

城区市政工程给排水施工中的顶管技术应用实践研究

杨四艳 谢 飞 桂保国

深圳市原水有限公司 广东深圳 518000

摘 要：城区市政给排水工程顶管技术应用实践研究以非开挖施工为核心，系统探讨了现代顶管技术的创新优势与实施路径。研究揭示了顶管技术在地下管网建设中降低交通干扰、提升工程安全、适应复杂地质及优化经济指标的三维效益体系，构建了涵盖智能勘测、装备适配、工艺优化和资源再生的全流程技术方案。通过数字孪生建模、智能导向控制、复合支护体系等技术创新，形成了环境保护与施工效能协同提升的技术范式，为城市地下空间开发提供了绿色智能的解决方案。

关键词：城区市政工程；给排水施工；顶管技术

引言

随着城市化进程加速，传统明挖式地下管网建设模式已难以适应高密度建成区的工程需求。顶管技术作为非开挖施工的核心手段，其隐蔽施工特性与智能化建造能力成为破解市政工程建设与城市运行矛盾的关键技术路径。

一、市政工程给排水施工中的顶管技术应用优势

（一）减少对地面交通和环境的影响

传统明挖法在城区地下管网施工中易引发大面积路面占用和持续性交通阻滞，而顶管技术通过非开挖工艺有效保障地面通行能力，其微型化工作井设计使施工区域占地面积缩减。全封闭式掘进系统结合自动降尘装置，从源头控制施工扬尘扩散，配合低噪音动力系统使作业声级降低约30dB，满足城市二类声环境标准。智能化泥浆循环系统实现渣土资源再生利用，形成施工废料零排放的生态闭环，构建了基础设施建设与城市生态保护协同发展的新型技术范式。

（二）地下工程高效安全施工

针对传统基坑施工暴露面广、周期冗长的不足，机械化顶管技术通过地下定向掘进系统与计算机轨迹控制实现管道连续精准敷设，结合液压推进装置与智能纠偏系统形成毫米级轴线控制能力。封闭式作业环境消除高空坠落风险，集成光纤传感网络与三维监测系统实现地层压力及设备工况的实时动态监控，通过智能预警机制自动触发应急保护程序。工业化建造体系引入模块化设备组装技术，配合智能管节运输系统与掘进参数数据库，

形成质量安全双控的数字化施工模式，显著提升地下工程综合建造效能。

（三）复杂地质条件下非开挖施工

传统明挖工艺在软弱复合地层施工时需依赖辅助加固措施，而现代顶管技术通过地层响应式装备体系突破地质限制。模块化选型系统结合智能控制单元，可根据地质条件自适应配置泥水平衡或硬岩掘进装置，通过动态压力调节与实时监测网络维持掘进面稳定。装备集成多源感知系统，实时捕捉地层变形与水土压力变化，触发自动注浆与参数调整机制。创新的模块化结构允许单套设备兼容流塑状黏土至高强度岩层，其柔性技术特征显著提升复杂地层工程适应性，为特殊地质区管网建设提供系统性解决方案。

（四）市政管网工程全生命周期经济性优化

传统明挖法实施过程中涉及大量土方运输、临时支护及路面修复作业，产生显著的资源消耗与重复投入。机械化顶管技术通过地下隐蔽施工方式，将传统工艺中的土方工程、结构支护、路面恢复等多个环节整合为连续顶进作业流程，实现人工投入量降低至传统工法的三分之一，大幅缩减劳动力成本支出。

施工机械的自动化控制系统显著提升作业效率，其连续掘进能力可避免降水、支护等辅助工序造成的工程停滞。工艺革新使管网敷设速度较常规方法提升两倍以上，项目总工期压缩带来的资金周转效率提高，有效降低建设单位的管理成本与财务费用。

非开挖技术特性从根本上减少地表开挖面积，消除土方外运及回填压实产生的直接工程费用。同时，施工

期间路面占用率下降使交通导改方案得以简化，避免道路反复开挖导致的后期修复成本叠加。环境友好型施工模式减少粉尘污染治理支出，降低因施工扰民引起的间接经济损失。

该技术体系通过全要素成本控制机制，在减少直接工程费的同时降低社会综合成本。工程实践表明，在市政管网建设项目中采用顶管工艺，全生命周期综合造价较明挖法节约明显，为城市基础设施建设提供了经济高效的解决方案。

二、市政工程给排水施工中的顶管技术应用的有效措施

（一）施工前期技术准备

非开挖施工项目实施前需建立系统化技术准备体系，通过多维度场地信息采集构建数字孪生模型。现场三维激光扫描系统结合卫星定位技术，实现施工区域地形地貌、既有建构筑物 and 交通流线的高精度建模。这种空间信息数据库为顶进轨迹规划、工作井定位提供可视化决策支持，确保施工布局与周边环境的兼容性。

岩土工程勘察采用定向钻探技术获取连续地层样本，通过岩土力学实验分析各层土体的压缩模量、渗透系数等关键参数。结合地下水位动态监测数据，建立地质剖面数字模型预测不同深度土体的工程响应特性，为顶管机选型提供科学依据。对于特殊地层接触带，运用微动探测技术绘制地质界面三维分布图，提前识别潜在施工风险。

既有管网探测采用多频电磁感应装置与探地雷达协同作业，形成地下综合管线立体图谱。通过比对市政管网信息平台数据，建立管径、材质、埋深等属性的拓扑关系网络。针对探测盲区实施微创验证孔取样，完善隐蔽设施的空间信息数据库，为优化顶进路径提供安全保障。

施工团队能力建设依托虚拟现实仿真系统，构建典型工况下的沉浸式培训场景。操作人员通过人机交互终端模拟设备调试、参数设置、应急响应等实操流程，掌握泥水平衡控制、轴线纠偏等核心技术要点。同时建立岗位胜任力评估体系，结合事故案例库开展互动式安全培训，确保持证人员具备全过程质量控制与风险处置能力。

（二）工程装备选型与调试

施工装备的适配性选择是保障工程实施的基础条件，需综合考虑地质构造特征与管网敷设要求。针对不同的

岩土体力学特性建立装备选型矩阵：砂质地层选用泥水压力平衡式顶管设备，其动态土压维持系统可有效控制地层扰动；硬岩发育区则配备复合刀盘掘进系统，通过滚刀与刮刀协同作用实现高强度岩层的连续破碎。装备选型阶段需结合工程勘察数据建立施工参数优化模型，确保设备性能参数与地层条件的精确匹配。

设备进场后实施系统化调试流程，重点验证关键子系统的运行稳定性。对切削模块进行动平衡检测，确保刀盘旋转精度控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 范围内。液压顶推装置需完成空载与带载状态下的双模式试验，通过油压补偿系统验证多点顶推的同步精度。泥浆循环系统调试中实施流变参数实时监测，构建泥浆粘度与地层渗透性的动态平衡关系。智能化管控平台则需通过虚拟施工场景模拟验证各项传感器的数据采集频率和控制系统响应时效。

电气系统的联调联试是装备调试的核心环节，重点检测动力配电系统的谐波抑制能力与信号传输系统的抗干扰性能。自动导向系统需完成激光靶标定位试验，确保三维空间定位偏差不超过设计允许范围。同时建立施工参数数据库，将刀盘扭矩、推进速度等关键参数预设动态调整区间，形成基于实时监测数据的自适应控制机制。

装备全生命周期管理采用预防性维护策略，依据运行负荷等级制定分级维保计划。建立关键部件的剩余寿命预测模型，对主轴承密封系统、液压力单元等核心部件实施状态监测。通过油液光谱分析技术检测传动系统的磨损状态，当金属微粒浓度超过预警阈值时自动触发检修指令。智能化运维平台整合设备运行数据与维保记录，形成装备健康状态的三色预警体系，最大程度降低施工过程中的机械故障风险。

（三）顶管施工工艺

施工始发与接收工作井的构筑采用模块化支护设计，根据结构力学分析确定分层开挖深度与支护参数。采用地下连续墙结合环向预应力锚索的复合支护体系，在确保井壁稳定性的同时实现工作空间的最优布局。施工过程中运用三维激光扫描技术对井体变形进行实时监测，建立支护结构与土体相互作用的动态响应模型。顶管施工工艺流程如图1所示。

设备配置阶段遵循地质适应性原则，构建施工参数数据库指导装备选型决策。完成整机组装与系统联调后，采用激光陀螺仪进行空间姿态标定，确保顶进轴线与设计轨迹的三维坐标偏差控制在毫米级。实施分级加载试

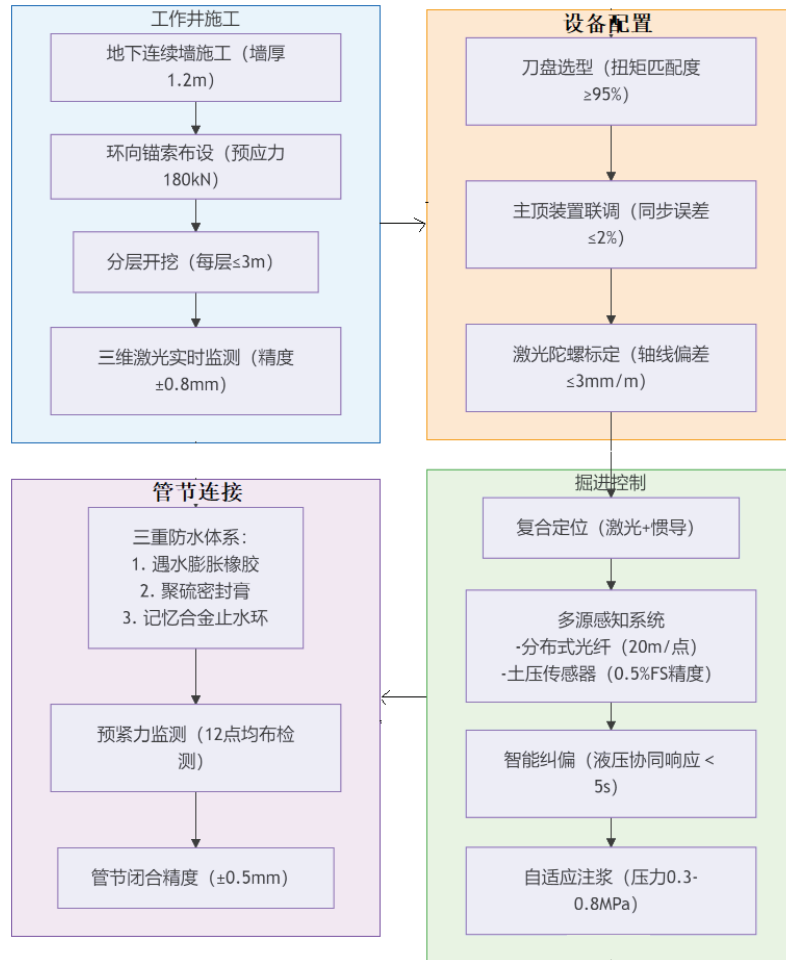


图1 顶管施工工艺流程图

验证设备综合性能，形成包括主顶装置同步性、刀盘扭矩匹配度等在内的设备性能评价体系。

掘进过程实施全过程智能监控，集成惯性导航系统与激光导向装置构建复合定位网络。通过分布式光纤传感器实时感知管节应力应变状态，当轨迹偏移超过设定阈值时，液压纠偏系统自动生成多油缸协同动作方案。配套研发的自适应注浆控制系统根据地层渗透系数动态调整注浆压力与流量配比，形成环向注浆体的均匀包裹效应。

管道接口处理采用高分子复合密封技术，设置三重防水构造形成多道防护体系。研发管节自动对接装置实现承插口的毫米级精准定位，通过预紧力监测系统确保密封元件均匀压缩。针对特殊地质段创新应用记忆合金膨胀止水环，在复杂应力条件下保持永久弹性密封性能。

(四) 泥浆处理与排泥

非开挖施工产生的固液混合物需建立闭环处理体

系，通过集成化处理系统实现土体资源再生。多级筛分装置基于振动分离机理，实现粒径分级与固态物质初级分离，采用变频控制技术调节处理通量。螺旋离心机组通过差速沉降原理完成泥浆相态分离，配套絮凝剂自动投加系统提升细颗粒截留效率。叠片压滤机组形成机械挤压脱水工艺，结合热风干燥技术实现固相产物含水率优化控制。

排泥系统设计遵循流体动力学原理，构建压力管道输送网络。采用耐磨合金内衬管件组成环形输送回路，配备大流量压力输送装置，确保泥浆远距离稳定输送。泥浆缓存装置配置防沉降搅拌机构，结合超声波液位检测实现储运容量动态调控。全密封式运输载具配备GPS定位与防泄漏传感器，构建覆盖运输全过程的污染物扩散预警体系。

处理工艺流程集成智能化控制模块，开发物料平衡自动调节系统。通过在线浊度计与含水率检测仪实时反馈处理效果，形成加药量、转速等参数的动态优化方案。

处理系统采用能源梯级利用设计，回收离心机组余热用于压滤介质预热，降低整体能耗水平。

施工过程中建立泥浆处理效能评估体系，运用质量守恒原理计算土体回收率。配备应急缓冲池应对设备突发故障，防止泥浆外溢污染环境。研发的固化剂复配技术可将处理残渣转化为回填材料，实现施工废弃物的资源化再生利用。该技术体系在保证施工效率的同时，形成了绿色循环的生态施工模式。

结束语

本研究通过系统化的工程实践验证，确立了顶管技术在城区市政给排水工程中的技术经济优势。形成的数字勘察体系与智能施工方案有效解决了传统施工中的交通梗阻、环境扰动等问题，装备选型矩阵与工艺优化模型显著提升了工程适应性与建设效率。创新研发的闭环泥浆处理系统实现了废弃物资源化利用，构建了绿色可

持续的施工模式。随着智能感知技术与自动化装备的持续发展，顶管技术将在城市地下空间立体开发中发挥更重要作用。本文研究成果为新型城镇化背景下的市政工程建设提供了可复制的技术范式，对推动城市基础设施智能化转型具有积极的示范意义。

参考文献

- [1] 尹彤. 长距离顶管施工技术在市政排水工程施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (11): 156-158.
- [2] 彭中祥. 泥水平衡顶管在市政排水管道施工中的应用研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(23): 184-186.
- [3] 牛汉文. 非开挖顶管技术在市政排水管道施工中的应用研究[J]. 水上安全, 2024, (11): 190-192.
- [4] 黄宛轩. 泥水平衡顶管技术在市政排水管道施工中的应用研究[J]. 工程机械与维修, 2024, (04): 101-103.