

计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目: 数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法
作者: 孙学民, 刘世民, 申兴旺, 黄德林, 鲍劲松
收稿日期: 2020-07-20
网络首发日期: 2021-04-29
引用格式: 孙学民, 刘世民, 申兴旺, 黄德林, 鲍劲松. 数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法. 计算机集成制造系统.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210428.1802.018.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法

孙学民, 刘世民, 申兴旺, 黄德林, 鲍劲松⁺
(东华大学 机械工程学院, 上海, 201620)

摘要: 为解决当前高精密产品装配过程中虚拟仿真分析与物理装配相脱节导致的装配效率较低和装配质量一致性较差问题, 提出一种数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法。首先, 构建包含装配全要素的高精密产品数字孪生体。第二, 针对当前装配工艺文档可读性差、知识关联关系弱等问题, 提出一种基于知识图谱的装配工艺表达方式, 并利用知识图谱的可推理性实现装配工艺动态调整。第三, 针对产品质量控制问题, 提出一种操作-状态-质量三层结构质量控制策略。最后, 以某型号汽车发动机缸体单元装配为例, 验证所提方法的实用性。

关键词: 数字孪生; 知识图谱; 装配工艺; 质量控制; 高精密产品
中图分类号: TG95 **文献标识码:** A

Digital twin-driven intelligent assembly method for high precision products

Sun Xuemin, Liu Shimin, Shen Xingwang, Huang Delin, Bao Jinsong⁺
(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620)

Abstract: To solve the problems of low assembly efficiency and poor consistency of assembly quality caused by disconnection between virtual simulation analysis and physical assembly in assembly process of high precision products. An intelligent assembly method of high precision product driven by digital twin is proposed. Firstly, the digital twins of high-precision products including all assembly elements were constructed. Secondly, aiming at the problems of poor readability of assembly process documents and weak knowledge correlation, an assembly process expression method based on knowledge map was proposed. At the same time, the dynamic adjustment of assembly process was realized by using the inferential property of knowledge map. Thirdly, aiming at the problem of product quality control, a three-layer structure quality control strategy of operation-state-quality was proposed. Finally, taking the assembly of a certain type of automobile engine block unit as an example, the practicability of the proposed method is verified.

Keywords: Digital twin; Knowledge graph; Assembly process; Quality control; High precision products

收稿日期:2020-07-20; 修订日期: 2021-03-27. Received 20 July 2020; accepted 27 Mar. 2021.
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 东华大学研究生创新基金资助项目 (CUSF-DH-D-2020051)。
Foundation items: Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China, and the Graduate Student Innovation Fund of Donghua University, China (CUSF-DH-D-2020051) .

0 引言

近年来，随着机器学习、大数据、数字孪生和 IoT 等技术的快速发展，使产品装配技术由理想几何模型仿真为主的虚拟装配逐渐向虚实深度融合的智能化装配方向发展，对产品装配质量和效率的要求也随之不断提高^[1-2]。像汽车发动机、电液伺服阀和机器人传动机构等高精密产品为所属系统的核心产品，其装配精度直接影响整个系统性能。但是，该产品不仅装配工艺复杂、装配精度要求高，同时其装配过程中动态时变因素较多、性能范围波动较大，致使产品的装配效率和装配质量一致性较低，难以满足市场在数量和质量上的需求。

随着数字化技术的发展与应用，基于数字化模型的虚拟仿真已经成为高精密产品装配的主流技术。在虚拟仿真环境下，设计者可以进行装配序列规划、装配路径规划、装配干涉检查和装配公差设计等操作，在产品装配前可以提前发现问题及时修正。传统的虚拟装配技术虽然在一定程度上提高了装配效率，但是由于缺乏虚实之间的深度交互与融合，不能根据实际装配环境中的动态时变因素作出反应。并且基于理想几何模型仿真得出的装配工艺可靠性差，对装配操作者指导有限。在实际装配操作过程中，还需要依靠大量人工经验反复拆装、调试，难以满足装配质量一致性要求。

数字孪生通过集成新一代信息技术实现了虚拟空间与物理空间的信息交互与融合，即由实到虚的实时映射和由虚到实的实时智能化控制^[3-5]。为此，本文将数字孪生技术应用在高精密产品装配中，提出了一种数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法。构建了包含装配全要的高精密数字孪生体，提出了基于知识图谱的装配工艺表达和优化方法。在此基础上进一步研究了操作-状态-质量的装配质量控制策略。

1 相关研究

随着计算机技术、实时感知与采集技术以及机器学习算法的发展，数字化装配技术也取得了巨大进步。按照虚实交互程度，我们将虚拟装配归结为三个发展历程：基于约束的虚拟装配、基于物性的虚拟装配和基于数字孪生的虚拟装配，如图 1 所示。本节针对虚拟装配技术的相关研究进展进行了文献查阅。

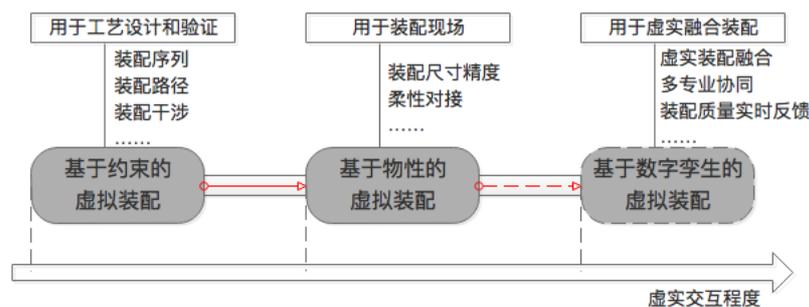


图 1 虚拟装配技术的发展历程

1.1 基于约束的虚拟装配

随着计算机建模及仿真工具 CAD、CAPP 等开发,使得数字化装配建模技术引入到产品的装配过程。如图 1 中第一个阶段为基于约束的虚拟装配 (CBVA)。CBVA 出现较早,在建立的理想几何模型基础上,通过实现零件的自由运动行为和约束导航,进而实现逼真的仿真。如美国桑迪亚国家实验室开发了一套 Archimedes 虚拟装配系统^[6],用于生产优化和检查装配工艺的交互式装配规划系统,并成功用于 NASA、休斯飞机和洛克韦尔公司等。Anantha 等^[7]采用关于零件几何结构的符号推理法来求解零件间的空间几何约束,能够处理过约束、欠约束和全约束三种问题。谭建荣等^[8-9]研究了虚拟产品的混合建模、面向语义的表达以及装配序列偏差传递模型等。武殿梁^[10]等研究了虚拟环境下的多约束导航问题,提出基于增量驱动和规约原理的多约束求解方法。

由于 CBVA 具有高精度的约束条件,可以实现高精度和小间隙装配仿真,在一定程度上提升了装配质量及效率。但是 CBVA 的零件不受物理属性及外界因素干扰,虚拟装配与物理装配还是相互独立的,只能装配到理想位置,无法模拟实际装配误差。

1.2 基于物性的虚拟装配

为了使虚拟装配过程更加逼真,在 CBVA 的研究基础上引入了物理属性信息。如图 1 中第二阶段为基于物性的虚拟装配 (PBVA)。在这一阶段学者们开始尝试虚实空间之间的初步融合。针对 PBVA 的研究:Germanico 等^[11]开发了一种基于触觉交互的虚拟现实平台,利用交互设备对虚拟零件进行运动控制,利用物理仿真引擎进行基于物理属性的装配仿真和碰撞检测。高巍^[12]以操作台装配为例,对虚拟装配中的零部件物理属性建模、碰撞检测、装配引导、人机因素分析和可装配性评价等关键技术进行了深入研究。单纯的 PBVA 无法进行高精度和小间隙的装配仿真。为了弥补 PBVA 出现的问题,学者们开始进行 PBVA 和 CBVA 混合的研究:Seth 等^[13]将物理属性建模和几何约束建模相结合,利用几何约束提高精准的零件定位,利用物理属性对发生碰撞的零件进行动力学仿真。Wang 等^[14]通过综合应用基于物性的建模方法以及约束运动仿真,研究了与装配模型相关的三种运动过程。刘检华等^[15-16]提出了一种基于精度和物性的虚拟装配技术,在过程、精度和物理属性的角度模拟装配现场。

PBVA 中零件的运动是根据物理定律确定的,物理定律考虑了施加在零件上的力和力矩,因此提高了装配仿真的逼真度。通过混合 CBVA 和 PBVA 解决解决了高精度、小间隙装配问题。但是,由于 PBVA 虚实交互程度不高,因此其功能较为单一,缺乏对多学科、多层次、多尺度等综合分析,无法满足本文所指高精密产品的装配要求。

1.3 基于数字孪生的虚拟装配

自 Grieves 教授于 2003 年在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上提出数字孪生的概念以来^[17]。NASA 指出数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行

历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。在近几年计算技术、机器学习算法等快速发展下,数字孪生技术得到了广泛的关注和应用。为了提高产品的装配质量和效率,学者们尝试将数字孪生技术引入到虚拟装配中,如图 1 中第三个阶段为基于数字孪生的虚拟装配。针对数字孪生装配技术,大量学者取得了探索性的研究成果。

在框架和关键技术角度:陶飞等^[18]在基于数字孪生的产品装配上,探讨了构建复杂产品装配过程的信息物理融合系统亟需突破的关键技术。刘检华等^[19-20]以航空航天装配领域为对象,基于数字孪生研究了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、装配车间生产管控、装配工艺优化等关键技术。Guo 等^[21]提出一种数字孪生技术下的装配岛毕业制造系统,将数字孪生服务作为一种使能技术。在数字孪生模型构建角度:在 Sierla 等^[22]提出了从数字产品描述派生的数字孪生,可自动执行组装计划并协调制造单元中的生产资源。Polini 等^[23]研究了一种数字孪生工具以管理从制造到装配几何的变化,建立的仿真模型不仅满足产品表示,也适用于预期产品行为的预测。Yi 等^[24]提出了智能装配工艺设计的数字孪生参考模型,使得产品设计和制造之间架起了一座“桥梁”。Grégorio 等^[25]提出了一种产品的混合表示法,它可以集成到数字孪生方法中,利用数字孪生模型管理装配过程中的几何偏差。Bilberg 等^[26]提出了一种灵活装配单元的数字孪生,将生产系统设计阶段开发的虚拟仿真模型的应用在实际装配中,实现了装配质量实时控制。

根据上述文献发现,目前数字孪生装配的研究可总结为两个层面。广义层面上来讲构建的数字孪生是车间级、单元级的系统作为一个整体来进行描述,更加注重实现的关键技术。狭义层面上来讲构建的数字孪生是产品级,更加注重描述产品数字孪生的构建方法。本文将数字孪生技术应用在高精密产品的装配中,着重描述了产品数字孪生体的构建、装配工艺的智能化表达以及单元级系统的控制策略。

2 高精密产品数字孪生体的构建

根据刘检华团队^[5]提出的“数字孪生体”定义:数字孪生体是指与现实世界中的物理实体完全对应和一致的虚拟模型,可实时模拟自身在现实环境中的行为和性能,也称为数字孪生模型。实现数字孪生装配的前提是构建高保真模型。为了实现构建的高精密产品数字孪生体具有高保真度,应包含装配全要素信息。如图 2 所示,本文构建的高精密数字孪生体中包含了产品集成信息和实际测量信息。产品数字孪生体的信息在层次结构上可以分为结构 BOM、工艺约束和性能约束。根据多层次结构我们建立了装配特征关系集、装配工艺约束集、动态稳定性约束集、静态稳定性约束集和动静耦合约束集。这些信息存储于 MBD 模型文件中。为了实现几何模型的高保真度,我们将理想的几何模型生成一棵用装配特征描述的树。根据此特征树,建立点云的配

准树，通过点云特征快速生成方法，将离散的没有拓扑关系的点云快速映射到理想特征树上。将装配特征分为关键装配特征和非关键装配特征，给出其配准权重；根据结构 BOM、工艺约束、性能约束分配不同共融规则，从而建立了一棵共融规则树，规则树优化了精细配准方法。

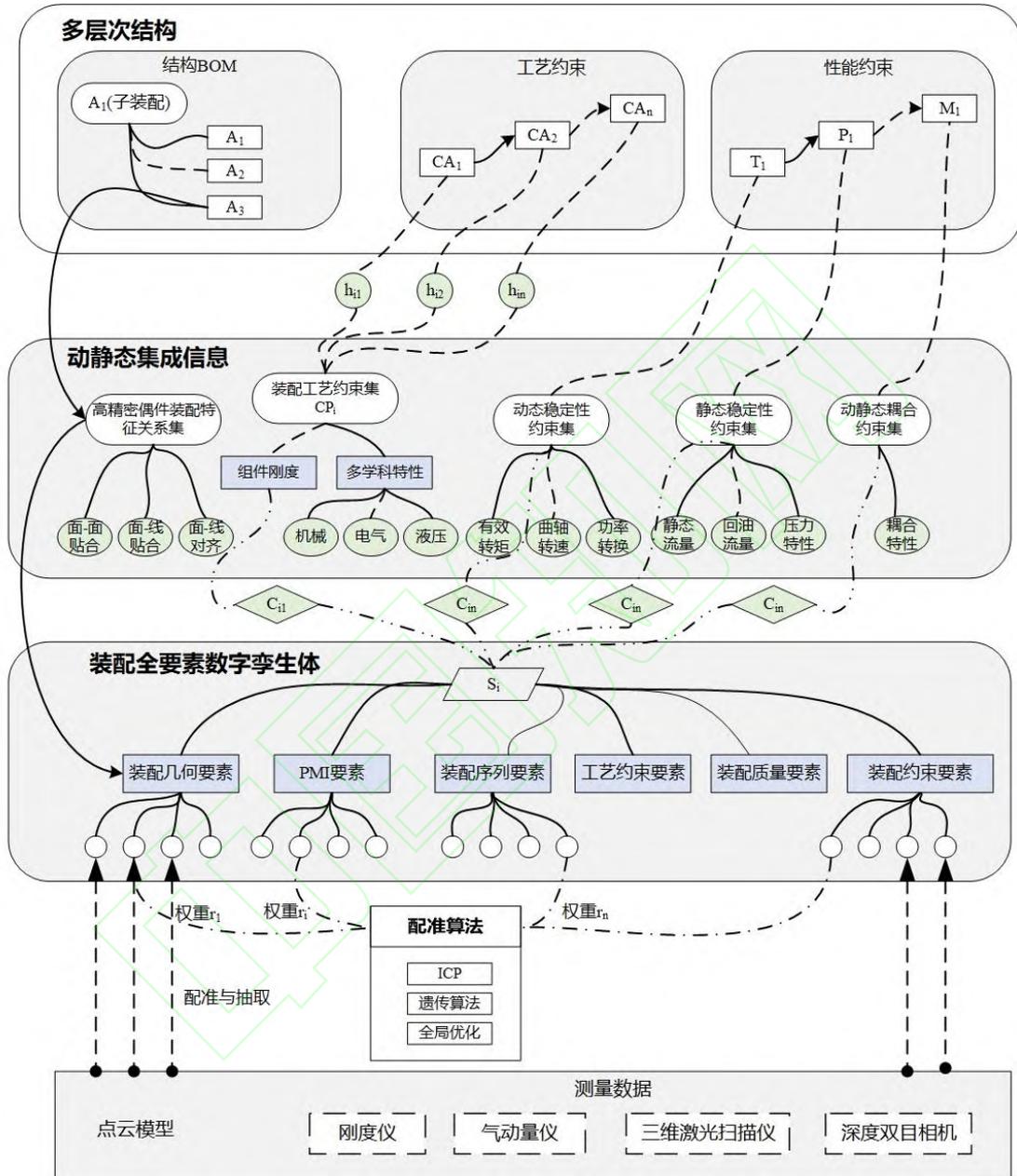


图2 高精度产品数字孪生体信息模型

2.1 动静态集成信息

高精度产品通常是—种结构精密的机、电、液—体化产品，针对高精度产品的建模动静态信息的角度考虑，如图3所示，为动静态集成信息模型。

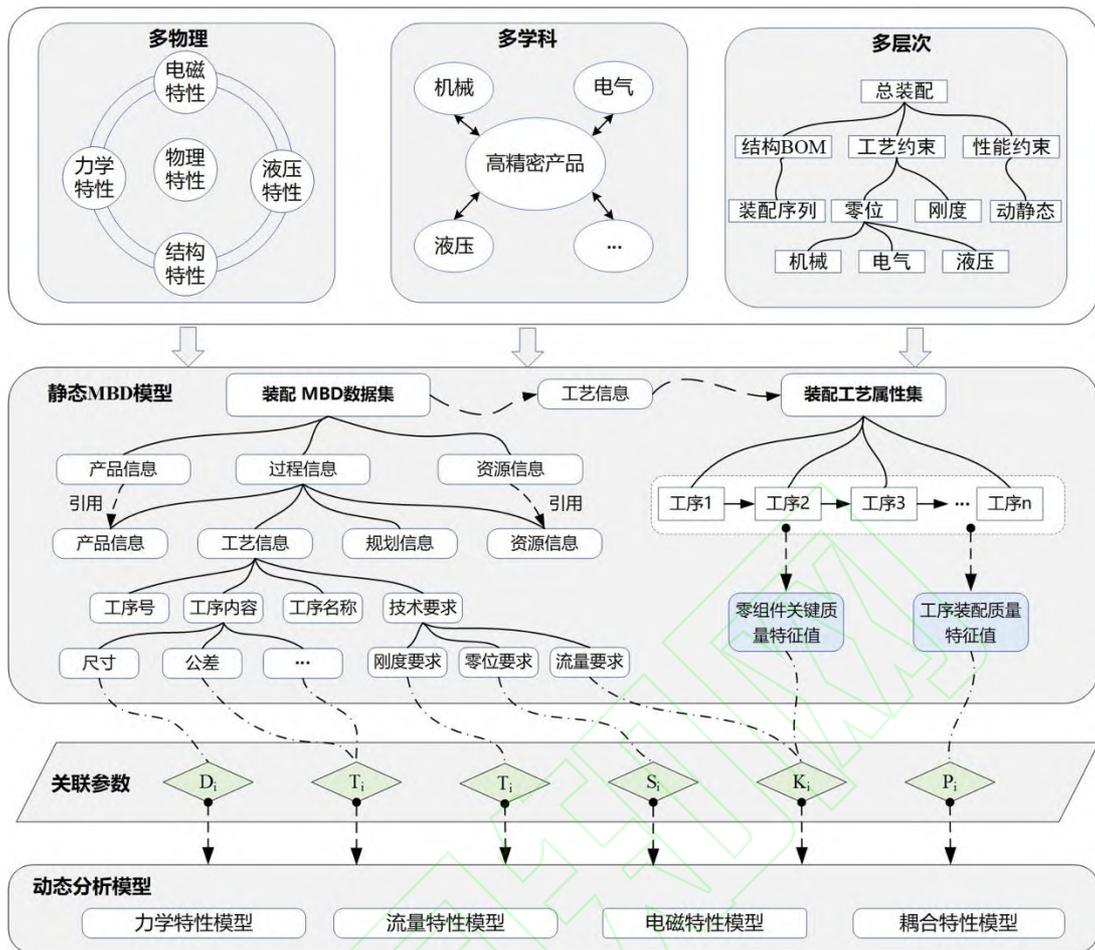


图3 动静态集成信息模型

在静态信息上，基于MBD技术的信息模型描述了产品的装配MBD数据集与装配工艺属性集。装配MBD数据集包含了在装配工艺规划阶段和现场装配指导阶段等过程中用到的所有信息的集合。装配MBD数据集中定义了高精密装配部件的多物理、多学科、多层次特性。对于多物理性，静态MBD模型不仅描述实体产品的几何特性（如形状、尺寸、公差等），还描述实体产品的多种物理特性，包括结构特性、力学特性、流量特性等。对于多层次性，组成最终产品的不同组件、部件、零件等，都可以具有其对应的模型，从而有利于产品数据和产品模型的层次化和精细化管理。对于多学科性，高精密产品通常涉及机械、电气、液压等多个学科的交叉和融合。装配MBD数据集为装配全过程服务，作为唯一的数据源来规范装配相关的活动，最后在实物产品的配过程中得到实例化和应用。

在静态MBD模型中各类参数已经定义的基础上，考虑装配过程的复杂性和动态不确定性，建立可描述高精密产品性能模型。以高精密产品的流量特性为例，静态流量曲线是输出流量与输入电流呈回环状的函数曲线，它是在给定的压降和负载压降为零的条件下，使输入电流正、负额定电流值之间的动态特性不产生影响的循环速度作

以完整的循环所描绘出来的连续曲线。通过流量曲线可以了解到很多关于产品的性能特征。

2.2 实际测量信息

传统的产品数字化装配工艺设计方法大多基于理想模型，该模型可在装配工艺设计阶段用于检查装配序列、获取装配路径、装配干涉检测等环节，然而对于高精密产品而言，现阶段的三维数字化装配工艺设计并不能完全满足现场装配发生的工艺调整，主要是由于在装配工艺设计阶段未考虑来自零件制造误差等因素造成的。本文采用虚实映射的零组件逆向建模技术构建高度精确的实体数模。对于一个待测装配零件，传统的点云扫描方法是对被测零件表面进行无差别的扫描，没有考虑到装配特征、基准特征等关键部分，因而导致数据量极大、数据冗余等问题。本文采用考虑关键装配特征（主要指零件之间相互配合特征，如面-面、轴与孔、齿-齿等之间的配合特征）的零组件逆向建模技术，如图 4 所示。具体关键装配特征数据获取步骤如下：

1)确定装配零组件装配特征、基准特征、边界特征等；

2)根据零部件的几何外形，关键装配特征，确定高精密装配零组件激光扫描系统中的运动轨迹、转台转动、专用测量设备的扫描频率；

3)获得高精度测量三维特征形貌点云；

4)通过专用高精度间接测量设备，获得腔体内部密闭特征形貌。

需要说明的是，测量的间接数据，通过数理模型分析后生成密闭轮廓信息，最终融合在点云数据中。

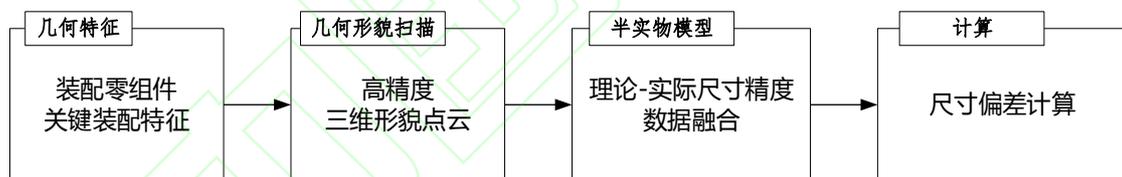


图 4 融合制造偏差的装配数据融合与偏差计算

3 基于知识图谱的装配工艺表达及动态优化

3.1 基于知识图谱的装配工艺表达

传统的装配工艺是通过装配仿真得出工艺文档，其表达方式不易查阅、且缺乏隐含知识的挖掘。同一批次装配工艺一旦形成，大多是无法变更的，不能根据同一批次不同产品装配状态做出适应性调整。而知识图谱可以很好的表达相邻零件之间的装配关系（显式关系），同时可以深入挖掘非相邻零件之间的关系（隐式关系），同时提高了工艺检索效率^[27-28]。为此，本文对高精密产品的装配工艺采用了基于知识图谱的表达方式。按照知识图谱的信息组织方式，通过“类-关系类-类”、“类-属性-值”定义装配工艺文档，其本体为组成高精密产品数字孪生体的各零件子数字孪生体。如图 5 所示，建立的装配工艺知识图谱包含了模式层和数据层两个部分。其中，数据层为实体

对象与关系对象共同组成的“节点-属性-值”、“节点-连接-节点”三元组，当三元组大量存在时就得到语义网络图。模式层是装配工艺知识图谱建模的核心，为了清晰描述装配工艺复杂的语义信息，将模式层分为了装配结构模式和装配工序模式。

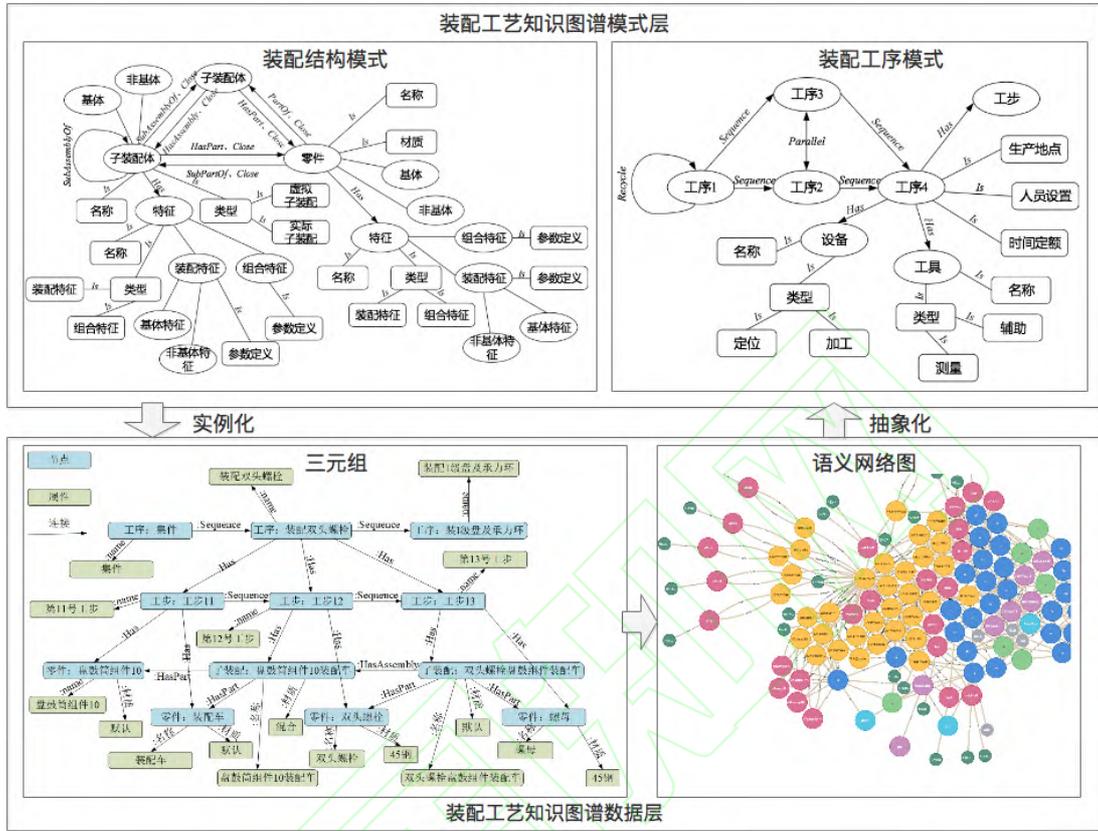


图5 装配工艺知识图谱的构建

3.2 基于知识图谱的装配工艺动态优化

在高精密产品的装配过程中，需要根据不同装配阶段进行装配质量评估，对于质量评估不符合装配性能要求的，需要进一步进行装配工艺优化。

(1) 装配质量评估

在产品装配过程中，根据对象的不同可分为阶段质量评估和综合质量评估，两种评估方式共同实现整个装配过程的装配质量评估。阶段质量评估阶段是产品装配到具备一定性能时（一般指形成子装配体），评估内容为装配的几何精度和性能精度。其中，几何精度包含同轴度、平行度和垂直度等。性能精度包含静态性能（压力特性、负载特性等）和动态性能（幅频、相频等）。阶段质量评估和综合评估的方法相似。不同的是，若子装配体性能不符合装配需求，则构建的产品性能一定不符合要求。而由于构成产品的子装配体之间又存在关联关系，所以，在所有子装配体性能满足要求下，装配形成的产品性能不一定符合要求。可以理解为阶段质量评估是综合质量评估的必要不充分条件。以阶段质量评估为例，其流程如图6所示，首先通过传感器、测量设备和专用设备获取各项关键特征数据，经过智能算法预测性能指标，然后进行匹配对比对应的装配性能指标得出评价结果。最后根据评价结果进行装配工艺优化。

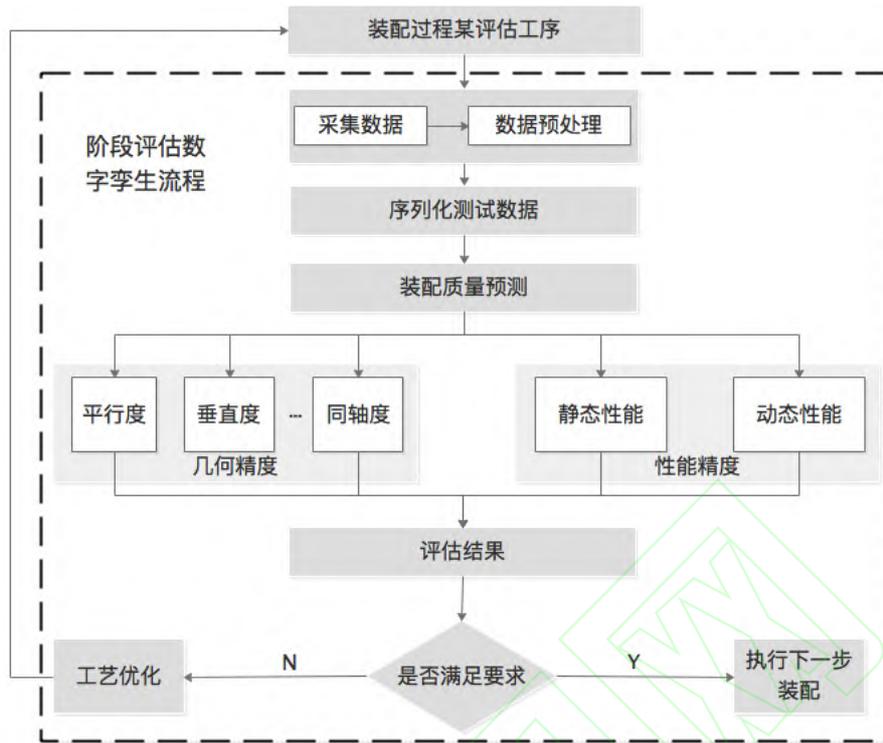


图 6 阶段评估数字孪生体评估流程

(2) 装配工艺动态优化

对应阶段质量评估和综合质量评估，分别进行了局部工艺优化和全局工艺优化。

1) 局部工艺优化

在高精密产品的装配过程中存在多个装配过程阶段，局部工艺优化是在阶段装配完成后根据阶段装配质量评估结果，利用机器学习算法得出修正装配工序参数，进而形成装配工序链插入末端工序后。其中，插入的工序属于调试工序（配合值修改或二次拆装）。由于不同的装配阶段具有不同的质量评估指标和工艺优化目标，本文将工艺优化目标分为两大类：几何层面的工艺优化目标 $G_s(x)$ 和性能层面的优化目标 $P_s(x)$ ，优化对象为组件级。为此局部工艺优化目标函数 $SO(X)$ 可表示为(1)：

$$SO(X) = [G_s(x), P_s(x)]^T \quad (1)$$

(2) 全局工艺优化

全局工艺优化是由于根据综合质量评估结果可能存在多个装配过程阶段的工艺优化，为此是面向全局的工艺调整。在全局工艺优化过程中，需要重新抽取装配工艺知识图谱中的部分装配工序，与原装配工序参数进行匹配对比，将得出的参数差值形成新的工序插入到原装配工序链中。其中，插入的工序可看作为调试策略。同样全局工艺优化目标同样分为两大类：几何层面的工艺优化目标 $G_s(x)$ 和性能层面的优化目标 $P_s(x)$ ，优化对象为产品级。全局工艺优化目标函数 $CO(X)$ 可表示为(2)：

$$CO(X) = [G_s(x), P_s(x)]^T \quad (2)$$

4 操作-状态-质量三层结构下的质量制控策略

高精度产品质量控制点多，装配性能与装配参数之间存在复杂的非线性关系，导致装配质量难以控制。本文采用构建了操作-状态-质量三层结构下的质量控制策略框架，从控制最基本人工、设备操作行为开始，逐步实现装配过程与状态的控制，最终完成装配质量与性能的控制，如图 7 所示。其中，操作层控制包括设备操作变量控制，即控制设备运行参数；标准作业流程控制，针对高精度产品建立标准作业流程，对装配作业人员的行为进行规范；装配标准执行度控制，即衡量装配作业人员对标准作业流程的执行程度。状态层控制包括多学科性能的相互补偿控制、装配组件刚度控制、动静态控制。质量层控制总装产品的动态静态稳定性，以及最终产品的动静态耦合性能，质量层是评价产品最终性能的关键。

面向复杂装配过程的动态装配质量闭环控制过程如下：

1) 装配实体动态数据的实时采集

在复杂的装配过程中，利用传感器和专业的测量设备实现对装配状态信息的实时感知。针对实时采集的多源、异构装配数据，在预定义的装配信息处理与提取规则的基础上，对多源装配信息关系进行定义并进行数据的识别和清洗，在此基础上进行数据的分析与挖掘，实现多源异构数据的集成。多源异构数据可分为结构化数据、半结构化数据和非结构化数据。对于非结构化数据类型具有不同的处理方式，如图像数据可以采用卷积神经网络（CNN）进行识别处理，对于噪声、XML 类数据可采用自然语言处理（NLP）进行识别处理。

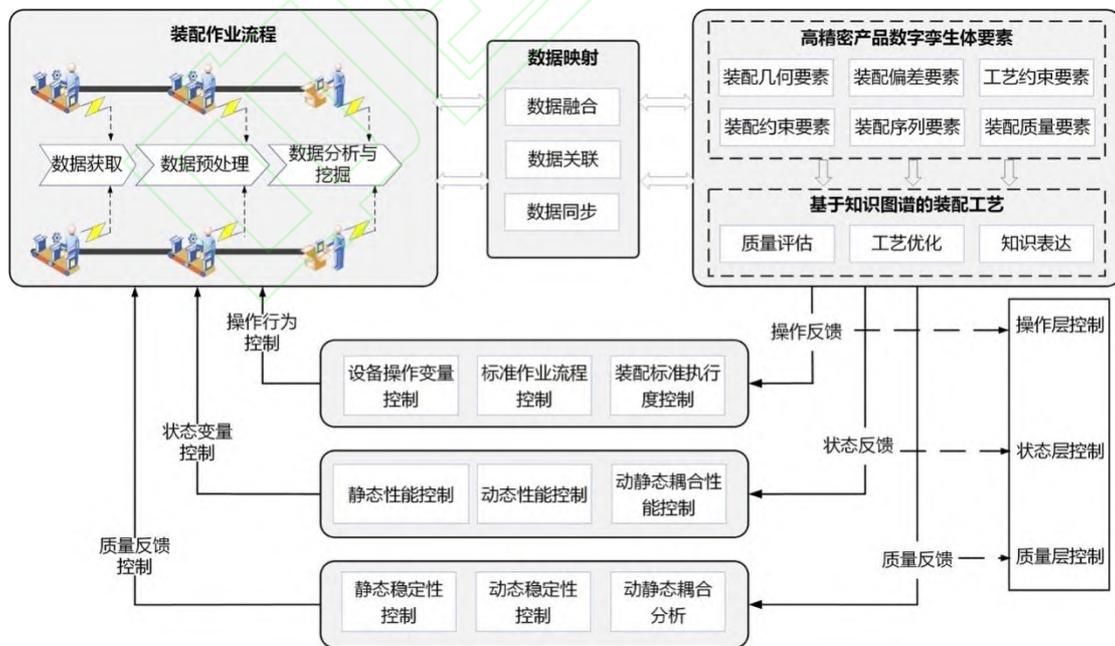


图 7 操作-状态-质量三层结构下的质量控制策略框架

2) 虚实之间的关联与映射

在虚实数据融合、关联、同步的基础上，实现装配实体与数字孪生体之间的关联与映射。对统一规范化处理的装配实体数据，匹配数字孪生体中的各个装配要素。目前数据的融合方法可采用主成分变换法、小波变换法、贝叶斯算法、神经网络算法等。不同的数据融合自身情况而定。

3) 基于数字孪生体和知识图谱的反馈控制

在实时采集装配数据基础上，根据质量评估结果，通过知识图谱做出工艺优化。从操作行为的反馈控制开始，逐步上升到装配状态的反馈控制，最终完成装配质量的控制，形成一套操作-状态-质量三层结构下的质量控制策略。需要说明的是，上述过程是一个不断迭代优化的过程，直至装配产品质量满足要求。

5 应用案例

汽车发动机缸体单元装配工艺复杂、装配精度要求较高，其由缸体、缸盖、曲轴、连杆、活塞、凸轮轴和气门等数十个精密零组件构成。同时各零组件装配精度与整机性能之间的影响关系错综复杂，装配过程需要经过反复调试才能达到装配质量要求，装配效率和装配质量一致性较低。本节结合发动机缸体单元的实际装配过程，从装配工艺动态调整的角度出发，将所提方法应用于发动机缸体单元装配中，以此验证本文方法的实用性。

5.1 多数字孪生体协同装配的实现

5.1.1 数字孪生装配系统的搭建

在汽车发动机缸体单元的多数字孪生体协同装配系统中，搭建了虚实装配实验环境。如图 8 所示，在物理装配实验环境搭建中，利用装配实验平台，在原装配设备基础上添加了双目视觉相机、流量测量设备、电信号检测设备、力矩测量仪和高精度激光扫描仪等检测设备，用于获取装配过程中发动机缸体单元的装配状态数据。在汽车发动机的装配中，部分零件的装配精度达到了微米级，而目前高精密激光扫描仪的精度可达亚微米级，因此可以满足当前的测量需求。在虚拟装配实验环境搭建中，以 Visual Studio2019 为系统开发平台，以 Unity3D 为图形显示，搭建虚拟装配系统，虚实装配空间通过双向互操作接口进行连接。虚实之间通过操作-状态-质量三层结构进行控制。在操作层，本文通过建立了虚实设备接口，利用 PLC 技术对物理设备进行控制；对于标准作业流程和标准执行度的控制可对比生产计划进行调控。在状态层，通过改变输入变量来测量产品性能，如改变输入电流，观察空载流量性能。在质量层，通过采集装配质量数据进行质量评估，以此作为工艺优化的约束条件，通过工艺优化（调试）控制质量变量。

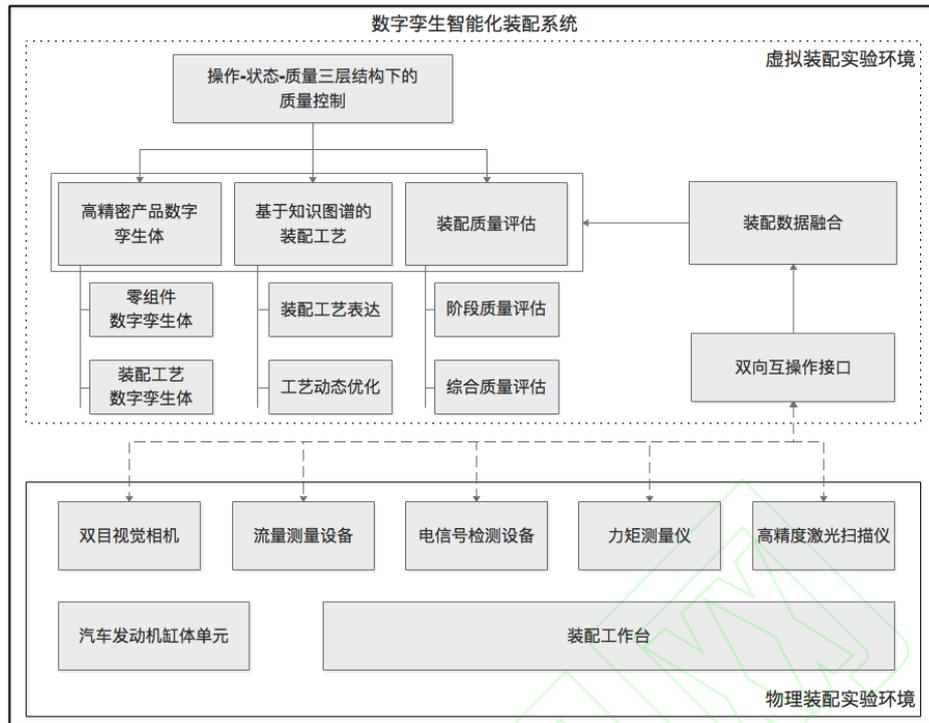


图 8 虚实装配实验环境

5.1.2 装配工艺知识的生成

在开始实际装配前，即装配设计阶段需要形成装配工艺知识。如图 9 所示，首先利用历史装配工艺数据形成装配工艺知识图谱，根据产品装配需求和零组件的实际尺寸提取装配工艺信息。其中零组件在虚拟空间中的表示是集成了三维几何模型、点云模型和属性信息。几何模型来源于上游的产品设计部门，通过 CAD 软件（UG、CATIA 等）生成 .stl 格式模型文件，然后导入数字孪生装配系统的模型库中。点云模型是通过连接物理空间模块的三维激光扫描仪获取点云数据，经过点云的过滤、拟合等预处理形成点云模型。属性信息依靠 XML 文件进行存储，主要包括几何特征信息、材料属性信息、物理属性信息、约束关系信息等。在完成整个装配仿真过程后，根据装配过程的不同阶段（与阶段质量评估相对应）对总装配序列进行分解，形成不同装配过程阶段的子知识图谱。子知识图谱表示的是不同装配过程阶段的工序链。其中，知识图谱数据的通过 Neo4j 进行存储，通过 NLTK 工具进行自然语言处理形成知识。

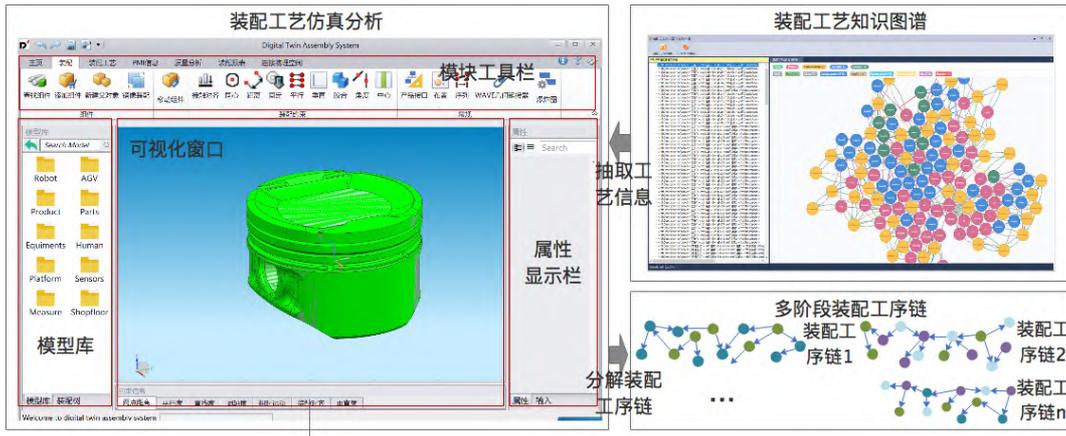


图9 装配工艺知识的生成

5.1.3 质量控制策略下的工艺动态优化

发动机缸体单元的实际装配过程要分为装配曲轴、装配主轴承盖、装配止推轴承等数十个阶段。在装配过程中首先对装配状态数据进行采集，如图 10 所示，列举了部分间隙测量数据。采集的数据包括每一道工序的装配尺寸数据数据，通过 OPC-UA 标准通讯协议上传至虚拟空间装配系统的数据存储模块，并根据不同工序和数据类别进行分类。其中装配数据检测实现了全自动化控制，设备部件的移动均采用气动控制，通过动作控制柜控制设备的各个动作。



图 10 装配过程及质量检测数据采集

根据采集的数据，利用装配质量评估结果对发动机缸体单元进行局部和全局工艺优化。如表 1 所示，首先根据不同的装配阶段分别进行装配质量评估，然后根据质量评估结果在原装配工艺基础上进行优化。对于局部工艺优化是在阶段装配完成后，插入新的装配工序链。如在装配曲轴过程中，需要采集的数据主要为装配几何误差，在进行装配质量评估时需要对 4 项指标进行评估，根据评估结果重新插入了 2 道工序来

修正装配误差（如，在本案例中，轴向间隙指标过大，不符合装配质量需求，所以插入工序是工序 1:拆卸原止推垫片，工序 2:更换止 JTW-3W-13 推垫片）。如在装配连杆活塞过程中，需要采集的数据包含装配几何误差和性能误差两大类数据，在进行装配质量评估时需要分别对几何质量的 3 项指标和性能质量的 2 项指标进行评估，根据评估结果重新插入了 2 道工序来修正装配误差。对于全局工艺优化，需要采集的数据同样包含装配几何误差和性能误差两大类数据，在进行装配质量评估时需要分别几何质量的 9 项指标和性能质量的 8 项指标进行评估。通过装配工艺知识图谱重新提取总装配工序链，经过装配工艺仿真后进行分解成多阶段装配工序链。值得注意的是，发动机缸体单元装配顺序是固定的，也就是意味着优化的装配工艺主要为部分工序的装配参数。经过优化的装配工艺会再次下达物理装配空间，进而实现动态迭代优化装配。

表 1 装配工艺优化及应用结果对比

装配阶段	装配质量评估	原装配工序链	优化装配工序链	平均装配时间/s	质量一致性/%
装配曲轴	$G_S(x_1, x_2, x_3, x_4)$			220→151	94.7→97.0
装配凸轮轴	$G_S(x_1, x_2, x_3)$			42→22	96.1→98.3
装配连杆活塞	$G_S(x_1, x_2, x_3)$ $P_S(x_1, x_2)$			198→101	97.5→99.1
...	$G_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ $P_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$
完成总装	$G_S(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)$ $P_S(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8)$			1265→746	97.7→98.9

5.2 讨论

在传统的发动机缸体单元装配方法中，装配设计阶段虚拟仿真得出的装配工艺是通过理想几何模型及理论数据产生的，无法正确指导实际装配过程，使得装配设计与装配过程出现脱节。在实际装配过程中根据当前装配状况需要人工推算后续多道工序的预留公差，这给装配操作带来了极大的难度，且装配耗时较长，装配质量一致性较差。利用数字孪生装配方法实现了虚实空间的深度交互与融合。在完成每一装配工序后，可进行下一道或多道工序的装配质量预测和工艺优化，实现了装配过程的智能决策。将传统装配方法与本文所提方法进行对比，取 20 台发动机装配的实验结果如图 11 可以看出，每一阶段的平均装配时间均有所减少，装配质量一致性均有所提高。同时这种智能化装配方法在一定程度上摆脱了人工经验，降低了装配过程的操作难度。

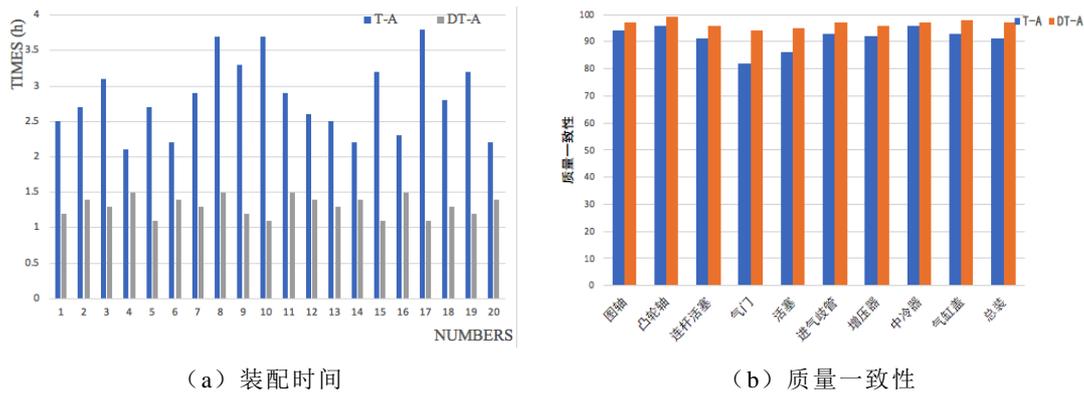


图 11 结果对比

6 结束语

数字孪生的出现为当前数字化装配技术瓶颈问题提供了突破契机。利用数字孪生装配技术可以满足高精密产品不断提高的装配效率和装配质量一致性要求。为此本文提出了一种数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法。研究了产品包含装配全要素数字孪生体的构建方法，提出了一种基于知识图谱的装配工艺表达和工艺优化方法。为了实现高精密产品装配质量的精准控制，在构建数字孪生体和知识图谱工艺表达与优化基础上，进一步提出了一种操作-状态-质量三层结构的质量控制策略。最后，通过搭建的数字孪生装配系统平台对某型号汽车发动机缸体单元进行装配，结果表明本文方法可以有效提高高精密产品装配效率和装配质量一致性。

本文所提方法不仅对高精密产品有效，对于其它复杂产品也具有普适性。目前数字孪生装配系统中数据向知识的转化还处于初级应用阶段，将数据提炼成信息，然后进一步形成知识，可以更好的实现装配过程的智能决策。因此，利用知识图谱研究数字孪生装配过程的知识转化是我们下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The State-of-the-art, Connotation and Developing Trends of the Products Assembly Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(11):2-28(in Chinese). [刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018,54(11):2-28.]
- [2] National Strategic Advisory Committee on the Construction of a Strong Manufacturing Nation. Made in China 2025 Blue Book[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2018(in Chinese). [国家制造强国建设战略咨询委员会. 中国制造 2025 蓝皮书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.]
- [3] TAO Fei, QI Qinglin. New IT Driven Service-Oriented Smart Manufacturing: Framework and Characteristics[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2019,49(1):81-91.
- [4] ZHANG Hao, LIU Qiang, CHEN Xin, et al. A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line[J]. IEEE Access. 2017,5:26901-26911.

- [5] 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(in Chinese). [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.]
- [6] KAUFMAN S G, WILSON R H, JONES R, et al. The Archimedes 2 mechanical assembly planning system[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. 1996.
- [7] ANANTHA R, KRAMER G A, CRAWFORD R H. Assembly modelling by geometric constraint satisfaction[J]. Computer-Aided Design, 1996,28(9):707-722.
- [8] PENG Xiang, LIU Zhenyu, TAN Jianrong, et al. Simplification of Complex Product Design Model Based on Variable Correlation Analysis [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2013,25(8):1245-1254(in Chinese). [彭翔, 刘振宇, 谭建荣, 等. 基于变关联分析的复杂产品设计模型简化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013,25(8):1245-1254.]
- [9] ZHOU Sihang, LIU Zhenyu, TAN Jianrong. Dimensional Variation Based Assembly Sequence Deviation Transfer Model and Quality Evaluation Method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011,47(2):1-8(in Chinese). [周思杭, 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.]
- [10] WU Dianliang, YANG Rundang, MA Dengzhe, et al. Research on Multi-Constrained Navigation Technology in Integrated Virtual Assembly Environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004,4(11):47-52(in Chinese). [武殿梁, 杨润党, 马登哲, 等. 集成虚拟装配环境中的多约束导航技术研究[J]. 机械工程学报, 2004,4(11):47-52.]
- [11] GERMANICO G, HUGO I, THEODORE L. Development of a haptic virtual reality system for assembly planning and evaluation[J]. Procedia Technology, 2013,7:265-272.
- [12] GAO Wei. Study on Physical-based Virtual Assembly Technology[D]. Xidian University, 2015. [高巍. 基于物理属性的虚拟仿真技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2015.]
- [13] SETH A, VANCE J, OLIVER J. Combining Dynamic Modeling with Geometric Constraint Management to Support Low Clearance Virtual Manual Assembly[J]. Journal of Mechanical Design, 2010,132(8):1002-1008.
- [14] WANG Yong, JAYARAM S, AYARAM U, et al. Physically based modeling in virtual assembly[J]. The International Journal of Virtual Reality, 2001,5(1):1-14.
- [15] LIU Jianhua, HOU Weiwei, ZHANG Zhixian, et al. Virtual assembly technology based on accuracy and physical properties [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011,17(3):595-604(in Chinese). [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.]
- [16] ZHANG Zhixian, LIU Jianhua, NING Ruxin. Simulation of physical assembly process based on multi-body dynamics in virtual assembly[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(5):90-99(in Chinese). [张志贤, 刘检华, 宁汝新. 虚拟装配中基于多刚体动力学的物性装配过程仿真[J]. 机械工程学报, 2013,49(5):90-99.]
- [17] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2017.
- [18] TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018,24(1):1-18(in Chinese). [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.]
- [19] WU Ying, YAO Liya, XIONG Hui, et al. Quality control method of complex product assembly process based on digital twin technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(6):1568-1575(in Chinese). [武颖, 姚丽亚, 熊辉, 等. 基于数字孪生技术的复杂产品装配过程质量管控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019,25(6):1568-1575.]

- [20] ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018,96(1-4):1149-1163.
- [21] GUO Daqiang, ZHONG RY, LIN Peng, et al. Digital twin-enabled Graduation Intelligent Manufacturing System for fixed-position assembly islands[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020,63:101917.
- [22] SIERLA S, KYRKI V, AARNIO P, et al. Automatic assembly planning based on digital product descriptions[J]. Computers in Industry. 2018,97:34-46.
- [23] POLINI W, CORRADO A. Digital twin of composite assembly manufacturing process[J]. International Journal of Production Research. 2020,17(58):5238-5252.
- [24] YI Yang, YAN Yuehui, LIU Xiaojun, et al. Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study[J]. Journal of Manufacturing Systems. 2020.
- [25] GREGORIO J, LARTIGUE C, THIEBAUT F, et al. A digital twin-based approach for the management of geometrical deviations during assembly processes[J]. Journal of Manufacturing Systems. 2020.
- [26] BILBERG A, MALIK A. Digital twin driven human-robot collaborative assembly[J]. CIRP Annals. 2019,68(1):499-502.
- [27] Zhou B, Bao J, ChenZ, et al. KGAssembly: Knowledge graph-driven assembly process generation and evaluation for complex components[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021.
- [28] Zhou B, Bao J, Li, J, et al. A novel knowledge graph-based optimization approach for resource allocation in discrete manufacturing workshops[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021.

作者简介:

孙学民(1991-), 男, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向: 数字孪生、数字化装配, E-mail:312164355@qq.com;
刘世民(1994-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 研究方向: 数字孪生、数字化加工;
申兴旺(1992-), 男, 河南林州人, 博士研究生, 研究方向: 数据智能;
黄德林(1990-), 男, 河南信阳人, 讲师, 博士, 研究方向: 质量控制、智能制造;
+鲍劲松(1972-), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士, 研究方向: 工业大数据、智能制造, E-mail: bao@dhu.edu.cn。