

文章编号:1008-1542(2020)03-0201-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



考虑周期性维护与工时恶化的单机调度研究

王 昕, 吴 晓, 郭 鹏, 袁雨阳, 裴 霞

(西南交通大学机械工程学院, 四川成都 610031)

摘 要:机械加工的“个性化定制”和“多品种小批量生产”需求与日俱增,生产的高度灵活性和设备维护的必要性给调度工作带来了巨大挑战,实际生产伴随的工时恶化效应使得调度问题更加复杂。为了解决周期性维护策略下考虑工时恶化的单机调度和维护决策问题,利用分段线性函数对工时恶化进行描述,分别基于固定周期维护与柔性周期维护的特点,以最小化最大拖期成本和维护成本为目标建立模型,通过数值实验和调参分析,确定了维护决策的关键和非关键因素。结果表明:柔性周期维护没有批次空闲,目标函数值随 β/α 比值的增大呈阶梯增长状,能实现成本的“自适应”调节,较固定周期维护有显著优势。构建生产与维护的联合调度模型,可实现维护策略的优劣对比和生产与维护的联合决策,降低企业生产和维护的运营成本。

关键词:生产管理;固定周期维护;柔性周期维护;工时恶化;单机调度;整数规划模型

中图分类号:TH186

文献标识码:A

doi:10.7535/hbkd.2020yx03001

Study on single machine scheduling with time-based maintenance and step-deteriorating jobs

WANG Xin, WU Xiao, GUO Peng, YUAN Yuyang, PEI Xia

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Nowadays, the demand of “personalization” and “multiple varieties and small batch production” in machining is increasing dramatically. The great challenges of scheduling are brought about by the high flexibility of production and the necessity of equipment maintenance, and the scheduling problems are more complex due to the deteriorating effect of the production process. In order to solve the single machine scheduling problem with step-deteriorating jobs and fixed periodic maintenance strategy, the processing time was described by the piecewise linear function. Based on the properties of the periodic maintenance and the flexible periodic maintenance, two scheduling models were established respectively to minimize the tardiness penalties and maintenance cost. According to the numerical experiments and parameter analysis, the key factors and non-key factors of maintenance decision were determined. The result shows that flexible periodic maintenance has no idle time between

收稿日期:2020-04-22;修回日期:2020-05-30;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金(51405403);中央高校基本科研业务费专项资金(2682018CX09)

第一作者简介:王 昕(1994—),女,四川达州人,硕士研究生,主要从事生产调度方面的研究。

通讯作者:郭 鹏副教授。E-mail:pengguo318@swjtu.edu.cn

王昕,吴晓,郭鹏,等.考虑周期性维护与工时恶化的单机调度研究[J].河北科技大学学报,2020,41(3):201-209.

WANG Xin, WU Xiao, GUO Peng, et al. Study on single machine scheduling with time-based maintenance and step-deteriorating jobs[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2020, 41(3): 201-209.

adjacent batches. The objective function value increases step by step with the increase of ratio, which can realize “adaptive” adjustment of cost and has significant advantages over fixed cycle maintenance. The construction of a joint scheduling model of production and maintenance can realize the comparison of the advantages and disadvantages of maintenance strategies and the joint decision of production and maintenance, and reduce the operating cost of enterprise production and maintenance.

Keywords: production management; periodic maintenance; flexible periodic maintenance; deteriorating job; single machine scheduling; integer programming model

确定性调度研究假设作业处理时间已知且恒定^[1],但实际生产过程中伴随着设备性能的下降,后续作业的加工时间将会不断增加。针对此类加工时间可变的情况,GUPTA等^[2]提出具有开工时刻依赖性恶化的生产调度模型。自此以后工时具有恶化效应的生产过程受到了学术界的广泛关注^[3-5]。以最小化某一目标建立模型,主要考虑2种类型的线性恶化效应: $p_j = a_j + b_j s_j$ 和 $p_j = b_j s_j (s_j > 0)$,其中 p_j, a_j, b_j, s_j 分别为实际加工时间、基本加工时间、恶化率和开工时间,前者每个作业存在基本处理时间,后者实际加工时间只取决于开工时间。为了进一步扩展恶化效应的适用范围,KUNNATHUR等^[6]使用分段函数描述恶化效应,指出在给定恶化工期 h_j 的情况下,工件实际加工处理时间为其相对于恶化工期等待时间的线性函数。此外,JAFARI等^[7]对考虑分段线性恶化效应的单机调度问题进行了研究,GUO等^[8]研究了具有工时阶梯恶化效应的并行机调度问题。

为提升设备性能、延长设备寿命^[9],需定期或不定期将设备从生产线脱离并进行预防性维护,维护活动会占用生产时间,降低设备可用性。将维护视为不可用约束有2种情况:一是不可用时间间隔已知且固定,二是不可用时间间隔柔性且可变^[10]。研究人员以完成时间为目标,从单机环境到流水车间加工环境,先后研究了考虑固定周期维护的调度问题^[11-14]。DONG等^[15]对具有随机、结构和经济3种相依性的并行冗余系统的最优维护周期进行了探讨。在柔性预防性维护中,通常假设2次连续的维护间隔不能超过某一最大值。CHEN^[16]以最小化最大完工时间为目标,研究了考虑柔性时间窗维护的单机调度问题。CUI等^[17]考虑工件到达时间,对具有柔性周期维护不可用时间约束的单机调度问题进行了拓展研究。

同时优化生产调度和维护决策能有效提高生产效率,越来越多的学者注意到两者的耦合关系,将恶化效应和维护不可用时间考虑到生产调度研究中^[18-20]。WANG等^[21]将柔性周期维护 and 恶化效应同时考虑进单机调度问题,以最小化完工时间为目标构建数学模型并设计算法进行了求解。WOO等^[22]使用遗传算法解决了考虑柔性维护活动和工时恶化效应的并行机调度问题。这些考虑维护需求的生产调度问题研究都采用一般线性函数对工时恶化效应进行描述,尚未使用分段线性函数描述工时恶化。本文基于复杂生产系统的可分解性,以生产调度中最简单的单机环境为基础,从机械加工生产实际情况出发,使用分段线性函数描述工时恶化,构建生产与维护的联合调度模型,通过数值实验分析,实现维护策略的优劣对比和生产与维护的联合决策。

1 问题描述

机械加工设备性能因物理磨损及热效应不断下降,需在特定时间内进行预防性维护,以保证正常生产,最长运行时间由规定的可靠度阈值转化得到^[23]。针对最长运行时间的约束,存在固定周期维护(PM)和柔性周期维护(flexible periodic maintenance, FPM)2种周期性维护策略,图1和图2分别为2种维护策略下的作业调度情况。固定周期维护的周期时间限制基于自然日历时间,维护时间点确定,生产部门在时间间隔 T 内安排生产;柔性周期维护的周期时间基于设备运行时间,维护时间点不确定,维护部门保证2次维护时间间隔不超过 T ,生产部门根据订单和维护情况安排生产。

工件集合为 $J_j \in \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$,基本加工时间 a_j 、交货期 d_j 、维护周期限制 T 及预防性维护时间均已知。所有工件在0时刻到达且只能被加工一次,同一时刻只能加工一个工件。工件加工和设备维护不允许中断,初始设备全新,预防性维护后恢复全新,维护和生产相关的资源充足,忽略准备时间。基于PM或FPM策略,以最小化拖期成本和维护成本为目标,决策生产与维护。

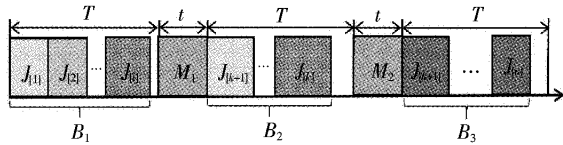


图1 固定周期维护(PM)下的作业调度情况
Fig.1 Scheduling of jobs under periodic maintenance

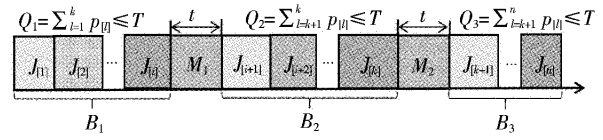


图2 柔性周期维护(FPM)下的作业调度情况
Fig.2 Scheduling of jobs under flexible periodic maintenance

考虑设备性能衰退造成的工时恶化效应,图3为设备的3个作业阶段。1)正常作业阶段:设备性能良好,可忽略磨损对工件加工的影响;2)恶化作业阶段:设备保持加工能力,但工件加工时间增加;3)失效阶段:出现异响、扭矩数据异常等情况,不能加工出合格产品。

对图3分析可知,机械加工中的恶化惩罚时间不仅与开工时刻有关,还与设备恶化系数及工件基本加工时间有关。一般线性恶化在加工开始时就出现恶化惩罚,不符合生产实际。结合机加工设备3个阶段的特点,采用分段线性函数描述工时恶化,函数表达式如下:

$$p_j = \begin{cases} a_j, & s_j \leq h, \\ a_j + b_j \times (s_j - h), & s_j > h, \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_j 为实际加工时间; a_j 为基本加工时间; b_j 为工件的恶化率; h 为恶化工期,对应设备正常作业阶段时间。其中 $a_i/b_i = a_j/b_j = \sigma, \forall i, j \in J, \sigma$ 为恶化系数。

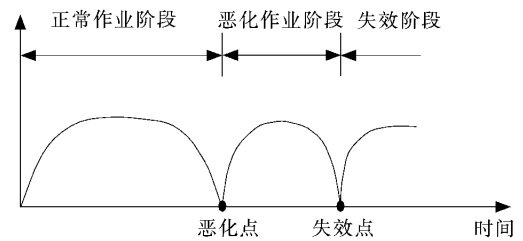


图3 设备的3个作业阶段
Fig.3 Three working stages of the equipment

2 数学模型

2.1 固定周期维护模型的建立

通过位置参数建立各个变量的联系。 n 个工件重新排序后有 l 个位置,故 $l \in \{1, 2, \dots, n\}$,基于自然时间设置变量 e_l ,表示 l 位工件距离上次维护的时间距离,其中 $e_1 = 0$ 。其他符号及定义如表1所示。

表1 模型涉及的符号及定义

Tab.1 Symbols and definitions in the model

符号	定义	符号	定义	符号	定义
ω_1, ω_2	生产、维护部门权重系数	α, β	单位时间拖期成本、维护成本	h, σ	恶化工期、恶化系数
t, T	维护时间、维护周期限值	j, J_j	工件初始索引、第 j 个工件	l	位置索引,第 l 个处理位置
J_l	第 l 个位置处理的工件	a_j	工件 J_j 的基本加工时间	a_l	第 l 位工件的基本加工时间
p_l	第 l 位工件的实际加工时间	d_j	工件 J_j 的交货期	d_l	第 l 位工件的交货期
b_j	工件 J_j 的恶化率	b_l	第 l 位工件的恶化率	D_l	第 l 位工件产生的拖期惩罚
s_l	第 l 位工件的开工时间	c_l	第 l 位工件的完工时间	N_l	第 l 位工件前产生的维护次数
x_{jl}	J_j 在 l 位加工时取1,其他取0	w_l	l 位工件是维护批次中最后一个工件时取1,其他取0	z_l	l 位工件在恶化工期前加工时取1,其他取0

考虑生产与维护的耦合,建立生产与维护联合调度模型,最小化加权工件拖期成本 D_{\max} 和设备维护成本 M_{\max} 。

目标函数为

$$\text{Min}[\omega_1 D_{\max} + \omega_2 M_{\max}], \quad (2)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^n x_{jl} = 1, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^n x_{jl} = 1, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (4)$$

$$a_l = \sum_{j=1}^n a_j \times x_{jl}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (5)$$

$$b_l = \sum_{j=1}^n b_j \times x_{jl}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (6)$$

$$d_l = \sum_{j=1}^n d_j \times x_{jl}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (7)$$

$$p_l = a_l + b \times (e_l - h)(1 - z_l), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (8)$$

$$e_l \leq h + M(1 - z_l), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (9)$$

$$e_l = 0, \quad (10)$$

$$s_l = 0, \quad (11)$$

$$e_l + Mw_l \geq e_{l-1} + P_{l-1}, \quad l \in \{2, 3, \dots, n\}, \quad (12)$$

$$e_l + M(1 - w_{l-1}) \geq 0, \quad l \in \{2, 3, \dots, n\}, \quad (13)$$

$$e_l + p_l \leq T, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (14)$$

$$c_l = s_l + p_l, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (15)$$

$$s_l \geq c_{l-1}, \quad l \in \{2, 3, \dots, n\}, \quad (16)$$

$$s_l \geq (T + t) \times N_l + e_l, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (17)$$

$$N_l = \sum_{k=1}^{l-1} w_k, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (18)$$

$$D_l = \max\{0, \alpha \times (c_l - d_l)\}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (19)$$

$$D_{\max} \geq \sum_{l=1}^n D_l, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (20)$$

$$M_{\max} \geq N_l \times (\beta \times t), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (21)$$

$$x_{jl}, z_l, w_l \in \{0, 1\}, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}, l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (22)$$

$$p_l, e_l, s_l, N_l \geq 0, \quad l \in [1, 2, \dots, n]. \quad (23)$$

式(3)和式(4)是对工件和设备的单一匹配性约束;式(5)~式(7)分别对基本加工时间、恶化率、交货期进行了位置与工件的转化;式(8)表示 l 位工件的实际加工时间;式(9)说明 0—1 变量 z_l 的取值情况,若工件在恶化工期前加工, z_l 取 1, 否则取 0;式(10)和式(11)定义设备初始状态,加工前进行了一次维护,开工时刻为 0;式(12)和式(13)通过判断工件是否为批次内最后一个工件来定义批次内流逝时间;式(14)表示维护批次内工件完工时间不超过给定维护周期 T ;式(15)表示 l 位工件完工时刻等于其开工时刻与加工时间的和;式(16)和式(17)是对工件开工时刻的约束,工件只能在上一个工件完成后开始加工,且开工时间不小于 l 位前所有批次时间与所在批中流逝时间之和;式(18)通过统计末尾工件数量来确定维护次数;式(19)定义 l 位工件的拖期成本;式(20)为 n 个工件的拖期成本和;式(21)表示系统维护总成本取值为维护次数与单次维护成本的积;式(22)和式(23)定义决策变量。

2.2 柔性周期维护模型的建立

柔性周期维护与固定周期维护除维护周期限制 T 定义不同外,生产情况并无区别,因此模型中某些约束不变,如包含约束同式(3)~式(7)、式(11)、式(15)、式(16)、式(19)~式(21),相关表达式及含义与 PM 模型相同。在 FPM 中, T 为设备运行时长对应的役龄。去掉 2.1 节中与批次流逝时间相关的 0—1 变量 w_l 和决策变量 e_l ,引入的新变量如表 2 所示。

表 2 新引入的符号及定义

Tab.2 New symbols and definitions in the model

符号	定义	符号	定义	符号	定义
y_l	l 位置后进行维护,取 1;其他取 0	u_l	l 位工件加工前的设备役龄	v_l	l 位工件加工后的设备役龄

目标函数:

$$\text{Min}[\omega_1 D_{\max} + \omega_2 M_{\max}], \tag{24}$$

s. t.

$$p_l = a_l + b \times (u_l - h)(1 - z_l), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{25}$$

$$u_l \leq h + M(1 - z_l), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{26}$$

$$u_l > h - M \cdot z_l, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{27}$$

$$u_l = 0, \tag{28}$$

$$u_l = v_{l-1} \cdot (1 - y_{l-1}), \quad l \in \{2, 3, \dots, n\}, \tag{29}$$

$$v_l = u_l + p_l, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{30}$$

$$v_l \leq T, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{31}$$

$$s_l \geq c_{l-1} + y_{l-1} \cdot t, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{32}$$

$$N_l = \sum_{k=1}^{l-1} y_k, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{33}$$

$$x_{jl}, y_l, z_l \in \{0, 1\}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{34}$$

$$p_l, u_l, v_l, s_l, c_l, N_l \geq 0, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}. \tag{35}$$

式(25)表示 l 位工件的实际加工时间;式(26)和式(27)说明 0—1 变量 z_l 的取值情况;式(28)定义设备初始役龄;式(29)定义维护和役龄的关系;式(30)定义 l 位工件加工后的设备役龄;式(31)定义维护需求,完工役龄不超过维护限制周期;式(32)定义完工时间, l 位工件开始时间不小于前一位工件完工时间与它们间可能存在的维护时间之和;式(33)定义系统维护次数;式(34)和式(35)定义决策变量。

3 模型验证

3.1 恶化工期变化对比

h 是设备的特征参数,也是工件的恶化工期,取值范围为 $0 \leq h \leq T$,该参数的取值情况会影响模型的有效性。当 $0 \leq h \leq a_j, \forall j$,两阶段线性恶化转化为一般线性恶化, $p_j = a_j + b_j s_j$,此时恶化从维护批次内第二位作业开始;当 $s_j \leq h \leq T, \forall j$,加工任何工件都不会产生恶化惩罚, $p_j = a_j$ 。2 种情况都与本文研究内容不一致,算例设计中应注意 h 的取值范围,以保证模型的有效性。

3.2 独立决策与联合决策对比

为验证联合决策的优势,分别设置目标函数,包括生产与维护联合调度决策、只考虑生产部门目标以及只考虑维护部门目标 3 种情况。引入算例进行分析,已知 $T = 70, t = 2.2, h = 15, a_j = \{35, 11, 18, 7, 9, 22, 30, 25, 14, 11\}, d_j = \{100, 24, 27, 19, 24, 37, 89, 42, 27, 33\}$,使用 Gurobi 求解,得到求解结果如表 3 所示。

表 3 不同优化目标下维护和生产调度方案

Tab.3 Maintenance and production scheduling under different optimization objectives

项目	维护策略	调度序列	维护序列	拖期时间取值	维护时间取值
生产与维护联合决策	PM	J4J5J2J1J0J6J9J3J7J8J1	$y_6 = y_7 = 1$	461.37	4.40
	FPM	J4J5J2J1J0J9J3J6J8J7J1	$y_{10} = y_3 = y_8 = y_7 = 1$	390.05	4.40
只考虑生产部门目标	PM	J5J4J2J1J0J6J9J3J7J8J1	$y_6 = y_7 = 1$	461.37	4.40
	FPM	J4J5J2J1J0J9J3J6J8J7J1	$y_2 = y_9 = y_6 = y_8 = y_7 = 1$	389.12	11.00
只考虑维护部门目标	PM	J5J6J7J8J4J1J0J3J2J1J9	$y_7 = y_3 = 1$	767.00	4.40
	FPM	J5J6J7J8J4J1J0J3J2J1J9	$y_7 = y_3 = 1$	767.00	4.40

由表 3 可知:柔性周期维护下,只考虑生产部门目标时获得的拖期时间最小,但牺牲了大量的维护时间来获取拖期时间的少量减小,不能降低企业成本。固定周期维护下,联合调度与只考虑生产部门目标的结果相同。只考虑维护部门目标时,虽保证了维护次数最少,但工件被随机安排生产,拖期时间很大。综上,相较于传统生产调度和设备维护的单独决策,生产与维护联合决策更加科学有效。

4 数值实验与分析

4.1 固定与柔性周期策略比较

柔性维护能减少拖期成本,但维护次数增加导致维护成本增加。在某一算例中,已知 $n=10, T=65, t=6, h=16, \sigma=10, a_j=\{6, 11, 30, 40, 3, 22, 32, 10, 33, 27\}$, 交货期 $d_j=\{7, 12, 56, 54, 8, 45, 85, 28, 44, 50\}$ 。通过 Gurobi 计算,固定周期维护策略下,最优生产调度序列为 J1J5J2J8J3J6J9J10J7J4, 3 次维护时间为 18, 最小拖期时间为 589.62。柔性周期维护策略下,存在以下 2 种情况:1)当维护成本较低时,最优生产调度序列为 J1J5J2J8J6J10J3J7J9J4, $y_6=y_3=y_7=y_9$, 拖期时间为 547.02, 4 次维护时间为 24; 2)当维护成本较高, 最优生产调度序列为 J1J5J2J8J3J6J7J10J9J4, $y_3=y_7=y_9$, 拖期时间为 559.66, 3 次维护时间为 18。具体生产与维护甘特图如图 4 所示。

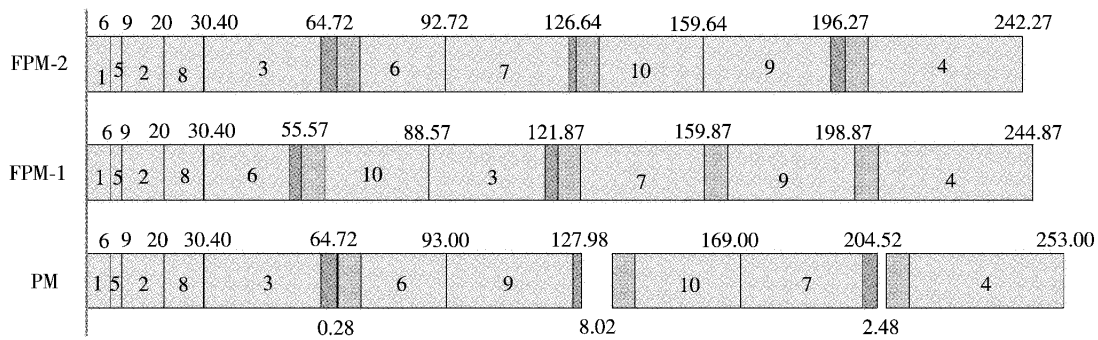


图 4 最优维护与生产的调度甘特图

Fig.4 Gantt chart of the optimal maintenance and production scheduling

由图 4 可知:FPM 的维护次数不低于 PM。维护次数不同时,增加的维护能抵消惩罚时间;维护次数相同时,PM 不可避免地出现空闲时间。图 4 中空闲时间分别为 0.28, 8.02, 2.48, 空闲停机对产品按时交付有不良影响。

4.2 单因素调试结果分析

采用控制因子法进行单因素调试实验,检验参数变化对拖期和成本是否有显著影响。调试参数包括设备参数 T, t, h, σ 和作业参数 a_j, d_j 。设备参数调试规则为 $T=s/i, \forall i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, s = \sum_{j=1}^n a_j; t = h = i \times (T/10), \forall i \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ 。作业参数调试规则为 $a_j \sim U[1, 10i], \forall i \in \{3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}; d_j = i \cdot a, \forall i \in \{2, 3, 4, 5\}$ 。图 5—图 8 是设备参数调整结果,图 9 和图 10 是作业参数调整结果。其中,PM-1 和 FPM-1 是 $\sigma_1=200$ 的计算结果,PM-2 和 FPM-2 是 $\sigma_2=100$ 的计算结果。

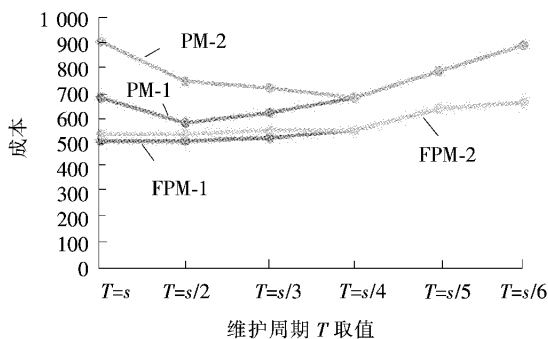


图 5 参数 T 的调试结果

Fig.5 Debug results for parameter T

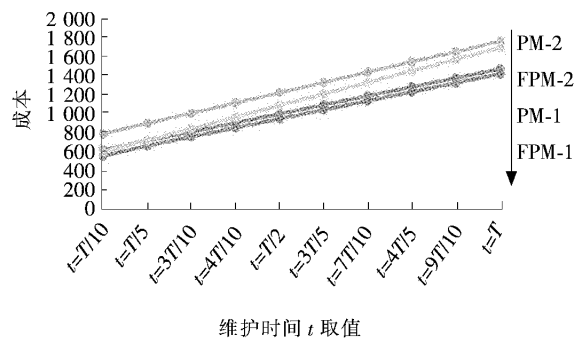


图 6 参数 t 的调试结果

Fig.6 Debug results for parameter t

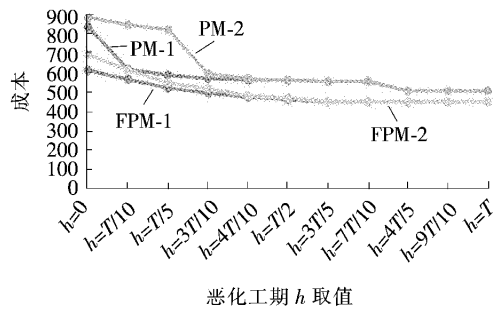


图 7 参数 h 的调试结果

Fig.7 Debug results for parameter h

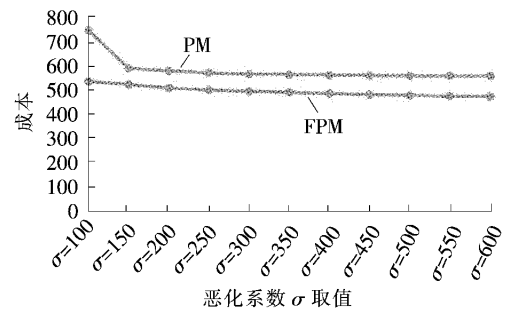


图 8 参数 σ 的调试结果

Fig.8 Debug results for parameter σ

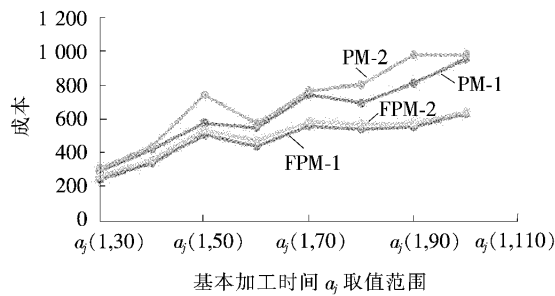


图 9 a_j 取值范围对结果的影响

Fig.9 Effect of the value range of a_j on the result

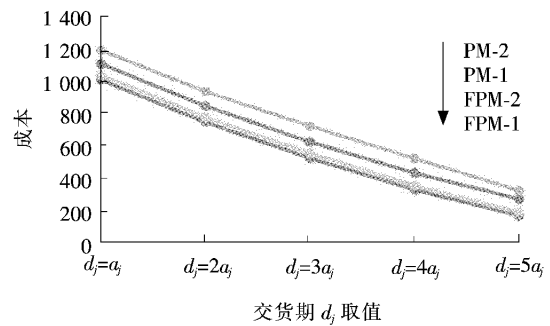


图 10 d_j 取值对结果的影响

Fig.10 Effect of the value of d_j on the result

从图 5 可知:PM 与 FPM 的目标值差值随 T 的减小,呈现先减小后增大的趋势,在这一点固定周期和柔性周期最大程度地逼近。造成柔性周期维护明显优势的原因如下:1) T 越小,最低维护次数越多,PM 与 FPM 下的维护情况相似,但固定周期维护中会出现更多的批次空闲;2) T 越大,最低维护次数越少,FPM 下的维护比 PM 多,但能抵消恶化时间惩罚。由图 6 可知:目标值与维护时间呈近似线性正比关系,两策略成本差值变化不大,维护时间不是转变维护策略的关键因素。由图 7 可知:随着 h 增加,目标函数值逐渐趋近于无恶化的生产调度结果。恶化率较小时, h 的提前对 2 种策略影响不大,针对恶化率较大且 h 较小的生产系统,固定周期维护会加大系统成本负担。PM 策略下的生产较 FPM 策略更易受影响,特别是针对加工时间离散或维护周期变化的情况,成本波动幅度大。由图 8 可知: σ 越大,恶化率越小,成本越小,PM 策略与 FPM 策略目标值差值趋近一个定值。说明恶化率越高,柔性周期维护优势越大。

取 $n=10$,保持其他参数不变,根据作业参数调试规则 $a_j \sim U[1,10i], \forall i \in \{3,4,5,6,7,8,9,10\}$,生成基本加工时间范围不同的 8 组算例,求解整理结果得到如图 9 所示的 a_j 调试结果。相邻调参的结果存在波动,但整体上呈现一定规律。 a_j 对优化目标影响较大,拖期和维持总成本随 a_j 的增加而增加。研究发现:柔性周期维护策略的优势随 a_j 离散程度的增加而更加明显。从图 10 可知: d_j 与目标成本呈近似线性反比关系,两目标函数值差值不会随交货期的改变而大幅度变化,因此交货期不是转变维护策略的关键因素。

4.3 成本与权重比值的影响

为统一加工环境,令维护周期 T 为 10 组算例中的设备维护周期参数的均值。已知 $D_{\max} = \alpha \cdot D_{\text{total}}$, $M_{\max} = \beta \cdot M_{\text{total}}$,故单位时间维护/拖期成本比值(β/α)和维护/生产权重比值(ω_2/ω_1)的调参结果一样,下面对 β/α 进行说明,表 4 和图 11 给出了 β/α 变化下的解的情况。

表4 不同 β/α 比值下的最优解和维护次数统计
Tab.4 Optimal solutions and the number of maintenance at different ratios of β/α

项 目		β/α 比值									
		1	3.34	3.35	3.43	3.44	18.85	18.86	25.14	25.15	40
PM-1	目标值	254.12	254.12	254.12	254.12	254.12	254.12	254.12	254.12	254.12	254.12
	维护次数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
FPM-1	目标值	197.25	197.25	197.25	197.25	202.60	202.60	202.60	202.60	202.60	202.60
	维护次数	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2
PM-2	目标值	465.77	465.77	465.77	465.77	465.77	465.77	465.77	465.77	465.77	465.77
	维护次数	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
FPM-2	目标值	398.85	398.85	404.00	404.00	404.00	404.00	413.28	413.28	413.28	413.28
	维护次数	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2
PM-3	目标值	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66	1023.66
	维护次数	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
FPM-3	目标值	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	732.42	785.54	785.54
	维护次数	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5

4.1 节已经证明了 FPM 的维护次数不低于 PM。当单位时间维护成本较低时, FPM 的维护次数比 PM 次数多, 但增加的维护能抵消恶化惩罚时间, 减少总成本。根据表 4 结果分析可知, 在调整 β/α 的过程中, 柔性周期维护会根据系统单位时间维护成本的大小调整维护次数, 最终造成目标值的突变。

图 11 为 3 组算例调整 β/α 比值运行的结果。数据实验显示: β/α 比值对固定周期维护没有影响; 柔性维护中, 随着 β/α 比值的增大, 目标函数值呈阶梯增长状。在某一比值节点, 目标函数值会往靠近固定周期维护目标值的方向突变(后称该节点为跳跃节点), 直至维护次数与固定周期相同, 解不再发生跳跃。研究发现: 目标值的突变由维护次数改变造成。可以看出: FPM-1, FPM-2 和 FPM-3 中跳跃节点数分别为 1, 2, 1。

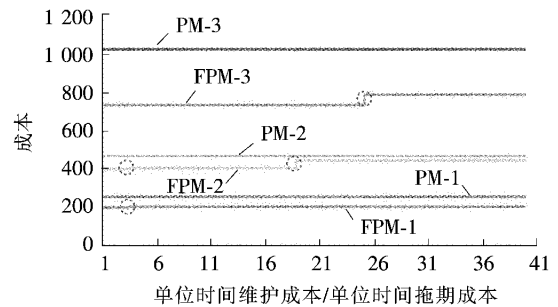


图 11 β/α 变化下最优解的分布图
Fig.11 Distribution diagram of optimal solution under β/α variation

5 结 语

本文研究了周期性维护策略与工时恶化作用下的单机调度问题, 主要对周期性维护策略中的固定周期维护与柔性周期维护进行了探讨。首先, 从联合决策的角度出发, 以最小化拖期成本和维护成本为目标, 建立了考虑分段线性恶化和维护不可用时间的单机调度模型。然后, 通过数值计算对比 2 种维护策略。实验发现: 柔性周期维护无批次空闲, 且能“自适应”调整维护次数, 抵消恶化惩罚, 较固定周期维护有显著优势。最后, 通过单调参分析, 总结了参数对模型的影响规律: a_j, T, h, σ 是周期性维护策略选择的关键因素, t 和 d_j 是非关键因素, 其中, 参数 $a_j \leq h < s_j$ 且 $0 \leq h \leq T$ 是模型有效的保证。另外, 柔性周期维护的目标函数值随 β/α 比值的增大呈阶梯增长状, 能实现成本的“自适应”调节。

个性化产品加工应避免采用固定周期维护策略, 特别是在单位时间维护成本较小时, 采取柔性周期维护的优势更为明显。在柔性周期维护策略下, 尽可能提升设备性能并延长维护时间限制, 可降低企业生产和维护的运营成本。

本文针对恶化效应和维护需求的生产调度问题进行了维护策略对比和建模分析。所建模型仅考虑了工时恶化带来的加工时间不确定性,未来有必要分析小修、大修、更换等多类型维护措施带来的时间和成本的不确定性问题;也可直接与制造云平台对接,获取实际加工和维护的基本数据,通过大数据分析 with 深度学习等技术,实现智能调度。在应用场景方面,后续研究可考虑将柔性周期维护策略和两阶段线性恶化问题应用到流水车间、作业车间等更为复杂的制造系统中。

参考文献/References:

- [1] TAVANA M, ZAROOK Y, SANTOS-ARTEAGA F J. An integrated three-stage maintenance scheduling model for unrelated parallel machines with aging effect and multi-maintenance activities[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2015, 83: 226-236.
- [2] GUPTA J N D, GUPTA S K. Single facility scheduling with nonlinear processing times [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1988, 14:387-393.
- [3] YU Sheng. An optimal single-machine scheduling with linear deterioration rate and rate-modifying activities [J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 2015, 30(2): 242-52.
- [4] MA R, TAO J, YUAN J. Online scheduling with linear deteriorating jobs to minimize the total weighted completion time [J]. *Applied Mathematics Computational Optimization and Applications*, 2016, 273(15): 570-583.
- [5] YUAN G, JIN J Y. A further study on two-agent parallel-batch scheduling with release dates and deteriorating jobs to minimize the makespan [J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 273(1): 74-81.
- [6] KUNNATHUR A S, GUPTA S K. Minimizing the makespan with late start penalties added to processing times in a single facility scheduling problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 47(1): 56-64.
- [7] JAFARI A A, LOTFI M M. Single machine scheduling to minimize the maximum tardiness under piecewise linear deteriorating jobs [J]. *Scientia Iranica*, 2018, 25(1): 370-85.
- [8] GUO P, CHENG W M, ZENG M, et al. Scheduling step-deteriorating jobs on parallel machines by mixed integer programming [J]. *Journal of Donghua University(English Edition)*, 2015, 32(5): 709-714.
- [9] ERTOGRAL K, OZTURK F S. An integrated production scheduling and workforce capacity planning model for the maintenance and repair operations in airline industry [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2019, 127: 832-840.
- [10] XU S, DONG W, JIN M, et al. Single-machine scheduling with fixed or flexible maintenance [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2020, 139: 106203.
- [11] JI M, HE Y, CHENG T C E. Single-machine scheduling with periodic maintenance to minimize makespan [J]. *Computers and Operations Research*, 2007, 34: 1764-70.
- [12] PEREZGONZALEZ P, FERNANDEZVIAGAS V, FRAMINAN J M. Permutation flowshop scheduling with periodic maintenance and makespan objective [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2020, 143: 106369.
- [13] KRIM H, BENMANSOUR R, DUVIVIER D, et al. Heuristics for the single machine weighted sum of completion times scheduling problem with periodic maintenance [J]. *Computational Optimization and Applications*, 2020, 75(1): 291-320.
- [14] 吴玉洁. 单机调度与预防性维护的集成优化 [D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
WU Yujie. The Integrated Optimization of Single-machine Scheduling and Preventive Maintenance[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [15] DONG W, LIU S, DU Y. Optimal periodic maintenance policies for a parallel redundant system with component dependencies [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2019, 138: 106133.
- [16] CHEN J S. Scheduling of nonresumable jobs and flexible maintenance activities on a single machine to minimize makespan [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 190(1): 90-102.
- [17] CUI W W, LU Z J C. Minimizing the makespan on a single machine with flexible maintenances and jobs' release dates [J]. *Computers and Operations Research*, 2017, 80: 11-22.
- [18] WANG Z, PING J I, WANG J B. Parallel machines scheduling with simple linear job deterioration and non-simultaneous machine available times [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2014, 74: 88-91.
- [19] JOO C M, KIM B S. Machine scheduling of time-dependent deteriorating jobs with determining the optimal number of rate modifying activities and the position of the activities [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design Systems Manufacturing*, 2015, 9(1): JAMDSM0007.
- [20] WOO Y B. Matheuristic approaches for parallel machine scheduling problem with time-dependent deterioration and multiple rate-modifying activities [J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 95: 97-112.
- [21] WANG T, ROBERTO B, ANDREW L, 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.
- [22] WOO Y, JUNG S, KIM B. A rule-based genetic algorithm with an improvement heuristic for unrelated parallel machine scheduling problem with time-dependent deterioration and multiple rate-modifying activities [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 109: 179-190.
- [23] 何杰. 预防性维护下的混合型平行机调度问题研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2016.
HE Jie. Hybrid Parallel-machine Scheduling Problem with Preventive Maintenance[D]. Changsha: Hunan University, 2016.