

# 地下管线三维轨迹测量技术研究进展及展望

崔立泽<sup>1</sup>, 王瑜<sup>1\*</sup>, 吴川<sup>2</sup>, 孔令榕<sup>1</sup>, 苏世达<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 地下管线三维轨迹测量技术在保障管线施工安全、预防事故及应急响应等方面具有重要作用。管线三维轨迹测量包括施工前、施工中及竣工后轨迹测量三个方面, 本文梳理了当前地下管线三维轨迹测量技术的研究进展, 施工前轨迹测量主要利用地球物理探测技术, 如电磁探测、探地雷达等; 施工中轨迹测量常用手持导向仪; 竣工后轨迹测量则依赖于轨迹测量仪。本文分析了各类测量方法的基本原理、技术现状及应用挑战, 并探讨了综合探测方法的优势。未来的发展方向包括地下管线随钻数字孪生、多方法融合、智慧云端物联平台及三维轨迹虚拟现实可视化技术等, 以提升测量的精度、效率和智能化水平。本文旨在为地下管线三维轨迹测量技术的进一步研究和应用提供一定的借鉴。

**关键词:** 地下管线; 三维轨迹测量; 地球物理探测; 导向仪; 轨迹测量仪; 随钻数字孪生

**中图分类号:** TU990.3;P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0001-09

## Research progress and future prospects of 3D trajectory measurement technology for underground pipelines

CUI Lize<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1\*</sup>, WU Chuan<sup>2</sup>, KONG Lingrong<sup>1</sup>, SU Shida<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanical and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** Three-dimensional (3D) trajectory measurement technology for underground pipelines plays a vital role in ensuring pipeline construction safety, accident prevention, and emergency response. The 3D trajectory measurement of pipelines encompasses three phases: pre-construction, during construction, and post-construction. This paper systematically reviews the current research progress in 3D trajectory measurement technology for underground pipelines. Pre-construction trajectory measurement primarily employs geophysical detection technologies, such as electromagnetic detection and ground-penetrating radar (GPR). During construction, handheld guidance devices are widely used for trajectory monitoring, while post-construction measurement relies on dedicated trajectory measurement instruments. This paper analyzes the fundamental principles, technical status, and application challenges of these methods, and discusses the advantages of integrated detection approaches. Future development directions include digital twin systems for real-time drilling monitoring, multi-method fusion, intelligent cloud-based IoT platforms, and 3D trajectory virtual reality visualization technologies, all aimed at improving measurement accuracy, efficiency, and intelligence. This study aims to provide references for further research and applications of 3D trajectory measurement technology for underground pipelines.

**Key words:** underground pipelines; 3D trajectory measurement; geophysical detection; guidance device; trajectory measurement instruments; digital twin for real-time drilling

收稿日期: 2025-02-20; 修回日期: 2025-04-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.001

基金项目: 雄安新区科技创新专项(编号: 2023XAGG0067-4)

第一作者: 崔立泽, 男, 汉族, 2000 年生, 硕士研究生, 地质工程专业, 研究方向为地下管线三维轨迹测量, 北京市海淀区学院路 29 号, cuilize0110@163.com。

通信作者: 王瑜, 男, 汉族, 1979 年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 主要从事钻探工程领域的研究与教学工作, 北京市海淀区学院路 29 号, wangyu203@cugb.edu.cn。

引用格式: 崔立泽, 王瑜, 吴川, 等. 地下管线三维轨迹测量技术研究进展及展望[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 1-9.

CUI Lize, WANG Yu, WU Chuan, et al. Research progress and future prospects of 3D trajectory measurement technology for underground pipelines[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 1-9.

## 0 引言

随着现代化建设的不断加快,地下管线的重要性日益凸显,国务院办公厅自“十二五”期间开始就将其划定为保障国家运行的重要基础设施<sup>[1]</sup>。地下管线轨迹是指敷设的管线在地下空间中的位置和走向,是直观反映地下管线空间坐标的曲线图形<sup>[2]</sup>。前期敷设完成的地下管线轨迹的精确测量,对于管线施工的安全运行、事故预防及应急响应等方面都有至关重要的作用<sup>[3]</sup>。然而,当前我国地下管线施工普遍存在着施工前不测量轨迹、施工后不提交数据及再施工时测量不准确等问题,导致全国各地相继出现严重的地下管线施工事故,如新旧管线交叉碰撞、地下冲刷塌陷及第三方施工事故等(如图1所示),严重威胁着人民的生命和财产安全<sup>[4]</sup>。



(a)燃气管线施工交叉事故 (b)施工现场水管被扎穿

图1 管线轨迹施工事故<sup>[5]</sup>

Fig.1 Pipeline trajectory construction accident

管线三维轨迹测量是解决以上问题的有效技术手段。管线三维轨迹的测量方法可分为施工前轨迹测量、施工中轨迹测量及竣工后轨迹测量三方面。施工前轨迹测量一般是利用探地雷达等设备,对即将施工区域的原有管线轨迹进行探测,从而在施工时有效避开原有管线,防止发生管线碰撞事故<sup>[6]</sup>。施工中轨迹测量是利用导向仪等专业设备,对正在施工的管线轨迹进行探测,确保施工管线按设计轨迹敷设。竣工后轨迹测量是指利用专业的管线轨迹测量仪器,在管道敷设竣工后立即进行轨迹测量,并将测量数据提供给市政管理部门,为日后其他管线轨迹设计及施工防碰撞提供数据<sup>[7]</sup>。

地下管线种类繁多、错综复杂且比较隐蔽,给三维轨迹测量工作带来了极大挑战<sup>[8]</sup>。随着管线施工案例增多,施工区域地层环境愈发复杂,同时鉴于人工智能和信息传感技术的迅猛发展,传统的管线轨迹测量技术有望迎来新的技术突破。据此,本文通过对当前管线三维轨迹测量中的主流测量方

法进行梳理,在详细资料调研及前期研发经验的基础上,介绍了其工作原理、技术现状及未来趋势,旨在为后续的技术研发和学术研究提供一定借鉴。

## 1 地下管线概述

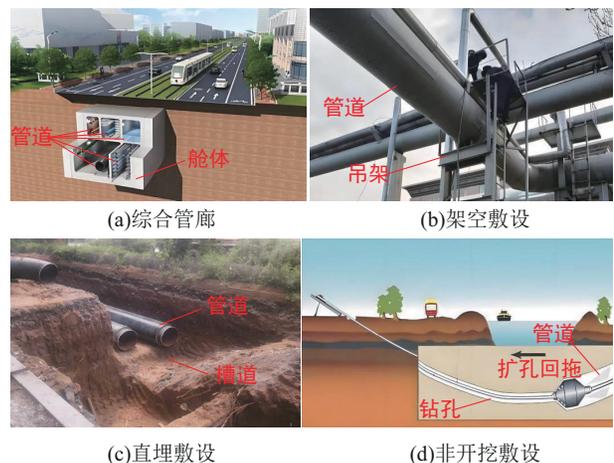
地下管线特指敷设在地下用于输送液体、气体、电力或松散固体等的管线及其配套附属设施,被广泛应用于基础设施建设,包括供水系统、燃气系统、热力系统、电力系统、通信系统及工业管线在内的多个关键领域<sup>[9]</sup>。

### 1.1 管线施工方法

针对上述关键领域,保障管线施工的安全性、准确性及可靠性至关重要。目前管线施工可分为综合管廊与传统敷设两种类型,其中综合管廊也称“共同沟”,是一种在地下建设的用于集中收纳各类管线的隧道结构(图2a)。地下管线的传统敷设方式可分为架空敷设(图2b)、直埋敷设(图2c)及非开挖敷设(图2d)3种类型。其中,非开挖敷设是以定向钻进技术为核心,在路面下方定向钻取所需规格的钻孔,并将待敷设管线回拖进钻孔内的管线敷设技术。作为先进的现代化管线敷设方法,非开挖敷设管线具备不破坏路面、不影响交通、施工周期短及造价低等优点,但也存在技术复杂及前期轨迹不易获取等缺点。随着技术不断进步,这些问题会逐渐得到解决,非开挖管线敷设将会是未来管线施工的重要技术方向。

### 1.2 地下管线分类

地下管线根据用途可划分为热力管线、给水管



(c)直埋敷设 (d)非开挖敷设

图2 地下管线敷设方式

Fig.2 Underground pipelines laying methods

线、排水管线、燃气管线、工业管线、电力管线及通信管线等。不同用途的管线材质及规格不同,在针对以上管线开展轨迹测量时所采用的测量方法及误差亦不同,本文对地下管线的分类、应用、材质及口径等进行了梳理,结果见表1<sup>[10-12]</sup>。

表1 地下管线的属性及技术参数<sup>[10-12]</sup>

Table 1 Attributes and technical parameters of underground pipelines

分类	输送物质	材质	口径/mm
热力管线	热水、蒸汽	钢	8~2400
给水管线	工业、生活、消防给水等	聚乙烯塑料	16~500
排水管线	污水、雨污合流及工业废水	钢筋混凝土	50~2800
燃气管线	煤气、液化气和天然气	钢、铜、铝塑复合材质	8~2400
工业管线	乙炔、石油、排渣等	合金钢	15~100
电力管线	输电、配电	铜、铝搭配	
通信管线	电话、有线电视、专用通讯	铜、铝搭配 PVC材质	

## 2 施工前管线轨迹测量

管线施工前需对地下已存在管线的轨迹进行测量<sup>[13]</sup>,从而防止施工时管线交叉碰撞事故。由于地下原有管线前期未测量轨迹数据,因此该类管线只能采用地球物理方法进行探测<sup>[14]</sup>。如图3所示,地球物理方法的基本原理是通过探测地下物质的物理属性差异,如电阻率、磁导率和密度等,来确定管线的位置和走向<sup>[15]</sup>,常用的方法包括电磁探测、地质雷达和地震波探测等。经过多年的研究,地球物理管线探测技术逐渐趋于成熟,但同样面临若干技术和应用上的挑战<sup>[16]</sup>。

表2梳理了各类地球物理管线探测方法的分类、基本原理及指标范围。地球物理探测方法的优点是非破坏性、能覆盖大面积区域并提供连续的管线轨迹信息,不过度依赖工作人员技术经验<sup>[18]</sup>,在技术层面能够较好地与地理信息系统(GIS)等先进技术集成;缺点是探测结果易受地下环境和干扰物影响,分辨率较低,且在复杂的地质条件下需要综合多种方法才能获得准确结果。此外,部分地球物理测量方法需要预先布置检波设备,对场地也有具体要求<sup>[19]</sup>,一定程度上限制了该方法的应用。

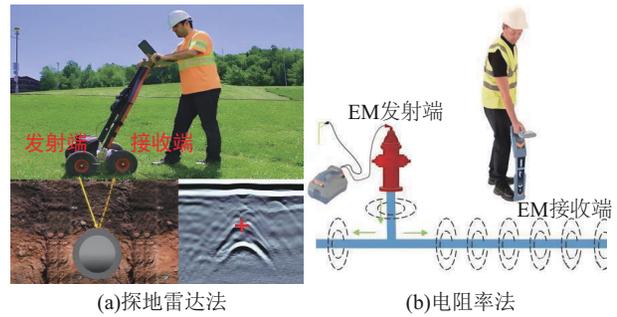


图3 几种典型物探原理示意<sup>[17]</sup>

Fig.3 Schematic principles of several typical physical exploration methods

表2 地球物理管线探测方法技术指标  
Table 2 Technical parameters of geophysical pipeline detection methods

分类	基本原理	埋深范围/m	误差范围/m
磁法探测	金属管线被地磁场磁化会产生磁异常,反演得到管线轨迹	0.5~3.0	±(0.1~0.3)
电阻率法	向地下通直流电,管线改变电流密度,反演得到管线轨迹	1.0~5.0	±(0.3~0.5)
电法探测	电磁感应	交变电磁场激发金属管线产生二次电磁场,反演得到管线轨迹	0.5~4.0 ±(0.05~0.2)
	探地雷达	发射电磁波,遇到管线产生反射波,反演得到管线轨迹	0.3~2.0 ±(0.1~0.3)
声波和弹性波探测	管线与土体间存在分界面,产生反射波,反演得到管线轨迹	2.0~6.0	±(0.5~1.0)

在地球物理管线探测技术领域,国内外的研发均较为成熟。欧洲、北美及中国的多家相关公司和研究机构都开发出了多种类型的地下管线轨迹探测方法和相关产品,具有代表性的有英国的Radiodetection、美国的Subsite Electronics、荷兰的Fugro,以及国内的中科创达和宏信科技等公司开发的产品。这些公司基于地球物理探测技术所开发的地下管线轨迹测量产品,已从最初仅能满足定位和标记地下管线的需求,发展到能够实现选择性增强不同埋深管线的三维轨迹显示等功能,极大方便了现场技术人员的指令传输和数据后处理。

随着研究的深入,相关学者逐渐发现单一的测量手段容易受到环境及管道材质等因素干扰,导致测量结果存在较大误差且易出现多解性。此外,测

量过程还受到频率和天线大小等参数限制,难以达到高精度的测量目标。因此,相关学者提出了综合探测方法,以提升测量的精度和范围。王胜炎等<sup>[20]</sup>首次尝试将磁法探测与电法探测相结合,针对跨江桥梁拓宽工程埋深3.5~5.2 m的DN300钢质天然气管线定位需求,通过磁法快速圈定疑似区域(50 m×20 m网格),电法在目标区加密测量(5 m×2 m网格)的方法,测量误差小于0.15 m。为进一步解决大埋深管线轨迹测量的适用性问题,薛飞等<sup>[21]</sup>将声波探测与磁法探测相结合,针对城市地下空间开发6.0~8.5 m大埋深的500 kV超高压电力管线定位需求,实测误差控制在±0.12 m范围内。在此基础上,为探明不同材质管线轨迹测量的适用性,Deng等<sup>[22]</sup>将声波探测与电法探测结合,针对城市道路改造项目同步探测埋深1.5~4.0 m的金属(球墨铸铁)与非金属(HDPE)供水管线,测量误差分别为±0.15 m与±0.25 m,测量结果符合工程需要。虽然综合探测方法相较于单一地球物理探测方法在探测精度和适用范围上都有显著改善,但其实施成本较高,在人力、物力和财力方面的投入较大,且通常仅适用于施工前的管线轨迹测量。未来的研究有望开发出更加高效和经济的测量手段,以获取更加精确的管线轨迹数据。

### 3 施工中管线轨迹测量

在施工过程中,为确保施工的顺利进行及地下管线的安全,精确的管线轨迹测量十分必要。目前,应用最广泛的管线轨迹测量设备是手持导向仪。该设备利用角度传感器和深度传感器的配合,实现钻孔空间轨迹测量。手持导向仪通常由接收器、探棒及碳纤维推杆组成<sup>[23]</sup>,其工作原理见图4。在实际施工测量中,将探棒与碳纤维推杆连接后,手动将其推入钻孔中。随后手持接收器沿预设管

线轨迹匀速移动,从而精确测量钻孔的空间走向<sup>[24]</sup>。手持导向仪具有操作简单、携带方便等特点,应用广泛。然而该设备在测量金属管线及内部搭建有金属骨架的管线时测量精度会大大降低。原因在于金属材料会对探棒发出的电磁场产生屏蔽作用,影响测量结果。因此,手持导向仪主要用于各类非金属管线的测量场景<sup>[25]</sup>。

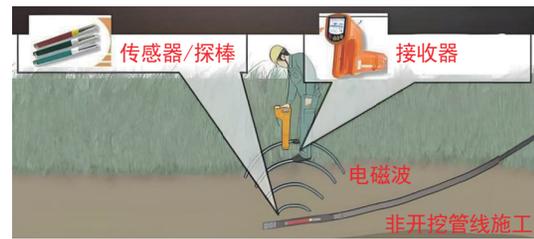


图4 手持导向仪工作原理

Fig.4 Principle of handheld guide device

近年来,国内外对手持导向技术的研发投入较大,该技术与非开挖水平定向钻进(HDD)具有较好的适配性。经过几十年的发展,国外几乎垄断了手持式导向仪的市场(如图5所示)。代表性的公司包括美国的DCI,英国的Radiodetection,以及中国的金地公司等,主要参数见表3。美国最早开始研究无损更换地下电缆的方法。Baik等<sup>[26]</sup>将电缆定位技术应用于水平定向钻进施工中,提出了将电缆定位与磁偶极子发射器结合进行管线轨迹测量的方法。然而,该技术存在测量前需提前布线、设备较大及测量精度不够等问题。针对这些问题,国外公司研发出了集成工具面角传感器的手持导向仪,极大地简化了测量流程。经测试,国内外手持导向产品的测量深度可达地下4.5 m,满足大部分管线施工的要求<sup>[27]</sup>。

国内对于该技术的研发起步较晚,高精度的手持导向仪仍然依赖进口。孙雷等<sup>[28-29]</sup>研制出工程导

表3 手持导向仪代表产品参数

Table 3 Parameters of representative products of handheld guide devices

型号	测量精度	适用口径/ mm	频率范围		探测深度/m		成本/ 万元
			主动/kHz	被动/Hz	金属	非金属	
美国DCI Eclipse	±(2%埋深+5 cm)	15~2000	10~100	50/60	8	3	12~15
英国RD8200	±(1.5%埋深+3 cm)	20~3000	9~199	50/60/100	10	4	18~22
美国Digitrak Mark	±(1%埋深+2 cm)	10~2500	5~300	DC~1000	15	5	25~30
中国金地GD-10Pro	±(3%埋深+8 cm)	25~1500	8~80	50/60	6	2.5	3~5



(a) Subsite™手持导向仪

(b) RD8200™手持导向仪

(c) DigTrak Mark™手持导向仪

图5 手持导向仪代表产品<sup>[28]</sup>

Fig.5 Representative products of handheld guide devices

向孔多功能无线探测仪,但由于该设备元器件的参数不高,使其在复杂地层下施工的稳定性大幅度下降。在此基础上,阮学谦等<sup>[30]</sup>提出采用地面铺设载有低频交流电的直导线产生交变磁场,再通过测量人工交变磁场来获得方位角等信息,有效降低了传感器在地下复杂环境下的漂移,但由于设备较多,对场地提出了较高的要求。有学者<sup>[31-33]</sup>进一步提出了地下钻具姿态测量及信号发射系统,并对测深技术进行了深入研究,研制出了导向定位装置样机,进行了多地现场试验,但该技术仍难以达到工程应用层面。

此外,早期 Nakauchi 等<sup>[34-35]</sup>提出了一种智能水平导向钻进系统(IHDD),该系统在上位机程序的控制下,在获取轨迹数据后引导钻头进行导向钻进。IHDD系统的基础是随钻探地雷达,通过在钻头处安装小型化探地雷达实时采集钻头行进过程中的轨迹信息,从而实现钻孔轨迹可视化。目前,常用的IHDD系统的信号频率最高可达1.5 GHz,测量深度达20 m,水平误差与垂直误差分别为 $\pm(1\% \text{埋深} + 0.1 \text{ m})$ 与 $\pm(2\% \text{埋深} + 0.2 \text{ m})$ ,并应用于多种工程场景,如表4所示。

表4 IHDD系统工程应用案例

Table 4 Case studies of the IHDD system in engineering applications

地层类型	工程案例	误差范围/m
高含水黏土层	上海某过江管线工程(埋深12 m,黏土含水量 $>40\%$ )	$\pm 0.3$
卵石-砂层混合	成都地铁盾构区间管线(卵石粒径20~50 cm,砂层占比60%)	$\pm 0.3$
风化岩层	深圳某山体隧道工程(花岗岩风化层,裂隙发育)	$\pm 0.5$

然而,最初由于电磁波的衰减特性,模拟环境下该系统的测量距离仅为50 cm<sup>[36]</sup>。为了解决电磁波衰减对测量结果的干扰,徐慧峰<sup>[37]</sup>提出了一种基于弹性波的地下管线随钻测量系统。该系统由弹性波探测单元及惯性测量单元组成,试验结果表明,该系统显著抑制了误差,测量距离也得到了明显提高。然而,在实际工况下,该系统的数据传输存在不稳定问题。为了进一步提升测量系统的性能,Wang等<sup>[38]</sup>提出了简化惯性传感器系统(RISS)用于水平钻进连续测量。RISS系统分为旋转和导向两种模式,在导向模式下对测量结果的影响最小,试验验证过程中,系统的误差没有显著发散。针对IHDD系统在工程应用中的限制,中国地质大学(北京)等单位开展了地下管线随钻轨迹测量系统的研究,该系统采用有线随钻测量短节,实现了管线的实时三维轨迹测量,并赋予轨迹GPS坐标,对轨迹进行实时修正。此外,该系统还具备云端储存、智能推送及事故报警等功能,对于提高管线建设的精细化管理水平及事故应急处理能力具有重要意义<sup>[39]</sup>。

#### 4 竣工后管线轨迹测量

竣工后管线轨迹测量是指在管线施工完成后,通过相应的技术手段获取地下管线轨迹信息的过程<sup>[40]</sup>。目前常用的方法是利用轨迹测量仪测量竣工管道轨迹,该仪器结合先进的传感技术,在测量过程中实时采集与轨迹相关的孔深、俯仰角及方位角等信息,经建模计算得到钻孔三维轨迹<sup>[41-43]</sup>(如图6所示)。该方法不受管线材质的限制,且可用于测量小口径地下管线,是目前满足施工需要的最常用的竣工管线轨迹测量手段<sup>[44]</sup>。

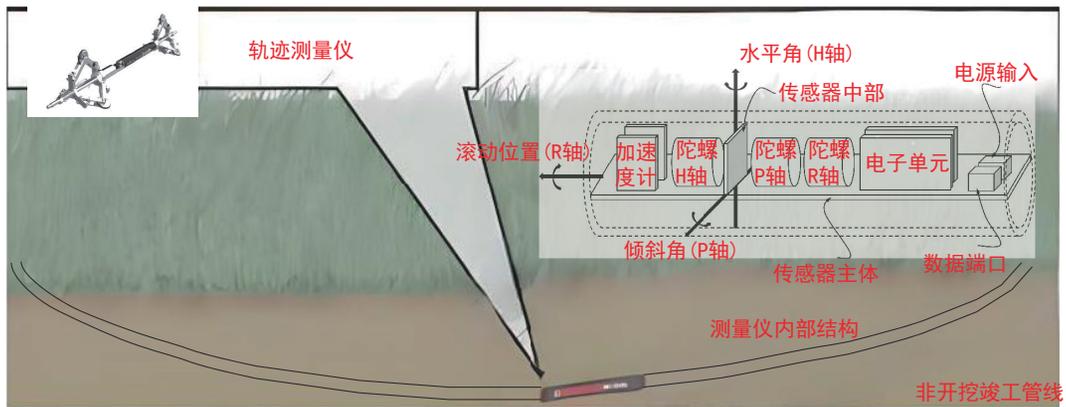


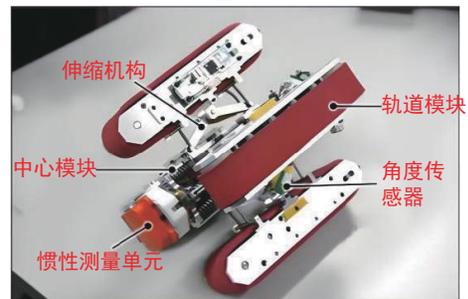
图6 轨迹测量仪工作原理

Fig.6 Trajectory measuring instrument working principle

随着信息传感技术的发展,现代轨迹测量仪器在测量场景的适应性、测量精度和数据直观性等方面,已远超早期测量设备<sup>[45]</sup>。国内外企业、高校及科研机构在这一领域开展了广泛的研发工作,取得了显著进展。典型代表包括比利时的REDCT、澳大利亚的Advanced Navigation,以及国内的南方测绘和上海佳友电力等。国外的先进产品在多尺寸管径的适用性上表现优异,配合辅助测量设备,可与各种地理数据无缝衔接,即使在复杂的地下空间场景中,也能保持较高的测量精度<sup>[46]</sup>。相比之下,国内研发更侧重于技术融合,例如,一些企业开发了融合RTK技术的管线轨迹测量仪器,实现了地上、地下数据的远传,为多方法融合的轨迹测量技术提供了重要参考。

在学术界,高校围绕竣工管线轨迹测量研制了一系列试验样机。例如, Park等<sup>[47]</sup>展示了履带式管线轨迹测量样机(见图7a), Wang等<sup>[48]</sup>报道了微机电管线轨迹测量试验小车(见图7b),而 Lin等<sup>[49]</sup>则介绍了里程-支撑分离式管线轨迹测量样机(见图7c)。近年来,国内外的相关研究主要聚焦于传感器选择及算法的适应性、效率和精度的提升上,取得了诸多阶段性进展。

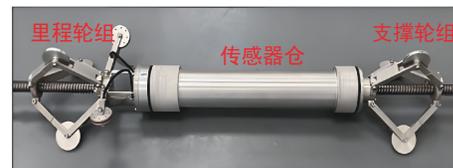
在传感器选择方面,为最大限度提高系统的适用性,相关研究主要集中在简化惯性传感器系统(RISS)的算法优化上。Wang等<sup>[38]</sup>最早提出将RISS应用于管线轨迹测量,并分析了各种简化传感器组合系统的优劣。随后,师恬恬<sup>[50]</sup>针对RISS精度衰减的问题,提出了完全集成经验模态分解(EMD)算法的方案。在长达75 m的管道试验中,



(a)履带式测量样机



(b)测量试验小车



(c)里程-支撑分离式测量样机

图7 国内外高校部分试验样机

Fig.7 Some test prototypes of domestic and foreign universities

改进后的RISS系统与真实轨迹数据的最大偏差小于管线全长的0.2%。此外,李昊等<sup>[51]</sup>进一步改进了这一研究,提出了部分自适应噪声的集合经验模态分解算法,解决了高阶分量意义模糊和计算量大的问题,进一步提高了传感器的测量精度和容错能

力。经过上述EMD算法的优化,RISS误差曲线如图8(a)所示,-1与1两条直线之间是优于原算法的置信区间。经统计,在俯仰角、钻滚角、钻向角三个角度的计算中,位于置信区间内的点占比分别达到93.48%、95.85%、95.54%。同时,在平均运算时间上,改进算法用时是原算法的68.58%,优化轨迹与真实轨迹铅垂面、水平面投影分别见图8(b)、(c),优化算法轨迹偏离真实轨迹距离的平均值为0.095 m,最大值为0.140 m,满足实际测绘需要。

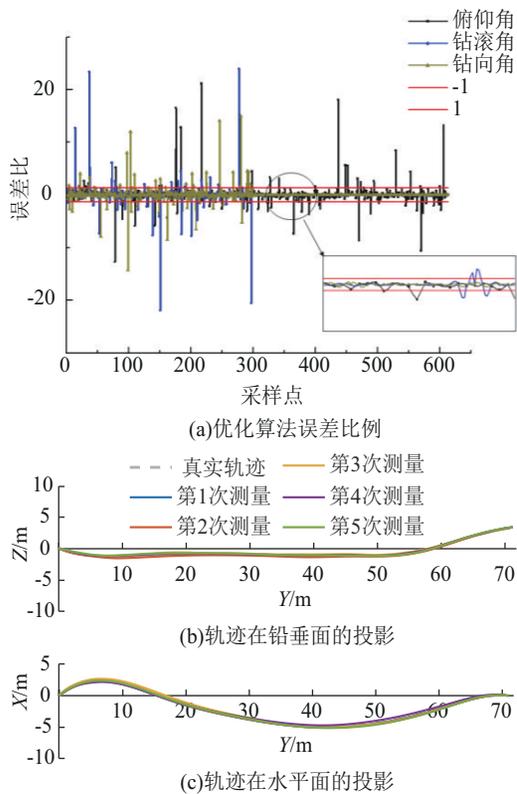


图8 经EDM优化后误差及轨迹投影  
Fig.8 The error and trajectory projection after EDM optimization

得益于电子电路技术的成熟和加工工艺的进步,微机电惯性测量单元(MEMS IMU)发展迅速。MEMS具有成本低、尺寸小的优点,能够满足不同管径的测量需求。可见目前国内外将惯性导航系统应用于管线轨迹测量领域的研究思路清晰,且取得了显著的进展。这些研究拓宽了惯性导航系统在管线测量领域的应用边界,并不同程度地解决了相关问题。然而,目前的算法仍存在适用性不足的问题,主要体现在对姿态和位置信息的预处理和实

时处理上。对于管线轨迹测量所需的后处理算法研究较少,且在实际工程项目中,绝大多数情况没有预先设置信标,仍需通过各环节抑制误差来获取精确的管线轨迹数据。因此,抑制误差依旧是当前研究的重点和趋势。

## 5 发展展望

目前国内外对地下管线三维轨迹测量技术的研究虽然取得了诸多进展,但仍存在一定的不足之处,如环境适应性差、数据处理与融合瓶颈等。未来发展的重心应放在如何更好地适应时代需求,即将测量技术与数字化、智能化、大数据和云计算有效结合,通过深入的理论研究,找到切实可行的方法以提高测量精度和效率,达到低成本、高精度及实时数据处理等技术目标。基于此,本文提出3点关于地下管线轨迹测量技术未来发展趋势的展望。

(1)地下管线随钻数字孪生。目前管线轨迹测量在施工前和竣工后的独立性较强,导致测量与实际施工过程存在脱节,即使测量工艺完善,仍难以完全避免施工中遇到的风险。因此,未来的技术趋势是利用随钻仪器实时测量钻孔轨迹,将北斗坐标数据与随钻轨迹信息融合,赋予轨迹实时三维地理坐标,并对钻孔轨迹进行实时修正,通过三维地图等形式可视化管线轨迹,实现地下管线的三维数字孪生。这一技术在电子信息及人工智能蓬勃发展的背景下,将成为主要趋势。

(2)智慧云端物联平台。近年来,我国大力发展数智融合,地下管线轨迹测量技术也将支持无线通信和远程控制功能。通过与移动设备、云端平台的连接,测量仪器可以实现5G数据传输、远程监控和远程诊断,便于操作人员随时掌握测量数据和设备状态。未来可以将机器学习和深度学习应用于管线轨迹测量技术中,从大量数据中自动提取特征并建立复杂模型,实现对轨迹测量的智能诊断与决策支持。包括轨迹状态识别、轨迹趋势预测及施工参数智能指导等。智慧云端物联平台的搭建,对市政部门的精细管理和科技创新发展具有重要意义。

(3)管线三维轨迹虚拟现实可视化。在测得管线轨迹数据后,需要对数据进行处理,形成可视化的二维或三维轨迹图像。在当代地下管线管理中,将轨迹测量数据转化为直观的三维可视化图像,已成为衡量技术实用性和推广潜力的重要标准。当

前研究趋势表明,传统的二维平面图和剖面图由于空间表现力的局限性,正逐渐被三维可视化技术取代。现行技术有望整合计算机图形学、多传感器融合、增强现实(AR)、虚拟现实(VR)以及无损检测等前沿科技,为地下管线的设计、敷设和维护提供强有力的技术支持和直观的信息展示。

### 参考文献(References):

- [1] 王诗东. 地下管线探测技术的应用研究[C]//2022年中国地球科学联合学术年会论文集. 2022-12-06:26-27.  
WANG Shidong. Applied research on underground pipeline detection technology [C]//Proceedings of the 2022 China Earth Science Joint Academic Conference. 2022-12-06:26-27.
- [2] Zhang S, Dubljevic S. Trajectory determination for pipelines using an inspection robot and pipeline features[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2021, 28(3):439-453.
- [3] Zhou B, Li B, Lan W F, et al. SDH-FCOS: an efficient neural network for defect detection in urban underground pipelines[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2024, 78(1):633-652.
- [4] 刘海, 邓新, 戴定武, 等. 地下管线渗漏探测与定位方法研究[J]. *现代雷达*, 2023, 45(12):7-14.  
LIU Hai, DENG Xin, DAI Dingwu, et al. A study on the method for detecting and locating leakage in underground pipeline[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(12):7-14.
- [5] Wai-Lok Lai W, Dérobert X, Annan P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis[J]. *NDT & E International*, 2018, 96:58-78.
- [6] 孙平贺, 刘伟胜, 杨涵涵, 等. 中国非开挖水平定向钻进装备与技术研究应用进展[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(1):122-130.  
SUN Pinghe, LIU Weisheng, YANG Hanhan, et al. Progress in research and applications of trenchless horizontal directional drilling equipment and technology in China[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(1):122-130.
- [7] Chen Q J, Zhang Q, Niu X J, et al. Positioning accuracy of a pipeline surveying system based on MEMS IMU and odometer: Case study[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:104453-104461.
- [8] Ali H, Choi J H. A review of underground pipeline leakage and sinkhole monitoring methods based on wireless sensor networking[J]. *Sustainability*, 2019, 11(15):4007.
- [9] Medvedeva O N, Penenko V D. Routes of laying gas supply system pipeline[J]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University-Geo Assets Engineering*, 2021, 332(1):153-163.
- [10] Xiao X T, Chen S S, Xu Y, et al. Ground-Penetrating radar (GPR)-Based mapping of underground pipeline network distribution[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(12):19562-19576.
- [11] 上海市测绘院. 地下管线测绘标准[M]. 上海: 同济大学出版社, 2020.  
Shanghai Municipal Surveying and Mapping Institute. Standard for Surveying and Mapping Underground Pipelines and Cables Standard for Surveying and Mapping Underground Pipelines and Cables[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2020.
- [12] Jeng Y, Chen C S. Subsurface GPR imaging of a potential collapse area in urban environments [J]. *Engineering Geology*, 2012, 147-148:57-67.
- [13] 邓诗凡, 张智华, 李想, 等. 城市老旧小区内外业一体化给水管线探测[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(5):1996-2001.  
DENG Shifan, ZHANG Zhihua, LI Xiang, et al. Detection water supply pipeline in old urban communities by integrated interior work and field work[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(5):1996-2001.
- [14] Wang Z, Feng G, Qiao Y J, et al. Geophysical exploration technology and its application research [C]// In International Conference on Computer Vision and Pattern Analysis. Guangzhou, China, 2022:12158.
- [15] Lee S, Kang J, Kim J. Machine Learning-Based predictive model of ground subsidence risk using characteristics of underground pipelines in urban areas[J]. *IEEE Access*, 2023, 11:69326-69336.
- [16] 徐匆匆, 马向英, 何江龙, 等. 城市地下管线安全发展的现状、问题及解决办法[J]. *城市发展研究*, 2013, 20(3):108-112, 118.  
XU Congcong, MA Xiangying, HE Jianglong, et al. Status, problems and solutions of urban underground pipeline safety and development[J]. *Urban Studies*, 2013, 20(3):108-112, 118.
- [17] Bachiri T, Alsharahi G, Khamlichi A, et al. Ground Penetrating Radar Data Acquisition to Detect Imbalances and Underground Pipes [M]//Bennani S, Lakhrissi Y, Khaissidi G, et al. WITS 2020. Lecture Notes in Electrical Engineering, Singapore: Springer, 2020.
- [18] Tang L, Chen C, Li H T, et al. Developing a BIM GIS - integrated method for urban underground piping management in China: a case study [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2022, 148(9):05022004.
- [19] 林朋皓. 基于惯性导航系统的非开挖铺管轨迹测量技术研究与应用[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2023.  
LIN Penghao. Research and application of trenchless pipeline trajectory mapping technology based on inertial navigation system [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023.
- [20] 王胜炎, 茅斌辉, 顾紫娟, 等. 深埋天然气管道精确探测技术探讨[J]. *煤气与热力*, 2015, 35(4):43-47.  
WANG Shengyan, MAO Binhui, GU Zijuan, et al. Discussion on accurate detection technology of deep buried natural gas pipeline[J]. *Gas & Heat*, 2015, 35(4):43-47.
- [21] 薛飞, 俞佳斌. 地下管线精确探测技术在市政工程中的应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2018(10):211-213.  
XUE Fei, YU Jiabin. Application of underground pipeline accurate detection technology in municipal engineering [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2018(10):211-213.
- [22] Deng S F, Ma S Y, Zhang X W, et al. Integrated detection of a complex underground water supply pipeline system in an old urban community in China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(4):1670.
- [23] Barnes D. How modern data management software and state of the art inspection gauges improve the efficiency of the pipeline coating inspection process [J]. *InE3S Web of Conferences* 2019, 121:05001.
- [24] 谢让碌, 陈忠卫, 温激鸿. 非开挖定向钻地下管线自主测量与标绘系统[J]. *市政设施管理*, 2010(2):54-57.  
XIE Ranglu, CHEN Zhongwei, WEN Jihong. Mapping system of no-dig controlled angle drilling of underground pump[J]. *Municipal Installation Management*, 2010(2):54-57.
- [25] 裴志. 地下管线探查与测绘技术[J]. *测绘通报*, 2016(S1):89-90.  
PEI Zhi. Underground pipeline exploration and mapping technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(S1):89-90.
- [26] Baik H S, Abraham D M, Gokhale S. A decision support system for horizontal directional drilling[J]. *Tunnelling and Under-*

- ground Space Technology, 2003, 18(1):99-109.
- [27] 沈林勇. 非开挖地下信息管线的三维曲线探测新技术研究[D]. 上海:上海大学, 2011.  
SHEN Linyong. On New Detecting Method of 3D Curve of Trenchless Information Pipelines[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011.
- [28] 孙雷. 非开挖水平定向钻进导向定位技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.  
SUN Lei. Research of the guiding and positioning technology in the trenchless horizontal directional drilling[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [29] 孙雷, 韩峰. 便携式ULF/VLF机械通信天线技术的研究进展[J]. 电讯技术, 2021, 61(3):384-390.  
SUN Lei, HAN Feng. Research progress of portable mechanically based antenna project for ULF/VLF communication[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(3):384-390.
- [30] 阮学谦, 常丰奇, 吴毅, 等. GT-1型工程导向孔多功能无线探测仪和GD-200型钻机在非开挖铺线技术中的应用[J]. 探矿工程, 1996(1):33-34, 11.  
RUAN Xueqian, CHANG Fengqi, WU Yi, et al. Application of GT-1 Wireless Detector and GD-200 Drill for Drilling Trenchless Hole for Pipeline Installation[J]. Prospecting Engineering, 1996(1):33-34, 11.
- [31] 徐涛. 水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.  
XU Tao. Research on MWD surveying method and locating-technique of horizontal directional drilling[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [32] Tao X, Wusheng L, Haibao L, et al. Design of underground sonde of a directional drilling locator system[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2005, 119(2):427-432.
- [33] 董文娟. 非开挖水平定向钻进轨迹测量技术的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.  
DONG Wenjuan. Research on the measurement technology of non-excavation horizontal directional drilling trajectory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [34] Nakauchi T, Arai I, Hayakawa H. Small prospecting radar system[C]//8th International Conference on Ground Penetrating Radar. Gold Coast, Australia, 2000: 548-551.
- [35] Nakauchi T, Nakajima H, Lizuka K. Development of the intelligent horizontal directional drilling systems[C]//22nd International NO-DIG Conference and Exhibition. 2004.
- [36] 李根生, 宋先知, 田守贻. 智能钻井技术研究现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1):1-8.  
LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouceng. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1):1-8.
- [37] 徐慧峰. 基于弹性波的地下管线水平定向钻进随钻探测理论与技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.  
XU Hui Feng. Research on detecting buried pipelines while drilling based on elastic waves in horizontal direction drilling[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [38] Wang L, Noureldin A, Iqbal U, et al. A reduced inertial sensor system based on MEMS for wellbore continuous surveying while horizontal drilling[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(14):5662-5673.
- [39] 王光耀, 朱律, 王伟, 等. 面向智慧新城的市政管线全周期数字孪生平台建设路径[J]. 测绘通报, 2024(S01):216-220.  
WANG Guangyao, ZHU Lv, WANG Wei, et al. Construction path of a full cycle digital twin platform for municipal pipelines in a smart new city[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(S01):216-220.
- [40] 王文东. 基于IMU惯性导航的竣工管线轨迹探测系统的研发[D]. 上海:上海工程技术大学, 2019.  
WANG Wendong. Research and development of completed pipeline track detection system based on IMU inertial navigation [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering and Technology, 2019.
- [41] 张新宇, 陈强, 杨文龙, 等. 基于旋转式IMU地下管线轨迹探测系统[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(3):95-98.  
ZHANG Xinyu, CHEN Qiang, YANG Wenlong, et al. Underground pipeline trajectory detection system based on rotary IMU[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(3):95-98.
- [42] 程铭宇, 陈友良. 三维惯性陀螺定位技术在非开挖地下管线高精度探测中的应用研究[J]. 城市勘测, 2021(1):182-184, 189.  
CHENG Mingyu, CHEN Youliang. Application research of 3D inertial gyroscope positioning technology in the high-precision detection of underground pipelines of trenchless constructions[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2021(1):182-184, 189.
- [43] 路桂英, 乌效鸣, 沈璟璟, 等. 可实时显示的非开挖竣工管线轨迹探测仪[J]. 仪表技术与传感器, 2010(12):35-37.  
LU Guiying, WU Xiaoming, SHEN Jingjing, et al. Rear-time Displaying Trenchless Completion Pipeline Trajectory Detecting Instrument[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(12):35-37.
- [44] 张永权. 基于惯性测量的滑坡位移监测研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2016.  
ZHANG Yongquan. Systematic Research of Landslide Displacement Monitoring Based on Inertial Measurement[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- [45] Xu T S, Wang L, Zhang P, et al. Key techniques for rapid jacking and laying of pipelines: A case study on "Jingshihan" gas pipelines in China[J]. Energies, 2022, 15(8):2918.
- [46] Shao Y C, Jin Y B, Huang Z L, et al. A learning-based control pipeline for generic motor skills for quadruped robots[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2024, 25(6):443-454.
- [47] Park J, Yang H. Pipeline mapping with crawler-type in-pipe robot feature[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(10):5015-5020.
- [48] Wang W M, Yang D S, Zhang J F, et al. A dead reckoning localization method for in-pipe detector of water supply pipeline: An application to leak localization[J]. Measurement, 2021, 171:108835.
- [49] Lin P H, Sun J J, Xu Y H, et al. Underground pipeline mapping system based on inertial measurement unit: Research and application[J]. Measurement, 2023, 222:113634.
- [50] 师恬恬. 水平定向钻具姿态测量方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2020.  
SHI Tiantian. Research on attitude measurement method of horizontal directional drilling tools[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [51] 李昊, 陈强, 徐一雄. 基于简化惯导的地下管线轨迹测量方法[J]. 上海工程技术大学学报, 2022, 36(4):364-368.  
LI Hao, CHEN Qiang, XU Yixiong. Underground pipeline trajectory measurement method based on reduced inertial navigation [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2022, 36(4):364-368.