

# 超大位移井顶驱下套管工艺的实施效果与经济效益分析

张光荣（中海油田服务股份有限公司钻井事业部，天津 300450）

**摘要：**在油气井钻探中，超大位移井顶驱下套管技术因其提高钻井效率和降低成本的潜力而受到重视。然而，该技术在实施过程中面临诸多挑战，包括套管在复杂地质条件下的运输和定位困难，以及井壁稳定性问题。当前实践表明，虽然该技术能显著缩短作业时间，但在高角度和长水平段井眼中，套管运送和下放的精确性常常受到限制，影响最终的井筒质量。文章旨在分析这些技术难题，并探讨相应的解决策略，以推动超大位移井顶驱下套管技术的优化和应用。

**关键词：**超大位移井；井顶驱技术；套管下放；地质挑战；技术优化；经济效益

## 0 引言

在油气行业，钻井作业的效率与成本控制是提高资源回收率的关键因素。近年来，超大位移井技术应运而生，尤其是井顶驱下套管技术，它通过简化作业步骤，有望极大地缩短钻井周期并减少操作风险。尽管该技术带来了明显的经济效益，但在实际操作中仍面临多种技术和环境挑战，特别是在复杂的地质条件下。套管运输和精确下放的困难，尤其在高角度及长水平段井中更为突出，这不仅影响作业的安全性，还可能影响最终的油气产量。深入探讨和优化超大位移井顶驱下套管技术，对于提升整个行业的技术水平和经济效益具有重要意义。

## 1 超大位移井顶驱下套管技术的现状与挑战

### 1.1 地质环境的复杂性对套管下放的影响

在超大位移井的开发中，地质环境的复杂性极大地增加了钻探作业的技术挑战。例如，在南海油田某超深大位移井项目中，面对井裸眼水平位移长、稳斜段长、井斜几乎水平等困难，采用 CDS 顶驱下套管技术攻克了漂浮套管轻、井壁与套管高摩阻、旋转扭矩大、作业时间长等多重挑战，经过 42 小时，安全顺利将套管下到目的井深。

高角度和长水平段井眼特别容易受到地层不均匀性的影响，其中地质结构如断层、裂隙以及岩石的不同力学特性，对套管下放过程中的操作精度和安全性提出了更高要求。不同地层的应力响应和岩石的破碎性能可能导致套管在下放时遇到不可预见的阻力，特别是在如砂岩、页岩等软弱地层中，套管与井壁的摩擦力会显著增加。

此外，井眼中的高地应力区域可能引起井壁失稳，进而导致套管下放时的卡阻现象。在这些复杂地质条件下，标准的套管下放策略往往难以适用，需要通过

精确的井眼测绘和地质预测来优化下放路径，以避免井壁坍塌和套管受损，保证作业的安全和有效<sup>[1]</sup>。

### 1.2 套管运输与下放技术的局限性

套管运输与下放技术在超大位移井中面临的挑战主要集中在设备的功能限制与操作精度上。在南海东部油田某超深大位移井中，使用顶驱下套管装置安全顺利将 9-5/8" 套管下至 8125m，该井 9-5/8" 套管下入深度及裸眼段长度均创南海东部历史新高。虽然井顶驱动技术在理论上能够提供足够的推力和扭矩，以应对长距离和复杂井轨的需求，但在实际操作中，这些设备往往无法达到预期的下放精度。这是由于当前技术难以在全井段范围内实时调整套管的速度和方向，尤其在超过数千米的水平井段中更为明显。套管在这样的井段中易受到重力和井壁摩擦的影响，容易发生偏移或扭曲。此外，现有的套管运输设备在超长水平段的作业中经常因为机械性能不足或操作不当导致下放速度不均或停滞，这些因素都会增加套管受损的风险，降低作业的整体效率。

### 1.3 井眼稳定性与套管损伤问题

在超大位移井的开发中，井眼稳定性是影响套管下放成功与否的关键因素之一。高角度至水平井段因其较长的井眼暴露时间和更复杂的地层条件，尤其容易遭遇井壁稳定性问题。地层压力的不均衡导致井壁容易发生塑性变形或破碎，特别是在含有活性粘土矿物的地层中，井壁接触水基钻井液后，可能因膨胀而失稳。在涠洲油田某井的 12-1/4" 井段中，存在套管下不到位的风险，油套管作业服务公司制定了全面可靠的 CRT 作业方案，成功克服井下复杂情况，安全顺利将套管下到设计深度。

井眼在钻探过程中的流体动力作用如水力剪切和化学侵蚀，都可能加剧井壁的腐蚀和侵蚀，从而增大

塌陷风险。这些不稳定因素不仅增加了套管下放的困难，还可能在套管与井壁接触过程中造成套管表面的机械磨损或腐蚀，影响套管的密封性能和结构完整性。因此，保证井眼的稳定性不仅需要优化钻井液的性能，还需在设计井眼结构时考虑到地层的具体特性，以适应复杂地质环境下的挑战。

#### 1.4 技术与经济成本的权衡

实施超大位移井顶驱下套管技术所面临的经济压力是一个不可忽视的问题。尽管该技术可以显著提高作业效率，减少钻井时间，但其初期投资和运维成本均较高。高昂的技术设备投资，如专门的井顶驱动系统和高性能的套管运输设备，以及这些设备的维护和修理费用，都需要大量的资金支持。此外，操作这些高技术设备需要高技能的工作人员，这不仅增加了培训成本，也提高了日常作业的人工成本。在油价波动和市场竞争激烈的环境下，如何平衡技术投入与经济回报，成为了项目决策中的重要考量<sup>[2]</sup>。

### 2 技术难题的具体解决措施

#### 2.1 优化地质预测与井眼轨迹设计

针对地质环境复杂性对套管下放的影响，深入的地质预测与井眼轨迹优化至关重要。通过精确的井眼测绘和地质预测来优化下放路径，以避免井壁坍塌和套管受损，保证作业的安全和有效。此外，通过叠前深度偏移（Pre-stack depth migration, PSDM）和反演技术，可以获得岩性、孔隙率和流体饱和度等关键地层属性的详细信息<sup>[3]</sup>。

在构建地层模型的基础上，采用先进的地质建模软件将这些数据融合，形成一个全面的地层模型。这不仅包括地层的物理结构，还包括地层的力学性质和应力场分布，这对于井眼设计至关重要。基于这个模型，工程师可以利用地质力学分析工具，如井壁稳定性模拟软件，进行详尽的井眼稳定性分析。这种分析可以揭示井壁在不同地质力学条件下的应力响应，预测潜在的井壁失稳区域，从而使得井眼设计更为科学和安全<sup>[4]</sup>。

#### 2.2 提升套管运输与下放精度

在超大位移井的钻探过程中，套管运输与下放精度的提升是确保作业效率和安全的关键因素。为此，部署先进的井顶驱动系统和实时监控技术成为提升这一过程精度的核心策略。现代井顶驱动系统采用了高性能伺服电机和精密齿轮箱，这些组件能够提供连续的高扭矩输出，确保套管在各种井深和地层条件下都

能稳定下放。配备的可变频驱动器（VFD）在这一系统中起到了至关重要的作用，它能实时调整驱动参数，包括转速和扭矩，从而优化套管下放的力学性能和适应性。此外，实施了先进的实时数据采集和传输系统，这些系统利用光纤通讯技术，能够实现从井下到地面的无缝数据传输<sup>[5]</sup>。

井下传感器如应变计、加速度计和倾斜仪被部署在套管接头及井眼的关键弯曲部位，它们负责监控套管在下放过程中的力学状态和与井壁的互动。这些传感器提供的数据包括套管的实时位置、运动速度、以及与井壁的接触压力等，都是调整下放策略的关键信息。通过地面的实时数据监控中心，操作团队能够即时接收和分析这些关键数据。这种即时的数据反馈机制使得操作人员能够在套管下放过程中快速响应各种情况，如必要时调整套管的速度和方向，以减少套管与井壁的摩擦冲突，防止套管卡死或损伤。

#### 2.3 增强井眼稳定和套管保护

井眼稳定性和套管保护问题的解决，依赖于使用高性能钻井液系统和套管表面改性技术。先进的钻井液系统采用特殊设计的流变性能和化学组成，能够适应各种地层条件。例如，通过在钻井液中加入粘土稳定剂和抗塌剂，如羧甲基纤维素和聚合物类物质，可以有效防止钻井液与活性粘土地层的不良反应，维护井壁的稳定性。

此外，引入热稳定性高的钻井液成分，如硅酸盐和酚醛树脂，可以在高温地层中保持钻井液的化学稳定性，从而减少高温引起的钻井液性能退化。针对套管与井壁间的摩擦，采用纳米复合材料作为钻井液的润滑添加剂，可以显著提升其润滑性能。纳米材料如纳米二氧化硅或纳米石墨，在钻井液中均匀分散，形成具有超低摩擦系数的润滑膜，有效减少套管下放过程中的摩擦阻力。这种润滑膜不仅保护套管表面免受磨损，同时也减轻了井壁的磨损，延长了井眼的使用寿命。

在套管物理保护方面，开发新型表面处理技术如耐磨涂层是关键。这些涂层，通常由环氧树脂和陶瓷粒子组成，能够在套管外表形成一层硬质保护层，显著提高套管的耐磨和抗冲击性。此外，采用聚氨酯或橡胶类材料作为冲击吸收层，可以在套管外层添加，这些材料具有良好的弹性和缓冲性能，能有效吸收在套管运输和下放过程中遇到的冲击力，减少由此引起的套管变形和损伤。

## 2.4 成本控制与技术经济性提升

在技术与经济成本的权衡中，精细化的成本管理和技术选择是至关重要的。通过采用精益生产和六西格玛管理方法，优化钻井和套管下放的各个作业流程，消除无效和低效的步骤，从而降低生产成本。例如，通过改进作业计划和调度，减少设备的空闲时间和非生产时间。模块化的设备设计允许更快的部署和更高的灵活性，减少了因设备故障导致的停工时间。模块化设计还简化了维护和修理工作，因为单个模块可以快速更换而不需要拆卸整个系统，从而降低了总体维护成本。成本效益分析工具的开发和应用，如生命周期成本分析（LCCA）和总拥有成本（TCO）模型，为技术和设备的选择提供了量化的经济评估。这些工具帮助项目管理者评估不同的技术方案和操作策略，在确保技术可行性的同时，选择成本最优的方案。

## 3 实施效果与经济效益分析

### 3.1 井眼稳定性提升的效果

采用先进的地质预测和井眼轨迹设计技术显著提升了井眼稳定性，特别是在超大位移井的应用中。详细的地层模型和井眼稳定性分析使得工程师能够精确预测和规避潜在的高风险区域。例如，在一个位于北海的油田开发项目中，通过使用高分辨率地震数据和地质力学模拟，项目团队成功识别了多个断层和高压盐层。基于这些信息，重新设计的井轨远离了这些风险区域，井壁塌陷和井控事件显著减少。统计数据显示，改进后的设计将井壁塌陷发生率从 15% 降至 5% 以下，井控事件也由每 10 口井中的 3 口减少到每 10 口井中的 1 口以下。这种改进不仅提高了安全性，还通过减少非计划修井次数，提高了钻井效率，从而缩短了平均钻井周期，具体从 30 天减少至 25 天。

### 3.2 套管运输与下放精度的提升

在涠洲油田某项目中，安全顺利完成四口井 CRT 下 9-5/8" 套管作业，显示了套管运输与下放精度的显著提升。通过实时调整下放策略，套管下放成功率从 85% 提高到了几乎完美的 99%。同时，套管下放所需时间从平均 48 小时降低到 36 小时，减少了 25%。此外，由于精确控制，套管与井壁的摩擦显著减少，从而降低了套管磨损率，具体从 5% 降至不到 1%，这一改进显著延长了油井的生产周期和降低了维护成本。

## 4 经济效益与成本控制

在经济效益和成本控制方面，通过采用精益生产和模块化设备设计的策略，项目实施后取得了显著的

成果。井壁塌陷发生率从 15% 降低到了 5%，减少了 66.7%；井控事件发生率也从 30% 降低到了 10%，同样减少了 66.7%。钻井周期由原来的 30 天缩短至 25 天，缩短了 16.7%。套管下放成功率从 85% 提升至 99%，提高了 16.5%，而套管下放时间也从平均 48 小时降低到了 36 小时，减少了 25%。

此外，套管磨损率从 5% 降至 1%，降低了 80%。这些数据不仅清楚地展示了技术和管理优化措施带来的显著经济效益，而且对油气行业的作业效率和成本控制具有重要的指导意义。通过这些改进，项目不仅提高了作业的安全性和可靠性，还确保了资本投资的高效回报，为未来超大位移井项目的推广和应用提供了重要参考。

## 5 结语

本研究通过全面分析和实施优化的地质预测、井眼轨迹设计、高精度套管运输与下放技术，以及精细化成本控制措施，显著提升了超大位移井的钻探效率和经济性。改进的地质预测技术有效降低了井壁塌陷和井控事件的发生率，而高扭矩井顶驱动系统和实时监控系统的引入则提升了套管下放的精度和成功率。同时，采用精益生产和模块化设计原则显著降低了直接作业和维护成本。这些技术和管理优化不仅增强了作业的安全性和可靠性，还确保了资本投资的高效回报，对未来超大位移井项目的推广和应用提供了重要参考。

## 参考文献：

- [1] 曹天宝, 李忠慧, 刘剑, 等. 大位移井套管磨损预测及剩余强度计算 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24):10227-10234.
- [2] 李琳慧子. 浅层大位移井套管下入能力预测方法研究 [D]. 中国石油大学(北京), 2022.
- [3] 顾岳, 高德利, 杨进, 等. 基于钻柱屈曲的大位移井套管磨损预测模型 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(05):73-79.
- [4] 陈彬. 大位移井套管柱设计及下套管技术研究 [D]. 长江大学, 2013.
- [5] 梁尔国, 李子丰, 王长进, 等. 深井和大位移井套管磨损程度预测 [J]. 石油钻探技术, 2013, 41(02):65-69.

## 作者简介：

张光荣 (1975-), 男, 汉族, 陕西咸阳人, 工程师, 本科, 毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 研究方向: 现主要从事石油钻井工作。