

新一代旋转导向系统的研发进展与挑战

孙全华

四川天石和创科技有限公司 四川 成都 610000

摘要：旋转导向钻井技术是现代钻井技术的重要组成部分，其通过实时控制井下钻进方向，实现了对井眼轨迹的高精度控制，显著提高了钻井效率和安全性。近年来，随着油气田勘探开发向更复杂地质条件发展，对旋转导向系统的性能提出了更高要求。本文旨在探讨新一代旋转导向系统的研发进展，分析其面临的技术挑战，并提出相应的解决方案。

关键词：旋转导向系统；研发进展；挑战；解决建议

引言

旋转导向钻井技术自20世纪90年代以来得到了快速发展，已成为现代钻井技术的重要里程碑。该技术能够在钻柱旋转状态下完成导向功能，具有井眼轨迹控制精度高、钻井速度快、成本低等优势。然而，随着油气田勘探开发向更深、更复杂地质条件发展，传统旋转导向系统已难以满足实际需求，新一代旋转导向系统的研发成为必然趋势。

1 新一代旋转导向系统的研发进展

1.1 技术原理创新

新一代旋转导向系统在技术原理层面实现了跨越式的创新，这些创新不仅提升了系统的性能，还极大地拓宽了其应用范围。传统旋转导向系统主要依赖于推靠式或指向式导向机制，这些机制虽然在一定程度上能够满足钻井需求，但在面对复杂地质条件时，其控制精度和灵活性仍显不足。为此，新一代旋转导向系统引入了智能柔性导向技术，为钻井技术带来了革命性的变化。智能柔性导向技术的核心在于高精度传感器和微型液压控制单元的集成应用。高精度传感器能够实时监测钻头的姿态、位置以及周围地质环境的变化，为系统提供精确的数据支持。这些传感器不仅具有高度的灵敏度和准确性，还能够在极端环境下稳定工作，确保数据的可靠性和实时性。微型液压控制单元则是智能柔性导向技术的执行机构。它根据传感器提供的数据，通过精密的液压控制系统，实时调整钻头的姿态和钻进方向。这种调整是连续且平滑的，能够实现井眼轨迹的精确控制^[1]。与传统的机械式调整方式相比，微型液压控制单元具有更高的响应速度和更小的调整误差，从而提高了钻井的效率和成功率。智能柔性导向技术的引入，使得新一代旋转导向系统在面对复杂地质条件时，能够更加灵活地调整钻进方向，避免地层塌陷、卡钻等风险。同时，该技

术还提高了井眼轨迹控制的精度，使得钻井过程更加高效、可控。这些创新不仅提升了新一代旋转导向系统的性能，还为其在深海钻探、非常规油气资源开发等领域的应用奠定了坚实的基础。

1.2 系统性能提升

1.2.1 最大造斜率的飞跃

传统旋转导向系统的最大造斜率通常限制在6-8°/30米，这在面对需要大角度转向或穿越复杂地层时显得力不从心。而新一代旋转导向系统通过技术创新，最大造斜率已提升至15°/30米，甚至更高。这一提升意味着系统能够在更短的距离内实现更大的井眼轨迹变化，从而大幅减少了钻井时间和成本。对于深海钻探、页岩气开发等需要高精度、大角度转向的钻井作业来说，这一性能的提升无疑是一个巨大的福音。

1.2.2 工作稳定性与可靠性的增强

钻井作业往往面临极端的地质环境和恶劣的工作条件，这对旋转导向系统的稳定性和可靠性提出了极高的要求。新一代旋转导向系统在设计时充分考虑了这些因素，通过采用更先进的材料、更优化的结构设计和更严格的制造工艺，显著提高了系统的工作稳定性和可靠性。无论是在高温高压的深海环境，还是在地质复杂、易塌方的陆地钻井现场，新一代系统都能保持稳定的性能输出，确保钻井作业的顺利进行。

1.2.3 智能化控制算法的应用

新一代旋转导向系统还引入了先进的智能化控制算法，这些算法基于大数据分析和机器学习技术，能够实时分析钻井过程中的各种数据，并根据分析结果自动优化和调整钻井参数。例如，系统可以根据地层硬度的变化自动调整钻头的转速和推力，以避免过度磨损或卡钻；还可以根据井眼轨迹的偏差自动调整导向头的方向，确保钻井过程始终沿着预定的轨迹进行。这种智能

化的控制方式不仅提高了钻井效率，还降低了人为操作失误的风险，为钻井作业的安全性和经济性提供了有力保障。

1.3 应用范围拓展

1.3.1 特殊环境下的应用

深海钻井是油气勘探和开发的前沿阵地，也是技术挑战最为严峻的领域之一。新一代旋转导向系统凭借其高精度控制、强稳定性和智能化操作等优势，成功应用于深海钻井作业中。系统能够在极端的水深、高压和低温环境下稳定工作，确保钻井作业的顺利进行，为深海油气资源的开发提供了有力支持。极地地区的气候条件极为恶劣，对钻井设备的性能和稳定性提出了极高的要求^[2]。新一代旋转导向系统通过采用耐低温材料、优化密封设计和加强保温措施等手段，成功适应了极地钻井的严苛环境。系统的应用不仅提高了极地钻井的效率和安全性，还为极地油气资源的勘探和开发开辟了新的途径。

1.3.2 复杂地质条件下的应用

除了特殊环境外，新一代旋转导向系统还广泛应用于复杂地质条件下的钻井作业中。例如，在水平井、大位移井和三维多目标井等钻井作业中，系统能够精确控制井眼轨迹，避免地层塌陷、卡钻等风险，确保钻井作业的顺利进行。此外，系统还具备处理复杂地层结构、应对地层压力变化等能力，为复杂地质条件下的钻井作业提供了可靠的技术保障。

1.3.3 与其他钻井技术的集成

新一代旋转导向系统还具备与其他先进钻井技术集成的潜力。例如，随钻测井技术是一种在钻井过程中实时获取地层信息的先进技术，对于提高油气田勘探开发的效率和准确性具有重要意义。新一代旋转导向系统可以与随钻测井技术实现无缝集成，通过共享数据和信息，实现钻井过程中的实时优化和调整。这种集成应用不仅提高了钻井作业的效率和安全性，还为油气田的勘探和开发提供了更加全面、准确的地层信息支持。

2 新一代旋转导向系统的应用成果

新一代旋转导向系统作为钻井技术的重大突破，已经在国内外多个油田展现了其卓越的性能和广泛的应用前景。这一系统凭借其高精度、高效率 and 强适应性，成功助力各大石油公司提高了钻井作业的效率和成功率。以经纬公司为例，其自主研发的旋转地质导向系统已经在国内外165口井上成功应用，钻井进尺累计达到惊人的18.34万米。这一系统通过实时监测和调整钻井路径，确保了井眼轨迹的精确控制，从而大大提高了油气井的开采效率和产量。在复杂地质条件下，该系统依然能够保

持稳定运行，充分展现了其强大的适应性和可靠性。另一家值得一提的是中国海油，其“璇玑”系统作为全球领先的旋转导向系统之一，已经在全球范围内累计作业超过1397井次，钻井总进尺更是突破了132万米。这一系统在深海、极地等极端环境下依然能够保持优异的性能，为海洋油气资源的勘探和开发提供了有力支持。其高精度的测量和控制技术，以及强大的系统集成和兼容性，使得“璇玑”系统在全球范围内赢得了广泛的赞誉和认可。

3 新一代旋转导向系统面临的挑战

3.1 高精度测量与控制技术

新一代旋转导向系统对井眼轨迹的控制精度要求极高，这直接依赖于高精度测量与控制技术。然而，目前市场上的高精度传感器和控制器在钻井环境中存在以下问题：（1）精度与稳定性：在高速旋转、高温高压、强振动等极端钻井环境下，保持高精度测量与控制是一项巨大的技术挑战。这些环境因素可能导致传感器和控制器性能下降，从而影响井眼轨迹的控制精度。（2）成本与可用性：高精度传感器和控制器往往价格昂贵，且技术成熟度有待提高。这增加了钻井作业的成本，并可能限制了新一代旋转导向系统的广泛应用。

3.2 系统集成与兼容性

随着油气田勘探开发向更复杂地质条件发展，对钻井系统的集成度和兼容性提出了更高的要求。然而，新一代旋转导向系统在这一方面面临以下挑战：（1）接口标准不统一：目前，不同钻井技术之间的接口标准不统一，这增加了系统集成的难度和复杂性。缺乏统一的标准可能导致系统集成效率低下，甚至无法实现无缝集成。（2）技术协同与兼容性：不同钻井技术之间的协同研发和兼容性测试也是一大挑战^[3]。由于各技术之间的差异性，如何实现它们之间的有效协同和兼容，以形成完整的钻井解决方案，是当前亟待解决的问题。

3.3 极端环境下的适应性

新一代旋转导向系统需要适应更极端的钻井环境，如深海、极地等。这些环境对系统的性能提出了更高要求，具体挑战包括：（1）耐压、耐温、耐腐蚀性能：在深海和极地等极端环境下，系统需要承受极高的水压、低温或恶劣的气候条件。这对系统的耐压、耐温、耐腐蚀等性能提出了更高要求，需要采用特殊的材料和制造工艺来满足这些要求。（2）稳定可靠运行：在极端环境下，如何确保系统的稳定可靠运行是一个巨大的挑战。系统需要具备良好的抗干扰能力、自我诊断与修复能力以及远程监控与管理能力，以应对各种突发事件和异常

情况。

4 解决建议与展望

4.1 加强技术研发与创新

针对高精度测量与控制技术难题,加强技术研发与创新是破解当前困境的关键。首先,在材料科学领域,应积极探索新型传感器材料,如高性能陶瓷、光纤传感材料等,这些材料具有更高的灵敏度和稳定性,能够在极端钻井环境下保持精确的测量性能。同时,研究新型电子元件和电路设计,提高控制器的抗干扰能力和精度,确保其能在高速旋转和恶劣环境中稳定运行。在新工艺方面,应优化传感器的制造工艺,提高生产效率和产品质量。例如,采用微纳加工技术制造微型传感器,可以大幅提高传感器的集成度和精度。此外,探索新的封装技术和保护措施,以增强传感器和控制器的耐压、耐温和耐腐蚀性能,满足极端环境下的使用需求。在算法设计方面,应开发更先进的控制算法和数据处理方法,以提高井眼轨迹的控制精度和稳定性。例如,引入人工智能和机器学习技术,可以实现对钻井过程的实时优化和调整,提高钻井效率和安全性。

4.2 推动标准化与规范化建设

针对系统集成与兼容性问题,推动相关标准的制定与实施是提升旋转导向系统整体效能的关键。首要任务是加强行业内各利益相关方的合作与协调,包括钻井设备制造商、技术服务提供商、科研机构以及行业协会等,共同推动技术规范和标准体系的建立。在标准制定过程中,应充分考虑不同钻井技术的特点和需求,确保标准的科学性和实用性。重点聚焦于接口标准、数据交换协议以及系统集成流程等方面,形成统一的技术规范和操作指南。这有助于降低系统集成难度,提高集成效率,同时减少因接口不兼容导致的额外成本和时间延误。为了促进标准的广泛实施,应开展标准宣贯和培训活动,提高行业人员对标准的认知和理解。通过组织专题研讨会、技术交流会等形式,搭建平台促进各方之间的沟通与协作,共同推动标准的落地应用^[4]。此外,应建立标准更新和维护机制,确保标准与技术的同步发展。随着钻井技术的不断进步和市场需求的变化,应及时对标准进行修订和完善,保持标准的先进性和适用性。

4.3 提高系统适应性与可靠性

针对极端环境下的适应性挑战,提升旋转导向系统的耐压、耐温、耐腐蚀等性能是确保系统稳定可靠运行的关键。为此,应加强对系统材料、结构设计和制造工艺的研究与改进。在材料选择方面,应积极探索和应用新型高性能材料,如高强度合金、特种陶瓷、耐腐蚀聚合物等。这些材料具有优异的机械性能和化学稳定性,能够在深海、极地等极端环境下承受高压、高温或低温以及腐蚀介质的侵蚀,从而延长系统的使用寿命。在结构设计方面,应优化系统的整体布局和关键部件的设计,以提高系统的抗压能力和稳定性。例如,采用模块化设计,方便系统的拆卸、维修和升级;加强关键连接部位的强度和密封性,防止因振动、冲击或压力变化而导致的失效。在制造工艺方面,应引进先进的加工设备和工艺技术,提高系统的制造精度和一致性。通过精密加工、热处理、表面处理等工艺手段,改善材料的微观组织和性能,提高系统的整体质量和可靠性。此外,还应建立完善的故障诊断和排除机制,提高系统的可维护性和可修复性。

结语

新一代旋转导向系统的研发进展显著,为油气田勘探开发提供了更高效、更安全的解决方案。然而,该技术仍面临高精度测量与控制技术、系统集成与兼容性以及极端环境下的适应性等挑战。通过加强技术研发与创新、推动标准化与规范化建设以及提高系统适应性与可靠性等措施,可以进一步推动新一代旋转导向系统的发展与应用。未来,随着技术的不断进步和应用范围的不断拓展,新一代旋转导向系统将在油气田勘探开发中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势[J]. 钻采工艺, 2024, 47(03): 1-8.
- [2] 黎伟, 牟磊, 周贤成, 等. 旋转导向系统及其控制方法研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(10): 167-179.
- [3] 宋红喜, 曾义金, 张卫, 等. 旋转导向系统现状及关键技术分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(06): 2123-2131.
- [4] 米金泰, 王章波, 张卫, 等. 旋转导向推靠控制系统研发及实验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(18): 7271-7276.