

曲线顶管三维轨迹动态测量技术研究进展及展望

王璐^{1,2}, 祖雨彤^{1,2*}, 胡远彪^{1,2}

(1. 深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 曲线顶管施工要求管道沿空间曲线高精度掘进, 轨迹控制是贯通质量与安全的关键。传统顶管导向系统主要面向近直线工况, 难以满足复杂三维曲线顶管的姿态与方向控制需求。陀螺导向系统有望解决空间曲线顶管导向难题, 但在顶管施工复杂环境下, 其动态精度劣化及长时精度难以保持。本文面向空间曲线顶管的三维轨迹测量需求, 对常用导向与测量技术进行梳理, 总结了人工目测法、激光标靶法、棱镜法、全站仪法和陀螺导向法5种方法, 并明确各方法的适用条件与局限。其中, 陀螺导向法是解决长距离曲线顶管的首选方案。因此, 本文针对陀螺导向法在实际工程应用过程中存在的问题, 提出解决方案和改进思路。本文旨在为空间曲线顶管三维轨迹动态测量技术的进一步研究和应用提供一定的借鉴。

关键词: 定向钻探; 曲线顶管; 陀螺导向; 顶管轨迹; 动态测量; 劣化机理; 保持机制

中图分类号: TU990.3; P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)03-0001-09

Advances and prospects in dynamic 3D trajectory measurement technology for curved pipe jacking

WANG Lu^{1,2}, ZU Yutong^{1,2*}, HU Yuanbiao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, Beijing 100083, China; 2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Curved pipe jacking requires the pipeline to advance with high accuracy along a three-dimensional designed alignment, and trajectory control is critical to both breakthrough quality and construction safety. Traditional guidance systems for pipe jacking are designed primarily for near-straight drives, and therefore cannot adequately meet the attitude and heading control requirements of complex three-dimensional curved drives. Gyroscope-based guidance is a promising approach to this problem, but the dynamic accuracy can degrade in complex construction environments and its long-term stability is difficult to maintain. Targeting the needs of dynamic three-dimensional trajectory measurement for space-curved pipe jacking, this paper reviews commonly used guidance and measurement techniques including manual visual sighting, laser-target methods, prism-based optical tracking, total-station surveying, and gyro-based guidance, while clarifying their applicability and limitations. Among these, gyro-based guidance is the preferred solution for long-distance curved drives. Therefore, this paper identifies the major issues encountered in engineering practice and proposes corresponding remedies and avenues for improvement. This work aims to inform further research and application of dynamic 3D trajectory measurement technologies for space-curved pipe jacking.

Key words: directional drilling; curved pipe jacking; gyro guidance; pipe jacking trajectory; dynamic measurement; deterioration mechanism; retention mechanism

收稿日期: 2025-09-26; 修回日期: 2025-11-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.03.001

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“空间曲线顶管三维轨迹动态测量模型与精度保持机制”(编号: 42572293)

第一作者: 王璐, 女, 汉族, 1988年生, 副教授, 光学工程专业, 博士, 研究方向为随钻测量和非开挖技术, 北京市海淀区学院路29号, wanglu666@cugb.edu.cn。

通信作者: 祖雨彤, 女, 汉族, 1998年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 研究方向为随钻测量和非开挖技术, 北京市海淀区学院路29号, 3002220025@email.cugb.edu.cn。

引用格式: 王璐, 祖雨彤, 胡远彪. 曲线顶管三维轨迹动态测量技术研究进展及展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(3): 1-9.

WANG Lu, ZU Yutong, HU Yuanbiao. Advances and prospects in dynamic 3D trajectory measurement technology for curved pipe jacking[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(3): 1-9.

0 引言

顶管法因无需大面积开挖、对地表交通和既有建构筑物扰动小,被广泛用于城市地下管线、能源输送管道及市政排水管道的敷设,尤其适用于中心城区、密集管线走廊以及不宜开挖的敏感区域^[1-2]。随着管线敷设距离不断增加、空间走向日益受既有设施、红线条件和安全隔离要求的约束,顶管工程正由短距离直线或平面曲线掘进,逐步发展为长距离三维空间曲线掘进^[3]。目前,常用的顶管导向方法在长距离曲线顶管的导向上均存在局限性,导向精度不满足顶管施工的要求。因此,本文针对顶管的施工特征和曲线顶管三维轨迹测量参数进行梳理,对常用的顶管导向与测量技术进行了综述,并针对陀螺导向法在实际工程应用过程中存在的问题,提出解决方案和改进思路。

1 顶管施工工法及三维轨迹测量

1.1 顶管施工工法

顶管法是一种非开挖铺设地下管道的方法^[4],借助顶推设备将顶管掘进机(顶管机)从始发井内一直推到接收井内,与此同时,把紧随顶管机后的管道顶入并埋设在两井之间^[5]。顶管的施工过程通常包括前期的地质与既有管线探查、障碍物清理与风险评估,然后依据地质条件及地下障碍设计轨迹(预设轨迹)。在预设轨迹的起点与终点分别建设始发井与接收井。在始发井内安装千斤顶与顶推等设备,并配置中继千斤顶与同步注浆/泥浆润滑系统以降低管土摩阻。随后采用顶管掘进机在土体中开挖,利用主顶油缸的推力将待铺管节逐节顶进,直至到达接收井,从而使地下管道严格按照预设轨迹贯通(图1)^[6]。

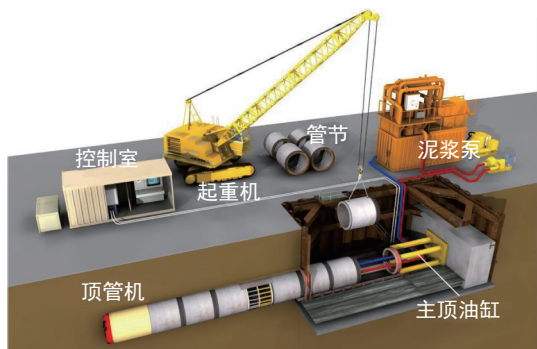


图1 顶管施工示意

Fig.1 Schematic diagram of pipe-jacking construction

1.2 曲线顶管三维轨迹测量参数

顶管施工期间,需要对铺设管道的三维轨迹进行准确的测量与控制,否则管道将无法进入接收井,导致管道无法贯通,工程失败。因此,顶管轨迹必须严格按照预设的轨迹顶进。顶管导向系统是在顶管掘进施工全过程中,实时测量顶管掘进机的姿态以及轴线相对预设轨迹轴线偏差的装备^[7]。

顶管姿态定义如图2所示,顶管轨迹相对预设轨迹的偏差定义如图3所示^[8]。

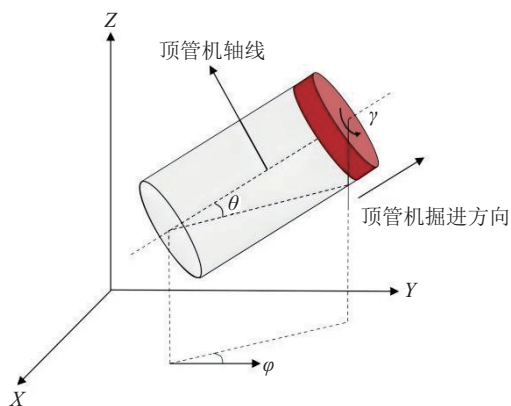


图2 顶管姿态定义示意

Fig.2 Schematic diagram of pipe-jacking attitude

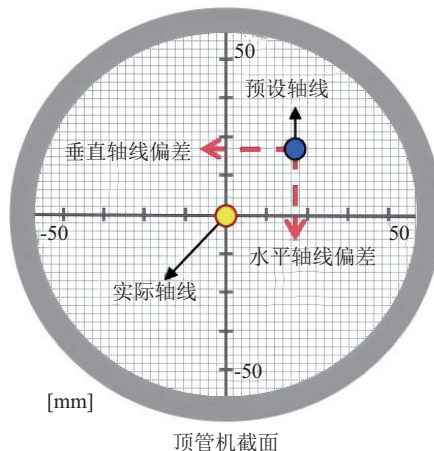


图3 顶管轨迹偏差示意(横截面)

Fig.3 Schematic diagram of pipe-jacking trajectory deviation (cross section)

(1)倾角:顶管掘进机轴线与水平面之间的夹角 θ ,影响管道/隧道的铺设坡度。

(2)横滚角:顶管掘进机绕自身轴线旋转的角度 γ ,主要由刀盘长时间朝同一方向旋转所致,顺时针为正,逆时针为负。

(3)方位角:顶管掘进机轴线在水平面的投影与真北的夹角 φ ,主要由土质不均匀时顶管机的机头发生摆动所致,北偏东为正,北偏西为负。

(4)水平轨迹偏差:顶管掘进机轴线轨迹与预设轨迹在水平方向上的偏差。

(5)垂直轨迹偏差:顶管掘进机轴线轨迹与预设轨迹在垂直方向上的偏差。

通常情况下,管道从始发井贯通至接收井,水平偏差与垂直偏差应小于100 mm^[9]。顶管施工的复杂环境与复杂工序,为顶管导向带来了挑战。

1.3 顶管施工特征

顶管法是我国发展最早、最成熟的非开挖铺管方法,具有以下特征^[10]。

(1)施工速度极其缓慢:掘进机的刀盘在前方研磨土体,同时,始发井中的液压千斤顶将管道顶入土体,顶进线速度通常为1~2 m/h,导向系统需长时间服役。

(2)施工工序不连续:当上一根管节(2~3 m)顶入土体后停止顶进,中断始发井中与掘进机之间的所有线缆,缓慢放置新管节至主顶油缸设备前,然后再连接所有线缆开始新管节的顶进(图4)。在安装新管节的过程中,顶管掘进机完全静止不动。



图4 工作井与掘进机之间的线缆

Fig.4 Cable between the working shaft and the pipe-jacking machine

(3)施工环境复杂恶劣:顶管施工中,多台驱动电机驱动掘进机刀盘旋转,且频繁启动与关停,导致顶管内部电磁场异常复杂(图5);顶管机内部为密闭空间,刀盘研磨土体、电动机运转产生热量,导致顶管掘进机内部的温度场变化异常复杂;刀盘切削土体、电动机运转产生振动,导致顶管内部的应力场异常复杂。



图5 掘进机内部环境

Fig.5 Internal environment of the pipe-jacking machine

顶管特殊的施工工艺及复杂的施工环境,使顶管轨迹的测量及导向方法也具有独特的特征。

顶管施工过程中,姿态与轨迹控制、摩阻控制、地层改良与同步注浆是确保工程质量与环境安全的关键环节。为了确保顶管顺利贯通,铺设管道的轨迹与预设轨迹偏差应 <100 mm。然而,在实际顶进过程中,受软硬互层、砂卵石、孤石、回填土等不均匀地层条件、地下水位变化、管节与土体界面摩阻分布不均、刀盘/土压控制误差、推力与纠偏油缸作用不对称、施工工法切换(如中继千斤顶安装)及导向测量误差等多重因素影响,顶管机实际位置非常容易偏离预设轨迹(图6)^[11]。

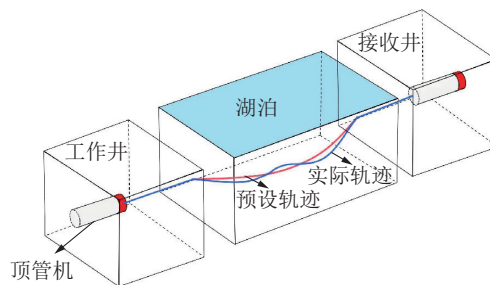


图6 顶管轴线偏差示意

Fig.6 Schematic diagram of pipe-jacking axis deviation

若不能准确、连续、实时地测量三维轨迹并及时实施纠偏,不仅会导致接收困难、接口错台与橡胶圈受损,还可能引发地表沉降与隆起超限、邻近建筑与既有管线变形,甚至造成工程失败与人员伤亡^[12-14]。在长距离顶进、复合地层、小半径曲线与大断面等复杂工况下,导向与测量系统必须同时满足高精度、强鲁棒性与高时效性3项指标。因此,顶管掘进机在长距离、弯曲路径等复杂空间曲线管道顶进过程中对

高精度、实时性的导向系统提出了更高要求^[15-16]。

因此,顶管三维轨迹的测量精度直接决定了顶管工程的成败,尤其是建设复杂空间曲线管道。据此,本文通过对当前顶管三维轨迹动态测量中的主流方法进行梳理,通过详细资料调研,介绍了现有测量方法的工作原理、技术现状以及未来趋势,希望为后续的技术研发和学术研究提供支持。

2 顶管三维轨迹测量方法

目前顶管导向方法有人工目测法、激光标靶法^[17]、棱镜法、全站仪法^[18]和陀螺导向法。

2.1 人工目测法

通过在工作坑内设置激光发射器,使其光轴与设计轴线同向;在刀盘驱动轴或近端管节上安装光靶(常见为同心圆/十字线靶标或荧光板)。施工人员通过观察光斑在靶面上的相对位置,判断掘进机与预设轴线的偏差与转向趋势,从而在控制台上微调各推进油缸推力或修正刀盘姿态,保障掘进朝向设计线路推进(图7)^[19]。



图7 人工目测法

Fig.7 Manual visual inspection method

人工目测法无法形成三维坐标,只能目测顶管机头偏离轴线大致距离,但设备简易、成本低、上手快,适用于视距无遮挡、环境干扰较小的短距离直线顶进(工程上以 ≤ 200 m为宜)。该方法无法自动化、连续输出三维轨迹,且误差会随距离增加、光斑变大而快速放大,并对粉尘/水雾/热对流、安装同轴度、振动与人员判读主观性等高度敏感。为降低误差,工程上通常先进行零点与同轴度校准,控制现场尘湿与光干扰,分段复核基线并记录里程对应的光斑偏差;也可通过小发散角激光与防振支架、优化磨砂靶面刻度、设置中继靶分段观测,或引入相机质心定位实现半自动读数以提升分辨率与稳定性。

2.2 激光标靶法

激光标靶法基于激光直线性原理,但将人工读数替换为光电阵列自动测读,在始发井布设与设计轴线共线的激光发射器,机头安装电子光靶,常见为二维PSD/光电二极管矩阵或面阵相机和标靶,系统采集靶面光斑的强度分布并计算质心坐标(图8)^[20]。其优点是自动读数、刷新率高、连续留痕,能显著降低人为判读误差,适用于视距无遮挡的短距离直线顶进;但仍依赖笔直光轴与良好环境,受光束发散、粉尘/水雾折射、设备振动与同轴度偏差影响,距离增大时像斑放大与阵列分辨率限制会显著放大误差;当进入曲线段时易出现脱靶或解算假解,通常需要中继靶分段复测,故不适用于长距离(>200 m)的曲线顶管。典型的产品有德国VMT公司的SLS-Microtunnelling LT和TUnIS Navigation MT^{Laser}等(表1)。

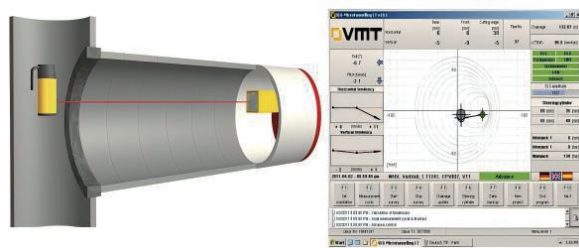


图8 激光标靶法

Fig.8 Laser targeting method

国内学者已开展激光标靶法的研究。吴全科等^[21]基于红外跟踪定位,自动获取掘进机位置信息,并以偏差趋势图监控推进方向与高程变化;王彩等^[22]构建光学靶标水平测量系统,将两套靶标装置布设于机尾,利用靶标棱镜接收准激光、CCD成像求取光斑位置,从而解算机头航向;翟华等^[23]提出以始发井激光为方向基准、机头平面光电传感器阵列接收端,通过激光斑在阵列上的位移反演掘进姿态;黄喆等^[24]提出了一种基于双相机靶标的实时位姿测量方法,利用对向安装的两个工业相机及两块感光成像屏组成测量标靶,采用光斑图像分析处理、标定网格检索以及欧拉角解算技术,完成掘进机相对计划线在工程坐标系下水平/垂直偏差的测量,直线段15 m内姿态平均测量精度 $<0.03^\circ$,水平/垂直偏差测量误差 <3 mm。

以激光基准为核心的方案在直线或近直线工

表1 国外激光标靶导向系统

Table 1 Foreign laser target guidance system

激光标靶导向系统	导向原理	应用领域	顶进长度/m
SLS-Microtunnelling LT	激光靶系统通过安装在机器上的激光靶,连续不断地确认顶管机的确切位置,在操作台上显示设计轴线偏差数据	直线短距离掘进	≤ 250
TUnIS Navigation MT ^{Laser}	通过使用击中目标板的参考激光束,确定机器的水平和垂直位置;集成的倾斜传感器测量纵向倾斜和滚动	直线短距离掘进	≤ 250
TUnIS Navigation MT ^{HydroLevel}	在TUnIS Navigation MT ^{Laser} 激光系统的基础上升级了电子水准仪来计算顶管机的垂直位置	直线中短距离掘进	≤ 400

况具备较高自动化与较好精度,但受制于激光直线传播特性与远距离光斑发散,难以适配三维空间曲线路径,且随距离增大,光斑扩散致定位精度衰减、误差累积放大。故激光标靶类方法更适用于短距直线顶管,仍难以满足长距离曲线顶管导向需求。

2.3 棱镜法

棱镜法基于“三点确定一平面”的几何原理,在掘进机机体上布设三个反射棱镜作为刚性基准,施工时由全站仪依次测定三个棱镜的三维坐标,通过坐标系转换与最小二乘直线拟合求得机头轴线的位置与姿态参数,再与设计轴线对比获得轴线偏差(图9)^[25]。由于该方法依赖外部测量网与空间坐标解算,为避免遮挡并提高解算稳定性,工程上通常要求三个棱镜两两间距 ≥ 1 m,使其不适用于小口径顶管;且观测需保证三靶同时无遮挡视线,掘进推进中还需间歇停机/减速进行测量与测站转移,难以实现连续全自动导向。典型的产品有日本Koubou enzan公司的Total Station Robotec、德国VMT公司的TUnIS Navigation MT激光全站仪和上海隧道工程有限公司研制的单站轨迹式定向的顶管导向系统。

2.4 全站仪法

在已铺设管道内分段建立全站仪导线,按预先

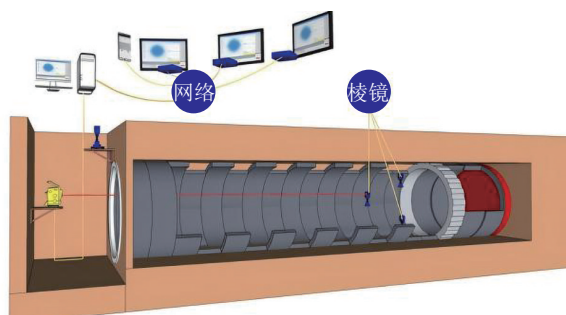


图9 棱镜法

Fig.9 Prism method

量测或布设的已知基线间距,在管内依次设置多个全站仪站点,相邻站点之间以已知距离为约束,全站仪实测每段的方位角与俯仰角,再按三角投影将各段增量向量累计求和,得到掘进机当前端点坐标与姿态(图10)^[26]。由于采用分段累积的导线解算,该方法可适用曲线顶管与长距离工况,并可通过对前后站回视、闭合差与平差计算提升精度;但其实施需人员携设备进入狭小管道内逐段架设与对点,效率低,且受视线遮挡、管内粉尘/水雾、照明与通风影响较大;同时,存在累积误差与作业安全风险。

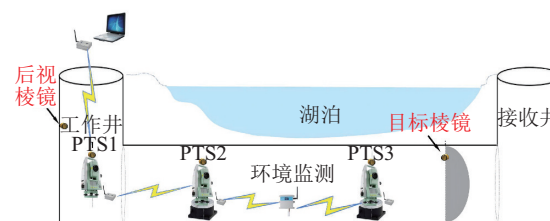


图10 全站仪法

Fig.10 Total station method

全站仪导向法,顶管机三维坐标计算原理如下:

$$\begin{aligned}
 X_T &= X_1 + \cos\varphi_1 S_{12} + \cos\varphi_2 S_{23} + \cdots + \cos\varphi_n S_{nT} \\
 Y_T &= Y_1 + \sin\varphi_1 S_{12} + \sin\varphi_2 S_{23} + \cdots + \sin\varphi_n S_{nT} \quad (1) \\
 Z_T &= Z_1 + \sin\theta_1 S_{12} + \sin\theta_2 S_{23} + \cdots + \sin\theta_n S_{nT}
 \end{aligned}$$

式中: (X_1, Y_1, Z_1) ——起点坐标; (X_T, Y_T, Z_T) ——终点坐标; $S_{i(i+1)}$ ——第 i 与 $i+1$ 个全站仪之间的距离; φ_i ——第 i 个全站仪测得的方位角; θ_i ——第 i 个全站仪测得的倾角; n ——全站仪的数量。

基于全站仪导向法,潘国荣等^[27]研发了“APS顶管智能引导系统”,利用导线传递原理配合全站仪等测量设备,实现曲线顶管的自动导向(图11)。该系统通过多测站的坐标传递与解算,获取掘进机的空间坐标和姿态信息,并据此提供导向指令,已

在工程中多次应用并验证其可行性。但其在长距离曲线施工中需多台全站仪,设备投入大;同时,需要施工人员在管内反复布设并整平测量站点,操作流程繁琐且存在安全风险;并且,当顶管曲率半径较小时,导线传递的测量条件受限,适用性下降。

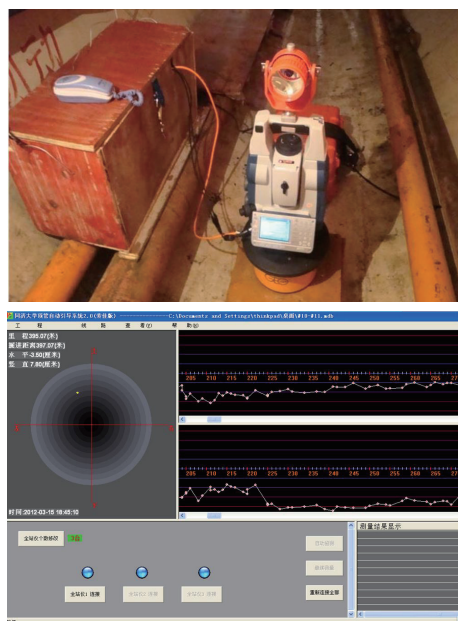


图 11 APS 顶管智能引导系统

Fig.11 APS intelligent guide system for pipe jacking

MTG-L 系统(图 12)在原有顶管自动测量导向系统的基础上,针对长距离、曲线顶管特性对测量方法进行了优化,通过轨迹内插得出第一台全站仪和后视棱镜的坐标,从而实现全站仪的动态设站定向。应用结果:顶进距离为 300 m 时轴线偏差为 4.5 cm^[28]。

2.5 陀螺导向法

2018 年以来,国内外研究机构尝试用陀螺惯性导航系统解决长距离复杂空间曲线顶管导向难题。目前的原理样机有德国 VMT 公司的 TUNIS Navigation MT^{gyro}(图 13)、日本 TOKYO KEIKI 公司的 TMG 系列(图 14)和国内力信测量(上海)有限公司 RMS-D(图 15)。

在顶管施工环境下,陀螺导向系统的动态测量精度发生劣化,且长时间服役状态下测量精度难以保持。经统计,每 100 m 的施工距离(服役时间约 50 h),陀螺的测量误差可达 10 m,远远不能满足工程应用需求。因此,为了保持长时间的动态精度,国内学者开展了相关研究。Pan 等^[29]提出一种基于

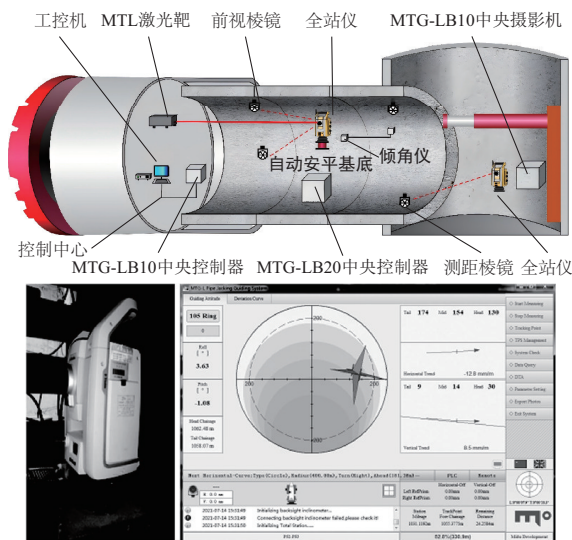


图 12 MTG-L 曲线顶管自动测量系统

Fig.12 MTG-L automatic measurement system for pipe jacking

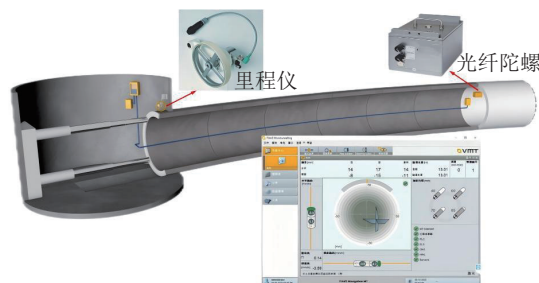


图 13 德国 VMT 公司 TUNIS Navigation MT^{gyro} 系统

Fig.13 TUNIS Navigation MT^{gyro} by VMT GmbH, Germany

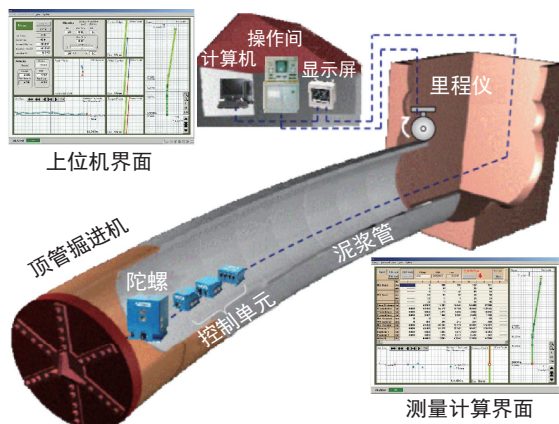


图 14 日本 TOKYO KEIKI 公司 TMG 系列

Fig.14 TMG Series by TOKYO KEIKI Co., Ltd. of Japan

单棱镜和陀螺的多源数据融合的顶管姿态三维定位模型,1 h 内定位精度达到 10 mm,但需要施工人

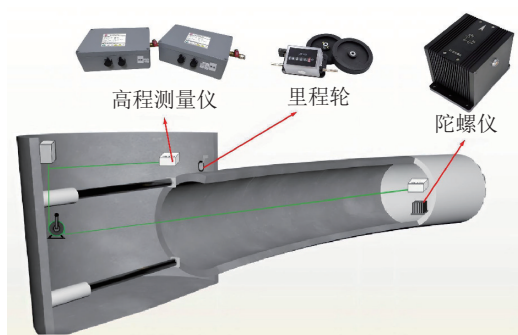


图15 力信测量(上海)公司 RMS-D
Fig.15 RMS-D measurement by Lixin
Measurement (Shanghai)

员在管道内部设置全站仪测量站点;Zhao等^[30]采用陀螺/里程仪/全站仪组合导航模型,并采用无偏有限脉冲响应滤波器作为融合机制,2 h内测量峰值偏

差 <100 mm,但也需要施工人员在管道内部设置全站仪站点(图16)。

2.6 小结

顶管导向方法的优缺点对比见表2。

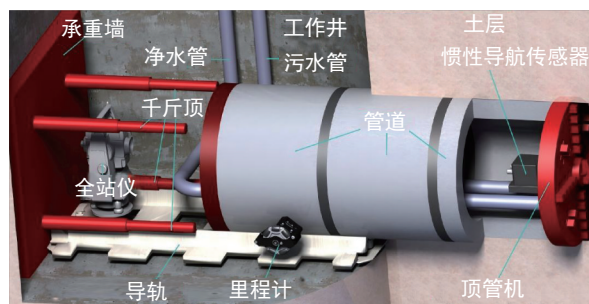


图16 江南大学惯导+里程计地下实时定位方案
Fig.16 Real-time underground positioning scheme of
inertial navigation and odometer at Jiangnan University

表2 顶管导向方法对比

Table 2 Comparison of pipe jacking methods

导向方法	优 点	缺 点	适用距离
人工目测法	没有设备费用	自动化程度低,施工质量没有保证,不适用于微型顶管与人员无法进入的顶管	短距离(直线)
激光标靶法	可应用于人无法进入的小口径顶管	导向需要通视条件,激光标靶光斑随导向距离增加发散,因此不能应用于长距离和曲线顶管	中短距离(直线)
棱镜法	具有一定自动化	不适用于小口径的顶管工程	中短距离(直线)
全站仪法	可通过增加全站仪和棱镜数量实现长距离和曲线顶管	顶管口径小于1.6 m时无法应用;随距离增加需增设新的全站仪设备,费用昂贵,成本高;操作复杂,需要专业技术人员多	中长距离
陀螺导向法	可适用于长距离曲线顶管,一次安装全程测量	测量误差随时间累积,长时间测量精度不足	长距离

综上,目前基于光学测量的顶管导向方法,由于光的直线传播特性,且长距离光斑会发散,需架设中继测量设备,实现曲线和长距离测量;但不断架设新设备操作流程复杂,设备费用昂贵,施工风险大,且无法应用于小口径的顶管工程中。陀螺导向系统可适用于长距离曲线顶管,但顶管施工环境下陀螺导向系统的动态测量精度随施工时间的增加而劣化。因此,顶管陀螺导向系统动态精度保持方法是急需解决的难题。

3 展望

由于空间曲线顶管的三维轨迹需要进行高精度测量与控制,现有的顶管导向方法已不能满足曲线顶管使用需求。陀螺导向系统有望解决曲线顶管三维轨迹测量难题,但是基于陀螺的顶管三维轨

迹测量模型不清晰、顶管环境对陀螺的影响机制不明确,因此急需开展相关研究。本文提出3点关于空间曲线顶管三维轨迹动态测量技术未来发展趋势的展望。

(1)面向顶管施工的长时、低速、间歇推进等工况,未来可构建以“光纤陀螺惯性测量单元+里程仪+静力水准仪”为核心的异步多源融合框架。推进阶段利用光纤陀螺惯性测量单元在短时姿态上的高精度优势,叠加上里程仪的长时里程约束与水准仪的标高稳定约束实现优势互补;停顿与换管节阶段引入零速、零角速信息抑制漂移,配合时间戳对齐与时延补偿、紧耦合EKF/UKF或因因子图平差,充分利用顶管施工特征信息,考虑多源传感器数据不同步的影响,提出可自适应顶管不同工作模式、长

时间服役的三维轨迹测量模型。

(2)针对顶管复杂环境导致的测量动态精度劣化,有必要开展顶管复杂环境下陀螺导向系统动态精度劣化机理研究。一是面向工程现场建立误差源图谱,在多项目调研与对比试验基础上识别并量化各类误差成因与占比;二是针对施工操作干扰,如初始安装与对准偏差、里程轮打滑致长度误差、水准仪进气致标高跳变等,在既有测量模型的框架下研究误差项的时变传播与耦合规律,构建动态误差模型与可观测性评估方法;三是聚焦非线性动态复合物理场(电磁扰动、缓慢温漂、长时低强度高频率振动)对惯性器件与解算链路的影响,结合计算机仿真、数据驱动辨识与机理建模,揭示零偏、标度因子、随机游走等参量的环境敏感性与漂移通道,形成可解释的劣化机理框架。为实现误差在线自标定、权重自适应融合与长时精度保持机制提供物理依据与参数先验,支撑曲线顶管三维轨迹的高精度、长期稳定测量。

(3)开展顶管轨迹动态精度长时保持机制研究。一是在系统与机械层面优化陀螺导向装置的布局与封装,实施热隔离、减振缓冲与电磁屏蔽以提升环境适应性;二是在算法与模型层面,针对施工操作干扰引入的系统性误差构建时变动态误差模型,提升测量精度;三是面向复合物理场诱发的随机误差,开展噪声特征分析与自适应建模,在数据处理层面持续抑制漂移,稳定解算精度。

4 结论

本文首先介绍了顶管施工工法,阐明曲线顶管三维轨迹测量参数与顶管施工特征。其次,围绕空间曲线顶管三维轨迹的高精度、长时、实时测量需求,系统梳理了人工目测法、激光标靶法、棱镜法、全站仪法以及陀螺导向法等主流导向技术的机理、能力边界与适用场景。其中,陀螺导向系统可以适用于长距离曲线顶管,但顶管施工环境下陀螺导向系统的动态测量精度随施工时间的增加而劣化。因此,为实现陀螺导向系统的动态测量精度长时保持,结合顶管施工工况和运动特征,本文提出空间曲线顶管三维轨迹动态测量技术的未来展望。通过结合顶管施工工作特征,构建光纤陀螺惯性测量单元/里程仪/静力水准的异步多源融合框架,理清顶管复杂环境测量动态精度劣化机理,解决测量模

型不清晰、环境影响机制不明确和长时间测量累积误差大的问题,为解决长距离复杂空间曲线顶管的导向难题提供创新方法及理论支持与基础。

参考文献(References):

- [1] Ong D E L, Barla M, Cheng J W C, et al. Sustainable Pipe Jacking Technology in the Urban Environment[M]. Singapore: Springer, 2022.
- [2] 田海涛. 导向式微型顶管工艺技术的工程应用[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 906-908.
TIAN Haitao. Engineering application of guided micro pipe jacking technology [J]. Industrial Construction, 2023, 53 (S2): 906-908.
- [3] 潘国荣, 吴廷, 白昀. 顶管自动导向系统在三曲线顶管工程中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(4): 102-105, 109.
PAN Guorong, WU Ting, BAI Yun. Application of automatic guidance pipe-jacking system in three curved pipe-jacking engineering[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(4): 102-105, 109.
- [4] Ma P, Shimada H, Huang S, et al. Transition of the pipe jacking technology in Japan and investigation of its application status [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 139: 105212.
- [5] Wen J W, Zhang P S, Xiang T. Comparative research on the pipe-soil frictional resistances of circular and rectangular pipe sections during trenchless pipe jacking [J]. PLOS One, 2024, 19 (2): e0297537.
- [6] 潘国荣, 刘毛毛, 赵鹏飞, 等. 超长顶管智能引导测量系统研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(1): 66-69.
PAN Guorong, LIU Maomao, ZHAO Pengfei, et al. Study on the intelligent guided surveying system of the ultra-long jacked pipe [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(1): 66-69.
- [7] Yang Y F, Liao S M, Liu M B. Dynamic prediction of moving trajectory in pipe jacking: GRU-based deep learning framework [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2023, 17(7): 994-1010.
- [8] 金郑星, 郭平, 周文朋, 等. 浅埋超大断面组合矩形顶管左右密贴顶进施工姿态控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62 (1): 259-266.
JIN Zhengxing, GUO Ping, ZHOU Wenpeng, et al. Research on construction posture control technology for shallow buried extra-large section combined rectangular pipe jacking with tight gaps [J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62 (1): 259-266.
- [9] 王瑞杰, 段文贵, 饶才强, 等. 手掘式顶管施工轴线偏差测量及纠偏对策[J]. 建筑技术, 2016, 47(7): 642-644.
WANG Ruijie, DUAN Wengui, RAO Caiqiang, et al. Measurement and correction measures for axial deviation in manual pipe jacking construction [J]. Architecture Technology, 2016, 47 (7): 642-644.
- [10] Ma J F, He S H, Cui G Y, et al. Construction stability and reinforcement technology for the super-large rectangular

- pipe-jacking tunnel passing beneath the operational high-speed railway in composite stratum[J]. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 2023, 14(1):2208720.
- [11] Cheng M, Lu Y J. Developing a risk assessment method for complex pipe jacking construction projects[J]. *Automation in Construction*, 2015, 58:48-59.
- [12] 钟汉杰. 非开挖顶管施工技术在市政管网中的应用[J]. *工程技术研究*, 2019, 4(21):89-90.
- ZHONG Hanjie. Application of trenchless pipe jacking technology in municipal pipe network[J]. *Engineering and Technological Research*, 2019, 4(21):89-90.
- [13] Zhang P, Ma B S, Zeng C, et al. Key techniques for the largest curved pipe jacking roof to date: a case study of Gongbei tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 59:134-145.
- [14] 邓长茂, 彭基敏, 沈国红. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(4):1002-1007.
- DENG Changmao, PENG Jimin, SHEN Guohong. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(4):1002-1007.
- [15] Schoen M, Holter R, Boldini D, et al. Application of optimal experiment design method to detect the ideal sensor positions: a case study of Milan metro line 5[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 130:104723.
- [16] Zhang P, Li Y, Zhuang Y, et al. Multi-level information fusion with motion constraints: Key to achieve high-precision gait analysis using low-cost inertial sensors[J]. *Information Fusion*, 2023, 89:603-618.
- [17] 潘明华. 盾构自动导向系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- PAN Minghua. Research and realization on automatic guidance system of tunnel boring machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [18] 王国辉, 马莉. TBM隧道掘进中的激光导向系统[J]. *铁道建筑*, 2006(6):24-26.
- WANG Guohui, MA Li. Laser-oriented system in TBM (tunnel boring machine) used in advance of tunnel driving[J]. *Railway Engineering*, 2006(6):24-26.
- [19] 李洋, 程鹏, 李鹏, 等. 小半径曲线管幕修建暗挖地铁车站技术研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(7):1207-1218.
- LI Yang, CHENG Peng, LI Peng, et al. Research on construction technology for small-radius curved pipe-curtain mined metro stations[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(7):1207-1218.
- [20] Huang Z, Shen X L, Wang L, et al. A low-cost and real-time pose measurement method for straight pipe jacking machine based on dual-screen laser target in tunneling guidance[J]. *Measurement*, 2022, 195:111110.
- [21] 吴全科, 伍田生, 林超. 软弱土质中大口径长距离泥水平衡顶管纠偏及减阻施工技术[J]. *工业建筑*, 2012, 42(4):107-112.
- WU Quanke, WU Tiansheng, LIN Chao. Construction technology research on rectifying deviation and down resistance reduction of mud balanced pipe-jacking with large-diameter and long-distance in soft soil[J]. *Industrial Construction*, 2012, 42(4):107-112.
- [22] 王彩, 李月强, 刘力双. 顶管机自动导向水平角测量系统研究[J]. *光学技术*, 2015, 41(3):238-242.
- WANG Cai, LI Yueqiang, LIU Lishuang. Horizontal angle measurement of automatic navigation system of pipe jacking machine[J]. *Optical Technique*, 2015, 41(3):238-242.
- [23] 翟华, 闫梦飞, 吕庆洲, 等. 组合FPGA光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(7):50-57.
- ZHAI Hua, YAN Mengfei, LY Qingzhou, et al. Laser attitude measurement system of pipe jacking machine based on FPGA photoelectric sensor array[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(7):50-57.
- [24] 黄喆, 燕庆德, 邵震宇, 等. 基于双相机标靶的直线顶管掘进机导向方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4):450-457.
- HUANG Zhe, YAN Qingde, SHAO Zhenyu, et al. Guiding method of linear pipe jacking machine based on dual camera target[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4):450-457.
- [25] 王浩, 陈刚, 李刚. 单站轨迹式长距离顶管导向系统的研发与应用[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(S1):1043-1051.
- WANG Hao, CHEN Gang, LI Gang. Development and application of single-station long-distance pipe jacking guidance system by track correction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(S1):1043-1051.
- [26] 潘国荣, 李怀锋, 王穗辉. 盾构姿态自动导向及多源数据融合处理方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4):619-623.
- PAN Guorong, LI Huaifeng, WANG Suihui. A new method of shield attitude automatic measurement and multi-source data processing[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 41(4):619-623.
- [27] 潘国荣, 王穗辉, 白昀. 福州S型曲线顶管自动导向系统的研制及应用[J]. *测绘通报*, 2013(s1):209-213, 225.
- PAN Guorong, WANG Suihui, BAI Yun. Development and application of automatic guidance system for S-curve pipe jacking in Fuzhou[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(s1):209-213, 225.
- [28] 姜留涛, 汪慧琴, 胡倩. 曲线顶管自动测量系统的应用[J]. *测绘通报*, 2021(11):161-164, 168.
- JIANG Liutao, WANG Huiqin, HU Qian. Application of automatic measurement system for pipe jacking used in curve designed axis tunnel[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(11):161-164, 168.
- [29] Pan G R, Fan W. Automatic guidance system for long-distance curved pipe-jacking[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(8):2505-2518.
- [30] Zhao S Y, Zhou Z, Zhang C X, et al. Localization of underground pipe jacking machinery: a reliable, real-time and robust INS/OD solution[J]. *Control Engineering Practice*, 2023, 141:105711.