

# 非开挖管道施工在水利工程中的有效运用研究

杨佳鑫

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830011

**【摘要】**：随着水利工程建设对环境保护和社会影响的要求越来越高，非开挖管道施工技术是穿越复杂环境的主要解决方法。以我国某地一处城市“城乡供水一体化工程”为研究案例，对水平定向钻（HDD）等非开挖技术的原理、优势、适用性做了系统的阐述。通过对工程案例中精细化勘察、轨迹设计、导向控制、泥浆工艺、回拖风险控制等关键技术要点的分析，证明了非开挖技术在有效减少环境影响、规避社会干扰、控制综合成本方面有明显的价值，对实现更高的水利工程经济效益和社会效益打下良好的基础。

**【关键词】**：非开挖技术；水利工程；水平定向钻；关键技术；环境保护

DOI:10.12417/2811-0528.26.06.077

水利工程是国家基础设施建设的重要组成部分，管道工程在引调水、排水、生态修复等各方面起着非常重要的作用。传统的明挖沟槽施工方式穿越城市建成区、交通干线、河流水体、生态敏感区时，拆迁量大、交通阻断、生态破坏、成本高，已经不能满足现代化工程绿色、高效、可持续发展的要求。在此背景下，非开挖管道施工技术作为一种对地表干扰很小、环境友好的先进施工方法，在市政、油气等领域已经得到了广泛的应用，其在水利工程中的推广潜力很大。但是由于水利工程的功能特殊性，对管道结构安全、长期服役性能和特殊环境下的施工控制提出了更加严格的要求。当前水利场景下非开挖技术系统性应用及关键技术要点研究还不足，因此需要根据工程实际情况，对非开挖技术在水利工程中适用方案、关键技术点、风险控制策略进行研究，为类似工程的实施提供理论依据和实践参考，推动水利建设向高质量、可持续方向发展。

## 1 非开挖管道施工主要技术方法及其原理

### 1.1 常用的非开挖管道施工技术介绍

非开挖管道施工技术体系丰富，其核心方法根据地质条件、管径、施工精度和成本要求的不同而有所不同。顶管法是历史较早的一种工法，主要依靠主顶油缸的推力，将工具管或者掘进机从工作井穿过土层推到接收井，同时在后方敷设预制管节，该方法适合于管径较大（DN800以上）、施工精度要求高的城市地下管道工程，在穿越重要构筑物下面时能有效控制沉降。水平定向钻（HDD）技术是利用可导向的钻头先钻出导向孔，再进行扩孔作业形成所需孔径，最后将预制管道拖入孔中完成敷设<sup>[1]</sup>。HDD技术对地表干扰很小，适合管径较小，常用DN200-DN1200、长距离穿越河流、公路、铁路的管线工程，技术核心就是精确的导向控制和科学的泥浆护壁。盾构法和微型隧道法属于更先进的机械化暗挖技术，盾构法配备完整的盾构机，在掘进过程中拼装管片形成永久衬砌，适用于

长距离、大直径的隧道工程；微型隧道法可以看作是小型化的盾构，常用于市政管道的精密铺设。另外，还有夯管法、螺旋钻进法等工法，适用于某些地质条件以及短距离施工，这些工法共同构成了一个多层次、全口径的非开挖技术解决方案库。

### 1.2 技术优势与适用性分析

非开挖技术的综合优势比传统开挖施工要高得多，其主要价值体现在环境、社会、经济三个方面。在环境保护方面，非开挖技术将施工活动主要限制在进出工作井的范围内，最大程度地避免了大范围地表开挖所造成的植被破坏、水土流失、扬尘污染和景观破坏，对穿越河流、湖泊、湿地等生态敏感区具有不可替代的保护作用。从社会效益上来说，它极大减少了既有的道路交通被长期占用、阻断的情况，降低了沿线居民生活、商业活动所受的噪音、安全等干扰，避免因开挖可能造成的对地下光缆、燃气管道等已有管线的意外破坏，大大提升了城市文明施工的水平<sup>[2]</sup>。

从全生命周期经济性来看，虽然非开挖技术的直接设备投入和单位长度施工成本比明挖要高，但是它通过大幅度降低征地拆迁费、路面修复费、交通疏导费、环境恢复费等，在穿越障碍物的复杂工况下，往往具有更好的经济性。另外，施工受气候条件影响小，工期更具有可控性、可预测性，但是该技术优势的发挥很大程度上依靠前期地质勘察的准确性、合理选择工法，坚硬岩层、孤石密集地层、高精度重力流管道施工时存在局限性，应结合工程条件做严谨的技术经济比选。

## 2 工程概况

本案例选取了某地区一处“城乡供水一体化工程”的关键管段作为分析对象，该工程主要目的就是新建DN800-DN250输水管道，从上游水库每天输送7.35万m<sup>3</sup>饮用水到严重缺水的村镇居民，改善村镇居民旱季用水难，无水

用等困难境地。项目面临的主要问题是输水管道要依次下穿高铁线路、城市主干道、老旧密集居民区；既有年代久远的地下管线，还有宽度约为100m的河道支流，整个工程全长约157km。

穿越区域地质条件复杂，本次选取其中一段河床穿越进行研究，其地质自上而下依次为杂填土层、流塑状淤泥质粉质粘土层、中密粉砂层，地下水位高，河床段有冲刷风险，采用传统的开挖方式，会导致主干道长期封闭、大量沿河设施拆迁费用，对河道护坡和生态造成严重破坏，社会和经济成本非常高。经多方论证，为了最大程度上减少社会干扰、保护生态环境、控制工程风险和总投资，决定采用非开挖技术敷设管道。经过对顶管法与水平定向钻（HDD）法进行详细的比选，最后确定采用水平定向钻（HDD）技术实施本次穿越，并对河床穿越段做了专门的轨迹设计和环保控制方案。

### 3 非开挖管道施工在水利工程中的实践应用要点分析

#### 3.1 前期勘察与设计要点

##### 3.1.1 精细化地质勘察与环境探查

科学、准确的前期勘察是决定非开挖工程成败的前提，本项目为了满足HDD施工对地层信息的严格要求，勘察工作由原来的面到线进行深化。在常规区域勘察的基础上，沿设计管道轨迹线加密钻孔、原位测试，主要确定了淤泥质粘土层的灵敏性、不排水抗剪强度、粉砂层的密实度、标贯击数、渗透系数，为轨迹优化、钻头选型、泥浆配方设计提供主要参数<sup>[3]</sup>。综合运用地质雷达、管线探测仪等物探手段，对拟穿越路径下方的既有市政管线、遗留障碍物、地层异常区做三维扫描式探查，准确找到了多条未知通讯光缆、废弃基础，避免了施工中的撞击。对于重要的河道穿越段，补充了河床地形测量、水深和冲刷历史数据调查，为管道最小安全埋深的确定提供了依据。

##### 3.1.2 管道轨迹与结构设计的协同优化

在精准勘察数据的基础上，管道轨迹设计就成了联系施工可行性和水利功能要求的枢纽，设计遵循平滑过渡、安全规避的原则，在三维空间里对轨迹的入土角、出土角、曲率半径、中间段深度做多方案比选，最终确定的轨迹用平缓弧线穿行，保证河床下最小覆土厚度大于规范要求的1.5倍河道冲刷深度，并且避开了所有探明的地下障碍物。从结构设计方面考虑，结合水利管道输水功能特点：由于管道内水压力高、需长期运行，所以选择了承压性能好、柔韧性好、耐腐蚀的高密度聚乙烯（HDPE）实壁管作管材，采用熔接方式可保证整体密封。同时根据输送水质的腐蚀性分析，确定管道外壁采用双层环氧

粉末涂层防腐，内壁保持食品级光滑内衬减小输水阻力和生物附着，实现了非开挖施工工艺与水利工程长期服役性能的深度融合。

#### 3.2 导向与钻进精度控制

导向及钻进精度属于水平定向钻（HDD）施工的关键部分，同时也是保证管道可以按照设计轨迹精准敷设，避免碰到地下障碍物的重要环节。本工程采用无线随钻测量（MWD）系统进行实时导向，无线随钻测量系统由井下探棒、地面接收器、计算机控制系统组成。探棒在钻头后面实时测量井斜角、方位角、工具面向角等参数，用泥浆脉冲信号传到地表，操作人员根据反馈数据和设计轨迹的对比，通过调节钻头泥浆喷嘴的方向（即工具面向角）来控制钻进方向，达到测控闭环的目的<sup>[4]</sup>。

钻杆进行施工作业，每一根钻杆完成后需要进行钻头的位置确定，通过与设计路线相比进行团头方向的调整，施工中对关键参数设置严格的控制标准（如表1所示），并制定相应的调整策略。软硬交替的粉砂和粘土互层中钻进时，当监测到轨迹横向偏差接近±100mm预警值时立即停止推进，通过改变工具面向角、调节钻压和转速的组合来纠偏。考虑到河流穿越段河床稳定性风险，将轨迹精度控制在±150mm以内，导向数据采样频率加密到每钻进0.5m一次。通过全过程精细控制。本工程导向孔实际出土点与设计位置的水平偏差控制在80mm以内，高程偏差控制在50mm以内，完全满足管道对接和水利功能的要求。

表1 HDD 施工导向与钻进关键参数控制标准

控制参数	控制标准	预警值	备注
轨迹横向偏差	±200 mm	±100 mm	相对于设计轴线
轨迹高程偏差	±150 mm	±75 mm	相对于设计标高
工具面向角控制精度	±1.5°	-	决定钻头转向的关键参数
导向数据采样频率	每1.0米	-	河床段加密至每0.5米
最大允许曲率半径	1200D(D为管径)	-	本例中D=500mm，即不小于600米

### 3.3 泥浆工艺与孔壁稳定

泥浆工艺在水平定向钻(HDD)施工中起着保证孔壁稳定,使施工顺利进行的作用,泥浆既是冷却润滑钻具的介质,又是携带钻屑的介质,更重要的是它在孔壁周围形成低渗透性的泥皮,来平衡地层压力,防止孔壁坍塌或者缩径。本工程根据穿越地层主要为淤泥质粘土、粉砂层的特性,做了专门的泥浆配方设计和动态管理,对于上部软塑粘土层,配制了低固相、低失水的聚合物泥浆,减少对地层的扰动,快速形成护壁泥皮;穿越松散粉砂层及河床段时,提高泥浆的粘度和动切力,加入适量的降滤失剂和封堵剂超细碳酸钙,封堵砂层孔隙,防止泥浆漏失、孔壁失稳。

定向钻托长度相对较长,需要使用较大机械拉力完成相应操作,要将定向钻机固定在混凝土基础部分,做好混凝土浇筑处理,并且内配双层双向钢筋,保证基础部分的稳固性,同时施工过程中设置现场泥浆实验室,实时检测并调节泥浆密度、粘度、pH值、滤失量等指标,保证其性能一直适应地层变化。在穿越河道支流时,通过精确控制泥浆泵送压力,使其略高于地层静水压力但是低于最小地应力,成功地避免了泥浆冒顶污染水体的风险。经过振动筛、除砂器等固控设备循环净化处理后的泥浆,分离出的钻屑被环保外运,净化过的泥浆补充新材料后再次使用,既能保证孔壁稳定又能体现绿色施工理念。

### 3.4 回拖敷管与风险控制

回拖敷管是非开挖管道施工的最后也是最重要的工序,它的主要目的是以最小的风险把预制管道平稳、完整地拖入已形成的孔洞中。本工程回拖前做了充分的准备工作,所有的高密

度聚乙烯管段都在场地内完成了专业的热熔对接,并对每一道焊口进行了100%的超声波无损检测和100%的冷却翻边刮削检查,保证接口强度和密封性;管道外壁防腐层经过电火花检测,无破损<sup>[5]</sup>。回拖作业采用“发送沟”加“发送小车”的方式,全程使用专用回拖头和旋转接头,分散拉力、防止管道扭转。过程中对回拖力、回拖速度、泥浆返排量、孔口状态进行24h连续监测。根据理论计算得到的回拖力与实际值进行实时对比,当拉力接近管道极限抗拉强度的50%时,立即停止回拖,检查孔壁失稳、孔洞缩径、管道卡阻等状况,用改变泥浆润滑性能或辅助清孔等方法解决。针对河床段这个高风险区,专门制定了应急预案,有备用回拖设备、快速堵漏材料和水体污染应急处理方案,可以对“卡管”、孔壁坍塌、冒浆等潜在的风险做出快速的反应并加以控制,最终实现了DN500管道一次安全、成功回拖。

## 4 结语

综合以上分析可知,本次工程运用实证的方法对水平定向钻(HDD)等非开挖管道施工技术进行研究后得出,在水利工程中采用水平定向钻(HDD)等非开挖管道施工技术能有效解决复杂环境中管道敷设问题,是实现绿色高效水利建设的优选方案。成功实施的关键在于系统的化技术管理,在前期依靠精细化地质勘察和多目标协同轨迹设计;在施工中依靠高精度导向系统实现过程控制,用科学的泥浆工艺保证孔壁稳定;最后用严密的回拖方案和应急预案控制风险。其主要价值就是大大减小了对地表生态和社会活动的干扰,在穿越障碍物的综合工况下表现出更好的全生命周期经济性。

## 参考文献:

- [1] 黄丽婷.水利工程中的顶管技术应用与优化策略[J].水上安全,2024,(24):163-165.
- [2] 江永安,刘新朋,胡晓辉.非开挖顶管施工技术在前坪灌区穿越北汝河工程的应用[J].海河水利,2024,(05):97-100+110.
- [3] 刘洪君.非开挖管道施工在水利工程中的应用研究[J].东北水利水电,2023,41(03):15-16+56.
- [4] 李光亮,李学敏,任晓舟.非开挖定向钻穿越技术在水利工程中应用关键技术[J].价值工程,2023,42(03):59-61.
- [5] 胡东起,史芳弟,王徐越,等.非开挖修复技术在城市密集区排水管道修复中的应用[J].绿色建筑,2022,14(02):105-107.