

考虑工人移动的多人共站双边拆卸线平衡问题的建模与优化

脱 阳 张则强* 谢心澜 宋昊轩
西南交通大学机械工程学院,成都,610031

摘要:工人移动的多人共站双边拆卸是拆卸线处理具有多属性大型产品的理想选择,因此提出一个工人移动的多人共站双边拆卸线平衡问题。以最小化的组合工作站数、高级工人数、空闲时间和疲劳指数为目标构建数学模型,并提出一种含有激励策略的樽海鞘群差分混合算法来解决拆卸线平衡问题。大规模案例验证了算法性能。所提模型与算法应用至某废旧汽车拆卸案例能得到可供企业灵活选择的多个分配方案。

关键词:工人移动;双边拆卸线;樽海鞘群差分算法;激励策略

中图分类号:TH165;TP301.6

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Modeling and Optimization of Multimanned Two-sided Disassembly Line Balancing Problems for Walking Workers

TUO Yang ZHANG Zeqiang* XIE Xinlan SONG Haoxuan

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031

Abstract: The multimanned two-sided disassembly with walking workers was an ideal choice for processing large products with multiple attributes in disassembly line. So, a multimanned two-sided disassembly of walking workers line balancing problem was proposed. A mathematical model was built with the goal of minimizing the number of multimanned workstations, senior workers, idle time, and fatigue index. In addition, a salp swarm-differential evolution algorithm with incentive strategy was proposed to solve the disassembly line balancing problem. The algorithm performance was validated by using large-scale cases. The proposed model and algorithm were applied to a used car dismantling case, and multiple allocation schemes were obtained for enterprises to flexibly choose from.

Key words: walking worker; two-sided disassembly line; salp swarm-differential evolution algorithm; incentive strategy

0 引言

拆卸是绿色制造的重要环节,在减少废弃物排放的同时有助于减少对原材料的需求,但效率低下。许多学者在寻找高效拆卸方式的过程中发现拆卸生产线是一种有效的解决方案。GUNGOR等^[1]提出了拆卸线平衡问题(disassembly line balancing problem, DLBP),即在保证生产线平稳高效的前提下平衡每个工人的工作量,使每个工人的任务负荷尽量均衡。现实中,平衡优化

后得到的最优分配方案对拆解企业非常重要。

随着技术发展,拆卸线出现了多种布局形式:直线拆卸线中,待拆卸产品仅在线路的一侧拆卸,布局简单且操作方便^[2-3];U形拆卸线将拆卸传动装置沿逆时针方向按U形布置,工人可处理出口区和入口区的拆卸任务^[4-5];并行拆卸线是平行使用多条直线拆卸线,工人可在站内转动来拆卸前后侧产线的产品^[6];双边拆卸线允许工人在线路两侧工作,更方便拆卸具有对称结构的大型废旧产品^[7]。为提高工作站的拆卸效率,CEVIKAN等^[8]通过学习多人共站装配线提出了多人共站DLBP;YIN等^[9]考虑废品的报废状态和工人的技能差异,建立了多人共站部分拆卸线DLBP。双边拆卸布局下,多人共站的拆卸模式能进一步提高拆卸对称结构大型废旧产品的效率,因此本

收稿日期:2023-05-06

基金项目:国家自然科学基金(52375268,52342505,72401239);教育部人文社会科学研究规划基金(23YJA630139);河北省自然科学基金(E2024105031);四川省自然科学基金(2024NSFSC1048);中央高校基本科研业务费专项资金(2682023CX009)。

文将多人共站模式与双边拆卸布局进行结合研究。

大多数企业拆卸线的工作站为开放式工作站,工作站中的部分工人移动不受限制,故可以设计一种考虑工人移动的拆卸线,即部分工人可在不违反优先级和循环时间限制的情况下执行分配给不同工位的任务。

简单 DLBP 的优化目标主要包括站点数量和工作负载平滑度^[10]。拆卸模型从单人单站扩展到多人共站时,工人的数量对拆卸线成本的影响变大,为最大化拆卸利润,应尽可能降低工人成本。根据《废弃车辆回收管理办法》的规定,废弃车辆回收单位可对拆卸下来的部分零部件和材料进行加工、修复和再生等处理,实现资源的最大化利用和环境的最小化影响,即回收废旧汽车的有价值零部件不进行破坏拆卸,而保留其功能并进行加工和修复。高级工人技能全面,能对有价值零部件不进行破坏拆卸,但有更高的雇佣成本,因此将高级工人数量作为优化目标可减少雇佣成本。此外,拆卸疲劳任务会导致工人身体疲惫,因此希望每个工人拆卸疲劳任务的数量尽可能均衡,即每个工人拆卸的疲劳任务尽可能的少,应考虑工人疲劳指标,均衡每个工人的拆卸疲劳任务数^[11]。因此,在分配任务时,必须尽可能平衡工作量,最大限度地降低工人成本和拆卸疲劳^[12]。

DLBP 是一个 NP 完全问题,随着问题规模的增大,其计算时间呈指数级增长。现有的 DLBP 求解方法包括精确方法、启发式和元启发式方法^[13]。启发式方法可获得小规模问题的最优或接近最优解。精确方法在可接受的时间范围内获得小规模 DLBP 令人满意的解,但不适用于大规模问题。元启发式方法,如蚁群优化^[14]、智能水滴^[15]已被广泛用于求解 DLBP。樽海鞘群算法^[16](salp swarm algorithm, SSA)对于离散问题的处理具有优越性,但算法寻优能力不足,为此加入激励策略来让 SSA 更快得到最优解,从而提出一种含有激励策略的樽海鞘群差分混合算法(salp swarm-differential evolution algorithm with incentive strategy, SSA-DE)。

笔者将多人共站和双边布局结合,并考虑工人移动,以最小化的组合工作站数、高级工人数、工人均衡空闲时间指标和疲劳指标为目标建立工人移动的多人共站双边拆卸线平衡问题 MTWW-DLBP 模型,根据问题特点构建多目标离散 SSA-DE 算法。通过汽车拆卸实例验证所提模型的有效性及其算法性能的优越性。

1 工人移动的多人共站双边拆卸线平衡问题

1.1 问题描述

如图 1 所示,MTWW-DLBP 具有如下特征:①待拆卸的一个产品从传送带输入端进入,根据节拍时间依次在各个组合工作站停留,工作站根据分配的拆卸任务对产品进行拆卸。②一个工作站可容纳多个工人。以拆卸线移动方向为标准,组合工作站 1 左右两侧均有 2 个工人,组合工作站 2 右侧只有 1 个工人。③工人有差异,只有高级工人可在工作站之间移动,如组合工作站 1 左侧的高级工人可从工作站 1 移动到工作站 2 帮助拆卸,但只能在拆卸线左侧移动。

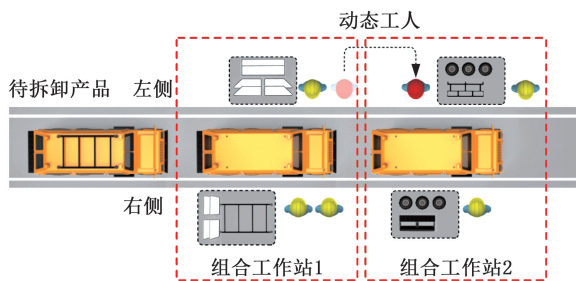


图 1 工人移动的多人共站双边拆卸线示意图

Fig.1 Multimanned two-sided disassembly line of walking workers

每个拆卸任务具有价值属性和疲劳属性。具有价值属性的任务不可采用破坏拆卸,而普通工人因技能不足无法拆卸,故价值任务只能交给高级工人完成。疲劳属性指的是拆卸会导致工人出现肌肉疲劳,所有工人均可完成疲劳任务。图 2 为 10 任务优先关系图,圆内数字为拆卸任务编号,红色圆表示价值任务,蓝色圆表示疲劳任务,紫色圆表示同时具有价值属性和疲劳属性的任务,拆卸方向用箭线标出;圆上的 L 表示拆卸方向为左,R 表示拆卸方向为右,圆上无字母表示两侧都可拆卸。任务 8 必须在任务 4、7 完成后才可开始,任务 7 必须在任务 5、6 完成后才可开始。

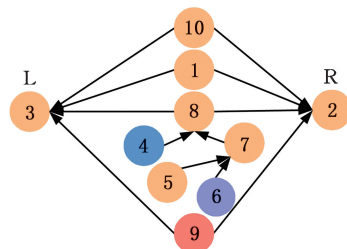


图 2 10 任务优先关系图

Fig.2 10 task priority diagram

1.2 数学模型

MTWW-DLBP 数学模型具有以下假设:

①每个工作站最大工人数已知,且每个工人执行不同任务时互不干扰;②拆卸供给无限量,且拆卸过程中不中断;③产品完整,各个任务必须执行拆卸操作;④拆卸任务信息已知;⑤不考虑其他突发因素影响。

1.2.1 符号说明

TDWMM-DLBP 数学模型参数及含义见表 1。

表 1 TDWMM-DLB 的数学模型参数

Tab.1 Mathematical model parameters of TDWMM-DLB

参数	含义
i, j, h, b	拆卸任务编号
m, p	工作站编号
k, n	工人编号
I	拆卸任务数量
d_i	若任务 i 具有疲劳属性, $d_i = 1$, 否则 $d_i = 0$
v_i	若任务 i 具有价值属性, $v_i = 1$, 否则 $v_i = 0$
M	组合工作站数量
W_m	表示第 m 个工作站的状态, 若开启, 则 $W_m = 1$, 否则, $W_m = 0$
G_{\max}	同时在一个工作站工作的最大工人数
G	工人数量
g_k	工人 k 为普通工人, $g_k = 0$; 工人 k 为高级工人, $g_k = 1$
L_i	若任务 i 只能在左侧拆卸, $L_i = 1$, 否则 $L_i = 0$
R_i	若任务 i 只能在右侧拆卸, $R_i = 1$, 否则 $R_i = 0$
o	表示位置, $o = 1$ 表示在拆卸线左侧, $o = 2$ 表示在拆卸线右侧
x_{imo}	若任务 i 分配至拆卸线 o 侧的第 m 个组合工作站, 则 $x_{imo} = 1$, 否则 $x_{imo} = 0$
y_{ik}	若任务 i 分配给 k 工人, 则 $y_{ik} = 1$, 否则 $y_{ik} = 0$ 。
y_{ijmo}	任务 i, j 皆分配至拆卸线 o 侧的第 m 个组合工作站时, 若任务 i 先于 j 分配至该工作站, 则 $y_{ijmo} = 1$, 否则 $y_{ijmo} = 0$
q_{ijmk}	若任务 i 和 j 分配给工作站 m 的工人 k 且任务 i 先分配, 则 $q_{ijmk} = 1$, 否则 $q_{ijmk} = 0$
t_i	拆卸任务 i 的时间
z_{km}	若工人 k 在工作站 m , 则 $z_{km} = 1$, 否则 $z_{km} = 0$
C_T	节拍时间
t_{wt}	工人跨站走动时间
l_{nmi}	工人 n 在工作站 m 执行任务 i 的次序
s_i	任务 i 的开始时间, 以任务 i 所在工作站开始时间及任务 i 之前工作站的时间总和为度量
e_i	任务 i 的结束时间, 以任务 i 所在工作站结束时间及任务 i 之前工作站的时间总和为度量
F_{imm}	工作站 m 的工人 n 完成任务 i 最后的结束时间, 以任务 i 所在工作站结束时间及任务 i 之前工作站的时间总和为度量
S_{hnp}	工作站 p 的工人 n 完成任务 h 的开始时间, 以任务 h 所在工作站结束时间及任务 h 之前工作站的时间总和为度量
A_{ij}	表示任务优先关系, 若任务 j 是任务 i 的紧前拆卸任务, 则 $A_{ij} = 1$, 否则 $A_{ij} = 0$

1.2.2 目标函数

最小化工作站数 f_1 、最小化工人空闲均衡指标 f_2 、最小化高级工人数量 f_3 、每个工人拆卸疲

劳任务的均匀数量 f_4 分别为

$$f_1 = \min \sum_{m=1}^M W_m \tag{1}$$

$$f_2 = \min \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^G \sum_{o=1,2}^I (z_{km} C_T - \sum_{i=1}^I y_{ik} t_i)^2 \tag{2}$$

$$f_3 = \min \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^G z_{km} g_k \tag{3}$$

$$f_4 = \min \sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^I y_{ik}^2 d_i \tag{4}$$

最小化高级工人数量能降低企业的用工成本, 任务数量平均的目的是每个工人不要在一个 C_T 内承担过多的任务, 让肌肉疲劳得到恢复。

1.2.3 约束条件

任务分配约束如下:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{o=1,2} x_{imo} = 1 \tag{5}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{o=1,2} x_{hmo} v_i = 1 \tag{6}$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1 \tag{7}$$

$$\sum_{i \in I} y_{ik} \leq I \tag{8}$$

$$\sum_{m=1}^M x_{im1} L_i = 1 \tag{9}$$

$$\sum_{m=1}^M x_{im2} R_i = 1 \tag{10}$$

式(5)、式(6)约束拆卸任务集中的任务和价值, 拆卸任务集中的任务只能分配至一个工作站; 式(7)表示 1 个任务只能由 1 个工人完成; 式(8)约束工人可移动的最大工作站数; 式(9)表示左侧进行的拆卸任务只能分配至拆卸线左侧; 式(10)表示右侧的拆卸任务只能分配至拆卸线右侧。

节拍约束为

$$\sum_{i=1}^I t_i y_{ik} \leq C_T \tag{11}$$

$$C_T (\sum_{m=1}^M m x_{im} - 1) \leq s_i \tag{12}$$

$$e_i \leq C_T \sum_{m=1}^M m x_{im} \tag{13}$$

式(11)表示单个工人拆卸的总时长不超过 C_T ; 式(12)、式(13)约束任务 i 在 C_T 时间内分配。

优先关系约束为

$$s_i \geq e_h + t_h \quad \forall i, h \in \{i, h \mid A_{ih} = 1\} \tag{14}$$

$$\left. \begin{aligned} x_{imo} + x_{jmo} &\leq 1 + (y_{ijmo} + y_{jimo}) \\ (x_{imo} + x_{jmo})/2 &\geq y_{ijmo} + y_{jimo} \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

式(14)表示, 若 h 是 i 的紧前任务, 则任务 i 必须等任务 h 完成才能开始; 式(15)表示站内拆卸任务的相对关系。

工位约束为

$$W_{m-1} \geq W_m \quad \forall m = 2, 3, \dots, M \quad (16)$$

$$\left[\frac{1}{C_T} \sum_{i=1}^I t_i \right] \leq \sum_{m=1}^M W_m \leq I \quad (17)$$

式(16)对工位连续开启进行约束;式(17)为开启工作站数量约束。

工人分配约束为

$$s_j + I(1 - q_{ijmk}) \geq e_i \quad i \neq j \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} t_{wt}(p-m) + F_{im} - C_T \left(\sum_{m=1}^M mx_{im} - 1 \right) &\leq \\ S_{hnp} - C_T \left(\sum_{m=1}^M mx_{hp} - 1 \right) & \\ F_{hnp} - C_T \left(\sum_{m=1}^M mx_{hp} - 1 \right) + t_{wt}(p-m) &\leq \\ S_{jnm} - C_T \left(\sum_{m=1}^M mx_{im} - 1 \right) & \\ m = 1, 2, \dots, p-1 & \\ i, j = 1, 2, \dots, h-1 \text{ 且 } i < j & \\ t_h < t_j - t_i & \\ 1 < l_{nmj} = l_{nmi} + 1 < \sum_{b=1}^I y_{bn} & \\ \forall h = 1, 2, \dots, I_v \quad m, p = 1, 2, \dots, M & \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式(18)表示分配给工人的较晚任务 j 的开始时间应晚于该工人较早任务 i 的结束时间;式(19)表示只有高级工人可以走动。

2 混合樽海鞘群差分算法

2.1 激励策略的离散樽海鞘群算法

SSA-DE 算法使用不同的遗传(交叉、变异、交换)算子处理离散问题。SSA-DE 混合算法包括 5 个部分:编码、解码、领导者位置更新、跟随者位置更新、激励策略。

2.1.1 编码解码

基于任务的编码方式将每个拆卸任务与一个编号对应。为确定拆卸任务之间的优先关系,引入优先由 0 和 1 组成的关系矩阵:

$$Y = \begin{matrix} \text{任务} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

若矩阵 Y 某列的所有元素都是 0, 则说明该列位置对应的任务没有紧前任务;若该列某个元素是 1, 则说明该任务有紧前任务, 数字 1 所在的行数就

是紧前任务的编号。任务分配时, 选择没有紧前任务的任务进行分配。任务分配到工作站后, 需要解除该任务的紧前紧后关系约束, 即先将该任务所在列的所有元素改为 1(表示该任务已被分配到工作站), 再将该任务所在行的所有元素都改为 0(表示与该任务相关的约束关系已被解除), 最后重新随机选择下一个任务进行分配。这种方式可有效解决拆卸任务之间的优先关系, 并实现任务的分配和约束的解除。

解码过程分为两个阶段: 第一阶段将所有的任务分配至工作站, 第二阶段给价值任务分配工人。第一阶段解码具体步骤如下:

1) 令 $i = 1$ 。

2) 判断任务 i 的位置, 按照位置分配至对应工作站。若任务 i 在组合工作站两侧均可完成, 则判断两侧开启工作站数量, 选择工作站数量较小侧的第一个工作站进行拆卸; 若工作站数量相同, 则选择剩余时间多侧的第一个工作站进行拆卸。

3) 确定任务 i 在该工作站的起始时刻 W_{ST} 和结束时刻 W_{FT} 。判断紧前任务是否对任务分配有影响, 若有影响, 则转至步骤 4), 没有则转至步骤 5)。

4) 确定任务 i 在该工作站的实际起始时刻 W_{RST} , 并令任务的开始时刻为 W_{RST} 。

5) 若当前工作站内的剩余时间 $R_T > C_T - W_{ST}$, 则更新站内 R_T , 并将任务分配至工作站; 若 $R_T < C_T - W_{ST}$, 则开启新的工作站并令 $m \leftarrow m + 1, R_T = C_T$ 。

6) 令 $i \leftarrow i + 1$, 若 $i \leq I$, 转至步骤 2), 若 $i > I$, 则结束循环。

第二阶段解码流程如下:

1) 价值任务总数为 I_v , 令 $j = 1$ 。找到所有价值任务所在工作站, 在任务 j 所在工作站加入高级工人 k 。该工作站内所有价值任务都由高级工人 k 完成, 记录工人的工作时间区间 $worktime$ 和空闲时间区间 $freetime, j \leftarrow j + 1$ 。

2) 判断任务 j 是否可由别的高级工人走动完成。若工作站 m 的损坏任务 j 无法由工作站 $m - 1$ 内的工人 k 完成, 执行步骤 3), 否则执行步骤 4)。

3) 新加入的高级工人 n 完成价值任务 j 。记录高级工人 n 的 $worktime$ 和 $freetime$, 转至步骤 7)。

4) 判断工作站 m 是否已有高级工人, 若有, 则执行步骤 5), 否则执行步骤 6)。

5) 工作站 m 高级工人完成任务 j 。记录高级工人的 $worktime$ 和 $freetime$, 转至步骤 7)。

6) 工人 k 移动到工作站 m 完成任务 j , 并更新工人 k 的 $worktime$ 和 $freetime$ 。

7) $j \leftarrow j + 1$ 。若 $j \leq I_v$, 转至步骤 2); 若 $j > I_v$, 则结束循环。

2.1.2 领导者位置更新

领导者主要负责扩大解空间, 使算法尽可能

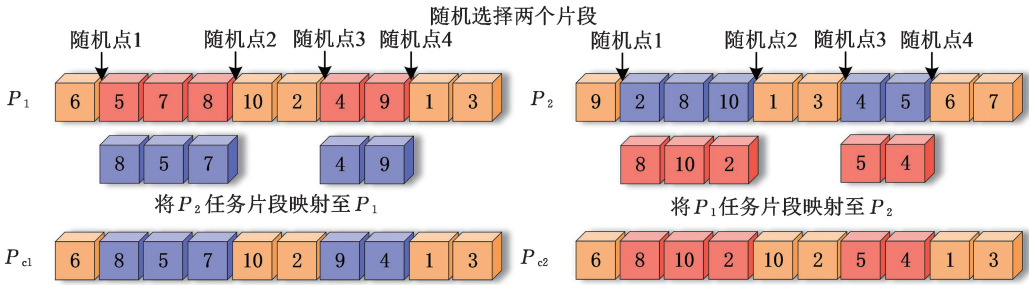


图 3 四点交叉操作

Fig.3 Four points crossover operation

2.1.3 跟随者位置更新

跟随者操作属于一种局部搜索策略, 主要负责在领导者附近寻找近似解。改进樽海鞘群算法(improved salp swarm algorithm, ISSA)的局部搜索能力较弱, 故采用差分随机搜索策略。如图 4 所示, 在所有种群中随机选择序列 P_1 、 P_2 和 P_3 , 对 P_2 和 P_3 进行差分, 将偏差向量 2 和 3 作为 P_1 序列变异点。对 P_1 序列变异点进行单点变异, 操作得到新序列 P_{n1} 、 P_{n2} 。可以预见, 随着问题规模增大, 偏差向量会大量增多, 导致种群急速扩大, 因此差分随机搜索策略具有强大的局部搜索能力。

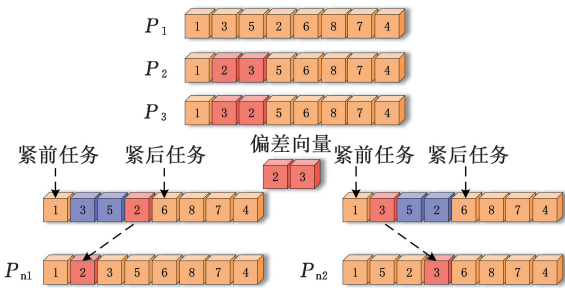


图 4 差分变异操作

Fig.4 Differential mutation operation

2.1.4 激励操作

通过四点交叉和差分随机得到的新解的 Pareto 筛选总是可以保留包含 3 个单目标最小值的解, 因此将包含 3 个单目标最小值的解和每次迭代中的非劣解集作为父代解来执行差分进化操作, 以产生更好的新解。这种父代选择方法称为激励策略, 可提高算法的全局搜索能力和收敛速度。差分进化操作与差分随机类似, 此时图 4 中

遍历解空间。四点交叉操作能有效扩大解空间, 具体操作如图 3 所示。首先分别在序列 P_1 、 P_2 随机选取 4 个点, 其中, P_1 取片段 $[5, 7, 8]$ 和 $[4, 9]$, P_2 取相同位置的片段 $[2, 8, 10]$ 和 $[4, 5]$ 。 P_1 中的片段 $[5, 7, 8]$ 和 $[4, 9]$ 在 P_2 中出现的片段为 $[8, 5, 7]$ 和 $[9, 4]$, P_2 中的片段 $[2, 8, 10]$ 和 $[4, 5]$ 在 P_1 中出现的片段为 $[8, 10, 2]$ 和 $[5, 4]$ 。将两个片段进行交换, 就可以得到新序列 P_{c1} 和 P_{c2} 。

的序列 P_1 为非劣解集单目标最优解, 序列 P_2 为四点交叉操作和差分变异操作后 Pareto 筛选得到的非劣解集中的解序列。删除序列 P_3 , 对序列 P_1 、 P_2 进行差分操作, 得到偏差向量, 再对 P_1 进行单点变异操作, 得到新解。

2.2 多目标处理方法

Pareto 解集处理多目标问题具有优越性, 因此将 Pareto 最优作为多目标处理方法。外部档案中的非劣解数量大于设定上限时, 需筛选外部档案中的所有非劣解。拥挤距离是度量解在目标空间中分布密度的指标, 可用于评估解的多样性。NSGA-II 拥挤距离机制通过计算每个解在每个目标函数上的拥挤距离对解进行排序和筛选。拥挤距离的计算方法如下: 对于按升序排列目标函数 f_s , 其中 $f_{s,i+1}$ 代表 $i+1$ 的解, $f_{s,i-1}$ 代表 $i-1$ 的解, $f_{s,j}$ 为最大值, $f_{s,1}$ 为最小值, $s \in \{1, 2, \dots, n\}$, 令 f_s 的 2 个边界解的子拥挤距离 $l_{s,1} = l_{s,N_Q} = 1$, 第 i ($i=2, 3, \dots, N_Q$; N_Q 为解的上限) 个解在第 s 个目标的子拥挤距离为 $l_{s,i}$, 则解 i 的总拥挤距离为

$$L_i = \sum_{s=1}^n l_{s,i} \tag{20}$$

$$l_{s,i} = \frac{f_{s,i+1} - f_{s,i-1}}{f_{s,j} - f_{s,1}} \tag{21}$$

SSA-DE 算法流程如图 5 所示。

3 算法验证

为验证 SSA-DE 算法的可行性与优越性, 引用拆卸线经典案例与本文所提算法进行对比。通

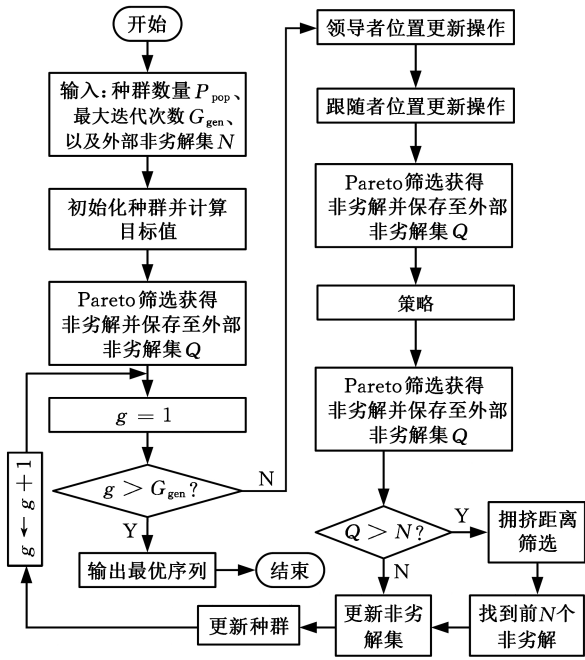


图 5 SSA-DE 流程图

Fig.5 SSA-DE flow chart

过比较拆卸线经典案例的迭代曲线来证明激励策略对 SSA-DE 算法收敛的有效性。为保证算法的时效性,对比所用结果皆引用已发表文献。算法测试实验所用的计算机 CPU 为 Intel i5-6300HQ,内存为 8GB,仿真软件为 win10 系统下的 MATLAB R2022b。

SSA-DE 算法参数只有种群规模 P_{pop} 和算法迭代次数 G_{gen} ,根据这两个参数的特点设置两因素三水平参数配置,如表 2 所示。设定大规模算例(P52)和汽车拆卸实例(45)参考点,算法在每个参数配置下运行 20 次,超体积指标(Hypervolume, H_v)的均值如表 3 所示。

表 2 正交试验水平参数表

Tab.2 Horizontal parameters of orthogonal test

水平	大规模算例		汽车拆卸实例	
	P_{pop}	G_{gen}	P_{pop}	G_{gen}
1	50	1000	50	1000
2	60	2000	60	2000
3	70	3000	70	3000

表 3 H_v 指标平均值置表

Tab.3 H_v index average values

水平	大规模算例	汽车拆卸实例
1	445.84	1.06×10^9
2	445.25	1.02×10^9
3	445.98	1.05×10^9
4	444.72	1.02×10^9
5	444.73	1.04×10^9
6	445.27	1.03×10^9
7	444.71	1.13×10^9
8	444.63	1.03×10^9
9	445.03	1.04×10^9

3.1 大规模算例验证

52 拆卸任务的大规模算例^[17]的目标函数为闲置率 F_{idel} 、负载均衡指标 F_{smooth} 、拆卸成本 F_{cost} 。根据 H_v 指标选择 $P_{pop} = 50, G_{gen} = 1000$,外部种群数量 $N = 10$,每个参数配置计算 10 次,随机选取其中一次的结果与人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[17]、遗传模拟退火算法(genetic algorithm and Simulated annealing algorithm, GASA)^[18]、蚁群遗传算法(ant colony Genetic algorithm, ACGA)^[19-20]、局部领域遗传算法(local neighborhood genetic algorithm, LNGA)^[21]和 ISSA^[22]进行对比。将所有算法得到的非劣解进行 Pareto 筛选,结果如表 4 所示,表中蓝色背景结果为 Pareto 筛选得到的非劣解。由于 F_{cost} 均为 0.0579,故将 F_{smooth}, F_{idel} 作为纵横坐标,算法对比结果如图 6 所示,可以看出,SSA-ED 的 10 个解均 Pareto 占优,SSA-ED 算法得到的 F_{smooth} 可求得最大值 1.0000, F_{idel} 可求得最小值 124.686,两者结果均优于其他算法,这

表 4 SSA-DE 与其他算法的比较结果

Tab.4 Comparison results between SSA-DE and other algorithms

算法	编号	F_{cost}	F_{smooth}	F_{idel}	算法	编号	F_{cost}	F_{smooth}	F_{idel}
GASA	1	0.0579	0.9860	133.824	LNGA	1	0.0579	0.8555	127.146
	2	0.0579	0.9873	134.286		2	0.0579	0.9699	128.178
	3	0.0579	0.9916	136.956		3	0.0579	0.9909	128.268
	4	0.0579	0.9971	141.576		4	0.0579	0.9915	128.730
	5	0.0579	0.9889	134.652		5	0.0579	0.9958	129.096
	6	0.0579	0.9908	135.114		6	0.0579	0.9986	130.734
	7	0.0579	0.9928	137.418		7	0.0579	0.9987	138.246
	8	0.0579	0.9945	137.784		8	0.0579	0.9993	139.230
	9	0.0579	0.9963	138.246		9	0.0579	0.9996	140.874
	10	0.0579	0.9974	145.722		10	0.0579	0.9999	152.232
AFSA	1	0.0579	0.9854	139.446	ACGA	1	0.0579	0.9823	142.224
	2	0.0579	0.9976	150.084		2	0.0579	0.9153	130.332
	3	0.0579	0.9951	148.788		3	0.0579	0.9234	135.648
	4	0.0579	0.9840	136.962		4	0.0579	0.9321	137.262
	5	0.0579	0.9770	130.734		5	0.0579	0.9646	140.766
	6	0.0579	0.9691	129.750		6	0.0579	0.9413	140.304
	7	0.0579	0.9777	133.224		7	0.0579	0.9761	141.924
	8	0.0579	0.9929	140.928		8	0.0579	0.9900	146.994
ISSA	1	0.0579	0.8523	127.15	SSA-DE	1	0.0579	0.6923	124.686
	2	0.0579	0.8525	127.61		2	0.0579	0.6938	124.71
	3	0.0579	0.9337	128.27		3	0.0579	0.7614	124.776
	4	0.0579	0.9342	128.73		4	0.0579	0.8207	124.8
	5	0.0579	0.9352	128.78		5	0.0579	0.8785	125.922
	6	0.0579	0.9353	129.25		6	0.0579	0.9203	126.282
	7	0.0579	0.9921	129.75		7	0.0579	0.9814	128.178
	8	0.0579	0.9978	129.91		8	0.0579	0.9998	129.75
	9	0.0579	0.9985	130.56		9	0.0579	0.9999	141.786
	10	0.0579	0.9988	130.73		10	0.0579	1.0000	155.562

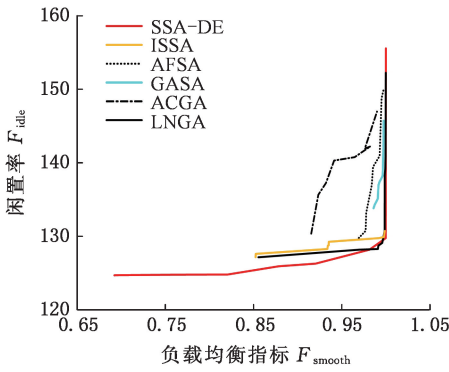


图 6 算法对比图

Fig.6 Comparison Chart of Algorithm

证明 SSA-ED 算法性能最好。

为证明激励策略的有效性,选择计算 P52 问题,在选择表 2 水平 1 参数的情况下,记录有无激励策略的 SSA-DE 算法每一代 H_v 指标,绘制 H_v 指标迭代图(图 7)。由图 7 可以看出,有激励策略 SSA-DE 算法的 H_v 曲线收敛更早,在 143 代时已基本收敛;无激励策略 SSA-DE 算法在 724 代时基本收敛。迭代 1000 次后,有激励策略 SSA-DE 算法能求解得到的 H_v 指标比没有激励策略 SSA-DE 算法大,这说明本文所提激励策略的有效性及其优越性。

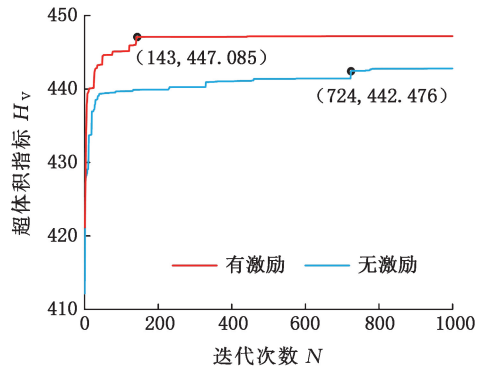


图 7 SSA-DE 的 H_v 迭代曲线

Fig.7 H_v Iteration Curves for SSA-DE

4 实例应用

本节研究了一条废旧汽车的多人共站双边拆卸线。废旧汽车的优先级关系如图 8 所示。拆卸任务与废旧汽车零件的对应关系如表 5 所示。每个工作站的最大工人数量为 2,工人跨站走动时间 $t_{wt} = 4$ s。由正交试验表设定算法参数:种群规模 $P_{pop} = 70$,迭代次数 $G_{gen} = 1000$,外部种群数量 $N = 10$ 。算法独立运行 10 次,随机选择一次结果,如表 6 所示。其中每个括号代表一个工作站,括号内数字代表工作站分配的任务。

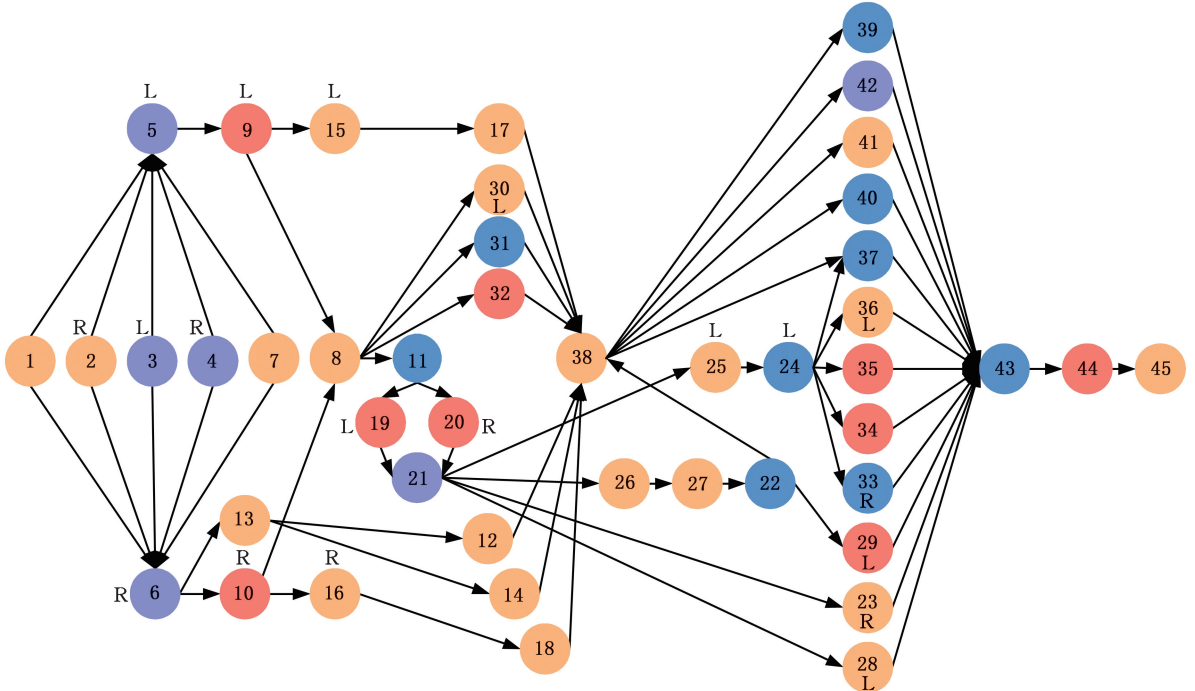


图 8 P45 优先关系图

Fig.8 P45 priority diagram

由表 6 可以看出,在算法求解得到的 10 个结果中,最小化组合工作站数 F_1 为 5,最小化高级工人数 F_2 为 4,最小化空闲均衡指标 F_3 最小为 492 828,最小化疲劳指标 F_4 为 17。方案 1 的 F_1 和 F_2 目标值最优,故选择方案 1 画出甘特图(图

9),其中,括号内数字为高级工人编号。左侧工作站中,价值任务分布在 5 个工作站内,但只需要 3 个高级工人即可完成所有价值任务;右侧工作站中,价值任务分布在工作站 1、2 内,只需 1 个高级工人通过走动即可完成所有价值任务。若不考

表 5 拆卸任务名称表

Tab.5 Name of disassembly tasks

编号	部件名称	拆卸时间/s	价值指标	疲劳指标	拆卸方向	编号	零件名称	拆卸时间/s	危害指标	疲劳指标	拆卸方向
1	安全气囊	62	0	0	0	24	仪表板	300	0	1	1
2	蓄电池	162	0	0	2	25	方向盘	105	0	0	1
3	左侧车轮	200	1	1	1	26	底部护板	60	0	0	0
4	右侧车轮	200	1	1	2	27	排气管	114	0	0	0
5	左侧车门	170	1	1	1	28	安全带总成	115	0	0	1
6	右侧车门	170	1	1	2	29	碳罐	28	1	0	1
7	引擎盖	80	0	0	0	30	散热器	112	0	0	1
8	保险杆	120	0	0	0	31	油液存储装置	344	0	1	0
9	左侧车灯	70	1	0	1	32	空气滤清器	50	1	0	0
10	右侧车灯	70	1	0	2	33	制动组件	170	0	1	2
11	后备箱盖	112	0	1	0	34	离合器踏板	52	1	0	0
12	挡风玻璃	80	0	0	0	35	加速踏板	58	1	0	0
13	雨刮器	53	0	0	0	36	空调组件	132	0	0	1
14	雨刮电机	58	0	0	0	37	转向系统	240	0	1	0
15	左侧翼子板	60	0	0	1	38	发动机舱管路	175	0	0	0
16	右侧翼子板	60	0	0	2	39	前悬架	231	0	1	0
17	左侧挡泥板	50	0	0	1	40	后悬架	234	0	1	0
18	右侧挡泥板	50	0	0	2	41	变速器	210	0	0	0
19	座椅 1	70	1	0	1	42	发动机	270	1	1	0
20	座椅 2	70	1	0	2	43	内饰组件	240	0	1	0
21	座椅 3	100	1	1	0	44	车身附件	98	1	0	0
22	油箱	118	0	1	0	45	线束	115	0	0	0
23	换挡手柄	116	0	0	2						

表 6 SSA-DE 对 P45 汽车拆卸求解结果

Tab.6 Solution results of SSA-DE for P45 vehicle disassembly

编号	F_1	F_2	F_3	F_4	分配方案
1	5	4	595 376	25	$L_1: \{7, 13, 8\} \rightarrow \{12, 15, 17, 30, 38\} \rightarrow \{25, 39, 28\} \rightarrow \{24, 36\} \rightarrow \{37, 45\}$ $L_2: \{1, 2, 14, 16\} \rightarrow \{18, 31, 11\} \rightarrow \{23, 26, 40\} \rightarrow \{27, 41, 33\} \rightarrow \{22, 43\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{32, 19\} \rightarrow \{21, 42\} \rightarrow \{34, 35\} \rightarrow \{29, 44\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{20\}$
2	5	4	492 828	23	$L_1: \{1, 7, 13, 8\} \rightarrow \{30, 15, 17, 38, 11\} \rightarrow \{25, 39, 28\} \rightarrow \{24, 36\} \rightarrow \{37, 45\}$ $L_2: \{2, 14, 16, 18\} \rightarrow \{12, 31\} \rightarrow \{23, 26, 40\} \rightarrow \{41, 27, 33\} \rightarrow \{22, 43\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{32, 19\} \rightarrow \{21, 42\} \rightarrow \{34, 35\} \rightarrow \{29, 44\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{20\}$
3	5	5	639 424	21	$L_1: \{1, 7, 13, 14, 12\} \rightarrow \{15, 17, 11, 30, 38\} \rightarrow \{25, 40, 28\} \rightarrow \{24, 36\} \rightarrow \{37, 45\}$ $L_2: \{2, 16, 18\} \rightarrow \{8, 31\} \rightarrow \{39, 23, 26\} \rightarrow \{41, 27, 33\} \rightarrow \{22, 43\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{19, 32\} \rightarrow \{34, 35\} \rightarrow \{29, 44\}$ $\{4, 6, 10\} \rightarrow \{20, 21\}$
4	6	4	766 316	21	$L_1: \{2, 15, 14\} \rightarrow \{30, 17, 12, 11\} \rightarrow \{38, 40\} \rightarrow \{25, 24\} \rightarrow \{39, 36, 41\} \rightarrow \{28, 45\}$ $L_2: \{1, 7, 13, 16, 18\} \rightarrow \{8, 31\} \rightarrow \{26, 27, 23, 22\} \rightarrow \{37, 33\} \rightarrow \{43\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{21, 32, 29\} \rightarrow \{42, 35, 34\} \rightarrow \{44\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{20\}$
5	6	4	1 005 100	19	$L_1: \{1, 7, 13, 15, 14\} \rightarrow \{30, 17, 12, 11\} \rightarrow \{38, 22, 25\} \rightarrow \{24\} \rightarrow \{39, 36, 28\} \rightarrow \{45\}$ $L_2: \{2, 16, 18\} \rightarrow \{8, 31\} \rightarrow \{26, 27, 40\} \rightarrow \{23, 37\} \rightarrow \{33, 41\} \rightarrow \{43\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{19\} \rightarrow \{21, 32, 29\} \rightarrow \{42, 35, 34\} \rightarrow \{44\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{20\}$
6	7	6	1 559 506	17	$L_1: \{1, 7\} \rightarrow \{15, 17, 13, 30\} \rightarrow \{31, 25\} \rightarrow \{40, 27\} \rightarrow \{24, 28\} \rightarrow \{37, 36\} \rightarrow \{45\}$ $L_2: \{2\} \rightarrow \{16, 18, 8, 11, 12\} \rightarrow \{14, 38, 39\} \rightarrow \{26, 41, 22\} \rightarrow \{23, 33\} \rightarrow \{43\}$ $R_1: \{4, 3\} \rightarrow \{5, 9, 32, 19\} \rightarrow \{21\} \rightarrow \{29\} \rightarrow \{35\}$ $R_2: \{6\} \rightarrow \{10, 20\} \rightarrow \{42\} \rightarrow \{34\} \rightarrow \{44\}$
7	6	5	830 128	19	$L_1: \{1, 13, 15, 17\} \rightarrow \{12, 31\} \rightarrow \{30, 39, 26\} \rightarrow \{28, 25, 24\} \rightarrow \{37, 36\} \rightarrow \{22, 45\}$ $L_2: \{7, 2, 16, 18\} \rightarrow \{14, 8, 11\} \rightarrow \{38, 40\} \rightarrow \{33, 27, 41\} \rightarrow \{23, 43\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{19, 21\} \rightarrow \{34\} \rightarrow \{42\} \rightarrow \{29, 44\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{32, 20\} \rightarrow \{35\}$
8	5	4	508 250	21	$L_1: \{2, 15, 14\} \rightarrow \{30, 17, 12, 11\} \rightarrow \{25, 27, 22, 28\} \rightarrow \{24, 41\} \rightarrow \{36, 43\}$ $L_2: \{1, 7, 13, 16, 18\} \rightarrow \{8, 31\} \rightarrow \{26, 38, 40\} \rightarrow \{39, 23, 33\} \rightarrow \{37, 45\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{19\} \rightarrow \{21, 32, 29\} \rightarrow \{35\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{20\} \rightarrow \{42, 34\} \rightarrow \{44\}$
9	6	4	724 668	19	$L_1: \{2, 15, 14\} \rightarrow \{30, 17, 12, 11\} \rightarrow \{25, 27, 22\} \rightarrow \{40, 28\} \rightarrow \{24, 41\} \rightarrow \{36, 43\}$ $L_2: \{1, 7, 13, 16, 18\} \rightarrow \{8, 31\} \rightarrow \{26, 38, 39\} \rightarrow \{33, 23\} \rightarrow \{37, 45\}$ $R_1: \{3, 5, 9\} \rightarrow \{19\} \rightarrow \{21, 32\} \rightarrow \{42, 29\} \rightarrow \{34, 35\} \rightarrow \{44\}$ $R_2: \{4, 6, 10\} \rightarrow \{20\}$
10	7	5	1 467 520	17	$L_1: \{1, 7\} \rightarrow \{8, 15, 17, 30\} \rightarrow \{38, 25, 39\} \rightarrow \{28, 24\} \rightarrow \{37, 36\} \rightarrow \{43\}$ $L_2: \{2\} \rightarrow \{13, 12, 11, 14\} \rightarrow \{31, 16, 18\} \rightarrow \{26, 40\} \rightarrow \{23, 33\} \rightarrow \{27, 22, 41\} \rightarrow \{45\}$ $R_1: \{5\} \rightarrow \{9, 19, 32\} \rightarrow \{42\} \rightarrow \{29, 35\}$ $R_2: \{3, 4\} \rightarrow \{6, 10, 20\} \rightarrow \{21\} \rightarrow \{34\} \rightarrow \{44\}$

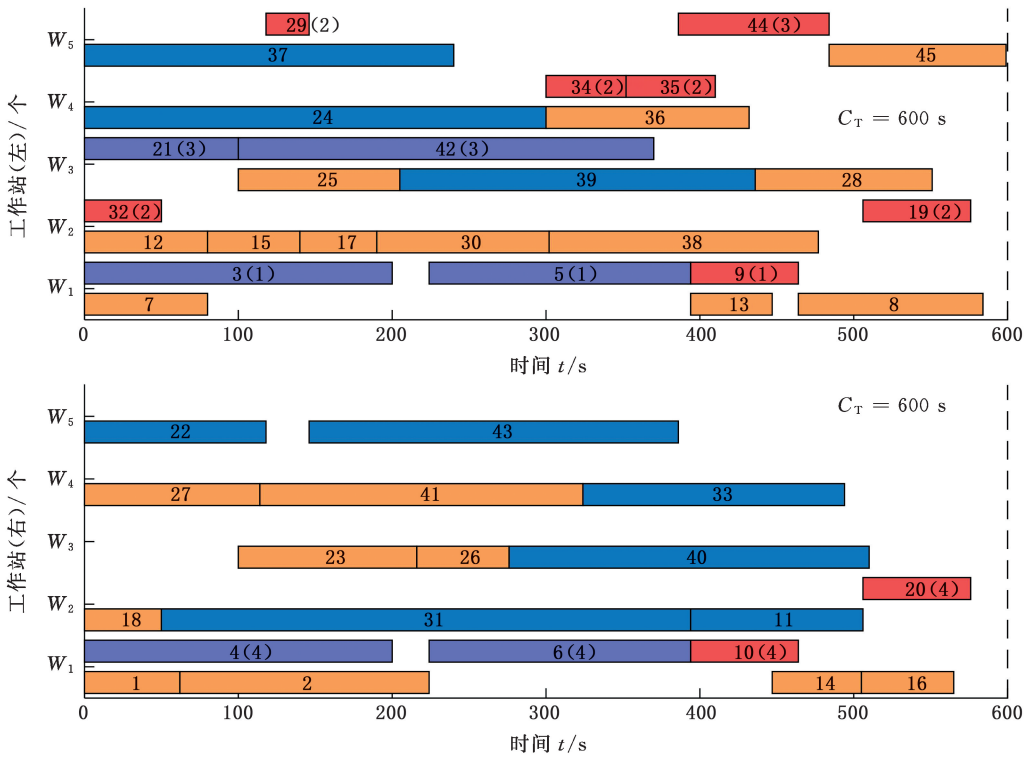


图9 拆卸方案1甘特图

Fig.9 Gantt Chart of Disassembly Scheme 1

考虑工人走动,方案1高级工人数量增至7,工人空闲均衡指标增至1486516,组合工作站数和疲劳指标不发生变化。这证明相较于不考虑工人移动,考虑工人移动的多人共站双边拆卸模式能减少高级工人,降低工人空闲均衡指标。分析结果发现, F_4 与 F_1 和 F_3 存在冲突,即降低工人疲劳必然导致工作站增加;任务越集中,疲劳任务分配至同一工人的概率越大。企业可根据需求选择解方案,若考虑工人成本,方案1、2、4、5、8、9为较优选择;若考虑工人疲劳,方案6、10为最佳方案。

5 结论

1)将多人共站模式与双边拆卸线结合,提出一种新的拆卸线方法来解决工人可在拆卸线移动的多人共站双边拆卸线平衡问题。

2)在有激励策略的混合樽海鞘群差分算法(SSA-DE)中,设计了针对多人共站双边拆卸线平衡问题的双层解码方法,以实现任务到工作站的分配、工人到任务的分配。差分随机操作可有效生成新的解决方案,差分进化激励策略可加快SSA-DE的收敛,混合樽海鞘群差分算法能解决多人共站双边拆卸线平衡问题和其他拆卸线平衡问题。废旧汽车实例计算得到的7组优秀解揭示了目标值之间的冲突关系,为决策者提供了Pareto最优解集。

未来的研究方向如下:①疲劳恢复时间对拆

卸的影响,即考虑不同工人的疲劳恢复;②影响拆卸线平衡问题的更多因素,如工人协作拆卸对拆卸时间的影响;③考虑多人和机器人同时位于工作站的拆卸线平衡问题。

参考文献:

- [1] GUNGOR A, GUPTA S M. A Solution Approach to the Disassembly Line Balancing Problem in the Presence of Task Failures[J]. International Journal of Production Research, 2001, 39(7):1427-1467.
- [2] WU Tengfei, ZHANG Zeqiang, YIN Tao, et al. Multi-objective Optimisation for Cell-level Disassembly of Waste Power Battery Modules in Human-machine Hybrid Mode [J]. Waste Management, 2022, 144:513-526.
- [3] KALAYCI C B, HANCILAR A, GUNGOR A, et al. Multi-objective Fuzzy Disassembly Line Balancing Using a Hybrid Discrete Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 37:672-682.
- [4] LI Zixiang, JANARDHANAN M N. Modelling and Solving Profit-oriented U-shaped Partial Disassembly Line Balancing Problem [J]. Expert Systems with Applications, 2021, 183:115431.
- [5] 张雷,耿笑荣,陶凯博,等.考虑碳排放与收益的随机并行拆卸线平衡优化[J]. 机械工程学报,2023,59(7):330-338.

ZHANG Lei, GENG Xiaorong, TAO Kaibo, et al.

- Optimization of Stochastic Parallel Disassembly Line Balancing Considering Carbon Emission and Profitability[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(7):330-338.
- [6] HEZER S, KARA Y. A Network-based Shortest Route Model for Parallel Disassembly Line Balancing Problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(6):1849-1865.
- [7] 邹宾森, 张则强, 李六柯, 等. 双边拆卸线平衡问题建模与优化[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(9):1090-1097.
- ZOU Binsen, ZHANG Zeqiang, LI Liuke, et al. Modeling and Optimization for Two-sided Disassembly Line Balancing Problems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(9):1090-1097.
- [8] CEVIKCAN E, ASLAN D, YENI F B. Disassembly Line Design with Multi-manned Workstations: a Novel Heuristic Optimisation Approach[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(3):649-670.
- [9] YIN Tao, ZHANG Zeqiang, WU Tengfei, et al. Multimanned Partial Disassembly Line Balancing Optimization Considering End-of-life States of Products and Skill Differences of Workers[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 66:107-126
- [10] WANG Kaipu, LI Xinyu, GAO Liang, et al. Modeling and Balancing for Disassembly Lines Considering Workers with Different Efficiencies [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(11):11758-11771.
- [11] YI Cannan, TANG Fan, LI K W, et al. Modeling and Validation of Fatigue and Recovery of Muscles for Manual Demolition Tasks [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(2):930.
- [12] 张则强, 郑红斌, 曾艳清, 等. 考虑人因的多目标拆卸线平衡问题建模及优化[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(6):89-96.
- ZHANG Zeqiang, ZHENG Hongbin, ZENG Yanqing, et al. Considering Human Factors for Multi-objective Disassembly Line Balancing Problem Modeling and Optimization[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(6):89-96.
- [13] 孙志峻, 潘全科, 朱剑英. 基于遗传算法的多资源作业车间智能优化调度[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(24):2104-2107.
- SUN Zhijun, PAN Quanke, ZHU Jianying. Genetic Algorithm Based Approach for Intelligent Scheduling Optimization of Multi-resources [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(24):2104-2107.
- [14] McGOVERN S M, GUPTA S M. Ant Colony Optimization for Disassembly Sequencing with Multiple Objectives[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(5):481-496.
- [15] 高博, 胡晓宇, 彭珍瑞, 等. 基于智能水滴算法的装夹规划方法[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(21):2539-2545.
- GAO Bo, HU Xiaoyu, PENG Zhenrui, et al. Setup Planning Method Based on Intelligent Water Drops Algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(21):2539-2545.
- [16] MIRJALILI S, GANDOMI A H, MIRJALILI S Z, et al. Salp Swarm Algorithm: a Bio-inspired Optimizer for Engineering Design Problems [J]. *Advances in Engineering Software*, 2017, 114:163-191.
- [17] 汪开普, 张则强, 毛丽丽, 等. 多目标拆卸线平衡问题的 Pareto 人工鱼群算法[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(2):183-190.
- WANG Kaipu, ZHANG Zeqiang, MAO Lili, et al. Pareto Artificial Fish Swarm Algorithm for Multi-objective Disassembly Line Balancing Problems[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(2):183-190.
- [18] 汪开普, 张则强, 朱立夏, 等. 多目标拆卸线平衡问题的 Pareto 遗传模拟退火算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(6):1277-1285.
- WANG Kaipu, ZHANG Zeqiang, ZHU Lixia, et al. Pareto Genetic Simulated Annealing Algorithm for Multi-objective Disassembly Line Balancing Problem[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(6):1277-1285.
- [19] 丁力平, 谭建荣, 冯毅雄, 等. 基于 Pareto 蚁群算法的拆卸线平衡多目标优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(7):1406-1413.
- DING Liping, TAN Jianrong, FENG Yixiong, et al. Multiobjective Optimization for Disassembly Line Balancing Based on Pareto Ant Colony Algorithm [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(7):1406-1413.
- [20] 张则强, 汪开普, 朱立夏, 等. 多目标 U 型拆卸线平衡问题的 Pareto 蚁群遗传算法[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(3):628-637.
- ZHANG Zeqiang, WANG Kaipu, ZHU Lixia, et al. Pareto Hybrid Ant Colony and Genetic Algorithm for Multi-objective U-shaped Disassembly Line Balancing Problem[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(3):628-637.

(10):134-138.

ZHAO Di, XU Zhen, HU Lihong, et al. Research on AR Intelligent Matching Assembly Based on Feature Recognition [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022, 380(10):134-138.

- [13] 韩周鹏, 刘永, 巴黎, 等. 基于复杂网络的三维 CAD 装配模型模块单元发掘[J]. 中国机械工程, 2022, 33(6):690-697.

HAN Zhoupeng, LIU Yong, BA Li, et al. Discovery of Modular Units for Complex Three-dimension CAD Assembly Model Based on Complex Network [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(6):690-697.

- [14] 刘凯, 赵新灿, 谭同德. 基于 STEP 和 OSG 的虚拟装配系统[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(1):262-267.

LIU Kai, ZHAO Xincan, TAN Tongde. Virtual Assembly System Based STEP and OSG[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(1):262-267.

- [15] 刘一字, 罗意平, 张晓峰. 基于 STEP 装配特征的 BOM 信息提取和多视图映射[J]. 微计算机信息,

2010, 26(13):141-143.

LIU Yiyu, LUO Yiping, ZHANG Xiaofeng. BOM Information Auto-generate Based on STEP Assembly Feature and BOM Multi-view Mapping[J]. Science and Technology & Innovation, 2010, 26(13):141-143.

(编辑 张 洋)

作者简介: 贾 康, 男, 1987 年生, 副研究员、硕士研究生导师。研究方向为复杂机械装备精密装配的技术与软件系统开发。发表论文 26 篇。E-mail: jiakang@xjtu.edu.cn。洪 季* (通信作者), 男, 1968 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为数字化设计、制造与装配、精密电主轴技术。发表论文 577 篇。E-mail: jhong@mail.xjtu.edu.cn。

本文引用格式:

贾康, 唐竞, 任东旭, 等. 面向 STEP 模型装配特征自动提取的装配信息模型构建[J]. 中国机械工程, 2025, 36(1):123-132.

JIA Kang, TANG Jing, REN Dongxu, et al. Construction of Assembly Information Model Based on Assembly Features Automatic Extraction for STEP Models[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):123-132.

(上接第 122 页)

- [21] 张则强, 李六柯, 蔡宁, 等. 随机型拆卸线平衡问题的局部邻域遗传算法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3):607-618.

ZHANG Zeqiang, LI Liuke, CAI Ning, et al. Local Neighborhood Genetic Algorithm for Stochastic Disassembly Line Balancing Problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3):607-618.

- [22] 脱阳, 张则强, 张裕, 等. 考虑可变时间的双边机器人拆卸线平衡问题建模与优化[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(12):4073-4088.

TUO Yang, ZHANG Zeqiang, ZHANG Yu, et al. Modeling and Optimization for Two-sided Robots Disassembly Line Balancing Problems Considering Variable Time[J]. Computer Integrated Manufac-

turing Systems, 2023, 29(12):4073-4088.

(编辑 张 洋)

作者简介: 脱 阳, 男, 1999 年生, 硕士研究生。研究方向为制造系统与智能优化。发表论文 2 篇。E-mail: 1102558842@qq.com。张则强* (通信作者), 男, 1978 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为制造系统与智能优化。发表论文 100 余篇。E-mail: zzq_22@163.com。

本文引用格式:

脱阳, 张则强, 谢心澜, 等. 考虑工人移动的多人共站双边拆卸线平衡问题的建模与优化[J]. 中国机械工程, 2025, 36(1):113-122.

TUO Yang, ZHANG Zeqiang, XIE Xinlan, et al. Modeling and Optimization of Multimanned Two-sided Disassembly Line Balancing Problem for Dynamic Workers[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):113-122.