

数字孪生在城镇燃气管道安全管理中的应用探讨

惠永川

天津市特种设备监督检验技术研究院 天津 300192

摘要：随着城市化进程加速，城镇燃气管道安全管理的智能化需求凸显。传统监管方式在实时性、预警能力及跨部门协同方面存在不足，而数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟模型，集成物联网、大数据与人工智能算法，为燃气管道全生命周期管理提供了创新方案。本文系统梳理数字孪生技术架构，分析当前管道老化、数据孤岛、第三方施工损伤等痛点，并探讨其在实时监控、动态仿真、风险预测及应急响应中的应用路径。案例表明，该技术可集成多源数据、优化运维决策，显著提升安全性与效率。未来需突破数据标准化、算法优化与跨部门协同等挑战，推动燃气监管向智慧化转型。

关键词：数字孪生；城镇燃气；管道完整性管理；风险预警；智慧监管

引言

近年来，城镇燃气事故频发，给公共安全和城市经济发展带来了巨大隐患。燃气管道作为特种设备，在长期运行过程中容易出现腐蚀、泄漏等问题，传统的巡检和监控手段难以及时发现并处理潜在隐患。同时，燃气管道监管涉及设计、建设、运维、检修等多个环节，监管信息孤岛、部门协同不足以及应急响应不及时等问题亟待解决。数字孪生技术作为一种通过数字模型实时映射物理实体运行状态、预测故障并支持决策的先进方法，为城镇燃气管道安全管理提供了新的解决方案。

1 数字孪生技术概述

1.1 定义与原理

数字孪生（Digital Twin）是指利用数字技术构建与物理实体、系统或过程相对应的虚拟模型，并通过数据采集和动态仿真，实现对物理系统全生命周期的映射、监控和预测。该技术依托物联网、大数据、云计算及人工智能算法，使得物理系统与其数字模型之间实现实时信息交互，从而为运行优化、故障诊断和风险预警提供数据支撑和决策依据。通俗的讲，就是一种创造与真实设备一模一样的数字“克隆体”的技术手段，该“克隆体”能够实时反映、预测、控制真实设备。

1.2 数字孪生系统

数字孪生系统一般由以下五个维度^[1]构成（如图1）：

物理实体：从研究对象出发，考虑设备生产活动中涉及的物理实体要素总和，通过传感器、RFID、物联网、工业互联网等设备将物理实体各要素进行实时感

知、采集并传输至虚拟实体。

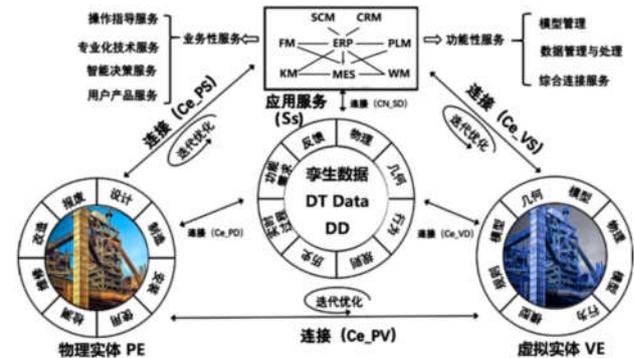


图1 数字孪生系统的五个维度

虚拟实体：包含几何模型、物理模型、行为模型和规则模型。几何模型为描述物理实体的几何参数的三维模型；物理模型是在几何模型的基础上加上物理属性、约束等信息等；行为模型是物理实体在外部环境作用下及内部运行控制共同作用下产生的实时响应及行为等；规则模型包括与历史关联数据的规律规则，以及相关标准及准则等。

孪生数据：数字孪生中的孪生数据，包括物理数据、几何数据、行为数据、规则数据、历史数据、实时数据、功能需求数据及用户反馈数据等，并对这些数据进行转换、预处理、分类、关联等处理，最后得到信息物理融合数据，为服务模型提供驱动力。

连接：实现数字孪生各维度互联互通的关键，物理实体与孪生数据、虚拟实体的连接、服务通过通信协议传输进行连接；虚拟实体、服务与孪生数据通过数据库接口实现交互。

应用服务：在应用数字孪生过程中所需的各类数据、模型、算法、仿真等进行数字化封装，以工具组

基金项目：源自天津市市场监督管理委员会科技计划项目“基于数字孪生的城镇燃气管道智慧监管系统的研究”（编号：2023-W04）。

件、模块展示等形式支撑数字孪生内部功能，以不同形式的软件、平台等满足不同用户需求的交互服务^[2]。

1.3 数字孪生与相关技术的融合

数字孪生技术具备与物联网（IoT）、人工智能（AI）、大数据、地理信息系统（GIS）、云计算等技术融合的能力^[3]。物联网通过传感器实时采集燃气管道运行数据（如压力、流量、腐蚀度等），为数字孪生提供动态、高精度的数据源。人工智能算法对海量数据进行深度挖掘，实现故障预测与智能决策；大数据技术整合多源异构信息（如环境参数、检验记录、地理空间数据），支撑孪生数据库的构建与跨部门协同管理。地理信息系统（GIS）增强了数字孪生的空间可视化能力，精准定位高风险区域并模拟环境因素（如地质沉降、第三方施工）对管道的影响。云计算与边缘计算的结合，通过云端高性能计算实现复杂模型仿真，借助边缘设备实时处理关键数据，降低响应延迟。这些技术的融合可以实现燃气管网全生命周期的动态监控与风险主动防控，将传统的“事后补救”模式转型为“事前预测—事中控制—事后优化”的闭环管理，显著提升了安全性与运维效率。

2 城镇燃气管道安全管理现状

我国多数城镇燃气管网建设于20世纪90年代，已运行近30年，接近或超过设计寿命（15~20年），管道腐蚀、壁厚减薄现象严重。数据显示部分中压管网检测显示高风险管道占比达3%~5%，中等风险占比超80%。其中老旧管道防腐层破损、焊接缺陷等问题突出，成为重大安全隐患^[4]。城市建设中的道路改造、旧城更新等工程频繁，第三方施工（如挖掘、钻探）因缺乏协调和防护措施，导致管道被挖断或损坏。此外，地下管线规划缺乏统一标准，不同市政管线交叉重叠，安全间距不足，进一步加剧风险。大量违章建筑占压燃气管道，或与管道安全距离不足，不仅阻碍抢修，还可能导致燃气泄漏后在密闭空间积聚爆炸^[5]。同时，部分燃气公司企业责任缺失，重建设轻管理，安全投入不足，巡查维护不到位，应急预案流于形式，缺乏专业技术人员，安全管理技术手段滞后，传统人工巡检效率低，部分区域仍依赖纸质档案定位管道，信息化监测系统（如GIS、SCADA）覆盖率不足，实时预警能力有限。这些都是燃气事故频发的原因。

城镇燃气管道铺设范围广、结构复杂，涉及地下和地面、主干线与分支管网，完整性管理要求高^[6]。管道在长期运行中容易出现腐蚀、磨损、疲劳等问题，加之外部环境的影响，增加了安全风险。人工巡检周期长、数据更新滞后，难以满足高风险区域和关键节点的安全监管需求。城镇燃气管道涉及规划、建设、市场监管、应

急管理等多个部门，缺乏统一数据平台和协同机制，影响整体管网完整性管理效果^[7]。随着“智慧燃气”建设推进，部分城市开始探索物联网、在线监测、大数据分析和数字孪生等前沿技术，通过实时采集压力、流量、温度、应变等关键参数，实现管网安全状态的动态仿真、风险预测与智能预警，未来将进一步提升安全监管的精细化与智能化水平^[8]。

3 数字孪生在城镇燃气管道安全管理中的应用

在城镇燃气管道的安全管理中，数字孪生具有天然的优势。燃气管道作为一种特种设备，安全风险高，运行安全受环境因素影响较大，存在变形、腐蚀、泄漏等隐患，传统的检测方式难以达到实时监控和精准评估的要求。通过数字孪生技术，可以在虚拟空间中实时监控管道的压力、流量、温度等重要参数，并通过动态仿真和智能算法，预测管道可能存在的故障和风险，帮助决策者提前发现问题，制定有效的维护策略，降低突发事件的发生概率。此外，数字孪生能够通过孪生数据库集成燃气管道运行、巡检、检验检测和安全监察的数据，促进各方信息共享和协同管理，大大提升燃气管网整体安全性和管道安全管理效率。

3.1 数字孪生在城镇燃气管道安全监管中的应用路径

数字孪生技术在城镇燃气管道安全管理中的技术路径遵循数字孪生物理实体、虚拟实体、孪生数据、连接、应用服务五个维度。

（1）物理实体数据收集：包括城镇燃气输配管道数据（材质、规格、地理位置、环境等）、燃气管道的运行状态的监测数据（压力、流量、温度、振动、腐蚀等）、检验检测数据（历次检验检测结果与缺陷评定情况等）、使用登记情况（管理单位、管理人员、注册信息等）

（2）构建虚拟实体：构建与实际管道系统一一对应的虚拟管道模型，包含几何模型、物理模型、行为模型和规则模型。该虚拟实体能够实时反映物理实体的安全状况，并在模型中进行各种运行场景和故障模式的模拟。

（3）建立孪生数据库：建立包括管道物理实体和虚拟实体全部信息的孪生数据中心。孪生数据中心不仅包含管道在实际使用过程中产生的一系列数据信息还包括管道在虚拟空间内模拟运行和分析产生的数据信息。通过数据清洗、融合和标准化处理，形成高质量、可持续更新的数据库。

（4）连接共享：构建物理实体与虚拟实体之间的数据通路和通信网络。利用物联网（IoT）、边缘计算和云平台，实现数据的实时传输、存储和处理。确保各类设备、监控系统、数据平台之间无缝衔接，形成统一、协

同的数字孪生平台。

(5) 提供应用服务：基于数字孪生系统，向燃气管道监管部门、使用单位、检验检测机构提供可视化、智能预警、预测性维护、应急响应等多种应用服务。实现风险评估、故障预测、维修调度和多部门协同监管。

这种基于五个维度构建的技术应用路径，涵盖了从物理实体到虚拟建模，再到数据融合、实时连接与智能服务的全流程管理，为城镇燃气管道的安全监控与风险预警提供了一套数字化解决方案，推动传统燃气管网管理向智慧化、数字化转型，提升整体安全性和管理效率。

3.2 应用案例

基于数字孪生的燃气管道应变监测系统

某地燃气管线因地铁施工需要进行切改，管道采用直埋敷设，由于地铁施工可能造成燃气管道周围的地基变形和水土流失，对燃气管道的安全性造成影响。为保证燃气管道运行安全，避免地铁施工对管道本体造成影响，建立管道应力监测系统。监测系统不仅用于监控地铁开挖作用下上方管道的安全状态，而且为管道完整性管理的风险评估系统提供科学、有效的支持。系统利用数字孪生技术，针对可能出现沉降管段，采集完整的基础数据，监测管道应力变化，预测管道变形趋势，以应用服务的形式输出直观的量化指标，使管道安全的管理者能够及时、准确地掌握管道地质沉降作用下管道的现状和发展趋势。

燃气管道应变监测系统（图2），包含传感器以及数据采集设备，用于采集物理实体（管道本体）的各种状态参数，完成监测系统的数据获取工作；通过数据传输系统传入系统数据处理系统，数据处理系统包含有物理实体各类数据采集的解析软件、数据库软件和专用的集成分析软件，通过对管道本体参数的数据化，在系统中建立燃气管道的数字模型（图3），集合实时采集的应力应变数据，通过物理模型和规则模型的计算，得出燃气管道的力学指标变化，预测可能发生的应力变化趋势，以及设定阈值进行管道应力的预报预警。



图2 燃气管道应变监测系统

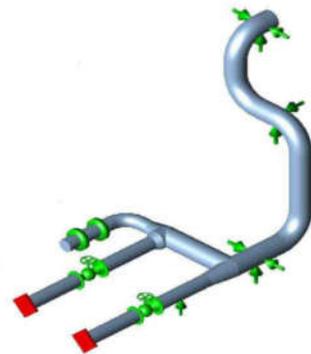


图3 燃气管道的数据模型

4 结束语

数字孪生作为一种前沿的数字化应用技术，具备提升城镇燃气管道的安全管理水平的巨大潜能。通过构建与物理系统实时映射的数字模型，该技术不仅可以实现管网状态的全天候监控、风险预测与预警、应急响应和跨部门协同监管，还能有效优化运维管理、降低事故发生率和运维成本。随着物联网、人工智能、大数据等技术的不断进步和应用场景的不断拓展，数字孪生技术在城镇燃气管网安全管理中的应用前景将十分广阔。通过制定统一标准、加强设备改造、优化模型算法和构建跨部门协同机制，逐步实现由传统监管向智慧监管的转型，为城市公共安全和智慧城市建设提供有力支撑。

参考文献

- [1]陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用.计算机集成制造系统,2019(01)
- [2]陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索.计算机集成制造系统,2018(01)
- [3]陶飞,张贺,等.数字孪生模型构建理论及应用.计算机集成制造系统,2021(01)
- [4]罗自治,张传涛,杨勇,等.国外管道失效原因分析及对我国管道管理建议[J].煤气与热力,2011,31(03):79-82.
- [5]周立国,姚安林,蒋宏业,等.城镇燃气管道第三方施工损伤风险评价方法研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(12):123-128.
- [6]陈飞.城镇燃气管道完整性管理数据采集研究[J].煤气与热力,2012,32(05):80-82.
- [7]杨永,何仁洋,吉建立,等.城镇燃气管道安全监管现状及建议[J].中国特种设备安全,2019,35(12):1-4.
- [8]王林.浅谈城镇燃气管道安全现状及解决对策[C]//中国城市燃气协会标准工作委员会.2022年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨聚焦燃气安全赋能创新发展标准化论坛获奖论文集.上海燃气市北销售有限公司;2022:203-206.DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.021255.