

人口密集型城区深层急曲线盾构施工工艺研究 ——以桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程为例

吴昊

[上海城投(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要:为解决老城区深层地下管网建设过程中遇到的交通导行“搬不动”、地下管线“碰不得”、周边环境“扰不了”等急难问题,以减少新建竖井数量作为切入点,针对性地提出急曲线盾构成套施工工艺,从设备、材料、技术、测量4方面形成完整体系,可缓解上述难题。桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程TP1.4标截流总管项目(梅川路—中江路、中江路—梅岭北路、梅岭北路—兰溪路转弯段)成功运用该工艺,有效克服盾构急曲线的工程难题,实现了工期缩短、成本降低与环境扰动减小,既为老城区深层地下管网的“点”“线”“网”逐次逐层级建设提供新方法,也为市政设施建设向城市深层地下空间管网化发展提供新思路。

关键词: 地下管网;盾构隧道急曲线;方案优化;竖井

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0352-05

Research on Deep Sharp Curved Shield Tunneling Technology for Population-Dense Urban Areas: A Case Study of Initial Rainwater Storage Project of Taopu WWTP

WU Hao

[Shanghai Chengtou Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: To address the urgent and difficult challenging encountered during the construction of deep underground pipelines in old urban areas, such as “inability to move” for traffic diversion, “inability to touch” for underground utilities, and “inability to disturb” for the surrounding environment, focusing on reducing the number of new shaft constructions, the construction process of the set of sharp curve shield is specially proposed. A complete system is formed from four aspects of equipment, materials, technologies and surveying, which can alleviate the aforementioned challenges. The technique is successfully applied to main interception pipeline of Taopu Wastewater Treatment Plant Initial Rainwater Storage Project Section TP1.4 (Meichuan Road - Zhongjiang Road, Zhongjiang Road - Meilin North Road, and Meilin North Road - Lianxi Road turning sections), effectively overcoming the difficulties associated with shield tunneling along sharp curves, and shortening the project duration, reducing costs, and minimizing environmental disruption, which not only provides a new approach for the step-by-step and layer-by-layer construction of the “points”, “lines” and “networks” of the deep underground pipe network in the old urban area, but also offers new ideas for the development of municipal facilities towards the pipe network of the deep underground space of the city.

Keywords: underground pipeline network; sharp curve of shield tunneling; scheme optimization; shaft

0 引言

我国一线城市老城区市政设施由于建设较早,规划设计落伍,设施日渐老旧,功能逐渐无法满足城市化建设飞速发展的需求。老城区地表建设用地紧张,空间利用转向地下发展。传统上我国市政管网以直埋方式铺设^[1-5],主要分布于城市地下10 m以内

的浅层地下空间^[6-7],种类庞杂、功能繁多的市政管网的埋设、更新和扩容需将路面反复“开膛破肚”,且在空间上相互影响。老城区本身道路狭窄,基础薄弱的老旧建构物居多,市政管网建设过程中极易对路面交通运行和周边环境造成不利影响^[8-11]。因此,面对我国老城区市政基础设施更新改造的新需求,市政设施建设势必向城市深层地下空间发展^[12-14]。采用盾构法等非开挖工艺施工深埋管线时,不可避免地需要建造工作井。优化工作井数量成为老城区建设的重要议题。

收稿日期: 2026-01-20

作者简介: 吴昊(1985—),男,硕士,工程师,从事给排水工程规划建设管理工作。

本文首先结合桃浦污水处理厂调蓄工程实例,阐述急曲线盾构成套施工工艺的必要性;其次提出以减少竖井建造数量为切入点的优化方案,阐述急曲线盾构的关键技术;最后展示该工艺在缩短工期、减少环境扰动方面的实际效果。

1 工程简介

根据《上海市污水污泥处理处置系统规划(2017—2035年)》,桃浦污水处理厂功能调整后用于地区初期雨水调蓄和雨水系统提标。2020年5月,《上海市城镇雨水排水规划(2020—2035年)》规划公示,明确了上海市城镇雨水排水规划形成“1+1+6+X绿灰交融,14片蓝色消纳”的总体布局^[15]。桃浦污水处理厂作为6座功能调整厂之一,服务于片区控污+提标,具体范围包括:真江(部分)、真光、真如、曹杨、铜川、交通南、真南、真南北等8个排水系统,总服务面积21.56 km²(不含嘉定3.6 km²),如图1所示。



图1 项目概况

工程内容包括厂内工程、厂外工程两部分。其中,厂内工程包括:新建初期雨水提升泵站1座,规模11.5 m³/s;改造调蓄池5座,总容量8.9万m³;厂外工程包括:

(1) 厂外截流管道工程

8个排水系统,敷设 $\phi 3\ 500 \sim \phi 4\ 500$ mm初期雨水截流总管1根,总长约9.1 km; $\phi 2\ 000 \sim \phi 2\ 400$ mm截流支管若干根,总长约4.0 km。

(2) 泵站初期雨水截流设施工程

8座泵站初期雨水截流设施建设。

桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程位于上海市普陀区,城市化建设起步早,人口密集,交通、供排

水、能源、信息通信等市政基础设施相对老旧,厂外截流管道工程在老城区内施工面临诸多困难。

1.1 地面交通导行难度大

城区施工中交通导改一般遵循“不封交、占一还一”原则,且对于交通堵点,不能占用道路作为施工场地。如采用常规工艺措施,各竖井施工将对普陀区曹杨、真如等区域公共交通带来巨大压力,基本不具备封交或者借地绕行的交通组织条件。

以项目某处盾构井为例:梅岭北路交通现状为9 m路幅双向两车道+非机动车道,兰溪路同样为9 m路幅双向两车道+非机动车道。

若实施该盾构井,需对梅岭北路进行封交,将严重影响市区道路通行,无法获得交通管理部门审批,因此该盾构井不具备落地条件,严重影响主截流管道实施,整个项目难以推进。

1.2 浅层地下管线复杂

厂外截流管道线路上部浅层覆土内分布大量市政管线,涉及供水、供电、燃气、通信等权属单位,管线种类繁多、建成年代久远、布局密集,管线搬迁与现场保护工作难度极大,操作不当可能影响居民正常生活,甚至引发安全事故。

以项目某处盾构井为例,竖井位于梅岭北路中江路路口,若实施需搬迁4种15条管线,埋深范围0.50~6.45 m。市政管线种类多、权属复杂、相互干扰,管线搬迁工期不可控。

1.3 周边环境维稳压力大

本项目截流主管道竖井开挖深度一般超过30 m,设计井位周边一倍开挖深度范围内存在多处学校、住宅、商业、历史保护建筑、医院、防汛墙等敏感设施,如处理不当极易产生不良社会影响。

2 盾构轴线转向方案优化

针对老城区深层地下管网建造存在交通导改困难、地下管线复杂、周边环境维稳压力大等难题,本工程通过优化设计方案、细化施工工序、整合形成工艺体系,并与原方案进行分析对比,验证优化效果。

本文以梅川路—中江路、中江路—梅岭北路、梅岭北路—兰溪路截流总管盾构隧道轴线转折为研究对象。该3处轴线转折角度近乎90°,传统的直线盾构一次推进技术无法实现该规划。

2.1 直线盾构过转折井转向施工工艺

深层盾构隧道在面临主线路转折的难题时,往往采用在转折处设置竖井的方法。通过竖井可以将

两个轴线方向的隧道连通,起转折作用,盾构亦可保持直线推进。梅川路—中江路、中江路—梅岭北路、梅岭北路—兰溪路盾构隧道转折处分别设置 DG4、DG5、DG7 盾构井,可兼作检修井、透气井等功能性井,详见图 2。然而,为了降低对既有建构筑物的扰动,管网一般优先选择在现状道路下排布,因而管网转折处位于道路下方。如果在该位置设立竖井,将会引发交通导改、管线搬迁、环境扰动控制等难题,显著增加施工成本和周期。此外,在人口密集的老城区,交通、管线、建构筑物遭受影响将会产生较大的社会维稳压力。



图2 优化前方案

2.2 盾构隧道急曲线施工工艺

传统盾构隧道在轴线方向急剧变化处设置竖井的方案存在不足之处,通过减少工作井数量可有效避免交通、管线、维稳问题。转折井的取消导致盾构轴线需在推进过程中自行完成方向的转变,一方面近乎 90° 的转向角度 θ 大,另一方面受地道、学校、医院、小区等建构筑物扰动控制限制,盾构仅能在较短的路段下进行转向,即转弯段长度 L 不能过长。盾构轴线的曲率半径 R 满足式(1)关系。

$$R = \frac{L}{\theta} \quad (1)$$

式中: R 为盾构轴线曲率半径, m; L 为转弯段长度, m; θ 为转向角度, rad。转弯段长度 L 越小,转向角度 θ 越大,则轴线曲率半径越小。通过计算可得 3 段盾构转向的曲率半径,详见表 1。优化后的路由详见图 3。

表1 3段盾构转向曲率半径 R

盾构转向段	L /m	θ /rad	$\theta/(^\circ)$	R /m
梅川路—中江路	108	1.54	88.24	70
中江路—梅岭北路	119	1.59	91.10	75
梅岭北路—兰溪路	111.3	1.71	97.98	65

根据《盾构法隧道施工及验收规范》^[16](GB 50446—2017),急曲线段可按照式(2)进行定义,即:

$$\frac{R}{D} \leq 40 \quad (2)$$

式中: D 为隧道外径, m。3 段急曲线盾构的曲率半径与外径比值见表 2。

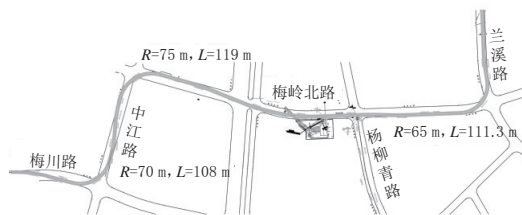


图3 优化后方案

表2 3段急曲线盾构 R/D 值

盾构转向段	R /m	D /m	R/D
梅川路—中江路	70	4	17.5
中江路—梅岭北路	75	4	18.75
梅岭北路—兰溪路	65	4	16.25

通过上表可知,该工程 3 段曲线盾构均为急曲线。目前地下排水隧道及电力隧道等市政管线隧道不受车辆运营的限制,可显著缩小隧道曲线半径,实现 90° 设计曲线转弯,充分发挥急曲线盾构法隧道技术的优势,减少工作井的数量及土地征用量,降低对城市运行功能及周边环境的影响,增强隧道在市区狭窄道路或高层建筑间的穿行能力。本项目截流总管最小转弯半径 R 为 65 m,位于 TP1.4 标兰溪路梅岭北路路口。然而,急曲线盾构在施工时面临较多难点,需采取相应措施克服。

通过对国内外盾构隧道急曲线技术及工程实例调研,结合老城区深层地下空间在深覆土、高水压、周边环境复杂条件下连续急曲线施工工况分析,盾构隧道急曲线施工主要难点为 4 个方面:盾构机能否急转弯、隧道能否稳得住、地面沉降是否可控、测量技术是否到位。

2.2.1 盾构隧道急曲线施工关键技术

(1) 盾构机针对性选型

a. 为了适应急曲线段掘进,盾构机的长度不宜过长,通过减小盾体长度,适当减小超挖量和旋转抗力,提升盾体在急曲线段的通过能力。

b. 为了使盾构机能够沿设计的急曲线掘进,需要装备铰接装置。急曲线盾构一般采用主动 V 型或 X 型球面铰接,其中 V 型结构简单、成本低,可满足常规转弯;X 型结构复杂、成本高,适用超急弯。为了保障工程的顺利推进,本工程选 X 型,并为铰接系统弯折的角度留出充足的余量(最大水平转角 4.4°),保证盾构的可操作性,如图 4 所示。同时,主动球面铰接具有良好的自密封性,在铰接开启状态下,能够大幅降低铰接渗漏发生概率。

c. 为了切削比直线施工更大的开挖断面使盾构机能够转弯,盾构机需配置仿形刀(超挖量 0~250 mm),

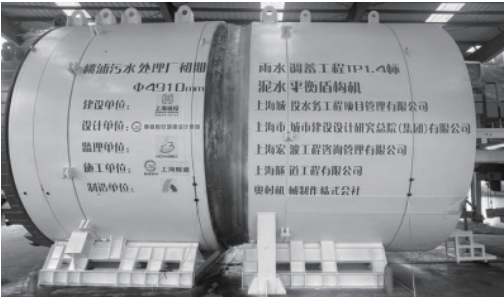


图4 配置主动球面铰接的盾构机

如图 5 所示。在最小转弯半径为 65 m 的条件下,根据陈剑、李智明提出的理论计算方法^[17],选取的超挖量约为 150 mm。

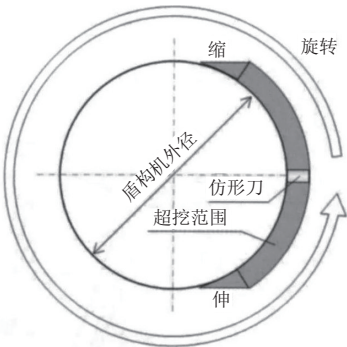


图5 盾构机仿形刀

(2)管片结构针对性设计

a. 小环宽钢结构管片

急曲线盾构机推进过程中管片存在向曲线外侧滑移的趋势,为适应急曲线的线形,急曲线段隧道管片一般采用小环宽大楔形量钢结构管片。同时考虑到盾构机盾尾拼装管片时所需的空間,部分急曲线段隧道对应的管片存在一定的缩径,增大盾尾间隙,便于转弯,见图 6。

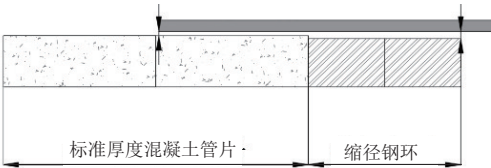


图6 急曲线小环宽大楔形量缩径管片示意图

b. 附囊袋管片

急曲线隧道施工时,附囊袋管片一般在脱出盾尾 3~4 环(急曲线隧道环宽较小)后进行囊袋注浆,防止浆液不规律扩散,填充特定位置建筑空隙。囊袋注浆后能够更好地稳定隧道,提供充足的推进反力,同时减小急曲线盾构推进时产生的法向分力对管片接缝的破坏。

(3)急曲线段针对性预加固

急曲线隧道施工存在超挖,为提供足够的急曲线隧道推进反力,并控制地面和周边环境沉降、提供

盾构推进所需推力、维持隧道稳定,在急曲线隧道段上部和侧面进行 MJS 预加固,确保急曲线段的盾构掘进施工。曲线外侧加固较厚,加固范围进入盾构推进断面 450 mm(进入隧道断面 300 mm),为盾构推进提供足够推力并保障隧道稳定。上部和曲线内侧加固主要是减少超挖影响区域,控制地面沉降。

(4)测量导向针对性提升

常规测量系统在地下短边长距离传递时,会带来巨大的方位误差和点位误差,且测量设备精度和稳定性不足,严重影响急曲线轴线控制和贯通精度。因此,盾构隧道急曲线需采用高精度激光跟踪仪+陀螺定向仪,进行控制测量和联系测量,提高掘进面附近的测量精度。

3 方案优化效果

针对传统盾构隧道在轴线方向急剧变化处设置竖井的方案,急曲线盾构隧道施工技术虽然在盾构隧道建设方面会增加投资额并延长工期,但综合考量下具有多方面的优势。以兰溪路—梅岭北路处截流总管转弯为例,该处设计隧道轴线转折角度为 97.98°,曲率半径为 65 m,路口北侧为小区和商场,南侧为曹杨第二中学和普陀区中心医院,人车流量大。传统的设置竖井方案和急曲线盾构方案的费用、工期、交通流量对比详见表 3 至表 6。

表 3 费用对比			单位:万元
费用项	直线盾构+转折井	急曲线盾构	
措施费	管线搬迁与临排	210	0
	交通导改	70	0
	地基加固	120	250
分部分项工程费	盾构	210	395
	竖井	615	0
总计	1 225	645	

表 4 工期对比			单位:d
施工内容	直线盾构+转折井	急曲线盾构	
措施	管线搬迁与临排	30	0
	交通导改	30	0
	地基加固	24	38
土建与安装	盾构	10	20
	竖井	110	0
总计	204	58	

4 结 语

通过以上新工艺对原方案部分节点进行变更,转折井取消变为急曲线盾构隧道,本项目减少了 4

表 5 高峰时段交通流量对比

路段	交通测算项	直线盾构+转折井	急曲线盾构
梅岭北路	流量	143 PCU	280 PCU
	饱和度	0.92	0.59
兰溪路	流量	137 PCU	285 PCU
	饱和度	0.80	0.45

表 6 占路时长对比

占路用途	直线盾构+转折井	急曲线盾构
竖井	110	0
沿线加固	0	38
总计	110	38

单位:d

个盾构工作井,减少市中心道路占地不少于 10 000 m²,减少土方开挖不低于 7 万 m³,缩短工期约 12 个月,减少各类管线搬迁,减少了扰民,保障了周边学校、住宅、医院设施安全。在老城区深层地下管网中,实现了“点连线、并线成网”,用新质生产力解决了老城区深层地下管网建设过程中遇到的交通导行“搬不动”、地下管线“碰不得”、周边环境“扰不了”等急难问题,在今后地下综合管廊、给排水管道、电力、通信等管网建设中有着非常广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 王军,潘梁,陈光,等.城市地下综合管廊建设的困境与对策分析[J].建筑经济,2016,37(7):15-18.
[2] 葛春茂.关于旧城改造地下管网施工中难点和解决办法的探讨[J].重庆建筑,2017,16(11):53-55.

[3] 孔识荣,徐玲.市政道路改造工程复杂管网施工与协调[J].施工技术,2013,42(增刊1):405-406.
[4] 郑凤宜,张磊.市政排水管道改造设计思路研究[J].科技资讯,2013(10):74-75.
[5] 荣梅.老城区市政排水管网改造设计浅析[J].城市道桥与防洪,2012(9):175-177;336.
[6] 张寿川,张海波,刘凯,等.基于约束条件的城市地下空间综合质量评价[J].城市地质,2025,20(1):24-34.
[7] 贾伍慧,李宗发,刘凯,等.典型滨海平原城市地下空间地质适宜性评价[J].地质与勘探,2024,60(2):367-376.
[8] 何辉军.大面积老旧城区市政雨污管网提升改造综合管理研究[J].低碳世界,2025,15(6):7-9.
[9] 张靠.城区市政给排水管网设计及施工要点分析[J].水上安全,2024(22):19-21.
[10] 谭博寅.老城区市政排水管网改造工程中技术难点及策略[J].中国住宅设施,2022(4):121-123.
[11] 李骏.市政管网改造设计要点探讨[J].中国高新技术企业,2011(21):14-15.
[12] 彭芳乐.高质量推动城市地下空间开发利用[J].国家治理,2025(19):70-76.
[13] 彭芳乐,乔永康.城市地下空间开发过程中的若干重要问题及未来发展[J].施工企业管理,2024(11):55-58.
[14] 苏栋,黄茂隆,韩文龙,等.城市深层地下空间地质环境韧性评估模型与应用[J].中国地质,2024,51(1):157-169.
[15] 《上海市城镇雨水排水规划(2020-2035年)》规划方案介绍[J].给水排水,2020,56(6):140.
[16] GB 50446—2017 盾构法隧道施工及验收规范[S].
[17] 陈剑,李智明.急曲线隧道盾构超挖量及铰接角的理论算法[J].中国公路学报,2017,30(8):66-73.

(上接第 330 页)

[9] 孙修程.热带地区混凝土的裂缝分析与处理[J].城市建设理论研究(电子版),2015(23):424.
[10] 詹炳根,张青峰,林兴胜.安徽石油总公司办公楼基础施工中的温度监测[J].工程与建设,2007,21(1):48-50.
[11] 赵涛.土木工程高支模施工技术的设计与施工流程[J].中国建筑金属结构,2025,24(9):31-33.
[12] 成云波.建筑工程地下室底板大体积混凝土施工技术分析[J].居业,2025(1):10-12.
[13] 李蓉.现浇连续梁技术在施工中的应用[J].建材与装饰,2014(10):

207-209.
[14] 陈晓辉.高速铁路桥梁连续梁工程施工技术探究[J].建材发展导向(下),2018,16(5):109-110.
[15] 黄俊豪,周敏,陆杨,等.基于 5G+技术的大型医疗建筑智慧工地系统应用研究[J].建筑施工,2023,45(1):156-159.
[16] 朱洪军.公路拱桥拱圈施工技术探讨[J].中国房地产业,2017(8):197-198.
[17] 曾桂媛.悬臂技术在桥梁施工中的应用分析[J].运输经理世界,2023(29):115-117.