

地勘工程中地下管线探测与三维建模一体化方法研究

李华文

山东省菏泽市巨野县自然资源和规划局 山东 菏泽 274900

摘要: 本文聚焦于地勘工程, 系统性地提出并深入研究了一种地下管线探测与三维建模一体化方法。该方法以“数据驱动、流程融合、模型统一”为核心思想, 通过整合多源异构探测技术(如电磁感应法、探地雷达、惯性定位等), 构建标准化的数据采集与处理流程, 并利用先进的点云与BIM(建筑信息模型)/CIM(城市信息模型)技术, 实现从外业探测到内业三维模型自动生成的无缝衔接。文章详细阐述了该一体化方法的技术框架、关键环节、实施流程及质量控制体系。研究表明, 推行探测与建模一体化是破解当前地下管线管理困境、赋能智慧城市建设的**有效路径, 对推动地勘行业数字化转型具有重要的理论意义和实践价值。

关键词: 地下管线; 管线探测; 三维建模; 一体化方法; 多源数据融合

引言

地下管线系统涵盖给水、排水等多类管线, 是城市运转的“血管”与“神经”, 其安全高效运行关乎国计民生。但长期城市建设使大量管线存在“家底不清”等问题, 信息不确定引发施工破坏事故, 延误突发事件抢险救援, 威胁公共安全。地质勘察工程中, 地下管线精准探测与信息获取是关键, 传统模式下管线探测与三维建模独立进行, 外业采集、内业建模割裂, 导致二维图纸信息损失严重、内外业沟通成本高、返工率高、项目周期长, 且三维模型与原始数据关联弱, 限制了其在全生命周期的应用。在此背景下, 探索建立地下管线探测与三维建模深度融合的一体化方法, 实现“所测即所得、所得即所用”, 既是提升地勘技术水平的内在要求, 也是服务新型城镇化、支撑智慧城市建设和提升城市安全韧性的迫切需求, 本研究致力于构建相关方法论体系。

1 一体化方法的总体技术框架

1.1 核心理念

一体化方法的成功实施依赖于三个相互支撑的核心理念。首先是“数据同源”, 它要求三维模型的所有几何与属性信息均直接来源于经过严格质量控制的外业探测数据, 从而从根本上杜绝了信息在二次加工过程中可能产生的失真与误差。其次是“流程贯通”, 即将外业探测、数据处理、三维建模、成果输出等原本割裂的环节, 无缝集成在一个统一的数字工作流之中, 确保数据能够实时流转、状态同步, 极大地提升了工作效率与协同水平^[1]。最后是“模型驱动”, 即以最终的、可用于BIM/CIM平台的三维信息模型为目标, 反向指导外业探测的内容、精度和格式要求, 使整个探测工作更具目的性和前瞻性, 避免了无效劳动。

1.2 框架构成

该框架主要由四大模块构成, 共同支撑起一体化的完整链条。最底层是多源协同探测层, 作为整个系统的数据输入源头, 它根据管线材质、埋深、周边环境等不同条件, 智能选择并协同运用电磁感应仪(EM)、探地雷达(GPR)、惯性陀螺仪以及全站仪/GNSS等多种探测设备, 并通过统一的时空基准确保所有数据在同一参考系下。其上是数据融合与处理层, 扮演着承上启下的关键枢纽角色, 负责接收来自探测层的原始数据流, 执行数据清洗、配准、特征提取和融合等一系列标准化处理, 最终生成一个高精度、富含属性信息的管线中心线点云数据集。再往上是智能三维建模层, 这是方法的核心产出所在, 它利用处理后的点云数据作为输入, 调用专业的三维建模引擎, 自动拟合出平滑连续的三维管线中心线, 并依据属性信息参数化生成三维管体模型, 同时构建起完整的管网拓扑逻辑结构。最顶层是成果应用与交互层, 作为价值实现的出口, 它将最终生成的、符合IFC或CityGML等开放标准的三维管线模型无缝对接到BIM/CIM平台, 支持可视化漫游、空间分析、碰撞检测、应急演练等多种高级应用, 真正实现了数据的价值转化。

2 一体化方法的关键技术环节

2.1 多源探测技术的协同与优化

一体化方法强调必须根据具体的任务需求、管线类型和现场环境, 进行探测技术的科学组合与动态优化。对于导电性能良好的金属管线, 电磁感应法(EM)因其高效率和高精度而成为首选, 但在管线密集、相互平行或交叉的区域, 则需要灵活运用多频段、多模式(如直连法、夹钳法、感应法)相结合的策略, 并辅以探地雷达(GPR)进行交叉验证, 以有效区分相邻的不同管线。

而对于非金属管线,如PVC或混凝土管,主要依赖于探地雷达(GPR),通过精心选择天线频率(高频用于浅层高分辨,低频用于深层穿透)并采用三维网格状测线进行数据采集,可以较好地获取其三维空间形态;在信号衰减严重的深埋区域,甚至可以考虑将地质雷达与地震映像法进行结合以增强探测能力。对于采用顶管或定向钻等非开挖工艺铺设的管道,其内部轨迹通常无法从地表直接探测,此时管道惯性定位仪(PIG)便成为不可或缺的工具,它可以从检查井进入管道内部,实时记录下高精度的三维轨迹,为构建此类管线的精确模型提供了黄金数据^[2]。无论采用何种技术,所有探测点都必须与高等级控制点进行联测,通常采用RTK-GNSS或高精度全站仪,以确保整个探测区域的绝对位置精度满足后续建模的要求。

2.2 数据标准化与预处理

首先建立一套详尽的数据字典,明确定义所有管线及其附属物的几何、物理和管理属性字段,例如管线类型、材质、管径、埋深、探测方法代码以及置信度等级等。在数据格式方面,虽然原始数据可以保留各自设备的专有格式,但经过内业处理后,必须统一转换为通用的中间交换格式,如带有丰富属性信息的LAS/LAZ点云格式或GeoJSON格式,以便于后续建模引擎的高效读取与处理。在具体的数据预处理环节,针对不同来源的数据需要采用相应的算法。对于探地雷达(GPR)采集的原始剖面数据,需进行一系列处理步骤,包括背景去除以消除系统噪声、增益调整以补偿信号随深度的衰减、各种滤波(如F-K滤波、小波变换)以压制干扰波并突出有效反射信号,以及偏移归位处理以校正因波速变化引起的横向位置偏移,从而增强管线反射信号并提高横向分辨率。对于融合后形成的管线点云数据,则需要进行去噪与精化处理,采用统计离群点移除(SOR)或半径离群点移除(ROR)等算法剔除由探测误差引入的异常点;对于因探测条件限制而形成的稀疏点云,还可以采用样条插值或移动最小二乘法(MLS)进行加密和平滑,以获得更连续、更可靠的管线轨迹。

2.3 三维建模引擎与算法

三维建模引擎是将高质量点云数据转化为可用信息模型的核心工具,其性能直接决定了建模的自动化程度和最终成果的质量。一个理想的建模引擎应当具备强大的智能化能力。在中心线提取方面,对于由离散点组成的管线轨迹,通常采用三次样条曲线(CubicSpline)或B样条曲线(B-Spline)进行拟合,这种方法既能保证生成曲线的数学光滑性,又能最大程度地忠实反映原始探测

点的空间走向。对于探地雷达生成的密集点云数据,则可以先进行骨架化(Skeletonization)处理,提取出代表管线轴线的单像素宽骨架,再基于此骨架拟合出精确的中心线。在管体生成阶段,建模引擎会依据中心线路径和点云附带的管径属性,沿中心线进行放样(Sweep)操作,自动生成三维管体模型;对于存在变径情况的管线,引擎需要在变径点处进行特殊处理,例如插入过渡段或使用分段建模的方式,以确保整个管体模型的几何连续性和视觉合理性。此外,阀门、井盖、消防栓等各类附属物的建模,可以通过预先建立一个标准化的构件库(FamilyLibrary)来实现,当模型构建到相应位置时,系统能够自动实例化对应的三维构件,并将其与主管线建立逻辑上的关联^[3]。最后,构建正确的管网拓扑关系是模型能否用于分析的关键。建模引擎通过计算各管线中心线之间的最近距离,若该距离小于一个预设的工程阈值(例如0.5米),则判定此处为一个连接点,并在信息模型中创建一个节点(Node)对象,用以记录和管理这些管线间的连接逻辑,从而形成一个完整的、可用于网络分析的管网系统。

3 一体化方法的实施

3.1 项目策划与方案设计阶段

此阶段是整个项目的“蓝图”制定环节。首先,需与业主或相关管理部门充分沟通,明确探测范围(如街区、园区、道路段等)、精度等级(通常依据《城市地下管线探测技术规程》CJJ61划分)、目标管线类型(包括给水、排水、燃气、电力、通信、热力等)。在此基础上,综合考虑地质条件、地面干扰源、既有资料完整度等因素,制定多源探测技术组合方案——例如,在金属管线密集区采用电磁感应法(EM),非金属管线区域辅以探地雷达(GPR),复杂节点处引入惯性陀螺仪或微动探测等补充手段。同时,制定统一的数据采集规范,包括坐标系、高程基准、属性字段、命名规则等,确保后续数据融合的一致性。

3.2 外业协同探测阶段

外业团队携带电磁管线仪、探地雷达、GNSSRTK、全景相机、移动终端等设备进场作业。所有操作严格遵循前期方案,确保探测路径全覆盖、无遗漏。关键创新在于“实时协同”:探测人员通过加固型平板或智能手机,将采集的管线点位、埋深、材质、管径等属性信息,连同现场照片、视频、手簿记录等多媒体资料,通过4G/5G网络实时上传至云端项目协同平台。平台自动打上时间戳、位置标签,并进行初步格式校验,有效避免后期数据混乱或丢失,显著提升外业效率与数据完整性。

3.3 内业数据处理阶段

数据处理工程师在云端平台接收原始数据后,执行标准化处理流程:首先进行数据清洗,剔除异常值与重复记录;随后进行多源数据配准,将不同设备、不同时间采集的数据统一到同一空间参考系下;接着开展数据融合,整合管线几何信息与属性信息,形成结构化的管线数据库;最后进行特征提取,识别管线交叉点、变径点、附属设施等关键要素^[4]。整个过程依托平台内置的SOP(标准操作手册),每一步操作均有日志记录,支持全流程追溯。关键节点(如主干管线定位)需由质检人员在线审核确认,确保数据可靠性。

3.4 自动化三维建模阶段

处理完成的标准数据集自动触发平台中的三维建模引擎。引擎基于管线拓扑关系、埋深逻辑和空间约束,自动生成初步的三维管线模型。系统智能识别低置信度区域(如信号干扰严重区、数据缺失段)或空间冲突区域(如管线间距小于规范要求),并以高亮或标记形式提示,供技术人员重点复核。该阶段大幅减少人工建模工作量,提升建模效率与一致性。

3.5 模型校验与修正阶段

技术人员结合外业上传的实景照片、视频及现场经验,对自动生成的模型进行人机协同校验。对存在偏差的管线走向、错误连接关系或模糊属性进行手动修正。修正结果不仅用于完善当前项目模型,还作为反馈样本输入机器学习模块,持续优化自动化建模算法的准确率,形成“实践—反馈—优化”的闭环机制。

3.6 成果输出与交付阶段

最终成果包括符合行业标准的三维管线模型(支持IFC、CityGML、LAS等开放格式)、完整的属性数据库、元数据说明及质量评估报告。质量报告详细记录各阶段QC结果,如外业重复测量误差统计、内业拓扑一致性检查通过率、属性完整性百分比等。成果可直接交付业主,或无缝集成至城市信息模型(CIM)平台,支撑智慧管网、

应急管理、规划建设等应用场景。

在整个流程中,质量控制贯穿始终:外业采用不少于10%的重复测量进行精度验证;内业处理严格执行SOP并实行双人校核;建模成果必须通过拓扑连通性、空间冲突、属性完整性等多重检查。这种一体化、数字化、可追溯的实施流程,不仅提升了地下管线探测与建模的效率与精度,也为城市地下空间的可持续管理奠定了坚实数据基础。

4 结语

本文对地勘工程中地下管线探测与三维建模一体化方法展开系统性研究,得出重要结论:该方法确立“数据同源、流程贯通、模型驱动”理念,构建完整闭环,破解传统痛点,依赖多源探测技术协同、数据处理标准化、三维建模自动化三大关键技术,能提升普查效率、保障精度、丰富信息内涵、拓展应用价值,是地勘行业革新方向与服务国家战略的有效路径。不过,一体化方法推广应用面临挑战,高精度设备与专业软件成本高,中小型单位门槛高;极端复杂环境下自动化算法鲁棒性和准确率待提升;国家统一标准体系不完善,制约成果互操作性和共享水平。面向未来,研究与实践可聚焦深度赋能人工智能,提升自动解译和语义分割能力;推动技术轻量化与普及化,降低使用门槛;探索建立动态更新机制,确保城市地下管线“一张图”现势性和权威性,为智慧城市提供数字基底。

参考文献

- [1]赵庆振.地下管线三维建模与可视化技术研究[J].智能建筑与智慧城市,2024,(01):63-65.
- [2]李康.地下管线的三维建模及可视化研究[D].西安科技大学,2020.
- [3]张宁,徐斌,王涛,等.城市地下管线三维建模及可视化系统实现研究[J].科技资讯,2025,23(03):57-59.
- [4]田红霞.城市地下管线三维空间GIS建模关键技术及计算[J].科学技术创新,2022,(32):64-68.