

考虑产品堕化的生产计划与设备维修集合优化研究

刘勤明, 董航宇

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对单设备生产系统为解决生产计划与维修计划独立决策的不足, 构建了生产计划与设备维修计划的联合优化模型。考虑设备役龄对产品加工工时的影响, 在联合优化模型中引入产品堕化效应。在分析设备故障时, 区分设备闲置状态和生产状态, 同时考虑产品实际加工时间和设备役龄的关系, 以生产计划与设备维修计划的集成计划总费用最小为优化目标, 建立考虑产品堕化和设备运行时间的生产与维修的联合优化模型。运用改进粒子群算法求解能力约束下的联合优化问题, 结合算例分析, 说明联合优化模型在企业生产中的实用性, 验证该联合优化模型的有效性和应用价值。

关键词: 预防维护; 产品堕化; 设备役龄; 集合优化; 粒子群算法

中图分类号: F 273; TP 18 **文献标志码:** A

Integrated optimization of production planning and equipment maintenance considering deterioration of product

LIU Qinming, DONG Hangyu

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to solve the shortage of independent decision making in the planning of production and maintenance, a joint optimization model for the two plans was built for a single equipment production system. Considering the effect of the equipment age on the processing time of the product, the effect of product degradation was introduced. When analyzing the equipment failure, the idle state and production state of the equipment were distinguished, the relationship between the actual processing time of the product and the equipment age was considered, and an integrated optimization model for production and maintenance considering the degradation of products and the operating time of the equipment was established. The particle swarm optimization algorithm was used to solve the model, and the validity of the model was verified by an example analysis.

Keywords: preventive maintenance; deterioration of product; equipment age; integrated optimization; particle swarm optimization algorithm

企业正常运行的前提是能够为社会提供产品或服务,而设备是企业运行的基础,设备的状态决定企业是否有能力提供产品或服务,进而影响企业效益。设备维修与生产计划密切相关,设备维修占用生产资源,过度关注生产又带来设备失效,维修过度又会降低企业生产率。如何平衡二者之间的关系是企业十分关心的问题。

设备维修和生产存在耦合矛盾,因此兼顾设备维修和产品生产,平衡二者的矛盾,开展维修和生产集合计划的优化研究,为企业生产提供有价值的指导,具有较高的研究意义。例如 Graves 等^[1]提出单台设备的生产计划问题,在计划期内进行一次维修,以加权总完工时间最小为目标;Lee 等^[2]将文献[1]的研究成果扩展到并行设备问题上,但在计划期内还是只进行一次维修。在制定设备维修计划时,很多研究模型一般假设预防维修可使设备恢复如新,但是由于设备运行受到环境等因素的影响,这一假设与实际情况并不符合。文献[3-4]提出预防维修只是使设备的役龄减少一定值或降低一定比例。文献[5-8]在研究设备维修时,提出预防维修费用和维修效果存在线性关系,以维修费用最小为目标,建立设备维修计划模型。文献[9-10]研究了已知维修计划时,以总完成时间最短为目标,运用动态规划等算法解决生产能力约束下的调度问题。文献[11-13]研究了生产计划和预防维修的集成计划,但是没有考虑可靠度对产品质量的重要影响。文献[14-15]在研究生产调度与设备维护的集成计划时,提出工件堕化因子。蓝天皓等^[16]研究运用基于遗传算法的启发式算法求解单机预防维护与生产批量的集合计划。周炳海等^[17]研究了基于批量生产模式的混联系统双向导的机会维护问题。但是现有的文献大多都没有区分设备的闲置状态、运行状态对维修计划和生产计划的影响。

本文考虑设备役龄对产品加工工时的影响,引入产品堕化效应。同时考虑设备闲置与生产的不同状态,基于设备的实际生产运行时间研究设备故障,制定维修计划和生产计划,实现生产与维修费用的总费用最低,最后,运用粒子群算法求解生产计划和设备维修计划的集合问题。

1 问题描述

本文的生产计划采用批量生产的策略,维修策略采用基于设备实际运行时间的非固定周期预

防维修和故障后小修相结合的维修方式,同时预防维修以及故障小修都会占用设备运行时间,即维修时设备处于停机状态。设备加工产品过程中由于设备役龄增长,存在产品堕化效应^[18],即随着设备的役龄增加而导致产品的加工时间不确定。这种情况是由于设备服役时间越长,设备的性能退化越严重,产品的实际加工时间越长,设备运行时间越长,产品实际加工时间与其开始加工时的设备状态有关。并且,在分析设备故障发生次数时,需区分设备的运行状态和闲置状态,假设闲置状态的设备不会发生故障,采用基于运行时间的故障分析。

本文考虑产品堕化效应和设备实际运行时间,例如,阶段 t 的生产能力与阶段 $t-1$ 的产量有关,阶段 t 的生产能力又会约束阶段 $t+1$ 的生产计划,目标是确定每个阶段的生产批量和预防维修周期,使得整个生产计划周期的总费用期望值最低。

2 模型建立

2.1 符号说明

- τ ——固定时间长度;
 - H ——给定计划周期长度, $H=N\tau$, 其中 N 为整数;
 - i ——产品种类, $i=1, 2, \dots, p$;
 - d_{it} ——每个阶段 $t(t \in H)$ 对产品 $i(i \in p)$ 的市场需求;
 - $C_{\max}$ ——设备在每个生产阶段的最大生产能力;
 - L_p ——预防维修占用的生产时间;
 - L_r ——故障小修占用的生产时间;
 - $f(t)$ ——生产系统的故障概率密度函数;
 - $r(t)$ ——系统的故障率函数;
 - f_{it} ——在时间 t 生产产品 i 的生产准备费用;
 - ρ_{it} ——在时间 t 生产单件产品 i 的变动费用;
 - h_{it} ——在阶段 t 每件产品 i 的库存费用;
 - c_p ——预防维修的费用;
 - c_r ——故障时的小修费用;
 - ρ_i ——单件产品 i 的基本加工时间;
 - a_i ——单件产品 i 的实际加工时间;
 - j_i ——加工产品 i 的设备的役龄;
 - θ_i ——产品 i 的堕化因子;
 - I_{it} ——在阶段 t 的产品 i 的库存数量;
 - W_t ——故障次数;
 - Z_t ——设备实际运行时间。
- 模型决策变量:
- x_{it} ——在阶段 t 生产的产品 i 的数量;

y_{it} ——双值决策变量(产品 i 是在生产阶段 t 生产则 y_{it} 为 1, 否则为 0);

U_t ——双值决策变量(若在生产阶段 t 进行预防维修, 则为 1, 否则为 0);

T ——预防维修周期长度 $T = k\tau$ 。

2.2 数学模型

根据设备故障次数和设备故障率关系, 得到设备故障次数为

$$W_t = \int_{(1-U_t)Z_{t-1}}^{Z_t} r(t) dt \quad (1)$$

设备运转过程中对出现的随机故障采取小修策略, 根据式(1), 可得故障小修总费用为

$$C_1 = \sum_{t=1}^N W_t c_r \quad (2)$$

$U_t=1$ 表示在生产阶段 t 进行了预防维修, 否则不进行预防维修, 可得预防维修费用为

$$C_2 = \sum_{t=1}^N U_t c_p \quad (3)$$

基于式(2)和式(3), 可得到总维修费为

$$C = C_1 + C_2 = \sum_{t=1}^N (U_t c_p + W_t c_r) \quad (4)$$

预防维修使得设备役龄降为 0, 一个预防维修周期可能包含多个生产阶段, 根据 U_t 判断相邻两个生产阶段的关系, 若 $U_t=1$, 表示在生产阶段 t 进行了设备预防维修, 设备的实际运行时间与上个生产阶段没有关系, 则设备实际运行时间为

$$Z_t = \sum_{i=1}^p a_i(t_r) x_{it} \quad (5)$$

若 $U_t=0$, 则生产阶段 t 的生产状态与前一个生产阶段相关, 则设备实际运行时间为

$$Z_t = Z_{t-1} + \sum_{i=1}^p a_i(t_r) x_{it} \quad (6)$$

基于式(5)和式(6), 得到设备累计运行时间为

$$Z_t = (1 - U_t)Z_{t-1} + \sum_{i=1}^p a_i(t_r) x_{it} \quad (7)$$

由于受堕化效应的影响, 设备的役龄越来越大, 导致产品的实际加工时间越来越长, 而产品的实际加工时间与开始加工时设备的状态有关, 产品的实际加工时间与设备役龄 t_r 线性相关, 则由式(7)得到产品 i 的实际加工时间

$$a_i(t_r) = \rho_i + \theta_i t_r$$

设备的每个生产阶段的生产长度相同, 表示为 L , 预防维修和故障小修会占用一部分生产时间, 所以设备实际生产率为

$$A(U_t) = \frac{L - L_{pm}U_t - L_{cm}W_t}{L} \quad (8)$$

设备故障维修和预防性维修所占时间比例为 α , 可得

$$\alpha = \frac{L_{pm}U_t + L_{cm}W_t}{L} \quad (9)$$

设备的生产时间对应设备的生产能力, 设备总的实际可用生产能力为最大生产能力减去预防维修与故障小修所消耗的生产能力。设 g 为设备最大生产能力, 则设备在生产阶段的实际生产能力为

$$C_t(z) = g(1 - \alpha) \quad (10)$$

生产计划与预防维修计划的集成优化目的是使总费用最低, 总费用包括生产费用和维修费用, 即

$$\sum_{i \in H} \sum_{i \in p} (f_{it}y_{it} + p_{it}x_{it} + h_{it}I_{it}) + \sum_{t=1}^N (U_t c_p + W_t c_r) \quad (11)$$

$$x_{it} + I_{it-1} - I_{it} = d_{it} \quad (12)$$

$$x_{it} \leq d_{itN}^i y_{it} \quad (13)$$

$$\sum_{i \in p} a_i(t_r) x_{it} \leq C_t(Z) \quad (14)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0; y_{it} \in \{0, 1\}; U_t \in \{0, 1\}; T-1 \geq t_r \geq 0 \\ t \leq N; i \in p; t \in H$$

式(11)中: $\sum_{i \in H} \sum_{i \in p} (f_{it}y_{it} + p_{it}x_{it} + h_{it}I_{it})$ 表示生产费用; $\sum_{t=1}^N U_t c_p$ 表示预防维修总费用; $\sum_{t=1}^N W_t c_r$ 表示故障后小修的总费用。式(12)表示物料平衡约束, 式(13)表示生产固定费用约束, 式(14)表示生产能力约束。

3 模型求解

将式(1)故障次数表达式代入式(11), 将式(1)和(9)代入式(14), 结合式(5)~(7), 可得

$$\sum_{i \in H} \sum_{i \in p} (f_{it}y_{it} + p_{it}x_{it} + h_{it}I_{it}) + \sum_{t=1}^N (U_t c_p + c_r \int_{(1-U_t)Z_{t-1}}^{Z_t} r(t) dt) \quad (15)$$

$$x_{it} + I_{it-1} - I_{it} = d_{it} \quad (16)$$

$$x_{it} \leq d_{itN}^i y_{it} \quad (17)$$

$$Z_t = Z_{t-1} + \sum_{i=1}^p (\rho_i + \theta_i t_r) x_{it} \quad (18)$$

$$\sum_{i \in p} a_i(t_r) x_{it} \leq g \left[1 - \left(L_{pm}U_t + L_{cm} \int_{(1-U_t)Z_{t-1}}^{Z_t} r(t) dt \right) / L \right] \quad (19)$$

$$x_{it}, I_{it} \geq 0; y_{it} \in \{0, 1\}; U_t \in \{0, 1\}; T-1 \geq t_r \geq 0 \\ t \leq N; i \in p; t \in H$$

制定生产和预防维修的集成计划,即求出 U_t , x_{it} , I_{it} 和 y_{it} 。运用粒子群算法与启发式算法相结合的解法,可得到预防维修计划和生产计划。

计算步骤如下:

Step 1 设定预防维修周期,得到相应的 U_t ;

Step 2 计算得到每个生产阶段产品的实际加工时间;

Step 3 运用粒子群算法求解能力约束下的生产计划问题;

Step 4 比较生产和维修的总费用,使得费用取得最小值的 U_t , x_{it} 为最优的生产计划和预防维修的集成计划。

3.1 产品加工时间和生产能力计算

由 $T=k\tau$, 令 $k=1,2,\dots,N$, 可得到 U_t , 已知计划周期长度、设备故障率函数、预防维护费用和故障小修费用,则根据式(4)计算得到在计划周期内的设备维修总费用。

已知生产周期 T , 首先,设定预防维修周期,即获得预防维修费用和预防维修间隔长度,计算求解总费用,求解模型得到故障小修费用和生产费用;其次,分析故障次数与生产能力的互相影响,生产产品数量与生产能力之间的关系,产品的实际加工时间为

$$a_i(t) = \rho_i + \theta_i \left[(1 - U_t) Z_{t-1} + \sum_{i=1}^p a_i x_{it} \right] \quad (20)$$

各个生产阶段的生产能力为

$$C_t(z) = g \left[1 - \frac{L_{pm} U_t + L_{cm} W_t}{L} \right] \quad (21)$$

在已知生产能力后,可求解生产能力约束下的生产批量。

3.2 改进粒子群算法求解批量生产问题

构建粒子群算法(PSO)求解模型, x_{it} 和 I_{it} 均为连续整数变量, y_{it} 为 0,1 决策变量,用变量 y_{it} 作为构造 0,1 的编码粒子,对 y_{it} 进行编码,根据 y_{it} 与 x_{it} 和 I_{it} 的相关关系,用 y_{it} 表达出 x_{it} 和 I_{it} 。

$$x_{it} = \begin{cases} 0, & y_{it} = 0 \\ \sum_{m=1}^t d_{im}, & y_{it} = 1 \end{cases} \quad (22)$$

$$I_{it} = \sum_{m=1}^t x_{im} - \sum_{m=1}^t d_{im} \quad (23)$$

式中, $t = \min_{p=t+1,\dots,T} \{p | Y_{ip} = 1\}$ 。

对于多种产品多个周期的粒子,编码表示如

下式所示。

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1T} \\ \vdots & & \vdots \\ q_{p1} & \cdots & q_{pT} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Q 表示粒子群中的粒子,设 Q_h^k 表示粒子群中的第 h 个粒子在进化到第 k 代的位置值,表示生产计划问题的解,表达式为 $Q_h^k = [q_{hit}^k]_{p \times T}$ 。若 $q_{hit}^k = 0$, 则第 h 个粒子在进化到第 k 代时,第 i 个产品品种在生产阶段 t 不生产,否则表示生产。 $V_h^k = [v_{hit}^k]_{p \times T}$, 其中 V_h^k 表示粒子群中第 h 个粒子进化到第 k 代的进化速度。

批量问题的基本求解流程如下:

a. 确定参数。

确定种群规模 H , 和学习参数 c_1 和 c_2 , 赋值 $k=0$ 。

b. 初始化。

初始化所有粒子的位置和速度,位置和速度由以下公式随机生成, $R(0,1)$ 表示在 $[0,1]$ 间的随机数。

$$q_{hit}^0 = \begin{cases} 0, & R(0,1) < 0.5 \\ 1, & R(0,1) \geq 0.5 \end{cases} \quad (25)$$

$$v_{hit}^0 = v_{\min} + R(0,1)(v_{\max} - v_{\min}) \quad (26)$$

式中: $h = 1, 2, \dots, H$; $i = 1, 2, \dots, p$; $t = 1, 2, \dots, T$; $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 表示最大速度和最小速度。

c. 计算粒子适应值以及每个粒子和种群经历的最好位置,并更新记忆库。

粒子 Q_h^k 的适应值可由式(27)计算得出,当 $k > 0$ 时,由式(28)得出每个粒子在进化到第 k 过程中的最好位置 PB_h^k , 粒子初始化也就是 $k=0$, $PB_h^0 = Q_h^0$ 。由式(29)得出粒子群在进化到第 k 过程中的最好位置 GB^k , 并将其存入种群记忆库中。根据设置的计算条件进行检查,满足条件则终止计算,否则继续计算直到满足条件为止。

$$f(Q_h^k) = \left(\sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^N (f_{it} q_{hit}^k + p_{it} x_{it} + h_{it} I_{it}) \right) + M \sum_{t=1}^T \left(\max \left\{ 0, \sum_{i=1}^p (a_i(t) x_{it} - C_t(Z)) \right\} \right) \quad (27)$$

式中, M 表示无穷大的正数。

$$PB_h^k = \begin{cases} PB_h^{k-1}, & f(Q_h^k) > f(PB_h^{k-1}) \\ Q_h^k, & f(Q_h^k) \leq f(PB_h^{k-1}) \end{cases} \quad (28)$$

$$GB^k = \min(PB_h^k) \quad (29)$$

d. 对适应值差的粒子进行更换。

根据运算设置,从记忆库中选择一定量的粒

子替换种群中适应值较差的粒子。

e. 更新粒子位置和粒子速度。

根据式(30)使粒子速度在范围之内,式(31)使其结果在0和1之间。

$$g(v_{hit}^k)=\begin{cases} v_{\max}, & v_{hit}^k > v_{\max} \\ v_{hit}^k, & v_{\min} \leq v_{hit}^k \leq v_{\max} \\ v_{\min}, & v_{hit}^k < v_{\min} \end{cases} \quad (30)$$

$$h(v_{hit}^k)=\frac{1}{1+\left(\frac{v_{\max}-v_{hit}^k}{v_{hit}^k-v_{\min}}\right)^2} \quad (31)$$

初始化 $k=0$,之后令 $k=k+1$,由以下公式计算粒子的位置和速度,然后到步骤c进行迭代,达到最大循环次数终止。

$$\begin{aligned} \Delta v_{hit}^{k-1} &= c_1 R(0,1) \left(\boldsymbol{PB}_{hit}^{k-1} - q_{hit}^{k-1} \right) + \\ &\quad c_2 R(0,1) \left(\boldsymbol{GB}_{it}^{k-1} - q_{hit}^{k-1} \right) \\ v_{hit}^k &= g \left(v_{hit}^{k-1} + \Delta v_{hit}^{k-1} \right) \end{aligned}$$

$$q_{hit}^k = \begin{cases} 1, & R(0,1) < h(v_{hit}^k) \\ 0, & R(0,1) \geq h(v_{hit}^k) \end{cases}$$

4 算例分析

假设计划周期长度 $H=8\tau$,共8个生产周期,每个生产周期 L 的长度为1个月,每个生产阶段的最大生产能力 $C(t)=50$ 个,采用批量生产的策略,计划周期内共生产两种产品,基本加工时间为1。参考文献[14],两种产品的堕化因子相同, $\theta_1=\theta_2=R(0,0.003)$, $R(0,0.003)$ 表示 $[0,0.003]$ 间随机生成的数,每一次预防维修消耗时间为 $0.02L$,故障后小修时间为 $0.09L$ 。求满足每个生产阶段 t 的市场需求 d_{it} ,不会发生延迟交货或者缺货,假设生产系统的故障概率函数服从威布尔分布,威布尔分布故障率函数为

$$r(t)=\frac{\eta t^{\eta-1}}{\lambda^\eta} \quad (32)$$

$t>0, \eta>0, \lambda>0$,对应得到故障概率密度函数为

$$f(t)=\frac{\eta t^{\eta-1}}{\lambda^\eta} \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\eta\right] \quad (33)$$

取形状参数 $\eta=2$,尺度参数 $\lambda=2$,得到故障率函数如下:

$$r(t)=t/2$$

生产费用与每个阶段 t 的需求和设备相关参数如表1~3所示。

表 1 生产费用表
Tab.1 Production cost

产品	生产固定费用/元	单件产品变动费用/元	单件产品库存费用/元
1	1 000	90	40
2	1 000	90	40

表 2 每个生产周期的需求量
Tab.2 Demand of each production cycle

阶段	产品 1 的需求量/个	产品 2 的需求量/个
1	22	25
2	22	25
3	22	22
4	22	25
5	23	23
6	22	22
7	20	20
8	20	20

表 3 设备相关参数表
Tab.3 Related paremeters of the equipment

最大生产 能力	预修费用/ (元·次 ⁻¹)	小修费用/ (元·次 ⁻¹)	预修消耗 能力/次	小修消耗 能力/次
50	4 000	1 000	1	4.5

通过 VB6.0 编程运算求解,可得到最优生产计划和维修计划的总费用,如表4所示。

表 4 生产计划和维修计划的总费用
Tab.4 Total cost of production and maintenance planning

U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	维修费用/元	生产费用/元	总费用/元
1	1	1	1	1	1	1	1	34 000	47 863	81 863
1	0	1	0	1	0	1	0	20 000	48 189	68 189
1	0	0	1	0	0	1	0	17 500	49 032	66 532
1	0	0	0	1	0	0	0	16 000	51 765	67 765
1	0	0	0	0	1	0	0	16 500	56 242	72 742
1	0	0	0	0	0	1	0	18 000	61 483	79 483
1	0	0	0	0	0	0	1	20 500	64 678	85 178
1	0	0	0	0	0	0	0	20 000	66 083	86 083

生产计划与维修计划集成计划的优化目标是使总费用最小。首先基于改进粒子群算法求解提出的模型,通过表4可知最小费用为66 532元,设备维修费用为17 500元,生产费用为49 032元。其次,基于基本粒子群算法求解模型,可得最小费用为80 219元,设备维修费用为21 820元,生

产费用为 58 399 元, 并且计算时间长于改进粒子群算法。综合看出改进粒子群算法求解联合优化模型优于粒子群算法求解该模型。

考虑总费用最低, 最佳的预防维修计划为 $1 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 1 \rightarrow 0 \rightarrow 0 \rightarrow 1 \rightarrow 0$, 生产计划如表 5 所示。

表 5 最优生产计划
Tab.5 Optimal production planning

周期	产品种类		产品库存		生产固定成本	
	1	2	1	2	1	2
1	22	25	0	0	1	1
2	22	25	0	0	1	1
3	22	22	0	0	1	1
4	22	25	0	0	1	1
5	23	23	0	0	1	1
6	22	22	0	0	1	1
7	20	20	0	0	1	1
8	20	20	0	0	1	1

5 结 论

本文以单设备生产系统为研究对象, 研究了预防维修计划和生产计划的集合优化, 考虑在实际生产中的产品堕化效应, 即产品实际加工时间不是确定值, 而是与产品基本加工时间和设备役龄相关。随着设备役龄增大, 产品所需加工时间增长, 这种情况更贴近生产实际。另外在分析设备故障时, 区分了设备闲置状态和生产运行状态, 只考虑设备在生产时间内可能发生的故障, 避免把生产运行状态和闲置状态作为相同的情形进行分析, 导致设备维修过度。最后, 通过算例分析, 说明模型在企业实际生产中的应用, 证明模型具有更好的实际价值。未来将研究如何制定能力约束下的维修与多级多资源约束下的生产与维修的集合计划。

参考文献:

[1] GRAVES G H, LEE C Y. Scheduling maintenance and semi-resumable jobs on a single machine[J]. *Naval Research Logistics*, 1999, 46(7): 845–863.

[2] LEE C Y, CHEN Z L. Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines[J]. *Naval Research Logistics*, 2000, 47(2): 145–165.

[3] GUO C M, WANG W B, GUO B, et al. A maintenance optimization model for mission-oriented systems based on Wiener degradation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2013, 111: 183–194.

[4] 王文彬, 赵斐, 彭锐. 基于三阶段故障过程的多重点检策略优化模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(1): 223–232.

[5] 董克, 吕文元. 考虑租赁延迟的设备预防维护策略优化研究[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(1): 60–66.

[6] 董克, 吕文元. 基于历史故障数据的租赁设备预防维护策略优化[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(5): 119–124.

[7] 董克, 吕文元. 考虑客户满意度的租赁设备维护策略优化[J]. *系统工程*, 2017, 35(3): 153–158.

[8] 刘勤明, 吕文元, 叶春明. 考虑中间库存缓冲区的设备不完美预防维修策略研究[J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(9): 2614–2616, 2623.

[9] DONG M. Parallel machine scheduling with limited controllable machine availability[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(8): 2240–2252.

[10] SCHMIDT G. Scheduling with limited machine availability[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 121(1): 1–15.

[11] AGHEZZAF E H, JAMALI M A, AIT-KADI D. An integrated production and preventive maintenance planning model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(2): 679–685.

[12] AGHEZZAF E H, NAJID N M. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(17): 3382–3392.

[13] YALAOUI A, CHAABI K, YALAOUI F. Integrated production planning and preventive maintenance in deteriorating production systems[J]. *Information Sciences*, 2014, 278: 841–861.

[14] 崔维伟, 陆志强, 潘尔顺. 基于多目标优化的生产调度与设备维护集成研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(6): 1398–1404.

[15] 陆志强, 赵婵媛, 崔维伟. 串联生产系统预防性维护计划建模与优化[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2017, 38(2): 269–275.

[16] 蓝天皓, 陆志强, 张岳君. 单机系统预防性维护与生产批量联合决策研究[J]. *工业工程与管理*, 2014, 19(2): 55–61.

[17] 周炳海, 林松. 基于批量生产模式的混联系统双向机会维护建模[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(8): 1382–1388.

[18] KUO W H, YANG D L. Minimizing the makespan in a single-machine scheduling problem with the cyclic process of an aging effect[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(3): 416–420.