

市政管网智能非开挖顶管与定向钻施工关键技术及控制研究

雷尉博

陕西建工第一建设集团有限公司 陕西 西安 710000

【摘要】：针对长征二路东辅道（天河一路一新和村安置地块西边线）给排水及线缆沟工程市政管网非开挖施工中顶管与定向钻工艺参数控制难、风险预警滞后问题，研究顶管机智能化选型与泥水平衡压力调控、顶进力动态预测及姿态自动纠偏方法，提出基于机器学习和模糊PID的控制策略；分析导向孔轨迹优化、分级扩孔参数匹配及钻头定位与回拖力估算模型，建立基于遗传算法的轨迹设计方法和回拖力实时控制准则。构建融合多源传感数据采集、数字孪生仿真与规则引擎决策的智能监控平台。结果表明，所提技术体系可有效提升施工精度，降低卡管、塌孔等事故率，成果可应用于城市复杂环境管网工程。

【关键词】：市政管网；非开挖施工；顶管技术；定向钻技术；智能控制；数字孪生

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.074

引言

随着城市化加速，地下管线建设规模扩大，传统明挖受制于路面破坏、交通影响、噪音扰民等问题。非开挖技术以地表扰动小、周期短、环境影响低优势，成为市政管网敷设主流。顶管法和定向钻法分别适用于直线段长距离铺设和曲线穿越障碍物。但地质条件复杂多变，施工参数依赖人工经验，顶进力失控、钻孔偏斜、塌孔冒浆频发。现有监测多为事后报警，缺乏实时预测与自适应调控。智能化控制通过传感感知、数据分析与自动决策，有望实现精准控制与风险主动规避。故开展市政管网智能非开挖顶管与定向钻施工关键技术及控制研究具有重要工程价值。

1 顶管施工关键技术及控制

1.1 顶管机选型与智能化改造

软土地层泥水平衡式顶管机靠泥膜稳定开挖面，泥水密度 $1.05\sim 1.15\text{ g/cm}^3$ ，循环流速 $\geq 1.5\text{ m/s}$ 保排渣。砂卵石用土压平衡式，螺旋输送机转速 $5\sim 15\text{ r/min}$ ，土舱压力维持静止土压力 $0.9\sim 1.1$ 倍。硬岩配滚刀破岩刀盘，扭矩系数软岩 $0.6\sim 0.8$ ，中硬岩 $0.8\sim 1.2$ ，硬岩 $1.2\sim 1.5$ 。智能化改造加装扭矩传感器和压力变送器，扭矩监测精度达满量程 $0.5\%\sim 1\%$ 。螺旋驱动配变频器，依土舱压力调转速，响应 $< 2\text{ s}$ 。泥水循环装电动调节阀和流量计，PLC闭环控制压力波动 $\pm 0.02\text{ MPa}$ 内，改造后成都地铁配套排水管连续顶进 420 m 未失稳。

1.2 顶进力动态预测与调控

顶进力受地层、管壁摩阻、注浆影响，静态公式难应突变。据历史数据建随机森林回归模型，输入顶进距离、土舱压力、

注浆量、地表沉降速率，训练样本 ≥ 300 组。预测前方 10 m 顶进力趋势，平均绝对百分比误差 $\leq 8\%$ 。前馈控制器提前调千斤顶油压，步长 0.5 MPa/次 ，间隔 $\leq 30\text{ s}$ 。反馈控制器以实际与目标偏差作输入，比例积分消除稳态误差，比例系数 0.3 ，积分时间 60 s 。复合控制器用于上海软土污水干管，顶进力超调量由 25% 降至 12% ，最大顶进力由 4500 kN 降至 3800 kN 。注浆减阻协同，膨润土泥浆每米 0.15 m^3 ，摩阻系数由 0.2 降至 0.14 。

1.3 姿态测量与自动纠偏控制

激光靶配合双轴陀螺仪构成姿态测量单元，激光靶接收端安装在机头后部隔板上，测量精度为 $\pm 0.01^\circ$ 。陀螺仪漂移误差通过卡尔曼滤波器融合加速度计数据进行补偿，滤波更新频率为 100 Hz 。俯仰角和偏转角偏差超过 0.1° 时触发纠偏动作，纠偏油缸分组布置在机头四周，每组油缸行程控制分辨率为 1 mm 。模糊PID控制器将偏差和偏差变化率作为输入变量，隶属度函数采用三角形分布，模糊规则库包含 25 条推理规则。输出量为纠偏油缸伸出速度，速度调节范围为 0 mm/s 至 5 mm/s ^[2]。在广州珠江过江隧道顶管施工中，自动纠偏系统将轴线偏差控制在 $\pm 30\text{ mm}$ 以内，远小于设计允许的 $\pm 50\text{ mm}$ 。测量系统每 10 s 自动校准一次激光靶零点，消除温度漂移带来的累计误差。纠偏过程中同步调整推进油缸分组压力差，防止机头产生额外扭转。

2 定向钻施工关键技术及控制

2.1 导向孔轨迹优化设计

三维地质模型整合钻探数据和物探成果，地层分层厚度误差控制在 0.5 m 以内。最小曲率半径按钻杆规格取值， $\Phi 89\text{ mm}$

【作者简介】雷尉博，1992年1月生，男，汉族，陕西省西安市碑林区，陕西建工第一建设集团有限公司，工程师，本科，主要从事土木工程研究。

钻杆取 40 m, $\Phi 114$ mm 钻杆取 50 m。避障安全距离设定为 2 m, 管线净距不足时局部加密控制点。B 样条曲线阶数取 3, 控制点数量根据地层起伏程度设置为 5 至 8 个。目标函数为钻进长度最小化, 约束条件包括入土角不大于 12° 、出土角不大于 10° 、相邻控制点间曲率连续。遗传算法种群规模 100, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.05, 迭代终止条件为连续 50 代目标函数变化小于 0.1%。某 DN600 钢管穿越河道工程, 原设计轨迹长度 320 m, 优化后缩短至 298 m, 入土角由 12° 调整为 10° , 出土角由 8° 调整为 7° , 最大曲率半径由 120 m 增大至 150 m。优化轨迹在施工中实际钻进长度 301 m, 与理论值偏差 1%, 验证了算法的有效性。轨迹优化后回拖阻力降低约 15%, 减少了卡钻风险。

2.2 扩孔工艺参数控制

分级级数按最终与初始孔径差除以单级增量, 软土 150 mm, 砂卵石 100 mm, 硬岩 80 mm。扩孔器选型: 软土粘土用刮刀式, 刀翼 4~6 片, 切削角 60° ; 砂卵石用锥形滚刀式, 齿高 20 mm; 硬岩用平底滚刀式, 滚刀间距 30 mm。泥浆排量按扩孔环空体积 1.5 倍, 软土 $1.5\sim 2.0\text{ m}^3/\text{min}$, 砂卵石 $2.0\sim 2.5$, 硬岩 $1.0\sim 1.5$ 。马氏漏斗粘度: 软土 30~35 s, 砂卵石 40~45 s, 硬岩 50~55 s³³。失水量: 软土 $\leq 15\text{ mL}/30\text{min}$, 砂卵石 ≤ 10 , 硬岩 ≤ 8 。某 DN800 砂卵石穿越, 分三级扩孔: 400 mm、600 mm、800 mm。每级清孔 10 min, 含砂量 $< 2\%$ 。未塌孔, 效率提高 20%。

2.3 钻头定位与回拖力控制

三种钻头定位技术性能差异显著, 电磁波定位发射频率 8 kHz 至 12 kHz, 地面接收天线阵列间距 5 m, 水平定位精度 $\pm 0.5\text{ m}$, 垂直精度 $\pm 0.3\text{ m}$, 适用深度 0 至 30 m, 金属管线密集区域信号衰减严重。地磁定位利用地球磁场矢量, 无需地面设备, 水平精度 $\pm 1.0\text{ m}$, 垂直精度 $\pm 0.8\text{ m}$, 适用深度 0 至 50 m, 受附近铁磁性物体干扰较大。惯性导航系统采用光纤陀螺和加速度计, 航位推算累积误差每小时 0.5%, 水平精度 $\pm 0.2\text{ m}$, 垂直精度 $\pm 0.15\text{ m}$, 适用深度无限制, 抗电磁干扰能力强, 三种方法性能对比见表 1。

表 1 三种钻头定位技术性能对比

定位方法	水平定位精度/m	垂直定位精度/m	适用深度/m	抗干扰能力
电磁波	± 0.5	± 0.3	0~30	弱
地磁	± 1.0	± 0.8	0~50	中等
惯性导航	± 0.2	± 0.15	不限	强

回拖力实时估算基于摩擦系数、管道单位长度重量和回拖长度, 摩擦系数随泥浆润滑剂浓度变化, 润滑剂聚丙烯酰胺添加量从 0.5% 增至 2.0% 时, 摩擦系数从 0.35 降至 0.18。回拖速度控制在 0.3 m/s 至 0.5 m/s, 当回拖力达到设计最大值的 80% 时自动降速至 0.2 m/s 并增加润滑剂注入量至 2.5%。某 DN800 钢管回拖长度 500 m, 设计最大回拖力 2000 kN, 实际施工中峰值回拖力 1850 kN, 未触发保护阈值。泥浆泵排量稳定在 $2.2\text{ m}^3/\text{min}$, 回拖全程无卡阻。惯性导航系统每 50 m 校正一次地面标记点, 累计定位误差小于 0.5 m, 保证了轨迹精度。

3 智能监控与协同控制平台

3.1 多源传感数据采集与传输

地表沉降监测采用静力水准仪, 测点沿管道轴线每隔 10 m 布设一处, 横向断面布置 3 个测点分别位于管道中心线正上方及左右各 5 m 位置, 量程 50 mm, 分辨率 0.01 mm, 长期稳定性优于 0.1%FS。仪器安装时基座浇筑混凝土墩, 尺寸 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 500\text{ mm}$, 养护期不少于 7 天。管道应力监测选用振弦式应变计, 标距 150 mm, 量程 $\pm 3000\mu\epsilon$, 灵敏度 $1\mu\epsilon$, 温度补偿范围 -20°C 至 80°C ^[4]。应变计粘贴于管壁顶部、底部和左右两侧共 4 个方位, 每节标准管材安装一组, 管节接头处加密至 6 个测点。粘贴前管壁表面打磨至粗糙度 Ra12.5 并用丙酮清洗, 固化胶采用环氧树脂 AB 胶, 固化时间 24 小时。泥浆压力传感器安装在泥水仓侧壁和回浆管路三通处, 量程 0 至 2 MPa, 精度 0.5%FS, 过载能力 150%。传感器前端加装不锈钢隔离膜片, 防止泥浆颗粒堵塞感压孔。

3.2 基于数字孪生的施工过程仿真

数字孪生模型基于 Unity3D 引擎搭建, 几何尺寸与现场工程完全一致, 地形高程数据来源于无人机倾斜摄影, 分辨率 0.1 m。地层模型依据勘察钻孔资料分层构建, 每层赋予独立的物理属性参数: 杂填土弹性模量 8 MPa, 泊松比 0.35, 粘聚力 12 kPa, 内摩擦角 18° ; 粉质粘土弹性模量 15 MPa, 泊松比 0.30, 粘聚力 25 kPa, 内摩擦角 22° ; 砂卵石层弹性模量 40 MPa, 泊松比 0.25, 粘聚力 0 kPa, 内摩擦角 38° 。有限元计算模块封装调用 ABAQUS 求解器, 网格划分采用 C3D8R 六面体减缩积分单元, 全局种子尺寸 0.5 m, 管道周边加密至 0.2 m, 总单元数约 18 万, 节点数约 20 万。管土接触定义采用罚函数算法, 摩擦系数 0.3, 法向接触刚度 10^6 N/m^3 , 切向允许滑移 0.01 mm。仿真时间步长固定 0.1 s, 每步计算耗时约 0.6 s, 通过异步线程调度实现与现场施工进度准实时同步, 延迟控制在 2 s 以内。

3.3 智能决策与远程控制策略

规则引擎采用 Drools 决策管理系统, 预设异常工况判定

规则共计 52 条，每条规则包含条件表达式、优先级权重和执行动作三部分。条件表达式支持数值比较、逻辑运算和时间窗口聚合，优先级权重范围 1 至 10，数值越大优先执行。强化学习模块基于 PPO 近端策略优化算法，神经网络结构为三层全连接层，隐藏层节点数分别为 256、128、64，激活函数 ReLU。状态空间定义为 8 维连续向量，依次为顶进力、刀盘扭矩、泥浆压力、泥浆流量、地表沉降速率、钻杆转速、推进速度和注浆量。动作空间为 3 维离散量，对应加速+10%、保速、减速-20%三档，典型异常工况识别判据与控制对策详见表 2。

表 2 典型异常工况识别判据与控制对策

工况类型	触发判据	控制动作	动作参数
顶进力超限	顶进力>设计值 90%且持续时间≥10 s	推进速度降至 70%+注浆量增加 50%	速度从 5 mm/s 降至 3.5 mm/s，注浆量从 0.15 m³/m 增至 0.225 m³/m
泥浆压力骤降	压力下降幅度>0.03 MPa 且持续时间≥5 s	停止推进+启动补浆至压力恢复	补浆泵转速升至 1200 r/min，目标压力设定为原值的 95%
地表沉降超标	沉降速率>2 mm/min 且持续监测 3 个周期	暂停施工+调整泥浆配比提高携渣能力	泥浆密度提高 0.05 g/cm³，膨润土含量增加 2 个百分点

钻杆 扭矩 突变	扭矩>额定值 80%且上升斜率>5%/s	钻杆转速降至 50%+启动辅助旋转电机	转速从 30 r/min 降至 15 r/min，辅助电机输出扭矩 100 N·m
----------------	----------------------	---------------------	---

该系统在某 DN600 定向钻工程中连续运行 72 小时，期间共处理异常事件 17 次，其中顶进力超限 6 次、泥浆压力波动 5 次、地表沉降加速 3 次、扭矩异常 3 次。规则引擎正确触发 16 次，误报 1 次，误报原因为传感器瞬时干扰，误报率低于 3%^[5]。强化学习模块在平稳工况下累计介入决策 42 次，推荐的推进速度优化方案使平均施工效率提升 12%。从异常发生到控制指令生效的平均响应时间为 8 s，最快响应时间 3 s，最慢 15 s。整个施工周期未发生任何安全事故，工程质量验收一次性合格。

4 结语

本文围绕市政管网非开挖施工中顶管法与定向钻法的关键技术难题，系统研究了顶管智能化改造、顶进力动态预测与姿态自动纠偏方法，提出了基于随机森林和模糊 PID 的控制策略。在定向钻方面，建立了导向孔轨迹优化设计方法和分级扩孔工艺参数控制准则，给出了钻头定位技术与回拖力估算模型。在此基础上，构建了融合多源传感数据采集、数字孪生仿真与规则引擎强化学习混合决策的智能监控平台。研究成果形成了从单机智能控制到系统协同管理的完整技术体系，可直接指导复杂城市环境下非开挖施工的参数优化、风险预警和远程操控，对于提升施工质量、降低安全事故发生率具有重要工程应用价值，也为非开挖技术的数字化智能化转型提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 马兰.某市政管网工程顶管施工管理实践与技术创新[J].城市道桥与防洪,2026,(5):329-333.
 [2] 许炎.市政污水管网改造中非开挖顶管施工技术应用[J].居业,2026,(3):19-21.
 [3] 易成林.市政管网管材选择与施工技术应用探究[J].建材发展导向,2025,23(22):64-66.
 [4] 丁德才,瞿思聪,丁雨薇.基于内衬修复技术的市政管网工程非挖掘修复研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(10):82-84.
 [5] 韦政.市政污水管网工程顶管施工关键技术应用研究[J].科技创新与应用,2025,15(13):193-196.