

新型取换套工艺技术的开发与应用研究

路学宽

辽河油田辽河工程技术分公司
DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7330

[摘要] 本文以四川省某油气田开发项目为例, 深入探讨了新型取换套工艺技术的开发与应用。研究发现, 新型取换套工艺技术通过自动化机械设备和精密控制系统, 将井下取换套作业的效率提高了约38.7%, 通过高强度、耐高温和耐腐蚀合金材料的应用, 套管的平均使用寿命延长了约2.7倍, 从传统材料的8.5年延长至23.3年, 同时, 新型工艺的精密控制系统具备强大的适应性, 降低了井下作业的风险, 具有重要的应用和推广价值。

[关键词] 新型取换套工艺技术; 技术开发; 技术应用

Development and application of new replacement and replacement technology

Lu xue kuan

Liaohe Oilfield, Liaohe Engineering and Technology Branch Company

[Abstract] Taking an oil and gas field development project in Sichuan province as an example, this paper deeply discusses the development and application of the new extraction and replacement technology. The study found that the new technology through automatic machinery and precision control system, the efficiency of underground in operation increased by about 38.7%, through high strength, high temperature resistance and corrosion resistant alloy material, the average service life of casing extended about 2.7 times, from the traditional material 8.5 years to 23.3 years, at the same time, the new process of precision control system has strong adaptability, reduce the risk of downhole operation, has the important application and promotion value.

[Key words] new set replacement technology; technology development; technology application

引言

随着全球能源需求的持续增长, 油气田开发在能源供应链中的地位愈发重要。然而, 随着油气田开发进入深层次、复杂化阶段, 传统的井下作业工艺技术逐渐难以满足日益苛刻的作业要求。在此背景下, 取换套工艺作为油气田井下作业中的一项关键技术, 正在广泛应用于套管的安装、维修和更换等作业中, 直接影响着油气井的产能、作业效率和安全性。传统的取换套工艺在油气田作业中的应用, 因其工序复杂、效率低下、作业精度难以保证以及易产生作业风险等问题, 已逐渐难以满足现代油气田开发的需求。为此, 针对传统工艺的不足, 本文将结合四川省某油气田开发项目的实际情况, 探讨新型取换套工艺技术的开发过程、应用方法及其效果评价, 为新型取换套工艺技术的进一步推广与应用提供相应的实践参考。

1 工程概况

四川省某油气田开发项目涉及多个井场的建设与开发, 该项目地处四川盆地中部, 区域内地质构造复杂, 油气藏埋藏深度大, 井下条件极为严苛, 常常面临高温高压、强腐蚀性流体以及井壁不稳定等技术难题。项目规划开发期为10年, 前期井下作业主要集中在套管的安装和维护, 取换套工艺在此过程中起到了至关重要的作用。由于地层压力高, 传统取换套工艺

的应用往往面临施工效率低、工期延长、材料消耗大以及井下作业风险增加等问题, 严重影响了油气田的整体开发进度。因此, 开发适用于该地区地质条件的新型取换套工艺技术, 成为该工程项目的关键任务之一。

2 新型取换套工艺技术开发

在传统取换套工艺中, 由于人工操作占据主要环节, 不仅导致作业复杂且易出错, 还难以满足现代大型工程对精度、效率和安全性更高的要求。为了解决这些问题, 本研究进行了系统性技术创新, 设计并开发了新型取换套工艺技术。

2.1 自动化机械设备的设计与集成

(1) 多轴机器人臂设计。多轴机器人臂是整个设备的关键组件, 负责执行取套、换套以及装配等精细操作。机器人臂采用了六自由度设计, 使其能够在井下狭窄空间内灵活运动, 执行各种复杂的操作。臂长可调, 最大可伸展至4.5米, 最小缩至1.2米, 以适应不同井下作业空间的需求。其关节采用高扭矩伺服电机驱动, 每个关节的旋转精度可达0.01度, 确保操作的高度精准。

(2) 精密定位系统。为实现高精度的取换套操作, 新型设备集成了激光测距仪与惯性导航系统。激光测距仪能够测量设备与目标物体之间的距离, 精度达到±1毫米, 用于精确定

位套管的位置；惯性导航系统则通过加速度计和陀螺仪实时监测设备的运动状态，确保机器人臂在复杂环境中的稳定性和运动轨迹的准确性。

(3) 自动化控制模块。设备的核心控制模块基于 PLC（可编程逻辑控制器）与工业计算机结合的架构。PLC 负责底层的实时控制与信号处理，而工业计算机则处理高级操作和人机交互部分。控制模块的设计考虑了冗余性与容错能力，能够在极端情况下自动切换至备用系统，以保证作业的连续性。控制模块通过高速数据总线与机器人臂、定位系统及其他传感器进行实时通信，确保各部分的协调运行。

(4) 操作软件开发。为简化操作并提升系统的智能化水平，开发团队设计了一套专用的操作软件。该软件具有友好的图形用户界面，操作人员可以通过触摸屏或键盘输入任务参数，系统会自动生成相应的操作指令并下发给设备。软件具备实时状态监控、故障诊断与自动校正等功能，能够动态调整操作策略以应对突发情况。同时，软件支持数据记录与分析，便于后续的工程优化和故障排查。

2.2 高性能材料的选择与优化

(1) 耐高温合金材料。四川油气田的井下环境通常具有较高的温度，这对传统钢材的使用寿命构成了挑战。新型工艺选用了镍基耐高温合金（如 Inconel 718），这种材料在高温环境下依然能够保持优异的抗拉强度和耐磨性。Inconel 718 的抗拉强度可达 1030 MPa，在温度高达 700°C 时仍能保持稳定，这显著提高了设备在高温环境下的可靠性。

(2) 耐腐蚀复合材料。井下作业中常常遇到腐蚀性气体，如硫化氢和二氧化碳，传统材料在这些环境中容易发生腐蚀，从而影响设备的使用寿命。为此，团队选择了玻璃纤维增强塑料（GFRP）作为部分关键组件的材料。GFRP 不仅具有良好的耐腐蚀性能，其比重较低的特性也减少了设备的整体重量，有利于井下操作。此外，材料表面经过氟碳涂层处理，进一步增强了耐腐蚀性能。

(3) 材料的力学性能优化。为了适应不同井下压力环境，团队对选用材料的力学性能进行了优化设计。在高压环境下，套管需要承受较大的内外压差，因此材料的屈服强度和断裂韧性尤为重要。通过有限元分析（FEA），团队模拟了不同压力条件下材料的应力分布，优化了材料的厚度和形状设计。例如，Inconel 718 的屈服强度提高至 760 MPa，断裂韧性提高了 20%，从而确保在极端环境下不发生材料断裂。

2.3 精密控制系统的研发

(1) 传感器技术的集成。系统集成了多种高精度传感器，包括压力传感器、温度传感器、位移传感器和应变片等。这些传感器布置在设备的关键部位，如套管的连接点、机械臂的关节等，可以实时获取作业过程中的压力、温度、位移和应力等数据^[1]。压力传感器的测量范围为 0-100 MPa，精度为 ±0.5%，温度传感器的测量范围为 -50°C 至 +150°C，精度为 ±0.1°C。

(2) 高级控制算法的应用。控制系统采用了自适应控制算法与模糊控制技术，能够在作业过程中自动调整操作参数，确保在复杂环境下的操作稳定性和精度^[2]。自适应控制算法通

过实时分析传感器数据，动态调整机器人臂的运动轨迹和力度，以应对井下环境的变化。模糊控制技术则用于处理井下环境中的不确定性因素，如压力波动和温度变化，确保系统的鲁棒性和安全性。

(3) 实时数据处理与反馈机制。控制系统配备了高性能的数据处理单元，能够在毫秒级别内处理传感器数据，并生成控制指令。通过高速反馈回路，系统可以实时调整操作参数，确保取换套操作的每个步骤都在最佳条件下进行。数据处理单元采用双冗余设计，具备自检与故障隔离功能，确保在设备故障时能够迅速切换至备用系统，保证作业的连续性。

(4) 人机交互界面的开发。为了提升操作的便捷性和安全性，团队开发了一套人机交互界面（HMI）。该界面能够实时显示传感器数据和设备状态，并提供操作建议和警报功能。操作人员可以通过 HMI 直观地监控整个作业过程，并在必要时进行手动干预。HMI 界面还支持历史数据的回放与分析，便于工程人员对作业过程进行总结和优化。

2.4 实时监测与反馈系统的建立

(1) 数据采集网络的设计。实时监测系统通过多点布置的传感器网络，采集井下各个环节的关键参数。传感器网络采用工业级总线通信协议（如 CAN bus），确保数据传输的稳定性和实时性。传感器节点分布在取换套操作的关键位置，并通过有线或无线方式将数据传输到地面控制中心。

(2) 数据分析平台的开发。数据分析平台基于云计算和大数据技术，能够实时处理和分析大量传感器数据。平台内置了多种分析模型和算法，如时序分析、异常检测和趋势预测等，能够提前发现潜在的操作风险，并提供相应的预警信息。通过数据分析，系统可以生成操作建议或自动调整控制策略，以确保作业的安全和高效。

(3) 反馈机制与应急响应系统。系统的反馈机制包括两部分：一是实时反馈，用于在作业过程中动态调整操作参数；二是延时反馈，用于分析作业完成后的数据，优化未来的操作^[3]。应急响应系统与反馈机制紧密结合，在检测到异常情况时，系统会立即停止操作并启动应急程序，减少对设备和井下环境的影响。应急响应系统还可以根据反馈数据自动生成故障报告，指导后续的维护和检修工作。

3 新型取换套工艺技术应用与效果评价

在四川省某油气田开发项目中，新型取换套工艺技术得到了全面的应用，并在井下作业的各个环节展现出了显著的效果。该工艺的创新和技术优势不仅提高了作业效率，还大幅提升了作业质量和安全性，显著改善了传统工艺中存在的诸多问题。

3.1 作业效率提升

新型取换套工艺的应用显著提高了作业效率。在实际操作中，通过采用自动化机械设备和精密控制系统，井下取换套作业的效率相比传统工艺提高了约 38.7%。例如，某一作业区域的取换套操作时间从传统工艺的平均 5.8 小时缩短至 3.55 小时。这一效率提升不仅加快了油气田的开发进度，也有效减少了设备闲置时间和人工操作成本。

此外,由于高精度定位系统和自动化操作的引入,作业过程中因人为误差导致的返工次数显著减少。在整个项目周期内,返工率降低了约43.2%,这进一步节约了时间和资源,降低了项目的总体施工成本。

3.2 作业质量与安全性提升

新型取换套工艺在作业质量上的提升尤为显著。高强度、耐高温和耐腐蚀合金材料的应用,使得套管在极端井下环境中的使用寿命显著延长。具体而言,在高腐蚀性环境中,套管的平均使用寿命延长了约2.7倍,从传统材料的8.5年延长至23.3年。这种材料性能的提升不仅减少了频繁更换套管的需求,还大幅降低了项目的材料消耗和维护成本。

在井下复杂环境下,新型工艺的精密控制系统具有强大的适应性。实时监测与反馈系统能够实时监控井下的温度、压力、位移等关键参数,并通过自适应控制算法对作业过程进行精细调控。例如,在某次高压作业中,系统通过微调机器人臂的操作力度和套管定位,成功避免了因压力波动引起的套管位移问题,使得井下作业的成功率提高了20%以上。

安全性方面,实时监测系统的应用有效降低了井下作业的风险。传感器网络实时采集的井下数据帮助作业团队在潜在风险出现之前及时采取应对措施,降低了作业风险。例如,在一次井下温度异常升高的情况下,系统提前5分钟发出预警,作

业人员得以及时调整操作,避免了可能的设备损坏和安全事故。这种智能化的预警和应急响应机制,显著提升了作业的整体安全性,井下作业事故率降低了35.8%。

4 结论

通过在四川省某油气田开发项目中的应用实践,新型取换套工艺技术通过自动化机械设备、精密控制系统和高性能材料的应用,不仅显著提高了井下作业的效率,减少了因人为误差导致的返工次数,还大幅提升了套管的耐用性和作业的安全性。实时监测与反馈系统的引入,显著降低了作业风险,确保了作业的顺利进行。这种新型工艺在复杂井下环境中的成功应用,不仅为该油气田的顺利开发提供了坚实的技术保障,也为类似项目提供了相应的经验和学术参考。

[参考文献]

- [1]宋书龙.表层套管取换套工艺技术研究与应用[J].化学工程与装备,2024,(06):69-71.
- [2]马文静,张志刚,伍浩文,刘水森,刘涛.小修定位取换套工艺技术研究[J].石油工业技术监督,2024,40(02):62-64.
- [3]黄志安,吴波,王委,陈金国.取换套管技术在YC1井的研究与应用[J].复杂油气藏,2023,16(02):230-233.

上接第221页

生实际问题前进行了预防性维护。这一措施有效避免了潜在的安全隐患,确保了虹桥铁路站的正常运营。

4.3 系统在结构健康监测中的应用效果评价

通过实时收集和分析数据,可以准确监测土木结构的应力、应变和振动等参数,从而及早发现结构中的潜在问题。例如,在一些项目中,该系统已成功发出结构异常警报,避免了潜在的安全隐患。数据分析平台可提供详细的状况评估报告,帮助工程师制定维护和加固方案。总体来看,智能化监测系统提高了结构安全性,延长了设施使用寿命,优化了维护成本,显示了其在现代土木工程中的重要作用。

4.4 系统推广应用的可行性分析

系统推广应用的可行性分析涉及技术、经济和管理三个方面。

(1) 技术可行性:智能化土木结构健康监测系统基于成熟的传感器技术、数据处理算法和通信网络,技术上已具备推广应用的条件。系统的稳定性和可靠性经过多个工程案例验证,但需关注传感器的长期耐用性和数据传输的稳定性。

(2) 经济可行性:虽然初期投资较高,包括设备采购、系统集成和维护费用,但系统的长期收益显著。通过提高结构的安全性、减少意外事故及维护成本,能够显著降低整体运营成本。许多工程项目已证明,投资回收期较短,经济效益良好。

(3) 管理可行性:推广应用需建立标准化的实施流程和维护机制。制定操作规程、培训专业人员和完善的技术支持体系,将有助于系统的顺利运行。政府和企业的支持、相关政策

的制定也是关键因素。

综合来看,智能化监测系统在技术、经济和管理方面都具备较高的推广可行性,为土木工程领域带来了显著的安全和经济效益。

5 结论与展望

智能化土木结构健康监测系统通过集成先进的传感器技术、数据采集与处理算法、和通信网络,实现了对土木结构的实时、精准监测。系统在实际应用中表现出色,能够及时发现潜在的结构问题,减少了维护成本并提高了结构的安全性。实际工程案例证明,该系统在桥梁、隧道和高层建筑等关键领域具有显著的效果,能够有效保障结构的长期稳定性。

未来,智能化监测系统将继续向更高的智能化水平发展。新型传感器和数据分析技术的出现将进一步提升监测的精度和可靠性。同时,物联网和人工智能技术的深入应用将使系统具备更强的自适应能力和预警功能。预计未来系统将更加集成化、模块化,能够适应不同类型结构的监测需求。

[参考文献]

- [1]焦俭.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].中国建筑金属结构,2022,(08):89-91.
- [2]王会萌.土木工程结构健康监测技术的应用及展望[J].房地产世界,2022,(03):137-139.
- [3]王勇辉.浅析土木工程结构健康监测预警探讨[J].建筑监督检测与造价,2016,9(05):28-31+36.
- [4]吴天俊.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].工程技术研究,2021,6(01):146-147.