



基于数字孪生模型的工业互联网应用

刘彬¹, 张云勇²

(1. 上海航空工业(集团)有限公司, 上海 200232;
2. 中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100176)

摘要: 工业互联网是我国制造业智能化、服务化转型的重要推动力。立足制造业视角, 介绍了工业互联网的定义与数据来源, 提出了工业互联网的五层体系架构及价值核心。以数字孪生为代表的工业数据分析模型是制造业发展工业互联网的核心, 详细讨论了数字孪生的定义、特点、关键技术及在产品全生命周期的典型应用。最后分析了我国在推进工业互联网应用过程中存在的问题及应对措施。

关键词: 工业互联网; 智能制造; 数字孪生; 产品生命周期管理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019088

Application of digital twin model based industrial internet

LIU Bin¹, ZHANG Yunyong²

1. Shanghai Aviation Industrial (Group) Co., Ltd., Shanghai 200232, China
2. Research Institute of China United Network Communication Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: Industrial internet is an important engine for manufacturing enterprises to provide intelligent products and services in China. From manufacturing enterprises' point of view, the definition and data sources of industrial internet were introduced, and the five-layer function architecture of industrial internet was proposed. The industrial data analysis model represented by digital twin played a crucial role in developing industrial internet for manufacturing enterprises, whose definition, characteristics, key technologies and applications in the whole product lifecycle were elaborated. Finally, the problems and solutions of carrying forward industrial internet in China were addressed.

Key words: industrial internet, intelligent manufacturing, digital twin, product lifecycle management

1 引言

近年来, 以大数据、人工智能为代表的新一代信息技术蓬勃发展。2017年12月8日, 中共中央

总书记习近平总书记在中共中央政治局第二次集体学习时指出, “大数据发展日新月异, 我们应推动实施国家大数据战略, 加快完善数字基础设施, 推进数据资源整合和开放共享, 保障数据安

收稿日期: 2019-02-12; 修回日期: 2019-04-28

基金项目: 工业和信息化部民用飞机专项科研项目 (No.MJ-2017-J-90)

Foundation Item: Civil Aircraft Special Scientific Research Project of Ministry of Industry and Information Technology of China (No.MJ-2017-J-90)

全,加快建设数字中国,更好服务我国经济社会发展和人民生活改善。”根据中国信息通信研究院的初步测算,2018年我国大数据产业的规模约为6 200亿元。工业是国民经济的命脉,在产品设计制造和运行维护过程中产生了海量数据。以航空制造业为例,空客A350飞机试飞阶段收集的参数将近60万个,每天可收集到超过1.8 TB的数据;波音B787飞机仅执行一个航班,所采集到的客舱压力、高度、燃油消耗等数据就可达到0.5 TB。航空制造商利用采集到的数据对飞机或发动机等系统部件物理特性进行智能分析,将分析结果反馈给设计制造部门和航空公司,为产品设计制造优化和飞机低耗高效可靠运营提供支撑。2017年6月“巴黎—布尔歇国际航空航天展览会”期间,波音公司、空中客车公司同时对外发布各自的大数据分析平台,开始为航空公司客户提供增值服务。

世界各国逐渐认识到新一代信息技术是推动工业变革和转型升级的重要驱动力。2012年美国率先提出“先进制造业伙伴计划”,推动高端制造业重返美国。2013年德国提出“工业4.0”战略,旨在通过构建信息物理系统(cyber-physical system, CPS)推动制造业智能化转型。2015年我国发布了《中国制造2025》,提出以新一代信息技术与制造业深度融合为主线,以推进智能制造为主攻方向,不断提升企业的产品质量、生产效率和服务水平^[1-2]。不同国家基于各自的基础和优势,提出了本国发展现代工业的不同策略和路径,但本质都是实现新一代信息技术与工业的深度融合,充分发挥数据价值,驱动制造业智能化、服务化转型升级,全面提高发展质量和核心竞争力^[3]。以数字孪生(digital twin)模型为代表的工业机理和知识的数字化积累、运用和发展,以工业互联网为代表的新一代信息技术与工业融合体系架构的应用与实践,是我国制造业聚焦自身优势、推动自身变革、赶超国外行业巨头、实现“弯道超

车”的关键。

2 工业互联网

18世纪以来,人类经历了工业革命和互联网革命两大洗礼,带来工业生产、控制能力的提升和计算、通信能力的发展,两者的有机融合将给世界带来又一次崭新的变革。2012年11月,美国通用电气公司(General Electric, GE)发布《工业互联网:打破智慧与机器边界》白皮书^[4],正式提出工业互联网的概念,认为工业互联网是200多年以来继工业革命、互联网革命之后的第三次影响世界的革命性转折。2014年3月,GE与AT&T、思科、IBM和英特尔共同发起成立了工业互联网联盟,推动工业互联网技术的研究和应用。2016年2月,在工业和信息化部的大力支持和指导下,中国信息通信研究院联合制造业、通信业、互联网业等企业联合成立了工业互联网产业联盟,共同推进我国工业互联网顶层设计、技术研发、标准制定、产业实践和国际合作等工作。

2.1 工业互联网的定义

工业互联网是指通过网络将工业系统中的智能物体(intelligent machine)、智能分析(advanced analytics)和人(people)相连接的系统^[4]。其中智能物体是指具有通信能力,可以接入网络的物理世界中的物体,包括智能终端、传感器、具有通信能力的机器设备等。智能分析是指人将工业领域的业务流程、专业技术等知识与数据科学相结合,形成面向不同业务目标的工业数据分析模型,分析结果可以部分代替人的脑力劳动。工业互联网的实质是通过工业系统中智能物体的互联,获取智能物体的工业数据,建立面向特定业务场景的工业数据分析模型,进而形成分析结果以优化智能物体的设计、制造与运行等。

推进工业互联网技术研究和深度应用是一项



复杂的系统工程，需要各行业的共同努力。通过工业机理和数据科学相结合，将工业领域的业务流程、专业技术等知识转化为工业数据分析模型是工业互联网的价值和核心，也是以制造业为代表的工业企业的努力方向。

2.2 工业互联网的数据来源

工业互联网的数据主要有 3 个来源：企业信息系统数据、机器设备数据和外部数据^[5]。PLM、ERP、MES、CRM 等企业信息系统存储了包括产品研发设计、生产制造、供应链、运营支持等大量高价值密度的业务数据，是制造业的核心数据资产。机器设备数据指由传感器、仪器仪表和智能终端等采集的反映机器设备运行状态的数据，既包括企业内部生产设备运行产生的数据，也包括企业交付给客户的智能产品运行和维护产生的数据。例如飞机的飞行参数数据（QAR）、远程故障诊断数据（RD）就是飞机制造商交付给航空公司的飞机产品运行和维护产生的数据。工业互

联网应用所需的绝大部分数据均来自企业信息系统和机器设备。以航空制造业为例，按照美国国家标准与技术研究院提出的企业数据分类标准，从企业、产品和价值链 3 个维度对其拥有的数据类型进行了梳理，如图 1 所示。外部数据则主要包括与制造业发展相关的市场、舆情、社交等信息。

数据必须经过“管理”，确保数据质量达到规定标准，并按照一定结构形式组织，以达到可以分析利用的水平。国际数据管理协会（DAMA）提出的数据管理知识体系是目前数据管理领域普遍采用的方法论，对数据管理职能、交付成果、角色和术语等进行了标准化的定义^[6]，通过建立数据管理体制机制，明确数据管理责任主体，制定数据管理流程、制度、架构、规范和标准，建立数据管理组织，实现对数据全生命周期的管控。

2.3 工业互联网的体系架构

工业互联网通过构建“万物互联”的基础网

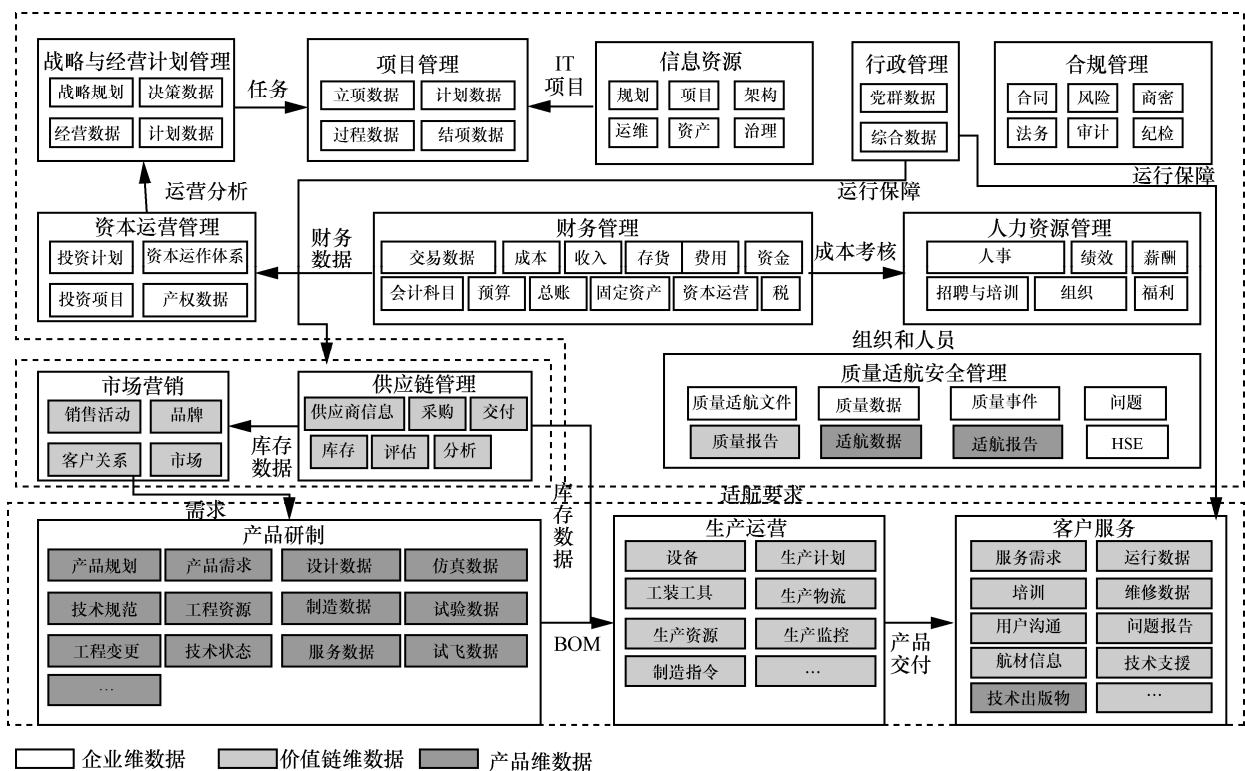


图 1 航空制造业数据类型

络,实现工业数据的全面感知、动态传输、实时分析,形成科学决策和智能控制,是制造业智能化、服务化转型发展的必然之路。工业互联网呈现“工业数据+工业云平台+工业应用”的功能层级架构,是由信息技术企业、工业企业、互联网企业和众多应用开发者共同构建的生态体系。立足制造业视角,基于工业互联网产业联盟提出的工业互联网平台通用功能架构,突出工业企业核心能力和竞争优势,工业互联网的体系架构如图2所示。

数据采集层收集企业信息系统数据、生产设备和产品运行数据及市场、社交等外部数据,利用协议解析技术实现多源异构数据的互联互通和互操作,利用边缘计算技术实现数据的预处理,降低网络传输负载和工业云平台计算压力。网络传输层将采集到的数据以有线或无线方式传输到

工业云平台。

工业云平台自下向上包括基础设施层、平台工具层和数据应用层。基础设施层提供服务器、存储、网络和虚拟化等服务。平台工具层在以Cloud Foundry为代表的通用PaaS平台基础上增加工业数据管理、建模、分析功能,将工业数据分析模型固化封装成可移植复用的工业微服务组件。平台工具层本质上是可扩展的开放式工业操作系统。数据应用层用来快速构建基于工业微服务组件的定制化工业应用,面向工业产品全生命周期特定业务场景的需求,把工业产品及相关技术过程中的知识经验、最佳实践封装成应用软件,是工业技术软件化的重要成果。

3 数字孪生模型

以飞机、汽车、船舶、武器系统为代表的复

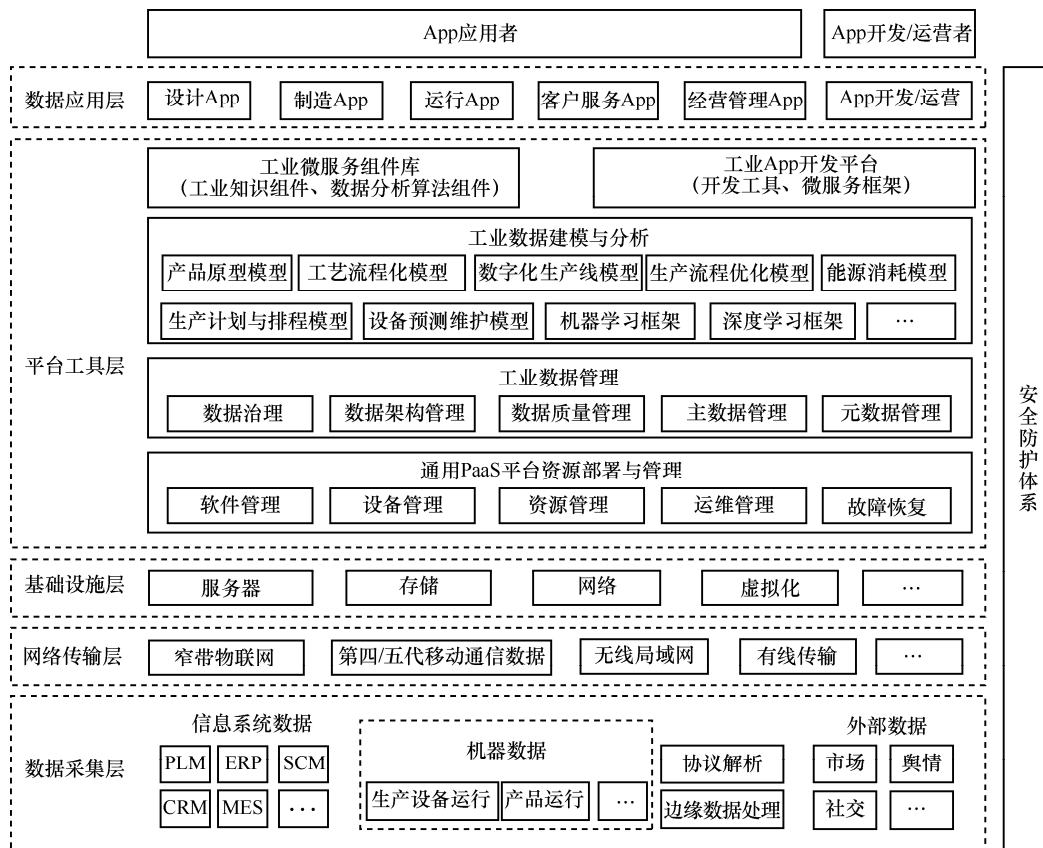


图2 工业互联网体系架构



杂产品设计、制造、运行、项目管理等过程十分复杂,在不同阶段可能表现出“不可预测的非期望行为”。通过基于数字孪生模型的仿真预测可以最大程度减少复杂产品的该类行为,避免不可知的负面事件发生^[8]。数字孪生模型是工业机理知识与数据科学融合的产物,是工业数据分析模型的典型代表。数字孪生的雏形由 Michael Grieves 于 2002 年提出,经过不断丰富完善,2011 年美国空军研究实验室和美国国家航空航天局(NASA)合作提出构建未来航天器的数字孪生,数字孪生的定义基本确定下来^[9],目前已被 NASA、GE、西门子、达索等机构广泛采用。

3.1 定义与特点

数字孪生是指在虚拟空间构建的可以表征物理实体特征、形成过程和行为的虚拟数字化表达,具有多物理性、多尺度性和概率性等特点。数字孪生在理想情况下包含了物理实体的所有信息,是物理实体在虚拟空间的镜像,具有以下主要特点。

(1) 通过对虚拟空间数字孪生的运行分析,无需建立物理实体,就可以监控、诊断、预测、控制物理实体在真实环境中形成过程、状态和行为。随着对世界理解的深入和模拟物理世界能力的加强,数字孪生表征物理实体的能力越来越强,但在一些关键环节尚无法完全取代物理实体。

(2) 根据产品全生命周期管理理论,物理实体随着所处的产品阶段动态变化,因为数字孪生是物理实体在虚拟空间的镜像,所以数字孪生也随之动态变化。

描述物理空间的物理实体和虚拟空间的数字孪生关系的镜像关系模型如图 3 所示,一般包含以下 4 个步骤:基于物理实体的机理和数据科学知识,在虚拟空间构建它的数字孪生;将通过控制单元、传感器等采集的物理实体运行状态数据和运行维护历史数据等动态同步到数字孪生,对其进行迭代优化;在虚拟空间里构建体现真实环

境的虚拟环境,对优化后的数字孪生在虚拟环境里仿真,模拟物理实体在真实环境里的行为状况;对模拟仿真的结果进行分析,生成有价值的信息,反馈给物理实体,改进优化物理实体的设计、制造和运行维护等。

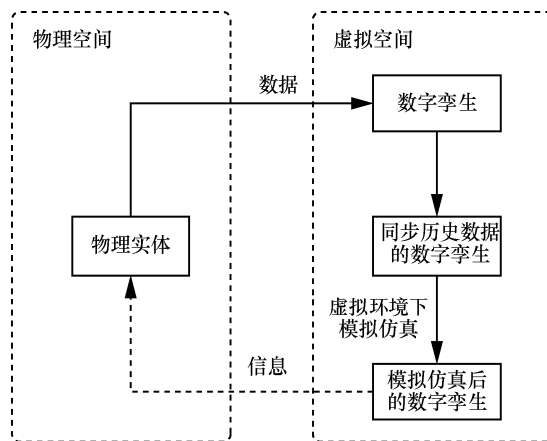


图3 物理实体与数字孪生的镜像关系模型

广义上来讲,由物理实体的数字孪生和反映真实运行环境的虚拟环境组成的虚拟空间,也是其对应物理空间的数字孪生。

3.2 关键技术与难点

数字孪生的应用起源于美国航空航天领域,已取得了长足进展。例如 GE 每下线一台飞机发动机,都会同时生成它的数字孪生,有 2 000 多个重要特征参数表征发动机性能。每一次洲际飞行,每个发动机可以产生约 0.5 TB 的数据。发动机上的传感器收集数据,传送给发动机控制单元,经处理后传输给发动机的数字孪生,用于同步更新数字孪生状态,进而预测发动机故障,优化维修计划,开展视情维修和可预测维修,减少因飞机过度检修或非计划停飞造成的损失。数字孪生的构建和仿真是一个复杂的过程,关键技术与难点主要集中在以下 3 个方面。

(1) 高保真度的多物理多尺度建模

数字孪生是物理实体在虚拟空间的数字化表达,其应用效果取决于其对物理实体的保真程度。物理实体的每个物理特性都有其特定的模型描

述,例如计算流体动力学模型、结构动力学模型、热力学模型、疲劳损伤模型以及材料状态演化模型。如何将这些模型关联耦合在一起,是建立数字孪生并发挥其作用的关键。基于多物理多尺度集成模型的仿真结果能够更加精确地反映物理实体在真实环境中的状态和行为。

(2) 高置信度的预测分析

高保真度的物理建模完成后,以物理实体的实时运行测量数据、历史数据、关键技术状态参数数据为观测量,以动态贝叶斯网络、机器学习、深度学习等概率统计算法为工具,开展物理实体设计、制造、运行服务等阶段不确定性预测,提供高置信度的产品故障诊断与预测、剩余健康寿命预测等信息。

(3) 高实时性的数据交互

物理实体需要把运行状态和维护历史等数据动态实时地传递给数字孪生,数字孪生需要把故障诊断结果、评估预测结果、对物理实体的行为控制等信息准确实时地传递给物理实体,两者之间高实时性的数据交互是数据孪生技术应用的基础和前提。

3.3 典型应用

数字孪生可广泛应用于产品全生命周期,实现对产品行为方式和性能指标的分析预测,提高产品研制和运行效率,降低生产和运维成本。

(1) 研发设计阶段

利用数字孪生可以提高设计准确性,在不必试制物理实体的情况下,验证产品在真实环境中的性能。使用计算机辅助设计(CAD)工具开发出满足技术规格的产品虚拟原型,精确地记录产品的各种物理参数,以可视化的方式展示出来,并通过一系列可重复、可变参数、可加速的仿真实验来检验产品在不同外部环境下的行为和性能。例如飞机方案设计阶段的重点是设计飞机的气动布局和总体布置,利用空气动力学计算结果,用软件构建飞机的虚拟气动外形,然后通过计算

流体动力学(CFD)运算,反复优化确定几个备选方案,再加工成实物模型,通过风洞试验确定最终方案。

(2) 市场营销阶段

在不必生产实际产品的情况下,将利用数字孪生构建的产品虚拟原型简化为市场营销人员使用的虚拟产品,客户通过虚拟现实技术模拟体验产品内外部结构及功能性能。这样,一方面根据客户提出的产品改进意见优化产品设计;另一方面根据客户需求进行产品个性化配置选型和定制化生产,实现产品柔性制造。

(3) 生产制造阶段

将产品的数字孪生同生产过程、生产设备、生产线等其他形态的数字孪生高度集成,将生产阶段各要素(原材料、设备、工艺、工序等)通过虚拟方式集中在产品虚拟的生产过程中,模拟仿真产品生产全过程,记录生产过程中的关键参数,对产能、效率及可能出现的生产瓶颈等问题进行预判与改进,缩短新产品导入周期,提高产品生产交付速度,降低产品生产成本。

(4) 运营支持阶段

利用数字孪生模拟产品装卸、使用、更换零部件等运行维护操作,开展相关工作培训。利用安装在产品上的传感器和控制系统记录的各种参数等数据,构建产品部件级、系统级甚至产品级健康指标体系。利用产品数字孪生在虚拟环境里的模拟运行,对产品故障进行预测。预测性维修分析结果可以对产品维修策略和备品备件管理策略进行针对性调整优化,降低甚至避免产品非计划停机带来的损失。

3.4 应用案例

数字孪生广泛应用于以航空制造为代表的众多工业领域,下面以美国空军研究实验室为解决复杂环境下航空器机体结构健康状况和寿命预测问题采用的数字孪生作为案例详细说明^[10]。

在决定航空器是否可以安全执行飞行任务



时, 机体结构健康状况 (机体材料状态、损伤等) 是一项重要的指标。即使是同一类型的航空器, 因为制造装配质量、材料特性、飞行历史、驾驶习惯等差异, 机体结构状况也存在很大的个体差异。因此必须对航空器进行逐一分析, 确定是否足够可靠安全执行飞行任务。航空器机体结构健康状况分析过程如图 4 所示。

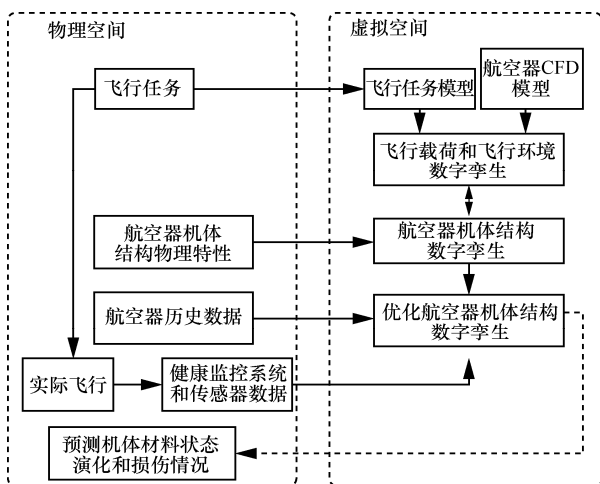


图 4 航空器机体结构健康状况分析过程

航空器机体的物理特性分别由不同的模型表征, 例如结构动力学模型、热力学模型、应力分析模型、疲劳损伤模型、材料状态演化模型等。将这些基于不同物理特性的模型耦合关联到一起, 构建航空器机体结构的数字孪生。航空器的 CFD 模型和对飞行任务的仿真可以构建起飞行载荷和环境的数字孪生。利用航空器运行与结构状况等历史数据, 更新航空器机体结构的数字孪生, 在虚拟飞行环境条件下预测虚拟飞行载荷对材料状态演化和损伤情况的影响。

在航空器实际飞行后, 其健康监控系统记录了大量飞行参数数据, 同时在航空器某些关键部位安装的传感器记录了张力和损伤探查数据。通过对航空器虚拟飞行和实际飞行后机体结构健康状况的对比分析, 不断迭代, 提升机体结构数字孪生的拟真度。实际飞行次数越多, 机体结构数字孪生的拟真度就越高。

为了预测航空器的剩余寿命, 需要对所有可能的载荷引起的机体结构反应建模, 进而模拟仿真机体结构损伤状态演进情况, 并利用航空器实际飞行后机体关键部位的损伤状态的真实测量结果, 不断优化模型。

4 问题与对策

新一代信息技术的迅猛发展推动社会正从信息技术 (IT) 时代进入数据技术 (DT) 时代。阿里巴巴集团创始人马云认为, IT 时代以自我控制、自我管理为主, 而 DT 时代则以激发生产力、服务大众为主。数据的价值从没有像现在这么重要。谁掌握了数据, 谁就掌握了开启未来的钥匙。我国工业互联网产业从无到有, 经过近几年的快速发展, 在工业云基础设施、平台使能、应用开发等领域已接近国际先进水平。但在对制造业最重要的工业数据建模与分析能力方面, 与波音公司、空中客车公司、GE 等国际先进制造企业存在较大差距, 难以有效支撑由单纯提供产品向同时提供产品与服务转变。

4.1 主要问题

(1) 数据发展水平参差不齐

国际上普遍认为, 数据发展分为 3 个阶段。在数据 1.0 阶段, 数据服务于特定的业务应用; 在数据 2.0 阶段, 数据支撑业务流程的优化改进; 在数据 3.0 阶段, 数据驱动企业智能化、服务化转型。目前我国制造业多数处于数据 2.0 阶段, 数据管理基础薄弱, 数据的准确性、唯一性、完整性等无法得到有效保证, 数据质量问题突出。

(2) 缺乏工业互联网基础平台

工业数据分析与应用要基于稳定、可靠、可扩展的工业互联网平台, 平台建设需要较高的技术水平和较大的资金投入。我国制造业多数在数据采集、数据处理、数据存储、数据集成、数据安全防护等方面的整体实力较弱, 仅靠企业自身人力和资金的投入难以为继。

(3) 缺乏工业数据分析模型

我国制造业的数据分析与应用多数仍停留在报表统计与图形展示层面,缺乏对工业数据分析算法和工具的掌握,尤其是缺乏建立面向不同业务域和目标的工业数据分析模型,无法有效将数据转化为支撑决策的信息。

(4) 缺乏完善的配套机制和充足的人才储备

工业互联网应用和信息安全保护存在一定矛盾,目前缺乏在确保信息安全的前提下推进工业互联网应用的体制机制,数据所有权相关法律法规尚不健全。工业互联网应用需要大量既具备统计学、机器学习、深度学习等数据科学知识,又具有工业领域技术背景的复合型人才,企业相关人才储备严重不足。

4.2 解决对策

我国制造业要牢牢把握数据驱动下智能化、服务化转型的机遇,避免沿着行业标杆企业的足迹亦步亦趋,力争实现“弯道超车”。

(1) 建立健全数据管理体系

工业互联网的“原材料”是高质量的数据,基于低质量甚至错误数据的分析结果是没有意义的。制造业应建立健全数据管理体系,通过制定和实施数据管理流程、制度、规范和标准,实现对数据全生命周期的管控,保证数据的准确性、唯一性、完整性、有效性和一致性。同时,采用“计划—执行—检查—处理”(PDCA)的质量管理方法,查找分析数据质量问题,定义数据质量指标,开展数据质量评估,制定并实施数据质量改进措施。

(2) 建设公用工业互联网平台

复杂的建设技术要求和巨大的资金投入使每个企业很难也没有必要单独建设工业互联网平台。虽然中国航天科工集团有限公司、海尔集团、中国电信集团有限公司、华为技术有限公司等企业建设了各自的工业互联网平台,并具有一定的用户规模,但与以 GE Predix 平台和西门子

MindSphere 平台为代表的国际主流工业互联网平台相比,在总体架构、平台功能、性能指标、运行维护等诸多方面都存在较大差距。应将工业互联网平台作为信息化与工业化深度融合的重要基础设施,由国家组织信息技术企业、工业企业、互联网企业等利益相关方,集中力量统一规划、统一投资、分步建设,建成后委托电信运营商运营管理,各制造企业作为用户租用公用工业互联网平台的服务。

(3) 建立基于数字孪生的工业数据分析模型

数字孪生是工业机理知识和数据科学融合的产物,是承载工业流程、技术、知识和经验的重要载体。制造业应不断提升对产品本身及产品所处环境的模拟仿真能力,建立面向产品全生命周期、不同业务场景的多尺度数字孪生。基于数字孪生开展产品全生命周期行为方式和性能指标的分析预测,减少或延迟物理实体的加工生产,提高产品研制和运行维护的效率,降低成本。

(4) 加强配套机制保障和人才队伍建设

国家及地方各级政府应加强在法律法规层面对工业互联网应用的保障支持。工业互联网生态链相关方密切合作,培养建设一支“一专多能”和高、中、低层次合理分配的“水滴形”工业互联网复合型人才队伍。

参考文献:

- [1] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. Engineering, 2018, 4(1): 11-20.
- [2] 臧冀原,王柏村,孟柳,等. 智能制造的三个基本范式:从数字化制造、“互联网+”制造到新一代智能制造[J]. 中国工程科学, 2018, 20(4): 13-18.
ZANG J Y, WANG B C, MENG L, et al. Brief analysis on three basic paradigms of intelligent manufacturing[J]. Engineering Science, 2018, 20(4): 13-18.
- [3] 延建林,孔德婧. “工业互联网”解析与“工业4.0”及其对中国制造业发展的启示[J]. 中国工程科学, 2015, 17(7): 141-144.
YAN J L, KONG D J. Study on “Industrial Internet” and “Industrie 4.0” [J]. Engineering Science, 2015, 17(7): 141-144.



- [4] EVANS P C, ANNUNZIATA M. Industrial internet: pushing the boundaries of minds and machines[R]. 2012.
- [5] 王建民. 工业大数据技术综述[J]. 大数据, 2017, 3(6): 3-14.
WANG J M. Survey on industrial big data[J]. Big Data Research, 2017, 3(6): 3-14.
- [6] DAMA International. DAMA 数据管理知识体系指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
DAMA International. The DAMA guide to the data management body of knowledge[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [7] 陈山枝. 发展 5G 的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10.
CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.
- [8] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//Transdisciplinary perspectives on complex systems: new findings and approaches. Cham: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [9] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011.
- [10] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011: 154798.

[作者简介]



刘彬(1978-), 男, 上海航空工业(集团)有限公司高级工程师, 主要研究方向为信息化管理、数据管理、工业互联网与智能制造架构与应用等。



张云勇(1976-), 男, 博士, 中国联合网络通信有限公司研究院院长、技术委员会主任、教授级高级工程师, 国务院政府特殊津贴专家, 北京邮电大学、四川大学兼职教授, “863”计划、国家科技重大专项和国家科学技术奖励工作办公室核心专家, 中国通信学会会士, 中国通信学会学术委员会委员, SDN 产业联盟副理事长, 信息通信大数据产业联盟副理事长, 中国通信学会新锐论坛技术委员会副主席, 《电信科学》编委。出版中文论著 19 部, 英文论著 1 部, 在国内外权威期刊发表学术论文 70 余篇, 授权 54 项专利和 37 项软件著作权, 300 余篇国际文稿被国际组织采纳, 主持发布国际上第一个 ITU 云计算框架、SDN 标准, 报批发布国家、行业标准 9 项, 获得工业和信息化部 ITU 优秀文稿奖 2 次、优秀个人奖 2 次, 获得国际奖励 1 项、省部级奖励 15 项。