

面向航空航天制造的动态排产优化算法及其扰动应对策略研究

杨胜腾¹, 王娜², 刘方举¹, 洪鹏², 秦磊², 胡顺旺¹

(1. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 贵州 贵阳 550014; 2. 江苏金陵智造研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对航空航天产品制造过程中工序复杂性高、设备类型多样、资源约束严格及扰动频繁等问题, 提出一种基于动态调度技术和混合排产策略的优化算法。该算法通过实时监控生产过程中的扰动信号, 并结合反馈控制机制, 构建了动态排产系统的核心算法模型。该系统采用基于紧迫度值的动态触发机制和生产进度偏差分析方法, 能够快速识别生产扰动并生成最优的调整方案。实验表明, 该算法能够有效应对生产过程中的不确定性因素, 提高生产效率和资源利用率, 为航空航天智能制造提供了高鲁棒性、高实时性的排产解决方案, 具备重要工业应用价值。

关键词: 航空航天; 动态排产; 生产扰动; 混合排产策略; 反馈控制

DOI: 10.11907/rjtk.251222

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TP18

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2025)007-0089-06



Dynamic Scheduling Optimization Algorithm and Disturbance Response Strategies for Aerospace Manufacturing

YANG Shengteng¹, WANG Na², LIU Fangju¹, HONG Peng², QIN Lei², HU Shunwang¹

(1. China Aviation Industry Corporation of China Guizhou Liyang Aerospace Power Co., Ltd., Guiyang 550014, China;

2. Jiangsu Jinling Intelligent Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: In response to the challenges of high process complexity, diverse equipment types, strict resource constraints, and frequent disturbances in aerospace product manufacturing, this paper proposes an optimization algorithm that integrates dynamic scheduling technology and hybrid production scheduling strategies. The algorithm incorporates real-time monitoring of disturbance signals and feedback control mechanisms to construct the core mathematical model of a dynamic production scheduling system. Specifically, the system employs an urgency value based dynamic triggering mechanism and production progress deviation analysis method to rapidly identify production disturbances and generate optimal adjustment plans. Experimental results demonstrate that the algorithm effectively addresses uncertainties in the production process, improving both production efficiency and resource utilization. The proposed solution provides a high robustness and real-time capability for intelligent manufacturing in aerospace applications, showcasing significant industrial application potential.

Key Words: aerospace; dynamic scheduling; production disturbances; hybrid scheduling strategy; feedback control

0 引言

在航空航天制造过程中, 常见的不确定性因素包括: 设备故障、零部件供应延误、订单变更、生产任务插单、加

工异常和人员调度变化等。这些不确定性因素的出现可能会引发生产扰动, 使得原有排产方案难以有效执行, 导致订单延期、资源利用率下降, 甚至影响整体生产效率^[1-2]。因此, 如何在生产过程中快速识别生产扰动, 并针对不同类型的扰动采取合适的排产策略, 成为提高航空航

收稿日期: 2025-03-31

扫描二维码阅读全文:

基金项目: “1650”产业体系协同攻关项目(链主企业出题类)

作者简介: 杨胜腾(1985-), 男, 学士, 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司工程师, 研究方向为航空航天制造; 王娜(1995-), 女, 硕士, 江苏金陵智造研究院有限公司工程师, 研究方向为人工智能; 刘方举(1989-), 男, 学士, 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司工程师, 研究方向为航空航天制造; 洪鹏(1991-), 男, 硕士, 江苏金陵智造研究院有限公司工程师, 研究方向为人工智能; 秦磊(1993-), 男, 硕士, 江苏金陵智造研究院有限公司工程师, 研究方向为人工智能; 胡顺旺(1996-), 男, 硕士, 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司工程师, 研究方向为航空航天制造。本文通讯作者: 王娜。



天制造业智能化水平的重要研究方向^[3]。

面对如此多变的生产环境,传统的生产排程方法往往难以适应实际需求,特别是在应对突发事件和不确定性因素方面存在明显不足。

目前,已有研究针对生产排产问题提出了多种优化方法,如启发式调度算法(候鸟优化算法、粒子群优化、麻雀搜索等)、强化学习方法、基于规则的生产控制策略等。玉海龙等^[4]结合紧急插单、任务优先级等规则,对生产线进行建模,提出一种带粒子调整环节的粒子群优化算法。肖海宁等^[5]建立多关联整车车间协同排产优化数学模型,提出了一种基于改进候鸟优化算法的协同排产方法,用以优化最小化停产时间和成本。郭羽等^[6]将车间调度问题转化为马尔可夫决策过程,构建了强化学习任务数学模型,提出了一种基于D3QN(Dueling double DQN)的调度方法。张富强等^[7]提出了一种基于非支配排序与麻雀搜索算法融合的多目标优化算法,用于求解柔性车间生产调度问题。彭相涵等^[8]针对柔性装配产线的订单生产排程问题,考虑订单紧急程度的优先级规则,提出了一种订单优先级策略,并基于该策略建立了生产排程模型,同时采用粒子群优化算法设计了相应的求解方法。然而,目前大部分方法都缺乏对动态扰动事件的有效应对能力。为了提高生产计划的适应性和稳定性,本文提出了一种基于反馈控制的动态计划排产优化算法。该方法在静态排产的基础上,引入扰动识别触发机制,并采用基于反馈控制的动态优化模型,实现对生产扰动的快速响应和调整。与已有工作相比,本文主要贡献体现在:

(1)设计融合反馈控制与约束优化的动态调整模型,在比例-积分-微分控制器(Proportional-Integral-Derivative, PID)调控框架内兼顾响应速度与系统稳定性。

(2)通过引入实际工业场景中的关键参数(如换型准备时间、节拍速率等),使模型更具应用价值。

(3)开发面向柔性资源的弹性约束建模方法,支持设备-人员-资源的协同再配置。

1 模型构建

在实际的生产管控中,当遇到无法预测的生产扰动进而导致原有排产方案未执行部分无法维持较优状态时,排产系统需要及时调整生产计划和资源调度,以确保生产过程连续、优化地运行。因此,动态排产模型包含2个部分:无扰动情况下的静态排产模块和扰动情况下的动态排产模块,通过扰动识别触发机制实现两部分间的自动切换^[9-11]。

1.1 无扰动情形下的静态排产模型

在无扰动情形下,生产环境是稳定的,各项生产参数和约束条件均为确定值。本文通过以下公式描述静态排产问题。

1.1.1 目标函数

静态排产的目标通常是最小化生产成本或最大化生产效率。假设目标是最小化生产成本,目标函数如公式(1)所示。

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (c_i^k \cdot x_i^k) \quad (1)$$

其中: n 是工件的总数; m 是制造单元的总数; c_i^k 是第 i 个工件在第 k 个制造单元上的加工成本; x_i^k 是二进制变量,表示第 i 个工件是否在第 k 个制造单元上加工($x_i^k=1$ 表示加工, $x_i^k=0$ 表示不加工)。

1.1.2 约束条件

(1)每个工件只能在一个制造单元上加工,如公式(2)所示。

$$\sum_{k=1}^m x_i^k = 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

(2)制造单元的容量约束,如公式(3)所示。

$$\sum_{i=1}^n t_i^k \cdot x_i^k \leq T_k, \forall k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (3)$$

其中: t_i^k 是第 i 个工件在第 k 个制造单元上的加工时间(考虑设备差异性),如公式(4)所示。

$$t_i^k = \frac{q_i}{\rho_k} + \beta_k \quad (4)$$

其中: q_i 为第 i 个工件的加工量(如零件数); ρ_k 为第 k 个制造单元的节拍速率(件/小时); β_k 为第 k 个制造单元的换型准备时间; T_k 是第 k 个制造单元的总可用时间。

(3)人员调度约束,如公式(5)所示。

$$\sum_{i=1}^n l_i^k \cdot x_i^k \leq L_k, \forall k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (5)$$

其中: l_i^k 为第 i 个工件在第 k 个制造单元上加工所需的人员工时; L_k 为第 k 个制造单元的总可用工时(考虑班次和倒班限制)。

(4)交货期约束,如公式(6)所示。

$$\sum_{k=1}^m (s_i^k + t_i^k) \cdot x_i^k \leq d_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

其中: s_i^k 是第 i 个工件在第 k 个制造单元上的开始时间; d_i 是第 i 个工件的交货期。

1.2 扰动情形下的动态排产模型

在扰动情形下,生产环境中存在不确定性因素,如设备故障、订单变更等。动态排产模型的目标是在发生扰动后,通过及时调整生产计划和资源调度,最小化与基准计划的偏差^[12-13]。

1.2.1 目标函数

具体目标函数如公式(7)所示。

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (|x_i^k - \bar{x}_i^k| + \lambda \cdot \max(0, C_i - d_i)) \quad (7)$$

其中: $\bar{x}_i^k$ 是历史基准排产方案; λ 为交货期延迟惩罚系数(取大值以确保交货优先)。

1.2.2 约束条件

(1) 扰动后的制造单元容量约束,如公式(8)所示。

$$\sum_{i=1}^n t_i^k \cdot x_i^k \leq T_k - \Delta T_k - \gamma_k, \forall k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (8)$$

其中: ΔT_k 是由于扰动导致的第k个制造单元的可用时间减少量; γ_k 为设备计划性维护时间。

(2) 扰动后的人员约束,如公式(9)所示。

$$\sum_{i=1}^n l_i^k \cdot x_i^k \leq L_k - \Delta L_k \quad (9)$$

其中: ΔL_k 是缺勤导致的工时损失。

(3) 扰动后的交货期约束,如公式(10)所示。

$$\sum_{k=1}^m (s_i^k + t_i^k) \cdot x_i^k \leq d_i + \Delta d_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

其中: Δd_i 是由于扰动导致的第i个工件的交货期延长量;插单任务j需强制分配并更新交货期,如公式(11)所示。

$$x_j^k = 1, d_j = d_j^{new}, \forall k \in \text{可选单元} \quad (11)$$

(5) 扰动后的资源约束,如公式(12)所示。

$$\sum_{i=1}^n r_i^k \cdot x_i^k \leq R_k - \Delta R_k, \forall k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (12)$$

其中: r_i^k 是第i个工件在第k个制造单元上所需的资源量; R_k 是第k个制造单元的总资源量; ΔR_k 是由于扰动导致的第k个制造单元的资源减少量。

1.3 动态排产决策触发条件

由于各种扰动对车间所产生的影响间接体现在生产进度与生产计划在时间上的偏差,因此,可将实际生产进度与生产计划间的差距作为触发生产过程智能决策的判定条件。动态排产决策的触发条件,如公式(13)所示。

$$E(t) = t - t_0 \quad (13)$$

其中: $E(t)$ 是订单的紧迫度值; t 是订单的交货期限; t_0 是当前排产的时间点。当 $E(t)$ 小于某个阈值时,触发动态排产决策,优先处理紧迫度较高的订单,默认插单紧迫度最高。

2 排产优化方案

2.1 混合排产策略

制造系统在应对动态或异常事件时采用的排产策略可分为周期性驱动、事件驱动和混合排产。周期性驱动排产即静态排产,在每个生产周期开始前先预排产设备,按照预定计划执行,简单易实现,但处理突发事件能力有限;事件驱动排产即动态排产,在系统状态变化时触发重排产,可快速应对突发事件,但缺乏未来事件预见能力;混合排产策略在正常周期采用静态排产,在出现动态事件时切换为事件驱动排产,实现离线重排产。

在动态排产策略的选择中,混合排产策略结合了周期排产和事件驱动排产的优点。系统在开始时按周期排产预排设备,在运行过程中根据设备故障、急件到达或排产偏差等情况进行事件驱动排产,以实现最优性能。混合排产策略既能灵活应对动态环境,又能保持系统稳定性,更

适合实际制造系统的需求。因此,本文采用基于事件驱动和周期性驱动相结合的动态排产策略,以此提高系统效率和灵活性。

2.2 反馈控制的动态排产模型

在处理生产扰动的动态排产过程中,评估动态排产算法优劣性可以从以下3个维度进行展开:①需要能够快速响应扰动事件,使输出的实际值(如重排产交货期)线性逼近目标值(如订单交货期),但是重排产过程中容易产生稳态误差(如超期或提前交付);②需要动态排产过程中消除系统快速响应过程中产生的稳态误差;③需要动态排产过程中尽量减小对初始生产计划中未执行部分的影响,避免调节过度。针对上述动态排产需求,可以通过借鉴传统线性时不变控制系统的调节原理,分别从计划任务加工情况、任务队列缓存情况和任务完工预测情况3个角度进行形式化建模,构建基于反馈控制的动态排产模型,使得在保证控制系统稳定的情况下快速使实际值趋于目标值。基于反馈控制的动态排产模型,如公式(14)所示。

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

其中: $u(t)$ 是控制输出,表示排产调整量; $e(t)$ 是误差,表示实际生产进度与计划生产进度的偏差; K_p 、 K_i 、 K_d 分别是比例、积分和微分系数,用于调节控制系统的响应速度和稳定性。

2.3 系数设置方法

在反馈控制动态排产模型中,比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的设置是确保系统稳定性和性能的关键^[14-15]。本文详细介绍各系数的设置方法及其对系统性能的影响。

2.3.1 比例系数 K_p 的设置

比例系数 K_p 决定了系统对当前误差的响应强度。较大的 K_p 值可以提高系统的响应速度,但过大的 K_p 可能导致系统振荡或不稳定。因此, K_p 的设置需要在响应速度和稳定性之间进行权衡。

具体设置方法如下:

(1) 理论分析:根据控制理论, K_p 的选择应满足系统的稳定性条件。通过分析系统的传递函数,可以确定 K_p 的合理范围。

(2) 实验验证:通过仿真实验,逐步调整 K_p 的值,观察系统的响应速度和稳定性。本文从较小的 K_p 值($K_p=0.1$)开始,逐步增加 K_p ,直到系统开始出现振荡,随即适当减小 K_p 以确保系统稳定。

2.3.2 积分系数 K_i 的设置

积分系数 K_i 用于消除系统的稳态误差(即长期偏差)。较大的 K_i 值可以加快系统消除稳态误差的速度,但过大的 K_i 值可能导致系统响应过慢或振荡。

具体设置方法如下:

(1) 理论分析:根据控制理论, K_i 的选择应满足系统的稳态误差消除条件。通过分析系统的稳态性能,可以确定

K_i 的合理范围;

(2)实验验证:通过仿真实验,逐步调整 K_i 的值,观察系统的稳态误差是否减小。本文从较小的 K_i 值($K_i=0.01$)开始,逐步增加 K_i ,直到系统开始出现振荡,随即适当减小 K_i 以确保系统稳定。

2.3.3 微分系数 K_d 的设置

微分系数 K_d 用于预测误差的变化趋势,抑制系统的超调和振荡。较大的 K_d 值可以提高系统对误差变化的响应速度,但过大的 K_d 可能导致系统对噪声敏感。

具体设置方法如下:

(1)理论分析:根据控制理论, K_d 的选择应满足系统的动态性能要求。通过分析系统的动态响应,可以确定 K_d 的合理范围。

(2)实验验证:通过仿真实验,逐步调整 K_d 的值,观察系统的超调和振荡是否减小。本文从较小的 K_d 值(如 $K_d=0.01$)开始,逐步增加 K_d ,直到系统对噪声过于敏感,随即适当减小 K_d 以确保系统的鲁棒性。

通过合理设置 K_p 、 K_i 、 K_d 的值,可以确保反馈控制动态排产模型在扰动发生后能够快速、稳定地调整生产计划。通过最小化生产进度偏差,从而提高生产系统的稳定性和效率。

3 算法描述

3.1 静态排产算法

算法1 静态排产算法

输入:工件总数(n),制造单元总数(m),加工成本矩阵(c , $c[i][k]$ 表示工件 i 在制造单元 k 上的加工成本),加工时间矩阵(t , $t[i][k]$ 表示工件 i 在制造单元 k 上的加工时间),制造单元容量向量(T , $T[k]$ 表示制造单元 k 的总可用时间),交货期向量(d , $d[i]$ 表示工件 i 的交货期),人员工时(L),任务人员需求(l)

输出:排产方案矩阵(x , $x[i][k] = 1$ 表示工件 i 在制造单元 k 上加工,否则为 0)

```
1. FOR 每个元素  $x[i][k]$ 
2.  $x[i][k] = 0$ 
3. END
4. FOR 每个工件  $i$  从 1 到  $n$  DO
5. FOR 每个制造单元  $k$  从 1 到  $m$  DO
6. IF 加工时间  $t[i][k] \leq T[k]$  且 人员工时  $l[i][k] \leq L[k]$  且 交货期  $s[i][k] + t[i][k] \leq d[i]$  THEN
7.  $x[i][k] = 1$ 
8.  $T[k] = T[k] - t[i][k]$  # 更新制造单元可用时间
9.  $L[k] = L[k] - l[i][k]$  # 更新制造单元人员可用工时
10. BREAK
11. END IF
12. END
13. END
14. RETURN  $x$ 
15. END
```

3.2 动态排产决策触发

算法2 动态排产决策触发算法

输入:生产计划(包含所有工件计划加工时间和交货期),实

际进度(包含所有工件的实际加工进度)

输出:触发结果 $trigger$ (布尔值, True 表示触发动态排产, False 表示不触发)

```
1. FOR 每个生产计划中的工件  $i$  DO
2. 计算紧迫度  $E(t) = d[i] - t0 \# d[i]$  是工件  $i$  的交货期,  $t0$  是当前时间
3. IF  $i$  是插单任务 或  $E(t) < \text{阈值}$  THEN
4.  $trigger = \text{TRUE}$ 
5. BREAK
6. END IF
7. END
8. RETURN  $trigger$ 
9. END
```

3.3 反馈控制的动态排产优化

算法初始化设置控制输出 $u(t) = 0$, 计算初始误差 $e(t) = \text{实际进度} - \text{生产计划}$ 。在每次迭代中,根据当前误差 $e(t)$ 计算控制输出 $u(t)$, 并更新排产方案为调整后的排产方案 = 生产计划 + $u(t)$ 。计算新的误差 $e(t) = \text{实际进度} - \text{调整后的排产方案}$, 直到误差接近零。

算法3 反馈控制的动态排产优化算法

输入:生产计划(包含所有工件计划加工时间和交货期),实际进度(包含所有工件的实际加工进度)

输出:调整后的排产方案

```
1. 控制输出  $u(t) = 0$ 
2. 误差  $e(t) = \text{实际进度} - \text{生产计划}$ 
3. WHILE  $e(t) \neq 0$  DO
4.  $u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d de(t)/dt$ 
5. 调整后的排产方案 = 生产计划 +  $u(t)$ 
6.  $e(t) = \text{实际进度} - \text{调整后的排产方案}$ 
7. END WHILE
8. RETURN 调整后的排产方案
9. END
```

3.4 混合排产策略

算法4 混合排产策略

输入:生产计划(包含所有工件计划加工时间和交货期),实际进度(包含所有工件的实际加工进度),扰动类型(存在或者不存在)

输出:最终排产方案

```
1. IF 扰动类型 == "不存在" THEN
2. 最终排产方案 = 静态排产算法
3. ELSE
4. 最终排产方案 = 反馈控制的动态排产优化算法
5. END
6. RETURN 最终排产方案
7. END
```

4 实验结果

4.1 实验设置

4.1.1 实验环境

(1)生产车间。模拟航空航天产品生产车间,包含 5

个制造单元和20个工件。

(2)扰动类型。设备故障、订单变更、人员调度变化等。

(3)软件平台。MATLAB 仿真平台,用于模拟生产过程和扰动事件。

(4)硬件平台。Intel Xeon(R) Gold 6248R(3.00GHz, 48核),64GB RAM。

4.1.2 实验参数

(1)工件数量。20个工件,每个工件的加工时间、交货期和优先级随机生成。

(2)制造单元数量。5个制造单元,每个制造单元的容量和资源限制随机生成。

(3)扰动事件。①设备故障:随机选择1~2个制造单元在实验过程中发生故障;②订单变更:随机选择2~3个工件的交货期提前或延后;③人员调度变化:随机选择1~2个缺勤人员。

4.1.3 对比算法

(1)传统周期性排产算法。按照固定的时间间隔进行排产,不考虑扰动事件。

(2)事件驱动排产算法。在扰动事件发生时立即进行排产调整,但缺乏对未来事件的预见能力。

(3)粒子群优化算法^[4]。以最小化任务总完工时间为求解目标,并在满足总超期时间约束的条件下进行排产优化,但缺乏实时动态调整调度的能力。

(4)本文提出的混合排产策略。结合周期性排产和事件驱动排产的优点,动态调整排产计划。

4.2 实验结果

(1)扰动情形下的排产结果,如图1所示。

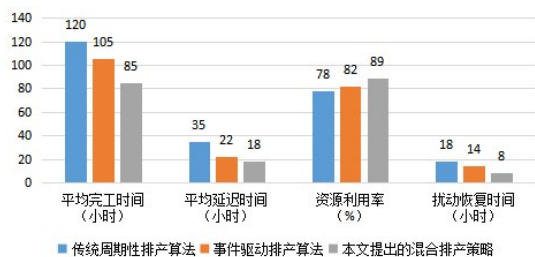


Fig. 1 Production scheduling results under disturbance conditions

图1 扰动情形下的排产结果

实验结果表明,在扰动情形下,本文提出的混合排产策略仍然表现最优,平均完工时间和延迟时间均低于其他2种算法,资源利用率也最高。在扰动恢复时间方面,本文算法的恢复时间最短,表明其能够快速应对扰动事件,确保生产过程的连续性。

(2)不同扰动类型下的排产结果,如图2所示。

实验结果表明,本文算法在不同扰动类型下均表现出较好的性能,能够有效应对设备故障、订单变更和人员调度变化等扰动事件。订单变更的扰动恢复时间最短,表明本文算法在处理订单变更时具有较高的灵活性。

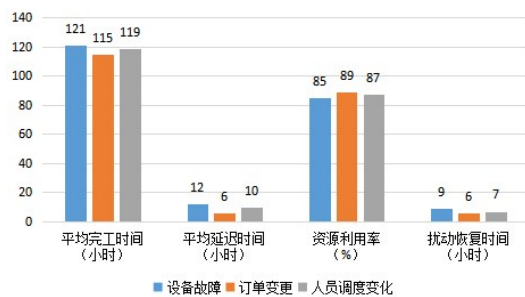


Fig. 2 Production scheduling results under different types of disturbances

图2 不同扰动类型下的排产结果

(3)平均完工时间在扰动事件增多情形下的排产结果,如图3所示。

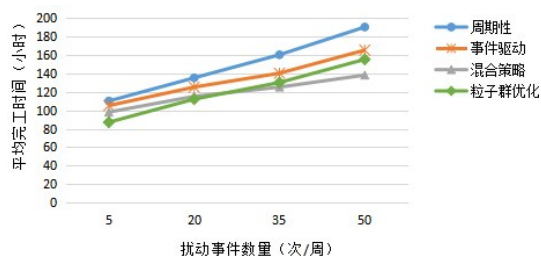


Fig. 3 Production scheduling results under increased disturbance events (average completion time)

图3 扰动事件增多情况下的排产结果(平均完工时间)

实验结果表明,所有方法的完工时间均随扰动增多而上升,但混合策略增速最缓,因为混合策略通过动态系数调整,优先处理高优先级任务,减少连锁延迟。此外,随着扰动事件增多,粒子群优化算法容易表现出收敛速度较慢或陷入局部最优解的问题,导致调度能力下降,而混合策略仍保持较高性能,验证了本文算法的优势。

(4)资源利用率在扰动事件增多情况下的排产结果,如图4所示。

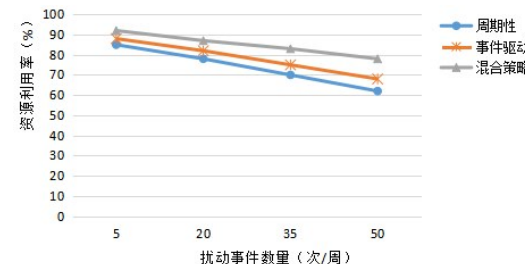


Fig. 4 Production scheduling results under increased disturbance events (resource utilization rate)

图4 扰动事件增多情况下的排产结果(资源利用率)

实验结果表明,混合策略的资源利用率最高,且下降幅度最小。这是因为混合策略通过反馈控制机制动态分配备用资源,从而有效避免了设备闲置或过载的情况。

(5)扰动恢复时间在扰动事件增多情况下的排产结果,如图5所示。

实验结果表明,混合策略的恢复时间始终最短,因为混合策略通过周期性基线修正与反馈微调,有效维持了系

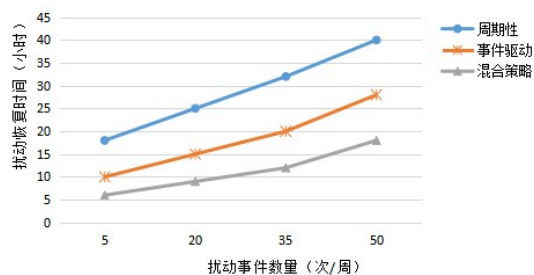


Fig. 5 Production scheduling results under increased disturbance events (disturbance recovery time)

图5 扰动事件增多情况下的排产结果(扰动恢复时间)

统稳态。

4.3 实验结论

综上,本文提出的动态计划排产优化算法能够有效应对生产过程中的不确定性因素,显著提高生产效率和资源利用率。具体而言,该算法能够有效应对设备故障、订单变更和人员调度变化等扰动,通过实时监测和数据收集,及时调整生产计划,以确保生产过程的连续性。同时,算法能够迅速发现生产进度中的偏差,并及时进行调整,避免生产进度中的累积性偏差。

5 结语

本文提出了一种动态计划排产优化算法。通过构建动态排产模型,识别生产扰动类型,触发动态排产决策,最终生成排产优化方案。实验结果表明,该算法能够有效应对航空航天制造生产过程中的复杂扰动场景,显著提高了生产效率和资源利用率,同时展现出良好的工业推广潜力。未来研究可进一步优化动态排产模型,提升算法的实时性和精准性,以更好地满足实际应用需求。

参考文献:

- [1] WU Z B. Research on intelligent modeling and integrated control of discrete manufacturing production lines [J]. Engineering Technology (Abstract Edition) · Architecture, 2017 (5): 142-146.
吴宗波. 离散型制造生产线智能建模与集成管控研究[J]. 工程技术(文摘版)·建筑, 2017(5):142-146.
- [2] DING C H, WEI Q Y, YAN H. Modeling and optimization method of discrete flexible production line for complex products [J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(7): 82-88.
丁朝臣,卫青延,闫华. 复杂产品离散型柔性生产线建模与优化方法[J]. 制造业自动化, 2024, 46(7):82-88.
- [3] YANG L, LI T, WU Z Z, et al. Research and application practice of digital system in discrete equipment manufacturing enterprises [J]. New Industrialization, 2023, 13(3):42-50.
杨磊,李涛,武籽臻,等. 离散型装备制造企业的数字化体系研究与应用实践[J]. 新型工业化, 2023, 13(3):42-50.
- [4] YU H L, HE T. Flexible production line scheduling method based on particle swarm optimization algorithm [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2024, 67(6): 84-91.
玉海龙,何陶. 基于粒子群优化算法的柔性生产线排产方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(6):84-91.
- [5] XIAO H N, SUN H H, PENG M H, et al. Collaborative scheduling method for automotive workshops based on migratory bird optimization algorithm and scheduling rules [P]. China, CN202411064584. 9, 2024-11-29.
肖海宁,孙慧慧,彭明花,等. 基于候鸟优化算法和排产规则的汽车车间协同排产方法[P]. 中国, CN202411064584. 9, 2024-11-29.
- [6] GUO Y, TANG D B, ZHANG Z Q. Flexible job-shop scheduling method based on deep reinforcement learning [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(22): 114-120.
郭羽,唐敦兵,张泽群. 基于深度强化学习的柔性作业车间调度方法[J]. 航空制造技术, 2024, 67(22):114-120.
- [7] ZHANG F Q, WU L, HUI J Z, et al. Flexible job-shop scheduling method based on multi-objective sparrow search algorithm [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(11): 1132-1140.
张富强,吴磊,惠记庄,等. 基于多目标麻雀搜索算法的柔性车间生产排程方法[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(11): 1132-1140.
- [8] PENG X H, ZHU Y J. Production scheduling optimization based on order priority and improved particle swarm algorithm [J]. Light Industry Machinery, 2024, 42(5):97-104.
彭相涵,朱玉杰. 基于订单优先级和改进粒子群算法的生产排程优化[J]. 轻工机械, 2024, 42(5):97-104.
- [9] SUN S L, HE X M, LU L X, et al. Research and application of intelligent scheduling algorithm for order production enterprises [J]. Modern Electronic Technology, 2022, 45(7):92-96.
孙世林,何雪明,卢立新,等. 面向订单生产企业的智能排产算法研究与应用[J]. 现代电子技术, 2022, 45(7):92-96.
- [10] PEI Z J, YANG X Y, YANG X, et al. Intelligent scheduling of bearing production based on double-layer interactive Q-learning algorithm [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2025, 42(3):451-462.
裴志杰,杨晓英,杨欣,等. 基于双层交互Q学习算法的轴承生产智能排程[J]. 机电工程, 2025, 42(3):451-462.
- [11] TANG Y Y, ZHANG S W, ZENG Y Q. Optimization of cigarette workshop scheduling based on two-stage hybrid algorithm [J]. Industrial Control Computer, 2024, 37 (7): 132-133.
唐媛媛,张双武,曾宇清. 基于两阶段混合算法的卷烟车间排产优化[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(7):132-133.
- [12] LIU S L. Research on optimization of prefabricated component production line scheduling based on DQN algorithm [J]. Computer Knowledge and Technology, 2024, 20(32):104-106.
刘松林. 基于DQN算法的预制构件生产线排产优化问题研究[J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(32):104-106.
- [13] WANG M L, WU G F, LIANG K Q, et al. Application of dueling double deep Q-network in real-time scheduling of hybrid flow shop based on MPN [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2024, 30(11):3929-3942.
王美林,吴耿枫,梁凯晴,等. Dueling Double DQN在基于MPN混流制造车间实时调度中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(11):3929-3942.
- [14] ZHANG F, LIU J, CHEN Q F, et al. Research on improved algorithm of four propeller unmanned ship control system [J]. Software Guide, 2017, 16(10):47-50.
张帆,刘军,陈起凤,等. 四螺旋桨无人船控制系统改进算法研究[J]. 软件导刊, 2017, 16(10):47-50.
- [15] JIA G J, QIAN J, ZOU Y D, et al. PID parameter optimization of hydraulic turbine governing system based on CPSOGSA [J]. Software Guide, 2022, 21(10): 103-108.
贾高杰,钱晶,邹屹东,等. 基于CPSOGSA的水轮机调速系统PID参数优化[J]. 软件导刊, 2022, 21(10):103-108.

(责任编辑:陈维捷)