

引文格式: 钟珂珂, 洪海波, 沈义平, 等. 孪生技术使能的航天关重件机加车间集成框架研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(20): 38-46.
ZHONG Keke, HONG Haibo, SHEN Yiping, et al. Study on digital twin-based integration framework of aerospace key parts machining workshop[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(20): 38-46.

孪生技术使能的航天关重件 机加车间集成框架研究*

钟珂珂¹, 洪海波¹, 沈义平¹, 钱伟伟², 于成龙³, 王宇斐¹

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600;

2. 南京航空航天大学, 南京 210016;

3. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048)

[摘要] 针对新形势下航天飞行器关重件机加车间日益显现的工艺优化周期长、资源配置效率低、质量保证手段单一等瓶颈问题, 引入数字孪生(Digital twin)的理念、手段、工具和方法, 结合机加车间的生产运行特点, 提出了基于数字孪生技术的航天关重件机加车间集成框架; 阐述了孪生环境、映射枢纽以及使能平台等核心功能要素的内涵; 论述了通过孪生数据实现加工工艺优化、混流排产与调度以及质量诊断、预测与控制的技术途径; 讨论了机加车间孪生系统的开发与集成要点, 从而实现车间动态迭代优化与高效协同管控的目标。

关键词: 数字孪生; 航天关重件; 机加车间; 集成框架; 协同管控

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.20.038



钟珂珂

高级工程师, 硕士, 主要从事航天先进制造与数字孪生技术研究与应用工作。

作为实现信息物理系统(Cyber-physical systems, CPS)落地实践的核心技术, 数字孪生(Digital twin, DT)是以数据与模型的集成融合为核心的新模式, 其通过在数字空间实时构建物理对象的精准数字化映射, 基于分析预测形成最佳综合决策, 从而实现制造过程全业务流程的闭环优化^[1]。近年来, 数字孪生技术凭借高保真实时镜像、多层级灵活组合、强动态按需配置等特点, 在产品工艺设计、资源优化配置、质量分析预测、全要素协同管控等领域越来越受到工业界的重视^[2]。

以舱体为代表的薄壁回转体零

件具有壁薄、复杂、高精、结构与尺寸各异等结构特点, 是航天飞行器的主要结构部段, 其上安装空气舵、翼面带来大集中载荷, 是典型的主承力构件; 同时也是全弹俯仰、偏航控制机构的承载体, 对保证飞行控制起重要作用; 另外, 舱体也是各类直属件、配套件等安装的附属本体, 因此是航天飞行器的关键重要零件。目前机加车间承载着多品种、变/小批量的共线生产任务, 存在研制阶段工艺动态优化任务重、生产质量控制手段单一、生产计划调度与重排的频度较高等问题与瓶颈, 无法满足“十四五”期间生产当量、

* 基金项目: 上海市启明星计划项目(21QA1403800); 上海市工业互联网创新发展专项(2020-GYHLW-01009)。

周期、质量等要求大幅提升条件下车间运行所面临的越来越频繁的动态不确定性的挑战。

如何通过模型构建-仿真预测-决策优化的全链路系统集成技术,构建航天关重件机加车间数字孪生技术集成框架,形成孪生技术赋能的数控机加车间制造新模式,大幅提高模型与数据双驱动的车间生产全流程、全过程管控的实时性和准确性,对全面提升武器装备保障水平具有重要的战略意义。

数字孪生技术与机加车间的需求结合

在已有机群、数字化生产单元、数字化生产线、立体库、刀具库、检测单元等要素的基础上,通过物理车间与虚拟车间的双向真实映射与实时交互,实现在机加车间孪生数据的驱动下,研制工艺、生产作业计划、质量控制过程等的迭代运行,从而实现航天飞行器关重件高质高效加工^[3],具体需求如下:

(1)探索基于模型的智能工艺,实现多工艺交叉下的高效加工。传统研制模式中结构设计数据和工艺数据、制造过程数据相互分离、自为体系,同时,基于人工经验“试错”的工艺设计方式造成动态优化效率难以有效提升,工艺优化周期长,本研究针对加工工艺中的加工策略、加工路径、加工工序和加工参数,通过高效加工专家知识库,并基于孪生数据进行可视化动态仿真,实现加工工艺的事前加速验证与智能决策。

(2)实现零件加工质量控制由事后检验向事前预测和事中主动控制转变。现阶段一步一测、一序一检的模式缺乏基于零件物理模型与在线监测数据相结合的过程质量事中分析手段,同时对可能产生的过切、漏切、精度不足等问题没有事前预测的工具和方法,质量保证手段单一。本研究通过信息反馈实现数控加工

过程自适应控制和加工过程零件的尺寸精度控制,强化全过程实时监控与预警反馈手段,提高关重件加工过程质量的管控水平。

(3)提升多工序、多扰动情境下的智能排产能力,满足多型号共线生产快速响应制造需求。目前依据人工经验排产得到的作业计划可行性不足,导致在生产过程中存在频繁调整,不同型号零件切换周期长,资源配置效率低。本研究有效打通复杂结构件数控加工过程资源配置全闭环控制链路,形成基于实时数据与计划模型在线交互与解算的动态调度机制,提升智能车间的敏捷度。

(4)全面集成数字孪生的工具、方法与系统平台,实践基于虚实融合的智能车间管控模式。以往单点数字化手段已难以解决工艺设计、质量保证以及资源配置等方面的动态不确定问题,本研究通过物理制造系统与虚拟制造系统的虚实融合、以虚控实,快速响应车间各种生产状况,提升车间整体效能,发挥示范效应。

数字孪生机加车间整体集成框架

在充分梳理、分析和提炼上述航天关重件机加车间业务需求的基础上,按照“1个孪生环境、3项业务场景、1个使能平台”的思路,围绕数字孪生建模与虚实映射、加工工艺优化设计、混流排产与动态调度优化、加工质量预测与控制以及智能车间数字孪生系统开发等建设内容,构建如图1所示的数字孪生机加车间整体集成框架^[4]。

(1)数据感知。以车间现有的数据感知物联网为核心载体,利用 OPC、Modbus TCP/RTU、Profibus、EtherCAT 等采集协议并结合信号提取与处理过程,实时采集机加生产现场工艺、设备、物料、质量等对象的状态数据、工况信息与检测结果,作为物理车间状态表征、孪生车间状态映

射的数据源头。

(2)孪生环境。研究全要素孪生体建模、多源异构数据融合与传递、在线运行与状态镜像等技术,构建包含人机料法环孪生体的多层次、全要素、全流程的机加虚拟车间。

(3)映射枢纽。数据中台负责物理车间与孪生车间之间的数据传输、映射与交互,保证数据的一致性,是虚拟车间高保真动态镜像的关键。

(4)使能平台。全面集成仿真、模型、数据与控制组件,通过接口的调用,形成面向不同功能模块的数字孪生决策引擎,进而构建工艺设计、动态调度以及质量预测 APP, 3个 APP 是孪生系统发挥具体作用的落脚点,同时也是孪生决策引擎的前台,仿真、分析、预测以及控制措施都从 APP 里生成、配置与分发;虚拟车间进行工艺和排产的加速仿真优化并反馈给孪生系统 APP,从而指导和优化物理车间实际的业务过程;同时孪生系统会对物理车间的设备、刀具等核心生产要素进行监测、趋势分析与预警。

(5)孪生车间。孪生车间是包含物理车间、虚拟车间以及孪生系统三大要素的集合体。其中物理车间是加工任务的实际载体和数据源头;虚拟车间是物理车间的忠实映射和交互界面;孪生系统是工艺、计划与质量相关业务迭代优化的决策中枢。

车间数字孪生全要素建模与虚实映射

全要素数字孪生模型是构建机加虚拟车间的基础,国内刘利钊等^[5]从矩阵论的视角出发,研究了一种面向复杂制造流程类簇/类/对象的多维时空建模方法以及数据建模处理方法,但未对基于实时仿真的时空模型与实际制造过程的实时同步和虚实镜像进行深入研究。陈援非等^[6]采用 Ontology 方法对物理空间和息空间分别进行建模,并将泛在设备

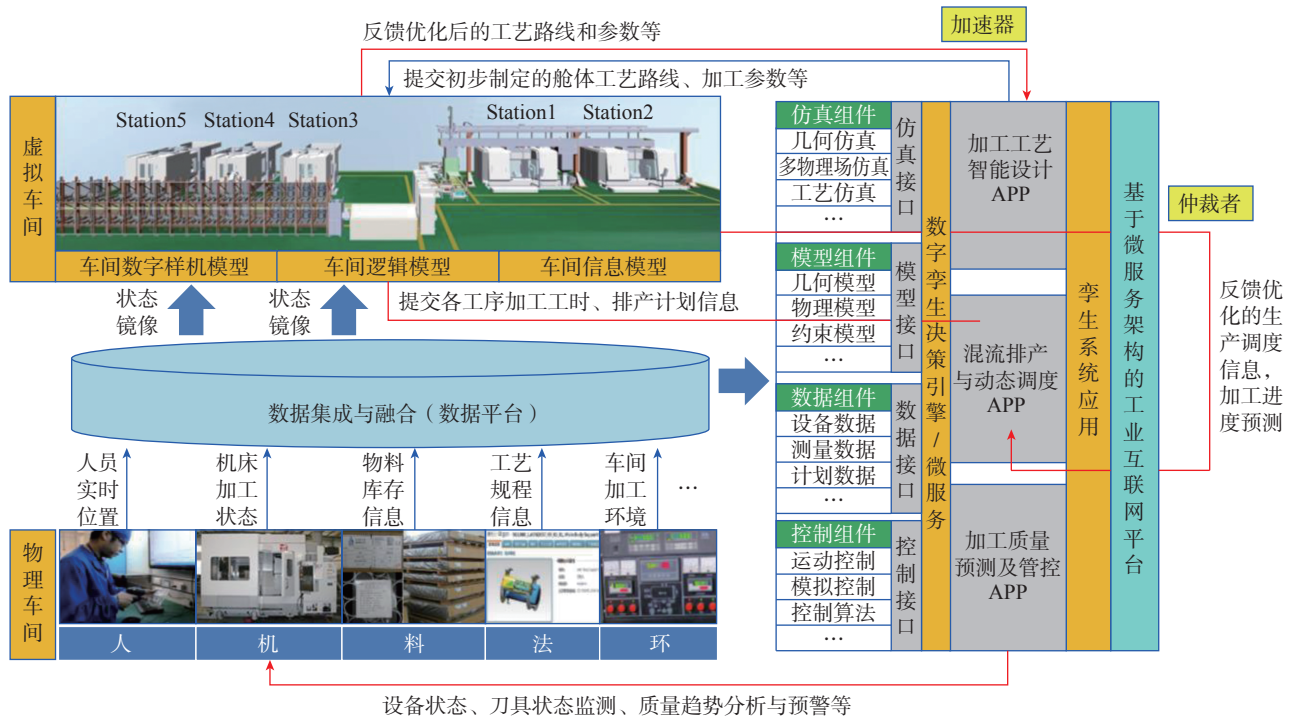


图1 数字孪生机加车间整体集成框架

Fig.1 Integration framework of digital twin machining workshop

作为媒介建立信息-物理空间的映射关系,实现信息空间的服务规划。对于制造系统特别是离散制造过程的数字孪生建模过程而言,能有效融合多域模型构建、实时虚实精准映射以及在线动态运行仿真的集成建模方法是目前存在的难点。

本研究针对设备软硬件紧密耦合、非标准指令混杂、传感数据多源异构给孪生模型多尺度集成、虚实状态同步镜像、在线运行仿真带来的挑战,通过揭示工艺、机构动作、物流运动、资源配置之间的多因素、多层次耦合关系,建立关键件机加车间多尺度、多物理量、多维度集成的设计模型。

1 多维度数字孪生体构建与全要素集成

车间多维度孪生体构建与全要素集成主要包括数字样机构建、车间逻辑模型构建、车间信息模型构建,以及包含孪生单元整合、数据知识传递、弹性扩展在内的多尺度单元组装技术^[7],如图2所示。

(1) 车间数字样机构建。对机加车间中人、机、料、法、环90%以上核心生产要素进行CAD几何模型构建及预处理,特别是机床、工件、刀具、工装、厂房、人员、物流设备等对象。其中模型预处理包括格式转换、模型简化等,并参照相关行业标准对各个零部件进行规范命名。数字孪生虚拟车间构建包括场景建模和工艺流程仿真,其中场景建模又包括设备模型、车间模型、工具模型,工艺流程仿真模块接受来自场景建模中的数据,通过CAT Process文件进行流程仿真。

(2) 车间逻辑模型构建。物理车间到虚拟车间的映射是关键件加工数字孪生车间三维可视化监控的核心,为建立真实的映射过程,需要对车间生产系统进行建模,从而准确地描述车间动态行为。针对典型离散事件动态系统的特点,通过Petri网建模方法来描述生产系统作业逻辑,通过实时信息转化的车间事件驱动生产系统状态转换,通过层次化的

映射规则建立数据驱动的虚拟车间同步运行模式,从而动态映射物理车间现场作业运行^[8]。

(3) 车间信息模型构建。利用物联网及大数据技术,构造层次化、模块化的信息模型体系。通过对关键件机加数字孪生车间信息站点的动态组合,实现在网络环境下进行并行工程分布式的动态联盟。机加车间信息模型由车间信息管理系统、车间数据中心和各区域信息站点等要素构成。

数据中台不同的数据管理组件负责对上述3类主要模型信息进行一体化存储、管理与传递。信息模型中的生产计划、作业调度、设备资源、物流控制、工作状态等数据传递给车间逻辑模型进行关联,动态映射物理车间的现场作业状态,同时,车间逻辑模型又进一步调用相应点位的车间数字样机信息,将动作变量、历程变量和场变量数据转换成控制逻辑、曲线、云图和流场,进行可视化精准镜像。

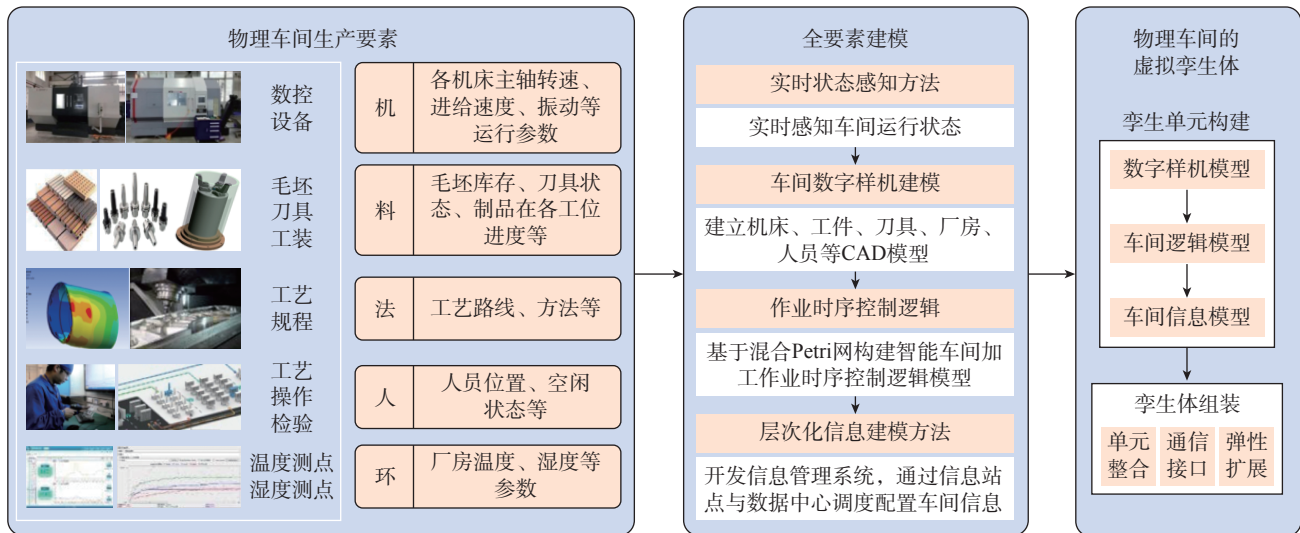


图2 机加车间数字孪生体构建与全要素集成

Fig.2 Building and integration of digital twins of machining workshop

2 多源复合驱动的在线运行与虚实状态镜像映射

通过对复合数据的频谱滤波、实体设备几何特征提取以及工艺流程的语义抽象,实现车间多层次状态镜像映射;构建孪生体的响应机制,采用物理信息融合的方法真实模拟数据在孪生单元间的传递,实现复合数据驱动的孪生体在线运行,采用基于代理模型的方法加快孪生系统的响应速度;最后在车间孪生场景中导入关联数据格式文件,将场景模型与仿真分析数据相关联,基于可视化渲染引擎将设备的运动行为以及应力应变等CAE分析数据直观实时地展示出来,如图3所示。

孪生数据驱动的加工工艺优化设计

如图4所示,在航天关重件机加车间的场景中,孪生数据驱动的加工工艺优化具体在以下两个方面发挥作用:(1)在数字孪生系统中,以加工稳定性、设备加工能力、所耗工时、资源整体平衡性为首要评价标准,对初步制定的加工工艺路线安排、加工工艺参数(转速、进给、切深和切宽)进行虚拟仿真,避免

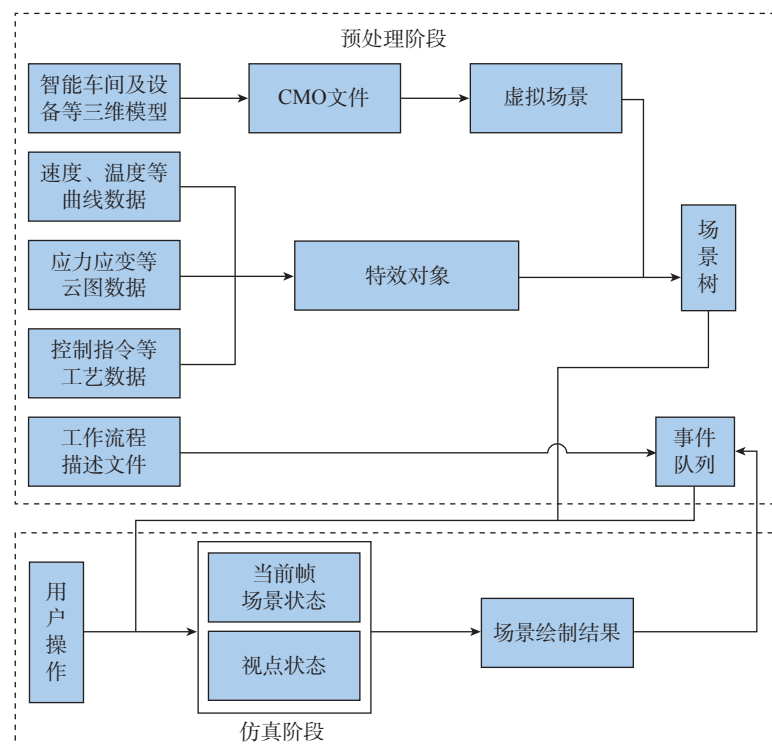


图3 虚拟车间在线仿真流程

Fig.3 Online simulation flow of virtual workshop

欠切、过切和碰撞,实现在正式加工之前基于孪生系统对微观加工参数的正确性以及宏观的工艺资源配置的可行性进行优化与验证,从而提前规避工件质量问题、设备加工能力不足、额外加工任务等各项干扰;

(2)在实际加工过程中,基于制造过程模型开展可视化工艺动态仿真,从而对加工参数进行决策优化,并且对零件的加工质量进行在线评估与预测,实现从基于静态数据的工艺被动设计到基于实时孪生数据的

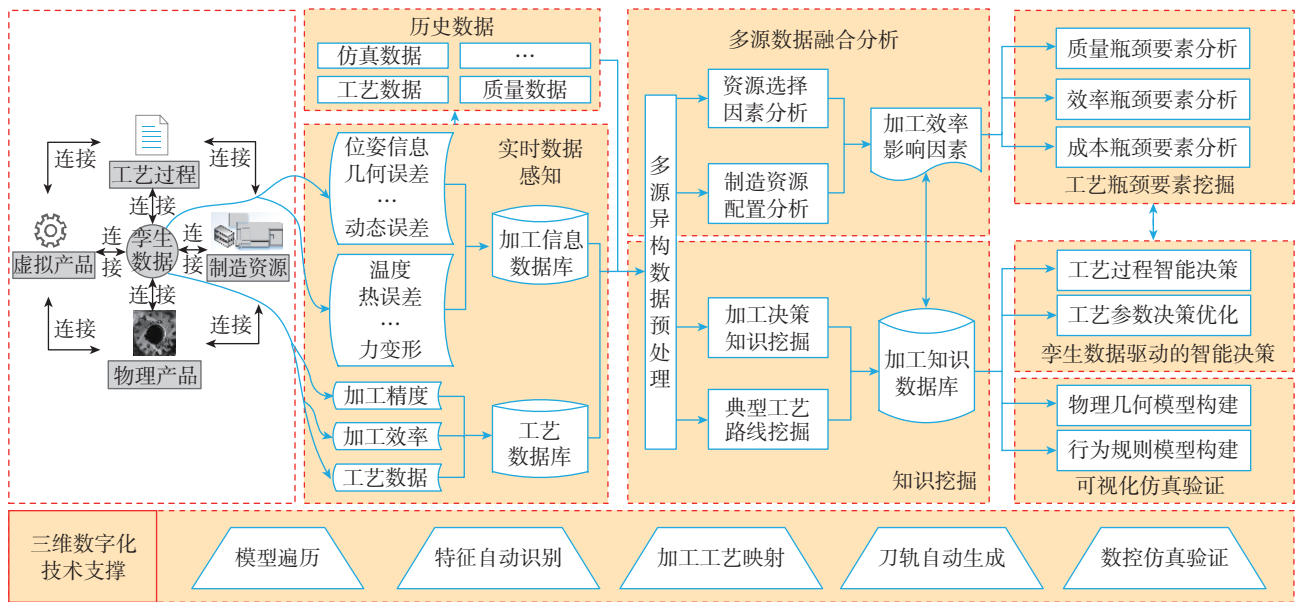


图4 加工工艺优化技术途径
Fig.4 Technical solution of process optimization

主动评估的转变。

如图5所示,基于制造过程模型开展可视化工艺动态仿真,其中制造过程模型主要包括制造工艺过程涉及的几何模型、物理模型、行为模型、规则模型等。几何模型和物理模型同属于工艺实体模型范畴,用于表征加工特征的几何信息和拓扑关系;行为模型主要模拟外部环境对加工过程的影响,可进一步细分为问题模型、评估模型和决策模型;规则模型涵盖工艺要求、加工方法、切削参数和切削余量等。首先导入用于反映制造过程运行状况、实时性能、环境参数、突发扰动等信息的装备实时数据,接着利用这些信息结合加工的物理模型,从微观尺度对加工工艺产生的实时响应及行为进行动态的数学近似模拟与描述,如结构、热变形、零件受力等;最后结合基于机器学习的加工规则模型,实现仿真过程的自学习和自演化,从而使得动态仿真具备实时的判断、评估、优化及预测的能力,即人机紧密在线交互式可视化的工艺动态仿真^[9]。

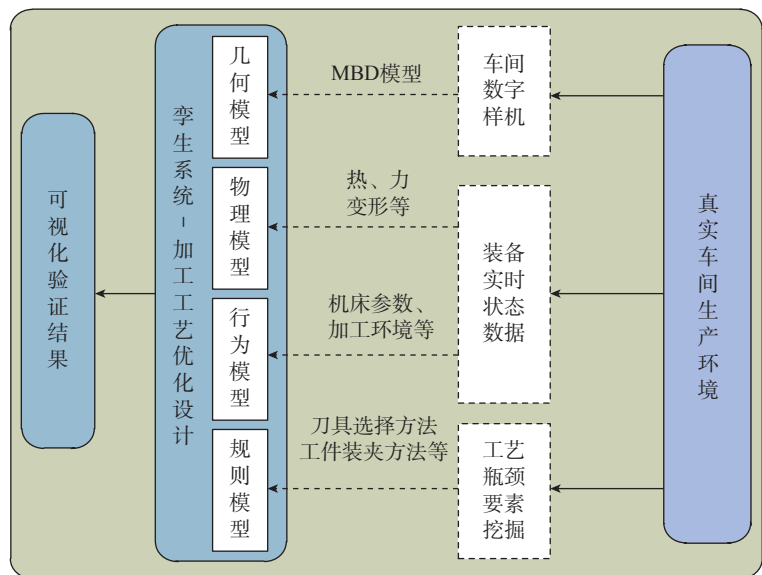


图5 可视化工艺动态仿真
Fig.5 Visual process dynamic simulation

基于实时数据的混流排产与动态调度

针对航天飞行器关重件生产多品种变批量、动态扰动频度高等问题,结合机加工工艺过程,围绕生产计划执行情况、生产过程扰动情况和制造资源平衡性等,通过工业互联网平台获取当前加工情况,以及订单变

化、质量问题、设备故障等不确定要素;根据实时的加工任务,基于加工工序和加工设备两层编码的改进遗传算法在孪生系统里进行选择、交叉和变异求解^[10],获取优化的排产方案并进行动态调度,具体实施路径如图6所示。

多目标柔性作业车间调度可以描述为生产车间中在 m 台设备上加工 n

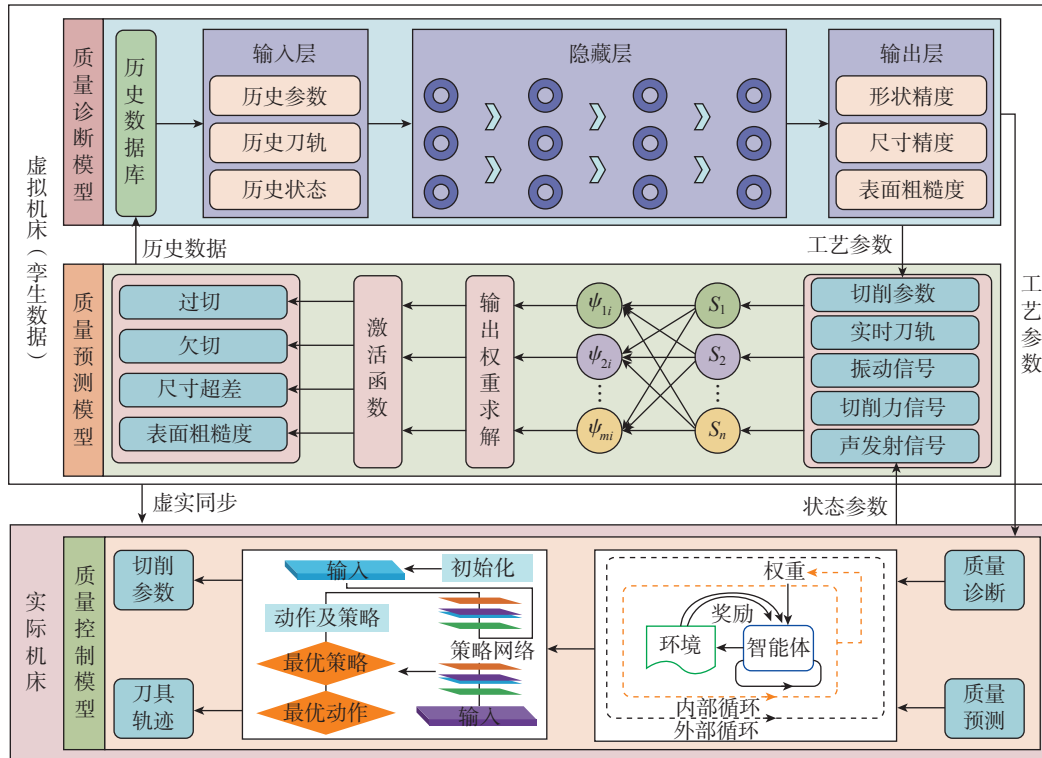


图7 基于孪生数据的产品质量预测与控制路线图
Fig.7 Quality forecast and control based on twin data

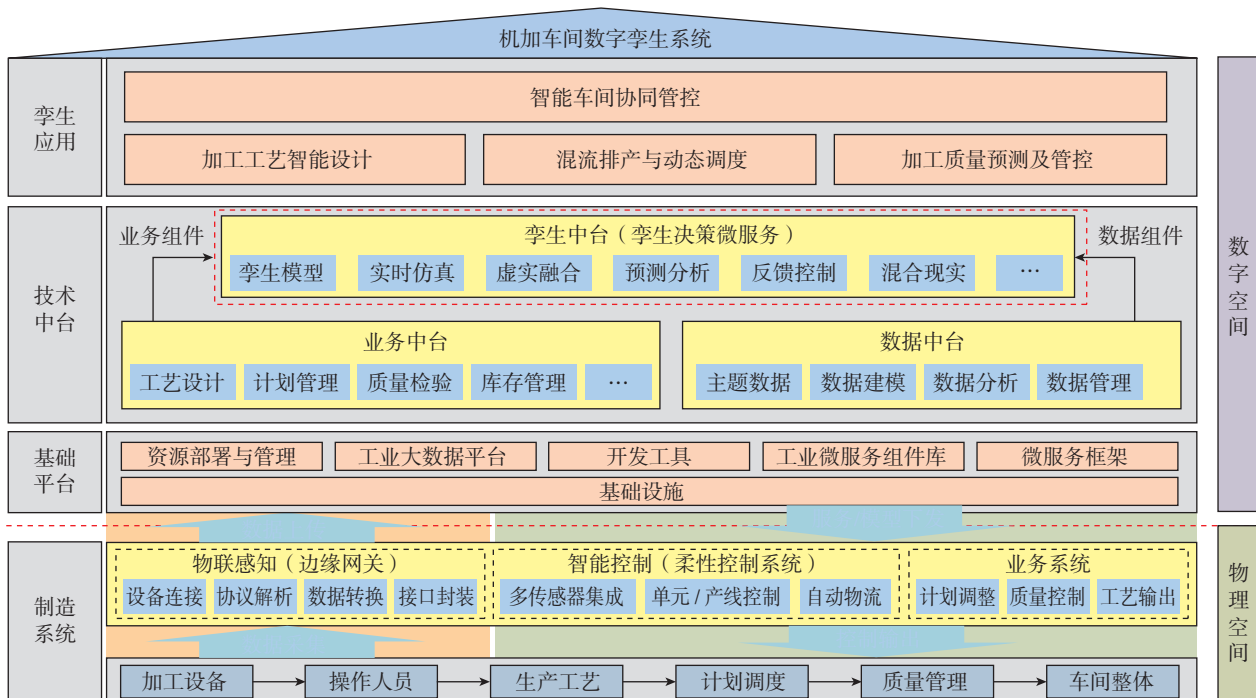


图8 机加车间数字孪生系统整体架构
Fig.8 Architecture of machining workshop digital twin system

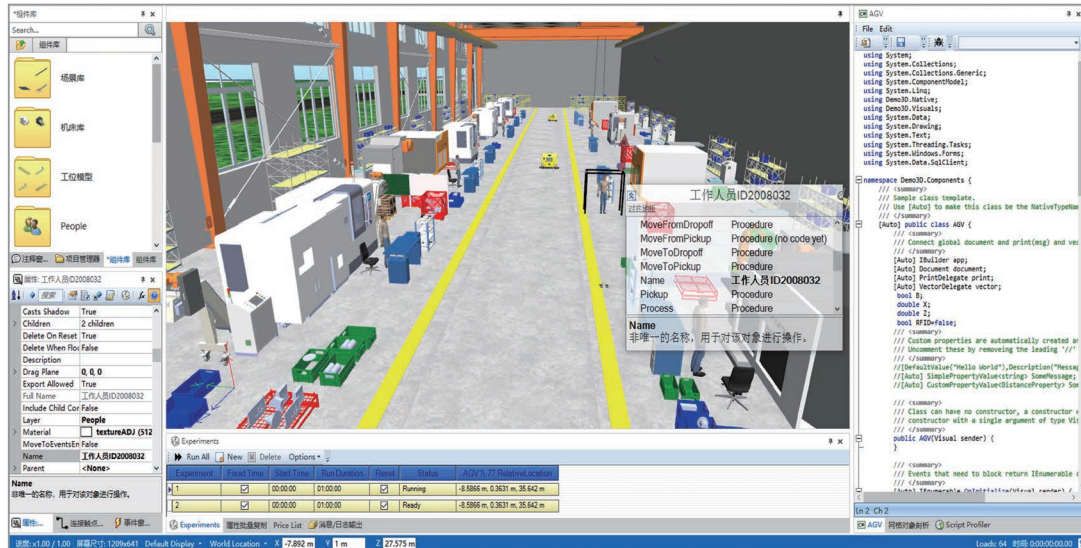


图9 机加车间数字孪生环境集成建模

Fig.9 Integrated modeling of digital twin machining workshop



图10 基于工位状态诊断的车间资源调度

Fig.10 Workshop resource scheduling based on state diagnosis

架。通过孪生数据驱动的加工工艺优化设计、基于实时数据的混流排产与动态调度以及虚实同步的加工质量诊断、预测与控制等手段,为机加车间缩短工艺优化周期、提高资源动态配置效率、提升质量分析预测水平提供了切实可行的技术途径。同时也为航空、船舶、电子、兵器等军工离散制造企业智能车间的建设提供了借鉴。

参考文献

[1] PANETTA K. Gartner's Top10

strategic technology trends for 2017[EB/OL]. (2017-8-2)[2017-09-25]. <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017>.

[2] 陶飞,程颖,程江峰,等.数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J].计算机集成制造系统,2017,23(8):1603-1611.

TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 刘利钊,刘健,李俊伟,等.面向复杂智能制造的多维时空建模方法与应用[J].北京工业大学学报,2019,23(1):35-46.

LIU Lizhao, LIU Jian, LI Junyi, et al. Modeling method and application of multi-dimensional spatio-temporal for complex intelligent manufacturing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 23(1): 35-46.

[6] 陈援非, 朱珍民, 鹿晓文. 基于信息-物理空间映射的智能空间建模方法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(2): 216-219, 227.

CHEN Yuanfei, ZHU Zhenmin, LU Xiaowen. Modeling method for smart space based on cyber-physical space mapping[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(2): 216-219, 227.

[7] 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, 60(7): 41-45.

YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 41-45.

[8] 宁汝新, 刘检华, 唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械工程学报, 2006, 42(7): 132-137.

NING Ruxin, LIU Jianhua, TANG Chengtong. Modeling and simulation technology in digital manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(7): 132-137.

[9] 于勇, 胡德雨, 戴晟, 等. 数字孪生在工艺设计中的应用探讨[J]. 航空制造技术, 2018, 61(18): 26-32.

YU Yong, HU Deyu, DAI Sheng, et al. Study on application of digital twin in process planning[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 26-32.

[10] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 柔性作业车间多目标动态调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2629-2637.

LIU Aijun, YANG Yu, XING Qingsong, et al. Dynamic scheduling on multi-objective flexible job shop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2629-2637.

[11] 汪俊亮, 张洁, 秦威, 等. 加工时间不确定的柔性作业车间鲁棒调度方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(5): 627-632.

WANG Junliang, ZHANG Jie, QIN Wei, et al. Robust scheduling on flexible job shop with

uncertain processing time[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(5): 627-632.

[12] 刘磊, 张振明, 田锡天, 等. 基于MBOM的飞机制造过程质量管理[J]. 航空制造技术, 2008, 51(7): 74-76.

LIU Lei, ZHANG Zhenming, TIAN Xitian, et al. Quality management of aircraft manufacturing process based on MBOM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(7): 74-76.

[13] 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.

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.

通讯作者: 洪海波, 高级工程师, 博士, 主要从事复杂制造系统孪生技术、智能传感与检测等研究。

Study on Digital Twin-Based Integration Framework of Aerospace Key Parts Machining Workshop

ZHONG Keke¹, HONG Haibo¹, SHEN Yiping¹, QIAN Weiwei², YU Chenglong³, WANG Yufei¹

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China)

[ABSTRACT] In view of the increasingly prominent bottlenecks in machining workshop for aerospace key parts under the new situation, such as the long cycle of process optimization, the low efficiency of resource allocation and the lack of means of quality assurance, the concept and methods of digital twins are introduced. Combined with the production and operation characteristics of machining workshop, the digital twin-based integration framework of aerospace key parts machining workshop is introduced. The ways of achieving the twin environment, the mapping hub and the enabling platform through twin data are explained. The optimization of the processing, the mixed-flow scheduling, as well as the quality diagnosis, prediction and control technology are discussed. The development and the integration of machining workshop digital twin system are also discussed so as to achieve the goal of dynamic iterative optimization and efficient collaborative management of the workshop.

Keywords: Digital twin; Aerospace key parts; Machining workshop; Integration framework; Coordinated control

(责编 七七)