

数字孪生与设计知识库驱动的飞机装配生产线设计及应用*

常笑,贾晓亮,刘括

(西北工业大学机电学院,西安 710072)

[摘要] 飞机装配生产线设计影响因素众多且关系复杂,传统设计方法通常难以定量准确、可视化地进行飞机装配生产线的设计分析,也难以全面有效地发现设计方案存在的问题。引入数字孪生技术开展飞机装配生产线设计与应用的研究,一方面能够帮助企业在生产线实际建设及投入生产之前在数字孪生环境进行分析、优化、仿真和测试,进一步通过数字孪生飞机装配生产线运行的交互环境和载体,对飞机装配生产线的工作流程、信息流和物流进行实时、精确的运行分析和优化,从而提高飞机装配生产线设计的质量和性能。开展飞机装配生产线设计知识库构建的研究,以支持数字孪生飞机装配生产线设计的建模和仿真分析,从而缩短设计周期、提高设计效率和质量。通过将数字孪生驱动的飞机装配生产线设计方法在某型飞机中机身装配生产线设计中的实际应用验证,及时发现了设计中工作流程、物流及布局等方面存在的问题,并依据数字中机身装配生产线的产能、站位利用率、装配生产线瓶颈等定量仿真分析,进行了生产线的优化,提高了设计方案的质量和性能。

关键词: 数字孪生;飞机装配;生产线设计;知识库;建模与仿真

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.20.020



常笑

博士研究生,研究方向为生产线分析与优化、数字孪生技术。

随着中国制造 2025 的推动,以及工业 4.0、智能制造的持续发展,飞机装配生产线正朝着智能化、信息化的制造模式不断转型^[1]。飞机装配生产线作为飞机制造系统的关键环节,是保证飞机制造高质量、高效率的重要保障。飞机装配生产线设计是以产品质量、生产周期、目标成本等为主要依据,基于飞机装配流程和生产组织,通过分析计算,合理划分工艺分离面,实现飞机装配工艺流程、站位布局、工艺装备、人员配置及生产作业形式等的规划设计^[2]。在设计新的飞机装配生产线或对现有飞机装配生产线进行调整时,仅依靠设计人员的经验、技能和定性分析,通常难以识别和解决设计过程中存在的缺陷或瓶颈,从而导致设计方案

不完善、定量准确性差,需要在方案实施中进行补充修订以适应实际运行^[3]。因此,先进的飞机装配生产线设计方式对于提高飞机装配效率,快速适应市场需求,降低飞机装配成本等具有重要的研究意义和应用价值。

随着新一代信息技术与制造业的深度融合,以及基于模型定义(MBD)等数据表达技术的日趋成熟,为数字孪生技术提供了有效的基础支撑。基于MBD技术是将产品的所有相关设计定义、工艺描述、属性和管理等信息都附着在产品三维模型中先进的数字化定义方法。数字孪生作为MBD的扩展和延伸,使数字化设计技术进入了一个新的阶段。近年来,数字孪生成为智能制造领域的研究热点,被认为是实现智能工厂

* 基金项目:国家自然科学基金(52075452)。

的新手段和重要技术支撑^[4-5]。数字孪生的概念最早由 Michael Grieves 教授于 2003 年提出,近年在数字车间的应用和构建中得到了很多研究,如陶飞等^[6]提出数字孪生车间的概念和参考系统架构,通过物理实体和虚拟模型的结合,突破物理空间和虚拟模型之间的瓶颈。Zhuang 等^[7]提出了基于数字孪生的复杂产品装配车间智能生产管理和控制方法框架,并在卫星装配车间进行验证。对于数字孪生在设计中的应用,西门子公司认为数字孪生可以在物理原型和投资之前模拟、预测和优化产品和生产系统^[8]。庄存波等^[9]认为产品数字孪生支持在产品阶段就通过建模、仿真及优化手段来分析产品的可制造性,同时还支持产品性能和产品功能的测试与验证。赵敏等^[10]认为数字孪生模型可以与实物模型高度相像,而不是简单的一对一的对应关系,可能存在“零对一”等多种对应关系,即人类凭想象和创意在数字空间创造的“数字虚体”,现实中没有与其对应的“物理实体”(如数字创意中的各种形象)。Guo 等^[11]认为数字孪生可以建立虚拟的数字化生产线、机床、机器人等生产环境,由此发现设计中隐藏的缺陷,并提出了解决方案。

在飞机装配生产线的设计中引入数字孪生技术可以有效帮助设计人员及时发现设计中的潜在问题,并建立飞机装配生产线设计与运行的交互环境和载体,对飞机装配生产线的工作流程、信息流和物流进行实

时、精确的仿真分析,从而提高飞机装配生产线设计的质量和性能。因此,本文面向数字孪生驱动下的飞机装配生产线设计与应用,首先对当前飞机装配生产线设计方法进行分析,结合先进总结飞机装配生产线的特点与需求,提出数字孪生驱动下的飞机装配生产线设计方法,并以设计知识库支撑数字孪生飞机装配生产线的建模和仿真分析,以提高数字孪生飞机装配生产线建模的效率;最后以某飞机中机身装配生产线设计为例进行验证,提高了设计方案的质量和性能。

飞机装配生产线设计过程分析

飞机装配生产线是飞机制造系统的核心环节,其设计的合理性直接决定生产物流是否流畅、成本是否合理、生产节拍是否满足要求以及企业能否获得最大的效益等^[12]。由于飞机产品结构复杂、工艺类型复杂,在装配过程所需物料及相应的工具、量具、工装种类繁多、数量巨大、装配周期耗时长^[13]。因此,飞机装配生产线的设计需要考虑的因素众多,如何得到合理优化的设计方案是核心难题。传统的飞机装配生产线设计通过接收客户需求,依靠设计人员的经验直接在二维平面进行规划,并通过主观经验发现问题和改进,如图 1 所示。设计方案的质量主要取决于设计人员的经验和技能水平,通常难以定量准确、可视化地进行飞机装配生产线的运行过程分析。因此,在飞机装配生产线设计中主要存在以下挑

战^[14]:一是如何在飞机装配生产线设计阶段能够直观表达设计过程和设计结果,并且能够定量考虑整个飞机装配生产线的合理性;二是如何利用先进技术(如数字孪生等)以及设计知识进行飞机装配生产线设计的准确、高效建模;三是如何帮助设计人员对设计方案进行可视化的定量仿真验证,来不断优化飞机装配生产线设计方案,以提高飞机装配生产线的设计质量。

数字孪生技术将带有三维数字模型的信息拓展到整个生命周期的技术,能够帮助企业实际投入生产之前即能在虚拟环境中仿真和测试,在生产过程中也可同步监控和控制整个生产流程,实现高效的柔性生产。在飞机装配生产线设计中,虚拟飞机装配生产线和设计需求形成一对虚实孪生体^[15]。通过离散系统仿真对飞机装配生产线的工作流程、信息流和物流进行精确的仿真分析,验证设计方案的合理性,进而优化设计方案,提高设计的质量和性能,缩短设计周期。数字孪生驱动下的飞机装配生产线设计主要包含两个内容:(1)数字孪生驱动下的飞机装配生产线建模。MBD 技术为数字孪生建模提供了完善的信息载体。依靠 MBD 技术,使用数字化手段构建满足客户需求和功能需求的数字飞机装配生产线,可以精确地记录飞机装配生产线的各种属性参数,并以可视化的方式展示出来。(2)数字孪生驱动下的飞机装配生产线仿真与验证,在实际生产装配线投产之前,通过一系列可重

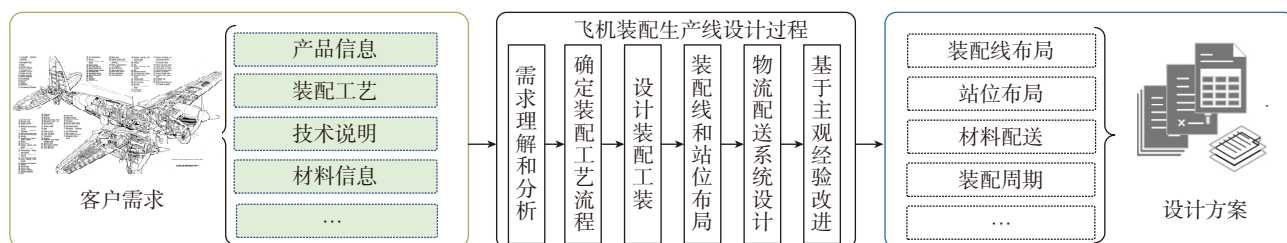


图1 传统飞机装配生产线设计

Fig.1 Design and planning process of traditional aircraft assembly line

复、可变参数、可加速的仿真试验,帮助设计人员尽可能了解飞机装配生产线在实际运行中的状态、性能等,为后续的分析 and 优化提供可靠的参考数据^[16]。此外,在飞机装配生产线运行中,可以通过设计阶段构建的数字孪生模型对物理飞机装配生产线的生产设备、物流设备、产线的运行状态与绩效进行可视化,在此基础上进行同步分析和优化,从而不断帮助装配生产线提高产能、提升质量、降低能耗,同时可以将运行结果反馈给设计阶段,用于装配生产线和工艺的持续改进,最终形成闭环数字孪生。

数字孪生驱动的飞机装配生产线设计方法

1 设计流程

面向飞机装配生产线设计的实际需求,本文在传统设计方法的基础上提出一种数字孪生驱动的飞机装配生产线设计方法。通过数字孪生技术构建符合实际生产中各类状况的数字孪生飞机装配生产线模型,利

用飞机装配生产线设计知识库支持数字孪生的建模过程和仿真以提高设计效率,减少设计人员的工作量。在设计过程中,数字孪生飞机装配生产线可以提前对装配线性能进行仿真和验证,及时发现设计结果中存在的缺陷。数字孪生驱动的数字飞机装配生产线设计过程主要包括3个阶段:客户需求与工艺分析、数字飞机装配生产线建模、数字飞机装配生产线建模仿真验证,如图2所示。

(1) 客户需求与工艺分析。客户需求与工艺分析是飞机装配生产线设计第1阶段。根据客户需求,设计人员需要收集企业愿景、明确客户需求、确定目标计划、初步拟定设计方案,包括生产线产量、车间布局信息、建设成本和产品质量等,数字孪生技术能够集成这些数据并可视化地表现出来,设计人员通过考虑相似的案例来计算建设成本和产量等,验证是否满足客户需求,使客户与设计人员之间的交流更加透明、快捷,从而验证设计理念。

(2) 构建数字飞机装配生产线,这一阶段设计人员完成数字飞机装配生产线的构建。设计人员在前一阶段的基础上,通过设计知识来完成飞机装配生产线的初步规划方案,根据规划方案需要进一步细化虚拟飞机装配生产线,包括人员行为、设备操作、物流配送等逻辑参数。由于飞机装配生产线的动态变化,这些逻辑参数很难计算。研究人员通过利用设计知识库中的相似案例来查询这些逻辑参数,通过数字孪生技术,可以对逻辑参数的各种组合进行验证和选择,可以为设计人员提供更合理的逻辑参数组合,帮助设计人员做出更准确的设计决策。

(3) 仿真与验证。通过验证是为了减少实际运行状态与预期的运行状态之间的不一致性,使飞机装配生产线投产运行后尽可能与预期运行一致^[17]。通过上一阶段构建的数字飞机装配生产线可以模拟装配线运行过程和物流控制策略,设计人员能够得到符合实际装配运行的装配

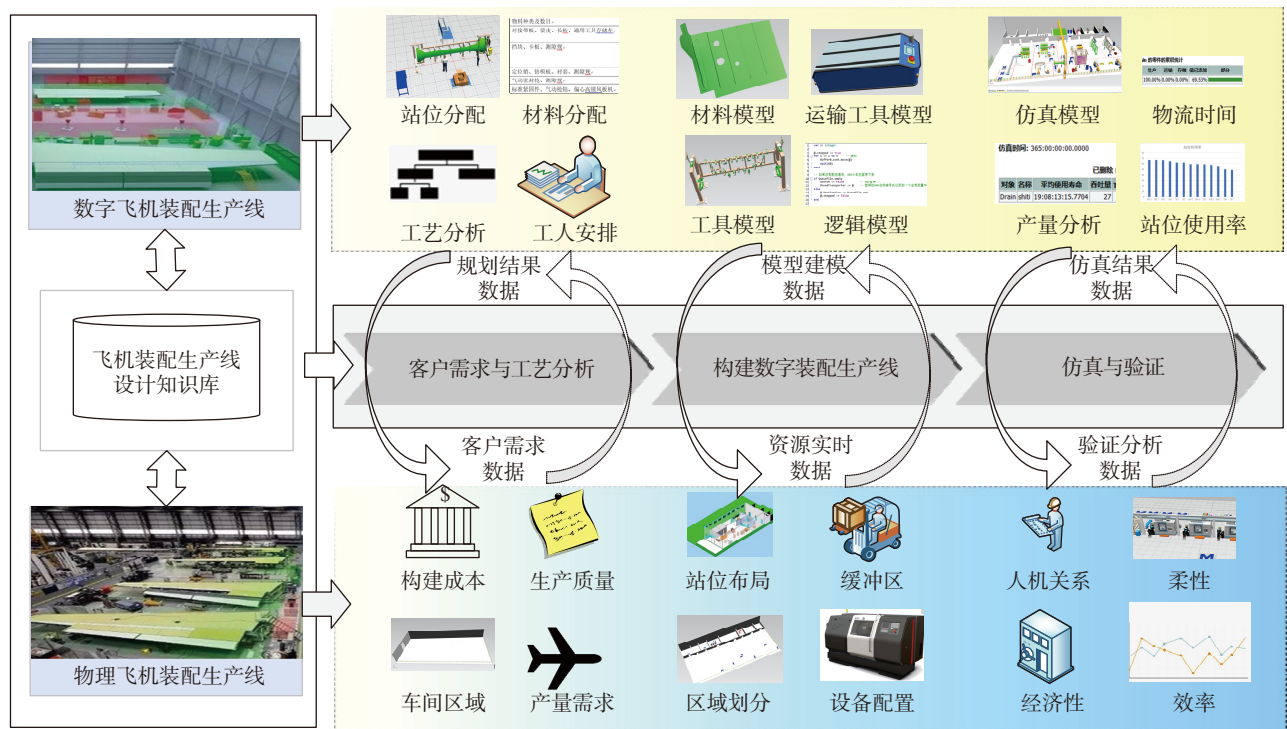


图2 基于数字孪生飞机装配生产线设计方法

Fig.2 Digital twin-based aircraft assembly line design method

线产能、站位的工作能力、物流存储运输等数据,结合设计知识判断生产线平衡性、装配站位的瓶颈、设备利用率等指标。由于数字孪生技术的高保真性和灵活性,不仅可以得到传统的仿真结果,还可以确认设备之间是否存在空间干涉,物料运输路线是否合理。最终促进设计方案的迭代优化,满足设备利用率、物流顺畅等多方面要求。

在数字孪生驱动的飞机装配生产线设计过程中,设计方案会不断改进和细化,因此数字飞机装配生产线也会随着设计方案的变化而变化。为了保证数字飞机装配生产线的高保真性,需要建立复杂的数字孪生模型(如设备、人员)模型,导致建模时间长和工作量大。此外,为了确保数字飞机装配生产线尽可能符合真实的环境,需要真实的运行参数来对数字飞机装配生产线的仿真逻辑进行

构建。为了解决上述问题,通过对历史案例、模型等数据进行整理,构建飞机装配生产线设计知识库,以便能够支持数字孪生的构建和应用。

2 设计知识库构建

飞机装配生产线设计仅仅依靠设计人员的经验和手工演算,难以全面保证设计方案的优化,且缺乏相关科学的依据和标准支撑。通过总结和整理已有的设计案例、MBD 资源模型等数据,形成可参考的飞机装配生产线设计知识库,为数字孪生驱动的飞机装配生产线建模和仿真分析的效率,从而提高设计的效率和质量。

为了实现知识的重用,需要建立飞机装配生产线设计知识库。通过对已有设计案例进行分析,将相应内容进行分类,构建设计知识库的体系结构,并进行知识的标准化。通过

分析,将飞机装配生产线设计知识库的结构进行以下划分,具体结构如图 3 所示。飞机装配生产线设计知识库主要包括 3 类:仿真逻辑、MBD 设计资源和设计实例,知识库为飞机装配生产线的设计全周期提供支持。设计人员利用知识库查询相关知识,在这些参考知识的基础上,设计人员可以尽量避免装配生产线设计过程中的缺陷,提高构建数字飞机装配生产线的效率。

3 基于知识库的建模与验证

根据客户的需求和对产品工艺的分析,确定需要查询的内容,在知识库中进行查询,相同的几何模型可以直接重用,相似的模型则需要根据实际情况进行调整应用,几何模型主要包括建筑模型、设备模型、工装模型、物料模型、人员模型等实体模型。然而,基于几何模型对实际的装配生产线运行缺乏行为、规则等进一步刻

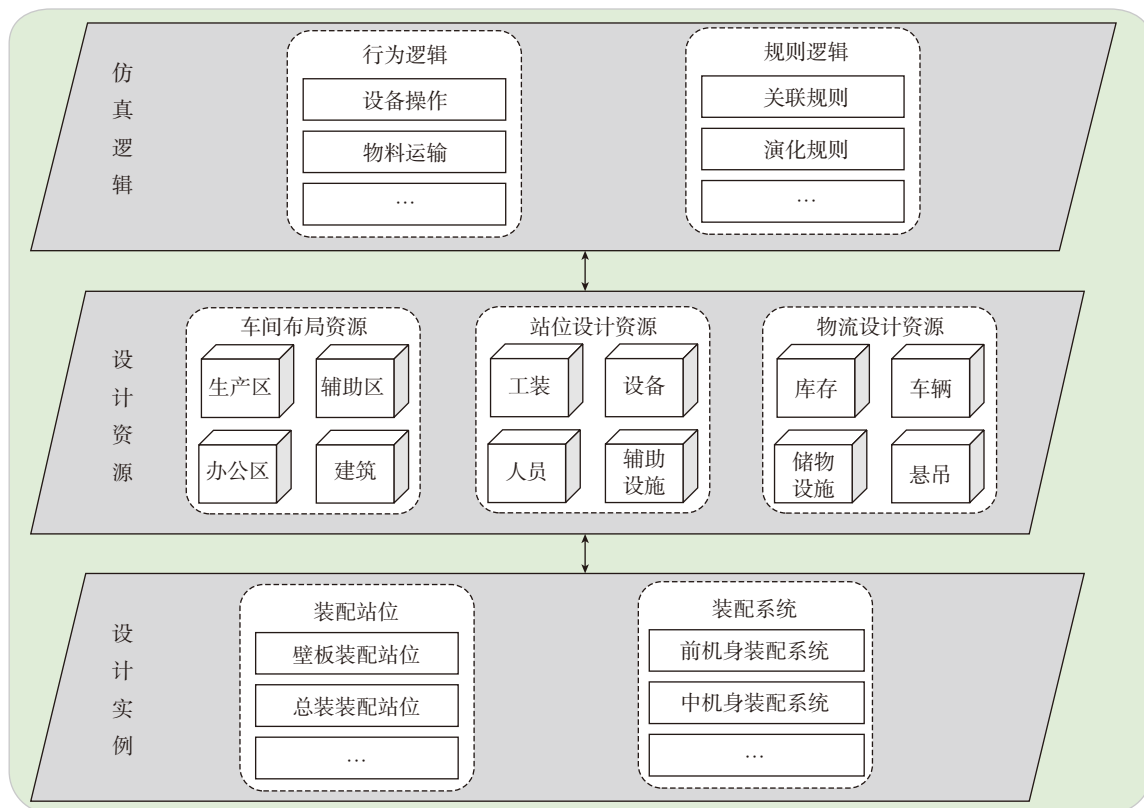


图3 飞机装配生产线设计知识库结构

Fig.3 Aircraft assembly line design knowledge library structure

画,因此需要构建逻辑模型以确保数字飞机装配生产线能够符合实际生产中的人员操作情况、设备运行状况等各类情况。最后,将几何模型和逻辑模型进行关联、组合与集成,从而形成高保真的数字飞机装配生产线,如图4所示。在数字飞机装配生产线的基础上,设计人员可以选择不同的知识,分析仿真结果。基于相关知识,可以挖掘隐藏于数据中的瓶颈问题,这样能够使设计人员更及时地发现问题,并利用推荐的相关知识帮助完成验证和优化,节约设计的时间和工作量。

应用验证

本文针对某飞机主机制造企业承担的某型飞机中机身部件装配任务,面向中机身部件装配生产线的设计需求,以 Teamcenter 软件和 Tecnomatix 软件为工具,建立了相关的设计知识库,构建数字孪生中机身装配生产线,并通过仿真验证分析提前发现并解决设计中存在的问题,有效节约设计时间及成本,在飞机中机身装配线建成运行后,基于数字孪生

中机身装配生产线模型可以实现生产线实际运行过程的分析优化,验证了数字孪生驱动的数字飞机装配生产线设计方法的有效性。

1 应用背景

随着民用客机市场需求的不断升级,某飞机主机制造企业面向新承担的型号任务,原有装配生产线产能已不能满足制造需求。因此,需要设计建立全新的某型飞机中机身装配生产线,并满足生产高效率、低生产成本等要求,以提升企业的竞争力。中机身是某型飞机的重要组成部分,处于机身中部与机翼交汇处,是飞机重要的受力部件。在中机身装配生产线中包括中机身顶部壁板、左右侧壁板(含应急门框)、左右侧下壁板、机身36框、客舱地板、龙骨梁等部件的装配。通过对以上部件的工艺分析,将中机身装配生产线划分为9个装配站位,分别是底壁板装配站、侧壁板装配站、顶壁板装配站、龙骨梁装配站、地板装配站、机身框装配站、应急门框装配站、中机身总装站、中机身架外装配站^[18],中机身装配生产线的装配

站位分配如图5所示。

2 基于客户需求分析的初始设计方案

通过对客户需求和产品工艺进行分析,设计人员按照每个装配站部件选择所需的工装和设备,并且对每个站位之间的物流关系进行分析和统计。利用飞机装配生产线设计知识库中相关知识,借助数字孪生技术,实现站位布局、缓存区布局、设备需求、生产节拍和在制品成本等参数的快速规划,部分初始设计结果如图6所示。

3 数字孪生驱动的中机身装配生产线建模与仿真

基于初始设计结果建立数字中机身装配生产线,利用知识库中已有的资源模型直接重用,对缺少的资源模型使用 NX 和 Tecnomatix 软件完成建模,所得到的全部资源模型再按照模块组合规则形成中机身装配生产线的几何模型。获得中机身装配生产线几何模型后,设计人员会根据需求将运行所需的逻辑设置到几何模型中,本文主要从以下方面定义运行逻辑:对于虚拟化的人员,从操作

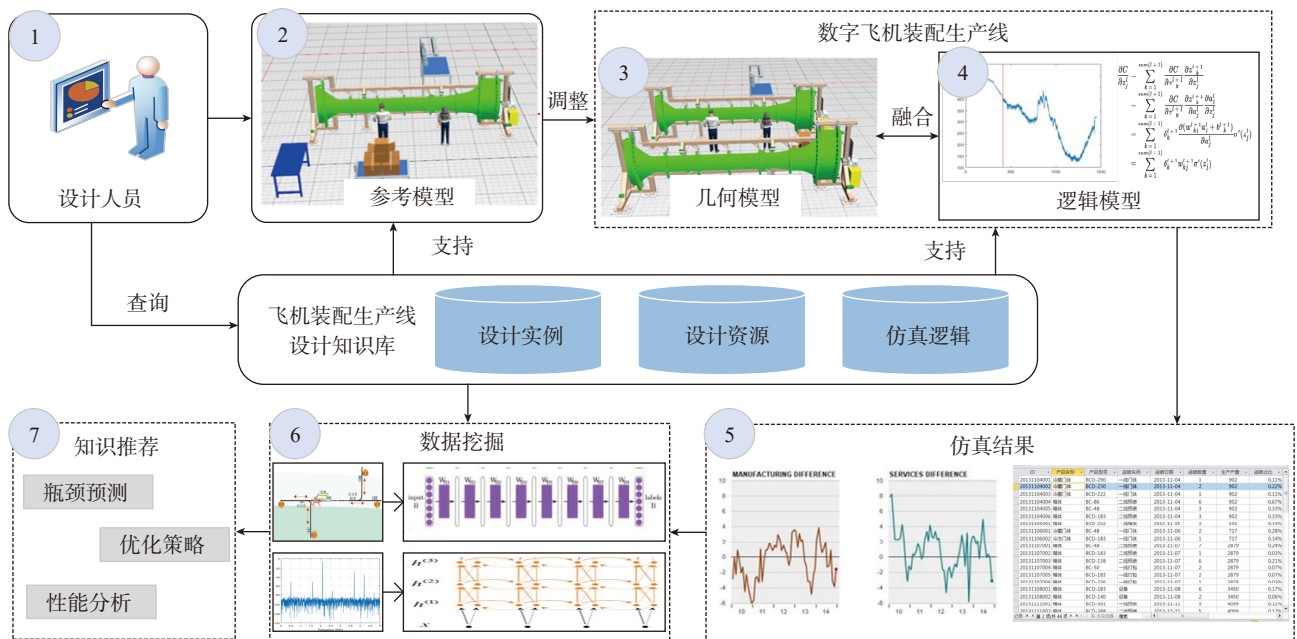


图4 基于设计知识库的数字飞机装配生产线设计

Fig.4 Design knowledge library-based digital aircraft assembly line design

层面对人的动作进行规范,如在某个站位的某个设备处,采用某种姿势装配某个部件。对于固定设备,则通过根据厂家提供的操作说明对其操作、状态进行总结分类,建立运行规则,同时还要考虑到设备的故障、维护等特殊情况。对于物流设备,主要体现

在各个站位模型之间的物流关系,吊车、小车的工作路径及运行方式。数字中机身装配生产线流程和界面如图7所示。在数字中机身装配生产线的基础上,可得到装配生产线中各个装配站位的工作数据,整个装配生产线的产能、物料的流动情况等数

据。根据这些数据,设计人员通过相关知识分析可以得到设备利用情况是否合理、装配线产能是否达到预期目标等问题,从而对发现的瓶颈进行分析和优化,使设计方案更为可靠。

4 数字孪生驱动的中机身装配生产线设计分析

利用数字中机身装配生产线,可以对生产线产能、装配站位利用率、装配生产线瓶颈等进行量化的仿真分析,如图8显示了装配站位利用率。其中图8(a)表示了优化前的站位利用率。这些站位的最低利用率是34.52%,最高利用率为68.59%,平均利用率为47.46%,如表1所示。从数字飞机装配生产的动态过程来看,9个站位使用初期的利用率不是很低,但是经过一段时间的模拟,站位利用率逐渐减少,造成了严重的堵塞,其中利用率最高的站位(站位8)会成为瓶颈点。

基于数字中机身装配生产线的仿真分析,可以发现堵塞原因是站位1~7的装配周期与站位8和9的装

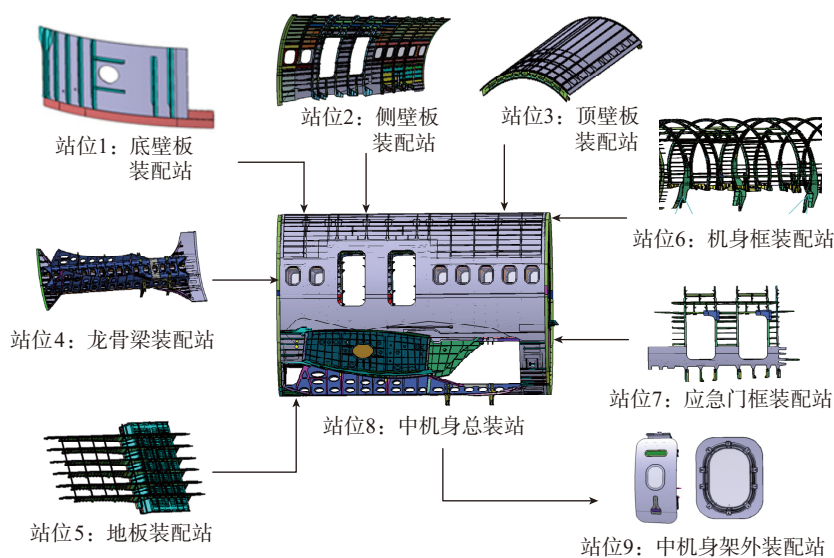


图5 某型飞机中机身装配工艺流程
Fig.5 Middle fuselage assembly process

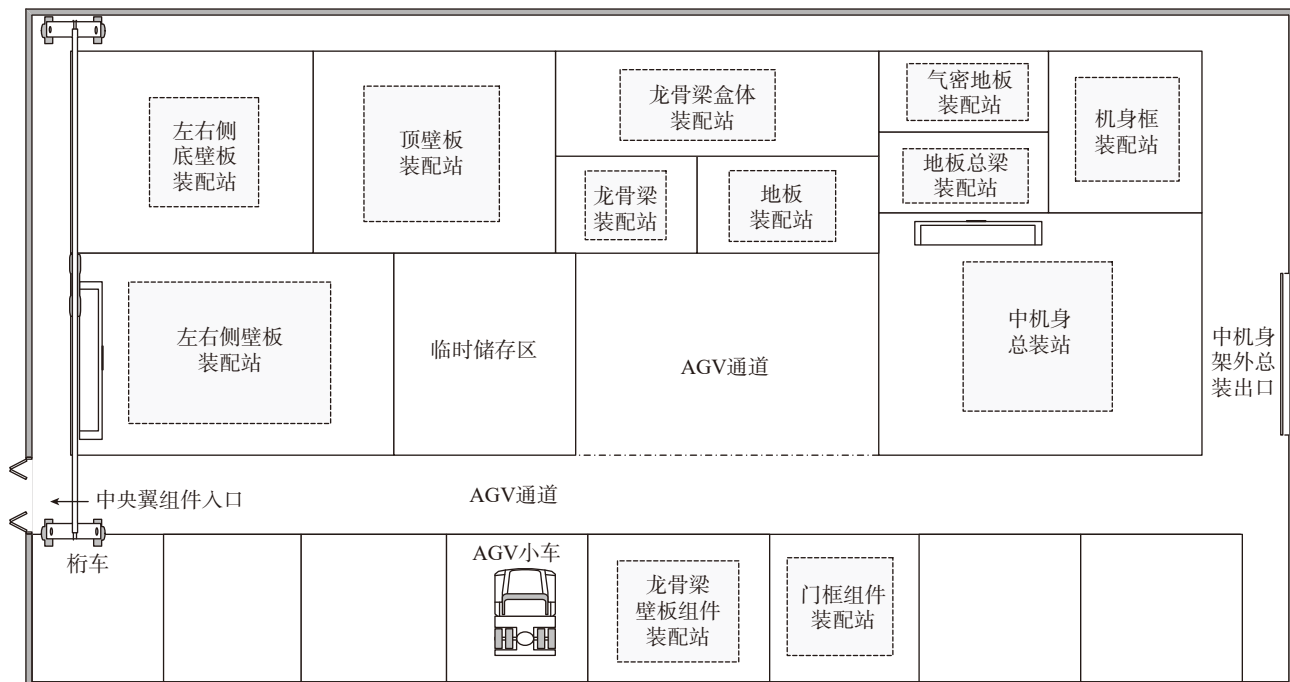


图6 基于客户需求和工艺分析的初始设计结果
Fig.6 Initial design result based on customer demand and process analysis

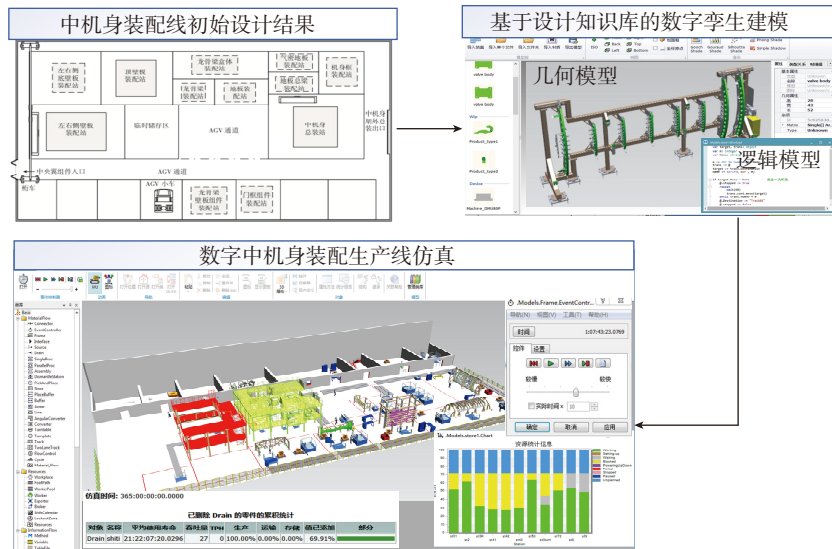


图7 数字孪生驱动的中机身装配生产线建模与仿真

Fig.7 Digital twin-driven middle fuselage assembly line modeling and simulation

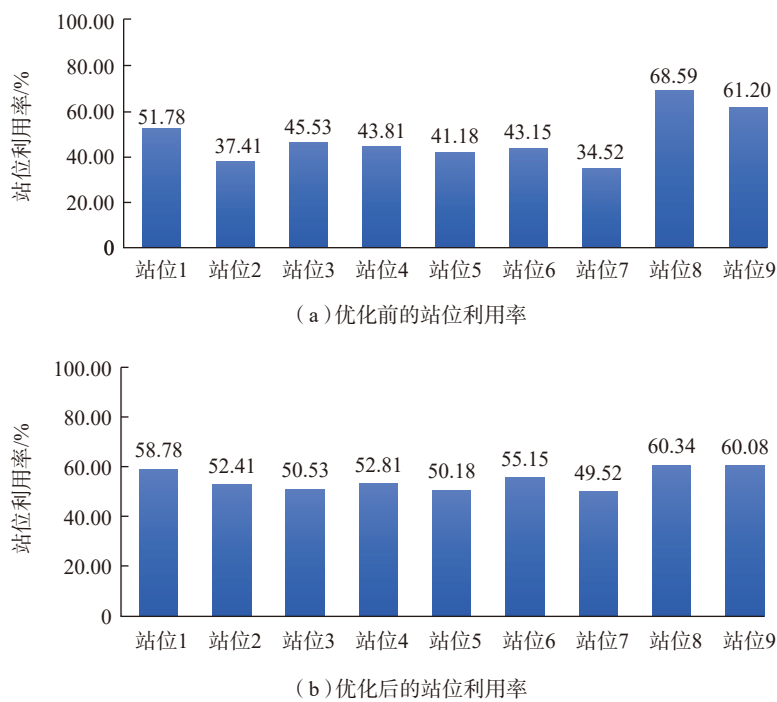


图8 优化前和优化后的站位利用率对比

Fig.8 Comparison of station utilization before and after optimization

配周期相差较大; 站位1~7的固定工装数量较少; 站位1~7的物流配送量远小于站位8的物流配送量, 需要对站位8进行提前配送。这就导致在有限的缓冲区容量下, 会造成装配周期短的站位产能过剩, 存在过多的阻塞时间。根据上述分析结果, 设计人员对运行参数进行调整(如调整生产班次制度、优化物料配送方案), 对设计方案进行优化, 优化后结果如表1所示, 中机身年产量在优化后由24架/年增加到26架/年, 装配生产线平衡率提升了6.63%; 优化后的站位平均利用率为54.42%, 比优化前的站位平均利用率增加了6.96%, 每个站位之间的利用率变得更加均衡; 优化后的物流运转总时间更低, 表明阻塞率变低, 阻塞时间大幅度减少。因此, 数字孪生技术帮助设计人员可以发现设计阶段的隐藏问题, 提

表1 中机身装配生产线设计优化前后性能指标对比

Table 1 Comparison of performance indicators before and after optimization of mid-airframe assembly line design

| 状态/指标 | 装配生产线产量(架/年) | 装配生产线平衡率/% | 物流运转总时间/h | 站位平均使用率/% |
|-------|--------------|------------|-----------|-----------|
| 优化前 | 24 | 67.46 | 532 | 47.46 |
| 优化后 | 26 | 74.09 | 313 | 54.42 |

前找到合适的优化方案,并且有效提升了装配生产线的性能。

目前,该中机身装配生产线处于设计阶段,主要是将客户设计需求通过数字孪生技术以虚拟化的方式表现出来,帮助企业在实际投入生产之前即能在虚拟环境中优化、仿真和测试所设计的中机身装配生产线。在未来的装配生产线生产运行阶段,根据设计阶段产生的数字中机身装配生产线,将数字中机身装配生产线与物理中机身装配生产线实现数据关联,通过对物理中机身装配生产线运行的不断拟合,实现数字中机身装配生产线的实时、精确模拟。基于物理中机身装配生产线采集的实时数据,结合数字中机身装配生产线的仿真模型对物理飞机装配生产线未来运行状态进行预测,对生产线现场的资源配置、物流调度、生产结构等提供动态的优化决策,如图9所示,并且在设计知识库的支持下,能够更加灵活地利用已有知识构建和调整数字飞机装配生产线,可以减少大量的模型开发时间,使数字飞机装配生产线能够更灵活地响应物理飞机装配生

产线。

结论

传统的飞机装配生产线设计主要取决于设计人员的经验和技能水平,通常难以定量准确、可视化地进行飞机装配生产线的设计分析。引入数字孪生技术可以有效帮助设计人员及时发现设计中的潜在问题,并建立飞机装配生产线设计与运行的交互环境和载体,对飞机装配生产线的工作流程、信息流和物流进行实时、精确的仿真分析,从而提高飞机装配生产线设计的质量和性能。本文通过分析飞机装配生产线设计中存在的问题,提出数字孪生驱动的数字飞机装配生产线设计方法,构建飞机装配生产线设计知识库以支持数字飞机装配生产线的设计,可以有效节约设计周期和工作量。通过将数字孪生驱动的数字飞机装配生产线设计方法在某型飞机中机身装配生产线设计中的实际应用验证,及时发现了设计中工作流程、物流及布局等方面存在的问题,并依据数字中机身装配生产线的产能、站位利用率、

装配生产线瓶颈等定量仿真分析,进行了生产线的优化,提高了设计方案的质量和性能。

参考文献

[1] 李西宁,支劭伟,蒋博,等.飞机总装数字化脉动生产线技术[J].航空制造技术,2016,59(10):48-51.

LI Xining, ZHI Shaowei, JIANG Bo, et al. Digital pulsation production line for aircraft final assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 48-51.

[2] 巴晓甫,赵安安,郝巨,等.模块化柔性飞机装配生产线设计[J].航空制造技术,2018,61(9):72-77.

BA Xiaofu, ZHAO Anan, HAO Ju, et al. Design of modular flexible aircraft assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(9): 72-77.

[3] 陈军,孙技伟,杨毅.基于仿真决策的飞机总装脉动生产线规划与运行优化关键技术[J].航空制造技术,2018,61(12):38-45.

CHEN Jun, SUN Jiwei, YANG Yi. Research on key technology of aircraft assembly pulsation line planning and operation optimization based on simulation decision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(12): 38-45.

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

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

[5] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生十问:分析与思考[J].计算机集成制造系统,2020,26(1):1-17.

TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Ten questions towards digital twin: Analysis and thinking[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 1-17.

[6] 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.

[7] ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the

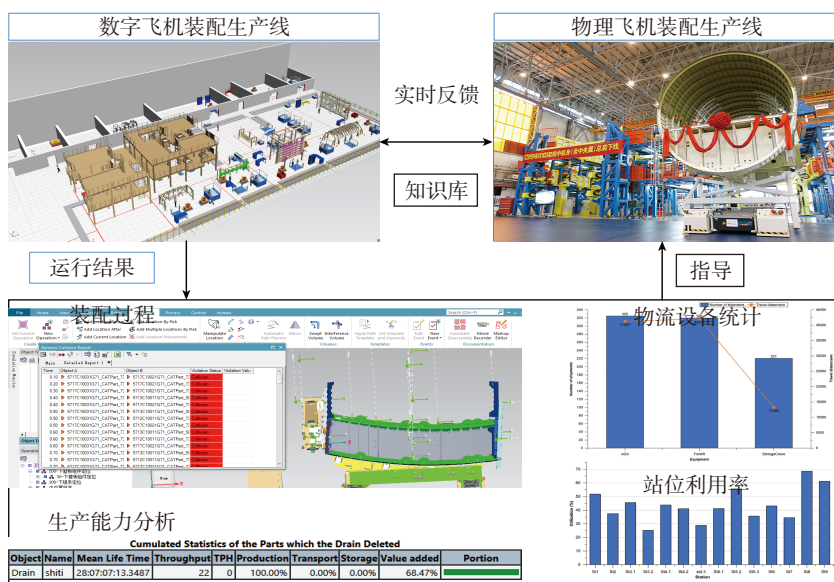


图9 数字孪生驱动中机身装配生产线运行

Fig.9 Digital twin-driven operation of the middle fuselage assembly line

complex product assembly shop-floor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 1149-1163.

[8] 唐堂, 滕琳, 吴杰, 等. 全面实现数字化是通向智能制造的必由之路——解读《智能制造之路: 数字化工厂》[J]. 中国机械工程, 2018, 29(3): 366-377.

TANG Tang, TENG Lin, WU Jie, et al. Fully realizing digitization is the only way to intelligent manufacturing the interpretation of "Smart Manufacturing System and Practices" [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(3): 366-377.

[9] 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.

[10] 赵敏, 宁振波. 铸魂: 软件定义制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.

ZHAO Min, NING Zhenbo. Software defined manufacturing[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.

[11] GUO J P, ZHAO N, SUN L, et al. Modular based flexible digital twin for factory design[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 1189-1200.

[12] 李涛, 张世炯, 张宁. 工业 4.0 牵引的飞机总装工艺流程设计技术浅析[J]. 航空制造技术, 2015, 58(21): 81-86.

LI Tao, ZHANG Shijiong, ZHANG Ning. Preliminary research on aircraft final assembly process design in industrie 4.0[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(21): 81-86.

[13] 林美安. 飞机机身装配工艺及仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

LIN Mei'an. Research on the assembly process and simulation of aircraft fuselage[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[14] 马小丽. 飞机总装配生产线优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

MA Xiaoli. Research on optimal design for aircraft final assembly line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[15] 崔一辉, 杨滨涛, 方义, 等. 数字孪生技术在航空发动机智能生产线中的应用

[J]. 航空发动机, 2019, 45(5): 93-96.

CUI Yihui, YANG Bintaoy, FANG Yi, et al. Application of digital twin technology in aeroengine smart production line[J]. Aeroengine, 2019, 45(5): 93-96.

[16] 梁乃明, 方志刚, 李荣跃, 等. 数字孪生实战: 基于模型的数字化企业 (MBE) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.

LIANG Naiming, FANG Zhigang, LI Rongyue, et al. Digital twin in action toward model based enterprise[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.

[17] TAO F, SUI F Y, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3935-3953.

[18] 聂江西. 民机中机身自动化装配的容差分析方法与应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

NIE Jiangxi. The application of tolerance allocation for the aircraft automatic assembly line[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

通讯作者: 贾晓亮, 教授、博士生导师, 主要研究方向为智能工厂、飞机 MRO、复合材料切削、智能制造, E-mail: jiaxl@nwpu.edu.cn.

Digital Twin and Design Knowledge Library-Driven Aircraft Assembly Line Design and Application

CHANG Xiao, JIA Xiaoliang, LIU Kuo

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710012, China)

[ABSTRACT] Aircraft assembly line design has many influencing factors and complex relationships. Traditional design methods are usually difficult to quantitatively, accurately and visually analyze the aircraft assembly line design, and it is difficult to effectively discover the problems in the design scheme. This paper introduces digital twin technology to carry out research on the design and application of aircraft assembly line. By establishing the interactive environment and carrier of the design and operation for the digital twin aircraft assembly line, the real-time and accurate simulation analysis of the workflow, information flow and logistics of the aircraft assembly line is carried out to improve the quality and performance. Meanwhile the construction of aircraft assembly line design knowledge library is studied to support the modeling and simulation analysis of digital twin aircraft assembly line, which shortens the design cycle and improves the design efficiency. Through the practical application of digital twin driven design method in an aircraft fuselage assembly line design, the problems in workflow, logistics and layout were found effectively. According to quantitative simulation analysis of the capacity, station utilization and bottleneck of the digital fuselage assembly line, the line is optimized, and the quality and performance of the design are improved.

Keywords: Digital twin; Aircraft assembly; Production line design; Knowledge library; Modelling and simulation

(责编 古索)