

引文格式: 胡秀琨, 张连新. 数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 87-96.

HU Xiukun, ZHANG Lianxin. Study on application of digital twin workshop in assembly process of complex products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 87-96.

数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索^{*}

胡秀琨, 张连新

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

[摘要] 数字孪生车间以数字孪生技术为核心,能有效解决车间内物理空间与信息空间融合的瓶颈。阐述了当前复杂产品装配过程的特点,提出了实作装配体模型的概念,以及包括物理实体层、模型数据层、迭代分析层、协同服务层的复杂产品装配数字孪生车间的整体框架,研究了以装配体修正模型为核心的装配过程调控方法和数字孪生装配车间的运行机制。在此基础上分析了数字孪生车间对装配过程效能提升的促进作用,为复杂产品装配车间的改进提供了新的思路。

关键词: 复杂产品; 装配; 数字孪生; 数字孪生车间; 实作装配体模型; 调控方法

Study on Application of Digital Twin Workshop in Assembly Process of Complex Products

HU Xiukun, ZHANG Lianxin

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

[ABSTRACT] The digital twin workshop (DTW) uses digital twin technology as the core, which could effectively solve the bottleneck of the physical-cyberspace fusion in workshop. The characteristics of the current complex products assembly process are summarized, the concept of as-built assembly model, as well as the framework of the DTW for complex products assembly including physical entity layer, model data layer, iterative analysis layer, and collaborative service layer, are proposed. The regulating method of assembly process with assembly modified model as the core and the operation mechanism of assembly DTW are studied. On this basis, the contribution of the DTW to the efficiency promotion of the assembly process is analyzed, and a new idea for improving the complex products assembly workshop is provided.

Keywords: Complex product; Assembly; Digital twin; Digital twin workshop (DTW); As-built assembly model; Regulating method

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.03.087

复杂产品组成结构复杂且产品种类多,其装配存在着技术复杂且可靠性要求高、过程复杂且交付周期短等一系列困难,随着用户需求的发展变化,传统以手工操作为主的装配过程愈发暴露出其弱点。仿真技术虽然在一定程度上帮助人们规避了复杂产品装配制造中的一些缺陷和风险,优化了部分流程,但目前的仿真行为在准确模拟装配生产过程中各种因素的耦合作用方面存在一定困难。为使复杂产品的最终质量满足新的要求,复杂产品的装配过程应向数字化、网络化、智能化的

智能制造模式转变。

实现智能制造的一大瓶颈是物理世界和信息世界的互联互通,数字孪生作为全新的理论工具,其包含的数字孪生技术能够对复杂产品全生命周期活动中产生的多源异构动态数据进行有效融合和管理,数字孪生可被看作构建与实现 CPS (Cyber-physical systems) 的必要基础^[1]。借助数字孪生的思想、理论和技术,重新定义复杂产品装配过程,为实现智能化的装配过程提供了新的思路。

由于车间是复杂产品装配制造的具体实施单位,因

^{*} 基金项目: XXX 装检流程优化研究项目 (K1217-1923-TCA)。

此实现车间物理空间和虚拟空间的融合具有重要意义。数字孪生车间分别从物理空间和虚拟空间中提出异构要素融合、多维模型融合、物理信息数据融合以及服务应用融合4个方面的融合,提供了对装配车间内所有要素全面分析和管控,以及打通制造链、信息链的平台和手段。本文在分析当前复杂产品装配特点的基础上,结合数字孪生车间概念,提出了基于数字孪生的复杂产品装配车间框架,该框架能够为复杂产品数字孪生装配车间的设计提供一定的参考。

1 数字孪生技术的发展

1.1 从数字孪生体到数字孪生车间

Grievess 博士^[2]于2003年提出“镜像空间模型”,并将其定义为“与物理产品等价的虚拟数字表示”,该模型可以被认为是数字孪生体概念的雏形。后来,美国国家航空航天局(NASA)针对运行中的空间飞行器,利用其数字孪生体进行仿真分析,实现对空间飞行器飞行状态的监测和预测,为地面控制人员正确做出决策提供帮助。2011年 Grievess^[3]引用了 John Vickers 所建议的“数字孪生体(Digital Twin)”这一名词,作为其镜像空间模型的别名。2012年, NASA 和美国空军研究实验室提出数字孪生体是一个集成了多物理场、多尺度以及概率仿真的数字飞行器或系统,能通过超写实的物理模型、实时传感器数据和运行历史数据等反映出对应于该模型的实体飞行器的实时运行状态^[4],从此数字孪生真正引起了学界的聚焦和关注。2016年 Grievess 等^[5]提出数字孪生体是一组能够在微观到宏观的尺度范围内全面描述实际或潜在的物理制成品的虚拟信息结构。理想情况下,任何物理制成品的实测信息都可以通过其数字孪生体获得。2019年 ISO 将数字孪生体定义为现实事物(或过程)具有特定目的的数字化表达,并通过适当速率的同步使物理实例与数字实例趋于一致^[6]。

从以上数字孪生体的定义可以看出,数字孪生是实现物理与信息交互融合的重要且有效的手段,为打通车间物理空间与信息空间的交互与融合的瓶颈,北航陶飞等^[7]提出了一种基于数字孪生的数字孪生车间(Digital twin workshop, DTW)的新概念,指出 DTW 是一种受新一代信息和生产技术的推动,以生产车间在物理空间和虚拟空间中的双向完整映射与实时交互为桥梁,集成并融合物理车间、虚拟车间以及车间服务系统中的全要素在全制造周期产生的数据,并且以孪生数据作为驱动,在物理车间、虚拟车间及车间服务系统三者之间实现车间生产计划、管理等活动的迭代运行,从而使车间生产和管控过程在特定目标及限制条件下达到最优的全新车间运行模式。数字孪生车间包括虚拟车间和

数字化物理车间两个部分,它能够有效地将两者进行结合,从而解决车间内信息/物理空间之间存在的融合问题^[8]。

1.2 数字孪生车间架构

数字孪生车间首要目的是解决车间内物理空间和信息空间交互融合的问题,因此其最基本的应包括三大组成部分:物理车间、虚拟车间以及两者之间的连接。物理车间指车间内客观存在的实体要素的集合,如厂房设备、原料产品、测量仪器、总线网络、操作人员、能源环境等;虚拟车间是物理车间在虚拟空间的完全数字化的超写实映射;连接是指物理车间和虚拟车间在信息交流方面的互联互通,包括硬件上的连接传输以及软件上的通信交互。陶飞团队^[9-10]设计构建了包括物理车间、虚拟车间、车间服务系统以及车间孪生数据的参考架构,并进一步对此总体架构进行了分层和细化,提出了自下而上由物理层、模型层、数据层、服务层及应用层构成的数字孪生车间参考系统架构。陈振等^[11]提出了包含物理装配车间、虚拟装配车间、车间服务应用平台以及车间数据存储管理平台的基于数字孪生的飞机装配车间生产管控框架。Zhang 等^[12]搭建了基于物理本体数据实现物理模型和数字仿真模型关联的数字孪生车间模型,该模型由物理模型、对应的 Flexsim 仿真模型及数字描述模型组成。Zhang 等^[13]提出了基于数字孪生驱动的智能车间五层体系结构,该体系结构具体包括了物理车间层、车间网络层、车间数据层、信息车间层以及车间应用层。郭东升等^[14]针对航天结构件的制造车间,将数字孪生的车间模型分为物理层、模型层、信息层与系统层四层。柳林燕等^[15]提出了由物理实体层、孪生模型层以及功能层组成的车间生产过程数字孪生体系架构。综合分析上述研究可以看出,关于数字孪生车间系统框架的研究目前仍处在探索和成型阶段。

2 复杂产品装配过程分析

所谓复杂产品是一类具有复杂的用户需求、产品构成、产品技术、制造过程、项目管理等特点的产品的统称,例如复杂机电产品、汽车、航天器、飞行器、武器系统等^[16]。当前复杂产品的装配具有明显的离散型装配特征,其装配作业时间长,以手工操作为主、涉及学科广泛,参与单位众多,除汽车等少数具有规模化生产需求的产品外,大多只进行单件或小批量生产。在复杂产品生产中,因为人力物力财力的充足供应,单个零件或部件的设计、制造与管理已实现相当程度的自动化,与之相比,复杂产品的装配过程依然相对传统,即便在较为成熟的汽车行业,绝大多数的发动机组装、整车组装等仍旧离不开大量的人力参与。

2.1 复杂产品装配的问题

复杂产品涉及的零部件数量庞大且相互约束关系复杂,装配结构关系主要由静态装配数据呈现,缺少装配过程的动态演变模型,数据管理与过程管理脱钩,在装配过程中极易发生错装漏装的情况。并且由于其高精度的特点,装配质量对装配过程中的误差、干扰等极为敏感,且极其注重产品零部件表面质量,杜绝出现污渍、划痕等损伤。同时因为装配工序多、操作复杂、资源调配频繁和对设备状态、人员素质、生产环境等的高要求等特点,导致产品装配精度的影响因素繁杂,各因素之间相互关联耦合且难以解耦。在按照一定的工艺路线装配时,路线上的质量控制点之间复杂的、动态的、非线性的相关性使得质量控制极为复杂,上游工序产生的非最优装配状态中的偏差会以在制品为载体传递到下游工序,并且累积和放大,导致装配完成后的产品整体性能在零部件均检测合格的条件下仍无法达到指标要求。另外,传统的在装配完成后综合评价产品性能的方式,缺乏对装配中间过程的管控,给及时识别和定位产生质量问题的原因带来困难^[17-18]。并且由于大量的信息传递与资源协调活动进行,尤其当产品处于研制阶段时,反复的设计更改与频繁的生产扰动给生产调度工作造成了极大的复杂性和困难性。

2.2 复杂产品装配的一般要求

2.2.1 复杂产品装配的高可靠性要求

一般来说,复杂产品多以大量的壳体零件、高精度曲面类零件、精密仪器、非标准件及电线电缆组成,工件尺寸大,形状不规则,重量大且重心通常不在几何中心,抓取、定位困难,装配约束关系复杂,装配过程工序繁多且工艺复杂,因而其可靠性控制难度很大。但是,由于复杂产品对使用性能(特别是在恶劣工况下的可靠性、维修性、保障性、安全性、经济性、环境适应性指标)的要求极为苛刻,所以对其装配过程中可靠性的把控显得至关重要。复杂产品装配过程的可靠性可分为两个方面:一是装配设备的可靠性,包括装配装置、吊具夹具、仪器仪表、软件系统以及其他装配车间内的辅助设备,包括环境设备、能源设备、通信设备等的长期健康稳定运行;二是装配产品的可靠性,包括装配精度、装配应力、装配变形、表面质量、润滑密封等严格满足设计要求。

2.2.2 复杂产品装配的高一致性要求

复杂产品由于使用工况复杂,为保证使用过程的安全性和稳定性,对产品质量一致性的要求极高。复杂产品的不确定性来自于各个子系统和零件的不确定性以及它们装配关系的不确定性^[19],通常受工厂的人(Man)、机(Machine)、料(Material)、法(Method)、测

(Measurement)、环(Environment)(即5M1E要素)6个因素的影响。具体而言,在以手工操作为主的装配过程中,由于装配人员操作、设备状态、零部件质量、上游工序装配结果、测量方法与测量误差、环境参数等不确定性因素的影响,将会产生一系列的装配误差。这些误差具有随机性、不可重复性,难以补偿消除,共同影响着复杂产品装配过程的一致性,特别是手工操作主要依靠操作者的经验和知识,其带来的不确定性在很大程度上会导致同一批次产品的最终质量也无法保持很高的一致性。

2.2.3 复杂产品装配的柔性化要求

复杂产品装配大多具有多型号、小批量的生产特征,若采用传统的装配方式,对于不同产品更换不同设备、工装、量具等,将带来大量的人力、物力与时间资源的非必要消耗。同时,复杂产品装配过程必须及时对用户需求的变化、装配工艺的更改及装配过程中的干扰因素做出响应。这些特征要求复杂产品装配向柔性化的方式转变。

复杂产品装配的柔性化趋势体现在以下5个方面。

(1)资源柔性。一机多能,一人多能,即同一台设备或同一个装配人员需要具备完成不同型号、系列产品的装配的能力,从而提高设备利用率,增强响应能力,缩短装配周期,节省装配成本。

(2)物流柔性。针对不同的产品装配任务调整物流方案,包括物料清单、物流线路、物流节拍等,且能跟踪装配进程,满足多任务同时装配的物流要求。

(3)车间布局柔性。装配车间能够针对不同类型的产品装配快速地调整,良好的节拍控制能支持在不同工位的多种类型产品的同时装配。

(4)工艺柔性。针对一组装配任务,工艺路线是可以随时动态寻优的,一方面可以根据零件实测尺寸或实测装配状态调整下一步的装配工艺,另一方面在某一工位被占用或设备故障时,能够实时实施动态调度,寻找替代工位。

(5)需求柔性。装配车间在仅少量增加设备设施的情况下,能够快速满足新型号产品的装配需求,能跟踪、分析、预测用户需求。

2.2.4 复杂产品装配的协同化要求

由于复杂产品研制生产具有承研单位众多、地域分布广泛、设计制造分离等特点,一家单位通常只负责提供某些特定的模块或子系统,而这些模块和子系统一般会涉及到核心的商业秘密或国家秘密,因而装配单位难以全面获取这些模块或子系统的特性以独立开展装配工艺设计和操作。同时,围绕全制造链协同共享的复杂产品信息溯源体系也具有重要意义。与传统形式的离

散制造车间相比,复杂产品装配车间更加需要在制造方面实现横向、纵向以及端到端的集成,因而呈现出更为迫切的协同性需求。

在复杂产品装配的过程中,会有大量数据的交互以及各方人员的协同配合,主要包括:

(1)与合作配套单位、上级单位、供应商及用户之间的沟通和交流,有助于准确贯彻执行上级单位下发的生产任务,详细了解并分解用户需求,掌握各模块和子系统的接口要求及装配注意事项,在某些需多家单位共同参与的装配工序中同时且高质量地达到多方要求;

(2)调度部门对车间现场的任务指派及车间现场对调度部门的进程反馈,有助于对车间调度行为做出较好规划;

(3)设计、工艺部门对车间现场的工艺信息传达及车间现场对设计、工艺部门的生产问题反馈,有助于形成生产过程的迭代寻优,提高设计制造水平;

(4)车间现场对质量部门的装配情况报告及质量部门对车间现场的检测质量反馈,有助于及时发现并消除装配缺陷,增强装配过程的可控性。

3 基于数字孪生的复杂产品装配车间框架设计

3.1 复杂产品的实作装配体模型

复杂产品的数字孪生装配体与通常的产品数字孪生体一样,具有包括唯一性、虚拟性、超写实性(数字孪生体在外观、内容与性质等方面对物理产品的拟实度高,可以准确描述其真实状态)、多物理性、动态性、集成

性、多尺度多层次性、可计算性、概率性及多学科性等在内的多种综合特性^[20]。通常而言,利用设计参数及理想模型构建的数字孪生装配体可称为理想孪生装配体模型(Ideal digital-twin assembly model),理论上这个模型可对物理装配体包含的所有信息和知识从几何、物理、行为、规则等方面进行全面描述,如图1所示。然而由于加工误差、测量误差、壳体变形、零件磨损、环境因素以及操作不规范而引起的误差,理想孪生装配体模型并不是物理装配体完全忠实的超写实镜像模型,它与生产现场的实际产品是存在差异的。如果按照理想孪生装配体模型来指导后续装配工序,将导致这些差异被忽略和积累。由于以实映虚的过程不能保证高忠实度,模型融合时往往无法识别和补偿误差,甚至会将会误差放大,从而使以虚控实的过程难以实现。

为准确映射物理空间中的物理装配体,可在虚拟空间建立一个反映和记录产品实时装配状态和装配过程的数据集合,称之为实作装配体模型(As-built assembly model)。实作装配体模型是根据装配过程中的实测数据建立的,主要包括装配定位数据、装配应力数据、装配表面质量数据以及装配形变数据等,并随产品装配过程动态更新和迭代,因而实作装配体模型的建立是以检测为基础的,检测应贯穿整个装配过程。

实作装配体模型继承了产品数字孪生体的所有特性,它的超写实性反映的是物理装配体的真实状态,不仅描述了物理装配体宏观尺度上的状态,如尺寸、形状、位置、装配关系,而且描述了产品的表面质量、应力、应变等微观尺度上的状态;从层次性上可将实作装配模型

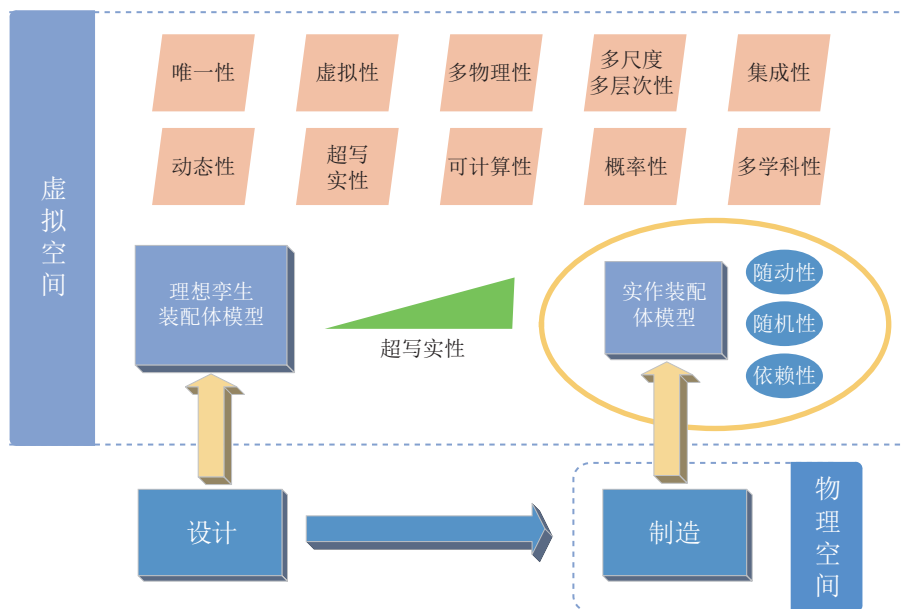


图1 实作装配体模型

Fig.1 As-built assembly model

划分为实作零件模型、实作组件模型、实作部装模型、实作总装模型等层级,并且由于其数据集的本质属性,包含了多物理场景、多学科类型的实际数据。可以说,实作装配体模型是产品数字孪生装配体在装配过程中的实例化^[21]。另外,实作装配体模型还具有以下特点:

(1) 随动性。实作装配体模型总是随着物理装配体的更新而更新,如拧紧连接螺钉后,实作装配体模型中才会增加该螺钉的位置及预紧力等数据,以保证超写实性要求;同时,随动性特点还体现在响应快,物理装配体一旦更新,即产生新的状态下的实作装配体模型,在时间上实作装配体模型的更新与物理装配体的变化趋于同步,保证了模型的时效性。

(2) 随机性。实作装配体模型描述了物理装配体的真实状态,物理装配体中的误差将会反映到实作装配体模型中,这些误差大多都是随机性的,所以实作装配体模型具有随机性;在随机性的影响下,产品在任一装配工序下的实作装配体模型都是唯一的,不同产品在同一装配工序下的实作装配体模型也不可能完全相同;

(3) 依赖性。实作装配体模型极大地依赖对装配过程参数实时全面的监测和采集,要求装配及检验设备高度集成。

3.2 复杂产品装配的数字孪生车间整体框架

复杂产品装配作为完成产品功能和性能构建的关键最终环节,对复杂产品研发品质的高低与使用性能的优劣起着重要作用,复杂产品的最终质量技术指标深受其装配质量的影响^[22]。所以实作装配体模型以其更高的超写实性,要求数字孪生驱动的装配过程应从理想孪生装配体模型指导装配向实作装配体模型指导装配转变。由于复杂产品装配过程具有的可靠性、一致性、柔性及协同性要求,数字孪生驱动的装配过程将不限于物联网平台,而是要向体现了“智慧化制造技术特征”的,以及制造资源与制造能力的物联化、虚拟化、服务化、协同化、智能化^[23]的云制造平台发展。

复杂产品装配的数字孪生车间包括装配产品数字孪生、装配流程数字孪生和装检设备数字孪生 3 个层面,整体框架如图 2 所示,由物理实体层、模型数据层、迭代分析层、协同服务层组成。

3.2.1 物理实体层

物理实体层是指装配车间内人、机、料、环及其他如传感装置、总线网络、工装夹具等在内的所有生产实体要素和物理装配体的集合。物理实体层的各要素之间应建立广泛的连接,且能够实现对多源异构数据,尤其是装配过程及装配质量数据进行连续、实时、准确地采集、传输和存储。这意味着复杂产品装配的数字孪生车

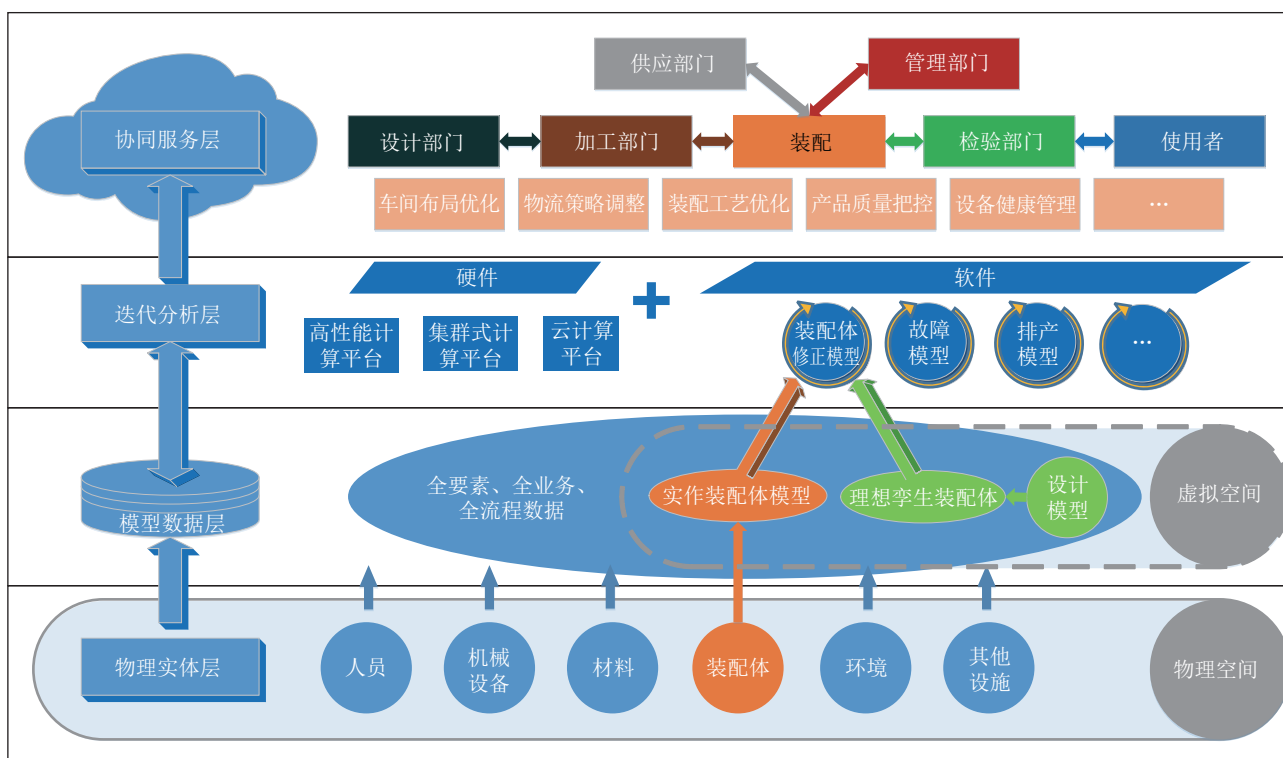


图2 复杂产品装配的数字孪生车间整体框架

Fig.2 Digital twin workshop framework for complex product assembly

间对装配设备提出了更高的要求,传统的装配设备以手工操控为主,缺少反馈控制,无法实时掌控装配质量,数字孪生车间的建设一方面能引导已有装备的改进升级,另一方面能促进新一代装配装备的研发,为复杂产品装配过程的信息化、网络化、智能化水平提升带来新的契机。适应数字孪生车间的未来装配设备可以更广泛地使用机器人以增强运动的灵活性和生产柔性,机械结构上应注重“刚柔结合”,合理设计刚性机构和需要浮动的机构,综合利用电、气、液等多种驱动方式,在核心零部件中按需嵌入传感装置以实时监测运行状态,拓展和其他设备互联的接口,能与智能管控系统交互;除此之外,装配装备的控制方式要从开环或半闭环向全闭环、智能化的方向发展;测量手段要从单一的、传统的向融合的、先进的方向发展;检测方式要从阶段检测向实时检测的方向发展。

3.2.2 模型数据层

模型数据层以数据库技术为支撑,存储了物理实体层、迭代分析层、协同服务层三者自身的数据以及在三者的交互行为中衍生出的数据,另外还包含了MES、ERP、DOM、PDM等系统提供的装配体模型设计及工艺设计阶段产生的所有数据,具备了包括多样性、海量性、高速性及多源异构等特征在内的一系列的大数据特征,完成了全业务、全要素、全流程数据的集成与融合。其中,反映和记录物理装配体实时装配状态和装配过程的数据集合即为实作装配体模型,反映和记录装配产品设计参数及理想模型的数据集合则代表了理想孪生装配体模型。实作装配体模型和理想孪生装配体模型均属于虚拟空间的范畴,同时,虚拟空间还包含了人-机-物-环等实体集合的数字镜像。这样,通过模型数据层将整个物理车间映射到了虚拟空间,形成了数字模型形式的孪生车间。模型数据层包含中的知识与规则数据可以被协同服务层当作能够直接使用的决策参考,另外一些几何、物理、行为、规则模型的数据经过封装可被迭代分析层调用进行装配过程的仿真优化^[14]。

3.2.3 迭代分析层

迭代分析层是数字孪生车间“智能”的来源,硬件方面的主体内容由嵌入式设备、云计算服务器以及高性能图像处理平台设备构成;软件方面则主要是对几何、物理、行为及规则模型的封装调用和优化。依靠迭代分析层,模型数据层中的数据会在实时的更新过程中被整理、分析、挖掘,经过信号处理、图像处理、故障诊断、可靠性分析等方法提炼出的有用信息将作为协同服务层调控生产活动的决策依据。

与此同时,在迭代分析层中理想模型会在实作装

配体模型数据的修正下形成装配体修正模型。装配体修正模型反映了当前状态下装配体几何、物理、行为、规则等维度的模型在虚拟空间中的真实映射,以装配体修正模型为依据进行实时的装配工艺调整,有利于精准调控零件部件、装备装置及装配过程,有利于实现具备自适应、自组织以及动态响应能力的产品装配系统,有利于寻找到物理装配体完成所有工序后的最优装配状态。由于实作装配体的随机性特点,装配体修正模型并不能适应每个产品的装配要求,所以理想模型会一直参与到每个产品对应的装配体修正模型的形成过程中。

3.2.4 协同服务层

协同服务层利用互联网将在装产品全生命周期的各个阶段相连接,打通了整个制造系统的数据流与信息流,从而在制造方面实现横向、纵向与端到端集成。协同服务层提供的各类应用让制造系统上的每个节点都能实时参与到产品装配的过程中来,实现对复杂产品装配的“云监工”,并根据装配过程中产生的问题提出相应的改进方案或进行资源协调。复杂产品更加注重用户的使用需求,用户可以通过协同服务层全面了解产品的装配生产过程,监督生产质量,甚至利用虚拟现实技术进行使用和维护培训。协同服务层的应用涵盖了监测、控制、分析、管理等功能,以数据为驱动在车间各生产要素的全生命周期内实现故障预测和健康管理,以及设计和装配生产过程的优化改进。

3.3 数字孪生车间内的装配过程调控

由前所述,为保证复杂产品装配的质量,以实作装配体模型代替了理想孪生装配体模型来描述物理装配体实时的真实状态,原本用来指导装配工艺的理想模型就会在迭代分析层中被修正为装配体修正模型,根据实时信息和控制模型实现对装配策略的调整和误差的动态补偿,为装配过程质量的主动调控提供理论支持^[17]。基于装配体修正模型的装配过程调控是复杂产品装配的数字孪生车间的核心技术,整个实时装配调控过程如图3所示。

每个装配工序*i*开始前都要构建前一个装配工序*i-1*的装配体修正模型。即在第1个工序开始前,应当构建物理装配体在第0个工序(零部件准备状态)的装配体修正模型,随后每完成一个装配工序*i*后,便构建第*i*个工序的实作装配体模型,若该实作装配体模型满足要求,则会进一步形成第*i*个工序的装配体修正模型,以指导第*i+1*个工序的进行。

对装配工序*i*的实作装配体模型的评价以相似度为评判标准^[21],每个装配工序*i*完成后,迭代分析层都会计算实作装配体模型和理想孪生装配体模型的

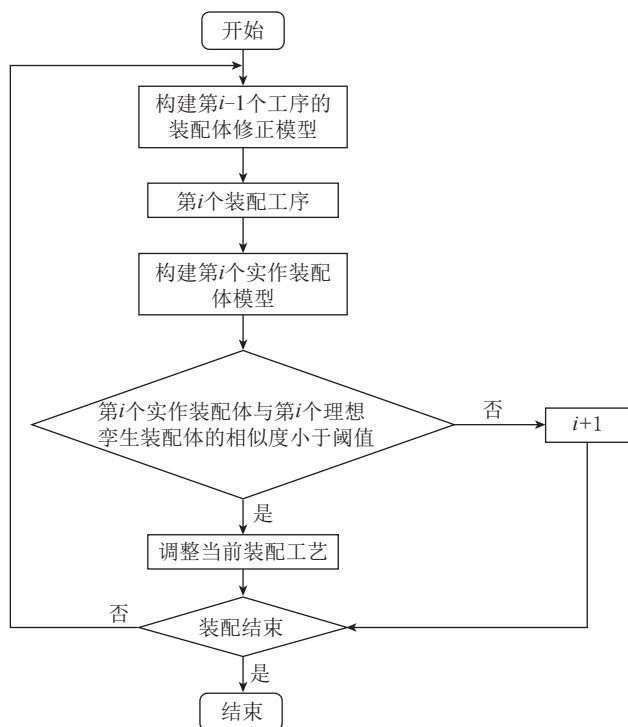


图3 基于装配体修正模型的装配过程调控方法

Fig.3 Regulating method of assembly process based on assembly modified model

相似度:

$$\text{SIM}(\text{ASAM}_i, \text{IDTAM}_i) = \sum_{j=1}^{M_i} \alpha_j (\text{position}_{ij} - \text{position}'_{ij}) + \sum_{k=1}^{N_i} \beta_k (\text{stress}_{ik} - \text{stress}'_{ik}) + \sum_{l=1}^{S_i} \gamma_l (\text{strain}_{il} - \text{strain}'_{il}) + \sum_{m=1}^{T_i} \eta_m (\text{sq}_{im} - \text{sq}'_{im}) \quad (1)$$

其中, $\text{SIM}(\text{ASAM}_i)$ 表示第 i 个装配工序的实作装配体模型和理想孪生装配体模型的相似度; M_i 表示第 i 个装配工序包含的同轴度、位置度等关键定位参数的数量; N_i 表示第 i 个装配工序包含的螺栓预紧力、焊接应力等关键应力参数的数量; S_i 表示第 i 个装配工序包含的壳体变形、螺栓变形等关键应变参数的数量; T_i 表示第 i 个装配工序包含的光洁度等装配表面质量参数的数量; position_{ij} 和 $\text{position}'_{ij}$ 分别表示第 i 个装配工序的实作装配体模型及对应的理想孪生装配体中的第 j 个定位参数; stress_{ik} 和 stress'_{ik} 分别表示第 i 个装配工序的实作装配体模型及对应的理想孪生装配体中的第 k 个应力参数; strain_{il} 和 strain'_{il} 分别表示第 i 个装配工序的实作装配体模型及对应的理想孪生装配体中的第 l 个应变参数; sq_{im} 和 sq'_{im} 分别表示第 i 个装配工序的实作装配

体模型及对应的理想孪生装配体中的第 m 个表面质量参数; α_j 、 β_k 、 γ_l 、 η_m 分别表示定位参数、应力参数、应变参数、表面质量参数在实作装配体模型和理想孪生装配体模型的相似度计算中所占的权重。

设定某一相似度阈值 δ , 若计算出的相似度大于指标 δ , 则认为此工序合格; 若计算出的相似度小于指标 δ , 则形成工艺优化方案, 重新进行该装配工序的实施, 提升装配工艺的快速应变能力^[24]。

基于装配体修正模型的装配过程调控, 体现了数字孪生“以虚映实、虚实共融、以虚控实”的理念。其充分重视了复杂产品物理装配体的随机性, 以实际产品为基础, 在数字孪生车间的框架下, 可以完成从数据采集、存储、分析、优化、应用在内的所有流程, 为复杂产品装配质量的提高提供了崭新的实施思路。

3.4 复杂产品孪生装配车间的运行机制

复杂产品孪生装配车间的运行是由车间数据驱动的, 主要分为4个阶段(图4)。

(1) 理想孪生装配体模型产生。

装配工艺设计部门根据复杂产品图样数据, 利用装配工艺与仿真系统实施装配信息组织、装配顺序规划等工艺行为, 获得理想情况下的复杂产品装配状态, 在此过程中形成理想孪生装配体模型。在实际装配生产过程中, 装配工艺设计部门也会随着实际装配数据的反馈形成经验积累, 产生更优的装配工艺和方法。

(2) 车间孪生模型形成。

车间孪生模型由数据驱动, 和物理车间的实时状态保持高忠实度的映射关系, 车间内任何数据的变化都会引起车间孪生模型的更新, 实作装配体模型作为车间孪生模型的组成部分和在装产品保持高度一致。车间孪生模型的构建依赖于对物理装配车间现场数据全面的、实时的感知、采集以及信息的互联互通, 利用智能传感器、RFID、物联网等技术标识各个实体要素, 形成各要素的唯一编码, 并建立广泛的传感通信网络, 使得信息可以在人-机、机-机之间高效传输, 打破异构设备及车间各类管控系统通讯的瓶颈, 以满足数字孪生体所包含的超写实性、动态性、集成性等多种特性的要求。这一阶段实现了物理空间到信息空间的映射。

(3) 以装配体修正模型为指导的装配过程管控。

智能系统(包含模型数据层和迭代分析层)所具备的数据存储与分析能力将理想孪生装配体模型与实际装配体模型相融合, 形成装配体修正模型, 并以装配体修正模型为指导向装配车间现场下发装配过程管控指令, 调整装配装备的动作, 协调设备、物流、能源等资源。这一阶段实现了信息空间到物理空间的反馈。

(4) 产品制造链上各单位协同。

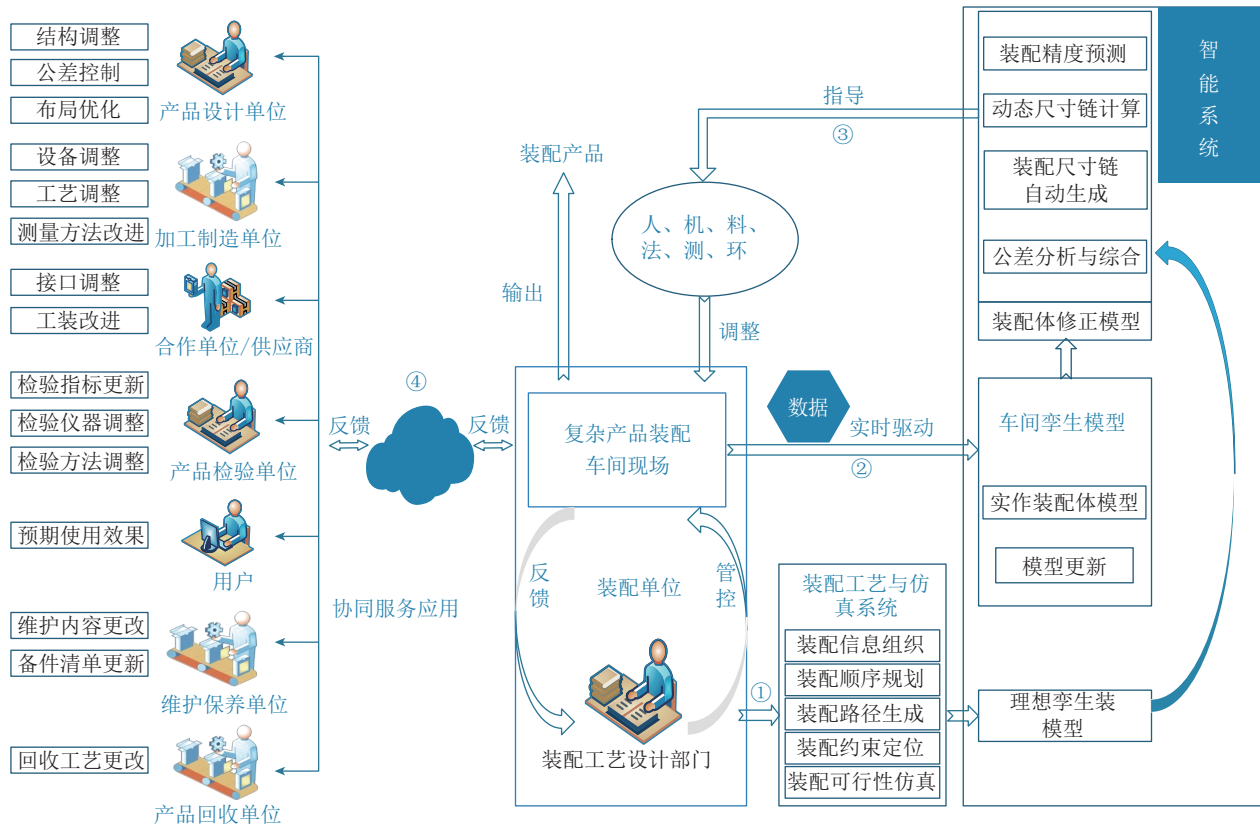


图4 复杂产品孪生装配车间的运行
Fig.4 Operation of assembly DTW for complex products

协同服务应用提供了使产品设计单位、加工制造单位、合作配套单位、产品用户等能够全方位参与复杂产品装配过程的平台,在协同服务应用上产生的交互可以推动产品设计、工艺等的迭代优化,最终实现提质增效的目标。

4 装配过程在数字孪生车间中的持续改进

以实作装配体模型为核心的数字孪生装配车间有望实现复杂产品装配过程的虚实融合,通过软硬件服务平台及工具,能够跟踪装配过程的每一个环节,对涉及的大量零部件建立完备的档案,实现对装配装备和装配过程的自组织、自适应的动态控制。数字孪生装配车间的装配过程完成了装配工艺过程从数字信息主导向虚实结合、共同进化的方式转变,实现了面向装配车间现场的、以实测数据为基础的、涉及多维工艺要素的、以大数据分析为手段的工艺知识及过程的建模、仿真与优化,实现了装配工艺问题的主动决策^[22]。

与传统装配过程相比,数字孪生车间将数据管理与过程管理挂钩,支持装配过程的动态演变,杜绝了零部件错装漏装情况的发生,智能系统为解耦各因素的影响提供了工具和方法,实时主动的监测调控能及时发现并

解决工艺问题,有效减少偏差向下游工序的传递、累积和放大的概率,从而实现复杂产品装配质量的提升。

4.1 装配过程的可靠性和一致性进一步提高

基于数字孪生的复杂产品装配车间为全生命周期的管理思想在复杂产品装配中的实践提供了平台,它以成熟的自动化为基础,全面的信息化为保障,高度的智能化为核心,以数据为驱动,有望将设计、制造、装配、使用、维护、回收各个阶段有机统一起来。数字孪生车间为寻找更优的设计思想、加工工艺、装配工艺提供了原料、工具和方法,任何零部件在设计之初都可以通过对其数字孪生模型进行仿真来预测其成品质量,找出设计缺陷产生的本质原因,并直接在数字孪生模型中进行质量问题归零和迭代设计,直到寻求到最优设计,从源头上控制和消除了装配过程中的一些不确定性因素。并且通过对数据的挖掘和分析,对理想模型进行修正,可将认知性的不确定性因素逼近到更为真实的范围,从原理上保证复杂产品更高的可靠性。而智能系统将虚拟世界和现实世界关联起来,根据实作装配体模型的实时状态自适应地调整其装配策略,确保复杂产品的装配质量始终处于一种可控和寻优的状态,最终保障了复杂产品的综合装配性能。同时通过人机的互联协同,深度融

合了机器动作的准确性优势和人类行为的灵活性特点。机器替代了大部分传统手工装配工作,其高精度的重复定位能力有效消除了手工操作的随机性,最大程度实现过程的一致性,从而保证结果的一致性,提高复杂产品装配质量的稳定性。复杂产品可靠性的提高可以减少产品故障发生率,从而带来安全性、维修性、保障性、环境适应性等性能的提高,长远来看,降低维护费用也符合经济性的要求。

4.2 装配过程的敏捷化水平进一步提高

基于数字孪生的复杂产品装配车间提供了将高素质的人员、智能化的设备、高性能的材料、先进的制造工艺、稳定的环境因素有机融合的平台,并将这些关键要素与产品装配过程进行无缝关联。这有利于提高企业的硬实力,是企业提高创新力和适应性的基础。通过传感装置对装配状态的实时感知、通信网络对异构设备的全面互联、装配设备的自适应控制以及数字孪生车间系统的统筹调度能够大幅提升装配过程的资源柔性、物流柔性、车间布局柔性、工艺柔性以及需求柔性。数字孪生车间对车间数据的全面管控有助于提供如工艺规划、智能排产、布局调整、生产监管、设备诊断、质量管控、能效优化、风险评估等服务内容,从而提高复杂产品装配质量,节约生产成本,优化供应链结构,减少污染排放,进而满足复杂产品多品种、变批量、按需生产要求。同时由于对产品使用、维护、回收等产品后生命阶段数据的挖掘,可以跟踪用户体验,找到对用户需求更有针对性的改进方向,甚至提供除产品以外的附加服务及配套产品,增加产品附加值,增强企业决策的前瞻性,提高企业的软实力。

4.3 装配过程的协同化水平进一步提高

基于数字孪生的复杂产品装配车间利用互联网将装配车间内的全要素、全流程、全业务信息共享到云平台,打破了设计者、加工者、装配者、供应商、使用者、维护者之间的壁垒。利用数字孪生车间平台,可以提高复杂产品装配过程以下 5 个方面的协同化水平。

(1) 设计-装配协同。装配车间实时信息的共享使得设计和装配从顺序行为变成了迭代行为,设计者可以根据实际出现的装配问题给予及时的图纸和工艺变更方案,与此同时在数字孪生模型中更新装配过程,对后续的装配工序进行修正和指导,提高对复杂产品装配质量的预判和把控能力。同时参与产品设计的多个团队将打破空间位置的限制进行并行设计,对关键零部件、产品接口等协同优化,提高复杂产品在首次设计和制造过程中的成功率。

(2) 加工-装配协同。数字孪生车间通过实作装配体模型架起了加工质量和装配质量之间的桥梁,使得在

装配前就能根据零部件的加工质量大致预测出复杂产品装配最终的状态,为加工工艺优化提供了指导。加工者交付加工件后还能跟踪装配过程,在此期间可以实时接收装配人员发出的修配、更换等需求,提高加工的响应能力和保障能力。

(3) 调度-装配协同。数字孪生车间为调度部门提供了全面的车间信息,并帮助实现对物料、设备、人员、物流、能源等各个要素的统筹规划。调度部门可以根据实际生产情况进行生产计划、人员配置、库存管理、资源调用,将复杂产品从单件装配推向多工位并行装配,提高设备的利用率,实现省时增量。

(4) 供应-装配协同。数字孪生车间提供的平台允许供应商实时参与装配生产过程,对其供应的产品提供在线的技术指导、安全培训和维修服务。

(5) 使用/维护-装配协同。复杂产品常常要求具有较强的测试性、维修性、保障性以及环境适应性,数字孪生车间将产品后生命周期的数据纳入管理,有利于以用户需求为导向,用户体验为反馈进行产品装配问题的消除和归零,形成装配和使用/维护的小闭环。

5 结论

复杂产品需求的变化对其装配过程提出了更高的要求,传统装配方式已渐渐不能适应复杂产品装配特点,信息系统和物理系统的深度融合是解决复杂产品装配难题的关键。本文对数字孪生车间在复杂产品装配过程当中的应用进行了探索。数字孪生技术能够实现物理空间与虚拟空间的映射、融合和交互,数字孪生车间基于数字孪生技术将复杂产品装配过程镜像到虚拟空间,并通过以虚控实的方式进行装配过程调控,同时有望打通复杂产品全生命周期的各个环节,全面管理全业务、全要素、全流程数据。将数据孪生车间应用于复杂产品装配能有效克服传统模式的弊端,使复杂产品的装配过程在数字孪生车间中产生颠覆性的进步。

参考文献

- [1] 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): 595-812.
- [2] GRIEVES M W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises[J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1/2): 71.
- [3] GRIEVES M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. *White Paper*, 2014, 1: 1-7.
- [4] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures

Conference
14th AIAA. Virgina: AIAA, 2012.

[5] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Cham: Springer International Publishing, 2016.

[6] 安世亚太科技股份有限公司. 数字孪生体技术白皮书 [EB/OL].(2019-12-20)[2020-03-18]. <https://www.peraglobal.com/phone/resources/index.html>.

PARE GLOBAL. Digital twin techology white paper[EB/OL]. (2019-12-20)[2020-03-18]. <https://www.peraglobal.com/phone/resources/index.html>.

[7] 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.

[8] 陆剑峰, 王盛, 张晨麟, 等. 工业互联网支持下的数字孪生车间 [J]. 自动化仪表, 2019, 40(5): 1-5.

LU Jianfeng, WANG Sheng, ZHANG Chenlin, et al. Digital twin workshop supported by industrial internet[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(5): 1-5.

[9] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.

[10] 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.

[11] 陈振, 丁晓, 唐健钧, 等. 基于数字孪生的飞机装配车间生产管控模式探索 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(12): 46-50, 58.

CHEN Zhen, DING Xiao, TANG Jianjun, et al. Digital twin-based production management and control mode for aircraft assembly shop-floor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(12): 46-50, 58.

[12] ZHANG Q, ZHANG X M, XU W J, et al. Modeling of digital twin workshop based on perception data[M]//Intelligent Robotics and Applications. Cham: Springer International Publishing, 2017.

[13] ZHANG H, ZHANG G, YAN Q. Dynamic resource allocation optimization for digital twin-driven smart shopfloor[C]//2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). New York: IEEE, 2018.

[14] 郭东升, 鲍劲松, 史恭威, 等. 基于数字孪生的航天结构件制造车间建模研究 [J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2018(4): 578-585.

GUO Dongsheng, BAO Jinsong, SHI Gongwei, et al. Research on modeling of aerospace structural parts manufacturing workshop based on digital twin[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2018(4): 578-585.

[15] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.

LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Huifen, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.

[16] 李伯虎, 柴旭东. 复杂产品虚拟样机工程 [J]. 计算机集成

制造系统, 2002, 8(9): 678-683.

LI Bohu, CHAI Xudong. Virtual prototyping engineering for complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(9): 678-683.

[17] 王小巧. 复杂机械产品装配过程质量自适应控制方法及支持系统研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.

WANG Xiaoqiao. Research on assembly quality adaptive control method and system for complex mechanical products assembly process[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.

[18] 王小巧, 刘明周, 葛茂根, 等. 复杂机械产品装配过程质量门监控系统与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2869-2884.

WANG Xiaoqiao, LIU Mingzhou, GE Maogen, et al. Quality gates monitoring system and key technologies for assembly process of complex mechanical products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2869-2884.

[19] 石博强, 段国晨, 申焱华, 等. 复杂机械系统时变不确定性设计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 80-84, 135.

SHI Boqiang, DUAN Guochen, SHEN Yanhua, et al. Evolution based uncertainty design for complex mechanical systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 80-84, 135.

[20] 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(4): 753-768.

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.

[21] 于勇, 胡德雨, 戴晟, 等. 数字孪生在工艺设计中的应用探讨 [J]. 航空制造技术, 2018, 61(18): 26-33.

YU Yong, HU Deyu, DAI Sheng, et al. Study on application of digital twin in process planning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 26-33.

[22] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.

[23] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7): 1345-1356.

LI Bohu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7): 1345-1356.

[24] 唐竞. 数字孪生在航空机电产品装配工艺中的应用研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(15): 22-30.

TANG Jing. Application of digital twin in assembly process of aviation electromechanical products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 22-30.

通讯作者: 胡秀琨, 助理工程师, 硕士, 研究方向为自动化装备、智能制造与检测数字孪生车间在复杂产品装配过程中的应用探索, E-mail: huxiukunm2016@163.com.

(责编 阳光)