



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION

基于两种周期维护类型和序列准备时间的单机调度

杨梦月, 董文杰, 刘思峰

引用本文:

杨梦月,董文杰,刘思峰. 基于两种周期维护类型和序列准备时间的单机调度[J]. *控制与决策*, 2024, 39(10): 3488–3496.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于预防维护的单机调度问题

Single-machine scheduling problem with preventative maintenance activities

控制与决策. 2021, 36(2): 395–402 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0626>

区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

控制与决策. 2021, 36(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型

Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems

控制与决策. 2021, 36(6): 1377–1386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1357>

基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(1): 241–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

基于两种周期维护类型和序列准备时间的单机调度

杨梦月, 董文杰[†], 刘思峰

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 为了更好地提高客户满意度以及更高效地进行生产调度和设备维护, 研究具有序列准备时间和两种周期维护类型的单机调度问题. 首先通过不同预防性维护效果定义两种周期维护类型, 同时考虑序列准备时间, 以最小化总延误为目标建立混合整数规划模型; 然后通过分析模型结构得到有效不等式提高模型求解效率; 接着设计高效的多起点算法进行求解, 为了避免算法陷入局部最优, 设计 5 种局部搜索算子进行搜索; 最后通过仿真实验验证模型和算法的有效性, 并对参数进行灵敏度分析. 研究表明, 在不同种维护类型之间进行权衡可以降低总延误, 两种周期维护类型的总延误优于单一周期维护类型. 研究结果可以为制造企业实际制定调度和维护方案时提供决策支持.

关键词: 生产调度; 周期性维护; 单机调度; 序列准备时间; 总延误; 多起点算法

中图分类号: F273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1051

引用格式: 杨梦月, 董文杰, 刘思峰. 基于两种周期维护类型和序列准备时间的单机调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3488-3496.

Single machine scheduling based on two types of periodic maintenance and sequence-dependent setup times

YANG Meng-yue, DONG Wen-jie[†], LIU Si-feng

(College of Economic and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: To improve customer satisfaction and to perform production scheduling and equipment maintenance more efficiently, a single-machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and two types of periodic maintenance is tackled. Firstly, two types of periodic maintenance are defined by different preventive maintenance effects, and a mixed integer programming model is formulated to minimize the total tardiness by taking into account the sequence-dependent setup times. Then, the valid inequalities are proposed to improve the model efficiency by analyzing the model structure. Then, an efficient multi-start algorithm is also designed for the solution, and five local search operators are designed for the search to avoid the algorithm falling into local optimum. Finally, computational experiments are performed to evaluate the effectiveness of the model and algorithm, as well as to analyze the sensitivity of parameters. The result shows that the trade-off between different maintenance types can reduce the total tardiness, and the total tardiness of two types of periodic maintenance is better than that of a single type of periodic maintenance. The result can provide decision support for manufacturing enterprises to make scheduling and maintenance plans.

Keywords: production scheduling; periodic maintenance; single machine scheduling; sequence dependent setup times; total tardiness; multi-start algorithm

0 引言

机器突发故障往往会造成巨大的经济损失, 甚至安全风险, 因此制造企业会主动采取预防性维护 (preventive maintenance, PM) 来避免突发故障^[1-4]. 同

时, 实际生产中随着客户购买力的增强, 满足客户订单的交货期在制造企业中变得越来越重要^[5-6]. 而预防性维护会导致工件加工过程的推迟, 从而影响客户交货期和客户满意度; 若不进行预防性维护会导致

收稿日期: 2023-07-27; 录用日期: 2023-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071111, 72271124); 江苏省自然科学基金项目(BK20230870); 中国博士后科学基金项目(2022M721596); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NS2023043).

责任编委: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: dongwenjie@nuaa.edu.cn.

机器故障,从而可能导致更多的延误.因此在生产调度中考虑预防性维护,对于提高机器生产效率,进而增强企业竞争力具有重要的现实意义.

国内外已经有很多学者对生产调度和预防性维护问题进行了相关研究,从预防性维护的视角可以分为两类策略,分别是基于机器状态的视情维护^[7-10]和基于时间的周期维护.由于目前并没有统一定义机器状态的方法^[11],现阶段最广泛采用的是周期维护策略.针对后者的研究,相关学者通常将周期维护作为一种资源约束加入到生产调度中从而进行决策. Liao等^[12]首次将周期维护引入到单机调度问题中,自此以后,越来越多的学者开始关注周期维护的生产调度问题,对各种机器环境下周期维护的生产调度问题进行了相关研究.当不考虑序列准备时间时,周期性维护可以看作是装箱约束,文献^[13-16]研究了不同环境下的调度问题,分别设计了分支定界算法、多项式算法、启发式规则以及启发式算法进行求解.但在纺织业、印刷电路制造业和化学工业等很多实际行业中,往往存在着准备时间,它对生产效率有着重要的影响,因此必须独立考虑^[17-19].当同时考虑序列准备时间时,周期维护生产调度问题的复杂性会大大增加,目前已有部分学者初步研究了考虑序列准备时间和周期维护的生产调度问题. Pacheco等^[20]和 Nesello等^[21]研究了带有序列准备时间和周期性维护的单机调度问题,分别设计了多起点禁忌搜索算法(multi-start tabu search, MST)和基于模型的精确迭代求解算法进行求解. Avalos-Rosales等^[22]和雷德明等^[23]针对不相关并行机环境下的同一问题,设计了多起点算法和多群体人工蜂群算法进行求解.

上述研究中,考虑序列准备时间和周期维护的研究通常认为PM是单一的完美维护类型.在具体工程实践中,系统存在着不同程度的维护效果,除了完美维护(perfect preventive maintenance, PPM)外,还具有最小维护(minimal preventive maintenance, MPM)和不完美维护(imperfect preventive maintenance, IPM)^[24],目前已有文献^[11, 25-26]开始研究IPM类型.此外,对于订单驱动型生产企业而言,工件总延误是影响顾客满意度的重要指标,多种维护类型下目标函数为最小化总延误的单机调度问题还极少被研究.基于此,本文在现有文献的基础上有以下创新点:1)独立考虑序列准备时间,针对生产系统进行生产调度和设备维护的联合决策;2)考虑PPM和IPM两种周期维护类型,深入分析两种维护效果对生产调度的影响机制;3)以影响顾客满意度的总延误为目标,对两种维护类型的单机总延误问题进行研究.

本文拟对两种周期维护类型的单机调度问题进行研究,考虑PPM和IPM两种改进效果的周期维护

类型,同时考虑序列准备时间,以最小化总延误为目标建立混合整数规划模型,并分析模型结构得到有效不等式加快模型求解效率,同时设计高效的多起点算法(multi-start algorithm, MSA)对问题进行求解.最后通过算例分析验证模型和算法的有效性.

1 考虑两种周期性维护类型的单机调度模型

1.1 两种周期性维护类型

设备的维护周期通常可以根据车间所要求的可靠性阈值 δ 和设备的可靠性函数 R 计算得到^[27].其中,可靠性阈值 $\delta(0 < \delta < 1)$ 是衡量机器设备是否可用的标准,当设备可靠性 R 介于 $[\delta, 1]$ 之间时,机器设备可用,否则设备不可用.在可靠性理论中,机器的故障率 $\rho(v)$ 通常服从威布尔分布,即 $\rho(v) = \lambda\beta v^{\beta-1}$.其中: v 为机器役龄; λ 和 β 分别为威布尔分布的比例参数和形状参数,二者的不同取值分别影响威布尔函数的均值广度和形状.当 $\beta > 1$ 时,机器进入耗损失效期,机器设备的故障率会随着运行时间的增加而逐渐增大,因此在这一阶段及时地进行PM是非常必要的.

考虑PPM和IPM两种维护类型,在可靠性不低于可靠性阈值 δ 前进行PM.其中PPM是指设备修复如新,即当执行PPM操作后,设备役龄变为0.随着设备运行,设备役龄在不断增加,设备的可靠性 $R = e^{-\int_0^v \rho(v)dv} = e^{-\int_0^v \lambda\beta v^{\beta-1}dv} = e^{-\lambda v^\beta}$ 不断降低,直到降低到可靠性阈值 $\delta(R = \delta)$ 时,得到PPM的周期时长 TPM_1 ,有

$$TPM_1 = \sqrt[\beta]{\ln \delta / -\lambda}. \quad (1)$$

而IPM操作只能使设备役龄在一定程度上回退, $\theta(0 < \theta < 1)$ 表示役龄的回退因子,即执行IPM操作后役龄变为 $TPM_1(1 - \theta)$ ^[11, 28],设备的可靠性为

$$R = e^{-\int_{TPM_1(1-\theta)}^{TPM_1(1-\theta)+TPM_2} \rho(v)dv} = e^{-\lambda[(TPM_1(1-\theta)+TPM_2)^\beta - TPM_1^\beta(1-\theta)^\beta]}. \quad (2)$$

同理,可以得到IPM周期 TPM_2 ,有

$$TPM_2 = \sqrt[\beta]{\ln \delta / -\lambda} [\sqrt[\beta]{1 + (1 - \theta)^\beta} - (1 - \theta)]. \quad (3)$$

由于回退因子 θ 影响着IPM周期长度,因此后文对回退因子 θ 进行了灵敏度分析.

1.2 问题描述

本文考虑PPM和IPM两种周期维护类型,执行PPM和IPM操作时机器不可用,因此具有两种周期维护类型的单机调度问题可以描述为: n 个独立的工件需要在机器上进行加工;每个工件的加工时间和交付期已知;序列准备时间已知;不同PM水平对应的周期以及维护时长已知.记执行PM后所在周期内

包含的工件集合为一个加工批次,则所有批次可以分为两种PM类型,分别对应PPM和IPM周期.各批次工件的加工时间及准备时间之和需要满足执行不同种PM对应的周期约束.本文需要决策的是如何安排合适的周期维护类型及各批次内工件的加工顺序,才能使工件的总延误最小.

不失一般性,作出如下假设:1)所有工件在初始时刻都可用;2)机器在初始时刻的虚拟年龄为0;3)机器同一时刻只能加工一个工件且无抢占.

1.3 符号和变量说明

定义如下符号:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$, 工件索引集合 $j \in N, N_0 = N \cup \{0\}$, 0表示虚拟工件;

$B = \{1, 2, \dots, l\}$, 批次索引集合, $b \in B$;

$I = \{1, 2\}$, PM周期类型集合, $i \in I$, 分别用索引 $i = 1, 2$ 表示PPM和IPM周期类型.

定义如下参数:

p_j : 工件 j 加工时间;

d_j : 工件 j 交付期;

s_{jk} : 加工完工件 j 后立即加工工件 k 的序列准备时间;

tpm_i : 执行第 i 种PM的时长;

TPM_i : 第 i 种PM对应的周期时长;

M : 一个特别大的正数.

定义如下决策变量:

uu_j : 工件 j 的流逝时间, 表示工件 j 完成时刻与 j 所在批次PM结束时刻之间的时长;

x_{ijk}^b : 批次 b 的PM类型与工件前序后序关系, 当工件 k 与工件 j 处于同一批次, 且在执行第 i 种PM后所在批次上工件 k 紧随工件 j 加工时取值为1, 否则为0;

y_{ij}^b : 工件 j 在执行第 i 种PM类型的批次 b 上加工时取值为1, 否则为0;

u_{ib} : 在批次 b 上执行 i 种PM类型时取值为1, 否则为0;

c_j : 工件 j 的完成时间;

T_j : 工件 j 的延误时间.

1.4 模型建立

按照各批次所执行的PM类型, 可以将所有批次分为两类, 所有批次之间互相独立. 当工件处于第1批次时, 工件 j 的完成时间 c_j 即为工件所在批次的流逝时间 uu_j . 当工件处于后续批次时, c_j 由3部分组成, 分别是工件所在批次之前的PM批次所花费的时间 t_1 (包含执行PM的时长和对应的周期时长), 工件所

在批次执行PM的时间 t_2 , 工件所在批次的流逝时间 t_3 , 有

$$c_j = t_1 + t_2 + t_3. \tag{4}$$

其中

$$t_1 = \sum_{i \in I} \sum_{b=1}^{b-1} u_{ib}(TPM_i + tpm_i) - tpm_1, \tag{5}$$

$$t_2 = \sum_{i \in I} u_{ib} tpm_i, \tag{6}$$

$$t_3 = uu_j. \tag{7}$$

因为假设初始机器是全新的, 在计算 t_1 时需要去除第1个批次执行PPM的时间. 最终工件 j 的完工时间为

$$c_j \geq \sum_{i \in I} uu_j \cdot y_{ij}^b, \forall j \in N, b = 1, \tag{8}$$

$$c_j + M(1 - \sum_{i \in I} y_{ij}^b) \geq \sum_{i \in I} \sum_{b=1}^{b-1} u_{ib}(TPM_i + tpm_i) - tpm_1 + \sum_{i \in I} u_{ib} tpm_i + uu_j, \forall j \in N, \forall b \in B \setminus 1. \tag{9}$$

根据上述问题描述及参数说明, 可以建立如下混合整数规划模型M1:

$$\min \sum_{j \in N} T_j. \tag{10}$$

$$\sum_{j \in N} x_{i0j}^b = \sum_{j \in N} x_{ij0}^b = u_{ib}, \forall i \in I, \forall b \in B; \tag{11}$$

$$\sum_{k \in N_0, k \neq j} x_{ijk}^b = \sum_{k \in N_0, k \neq j} x_{ikj}^b = y_{ij}^b, \forall j \in N_0, \forall i \in I, \forall b \in B; \tag{12}$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in N_0, k \neq j} (s_{jk} + p_k) x_{ijk}^b \leq \sum_{b \in B} u_{ib} TPM_i, \forall i \in I; \tag{13}$$

$$\sum_{i \in I} u_{ib} \leq 1, \forall b \in B; \tag{14}$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{i \in I} y_{ij}^b \leq 1, \forall j \in N; \tag{15}$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{b \in B} \sum_{i \in I} y_{ij}^b = n; \tag{16}$$

$$\sum_{i \in I} u_{ib} \leq \sum_{i \in I} u_{ib+1}, \forall b \in B \setminus l; \tag{17}$$

$$uu_j - uu_k + [TPM_i + (s_{jk} + p_k)] \sum_{b \in B} x_{ijk}^b + [TPM_i - (s_{jk} + p_k)] \sum_{b \in B} x_{ikj}^b \leq TPM_i + M \left(1 - \sum_{b \in B} y_{ij}^b \right), \forall j, k \in N_0, j \neq k, \forall i \in I; \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 uu_j + M \left(1 - \sum_{b \in B} y_{ij}^b \right) &\geq (s_{0j} + p_j) \sum_{b \in B} x_{i0j}^b, \\
 \forall j \in N, \forall i \in I; & \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 uu_j \leq TPM_i - (s_{j0} + p_0) \sum_{b \in B} x_{ij0}^b + M \left(1 - \sum_{b \in B} y_{ij}^b \right), \\
 \forall j \in N, \forall i \in I; & \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$T_j \geq c_j - d_j, \forall j \in N; \quad (21)$$

$$T_j \geq 0, \forall j \in N; \quad (22)$$

$$u_{11} = 1; \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
 uu_j \geq 0, u_{ib}, x_{ijk}^b, y_{ij}^b, u_{ib} \in \{0, 1\}, \\
 \forall j, k \in N_0, i \in I, \forall b \in B; & \quad (24)
 \end{aligned}$$

式(8)和(9).

目标函数(10)为最小化工件的总延误. 约束条件中, 式(11)表示工件 j 被分配的批次 b 和该批次的 PM 类型 i . 式(12)表示批次中每个工件的流平衡约束, 即对于每一个工件而言, 都有一条弧线流入/流出同批次的其他工件. 式(13)表示各批次的最大加工时长约束, 等于该工件所在批次 PM 类型对应的周期时长. 式(14)表示每批次仅进行一次 PM. 式(15)和(16)表示工件仅被分配到一个批次上, 且所有工件都被分配. 式(17)保证只有前一批次被分配工件, 后一批次才能被使用, 即避免产生空批次. 式(18)表示对于任意 PM 类型, 当工件 j 排在工件 k 之前且位于同一批次相邻位置时, 确保 $uu_k = uu_j + s_{jk} + p_k$, 否则公式无效. 式(19)和(20)定义了工件的流逝时间范围. 式(21)和(22)定义了工件的延误. 式(23)表示机器初始是全新的. 式(24)为变量取值约束. 式(8)和(9)定义了工件的完成时间.

1.5 添加有效不等式

商业求解器求解模型 M1 时得到的下界较差, 因此分析上述模型结构可以构造有效不等式如下:

$$\begin{aligned}
 \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in N_0, k \neq j} (s_{jk} + p_k) x_{ijk}^b \leq u_{ib} TPM_i, \\
 \forall i \in I, \forall b \in B. & \quad (25)
 \end{aligned}$$

其中: 不等式左边表示各批次实际被占用的时长, 即序列准备时间与工件的加工时间之和; 不等式右边表示各批次对应的周期类型. 因此原问题的所有可行解都满足于式(25), 即添加有效不等式后不会减少可行域. 此外, 只要存在 $x_{ijk}^b = 1, \forall j, k \in N, j \neq k, i \in I, \forall b \in B$, 则有 $u_{ib} = 1, \forall i \in I, \forall b \in B$, 此时松弛问题的下界得到提升. 将有效不等式(25)添加到模型 M1 中得到的新模型称为模型 M2. 后文对比分析了模型和有效不等式的性能.

性质 1 考虑两种周期维护类型的单机调度问题是 NP 难问题.

证明 当 $s_{jk} = tpm_i = 0$, 且不同 PM 周期时长为无穷大时, 即不考虑两种 PM 水平和序列准备时间, 原问题可以被规约为最小化工件总延误的单机调度问题 $(1 // \sum T_j)$. 该问题已经被学者证明是 NP 难问题^[29], 因此考虑两种周期维护类型的单机调度总延误问题是 NP 难问题. □

由于考虑两种周期维护类型的单机总延误问题是 NP 难问题, 商业求解器只能求解有限规模的问题, 本文将 MSA 算法进行求解.

2 算法设计

MSA 算法包含构造和改进两个阶段, 同时体现了多样性和改进性, 目前已在求解生产调度等组合优化问题时取得了很好的效果^[22,30]. 本节将结合考虑两种周期维护类型单机总延误问题整数规划模型的特征, 设计求解两种周期维护类型的单机总延误问题的 MSA 算法.

2.1 解的编码规则

采用单层编码规则, 编码方案 π 表示工件-批次分配、各批次工件的加工顺序以及各批次的维护类型. 如方案 $\pi = \{PPM, 2, 1, 6, IPM, 5, 4, PPM, 3, 7\}$, 表示共有 3 个批次, 各批次内的加工顺序分别为 $\{2, 1, 6\}, \{5, 4\}$ 以及 $\{3, 7\}$, 其中第 1 批次和第 3 批次采用 PPM 周期类型, 第 2 批次采用 IPM 周期类型.

2.2 构造阶段

构造阶段根据贪婪和随机的思想设计并产生多个初始解. 贪婪的目的是保证初始解的质量, 而随机的目的是为了增加解的多样性, 其中随机通过从限制列表中随机挑选工件来实现.

定义满足周期维护类型时长约束的移动为可行移动, 构造阶段步骤如下: 首先对工件的交付期进行非降序排序, 得到列表 L ; 然后, 选取前 r 个形成限制列表 (restricted candidate list, RCL), 其中 r 为参数, 决定了构造算法随机的程度. r 越小表明越贪婪, r 越大表明越随机; 接着, 从限制列表 RCL 中随机选择一个工件, 插入所有可行位置并计算目标函数增加值, 找到目标函数增加最小的位置作为最好位置进行插入; 最后, 更新工件完成时间、工件延误, 并更新限制列表 RCL. 构造算法对应的流程如下.

算法 1 构造算法.

输入: 工件及 PM 参数信息 $p_j, d_j, s_{jk}, tpm_i, TPM_i$, 控制随机程度的参数 r ;

输出: 工件加工及维护方案 π_0 .

step 1: 工件交付期 d_j 按照非递减排序组成列表 L , 初始方案 $\pi_0 = \emptyset$

step 2: L 中前 r 个工件组成限制列表 RCL

step 3: $k = 0$, 随机选择批次 k 的 PM 类型

step 4: while RLC $\neq \emptyset$ do

step 5: 从 RCL 中随机挑选一个工件 j

step 6: for q in 批次 k 内所有可能的插入位置 do

step 7: if 插入位置 q 后为可行方案 do

step 8: 计算所有可行插入点位 q 的目标函数增量 Δq

step 9: if 批次 k 内无可行的插入位置 do

step 10: 开启新批次并随机选择 PM 类型, $k = k + 1$, 计算插入到新批次首位的目标函数增量 Δq

step 11: 最好的可行插入点位 $q^* = \min\{\Delta q\}$

step 12: 将工件 j 插入到批次 k 的最好位置, 更新 π_0

step 13: 更新 c_j 和 d_j , 更新 RCL, 从 RCL 中删除工件, 且从 L 中依次添加一个工件

step 14: end

step 15: 返回方案 π_0

2.3 提升阶段

提升阶段使用局部搜索算法改进构造阶段的初始解, 直到不能改进为止. 本阶段分为阶段 1 和阶段 2, 共设计 5 种局部搜索算子, 不断搜索解空间从而进一步提高解的质量.

2.3.1 阶段 1

阶段 1 定义了 3 种搜索动作, 每种搜索动作对应一种局部搜索算子. 在阶段 1 中, 这些局部搜索算子依次被使用, 直到不能再提高解的质量为止. 定义各批次满足周期维护类型时长的移动作为可行移动, 然后在所有可行移动中选择改进最大的移动, 假如该移动得到的解可以接受, 则执行该移动动作并更新当前解. 其中, 机器所有批次内的空闲时间非升序排列得到批次列表 (list of batches, Lb), 局部搜索算子 1 和 2 的流程如下.

算法 2 局部搜索算子 1 和 2.

输入: 构造阶段的方案 π_0 , 工件及 PM 参数信息 $p_j, d_j, s_{jk}, tpm_i, TPM_i$;

输出: 工件加工及维护方案 π_1 .

step 1: $\pi'_1 = \pi_0, \pi_1 = \pi_0$, 计算机器所有批次的空闲时间

step 2: 机器所有批次的空闲时间按照非升序排列得到 Lb

step 3: $k = 1$

step 4: while $k \leq$ 批次数量 do

step 5: $[k] =$ Lb 中的第 k 个位置的批次

step 6: for $k' = 1$: 批次数量 and $k' \neq k$ do

step 7: 对批次 $[k]$ 和批次 $[k']$ 上的工件执行插入/交换操作

step 8: 所有操作最好的可行操作为 $best_{move}$, 对方案 π_1 执行 $best_{move}$ 操作得到方案 π'_1

step 9: if $f(\pi'_1) < f(\pi_1)$ then

step 10: 更新批次 $[k]$ 和批次 $[k']$ 内工件完成时间及延误, $\pi_1 \leftarrow \pi'_1$, 更新 Lb, $k = 1$

step 11: else

step 12: $k = k + 1$

step 13: end

step 14: 达到局部最优解

step 15: 返回方案 π_1

局部搜索算子 1: 该搜索动作对应机器不同批次之间工件的插入操作, 目的是减少批次内的空闲时间, 最终降低工件总延误. 若该批次可以由 PPM 类型转化为 IPM 类型且转化后仍是可行方案, 则将该批次转换为 IPM 类型以进一步降低批次的空闲时间, 最终降低工件总延误. 当选定一个批次后, 该批次上所有位置的工件插入到其他所有批次的所有位置上.

局部搜索算子 2: 该搜索动作对应机器上不同批次之间的交换操作, 与局部搜索算子 1 类似, 目的是减少批次内的空闲时间, 最终降低工件总延误. 当选定一个批次后, 该批次上所有位置的工件与其他所有批次上所有位置的工件进行交换.

局部搜索算子 3: 该搜索动作对应每个批次的 Or-opt 操作, 目的同样是降低工件的总延误. 选定一个批次, 移除该批次上少于或等于 3 个的相邻工件, 然后重新插入到相同批次的不同位置, 从可行操作中选择最好的操作, 直到该批次 Or-opt 操作执行完毕.

2.3.2 阶段 2

阶段 2 定义了 2 种局部搜索算子, 它们分别是阶段 1 中 3 种局部搜索算子的组合. 2 种局部搜索算子分别作用于当前的解序列, 直到不能改进为止, 退出本阶段. 与阶段 1 类似, 在所有可行操作中, 选择改进最大的操作, 假如该操作得到的解可以接受, 则执行该局部搜索算子并更新当前解.

局部搜索算子 4: 该局部搜索算法是局部搜索算子 1 与局部搜索算子 3 的组合, 先执行机器不同批次之间工件的插入操作, 再执行批次内的 Or-opt 操作.

局部搜索算子 5: 该局部搜索算法是局部搜索算子 2 与局部搜索算子 3 的组合, 先执行机器不同批次之间工件的交换操作, 再执行批次内的 Or-opt 操作.

综上, MSA 算法经过构造阶段产生多个初始解,

初始解在提升阶段通过 5 种局部搜索算子不断迭代改进,直到达到停止规则时输出最好的方案作为最终方案.

3 算例验证

本文选用某转子生产车间内的 CNS 镗床进行分析验证. 为了避免发生机器意外故障以及保证加工工件的精度,需要定期进行检修和维护. 此外,实际加工过程中需要频繁进行切换生产工况,更换工具以及调整设备参数等准备操作,该准备时间与工件的加工次序相关,即 CNS 镗床加工过程中存在着序列准备时间. 根据从工厂 CNS 镗床提取的相关信息以及文献[11],得到算例参数介绍如下.

工件的加工时间和序列准备时间分别服从 $[20, 30] \text{ h}$ 和 $[0, 5] \text{ h}$ 的均匀分布. 工件的交付期由交付期松紧度 T 和交付期离散程度 R 共同决定,交付期服从 $\left[(1 - T - R/2) \sum_{j \in N} p_j, (1 - T + R/2) \sum_{j \in N} p_j \right]$ 区间内的均匀分布,单位为 h ,令 $T = 0.1, R = 0.5$. 执行 PPM 和 IPM 的时间分别为 5 h 和 2 h . 机器故障服从

威布尔分布,相关参数分别为 $\beta = 3, \lambda = 10^{-6}, \delta = 0.78, \theta = 0.4$. 由式(1)和(3)可以得到不同 PM 类型的周期时长.

3.1 小规模数据

由于所提出问题是 NP 难,求解器只能用来求解小规模问题,为了验证模型(M1 和 M2)、有效不等式以及所设计 MSA 算法的有效性,本节产生一系列小规模算例进行算例分析,最终对比结果如表 1 所示. 对于每一个小规模算例,先通过商业求解器 Gurobi 9.5.1 分别对模型 M1 和模型 M2 求解,再利用 MSA 算法进行求解. 其中 Gurobi 求解时间限制为 $3\ 600 \text{ s}$,若在规定的时间内未求得最优解,则终止求解,在表 1 中用 “-” 表示. MSA 算法参数组合 $r = 3$,终止时间 $\text{Limit} = 0.2n$. 对于每个算例,利用 MSA 算法分别运行 10 次,统计算法的最好解和平均解. 将 Gurobi 与 MSA 算法求得的解进行对比,选用偏差程度 Dev (deviation value) 作为评价指标,其中 $\text{Dev} = (\text{Obj}_{\text{MSA}} - \text{Obj}_{\text{Gurobi}}) \times 100\% / \text{Obj}_{\text{Gurobi}}$, Obj_{MSA} 和 $\text{Obj}_{\text{Gurobi}}$ 分别为 MSA 算法和 Gurobi 得到的解.

表 1 小规模算例结果对比

n	Gurobi (M1)		Gurobi (M2)		MSA			
	Obj/h	time/s	Obj/h	time/s	最好解	Dev ₁ /%	平均解	Dev ₂ /%
6	64.27	1.63	64.27	0.32	64.27	0.00	64.27	0.00
7	78.29	5.88	78.29	0.96	78.29	0.00	78.29	0.00
8	91.82	55.79	91.82	3.61	91.82	0.00	91.85	0.03
9	108.28	255.02	108.28	5.88	108.31	0.03	108.42	0.13
10	111.71	600.99	111.71	9.24	111.84	0.12	111.91	0.18
11	124.27	1 918.46	124.27	23.84	124.57	0.24	124.68	0.33
12	-	3 600.00	147.34	202.12	147.39	0.03	148.03	0.47
13	-	3 600.00	161.22	3 057.66	161.40	0.11	162.27	0.65
14	-	3 600.00	187.37	3 600.00	187.76	0.21	189.34	1.05
15	-	3 600.00	198.78	3 600.00	199.17	0.20	204.05	2.65

由表 1 可知,模型 M1 仅能在时间限制内求解 11 个工件规模,但添加了有效不等式的模型 M2 可以求解更多的算例规模,且求解时间相较于 M1 得到降低,求解效率得到提高,验证了不等式的有效性. 随着算例规模的增大, Gurobi 无法在规定时间内求得精确最优解,此时 MSA 算法相对于模型 M2 目标值的偏差程度均低于 3%,MSA 算法的求解时间更低,算法的有效性得以验证.

3.2 中、大规模数据

比较 3 种策略下的总延误,3 种策略分别为所提出包含 PPM 和 IPM 两种周期类型的策略 (MSA_{IPM})、仅考虑单一 PPM 周期类型的策略 (MSA_{PPM}) 和仅考

虑单一 IPM 周期类型的策略 (MSA_{IPM}),3 种策略均利用 MSA 算法进行求解. 同时验证了 MSA 算法的性能,选用解决相似问题的 MST 算法^[20] 进行对比 (MST_{PM}). 算法求解的均为所提出两种周期类型的总延误问题,其最大运行时间与 MSA 算法的运行时间一致.

问题参数设置与小规模算例相同,共生成 9 组中、大型算例数据. 对于每一组算例,独立运行 10 次. 以 MSA 算法求解两种周期类型的策略结果 (MSA_{PM}) 作为基准,对比不同策略和不同算法的求解结果,选用偏差程度 Dev 作为评价指标. 表 2 为最终的对比结果.

表2 中、大规模算例的结果对比

n	MSA _{PM}	MST _{PM}		MSA _{PPM}		MSA _{IPM}	
	Obj/h	Obj/h	Dev ₃ /%	Obj/h	Dev ₄ /%	Obj/h	Dev ₅ /%
20	259.57	260.07	0.29	349.53	33.72	477.76	84.06
30	480.08	490.03	2.05	623.94	30.24	943.38	96.51
40	994.15	1 003.78	1.25	1 198.87	17.09	1 908.85	92.01
50	1 304.84	1 297.40	-0.47	1 881.07	41.98	2 316.06	77.50
60	1 783.74	1 788.13	0.58	2 599.05	50.48	3 257.52	82.62
70	2 670.38	2 702.22	1.38	3 418.14	28.36	4 638.73	73.71
80	3 085.54	3 125.54	1.22	4 879.89	59.59	5 825.15	88.79
90	4 014.07	4 044.05	0.82	5 335.52	36.22	7 733.81	92.67
100	5 506.02	5 588.56	1.62	6 734.43	24.77	10 420.11	89.25

由表2可知,所提出两种周期类型策略的总延误要优于单一周期类型,这主要是因为仅采用PPM类型会导致批次内存在较多的空闲时间,仅采用IPM类型会导致批次增多,而同时采用两种周期类型可以在降低批次空闲时间与增多批次之间进行权衡,最终降低工件总延误.同时可以观察到,本文MSA算法在大多数算例上的表现要优于MST算法,这验证了本文算法的有效性.

3.3 灵敏度分析

对可靠性阈值 δ 以及IPM的回退因子 θ 进行灵敏度分析,测试可靠性阈值 δ 以及IPM的不同回退因子 θ 对两种维护类型的影响.

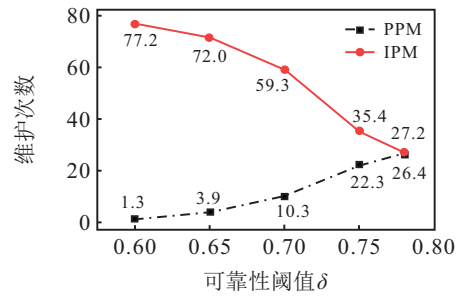
3.3.1 可靠性阈值的灵敏度分析

选取工件数为20、50、80共3组规模的算例,其他参数保持不变,对可靠性阈值 δ 为0.60、0.65、0.70、0.75、0.78共5种可靠性阈值进行灵敏度分析.按照式(1)和(3)计算两种PM类型对应的周期时长.不同可靠性阈值 δ 及不同规模算例下两种维护类型次数的对比结果如图1所示.

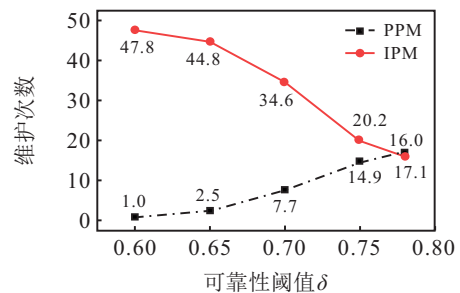
由图1可知,对于不同规模的工件,随着可靠性阈值的变化,两种维护类型的数量呈现相反的变化趋势.其中PPM类型的次数在提高,而IPM的次数在降低,并且伴随着工件规模的增加变化趋势会更加明显.造成这种现象的原因是:当可靠性阈值较低时,选用IPM会降低各批次的空闲时间.但随着可靠性阈值的提升,对应两种维护类型的周期都会减小,此时若选用IPM,则机器需要频繁地进行维护,反而会增加工件总延误,因此机器会倾向于选择PPM维护,以降低维护次数,从而减少工件总延误.

3.3.2 回退因子的灵敏度分析

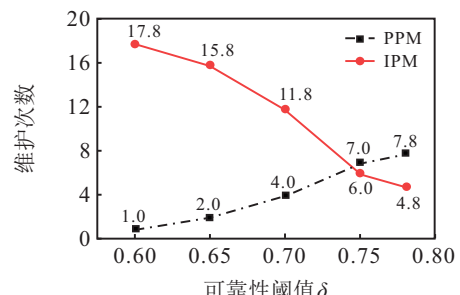
本节选取回退因子为0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.55共6种水平,工件数为20、50、80共3组规模的算例.按照式(1)和(3)计算两种PM类型对应的周期时长,其他参数保持不变,对比IPM的不同回退因子 θ 对两种维护类型的影响,结果如图2所示.



(a) n=20



(b) n=50



(c) n=80

图1 不同可靠性阈值下两种维护类型的次数

由图2可知,对于不同规模的工件,随着回退因子的增加,两种维护类型呈现完全相反的变化趋势.其中PPM次数在降低,而IPM次数在提高.造成这种现象的原因是:回退因子对应着IPM的周期时长,当回退因子增加时,IPM的周期时长会增大.此时与PPM相比,选择IPM维护类型时各批次的空闲时间在降低,从而降低了工件的总延误.因此选择IPM维护的性价比在提升,PPM维护的次数相应降低.随着数据规模的增加,加工的批次会增多,此时PPM降低的趋势会更明显.

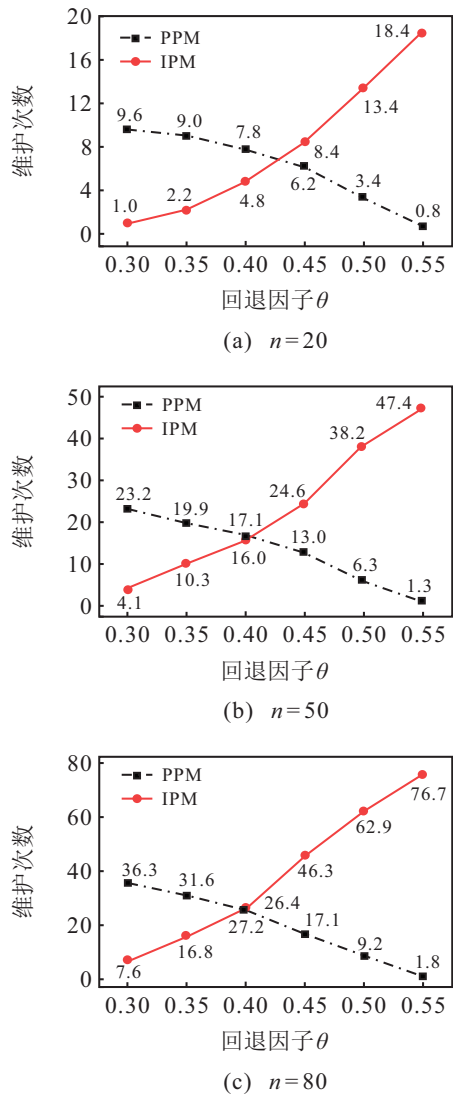


图2 不同回退因子下两种维护类型的次数

4 结论

本文针对单机总延误问题,研究了两种周期维护类型对调度的影响.在考虑序列准备时间的前提下,以总延误为目标建立了混合整数规划模型,分析模型结构得到有效不等式加速模型求解效率,同时设计了高效的MSA算法进行求解.本文研究是对调度和维护管理研究的进一步深入和拓展,为企业进行生产调度和维护决策提供了新的思路.在制造业服务化转型的背景下,两种周期维护类型的研究能够帮助企业降低总延误,从而提升顾客满意度和增强企业竞争力.后续研究可以根据问题结构设计出更有效的算法,也可以结合不同维护类型的成本、总维护资源约束等进行综合考虑.

参考文献(References)

[1] 黄龙珠, 贾之阳, 王遵君, 等. 基于退化机器模型的分布式柔性生产系统: 性能分析、任务调度及预测性维护[J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2641-2652. (Huang L Z, Jia Z Y, Wang Z J, et al. Distributed

flexible systems with degenerate machines: Performance analysis, production scheduling, and predictive maintenance[J]. Control and Decision, 2023, 38(9): 2641-2652.)

[2] Huang J Y, Wang L Y, Jiang Z B. A method combining rules with genetic algorithm for minimizing makespan on a batch processing machine with preventive maintenance[J]. International Journal of Production Research, 2020, 58(13): 4086-4102.

[3] Avilés F N, Etchepare R M, Aguayo M M, et al. A mixed-integer programming model for an integrated production planning problem with preventive maintenance in the pulp and paper industry[J]. Engineering Optimization, 2023, 55(8): 1352-1369.

[4] Lu B, Zhou X J. Quality and reliability oriented maintenance for multistage manufacturing systems subject to condition monitoring[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 52: 76-85.

[5] Ghorbani Saber R, Ranjbar M. Minimizing the total tardiness and the total carbon emissions in the permutation flow shop scheduling problem[J]. Computers & Operations Research, 2022, 138: 105604.

[6] 张杨, 但斌, 高华丽. 客户满意度视角下面向产品服务系统订单的调度问题研究[J]. 管理工程学报, 2021, 35(5): 202-211. (Zhang Y, Dan B, Gao H L. The order scheduling problem of product-service system from the perspective of customer satisfaction[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2021, 35(5): 202-211.)

[7] 甘婕, 张文宇, 王磊, 等. 两部件系统视情维修与生产调度的联合优化模型[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1377-1386. (Gan J, Zhang W Y, Wang L, et al. Joint optimization model for condition-based maintenance and production scheduling of two-component systems[J]. Control and Decision, 2021, 36(6): 1377-1386.)

[8] 李佳磊, 顾幸生. 双种群混合遗传算法求解具有预防性维护的分布式柔性作业车间调度问题[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 475-482. (Li J L, Gu X S. Two-population hybrid genetic algorithm for distributed flexible job-shop scheduling problem with preventive maintenance[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 475-482.)

[9] Zhang X Y, Chen L. A general variable neighborhood search algorithm for a parallel-machine scheduling problem considering machine health conditions and preventive maintenance[J]. Computers & Operations Research, 2022, 143: 105738.

[10] Yang W H, Chen L, Dauzère-Pères S. A dynamic optimisation approach for a single machine scheduling problem with machine conditions and maintenance decisions[J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(10): 3047-3062.

[11] Chen L, Wang J F, Yang W H. A single machine

- scheduling problem with machine availability constraints and preventive maintenance[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(9): 2708-2721.
- [12] Liao C J, Chen W J. Single-machine scheduling with periodic maintenance and nonresumable jobs[J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(9): 1335-1347.
- [13] 吴慧, 王冰. 基于预防维护的单机调度问题[J]. *控制与决策*, 2021, 36(2): 395-402.
(Wu H, Wang B. Single-machine scheduling problem with preventative maintenance activities[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(2): 395-402.)
- [14] Krim H, Zufferey N, Potvin J Y, et al. Tabu search for a parallel-machine scheduling problem with periodic maintenance, job rejection and weighted sum of completion times[J]. *Journal of Scheduling*, 2022, 25(1): 89-105.
- [15] 蒋凯丽, 陆志强, 崔维伟. 考虑周期预防性维护的两阶段混合流水线调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(3): 616-623.
(Jiang K L, Lu Z Q, Cui W W. Two-stage hybrid flow shop scheduling with periodic preventive maintenance[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(3): 616-623.)
- [16] Perez-Gonzalez P, Fernandez-Viagas V, Framinan J M. Permutation flowshop scheduling with periodic maintenance and makespan objective[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 143: 106369.
- [17] Allahverdi A. The third comprehensive survey on scheduling problems with setup times/costs[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246(2): 345-378.
- [18] 王建军, 侯晓文, 刘晓盼, 等. 具有安装时间的置换流水线车间组合干扰管理研究[J]. *管理工程学报*, 2020, 34(4): 144-153.
(Wang J J, Hou X W, Liu X P, et al. Combinational disruption management in permutation flow shops with sequence-dependent setup times[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020, 34(4): 144-153.)
- [19] Berthier A, Yalaoui A, Chehade H, et al. Unrelated parallel machines scheduling with dependent setup times in textile industry[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 174: 108736.
- [20] Pacheco J, Ángel-Bello F, Álvarez A. A multi-start tabu search method for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent set-up times[J]. *Journal of Scheduling*, 2013, 16(6): 661-673.
- [21] Nesello V, Subramanian A, Battarra M, et al. Exact solution of the single-machine scheduling problem with periodic maintenances and sequence-dependent setup times[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 266(2): 498-507.
- [22] Avalos-Rosales O, Angel-Bello F, Álvarez A, et al. Including preventive maintenance activities in an unrelated parallel machine environment with dependent setup times[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 123: 364-377.
- [23] 雷德明, 杨海. 求解多目标不相关并行机调度问题的多群体人工蜂群算法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1174-1182.
(Lei D M, Yang H. Multi-colony artificial bee colony algorithm for multi-objective unrelated parallel machine scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1174-1182.)
- [24] Chen X H, Xiao L, Zhang X H. A production scheduling problem considering random failure and imperfect preventive maintenance[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2015, 229(1): 26-35.
- [25] 赵斐, 刘学娟. 考虑不完美维修的定期检测与备件策略联合优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(12): 3201-3214.
(Zhao F, Liu X J. Joint optimization of periodical inspection and spare parts policies considering imperfect maintenance[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(12): 3201-3214.)
- [26] Shen Y L, Zhang X, Shi L Y. Joint optimization of production and maintenance for a serial-parallel hybrid two-stage production system[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 226: 108600.
- [27] Wang T, Baldacci R, Lim A, et al. A branch-and-price algorithm for scheduling of deteriorating jobs and flexible periodic maintenance on a single machine[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 271(3): 826-838.
- [28] Salmasnia A, Mirabadi-Dastjerd D. Joint production and preventive maintenance scheduling for a single degraded machine by considering machine failures[J]. *TOP*, 2017, 25(3): 544-578.
- [29] Du J Z, Leung J Y T. Minimizing total tardiness on one machine is NP-hard[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1990, 15(3): 483-495.
- [30] Avalos-Rosales O, Angel-Bello F, Alvarez A. Efficient metaheuristic algorithm and re-formulations for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence and machine-dependent setup times[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(9): 1705-1718.

作者简介

杨梦月(1994—), 女, 博士生, 从事生产调度与设备维护的研究, E-mail: yangmengyue2016@163.com;

董文杰(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事生产调度、可靠性与维修决策等研究, E-mail: dongwenjie@nuaa.edu.cn;

刘思峰(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统理论与复杂装备研制管理等研究, E-mail: sflu@nuaa.edu.cn.