

文章编号:1006-2467(2021)01-0103-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.173

考虑设备可用性约束的单机调度问题

王金凤, 陈璐, 杨雯慧

(上海交通大学 工业工程与管理系, 上海 200240)

摘要: 针对某转子生产车间设备可靠性低导致的工件加工质量差这一问题, 研究带有设备可用性约束的单机调度问题. 通过设备的可靠性定义其可用性, 而设备可靠性可以通过预防性维护得以恢复. 在建模时考虑了多种不同改进效果的预防性维护, 以最小化总拖期时间为优化目标, 并设计了遗传算法对模型进行求解. 算例结果表明, 所提出的决策模型能够有效应对设备可用性对生产调度带来的影响. 通过敏感性分析为实际车间调度提供决策支持.

关键词: 单机调度; 可用性; 预防性维护; 总拖期; 遗传算法

中图分类号: F 406.2

文献标志码: A

A Single Machine Scheduling Problem Considering Machine Availability Constraints

WANG Jinfeng, CHEN Lu, YANG Wenhui

(Department of Industrial Engineering and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The study described in this paper is derived from a real rotor production workshop where low reliability leads to poor quality of workpieces. A single machine scheduling problem considering machine availability constraints is addressed. The availability is defined by the machine reliability, which can be restored by preventive maintenance. Preventive maintenance with different improvement factors is defined in the mathematical model to minimize the total tardiness. A genetic algorithm is designed to solve the problem. Numerical results show that the proposed approach can effectively deal with the impact of machine availability constraints on production scheduling. Sensitivity analyses provide valuable managerial insights for real workshop scheduling.

Key words: single machine scheduling; availability; preventive maintenance; total tardiness; genetic algorithm

传统调度方法假设设备总是可用的,但在实际生产过程中,许多因素会导致设备不可用,如更换刀具、设备检修、设备突然故障等情况.当这些情况发生时,设备的不可用约束较容易量化,可以通过定义

周期性不可用时段^[1-2],或通过定义设备失效函数定义不可用约束^[3].而当设备中的关键部件发生可靠性退化而影响工件的加工质量、加工速度或加工能耗时,设备同样具有不可用性^[4-5].因此,考虑设备状

收稿日期:2019-06-21

基金项目:国家自然科学基金(51775347)资助项目

作者简介:王金凤(1993-),女,黑龙江省大兴安岭市人,硕士生,主要研究方向为生产调度.

通信作者:陈璐,女,副教授,博士生导师;E-mail:chenlu@sjtu.edu.cn.

态对可用性约束的影响对于生产调度具有重要的现实意义. 然而, 如何量化此类设备的可用性约束是一个很大的挑战. 在现有文献中, 没有统一的方法来量化设备状态对可用性的影响, 应用最广泛的是利用可靠性来衡量设备状态, 进而对设备的可用性进行量化^[6-7].

在现有文献中, 设备不可用性通常分为单周期不可用、多周期不可用、柔性不可用 3 类, 多数是以维护为代表的操作造成的设备不可用. Lee^[8]作为开创者, 首次在生产调度问题中考虑设备不可用, 考虑单次已知开始时间和持续时间的不可用间隔. Kubzin 等^[9]在考虑设备单周期不可用时, 假设其持续时间依赖于启动时间, 具有可控长度. 但实际上, 单周期不可用是对实际生产情况过分简化的结果, 与现实情况存在较大差异. Yu 等^[1]在此类问题中引入开始时间和持续时间都已知的多周期不可用间隔. 蒋凯丽等^[2]在模型中考虑具有时间窗的多周期不可用间隔. 但由于影响间隔周期长短的因素较多, 难以准确计算. 当周期过短时会造成资源浪费, 而周期过长又会导致设备失效率增加^[10]. Ahmadi 等^[11]引入基于状态的不可用间隔, 并通过对比实验得出采用基于状态的不可用间隔更具有现实应用意义的结论. Yildirim 等^[12]在研究中提出, 当可靠性低于临界阈值时, 需引入单一级别的不可用间隔. Chen 等^[13]在此基础上引入柔性不可用间隔, 按照其效果分为 3 个级别: ① 将设备恢复如新; ② 改善部分设备状态; ③ 仅将设备恢复到失效前的工作状态. 但在上述研究中, 设备失效并没有被考虑在模型中. 丁珮雯等^[14]和 Salmasnia 等^[3]在考虑设备状态的单机调度问题研究中, 也引入了柔性不可用. 但以上研究均未考虑由可靠性过低而引发的设备不可用问题^[15].

本文对单机调度问题进行了研究, 同时考虑设

备失效和设备可靠性对可用性的影响, 选用不同类型的维护作业对设备状态进行恢复, 建立以最小化总拖期时间为优化目标的数学规划模型, 并设计开发了遗传算法(GA)对问题进行求解, 最后利用算例分析对算法的有效性 & 效率进行验证.

1 设备可用性的定义

在可靠性、维修性术语中, 将可用性定义为在要求的外部资源得到保证的前提下, 设备在规定的条件下和规定的时间区间内处于可执行规定功能状态的能力. 利用设备可靠性对“可执行规定功能状态的能力”进行量化. 假设设备故障函数服从 Weibull 分布, 可以表示为^[16]

$$\rho(u) = \lambda \beta u^{\beta-1} \quad (1)$$

式中: λ 和 β 分别为 Weibull 分布的比例参数和形状参数; u 为设备役龄. 当 $\beta > 1$ 时, 该过程为非齐次泊松分布过程(NHPP), 设备故障率随时间的增长而逐渐增大. 在此过程中, 设备可靠性 R 可表示为

$$R = e^{-\int_0^u \rho(u) du} = e^{-\lambda(u)^\beta} \quad (2)$$

本文提出两种等级的预防性维护策略: 不完全维护(IPM)和完全维护(PPM). IPM 仅改善部分设备状态, 而 PPM 将设备状态恢复如新. 设备可靠性随加工时间的演化过程如图 1 所示. 可靠性阈值 δ 作为衡量设备是否可用的标准, 假设当设备可靠性介于 $[\delta, 1]$ 时, 设备可用; 而介于 $[0, \delta)$ 时, 设备不可用. 由图 1 可知, 工件 4 和工件 7 的加工将导致设备可靠性超过临界阈值, 因此, 必须在这两个工件开始加工之前进行维护. 此时, 需要在维护时间和维护效果两者之间进行权衡, 确定维护级别(IPM 或 PPM), 即选择 IPM 所需维护时间较短, 但可靠性改善程度有限, 而选择 PPM 可以使设备修复如新, 但是所需维护时间较长.

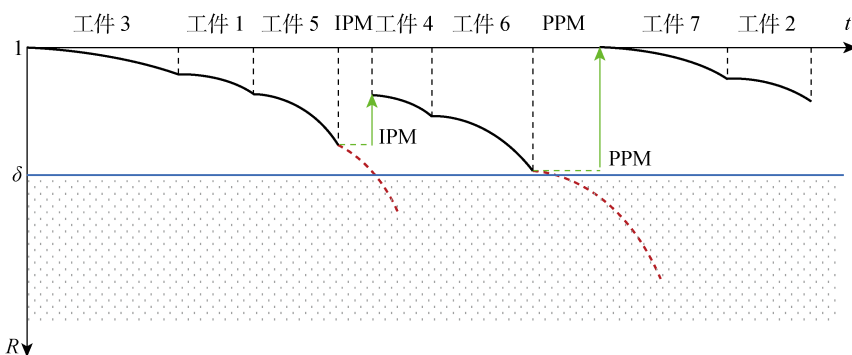


图 1 设备可靠性和可用性的关系

Fig. 1 Machine reliability versus availability

2 模型的建立

在考虑设备状态的单机调度问题中,需要对工件集合 N 中的工件进行排序,目标是 최소화总拖期时间.两个相邻工件中可以插入一次 IPM 或 PPM 以改善设备状态.模型假设包括:① 在 0 时刻,所有工件均可加工;② 在加工前,设备役龄为 0;③ 设备在同一位置只能加工一个工件,且一个工件只需加工一次;④ 忽略设备在加工不同工件之间的准备时间;⑤ 在加工过程中,设备发生故障修复后,被中断的工件可以继续加工,不需要额外的加工时间.

基于可靠性理论中的最优维护间隔(T^*),设备可靠性的临界阈值可表示为

$$\delta = e^{-\lambda(T^*)^\beta} = e^{-\frac{t_{\text{PPM}}}{t_{\text{F}}(\beta-1)}} \quad (3)$$

基于 NHPP 假设,工位 j 上的累积故障次数可表示为

$$M_j = \int_{u_{\text{bl}}}^{u_{\text{tj}}} \rho(u) du = \int_{u_{\text{bl}}}^{u_{\text{tj}}} \lambda \beta u^{\beta-1} du = \lambda [(u_{\text{tj}})^\beta - (u_{\text{bl}})^\beta] \quad (4)$$

式中: $u_{\text{bl}}=0$.

模型的决策变量为

$$\begin{aligned} x_{ij} &= \begin{cases} 1, & \text{工件 } i \text{ 在第 } j \text{ 个工位上加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ y_j &= \begin{cases} 1, & \text{IPM 在第 } j \text{ 个工位上进行} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ z_j &= \begin{cases} 1, & \text{PPM 在第 } j \text{ 个工位上进行} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \end{aligned}$$

由此建立数学模型如下:

$$\min \sum_{i \in N} \max \{c_i - d_i, 0\} \quad (5)$$

s. t.

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in N \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$t_{j+1}^s \geq x_{ij} c_i, \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in N \quad (8)$$

$$c_i + K(1 - x_{ij}) \geq t_j^s + p_i + t_{\text{IPM}} y_j + t_{\text{PPM}} z_j + t_{\text{F}}(M_j - M_{j-1}) \quad (9)$$

$$\forall i \in N, \forall j \in N$$

$$u_{bj} = u_{(j-1)}(1 - \theta y_j - z_j), \quad \forall j \in N \quad (10)$$

$$u_{tj} \geq u_{bj} + x_{ij} p_i, \quad \forall j \in N \quad (11)$$

$$e^{-\lambda[(u_{tj})^\beta - (u_{bj})^\beta]} \geq \delta, \quad j \in N \quad (12)$$

$$y_j + z_j \leq 1, \quad \forall j \in N \quad (13)$$

$$x_{ij}, y_j, z_j \in \{0, 1\}, \quad t_j^s, c_i \geq 0, \quad \forall i \in N, \forall j \in N \quad (14)$$

式中: K 为一个极大的正数; i 为工件序号, $i \in N$; j 为工位序号, $j \in N$; p_i 为工件 i 的加工时间, $i \in N$; d_i 为工件 i 的交货期, $i \in N$; t_{IPM} 为 IPM 的持续时间; t_{PPM} 为 PPM 的持续时间; t_{F} 为设备失效的惩罚时间; u_{bj} 为设备在工位 j 上的初始役龄, $j \in N$; u_{tj} 为设备在工位 j 上结束加工时的役龄, $j \in N$; θ 为当采取 IPM 时,设备状态的改善因子, $\theta \in (0, 1)$; R_j 为设备在工位 j 上结束加工时的可靠性, $j \in N$; t_j^s 为设备在第 j 个工位上的开始时间, $j \in N$; c_i 为工件 i 的完工时间, $i \in N$.

目标函数(5)为最小化总拖期时间;约束(6)和(7)保证设备在一个工位只能加工一个工件,而且每个工件只需加工一次;约束(8)明确了工件的完工时间与设备在工位上的开始时间之间的关系,其中设备在第 1 个工位的开始时间为 $t_1^s=0$;约束(9)计算了两个相邻工位的时间,其中包括工件加工时间、预防性维护时间和设备失效惩罚时间;约束(10)和(11)表示了设备的役龄,其中 $u_{t0}=0$;约束(12)确保设备可靠性高于阈值;约束(13)保证了每个工位至多进行一种级别的预防性维护;约束(14)定义模型中各个变量的取值范围.

3 算法设计

考虑设备状态的单机调度问题已被学者证明是 NP 难问题^[17],引入计算可靠性的非线性约束(约束 12),增加了求解难度. Lingo 等商业求解器只能对有限规模的问题进行计算.因此,研究采用更为高效的遗传算法进行求解,并通过 C++ 语言实现.

3.1 编码与解码

染色体对工件加工序列进行编码,图 1 中算例的编码染色体如图 2 所示.

3	1	5	4	6	7	2
---	---	---	---	---	---	---

图 2 染色体编码方式

Fig. 2 Chromosome coding

通过对染色体进行解码,确定维护位置和维护方式,获得一个完整的调度策略,其解码算法如算法 1 所示.

算法 1 解码

1. 已知各工位 j 上的待加工工件的序号、加工时间以及 δ .
2. 根据式(2),计算工位 j 在完成工件加工后的设备可靠性 R .

3. 若 $R \geq \delta$, 则 $y_j = z_j = 0$, 即表示不需要任何类型的维护。
4. 否则, 令 $y_j = 1$, 即假设在工位 j 上进行 IPM, 并计算该工位在完成工件加工后的设备可靠性 R' 。
5. 若 $R' \geq \delta$, 则 $y_j = 1, z_j = 0$, 即在工位 j 上进行 IPM。
6. 否则, $y_j = 0, z_j = 1$, 即在工位 j 上进行 PPM。
7. $j++$, 若 $j \leq |N|$, 则返回步骤 2; 否则, 继续步骤 8。
8. 将各工位上的维护操作和工件序列结合, 获得完整的调度方案。

利用上述算法对图 2 中的染色体编码进行解码, 获得一个完整调度方案, 如图 3 所示。

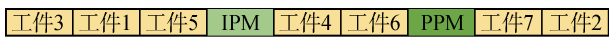


图 3 完整调度方案

Fig. 3 A complete schedule for sample problem

3.2 种群初始化

种群规模的大小会影响算法的性能及效率, 所提算法中, 种群规模 $N_{\text{pop}} = 50$ 。首先, 采用完全随机的方式生成 45 个不同的个体作为初始解, 继而利用最早交货期启发式 (EDD) 规则生成 5 个较好的初始解, 这样既保证了初始种群的多样性, 同时能提高算法的收敛速度。

3.3 评价与选择

模型的目标函数为最小化总拖期时间, 因此采用 $f_i = 1 / \sum_{i=1}^n \max\{c_i - d_i, 0\}$ 作为适应度函数。已知各染色体的适应度 f , 通过轮盘赌方式选择父代, 即第 i 个染色体被选作父代的概率为 $Q_i = f_i / \sum_{i=1}^{N_{\text{pop}}} f_i$, 通过此概率选择父代进行交叉变异。在此过程中, 为了保证最优染色体不丢失, 采用精英策略, 用种群中最优的个体代替最差的个体。

3.4 交叉与变异

考虑到染色体代表个体的可行性, 故对实数编码的工序染色体采用两点式交叉方法。交叉概率范围一般为 0.4~0.9。同样, 为保证染色体的可行性, 对工序染色体采用换位变异方式。在变异过程中, 引入 Emmons 规则^[18]确定工件的优先关系, 缩小搜索空间^[19]。

设 B_i 和 A_i 分别为在工件 i 加工前和加工后的工件集合, 记为 $B_i \rightarrow i$ 和 $i \rightarrow A_i$ 。若 $j < k$ 则表示工件 j 和 k 满足下面两种情形之一: ① $p_j < p_k$; ② $p_j =$

p_k 且 $d_j \leq d_k$ 。Emmons 规则如下:

规则 1 对于任意两个工件 j 和 k , 且 $j < k$, 如果 $d_j \leq \max\{\sum_{i \in B_k} p_i + p_k, d_k\}$, 那么在最优解中工件 j 在工件 k 之前加工, 即 $j \rightarrow k$ 。

规则 2 对于任意两个工件 j 和 k , 且 $j < k$, 如果 ① $d_j > \max\{\sum_{i \in B_k} p_i + p_k, d_k\}$, 且 ② $d_j + p_j \geq \sum_{i \in A'_k} p_i$, 其中 $A'_k = \{i: i \notin A_k\}$, 那么在最优解中工件 k 在工件 j 之前加工, 即 $k \rightarrow j$ 。

变异的发生需满足上述优先规则, 定义 p_m 为变异概率, 算法 2 详细描述了变异过程。

算法 2 变异

1. 已知各工位 j 上待加工工件的序号 i 、加工时间 p_i 和交货期 d_i ;
2. 对于任意染色体, 随机生成 (0,1) 之间的数 a ;
3. 若 $a > p_m$, 则该染色体不进行变异, $i++$, 返回 2;
4. 否则, 随机生成两个满足条件 $j < k$ 的工件序号 j 和 k ;
5. 若 $j \rightarrow k$, 且 $d_j \leq \max\{\sum_{i \in B_k} p_i + p_k, d_k\}$, 则该染色体不进行变异;
6. 若 $j \rightarrow k$, 且 $d_j + p_j \geq \sum_{i \in A'_k} p_i$, 则交换该染色体中工件 j 和 k 的位置;
7. 若 $k \rightarrow j$, 且 $d_j \leq \max\{\sum_{i \in B_k} p_i + p_k, d_k\}$, 则交换该染色体中工件 j 和 k 的位置;
8. 若 $k \rightarrow j$, 且 $d_j + p_j \geq \sum_{i \in A'_k} p_i$, 则该染色体不进行变异。

3.5 算法流程

完整算法流程可见算法 3。

算法 3 遗传算法

1. 已知算法参数 $N_{\text{pop}}, G_{\text{max}}, p_c$ 和 p_m 。
2. 初始化第 1 代种群, 解码后计算适应度值, 得到最优个体 π^* 和最差个体 ω , 并将 π^* 的染色体序列复制给 ω 。
3. 基于轮盘赌选择法在种群中选取两条染色体作为父代。
4. 对父代进行交叉操作, 得到子代。
5. 对子代进行突变操作, 得到新的子代。
6. 对新的子代染色体解码后, 计算其适应度值, 得

到当前代最优个体 π ,最差个体 ω ,将 π 的染色体序列复制给 ω ,并更新全局最优个体 π^* .

7. $g++$,若 $g\leq G_{\max}$,则返回 3;否则,继续 8.

8. 返回最优个体 π^* .

其中: g 为当前代数; G_{\max} 为最大迭代次数; p_c 为交叉概率; π^* 为最优个体; π 为当前代最优个体; ω 为当前代最差个体.

4 算例验证与分析

为验证所提模型和算法的有效性,现对某转子生产车间的数据进行实证分析.选择转子车间内的 CNS 镗床作为研究对象,根据从工厂获得的数据信息生成若干实例.对于转子 i ,设其加工时长 p_i 服从 $[20,30]$ h 区间内的均匀分布.交货期 d_i 服从 $[(1-J-V/2)\sum_{i\in N} p_i, (1-J+V/2)\sum_{i\in N} p_i]$ h 区间内的均匀分布.其中,交货期的紧度参数 $J=0.1$;范围参数 $V=0.5$.设备的故障函数服从 Weibull 分布, $\beta=3,\lambda=100,\delta=0.78$.各维护作业时长分别为 $t_{\text{IPM}}=2\text{ h},t_{\text{PPM}}=5\text{ h},t_{\text{F}}=10\text{ h}$.IPM 对设备状态的改善因子 $\theta=0.4$.

4.1 小规模算例验证

为证明遗传算法的有效性,将遗传算法所求的解与商业求解器 Lingo 所求的最优解进行比较.考虑 8 种不同规模的问题,分别在每种规模下生成 10 个算例.设置 Lingo 求解时限为 5 400 s.两种解的比较如表 1 所示.其中, O_{Lin} 和 O_{GA} 分别为 Lingo 求解器和 GA 所求解的目标值; t_{CPU} 为运算时间.

由表 1 可知,在小于 8 个工件的算例中,GA 不仅得到了最优解,而且在求解时间上明显优于 Lingo.当工件数量增加时,Lingo 求解器无法在限定的

时间内得到最优解,此时 GA 得到的最优解优于 Lingo 在规定时间内得到的最优解.因此,遗传算法的有效性得以验证.

表 1 小规模算例实验结果
Tab. 1 Results of small-scale instants

$ N $	Lingo		GA	
	O_{Lin}/h	t_{CPU}/s	O_{GA}/h	t_{CPU}/s
3	0	1.32	0	1.35
4	0	12.93	0	1.40
5	0	68.70	0	1.44
6	0	421.49	0	1.57
7	2.33	1 394.61	0	1.65
8	6.13	5 057.13	0	1.75
9	9.34	5 400.00	0	1.84
10	15.90	5 400.00	0	1.91

4.2 中、大规模算例验证

为了评估不同类型的维护作业对调度策略的影响,首先对 GA 进行修改,得到以下两种算法:

(1) GA-IPM:对任意一个工位 j ,令 $z_j=0$,此时算法只考虑 IPM.

(2) GA-PPM:对任意一个工位 j ,令 $y_j=0$,此时算法只考虑 PPM.

将第 3 节中提出的 GA 所求的解作为基准解,分别计算 GA-IPM 和 GA-PPM 所求解的偏差:

$$D_{\text{IPM}} = \frac{O_{\text{IPM}} - O_{\text{TPM}}}{O_{\text{TPM}}} \tag{15}$$

$$D_{\text{PPM}} = \frac{O_{\text{PPM}} - O_{\text{TPM}}}{O_{\text{TPM}}} \tag{16}$$

式中: $O_{\text{TPM}}, O_{\text{IPM}}$ 和 O_{PPM} 分别为 GA、GA-IPM 和 GA-PPM 所求解的目标值,其结果如表 2 所示.

表 2 不同 GA 在中、大规模算例中的表现
Tab. 2 Performance of different GAs on medium and large scales

$ N $	GA		GA-IPM			GA-PPM		
	O_{TPM}/h	t_{CPU}/s	O_{IPM}/h	t_{CPU}/s	$D_{\text{IPM}}/\%$	O_{PPM}/h	t_{CPU}/s	$D_{\text{PPM}}/\%$
20	8	3.21	21	3.01	162.50	14	2.87	75.00
30	17	4.64	36	4.08	111.76	26	3.91	52.94
40	94	5.88	140	5.04	48.94	137	4.86	45.74
50	237	6.72	335	6.35	41.35	308	5.79	29.96
60	295	6.94	407	6.94	37.97	320	6.93	8.47
70	470	8.35	603	8.14	28.30	499	7.31	6.17
80	711	9.21	924	9.41	29.96	742	9.45	4.36
90	1 142	10.37	1 458	9.88	27.67	1 198	9.53	4.90
100	1 445	10.28	1 793	10.56	24.08	1 511	10.78	4.57

由表 2 可知,同时考虑两种维护作业对减少总拖期时间具有一定的优越性,这种优越性随问题规模的增大而减小,最终趋于稳定,相比于 GA-IPM 和 GA-PPM 的改善分别维持在 25%和 5%左右. 另外,与 GA-IPM 相比,GA-PPM 表现更优. 由此可见,虽然 PPM 耗时长,但能更显著降低设备的失效风险,从而达到缩短总拖期时间的效果.

4.3 敏感性分析

下文将分别针对可靠性阈值和设备状态改善因子进行敏感性分析.

4.3.1 可靠性阈值对调度决策的影响 考虑 3 个级别的可靠性阈值,分别为 $\delta = 0.5, \delta = 0.6, \delta = 0.78$. 其中, $\delta = 0.78$ 是通过式(3)计算出来的临界阈值. 在其他参数设置保持不变的情况下,对比不同可靠性阈值对调度决策的影响,如图 4 和 5 所示. 其中: t_w 为总拖期时间; L 为维护次数.

由图 4 可知,随着可靠性阈值的增加,总拖期时间增大. 问题规模越大,这种变化趋势变得更加明

显. 造成这种现象的原因为,随着可靠性阈值的增加,设备需要更频繁的维护作业,使得设备可靠性能够保持在阈值之上. 而当维护作业时间增加时,总拖期时间也增加. 然而,当设备可靠性阈值降低时,设备在加工时的状态较差,将会导致加工工件的质量降低.

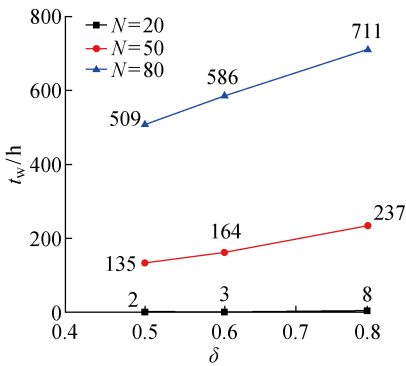


图 4 不同可靠性阈值下的总拖期时间
Fig. 4 Total tardiness at different reliability thresholds

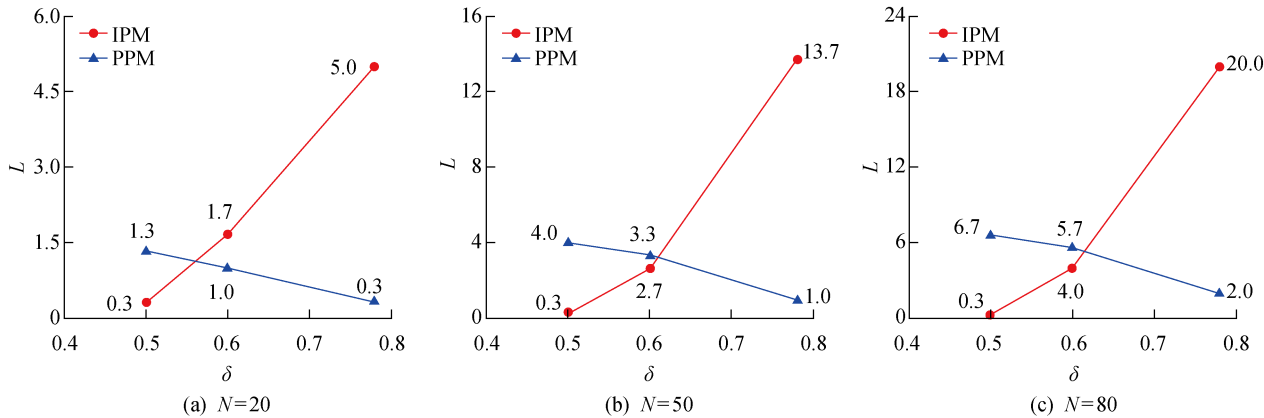


图 5 不同可靠性阈值下的维护次数
Fig. 5 Times of maintenance at different reliability thresholds

由图 5 可知,当可靠性阈值增加时,采用 IPM 的次数增加,采用 PPM 的次数减少. 原因是 IPM 能够以较短的耗时将设备可靠性恢复到阈值之上,而 PPM 则在恢复效率(改善效果与维护时长的比值)上稍显劣势. 由此可见,在可靠性阈值增加时,调度决策更加侧重维护的效率.

4.3.2 状态改善因子对调度决策的影响 考虑 3 种不同程度的状态改善因子,分别是 $\theta = 0.3, \theta = 0.4$, 和 $\theta = 0.5$. 在其他参数设置保持不变的情况下,对比不同状态改善因子对调度决策的影响,如图 6 和 7 所示.

由图 6 可知,当改善因子增加时,总拖期时间相应降低,这种变化趋势随着问题规模的增大而变得

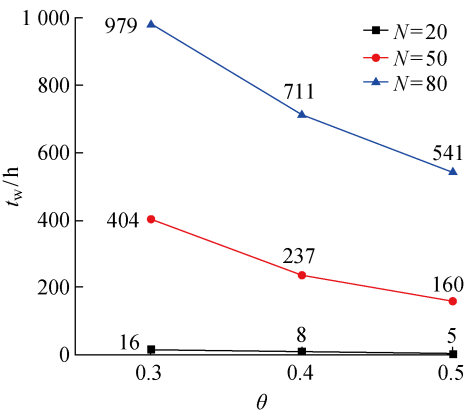


图 6 不同改善因子下总拖期时间的变化曲线
Fig. 6 Total tardiness with different improvement factors

更加明显.这是由于在 IPM 耗时不变的前提下,随着改善因子的增加,IPM 的效率提高,节省了维护时间,从而减少了总拖期时间.

由图 7 可知,当改善因子增加时,采用 IPM 的次数增加,PPM 的次数减少至 0.

以上结果表明,在实际生产调度决策时,可以通过提高维护效率,提高可靠性改善效果来降低生产交付的压力.

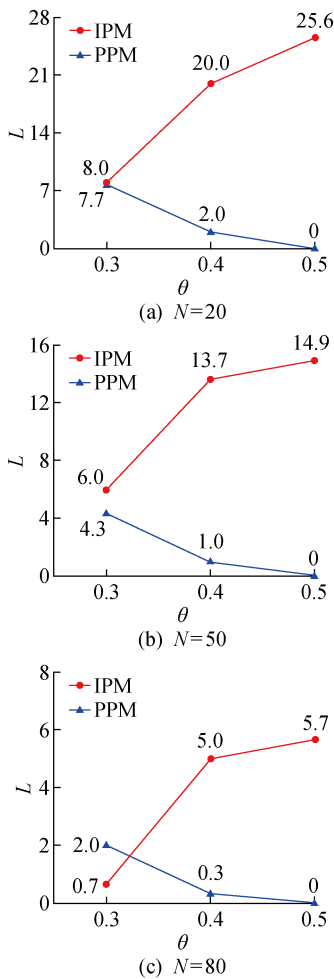


图 7 不同改善因子下的维护次数
Fig. 7 Times of maintenance with different improvement factors

5 结语

本文研究了某转子车间内单台设备的生产调度问题,考虑设备可用性约束,以及不同级别的维护作业,优化目标为最小化总拖期时间.优化模型中通过可靠性来表征设备的可用性约束,减少当设备可靠性下降时对加工质量的影响.设计开发了遗传算法对模型进行优化求解.实验结果表明,所提方法能够有效量化设备可用性对生产调度的影响,并能够合

理地选择不同类型的维护作业,以减少总拖期时间.灵敏度分析为车间内实际生产调度提供决策支持,具有实际应用价值.后续研究将该方法应用于更复杂的生产环境中,如并行机、流水线生产等.

参考文献:

[1] YU X Y, ZHANG Y L, STEINER G. Single-machine scheduling with periodic maintenance to minimize makespan revisited[J]. **Journal of Scheduling**, 2014, 17(3): 263-270.

[2] 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 Kaili, LU Zhiqiang, CUI Weiwei. Two-stage hybrid flow shop scheduling with periodic preventive maintenance[J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2017, 23(3): 616-623.

[3] 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.

[4] DIEULLE L, BÉRENGUER C, GRALL A, et al. Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system[J]. **European Journal of Operational Research**, 2003, 150(2): 451-461.

[5] PANDEY D, KULKARNI M S, VRAT P. A methodology for joint optimization for maintenance planning, process quality and production scheduling[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2011, 61(4): 1098-1106.

[6] LIU Q M, DONG M, CHEN F F, et al. Single-machine-based joint optimization of predictive maintenance planning and production scheduling[J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 2019, 55: 173-182.

[7] 陶辛阳, 夏唐斌, 奚立峰. 基于健康指数的预防性维护与多目标生产调度联合优化建模[J]. **上海交通大学学报**, 2014, 48(8): 1170-1174.
TAO Xinyang, XIA Tangbin, XI Lifeng. Health-index-based joint optimization of preventive maintenance and multi-attribute production scheduling[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2014, 48(8): 1170-1174.

[8] LEE C Y. Machine scheduling with an availability constraint[J]. **Journal of Global Optimization**, 1996, 9(3/4): 395-416.

[9] KUBZIN M A, STRUSEVICH V A. Planning machine maintenance in two-machine shop scheduling[J]. **Operations Research**, 2006, 54(4): 789-800.

- [10] 廖雯竹, 潘尔顺, 奚立峰. 基于设备可靠性的动态预防维护策略[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(8): 1332-1336.
- LIAO Wenzhu, PAN Ershun, XI Lifeng. Research on dynamic predictive maintenance policy based on system reliability[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2009, 43(8): 1332-1336.
- [11] AHMADI R, NEWBY M. Maintenance scheduling of a manufacturing system subject to deterioration [J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2011, 96(10): 1411-1420.
- [12] YILDIRIM M B, NEZAMI F G. Integrated maintenance and production planning with energy consumption and minimal repair[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014, 74(9/10/11/12): 1419-1430.
- [13] 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.
- [14] 丁珮雯, 蒋祖华, 胡家文, 等. 带有交货期时间窗的生产与维护联合调度优化[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 524-530.
- DING Peiwen, JIANG Zuhua, HU Jiawen, *et al.* Integrating production scheduling and preventive maintenance for a single machine with due window[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2015, 49(4): 524-530.
- [15] 郝虹斐, 郭伟, 桂林, 等. 非完美维修情境下的预防性维修多目标决策模型[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(5): 518-524.
- HAO Hongfei, GUO Wei, GUI Lin, *et al.* A multi-objective preventive maintenance decision-making model for imperfect repair process[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2018, 52(5): 518-524.
- [16] ASCHER H, FEINGOLD H. Repairable systems reliability modeling, inference, misconceptions and their causes [J]. **Microelectronics Reliability**, 1986, 26(5): 993.
- [17] SCHMIDT G. Scheduling with limited machine availability[J]. **European Journal of Operational Research**, 2000, 121(1): 1-15.
- [18] EMMONS H. One-machine sequencing to minimize certain functions of job tardiness[J]. **Operations Research**, 1969, 17(4): 701-715.
- [19] KANET J J. New precedence theorems for one-machine weighted tardiness[J]. **Mathematics of Operations Research**, 2007, 32(3): 579-588.
- (本文编辑: 石易文)