

doi: 10.7690/bgzd.2022.11.005

基于数字孪生的装配车间资源实时监控方法

邱枫¹, 赵智聪¹, 刘连喜², 孙科星¹, 徐曼菲¹

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司, 四川 绵阳 621000;

2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100081)

摘要: 针对装配车间人员位置不确定、设备信息采集滞后、环境数据管理分散等问题, 提出一种基于数字孪生(digital twin)的装配车间资源实时监控方法。分析装配车间数字孪生模型各层次的内涵和组成, 建立5层数字孪生模型技术架构; 在此基础上, 对装配车间关键生产资源描述与表征、基于短距离无线信号强度叠加的人员工位在线监测、装配车间监控指标体系与在线实时监控3个关键技术方法实现进行详细阐述, 并设计和开发实时监控系统。实例验证结果表明: 该方法能实现装配车间各类资源的实时、动态监控, 具备有效性。

关键词: 装配车间; 实时监控; RFID; 数据采集

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Real-time Monitoring Method of Assembly Workshop Resources Based on Digital Twin

Qiu Feng¹, Zhao Zhicong¹, Liu Lianxi², Sun Kexing¹, Xu Manfei¹

(1. Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. Beijing Xinghang Electromechanical Equipment Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problems of assembly workshop, such as the uncertainty of personnel location, the delay of equipment information collection and the decentralization of environmental data management, a real-time monitoring method of assembly workshop resources based on digital twin was proposed. The connotation and composition of each level of the assembly workshop digital twin model are analyzed, and the technical framework of the five-level digital twin model is established; On this basis, the description and characterization of key production resources in assembly workshop, the online monitoring of personnel based on short-distance wireless signal strength superposition, the monitoring index system of assembly workshop and the implementation of online real-time monitoring are described in detail, and the real-time monitoring system is designed and developed. The results of an example show that the method realizes the real-time and dynamic monitoring of all kinds of resources in the assembly workshop, and is effective.

Keywords: assembly workshop; real-time monitoring; RFID; data acquisition

0 引言

智能制造是制造技术与数字技术、智能技术及新一代信息技术的融合, 是面向产品全生命周期的具有信息感知、优化决策、执行控制功能的制造系统, 旨在高效、优质、柔性、清洁、安全、敏捷地制造产品和服务用户^[1-4]。虽然智能制造的内涵在不断演进, 但是追求的根本目标始终都是尽可能优化以提高质量、增加效率、降低成本、增强竞争力^[5]。近年来, 随着智能制造相关政策和建设项目的不断落地实施, 信息物理融合(cyber-physical system, CPS)^[6]、数字孪生^[7]等相关技术快速发展。其中, 数字孪生作为智能制造关键使能技术之一, 近年来受到国内外广泛关注^[8]。随着物理世界和虚拟世界之间深度融合的技术条件日趋成熟, 数字孪生作为

突破性的应用技术框架, 将会成为实现CPS乃至智能制造的基础, 值得深入、全面地研究其内在机理和应用模式^[9-10]。

为了形成统一的装配车间资源模型数字孪生模型, 促进数字孪生技术更好的落地实施, 笔者提出了基于数字孪生的装配车间资源实时监控方法。通过分析数字孪生车间组成要素, 对车间资源进行梳理和数字化表征, 并对资源属性进行定义; 建立孪生模型与实时数据之间的推动式映射方法, 并提出装配车间资源数字孪生监控体系; 以某装配车间为应用对象, 开展孪生体构建和监控应用, 用于验证装配车间资源实时监控方法的适用性。

1 国内外现状

数字孪生技术在工业制造领域开始应用之前,

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-08-03

基金项目: 国防基础科研资助项目(JCKY2019204A004)

作者简介: 邱枫(1991—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事工业数据采集、分布式数据存储、边缘计算等研究。

E-mail: 731385903@qq.com。

工业数据采集、工业互联网、数字化管控、生产线仿真等概念已被提出，并应用于生产过程管理和调度，但是上述技术多为独立应用，大部分未实现数据贯穿使用。随着工业物联网、智能制造等领域相关技术的发展与迭代，国内外学者围绕车间数据采集、车间模型构建、车间管控等方面进行了大量的研究和实践。

1) 工业数据采集技术。

工业数据采集技术是实现车间数字化、智能化的基础，唐任仲等^[11]研究了物流数据采集和物流事件转化方法，通过构建并分析物流矩阵获取在制品物流状态信息；张存吉等^[12]提出基于 RFID 和复杂事件处理的实时监测方法，解决制造车间工件异常情况的实时监测问题；曹伟等^[13]以事件为驱动设计了 RFID 车间数据采集方法，并建立了对应的离散制造车间多层次监控模型。

2) 数字化管控技术。

数字化管控技术通过构建 MES、QIS、WMS 等软件使能工具集，通过对管理业务流程进行数字化表征，从而实现以生产任务为主线的物料标识、物流管理、人机料协同和质量管控。刘明周等^[14]设计了一种以生产运行指标为核心的车间实时监控通用模型，具有很好的可拓展性和可维护性。

3) 数据可视化技术。

数据可视化技术通过构建车间管控体系，采用 2 维 3 维图形化方式，对生产资源进行可视化呈现，辅助人员进行决策和处置。Zhang 等^[15]在采用层次时间着色 Petri 网对车间建模的过程中引入并融合实时数据，动态展示车间实时状态。叶剑辉等^[16]以此为基础提出了装配车间现场数据管理模型，并建立了可配置看板模型，进一步实现了装配现场的精细化管控。

综上所述，目前数字孪生技术在制造环节也进行了大量探索应用，但是相关研究成果仍然存在以下不足：1) 目前数字孪生车间技术仍然以数据源物理视角进行定义和组合，与车间管理业务模型脱节，导致采集数据格式与业务功能要求格式不匹配，数据无法高效使用；2) 现有数字孪生模型针对生产资源描述缺乏统一的定义和表征，导致各个业务系统对统一资源可能拥有不同的名称和定义，在进行数据集成和数据互联时存在集成困难，数据价值发挥受限；3) 装配车间存在人员多、出入频繁、位置动态等特点，导致人员进行表征和属性定义，数据采

集与管理存在空白，相关技术研究和应用仍存在理论研究，工程应用较少。

2 技术架构

为实现装配车间资源管控的数字孪生模型，笔者以数据产生、采集、存储和应用的数据流为主线，分析了装配车间数字孪生模型各层次的内涵和组成，建立了如图 1 所示的 5 层数字孪生模型。

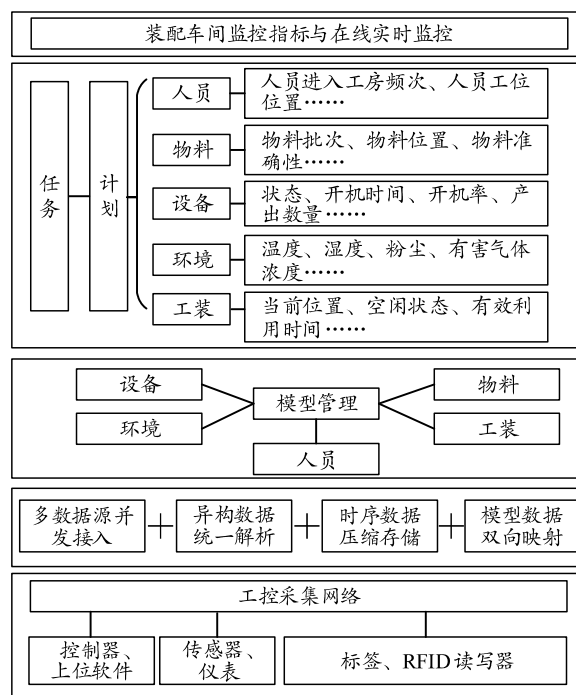


图 1 技术架构

基于数字孪生的装配车间资源实时监控采用 5 层设计，分别是硬件层、网络层、交互层、模型层和应用层。

1) 硬件层：主要包含控制器、上位机软件、温湿度传感器、粉尘传感器、各种 RFID 标签、RFID 读写器等；

2) 网络层：主要包含工业交换机、工控防火墙、安全审计系统；

3) 交互层：主要包含数据采集中间件，具备多路数据源并发接入能力，同时内嵌 Modbus、OPC 等工控协议解析模块；

4) 模型层：包含与业务相关的设备模型，环境模型、人员模型、物料模型、工装模型等，模型通过统一平台进行注册、使用和管理；

5) 应用层：主要以生产任务为主线，围绕各个生产要素相关的监控体系进行模型的调用，以及接入实时数据项对孪生体模型作用发挥。

3 关键技术途径

3.1 装配车间关键生产资源描述与表征

采用面向对象的设计方法，对生产要素进行数字化建模，根据不同类型的生产要素，采用不同的表征手段，应用于不同的标识模式，表征不同的生产要素与生产过程人、机、物映射关系。生产要素表征模型构建包括表征定义、表征关联、工序映射等内容。结合车间实际生产工艺要求，形成适用于人员表征、设备表征的生产要素数字化模型。

如图 2 所示，设备数据模型是基于设备模型展开的，在模型中定义了设备类、设备、维护对象，设备类包含有设备类操作和设备类属性，并各自具有相应的操作值和属性值。设备也同样由设备操作和设备属性构成，设备操作和设备属性在具有各自属性值的同时还必须映射到设备类操作和设备类属性。

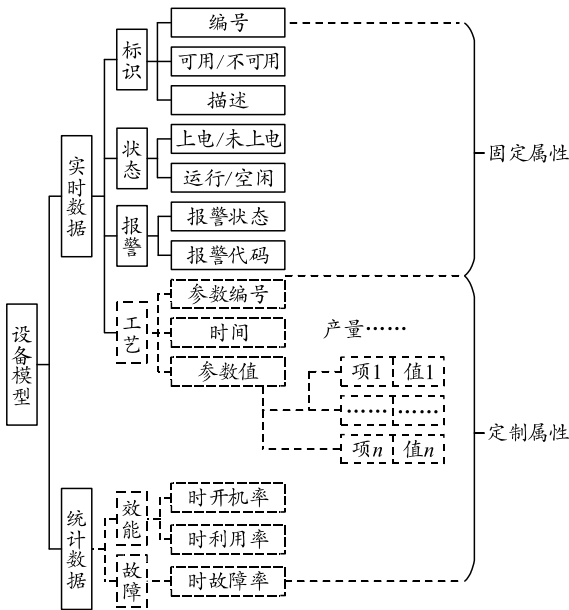


图 2 设备资源模型

3.2 人员工位在线监测

为实现装配车间人员管理，采用叠加短距离无线信号强度的人员工位在线监测进行人员监测。人员通过手环进行标识，手环录入人员编号、姓名、工种等基础信息，通过进门处进行双 RFID 设置，判断人员进出方向，从而判断当前门进出人员数量。由于 RFID 通信会受到车间物料、工装等遮挡，因此采用双侧叠加布置，通过在工位对向布置 RFID 传感器进行人员监测，配置额定工况下 RFID 信号强度与距离的基本参数，对双向 RFID 进行算法设计。在采用统一大小 RFID 标签情况下，信号强度 a

与距离 l 为指数衰减关系，可通过当前 RFID 扫描的 RFID 强度值，判断该 RFID 标签距离。信号强度与扫描时间之间距离采用二次函数插值拟合进行距离插值计算，具体计算结果如表 1、图 3 所示，人员工位在线监测布置如图 4 所示。

表 1 信号强度测试 dB

距离/m	次数					均值
	1	2	3	4	5	
1	121.0	118.0	127.0	124.0	122.0	122.4
2	74.0	71.0	76.0	73.0	71.0	73.0
3	54.0	57.0	58.0	56.0	56.0	56.2
4	47.0	46.0	45.0	47.0	45.0	46.0
5	42.0	41.0	43.0	42.0	39.0	41.4

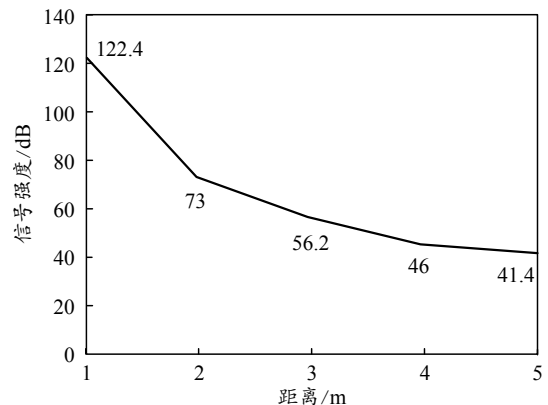


图 3 RFID 信号衰减曲线

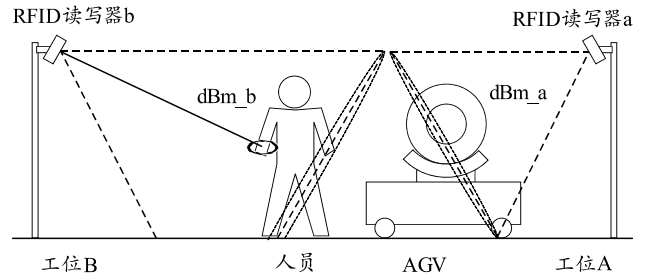


图 4 工位在线检测布置

3.3 装配车间监控指标体系与在线实时监控

为实现孪生体模型和实时数据价值，构建装配车间监控指标 3 层监控体系，实现车间质量、效率和安全 3 个维度的实时监控，如图 5 所示。首先关联生产资源关联模型和实时数据，从而实现生产过程管理者关心的数据应用，形成了装配车间监控指标体系；通过对现场数据进行低时延刷新和图形化呈现，操作人员、管理人员可根据自身岗位智能按不同颗粒度查看与之相关的信息；发生报警时，监控体系可推送报警处置预案，辅助人员进行相关处置。3 层监控体系通过对数据的实时呈现，从而实现了生产过程透明化，并可根据车间特点和组成进行删减和扩充，从而更好地反映装配车间生产态势。

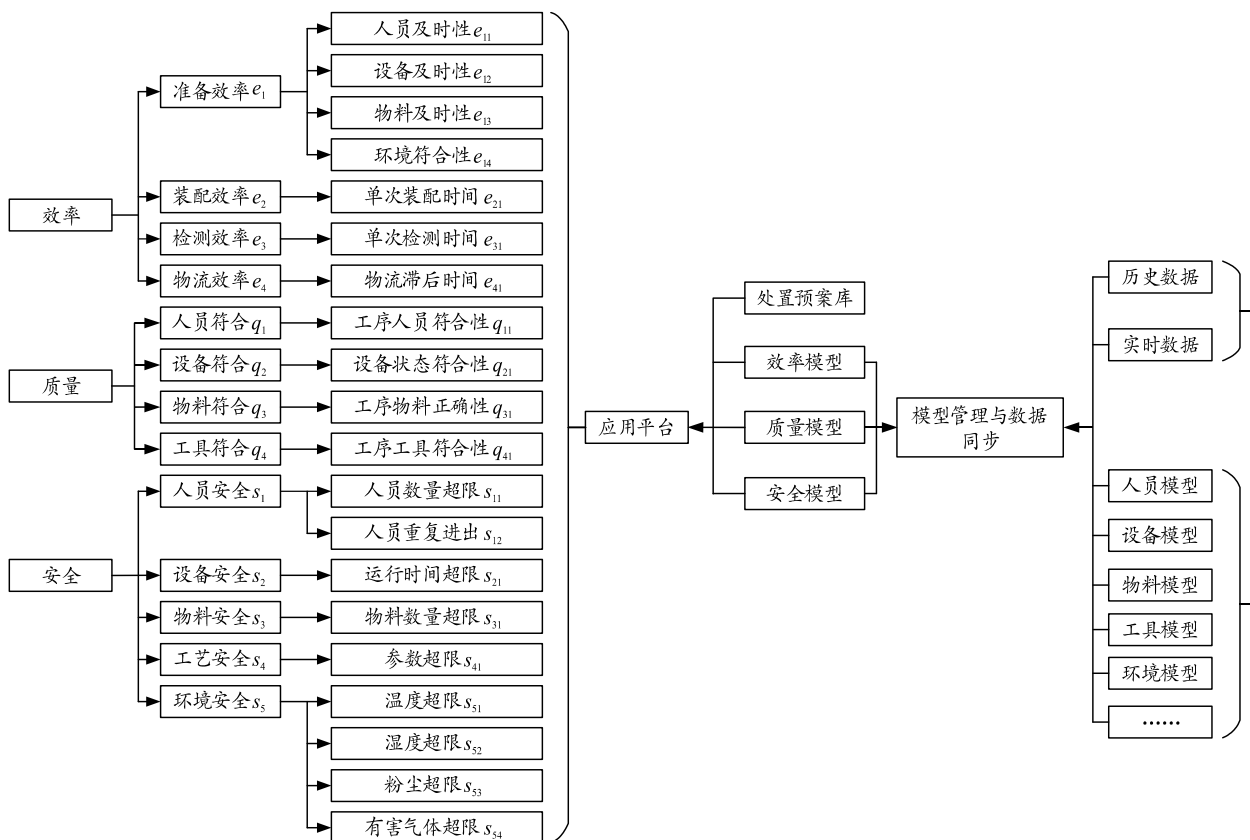


图 5 监控体系

4 系统实现

某企业进行车间自动化提升和数字化升级，在车间新增了 AGV、传送带、立体库、自动化工装、自动化检测设备等，初步构建了车间工控网，实现了车间数据的实时采集，并构建了车间监控指标体系，以实现生产过程异常的实时监控和干预，提升生产产能。航天产品具有典型的多品种、小批量特点，且装配过程除了物流部分实现自动化以外，线缆敷设、模块安装严重依赖人工进行操作，制造过程复杂，生产资源管理困难，生产效率受到资源齐套性及寻找资源等现状制约。

目前厂内的生产资源管理模式已无法满足日益增长的生产订单需求，由于生产过程各资源管理粗放，齐套性准备、过程数据记录、质量问题追溯等问题极大地制约了生产效能的提升；此外，车间过去采用人工记录的方法，采集数据量小，统计滞后，无法满足车间动态排产与调度的需求，无法实现生产过程的柔性批量生产。针对以上问题，以某装配车间为应用对象，根据笔者所提方法设计和开发了某装配车间实时监控系统，方便现场作业人员进行现场各要素的监控，对异常进行干预和处置，以及事后对异常进行追溯。

系统网络拓扑如图 6 所示，采用面向对象编程语言，对各类模型进行统一封装和表征，各数据源数据上传采用 MQTT 消息队列，在保证数据准确性的同时，可有效节约传输网络带宽资源，基于自研采存平台进行二次开发，采用 Net Core 框架技术，支持国产化平台移植，数据库采用开源 Influx DB 时序数据库，通过自主开发的数据翻转压缩与实时数据库 2 套压缩机制，在不丢失数据的情况下，实现数据的有效压缩存储，监控软件采用 VUE 框架，与实时数据通过 WebSocket 方式进行连接，传输时延在 200 ms 以内，可有效保证数据监控的实时性。目前，该系统已在某车间进行部署，经过 7×24 h 不间断运行无异常，数据无丢失，系统运行可靠。

如表 2 所示，该监控系统中各车间资源模型是实际车间资源(包括人员、物料、工具、设备等)的镜像映射，车间环境和布局也与物理车间保持一致。系统运行过程中，实时数据流不断驱动虚拟车间运行，新工件在进入车间时首先读取 MES 上的工艺流程，将其转化为工件在车间中的物流走向，并在接收到进入车间信号后调用人员和小车进行物流搬运，使离散实时位置数据拟合成连续的车间物流过程，在接收到工件进入工位的信息后执行放置动画，

在设备动作数据驱动下各嵌套子节点联合执行动作指令，手工工位执行操作人员动画。同时，工件根据标签信息确定实时工序，进行工件 3 维模型变化；

然后在接收到工件离开工位的信息后执行搬起动画，通过物流运输向下一个工位，依此类推，直至工件完成加工离开车间。

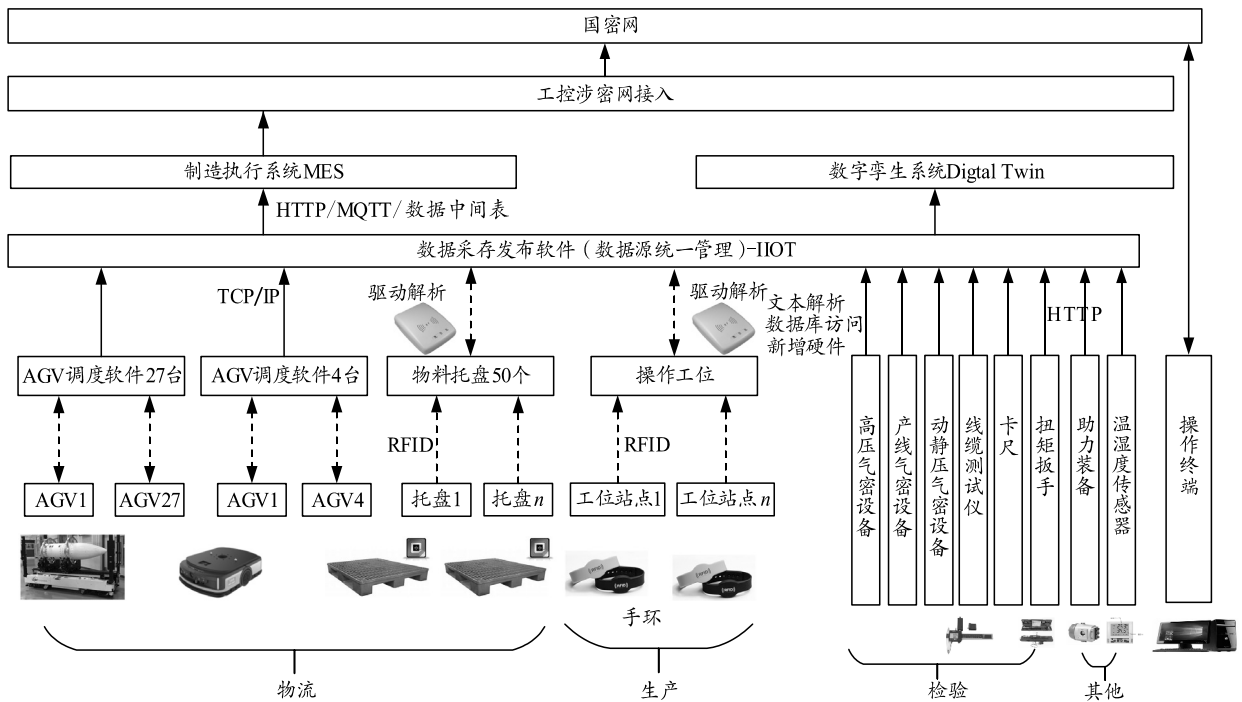


图 6 系统架构拓扑

表 2 案例模型种类和数量

模型类别	描述	种类	数量	监控指标
设备	装配、检验等	3	24	5
人员	装配、管理等	4	52	4
工装	工装、夹具等	12	24	3
工具	扳手、量具等	5	31	2
工位	装配、检验等	2	20	3

监控系统可切换自动轮播模式和手动点击模式，实现生产设备效能、检验设备数据、生产资源掉线、参数异常、安全事件等以警告弹窗方式进行提醒，并辅助提出处置建议，如图 7 所示。此外，系统支持数据检索，可实现采集全量数据按时间、资源编号等维度进行检索，通过表格和图表形式进行呈现，支持 excel、csv 等文件格式导出。



图 7 基于数据孪生的车间资源实时监控界面

通过系统的实施和应用，构建装配车间关键要素基于实时数据驱动的管控模型，完成了工位监控、人员监控、设备监控、环境监控、物料监控等功能，有效解决了装配现场数据滞后和异常排查处置造成的时间浪费。在此基础上，通过构建装配车间监控指标体系，实现了装配车间精细化管理基础，有效提升了车间透明度，通过与工控网 MES 系统定制数据接口，实现与现场数据与业务数据的绑定和关联分析。通过统计分析，装配车间模型准确率为 98.5%，孪生状态与现场状态一致性为 100%，从数据发生到数据显示过程的时间延时小于 200 ms，实现了采集数据的 100%存储管理。

5 结束语

笔者面向装配车间数字孪生的业务需求，分析装配车间组成要素及关键属性，设计面向装配车间资源高效协同的监控体系，提出实时数据映射的资源孪生体和用于模型动态管理的孪生体管理方法，研究异构数据解析、时序数据压缩和孪生模型低时延同步等技术，实现了装配车间各类资源的实时、动态监控。

装配车间孪生体标识和建模是数字孪生应用的基础。笔者仅对实时数据进行了针对业务的应用，

各项指标体系也主要围绕进度、异常等过程。下一步将集中对 3 方面进行研究：1) 完善模型种类和数量，以最大化的实现生产资源的表征和描述；2) 采用机器学习、深度学习等数据挖掘手段，实现海量历史数据的分析，用于安全态势评估与预测、设备预测性维护、生产瓶颈预测等应用；3) 充分与上层 MES、ERP 系统进行数据共享，实现生产过程现场全部物流和信息流的集中管理和优化，从而真正实现数据驱动的数字孪生车间，更好地发挥数据的价值。

参考文献：

- [1] 刘强. 智能制造理论体系架构研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 13.
- [2] 张群兴, 芮伟, 王明远. 电子信息装备质量检验智能化系统方案设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 16-20.
- [3] 梁海洋, 张瀚铭, 孙科星. 基于工业互联网的高危产品装配生产线智能管控平台设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(12): 24-28.
- [4] 葛峰, 韩建立, 林云, 等. 多应力条件下装备加速贮存寿命评估方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(3): 14-18.
- [5] 周济, 周艳红, WANG B C, 等. 面向新一代智能制造的人-信息-物理系统(HCPS)[J]. Engineering, 2019, 5(4): 624-636.
- [6] MONOSTORI L, KADAR B, BAUERNHANSL T, et al. Cyber physical systems in manufacturing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(2): 621-641.
- [7] ROSEN R, VON WICHERT G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manu-facturing[J]. IFAC-Papers OnLine, 2015, 48(3): 567-572.
- [8] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [9] QU T, ZHANG K, LUO H, 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.
- [10] TAO F, QI Q, WANG L, et al. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. Engineering, 2019, 5(4): 653-661.
- [11] 唐任仲, 胡罗克, 周邦, 等. 基于无线射频识别技术的车间在制品物流状态分析[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 45-54.
- [12] 张存吉, 姚锡凡, 张剑铭. 制造车间基于 RFID 与 CEP 的工件实时监测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(4): 38-45.
- [13] 曹伟, 江平宇, 江开勇, 等. 基于 RFID 技术的离散制造车间实时数据采集和可视化监控方法[J]. 计算机集成制造技术, 2017, 23(2): 273-284.
- [14] 刘明周, 王强, 凌琳. 基于实时信息驱动的生产车间运行驾驶舱研究及实现[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2052-2062.
- [15] ZHANG Y, WANG W, WU N, et al. IoT-enabled real-time production performance analysis and exception diagnosis model[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(3): 1318-1332.
- [16] 叶剑辉, 刘少丽, 刘检华, 等. 基于流程的复杂产品装配车间现场监控技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(7): 1469-1480.
- [17] 李珏, 卢鹤. 面向导弹武器系统全寿命管理的大数据模型[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(4): 119-122.
- [18] TAHIR H, TAHIR R, MC D M. On the security of consumer wearable devices in the Internet of Things[J]. P1oS one, 2018, 13(4): 112-122.
- [19] 姜军, 陈雄. 基于 B/S 架构的雷达装备信息综合管理系统设计[J]. 信息与电脑, 2019(20): 86-90.
- [20] 王一起, 王玉玫. 基于微服务架构的智能化装备维护与管理平台[J]. 计算机与现代化, 2018(10): 79-83.
- [21] 周向国, 刘腾飞, 杨涛. 设备管理信息化的研究和应用

(上接第 6 页)