

文章编号:1008-1542(2020)05-0381-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



考虑状态维护策略与工时恶化作用下的 单机调度研究

裴霞^{1,2}, 吴晓^{1,2}, 郭鹏^{1,2}, 王昕^{1,2}, 温昆^{1,2}

(1.西南交通大学机械工程学院,四川成都 610031;2.轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室,四川成都 610031)

摘要:为了解决单机调度问题,提高设备的可靠性和稳定性,根据连续故障检测和离散故障检测的特点,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,基于系统可靠性理论研究考虑机器可靠性的单机调度问题,采用决策条件统一化处理方法对维护策略进行对比,通过单因素和双因素调参分析确定相关参数变化对生产调度优化的影响。结果表明:模型求解时间与单位时间拖期成本的减少呈近似指数级增长,单位拖期成本越大,求解速度越快;单位时间拖期成本的变化不会引起维护成本的大幅度改变,成本函数不存在柔性周期维护中的跳跃节点,不能“自适应”调节;预防性维护时间与故障小修比值对离散检测下的维护决策有较大影响。采用决策条件统一化处理方法,可减少计算时间和检测成本,较好地解决了离散故障检测中易出现的过度维护或维护不足等问题,有助于降低运营成本,提高经济效益。

关键词:生产管理;连续故障检测;离散故障检测;工时恶化;单机调度;整数规划

中图分类号:TH186

文献标识码:A

doi:10.7535/hbkd.2020yx05001

Research on single machine scheduling with state maintenance strategy and step-deteriorating jobs

PEI Xia^{1,2}, WU Xiao^{1,2}, GUO Peng^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, WEN Kun^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2.Technology and Equipment of Rail Transit Operation and Maintenance Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: In order to solve the single machine scheduling problem, and improve the reliability and stability of the equipment, a single machine scheduling model considering piecewise linear deterioration and maintenance unavailability time was established according to the characteristics of continuous fault detection and discrete fault detection. Based on the system reliability theory,

收稿日期:2020-08-10;修回日期:2020-09-07;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基金(2682018CX09)

第一作者简介:裴霞(1995—),女,江西宜春人,硕士研究生,主要从事运筹优化方面的研究。

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

裴霞,吴晓,郭鹏,等.考虑状态维护策略与工时恶化作用下的单机调度研究[J].河北科技大学学报,2020,41(5):381-389.

PEI Xia, WU Xiao, GUO Peng, et al.Research on single machine scheduling with state maintenance strategy and step-deteriorating jobs [J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2020,41(5):381-389.

the single machine scheduling problem considering machine reliability was studied, and the advantages and disadvantages of maintenance strategy were compared by unified processing of decision conditions. The influence of related parameter changes on production scheduling optimization was determined by single factor and two factor adjustment analysis. The results show that the solution time of the model increases exponentially with the decreasing direction of unit delay cost, and the greater the unit delay cost, the faster the solution speed. The change of delay cost per unit time will not cause a significant change in maintenance cost, and the cost function does not have jumping nodes in flexible periodic maintenance, so it can not be adjusted adaptively. Ratio of preventive maintenance time to fault minor maintenance time has great influence on maintenance decision under discrete detection. The unified processing method of decision conditions can reduce the calculation time and detection cost, and better solve the problems of excessive maintenance or insufficient maintenance in discrete fault detection. These will help to reduce operating costs and improve economic benefits.

Keywords: production management; continuous fault detection; discrete fault detection; deteriorating jobs; single machine scheduling; integer programming

伴随着工业互联网的兴起^[1],产业数字化转型成为传统行业的发展趋势,一站式机械零部件制造云平台应运而生^[2],生产调度与设备维护相互影响且互为耦合^[3]。如何在保证加工质量和效率的同时提高设备的可靠性和稳定性已成为制造行业的热点之一。生产调度研究最早可追溯到 20 世纪 50 年代,它是以一个或多个指标最优为目标,在一定约束条件下安排工件加工位置和时间的决策过程,有研究对此进行了探讨。郑先鹏等^[4]通过对生产调度问题中的作业车间调度问题目标进行分解,设计改进了自适应遗传算法求解问题,并指出该问题是典型的 NP-hard 问题。单机调度模型也是生产调度模型中的一种,在实际加工过程中工件开工与加工时间不是固定的,由设备性能衰退或作业延迟处理带来的加工惩罚加大了单机调度问题的难度。如何在考虑工时恶化的情况下,实现生产调度与设备维护策略的最佳适配,对于降低车间运作成本和按时交货至关重要。

工时恶化效应自 GUPTA 等^[5]首次提出以来,受到了业界和学术界的广泛关注。其中,GAWIEJNOWICZ 等^[6]对近 40 年来在时间依赖调度领域的研究进行了全面回顾,阐述了不同任务的开始时间,重点讨论了时间依赖性调度问题的计算复杂度以及求解这些问题的算法。JAFARI 等^[7]研究了分段线性工时恶化单机调度问题,证明该问题为 NP-hard 问题。GUO 等^[8]研究了以最小化总延迟为目标的工时阶梯恶化单机调度问题。随后,CHENG 等^[9]研究了以完工时间最小为目标的工时阶梯恶化单机调度问题。近年来,LI 等^[10]提出了同时考虑加工时间可控和工时恶化效应的单机调度问题;LIANG 等^[11]研究了具有工时恶化效应和资源分配的单机调度问题,并设计了启发式算法与分支定界算法求解相关问题;陈海潮等^[12]研究了具有线性恶化的并行机调度问题;GUO 等^[13]研究了具有工时阶梯恶化效应的并行机调度问题;在此基础上,GUO 等^[14]提出了同时考虑工时阶梯恶化和安装次数的并行机调度问题,并设计了混合离散布谷鸟搜索算法求解。

设备在生命周期内会经历不同的性能衰退状态。维护作为一种支持功能,在保证产品质量和交货期、提高满意度等方面起着重要作用,维护不当会产生“过维护”(指过度维护)或“欠维护”(指维护不足)的状况。“过维护”将加大设备剩余价值浪费,增加维护成本;“欠维护”将影响产品质量和实际交付时间,降低顾客的满意度。因此,如何根据实际生产情况选择合适的维护决策方案引起了业界和学界的广泛关注。KRIM 等^[15]研究了以完工时间最小为目标的定期预防性维修单机调度问题,并证明该问题是 Np-hard 问题;LEE 等^[16]研究了考虑一次维护的单机调度问题,设计了动态规划算法求解相关问题;JOO 等^[17-18]引入遗传算法求解维护次数受限的生产调度问题,随后去掉了维护次数约束进行拓展研究;王昕等^[19]研究了考虑周期性维护与工时恶化的单机调度问题;ZHANG 等^[20]研究了考虑恶化效应和维护活动的单机调度问题。基于状态的维护决策研究主要从设备可靠性约束方面展开讨论,崔维伟等^[21]在单机系统里引入了故障小修,为保证决策模型有效,设计了遗传算法和枚举算法进行优化对比;为说明可靠度随维护次数增加而下降的情况,李有堂等^[22]在多设备混联系统中引入了役龄递减因子与故障率递增因子;杨宏兵等^[3]通过建立 Markov 决策模型获得模型最优方程,设计了强化学习算法求解预防性维护单机调度问题。

综上所述,考虑设备维护和恶化效应的生产调度研究已较为丰富,但部分研究理论作出的假设使其成果不能得到很好的应用。例如设备维护策略多样,而多数研究集中于单次维护策略下的生产调度优化,忽略了

改变维护策略、优化建模方向等方式。此外,工时恶化函数多样,但多数研究采用一般线性函数,使用分段线性恶化描述的还较少,且多数研究从生产时间角度进行优化,忽略了生产与维护之间的矛盾关系。

本文根据连续故障检测(通常根据设备状况设置故障率阈值 Z_{cm} ,根据故障率阈值比决策预防性维护位置)和离散故障检测(通常根据最优设备利用率下的维护周期 T 来设置维护决策)的特点,以最小化拖期成本和维修成本为目标,建立考虑分段线性恶化和维护不可用时间的单机调度模型,基于系统可靠性理论,研究了考虑机器可靠性的单机调度问题,采用决策条件的统一化处理实现维护策略的优劣对比,通过单因素和双因素调参分析确定相关参数变化对生产调度优化的影响。

1 问题描述

假设生产车间中有 n 个工件集合为 $J_j = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ 在机器 M 上加工,工件基本加工时间 $a_j = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,恶化率 $b_j = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$,交货期 $d_j = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$,机器在同一时刻只能加工一个工件且在加工过程中不允许中断。考虑机械加工设备性能衰退造成的工时恶化效应,将加工设备分为正常作业、恶化作业、失效 3 个作业状态。 p_j 为实际加工时间, s_j 为连续加工时间, h 为设备恶化期, σ 为设备恶化系数, α 为单位时间拖期惩罚成本, Δ 为极大常数。一旦该设备连续加工时间超过设备恶化期,将面临加工性能恶化。采用分段线性函数表述工时恶化情况,表达式如下:

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

故障率能较好地表征设备状态条件。基于故障率的维护策略,可通过采用连续故障检测或离散故障检测获取故障率数据,从而对设备故障率作出准确评估。维护成本主要分为维护动作成本和维护时间成本,维护动作成本 M_M 包含故障小修、预防性维护及维护检测的操作成本,维护时间成本 M_T 用停机时间表示,故障小修和预防性维护会导致停机。

假设所有工作均在零时刻准备就绪,设备完成维护活动后,性能可恢复至初始状态。采用 GRAHAM 等^[23]提出的三参数表示法描述状态维护策略下考虑工时恶化的单机生产调度问题:

$$1 \mid nr, p_j = a_j + \max\{0, b_j \times (s_j - h)\}, dpm \mid \omega_1 D_{\max} + \omega_2 M_{\max}. \tag{1}$$

式中:1 表示单机; nr 表示工件加工和设备维护均不可中断; dpm 表示基于条件的动态维护; ω_1 和 ω_2 分别是生产部门和维护部门的权重系数; $\omega_1 D_{\max} + \omega_2 M_{\max}$ 表示将从成本角度出发,以最小化工件延误成本和设备维护成本为目标。

2 数学模型

2.1 连续故障检测维护模型的建立

n 个工件调度后有 n 个位置,位置下标为 l ,其他模型符号与定义如表 1 所示。

表 1 模符号与定义

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、维护权重系数	α	单位时间拖期成本	h, σ	设备恶化期、恶化系数
t_c	预防性维护时间	t_r	故障小修时间	ξ	单位时间停机成本
β_c	维护成本	β_r	小修成本	β_d	检测成本
M_M	维护动作成本	M_T	维护时间成本	Δ	极大常数
j	工件初始索引	J_j	第 j 个工件	l	第 l 个处理位置
$u_{[l]}$	l 位工件加工前役龄	$v_{[l]}$	l 位工件加工后役龄	$M_{[l]}$	l 位工件故障处理时间
$b_{[l]}$	l 位工件恶化率	a_j	工件 J_j 的基本加工时间	$a_{[l]}$	l 位工件基本加工时间
$p_{[l]}$	l 位工件实际加工时间	d_j	工件 J_j 的交货期	$d_{[l]}$	l 位工件交货期
b_j	工件 J_j 的恶化率	$b_{[l]}$	第 l 位工件的恶化率	$D_{[l]}$	l 位工件完工后拖期惩罚值
$s_{[l]}$	第 l 位工件的开工时间	$c_{[l]}$	第 l 位工件的完工时间	T	最优维护周期
$x_{j[l]}$	J_j 在 l 位加工时取 1,其他取 0	$y_{[l]}$	l 位工件加工前进行预防性维护取 1,其他取 0	$z_{[l]}$	l 位工件在恶化阈值前加工时取 1,其他取 0

同时考虑生产与维护的调度目标,目标函数为最小化工件延误成本和维护成本如下:

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

s. t.

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

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

$$s_{[1]} = 0, \quad (5)$$

$$u_{[1]} = 0, \quad (6)$$

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

$$D_{[l]} = \max\{0, \alpha \times (c_{[l]} - d_{[l]})\}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (8)$$

$$D_{\max} \geq \sum_{l=1}^n D_{[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (9)$$

$$E(c_{[l]}) = s_{[l]} + p_{[l]} + M_{[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (10)$$

$$s_{[l]} \geq c_{[l-1]} + y_{[l]} \cdot t_c, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (11)$$

$$M_{[l]} = t_r \left[\left(\frac{v_{[l]}}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{u_{[l]}}{\eta} \right)^\beta \right], \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (12)$$

$$Z_{[l]} = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{u_{[l]}}{\eta} \right)^{\beta-1}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (13)$$

$$Z_{[l]} \geq Z_{cm} - \Delta(1 - y_{[l]}), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (14)$$

$$Z_{[l]} \leq Z_{cm} + \Delta y_{[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (15)$$

$$u_{[l]} = v_{[l-1]} \cdot (1 - y_{[l]}), \quad l \in \{2, \dots, n\}, \quad (16)$$

$$a_{[l]} = \sum_{j=1}^n a_j \times x_{j[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (17)$$

$$b_{[l]} = \sum_{j=1}^n b_j \times x_{j[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (18)$$

$$p_{[l]} = a_{[l]} + \max\{0, b_{[l]} \times (u_{[l]} - h)\}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (19)$$

$$u_{[l]} \leq h + \Delta(1 - z_{[l]}), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (20)$$

$$u_{[l]} \geq h - \Delta \cdot z_{[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (21)$$

$$v_{[l]} = u_{[l]} + p_{[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (22)$$

$$M_{\max} = M_T + M_M, \quad (23)$$

$$M_T = \varepsilon \sum_{l=1}^n [M_{[l]} + t_c \cdot y_{[l]}], \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (24)$$

$$M_M = \sum_{l=1}^n [y_{[l]}(\beta_c) + \beta_r \left(\left(\frac{v_{[l]}}{\eta} \right)^\beta - \left(\frac{u_{[l]}}{\eta} \right)^\beta \right) + n\beta_d], \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (25)$$

$$x_{j[l]}, z_{[l]}, y_{[l]} \in \{0, 1\}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (26)$$

式(3)和式(4)表示工件与位置的唯一匹配性约束;式(5)和式(6)表示由第一个位置工件开工时刻和役龄定义生产系统初始状况;式(7)表示工件交货期约束;式(8)表示 l 位工件的延期惩罚成本约束;式(9)表示 n 个工件延期惩罚成本之和;式(10)表示 l 位工件期望完工时间;式(11)表示工件开工时间与上一个工件完工时间的关系约束,工件只能在上一工件完工后开始加工;式(12)表示 l 位工件加工期间故障处理时间;式(13)一式(15)表示故障率与维护关系约束,根据两参数威布尔分布故障率公式^[24],决定是否进行预防性维护;式(16)表示 l 位工件加工期间故障处理时间;式(17)一式(18)表示实现位置 l 与工件的转化,分别对应基本加工时间、恶化率;式(19)表示第 l 个位置工件的实际加工时间;式(20)和式(21)表示开工设备役龄与恶化工期约束;式(22)表示 l 位工件加工前后设备役龄与实际加工时间约束;式(23)表示系统维护总成本约束;式(24)表示维护时间成本约束;式(25)表示维护动作成本约束;式(26)定义决策变量。

2.2 离散故障检测维护策略下的模型建立

为减少检测次数和降低检测成本,离散故障检测结合可靠性原理得到最优设备利用率下最优维护周期 T ,并根据 T 设置离散检测的时间点与预防性维护实施点。对于两种状态维护下的生产调度问题,建模方向和方式总体上一致,相同约束见式(2)一式(19)和式(22)一式(24)。区别在于一是维护决策评估条件改变导致决策变量约束改变;二是检测次数改变引起维护成本表达式的改变。本文对相同模型约束不再赘述,只对发生改变的部分进行分析。

设备在周期 T 内失效风险函数为

$$f(T) = \int_0^T \lambda(t) dt = \int_0^T \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} dt = \left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta, \tag{27}$$

设备稳态下的利用率为

$$A(T) = \frac{T}{T + t_r f(T) + t_c}, \tag{28}$$

最优设备利用率下最优维护周期 T 可由上述表达式求导得到:

$$T = \eta \left[\frac{t_c}{t_r(\beta-1)} \right]^{\frac{1}{\beta}}. \tag{29}$$

同时考虑生产与维护的调度目标,最小化工件的延误成本和维护成本目标函数为

$$\text{Minimize}[\omega_1 D_{\max} + \omega_2 M_{\max}], \tag{30}$$

s. t.

$$u_{[l]} \geq T - \Delta(1 - y_{[l]}), \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{31}$$

$$u_{[l]} \leq T + \Delta y_{[l]}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{32}$$

$$M_M = \sum_{l=1}^n \left[y_{[l]} \beta_c + \beta_r \left(\left(\frac{v_{[l]}}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{u_{[l]}}{\eta}\right)^\beta \right) \right] + \sum_{l=1}^n y_{[l]} \beta_d, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}, \tag{33}$$

$$x_{j[l]}, z_{[l]}, y_{[l]} \in \{0, 1\}, \quad l \in \{1, 2, \dots, n\}. \tag{34}$$

式(31)和式(32)表示以最优维护周期 T 为依据的维护决策约束;式(33)表示维护动作成本约束;式(34)定义决策变量。

3 模型求解及实验分析

对上述模型进行数值实验和结果分析,所有数值实验采用 9.0 版本 Gurobi 优化器运行。为验证两种状态维护策略下所建模型的正确性,将随机生成新的算例,同时引入系列参数进行数值仿真实验,完成连续/离散故障率检测策略对比。

在两参数威布尔分布下,参考文献[25]中的参数估计和检验方法,设置形状参数 $\beta=2$,尺寸参数 $\eta=100$,设定单位时间停机成本 $\epsilon=10$,单位时间拖期成本 $\alpha=1$,加工设备信息和维护参数如表 2 和表 3 所示。

由系统故障率分布函数 $\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$ 得到系统故障率分布函数:

$$\lambda(t) = \frac{2}{100} \left(\frac{t}{100}\right)^{2-1} = \frac{t}{5\,000},$$

$[l]$ 位工件加工期间故障处理时间:

$$M_{[l]} = t_r \left[\left(\frac{v_{[l]}}{100}\right)^2 - \left(\frac{u_{[l]}}{100}\right)^2 \right],$$

最优设备利用率下最优维护周期:

$$T = 100 \times \sqrt{t_c / t_r}.$$

表 2 加工设备信息

Tab.2 Processing equipment information

设备恶化系数 σ	恶化工期 h	初始役龄 u_0
200	15	0

表 3 维护参数

Tab.3 Maintenance data

项 目	故障小修 r	预防性维护 c	检测 d
时间 t	$t_r=5$	$t_c=20$	$t_d=0$
成本 β	$\beta_r=50$	$\beta_c=150$	$\beta_d=10$

3.1 连续/离散检测策略比较

两种策略决策条件不同,通过决策条件“统一化”(连续故障检测根据设备状况设置故障率阈值 Z_{cm} ,通过对故障率与故障率阈值进行比较来决策预防性维护位置;离散故障检测是根据最优设备利用率下的维护周期 T 来决策维护位置。为了对两种检测方法进行对比,通过系统故障率分布函数,将离散故障检测的维护周期 T 转化为故障率,该转化过程定义为决策条件“统一化”)实现 T 与故障率的转化。

将离散检测策略最优维护周期代入 $T=100 \times \sqrt{t_c/t_r}$,得 $T=200$,令 $t=200$,代入 $\lambda(t)=t/5\ 000$ 中得故障率为 0.04。因此,在算例对比分析中,连续故障率检测策略设置故障率阈值 $Z_{cm}=0.04$,离散故障率检测策略设置最优维护周期 $T=200$ 。基本加工时间 a_j 服从 $[1, 100]$ 的均匀分布,交货期 d_j 服从 $a_j + U(0, 3a_j]$, $n \in \{5, 10\}$,保持加工环境不变,各生成 5 组算例。计算结果如表 4 所示,其中,CD 表示连续检测,DD 表示离散检测。

表 4 决策条件统一化处理后得到的算例结果

Tab.4 Example results obtained after decision condition unification treatment

规模	算例	维护类型	求解时间/s	拖期成本	维护成本	调度方案
n=5	1	CD	0.44	284.71	640	J5J3J4-J1J2
		DD	1.63	284.71	620	J5J3J4-J1J2
	2	CD	0.67	132.34	553	J4J1J2-J5J3
		DD	1.34	132.34	508	J4J1J2-J5J3
	3	CD	0.35	198.24	631	J2J3J4-J1J5
		DD	0.50	198.24	611	J2J3J4-J1J5
	4	CD	1.28	188.03	604	J2J5J1-J3J4
		DD	1.51	188.03	584	J2J5J1-J3J4
	5	CD	0.35	50.58	129	J2J5J4J1J3
		DD	0.52	50.58	104	J2J5J4J1J3
n=10	1	CD	467.92	926.31	1 285	J10J4J2J7J6-J8J9J5-J1J3
		DD	608.57	926.31	1 245	J10J4J2J7J6-J8J9J5-J1J3
	2	CD	1 278.88	1 320.38	1 694	J8J4J10J6-J1J2-J9J7-J5J3
		DD	1 449.54	1 320.38	1 659	J8J4J10J6-J1J2-J9J7-J5J3
	3	CD	58.99	1 761.48	2 223	J7J3J8-J6J2-J4J5-J10J9-J1
		DD	109.23	1 761.48	2 193	J7J3J8-J6J2-J4J5-J10J9-J1
	4	CD	649.31	1 248.71	1 894	J4J2J9J3-J6J1-J7J8-J5J10
		DD	823.80	1 248.71	1 859	J4J2J9J3-J6J1-J7J8-J5J10
	5	CD	782.41	1 750.52	1 655	J1J3J9J6-J4J2-J7J5-J8J10
		DD	907.06	1 750.52	1 620	J1J3J9J6-J4J2-J7J5-J8J10

注:“-”表示预防性维护间隔;“加粗”数字代表加工产生恶化惩罚时间的工件。

对表 4 分析可知:同一算例连续检测和离散检测所得的最优调度方案相同,拖期成本也相同,而离散检测的成本总是少于连续检测的成本。模型运算时间上,离散检测模型计算时间比连续检测模型的计算时间长,特别是算例规模变大时,区别更为明显。为了同时优化计算时间和成本,可采取决策条件“统一化”方法。通过数值仿真计算得出连续检测策略下的调度序列,再用离散检测的最优维护周期进行检测并决策维护操作点,实现计算时间和检测成本的减少。

3.2 单位时间拖期成本的影响

针对同一算例,采用单因素控制法调整单位时间拖期成本参数。大量数据实验结果显示,在调整 α 参数时,两种方案所表示的趋势相同,故选取一种进行分析。当 α 足够小时,Gurobi 求解器不能在限定时间内获得规模为 10 的小规模算例的最优解。图 1 和图 2 分别显示了 2 个算例单位时间拖期成本对总成本目标和运算时间的影响情况。

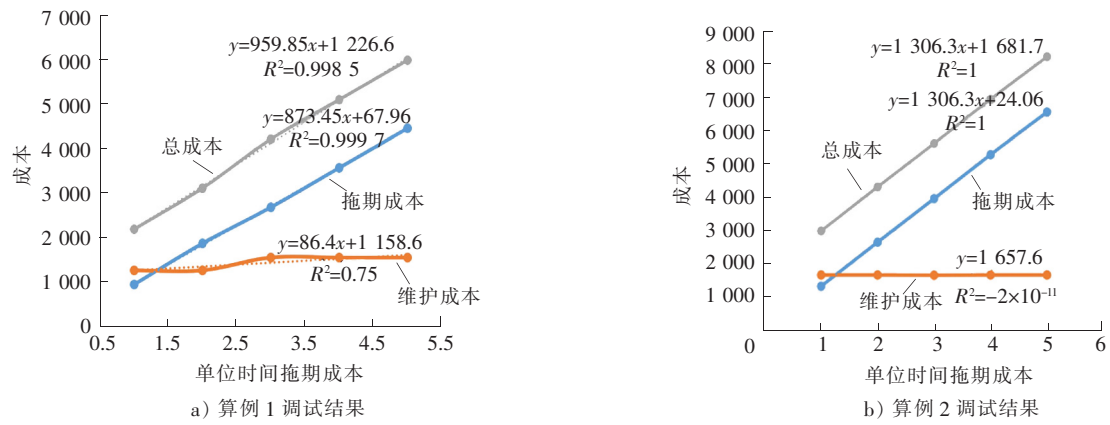


图 1 单位时间拖期成本 α 对总成本的影响

Fig.1 Impact of delay cost per unit time α on total cost

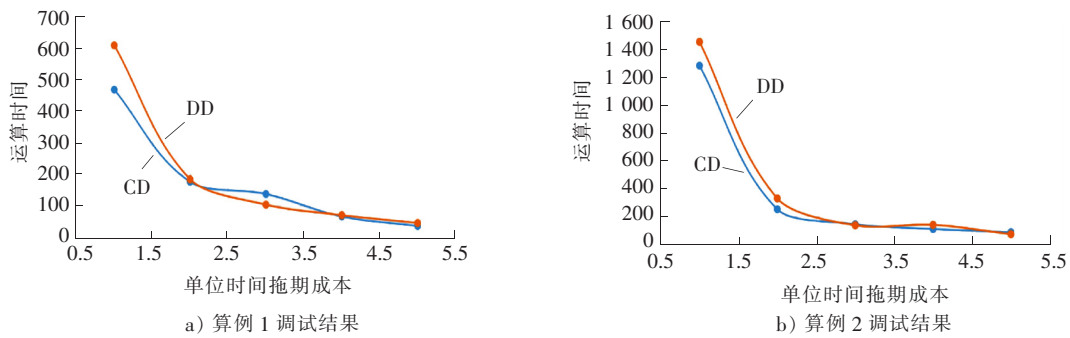


图 2 单位时间拖期成本 α 对运算时间的影响

Fig.2 Impact of delay cost per unit time α on operational time

对图 1 分析可知:总成本和拖期成本与单位时间拖期成本 α 呈线性相关,线性函数斜率与算例中的作业数据有关。维护成本基本无变化,不存在周期性维护^[19]中的多个跳跃点节点(跳跃点节点是指在某一个参数比值对应的节点,目标函数值会往靠近固定周期维护目标值的方向突变)。图 2 显示了模型求解时间与 α 的关系,可以发现:单位时间拖期成本 α 越大,求解速度越快。

3.3 维护与小修时间比值的影响

离散故障率检测的决策条件 T 对 t_c/t_r 比值依赖性强,为探究该参数比值对两种方案的影响,需进行调参分析。保持 $t_r=5, Z_{cm}=0.04$ 不变,令 $t_c=\{1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40\}$,改变维护时间参数进行实验,得到如表 5 所示的调度方案成本。将总成本进行分解,得到 t_c/t_r 比值变化下的各项成本情况,如图 3 所示。

表 5 t_c/t_r 比值调整得到的不同调度方案的成本

Tab.5 Cost of different scheduling plans after adjusting t_c/t_r ratio

t_c	t_r	CD 调度方案	CD 总成本	DD 调度方案	DD 总成本
1	5	J5J3J4-J1J2	930.71	J5J3-J4-J1J2	713.48
5	5	J5J3J4-J1J2	978.71	J5J3J4-J1J2	958.71
10	5	J5J3J4-J1J2	1 038.71	J5J3J4-J1J2	1 018.71
15	5	J5J3J4-J1J2	1 098.71	J5J3J4J1-J2	1 361.77
20	5	J5J3J4-J1J2	1 158.71	J5J3J4J1-J2	1 411.77
25	5	J5J3J4-J1J2	1 218.71	J5J3J4J1-J2	1 456.77
30	5	J5J3J4-J1J2	1 278.71	J5J3J4J1-J2	1 511.77
35	5	J5J3J4-J1J2	1 338.71	J5J3J4J1J2	2 336.83
40	5	J5J3J4-J1J2	1 398.71	J5J3J4J1J2	2 336.83

注:“-”表示预防性维护间隔;“加粗”数字代表加工产生恶化惩罚时间的工件。

由表5可知:维护时间 t_c 的增加不影响连续检测CD维护决策下的调度方案,但对离散检测DD维护决策有较大影响。CD维护决策由故障率阈值决定,因此维护位置不发生改变。若以CD调度方案为标准,DD调度方案则存在过维护或欠维护的情况。例如表5中 $t_c=1$ 为过维护, $t_c=35$ 和 $t_c=40$ 为欠维护。

图3为 t_c/t_r 比值变化下的各项成本情况。通过分析可知, t_c 主要影响DD的维护成本,对拖期成本影响不大。当 $t_c=1$ 时,使用离散检测策略导致了过维护,但各项成本值均低于使用连续检测策略下的情况,这说明基于故障率阈值条件决策维护得到的结果并不总是最优的。

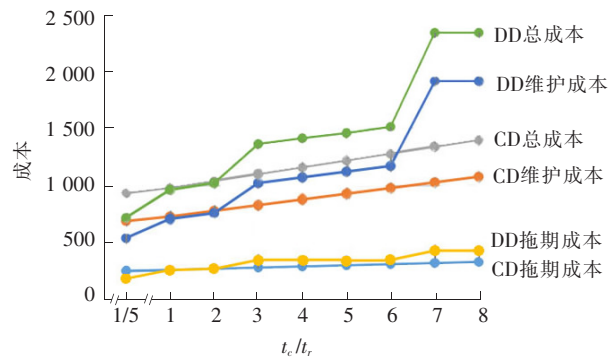


图3 t_c/t_r 比值调整得到的各项成本

Fig.3 Different costs after adjusting t_c/t_r ratio

4 结 论

本文研究了状态维护策略与工时恶化作用下的单机调度问题,基于连续故障检测和离散故障检测两种维护策略的特点,分别以最小化最大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。通过对计算结果进行分析,得到如下结论。

1)离散检测模型运算时间比连续检测长,但成本更少,采用决策条件“统一化”处理,可减少检测成本与模型运算时间。

2)维护成本基本不随单位时间拖期成本发生变化,不存在周期性维护中的多个跳跃节点,不能“自适应”调节,模型运算时间随单位时间拖期成本的减少呈指数级增长。

3)预防性维护时间与故障小修时间比值对离散检测维护决策有较大影响,存在过维护或欠维护状态,但基于故障率阈值条件的连续检测维护决策得到的调度方案不一定最优。

本文基于系统可靠性理论,探讨了考虑机器可靠性的单机调度问题,但研究中也存在着不足之处。在模型建立方面,仅考虑了分段线性恶化和维护不可用时间,有必要考虑负载、可变时长维护等因素带来的成本不确定性,在维护策略的选择上应设计算例与其他策略进行优劣对比;在数据来源方面,仅参考相关文献随机生成数据。未来应与机械加工企业合作,获取真实的生产数据,使研究结果更能直接反映实际情况,进一步探索将状态维护策略与两阶段线性工时恶化应用到更为复杂的生产系统中。

参考文献/References:

- [1] 姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2020; 1-30[2020-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200312.1339.010.html>.
YAO Xifan, JING Xuan, ZHANG Jianming, et al. Towards smart manufacturing for the new industrial revolution[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020; 1-30[2020-03-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200312.1339.010.html>.
- [2] 孙学珊, 杨欣, 李民. 工业云平台的构建与服务新模式研究[J]. 中国市场, 2019(2): 191-192.
SUN Xueshan, YANG Xin, LI Min. Research on the construction of industrial cloud platform and new service mode[J]. China Marketing, 2019(2): 191-192.
- [3] 杨宏兵, 沈露, 成明, 等. 带退化效应多态生产系统调度与维护集成优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 80-88.
YANG Hongbing, SHEN Lu, CHENG Ming, et al. Integrated optimization of scheduling and maintenance in multi-state production systems with deterioration effects[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 80-88.
- [4] 郑先鹏, 王雷. 面向作业车间调度问题的遗传算法改进[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(6): 496-502.
ZHENG Xianpeng, WANG Lei. Improved genetic algorithm for job shop scheduling[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(6): 496-502.
- [5] GUPTA J N D, GUPTA S K. Single facility scheduling with nonlinear processing times[J]. Computers & Industrial Engineering, 1988, 14(4): 387-393.
- [6] GAWIEJNOWICZ S. A review of four decades of time-dependent scheduling: Main results, new topics, and open problems[J]. Journal of Scheduling, 2020. doi:10.1007/s10951-019-00630-w.

- [7] JAFARI A A, LOTFI M M. Single machine scheduling to minimize the maximum tardiness under piecewise linear deteriorating jobs[J]. *Scientia Iranica*, 2017. doi:10.24200/sci.2017.4408.
- [8] GUO P, CHENG W M, WANG Y. A general variable neighborhood search for single-machine total tardiness scheduling problem with step-deteriorating jobs[J]. *Journal of Industrial Management Optimization*, 2017, 10(4): 1071-1090.
- [9] CHENG T C E, KRAVCHENKO S A, LIN B M T. Scheduling step-deteriorating jobs to minimize the total completion time[J]. *Computers Industrial Engineering*, 2020. doi:10.1016/j.cie.2020.106329.
- [10] LI L, WANG J J. Scheduling jobs with deterioration effect and controllable processing time[J]. *Neural Computing Applications*, 2016, 29: 1163-1170.
- [11] LIANG X X, LIU M, FENG Y B, et al. Solution algorithms for single-machine resource allocation scheduling with deteriorating jobs and group technology[J]. *Engineering Optimization*, 2020, 52(7): 1184-1197.
- [12] 陈海潮,程文明,郭鹏,等.混和进化算法求解具有分段恶化效应的并行机调度问题[J].*计算机系统应用*,2020,29(4):10-17.
CHEN Haichao,CHENG Wenming,GUO Peng,et al.Hybrid evolutionary algorithm for solving parallel machine scheduling problems with step-piece deteriorating processing time[J].*Computer System & Applications*,2020,29(4):10-17.
- [13] GUO P, CHENG W M, ZENG M. Scheduling step-deteriorating jobs on parallel machines by mixed integer programming[J]. *Journal of Donghua University(English Edition)*, 2015, 32(5): 709-714.
- [14] GUO P, CHENG W M, WANG Y. Parallel machine scheduling with step-deteriorating jobs and setup times by a hybrid discrete cuckoo search algorithm[J]. *Engineering Optimization*, 2015, 47(11): 1564-1585.
- [15] KRIM H, RACHID B, 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.
- [16] LEE C Y, LEON V J. Machine scheduling with a rate-modifying activity[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 128(1): 119-128.
- [17] JOO C M, KIM B S. Genetic algorithms for single machine scheduling with time-dependent deterioration and rate-modifying activities[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(8): 3036-3043.
- [18] 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. doi:10.1299/jamdsm.2015jamdsm0007.
- [19] 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. 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.
- [20] ZHANG X, YIN Y, WU C C. Scheduling with non-decreasing deterioration jobs and variable maintenance activities on a single machine [J]. *Engineering Optimization*, 2017,49(1):84-97.
- [21] 崔维伟,陆志强.单机系统的生产调度与预防性维护的集成优化[J].*上海交通大学学报*,2012,46(12):2009-2013.
CUI Weiwei,LU Zhiqiang. Integrating production scheduling and preventive maintenance planning for a single machine[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, 46(12): 2009-2013.
- [22] 李有堂,程钥,任泽海.基于可靠性的混联系统的动态预防性维护策略[J].*兰州理工大学学报*,2018,44(6):35-38.
LI Youtang,CHENG Yue,REN Zehai.Dynamic preventive maintenance strategy for hybrid system based on reliability[J].*Journal of Lanzhou University of Technology*,2018,44(6):35-38.
- [23] 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*, 1979, 5(1): 287-326.
- [24] 金琳,黄开敏,周晓军.租赁设备的多阶段预防性维护策略及优化[J].*计算机集成制造系统*,2013,19(12):2947-2953.
JIN Lin, HUANG Kaimin,ZHOU Xiaojun.Multi-period preventive maintenance policy and optimization for leased equipment[J].*Computer Integrated Manufacturing Systems*,2013,19(12):2947-2953.
- [25] 于捷,申桂香,贾亚洲.基于三参数威布尔分布的数控机床的可靠性评价[J].*现代制造工程*,2007(5):26-28.
YU Jie, SHEN Guixiang,JIA Yazhou.Reliability evaluation on CNC lathes based on the three Weibull distributions[J].*Modern Manufacturing Engineering*, 2007(5): 19-20.