

DOI:10.13196/j.cims.2017.08.001

数字孪生车间信息物理融合理论与技术

陶 飞¹,程 颖^{1,2},程江峰¹,张 萌¹,徐文君³,戚庆林¹

(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. 香港理工大学 工业与系统工程系,香港 999077;

3. 武汉理工大学 信息工程学院,湖北 武汉 430070)

摘要:数字孪生车间作为实现制造物理世界和信息世界智能互联与交互融合的一种潜在的有效途径,近期被国内外相关领域学术界和企业界高度关注。基于前期对数字孪生车间的概念、系统组成、运行机制、特点和关键技术等研究,设计了数字孪生车间的参考系统架构,并从数字孪生车间 4 个主要系统组成(物理车间、虚拟车间、车间孪生数据、车间服务系统)的角度出发,分别对物理车间异构要素融合、虚拟车间多维模型融合、车间物理—信息数据融合、车间服务/应用融合等关键问题进行了研究分析。从物理融合、模型融合、数据融合和服务融合 4 个维度,系统地探讨了实现数字孪生车间信息物理融合的基础理论与关键技术,为企业实践数字孪生车间提供了参考。

关键词:数字孪生车间;信息物理融合;物理融合;模型融合;数据融合;服务融合

中图分类号:TP301.6 文献标识码:A

Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor

TAO Fei¹, CHENG Ying^{1,2}, CHENG Jiangfeng¹, ZHANG Meng¹, XU Wenjun³, QI Qinglin¹

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Department of Industrial and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

3. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: As a potential way to realize the interaction and integration between manufacturing physical world and information space, the concept of Digital Twin Shop-floor (DTS) had been proposed recently which attracted high attentions of both academics and industrial practitioners in related fields. Based on the authors' previous work on DTS's concept, system composition, operation mechanisms, characteristics and key technologies, a reference architecture for DTS system was designed. According to the four main system compositions of DTS, the cyber-physical fusion problem was investigated from the following four aspects which were physical elements connection and fusion in physical shop-floor, virtual models integration and fusion in virtual shop-floor, physical-cyber data integration and fusion based on digital twin, and applications integration based on services. The basic theories and key technologies for implementing the four issues of cyber-physical fusion were investigated respectively, which provided a reference for enterprises to build and practice DTS.

Keywords: digital twin shop-floor; cyber-physical fusion; physical elements fusion; models fusion; data fusion; services fusion

收稿日期:2017-05-30;修订日期:2017-07-30。Received 30 May 2017;accepted 30 July 2017.

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金资助项目(51522501);科技部智能制造创新方法工作专项资助项目(2015IM040700);“香江学者”计划资助项目(XJ2016004);北京航空航天大学青年科学家团队(面向服务的智能制造团队)支持计划资助项目。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51522501), the Innovative Methods Special Program of Ministry of Science and Technology, China(No. 2015IM040700), the Hong Kong Scholar Program, China(No. XJ2016004), and the Young Scientist Group Program of BUAA(Group of Service-Oriented Smart Manufacturing), China.

0 引言

为满足和适应社会化、个性化、服务化、智能化、绿色化等制造发展的需求和趋势,世界各国相继提出了各自国家层面的制造发展战略,这些制造发展战略的共同目标之一就是实现制造的物理世界和信息世界的互联互通和智能化操作,进而实现智能制造^[1-3],其共同瓶颈之一是制造的物理世界和信息世界之间的交互与共融^[1]。从作为制造活动执行基础的车间层面出发,为逐步解决车间层的物理世界和信息世界之间的交互与共融,最终实现智能生产和精准服务这一目标,数字化车间/工厂的概念于多年前即被提出。国内外学者和实践者围绕数字化车间/工厂开展了大量研究和建设工作,包括车间制造物联^[4-5]、数字/虚拟车间建模^[6-7]、车间数据/信息集成^[8-9]、车间智能运行与精准管理^[10-11]等,提出了很多有价值的理论和技术,从不同角度对车间层面的这一难题与目标进行了分析,并提出了相应的解决方案。然而,在新一代信息技术背景下,实现智能制造和智能生产需求仍存在以下局限和不足:

(1)车间制造物联方面 现有研究主要围绕单个设备的智能感知与接入(包括接口、协议、模型)、状态和运行数据采集/传输/处理、运行状态监测与健康管理等开展了大量理论、技术和方法的研究,研制了相关装置,在一定程度上实现了单一设备的网络化接入与智能化操作。而对车间异构要素间(如设备与设备、人与设备、设备和环境、人—设备—环境等)的互联互通关注不足,尤其缺少综合考虑人、机、物、环境等车间多源异构要素的系统级全面互联互通的研究,即缺乏车间异构要素的全互联与融合理论和通用装置的支撑。

(2)数字/虚拟车间建模/仿真/分析方面 现有研究主要集中在车间要素的几何模型或系统模型的构建与仿真分析方面,缺少刻画和反映物理车间真实行为、规则、约束等的模型,从而无法实现物理车间到虚拟车间的真实完全镜像;此外,在车间运行仿真分析方面,现有研究主要依赖已有数据驱动模型进行,对车间行为、规则、约束等因素,以及车间物理要素实时动态数据综合集成考虑不足,即缺少几何—行为—规则—约束多维融合模型的支撑。

(3)在车间数据/信息集成方面 主要基于某一信息系统或平台(如制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)),对车间涉及到的信息/

数据进行集成与共享,其集成范围主要局限于车间部署的信息系统(如MES,企业资源计划(Enterprise Resources Planning, ERP),计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)等)已有数据和采集的部分实时数据,对车间上游业务/流程(如市场需求、产品设计)和下游业务/流程(如产品维护、维修和大修(Maintenance, Repair & Overhaul, MRO))数据考虑和集成不足。此外,因缺乏车间异构要素智能互联与融合理论和装置的支撑,对车间实时物理数据采集与集成不够,物理和信息数据双向动态链接与融合不足,即缺乏对车间全要素/全业务/全流程物理—信息融合数据的考虑和支撑。

(4)在车间运行优化与精准管理方面 传统思路主要基于“问题分析—模型构建—求解算法设计—优化分析控制”的流程来展开研究,在物联网和大数据被引入车间应用后,国内外学者提出了基于车间大数据的“数据关联挖掘—动态演化—仿真/预测—智能调控”新思路,两者都依赖于反映车间运行状态的模型和数据,但因缺少车间几何—行为—规则—约束多维融合模型的支撑,又缺少对车间物理—信息融合数据的考虑和驱动,导致当前数字化车间在实际运行优化与精准管理过程中,车间信息层和物理层不同步、一致性差、智能化程度低、管理精准度不够,缺乏车间应用和服务融合理论的支撑。

以上不足可归纳为车间信息物理融合这一科学问题;针对该问题,笔者2016年将数字孪生技术引入到车间研究与应用中,探索了数字孪生车间(Digital Twin Shop-floor, DTS)的概念^[1]。DTS作为一种可实现车间制造物理世界和信息世界智能互联与交互融合的潜在有效途径,近期受到了国内外相关领域学术界和企业界的高度关注。信息物理融合既是DTS的目标,也是构建和实践DTS所面临的核心挑战之一。要解决这一核心问题,必须首先解决车间海量数据融合问题,并在此基础上进一步解决多源异构物理—信息数据融合问题,包括:物理车间异构要素融合、虚拟车间多维模型融合、车间物理—信息数据融合、车间服务与应用融合4个关键科学难题。

基于笔者前期对DTS的概念、系统组成、运行机制、特点和关键技术等研究,本文设计了DTS参考系统架构,并从DTS主要系统组成(包括物理车

间、虚拟车间、车间孪生数据、车间服务系统)^[1]的角度出发,分别对上述车间信息物理融合的 4 个关键科学问题进行系统性研究与分析。基于现有数字化车间理论与技术,将数字孪生技术与制造服务理论相结合,将其概念进行扩展,通过分别构建全互联的物理车间、全镜像的虚拟车间、全要素/全流程/全业务的车间孪生数据及其相应的车间服务系统,基于车间孪生数据实现物理车间异构要素融合、虚拟车间多维模型融合、车间物理—信息数据融合、车间服务与应用融合,最终实现车间信息物理融合,从而为企业开展智能车间建设、实现智能生产和精准管理提供一种新的思路。

1 数字孪生车间参考系统架构

为给企业未来开展 DTS 实践提供参考,本文设计了如图 1 所示的 DTS 参考系统架构,该架构主要

包括 5 层:①物理层,主要指车间人、机、物等物理车间实体,以及物理车间对应生产活动的集合,负责产品生产加工的物理空间实现,同时具有自感知、自决策、底层数据采集与传输等功能;②模型层,主要指 DTS 虚拟车间及其对应承担的虚拟生产活动,包括虚拟车间的各类模型、规则、知识等,负责生产活动在虚拟空间的仿真、分析、优化、决策等;③数据层,指车间孪生数据服务平台,负责为 DTS 的物理车间、虚拟车间和车间服务系统运行提供数据支撑服务,并具备车间孪生数据的生成、处理、集成、融合等数据生命周期管理与处理功能;④服务层,负责为车间生产提供智能排产、协同工艺规划、产品质量管理、生产过程管控、设备健康管理、能效优化分析等各类车间生产服务;⑤应用层,主要指开展具体产品加工生产涉及到的智能生产、精准管控、可靠运维等智能制造任务应用需求。

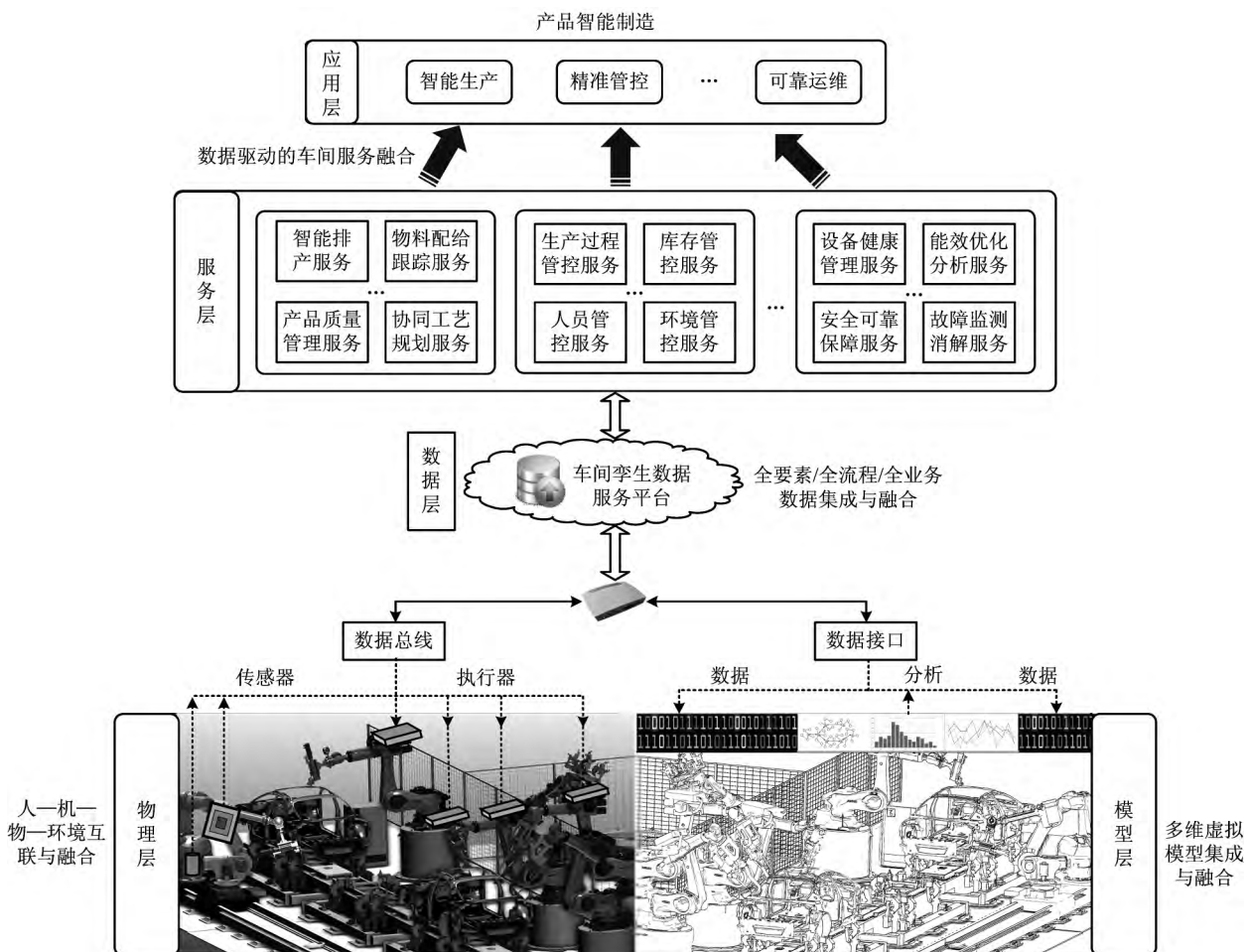


图1 数字孪生车间参考系统架构

2 数字孪生车间信息物理融合

结合图 1 及笔者前期提出的 DTS 4 部分系统^[1] (即物理车间、虚拟车间、车间孪生数据、车间服务系统)可知, DTS 信息物理融合科学问题可进一步细分为物理车间异构要素融合 (即物理融合)、虚拟车间多维模型融合 (即模型融合)、车间物理—信息数据融合 (即数据融合)、车间服务融合与应用 (即服务融合) 4 个关键问题。

2.1 物理融合

为实现车间异构要素智能感知与互联, 国内外学者开展了大量相关研究, 如基于无线射频识别 (Radio Frequency Identification, RFID)^[12]、无线传感网络 (Wireless Sensor Network, WSN)^[13]、智能仪表^[5] 的车间数据采集与过程监测, 基于制造服务总线 (Manufacturing Service Bus)^[14]、PROFI-

NET^[15]、OPC UA^[16]、AutomationML^[17] 的车间智能互联协议, 基于物联网的感知与接入方法及装置^[18]和工业互联网 Hub 解决方案^[19]等, 但仍存在车间要素互联不全、采集数据有限、制造装备物理和信息分离等不足, 未能实现“人—机—物—环境”这 4 大车间要素的全面感知与融合。据此, 本文提出 DTS“物理车间人—机—物—环境融合”这一理论科学问题 (简称物理融合)。

物理融合指通过可靠感知物理车间内人、机、物、环境异构全要素信息, 将动态网络环境下的海量感知数据实时传输至信息层, 集成规约多源多模态异构数据, 并精准控制混杂动态环境下车间异构制造资源的行为协同, 从而实现车间内“人—机—物—环境”全要素的智能感知与互联、高效数据传输与集成、实时交互与控制、智能协作与共融, 如图 2 所示。

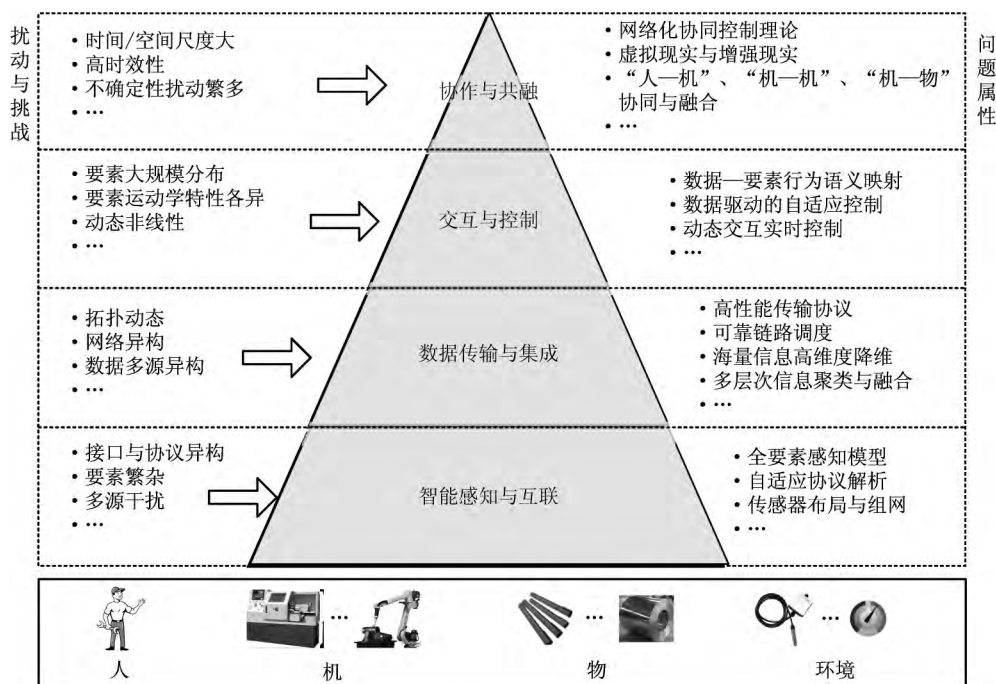


图2 车间异构要素物理融合

物理融合的目标是为实现 DTS 的模型融合、数据融合、服务融合提供底层实时数据支撑, 在实现车间异构要素智能感知和互联以及多源异构数据集成的基础上, 进一步实现: ①“人—机”互联与协同, 融合机器的准确性与人的灵活性, 使机器能迅速调整自我工作计划以适应动态变化的生产情况, 并响应人通过声音或手势、软件等工具下达的命令; ②“机—机”互联与协同, 车间制造资源协同作业, 具有更好的自我调节适应能力、更好的数据冗余性和鲁

棒性; ③“机—物”协同, 如基于 RFID/摄像头的物料/在制品/成品智能感知与定位, 高效生产、精准溯源与智能仓储等。由图 2 可知, 实现物理融合主要涉及以下理论与技术:

(1) “人—机—物—环境”智能感知与互联 (smart connection and interconnection) 包括面向混杂动态车间全要素的感知模型、即插即用自适应匹配协议解析方法、多传感器群组优化布局与动态组网机理、多时间/空间尺度协同测量理论、车间异

构要素智能互联通用装置^[19]等。

(2)“人—机—物—环境”数据智能传输与集成 (smart communication and integration) 包括高速、高稳定性、低延迟的数据传输协议;实时可靠链路调度技术,多粒度异构数据融合与服务化封装方法,海量信息高维度降维处理和分布式存储方法。

(3)“人—机—物—环境”智能交互与控制 (smart control and interaction) 包括多模态数据与对象行为的语法和语义映射规则、关键工艺过程建模与控制、数据驱动的自适应控制方法、基于模板和模型驱动映射方法的动态交互实时控制理论与方法。

(4)“人—机—物—环境”智能协作与共融 (smart cooperation and convergence) 包括网络化分布式协同控制理论,虚拟现实与增强现实技术,车间运行模式认知与知识挖掘,面向精准反馈的车间孪生数据驱动的“人—机”、“机—机”、“机—物”协同控制方法。

2.2 模型融合

在车间建模方面,现有研究主要集中在车间要

素的几何模型构建,以及对车间布局^[20]、装配流程^[7]、加工过程^[21]、车间物流^[22]等进行建模仿真分析。部分研究工作基于几何模型,进一步考虑了物理因素(如设备的物理运行参数、工艺参数、生产能力和生产特征等)的建模,并对物理参数变化过程仿真^[23]、工艺方案评估^[24]等进行了研究。但基于几何模型对物理因素的建模仿真,仍缺乏对车间真实行为、规则、约束等的进一步刻画,尤其缺乏“几何—物理—行为—规则”等多个维度的模型融合,无法形成完全真实映射物理车间的虚拟车间。

为实现物理车间到虚拟车间的真实完整映射,必须首先从几何、物理、行为、规则等多个维度对车间进行建模,并对所建立的模型进行评估和验证,以保证模型的正确性和有效性;在此基础上将各维度模型进行关联、组合与集成,从而在信息空间级连与融合为一个完整的、具备高忠实度的虚拟车间模型,如图 3 所示。因此,本文提出基于“几何—物理—行为—规则”的虚拟车间多维模型融合这一理论科学问题(简称模型融合)。

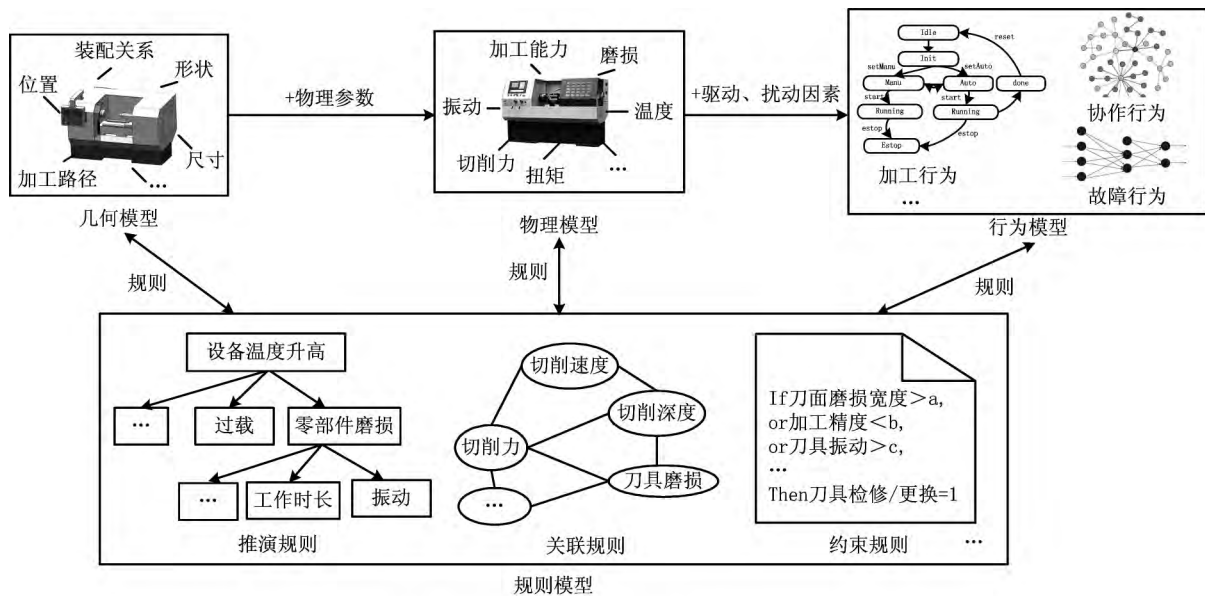


图3 虚拟车间多维模型构建与融合

模型融合过程主要涉及多维模型的构建、评估与验证、关联与映射、融合、一致性分析等过程和问题,具体包括:

(1)虚拟车间多维模型构建 为实现车间多维模型融合,必须构建几何、物理、行为、规则等多维度的车间模型,从几何形状、物理属性、行为响应及规律规则等多方面对物理车间进行真实刻画和描述建模。

(2)虚拟车间多维模型评估与验证 模型确定后,必须保证模型的有效性和正确性,即基于VV&A(verification validation & accreditation)对所构建的多维模型进行验证,包括对模型演绎过程中的输入/输出准确度的验证、仿真置信度的验证、灵敏度与仿真精度的验证等。

(3)虚拟车间多维模型关联关系与映射机制 为实现多维模型的融合,在所述 4 层正确模型的基础

基础上,必须研究并分析各维模型间的关联与映射关系。其中:几何模型与物理模型是对车间异构要素的描述;行为模型是在此基础上加入驱动及扰动因素,使各要素具备行为特征、响应机制以及进行复杂行为的能力;规则模型是对物理车间及其模型在几何、物理、行为多个层面上反映的规律规则进行刻画,并将其映射到相应的模型上,使各模型具备评估、演化、推理等能力。通过建立各层模型间的关联关系,从结构和功能两方面对这 4 层模型进行集成与融合,形成虚拟车间综合模型,并以统一的三维表现形式支持该模型的可视化呈现与仿真运行。

(4)虚拟车间多维模型一致性理论与方法 为使虚拟车间模型与物理车间及其复杂生产活动保持真实镜像和同步,必须保证几何、物理、行为、规则等各维模型与其所刻画的实际对象的一致性,以及同一实际对象对应的不同维度模型的一致性。

2.3 数据融合

车间制造数据具有规模海量、多源异构、多时空尺度、多维度等大数据特征^[10,25-26]。通过制造大数据建立车间生产过程和运行决策间的关系,能对车间运行状态进行统计和分析,有助于提升车间生产效率^[26-27]和产品质量^[28]、降低车间能耗^[29]、保障车间设备健康^[30]等。然而,相关研究主要基于车间生产过程感知数据,实现了车间信息层面的数据集成融合,但没实现“虚实交互”环境下车间全业务/全要素/全流程数据的集成与融合。如制造某手机保护壳,既需要考虑外壳样式、颜色、用户评价、材质手感、氧化度等设计数据,又需要考虑加工温度、压力、表面粗糙度等物理车间实时加工数据,同时还需要考虑加工质量、周期、车间排产任务等订单数据。因此,本文提出 DTS“全要素/全流程/全业务物理—信息数据融合”这一理论科学问题(简称数据融合)。

数据融合指在实现车间物理融合与模型融合的基础上,基于车间运行一致性原理,对物理车间现场实时数据、虚拟车间模型数据、仿真数据、车间服务系统数据等覆盖全要素、全流程、全业务的相关数据,进行生成、建模、清洗、关联、聚类、挖掘、迭代、演化、融合等操作,真实地刻画和反映车间运行状态、要素行为等各类动态演化过程、演化规律、统计学特性等。如图 4 所示,实现 DTS 的数据融合主要涉及以下理论与技术:

(1)数据“生成—建模—清洗”理论与技术 包括多学科/多物理量/多尺度信息融合的车间孪生数

据实时生成机制及产生机理、多源/多维/异构/多模态复杂数据分类与建模、非完备信息系统的空值属性估算与特征约简技术、海量多源数据清洗技术、数据级同质多源数据准确性/完整性/一致性理论与验证等。

(2)数据“关联—聚类—挖掘”理论与技术 包括实时车间孪生数据和历史数据的关联、比对与整合,车间孪生数据与车间运行映射,多层次/时间/空间信息聚类与融合理论,车间孪生数据溯源方法和源数据特征提取,特征级异构对象行为性能模式识别等。

(3)数据“迭代—演化—融合”理论与技术 包括物理数据、模型数据、服务系统数据交互迭代与优化,车间孪生数据模态更新与模态衍生动态增长规则,对相似或不同特征模式多源数据的相关性动态演化,决策级车间全要素数据演化规律与统计特性分析等。

2.4 服务融合

融合了物理—信息数据的车间孪生数据既能反映物理车间和虚拟车间的运行情况,也能驱动并影响物理车间和虚拟车间的运行。车间运行过程中的智能生产、精准管控、可靠运维等实际需求涉及一系列复杂动态智能决策问题,其复杂性和动态性体现在环境动态不确定、车间要素状态不确定、生产任务需求动态变化、目标及约束多样性等方面。服务是实现制造物理世界和信息世界间智能互联与智能操作的重要桥梁^[31-32],是德国工业 4.0、美国工业互联网、中国制造 2025 等制造国家战略发展和研究的重点。如何基于车间孪生数据,结合现有信息系统(如 MES),形成车间生产运行过程中所需的各类服务(如智能排产服务、产品质量管理服务、协同工艺规划服务^[33]、生产过程管控服务、设备健康管理服务、能效优化分析服务^[34]等),从而以融合服务协作的方式实现车间智能生产、精准管控、可靠运维等智能目标,是物理融合、模型融合、数据融合在车间生产应用的最终体现,也是建设 DTS 的目标之一。本文将以上过程定义为“数据驱动的服务融合”这一科学问题(简称服务融合)。车间服务融合与应用主要涉及以下理论与技术:

(1)数据驱动的服务生成理论与方法 包括从孪生数据到服务的转换方法、车间“物理对象—虚拟模型—孪生数据—应用服务”多元多层多级映射机制、服务数字化描述与封装方法、服务聚合理论与技术等。

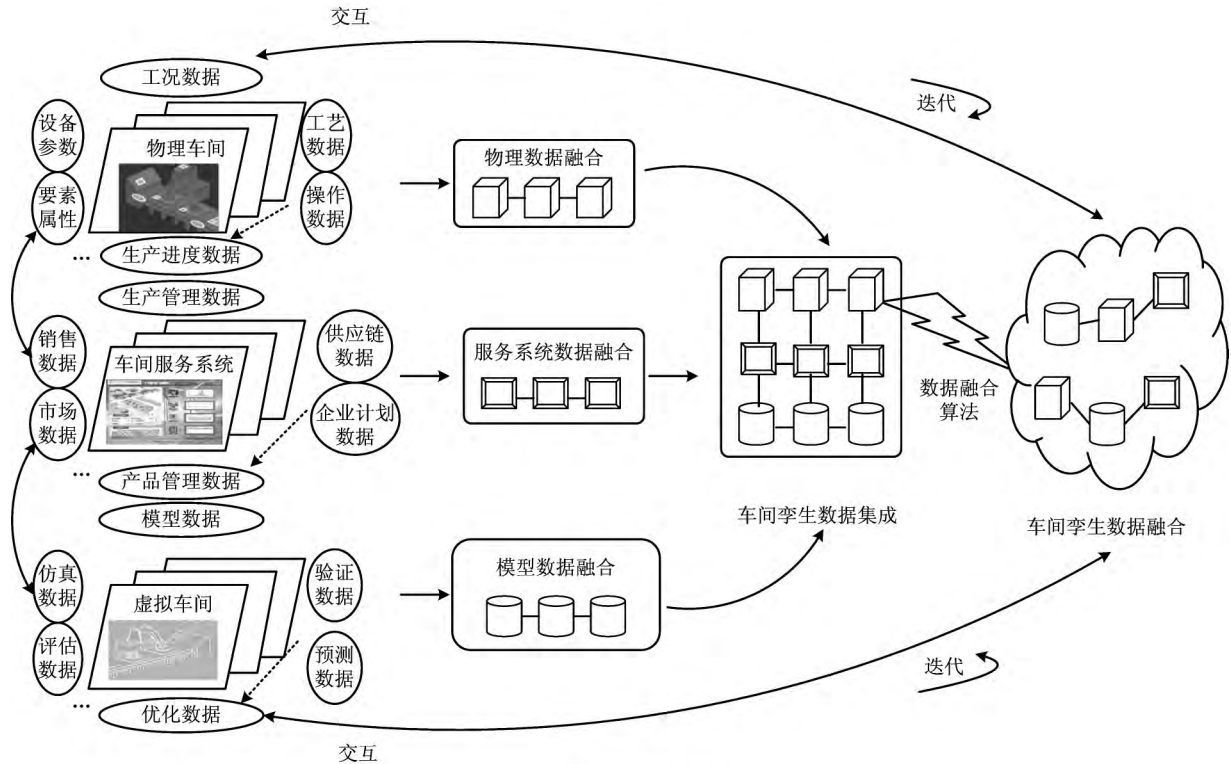


图4 数字孪生车间数据融合

(2)车间服务智能管理与优化 包括车间服务模型构建、服务质量综合评估、服务在线监测等理论与技术,服务与任务从虚实映射到供需匹配的双重匹配机制^[35-36],服务优化配置理论与方法等。

(3)车间服务协作与融合应用 包括车间复杂耦合应用需求/任务解析与描述;车间任务需求与服务的映射匹配机制与方法,车间服务动态调度理论与方法,基于服务组合^[37-38]的车间服务协作与融合理论与方法,服务协作可靠性评估与提高策略等。

3 基础支撑技术

在开展 DTS 信息物理融合研究,实践数字孪生车间过程中,除上述理论与技术外,还需以下基础支撑:

(1)标准与规范、接口与协议 包括物理车间异构要素智能互联标准规范与接口协议、异构数据转换和通讯标准与协议、多源多模态数据语法与语义映射规则、多维模型虚实同步交互接口、车间孪生数据构成与分类标准、车间服务描述与规范接口等。

(2)通用装置、工具与系统 包括物理车间异构要素通用接入装置^[19]、多源并发数据通用传输与转换装置、多维模型建模与分析工具、车间大数据/孪生数据平台与分析工具、软/硬件及异构信息系统集

成工具、信息物理融合服务系统平台等。

(3)各类算法 包括数据清洗算法、数据归约算法、物理—信息数据融合算法、模型相关性与相容性测量与评估算法、模型虚实偏差分析算法、知识挖掘算法、服务关联挖掘算法、可视化算法、面向车间动态运行优化的闭环控制算法、可配置智能优化算法^[39]等。

(4)可靠与安全机制 包括物理车间协同生产操作安全机制、虚拟车间仿真一致性与可靠性验证、数据可靠传输与交互安全机制、系统平台运营安全机制、融合服务协作可靠性保障机制等。

4 结束语

信息物理融合是实现工业 4.0、美国工业互联网、中国制造 2025 和“互联网+制造”等先进制造战略的共同挑战,是智能制造落地应用所需解决的关键科学问题。针对当前数字化车间及其生产运行过程所存在物理车间全面/实时数据难获取(物理分离)、虚拟/数字化模型难建立且仿真分析缺乏系统性(模型独立)、物理和信息数据双向动态链接与融合不足(数据孤岛)、生产与管理运行规律且全面实时数据驱动不足(应用被动)等问题,本文基于团队前期对数字孪生车间的概念、系统组成、运行机制、

特点和关键技术等研究,进一步提出并探讨了 DTS 信息物理融合这一科学问题。从 DTS 系统组成的角度出发,将车间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 个不同维度的科学问题,设计了相应的系统实现参考框架。结合数字孪生技术与制造服务理论,对这 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。相关工作作为学者们开展 DTS 理论与技术研究、为企业建设并实践 DTS 提供了一定的理论与技术参考。

致谢

感谢课题组博士生张永平、李培、张贺、刘蔚然和硕士生隋芳媛,以及武汉理工大学孟伟和严俊伟博士参与本文有关内容的讨论。本论文部分工作作为申请书的部分内容,于 2017 年 3 月向国家自然科学基金委提交了国际合作与交流项目申请,并得到了武汉理工大学周祖德教授、新加坡国立大学 Andrew Y. C. Nee 教授、英国伯明翰大学的 D. T. Pham 教授的支持与指导,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 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.]
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] SHARIATZADEH N, LUNDHOLM T, LINDBERG L, et al. Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things [J]. Procedia CIRP, 2016, 50: 512-517. DOI:10.1016/j.procir.2016.05.050.
- [5] CUTTING-DECELLE A, BARRAUD J, VEENENDAAL B, et al. Production information interoperability over the Internet: a standardised data acquisition tool developed for industrial enterprises[J]. Computers in Industry, 2012, 63(8): 824-834.
- [6] TOLIO T, SACCO M, TERKAJ W, et al. Virtual factory: an integrated framework for manufacturing systems design and analysis[J]. Procedia CIRP, 2013, 7(5): 25-30.
- [7] WANG X, ONG S, NEE A. Real-virtual components interaction for assembly simulation and planning[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 41(C): 102-114.
- [8] HIMMLER F, AMBERG M. Data integration framework for heterogeneous system landscapes within the digital factory domain[J]. Procedia Engineering, 2014, 69(1): 1138-1143.
- [9] PANETTO H, CECIL J. Information systems for enterprise integration, interoperability and networking: theory and applications[J]. Enterprise Information Systems, 2013, 7(1): 1-6.
- [10] ZHANG Jie, GAO Liang, QIN Wei, et al. Big-data-driven operational analysis and decision-making methodology in intelligent workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(5): 1220-1228 (in Chinese). [张洁, 高亮, 秦威, 等. 大数据驱动的智能车间运行分析与决策方法体系[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1220-1228.]
- [11] ZHANG Yongping, CHENG Ying, TAO Fei. Smart production line: common factors and data-driven implementation method[C]//Proceedings of the ASME 2017 International Manufacturing Science and Engineering Conference. New York, N. Y., USA: ASME, 2017, 3: 40-47.
- [12] HAMEED B, KHAN I, DURR F, et al. An RFID based consistency management framework for production monitoring in a smart real-time factory[C]//Proceedings of the 2nd International Internet of Things Conference. Washington, D. C., USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [13] ZHAO Gang. Wireless sensor networks for industrial process monitoring and control: a survey[J]. Network Protocols and Algorithms, 2011, 3(1): 46-63.
- [14] BOYD A, NOLLER D, PETERS P, et al. Soa in manufacturing guidebook[Z]. MESA International, IBM Corporation and Capgemini Co-branded White Paper, 2008.
- [15] FERRARI P, FLAMMINI A, VENTURINI F, et al. Large PROFINET IO RT networks for factory automation: a case study[C]//Proceedings of 2011 IEEE 16th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Washington, D. C., USA: IEEE, 2011: 1-4.
- [16] HENSSEN R, SCHLEIPEN M. Interoperability between OPC UA and AutomationML[J]. Procedia CIRP, 2014, 25: 297-304. DOI:10.1016/j.procir.2014.10.042.
- [17] DRATH R, LUDER A, PESCHKE J, et al. AutomationML-the glue for seamless automation engineering[C]//Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Washington, D. C., USA: IEEE, 2008: 616-623.
- [18] TAO Fei, ZUO Ying, XU Lida, et al. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1547-1557.
- [19] TAO Fei, QI Qinglin, CHENG Jiangfeng, et al. An industrial Internet Hub device: China, 201610739066. 1[P]. 2016-08-29 (in Chinese). [陶飞, 戚庆林, 程江峰, 等. 一种工业互联网 Hub 装置: 中国, 201610739066. 1[P]. 2016-08-29.]
- [20] LI Congbo, MA Huijie, LI Lingling, et al. Dynamic facility layout method for remanufacturing shop with stochastic re-

- turns[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11):2901-2911(in Chinese). [李聪波, 马辉杰, 李玲玲, 等. 面向不确定性的再制造车间设施动态布局方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11):2901-2911.]
- [21] ZHU Lida, LI Haonan, LIANG Weili, et al. A web-based virtual CNC turn-milling system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1/2/3/4): 99-113.
- [22] WANG Y R, CHEN A N. Production logistics simulation and optimization of industrial enterprise based on Flexsim [J]. International Journal of Simulation Modelling, 2016, 15(4):732-741.
- [23] ALTINTAS Y, KERSTING P, BIERMANN D, et al. Virtual process systems for part machining operations[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2):585-605.
- [24] TRAN Q H, CHAMPLAUD H, FENG Z, et al. Analysis of the asymmetrical roll bending process through dynamic FE simulations and experimental study [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5/6/7/8):1233-1244.
- [25] DUBEY R, GUNASEKARAN A, CHILDE S J, et al. The impact of big data on world-class sustainable manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1/2/3/4):631-645.
- [26] LI Jingran, TAO Fei, CHENG Ying, et al. Big data in product lifecycle management [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1/2/3/4): 667-684.
- [27] LEE J, LAPIRA E, BAGHERI B, et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment[J]. Manufacturing Letters, 2013, 1(1):38-41.
- [28] COLLEDANI M, TOLIO T, FISCHER A, et al. Design and management of manufacturing systems for production quality [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(2): 773-796.
- [29] GENG Zhiqiang, HAN Yongming, GU Xiangbai, et al. Energy efficiency estimation based on data fusion strategy: case study of ethylene product industry [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(25):8526-8534.
- [30] LEE J, WU Fangji, ZHAO Wenyu, et al. Prognostics and health management design for rotary machinery systems—reviews, methodology and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42(1/2):314-334.
- [31] TAO Fei, ZHANG Lin, HU Yefa. Resource Services Management in Manufacturing Grid System [M]. Beverly, Mass., USA:Wiley-Scrivener Publishing, 2011.
- [32] TAO Fei, CHENG Ying, XU Lida, et al. CCIoT-CMfg: Cloud computing and Internet of things based cloud manufacturing service system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2):1435-1442.
- [33] TAO Fei, BI Luning, ZUO Ying, et al. A cooperative co-evolutionary algorithm for large-scale process planning with energy consideration[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2017, 139(6):0610161-06101611.
- [34] TAO Fei, BI Luning, ZUO Ying, et al. A hybrid group leader algorithm for green material selection with energy consideration in product design[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1):9-12.
- [35] TAO Fei, CHENG Jiangfeng, CHENG Ying, et al. SDM-Sim: a manufacturing service supply-demand matching simulator under cloud environment[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2017, 45(6):34-46.
- [36] CHENG Ying, TAO Fei, ZHAO Dongming, et al. Modeling of manufacturing service supply-demand matching hypernetwork in service-oriented manufacturing systems[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2016, 45: 59-72. DOI:10.1016/j.rcim.2016.05.007.
- [37] TAO Fei, LAILI Yuanjun, XU Lida, et al. FC-PACO-RM: a parallel method for service composition optimal-selection in cloud manufacturing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4):2023-2033.
- [38] TAO Fei, ZHANG Lin, GUO Hua, et al. Typical characteristics of cloud manufacturing and several key issues of cloud service composition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3):477-486(in Chinese). [陶 飞, 张霖, 郭 华, 等. 云制造特征及云服务组合关键问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3):477-486.]
- [39] TAO Fei, ZHANG Lin, LAILI Yuanjun. Configurable intelligent optimization algorithms: design and practice in manufacturing[M]. Berlin, Germany:Springer-Verlag, 2015.

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、绿色与可持续制造服务技术等, E-mail:ftao@buaa.edu.cn;

程 颖(1988—),女,湖南岳阳人,北京航空航天大学 and 香港理工大学博士后,博士,研究方向:面向服务的智能制造、制造服务管理与优化;

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;

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

徐文君(1983—),男,广东和平人,副教授,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、传感器网络等;

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。