

工业数字孪生技术体系及关键技术研究

刘阳 赵旭

(中国信息通信研究院信息化与工业化融合研究所,北京 100191)

摘要:研究了工业数字孪生内涵、发展脉络及意义,重点对工业数字孪生技术体系和关键技术发展趋势进行了深入剖析,分析了数字支撑、数字线程、模型构建、模型融合、模型修正、模型验证、人机交互等关键技术,提出了对工业数字孪生发展的建议。

关键词:工业数字孪生;数字线程;模型融合

中图分类号:F49;F424;TP18;F414

文献标识码:A

引用格式:刘阳,赵旭.工业数字孪生技术体系及关键技术研究[J].信息通信技术与政策,2021,47(1):8-13.

doi:10.12267/j.issn.2096-5931.2021.01.003

0 引言

近些年,随着全球工业互联网发展战略深入实施,工业领域催生出一批数字化、网络化、智能化的新模式、新业态。其中,工业数字孪生日趋成为学术、产业界研究热点,并有望成为推动工业企业数字化转型的新动能。与此同时,当前产业界对于工业数字孪生定义及内涵尚未形成统一认识,亟需系统梳理相关概念、关键技术、应用场景和实施路径,凝聚和深化产业共识,加速工业数字孪生技术创新和产业实践。

1 工业数字孪生内涵及意义

1.1 工业数字孪生的发展脉络

工业数字孪生发展经历了3个阶段,其发展的背后是数字化技术在工业领域的演进与变革。第一阶段,概念发展过渡期。2003年,美国密歇根大学Michael Grieves教授首次提出了数字孪生概念^[1],原因是当时PLM、仿真等工业软件已经较为成熟,为数字孪生在虚拟空间构建奠定了基础。第二阶段,航空航天行业应用期。2010年以后,数字孪生开始最早应用于航空航天行业,NASA和美国空军实验室是第一批应用数字孪生技术的企业,这与航空航天行业最早

建设基于模型的系统工程(MBSE)息息相关,能够支撑多类模型敏捷流转和无缝集成。第三阶段,多行业拓展应用期。当前,数字孪生应用已经由航空航天领域向多个行业拓展演进,以GE、西门子等为代表的工业企业加快构建数字孪生解决方案,为工业企业提供创新赋能服务。数字孪生蓬勃发展的背后与新一代信息技术的兴起、工业互联网在多个行业的普及应用息息相关。未来,数字孪生在工业领域的应用将持续深化,并加快推动工业企业数字化转型。

1.2 工业数字孪生的定义及功能架构

1.2.1 工业数字孪生的定义

工业数字孪生是以数据与模型的集成融合为核心的数字化转型方法论,基于多类建模工具在数字空间构建物理对象(包括资产、行为、过程等)的精准数字化映射,并通过IOT数据对各类模型进行实时驱动和修正,构建起综合决策能力,推动工业全业务流程闭环优化。

1.2.2 工业数字孪生的功能架构

工业数字孪生功能架构主要由连接层、映射层、决策层三部分组成,具体如图1所示。

(1)连接层。连接层具备采集感知和反馈控制两类功能,是数字孪生闭环优化的起始和终止环节。

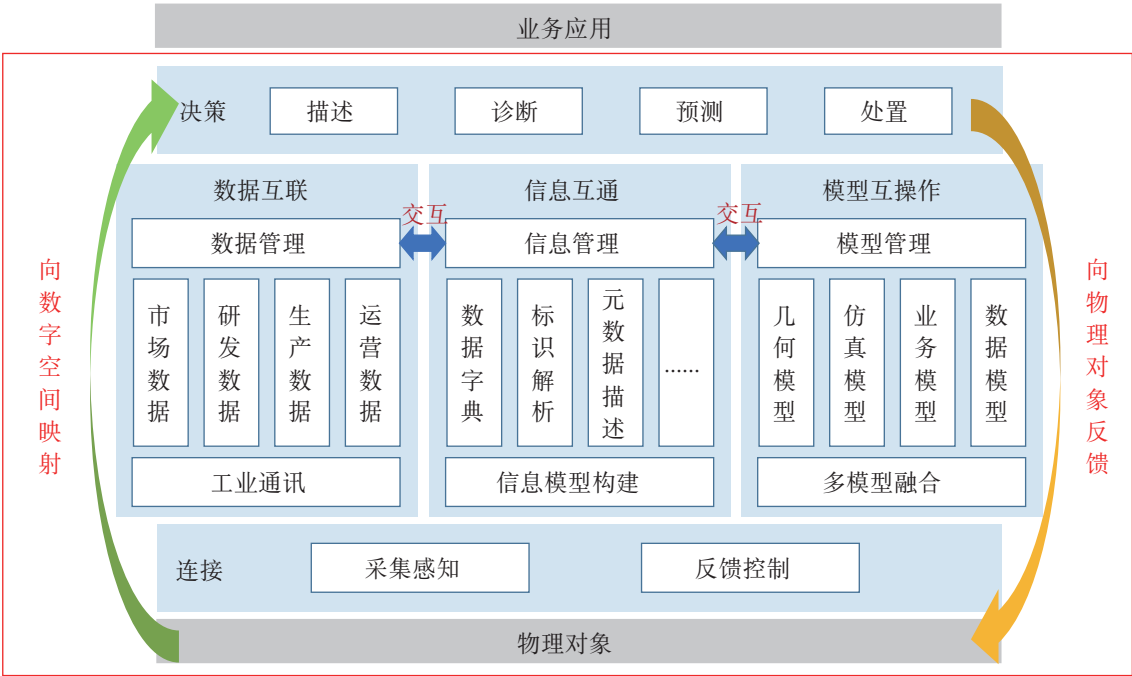


图 1 工业数字孪生功能架构

通过深层次的采集感知获取物理对象全方位数据,利用高质量反馈控制完成最终对物理对象的执行指令。

(2)映射层。映射层具备数据互联、信息互通、模型互操作 3 类功能,同时数据、信息、模型三者间能够自由交互。其中,数据互联指通过工业通讯实现物理对象市场数据、研发数据、生产数据、运营数据的全生命周期集成;信息互通指利用数据字典、标识解析、元数据描述等功能,构建统一的信息模型,实现对物理对象信息的统一描述;模型互操作指能够将几何模型、仿真模型、业务模型、数据模型等多类刻画物理对象内在规律的模型集成融合。

(3)决策层。在连接层和映射层的基础上,实现描述、诊断、预测、处置等不同程度的综合决策,并将最终决策指令反馈给物理对象,驱动物理对象控制执行。

工业数字孪生发展有三大典型特征:一是全生命周期实时映射,指孪生对象与物理对象能够在全生命周期实时映射,并持续通过实时数据修正完善孪生模型;二是综合决策,指通过数据、信息、模型的综合集成,构建起智能分析的决策能力;三是闭环优化,指数字孪生能够实现对物理对象从采集感知、综合决策到反馈控制的全流程闭环应用。

1.3 工业数字孪生的发展意义

美、德两大制造强国分别于 2020 年成立了数字孪生联盟和工业数字孪生协会,加快布局数字孪生技术。我国国家发展改革委、中央网信办印发《关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展实施方案》^[2],工业和信息化部出台《智能船舶标准体系建设指南(征求意见稿)》^[3],上海和雄安等地均在城市规划中提出打造数字孪生城市^[4-5]。Gartner 连续 3 年将数字孪生列为未来十大战略趋势,Global Market Insights 预测数字孪生市场在 2020—2026 年将保持 30% 多的稳定增长,从目前的 40 多亿美元增长到 350 多亿美元。由此可见,发展工业数字孪生意义重大。

(1)从国家层面看,随着我国工业互联网创新发展工程的深入实施,我国涌现了大量数字化网络化创新应用,但在智能化探索方面实践较少,如何推动我国工业互联网应用迈向智能化成为当前亟需解决的重大课题。而数字孪生为我国工业互联网智能化探索提供了基础方法论,成为我国制造业进一步高质量发展的关键抓手。

(2)从产业层面看,数字孪生有望带动我国工业软件产业快速发展,加快缩短与国外工业软件的差距。由于我国工业历程发展时间短,工业软件核心模型和

算法一直与国外存在差距,成为国家关键“卡脖子”短板。数字孪生能够充分发展我国工业门类齐全、场景众多的优势,释放我国工业数据红利,将人工智能技术与工业软件结合,通过数据科学优化机理模型性能,实现工业软件弯道超车。

(3)从企业层面看,数字孪生在工业研发、生产、运维全链条均能发挥重要作用。在研发阶段,数字孪生通过在虚拟空间的模拟验证工程,加快推动产品研发设计低成本试错;在生产阶段,数字孪生能够构建实时联动的三维可视化工厂,提升工厂一体化管控水平;在运维阶段,数字孪生可以将仿真技术与大数据技术结合,不但能够知道工厂或设备“什么时候发生故障”,还能够了解“哪里发生了故障”,极大提升了运维的安全可靠性。

2 工业数字孪生技术体系及关键技术

工业数字孪生不是近期诞生的一项新技术,而是一系列数字化技术的集成融合和创新应用,涵盖了数字支撑技术、数字线程技术、数字孪生体技术、人机交互技术四大类型。其中,数字线程技术和数字孪生体技术是核心技术,数字支撑技术和人机交互技术是基

础技术。工业数字孪生技术体系的架构如图2所示。

2.1 数字支撑技术体系

数字支撑技术体系具备数据获取、传输、计算、管理一体化能力,为数字孪生高质量开发利用数据提供基础支撑,涵盖了采集感知、执行控制、新一代通讯、新一代计算、数据模型管理五大类型技术。未来,集5类技术于一身的通用技术平台将成为数字孪生发展的“基础底座”。其中,采集感知技术不断创新推动数字孪生蓬勃发展,支撑数字孪生更深入获取物理对象数据。一是传感器不断朝着微型化发展,能够被嵌入到工业装备之中,实现更深层次的数据采集。当前,微型化传感器尺寸可达到毫米级,甚至更小。如GE研发的嵌入式腐蚀传感器,可嵌入到压缩机内部,能够实时显示腐蚀速率。二是多传感器融合技术快速发展,支撑单个传感器采集多类型数据,提升分析决策水平。如第一款L3自动驾驶汽车奥迪A8的自动驾驶传感器搭载了7种类型的传感器,包含毫米波雷达、激光雷达、超声波雷达等,可保证汽车决策的快速性和准确性。

2.2 数字线程技术体系

数字线程技术是数字孪生技术体系中最为核心的技术,能够屏蔽不同类型数据和模型格式,支撑全

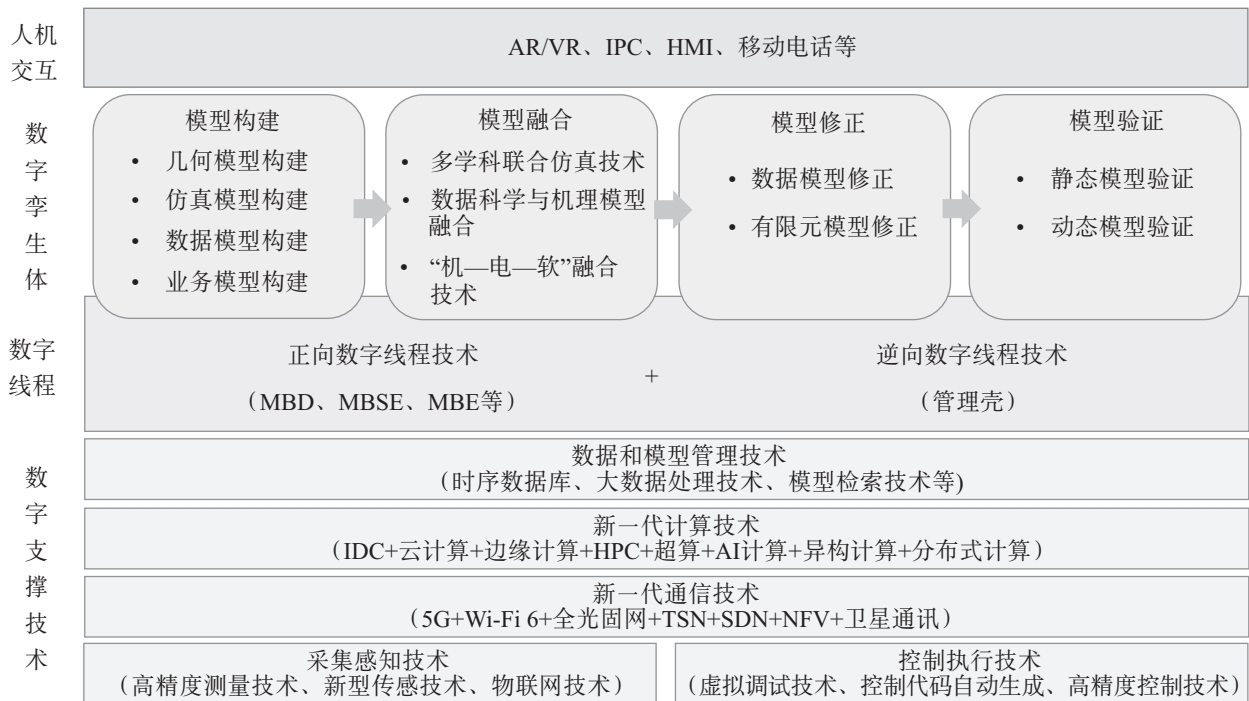


图2 工业数字孪生技术体系架构

类数据和模型快速流转和无缝集成,主要包括正向数字线程技术和逆向数字线程技术两大类型。

(1)正向数字线程技术以基于模型的系统工程(MBSE)为代表,在数据和模型构建初期就基于统一建模语言(UML)定义好各类数据和模型规范,为后期全类数据和模型在数字空间集成融合提供基础支撑。如空客利用模型系统工程(MBSE)设计和制造A350飞机,实现了比A380工程变更数量降低10%的目标,极大地缩短了项目周期。

(2)逆向数字线程技术以管理壳技术为代表,面向数字孪生打造了数据/信息/模型的互联/互通/互操作的标准体系,对已经构建完成或定义好规范的数据和模型进行“逆向集成”,进而打造虚实映射的解决方案。如在数据互联和信息互通方面,德国在OPC-UA网络协议中内嵌信息模型,实现了通讯数据格式的一致性;在模型互操作方面,德国依托戴姆勒Modolica标准开展多学科联合仿真,目前该标准已经成为仿真模型互操作全球最主流的标准。

2.3 数字孪生体技术体系

数字孪生体是数字孪生物理对象在虚拟空间的映射表现,重点围绕模型构建技术、模型融合技术、模型修正技术、模型验证技术开展一系列创新应用。

2.3.1 模型构建技术

模型构建技术是数字孪生体技术体系的基础,几何、仿真、数据、业务等多类建模技术的创新,提升在数字空间刻画物理对象的形状、行为和机理的效率。

(1)在几何建模方面,基于AI的创成式设计工具提升产品几何设计效率。如上海及瑞利用创成式设计帮助北汽福田设计前防护、转向支架等零部件,利用AI算法优化产生了超过上百种设计选项,综合比对用户需求,从而使零件数量从4个减少到1个,重量减轻70%,最大应力减少18.8%。

(2)在仿真建模方面,仿真工具通过融入无网格划分技术降低仿真建模时间。Altair基于无网格计算优化求解速度,消除了传统仿真中几何结构简化和网格划分耗时长的问題,能够在几分钟内分析全功能CAD程序集而无需网格划分。

(3)在数据建模方面,传统统计分析叠加人工智能技术,强化数字孪生预测建模能力。如GE通过迁移学习提升新资产设计效率,有效提升航空发动机模

型开发速度和模型再开发精确度,以保证虚实精准映射。

(4)在业务建模方面,BPM、RPA等技术加快推动业务模型敏捷构建。如SAP发布业务技术平台,在原有Leonardo平台的基础上创新加入RPA技术,形成“人员业务流程创新—业务流程规则沉淀—RPA自动化执行—持续迭代修正”的业务建模解决方案。

2.3.2 模型融合技术

在多类模型构建完成后,需要通过多类模型“拼接”构建更加完整、精准的数字孪生体,而模型融合技术在这过程中发挥了重要作用,重点涵盖了跨学科模型融合技术、跨领域模型融合技术、跨尺度模型融合技术。

(1)在跨学科模型融合技术方面,多物理场、多学科联合仿真加快构建更完整的数字孪生体。如苏州同元软控通过多学科联合仿真技术为嫦娥五号能源供电系统量身定制了“数字伴飞”模型,精确度高达90%~95%,为嫦娥五号飞行程序优化、能量平衡分析、在轨状态预示与故障分析提供了坚实的技术支撑。

(2)在跨类型模型融合技术方面,实时仿真技术推动构建数字孪生体由“静态描述”向“动态分析”演进。如ANSYS与PTC合作构建实时仿真分析的“泵”孪生体,利用深度学习算法进行CFD训练,获得流场分布降阶模型,极大缩短了仿真模拟时间。

(3)在跨尺度模型融合技术方面,通过融合微观和宏观的多方面机理模型打造复杂系统级数字孪生体。如西门子持续优化汽车行业Pave360解决方案,构建系统级汽车数字孪生体,整合传感器电子、车辆动力学和交通流量管理不同尺度模型,构建从汽车生产、自动驾驶到交通管控的综合解决方案。

2.3.3 模型修正技术

模型修正技术基于实际运行数据持续修正模型参数,是保证数字孪生不断迭代精度的重要技术,涵盖了数据模型实时修正、机理模型实时修正两种技术。

(1)从IT视角看,在线机器学习基于实时数据持续完善统计分析、机器学习等数据模型精度。如流行的Tensorflow、Skit-learn等AI工具中都嵌入了在线机器学习模块,基于实时数据动态更新模型。

(2)从OT视角看,有限元仿真模型修正技术能够基于试验或者实测数据对原始有限元模型进行修正。

如在达索、ANSYS、MathWorks 等领先厂商的有限元仿真工具中,均具备了有限元模型修正的接口或者模块,支持用户基于试验数据对模型进行修正。

2.3.4 模型验证技术

模型验证技术是数字孪生模型由构建、融合到修正后的最终步骤,唯有通过验证的模型才能够安全地下发到生产现场进行应用。当前模型验证技术主要包括静态模型验证技术和动态模型验证技术两大类,通过评估已有模型的准确性,提升数字孪生应用的可靠性。

2.4 人机交互技术体系

虚拟现实技术带来全新的人机交互模式,以 AR/VR 为代表的新兴技术正加快与几何设计、仿真模拟的融合,持续提升数字孪生可视化效果。

(1) 在“AR+CAD”方面,西门子的 Solid Edge 2020 产品新增增强现实功能,能够基于 OBJ 格式快速导入到 AR 系统,提升 3D 设计外观感受。

(2) 在“AR+三维扫描建模”方面,PTC Vuforia Object Scanner AR 产品可扫描 3D 模型并将其转换为 Vuforia 引擎兼容的格式。

(3) 在“AR+仿真”方面,西门子将 COMOS Walkinside 3D 虚拟现实与 SIMIT 系统验证和培训的仿真软件紧密集成,以支持更高效的工厂工程和较短的调试时间^[6]。

3 发展建议

结合上文的研究,可对工业数字孪生发展提出如下建议。

一是加快制定数字孪生系统工程标准体系。依托我国航空航天领域已有系统工程体系,邀请全国专家封闭完成标准体系制定工作,并向全社会征求意见。标准体系制定后,鼓励我国各行业开展垂直行业标准制定,并在工程实践中不断迭代标准版本。

二是加大建模工具的培育和产权保护。鼓励全社会开展建模工具创新,完善工业软件减费降税政策,保护创新企业的知识产权。大力支持应用企业使用国产化建模工具,提升财政补贴力度,撬动应用企业“敢用”国产工具。

三是广泛开展工业机理模型汇聚共享行动。鼓励平台企业与高校合作共同培育工业机理模型,打造“1

平台+N 高校”的合作体系,将平台的数据汇聚优势与高校的机理分析优势结合,在完成项目过程中沉淀各类机理模型,丰富我国知识库机理模型种类和数量。

四是加快 AI 技术与机理模型融合创新。支持构建数字孪生创新实验室,充分发挥我国数据量多、AI 应用技术领先的优势,鼓励高校、领先企业研发人工智能与机理模型融合技术,基于 AI 绕过机理缩短我国与国外模型质量差距。

五是积极培育数字孪生总集成总承包商。鼓励各联盟、协会面向各行业遴选一批主要的总集成总承包商,并在联盟发起“合作共建”行动,为总集成总承包商配套好软件厂商、装备厂商和专业技术厂商,形成打造工厂级数字孪生的整体实力,提升我国国产化数字孪生建设率。

4 结束语

数字孪生应用需要多类数字化工具支撑,在美国对我国进行科技封锁、我国开展“内循环和国际国内双循环”发展的新形势下,我国应充分利用工业门类齐全、应用场景众多的优势,持续培育国产化软件工具和总集成总承包商,不断积累工业数据和模型,加快人工智能与工业模型集成应用,实现数字孪生弯道超车。

参考文献

- [1] Michael Grieves. Digital Twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [R/OL]. (2014) [2020-12-17]. https://www.autobeatonline.com/cdn/cms/Digital_Twin_White_Paper_2.pdf.
- [2] 国家发展改革委,中央网信办. 关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展实施方案的通知[Z/OL]. (2020-04-10) [2020-12-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/fkyqfgwzxdzt/fkgjdt/fghc/202004/t20200410_1225542_ext.html.
- [3] 工业和信息化部装备工业二司,国家市场监管总局标准技术司. 智能船舶标准体系建设指南(征求意见稿)[Z/OL]. (2020-04-30) [2020-12-17]. http://www.samr.gov.cn/bzjss/zqyj/202004/t20200430_314928.html.
- [4] 上海市发展和改革委员会. 上海市推进新型基础设施建设行动方案(2020—2022 年)[Z/OL]. (2020-05-12) [2020-12-17]. <http://fgw.sh.gov.cn/zgjil/20200512/>

63f3630e9d824e07976d6c552ed364e7. html.

- [5] 河北省人民政府. 河北雄安新区规划纲要[Z/OL].
(2018-04-21) [2020-12-17] http://www.xiongan.gov.cn/2018-04/21/c_129855813.htm. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/fkyqfgwzxdzt/fkgjdt/fgfc/202004/t20200410_1225542_ext.html.
- [6] 刘阳. 工业数字孪生技术体系及发展趋势[N]. 人民邮电, 2020-07-10(06).

作者简介:

刘阳 中国信息通信研究院信息化与工业化融合研究所工程师,主要从事工业数字孪生、工业互联网产业政策研究工作,主持并核心参与多份白皮书的编制工作,牵头起草多项地方政府工业互联网发展规划

赵旭 中国信息通信研究院信息化与工业化融合研究所工程师,主要从事两化融合、工业数字孪生领域产业政策研究工作,牵头并核心参与若干工业互联网平台关键标准研制工作

Research on industrial digital twin technology system and key technologies

LIU Yang, ZHAO Xu

(Informatization and Industrialization Integration Research Institute, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper discusses the connotation, development context and significance of the industrial digital twin, focusing on an in-depth analysis of the industrial digital twin technology system and key technology development trends, and finally gives the development prospect of the industrial digital twin.

Keywords: industrial digital twin; digital thread; model fusion

(收稿日期:2020-12-17)