

航天器制造领域数字孪生技术的探索与实践

刘金山 徐磊 冯锦丹 王彬 孙连胜

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

文 摘 从实现航天器单件、小批量生产质量、柔性、效率同步提升的需求出发,回顾了数字孪生技术的内涵和发展,提出了包含产品孪生-产线孪生的航天器制造系统数字孪生的基础模型和动态演化过程,提出了数字孪生在数据采集、同步建模、系统评估和生产线重构等技术方面的实现方法,阐述了采用数字孪生的虚实互动机制提升的具体实现途径,并通过航天器产品生产的具体应用验证了有效性。

关键词 数字孪生,柔性制造系统,虚拟制造,信息物理融合

中图分类号:TH18

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.018

Exploitation and Practice of Digital Twins Technology in Spacecraft Manufacturing Field

LIU Jinshan XU Lei FENG Jindan WANG Bin SUN Liansheng

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract In order to realize the synchronous improvement of quality, flexibility and efficiency of single piece and small-batch production of spacecraft, the connotation and development of digital twin technology are reviewed, and the basic model and dynamic evolution process of digital twin technology for spacecraft manufacturing system including product twin and production line twin are proposed. The realization method of digital twin in data acquisition, synchronous modeling, system evaluation and production line reconstruction is proposed, and the concrete realization way of virtual reality interaction mechanism by digital twin is expounded, and its validity is verified by practical application of spacecraft production.

Key words Digital twins, Flexible manufacturing systems, Virtual manufacturing, Cyber and physical convergence

0 引言

随着新一代信息与通信技术的高速发展,数字孪生模型逐渐成为潜在的能够有效解决物理世界和虚拟世界之间交互与融合的新方法和新途径^[1]。近年来,数字孪生技术得到了国内外学术界和产业界的高度关注和广泛研究^[2-9]。数字孪生技术自提出以后,逐步被美国空军实验室与美国国家航空航天局深入研究,目前针对数字孪生研究已经提出了包括物理设备、虚拟设备、服务模型、孪生数据以及连接模型的五维结构模型^[10],在产品全生命周期管理方面,提出了可供试验的数字孪生体,在车间生产系

统方面提出了数字孪生车间的概念、系统组成、运行机制、特点和关键技术。美国PTC公司、西门子、达索、通用电气等国际知名公司也在自身的产品中积极实践数字孪生的理念。在航天领域,面向航天器产品或系统的高度集成的多物理场、多尺度、多概率的仿真模型,能够利用物理模型、传感器数据和历史数据等反映与该模型对应的实体的功能、实时状态及演变趋势^[8],数字孪生具有比较明确的应用方向。然而,在航天器制造领域如何适应航天器单件、小批量的特点^[11],构建生产系统孪生模型,解决航天器研制的任务瓶颈,还没有得到充分研究。因此,本文针

收稿日期:2021-08-09

基金项目:国防基础科研计划(JCKY2020203B016)

第一作者简介:刘金山,1979年出生,博士,研究员,主要从事数字化制造、智能制造等方向的研究工作。Email:8680833@qq.com

对航天复杂产品的生产特点,提出了数字孪生技术在航天器生产中的应用模式。

1 航天器产品研制的问题与需求

卫星等航天器产品由于运行环境与研制生产环境之间具有较大差异,在目前的技术条件下仍然属于不可维修的产品,产品的高质量、高可靠的特点明显。同时卫星等航天器的研制具有典型的单件小批量、研制类产品的生产特点,由于产品自身的复杂性,生产过程技术状态控制、生产过程组织、产品数据的传递、车间物流控制等管理活动,随着型号数量的增加变得越来越复杂。在这样的情况下,保证产品生产的同时,保证生产过程中的质量,还需要解决以下问题。

(1) 产品全链条数据打通与闭环

单件小批量产品的研制过程,技术状态变化快,不能通过专业专人维护产品配置信息的方式来确保数据源头的统一。在以工程图纸为介质的研制体系中,大量的档案分发、图纸替换等工作,随着型号任务的持续增加,这种模式很难适应大量型号并行生产的需求。需要以设计为统一的源头,借助系统工程的思想,实现全链条数据的打通和闭环。

(2) 制造系统对不同型号的适应性

单件小批量产品研制的条件下,制造系统往往采用专业化布局的方式,通过管理人员的工作指令来实现产品在不同工位之间的流转。这种制造系统的组织模式,自组织能力差,管理成本高,制造系统的柔性是通过人的柔性来保证的,制造系统关键设备的利用率往往只能达到批量化产品制造系统关键设备的利用率的50%,给企业造成了极大的浪费。

(3) 生产节拍控制与物流整体流动性

由于单件小批量产品制造系统的专业化布局,导致了生产过程现场物料的流动性差,生产缺少明显的节拍。航天产品生产周期往往通过各个环节人员加班加点,凭借经验进行保证。而且,一旦中间过程中的任何环节出现了问题,就会导致整个型号研制周期的拖延,生产管控风险高。这导致在很多航天器,各级管理人员都在不断协调螺钉、标准件、工装齐套等临时性问题。

(4) 工序上下游之间缺少相互的制约

单件小批量产品生产的过程自组织性比较差,统一产品的上下游之间缺少必要的主动配合,“扔过墙”的情况比较普遍。各个环节之间缺少相互制约,自顶向下的管理方式协调工作量大,系统级的持续改善难以实施,精益管理等先进的理念难以在航天器生产企业进行推行,质量稳定性也受到限制,“一次成功,不代表次次成功”在航天企业中普遍存在。

(5) 管理成本随着任务量的增加而增加

由于生产过程重复性低,单一管理和多型号管理之间可重复的管理方式没有固化,型号设计更改频繁,人为跟踪和落实技术状态变化,航天企业管理成本随着型号任务的持续增加而不断增加。单纯依赖增加人员,难以缓解这种恶性循环,迫切需要通过制造系统的优化与重构来解决这种问题。

2 航天器制造系统数字孪生的框架

针对上述问题,以及航天器在轨运行环境与地面制造环境存在较大差距的问题,建立包含几何、物理属性的产品及生产线动态同步模型,支撑产品设计态、制造态、运行态的三态高保真模型的模拟与映射,利用实做信息的完整采集,以及物理约束消减方法实现对空间物理运行状态的高保真模拟,从而为提升制造质量奠定基础。航天器制造系统数字孪生模型中包含了产品数字孪生模型和生产线的数字孪生模型,通过产品孪生数据集合、生产线的数字孪生数据集合与生产过程各个系统信息交互,如图1所示。在此过程中,产品数字孪生和生产线数字孪生的生成是一个动态过程,需要结合从需求模型、设计模型、工艺模型到实做模型的转变,也包含了PDM、ERP、MES、数据包等管理系统对生产线数字孪生的动态驱动。

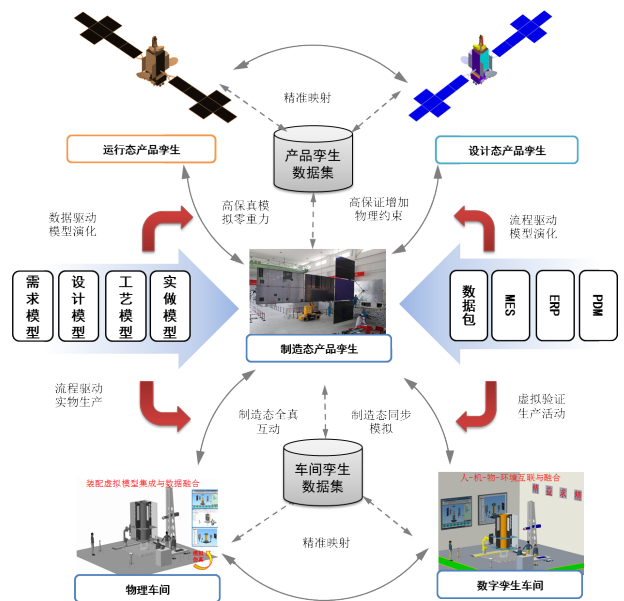


图1 航天器数字孪生模型

Fig. 1 Digital twin model of spacecraft

在航天器产品的研制过程中,为了适应产品建立设计态、制造态、运行态的三态的数字孪生,覆盖航天器结构产品智能车间全要素、全流程、全业务的航天器结构产品智能车间数字孪生平台系统,实现航天器结构制造过程中计划调度、过程管控、数据分析、质量管控、辅助决策等方面的深度集成优化,形成具有“虚实响应、虚实交互、以虚控实、迭代优化”

特点的航天器结构产品智能车间。基于数字孪生的 航天器整体研制模型如图2所示。



图2 基于数字孪生的航天器研制模式

Fig. 2 Spacecraft development mode based on digital twin

3 航天器制造系统数字孪生的技术实现

3.1 制造过程智能感知与数据采集

航天器产品具有单件小批量、种类多、结构复杂等特点,由于其产品运行于外太空的特殊性,使其对产品的质量有着极高的要求,这就对产品的生产过程参数控制提出了更高的要求。为了实现卫星结构

生产过程管控的精准化,就需要借助物联网和智能感知技术对影响产品质量、过程质量的人、机、料、法、环、测等状态信息进行有效的感知与监控,并在此基础上建立起面向生产现场的多源异构制造数据关联网络。

航天器结构生产线的物理系统组成一般包括:

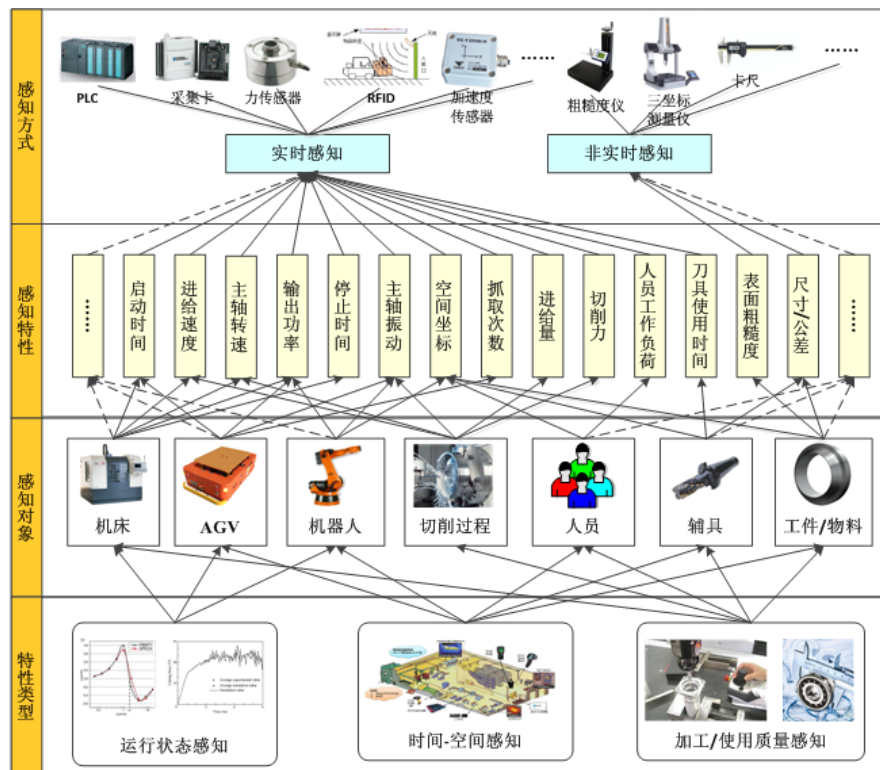


图3 制造过程智能感知与数据采集层次模型

Fig. 3 Hierarchical model of intelligent perception and data collection in manufacturing process

数控机床、AGV 物流小车、机器人、操作人员、工件/物料等；它们的状态与属性是感知网络构建的基础对象,通过感知网络的构建可以建立起底层物理系统与上层信息系统(PDM 系统、MES 系统、ERP 系统、质量系统)间的桥梁,进而实现制造过程状态信息的采集,为实现产品质量问题溯源、调度策略的优化、人员工作负荷的合理配置,以及航天器产品加工过程的综合优化提供数据支撑。基于所识别的航天器产品制造过程关键特性与参数,构建感知网络,可得出制造过程智能感知与数据采集层次模型,如图 3 所示。

来自数控机床的状态和属性信息可以通过机床本身提供的参数表以及 PLC 系统来进行采集,对于这类信息一般可以通过 DNC 系统来实时采集,如机床的启动/停止、程序段号、主轴转速、进给速度等;但对于像切削力、主轴振动、输出功率等状态的感知则需要部署相应的切削力传感器、加速度传感器、电流和电压传感器、以及信号放大器、数据采集卡等实现对上述实时信号的采集;对于 AGV 物流小车的轨迹、人员的工作轨迹等需要实时感知的时空信息则通过

RFID 系统进行感知,RFID 发射器和接收器的将根据需要感知的粒度和空间范围进行合理的配置;而对于产品尺寸、形位公差、粗糙度等在内的非实时特性或参数的测量则采用卡尺、三坐标测量机、粗糙度仪等数字化检测装置进行采集。

3.2 实时信息驱动的制造系统同步建模

实时信息驱动的制造系统运行状态和过程同步建模,如图 4 所示,首先要对制造系统中多源异构数据进行采集,然后经过数据的整合处理,建立统一的数据描述结构,存储到数据库。基于制造系统静态资源信息,建立静态制造系统逻辑模型和静态制造系统三维模型,前者描述制造系统运转逻辑,后者描述制造系统资源的几何信息,两者结合得到制造系统的静态模型,以在线采集的实时生产数据为驱动,控制智能制造系统虚拟模型动态运行,以此为基础将实时生产数据可视化展示出来,输出制造系统运行情况的动态可视化监控界面。该技术主要分为三部分:航天器产品制造系统数字孪生静态模型构建技术、实时信息驱动的制造系统同步建模技术、制造系统运行状态和过程同步建模系统数据管理架构。

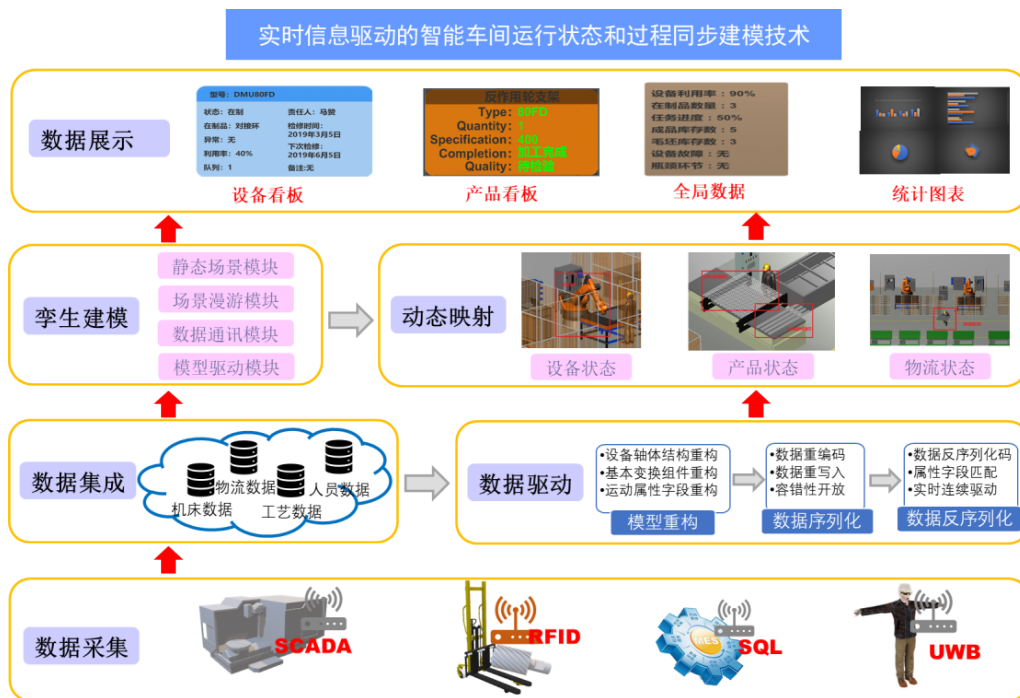


图 4 实时信息驱动的智能车间运行状态和过程同步建模

Fig. 4 Real time information driven workshop synchronization modeling

3.3 基于数字孪生的制造系统状态评估与质量监控

制造系统运行状态评估途径如图 5 所示。通过设备状态、车间级设备集群数字孪生模型等将数据实时汇聚起来,实现虚实交互反馈。基于历史数据、产品、加工和设备的状态数据,使用人工智能算法对

制造车间数字孪生模型中的运行数据予以融合分析,评估制造系统运行状态。

状态感知首先是通过自动化、条码扫码、终端输入等状态数据采集方式,将数字孪生模型、生产进度状态、检验检测数据、物流状态数据、NC 代码等制造执行数据动态、实时地传输到上层数据管理中心,并

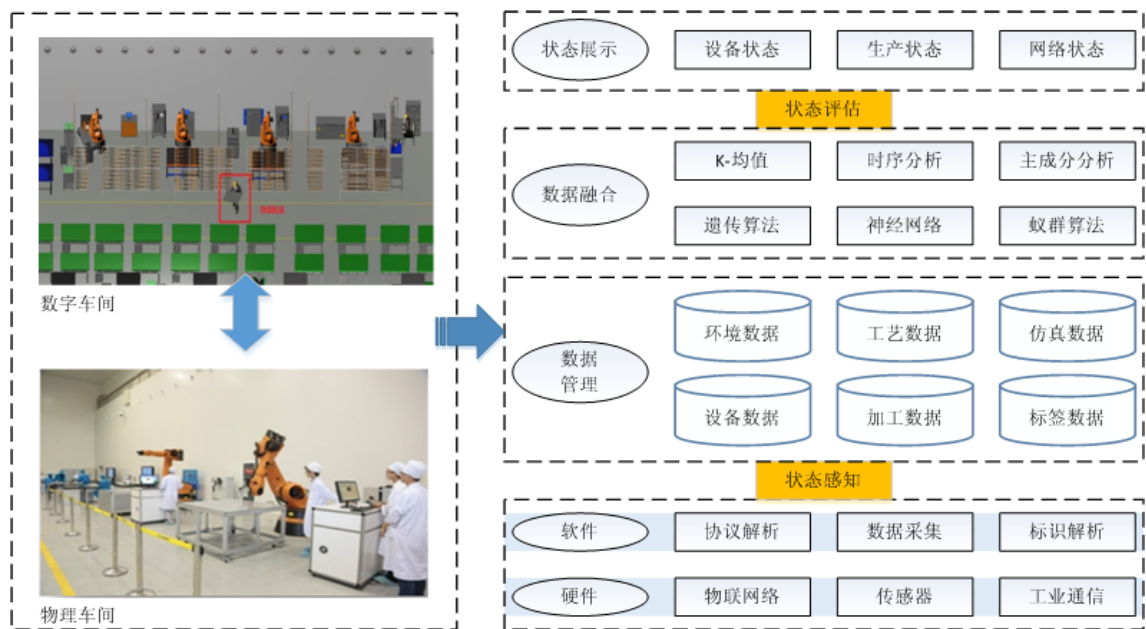


图5 车间运行状态评估路径

Fig. 5 Evaluation method of workshop operation status

对必要数据进行持久化处理。然后,再利用看板、视频、三维仿真等可视化方式展示指标数据和相关信息节点数据。

制造系统运行状态评估分为生产过程显性问题的发现和隐性问题的挖掘。通过生产过程状态感知发现显性问题,包括生产过程中的设备工况、生产节拍、过程实况、物料信息、人员操作、能耗变化、产品质量和安全环境等状态的实时感知;在所构建的制造系统数字孪生体的基础上,通过车间、制造单元、工位等多个场景的生产情况予以模拟生产、虚实融合的制造,辅以制造过程大数据分析技术,发现隐性数据关联和生产流程中的潜在隐患,以实现历史数据追溯、异常情况预警。制造系统运行状态评估具体包括以下几个方面。

(1) 通过KPI看板评估制造系统运行状态

在数字孪生体中构建KPI看板,综合性展示与效率、质量、风险三个维度的关键数据。效率数据包括设备利用率、资源配置效率、异常响应效率、人员绩效,以及车间生产效率和计划完成进度,这些数据将为管理层短期调度或长期优化决策提供依据。通过可视化产品检测数据、质量问题等信息,管理者实时掌握产品制造质量态势数据,将有效预防质量风险的发生、逐步优化质量管理机制。实时突发的异常信息与历史数据分析相结合,借助风险预示指标体系能够快速识别出当前生产过程中的潜在风险。

(2) 通过异常报警信息评估车间运行状态

制造系统中的设备、资源与系统均可以设置错误、异常等报警状态,采用红色、橙色醒目标识并在

数字孪生体场景中高频闪烁以快速定位异常位置,并通过报警状态规则快速了解可能造成异常的原因。

(3) 通过历史回溯数据进行制造系统运行状态评估

当出现设备警报异常时,基于历史数据对加工数据、制造系统运行过程、加工设备状态进行回溯,通过数字孪生体模拟过去一段时间内的车间运行状况,评估加工状态,以分析引起设备异常的原因。

3.4 基于数字孪生的航天器产品生产线虚拟重构

基于数字孪生技术的支撑下,建立制造系统人、机、料等相关要素的孪生模型,在虚拟环境中定义出不同工位之间的逻辑衔接关系,如图6所示。基于数字孪生几何模型、数据模型、物性模型、行为模型、规则模型为支撑,通过生产数据重定向、物流重构、几何模型重构、行为模型的重构,实现生产线上下游之间的可视化信息共享和工位实际视频的共享,形成工位之间的相互监督。

同时,利用自动化物流系统的准时化特点,实现不同工位之间物料的衔接。在车间信息物理系统的支持下,逻辑生产线各个工位及物流系统可以完整真实地复现在虚拟空间中。利用虚拟化技术调整工位局部相对比较容易,并且可以将多个机床定义为一个虚拟单元,或将一个制造单元定义为若干个单元,在虚拟空间构建可视化连续运行的生产线。生产线各个单元的实际运行状态、物流路线等信息均可以复现虚拟环境中,在此基础上形成相对简化、集中的虚拟生产线。通过虚拟生产线,管理者可以非常方便地进行管理,降低了面向生产过程管理的难度。

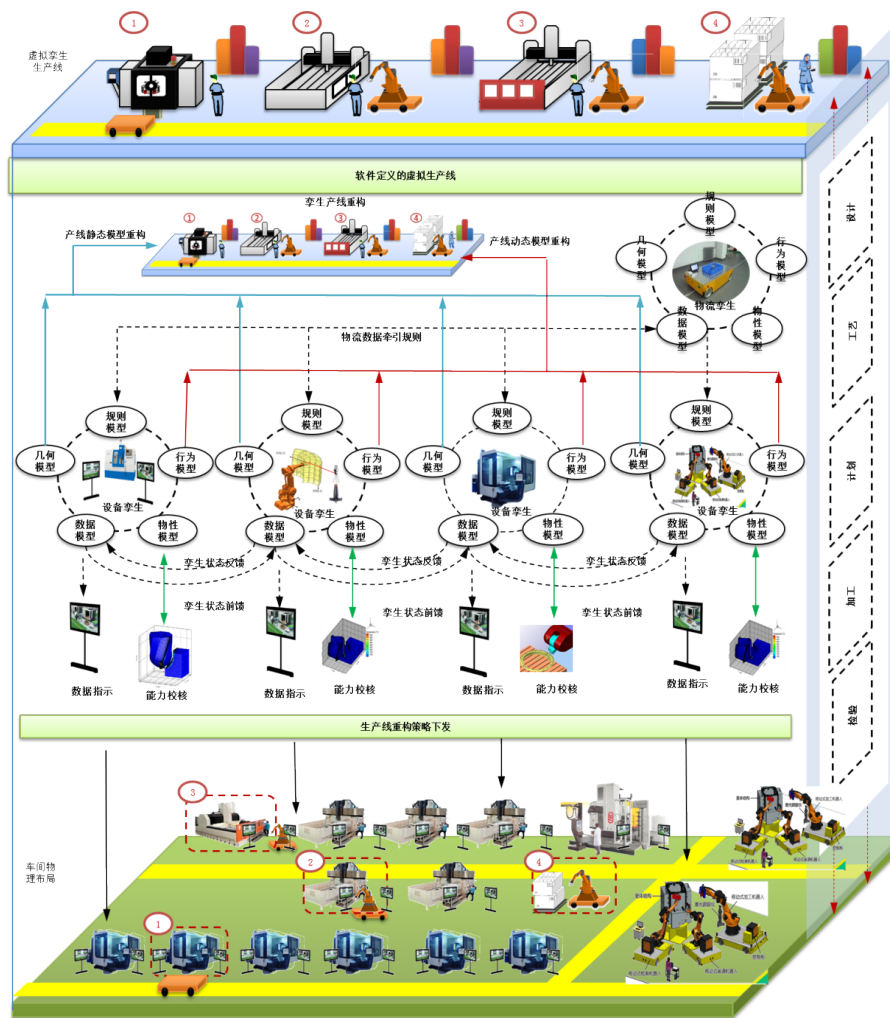


图6 基于数字孪生的生产线重构

Fig. 6 Product line reconfiguration based on digital twin

4 案例分析

为验证上述数字孪生方法在航天器产品生产过程中的作用,在结构件生产车间进行了应用验证。该结构件生产车间主要面向航天器中小型结构件加工单元4个主要业务环节,通过以数字孪生模型为核心实现了工艺设计三维化、生产准备辅线化、生产执行自动化、数据采集自动化等自动化、智能化升级。在数字孪生系统中,实现了对产品设计模型到实做

模型的全面打通,车间物流方式的定义,以及车间生产装备的数据采集、分析与健康预测,配合车间自动上下料装备的升级,降低了管控难度、提升生产效率和质量管理能力。具体实现情况如图7所示。

系统建设前后对比发现,机床有效切削时间提高1倍,某批次零件生产时长由初样120 h缩短至46 h,中小型金属结构件产能提升50%,产品一次交验合格率99.5%;生产准备、数控机床操作等环节实现

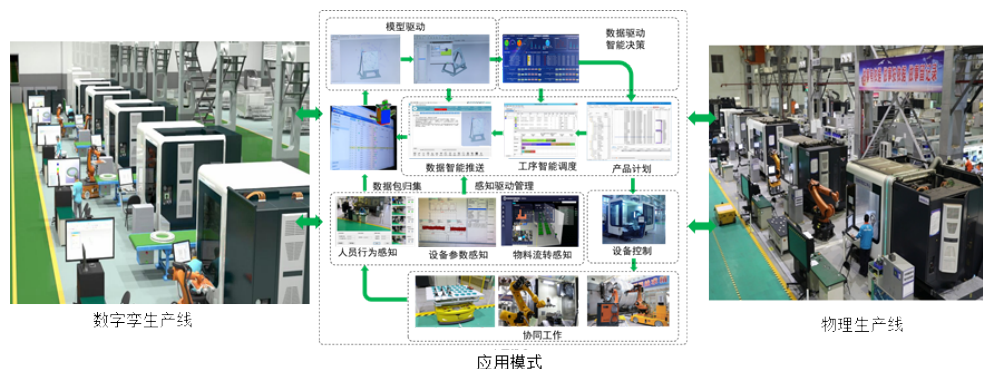


图7 数字孪生车间应用案例

Fig 7 Application case of digital twin

并行,人员需求减少2人/年。

5 结论

面向航天器产品研制的特殊问题和需求,提出了包含产品数字孪生和生产线数字孪生的制造系统数字孪生模型,描述了基于数字孪生的航天器研制模式,通过构建智能感知与数据采集、制造系统同步建模、状态评估与质量监控和生产线虚拟重构等技术构建了一种新型的制造系统。通过在航天器产品生产实践中的验证,可以证明:

(1)在航天器研制过程中,以数字孪生主线,打通产品全过程数据链路,即可以减少技术状态控制的管理成本,提升产品研制效率,也可以持续促进产品性能提升;

(2)基于数字孪生技术,建立虚拟连续运行的生产线,实现面向不同型号的生产线重构,可以解决生产系统柔性、节拍控制、物料流动性、车间自组织等一系列问题;

(3)建设产品数字孪生与生产线数字孪生模型,将产品研制过程和车间生产运行状态显性化,能够推动管理的持续优化,避免单件小批量研制过程中的管理成本随任务量增加而持续增加。

参考文献

- [1] TAO Fei, QI Qinglin. New IT driven service-oriented smart manufacturing : framework and characteristics [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems , 2017, 49 (1):81-91.
- [2] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Re-engineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, DOI:10. 1155 / 2011 / 154798.
- [3] TUEGEL E J. The airframe digital twin: some challenges to realization [C]//Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, Va, USA: AIAA, 2012: 1812.
- [4] GLAEXGEN E, STARGEL D. The digital twin

paradigm for future NASA and US air force vehicles [C]// Proceedings of the 53rd Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, Va., USA: AIAA, 2012: 1-14.

[5] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap [R]. Washington, D. C, USA: NASA, 2012.

[6] WARWICK Graham. GE advances analytical maintenance with digital twins [M]. Aviation Week & Space Technology, 2015: 10-19.

[7] 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.

[8] 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.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.

[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] 陶飞, 张贺, 戚庆林等. 数字孪生模型构建理论及应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.

TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1-15.

[11] 孙京, 刘金山, 赵长喜. 航天智能制造的思考与展望 [J]. 航天器环境工程, 2015, 32(6): 577-582.

SUN Jing, LIU Jinshan, ZHAO Changxi. A retrospective and prospective review of aerospace smart-manufacturing [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(6): 577-582.