

考虑劣化状态的单机调度与维修决策集成模型

甘 婕, 曾建潮

(太原科技大学 工业与系统工程研究所, 太原 030024)

摘 要: 大多数研究单机调度与维修决策集成问题的文献采用基于役龄的维修策略. 然而, 设备劣化状态与加工对象、加工环境和加工时间等诸多因素相关. 鉴于此, 针对设备状态可检测的系统, 采用非完美预防性视情维修、小修与故障更换相结合的维修策略, 建立一种以加工作业次序和预防维修阈值为决策变量, 加工作业的总加权期望完成时间最小为优化目标的随机期望值集成模型. 实验结果表明, 所提出的模型能更有效地避免过维修或欠维修, 并且能够降低生产持有成本.

关键词: 视情维修策略; 非完美预防性维修; 单机调度; 集成研究; 期望值模型

中图分类号: TH163.5

文献标志码: A

Integrated model of single-machine scheduling and maintenance decision for degrading state systems

GAN Jie, ZENG Jian-chao

(Division of Industrial and System Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China. Correspondent: GAN Jie, E-mail: ganjies.cn@sina.com)

Abstract: Most literatures studying the integration model of scheduling and maintenance decision-making for the single machine adopt the age-based maintenance policy. However, the degradation condition for the equipment is related to numerous factors such as processing object, processing environment and processing time. As a result, focusing on the systems whose state can be inspected, an integrated model of stochastic expected values is built, which takes the job sequence and threshold value for preventive maintenance as the decision variable and the minimum total expected weighted completion time of jobs as the optimization objective by adopting the combined maintenance strategy of imperfect preventive maintenance depending on conditions, minor repair and replacement after breakdown. The experimental results show that the model can more effectively avoid excessive maintenance or insufficient maintenance and reduce the holding cost for production.

Keywords: condition based maintenance; imperfect preventive maintenance; single-machine scheduling; integration research; expected value model

0 引 言

单机调度问题可以视为其他各类复杂生产调度问题的基础. 传统的单机调度问题往往只考虑在设备始终连续可用的情况下, 加工作业在调度周期内的排序问题^[1]. 然而, 设备在加工过程中, 由于磨损或腐蚀等原因会产生退化现象, 设备退化到一定程度时, 会因设备故障或进行的预防性维护维修活动而产生相应的不可用时间. 尽管维修活动造成的设备不可用时间浪费了相应的生产时间, 但维修活动可使劣化的设备状态得以恢复. 由于生产与维修在生产系统中具有

一定的相关性, 企业进行调度时通常需考虑如何在同一台设备上的不同时间段更加合理地安排生产和维修活动. 因此, 建立单机调度与维护维修决策的集成模型, 以在生产调度过程中选择恰当的时刻进行按需维修成为研究的焦点.

在最近几十年里, 人们针对单机调度与维护维修决策的集成问题进行了大量的研究. 文献[2]假设在整个调度周期内, 仅有一个维护维修活动所产生的不可用时间间隔, 且这个间隔的开始时间为常数. 文献[3]在此基础上, 考虑了不可用时间间隔的开始时间

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-04-02.

基金项目: 山西省回国留学人员科研项目(2013-089); 山西省自然科学基金项目(2014011019-2); 山西省科技攻关项目(20140321003-06).

作者简介: 甘婕(1976—), 女, 博士生, 从事智能优化、复杂系统的优化调度与健康管理的研究; 曾建潮(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统建模与仿真、智能计算、复杂系统健康管理等研究.

为决策变量. 然而, 在整个生产调度周期内往往需要进行多次维修活动. 文献[4]在处理时间不断恶化的情况下, 研究了插入多个设备维护阶段和考虑交货期安排的单机调度问题. 文献[5-6]考虑在整个生产过程中, 有多个由于周期性维护维修活动所造成的不可用时间间隔的情况, 研究了单机调度与周期性维护维修的集成问题. 文献[7-8]也研究了类似于文献[5-6]的集成问题, 但引入了双控制限的维修策略, 即: 固定周期间隔 T 和加工作业的数量 K , 只要达到任何一个维修控制限, 设备才进行预防性维修活动. 文献[9]考虑多种产品的批量生产问题, 采用周期性更换与随机故障时小修相结合的维修策略, 建立了生产与周期性维修的集成模型. 文献[10]扩展了文献[9]的研究, 考虑了多条生产线的情况, 假设每条生产线分别有自己的维修周期. 上述研究都假设了固定周期的预防性维修活动(即维修间隔提前确定). 对于生产不可续的加工作业, 固定维修周期的设置与加工作业时间的不协调会造成设备的空闲时间增加, 从而影响整个系统的生产率.

考虑到周期性维修策略的弊端, 许多学者研究了非周期维护维修与单机调度的集成问题. 在文献[11-12]中, Cassady 等建立的单机调度与维护维修的集成模型, 以加工作业序列的安排和是否进行预防性维护的逻辑变量为决策变量, 考虑了完美的预防性维修结合基于役龄的小修活动. 文献[11]以加工作业延迟最小为优化目标, 而文献[12]以加权总期望完成时间最小为优化目标. 文献[13]中, Pan 等学者在文献[11-12]的基础上, 建立了预防性维护时间与设备役龄的函数关系, 并以最大加权延误最小为优化目标, 构建了维修维护与单机调度的集成模型. 文献[14]针对逐渐劣化的生产系统, 同时考虑生产率和基于役龄的小修与更换的转换策略, 建立了最小化总成本(包括小修成本、更换成本、库存持有成本和积压成本)的集成模型. 文献[15]在周期性预防性维修的基础上, 引入了安排预防性维修的优化变量(即判断在某周期前是否进行预防性维修的逻辑变量), 以总成本最小为目标, 建立了生产调度与非周期预防性维修的集成模型.

文献[16]在此基础上, 针对含有多设备的多状态系统进行了集成研究. 目前的集成模型中, 大都采用了基于时间的预防性维修策略, 忽略了设备状态的实际劣化程度. 然而, 设备实际状态的劣化程度与加工对象、加工时间、加工环境等多种因素相关. 基于时间的预防性维修策略所作的维修决策, 没有考虑设备的劣化程度所对应的维修需求, 容易产生欠维修或过维修现象. 例如冶炼炉在加工含有钨元素的合金钢时, 由于钨的密度大且熔点高, 加工含钨的合金钢比加工

普通碳钢需要的温度高. 在同样的时间段内, 加工含钨的合金钢时炉体的损耗程度要大很多. 如果不能根据炉体劣化的严重程度及时安排维修, 可能会造成设备故障停机, 甚至炉体余钢等重大事故. 这样, 不但会使维修成本大幅上升, 而且还会延误生产. 相反地, 在同一时间段内, 加工普通碳钢时炉体损耗相对要小得多, 如果忽略炉体实际的劣化状态, 就会进行不必要的维修活动, 从而增加不必要的维修成本, 并由此耽误加工时间.

在生产过程中, 如果生产设备欠维修, 则会造成生产的安全问题和产品质量问题, 从而带来严重的经济损失, 并延误生产; 如果生产设备过维修, 则会造成有限资源的浪费和维修成本的增加, 而且过于频繁的维修也会减缓生产进度, 降低生产效率. 对此, 本文针对劣化状态可检测的生产系统, 研究基于设备劣化状态的维修策略与单机调度的集成问题.

另外, 维修效果对生产调度有着直接的影响, 在设备故障前, 进行非完美预防性维修可以有效地节约维修成本, 从而降低整个生产的持有成本. 因此, 在单机调度与维护维修的集成研究中, 预防性维修可以考虑非完美的维修效果. 文献[17]在假设非完美预防性维修的前提下, 以预防性维修的役龄和更换周期为决策变量, 研究了经济生产批量和预防维修计划的联合优化问题. 文献[18]以非完美预防性维修前的可用时间和设备更换前所生产的产品数量为决策变量, 即: 定时的非完美预防性维修结合加工一定数量产品后的更换活动, 研究了生产与维修的集成问题. 文献[19]针对串并联多状态退化系统, 采用非完美维修策略, 以设备可用性和生产成本为目标, 建立了生产与维修的优化模型. 文献[20]针对单设备系统, 考虑多种产品批量生产问题, 采用非完美预防性维修, 完美的大修及小修相结合的维修策略, 以最小化总成本(包括预防性维修成本、小修成本、大修成本、准备成本、持有成本、延期未交货成本和生产成本)为优化目标, 建立了生产计划和非完美预防性维修策略的集成模型. 这些考虑了非完美预防性维修的集成研究均采用基于役龄的维修策略. 目前, 随着传感系统的发展, 许多设备可以通过状态检测, 得到其在加工过程中的实际劣化状态, 这样便可根据实际的劣化状态进行维修决策, 安排恰当的非完美维修, 以便降低生产的持有成本.

本文研究单机调度与维护维修决策的集成问题, 其创新点在于针对劣化状态可检测的系统, 采用加工作业完成后视情非完美预防性维修或故障后更换, 结合加工过程中设备故障后小修的混合维修策略, 建立以加工作业的调度次序和预防性维修阈值为决策变

量, 最小化加工作业的总加权期望完成时间为目标的随机期望值模型. 实验结果表明了该方法的有效性.

1 考虑劣化状态的单机调度与维修的集成模型

1.1 问题描述

本文针对逐渐劣化的单设备生产系统, 根据设备实际劣化状态, 同时考虑加工作业和维护维修的调度问题. 由于预防性维修往往不能使设备状态恢复如新, 在集成研究中, 考虑非完美预防性维修. 设备发生故障前, 根据每项加工作业完成后的劣化程度, 安排非完美预防性维修或下一项加工作业. 如果进行非完美预防性维修, 则设备状态恢复到好于当前状态的某一非新状态; 如果继续进行下一项加工作业, 则设备状态在当前状态基础上继续劣化. 设备发生故障后, 如果当前加工作业尚未完成, 则进行小修, 直到完成该加工作业, 再进行更换, 使设备状态恢复如新.

1.2 符号定义与模型假设

决策变量的定义如下.

x_{ij} : 表示在加工作业序列中, 第 i 项加工作业是否为工件 j , 即调度序列的决策变量;

D_P : 表示预防性维修的阈值, 即非完美预防性维修的决策变量.

其他符号的定义如下.

n : 表示整个调度序列的加工作业总数.

i : 表示在调度序列中加工作业的调度次序, $i = 1, 2, \dots, n$.

j : 表示加工作业的下标编号, $j = 1, 2, \dots, n$.

$c_{[i]}$: 表示在加工序列中, 第 i 项加工作业的完成时间(确定的情况).

$C_{[i]}$: 表示在加工序列中, 第 i 项加工作业的完成时间(随机的情况).

w_j : 表示加工作业 j 的权值.

p_j : 表示加工作业 j 的加工时间.

$w_{[i]}$: 表示加工序列中, 第 i 项加工作业的权值.

$p_{[i]}$: 表示加工序列中, 第 i 项加工作业的加工时间.

t_m : 表示对设备进行预防性维修的时间.

t_R : 表示对设备进行更换所需要的时间.

t_r : 表示对设备进行小修所需要的时间.

D_F : 表示设备的故障阈值, 当设备的劣化值超过该故障阈值时, 对设备进行更换活动.

ΔD : 表示单位时间内设备的劣化增量.

$\eta_{[i]}$: 表示在加工序列中, 第 i 项加工作业前, 对设备进行非完美的预防性维修活动后, 设备劣化的回退因子.

$D_{[i]}$: 表示在加工序列中, 第 i 项加工作业后, 未进行维修或更换活动时, 设备的劣化值.

$\bar{D}_{[i]}$: 表示在加工序列中, 第 i 项加工作业前, 设备的劣化值. 如果第 i 项加工作业前, 设备进行更换, 则 $\bar{D}_{[i]} = 0$; 如果第 i 项加工作业前, 设备进行非完美预防性维修, 则 $\bar{D}_{[i]} = \eta_{[i]}D_{[i]}$ ($i = 2, \dots, n$); 否则 $\bar{D}_{[i]}$ 值不变.

$D_{[0]}$: 表示设备的初始劣化状态.

$I_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases}$: 为指示函数. $I_A : X \rightarrow \{0, 1\}$ 是定义在某集合 X 上的函数, 表示其中有哪些元素属于某一子集 A .

下面给出模型假设.

1) 生产设备为单设备系统;

2) 在第 1 项加工作业前, 假设设备状态全新, 即 $D_{[0]} = 0$;

3) 单设备系统在同一时刻仅能调度一项加工作业或维修活动, 某项加工作业或维修活动在某一时刻也仅能在一个位置被调度;

4) 在设备进行某项加工作业的过程中, 不允许其他加工作业或预防性维修将其中断;

5) 假设设备加工过程中发生故障, 通过小修恢复运行, 且没有额外的时间惩罚;

6) 设备执行更换活动后便是新一轮的衰退周期;

7) 进行预防性维修或更换活动后, 设备的开机时间忽略.

1.3 考虑劣化状态的单机调度与非完美视情维修的集成

1.3.1 不考虑维修的单机调度模型

假设在单机调度过程中, 有 n 项加工作业 $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$, 它们对应的加工时间为 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 设备从全新状态(即设备的初始劣化值为 0)开始准备加工. 加工作业执行的过程中不允许被中断, 即加工作业是不可续的. 假设设备在整个调度过程中始终是可用的, 则单机调度的目的是根据优化目标得到最优的加工作业调度序列. 令

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果第 } i \text{ 项加工作业为工件 } j; \\ 0, & \text{否则;} \end{cases} \quad (1)$$

$$p_{[i]} = \sum_{j=1}^n p_j x_{ij}; \quad (2)$$

$$w_{[i]} = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}; \quad (3)$$

$$c_{[i]} = \sum_{k=1}^i p_{[k]}. \quad (4)$$

如果以最小化加工作业的总加权完成时间为目

为1, 表示预防性维修阈值.

这里采用轮盘赌的方法选择染色体.

交叉算子的基本运作过程是: 产生一个0~1的随机数, 如果该随机数小于设置好的交叉概率, 则进行交叉操作; 交叉点为1~n的随机整数, 对交叉点到n之间的编码进行单点交叉操作, 操作后, 检查编码中的加工作业序列, 将序列中重复的部分进行调整, 以满足单机调度的约束条件; 对n之后的维修阈值编码进行算术交叉操作, 假设在两个个体 D'_{PA} 与 D'_{PB} 之间进行算术交叉, 运算后产生的两个新个体为

$$\begin{cases} D_{PA} = \mu D'_{PB} + (1 - \mu) D'_{PA}, \\ D_{PB} = \mu D'_{PA} + (1 - \mu) D'_{PB}, \end{cases} \quad (15)$$

其中 μ 为一个常数.

变异算子的基本运作过程是: 产生一个0~1的随机数, 如果该随机数小于设置好的变异概率, 则进行变异操作; 变异位置为1~n+1的随机整数. 如果变异位置小于n+1, 则对加工序列执行变异操作, 即随机产生一个1~n的整数代替变异位置上的数值, 之后, 把与变异位置上重复的非变异位置的数据进行调整, 以满足单机调度的约束条件; 如果变异位置为n+1, 则对维修阈值进行变异, 即随机产生一个0~ D_F 的实数值代替变异位置上的数据.

2.2 算法步骤

1) 用蒙特卡洛仿真的方法产生训练样本, 即把输入数据(x_{ij} 和 D_P)和输出数据(即加工作业的总加权期望完成时间)作为训练样本;

2) 训练BP神经网络;

3) 遗传算法产生初始种群;

4) 用训练好的神经网络计算其适应值;

5) 根据计算出的适应值进行最优保留;

6) 通过轮盘赌的方法选择染色体;

7) 对选择的染色体进行交叉操作;

8) 对交叉操作后的染色体进行变异操作;

9) 判断是否完成遗传算法中的循环代数, 如果未完成, 则再执行4)~8), 否则执行10);

10) 最小的适应值所对应的染色体作为最优解.

3 算例分析

本文所建立的考虑劣化状态的单机调度与维修决策的随机期望值集成模型, 采用基于状态的维修策略解决了基于时间的维修策略所带来的过维修或欠维修问题; 而且针对状态可检测的生产系统, 采用视情的非完美预防性维修策略, 有效地降低了整个生产的持有成本.

下面给出相应的算例分析. 假设n项加工作业的加工时间为服从1~5的均匀分布的随机整数, 即

$p_j \sim U(1, 5)$; n项加工作业的权值为服从1~10的均匀分布的随机整数, 即 $w_j \sim U(1, 10)$; 单位时间内, 设备劣化值的增量 ΔD 是非负、稳定、独立的, 且服从参数为(4, 0.25)的Gamma分布, 即 $\Delta D \sim \Gamma(4, 0.25)$; 对设备进行非完美预防性维修后, 设备劣化的回退因子 $\eta_{[i]}$ 服从0~0.5的均匀分布, 即 $\eta_{[i]} \sim U(0, 0.5)$; 进行第i项加工作业的时间段内, 设备劣化增量的概率为 $f^{p_{[i]}}(D_{[i]} - \bar{D}_{[i]})$, 由此得到第i项加工作业完成后, 设备的劣化值 $D_{[i]}$; 到第i项加工作业前, 进行了预防性维修或更换后, 设备劣化值为 $\bar{D}_{[i]}$; 设备的故障阈值 D_F 为10.

此算例分析的运行环境为Windows 7, 设备处理器为Pentium(R) Dual-Core CPU, 内存(RAM)为4.0 GB, 实验运行平台为Matlab 2010b. 利用本文提出的随机期望值集成模型, 可以在加工作业的调度过程中, 设备的劣化值达到预防性维修阈值时, 安排非完美的预防性维修活动及维修时间; 在设备的劣化值达到故障阈值时, 安排更换活动及更换时间. 运用反向传播(BP)神经网络与遗传算法相结合的混合智能算法^[21]对所建立的随机期望值集成模型进行优化. 遗传算法的运行参数统一设置为: 种群大小为20, 最大遗传代数为80, 交叉概率为0.8, 算术交叉中的参数 $\mu = 0.3$, 变异概率为0.1, 代沟为0.8, 模拟次数为20次.

3.1 在集成研究中采用基于状态的维修策略与基于时间的维修策略的比较

在单机调度与维修决策的集成研究中, 为了解决基于时间的预防性维修策略进行维修决策所带来的过维修或欠维修问题, 本文采用基于状态的预防性维修策略进行维修决策.

取表1中的加工作业和对应权值, 以最小加权总期望完成时间为优化目标, 比较集成模型中采用基于状态的预防性维修策略和基于时间的预防性维修策略所得到的优化结果.

表1 加工作业时间与对应的权值

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_j	3	2	1	5	3	4	5	5	5	1
w_j	1	9	5	2	1	5	9	6	1	7

为了比较在同一设备的劣化分布下, 采用两种维修策略得到的最优目标值, 对劣化状态的增量服从 $\Gamma(4, 0.25)$ 的设备求其故障率.

对于 $t > 0$ 和 $h > 0$, $D_i(t+h) - D_i(t)$ 服从形状参数为 α 、尺度参数为 β 的Gamma分布, 其退化分布的概率密度函数为

$$f(D) = \frac{\beta^{\alpha h}}{\Gamma(\alpha h)} D^{\alpha h - 1} \exp(-\beta \cdot D), \quad (16)$$

而伽马函数为

$$\Gamma(q) = \int_0^{+\infty} u^{q-1} \exp(-u) du, \quad (17)$$

由故障概率定义 $F_i(t) = P(D_i(t) \geq D_F)$ 可求得 t 时刻前系统发生故障的概率^[22]为

$$F_i(t) = \frac{\Gamma(\alpha t, \beta(D_F) - D_i(0))}{\Gamma(\alpha t)}, \quad (18)$$

不完全 Gamma 函数为

$$\Gamma(u, v) = \int_v^{+\infty} x^{u-1} \exp(-x) dx. \quad (19)$$

已知 $D_i(0) = 0$, 令

$$A = \Gamma(\alpha t, \beta(D_F)) = \int_{\beta D_F}^{+\infty} x^{\alpha t-1} \exp(-x) dx,$$

$$B = \Gamma(\alpha t) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha t-1} \exp(-x) dx,$$

则 $F_i(t) = A/B$. 相应的可靠度函数为

$$R(t) = 1 - A/B.$$

故障概率密度函数为

$$f(t) = F'(t) = \frac{A'B - AB'}{B^2}.$$

其中

$$A' = \int_{\beta D_F}^{+\infty} \alpha x^{\alpha t-1} \ln x \exp(-x) dx,$$

$$B' = \int_0^{+\infty} \alpha x^{\alpha t-1} \ln x \exp(-x) dx.$$

因此, 故障率函数为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{A'B - AB'}{B(B - A)}. \quad (20)$$

基于时间的预防性维修策略采用文献[12]中的维修策略, 即以加工作业序列的安排和是否进行预防性维护的逻辑变量为决策变量, 考虑完美的预防性维修结合基于役龄的小修策略.

τ 时刻内的故障次数为

$$m(\tau) = \int_0^\tau \lambda(t) dt = \int_0^\tau \frac{A'B - AB'}{B(B - A)} dt. \quad (21)$$

进行预防性维护的决策变量为

$$y_{[i]} = \begin{cases} 1, & \text{如果第 } i \text{ 项加工作业前执行预防性维修;} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (22)$$

令 $a_{[i]}$ 表示第 i 项加工作业完成后设备的年龄, $\bar{a}_{[i]}$ 表示第 i 项加工作业前设备的年龄, 则

$$\bar{a}_{[i-1]} = a_{[i-1]}(1 - y_{[i]}), \quad (23)$$

$$a_{[i]} = \bar{a}_{[i-1]} + p_{[i]}. \quad (24)$$

$C_{[i]}$ 的期望值为

$$E(C_{[i]}) = \sum_{k=1}^i \{p_{[k]} + t_m y_{[k]} + t_r [m(a_{[k]}) - m(\bar{a}_{[k-1]})]\}. \quad (25)$$

文献[12]所建立的集成模型为

$$\min \sum_{i=1}^n w_{[i]} E(C_{[i]}). \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (28)$$

$$x_{ij} = 0, \quad 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; \quad (29)$$

$$y_{[i]} = 0, \quad 1, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (30)$$

取预防性维修的时间 $t_m = 5$, 小修时间 $t_r = 15$, 优化后得到的结果如表2所示.

表2 采用基于时间的维修策略得到的优化结果

调度序列	预防性维修序列	维修次数	最优目标值
10-2-3-7-8-6-9-4-1-5	0-0-1-0-0-1-1-1-1-0	5	700.6515

本文所建立的考虑连续劣化状态的单机调度与维修决策的集成模型, 采用基于状态的预防性维修策略. 为了与表2的结果进行比较, 这里考虑预防性维修效果为完美维修, 即以加工作业序列和完美预防性维护的阈值为决策变量, 考虑完美预防性维修结合小修的策略. 第 i 项加工作业完成时间的期望值为

$$E(C_{[i]}) = E\left(\sum_{k=1}^i (p_{[k]} + t_m I_{[D_F, \infty)}(D_{[k-1]}) + t_r I_{(D_F, \infty)}(D_{[k-1]}))\right),$$

当设备劣化值超过预防性维修阈值时, 进行完美维修, 优化目标与约束为式(10)~(14). 完美预防性维修的时间 $t_m = 5$, 小修时间 $t_r = 15$, 优化结果如表3所示.

表3 采用基于状态的维修策略得到的优化结果

调度序列	完美维修阈值	完美维修次数	最优目标值
10-3-2-7-8-6-4-1-9-5	5.5035	3	565

比较表2与表3的优化结果可以看出, 采用基于状态的维修策略得到的平均预防性维修次数和平均目标值优于基于时间的维修策略得到的平均预防性维修次数和平均目标值. 因此, 对于可以获得劣化状态的设备, 在集成研究中, 采用基于状态的维修策略可以避免过度维修, 减少维修次数, 降低持有成本.

由于设备的劣化状态与加工对象、加工环境和加工时间等诸多因素相关, 采用基于时间的维修策略所得到的最优的加工作业调度序列和维修序列在设备退化过程中的一次实现可能会出现欠维修的情况, 如图2所示. 图2中纵轴为设备的劣化状态值, 横轴为排好序的10项加工作业所对应的完工时间.

根据表2中得到的最优序列安排加工作业和维修活动, 设备劣化增量 $\Delta D \sim \Gamma(4, 0.25)$, D_F 为设备的故障阈值, 在某次实现中, 第4项加工作业完成后, 设备已经发生故障, 但基于时间的维修策略所作出的维修决策是, 不进行维修, 而是继续加工下一项加工

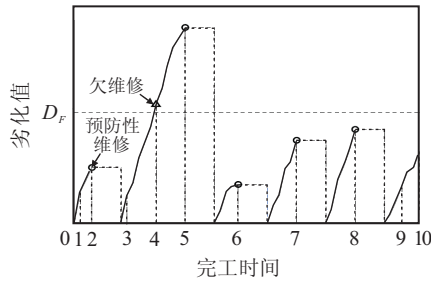


图2 基于时间维修策略得到的加工作业序列和维修阈值
作业, 显然此时发生了欠维修的情况. 对此, 采用基于状态的维修策略, 便能有效地避免这种欠维修的发生, 如图3所示.

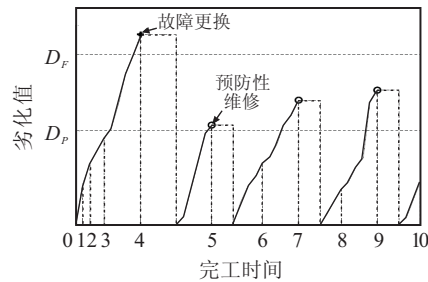


图3 基于状态维修策略得到的加工作业序列和维修阈值

图3中 D_P 为预防性维修阈值, 在某次实现中, 第4项加工作业完成后, 设备发生故障, 根据基于状态的维修策略所作出的维修决策, 及时进行故障后更换, 避免了欠维修的情况.

通过比较可以看出, 在集成研究中, 采用基于状态的维修策略, 根据设备实际状态安排维修和加工活动能更有效地避免过维修和欠维修.

3.2 采用视情非完美预防性维修策略的集成研究

非完美维修成本往往低于完美维修成本, 采用视情的非完美预防性维修策略既能根据设备的劣化程度及时安排维修, 又能降低生产过程中由于维修活动所产生的持有成本. 运用本文建立的考虑连续劣化状态的单机调度与维修决策的集成模型(即式(9)~(14))计算最优目标值, 其中加工作业的加工时间和权值为表1中给出的数值, 非完美维修时间为3, 故障后更换时间为5, 小修时间为15, 得到的优化结果如表4所示.

表4 采用视情的非完美预防性维修策略得到的优化结果

调度序列	非完美维修阈值	非完美维修次数	最优目标值
10-2-3-7-6-8-4-1-5-9	5.423	4	536.1

比较表4和表3中的优化结果可以看出, 采用视情非完美预防性维修策略可以得到更低的总加权期望完成时间, 即有效地降低了调度和维修决策引起的所有持有或库存成本.

3.3 不同加工作业规模下的优化结果

为了说明本文所建立的集成模型具有广泛的适用性, 以30项和100项加工作业为例, 分别随机产生

50组 (p_j, w_j) , 采用不同的维修策略, 得到相应的最优目标值. 图4和图5分别为50组30项和100项加工作业 (p_j, w_j) 在不同维修策略下得到的最优目标值. 其中: 方形表示每组加工作业在采用视情非完美维修策略下得到的最优目标值, 圆形表示每组加工作业在基于状态的完美预防性维修策略下得到的最优目标值, 三角形表示每组加工作业在基于时间的预防性维修策略下得到的最优目标值; 纵坐标为每组加工作业在3种维修策略下对应的最优目标值, 横坐标为加工作业对应的组数, 共有50组加工作业.

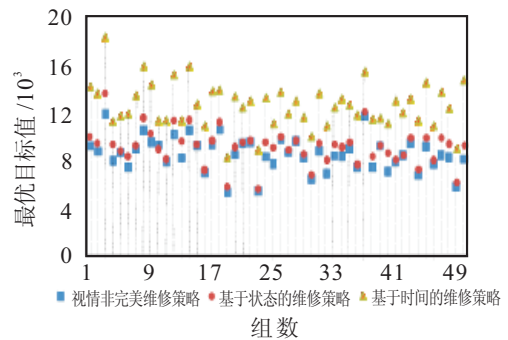


图4 50组30项加工作业在3种维修策略下的优化结果

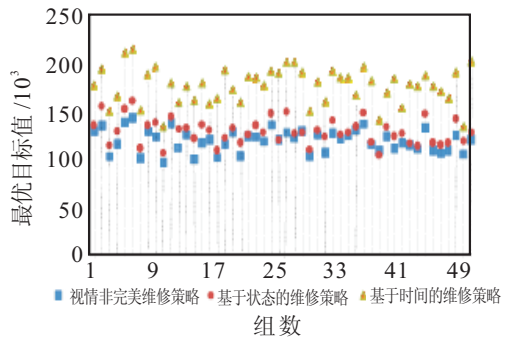


图5 50组100项加工作业在3种维修策略下的优化结果

如图4和图5所示, 每组加工作业和对应的权值在3种维修策略下得到的优化结果, 均是采用视情的非完美预防性维修策略得到的最优目标值最低, 基于状态的完美预防性维修策略得到的最优目标值较高, 而基于时间的维修策略得到的最优目标值最高. 由此看出, 考虑设备劣化状态, 并采用视情的非完美预防性维修策略的单机调度与维修决策的集成模型对于不同规模的加工作业都适用, 而且得到了比其他两种维修策略更优的目标值.

4 结 论

本文针对劣化状态可检测的系统, 在单机调度与维修决策的集成研究中, 考虑了设备的劣化状态, 根据预防性维修的阈值安排预防性维修活动, 避免了采用基于时间的维修策略可能产生的过维修或欠维修情况. 为了进一步降低整个生产过程的持有成本, 采用视情的非完美预防维修、小修和故障后更换相结合的混合维修策略, 以加工作业的次序和预防维修阈值

为决策变量,建立了加工作业的总加权期望完成时间最小为优化目标的随机期望值集成模型.实验结果表明:本文建立的集成模型既解决了在集成研究中采用基于时间维修策略可能产生的过维修与欠维修问题,又降低了生产的持有或库存成本;该集成模型适用于各种规模的加工作业.

本文在单机调度与维修决策的集成研究中,考虑了设备连续的劣化状态,并采用了视情的非完美预防性维修,最小化总加权期望完成时间.然而,对于更复杂的调度与维修决策的集成问题还需要进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Pinedo M L. Scheduling: Theory, algorithms, and systems[M]. New York: Springer, 2012: 13-40.
- [2] Adiri I, Bruno J, Frostig E, et al. Single machine flow-time scheduling with a single breakdown[J]. *Acta Informatica*, 1989, 26(7): 679-696.
- [3] Lee C Y, Leon V J. Machine scheduling with a rate-modifying activity[J]. *European J of Operational Research*, 2001, 128(1): 119-128.
- [4] 吴花平, 黄敏, 王兴伟. 考虑多个RMAs的单机调度问题[J]. *控制与决策*, 2014, 29(12): 2253-2258.
(Wu H P, Huang M, Wang X W. Single-machine scheduling problem with multi-RMAs[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(12): 2253-2258.)
- [5] Liao C J, Chen W J. Single-machine scheduling with periodic maintenance and nonresumable jobs[J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(9): 1335-1347.
- [6] Chen W J. Minimizing total flow time in the single-machine scheduling problem with periodic maintenance[J]. *J of the Operational Research Society*, 2006, 57(4): 410-415.
- [7] Hsu C J, Low C, Su C T. A single-machine scheduling problem with maintenance activities to minimize makespan[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 215(11): 3929-3935.
- [8] Benmansour R, Artiba A, Duvivier D, et al. Scheduling of production and maintenance activities under reliability constraint[C]. *The 9th Int Conf on Modeling, Optimization & SIMulation*. Bordeaux, 2012.
- [9] Aghezzaf E H, Jamali M A, Ait-Kadi D. An integrated production and preventive maintenance planning model[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 181(2): 679-685.
- [10] Aghezzaf E H, Najid N M. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(17): 3382-3392.
- [11] Cassady C R, Kutanoglu E. Minimizing job tardiness using integrated preventive maintenance planning and production scheduling[J]. *IIE Trans*, 2003, 35(6): 503-513.
- [12] Cassady C R, Kutanoglu E. Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine[J]. *IEEE Trans on Reliability*, 2005, 54(2): 304-309.
- [13] Pan E, Liao W, Xi L. Single-machine-based production scheduling model integrated preventive maintenance planning[J]. *The Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 50(1): 365-375.
- [14] Nodem F I D, Kenne J P, Gharbi A. Production planning and repair/replacement switching policy for deteriorating manufacturing systems[J]. *The Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 57(5-8): 827-840.
- [15] Fitouhi M C, Nourelfath M. Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for a single machine[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 136(2): 344-351.
- [16] Fitouhi M C, Nourelfath M. Integrating noncyclical preventive maintenance scheduling and production planning for multi-state systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, 121(1): 175-186.
- [17] El-Ferik S. Economic production lot-sizing for an unreliable machine under imperfect age-based maintenance policy[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 186(1): 150-163.
- [18] El-Ferik S, Ben-Daya M. Integrated production maintenance model under imperfect age-based maintenance policy and non-negligible maintenance times[J]. *Asia-Pacific J of Operational Research*, 2010, 27(4): 539-558.
- [19] Nourelfath M, Chatelet E, Nahas N. Joint redundancy and imperfect preventive maintenance optimization for series-parallel multi-state degraded systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 103(4): 51-60.
- [20] Wang S. Integrated model of production planning and imperfect preventive maintenance policy for single machine system[J]. *Int J of Operational Research*, 2013, 18(2): 140-156.
- [21] 刘宝碇, 赵瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 64-66.
(Liu B D, Zhao R Q, Wang G. *Uncertain programming with applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 64-66.)
- [22] Bouvard K, Artus S, Berenguer C, et al. Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping: Application to commercial heavy vehicles[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(6): 601-610.