

数字化孪生技术在城市燃气管道全生命周期管理中的实践路径

张雪迎 孙佳佳 (山东一通工程技术服务有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 城市燃气管道作为城市能源供应的核心基础设施, 其全生命周期管理 (规划设计、建设施工、运行维护、报废更新) 的安全性及效率性直接关系到城市运转与民生保障。当前, 传统燃气管道管理面临信息割裂、风险预警滞后、运维成本高等问题, 难以适应智慧燃气发展需求。数字化孪生技术通过构建“物理实体-虚拟映射-数据交互”的闭环体系, 可实现对燃气管道全生命周期的动态感知、精准模拟与智能决策。

关键词: 数字化孪生; 城市燃气管道; 全生命周期管理; 智慧燃气; 实践路径

中图分类号: TU996.7+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 003-0104-03

The practical path of digital twin technology in the full lifecycle management of urban gas pipelines

Zhang Xueying, Sun Jiajia (Shandong Yitong Engineering Technology Service Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: As the core infrastructure for urban energy supply, the safety and efficiency of the full-life-cycle management (including planning and design, construction and implementation, operation and maintenance, decommissioning and renewal) of urban gas pipelines are directly related to urban operation and people's livelihood security. Currently, traditional gas pipeline management faces issues such as information silos, delayed risk early warning, and high operation and maintenance costs, struggling to meet the development needs of smart gas. By establishing a closed-loop system of "physical entity - virtual mapping - data interaction", digital twin technology enables dynamic perception, accurate simulation, and intelligent decision-making throughout the full life cycle of gas pipelines.

Key words: Digital Twin; Urban Gas Pipelines; Full-Life-Cycle Management; Smart Gas; Practical Pathways

管道管理面临“老旧管网多、覆盖范围广、工况复杂”的典型难题——传统管理模式依赖人工巡检、纸质档案, 存在“规划缺模拟、施工缺监控、运维缺预警、报废缺评估”的信息断层问题, 难以满足“全生命周期可控、全风险点可防”的管理目标。数字化孪生技术源于工业领域, 其核心是通过三维建模、物联网 (IoT)、大数据、人工智能 (AI) 等技术, 构建与物理实体实时同步、动态交互的虚拟模型, 实现“感知-模拟-决策-执行”的闭环管理。探索数字化孪生技术在燃气管道全生命周期中的实践路径, 不仅是破解传统管理困境的关键。

1 数字化孪生技术与燃气管道全生命周期管理的理论基础

1.1 数字化孪生技术的核心内涵与技术架构

数字化孪生 (Digital Twin, DT) 并非简单的“数字建模”, 而是具备“动态映射、数据驱动、智能决策”三大核心特征的技术体系。其核心内涵可概括为“三要素、四维度”。

①三要素: 物理实体 (燃气管道及其附属设施)、虚拟模型 (与物理实体 1:1 映射的数字模型)、数据

链路 (连接物理与虚拟的实时数据交互通道);

②四维度: 几何维度 (管道的空间形态、材质参数等静态属性)、物理维度 (管道的压力、温度、腐蚀速率等动态工况)、行为维度 (管道在不同环境下的运行状态变化)、规则维度 (管道管理的标准规范、风险预警阈值等)。

1.2 城市燃气管道全生命周期管理的阶段特征

城市燃气管道全生命周期可划分为“规划设计、建设施工、运行维护、报废更新”四个阶段, 各阶段管理目标与核心需求存在显著差异, 为数字化孪生技术的分阶段应用提供了明确导向。

①规划设计阶段: 核心目标是“科学布局、规避风险”, 需结合城市规划、地质条件、用户分布等因素, 优化管道路由与管径选择, 避免与其他管线 (给排水、电力) 冲突; ②建设施工阶段: 核心目标是“质量可控、进度可溯”, 需监控施工过程中的管道焊接质量、防腐处理、埋深合规性, 确保施工与设计一致; ③运行维护阶段: 核心目标是“安全运行、降本增效”, 需实时监测管道泄漏、腐蚀、第三方破坏等风险, 及时开展维修保养, 减少停气时间; ④报废更新阶段:

核心目标是“安全退役、资源优化”，需评估老旧管道的剩余寿命与拆除风险，制定科学的更新方案，避免环境污染与安全事故。

2 数字化孪生技术在燃气管道全生命周期管理中的实践路径

基于全生命周期各阶段的特征与需求，数字化孪生技术需通过“分阶段赋能、全流程贯通”的方式，构建覆盖管道从“诞生”到“退役”的全链条管理体系。以下结合济南港华燃气的管理实践需求，详细阐述各阶段的应用路径。

2.1 规划设计阶段：构建“虚拟预演”模型，实现科学决策

传统管道规划设计依赖经验判断与二维图纸，易因地质数据不准、管线冲突等问题导致后期返工。数字化孪生技术通过“虚拟预演”可提前规避风险，具体路径如下：①多源数据融合建模：整合济南城市GIS地图、地质勘察数据（土壤类型、地下水位）、现有管线数据（管径、材质、位置），构建“城市地下空间数字孪生底座”；在此基础上，基于BIM技术搭建燃气管道三维设计模型，明确管道路由、管径、阀门位置等参数，实现“地上-地下”空间关系的可视化呈现；②多场景模拟分析：通过虚拟模型开展“冲突检测”与“风险预演”；③冲突检测：模拟管道与给排水、电力管线的空间位置，自动识别交叉冲突点（如管道间距小于规范要求），生成优化方案（如调整路由或埋深）；④风险预演：结合济南雨季多雨、部分区域地质疏松的特点，模拟暴雨、地震等极端天气下管道的受力状态，评估路由选择的安全性，优先选择地质稳定区域；⑤用户需求匹配优化：导入济南各区域的用户分布数据（居民户数、工商业用气量），通过虚拟模型模拟不同管径管道的供气能力，优化管径选择（如市中心用户密集区采用DN300管径，郊区采用DN150管径），避免“大管小用”或“小管超载”。

2.2 建设施工阶段：打造“实时监控”闭环，确保质量与进度

建设施工是管道质量的“源头”，传统管理依赖人工巡检与纸质记录，易出现“质量隐患难发现、进度偏差难追溯”问题。数字化孪生技术通过“物理-虚拟”实时同步，实现施工全过程可控。

①施工过程动态映射：在施工设备（挖掘机、焊接机）上安装GNSS定位与传感器，在管道焊接点、防腐层等关键部位粘贴RFID标签，实时采集施工位置、焊接温度、防腐厚度等数据；将数据同步至虚拟模型，动态更新管道施工进度（如“已焊接300m，完成总进度60%”），实现“施工到哪里，虚拟模型更到哪里”；

②质量实时管控：通过虚拟模型设置质量阈值（如焊接温度需 $\geq 1500^{\circ}\text{C}$ 、防腐层厚度需 $\geq 3\text{mm}$ ），当传感器采集的数据超出阈值时，系统自动报警并定位问题位置（如“K1+200处焊接温度 1420°C ，不达标”），施工人员可及时整改，避免质量隐患留存；③进度偏差预警：在虚拟模型中设置施工计划基线（如“每日焊接50m”），实时对比实际进度与计划进度，当偏差超过10%时（如“实际每日焊接40m”），系统自动分析原因（如设备故障、人员不足）并推送预警信息至管理人员，辅助调整施工方案。

2.3 运行维护阶段：建立“智能预警”体系，保障安全高效

运行维护是管道全生命周期中持续时间最长、管理难度最大的阶段，传统“人工巡检+定期检测”模式存在“覆盖范围有限、风险发现滞后”问题。数字化孪生技术通过“实时感知+智能分析”，实现风险精准预警与运维优化。

①全工况实时监测：在管道沿线布设物联网传感器（压力传感器、甲烷泄漏传感器、腐蚀传感器），在阀门井安装视频监控，实时采集管道内压力、泄漏浓度、腐蚀速率等数据；将数据同步至虚拟模型，通过颜色编码可视化呈现运行状态（如“绿色=正常，黄色=预警，红色=报警”），管理人员可通过平台实时掌握全网工况；②风险智能预警与诊断：基于历史运维数据（如济南近5年管道泄漏案例）训练AI预警模型，通过虚拟模型开展“风险模拟分析”；③泄漏预警：当某区域甲烷浓度超过阈值时，系统自动定位泄漏点（误差 $\leq 5\text{m}$ ），并模拟泄漏扩散范围（结合风速、地形），推送预警信息至巡检人员，指导快速处置；④腐蚀预警：根据腐蚀传感器采集的数据，在虚拟模型中预测管道剩余寿命（如“K3+500处管道剩余寿命5年”），提前制定防腐维修计划，避免突发爆管；⑤运维优化调度：当管道出现故障时，通过虚拟模型模拟不同维修方案的影响（如“关闭A阀门会影响1000户居民供气，关闭B阀门仅影响200户”），辅助选择最优方案；同时，结合巡检人员实时位置（通过手机APP定位），智能调度最近人员前往处置，缩短维修时间。

3 数字化孪生技术落地的挑战与对策

尽管数字化孪生技术为燃气管道管理提供了全新路径，但在企业的实践中，仍面临“数据融合难、成本投入高、人才适配不足”等现实挑战，需针对性突破。

3.1 挑战 1：多源数据融合难度大，数据标准不统一

问题表现：燃气管道全生命周期数据来源分散（设计阶段的BIM数据、施工阶段的RFID数据、运维阶

段的传感器数据)，且数据格式不统一（如 BIM 数据为 .ifc 格式，GIS 数据为 .shp 格式），导致“数据孤岛”，难以支撑虚拟模型的动态更新。

对策建议：①建立统一数据标准：参考《城镇燃气数字化管理技术标准》（CJJ/T 292-2021），制定企业级“燃气管道全生命周期数据规范”，明确数据采集范围（如管道材质、压力、温度）、格式（统一采用 JSON 格式）、更新频率（如实时数据每 10 s 更新，静态数据每月更新）；②构建数据中台：搭建燃气管道“数据中台”，通过 ETL（抽取-转换-加载）工具整合多源数据，实现“一次采集、多方复用”；例如，将施工阶段的 RFID 数据转换为标准格式后，同步至运维阶段的虚拟模型，避免重复采集；③推动跨部门数据共享：在济南港华内部建立“数据共享机制”，打破设计部、工程部、运维部的数据壁垒，明确各部门的数据权责（如设计部负责提供 BIM 基础数据，运维部负责提供实时工况数据），确保数据全流程贯通。④聚焦“核心需求”降本：优先开发核心功能模块（如运行维护阶段的风险预警），暂缓非必要功能（如复杂的三维动画展示），以“最小投入实现最大效益”。

这种降本策略本质是基于燃气管道全生命周期管理的核心目标与资源适配性的精准权衡。从燃气企业实际运营需求来看，运行维护阶段作为管道全生命周期中持续时间最长、风险隐患最集中的环节，其风险预警功能直接关联管道安全与运维成本——传统模式下因风险发现滞后，单次泄漏事故的处置成本、停工损失往往高达数十万元，而优先开发风险预警模块，能通过实时监测泄漏、腐蚀等风险，将事故遏制在萌芽阶段，仅这一项功能就能为企业减少大量隐性损失，实现“投入即见效”。反观复杂的三维动画展示，虽能提升虚拟模型的视觉效果，但对管道安全运行、成本控制的直接赋能作用有限，短期内难以转化为实际效益，尤其对于资金压力较大的区域燃气企业，暂缓此类功能可避免资源错配，将有限资金集中投向能直接解决“安全痛点、成本难点”的核心领域。

从长期落地来看，这种“先核心后拓展”的路径还为数字化孪生技术的渐进式推广奠定基础——企业可先通过核心功能模块验证技术价值，积累数据与运维经验，待资金条件成熟、管理需求升级后，再逐步完善非必要功能，形成“小步快跑、持续迭代”的良性循环，既降低了技术落地的初期门槛，也确保每一笔投入都能精准服务于管道全生命周期管理的“安全与效率双提升”目标。

3.2 挑战 2：技术投入成本高，中小企业难以承担

问题表现：数字化孪生技术涉及传感器、数据中

台、虚拟建模等硬件与软件投入，初期成本较高（如一套中等规模的系统投入约 500-1000 万元），对于部分区域燃气企业而言，资金压力较大。

对策建议：①分阶段、分区域投入：采用“试点-推广”模式，优先在风险高、规模大的区域（如济南老城区、商业核心区）落地，总结经验后逐步推广至全城，降低一次性投入压力；②探索“政企合作”模式：联合济南市政府申请“城市智慧管网”专项补贴，或与华为、阿里等科技企业合作，采用“共建共享”模式（企业提供场景与数据，科技企业提供技术支持，收益按比例分成）；③聚焦“核心需求”降本：优先开发核心功能模块（如运行维护阶段的风险预警），暂缓非必要功能（如复杂的三维动画展示），以“最小投入实现最大效益”。

4 结论

城市燃气管道全生命周期管理的数字化转型是智慧燃气发展的必然趋势，数字化孪生技术通过“虚拟映射、数据驱动、智能决策”，为破解传统管理中的“信息割裂、风险滞后、成本高昂”问题提供了有效方案。本文从规划设计、建设施工、运行维护、报废更新四个阶段，构建了数字化孪生技术的实践路径，核心在于：以“全生命周期数据”为基础，以“分阶段赋能”为策略，以“安全与效率双提升”为目标，实现管道管理从“经验驱动”向“数据驱动”的转变。

对于燃气企业而言，数字化孪生技术不仅是提升管道安全保障能力的工具，更是实现战略的重要支撑——通过技术落地，可逐步构建“济南城市燃气数字孪生体”，为城市能源安全与民生保障提供坚实基础。未来，随着技术成熟度提升与成本下降，数字化孪生技术将在更多燃气企业推广应用，推动我国城市燃气管道管理进入“全生命周期智能管控”的新阶段。

参考文献：

- [1] 张育雄, 姜约翰. 数字孪生技术赋能城市全域数字化转型的路径分析 [J]. 中国建设信息化, 2025, (13): 48-51.
- [2] 霍震. 数字孪生技术驱动下的油田注水精细化管理研究 [J]. 化学工程与装备, 2025, (03): 85-88.
- [3] 刘建, 王艳. 数字化孪生技术在城市燃气管道运维中的应用研究 [J]. 煤气与热力, 2022, 42(11): 1-5.
- [4] 张士伟, 李刚. 基于 BIM+GIS 的燃气管道数字孪生模型构建与应用 [J]. 测绘通报, 2023(05): 142-146.
- [5] 冯耀宇. 天然气长输管道泄漏检测技术的研究与应用 [J]. 石化技术, 2025, 32(09): 184-186.