

中文引用格式:郭晨,吴成森,李仙乐. 考虑工人无聊感知的作业车间安全生产调度研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 8-17.

英文引用格式:GUO Chen, WU Chengsen, LI Xianye. Study on work safety job shop scheduling considering worker boredom perception[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 8-17.

考虑工人无聊感知的作业车间安全生产调度研究^{*}

郭晨^{1,2}副教授, 吴成森^{1,2}, 李仙乐^{**3}

(1 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070; 2 武汉理工大学
中国应急管理研究中心, 湖北 武汉 430070; 3 武汉理工大学 管理学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号: X910 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1724

基金项目: 国家社科基金重大项目资助(21&ZD127); 湖北创新发展研究院资助项目(CX2023-1-3); 湖北省社科基金一般项目资助(HBSK2022YB255); 湖北本科高校省级教学改革研究项目(2024109)。

【摘要】 为实现作业车间的安全高效生产, 提出一种考虑工人无聊感知的双资源柔性作业车间调度问题(BP-DRFJSP)模型。首先, 分析工人重复性作业中所产生的无聊感对工作效率与生产安全事故风险的影响, 构建量化该影响的数学模型, 并以最大完工时间和生产安全事故风险为优化目标建立调度模型; 然后, 通过设计多目标足球队训练算法(MO-FTTA)求解该模型; 最后, 通过 MO-FTTA 与其他 3 种常见算法进行对比试验与实例分析, 验证该算法的性能与可行性。结果表明: 使用 MO-FTTA 求解 BP-DRFJSP 模型时, 在 95% 的算例中均能获得更优的超体积(HV)与反转世代距离(IGD), 且 C 值均接近于 1, 同时, 90% 算例的目标函数值优于其他对比算法; 实例验证中, MO-FTTA 将最大完工时间缩短为 79.635 min, 并使安全生产事故风险降低 1.25%, 能够在有效提升生产效率的同时降低生产安全事故风险, 实现车间的安全高效生产。

【关键词】 工人无聊感知(BP); 安全生产调度; 加工效率; 生产安全事故; 双资源柔性作业车间调度(DRFJSP); 多目标足球队训练算法(MO-FTTA)

Study on work safety job shop scheduling considering worker boredom perception

GUO Chen^{1,2}, WU Chengsen^{1,2}, LI Xianye³

(1 School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 2 China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 3 School of Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: To achieve safe and efficient work in job shops, this paper proposed a BP-DRFJSP model that considers workers' boredom perception. First, the impact of boredom arising from repetitive tasks on work efficiency and work safety accident risks was analyzed. A mathematical model was developed to quantify this impact, and a scheduling model was established with the optimization objectives of minimizing makespan and production safety risks. Then, a MO-FTTA was designed to solve the model. Finally, comparative experiments and a case study involving MO-FTTA and three other common algorithms were conducted to verify the performance and feasibility of the proposed approach. The results show that when

* 文章编号: 1003-3033(2025)12-0008-10; 收稿日期: 2025-07-20; 修稿日期: 2025-10-10

** 通信作者: 李仙乐(1995—), 女, 吉林吉林人, 硕士, 助教, 主要从事安全生产方面的研究。E-mail: 2536545650@qq.com。

solving BP-DRFJSP model, MO-FTTA achieves better hypervolume (HV) and inverted generational distance (IGD) in 95% of the test instances, with C -metric values close to 1. Moreover, it yields superior objective function values in 90% of the instances compared to other algorithms. In the case study, MO-FTTA reduces the makespan to 79.635 minutes and lowers work safety risk by 1.25%, demonstrating its effectiveness in enhancing production efficiency while mitigating safety risks, thereby supporting safe and efficient workshop operations.

Keywords: workers' boredom perception (BP); work safety scheduling; processing efficiency; work safety accidents; dual-resource flexible job shop scheduling (DRFJSP); multi-objective football team training algorithm (MO-FTTA)

0 引言

在实际生产中,要实现安全生产,人的因素往往不能忽略^[1]。据统计,人的不安全行为是造成生产安全事故的主要原因之一^[2]。因此,减少人的不安全行为是降低生产安全事故风险的有效途径。而随着工业水平的不断发展,工人长时间进行重复性工作而产生的无聊感知成为影响工人不安全行为的重要因素之一,不仅影响工作效率^[3-4],而且当工人的无聊感显著增加时,注意力水平会随之下降,进而导致工人不安全行为发生并引发生产安全事故^[5]。因此,研究工人的无聊感知,对提高工人工作效率、降低生产安全事故风险具有重要意义。

目前,诸多学者针对工人无聊感知与安全高效生产之间的关系开展了研究。FISHER^[5]指出,重复单调的任务容易引起无聊,导致注意力分散和工作失误,增加安全事故风险;CLEARY 等^[6]指出,员工无聊感知会导致错误、不良事件和生产力下降;AZIZI^[7]指出,重复性工作引发的工人无聊感知不仅降低效率,还增加安全风险,并为此提出了工作轮换的数学规划模型。近年来,随着人力成本的不断上升,双资源约束的柔性作业车间调度问题(Dual Resource Constrained Flexible Job Shop Scheduling Problem, DRFJSP)已成为学术界的研究热点。TAN Weihua 等^[8]提出一种具有疲劳意识的车间调度模型,并以最大工人疲劳为目标函数进行优化;SHI Jiaxuan 等^[9]将工人的无聊感知融入 DRFJSP,并设计了一种双层词典模型来描述和求解该问题。当前,虽然对无聊感知和 DRFJSP 的研究较多,但针对工人因重复性工作引发无聊感知进而影响安全生产这一具体问题的研究仍较为稀缺。

因此,笔者拟综合考虑车间生产过程中安全与效率的双重因素,通过分析工人无聊感知对加工效率和不安全行为的影响,提出一种工人无聊感知

(Boredom Perception, BP) 的 DRFJSP (BP-DRFJSP); 并设计多目标足球队训练算法 (Multi-Objective Football Team Training Algorithm, MO-FTTA) 来求解该模型,以期实现车间的安全高效生产。

1 工人无聊感知描述与数学模型

无聊感知是指工人在工作中因缺乏兴趣、刺激或满足感而产生的一种倦怠状态。通常是由于工作任务单一重复、缺少挑战性造成的^[7]。为探究其对工作效率和生产安全的影响,构建无聊感知与工作效率和生产安全事故风险的数学模型。

1.1 工人无聊感知与加工效率

工人无聊感知主要受同一类型操作的累计时间的影响。当工人刚开始从事某类操作时,他们并不会感到无聊,工作动机反而逐渐上升,直到达到最高水平,这时,工人效率也相应达到最高水平;然而,随着操作同一类型工序的累计时间增加,工人开始感到无聊且这种无聊感会逐渐增加,工作效率也会随之降低^[7]。为此,SHI Jiaxuan 等^[9]构建了工人无聊感知与工人加工效率的数学模型。在此基础上,结合车间生产的实际情况及 AZIZI 等^[4]提出的员工无聊感知与技能变化的数学模型,改进数学模型,见下式:

$$E(t) = \begin{cases} Y + S - \exp(-v \cdot t) & t < t_1 \\ Y + S - \exp(-v \cdot t_1) & t_1 \leq t < t_2 \\ Y - \exp(-v \cdot t_1) + \exp(-b \cdot (t - t_2)) & t_2 \leq t < t_3 \\ Y - \exp(-v \cdot t_1) + \exp(-b \cdot (t_3 - t_2)) & t \geq t_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为实际加工效率; t 为工人操作同一类型工序的累计时间; Y 为加工该类型工序的初始效率; S 为标准加工效率; v 为工人动机影响率,用于衡量

工人对新任务的积极动机对加工效率的提升速度; b 为工人无聊感知影响率,用于衡量工人无聊感知对加工效率的衰减速度; t_1 为工人动机水平达到上限的时间点; t_2 为工人对重复性工作的容忍度达到上限的时间点; t_3 为工人无聊感知达到上限的时间点。当 $Y = 1.2, S = 1, t_1 = 4, t_2 = 8, t_3 = 12, v = 0.3, b = 0.5$ 时,工人实际加工效率与工人操作同一类型工序的累计时间的关系如图1所示。

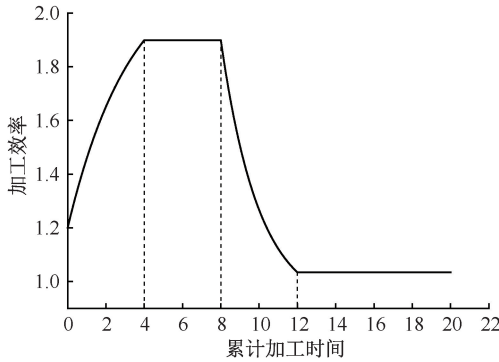


图1 基于工人无聊感知的实际加工效率

Fig. 1 Practical processing efficiency based on workers' boredom perception

1.2 工人无聊感知与生产安全事故风险

目前,已有学者研究了工人无聊感知、注意力水平和不安全行为之间的关系,并证明了由于工人重复性劳动造成的无聊感知与工人不安全行为之间存在正向且显著的相关性^[10],而工人的不安全行为会进一步造成生产安全事故^[11]。

根据 AZIZI^[7]和 SHI Jiaxuan^[9]等提出的无聊感知相关模型,并结合式(1)工人无聊感知对工作动机的影响模型,构建衡量工人无聊感知程度的数学模型,见下式:

$$B(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_2 \\ \frac{E_{\max} - E(t)}{E_{\max}} & t > t_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $B(t)$ 为工人的无聊感知程度,其值在0~1之间, $B(t)$ 越接近1,则无聊感知程度越深; $E_{\max}$ 为当工人最高动机水平的加工效率。

根据 YEOW 等^[10]提出的无聊感知、注意力水平与不安全行为的影响机制模型,工人无聊感知与不安全行为存在正向且显著的关系。当工人无聊感知积累到一定程度时,注意力水平会随之下降。同时,工序操作的复杂程度也会影响生产安全事故风险,工人在同等注意力水平下,工序复杂程度越高,引发生产安全事故的风险就越高^[12]。为简化模型,

工序生产安全事故风险与工人加工该工序过程中的最大无聊感知程度被认为是线性关系。结合上述相关研究和式(2),建立工人无聊感知与生产安全事故风险模型,见下式:

$$R = B(t)_{\max} \cdot a \cdot \gamma + V \quad (3)$$

式中: R 为生产安全事故风险; $B(t)_{\max}$ 为工人加工某工序过程中 $B(t)$ 的最大值; a 为注意力水平的衰减系数,用于衡量因无聊感知造成的工人注意力水平下降对生产安全事故风险的影响程度; γ 为工序复杂度影响率,用于衡量工序复杂度对生产安全事故风险的影响程度; V 为生产安全事故的基础风险,用于衡量车间生产固有的生产安全事故风险水平。

2 考虑工人无聊感知的安全生产调度模型

2.1 BP-DRFJSP 描述

DRFJSP 可描述为:假设生产车间中有 n 个不同的待加工工件 $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$,每个工件由若干个工序构成,且共有 m 台柔性机器 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 和 w 个柔性工人 $W = \{W_1, W_2, \dots, W_w\}$ 完成加工。每道工序有若干台候选机器,每台机器有若干个候选工人。每个工件具有相同的优先级;同一个工件的工序之间存在优先级。DRFJSP 的核心是通过合理的工序排序、机器选择和工人分配,使得目标函数达到综合最优。而 BS-DRFJSP 是在 DRFJSP 基础上,考虑工人的无聊感知对工人加工效率和生产安全事故风险的影响。

2.2 BS-DRFJSP 模型构建

1) 目标函数。BS-DRFJSP 以最小化最大完工时间 f_1 和生产安全事故风险 f_2 为优化目标,见下式:

$$\min f = (f_1, f_2) \quad (4)$$

式中: f_1 为最大完工时间; f_2 为生产安全事故风险。

$$f_1 = \min(T_i) = \min\left\{\max\left(\sum_{j=1}^n T_i\right)\right\} = \quad (5)$$

$$\min\left\{\max\left(\sum_j^{n_i} \sum_k^m \sum_r^w A_{ijkz} \partial_{ijkz}\right)\right\}$$

式中: n, m, w 分别为工件、机器和工人的总数; $i(i'), j(j'), k, z$ 分别为工件、工序、机器和工人的索引; T_i 为工件 i 的完工时间; A_{ijkz} 为工序 O_{ij} 在机器 k 由工人 z 操作的实际加工时间; ∂_{ijkz} 为工序 O_{ij} 是否在机器 k 由工人 z 进行加工,是为1,否为0。

$$f_2 = \min(R_{ijkz}) \cdot \partial_{ijkz} \quad (6)$$

式中 R_{ijkz} 为工人 z 操作机器 k 对工序 O_{ij} 进行加工时的生产安全事故风险。

2) 约束条件。结合 2 个目标函数,确定约束条件。每个工序只能分别由 1 台机器和 1 个工人完成,见下式:

$$\sum_{k=1}^M \alpha_{ijk} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{z=1}^W \beta_{ijz} = 1 \quad (8)$$

式中: M 和 W 分别为机器集和工人集; α_{ijk} 和 β_{ijz} 分别为工序 O_{ij} 是否由机器 k 或工人 z 加工,是为 1, 否为 0。

保证每次所选择的机器和工人能够完成该项工序,见下式:

$$\alpha_{ijk} \leq x_{ijk} \quad (9)$$

$$\beta_{ijz} \leq y_{ijz} \quad (10)$$

式中 x_{ijk} 和 y_{ijz} 分别为机器 k 或工人 z 是否能加工工序 O_{ij} , 是为 1, 否为 0。

加工 1 项作业时必须连续进行,未完成不能中断,见下式:

$$L_{ij} = Q_{ij} + \sum_{k=1}^m \sum_{z=1}^w A_{ijkz} \alpha_{ijk} \beta_{ijz} \quad (11)$$

式中 L_{ij} 和 Q_{ij} 分别为工序 O_{ij} 的开工和完工时间。

任一机器和工人最多只能同时加工 1 道工序,见下式:

$$Q_{ij'} + \infty (1 - \delta_{ij'j}^k) \geq L_{ij} \quad (12)$$

$$Q_{ij'} + \infty (1 - \rho_{ij'j}^z) \geq L_{ij} \quad (13)$$

式中: ∞ 为 1 个足够大的正实数; $\delta_{ij'j}^k$ 和 $\rho_{ij'j}^z$ 分别为由机器 k 或工人 z 加工的工序 O_{ij} 的顺序是否先于工序 $O_{ij'}$, 是为 1, 否为 0; $Q_{ij'}$ 为工序 $O_{ij'}$ 的完工时间。

工人加工某类型工序的累计加工时间,见下式:

$$H_{ijzl} = H_{ij'zl} (1 - \rho_{ij'j}^z) + \alpha_{ijkz} A_{ijkz} \quad (14)$$

式中: l 为工序类型索引; H_{ijzl} 为工人 z 完成类型为 l 的工序 O_{ij} 后,同类型工序的累计时间。

工人无聊感知对实际加工效率的影响,见下式:

$$S \cdot G_{ijk} = \int_{H_{ij'zl}}^{H_{ijzl} + A_{ijkz}} E(t) dt \quad (15)$$

由式 (15) 求解得到工序的实际加工时间,见下式:

$$A_{ijkz} = F^{-1}(F(H_{ij'zl}) + G_{ijk}) - H_{ij'zl} \quad (16)$$

式中: G_{ijk} 为工人在机器 k 以标准效率完成工序 O_{ij} 的标准加工时间; F 为积分 $\int H_{ij'zl} dt$ 的原函数;

F^{-1} 为 F 的反函数。

3 安全生产调度算法设计

足球队训练算法 (Football Team Training Algorithm, FTTA) 是由 TIAN Zhirui 等^[13]提出的一种高效的智能优化算法。该算法模拟了足球队的训练过程,通过“集体-小组-个体”3 阶段训练过程,最终提高整个团队的水平。以 FTTA 为基本框架,根据 BP-DRFJSP 的特点,改进 FTTA 的各个阶段,设计了 MO-FTTA。

3.1 编码与解码

BP-DRFJSP 的核心是工序排序、机器选择和工人分配这 3 个子问题。因此,采用工序层 (Operation Scheduling, OS)、机器层 (Machine Scheduling, MS) 和工人层 (Workforce Scheduling, WS) 的 3 层编码方式。假设生产车间中有 3 个工件,每个工件分别有 2、3、4 道工序,共有 4 台机器和 3 名工人对其进行加工。具体编码如图 2 所示,OS 中的数字表示工件号,从左到右数字出现的次数为工序号;MS 和 WS 中的数字分别为机器号和工人号。

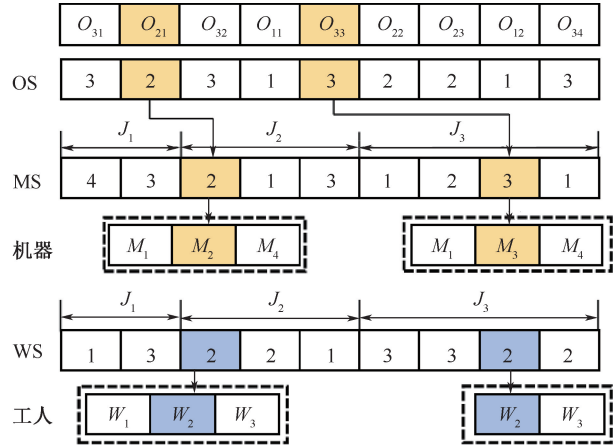


图 2 3 层编码

Fig. 2 Diagram of three-layer coding

3 层编码方案转化为完整调度方案的过程称为解码。由于 BP-DRFJSP 是双资源约束问题,因此,采用插入式贪婪解码策略,将工件优先插入机器与工人的共空闲时段,以最小化最大完工时间。

3.2 初始化

为提高初始解的质量,同时保持种群多样性,针对 3 层编码特点,采用不同方式初始化。OS 层采用随机选择的方式生成编码。MS 和 WS 层采用全局选择、局部选择和随机选择 3 种策略,3 种策略比例为 5 : 4 : 1。

3.3 第1阶段:集体训练

集体训练阶段将队员分为4种不同类型:追随者、发现者、思考者和波动者。追随者朝着最佳个体努力;发现者追随最佳个体,也尽量避免成为最差个体;思考者关注最佳与最差个体之间的差距,并努力缩小这个差距;波动者进行随机波动。在每次迭代中,队员随机改变自己的类型^[13]。

1) 追随者与发现者。对于追随者和发现者,3层编码都采用改进 Jaya 算子^[14],具体过程如图3所示。首先,找出当前最好与最差的个体 X_1 与 X_2 ;然后,将训练前个体 X_3 中的编码与 X_2 比较,去除两者相同的编码;最后,相同编码位置由 X_1 填充,得到新个体 X_4 。

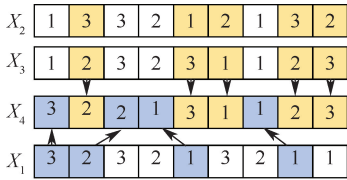


图3 OS层改进 Jaya 算子

Fig.3 Diagram of improved Jaya operator at OS layer

2) 思考者与波动者。对于思考者和波动者,3层编码都采用改进随机交换算子^[15]。具体过程如图4所示。首先,找出 X_1 并随机生成与 X_3 长度相同的二进制向量 X ;然后,对于 X_3 中值为0的位置,将其编码替换为 X_1 中对应位置的编码,并将这些值赋给 X_4 ;最后,对于 OS 层,将 X_3 中对应为1的位置的编码值依次赋给 X_4 ;对于 MS 和 WS 层,则将 X_3 中对应为1的编码值赋给 X_4 中相同的位置。

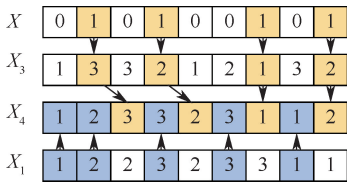


图4 OS层改进随机交换算子

Fig.4 Diagram of improved random exchange operator at the OS layer

3.4 第2阶段:小组训练

集体训练后,队员被随机分为4组,每个个体与组内成员进行学习或交流。小组训练有3种状态进行随机选择:最优学习、随机学习和随机交流。为确保算法全局探索与局部开发的平衡,该阶段将采用固定和自适应概率的学习、交流算子。组内个体选择一种状态后,在 $[0,1]$ 中随机生成数值 r ,若 $r \leq$ 自

适应学习或交流概率,则执行学习或交流算子,否则保持原编码值。最优学习是向组内最优个体学习,随机学习是向组内任意个体学习,随机交流是与组内其他成员交流^[13]。

1) 最优学习与随机学习。首先,以相同的概率选择组内最优个体或任意个体,并将其3层编码值赋给要进行小组训练的个体。然后,针对 OS 层,引入随机排列突变,具体过程如下:随机截取任意长度的 OS 层片段,将该片段的编码值随机打乱;针对 MS 和 WS 层,引入2位置突变^[15],具体过程如下:随机选取 MS 和 WS 层的2个位置,将这2处位置的机器和工人随机换成可选集中的其他机器和工人。小组学习的自适应概率见下式:

$$P_1 = \theta P_1^{\max} + (1 - \theta) P_1^{\min} \quad (17)$$

$$\theta = 1 - e/I \quad (18)$$

式中: P_1 为自适应学习概率; $P_1^{\max}$ 和 $P_1^{\min}$ 分别为最大和最小学习概率; θ 为学习的自适应参数; e 和 I 分别为当前和最大迭代次数。

2) 随机交流。针对随机交流,OS 采用优先交叉策略,而 MS 和 WS 层则采用单段交叉策略^[9]。小组交流的自适应概率见下式:

$$P_2 = \varphi P_2^{\max} + (1 - \varphi) P_2^{\min} \quad (19)$$

$$\varphi = e/I \quad (20)$$

式中: P_2 为自适应交流概率; $P_2^{\max}$ 和 $P_2^{\min}$ 分别为最大和最小交流概率; φ 为交流的自适应参数。

3.5 第3阶段:个体训练

在小组训练结束后,将最优个体进行训练,使其变得更好,从而带动整个群体的进步^[13]。

通过引入存档集存储最优解,每次迭代后将非支配解存储到存档集中,并通过非支配排序更新存档集,使存档中仅保留非支配解^[14]。当迭代超过最大迭代次数的一半时,采用多目标变邻域搜索 (Multi-Objective Variable Neighborhood Search, MO-VNS) 训练存档个体^[16]。在 MO-VNS 中,嵌入4种邻域结构,其中, N_1 - N_3 用于 OS 层, N_4 用于 MS 和 WS 层,4种邻域结构描述如下:

1) N_1 : 交换。随机选择2个工序层编码 d_1 和 d_2 , 交换它们的位置。

2) N_2 : 插入。随机选择 d_1 和 d_2 的2个操作, 将 d_2 插入 d_1 的前面。

3) N_3 : 逆序。随机选择 d_1 和 d_2 的2个操作, 并将它们之间的顺序逆转。

4) N_4 : 分配。选择目前加工时间最长的机器和生产安全事故风险最高的工人进行随机替换。

MO-VNS 的最大搜索次数为 U ,具体步骤采用 MENG Leilei 等^[16]提出的变邻域搜索方法。

3.6 算法框架

MO-FTTA 的框架如图 5 所示。其中,算法初始化需要 5 个基本参数,分别为:种群规模 p 、 I 、 P_1 、 P_2 和 U 。

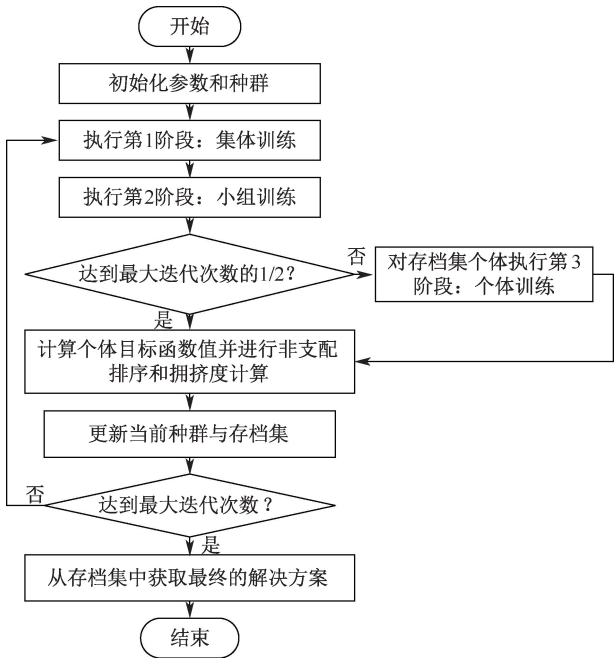


图 5 MO-FTTA 框架
Fig. 5 Framework of MO-FTTA

4 安全生产调度模型与算法验证

为验证模型有效性及算法性能,将 MO-FTTA 与解决同类问题的两阶段多目标粒子群优化算法 (Two-Stage Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm, TS-MOPSO)^[8]、改进非支配排序遗传算法 (Enhanced Nondominated Sorting Genetic Algorithm II, ENSGA-II)^[17] 和改进模因算法 (Modified Memetic Algorithm, MMA)^[18] 进行对比试验。所有试验均在同一个设备上运行,试验代码利用 Python3 编程语言编写。

4.1 安全生产调度测试算例生成

构建 20 个测试算例用于结果分析和对比试验,其中, $D_1 - D_{10}$ 是在借鉴 SHI Jiaxuan 等^[9]关于 DRFJSP 研究中提出的试验算例基础上,对该算例进行扩展得到,其目的是验证算法有效性。 $K_1 - K_{10}$ 则是在 BRANDIMARTE^[19]提出的算例基础上扩展得到,目的是进一步验证算法的通用性。算例具体内容见表 1。

表 1 试验算例

Table 1 Experimental example

算例	工件总数	工序总数	机器总数	工人总数	工序类型总数	操作等级总数
D_1	9	48	6	4	6	4
D_2	12	59	7	4	8	4
D_3	15	78	10	8	8	4
D_4	18	87	14	10	8	6
D_5	19	91	14	12	8	6
D_6	21	105	15	12	10	6
D_7	22	116	16	12	8	6
D_8	26	131	18	15	8	8
D_9	28	150	20	16	8	8
D_{10}	30	164	19	14	8	8
K_1	10	55	6	4	6	4
K_2	10	58	6	4	7	5
K_3	15	150	8	6	10	9
K_4	15	90	8	5	8	5
K_5	15	106	4	3	8	6
K_6	10	150	15	10	7	8
K_7	20	100	5	4	9	4
K_8	20	225	10	8	7	7
K_9	20	240	10	8	10	9
K_{10}	20	240	15	10	9	8

4.2 MO-FTTA 与对比算法参数优化与设置

为处理最大完工时间和生产安全事故风险 2 个目标值不同量级之间的差异,采用 WU Xiuli 等^[20]提出的指标作为评价算法性能的综合值。见下式:

$$g = \sum_{h=1}^2 \frac{f_h^{\text{avg}} - f_h^{\text{min}}}{f_h^{\text{max}} - f_h^{\text{min}}} \tag{21}$$

式中: g 为算法性能的综合值; h 为目标函数索引; f_h^{avg} 、 f_h^{min} 和 f_h^{max} 分别为帕累托解集中第 h 个目标函数的平均值、最小值和最大值。

P_1 和 P_2 采用自适应策略,其范围分别为 $[0.05, 0.4]$ 和 $[0.4, 0.9]$ 。其他参数利用 D_6 进行正交试验,确定并设计 3 因素 3 水平的正交表 $L_9(3^3)$ 。其中,试验次数为 9,参数个数为 3,因子水平数为 3。参数水平见表 2。

表 2 参数水平对应表

Table 2 Corresponding table of parameter levels

参数	水平		
	1	2	3
p	40	60	80
I	150	250	350
U	15	20	25

表 3 为正交试验结果,其中各水平中的数字与表 2 一一对应,表示各参数的大小。MO-FTTA 根据

表 3 中的参数组合分别运行 20 次。每次运行后根据式(21)计算出综合值,然后求取平均值,得到该参数组合的最终结果。对于每个参数, $u_s(\delta \in 1, 2, 3)$ 表示该参数组合得到的最终结果的平均值。

表 3 正交试验结果

Table 3 Results of orthogonal experiments				
参数组合	水平			结果
	p	I	U	
1	1	1	1	0.372 1
2	1	2	2	0.556 0
3	1	3	3	0.743 6
4	2	1	2	0.557 6
5	2	2	3	0.817 2
6	2	3	1	0.646 1
7	3	1	3	0.534 6
8	3	2	1	0.763 2
9	3	3	2	0.628 9
u_1	0.557 2	0.488 1	0.593 8	—
u_2	0.673 6	0.712 1	0.580 8	—
u_3	0.642 2	0.672 8	0.698 5	—

根据正交试验结果,MO-FTTA 的另外 3 个参数

表 4 HV 和 IGD 指标的对比试验结果

Table 4 Contrast experimental results of HV and IGD								
算例	HV				IGD			
	MO-FTTA	ENSGA-II	MMA	TS-MOPSO	MO-FTTA	ENSGA-II	MMA	TS-MOPSO
D_1	0.962 4	0.475 7	0.637 5	0.813 3	0.071 5	0.414 0	0.211 7	0.236 7
D_2	0.913 8	0.697 5	0.799 6	0.750 8	0.096 4	0.332 6	0.359 7	0.148 1
D_3	0.971 2	0.660 1	0.736 4	0.843 7	0.054 6	0.317 3	0.305 3	0.245 8
D_4	1.222 2	0.845 2	0.862 7	0.858 6	0.193 0	0.713 0	0.447 0	0.309 5
D_5	1.097 2	0.310 8	0.630 2	0.753 6	0.166 7	0.594 9	0.555 3	0.318 6
D_6	1.031 8	0.771 2	0.791 0	0.811 6	0.143 6	0.680 5	0.357 0	0.259 6
D_7	1.310 3	0.516 2	0.797 1	1.056 1	0.051 9	0.580 9	0.539 3	0.475 8
D_8	1.534 0	0.449 8	0.734 5	0.824 0	0.204 4	0.851 5	0.771 7	0.565 2
D_9	1.476 0	0.517 6	0.734 7	0.854 9	0.131 7	0.689 9	0.462 6	0.352 4
D_{10}	2.108 1	0.762 8	1.052 1	1.134 8	0.033 9	0.477 1	0.421 0	0.376 6
K_1	1.393 0	0.565 8	0.962 3	0.944 4	0.183 7	0.878 4	0.342 9	0.350 3
K_2	1.561 9	0.697 8	0.994 7	1.233 3	0.123 8	0.448 6	0.326 4	0.203 3
K_3	1.059 6	0.708 1	0.739 0	0.912 3	0.078 0	0.206 9	0.215 6	0.070 7
K_4	1.969 2	0.739 8	0.731 6	0.998 7	0.099 3	0.562 5	0.376 3	0.150 8
K_5	1.802 5	0.574 9	0.734 6	0.753 9	0.119 1	0.386 7	0.214 4	0.284 4
K_6	2.292 0	0.936 9	0.798 9	0.814 6	0.233 9	0.314 2	0.699 9	0.482 6
K_7	1.079 1	0.746 1	0.770 3	0.820 7	0.358 9	0.563 6	0.528 7	0.463 7
K_8	1.077 0	0.517 7	0.636 9	0.996 2	0.475 7	0.690 9	0.490 1	0.485 3
K_9	1.911 3	0.744 1	0.773 5	0.829 0	0.292 1	0.458 1	0.429 4	0.379 8
K_{10}	1.993 0	1.565 8	0.962 3	1.044 4	0.183 7	0.478 4	0.242 9	0.250 3

分别设置为 $p = 60, I = 250, U = 25$ 。为公平比较不同算法性能,其他 3 种对比算法均保留原文献中的参数设置。

4.3 安全生产调度模型结果与算法性能对比

为验证 MO-FTTA 在求解 BS-DRFJSP 模型时的性能,在测试算例上将 MO-FTTA 与上述 3 种算法对比。每个算法在每个算例上独立运行 20 次。对比试验评价的指标采用常见的解集覆盖率 C 、超体积 (Hypervolume, HV) 和反转世代距离 (Inverted Generational Distance, IGD)^[9]。对不同的对比指标,求取每个算法在每个算例上的平均值,对比试验结果见表 4—表 6。

由表 4 可知:相较于其他算法,MO-FTTA 在 19 组算例中都取得了较优的 HV 和 IGD,说明 MO-FTTA 的 Pareto 解集更接近于参考解集;由表 5 可知:MO-FTTA 的 C 值均接近于 1,进一步说明了 MO-FTTA 的 Pareto 解集优于对比算法;由表 6 可知:MO-FTTA 在 2 个目标值上均有 17 组算例优于其他 3 种算法。由以上结果可知:MO-FTTA 不仅在

表 5 C 指标的对比试验结果
Table 5 Contrast experimental results of C

算例	$C(q_1,q_2)$	$C(q_2,q_1)$	$C(q_1,q_3)$	$C(q_3,q_1)$	$C(q_1,q_4)$	$C(q_4,q_1)$
D_1	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.038 4	1.000 0	0.135 8
D_2	0.935 4	0.025 7	0.875 4	0.000 0	0.864 9	0.000 0
D_3	0.881 2	0.000 0	0.867 9	0.000 0	0.826 9	0.000 0
D_4	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.034 9	1.000 0	0.000 0
D_5	1.000 0	0.070 6	0.845 2	0.142 3	0.762 0	0.247 5
D_6	0.941 5	0.036 4	0.755 8	0.163 4	0.751 5	0.182 6
D_7	1.000 0	0.073 0	1.000 0	0.025 1	0.896 0	0.093 1
D_8	0.995 2	0.016 1	1.000 0	0.081 6	1.000 0	0.000 0
D_9	1.000 0	0.095 8	0.782 8	0.239 9	0.651 9	0.254 9
D_{10}	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0
K_1	0.994 8	0.045 2	0.930 4	0.043 9	0.834 4	0.154 3
K_2	1.000 0	0.019 4	1.000 0	0.078 4	1.000 0	0.019 6
K_3	0.919 6	0.000 0	0.955 3	0.000 0	0.828 6	0.085 2
K_4	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.020 8	1.000 0	0.000 0
K_5	1.000 0	0.049 1	0.950 0	0.061 6	0.908 6	0.027 3
K_6	0.942 3	0.005 6	1.000 0	0.064 2	0.903 1	0.104 3
K_7	0.968 2	0.000 0	0.937 4	0.052 5	0.909 5	0.044 5
K_8	1.000 0	0.022 1	0.925 1	0.000 0	0.855 9	0.138 9
K_9	1.000 0	0.014 1	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0
K_{10}	1.000 0	0.000 0	0.930 4	0.043 9	0.914 4	0.054 3

注: q_1,q_2,q_3 和 q_4 分别表示 MO-FTTA, ENSGA-II, MMA 和 TS-MOPSO 的帕累托解集。

表 6 各算法目标平均值对比结果
Table 6 Comparison results of target average values of each algorithm

算例	MO-FTTA		ENSGA-II		MMA		TS-MOPSO	
	f_1	$f_2/\%$	f_1	$f_2/\%$	f_1	$f_2/\%$	f_1	$f_2/\%$
D_1	12.158 6	1.91	16.815 3	2.74	15.252 2	2.72	14.232 3	2.68
D_2	15.411 3	2.42	18.067 0	4.79	19.884 7	3.82	17.643 5	3.75
D_3	12.128 5	1.81	16.543 6	2.53	15.659 4	3.36	14.993 6	3.93
D_4	12.116 5	1.83	16.125 9	1.75	14.076 8	2.25	14.043 3	4.06
D_5	11.219 3	0.54	13.801 4	0.89	14.849 5	2.52	12.300	1.71
D_6	13.698 9	3.45	17.868 0	3.47	15.639 9	4.62	16.821 2	3.07
D_7	12.485 7	1.28	16.623 1	3.83	14.523 3	3.77	15.172 1	2.81
D_8	13.279 1	1.66	18.561 3	2.23	15.485 2	2.73	14.264 1	4.92
D_9	12.192 9	1.34	13.835 8	2.69	13.132 5	3.29	14.725 9	1.49
D_{10}	19.047 4	3.38	22.963 2	4.47	22.702 5	4.76	23.363 0	3.85
K_1	50.794 8	2.32	62.330 4	3.40	60.814 4	3.66	62.084 8	4.81
K_2	41.153 6	1.85	54.526 5	2.99	52.311 4	3.49	65.099 6	3.60
K_3	326.419 6	2.51	393.855 3	3.61	402.028 6	2.47	341.113 2	4.62
K_4	87.259 5	2.76	94.986 1	3.60	102.614 1	4.25	101.593 7	3.22
K_5	340.931 3	3.05	397.550 0	3.43	383.908 6	4.25	357.127 8	5.74
K_6	71.742 3	3.68	89.819 0	4.49	83.303 1	4.67	91.123 7	4.14
K_7	261.508 2	2.56	332.407 4	3.41	297.909 5	4.24	289.242 2	3.35
K_8	639.121 1	2.25	697.955 1	3.33	691.655 9	3.48	651.961 8	4.52
K_9	596.725 3	2.53	603.646 8	4.41	649.702 9	3.50	671.352 7	4.92
K_{10}	431.794 8	2.17	512.330 4	3.84	493.814 4	2.63	542.084 8	2.26

注: f_1 为最大完工时间, f_2 为生产安全事故风险。

求解 BS-DRFJSP 模型时效果显著且具备绝对优势,同时,也能为实现车间安全高效生产提供有效解决方案。

4.4 作业车间安全生产调度实例应用

为进一步验证 MO-FTTA 在实际生产中的有效性和可行性,以某汽车制造企业的柔性作业车间为例进行分析。经调查,该车间的生产安全事故主要由人的不安全行为造成,工人的无聊感知是主要因素之一。

结构件工序信息见表 7,通过整理分析该生产车间的数据,给出该实例 Z 的具体加工信息。该生产车间共有 4 名工人,5 台设备,4 种不同的工序类型和 3 个工序操作等级,需要加工 7 个结构件。用 MO-FTTA 来求解该实例,该实例的加工信息见表 8。算法参数的设置与运行环境与 4.2 节相同。无聊感知函数的 t_1 、 t_2 和 t_3 分别设置为 15、20 和 35; v 、 b 、 a 和 V 分别为 0.3、0.5、0.05 和 0.005。

表 7 结构件工序信息

Table 7 Process information of structural components					
结构件	工序	可加工设备	对应加工时间/min	工序类型	工序等级
J_1	O_{11}	$M_1/M_3/M_5$	20/25/18	3	3
	O_{12}	$M_1/M_4/M_5$	15/17/14	3	1
	O_{13}	$M_2/M_3/M_4$	12/13/11	1	3
	O_{14}	$M_2/M_4/M_5$	12/10/19	2	3
J_2	O_{21}	$M_1/M_4/M_5$	14/16/13	3	3
	O_{22}	$M_2/M_3/M_5$	10/11/9	1	3
	O_{23}	$M_2/M_3/M_4$	18/17/19	4	1
J_3	O_{31}	$M_1/M_4/M_5$	18/20/17	2	2
	O_{32}	$M_1/M_2/M_3$	35/40/33	2	2
	O_{33}	$M_1/M_3/M_5$	25/28/23	3	3
	O_{34}	$M_2/M_3/M_5$	13/15/12	3	1
	O_{35}	$M_1/M_2/M_4$	14/12/12	1	1
J_4	O_{41}	$M_1/M_4/M_5$	14/16/13	1	2
	O_{42}	$M_1/M_2/M_3$	35/38/34	4	2
	O_{43}	$M_3/M_3/M_4$	28/30/27	2	2
	O_{44}	$M_1/M_3/M_4$	18/20/17	3	1
J_5	O_{51}	$M_1/M_3/M_5$	22/25/20	1	2
	O_{52}	$M_1/M_2/M_4$	28/30/27	3	2
	O_{53}	$M_1/M_4/M_5$	15/18/14	4	1
	O_{54}	$M_2/M_3/M_4$	8/10/9	4	2
J_7	O_{71}	$M_1/M_2/M_3$	11/12/10	4	3
	O_{72}	$M_3/M_4/M_5$	18/16/15	1	2
	O_{73}	$M_1/M_3/M_4$	13/12/11	2	3
J_8	O_{81}	$M_1/M_3/M_5$	16/14/15	2	1
	O_{82}	$M_2/M_3/M_4$	21/20/19	1	1
	O_{83}	$M_1/M_3/M_5$	12/15/13	2	3
	O_{84}	$M_2/M_3/M_4$	10/12/14	4	1

表 8 每个工人可加工的工序类型

Table 8 Types of processes that each worker can process

W_1	W_2	W_3	W_4
1、2、4	1、2、5	1、3、4	2、3、5

该实例原调度方案的最大完工时间为 102.317 min,生产安全事故风险为 3.42%。采用 MO-FTTA 求解实例 Z,得到 Pareto 最优解的调度方案的机器/工人甘特图和迭代曲线,如图 6—图 8 所示。其中,甘特图上的符号“4-1”表示结构件 J_4 的第 1 个工序。由迭代曲线可知:该实例的最佳调度方案的最

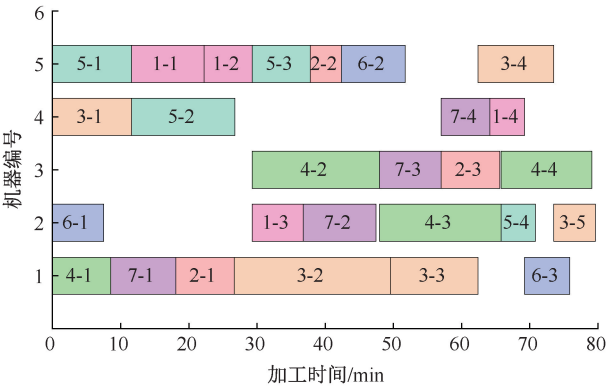


图 6 Z 实例调度方案机器甘特图

Fig. 6 Gantt chart of machine scheduling for Z instance

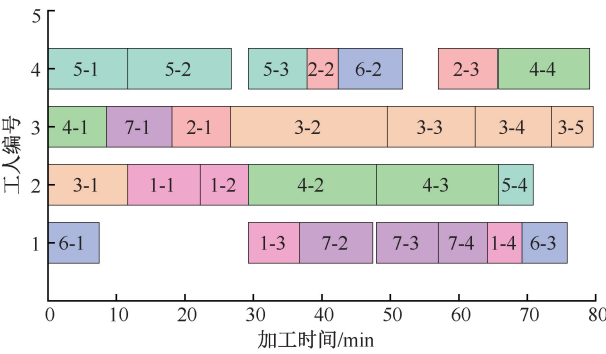


图 7 Z 实例调度方案工人甘特图

Fig. 7 Gantt chart of worker scheduling for Z instance

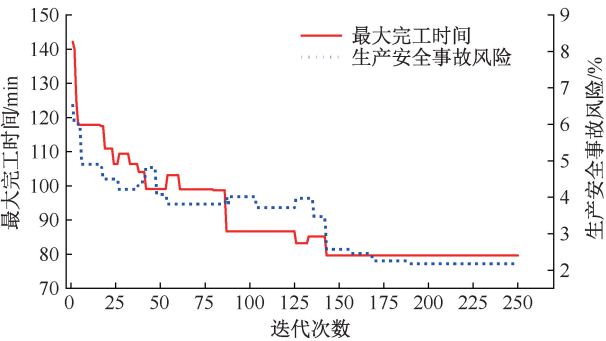


图 8 Z 实例迭代曲线

Fig. 8 Iteration curve of Z instance

大完工时间为 79.635 min, 生产安全事故风险为 2.17%。由此可见:MO-FTTA 对于实现该车间的安全高效生产具有显著的效果。

5 结 论

1) 通过对比试验,MO-FTTA 在 95%的算例中 HV 与 IGD 指标均优于对比算法,且其 C 值均接近

于 1,同时,在 90%的算例中目标函数值表现最佳,这充分证明了其在逼近 Pareto 前沿和维持解集多样性方面的显著优势。

2) 通过实例应用进一步验证算法和模型的有效性,该算法可将最大完工时间缩短 22.682 min,使生产安全事故风险降低 1.25%,协同优化生产效率。

参 考 文 献

[1] 钟茂华,魏玉东,范维澄,等.事故致因理论综述[J].火灾科学,1999,8(3):36-42.
ZHONG Maohua, WEI Yudong, FAN Weicheng, et al. Overview on accident-causing theories [J]. Fire Safety Science, 1999, 8(3): 36-42.

[2] 刘全龙,彭雨蒙,赵盼,等.基于 HFACS 模型的制造企业机械伤害事故致因分析[J].中国安全科学学报,2023,33(3):51-59.
LIU Quanlong, PENG Yumeng, ZHAO Pan, et al. Causal analysis of mechanical injury accidents in manufacturing enterprises based on the HFACS model [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 51-59.

[3] GAME A M. Workplace boredom coping: health, safety, and HR implications[J]. Personnel Review, 2007, 36(5): 701-721.

[4] AZIZI N, ZOLFAGHARI S, LIANG Ming. Modeling job rotation in manufacturing systems: the study of employee's boredom and skill variations [J]. International Journal of Production Economics, 2010, 123(1): 69-85.

[5] FISHERL C D. Boredom at work: a neglected concept [J]. Human Relations, 1993, 46(3): 395-417.

[6] CLEARY M, SAYERS J, LOPEZ V, et al. Boredom in the workplace: reasons, impact, and solutions [J]. Issues in Mental Health Nursing, 2016, 37(2): 83-89.

[7] AZIZI N. Manufacturing productivity improvement: a study of human boredom, job rotation and scheduling [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2009.

[8] TAN Weihua, YUAN Xiaofang, WANG Jinlei, et al. A fatigue-conscious dual resource constrained flexible job shop scheduling problem by enhanced NSGA-II: an application from casting workshop [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 160: DOI:10.1016/j.cie.2021.107557.

[9] SHI Jiaxuan, CHEN Mingzhou, MA Yumin, et al. A new boredom-aware dual-resource constrained flexible job shop scheduling problem using a two-stage multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Information Sciences, 2023, 643: DOI:10.1016/j.ins.2023.119141.

[10] YEOW J A, NG P K, TAN K S, et al. Effects of stress, repetition, fatigue and work environment on human error in manufacturing industries [J]. Journal of Applied Sciences, 2014, 14(24): 3464-3471.

[11] 张冰鉴,苏秦,刘海龙.基于 FTA-BN 的云 ERP 不安全事件的人因失误分析[J].中国安全科学学报,2023,33(2): 38-47.
ZHANG Bingjian, SU Qin, LIU Hailong. Human error analysis of unsafe events in cloud ERP based on FTA-BN [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 38-47.

[12] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems [J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.

[13] TIAN Zhirui, GAI Mei. Football team training algorithm: a novel sport-inspired meta-heuristic optimization algorithm for global optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 245: DOI:10.1016/j.eswa.2023.123088.

[14] USMAN S, LU Cong. Job-shop scheduling with limited flexible workers considering ergonomic factors using an improved multi-objective discrete Jaya algorithm [J]. Computers & Operations Research, 2024, 162: DOI:10.1016/j.cor.2023.106456.

[15] ZHU Nan, GONG Guiliang, LU Dian, et al. An effective reformative memetic algorithm for distributed flexible job-shop scheduling problem with order cancellation [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 237: DOI:10.1016/j.eswa.2023.121205.

[16] MENG Leilei, ZHANG Chaoyong, ZHANG Biao, et al. MILP modeling and optimization of multi-objective flexible job shop scheduling problem with controllable processing times [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2023, 82: DOI:10.1016/j.swevo.2023.101374.

[17] SHI Shuangyuan, XIONG Hegen. Solving the multi-objective job shop scheduling problems with overtime consideration by an enhanced NSGA-II [J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 190: DOI:10.1016/j.cie.2024.110001.

[18] ZHU Kaikai, GONG Guiliang, PENG Ningtao, et al. Dynamic distributed flexible job-shop scheduling problem considering operation inspection [J]. Expert Systems with Applications, 2023, 224: DOI:10.1016/j.eswa.2023.119840.

[19] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search [J]. Annals of Operations Research, 1993, 41(3): 157-183.

[20] WU Xiuli, YUAN Qi, WANG Ling. Multiobjective differential evolution algorithm for solving robotic cell scheduling problem with batch-processing machines [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(2): 757-775.

作者简介: 郭晨 (1989—),女,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事安全生产等方面的研究。E-mail: guochen2016@126.com。