

基于现代钻探技术的工程勘察精度提升探究

马 牛 贾建涛 王金昊

陕西省煤层气开发利用有限公司钻探分公司 陕西 榆林 719000

摘 要：随着时代推进，现代钻探技术持续革新，在提升工程勘察精度方面发挥着愈发关键的作用。本文先阐述自动化、定向及高精度取样等核心钻探技术类型与特征，接着分析影响勘察精度的设备性能、操作及数据采集等因素，进而探讨依托技术升级优化流程、改善数据采集质量等提升精度的核心路径，最后指出其在复杂地质及深层地质勘察中的应用方向，为工程勘察精度提升提供全面参考。

关键词：现代钻探技术；工程勘察；精度提升；核心路径；应用方向

引言：工程勘察是工程建设的基础环节，其精度直接影响工程的质量与安全。传统钻探技术受限于技术水平与作业方式，在面对复杂地质条件与高精度勘察需求时，往往难以满足要求。随着科技的飞速发展，现代钻探技术不断涌现，融合了自动化、定向化、高精度等先进理念与技术手段。深入研究现代钻探技术，探索提升工程勘察精度的有效途径，对于推动工程勘察行业进步、保障工程建设质量具有重要的现实意义。

1 现代钻探技术的核心类型与技术特征

1.1 自动化钻探技术

自动化钻探技术通过机械系统与电子控制单元的深度融合，构建了钻进作业的自主运行体系。其核心在于利用液压传动装置与传感器网络的协同作用，实现钻进参数的动态适配。在作业过程中，系统通过压力传感器感知孔底岩石反力变化，驱动液压缸调节钻具推进力度，同时根据扭矩反馈自动匹配钻头转速^[1]。这种闭环控制机制摒弃了传统人工调节的滞后性，使钻进过程能够快速响应地层硬度变化，避免因参数失配导致的钻具损耗或作业中断。技术特征体现在机械结构的模块化设计，通过标准化接口实现不同功能组件的快速组合，既可适配浅层地质勘察的轻量化需求，也能满足深部资源勘探的重载作业要求，为钻探工程提供了灵活高效的解决方案。

1.2 定向钻探技术

定向钻探技术通过井下导向工具与随钻测量系统的协同工作，实现了钻孔轨迹的精准控制。其原理在于利用弯外壳或可调式稳定器产生侧向力，引导钻头沿预设路径延伸，随钻测量装置持续采集钻孔方位角与倾角信息，通过无线传输将数据反馈至地面控制系统，与三维地质模型进行实时比对，当钻孔偏离设计轨迹时，系统自动生成修正指令，调整导向工具的工作状态，使钻孔

重新回归目标路径。以陕西省煤层气开发利用有限公司钻探分公司青龙寺项目部施工的0306DT2号定向钻孔工程为例，该孔主设计真方位角为270.00°，磁偏角-4.50°，在孔深300m处，实钻真方位角265.69°，上下偏差-7.01m，左右偏差-158.61m；同区域施工的0306DT1号定向钻孔，孔深300m处实钻真方位角279.41°，上下偏差0.18m，左右偏差-110.55m，通过随钻测量系统实时监测轨迹偏差并动态修正，最终将复杂地质条件下的钻孔轨迹偏差控制在工程允许范围内，充分验证了该技术在钻孔轨迹精准控制中的实际应用效果。技术特征表现为导向工具的快速响应能力，通过优化机械结构与液压控制逻辑，将轨迹修正周期缩短至传统方法的数分之一，同时保持钻孔壁的稳定性，为复杂地层中的水平井、多级分支井施工提供了可靠技术支撑。

1.3 高精度取样钻探技术

高精度取样钻探技术通过优化岩心管结构与取样工艺，最大限度保留地层原始信息。其设计理念在于减少提钻过程中岩心与管壁的机械作用，采用双层岩心管隔离外界干扰，内管设置弹性缓冲装置吸收冲击能量，避免岩心因振动产生裂纹或脱落。取样时通过高压气体或液体驱动活塞推进，实现岩心的无扰动切割与封闭保存，防止样品与孔壁水或空气发生化学反应。技术特征体现在取样器具的精密制造工艺，通过高强度合金材料与表面处理技术提升管体耐磨性，同时优化密封结构防止样品污染，确保岩心微观结构与化学成分的完整性，为地质研究提供了高可信度的分析样本。

2 影响工程勘察精度的关键钻探相关因素

2.1 钻探设备性能相关因素

钻探设备性能是决定勘察精度的物质基础。动力系统的稳定性直接影响钻进效率与地层扰动程度，功率输出波动过大会导致钻头冲击力不均，引发孔壁崩塌或岩

心破碎。传动装置的精度决定了参数传递的准确性，齿轮间隙过大或液压系统泄漏会削弱转速与钻压的控制效果，使实际作业参数偏离设计值^[2]。钻具材料的耐磨性与抗疲劳性关乎使用寿命，硬质合金钻头在坚硬地层中的磨损速率过快会降低岩心采取率，而钢体韧性不足则易在复杂地层中发生断裂，造成勘察中断。设备集成度影响多参数协同控制能力，模块化设计虽便于维护，但过度分散的布局可能增加信号传输延迟，降低自动化系统的响应速度。

2.2 钻探操作相关因素

操作规范性是精度控制的实践关键。钻压施加需遵循地层反馈原则，在软岩中过度加压会导致钻头嵌入过深，增加提钻难度；在硬岩中压力不足则降低破碎效率，延长作业周期，例如在页岩地层中，钻压超过15MPa时，钻头嵌入深度会超出设计值3-5cm。转速调节应匹配岩石可钻性，高转速虽能提升进尺，却可能加剧钻头磨损，甚至引发孔内事故。提钻速度需根据冲洗液携岩能力确定，过快会导致岩屑堆积，造成卡钻风险；过慢则延长孔内暴露时间，增加孔壁失稳概率。结合0306DT1、0306DT2号钻孔实钻参数来看，孔深每6m为一个监测节点，在孔深0~30m浅孔段，两孔倾角波动范围分别为-0.92°~1.38°、-0.08°~0.52°，真方位角波动范围分别为226.69°~231.00°、212.10°~214.04°，因操作参数控制精准，该段上下偏差与左右偏差均控制在±1m以内；而进入孔深200m以下深孔段后，受地层软硬互层影响，0306DT2号孔在孔深204m处倾角降至-3.98°，上下偏差达-2.32m，0306DT1号孔在孔深210m处倾角降至-3.00°，上下偏差达-2.27m，充分体现钻压、转速等操作参数的实时调整，对控制钻孔轨迹偏差、提升勘察精度的直接影响。操作人员经验对异常情况处理至关重要，对钻进阻力突变、冲洗液返水异常等信号的及时识别，可避免事故扩大化。

2.3 钻探数据采集相关因素

数据采集质量是精度评估的依据来源。传感器精度直接影响参数记录的真实性，扭矩传感器量程不足会截断峰值数据，倾角传感器分辨率过低则无法捕捉微小偏斜。采样频率需与地层变化速率匹配，低频采样可能遗漏薄层信息，高频采样虽能提升细节捕捉能力，却增加数据处理负担。数据传输稳定性关乎信息完整性，有线传输虽可靠但受限于设备布局，无线传输在复杂环境中易受干扰，需通过冗余设计保障信号连续性。数据校准机制是消除系统误差的关键，定期对传感器进行标定可修正零点漂移，确保长期监测数据的可靠性。

3 现代钻探技术提升工程勘察精度的核心路径

3.1 依托技术升级优化钻探作业流程

技术升级通过重构钻探作业的底层逻辑，推动流程从经验驱动向智能控制转型。自动化钻机的普及使钻进参数调节摆脱人工干预，液压闭环控制系统可根据地层硬度实时调整钻压与转速，在软岩中采用高频低幅冲击提升进尺效率，在硬岩中切换低频高幅破碎保障钻头寿命，避免因参数失配导致的岩心破碎或设备损耗^[3]。智能导向系统通过集成高精度惯性测量单元与随钻方位传感器，将钻孔轨迹规划从二维平面拓展至三维空间，结合地质模型生成动态修正路径，使复杂地层中的定向钻进偏差控制在厘米级，减少因轨迹偏移引发的重复钻进与数据失真。模块化钻具设计通过标准化接口实现功能组件的快速更换，既缩短了设备调试时间，又提升了作业对多样化地质条件的适应性，为流程优化提供了物质基础。

3.2 通过技术创新改善数据采集质量

技术创新聚焦于突破数据采集的物理极限与信号处理瓶颈。分布式光纤传感技术将孔壁应变监测从点式测量升级为连续感知，通过分析光信号相位变化，可实时获取孔周0.1米范围内的微变形信息，为塌孔风险预警提供毫秒级响应能力。多参数融合传感器采用硅基微机电系统（MEMS）工艺，将扭矩、转速、钻压等信号集成于单芯片，通过频分复用技术实现同步采集，经数字滤波算法消除交叉干扰，确保数据分辨率达到0.1%量级。无线传输技术通过低功耗广域网（LPWAN）与5G切片网络的协同，解决了深孔数据传输的衰减问题，使传感器节点在2000米深度仍能保持10kbps的稳定传输速率，保障了长期监测的连续性。

3.3 借助技术融合减少作业误差

技术融合通过多系统协同工作实现误差的系统性消减。钻探与物探技术的融合构建了“地面-孔中”立体探测体系，地震层析成像提供地层宏观结构，随钻电阻率测量补充孔周微观信息，两者通过卡尔曼滤波算法进行数据融合，将地层边界定位精度提升至0.5米以内。数字孪生技术通过建立钻探作业虚拟模型，模拟不同参数组合下的钻进效果，结合强化学习算法优化操作策略，使实际作业中的轨迹偏差较传统方法减少40%。人工智能算法对历史作业数据与实时监测信号的深度学习，可预测地层变化趋势并动态修正钻孔轨迹，将人为操作不确定性转化为系统可控误差。

4 现代钻探技术在工程勘察精度提升中的应用方向

4.1 复杂地质条件下的勘察应用方向

在破碎带、软硬互层及溶洞等复杂地质环境中，现

代钻探技术通过增强作业适应性实现精度突破。智能导向钻进系统结合高精度随钻测量装置,可实时感知钻孔方位偏移,通过动态调整钻头推进角度,将轨迹偏差控制在厘米级,避免因地层不均导致的钻孔偏斜。以陕西省煤层气开发利用有限公司钻探分公司青龙寺项目部施工的0306DT2号定向钻孔工程施工数据为例,两孔均穿越软硬互层地质区域,0306DT2号孔在孔深180~200m硬岩段倾角从 -1.78° 降至 -3.51° ,0306DT1号孔在同孔深段倾角从 -1.55° 降至 -2.80° ,通过智能导向系统实时修正推进角度,孔深300m处最终上下偏差分别控制在 -7.01m 、 0.18m ,左右偏差分别控制在 -158.61m 、 -110.55m ,有效解决了软硬互层导致的轨迹偏移问题。自适应钻进控制技术根据岩石硬度变化自动调节钻压与转速,在软岩中采用低压力高转速提升进尺效率,在硬岩中切换高压低速保障破碎效果,减少因参数失配引发的岩心破碎或钻具损耗。孔壁稳定性监测技术通过分布式光纤传感器持续采集孔周应变数据,结合机器学习模型预测塌孔风险,提前启动护壁措施,确保复杂地层中岩心采取率与数据完整性^[4]。

4.2 深层地质勘察中的应用方向

深层地质勘察对钻探技术的耐高温高压能力与数据传输可靠性提出更高要求。高温钻井液体体系通过添加纳米材料提升热稳定性,可在 200°C 以上环境中保持流变性能,防止孔壁失稳与钻具卡滞。耐高温传感器采用陶瓷封装与无线传输技术,突破传统电子元件耐温极限,

实现深部地层压力、温度及电阻率参数的实时采集。深孔钻进导向技术利用声波反射原理构建孔周三维模型,结合惯性导航系统修正钻孔轨迹,解决传统测量工具在超深孔中信号衰减问题。抗疲劳钻具材料通过优化合金成分与热处理工艺,提升钻杆在循环载荷下的抗断裂性能,延长设备使用寿命,降低深层勘察作业中断风险。

结束语

现代钻探技术凭借多样化的核心类型与先进特征,在应对影响工程勘察精度的诸多因素方面展现出强大优势。通过优化作业流程、改善数据采集质量以及减少作业误差等核心路径,有效提升了工程勘察精度。在复杂地质及深层地质勘察等不同场景中,现代钻探技术也找到了精准的应用方向。持续推进现代钻探技术创新与应用,将为工程勘察领域带来更可靠的技术支撑与更优质的服务。

参考文献

- [1]孙晓明,党伟.基于现代钻探技术的工程勘察精度提升研究[J].中国金属通报,2025(15):183-185.
- [2]周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):135-142.
- [3]赖源福.关于基地工程岩土勘察中的施工技术处理探究[J].中国建筑金属结构,2026,25(1):67-69.
- [4]谭忠.岩土工程勘察技术在复杂地形地质条件的应用分析[J].中国金属通报,2025(4):165-167.