

文章编号: 1000-8241(2018)10-1081-07

数字孪生体及其在智慧管网应用的可行性

李柏松 王学力 王巨洪

中国石油管道公司智慧管道建设项目中心

摘要: 伴随着工业 4.0 时代的来临,数字孪生体(Digital Twin)概念蓬勃发展,在航空航天、汽车制造、军事、能源等行业中逐步得到应用,为其在管道行业的应用发展起到良好示范。介绍了数字孪生体的内涵和发展演化过程,分析了数字孪生体在产品的设计、飞机故障预测、汽车制造、电厂发电机组智能健康管理、复杂产品装配等行业的应用案例,并从管道设计、调度优化、管道设备运行维护、管道全生命周期管理 4 个方面分析数字孪生体在油气管道中的应用前景。数字孪生体为真实管道系统与虚拟管道系统的信息交互及融合提供了新的技术手段,可以实现虚拟管道的仿真优化,有利于促进智慧管网建设。(图 4,参 22)

关键词: 油气管道; 数字孪生体; 智能化; 数据融合

中图分类号: TE89

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.10.001

Digital Twin and its application feasibility to intelligent pipeline networks

LI Baisong, WANG Xueli, WANG Juhong

Intelligent Pipeline Center, PetroChina Pipeline Company

Abstract: With the advent of the industry 4.0 era, the concept of Digital Twin is flourishing and is gradually being applied in aerospace, automobile manufacturing, military, energy and other industries, which has played a good demonstration effect for its application and development in the industry of pipeline. In this paper, the connotation and evolution process of Digital Twin were introduced. Then, the application practices and cases of Digital Twin in the industries of product design, aircraft fault prediction, automobile manufacturing, intelligent health management of power plant generator set and complex product assembly were analyzed. Finally, the application prospects of Digital Twin in oil and gas pipeline were discussed from four aspects, e.g. pipeline design, scheduling optimization, pipeline equipment operation and maintenance, and life-cycle pipeline management. In conclusion, the Digital Twin provides the new technical means for the information interaction and fusion between the real pipeline system and the virtual pipeline system, so as to achieve the simulation optimization of virtual pipeline, guide the construction and operation optimization of real pipeline and promote the construction of intelligent pipeline network. (4 Figures, 22 References)

Key words: oil and gas pipeline, Digital Twin, intelligence, data fusion

伴随日益加速的智能化进程,欧美国家相继推出工业 4.0、工业互联网规划等产业发展规划^[1],中国也提出“中国制造 2025”,以此实现传统制造业的智能化转型。如何实现物理世界与信息世界的交互与融合,是当前国内外实践智能制造理念所共同面临的主要瓶颈之一^[2]。数字孪生体是近年来工业 4.0 浪潮催生的

新概念,为真实物理实体与虚拟空间信息的交互与融合提供了新的技术手段,其诞生与发展受到广泛关注。自 2017 年以来,数字孪生体连续两年入围由全球领先的 IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 发布的“十大战略科技趋势”^[3-4]。2017 年 11 月,世界最大的国防承包商洛克希德·马丁公司将数字孪生体列为未来几年在国

防和航天工业中发挥重要作用的六大顶尖技术之首^[2]。数字孪生体在航空航天、汽车制造、军事、能源等行业中逐步得到应用,并不断向其他领域扩展,为其在管道行业的应用发展起到良好示范^[5-9]。因此,了解数字孪生体的内涵和发展演化过程,借鉴其在航空航天、汽车制造、军事等行业应用的先进做法,探讨其在油气管道中应用的可行性,有利于促进油气管道智能化建设的发展^[10-11]。

1 演化过程与内涵

1.1 演化过程

1961—1972年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在阿波罗项目的实施过程中首次提出“孪生体”概念,即制造两个完全相同的空间飞行器,一个执行飞行任务,另一个则留在地球上并将其称为孪生体(Twin)^[12-13]。在飞行任务准备期间,孪生体用于训练;在飞行任务执行期间,孪生体基于执行飞行任务的空间飞行器的飞行状态数据构建精确仿真模型并进行仿真试验,辅助太空轨道上的航天员在紧急情况下做出正确决策^[12-13]。此时,孪生体概念还是物理实体,并非虚拟空间的数字孪生体。

2002年,美国Grieves在组建密歇根大学产品全生命周期管理中心时提出“Conceptual Ideal for PLM”概念模型,此概念模型虽未被称为数字孪生体,却包含组成数字孪生体的全部要素,即实体空间、虚拟空间、实体与虚拟空间之间的数据和信息连接^[14]。2005—2006年,Grieves将此概念模型进一步称作“Mirrored Spaced Model”和“Information Mirroring Model”^[14]。该阶段是数字孪生体概念的孕育发展阶段,形成了数字孪生体的雏形。

2011年,Grieves正式提出数字孪生体概念^[14]。NASA在其技术发展路线图(NASA Technology Roadmap, 2010 and 2012)第11个技术领域(模型、仿真、信息技术与处理)中也提出数字孪生体概念^[12]。至此,数字孪生体概念正式诞生。

2012年,NASA正式给出数字孪生体的明确定义:数字孪生体是指充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟信息空间中对物理实体进行镜像映射,反

映物理实体行为、状态或活动的全生命周期过程^[13, 15-16]。

2015年,Rios等给出通用产品的数字孪生体定义,从此将其由复杂的飞行器领域向一般工业领域进行拓展应用及推广^[17]。此后,数字孪生体理念逐渐被美国GE、IBM、Microsoft、PTC、德国Siemens、法国Dassault等企业所接受并应用于技术开发及生产,形成了如GE的Predix平台、Siemens的Simcenter 3D等数字孪生体开发软件工具,引起了国内外工业界、学术界及新闻媒体的广泛关注^[16-19]。至此,数字孪生体概念得到进一步发展和推广。

1.2 内涵

数字孪生体是指在虚拟空间中集对象、模型及数据于一体的仿真模型,该虚拟模型与真实空间中的物理实体完全对应一致,是真实空间中物理实体的映射。此映射通常是多维动态数字映射,依赖于安装在物理实体上的传感器或模拟数据来洞察和呈现物理实体的实时状态,同时也将承载指令的数据回馈到物理实体上,使其状态产生变化。

不同结构层次的物理实体,如零件、套件、部件、组件、总装以及多个单体组成的物理系统,在虚拟空间均可建立相对应的数字孪生体,如管道数字孪生体包括管体数字孪生体、设备数字孪生体、控制系统数字孪生体、生产工艺数字孪生体等。数字孪生体融合了几何、物理、行为及规则4层模型,其中,几何模型描述形状、尺寸、公差、装配关系等;物理模型描述组成材料的强度、刚度、硬度等材料特性,并分析其应力、疲劳、变形等;行为模型响应外界驱动及扰动作用;规则模型对物理实体运行的规律/规则建模^[2]。数字孪生体数据包括物理实体和仿真模型的相关数据,覆盖规划、设计、制造、运行、维护、报废等全生命周期各个阶段。

数字孪生体与真实空间中物理实体信息和数据进行连接及交互,实现全生命周期数据统一集中管理^[13]。产品数字孪生体的最终表现形式是对产品物理实体完整、精确的数字化描述,可用来模拟、监控、诊断、预测及控制产品物理实体在现实物理环境中的形成过程和状态,在其全生命周期各阶段均可发挥重要作用^[13]。以输油泵数字孪生体为例,物理实体空间为管道输油泵及其部件,虚拟空间的数字孪生体包括几何模型、有限元模型、应力分析模型、材料属性、性能测试数据、振动测试数据等(图1)。

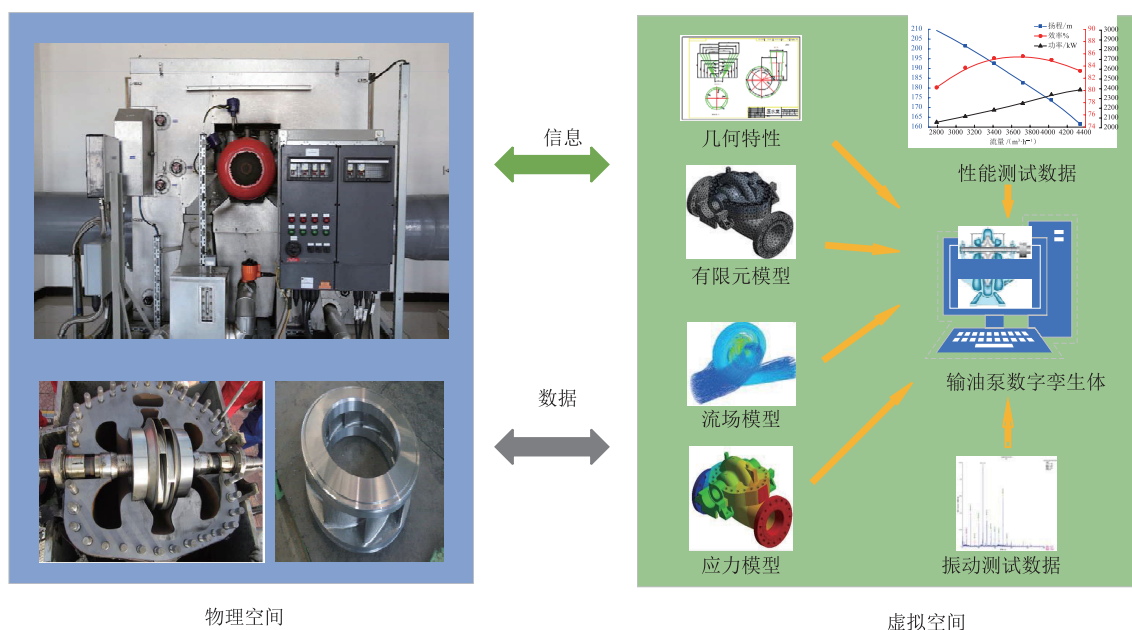


图1 管道输油泵物理实体空间与虚拟空间数字孪生体示例图

2 相关行业应用

2.1 产品设计

数字孪生体从虚拟样机等技术发展而来,在产品领域应用广泛,GE、PTC、Siemens、Dassault 等企业均有支持其产品设计的数字孪生体工具。数字孪生体可帮助用户在产品设计的早期了解产品特性,尤其是复杂产品的创新设计,避免无效设计与开发,且可防止在验证阶段重复设计,从而以较低成本将创新技术更快推向市场。其还可对复杂产品的多物理、多尺度、多概率进行仿真,创建高逼真度的虚拟模型来模拟样机性能,反馈产品实体的测试、运行、维护等数据,且用户、环境及其他系统影响均可得到有效反馈。以基于数字孪生体的自行车设计为例^[20],其产品设计过程可以分为概念设计、详细设计及虚拟验证。

2.2 汽车制造

汽车制造的重要环节是对制造过程和制造设备的实时监控,传统汽车工厂一般采用人工对制造故障和制造偏差进行识别或对简单参数进行监控,这些操作无法持续有效地监控生产设备和车辆制造状态。宝马丁格芬工厂是宝马汽车最大的生产工厂,也是欧洲最大汽车制造工厂之一,主要装配其品牌高端车型,也生产零部件,从冲压到整装主要使用工业机器人,且大量使用自动运输小车、无人仓库,自动化率超过 95%。

在宝马丁格芬智能工厂中,人工监控被基于数字

孪生体的智能数据分析系统(Smart Data Analytics)取代。在整个车辆制造过程中会产生大量数据,包括生产设备安装时传感器感知数据、制造过程中的生产数据、零部件运输中的物流数据等,以制造车辆三维模型为基础,将这些数据同时在信息系统虚拟环境下通过三维可视化进行镜像重构和体现,并在制造生命周期内进行实时更新,数字孪生体可准确地将制造现场的生产设备和制造车辆状态在虚拟环境中进行可视化呈现,每个零部件、每台机器、每次作业均可被追踪、分析及有效监控,保证产品质量。

2.3 飞机故障预测

美国空军提出利用数字孪生体概念,构建飞行载荷与环境数字孪生体、结构数字孪生体,进行飞机的结构寿命预测^[21]。在数字空间中建立战斗机的三维模型,将计算流体力学模型、动力学模型、热力学模型、应力分析模型、疲劳裂纹模型及其他材料状态演化模型紧密耦合,并集成到统一的结构数字孪生体中,通过评估飞行载荷与环境载荷的结构响应来预测飞机结构剩余寿命。每次飞行任务结束后,通过飞机上的传感器实现状态实时监测,进而对数字孪生体进行更新和完善,确定飞机结构可靠性状况,分析评估是否需要维修维护。真实飞机和数字孪生结构模型均关联到可视化数据库。

2.4 电厂发电机组智能健康管理

基于数字孪生概念的电厂发电机组智能健康管

理,实现了逼真透视化监测、基于多维特征及其融合的故障准确预警、运行状态持续迭代优化及维修策略精准验证等,改变了传统模式下发电机组运行的“黑箱”状态,为发电机组的健康管理及可靠运维提供了有效途径^[2]。利用基础数据、历史运行数据、实时监测数据(如轴承振动、转轴转速、定子电流、有功及无功功率等),通过几何、物理、行为、规则4个维度在虚拟空间对发电机组各部件(如汽缸、叶轮、主轴、联轴器)进行描述,并集成为发电机组高逼真度虚拟模型。虚拟模型与发电机组实体同步运行,基于实时感知数据、仿真数据及融合数据等孪生数据,使运维人员通过虚拟模型透视观察发电机组内部的实际运行状态,并通过与虚拟模型定义的当前期望状态进行实时比对与交互,对其健康状态进行评估^[2]。

2.5 复杂产品装配

在高度自动化的生产工厂里,复杂产品装配的处理和操作通常需要数百个机器人协作完成。由于组装部件的几何特性等问题,常导致后期装配延迟,从而影响组装质量,增加费用成本。Rikard等^[22]提出基于数字孪生体搭建机器人自动优化组装平台的概念,快速实时扫描和分析零部件尺寸偏差等数据,根据装配工艺对零件几何形状进行微调,并优化调整装配过程,使之更好地与待组装部件进行匹配。构建的数字孪生体包括基于三维设计的零部件几何形状及有限元网格、装配设备(夹具、机器人及焊枪)、装配工艺及优化方案等方面。

3 在管道中的应用可行性

3.1 管道设计

传统管道设计思路基本为串行设计,按照可行性研究、初步设计、施工图依次进行,虽然主流管道设计大多已经采用三维设计方案,但三维模型通常是静态的,对设计人员经验依赖性较强,利用率不高,对管道系统全局性考虑较少。

管道数字孪生体赋予三维模型新的生命力,基于高保真动态三维模型,关联各种属性和功能定义,包括材料属性、感知系统、有限元模型等,可反馈现实世界管道系统实际施工、运行、维护等数据,实现线路、工艺、设备、控制、电力、建筑等全要素、全过程仿真模拟。管道数字孪生体在设计前期即可识别异常情况,

从而在未施工时,提前避免管道设计缺陷,使设计发生根本转变,实现面向管道运行维护的设计和优化。此外,数字孪生体还可以持续累积管道设计和建设的相关知识,帮助设计人员不断实现重用和改进,实现知识复用。

管道数字孪生体包含线路、站场、建筑3个方面:

①管道线路包括测量三维、地质三维、基于GIS的选线、多专业协同施工图;②管道站场包括工艺、仪表自动控制逻辑、电力系统、三维施工图等;③建筑方面包括建筑信息模型建模、建筑内辅助设施、钢结构。多专业设计数据融合集成后,模拟现场工艺、控制、环境影响等方面进行虚拟验证,根据验证结果对数字孪生体进行更新和迭代优化。同理,施工阶段和运行阶段的数据均可代入管道数字孪生体进行更新(图2)。

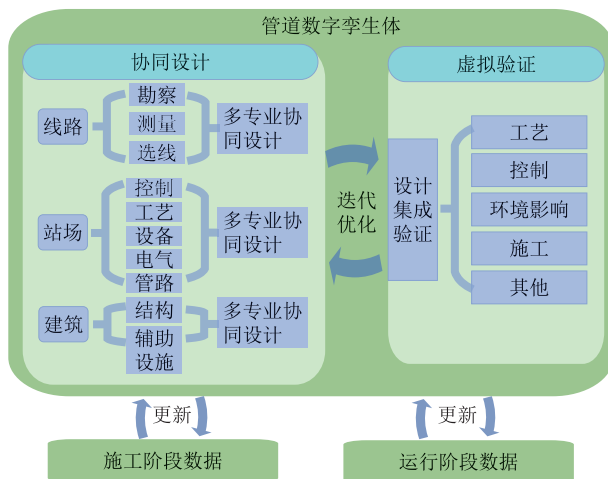


图2 基于数字孪生体的管道设计过程示意图

3.2 调度优化

随着中国油气管网建设的发展,管网运行灵活性显著提高,网络化运行模式使得管道间相互影响日趋复杂,管网集中调控及优化运行难度随之增大。

基于数字孪生体的管网调度模式,通过物理实体管道系统与管道数字孪生体进行交互融合及相互映射,实现物理实体管道系统对管道数字孪生体数据的实时反馈,使管道数字孪生体通过高度集成虚拟模型进行管网运行状态仿真分析和智能调度决策,形成虚拟模型和实体模型的协同工作机制,达到二者的优化匹配和高效运作,实现管网动态迭代和持续优化。

此外,基于数字孪生体的管网调度模式,承接设计阶段的工艺、控制、设备虚拟模型,接收实时采集的工艺参数、控制参数、设备状态参数等数据,并考虑其相互耦合作用,通过不同学科的仿真组合进行系统协同

仿真,更准确、全面、真实地模拟管网复杂运行过程并进行趋势预测,采用遗传算法、人工神经网络、群体智能等新兴智能优化算法进行优化控制,整体解决压缩机组/泵机组启停选择、运行工艺参数设定、管网资源调配及流向优化等问题(图3)。

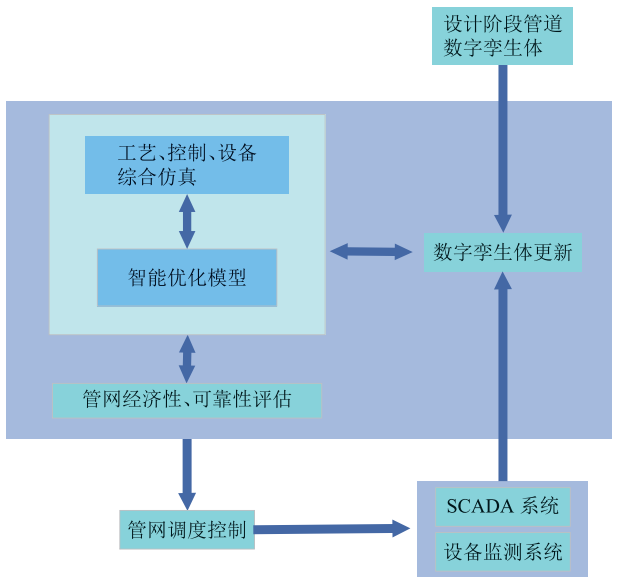


图3 基于数字孪生体的管网调度模式示意图

3.3 设备运行维护

管道设备包括机械设备、电气设备、仪表设备、计量设备等,结构复杂、种类众多、数量巨大。管道设备的运行维护,直接影响到管道系统的可靠性、经济性及安全性,同时关系到无人站场能否顺利实现,是制约管道系统自动化和智能化发展的关键因素。

基于数字孪生体的设备维修维护,即承接设计、采购、安装调试阶段的设备虚拟模型。根据实体设备的SCADA系统、设备监测系统、运行历史等数据,对数字孪生体加以更新,进行集成多学科、多物理量的仿真模拟分析,实现基于RCM、RBI、SIL的可靠性安全评估及基于故障案例库的诊断,对设备的健康状况进行评估,预测设备故障原因及剩余寿命,给出维修维护策略,制定维修维护作业计划。实体设备完成维修维护作业后,将相关数据和信息反馈给数字孪生体进行更新,从而保证物理设备的安全高效运行(图4)。

基于数字孪生体的设备维修维护,可实现设备维修维护由部件级别向系统级别转变,由故障诊断向故障预测转变。同时,还可通过虚拟现实/增强现实/混

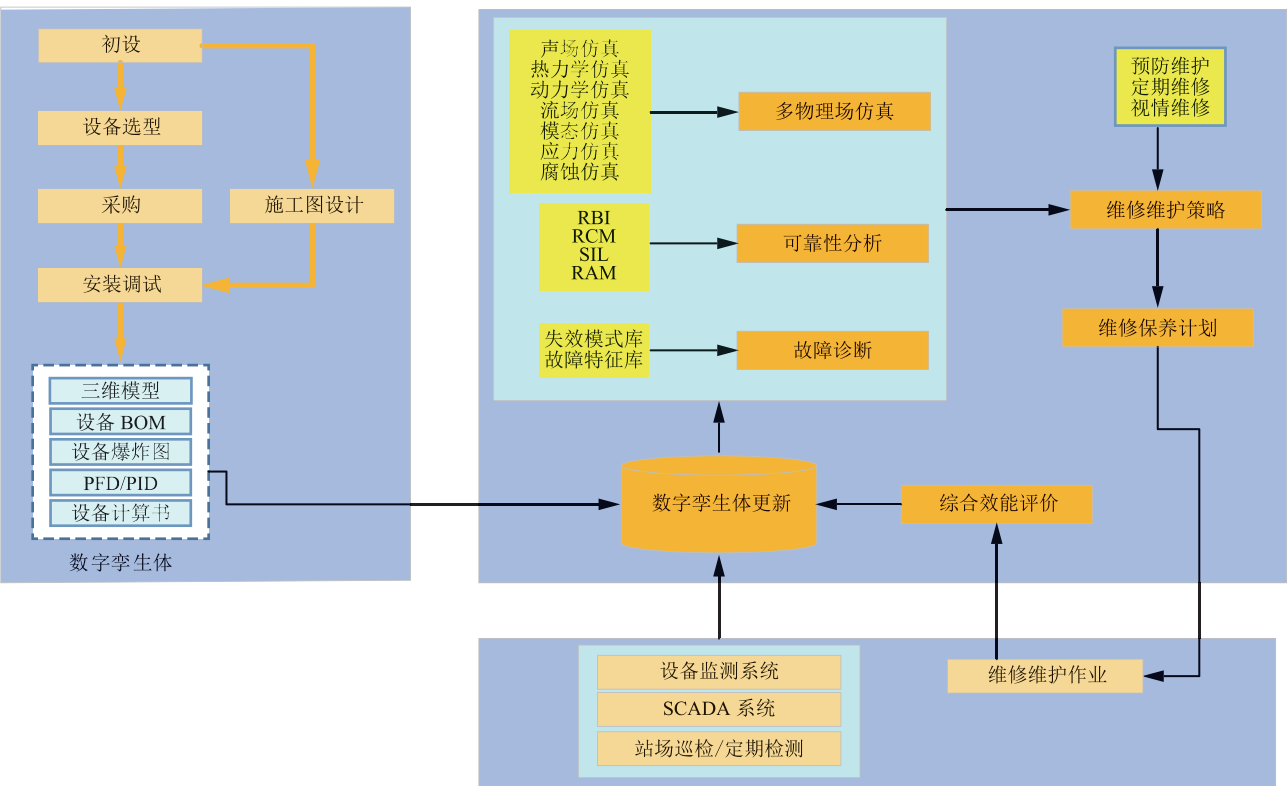


图4 基于数字孪生体的管道设备维修维护流程图

合现实技术,提高人机交互的体验性,将零部件三维结构、维修维护流程等虚拟信息叠加到同一个真实维修维护环境中,两种信息相互补充,清晰直观地显示出维

修维护的操作流程和操作步骤,协助现场操作人员作业,从而提高其工作准确性、安全性及高效性,可有效实施设备安全培训、操作培训、维修维护远程指导。

3.4 全生命周期管理

数字孪生体贯穿管道全生命周期的各个阶段,记录整个周期内全部对象、模型及数据,是管道系统的数字化档案,反映其在全生命周期各阶段的特征、行为、过程及状态等,可实现管道全业务、全过程信息化、可视化统一管理。同时,还可实现各个阶段业务模型和数据的传递、交换及共享,调用当前所处阶段并共享过去阶段的对象、模型及数据,为全过程质量追溯和持续提高管道系统管理水平提供依据和保障。以投产运行阶段为例,数字孪生体在管道设计和建设阶段的数据与模型可为管体质量追溯、设备可靠性分析提供准确的模型和数据来源。

4 结论

(1)分析数字孪生体的特征与内涵,得出数字孪生体可面向管道全生命周期,以数字化方式创建管道、设备、工艺等高逼真度虚拟模型,能够更加精确地模拟、监控、诊断、预测及控制管道物理实体在现实环境中的真实状态和行为,成为推进数字管道向智能管道和智慧管网发展的强大动力,具有广阔的应用前景。

(2)数字孪生体在产品的设计、飞机故障预测、汽车制造、电厂发电机组智能健康管理、复杂产品装配等领域具有较多应用案例,但该技术仍处于持续探索和不断完善阶段,应用模式尚未完全成熟。

(3)探讨数字孪生体在管道设计、调度优化、管道设备运行维护、管道全生命周期管理等场景应用的技术可行性,旨在通过多物理集成模型仿真分析、虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,充分利用模型、数据并集成多学科技术,解决传统方法存在的问题,提升管道技术和管理水平。

参考文献:

- [1] 胡晶. 工业互联网、工业 4.0 和“两化”深度融合的比较研究[J]. 学术交流, 2015(1): 151-158.
HU J. Comparative study on industry internet, industry 4.0 and deep integration of informationization and industrialization[J]. Academic Exchange, 2015(1): 151-158.
- [2] 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.
TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [3] KASEY P. Gartner top 10 strategic technology trends for 2018[EB/OL]. (2017-10-03)[2018-07-03]. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>.
- [4] KASEY P. Gartner top 10 strategic technology trends for 2017[EB/OL]. (2016-10-18)[2018-07-03]. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>.
- [5] IGLESIASA D, BUNTINGA P, ESQUEMBRI S, et al. Digital twin applications for the JET divertor[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 125: 71-76.
- [6] NEGRIA E, FUMAGALLIA L, MACCHI M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 939-948.
- [7] KAHLEN F J, FLUMERFELT S, ALVES A. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017: 85-112.
- [8] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017(7): 41-45.
YU Y, FAN S T, PENG G W, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(7): 41-45.
- [9] GRIEVES M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [10] 徐波, 李博, 宋小晖, 等. 油气管道智能化运行解决方案的思考[J]. 油气储运, 2018, 37(7): 721-727.
XU B, LI B, SONG X H, et al. Thinking on the solution of intelligent oil and gas pipeline operation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(7): 721-727.
- [11] 张海峰, 蔡永军, 李柏松, 等. 智慧管道站场设备状态监测关键技术[J]. 油气储运, 2018, 37(8): 841-849.
ZHANG H F, CAI Y J, LI B S, et al. Key technologies of equipment condition monitoring at the station of intelligent pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(8): 841-849.
- [12] ROSEN R, WICHERT G V, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of

- manufacturing[J]. IFAC-Papers on Line, 2015, 48(3): 567-572.
- [13] 庄存波,刘检华,熊辉,等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
- ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.
- [14] GRIEVES M. Origins of the digital twin concept[R/OL]. (2016-08-31)[2018-08-03]. https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept.
- [15] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles[C]. Reston: the 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012: 1-14.
- [16] 秦晓珠,张兴旺. 数字孪生技术在物质文化遗产数字化建设中的应用[J]. 情报资料工作, 2018, 39(2): 103-111.
- QIN X Z, ZHANG X W. Application of digital twin technology in the digital construction of material cultural heritage[J]. Information and Documentation Services, 2018, 39(2): 103-111.
- [17] RIOS J, HERNANDEZ J C, OLIVA M, et al. Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: literature review and implications in an aircraft[C]. Delft: 22nd ISPE-Inc International Conference on Concurrent Engineering, 2015: 657-666.
- [18] TIMOTHY D W, MARK B. Is Digital Thread/Digital Twin affordable? A systemic assessment of the cost of DoD's latest Manhattan Project[J]. Procedia Computer Science, 2017, 114: 47-56.
- [19] GE. GE digital twin: analytic engine for the digital power plant[R/OL]. (2016-06-01)[2018-08-09]. <https://www.ge.com/digital/sites/default/files/Digital-Twin-for-the-digital-power-plant-.pdf>.
- [20] TAO F, CHENG J, QI Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.
- [21] TUEGEL E J, INGRAFEAA R, EASON T G, et al.

Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[EB/OL]. (2012-01-30)[2018-07-08]. <https://www.hindawi.com/journals/ijae/2011/154798/>.

- [22] RIKARD S, KRISTINA W, JOHAN S C, et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 137-140.

(收稿日期:2018-08-14; 修回日期:2018-08-22; 编辑:王潇潇)

作者简介: 李柏松,男,1979年生,高级工程师,2009年博士毕业于中国石油大学(北京)机械设计专业,现主要从事管道设备、智慧管道相关研究工作。地址:河北省廊坊市广阳区新开路408号,065000。电话:0316-2170403,Email: libaisong@petrochina.com.cn

下 期 要 目

蛛网式管网系统对天然气产业发展的作用及启示

——周建,等

车载储氢技术研究现状及发展方向

——张志芸,等

天然气长输管道集成式压缩机关键技术研究进展

——古自强,等

原油管道流动安全评价方法及体系

——苗青,等

结蜡对内置电缆连续油管流场的影响

——李霄,等

成品油运输优化模型的研究与应用

——耿紫星,等

中俄油气管道施工常用标准对比

——孙国瀚,等

管道内封堵器卡瓦齿形角对锚定性能的影响

——李振北,等

基于物联网的油田输油泵远程DCS系统设计

——杨盛泉,等

LNG接收终端气化器冬季运行模式优化

——王同吉,等