

期望-风险准则多阶段流水车间鲁棒调度

张先超¹, 周泓²

(1. 北京大学工学院, 北京 100871; 2. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

摘要: 研究在设备故障环境下调度目标为工期的期望-风险准则多阶段流水车间鲁棒调度问题. 以期望工期和工期标准差分别作为调度性能和风险的度量, 求解这样的鲁棒调度方案, 使得期望工期尽可能满意的同时降低风险. 在详细描述问题的基础上, 研究问题的性质, 对量子进化算法进行改进来求解该鲁棒调度问题. 计算实验表明, 在机器可能发生故障的情况下, 期望-风险准则多阶段流水车间的鲁棒调度能够获得满意的性能和鲁棒性.

关键词: 鲁棒调度; 量子进化算法; 期望-风险准则; 多阶段流水车间; 工期

中图分类号: TP301; F406.6

文献标志码: A

Robust scheduling of multi-stage flow shop under machine breakdowns following expect-risk rule

ZHANG Xian-chao¹, ZHOU Hong²

(1. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China. Correspondent: ZHANG Xian-chao, E-mail: xianchao.zhang@pku.edu.cn)

Abstract: This paper studies the expect-risk robust scheduling under machine breakdowns in multi-stage flow shop, aiming to solve the schedules which can minimize the expected makespan and the risk at the same time as far as possible. Then, an improved quantum-inspired evolutionary algorithm is proposed to solve the problem. A computational experiment is conducted to illustrate that the robust scheduling of multi-stage flow shop can increase scheduling performance and reduce risk remarkably under machine breakdowns effectively.

Keywords: robust scheduling; quantum-inspired evolutionary algorithm; expect-risk decision rule; multi-stage flow shop; makespan

0 引言

实际生产中设备故障是不可避免的, 这也是影响生产的主要因素. 设备故障将中断正在进行的加工, 导致初始调度无法按计划实施, 使实际完工时间偏离预计的完工时间, 扰乱生产计划, 给企业造成损失. 设备故障对生产的影响主要取决于故障间隔时间和修复时间这两个参数, 然而在几乎所有的情况下, 这两个参数都是不确定的, 使得确定性调度难以适用, 极大地增加了调度问题的难度. 近年来, 反应式调度^[1]、随机调度^[2-3]和鲁棒调度^[4-5]等常被用来解决设备故障环境下的调度问题.

流水车间(flow shop)是现代工业的一种重要的生产模式, 例如, 在汽车和半导体行业, flow shop得到了广泛的应用. 流水车间有着突出的优势, 能够整合

生产工艺, 节约成本, 易于在一定程度上实现自动化. 然而, 流水车间有着自身难以克服的脆弱性, 一个环节出现异常, 整个生产线都会受到影响. 流水车间某台设备发生故障, 会使得上游的在制品不断积压, 而下游的设备处于空闲状态, 待故障修复一段时间后, 下游生产线才能恢复正常生产状态. 因此, 设备故障对流水车间生产的稳定性有着至关重要的影响.

设备故障间隔时间和修复时间通常描述为服从一定分布的随机变量, 与此相适应, 随机调度已被比较广泛地用来解决设备故障环境下的flow shop调度问题. Allahverdi等^[6-7]研究了设备故障环境下两台设备flow shop的鲁棒调度问题, 分别以工期与总完工时间为调度目标, 给出了没有任何条件和有一定条件下的随机占优排序求解方法; 文献[8]针对存在设备故

收稿日期: 2015-05-06; 修回日期: 2015-10-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71071008, 71471007); 中国博士后科学基金项目(2015M570896).

作者简介: 张先超(1984—), 男, 博士后, 从事智能制造、鲁棒优化、系统调度的研究; 周泓(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产与物流系统优化与仿真等研究.

障的 flow shop 调度问题, 将其转换为无故障调度问题序列, 予以求解; 文献 [9] 则研究了加工时间和设备故障都是随机的置换流水线调度问题, 通过对故障发生时间的预测来计算总完工时间.

使用随机调度方法求解设备故障环境下的调度问题有着不可避免的局限性, 主要体现在两方面: 一是故障发生时刻及修复时间的分布函数难以获取; 二是满意的随机调度方案也难以保证每次生产的实际效果. 为此, 针对该调度问题的反应式调度与鲁棒调度也有了一定的研究. Guo 等^[1]研究了 3 台设备 flow shop 的重调度问题, 3 台设备中的第 2 台设备可能会发生故障, 提出了根据设备故障时长给出重调度策略的方法, 并且给出了反应式调度阈值. 这种方法必须提前给出故障确切的发生时刻和持续时长. 文献 [10] 提出了设备可能发生故障的, 以工期为调度目标的 flow shop 鲁棒调度问题的框架, 以发生故障的实际工期与无故障工期的比值在一定范围内的概率来表征鲁棒性, 并据此给出了鲁棒性的测度. 这种表征鲁棒性的方式依据的是实际工期与无故障工期的相对关系, 这与以给定不确定因素情景下的实际工期与最优工期的绝对偏差作为鲁棒性的测度^[11-12], 在目标上是类似的, 旨在减小实际工期与最优工期的差距. 文献 [11-12] 也论证了这样的鲁棒调度方法能够获得较好的调度性能. 这种鲁棒调度方法没有考虑不确定环境下工期的不稳定性, 然而维持工期的稳定往往是很必要的, 尤其是在生产作为供应链的关键环节的情况下, 工期的不稳定性会给供应链带来很大的风险.

本文研究设备故障环境下, 期望-风险准则的 m ($m \geq 2$) 个阶段 flow shop 鲁棒调度问题, 每个阶段由一台设备构成 (后文不区分阶段和设备). 以工期为调度目标, 考虑到设备故障随机发生的情形, 使用调度的期望工期度量调度的性能. 设备故障使得实际工期不稳定, 这给生产带来了风险, 为控制生产的风险, 使用工期标准差作为风险的度量. 期望-风险准则的鲁棒调度就是兼顾性能和风险, 在尽可能提高调度性能的同时, 控制风险. 在以往的鲁棒调度研究中, 遗传算法等智能计算方法逐渐被用于求解鲁棒调度问题^[13-16]. 本文对传统的量子进化算法进行改进, 设计一种改进的量子进化算法, 用以求解设备故障环境下, m ($m \geq 2$) 个阶段 flow shop 的期望-风险准则的鲁棒调度问题.

1 问题描述

1.1 多阶段流水线车间调度问题

多阶段流水线车间中所有工件需要依次通过各个阶段, 且同一时间每个阶段最多只能处理一个工件, 一个工件仅处于一个阶段. 现有 n 个工件在 m 个阶段

的 flow shop 上加工, 工件 j 在阶段 i 的加工时间为 p_{ij} (或 $p_{i,j}$), 完工时间为 C_{ij} (或 $C_{i,j}$), $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$; 工期是 C_{\max} , 即所有工件的最迟完工时间. 设 $\sigma = \{\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n)\}$ 是这 n 个工件的一个调度方案, 其中 $\sigma(j)$ 是调度 σ 中第 j 个位置的工件, 则

$$C_{i,\sigma(1)} = \sum_{l=1}^i p_{l,\sigma(1)}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (1)$$

$$C_{1,\sigma(j)} = \sum_{l=1}^j p_{1,\sigma(l)}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$C_{i,\sigma(j)} = \max(C_{i-1,\sigma(j)}, C_{i,\sigma(j-1)}) + p_{i,\sigma(j)}, \quad i = 2, 3, \dots, m, j = 2, 3, \dots, n. \quad (3)$$

这样, 调度 σ 的工期为

$$C_{\max}(\sigma) = C_{m,\sigma(n)}. \quad (4)$$

1.2 机器故障环境下期望-风险准则鲁棒调度目标

设备发生故障后, 未完工的工件依次右移, 以保证生产顺利进行. 设备故障延长了部分工件在设备上的停留时间, 从加工时间的角度看, 如果把工件在某台设备上从开始加工到结束的时间认为是工件在这台设备上的加工时间, 则设备故障相当于延长了工件的加工时间, 称延长后的加工时间为实际加工时间. 实际加工时间与计划加工时间的偏差取决于加工过程中设备故障间隔时间及其修复时间. 设设备故障间隔时间为 T , 修复时间为 X , 这样的设备故障环境表示为 (T, X) , 通常设备故障间隔时间 T 和故障修复时间 X 为服从一定分布的随机变量. 在 (T, X) 的设备故障环境下, 调度 σ 的第 j 个位置工件 $\sigma(j)$ 在第 i 个阶段的实际加工时间为 $p_{i,\sigma(j)}^{T,X}$, 相应地, 各工件的完工时间也将发生变化, 称为实际完工时间, 用 $C_{i,\sigma(j)}^{T,X}$ 表示, 有

$$C_{i,\sigma(1)}^{T,X} = \sum_{l=1}^i p_{l,\sigma(1)}^{T,X}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (5)$$

$$C_{1,\sigma(j)}^{T,X} = \sum_{l=1}^j p_{1,\sigma(l)}^{T,X}, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$C_{i,\sigma(j)}^{T,X} = \max(C_{i-1,\sigma(j)}^{T,X}, C_{i,\sigma(j-1)}^{T,X}) + p_{i,\sigma(j)}^{T,X}, \quad i = 2, 3, \dots, m, j = 2, 3, \dots, n. \quad (7)$$

这样, 实际工期为

$$C_{\max}^{T,X}(\sigma) = C_{m,\sigma(n)}^{T,X}. \quad (8)$$

故障间隔时间 T 和故障修复时间 X 都是随机变量, 因此 $C_{\max}^{T,X}(\sigma)$ 也是随机变量, 其期望值为 $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$. 在实际生产中, $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 近似为多次生产的实际工期的平均值. 但是, 每次生产的工期可能相差很大, 也就是说, 即使期望工期很好, 某次生产的实际工期也可能较差, 导致实际生产效果无法预知, 给生产带来极大的风险. 这就迫切要求

在保证 $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 满意的同时, 每次生产的实际工期的波动能够控制在较小范围内. $C_{\max}^{T,X}(\sigma)$ 的方差 $\text{Var}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 能很好地反映波动情况, $\text{Var}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 越大, 实际工期的波动程度越大; 反之, 实际工期波动越小. 由于 $\text{Var}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 是二次统计量, $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 是一次统计量, 考虑到数量级的一致性, 采用标准差 $\text{Std}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 作为实际工期波动的度量. 使用 $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 和 $\text{Std}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 的凸组合作为调度 σ 在设备故障环境 (T, X) 下的鲁棒调度目标, 用 $R^{T,X}(\sigma)$ 表示, 有

$$R^{T,X}(\sigma) = \gamma \cdot E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)] + (1 - \gamma) \cdot \text{Std}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)], \quad \gamma \in [0, 1], \quad (9)$$

其中 γ 是偏好系数, 反映了对调度 σ 的期望工期和工期稳定性的偏好程度. γ 越大, 越偏向于使得工期的期望值尽可能小; 反之, γ 越小, 则偏向于使得每次生产的实际工期尽可能接近, 既工期具有尽可能好的稳定性. 当 $\gamma = 1$ 时, 只考虑期望工期, 不考虑实际工期的波动程度. 结果是获得期望工期最小的调度方案, 而每次生产的实际工期可能出现很大的波动. 当 $\gamma = 0$ 时, 则只考虑工期的波动, 使得每次生产的实际工期尽可能接近, 而不考虑期望工期. 结果是获得的调度方案经过多次生产的平均工期可能较大. 通常情况下, 不采用这两种极端情况.

1.3 机器故障环境下期望-风险准则鲁棒调度问题

设有调度 σ^R , 满足

$$R^{T,X}(\sigma^R) \leq R^{T,X}(\sigma), \quad \sigma \in \Omega, \quad (10)$$

则 σ^R 是求解的鲁棒调度, 其中 Ω 是调度解空间. 理论上, 根据式 (8)~(10) 可以求解设备故障环境 (T, X) 下的鲁棒调度 σ^R , 然而, 期望工期 $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 和工期标准差 $\text{Std}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 往往不易求解. 实际应用中, 可依据“频率代替概率”的原理, 采用样本均值和样本标准差分别替代 $E[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$ 和 $\text{Std}[C_{\max}^{T,X}(\sigma)]$.

2 求解的量子进化算法

本文对基本量子进化算法进行改进, 用于求解鲁棒调度问题. 使用极角构造工件排序, 运用变异操作进行全局搜索, 旋转操作实现局部寻优, 选择操作用于保留较优的染色体. 在运算过程中, 一次变异形成的全局搜索范围需要多次选择和旋转操作才能实现局部寻优. 为了尽可能地提高全局搜索能力和局部寻优性能, 提高运算效率, 根据当前的适应度改变变异率和局部寻优 (选择和旋转) 次数.

2.1 算法流程

图1是算法流程图. 在图1中, T 是全局搜索迭代次数的计数, $Q(T)$ 是第 T 次全局迭代的量子染色体, t 是局部寻优迭代次数的计数, $B(T)$ 是到 T 代为止的最优调度目标, I_{best} 是最优调度目标保持不变的全

局迭代次数, M_{best} 是 I_{best} 的阈值, p_m 是变异率, I_{local} 是局部寻优迭代代数, p_m^{\min} 是 p_m 的较小值, p_m^{\max} 是 p_m 的较大值, I_{local}^{\min} 是 I_{local} 的较小值, I_{local}^{\max} 是 I_{local} 的较大值. 根据 $B(T)$ 改变 p_m 和 I_{local} , 如果 $B(T)$ 经过 M_{best} 次全局迭代都没有改变, 即 $I_{\text{best}} \geq M_{\text{best}}$, 则变异率 p_m 采用较大的值 p_m^{\max} , I_{local} 采用较大的值 I_{local}^{\max} ; 反之, 如果 $B(T)$ 保持不变的全局迭代次数尚不到 M_{best} 次, 即 $I_{\text{best}} < M_{\text{best}}$, 则变异率 p_m 采用较小的值 p_m^{\min} , I_{local} 采用较小的值 I_{local}^{\min} .

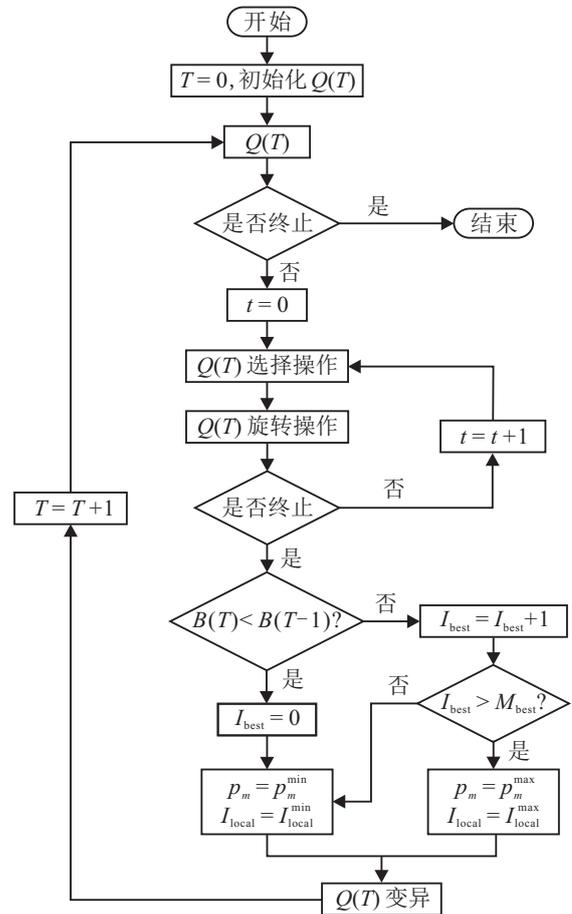


图1 算法流程

2.2 编码与调度表示

在二态量子计算机中, 每一个量子位唯一对应极坐标图中 $[0, 2\pi)$ 内的极角 (见图2). 根据这种特点, 本文采用极角进行编码.

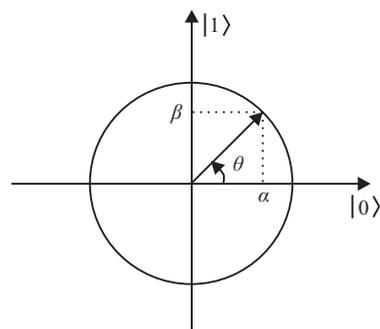


图2 量子位极坐标图

长度为 l 的量子染色体 q 的第 j 个量子位的极角 φ_j ($j = 1, 2, \dots, l$) 定义如下:

$$\varphi_j = \begin{cases} 0, & \alpha_j \geq 0, \beta_j = 0; \\ \arctan \frac{\beta_j}{\alpha_j}, & \alpha_j > 0, \beta_j > 0; \\ 0.5\pi, & \alpha_j = 0, \beta_j > 0; \\ \arctan \frac{\beta_j}{\alpha_j} + \pi, & \alpha_j < 0, \beta_j > 0; \\ \pi, & \alpha_j = 0, \beta_j < 0; \\ \arctan \frac{\beta_j}{\alpha_j} + \pi, & \alpha_j < 0, \beta_j < 0; \\ 1.5\pi, & \alpha_j = 0, \beta_j < 0; \\ \arctan \frac{\beta_j}{\alpha_j} + 2\pi, & \alpha_j > 0, \beta_j < 0. \end{cases} \quad (11)$$

由图 2, 量子染色体 q 中各量子位分别对应极角 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_l$, 对极角进行升序排序, 在对应的染色体位置上按工件编号依次安排工件, 这样即可得到工件排序, 如图 3 所示.

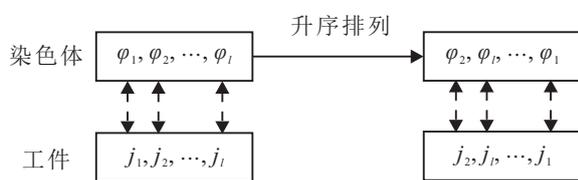


图 3 量子染色体解码

在图 3 中, 各量子位分别为 $\varphi_2, \varphi_1, \dots, \varphi_l$ 的量子染色体, 经解码得到的工件排序为 j_2, j_1, \dots, j_l .

2.3 适应度函数

设调度 σ 在故障环境 (T, X) 下进行 H 次生产, 第 h 次的实际工期为 $C_{\max, h}^{T, X}(\sigma)$, $h = 1, 2, \dots, H$, 那么, H 次生产的平均实际工期为

$$\overline{C_{\max, h}^{T, X}(\sigma)} = \frac{1}{H} \sum_{k=1}^H C_{\max, h}^{T, X}(\sigma). \quad (12)$$

实际工期的标准差为

$$s_{\sigma}^{T, X} = \sqrt{\frac{1}{H-1} \sum_{h=1}^H [C_{\max, h}^{T, X}(\sigma) - \overline{C_{\max, h}^{T, X}(\sigma)}]^2}. \quad (13)$$

若 H 足够大, 则可以使用式 (12) 和 (13) 分别代替 $E[C_{\max}^{T, X}(\sigma)]$ 和 $\text{Std}[C_{\max}^{T, X}(\sigma)]$, 那么式 (9) 的调度 σ 的鲁棒调度目标转换为

$$R^{T, X}(\sigma) = \gamma \cdot \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H C_{\max, h}^{T, X}(\sigma) + (1 - \gamma) \times \sqrt{\frac{1}{H-1} \sum_{h=1}^H [C_{\max, h}^{T, X}(\sigma) - \overline{C_{\max}^{T, X}(\sigma)}]^2}, \quad \gamma \in [0, 1]. \quad (14)$$

设在规模为 S 的种群中, 第 s ($s = 1, 2, \dots, S$) 个

染色体 pop_s 对应的调度为 σ_s , 对 σ_s 在故障环境 (T, X) 下进行 H 次仿真运行, 仿真的调度目标的均值和标准差分别为

$$\overline{C_{\max}^{T, X}(\sigma_s)} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H C_{\max, h}^{T, X}(\sigma_s), \quad (15)$$

$$s_{\sigma_s}^{T, X} = \sqrt{\frac{1}{H-1} \sum_{h=1}^H [C_{\max, h}^{T, X}(\sigma_s) - \overline{C_{\max}^{T, X}(\sigma_s)}]^2}. \quad (16)$$

那么, 可以认为染色体 pop_s 对应的调度的鲁棒调度目标为

$$R^{T, X}(\sigma_s) = \gamma \cdot \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H C_{\max, h}^{T, X}(\sigma_s) + (1 - \gamma) \times \sqrt{\frac{1}{H-1} \sum_{h=1}^H [C_{\max, h}^{T, X}(\sigma_s) - \overline{C_{\max}^{T, X}(\sigma_s)}]^2}, \quad (17)$$

以 $R^{T, X}(\sigma_s)$ 作为 σ_s 的适应度函数.

2.4 变异操作

变异操作采用交换量子位的方式, 随机选择两个量子位进行交换, 这实质上交换了量子位的极角, 从而使得工件排序发生变化. 染色体种群变异的程度由变异率 p_m 控制, 在本文改进的量子进化算法中, p_m 在运算过程中发生变更, 以提高搜索的全局性和搜索效率, 其变更依据当前的最优适应度 $B(T)$ 在全局迭代中保持不变的迭代次数. 当 $I_{\text{best}} \leq M_{\text{best}}$ 时, 在解空间的一定范围内存在着较多的局部最优解, 为了提高全局最优性, p_m 取其较小值 p_m^{\min} , 以使全局搜索更加全面. 反之, 当 $I_{\text{best}} > M_{\text{best}}$ 时, 在解空间的一定范围内已难以获取更满意的解, 为了提高搜索效率, p_m 取其较大值 p_m^{\max} , 以快速扩大搜索范围.

M_{best} 取决于工件和设备数目, 可根据下式确定:

$$M_{\text{best}} = \lfloor \ln(n \cdot m) \rfloor. \quad (18)$$

其中: n 是工件数目, m 是设备数目.

p_m^{\min} 和 p_m^{\max} 可依据工件数目 n 来设置, 分别设为 $1/n$ 和 $2/n$.

2.5 选择与旋转操作

选择和旋转属于局部寻优操作, 在各次全局迭代中的选择和旋转操作次数 I_{local} 取决于当前的最优适应度 $B(T)$ 保持不变的迭代次数. 依据图 1 给出的流程图, 如果 $B(T)$ 在 M_{best} 代之内都没有发生变化, 即 $I_{\text{best}} > M_{\text{best}}$, 则需要采用较大的变异率. 在这种情况下, 为了实现局部收敛, I_{local} 也取其较大值 I_{local}^{\max} , 反之 I_{local} 取其较小值 I_{local}^{\min} . I_{local}^{\max} 和 I_{local}^{\min} 可依据工件数目 n , 分别设置为 $2n$ 和 n .

2.5.1 选择操作

首先, 依据适应度函数, 将种群 $Q(T)$ 中的染色

体按照优劣进行排序; 然后, 复制 $Q(T)$ 中最优的染色体, 丢弃最劣的染色体. 这里, 为了提高局部寻优的精度, 选择操作仅复制最优的一个染色体, 以避免早熟.

2.5.2 旋转操作

使用旋转门实现旋转操作, 旋转门 U 表示如下^[17]:

$$U = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中 θ 称为旋转角. 通过转换, 量子位变换为

$$\begin{bmatrix} \alpha' \\ \beta' \end{bmatrix} = U \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \alpha - \sin \theta \cdot \beta \\ \sin \theta \cdot \alpha + \cos \theta \cdot \beta \end{bmatrix}. \quad (20)$$

第 j 个量子位的旋转角 θ_j 可根据下式确定:

$$\theta_j = \kappa \cdot \text{sgn}(\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}}) \cdot \frac{|\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}}|}{2\pi}. \quad (21)$$

其中: κ 是旋转系数, 决定了局部寻优的精度, 通常取相当小的正实数, 在 $(0, 1]$ 之间取值, 其值越小, 局部寻优的精度越高, 但收敛的时间也越长; $\text{sgn}(\cdot)$ 是符号函数; φ_j^{best} 是到当前为止, 最优量子染色体第 j 个量子位对应的极角. $|\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}}|$ 反映了 φ_j 与 φ_j^{best} 的差别, 其值越大, 旋转角 θ_j 越大.

$$\text{sgn}(\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}}) = \begin{cases} -1, & \varphi_j - \varphi_j^{\text{best}} > 0; \\ 1, & \varphi_j - \varphi_j^{\text{best}} < 0; \\ 0, & \text{others.} \end{cases} \quad (22)$$

式 (21) 直接根据染色体的极角确定旋转角, 若 $\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}} > 0$, 则 $\theta_j < 0$, 量子比特顺时针旋转, 极角 φ_j 减小; 若 $\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}} < 0$, 则 $\theta_j > 0$, 量子比特逆时针旋转, 极角 φ_j 增大; 若 $\varphi_j - \varphi_j^{\text{best}} = 0$, 则极角 φ_j 不需要变化.

3 计算实验

3.1 实验设计与参数设置

有 n 个工件需要在 m 个阶段的流水车间加工, 每个阶段由一台设备构成, 在加工过程中, 设备可能会发生故障. 设备台数分别为 $m = 5, 10, 20$, 工件数目分别为 $n = 5, 10, 20, 40$, 工件加工时间 p_{ij} 服从均匀分布, 且 $p_{ij} \sim U[1, 99]$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$. 故障间隔时间 T 服从指数分布, 有两种分布函数, 分别是 $T \sim \text{Exp}(250)$, $T \sim \text{Exp}(500)$; 故障修复时间 X 服从均匀分布, 也有两种分布函数, 分别是 $X \sim U[20, 50]$, $X \sim U[100, 200]$. 数值实验表明 $\kappa = 0.01$ 的求解效果最好, 故这里取 $\kappa = 0.01$. 由 m, n, T 和 X 的组合, 共形成 48 组问题. 每组问题随机生成一组实例, 分别求解不考虑设备故障的确定性初始调度方案 (DS)、考虑故障的随机调度方案 (SS) 和鲁棒调度方案 (RS). 将这 3 种调度方案在相应的故障环境下仿真运行 100 次, 记录平均工期和工期标准差, 确定性调度的平均工期为 E_{DS} , 工期标准差为 S_{DS} , 随机调度的

平均工期和工期标准差分别为 E_{SS} 和 S_{SS} , 鲁棒调度的平均工期和标准差分别为 E_{RS} 和 S_{RS} . 为了分析鲁棒调度的效果, 计算随机调度与确定性调度平均工期的相对比值 $RE_{SS/DS}$, 工期标准差的相对比值 $RS_{SS/DS}$, 鲁棒调度与随机调度平均工期的相对比值 $RE_{RS/SS}$, 工期标准差的相对比值 $RS_{RS/SS}$, 这 4 个指标的求解分别为:

指标 1 $RE_{SS/DS} = (E_{SS} - E_{DS})/E_{DS}$;

指标 2 $RS_{SS/DS} = (S_{SS} - S_{DS})/S_{DS}$;

指标 3 $RE_{RS/SS} = (E_{RS} - E_{SS})/E_{SS}$;

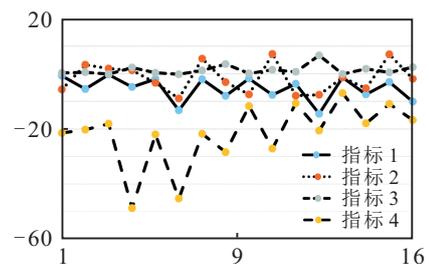
指标 4 $RS_{RS/SS} = (S_{RS} - S_{SS})/S_{SS}$.

3.2 实验结果与分析

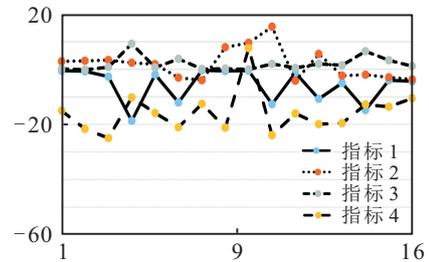
对于机器数目 $m = 5, 10, 20$, 分别给出 16 个问题的指标, 表 1 给出了这 16 个问题.

表 1 实验问题组

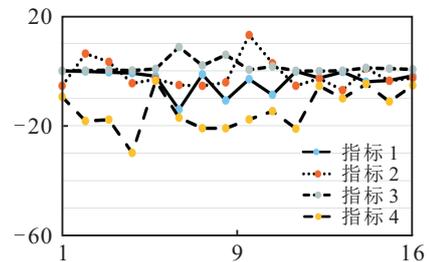
No.	n	T	X	No.	n	T	X
1	5	250	20,50	9	20	250	20,50
2	5	250	100,200	10	20	250	100,200
3	5	500	20,50	11	20	500	20,50
4	5	500	100,200	12	20	500	100,200
5	10	250	20,50	13	40	250	20,50
6	10	250	100,200	14	40	250	100,200
7	10	500	20,50	15	40	500	20,50
8	10	500	100,200	16	40	500	100,200



(a) $m = 5$



(b) $m = 10$



(c) $m = 20$

图 4 实验结果

按照机器数目, 分别给出实验结果的折线图, 如图4所示. 其中: 横轴为对于给定的机器数, 由不同的工件数、故障间隔时间和故障修复时间组合问题的序号(见表1); 纵轴是百分数.

从图4可以看出: 指标1表明随机调度的平均工期明显小于确定性调度; 指标2表明随机调度的工期平均值与确定性调度几乎相当, 这反映出随机调度相对确定性调度, 能够获得更好的调度性能, 然而对风险的规避能力没有优势; 指标3略大于0, 表明鲁棒调度的平均工期略大于随机调度; 指标4表明鲁棒调度的工期标准差明显小于随机调度. 指标3和指标4相比较可以看出, 期望-风险准则的鲁棒调度能够获得满意的调度性能, 且有着良好的风险规避能力, 能够有效克服机器故障带来的实际工期的波动.

4 结 论

本文研究了设备故障环境下多阶段流水车间的期望-风险准则鲁棒调度问题, 能够求解使得期望工期与工期标准差的凸组合最小的鲁棒性初始调度方案. 首先, 详细阐述了期望-风险准则的鲁棒调度, 并给出了目标函数; 然后, 设计了一种改进的量子进化算法, 用以求解该鲁棒调度问题; 最后, 通过计算实验, 验证了期望-风险准则鲁棒调度对于解决设备故障环境下多阶段流水车间生产调度的有效性. 在实际生产中, 根据实际需要会用到总完工时间等更为复杂的调度性能指标, 半方差等更合理的风险度量方法, 且相比调度性能与风险的凸组合, 其Pareto解能够更好地为决策提供支持, 这些都需要进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Guo B, Nonaka Y. Rescheduling and optimization of schedules considering machine failures[J]. *Int J of Production Economics*, 1999, 60: 503-513.
- [2] Birge J, Frenk J B G, Mittenthal J, et al. Single-machine scheduling subject to stochastic breakdowns[J]. *Naval Research Logistics*, 1990, 37(5): 661-677.
- [3] Cai X, Zhou S. Stochastic scheduling on parallel machines subject to random breakdowns to minimize expected costs for earliness and tardy jobs[J]. *Operations Research*, 1999, 47(3): 422-437.
- [4] Leon V J, Wu S D, Storer R H. Robustness measures and robust scheduling for job shops[J]. *IIE Trans*, 1994, 26(5): 32-43.
- [5] Briskorn D, Leung J, Pinedo M. Robust scheduling on a single machine using time buffers[J]. *IIE Trans*, 2011, 43(6): 383-398.
- [6] Allahverdi A, Mittenthal J. Two-machine ordered flowshop scheduling under random breakdowns[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 1994, 20(2): 9-17.
- [7] Allahverdi A, Mittenthal J. Scheduling on a two-machine flowshop subject to random breakdowns with a makespan objective function[J]. *European J of Operational Research*, 1995, 81(2): 376-387.
- [8] Alcaide D, Rodriguez-Gonzalez A, Sicilia J. An approach to solve the minimum expected makespan flow-shop problem subject to breakdowns[J]. *European J of Operational Research*, 2002, 140(2): 384-398.
- [9] 李素粉, 朱云龙, 尹朝万. 具有随机加工时间和设备故障的流水车间调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(10): 1425-1429.
(Li S F, Zhu Y L, Yin C W. Flow shop scheduling with stochastic processing times and machine breakdowns[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2005, 11(10): 1425-1429.)
- [10] Allaoui H, Lamouri S, Lebbar M. A robustness framework for a stochastic hybrid flow shop to minimize the makespan[C]. *Int Conf on Service Systems and Service Management*. Troyes: IEEE, 2006: 1097-1102.
- [11] Daniels R L, Kouvelis P. Robust scheduling to hedge against processing time uncertainty in single-stage production[J]. *Management Science*, 1995, 41(2): 363-376.
- [12] Kouvelis P, Daniels R L, Vairaktarakis G. Robust scheduling of a two-machine flow shop with uncertain processing time[J]. *IIE Trans*, 2000, 32(5): 421-432.
- [13] Sevaux M, Sorensen K. A genetic algorithm for robust schedules in a one-machine environment with ready times and due dates[J]. *Quarterly J of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies*, 2004, 2(2): 129-147.
- [14] Zuo X Q, Mo H W, Wu J P. A robust scheduling method based on a multi-objective immune algorithm[J]. *Information Sciences*, 2009, 179(19): 3359-3369.
- [15] Chaari T, Chaabane S, Loukil T, et al. A genetic algorithm for robust hybrid flow shop scheduling[J]. *Int J of Computer Integrated Manufacturing*, 2011, 24(9): 821-833.
- [16] Bonfill A, Espuna A, Puigjaner L. Proactive approach to address the uncertainty in short-term scheduling[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, 32(8): 1689-1706.
- [17] Wang Ling, Wu Hao, Tang Fang, et al. A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for flow shop scheduling[C]. *Proc of Int Conf on Intelligent Computing*. Hefei: IEEE, 2005: 636-644.