

控制与决策

Control and Decision



区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

董君, 叶春明

引用本文:

董君, 叶春明. 区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2599–2608.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0973>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time

控制与决策. 2021, 36(5): 1127–1136 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036>

基于多班教学优化的多目标分布式混合流水车间调度

Multi-class teaching-learning-based optimization for multi-objective distributed hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(2): 303–313 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0549>

基于深度强化学习与迭代贪婪的流水车间调度优化

Scheduling optimization for flow-shop based on deep reinforcement learning and iterative greedy method

控制与决策. 2021, 36(11): 2609–2617 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0608>

基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

控制与决策. 2021, 36(1): 143–151 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

基于改进蛙跳算法的分布式两阶段混合流水车间调度

An improved shuffled frog leaping algorithm for the distributed two-stage hybrid flow shop scheduling

控制与决策. 2021, 36(1): 241–248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0472>

区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化

董 君^{1,2}, 叶春明^{1†}

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 河南工学院 管理学院, 河南 新乡 453000)

摘 要: 针对加工时间不确定的可重入混合流水车间调度与预维护协同优化问题, 构建以区间最大完工时间、区间总碳排放和区间总预维护费用为优化目标的集成调度模型. 针对问题特性, 通过设计改进的可能度计算方法, 定义区间意义下解的 Pareto 占优关系. 提出一种改进的离散鲸鱼群算法, 通过同步调度与维护策略, 实现制造与维护的联合优化; 设计个体间距离计算策略, 寻找“最近较优个体”; 设计个体位置移动策略以及多邻域搜索策略, 有效地平衡全局搜索和局部搜索, 提高收敛精度. 通过大量的仿真实验和结果对比分析, 表明了所提出的算法对于求解区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化问题的有效性和可行性.

关键词: 区间加工时间; 预维护; 可重入混合流水车间; 鲸鱼群算法; 协同优化

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0973

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 董君, 叶春明. 区间数可重入混合流水车间调度与预维护协同优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2599-2608.

Collaborative optimization of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance

DONG Jun^{1,2}, YE Chun-ming^{1†}

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Management, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453000, China)

Abstract: Aiming at the collaborative optimization problem of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance (PM), an integrated scheduling model is constructed, which takes the interval makespan, total carbon emissions and total PM costs as the optimization objectives. For this problem characteristics, the Pareto relation of solution in interval sense is defined by designing the improved possibility calculation method. Besides, an improved discrete whale swarm algorithm is proposed, which designs a synchronous scheduling and maintenance strategy to realize the joint optimization of manufacturing and maintenance. Also, a distance calculation strategy between individuals to find the "nearest better individual", and an individual position movement strategy and a multi-neighbourhood search strategy are designed to effectively balance the global and local search in order to improve the convergence accuracy. Simulation results and statistical comparison with extensive experiments show the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm for solving the collaborative optimization problem of interval number reentrant hybrid flow shop scheduling and preventive maintenance.

Keywords: interval processing time; preventive maintenance; reentrant hybrid flow shop; whale swarm algorithm; collaborative optimization

0 引 言

可重入混合流水车间调度(reentrant hybrid flow shop, RHFS)问题^[1]的应用领域主要集中于半导体晶圆制造、印刷电路板等电子工业生产中,其复杂性较高,已被证明是 NP-hard 问题^[2]. 关于该问题的研究,轩华等^[3]考虑运输时间约束,建立了求解多阶段动态

RHFS 问题的调度模型;Chamnanlor 等^[4]设计了基于遗传算法和蚁群算法的混合优化算法研究具有时间窗约束的 RHFS 问题;Cho 等^[5]提出了一种两级优化算法求解满足总成品数量最大化和客户需求延迟最小化的 RHFS 问题;周炳海等^[6]考虑实际生产中的检测修复阶段,设计了拉格朗日松弛算法进行 RHFS 问

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-09-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71840003); 上海理工大学科技发展项目(2018KJFZ043); 上海市科委“科技创新行动计划”软科学重点项目(20692104300).

责任编委: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: yechm6464@163.com.

题的求解.

产品生产过程中,随着设备老化、零件磨损,在同一台设备上加工同一道工序的时间会不同,导致工件各道工序加工时间的不确定性.相比采用随机数需要事先知道变量满足的分布,采用模糊数需要事先知道其对应的隶属度函数而言,预知工序加工时间的上下界相对容易,因此将加工时间表示为区间数在RHFS问题的研究中是可行的.针对区间数作业车间调度问题,朱艳艳等^[7]构建了以提前/拖期惩罚区间为目标的可重入调度模型,并采用改进的化学反应算法进行求解;王春等^[8]构建了以最小化区间最大完工时间和机器总负荷为优化目标的区间柔性作业车间调度模型;Zhou等^[9]研究了考虑能源有效性的区间混合流水车间调度问题,以总能耗和最大完工时间最小化为优化目标;王凌等^[10]针对区间数分布式流水线调度问题设计了混合果蝇优化算法进行求解.

由于长时间的持续生产,机器设备会产生遗忘和退化效应,延长工件的加工时间,机器耗能也会增加,由此产生的二氧化碳排放也会相应增加.此外,在实际生产中,设备故障对生产过程会造成较大的影响,如果一旦出现故障进行维修,则会耽误整个生产线的生产进程,造成企业巨大的经济损失.因此,有必要对设备进行预维护(preventive maintenance, PM),PM后的设备可以一定程度上恢复其加工能力,缓和机器的遗忘和退化效应,减少发生随机故障的频率,缩短加工时间,减少机器能耗以及二氧化碳的排放量,从而为实现绿色制造做出一定的贡献.Huang等^[11]研究了对两级多处理机的流水车间增加维护操作而实现清洁生产的问题;Xiao等^[12]设计了一个能获得机器最优预防性维修间隔以及每个作业分配策略的联合优化模型;吴秀丽等^[13]考虑了机器使用过程中的预维护操作,设计了3种不同的集成优化策略;Wang等^[14]研究了每台机器都受到计划期内预维护约束的柔性车间调度问题,其中分别考虑了预维护的开始时间确定以及在一个时间窗内取值两种情况.

由以上文献可以看出:1)目前文献中对于区间数车间调度问题主要限制于作业车间调度、柔性车间调度和流水车间调度,且大多为单目标优化,几乎没有针对具有可重入约束的多目标优化问题展开研究的文献;2)目前文献中没有关于对区间数RHFS调度和PM协同优化的研究.鉴于此,本文以优化区间最大完工时间、区间总碳排放和区间总PM费用为优化目标,建立了多目标区间可重入混合流水车间调度与PM(multi-objective interval reentrant hybrid flow

shop scheduling and PM, MIRHFSPM)协同优化模型,并设计了改进的离散鲸鱼群算法(improved discrete whale swarm algorithm, IDWSA)对该问题进行求解,通过仿真实验验证了所提出算法的有效性和可行性.

1 MIRHFSPM问题描述

1.1 问题描述

设备加工过程中会因为等待的空闲状态改变机器的生产加工环境,从而产生遗忘效应,导致工件实际加工时间延长.同时,因为长时间的持续生产会出现设备老化、零件磨损等情况,致使设备性能变差,对工件的加工能力减弱,同样也会延长工件的实际加工时间^[15].本文研究中当两者共同存在时,工件的实际加工时间选取两者中的最大值,有

$$T_{ijklk} = \max(T_{ijklk}' \times t_{\omega}^{\eta}, T_{ijklk}' + \varphi \times ts_{ij}). \quad (1)$$

其中: $T_{ijklk} = [\underline{T}_{ijklk}, \overline{T}_{ijklk}]$ 为 O_{ij} 的实际区间加工时间, $\underline{T}_{ijklk}$ 和 $\overline{T}_{ijklk}$ 分别为区间的下限和上限; $T_{ijklk}' = [\underline{T}_{ijklk}', \overline{T}_{ijklk}']$ 为 O_{ij} 的标准区间加工时间; $T_{ijklk}' \times t_{\omega}^{\eta}$ 为机器产生的遗忘效应^[15], $t_{\omega} = [t_{\omega}, \bar{t}_{\omega}]$ 为 O_{ij} 加工前的区间等待时间, η 为机器遗忘因子; $T_{ijklk}' + \varphi \times ts_{ij}$ 为机器产生的退化效应^[16], φ 为机器退化率, $ts_{ij} = [ts_{ij}, \bar{ts}_{ij}]$ 为工件 O_{ij} 的区间开始加工时间.

在实际的制造生产中,倾向于采用二参数威布尔分布^[17]描述设备的故障规律,设备的故障率函数为

$$p(t) = \frac{m}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{m-1} \exp \left(- \left(\frac{t}{\beta} \right)^m \right). \quad (2)$$

其中: m 为形状参数, $m > 0$; β 为尺度参数, $\beta > 0$.

设备的可靠度指设备在规定时间和条件下无故障地完成规定功能的概率,设备役龄指设备从投入生产起参与生产过程的时间.工位 l 中机器 k 在运行时刻 t 的可靠度 R_{lkt} 及其役龄阈值 Z_{lk0} ^[18]分别为

$$R_{lkt} = \exp \left(- \left(\frac{Z_{lkt}}{\beta} \right)^m \right), \quad (3)$$

$$Z_{lk0} = \beta (-\ln(R_{lk0}))^{1/m}. \quad (4)$$

其中: Z_{lkt} 为设备在 t 时刻的役龄, R_{lk0} 为设备的可靠度阈值.

设备经过PM后,不可能完全恢复到最初的状态,则设备经过PM后初始役龄 Z_{lk} 为

$$Z_{lk} = Z_{lk}'(1 - p_{lk}). \quad (5)$$

其中: Z_{lk} 为工位 l 中机器 k 经过PM后的役龄; Z_{lk}' 为该设备执行PM前的实际役龄; p_{lk} 为役龄回退因子.图1为设备执行PM操作示意图.

MIRHFSPM问题可以描述为 n 个工件 $\{i = 1, 2, \dots, n\}$ 在 s 个串行的工位 $\{l = 1, 2, \dots, s\}$ 上进行

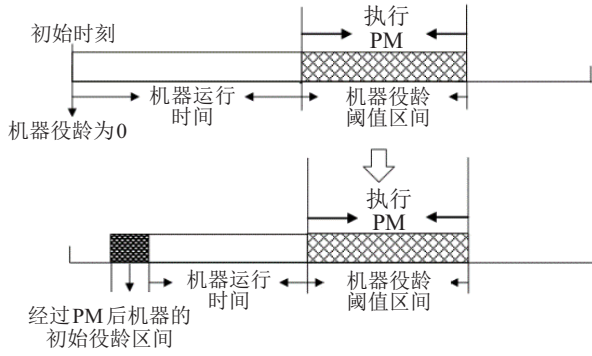


图1 设备PM示意图

相应工序的加工,每个工件的加工次数 L_i 可以不同,工件 i 需要重入加工 $(L_i - 1)$ 次;至少存在一个工位 l ,具有 $m_l(m_l \geq 1)$ 台同样的并行机可供选择,每道工序可以选择该工位上任何一台空闲的机器 $k\{k = 1, 2, \dots, m_l\}$ 进行加工;工件 i 包含 j 道工序 $\{j = 1, 2, \dots, N_i\}$,每个工件工序之间存在加工顺序的先后约束;工序 O_{ij} 只能在对应工位中的一台机器上加工.每道工序加工之前均需要计算选择机器的役龄,只要役龄不小于 Z_{lk0} ,设备便需要进行PM. MIRHFSPM问题中处于不同加工层次的工件有可能在同一时刻争夺相同的机器,需要为每道工序选择合适的机器进行加工,对每台机器上分配的工序进行加工顺序的优化,并合理安排设备的PM操作,使得生产调度和PM实现协同优化,3个区间指标达到最优.

1.2 问题模型

本文优化目标有3个,分别为最小化区间最大完工时间 $C_{\max}$ 、区间总碳排放TCT和区间总PM费用TCost,其中碳排放为绿色指标.本文仅考虑与调度相关的机器加工、空转状态消耗电能产生的碳排放和使用润滑油产生的碳排放^[19],分别定义为

$$f_1 = \min(C_{\max}), C_{\max} = \max(C_i), i = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$f_2 = \min(\text{TCT}) = \min(\text{TC}_P + \text{TC}_I + \text{TC}_R). \quad (7)$$

其中

$$\text{TC}_P = \sum_{l=1}^s \sum_{k=1}^{m_l} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} r_{ijkl} F_e \text{PW}_{lk} T_{ijkl}, \quad (8)$$

$$\text{TC}_I = \sum_{l=1}^s \sum_{k=1}^{m_l} F_e \text{PI}_{lk} \text{TI}_{lk}, \quad (9)$$

$$\text{TC}_R = \sum_{l=1}^s \sum_{k=1}^{m_l} \frac{\text{Tclose}_{lk} - \text{Topen}_{lk}}{\text{TR}_{lk}} \text{UR}_{lk} F_R, \quad (10)$$

$$f_3 = \min(\text{TCost}) = \min \left(\sum_{l=1}^s \sum_{k=1}^{m_l} (\text{GCost}_{lk} + \text{tp}_{lk} \times \text{VCost}_{lk}) \right); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & r_{ijkl} Y_{lkv} (C_{ij} - \text{tp}_{lk} - T_{ijkl}) \left(\frac{1}{2} Z_1 (Z_1 + 1) \right) + \\ & r_{ijkl} Y_{lkv} (C_{PM} - C_{ij} - \text{tp}_{lk}) \times \\ & \left(\frac{1}{2} Z_1 (Z_1 - 1) \right) \geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

式(6)中 C_i 为工件 i 的完工时间.式(7)中 TC_P 、 TC_I 、 TC_R 分别为机器加工过程、空转状态以及使用润滑油产生的区间总碳排放,定义分别如式(8)~(10)所示.其中: F_e 和 F_R 分别为电能和润滑油的碳排放因子; PW_{lk} 和 PI_{lk} 分别为工位 l 中机器 k 的加工和空转能耗; TI_{lk} 为工位 l 中机器 k 的区间空转时间; UR_{lk} 和 TR_{lk} 分别为工位 l 中机器 k 上润滑油的使用量和有效使用时间; Topen_{lk} 和 Tclose_{lk} 分别为工位 l 中机器 k 的区间运行开始时间和运行结束时间; r_{ijkl} 为决策变量,为1表示 O_{ij} 在工位 l 中机器 k 上加工,为0表示不在此机器上加工.式(11)中 GCost_{lk} 和 VCost_{lk} 分别为工位 l 中机器 k 的PM固定成本和单位活动成本; tp_{lk} 为工位 l 中机器 k 的区间预维护时间.式(12)规定每台机器上不能同时进行PM操作和工件加工,其中 Y_{lkv} 和 Z_1 为决策变量,前者为1表示PM在工位 l 中机器 k 上进行,否则为0;后者为1表示 O_{ij} 加工与PM操作前后相邻,为-1表示PM操作和 O_{ij} 的加工前后相邻,否则为0.其余相关约束条件见文献[15].

1.3 区间数相关操作

求解调度问题时,涉及到的区间数操作主要有区间数求和、求差、取大、比较以及区间中点和半径的计算等^[20]. MIRHFSPM问题中3个优化目标均为区间数,传统的Pareto支配关系已不再适用,本文在文献[21]的基础上进行扩展,同时考虑区间的中点和半径因素,提出了改进的可能度计算方法. $f_l(x_i) = [f_l(x_i), \overline{f_l(x_i)}]$ 表示个体 x_i 对应的第 l 个目标的区间函数值, m_i/m_j 和 r_i/r_j 分别表示 $f_l(x_i)/f_l(x_j)$ 的区间中点和半径,则 $f_l(x_i) \leq f_l(x_j)$ 的可能度 $P_l(x_i \leq x_j)$ 为

$$P_l(x_i \leq x_j) = \begin{cases} 1, & \overline{f_l(x_i)} \leq \underline{f_l(x_j)}; \\ 0, & \underline{f_l(x_i)} \geq \overline{f_l(x_j)}; \\ \frac{\max \left\{ 0, \left(r_i + r_j - \max \left(\frac{\overline{f_l(x_i)} - \underline{f_l(x_j)}}{2}, 0 \right) \right) \right\}}{2(r_i + r_j)}, & \text{otherwise.} \\ \frac{\max \left\{ 0, \left(m_i + m_j - \max \left(\frac{\overline{f_l(x_i)} + \underline{f_l(x_j)}}{2}, 0 \right) \right) \right\}}{2(m_i + m_j)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

该区间占优可能度具有如下性质: $P_l(x_i \leq x_j) + P_l(x_j \leq x_i) = 1$. 多目标优化问题,对于优化的任意一个目标 $l \in \{1, 2, \dots, O\}$,均有 $P_l(x_i \leq x_j) \geq P_l(x_j \leq x_i)$ 且至少存在一个目标 $q, q \in \{1, 2, \dots, O\}$,使得 $P_q(x_i \leq x_j) > P_q(x_j \leq x_i)$,则 x_i 占优 x_j . 对于区间多目标优化问题而言,Pareto 前沿中每一个解是一个超体,因此本文采用区间拥挤距离计算方法对相同等级下的个体进行评价^[22].

2 IDWSA 求解MIRHFSPM 问题

受鲸鱼群通过超声波通信完成彼此交流进行捕食行为的启发,Zeng 等^[23]于 2017 年提出了一种新型群体智能优化算法——鲸鱼群算法 (whale swarm algorithm, WSA). 该算法控制参数较少,容易实现,目前已成功地应用于分布式置换流水车间调度^[24]、柔性作业车间调度^[25]等领域,但尚没有应用在不确定可重入混合流水车间的研究中. 此外,在算法搜索机制上,WSA 采取小生境技术搜索框架获取更多的全局解,能够灵活地嵌入许多根据各个优化目标设计的搜索算子. 因此本文针对 MIRHFSPM 特性设计了 IDWSA 进行求解.

2.1 编码和解码

每个个体长度为 n ,由所有工件的序号组成,采用置换编码序列表示 n 个工件的加工优先级. 例如,对于 3 个工件的调度问题,个体 3、1、2 表示工件 3 最先加工,其次是工件 1 和工件 2. 为了得到可行且有效的调度方案,采用 ECT(earliest completion time) 规则^[26]

进行工件的排序,第 1 阶段按照编码的工件顺序进行解码,后续阶段则按照先完成先加工的方式确定工件的加工顺序. 对于机器选择,采用 FAM(first available machine) 机器分配策略^[27]. 为了更加清楚地展示解码方案,通过一个小规模算例 {3, 1, 2} 进行阐述. 该实例共有 2 个工位,机器数分别为 2 和 3,重入次数为 1,表 1 为各个工件的区间加工时间,表 2 为其对应的解码过程,时间为相应区间中点值. 图 2 为工件的调度甘特图,其中阴影部分为两个区间相互重叠的时间区域,括号中的标注分别表示工件和加工层次,例如 (3, 1) 代表工件 3 的第 1 层加工.

表 1 3 个工件的区间加工时间

工件	第 1 层加工		第 2 层加工(重入)	
	工位 1	工位 2	工位 1	工位 2
job ₁	[20, 25]	[12, 41]	[13, 34]	[14, 27]
job ₂	[14, 24]	[0, 0]	[15, 29]	[10, 27]
job ₃	[16, 35]	[16, 24]	[10, 30]	[18, 23]

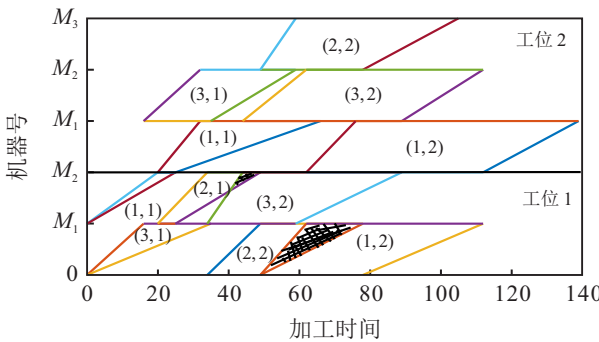


图 2 调度甘特图

表 2 解码过程

加工层次	工位	上道工序完成时间	工件加工顺序	选择的机器	开始加工时间	加工完成时间
第 1 层	1		[3, 1, 2]	[1, 2, 2]	[0, 0], [0, 0], [20, 25]	[16, 35], [20, 25], [34, 49]
	2	[25.5, 22.5, 41.5]	[1, 3, \]	[3, 4, \]	[20, 25], [16, 35], [34, 49]	[32, 66], [32, 59], [49, 78]
第 2 层	1	[49, 45.5, 41.5]	[2, 3, 1]	[1, 2, 1]	[34, 49], [34, 59], [49, 78]	[49, 78], [44, 89], [62, 112]
	2	[63.5, 66.5, 87]	[2, 3, 1]	[5, 4, 3]	[49, 78], [44, 89], [62, 112]	[59, 105], [62, 112], [76, 139]

注: 工件 2 在第 1 层加工的第 2 个工位上加工时间为 [0, 0], 表明其跳过当前工位, 因此不用考虑该工件的机器分配.

2.2 同步调度与维护策略

同步调度维护策略同步安排生产任务和 PM 任务,每安排一个工件,根据设备的役龄阈值决定是否需要进行 PM 操作,实现生产调度与 PM 的协同优化,在文献 [13] 中其已被证明为最佳的协同优化策略. 因此本文针对 RHFS 的特点,设计了求解 MIRHFSPM 问题的同步调度策略,具体流程如下.

step 1: 对于待加工工序 O_{ij} ,选择对应工位 l 上可以最早开始加工它的机器. 计算出选中机器该时刻的役龄区间 Z_{lkt} ,如果 $Z_{lkt} + T_{ijlk} < Z_{lk0}$,则不需要

进行 PM,直接在该机器上进行加工,否则转至 step 2.

step2: 若 $T_{ijlk} + Z_{lkt} > Z_{lk0}, Z_{lkt} < Z_{lk0}$, $idle_{time}_{lk} < tp_{lk}$ ($idle_{time}_{lk}$ 为加工 O_{ij} 之前工位 l 中机器 k 的区间空闲时间),即机器的空闲时间无法完成 PM 操作,则将 PM 的区间开始时间设置为 $ts_{PM} = \max(MS_{lk}, C_{ij-1})$ (MS_{lk} 为工位 l 中机器 k 可以开始加工下道工序的时间, C_{ij-1} 为 O_{ij-1} 的完工时间), O_{ij} 的区间开始加工时间与 PM 的区间结束时间相同, $ts_{ij} = C_{PM} = ts_{PM} + tp_{lk}$,执行结束转至 step 5, 否则转至 step 3.

step 3: 若 $T_{ijk} + Z_{lkt} > Z_{lk0}$, $Z_{lkt} < Z_{lk0}$, $\text{idle time}_{lk} \geq \text{tp}_{lk}$, 即机器的空闲时间可以完成PM操作, 则PM的区间结束时间设置为 $C_{PM} = \max(\text{MS}_{lk}, C_{ij-1})$, 其区间开始时间 $\text{ts}_{PM} = C_{PM} - \text{tp}_{lk}$, O_{ij} 的区间开始加工时间 $\text{ts}_{ij} = C_{PM}$, 执行结束转至 step 5; 否则转至 step 4.

step 4: 若 $Z_{lkt} = Z_{lk0}$, 即机器完成上道工序, 立即需要进行PM操作, 则其区间开始时间 $\text{ts}_{PM} = \text{MS}_{lk}$, 区间结束时间 $C_{PM} = \text{ts}_{PM} + \text{tp}_{lk}$. O_{ij} 的区间开始加工时间 $\text{ts}_{ij} = \max(C_{PM}, C_{ij-1})$, 执行结束转至 step 5.

step 5: 记录该机器上考虑PM操作后 O_{ij} 的最早区间开始时间, 依次判断对应工位中其余机器上加工 O_{ij} 是否需要执行PM, 计算出加工 O_{ij} 的最早区间开始时间, 最终选择一个能够最早开始加工的机器进行加工.

2.3 个体间距离计算策略

寻找“最近较优”个体是WSA算法的重要环节. 原始算法中, 个体之间的距离采用欧氏距离进行衡量, 而车间调度属于离散的优化问题, 本文采用汉明距离计算不同个体之间的距离, 即两个个体之间对应位置处元素相同则距离为1, 否则为0. 采用汉明距离虽然不能得到两个个体之间的精确距离, 但是缩短了计算时间, 而且更加直观, 不需要再将个体的位置信息映射为工件的加工顺序, 一定程度上提高了算法的运行效率. 此外, 可以根据研究问题进行扩展, 用两个个体之间更多的差异信息表示彼此之间的距离. 在MIRHFSPM问题中, 根据解码过程, 每层加工的每个工位上, 工件的加工序列 π_{Xcl} (X 为个体序号, c 为加工层次序号, l 为工位号) 都要按照上个工位工件的完工时间重新排列, 因此本文取加工过

加工第1层工位1	π_{111}	1	2	3	4	6	5
	π_{211}	6	3	4	1	2	5
	汉明距离	0	0	0	0	0	1
加工第1层工位2	π_{112}	3	4	1	5	2	6
	π_{212}	2	4	1	6	5	3
	汉明距离	0	1	1	0	0	0
加工第2层工位1	π_{121}	2	1	4	6	3	5
	π_{221}	2	4	6	1	3	5
	汉明距离	1	0	0	0	1	1
加工第2层工位2	π_{122}	5	6	4	3	1	2
	π_{222}	5	3	2	4	1	6
	汉明距离	1	0	0	0	1	0

图3 个体间距离计算方法

程中所有 π_{Xcl} 的汉明距离和来表示两个个体之间的距离. 详细过程以一个6工件、2工位、重入次数为1的小规模测试算例进行说明, $X_1 = [1, 2, 3, 4, 6, 5]$, $X_2 = [6, 3, 4, 1, 2, 5]$ 分别代表两个鲸鱼个体. 如图3所示, 两个个体间的距离为 $1 + 2 + 3 + 2 = 8$. 按照上述方法计算出每个目标个体的最近个体, 并进行支配关系的判断, 若“最近较优”个体存在, 则称之为该目标个体的“引导个体”, 执行第2.4节的个体位置移动策略, 否则对目标个体执行第2.5节的变邻域搜索策略, 从而扩大种群的多样性, 使算法能够有效跳出局部最优解.

2.4 个体位置移动策略

以一个小规模案例具体阐述个体位置移动策略的具体步骤.

step 1: 目标个体为 P_1 , “最近较优”个体为 P_2 (若存在多个, 则随机选择一个), 生成两个随机数数组 r_1 和 r_2 分别与 P_1 、 P_2 相对应. 对于随机数 $r < 0.5$ 的位置, 将 P_1 中相应元素移至 C_2 中, 将 P_2 中相应元素移至 C_1 中, 则 C_1 中待填充子集为 $\text{set}_1 = [6, 1, 4, 2]$, C_2 中待填充子集为 $\text{set}_2 = [1, 2, 4, 5]$, 如图4所示.

P_1	1	2	3	4	5	6
r_1	0.8147	0.9058	0.1270	0.9134	0.6324	0.0975
C_2			3			6

P_2	3	6	1	4	5	2
r_2	0.2785	0.5469	0.9575	0.9649	0.1576	0.9706
C_1	3				5	

图4 个体位置移动策略 step 1 示意图

step 2: 以 C_1 的形成过程为例, 其待填充位置为 $[2, 3, 4, 6]$, 依次判断 P_1 中相应位置的元素是否存在于 set_1 中. P_1 中位置2处的元素为2, 存在于 set_1 中, 则将其填充至 C_1 位置2处, 将2从 set_1 中删除, 则 $\text{set}_1 = [6, 1, 4]$. 继续判断位置3处的元素, P_1 中位置3处的元素为3, 不存在于 set_1 中, 因此从 set_1 中随机选一个元素 (如4) 进行 C_1 位置3处的填充, 将4从 set_1 中删除, 则 $\text{set}_1 = [6, 1]$, 依次类推完成位置4和6处的元素填充, 如图5所示.

①	C_1	3	2		5	更新后 $\text{set}_1 = [6, 1, 4]$		
②	C_1	3	2	4	5	更新后 $\text{set}_1 = [6, 1]$		
③	C_1	3	2	4	6	5	更新后 $\text{set}_1 = [1]$	
④	C_1	3	2	4	6	5	1	更新后 $\text{set}_1 = []$

图5 C_1 个体形成过程

2.5 多邻域搜索策略

为了增强目标个体的局部搜索能力,对于工件编码序列,随机选择两个不同的位置 a 和 b . 采用随机选择的邻域搜索方式,生成一个 $[0, 1]$ 之间的随机数 rand , 当 $\text{rand} < 1/3$ 时,采用 swap 方式将两个位置的元素进行互换,生成一个新的工件加工序列;当 $1/3 < \text{rand} \leq 2/3$ 时,采用 insert 方式将排序在后的一个元素插入到排序在前的元素位置,其余元素依次后移;其余情况采用 fliplr 方式,将两个位置之间的元素进行翻转排列. 每次迭代过程中第 2.4 和 2.5 节中新形成的子代个体和原种群个体合并,并进行快速非支配排序和拥挤距离的计算,挑选出排列在前的 N 个个体作为下次迭代的初始种群.

3 仿真实验

由于本文首次展开对 MIRHFSPM 问题的研究,实验阶段选取 IMSSA 算法^[2]、 VNCRO 算法^[7] 和 NSGA-II 算法^[28] 进行比较分析. IMSSA 算法已被证明为求解 RHFS 问题的有效算法, VNCRO 算法已被证明能够有效地对区间可重入调度问题进行求

解, NSGA-II 算法是求解多目标问题有效且经典的算法之一,因此将其改进对 MIRHFSPM 问题进行求解. 设计思路如下: 3 种对比算法同样采用本文提出的区间意义下的占优关系、拥挤距离计算方法以及解码策略和同步调度维护策略,每个算法只保留独有的基础操作部分进行迭代,使得其能够对 MIRHFSPM 问题进行求解的同时保留各自的特点,较好地比较算法之间的优劣.

3.1 测试算例和参数设置

本文参照文献[6, 15]不同规模算例生成方法,设置数据集中包括3个工件数标准(10, 50, 100)、2个工位数标准(3, 4)、3个重入次数标准(1, 2, 3). 共18个参数组合,其余参数及其取值如表3所示,符号 $n \times s \times L$ 表示随机产生的实例. 此外,采用 I 测度^[8]、 DD 测度^[30] 和 C 测度^[8] 作为评价指标. IDWSA 中的关键参数主要为种群规模 N , 算法迭代次数 IT . 通过多次实验分析,当 $N = 50$ 且 $IT = 50$ 时能够在保证算法运行时间的基础上获得最佳的结果,其他算法中涉及到的参数分别设置为文献[2, 7, 28]中的取值.

表3 数据集中关键参数及其取值

参数名称	取值	参数名称	取值
工件数	10 \ 50 \ 100	工件区间加工时间	$[\text{round}(\text{DU}[10, 20]), \text{round}(\text{DU}[22, 44])]$
重入次数	1 \ 2 \ 3	机器的预维护时间	$[\text{round}(\text{DU}[5, 10]), \text{round}(\text{DU}[11, 22])]$
工位数	3 \ 4	电能碳排放因子	$1.874\,2 \times 10^{-7}$ ^[29]
润滑油碳排放因子	469 ^[29]	每个工位上的机器数	$\text{DU}[2, 4] \setminus \text{DU}[5, 7] \setminus \text{DU}[8, 10]$
润滑油的使用量	$\text{DU}[0.2, 0.4]$	机器的加工功率(空转功率)	$\text{DU}[10, 15](\text{DU}[1, 5])$
故障率函数中的形状参数 m	1.1 ^[15]	故障率函数中的尺度参数 β	110 ^[15]
润滑油的有效使用期	$\text{DU}[4, 6]$	可靠度阈值	$[\text{round}(\text{DU}[0.1, 0.2]), \text{round}(\text{DU}[0.3, 0.4])]$
机器预维护的固定成本	$\text{DU}[10, 15]$	机器预维护的单位活动成本	$\text{DU}[3, 5]$

注: 功率单位为kW/h, 润滑油有效使用期单位为h, 润滑油使用量单位为L, 加工时间和预维护时间单位为min, 成本单位为RMB, 电能碳排放因子单位为kgCO₂/J, 润滑油碳排放因子单位为kgCO₂/m³.

3.2 同步调度维护策略有效性分析

为了验证所提出同步调度维护策略的有效性,对比其考虑PM操作和不考虑PM操作两种情况下获得的区间最大完工时间和总碳排放,结果如表4所示. 可以看出,采用所提出的同步调度维护策略,考虑调度和PM的集成优化能够有效地缓解设备的遗忘和退化效应带来的加工时间延长的现象,一定程度上优化了最大完工时间和总碳排放,并且通过区间中点改进率可以发现,当工件数越多,规模越大时,改进效果越明显.

3.3 算法性能比较分析

分别用所有对比算法对测试算例进行仿真实验,取其平均值作为该参数组合最终的结果,实验结果中最优解用粗体表示. +表示IDWSA算法显著优于某一对比算法;=表示IDWSA算法与某一对比算法之间不存在显著性差异. 表5和表6分别为各算法之间 I 测度、 DD 测度和 C 测度的实验结果对比以及 Wilcoxon 符号秩检验结果. 可以看出,针对前两种评价指标,对于大部分测试实例, IDWSA 均显著优于其余对比算法. 针对 I 测度,对于 $50 \times 3 \times 3$ 、 $50 \times 4 \times 2$ 和

表 4 两种策略实验结果对比

实例	不考虑 PM 操作		同步调度维护策略		区间中点改进率 / %	
	$C_{\max}$	TCT	$C_{\max}$	TCT	$C_{\max}$	TCT
10×3×2	[238.05, 466.24]	[1.04, 2.09]	[178.00, 353.00]	[0.76, 1.53]	24.60	26.84
10×3×3	[284.35, 596.48]	[1.70, 4.10]	[185.00, 438.00]	[1.17, 2.54]	29.27	36.03
10×3×4	[281.52, 680.61]	[1.98, 4.84]	[254.70, 649.00]	[1.58, 3.87]	29.22	20.09
10×4×2	[269.51, 590.67]	[1.28, 2.81]	[214.00, 438.00]	[0.91, 1.85]	24.20	32.48
10×4×3	[274.25, 821.67]	[1.68, 4.55]	[307.00, 679.00]	[1.45, 3.21]	10.03	25.20
10×4×4	[344.16, 802.77]	[3.38, 7.76]	[297.00, 648.72]	[2.79, 5.99]	17.54	21.18
50×3×2	[392.62, 949.49]	[3.33, 7.58]	[412.73, 840.85]	[2.91, 6.22]	6.60	16.32
50×3×3	[1 093.90, 2 280.50]	[5.79, 12.60]	[707.60, 1 569.70]	[4.09, 8.88]	32.51	29.47
50×3×4	[3 410.70, 7 674.60]	[18.00, 40.29]	[1 496.00, 3 104.3]	[7.93, 17.09]	58.50	57.08
50×4×2	[647.20, 1 435.30]	[4.82, 10.99]	[514.70, 1 175.00]	[3.90, 8.52]	18.86	21.44
50×4×3	[1 987.60, 4 543.60]	[14.34, 33.35]	[1 010.70, 2 407.30]	[9.07, 21.42]	47.67	36.07
50×4×4	[3 288.60, 7 231.20]	[25.43, 56.54]	[1 435.00, 2 920.30]	[13.15, 27.35]	58.60	50.59
100×3×2	[3 619.00, 7 818.50]	[12.40, 27.08]	[1 447.90, 3 081.20]	[6.32, 13.41]	60.40	50.03
100×3×3	[9 553.00, 20 276.00]	[42.20, 91.47]	[2 037.40, 4 516.20]	[13.47, 29.60]	78.03	67.78
100×3×4	[23 280.00, 52 005.00]	[110.51, 243.86]	[2 907.20, 6 064.1]	[16.69, 35.98]	88.08	85.14
100×4×2	[3 435.90, 7 149.30]	[19.45, 42.45]	[1 453.40, 3 042.50]	[9.15, 19.62]	57.53	53.52
100×4×3	[9 858.00, 20 708.00]	[55.21, 120.77]	[2 087.60, 4 589.60]	[14.65, 32.64]	78.15	73.13
100×4×4	[23 970.00, 54 746.00]	[144.82, 324.78]	[3 000.00, 6 507.10]	[18.14, 39.79]	87.92	87.66

表 5 各个算法 I 测度和 DD 测度指标比较

实例	I 测度				DD 测度			
	IDWSA	NSGA-II	VNCRO	IMSSA	IDWSA	NSGA-II	VNCRO	IMSSA
10×3×2	0.105 8	0.139 5+	0.157 1+	0.166 6+	0.017 3	0.024 9+	0.063 0+	0.025 4+
10×3×3	0.200 4	0.273 1+	0.265 1+	0.282 1+	0.004 0	0.012 3+	0.034 3+	0.016 5+
10×3×4	0.211 9	0.347 1+	0.351 7+	0.378 0+	0.005 5	0.016 3+	0.016 2+	0.013 1+
10×4×2	0.121 6	0.189 5+	0.171 5+	0.222 7+	0.007 9	0.020 7+	0.041 2+	0.023 7+
10×4×3	0.222 9	0.312 5+	0.308 0+	0.388 1+	0.005 1	0.015 7+	0.018 3+	0.013 7+
10×4×4	0.280 3	0.406 8+	0.431 8+	0.418 2+	0.012 3	0.019 1+	0.014 8+	0.017 5+
50×3×2	0.094 6	0.146 7+	0.163 2+	0.161 5+	0.009 8	0.018 9+	0.037 3+	0.040 4+
50×3×3	0.128 3	0.188 4+	0.179 2=	0.296 5+	0.005 0	0.043 6+	0.047 8+	0.024 1+
50×3×4	0.170 9	0.218 9+	0.324 2+	0.295 6+	0.007 5	0.017 4+	0.021 5+	0.020 4+
50×4×2	0.139 2	0.215 3+	0.199 7=	0.294 7+	0.006 8	0.023 2+	0.033 4+	0.023 1+
50×4×3	0.227 1	0.285 1+	0.293 0+	0.360 3+	0.008 9	0.015 7=	0.016 8+	0.017 6+
50×4×4	0.348 2	0.467 7+	0.474 6+	0.528 7+	0.005 1	0.008 5=	0.010 4=	0.012 0+
100×3×2	0.120 1	0.125 3=	0.145 6=	0.149 3=	0.010 3	0.035 7+	0.115 2+	0.055 0+
100×3×3	0.164 3	0.236 1+	0.215 2=	0.316 7+	0.009 7	0.016 0=	0.045 0+	0.034 7+
100×3×4	0.183 8	0.270 4+	0.253 4+	0.334 0+	0.005 1	0.025 9+	0.024 0+	0.029 6+
100×4×2	0.113 0	0.169 4+	0.170 6+	0.355 8+	0.004 6	0.034 6+	0.041 1+	0.022 7+
100×4×3	0.208 7	0.325 9+	0.354 2+	0.464 8+	0.009 1	0.013 0=	0.015 1=	0.012 8=
100×4×4	0.318 5	0.423 0+	0.516 6+	0.498 0+	0.008 5	0.010 7=	0.015 8=	0.011 0=

表6 各个算法C测度指标比较

实例	IDWSA(A) vs. NSGA-II(B)		IDWSA(A) vs. VNCRO(C)		IDWSA(A) vs. IMSSA(D)	
	$C(A, B)$	$C(B, A)$	$C(A, C)$	$C(C, A)$	$C(A, D)$	$C(D, A)$
10×3×2	0.9718	0.000 0+	1.000 0	0.000 0+	1.000 0	0.000 0+
10×3×3	0.895 8	0.026 2+	0.834 6	0.006 8+	0.990 9	0.003 2+
10×3×4	0.928 8	0.014 0+	0.874 7	0.030 8+	1.000 0	0.000 0+
10×4×2	0.966 7	0.014 6+	0.830 7	0.030 7+	1.000 0	0.000 0+
10×4×3	0.889 3	0.016 1+	0.607 0	0.056 6+	1.000 0	0.000 0+
10×4×4	0.904 8	0.003 1+	0.598 8	0.030 8+	0.950 0	0.011 1+
50×3×2	0.952 8	0.024 7+	0.991 7	0.034 3+	1.000 0	0.000 0+
50×3×3	0.710 4	0.068 1+	0.883 3	0.030 1+	1.000 0	0.000 0+
50×3×4	0.619 3	0.108 2+	0.692 3	0.022 7+	1.000 0	0.000 0+
50×4×2	0.766 8	0.077 5+	0.969 0	0.000 0+	1.000 0	0.000 0+
50×4×3	0.610 6	0.235 4+	0.629 0	0.070 0+	1.000 0	0.000 0+
50×4×4	0.540 7	0.115 8+	0.666 3	0.097 7+	1.000 0	0.000 0+
100×3×	2 0.699 0	0.140 9+	1.000 0	0.000 0+	1.000 0	0.000 0+
100×3×3	0.675 7	0.168 3+	0.941 3	0.005 6+	0.981 5	0.000 0+
100×3×4	0.685 7	0.087 7+	0.765 7	0.024 4+	1.000 0	0.000 0+
100×4×2	0.648 6	0.102 3+	0.875 1	0.016 1+	1.000 0	0.000 0+
100×4×3	0.600 6	0.092 6+	0.784 3	0.039 8+	1.000 0	0.000 0+
100×4×4	0.921 5	0.029 2+	0.880 6	0.068 8+	1.000 0	0.000 0+

表7 3种类型工件加工时间

单位: min

工件	第1层加工			第2层加工(重入)			第3层加工(重入)		
	工位1	工位2	工位3	工位1	工位2	工位3	工位1	工位2	工位3
job ₁	[220, 484]	[45, 99]	[60, 132]	[0, 0]	[55, 121]	[0, 0]	[250, 550]	[0, 0]	[20, 44]
job ₂	[235, 517]	[40, 88]	[30, 66]	[0, 0]	[60, 132]	[0, 0]	[245, 539]	[0, 0]	[40, 88]
job ₃	[120, 264]	[20, 44]	[65, 143]	[0, 0]	[50, 110]	[0, 0]	[200, 440]	[0, 0]	[25, 55]

100×3×3算例, IDWSA与VNCRO之间无显著性差异. 对于100×3×2算例, IDWSA与其余对比算法之间均不存在显著性差异, 只是略微占优; 针对DD测度, 对于50×4×3和100×3×3算例, IDWSA与NSGA-II之间无显著性差异. 对于50×4×4算例, IDWSA与NSGA-II、VNCRO之间无显著性差异. 对于100×4×3和100×4×4算例, IDWSA与其余对比算法之间均不存在显著性差异, 只是略微占优. 针对C测度, 对于所有测试算例, IDWSA均显著占优. 表明对于绝大部分测试算例, IDWSA算法在获得Pareto前沿上超体的不确定性和分布性上均显著优于其余对比算法, 而对于所有测试算例, IDWSA算法的支配性和收敛性均显著优于其余对比算法. 由以上分析可知, 本文提出的IDWSA对于求解MIRHFSPM问题是有效且可行的.

3.4 案例分析

半导体晶圆制造属于典型的可重入混合流水车间调度问题, 本文以半导体mini-fab实际生产线为例进行案例分析和说明. 对于3种类型的晶片, 各选取5卡工件进行仿真实验, 表7和表8分别为加工时间以及机器的役龄阈值和维护时间. 图6为各算法获得的Pareto前沿超体中点. 可以看出, IDWSA算法获得的

表8 机器役龄阈值和维护时间

设备编号	役龄阈值	维护时间/min
Ma	[1 400, 1 680]	[40, 88]
Mb	[1 500, 1 800]	[70, 154]
Mc	[700, 840]	[120, 264]
Md	[800, 960]	[100, 220]
Me	[700, 840]	[3, 6.6]

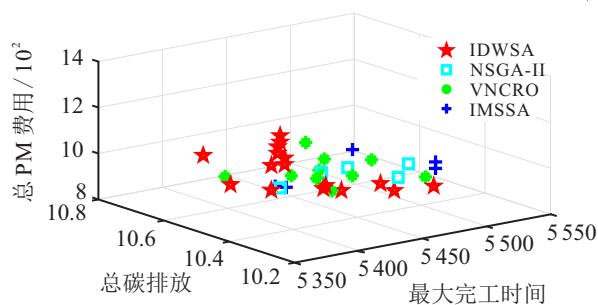


图6 Pareto前沿超体中点对比

Pareto解个数最多,分布更均匀,支配性更好,与其他算法相比具有一定的优势,可以获得更优的解。

4 结 论

本文首次构建了可重入混合流水车间不确定调度与预维护协同优化模型,设计了区间同步调度维护策略和基于可能度的Pareto占优关系,通过个体位置计算策略、个体位置更新策略以及多邻域搜索策略对鲸鱼群算法进行改进,提出了一种有效求解该问题的IDWSA算法。通过大量仿真实验验证了所提出算法的有效性、可行性和竞争力。企业决策者可以根据实际情况和利益倾向,从获得的Pareto解集中选择一个最优的调度方案,合理地安排生产和预维护任务。下一步将在本文研究的基础上考虑分布式制造模式,研究可重入混合流水车间不确定分布式调度与预维护的协同优化问题。

参考文献(References)

- [1] Lin D, Lee C K M. A review of the research methodology for the re-entrant scheduling problem[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(8): 2221-2242.
- [2] 姚远远, 叶春明. 考虑节能的改进多目标樽海鞘群算法TFT-LCD面板阵列制程调度问题[J]. 中国机械工程, 2019, 30(24): 2994-3003.
(Yao Y Y, Ye C M. IMSSA for TFT-LCD panel array process scheduling problem considering energy saving[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(24): 2994-3003.)
- [3] 轩华, 李冰, 王薛苑, 等. 带运输考虑的多阶段动态可重入混合流水车间调度[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(3): 357-366.
(Xuan H, Li B, Wang X Y, et al. Multi-stage dynamic reentrant hybrid flowshop scheduling with transportation consideration[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(3): 357-366.)
- [4] Chamnanlor C, Sethanan K, Gen M, et al. Embedding ant system in genetic algorithm for re-entrant hybrid flow shop scheduling problems with time window constraints[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(8): 1915-1931.
- [5] Cho H M, Jeong I J. A two-level method of production planning and scheduling for bi-objective reentrant hybrid flow shops[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 106: 174-181.
- [6] 周炳海, 钟臻怡. 可重入混合流水车间调度的拉格朗日松弛算法[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(7): 28-33.
(Zhou B H, Zhong Z Y. Lagrangian relaxation algorithm for scheduling problems of reentrant hybrid flow shops[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(7): 28-33.)
- [7] 朱艳艳, 徐震浩, 顾幸生. 工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1127-1136.
(Zhu Y Y, Xu Z H, Gu X S. Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1127-1136.)
- [8] 王春, 王艳, 纪志成. 求解区间柔性作业车间调度的多目标进化算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(5): 908-916.
(Wang C, Wang Y, Ji Z C. Multi-objective evolutionary algorithm to solve interval flexible job shop scheduling problem[J]. Control and Decision, 2019, 34(5): 908-916.)
- [9] Zhou R, Lei D M, Zhou X M. Multi-objective energy-efficient interval scheduling in hybrid flow shop using imperialist competitive algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85029-85041.
- [10] 王凌, 郑洁, 王晶晶. 求解区间数分布式流水线调度的混合离散果蝇优化算法[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 930-936.
(Wang L, Zheng J, Wang J J. A hybrid discrete fruit fly optimization algorithm for distributed permutation flowshop scheduling with interval data[J]. Control and Decision, 2020, 35(4): 930-936.)
- [11] Huang R H, Yu S C. Two-stage multiprocessor flow shop scheduling with deteriorating maintenance in cleaner production[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 276-283.
- [12] Xiao L, Song S L, Chen X H, et al. Joint optimization of production scheduling and machine group preventive maintenance[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 146: 68-78.
- [13] 吴秀丽, 张志强, 赵宁, 等. 超启发式文化基因算法优化生产与预维修集成调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 1885-1896.
(Wu X L, Zhang Z Q, Zhao N, et al. Production scheduling and preventive maintenance plan optimization with hyper-heuristics memetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 1885-1896.)
- [14] Wang S J, Yu J B. An effective heuristic for

- flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 59(3): 436-447.
- [15] Dong J, Ye C M. Research on two-stage joint optimization problem of green manufacturing and maintenance for semiconductor wafer[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020(1): 1-22.
- [16] Gupta J N D, Gupta S K. Single facility scheduling with nonlinear processing times[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1988, 14(4): 387-393.
- [17] Cassady C R, Kutanoglu E. Integrating preventive maintenance planning and production scheduling for a single machine[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2005, 54(2): 304-309.
- [18] Lu Z Q, Zhang Y, Han X L. Integrating run-based preventive maintenance into the capacitated lot sizing problem with reliability constraint[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(5): 1379-1391.
- [19] 刘琼, 梅侦. 面向低碳的工艺规划与车间调度集成优化[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(11): 164-174.
(Liu Q, Mei Z. Integrated optimization of process planning and shop scheduling for reducing manufacturing carbon emissions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(11): 164-174.)
- [20] 杨宏安, 王周锋, 吕阳阳, 等. 工序加工时间不确定条件下作业车间调度问题的区间数求解方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(9): 2231-2240.
(Yang H A, Wang Z F, Lv Y Y, et al. Interval number solving method for job-shop scheduling problem with processing time variability[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2014, 20(9): 2231-2240.)
- [21] 达庆利, 徐泽水. 不确定多属性决策的单目标最优化模型[J]. *系统工程学报*, 2002, 17(1): 50-55.
(Da Q L, Xu Z S. Single-objective optimization model in uncertain multi-attribute decision-making[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2002, 17(1): 50-55.)
- [22] Gong D W, Qin N N, Sun X Y. Evolutionary optimization algorithm for multi-objective optimization problems with interval parameters[C]. *Proceedings of the 5th IEEE Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*. Changsha: IEEE, 2010: 411-420.
- [23] Zeng B, Gao L, Li X. Whale swarm algorithm for function optimization[C]. *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Computing*. Liverpool: Springer, 2017: 624-639.
- [24] Wang G C, Gao L, Li X Y, et al. Energy-efficient distributed permutation flow shop scheduling problem using a multi-objective whale swarm algorithm[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, 57: 100716.
- [25] 王思涵, 黎阳, 李新宇. 基于鲸鱼群算法的柔性作业车间调度方法[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(1): 1-11.
(Wang S H, Li Y, Li X Y. An improved whale swarm algorithm for flexible job-shop scheduling problem[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(1): 1-11.)
- [26] Shao W S, Shao Z S, Pi D C. Modeling and multi-neighborhood iterated greedy algorithm for distributed hybrid flow shop scheduling problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 194: 105527.
- [27] 王圣尧, 王凌, 许烨, 等. 求解混合流水车间调度问题的分布估计算法[J]. *自动化学报*, 2012, 38(3): 437-443.
(Wang S Y, Wang L, Xu Y, et al. An estimation of distribution algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problem[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(3): 437-443.)
- [28] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [29] Leung M, Leung Y, Chan A. Carbon audit toolkit for small & medium enterprises in Hong Kong[D]. Hong Kong: University of Hong Kong, 2010.
- [30] 邵振国, 王树洪. 一种采用复仿射区间潮流的有源配电网多目标无功优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 4956-4965.
(Shao Z G, Wang S H. Multi-objective reactive power optimization method of distribution network with DGs base on complex affine power flow algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(17): 4956-4965.)

作者简介

董君(1985—), 女, 讲师, 博士生, 从事生产调度、智能算法等研究, E-mail: dj8519@163.com;

叶春明(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产调度、智能制造、企业信息化等研究, E-mail: yechm6464@163.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)