

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/323316547>

Digital Twin and Its Potential Application Exploration 数字孪生及其应用探索

Article in Computer Integrated Manufacturing Systems · January 2018

DOI: 10.13196/j.cims.2018.01.001

CITATIONS

133

READS

12,709

22 authors, including:



Fei Tao

Beihang University (BUAA)

255 PUBLICATIONS 18,723 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Weiran Liu

Beihang University (BUAA)

2 PUBLICATIONS 156 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Tianliang Hu

Shandong University

67 PUBLICATIONS 1,686 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Zhinan Zhang

Shanghai Jiao Tong University

121 PUBLICATIONS 1,468 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Open control system [View project](#)



Engine Tribology [View project](#)

DOI:10.13196/j.cims.2018.01.001

数字孪生及其应用探索

陶飞¹, 刘蔚然¹, 刘检华², 刘晓军³, 刘强⁴, 屈挺⁵, 胡天亮⁶, 张执南⁷, 向峰⁸,
徐文君⁹, 王军强¹⁰, 张映锋¹⁰, 刘振宇¹¹, 李浩¹², 程江峰¹, 戚庆林¹, 张萌¹,
张贺¹, 隋芳媛¹, 何立荣¹³, 易旺民¹⁴, 程辉¹⁵

- (1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 2. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;
3. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 广东工业大学 广东省计算机集成制造重点实验室, 广东 广州 510006;
5. 暨南大学 电气信息学院, 广东 珠海 519070; 6. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250002;
7. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 8. 武汉科技大学 机械自动化学院, 湖北 武汉 430081;
9. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070; 10. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;
11. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310058; 12. 郑州轻工业学院 河南省机械装备智能制造
重点实验室, 河南 郑州 450002; 13. 北京必可测科技股份有限公司, 北京 100085; 14. 北京卫星环境工程研究所
总装技术研究室, 北京 100094; 15. 上海航天设备制造总厂有限公司 智能制造与工业工程研究室, 上海 200240)

摘要:数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段。随着数字孪生车间概念的提出,数字孪生在智能制造中的应用潜力得到越来越多的关注。分析了数字孪生在企业应用和理论研究上的进展,基于前期提出的数字孪生的五维结构模型,提出数字孪生驱动的6条应用准则,探索了数字孪生驱动的14类应用设想与实施过程中所需突破的关键问题与技术,为未来开展数字孪生的进一步落地应用提供理论和方法论参考。

关键词:数字孪生;数字孪生模型;应用准则;数字孪生应用;智能制造

中图分类号:TP301.6 **文献标识码:**A

Digital twin and its potential application exploration

TAO Fei¹, LIU Weiran¹, LIU Jianhua², LIU Xiaojun³, LIU Qiang⁴, QU Ting⁵, HU Tianliang⁶,
ZHANG Zhinan⁷, XIANG Feng⁸, XU Wenjun⁹, WANG Junqiang¹⁰, ZHANG Yingfeng¹⁰, LIU Zhenyu¹¹,
LI Hao¹², CHENG Jiangfeng¹, QI Qinglin¹, ZHANG Meng¹, ZHANG He¹,
SUI Fangyuan¹, HE Lirong¹³, YI Wangmin¹⁴, CHENG Hui¹⁵

- (1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Computer Integrated Manufacturing System,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
5. School of Electrical and Information Engineering, Jinan University, Zhuhai 519070, China;
6. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250002, China;
7. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
8. School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
9. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
10. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

收稿日期:2017-12-26;修订日期:2018-01-10。Received 26 Dec. 2017;accepted 10 Jan. 2018.

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51522501)。**Foundation item:**Project supported by the National Natural Science Foundation for Excellent Young Scholars, China(No. 51522501).

11. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
12. Henan Provincial Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Mechanical Equipment, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
13. Beijing Bicostest Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China;
14. Division Spacecraft Integration Technology, Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;
15. Director of Assembly Technology Research Lab, Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200240, China)

Abstract: Digital twin, as a technology of integrating multi-physics, multi-scale and multidisciplinary attributes, characterized by real-time synchronization, faithful mapping and high fidelity, could realize interaction and integration between physical space and virtual world. At present, digital twin had received great attention from academics and enterprises worldwide. With the advent of Digital Twin Shop-floor (DTS), digital twins were gained more and more attention on the potential of digital twin in smart manufacturing. The present situation of digital twin in enterprise application and theoretical research was discussed. Based on five-dimensional structure models of digital twin, six application principles were presented. On this basis, fourteen typical application of digital twin and their concepts and key scientific problems or technologies were explored. Which could provide theoretical and methodological reference for engineering practice of digital twin in the future.

Keywords: digital twin; digital twin model; application principle; digital twin application; smart manufacturing

0 引言

随着新一代信息技术(如云计算、物联网、大数据等)与制造业的融合与落地应用,世界各国纷纷出台了各自的先进制造发展战略,如美国工业互联网和德国工业 4.0,其目的之一是借力新一代信息技术,实现制造的物理世界和信息世界的互联互通与智能化操作,进而实现智能制造^[1]。与此同时,在“制造强国”和“网络强国”大战略背景下,我国也先后出台了“中国制造 2025”和“互联网+”等制造业国家发展实施战略。此外,党的十九大报告也明确提出“加快建设制造强国,加快发展先进制造业,推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合”,其核心是促进新一代信息技术和人工智能技术与制造业深度融合,推动实体经济转型升级,大力发展智能制造。因此,如何实现制造物理世界与信息世界的交互与共融,是当前国内外实践智能制造理念和目标所共同面临的核心瓶颈之一^[2-3]。

数字孪生(digital twin)是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理实体增加或扩展新的能力。作为一种充分利用模型、数据、智能并集成多学科的技术,数字孪生面向产品全生命周期过程,发挥连接物理世界和信息世界的桥梁和纽带作用,提供更加实时、高效、智能的服务^[3-5]。

数字孪生近期得到了广泛和高度关注。全球最具权威的 IT 研究与顾问咨询公司 Gartner 连续两年(2016 年和 2017 年)将数字孪生列为当年十大战略科技发展趋势之一。世界最大的武器生产商洛克希德马丁公司 2017 年 11 月将数字孪生列为未来国防和航天工业 6 大顶尖技术之首;2017 年 12 月 8 日中国科协智能制造学术联合体在世界智能制造大会上将数字孪生列为世界智能制造十大科技进展之一。

此外,许多国际著名企业已开始探索数字孪生技术在产品设计、制造和服务等方面的应用。在产品设计方面,针对复杂产品创新设计,达索公司建立了基于数字孪生的 3D 体验平台,利用用户交互反馈的信息不断改进信息世界中的产品设计模型,并反馈到物理实体产品改进中^[6]。在生产制造方面,西门子基于数字孪生理念构建了整合制造流程的生产系统模型,形成了基于模型的虚拟企业和基于自动化技术的企业镜像,支持企业进行涵盖其整个价值链的整合及数字化转型,并在西门子工业设备 Nanobox PC 的生产流程中开展了应用验证。在故障预测与健康管理方面,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)将物理系统与其等效的虚拟系统相结合,研究了基于数字孪生的复杂系统故障预测与消除方法,并应用在飞机、飞行器、运载火箭等飞行系统的健康管理中^[7]。美国空军研究实验室结构科学中心通过将超高保真的飞机虚拟模型与影响飞行的结构

偏差和温度计算模型相结合,开展了基于数字孪生的飞机结构寿命预测^[8]。在产品服务方面,PTC公司将数字孪生作为“智能互联产品”的关键性环节,致力于在虚拟世界与现实世界间建立一个实时的连接,将智能产品的每一个动作延伸到下一个产品设计周期,并能实现产品的预测性维修,为客户提供了高效的产品售后服务与支持。

此外,车间是制造活动的执行基础,为践行智能制造和智能生产理念,国内陶飞等^[2,4]于2016年探索了数字孪生车间(Digital Twin Shop-floor, DTS)的概念,设计了DTS的组成与运行机制,阐述了实现DTS的4个特点和5大类关键技术,为数字孪生在生产制造环节落地应用提供了基础理论支撑参考。庄存波等^[9]分析了数字孪生体的产生背景,阐述了产品数字孪生体的内涵,并提出产品数字孪生体的体系结构和实施途径,同时指出数字孪生技术出现和发展不但为实现信息物理系统(Cyber Physical System, CPS)提供了清晰的新思路、方法和实施途径,而且为人类利用虚拟模型探讨和预测未知世界提供了新的理念和工具。于勇等^[10]探讨了数字孪生模型在产品构型管理中的应用。Zhang hao等^[11]提出基于数字孪生的个性化产线快速定制设计方法,将数字化模型和物理装备虚实同步,形成整线的数字孪生系统;提出生产过程中耦合优化问题的解耦算法,作为引擎驱动数字孪生;通过订单模拟投放与运行,进行整线性能评估与调控。Wang Junqiang等^[12]面向物联制造车间,立足工件、机器的主观能动性,提出主动调度(initiative scheduling)模式,探讨了主动调度的交互体系、响应机制、运作模式和互调度行为。Zhang Yingfeng等^[13]针对智能工厂制造资源自组织配置与自适应协同控制需求,提出基于CPS的底层制造资源加工服务状态实时感知和自主决策的智能化建模方法。屈挺等^[14-15]利用数字孪生思想将物联制造下的在线控制理念进行扩展,提出多系统联动优化控制思想、机制及定量优化方法,并应用于生产过程的精准计划、实时跟踪与动态控制3个阶段,相应技术和系统已在嘉宝莉化工集团等行业龙头企业应用实施。

虽然已有企业初步探索了数字孪生的相关应用,但数字孪生在实际应用过程中仍存很多问题和不足,例如:

(1)缺乏系统的数字孪生理论/技术支撑和应用准则指导 目前在数字孪生模型构建、信息物理数据融合、交互与协同等方面的理论与技术比较缺乏,导致数字孪生落地应用过程中缺乏相应的理论和技术支撑。

(2)数字孪生驱动的应用产生的比较优势不明显 目前数字孪生应用基本处于起步阶段,数字孪生在产品设计、制造和服务中的应用所带来的比较优势不明显,应用过程中所需攻克的问题和技术不清楚。

(3)在产品生命周期各阶段的应用不全面 从产品的产前、产中、产后3个阶段分析,当前数字孪生的应用主要集中在产品的运维和健康管理等产后方面,需要加强在产前(如产品设计、再设计、优化设计等)和产中(如装配、测试/检测、车间调度与物流等)的应用探索。

针对以上问题,本文在分析数字孪生当前应用现状后,总结分析了当前数字孪生理论与技术研究进展;在此基础上,基于参考文献^[4]提出的数字孪生五维结构模型,提出数字孪生驱动的应用准则,基于所提出的准则,探索了数字孪生在产品全生命周期中的应用前景和有待突破的关键问题或技术,为未来开展数字孪生的进一步落地应用提供理论和方法参考。

1 数字孪生理论研究进展

数字孪生的概念最初由Grieves教授于2003在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上提出,并被定义为三维模型,包括实体产品、虚拟产品以及二者间的连接^[16],但由于当时技术和认知上的局限,数字孪生的概念并没有得到重视。直到2011年,美国空军研究实验室和NASA合作提出了构建未来飞行器的数字孪生体,并定义数字孪生为一种面向飞行器或系统的高度集成的多物理场、多尺度、多概率的仿真模型,能够利用物理模型、传感器数据和历史数据等反映与该模型对应的实体的功能、实时状态及演变趋势等,随后数字孪生才真正引起关注,一些学者在NASA提出概念的基础上进行了补充和完善,例如Gabor等提出数字孪生还应包含专家知识以实现精准模拟^[17],Rios等认为数字孪生不仅面向飞行器等复杂产品,还应面向更加广泛通用的产品^[18]。

在数字孪生概念不断完善和发展过程中,学术界主要针对数字孪生的建模、信息物理融合、交互与协作及服务应用等方面开展了相关研究。

(1)在建模方面 当前在数字孪生建模的框架^[19]和建模流程^[20]上已开展了一定研究,但还没有一致的结论。在建模相关理论上,包括物理行为研究^[21]、无损材料测定技术、量化误差与置信评估研究^[22],已取得一定进展,这些辅助技术将有助于模型参数的确定、行为约束的构建以及模型精度的验证。

(2)在信息物理融合方面 在数字孪生信息物

理融合上,目前仅在数据融合方面的降维处理^[23]、传感器数据与制造数据集成融合^[24]上有初步研究,而针对数字孪生信息物理融合理论与技术的研究仍是空白。为解决这一难题,北航团队于 2017 年将信息物理融合这一科学问题分解提炼为“物理融合、模型融合、数据融合、服务融合”4 个不同维度的融合问题,设计了相应的系统实现参考框架。并结合数字孪生技术与制造服务理论,对物理融合、模型融合、数据融合和服务融合 4 个关键科学问题开展了系统性研究与探讨,提炼和归纳了相应的基础理论与关键技术。相关工作作为相关学者开展数字孪生信息物理融合理论与技术研究、为企业建设并实践数字孪生理念提供了一定的理论与技术参考^[5]。

(3)在交互与协同方面 已经开展的生产数据实时采集理论^[25]和人机交互^[26]的研究有助于实现物理世界与虚拟世界的交互与协同,但当前几乎没有机器间以及服务间交互协同的相关研究。

(4)在服务应用方面 目前对数字孪生在疲劳损伤预测^[27]、结构损伤监测^[28]、实时运行状态检测^[24]、故障定位^[29]等方面的服务应用已开展一定研究,而在实现服务融合协同上仍有很多问题有待研究解决。

由上分析可知,当前数字孪生相关理论研究还处于起步阶段,为促进数字孪生的落地应用,在数字孪生建模、信息物理融合、交换与协同等方面有待系统深入地研究。

2 数字孪生驱动的应用准则

数字孪生的核心是模型和数据,为进一步推动数字孪生理论与技术的研究,促进数字孪生理念在产品全生命周期中落地应用,北航团队结合多年在智能制造服务、制造物联、制造大数据等方面的研究基础和认识,将数字孪生模型由最初的三维结构^[16]发展为如图 1 所示的五维结构模型^[4],包括物理实体、虚拟模型、服务系统、孪生数据和连接。

(1)物理实体是客观存在的,它通常由各种功能子系统(如控制子系统、动力子系统、执行子系统等)组成,并通过子系统间的协作完成特定任务。各种传感器部署在物理实体上,实时监测其环境数据和运行状态。

(2)虚拟模型是物理实体忠实的数字化镜像,集成与融合了几何、物理、行为及规则 4 层模型。其中:几何模型描述尺寸、形状、装配关系等几何参数;物理模型分析应力、疲劳、变形等物理属性;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,使模型具备评估、优化、预测、评测等功能。

(3)服务系统集成评估、控制、优化等各类信息系统,基于物理实体和虚拟模型提供智能运行、精准管控与可靠运维服务。

(4)孪生数据包括物理实体、虚拟模型、服务系统的相关数据,领域知识及其融合数据,并随着实时数据的产生被不断更新与优化。孪生数据是数字孪生运行的核心驱动。

(5)连接将以上 4 个部分进行两两连接,使其进行有效实时的数据传输,从而实现实时交互以保证各部分间的一致性与迭代优化^[4]。

基于上述数字孪生多维结构模型实现数字孪生驱动的应用,首先针对应用对象及需求分析物理实体特征,以此建立虚拟模型,构建连接实现虚实信息数据的交互,并借助孪生数据的融合与分析,最终为用户提供各种服务应用。为推动数字孪生的落地应用,数字孪生驱动的应用可遵循以下准则(如图 1):

(1)信息物理融合是基石 物理要素的智能感知与互联、虚拟模型的构建、孪生数据的融合、连接交互的实现、应用服务的生成等,都离不开信息物理融合。同时,信息物理融合贯穿于产品全生命周期各个阶段,是每个应用实现的根本。因此,没有信息物理的融合,数字孪生的落地应用就是空中楼阁。

(2)多维虚拟模型是引擎 多维虚拟模型是实现产品设计、生产制造、故障预测、健康管理等各种功能最核心的组件,在数据驱动下多维虚拟模型将应用功能从理论变为现实,是数字孪生应用的“心脏”。因此,没有多维虚拟模型,数字孪生应用就没有了核心。

(3)孪生数据是驱动 孪生数据是数字孪生最核心的要素,它源于物理实体、虚拟模型、服务系统,同时在融合处理后又融入到各部分中,推动了各部分的运转,是数字孪生应用的“血液”。因此,没有多元融合数据,数字孪生应用就失去了动力源泉。

(4)动态实时交互连接是动脉 动态实时交互连接将物理实体、虚拟模型、服务系统连接为一个有机的整体,使信息与数据得以在各部分间交换传递,是数字孪生应用的“血管”。因此,没有了各组成部分之间的交互连接,如同人体割断动脉,数字孪生应用也就失去了活力。

(5)服务应用是目的 服务将数字孪生应用生成的智能应用、精准管理和可靠运维等功能以最为便捷的形式提供给用户,同时给予用户最直观的交互,是数字孪生应用的“五感”。因此,没有服务应用,数字孪生应用实现就是无的放矢。

(6)全要素物理实体是载体 不论是全要素物理资源的交互融合,还是多维虚拟模型的仿真计算,亦或是数据分析处理,都是建立在全要素物理实体之上,同时物理实体带动各个部分的运转,令数字孪生得以实现,是数字孪生应用的“骨骼”。因此,没有了物理实体,数字孪生应用就成了无本之木。

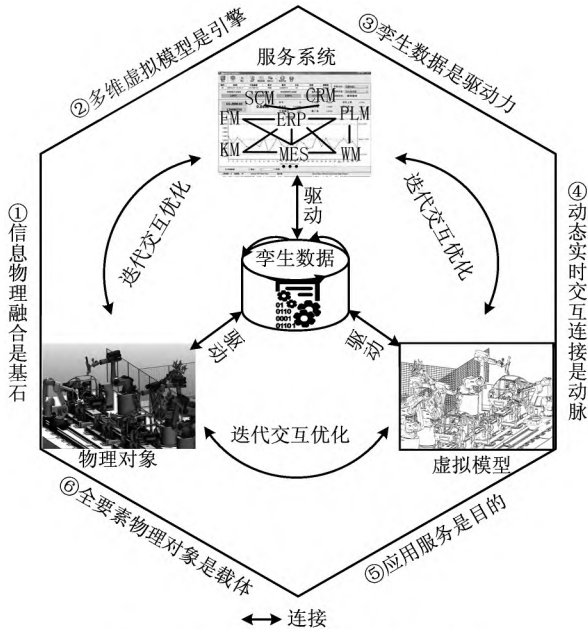


图1 数字孪生五维结构模型与应用准则

3 数字孪生应用探索

依据以上 6 点数字孪生驱动的应用基本准则,本章将进一步尝试探索数字孪生驱动的 14 类应用的初步概念,并分析其与传统(或现有)方法的区别,以及其实施过程中所需突破的关键问题和技术等,从而为数字孪生理念的进一步应用提供参考。

3.1 基于数字孪生的产品设计

产品设计是指根据用户使用要求,经过研究、分析和设计,提供产品生产所需的全部解决方案的工作过程。基于数字孪生的产品设计是指在产品数字孪生数据的驱动下,利用已有物理产品与虚拟产品在设计中的协同作用,不断挖掘产生新颖、独特、具有价值的产品概念,转化为详细的产品设计方案,不断降低产品实际行为与设计期望行为间的不一致性。基于数字孪生的产品设计更强调通过全生命周期的虚实融合,以及超高拟实度的虚拟仿真模型建立等方法,全面提高设计质量和效率。其框架分为需求分析、概念设计、方案设计、详细设计和虚拟验证 5 个阶段,每个阶段在包括了物理产品全生命周期数据、虚拟产品仿真优化数据,以及物理与虚拟产品融合数据驱动下进行,如图 2 所示。

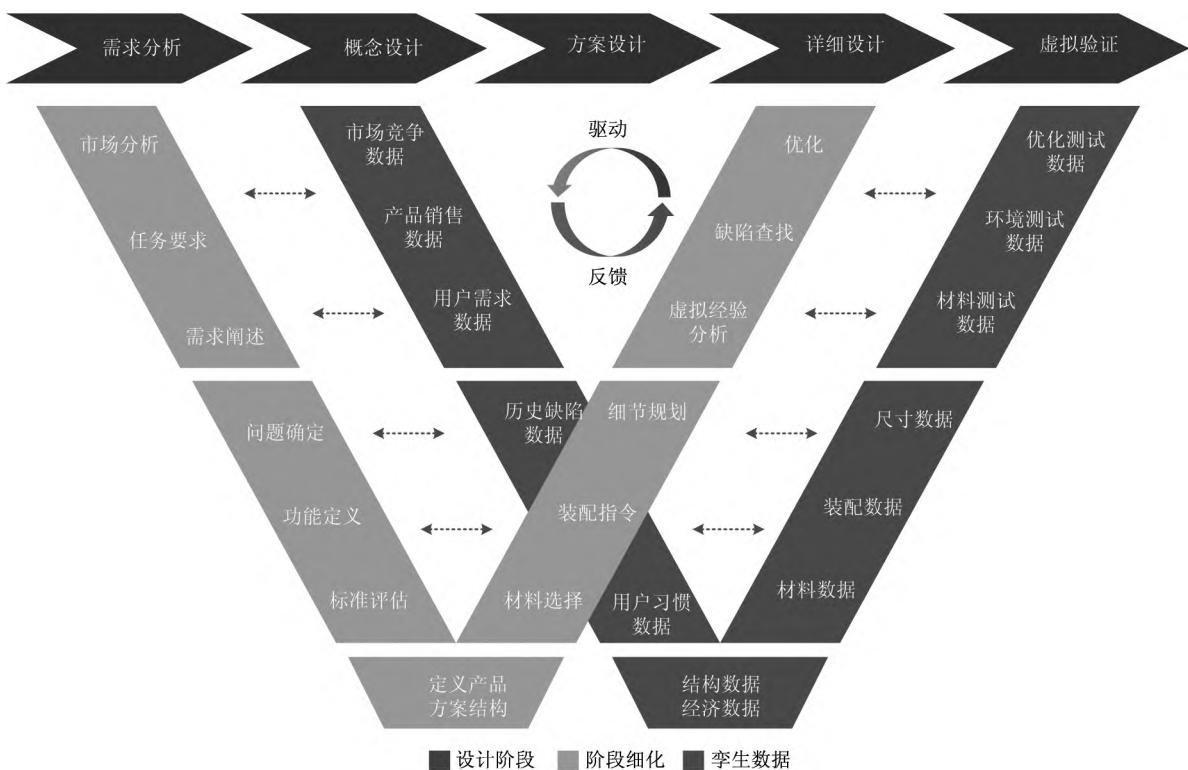


图2 数字孪生驱动的产品设计

基于数字孪生的产品设计表现出如下新的转变:①驱动方式,由个人经验与知识驱动转为孪生数据驱动;②数据管理,由设计阶段数据为主扩展到产品全生命周期数据;③创新方式,由需求拉动的被动式创新转变为基于孪生数据挖掘的主动型创新;④设计方式,由基于虚拟环境的设计转变为物理与虚拟融合协同的设计;⑤交互方式,由离线交互转变为基于产品孪生数据的实时交互;⑥验证方式,由小批量产品试制为主转变为高逼真度虚拟验证为主。

基于数字孪生的产品设计亟需在如下方面进行突破:①产品设计隐性需求挖掘,包括高维数据属性间复杂关系,及其可伸缩的数据降维、关联、聚类挖掘方法;②产品协同设计,包括设计、校验、审核等不同角色的信息交互及协同机制,设计师间的并行交互式设计机制,以及物理产品与虚拟产品的迭代优化协同机制;③基于数字孪生的设计优化方法,包括:数字孪生驱动的设计过程迭代优化理论与方法;④产品数据管理,包括:完整、实时、安全的海量产品孪生数据传输、清洗、存储技术,实现服务阶段数据的有机集成与管理。

3.2 基于数字孪生的虚拟样机

虚拟样机是建立在数字世界的、可反映物理样机真实性的数字模型,通过多领域的综合仿真和设

备的性能衰减仿真,在物理样机制造之前对装备的性能进行测试和评估,改进其设计缺陷,可以缩短其设计改进周期。基于数字孪生的虚拟样机建立在对设备的机械系统、电气系统和液压多领域系统全面、综合、真实的描述能力的基础上,具备对物理设备全生命周期的映射能力,从而对设备的设计仿真和预测性维护提供有力的分析决策支持。

为实现以上功能,需遵循以下原则:

(1)综合性原则 基于数字孪生的虚拟样机需要具备对物理实体全面、综合的描述能力,是车间装备的机械、电气、液压气动等各单元多领域联合建模的结果。各单元间相互独立又相互耦合,内部通过能量数据转化实现其耦合关系。

(2)真实性原则 基于数字孪生的虚拟样机与物理实体虚实共生,应考虑各种线性和非线性、时变和时不变等特点,真实地实现对物理实体的映射。

(3)动态更新原则 基于数字孪生的虚拟样机需要实现对物理实体全生命周期的映射,需具备对物理实体的维护升级、性能衰减等活动的动态更新能力,始终具备对物理实体每个阶段的动态更新能力。图3基于三个原则,对基于数字孪生的虚拟样机进行了设计。

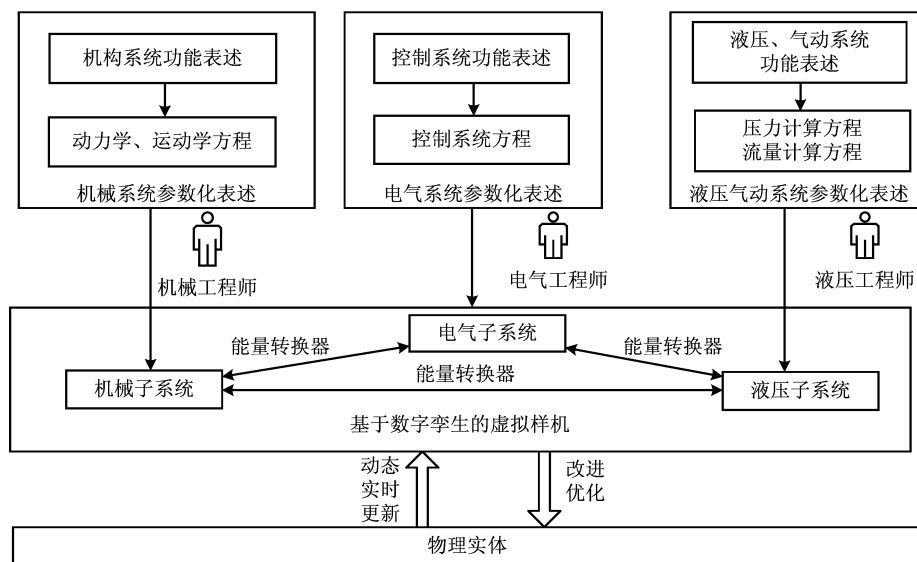


图3 基于数字孪生的虚拟样机设计

基于数字孪生的虚拟样机具有以下优势:①面向对象的设计和模块间的交互机制提升了机械、电气、液压等多领域复杂耦合仿真和性能分析解耦能力;②先进的虚实共生理念提升了其对物理实体的表述真实度;③数字孪生对物理设备运行周期的实时映射能力拓展了虚拟样机的使用周期,实现了对

产品功能、性能衰减的预测。

基于数字孪生的虚拟样机亟需解决:①多领域产品构成描述,即机械、电气、液压气动等涵盖车间装备多技术领域的车间装备子系统与零部件统一描述方法;②虚实交换的动态实时更新,包括基于车间装备零部件参数化、模块化、数学方程化的模型实时

更新与交互迭代;③耦合仿真与解耦定位,包括基于多领域统一建模语言的零部件之间及各子系统之间的耦合仿真和对问题征候的定位解耦方法。

3.3 基于数字孪生的车间快速设计

传统车间复杂制造系统设计思路基本为串行设计,在部分假设的基础上进行数学建模,不能充分反应实际问题,缺乏对系统进行全局考虑,存在对设计人员经验依赖性强等问题。数字孪生驱动的车间快速设计采用数字孪生“信息物理融合”的思想,依次完成“实物设备数字化、运动过程脚本化、系统整线集成化、控制指令下行同步化、现场信息上行并行化”,形成整线的执行引擎。实物设

备与所对应的虚拟模型进行虚实互动、指令与信息同步,形成一个支持实物设备连线的车间快速设计、规划、装配与测试平台,如图 4 所示。基于平台:①利用三维设计引擎与构建的专用模型库,结合车间场地、产能需求、设备选型,构建车间的虚拟三维模型,可快速完成车间布局设计;②编制异构设备的动作脚本,开发响应程序,搭建虚拟控制网络,可实现虚拟整线加工运动的近物理仿真,并基于实际数据进行预测、评估和优化;③可测试分布式集成设备与整线动作的一致性、内部控制逻辑、指令与信息上下行通道、作业周期同步化等内容,并基于虚实融合数据优化车间设计。

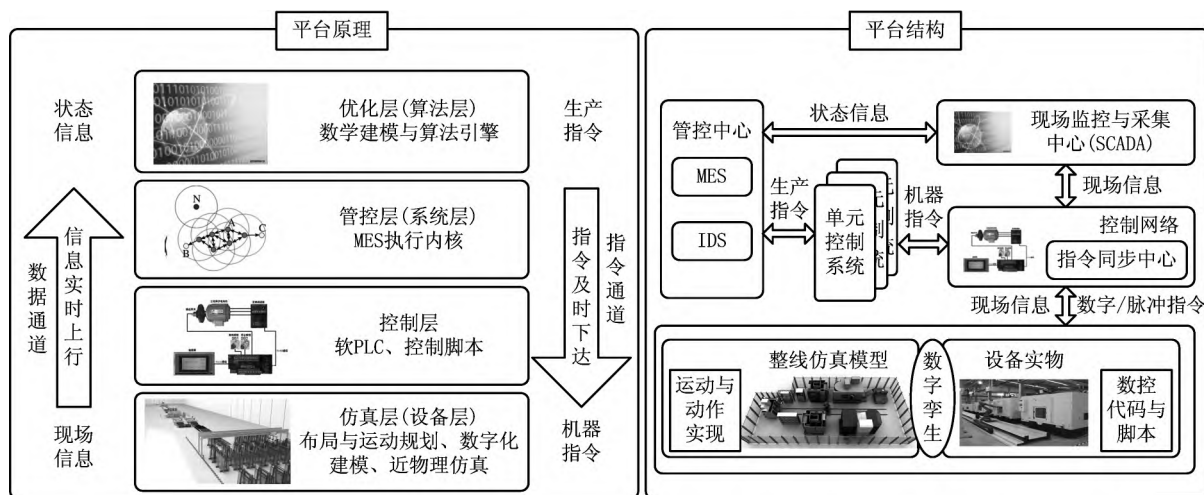


图4 数字孪生驱动的车间快速设计原理及结构图

数字孪生驱动的车间快速定制设计具有以下特征:①基于装备、模型、监控 3 部分的数据融合和视图同步联动;②通过半实物仿真的形式进行分布式整线集成,对整线或单元进行实物执行效果验证;③数字孪生整线设计方案,与车间制造执行系统对接,进行设计与执行的迭代优化。

装备、模型、监控、系统多维视图同步运动或变化,亟需突破:

(1)异构系统通讯 重点突破异构系统通讯与信息的一致性、异型系统实时通讯、指令语义无损翻译、异构多元反馈数据校验等关键技术。

(2)指令数据同步 突破实现实物可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)与仿真模型软 PLC 异步采样周期同步的指令及时下行通道与信息实时上行通道。

3.4 基于数字孪生的工艺规划

工艺规程是产品制造工艺过程和操作方法的技术文件,是一切有关生产人员都应严格执行、认

真贯彻的纪律性文件,是进行产品生产准备、生产调度、工人操作和质量检验的依据。数字孪生驱动的工艺规划指通过建立超高拟实度的产品、资源和工艺流程等虚拟仿真模型,以及全要素、全流程的虚实映射和交互融合,真正实现面向生产现场的工艺设计与持续优化。在数字孪生驱动的工艺设计模式下,虚拟空间的仿真模型与物理空间的实体相互映射,形成虚实共生的迭代协同优化机制。数字孪生驱动的工艺设计模式如图 5 所示。

数字孪生驱动的工艺设计模式使工艺设计与优化呈现出以下新的转变:①在基于仿真的工艺设计方面,真正意义上实现了面向生产现场的工艺过程建模与仿真,以及可预测的工艺设计;②在基于知识的工艺设计方面,实现了基于大数据分析的工艺知识建模、决策与优化;③在工艺问题主动响应方面,由原先的被动工艺问题响应向主动应对转变,实现了工艺问题的自主决策。

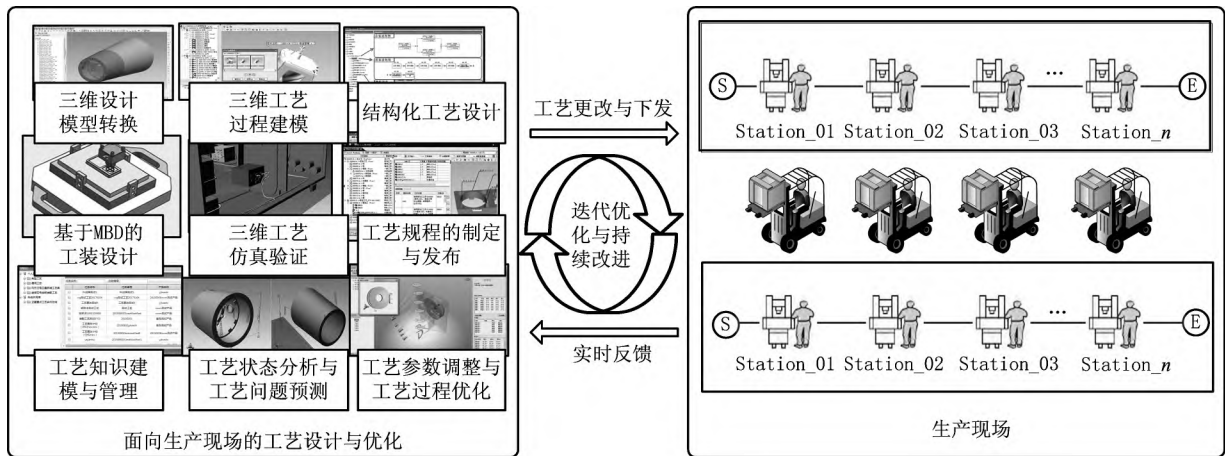


图5 数字孪生驱动的工艺设计模式

围绕数字孪生驱动的工艺设计方法亟需在以下难点问题上取得突破：

(1) 数字孪生工艺模型构建 研究基于几何量和多物理量等融合的物理实体数字孪生模型构建理论与方法,以及基于数字孪生模型的工艺过程建模与仿真技术。

(2) 基于数字孪生的工艺创新设计方法 研究基于大数据分析的知识建模、知识提炼和知识优化方法,以及基于增强学习、深度学习、自主学习等的自主工艺设计、工艺优化和工艺决策方法。

(3) 基于数字孪生的工艺持续优化方法 研究基于海量数据的工艺持续改进方法和工艺更改响应机制,以及基于现场实时数据的工艺问题预测、参数动态调整、过程迭代优化和决策制定、评估与评测的理论与方法。

3.5 基于数字孪生的车间生产调度优化

生产调度是生产车间决策优化、过程管控、性能提升的神经中枢,是生产车间有序平稳、均衡经济和敏捷高效的运营支柱。数字孪生驱动的调度模式是在数字孪生系统的支撑下,通过全要素、全数据、全模型、全空间的虚实映射和交互融合,形成虚实响应、虚实交互、以虚控实、迭代优化的新型调度机制,实现“工件—机器—约束—目标”调度要素的协同匹配与持续优化。在数字孪生驱动的调度模式下,调度要素在物理车间和虚拟车间相互映射,形成虚实共生的协同优化网络。物理车间主动感知生产状态,虚拟车间通过自组织、自学习、自仿真方式进行调度状态解析、调度方案调整、调度决策评估,快速确定异常范围,敏捷响应,智能决策,具有更好的变化适应能力、扰动响应能力和异常解决能力。其模式如图6所示。

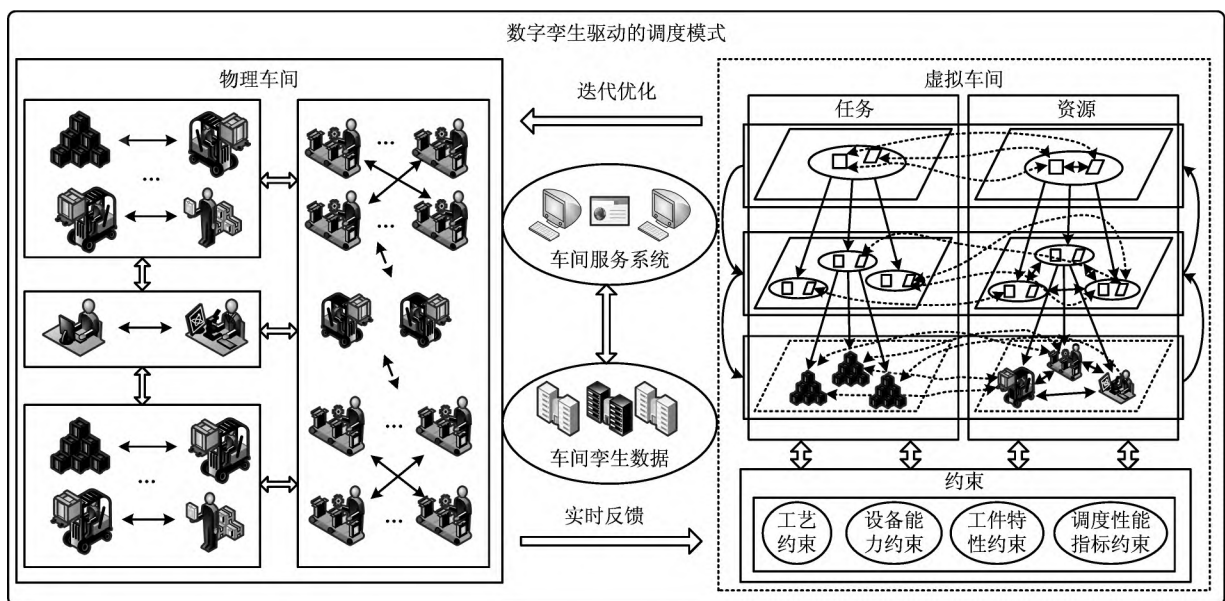


图6 数字孪生驱动的车间生产调度

数字孪生驱动的调度模式使调度优化与过程管控呈现出新的转变,即驱动方式由能量驱动向数据驱动转变,调度要素由实体互联向虚实映射转变,响应方式由被动响应向主动应对转变,过程控制由粗放控制向精确控制转变,管理形式由层级结构向扁平化结构转变。

围绕数字孪生驱动的调度技术研究,亟需在以下难点问题取得突破:①在虚实交互机理方面,系统研究虚实交互行为,揭示自组织、自学习、自优化机制下虚实交互机理,从而实现调度要素的优化匹配和高效运作;②在动态迭代优化方面:研究新的调度优化方法,能够进行“任务—资源”自主决策、动态迭

代和连续优化等。

3.6 基于数字孪生的生产物流精准配送

生产物流包括企业内部物流(车间物流)和企业外部物流(企业之间物流),是保证企业正常生产、提高生产效率、降低产品成本的关键。数字孪生生产物流是在孪生数据驱动下,通过物理实体与虚拟模型的真实映射、实时交互、闭环控制,实现生产物流的任务组合优化、运输路线规划、运输过程控制在物理世界、信息世界和上层物流服务系统之间的迭代运行,从而达到生产过程物流无缝化和智能化的一种新的生产物流运行模式,其结构组成如图 7 所示。

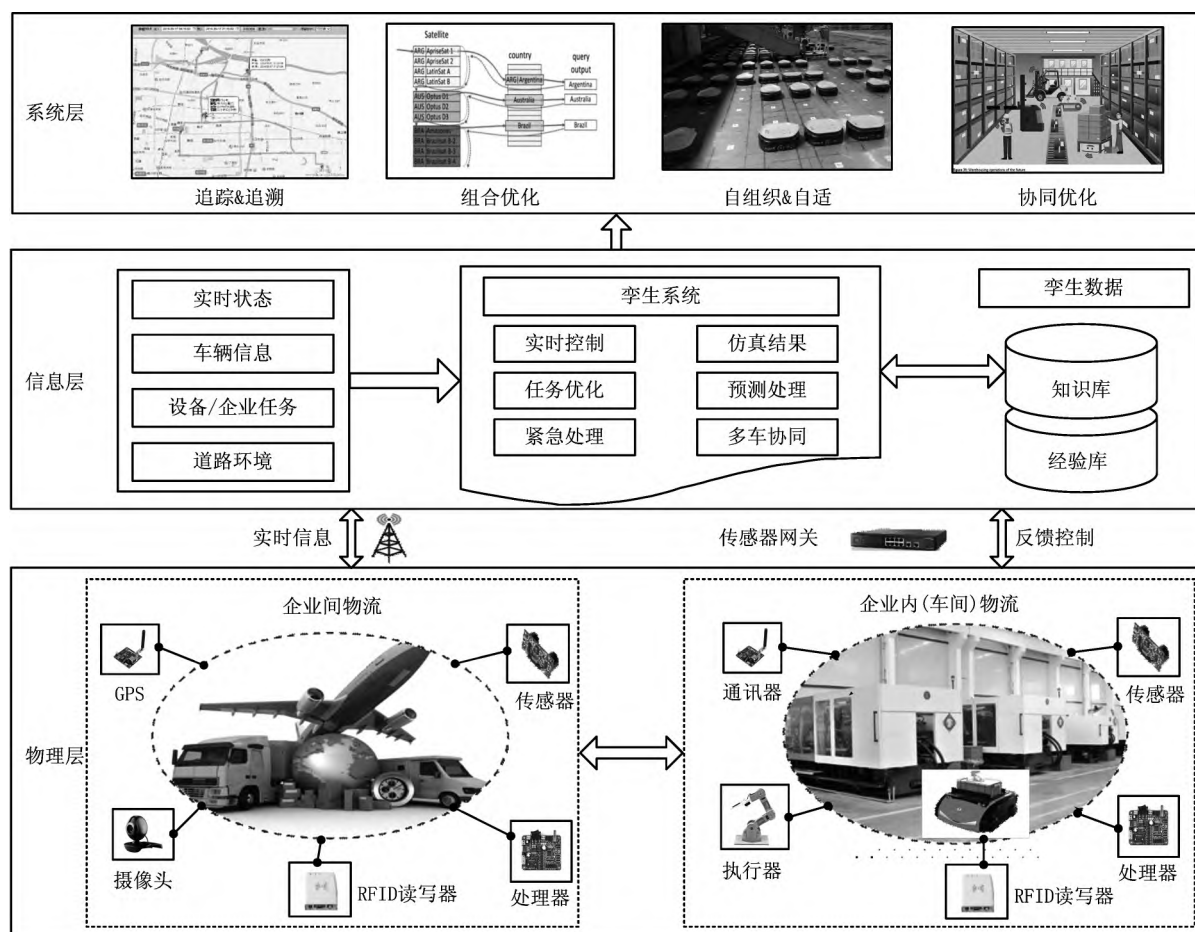


图7 基于数字孪生的生产物流智能化配送结构组成

基于数字孪生的生产物流使生产物流的管控模式更加智能:①物理实体,运输设备拥有自我决策和通讯能力;②决策要素,由对物理世界实时信息的处理提升到对信息世界仿真预测的孪生数据的处理;③决策方式,由被动的中央系统分配的方式转变为以搬运载体为核心的“抢”任务的主动决策;④控制策略:由上级命令的控制方式转变为多设备交互协

同实现自组织、自适应控制;⑤物流透明化,由传统“黑箱”运输模式转变为物料、搬运载体等实时状态透明,可实时追踪和精准配送。

基于数字孪生的智能物流配送的关键技术主要包括以下两部分:

(1)搬运载体无人运行及智能协同技术 基于数字孪生设计的运输车辆和制造设备具备感知、通

讯和决策能力,利用设备之间相互通讯、信息共享以及孪生数据库,实现多设备交互协同,达到自组织、自适应控制。

(2)实时信息驱动的物料配送决策技术 利用孪生数据、信息共享和模型预测控制等技术,基于智能算法实现搬载体间的智能协同、应急处理和物料运输任务的组合优化,提高运输效率和对变化环境的适应性,从而实现物料/物流配送任务的高效精准配送。

3.7 基于数字孪生的车间装备智能控制

车间装备的控制系统是车间装备的大脑,其控制功能和控制策略的正确性,直接影响到车间装备的功能与性能。基于数字孪生可对控制系统的设计、控制功能和性能的调试优化以及基于虚实映射丰富数据的控制系统决策能力提供多维度的支持。在设计阶段,通过虚拟模型仿真调试实现控制功能的完整性校验和控制算法选择优化,同时改进迭代机械系统和控制系统;在样机调试阶段,通过虚实映射,对实际控制效果进行评估,改进控制系统和物理样机的设计;在运行维护阶段,对物理样机和加工对象的状态全面感知,满足实时自主决策控制中对物理实体实时状态和历史状态真实反馈的需要。借助数字孪生技术,能够达到控制系统控制精准、算法高效、运行可靠、成本经济的目标。

基于数字孪生的控制优势如下:①在装备设计阶段,基于数字孪生虚实同步对控制系统进行设计匹配,使控制系统和物理装备更早地融合匹配,减轻实机调试的负担;②在调试阶段,进一步促进控制系统和设备的全面匹配,改进设计缺陷,降低设计冗余;③在运行阶段,控制反馈信息不再是相对独立的参数,而是数字孪生呈现的物理实时状态,可对算法自主决策提供客观、有效的数据支持。

探索基于数字孪生的控制,研究在数字孪生下控制系统全新的设计、调试和运行使用模式,亟需在以下几个方面进行突破:①接口交互需要解决模型与控制系统之间驱动交互和状态反馈问题,从而实现数字孪生体与控制系统之间的无缝交互。②控制仿真基于物理属性和动力学特性,实现数字孪生模型在控制数据驱动下的行为仿真,是对物理设备真实的描述。③自主决策基于数字孪生模型大量、及时、多维的数据,突破传统依赖公共数据训练集的局部最优限制,从数据源头上解决控制自决策的有效性和准确性。

3.8 基于数字孪生的车间人机交互

人机交互协同是先进智能制造模式中另外一个典型的应用场景,通过人机交互可以提高机器使用的灵活性,并减轻手工作业的工作量。基于数字孪生的车间人机交互是指,构建与实际物理车间完全映射的数字孪生虚拟车间,通过高速高可靠的通信技术识别工人通过触摸、手势或者声音等下达的指令,机器人能够迅速调整工作计划,以做出能够配合工人生产作业的动作,并实时更新虚拟车间的制造进程。基于数字孪生的车间人机交互如图8所示。

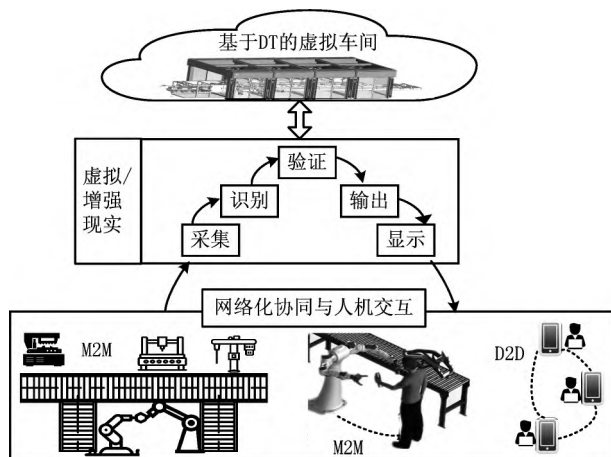


图8 基于数字孪生的车间人机交互

基于数字孪生的车间人机交互,相较于传统的制造车间生产模式,呈现出如下新的特点:

(1)全要素交互融合 从传统的人与生产线设备之间的一对一交互,转变为虚拟车间与车间孪生数据驱动的车间全要素综合联动的交互融合。

(2)虚拟/增强现实辅助的人机交互 通过虚拟现实/增强现实技术,将虚拟信息叠加到同一个真实的生产制造环境中,两种信息相互补充、叠加,能够直观地显示出操作步骤和工艺,协助人员进行加工制造,从而提高生产效率。

(3)复杂环境自学习 从传统生产线制造设备固定条件下的固定动作响应,转变为基于虚拟车间高保真度仿真的复杂环境自学习、自适应。

基于数字孪生的车间人机交互来实现人与车间的深度融合,亟需解决如下的关键科学技术:

(1)超灵敏超精确行为识别技术 工人触摸、手势或声音等行为信息的超高灵敏度超精确的识别,是实现基于数字孪生的车间人机交互的首要前提。

(2)超高灵活性显示技术 超高灵活性的显示技术,如透明视频、全息投影等,可以快速准确地给

工人以生产辅助。

(3) 超低时延超高速率通信技术 研究超低时延超高速可靠性的通信技术,从而保证基于虚拟现实与增强现实技术的人机交互。

3.9 基于数字孪生的装配

复杂产品装配是产品功能和性能实现的最终阶段和关键环节,是影响复杂产品研发质量和使用性

能的重要因素,装配质量在很大程度上决定着复杂产品的最终质量。数字孪生驱动的装配过程将基于集成所有装备的物联网,实现装配过程物理世界与信息世界的深度融合,通过智能化软件服务平台及工具,实现零部件、装备和装配过程的精准控制,对复杂产品装配过程进行统一高效地管控,实现产品装配系统的自组织、自适应和动态响应。

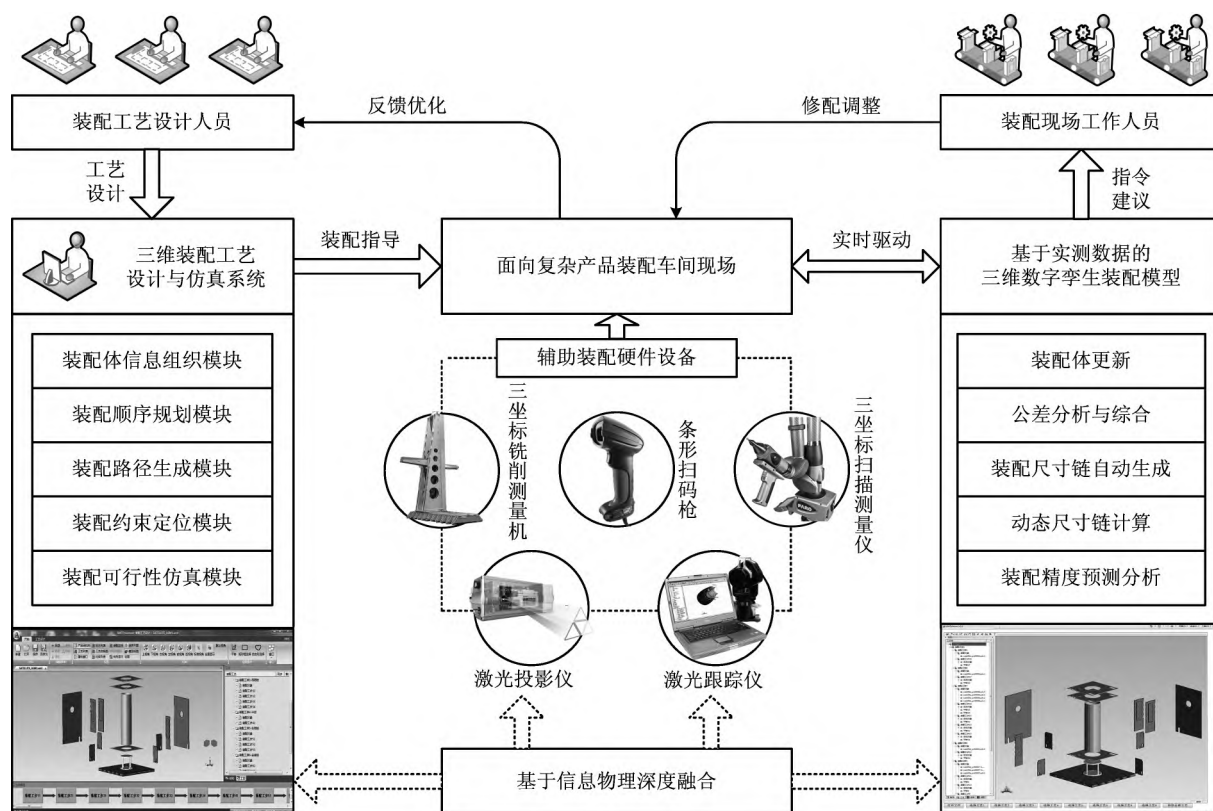


图9 数字孪生模型驱动的复杂产品智能装配

相对于传统的装配,数字孪生驱动的产品装配呈现出新的转变,即工艺过程由虚拟信息装配工艺过程向虚实结合的装配工艺过程转变,模型数据由理论设计模型数据向实际测量模型数据转变,要素形式由单一工艺要素向多维度工艺要素转变,装配过程由以数字化指导物理装配过程向物理、虚拟装配过程共同进化转变。

实现数字孪生驱动的智能装配技术,构建复杂产品装配过程的信息物理融合系统,亟需在以下技术问题取得突破:

(1) 数字孪生装配工艺模型构建 研究基于零件实测尺寸的产品模型重构方法,并借助产品数字孪生模型进行装配工艺设计和工艺仿真优化。

(2) 基于孪生数据融合的装配精度分析与可装配性预测 研究装配过程中物理、虚拟数据的融

合方法,建立待装配零件的可装配性分析与精度预测方法,并实现装配工艺的动态调整与实时优化。

(3) 虚实装配过程的深度整合及工艺智能应用 研究装配现场实物与装配模型的关联机制,实现装配工艺流程、制造执行系统(Manufacturing Executive System, MES)及装配现场实际装配信息的深度集成,完成装配工艺信息的智能推送。

3.10 基于数字孪生的测试/检测

测试/检测是针对被测对象某种或某些状态参量进行的实时或非实时的定性或定量测量,是生产各项活动正常有序、高效高质进行的必要保障,发展高效高质量、高精度高可靠、低能耗低消耗的测试/检测技术一直都是工业界和学术界的研究热点。数字孪生驱动的测试/检测模式是在虚拟空间中构建

高保真度的测试系统及被测对象虚拟模型,借助测试数据实时传输、测试指令传输执行技术,在历史数据和实时数据的驱动下,实现物理被测对象和虚拟被测对象的多学科/多尺度/多物理属性的高逼真度仿真与交互,从而直观、全面地反映生产过程全生命

周期状态,有效支撑基于数据和知识的科学决策。数字孪生驱动测试/检测流程包括知识建模、系统设计、系统构建,以及系统、对象、过程状态数据全生命周期管理和自主决策。数字孪生驱动测试/检测模式如图 10 所示。

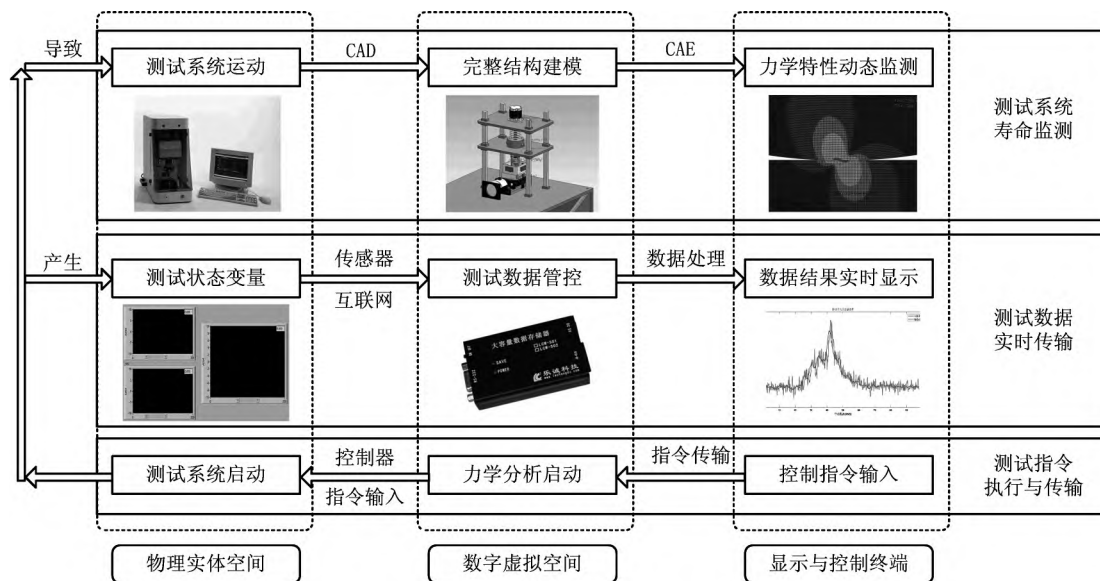


图10 数字孪生驱动的测试/检测

数字孪生驱动的测试/检测基于物理系统和虚拟系统的虚实共生,出现以下新变化:①直观呈现,即由状态参量数据化展现向状态参量可视化直观呈现;②原位表征,即由事后测量向被测量原位表征转变;③双向驱动,即由仅测量物理量向虚实共生数据双向驱动转变;④调整方式,即由被动响应向基于虚实交互的自适应主动控制转变;⑤管理方式,即由状态监测向虚实同步映射的全生命周期状态预测转变。

围绕数字孪生驱动的测试/检测模式研究,亟需在以下难点问题取得突破:

(1)数字孪生测试/检测系统建模 针对测试/检测系统虚实共生新特征,需面向性能和测试对象行为进行动态系统建模,为测试/检测数据流管理奠定基础。

(2)测试/检测系统信息物理融合 为实现状态测试、检测及预测的功能,需围绕数字孪生共生驱动的机理特征,探索测试设备、物联网设备和虚拟测试系统的信息物理融合方法。

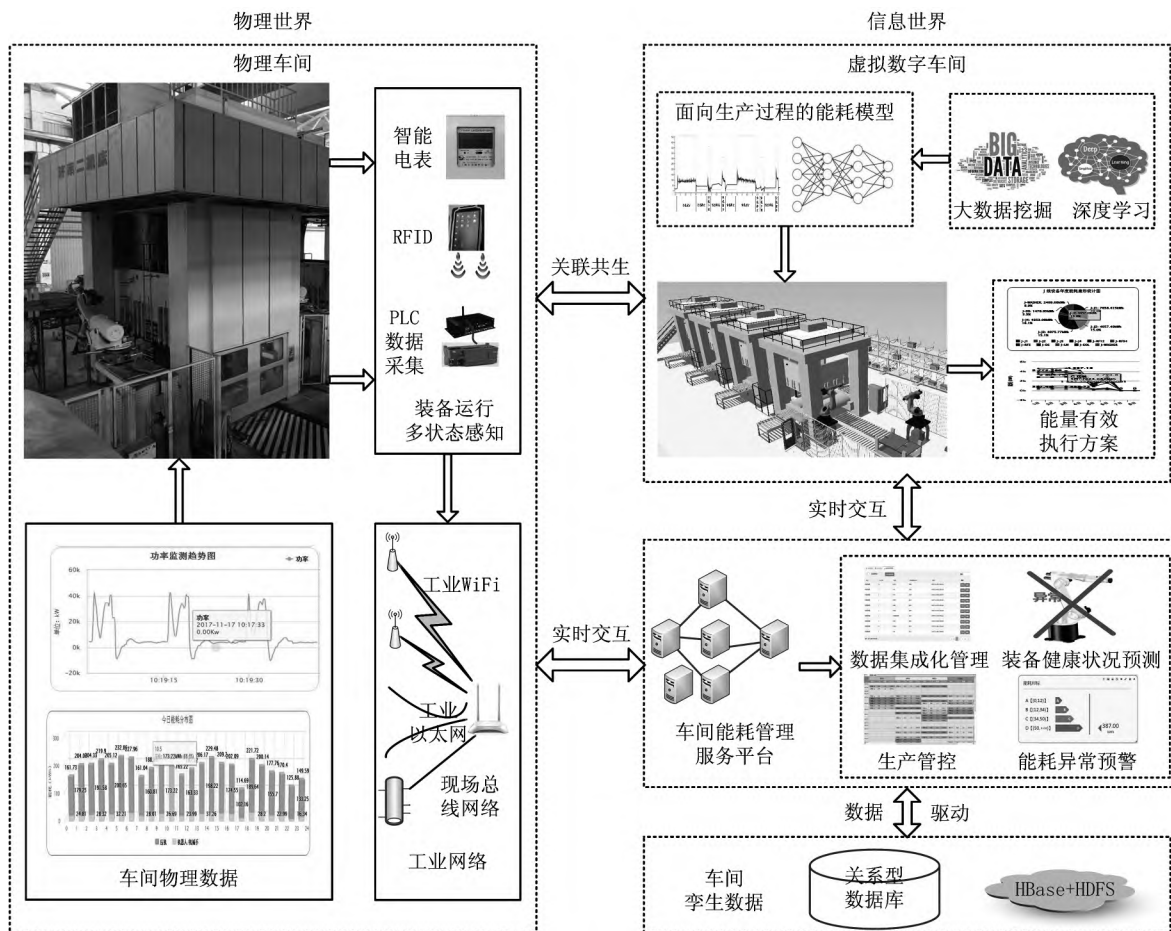
3.11 基于数字孪生的制造能耗管理

制造能耗管理指在有效保障制造系统性能、企业经济效益的同时,对制造过程中水、电、气、热、原

材料等能源消耗进行监测、分析、控制、优化等,从而实现能耗的精细化管理,达到节能减排、降低制造企业成本、保持企业竞争力的目的。基于数字孪生的制造能耗管理指在物理车间中,通过各类传感技术实现能耗信息、生产要素信息和生产行为状态信息等的感知,在虚拟车间对物理车间生产要素及行为进行真实反映和模拟,通过在实际生产过程中物理车间与虚拟车间的不断交互,实现对物理车间制造能耗的实时调控及迭代优化。基于数字孪生的制造能耗管理机制如图 11 所示。

数字孪生驱动的制造能耗管理与传统技术和方法相比,具有以下特点:①数据来源由单一的能耗数据向多类型的装备能耗、生产要素和生产行为等数据转变,数据来源不仅包括物理车间多源异构感知数据,还包括虚拟数字车间仿真演化数据;②交互方式由传统的平面统计图表显示向基于虚拟/增强现实技术的沉浸式交互转变;③能量有效生产过程管理由传统的经验指导管理向物理模型驱动数字模型知识演化的物理—信息融合的管理转变。

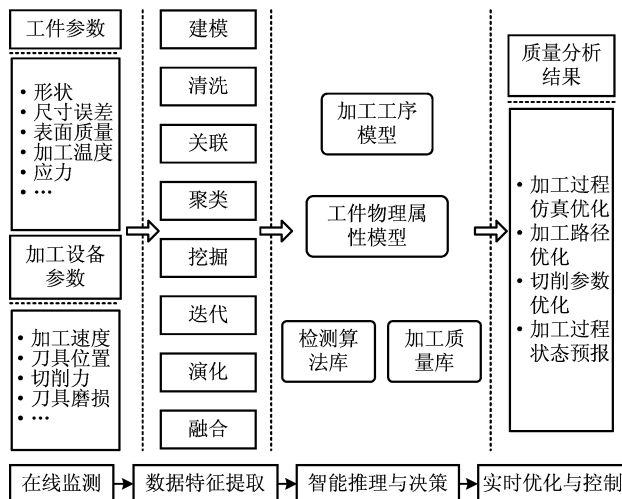
围绕基于数字孪生的制造能耗管理模式及应用研究,需解决以下难点:①能量有效多状态感知方面,需要研究能够适应车间恶劣工况环境并且准确



可靠的智能感知装置及分布式感知网络,为基础物理数据的获取提供保障;②能量有效迭代优化方面,在数字模型的仿真测试过程中,需要研究基于孪生数据的自组织、自学习优化方法,为系统的优化运行提供依据,同时在物理车间的实际生产过程中,需要研究高效的物理—信息系统迭代交互机制,支持实现动态环境下能量有效性能的优化提升。

3.12 基于数字孪生的产品质量分析与追溯

产品质量分析与追溯指在设计正确合理的制造工艺的同时,对生产过程中加工精度、所受应力等因素综合考虑实现产品的加工质量分析,并在出现质量问题时,可以追溯其加工中每个环节,找出原因,从而改进加工工艺、控制加工质量。基于数字孪生的产品质量分析与追溯指在采集物理车间中各个制造工序所承受的切削力误差、定位精度、工件热变形等信息基础上,通过在虚拟车间仿真计算,以对产品加工质量进行分析和预测。此外,产品的加工过程及相应的加工参数被记录在虚拟车间中以便产品质量追溯,如图12所示。



基于数字孪生的产品质量分析与追溯呈现出如下新的特点:

(1)多学科全要素仿真 虚拟车间构建4类模型数据库,分别是产品虚拟几何模型、加工工序与工艺模型;产品热传导模型、形变等物理属性模型;不

同类型加工质量模型库;数据检测算法库。

(2)加工质量实时分析 物理车间实时加工状态同步至虚拟车间,虚拟车间仿真后,实时获得质量分析结果。

(3)加工质量优化控制 在加工前,虚拟车间对设定的加工工艺进行仿真,优化加工工艺;在加工过程中,通过虚拟车间实时仿真进一步优化工艺。

(4)自我学习 生产过程中,加工质量库自动更新遇到的加工质量问题,并根据用户的引导进行自我学习,不断提高加工质量分析能力。

基于数字孪生的产品质量分析与追溯亟需解决以下难点问题:①加工质量预测技术,研究基于仿真的加工过程预测与优化、基于机器学习的智能预测算法。②加工质量稳态控制技术,研究虚拟车间自主地优化加工工艺,自主生成加工操作指令,并将相应的操作指令下达至加工执行机构。

3.13 基于数字孪生的故障预测与健康管理

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)利用各种传感器和数据处理方法对设备健康状况进行评估,并预测设备故障及剩余寿命,从而将传统的事后维修转变为事前维修。数字孪生驱动的 PHM 是在孪生数据的驱动下,基于物理设备与虚拟设备的同步映射与实时交互以及精准的 PHM 服务,形成的设备健康管理新模式,实现快速捕捉故障现象,准确定位故障原因,合理设计并验证维修策略。如图 13 所示,在数字孪生驱动的 PHM 中,物理设备实时感知运行状态与环境数据;虚拟设备在孪生数据的驱动下与物理设备同步运行,并产生设备评估、故障预测及维修验证等数据;融合物理与虚拟设备的实时数据及现有孪生数据,PHM 服务根据需求被精准的调用与执行,保证物理设备的健康运行。

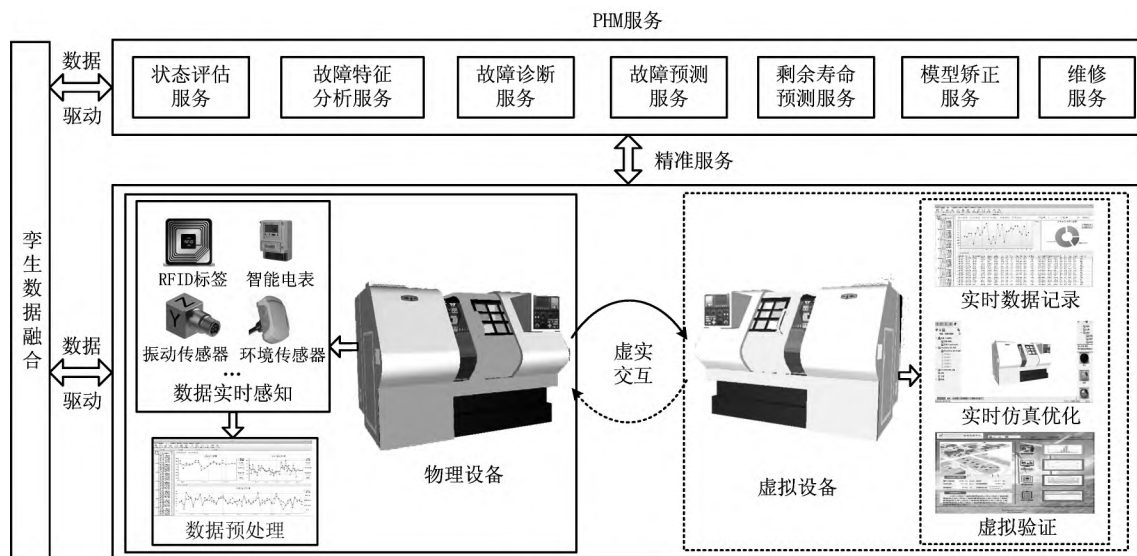


图13 数字孪生驱动的PHM模式

数字孪生驱动的 PHM 模式为传统的 PHM 带来以下新的转变:①故障观察方式由静态的指标对比向动态的物理与虚拟设备实时交互与全方位状态比对转变;②故障分析方式由基于物理设备特征的分析方式向基于物理、虚拟设备特征关联与融合的分析方式转变;③维修决策方式由基于优化算法的决策向基于高逼真度虚拟模型验证的决策转变;④PHM 功能执行方式由被动指派向自主精准服务转变。

围绕数字孪生驱动的 PHM 研究,需在以下难点问题取得突破:

(1)故障捕捉方法 研究虚实自主交互机制,虚实一致性/不一致性的判别规则,引发虚实不一致性扰动(故障诱因)的捕捉与消解方法等。

(2)故障机理研究 研究基于孪生数据的故障特征提取及融合、故障过程建模及传播机理等。

(3)PHM 服务的精准调度与执行 研究 PHM 服务的自组织、自学习、自优化机制,需求的捕捉与精准解析,基于虚拟验证的服务精准执行等。

3.14 基于数字孪生的产品服务系统

产品服务系统(Product-service System, PSS)是一种向消费者提供不同“物理产品和/或服务”组合的价值提供系统,分别包括面向产品的 PSS、面向使用的 PSS 和面向结果的 PSS。基于数字孪生的 PSS 是在数字孪生的支撑下,通过不同“物理产品和/或服务”组合的智能分析决策、快速个性化产品服务配置和服务过程体验与快速供给等,借助要素

间的虚实同步,实现资源的优化配置与融合。建立基于数字孪生模型的 PSS,充分利用数字化与信息化系统,有效支持复杂产品与服务生命周期的智能决策提供、快速供给、智能服务、价值与环境分析等。

基于数字孪生的 PSS 使服务管理呈现出新的转变,即响应方式由客户响应向服务商主动服务转变;服务配置与价值分析方式由人为主观配置与评估向实时精确配置与评估转变;服务理念由为自己创造价值转变为与客户一起共同创造价值转变;过程管理由传统服务管理模式向实时化、远程化、集成化的生命周期管理转变。

基于数字孪生的 PSS 亟需在以下难点问题取得突破:①在不同类型 PSS 组合的智能分析决策方面,智能获取和融合现有信息系统中的准确数据,通过可视化的智能分析工具实现不同客户的个性化 PSS 模式和物理与服务模块组合;②在 PSS 价值与环境效益分析决策方面,基于产品服务价值分析工具、产品环境化分析与评价工具等,实现价值增值能

力和环境效益的实时分析与可视化展示;③在复杂产品远程控制方面,融合多源传感器信息,建立远程系统与 PLC 之间的数据通道,构建产品的在线监控、多参数故障分析预警模型和远程控制模型,为产品的远程、实时和无人化操控提供支持;④物理产品与服务集成的生命周期数据模型及演化方面,在服务生命周期过程中,研究物理产品与服务相集成的数据模型及生命周期状态变化规律,有效支持不同类型 PSS 的生命周期履历管理,并支持物理产品再设计的可靠性分析与优化。

4 应用案例:基于数字孪生的电厂发电机组智能健康管理

发电机组是电厂的核心设备,保证发电机组的健康运行对电力的稳定供给至关重要。基于数字孪生理念及应用实践参考系统架构^[5],某公司实践了基于数字孪生的电厂发电机组智能健康管理系统,其实现框架如图 14 所示。

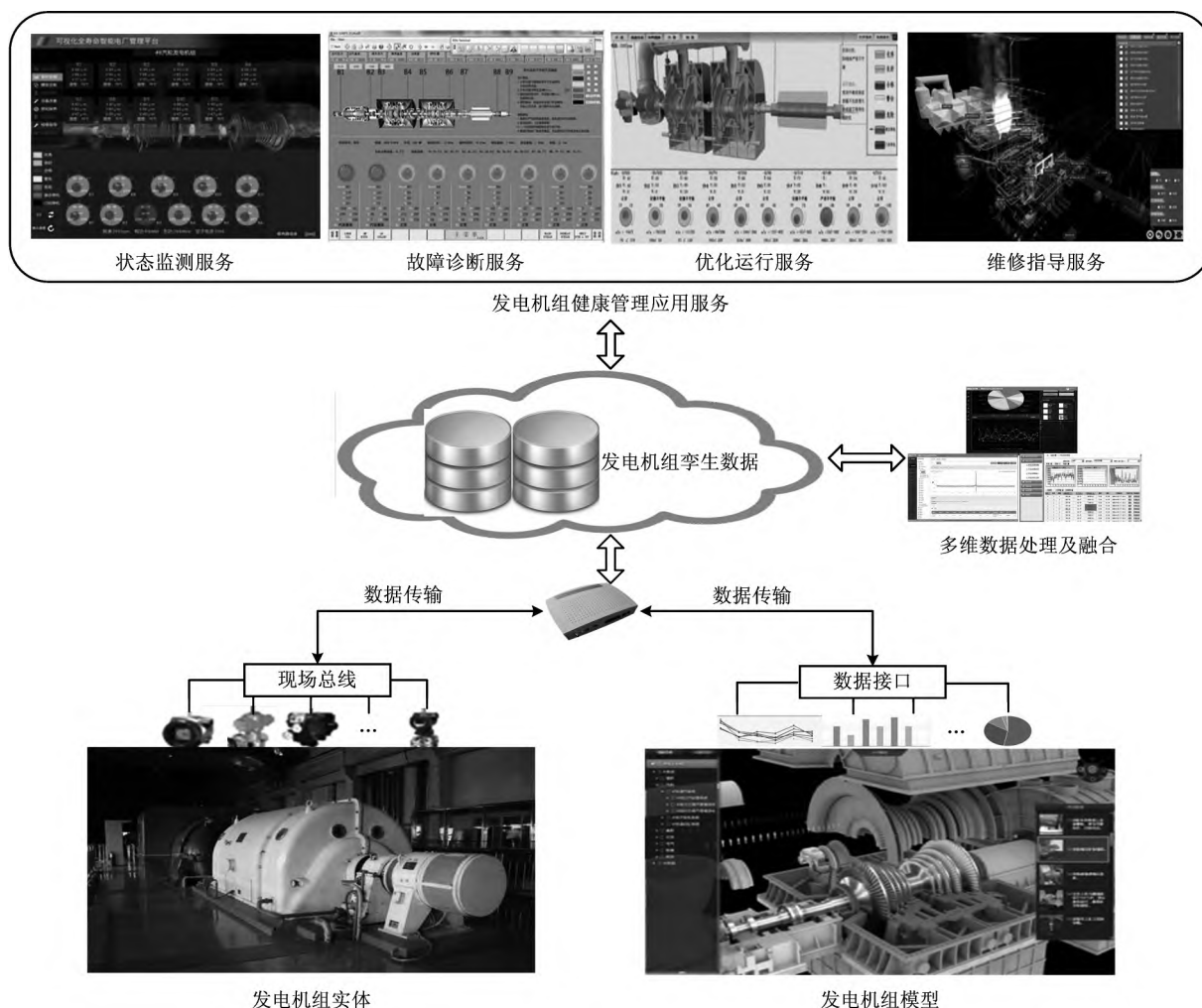


图14 基于数字孪生的电厂发电机组智能健康管理系统实现框架

首先通过加速度传感器、转速传感器、电流传感、功率传感器等对发电机组实体的轴承振动、转轴转速、定子电流、有功及无功功率等进行实时监测。基于实时监测数据、已有历史数据及规格数据等,在虚拟空间对发电机组各部件(如汽缸、叶轮、主轴、联轴器)从几何、物理、行为、规则4个维度进行描述,并集成为发电机组的高逼真度虚拟模型。发电机组实体及其虚拟模型同步运行,产生的孪生数据不仅包括振动、温度、转速、电流等实时感知数据,还包括虚拟模型产生的轴系疲劳磨损、扭振、热应力等仿真数据,以及通过多维数据处理与融合得到的融合数据等。在孪生数据及虚拟模型的驱动下,实现对发电机组的智能健康管理应用服务,以保证其健康运行。其中,状态监测服务使运维人员通过高逼真度虚拟模型以透视的眼光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的比对与交互,从优秀、良好、合格、警告等7个层次对其健康状态进行评估。故障诊断服务综合考虑发电机组实体特征、虚拟模型特征及其融合特征等多维特征,准确预警发电机组超速、断轴、大轴承永久弯曲、烧瓦、油膜失稳等事故。优化运行服务利用发电机组实体与其模型的实时交互,实现对轴承设计、阀序、开度以及运行参数等的迭代优化,使发电机组持续保持在最优工况下运行。维修指导服务与维修作业指导书相关联,基于高逼真度虚拟模型模拟发电机组的维修过程,形成三维作业指导书,提高维修的精准性。

基于数字孪生的智能健康管理彻底改变了传统模式下发电机组运行的“黑箱”状态,实现了逼真可视化监测、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,为发电机组的健康管理及可靠运维提供了有效途径。

5 结束语

数字孪生技术不但可以利用人类已有理论和知识建立虚拟模型,而且可以利用虚拟模型的仿真技术探讨和预测未知世界,发现和寻找更好的方法与途径,不断激发人类的创新思维、不断追求优化进步,其为当前制造业的创新和发展提供了新的理念和工具,得到了工业界和学术界越来越广泛的关注。本文总结了数字孪生理论研究和企业应用上的进展,分析和探讨了当前数字孪生技术存在的问题和不足,同时从应用需求出发,基于提出的数字孪生五

维结构模型,设计了数字孪生驱动的6条应用基本准则。依据6条基本准则,进一步探索了数字孪生驱动的14类应用初步设想、与传统(或现有)方法的区别,以及数字孪生理念实施过程中所需突破的关键技术等。期望相关工作能为相关学者进一步开展数字孪生理论、技术和工程应用研究提供启发及参考。

致谢

2017年7月25日在北航召开了“第一届数字孪生与智能制造服务学术研讨会”,来自全国20多所高校的70余名学者参加了研讨。本文是在研讨会结束后,由北航陶飞教授发起,参考CIRP的Keynote Paper的组织和写作模式,邀请并组织国内十多个单位共同完成。本文所列作者贡献均等,均为第一作者。

特别感谢2017年7月在北航研讨会期间,对数字孪生相关研究工作提出宝贵指导建议的70余名专家学者。感谢北航课题组张永平、李培、苏雍贺、马昕等博士生等参与本文讨论与完善。非常感谢新加坡国立大学A Y C Nee教授、瑞典皇家理工学院Lihui Wang教授、新西兰奥克兰大学Xun Xu教授、英国伯明翰大学D T Pham教授、武汉理工大学周祖德教授、北京机械工业自动化研究所有限公司谢兵兵总工程师、法国ENS Paris-Saclay & Paris-Sud University的Nabil Anwer教授、澳大利亚新南威尔士大学Ang Liu博士对相关工作的帮助和指导!特别感谢《计算机集成制造系统》编辑部的支持。

数字孪生理论研究和应用当前国内外还处于起步阶段,本文相关工作难免存在不足之处,恳请国内外同行批评指正。

参考文献:

- [1] TAO Fei, QI Qinglin. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 2017. DOI:10.1109/TSMC.2017.2723764.
- [2] TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9 (in Chinese). [陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 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.]
- [3] TAO Fei, CHENG Jiangfeng, QI Qinglin, et al. Digital twin-

- driven product design, manufacturing and service with big data [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, DOI:10.1007/s00170-017-0233-1.
- [4] TAO Fei, ZHANG Meng. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.
- [5] TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jingfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(08): 1603-1611 (in Chinese). [陶 飞, 程 颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(08): 1603-1611.]
- [6] FOURGEAU E, GOMEZ E, ADLI H, et al. System engineering workbench for multi-views systems methodology with 3D EXPERIENCE Platform. the aircraft radar use case[M]// Complex Systems Design & Management Asia. Springer International Publishing, 2016.
- [7] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2017.
- [8] TUEGEL E, INGRAFFEA A, EASON T, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, DOI:10.1155/2011/154798.
- [9] ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(04): 753-768 (in Chinese). [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(04): 753-768.]
- [10] YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 526(7): 41-45 (in Chinese). [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, 526(7): 41-45.]
- [11] ZHANG Hao, LIU Qiang, CHEN Xin, et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line[J]. IEEE Access, 2017, 5: 26901-26911.
- [12] WANG Junqiang, FAN Guoqiang, YAN Feiyi, et al. Research on initiative scheduling mode for a physical internet-based manufacturing system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1): 47-58.
- [13] ZHANG Yingfeng, QIAN Cheng, LYU Jingxiang, et al. Agent and cyber-physical system based self-organizing and self-adaptive intelligent shop floor[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(2): 737-747.
- [14] QU Ting, PAN Yanghua, LYU Xuan, et al. IoT-based real-time production logistics synchronization mechanism and method toward customer order dynamics[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2017, 39(4): 429-445.
- [15] QU Ting, ZHANG Kai, LUO Hao, et al. Internet-of-things based dynamic synchronization of production and logistics: mechanism, system and case study[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 36-44 (in Chinese). [屈 挺, 张 凯, 罗 浩, 等. 物联网驱动的“生产—物流”动态联动机制、系统及案例[J]. 机械工程学报, 2015, 51(20): 36-44.]
- [16] APRISO. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication [EB/OL]. (2014-05-06). <http://www.apriso.com>.
- [17] GABOR T, BELZNER L, KIERMEIER M, et al. A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomic Computing. Washington, D. C., USA: IEEE, 2016: 374-379.
- [18] 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]//Proceedings of the 22nd ISPE-Inc International Conference on Concurrent Engineering, 2015: 657-666. DOI:10.3233/978-1-61449-544-9-657.
- [19] SCHROEDER G N, STEINMETZ C, PEREIRA C E, et al. Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data Exchange[J]. IFAC-Paper OnLine, 2016, 49(30): 12-17.
- [20] AITOR M, GORKA V, AITOR A, et al. Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2017, 11(2): 365-373.
- [21] MAJUMDAR P K, FAISALHAIDER M, REIFSNIDER K. Multi-physics Response of Structural Composites and Framework for Modeling Using Material Geometry [C]//Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, Va., USA: AIAA, 2013, 76(9).
- [22] SCOTT-EMUAKPOR O, GEORGE T, BECK J, et al. Material Property Determination of Vibration Fatigued DMLS and Cold-rolled Nickel Alloys [C]//Proceedings of the International Gas Turbine Institute Turbo Expo. New York, N. Y., USA: ASME, 2014, V07AT28A008.
- [23] RICKS T M, LACY T E, PINEDA E J, et al. Computationally efficient solution of the high-fidelity generalized method of cells micromechanics relations [EB/OL]. [2107-01-05]. http://www.cavs.msstate.edu/publications/docs/2015/09/140441700_Ricks.pdf.
- [24] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing [C]//Proceedings of the 45th SME North American Manufacturing Research Con-

- ference. Amsterdam, the Netherlands; Elsevier, 2017, 10: 1031-1042.
- [25] UHLEMANN T H J, SCHOCK C, LEHMANN C, et al. The digital twin; demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 9: 113-120.
- [26] WANG X V, KEMENY Z, VANCZA J, et al. Human-robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 5-8.
- [27] BAZILEVS Y, DENG X, KOROBENKO A, et al. Isogeometric fatigue damage prediction in large-scale composite structures driven by dynamic sensor data[J]. Journal of Applied Mechanics, 2015, 82(9).
- [28] BIELEFEDT B, HOCHHALTER J, HARTL D. Computationally efficient analysis of SMA sensory particles embedded in complex aerostructures using a substructure approach [C]//Proceedings of ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2015: V001T02A007.
- [29] SESHADRI B R, KRISHNAMURTHY T. Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept[EB/OL]. [2107-01-15]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170001027.pdf>.

作者简介:

陶 飞(1981—),男,湖北武汉人,教授,博士,博士生导师,研究方向:面向服务的智能制造、制造服务管理与优化、数字孪生技术等, E-mail:ftao@buaa.edu.cn;

刘蔚然(1991—),男,吉林长春人,博士研究生,研究方向:数字孪生技术、空间信息网络建模技术;

刘检华(1977—),男,江西萍乡人,教授,博士,博士生导师,研究方向:数字化装配技术;

刘晓军(1980—),男,河北张家口人,副教授,博士,研究方向:三维工艺设计、智能设计方法等;

刘 强(1978—),男,湖南娄底人,教授,博士,研究方向:排样算法、智能车间定制设计与运行优化;

屈 挺(1979—),男,陕西西安人,教授,博士,博士生导师,研究方向:工业物联网与智能制造、生产物流管理、供应链管理、数字孪生技术等;

胡天亮(1981—),男,山东济南人,副教授,博士,博士生导师,研究方向:智能制造系统、智能感知与自决策、智能控制系统、数字孪生技术等;

张执南(1978—),男,辽宁盘锦人,副教授,博士,博士生导师,研究方向:创新设计方法、摩擦学设计等;

向 峰(1983—),男,湖北武汉人,副教授,博士,硕士生导师,研究方向:面向服务的智能制造、制造业信息化、绿色制造服务技术、数字孪生技术等;

徐文君(1983—),男,广东和平人,教授,博士,研究方向:可持续制造、人机共融协作制造、制造智能与制造服务、信息物理融合生产系统、数字孪生技术等;

王军强(1977—),男,陕西岐山人,教授,博士,博士生导师,研究方向:生产与运作系统的调度优化、性能分析等;

张映锋(1979—),男,陕西汉中,教授,博士,博士生导师,研究方向:制造物联网、智能制造系统、智能工厂技术等;

刘振宇(1974—),男,江西赣州人,教授,博士,博士生导师,研究方向:数字化设计与制造、建模仿真与数字样机技术;

李 浩(1981—),男,河南唐河人,副教授,博士,硕士生导师,研究方向:产品设计方法学、智能制造服务、数字孪生技术等;

程江峰(1987—),男,山东烟台人,博士研究生,研究方向:面向服务的智能制造、数字孪生车间智能互联技术;

戚庆林(1989—),男,山东聊城人,博士研究生,研究方向:面向服务的智能制造、数字孪生技术;

张 萌(1989—),女,河北保定人,博士研究生,研究方向:数字孪生技术、绿色可持续制造服务技术;

张 贺(1995—),男,吉林四平人,博士研究生,研究方向:工业 Hub 技术、数字孪生技术;

隋芳媛(1995—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,研究方向:数字孪生技术;

何立荣(1961—),男,山东青岛人,北京必可测科技股份有限公司董事长,智能电厂建设先行者。第三届中国设备管理杰出创新人物;

易旺民(1979—),男,湖南宁乡人,研究员,主任,研究方向:数字化工艺设计及仿真、智能装配技术;

程 辉(1979—),女,山东东营人,高级工程师,博士,主任,研究方向:智能制造、工业工程。