

12-13-2019

Intelligent Manufacturing Plan Management Based on Digital Twins

Yingying Xiao

1. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; ;3. Science and Technology on Space System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Wang Mei

1. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; ;

Liqin Guo

1. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; ;

Xing Chi

1. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; ;2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; ;3. Science and Technology on Space System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Intelligent Manufacturing Plan Management Based on Digital Twins

Abstract

Abstract: For the multi-variety and small-batch manufacturing mode, the planning management system cannot be timely automatically adjusted according to uncertain factors. *This paper proposes an intelligent manufacturing plan management system based on factory digital twins. The plan management PDCA business process model is established. In addition, the processing logic model and constraints of the periodic static scheduling model and the dynamic emergency scheduling model are proposed.* Based on the planning management case of hybrid assembly of two types of aerospace complex products, it is verified that the management model proposed in this paper can support the intelligent dynamic adjustment of plans for different orders and resource states, and improve the processing efficiency of the workshop to cope with uncertain factors.

Keywords

planning management, intelligent manufacturing, digital twins, dynamic scheduling

Authors

Yingying Xiao, Wang Mei, Liqin Guo, Xing Chi, and Changhui Zhuang

Recommended Citation

Xiao Yingying, Wang Mei, Guo Liqin, Xing Chi, Zhuang Changhui. Intelligent Manufacturing Plan Management Based on Digital Twins[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2323-2334.

基于数字孪生的智能制造计划管理

肖莹莹^{1,2,3}, 王玫^{1,2}, 郭丽琴^{1,2}, 邢驰^{1,2,3}, 庄长辉^{1,2}

- (1. 北京市复杂产品先进制造系统工程技术研究中心 北京仿真中心, 北京 100854;
2. 复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室 北京电子工程总体研究所, 北京 100854;
3. 航天系统仿真重点实验室 北京仿真中心, 北京 100854)

摘要: 针对多品种、小批量制造模式下计划管理系统无法根据不确定因素及时自动调整, 提出一种基于数字孪生的智能制造计划管理系统框架。建立了计划管理PDCA业务过程模型。提出了静态排程的周期滚动模型和动态应急排程的优化模型的处理逻辑和约束条件。以航天复杂产品两类零部件混线装配场景下的计划管理为背景, 验证了本文提出的管理模式能够支持不同订单与资源状态的智能计划动态调整, 提升车间应对不确定因素的处理效率。

关键词: 计划管理; 智能制造; 数字孪生; 动态排程

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2019)11-2323-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0375

Intelligent Manufacturing Plan Management Based on Digital Twins

Xiao Yingying^{1,2,3}, Wang Mei^{1,2}, Guo Liqin^{1,2}, Xing Chi^{1,2,3}, Zhuang Changhui^{1,2}

- (1. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;
2. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;
3. Science and Technology on Space System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: For the multi-variety and small-batch manufacturing mode, the planning management system cannot be timely automatically adjusted according to uncertain factors. *This paper proposes an intelligent manufacturing plan management system based on factory digital twins. The plan management PDCA business process model is established. In addition, the processing logic model and constraints of the periodic static scheduling model and the dynamic emergency scheduling model are proposed.* Based on the planning management case of hybrid assembly of two types of aerospace complex products, it is verified that the management model proposed in this paper can support the intelligent dynamic adjustment of plans for different orders and resource states, and improve the processing efficiency of the workshop to cope with uncertain factors.

Keywords: planning management; intelligent manufacturing; digital twins; dynamic scheduling

引言

由于航天复杂产品是典型的“多品种、小批量”



收稿日期: 2019-05-21 修回日期: 2019-07-24;
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1004005);
作者简介: 肖莹莹(1987-), 女, 湖北随州, 博士, 高工, 研究方向为智慧云制造, 人工智能等; 王玫(1979-), 女, 黑龙江, 硕士, 高工, 研究方向为虚拟样机, 智能制造等。

定制化制造模式, 在产品快速试制和批产阶段会面临车间布局调整、多工艺方案优化、紧急插单、机器维修、工期拖延等各种类型的不确定因素干扰, 使得工艺方案的可制造性验证、生产效率的准确评估等都具有很大难度。因此, 基于数字孪生技术建立虚拟工厂环境并以此为基础研究各类不确定因素干扰下的智能计划管理技术是提高复杂产品智

能制造系统运行效率的关键。

目前,商业软件中的计划管理多依托 MES 系统或独立的 APS 模块制定订单的静态排程方案,很难对不确定需求下的柔性布局/多工艺方案执行效率做仿真优化分析;同时,对订单执行中出现的各类动态干扰多依赖计划人员经验采取手动调整方式实现,影响了计划执行效率和资源利用率。在学术领域,计划与排程研究多集中在静态模型,多以作业车间模型、流水车间模型、并行机模型为基础进行扩展^[1-6]。但静态模型结果在具体执行中会受到各类不确定因素的扰动(常见的因素包括工序拖期、机器故障、紧急插单等),因此动态计划与调度是响应各类不确定扰动的关键^[7],研究方法主要包括:(1)基于事件驱动的被动应急模型;(2)基于时间窗的主动滚动排程;(3)混合策略。混合策略是将事件驱动与滚动排程结合,能够及时效应扰动并在滚动周期内消除对后续订单任务的影响,因此是最有效的动态计划与排程方法。但在工业领域,各种类型的高级计划排程模型(Advanced Planning and Scheduling, APS)^[8-10]多停留在静态计划排程应用阶段,还没有有效地与物理车间信息融合,无法对各类扰动做出及时响应,影响了 APS 软件的应用效果。

随着 CPS 技术的发展,可以实时获取车间执行信息。因此,构建基于仿真的数字孪生系统,实现虚拟现实融合的智能工厂动态计划排程,可以支持企业对各内/外部不确定性及其处理方案做模拟仿真,并将最优排程结果下发到车间执行层监控并反馈其执行效果。因此,本文提出的一种数字孪生的智能计划管理系统可以在制造资源能力约束与不确定因素扰动并存的多品种个性化订单混线生产场景下,验证工艺方案的可制造性和效率,平衡订单交付率与资源利用率。

1 基于数字孪生的智能制造计划管理系统框架

基于数字孪生的智能制造计划管理系统主要

由数据总线 EDI、核心功能层和门户层构成,如图 1 所示。

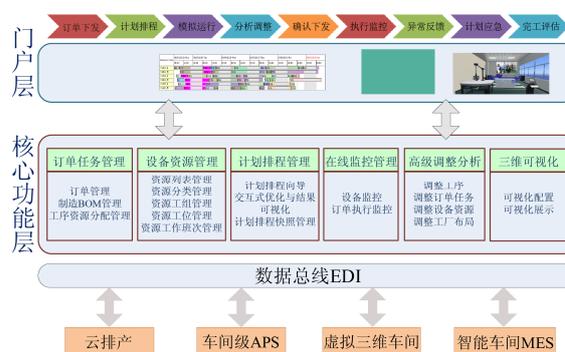


图 1 系统总体框架

Fig. 1 System architecture

(1) 门户:包含云端融合的 PDCA 闭环过程的相关管理页面,实现计划人员与系统的交互式计划排程,包括订单(资源)甘特图、统计图、三维可视化等多种方式。

(2) 核心功能:是实现虚拟现实融合的动态计划排程的关键功能模块,包括 6 大功能:订单任务管理(包含订单管理、制造 BOM 管理、工序资源分配管理等功能)、设备资源管理(包括资源列表管理、资源分类管理、资源工组管理、资源工位管理、资源工作班次管理等功能)、计划排程管理(包括计划排程向导、交互式优化与结果可视化、计划排程快照管理等功能)、在线监控管理(包括设备监控、订单执行监控等)、高级调整分析(包括调整工序、调整订单任务、调整设备资源、调整工厂布局等分析)、三维可视化(包括三维可视化配置、三维可视化展示等功能)。

(3) 数据总线 EDI:是连接各专业功能模块的通道,实现云排产、车间级 APS、虚拟三维车间、智能装配线 MES 与集成框架间的数据传输。

2 智能制造计划管理 PDCA 业务过程模型

智能制造计划管理 PDCA 基本业务流程,如图 2 所示,包括计划数据采集转换、向导式+交互优化的静态排程、动态应急排程 3 大基本业务。

(1) “计划数据采集转换”将外部用户和来自云排产的订单信息、来自用户导入或装配线 MES 的资源/工装/工组/班次/库存信息、来自外部用户导入或装配线 MES 的制造 BOM 信息通过集成框架同步到车间 APS 计算引擎; 同时, 外部用户可通过向导式配置修改排程模型的配置参数。

(2) “向导式+交互优化的静态排程”根据订单等信息和模型配置参数, 车间 APS 启动计算引擎给出资源约束下的排程方案, 以甘特图、直方图等方式返回给用户, 并允许用户使用交互优化控件对

排程方案做调整; 同时, 用户可调用 APS 的分析功能(或通过 3D 车间的虚拟运行体验)对当前排程方案做瓶颈分析, 以持续改进排程方案; 最终用户通过对多方案的快照对比分析, 选择最优结果下发给 MES, 并将静态订单交货时间返回云排产系统作为订单承诺交期。

(3) “动态应急排程”对已下发 MES 订单执行状态持续监控, 对产生的异常报警及时做应急优化(并支持用户多次交互调整); 同时, 将最终订单的完成时间上报给云排产, 完成订单的执行反馈。

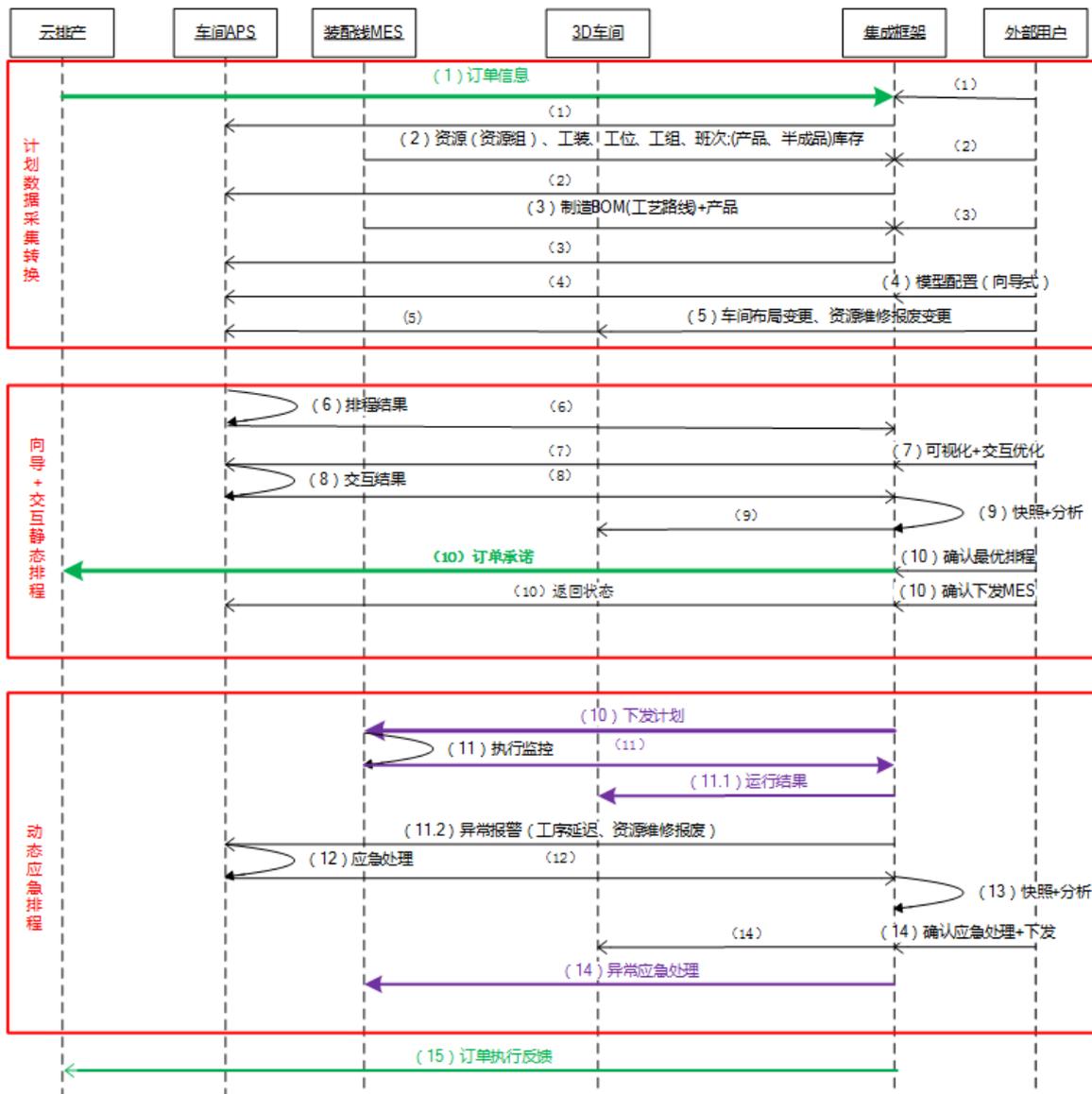


图 2 PDCA 业务过程模型
Fig. 2 PDCA business process model

具体来说,在上述软件体系 6 大核心功能模块的支持下,上图业务流程形成了计划与排程、排程与执行、订单承诺与履约 3 大业务闭环,如图 3 所示,构成完整的计划 PDCA 循环。

(1) 计划与排产闭环:来自云排产的拟下发订单(或用户新建订单)汇总到“1. 订单任务管理”模块,通过“3. 计划排程管理模块”的向导式计划排程和交互优化进行多品种产品的静态排程,模拟当前车间资源约束下的最优订单交期承诺,返回给云排产。在此过程中,订单计划会推送到“5. 三维可视化”模块做模拟运行,便于用户直观了解计划运行过程。

(2) 排产与执行闭环:云排产审核通过的正式生产订单及排产结果通过 EDI 下发给 MES,并在“4. 在线监控管理”模块的支撑下实时返回车间执行状态,及时将车间异常(如机器维修、工序拖期等)反馈给“3. 计划排程管理模块”做应急优化,为车间计划人员调整执行过程提供科学依据,该过程持续到订单完工(或撤销)。在此过程中,车间执行视情况实时推送到“5. 三维可视化”模块展示,便于用户直观了解计划在车间执行过程。

(3) 订单承诺与履约闭环:从云排产中拟下发

订单经过静态计划排程反馈其交货承诺,到审核通过的生产订单及其排程结果下发到 MES 执行至完工,整个过程构成了完整的订单承诺与履约的 PDCA 循环。

同时,从图 3 可以看出,在上述计划排程 PDCA 闭环业务过程中,面对各种类型的不确定因素,计划排程系统需要动态响应以保证计划执行效率,本研究支持周期性滚动和事件驱动应急优化排程 2 种方式:

(1) 周期性滚动排程:以向导式周期性计划排程结果为基础(例如月度计划),在局部时间段内(例如一周)根据历史执行结果调用“3. 计划排程管理模块”重新计算后续订单的计划安排,以消除拖期订单并考虑后续订单的计划安排。

(2) 应急优化排程:应急优化排程是以事件驱动的响应式调整,在接收到来自 MES/三维车间/用户等各类紧急扰动后,立刻调用“3. 计划排程管理模块”得到最优的响应调整方案。针对不同的应急情况,找到与该操作相关联订单,再找到与该订单待排工序相关资源进行重排,已经完成的或不需要调整的工序,用于约束其他待排工序。

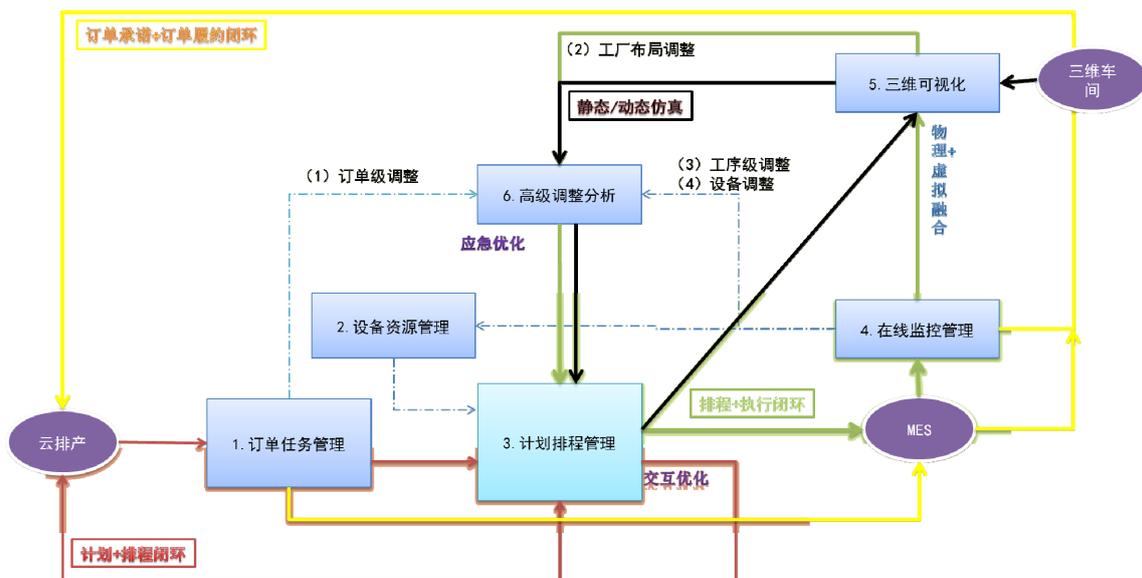


图 3 PDCA 循环示意图

Fig. 3 PDCA cycle

<http://www.china-simulation.com>

• 2326 •

3 基于虚拟制造系统的智能计划动态调整模型

上述 PDCA 业务过程模型中, 订单和制造资源是计划与排程的输入条件。周期性滚动排程和应急优化排程两种模式会对不同状态的订单和资源做不同处理。本节将分别论述订单与资源状态控制和计划与排程逻辑。

3.1 订单状态机

图 4 所示订单状态机包括以下状态: 紧急中断(suspended) 4, 表明订单被发布后, 遇到紧急情况, 需要紧急中断。发布(launched) 3, 表明订单被 MES 发布。锁定(locked) 2, 表明订单被确定后, 其时间和安排已被锁定, 不参加全局优化排程或交互式优化过程。计划(planned) 1, 表明订单经过全局优化排程或者交互式优化过程, 获得了相应的结果。候选(candidate) 0, 表明订单目前未参加全局优化排程。根据用户需要, 目前处于待选状态。删除(deleted)-1, 表明根据用户的需要, 订单不再参加全局优化排程, 被进行物理删除。

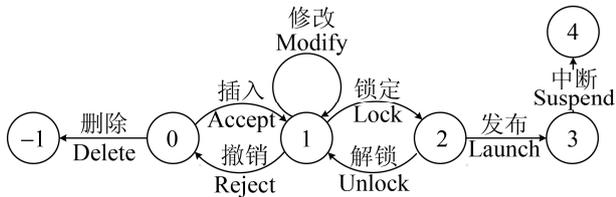


图 4 订单状态机
Fig. 4 Order status machine

订单被插入到订单执行计划一览表后, 处于状态“候选(0)”, 经过“插入(accept)”操作后, 订单将参与新的优化计算过程, 计算结果为订单的状态变为状态“计划(1)”。订单在状态“计划(1)”下, 可反复进行“修改(modify)”操作。订单在状态“计划(1)”下经过“锁定(lock)”操作, 状态变为“锁定(2)”状态。订单在状态“锁定(2)”下经过“发布(launch)”操作, 状态变为“发布(3)”状态。订单在状态“发布(3)”下

经过“紧急中断(suspend)”操作, 状态变为“紧急中断(4)”状态。订单在“锁定(2)”状态经过“解锁(unlock)”操作, 其状态变为“计划(1)”; 在状态“计划(1)”下, 订单经过“撤销(reject)”操作, 其状态变为“候选(0)”; 在状态“候选(0)”下, 订单经过“删除(delete)”操作, 其状态变为“删除(-1)”。

3.2 资源状态机

图 5 所示资源状态包括以下状态: 可用(active) 1, 表明在此状态下, 资源处于可用状态, 正在被使用。不可用(inactive) 0, 表明在此状态下, 资源处于不可用状态。删除(deleted)-1, 表明在此状态下, 资源处于被删除的状态。

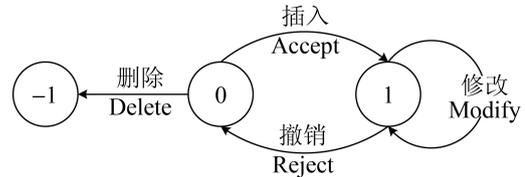


图 5 资源状态机
Fig. 5 Resource status machine

资源处于状态“不可用(0)”, 经过“插入(accept)”操作后, 资源的状态变为“可用(1)”。资源在状态“可用(1)”下, 可反复进行“修改(modify)”操作。资源在状态“可用(1)”下, 进行“撤销(reject)”操作, 其状态变为“不可用(0)”; 资源在状态“不可用(0)”下经过“删除(delete)”操作, 状态变为“删除(-1)”。

3.3 计划与排程模型

3.3.1 周期性滚动排程模型

周期性滚动排程实现对排程周期 p 内的所有订单按滚动周期 n 更新的静态车间计划。在滚动过程中允许用户根据实际车间情况调整排程周期/滚动周期/车间布局等参数, 以应对具有一定周期性的不确定因素对生产计划的影响。相关参数如表 1 所示。

t_1 = 指定应急操作开始时间(每次交互时给定)

$timeBuffer$ = 应急缓冲时间(可调节)

$IntervalEmergency$ = 应急排程区间。

对于所有应急操作, 设定一个应急排程区间, $IntervalEmergency = [t_1, t_1 + timeBuffer]$, 仅执行在 $IntervalEmergency$ 区间内相关的订单、工序的应急操作。针对不同的应急情况, 找到与该操作相关联订单, 再找到与该订单待排工序资源相关进行重排, 已经完成的或不需要调整的工序, 用于约束其他待排工序。在 $IntervalEmergency$ 时间之后与当前待排工序(资源相关、前后继相关)的相关订单全部撤销, 待应急完成后, 再后续滚动排上。

应急优化求解的基本约束和初次排程一样, 区别在于对应不同的应急状况会有一些个性化的约束。求解规则和初次排程一样。本文主要针对 3 种不同应急情况处理原理进行分析。

(1) 工序拖期

为应对工序拖期, 应急优化模型将对后续受影响订单的工序时间安排变更、工序占用资源变更、工序交期调整、工序数量调整。个性化约束包括:

- 待排工序开始时间 > 当前时间 + 工序拖拽精度;
- 待排工序开始时间 \geq 指定工序开始时间 - 工序拖拽精度;
- 待排工序开始时间 \leq 指定工序开始时间 + 工序拖拽精度;
- 待排工序开始时间 \geq 指定工序开始时间;
- 交互工序所用资源 \in 交互工序选用资源集合。

(2) 订单调整

为应对紧急插单/修改交货期, 应急优化模型将对受影响订单变更订单的交货时间。个性化约束包括:

- 新订单所有待排工序开始时间 \geq 指定订单开始时间;
- 新订单所有待排工序结束时间 \leq 指定订单结束时间。

• 其中紧急撤销订单还包括个性化约束:

• 所有待排工序的开始时间 \geq 指定撤销订单开始时间;

• 紧急修改订单(变更订单的开始时间)个性化约束还包括个性化约束:

• 所有待排工序的开始时间 \geq 指定订单开始时间。

(3) 资源调整

调整设备资源(例如进行设备资源维修、新增设备等), 应急优化模型将对影响情况进行分析, 给出新资源约束下的排程方案。

其中撤销资源个性化约束包括:

• 所有待排工序的开始时间 \geq 指定资源撤销开始时间;

• 待排工序所用资源 \cap 已撤销资源 = $\{\}$ 。

设置资源不可用时段个性化约束包括:

• 所有待排工序的开始时间 \geq 指定资源撤销开始时间;

• 待排工序排程时间 \cap 不可用时间段 = $\{\}$ 。

设置资源班次个性化约束包括:

• 所有待排工序的开始时间 \geq 指定资源撤销开始时间;

• 如果资源修改前班次时间段 \subseteq 资源修改后班次时间段, 则修改班次前资源所服务工序 \subseteq 修改班次后资源所服务工序。

4 系统实现

本文提出的基于数字孪生的智能制造计划管理系统框架, 将现有各类专业软件通过 EDI 的方式集成, 在各系统接口协议的基础上, 打通了计划排程业务中订单自动获取、用户参与的计划模拟仿真与调整、计划下发执行与监控、紧急应急调整等各业务环节的信息流。为用户提供首页、订单任务管理、设备资源管理、计划排程管理、在线监控、高级调整分析和 3D 车间等功能模块, 如图 7 所示。

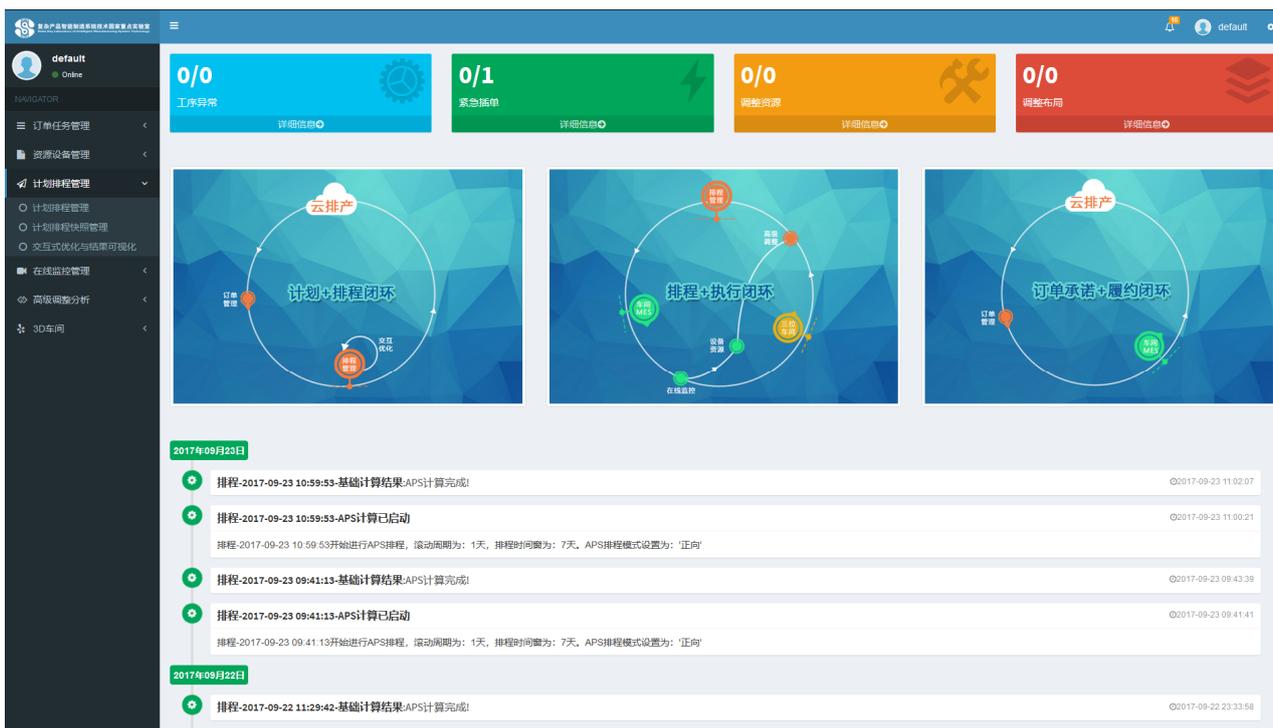


图 7 系统主界面

Fig. 7 System main interface

本节选取了车间生产空气舵和仪器舵,按照新建排程、APS 自动计算及手动调整排程、快照对比、3D 模拟展示与下发 MES、执行监控与应急优化 5 个环节展示车间滚动排程流程。

(1) 新建排程: 计划员指定排程周期、滚动周期、排程模式、可容忍时间等参数,可查看当前周期内的可选订单。同时,选择当前需要模拟的车间布局,例如选择布局 2,包括 2 个智能装配平台、1 个人机协作平台。最后,从可选订单中选择待计算的候选订单集合,例如选取空气舵和仪器舵两个不同的订单验证排程的结果是否准确,如图 8 所示。

(2) APS 自动计算及手动调整排程: 点击“开始排程”,即可将需要生产的订单交由后台 APS 引擎计算,在计算完成后,排程记录的状态会及时的更改。在此基础排程结果之上,若对 APS 引擎自动计算出来的排程结果不满意,支持计划员手动调整,例如调整某个工序时,会重新触发新的一次排程计算,如图 9 所示。

(3) 快照对比: 自动计算和手动调整的排程结果均会以快照的方式存储。在排程快照页面,用户可以选择最近一次排程信息,查看此次排程下不同的排程结果信息,并选择多个快照做性能分析对比,便于选择最优的结果,如图 10 所示。

(4) 3D 模拟展示与下发 MES: 点击右侧的菜单,查看 3D 车间对所选结果信息的动态模拟。该模拟过程真实的模拟了订单被执行的全流程,有助于分析结果是否存在不足,如图 11 所示。当查看了模拟的信息后,可以将所选择结果信息下发至 MES,进行真实的生产。

(5) 执行监控与应急优化: MES 执行过程中实施反馈异常情况,触发各类应急优化排程。包括记录从 MES 反馈的工序因为拖期等情况产生的故障、在排程执行的周期内产生的紧急订单、生产中资源故障情况 3 类异常和因人为调整车间布局触发的布局调整,如图 12 所示。

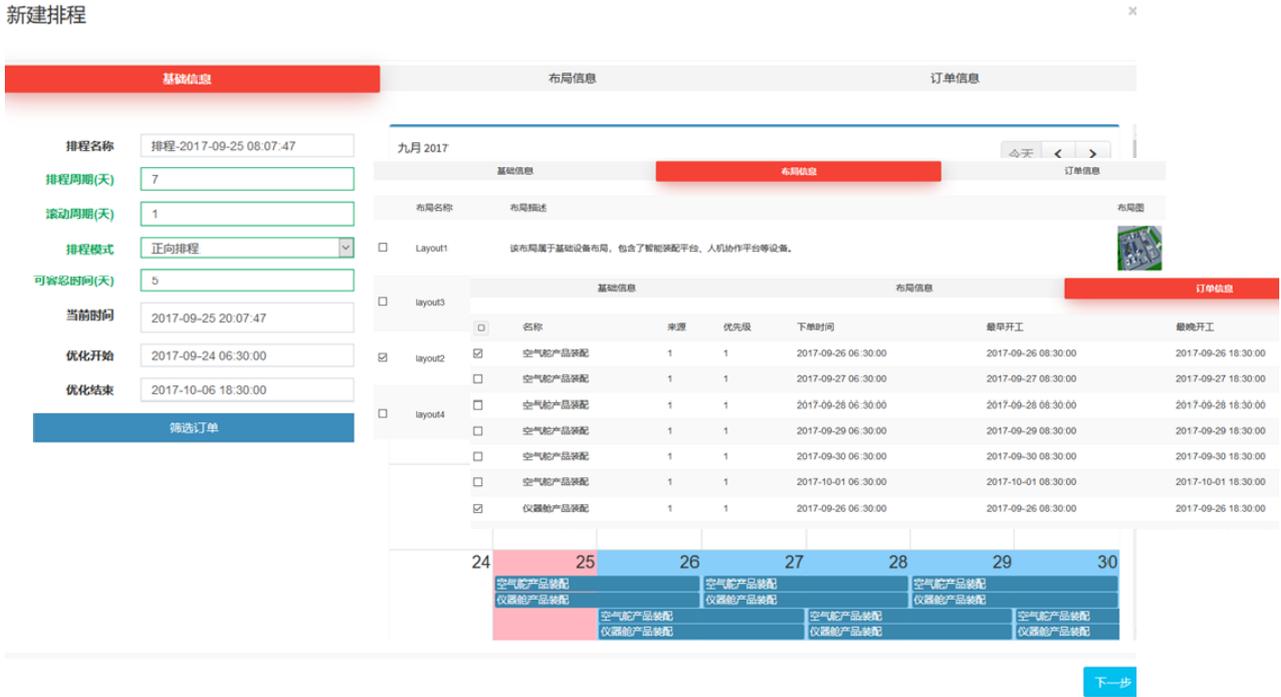


图 8 新建排程
Fig. 8 Create a new scheduling

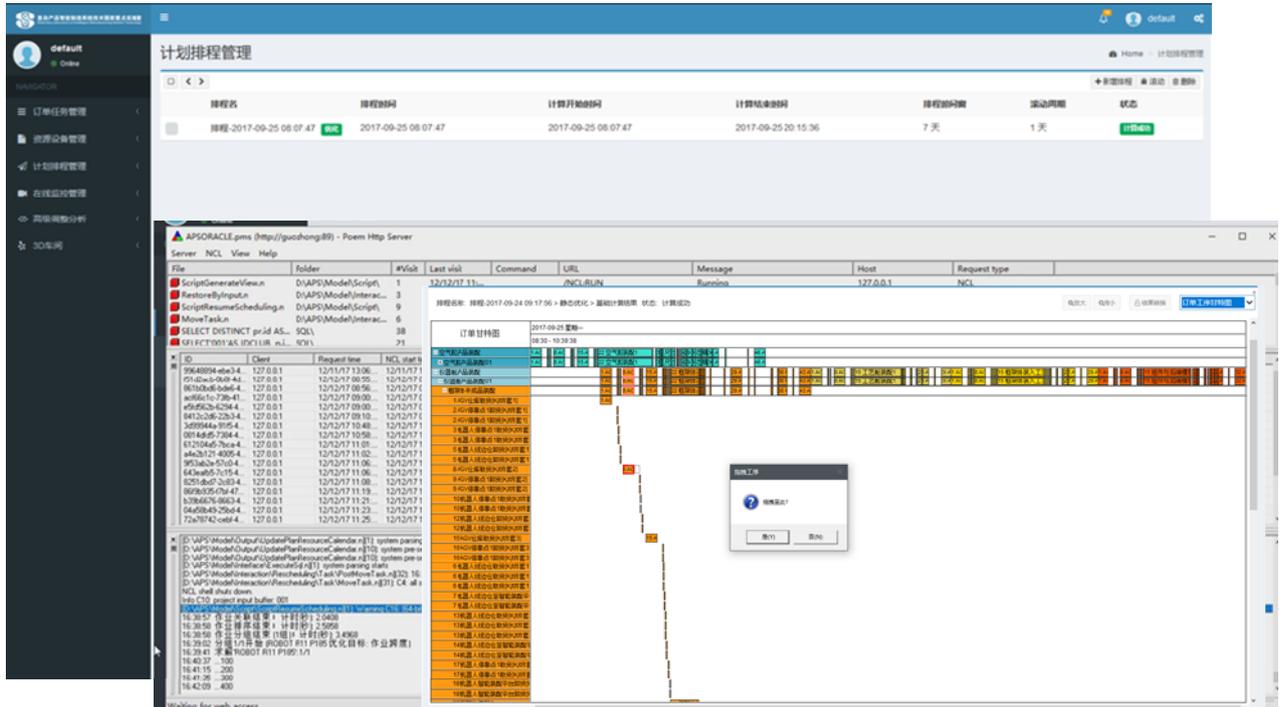


图 9 APS 自动计算及手动调整排程结果
Fig. 9 APS automatically calculates and manually adjusts the schedule results

<http://www.china-simulation.com>

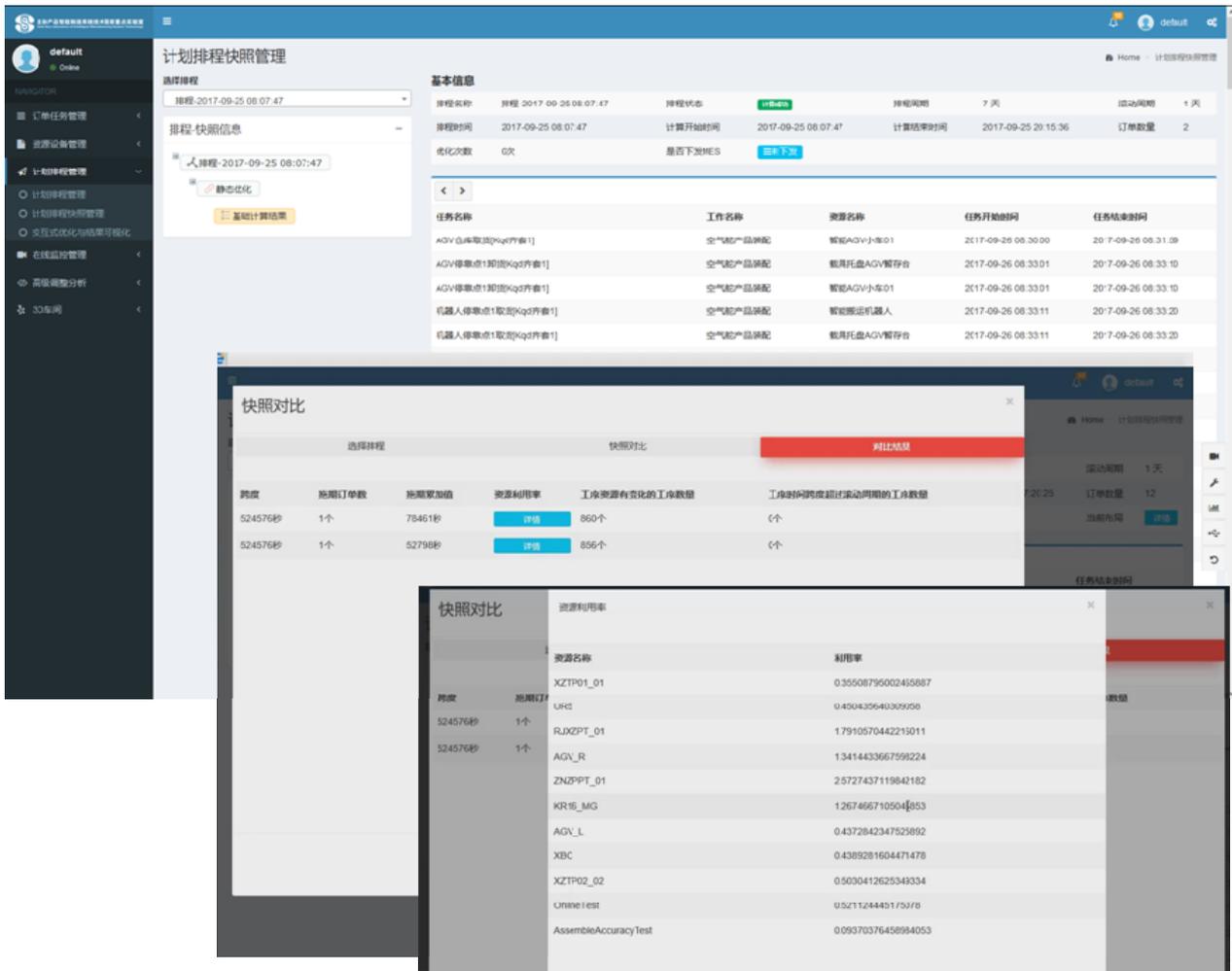


图 10 排程快照信息
Fig. 10 Snapshot of schedule results



图 11 3D 结果模拟
Fig. 11 3D virtual workshop

<http://www.china-simulation.com>

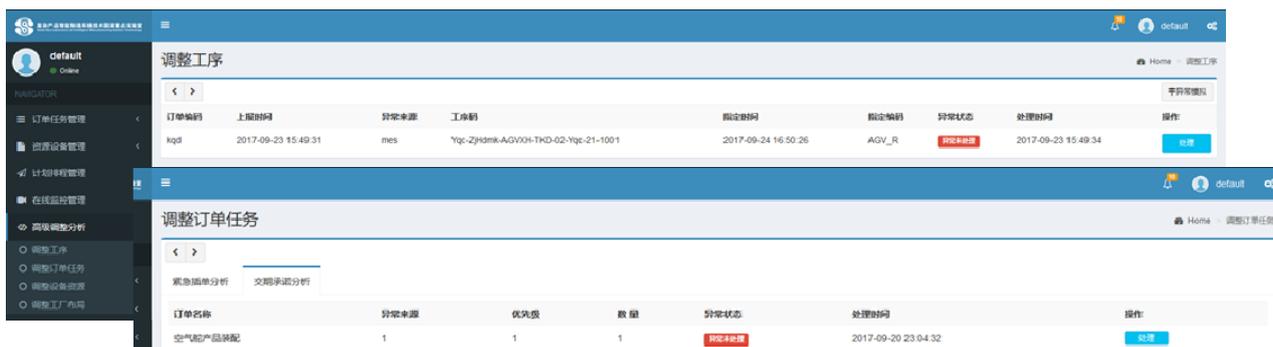


图 12 应急优化管理

Fig. 12 Emergency optimization management

总之, 本文提出的一种基于虚拟制造系统的智能计划与排程动态调整模型, 通过周期滚动将历史订单与新增订单结合进行重排程, 以调整最小为约束尽可能消除历史订单拖期、保证新订单按期完成; 通过事件驱动响应式排程对各类紧急扰动做实时响应, 在局部范围内消除不确定因素对订单计划执行的影响。

5 结论

本文提出的一种基于数字孪生的智能制造计划管理模式在虚拟现实融合的智能计划排程系统 6 大功能模块的支持下, 定义了计划与排程、排程与执行、订单承诺与履约 3 大业务闭环过程, 构成了完整的计划 PDCA 循环。基于虚拟制造系统的智能计划动态调整技术在计划排程 PDCA 闭环业务中专门处理各类不确定因素的扰动, 支持周期性滚动和事件驱动的应急优化排程两种方式, 能够应对工序调整、资源调整、订单调整等多种类型的扰动。

本文所述系统能够为数字化向智能化转型升级提供仿真决策支撑和执行监控一体化解决方案。同时, 作为智能制造系统的虚拟仿真实验平台, 为开展基于深度强化学习的计划与排程 Agent 模型验证、多机械臂智能装配动作路径规划仿真验证、智能制造系统仿真模型验证与改进等研究提供基础支撑。此外, 计划管理中核心的优化问题建模方法与求解工具可以为后续军事运筹相关问题的建模与求解提供支撑。

参考文献:

- [1] Graham R L, Lawler E L, Lenstra J K, et al. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey[J]. *Annals of discrete mathematics* (S0167-5060), 1979, 5: 287-326.
- [2] Ribas I, Leisten R, Framiñan J M. Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems for a production system and a solutions procedure perspective[J]. *Computers & Operations Research* (S0305-0548), 2010, 37(8): 1439-1454.
- [3] Peidro D, Mula J, Poler R, et al. Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (S0268-3768), 2009, 43(3/4): 400-420.
- [4] 肖莹莹, 李伯虎, 侯宝存, 等. 智慧云制造中供应链管理的计划调度技术综述[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(7): 1619-1635.
Xiao Yingying, Li Bohu, Hou Baocun, et al. Planning and scheduling technology review of supply chain management in smart manufacturing cloud [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(7): 1619-1635.
- [5] 肖莹莹, 李伯虎, 庄长辉, 等. 面向用户多品种定制的分布式供应链调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(3): 800-812.
Xiao Yingying, Li Bohu, Zhuang Changhui, et al. Distributed supply chain scheduling oriented to multi-variety customization [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(3): 800-812.
- [6] Lin T Y, Xiao Y, Yang C, et al. Manufacturing Capability Service Modeling, Management and Evaluation for Matching Supply and Demand in Cloud Manufacturing[C]. *Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex*

- Systems. Singapore: Springer, 2016: 35-48.
- [7] 王艳红, 于宁, 蔡明, 等. 动态制造系统生产计划与调度协同优化 [J]. 中国机械工程, 2018, 29(22): 2767-2771.
Wang Yanhong, Yu Ning, Cai Ming, et al. Collaborative Optimization of Dynamic Manufacturing Production Planning and Scheduling [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(22): 2767-2771.
- [8] 施灿涛, 李铁克, 王昌保, 等. 基于 APS 的钢铁企业生产计划系统设计及实现 [J]. 中国管理信息化, 2011, 14(16): 84-86.
Shi Cantao, Li Tieke, Wang Changbao, et al. Design and Implementation of Production Planning System for Steel Enterprises Based on APS [J]. China Management Informationization, 2011, 14(16): 84-86.
- [9] 闻超, 黎小平. 基于 ERP 与 APS 集成模型的协同供应链计划研究 [J]. 管理学报, 2007, 4(12): 31-36.
Wen Chao, Li Xiaoping. Research on the Collaborative Supply Chain Planning Based on the Integration Model of ERP and APS [J]. Chinese Journal of Management, 2007, 4(12): 31-36.
- [10] 谈晓勇, 庄致. 基于业务规则的面向订单生产的计划管理模型研究 [J]. 中国管理信息化, 2008, 11(21): 68-70.
Tan Xiaoyong, Zhuang Zhi. Research on Plan Management Model of Order-Oriented Production Based on Business Rules [J]. China Management Information, 2008, 11(21): 68-70.