

数字孪生技术在天然气输气站安全管理中的实践

张 静 (江西省天然气投资有限公司, 江西 南昌 330000)

摘要: 本文以数字孪生技术在天然气输气站安全管理中的应用及发展趋势为研究对象, 运用文献研究、现状分析与效果分析方法, 分析其在数字孪生技术概述、天然气输气站安全管理现状呈现法规执行、数据应用、应急水平等问题、技术实施效果及未来发展趋势探索过程中的表现。旨在提出数字孪生技术深化应用的针对性建议, 提升天然气输气站安全管理的精细化、智能化水平与本质安全能力, 为行业安全管理体系优化与高质量发展提供参考。

关键词: 数字孪生技术; 天然气输气站; 安全管理; 实践

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0160-03

Practice of Digital Twin Technology in Safety Management of Natural Gas Transmission Stations

Zhang Jing (Jiangxi Natural Gas Investment Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330000, China)

Abstract: This article takes the application and development trend of digital twin technology in the safety management of natural gas transmission stations as the research object, and uses literature research, current situation analysis, and effect analysis methods to analyze its performance in the overview of digital twin technology, the implementation of laws and regulations in the safety management of natural gas transmission stations, data application, emergency level and other issues, technical implementation effects, and exploration of future development trends. Aiming to propose targeted suggestions for deepening the application of digital twin technology, enhance the refinement, intelligence, and intrinsic safety capabilities of natural gas transmission station safety management, and provide reference for optimizing the industry's safety management system and promoting high-quality development.

Keywords: digital twin technology; Natural gas transmission station; Safety management; practice

近年来, 伴随城市化推进和能源结构转型, 天然气输气站需要应对设备老化、操作流程繁琐以及突发状况处理复杂等多项难题, 传统安全管理方式逐渐难以适应现代化要求。信息技术的快速发展, 尤其是数字孪生技术的出现, 为解决这些难题开辟了新途径, 借助构建虚拟数字化模型, 该技术能够对实际系统进行持续监测、风险预测和运行优化, 从而帮助提前发现隐患, 加强事故应对效率, 保障输气站平稳安全运转。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术借助虚拟模型对实体系统进行数字化再现和动态映射, 属于一类比较先进的技术手段。这一技术涵盖对物理实体、过程与系统的数字化建模, 同时融合实时数据采集与分析, 形成虚实结合的数字双胞胎形态。其基本结构大致包括三块内容: 物理实体本身、对应的数字模型以及承担双向通信功能的连接平台。伴随信息技术不断进步, 数字孪生从早期简单的虚拟模拟逐步演变, 融合了大数据、云计算、物联网与人工智能等多种技术, 借助这项技术, 人们能对复杂系统展开实时监控、预测分析和优化决策, 为工业生产与基础设施管理等诸多领域带来重要变革。数字孪生的应用范围持续扩展, 借此来增强安全性、

提升效率并推动智能化水平不断提高。

2 天然气输气站的安全管理现状

2.1 法规标准较完善, 执行仍需加强

我国已经形成一套以《安全生产法》《石油天然气管道保护法》和《城镇燃气管理条例》等法律条文为基础, 配合 GB50183《石油天然气工程设计防火规范》、GB50251《输气管道工程设计规范》这类国家和行业标准作为支撑的安全监管体系。在“工业互联网+安全生产”这类政策推动下, 数字化监控和智能预警方面的要求变得更为明确。从实际情况看, 大型国有管网企业以及多数城市输气站已经建立起规范的 HSE 管理体系, 各类规章制度和操作流程文件也较为完备。不过在一些基层场站或建设时间较早的站点, 标准落实有时并不彻底, 比如巡检记录容易变成走过场, 设备维护周期因为生产任务紧张而被拉长, 新出台或修订的标准内容未能及时学习和使用。此外, 面对第三方施工破坏方式不断变化、极端天气现象增多等新型风险, 现有标准在具体应对措施和快速响应机制上还需要进一步充实。

2.2 数据深度应用与本质安全短板并存

现代化输气站普遍借助 SCADA 系统完成远程监控与数据采集任务, 关键参数能实时跟踪, ESD 紧急

切断功能也基本成为必备配置。智能视频分析技术、激光甲烷检测手段以及无人机巡检方式的应用范围逐步扩大，这有助于提升泄漏识别和入侵告警的覆盖面和响应速度。在设备层面，大型过滤器、调压计量撬装设备以及安全阀等关键装置的可靠性持续增强，自动化水平也在不断进步，不过现状呈现双重特点：大量数据还未被深入挖掘用于预测设备维护需要和风险提前预警，一些系统仍然处于单纯监视状态而未能实现智能诊断功能，数据隔离现象制约了整体安全效能的准确判断，同时部分老旧站在役设备更新节奏缓慢，由于早期设计标准不高或设备老化带来的本质安全弱项依然存在。

2.3 应急实战化水平有待深化

随着行业安全文化建设不断推进，输气站层面“安全第一”的理念已经获得广泛认同，危险源辨识与风险评估工作普遍开展，诸如 HAZOP 分析、LEC 评价方法等方法得以运用，形成风险清单并配套了管控方案。应急预案体系大致建立，定期组织演练，不过当前存在的薄弱环节依然比较突出：人员结构方面，一些站点存在老师傅经验足但知识更新滞后、新员工理论扎实却缺乏实战经验的矛盾，高风险作业监护、异常工况处置等关键技能仍需持续磨练。风险评估方面，动态更新不够及时深入，偶尔未能覆盖全部作业环节或跟随工艺变化同步调整。应急演练有时偏向“按脚本走”，针对复杂耦合事故比如泄漏与火灾、通信中断同时发生的情形，实战化、无预案拉动演练较为欠缺，与地方政府、周边社区的应急联动效果还需实际检验来验证。

3 数字孪生技术在安全管理中实施效果分析

3.1 构建高保真动态镜像，实现安全风险感知

数字孪生技术的关键在于借助物联网、建筑信息模型、地理信息系统以及各类业务系统数据，建立一个与物理实体或流程高度吻合的动态虚拟模型。在安全管理方面，这项技术首次做到了对复杂系统安全状态的全方位透视，以往的安全监控更多依赖分散的传感器和定期检查，容易出现时间与空间上的盲区以及数据不连贯的问题。数字孪生则能整合成千上万的感知节点，对工厂设备的内外应力、化工流程中的温度和压力、建筑结构的微小变形、城市交通流量、人员密集场所的实时位置等多元信息进行毫秒级的同步和映射，拿智能矿山来说，数字孪生平台可以同时展示井下地质构造、通风系统状态、设备位置与运行状况、人员移动路径以及环境中的瓦斯浓度，从而形成一幅四维的安全态势图。系统还借助内嵌的物理机理模型和大数据分析算法，从看似不相关的参数变化中，比

如某个区域温度缓慢上升同时设备振动频谱出现改变，敏锐捕捉到早期故障或风险叠加的迹象，这有助于实现从“监测已发生事件”向“预警潜在风险”的转变，将安全管理的时间窗口大大提前，为主动预防打下扎实基础。

3.2 预测性模拟与决策优化，重塑应急预案与培训模式

数字孪生除实时监控之外，其预测与模拟功能展现出更显著的优势，管理者能在虚拟环境中以较低成本开展压力测试并推演未来可能发生的情况。以安全规划为例，借助数字孪生可以模拟新建化工厂在极端台风天气下的反应，观察危化品储罐的受力状态及泄漏后的扩散路径，借此优化整体布局与防洪设计。进入运营阶段后，系统可随时针对火灾、爆炸、结构坍塌或恐怖袭击等重大事故场景进行应急演练。拿大型体育场馆来说，数字孪生能仿真突发火灾时，采用不同出口开启方案、应急照明和广播引导手段对数万人疏散效率的具体影响，从而识别出人员流动的瓶颈区域并估算最短安全撤离时间，最终形成更优的应急预案，这项技术也重新塑造了安全培训的方式。结合虚拟现实技术，员工能够沉浸到高度仿真的高风险作业场景中，比如高空维修或受限空间救援，开展标准化操作或事故应急训练，其体验几乎等同于真实环境，同时保障了绝对安全，这类所见即所得的模拟培训大大提升了培训的实际效果，帮助人员将安全知识转化为下意识的反应能力。

3.3 打通数据壁垒，驱动跨部门的安全协同管理

传统安全管理体系下，生产、设备、安环、消防、安保等部门往往独立运作，数据和系统之间缺乏连通，容易造成风险判断不够全面、应急反应速度偏慢。数字孪生作为一个统一的数字基础平台，天然适合用来打通信息壁垒，促进不同业务之间的协作。它能够把来自不同管理部门、不同技术协议的数据汇集起来，进行融合与关联分析，从而形成一张完整统一的安全运行全景视图。以城市安全管理为例，数字孪生城市模型可以整合交通摄像头、气象信息、地铁客流数据、重点危化企业监控以及消防站分布等多源信息。一旦系统借助视频分析发现某路口出现危险品运输车辆事故，就能在数字孪生体上快速定位，自动关联附近的危化品属性数据库和实时风速风向数据，预测有害气体可能扩散的范围，并一键启动协同预案：同步向交警推送交通管制建议，通知消防派出对应处置车辆，向环保部门报送监测需求，同时借助公共信息平台向可能受影响的社区发布疏散指引，这种基于同一事实模型的高效跨部门协作，有助于实现从单点响应向全

局联动的转变,显著提升了应对复合型、链式化安全危机的整体能力。

3.4 实现安全管理体系的动态自进化

数字孪生不仅能够监控状态和进行模拟,它更可以作为一个推动安全管理不断升级的智能动力。这种技术构建起一套完整的计划-执行-检查-处理数字化循环流程,在日常运作过程中,孪生系统持续对照物理世界的实际回馈与虚拟模型的预设状态,一旦出现偏差,比如设备运行效率偏离预测曲线或结构沉降超出设计范围,系统会自动记录并启动原因追溯,查找是否源于设计问题、材料老化、操作失误或外部影响等根本因素。拿桥梁运维来说,借助长期监测应力、位移以及交通荷载数据,数字孪生能准确评估桥梁性能的退化趋势,从而把以往定期大修的方式转变为更合理、更节省成本的预测性维护。每一次实际应急事件处理完毕,相关全程数据,从预警到恢复,都可以重新输入孪生模型,用来调整仿真参数、优化预警门槛并完善应急预案规则,这使整个安全管理体系具备学习能力,能够从过往事件和持续运行中积累经验,逐步提升风险识别的准确性、预测的前瞻性和决策的科学性,形成一个越使用越智能、越可靠的良性循环。

3.5 提升透明化与参与度,塑造安全文化与战略价值

数字孪生技术以其直观、可看懂的视觉呈现方式,让安全管理过程变得更加透明。管理人员能够借助三维图形界面,迅速把握整体安全状况,不必再翻阅大量表格文件;现场工作人员则能利用手机等移动设备,清楚知道自己所处环境的实时风险和 Related 安全措施。这种透明度的提高,有助于将安全责任从专门的安教科室扩展到每一位员工、每一个岗位。借助数字模型的互动培训与沉浸式演练,员工对安全知识的学习积极性被调动起来,安全参与感也得到增强,使得安全要求从“必须遵守的条文”逐渐转变为“自己愿意主动去做的事”。

从更宏观的视角看,数字孪生把安全管理从过去主要依赖规章制度和个人经验、被视为成本负担的职能,升级为能带来明显价值的战略支撑,它借助提前防范重大事故,有效避免了巨大的经济与声誉损失;通过改进设备维护方案,延长了资产使用寿命,也削减了日常运维开支;提升突发事件应对效率,还增强了企业或城市的抗风险能力。最终,数字孪生帮助组织建立起一种以数据为基础、以防患为重点、全员共同投入的现代安全文化,让安全真正渗透到日常运营中,成为组织核心能力的关键部分。

4 数字孪生技术的未来发展趋势

数字孪生技术持续发展并深入应用于天然气输气

站安全管理,其潜力逐步显现,技术创新方向包括引入人工智能与大数据分析,借此提升数字孪生的智能程度,增强风险预测和故障诊断的准确性,边缘计算技术推进数据处理能力向现场设备靠拢,有助于改善系统实时响应表现。操作人员培训效率可借助 3D 可视化与虚拟现实技术得到加强,这类技术能提升直观感知效果。行业重点推行标准化和模块化设计,这有助于推动数字孪生平台具备更好的互操作性和扩展性,政策上需要制定统一行业规范,保障技术健康发展并促进产业协作,将 AI 融入数字孪生模型能提升数据分析效率和模式识别能力,人工智能在处理复杂监测数据方面表现突出,可自动发现潜在风险与异常情况,为安全预警提供精准支持。在应急响应场景中,结合 AI 的数字孪生可模拟多种应对方案,辅助决策过程,提高反应速度与措施科学性,设备维护方面,借助预测性维护实现智能化管理,能降低故障发生概率,延长设备使用寿命。

5 结语

综上,数字孪生技术为天然气输气站的安全管理提升开辟了新方向,它正好应对了当前输气站在法规执行、数据深入使用、应急实战能力等方面存在的不足,借助高保真动态镜像的构建,能够提前进行预测性模拟并优化决策过程,打通不同系统间的数据隔阂,推动管理机制自我完善,同时塑造更强的安全文化氛围,数字孪生从风险识别、协同运作、应急响应以及文化培育多个方面提供支持,明显提高了安全管理的细致度、智能化水平和本质安全能力。未来要继续推进该技术的实际应用与探索,加强技术手段与管理需求的有机结合,从而充分挖掘数字孪生技术的潜在价值,为天然气输气站的安全平稳运行建立坚实的技术支撑,促进行业走向安全、高效和可持续的高质量发展路径。

参考文献:

- [1] 安鹏飞. 基于数字孪生技术的天然气管道完整性管理研究 [J]. 化工管理, 2025, (22): 93-96.
- [2] 张丹. 数字孪生驱动的天然气管道泄漏测关键技术研究 [D]. 东北石油大学, 2025.
- [3] 肖石. 数字孪生技术在天然气站建设中的应用 [J]. 中国高新科技, 2022, (23): 65-67.
- [4] 王浩, 张斌, 朱桥梁, 等. 长输天然气管道场站数字孪生技术的运用及研究 [J]. 当代化工研究, 2022 (16): 95-97.
- [5] 陈玉梅. 油田数字化建设中数字孪生技术的应用研究 [J]. 石油石化物资采购, 2024, (14): 91-93.