

# 基于数字孪生的飞机装配车间 生产管控模式探索\*

陈 振,丁 晓,唐健钧,刘玉松

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610091)

**[摘要]** 飞机装配车间中实现制造的物理世界和信息世界的互联互通成为飞机装配智能化的发展趋势,数字孪生是实现物理世界与信息世界交互与融合的有效技术手段。分析了车间发展历程并阐述了目前飞机装配车间的特点及问题,在此基础上,提出了涵盖物理装配车间、虚拟装配车间、车间孪生数据及装配车间服务系统的飞机数字孪生装配车间架构,并对物理装配车间数据的实时感知与采集、虚拟装配车间建模与仿真运行技术、数字孪生与数据驱动的装配车间生产管控等飞机数字孪生装配车间关键技术进行了研究,为航空工业领域的智能制造提供参考。

**关键词:** 飞机; 装配车间; 生产管控; 数字孪生; 智能制造

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.12.046



陈 振

助理工程师,主要研究方向为飞机数字化装配。

信息技术与制造业的融合与应用促进了制造业的变革,为应对这场变革,世界各国纷纷提出先进制造发展战略,以促进本国制造业的转型升级,如“美国工业互联网”、“德国工业4.0”、“中国制造2025”等,这些举措的目的都是借助信息技术,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<sup>[1-2]</sup>。

作为实现物理信息系统融合的关键技术之一,数字孪生技术近年来得到深入研究。数字孪生(Digital Twin, DT)的概念最早诞生于2003年,由美国密歇根大学的Grieves在讲授产品全生命周期管理课程时提出<sup>[3]</sup>。数字孪生技术是指用数字技术描述和建模一个与物理实体的特性、行为和性能一致的过程或方法,它是实现物理空间与信息空间交互与融合的有效途径<sup>[4]</sup>,主要由3部分组成:现实空间中的物理实体

(Physical Twin, PT)、信息空间的虚拟产品以及将虚拟产品和物理产品连接在一起的数据和信息。数字孪生概念自提出以来,得到越来越广泛的关注。Gartner公司将数字孪生列为十大战略科技发展趋势之一,洛克希德·马丁公司将数字孪生列为未来国防和航空工业十大顶尖技术之首<sup>[5]</sup>。Rosen等<sup>[6]</sup>探索了一种产品全生命周期管理方法,该方法通过系统集成对产品物理模型、虚拟模型和工程数据进行管理,从而使得与产品相关的数据在其全生命周期的各个阶段都能充分使用,并将数字孪生可以看作是建模、仿真和优化技术的下一个重大进展。Schleich等<sup>[7]</sup>研究了数字孪生技术的发源及应用趋势,并着重介绍了数字孪生在产品设计和生产制造中的综合参考模型。车间作为制造执行的基础,是实践智能制造的重要应用场景。Zhuang等<sup>[8]</sup>

\* 基金项目:“中国制造2025”四川行动资金项目(40207000120X)。

分析了卫星装配车间存在的主要问题,研究了数字孪生技术在卫星装配车间的应用模式,阐述了其中的4个关键技术。陶飞等<sup>[9]</sup>探索了数字孪生车间的概念,并分析了其系统组成和运行机制,为数字孪生技术在车间的落地提供了理论支撑。在此基础上,陶飞等<sup>[10]</sup>设计了数字孪生车间的参考系统架构,从物理融合、模型融合、数据融合和服务融合角度,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,为企业实现数字孪生车间提供了参考。

飞机相对于其他产品而言,其系统结构、制造装配技术等都尤为复杂,其研制过程是一项复杂的系统工程。装配是飞机制造过程中最后也是最重要的阶段,对飞机质量、综合性能以及可靠性等有着决定性影响。目前飞机装配车间的生产要素管理、生产活动计划以及生产过程控制基本以人工经验管理为主,缺乏车间中物理层与信息层数据的连续、实时交互和融合。为了提高飞机装配效率、降低装配成本、保证装配质量,近年来,国内外航空制造企业在装配车间纷纷引入智能化生产管控技术。本文在分析当前飞机装配车间面临的问题的基础上,结合航空制造领域智能制造的发展趋势,提出一种基于数字孪生的飞机装配车间框架,为飞机装配车间的智能化生产管控提供参考。

### 车间发展历程及飞机装配车间特点

车间是制造活动的执行主体,是信息流、物料流和控制流的汇合点,因此,车间智能化是实现智能制造的必经之路<sup>[11]</sup>。从车间的生产管控角度分析,车间的发展主要经历了3个阶段。第1阶段:车间的生产管控仅限于物理空间,这个阶段的生产要素、生产计划及生产控制主要以人为操作管理为主。比如,车间的人员、

设备、物料等信息主要通过人工登记存储于纸质介质上,这些信息的查询、传递、统计、分析十分困难。第2阶段:随着计算机信息技术的应用,车间信息空间诞生,使得车间的生产管控步入计算机辅助阶段,各种企业资源管理系统、产品数据管理系统等得以使用,生产计划的下发、人员设备物料等生产要素的管理、生产活动的监控等方面基本实现了信息化,但此阶段车间物理空间与信息空间缺少交互与融合。第3阶段:随着以无线射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、条形码、二维码等为代表的物联网技术以及大数据、云制造等技术的发展,车间的物理空间与信息空间开始交互与融合,人员、设备、物料等信息实现了实时采集并动态跟踪,生产活动的预测性及对车间不确定性生产扰动的处理能力得以增强,车间的生产管控由单点管理逐步发展到集成管理、协同管理和智能管理,如图1所示。

飞机装配具有手工离散作业、单件小批生产、质量控制严格、装配生

产周期长等特点。飞机装配车间中,飞机装配实行单架次管理,装配车间的每架飞机,相关的生产数据都必须收集、组织、管理,以保证整个生产流程被记录和追踪。然而,由于装配车间生产要素的异构多源、生产活动计划的多变、生产控制的滞后等因素以及产品本身的特性,使得飞机装配车间与传统离散制造车间相比,呈现出高度的复杂性、协同性和不确定性特征。飞机装配车间中常见的不确定性因素主要包括:设计更改的突发性;工装设备故障以及装配作业时产品质量不稳定;各种辅助资源特别是成品件不能及时到位;装配时间、工时定额具有不确定性;飞机现场装配人力资源及装配流程具有多变性。在这种情况下,如何实现飞机装配车间的智能化生产管控,是实现航空智能制造的关键问题。

### 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控框架

飞机装配具有手工离散作业、单件小批生产、质量控制严格、装配生

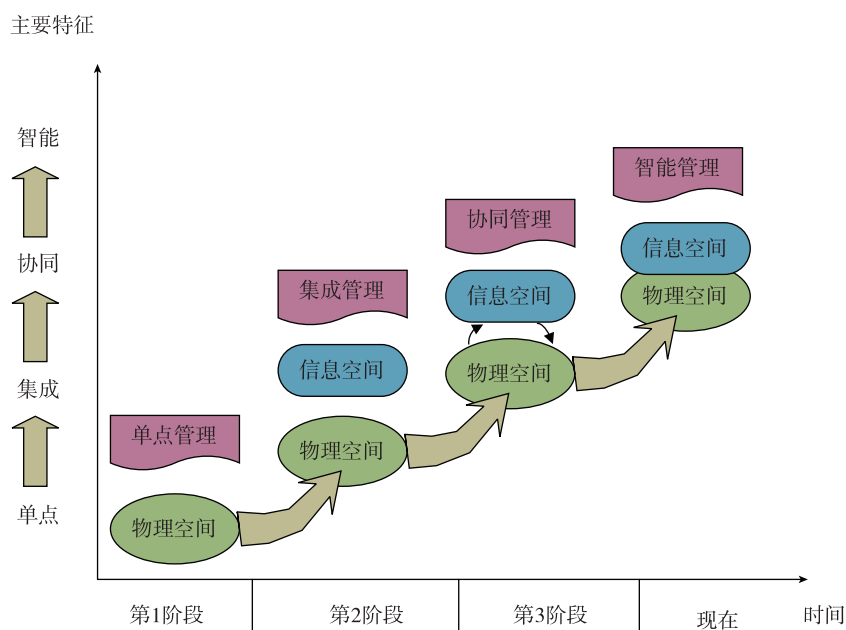


图1 车间生产管控发展历程

Fig.1 Evolution of shop-floor production management and control

产周期长等特点,飞机装配车间的智能生产管控主要侧重于面向飞机装配智能车间的应用系统和物理系统与虚拟系统之间的交互融合,以解决飞机装配过程车间管理技术手段落后、生产扰动等问题。本文通过借鉴 Schleich 等<sup>[7]</sup>提出的数字孪生车间概念,探索一种基于数字孪生的飞机装配车间生产管控框架,如图2所示,其中主要由物理装配车间、虚拟装配车间、装配车间服务应用平台、装配车间数据存储管理平台4部分组成。

### 1 物理装配车间

物理装配车间是车间现有物理实体的集合,包括车间人员、设备、物

料、产品等。物理装配车间主要负责接收生产调度下发的生产任务,与传统装配车间相比,数字孪生装配车间需具备多元异构要素的互联互通及数据融合能力,如人与设备、设备与设备、设备与产品等的数据实时感知接入与互通。飞机装配车间生产不确定性因素众多,通过异构要素的互联互通,可以实时感知生产状态,预测干扰因素对生产活动的影响,进而优化生产指令,使整个生产过程都处于可控状态。

### 2 虚拟装配车间

虚拟装配车间是通过建模技术,从要素、行为、规则3方面将物理车间的实体及生产活动进行虚拟重构

与数字化镜像。通过构建虚拟装配车间,产品、制造资源在物理装配车间中的装配进度和工作状态可以动态地、实时地、准确地映射在虚拟空间中,从而可以随时监控和跟踪物理装配车间的运行状况。此外,在虚拟装配车间内,可以通过数字孪生装配车间模拟、评估、验证车间内各种生产活动(如车间调度、生产物流计划、制造资源分配)和生产过程。

### 3 车间孪生数据

车间孪生数据主要由虚拟车间相关数据、车间传统生产数据,以及它们之间融合产生的数据组成。虚拟车间数据主要包括虚拟车间运行所需的数据及运行中产生的数据,如

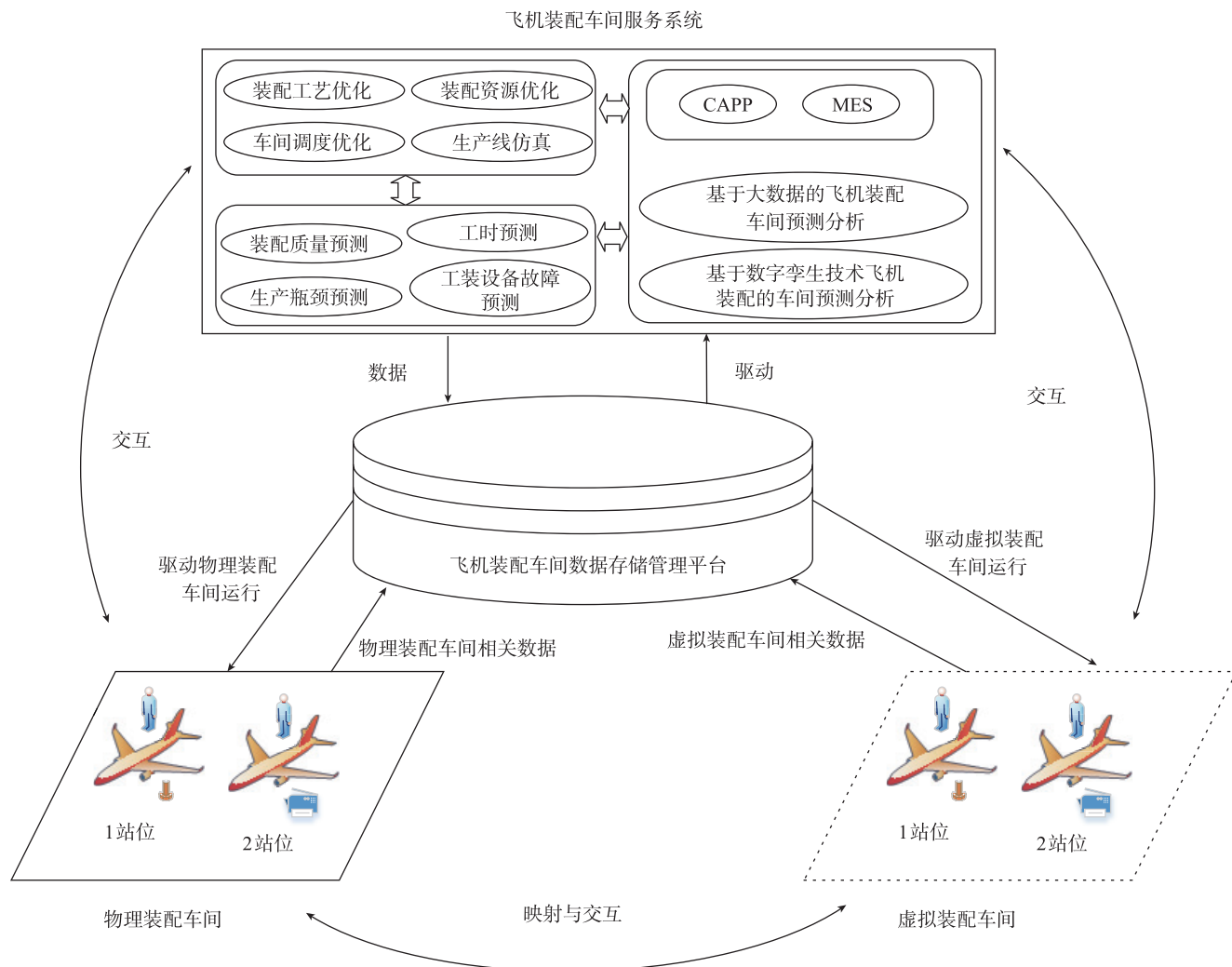


图2 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控框架

Fig.2 Framework of digital-twin based production management and control for a aircraft assembly shop-floor



工艺模型数据、仿真数据以及评估、优化、预测等数据。车间传统生产数据即物理车间数据,主要包括人员、设备、物料、产品等生产要素数据及在装配车间协同作用下完成产品生产的过程数据。虚拟车间数据与物理车间数据融合产生的数据是指对虚拟车间、物理车间进行统计、回归、聚类、演化等操作下的衍生数据。飞机装配车间时刻产生着大量的实时数据(工装设备产生的数据、测量类数据、各类传感器产生的数据等)和非结构化数据(例如视频、音频、照片),这些数据呈现出大数据典型的“3V”特征,即大量(Volume)、多维度(Variety)和及时性(Velocity)。在飞机装配车间,由于生产干扰频繁,车间数据也显示出不确定性、高噪声和可变性的特点。因此有必要为飞机装配车间建立一个大数据存储管理平台。

#### 4 装配车间服务系统

飞机装配车间服务系统主要实现对制造资源、生产活动、生产过程控制的监控、预测与优化,它提供了针对装配车间实时的、可预测的生产管控服务。它由车间预测平台和生产管控平台构成,以车间服务系统(如MES、CAPP等)、基于大数据预测分析系统和基于数字孪生预测分析系统作为支撑。飞机装配车间生产预测的对象主要是产品质量预测、工时预测、生产进度预测、生产瓶颈预测、生产扰动预测、设备故障预测、物料需求预测等。物理装配车间与虚拟装配车间通过车间大数据管理平台进行数据/信息/知识的交互。基于数据驱动,在所构建的数字孪生装配车间的基础上,对飞机装配车间智能化生产管控提供系统支持与服务。数字孪生装配车间具有强大的仿真模拟运行功能,飞机装配开始前,装配车间服务系统根据虚拟装配车间对生产计划的仿真、评估和优化数据结果,对生产计划做出修正和优

化。在飞机装配过程中,物理装配车间的生产状态和虚拟装配车间对生产任务的仿真、验证与优化结果被不断反馈到装配车间服务系统,车间服务系统实时调整生产计划以适应装配车间工况的变化。通过数字孪生装配车间的预测、生产管控机制,可以有效实现对装配车间资源的优化配置及管理、生产计划的优化以及生产要素的协同运行,能够以最少的耗费创造最大效益,从而在整体上提高数字孪生车间的效率。

### 基于数字孪生的飞机装配车间关键技术

根据飞机装配车间业务实际需求及系统组成,基于数字孪生的飞机装配车间关键技术主要包含:(1)物理装配车间数据的实时感知与采集;(2)虚拟装配车间建模与仿真运行技术;(3)数字孪生与大数据驱动的装配车间预测。

#### 1 物理装配车间数据的实时感知与采集

如何有效采集、组织和管理装配车间产生的大量数据,是车间智能化面临的关键问题之一。随着物联网、传感器以及无线技术的不断发展,以RFID为代表的物联网技术在制造/装配车间得到广泛应用<sup>[12]</sup>。与传统条码识别技术相比,RFID具有极高的信息采集与处理速度,使用操作较为便捷,且抗干扰、适应环境等方面能力强。

物理装配车间制造资源的实时感知。实时感知是数据实时采集、管理和控制的基础。具有感知设备(感知或感知能力)的制造资源,不仅有助于实现自己的业务逻辑,而且还可以与其他制造资源进行交互式 and 协同工作<sup>[13]</sup>。理想状态下,物理装配车间的所有制造资源都可以被贴上具有感知功能的标签(如RFID),这些制造资源可以是装配操作者、成零标件、装配工装夹具以及测量设备

等。通过这种方式,可以实现制造资源从单一的实体变为具有交互功能的智能体。

物理装配车间数据的实时采集。物理装配车间收集的数据分为3类:实时感知数据、生产过程数据和生产活动计划数据。实时感知数据主要指制造资源数据。生产过程数据是指与飞机装配过程相关的数据,包括装配进度数据、工时数据、装配质量数据、装配物料数据、装配站位状态数据等。生产活动计划数据包括装配计划数据和物料分配计划数据。这些数据采集的结果反馈到数字孪生装配车间,通过虚拟车间的仿真运行、验证与优化,促使车间管理人员动态优化生产活动计划,生成生产活动计划相关数据。最后,将优化后的车间生产活动计划反馈给实际装配车间,再指导物理装配车间的生产。这样,在物理装配车间与数字孪生装配车间形成一个闭环的数据流。

#### 2 虚拟装配车间建模与仿真运行技术

数字孪生装配车间的核心在于利用数字建模技术对虚拟装配车间进行构建。所构建的虚拟装配车间既是物理装配车间的数字化镜像,又是在信息流、物料流、控制流方面与物理车间一致的虚拟体。构建数字孪生装配车间时从3个层次进行考虑:元素、行为和规则。元素层面,数字孪生装配车间由车间生产要素的几何模型和物理模型构成,主要包括车间模型、生产线模型,装配站模型,制造资源模型(装配/检验/测量/测试设备模型、操作人员模型、材料模型、产品模型)。元素层面的建模工具主要为三维几何建模工具,如CATIA、Pro/E、AutoCAD、SolidWorks等。在行为层面上,主要指数字孪生装配车间组的元素的行为和反应机制,包括虚拟化模型的人员操作,设备的操作和材料运输。这一层面最常用的建模工

具是 Tecnomatix, DELMIA, 3DVIA Composer 等。在规则层面,数字孪生装配车间由模型中元素之间的关联规则,车间装配操作规则和演化规则,这些规则是保证数字孪生车间的运行机制与物理车间的运行机制一致的基础,从而真实模拟物理车间的行为、状态、操作和演变。基于以上3个层面构建的数字孪生装配车间可以真正实现其功能的运行、验证、预测和生产优化。

### 3 数字孪生与数据驱动的装配车间生产管控

数字孪生装配车间犹如一个数据池,车间各种数据汇聚融合,如何对这些数据进行应用分析从而达到指导生产、优化生产的目的,是数字孪生装配车间技术应用的关键。基于数字孪生车间数据实现飞机装配车间的预测管理与控制是迫切需要。与传统的“小”数据分析工具相比,大数据应用具有以下特点:(1)从被动处理到主动预测。有了车间大数据,就可以进行车间生产扰动的提前预测。(2)从因果分析到关联分析。利用大数据,将优化决策的分析模型从因果关系分析转换为相关分析。这为产品/过程优化和决策提供了一种新的途径,特别是对于大规模资源组合和优化问题。

大数据驱动的装配车间运行状况预测过程。其主要采集物理装配车间的实时数据,对于特定的预测需求,调用封装在服务平台中的相应预测模型,其输入包括历史数据、经验、知识以及物理装配车间收集的实时数据,输出是理论预测值或理论结果。

数字孪生驱动的装配车间运行状况预测过程是在构建了与物理装配车间运行机制一样的数字孪生装配车间的基础上,基于物理车间的实时数据,进行虚拟车间的仿真,得到虚拟车间仿真结果。首先,采集物

理装配车间的实时数据,在此基础上,通过车间数字孪生系统,动态地跟踪和监视实际车间的运行状况。然后,基于数字孪生车间服务平台驱动装配车间数字孪生模拟物理装配车间的生产运行状况。最后,将车间数字孪生系统仿真运行结果反馈给车间服务平台,优化生产运行。

**预测结果的比较、分析与优化**是将基于大数据的理论分析结果与基于数字孪生技术的仿真结果进行比较,一方面可以实现对预测精度的有效评价;另一方面,可以提升基于大数据的预测模型和基于数字孪生的预测模型的改进,以实现更准确的预测。

## 结论

数字孪生装配车间作为未来车间的运行新模式,对实现航空智能制造具有重要的推动作用。本文分析了车间发展历程及飞机装配车间存在的主要问题,探索了数字孪生技术在飞机装配车间中的应用模式,重点对基于数字孪生的飞机装配车间生产管控框架及涉及的关键技术进行了阐述。随着物联网、大数据、移动互联等新一代信息技术的应用,对飞机装配车间的智能制造也提出新的需求和挑战,迫切需要在数字孪生装配车间开展更加深入的应用研究和探索,提高飞机装配的质量和效率。

## 参考文献

- [1] 隋少春, 牟文平, 龚清洪, 等. 数字化车间及航空智能制造实践[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 46-50.
- [2] SUI Shaochun, MOU Wenping, GONG Qinghong, et al. Digital workshop and intelligent manufacturing practices[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 46-50.
- [3] TAO F, QI Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics[J]. IEEE Transactions on Systems

Man & Cybernetics Systems, 2017, 99: 1-11.

[4] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[0B102]. [2015-01-01]. [http://www.aprison.com/library/Whitepaper\\_Dr\\_Grievess\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_Php](http://www.aprison.com/library/Whitepaper_Dr_Grievess_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_Php).

[5] UHLEMANN H J, LEHMANN C, STEINHILPER R. The digital twin: realizing the cyber-physical production system for industry 4.0[J]. Procedia Cirp, 2017, 61: 335-340.

[6] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force Vehicles[C]// Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Aiaa/asme/ahs Adaptive Structures Conference. Aiaa, 2012.

[7] ROSEN R, WICHERT G V, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC Papersonline, 2015, 48(3): 567-572.

[8] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 141-144.

[9] ZHUANG C, LIU J, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 1149-1163.

[10] 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.

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.

[11] 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(8): 1603-1611.

TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.

(下转第 58 页)

## Review on Key Technologies of Workshop's Big Data for Intelligent Manufacturing

MIN Tao<sup>1</sup>, LENG Sheng<sup>1</sup>, WANG Zhan<sup>1</sup>, DAI Zhiqiang<sup>1</sup>, YANG Xianggui<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Changhe Aircraft Industry (Group) Corporation Ltd., Jingdezhen 333002, China)

**[ABSTRACT]** As Intelligent Manufacturing gets great support, the manufacturing industry is gradually developing more and more intelligently. A large number of data acquisition equipment has been utilized in workshops, collecting mass data of the production. By analyzing these data, big data technology can give full play to the value of data, raise the management level, and improve the competitiveness of enterprises. Combining the applications of big data in manufacturing enterprises, the framework of big data processing platform in intelligent workshop is put forward. Based on data integration, data processing and data analysis, big data technology is fully discussed, and the direction of its application in workshop is pointed out. Big data technology is of great value to the production in the intelligent workshop and its wide application will bring great changes to the industry and boost the development of intelligent manufacturing into a new stage.

**Keywords:** Intelligent manufacturing; Big data; Data integration; Data processing; Data analysis

(责编 大漠)

(上接第 50 页)

[11] 张国军, 黄刚. 数字化工厂技术的应用现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2013, 56(8): 34-37.

ZHANG Guojun, HUANG Gang. Digital factory: its application situation and trend [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(8): 34-37.

[12] 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与可视化监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(2): 273-284.

CAO Wei, JIANG Pingyu, JIANG Kaiyong, et al. Radio frequency identification-based real-time data collecting and visual monitoring for discrete manufacturing workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(2): 273-284.

[13] ZHANG Y, ZHANG G, WANG J, et al. Real-time information capturing and integration framework of the internet of manufacturing things[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2012, 28(8): 811-822.

通讯作者: 陈振, E-mail: chenchen1451@163.com。

## Digital Twin-Based Production Management and Control Mode for Aircraft Assembly Shop-Floor

CHEN Zhen, DING Xiao, TANG Jianjun, LIU Yusong

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

**[ABSTRACT]** The interconnection between the physical world and the information world in the aircraft assembly workshop has become the trend of aircraft assembly intellectualization. Digital twin is an effective technology to achieve interaction and integration between the physical world and the information world. This paper analyzes the development of the aircraft assembly shop-floor and expounds the characteristics and problems of the aircraft assembly shop-floor. On this basis, the framework of digital twin shop-floor for aircraft assembly, which covers the physical assembly shop-floor, the virtual assembly shop-floor, the twin data of the shop-floor and the assembly shop service system, is proposed. The key technologies such as real-time perception and acquisition of the physical assembly shop-floor data, modeling and simulation technology of virtual assembly shop-floor, digital twin and data-driven of the assembly production management and control are illustrated in detail. This study will provide reference for intelligent manufacturing in aviation industry.

**Keywords:** Aircraft; Assembly workshop; Production management and control; Digital twin; Intelligent manufacturing

(责编 大漠)