DOI: 10.3901/JME.2019.17.110

数字孪生驱动的装配工艺设计现状及 关键实现技术研究*

郭飞燕¹ 刘检华² 邹方¹ 翟雨农³ 王仲奇⁴ 李少卓⁵

- (1. 中国航空制造技术研究院 北京 100024;
2. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;
3. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191;
4. 西北工业大学机电学院 西安 710072;
5. 北京万瑞思创科技有限公司 北京 100191)

摘要: 基于制造过程中的全数字量协调传递方式,通过“虚实融合、以虚控实”的手段,对数字孪生模型驱动的航空产品装配工艺优化-反馈-改进环机制进行了研究。分析了装配单元划分/求解/评价、孪生工艺模型构建、以及装配精度闭环控制等方面的技术内涵,阐述了国内外的研究现状及存在问题;考虑虚拟空间的设计与物理空间的装配等因素约束,提出数字孪生在装配工艺设计中的三项关键技术:① 基于“面向装配设计”(DFA)的装配工艺规划与评价;② 考虑真实物理拓扑关系的孪生工艺模型动态构建与分析;③ 面向装配现场的工艺优化—反馈—改进环机制构建,并给出具体的解决途径,从而拓展基于模型的制造技术内涵,将数字孪生落地应用,实现产品研发生产的闭环优化决策及产品研制模式的改变,提高装配准确性/一致性及装配效率。

关键词: 数字孪生模型; 装配工艺规划与评价; 真实物理特性; 接力传递; 装配偏差

中图分类号: V262

Research on the State-of-art, Connotation and Key Implementation Technology of Assembly Process Planning with Digital Twin

GUO Feiyan¹ LIU Jianhua² ZOU Fang¹ ZHAI Yunong³ WANG Zhongqi⁴ LI Shaozhuo⁵

- (1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024;
2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;
3. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191;
4. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;
5. Beijing Wonstrong Technology., Limited, Beijing 100191)

Abstract: Based on the entire digital coordination transfer process in manufacturing process, with the strategy of ‘fusion of virtuality and reality, control the reality with virtuality’, the optimization-feedback-improvement loop mechanism of assembly process that driven by digital twin model is studied. Firstly, the essence and technical composition of (1) the quantitative partition/solution/evaluation of assembly unit, (2) the construction of digital twin model, and (3) assembly precision controlling with a closed-loop are analyzed, and the research status and existing problems are summarized. Then considering the detailed constraints of design in virtual field and assembly in physical field, three key technology are proposed, i.e. (1) assembly process planning and evaluation with the thought of DFA, (2) dynamic construction and analysis of twinning process model considering physical topological relation, (3) optimization-feedback-improvement ring mechanism construction orienting for the actual assembly field. Then the specific solutions and possible innovation directions are given. With the above analysis, the connotation of manufacturing technology based on virtual model can be expanded. Finally, the closed-loop optimization decision of production activity and the

* 国家自然科学基金(51805502), 航空科学基金(2017ZE25005), 中国博士后科学基金(2018M631706)和国防基础科研项目 (JCKY2016204B203) 资助。20181024 收到初稿, 20190321 收到修改稿

change of product development mode are expected to be realized in product development and production, and the assembly accuracy/consistency and assembly efficiency can be improved.

Key words: digital twin model; assembly process planning and evaluation; real physical properties; relay transfer; assembly deviation

0 前言

装配作为产品研制过程精度控制最后的保障环节,在实际生产过程中通常占据着平均 45% 的工作量^[1]。为确保装配质量、缩短装配周期,在产品结构设计功能的基础上,将包含 n 个零组件的复杂产品 $P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 分解为易于装配工艺规划的、独立的、完整的子装配单元体集合,从而在不同的装配工序中和装配型架上并行地完成产品的装配,可达到降低装配难度、提高装配作业并行度、方便装配精度控制等目的^[2]。其中,零件是最小的装配单元,产品是最终的装配单元。为提升装配工艺性能,开展子装配单元的划分是进行合理装配工艺设计的基础性工作,其划分需要根据实际装配需求与工艺约束,面向具体的生产过程,考虑产品组成零部件属性和特征的约束结构、工艺装备等制造资源,以及装配定位稳定性与正确性、连接可靠性、装配操作并行性、工艺组件的装配顺序和装配误差累积传递方式等具体的装配工艺设计过程。与通用机械产品(如数控机床)或其他军工产品(如卫星、火箭等)相比,航空产品使用要求较高、结构复杂、零部件及连接件数量众多、且以大量的薄壁钣金零件与大型整体复材、机加制件为主,其装配工艺设计过程相对比较复杂,需要考虑的因素更为多样化。

随着基于模型的定义、模型轻量化、基于物理的建模等技术的日趋成熟,大数据、物联网、云计算等新一代信息与通信技术的快速普及应用,以“中国制造 2025”为代表的智能制造技术已经被列入国家实施制造强国战略的行动纲领,同时智能制造也是“2025”战略任务“推进信息化与工业化深度融合”中的一项重点工程。航空产品的设计和装配在加速走向数字化、智能化时代^[3-7]。生产中的工艺装备正处于满足“功能需求—性能需求—智能需求”的更新换代时期。同时,航空产品的制造模式也发生了三个显著的变化:① 模拟量表征向数字量表征转变;② 单一测量向复合测量表征转变;③ 质量检验及验收由被动式向装配过程实时主动控制转变。在此背景下,为保证装配质量,在开展实际装配工作之前的装配工艺设计阶段,需要首先采用产品理论模型进行工艺的仿真与规划,

划分装配单元并设计较优的装配序列,得到较优的装配工艺参数。

在实际装配阶段,虽然使用了大量的数字化检测设备与装配工装设备,实现了对几何量的精准控制与调节,但是由于产品形变、工装设备定位误差等物理量的存在及其状态变化不断累积等原因,使得产品的实际装配状态与理论数值之间存在差异,基于理论模型的工艺仿真结果与实际现场情况不具有 consistency,装配质量无法满足现代复杂(航空)产品高性能、高协调精度与长寿命等制造与使用要求。

自 2003 年密歇根大学的 MICHAEL 教授^[8]提出 Digital Twin 的概念雏形以来,现在对数字孪生的认识为:通过数字化的方式,0 数字孪生借助数据模型与物理实体间的数据交互,构建物理实体与其对应虚拟模型之间的关联,从而支持产品的研发、生产及业务管理过程科学的分析和决策,实现面向产品全生命周期的模型、数据及智能技术的集成。数字孪生是解决具体问题的一种技术手段,核心是使用动态集成的模型与数据,实现优化决策的目的^[9-11]。因此,在基于理论模型的装配工艺设计结果的基础上,通过“装”、“测”、“控”相结合的技术手段,结合生产现场的实际装配工况与实物制造过程中的大量数据信息,构建与装配现场的产品与工装完全对应和一致的虚拟模型,即工艺孪生模型(Digital twin model, DTM)^[12-14],用以实时模拟仿真与分析产品下一步装配过程中的行为与装配性能,进行装配工艺设计结果的闭环优化反馈设计,控制装配精度并指导装配现场操作,可为装配质量的一致性保障提供一种有效的解决途径。

将数字孪生技术(概念)的核心思想与装配工艺设计过程相结合,基于制造过程中的全数字量协调传递过程,借助“虚实融合、以虚控实”的手段,本文分析了面向理论数学模型的装配工艺优化设计技术、数字孪生模型动态精准建模技术、以及面向装配现场的装配精度主动控制技术等方面的内涵与技术组成,综述了国内外的研究现状及存在问题,从装配工艺优化-反馈-改进环机制的构建方面提出了三项关键技术,并给出其具体的技术解决途径,从而拓展基于模型的制造技术内涵,实现产品研发生产中各种生产活动的优化决策及产品研制模式的改变,提高装配准确度、一致性与装配效率。

1 国内外研究现状综述

考虑装配工艺规划设计对于装配工艺文件的生成及后续生产的重要指导作用,国内外学者对此进行了大量的研究。结合数字孪生思想,下面从应用层面和技术层面综述相关研究动态。

1.1 应用发展现状

航空工业被誉为现代工业之花,具有较高的装配难度与技术代表性。从作者所在的航空制造行业角度出发,在国外复杂航空产品的实际生产中,波音公司^[15]采用了三维实体建模和虚拟装配仿真技术完成B787的装配工艺设计,从三维数据集中直接采集所需的尺寸与非尺寸信息,用于测量、检验、装配,并及时进行必要的数据处理和分析,保证产品装配准确度和装配成品率,使得装配返工修配工作大量减少。空客公司^[16]已经在其多个工厂部署数字孪生,在A380、A400M的部件装配对接中,可建模并实施检测数万平米空间和数千个对象,通过实时在线检测,将理论模型与实测物理模型数据相关联,实现了基于实测物理特性的装配工艺优化。洛克希德·马丁公司^[17]创建了“数字线”的工作模式,采用数字纽带(Digital thread)技术,通过采集实体空间的多源异构动态数据,建立与现实世界中的物理实体完全对应和一致的数字孪生模型,在虚拟环境中进行仿真、分析和预测实物产品在现实环境中的演进过程和状态,此项技术获得了2016年美国国防制造技术金奖,且被列为2018年顶尖技术之首。美国空军研究实验室(Air force research laboratory, AFRL)^[18]基于数字孪生模型研究了飞机机体健康监测管理技术,计划在2025年交付一个新型号的空间飞行器以及与该物理产品相对应的孪生模型,其包括所有的几何数据和材料数据,如加工时的误差与材料微观结构数据等。此外,德国西门子公司^[19-20]致力于帮助制造企业在信息空间构建整合制造系统的生产系统模型,利用其工业互联网平台Mindspher,通过数字孪生仿真模拟工厂的实际操作空间,如生产线,通过非常真实而精确的仿真结果判断现实中工厂的各项情况,实现物理空间从产品设计到制造执行的全过程数字化。法国达索公司^[21]强调数字孪生不仅要基于物理产品的数字化表现,而且还要通过三维体验平台让设计师和客户在产品制造过程中与产品互动,进行产品测试,理解产品如何工作等。美国ANSYS公司^[22]提出通过利用ANSYS Twin Builder创建数字孪生并可快速链接至工业互联网平台,帮助用户进行故障诊断,确定理想的维护计划,降低

由于非计划停机带来的成本,优化每项资产的性能,并生成有效数据以改进其下一代产品。

通过近十年的建设,国内航空企业^[23]在装配工艺设计中,广泛以三维设计数字模型为制造依据,借助自动化装配与测量系统,从装配顺序、定位方法、人机工程及装配精度等方面进行了装配工艺过程的仿真与验证,在提升装配工艺可行性及保证装配质量中发挥了巨大的作用。基于数字孪生的设想,在通用航空制造中^[24],在工艺优化设计的基础上,使用以RFID、电子标签、条形码等为代表的电子标识技术,采用移动终端或无线射频扫描器识别电子标识的方式,采集并记录工艺准备信息、装配进程信息以及工时信息,并在工艺执行过程中出现问题时,通过移动终端上的反馈对话方式(语音、录像、拍照等)提交反馈信息,交由专业人员实时处理;此外,随着装配架次的增加、现场数据的增加,还可形成一套现场装配情况列表,为装配工艺的闭环控制提供数据基础。商发公司^[25]以某型航空发动机总装装配的低压涡轮单元体对接安装关键过程为对象,首先对环境、工艺过程中的物理对象建模,通过研究多线程的数据采集技术,使用多传感器实现模型与物理对象之间数据的映射与关联;其次,通过数据在虚拟仿真环境中的可视化展示与分析,实时预警及决策,并借助物理终端控制实现自动运输及上下料、多自由度对接、螺母拧紧等工序操作,提高了真实对接过程的可视性与无磕碰对接。但是,与国外相比,国内在以下方面的差距^[26]较为明显:装配现场存在大量“聋哑傻”装备,实际物理产品和设备工况等测量采集数据与理论模型数据分离,没有有效支撑二者融合的建模方法和相互匹配机制,致使对装配过程的控制较弱,无法形成一个闭环控制系统。所谓“聋哑傻”,是指不同种类的装备之间无互联互通,与外界没有交流,程序通信接口形同虚设,装配操作程序主要是手动输入;设备或工件出现问题,外界不能及时感知;无法根据现场数据、历史数据等信息进行自主学习,从而无法完成生产活动的各种优化决策。

1.2 技术发展现状

智能制造环境下,对装配工艺设计的研究,归根到底是精准控制装配过程,实现装配质量控制模式由被动修配式向主动控制式转变,从而为工艺的修正与完善提供依据。在技术层面,下面从装配工艺(单元)设计、孪生模型构建、装配精度控制等方面分析研究现状并指出其中存在的问题。

1.2.1 装配单元划分、求解及评价

在装配工艺规划的研究中,为使工艺的规划设

计结果能更好地适用于装配过程,降低装配规划难度,并获取较好的装配质量,国内外学者对装配单元的划分进行了大量的研究。装配单元的划分工作,是在产品设计模块划分的基础上,充分考虑装配工艺因素对设计结果进行反馈,从而达到降低装配难度、提高装配效率与质量的效果。

产品模块化设计是装配工艺设计的基础,具体是指在对一定范围内的不同功能或相同功能不同性能、不同规格的产品进行功能分析的基础上,划分并设计出一系列功能模块。其中,模块是模块化产品的基本组成元素,是具有某种确定独立功能的、具有接口结构的单元,通过模块的选择和组合可以构成不同的产品。ULRICH等^[27]认为模块划分首先应考虑功能模块到结构模块的映射关系,其次,还应规划好产品功能和结构的分布、合理安排两者的映射关系,并要尽可能遵循功能独立和结构独立的模块划分原则,从而提高模块的通用性能。GU等^[28]考虑模块的回收性、重构性和升级性等多项性能,提出面向产品全生命周期的多目标模块划分方法,但由于此方法需要构造产品全生命周期过程中各个阶段的相关矩阵,并且设计者的经验对划分结果会产生直接影响,因此要想实现计算机辅助模块化设计较困难。LEE等^[29]利用模糊层次分析法把复杂问题分解为简单问题,并计算出各个影响因素的权重值,构造出相应的模块判断矩阵,提出了产品模块划分决策支持算法。PAHL^[30]通过对产品的功能结构图进行分析,根据模块制造费用和成本效益对产品的零部件进行聚类来完成产品模块的划分。STONE等^[31]提出了启发式模块创建方法,考虑产品的能量流、物料流、信号流以及力等因素,依据三种判断准则:支配性流、分支流以及转换传输流来规划产品模块。CHEN等^[32]将接口分为内部接口和外部接口,探讨了模块化产品的接口与产品创新设计之间的关系,建立了接口的理论矩阵。JONATHAN等^[33]指出,面向产品族的产品平台规划策略可以分为两种类型,即自顶向下法和自底向上法,并重点对自顶向下法的规划过程进行了研究。高浪等^[34]提出机电产品多策略模块划分方案,采用多策略质量功能展开法,构建主参数分布模型和演进模型,并采用基于流准则的功能模块划分方法初步划分模块,针对多策略设计目标分析模块与主参数的关系,提出分离准则和实例设计准则对划分结果进行评估。王鹏家等^[35]利用AHP法及谱系聚类算法,结合卧式数控机床模块的划分,从功能角度出发,通过相关度矩阵得到距离矩阵,运用谱系聚类方法对距离矩阵进行聚合,得到模块划分结果,

并以此利用VB及Matlab开发了数控机床模块划分系统。毛雨辉^[36]将聚类算法用于雷达导引头的功能模块划分,首先根据导引头设计的实际过程,将基于平均算法的划分方法改进为最短距离算法,并给出功能模块间的相异度评价方法。程贤福等^[37]在建立产品设计矩阵的基础上,构建了产品设计关联矩阵,然后利用可拓聚类算法对该关联矩阵进行聚类运算,并用独立公理对所划分的产品模块进行功能独立性分析。通过以上的分析可知,产品设计模块的划分,更多是从结构特点、产品功能及成本划分等角度出发,快速实现产品的重构,但较少考虑制造、装配过程中的工艺因素,导致在实际生产中产品的可装配性能较差。

而装配是产品设计制造全过程各环节中工作量最大、耗时最多的环节。在产品设计模块划分的基础上,通过相关性分析和聚类分析,即各单元之间的关联程度/相互影响程度,为保证各个装配单元之间的独立性和完整性,LI等^[38]提出了一种新的装配单元划分方法,利用CAD软件工具的自动可编程接口,直接从给定的装配模型中提取装配信息,经处理生成组件设计结构矩阵(Design structure matrix, DSM),使用层次聚类方法,利用组件DSM构建相关性矩阵,获得模块划分结果。HEMEN等^[39]采用割集算法来求得产品所有装配序列的AND/OR图,通过对联接图进行循环分解,生成所有可能的子装配体,但是当产品很复杂时,容易出现“组合爆炸”问题。LEE等^[40]在装配连接图的基础上定义了节点间分离自由度的概念,根据一系列规则合并节点,得到不同大小的合理子装配体。TSAIA^[41]从并行工程的角度出发,在产品设计的阶段考虑其装配和制造等因素,按照功能相关度采用模糊聚类方法进行功能模块的划分,并根据系统的装配和制造复杂度对模块划分结果进行优化。WANG等^[42]依据具体的装配约束,给出了装配单元划分的评价指标,通过分析装配关系的决策值和给定条件,提出了基于决策模型和模糊层次分析法的装配单元划分方法。邹成等^[43]提出了一种基于工艺关联度的装配单元划分方法,在工艺分离面几何粗略划分的基础上,针对两侧无法利用几何位置确定其装配单元归宿的零件,利用灰色区间关联度分析法,进一步确定其所属的装配单元。靳江艳等^[44]总结了装配单元划分的影响因素,然后基于广义装配关系,构建以装配关系强度和装配并行度为目标的数学优化模型,并采用免疫克隆算法进行聚类优化,得到合理的工艺划分结果。此外,冯毅雄等^[45]提出基于粗糙核聚类算法的模块化产品方案求解方法,具体包括

利用粗糙集对希尔伯特空间内的零部件样本进行初步分类,并利用改进的非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm, NAGA)求解模块划分目标函数,获得最优的模块单元划分方案。郑维强等^[46]构建了以模块内平均模糊聚合度高、模块间平均模糊耦合度低为驱动目标的数学规划模型,并发展了一种基于模糊非支配解的多目标离散粒子群算法,采用模糊逼近理想解排序法优选所求得解。张磊等^[47]从产品结构、功能和装配工艺三方面评价零件间的相关性与非相关性,引入直觉模糊集理论处理评价数据的主观性和模糊性,采用模糊聚类方法对零部件聚类,并通过检验装配单元干涉性,得到最优的装配单元划分方案。

以上研究在产品设计结构和功能的基础上,在装配单元/模块划分过程中考虑了产品的结构与功能相似性,以及装配工艺过程中的定位与连接等约束因素,构建了不同的目标函数,并结合智能优化算法,为装配单元集的划分提供了丰富的思路和实践性的指导,但划分过程多依赖于主观数据,缺少定量计算,在单元间的相关性关系解耦方面有待加强;而且划分后的装配单元是否同时满足装配定位正确性/稳定性以及装配准确度要求等评价方面的研究,也缺乏相应的讨论;另外,考虑到装配返修及装配过程的控制等因素,装配单元的划分过程,与装配现场的结合性也亟待加强。综上,为获得优化的装配工艺参数,需要在产品设计的基础上,建立一种基于装配现场的装配工艺设计优化—反馈—改进环机制。

1.2.2 孪生工艺模型构建

可装配性设计^[48-49](Design for assembly, DFA)是一种针对装配工艺的设计思想和方法,一方面是为了使航空产品的结构单元设计结果具有良好的装配工艺性,使得在产品设计中充分考虑其装配环节的影响,在满足产品性能与功能条件下改进产品装配结构;另一方面可达到简化装配过程、避免不正确的定位及简化定位、提高航空产品模块化和标准化水平的目的。考虑到实际装配过程中出现的定位偏差、产品变形、误差累积等问题,在第 1.2 节中,基于理论数模的装配工艺设计,虽然能够获得优化的装配工艺参数,在一定程度上可保证装配/协调准确度。考虑到新一代飞机型号的制造与装配要求提高了近一个数量级,上述考虑各种因素的工艺优化措施已经无法满足新一代飞机高质量装配要求,迫切需要综合真实的装配状态,制定基于实际物理产品的装配工艺方案。鉴于数字孪生模型^[50]的技术特点,可以发现,产品数字孪生体同样支持在产品设

计阶段就通过建模、仿真及优化手段来分析产品设计结果的可制造性,同时还支持产品功能和性能的测试与验证,并通过产品的实际制造数据来优化和改进产品或工艺的设计。数字孪生的应用效果可看作是传统 DFA 设计思想的一种演化和扩展,将理论数模与装配现场相结合,可为产品装配工艺规程的制定提供优化的工艺参数。

自 2017 年以来,对于数字孪生技术的研究呈现出了爆炸式的增长。GRIEVE 等^[51]提出数字孪生的实质是把数字信息嵌入在物理系统本身内,并是在整个系统生命周期内与该物理系统链接信息的“双胞胎”,可减轻复杂系统中不可预测的情况。SCHLEICH 等^[52]把生产过程管理中 Digital Twin 的 reference model 方法进行归纳整理,认为数字孪生应具有 4 种特性,即互操作性、保真度、可伸缩性、可扩展性。SOEDERBERG 等^[53]在生产中探讨了如何从设计、生产前过程到生产过程中,对产品物理几何尺寸使用数字孪生方法进行实时几何保证。MORRIS 等^[54]从产品研制生态系统的角度出发,将其分为产品设计、生产制造与业务三个维度,通过三类数字孪生的有机结合,改善产品研制中依靠生产现场的试制、调试和整改过程。此外,在孪生模型的构建中,有限元模型、异构系统间的交换数据模型^[55]、架构参考模型^[56]、适用于产品物理和性能特征精确再现的产品开发精确虚拟模型^[57]、多物理场模型^[58]及全参数虚拟模型^[59]等已经应用于使用数字孪生方法的建模以及未来模型在数字孪生领域如何进一步的应用探索中。

在 2019 年 2 月 21 日于北京国家会议中心举办的工业互联网峰会上,李心悦等^[60]提出数字孪生是工业互联网和智能制造发展的一个自然结果,同时,数字孪生体是实体或逻辑对象在数字空间的全生命周期的动态复制体,基于丰富的历史和实时数据和先进的算法模型,用来实现对对象状态和行为高保真度的数字化表征、模拟试验和预测,完成对物理和逻辑空间的对象深入的认知、正确的推理、精准的操作,最后还是回到操作这个层次。为实现数字孪生的普遍应用,刘青等^[61]认为数字孪生模型是数字孪生研究的核心领域之一,未来的研究重点是如何将不断涌现的各不相同的数字孪生体的外部特征和内在属性归纳为可集成、可交互、可扩展的模型,便于更高效地实现信息在物理世界和数字世界之间流动。庄存波等^[62]回顾了数字孪生体的产生背景,阐述了其技术内涵,并给出了孪生体在产品设计、制造及服务阶段的实施途径。按照从基础数据采集层到顶层应用层,刘大同等^[63]将数字孪生技术体系

分为四个层次,即:数据保障层、建模计算层、数字孪生功能层和沉浸式体验层,此外,也提出了数字孪生中的多项关键技术,比如:多领域多尺度融合建模、数据驱动与物理模型融合的状态评估、数据采集和传输、全寿命周期数据管理、VR呈现及高性能计算等。在通用机械领域,面向生产现场,考虑装配过程物性化与装配要素多样化,刘检华等^[64]提出了从过程、精度和物理属性的角度实时地模拟装配现场和装配过程,为实现结构件与线缆管路的科学装配和装配质量预测提供了有效途径。为了在实际安装之前,仿真和验证实际装配结果,孔庆超^[65]提出了一种理论CAD模型和高密度测量数据互融的方法,可有效处理大尺寸航天结构件装配问题。在航空制造领域,于勇等^[66]研究了基于数字孪生模型的产品构型管理方法和包含产品构型信息的产品数字孪生模型本体表达,为全三维研制模式下的产品构型管理提供了可行的技术方案;陶飞等^[67]基于数字孪生提出了孪生车间的概念,并阐述了其系统组成、运行机制及关键技术等;陶剑等^[68]利用数字线索和数字孪生开展复杂产品生命周期业务过程建模与仿真、动态预测和评估,以期实现数字空间与物理空间虚实映射的产品规划与定义、模拟与分析、验证与确认的业务闭环。在其他领域,比如物流智慧工厂、3D打印、健康监测、资产评估、汽车制造、自动驾驶、医学工程、超高压电力网格及电力控制等,刘青等^[61]就其发展与应用现状进行了综合分析。此外,在数字孪生技术体系的指导与国家自然科学基金委的资助下,大连理工大学的孙清超团队^[69]正在开展孪生模型驱动的旋转机械装配性能协同控制方向的研究;暨南大学的屈挺团队^[70]正在开展数字孪生控制体系驱动的联动式生产运作系统在线优态控制方向的研究;山东大学的胡天亮团队^[71]也在着手于基于数字双胞胎的数控机床智能运行维护方向的研究,并已从数控机床Digital Twin模型的构建方法和Digital Twin的智能感知策略两方面提出了许多有价值的新理论和新方法;郑州航空工业管理学院的张海军团队^[72]在基于数字孪生的复杂产品混流装配线网络平衡动力学与优化方向也开展了较为深入的研究。

虽然数字孪生技术被认为是实现信息物理系统的核心关键技术,但数字孪生体的构建目前尚处于探索阶段,在国外主要侧重于数字孪生的概念研究、产品使用维护以及工厂运营,基于数字孪生的制造模式尚未得到根本实现。如何实现复杂动态的实体空间的多源数据实时准确采集、有效信息提取与可靠传输是构建数字孪生模型的前提条件,从装配工

艺设计与优化的角度出发,尚未解决的技术问题主要包括:①孪生模型的动态建模、重构、表达与解析技术;②物理状态的识别、快速建模结果与物理实体的虚拟映射技术;③模型精确匹配过程中,几何物理拓扑关系的修正及与理论模型的融合方法;④基于传感数据的实时性仿真、分析及可视化呈现等。

以上四类问题的存在,使得此项技术在国内尚未落地,研究成果相对较少且缺乏系统性。但在已经开展的装配工艺研究中,却有很多符合数字孪生思想的工作已经开展:张微^[73]提出了一种基于实际构件的预装配技术来真实地模拟现场装配,对实际装配过程中出现的干涉进行预测,实现壁板位姿的数字化调整以及装配间隙的补偿;BAO等^[74]为了实现一次装配成功率,提出了一种三维几何模型和海量检测数据融合的虚拟装配技术——“半实物装配”,通过虚物实化操作,使虚拟模型无限接近实物样机,通过实物虚化操作,将低维度的测量数据转换成高维度的CAD模型,使其具备精确的拓扑关系;GUO等^[75]提出了“以数字协调模型为基础、以产品装配误差传递为导向、以测量数据为依据、以动态反馈调整手段、以协调尺寸一致性为核心”的全数字量闭环协调控制方法,此种工作模式对于装配工艺的优化设计具有一定的指导作用,但还无法实现数字孪生模型所具有的“虚实融合、以虚实”功能。

1.2.3 装配精度控制

产品装配的根本问题之一是如何保证装配精度。在用数字孪生模型进行工艺优化时,装配现场的质量要求显得尤为关键。从组合学观点来看,若一个完整的产品有 N 个装配单元需要装配,在理论上,就有可能存在 $N!$ 种不同的装配定位方式,装配顺序也会呈现多样化。在具体的装配过程中,装配体之间的装配顺序不同,会引起零部件上的配合特征在装配过程中对应不同的定位方式,配合接口处也会产生不同的变形误差等,这些因素产生的误差在装配过程中不断的累积融合,最终对装配偏差产生影响。因此,基于数字孪生模型中定义的产品与工装设备实际状态信息,探究不同的装配顺序与装配偏差累积计算结果之间的关系,通过“以虚实”的具体措施,将数字孪生落地应用,对实现装配工艺设计结果(参数)的“优化—反馈—改进”闭环控制具有重要的意义。

影响装配精度的误差源主要分为三类:①零件在加工过程中产生的制造误差;②零件装配过程中产生的定位误差和配合误差;③零部件的装配变形

误差。在基本误差源的建模中, 基于小位移旋量理论, LI 等^[76]和 YANG 等^[77]用 GD&T 完成了公差建模。GUO^[78]描述了各类几何公差的统一误差模型, 并得到了控制点沿不同方向的偏差分布。根据 ANSI 或 ISO 标准, FRANCIOSA 等^[79]根据给定的一组公差规格自动计算了平面或圆柱形特征的误差变动参数, 并提出了一种适用于刚性装配体的通用公差分析方法。在这里指出, 仅仅考虑从数字孪生模型中获取的零件尺寸误差允许范围值, 不足以计算最终装配偏差。这是因为装配过程是离散连续的, 上述各误差项将彼此耦合, 并随着制造流程向下流动而累积, 具有一定的扩散效应, 使得误差累积传递值分布范围较大。为了对装配误差进行建模, LIU 等^[80]考虑了各种类型的偏差源, 提出了多级装配过程中三维偏差传播的状态空间模型(State space model)。利用误差流分析理论(Stream-of-variation analysis, SoVA), HUANG 等^[81]建立了三维单站位和多站位偏差传递的数学模型。此外, 基于微分运动矢量(Differential motion vector)的齐次变换, DU 等^[82]提出了适用于多级车削过程三维误差变化传播建模的通用框架。上述研究成果为装配误差建模提供了有效的方法, 但基本上主要基于刚性假设, 只考虑了零件的几何尺寸、位置制造/装配偏差。对于大多数航空/航天部件和具有弱刚度的部件, 在每个装配过程中的变形却是不可避免的。利用上述方法, 不能正确、有效地对装配误差及变形传播进行建模。因此, 需要对装配工艺过程中所涉及的误差信息进行建模, 并进行精确感知。

考虑到变形误差的存在, BAKKER 等^[83]在翼盒的自动化装配过程中, 分析了零件的柔性因素, 并采用偏差流方法(SoVA)对装配偏差进行了建模, 得到了上下壁板之间的最大修补量, 完成了装配工艺的仿真并保证尺寸质量。CHEN 等^[84]针对仅考虑零件几何误差计算装配偏差的不足, 运用一阶摄动理论推导了柔性装配偏差的协方差模型, 结合有限元仿真计算, 提出了面向几何误差耦合作用的装配偏差统计分析方法。CHENG 等^[85]通过分析定位误差与变形误差之间的耦合和作用关系, 研究了大型壁板自动钻铆误差的分析方法。CAI 等^[86]在钣金零件的装配过程中, 基于影响系数法, 提出了一种融合刚性位移偏差和柔性变形偏差相结合的装配偏差完整计算模型。DAS 等^[87]提出了一种装配传递函数(Assembly transfer function)方法来建模和模拟具有非理想与柔性特点的零件的装配过程。FRANCIOSA 等^[88]提出一种基于有限元模型的计算工具, 用于统计分析在装配过程中出现的柔性变形。

为更好评价三维曲面的装配尺寸质量, CAI 等^[89]利用微分运动矢量和齐次变换矩阵, 提出了一种基于影响系数法的刚柔混合变分建模方法; WAN 等^[90]通过对产品关键特性与工装关键控制特性之间关系的解析, 利用 CAD 几何参数敏感度进行了容差优化分配过程。为了降低建模的复杂度, LIN 等^[91]将柔性零件分解成若干子结构, 提出了基于有限元的偏差传播模型 DPM, 但对于具有可变结构的复杂装配体, DPM 的应用范围有限。此外, 为了提高柔顺变化的计算效率, CAMELIO 等^[92]利用主成分分析和有限元分析对柔顺零件的装配变化进行了预测。

综上所述, 利用上述变形误差的各类数学模型与装配现场精度信息的感知结果, 与刚体假设相比, 装配误差的预测计算结果更为准确。然而, 虽然有数字孪生模型中精准数据的支持, 上述研究普遍将装配阶段不同误差项之间的关系简化为线性关系, 没有深入分析装配偏差与变化源之间的非线性传递积累特性。

在装配误差的非线性累积传递中, WANG 等^[93]基于弹性变形理论与有限元仿真, 以装配变形产生的应变能最小为目标, 分析关键特征点位移变化, 采用非线性分析建立装配变形预测模型。LI 等^[94]综合形状误差因素与力学平衡方程, 采用自然模态分析与动态子结构法, 建立基于基本变形模式(误差场)的误差传递模型, 揭示了制造误差对产品外形误差的影响规律。XIE 等^[95]首先通过基于误差空间的迭代优化采样、误差的 Kriging 回归拟合计算及有限元仿真分析等组成的离线训练过程, 得出误差指导调整量, 此后又结合装配测量结果, 在线反馈确定最优控制行为, 完成装配误差的非线性累积补偿。WANG 等^[96]基于测量粗/精配准分析, 建立装配间隙计算模型, 并对机翼壁板姿态评价调整, 精确控制配合间隙。王皓等^[97]从制造与协调准确度两个角度构建大部件对接装配中最优匹配位置的综合评价指标体系, 提高了协调质量。朱永国等^[98]利用微分变换, 建立了定位器制造误差与中机身位姿误差间的显式函数关系, 并运用间接平差法和加权最小二乘法, 耦合计算多定位器动态误差及其补偿量, 保证了对接协调准确度。

考虑到装配与协调误差传递机理的复杂性, 以上研究虽然从实际装配现场的装配过程与真实物理状态入手, 符合数字孪生的优化理念, 但较少考虑: ①装配变形误差与定位误差间的耦合关系; ②由协调基准转变产生的误差环节; ③装配过程结合面处的“二次形变”现象(在装配连接面初次变形结果的基础上, 随着后续零件的装配, 连接界面会再次发

生形变)对装配偏差累积计算的影响;④协调尺寸链的非线性构建等协调性控制的关键问题,导致协调误差理论计算结果与实际装配现场有较大差异,无法通过产品与工装设备的实际精度状态数据来优化和改进产品或装配工艺的设计,从根本上提高产品的实际装配准确度较困难。

为了实现利用数字孪生技术对生产过程进行反馈促进的功能,在具体的装配顺序与装配精度关系解析中,张芹^[99]基于粒子群遗传算法,对数控机床装配顺序进行了优化,并在模块化思想的基础上对装配序列规划方案进行了评价。LI等^[100]将机床的功能结构分解至最基本的元动作层,并以元动作装配单元为对象分别对数控机床的装配精度进行深入研究,建立装配质量模型,对装配质量进行诊断和评估。周思航等^[101]提出了针对机床装配精度的评价体系,采用了尺寸变动度对数控机床的装配精度进行评价,实现了在不同装配需求下对装配序列的择优。李敬花等^[102]采用了遗传模拟退火融合算法进行了装配偏差的求解与优化,实现了对船舶装配序列的优化,对提高装配序列下的装配精度有着重要意义。

此外,在装配偏差的优化与控制中,TANG等^[103]通过基于误差源的敏感度分析,研究了面向精度控制的飞机装配工艺设计与快速优化技术,提高了装配工艺的可靠性。BI等^[104]从定位支撑布局优化、检测点布置优化、变形预测与校正等层面对壁板装配变形的有效调控展开系统深入研究,完成了大型飞机壁板的装配变形控制与校正。WANG等^[105]从系统层面出发进行装配质量控制,通过研究装配过程中上下游工序和质量控制点之间的相关关系,实现了复杂机械产品装配过程质量自适应闭环控制。王跃^[106]从装配效率、装配精度、装配成本、人机工效学4个方面入手,鉴别出27项影响飞机装配工艺性的子影响因素,基于支持向量机和模糊数学的理论,对装配方案进行了工艺性评价。唐文斌^[107]通过对装配偏差的“Kriging-QMC”两阶段累积计算分析,建立了装配容差协同分配模型并完成了优化求解。凤俊杰^[108]对复杂机械产品装配过程数据采集技术和装配执行过程进行了研究,通过分析装配过程中的过程监控技术、建立装配执行过程模型,对装配过程的质量数据进行分析与监控。窦亚冬^[109]建立了适用于机翼多个区域装配间隙的协调优化模型,提出一种基于最优位姿的装配间隙控制方法,虽然能够实现装配间隙的主动协调控制,但忽略了真实的间隙,其几何形态所具有的随机性特点。

考虑到制造数据几何指数的快速增长,为充

分发挥数据中所包含的价值,需要加强数据挖掘机理等方面的研究,包括基于大数据分析的知识建模、知识提炼和知识优化方法,以及基于学习的工艺优化决策方法,参数动态调整与预测方法,从而实现装配工艺参数的迭代优化与持续改进。在数据相关性解耦与维数降解中,WEN等^[110]通过模糊聚类获取敏感特征子集,并提出小波包降噪与经验模态分解联合的潜在故障特征挖掘方法。ZHOU等^[111]提出基于随机森林的递归聚类消除特征选择方法RF-RCE,用于高维小样本数据特征的准确分类与稳定泛化选择。ZHANG等^[112]提出嵌入特征选择方法K-split Lasso来降维,通过过滤和嵌入,从高维数据中选出具有强类别区分能力的特征子集,解决过拟合与复杂度高问题。在装配(协调)误差溯源与分类识别中,TANG等^[113]提出了基于蒙特卡洛模拟的全局灵敏度分析方法,通过结果排序,实现面向精度控制的装配误差溯源分析,但计算效率较低,且需求解出显式的误差传递关系;王伟等^[114]针对机床参数调整问题,分析机床动态参数集与试件轮廓误差间的映射关系,统计各指标的误差影响区域,建立加工误差溯源模型,但其评价指标的权重系数过多依赖于主观因素。为充分挖掘统计数据信息,机器学习在误差溯源诊断中得到了应用,BERUVIDES等^[115]在汽车多工位非线性装配的失效模型识别中,提出增强型学习框架,利用多物理变分误差模型产生随机失效模式数据库及误差响应工具包、采用Q强化学习与人工神经网络实现失效模式的自适应识别;GORJIAN等^[116]运用相关分析选取敏感特征作为输入,考虑多个变量间相互影响与制约,构造兼顾多变量回归和小样本预测双重优势的多变量支持向量机,实现小样本数据潜在信息的最大挖掘;张发平等^[117]根据盲源信号分离理论,建立基于负熵固定点算法的误差分离模型,实现相近尺度系统加工误差的分离,并利用主成分分析确定误差源数量。考虑到航空制造行业的特点,其生产数据具有“小样本、高维数、相关性强”的特征,装配质量数据的抽样需要最大限度地代表装配过程中的误差累积结果。此外,结合航空制造的多层次性、多决策变量属性特点,整体溯源诊断模型的求解效率也是需要关注的关键问题。

2 数字孪生在装配工艺设计中的关键技术及解决方案

为实现数字孪生在装配工艺设计中的落地应

用,需要基于制造过程中的全数字量协调传递过程,融合实体空间的实时动态数据,构建能精确描述实体产品相关属性和行为的孪生工艺模型,建立基于数字孪生模型驱动的航空产品装配工艺优化—反馈—改进环机制。融合数字孪生的装配工艺设计亟需在以下三个方面进行突破。

首先,需在产品设计 MBD 模型的基础上,提出一种面向装配过程的模块单元划分的定量建模、求解及评价方法,以完成基于理论数模的装配工艺设计,得到优化的工艺参数,比如装配顺序、定位夹紧方案、零部件容差优化分配数据等,确保制造装配过程和制造装配工艺方法的有效性。

其次,借助数字化的装配系统与数字化的检测/测量系统,感知采集在实物制造/装配过程中的多源异构实物测量数据,包括真实配合精度状态、有限元仿真分析数据、装配实例物理变形仿真与感知数据、检验测量数据等信息,动态构建孪生工艺模型,完成物理空间和虚拟空间中数据与信息的关联与互动,即“虚实融合”过程。

第三,基于孪生工艺模型中的:① 历史与经验数据、② 产品实物的装配物理变形与配合精度状态的实时传感测量数据,通过基于真实物理特性的装配偏差的接力传递计算,研究装配顺序与装配精度间的关系,并开展虚拟仿真验证,以此评估装配可行性。通过生产过程虚实模型的对应,借助“以虚控实”的闭环控制手段,形成相关装配工艺优化决策信息,不仅可对装配工艺设计参数及产品设计 MBD 模型进行优化反馈,在设计研发阶段改善产品质量;还可对产品的下一步装配过程进行精确控制,直到满足要求。从而实现质量与数据信息的双向流动,即利用装配现场采集的数据分析以进一步改进产品研制的流程:数据向上传递至设计 BOM 和制造 BOM 中,可以优化产品设计和工艺设计,数据向下传递至 MES 系统中,可以在装配现场提高装配准确性/一致性及装配效率,从而为生产模式的转变提供技术支撑,具体方案如图 1 所示。

2.1 基于“面向装配设计”(DFA)的装配工艺规划与评价

基于“面向装配设计”(DFA)思想,对装配工艺进行规划与评价,可以在不同的工作场地和装配型架上并行完成产品的装配,显著降低装配难度并提升装配工艺性能。依据产品的设计 MBD 模型及其模块单元划分方案,为使产品的装配工艺方案具有良好的可装配性,从以下四个方面进行阐述,具体路线如图 2 所示。

图 1 数字孪生模型驱动的装配工艺优化—反馈—改进环机制

图 2 基于 DFA 的装配工艺规划与评价

(1) 建立面向装配工艺约束的装配模块单元定量划分模型。基于产品的结构、功能及组成零部件间的装配关系,总结分析装配单元划分的影响因素,如图 3 所示。此后,采用零部件接口特征属性值的比例系数、模糊评价与熵值计算方法,将连接可靠性、结构相似性与装配并行度作为子装配体单元划分的定量计算指标模型。其中,连接可靠性是指零部件 p_i 和 p_j 在规定的条件下和时间内,完成规定连接功能的能力,可用连接强度 L_{ij} 表示。一般来说,焊接的连接强度较最高,销或键的连接强度较低。结构相似性指零部件间的相似程度,包括属性和特

征两方面, 具体为拓扑结构、几何形状、尺寸、连接方式、功能等, 可通过产品零部件特征属性值的比例系数, 计算指标矩阵中具体的行列数值。装配并行度定义为两装配体装配难度间的一致性, 影响装配难度的因素主要有: ① 零件本身的因素, 如零件形状、尺寸、重量以及材料等; ② 定位连接因素, 如定位方式、连接方式、零件之间的装配类型等; ③ 装配工艺的影响, 如装配路径、装夹工具等, 其定量计算可综合采用模糊评价算法与熵值计算算法进行建模, 形成优化目标函数 $y=f(x_1, x_2, x_3)$ 。

图3 装配单元划分及评价

(2) 基于相关性解耦分析理论, 优化求解装配模块单元划分模型。对定量计算指标进行加权组合, 将装配单元划分问题转化为最值优化问题, 建立起优化模型。Copula 一词的本意是交换、连接的意思, Copula 理论由 SKLAR 在 1959 年提出, 其本质是一个“连接”多维联合分布及其边缘分布的函数, 此函数能将多维随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的联合分布 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与它们各自的边缘分布相连接, 且不需要对边缘分布作任何假设, 也可将随机变量的边缘分布与相关结构分别进行讨论, 使得能够完整地刻画变量之间的相关性结构, 使得多元概率的研究变得更为简单^[118]。近十年以来, Copula 技术在金融、保险、生物、医药等领域发展非常迅速。因此对装配单元划分目标函数的求解中, 可采用 Copula 相关性解耦分析理论, 求解目标函数 $Y=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$, 从而得到多个优选的装配单元划分方案。

(3) 建立面向装配工艺过程的子装配模块单元评价体系。基于几何因素、装配受力因素、装配体自由度约束判断及偏差的耦合等因素, 完成零部件间的定位稳定性、定位正确性、装配操作空间以及装配精度影响因素等评价指标的建模, 对装配单元划分方案进行综合评价, 建立面向装配工艺性能的定量评价技术体系, 优选出面向装配工艺过程的划分方案, 完成基于理论 MBD 模型的装配工艺设计与规划。其中, 定位稳定性在宏观上可从零件受力

支撑方面寻找临界稳定支撑的平衡条件; 在具体的定位中, 在满足配合约束功能的前提下, 通常将配合约束转化为定位点约束, 6 个定位点在主定位面、次定位面与第三定位面上构成“3-2-1”定位形式, 基于自由度分析选取定位点使零件处于静力平衡状态, 可采用夹具定位点布局领域中的“几何稳定性”作为选择定位点的依据, 一般主定位面上定位点组成的三角形面积越大、投影距离越大, 几何稳定性越好。此外, 在装配过程中, 零部件会受到定位元件夹紧力、自身重力以及其他装配力(夹紧力、制孔力、回弹力等)的作用, 此外, 考虑到装配受力因素的定位稳定性主要靠静力平衡来体现, 其也需要计算在内。定位正确性是指工件的自由度是否被完全约束, 可通过求解定位雅可比矩阵的秩来反映, $k=\text{Rank}(J)=6$ 是完全定位的充要条件。对于装配精度的评价指标, 将在后续的章节中进行详细说明。

(4) 完成详细的装配工艺设计及仿真。综合考虑后续物理空间装配现场可能需要的资源因素, 比如工艺装备、相关工具等, 导入 DELMIA 软件下的 DPE 模块, 进行产品的装配层次设计, 并根据装配顺序设计零部件的工序流程, 构建面向装配现场的 P-P-R(产品、工艺操作和资源)装配工艺结构模型, 仿真夹具的操作动作及产品的装配工序流程, 验证产品装配的工艺性, 最终生成面向装配现场的可视化工艺文件。

2.2 考虑真实物理拓扑关系的孪生工艺模型动态构建与分析

考虑面向装配现场的装配工艺仿真优化与准确度保障的数据支撑要求, 基于产品设计 MBD 模型与装配单元划分结果, 从以下四个方面对关键技术“考虑真实物理拓扑关系的孪生工艺模型动态构建与分析”进行突破, 从而实现数字孪生中所具有的“虚实融合”效果, 具体路线如图 4 所示。

图4 孪生工艺模型的动态构建与分析

(1) 定义孪生工艺模型的组织要素及描述模型属性。基于装配单元接口间的精度属性信息, 计算其质量损失, 定量筛选识别用于构建孪生工艺模型的关键装配特征^[119], 从而保障模型轻量化的需求,

同时还可克服关键特征的筛选依照专家经验进行确定的弊端,如在产品结构复杂时难以有效判定,造成经常多选,使得在实际生产中难以保证。与这些特征相关的属性数据及装配参数是需要感知采集的对象。

在基于数字孪生的产品构型数据定义与反馈过程中,实现基于语义的产品模型表达是关键^[66]。

OWL 语言是一种本体建模语言,可以定义 OWL 类及 OWL 属性,实现领域本体构建。因此可采用 OWL 语言描述特征的语义信息,通过本体建模开发工具实现孪生工艺模型中组织要素的定义及属性描述,建立数据之间的关联关系。其中,几何特征和构型数据为子类的组织形式,可定义产品信息与尺寸公差信息,以及产品零部件的构型状态。

(2) 提取装配过程中的实作(As-built)^[66]物理数据信息。在产品的实物装配过程中,需对各类繁杂的实物信息进行感知,形成数字信息,作为孪生工艺模型中的数据信息来源。基于多种数字测量设备(三坐标测量机、温度/振动/角度/速度/力/位移传感器、激光跟踪仪等)的优化布置,构建感知测量场,并建立 3D 虚拟仿真平台,以实现实时数据与平台模型交互。对于不能实现自动采集的生产工位,装配现场的数据,可通过现场工位机、移动终端、条码扫描枪等数字化设备进行数据采集。在装配测量场中,根据装配工艺过程,可通过在线传感测量及监控的信息采集方式^[26],实时感知设备类数据(设备运行状态信息、实时工艺参数信息、故障信息、维修/维护信息等)、生产过程数据(装配工况数据)及质量数据等信息类型。对于质量数据,其主要包括:现场装配过程中的真实配合精度状态信息、物理变形信息及关键装配特征的位置精度信息等。

此后,在数据的集成、转换过程中,可采用小波分解或模式分解等方法进行测量数据的降噪与不同数据类型的归一化处理,在长度、时间尺度及耦合范围三个方面满足要求,不仅使得传感器采集的数据要求与实际系统数据高度一致,还可去除或者减少其中的无效数据。此外,针对异构数据各自的特点,还可综合采用诸如定制转换工具、集中复制数据、数据集成中间件等方式,融合异构数据源。在以上步骤的基础上,便可修正关键装配特征状态及精度属性信息,提取装配过程中有效数据信息,为建立精准的数字孪生系统做准备。

(3) 修正实际模型的物理拓扑关系,重构装配变形物理状态,动态构建孪生工艺模型。拓扑信息表达了模型中的点、线、面几何特征间的关联关系。基于离散的数据逆向生成几何特征,在模型匹配过程中,从低纬度数据向高维度数据进行转换,生成

具有实际状态的几何特征,是非常困难的事情^[73]。其中,根据测量数据重构的零部件模型的装配定位,本质是两个带有几何误差的配合表面间的精确匹配^[120],即测量点云数据的配准拟合。通过对测量数据进行处理,将数字化测量与装配变形仿真相结合,解析零部件间对应的几何拓扑关系,需要进行正确的力学计算,融合不同装配阶段的装配体结合面处的二次形变信息,搜索发生变形的对应位置。使用特征元组区间的笛卡尔乘积分析变形约束如何渐变到其邻近约束关系,反映真实装配结构的细观几何拓扑关系,并将其映射到模型相关节点位置(图 5),定义发生变形的关键装配特征。通过装配基准与装配约束的重构,快速衍生出与当前装配物理状态相关联的三维模型,完成装配实体向虚拟空间数字孪生体的虚实融合映射过程,为面向装配现场的装配工艺仿真优化与准确度保障提供数据支撑。

图 5 考虑真实装配状态的自由曲面拓扑关系修正

综上,在适用于装配工艺优化设计的孪生工艺模型中,为了代表物理实体的真实状态,其所包含的数据信息主要包括以下四类:① 设计数据:主要包括产品三维几何模型,产品材料、分析测试等属性数据,尺寸与公差等三维标注数据,包含配合关系的 PBOM 以及相关设计文档等内容;② 工艺数据:主要包括工装工具设计要求及模型,装配工艺过程参数,质量检验/测量/控制要求数据,装配过程仿真评估数据等相关性内容;③ 制造过程数据:主要包括 MBOM,检测得到的零部件真实配合精度状态数据,技术状态实测数据,生产资源及环境相关的实测数据等;④ 具有动态性特点的装配过程数据:主要包括在现场装配过程的操作数据,装配过程状态监测数据,多传感器采集和分析的数据,逆向数据,装配仿真与预测数据等。

(4) 孪生数据与装配现场间的快速传输。高精度传感数据反映了整个状态系统的运行状态,其快速传输是整个孪生体系的基础。借助于服务器的存储,搭建快速可靠的信息传递网络,建立高效率存储结构(比如,分布式云服务器存储技术)和数据检

索结构, 为装配系统的海量历史运行数据的存储和快速提取提供了重要保障。同时, 以往的历史数据基础, 使大数据分析和计算的数据查询和检索能快速可靠完成, 为下一阶段的虚拟装配仿真/分析/预测/反馈的顺利进行奠定数据与模型基础。

2.3 面向装配现场的工艺优化—反馈—改进环机制

由于产品形变、工装设备定位误差等物理量的存在及其状态变化不断累积等原因, 使得基于理论模型的工艺仿真结果与实际情况不具有一致性^[106]。为解决基于理论模型的工艺仿真结果与实际情况的不一致性问题, 需基于孪生工艺模型中定义的装配过程中偏差源几何精度信息, 以实际孪生模型代替理论模型做分析评估, 进行装配工艺设计结果验证及可装配性评估优化, 获得现场精度状态的变化情况。因此, 从以下三个方面对关键技术“面向装配现场的工艺优化—反馈—改进环机制”进行突破, 具体路线如图 6 所示。

图 6 孪生工艺模型驱动的装配工艺优化反馈

(1) 建立基于实测数据的装配偏差传递矩阵更新机制。复杂产品的装配精度, 不仅与各组成零部件的制造误差有关, 还会受到装配过程中产生的各项偏差源影响。在具体的装配过程中, 各零部件具有不同的装配顺序, 顺序不同, 会引起零部件上的配合特征在装配过程中对应不同的定位方式, 配合接口处也会产生不同的变形误差等, 这些因素产生的误差在装配过程中不断的累积融合, 最终对装配

偏差产生影响。因此, 探究不同的装配顺序与装配偏差之间的关系, 对提升产品的装配精度具有重要的工程意义。针对某一特定的装配序列, 面向装配现场, 通过孪生工艺模型, 提取各组成装配单元接口以及工装设备间真实的配合精度状态、装配变形信息及关键装配特性空间位置, 考虑装配顺序的因素, 将尺寸链与物理变形融合, 并针对不同装配单元的接口处发生的“二次形变”现象, 随着装配工序的推进, 建立装配偏差传递矩阵的更新机制, 如式(1)所示, 使之能够适应装配现场所对应的真实状况。

$$P_2 = T_{12}^V P_1, P_3 = T_{23}^V P_2, \dots, P_n = T_{(n-1)n}^V P_{n-1} \quad (1)$$

(2) 对基于装配尺寸链与物理变形融合的装配偏差, 进行接力计算与评价。在面对复杂对象的装配过程中, 装配顺序是比较复杂的, 考虑到在整个装配精度的计算过程中装配偏差是后一个偏差不断在前一个偏差的基础上重复累积得到的, 如图 7 所示。

图 7 装配偏差传递示意图

为减少计算工作量, 受到四乘一百米接力比赛的启发, 在竞赛过程中, 接力棒不断地在队员的手中传递, 最终以带着接力棒的参赛队员到达终点的时间为参赛成绩, 在此提出接力计算思想, 偏差传递的载体就是装配偏差矩阵, 此时偏差传递矩阵就类似于比赛中的接力棒, 不同的是误差在累积过程中每传递一次, “接力棒”就自我刷新一次, 直到得到最后的最终装配结束后偏差传递矩阵, 如图 8 所示。

图 8 装配偏差矩阵传递更新

此时的接力棒也就是偏差传递矩阵, 包含了装配过程中所有的偏差信息。这样就可将上一阶段的装配偏差输出作为下一装配阶段的装配偏差输入, 基于“接力计算”的思想, 建立产品不同装配单元的真实偏差传递模型, 从而计算最终的装配精度,

如式(2)所示, T^N 为固有装配偏差矩阵, Δ_1 为形状和位置公差偏差传递因子, Δ_2 为装配过程影响带来的偏差传递因子, Δ_3 为外力形变带来的装配偏差传递因子。

$$T^V = T^N + \Delta_1 T^N + \Delta_2 T^N + \Delta_3 T^N \quad (2)$$

考虑装配累积偏差的结果, 求解闭环尺寸和关键尺寸的变动度^[121], 如式(3)和式(4)所示。

$$\lambda = 1 - \frac{\delta_R}{\delta} \quad (3)$$

式中, λ 为闭环特征尺寸变动度; δ_R 为该对装配特征在实际装配中通过不同偏差累积过程最终形成的最大偏移量; δ 为具有配合关系的两装配特征直接装配时的允许偏移量。

$$\mu = 1 - \frac{\delta_K}{\delta} \quad (4)$$

式中, μ 为关键特征尺寸变动度; δ_K 为关键特征之间的尺寸累积偏差量; δ 为确保装配精度对关键偏移量的要求。

此后, 对不同装配单元划分方案对应的装配序列下的产品装配质量进行评价, 从而选择出最优装配序列, 如图 9 所示。

图 9 装配精度评价流程图

(3) 结合装配变形信息与真实装配精度信息, 求解尺寸偏差对产品质量的具体影响, 实现公差的仿真优化。随着市场对飞机产品需求的多样性和紧迫性要求, 飞机制造越来越需要依靠贯穿产品设计、工艺设计和产品制造装配过程的尺寸管理, 通过前期的优化设计来减少后期对制造协调以及昂贵工装的需求。3DCS 是一款强大的三维尺寸偏差分析工具, 用于仿真制造工艺和装配, 决定尺寸偏差对产品的影响。基于确定性的装配工艺和实际制造能力, 结合数字孪生模型中的现场数据与历史有效数据,

使用 3DCS 进行三维数字样机的装配偏差分析与优化, 真实模拟飞机零部件的制造能力和装配流程及工艺方案, 可计算装配体关键特性偏差分布情况, 并快速追踪偏差源, 根据计算结果定位到需要整改的零部件或装配工艺。上述基于 3DCS 的柔性装配偏差分析过程如图 10 所示。

图 10 基于 3DCS 公差仿真软件的柔性装配偏差分析

3DCS 有限元柔性模块是用于精确模拟柔性零件以及装配变形的高级模块。为了验证装配误差计算结果的正确性, 还需要模拟生产制造中变形的情况, 诸如夹持、焊接、松开夹持以及施加外力(装配载荷、重力等)等情况, 以输入软件的零件的刚度矩阵为依据, 在 FEA Compliant 模块中精确模拟计算柔性零件以及装配的变形。通过蒙特卡洛分析, 敏感度分析及几何因子分析, 对融合装配变形信息与真实装配精度信息的公差仿真优化方法进行研究。采用① 零部件真实外形模拟法、② 有限元刚度矩阵法或③ 有限元结果导入法, 将 3DCS 公差仿真软件与 CAE 仿真分析相结合, 尽可能的模拟真实工艺过程, 可提高计算精度, 通过统计结果判断设计目标是否能够满足, 并定位到需要整改的零部件或装配工艺环节。

结合在尺寸控制软件 3DCS 中的仿真验证结果, 分析评价装配质量, 实时调整装配现场产品与工装设备的物理状态, 通过装配工艺结果的优化反馈, 对可装配性进行评估, 生成面向装配现场的装配方案, 借助生产现场管控系统, 将装配工艺优化信息传递到现场, 实现基于孪生工艺模型的“以虚控实”过程, 从而保证实际装配工作高质高效完成。

3 应用验证示例

3.1 装配需求分析

某大型薄壁部件试验件, 特征独特, 由多个复杂变截面分段过渡结构组成, 包括内外蒙皮/法兰/环向弱框/加强框/纵向加强筋/大梁等零组件; 内外蒙皮覆盖在框梁骨架零件上, 与机身连接的隔框以

弱框为主, 封闭区多且施工空间狭小。蒙皮内腔型面、蒙皮内形间隙与阶差等协调准确度要求对产品的气动等性能具有直接影响, 由于定位/装配基准变换、装配约束关系复杂、装配变形大且协调要求高, 给装配工艺的规划带来了巨大挑战。结合制造全过程中的生产实际约束, 融合数字孪生思想, 本节从工艺分离面划分、装配精度闭环控制等方面出发, 阐述其优化设计过程。

3.2 面向制造全过程的分离面设计优化

根据设计单位提供的设计数模, 该部件通过设计分离面整体分为转接段、前段和后段, 其中, 前段外蒙皮分为上、下两部分, 每一部分为一个单独的整体结构。

考虑到上述薄壁部件为双层中空结构, 内部空间狭小, 型面几何形状为由圆渐变为圆角矩形的复杂空间曲面, 且母线为闭合曲线。汇总各制造工艺的技术条件, 得知以下几点。

(1) 结合复杂薄壁件热成形的技术特点, 为减小成形过程的应力耦合效应, 需要将整块蒙皮零件划分为多块大曲率半径、小尺寸的平整结构, 且分割位置多位于曲面的曲率半径较小处; 而考虑切割及焊接工艺的技术要求, 需要将分缝选取在大曲率半径处, 并趋向于减少分割数量。

(2) 数控加工精度高, 限制相对较少, 但也应减少划分工艺分离面产生新的大尺寸薄壁结构等低刚度加工对象; 出于成本因素的考虑, 还应合理划分尽量降低五轴加工占用工时。

(3) 此外, 以骨架为装配定位基准时, 考虑研制过程中所涉及到的主要制造工艺方法及各阶段的基准设计, 包含柔性定位器与可重构模块化工装的定位柔性化特点, 结合装配过程中的误差累积传递过程, 为了减少装配过程中的过约束及装配完工前的修配量, 装配单元划分的数量又不宜太多。

结合制造全过程, 综合考量各种工艺技术对产品结构的需求, 对制造精度控制的能力, 通过平衡各种制造技术对几何精度、表面质量、力学性能及装配准确度要求等指标控制的技术难度, 在设计阶段介入制造全过程, 定义工艺分离面划分的基本原则, 制定工艺分离面划分方案, 并以此合理规划了装配单元及其制造路线。前段外蒙皮上表面的设计结果如图 11 所示。

3.3 面向现场的装配工艺规划与优化

为得到装配前各零组件制造精度的真实状态, 采用三维激光扫描技术手段, 选择按曲率变化自适应采样的方法^[122], 进行测量数据的采集工作, 并按照设定的百分比精简点云数据。通过测量数据的预

图 11 前段外蒙皮上表面工艺分离面划分(示意图)

处理方法, 准确获得零组件的离散测量点云数据信息, 以此构建孪生工艺模型, 为装配工艺的优化奠定数据基础。以外蒙皮上表面的两块蒙皮零件为例, 其测量点随曲率的分布以及整体布置方案如图 12 和图 13 所示, 测量点云的部分数据如图 14 所示, 真实制造精度与理论数模的配准拟合结果如图 15 和 16 所示。

图 12 蒙皮 1 的测点分布图

图 13 蒙皮 2 的测点分布图

拍照测量数据 (板子01) - 记事本					拍照测量数据 (板子01) - 记事本				
文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)	文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)
1002	-433.0616	-22.1929	533.0663		1001	192.7533	-36.3461	738.8106	
1003	-433.2951	-38.5086	514.4238		1006	672.9905	540.0564	614.5076	
1004	-431.0824	58.9983	626.4352		1007	400.6249	229.4237	583.5841	
1005	-431.5879	42.7356	607.6815		1008	659.7486	523.6502	601.6582	
1006	-432.0279	26.5183	599.0803		1009	646.4978	547.1578	588.7405	
1007	-432.4218	10.2844	570.3315		1010	613.4092	468.4974	566.0120	
1008	-432.7670	-5.9337	551.7314		1011	598.9671	451.2461	555.6392	
1009	-426.8734	155.9174	738.7771		1012	584.6790	433.9872	545.2349	
1010	-427.6786	139.7543	728.0103		1013	570.4684	416.6925	534.7809	
1011	-428.4466	123.6729	701.3439		1014	542.2353	381.8413	513.6722	
1012	-429.1798	107.5160	682.6068		1015	814.8038	561.3405	454.5338	
1013	-429.8376	91.2799	663.7872		1016	799.2608	546.8354	441.8072	
1014	-430.4704	75.1611	645.1384		1017	783.7414	532.2540	429.1657	
1015	-421.5518	252.4306	851.5753		1018	768.3244	517.5936	416.5964	
1016	-422.4516	236.3801	832.7250		1019	752.9281	502.7865	404.0907	
1017	-423.3335	220.3310	813.9420		1020	737.6124	487.8117	391.6913	
1018	-424.2547	204.2472	795.1342		1021	722.2963	472.7584	379.3582	
1019	-425.1718	188.1394	776.3311		1022	707.0148	457.6928	367.0591	
1020	-426.0588	172.0357	757.5630		1023	691.8127	442.5819	354.8335	
1021	-418.0828	300.4804	908.1803		1024	1037.8513	494.8901	363.5474	
1022	-419.7847	284.4609	889.2886		1025	1023.1524	480.4127	349.0388	
1023	-420.6209	268.4425	870.4067		1026	676.6392	427.1917	342.6273	
1024	-268.8765	170.5705	634.9259		1027	661.5313	411.7736	338.5307	
1025	-261.8304	154.2483	616.2978		1028	381.5897	60.1802	321.6839	
1026	-262.8129	137.9792	597.6783		1029	288.5978	41.8826	311.0653	
1027	-263.7909	121.6952	579.1596		1030	999.1462	458.3509	326.0135	
1028	-264.7207	105.3722	560.5817		1031	983.4504	444.9796	312.2582	
1029	-265.6240	89.0265	542.0304		1032	275.7502	23.5919	300.4994	
1030	-266.5200	72.6439	523.4782		1033	967.8029	437.7572	298.4431	
1031	-253.1908	283.9603	765.4822		1034	952.1720	418.4340	286.7806	
1032	-254.3392	267.8347	746.8132		1035	936.4778	404.9400	271.1461	
1033	-251.9792	300.1529	784.2609		1036	920.7758	391.3850	257.5813	
1034	-255.5178	251.6467	728.1376		1037	1071.1435	382.4308	248.8147	
1035	-256.6494	235.4239	709.4284		1038	985.8985	377.8103	244.1674	

图 14 测量点云数据(部分)

- [3] OLA A. Quality modeling case study at GKN Aerospace Sweden [D]. Gothenburg : Chalmers University of Technology, 2015.
- [4] ANDOLFATTO L, THIÉBAUT F, LARTIGUE C. Quality-and cost-driven assembly technique selection and geometrical tolerance allocation for mechanical structure assembly [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(1): 103-115.
- [5] CAMPOS A, JOHNSON R, KENNEDY J. System and method for wiring an aircraft. USA 9727689 [P]. 2017-08-08.
- [6] PILLON E, MAHU C, GRENET D. Key tool and composite panel in particular for an aircraft engine nacelle manufactured by means of such tool. Patent WO/2015/028736A1, FRANCE, 2015.
- [7] 张歌, 蒋波, 林忠钦委员: 要让孩子不出国门就能念世界一流大学[N]. [2018-03-10]: 人民网, <http://lianghui.people.com.cn/2018cppcc/n1/2018/0310/c417786-29860022.html>.
ZHANG Ge, JIANG Bo. Commissioner Lin Zhongqin: enable children to attend world-class universities without leaving China[N]. [2018-03-10]: People's Daily. <http://lianghui.people.com.cn/2018cppcc/n1/2018/0310/c417786-29860022.html>.
- [8] GRIEVES M. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises [J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1-2): 71-84.
- [9] TAO F, QI Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017. DOI: 10.1109/TSMC.2017.2723764.
- [10] TAO F, CHENG J, QI Q. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.
- [11] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 11-24.
TAO Fei, QI Qinglin. Service-oriented smart manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 11-24.
- [12] ROSEN R, VON W, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC-Papers on line, 2015, 48(3): 567-572.
- [13] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2017.
- [14] JIN Y, ABELLA R, ARES E, et al. Modeling and digital tool development of a new similarity metric for aerospace production[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2013, 69(10): 1-4.
- [15] XI F, LIN Y, LI Y. A robotic percussive riveting system for aircraft assembly automation[M]// Advanced Mechatronics and MEMS Devices II. Springer International Publishing, 2017.
- [16] MANOHAR K, HOGAN T, BUTTRICK J, et al. Predicting shim gaps in aircraft assembly with machine learning and sparse sensing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48 (7): 87-95
- [17] LEE B, BINDER W, PAREDIS C. A Systematic method for specifying effective value models[J]. Procedia Computer Science, 2014, 28: 228-236.
- [18] 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.
- [19] Siemens. Industry software[EB/OL]. <http://w1.siemens.com.cn/digitalization-zh/industry-software.html>.
- [20] 中国工控网. 解密“Digital Twin”[EB/OL].[2017-01-04] <http://www.gongkong.com/news/201701/354714.html>.
Gongkong.com Decrypt "Digital Twin"[EB/OL].[2017-01-04] <http://www.gongkong.com/news/201701/354714.html>
- [21] 李璐. Digital Twin 的 8 种解读[EB/OL].[2017-12-25] http://www.sohu.com/a/212692891_505781.
LI Lu. 8 interpretations of Digital Twin[EB/OL].[2017-12-25] http://www.sohu.com/a/212692891_505781.
- [22] ANSYS. ANSYS Twin builder[EB/OL].<https://www.ansys.com/zh-cn/products/systems/ansys-twin-builder>.
- [23] 郭洪杰, 冯子明, 张永亮, 等. 以模型为核心的飞机智能化装配工艺设计[J]. 航空制造技术, 2017, 53(11): 64-69.
GUO Hongjie, FENG Ziming, ZHANG Yongliang, et al. Design on aircraft smart assembly based numerical model[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2017, 53(11): 64-69.
- [24] 张棚翔. 基于数字孪生的通飞产品装配工艺规划与仿真技术研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
ZHANG Pengxiang. Research of digital twin based on assembly process planning and simulation of general aircraft product[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2018.
- [25] 王岭. 基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体对

- 接技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(10): 292-296, 309.
- WANG Ling. Research on the docking technology of final installation for aeroengine low pressure turbine unit based on digital twin[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(10): 292-296, 309.
- [26] 朱铎先, 赵敏. 解码智造, 《机·智》当先[J]. 中国机械工程, 2019, 30(1): 113-117.
- ZHU Dixian, ZHAO Min. Decoding intelligent manufacturing, machine intelligence first[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(1): 113-117.
- [27] ULRICH K, TUNG K. Fundamentals of product modularity[J]. Issues in Design Manufacturing Integration, 2006(2): 73-79.
- [28] GU P, SOSAL E S. Product modularization for life engineering[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(5): 387-401.
- [29] LEE W B, LAU H, LIU Z. A fuzzy analytic hierarchy process approach in modular product design[J]. Expert Systems, 2001, 18(1): 32-41.
- [30] Pahl, Beitz. Engineering design: a systematic approach[M]. Berlin: Springer Verlag, 1996.
- [31] STONE R B, WOOD K L, CRAWFORD R H. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. Design Studies, 2000, 9(1): 5-31.
- [32] CHEN K M, LIU R J. Interface strategies in modular product innovation[J]. Technovation, 2005, 25(7): 771-782.
- [33] JONATHAN R. MAIER T W, SIMPSON F M. Protect platform design: Method and application[J]. Research in Engineering Design, 2001(5): 2-22.
- [34] 高浪, 向东, 彭玲, 等. 机电产品多策略模块划分方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5): 1021-1028.
- GAO Lang, XIANG Dong, PENG Ling, et al. Multi-strategies modular partition method for electromechanical products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(5): 1021-1028.
- [35] 王鹏家, 巩亚东, 刘永贤, 等. 基于谱系聚类的数控机床模块划分系统[J]. 东北大学学报, 2014, 35(5): 739-743.
- WANG Pengjia, GONG Yadong, LIU Yongxian, et al. Module division system of CNC machine tools based on hierarchical clustering[J]. Journal of Northeastern University, 2014, 35(5): 739-743.
- [36] 毛雨辉. 基于一种改进聚类算法的雷达导引头产品功能模块划分方法研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(3): 314-319.
- MAO Yuhui. Research on radar seeker product functional module plotting method based on improved clustering analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(3): 314-319.
- [37] 程贤福, 陈诚. 基于设计关联矩阵与可拓聚类在产品模块划分方法[J]. 机械设计, 2012, 29(1): 5-9.
- CHENG Xianfu, CHEN Cheng. Method of module division based on design relationship matrix and extension clustering algorithm[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(1): 5-9.
- [38] LI B, XIE S. Module partition for 3D CAD assembly models: A hierarchical clustering method based on component dependencies[J]. International Journal of Production Research, 2015, 53(17): 1-17.
- [39] HEMEM M, SANDERSON A. AND/OR graph representation of assembly plans[J]. Robotics and Automation, 1990, 6(2): 188-199.
- [40] LEE S, SHIN Y. Assembly planning based on subassembly extraction[C]//The International Conference on Robotics and Automation, 1990: 1606-1611.
- [41] TSAIA Y T. The development of modular-based design in considering technology complexity[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 19(3): 692-703.
- [42] WANG Y, LIU J, LI L. Assembly sequences merging based on assembly unit partitioning[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(7): 808-820.
- [43] 邹成, 刘继红. 基于工艺关联度的飞机装配单元划分[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6): 32-38.
- ZOU Cheng, LIU Jihong. Process relationship based aircraft assembly unit partitioning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6): 32-38.
- [44] 靳江艳, 黄翔, 刘希平, 等. 基于广义装配关系的复杂产品装配单元划分方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 50-55.
- JIN Jiangyan, HUANG Xiang, LIU Xiping, et al. Assembly unit partition for complex product based on generalized assembly relationship[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 50-55.
- [45] 冯毅雄, 王明, 谭建荣, 等. 基于粗糙核聚类的模块化产品方案求解[J]. 浙江大学学报, 2016, 46(1): 150-155.
- FENG Yixiong, WANG Ming, TAN Jianrong, et al. Product module construction method based on rough kernel clustering algorithm[J]. Journal of Zhejiang

- University, 2016, 46(1): 150-155.
- [46] 郑维强, 刘振宇, 刘达新, 等. 基于模糊关联的复杂产品模块化设计方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(05): 131-142.
- JIA Weiqiang, LIU Zhenyu, LIU Daxin, et al. Modular design method and application for complex product based on fuzzy correlation analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(05): 131-142.
- [47] 张磊, 褚学宁, 李玉鹏, 等. 结构化装配工艺设计中的装配单元划分[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(2): 43-48.
- ZHANG Lei, CHU Xuening, LI Yupeng, et al. Assembly unit partitioning for structural assembly process planning[J]. Machine Design and Research, 2013, 29(2): 43-48.
- [48] NEVINS J, WHITNEY D. Concurrent design of products and process[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1989.
- [49] ULLMAN D. The mechanical design process[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 2003.
- [50] WARWICK G. GE advances analytical maintenance with digital twins[N]. Aviation week & space technology, 2015-10-19.
- [51] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, 2017: 85-113.
- [52] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 141-144.
- [53] SOEDERBERG R, WAERMEFJORD K, CARLSON J, et al. Toward a digital twin for real-time geometry assurance in individualized production[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 137-140.
- [54] MORRIS K, FRECHETTE S, LU Y. Standards landscape and directions for smart manufacturing systems[C]// 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2015. DOI: 10.1109/CoASE.2015.7294229
- [55] SCHROEDER G, STEINMETZ C, PEREIRA C, et al. Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange[J]. IFAC-Papers on Line, 2016, 49(30): 12-17.
- [56] AALM K, SADDIK A. C2ps: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 2050-2062.
- [57] FERGUSON S, BENNETT E, IVASCHHENKO A. Digital twin tackles design challenges[J]. World Pumps, 2017(4): 26-28.
- [58] Seshadri B, Krishnamurthy T. Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept[C]// 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference. 2017: 1675
- [59] ZHENG Y, YANG S, CHENG H. An application framework of digital twin and its case study[J]. Journal of Ambient Intelligence Humanized Computing, 2018: 1-13.
- [60] 李心悦. 林诗万: 数字孪生体在工业互联网的作用与意义[EB/OL].[2019-02-21]. <https://www.innovation4.cn/toutiao/028319-9821421831/>.
- LI Xinyue. LIN Shiwan. The role and significance of digital twin in industrial internet[EB/OL].[2019-02-21]. <https://www.innovation4.cn/toutiao/028319-9821421831/>.
- [61] 刘青, 刘滨, 王冠, 等. 数字孪生的模型、问题与进展研究[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(1): 82-92.
- LIU Qing, LIN Bin, WANG Guan, et al. Research on digital twin: Model, problem and progress[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(1): 82-92.
- [62] 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.
- [63] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
- LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1-10.
- [64] 刘检华, 侯伟伟, 张志贤, 等. 基于精度和物性的虚拟装配技术[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 595-604.
- LIU Jianhua, HOU Weiwei, ZHANG Zzhixian, et al. Virtual assembly technology based on precision and physical attribute[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 595-604.
- [65] 孔庆超. 大尺寸航天结构件装配的半实物模型点云处理关键技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- KONG Qingchao. Research on key technique of point cloud processing for semi-physical model of large size aerospace structure assembly[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.

- [66] 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, 53(7): 41-45.
YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aviation manufacturing technology, 2017, 53(7): 41-45.
- [67] 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.
- [68] 陶剑, 戴永长, 魏冉. 基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J]. 航空制造技术, 2017, 53(21): 26-31.
TAO Jian, DAI Yongchang, WEI Ran. Study on production lifecycle based on digital thread and digital twin[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2017, 53(7): 41-45.
- [69] 穆晓凯, 孙清超, 孙克鹏, 等. 基于载荷作用的柔性体三维公差建模及精度影响分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 39-48.
MU Xiaokai, SUN Qingchao, SUN Kepeng, et al. Three-dimensional tolerance modeling and precision analysis of flexible body based on the assembly load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 39-48.
- [70] 屈挺, 张凯, 李从东. 物联网环境下面向高动态性生产系统优态运行的联动决策与控制方法[J/OL]. (2018-04-16). <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotol-JXXB2018081400W.htm>.
QU Ting, ZHANG Kai, LI Congdong. Synchronization decision-Making and control method for the high-dynamic production system operation in opti-stage under environment of internet of things[J]. (2018-04-16). <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotol-JXXB2018081400W.htm>.
- [71] ZHU W, HU T, LUO W, et al. A STEP-based machining data model for autonomous process generation of intelligent CNC controller[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 271-285.
- [72] 张海军, 闫琼. 面向航空复杂产品的大数据制造[J]. 河南科技学院学报, 2016, 44(1): 68-73.
ZHANG H, YAN Q. Big data manufacturing for aviation complicated products[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology, 2016, 44(1): 68-73.
- [73] 张微. 基于实测数据的飞机部件数字化预装配技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
ZHANG Wei. Research on digital pre-assembly technology of aircraft components based on measured data[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016.
- [74] BAO J, WU D, CHENG Q, et al. Information modeling and visualization of assembly fat model for large-scale product[J]. Key Engineering Materials, 2014, 579-580: 711-718.
- [75] GUO F, ZOU F, LIU J, et al. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018: 76(5-8): 1-25.
- [76] LI H, ZHU H, LI P, et al. Tolerance analysis of mechanical assemblies based on small displacement torsor and deviation propagation theories[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(1-4): 89-99.
- [77] YANG Z, MCWILLIAM S, HUSSAIN T. A probabilistic approach to variation propagation control for straight build in mechanical assembly[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, 64 (5): 1029-1047.
- [78] GUO C, LIU J, JIANG K. Efficient statistical analysis of geometric tolerances using unified error distribution and an analytical variation model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(1-4): 347-360.
- [79] FRANCIOSA P, GERBINO S, LANZOTTI A, et al. Automatic evaluation of variational parameters for tolerance analysis of rigid parts based on graphs[J]. International Journal on Interactive Design & Manufacturing, 2013, 7(4): 239-248.
- [80] LIU J, JIN J, SHI J. State space modeling for 3-D variation propagation in rigid-body multistage assembly processes[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2010, 7(2): 274-290.
- [81] HUANG W, KONG Z. Simulation and integration of geometric and rigid body kinematics errors for assembly variation analysis[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2008;27(1): 36-44.
- [82] DU S, YAO X, HUANG D, et al. Three-dimensional variation propagation modeling for multistage turning process of rotary workpieces[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 82(C): 41-53.

- [83] BAKKER O, POPOV A, RATCHEV S. Variation analysis of automated wing box assembly[C]//CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2017: 1-6.
- [84] CHEN H, TIAN C, WANG Z. Statistical variation analysis of complaint assembly coupling geometrical and material error[J]. Chemical & Petroleum Engineering, 2016, 12(5): 421-428.
- [85] CHENG H, WANG R, LI Y, et al. Modeling and analyzing of variation propagation in aeronautical thin-walled structures automated riveting[J]. Assembly Automation, 2012, 32(1): 25-37.
- [86] CAI N, QIAO L, ANWER N. Unified variation modeling of sheet metal assembly considering rigid and compliant variations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(3): 495-507.
- [87] DAS A, FRANCIOSA P, PRAKASH P, et al. Transfer function of assembly process with compliant non-ideal parts[J]. Procedia CIRP, 2014, 21: 177-182.
- [88] FRANCIOSA P, GERBINO S, LANZOTTI A, et al. Automatic evaluation of variational parameters for tolerance analysis of rigid parts based on graphs[J]. International Journal on Interactive Design & Manufacturing, 2013, 7(4): 239-248.
- [89] CAI N, QIAO L. Rigid-compliant hybrid variation modeling of sheet metal assembly with 3D generic free surface[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 41(3): 45-64.
- [90] WAN D W, ROBINSON T, ARMSTRONG C, et al. Using CAD parameter sensitivities for stack-up tolerance allocation[J]. International Journal on Interactive Design & Manufacturing, 2016, 10(2): 139-151.
- [91] LIN J, JIN S, ZHENG C, et al. Compliant assembly variation analysis of aeronautical panels using unified substructures with consideration of identical parts[J]. Computer Aided Design, 2014, 57(1): 29-40.
- [92] CAMELIO J, HU S, MARIN S. Compliant assembly variation analysis using component geometric covariance[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(2): 355-360.
- [93] WANG Q, HOU R, LI J, et al. Positioning variation modeling for aircraft panels assembly based on elastic deformation theory[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017: 095440541769734.
- [94] LI Y, ZHAO Y, YU H, et al. Compliant assembly variation analysis of sheet metal with shape errors based on primitive deformation patterns[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2017: 095440621772023.
- [95] XIE K, CAMELIO J A, IZQUIERDO L E. Part-by-part dimensional error compensation in compliant sheet metal assembly processes[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2012, 31(2): 152-161.
- [96] WANG Q, DOU Y, LI J, et al. An assembly gap control method based on posture alignment of wing panels in aircraft assembly[J]. Assembly Automation, 2017, 37(4): 422-433.
- [97] 王皓, 陈根良, 黄顺舟, 等. 面向最优匹配位置的大部件自动对接装配综合评价指标[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 137-146.
- WANG Hao, CHEN Genliang, HUANG Shunzhou, et al. Evaluation index framework of optimal matching position for large components automatic assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(23): 137-146.
- [98] 朱永国, 张文博, 刘春锋, 等. 基于 SDT 和间接平差的中机身自动调姿精度分析[J]. 航空学报, 2017, 38(12): 421301.
- ZHU Yongguo, ZHANG Wenbo, LIU Chunfeng, et al. Accuracy analysis for automatic adjustment of aircraft fuselage posture based on SDT and indirect adjustment[J]. Acta Aerospace et Astronautica Sinica, 2017, 38(12): 421301.
- [99] 张芹. 数控机床模块化拆卸序列规划与方案评价技术及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- ZHANG Qin. Research on modular disassembly sequence planning and scheme evaluation for CNC machine tools and their application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [100] LI D, ZHANG G, LI M, et al. The diagnosis of abnormal assembly quality based on fuzzy relation equations[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014; doi: 10.1155/2014/437364.
- [101] 周思航, 刘振宇, 谭建荣. 基于尺寸变动度的装配序列偏差传递模型及质量评价方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 1-8.
- ZHOU Sihang, LIU Zhenyu, TAN Jianrong. Deviation propagation model of assembly sequence and quality evaluation approach based on degree of dimensional variation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 1-8.

- [102] 李敬花, 余峰, 樊付见. 基于遗传模拟退火融合算法的船舶分段装配序列优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 39-45.
LI Jinghua, YU Feng, FAN Fujian. Ship block assembly sequence optimization based on genetic simulated annealing algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1): 39-45.
- [103] TANG J, TIAN X, GENG J. Sensitivity analysis of deviation source for fast assembly precision optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(12): 1-7.
- [104] BI Y, YAN W, KE Y. Numerical study on predicting and correcting assembly deformation of a large fuselage panel during digital assembly[J]. Assembly Automation, 2014, 34(2): 204-216.
- [105] WANG X, LIU M, GE M, et al. Research on assembly quality adaptive control system for complex mechanical products assembly process under uncertainty[J]. Computers in Industry, 2015, 74(C): 43-57.
- [106] 王跃. 飞机装配工艺综合评价技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
WANG Yue. Research on comprehensive evaluation technology of aircraft assembly process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics&Astronautics, 2016.
- [107] 唐文斌. 飞机非线性装配偏差分析与容差协同分配方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
TANG Wenbin. Non-linear assembly deviation analysis and tolerance co-allocation for aircraft[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [108] 凤俊杰. 复杂机械产品装配过程动态监测与控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
FENG Junjie. Research on dynamic monitoring and control method for assembly process of complex mechanical products[D]. Heifei: Heifei University of Technology, 2015.
- [109] 窦亚冬. 飞机装配间隙协调及数字化加垫补偿技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
DOU Yadong. Study on gap coordination and shim compensation in aircraft assembly[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [110] WEN Y, TAN J W, ZHAN H, et al. Fault diagnosis based on multi-sensor data fusion for numerical control machine[J]. International Journal of Online Engineering, 2016, 12(2): 29-35.
- [111] ZHOU Q, NING Y, LUO L, et al. Structural damage detection method based on random forests and data fusion[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(1): 48-58.
- [112] ZHANG J, WU G, HU X, et al. A parallel clustering algorithm with MPI-MK means[J]. Journal of Computers, 2013, 8(1): 10-17.
- [113] TANG J, TIAN X, GENG J. Sensitivity analysis of deviation source for fast assembly precision optimization[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, (12): 1-7.
- [114] 王伟, 李晴朝, 康文俊, 等. 基于综合评价体系的五轴数控机床加工性能评价和误差溯源方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(21): 149-157.
WANG Wei, LI Qinglang, KANG Wenjun, et al. Method of machining error tracing and processing performance evaluation for five-axis CNC machine tool based on the comprehensive evaluation system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(21): 149-157.
- [115] BERUVIDES G, VILLALONGA A, FRANCIOSA P, et al. Fault pattern identification in multi-stage assembly processes with non-ideal sheet-metal parts based on reinforcement learning architecture[C]//CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 2017: 18-27.
- [116] GORJIAN N, SUN Y, MA L, et al. Remaining useful life prediction of rotating equipment using covariate-based hazard models-Industry applications[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2015, 15(1): 36-45.
- [117] 张发平, 吴迪, 张体广, 等. 基于盲源信号分离的加工误差分离方法研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(9): 1692-1699.
ZHANG Faping, WU Di, ZHANG Tiguang, et al. Independent component analysis based on machining error separation[J]. ACTA Armamentarii, 2016, 37(9): 1692-1699.
- [118] 王晓峰, 张园, 冯晓明, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 206-214.
WANG Xiaofeng, ZHANG Yuan, FENG Xiaoming, et al. Analysis and application of drought characteristics based on run theory and Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 206-214.
- [119] GUO F, ZOU F, LIU J H, et al. Comprehensive identification of aircraft coordination feature based on

- complete importance modeling and its engineering application[J]. *Assembly Automation*, 2018, 38(4): 398-411.
- [120] 张秋爽, 金鑫, 张忠清, 等. 基于曲面约束匹配算法的装配仿真定位方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(11): 70-76.
ZHANG Qiushuang, JIN Xin, ZHANG Zhongqing, et al. Assembly method based on constrained surface registration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(11): 70-76.
- [121] 鞠萍华, 黄广全, 肖莉明, 等. 多目标模糊综合评价的装配序列优选方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(7): 154-163.
JU Pinghua, HUANG Guangquan, XIAO Liming, et al. Optimization method of assembly sequence based on multi-objective fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(7): 154-163.
- [122] GUO F, ZHANG X, ZOU F, et al. An adaptive sampling methodology for measuring blade with CMM based on dominant feature points[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019. DOI: 10.1088/1361-6501/ab019d.
- [123] 亢颖, 王仲奇, 康永刚, 等. 飞机数字化装配数据集成管理研究[J]. *航空制造技术*, 2014, 50(16): 17-22.
KANG Ying, WANG Zhongqi, KANG Yongkang, et al. Data integration management of digital assembly for aircraft[J]. *Aircraft Manufacturing Technology*, 2014, 50(16): 17-22.
-
- 作者简介: 郭飞燕, 男, 1986 年出生, 博士后。主要研究方向为误差控制理论、智能装配与工艺装备等。
E-mail: 2009200890@mail.nwpu.edu.cn
- 刘检华, 男, 1977 年出生, 博士、教授、博士研究生导师。主要研究方向为产品虚拟装配与检测技术。
E-mail: jefliu@bit.edu.cn
- 邹方, 男, 1965 年出生, 硕士, 研究员, 博士研究生导师, 航空工业基础院首席专家。主要研究方向为数字化制造与柔性装配技术、工业自动化等。
E-mail: yzoufang@sina.com
- 翟雨农, 男, 1988 年出生, 博士后。主要研究方向为精密装配精益补偿理论与方法等。
E-mail: zhaiyunong.1988@163.com
- 王仲奇, 男, 1963 年出生, 硕士, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为数字化装配技术、信息化集成制造技术等。
E-mail: wangzhqi@nwpu.edu.cn
- 李少卓, 男, 1980 年出生。主要研究方向为容差虚拟装配仿真验证技术等。