

# 城市地下管线三维建模与可视化测绘应用研究

程文

中冶武勘工程技术有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i1.2413

**[摘要]** 城市地下管线是城市运行的重要基础设施,其空间位置、埋深关系和拓扑连通性直接影响道路建设、地下空间开发、灾害防控与市政运维效率。针对传统地下管线测绘成果分散、二维表达能力不足、模型更新滞后以及现场决策支撑有限等问题,本文以“三维建模—可视化表达—测绘应用”一体化流程为主线,系统研究城市地下管线三维建模与可视化测绘的关键技术。在数据获取层面,构建融合控制测量、管线探测、移动测量、激光扫描与既有竣工资料的多源数据体系;在建模层面,提出面向管线中心线、断面参数、附属设施和语义属性的分层重建方法,实现地下管线几何模型、拓扑网络和属性数据库的统一组织;在表达层面,结合GIS、BIM与三维引擎构建多尺度可视化场景,实现剖切分析、净距判别、碰撞检查、开挖辅助判读和动态更新管理。研究表明,该技术路线能够有效提高地下管线测绘成果的空间表达能力、更新效率与应用深度,对城市更新、精细化管理和数字孪生底座建设具有较强的工程应用价值。

**[关键词]** 城市地下管线; 三维建模; 可视化测绘; 多源数据融合; 地下空间管理

中图分类号: P2 文献标识码: A

## Research on 3D Modeling and Visualized Surveying Applications of Urban Underground Pipelines

Wen Cheng

China Metallurgical Wuhan Engineering Investigation Co., Ltd.

**[Abstract]** Urban underground pipelines are critical infrastructures that support water supply, drainage, gas, power, communications, and heating systems. Conventional surveying products are often fragmented, two-dimensional, and weak in supporting excavation planning, conflict detection, and dynamic management. To address these limitations, this paper develops an integrated workflow for three-dimensional modeling and visualized surveying of urban underground pipelines. At the data-acquisition stage, a multi-source scheme is organized by combining control surveying, utility detection, mobile mapping, laser scanning, and archived as-built drawings. At the modeling stage, a layered reconstruction method is proposed for centerlines, cross-sectional parameters, appurtenances, semantic attributes, and topological relations, enabling unified organization of geometric models, network connectivity, and attribute databases. At the visualization stage, GIS, BIM, and a three-dimensional rendering engine are integrated to support multi-scale scene management, sectioning analysis, clearance inspection, collision checking, excavation assistance, and dynamic updating. The study indicates that the proposed route can significantly improve spatial expression, updating efficiency, and application depth of utility surveying results, and can provide a practical technical basis for urban renewal, refined management, and digital-twin city construction.

**[Key words]** Urban underground pipelines; 3D modeling; Visualized surveying; Multi-source data fusion; Underground space management

### 引言

地下管线系统具有隐蔽性强、更新频繁、权属复杂和运行风险高等特点,是城市生命线工程的重要组成部分。长期以

来,地下管线测绘主要依赖控制测量、探测记录和二维竣工图存档,虽然能够满足基础存档需求,但在多专业协同、地下空间开发、道路开挖审批、应急抢修和运行评估等应用场景中,

二维成果难以直观表达管线间的高程关系、净距状况和交叉穿越关系。随着城市更新、综合管廊建设和数字孪生城市建设加速推进,测绘成果不仅要“测得准”,还要“表达清、可分析、能更新、易共享”,这对地下管线三维建模和可视化表达提出了更高要求。

目前,城市地下管线三维建模已经从单纯的几何重建逐步转向“测绘采集、语义组织、拓扑管理和场景应用”一体化建设<sup>[1]</sup>。国际上关于地下设施管理的研究强调 BIM、GIS与增强现实的协同应用<sup>[2]</sup>,以提升施工阶段与运营阶段的信息连续性;国内相关研究则更加关注普查数据整合<sup>[3]</sup>、三维GIS场景构建以及面向市政管理的可视化服务能力<sup>[4]</sup>。基于此,本文围绕城市地下管线三维建模与可视化测绘的技术路径进行系统梳理,提出一套适用于测绘生产和工程应用的组织方法<sup>[5]</sup>。此外,地下管线三维化并不是简单的图形立体化处理<sup>[6]</sup>,而是涉及数据采集标准统一<sup>[7]</sup>、空间定位精度控制<sup>[8]</sup>、语义属性组织<sup>[9]</sup>、网络拓扑表达以及可视化分析服务等多个环节的系统工程<sup>[10]</sup>。若缺乏完整的方法链条,往往会出现前端测得准、后端难表达,或模型建得出、业务用不深的问题。基于此,本文从测绘生产实际出发,重点围绕多源数据获取、三维建模逻辑、可视化表达方式及业务应用路径展开研究,力求形成兼顾工程可操作性与平台可扩展性的技术体系,为城市地下空间精细化管理和地下管线数字底座建设提供参考。

## 1 城市地下管线三维建模与可视化测绘的需求特征

### 1.1 多源数据并存与精度控制要求

地下管线三维模型的准确性首先取决于数据源质量。实际测绘中,地下管线数据往往来自控制点成果、RTK采集、全站仪测量、探地雷达探测、地下管线仪测线成果、井室调查记录、移动激光扫描点云以及历史竣工图和设计图。这些数据在采集尺度、时效性、属性完整性和误差来源上存在显著差异:控制测量和实测点位的绝对精度较高,但覆盖范围有限;

因此,地下管线三维建模不能简单理解为将若干折线“拉成圆管”,而应建立严格的数据分级机制和精度控制逻辑。一方面,需要在建模前统一坐标基准、高程基准和编码体系,明确现状测量数据、探测推算数据和历史推演数据的权重;另一方面,需要在模型成果中保留数据来源、采集时间、可信等级和更新状态等元信息,以支持后续质量追踪和动态维护。

### 1.2 二维成果向三维成果转化的现实瓶颈

当前很多城市虽然完成了地下管线普查或专项探测,但成果仍以二维图形、图层管理和表格台账为主。二维成果在静态存档方面具有成本低、表达直接的优点,但在复杂交叉节点、立体分层埋设和多专业协同审批场景中存在明显不足。

此外,如果缺少统一的数据模型和可视化平台,地下管线成果很难从“档案资料”转化为“分析工具”。因此,从测绘成果组织方式上推动二维成果向三维、静态成果向动态成果、单专业成果向跨专业协同成果转型,是城市地下管线应用深化的基础。从实际应用看,二维成果的局限主要体现在三个方面。其一,

二维图纸对交叉节点、上下翻越和异形附属设施的表达能力有限,管理人员往往需要结合多张平面图、纵断面图和台账资料进行人工判读,效率较低且容易产生误判。其二,二维成果缺少连续空间语义,难以支撑净距自动核算、碰撞预警、断面辅助分析等模型化处理过程,导致成果虽然“能看”,却难以“能算、能判、能比较”。其三,二维成果更新方式通常依赖人工修改图层和属性表,面对道路改造、局部迁改或应急抢修等高频变化情形时,常出现图形更新与属性更新不同步的问题。由此可见,地下管线成果从二维向三维转化,并不只是表现形式变化,更是成果组织逻辑、分析能力和管理方式的整体升级。

## 2 城市地下管线三维建模的关键技术路线

### 2.1 测绘采集与探测数据的一体化组织

面向三维建模的地下管线测绘应采用“控制框架先行、现状测量支撑、隐蔽探测补充、历史资料校核”的一体化组织思路。在控制层面,应利用GNSS、导线测量和水准测量建立统一平面与高程基准;在现状调查层面,对井盖、井室、阀门、检查井、箱体、杆件等可见设施进行坐标采集和属性调查;对不可见管线部分,则结合探地雷达、电磁法、管线探测仪和局部开挖验证手段获得管线走向、埋深和管径信息。

为了保证多源数据能够进入同一建模流程,需在采集阶段同步执行统一编码与字段设计。建议以管线类别、权属单位、管径断面、材质、埋设方式、埋深、年代、运行状态、数据来源和可信等级作为核心字段,形成可直接入库的采集模板。

### 2.2 坐标统一、拓扑修复与几何重建

在几何重建阶段,宜采用“中心线+断面参数+节点构件”三层表达方式。中心线决定管线空间走向,断面参数决定外径、内径和壁厚,节点构件则用于表达三通、弯头、阀门、井室、检查井、支墩和箱涵等特殊结构。这种分层建模方法既便于批量生成三维实体,又利于后续的更新维护和模型轻量化处理。在具体实施过程中,坐标统一与拓扑修复是几何重建之前不可忽略的关键步骤。由于地下管线数据通常来源复杂,不同批次数据之间常存在坐标偏移、节点错接、线段悬挂、重复建模和属性缺失等问题,因此应先通过统一坐标转换、节点吸附、线段拼接、方向校正和异常点筛查等方法,对原始成果进行预处理。对于井室、阀门、三通等关键节点,应优先以实测控制点和附属设施调查成果作为约束条件,对管线中心线进行局部校正;对于无法直接验证的隐蔽段,则可依据埋深逻辑、相邻节点高程及专业敷设规律进行推算修正。在几何重建环节,可按照“点位校核—中心线生成—断面赋参—节点构件匹配—实体生成”的流程逐级完成三维模型构造。对于密集区、弯折段和交叉段,还应通过局部加密采样或分段建模方式提高模型表达精度,以避免出现模型穿插失真、断面突变或结构关系错误等问题。

### 2.3 语义建模与数据库联动机制

高质量地下管线模型必须同时具备几何信息、语义信息和关系信息。几何信息解决“在哪里”和“长什么样”的问题,

语义信息回答“是什么、归谁管、怎么运行”，关系信息则描述“与谁相连、与谁冲突、是否跨层穿越”。

在数据库组织上,可采用GIS空间数据库作为主体管理平台,并通过服务接口与BIM模型、竣工图档案和城市信息模型平台进行联动。这样既能发挥GIS在海量空间数据组织和空间分析方面的优势,又能保留BIM在构件精细表达和工程属性管理方面的优势。通过建立统一对象编码和更新规则,地下管线三维成果可以从一次性生产成果转变为持续演化的数据资产。

### 3 可视化表达及测绘应用实现路径

#### 3.1 多尺度场景构建与三维表达

可视化不是建模完成后的附属环节,而是测绘成果价值实现的重要方式。城市地下管线的可视化表达应同时满足管理部门“全局浏览”和作业单位“局部精查”两类需求。在全局层面,可基于城市地形、道路红线、建筑白模和地下管线模型构建区域级三维场景,表达管网分布格局、密集区位置和专业管线叠置关系;在局部层面,则应支持井室级、道路断面级和施工段级的高精度显示,使用户能够查看单管段埋深、坡度、断面尺寸、净距与附属构件。

为了兼顾显示效率与信息完整性,可采用分层加载、层级细节和按需剖切等策略。远景浏览时保留中心线与关键节点,近景分析时加载实体断面和附属构件;在地下空间复杂区域,通过透明化、剖切面、立面展开和道路断面联动等方式,增强管线空间关系的可判读性。这种多尺度可视化组织方式能够有效降低模型渲染压力,并提升使用者对成果的理解效率。

#### 3.2 面向测绘业务的分析功能嵌入

与一般三维展示不同,地下管线可视化测绘平台应具备业务分析功能。其核心不只是“看得见”,更要“查得到、比得出、判得准”。因此,在平台设计中应嵌入净距分析、交叉关系识别、埋深统计、断面查询、碰撞检查、剖面生成和开挖影响范围分析等模块。通过这些分析功能,可以把原本分散在图纸、台账和经验判断中的信息整合为实时、图形化的辅助决策工具。从测绘应用角度看,这种基于模型的分析机制显著提升了成果的服务能力,使地下管线测绘由“成果交付型”向“业务支撑型”转变。进一步看,不同业务主体对分析功能的关注重点并不相同。对于规划审批部门,更关注道路红线范围内管线占压、交叉冲突和空间预留情况,以便在方案阶段提前识别风险;对于施工单位,则更需要掌握拟开挖区域内管线埋深、净距及周边附属设施分布,用于制定开挖方式、支护措施和迁改顺序;对于运维管理部门,则倾向于通过三维场景快速定位故障点、查询管段属性、追踪历史变更并辅助应急处置。由此可见,三维可视化平台只有将空间展示、属性查询与专题分析有机结合,才能真正嵌入地下管线测绘、建设和管理全过程。也正因如此,面向业务需求进行功能设计,应成为地下管线可视化测绘平台建设中的核心原则,而不应停留在单纯的模型展示层面。

### 4 应用研究与关键问题讨论

从已有实践看,将地下管线测绘成果转化为三维模型后,最

直接的效果体现在空间判读效率和跨专业协同能力显著提高。传统二维图纸往往需要多专业反复叠图、人工核算高程关系,而三维成果可以直接表达交叉穿越、埋深变化和局部拥挤程度,尤其适用于老城区改造、道路综合整治、泵站周边迁改和密集管线节点治理等复杂场景。从典型成效看,多源数据融合后模型的平面定位误差明显降低,能够更好地支撑复杂节点的空间判读与成果核查,如图1所示。此外,三维成果与数据库联动后,有助于提高数据复用效率。一次测绘形成的数据不仅可用于普查成果提交,还可用于道路开挖审查、迁改方案比选、施工放样辅助和运维档案更新。这意味着测绘成果的价值不再局限于单次项目交付,而是能够在后续多类业务中持续发挥作用。对城市治理而言,这种复用能力本身就是地下管线三维化建设的重要收益。从平台运行效果看,多尺度加载策略在局部场景下能够进一步缩短加载时间并保持较高帧率,如图2所示。结合城市道路更新和老旧片区改造场景,地下管线三维成果的应用价值主要体现在前期核查、过程控制和后期维护三个阶段。在前期核查阶段,可利用三维模型对既有资料与现状探测成果进行叠置比对,快速识别缺测区域、冲突疑点和重点核查位置;在施工组织阶段,可基于道路断面和开挖范围生成局部剖切场景,辅助判断机械作业风险及临时支护需求;在后期维护阶段,则可将迁改成果和竣工资料及时回填至模型数据库,实现“测后即更、改后即入库”的闭环管理。相比传统做法,这种以模型为中心的成果组织模式不仅提升了现场判读效率,也增强了地下管线信息在不同阶段、不同部门之间的传递连续性。对于城市基础设施精细化治理而言,其意义不仅在于提升单个项目的实施质量,更在于逐步积累可持续演化的地下空间数据资产。

尽管地下管线三维建模与可视化测绘的技术路径日益清晰,但在实际推广中仍面临若干瓶颈。第一,数据标准与编码规则尚未完全统一,不同部门、不同权属单位在图层命名、属性字段和更新方式等方面差异较大,导致多源成果融合成本较高。第二,地下管线探测结果本身存在不确定性,特别是在复杂地层、老旧小区和资料缺失区域,模型需要同时面对“实测精度有限”和“历史信息不全”的双重约束。第三,三维成果建设后若缺乏制度化更新机制,模型很容易在较短时间内失去现实性。

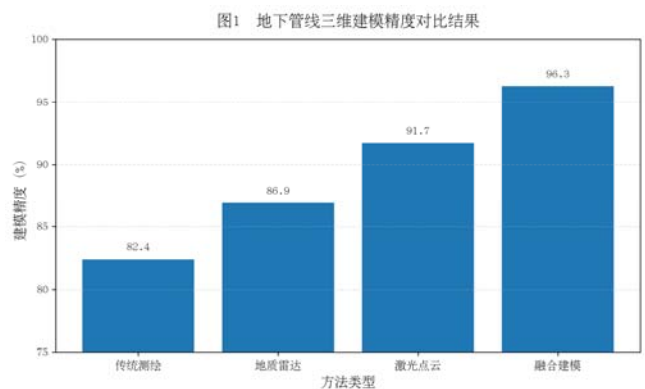


图1 地下管线三维建模精度对比结果

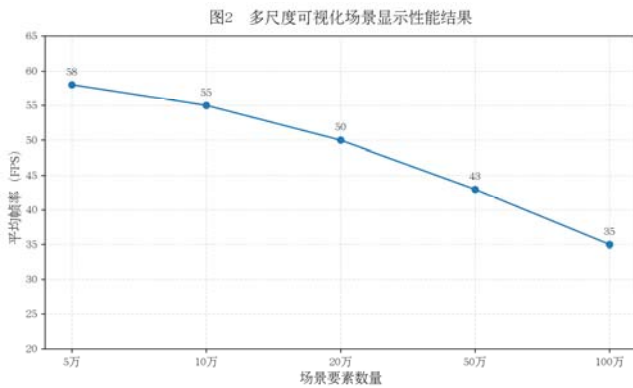


图2 多尺度可视化场景加载与显示性能结果

针对上述问题,建议从技术和管理两方面同步推进:技术上建立统一对象模型、统一字段标准和统一精度分级规则;管理上明确竣工资料移交标准、责任主体和更新时限,并将模型维护纳入城市基础设施管理流程。只有实现“标准统一、责任明确、流程闭合”,地下管线三维成果才能长期稳定运行。

## 5 结论

城市地下管线三维建模与可视化测绘的本质,是将多源测绘与探测成果转化为可表达、可分析、可更新、可共享的空间信息产品。本文围绕数据获取、几何重建、语义组织、可视化表达和业务应用五个环节,系统梳理了城市地下管线三维化建设的关键技术路线。研究认为,采用控制测量与探测数据协同组织、中心线与断面参数分层建模、图形数据库与属性数据库联动,以及多尺度三维场景与分析功能融合的技术体系,能够显著提升地下管线测绘成果的应用深度。未来,应进一步加强地下管线数据标准体系、动态更新机制以及GIS、BIM与城市信息模型平台之间的互联互通,推动地下管线测绘成果从静态档案向城市治理底座转变。同时还应看到,地下管线三维化建设的最终目标并不只是形成一套可浏览的模型成果,而是建立面向规划、建设、运维和应急管理全过程的信息支撑体系。对于测绘单位而言,这意味着成果生产方式将由阶段性交付逐步转向持续更新与长期服务;对于城市管理部门而言,则意味着地下空间信息能够以更加直观、准确和可计算的形式参与审批研判、施工组织和风险防控。随着城市更新进程不断推进,地下管线三维建模与可视化测绘将在提升基础设施治理精度、提高跨部门协同效率以及支撑数字孪生城市建设等方面发挥更加重要的作用。

## 参考文献

- [1]Yan J, Jaw S W, Soon K H, et al. Towards an Underground Utilities 3D Data Model for Land Administration[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 1957.
- [2]Sharafat A, Khan M S, Latif K, et al. BIM-GIS-Based Integrated Framework for Underground Utility Management System for Earthwork Operations[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5721.
- [3]Tang L, Chen C, Li H, 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): 04022096.
- [4]Wang M, Deng Y, Won J, et al. An Integrated Underground Utility Management and Decision Support Based on BIM and GIS[J]. Automation in Construction, 2019, 107: 102931.
- [5]Li M, Feng X, Han Y, et al. Mobile Augmented Reality-Based Visualization Framework for Lifecycle O&M Support of Urban Underground Pipe Networks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 136: 105069.
- [6]Pour E J, Atazadeh B, Rajabifard A, et al. Review and assessment of 3D spatial data models for managing underground utility networks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 157: 106219.
- [7]Lee J, Kim S, Shin Y, et al. Design and Validation of an Integrated CAD-to-5D BIM Process for Underground Utilities[J]. Buildings, 2025, 15(22): 4139.
- [8]Liu R, Shao Z, Sun Q, et al. Defect Detection and 3D Reconstruction of Complex Urban Underground Pipeline Scenes for Sewer Robots[J]. Sensors, 2024, 24(23): 7557.
- [9]中华人民共和国住房和城乡建设部.城市地下管线探测技术规程:CJJ61—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [10]中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.城市工程管线综合规划规范:GB50289—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.

## 作者简介:

程文(1983—),男,湖北阳新人,工学学士,高级工程师,从事工程测量、大地测量、地下工程探测检测修复相关技术研究。