

大曲率定向连续取心技术研究与应用

张世殊¹ 吴金生² 李青春¹

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610072; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川成都 610081)

摘要: 伴随能源、交通、国家水网等强国战略工程的实施, 我国已成为地下工程建设数量、规模和难度最大的国家。西部地区工程建设大多面临高海拔、高埋深、高应力、高水压和大落差的极端地质环境, 精细化勘察势在必行。针对西部地区某水电工程深切河谷区域横纵岩性展布规律不明确、定向精细化勘察难度大等问题, 研发绳索取心柔性导向取心钻具, 建立基于 Bezier 理论的轨迹控制模型, 构建“柔性导向取心钻具+Bezier 理论轨迹控制模型”的工作模式, 形成大曲率定向连续取心方法技术体系, 完成艰险复杂地质区域千米级大曲率定向连续取心精准轨迹控制, 实现精细化勘察目标。应用结果表明: (1) 建立柔性导向取心钻具在不同控制点下的力学仿真模型, 仿真结果表明: 稳定器距钻头距离越远, 钻头横向应力、最大应力、挠度等均减小, 表明稳定器距离钻头越近造斜强度越大。(2) 基于 Bezier 理论的轨迹控制模型计算轨迹控制参数与实测值的最大误差在 5% 以内; (3) 千米级曲线钻孔实际终孔孔斜 78°, 满足地质要求, 终孔方位角 212°, 与初始方位角误差仅为 0.95%, 实现大曲率造斜段连续取心, 且国内外首次取出弯曲状岩心, 轨迹控制较好, 可为艰险复杂地质区域的大曲率定向连续取心钻探提供技术支撑。

关键词: 极端地质环境; 柔性导向取心钻具; 大曲率连续取心; 随钻轨迹控制

中图分类号: P634.6

收稿日期: 2025-12-3

Research and Application of High-Angle Curved Directional Continuous Coring Technology

ZHANG Shishu¹, WU Jinsheng^{2*}, LI qingchun

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China;

2. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 610081, China)

Abstract: Driven by the implementation of national strategic projects such as energy, transportation and national water network construction, China has become a global leader in the scale, quantity and complexity of underground engineering. Engineering constructions in western China are frequently challenged by extreme geological conditions including high altitude, large burial depth, high geostress, high water pressure and great height difference, making refined geological investigation an urgent requirement. Aiming at the problems of unclear lithologic distribution and difficult directional refined exploration in deep valley areas of hydropower projects in western China, a wireline flexible steering coring tool was developed, and a trajectory control model based on Bezier theory was established. A technical framework of “flexible steering coring tool + Bezier trajectory control model” was proposed, forming a complete technical system for high-curvature directional continuous coring. Precise trajectory control for kilometer-scale high-curvature directional continuous coring was successfully achieved in complex and difficult geological areas, satisfying the demands of refined geological exploration. The application results show that: (1) Mechanical simulation of the flexible steering coring tool reveals that the lateral stress, maximum stress and deflection of the drill bit decrease as the stabilizer moves

基金项目: 国家自然科学基金(U22A20601); 西部地区复杂地层绿色钻探技术支撑(DD202402054); 中国电建核心攻关项目(DJ-HXGG-2024-07)。

第一作者及通讯作者: 张世殊, 1970 年 8 月生, 男, 主要从事深地工程生产与科研工作。国家百千万人才工程专家, 国家有突出贡献的中青年专家, 获国务院政府特殊津贴, 李四光地质科学奖获得者, 四川省“天府青城计划”卓越工程师, 四川省工程勘察大师, 中国电建集团首席技术专家。

邮箱: 1992070@chidi.com.cn

away from the bit, verifying that a shorter stabilizer-to-bit distance produces higher deflecting strength. (2) The maximum relative error between the trajectory parameters calculated by the Bezier-based model and the field-measured values is less than 5%. (3) The final inclination of the kilometer-scale curved borehole is 78°, fully meeting the geological requirements; the final azimuth is 212°, with an error of only 0.95% relative to the initial azimuth. Continuous coring in the high-curvature deflecting section is realized, and curved cores are successfully obtained for the first time worldwide with favorable trajectory control performance. The research results can provide solid technical support for high-curvature directional continuous coring drilling in difficult and complex geological areas.

Key Words: extreme geological conditions; flexible guided coring tool; high-angle curved continuous coring; while-drilling trajectory control

1 引言

伴随能源、交通、国家水网等强国战略工程的实施(张世殊, 2025; 宁波等, 2025), 基础设施建设蓬勃发展, 已成为地下工程建设数量、规模和难度最大的国家。西部地区作为重大工程建设主阵地, 但地形、地质条件极端复杂, 高山、峡谷、深切割等区域采用常规垂直孔或缓弯钻孔难以从单一平台有效控制勘察范围、精准揭示横纵岩性剖面展布规律及隐伏断层。因此, 在此类艰险复杂地质区域实施精细化勘察, 必须采用大曲率定向钻孔技术(秦如雷等, 2026), 以较大的造斜强度使钻孔轨迹在短距离内快速转向, 穿越河谷底部并控制对岸目标地层, 从而最大程度地揭露不同维度的地质信息。

自上世纪开始, 众多国外油服公司已开展定向钻进系统与工具的研发。意大利 AGIP 公司与美国 BakerHughes INTEQ 公司基于直钻井系统(VDS)和直井钻井装置(SDD)基础上研制了静态推靠式旋转导向系统(周文兵等, 2025; chur C *et al*, 1993), 用连续旋转钻井方式钻成理想的井斜和方位, 既可以精确地按照设计钻进, 也可在油藏内精确地进行地质导向钻井(秦永和等, 2025; 张威, 2025)。斯伦贝谢公司借鉴静态推靠式旋转导向工具的研发思路(杨明清, 2019), 增加多个推靠支撑块, 在造斜层段利用液压装置撑开推靠块, 实现造斜(孔锦炜, 2024)。2010 年, 斯伦贝谢公司结合高精尖控制技术, 升级地面造斜控制系统, 打造了高造斜率的复合式旋转导向系统 PD Archer(李术才等, 2023; chur C *et al*, 1993), 实现精准造斜。国内由于受到国外油服公司的技术封锁, 在高精尖定向钻探领域中一直处于

劣势。近年来, 通过借鉴国外旋导系统, 国内自主攻关的发展下, 川庆钻探研发 CGSTREE 旋导工具(ZHIRONKIN V *et al*, 2020), 填补了国内不能自主研发的空白, 但国产旋导面临井下高温时易失效的问题, 目前正作为主要突破目标。但是, 要明确未知区域的原始岩性资料和地质资料, 需对目标区域和地层开展不同维度剖面的取心钻探, 大口径定向钻探技术无法全孔取心, 不能满足原始岩性资料获取要求。基于此, 西安煤科院团队(石智军等, 2019; 王明华等, 2022)提出了全孔定向取心较为有效的方案: 以绳索取心为基础, 在钻具上设置稳定器, 实现特定方向的保直快速绳索取心钻进; 钻进完一段后立即测量钻孔轨迹, 根据偏斜程度动态调整稳定器位置实现钻孔防斜, 或利用螺杆全面钻进进行纠斜纠偏。但该技术在实际施工中仍存在一些不足: (1) 缺乏稳定器数量、位置对钻孔轨迹偏移的影响机理研究, 无法保证钻进效果。(2) 完成一段钻孔后进行测斜, 采用螺杆马达进行孔底纠斜的方式不能实时掌握钻孔轨迹偏移方向和大小, 无法及时进行纠斜, 会导致后期纠斜距离长、难度大, 同时, 全面钻进距离长导致全孔取心率低。(3) 频繁测斜、纠偏纠斜均需起大钻, 会增加施工周期。邹祖杰(2024)结合常规的施工方案, 基于绳索取心保直钻进轨迹偏斜机理, 开发出水平定向取心钻孔保直与纠斜钻具组合和基于中空螺杆的定向绳索取心钻具组合, 完成了现场试验, 但该套工具工艺不适用于断层涌水严重的地质条件。韩泽龙(韩泽龙等, 2025)等人提出了一种新型定向钻进连续取心钻具和工艺, 开展了钻进参数、造斜率对定向取心钻进的仿真模拟。林婷婷等人(林婷

婷等，2023）在连续取心钻具的基础上耦合姿态监测技术，设计定向连续取心钻具姿态监测系统，实现孔内姿态参数动态监测。高山峡谷、深切河谷、隧道（洞）等利用曲线孔进行勘察，在造斜段，如果使用不取心钻头则无法获取该段的构造特征，因此需要在造斜段进行定向连续取心，这对造斜段获取原始地质资料的完整性方面具有重大意义。

上述专家学者在一定程度上解决了连续定向取心中的部分难题，但均未能有效解决绳索连续定向取心工具适配性、轨迹参数准确计算和轨迹精准控制等问题。基于此，本文研制绳索连续取心柔性导向钻具，建立基于 Bezier 理论的轨迹控制模型，精确计算轨迹参数，构建“柔性导向绳索取心钻具+Bezier 理论轨迹控制模型”的工作模式，实现孔斜方位精准控

制，为千米级定向连续取心提供技术支撑。

2 大曲率定向连续取心技术研究

2.1 柔性导向取心钻具研制

高海拔山区、深切河谷等艰险地区深埋隧道（洞）勘查，地理条件复杂恶劣，水平孔勘查受到钻孔长度制约，垂直孔钻机搬运困难甚至无法搬迁，无法有效揭示横纵岩性剖面展布规律，故需利用高效便捷的新钻具、新方法实现大曲率钻孔，最大程度揭露不同维度的横纵岩性剖面展布规律以及断层资料。基于此，研发一套适用于坚硬地层大曲率取心钻进的柔性导向取心钻具组合（如图 1 所示），具体包括：导向取心钻头、扩孔器、滑动稳定器（扶正器）和高强度绳索取心钻杆，形成一套大曲率连续取心定向钻进方法。

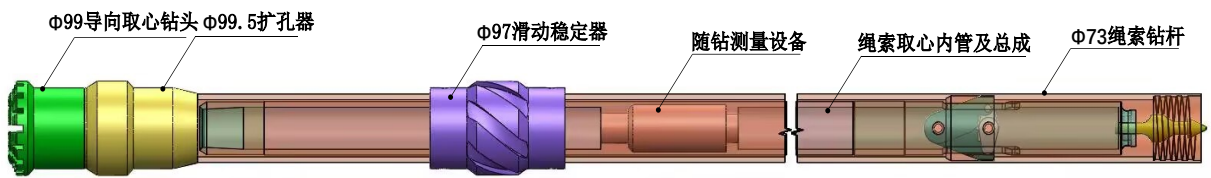


图 1 柔性导向取心钻具图

Fig.1 Schematic Diagram of Flexible Steering Coring Tool

导向取心钻头采用阶梯状锥度结构形式，外径 99mm，内径 47.6mm，如图 2 所示，钻头结构可实现大曲率定向钻进与绳索取心轨迹同步，若采用平底取心钻头，钻头无法沿前期定向轨迹下钻到底，造斜强度也难以满足大曲

率轨迹控制要求。钻头外径与绳索取心钻具外径差值大于常规绳索取心钻具，增强绳索取心钻具的柔性韧性，有利于大曲率的造斜和取心。

表 1 给出了两种型号的定制高强度绳索取心钻杆钻具参数，与普通同类绳索钻杆钻具比，H 系列钻杆最大扭矩提高 1.5 倍，最大抗拉力提高 1.18 倍，服役深度增加 50%；N 系列钻杆最大扭矩提高 1.4 倍，最大抗拉力提高 1.19 倍，服役深度增加 50%，性能提高显著。扩孔器外径大于钻头外径 0.3-0.5mm，有利于钻头稳定和保径。滑动稳定器（如图 3 所示）外径

需小于钻头外径 2-3mm（论述详情见 2.2 小节），起造斜钻进支点作用，利用杠杆原理实现造斜取心钻进。该套柔性连续取心导向钻具的亮点在于：（1）在常规钻具的基础上采用小一级口径的高强度绳索钻杆提高钻杆柱径长比，在保证强度的同时提升钻具的柔韧性。（2）添加滑动稳定器，可动态调控造斜强度，达到预期造斜目标。

表 1 绳索钻杆性能参数对照表

Table.1 Performance Parameter CoMParison Table for Wireline Drill Rods

名称	外径（mm）	内径（mm）	螺纹长度（mm）	螺距（mm）	抗拉力（kN）	最大扭矩（N·m）	设计钻深（m）
H 钻杆	89.0	77.8	44.5	8.47	550	6300	1600

HY 定制钻杆	91.0	77.8	55.6	12.7	650	9500	2400
N 钻杆	71.0	60.0	44.5	8.47	387	4500	1600
NY 定制钻杆	73.0	60.0	55.6	12.7	460	6500	2400

通过该柔性导向连续取心钻具组合，可以实现边造斜定向钻进边绳索连续取心，绳索取心内管总成与 N 系列绳索取心钻具基本一致，因钻孔轨迹弯曲率大（造斜强度超过 $0.9^{\circ}/10\text{m}$ ），钻具内管总成不能依靠重力投送到位，

只有依靠水力作用推送到位，因此，内管总成上需增加密封活塞，确保内管总成投送到位。地层软硬变化出现钻孔轨迹异常时，采用锥形钻头（如图 4 所示）修孔钻进。



图 2 柔性导向取心钻头

Fig.2 Flexible guided core bit



图 3 滑动稳定器

Fig.3 Sliding stabilizer



图 4 锥形钻头

Fig.4 taper bit

2.2 柔性导向取心钻具动力学仿真

通过 SolidWorks 建立柔性导向钻具模型（如图 5 所示），并完成仿真模型网格划分，具体参数设置如表 2 所示。需要说明的是本文

力学模型构建的假设前提为：（1）岩体均质、各向同性；（2）钻头与岩体接触是弹性的；（3）造斜过程为准静态过程。

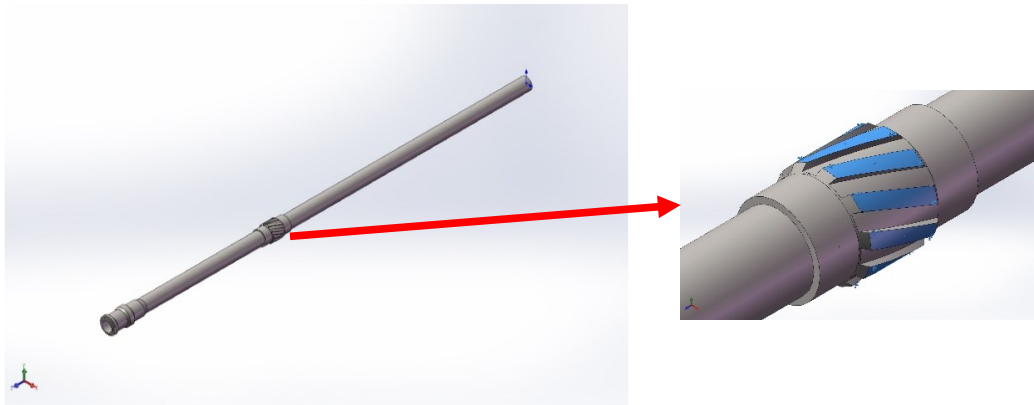


图 5 柔性导向取心钻具模型

Fig.5 Model of flexible guiding drill

表 2 网格划分

Table.2 Grid Division

网格类型	实体网格
所用网格器:	基于混合曲率的网格
高质量网格的雅可比点	16 点
最大单元大小	25.0381 mm
最小单元大小	8.34595 mm
节点总数	15097 个
单元总数	7522 个

通过仿真不同稳定器位置下的钻头横向应力、最大应力、挠度的变化情况和趋势，明

确稳定器不同位置对造斜强度以及极限应力对钻具的影响情况，为后续大曲率定向钻进轨

迹控制计算模型奠定基础。本文仿真稳定器距钻头 265-1526mm 的钻头横向应力、最大应力、挠度等的变化情况，以稳定器至钻头距离 1000mm 的情况为例，仿真结果如图 6-图 7 所

示，钻头横向应力为 0.498kN，最大应力 23.92MPa，挠度 0.0011m。由此可见，该钻具具备一定的造斜能力，极限应力在许用应力范围内。

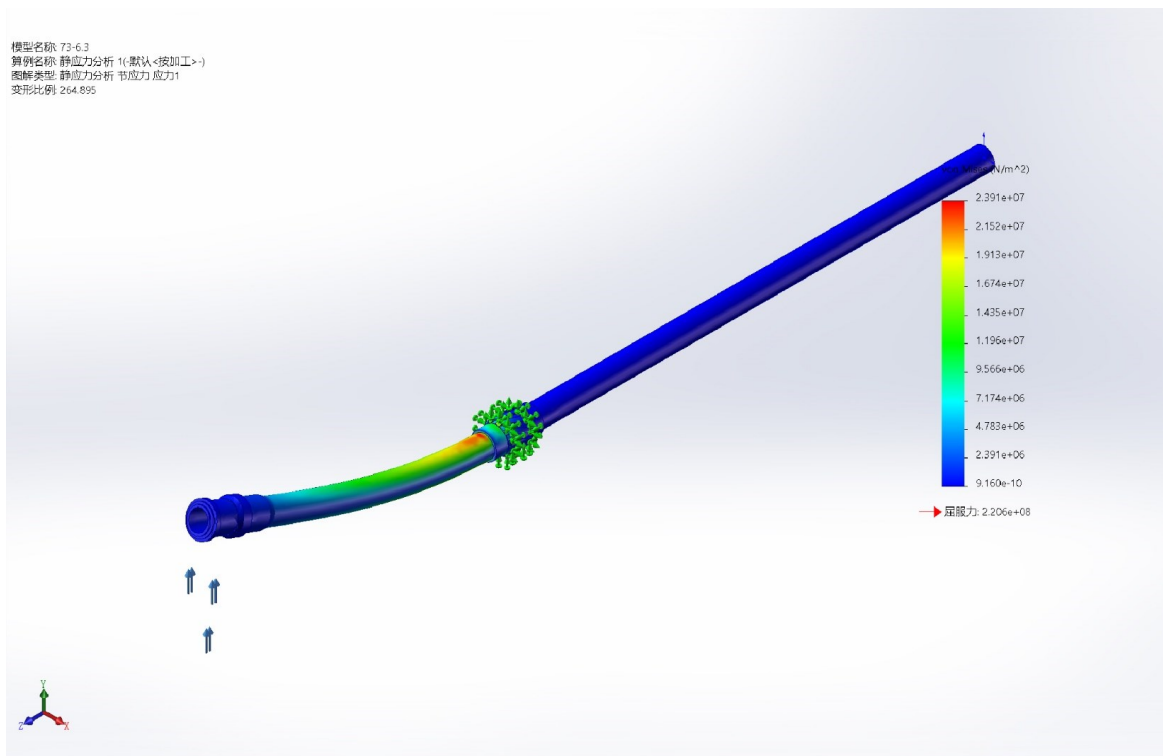


图 6 稳定器至钻头距离 1000mm 的应力变化情况

Fig. 6 shows the stress variation at a distance of 1000mm from the stabilizer to the drill bit

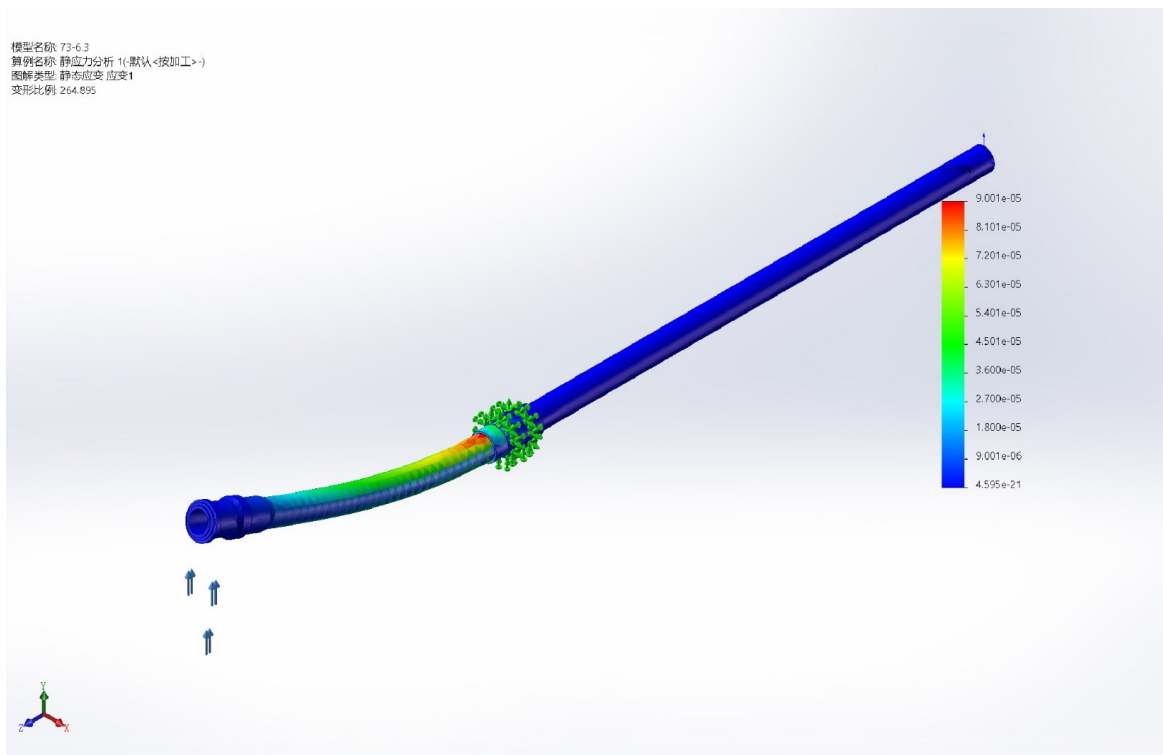
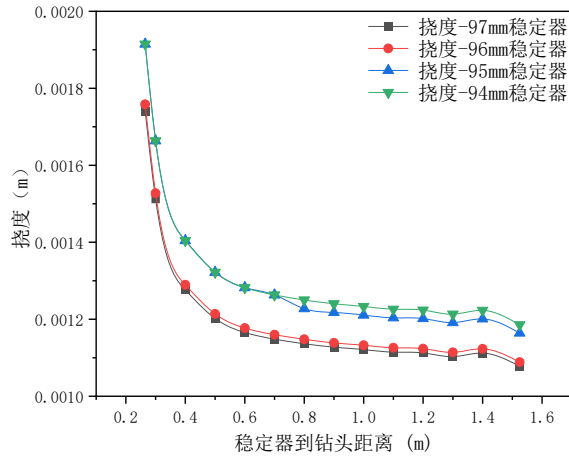


图 7 稳定器至钻头距离 1000mm 的应变情况

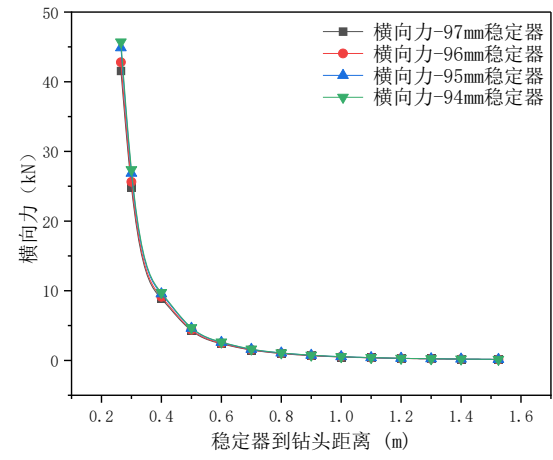
Fig.7 shows the strain condition at a distance of 1000mm from the stabilizer to the drill bit

为进一步说明稳定器距离、尺寸大小对柔性导向钻具造斜强度的影响，本文仿真了不同

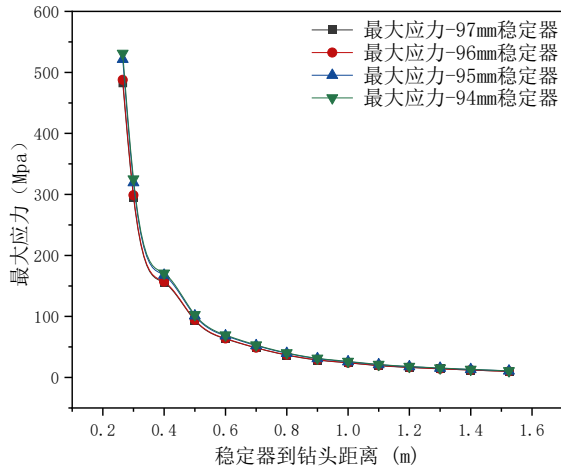
尺寸稳定器距钻头不同距离处对柔性导向钻具力学行为特征的影响，结果如图8-图9所示。



(a)



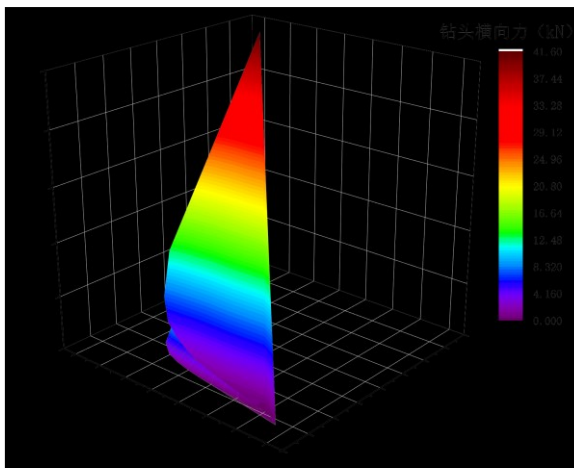
(b)



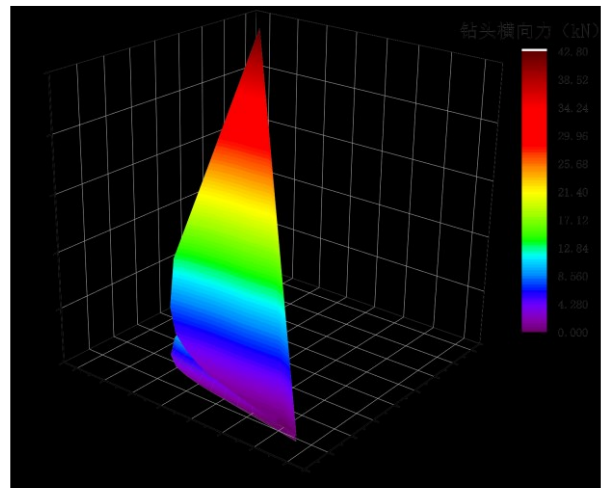
(c)

图8 稳定器至钻头不同距离的力学变化趋势

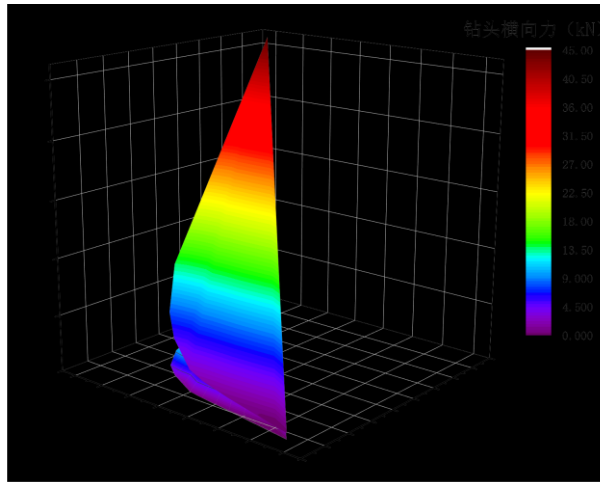
Fig. 8 Mechanical variation trends at different distances from the stabilizer to the drill bit



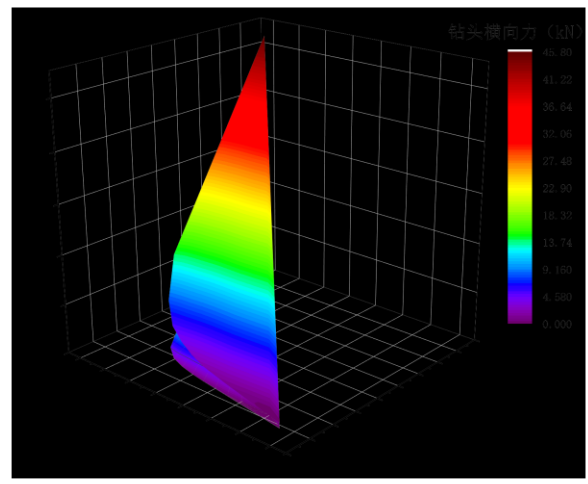
(a) 97mm 稳定器



(b) 96mm 稳定器



(c) 95mm 稳定器



(d) 94mm 稳定器

图 9 稳定器至钻头不同距离的力学响应特征

Fig.9 Mechanical response characteristics at different distances from the stabilizer to the drill bit

由图 9 可以看出：（1）稳定器距钻头距离越远，钻头横向应力、最大应力、挠度等均减小，表明稳定器距离钻头越近造斜强度越大。原因是：当稳定器靠近钻头时（如 $L=1.0\text{m}$ ），稳定器与钻头之间的钻具段长度缩短，其抗弯刚度相对增强，钻具在造斜过程中与井壁的接触点更靠近钻头，根据杠杆原理，钻头需要施加更大的侧向力才能克服井壁阻力实现造斜，从而导致钻头处横向力显著增大（图 8b）。同时，由于约束点靠近钻头，该位置成为弯矩的峰值区域，导致最大应力出现在稳定器附近（图 8c），形成“短而刚”的约束模式，造成明显的应力集中现象，有利于提高造斜强度。

3 大曲率定向钻进轨迹控制技术

3.1 定向连续取心造斜强度模型

为实现轨迹的精准控制，首先需要从力学层面确定钻具-地层所能达到的最大造斜能力。因此需要一个造斜强度极限能力评估模型。该模型基于钻具受力平衡和岩石强度准则，计算出在给定钻具组合（稳定器位置 L ）和特定地

（2）稳定器距钻头位置相同，稳定器尺寸越小，造斜强度越大。随着尺寸减小，95mm、94mm 与 96mm、97mm 的稳定器在造斜强度上并无太大差异，但挠度明显增大，表明相较于配备 96mm、97mm 稳定器的钻具断裂风险更高，因此推荐稳定器尺寸小于钻头尺寸 2-3mm。后续基于该钻具，通过实时计算不同位置的孔斜方位变化情况，动态调整稳定器位置，达到高效造斜、稳定控斜的目的。

层条件下，钻头能够产生的最大侧向力，进而推导出理论上的最大造斜强度，基于此为轨迹控制模型提供了关键的强度约束参数。

钻具受力分析如图 10 所示，可得出地下岩体钻探平衡方程为：

$$\begin{cases} M_1 = F_{x2}L \sin \theta + F_{y2}L \cos \theta \\ F_{x1} = F_{x2} \\ F_{y1} = F_{y2} \end{cases} \quad (1)$$

式中： M_1 为滑动稳定器的端部弯矩， $N \cdot m$ ； F_{x1} 为水平向荷载， N ； F_{y1} 为竖向荷载， N ； F_{x2}

为钻头顶部的水平向荷载， N ； F_{y2} 为竖向荷载， N ； θ 为钻头与水平面的夹角， $^\circ$ 。

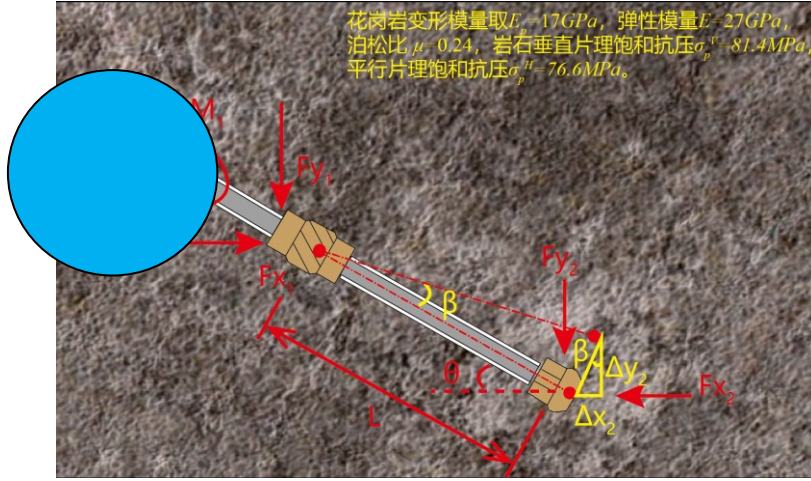


图 10 导向取心钻具受力分析图

Fig.10 Force Analysis Diagram of Steering Coring Tool

岩体变形对钻头产生的水平及法向力分别可表示为:

$$\begin{cases} F_{x2} = E_p A_N \varepsilon_{x2} \\ F_{y2} = E_p A_T \varepsilon_{y2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_p 为岩体变形模量, GPa ; 表示其中 ε_{x2} 为钻头位置岩体的正向应变, 无量纲; A_N 为钻头正面垂直于岩体方向的接触面积, m^2 ; A_T 为钻头侧面平行于岩体的接触面积, m^2 ; ε_{y2} 为钻头位置岩体的切向应变, 无量纲。

钻头受到荷载的最大值取决于岩石强度, 即:

$$\begin{cases} F_{x2,max} = \sigma_p^H A_N \\ F_{y2,max} = \sigma_p^V A_T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F_{x2,max}$, $F_{y2,max}$ 分别表示 x 方向和 y 方向钻头载荷最大值, N ; σ_p^H 为平行片理饱和抗压强度, MPa ; σ_p^V 为垂直片理饱和抗压强度, MPa 。

岩体的正向应变、切向应变可由钻头钻进距离在 x 、 y 轴上的分量进行计算:

$$\begin{cases} \varepsilon_{x2} = \Delta x_2 / x_0 \\ \varepsilon_{y2} = \Delta y_2 / y_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: ε_{x2} , ε_{y2} 分别为正向应变、切向应变, 无量纲; Δx_2 , Δy_2 分别为在 x 、 y 方向的进距, m ; x_0 , y_0 分别为 x 方向和 y 方向的原始距离,

3.2 基于 Bezier 理论的轨迹控制模型

石油钻井在实钻过程中利用 MWD 实时获取钻进轨迹参数并反馈至地面控制系统, 实现钻进轨迹动态调整和实时控制 (陈海宇等,

m 。

若滑动稳定器距离钻头位置: $L=1m$

根据造斜强度, 可计算出由滑动稳定器距离钻头的距离确定的最大造斜偏角 β :

$$\lambda = \frac{\beta}{L} \Rightarrow \beta = \lambda L \quad (5)$$

若造斜强度标准值为 $1^\circ / 50m$, 则

$$\lambda_{std} = \frac{\beta_{std}}{L_{std}} = 0.02^\circ / m$$

根据几何关系:

$$\tan(\beta) = \frac{\Delta y_2}{\Delta x_2} = \frac{y_0 \varepsilon_{y2}}{x_0 \varepsilon_{x2}} = \frac{y_0}{x_0} \cdot \frac{\sigma_p^V}{\sigma_p^H} \quad (6)$$

可计算出由滑动稳定器与钻头之间的距离确定的最大造斜强度 λ_{max} :

$$\lambda_{max} = \frac{1}{L} \arctan \left(\frac{y_0}{x_0} \cdot \frac{\sigma_p^V}{\sigma_p^H} \right) \quad (7)$$

式中: λ 为造斜强度, $^\circ/10m$; β 为造斜偏角, $^\circ$; L 为钻进距离, m ; λ_{std} 为标准造斜强度, $^\circ/10m$; $\tan(\beta)$ 为造斜偏角正切值, 无量纲; λ_{max} 为最大造斜强度, $^\circ/10m$ 。

2025; 史怀忠等, 2025; 张云龙等, 2024), 但地质钻探由于需要全孔取心和受到钻具尺寸限制, 国内鲜有小口径全孔取心随钻轨迹控制系统的报道, 因此本文通过“研发配套工具

+构建轨迹控制计算模型”的思路，实现随钻过程轨迹关键参数计算及轨迹动态优化调整的目的。

轨迹控制计算依赖于钻孔倾角和方位等信息，通过在内管总成上安装轨迹数据感知存储设备，实现实时数据存储，打捞内管时获取孔斜、方位角数据。Bezier 理论（王泽凡等，2025；朱文亮等，2025；谌生等，2025）创立之初是为解决复杂路径的量化描述难题，随着迁移应用，增加相应的边界条件，可实现钻孔轨迹进行精细化计算。传统的钻孔轨迹计算方法（如平均角法、最小曲率法、圆柱螺旋线法）更适用于曲率变化平缓的长井段，核心处理方式是利用直线代替曲线段，但在需要频繁、剧烈调整方向的大曲率造斜段，用直线近似代替曲线段会造成较大误差，且连续性和局部可控性较差。而 Bezier 曲线作为一种参数化曲线，其核心优势在于能够通过控制点直观、精确地定义一条光滑连续的曲线，这正好满足了本研究对轨迹“连续可控”的苛刻要求。因此，建立基于 Bezier 理论的轨迹控制模型，通过调控 Bernstein 基函数阶级结合初始孔位信息，可迭代计算出控制轨迹的控制点坐标，以控制点坐标为下一计算单元的初始值，继续迭代计算，直至计算完整个钻孔的控制点和优化轨迹方程。该模型通过调整基函数精度，采用“曲线

代替直线”的处理思路（如图 11 所示），在实际钻进过程中通过调整扶正器位置对控制点进行调整，达到对钻进轨迹动态控制优化的目的（如图 12 所示）。具体建模过程如下所示：

Bezier 曲线是由控制点和 Bernstein 基函数构成的参数曲线，其数学形式为：

$$\mathbf{B}(t) = \sum_{k=0}^n \mathbf{P}_k \cdot \underbrace{\binom{n}{k} t^k (1-t)^{n-k}}_{\text{Bernstein 基函数}}, \quad t \in [0, 1] \quad (8)$$

式中：PK 为第 k 个控制点的坐标（如二维或三维空间中的点）；

$$B_{k,n}(t) = \binom{n}{k} t^k (1-t)^{n-k} \quad (9)$$

式（9）为 n 次 Bernstein 基函数，t 为笛卡尔坐标转换参数， $t \in (0, 1)$ 。

实际钻探过程中，能够获取相等间距、相等时间步长的曲线长度与方向角信息，以钻孔位置为坐标原点（ x_0, y_0 ），初始方位角为 α_0 ，迭代后控制点坐标为（ x_1, y_1 ）、（ x_2, y_2 ）、（ x_3, y_3 ）……（ x_i, y_i ），终点方位角为 α_1 ，终点坐标为 $P_n(x_n, y_n)$ ，曲线长度为 ΔS 。

首先计算导数模长：

$$\left| \frac{dB(t)}{dt} \right| = \sqrt{\left(\frac{dB(t)}{dt} \right)_x^2 + \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)_y^2} = \sqrt{[x'_3(t)]^2 + [y'_3(t)]^2} \quad (10)$$

在导数模长的基础上计算 Bezier 曲线弧长：

$$\Delta S = \int_0^1 \left| \frac{dB(t)}{dt} \right| dt = \int_0^1 \sqrt{[x'_3(t)]^2 + [y'_3(t)]^2} dt \quad (11)$$

在计算控制点的过程中需要判断计算结果是否满足精度需要，因此采用实际值和目标值作差的方式，评判计算结果是否满足精度需

求，若不满足，则需要返回重新计算，直至计算结果满足精度需求，本文精度设置为 0.1m，优化目标函数为：

$$f(P_i) = (L_i - s_i)^2 = \left(\int_0^1 \left| \frac{dB(t)}{dt} \right| dt - s_i \right)^2 \quad (12)$$

除此之外，Bezier 曲线需要满足以下约束

条件：

$$\begin{aligned}
\left. \frac{dy}{dx} \right|_{t=0} &= \frac{y_{3i+1} - y_{3i}}{x_{3i+1} - x_{3i}} = \tan \alpha_{3i} \\
\left. \frac{dy}{dx} \right|_{t=1} &= \frac{y_{3i+3} - y_{3i+2}}{x_{3i+3} - x_{3i+2}} = \tan \alpha_{3i+3} \\
\sqrt{(x_{3i+1} - x_{3i})^2 + (y_{3i+1} - y_{3i})^2} &= \lambda \Delta s_i \\
\sqrt{(x_{3i+3} - x_{3i+2})^2 + (y_{3i+3} - y_{3i+2})^2} &= \lambda \Delta s_{i+1}
\end{aligned} \tag{13}$$

其中, $i=0, 1, 2, 3, \dots$

方程如下:

综上所述可得第 1 段至第 i 段的曲线控制

第 1 段曲线方程:

$$B(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3 \tag{14}$$

第 2 段曲线方程:

$$B(t) = (1-t)^3 P_3 + 3t(1-t)^2 P_4 + 3t^2(1-t) P_5 + t^3 P_6 \tag{15}$$

第 N 段曲线方程:

$$B(t) = (1-t)^3 P_{3N-3} + 3t(1-t)^2 P_{3N-2} + 3t^2(1-t) P_{3N-1} + t^3 P_{3N} \tag{16}$$

最终, 大曲率深部岩体钻探的曲线方程, 可表示为:

$$\{B(t)\}_{i=1\dots N} = \left\{ (1-t)^3 P_{3i-3} + 3t(1-t)^2 P_{3i-2} + 3t^2(1-t) P_{3i-1} + t^3 P_{3i} \right\}_{i=1\dots N}, t \in [0, 1] \tag{17}$$

式中: α_0 为钻孔开孔倾角; $P_0 (x_0, y_0)$ 为钻孔位置, 即为模型初始点坐标; $P_i (x_i, y_i)$ 为

任意时刻 t 的控制点位置。

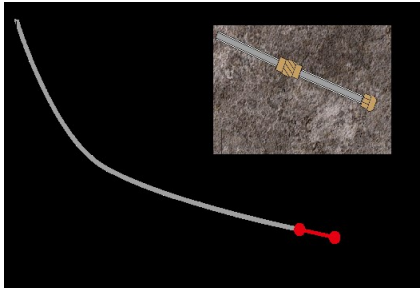


图 11 大曲率钻孔轨迹示意图

Fig.11 High-curvature drilling trajectory schematic

基于轨迹控制计算方程, 实时监测钻孔倾角和方位, 校核钻孔轨迹偏移情况, 及时调整稳定器位置和数量, 改变造斜强度, 达到精确控制轨迹的目的。该模型计算流程图如图 13 所示。

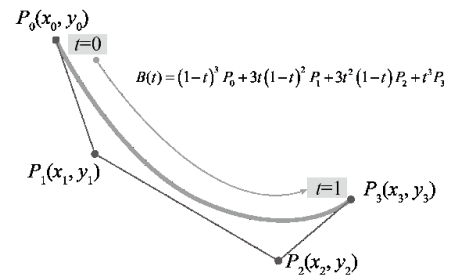


图 12 Bezier 曲线轨迹及控制点坐标示意图

Fig.12 Bezier curve trajectory and control point coordinates schematic

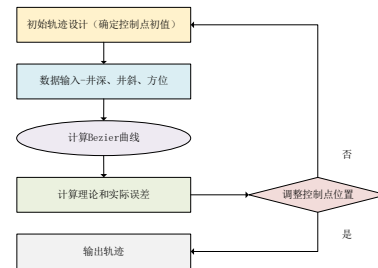


图 13 轨迹控制模型计算流程图

Fig13 Flowchart of the trajectory control model

4 重大水电工程应用

4.1 项目地质条件与钻孔结构设计

某水电工程是国家十四五规划重点工程，工程区地形陡峻、两岸岸坡坡度大于 60°，地形复杂艰险，岩性以古特提斯洋沉积岩变质形成石英岩、石英片岩为主，抗压强度大于 100MPa，河道宽度仅十米，为研究河谷是否

存在顺河向断层，评价对水电工程选址的影响，需要在复杂艰险地貌下进行跨河钻孔，常规的对穿斜孔受设备、作业条件影响难以实施，项目应用大曲率连续取心技术成功实施千米级曲线定向取心钻孔，为水电站电站方案选择提供支撑。曲线定向取心孔设计如图 14 所示。

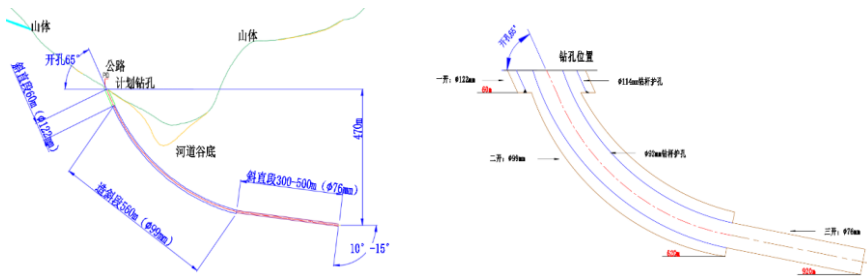


图 14 曲线定向取心深钻孔示意图

Fig.14 Schematic diagram of curved directional coring deep borehole

钻孔结构设计采用三开设计，一开采用 P 系列绳索取心钻进，Φ114mm 绳索取心钻杆，钻进至基岩一定深度后，预计钻进深度 60m，下入 Φ114mm 绳索钻杆当套管；二开定向钻进采用柔性导向取心钻具钻进，按 0.9°/10m 的造斜强度导向钻进至 620m，达到钻孔轨迹设

计要求后，下入 Φ92mm 绳索钻杆留在孔内作为套管护壁；三开采用 N 系列绳索取心钻进，Φ73mm 绳索钻杆，沿着定向钻孔轨迹绳索取心钻进，预计钻进深度 1000m，直至穿越目标层。

4.2 组织实施

钻探装备与器具：采用研制的 GXD-5S 全液压动力头岩心钻机，以 25° 的孔斜开孔钻进，钻进角度可在 0°~90° 内变化，配有额定功率为 179kW 的发动机，动力头给进行程 3.3m，最大提升力 125kN，最大给进力 75kN，主卷扬最大提升力 96kN，副卷扬最大提升力 11kN。泥浆泵采用 BW300/16 泵，该泵泵压最大达 16MPa，适应能力强。绳索取心钻杆采用定制的 Φ92mm 绳索钻杆（定制 HY）和 Φ73mm 绳索钻杆（定制 NY），导向取心钻具采用柔性导向取心钻具（实物如图 15 所示）。

一开钻进，施工结束后将 Φ114 钻杆下入孔内作为套管护壁。二开/三开冲洗液：水+3-5%P HP+0.1-0.5%特效润滑剂。二开采用 Φ99mm 柔性导向绳索取心钻进和修孔钻进交替进行，柔性导向取心钻具组合：Φ99mm 钻头+Φ99.5mm 扩孔器+钻具外管+Φ97mm 扶正器（滑动稳定器）+弹卡室+弹卡挡头+Φ97mm 扶正器（滑动稳定器）+Φ73mm 绳索钻杆（定制 NY），修孔钻具组合：Φ99mm 锥形钻头+Φ99.5mm 扩孔器+钻具外管+弹卡室+弹卡挡头+Φ92mm 绳索钻杆（定制 HY），二开钻进至 620m，下 Φ92mm 绳索钻杆作为套管护壁。三开采用 Φ76mm 绳索取心钻进，设计孔深 920m，后应地质要求孔深加深，钻进至 1004m 结束三开施工。

钻探实施过程：一开冲洗液：清水+0.3% XC++0.1% NaOH+0.2% FLA-2+0.1%PHP+2%CPC-1。一开使用 Φ122mm 孕镶金刚石取心钻头钻进，钻进至 59.9m 确认钻穿覆盖层结束



图 15 柔性导向取心钻具现场实物

Fig.15 Field photo of flexible guided coring drilling tool

4.3 完成情况

通过“柔性导向取心钻具+Bezier 轨迹控制模型”的工作模式，可实现孔斜方位精准控制。图 16 展示了随钻过程中动态调整滑动稳定器后的孔斜、方位预测值与实测值的趋势，从中可以看出，基于 Bezier 的轨迹控制模型计算结果与实测结果较为吻合，且模型计算结果与实测值最大误差不超过 5%，终孔实际孔斜 78° ，方位角 212° ，实际轨迹相较于理论轨

迹最大偏差不超过 6.5m，最大误差仅为 0.95%。此外，该技术不仅可实现造斜段连续取心，且在国内外首次取出弯曲状岩心，如图 18 所示，终孔实钻轨迹和设计轨迹对比如图 17 所示，达到地质设计目标。该孔平均台月效率 197.64m，全孔平均岩心采取率为 94.35%，取心钻进平均机械钻速 1.46m/h，优质高效完成了 1004m 曲线定向取心深钻孔施工任务。

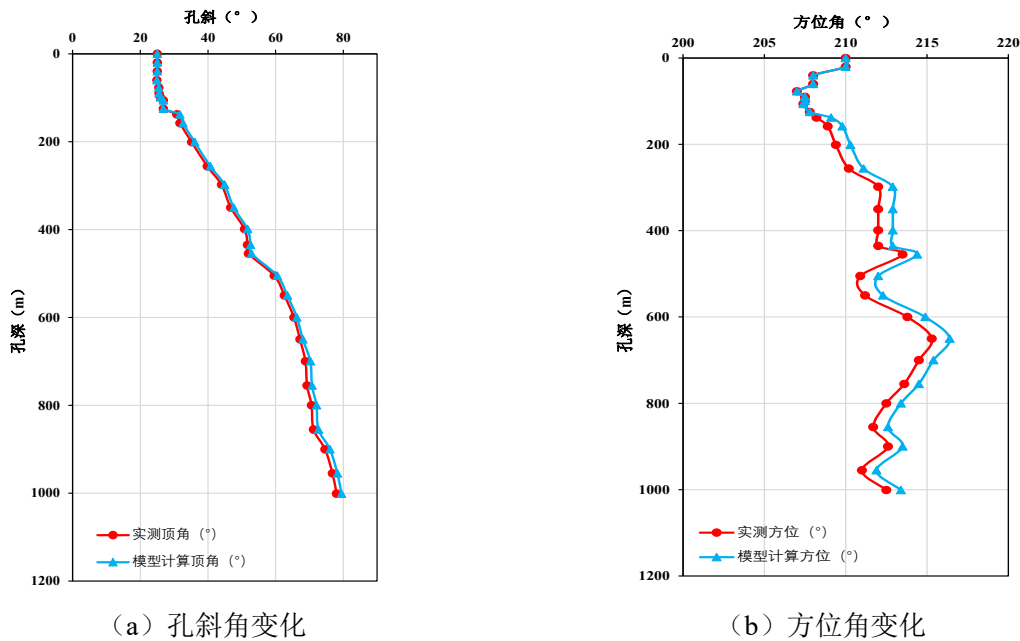


图 16 钻孔孔斜角、方位角计算与实测对比图

Fig.16 Comparison of Calculated vs. Measured Borehole Inclination and Azimuth



图 17 弯曲岩心图

Fig.17 Schematic diagram of curved core

5 结论与建议

(1) 针对西部地区某水电工程复杂艰险山区深切河谷工程地质勘察难题，建立了柔性

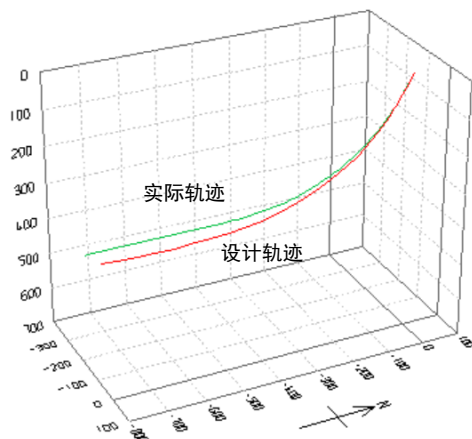


图 18 钻孔轨迹对比图

Fig.18 Comparison diagram of borehole trajectories

导向造斜连续取心钻具和大曲率定向连续取心勘探方法，实现了定向钻进与绳索连续取心钻进同步，在深切河谷一侧通过曲线定向钻进

连续取心方法穿越深切河谷底部和对面山体, 支撑高海拔大落差山区工程规划建设。

(2) 建立柔性导向取心钻具在不同控制点下的力学仿真模型, 仿真结果表明: 稳定器距钻头距离越远, 钻头横向应力、最大应力、挠度等均减小, 表明稳定器距离钻头越近造斜强度越大。

(3) 基于 Bezier 理论, 建立 Bezier 轨迹控制模型, 结合自研柔性导向取心钻具, 形成“柔性导向取心钻具+基于 Bezier 理论的轨迹控制模型”工作模式, 模型计算结果与实测值最大误差不超过 5%。应用于千米级钻孔, 终

孔孔斜 78° , 终孔方位角 212° , 实际轨迹相较于理论轨迹最大偏差不超过 6.5m, 最大误差仅为 0.95%, 实现大曲率造斜段连续取心, 且国内外首次取出弯曲状岩心, 满足地质要求, 轨迹控制较好。

(4) 本文轨迹测量工具为存储式, 在实际应用中具有一定的滞后性, 在后续研究中建议增添泥浆脉冲发生器, 以泥浆脉冲信号为传输介质, 建立地下-地面信息采集及传输的高效响应机制和传输系统, 达到实时采集传输地下信息和地面高效控制的目的。

References

- Zhang, S. S. (2025). Research Status and Development Trend of Deep Geological Exploration Techniques for Hydraulic and Hydroelectric Engineering. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 44(6), 1377–1404. DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0921.
- Ning Bo, Sha Zhibin, Li Jing, et al. Current Status and Development Trends of Deep-Sea Drilling Technology[J/OL]. Earth Science, 1-12[2026-01-26].
- Qin Rulei, Lu Qiuping, Xie Wenwei, et al. Influence Mechanism and Prediction Model of Driving Force for the Ball Valve in Deep-Sea Pressure-Coring[J/OL]. Earth Science, 1-18[2026-01-26].
- ZHOU W B, LI J, LI X L. Application of CG STEER rotary steerable system in tight gas horizontal wells: A case study of Sulige Gas Field[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2025, 39(02): 6-9+15.
- Chur C, Oppelt J. Vertical drilling technology: a milestone in directional drilling[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 1993: SPE-25759-MS.
- QIN Y H, YANG J Y, FANG P L, et al. Promoting unconventional oil and gas revolution through vigorous development of rotary steerable drilling technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2025, 44(01): 43-50+85.
- ZHANG W. Practice of directional drilling technology based on rotary steerable system in carbon sequestration wells[J]. Chemical Enterprise Management, 2025, (06): 158-161. DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2025.06.041.
- YANG M Q, YANG F, YANG Y P. Research progress of rotary steerable systems in Russia[J]. Mud Logging Engineering, 2019, 30(02): 79-82+135-136.
- KONG J W. Research progress on rotary steerable drilling systems and control methods[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(03): 211-213.
- LI S C, LI L P, SUN Z Z, et al. Key technology analysis and development trends of ultra-long directional drilling equipment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(01): 1-30. DOI:10.16285/j.rsm.2022.2027.
- Chur C, Oppelt J. Vertical drilling technology: a milestone in directional drilling[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. SPE, 1993: SPE-25759-MS.
- ZHIRONKIN V, EPIKHIN A, NOVOSELTSE V D, et al. Determination of the Loads on the Steering Module of the Push-the-Bit Rotary Steerable System in the Context of Its Reliability[J]. Acta Montanistica Slovaca, 2020, 25(3).
- SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, et al. Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3000 m in u

- nderground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47 (6): 1-7.
- WANG Minghua, LIU Wei, DUAN Xulin, et al. Optimization and application of coring technology in deep fractured formations in Sichuan-Chongqing area [J]. Drilling & Production Technology, 2022, 45 (6): 26-30.
- ZOU Zujie. Research and application of near-horizontal directional coring technology and supporting drilling tools[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55 (12): 214-220. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.20241199.
- HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling [J]. Drilling Engineering, 2025, 52 (1): 39-46.
- LIN Tingting, LIU Zekai, MA Yinlong, et al. Design of attitude monitoring system for directional drilling continuous coring tools [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51 (9): 138-146.
- CHEN H Y, WANG C, LIANG L, et al. Compound drilling trajectory control technology in deep Yang 101 block of Luzhou, Sichuan[J]. West-China Exploration Engineering, 2025, 37(05): 53-56.
- SHI H Z, CHEN H, HE W H, et al. Development of flexible ultra-short-radius multilateral sidetracking trajectory-control tools [C]// Shanghai United Unconventional Energy Research Center. Proceedings of the 1st ECF Youth Conference on Unconventional Energy. Beijing: National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum; Beijing Key Laboratory of Optical Detection Technology for Oil and Gas, China University of Petroleum, 2025: 93-97. DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.008608.
- ZHANG Y L, HUANG J Q, SONG B B, et al. Drilling trajectory control technology in strong deflecting formations of Lanling iron mine, Shandong[J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(12): 33-41.
- WANG Zefan, WANG Quanzheng, SUN Xiaoxu, et al. Unmanned Surface Vehicle Path Planning Based on Fish School Algorithm and Bezier Curve Optimization[J]. Ship Electronic Engineering, 2025, 45(05): 37-42.
- ZHU Wenliang, WANG Zhipeng. Path Planning Analysis Based on Fusion of Improved A* Algorithm and Cubic Bezier Curve[J]. Electronic Technology, 2025, 54(03): 56-58.
- CHEN Sheng, WEN Jiayan, GAO Yuan. Single AGV Path Planning Based on Improved A* Algorithm and Bezier Curve Smoothing[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2025, 36(02): 59-68.

中文参考文献

- 张世殊. 水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(06): 1377-1404. DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0921
- 宁波, 沙志彬, 李晶, 等. 深海钻探技术现状及发展动态[J/OL]. 地球科学, 1-12[2026-01-26].
- 秦如雷, 卢秋平, 谢文卫, 等. 深海保压取心球阀驱动力影响机理与预测模型[J/OL]. 地球科学, 1-18[2026-01-26].
- 周文兵, 李婧, 李晓黎. CG STEER 旋转导向钻井系统在致密气水平井中的应用——以苏里格气田为例[J]. 石油地质与工程, 2025, 39(02): 6-9+15.
- 秦永和, 杨建永, 房平亮, 等. 大力发展旋转导向钻井促进非常规油气革命[J]. 石油科技论坛, 2025, 44(01): 43-50+85.
- 张威. 基于旋转导向系统的定向钻井技术在碳封存井中的实践[J]. 化工管理, 2025, (06): 158-161. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2025.06.041.
- 杨明清, 杨凡, 杨一鹏. 俄罗斯旋转导向系统研发进展[J]. 录井工程, 2019, 30(02): 79-82+135-136.
- 孔锦炜. 旋转导向钻井系统及其控制方法研究进展[J]. 石化技术, 2024, 31(03): 211-213.
- 李术才, 李利平, 孙子正, 等. 超长定向钻注装备

- 关键技术分析及发展趋势[J].岩土力学,2023,44(01):1-30. DOI:10.16285/j.rsm.2022.2027.
- 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下 3000 m 顺煤层定向钻孔钻进关键技术 [J].煤田地质与勘探,2019,47(6):1-7.
- 王明华,刘维,段绪林,等.川渝地区深层破碎地层取心工艺优化研究 [J].钻采工艺,2022,45(6):26-30.
- 邹祖杰.近水平定向取心技术与配套钻具研究及应用[J].煤矿安全,2024,55(12):214-220. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.20241199.
- 韩泽龙,李小洋,施山山,等.定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析 [J].钻探工程,2025,52(1):39-46.
- 林婷婷,刘泽楷,马银龙,等.定向钻进连续取心钻具姿态监测系统[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):138-146.
- 陈海宇,王超,梁林,等.四川泸州深层阳 101 区块复合钻轨迹控制技术[J].西部探矿工程,2025,37(05):53-56.
- 史怀忠,陈晗,赫文豪,等.柔性钻具侧钻超短半径多分支井轨迹调控钻具研制[C]//上海联合非常规能源研究中心.首届 ECF 非常规能源青年大会论文集.中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室;中国石油大学(北京)油气光学探测技术北京市实验室,2025:93-97.
- 张云龙,黄建强,宋彬滨,等.山东兰陵铁矿强造斜地层钻探钻孔轨迹控制技术[J].山东国土资源,2024,40(12):33-41.
- 王泽凡,王全政,孙晓旭,等.基于鱼群算法和 Bezier 曲线优化的无人艇路径规划[J].舰船电子工程,2025,45(05):37-42.
- 朱文亮,王志鹏.基于改进 A*算法和三阶贝塞尔曲线融合的路径规划分析[J].电子技术,2025,54(03):56-58.
- 湛生,文家燕,高远.基于改进 A*算法和 Bezier 曲线平滑的单 AGV 路径规划[J].广西科技大学学报,2025,36(02):59-68.