



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

改进蚁群算法求解多目标单边装配线平衡问题

吴晓雯, 郑巧仙, 徐鑫强

引用本文

吴晓雯, 郑巧仙, 徐鑫强. 改进蚁群算法求解多目标单边装配线平衡问题[J]. 计算机科学, 2022, 49(11A): 210900165-5.

WU Xiao-wen, ZHENG Qiao-xian, XU Xin-qiang. Improved Ant Colony Algorithm for Solving Multi-objective Unilateral Assembly Line Balancing Problem [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 210900165-5.

相似文献推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[一种面向移动边缘计算的无人机基站部署方法](#)

UAV Base Station Deployment Method for Mobile Edge Computing

计算机科学, 2022, 49(11A): 220200089-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220200089>

[急件订单插入下生产系统的重调度](#)

Rescheduling of Production System Under Interference of Emergency Order

计算机科学, 2022, 49(11A): 211100193-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211100193>

[一种基于超网络的多目标回归方法](#)

Multi-target Regression Method Based on Hypernetwork

计算机科学, 2022, 49(11A): 211000205-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.211000205>

[自动化软件重构质量目标与非质量目标有效性研究](#)

Study on Effectiveness of Quality Objectives and Non-quality Objectives for Automated Software Refactoring

计算机科学, 2022, 49(11): 55-64. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220300058>

[一种基于AAE的协同多播主动缓存方案](#)

Collaborative Multicast Proactive Caching Scheme Based on AAE

计算机科学, 2022, 49(9): 260-267. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800019>

改进蚁群算法求解多目标单边装配线平衡问题

吴晓雯¹ 郑巧仙¹ 徐鑫强²

1 湖北大学计算机与信息工程学院 武汉 430062

2 电子科技大学计算机科学与工程学院 成都 611731

摘要 针对目前工业生产中存在的第二类单边装配线平衡问题,从实际角度出发,考虑人力资源如当前操作工熟练程度以及操作工疲劳程度,在这两种约束条件下,建立以最小化工位节拍和最小化平衡损失率为优化目标的数学模型。使用蚁群算法与模拟退火算法结合的改进蚁群算法求解单边装配线平衡问题的可行解。算法采用操作选择机制和操作分配机制,对操作集中的操作进行选择并将其分配至工位。采用仿真算例验证该算法的可行性,通过8个实例验证所提出的算法对求解该问题的有效性,并对实际的工业生产产生一定的技术方法支持。

关键词: 蚁群算法; 模拟退火算法; 多目标; 单边装配线平衡问题

中图分类号 TP311, TP18

Improved Ant Colony Algorithm for Solving Multi-objective Unilateral Assembly Line Balancing Problem

WU Xiao-wen¹, ZHENG Qiao-xian¹ and XU Xin-qiang²

1 College of Computer and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China

2 School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract In response to the second type of unilateral assembly line balance in industrial production, it is established with minimal chemical sections under two constraints. In these two constraints, Mathematical model for optimizing the balance loss rate. A feasible solution to the unilateral assembly line balance problem using an improved ant colony algorithm combining ant colony algorithm and simulated annealing algorithm. The algorithm uses the operation selection mechanism and the operation allocation mechanism to select and assign it to a station. In the experiment, simulation examples are used to verify the feasibility of the algorithm, and 8 examples are used to verify the effectiveness of the proposed algorithm for solving the problem, and to produce certain technical method support for actual industrial production.

Keywords Ant colony algorithm, Simulated annealing algorithm, Multi-objective, Unilateral assembly line balancing problem

1 引言

装配线平衡问题一直以来是工业制造业研究的热门话题。优化工业领域装配线可以在一定程度上提高工业产品的生产效率,减少工人劳动时间,获取更高的经济效益。装配线平衡问题是指工业产品制造过程中,更加有效地划分每个装配工位上产品的装配顺序,避免某个工位上作业任务出现过忙或过闲的现象,实现不同装配工位的负荷均衡。

单边装配线平衡问题是指在满足各种约束的情况下只使用装配线的一侧工位,将各项操作按照一定的顺序分配到这些工位上,在操作进行分配的过程中,各个工位上尽可能少地出现忙或等待现象。

目前对于单边装配线平衡问题的优化方式主要有3种:1)给定装配线节拍,最小化工位数量,我们将其称之为ALBP-1;2)给定装配线工位数量,最小化装配线节拍,我们将其称为ALBP-2;3)给定装配线节拍,最小化装配线的均衡指数,我们将其称为ALBP-3。这3种优化方式中由于装配线

上每个工位的操作工操作水平和疲劳程度有差别,装配线的节拍和平衡会受到影响。基于这种情况,考虑多约束单边装配线平衡问题成为了工业产品制造业领域相关研究者需要解决的问题。

1954年, Bryton首次提出装配线平衡问题^[1]。Bautista和Pereira利用蚁群算法求解最简单模型的装配线平衡调度问题^[2]。McMullen和Tarasewich采用蚁群算法有效解决了带有复杂因素混装模型的装配线平衡问题^[3]。Deng等针对给定装配线节拍,最小化工位数量这一问题提出一种自适应的蚁群算法,该算法针对问题的特点,设计了一种蚂蚁分配方案可行解的构造方法。该方法中提到可以自适应地调整蚁群算法中信息素的挥发度等系数,提高了其全局收敛性^[4]。Zhu^[5]提出一种设备预防性维修模型,并使用模拟退火算法对该模型进行求解。在此基础上,制定了以提高设备利用率和资产效率优先的多目标优化策略。

1983年, Gunther等首次提出将人因风险整合到装配线平衡问题中,他们评估了工位上每个操作需要消耗的能量值,

基金项目:国家自然科学基金(61803149);多约束装配平衡问题的可行性理论与高精度自适应启发式算法(61803149003593)

This work was supported by the Natural Science Foundation of China(61803149) and Feasibility Theory and High Precision Adaptive Heuristic Algorithm for Multi Constraint Assembly Balance Problem(61803149003593).

通信作者:吴晓雯(gracewxw@foxmail.com)

并将其作为装配线平衡问题的软约束加入到目标规划模型中,采用分支定界法对该问题进行求解^[6]。Carnahan 将最大握力等人体需求指标引入到简单装配线平衡问题中,建立了以最小化循环时间和最小化局部肌肉为目标的多目标简单装配线平衡模型,并采用 3 种启发式算法对其进行求解^[7]。Süer 将装配线上各工位的操作工熟练程度划分成 9 个类别,根据标准偏差值来计算员工的操作时间^[8]。Choi 将多种人因风险与装配线平衡问题相结合,提出了 0-1 整数规划模型,并对此模型进行求解^[9]。Yang 等聚焦于因为岗位上高技能员工离岗而导致的人员技能不均,最终导致产能下降甚至停产的现状,在加入人力资源和空间等约束的前提下,提出了以最大化装配线产能和最小化人员成本为目标的装配线人员再分配模型,并设计启发式算法对该模型进行求解^[10]。Zhang 等以 H 型装配线为例,构建以最小化装配线节拍、平衡损失率以及站间平滑指数为优化目标的装配线平衡模型,设置双阶段算法,采用遗传算法和 IE 技术对该模型分阶段进行求解,最终得到符合生产需要的可行解^[11]。Xu 等考虑装配线过程中人员差异所导致的操作工时与标准工时不相符合的问题,以人员差异和操作间的优先顺序作为约束条件,建立多人共站混流装配线多目标模型,并采用遗传算法进行求解^[12]。

目前,学者们对人因因素更加关注,但是依然更多地停留在分析单目标人因因素上,例如单一地对操作工的熟练程度或者操作工的疲劳等级进行分析,而本文将这两种人因因素进行结合。针对有关装配线平衡问题中每个工位上操作工操作水平以及疲劳程度不同的现象,提出一种多目标单边装配线平衡优化模型;主要针对第二类装配线平衡问题进行求解,该方法对装配线上不同熟练程度及不同疲劳程度的操作工进行分析,确定工位数量,构建相关数学模型,采用蚁群算法求出熟练度不同和疲劳度不同情况下的最小生产节拍和最小化平衡损失率为目标的模型,采用算例验证该模型及解的可行性;同时对需要进一步研究的问题和未来发展趋势作出展望。

2 问题描述与模型构建

2.1 多约束单边装配线平衡问题

本文主要对第二类单边装配线平衡问题进行求解。第二类装配线平衡问题通常是在确定生产何种工业产品,规划好装配线并完成安装后,在装配线上操作工固定的条件下,最小化装配线节拍和最小化装配线平衡损失率。第二类多约束单边装配线平衡问题可以描述为:初始情况下,有 m 个固定好的工位且有技术水平不全相同的操作工,操作工的数量为 z ,且 $z \geq m$;任意操作在任意工位上都可以进行装配;装配线上的每一种操作的顺序已知,且每一种操作的额定时间已确定;采用最大最小原则确定装配线节拍,选取不同工位的最大操作时间和操作空闲时间之和作为装配线的节拍;在同一时间,每种操作只能分配到一个工位;装配线上存在传送带可以在不同工位之间来回传送产品元件,由于传送的时间比较短,且为连续传送,所以忽略这一部分的传送时间。

将操作工的熟练程度划分为 5 个等级,其中最低等级为 1 级,最高等级为 5 级;再将操作工的疲劳程度同样分为 5 个等级,将操作工熟练等级为 4 级和疲劳等级为 3 级时的操作时间视为操作的额定时间。

本文对第二类装配线平衡问题做出以下假设:1) 每项

操作的额定时间可测,为熟练等级为 4 级和疲劳等级为 3 级的操作工对每一种操作的平均作业时间,其值为常数;2) 装配线上存在传送带,所以产品元件可以移动到任意工位上,但同一时间每个工位上最多只能存在一种操作;3) 产品的工艺路线是直线,产品的种类为单种;4) 单边装配线中工位只位于装配线的一侧,不需要两边同时设置工位完成操作;5) 每个工位上操作工的熟练等级随机,但他们可以完成装配线的任意操作。

2.2 考虑操作工疲劳程度和熟练程度的单边装配线平衡问题模型构建

基于以上假设,构建多约束单边装配线的数学模型。

表 1 列出了模型参数的含义。

表 1 模型参数含义
Table 1 Meaning of model parameters

参数	含义
C	装配线节拍
I	产品操作集合, $I = \{i i = 1, 2, 3, \dots, n\}$
J	装配线工位集合, $J = \{j j = 1, 2, 3, \dots, m\}$
NUM	操作工集合, $NUM = \{num num = 1, 2, 3, \dots, z\}$
i	操作
t_i	操作 i 的额定时间
$t_{i,j,num}$	操作工 num 在工位 j 上完成操作 i 的时间
j	工位
CM	平均工位作业时间, $CM = \sum_{i \in I} t_i / m$
$x_{i,j}$	0-1 变量,操作 i 是否被分配到工位 j ; 当操作 i 被分配到工位 j 时, $x_{i,j} = 1$; 否则其值为 0
$y_{j,num}$	0-1 变量,操作工 num 是否被分配到工位 j , 当 num 被分配到工位 j 时, $y_{j,num} = 1$; 否则其值为 0
F_{num}	操作工 num 的疲劳等级
SK_{num}	操作工 num 的熟练等级
ft_j	工位 j 的空闲时间
f_1	优化目标 1
f_2	优化目标 2
ω_1	优化目标 1 权值
ω_2	优化目标 2 权值
f	目标函数

依据问题描述,建立以下两个优化目标。

目标 1 最小化装配线生产节拍,如式(1)所示:

$$f_1 = \min C \quad (1)$$

$$\sum_{num \in NUM} \sum_{i \in I} (t_{i,j,num} x_{ij} y_{j,num} + ft_j) = C, j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{num \in NUM} y_{j,num} = 1, j \in J \quad (4)$$

$$s. t. \quad \sum_{i \in I} t_i x_{ij} y_{j,num} \leq C, j \in J, num \in NUM \quad (5)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\}, y_{j,num} = \{0, 1\}$$

$$\sum_{j_1 \in J} j_1 \cdot x_{i_1 j_1} \leq \sum_{j_2 \in J} j_2 \cdot x_{i_2 j_2}, i_1, i_2 \in I, j_1, j_2 \in J$$

$$P_{i_2, i_1} = 1 \quad (6)$$

式(2)为该装配线的节拍表示;式(3)表示同一时间每项操作仅能分配到一个工位上;式(4)表示同一时间每个操作工仅能分配到一个工位上;式(5)表示所有工位的作业时间不超过目标函数式子;式(6)是优先关系约束,说明如果操作 i_1 的顺序优先于操作 i_2 ,则该操作被分配的工位序号小于或者等于后者所分配的工位序号。

目标二:最小化装配线平衡损失率,如式(7)所示:

$$f_2 = \min G \quad (7)$$

s. t.

$$\begin{cases} G=1-\frac{\sum_{i \in I} t_{i,j,mm}}{m \times C} & (8) \\ \min G=1-\max\left(\frac{\sum_{i \in I} t_{i,j,mm}}{m \times C}\right)=\min\left(\frac{m \times C-\sum_{i \in I} t_{i,j,mm}}{m \times C}\right) & (9) \end{cases}$$

式(8)表示装配线平衡损失率计算方法;式(9)表示最小化装配线平衡损失率计算方法。

采用加权方式对 f_1 和 f_2 进行合并,并得出合并后的目标函数为 f 。

$$f=\omega_1 f_1+\omega_2 f_2 \quad (10)$$

其中, ω_1 和 ω_2 分别表示 f_1 和 f_2 的权值,其值可以根据对最小化装配线节拍和最小化装配线平衡损失率这两者之间的重要程度进行选取; $\omega_1+\omega_2=1$ 。

3 改进蚁群算法

本文主要采用改进蚁群算法求解该模型。蚁群算法具有较强的鲁棒性,更容易与其他算法进行结合,但其缺点也十分显著,较常见的是收敛速度较慢且容易过早陷入局部最优解。模拟退火算法的优点是可以以一定的概率接受新解的方法跳出局部最优解,并且易于与其他算法结合。因此,将蚁群算法与模拟退火算法进行结合。

改进蚁群算法的实质是依据蚁群算法的特性进行信息素的更新,再根据信息素进行新解的选择,最后根据模拟退火算法中接受新解的可能性对蚁群算法进行改进,避免蚁群算法陷入局部最优。

首先在给定范围内随机设定操作工的熟练等级和疲劳等级;并且定义一个足够大的温度作为初始温度 T ,设置结束温度 T_{end} 、每次退火的比例 q 以及迭代的次数 mc 。

在此基础上,随机产生一组问题的可行解,此解作为问题的初始可行解。在后续过程中,蚂蚁为每个工位选择操作,其中每只蚂蚁对应一种可行解,其所代表的路径不完全相同。

根据所得的初始可行解,计算出此时的目标函数值,目标函数值越小,说明其对应的生产节拍及平衡损失率越小。

此时工位的作业时间与当前操作工的熟练等级与疲劳等级有关。定义有关工位的作业时间如下:

$$t_{i,j,mm}=(F_{mm})^\gamma \cdot (SK_{mm})^\eta \cdot t_{i,j} \quad (11)$$

随机选取一只蚂蚁,依据当前启发式因素和信息素对操作进行选择。概率选择公式如下:

$$p_i=\frac{(\zeta_i)^\alpha \cdot (\tau_i)^\beta}{\sum_{ii \in CA} (\zeta_{ii})^\alpha \cdot (\tau_{ii})^\beta}, i \in CA \quad (12)$$

蚂蚁搜索问题的初始可行解时,取 $\alpha=1, \beta=0$ 。在初始情况下,蚂蚁没有搜索过程,故不存在信息素,此时仅根据启发式因素对操作进行选择。在实验过程中 $0 \leq \alpha, \beta \leq 5$ 。

采用信息素更新策略更新信息素。基于信息素 τ 以及对应的目标函数值计算每一条路径上的信息素浓度。

初始情况下,信息素强度为 Q ,蚂蚁 k 对操作 i 和工位 j 间的信息素为 $\Delta\tau_{ij}^k$,其值为:

$$\Delta\tau_{ij}^k=Q/f \quad (13)$$

按照蚁群算法的特性,蚂蚁在进行觅食的过程中,信息素会挥发, ρ 为信息素 τ 的挥发系数,且 $0 \leq \rho \leq 1$ 。

在蚂蚁遍历搜索结束后,各个蚂蚁得到新的可行解,此时算法将根据信息素挥发策略对路径上的信息素进行更新:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho)\tau_{ij} + \rho\left(\sum_{k=1}^s \Delta\tau_{ij}^k\right) \quad (14)$$

当前路径上信息素浓度越高,则蚂蚁选择该路径的概率越大。

若新的目标函数值 f' 比上一次解中的目标函数值好,则更新最好解和信息素。

若新解与上一次的解相比较差,则计算新解与旧解之间的差值 Δf ,并依据概率 $\exp(-\Delta f/qT)$ 接受 f' 作为当前解。

重复上述过程,直到算法满足设定的结束温度或迭代的次数时,该算法结束,输出此时的最好解。

该算法所涉及到的参数定义如表2所列。

表2 算法参数定义

Table 2 Algorithm parameter definition

参数	含义
K	蚂蚁集合, $K=\{k k=1,2,3,\dots,s\}$
$t_{i,j,mm}^k$	蚂蚁 k 选择的当前工位 j 上当前操作 i 的操作时间
A_j	分配到工位 j 的操作集合, $A_j \subset I, (A_1, A_2, \dots, A_m)$ 是第二类单边装配线平衡问题的一个解
CM	平均工位作业时间, $CM=\sum_{i \in I} t_i/m$
P	直接优先关系矩阵 $P=(P_{i_1, i_2})_{n \times n}$,若操作 i_2 是操作 i_1 的直接前序操作,则 $P_{i_1, i_2}=1$,否则为0
μ	每次退火的比例
γ	疲劳等级权值
η	熟练等级权值
VI	当前已分配的操作集合,用于放置蚁群算法中蚂蚁已经搜索完的操作
τ_{ij}	工位与操作间的信息素
$\Delta\tau_{ij}^k$	信息素 τ 的改变量
ρ_i	选择某项操作的概率
CA	操作 i 的候选操作集合
T	初始温度
T_{end}	结束温度
q	每次退火的比例
mc	迭代的次数
f'	新的目标函数值
ζ_i	操作 i 在 CA 中的选择权值

算法流程图如图1所示。

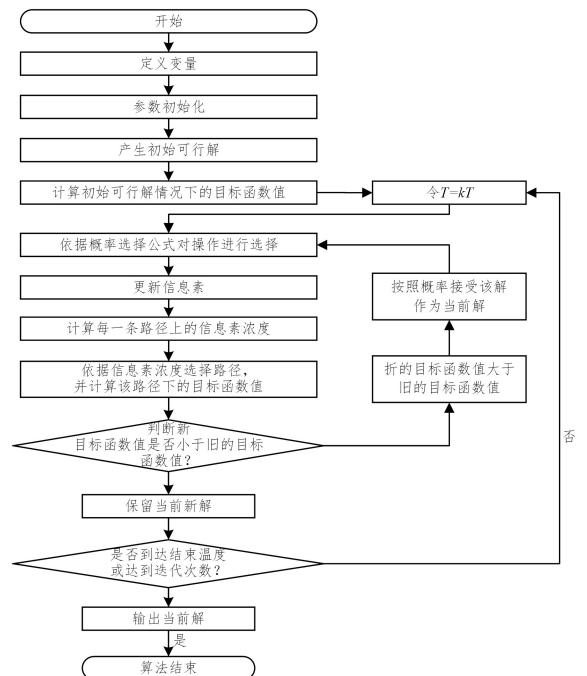


图1 改进蚁群算法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved ant colony algorithm

4 实验结果与分析

为了验证该问题具有可行解及算法的性能,在 Windows10 下使用 python 对装配线平衡问题中的 8 个标杆算例进行求解,所有算例均在 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7@ 2.40GHz CPU,16GB 内存 PC 上运行。针对这些算例,设计改进蚁群算法的各项参数为:蚂蚁数量 $s=50$,迭代次数 $mc=50$,初始温度 $T=50000$,结束温度 $T_{end}=15$,每次退火的比例 $q=0.98$,信息素挥发系数 $\rho=0.5$,信息素强度 $Q=50$ 。求解结果如表 3 所列。将信息素挥发系数 $\rho=0.5$ 替换为 $\rho=0.7$,所得到的最优解如表 4 所列。将信息素强度 $Q=50$ 替换为 $Q=100$,所得到的最优解如列表 5 所列。

在表 3 中,第 1 列给出了算例的来源以及算例的操作数,第 2 列给出改进蚁群算法求解该算例使用的工位数量,第 3 列给出了该算例的理想节拍,第 4-9 列给出了改进蚁群算法求解这些算例的平均节拍、实际最好节拍、50 次迭代的平均

空闲时间、最小平衡损失率、50 次迭代空闲时间均方差以及算法平均运行时间。由表 3 可知,对于 8 个算例,有 4 个算例的节拍均为理想节拍,剩余的算例的节拍与理想节拍之间相差较小,且该算例的平衡损失率在 $0.01\% \sim 0.22\%$ 之间,符合该算法提出的最小化平衡损失率和最小化装配线生产节拍的要求。

在表 4 中,将蚁群算法的信息素挥发系数由 0.5 替换为 0.7。在小型算例中,该算法的实际节拍会变大,但是在中大型算例中,该算法的实际节拍更接近于理想节拍,改进蚁群算法的平衡损失率同样处于 $0.01\% \sim 0.22\%$ 之间,符合该算法提出的最小化平衡损失率和最小化装配线生产节拍的要求。

在表 5 中,将蚁群算法的信息素强度由原先的 50 提升至 100,该装配线的生产节拍虽然无较大变化,但是平衡损失率更小,且算法运行的平均时间更短,改进蚁群算法的平衡损失率处于 $0.01\% \sim 0.22\%$ 之间,符合该算法提出的最小化平衡损失率和最小化装配线生产节拍的要求。

表 3 改进蚁群算法求解多目标装配线平衡问题的结果($\rho=0.5, Q=50$)

Table 3 Improved ant colony algorithm is used to solve the multi-objective assembly line balance problem($\rho=0.5, Q=50$)

算例	工位数量	理想节拍	平均节拍	实际最好节拍	50 次迭代平均空闲时间	最小平衡损失率/%	50 次迭代空闲时间均方差	平均 CPU/s
Mertens7	3	10	11.70	11.70	308.71	0.22	14847.21	0.72
Jaeschke9	3	13	12.60	12.60	115.00	0.06	5635.00	0.98
Jackson11	4	12	12.00	12.00	146.51	0.08	5198.32	1.53
Heskiaoff28	7	147	160.70	152.1	152.00	0.04	508.32	15.01
	9	114	123.90	118.80	237.22	0.05	1454.46	15.58
Sawyer30	9	36	47.83	39.6	5253.21	0.11	252320.51	17.24
	13	25	27.30	27.29	1051.54	0.11	38273.17	18.69
Orgin36	10	98	109.75	109.2	757.28	0.11	12555.16	29.38
	13	75	85.31	81.70	583.65	0.11	5316.35	29.74
Tonge70	9	391	397.88	394.80	189.02	0.03	652.71	138.43
	11	320	319.47	320.0	94.06	0.02	76.76	144.50
	13	270	271.75	271.0	142.64	0.03	358.17	154.37
Arcus111	9	16711	16709.82	16711.20	2096.42	0.01	1308.50	543.53
	12	12534	12714.62	12535.0	6281.52	0.02	67798.68	549.09
	13	11570	11578.78	11570.0	4226.65	0.02	5292.78	540.06

表 4 改进蚁群算法求解多目标装配线平衡问题的结果($\rho=0.7, Q=50$)

Table 4 Improved ant colony algorithm is used to solve the multi-objective assembly line balance problem($\rho=0.7, Q=50$)

算例	工位数量	理想节拍	平均节拍	实际最好节拍	50 次迭代平均空闲时间	最小平衡损失率/%	50 次迭代空闲时间均方差	平均 CPU/s
Mertens7	3	10	11.70	11.7	313.98	0.22	15233.66	0.67
Jaeschke9	3	13	12.60	12.60	115.00	0.06	5635.00	0.92
Jackson11	4	12	12.00	12.0	152.64	0.08	5359.67	1.47
Heskiaoff28	7	147	156.38	147.6	105.61	0.01	869.92	14.40
	9	114	129.10	124.0	435.25	0.10	3507.49	15.05
Sawyer30	9	36	47.66	39.60	1901.86	0.11	52804.74	16.88
	13	25	27.30	27.3	533.14	0.11	13237.56	17.90
Orgin36	10	98	143.42	117.00	552.11	0.18	1525.66	26.30
	13	75	87.14	81.70	1365.39	0.11	23351.19	29.88
Tonge70	9	391	397.95	393.90	121.92	0.02	110.60	137.99
	11	320	321.46	320.0	119.46	0.03	203.44	142.41
	13	270	284.52	270.60	290.69	0.03	1271.44	147.19
Arcus111	9	16711	16709.82	16711.20	2096.42	0.01%	1308.50	543.53
	12	12534	12533.52	12534.5	3863.18	0.02%	4412.77	549.95
	13	11570	11554.28	11568.0	5462.27	0.02%	14983.58	543.76

表5 改进蚁群算法求解多目标装配线平衡问题的结果($\rho=0.5, Q=100$)Table 5 Improved ant colony algorithm is used to solve the multi-objective assembly line balance problem($\rho=0.5, Q=100$)

算例	工位数量	理想节拍	平均节拍	实际最好节拍	50次迭代平均空闲时间	最小平衡损失率/%	50次迭代空闲时间均方差	平均CPU/s
Mertens7	3	10	11.70	11.7	314.48	0.22	15271.06	0.69
Jaeschke9	3	13	12.60	12.60	115.00	0.06	5635.00	0.96
Jackson11	4	12	12.02	12.0	149.66	0.08	5160.39	1.49
Heskiaoff28	7	147	148.74	147.4	37.71	0.01	224.74	14.87
	9	114	124.00	124.0	210.36	0.10	1098.55	15.26
Sawyer30	9	36	47.50	39.60	530.75	0.11	6633.78	16.60
	13	25	26.18	26.0	1629.87	0.06	72930.65	18.08
Orgin36	10	98	140.69	115.70	1004.19	0.17	6488.06	25.72
	13	75	85.31	81.70	583.65	0.11	5316.35	29.74
Tonge70	9	391	397.67	392.40	140.81	0.02	239.72	150.17
	11	320	320.25	320.0	106.94	0.02	287.10	143.87
	13	270	280.44	273.60	243.21	0.04	764.67	144.09
Arcus111	9	16711	16710.2	16738.01	33758.02	0.01	299348.87	562.41
	12	12534	12570.74	12525.6	4293.03	0.03	939.81	561.29
	13	11570	11612.01	11570.0	4616.41	0.02	15426.84	552.73

结束语 本文通过构建以装配线操作过程中操作工的熟练程度和疲劳程度两种不同的约束条件,最小化装配线节拍和最小化装配线平衡损失率为目标的第二类装配线平衡模型,通过算例验证了改进蚁群算法求解该模型的可行性。但由于在装配过程中操作工的熟练程度和疲劳程度是动态变化的,更符合装配线平衡过程中的实际生产问题,每一次所得解为每一次运行过程中的最优解。该改进蚁群算法可以为生产管理人员在实际生产过程中提供一定的技术方法支持,在后续研究中,将对其他融合算法与改进蚁群算法,并对其优劣程度进行比较,从中找出最符合实际生产生活需要的装配线平衡算法,并将其应用到实际中。

参考文献

- [1] DRISCOLL J, THILAKAWARDANA D. The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing: An International Journal of Manufacturing and Product and Process Development, 2001, 17(1/2): 81-86.
- [2] BAUTISTA J, PEREIRA J. Ant algorithms for assembly line balancing[C]// Proceedings of the Third International Workshop ANTS. Brussels, Belgium, 2002, 65-75.
- [3] MCMULLEN P R, TARASEWICH P. Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem[J]. IIE Transactions, 2003, 35(7): 605-617.
- [4] DENG F P, ZHANG C Y, LIAN K L, et al. An Adaptive Ant Colony Optimization for Solving Assembly Line Balancing Problem[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(16): 1949-1953.
- [5] ZHU C J, SONG W J, ZHANG C Y, et al. Research on Optimization of FJSP Based on Maintenance Time Window[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(10): 1337-1343.

- [6] GUNTHER R E, JOHNSON G D, PETERSON R S. Currently practiced formulations for the assembly line balance problem[J]. Journal of Operations Management, 1983, 3(4): 209-221.
- [7] CARNAHAN B J, NORMAN B A, REDFERN M S. Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing[J]. IIE Transactions, 2001, 33(10): 875-887.
- [8] SUEER G A, TUMMALURI R R. Multi-period operator assignment considering skills, learning and forgetting in labour-intensive cells[J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(2): 469-493.
- [9] CHOI G. A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(1): 395-400.
- [10] YANG H G, HU X F, ZHANG Y H, et al. Research on Assembly Line Rebalancing with Mixed-skill Workers[J]. Modular Machine Tool & Automatic Machining Technology, 2015(7): 131-134.
- [11] ZHANG Y X, LIANG S W, YANG M K. Research on Rebalancing of Multi-Objective Constraints Assembly Line[J]. Journal of Ordnance and Equipment Engineering, 2019, 40(1): 214-219.
- [12] XU Z, SONG X X, FU J L, et al. Study on the balance of multi-person stage-sharing mixed-flow assembly line considering the difference of personal ability[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(11): 33-40.



WU Xiao-wen, born in 1998, postgraduate. Her main research interests include intelligent algorithm and deep learning.