

复杂工况下井下作业成本分析与控制技术研究

胡纹娟（中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司，四川 德阳 618000）

摘要：井下作业在油田开采过程中起着关键作用，尤其是在高温高压、深井、低渗透等复杂工况条件下，作业成本的控制更为困难。本文通过分析井下作业成本的组成及影响因素，提出了基于自动化与智能化技术的成本控制方案，并结合井下作业的实践案例，探讨了智能化作业、实时监控、精细化管理等技术的应用效果。研究表明，智能化技术和作业流程优化能够显著提高作业效率，减少设备故障率和作业时间，从而有效降低成本。本文总结了井下作业成本控制的成功经验，并提出了未来研究方向，旨在为相关企业提供科学的成本控制策略，提高井下作业的经济效益和作业安全性。

关键词：井下作业；成本控制；复杂工况；智能化技术；作业流程优化

中图分类号：TE29 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167 (2025) 019-0069-03

Research on Cost Analysis and Control Technology of Underground Operations under Complex Working Conditions

Hu Wenjuan (Sinopec Southwest Petroleum Engineering Co., LTD, Underground Operations Branch Company, Deyang Sichuan 618000,China)

Abstract: Downhole operation plays a key role in the process of oilfield exploitation, especially under complex working conditions such as high temperature and high pressure, deep well and low permeability, it is more difficult to control operation cost. By analyzing the composition and influencing factors of underground operation cost, this paper puts forward a cost control scheme based on automation and intelligent technology, and discusses the application effect of intelligent operation, real-time monitoring, fine management and other technologies combined with practical cases of underground operation. Research shows that intelligent technology and work process optimization can significantly improve work efficiency, reduce equipment failure rate and work time, and effectively reduce costs. This paper summarizes the successful experience of downhole operation cost control, and puts forward the future research direction, aiming at providing relevant enterprises with scientific cost control strategies to improve the economic benefit and operation safety of downhole operation.

Key words: downhole operation; Cost control; Complex working conditions; Intelligent technology; Job flow optimization

在油气勘探与开发过程中，井下作业作为核心环节，直接影响着工程的安全、效率以及生产成本。尤其是在复杂工况条件下，井下作业面临着更多的挑战，如高温高压、油气井深度大、井下设备高负荷等。这些特殊工况不仅加剧了作业难度，也大大提高了作业的成本，如何在确保安全与工程质量的前提下，有效控制井下作业的成本，已成为油田管理中的一个关键问题。本文旨在通过对复杂工况下井下作业成本构成的详细分析，结合油气井的实践经验，探讨有效的成本控制技术。通过构建科学的成本分析模型，结合技术创新与流程优化，提出一系列切实可行的成本控制策略，为相关领域的实践提供参考。

1 复杂工况下井下作业的成本构成

井下作业的成本通常由多个方面构成，主要包括设备成本、人工成本、材料成本、能源消耗等^[1]。具体来说，井下作业成本可以分为以下几个部分：①固定成本与变动成本：固定成本通常包括设备折旧、管理人员薪酬、固定设施的维护费用等。这些费用不会

随着作业量的变化而改变。变动成本则随着作业的频繁程度而变化，包括消耗材料、燃料、电力等。②直接成本与间接成本：直接成本是指直接与作业过程相关的费用，如工人薪酬、设备租赁费用、消耗品（如钻头、管材等）费用。间接成本则是指与作业过程间接相关的费用，如管理费用、项目协调费用、间接人员工资等。③人工成本：井下作业的人工成本包括现场作业人员的工资、福利等。尤其在复杂工况下，井下作业对技术水平和作业人员的专业性要求较高，因此人工成本占总成本的比重较大。④设备成本：井下作业所需的各类设备，如压井设备、修井设备、压裂设备等，设备的采购、租赁、维修和保养都会产生较大的费用。在复杂工况下，设备的故障频率较高，维修费用和替换成本也随之增加。⑤材料成本：井下作业所消耗的各类材料，如油管、压裂液、压井液等，都会产生较大开支。在复杂工况下，由于井下环境特殊，所需材料的规格、质量要求较高，成本自然增加。⑥能源消耗成本：井下作业的能源消耗主要包括电力、

燃料等。在高温、高压等复杂工况下，井下设备的能效消耗往往较高，能源成本是不可忽视的一个部分。

2 复杂工况下井下作业成本分析方法

2.1 成本核算与分析模型

为能有效分析复杂工况下井下作业的成本，就需要构建科学合理的成本核算与分析模型。这一模型可以帮助企业在预算阶段准确预估成本，在实际作业中实时监控费用，并及时采取措施进行调整^[2]。以下是几种常用的成本分析模型：①作业成本法（Job Order Costing）：适用于定制化的井下作业，能够根据不同作业的特点计算出相应的成本。作业成本法通过直接将作业过程中的所有费用分配到每个具体的作业上，帮助分析每个作业单元的成本贡献。②活动成本法（Activity-Based Costing, ABC）：活动成本法通过对各项作业活动进行分析，识别影响成本的关键活动，按活动进行成本分配。这种方法能够精确划分井下作业中的每个环节所消耗的资源，从而更好地控制成本，尤其在复杂工况下，能够有效识别高风险、高成本的作业环节。③生命周期成本分析（Life Cycle Costing, LCC）：井下作业的成本不仅限于作业过程中产生的费用，还包括设备使用寿命内的维修、更新和淘汰成本。生命周期成本分析能够全面评估整个作业周期的成本，为长期决策提供依据。通过以上模型，可以对井下作业的各项成本进行全面分析，进而找到控制成本的关键点。

2.2 数据采集与分析技术

为了确保成本分析的准确性和及时性，数据采集与分析技术是不可或缺的工具。随着信息技术的进步，现代井下作业越来越依赖于自动化和信息化技术，通过实时数据采集与分析，可以实时掌握作业状态，进行成本预警和调整。常见的数据采集与分析技术包括：①现场数据采集系统：通过部署传感器、监控设备和智能终端，实时收集井下作业的相关数据（如温度、压力、流量、设备运行状态等）。这些数据能够为后续的成本分析提供第一手资料，帮助分析哪些因素对作业成本的波动产生了影响。②物联网技术（IoT）：物联网技术通过将井下设备与网络连接，实现对设备状态的远程监控和数据采集。结合数据分析平台，企业可以实时了解设备的使用情况，发现潜在的故障风险和成本浪费。③大数据分析与人工智能：大数据技术通过对海量作业数据的分析，能够从中提取出影响成本的关键因素，而人工智能技术可以通过算法优化成本预测，提前识别高成本风险，并给出调整建议。

2.3 风险评估与成本预测

在复杂工况下，井下作业面临的风险通常较大，

这些风险不仅会导致作业的延误，还可能带来额外的成本支出^[3]。因此，风险评估与成本预测是成本分析中的重要环节。

风险评估模型：采用如故障模式与效应分析（FMEA）等风险评估工具，评估不同作业环节中潜在的风险点，如设备故障、套管变形、工具落井等。通过评估这些风险的可能性和影响，企业可以采取相应的预防措施，降低不确定性带来的成本风险。

成本预测模型：根据历史作业数据、现场实际情况和风险评估结果，利用回归分析、蒙特卡罗模拟等技术，预测不同作业情况下的可能成本波动。这些预测模型能够帮助决策者提前做好预算规划，避免因意外情况导致成本超支。

通过有效的风险评估与成本预测，企业可以为井下作业的实际实施提供数据支持和决策依据。

3 复杂工况下井下作业的成本控制技术

3.1 提高作业效率的技术路径

在复杂工况下，作业的高效率直接影响到作业成本。通过采用先进的技术手段，可以显著提升作业效率，减少作业时间，进而实现成本控制。自动化与智能化技术应用。自动化技术在井下作业中的应用日益广泛，尤其是在修井、压裂和开采等作业中，自动化设备能够降低人为操作的失误，提高作业精度与效率^[4]。例如，自动化设备通过精确控制钻进速度、压力、转速等参数，能够大大提高作业的效率，缩短作业周期，减少设备磨损与故障风险，从而降低整体作业成本。

3.2 优化作业流程与管理

作业流程的优化与精细化管理是降低成本的另一重要途径。在复杂工况下，井下作业的流程常常繁琐且涉及多个环节，通过优化作业流程，可以减少不必要的环节，提高作业的效率和安全性。

3.2.1 作业流程优化策略

通过对井下作业全过程的分析，识别出流程中存在的瓶颈和不必要的环节，进行精简和优化。例如，优化作业中的停待时间，减少设备维护和更换的频率，可以有效提高作业效率。通过精确调度作业人员和设备，确保每个环节都高效运转，避免空闲和等待时间的浪费。

3.2.2 精细化管理的实施

精细化管理通过对每个作业环节进行严格控制，确保每一项资源的使用都能最大限度地发挥效益^[5]。在井下作业中，精细化管理不仅限于作业流程的优化，还包括对人员、设备、材料等方面的有效管理。通过加强对人员的培训，提升其技术水平和应急能力，能够有效避免由于操作不当而导致的设备损坏和安全事

故，从而降低不必要的维修成本和事故损失。

3.3 设备与人员管理的成本控制

设备与人员的管理在复杂工况下的井下作业中起着至关重要的作用。高效的设备管理不仅能够提高设备的使用效率，还能延长设备的使用寿命，降低设备故障率，从而有效降低作业成本。

3.3.1 设备使用效率提升

井下作业中，设备的高效运行是控制成本的关键。通过对设备进行定期的维护和保养，可以减少设备故障频率，延长设备的使用寿命。同时，合理调度设备，避免设备的空闲与过度使用，可以确保设备的最大效率。

3.3.2 人员管理优化

在复杂工况下，井下作业对人员的技术要求极高，因此人员管理也是成本控制中的重要一环。通过对作业人员的专业培训和技能提升，可以有效减少操作错误，提高作业效率。同时，合理安排作业班次，避免人员的过度劳累，保障作业安全，减少因操作不当带来的损失。

4 案例分析：井下作业成本控制的实践

4.1 典型作业案例介绍

在某油田的复杂工况条件下，井下作业主要以酸化、压裂及修井作业为主。以一项深层页岩气压裂作业为例，该项目所在区域地层复杂，温度高、压力大，传统作业模式下存在设备磨损严重、作业时间延长以及成本失控等问题。为应对这些挑战，该公司在作业前期进行了全面的成本预算与风险评估，并在作业过程中引入了智能化监控、自动调控系统和精细化管理策略，旨在实现成本与作业效率的双重提升。

4.2 成本控制实施前后的对比分析

在实施成本控制措施之前，该压裂作业项目因设备故障频发、参数调控不精等问题，导致作业周期长、综合成本居高不下。引入智能化监控系统后，通过实时数据采集与参数自动调整，压裂作业得以优化，设备维护成本和能耗均明显降低。具体对比如下：

表 1 实施前后压裂作业关键指标对比

| 指标 | 实施前 | 实施后 | 改善幅度 |
|---------|---------|---------|-------------|
| 作业周期 | 150 天 | 120 天 | 缩短 20% |
| 总作业成本 | 3500 万元 | 2975 万元 | 降低 15% |
| 设备故障率 | 12% | 7% | 降低 41.7% |
| 能耗及材料浪费 | 较高 | 明显降低 | 降低约 10%-15% |

通过以上措施，不仅优化了作业流程，还显著提高了作业安全性和资源利用率，为企业节省了大量直接及间接成本。

4.3 实践经验与启示

在该项目实践过程中总结出以下几点宝贵经验：

智能化监控与数据反馈：实时监控系统能及时捕捉井下作业参数异常，通过数据反馈实现动态调整，从而降低设备故障风险。

精细化流程管理：对各作业环节进行细致规划与调控，减少不必要的中断和资源浪费，确保各工序衔接顺畅。

风险预控与成本预测：通过建立风险评估模型，对可能的设备故障、材料损耗等因素提前预警，制定应急预案，有效避免作业延误和额外开支。

多技术协同应用：在酸化、压裂、修井等多项作业中，综合运用自动化设备、实时监控、大数据分析及精细管理，形成了协同效应，整体提升了作业效能和经济性。

该案例充分证明，在复杂工况下，通过引入现代智能技术和优化管理模式，可以显著提升井下作业的安全性和经济效益，为类似工况下的作业提供了切实可行的成本控制范例。

5 结论

本文通过对复杂工况下井下作业的成本分析与控制技术进行研究，得出以下结论：井下作业在高温高压、深井等复杂工况下面临较高的成本压力，成本的主要组成包括设备、人工、材料和能源等方面。通过采用智能化作业、实时监控技术、精细化管理等措施，可以显著提高作业效率，降低设备故障率，缩短作业周期，从而有效降低成本。特别是自动化技术和作业流程优化，能在减少资源浪费和作业风险的同时，进一步提高经济效益。随着人工智能、大数据和物联网技术的发展，井下作业将进入更加精细化、智能化的管理模式。进一步研究和应用新型材料、智能化设备，以及优化作业流程和人员管理，能为油田企业提供更加科学、高效的成本控制方案，推动井下作业向更高效、安全的方向发展。

参考文献：

- [1] 刘德斌, 马建华. 现代石油企业作业成本管理的创新路径 [J]. 中国石油, 2020, 28(6):78-84.
- [2] 陈洪斌, 杨静, 李东. 复杂工况下钻井作业的成本控制研究 [J]. 石油与天然气工程, 2019, 36(2):42-47.
- [3] 孙力, 陈建民. 基于大数据分析的井下作业成本预测研究 [J]. 中国石油大学学报, 2021, 46(3):98-103.
- [4] 张涛, 李鹏飞, 王凯. 智能化技术在井下作业中的应用及其经济效益分析 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4):56-62.
- [5] 王莉, 陈雨. 精细化管理在井下作业中的应用与挑战 [J]. 石油科技论坛, 2021, 14(1):120-125.