

6-28-2024

## Hybrid Flow Shop Scheduling with Limited Buffers Considering Energy Consumption and Transportation

Tingxin Wen

*School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China,*  
wen\_tx@163.com

Tingyu Guan

*School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China,*  
2316244404@qq.com

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. For more information, please contact [xfzxb@126.com](mailto:xfzxb@126.com).

---

# Hybrid Flow Shop Scheduling with Limited Buffers Considering Energy Consumption and Transportation

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the untimely production scheduling and excessive energy consumption during processing, a limited buffer hybrid flow shop scheduling optimization model is constructed. To minimize the makespan and total energy consumption of the workshop, the transport time, generalized energy consumption and buffer capacity being the constraints, and the on/off energy saving strategy applied to reduce the standby energy consumption, the feasibility of the optimization model are verified. A lion swarm optimization algorithm is designed, in which a population initialization method combining random generation and greedy selection is used to improve the initial solution quality and solution efficiency, the lion swarm optimization algorithm superiority is verified. The experimental results show that the algorithm can effectively solve the hybrid flow shop scheduling problem with limited buffer considering energy consumption and transportation time, and the established optimization model can be flexibly adjusted according to the actual needs, in which the purpose of rational production scheduling, energy saving and emission reduction for manufacturing enterprises can be achieved.

## Keywords

hybrid flow shop, comprehensive energy consumption, buffer, lion swarm optimization algorithm, multi-objective optimization

## Recommended Citation

Wen Tingxin, Guan Tingyu. Hybrid Flow Shop Scheduling with Limited Buffers Considering Energy Consumption and Transportation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1344-1358.

# 考虑能耗和运输的有限缓冲区混合流水车间调度

温廷新, 关婷誉\*

(辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要:** 为解决生产调度不及时、加工过程中能耗过大等问题, 构建了有限缓冲区混合流水车间调度优化模型。模型以最小化最大完工时间和车间总能耗为目标, 将运输时间、广义能耗和缓冲区容量等资源限制作为约束, 并应用开关机节能策略减少待机能耗, 验证了优化模型的可行性; 设计一种狮群算法, 采用随机产生与贪婪选择相结合的种群初始化方法, 提高初始解质量和求解效率, 验证了狮群算法的优越性。实验结果表明: 该算法能有效解决考虑能耗和运输时间的有限缓冲区混合流水车间调度问题, 优化模型能依照实际需要进行柔性调节, 达到制造型企业合理排产、节能减排的目的。

**关键词:** 混合流水车间; 综合能耗; 缓冲区; 狮群算法; 多目标优化

中图分类号: TH186; TP18 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)06-1344-15

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0343

**引用格式:** 温廷新, 关婷誉. 考虑能耗和运输的有限缓冲区混合流水车间调度[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(6): 1344-1358.

**Reference format:** Wen Tingxin, Guan Tingyu. Hybrid Flow Shop Scheduling with Limited Buffers Considering Energy Consumption and Transportation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(6): 1344-1358.

## Hybrid Flow Shop Scheduling with Limited Buffers Considering Energy Consumption and Transportation

Wen Tingxin, Guan Tingyu\*

(School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Aiming at the untimely production scheduling and excessive energy consumption during processing, a limited buffer hybrid flow shop scheduling optimization model is constructed. To minimize the makespan and total energy consumption of the workshop, the transport time, generalized energy consumption and buffer capacity being the constraints, and the on/off energy saving strategy applied to reduce the standby energy consumption, the feasibility of the optimization model are verified. A lion swarm optimization algorithm is designed, in which a population initialization method combining random generation and greedy selection is used to improve the initial solution quality and solution efficiency, the lion swarm optimization algorithm superiority is verified. The experimental results show that the algorithm can effectively solve the hybrid flow shop scheduling problem with limited buffer considering energy consumption and transportation time, and the established optimization model can be flexibly adjusted according to the actual needs, in which the purpose of rational production scheduling, energy saving and emission reduction for manufacturing enterprises can be achieved.

**Keywords:** hybrid flow shop; comprehensive energy consumption; buffer; lion swarm optimization algorithm; multi-objective optimization

收稿日期: 2023-03-27 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(71771111); 辽宁省社会科学规划基金(L14BTJ004)

第一作者: 温廷新(1974-), 男, 教授, 博士, 研究方向为矿业工程、智能优化算法及应用、计算机软件及计算机应用、供应链管理。

E-mail: wen\_tx@163.com

通讯作者: 关婷誉(1998-), 女, 硕士生, 研究方向为智能制造、车间调度。E-mail: 2316244404@qq.com

## 0 引言

随着“智能制造”战略的提出和“智慧工厂”的建设, 车间中各阶段生产节拍不同、使用自动导引运输车(automated guided vehicle, AGV)搬运工件、半成品需要充分静置等现实因素成为现代化工厂提高生产规模与效率面临的关键问题。加工设备间建立缓冲区可以在满足半成品静置需求的同时平衡车间生产节奏, 是实现精益生产和智能制造的有效手段<sup>[1]</sup>, 但缓冲区容量的限制为混合流水车间调度工作增加了难度, 因此, 针对有限缓冲区混合流水车间调度问题(hybrid flow shop-limited buffer, HFSP-LB)的研究具有重要意义。

对于HFSP-LB的研究, 文献[2]针对双机置换流水车间建立了考虑缓冲区容量的优化模型。文献[3]以最小化最大完工时间为目标建立了针对HFSP-LB的优化模型。文献[4]针对考虑调整时间的HFSP-LB建立双目标优化模型并使用遗传算法进行求解。文献[5]考虑了机器前后置缓冲区容量, 建立了以缓冲区占有率和完工时间为目标的调度模型。

随着绿色制造的推进和能源价格的上涨<sup>[6]</sup>, 如何在保证生产效率的同时减少能源消耗, 成为HFSP-LB研究中亟待解决的现实问题<sup>[7-8]</sup>。国内外考虑能耗的调度研究主要针对模型建立和求解算法的设计两方面。在模型的建立方面, 文献[9]提出开关机策略, 可以节约80%的空闲能耗。文献[10]定义了生产时的直接能耗和间接能耗, 并针对间接能耗建立了优化模型。文献[11]构建了与序列相关的柔性作业车间调度模型, 来提高了生产效率降低能源消耗。文献[12]同时考虑顺序相关调整时间和运输时间等多时间因素建立节能调度模型。在节能调度模型的求解方法上, 文献[13]利用数学规划方法求解考虑能耗和完工时间的置换流水车间调度问题。文献[14]运用帝国算法和变邻域搜索的双阶段算法求解以能耗为约束的作业车间调度问题。文献[15]以柔性作业车间为背景, 建立不同工作状态下能耗成本模型, 并设计了快速非支配排序遗传算法

进行求解。文献[16]针对考虑运输时间、机器预维护和能耗等约束的柔性作业车间调度问题, 提出了一种多目标离散Jaya算法进行求解。

综合国内外研究现状, 学者们在考虑车间能耗时将混合流水车间的缓冲区容量视为无限大, 但在实际生产中, 此类车间会在不同阶段的设备间建立容量有限的缓冲区<sup>[17]</sup>。此外, 智能制造模式下AGV的广泛应用, 使工件的运输操作成为车间生产过程中的关键环节<sup>[18]</sup>, 而关于工件运输的现有研究主要集中在作业车间领域, 对HFSP-LB的研究多数忽略运载设备的时间和能量消耗。

基于此, 本文对存在AGV运输和开关机节能策略的HFSP-LB进行研究, 以最小化最大完工时间和广义能耗为目标建立双目标优化模型。采用基于排列的编码方式, 设计随机产生和贪婪选择结合的初始化方法, 提出一种有效的狮群算法对问题进行求解。以实际生产案例为对象, 分析不同权重系数下完工时间和能耗的变化情况, 及缓冲区容量变化对生产目标的影响。

## 1 问题描述及建模

### 1.1 问题描述

HFSP-LB描述如下:  $n$ 个待加工工件, 均需在车间按顺序完成 $p$ 个阶段的加工, 各阶段存在加工能力不同的并行设备 $M_j$ 台, 每阶段的加工设备后都配置有容量为 $C^k$ 的后置缓冲区, 工件在缓冲区静置后, 由运载设备将完成某阶段加工的工件转移到下一阶段的加工设备上。

本文提出的是多目标静态调度问题, 考虑缓冲区容量约束, 安排最优的加工顺序以使总加工时间最短和车间总能耗最小。存在以下假设: ①不考虑设备故障、工件恶化、紧急插单、多技能员工的情况; ②每一加工阶段上能且仅能选择一台并行机进行加工, 加工过程必须连续, 一旦开始不能中断; ③所有工件、设备在零时刻均可开始生产; ④不考虑不同工件的运输时长不同;

⑤工件在缓冲区遵循先入先出规则。

## 1.2 数学模型

### 1.2.1 能耗分析

#### (1) 加工总能耗

加工总能耗 $E_p$ 是指机床设备在加工时直接消耗的能耗,为了能耗分析更具有针对性,车间的加工总能耗主要考虑机床设备主传动系统在切削状态下加工材料所消耗的切削能耗 $E_c$ 、加工设备正常运行时转动系统在切削状态下产生的包括附加电损和设备损耗在内的附加损耗 $E_a$ 以及工件未到达时加工设备仍然转动产生的空载能耗 $E_{nl}$ 。加工总能耗计算公式如下:

$$E_p = E_c + E_a + E_{nl} \quad (1)$$

加工设备的总输入功率 $P_{in}^k$ 与切削功率 $P_c^k$ 、附加损耗功率 $P_a^k$ 、空载功率 $P_{nl}^k$ 之间存在如下关系:

$$P_{in}^k = P_{nl}^k + P_c^k + P_a^k = P_{nl}^k + (1 + a_0)P_c^k + a_1 P_c^{k2} \quad (2)$$

式中: $a_0$ 、 $a_1$ 为附加损耗系数,机床主轴转速稳定时可视为恒定值。

相应地,设备加工能耗为

$$E_p^k = \sum_{k=1}^m \int_0^{t^k} P_{in}^k(t) dt = \sum_{k=1}^m \left( \int_0^{t^k} P_{nl}^k(t) dt + \int_0^{t_c^k} P_c^k(t) dt + \int_0^{t_c^k} P_a^k(t) dt \right) \quad (3)$$

对于一台机床来说,当主轴转速稳定时,其总输入功率及空载功率只存在微小波动,可视为恒定值<sup>[19]</sup>,结合式(2),机床设备加工能耗方程可以转化为

$$E_p^k = \sum_{k=1}^m (P_{nl}^k t^k + P_c^k t_c^k + P_a^k t_c^k) = \sum_{k=1}^m (P_{in}^k t_c^k + P_{nl}^k (t^k - t_c^k)) \quad (4)$$

生产加工总能耗可表示为

$$E_p = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (P_{in}^{k,i} t_i^k + P_c^{k,i} t_{ci}^k + P_a^{k,i} t_{ci}^k) B_i^k = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (P_{in}^{k,i} t_{ci}^k + P_{nl}^{k,i} (t_i^k - t_{ci}^k)) B_i^k \quad (5)$$

式中: $P_{in}^{k,i}$ 、 $P_{nl}^{k,i}$ 分别为设备 $k$ 加工工件 $i$ 时的输入功率、空载功率; $t_{ci}^k$ 、 $t_i^k$ 为工件在设备上切削时长

和加工时长; $B_i^k$ 为决策变量,为1表示工件 $i$ 在设备 $k$ 上加工,为0表示工件 $i$ 不在设备 $k$ 上加工。

#### (2) 空闲能耗

设备 $k$ 的等待时长 $t_w^k$ 由所有在该设备上加工的工件所需加工时长与设备 $k$ 工作总时长做差表示:

$$t_w^k = \sum_{i=1}^n t_i^k B_i^k - t_{ME}^k + t_{MB}^k \quad (6)$$

式中: $t_{ME}^k$ 为设备 $k$ 最后一次加工结束时间; $t_{MB}^k$ 为设备 $k$ 第一次加工开始时间。

当设备 $k$ 待机时间较长或待机能耗比较大时,执行开关机策略。只有当允许关机或重启的临界时间间隔 $t_r^k$ 大于等于开关机所用时长,且对应的能耗大于等于设备 $k$ 开机关机各一次消耗的能量时实施开关机策略。临界时间间隔可以表示为

$$t_r^k = \max \left\{ t_{on}^k + t_{off}^k, \frac{E_{on}^k + E_{off}^k}{P_w^k} \right\}, \forall k \in M_m \quad (7)$$

式中: $t_{on}^k$ 为设备 $k$ 开机所用时长; $t_{off}^k$ 为设备 $k$ 关机所用时长; $E_{on}^k$ 、 $E_{off}^k$ 为设备 $k$ 开、关机能耗; $M_m$ 为设备集合。

全部设备的空闲能耗,即设备等待能耗为

$$E_w = \sum_{k=1}^m P_w^k t_w^k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (E_{on}^k + E_{off}^k) z_i^k \quad (8)$$

式中: $z_i^k$ 为决策变量,用来表示是否开机或重启,当工序 $i$ 在设备 $k$ 上加工( $B_i^k=1$ ),默认加工开始前设备 $k$ 待机,当 $z_i^k=0$ 时继续待机,当 $z_i^k=1$ 时实行开机策略; $P_w^k$ 为设备的待机功率。

#### (3) 运输能耗

运输能耗 $E_T$ 主要由AGV在设备 $k$ 后置缓冲区与下一阶段所选的加工设备 $h(h \in M_m)$ 之间搬运工件产生:

$$E_T = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^{m-1} P_{agv} t_{agv}^{k,h} B_i^{k,h} B_i^k \quad (9)$$

式中: $P_{agv}$ 为AGV额定功率; $t_{agv}^{k,h}$ 为AGV将工件从设备 $k$ 的后置缓冲区转移到设备 $h$ 所用时长; $B_i^{k,h}$ 为决策变量,工件 $i$ 在设备 $k$ 上加工后下一阶段在设备 $h$ 上加工为1,否则为0。

#### (4) 公共能耗

车间公共能耗 $E_o$ 是指为保证车间正常运行所

需的如照明、空调和排尘等辅助公共设备所需能耗。在正常生产的状态下, 该部分能耗比较稳定, 与最大完工时间  $t_{\text{object}}$  和辅助功率  $P_o$  有关。

$$E_o = \sum_{k=1}^m P_o t_{\text{object}} \quad (10)$$

### 1.2.2 目标函数说明

(1) 混合流水车间总能耗主要包括机床加工总能耗、空闲能耗、运输能耗及公共能耗4部分。

$$E_{\text{object}} = E_p + E_w + E_T + E_o = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (P_{\text{in}}^{k,i} t_{\text{ci}}^k + P_{\text{nl}}^{k,i} (t_i^k - t_{\text{ci}}^k)) B_i^k + \sum_{k=1}^m P_w^k t_w^k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m (E_{\text{on}}^k + E_{\text{off}}^k) z_i^k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{h=1}^{m-1} P_{\text{agv}} t_{\text{agv}}^{k,h} B_i^{k,h} B_i^k + \sum_{k=1}^m P_o t_{\text{object}} \quad (11)$$

(2) 完工时间取最迟完工设备时间, 即

$$\max(T) = \max(t_{\text{ME}}^k), \forall k \in M_m \quad (12)$$

$$t_{\text{object}} = \max(T) \quad (13)$$

式中:  $T$  为各工件完工时间集合。

根据式(11)和(13)建立目标函数:

$$\min f(t_{\text{object}}, E_{\text{object}})$$

由于完工时间和总能耗是相互冲突的2个目标, 本文通过对目标进行去量纲加权求和, 形成单目标函数。综合目标评价函数为

$$f(t_{\text{object}}, E_{\text{object}}) = w \left( \frac{t_{\text{object}} - t_{\text{min}}}{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}} \right) + (1-w) \left( \frac{E_{\text{object}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \right) \quad (14)$$

式中:  $0 \leq w \leq 1$  为权重系数, 可以通过改变  $w$  的大小实现企业对目标倾向的调整;  $t_{\text{max}}$  和  $t_{\text{min}}$  为目标函数完工时间的最大值和最小值;  $E_{\text{max}}$  和  $E_{\text{min}}$  为目标函数车间总能耗的最大值和最小值。

### 1.2.3 约束条件

工序集合为  $P$ , 工序  $j$  可选加工设备数为  $M_j$ , 至少有一工序上存在并行设备:

$$\exists M_j > 1, j \in P \quad (15)$$

各工序上设备之和等于总设备数:

$$\sum_{j=1}^p M_j = m, j \in P \quad (16)$$

用  $W$  表示工件集合, 各工件在各阶段加工时只能选择一台设备:

$$\sum_{k=1}^{M_j} B_i^k = 1, \forall i \in W, j \in P \quad (17)$$

必须按工艺顺序加工各个工件, 并且加工一旦开始不可中断:

$$t_B^{i,j+1} \geq t_E^{i,j}, \forall i \in W, j \in P \quad (18)$$

式中:  $t_B^{i,j}$  为工件  $i$  第  $j$  道工序开始时间;  $t_E^{i,j}$  为工件  $i$  第  $j$  道工序结束时间。

任一工件在某工序的结束时间为该工序开始加工时间与在此工序加工所用时长之和:

$$t_E^{i,j} = t_B^{i,j} + t_i^k, \forall i \in W, j \in P \quad (19)$$

工件  $i$  在某设备上加工时长等于在  $k$  设备上切削时长、AGV 搬运时长、在缓冲区静置时长  $t_b^k$  三者之和:

$$t_i^k = t_{\text{ci}}^k + t_{\text{agv}}^k + t_b^k, \text{ when } B_i^k = 1, \forall k \in M_m, i \in W \quad (20)$$

各设备在 0 时均可使用:

$$t_{\text{MB}}^k \geq 0, \forall k \in M_m \quad (21)$$

当前后 2 个工序之间空闲时间间隔大于等于临界时间  $t_r^k$  时, 将执行开关机策略 ( $z_i^k = 1$ ), 否则不执行 ( $z_i^k = 0$ ):

$$t_B^{i,j} - t_E^{i,j-1} \geq t_r^k z_i^k, \forall i \in W, k \in M_m, j \in P \quad (22)$$

$$t_B^{i,j} - t_E^{i,j-1} < t_r^k + A z_i^k, \forall i \in W, k \in M_m, j \in P \quad (23)$$

式中:  $A$  为一个无限大的数。

加工设备  $k$  一次关机或重启的能耗小于等于设备  $k$  待机能耗  $E_w^k$ :

$$(E_{\text{on}}^k + E_{\text{off}}^k) z_i^k \leq E_w^k, \forall i \in W, k \in M_m \quad (24)$$

设备  $k$  后置缓冲区容量限制:

$$\sum_{i=1}^n B_i^k \leq C^k, \forall k \in M_m \quad (25)$$

限制决策变量的取值范围:

$$B_i^k \geq z_i^k, \forall k \in M_m, i \in W \quad (26)$$

$$z_i^k \in \{0, 1\}, \forall i \in W, k \in M_m \quad (27)$$

$$B_i^k \in \{0, 1\}, \forall i \in W, k \in M_m \quad (28)$$

## 2 求解HFSP-LB的狮群算法设计

狮群算法(LSO)是一种群体智能算法,通过模仿捕猎时不同狮子以不同方式更新位置来产生新解,多种位置迭代方法确保了算法收敛的时效,目前已经应用于主动配电网碳排放规划<sup>[20]</sup>、极限学习机废水处理<sup>[21]</sup>、无线传感器网络覆盖优化<sup>[22]</sup>、机床热误差预测<sup>[23]</sup>等领域。

本文研究的HFSP-LB引入了开关机策略和运输时间等约束,提高了问题复杂度,运筹学方法不能有效求解,而LSO作为新型的智能优化算法,相比传统优化算法参数较少,易于实现,在全局寻优方面优势明显<sup>[24]</sup>,为解决此问题提供了新的思路。

### 2.1 编码与解码

为实现LSO算法求解HFSP-LB,将工件序号和加工设备号分开编码。例如,计划加工6个工件,各工件要依次经过3道工序才能完成加工,各工序上分别可选{2,2,3}台并行设备,3道工序编码总长度为36。某工序编码示例如图1所示。前半段元素表示某道工序上3号工件首先被加工,4号工件第二个被加工,5号工件最后被加工。后半段编码表示加工设备序号:第一个被加工的3号工件在设备2上进行此道工序的加工,第二个被加工的4号工件在设备1上完成此道工序的加工,以此类推。

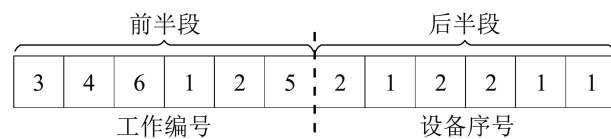


图1 编码示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coding

依照工件编号和设备序号可以转换出设备的加工时间,计算各工序相应的加工时间和能耗。

### 2.2 种群初始化

种群的初始化主要针对第一道工序上工件加工顺序的排列和加工设备的选择。由于HFSP-LB

对于工件的排序是非重复的离散整数序列,因此本文设计从实数串到工件序列的映射方式实现狮群算法在HFSP-LB上的应用。由 $h$ 个 $N(0,1)$ 产生的随机数生成 $N$ 个狮子位置, $N$ 个狮子的位置均用 $h$ 维向量表示:

$$\mathbf{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ih}), 1 \leq i \leq N \quad (29)$$

$h$ 维的狮子位置从小到大对应1~ $h$ 个工件的加工顺序。 $N$ 表示种群数量,对应生成 $N$ 个可行调度方案。例如,安排6个工件在第一道工序加工,随机生成的1个6维狮子位置为(0.55, 0.71, 0.39, 0.87, 0.14, 0.93),则对应工件加工序号为(3, 4, 2, 5, 1, 6)。考虑到工件需要在缓冲区静置,后续工序中加工顺序遵照“先完成静置先加工”的原则排列,如果多个工件同时结束静置,则随机生成这些工件的加工顺序。因LSO算法对初始解质量较为依赖,为保证初始解质量,提高收敛速度,采用贪婪算法对设备进行选择,结合式(11)考虑到加工时间对能耗的影响,在选择加工设备时优先安排用时短的设备。

### 2.3 适应度计算

对初始化种群后产生的各调度方案分别计算对应的 $t_{\max}$ 、 $t_{\min}$ 、 $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ ,适应性多目标评价函数如式(14)所示。对初始生成的 $N$ 个加工序号对应的适应度值进行比较,适应度值最小的狮子位置视为初始狮王位置即初始最优调度方案。

### 2.4 位置更新

通过适应度函数比较不同位置对应的调度方案,更新狮群最优解和个体历史最佳位置。个体位置按照狮子种类以3种方式更新,狮王和母狮为成年狮,其数量 $M$ 占整个种群数量 $N$ 的比例称为成年狮的比例因子,记作 $\beta \in (0, 1)$ 。

(1) 狮王在适应度值最小的位置附近小范围移动,并探寻周围是否存在更好的解,其更新式为

$$x^{k+1} = g^k (1 + \gamma \|P^k - g^k\|) \quad (30)$$

式中: $x^{k+1}$ 为狮王更新获得的下一代全局最佳位置; $g^k$ 为当前迭代最佳位置; $P^k$ 为狮王历史最佳

位置;  $\gamma$ 为[0, 1]范围内的随机数。

(2) 母狮位置更新式为

$$X_i^{k+1} = \frac{P_i^k + P_c^k}{2} (1 + a_i \gamma) \quad (31)$$

式中:  $P_i^k$ 为第*i*个母狮在经历第*k*次迭代后的历史最佳位置;  $P_c^k$ 为另一母狮的历史最佳位置;  $a_i$ 为会逐渐减小的扰动因子。

$$a_i = s \cdot \exp[-30(i/i_{\max})^{10}] \quad (32)$$

式中:  $i_{\max}$ 为最大迭代次数;  $i$ 为当前迭代次数。

$$s = 0.1(\bar{H} - \bar{L}) \quad (33)$$

式中:  $\bar{H}$ 、 $\bar{L}$ 为各维度的最大值均值和最小值均值。

(3) 适应度值最小的  $N-M$  个调度方案对应幼狮位置, 幼狮在狩猎过程中依据[0, 1]范围内的随机数  $q$  更新位置:

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} \frac{g^k + P_i^k}{2} (1 + \alpha_c \gamma), & q \leq \frac{1}{3} \\ \frac{P_i^k + P_m^k}{2} (1 + \alpha_c \gamma), & \frac{1}{3} < q \leq \frac{2}{3} \\ \frac{g^{-k} + P_i^k}{2} (1 + \alpha_c \gamma), & \frac{2}{3} < q \leq 1 \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $P_i^k$ 为幼狮历史最佳位置;  $P_m^k$ 为母狮的历史最佳位置;  $g^{-k}$ 为远离狮王的反向位置。

$$g^{-k} = \bar{H} + \bar{L} - g^k \quad (35)$$

幼狮的更新方程加入自适应的扰动因子  $\alpha_c$ , 随迭代次数的增加, 步长逐渐缩小, 避免后期大范围搜索:

$$\alpha_c = s \left( \frac{i_{\max} - i}{i_{\max}} \right) \quad (36)$$

## 2.5 算法流程

根据上述设计, 求解HFSP-LB的LSO算法流程如图2所示。

## 3 算例验证

本文以11组算例和某车间生产实例对数学模型的灵活性和LSO算法的有效性进行验证。实验环境和配置为Intel(R) Core(TM) i7-4770HQ、2.20 GHz CPU 16.0 GB RAM Windows 10 64位操

作系统, 程序编译和运行环境为MATLAB R2018a。

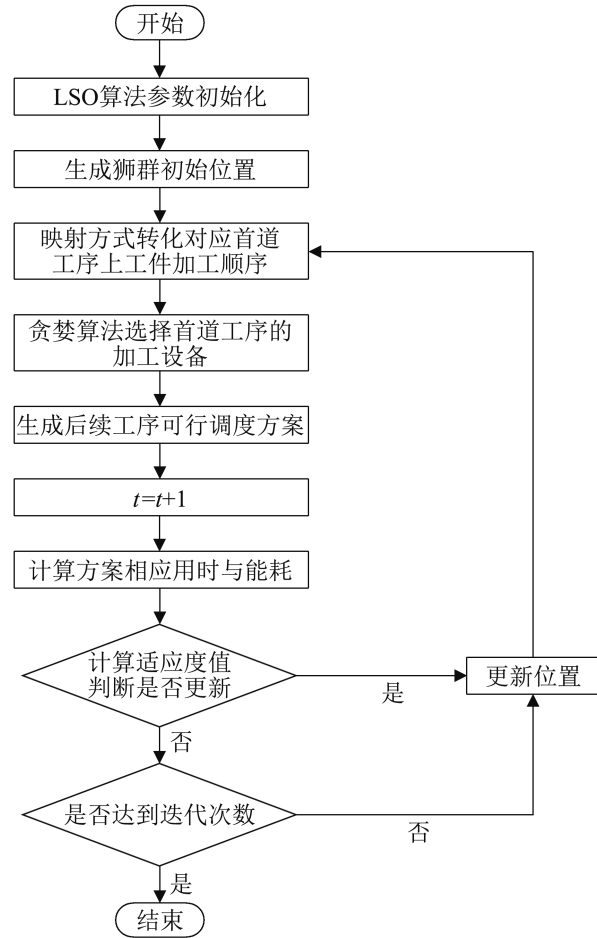


图2 狮群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of LSO

## 3.1 算例生成及参数设置

由于目前没有可直接用于HFSP-LB的基准数据, 本文以文献[16, 25]中的算例为基础, 结合车间实际情况拓展得到11组不同规模的算例。拓展信息: 输入功率在1~15 kW之间随机产生, 车间辅助设备功率为1 kW, 每个设备后都有一台功率为1.89 kW的AGV小车, AGV运输时间在40~100 s之间随机产生, 每个工件在缓冲区需要静置45 s。

问题规模用(工件数  $n \times$  工序数  $p \times$  缓冲区容量  $C^k$ )来表示, 例如,  $7 \times 3 \times 4$ 表示7个工件, 3道工序且缓冲区容量为4的算例。

LSO算法相关参数设置: 成年狮比例0.3, 种群规模100, 最大迭代次数为100。

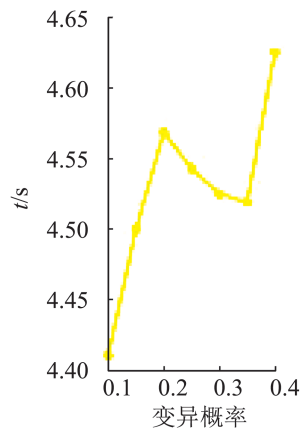


### 3.2 算法对比实验

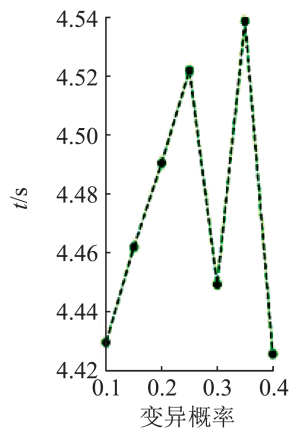
为验证算法性能, 将LSO算法与遗传算法、模拟退火算法进行比较。

考虑到遗传算法和模拟退火算法的优化效果与其参数选择密切相关, 因此在进行对比实验前, 参考文献[26-28]的参数水平和实验设计, 应用遗传算

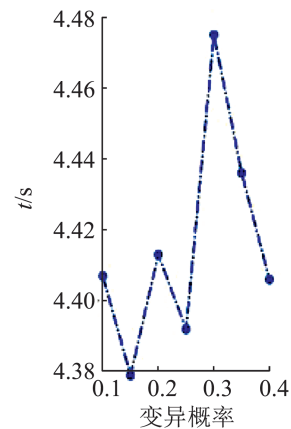
法和模拟退火算法对一组中等规模的HFSP-LB算例(16×8×11)进行求解。不同参数组合对应的求解时间和运算结果(重复计算10次取平均值)如图3~4所示。通过综合比较各组运算时长和结果发现, 遗传算法和模拟退火算法在求解HFSP-LB时的最佳参数组合为遗传算法交叉概率为0.85, 变异概率为0.15; 模拟退火算法劣解的概率为0.95, 衰减系数为0.85。



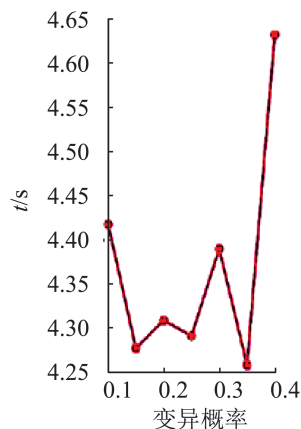
(a) 交叉概率0.70运行时长



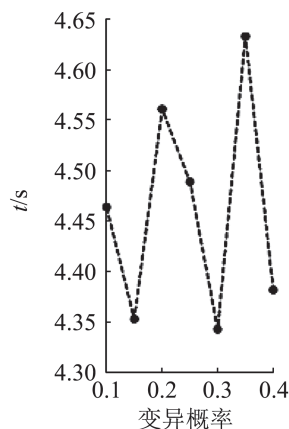
(b) 交叉概率0.75运行时长



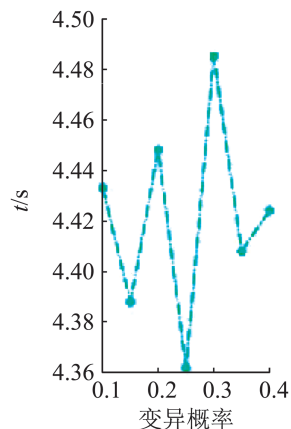
(c) 交叉概率0.80运行时长



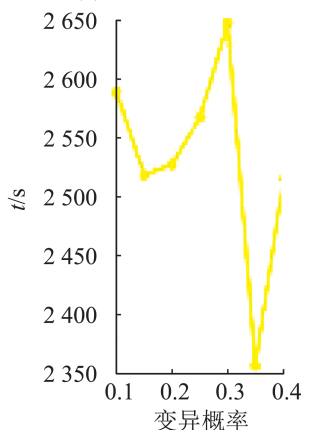
(d) 交叉概率0.85运行时长



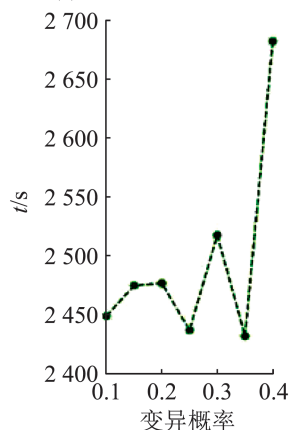
(e) 交叉概率0.90运行时长



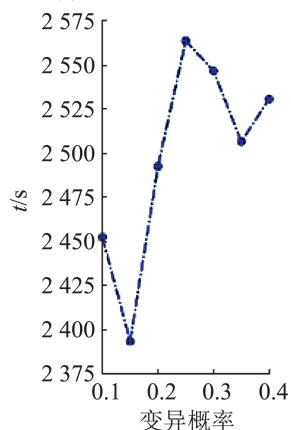
(f) 交叉概率0.95运行时长



(g) 交叉概率0.70完工时间



(h) 交叉概率0.75完工时间



(i) 交叉概率0.80完工时间

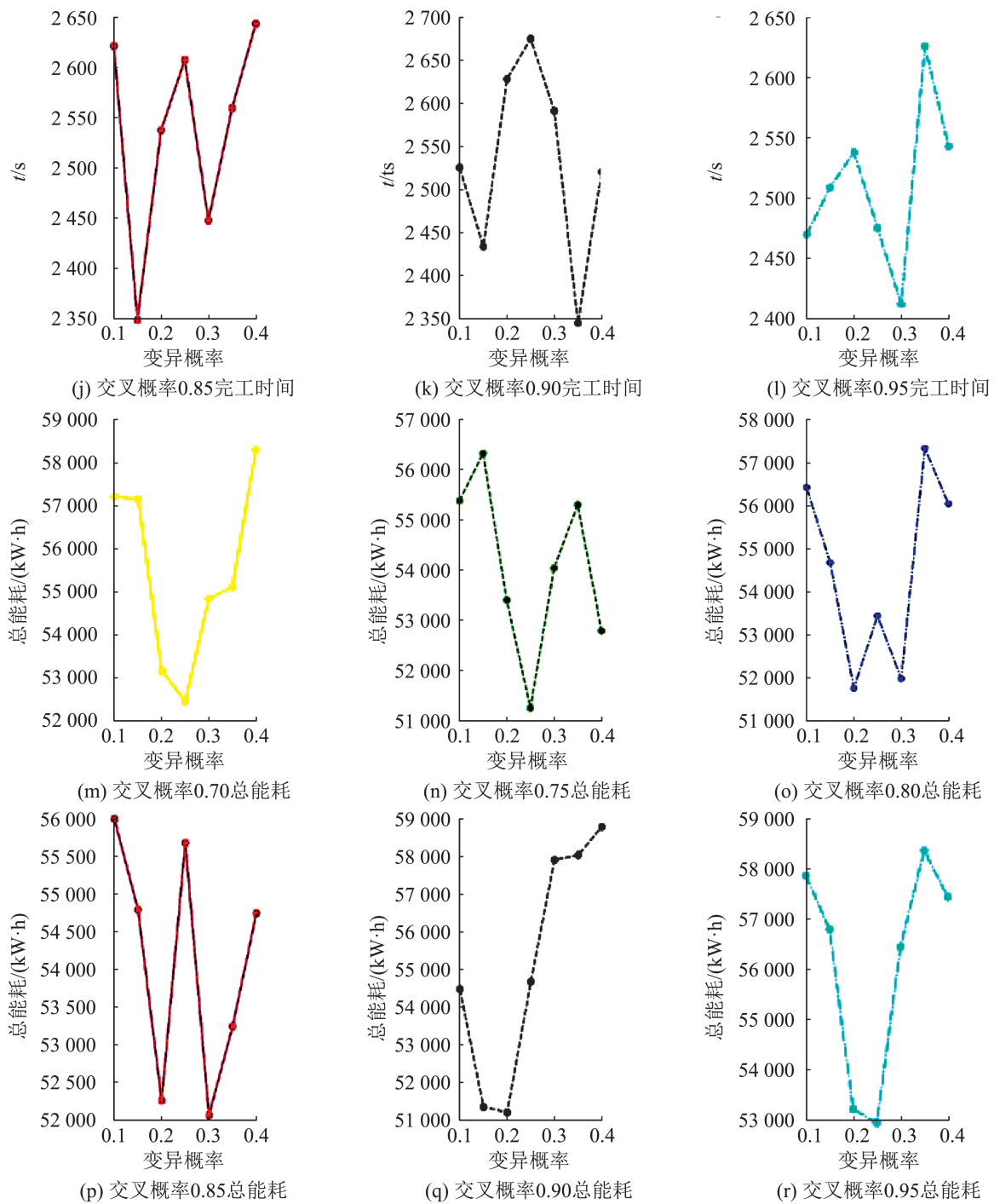


图3 遗传算法不同参数运算结果  
Fig. 3 Results of different parameters of GA

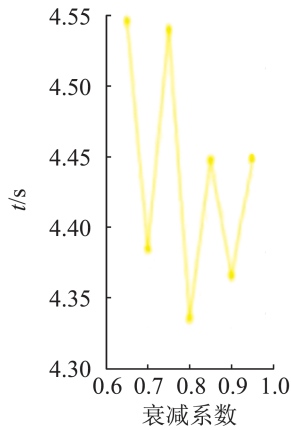
本节对比实验依据上述预备实验结果设置算法的参数。为公平比较上述算法, 设置相同的终止条件, 即最大迭代次数为100, 统一权重系数  $w=0.5$ 。为了减少算法的随机性, 对每个算例重复计算10次后取平均值。各算法运行结果如表1

所示。

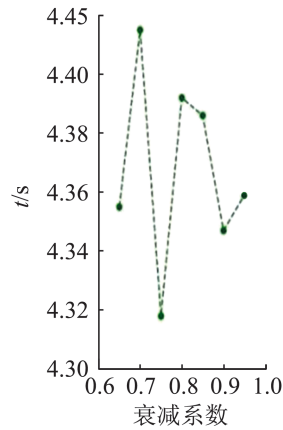
表1中对比结果表明, 处理中小规模问题时, LSO算法运行时间的平均值均低于传统的遗传算法和模拟退火算法运行时间, 证明本文算法在求解中小规模 HFSP-LB 问题时有较高的计算效率;

相同迭代次数下 LSO 算法求得各优化目标的平均值大多小于另 2 种算法的对应值，虽然偶有车间最小总能耗大于其他算法的最小总能耗，但 LSO 算法在其他目标值和算法效率上均有优势。处理大规模算例时，LSO 算法虽然运算速度放缓，但

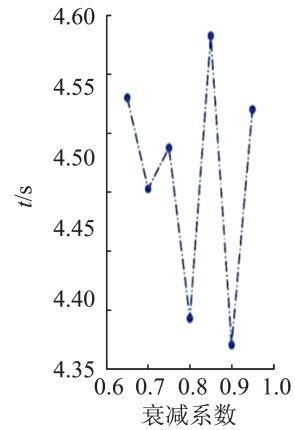
与另外两算法运算时间相差较小，另外在计算结果方面本文算法依然有良好的效果。由此可知，LSO 算法的寻优能力略高于遗传算法、模拟退火算法。综上，LSO 算法能有效求解 HFSP-LB 且具有优越性。



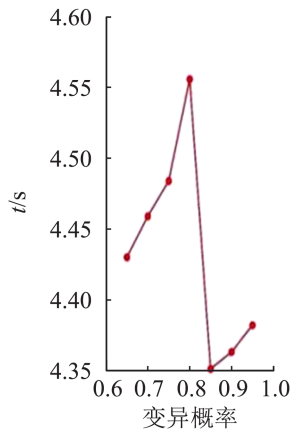
(a) 劣解概率0.70运行时长



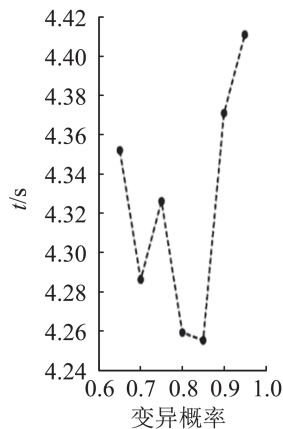
(b) 劣解概率0.75运行时长



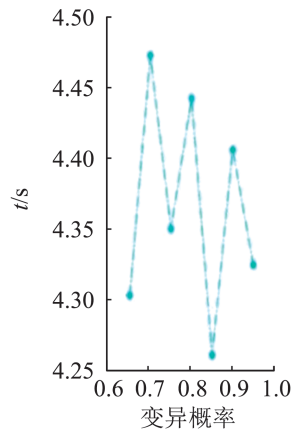
(c) 劣解概率0.80运行时长



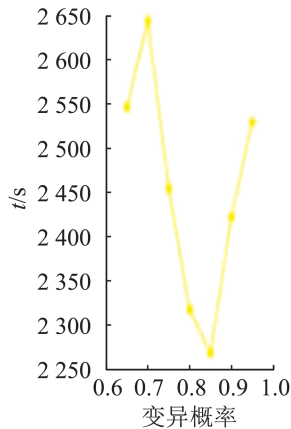
(d) 劣解概率0.85运行时长



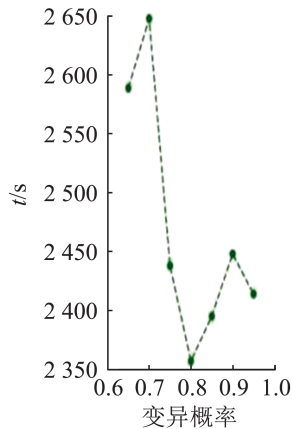
(e) 劣解概率0.90运行时长



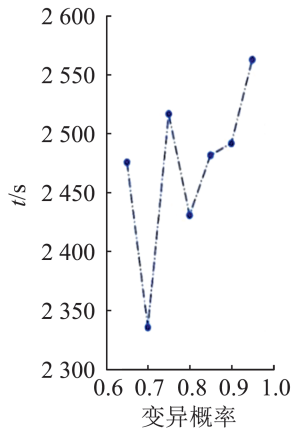
(f) 劣解概率0.95运行时长



(g) 劣解概率0.70完工时间



(h) 劣解概率0.75完工时间



(i) 劣解概率0.80完工时间

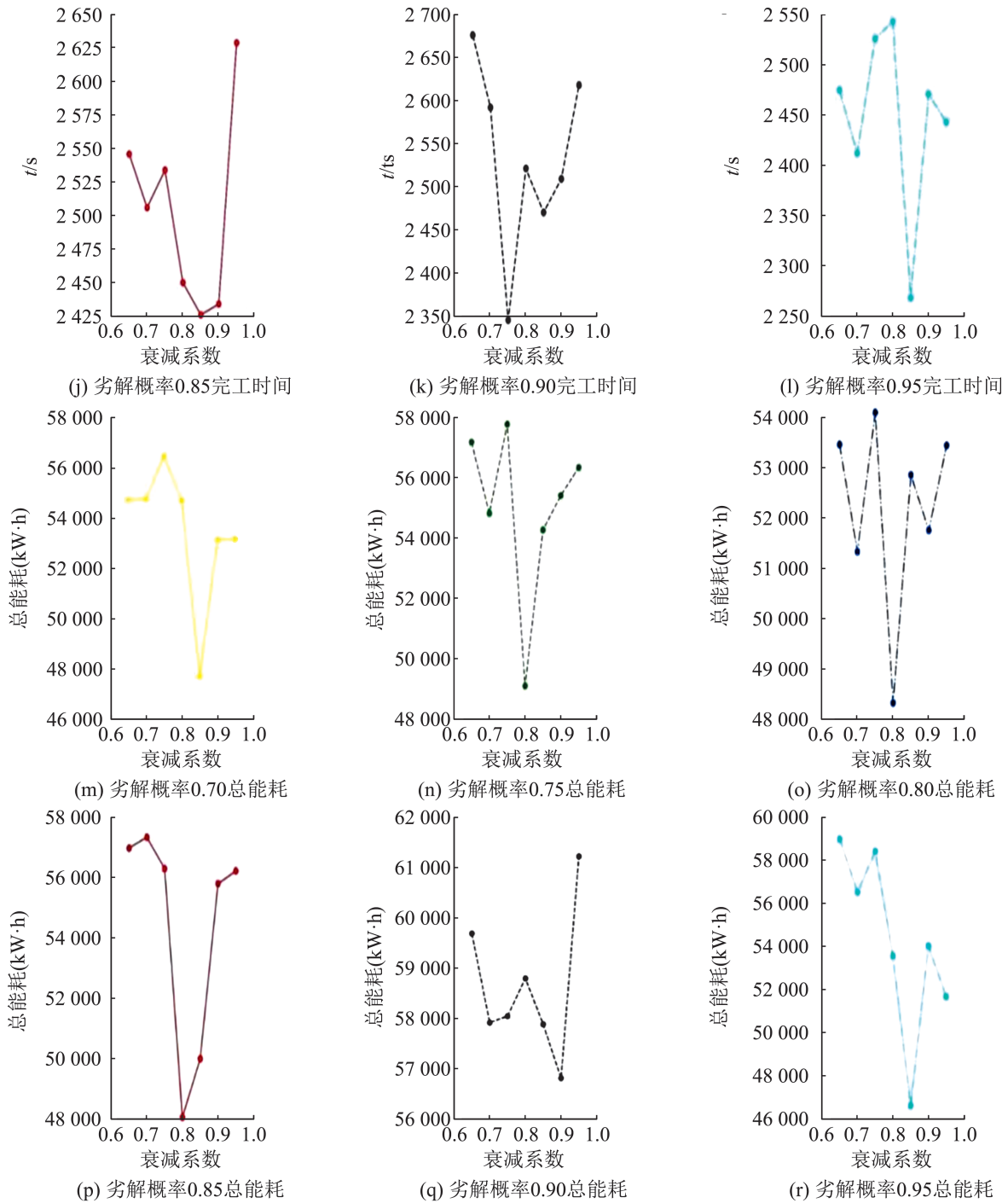


图4 模拟退火算法不同参数运算结果  
Fig. 4 Results of different parameters of SA

### 3.3 权重系数和缓冲区容量影响分析

为进一步验证模型中权重系数和缓冲区容量对调度结果的影响, 以某切削车间为例进行验证。该车间是含3道工序的混合流水线车间, 对8种工件

进行加工调度。相关数据见表2~4。1.89 kW的AGV在后置缓冲区与加工设备之间的移动时间如表5所示。

$C^k=4$  和  $C^k=5$  在不同权重下的测试结果(用狮群算法求解10次取平均值)如图5~6所示。在问题

偏好相同( $w$ 相同)的情况下,缓冲区容量的改变对加工静置后可进入后置缓冲区的工件越多,该阶段最大完工时间影响较大。原因是 $C^k$ 值越大,完成阶段因等待而产生的设备空闲时间变小。

表1 算例数据运行对比  
Table 1 Example data run comparison

算例	算例规模	遗传算法			模拟退火			狮群算法		
		$\bar{t}/s$	$\bar{E}/(kW \cdot s)$	$\bar{T}/s$	$\bar{t}/s$	$\bar{E}/(kW \cdot s)$	$\bar{T}/s$	$\bar{t}/s$	$\bar{E}/(kW \cdot s)$	$\bar{T}/s$
1	7×3×4	2.84	4 710.20	791.5	2.93	4 706.50	788.0	2.45	4 708.81	784.0
2	6×3×3	1.95	4 006.33	697.8	1.96	4 010.20	696.7	1.57	4 002.01	685.6
3	7×4×4	2.27	18 330.27	912.1	2.31	18 392.67	899.6	1.94	18 251.52	890.6
4	9×3×6	3.63	17 416.79	884.6	3.82	17 522.50	900.2	2.75	17 077.19	867.6
5	5×5×3	1.30	17 402.25	1 025.4	1.37	17 500.66	1 026.3	1.24	17 429.45	1 021.5
6	8×3×4	2.03	5 197.11	799.2	2.25	5 182.22	780.1	1.85	5 044.09	776.5
7	10×4×5	4.06	25 401.10	1 105.6	3.98	25 321.88	1 094.5	2.58	25 323.08	1 044.3
8	10×3×6	3.85	17 669.73	952.2	4.02	17 620.48	961.4	2.97	17 394.31	932.7
9	16×8×11	4.67	51 360.90	2 449.0	4.86	46 449.11	2 268.0	4.48	47 223.23	2 217.4
10	35×16×19	13.21	329 011.78	6 100.9	15.02	338 142.02	6 271.4	13.73	320 370.93	6 023.5
11	22×10×15	8.08	104 560.62	3 613.8	7.89	101 952.44	3 557.7	7.25	101 468.39	3 514.9

注:  $t$ 为算法运行时间;  $E$ 为车间最小总能耗平均值;  $T$ 为生产所用最小化最大完工时间; 算例1~6为小规模算例; 算例7~9为中规模算例; 算例10、11为大规模算例。

表2 加工功率  
Table 2 Processing power

工件	kW													
	工序1				工序2				工序3					
	设备1		设备2		设备3		设备4		设备5		设备6		设备7	
	$P_{in}$	$P_{nl}$	$P_{in}$	$P_{nl}$	$P_{in}$	$P_{nl}$	$P_{in}$	$P_{nl}$	$P_{in}$	$P_{nl}$	$P_{in}$	$P_{nl}$	$P_{in}$	$P_{nl}$
1	2.7	1.7	4.5	3.0	2.7	1.8	3.8	2.6	4.1	3.0	4.5	3.3	4.5	3.0
2	3.2	1.8	3.9	3.5	3.5	2.0	3.7	2.3	4.1	3.3	4.4	3.5	4.2	2.8
3	3.2	1.7	4.3	3.1	2.9	2.0	4.0	2.6	5.1	3.2	4.7	3.4	4.8	3.1
4	2.8	1.9	4.6	3.2	3.5	1.9	3.8	2.5	4.1	3.2	4.8	3.2	4.1	3.0
5	2.8	1.6	4.5	3.0	3.5	1.9	3.9	2.4	4.3	3.2	5.6	3.2	4.0	3.1
6	2.9	1.8	4.8	3.4	3.2	2.0	3.7	2.4	4.7	3.0	4.9	3.2	4.7	2.9
7	3.0	1.6	4.7	3.6	3.4	1.7	3.9	2.5	4.3	3.0	5.0	3.4	4.8	3.0
8	3.1	1.7	4.7	3.2	2.9	1.9	4.5	2.4	4.5	3.3	5.3	3.3	4.7	3.1
$P_w$	1.1		1.6		1.4		2.0		2.1		2.5		2.0	

表3 设备加工时间  
Table 3 Equipment processing time

工件	s													
	工序1				工序2				工序3					
	设备1		设备2		设备3		设备4		设备5		设备6		设备7	
1	44	60	37	34	43	42	40							
2	47	48	35	34	44	41	42							
3	47	46	30	28	42	42	42							
4	52	49	35	34	44	44	43							
5	45	43	32	31	39	39	39							
6	52	49	35	34	43	36	42							
7	60	59	43	41	53	50	51							
8	50	47	37	36	44	38	42							

表4 加工设备开关机数据  
Table 4 Processing equipment switch machine data

开关机数据	工序1		工序2		工序3		
	设备1	设备2	设备3	设备4	设备5	设备6	设备7
开机时长/s	180	120	180	120	180	120	180
关机时长/s	60	60	180	60	120	120	60
开机能耗/(kW·s)	86 400	82 800	90 000	79 200	86 400	79 200	90 000
关机能耗/(kW·s)	10 800	25 200	21 600	14 400	14 400	10 800	21 600

表5 AGV移动时间  
Table 5 AGV movement time s

缓冲区	工序2		工序3		
	设备3	设备4	设备5	设备6	设备7
设备1后置缓冲区	80	100	0	0	0
设备2后置缓冲区	100	80	0	0	0
设备3后置缓冲区	0	0	80	60	40
设备4后置缓冲区	0	0	100	60	40

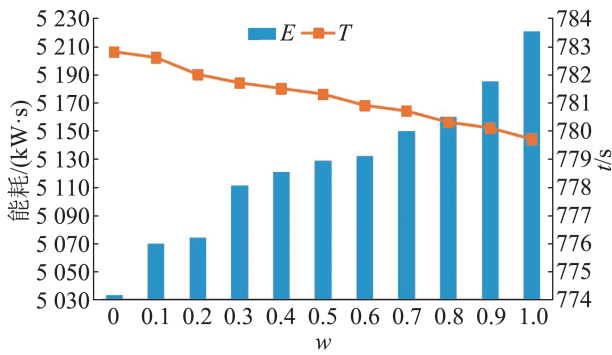


图5  $C^*=4$ 时能耗与时间变化  
Fig. 5 Energy consumption and time change at  $C^* = 4$

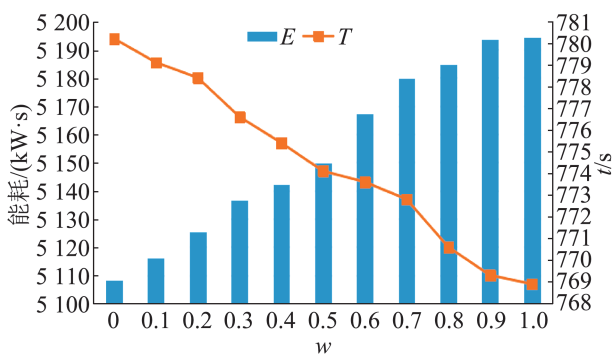


图6  $C^*=5$ 时能耗与时间变化示意图  
Fig. 6 Energy consumption and time change at  $C^* = 5$

在调度方案中完工时长和车间总能耗不能同时达到最优, 随着最大完工时间的减少, 车间总能耗呈增加趋势。考虑到企业的实际需求不同,

针对该案例在缓冲区容量可调整为4或5的情况下给出偏向高效和低能耗的2种方案。每种调度方案是通过狮群算法重复计算时所得目标值最小的方案。当 $C^k=5$ 且 $w=1$ 时, 最大完工时间最短, 为762 s, 耗电为5 138.1 kW·s, 其调度方案如图7所示, 只比低能耗方案多排放177.8 kW·s;  $C^k=4$ 且 $w=0$ 时能耗最低, 为4 960.3 kW·s, 其完工时间为782 s, 仅比高效型完工时间延长了20 s, 方案对应甘特图如图8所示。

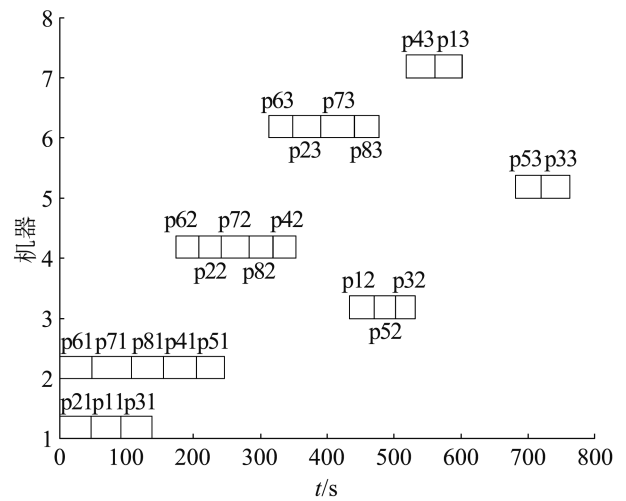


图7 用时最小调度方案  
Fig. 7 Minimum-time scheduling scheme

不同的调度方案虽然侧重不同, 总体来看均在一定程度上能考虑到时间、能耗2个调度目标的协调。在实际生产过程中, 交货期宽裕时可通过适当调节权重, 实现节能减排, 也可以在空间允许的情况下通过调节缓冲区容量, 达到既节省时间又节约能耗的目的。

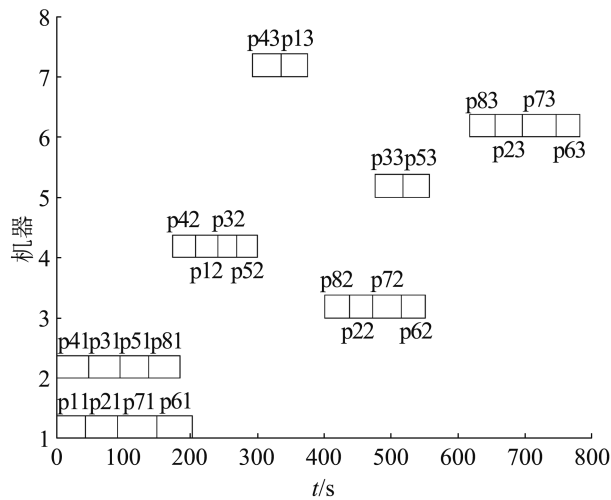


图8 耗能最少调度方案

Fig. 8 Minimum energy consumption scheduling scheme

## 4 结论

本文使用LSO算法求解考虑车间能耗和AGV运输的HFSP-LB，得出以下结论：

(1) 在优化完工时间的同时分析了加工时车间的直接能耗和间接能耗，引入开关机策略减少设备待机能耗，建立以最小化最大完工时间和总能耗为多目标的调度模型。通过算例实验，证明了优化模型可行并能依据不同需求偏好进行调节。

(2) 在算法设计方面，用LSO算法求解上述模型。针对问题特点使用新的种群初始化方案，在保证算法可行的基础上提高了优化质量和速度。通过11组对比实验验证了狮群算法相较于其他传统算法在求解HFSP-LB时的优越性。

(3) 针对案例中的生产问题，通过调整模型参数提出偏向高效和低能耗的2种调度方案，并得出缓冲区容量的增加对总加工时间的优化存在正向影响的结论。

在处理大规模HFSP-LB时，本文改进的LSO算法的运算效率仍有待提升，今后将针对此问题进一步改进LSO算法。另外，实际生产过程中，紧急插单、机器故障等突发状况会干扰调度方案的执行，影响车间的总能耗和完工时间。因此综合考虑这类动态因素将是下一步的研究重点。

## 参考文献：

- [1] 罗焕, 陈浩杰, 宋小欣, 等. 带有缓存约束的作业车间调度求解方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(10): 2880-2888.  
Luo Huan, Chen Haojie, Song Xiaoxin, et al. Job Shop Scheduling with Buffer Constraint[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(10): 2880-2888.
- [2] Czeslaw Smutnicki. A Two-machine Permutation Flow Shop Scheduling Problem with Buffers[J]. Operations-Research-Spektrum, 1998, 20(4): 229-235.
- [3] Wang Xianpeng, Tang Lixin. A Tabu Search Heuristic for the Hybrid Flowshop Scheduling with Finite Intermediate Buffers[J]. Computers and Operations Research, 2009, 36(3): 907-918.
- [4] Sina Hakimzadeh Abyaneh, Zandieh M. Bi-objective Hybrid Flow Shop Scheduling with Sequence-dependent Setup Times and Limited Buffers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(1): 309-325.
- [5] 袁庆欣, 董绍华. 带有限缓冲区的混合流水车间多目标调度[J]. 工程科学学报, 2021, 43(11): 1491-1498.  
Yuan Qingxin, Dong Shaohua. Optimizing Multi-objective Scheduling Problem of Hybrid Flow Shop with Limited Buffer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(11): 1491-1498.
- [6] 李勃昕, 任赞, 韩先锋. "双碳"挤压、经济增长与创新驱动[J]. 科学学研究, 2023, 41(3): 424-434.  
Li Boxin, Ren Yun, Han Xianfeng. "Dual-Carbon" Restriction, Economic Growth and Innovation Driving[J]. Studies in Science of Science, 2023, 41(3): 424-434.
- [7] 王凌, 王晶晶, 吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 385-391.  
Wang Ling, Wang Jingjing, Wu Chuge. Advances in Green Shop Scheduling and Optimization[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 385-391.
- [8] Meng Leilei, Zhang Chaoyong, Shao Xinyu, et al. MILP Models for Energy-aware Flexible Job Shop Scheduling Problem[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 710-723.
- [9] Mouzon G, Yildirim M B, Twomey J. Operational Methods for Minimization of Energy Consumption of Manufacturing Equipment[J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(18/19): 4247-4271.
- [10] 李聪波, 雷焱绯, 肖溱鹤, 等. 面向广义能耗的柔性作业车间调度优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(12): 3050-3059.  
Li Congbo, Lei Yanfei, Xiao Qinge, et al. Flexible Job

- Shop Scheduling Optimization Model for Generalized Energy[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(12): 3050-3059.
- [11] Lu Yi, Lu Jiacheng, Jiang Tianhua. Energy-conscious Scheduling Problem in a Flexible Job Shop Using a Discrete Water Wave Optimization Algorithm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 101561-101574.
- [12] 耿凯峰, 叶春明. 考虑多时间因素的绿色可重入混合流水车间调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(1): 75-90.
- Geng Kaifeng, Ye Chunming. Green Re-entrant Hybrid Flow Shop Scheduling Problem Considering Multiple Time Factors[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(1): 75-90.
- [13] Fang Kan, Uhan N A, Zhao Fu, et al. Flow Shop Scheduling with Peak Power Consumption Constraints [J]. *Annals of Operations Research*, 2013, 206(1): 115-145.
- [14] 雷德明, 杨冬婧. 具有总能耗约束的柔性作业车间调度问题研究[J]. *自动化学报*, 2018, 44(11): 2083-2091.
- Lei Deming, Yang Dongjing. Research on Flexible Job Shop Scheduling Problem with Total Energy Consumption Constraint[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 2083-2091.
- [15] 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 Shops Based on NSGA-II Under TOU Power Price[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(5): 576-585.
- [16] 张洪亮, 徐公杰, 鲍蕾, 等. 考虑运输时间的分布式柔性作业车间绿色调度[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(21): 2554-2563, 2645.
- Zhang Hongliang, Xu Gongjie, Bao Qiang, et al. Distributed Flexible Job Shop Green Scheduling with Transportation Time[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(21): 2554-2563, 2645.
- [17] Li Junqing, Pan Quanke. Solving the Large-scale Hybrid Flow Shop Scheduling Problem with Limited Buffers by a Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm[J]. *Information Sciences*, 2015, 316: 487-502.
- [18] 吴斌, 丁钰超, Abla B. 自动导引车与机器集成调度问题研究现状[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(6): 1-12.
- Wu Bin, Ding Yuchao, Abla B. Research Status of AGV and Machine Integrated Scheduling[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(6): 1-12.
- [19] 顾佰和, 谭显春, 谭显波, 等. 制造系统生产单元碳排放核算模型[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(10): 123-131.
- Gu Baihe, Tan Xianchun, Tan Xianbo, et al. Study on the Production Unit's Carbon Emission Accounting Model in the Manufacturing System[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(10): 123-131.
- [20] 何晨可, 朱继忠, 刘云, 等. 计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(1): 92-111.
- He Chenke, Zhu Jizhong, Liu Yun, et al. Coordinated Planning of Electric Vehicle Charging-swapping-storage Integrated Station and Active Distribution Network Considering Carbon Reduction[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(1): 92-111.
- [21] Zhao Feixiang, Liu Mingzhe, Wang Kun, et al. A Soft Measurement Approach of Wastewater Treatment Process by Lion Swarm Optimizer-based Extreme Learning Machine[J]. *Measurement*, 2021, 179: 109322.
- [22] 神显豪, 马雪皎, 牛少华, 等. 基于改进狮群算法的管道传感器网络覆盖优化[J]. *传感技术学报*, 2022, 35(9): 1268-1276.
- Shen Xianhao, Ma Xuejiao, Niu Shaohua, et al. Coverage Optimization of Pipeline Sensor Networks Based on Improved Lion Swarm Optimization[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(9): 1268-1276.
- [23] 黄智, 刘永超, 邓涛, 等. 一种五轴数控机床热误差建模方法[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(13): 1529-1538.
- Huang Zhi, Liu Yongchao, Deng Tao, et al. A Method for Thermal Error Modeling of FAMT[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(13): 1529-1538.
- [24] 刘生建, 杨艳, 周永权. 一种群体智能算法——狮群算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2018, 31(5): 431-441.
- Liu Shengjian, Yang Yan, Zhou Yongquan. A Swarm Intelligence Algorithm-lion Swarm Optimization[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, 31(5): 431-441.
- [25] 吕海利, 孙佳祺, 吴姝. 考虑机器能耗的绿色作业车间调度问题[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(12): 220-225.
- Lü Haili, Sun Jiaqi, Wu Shu. Green Job Shop Scheduling Problem Considering Machine Energy Consumption[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(12): 220-225.
- [26] 牟健慧, 段培永, 高亮, 等. 基于混合遗传算法求解分布式流水车间逆调度问题[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(6): 295-308.
- Mu Jianhui, Duan Peiyong, Gao Liang, et al. Hybrid Genetic Algorithm for Distributed Flow Shop Inverse Scheduling Problem[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(6): 295-308.
- [27] 鲁建厦, 金敬豪, 赵文彬, 等. 基于候鸟算法的批量混



合装配流水车间调度[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(11): 2135-2144.

Lu Jiansha, Jin Jinghao, Zhao Wenbin, et al. Lot Streaming Hybrid Assembly Flow Shop Scheduling on Migratory Bird Algorithm[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2022, 56(11): 2135-2144.

[28] 胡蓉, 董钰明, 钱斌. 基于探路者算法的绿色有限缓冲区流水线调度[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1384-1396.

Hu Rong, Dong Yuming, Qian Bin. Pathfinder Algorithm for Green Pipeline Scheduling with Limited Buffers[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1384-1396.