

引文格式: 孙连胜, 高庆霖, 王黎黎, 等. 基于数字孪生的航天器结构件产线重构与自适应调度方法[J]. 航空制造技术, 2023, 66(21): 36-45, 57.

SUN Liansheng, GAO Qinglin, WANG Lili, et al. Digital twin-based production line reconfiguration and adaptive scheduling method for spacecraft structure products[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(21): 36-45, 57.

# 基于数字孪生的航天器结构件产线重构与自适应调度方法\*

孙连胜<sup>1</sup>, 高庆霖<sup>2</sup>, 王黎黎<sup>1</sup>, 陈瑾<sup>2</sup>, 刘金山<sup>1</sup>, 庄存波<sup>2</sup>, 张雷<sup>2,3</sup>

(1. 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094;

2. 北京理工大学, 北京 100081;

3. 天津商业大学, 天津 300134)

[摘要] 针对航天器结构件机加工产线配置和计划调度难度大, 产线整体占用率高、利用率低, 产能提升受限等问题, 提出一种基于数字孪生的航天器结构件产线重构与自适应调度方法。以“基于数字孪生的可视化监控+产线快速重构+实时感知自适应调度”运行机制为基础, 对上述方法的3个关键实现技术, 即基于数字孪生的三维可视化监控、基于任务和车间运行状态数据驱动的生产线快速重构、基于重构产线与实时感知数据的自适应调度进行详细阐述。设计开发基于数字孪生的产线快速重构与自适应调度系统, 验证方法有效性。

关键词: 机加工车间; 数字孪生; 可视化监控; 产线重构; 虚拟制造单元; 自适应调度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.21.036



孙连胜

研究员, 博士, 主要从事信息化规划、数字化制造、智能化制造等领域的研究与应用。

航天器结构件具有品种繁多、功能复杂、总量大批量小、工艺特性多样的特点, 生产过程中存在大量设计更改、工艺变更、计划调整等现象, 加之多型号并行投产, 各型号共享制造资源和生产线, 导致航天器结构产品生产线运行状态复杂多变, 大大增加了生产过程中全面、及时获取产品状态信息的难度。目前, 很难采用流程固化的、大规模生产的方式来解决质量、效率、成本之间相互制约的关系, 往往选择以人为核心的方式来实现生产的高度柔性化。

随着我国航空航天企业信息化水平的不断提升, 以及数字孪生技术和物联网技术的快速发展, 充分挖掘设备运行数据及产品加工过程等数据背后潜在的价值、有效管理和利用

这些数据已成为可能, 也为解决复杂离散制造车间生产过程异常繁多、系统柔性差、过程变动频繁及需求响应慢等问题提供了新的思路和研究手段。通用电气计划基于数字孪生体, 通过 Predix 平台实现对发动机的实时监控、及时检查和预测性维护<sup>[1]</sup>。Grieves等<sup>[2]</sup>研究了基于数字孪生的复杂系统故障预测和消除方法, 并在 NASA 的相关系统中开展应用验证。Tao等<sup>[3]</sup>给出了数字孪生驱动的产品设计、制造和服务体系框架及其应用方法和实例说明, 阐述了需要研究的5类关键技术。面向生产车间及其可视化监控领域, 陶飞等<sup>[4]</sup>提出了数字孪生车间(Digital twin shop-floor, DTS)的概念, 并明确了数字孪生车间的实现模式、系统组成、运行

\* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2020203B016)。

机制和关键技术<sup>[5]</sup>,探索了数字孪生车间信息物理融合的理论和技术<sup>[6]</sup>,为生产车间信息物理系统的实现提供了理论和方法参考。赵浩然等<sup>[7]</sup>提出了面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法。针对机加车间“黑盒”问题,孙元亮等<sup>[8]</sup>研究了面向数字孪生的监控系统实现关键技术,并开发出了原型系统进行应用验证。

为了提高制造系统的柔性及突破设备物理位置不能或难以改变的瓶颈,进行结构件产线逻辑组成上的重构,基于可重构制造系统的虚拟制造单元(Virtual manufacturing cell,VMC)的概念为此提供了思路。VMC是在一个既定的目标下,为了完成指定的任务而动态形成的制造资源虚拟集合,其特点是制造资源的物理位置不变,但生产组织和管理逻辑会根据车间的实际运行情况和任务情况而动态变化<sup>[9]</sup>,能够实现混线生产模式下制造资源的动态优化配置,并对车间异常和扰动做出及时快速响应。在VMC构建方面,贾国柱等<sup>[10]</sup>利用零件聚类 and 工艺聚类相结合的方式对零件加工流程进行模块化分解,在此基础上提出了基于模块化流程的VMC构建方法。对于多品种、多批次、小批量航空产品数控加工过程,刘高群<sup>[11]</sup>根据航天机电产品工艺特征离散等难点,提出了矩阵式动态虚拟单元的概念。针对多品种、变批量生产过程可重构制造问题,陈亚绒等<sup>[12]</sup>提出了基于两阶段求解的可重构虚拟制造单元构建方法。

由于复杂构件加工车间的高动态性和不确定性,单纯的VMC构建并不能满足实际工程要求,需要在车间出现生产异常时对VMC进行动态重构。在VMC动态重构方面,Moradgholi等<sup>[13]</sup>针对时间周期驱动的虚拟单元动态重构问题构建了其双目标整数规划模型,并使用遗传算法进行了求解。Li等<sup>[14]</sup>研究了可重

构制造系统中新订单到达后的虚拟单元重构问题,提出了一种改进的遗传算法。为减少虚拟单元重构对原有单元的影响,韩文民等<sup>[15]</sup>研究了新订单和时间窗口混合驱动的继承性虚拟单元重构问题。

在VMC调度与自适应调度方面,Kesen等<sup>[16]</sup>针对多工件多工艺路线的VMC调度问题,提出了一种基于启发式规则的遗传算法,并验证了其有效性。Arkat等<sup>[17]</sup>针对允许外协的VMC调度问题,以最大完工时间和最小的交通运输成本(包括厂内和厂外)为调度目标,建立了考虑工序准备时间约束的混合整数规划模型,提出了一种求解该模型的遗传算法,并验证了模型和算法的优越性和有效性。但是,独立求解VMC重构和VMC调度问题容易存在设备资源优化和生产调度方案脱节的情况,所以需要同时对VMC运行的整体情况进行全局优化或评估,利用基于数字孪生的三维可视化监控技术对数据进行多层次监控,以及在任务-时间驱动的生产线快速重构技术的基础上,构建自适应调度方法。

## 1 问题概述

目前,产品制造过程和生产线现场数据存在维度多、渠道多、形式多等特点,数据分散于各类科研生产信息系统,缺乏数据融合处理和统一的动态展示。现场有时需要搜寻多个系统、多个平台才能真正掌握某个对象的状态,且仍然会存在信息不

及时、不全面、不准确的情况。这将导致“工位级”和“产线级”不能及时掌握现场生产的进度和作业活动等生产动态,管控指令具有一定滞后性,难以对生产异常或突发事件进行正确高效的协调决策,无法精准控制生产执行过程。

航天器结构产品具有高性能与高质量一致性的特点,对产品制造过程和生产线现场管控的产品齐套、生产配套、生产进程、过程管控、异常状况等方面精准管控提出了更高要求。然而,目前普遍缺乏对上述信息的整合,缺乏“全局性”“通透性”“层次性”,导致无法全面、准确、及时地掌控产品演化和产线运行状态和趋势。

如图1所示,面对航天器结构产品任务具有多星并行、产研并存的混流生产特点,其制造过程中动态性和随机性强、离散程度高。在设备资源及物理位置尽可能不变的情况下,迫切需要有效手段,通过灵活调整生产线设备组成,包容不同产品类型对生产连续性的需求,以提升设备的利用率和生产线的快速响应能力。目前,按照工艺专业化原则布置设备的单元制造系统(Cellular manufacturing systems,CMS)虽然可以改善系统应对多品种变需求的响应能力,提升系统运作的柔性,但其难以进行物理重构的弱点被放大,导致设备负载不均衡,一定程度上会出现产线占用率高、利用率低等问题。在现有的CMS基础上进行调度排产虽然可基本上满足生产任务,但是整体产能提

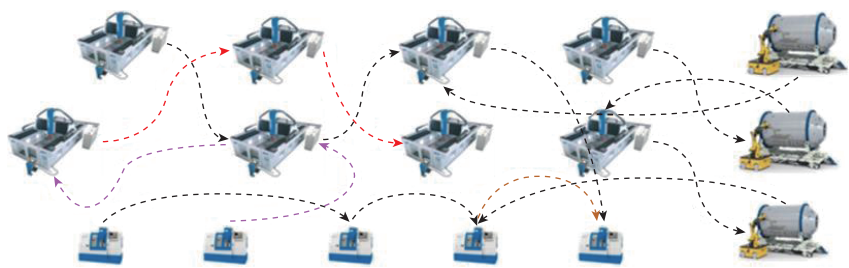


图1 航天器结构产品多星并行的混流生产任务

Fig.1 Multi-satellite parallel mixed flow production mission of spacecraft structural products

升十分有限,在生产任务增加及异常状况出现时,生产计划往往无法按期完成,难以满足车间柔性化混线生产、快速响应的需求。

此外,生产过程中,经常出现时间进度、设备状态、产品质量和现场需求不能被及时和准确获取的情况,导致车间管理人员不能对生产计划和现场需求进行及时调整和响应,影响了产品的生产进度和效率。因此,需要对现有生产线物理配置及逻辑组成进行应变能力与容错能力更高的重构研究,在产线重构的结果上根据动态数据进行适应性调整。

## 2 基于数字孪生的产线重构与自适应调度方法架构

针对航天器复杂构件加工车间制造过程特点,利用基于数字孪生的三维可视化监控技术、基于任务和车间运行状态数据驱动的生产线快速重构技术、基于重构产线与实时感知数据的自适应调度技术,建立“基于数字孪生的可视化监控+产线快速重构+实时感知自适应调度”运行机制,构建基于数字孪生的产线快速

重构与自适应调度系统,总体架构如图2所示。

### 2.1 基于数字孪生的三维可视化监控技术

基于数字孪生技术,实现数据驱动的生产线动态可视化管控,使产品制造演化、生产线运行状态、资源重组、物资齐套、生产协调、产品跟踪等活动由传统“黑箱”模式向“多维度、全面化、透明化”模式转变(图3),从而支撑数据驱动的虚拟制造单元构建与生产线快速重构,提升生产线资源配置和管控的科学性、合理性,能够做到及时预警、及时调整、及时应对,提高生产线运行效率和快速响应能力。

#### 2.1.1 多源异构数据的感知与预处理

基于物联网技术实现车间多源异构数据的实时感知和采集,一方面为制造资源(加工设备、物流设备、关键性物料、人员等)配备RFID标签、条形码和传感器等自动识别或智能感知器件,使得制造资源能够主动感知自身的位置、运行参数、环境等实时信息;另一方面,将产品加工过程产生的质量、工时、进度、物料等数

据与工艺流程进行关联,实现对产品加工过程数据的采集和管理。

在实现数据实时感知和采集的基础上,针对在加工过程中产生的多源异构数据,利用粗糙集理论对其中的不完备数据进行清洗;采用时间序列方法对加工/物流设备状态、人员与物料状态、质量检测等出现的噪声数据进行辨识和修正,从而为车间的动态实时可视化监控、设备健康状态评估与故障预测、产线运行状态评估和产线快速虚拟动态重构提供可靠和完备的数据源。

#### 2.1.2 现场数据与数字孪生体关联映射

将物理车间实时采集的生产过程数据(如质量数据、工时数据、进度数据、检测数据、完工数据等)及制造资源实时感知数据与车间数字孪生体的生产要素模型进行关联映射,使得车间数字孪生体能够真实反映物理车间制造资源(人员、设备和物料)、产品、生产计划和工艺流程的实际工作状态和工作进展,达到以虚映实的目的,从而实现对车间全要素和全流程的动态实时可视化监控。

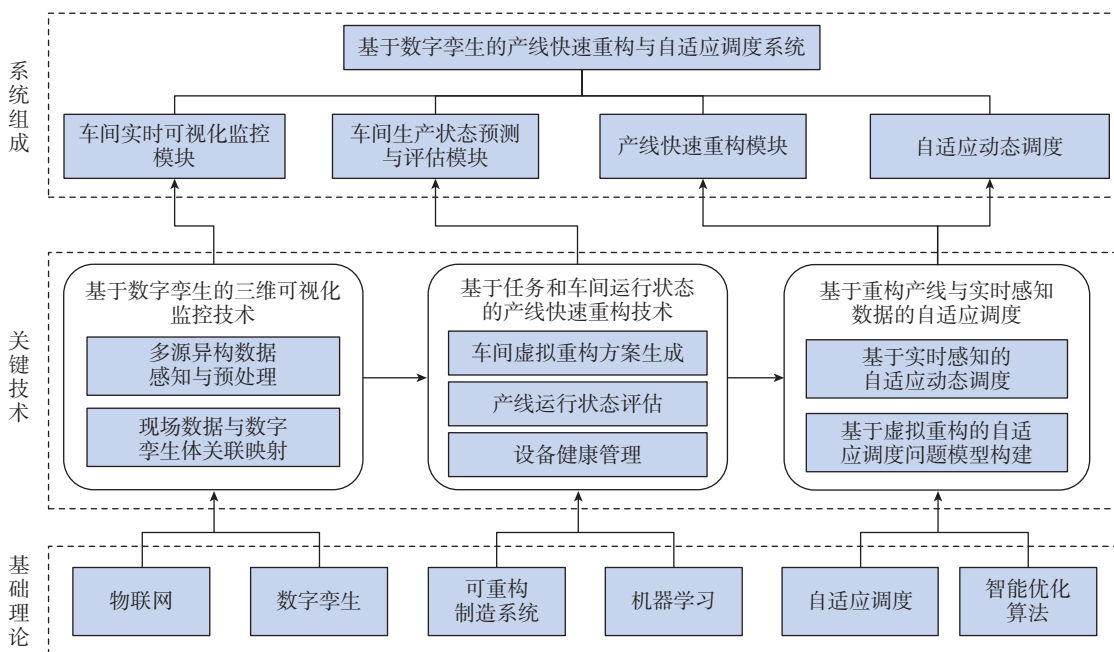


图2 基于数字孪生的产线快速重构与自适应调度系统

Fig.2 Rapid reconfiguration and adaptive scheduling system of production line based on digital twin

具体包括设备状态和动作监控、生产物流监控、产品状态和生产过程监控。利用基于数字孪生的车间动态实时可视化监控方法,实现对车间、产线(逻辑上)、工位、设备、人员、物料、生产计划、产品等运行状态和运行过程的全方位动态实时可视化监控和跟踪,如图4所示。

## 2.2 基于任务和车间运行状态的生产线快速重构技术

航天器结构件生产线的重构问

题是指当任务下达时,需要根据产品的工艺特性、设备评估状态、产能评测来判定重构后的产线设备组成,尽可能利用较少的设备满足加工任务要求,即形成可满足生产任务要求的最小设备包络,解放部分加工设备用于其他次要任务,同时最小包络外的设备可以作为可征用冗余设备,用于应对异常情况。如图5所示,整个车间由原有制造单元1、单元2、单元3、单元4组成,物理位置固定,不能

改变其设备组成,但通过产线重构策略,可征用冗余设备中任一满足条件的对象,重新构造虚拟的制造单元,以新的虚拟制造单元作为后续调度排产等活动的前提,将原有的高占用率、低利用率的生产模式转换为低占用率、高利用率的生产模式。同时在利用实时监控数据实现的设备故障预测与性能评估技术支持下,对利用率大幅度提升的加工设备进行及时的状态检测与预测性维护。

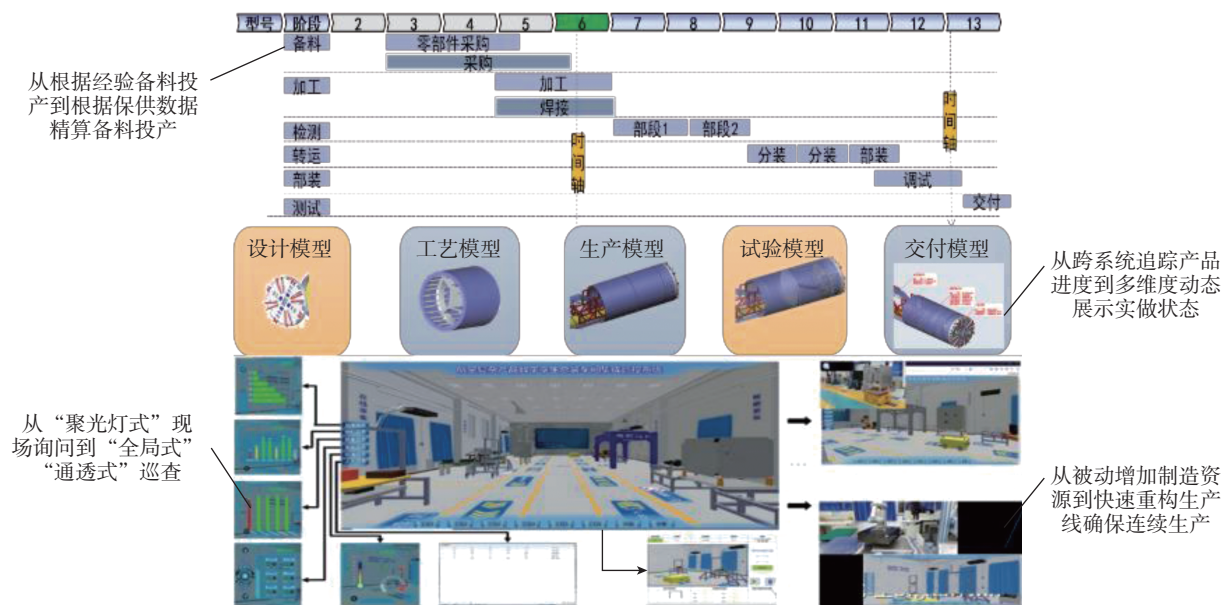


图3 “多维度、透明化、泛在感知”的生产线虚拟重构与可视化管控

Fig.3 “Multi-dimensional, transparent, ubiquitous perception” production line virtual reconfiguration and visual control

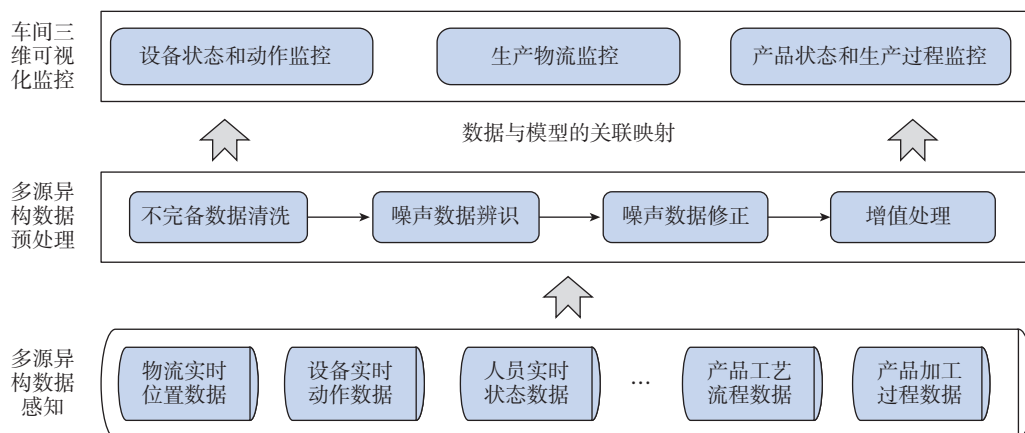


图4 基于数字孪生的车间三维可视化监控

Fig.4 Digital twin-based 3D visualization and monitoring of workshop

### 2.2.1 产线重构触发条件

对于影响范围较小的异常,如果通过调整调度排产方式可以解决,则无须进行产线重构。通常情况下,触发产线重构的条件主要有 2 种。

(1) 设备异常故障,导致产线某种工艺加工能力缺失或现有产线内无法通过自适应调度满足产能要求。

(2) 订单任务异常,导致产线产能不足,需要调整重构产线组成。

在上述情况下需重新分析重构目标和约束条件,建立面向异常的继承性虚拟动态重构产线的数学模型,利用资源池内可用设备进行继承性重构,其本质是产线中各虚拟制造单元设备组成的逻辑重构,如图 6 所

示。在重构过程中,从可用设备资源池中再次征用设备并不受实际物理位置限制。重构后的产线中,各虚拟制造单元将以原有的制造单元为基础,紧急情况下从设备资源池中优先选择具备与故障设备相同加工能力的机床,在局部形成新的虚拟制造单元,在全局视角下为整个产线继承性

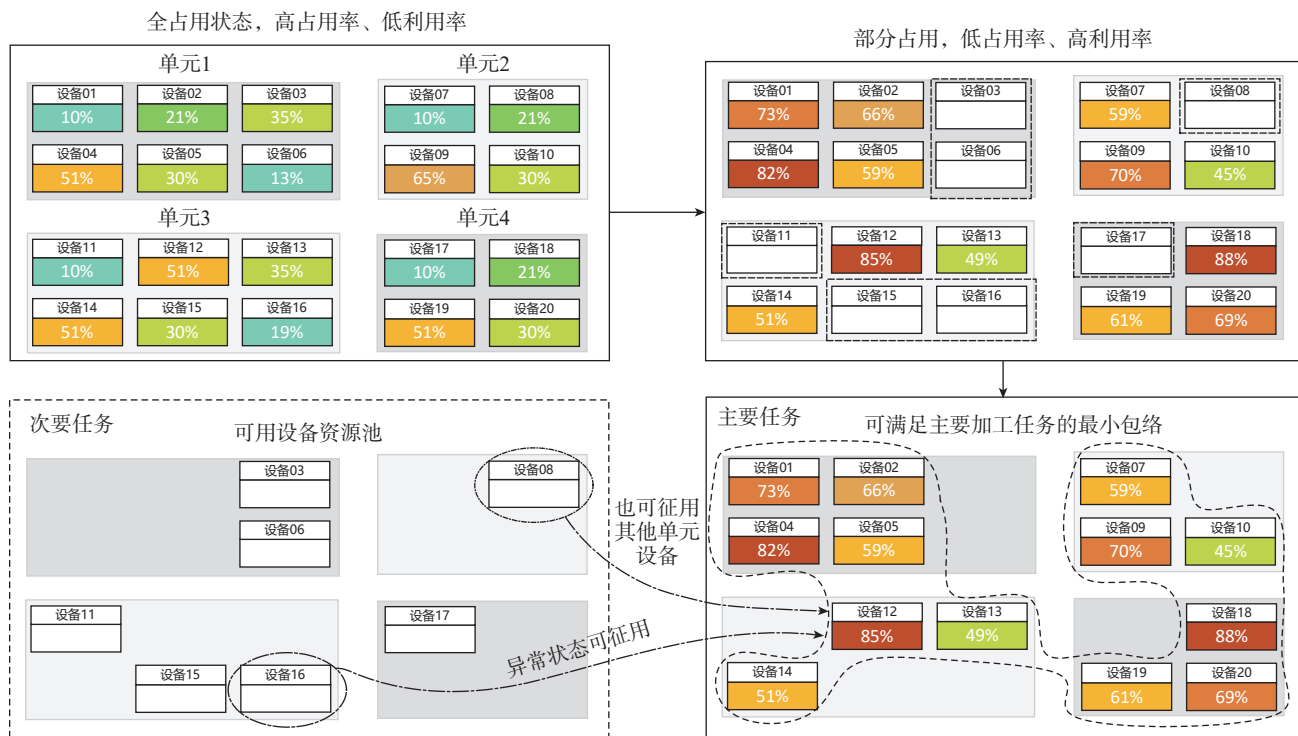


图 5 重构后的低占用率、高利用率产线

Fig.5 Reconfigured low occupancy, high utilization production line

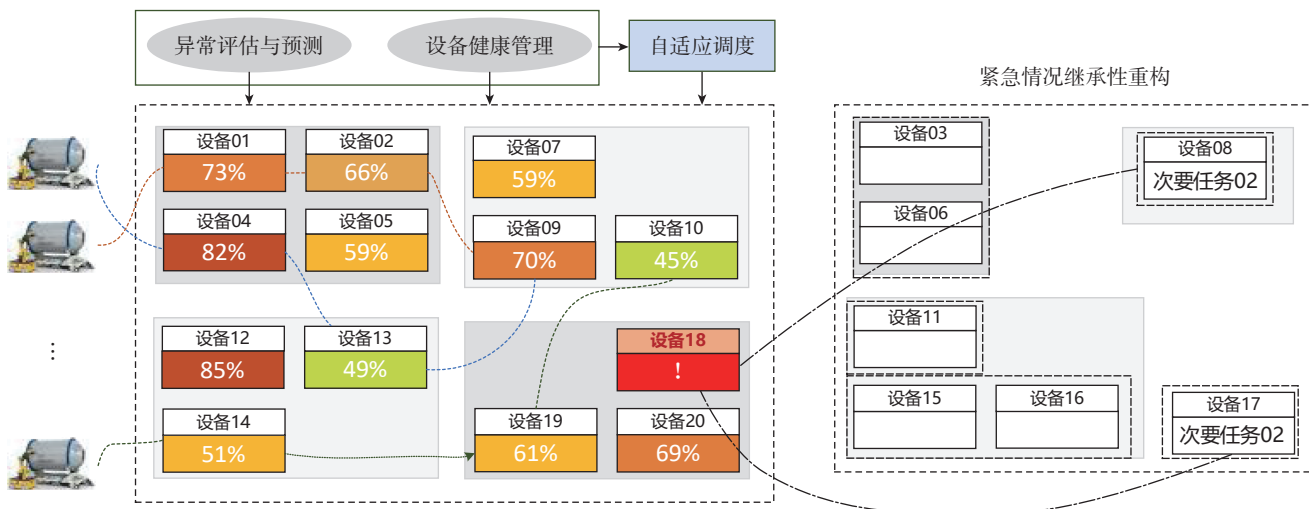


图 6 异常状态下对设备资源池的征用

Fig.6 Expropriation of device resource pools in abnormal states

重构。

### 2.2.2 产线重构模型建立策略

产线重构模型建立的关键在于根据系列任务的特征合理选用产线设备组成,模型构建关键参数主要分为决定性重构参数与量化评估性重构参数。重构产线模型的建立主要由设备选择方法与整体性评估方法实现。

(1) 工艺能力要求 (Craftiness)。工艺加工能力  $C$  为决定性重构参数,设备加工能力与制造单元的加工能力之间的关系:  $n_c \leq n_n$ ; 重构前产线的加工能力范围:  $\mathbf{CR}=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_{k-1}, C_k\}$ , 重构时加工任务所需的加工能力范围:  $\mathbf{TCR}=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_{h-1}, C_h\}$  ( $h$  为工序序号,  $h=1, 2, \dots$ )。当  $\mathbf{TCR} \subseteq \mathbf{CR}$  时不需要进行重构,即现有产线加工能力可以满足任务需求,否则需要进行重构。当需要进行产线重构时,待选用设备具备能力  $C_i$ ,若  $C_i \in \mathbf{TCR}$  且  $C_i \notin \mathbf{CR}$ , 此时决定性重构参数  $C=1$ , 即从资源池中增加具备  $C_i$  ( $i$  为机器序号,  $i=1, 2, \dots, M$ ) 加工能力的设备以满足加工要求,可选用; 否则  $C=0$ , 表示设备不可用。

(2) 可选设备健康状态 (Device's status)。可选设备健康状态  $D_s$  作为评估性重构参数,根据基于机器学习的设备健康状态评估数据。作为量化参数,可选设备健康状态  $D_s$  在设备选择方法中所占比重为  $W_{D_s}$ 。

(3) 共性工艺完工时间评估 (Completion time)。共性工艺完工时间  $C_t$  为评估性重构参数,根据历史数据中相似结构件的共性工序在各个设备上的加工时间进行量化评估。共性工艺完工时间  $C_t$  在设备选择方法中所占比重为  $W_{C_t}$ 。

重构产线设备选用方法公式为

$$DS_i = C(D_s \times W_{D_s} + C_t \times W_{C_t}) \quad (1)$$

式中,  $DS_i$  可以理解: 系列任务中以工艺加工能力  $C$  为主要决定性重构参数来确定初始资源池中某一设备是否可用,对设备 01 来说,若  $DS_1 \neq 0$  则说明设备 01 将作为重构产线组

成,此时的  $DS_1$  的值将作为整体产线产能评估的组成要素,并且  $DS_1$  值的大小代表了设备的可征用程度; 若  $DS_1=0$  则说明设备 01 不能作为重构产线组成。所以可以确定重构后产线的设备组成为  $\{DS_i | DS_i \neq 0\}$  的集合。

选择后的设备集合  $\{DS_i | DS_i \neq 0\}$  作为整个重构产线的组成,将采用整体性评估方法评估重构后的整体产线性能。重构产线的整体性产能评估参数为  $PC_a$ , 采用基于组合赋权法和灰色聚类的车间运行状态评估方法。利用组合赋权法对各指标权重进行计算,通过灰色聚类综合评价算法对车间运行状态进行评估,若重构产线满足要求,则可进行作业指导,确立任务下发,作为调度排产安排的决策前提。

### 2.3 基于重构产线与实时感知数据的自适应调度

通过分析现场实时数据和异常预测结果,确定已经出现或可能会出现的异常类型,以及相对应的异常处理策略,并判断是否需要进行适应性调度调整。若需要,基于现场实时数据和设备、人员、物料等制造资源的实时运行状态,建立受影响工序集合和可用制造资源集合,并在已构建完成的重构产线模型基础上,采用优化算法进行排产。

#### 2.3.1 基于重构产线与实时感知数据的自适应调度策略

基于重构产线与实时感知数据的自适应调度策略以事件-周期混合驱动方式为基础,将周期性调度与继承性重构相结合,以周期性订单变化为周期性驱动条件,以车间运行过程异常状态为事件性驱动条件,在周期性及事件性驱动条件下触发调度排产算法,具体自适应调度流程如图 7 所示。事件驱动的重构后产线自适应调度在基于数字孪生的三维可视化监控及设备健康状态与车间运行状态评估支持下,及时响应突发事件,在保证系统稳定性的同时,有效提高系统的响应能力。

在初始调度排产下发到重构产线的运行过程,期间需要触发自适应调度的条件或扰动因素主要为随机设备故障。假设  $t_1$  时刻在设备  $i$  上发生了随机性故障,即重构产线内部可用设备组成发生变化,此时设备  $i$  上正在加工的工序为工件  $j$  的  $O_{jh}$  工序,以目前产线上后续未加工工序及  $t_1$  时刻非故障设备作为输入,触发调度算法生成调度方案,若产线产能要求评估通过,将按照适应后调度方案排产; 若不能满足评估要求,则需征用资源池中设备,以保障后续工序运

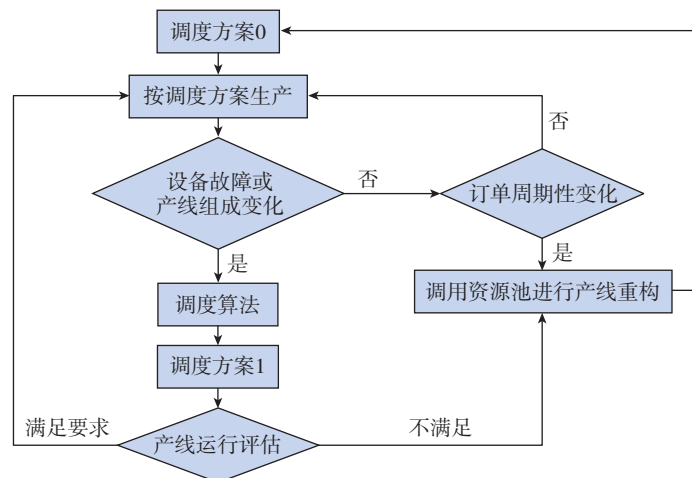


图 7 基于重构产线与实时感知数据的自适应调度流程

Fig.7 Adaptive scheduling process based on reconfigured production lines with real-time sensing data

行;假设重构产线中故障设备  $t_2$  时刻维修完成,则  $t_2$  时刻相当于产线组成发生变化,再次触发自适应调度。

### 2.3.2 基于重构产线与实时感知数据的调度算法

产线模型已经确定的航天器结构件机加车间调度问题,属于柔性作业车间调度,可以描述为有  $m$  台具备一种或多种制造能力的加工设备,其中有  $n$  个待加工工件需要在产线上进行加工,每个工件有一道或者多道工序。每个工件的工序顺序是已经确定的,每道工序可以在多台不同的机床上加工,工序的加工时间随机床的性能不同而变化。调度目标是最大完工时间 (Makespan) 最小。此外,还需满足以下 6 个约束条件。

(1) 同一时刻同一台机器只能加工一个零件。

(2) 每个工件的同一道工序在同一时刻只能在一台机器上加工。

(3) 每个工件的每道工序一旦开始,不能中途中断。

(4) 不同工件具有相同的优先级。

(5) 不同工件的工序之间没有前后约束,同一工件的工序之间有前后约束。

(6) 所有工件零时刻都可以被加工。

结合基于重构产线与实时感知数据的自适应调度策略,将改进的灰狼优化算法作为图 7 中的基本调度算法,参与到重构产线自适应调度中。结合基本 GWO 算法和多目标遗传算法 (NSGA II) 改进灰狼优化算法。NSGA II 的核心为非支配排序和拥挤度计算,对多个解按照支配关系进行分层处理,将各层级以拥挤度大小排列,判断每个个体的优劣。基本 GWO 算法优化过程主要分为社会等级分层、追踪目标、包围目标、猎取 4 个阶段。灰狼社会等级分为  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼、 $\gamma$  狼和  $\omega$  狼,其中  $\alpha$  狼为狼群决策者;  $\beta$  狼服从  $\alpha$  狼,辅助进

行决策;  $\gamma$  狼服从  $\beta$  狼和  $\alpha$  狼领导其余狼群;  $\omega$  狼为最底层。整个追踪和狩猎过程由种群中的  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼、 $\gamma$  狼引导完成。基于重构产线与实时感知数据的自适应调度算法实现步骤概括如下。

Step 1: 初始化参数(种群大小、迭代次数等)。

Step 2: 进行非支配排序和拥挤度计算。

Step 3: 用灰狼算子进行种群更新。

Step 4: 判断是否达到迭代次数。

Step 5: 输出结果 / 跳转 Step 2。算法步骤流程如图 8 所示。

## 3 系统验证

基于目前已有的 ERP、PDM、MES 等企业信息管理系统和数据管理平台,结合车间数据采集系统,开发了基于数字孪生的产线快速重构与自适应调度系统。系统架构如图 9 所示,主要由 ERP 系统、MES 系统、PDM 系统及数据采集系统为数据支撑,以产线资源的数学形式表达和三维数字孪生模型作为模型基础构建,由多层次监控模块、产线重构状态模块、自适应调度排产模块 3 个功能模

块组成。系统验证环境为 Windows 10 操作系统、Intel (R) Core (TM) i7-11700f 处理器、32 GB 运行内存、NVIDIA GeForce RTX 3060。

### 3.1 多层次监控模块

在基于数字孪生的三维可视化监控技术的支持下,对航天器结构件机加工车间建立了全局、单元、工位

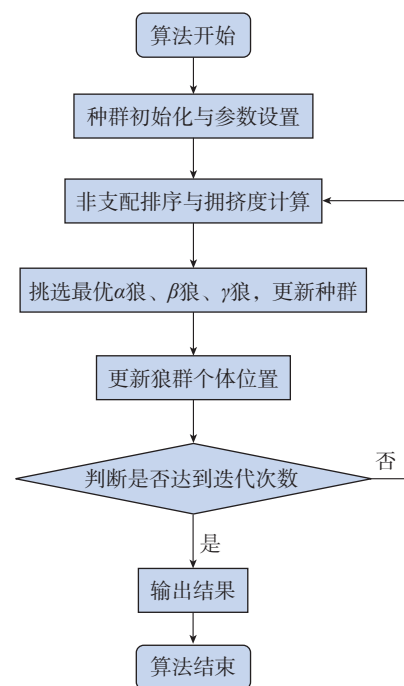


图 8 算法流程  
Fig.8 Algorithmic processes

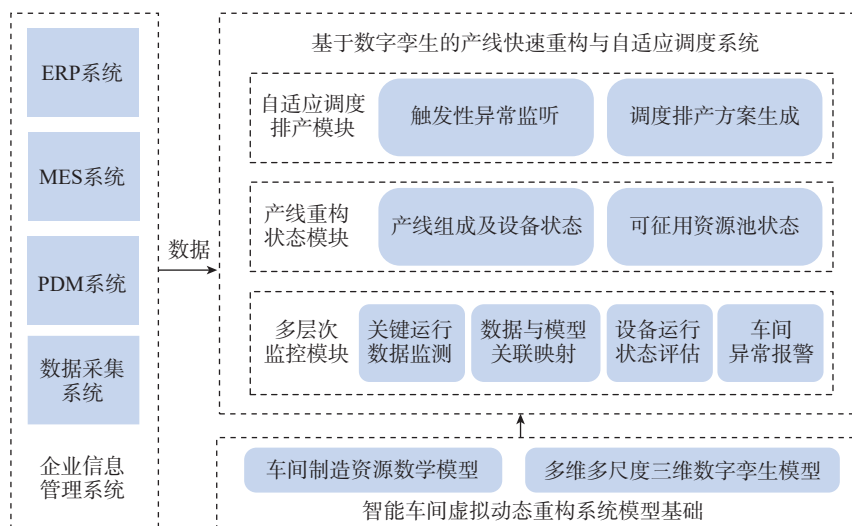


图 9 基于数字孪生的产线快速重构与自适应调度系统软件架构图  
Fig.9 Software architecture of digital twin-based production line rapid reconfiguration and adaptive scheduling system

多个层次的监控,如图 10 所示。

各项监控内容如表 1 所示。其中全局监控形式包括漫游视角与上帝视角,监控内容包括车间运行状态评估、主要设备运行数据、异常状态告警信息等 30 余项数据。有效地解决了复杂产品机加工车间运行状态监控数据更新不及时、不全面、不准确等问题。

### 3.2 产线重构状态模块

根据车间运行状态异常情况实时监控与任务态势变化,对产线重构触发条件进行全时段监听,并做出相关响应,部分的系统界面如图 11 所示。

为了更好地解决原产线高占用率、低利用率的问题,评定现产线占用与利用的情况,设定指标 ZL,指标 ZL 数值越高代表某一时刻产线的利用情况及产能效果越好,反之则代表产线处于占用率较高、利用率较低的状态。

$$ZL = \frac{\sum_{i=0}^n Mp_i}{m} \times p_m \times n_T \times \frac{1}{(p_B + 1)} \quad (2)$$

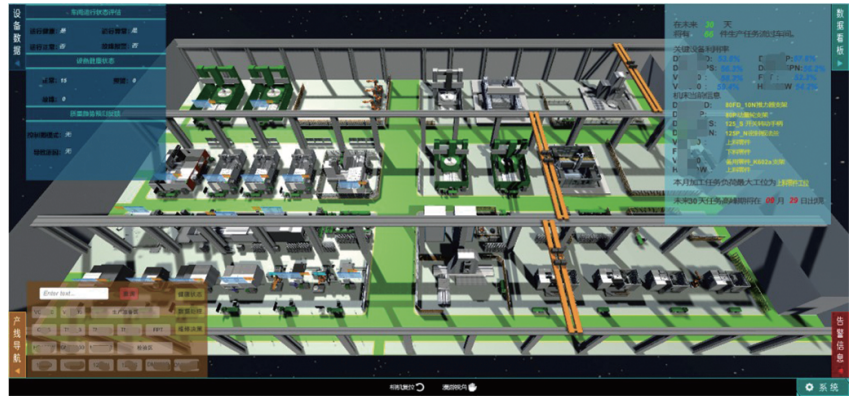
式中,  $m$  为车间内所有机床的数量;  $Mp_i$  为第  $i$  个机床的设备利用率, %;  $n_T$  为车间内正在进行的加工任务数量;  $p_m$  为加工任务对设备的占用率,正在进行任务总数与车间设备总数之比,即  $p_m = n_T/m$ , %;  $p_B$  为车间的设备故障率, %。因此,指标 ZL 也可以表达为

$$ZL = \frac{n_T^2 \times \sum_{i=0}^n Mp_i}{m^2 \times (p_B + 1)} \quad (3)$$

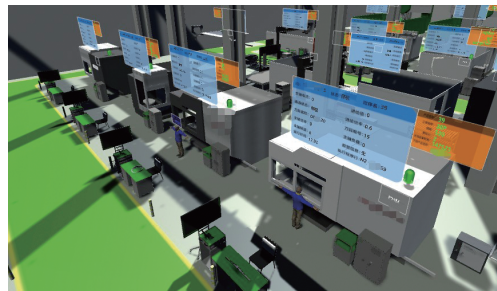
系统应用前后各 30 d 的 ZL 变化如图 12 所示,可以发现, ZL 指标值提升较为明显。

### 3.3 自适应调度排产模块

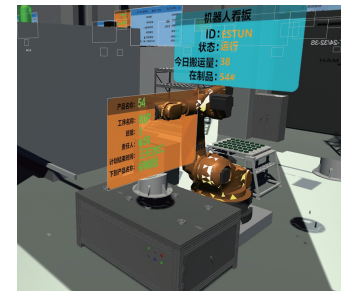
系统自适应调度排产模块以前两个功能模块为支撑,在周期性任务态势与多层次实时监控异常状态共同决定的周期+事件性驱动下实现其功能,系统界面如图 13 所示。对



(a) 全局监控界面



(b) 单元级监控界面



(c) 工位级监控界面

图 10 航天器结构件机加工车间监控

Fig.10 Spacecraft structural parts machining workshop monitoring

表 1 监控内容明细

Table 1 Monitoring content details

监控项	数据源系统	监测刷新频率/s
车间运行状态	车间运行评估与预测系统	0.02
设备健康状态	车间运行评估与预测系统	0.02
质量趋势预测	车间运行评估与预测系统	0.02
工件当前加工工序	MES	0.02
在制品编号	MES	0.02
待加工工件列表	MES	0.02
任务态势	MES	0.02
设备运行状态	IOT	0.02
电流	IOT	0.02
主轴转速	IOT	0.02
报警信息	IOT	0.02
设备利用率	IOT	0.02
工件实时位置	IOT	0.02
AGV 实时位置	IOT	0.02
AGV 故障状态	IOT	0.02
AGV 目标位置	IOT	0.02



图 11 当前产线重构状态

Fig.11 Reconfiguration state of production line

于工件数量为 50,设备数量分别是 16 和 25 的两种调度情况所生成的作业调度甘特图如图 14 所示。

#### 4 结论

针对航天器结构产品加工产线配置和计划调度难度大、周期长、不科学、易出错以及产线整体占用率高、利用率低、产能提升受限等问题,研究了基于数字孪生的航天器结构产品产线重构与自适应调度方法。运用数字孪生、机器学习、产线重构、智能调度排产等技术,建立模型和数据驱动的智能车间“基于数字孪生的可视化监控+产线快速重构+实时感知自适应调度”运行机制。并开发原型系统进行应用验证,帮助提高车间生产效率和设备利用率,缩短产品制造周期,改变现有生产调度模式,提升当前的资源重组能力,解决多品种变批量混线生产所带来的管控难题,有效缩短生产准备周期,提升车间产能。

#### 参考文献

[1] WARWICK C K, GRAHAM P B. GE advances analytical maintenance with digital twins[J]. Aviation Week & Space Technology, 2015(10): 12-19.

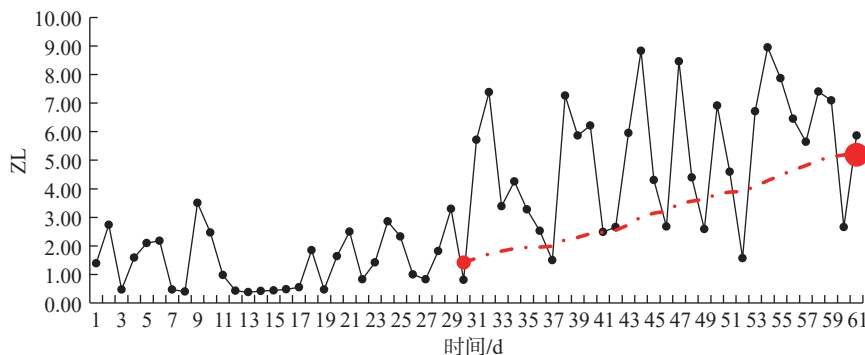


图 12 ZL 指标图

Fig.12 ZL indicator chart

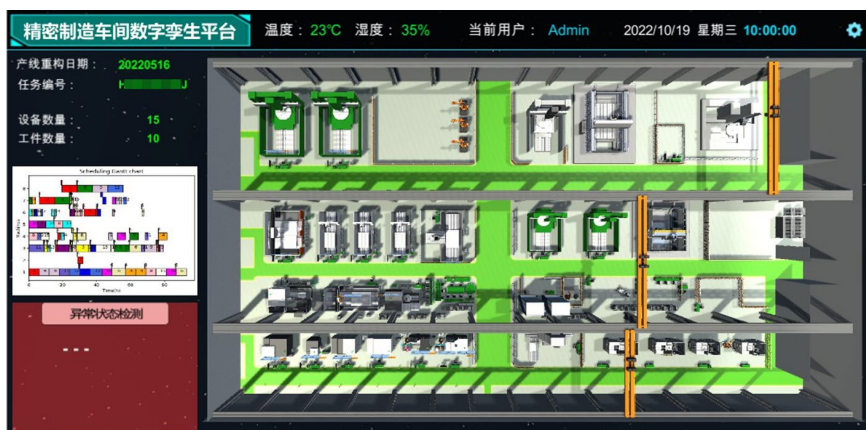


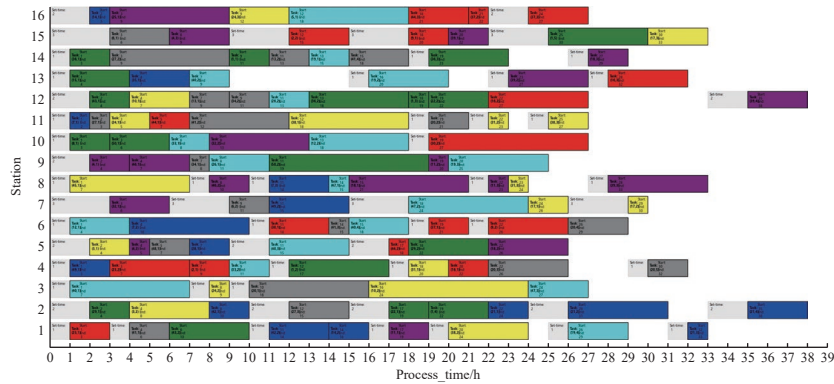
图 13 自适应调度排产界面

Fig.13 Adaptive scheduling interface

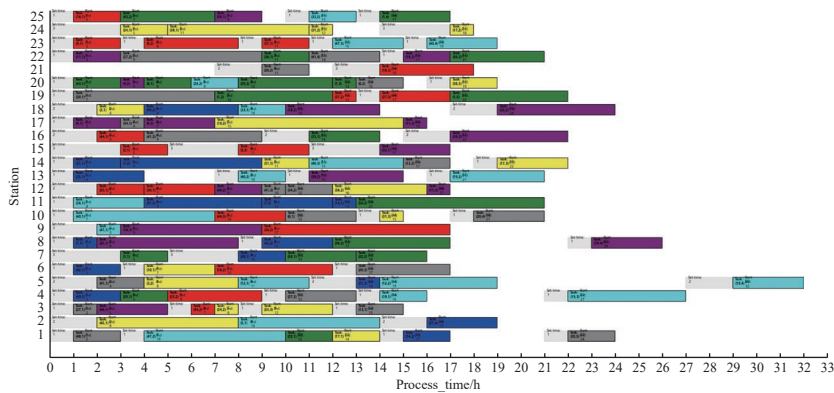
[2] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex

Systems. Cham: Springer International Publishing, 2016: 85-113.

[3] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing



(a) 50×16甘特图



(b) 50×25甘特图

图 14 作业调度甘特图

Fig.14 Job scheduling Gantt chart

and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.

[4] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.

[5] 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 Jiang feng, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.

[6] 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.

[7] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.

ZHAO Haoran, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443.

[8] 孙元亮, 马文茂, 张超, 等. 面向数字孪生的智能生产线监控系统关键技术研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 58-65.

SUN Yuanliang, MA Wenmao, ZHANG Chao, et al. Research on key technologies of digital twin-oriented intelligent production line monitoring system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(8): 58-65.

[9] 赵霖, 王爱民, 王崑声, 等. 基于改进遗传算法的虚拟制造单元继承性重构调度技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(11): 351-360.

ZHAO Lin, WANG Aimin, WANG Kunsheng, et al. Research on inheritance reconfiguration scheduling of virtual manufacturing cell based on improved genetic algorithm[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(11): 351-360.

[10] 贾国柱, 栾世超, 陈亮, 等. 基于流程模块化的虚拟制造单元构建方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(10): 2111-2118.

JIA Guozhu, LUAN Shichao, CHEN Liang, et al. Cell formation problem for virtual

cellular manufacturing based on the process modularization[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32(10): 2111-2118.

[11] 刘高群. 航空机电产品矩阵式动态虚拟单元研究与实践[J]. 航空精密制造技术, 2023, 59(1): 1-4.

LIU Gaoqun. Research and practice of matrix dynamic virtual element for aero electromechanical products[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2023, 59(1): 1-4.

[12] 陈亚绒, 周余庆, 周宏明, 等. 基于两阶段求解的可重构虚拟制造单元构建方法[J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3024-3029.

CHEN Yarong, ZHOU Yuqing, ZHOU Hongming, et al. Virtual manufacturing cell formation method for reconfigurable manufacturing based on two-stage solving[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(22): 3024-3029.

[13] MORADGHOLI M, PAYDAR M M, MAHDAVI I, et al. A genetic algorithm for a bi-objective mathematical model for dynamic virtual cell formation problem[J]. Journal of Industrial Engineering International, 2016, 12(3): 343-359.

[14] LI J S, WANG A M, TANG C T. Production planning in virtual cell of reconfiguration manufacturing system using genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1/4): 47-64.

[15] 韩文民, 余义, 高龙龙, 等. 新订单与时间窗口混合驱动的继承性虚拟单元重构[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(5): 1317-1326.

HAN Wenmin, YU Yi, GAO Longlong, et al. Virtual cellular inheritance reconfiguration driven by random arrival orders and time window[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(5): 1317-1326.

[16] KESEN S E, DAS S K, GÜNGÖR Z. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs)[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1148-1156.

[17] ARKAT J, GHAVE H. Scheduling of virtual manufacturing cells with outsourcing allowed[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2014, 27(12): 1079-1089.

通讯作者: 张雷, 讲师, 博士, 研究方向为数字孪生技术。

(下转第 57 页)

## Discussion on Several Digital Twin Key Technologies in Automatic Fiber Placement Based Liquid Composite Molding Process of Civil Aircraft Composite Material Structures

LI Chen<sup>1</sup>, QIN Tianliang<sup>1</sup>, JIA Xiwen<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, CHEN Cheng<sup>1</sup>, GAO Limin<sup>1</sup>, XU Jifeng<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Civil Aircraft Structures and Composite Materials,  
COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102200, China;  
2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**[ABSTRACT]** Based on the concept and principle of digital twin, as well as the current promising manufacturing technologies: Automatic fiber placement based liquid composite molding, by sorting and analyzing the key links of the AFP-LCM, this article elaborates on several key issues that urgently need to be solved in the establishment of digital twinning for the manufacturing of composite material components in civil aircraft. It also proposes a systematic architecture for the manufacturing technology of composite material structures in civil aircraft based on digital twinning. This paper discusses the problems faced by the implementation of this technology from both technical and policy perspectives, and it provides strategies for the practice in-depth of digital twinning technology in the field of composite material manufacturing in civil aircraft.

**Keywords:** Composites; Structure manufacturing; Automatic fiber placement based liquid composite molding (AFP-LCM); Digital twin; Process twin

(责编 大漠)

(上接第 45 页)

## Digital Twin-Based Production Line Reconfiguration and Adaptive Scheduling Method for Spacecraft Structure Products

SUN Liansheng<sup>1</sup>, GAO Qinglin<sup>2</sup>, WANG Lili<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>2</sup>, LIU Jinshan<sup>1</sup>, ZHUANG Cunbo<sup>2</sup>,  
ZHANG Lei<sup>2,3</sup>

(1. Beijing Spacecrafts Co., Ltd., Beijing 100094, China;  
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
3. Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the difficult configuration and planning scheduling of the machining production line of spacecraft structural parts, as well as the high overall occupancy rate, low utilization rate and limited capacity improvement of the production line, a digital twin based on the reconstruction of the production line of spacecraft structure products and adaptive scheduling method is proposed. Based on the operation mechanism of “visual monitoring based on digital twin + rapid reconstruction of production line + adaptive scheduling of real-time perception”, the three key implementation technologies of the above method, namely 3D visual monitoring based on digital twin, rapid reconstruction of production line driven by task and workshop operation status data and adaptive scheduling based on reconstructed production line and real-time perception data, are elaborated. Design and develop a virtual dynamic reconstruction system for intelligent workshops based on digital twins to verify the effectiveness of the method.

**Keywords:** Machining workshop; Digital twin; Visual monitoring; Production line reconstruction; Virtual manufacturing cell; Adaptive scheduling

(责编 晓月)