

引文: 刘鑫, 涂圣文, 侯燕芳, 等. 数字管道三维空间可视化建模技术研究进展[J]. 油气储运, 2025, 44(6): 621–632.

LIU Xin, TU Shengwen, HOU Yanfang, et al. Research review of digital modeling technologies with 3D spatial visualization for pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(6): 621–632.

数字管道三维空间可视化建模技术研究进展

刘鑫¹ 涂圣文¹ 侯燕芳¹ 林冬² 舒洁² 唐雨²

1. 西安交通大学化学工程与技术学院; 2. 中国石油西南油气田公司安全环保与技术监督研究院

摘要:【目的】数字管道三维空间可视化建模技术通过精确刻画埋地管道三维空间提供清晰的可视化展示, 已成为管道应急抢险与运维管理的关键技术。随着可视化理论与技术的发展, 需要依据现场实际需求选择合适的可视化建模技术, 以提升管道的应急响应能力与日常管理效率。【方法】基于软件与算法的特点, 将管道可视化建模技术分为三维建模软件、已有组件二次开发及底层开发 3 类, 梳理各类技术的方法原理、特点及应用场景, 并对比分析其优缺点; 针对油气管道穿越恶劣地质区域而导致管道可视化建模技术在管道变形刻画、人工运维等方面出现的问题, 探讨了惯性测量单元、激光雷达、增强现实、数字孪生及物联网等新型技术在管道可视化中的应用与优势; 从数据采集、特征信息构建及多系统融合方面分析了数字管道三维空间可视化建模技术面临的挑战, 并对其发展趋势进行了展望。【结果】管道可视化建模技术实现了基于要素信息库对管道本体、附属物、缺陷及服役场景的快速建模, 构建了三维可视化系统, 可真实反映管道的空间位置关系, 为管道选线规划与维抢修开挖提供有效指导。此外, 通过新型技术的引入, 管道可视化建模在提高探测数据精度、刻画管道变形趋势、增强系统交互性及实现实时管道数据监测等方面取得了显著进展, 提升了可视化系统功能及现场运维效率。【结论】数字管道三维空间可视化建模已进入多技术融合阶段, 开发者可根据需求选择合适的方法以确保系统的适用性。未来应重点推进高精度数据采集、多源数据融合、可视化系统实时性能优化、智能化与自动化应用等方面的工作, 以实现对管道空间位置、缺陷信息、运行工况数据的全方位可视化交互, 提升管道本质安全。(图 1, 表 2, 参 62)

关键词: 油气管道; 建模; 三维可视化; 泄漏; 维抢修

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)06-0621-12

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.06.002

Research review of digital modeling technologies with 3D spatial visualization for pipelines

LIU Xin¹, TU Shengwen¹, HOU Yanfang¹, LIN Dong², SHU Jie², TANG Yu²

1. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University; 2. Institute of Safety, Environment Protection and Technical Supervision, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company

Abstract: [Objective] Digital modeling technologies with three-dimensional (3D) spatial visualization have emerged as a crucial approach in the pipeline sector, particularly for emergency repairs and operation and maintenance management, leveraging their abilities to accurately represent the 3D spatial layout of underground pipelines and offer clear visual display. As visualization theories and technological practices continue to evolve, selecting appropriate visual modeling technologies adaptable to on-site requirements is essential for enhancing emergency response capabilities and improving the efficiency of routine pipeline management. [Methods] From the perspective of software and algorithm characteristics, this paper classifies visual modeling technologies for pipelines into three categories: 3D modeling software, secondary development based on existing components, and underlying development. The principles, characteristics, and application scenarios of each category are described, with a comparative analysis of their advantages and disadvantages. Given the deficiencies in these technologies, particularly when addressing adverse geological areas frequently encountered by oil and gas pipelines, such as challenges in clearly representing pipeline deformation and subsequent difficulties in manual operation and maintenance, this paper discusses the applications and benefits of new technologies in pipeline visualization, including Inertial Measurement Unit (IMU), Light Detection and

Ranging (LiDAR), Augmented Reality (AR), Digital Twin (DT), and the Internet of Things (IoT). Furthermore, from the perspectives of data collection, feature information architecture, and multi-system integration, this paper analyzes the challenges faced by the development of digital modeling technologies with 3D spatial visualization for pipelines and outlines prospects for future development trends in this field.

[Results] Visual modeling technologies for pipelines facilitate the establishment of 3D visualization systems through rapid modeling based on element information databases, encompassing pipelines, appendages, defects, and service scenarios. These visualization systems accurately reflect the spatial relationships of pipelines, providing effective guidance for selecting and planning pipeline routes, as well as for excavation during maintenance and rush repair. Additionally, the integration of new technologies has led to significant advancements in the visual modeling of pipelines, particularly in improving the accuracy of detection data, representing trends in pipeline deformation, enhancing system interactivity, and enabling real-time monitoring of pipeline data. These developments have resulted in more comprehensive functionalities for visualization systems and improved operational and maintenance efficiency. **[Conclusion]** Given the current emphasis on multi-technology integration in digital modeling with 3D spatial visualization for pipelines, developers should select appropriate methods based on specific requirements to ensure the applicability of their systems. Future efforts should focus on several key areas, including high-precision data acquisition, multi-source data fusion, optimization of real-time performance for visualization systems, and the promotion of intelligent and automated applications, aiming to achieve comprehensive visual interaction that encompasses pipeline spatial positions, defect information, and operational condition data, ultimately enhancing the intrinsic safety of pipelines. (1 Figure, 2 Tables, 62 References)

Key words: oil and gas pipeline, modeling, three-dimensional (3D) visualization, leakage, maintenance and rush repair

油气管道作为国家能源大动脉,担负着油气资源安全供应与灵活调配的重要任务,为生产建设提供有力保障^[1-4]。根据《“十四五”现代能源体系规划》,预计 2035 年中国油气管网规模将达到 21×10^4 km,逐步实现复杂管网的互联互通,以提高资源配置效率^[5]。中国油气资源主要分布在渤海湾、松辽、塔里木、鄂尔多斯等盆地,油气消费则主要集中在环渤海、长江三角洲及珠江三角洲等地区。油气管道沿线地理、地质条件复杂多样,对管道安全运行造成严重威胁^[6-8]。受土壤条件、地质运动、腐蚀、第三方破坏等多种因素影响,油气管道易发生泄漏事故,严重时可能引发燃烧或爆炸等灾害^[9-10]。由于泄漏点地下空间不可视,周围管道分布状况不明确,为管道开挖带来安全隐患。目前,管道管理与维抢修多依赖二维、三维图纸资料,存在不直观、管理效率低、动态调整困难等问题,难以满足现代运维管理需求^[11]。数字管道三维空间可视化建模技术能够弥补二维、三维图纸的缺陷,精确展示相邻管道的空间位置,支持全生命周期的智能管理,并与物联网(Internet of Things, IoT)、大数据、人工智能等技术融合,降低管理成本与维抢修风险,提升应急响应效率,保障管道安全高效运行,缩短施工周期,减少次生灾害^[12],推动管道行业良性发展^[13]。

基于此,结合埋地油气管道的安全开挖与日常运维需求,对国内外管道三维空间可视化建模技术进行

对比分析。将可视化建模技术分为三维建模软件技术、已有组件二次开发技术及底层开发技术 3 类,全面对比了各类技术的特点、优缺点及其融合方式。然后,针对油气管道因穿越恶劣地质区域而导致管道可视化建模技术在管道变形刻画、人工运维等方面出现的问题,介绍了惯性测量单元、激光雷达、增强现实、数字孪生及 IoT 等新技术的应用及其优缺点。最后,分析了现有技术的不足,对未来管道三维空间可视化建模技术的发展提出了建议。

1 三维空间可视化建模技术对比

油气管道选线规划的合理性不仅影响管道设计与施工难度,还因地质活动、自然条件等因素对管道运营安全产生影响。在传统油气管道三维图纸中,管道多以线段表示,难以直观展现其走势与空间分布。20 世纪末,随着管道里程增加,泄漏事故频发,数字管道三维空间可视化建模技术凭借其精准、直观的特点快速构建可视化平台,精确描绘泄漏点周围埋地管道空间走势,逐步应用于管道线路规划与运维中。Zlatanova 等^[14]通过将高程信息引入二维管道系统,实现了初步的三维展示。此后,随着可视化技术的发展,逐渐形成了三维软件建模、已有组件二次开发及底层开发 3 种数字管道三维空间可视化建模技术。

1.1 三维软件建模技术

三维软件建模技术通常采用 AutoCAD(Autodesk Computer Aided Design)、Blender、3ds Max(3D Studio Max)等软件对管道及其附属设施进行数字化建模,实现了从二维线条到三维实体的转变,清晰展示管道实体状态。Du 等^[15]结合 AutoCAD 软件与空间数据库,通过动态生成几何体来替代传统长直线,建立了简化的三维管道模型。针对传统二维 CAD 管道图纸生成三维管道模型需要依赖大量人机交互的问题,Yin 等^[16]提出了一种自动生成参数化三维管道模型的方法,利用工业基础类(Industry Foundation Class, IFC)格式表示模型的几何形状与拓扑结构,通过自动图层识别算法从 CAD 图纸中提取数据,并匹配管道的坐标、直径,自动生成三维模型。针对复杂管道曲面拐角生成困难的问题,Cheng^[17]提取并匹配管道表面的密集点云特征,利用多节点样条生成管道表面,构建了三维点云数据拼接模型。Conlan^[18]通过 Blender 构筑并渲染管道,借助 Python 编写的应用程序编程接口(Application Programming Interface, API),构筑了三维管道模型。与人工建模相比,该方法显著提升了构筑速度与精度。Samanta^[19]使用 3ds Max 中的基本几何形状与修改器进行管道的三维建模,通过材质编辑与照明对模型外观进行优化,提升了模型的设计效果。

三维建模软件技术能够直观展示管道的细节特征,适合静态场景展示,并具有较高灵活性。该方法生成模型可通过文件形式导出重复调用,适用于管道阀门、弯头等部件以及泄漏点等的构筑。但该技术多依赖手动调整管道模型,工作量大,难以处理大规模管道信息与更新管理动态场景数据,尚不具备直接用于管道运维分析的能力。

1.2 已有组件二次开发技术

已有组件二次开发技术是基于已有地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、建筑信息系统(Building Information Modeling, BIM)等组件进行二次开发,将管道分为管道管体、附属设施及缺陷、管道服役场景 3 部分进行建模。在管道管体部分,利用组件内封装的几何函数,采用多面体网格法,通过导入管道中心线坐标,再绘制基准圆面、直管段及弯管段实现模型构建。当绘制基准圆面时,基于数字图形的特性采用多面体拟合方式。多面体边数越多,生成管道模型逼真程度越高,但占用计算机性能越大。弯管的

绘制则通过相邻两直管段中心线内切圆弧的方式实现。管道阀门、泵等附属设施通过预先建模生成相应预制体,并结合位置坐标信息,实现自动化构筑。进一步通过探地雷达反馈物性参数,刻画土壤、砂石、障碍物等元素,搭建草地、沙地、坡面、跨越河流等管道服役场景,精细化生成管道地下空间可视化三维立体视野,清晰展示管道埋深、走势及空间位置关系。

ArcGIS 作为一款功能强大的 GIS 软件,凭借其卓越的制图工具与数据处理能力广泛应用于油气管道三维可视化系统的构建。Srivastava^[20]采用三角带与多面体逼近圆柱体圆面的方法,结合管道中心线、管径,通过拉伸完成管道的网格化建模,但对于弯管、管道接口处理不够理想,易出现开裂的现象。Li 等^[21]基于 ArcGIS Engine 开发平台,采用 Multipatch 多面体数据格式建立三维管道自动建模模块,自动生成管道模型并实现高质量纹理映射。为进一步提升可视化整体效果,系统设计了多尺度特征融合纹理建模模块,结合松弛自适应实例归一化与多尺度渲染技术,构建了端到端风格绘画渲染网络,显著提高了模型质量。Li^[11]针对当前数字管道建设中数据无法实时共享的问题,通过 ArcGIS 软件的 API、SDK(Software Development Kit)定制化开发,提出了“基于 Web 的数字管道”概念,建立管道空间数据模型(Pipeline Spatial Data Model, PSDM),实现了管道数据的实时共享。Wen 等^[22]基于国产 GIS 软件 SuperMap 提出一种管道三维模型自适应构建方法,利用 3ds Max 设计管道模型并导入 SuperMap 符号库,采用 SuperMap 接口动态加载。同时,将管道服役场景元素缓存为开源场景图二进制(Open Scene Graph Binary, OSGB)格式,构建支持交互式查询与专业分析功能的可视化系统,实现了阀门、三通接口等管道附属设施的自适应构筑,满足单一模型对不同管径、不同走势管道的连续适配,提高了大规模管网可视化建模过程中管道附属模型的构筑效率。Pang 等^[23]侧重对管道、附属设施以及服役场景进行综合一体化构筑与分析,使用 SuperMap RealSpace 命名空间渲染管网及管道服役场景的三维模型,并开发开挖分析、断面分析功能。管道服役场景的精细刻画提升了可视化系统的真实性,可为实际工况下埋地管道综合一体化管理提供支持。针对大规模管道系统地上、地下三维模型融合度差、数据更新不同步、空间分析困难等问题,梁国^[24]基于 SuperMap 平台,研发了二三维埋地管道信息系统,实现埋地管道

的三维自动化建模、统计分析、空间分析一体化,增强了 SuperMap 与 BIM、GIS 系统的信息融合能力,提升了埋地管道系统的信息化科学管理水平。在其他 GIS 组件方面,孙燕^[25]基于 CityMaker 组件进行了三维埋地管道管理系统的设计与开发,实现了系统的需求分析、数据库与功能设计、管道编程化入库、应用分析等功能。徐爱锋等^[26]以 Skyline 为基础平台,采用三层体系架构与功能模块化设计,开发出融合数据存储管理、管道自动建模、三维浏览、剖面分析等多功能的可视化系统。杨振杰等^[27]基于 Skyline 进行二次开发,总结了大批量三维管道自动化建模中附属物模型数据的整合方法。此外,陈瑞等^[28]开发了 Web 端三维可视化系统,实现了对三维模型的展示浏览、空间分析等功能。

BIM 技术能够创建数字化技术并管理建筑设施模型,涵盖了油气管道设计、施工、运维的全生命周期。在可视化建模方面,Chen 等^[29]基于 Revit 二次开发,实现了地下管网的高效建模,采用 Revit API 提取、插入管道空间位置与属性数据,利用 Family 类自定义管道附属物符号库,结合位置信息创建管道系统实例并扩展本地化模型,在 BIM 系统中实现了管道及其附属部件的适应性构筑,提升了埋地三维可视化与管网管理的效率。Wang 等^[30]对地下设施数据模型与 IFC 模式的扩展进行了研究,建立了埋地管道管段与功能组件(如管帽、阀门等)的 IFC 通用数据模型,形成完整的设施网络。此外,为提升设计、维护及管理效率,定义了包括几何与语义信息的属性实体,如管道尺寸、管道部件的几何参数及维护信息,进而为管网的全面管理提供支持。在 Web 平台展示方面,Zhang 等^[31]提出一种针对通用圆柱形管道网格、弯曲管道网格及空心管道网格的轻量级参数化算法,以减少 WebBIM 场景中的渲染负担。Wang 等^[32]采用基于二叉空间分割(Binary Space Partitioning, BSP)树的渲染优化算法,通过自适应空间分割与数据提炼技术提升了 Web 端管道 BIM 模型的加载速度与渲染质量。在运营管理方面,Luo 等^[33]构建了基于 BIM 空间组件识别的管道碰撞优化框架,涵盖碰撞检测、规则定义、规则库应用、贡献率评估、碰撞过滤及优化分析,通过规则库与贡献率排序优化碰撞检测,提升检测精度。Ma 等^[34]将 BIM 与 GIS 技术相结合,开发了统一平台支持管道网络信息管理,通过参数化建模与 Revit 插件实现基于物理勘探数据的管网建模,确保信息模型的标准化、

一致性,但该方法存在参数化模型链接、坐标系统对齐需人工干预的问题。Tang 等^[35]提出一种基于 BIM 与 GIS 集成的数据方法,用于实现埋地管道的三维空间可视化建模与全生命周期管理,通过集成地上、地下建筑资产及周围环境的几何与非几何信息,增强可视化系统与现实环境的交互能力。将该方法与管道传感器相融合,通过实例应用验证了其在非开挖检测与实时监控中的应用效果,具有模型构建简便、实时监控能力强、全流程自动化程度高等特点,为提升埋地管道管理效率提供了技术支持。

已有组件二次开发技术的开发难度较低,适用于大规模管网系统可视化平台的构建,能够整合空间位置数据与模型特征信息,并通过组件的原有功能进行管网运维分析。然而,该技术的建模精细化程度较低,难以准确刻画具有复杂空间关系的管道,易出现模型衔接处开裂、弯头接口不平滑等问题,对于管道附属设施、缺陷及服役场景的刻画较为粗糙。

1.3 底层开发技术

针对已有组件二次开发技术存在的不足,部分学者利用开放图形库(Open Graphics Library, OpenGL)、DirectX 及 J2EE(Java 2 Platform Enterprise Edition)等接口在底层开发领域进行了研究。Xu 等^[36]基于 OpenGL,通过多面体逼近圆面与 Grid 算法,实现了直管与弯管的平滑衔接。Han 等^[37]利用 OpenGL 透视投影技术,对 3ds Max 生成的管件模型进行快速渲染,并通过 Visual C++ 开发三维展示系统,实现对管件模型的可视化控制。结果表明,该方法能够满足三维模型的实时渲染、观察成像渲染,并提供良好的人机交互控制功能。Boutsi 等^[38]提出了一种基于 3D 文化遗产在线展示平台(Heritage Online Presenter, HOP)与 Three.js 库的解决方案,利用多种导航范式与丰富的元数据存储库,在 Web 浏览器中提供适用于管道模型构建的交互式、轻量级及高分辨率的 3D 可视化模型,增强用户体验。刘斌等^[39]基于 J2EE 技术设计了石油管道安全管理系统,采用模型-视图-控制器(Model-View-Controller, MVC)架构与 Oracle 数据库支持管道的安全分析与可视化展示。底层开发技术在管道建模中具有速度快、弯头衔接平滑、数据复用性高等优势,能够根据工程实际需求开发相应的管道分析功能。但其存在开发周期长、难度大、维护复杂等问题,限制了其在工程应用中的推广。

对比上述 3 种可视化建模技术的优缺点(表 1), 在工程应用中, 可结合工程具体情况与各种技术的特点选择不同可视化建模技术。在实际场景下, 已有组件二次开发技术应用最为广泛。随着技术发展, 多技术融合已成为主流方式, 通过底层开发构建相关函数对管道连接处、接口进行平滑处理, 解决组件开发中衔接处开裂的问题。三维软件建模技术受周期长、灵活性差等因素制约, 一般不用于管道模型构筑, 但因其具有高精度的特性, 可以对管道附属设施、缺陷、服役场景等元素进行刻画, 并建成相关模型数据库重复使用, 解决组件开发技术对于附属设施、环境刻画不足的问题。

表 1 不同类型可视化建模技术优缺点对比表
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages among different visual modeling technologies

技术名称	优点	缺点
三维软件建模技术	建模精细化程度高, 能够对管道附属物、服役环境元素进行刻画, 模型可以通过文件形式导出调用	建模速度慢, 不适宜大批量建模, 不能对管道进行管理分析
已有组件二次开发技术	在原有组件功能基础上进行开发, 开发难度较低, 适用于大批量管道, 能够利用原有组件的分析功能	建模精细化程度较差, 在管道弯头、连接处易出现开裂现象, 对于管道附属物、服役环境刻画较差
底层开发技术	建模精细化程度较高, 管道弯头能做到光滑连接, 可根据实际需求开发相应的分析功能	不适宜大批量建模, 无法刻画管道服役场景, 开发难度高, 周期长

2 新技术在管道可视化建模中的应用

现有的管道可视化建模技术主要依赖于已有数据

进行管道模型的构建, 并通过可视化系统实现三维空间展示、碰撞检测及剖面分析等功能, 这在实际应用中存在一定挑战。首先, 管道变形数据采集困难, 尤其是对变形较小的管道, 传统的探地雷达等探测技术难以灵敏捕捉, 无法精确获取管道的定位数据, 导致三维空间可视化建模精度不足, 且微小弯管变形难以刻画。其次, 管道数据采集与运维大多依赖人工操作, 由于管道多位于偏远地区, 难以实现常规维护与数据采集, 增加了人工管理的成本与风险。随着可视化技术的发展, 通过惯性测量、激光雷达、增强现实、数字孪生及 IoT 等新技术的应用, 有助于识别微小管道变形, 使可视化建模不仅限于管道模型的构建与三维展示, 还能增强用户交互体验, 从而提升管道运维水平。

2.1 惯性测量技术

惯性测量技术是保障管道安全运行的重要技术, 通过检测装置在管道内部的运动轨迹, 掌握管道中心线位置信息, 从而实现埋地管道的精确定位。近年来, 基于惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)的内检测设备(图 1)在油气管道领域应用广泛。其工作原理是利用 IMU 的加速计与陀螺仪获取载体运行信息, 借助变换矩阵将三维空间数据由载体坐标系(body frame, 简称 b 系)转换到导航坐标系(navigation frame, 简称 n 系), 结合高精度 GPS 参考点坐标与里程轮数据对管道位置进行修正, 绘制管道中心线三维图像, 掌握管道空间位置走势。Bando 等^[40]设计了集成 IMU 与超声波导航的管道探测器, 由蛇形管道机器人与管道入口处的超声波发射器组成。机器人上的超声波接收器接收信号, 通过计算超声波传播时间并融合惯性导航信息实现探测器的精确定位。Kazeminasab 等^[41]

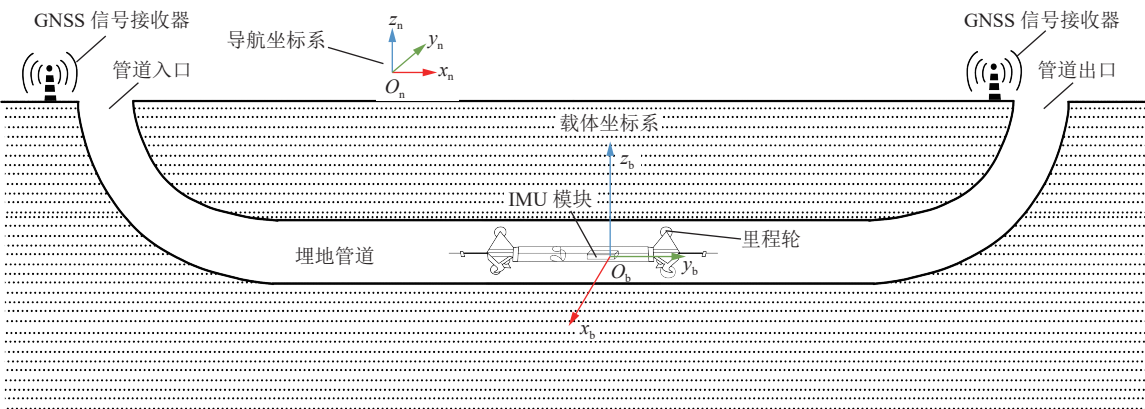


图 1 IMU 管道内检测器运行轨迹示意图
Fig. 1 Schematic diagram of motion trajectory of IMU-based in-line inspection tool

提出一种基于粒子滤波与两相运动控制器的管道机器人智能导航方法,通过粒子滤波器准确判断管道的线性与非线性构型,但无法绘制整个管道图。Santana 等^[42]基于惯性传感器与轮式里程表传感器的数据融合算法,采用扩展卡尔曼滤波计算了管道机器人的轨迹。为减少 IMU 运行过程中的测量误差, Li 等^[43]基于 16 维卡尔曼滤波模型的正向与反向数据融合算法,并结合微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)磁力计、里程计及 MEMS-IMU 优化了管道三维轨迹的测量结果。为了进一步提高惯性导航的精度, Wang 等^[44]提出了基于惯性传感器与轮式里程计的埋地管道机器人增强定位方法,通过消除异常值、先验回溯及优化自适应权重提升了定位精度。Lin 等^[45]在硬件设计上提出将里程记录功能与支撑轮分开以减少支撑轮打滑对测量轨迹的影响,提高测量精度;在算法上提出互补算法与几何修改算法,结合加速度与角速度数据,减少偏置与高频噪声,并通过几何变换进一步减小误差。

将惯性测量技术应用于管道可视化建模中可有效捕捉由地质运动引起的管道微小变形,从而获得精确的管道中心线坐标与管道运行姿态数据,为管道可视化建模提供准确的管道位置信息。同时,通过绘制管道中心线三维走势图掌握管道中心线的整体走势,识别漏磁检测与管道可视化模型中难以发现的小角度弯头,提高油气管道弯头的检测精度。然而,惯性测量技术需通过管道内检测器实施,因此管道设计需预留合适的入口以确保检测器安全部署与管道正常运行。与传统的探地雷达等测量方式相比,惯性测量技术还需针对管道内流体的安全性与稳定性进行优化设计以减小流体流动对测量精度的干扰,确保检测器安全回收。惯性测量的精度受限于 GPS 信号接收器的数量与相隔距离,限制了其在小段管道中的应用。此外,测量过程中产生的大量数据要求较强的数据处理能力,增加了数据处理的复杂性。

2.2 激光雷达技术

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)是将激光技术与雷达技术相结合的一种遥感技术。LiDAR 系统集成了激光技术、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)以及惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)技术,能够获取点云数据并生成精确的三维模型。凭借高效的数据采集能力、适

应复杂环境的灵活性、自动化生成三维模型且支持与 BIM 集成的多功能性, LiDAR 技术逐渐被应用于埋地管道的三维空间可视化建模。Oladosu 等^[46]介绍了 LiDAR 数据生成的纵向剖面图与数字地形模型(Digital Terrain Model, DTM),验证了其在长输石油与天然气管道走廊绘制中的有效性。梁周雁等^[47]利用三维激光扫描获取管廊点云数据,并结合拉普拉斯算法与随机抽样一致算法(Random Sample Consensus, RANSAC),实现了基于点云的管道三维自动建模。Huang 等^[48]利用三维激光雷达点云数据特性与管道空间拓扑关系,提出以构造实体几何-边界表示法(Constructive Solid Geometry-Boundary Representation, CSG-Brep)为基础的埋地管道三维模型构建方法。Aijazi 等^[49]开发了便携式自动测绘解决方案,通过改进的全局迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)方法对明沟中的地下管网进行 3D 扫描与建模,并采用模糊 C-means 聚类与嵌套 MSAC(M-estimate Sample Consensus)算法进行精确建模。在管道构件可视化建模方面, Yin 等^[50]提出了一种新型深度学习框架 SE-PseudoGrid,通过整合挤压-激发机制与局部聚合算子,显著提升了复杂管道组件的分类精度与效率。

LiDAR 技术能够快速、精确地捕捉管道及其周围环境的三维空间信息,提供高分辨率的点云数据,有助于建立详细的三维管道模型,进而对管道的空间布局、结构分析及潜在问题的识别提供支持。同时,激光雷达技术可以在不接触管道的情况下进行非破坏性检测,适用于复杂地形与高风险环境,具有较高的安全性与效率。然而, LiDAR 技术的高精度测量受限于激光的传播距离与环境条件,如雨、雾及灰尘等因素可能影响测量结果的准确性。此外,激光雷达设备的成本较高,对操作人员的技术要求较为严格,且在大规模管道测量中需要处理大量后期数据,增加了整体工作量与成本。

2.3 增强现实技术

增强现实(Augmented Reality, AR)是一种先进的计算机辅助技术,通过将虚拟对象叠加在用户的物理环境视图中,实现地下设施及其周围环境的实时可视化,能够增强信息呈现,并助力预防管道事故、降低运维成本^[51-52]。Li 等^[51]开发了基于移动增强现实(Mobile Augmented Reality, MAR)的可视化框架,采用管道中心线坐标、管径等参数自动建模,并通过预制体批量

生成缺陷模型, 结合 Lite RTK 设备实现埋地管道精准定位, 可有效避免开挖作业, 并提高运维效率。Li 等^[53]采用 DirectX3D 技术构建了基于 Web 的交互式 3D 虚拟管道, 实现管道的 Web 3D 可视化与 SCADA 系统的交互, 进行三维视觉监控。为突破传统 BIM 技术在管道碰撞检测中结果不直观、依赖经验判断的局限, 蔺鹏杰等^[54]提出将 BIM 与 AR 技术相结合, 避免了繁琐的数据处理与软件开发过程, 通过局域网实现多人协同碰撞检查操作, 并结合 AR 的沉浸式人机交互特点, 实现了管道空间布局的直观优化, 可辅助操作人员进行更精准的运维决策。Shekargoftar 等^[55]开发了集成 BIM、GIS 以及 AR 技术的管道运维管理系统 (Pipeline Operation and Maintenance Management System, POMMS), 通过 API 与云数据库整合项目信息, 实现更逼真的 3D 可视化与高效的数据检索。

AR 通过将虚拟管道数据与实际环境实时叠加, 提供直观的可视化效果, 帮助操作人员直观获取管道的空间布局, 进行虚拟巡检、故障定位及维护规划, 从而提升工作效率与决策准确性。同时, AR 技术支持交互式操作, 实时更新并显示管道信息, 增强现场决策的实时性与精确性。然而, AR 技术可能受复杂环境中光照、噪音等因素干扰, 影响其效果与稳定性。此外, 实时数据传输与处理对硬件性能要求较高, 可能导致系统延迟或性能瓶颈。

2.4 数字孪生技术与 IoT 技术

数字孪生作为一种集成传感器、建模及可视化的技术, 通过数字模型动态监测物理实体, 实现智能化与自动化解决方案^[56]。数字孪生技术可融合探地雷达, 实现埋地管道空间位置、埋深、走向及管径的快速无损获取; 融合多频激励技术, 对管道各种缺陷类型与特征进行检测; 利用传感器实时收集管道运行数据并进行状态分析; 最终通过 GIS、BIM 系统进行可视化展示, 实现管道空间位置、缺陷特征及运行工况数据的一体化呈现。近年来, 数字孪生技术已广泛应用于管道泄漏检测与态势评估、管道完整性评价及状态监测等多个领域。Liang 等^[57]采用知识与数据联合驱动的方式, 构建了适应实际工况的管道数字孪生模型, 提出一种基于孪生管道的深度学习方法。该方法通过自动学习实体管道工况数据, 掌握管道运行规律, 检测泄漏等异常行为, 并持续收集实时数据进行迭代更新, 从而提升孪生管道对运行条件

变化的适应性与泄漏识别能力。Lu 等^[58]基于数字孪生建立了地下综合管廊建设运营平台, 针对多系统复杂性、数据透明度及监测管理效率问题设计了全生命周期功能模型与业务框架, 应用可视化与数据驱动运营技术实现施工进度监控, 并展示运行工况下管道表面温度与压力水平。Li 等^[59]介绍了可用于海上油气田开发前端设计 (Front End Engineering Design, FEED) 的数字孪生系统, 结合 BIM 与生产数据构建数字案例集, 提升了 FEED 过程中的可视化与评估效率。Li 等^[60]提出基于 MAR 与布里渊光纤传感器 (Brillouin Fiber Optic Sensor, BFOS) 的数字孪生方法, 通过管道可视化与数字孪生的定量评估预测埋地管道的结构安全性, 并结合 IoT 技术实现对油气管道的全面监控与管理, 提升系统智能化水平与决策支持能力。IoT 技术从“全面感知、可靠传递、智能处理”3 个维度出发, 采用温度、压力、应变等传感器, 根据探测需求选取管道表面安装、埋地安装及内嵌式安装方式, 实时获取管道数据。结合有线与无线传输技术、云平台数据存储与处理技术, 实现传感器数据动态传递, 并通过 IoT、人工智能算法及大数据处理技术对管道状态进行实时监控、预警及优化管理。Aba 等^[61]提出一种基于 IoT 的管道监控系统, 利用脉冲传播速度与传感器之间时间延迟原理, 通过压力脉冲模拟与传感器数据分析实现管道失效位置的精准定位。该系统结合开源电子原型平台 Arduino 与 WiFi 模块, 开发了无线通信设备, 将测量的压力脉冲数据无线传输到 IoT 分析平台进行实时监控。该方法具有较高的定位精度与实时监控能力, 为管道失效检测提供了高效解决方案。Li 等^[62]将混合现实 (Mixed Reality, MR) 与 IoT 相结合, 利用 Unity 引擎与 Open XR 平台创建数字模型, 通过 API 集与云服务实现数据对接, 并采用 Socket 通信与卡尔曼算法优化数据交换, 提升前端与后端的协同管理。

数字孪生技术能提供精确的管道三维模型, 并结合实时传感器数据实现动态监测与状态评估, 显著提高管道管理的智能化水平, 有效捕捉管道变形、泄漏等异常情况。IoT 技术通过实时数据采集与传输, 优化管道状态监控, 增强故障预警能力, 避免了潜在安全隐患。数字孪生与 IoT 技术的结合提升了数据处理能力、响应速度及决策支持系统, 优化了管道维护与管理流程。然而, 数字孪生技术对传感器与高精度建

模工具的依赖,以及对数据处理与实时更新的高要求,增加了大规模管道系统监测的复杂性。IoT 技术在复杂环境中易受到信号干扰或传输延迟的影响,且大规模管道监测产生的数据量庞大,如何高效处理与分析这些数据对硬件性能与算法提出了较高要求。

对比上述新型技术在可视化建模中的优缺点(表 2),在实际应用中,可根据油气管道服役场地与实际运维需求进行选择。对于服役年限较长且地质活动频繁的区域,可采用惯性测量技术与 LiDAR 技术进行管道数据采集,结合管道中心线三维走势图与三维可视化模型对管道空间位置、走势及弯头进行综合分析。AR 技术可帮助操作人员直观地获取管道空间布局,进行虚拟巡检、故障定位及维护规划,提升工作效率。此外,数字孪生技术与 IoT 技术结合传感器数据能够实现管道的动态监测,使得可视化建模技术不仅局限于管道模型的构建,还能够结合实时数据对管道结构的安全性进行综合评估。

表 2 新型技术在管道可视化建模中的优缺点对比表
Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of new technologies for pipeline visual modeling applications

技术名称	优点	缺点
惯性测量技术	精确建立管道中心线坐标、捕捉管道微小变形,准确反映管道走势,提升弯头识别能力	需为管道内检测器设计合适入口,测量精度受管道流体干扰与 GPS 信号器限制,数据量较大
激光雷达技术	精确捕捉管道三维空间信息,支持高分辨率点云数据建模,非接触式检测,适用于复杂地形与高风险环境	测量精度受环境因素(如雨雾)影响,设备成本高,操作要求严格,大规模测量需大量后期数据处理
增强现实技术	提供直观的可视化效果,支持交互式操作,实时更新并显示管道信息	测量精度受复杂环境中光照、噪音等因素干扰,实时数据传输与处理对硬件性能要求较高
数字孪生技术与 IoT 技术	提升管道管理智能化,实时监测变形、泄漏,优化管道状态监控与故障预警	依赖高精度工具,信号干扰与大数据处理要求高

3 面临的问题与技术发展方向

虽然近年来数字管道三维空间可视化建模技术发展较快,能够直观反映管道地下三维空间,实现管道数据的实时更新与监控,多维度丰富管道系统的可视化展示,显著提高了突发事件的响应速度,但仍存在以下问题需要进一步探索:

1)高精度管道检测信息获取困难。获取高精度埋地管道数据主要依赖于复杂的非开挖技术,如探地雷达与激光扫描,其精度常受环境条件与土壤性质影响,导致数据完整性、一致性存在不足。IMU 技术因其成本低、精度高及利用率高的特性具备广泛应用潜力,但目前其主要应用于航空航天领域,在长输油气管道领域的应用研究尚处于起步阶段。此外,管道数据常因环境变化、土壤条件、设备精度等问题而存在偏差,影响模型计算结果的准确性与后续决策的可靠性。

2)细节描述与完整性刻画较差。管道的内外表面细节,如内衬材料、腐蚀层、防腐层以及绝缘层,通常无法在可视化建模中充分表达。尤其在大规模的地下管网系统中,由腐蚀、土壤条件、地质运动所引起的泄漏点、裂纹等管道缺陷刻画不清晰,无法及时排查易发生灾害的管道薄弱点。

3)多系统融合与信息整合能力不足。埋地管道三维空间可视化建模需整合探地雷达、管道内检测、传感器等多源数据,构建 GIS、BIM 或数字孪生等可视化框架。由于各系统标准、协议不统一,数据转换与集成困难,信息孤岛现象突出,难以保障数据一致性与准确性,影响可视化模型构建与管道运维效率。现有技术在应对油气管道复杂运营需求时适应性不足,尤其在事故维抢修作业中,实时动态分析与预警能力较弱,难以提供全面、精准的决策支持。

4 结束语

数字管道三维空间可视化建模技术作为油气管道安全运维与应急响应的关键技术,能够清晰展示管道的地下走势及其与相邻管道的空间关系,直观反映管道在服役状态下的地上与地下空间状况,准确呈现泄漏点、裂纹等缺陷的位置。该技术为管道开挖与维护检修工作提供了有效支持,有助于提升作业效率,降低次生灾害的风险。同时,三维可视化系统可为操作人员提供直观的管道布局图与实时工况数据,促进科学的线路规划设计与日常运维方案的制定。

此外,数字管道三维空间可视化建模技术将不再局限于管道模型的构建,未来应着重通过结合管道实际服役场景与运维需求,引入新型技术以完善系统性能。惯性测量、激光雷达等检测技术的持续优化将进一步提升数据采集精度,使可视化建模更好地应对复

杂地质条件下的管道变形与位移。AR、IoT 等技术的应用将提供更直观的日常运维交互, 显著提高运维效率。数字孪生技术的引入将实时采集管道运行数据, 实现管道安全状态的动态监控, 使三维可视化展示不仅限于几何形态与空间位置, 还能够结合实时数据对管道结构的安全性进行综合评估。与此同时, 管道细节特征的精确刻画与多系统的有效融合将有助于识别管道潜在灾害薄弱点, 为应急抢修决策提供精准支持, 实现对管道空间位置、缺陷信息、运行工况数据的全方位可视化交互, 提升管道本质安全。

参考文献:

- [1] 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 杜渐, 廖绮, 邵奇. 中国油气管网运行关键技术及展望[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 213–223. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016](#).
- LIANG Y T, QIU R, TU R F, DU J, LIAO Q, SHAO Q. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(2): 213–223.
- [2] CHEN P C, LI R, FU K, ZHONG Z K, XIE J L, WANG J L, et al. A cascaded deep learning approach for detecting pipeline defects via pretrained YOLOv5 and ViT models based on MFL data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 206: 110919. DOI: [10.1016/j.ymssp.2023.110919](#).
- [3] SHAN X Y, YU W C, GONG J, WEN K, WANG H, REN S P, et al. A methodology to determine the target reliability of natural gas pipeline systems based on risk acceptance criteria of pipelines[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 4(2): 100150. DOI: [10.1016/j.jpse.2023.100150](#).
- [4] 陈朋超. 油气管网安全状态监测传感系统构建与创新发展[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 998–1008. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.005](#).
- CHEN P C. Construction and innovative development of oil and gas pipeline network safety monitoring sensor system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 998–1008.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022-01-29)[2024-10-12]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice of the National Development and Reform Commission and the National Energy Administration on issuing the “14th Five Year Plan for Modern Energy System”[EB/OL]. (2022-01-29)[2024-10-12]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- [6] HE B H, BAI M Z, SHI H, LI X, QI Y L, LI Y J. Risk assessment of pipeline engineering geological disaster based on GIS and WOE-GA-BP models[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 9919. DOI: [10.3390/app11219919](#).
- [7] 孙青峰, 常维纯, 刘亮, 姜盛玉. “全国一张网”油气储运设施应急预案体系建设[J]. 油气储运, 2024, 43(2): 134–143. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.02.002](#).
- SUN Q F, CHANG W C, LIU L, JIANG S Y. Development of an emergency response plan system for the “One Pipeline Network” of oil and gas storage and transportation facilities[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(2): 134–143.
- [8] LI J H, ZHANG S Z, WANG X, WU Z Z. The impact of spatial layout on safety risks of urban natural gas pipelines[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 4(4): 100198. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100198](#).
- [9] BIEZMA M V, ANDRÉS M A, AGUDO D, BRIZ E. Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: a lessons learned approach[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104446. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2020.104446](#).
- [10] 陈国华, 陶侠, 周利兴. Natech 事件油气管道管段脆弱性评估系统设计及实现[J]. 油气储运, 2024, 43(1): 40–48, 66. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.01.005](#).
- CHEN G H, TAO X, ZHOU L X. Design and implementation of a vulnerability assessment system for oil and gas pipeline sections in the Natech incident[J]. Oil & Gas Storage and Transportation: 2024, 43(1): 40–48, 66.
- [11] LI Z P. Pipeline spatial data modeling and pipeline WebGIS[M]. Cham: Springer, 2020: 21–28.
- [12] SAEIDIAN B, RAJABIFARD A, ATAZADEH B, KALANTARI M. Underground land administration from 2D to 3D: critical challenges and future research directions[J]. Land, 2021, 10(10): 1101. DOI: [10.3390/land10101101](#).
- [13] VISHNUVARDHAN S, MURTHY A R, CHOUDHARY A. A review on pipeline failures, defects in pipelines and their assessment and fatigue life prediction methods[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 201: 104853. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2022.104853](#).

- [14] ZLATANOVA S, RAHMAN A A, PILOUK M. Trends in 3D GIS development[J]. *Journal of Geospatial Engineering*, 2002, 4(2): 71–80.
- [15] DU Y, ZLATANOVA S. An approach for 3D visualization of pipelines[M]//ABDUL-RAHMAN A, ZLATANOVA S, COORS V. *Innovations in 3D Geo Information Systems*. Berlin: Springer, 2006: 501–517.
- [16] YIN D X, DENG X Y, LU K. Automatic generation of pipelines from 2D CAD drawings to 3D IFC models using a parametric method[J/OL]. *International Journal of Construction Management*: 1–19[2024-10-12]. <https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2353927>. DOI: [10.1080/15623599.2024.2353927](https://doi.org/10.1080/15623599.2024.2353927).
- [17] CHENG X L. Algorithm of CAD surface generation for complex pipe model in industry 4.0 background[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, 2022(1): 7062052. DOI: [10.1155/2022/7062052](https://doi.org/10.1155/2022/7062052).
- [18] CONLAN C. The blender python API: precision 3D modeling and add-on development[M]. Berkeley: Apress, 2017: 11–26.
- [19] SAMANTA D. 3D modeling using autodesk 3ds max with rendering view[M]. Hershey: IGI Global, 2022: 48–54.
- [20] SRIVASTAVA P. Innovative approaches to 3D GIS modeling for volumetric and geoprocessing applications in subsurface infrastructures in a virtual immersive environment[D]. Morgantown: West Virginia University, 2020.
- [21] LI S, ZHOU Y. Pipeline 3D modeling based on high-definition rendering intelligent calculation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022(1): 4580363. DOI: [10.1155/2022/4580363](https://doi.org/10.1155/2022/4580363).
- [22] WEN F K, WEN L G, JUAN Y X, YANG P L, YU T Y. 3D visualization of urban underground pipelines by using SuperMap[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 295(4): 042060. DOI: [10.1088/1755-1315/295/4/042060](https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/4/042060).
- [23] PANG L Y, LAN G W, TAO Y Y. Design and implementation of 3D urban underground pipe network system[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 283(1): 012013. DOI: [10.1088/1755-1315/283/1/012013](https://doi.org/10.1088/1755-1315/283/1/012013).
- [24] 梁国. 基于 SuperMap 架构二三维地下管线信息系统的设计与实现[J]. *水利技术监督*, 2023(10): 43–47. DOI: [10.3969/j.issn.1008-1305.2023.10.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-1305.2023.10.012).
- LIANG G. Design and implementation of underground pipeline information system based on SuperMap architecture[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2023(10): 43–47.
- [25] 孙燕. 基于三维 GIS 的土地储备管理系统建设研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2023, 46(1): 90–93. DOI: [10.3969/j.issn.1672-5867.2023.01.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5867.2023.01.024).
- SUN Y. Research on the construction of land reserve management system based on 3D GIS[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2023, 46(1): 90–93.
- [26] 徐爱锋, 徐俊, 龚健雅. 基于 Skyline 的三维管线系统的设计与实现[J]. *测绘通报*, 2013(6): 75–77, 93.
- XU A F, XU J, GONG J Y. Design and implementation of 3D underground pipeline system based on skyline[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(6): 75–77, 93.
- [27] 杨振杰, 原瑞红, 朱泽宇, 韩松, 李媛媛. 一种基于 Skyline 地下管网三维建模的管点数据制作方法[J]. *岩土工程技术*, 2022, 36(2): 140–144. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2993.2022.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2993.2022.02.010).
- YANG Z J, YUAN R H, ZHU Z Y, HAN S, LI Y Y. Pipe point data making for 3D modeling of underground pipe network based on skyline[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2022, 36(2): 140–144.
- [28] 陈瑞, 谢飞, 李超. 基于 Skyline 的三维地理信息可视化系统设计与实现[J]. *测绘技术装备*, 2022, 24(3): 129–134. DOI: [10.20006/j.cnki.61-1363/P.2022.03.025](https://doi.org/10.20006/j.cnki.61-1363/P.2022.03.025).
- CHEN R, XIE F, LI C. Design and implementation of 3D geographic information visualization system based on Skyline[J]. *Geomatics Technology and Equipment*, 2022, 24(3): 129–134.
- [29] CHEN J, HU R, GUO X F, WU F. Building information modeling-based secondary development system for 3D modeling of underground pipelines[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 123(2): 647–660. DOI: [10.32604/cmes.2020.09180](https://doi.org/10.32604/cmes.2020.09180).
- [30] WANG M Z, DENG Y C, WON J, CHENG J C P. An integrated underground utility management and decision support based on BIM and GIS[J]. *Automation in Construction*, 2019, 107: 102931. DOI: [10.1016/j.autcon.2019.102931](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102931).
- [31] ZHANG H J, FAN L, WANG D Q, JIA J Y. Parameterization of complex pipeline meshes and its large-scale online visualization[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(8): 1489–1497. DOI: [10.16182/j.issn1004731x.joss.19-VR0468](https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.19-VR0468).
- [32] WANG X Y, HUO L, SHEN T, YANG X C, BAI H Y. A Web3D rendering optimization algorithm for pipeline BIM models[J]. *Buildings*, 2023, 13(9): 2309. DOI: [10.3390/buildings13092309](https://doi.org/10.3390/buildings13092309).
- [33] LUO S, YAO J Y, WANG S Q, WANG Y Z, LU G Y. A

- sustainable BIM-based multidisciplinary framework for underground pipeline clash detection and analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 374: 133900. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.133900](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133900).
- [34] MA F, GAO Y, ZHANG G E, HUANG C, CHEN W K. An underground pipeline relocation decision support system based on BIM and GIS integration[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2824(1): 012003. DOI: [10.1088/1742-6596/2824/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2824/1/012003).
- [35] TANG L, CHEN C, LI H T, MAK D Y Y. 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. DOI: [10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002323](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002323).
- [36] XU Z W, ZHANG C, ZHOU S H, YANG M H, WU H N, LI J F. GFNS: an OpenGL-based tool for shield tunneling simulation in 3D complex stratum[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 167: 106111. DOI: [10.1016/j.compgeo.2024.106111](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106111).
- [37] HAN H T, LI B, FU Y H, WANG T, ZHANG L, WEI Y L. Control and visualization of 3D pipe model based on OpenGL[C]. *Ma'anshan: 2022 5th World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM)*, 2022: 484–487.
- [38] BOUTSI A M, IOANNIDIS C, SOILE S. Interactive online visualization of complex 3D geometries[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-2/W9: 173–180. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-173-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-173-2019).
- [39] 刘斌, 孙喜龙, 吴宗生. 基于 MVC 模式的油气管道信息系统一体化设计[J]. *信息技术*, 2016(12): 101–106. DOI: [10.13274/j.cnki.hdzj.2016.12.023](https://doi.org/10.13274/j.cnki.hdzj.2016.12.023).
- LIU B, SUN X L, WU Z S. Integration design of oil and gas pipeline information system based on MVC mode[J]. *Information Technology*, 2016(12): 101–106.
- [40] BANDO Y, SUHARA H, TANAKA M, KAMEGAWA T, ITOYAMA K, YOSHII K, et al. Sound-based online localization for an in-pipe snake robot[C]. *Lausanne: 2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 2016: 207–213.
- [41] KAZEMINASAB S, JANFAZA V, RAZAVI M, BANKS M K. Smart navigation for an in-pipe robot through multi-phase motion control and particle filtering method[C]. *Mt. Pleasant: 2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 2021: 342–349.
- [42] SANTANA D D S, FURUKAWA C M, MARUYAMA N. Sensor fusion with low-grade inertial sensors and odometer to estimate geodetic coordinates in environments without GPS signal[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2013, 11(4): 1015–1021. DOI: [10.1109/TLA.2013.6601744](https://doi.org/10.1109/TLA.2013.6601744).
- [43] LI P F, WANG L, ZU Y T, BAI X S, HU Y B. Multi-sensor fusion method based on FFR-FK for 3D trajectory measurement of underground pipelines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 141: 105344. DOI: [10.1016/j.tust.2023.105344](https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105344).
- [44] WANG Q Y, CAI M C, GUO Z. An enhanced positioning technique for underground pipeline robot based on inertial Sensor/Wheel odometer[J]. *Measurement*, 2023, 206: 112298. DOI: [10.1016/j.measurement.2022.112298](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112298).
- [45] LIN P H, SUN J J, XU Y H, WU X M, ZHU Y G, ZHANG X J. Underground-pipeline mapping system based on inertial measurement unit: research and application[J]. *Measurement*, 2023, 222: 113634. DOI: [10.1016/j.measurement.2023.113634](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113634).
- [46] OLADOSU S O, MUHAMMAD M B M E, EHIGIATOR-IRUGHE R. Oil and gas pipeline corridor mapping in challenging terrain using LiDAR technology[J]. *FUOYE Journal of Pure and Applied Sciences*, 2022, 7(3): 77–84. DOI: [10.55518/fjpas.RQQN9758](https://doi.org/10.55518/fjpas.RQQN9758).
- [47] 梁周雁, 焦宁, 邓先睿, 姜海峰. 基于点云的管道三维自动建模方法研究[J]. *山东国土资源*, 2023, 39(9): 48–53. DOI: [10.12128/j.issn.1672-6979.2023.09.008](https://doi.org/10.12128/j.issn.1672-6979.2023.09.008).
- LIANG Z Y, JIAO N, DENG X R, JIANG H F. Study on pipeline 3D automatic modeling method based on point cloud[J]. *Shandong Land and Resources*, 2023, 39(9): 48–53.
- [48] HUANG M, WU X Y, LIU X L, MENG T H, ZHU P Y. Integration of constructive solid geometry and boundary representation (CSG-BRep) for 3D modeling of underground cable wells from point clouds[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1452. DOI: [10.3390/rs12091452](https://doi.org/10.3390/rs12091452).
- [49] AIJAZIAK, MALATERREL, TRASSOUDAINEL, CHATEAUT, CHECCHIN P. Automatic detection and modeling of underground pipes using a portable 3D LiDAR system[J]. *Sensors*, 2019, 19(24): 5345. DOI: [10.3390/s19245345](https://doi.org/10.3390/s19245345).
- [50] YIN C, CHENG J C P, WANG B Y, GAN V J L. Automated classification of piping components from 3D LiDAR point clouds

- using SE-PseudoGrid[J]. *Automation in Construction*, 2022, 139: 104300. DOI: [10.1016/j.autcon.2022.104300](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104300).
- [51] LI M H, FENG X, HAN Y, LIU X D. Mobile augmented reality-based visualization framework for lifecycle O&M support of urban underground pipe networks[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 136: 105069. DOI: [10.1016/j.tust.2023.105069](https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105069).
- [52] ZHANG D H, YANG Y. Development of a sectionalizing method for simulation of large-scale complicated natural gas pipeline networks[J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2024, 4(4): 100209. DOI: [10.1016/j.jpse.2024.100209](https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100209).
- [53] LI Z P, YANG L H. Implementation of the pipeline network virtual reality system[M]//LI Z P, YANG L H. *Pipeline Real-Time Data Integration and Pipeline Network Virtual Reality System*. Cham: Springer, 2021: 59–84. DOI: [10.1007/978-3-030-62110-0](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62110-0).
- [54] 蔺鹏杰, 王俊智. BIM 与 AR 结合在综合管线碰撞检查中的应用研究[J]. *科学技术创新*, 2023(2): 188–191. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1328.2023.02.045](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1328.2023.02.045).
- LIN P J, WANG J Z. Study on the application of combining BIM and AR in comprehensive pipeline collision inspection[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2023(2): 188–191.
- [55] SHEKARGOFTAR A, TAGHADDOS H, AZODI A, TAK A N, GHORAB K. An integrated framework for operation and maintenance of gas utility pipeline using BIM, GIS, and AR[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2022, 36(3): 04022023. DOI: [10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001722](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001722).
- [56] LIU M N, FANG S L, DONG H Y, XU C Z. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, 58(Part B): 346–361. DOI: [10.1016/j.jmsy.2020.06.017](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017).
- [57] LIANG J, MA L, LIANG S, ZHANG H, ZUO Z L, DAI J. Data-driven digital twin method for leak detection in natural gas pipelines[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2023, 110: 108833. DOI: [10.1016/j.compeleceng.2023.108833](https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108833).
- [58] LU H L, YU H, YAN S Y, LI S L. Key technologies study on digital twin platform for comprehensive utility tunnel[C]. Chongqing: 2024 IEEE 6th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 2024: 931–936.
- [59] LI W, Ding P, HUANG M, MIAO Q H. Applications of digital twins to offshore oil/gas exploitation: from visualization to evaluation[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(5): 738–743. DOI: [10.1016/j.ifacol.2021.04.166](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.166).
- [60] LI M H, FENG X, HAN Y. Brillouin fiber optic sensors and mobile augmented reality-based digital twins for quantitative safety assessment of underground pipelines[J]. *Automation in Construction*, 2022, 144: 104617. DOI: [10.1016/j.autcon.2022.104617](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104617).
- [61] ABA E N, OLUGBOJI O A, NASIR A, OLUTOYE M A, ADEDIPE O. Petroleum pipeline monitoring using an internet of things (IoT) platform[J]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(2): 180. DOI: [10.1007/s42452-021-04225-z](https://doi.org/10.1007/s42452-021-04225-z).
- [62] LI W, YE Z J, WANG Y J, YANG H L, YANG S L, GONG Z L, et al. Development of a distributed MR-IoT method for operations and maintenance of underground pipeline network[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 133: 104935. DOI: [10.1016/j.tust.2022.104935](https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104935).

(编辑: 黄星烨)

基金项目:国家重点研发计划项目“高压大口径油气管道泄漏应急处置技术与装备”, 2023YFC3011300; 国家自然科学基金青年基金资助项目“X80 高钢级管道环焊缝低强匹配韧脆断裂失效研究”, 12302100; 陕西省“三秦英才”优秀青年工程技术人才项目, 2023SYJ31; 陕西省秦创原高层次创新创业人才项目, QCYRCXM-2023-058; 西安交通大学青年拔尖人才项目, 11301223010729。

作者简介:刘鑫, 男, 2001 年生, 在读硕士生, 2023 年毕业于南京工业大学安全工程专业, 现主要从事埋地油气管道可视化与安全状态评估方向的研究工作。地址: 陕西省西安市碑林区咸宁西路 28 号, 710049。电话: 17791062309。Email: liuxin2023@stu.xjtu.edu.cn

通信作者:涂圣文, 男, 1988 年生, 副教授, 博士生导师, 2018 年博士毕业于挪威科技大学结构工程专业, 现主要从事油气管道、输氢管道结构安全完整性方面的教学、科研工作。地址: 陕西省西安市碑林区咸宁西路 28 号, 710049。电话: 13094235501。Email: shengwen.tu@xjtu.edu.cn

• Received: 2024-11-02

• Revised: 2024-12-17

• Online: 2025-01-03

