

文章编号: 1000-8241(2021)06-0643-08

# 管道数字孪生体模型的构建及应用

陈斯迅<sup>1</sup> 李在蓉<sup>1</sup> 王禹钦<sup>1</sup> 关红亮<sup>2</sup> 高丽<sup>3</sup> 马江涛<sup>1</sup> 王雪莉<sup>1</sup>

1. 国家管网集团北方管道公司; 2. 安徽省天然气开发股份有限公司; 3. 国家管网集团建设项目管理分公司

**摘要:** 根据智慧管网的概念和管道企业现状, 提出数字孪生是实现智慧管网的基本方法和理论依据。基于数字孪生理论和数字孪生五维模型, 构建了包含实体管道、虚拟管道、管道服务系统、管道孪生数据的管道数字孪生体模型, 阐述了模型内涵、各元素之间关系、运行机制以及云计算、大数据、人工智能、物联网等关键技术的具体应用, 重点分析了实体管道与虚拟管道之间的交互和融合, 并探讨了管道数字孪生体模型在管道设计、施工、运行、维修等场景中的作用。在管道的全生命周期中应用管道数字孪生体, 通过数据共享、信息可视化、智能分析等手段, 优化了资源配置, 增强了安全预警水平, 提升了决策能力, 为管道行业向信息化、智能化转型提供了支持。(图 1, 参 33)

**关键词:** 智慧管网; 数字孪生; 全生命周期; 物联网; 人工智能

中图分类号: TE973

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Construction and application of Digital Twin model of pipeline

CHEN Sixun<sup>1</sup>, LI Zairong<sup>1</sup>, WANG Yuqin<sup>1</sup>, GUAN Hongliang<sup>2</sup>, GAO Li<sup>3</sup>, MA Jiangtao<sup>1</sup>, WANG Xueli<sup>1</sup>

1. PipeChina North Pipeline Company; 2. Anhui Natural Gas Development Co.Ltd.;

3. Construction Project Management Sub-Company, PipeChina Corporation

**Abstract:** According to the concept of intelligent pipeline network and the current status of pipeline enterprises, it was put forward that Digital Twin was the basic method and theoretical basis to realize the intelligent pipeline network. Thereby, based on the theory and the five-dimensional model of Digital Twin, a Digital Twin model of pipeline, including the physical pipeline, the virtual pipeline, the pipeline service system and the pipeline twin data, was constructed, and the connotation of the model, the relationship between various elements, the operation mechanism and the concrete application of key technologies such as cloud computing, big data, artificial intelligence and Internet of Things, were elaborated. In addition, the interaction and fusion between the physical and the virtual pipeline was analyzed, and the application of the pipeline Digital Twin model in the pipeline design, construction, operation, maintenance and other scenarios was discussed. By applying the Digital Twin in the full life cycle of pipeline, the resource allocation was optimized and the level of safety pre-warning was enhanced through data sharing, information visualization and intelligent analysis, with the decision-making ability improved and supports provided for the informatization and intelligent transformation of pipeline industry. (1 Figure, 33 References)

**Key words:** intelligent pipeline network, Digital Twin, full life cycle, Internet of Things, artificial intelligence

近年来,管道运输行业打破传统管理和思维方式,充分利用互联网、云计算、大数据等新技术,不断提升生产质量,加强安全管控,优化资源调配,积极建设智慧管网系统。智慧管网是基于物联网、大数据、云计算、人工智能等技术,实现全面感知、实时分析、节能

高效、精准预测等目标的工业化与信息化相融合的系统<sup>[1-2]</sup>。智慧管网的实现需要多个技术领域的充分融合,建立管道全生命周期数据标准和数据库<sup>[3]</sup>,集成企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)、工程建设管理系统(Project Construction Management

Information System, PCM)、管道生产管理系统(Pipeline Product System, PPS)、管道完整性管理系统(Pipeline Integrity Management System, PIS)等信息系统,打通信息壁垒,实现互联互通<sup>[4]</sup>;搭建由感知层、网络层及应用层组成的管道物联网架构,实现全面智能感知;建立数据中心,对数据进行集成、存储、分析,通过大数据技术实现智能化应用<sup>[5]</sup>。在智慧管网的建设和应用中,物理世界与信息世界的交互融合是其面临的主要瓶颈之一<sup>[6]</sup>,基于物联网、大数据技术的管道数字孪生体是确保管道物理信息虚实融合的基础,也是智慧管网建设的技术支持。

## 1 管道数字孪生体模型

### 1.1 管道数字孪生体的概念

数字孪生概念最初由 Grieves 教授于 2003 年提出,是指以数字化的方式描述物理实体,建立全息动态虚拟模型,并通过虚拟模型进行仿真、模拟、分析,从而监测、预测、控制物理实体的属性、行为、规则<sup>[7]</sup>。数字孪生技术早期主要应用于航空航天和军工领域<sup>[8]</sup>,近年来,在电力、汽车、精密仪器、船舶等多个领域的产品设计、制造、服务、运维等生命周期各个阶段有所应用<sup>[9]</sup>,其已成为智能制造中解决物理实体与数据虚拟之间交互融合的关键技术。石油天然气领域逐步引入数字孪生技术,通过与人工智能、物联网等技术的融合,在设备监控、管道运维、调度运行等方面开展应用。西门子公司的 Smart Pumping 软件通过从各泵站采集实际运行数据,利用数字孪生、人工智能等技术,在虚拟设备中进行优化分析,从而实现降低能耗、减少瞬间压变、改进流量稳定性等目标<sup>[10]</sup>。BP 公司的模拟与监控系统(APEX)创建了 BP 公司所有生产系统的虚拟副本,通过将模型与实际数据配对,实时发现异常情况,调整流速、压力以及其他参数,实现油井投产、阀门测试、管道检查过程的预测分析与优化。BHGE 公司开发出 Reliability 应用程序,集成了深度学习、自然语言处理、机器视觉等功能和模型,持续收集来自物联网、信息系统、维护记录、管道与仪表装置的数据,建立数字孪生体,利用来自全系统的历史及实时数据,识别导致设备故障和流程混乱的异常情况,可据此采取主动干预措施,减少停机时间和营收损失。

Grieves 提出的数字孪生体模型包括物理实体、

虚拟实体以及虚实之间数据和应用的关联<sup>[7]</sup>,陶飞等<sup>[11]</sup>在此基础上提出了数字孪生五维模型(MDT)的概念,即在三维模型的基础上增加了孪生数据和服务。MDT=(PE, VE, SS, DD, CN),PE 表示物理实体;VE 表示虚拟模型,是对物理实体几何特征、物理特性以及行为约束等的刻画和描述;SS 表示服务,在数字孪生应用中,为不同业务、不同用户提供所需各类数据、算法、接口、预测等服务化封装,实现数字孪生体对具体业务的支持;DD 表示孪生数据,包含了物理实体、虚拟模型以及服务所需的数据;CN 表示各部分之间的连接。MDT 作为参考模型,提升了数字孪生模型的可操作性,适用于不同领域,能与物联网、云计算、人工智能、大数据等新 IT 技术融合,满足智能制造、信息物理系统等需求。依据 MDT 建立管道数字孪生体模型,作为智慧管网建设的理论基础,管道数字孪生体模型的组成部分包含实体管道、虚拟管道、管道服务系统以及管道孪生数据。通过实体管道与虚拟管道之间数据与操作的实时交互,提升管道全生命周期<sup>[12]</sup>中的数据集成和业务融合,实现设计、施工、运行、维护等过程在实体管道、虚拟管道、管道服务系统的迭代运行,实现信息化、智能化融合。

### 1.2 实体管道

管道系统作为一个整体,包括管道本体、管道站场、储运介质以及周边环境。作为管道数字孪生体模型中的实体管道,除了其基本油气储运功能外,还需具备数据实时感知接入与融合功能,通过安装各种传感器,实时监测管道、相关设备设施及周边安全,通过 SCADA 系统及设备电子仪表传输电压、温度、液位、压力、流量等信号,同时接收过程分析仪、色谱分析器、火焰检测器等设备的信号<sup>[13-14]</sup>,实现对管道运行状态的实时监控。在此基础上,将实体管道实时数据上传至虚拟管道和管道服务系统,对实体管道数据进行转换、清洗及封装等处理,与管道本体数据融合。在实体管道全生命周期过程中,集成各个阶段产生的数据,对外界的实时感知产生自动反应机制,并整体协同控制与优化个体行为,以达到全局最优的目标<sup>[15]</sup>。

### 1.3 虚拟管道

虚拟管道是对管道本体、管道介质、管道设施、周边环境等要素建立的数字化模型。不但在几何外形方面对实体管道对应的要素进行三维仿真,而且对其物理特性进行模拟,模型需要通过有限元分析、应力应变

测试、热分析、空气动力学等验证<sup>[16]</sup>,使其符合物理规律。此外,虚拟管道模型还需要建立行为约束,包括设备启用顺序、设备的联动性、操作的安全合规性、威胁行为的制止与提示等约束限制。最后,在管道孪生体运行期间,逐步将通过人工智能、数据挖掘等技术发现的规律加入虚拟管道模型中。虚拟管道是与实体管道同步建立的:在管道设计阶段,通过各专业数字化协调设计,建立管道本体、相关设备设施、周边环境的模型,形成最初的虚拟管道;在管道施工阶段,根据对设计阶段的变更及时调整虚拟管道模型,同时对施工过程中采购的压缩机、阀门、泵机组等设备建立相应的虚拟模型,并融合到虚拟管道模型中。在管道运营前,基于对未来运营情况的预估和其他管道的历史数据对运营情况迭代仿真分析,模拟管道运行的全过程,从而及时发现管道运行可能存在的问题,并调整和优化。在具体运行过程中,可以根据每次具体运输的油气介质、运输量等情况进行模拟分析,对运营情况进行预测分析,确保安全高效。同时,虚拟管道呈现逼真的三维可视化效果,用户(设计者、施工人员、运营人员、维修维护人员等)产生更强的交互性,从而激发灵感、提升效率。

#### 1.4 管道服务系统

管道服务系统是支撑管道企业智能运营的服务系统总称,是在企业信息管理系统和工控系统的基础上,对管道智能化管控提供系统支持和服务。如在接收到天然气调运任务后,通过对管道孪生数据的分析和挖掘,制定满足业务需求及约束条件的资源调配方案、初始运行计划。管道服务系统以信息化和自动化为基础,将远程通信、传感测量、工业控制、物联网、仿真模拟、最优化、大数据、机器学习等先进技术与油气管道调控系统有机融合,实现“状态信息数字化、调度运行最优化、操作控制自动化、预警应急及时化”,不断强化调控系统的“预测、预判、预调”能力,辅助提升一线调度、计划编制及调度管理人员的工作效率与调控水平,对调运计划不断修正优化,保障管道安全、环保、经济运行。管道数字孪生体有效集成了管道服务系统的多层次管理功能,实现了运行优化配置、能源高效利用、设备维护维修优化、管道本体安全提升,确保管道安全平稳高效运行。

#### 1.5 管道孪生数据

管道孪生数据包含了管道设计、施工、运营以及

管道企业管理的相关数据,国内外对管道本体数据及周边环境数据的管理较为成熟,国际管道运营公司主要使用管道公开数据标准(Pipeline Open Database Standard, PODS)数据模型<sup>[17]</sup>和地理信息管道数据模型(ArcGIS Pipeline Data Model, APDM)<sup>[18]</sup>。以APDM为例,基于GIS空间数据库,以管道中心线为核心,通过绝对里程方式,将管道本体、环境数据以及管道设备设施等相关数据分为在线和离线两种数据进行存储和管理。中国应用最为成熟的是管道完整性数据模型(Pipeline Integrity Data Mode, PIDM)<sup>[19]</sup>,该模型在APDM的基础上,结合中国管道完整性工作,增加了管道侵占、工程图、风险源、水工保护等相关内容,为管道的高后果区识别、风险评价、完整性评价、应急抢险等提供数据支持<sup>[20]</sup>。已有的数据模型为管道孪生数据的采集和管理提供了基础。

管道孪生数据主要由实体管道、虚拟管道、管道服务系统以及三者交互工作时产生的相关数据组成,其中虚拟管道是实体管道的虚拟化形式,两者之间的数据有着交集,称之为管道基础数据。管道基础数据<sup>[21]</sup>主要包括:①管道中心线及基础设施数据,包含管材、防腐层、弯头、管道桩、穿越、站场、设备等相关信息;②管道的状态数据,包含管道检测发现的金属损失、裂纹、焊缝缺陷、防腐层缺陷等数据;③管道失效数据以及管道沿线数据等。管道基础数据在管道的设计、施工、维护的全生命周期中不断变化,实体管道与虚拟管道是同步变化的。实体管道相关的数据主要为通过传感器、工控系统实时采集的数据,包括管道应力应变、气象数据、站场设备运行数据以及油气调运数据等。由于实时采集的数据量巨大,并不全部同步到管道基础数据中。虚拟管道相关的数据主要为定义虚拟管道模型的元数据,即管道几何模型、物理模型、行为约束的基本定义的元数据,在此元数据基础上结合管道基础数据构建了虚拟管道的数据库。管道服务系统的数据包括与企业运行相关的数据,主要涉及到企业管理、供应链管理、行政管理、人力资源管理、销售管理等各方面的数据,这类数据与管道运行数据有着深刻的联系,是管道大数据的组成部分。对上述3种数据进行数据挖掘、大数据分析等操作形成的相关知识也是管道孪生数据的重要组成部分。管道孪生数据实现了管道数字孪生体各部分之间的交互运行,提供了管道全息数据,消除了信息孤岛,在集成的基础上不断更新与扩充。





数字化表达提供统一的模型描述<sup>[25]</sup>,模型主要包括几何信息(形状、尺寸、公差)和非几何信息(如应力应变模型、流体力学分析模型、热力学模型以及管道材料的刚度、塑性、柔性、弹性、疲劳强度等)。在此模型基础上运用仿真技术,其中 SynerGEE、TGNET/TLNET、GREEG 等国际仿真软件广泛应用于全球油气管网,国家管网集团北方管道公司的 RealPipe 实现了管道仿真软件国产化<sup>[26]</sup>,管道仿真技术需要结合管道虚拟模型并同步管道实时感知数据,提升仿真效果。

### 3.3 管道孪生数据构建及管理技术

近年来,管道完整性技术发展迅速,其中数据管理是管道完整性技术的重要支撑,PIDM 是中国主要的管道完整性数据管理模型。数据管理主要分为 2 个方面:①需要从管道设计阶段开始持续建立数据管理机制,通过数字化设计平台实现多专业协同设计,基于地理信息系统(GIS)集成管道本体及周边环境信息,形成源头数据,在建设施工和运行维护过程中不断更新数据;②未建立数据管理机制的在役老管道需要数据恢复,如基于 GPS 的基准点测量和管道中心线探测定位管道精确坐标,利用固定电磁感应线圈定位管道埋深,采用无人机航空摄影测量获取高精度影像,通过三维激光扫描技术对管道跨越进行实景复制<sup>[27-28]</sup>。

### 3.4 智能生产与精准服务技术

ERP、PPS、PCM、PIS 等信息系统在管道企业中广泛应用,主要服务于管道运行维护等事项的管理;SCADA 系统等工控系统直接控制管道设备的运行和工艺流程。以上两类系统的集成是实现工业化与信息化融合的关键,同时深挖数据价值,利用大数据分析、人工智能、机器学习等技术实现各业务之间的高度融合,提升物料、成本、能耗优化,为运营、维护、应急响应的预测提供统筹分析能力。基于云计算的大数据分析虽然能提供决策支持信息,但由于计算能力、带宽容量难以匹配不断增长的海量实时感知数据,实现现场设备的实时智能感知需要边缘计算技术的支撑<sup>[29]</sup>。数字孪生体的另一个重要功能是实现“虚实交互,以虚控实”,通过增强现实的人机交互和虚实交互技术<sup>[30]</sup>提升实体管道与虚拟管道之间实时交互,在操作实体管道时可以通过感知装备实时获取管道和设备的相关信息,实体管道的变化可以及时同步到虚拟管道,工作人员通过对虚拟管道的操作来管控实体管道。

## 4 应用场景

### 4.1 管道建设

管道建设的过程包括设计和施工,这个过程也是建立管道数字孪生体的过程,从设计阶段开始统一数据标准,建立贯穿全生命周期的数据模型,基于 GIS 技术完成现场勘查、管道与站场的设计<sup>[31]</sup>,形成最初的虚拟管道。在设计验证阶段,可以根据其他相关管道历史数据和实验数据对虚拟管道的功能进行初步验证,以减少后期的变更频率。在验收阶段,虚拟管道的可视化展示可提高评审专家的直观体验,从而高效沟通技术问题。施工阶段继承设计阶段的数字化成果,并进一步增加或修正相关数据,主要包括:管道中心线、里程桩、强焊缝、弯头、防腐层等管道本体数据,全自动超声波、数字射线等检测结果数据,自动焊机、机械化补口等施工过程数据,周边建筑物、地质水位信息、道路信息、生态保护区等周边环境数据。通过数据更新不断完善虚拟管理,并基于虚拟管道的分析和预测指导施工过程。在站场的建设过程中,涉及到采购输油泵、压缩机组、阀门等相关设备,厂商在提供实体设备的同时,也需要提供虚拟设备,虚拟设备作为样品需要先测试其在虚拟管道工艺流程中的可用性和适用性,通过仿真测试为实体设备的选商选型以及调试测试提供指导。如建立 PLC 与虚拟设备的逻辑连接,通过 PLC 生成控制信号,虚拟环境中的设备作为受控对象,模拟整个工艺流程,在采购和安装物理设备前,发现相关问题并予以解决。管道施工的完成进一步完善管道数据、优化虚拟管道模型,为管道的运行维护提供了数据基础。

### 4.2 安全运行

管道建设过程中同步建立的管道数字孪生体将在管道运行阶段继续发挥作用。在管道安全运行过程中,从实体管道中实时获取设备状态、控制参数、工艺参数等信息,不断完善管道数据孪生体,根据油气调运任务,通过虚拟管道的流体力学模型、能耗模型等工业机理模型,结合管道孪生数据中的相关历史数据,对油气调运计划进行仿真、预测分析及迭代优化,最终使生产运行中的资源配置、设备启停时间、流向优化、节能环保、生产安全等指标达到最优,同时管道数字孪生体对运行操作结果的预测分析也提升了管道系统的容错性,从而减少了管道运行事故。

### 4.3 指导维检修

在维检修作业中,管道服务系统根据维检修体系文件、作业指导书、历史数据以及设备设施实时运行状况进行智能预测,结合ERP系统中的物料数据,初步制定出维检修工作计划,经过虚拟管道的仿真运行以及管道服务系统的预测与优化,形成最终的工作计划,据此对实体设备或管道本体进行维检修操作。在操作过程中,实体管道与虚拟管道实时融合,通过虚拟管道的在线仿真设备或管道本体数据,不断修正操作步骤,最终完成维检修工作。通过数字孪生体可以直观观察设备内部结构,结合智能诊断技术提升设备维检修效果;识别地下管道、光缆等隐蔽工程的位置及土壤阻力信息,通过智能挖掘技术计算最优挖掘轨迹并转化成控制参数<sup>[32]</sup>,有效减少对管体及其设施的破坏。

### 4.4 应急抢险

在应急演练过程中,根据历史事件事故的数据记录、管道相关数据以及现有应急预案,在管道服务系统中制定应急演练预案,通过虚拟管道仿真模拟爆炸损害、泄漏扩散、污染分析、自然灾害影响等应急场景,建立事故模型,并在虚拟管道上仿真演练,提升应急工作的培训效果,不断优化应急预案<sup>[33]</sup>。在应急事件发生时,通过虚拟管道实时接收实体管道的变化状态,从虚拟管道中初步分析判断事件的类型和级别,通过管道服务系统智能调度应急资源,并制定应急方案,在现场应急抢修工作中通过智能装置实时获取实体管道的相关数据,为现场的实时操作和决策提供数据支撑。

### 4.5 培训与实验

管道企业的运行和维修工作是安全风险极高的作业,对员工的培训工作是生产运行的重要环节,包括新员工的入职培训、每年的定期培训、新设备设施的使用培训,在以往的培训中更偏重于理论知识的理解,课堂授课形式较多,实践课程中使用的实体模型和真实的管道系统往往有较大差距。虚拟管道的出现为培训人员提供了更加真实的学习环境,学员可以通过智能装备对虚拟管道进行操作练习,可以具体到某个站场、某个具体管段的运行和维抢修环境,并对设备的内部结构、埋地管道的具体位置进行详细了解,具有更高的学习效率。随着虚拟管道模型的性能、机理及观感不断完善,一些管道科研实验可以在虚拟管道上进行,通过数字代替物理材料可以大幅度节约实验成本;同时,虚拟管道是对实体管道的实时仿真,可以同步接收现场

的真实感知数据,在某种程度上比现场实验环境更加接近真实的生产环境;此外,还可以便捷地进行多次实验以及调整实验过程的时间,通过放慢和暂停实验进度,对实验状态进行更加细致地观察,使科研结论更好地指导生产工作。

## 5 结论

智慧的本质是对未来的预知,不但需要对历史数据的分析挖掘,更重要的是在其模型上进行模拟仿真,通过实时反馈来修正对未来的预测,从而提升对事物的认知水平。管道及其相关设备设施和周边环境是一个大型复杂的系统,其特征决定了无法像一般产品一样生产实体样机来辅助其建设运营,因此其模型必须以数字的形式呈现。管道数字孪生体模型的建立,通过虚拟管道将管道相关数据以镜像的方式展示出来,不但为设计施工、运行维护、管理决策等相关人员提供了更加形象化的认知,提升其对性能功能的理解,提高各个阶段的学习培训效果以及创新能力;同时,通过数据整合、物理性能及行为约束模拟、实时感知、智能分析、虚实融合等能力,使各种研究、调试、演练等工作可以从实体管道转移到虚拟管道,工作对象也可以从实体管道的局部转变为虚拟管道整体,在设计源头上避免“信息孤岛”的出现,从而达到节约资源、减少安全风险、加快工作进度、提升工作效率的目的。最终,从当前管道各个专业领域上利用人工智能、数据挖掘等技术解决具体问题,真正演变为对管道系统整体的智能管控。

### 参考文献:

- [1] 聂中文,黄晶,于永志,王永吉,单超,冯骋,等.智慧管网建设进展及存在问题[J].油气储运,2020,39(1):16-24.  
NIE Z W, HUANG J, YU Y Z, WANG Y J, SHAN C, FENG C, et al. Progress and problems of smart pipe network construction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 16-24.
- [2] 刘慧婷,徐华,周东焱.基于“互联网+”模式下的石化行业智能管网的发展现状研究[J].石化技术,2015,22(5):90-91.  
LIU H T, XU H, ZHOU D Y. Study on development situation of smart pipeline net in petro-chemical industry based on Internet+ model[J]. Petrochemical Industry Technology, 2015, 22(5): 90-91.



- [3] 董绍华,张河苇. 基于大数据的全生命周期智能管网解决方案[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 28-36.
- DONG S H, ZHANG H W. Solution of full-life-cycle intelligent pipeline network based on big data[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 28-36.
- [4] 程万洲,王巨洪,王学力,王新. 我国智慧管道建设现状及关键技术探讨[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(3): 34-40.
- CHENG W Z, WANG J H, WANG X L, WANG X. Present conditions of China's intelligent pipelines construction and key technologies[J]. Oil Forum, 2018, 37(3): 34-40.
- [5] 徐建辉,聂中文,蔡珂. 基于物联网和大数据的全生命周期智慧管道实施构想[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(12): 6-13.
- XU J H, NIE Z W, CAI K. Implementation scheme of the whole life cycle intelligent pipeline based on the Internet of Things and big data[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(12): 6-13.
- [6] 陶飞,刘蔚然,刘检华,刘晓军,刘强,屈挺,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.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, LIU X J, LIU Q, QU T, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [7] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//KAHLEN S J, FLUMERFELT S, ALVES A. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Berlin: Springer, 2017: 85-113.
- [8] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]//Honolulu: The 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012: AIAA 2012-1818.
- [9] TAO F, ZHANG M, NEEA A Y C. Digital twin driven smart manufacturing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 5-7.
- [10] FOWLER E, SALAZAR T. Think smart, pump smart[EB/OL]. (2018-07-01)[2020-03-17]. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:88d52f4a0b2af0ad4a10e147bde5257257e8de48/version:1532447028/think-smart-pump-smart-july2018-wp.pdf>.
- [11] 陶飞,刘蔚然,张萌,胡天亮,戚庆林,张贺,等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
- TAO F, LIU W R, ZHANG M, HU T L, QI Q L, ZHANG H, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [12] 陈朋超,冯文兴,燕冰川. 油气管道全生命周期完整性管理体系的构建[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 40-47.
- CHEN P C, FENG W X, YAN B C. Construction of full life cycle integrity management system for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 40-47.
- [13] 董绍华,韩忠晨,杨毅,曹兴. 物联网技术在管道完整性管理中的应用[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 906-908, 911.
- DONG S H, HAN Z C, YANG Y, CAO X. The application of Internet of Things technology in the integrity management of pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(12): 906-908, 911.
- [14] 王昆,李琳,李维校. 基于物联网技术的智慧长输管道[J]. 油气储运, 2018, 37(1): 15-19.
- WANG K, LI L, LI W X. Intelligent long distance pipeline based on Internet of Things technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(1): 15-19.
- [15] 陶飞,张萌,程江峰,戚庆林. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
- TAO F, ZHANG M, CHENG J F, QI Q L. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.
- [16] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011: 79-80.
- [17] PODS. PODS white paper[EB/OL]. (1991-03-01)[2021-04-02]. <http://www.pods.org/standards>.
- [18] APDM. APDM technical data[EB/OL]. (1991-03-01)[2021-04-02]. [http://www.apdm.net/html/about\\_apdm.html](http://www.apdm.net/html/about_apdm.html).
- [19] LI Y, TAN X J, ZHOU L J, YU H C. Applying APDM to pipeline integrity management at PetroChina[J]. Pipeline & Gas Journal, 2009, 236(3): 58-61.
- [20] 周利剑,贾韶辉. 管道完整性管理信息化研究进展与发展方向[J]. 油气储运, 2014, 34(6): 571-576.
- ZHOU L J, JIA S H. Progress and development in the informatization of pipeline integrity management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 34(6): 571-576.
- [21] 《管道完整性数据管理技术》编委会. 管道完整性数据管理技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 19-21.
- The Editorial Board of Pipeline Integrity Data Management

- Technology. Pipeline integrity data management technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 19-21.
- [22] 王立坤, 王洪超, 熊敏, 吴家勇, 许斌. 长距离输油管道泄漏监测技术分析及研究建议[J]. 油气储运, 2014, 33(11): 1198-1201.
- WANG L K, WANG H C, XIONG M, WU J Y, XU B. Analysis and proposal on leak detection of long-distance oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(11): 1198-1201.
- [23] 范春辉. 物联网短距离无线传输技术研究[J]. 无线互联科技, 2017(19): 23-24.
- FAN C H. Study on short-range wireless transmission technology in Internet of Things[J]. Wireless Internet Technology, 2017(19): 23-24.
- [24] 范玉青. 基于模型定义技术及其实施[J]. 航空制造技术, 2012(6): 42-47.
- FAN Y Q. Model based definition technology and its practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(6): 42-47.
- [25] 周利剑, 李振宇. 管道完整性数据技术发展现状与展望[J]. 油气储运, 2016, 35(7): 691-697.
- ZHOU L J, LI Z Y. The development status and prospect of pipeline integrity data technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(7): 691-697.
- [26] 陈国群, 郑建国, 柳建军, 彭世垚, 张明. 油气管网仿真技术现状与展望[J]. 油气储运, 2014, 33(12): 1278-1281.
- CHEN G Q, ZHENG J G, LIU J J, PENG S Y, ZHANG M. Current situation and outlook of oil and gas pipeline network simulation technology[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1278-1281.
- [27] 熊明, 古丽, 吴志锋, 邓勇, 李双琴, 邹妍, 等. 在役油气管道数字孪生体的构建及应用[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 503-509.
- XIONG M, GU L, WU Z F, DENG Y, LI S Q, ZOU Y, et al. Construction and application of digital twin in the in-service oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(5): 503-509.
- [28] 李柏松, 王学力, 王巨洪. 数字孪生体及其在智慧管网应用的可行性[J]. 油气储运, 2018, 37(10): 1081-1087.
- LI B S, WANG X L, WANG J H. Digital Twin and its application feasibility to intelligent pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(10): 1081-1087.
- [29] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 张权, 刘伟. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
- SHI W S, SUN H, CAO J, ZHANG Q, LIU W. Edge computing - an emerging computing model for the internet of everything era[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [30] 王宇希, 张凤军, 刘越. 增强现实技术研究现状及发展趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(10): 75-83.
- WANG Y X, ZHANG F J, LIU Y. Augmented reality technology[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(10): 75-83.
- [31] 熊俊楠, 孙明远, 孙铭. 基于GIS及耦合协调原理的长输管道山洪泥石流风险性评价[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 116-124.
- XIONG J N, SUN M Y, SUN M. Risk assessment on mountain torrents and debris flows along long-distance pipelines based on the GIS and coupling-coordination principle[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 116-124.
- [32] 孙伟, 李二洋, 王晓邦, 郭正刚, 李旭东, 宋学官. 面向智能挖掘机的最优挖掘轨迹规划[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(3): 246-253.
- SUN W, LI E Y, WANG X B, GUO Z G, LI X D, SONG X G. Optimal trajectory planning for intelligent excavators[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(3): 246-253.
- [33] 赵煜, 吕孝飞, 郭文敏, 赵会军, 黄志江, 宋琳琳. 埋地原油管道稳态泄漏数值模拟[J]. 石油机械, 2019, 47(6): 114-120.
- ZHAO Y, LYU X F, GUO W M, ZHAO H J, HUANG Z J, SONG L L. Numerical simulation of steady leakage of buried crude oil pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(6): 114-120.
- (收稿日期: 2020-03-17; 修回日期: 2020-04-07; 编辑: 王雪莉)
- 
- 基金项目:** 中国石油管道公司科技攻关项目“中俄东线天然气管道工程建设及运营关键技术集成”, 20200201。
- 作者简介:** 陈斯迅, 男, 1981年生, 工程师, 2007年硕士毕业于中国科学院研究生院计算机专业, 现主要从事管道信息化与网络安全方向的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区新开路408号, 065000。电话: 15100621479。Email: chensx@pipechina.com.cn