = I_0(1+r_2)^n(1+r_3)^n$ 。

假设初始安装调试成本为 20 万元，人力成本年增长率为 3%，辅助材料价格年增长率为 2%，则第 2 年的安装调试成本约为 22.12 万元。

③运营维护成本动态估算：运营维护成本包含日常巡检、设备维修及零部件更换等费用，设初始日常巡检成本为 M_{01} ，年增长率为 r_5 ，初始设备维修成本为 M_{02} ，设备故障率为 P 每次维修成本增长率为 r_6 ，初始零部件更换成本为 M_{03} ，年增长率为 r_7 。则第 n 年的设备采购成本 M_n 计算公式为： $M_n = M_{01}(1+r_5)^n + M_{02}(1+r_6)^n + M_{03}(1+r_7)^n$

设初始日常巡检成本为 10 万元，年增长率为 4%，初始设备维修成本为 5 万元，设备故障率为 0.1，每次维修成本增长率约 5%，初始零部件更换成本 3 万元，年增长率约 3%，则第 3 年运营维护成本约 13.52 万元。

2.2.3.2 效益模块构建

①直接经济效益动态计算：设初始钻井周期为 D_0 天，采用先进工艺技术后钻井周期缩短率为 s_1 天，采用先进工艺技术后钻井周期缩短率为 C_d 万元，因效率提升带来的年收益 R_{n1} 计算公式为： $R_{n1} = C_d \times D_0 \times s_1 \times (1+s_1)^{n-1}$ 。

当初始钻井周期为 30 天，采用智能压力监测与调控系统后钻井周期缩短率约 10%，每日钻井成本约 50 万元，则第 4 年因钻井效率提升推动的收益约为 181.5 万元^[4]。

设初始材料损耗成本为 L_0 万元，采用先进工艺技术后材料损耗降低率为 s_2 ，则第 n 年因材料损耗降低带来的收益 R_{n2} 计算公式为： $R_{n2} = L_0 \times s_2 \times (1+s_2)^{n-1}$ 。

当初始钻井液添加剂等材料损耗成本为 40 万元，采用智能压力监测与调控系统后材料损耗降低率为 15%，则第 3 年因材料损耗降低产生的收益约为 7.94 万元。

②安全效益动态评估：设初始井喷事故发生概率为 q_0 ，采用先进工艺技术后事故概率降低率为 s_3 ，一次井喷事故平均损失为 L_s 万元，则第 n 年因安全效益产生的收益 R_{n3} 计算公式为： $R_{n3} = L_s \times q_0 \times s_3 \times (1+s_3)^{n-1}$ 。

当初始井喷事故发生概率约 0.05，采用智能压力监测与自适应控制系统后事故概率降低率为 60%，一次井喷事故平均损失 5000 万元，则第 2 年因安全效益产生的收益约为 240 万元。

3 优化策略创新探索

3.1 技术集成与定制化方案开发

针对各异地质状况及钻井实际需求，组建专业技术团队，将智能压力监测技术、采用高效井控装备新

材料技术以及一体化钻井液井控技术予以融合。以浅层气富集区域为例，将智能压力监测系统的精准测量功能与适配浅层地质的快速响应防喷装备整合，构建专属技术组合。同时，在开发定制化方案期间，详细收集油井深度、地层压力、周边环境等数据，根据此类数据，定制钻井液配方。如在高温高压地层，研发具备耐高温、高稳定性的钻井液体系，同时匹配相应井控设备参数与操作流程，为每口井打造契合自身条件的最优井控方案，进而提升井控成效与作业效率^[5]。

3.2 全生命周期成本管理策略

规划设计环节，需全面考量地质条件、井深等关键因素，审慎开展设备选型工作，如面对复杂地层，优先选用可靠性高、维护成本较低的智能压力监测与调控系统。虽此类系统初期采购成本较高，但从长远视角而言，其能够有效降低设备故障维修频次以及因故障导致的停产损失。

①采购建设阶段，应积极与优质供应商构建长期合作关系，通过批量采购设备与材料，获取价格优惠，切实降低采购成本，如集中团购新型复合材料防喷器，借此享受可观的价格折扣。②运营维护阶段，制定严谨的设备巡检计划，定期对智能传感器进行校准，及时更替老化零部件，以此降低设备突发故障的概率，进而减少维修成本支出。③退役处置阶段，科学合理评估设备剩余价值，针对具备回收利用价值的材料与零部件妥善并加以回收利用，有效降低处置成本。

4 结束语

综上所述，针对石油钻井井控先进工艺技术开展成本效益分析至关重要，深入研究表明，尽管先进技术在前期需较高投入，但其在提升钻井效率、确保作业安全、降低环境风险等层面，所产生的效益颇为显著。借助实施协同技术创新、全生命周期成本管理等优化策略，能够切实平衡成本与效益关系。展望未来，持续推动技术集成以及定制化方案开发，为石油行业高效、安全、可持续发展注入强大动力。

参考文献：

- [1] 刘建华,肖健,王文明,等.石油钻井井控技术应用研究[J].石油化工建设,2023,45(4):152-153.
- [2] 张齐山.油气井井控技术进展与展望[J].西部探矿工程,2023,35(1):61-63.
- [3] 韦龙贵,张伟国,罗黎敏,等.数字化井控技术研究现状及发展趋势[J].钻采工艺,2024,47(4):86-93.
- [4] 任峰.石油钻井井控设备现状与改进策略[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(9):19-21.
- [5] 周苏吉.石油钻井井控设备的应用现状与改进对策探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(4):174-176.