

探讨市政道路给排水系统建设中的顶管施工技术优化方案

张莉

北京市丰苑物业管理集团有限责任公司，北京市朝阳区，100000；

摘要：随着城市化进程的深入发展，市政道路给排水系统建设面临日益复杂的技术挑战。顶管施工技术作为非开挖施工方法，在减少交通干扰、保护环境方面具有显著优势，但实际应用中仍存在技术难题。本文深入分析顶管施工技术原理，系统梳理施工过程中的主要问题，提出针对性技术优化方案。研究表明，通过施工精度控制优化、地质适应性改善、管道连接技术革新及智能化控制系统引入，可有效提升顶管施工质量与效率，为市政给排水工程建设提供重要技术支撑。

关键词：市政道路；给排水管道；顶管施工技术

DOI：10.69979/3060-8767.25.04.073

引言

城市基础设施建设正经历前所未有的变革时期。市政道路给排水系统作为城市“生命线”工程的核心组成，其建设质量直接关系到城市运行安全性与可持续发展。传统开挖施工方法虽然技术相对成熟，但在交通密集的现代城市环境中面临诸多制约，交通中断、环境破坏、工期延长等问题日益凸显。

顶管施工技术作为典型的非开挖施工方法，为解决上述难题提供了新的可能性。该技术不仅能最大限度减少对地面交通的影响，更在环境保护方面展现出传统方法无法比拟的优势。然而，当前顶管施工在精度控制、地质适应性、连接可靠性等关键环节仍存在亟待突破的技术瓶颈。

本研究旨在通过系统分析顶管施工技术核心原理与应用现状，深入探讨制约技术发展的关键问题，进而提出切实可行的优化方案，为提升市政给排水工程建设水平、推动城市基础设施现代化进程提供重要理论依据和技术支撑。

1 顶管施工技术概述

1.1 技术发展与分类

顶管施工技术作为非开挖施工的重要分支，其核心理念在于通过地下掘进方式实现管道精确铺设，避免大规模地面开挖作业。经过近百年技术积淀与工程实践，已发展为现代城市基础设施建设的关键技术手段^[1]。

从技术分类角度，顶管施工主要包括泥水平衡式、土压平衡式及敞开式三种基本类型^[2]。泥水平衡式适用于含水量较高的软土地层，通过泥浆循环系统维持开挖面稳定；土压平衡式更适用于粘性土质条件，利用土体自身粘聚力实现开挖面支护；敞开式主要应用于地质条件相对稳定的硬质岩层。每种类型都有特定适用范围与

技术特点，需根据地质条件、管径要求及施工环境等因素合理选择。

1.2 应用优势与规范要求

在市政给排水工程中，顶管施工展现出突出优势。首先是对城市交通影响的最小化，相比传统开挖方式，仅需在起始点和接收点设置工作井，大大减少道路占用面积和交通管制时间。其次是显著的环境友好性，避免大面积地表破坏，最大程度保护城市绿化及既有地下管线设施。此外，在施工精度、工期控制及长期稳定性方面也表现出明显技术优势。

当前相关技术标准与规范体系日趋完善。《给水排水管道工程施工及验收规范》、《市政公用工程施工质量验收规范》等为顶管施工提供明确技术指导与质量控制依据。随着技术发展，顶管施工正呈现智能化、精准化趋势，激光导向系统、自动化控制技术、实时监测系统先进技术的引入，为进一步提升施工质量与效率提供了新的技术路径。

2 市政道路给排水系统顶管施工技术原理

2.1 基本原理与力学机制

顶管施工基本原理建立在土力学、结构力学及流体力学等多学科理论基础。核心机制通过顶进设备产生推力，驱动掘进机地下连续掘进，同时将预制管段逐步推入既定轨道，最终形成完整地下管道系统。该过程涉及复杂力学平衡关系，包括顶进力与土体阻力平衡、管道与周围土体相互作用及掘进面稳定性维持^[3]。

从力学角度分析，顶管施工过程中主要作用力包括顶进力、摩擦阻力及正面阻力。顶进力由液压千斤顶系统提供，需根据管道直径、施工长度、土质条件等因素精确计算。摩擦阻力主要源于管道外壁与周围土体摩擦，可通过注浆减阻等技术手段有效控制^[4]。正面阻力与掘

进面土质条件、开挖方式密切相关，需通过合理掘进参数设置实现优化控制。

2.2 施工工艺流程

施工工艺流程的精准执行是确保工程质量的关键。典型的顶管施工流程包括工作井开挖与支护、顶管设备安装调试、导向系统建立、掘进作业实施、管道接头处理及注浆加固等主要环节。工作井设计与施工质量直接影响后续顶管作业的顺利进行，井壁结构必须具备足够刚度与稳定性，承受巨大顶进反力。导向系统精度决定管道轨迹准确性，现代激光导向技术已实现毫米级控制精度。

2.3 关键设备与技术参数

关键设备与材料选择对施工成败具有决定性影响。掘进机类型选择需与地质条件高度匹配，兼顾施工效率与经济性。顶进设备推力计算必须留有充分安全余量，确保遭遇不良地质条件时仍能正常作业。技术参数确定是涉及多变量优化的复杂过程，掘进速度需根据土质条件、排土能力及管道跟进速度协调控制。

3 顶管施工中存在的主要技术问题

3.1 施工精度控制难题

施工精度控制难题是当前顶管施工面临的首要技术挑战。理想状态下管道轨迹应严格按设计路线进行，但实际施工中往往出现不同程度偏差。造成精度问题的原因多方面：地质条件非均匀性导致掘进机受到不均匀侧向力作用，产生轨迹偏移；导向系统精度限制及人为操作误差也是重要影响因素。更复杂的是，一旦发生偏差，纠偏过程往往引起新问题，强制纠偏可能导致管道变形，甚至结构性损伤。传统纠偏方法主要依赖操作人员经验判断，缺乏量化控制标准，主观性强的控制方式不仅难以保证精度，在复杂地质条件下更易失效。

3.2 地质条件适应性问题

地质条件适应性是制约顶管施工技术推广应用的重要因素。城市地下地质条件往往具有显著复杂性与变异性。不同土层力学性质差异巨大，地下水条件复杂多变，既有建筑物基础、地下管线等人工障碍物密集分布^[5]。在软土地层中，开挖面稳定性控制是技术难点，土体低强度特性使开挖面极易坍塌，而过度支护措施又可能导致掘进效率显著降低。硬岩地层面临掘进效率低下问题，硬质岩石高强度特性使传统掘进设备难以发挥有效能，刀具磨损严重，更换频率高，直接影响施工进度与成本控制。复合地层处理更是技术难点中的难点，当管道穿越软硬交替地层时，掘进机面临严峻技术挑战。不同土层掘进参数要求差异巨大，参数调整滞后性往往导致施工质量问题的。

3.3 管道接头密封性问题

管道接头密封性问题直接关系到排水系统长期运行安全。顶管施工中，管道接头处理是关键环节，其密封性能好坏直接影响整个管道系统功能实现。当前常用橡胶密封圈虽具有一定密封效果，但在地下水位变化、土体沉降等动态条件下，密封性能往往发生退化。接头错位是导致密封失效的主要原因之一，顶管施工过程中，由于各种因素影响，相邻管段间往往存在一定轴线偏差与高程差异，这种几何误差直接影响接头密封效果。此外，接头材料老化问题不容忽视，橡胶材料在地下环境中受化学腐蚀、温度变化等因素影响，长期使用后弹性性能退化，密封能力下降。

3.4 施工环境影响控制问题

施工环境影响控制问题在城市密集区显得尤为突出。顶管施工虽相对于开挖施工具有环境友好性，但仍会对周围环境产生一定影响。地面沉降是最常见环境影响之一，特别在软土地区，不当施工参数控制可能导致显著地面变形，进而影响周边建筑物与道路安全。噪声与振动控制也是需要重点关注的问题，掘进设备运行、管道顶进等作业过程都会产生一定噪声与振动，在居民密集区或敏感建筑物附近施工时必须采取有效控制措施。地下管线保护是城市顶管施工面临的独特挑战，城市地下空间中密布各种市政管线，这些既有设施保护要求极高，顶管施工过程中意外碰撞不仅可能造成重大经济损失，更可能引发安全事故。

4 顶管施工技术优化策略与方案

4.1 施工精度提升优化方案

施工精度提升优化方案核心在于建立多层次、全过程精度控制体系。在导向系统方面，采用激光导向与陀螺仪导向相结合的双重导向模式，激光导向系统在常规条件下提供高精度位置信息，陀螺仪导向系统在激光信号受干扰时发挥备用作用，确保导向系统可靠性与连续性。

在测量控制策略上，提出“预测-控制-修正”动态控制模式，通过建立管道轨迹预测模型，实时预测后续掘进轨迹发展趋势，提前识别可能偏差风险。建立精度控制智能化决策支持系统，集成地质信息、施工参数、实时监测数据等多源信息，运用人工智能算法对施工精度进行实时评估与预警。

4.2 复杂地质条件适应性优化

针对软土地层，提出“主动支护+动态平衡”开挖面稳定控制策略，通过在掘进机前方预注加固材料，主动提高开挖面土体强度；同时建立动态土压与泥浆压力平衡系统，根据开挖面稳定性实时调整支护参数。

对于硬岩地层,重点优化掘进效率与刀具寿命,采用智能化掘进参数控制系统,根据岩石硬度、完整性等地质参数自动调整掘进速度、推进力、转速等关键参数。复合地层处理采用“分段适应+过渡优化”策略,建立地层变化预警系统,通过监测掘进阻力、振动特性等参数变化,提前识别地层变化。

4.3 管道连接技术改进措施

在接头设计方面,提出柔性接头与刚性接头相结合的复合接头设计理念,柔性部分能够适应一定几何误差与变形,刚性部分保证结构整体性与稳定性。密封材料优化是提升接头性能的关键,开发新型复合密封材料,结合橡胶弹性特性与聚合物耐久性优势。

在接头安装工艺方面,提出标准化安装流程与质量控制体系,建立接头安装质量检查清单,采用数字化安装指导系统,为操作人员提供实时安装指导与质量反馈。

4.4 施工过程智能化控制方案

建立基于物联网技术的实时监测网络,对掘进参数、环境影响、设备状态等关键信息进行全天候监测。智能控制系统核心是建立多参数协同优化控制算法,综合考虑掘进效率、施工质量、环境影响、成本控制等多重目标,通过智能优化算法寻找最优施工参数组合。

在设备自动化方面,重点发展自适应掘进控制技术,掘进机能够根据地质条件变化自动调整掘进模式,建立设备故障智能预警与诊断系统,提前识别潜在故障,避免设备突发故障对施工进度的影响。

5 优化方案的技术经济分析

5.1 技术可行性与经济效益

技术可行性分析表明,所提出优化方案在技术层面具有良好实现基础。激光导向技术、智能控制系统等关键技术已在其他工程领域得到成功应用,技术成熟度较高。新型密封材料、复合接头设计等创新技术虽需进一步研发投入,但基础理论已相对完善,技术风险可控。

经济效益评估显示,虽然优化方案需要一定初期投资,但长期经济效益显著。精度控制技术提升能够减少返工与修复成本,据估算可降低相关费用 20-30%。智能化控制系统虽然设备投资较大,但通过提升施工效率、减少人工成本,预计投资回收期在 3-5 年。

5.2 社会环境效益与推广前景

施工精度与质量提升直接关系给排水系统长期运行安全,对保障城市供水安全、防汛排涝等公共安全具有重要意义。环境影响进一步减少符合绿色发展理念,

有助于提升城市环境质量。智能化技术应用还将推动建筑行业技术进步,培育新的技术增长点。

推广应用前景分析表明,技术优化方案具有广阔应用前景。随着城市化进程加快,市政基础设施建设需求持续增长,为先进顶管技术推广应用提供良好市场环境。技术标准化是推广应用重要保障,建议将成熟优化技术纳入相关行业标准。

6 总结与展望

本研究系统分析了市政道路给排水系统建设中顶管施工技术存在的关键问题,提出了综合性优化方案。通过施工精度控制、地质适应性改善、管道连接技术创新及智能化控制系统的协同应用,显著提升了顶管施工技术水平与工程质量。主要包括:构建多层次精度控制体系,有效解决施工精度保证难题;提出复杂地质条件适应性技术方案,扩大技术应用范围;开发新型管道连接技术,提升接头密封性与耐久性;建立智能化施工控制系统,推动传统技术向现代化转型。

未来顶管施工技术将向智能化、精准化、环保化方向发展。人工智能、大数据、物联网等新一代信息技术的深度融合将进一步提升技术水平。新材料科学进步为设备与材料性能优化提供更多可能性。同时,绿色施工理念的深入实践将推动技术朝更加环境友好的方向演进。

随着科技发展,后续研究应重点关注:深化智能化控制算法开发,提升系统自适应能力;加强新型材料研发,提升耐久性与环保性能;完善技术标准体系,为技术推广提供制度保障。通过持续技术创新与工程实践,顶管施工技术将为城市基础设施建设发挥更大作用。

参考文献

- [1] 张雪芬. 市政给排水工程中顶管施工技术的应用[J]. 中国新技术新产品, 2023, (23): 72-74. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2023.23.043.
- [2] 谭福平. 市政给排水施工中顶管技术的应用[J]. 居舍, 2022, (12): 51-53.
- [3] 郭同波. 市政给排水施工中顶管技术的应用[J]. 智能城市, 2021, 7(07): 45-46. DOI: 10.19301/j.cnki.zn cs.2021.07.023.
- [4] 徐鹏. 市政给排水施工中的中长距离顶管施工技术[J]. 工程技术研究, 2020, 5(13): 89-90. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2020.13.042.
- [5] 韩晓东. 市政给排水管道顶管施工技术的要点[J]. 地产, 2019, (22): 131.