

引文格式: 曹增义, 单继东, 王昭阳, 等. 面向航空发动机制造的数字孪生应用架构探索与实践[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 40-49.

CAO Zengyi, SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, et al. Exploration and practice of digital twin architecture for aero-engine manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 40-49.

面向航空发动机制造的数字孪生应用 架构探索与实践

曹增义, 单继东, 王昭阳, 陈贺利

(中国航发西安航空发动机有限公司, 西安 710021)

[摘要] 数字孪生作为一种新的思想和技术方法, 已成为各企业实施数字转型战略的重要抓手。结合我国航空发动机研制特点和行业数字化技术应用现状, 提出了面向航空发动机研制过程的数字孪生技术应用架构, 以及工艺设计、生产制造、产品装配、维护保障的数字孪生要素与应用模式, 并针对基于MBD的可制造性分析、数字化工艺设计与仿真、虚拟制造、虚拟装配与交付、远程维护等数字孪生实现技术开展研究与应用, 为航空发动机研制水平提升进行数字赋能。

关键词: 航空发动机; 数字孪生; 架构; 仿真; 虚拟制造

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.040



曹增义

高级工程师, 研究方向为设计制造协同、数字化制造、虚拟仿真等。

在新产品研制周期不断缩短, 制造成本压力不断增加, 全球疫情和能源危机延续等背景下, 数字孪生成为提升产品设计效率与性能, 降低研制成本的一种有效解决途径, 特别是在航空航天、深海下潜等领域具有不可

替代的作用。美国发布的《全球地平线》顶层科技规划文件和欧盟发布的框架计划中都提到, “数字孪生”技术被誉为未来有望改变航空制造业“游戏规则”的顶尖技术^[1]。美国国家航空航天局在太空技术路线图中首次引入了数字孪生的概念, 以期采用数字孪生实现飞行系统的全面诊断维护; 通用电气公司计划基于数字孪生实现对发动机的实时监控和预测性维护^[2]; 欧共体 Horizon 2020 框架计划提出名为“双胞胎控制 (Twincontrol)”的一个关于未来机床和加工过程的项目, 是数字双胞胎概念的具体应用^[3]。我国航空航天领域也已开展了一些有关数字孪生的探索性研究与应用, 如面向航天器在轨装配^[4]、基于数字孪生的航空发动机低压涡轮单元体对接等^[5], 同时正快速向城市服务、智慧交通、医疗服务等其他领域扩展。航空发动

机行业作为“中国制造 2025”大力推动突破发展的十大重点领域之一^[6], 近年来加快了数字转型速度以适应自身发展需要, 针对数字孪生已在某些点上开展了探索应用, 但面向航空发动机研制全过程可执行的数字孪生解决方案较少, 如何落地实施缺少明确的架构指引。结合这一现状, 本文开展了航空发动机研制过程数字孪生应用架构及关键支撑技术的探索与实践。

1 对数字孪生的理解

1.1 概念理解

数字孪生 (Digital twin) 这一概念最早出现在2003年, 由 Michael Grieves 教授在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上提出, 其描述为“与物理产品等价的虚拟数字化表达”^[7], 后续数字孪生的概念被许多国内外科研机构 and 专家进行解

读和扩展。埃森哲提出数字孪生是物理产品在虚拟空间的数字模型,包含了从产品构思到产品退市全生命周期的产品信息;美国国防采办大学关于数字孪生的定义为充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据,集成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;国内行业专家宁振波提出数字孪生是将物理对象以数字化方式在虚拟空间呈现,模拟其在现实环境中的行为特征;林诗万提出数字孪生是实体或逻辑对象在数字空间的动态复制体,可基于历史和实时数据、先进的算法模型实现对象状态和行为的数字化表征、模拟和预测^[8]。

由数字孪生的概念可以看出,数字孪生体由数字化、可视化的实体模型和能够模拟、预测行为及结果的仿真算法模型组成。国内目前成熟的应用主要是以实体模型为载体的三维可视化展示与监控,而实体模型和仿真算法模型共同作用的数字孪生案例很少。首先,数字孪生是一种理念,一种思想,是企业的业务流程、管理模式、技术手段在数字化条件下的转变和升级,甚至是大的变革。其次,数字孪生是一种技术平台,面对复杂的多物理对象及其业务过程,实现数字孪生需要成熟的行业生态资源和技术能力支撑,单单通过某一独立系统无法完成多专业、多领域体系级的数字孪生。下文结合工作实践阐述对现阶段数字孪生概念的理解。

(1)数据映射是纽带。数据映射是确保虚拟对象与物理对象状态和行为实时同步的纽带,数据交互频率、数据量级可根据实际业务特点进行设定,以免提高模型设计和数据处理复杂度,陷入为数据采集而采集的误区。

(2)仿真技术是关键。数字孪生发源于仿真,数字孪生本质上需要一套完整的仿真计算模型来实现对

物理对象特征和行为的模拟,提前对问题进行预测,具有前瞻性和可重复性特点。对物理对象的数据采集能够优化仿真模型及其算法。

(3)智能化是方向。针对业务执行过程,以各类知识库、规则库等为支撑,通过特征识别、大数据挖掘、人工智能等技术实现设计、制造、装配、维护过程的智能化。

(4)系统平台是途径。数字孪生需依靠一套系统平台实现,但不一定要求搭建一个全新的系统平台,可以以企业现有工程化软件和信息系统为基础,以物联网、仿真、系统集成、大数据等关键技术为支撑,将数字孪生的理念融入数字转型并通过系统功能落地实现。

通过上述对数字孪生的理解,结合企业现有数字化建设水平,这一概念如何在实际执行层面得到落地应用是企业关注的焦点。

1.2 面向航空发动机制造的数字孪生功能架构

航空发动机制造孪生是在虚拟环境中预先开展工艺设计、生产制造、产品装配、维护维修整个研制过程的模拟与分析,实现物理对象的可

制造性分析、工艺方案验证与优化、制造过程风险预判、实物状态信息同步及预测,最终以发动机制造过程孪生体和制造结果孪生体两类形态存在,覆盖产品数据、仿真数据、制造资源数据和物理对象采集数据等。航空发动机制造过程涉及多种专业协同,零部件加工精度要求高,实现制造数字孪生是一项复杂的系统工程,目前无法通过某一系统平台实现整个研制过程的数字孪生。结合行业特点和现有数字化建设条件,采取先模块化后体系化的思想推进航空发动机研制数字孪生功能平台建设,以工艺设计、生产制造、产品装配、维护维修4个业务为对象,分别定义其数字孪生模块功能,以BOM、MD (Master data, 主数据)、MBD模型为数字线索,实现各模块之间信息的互联互通。以数字化、网络化为基本保障条件,以仿真技术和数据映射为核心实现航空发动机整个研制过程的数字孪生,其功能架构如图1所示。

(1)物理层。指物理工厂中涉及物理存在的对象,如各种设备、工具工装、生产厂房、操作工人等,还包括物理存在的制度、标准、规定等技术

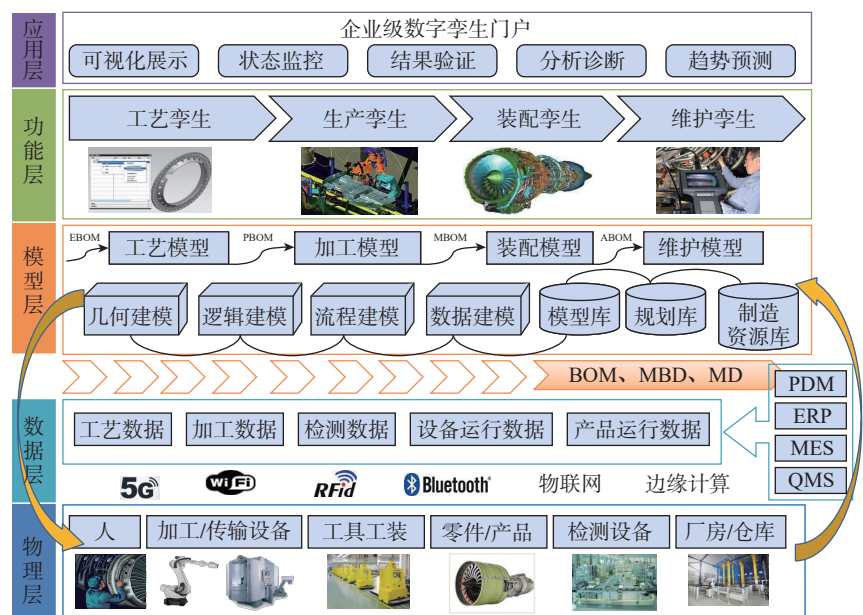


图1 航空发动机制造数字孪生功能架构

Fig.1 Digital twin functional architecture for aero-engine manufacturing

与遵循管理要求而产生的逻辑对象。

(2) 链接层。指连接物理对象和虚拟对象之间的各种通信与网络技术,负责模型层和物理层之间信息的交互与映射,其涉及的关键技术包括物联网技术、RFID 技术、5G 技术等。

(3) 数据层。物理对象时刻都产生大量状态数据和加工数据,通过对这些数据进行采集、过滤和处理,将有效的数据映射给虚拟对象,以实现虚拟对象状态的实时更新。相关应用系统产生的有效数据也需反馈至虚拟对象,以便支撑其计算逻辑。数据层涉及的关键技术包括数据采集技术、大数据分析挖掘技术、边缘计算技术、云计算与存储技术等。

(4) 模型层。是数字孪生的核心层,以复杂算法和仿真技术为核心,以各种资源库为支撑,将实物对象进行数字化、模型化转换,在虚拟空间对物理对象的形态、状态、功能等物理特征进行模拟、感知和识别,并根据采集数据不断完善自身计算模型。模型层涉及的关键技术包括 MBD 技术、仿真技术、虚拟制造技术、AI 技术和 VR/AR 技术等。

(5) 功能层。按照业务模块划分实现各子模块的数字孪生功能,通过将结果在不同数字孪生模块之间进行数字传递和功能组合,以实现更加复杂的数字孪生体功能。

(6) 应用层。构建企业级数字孪生门户,在统一的虚拟环境中根据不同的应用对象,实现航空发动机制造全生命周期的各种业务场景复现、状态监控、风险分析以及预测。

2 工艺孪生

工艺孪生是在虚拟环境中进行工艺设计方案验证和工艺参数优化,以多专业工艺仿真技术为核心引擎,以工艺资源库和知识库为支撑,并通过接收物理对象采集数据进行虚拟环境的修正和完善。MBD 是一种先进的产品数字化定义方法,改变了传

统以二维工程图为主的制造方式^[9]。通过构建基于 MBD 的工艺设计模式,实现工艺设计全要素数字化、模型化、知识化,为工艺孪生提供准确的模型输入,通过工艺设计流程贯通多专业协同仿真环境及各类工艺设计资源库,从而实现工艺孪生的识别、运行及反馈,其功能架构如图 2 所示。

2.1 基于 MBD 的可制造性预先验证

设计院和制造厂物理分离是航空发动机行业一个特点,上游设计院在完成产品设计后,将设计结果传递给制造厂进行加工制造,最终由制造厂交付物理产品。由于分工不同导致设计院无法掌握零件的可制造性及加工工艺可行性,在初步方案设计完成后需要经过制造厂初步验证,以确定设计方案的可制造性、制造成本等综合情况,避免在实际加工过程中发现设计缺陷,导致制造资源浪费,影响产品交付。

在接收到上游设计院 MBD 模型文件后,基于工艺数字孪生模块的可制造性分析功能,通过特征自动识别,系统基于已有规则库、知识库对零件的制造精度、加工规格、特征尺寸进行自动分析,并给出可制造性评价报告,其实现逻辑如图 3 所示。对于结构和制造工艺特别复杂的零件,需进一步通过工艺仿真技术进行预先模拟验证,最终将结果反馈至上

游设计院对设计方案进行修改和优化。

2.2 基于 MBD 的智能工艺设计

工艺设计方式、过程、结果的数字化和模型化是实现工艺数字孪生的基本保障。目前航空发动机行业已经基本实现工艺设计的结构化管理,但颗粒度细化程度不够,对工步信息、加工参数等内容结构化还不够彻底,仍然存在表格、文本形式的工艺表达。在数字孪生环境中执行终端大部分是系统和机器,而不是人,只有精准的数字化工艺信息才能被系统和机器识别和执行。

以工序对象为载体,通过工序三维模型、工具模型、刀具模型、设备模型、检验模型的数字化、结构化管理,对数控加工程序、工艺参数卡、刀具信息、工装信息进行深度结构化改造,使得工艺设计结果全面数字化。工艺知识库是实现工艺孪生的重要数据支撑,将典型工艺、加工参数、设备参数、刀具参数、材料参数等与工艺设计过程紧密关联的知识纳入工艺知识库管理,同时确保工艺知识库能够得到现场物理层采集数据的连续更新。在此基础上通过基于 MBD 的特征识别,以工艺知识库和规则库为支撑,通过知识推理实现面向知识驱动的工艺设计,自动输出对应的工艺规范、数控程序等工艺设计文件及

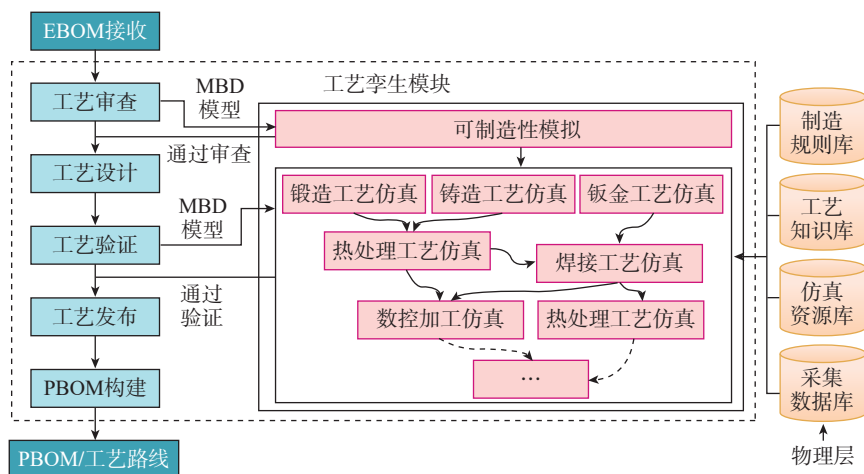


图 2 工艺孪生模块功能架构
Fig.2 Functional architecture of process twin module

参数,提高工艺设计的智能化程度,其实现逻辑如图4所示。

2.3 面向数字孪生的工艺仿真

目前,航空发动机制造主要的工艺类型已具备对应的工艺仿真能力,单项仿真水平已达到工程化应用成熟度,正向多专业耦合、全过程链式仿真方向发展。专业仿真工具封装了针对物理对象的计算模型、边界约束模型、工艺模型、材料模型等大量仿真计算模型,如热处理仿真中的热源模型、数控加工仿真中的机床抽象模型^[10]、锻造仿真中材料变形的有限元模型等,这些模型是模拟与预测物理对象特征的关键。

以数控机床加工仿真为例,工艺人员在完成数控程序编程后,经常需要通过现场试切方式验证加工刀路、参数的合理性,影响加工周期和成本。通过引入数字孪生概念,工艺人员可以在计算机上构建一台与车间现

场物理机床一样的孪生机床,包括机床结构、机床参数、机床控制系统等。通过加载零件模型、刀具模型、工装模型、NC程序等信息,设置对应的加工坐标系和加工零点,完成数字孪生机床构建(图5)。通过孪生机床加工过程可实时发现零件切削过程中的干涉、碰撞、过切、欠切等问题,甚至可以分析一些在物理机床上难以获取的参数信息,如每一刀的切削力、切削温度、功率等,从而实现数控加工过程深度模拟和参数优化。

3 制造孪生

制造孪生是在虚拟环境中再现产品的制造过程,通过制造系统、制造仿真和物理对象的数据映射,使得产品及其制造环境的数字空间模型和物理空间模型处于实时交互中。特别是对于多订单、小批量混线生产的复杂工况,人工无法对生产周

期、所需资源进行准确评估,而通过制造孪生可快速实现订单的模拟生产,加快产品导入时间,降低生产成本和提高产品交付速度^[11]。制造孪生以MBOM为数据基础,通过ERP生成虚拟订单,将虚拟订单下达至虚拟的生产制造环境,模拟整个订单的生产制造过程,分析订单的完成周期和制造资源匹配度,以及制造车间的生产能力。同时,通过与现场MES、MDC、安灯等系统采集的物理对象数据进行关联,实现整个制造过程的虚拟展示和状态监控,其应用架构如图6所示。

3.1 虚拟订单生成

(1) 数字线索。面向产品制造过程的数字线索主要包括MD、MBD及BOM 3类数据。产品主数据是贯穿产品设计、工艺、制造、装配等全生命周期的基础数据,涉及零件的编号、材料牌号、材料标准、毛坯状态、

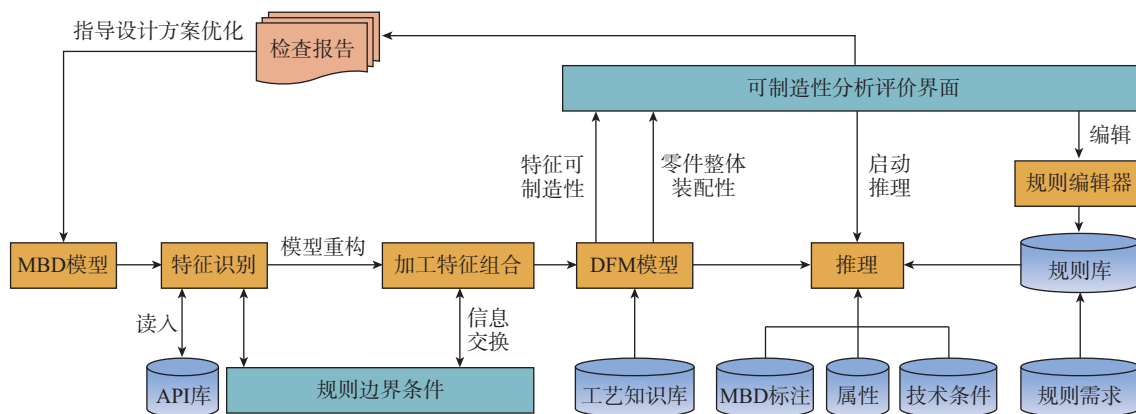


图3 可制造性自动审查实现逻辑图

Fig.3 Logic diagram for automated review of manufacturability

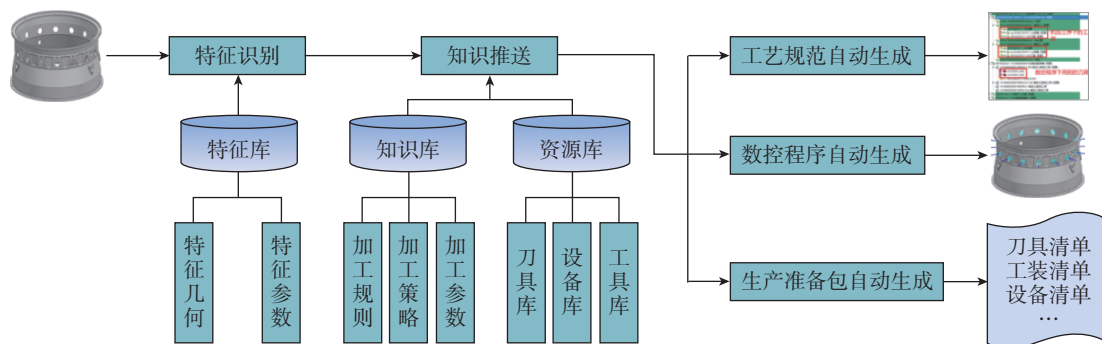


图4 智能工艺设计逻辑图

Fig.4 Logic diagram for intelligent process design

工艺路线等多种信息;MBD 模型是产品制造的依据,需在各个环节进行贯彻执行;BOM 是以树状结构展现产品装配结构及配比关系的一种数据组织形式,其中 MBOM 是形成虚拟订单的关键数据,是落实 ERP 管理思想的基石^[12]。

制造厂在接收到上游设计院所的 EBOM 数据后,根据制造能力评估和制造工艺要求,对从原材料、毛坯件到零件的成品过程进行工艺设计与规划,同步形成 PBOM。在制造阶段,考虑技术变更、制造能力、交付形式等因素需基于 PBOM 对结构和对象进一步调整,从而形成 MBOM。从 EBOM 到 MBOM 结构层面扩充毛坯、原材料、工艺件对象,在关系层面扩充零件与原材料、零件与毛坯、毛坯与原材料的关系对象。

如图 7 所示,通过采用遗传映射、聚合映射和衍生映射^[13]视图的复合表达方式实现 EBOM 到 MBOM 转换。采用遗传映射算法复制 EBOM 视图的结构、属性;然后根据工艺规划形成虚拟件、工艺件等基础单元,采用聚合映射算法对零组件装配关系进行重新设计,以确定 PBOM 下零组件的结构层次和装配关系;采用衍生映射算法对零件生产所需配套的锻铸件、原材料信息进行定义,形成包括零组件、锻铸件、原材料的 PBOM 结构;采用遗传映射算法复制 PBOM 视图的结构、属性,并结合交付、试验等因素采用聚合算法对结构做部分调整形成 MBOM。

(2) 虚拟订单。结合 MBOM 数据、已有库存数据、在制品数据等数据资源,通过 ERP 的 MRP 算法生成生产订单并传递给 MES 系统,经过 APS 排产后形成最终的班产执行工单,从而实现对生产订单周期、资源、成本的模拟计算。通过将采集的设备状态、利用率等实际数据纳入 APS 计算约束条件,使得虚拟订单准确性更加接近实际。

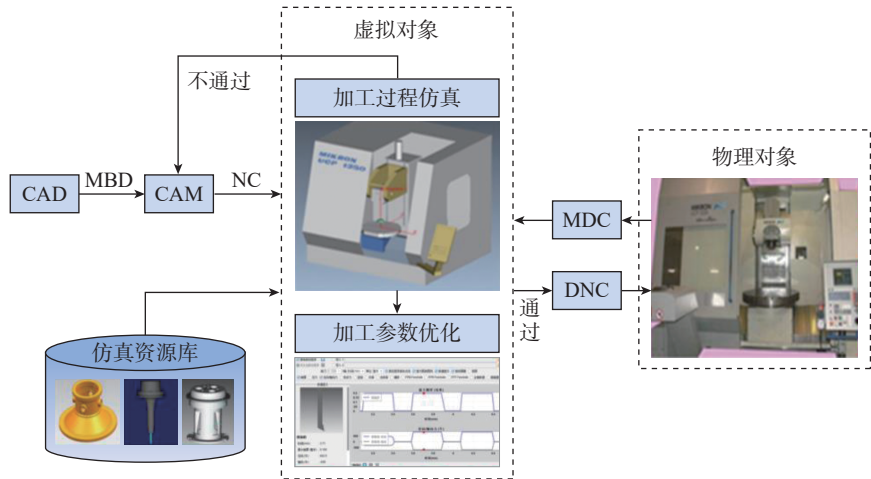


图 5 数字孪生机床
Fig.5 Digital twin machine

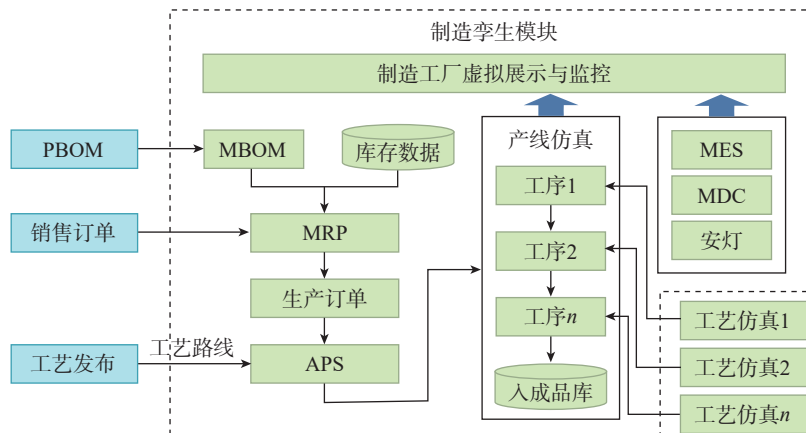


图 6 制造孪生模块应用架构
Fig.6 Application architecture of manufacturing twin module

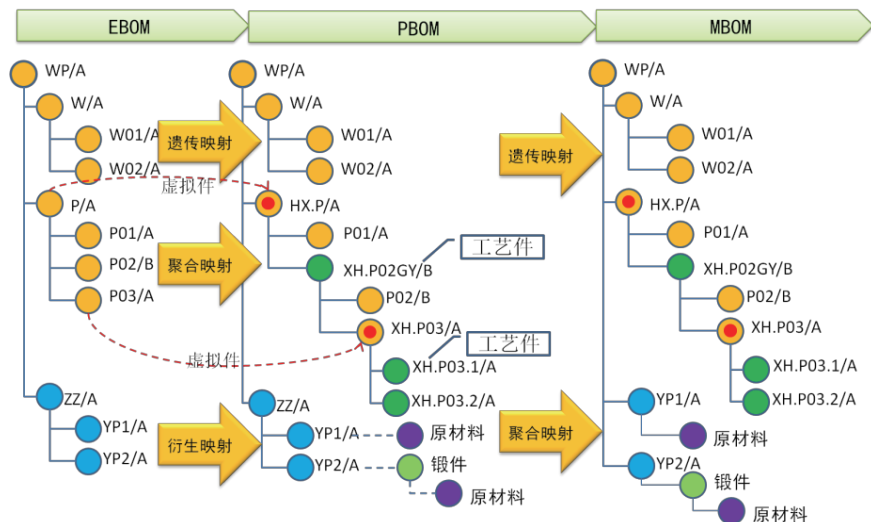


图 7 EBOM 至 MBOM 转换过程示意图
Fig.7 Schematic diagram of conversion process from EBOM to MBOM

3.2 虚拟制造

为实现虚拟制造首先需要构建一个与实际物理车间一样的虚拟加工环境,包括1:1的厂房布局模型、加工/运输/测量设备模型、立体仓库等三维空间模型。其次按照零件的加工路线进行设备之间的逻辑模型设计,包括物料在设备之间的传递顺序、设备加工时间、物料运输时间、物料进出设备逻辑等。最后,通过对产品、工位、工艺路线、生产任务、产能配置等生产基本属性进行参数化定义,以数字化的形式完成对产品、工艺等生产线基本要素的描述,构建生产运行仿真的数据模型。在虚拟车间模型完成构建后,按照数据模型对各个实体要素的定义生成实体模型并进行属性赋值,采用基于事件驱动的仿真控制方法,通过输入虚拟订单作为驱动指令,虚拟订单按照既定的控制逻辑在各个设备之间流转,同时通过与物理设备采集信息关联,同步在虚拟环境中监控整个车间设备运行状态和零件流转状态。

通过制造孪生,在虚拟车间环境中对生产准备、生产过程、生产结果等过程进行仿真验证,对各制造单元加工能力、生产瓶颈、厂房/设备/资源布局规划与配置合理性预先评估。通过与物理设备的数字映射,与现场信息系统数据集成,使得管理者

能够在虚拟车间对物理车间的各种状态进行监控,虚拟化巡检,及时发现问题并处理。如图8所示,以某车间高焓导向工位的人力资源能力配置评估为例,通过生产运行仿真模拟输出的工人利用率图表可知,当工人池中的工人总数为8人时,运行仿真模型输出该工位人员利用率维持在60%~70%之间,比较合理;当工人总数为6人时,该工位人员利用率上升到90%左右,存在生产风险。

3.3 制造过程可视化

数据采集与映射是连接虚拟对象和物理对象之间的重要纽带,是实现数字孪生的重要支撑技术之一。通过终端传感器、即时通信、物联网等技术实现物理对象的全面感知、传递、数字化处理、反馈。数据采集类型包括设备信息、检测信息、工时信息、实际加工参数等信息。数据的传递过程是将设备采集的数据通过边缘计算获取有效的信息,然后通过物联网将其传递给虚拟对象,通过对采集数据进行分析挖掘优化虚拟对象逻辑算法。经过多轮迭代,虚拟对象的控制逻辑、模拟算法日益趋于物理对象,形成虚实互补的良性循环模式。

另一方面,通过对生产计划执行情况、设备利用情况、零件的加工状态信息进行全链条获取,将物理对象

的执行信息反馈至虚拟的全要素生产制造模型当中,基于虚拟车间中的虚拟大屏对班产计划完成率、零件加工的合格率、设备利用率、废品波动等数据进行实时监控与展示,其应用场景如图9所示。

4 装配孪生

装配是发动机制造过程中的最后一个环节,其结果直接影响发动机整机的质量。通过物理装配过程与数字孪生模型的交互与共融,实现物理装配过程和状态的高置信仿真和高精准预测,提高装配管控的智能性、主动性、预测性,进而基于监测、仿真、预测结果的优化和控制,提高一次装配成功率和质量一致性,其实质思路为基于装配BOM和装配仿真技术开展装配工艺设计与验证,通过实物信息采集技术和优选、优配技术实现装配零件自动配套,在虚拟车间完成发动机整机装配过程验证,形成与物理发动机一一对应的装配技术状态信息,随物理发动机一起交付用户,其功能架构如图10所示。

4.1 基于MBD的虚拟装配

由于航空发动机结构的复杂性,传统二维图形加文字描述的表达方式已经不能完全适应现场业务需求。通过构建三维可视化的工艺设计平台,实现装配工艺设计过程流程化、

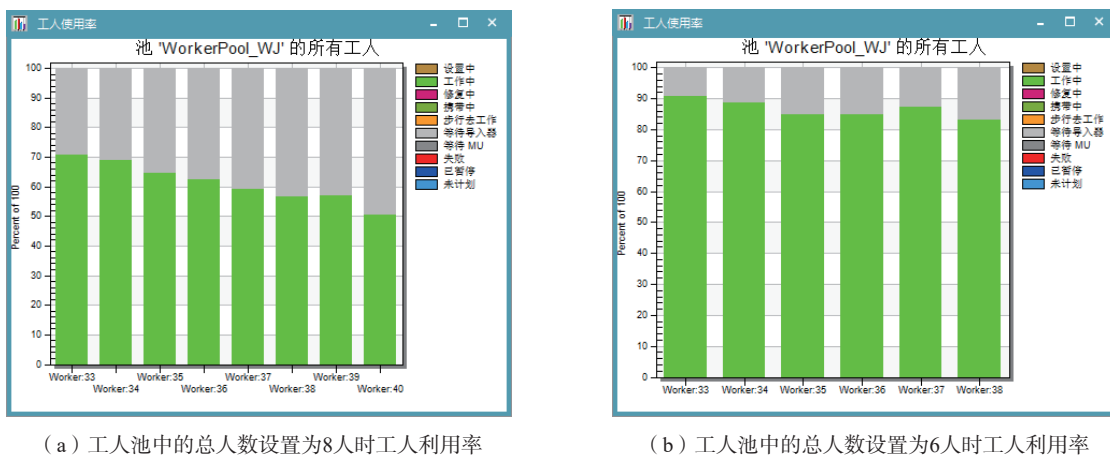


图8 人力资源利用情况模拟对比图

Fig.8 Simulation comparison chart of human resource utilization

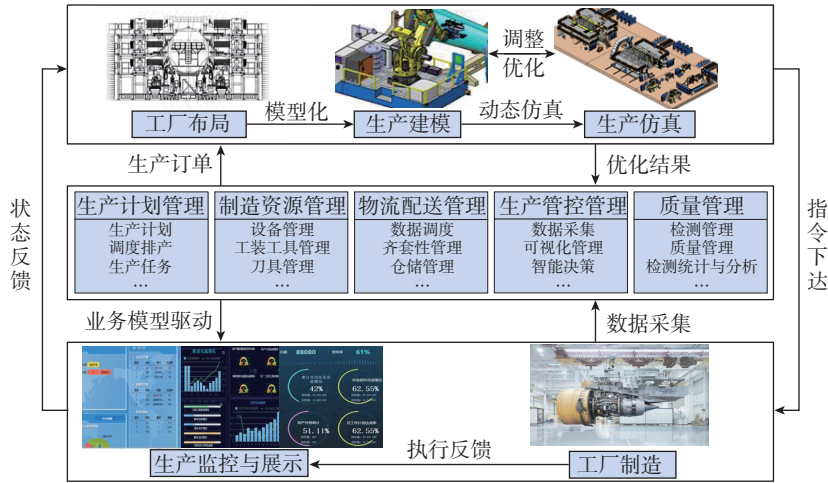


图9 制造孪生场景图

Fig.9 Scene diagram of manufacturing twin

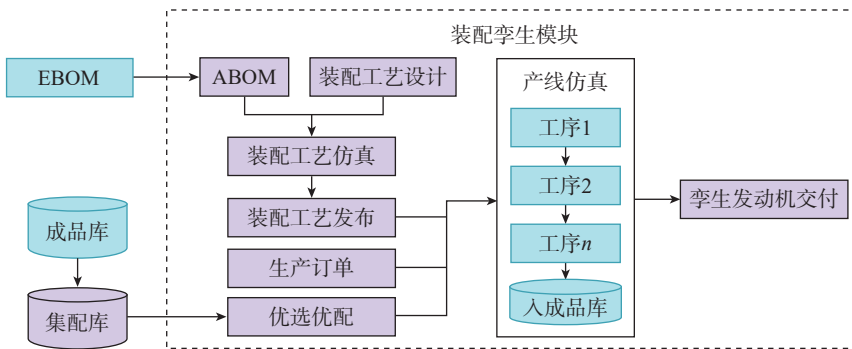


图10 装配孪生模块功能架构

Fig.10 Functional architecture of assembly twin module

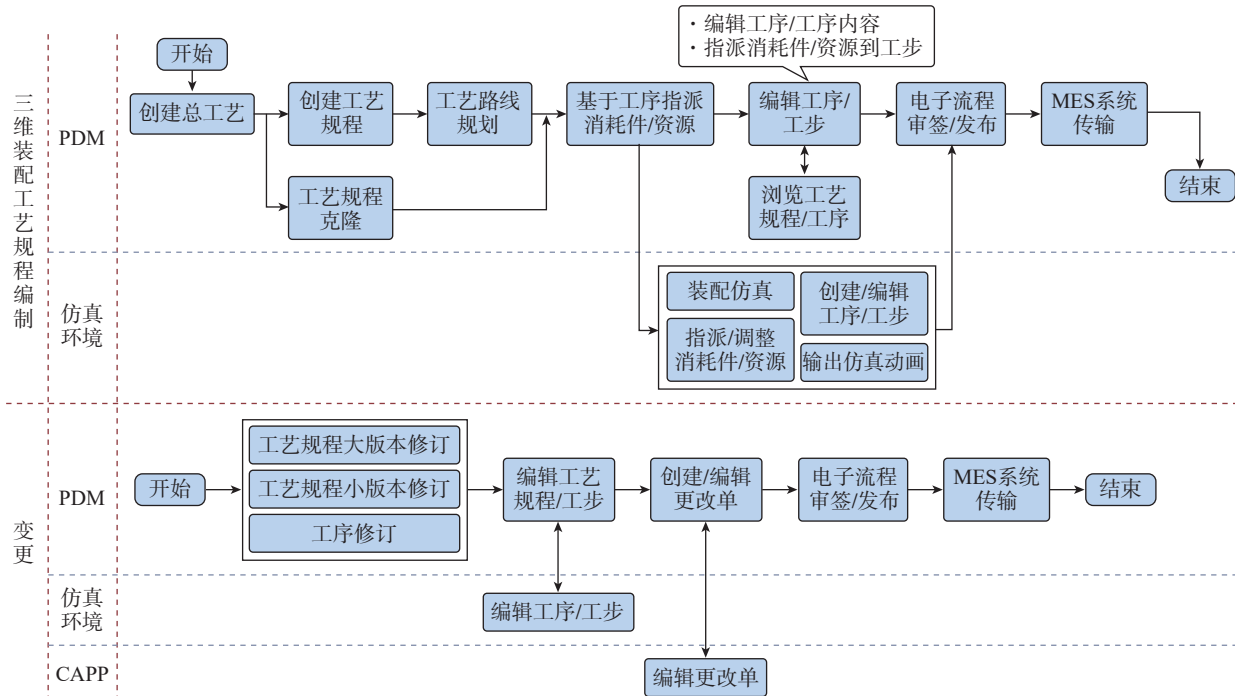


图11 三维装配工艺设计流程

Fig.11 3D assembly process design flow

结果可视化、应用现性化,其结果也是仿真技术、VR/AR、AI等技术应用的前提条件。基于MBD的装配工艺设计过程如图11所示。

虚拟装配车间既是物理装配车间的数字化镜像,又是信息流、物料流、控制流与物理车间相融合的虚拟体^[14]。通过产品装配过程仿真,对零部件装配顺序、路径、方法、资源进行全过程预先验证,对装配的干涉情况、可达性、人机工程进行模拟,对装配车间设备资源能力、生产能力、车间布局进行评估。特别是在新的产品、新的装配工人、新的安装设备情况下,基于三维可视化引导的装配工艺能够使其在一个动态的三维空间中准确掌握零件的安装位置及技术的要求,降低物理发动机在装配过程中错装漏装现象的发生。如图12所示,以发动机转子为例,通过对转子工位进行装配过程仿真,在三维可视化环境下进行装配顺序的规划,分析装配路径及人机交互情况,验证工装的适用性,对装配工艺的可行性和合理性进行验证并优化,减少生产准备及试

制周期。最终将装配过程以三维可视化工艺文件的形式输出,为装配现场提供可视化的作业指导,并基于VR/AR技术通过多视觉、全流程、浸入式方式实现装配运行过程的三维展示。

4.2 基于实测值的优选优配

装配精度控制是航空发动机制造的关键技术之一,一台航空发动机由成千上万个零件组成,虽然零件单体质量特征全部合格,但整机质量的高低需要精准的装配技术来保障。以航空发动机转子部件为例,其工作一直处于高压、高速状态,如果转子的同心度不合格,会造成转子不平衡,在运行过程中导致振动、碰磨状况的发生,轻则降低推进效率,重则导致发动机故障。由于发动机转子部件涉及多个零件,一次性装配成功率不高,需要多次调试才能满足要求^[15],以组成转子部件的叶片零件为例,每个叶片自身的质量、尺寸、频率等参数存在一定差异,致使整个转子部件的不同心度和不平衡量累计结果很难预测。

通过对影响转子不平衡量的关键参数梳理,研究公差带大小、概率分布类型、装配基准、测量基准、装配顺序等因素对转子部件装配质量的影响规律,构建转子不平衡量影响计算模型。通过检测系统获取物理零件对应特征的检测数据,结合计算模型在有限样本空间确定零件如何成组,什么装配顺序才能确保不平衡量最佳,其原理如图13所示。这里涉及两个层面的内容:一是物理零部件关键尺寸测量数据的采集,并与库存和集配系统关联,作为样本空间数据源头;二是开展基于实体数据多参数多因素耦合转子动力学特性模型,基于实际零件及装配大数据样本对转子不平衡分布特性影响模型等关键技术研究,为仿真计算模型的准确性提供理论依据。

4.3 基于实物BOM的虚拟交付

通过系统集成和数据获取,以实

物BOM为载体汇聚每个零部件的实物信息,包括设计、工艺、制造、质量、检验、供应商等信息,形成基于实物BOM的数字孪生发动机。在物理发动机交付的同时,为用户提供一个与物理产品相对应的孪生发动机,以便用户在使用过程中更加准确地掌握发动机的技术状态。对于发动机这种复杂结构和功能的产品,数字孪生交付物对其后期产品维护、维修、培训等工作都有非常重要的意义。

基于实物BOM的孪生发动机需要各个应用系统数据的有效支撑,涉及PDM、MES、ERP、QMS等信息系统。在产品的最后装配阶段,每一个零件对应的实物数字信息包自动完成归集,并以物料号为唯一性区分,包括零件设计、工艺、毛坯、制造、质量等信息,其详细内容如图14所示。

5 维护孪生

精湛的维护和维修能力是航空

发动机稳定、可靠运行的重要保障。通过构建基于实物BOM和实时采集数据复合的航空发动机维修孪生体,对产生的大数据进行信号处理、特征提取、监控评估和健康预测^[16],时刻反映物理发动机的运行状态,分析、预测发动机潜在故障,同步给出准确的维护和维修方案,确保飞行使用安全。维护孪生以交付的虚拟发动机为基础,以物理发动机运行数据和维修数据为输入,以仿真技术和知识库为支撑,实现发动机状态、性能、寿命的监控、预测及诊断,其功能架构如图15所示。

5.1 远程监控与诊断

在发动机交付使用后,为及时掌握发动机的运行状态,提升维护和维修服务水平,需要对发动机的使用情况进行信息采集,包括使用时间、状态、温度/压力等参数信息。通过物联网、5G等通信技术将采集到的信息与工厂内基于实物交付的孪生发



图12 转子零件装配工艺仿真场景

Fig.12 Simulation scene of rotor assembly process

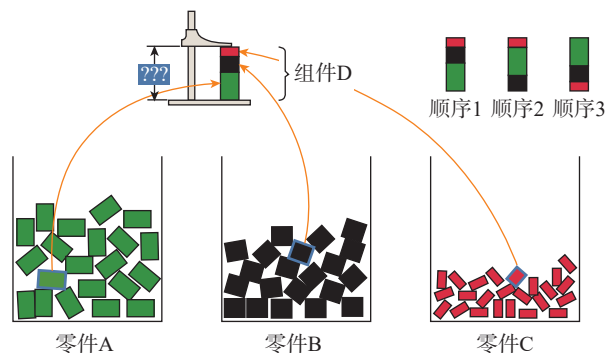


图13 零件公差装配结果影响原理图

Fig.13 Schematic diagram of the effect of tolerance assembly result on part

动机进行信息映射,在虚拟发动机孪生体上实时再现物理发动机的运行参数信息,以便实现发动机状态的实时监控。在此基础上,通过人工智能/机器学习算法对采集到的大量数据进行统计分析,并结合大数据技术进行深度挖掘,对发动机易损零件寿命做出准确预估,进而实现对整个发动机性能衰减情况、可能故障点、使用寿命的预测、预警;另一方面,通过对采集数据分析,为设计优化和产品质量追溯提供数据支撑。

维护孪生在实现各种信息统一可视化展示与监控的同时,通过将实时数据导入发动机整机运行仿真模型,结合发动机生命健康模型进行模拟计算,根据不同要素的触发时机,实时给管理者、运维者提供即时信息推送,如某零部件可能存在故障,并给出解决方案;某易损件已经到寿命,需要更换,并关联该零件的批次状态信息,与工厂已有库存进行匹配,从而实现快速精准的运维服务。

5.2 远程维护与指导

通过维护孪生可高保真模拟发动机内部工作情况,对发动机的运行状态进行分析,从而改进发动机的维修模式,缩短发动机维修停机时间。发动机外场出现维护需求时,远程技术专家可基于VR/AR技术在虚拟环境下对发动机进行拆解,分析故障原因,并与物理发动机的结构信息进行模型匹配,对异常部位进行提醒,如图16所示。结合已有的故障知识库,以发动机整机运行过程仿真为核心,维护数字孪生系统通过对运行数据的分析、诊断,在模拟预测发动机的非常规运行模式及其可能成因后,给出具有预见性的智能化决策建议,并由数字孪生系统自主决策实施。

另一方面,通过维护孪生可为最终用户搭建一个虚拟的维护操作培训平台,通过VR/AR技术在虚拟空间开展发动机维护操作培训,并将三维可视化的产品安装与维护手册进

行数据关联,自动识别零件并展示三维动画安装说明,提高维护过程的智能化程度。

6 结论

目前,航空发动机行业已初步实现了产品设计、工艺设计、生产制造、产品装配过程的数字化,建立了较为完整的信息化支撑体系,端到端的数字线索也在逐步打通,开展了发动机专业零部件制造、整机装配的数字化

单元/产线的建设探索,积累了较为丰富的企业数字化转型经验,为实现企业级数字孪生奠定了良好的基础。

实现数字孪生是一项非常复杂的系统性工程,依赖整个数字化生态和数字孪生支撑技术的成熟发展。目前航空发动机行业虽然在部分业务领域实现了数字孪生的雏形,但由于物理对象及其研制过程的模型构建能力、动态信息采集与处理能力还比较弱,距离实现真正意义上的数字

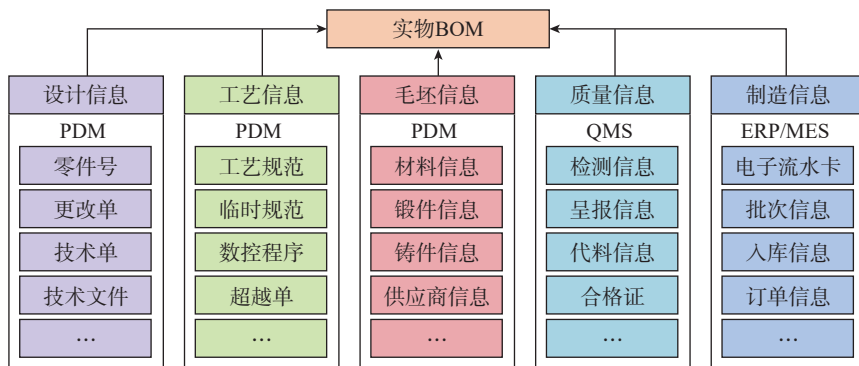


图 14 面向实物 BOM 的零件数字包信息组成

Fig.14 Part digital information package composition based on BBOM

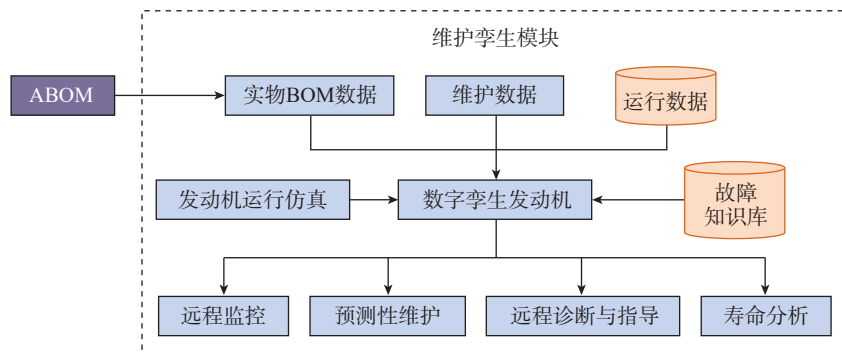


图 15 维护孪生模块功能架构

Fig.15 Functional architecture of maintenance twin module



图 16 基于 VR/AR 技术的发动机维护场景图

Fig.16 Engine maintenance scene based on VR/AR technology

孪生还有较大差距。本文从实际执行层面对航空发动机研制过程数字孪生的应用架构和核心内容进行了探索,并对工艺设计、生产制造过程及数控机床、装配单元等物理对象开展应用实践,为航空发动机制造业开展数字孪生建设提供借鉴。

参考文献

- [1] 孙敏. “数字孪生” 改变行业规则的顶尖技术 [J]. 大飞机, 2018(6): 44-47.
- SUN Min. Digital twin is the top technology of industry regulation[J]. Jetliner, 2018(6): 44-47.
- [2] WARWICK G. GE advances analytical maintenance with digital twins[N]. Aviation Week & Space Technology, 2015-10-19.
- [3] 张曙. 2030 的未来工厂 [J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(3): 1-8.
- ZHANG Shu. Factories of future 2030[J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(3): 1-8.
- [4] 张玉良, 张佳朋, 王小丹, 等. 面向航天器在轨装配的数字孪生技术 [J]. 导航与控制, 2018, 17(3): 75-82.
- ZHANG Yuliang, ZHANG Jiapeng, WANG Xiaodan, et al. Digital twin technology for spacecraft on-orbit assembly[J]. Navigation and Control, 2018, 17(3): 75-82.
- [5] 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): 286-290, 303.
- 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): 286-290, 303.
- [6] 王喜文. 中国制造 2025 解读: 从工业大国到工业强国 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- WANG Xiwen. Demystifying made in China 2025: From the large industrial country to the powerful industrial country[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [7] GRIVERS M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [2016-12-20]. http://www.aprison.com/library/Whitepaper_Dr_Grieves_Digital_Twin_ManufacturingExcellence.php. 2014.
- [8] 中国电子信息产业发展研究院. 数字孪生白皮书(2019年)[R]. (2019-12-25) [2021-11-01]. [Http://www.ccidgroup.com](http://www.ccidgroup.com).
- China's Electronic Information Industry Development Institute. Digital twin white papers(2019)[R]. (2019-12-25)[2021-11-01]. [Http://www.ccidgroup.com](http://www.ccidgroup.com).
- [9] 陈明, 梁乃明, 方志刚. 智能制造之路: 数字化工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- CHEN Ming, LIANG Naiming, FANG Zhigang. Smart manufacturing system and practices[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [10] 杨胜群, 唐秀梅, 李克安, 等. VERICUT 数控加工仿真技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- YANG Shengqun, TANG Xiumei, LI Kean, et al. VERICUT numerical control machining simulation technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [11] 时培昕. 数字孪生的概念、发展形态和意义 [J]. 软件和集成电路, 2018(9): 30-33.
- SHI Peixin. The concept development form and significance of digital twin[J]. Software and Integrated Circuit, 2018(9): 30-33.
- [12] 沈韩, 赵岩, 周慧宁. ERP 环境下的 BOM 的研究 [J]. 现代国企研究, 2016(2): 224-225.
- SHEN Han, ZHAO Yan, ZHOU Huining. Research on BOM in ERP environment[J]. Modern Soe Research, 2016(2): 224-225.
- [13] 刘明周, 何晓军, 程晓梅. 机电项目管理中的多视图及其映射方法研究 [J]. 机械工程师, 2006(9): 109-111.
- LIU Mingzhou, He Xiaojun, CHENG Xiaomei. Research on multi view and its mapping method in electromechanical project management[J]. Mechanical Engineer, 2006(9): 109-111.
- [14] 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.
- [15] 刘君, 吴法勇, 王娟. 航空发动机转子装配优化技术 [J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 75-78.
- LIU Jun, WU Fayong, WANG Juan. Optimization technique of aeroengine rotor assembly[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 75-78.
- [16] 李杰. 工业大数据: 工业时代的工业转型与价值创造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- LI Jie. Industrial big data: The revolutionary transformation and value creation in industry 4.0 era[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

Exploration and Practice of Digital Twin Architecture for Aero-Engine Manufacturing

CAO Zengyi, SHAN Jidong, WANG Zhaoyang, CHEN Heli
(AECC Xi'an Aero-Engine Ltd., Xi'an 710021, China)

[ABSTRACT] As a new idea and technical method, digital twin has become an important starting point for enterprises to implement digital transformation strategy. Combined with the development characteristics of aero-engine in China and the application status of digital technology in the industry, an application framework of digital twin technology for aero-engine development is proposed, and the digital twin element & application modes of process design, production and manufacturing, product assembly & maintenance support. And digital twin applied technology is researched and analyzed on the MBD-based manufacturability analysis, digital process design & simulation, virtual manufacturing, virtual assembly & delivery, remote maintenance, etc., which provides digital capability for the advancement of aero-engine development.

Keywords: Aero-engine; Digital twin; Architecture; Simulation; Virtual manufacturing

(责编 大漠)