

集成预防性维护和流水线调度的鲁棒性优化研究

陆志强¹ 张思源¹ 崔维伟²

摘 要 针对离散流水车间, 设备故障率函数服从威布尔分布, 在考虑维护策略的基础上, 以工件的最终完工时间期望值为质量鲁棒性指标、以所有工序的开始加工时间的延迟总和的期望值为解鲁棒性指标, 建立了不确定性环境下预防性维护 (Preventive maintenance, PM) 和生产调度的集成优化模型, 联合决策各工序的开始加工时间和预防性维护位置. 进一步, 设计了基于工件优先列表、有效代理指标、邻域搜索机制的三阶段启发式算法对模型进行求解. 最后, 数值实验与传统方法对比结果表明, 系统最优缓冲时间随着解鲁棒性权重的增大而逐渐增加, 且质量鲁棒性退化速度远小于解鲁棒性提升的速度, 使得其与传统方法相比总体目标愈加优异.

关键词 流水车间, 预防性维护, 不确定性, 启发式算法, 鲁棒性

引用格式 陆志强, 张思源, 崔维伟. 集成预防性维护和流水线调度的鲁棒性优化研究. 自动化学报, 2015, 41(5): 906–913

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140560

Integrating Production Scheduling and Maintenance Policy for Robustness in Flow Shop Problems

LU Zhi-Qiang¹ ZHANG Si-Yuan¹ CUI Wei-Wei²

Abstract For the flow-shops, where the machines' failure function is governed by the Weibull distribution, considering the maintenance strategy, a joint model of integrating run-based preventive maintenance (PM) and production scheduling is proposed under the uncertainty environment, in which the planned start times of jobs and the PM times are determined simultaneously. And, the makespan is selected as the quality robustness measure; the total delay of the jobs' start time is selected as the solution robustness measure. Then, a three-phase heuristic algorithm based on the priority list, surrogate measure, and local search is devised to solve the mathematic model. Experimental results demonstrate that the solution robustness can be significantly improved at the cost of very little degradation in quality robustness using our algorithm compared with the traditional way.

Key words Flow shop, preventive maintenance (PM), uncertainty, heuristic, robust

Citation Lu Zhi-Qiang, Zhang Si-Yuan, Cui Wei-Wei. Integrating production scheduling and maintenance policy for robustness in flow shop problems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(5): 906–913

传统调度理论假设机器总是可用的, 然而随着机器老化故障的概率不断增大, 需要对机器进行定期或不定期的维护, 从而造成机器的不可用性. 如汽车装配等离散制造系统, 在理论上可抽象为流水车间调度问题^[1]. 然而, 由于不确定的影响, 如设备故障, 常导致调度无法按预定执行. 又如, 在西装定制生产中, 任何有关设计、检测的仪器发生异常都会导

致生产无法预期进行^[2]. 因此, 在解决此类问题时, 考虑生产与维护的相互影响, 对两者进行联合优化具有更加广泛的应用价值.

已有流水车间调度与维护相结合的文献中, 根据考虑设备不可用性的形式, 可将其分为两类: 1) 确定性问题: 假设设备在调度期内安排充分的预防性维护活动, 因此设备的可靠性被认为很高且不会发生随机故障; 2) 不确定性问题: 假设设备在调度周期内会发生随机故障, 此类研究中往往涉及调度的鲁棒性指标. 在第 1) 类中, 针对两阶段流水线系统的研究较为广泛, 如 Lee^[3]、Vahedi-Nouri 等^[4]、Ramezani^[5] 等分别假设仅有一次不可用或者多次不可用期对问题进行了分析研究, 首先分析了仅有两个工件加工时的问题性质, 继而结合禁忌搜索算法求解 n 个工件时的优化问题. 但在多阶段流水线中此类研究相对较少, 周炳海等^[6] 考虑机器的预防性维护, 建立了机器预防性维护 (Preventive

收稿日期 2014-08-13 录用日期 2014-12-31
Manuscript received August 13, 2014; accepted December 31, 2014
国家自然科学基金 (61473211, 71171130), 上海市自然科学基金项目 (12ZR1414400) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61473211, 71171130), and Natural Science Foundation of Shanghai (12ZR1414400)
本文责任编辑 沈轶
Recommended by Associate Editor SHEN Yi
1. 同济大学机械与能源工程学院 上海 201804 2. 上海交通大学工业工程与管理系 上海 200240
1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804 2. Department of Industrial Engineering and Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240

maintenance, PM) 的优化周期模型, 以最小 Makespan 为调度优化目标设计了基于 NEH (Nawaz, Ensore, and Ham) 的启发式算法。

Khelifati 等^[7] 假设机器需要周期性地给定时间窗内进行维护, 采用多智能体算法求解问题。在第 2) 类中, Allahverdi 等^[8]、Zandieh 等^[9]、王圣尧等^[10]、Sarker 等^[11] 研究了流水线系统并假设机器会发生随机故障, 结合蒙特卡洛抽样的方法对问题求解, 并提出了前摄性调度策略以改善解鲁棒性指标。

综上, 现有文献中, 多数研究在确定环境中展开, 即忽略故障的不确定性。而在考虑了不确定性的文献中, 部分学者同时考虑了预防性维护和随机故障, 却仅考虑质量鲁棒性而未考虑解鲁棒性; 部分学者虽然提出了前摄优化以提高解鲁棒性, 却假设机器发生随机故障而未考虑机器老化的影响。本文针对离散型流水车间, 同时考虑预防性维护策略及故障概率, 在不确定环境下建立生产调度和设备维护的联合模型, 以质量鲁棒性与解鲁棒性为目标, 旨在实现生产调度和维护策略的联合优化。

1 问题描述

1.1 问题假设

1) m 个阶段的流水线系统, 调度期内共有 n 个工件需要加工, 每个工件均包含 j 道工序 ($1 \leq j \leq m$)。各阶段机器之间缓冲空间无限, 且所有工件均在零时刻到达。

2) 机器的失效函数服从威布尔分布, $\lambda(t)$ 为故障率函数, β 为形状参数, θ 为尺寸参数。 $\beta > 1$, 随着 t 的增加, 故障概率逐渐增大, 机器在 t 时刻的可靠度为 $R(t) = \exp(-\int_0^t \lambda(t')dt') = e^{-(t/\theta)^\beta}$ 。显然, 执行预防性维护可提高可靠度, 有效降低故障发生的概率。当故障时, 采取最小维修, 小修仅恢复机器的功能而不改变其役龄。 t_r 和 t_p 分别为机器的平均小修时间和平均预防性维护时间。

3) 对于传统调度问题, 学者多研究正则目标, 如 $C_{\max}$; 然而当存在意外故障时, 相应目标变为对应的数学期望, 如 $E(C_{\max})$ 。即, 当考虑不确定性时, 关注的是鲁棒性问题。鲁棒性可分为两类: 解鲁棒性 (Solution robustness) 和质量鲁棒性 (Quality robustness), 前者是指调度方案具有一定的稳定性, 后者是指目标函数在不确定环境下仍能较好的表现^[12]。本文采用前摄性调度, 即事先考虑故障影响, 在制定计划时加入缓冲时间来吸收不确定因素的影响。令 σ^o 为预计调度, 机器发生故障后, 采用右移策略对 σ^o 重调度, 最终执行的 σ^r 为实际调度。对于解鲁棒性, 所有工

序 $O_{[k],j}$ 在预计调度和实际调度间开始时间偏差之和的期望值, $E(\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m |S_{[k],j}^r - S_{[k],j}^o|)$ 为指标。而质量鲁棒性, 以 $E(C_{\max}^r)$ 为指标。总目标为 $Z = \alpha_1 E(\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m |S_{[k],j}^r - S_{[k],j}^o|) + \alpha_2 E(C_{\max}^r)$, 其中, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

1.2 数学建模

决策变量: $x_{i,j,k}$ 为 0/1 变量, 表示对任意一台机器 j , 工件 i 是否在第 k 个位置加工, 若是则为 1, 反之为 0; $y_{[k],j}$ 为 0/1 变量, 表示是否在 $O_{[k],j}$ 后维护, 若是则为 1, 反之为 0。辅助变量: $O_{[k],j}$ 为机器 j 的第 k 个位置的工序; $p_{[k],j}$ 为 $O_{[k],j}$ 的加工时间; $S_{[k],j}^o$ 为 $O_{[k],j}$ 在预测调度 σ^o 中的开始时间; $C_{[k],j}^o$ 为 $O_{[k],j}$ 在预测调度 σ^o 中的完成时间; $S_{[k],j}^r$ 为 $O_{[k],j}$ 在 σ^r 中的开始时间; $C_{[k],j}^r$ 为 $O_{[k],j}$ 在 σ^r 中的完成时间; $a_{[k],j}$ 为加工 $O_{[k],j}$ 前的役龄; $b_{[k],j}$ 为加工 $O_{[k],j}$ 后的役龄; $w_{[k],j}^r$ 与 $u_{[k],j}^r$ 为引入的参变量。

$$\min Z = \alpha_1 E \left(\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m |S_{[k],j}^r - S_{[k],j}^o| \right) + \alpha_2 E(C_{\max}^r) \quad (1)$$

$$S_{[1]1}^o = 0 \quad (2)$$

$$S_{[k]j}^o \geq C_{[k-1]j}^o + tp \times y_{[k-1]j}, \quad \forall j, \forall k \geq 2 \quad (3)$$

$$C_{[k]j}^o = S_{[k]j}^o + p_{[k],j}, \quad \forall j, \forall k \quad (4)$$

$$(2 - x_{ijk} - x_{i,j+1,k'})Z \geq S_{[k]j}^o + p_{ij} + tp \times y_{[k]j} - S_{[k'],j+1}^o, \quad \forall j < m, i, k, k' \quad (5)$$

$$S_{[1]1}^r = 0 \quad (6)$$

$$S_{[k],1}^r = \max\{S_{[k]1}^o, C_{[k-1]1}^r + tp \times y_{[k-1]1}\}, \quad \forall k \geq 2 \quad (7)$$

$$C_{[k]j}^r = S_{[k]j}^r + p_{[k],j} + N_{[k],j} \times tr_j \quad \forall k, j \quad (8)$$

$$S_{[1]j}^r = \max\{S_{[1]j}^o, C_{[1],j-1}^r\}, \quad \forall j \geq 2 \quad (9)$$

$$S_{[k]j}^{mr} = \max\{S_{[k]j}^o, \max\{X_{[k]j}^r, C_{[k-1]j}^r + tp \times y_{[k-1]j}\}\}, \quad \forall j \geq 2, \forall k \geq 2 \quad (10)$$

$$X_{[k]j}^r = C_{i,j-1}^r + (1 - x_{ijk}) \times M, \quad \forall i, j, k \quad (11)$$

$$S_{[k]j}^r = \min\{S_{[k]j}^{mr}\}, \quad \forall j \geq 2, \forall k \geq 2 \quad (12)$$

$$C_{\max}^r = C_{[n]m}^r \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall j, k \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ijk} = 1, \quad \forall j, i \quad (15)$$

$$p_{[k]j} = \sum_{i=1}^n x_{ijk} p_{ij}, \quad \forall j, k \quad (16)$$

其中, M 和 Z 为足够大的数. 式 (1) 表示目标函数. 约束 (2) 和 (3) 表示在预测调度中, 工序的加工时间和完成时间的约束. 约束 (4) 表示在预测调度中各工序的位置约束关系. 约束 (5)~(13) 表示当机器发生故障时, 采用右移策略对工序进行重调度, 得到工序的实际加工时间 $S_{[k],j}^r$; 其中, 约束 (10) 和 (11) 为引入的参变量, 与约束 (4) 相对应, 表示在实际调度中, 每台机器上加工的各工件顺序不须完全一致. 约束 (14)~(16) 表示工序和加工位置的一一对应关系.

2 算法设计

该模型为混合整数规划模型, 提出三阶段启发式算法. 算法主要思想为: 在第 1 阶段中, 设计了启发式规则 Procedure 1, 即首先基于优先列表机制生成一个部分调度, 接着根据 Procedure 1 在调度中确定工序的加工顺序和预防性维护的位置; 在第 2 阶段中, 提出了基于代理指标的规则 Procedure 2, 即根据代理指标在这个部分调度中插入缓冲时间, 从而得到一个完整预测调度; 在第 3 阶段中, 通过基于邻对交换的邻域搜索机制的规则 Procedure 3 对解进行改进.

2.1 三阶段算法描述

1) 第 1 阶段: 决策工序的加工顺序和预防性维护的位置. 为了最大化可用性, 实际的预防性维护周期应当与最优周期尽可能接近. 算法的具体步骤为:

Procedure 1.

步骤 1. 通过 NEH 规则产生工序优先序列 L : 按工件的总加工时间排序; 从 $k = 2$ 到 n , 把第 k 个工件插入到 k 个可能的位置, 比较所有排序方式, 求得最小的目标函数对应的排列.

步骤 2. 为了最大化设备的可用度, 最优的预防性维护周期 $T_j = \theta_j \{tp_j / [tr_j(\beta_j - 1)]\}^{1/\beta_j}$;

步骤 3. 对机器 M_1 , 令机器年龄为 0, 即 $\text{age} = 0$, 输入优先序列 L . 按照序列 L 的工件顺序, 依次检查各工件 L_i , 若 $\text{age} + p_{L_i,1} \leq T_1$, 则插入 L_i , 并将 L_i 从序列 L 中删除, 令 $\text{age} = \text{age} + p_{L_i,1}$. 序列 L 的最后一个工件检查结束后, 插入预防性维护, 令 $\text{age} = 0$. 重复此步骤, 直至序列 L 为空.

步骤 4. 对于机器 M_j ($2 \leq j \leq m$), 输入原始优先序列 L .

步骤 4.1. 令 $\text{age} = 0$, $k = 1$.

步骤 4.2. 产生一个时间槽 k , 令 LB_k 为此时间槽的开始时间, UB_k 为完成时间. 如果 $k = 1$,

则 $LB_k = 0$; 否则 $LB_k = UB_{k-1} + t_j$. 令 $UB_k = LB_k + T_j$. 按照 L 的工件顺序, 依次检查各工件 L_i , 若 $C_{L_i,j-1} < UB_k$ 且 $\text{age} + p_{L_i,j} \leq T_j$, 则插入 L_i , 将 L_i 从序列 L 中删除, 令 $\text{age} = \text{age} + p_{L_i,1}$, 更新 UB_k 的值, $UB_k = C_{J(k),j} + T_j - Q_k$, 其中 Q_k 为时间槽 k 中的总完成时间, $J(k)$ 为时间槽 k 中的最后一道工序. 序列 L 的最后一个工件检查结束后, 插入预防性维护, 令 $k = k + 1$, $\text{age} = 0$. 重复此步骤, 直至序列 L 为空.

步骤 5. 对于机器 M_j ($2 \leq j \leq m$), 工序排序为 π_j ; 令 $\pi_j(i)$ 为序列中的第 i 道工序, $\text{age} = 0$, $i = 1$.

步骤 5.1. 如果 $\text{age} + p_{\pi_j(i),j} > T_j$, 则插入一个预防性维护, 令 $\text{age} = 0$, 然后插入工序 $\pi_j(i)$; 否则, 直接插入工序. 令 $\text{age} = \text{age} + p_{\pi_j(i),j}$. 如果 $\pi_j(i)$ 和 $\pi_j(i-1)$ 的间隙大于 t_j , 则向间隙中插入预防性维护, 令 $\text{age} = p_{\pi_j(i),j}$.

步骤 5.2. 令 $i = i + 1$. 如果 $i < n$, 返回步骤 5.1; 否则, 输出结果.

2) 第 2 阶段: 确定了工件加工顺序和预防性维护位置之后, 利用 Procedure 2 步骤得到缓冲时间的大小 (见第 2.2 节).

3) 第 3 阶段: 此阶段通过基于邻对交换的局部搜索改进预测调度解. 算法的具体步骤为:

Procedure 3.

步骤 1. 记录预测调度 σ^o 的目标函数值 z_0 ;

步骤 2. 令 $i = 1, j = 1$;

步骤 3. 调度 σ^o 中有一对工序 $O_{[i]j}$ 和 $O_{[i+1]j}$, 交换两工序顺序, 通过以下步骤计算目标值;

步骤 3.1. 通过 Procedure 1 得到预防性维护的位置;

步骤 3.2. 通过 Procedure 2 向调度中插入缓冲时间. 记录此时的目标函数值 z_i ;

步骤 4. 如果 $z_i < z_0$, 则 $\sigma^o \leftarrow \sigma^i$, $z_0 \leftarrow z_i$;

步骤 5. $i = i + 1$, 若 $i > n$, 则转入步骤 6; 否则, 返回步骤 3.

步骤 6. $j = j + 1$, 若 $j > m$ 终止算法; 否则, 返回步骤 3.

2.2 Procedure 2: 插入缓冲时间的方法

由于对于给定的完整调度解, 无法推导出其目标的数学期望, 而采用蒙特卡洛模拟非常耗时. 因此提出有效代理指标来代替解鲁棒性和质量鲁棒性, 并建立基于代理指标的线性模型.

2.2.1 代理指标的相关分析

机器在役龄 t 时的可靠度为 $R(t) = \exp(-\int_0^t \lambda(t')dt') = e^{-(t/\theta)^\beta}$, 进而推导出当机器加工 $O_{[k],j}$ 时发生故障的概率为 $1 -$

$e^{-[(a_{[k],j}/\theta)^\beta - (b_{[k],j}/\theta)^\beta]}$, 通过积分可以得到机器发生故障次数的期望为 $[(a_{[k],j}/\theta)^\beta - (b_{[k],j}/\theta)^\beta]$, 机器的等效故障时间长度为 $t_{[k],j} = t_r[(a_{[k],j}/\theta)^\beta - (b_{[k],j}/\theta)^\beta]/(1 - e^{-[(a_{[k],j}/\theta)^\beta - (b_{[k],j}/\theta)^\beta]})$.

解鲁棒性指标为 $\sum_{[k]=1}^n \sum_{j=1}^m T_{[k],j}$, $T_{[k],j}$ 为 $O_{[k],j}$ 加工时间延迟的实际期望值的代理值. 工序 $O_{[k],j}$ 的延迟可能是由于其前续任意工序的故障引起的, 据此提出 $T_{[k],j} = \sum_{[k']=1}^k \sum_{j'=1}^j Pr_{[k'],j'} \max\{t_{[k'],j'} - \text{Idle}_{[k],j}^{k',j'}, 0\}$, 其中 $\text{Idle}_{[k],j}^{k',j'}$ 表示 $O_{[k],j}$ 的开始时间与 $O_{[k'],j'}$ 的完成时间之间的缓冲时间, $Pr_{[k'],j'}$ 为机器在加工 $O_{[k'],j'}$ 发生故障的概率, $t_{[k'],j'}$ 为机器在加工 $O_{[k'],j'}$ 时的等效故障时间. 以图 1 中 $O_{1,1}$ 发生故障导致 $O_{3,2}$ 延迟为例:

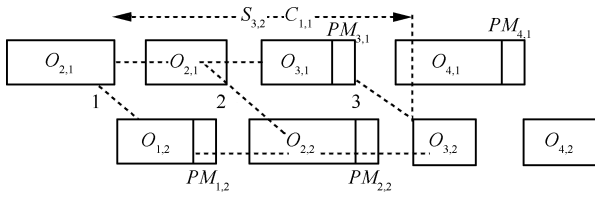


图 1 2 台机器 4 个工件的调度甘特图
Fig. 1 The scheduling Gantt chart of 2 machines and 4 jobs

由约束关系可知, $O_{1,1}$ 可以通过图中的路径 1~3 的任意一条路径对 $O_{3,2}$ 的开始时间产生影响.

在路径 1 中, 即 $O_{1,1} \rightarrow O_{1,2} \rightarrow O_{2,2} \rightarrow O_{3,2}$, 则 $\text{Idle}_{3,2}^{1,1}(1) = S_{3,2} - C_{1,1} - (p_{1,2} + p_{2,2} + PM_{1,2} + PM_{2,2})$.

在路径 2 中, 即 $O_{1,1} \rightarrow O_{2,1} \rightarrow O_{2,2} \rightarrow O_{3,2}$, 则 $\text{Idle}_{3,2}^{1,1}(2) = S_{3,2} - C_{1,1} - (p_{2,1} + p_{2,2} + PM_{2,2})$.

在路径 3 中, 即 $O_{1,1} \rightarrow O_{2,1} \rightarrow O_{3,1} \rightarrow O_{3,2}$, 则 $\text{Idle}_{3,2}^{1,1}(3) = S_{3,2} - C_{1,1} - (p_{2,1} + p_{3,1})$.

显然, $O_{3,2}$ 由于 $O_{1,1}$ 的故障而引起的延迟应为 $O_{1,1}$ 的故障时间与所有路径中的各缓冲时间最小值的差值, 此最小的缓冲时间对应的路径为问题的关键路径. 易发现 $S_{3,2} - C_{1,1}$ 为定值, 则 $\text{Idle}_{3,2}^{1,1} = S_{3,2} - C_{1,1} - \max\{D_{3,2}^{1,1}(1), D_{3,2}^{1,1}(2), D_{3,2}^{1,1}(3)\}$. 下面采用网络图的方式阐述 $D_{3,2}^{1,1}$ 的意义. 在图 2 中, 节点表示工序的加工时间, 横向弧的权重表示相邻两工序之间的预防性维护值 $PM_{i,j}$ 与 $y_{i,j}$ 的乘积, 其中 $y_{i,j}$ 为 0/1 变量, 若 $p_{i,j}$ 后实施 $PM_{i,j}$ 则为 1; 反之则为 0. 纵向弧的权重值为 0. 通过对图论中关键路径的描述作略微改动, 本问题的关键路径定义为: 从节点 $p_{1,1}$ 到节点 $p_{3,2}$ 的路径中, 经过这两点 (不含两节点) 的所有节点以及弧的权重之和最大的路径, 即为 $D_{3,2}^{1,1}$ 所对应的路径.

根据以上分析, 提出用

$$M_s = \sum_{[k]=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{O_{[k'],j'} \in E} Pr_{[k'],j'} \max\{t_{[k'],j'} - (S_{[k],j} - C_{[k'],j'} - D_{[k],j}^{[k'],j'}), 0\}$$

代替解鲁棒性函数值. 式中的 E 表示所有影响 $O_{[k],j}$ 的工序的集合. 此外, 采用 $M_q = C_{\max}^0$ 代替质量鲁棒性函数值.

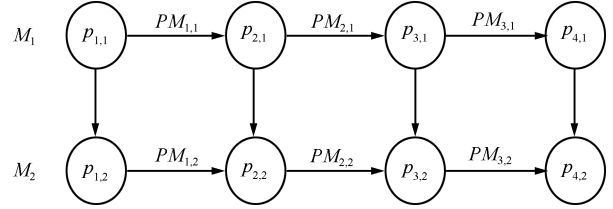


图 2 2 台机器 4 个工件调度示意网络图

Fig. 2 The scheduling network diagram of 2 machines and 4 jobs

2.2.2 代理指标的验证

以蒙特卡洛仿真验证代理指标对鲁棒性调度的预测能力. 首先, 对于随机产生的一个调度问题, 得到 N_x 个算例, 接着采用以下步骤进行相关性检验:

步骤 1. 针对每一个算例, 利用上文提出的 Procedure 1 产生一个部分调度 σ_p , 确定工序的顺序和维护的位置.

步骤 2. 向每一个 σ_p 中插入缓冲时间产生 N_r 个完成调度 σ_j ($j = 1, \dots, N_r$), 并计算 $A = M_s(\sigma_j)$,

$B = M_q(\sigma_j)$. 对每一个完成调度 σ_j , 随机产生 N_s 组机器故障, 采用右移策略分别计算所有工序延迟时间的总和 $\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m |S_{[k],j}^r - S_{[k],j}^0|$ 以及 $C_{\max}^r$, 并计算算例的两个函数值 $A' = (\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m |S_{[k],j}^r - S_{[k],j}^0|)/N_s$ 与 $B' = C_{\max}^r/N_s$.

步骤 3. 每个代理指标都有 N_r 组结果, 可以得到代理指标与抽样仿真的线性关系. 采用 R^2 为指标分别检验 A 与 A' , B 与 B' 的相关度.

对于每个随机产生的问题, 设置参数如下: $N_x = 10$, $N_r = 20$, $N_s = 5000$. 18 组算例组合, 通过 $n = 10, 20, 30, 50, 100$ 得到 90 种组合. 从表 1 中的数据可以看出, 所提出的代理指标与蒙特卡洛抽样得到的值的相关度为 87% 以上.

2.3 基于代理指标的模型

通过以上分析, 得出 M_s 和 M_q 可以较好地代替解鲁棒性和质量鲁棒性的表现值. 利用 Procedure 1 可以获得部分调度 σ_p , 求解以下模型可以得到含有缓冲时间的完整预测调度 σ^0 .

表 1 代理指标的相关性检验
Table 1 The average value of R^2 of M_S and M_q

$(\theta, \beta, t_r, t_p, n)$	R_s^2	R_s^2 平均值	$(\theta, \beta, t_r, t_p, n)$	R_s^2 平均值	R_q^2 平均值
50, 2, 15, 5, *	90.23	91.41	50, 3, 15, 5, *	91.91	92.14
50, 2, 15, 9, *	87.20	90.23	50, 3, 15, 9, *	92.14	91.66
50, 2, 15, 12, *	88.10	92.78	50, 3, 15, 12, *	88.37	89.87
80, 2, 15, 5, *	90.78	91.11	80, 3, 15, 5, *	92.45	91.65
80, 2, 15, 9, *	90.21	92.31	80, 3, 15, 9, *	87.61	93.72
80, 2, 15, 12, *	88.37	89.47	80, 3, 15, 5, *	90.23	92.62
100, 2, 15, 5, *	89.52	88.72	100, 3, 15, 9, *	89.22	90.12
100, 2, 15, 9, *	91.68	91.33	100, 3, 15, 12, *	91.16	93.56
100, 2, 15, 12, *	90.83	90.76	100, 3, 15, 5, *	91.91	92.14

$$\min \left(\alpha_1 \sum_{[k]=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{O_{[k']j'} \in E}^{Pr_{[k']j'}} \max \{ t_{[k']j'} - (S_{[k]j} - C_{[k']j'} - D_{[k,j]}^{[k',j']}), 0 \} + \alpha_2 C_{\max}^0 \right) \quad (17)$$

$$S_{[1]1}^0 = 0 \quad (18)$$

$$S_{[k]j}^0 \geq C_{[k-1],j}^0 + tp \times y_{[k-1]j}, \quad \forall j, \forall k \geq 2 \quad (19)$$

$$C_{[k]j}^0 = S_{[k]j}^0 + p_{[k]j}, \quad \forall j, \forall k \quad (20)$$

$$C_{\max}^0 = C_{[n]m}^0 \quad (21)$$

$$D_{[k,j]}^{[k',j']}, t_{[k']j'} \text{ 均已知} \quad (22)$$

式 (17) 为基于代理指标的目标函数。此外, 根据图论理论, $D_{[k,j]}^{[k',j']}$ 可利用 Bellman-Ford 算法通过上层决策提前得到^[13]。式 (18)~(22) 与原始模型相对应, 表示在预测调度中工序之间的加工时间、完成时间和工序位置的约束关系。

3 数值实验

3.1 前摄性调度与传统调度的比较

为了验证本文模型的有效性, 本节将前摄性调度模型和传统调度模型进行比较。在传统的调度模型中, 工序调度与预防性维护独立决策, 且模型中不考虑加入缓冲时间^[14]。下文将在前摄性调度模型和传统调度模型的解分别表示为 S_1 和 S_2 。

文献 [15] 研究了生产与维护集成调度问题, 由于其算例的完整性, 被后续学者广泛引用。本文根据问题特点将其算例参数适当调整。根据不同的工件数量 n , 考虑 5 种不同的问题规模, 每种规模随机生成 10 个算例。决策者根据企业运行的实际情况, 可分配得到不同的权重比例, 表 2 给出了当权重系数

$\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.5$ 时, 两种算法得到的数据结果。为清晰展现表 2 中数据, 表 3 中选取了当问题参数集合 $(\theta, \beta, t_r, t_p)$ 设置为 (50, 2, 15, 5) 时, 两种算法结果的比较。表 3 中决策模型的目标函数由两部分组成: 解鲁棒性和质量鲁棒性。其中, Z_t^s 和 Z_p^s 分别表示 S_1 和 S_2 中的解鲁棒性值, Z_t^q 和 Z_p^q 分别表示 S_1 和 S_2 中的质量鲁棒性值, Z_t^{q+s} 和 Z_p^{q+s} 分别表示 S_1 和 S_2 中的总目标函数值, $IMP - Z^s = |Z_p^s - Z_t^s| / Z_p^s$, $IMP - Z^q = |Z_p^q - Z_t^q| / Z_p^q$, $IMP - Z^{q+s} = |Z_p^{q+s} - Z_t^{q+s}| / Z_p^{q+s}$, IMP 为 Improvement 缩写, 结合表 2 和表 3 的数据可知, 虽然前摄性调度的计算用时较长, 但相比传统调度模型, 工厂的整体效益得到大幅度提高。以表 3 中的数据为例, 虽然采用前摄性调度得到的质量鲁棒性值与通过传统调度得到的质量鲁棒性值相比大约下降了 2%, 但解鲁棒性值有很大提高, 例如当工件规模 n 的取值为 25 时, 解鲁棒性值可达到 9 倍的改进, 并且随着工件规模的增加, 对解鲁棒性的改进逐渐增大。

当系数取值不同时, S_1 与 S_2 的比较结果如图 3 所示。从图 3(a) 中可看出, α_1 更大时, S_1 中的缓冲时间也越多。在图 3(b) 中所有的比值 Z_p^q / Z_t^q 都大于 1, 表示 S_1 获得的质量鲁棒性比 S_2 获得的要差。在图 3(c) 和图 3(d) 中, 所有的比值 Z_p^s / Z_t^s 和 Z_p^{q+s} / Z_t^{q+s} 小于 1, 说明 S_1 获得的目标函数值和解鲁棒性均优于 S_2 。通过观察图 3(b) 和图 3(c) 中在不同的 α_1 下所获得的数据, 可得到以下趋势: 随着 α_1 的增加, S_1 和 S_2 中的质量鲁棒性的比值逐渐增大, 而 S_1 和 S_2 中的解鲁棒性的比值逐渐减小。例如, 当 $\alpha_1 = 0.1$ 时, 两者的质量鲁棒性值几乎相等, 而 S_1 中的解鲁棒性值为 S_2 中的 80%; 当 $\alpha_1 = 0.9$ 时, S_1 中的质量鲁棒性值为 S_2 中的 1.8 倍, 而 S_1 中的质量鲁棒性值仅为 S_2 中的 5%。

从图 3(d) 中可看出, 随着 α_1 的增加, 两者的比值不断减小, 当 $\alpha_1 = 0.1$ 时, S_1 中的总目标函数值约为 S_2 中的 80%, 而当 $\alpha_1 = 0.9$ 时, S_1 中的总目

表 2 传统调度与前摄性调度的比较结果 a Table 2 The results of comparison between traditional scheduling and proactive scheduling α

$(\theta, \beta, t_r, t_p)$	n	Traditional scheduling			Proactive scheduling		
		Objective		Time (s)	Objective		Time (s)
		$E(\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m S_{[k]j}^r - S_{[k]j}^0)$	$E(C_{\max}^r)$		$E(\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m S_{[k]j}^r - S_{[k]j}^0)$	$E(C_{\max}^r)$	
50, 2, 15, 5	10	132.67	245.84	15.07	15.48	259.68	125
	15	251.01	254.01	25.78	25.57	262.86	385
	20	287.87	357.74	67.23	30.03	367.94	651
	25	394.36	396.71	96.01	36.93	403.13	1 004
	30	426.70	467.45	121.72	44.10	478.33	1 257
80, 2, 15, 5	10	122.17	265.53	11.55	13.21	269.12	113
	15	231.81	254.14	22.13	27.54	261.46	397
	20	245.85	348.89	47.17	30.74	377.54	698
	25	353.14	391.36	73.21	31.29	413.76	1 052
	30	456.56	432.77	121.56	47.47	435.21	1 346
50, 2, 15, 12	10	147.97	263.19	18.38	25.18	266.71	119
	15	261.39	271.58	27.48	32.66	282.13	345
	20	298.63	372.28	69.19	36.10	376.34	678
	25	399.83	399.76	91.84	39.58	417.29	1 055
	30	447.80	429.82	134.02	45.69	479.36	1 262
80, 2, 15, 12	10	112.92	233.76	18.23	19.38	234.19	136
	15	243.66	234.51	23.74	22.39	242.22	365
	20	289.31	377.70	67.83	34.71	379.24	671
	25	387.62	393.72	90.63	35.28	403.53	998
	30	421.52	469.46	121.52	4 264	472.61	1 304

表 3 传统调度与前摄性调度的比较结果 b Table 3 The results of comparison between traditional scheduling and proactive scheduling b

$(\theta, \beta, t_r, t_p)$	n	Z_t^{q+s}	Z_p^{q+s}	$IMP - Z^s$	$IMP - Z^q$	$IMP - Z^{q+s}$
50, 2, 15, 5	10	184.25	127.58	7.57	0.016	0.44
	15	252.51	145.22	8.10	0.033	0.74
	20	322.81	198.99	8.59	0.027	0.62
	25	395.54	221.03	9.13	0.015	0.79
	30	447.08	260.22	9.14	0.022	0.72

标函数值约为 S_2 中的 5%. 这是因为当 α_1 的取值逐渐增大时, 在 S_1 中需要插入更多的缓冲时间, 从而使得解鲁棒性比值 Z_p^s/Z_t^s 逐渐减小, 虽然质量鲁棒性比值 Z_p^q/Z_t^q 逐渐增加, 但是相比与比值 Z_p^s/Z_t^s 的减小速率, 比值 Z_p^q/Z_t^q 的增加速率要小得多, 因此, 总目标的比值 Z_p^{q+s}/Z_t^{q+s} 表现出与解鲁棒性比值 Z_p^s/Z_t^s 相类似的变化趋势.

3.2 解鲁棒性与质量鲁棒性的权衡

通过改变权重得到问题的帕累托曲线. 随机选取一个算例: $n = 20$, 失效参数为 (80, 2, 10, 5), 绘制帕累托曲线. 从图 4 中可看出, 在传统模型中, 没有缓冲时间, 解的质量鲁棒性最好而解鲁棒性最差. 而前摄优化方案可根据目标的权重变化, 得到不同的偏好解, 给决策者更大的选择空间. 随着 α_1 增大,

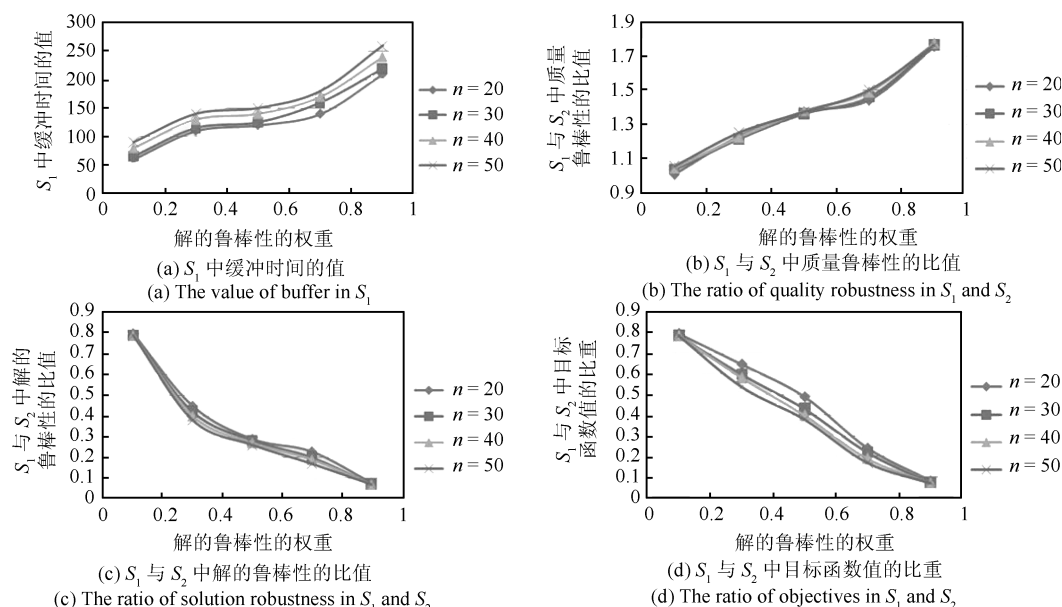
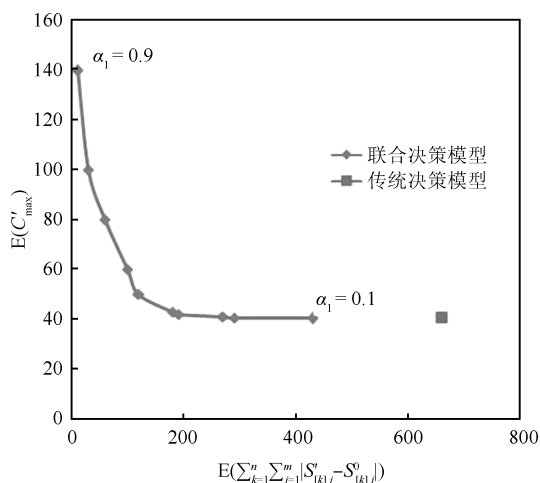
图3 S_1 和 S_2 的比较Fig. 3 Comparison between the S_1 and S_2 

图4 解鲁棒性和质量鲁棒性的帕累托曲线

Fig. 4 Pareto curve between the quality robustness and solution robustness

解鲁棒性值逐渐减小。从曲线的右半部分可看出解鲁棒性改进速度非常快,而质量鲁棒性衰退较慢,即通过插入缓冲时间的方式,在牺牲极小的质量鲁棒性的情况下显著提高了解鲁棒性。

4 结论

本文研究了基于前摄性调度的流水车间调度和预防性维护的联合优化问题。以非置换流水车间为背景,在考虑设备的故障服从威布尔分布的前提下,建立了考虑质量鲁棒性与解鲁棒性综合指标相应问题的混合整数规划模型,并设计了三阶段启发式算

法对模型进行有效求解。不同问题规模、参数设置下的数据实验表明,随着解鲁棒性权重的增大,系统最优缓冲时间值逐渐增加,且质量鲁棒性退化速度远小于解鲁棒性提升的速度,其中解鲁棒性的改进最高可达数倍。此外,各种不同的维护策略、混合流水线生产系统、维护成本与流程时间的联合优化等均可以本文算法思想为基础作为进一步的研究方向。

References

- 1 Zhou Dong-Hua, Wei Mu-Heng, Si Xiao-Sheng. A survey on anomaly detection, life prediction and maintenance decision for industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 711–722
(周东华, 魏慕恒, 司小胜. 工业过程异常检测、寿命预测与维修决策的研究进展. *自动化学报*, 2013, **39**(6): 711–722)
- 2 Safari E, Sadjadi S. A hybrid method for flowshops scheduling with condition-based maintenance constraint and machines breakdown. *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**(3): 2020–2029
- 3 Lee C Y. Minimizing the makespan in the two-machine flow-shop scheduling problem with an availability constraint. *Operations Research Letters*, 1997, **20**(3): 129–139
- 4 Vahedi-Nouri B, Fattahi P, Ramezani R. Minimizing total flow time for the non-permutation flow shop scheduling problem with learning effects and availability constraints. *Journal of Manufacturing Systems* 2013, **32**(1): 167–173
- 5 Ramezani R, Saidi-Mehrabad M, Fattahi P. MIP formulation and heuristics for multi-stage capacitated lot-sizing and scheduling problem with availability constraints. *Journal of Manufacturing Systems* 2013, **32**(2): 392–401
- 6 Zhou Bing-Hai, Jiang Shu-Yu, Wang Shi-Jin, Wu Bin, Xi Li-Feng. Integrated production and preventive maintenance scheduling algorithm for flow shops. *Journal of Dalian Maritime University*, 2007, **33**(3): 32–35

(周炳海, 蒋舒宇, 王世进, 吴斌, 奚立峰. 集成生产与预防性维护的流水线车间调度算法. 大连海事大学学报, 2007, **33**(3): 32–35)

- 7 Khelifati S L, Benbouzid-Sitayeb F. A multi-agent scheduling approach for the joint scheduling of jobs and maintenance operations in the flow shop sequencing problem. *Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011, **6923**: 60–69
- 8 Allahverdi A, Mittenthal J. Scheduling on a two-machine flowshop subject to random breakdowns with a makespan objective function. *European Journal of Operational Research*, 1995, **81**(2): 376–387
- 9 Zandieh M, Gholami M. An immune algorithm for scheduling a hybrid flow shop with sequence-dependent setup times and machines with random breakdowns. *International Journal of Production Research* 2009, **47**(24): 6999–7027
- 10 Wang Sheng-Yao, Wang Ling, Xu Ye, Zhou Gang. An estimation of distribution algorithm for solving hybrid flowshop scheduling problem. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(3): 437–443
(王圣尧, 王凌, 许烨, 周刚. 求解混合流水车间调度问题的分布估计算法. 自动化学报, 2012, **38**(3): 437–443)
- 11 Sarker R, Omar M, Kamrul Hasan S M, Essam D. Hybrid evolutionary algorithm for job scheduling under machine maintenance. *Applied Soft Computing*, 2013, **13**(3): 1440–1447
- 12 Xu Han-Chuan, Xu Xiao-Fei. Resource-confidence-considered robust project scheduling algorithm for cross-enterprise project. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(12): 2176–2185
(徐汉川, 徐晓飞. 考虑资源置信度的跨企业项目鲁棒性调度算法. 自动化学报, 2013, **39**(12): 2176–2185)
- 13 Qi X T. A note on worst-case performance of heuristics for maintenance scheduling problems. *Discrete Applied Mathematics*, 2007, **155**(3): 416–22
- 14 Choi B C, Lee K. Flow shops with machine maintenance: ordered and proportionate cases. *International Journal of Production Research*, 2010, **207**(3): 97–104
- 15 Cassady C R, Kutanoglu E. Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single

machine. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, **54**(2): 304–309

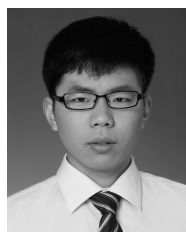


陆志强 同济大学教授. 2003 年获得法国南特大学生产与物流工程专业工学博士学位. 主要研究方向为物流与供应链管理. 本文通信作者.

E-mail: zhiqianglu@tongji.edu.cn

(**LU Zhi-Qiang** Professor at Tongji University. He received his Ph.D. degree at Universite De Nanets, France in

2003. His research interest covers logistics and supply chain management. Corresponding author of this paper.)



张思源 同济大学硕士研究生. 2012 年获得浙江工业大学工业工程学士学位. 主要研究方向为车间调度与设备维护的集成优化.

E-mail: zhangsiyuan888@126.com

(**ZHANG Si-Yuan** Mater student at Tongji University. He received his bachelor degree at Zhejiang University

of Technology in 2012. His research interest covers integrating production scheduling and maintenance for flowshop.)



崔维伟 上海交通大学博士研究生. 2010 年获得西安交通大学机械工程学士学位. 主要研究方向为车间调度与设备维护的集成优化.

E-mail: cuiww67@163.com

(**CUI Wei-Wei** Ph.D. candidate at Shanghai Jiao Tong University. He received his bachelor degree in 2010. His

research interest covers integrating production scheduling and maintenance for flowshop.)