

9-23-2022

Energy-Efficient Scheduling of Multi-objective Flexible Job Shop Considering Interval Processing Time

Hongliang Zhang

School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China; hlzhang@ahut.edu.cn

Renman Ding

School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

Gongjie Xu

School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Energy-Efficient Scheduling of Multi-objective Flexible Job Shop Considering Interval Processing Time

Abstract

Abstract: Based on the comprehensive consideration of economic indicators and environmental factors, the energy-efficient scheduling problem of multi-objective flexible job shop with uncertain processing time is studied. *The interval number is used to describe uncertain processing time of the workpiece, and the optimization model for energy-efficient problem of interval flexible job shop scheduling is established to minimize the maximum interval completion time and total energy consumption. According to the domination relation of interval possibility degree, an effective interval multi-objective evolutionary algorithm is designed.* The simulation experiments of the interval multi-objective evolutionary algorithm, SPEA-II and NSGA-II are carried out through 15 groups of test problems, and the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm are verified by two performance indexes, the inverse generation distance (IGD) and the covering set measure (*C* measure).

Keywords

flexible job shop scheduling, multi-objective optimization, interval number, possibility degree, energy consumption

Recommended Citation

Hongliang Zhang, Renman Ding, Gongjie Xu. Energy-Efficient Scheduling of Multi-objective Flexible Job Shop Considering Interval Processing Time[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1976-1987.

考虑区间工时的多目标柔性作业车间节能调度

张洪亮, 丁仁曼, 徐公杰

(安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 在综合考虑经济指标和环境因素基础上, 研究了工件加工时间不确定的多目标柔性作业车间节能调度问题。将工件不确定加工时间描述为区间数, 并以最小化最大区间完工时间、区间总能耗为目标构建区间柔性作业车间调度节能问题优化模型。同时, 依据区间可能度的支配关系, 设计了一种有效求解该问题的区间多目标进化算法。通过 15 组测试问题, 分别对区间多目标进化算法、SPEA-II 及 NSGA-II 进行仿真实验, 并采用反转世代距离(inverse generation distance, IGD)和覆盖集测度(C 测度)两种性能指标验证了所提算法的可行性和有效性。

关键词: 柔性作业车间; 多目标优化; 区间数; 可能度; 能耗

中图分类号: TP301; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2022) 09-1976-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0395

Energy-Efficient Scheduling of Multi-objective Flexible Job Shop Considering Interval Processing Time

Zhang Hongliang, Ding Renman, Xu Gongjie

(School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

Abstract: Based on the comprehensive consideration of economic indicators and environmental factors, the energy-efficient scheduling problem of multi-objective flexible job shop with uncertain processing time is studied. The interval number is used to describe uncertain processing time of the workpiece, and the optimization model for energy-efficient problem of interval flexible job shop scheduling is established to minimize the maximum interval completion time and total energy consumption. According to the domination relation of interval possibility degree, an effective interval multi-objective evolutionary algorithm is designed. The simulation experiments of the interval multi-objective evolutionary algorithm, SPEA-II and NSGA-II are carried out through 15 groups of test problems, and the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm are verified by two performance indexes, the inverse generation distance (IGD) and the covering set measure (C measure).

Keywords: flexible job shop scheduling; multi-objective optimization; interval number; possibility degree; energy consumption

引言

近年来, 我国制造业取得了长足发展, 但随之而来的环境问题也日益突出, 因此绿色可持续发展

成为制造业的发展趋势。车间调度是解决车间资源分配的重要手段, 在制造业生产运营中扮演着极其重要的角色, 而合理的调度方案已成为企业降低生产能耗、实现可持续制造的关键^[1], 因此考虑能耗

收稿日期: 2021-05-06 修回日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71772002); 安徽省高校人文社科重点项目(SK2019A0060); 安徽省社科联创新发展研究课题攻关项目(2018CX033)

第一作者: 张洪亮(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为生产调度优化、精益生产与管理。E-mail: hlzhang@ahut.edu.cn。

的多目标优化调度具有重要的研究价值。柔性作业车间调度问题(flexible job-shop scheduling problem, FJSP)减少了设备约束,使问题变得更为复杂,是车间调度中典型的 NP-hard 组合优化问题^[2]。Piroozfard 等^[3]对考虑总碳足迹的柔性车间调度问题进行了研究。Wu 等^[4]在考虑能耗问题的基础上研究了多目标柔性作业车间调度问题。Caldeira^[5]等研究了考虑能耗的柔性作业车间调度问题。朱光宇等^[6]以完工时间、空闲时间、机器能耗及加工质量为基础研究了多目标柔性作业车间调度问题。刘彩洁等^[7]研究了考虑车间能耗问题的多目标柔性作业车间绿色调度问题。李益兵等^[8]以环境污染程度及最大完成时间作为优化目标,对绿色柔性作业车间调度问题进行了研究。

在以往的研究中,通常将工件加工时间定义为确定的参数,然而在实际车间生产中,受机器、工人技术水平、生产环境等不确定性因素的影响,对于工件的精确加工时间通常很难准确预知。尽管加工时间不确定的 FJSP 在研究过程中比较复杂,但其更符合实际生产情况,因此具有重要的研究意义。对于考虑加工时间具有不确定性的车间调度问题,学者们通常利用模糊数学和随机理论来描述不确定性下的加工时间。Lin 等^[9]研究了带有模糊加工时间的柔性作业车间调度问题,并提出一种混合多元优化算法。李俊萱等^[10]基于模糊柔性作业车间调度,利用三角模糊数表征相关时间参数并提出了一种混合量子粒子群算法进行求解。郑小操等^[11]基于模糊工时下的柔性作业车间调度问题提出了一种引入混沌理论进行种群初始化的改进人工蜂群算法。杨子豪^[12]研究了基于强化学习的批处理机随机调度问题,并将加工时间随机情形下的问题描述为连续时间马尔科夫决策过程。Gu 等^[13]将加工时间用随机数描述,研究了以完工时间为优化目标的作业车间调度问题。Xiao 等^[14]研究了考虑机器-工人双资源约束下的随机作业车间调度问题,并建立了机器-工人双资源约束的鲁棒调度模型。Ghasemi 等^[15]针对车间调度中工时

不确定问题,研究了具有随机加工时间的作业车间调度问题。

通过模糊数学或随机理论对不确定加工时间下的 FJSP 进行建模,需要预先知道其隶属度函数或概率分布,然而在一个不确定的生产环境中,确定一个准确的隶属度函数和一个精准的概率分布函数通常很困难,但准确预测工件加工时间的上、下界相对容易,随机数与模糊数也可基于置信水平、截集水平分别化为区间数,因此,将工件加工时间用区间数描述是可行的。李雅琼等^[16]对于不确定柔性作业车间调度问题构建了考虑区间加工时间调度问题的时间 Petri 网模型。王凌等^[17]针对不确定分布式流水线调度问题,采用区间数描述工件加工时间并建立了区间优化模型。朱艳艳等^[18]对具有区间加工时间的可重入调度问题设计了一种变领域化学反应优化算法。Zhou 等^[19]利用区间数描述工件加工时间,研究了具有区间加工时间的流水车间调度问题。

基于以上分析,在考虑设备能耗及资源约束的基础上,本文将区间数理论与多目标柔性作业车间调度相结合,以最小化最大区间完工时间及总能耗为调度目标,对考虑多目标区间柔性作业车间节能调度问题(energy-efficient scheduling problem of multi-objective interval flexible job shop, ESPMIFJS)构建了区间优化模型。同时,基于区间可能度的支配关系,设计了一种有效求解区间柔性作业车间调度问题的区间多目标进化算法(interval multi-objective evolutionary algorithm, IMOEA),通过 15 组测试问题进行了仿真实验,并与 SPEA-II 及 NSGA-II 两种算法进行对比来验证该算法的优越性。

1 多目标区间柔性作业车间节能调度问题

1.1 问题描述

假设 ESPMIFJS 有 n 个工件(J_1, J_2, \dots, J_n)和 m

台机器(M_1, M_2, \dots, M_m), 工件 J_i 含一道或多道工序 O_{ij} , 工件 J_i 的工序总数为 n_i , 工序 O_{ij} 在可选设备集中选择一台加工设备 $M_k \in M$, 且在不同设备上加工时间与能耗各不相同, 所有工序均要按照可行的工艺路线进行加工。工序 O_{ij} 在 M_k 上的加工时间为区间数 $\tilde{p}_{ijk} = [\underline{p}_{ijk}, \overline{p}_{ijk}]$, 其中 \underline{p}_{ijk} 、 \overline{p}_{ijk} 分别代表工序区间加工时间的上、下界。为了更清晰地描述考虑区间工时的柔性作业车间调度问题, 3 个工件在 3 台设备上加工的区间柔性作业车间调度问题加工时间如表 1 所示。

表 1 3×3 区间柔性作业车间调度问题加工时间表
Table 1 3×3 Interval flexible job shop scheduling problem processing schedule

工件	工序	可选设备及加工时间 t/min		
		M_1	M_2	M_3
J_1	O_{11}	[6,8]	[2,5]	[7,8]
	O_{12}	—	[4,8]	[2,4]
	O_{13}	[7,10]	[6,8]	—
J_2	O_{21}	[3,4]	[8,11]	[6,7]
	O_{22}	[2,3]	—	[2,5]
J_3	O_{31}	[7,11]	[2,6]	[5,8]
	O_{32}	—	[3,7]	—
	O_{33}	[6,10]	—	[8,12]

注：“—”表示该工序不能在对应机器上加工。

为方便分析问题和模型建立, 提出如下假设:

- (1) 所有机器均相互独立且所有机器在零时刻均可用;
- (2) 同一时刻同一台机器仅加工一个工件, 且工件一旦开始加工则不许中断;
- (3) 同一工序在同一时刻仅能被一台机器加工;
- (4) 不同工件间优先级相同, 同工件工序间有顺序约束。

1.2 符号定义

为便于模型的表述, 引入以下符号并进行定义, 具体如表 2 所示。

表 2 符号定义
Table 2 Symbol definitions

符号	定义
n	待加工工件总数
m	机器总数
J	工件集
M	机器集
n_i	工件 J_i 的工序总数
i	工件序号, $i=1,2,\dots,n$
j	工序序号, $j=1,2,\dots,n_i$
k	机器序号, $k=1,2,\dots,m$
O_{ij}	工件 J_i 的第 j 道工序
\tilde{p}_{ijk}	工序 O_{ij} 在机器 M_k 上区间加工时间
\tilde{S}_{ijk}	工件 J_i 第 j 道工序在机器 M_k 上区间开工时间
\tilde{E}_{ijk}	工件 J_i 第 j 道工序在机器 M_k 上区间完工时间
\tilde{C}_i	工件 J_i 的区间完工时间
L	一个足够大的正数
pe_k	机器 M_k 单位时间加工能耗
ie_k	机器 M_k 单位时间空闲能耗
ce	车间单位时间公共能耗
\widetilde{PE}	车间区间总加工能耗
\widetilde{IE}	车间区间总空闲能耗
\widetilde{CE}	车间区间公共能耗
\widetilde{TEC}	车间区间总能耗

决策变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{工件的第 } j \text{ 道工序在机器 } M_k \text{ 上加工} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ijstk} = \begin{cases} 1, & \text{在机器 } M_k \text{ 上, } O_{ij} \text{ 先于 } O_{st} \text{ 加工} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad s = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n_i,$$

$$t = 1, 2, \dots, n_s, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

1.3 模型建立

$$f_1 = \min(\max_{1 \leq i \leq n} \tilde{C}_i) \tag{1}$$

$$f_2 = \min(\widetilde{TEC}) \tag{2}$$

s.t.

$$\sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \tag{3}$$

$$\tilde{S}_{ijk} \geq 0 \tag{4}$$

$$\tilde{S}_{ijk} + x_{ijk} \cdot \tilde{p}_{ijk} \leq \tilde{E}_{ijk} \tag{5}$$

$$\tilde{E}_{ijk} \leq \tilde{S}_{i(j+1)k} \tag{6}$$

$$\tilde{S}_{ijk} + \tilde{p}_{ijk} \leq \tilde{S}_{stk} + L(1 - y_{ijstk}) \tag{7}$$

$$\widetilde{PE} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} x_{ijk} \cdot pe_k \cdot \tilde{p}_{ijk} \tag{8}$$

$$\widetilde{IE} = \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{s=1}^n \sum_{i=1}^n y_{ijstk} \cdot ie_k \cdot (\widetilde{S}_{stk} - \widetilde{E}_{ijk}) \quad (9)$$

$$\widetilde{CE} = ce \cdot (\max_{1 \leq i \leq n} \widetilde{C}_i) \quad (10)$$

$$\widetilde{TEC} = \widetilde{PE} + \widetilde{IE} + \widetilde{CE} \quad (11)$$

$i=1,2,\dots,n, s=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,n_i,$
 $t=1,2,\dots,n_s, k=1,2,\dots,m$

式(1), (2)为 ESPMIFJS 的目标函数; 式(3)为机器约束, 即在 ESPMIFJS 中同一工序在同一时刻仅能被一台机器加工; 式(4)确保每个工序开始时间为非负; 式(5), (6)为 ESPMIFJS 中每个工件工序间加工先后约束; 式(7)为同一时刻同一机器仅加工一个工件; 式(8)为所有设备区间总加工能耗, 即在车间中所有设备在加工产品过程中所产生的区间加工能耗之和; 式(9)为所有设备的区间总空闲能耗, 即加工工件未到达, 所有设备处于闲置状态时的区间空闲能耗之和; 式(10)为车间内公共设施的能源消耗, 如照明、排风、采暖等消耗的能量总和; 式(11)为车间的区间总能耗, 即区间总加工能耗、区间总空闲能耗与公共能耗之和。

1.4 区间数运算

由于在求解 ESPMIFJS 时工件加工时间表示为区间数, 因而需先定义区间数相关运算。本文采用文献[20]定义的区间取大运算及区间求和运算, 其中, 区间取大运算用于确定每道工序允许最早的区间开工时间, 同时也用来判断各工序是否能插入机器空闲时间段进行加工; 区间求和运算用来计算每道工序的区间完工时间。本文采用文献[21]定义的区间数比较运算操作, 用于比较各工件的区间完工时间, 从而确定整个调度方案的区间最大完工时间。对于两个区间数 $a=[a^-, a^+]$ 和 $b=[b^-, b^+]$, $l(a)=a^+ - a^-$ 和 $l(b)=b^+ - b^-$ 为 2 个区间数对应的区间宽度, 则区间数的运算描述如下:

(1) 区间数取大运算

$$a \vee b = [\max(a^-, b^-), \max(a^+, b^+)]$$

(2) 区间数求和运算

$$a + b = [a^- + b^-, a^+ + b^+]$$

(3) 基于可能度的区间数比较运算

$$p(a \geq b) = \begin{cases} 1, & a^- \geq b^+, \\ 1 - \frac{(b^+ - a^-)^2}{2l(a)l(b)}, & b^- \leq a^- \leq b^+ \leq a^+, \\ \frac{a^+ + a^- - 2b^-}{2l(b)}, & b^- \leq a^- \leq a^+ \leq b^+, \\ \frac{2a^+ - b^+ - b^-}{2l(a)}, & a^- \leq b^- \leq b^+ \leq a^+, \\ \frac{(a^+ - b^-)^2}{2l(a)l(b)}, & a^- \leq b^- \leq a^+ \leq b^+, \\ 0, & a^- \leq a^+ \leq b^- \leq b^+. \end{cases}$$

区间可能度满足以下性质: ① $0 \leq p(a \geq b) \leq 1$; ② $p(a \geq b) + p(b \geq a) = 1$; ③ $p(a \geq b) = 1$, 当且仅当 $a^- \geq b^+$ 时; ④ $p(a \geq b) = 0$, 当且仅当 $a^+ \leq b^-$ 时; ⑤ 对于 3 个区间数, 若 $p(a \geq b) \geq 0.5$, $p(b \geq c) \geq 0.5$, 则 $p(a \geq c) \geq 0.5$ 。

2 算法设计

2.1 编码

考虑到 ESPMIFJS 在明确各道工序加工顺序的同时, 还要为每道工序安排合适的加工机器, 因此本文采用一种基于工序的扩展式编码方法。该编码由两部分组成: 前半部分基因串是针对工序的编码, 即为每道工序确定相应的加工顺序(operation sequence, OS), 其中染色体 OS 中每位基因意为一个工件, 工件相对应的工序号以工件在基因串上出现的次数表示; 后半部分基因串是针对机器的编码, 即为每道工序选择合适的机器配置(machine allocation, MA), 且染色体 MA 中每位基因的含义是当前工序在可选设备集中的序列号。以表 1 为例, 假设 3 个工件在 3 台设备上加工对应染色体编码如图 1 所示, 可知工序 O_{13} 在机器 M_2 上加工, 工序 O_{21} 在机器 M_3 上加工, 工序的加工顺序为 $O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{31} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{22} \rightarrow O_{33} \rightarrow O_{13}$ 。

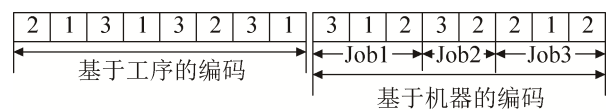


图 1 调度方案编码示例

Fig. 1 An example of scheduling scheme coding

2.2 解码

解码是将染色体编码转化为调度解的过程。本文将主动调度与区间数运算中的取大运算相结合，设计了一种新的贪婪插入法解码方式对染色体进行解码，具体步骤如下：

Step 1: 根据 OS 染色体，获取相应的加工工序 O_{ij} ；

Step 2: 通过 MA 染色体获取工序 O_{ij} 的加工设备 M_k 及区间加工时间 $\tilde{p}_{ijk} = [p_{ijk}^-, p_{ijk}^+]$ ；

Step 3: 依次寻找设备 M_k 上的空闲时段 $[\tilde{t}_k^s, \tilde{t}_k^e]$ ，其中 $\tilde{t}_k^s = [t_k^s, t_k^s]$ 、 $\tilde{t}_k^e = [t_k^e, t_k^e]$ 分别为空闲时段的区间开始时间、区间完工时间，则在符合加工工序顺序约束的基础上，工序 O_{ij} 的区间开始加工时间为

$$\tilde{S}_{ij} = \begin{cases} \max\{E_{i(j-1)}, \tilde{t}_k^s\}, & j \geq 2 \\ \tilde{t}_k^s, & j = 1 \end{cases} \quad (12)$$

Step 4: 根据式(13)判断间隔时间段是否满足插入条件，满足则插入当前空闲段；否则按照式(14)指定的时间进行加工，其中 LM_k 表示机器 M_k 最后一道加工工序的完工时间。

$$\begin{cases} \max\{E_{i(j-1)}, \tilde{t}_k^s\} + \tilde{p}_{ijk} \leq \tilde{t}_k^e, & j \geq 2 \\ \tilde{S}_{ij} + \tilde{p}_{ijk} \leq \tilde{t}_k^e, & j = 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \max\{E_{i(j-1)}, LM_k\} \quad (14)$$

2.3 种群初始化

在进化算法中，种群初始化是关键问题之一，初始种群的优劣对算法的优化速度以及求解精度存在很强的影响。针对 ESPMIFJS，本文在工序段采用随机产生工件加工顺序的方式进行排序。相比于工序排序，机器选择更为重要，因此本文在考虑机器工作负荷及种群的分布性基础上，采用三种机器选择来初始化种群^[22]：全局选择(global search, GS)、局部选择(local search, LS)及随机选择(radom search, RS)，并将区间数相关操作与不同的机器选择方法相融合。其中，全局选择、局部选择可以充分提高机器利用率，尽可能使被选择的各台机器工作负荷平衡；随机选择是尽量使初始种群分散地分布于整个解空间。三种机器选择方法概率分别为

0.6、0.3、0.1。

2.4 基于区间可能度的 Pareto 支配关系

考虑到本文所提问题的 2 个优化目标函数值均为区间数，确定目标值的 Pareto 支配关系已不适用。基于此，本文将单目标下基于可能度的区间数比较操作应用到多目标中，计算 2 个进化个体间的 Pareto 支配关系，并进行排序，即 2 个进化个体 x_i 、 x_j ，对于 z 个目标， $\forall h \in \{1, 2, \dots, z\}$ ，均有 $p_h(x_i \leq x_j) \geq p_h(x_j \leq x_i)$ ，且至少 $\exists l \in \{1, 2, \dots, z\}$ 满足 $p_l(x_i \leq x_j) > p_l(x_j \leq x_i)$ ，则称 x_i 支配 x_j ；若 x_i 不支配 x_j ， x_j 也不支配 x_i ，则 x_i 、 x_j 互不支配。

2.5 选择操作

选择操作采用锦标赛选择。对于 2 个进化个体，当 2 个个体序值不同时，选择序值小的个体；当 2 个个体序值相同时，则选择拥挤距离大的个体。在本文所求解的 ESPMIFJS 中，2 个目标函数值均为区间数，且帕累托前沿中每个解不是点而是一个超体，传统意义上计算拥挤距离的方法已不再适用。为评价等级相同的进化个体，本文采用文献[23]定义的区间意义下拥挤距离的计算方式。考虑不同目标在数量级上存在差异，在计算拥挤距离前先将目标归一化，即：目标 $f_h(x)$ ($h \in \{1, 2, \dots, z\}$) 被表示为 $f_h^* = [f_h^*(x), \overline{f_h^*(x)}]$ ，且 $f_h^*(x)$ 、 $\overline{f_h^*(x)}$ 满足：

$$\underline{f_h^*(x)} = \frac{f_h(x) - f_h^{\min}(x)}{f_h^{\max}(x) - f_h^{\min}(x)} \quad (15)$$

$$\overline{f_h^*(x)} = \frac{\overline{f_h(x)} - f_h^{\min}(x)}{f_h^{\max}(x) - f_h^{\min}(x)} \quad (16)$$

$$\underline{f_h^{\min}(x)} = \min_{1 \leq i \leq |P|} f_h(x_i) \quad (17)$$

$$\overline{f_h^{\max}(x)} = \max_{1 \leq i \leq |P|} \overline{f_h(x_i)} \quad (18)$$

x_i 和 x_j 的距离表示为

$$D(x_i, x_j) = \frac{\sum_{h=1}^z |m(f_h^*(x_i)) + m(f_h^*(x_j))|}{\gamma(x_i, x_j) + V(x_i) + V(x_j) + 1} \quad (19)$$

式中： $m(f_h^*(x_i))$ 、 $m(f_h^*(x_j))$ 分别为 $f_h^*(x_i)$ 和

$f_h^*(x_j)$ 的中点, $m(f_h^*(x_i)) = \frac{f_h^*(x_i) + \overline{f_h^*(x_i)}}{2}$,
 $m(f_h^*(x_j)) = \frac{f_h^*(x_j) + \overline{f_h^*(x_j)}}{2}$; $V(x_i)$, $V(x_j)$ 分别为 x_i ,
 x_j 的目标函数超体积; $\gamma(x_i, x_j)$ 为 x_i 和 x_j 的重叠度,
 $f_h^*(x_i)$ 和 $f_h^*(x_j)$ 的交区间表示为 $f_h^*(x_i) \cap f_h^*(x_j)$,
 交区间宽度为 $W(f_h^*(x_i) \cap f_h^*(x_j))$, 则 $\gamma(x_i, x_j) =$
 $\prod_{h=1}^z W(f_h^*(x_i) \cap f_h^*(x_j))$ 。

对于个体 x_i , 根据式(20)计算与其距离最近的
 个体 x_j 和 x_k , 个体 x_i 的拥挤距离可表示为

$$cd(x_i) = \frac{D(x_i, x_j) + D(x_i, x_k)}{2} \quad (20)$$

对于 cd 值较大的个体则优先选择进入下一
 代, 对于处在 Pareto 边界的个体则将其 cd 值定义
 为无穷大。

2.6 交叉操作

交叉对种群产生新个体具有重要的影响, 同时
 也决定着算法的收敛性能。为了更好地继承父代优
 良信息, 本文采用两种不同的交叉方法^[24], 即基于
 工序编码的改进交叉操作(IPOX)和多点交叉操作
 (MPX), 对染色体 OS 和染色体 MA 采用相同的交
 叉概率分别进行交叉。IPOX 交叉应用在前半段染
 色体 OS, 该交叉操作能较好地继承父代染色体的
 优良特征。其过程为: 把工件随机分为 2 个集合
 J_1 、 J_2 ; 将 P_1 中包含在 J_1 中的工件复制给 C_1 , 复
 制 P_2 中包含在 J_2 的工件至 C_2 , 保留它们的顺序不
 变; 将 P_2 中包含在 J_2 中的工件同样复制给 C_1 , P_1
 中包含在 J_1 的工件复制给 C_2 , 保留它们位置不变,
 具体如图 2 所示。MPX 交叉操作应用于后半段染
 色体 MA 中, 它能较好地将父代染色体工序分配的
 设备特性保留至子代。交叉过程为: 随机产生一个
 由 0、1 组成并与染色体长度相等的集合 R ; 依次
 在 P_2 、 P_1 中选出与 R 中“1”位置对应的相同工序,
 交换它们分配的加工设备, 并将 P_1 和 P_2 中其他设
 备保留到子代, 生成子代 C_1 和 C_2 , 如图 3 所示。

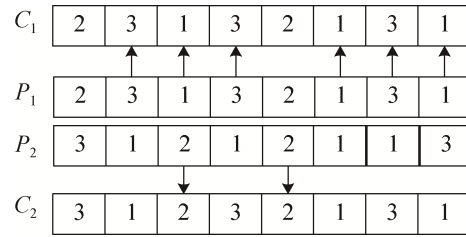


图 2 基于工序编码的 IPOX 交叉操作
 Fig. 2 IPOX crossover operation based on process coding

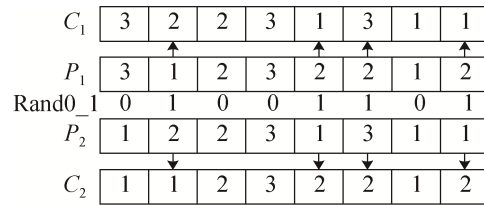


图 3 基于机器编码的 MPX 交叉操作
 Fig. 3 MPX crossover operation based on machine coding

2.7 变异操作

变异是通过对染色体给予较小的扰动以生成
 新的个体来维持群体多样性。本文采用交换变异和
 赋值变异对 2 段染色体通过同一变异概率分别执
 行变异操作, 以确保产生的子代为可行解。具体而
 言, 对染色体 OS 采用交换变异, 其变异过程为
 交换在染色体 OS 上随机选中的 2 个基因位置,
 如图 4 所示; 染色体 MA 采用赋值变异, 随机选
 择 MA 上 2 个基因, 在该工序可选机器集里随机选
 择机器号替换选中的基因, 如图 5 所示。

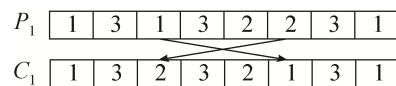


图 4 基于 OS 染色体的交换变异操作
 Fig. 4 Swap mutation operation based on OS chromosome

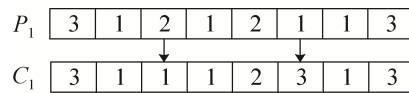


图 5 基于 MA 染色体的赋值变异操作
 Fig. 5 Assignment variation operation based on MA chromosome

2.8 精英保留机制

传统的非支配排序遗传算法中采用隐性精英
 保留机制, 这种方法会导致精英个体一直保留到最

后,使得算法过早收敛而进入局部最优。为了提高群体的多样性及算法的收敛性,本文结合区间可能度的 Pareto 排序关系,采用一种基于分布函数来计算每一等级前端中进入下一代的精英个体数量的精英策略。该策略并不是将每个前端中出现的优秀个体直接保留至下一代,而是基于计算分布函数来选择每级前端中的部分个体进入下一代。基于区间可能度 Pareto 排序的精英保留机制的计算表达式为

$$n_r = |F_r| \cdot u_r \quad (21)$$

式中: r 为非支配等级($r \geq 1$); n_r 为在第 r 级前端中选取的个体数; $|F_r|$ 为第 r 级前端上个体总数; u_r 为 0.5~1 的随机实数。

2.9 算法流程

本文提出的 IMOEa 算法采用 NSGA-II^[25] 算法框架,算法具体流程描述如下:

Step 1: 初始化种群 P_0 及算法参数;

Step 2: 采用贪婪插入式解码方法评估个体适应度,基于区间数可能度排序方法,通过非支配排序操作对种群排序,确定非支配前端中各级个体间的拥挤距离以获得当前种群的非劣解,并更新非劣解集;

Step 3: 判断是否达到终止条件,若达到则停止迭代返回最优解,否则返回 step 4;

Step 4: 基于设定的选择、交叉及变异方式对父代种群 P_t 进化以产生子代种群 Q_t ;

Step 5: 合并种群 P_t 、 Q_t 生成新种群 R_t ,对 R_t 进行非支配排序获得各级非支配前端;

Step 6: 基于区间拥挤距离的计算方法确定各级非支配前端个体间的拥挤距离,通过精英保留策略选出与种群规模相同的个体生成下一代种群 P_{t+1} ,返回 step 3;

Step 7: 输出 Pareto 最优解。

3 仿真实验与分析

本文所有实验均在主频为 2.8 GHz、物理内存为 8 GB、Windows7 操作系统的 PC 机下进行,并应用 Matlab 2016b 编译软件编程。

3.1 算例构造及性能指标分析

由于缺少 ESPMIFJS 的标准算例,本文所有测试问题均在 BRData 测试集(MK01~MK15)^[26] 基础上构造生成。将加工时间 p_{ijk} 转化为 $\tilde{p}_{ijk} = [\underline{p}_{ijk}, \overline{p}_{ijk}]$, 其中 \underline{p}_{ijk} 为各测试问题里对应的加工时间, $\overline{p}_{ijk} = \underline{p}_{ijk} + \delta_{ijk}$, δ_{ijk} 为 [1,10] 上的均匀随机整数。

本文选择 NSGA-II、SPEA-II 作为对比算法,考虑到多目标进化算法得到的最优结果是一个解集,不能直观地指出某一算法求得的非支配解更优,因此,基于所构造的算例,采用反转世代距离(inverse generation distance, IGD)^[27] 和覆盖集测度(C 测度)^[28] 两种性能指标来评价算法的性能:

(1) IGD: 利用算法所得非劣解集 F 上个体与真实 Pareto 面上个体的平均距离来评判各算法性能,其值越小,表明算法的综合性能越优。计算表达式为

$$IGD = \frac{\sum_{j \in F^*} d'_j}{|F^*|} \quad (22)$$

式中: F^* 为在真实 Pareto 面上分布均匀的点集; $|F^*|$ 为点集个数; $d'_j = \min_{i \in F} |\bar{j} - \bar{i}|$, 为 F^* 上的个体 \bar{j} 到 F 中个体 \bar{i} 的最小欧几里得距离。

(2) C 测度: C 测度指标用于比较算法求得的最优 Pareto 解集的相对覆盖率,计算表达式为

$$C(A, B) = \frac{|\{b \in B \mid \exists a \in A : \text{adom in ates } b\}|}{|B|} \quad (23)$$

式中: $|\cdot|$ 表示 Pareto 解集的个体数。对于 A 、 B 两种算法,若 $C(A, B) > C(B, A)$, 则说明算法 A 的求解效率比算法 B 的求解效率要好。

3.2 参数分析

为了使 IMOEa 算法参数设置更加科学,本文采用实验设计方法(design of experiment, DOE)对种群规模 PS、交叉概率 CR 及变异概率 MR 进行分析。针对 MK09 问题,以反转世代距离(IGD)作为性能评价指标,在每种参数组合下算法均独立运行

10 次, 并取 IGD 均值。对此, 建立一个三因素四水平 $L_{16}(4^3)$ 正交表, 如表 3, 4 所示。根据表 4 的数据, 计算各参数响应值, 并将各参数对应的最小响应值用粗体表示, 具体如表 5 所示。

表 3 参数水平
Table 3 Parameters of the horizontal

水平	PS	CR	MR
1	50	0.6	0.05
2	100	0.7	0.1
3	150	0.8	0.15
4	200	0.9	0.2

表 4 正交表和 IGD 值
Table 4 Orthogonal table and IGD values

实验号	PS	CR	MR	IGD
1	1	1	1	279.338 9
2	1	2	2	84.262 3
3	1	3	3	160.174 2
4	1	4	4	113.116 8
5	2	1	2	49.983 0
6	2	2	1	113.116 8
7	2	3	4	102.391 0
8	2	4	3	238.586 0
9	3	1	3	74.320 0
10	3	2	4	215.115 4
11	3	3	1	314.163 7
12	3	4	2	133.028 8
13	4	1	4	286.812 3
14	4	2	3	162.841 0
15	4	3	2	477.423 0
16	4	4	1	165.190 2

表 5 各参数响应值
Table 5 Response value of each parameter

水平	PS	CR	MR
1	159.2	172.6	218.0
2	126.0	143.8	186.2
3	184.2	263.5	159.0
4	273.1	162.5	179.4
极差	147.1	119.7	59
等级	1	2	3

表 5 中数据显示参数 PS 极差最大, 等级为 1, 表明该参数对算法性能影响最大, CR 次之, MR 影响最小。由表 5 可知, PS 响应值在水平 2 上最

小, CR 响应值在水平 2 上最小, MR 响应值在水平 3 上最小。

基于以上数据结果可以得到 IMOEA 相关参数为: 种群规模 $PS=100$, 交叉概率 $CR=0.7$, 变异概率 $MR=0.15$ 。对于对比算法 NSGA-II、SPEA-II 参数设置与 IMOEA 相同, 三种算法最大迭代次数为 200, 设备 M_k 单位时间加工能耗 $pe_k \in [10,15]kW$, 设备 M_k 单位时间空闲能耗 $ie_k \in [1,3]kW$, 公共能耗 $ce=2 kW$ 。为克服随机误差对实验的影响, 将三种算法均独立运行 10 次取平均值, 每个问题对应的最优结果用粗体表示。

3.3 实验结果与分析

本文采用 IGD 及 C 测度两种性能指标分别对 IMOEA、NSGA-II、SPEA-II 等三种算法进行定量分析, 评价其综合性能。由于考虑区间柔性作业车间调度问题中各目标函数值均为区间数, 因此为方便计算 IGD 值, 将各测试问题中对应不同算法所得非支配解集中的区间目标函数值转换为区间目标函数中点值。测试结果如表 6, 7 所示。

表 6 三种算法对各测试问题求得的 IGD 测度均值
Table 6 Mean values of IGD measures obtained by three algorithms for each test problem

问题	$n \times m$	IMOEA	NSGA-II	SPEA-II
MK01	10×6	19.226 7	95.513 3	54.045 2
MK02	10×6	0	227.153 7	129.155 7
MK03	15×8	31.004 7	505.801 7	545.750 1
MK04	15×8	5.571 7	412.085 7	732.203 9
MK05	15×4	49.952 3	250.967 8	475.395 8
MK06	10×15	88.721 2	199.328 8	882.548 1
MK07	20×5	301.061 8	303.925 1	277.056 5
MK08	20×10	0	226.160 1	129.112 7
MK09	20×10	31.942 6	150.122 1	143.580 7
MK10	20×15	458.250 5	1 773.317 6	2269.466 9
MK11	30×5	183.270 5	424.821 5	693.501 3
MK12	30×10	323.719 6	591.958 6	1231.970 2
MK13	30×10	181.746 3	316.728 5	852.865 0
MK14	30×15	128.647 8	405.071 6	707.740 3
MK15	30×15	31.942 6	537.898 9	1098.573 6

注: n 表示工件数; m 表示机器数。

表7 三种算法对各测试问题求得的 C 测度均值
Table 7 Mean value of C measure obtained by three algorithms for each test problem

问题	$n \times m$	$C(\text{IMOEA}, \text{NSGA-II})$	$C(\text{NSGA-II}, \text{IMOEA})$	$C(\text{IMOEA}, \text{SPEA-II})$	$C(\text{SPEA-II}, \text{IMOEA})$
MK01	10×6	1.000 0	0	1.000 0	0
MK02	10×6	1.000 0	0	1.000 0	0
MK03	15×8	1.000 0	0	1.000 0	0
MK04	15×8	1.000 0	0	1.000 0	0
MK05	15×4	1.000 0	0	1.000 0	0
MK06	10×15	0.910 0	0.131 7	1.000 0	0
MK07	20×5	1.000 0	0	0.900 0	0.360 0
MK08	20×10	1.000 0	0	0.825 0	0.200 0
MK09	20×10	1.000 0	0	1.000 0	0
MK10	20×15	0.970 0	0.230 0	0.880 0	0.240 0
MK11	30×5	1.000 0	0	1.000 0	0
MK12	30×10	1.000 0	0	1.000 0	0
MK13	30×10	0.720 0	0.260 0	0.300 0	0.500 0
MK14	30×15	1.000 0	0	1.000 0	0
MK15	30×15	1.000 0	0	1.000 0	0

注： n 表示工件数； m 表示机器数。

表6为 IMOEA、NSGA-II、SPEA-II 三种算法通过实验计算得到的平均 IGD 值。针对不同的测试问题，将三种算法对应各测试问题的非支配最优解综合在一起求出 Pareto 前沿作为真实的 F^* ，并通过计算得到三种算法对应 IGD 值。从表6中可以看出，除去 MK07 问题，在其余 14 组测试问题中，IMOEA 得到的 IGD 值均小于 NSGA-II、SPEA-II 两种算法对应的 IGD 值，且 MK02、MK08 两组测试问题对应的 IGD 值为 0，说明 IMOEA 在求解该问题时能够获得更好的 Pareto 解集，即 IMOEA 的综合性能明显优于 NSGA-II、SPEA-II。

IGD 指标除了能够反映解集的收敛性外，还能很好地反映其分布性与广泛性。为了更加直观地表示 IGD 性能指标对非支配最优解集综合性能的评价，本文给出了 IMOEA、NSGA-II、SPEA-II 三种算法通过实验计算得到的平均 IGD 值的箱线图，如图6所示。从图6可以明显看出，相比于 NSGA-II、SPEA-II 算法，IMOEA 算法通过实验得到的 IGD 值更小，由此可见，IMOEA 的求解效率

优于其他两种算法。

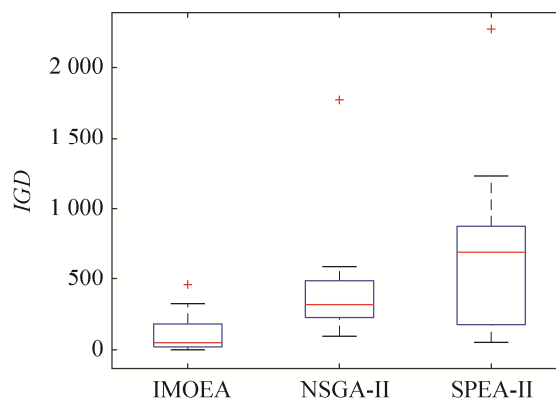


图6 三种算法的 IGD 指标箱线图

Fig. 6 Box-plot of IGD indicators of three algorithms

表7是 IMOEA、NSGA-II、SPEA-II 三种算法通过解集比较得到的 C 测度均值。从表7中的对比数据可以非常清晰地看出，针对 15 组测试问题，IMOEA 得到的 C 测度值均大于 NSGA-II 得到的 C 测度值，且有 12 组测试问题的 C 测度值为 1.000 0；对于 IMOEA 和 SPEA-II，虽然在测试问题 MK13 中通过 IMOEA 计算得到的 C 测度值劣于 SPEA-II 的 C 测度值，但其余 14 组测试问题中通过 IMOEA 计算得出的 C 测度值均大于 SPEA-II 得到的 C 测度值，且其中有 11 组测试问题通过 IMOEA 计算得出的 C 测度值均等于 1.0000，明显优于 SPEA-II，即 IMOEA 得到的 C 测度值更优。IMOEA 与 NSGA-II、SPEA-II 的 C 测度箱线图如图7,8所示，从表7中的数据及图7,8的箱线图可以看出，NSGA-II、SPEA-II 两种算法所得的种群中有多个个体被 IMOEA 所得种群中的个体所支配，进而可知 IMOEA 算法在求解 ESPMIFJS 时能够获得更好的解。

基于以上分析可知，对于大部分测试问题，IMOEA 所求出的 IGD 值和 C 测度值均优于与之对比的算法，说明在求解 ESPMIFJS 时，本文提出的 IMOEA 算法在维持解的多样性的同时，还能够获得更优的 Pareto 解集，进而可为企业制定合理的生产调度方案提供参考。

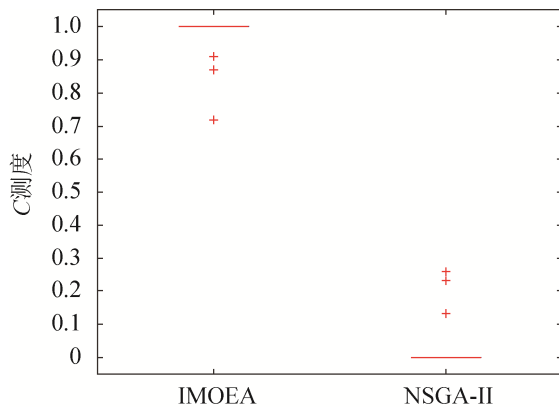


图 7 IMOEA 与 NSGA-II 的 C 测度箱线图

Fig. 7 C measure box-plot of IMOEA and NSGA-II

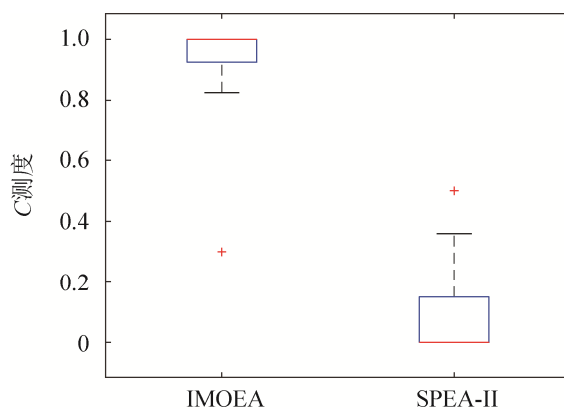


图 8 IMOEA 与 SPEA-II 的 C 测度箱线图

Fig. 8 C measure box-plot of IMOEA and SPEA-II

4 结论

本文在传统柔性作业车间调度问题基础上,考虑了加工时间不确定性因素,将区间数理论与柔性作业车间调度问题相结合,以最小化最大区间完工时间、区间总能耗为调度目标,建立了带有区间加工时间的柔性车间调度模型。同时设计了一种有效求解该问题的区间多目标进化算法,该算法将区间可能度的占优关系与区间意义下的拥挤距离相结合进行快速非支配排序,并引入精英保留机制,从而得到分布均匀的帕累托前沿。为验证改进算法的有效性,选取 NSGA-II、SPEA-II 作为对比算法,并基于测试问题集构造了 15 组测试问题进行对比实验,实验结果验证了本文所提 IMOEA 算法的优越性。该研究可为企业在不确定工时条件下制定更加合理的生产调度方案提供决策支持与参考,从而

促进企业实现生产效率提升及节能降耗的目标。在后续的研究中,可结合生产实际在不确定加工环境中考虑带有机器故障、紧急插单等情况的柔性作业车间动态调度问题。

参考文献:

- [1] 费凡. 面向节能优化的多目标柔性作业车间生产调度方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
Fei Fan. Research on Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling Method for Energy-saving Optimization[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [2] 罗雄, 钱谦, 伏云发. 遗传算法解柔性作业车间调度问题应用综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 15-21, 34.
Luo Xiong, Qian Qian, Fu Yunfa. Review of Application of Genetic Algorithms for Solving Flexible Job Shop Scheduling Problems[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(23): 15-21, 34.
- [3] Piroozfard H, Wong K Y, Wong W P. Minimizing Total Carbon Footprint and Total Late Work Criterion in Flexible Job Shop Scheduling by Using an Improved Multi-objective Genetic Algorithm[J]. Resources, Conservation and Recycling (S0921-3449), 2018, 128: 267-283.
- [4] Wu X, Shen X, Li C. The Flexible Job-shop Scheduling Problem Considering Deterioration Effect and Energy Consumption Simultaneously[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2019, 135: 1004-1024.
- [5] Caldeira R H, Gnanavelbabu A, Vaidyanathan T. An Effective Backtracking Search Algorithm for Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling Considering New Job Arrivals and Energy Consumption[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2020, 149: 106863.
- [6] 朱光宇, 徐文婕. 考虑能耗与质量的机床构件生产线多目标柔性作业车间调度方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 252-260.
Zhu Guangyu, Xu Wenjie. Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling Method for Machine Tool Component Production Line Considering Energy Consumption and Quality[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 252-260.
- [7] 刘彩洁, 徐志涛, 张钦, 等. 分时电价下基于 NSGA-II 的柔性作业车间绿色调度[J]. 中国机械工程, 2020, 31(5): 576-585.
Liu Caijie, Xu Zhitao, Zhang Qin, et al. Green Scheduling of Flexible Job Shop Based on NSGA-II

- under TOU Power Price[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(5): 576-585.
- [8] 李益兵, 黄炜星, 吴锐. 基于改进人工蜂群算法的多目标绿色柔性作业车间调度研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(11): 1344-1350, 1385.
Li Yibing, Huang Weixing, Wu Rui. Research on Multi-objective Green Flexible Job Shop Scheduling Based on Improved ABC Algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(11): 1344-1350, 1385.
- [9] Lin J, Zhu L, Wang Z-J. A Hybrid Multi-verse Optimization for the Fuzzy Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 2019, 127: 1089-1100.
- [10] 李俊萱, 王艳, 纪志成. 基于混合 QPSO 的模糊柔性作业车间调度问题研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(10): 2010-2021.
Li Junxuan, Wang Yan, Ji Zhicheng. Research on Fuzzy Flexible Job Shop Scheduling Problem Based on Hybrid QPSO[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 2010-2021.
- [11] 郑小操, 龚文引. 改进人工蜂群算法求解模糊柔性作业车间调度问题[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(6): 1284-1292.
Zheng Xiaocao, Gong Wenyin. An Improved Artificial Bee Colony Algorithm for Fuzzy Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(6): 1284-1292.
- [12] 杨子豪. 基于强化学习的批处理机随机调度问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
Yang Zihao. Research on Stochastic Batch Machine Scheduling Problem Based on Reinforcement Learning[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [13] Gu J, Gu M, Lu X, et al. Asymptotically Optimal Policy for Stochastic Job Shop Scheduling Problem to Minimize Makespan[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2018, 36(1): 142-161.
- [14] Xiao S, Wu Z, Yu S. A Two-stage Assignment Strategy for the Robust Scheduling of Dual-resource Constrained Stochastic Job Shop Scheduling Problems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(13): 421-426.
- [15] Ghasemi A, Ashoori A, Heavey C. Evolutionary Learning Based Simulation Optimization for Stochastic Job Shop Scheduling Problems[J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2021, 106: 107309.
- [16] 李雅琼, 李强, 阳小兰. 考虑非确定加工时间的柔性作业车间调度问题研究[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(10): 3016-3019.
Li Yaqiong, Li Qiang, Yang Xiaolan. Research on Flexible Job-Shop Scheduling Problem Considering Uncertain Processing Time[J]. Application Research of Computers, 2018, 35(10): 3016-3019.
- [17] 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 Ling, Zheng Jie, Wang Jingjing. A Hybrid Discrete Fruit Fly Optimization Algorithm for Distributed Permutation Flowshop Scheduling with Interval Data[J]. Control and Decision, 2020, 35(4): 930-936.
- [18] 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 Yanyan, Xu Zhenhao, Gu Xingsheng. Solution of Reentrant Scheduling Problem with Uncertain Processing Time[J]. Control and Decision, 2021, 36(5): 1127-1136.
- [19] Zhou R, Lei D, Zhou X. Multi-objective Energy-efficient Interval Scheduling in Hybrid Flow Shop using Imperialist Competitive Algorithm[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2019, 7: 85029-85041.
- [20] Sengupta A, Pal T K. On Comparing Interval Numbers[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2000, 127(1): 28-43.
- [21] 肖峻, 张跃, 付川. 基于可能度的区间数排序方法比较[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 705-711.
Xiao Jun, Zhang Yue, Fu Chuan. Comparison between Methods of Interval Number Ranking Based on Possibility[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 705-711.
- [22] 张国辉, 高亮, 李培根, 等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 145-151.
Zhang Guohui, Gao Liang, Li Peigen, et al. Improved Genetic Algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 145-151.
- [23] Gong D W, Qin N N, Sun X Y. Evolutionary Algorithms for Multi-objective Optimization Problems with Interval Parameters[C]// 2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA). Changsha, China: IEEE, 2010: 411-420.
- [24] 张守京, 王彦亭. 基于改进 NSGA2 的柔性车间多目标智能调度问题研究[J]. 现代制造工程, 2020(9): 23-31.
Zhang Shoujing, Wang Yanting. Research on

- Multi-objective Intelligent Scheduling of Flexible Job Shop Based on Improved NSGA2[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2020(9): 23-31.
- [25] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (S1089-778X), 2002, 6(2): 182-197.
- [26] Brandimarte P. Routing and Scheduling in a Flexible Job Shop by Tabu Search[J]. *Annals of Operations Research* (S0254-5330), 1993, 41(3): 157-183.
- [27] Tian Y, Cheng R, Zhang X, et al. PlatEMO: A MATLAB Platform for Evolutionary Multi-objective Optimization [educational forum][J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine* (S1556-603X), 2017, 12(4): 73-87.
- [28] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective Evolutionary Algorithms: a Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (S1089-778X), 1999, 3(4): 257-271.