

市政施工中地下管线施工技术

祝迎港

新疆北新国际工程建设有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830092

摘要: 地下管线作为城市的“生命线”，承载着给水、排水、燃气、热力、电力、通信等关键功能，其施工质量直接关系到城市运行的安全与效率。随着我国城市化进程的加速和地下空间开发强度的不断提升，市政地下管线施工面临着环境复杂、交叉作业多、既有管线保护要求高等严峻挑战。本文系统梳理了市政地下管线施工的核心技术体系，重点论述了以顶管法、水平定向钻为代表的非开挖技术在减少城市扰动、穿越敏感区域方面的独特优势与应用要点；深入分析了传统明挖法在沟槽支护、地基处理及管道安装等环节的关键控制技术；并前瞻性地探讨了BIM（建筑信息模型）技术在管线综合规划、碰撞检测及施工模拟中的赋能作用。研究表明，未来市政管线施工将朝着“少开挖、精定位、智能化”的方向发展，通过多种技术的集成创新与精细化管理，方能有效应对日益复杂的施工环境，保障城市地下“生命线”工程的安全、高效与可持续建设。

关键词: 市政工程；地下管线；非开挖技术；顶管法；水平定向钻；BIM技术

引言

现代城市的正常运转高度依赖于一个庞大而精密的地下管网系统。从居民家中的自来水、暖气，到街道上的交通信号灯、通信网络，再到工厂企业的能源供应，无一不通过埋设于地下的各类管线得以实现。因此，地下管线被誉为城市的“主动脉”与“神经网络”。然而，伴随着城市规模的扩张和基础设施的更新迭代，市政地下管线的新建、改造与修复工程日益频繁且复杂。传统的“马路拉链”式开挖施工，不仅严重干扰地面交通、破坏市容环境，更对周边建筑物基础和既有地下设施构成巨大威胁。在此背景下，如何在保障施工安全与质量的前提下，最大限度地减少对城市正常秩序的影响，已成为市政工程建设领域亟待解决的核心课题。近年来，以非开挖技术为代表的先进工法以及以BIM技术为核心的数字化管理手段，为破解这一难题提供了全新的解决方案。非开挖技术通过“微创”甚至“无创”的方式完成管线铺设，实现了对地面活动的“零干扰”；而BIM技术则通过构建高精度的数字孪生模型，在虚拟空间中预先解决设计冲突、优化施工方案，有效规避了现场返工的风险。本文旨在全面阐述这些关键技术的原理、应用及发展趋势，为提升我国市政地下管线施工的整体技术水平提供理论参考与实践指导。

1 非开挖施工技术：城市核心区的首选方案

面对交通繁忙、建筑密集、地下管线错综复杂的城区环境，非开挖技术凭借其显著的社会与经济效益，已成为市政管线施工的首选方案。该技术体系主要包括顶管法、水平定向钻法等，适用于不同管径、地质条件和

施工距离的需求。

1.1 顶管法的技术原理与精细化控制

顶管法是一种在工作井内利用主顶油缸和中继间产生的强大推力，克服管道与周围土体的摩擦阻力，将预制管节逐段顶入地层，并同步进行掘进、出土，最终在接收井内完成管道连接的施工方法。其核心在于“边掘进、边顶进、边排土”。根据前端掘进机对开挖面稳定性的控制方式，主要分为泥水平衡式和土压平衡式两大类。

1.1.1 泥水平衡式顶管技术

泥水平衡式顶管机通过在刀盘后方形成一个密闭的泥水舱，向舱内注入具有一定粘度和密度的膨润土泥浆，使其压力略高于开挖面的土水压力，从而有效支撑掌子面，防止坍塌和地面沉降。掘进过程中，切削下来的渣土与泥浆混合，通过排泥管路泵送至地面泥水分离站，经处理后的泥浆可循环使用。该工法特别适用于富水砂层、流沙、淤泥质软土等稳定性差的地层^[1]。以常见的YX-2000型顶管机为例，其技术参数极为精密：外径2420mm，全长4300mm，切削刀盘电机功率高达74kW，可提供470kN·m的强大扭矩；配备4个纠偏油缸，每个推力达1072kN，配合激光导向系统，可将推进轴线偏差严格控制在±5cm以内。此外，施工中还需精确控制触变泥浆的配比（通常水灰比为3:1至5:1），并在管节外壁同步注浆，形成润滑减阻层，大幅降低顶进阻力。

1.1.2 土压平衡式顶管技术

土压平衡式顶管机则通过调节螺旋输送机的转速，控制排土量，从而维持土仓内土体压力与开挖面土压力的动态平衡。该工法无需泥水处理系统，设备相对简

单,更适合于粘性土、粉土等地层。其核心在于对土仓压力的实时监控与精准调控,压力过低会导致地面沉降,过高则可能引起隆起。施工中需密切监测土仓压力传感器读数,并结合地面沉降监测数据,动态调整掘进参数。

1.2 水平定向钻法的精准导向与力学计算

水平定向钻(HDD)技术,俗称“拖拉管”,是一种更为灵活的非开挖铺管方法。其施工过程分为导向孔钻进、预扩孔和管道回拖三个阶段。

1.2.1 导向系统与轨迹控制

HDD施工成败的关键在于导向系统的精度。目前主流采用电磁波或陀螺仪导向系统。操作员在地面上通过接收器获取钻头内置探头发出的倾角、方位角和深度信号,实时计算出钻头的空间坐标,并与预设轨迹进行对比,通过调整钻杆的旋转和给进,实现毫米级的轨迹控制^[2]。这要求施工前必须进行详尽的地质勘察和地下管线探测,以规划出一条既能避开所有障碍物,又满足管道曲率半径(通常要求 $R \geq 1200D$, D 为管径)要求的最优路径。

1.2.2 回拖力的精确计算

回拖力是选择钻机型号和校核管道强度的核心依据。其计算需综合考虑管道自重、与孔壁的摩擦阻力、泥浆浮力以及穿越轨迹的弯曲程度。一个典型的回拖力计算公式可表示为:

$$F = W \cdot L \cdot (f_1 \cdot \cos \alpha + f_2 \cdot \sin \alpha)$$

其中, F 为总回拖力, W 为单位长度管道的有效重量(扣除泥浆浮力), L 为穿越长度, α 为管道轴线与水平面的夹角, f_1 和 f_2 分别为水平和垂直方向的摩擦系数。对于长距离、大管径的穿越,还需分段计算,并考虑中继间或辅助牵引措施。例如,对于DN800的钢管穿越1000米河流,其回拖力可能高达600吨以上,必须选用相应吨位的大型钻机。

2 传统明挖施工技术的精细化管控

尽管非开挖技术发展迅速,但在许多开阔场地、浅埋管线或大断面综合管廊工程中,传统的明挖法因其直观、经济、适用性强等特点,依然占据着不可替代的地位。然而,现代明挖施工已不再是简单的“开膛破肚”,而是融入了大量精细化管控技术,以确保工程安全与质量。

2.1 沟槽开挖与支护技术的选型与设计

明挖施工的第一步是沟槽开挖,其安全性直接取决于支护体系的设计与施工。对于深度较浅($< 3m$)、土质较好的沟槽,可采用放坡开挖,坡度根据土质类别按

规范(如《建筑基坑支护技术规程》JGJ120)确定。而对于深基坑或软弱土层,则必须采用板桩、钢板桩、地下连续墙或SMW工法桩等支护结构。

2.1.1 SMW工法桩技术

SMW(Soil Mixing Wall)工法桩是一种经济高效的深基坑围护形式。其施工过程是利用三轴搅拌钻机,将水泥浆液与原土体强制搅拌,形成连续的水泥土搅拌墙,并在墙体未凝固前插入H型钢(如H700×300×13×24)作为劲性骨架。该工法兼具挡土和止水双重功能,成墙渗透系数可达 $10^{-7}cm/s$,且H型钢在基坑回填后可拔出回收,降低成本。设计时需验算水泥土墙的抗弯、抗剪承载力以及H型钢的强度,并通过有限元软件(如MIDAS GTS)模拟开挖全过程,预测支护结构变形及周边地表沉降。

2.1.2 地下连续墙技术

对于超深、超大基坑(如地铁车站),地下连续墙是首选方案。其通过液压抓斗或铣槽机在地下开挖出标准槽段,下放钢筋笼后浇筑水下混凝土,形成一道刚度极大、隔水性能极佳的永久性或临时性围护结构^[3]。施工中需严格控制泥浆比重(通常 $1.1-1.25g/cm^3$)以维持槽壁稳定,并确保各槽段接头(如工字钢接头、铣接头)的施工质量,这是防渗的关键。

2.2 地基处理与管道安装的质量控制

沟槽开挖后,地基的承载力和均匀性是保证管道长期安全运行的基础。对于软弱地基,常采用换填级配碎石垫层(厚度通常为20-30cm)、强夯或CFG桩等地基处理方法进行加固。管道安装是明挖施工的核心环节,其质量控制贯穿于全过程。特别是对于承插式接口的球墨铸铁管,必须使用专用拉力工具,确保承口内的橡胶圈被均匀压缩,接口插入深度标记完全没入承口内。管道安装完成后,必须进行严格的闭水试验,试验水头应为上游管顶以上2米,观测时间不少于30分钟,以无渗漏为合格。回填时,应采用中粗砂或细粒土,从管道两侧对称分层回填,每层虚铺厚度不超过20cm,并用小型压实机具夯实,胸腔部分的压实度不得低于95%(重型击实标准)。

3 BIM技术赋能管线全生命周期管理

如果说非开挖和精细化明挖是解决“如何施工”的问题,那么BIM技术则从根本上解决了“如何规划与协同”的问题,为地下管线工程带来了革命性的变革。

3.1 管线综合规划与自动化碰撞检测

在项目设计阶段,各专业(给排水、暖通、电气、通信等)往往独立出图,极易在空间上发生冲突。BIM技

术通过构建一个包含所有专业信息的三维协同模型，可以在施工前利用其内置的碰撞检测引擎（如Navisworks的Clash Detective），自动识别并高亮显示硬碰撞（实体相交）和软碰撞（间距不足）。检测流程通常包括：模型整合→定义检测规则（如机电管线与结构梁的最小净距为100mm）→运行检测→生成碰撞报告→协调各方进行优化调整。这一过程可以提前发现并解决90%以上的管线冲突问题，避免了传统模式下“设计-施工-发现问题-返工”的恶性循环，真正实现了“零变更”施工的目标。

3.2 施工模拟与可视化交底

进入施工阶段，BIM模型的价值进一步凸显。通过将施工进度计划（4D）与模型关联，可以动态模拟整个管线施工过程，直观展示各工序的逻辑关系和空间占用情况，有助于优化工序安排、合理配置资源。对于复杂的节点（如大型阀门井、管廊交叉口），可利用BIM模型进行三维可视化技术交底，让一线工人清晰理解安装顺序和工艺要求，有效降低因理解偏差导致的施工错误^[4]。此外，BIM模型还可作为竣工资料的一部分，为后期的运营维护提供精准的空间和属性信息，实现从建设到运维的无缝衔接。

4 技术融合与未来发展趋势

未来的市政地下管线施工，绝非单一技术的独角戏，而是多种前沿技术深度融合、协同作战的系统工程。其核心发展方向体现在三大维度：首先，非开挖装备正朝着大型化、智能化演进。新一代智能顶管机集成了惯性导航、地质雷达和应力传感阵列，不仅能实现厘米级自主导航，还能实时感知前方地质变化和既有管线位置，动态调整掘进参数，从根本上预防施工事故。其次，数字孪生技术将成为项目管理的新范式。以BIM模型为骨架，深度融合GIS地理信息、IoT物联网传感数据（如管廊内的温湿度、气体浓度、结构应力）以及CCTV巡检影像，构建一个与物理工地完全同步的虚拟映射体。管理者可在数字孪生平台上进行施工全过程仿真、

风险推演和应急演练，实现从“经验驱动”到“数据驱动”的决策升级^[5]。最后，行业生态将走向标准化与平台化。建立统一的城市地下管线数据标准和共享交换平台，打破“信息孤岛”，使规划、设计、施工、运维各阶段的数据能够无缝流转。这不仅能为单个项目提供精准的历史数据支持，更能汇聚成城市级的地下空间大数据资产，为智慧城市顶层设计、韧性城市建设和突发公共事件应急响应提供强大的底层支撑。这种多技术、全流程、跨领域的深度融合，将共同塑造市政地下管线施工的智慧未来。

5 结语

市政地下管线施工技术正处在一个由传统向现代、由粗放向精细、由单一向集成转型的关键时期。以顶管法和水平定向钻为代表的非开挖技术，有效化解了城市核心区施工的扰民难题；精细化的明挖技术则确保了在适用场景下的安全与高效；而BIM技术的全面应用，则从源头上提升了规划设计的质量与协同效率。展望未来，只有将这些先进技术有机融合，并辅以科学的管理体系和高素质的人才队伍，才能真正构建起安全、韧性、智慧的城市地下“生命线”网络，为城市的高质量发展和人民的美好生活提供坚实保障。

参考文献

- [1]席小青.市政工程施工中的地下管线施工技术分析[J].中国房地产业,2025,(28):210-213.
- [2]杜宁.市政工程施工中地下管线施工技术探讨[J].居业,2025,(09):37-39.
- [3]林松.市政工程道路施工中地下管线施工技术[J].中国住宅设施,2025,(06):163-165.
- [4]禹丹丹.市政工程施工中地下管线施工技术探究[J].城市建设,2025,(05):64-66.
- [5]张明.市政工程道路施工中地下管线施工技术分析[J].散装水泥,2024,(03):124-126.