

数字孪生在城市燃气施工运维管理中的应用

王艺霖, 王海智

(北京邮电大学数字媒体与设计艺术学院, 北京 100876)

摘要: 城市燃气管网作为城市基础设施的重要组成部分,是衡量城市能源供应能力和现代化水平的重要指标,但随着地下燃气管网系统的日益复杂,传统的燃气运维管理已很难满足如今的需求。数字孪生技术具备实时同步、忠实映射和高保真度的特点,能够实现物理世界与信息世界的交互融合。提出城市燃气数字孪生系统设计思路及原则,并构建管理平台进行实践,证明数字孪生技术在燃气管网施工管理中具有显著优势及应用价值。

关键词: 燃气; 数字孪生; 燃气运维; 运维管理

中图分类号: TP399; TU996.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)21-0218-07

随着城市燃气管网系统日益复杂,管网里程不断增加,燃气管网的运维难度也愈发加大。城市燃气管网隐蔽工程数量众多,这些地下管道状态不易被观测、数据难以被记录,导致应急抢修事件频发,为燃气管网的运维管理带来了多重挑战,增加了燃气企业管网常规运营的难度。在2021年中国电信、天翼物联产业联盟智慧燃气产业推进组联合各大燃气产业共同撰写的《5G智慧燃气白皮书(2021版)》中提到,数字化转型将成为城市燃气企业未来转型的主要方向^[1],而数字孪生技术具备了实时同步、忠实映射和高保真度等特性,利用数字化技术赋能管网管理的创新和变革,能够有效解决地下管网不可视的难题,提高燃气管网建设、运营和应急效率,保障城市供气安全。

尽管有关数字孪生技术的研究在近几年取得了较大的进展,应用领域也在不断扩大,但在燃气管理方面的应用研究依然相对较少。因此,有必要探究数字孪生技术在燃气施工运维管理中具有哪些潜在优势、能够解决哪些问题,以此为依据提出一套城市燃气数字孪生系统的构建方案并进行应用实践。研究结果不仅凸显了数字孪生技术在燃气施工管理中的应用价值,也为燃气企业的数字化转型提供了重要的理论支持和实践参考。

1 城市燃气管网施工运维过程中面临的主要问题

城市燃气管道作为关键的基础设施,在保障现

代城市的能源供给、促进环境保护以及提升居民生活质量方面发挥着不可或缺的作用。据统计,截至2022年,中国建设天然气管道总长已突破98万km,城镇燃气天然气年供气量达1767亿m³,全国城镇燃气普及率98.06%,用气人口达到4.57亿人^[2],覆盖了全国大部分城市和城镇。随着城市化进程的加快,城市燃气建设和使用范围也不断扩大,而由于燃气管网特殊的性质和高风险性^[3],其安全性一直备受公众的广泛关注。因此,保障城市燃气管道的安全管理显得尤为重要,而目前管网管理的各环节仍面临着环境信息难感知、运行数据难掌握、应急维修难决策等挑战。

1.1 环境信息难感知

在室外燃气管道的建设过程中,尤其是在错综复杂的地下环境中,管道的铺设工作是极为复杂艰难的任务,易受到不利气候条件和外部环境的影响,而诸如交通、地质和水文等环境因素更会影响工程进展^[4],因此对地下环境信息的精确了解和掌握对确保施工顺利进行、保障施工工程质量至关重要。但随着地下管网规模的日益庞杂,再加上地下环境的复杂性和多变性,往往导致工程前期对施工环境的考察面临着数据资料不准确或不完整的问题。施工人员又通常依赖前期考察所绘制的平面图纸来理解地下环境,这种二维信息的局限性更易导致对现有管道位置的认识模糊,使后续的管道设计和施工作业阶段出现环境风险评估失误、管道材料选择不当以及意外损伤现有地下管道等问题,进

收稿日期: 2024-06-12

作者简介: 王艺霖(2000—),女,北京人,硕士研究生,研究方向为设计学;通信作者王海智(1980—),男,北京人,博士,副教授,研究方向为数字媒体内容、叙事学。

而影响城市管网的运行安全,并为后续的管网运营管理埋下诸多潜在的风险和隐患。

1.2 运行数据难掌握

城市燃气管道运维管理的主要问题在于管网数据的管理与运行状态的监控。传统的管网数据采集工作流程烦琐,且城市燃气管网规模庞大、布局错综复杂,整体结构呈现出较高的复杂性,导致常见数据错误、丢失和泄露等问题,影响管网数据的完整性和准确性,降低管网数据管理的质量和效率。此外,城市燃气管道通常深埋于地下,位置的隐蔽性使得其运行状态不易被直接观察^[5],管网泄漏、防腐层破坏等问题不易被及时发现,往往需要依赖周期性的检验才能识别,导致安全隐患的滞留周期延长,安全风险随之加剧。而近年因管网运行隐患不查导致的燃气事故更是频发:2021年1月25日,辽宁省大连市金普新区友谊街道管道底部缺乏土壤支撑,管道开裂处防腐涂层缺失,导致管道开裂泄漏,引发爆炸事故造成3人死亡;2021年6月13日,湖北省十堰市艳湖小区就因天然气中压钢管长期腐蚀且未被及时发现处理,最终导致管道破裂,引发天然气爆炸并导致26人死亡,等等。可见管网状态监控的困难与运行数据的缺失都会对公众安全造成威胁。

1.3 应急维修难决策

在燃气运维领域,抢险维修工作常常受到复杂多变的地下环境影响,导致应急响应的时效性不足。地下燃气管网的隐蔽性和复杂性不仅妨碍了管道施工和运行监测,也对维修抢险人员在紧急情况下准确理解和评估信息的能力提出了更高的要求。由于管网事故往往具有突发性,难以对潜在隐患进行提前预测和有效预防,这就要求应急人员在有限的时间内快速评估事故的严重程度,做出明智的应急决策,并立即前往现场采取行动。在这种情况下,事故现场管网的空间布局、损坏位置以及事故规模等信息的准确性成为应急人员能否迅速、准确、有效制定应急策略的关键因素。此外,事故处理往往需要跨部门协作,且进行维修维护工作时所需遵循的合法挖掘程序既复杂又耗时,迫使燃气公司不得不投入远超常规水平的人力、物力和财力资源来完成管道维修维护^[6]。

2 数字孪生技术如何解决城市燃气管道施工运维中的问题

如何提升对地下管网信息的感知能力和运维管理水平,已经成为燃气管理领域一个亟待解决的

问题,需要借助新技术手段来助力增强人员与地下管网状态的实时联系。在这种情况下,数字孪生技术的引入提供了一种创新的方法来应对这些挑战,使管道的状态监测和问题诊断变得更加直观和高效。数字孪生(digital twin)通过数字化手段构建物理实体的精确虚拟副本,融合模型、数据、智能等技术,实现物理世界与数字世界之间的无缝对接,提供即时、高效且智能化的服务^[7],近年来中外关于数字孪生的研究已逐渐成熟,应用领域也在不断拓展^[8]。而利用三维建立的地下管网数字孪生体,能够精确地模拟管网实体的属性、行为和性能,为隐蔽的地下管网提供一种新的可视化形式。此外,通过创建的数字孪生副本,能够实现对管网的实时监控,并利用这一数字模型来评估和预测管道的性能,借助现实与虚拟环境的互动交流帮助相关人员全面感知管网状态,解决管网环境不清晰、状态难把控、信息难获取的问题,为管网施工运维决策提供有力支持。

2.1 管网的信息可视

借助构建的地下管网数字孪生体,为不可见的地下管网提供一种可视化的手段,从而让操作人员能够以直观的方式获取地下管网的多方面信息。通过虚拟实体映射管道的布局和运行状态,使管网及其附属设施信息与现实世界一一对应,将原本“看不到、摸不着”的地下燃气管网在数字世界里直观呈现,实现管网信息的全面可视化。让人员能够清晰地了解管道的走向、连接方式和周围环境,并在虚拟环境中全面模拟和分析管网情况,显著提升城市燃气管网管理的可控性、透明度和效率,助力城市燃气系统的安全、稳定运行。

2.2 便捷的数据采集

通过传感器技术对管网状态进行实时监控,反映燃气系统的运行状态,实时捕捉管网动态数据、管道运行数据、周遭环境数据等信息,并结合边缘计算进行实时处理和分析,节省人工测量记录成本。在燃气事故发生时,借助采集而来的数据协助人员快速定位并采取相应措施减少损失,突破传统运维监控的现实限制,使得复杂的工作流程能够在虚拟环境中得以简化,在提高效率的同时,为燃气管道的安全管理提供了更为便捷和可靠的手段。

2.3 实时的交互操作

数字孪生技术构建的精细虚拟三维模型,赋予了运维人员对管网进行全方位实时审视、分析和交互的能力,通过旋转、缩放等灵活的操作,人员能够

从不同角度查看和理解燃气系统的构造,洞察管道的复杂结构和关键功能。同时,结合现场环境的具体数据和管网运行的实时信息,运维人员得以在虚拟空间中细致追溯现场的每一个环节,而借助真实世界与虚拟世界的双向交互,能够增强运维人员的信息物理交互融合能力^[9],有助于快速识别问题所在并规划维护工作,提升提高运维效率,提高燃气管网的质量和安全性。

2.4 形成一体化管理

数字孪生技术的引入,能够实现对燃气企业信息、设备设施、燃气管网、供气状况以及异常情况监控等内容的集成管理^[10]。同时,将设计勘察资料、施工信息、智能监测数据等关键数据集中汇总并整合至统一平台,构建一个集综合监测、智能分析、辅助决策与数据管理功能于一体的智慧城市管网共享平台,形成可视化的燃气运营管理体系,从而清晰地掌握城市地下管网的运行状况,实时监控潜在的安全隐患,实现对城市燃气管网的可控化、数字化、信息化的一体管理。

3 城市燃气管网数字孪生系统的建设思路及系统特征

城市燃气管网数字孪生系统是将数字孪生技术应用于燃气管理中,旨在构建一个虚拟的、与实体燃气管网一一对应的数字模型,实现管网的三维可视化和数据整合,形成一个集监测、分析、决策与管理功能于一体的城市管网信息管理平台,解决城市燃气面临的数据获取与管理难题。利用数字孪生技术构建系统时,应最大限度地发挥现有数字基础设施的作用,为用户提供一个全面的运维管理体系,涵盖从前期调研、数据管理到运维决策的各个环节,达到数据与技术的深度融合、对管网状态的实时可视感知、对异常情况的智能预判、运行数据的分析优化等燃气施工运维需求,实现全面掌握城市地下管网实际情况、完善管网数据信息化管理、实时监测事故隐患,形成从“智能感知到智能监测、智能防范、智能处置、智能优化”的全过程智能化管理。

为实现上述功能,系统应具备以下特征。

(1)实时映射。数字孪生模型必须是物理实体的精确映射,模型的构造和属性应与现实物体一致(包括管道布局、设备配置、运行状态等),以保证数据的准确性和可靠性。同时,通过传感器等形式实时收集数据,并同步至虚拟模型中,确保数字孪生体始终反映管网的实际状态。

(2)信息全面。为实现管网施工运维的全流程管理,系统应做到信息高度综合,需要包含管网的基础设施信息,如管道的长度、直径、材质和连接方式;建设施工信息,如现场环境、施工前后对比、施工器材;运行状态数据,如服役年限、检修数据、运行压力和温度等。

(3)数据安全。系统应具备强大的安全措施,在设计和运行时高度重视数据安全和系统的可靠性,防止管网数据泄露或被恶意篡改,确保城市燃气管网的安全运行和关键基础设施的信息安全。

(4)智能分析。系统应集成先进的数据分析和人工智能技术,通过全面、精准的分析计算,协助预防管网出现隐患,辅助运维人员做出科学决策,保证快速响应和高效运行,实现对管网信息的处理与分析,确保系统的智能化水平。

(5)用户友好。系统应注重用户体验,配备有用户友好的可视化界面,提供简洁直观的操作界面和流程,确保所有用户,无论其技术熟练程度如何,都能有效地与数字孪生系统交互,以减少用户的操作负担,提高工作效率。

4 系统建设与实践——数字化管道施工信息管理平台

以上述理论框架为基础、数字孪生技术为依托开展系统搭建,针对隐蔽工程管网纵横交错、分布复杂的特点,搭建数字化管道施工信息管理平台。目前系统已具备对管网数据的全面管理能力,在确保提供准确、及时的信息的同时,保护数据不受未授权访问和破坏,实现城市燃气的智能数据管理。平台不仅创新性地建立了燃气管道稳态运行评估方法,还提出了一个涵盖户内、户外、地下多维数据的采集、记录和建模的信息管理系统,实现了工程施工可视化管理、数据分析和信息交互等关键功能,显著提升了城市燃气工程的建设和运营的效率 and 可控性。

数字化管道施工信息管理平台总体构架的纵向结构由感知层、数据层、平台功能层及应用层搭建(图1)。其中感知层为系统的最底层架构,负责获取各类原始数据。原始数据在通过清洗、分类和归档后形成数据层,并作用于平台功能层,提供各类功能与服务,最终在应用层实现用户与系统的交互,为城市燃气管网提供科学决策支持。

4.1 系统界面设计

数字化管道施工信息管理平台基于 Unreal Engine 软件进行系统框架搭建(图2)。在前期规划

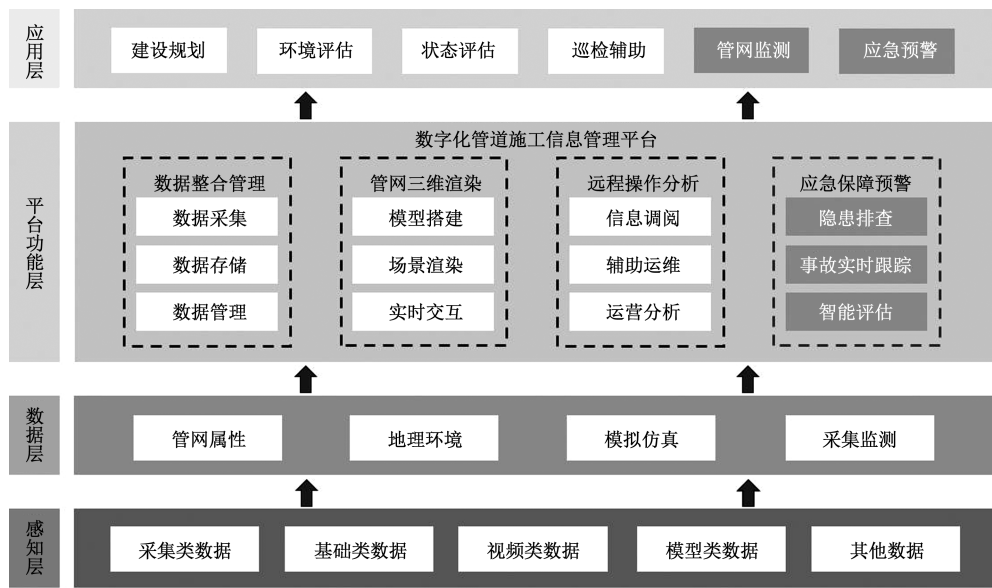


图1 数字化管道施工信息管理平台总体结构体系



图2 数字化管道施工信息管理平台界面设计

时考虑到主要服务对象为行业内专业人员,因此在界面设计上,项目组秉承用户友好性设计原则,为用户提供简洁直观的操作界面。在主界面中,用户可以清晰地查看项目信息、施工管线缩略图、三维还原的现场施工地点以及施工地点环境影像资料。在界面颜色的设计上,团队选择蓝色作为主色调,象征信任、稳定和专业,强调系统的可靠性、精准度和专业水平,同时体现系统的技术特性和创新理念。

4.2 系统主要功能

目前,系统仍在不断开发优化,已实现管网数据融合、三维场景交互、信息调阅分析的功能,为用户提供全面且深入的数据支持。

(1)管网数据整合。高质量的基础数据是确保数字孪生技术的有效应用的关键,因此对信息的精确收集与细致整理是确保进行管网信息准确性、真实性的关键所在。系统通过整合管网空间

数据、现场影像记录数据、远程实时传输数据、管网三维搭建数据等信息,并依照工程类型对信息进行分类后导入系统,为系统后续功能的实现提供了数据基础,使模型能够真实反映现实世界中的管网状态。同时,为了进一步提升平台的数据整合存储能力,项目组已成功研发并获得了多项软件著作权,包括互联网数据在线存储系统、视频图像信息管理平台、数据存储数据库云平台等,覆盖数据采集、存储和管理的各个环节,为平台提供了坚实的技术支持,大幅提升了平台的数据处理运行效能。

(2)三维场景交互。依托采集到的翔实数据,运用三维建模技术,构建与实际物理实体严格对应还原的燃气管道三维数字孪生模型(图3),为用户提供直观的视觉展示,使复杂的管道网络和其周围环境更容易被理解。在模型构建过程中,项目组采取了从单元级、系统级到复杂系统级的逐步构建策略,确保了虚拟模型在不同层面和各个方面的精确度,实现数据的精准映射。在建模内容上,团队不仅建立了燃气系统的几何模型(包括管网口径、走向、埋深等),还涵盖物理模型(如管网材料属性)和行为模型(如操作阀门、燃气表等),以实现系统全面的仿真模拟。同时,系统为用户提供了模型、图像、视频等多维度的信息查询和可视化展示功

能,用户可通过点按管道查看管道材质、管径、工艺等信息,轻松了解燃气管道系统状态,从而做出更加精准和高效的决策。

(3)信息调阅分析。在这一功能下细分为4个板块:管道基本信息板块、现场环境追溯板块、作业前后对比板块、重要信息分析板块。在管道基本信息模块,用户能够获取管道的施工信息、管道尺寸、应用设备等基础工程属性,了解管道埋设深度、接口设计等工艺细节,直观了解管道信息。现场环境追溯模块使用360°全景技术,提供无死角、高清晰的工程现场资料,确保用户能够全方位地追溯工程现场信息。在作业前后对比模块,用户通过系统存储复现的施工前后三维对比,可直观观察施工位置变化、作业方式和最终工程效果,帮助用户准确评估施工质量。重要信息分析模块则为用户提供统计分析工具,帮助运维人员迅速了解管道运行情况和存在的问题,从而制定科学的管道维护和管理计划。

4.3 系统应用成效

目前,数字化管道施工信息管理平台(图4)已获10项软著,包括互联网数据在线存储系统、分布式集群存储管理软件、视频图像信息管理平台、多层信息智能终端管理系统、数据存储数据库云平台等,从数据采集、数据存储、信息调用、辅助抢险交



图3 三维管道还原及场景交互



图4 系统管道信息交互展示

互动数据支持等多方面增强平台数字化赋能。基于上述平台已具备的功能,结合某企业的地下管网信息管理需求展开了系统的应用实验。截至2023年底,已在20个管道施工和应急抢修现场的50余个采集点位收集数据,并将实时传输数据与三维孪生体相结合,成功构建了一个全面的燃气管网全流程信息记录系统,该系统不仅覆盖了户内户外、地上地下的施工成果,还能够实时监控和记录管网的各种参数。

在数据管理方面,自动化数据记录和信息检索功能极大提高了管道运营数据的调阅速度和精度,该企业平时进行管网信息调阅通常须花费1~2 h,在平台应用后信息检索速度和准确性提升了90%,显著提升档案检索效率,推动管网数据存储管理从传统的纸质化模式向主动化、智能化形式转变。在辅助巡检方面,依托系统存储的管网数据,利用二三维一体的可视化呈现方式,实现对管网的地上地下分布态势、坐标、走向、管网实时运行情况、管廊管线健康状态等信息的分析处理,全面反映管网的实际运行状况,有效协助企业操作人员巡检,极大地提升了巡检工作准确性、安全性及效率性。实践应用表明,数字化管道施工信息管理平台能够帮助相关人员更加全面地感知和理解管网,在数据存储、分析、展示和管理等方面满足了城市地下管网

施工运维的需求,为城市基础设施的长期可持续发展提供了有力的技术支持,并展现了数字化技术在现代城市建设中的巨大潜力。

5 后续功能规划与展望

未来,项目组将重点针对提升抢险抢修效率进行功能设计。预计将实现对燃气系统的物理实体进行风险预测,全面监测管道状态,对异常情况进行精确分类和定位,并对高风险故障发出提示,从而提前采取预防措施。在抢修阶段,实现对事故现场的实时详细展示,涵盖事故的来源、类型、所属区域和当前状态等信息,并通过系统智能分配指派责任人,实现实时监控事件处理工单的流转情况,展示处理人员、业务承载量、工单进度和预计完成时间等信息。平台应用效果见表1。

通过这些针对性的设计,做到多源式的智能感知、工单指令精准下发、处置进度实时跟踪以及事件办结智能评估,确保全流程的可视化和可追溯,有效提升事件处置效率,并实现“事前、事中、事后”全过程分析,提高隐蔽工程施工的精确性,使操作更加安全、迅速,实现高效的抢险抢修作业,促进管网监管从传统的“被动响应”“事后处理”和“依赖人力”模式,转变为“主动侦测”“事先预警”“智能化管理”的新模式^[11],保障城市基础设施的稳定运行和公共安全。

表 1 数字化管道施工信息管理平台应用效果对比

对比项	常规管理	数字平台
管网信息检索	档案管理人员人工调阅	平台数据快速查阅
管网环境查询	依赖人工考察绘制的二维平面图纸	三维模型还原
管网巡检	定期人工巡检	后台管网数据实时监测
管网维护保养	需要人工监测管网数据信息	平台基于实时数据进行分析,降低人工成本
管网应急抢修	维修人员难以摸清事故详情	对事故情况进行分类定位,智能分配责任人员,实时反馈事故现场

6 结语

针对目前城市燃气施工运维管理中存在的问题,基于数字孪生技术提出了城市燃气管网数字孪生系统的建设理论,并将开发系统投入实际应用中,验证了数字孪生技术在燃气管理中的应用效果。目前平台的建设和打造还有一些没有打破的技术壁垒,但数字孪生技术的引入为解决燃气管理问题找到了新的突破口。而随着各地推行绿色低碳战略,燃气行业面临的经济、民生和城乡发展需求日益增长,城市燃气的大规模数字化转型将是未来发展的必然趋势。随着技术进步和应用深化,数字孪生技术将为城市燃气管道的安全高效运行提供强有力的技术支撑,推动城市燃气行业向智能化和数字化转变的速度,促进跨部门、跨领域的协同

合作,提升燃气行业的运营效率和安全性,加速推进城市智慧化建设进程。

参考文献

[1] 中国电信. 5G 智慧燃气白皮书 2021 版[R/OL]. (2021-10-28) [2024-05-26]. <https://13115299.s21i.faiusr.com/61/1/ABUIABA9GAaGvaSDjQYo5eCuGQ.pdf>.

[2] 段玄. 城镇燃气管网生命线安全监测系统应用与实践[J]. 中国建设信息化, 2024(11): 48-51.

[3] 张琰. 燃气管道工程质量与安全技术管理措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(16): 66-68.

[4] 郑志杰. 燃气管道施工工艺及注意事项研究[J]. 中国设备工程, 2024(8): 138-140.

[5] 胡劲, 房艳立. 城镇燃气设计和施工中存在的问题及改善对策[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(10): 61-63.

[6] 王文想. 城市燃气管道基础管理现状与对策[J]. 城市燃气, 2023(2): 43-47.

[7] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.

[8] 王亚彬, 王帅, 王金帽, 等. 基于数字孪生的装备保障关键技术研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(28): 12233-12241.

[9] 李明昊, 冯新. 基于增强现实的管网安全评价数字孪生方法[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 525-535.

[10] 范杰文, 金铭, 汪志星. 数字孪生赋能燃气管网[J]. 中国电信业, 2022(9): 23-27.

[11] 张佳宁, 丁冬. 数字孪生打造城市地下智慧管网[J]. 中国电信业, 2022(10): 66-69.

Application of Digital Twins in City Gas Construction Operation and Maintenance Management

WANG Yilin, WANG Haizhi

(School of Digital Media and Design Arts, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: As an important part of urban infrastructure, the city gas network is an important indicator of the city's energy supply capacity and modernisation level, but with the increasing complexity of the underground gas network system, the traditional gas operation and maintenance management has been difficult to meet today's needs. Digital twin technology has the characteristics of real-time synchronisation, faithful mapping and high fidelity, which can realise the interactive integration of the physical world and the information world. The design ideas and principles of the city gas digital twin system were put forward, and a management platform for practice was built, which proves the significant advantages and application value of the digital twin technology in the construction and management of gas pipeline network.

Keywords: gas; digital twin; gas operation and maintenance; operation and maintenance management