

考虑疲劳和恢复的混流装配线平衡问题

赵小松, 赵舒萌, 刘 娜, 樊 锐, 何 桢

(天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 针对混流装配线运行中人体负荷影响操作者的状态以及生产效率问题, 建立了基于人因约束的多目标平衡模型. 考虑了操作者的疲劳和恢复对装配任务分配的影响, 以总循环时间最小化等为目标, 采用遗传算法进行求解. 结果表明, 考虑人因约束条件, 能够通过合理利用每个工作站的空闲时间来缓解操作者的疲劳, 保证装配线平衡的同时可以有效降低人体负荷过度造成的人因风险.

关键词: 混流装配线平衡; 人因约束; 疲劳; 恢复; 遗传算法

中图分类号: TP30; TB1; F273

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)02-0265-11

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.02.012

Balance problem of mixed flow assembly line considering fatigue and recovery

Zhao Xiaosong, Zhao Shumeng, Liu Na, Fan Rui, He Zhen

(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A multi-objective equilibrium model based on human factor constraint is established to solve the problem that human body load affects the operator's state and production efficiency in the operation of mixed flow assembly line. Considering the effects of operators' fatigue and recovery process on assembly task assignment, the model aims to minimize cycle time and other objectives. Genetic algorithm is used to solve this problem. The results show that this model can alleviate operators' fatigue by taking advantage of the idle time in the workstations reasonably while considering ergonomics constraint. The study suggests that ergonomics risk caused by excessive work load can be reduced on the premise of ensuring assembly line balance.

Key words: mixed-model assembly lines balancing; ergonomic constraint; fatigue; recovery; genetic algorithm

1 引 言

如今市场需求变化显著加快, 为了提高制造柔性和资源利用率, 混流装配线逐渐代替传统的简单装配线, 同时也对操作者制定了更高的标准. 如果没有对混流装配线上的操作者的身体负荷进行合理分配, 那么操作者很可能在工作过程中产生差错, 从而会降低装配线的效率.

以往对装配线平衡问题的研究大致关注三方面内容^[1,2], 一是研究不同的资源约束^[3,4], 二是研究不同的布局 and 装配线类型^[5], 三是求解方法上的创新, 如采用改进遗传算法^[6-8]、改进混合粒子群^[9,10]、混合多目标优化^[11]等智能计算方法, 仅有少数学者把人作为制造资源的一部分重点研究. Gunther 等^[12]评估了工作站中每个任务需要消耗的能量值, 将能量消耗作为软约束加入装配线平衡的目标规划模型中, 采用分支定

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71672122).

界法进行求解,这是将人因风险整合到装配线平衡问题中进行研究的首次尝试. Carnahan 等^[13]在简单装配线平衡过程中引入了最大握力等人体需求指标,模型以最小化循环时间和最小化局部肌肉疲劳为目标,并用 3 种启发式算法进行了比较求解. Choi^[14]将求解装配线的时间与多种人因风险结合在一起,提出了 0-1 整数规划模型,采用模糊集进行量化. Battini 等^[15]提出了一个详细的装配线设计流程,综合考虑了工艺因素(工作时间和相关方法),环境因素(旷工、员工流失、工作动力)和人的因素(人员多样性),呼吁在设计装配线时应该结合工程师和人因专家的技能,同时考虑技术参数和人体工效学因素. Otto 等^[16]提出了两种在模型中考虑人体工效学风险的思路:作为目标或作为约束,并将此类问题命名为 Ergo-ALBP,为这个领域做出了贡献.

此后,一些学者也考虑了人体工效学风险的影响. Bautista 等^[17]在时间和空间受限的装配线平衡问题(TSALBP)的基础上,设定了人体工效学风险的上限和下限,并将此类问题定义为 TSALBP-erg. 之后,这些学者以巴塞罗那尼桑工厂的装配为例,提出了混合整数规划模型,该模型以最小化工作站数量和人体工效学风险为目标^[18]. 接下来,这些学者又尝试通过最小化工作站之间人体工程学风险的平均绝对偏差,来实现操作人员舒适程度最大化^[19]. Xu 等^[20]在上肢的人体工效学测量和生产线设计间建立了线性关系,形成了混合整数规划模型,降低了运算的复杂度. 与之类似, Mutlu 等^[21]采用专家评价的方法设定了装配任务的体力负荷值(从 0 到 9). Kara 等^[22]将资源变量以及人因变量一并纳入装配线平衡的约束条件,提出了一个成本导向的模糊目标规划模型. Sternatz^[23]从汽车行业的实践需求出发,定义了一系列有针对性的约束,如每个工作站包含多个工作点、任务和工作站之间分配限制、依赖顺序的起始时间和人体工效学风险控制等,目标是最小化总运营成本. 为了解决这个问题,作者采用改进的 multi-Hoffmann 启发式算法进行仿真并找到了可行解. Azizoglu 等^[24]采用混合整数规划的方法,研究了简单装配线的工作负载平滑问题,并用分支定界法进行求解. Akyol 等^[25]认为目前对 Ergo-ALBP 的研究不应局限于装配线上的任务分配,还应考虑操作者的分配问题,作者将其定义为 Ergo-ALWABP (ergonomic-assembly line worker assignment and balancing problem). Jaturanonda 等^[26,27]在两个相似的装配线平衡研究中均设定了双目标:通过计算方差来平衡工作站的处理时间和平衡工作站间的人体工效学风险,并应用局部搜索算法进行两阶段求解. Otto 等^[28]对考虑人体工效学风险的装配线平衡和工作轮换问题进行了总结.

总之,近几年的研究虽然极大丰富了 Ergo-ALBP 领域的成果,但较少考虑人因约束,没有涉及操作者的疲劳和恢复过程. 实际中,如果操作者的疲劳不断的进行累加,不仅会影响操作者的身体健康,由此引发的产品缺陷、生产效率下降以及工伤事故和法律赔偿问题,也会为公司带来不可估量的经济损失.

本文针对装配线中操作者过度的体力负荷影响自身健康及生产效率的问题,提出一种降低人因风险的平衡优化模型. 首先,对人体的疲劳和恢复情况进行描述,在已有研究基础上,考虑一种装配线上人体负荷均衡的评价指标,以第 II 类混流装配线平衡问题为例,提出了多目标优化模型,在满足生产效率要求的同时,均衡各操作者实际负荷,并采用遗传算法求解;最后,借助算例来验证模型及方法的可行性.

2 考虑疲劳和恢复的装配线平衡模型

2.1 疲劳和恢复

Jaber 等^[29]提出了人体疲劳和恢复的计算方法

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$R(\tau_i) = F(t)e^{-\mu\tau_i}, \quad (2)$$

其中 $F(t)$ 表示操作者在执行某项操作任务时间 t 后产生的疲劳, $R(\tau_i)$ 表示其在休息时间 τ_i 后剩余的疲劳. 当 $R = 0$ 时,操作者的疲劳彻底得到恢复. λ 代表操作任务的疲劳指数,疲劳的程度与 λ 的大小呈正相关, μ 代表操作任务的恢复指数, μ 越大表示恢复所需的时间越短. 式(1)中时间 t 的初始值为零,这意味着操作

者在之前的操作任务中完全得到恢复. 但在混流装配线平衡问题中, 由于装配任务之间的空闲时间较短, 往往并不能保证疲劳彻底恢复, 容易产生疲劳积累.

本文在 Jaber 模型^[29]基础上结合生产实际, 针对混流装配线中的多种产品模型和操作任务, 对作业人员的疲劳和恢复定义为

$$F_{jm} = 1 - \exp \left(- \sum_{i=1}^N \lambda_i t_{ijm} x_{ik} y_{jk} \right), \quad j = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (3)$$

$$R_{jm} = F_{jm} \exp \left(- \mu \sum_{k=1}^S s_{km} y_{jk} \right), \quad j = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (4)$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{当任务 } i \text{ 分配到工作站 } k \text{ 上} \\ 0, & \text{否则,} \end{cases} \quad (5)$$

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{当操作者 } j \text{ 分配到工作站 } k \text{ 上} \\ 0, & \text{否则,} \end{cases} \quad (6)$$

其中 S 表示工作站数和操作者数, M 表示产品装配模型, N 是操作任务数, F_{jm} 表示操作者 j 在装配模型 m 时持续积累的疲劳, R_{jm} 表示操作者 j 在装配模型 m 后剩余的疲劳值, t_{ijm} 表示操作者 j 在装配模型 m 中的任务 i 上消耗的时长, s_{km} 表示在工作站 k 中完成装配模型 m 后的剩余时长.

2.2 人体负荷均衡

Mutlu 等^[21]为工作站设定了人员工作负载的上限, 适用于简单装配线. 但就混流装配线而言, 仅考虑上限是远远不够的, 还应保证装配任务在不同工作站之间的均衡分配. 如图 1 所示, 操作者 3 的负荷明显高于操作者 1, 随着装配任务的不断循环, 操作者 3 的疲劳会逐渐积累, 容易造成其长时间超负荷工作.

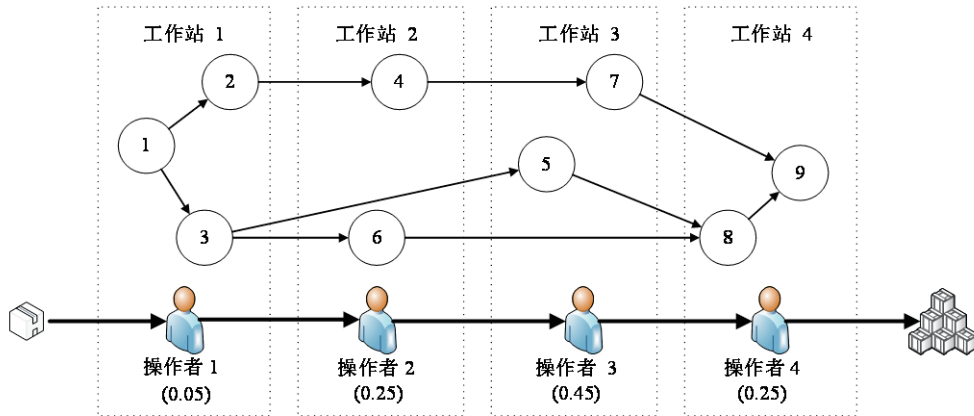


图1 装配线实例

Fig. 1 An example for assembly line

因此引入人体负荷均衡目标 η ,

$$\eta = \frac{S}{S-1} \sum_{j=1}^S \left(P_j - \frac{1}{S} \right)^2, \quad (7)$$

$$P_j = W_j \left(\sum_{j=1}^S W_j \right)^{-1}, \quad j = 1, 2, \dots, S, \quad (8)$$

其中 P_j 表示操作者 j 的疲劳值, W_j 在操作者 j 的疲劳值在所有操作者疲劳值中的占比.

2.3 考虑人体负荷均衡的装配线平衡模型

表 1 给出了各参数的含义.

表 1 各参数含义
Table 1 Meaning of each parameter

参数	含义
C	循环时间
i	操作任务
j	操作者
k	工作站
m	装配模型
q_m	装配模型 m 的比例
t_{ijm}	操作者 j 在模型 m 中的任务 i 消耗的时间
x_{ik}	任务 i 是否被分配到工作站 k 上
y_{jk}	操作者 j 是否被分配到工作站 k 上
F_i	装配 i 的所有前置任务
s_{km}	工作站 k 在完成装配模型 m 后剩余的空闲时间
S_{km}	工作站 k 在完成装配模型 m 后剩余的空闲时间所占比率
λ_i	任务 i 的疲劳指数
μ	空闲时间恢复指数
F_{jm}	操作者 j 在完成装配模型 m 后积累的疲劳值
R_{jm}	操作者 j 在完成装配模型 m 后, 通过恢复剩余的疲劳值
W_j	操作者 j 在循环周期内的疲劳值均值
P_j	在操作者疲劳值占有所有操作者的比重

本文的目标函数包括三个, 一方面求解最小总循环时间, 确保生产效率, 另一方面需要通过调节各工作站之间的空闲时间和均衡操作者的身体负荷来降低人因风险.

$$z_1 = C, \quad (9)$$

$$z_2 = \frac{M}{S(M-1)} \sum_{k=1}^S \sum_{m=1}^M \left(S_{km} - \frac{1}{M} \right)^2, \quad (10)$$

$$z_3 = \frac{S}{S-1} \sum_{j=1}^S \left(P_j - \frac{1}{S} \right)^2. \quad (11)$$

由于工作站的空闲时间会对以上三个目标同时产生作用, 需要综合表示三个目标. 设总的目标函数为

$$z = \alpha z_1 + \beta z_2 + \gamma z_3, \quad (12)$$

其中 z 表示总的目标函数, α , β 和 γ 是三个目标函数的系数, 代表相应的权重. 为了确保装配线的性能, α 通常取值为 1, β 和 γ 取介于 0 到 1 的数值, 视具体情况而定.

由此, 多目标规划模型可转化成如下模型

$$\text{Min } z = \alpha z_1 + \beta z_2 + \gamma z_3, \quad (13)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^N t_{ijm} x_{ik} y_{jk} + s_{km} = C, \quad k = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^S x_{ik} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^S y_{jk} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, S, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^S y_{jk} = 1, \quad k = 1, 2, \dots, S, \quad (17)$$

$$S_{km} = \begin{cases} 0, & \text{若 } \sum_{m=1}^M q_m s_{km} = 0 \\ q_m s_{km} \left(\sum_{m=1}^M q_m s_{km} \right)^{-1}, & \text{否则, } k = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \end{cases} \quad (18)$$

$$P_j = W_j \left(\sum_{j=1}^S W_j \right)^{-1}, \quad j = 1, 2, \dots, S, \quad (19)$$

$$W_j = \sum_{m=1}^M q_m R_{jm}, \quad j = 1, 2, \dots, S, \quad (20)$$

$$R_{jm} = F_{jm} \exp \left(-\mu \sum_{k=1}^S s_{km} y_{jk} \right), \quad j = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (21)$$

$$F_{jm} = 1 - \exp \left(-\sum_{i=1}^N \lambda_i t_{ijm} x_{ik} y_{jk} \right), \quad j = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (22)$$

$$\sum_{k=1}^S k x_{ak} \geq \sum_{k=1}^S k x_{bk}, \quad a = 1, 2, \dots, N; \quad b \in F_a, \quad (23)$$

$$s_{km} \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, S; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (24)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \quad k = 1, 2, \dots, S; \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (25)$$

$$y_{jk} \in \{0, 1\}, \quad j, k = 1, 2, \dots, S, \quad (26)$$

其中式(14)用来计算各工作站的空闲时间; 式(15)限定了一个任务只能被安排到一个工作站上; 式(16)限定了一个操作者只能被安排到一个工作站上; 式(17)限定了一个工作站上只能容纳一个操作者; 式(18)用来计算各工作站的空闲时间占所有工作站空闲时间的比重; 式(19)为操作者 j 的体力负荷在所有操作者体力负荷中的比重; 式(20)表示在初始循环时间内, 操作者 j 在完成各操作任务后的体力负荷均值; 式(21)和式(22)用来计算操作者在装配不同模型时的疲劳值和完成装配任务恢复后剩余的疲劳值; 式(23)限定了各装配任务的优先顺序; 式(24)限定了空闲时间取非负; 式(25)和式(26)代表装配任务和操作者的安排方式。

2.4 模型求解

本文提出的模型为一类非线性的组合优化问题, 属于 NP 难的范畴, 常用启发式算法进行求解. 因遗传算法较其他算法而言能够跳出局部最优, 故采用遗传算法进行求解.

1) 个体编码与种群初始化

在任务分配基因部分, 第 i 个基因位上的数值表示第 i 个任务被安排的工作站位置, 每个工作站至少出现一次. 在操作者分配基因部分, 第 j 个基因位上的数值表示第 j 个操作者被安排的工作站位置. 因此每条染色体应包含 $N + S$ 个基因位. 将上述两段编码方式进行匹配, 便可识别操作者及操作任务的分配情况.

编码和解码的过程如图 2 所示, 操作任务 1、2 和 3 被分配到了工作站 1, 并安排操作者 1 来完成这些任务. 由于任务分配基因部分缺少工作站 5, 解码后该工作站上并没有安排操作任务, 与之匹配的操作者 4 也是无效的.

编码完成后, 产生初始种群, 初始种群需满足混流装配线中的一系列约束条件. 在第一阶段, 为了方便起见, 先为工作站 1 分配任务 1, 然后令 $i = 2$ 开始, 在任务 i 的所有前置任务中找寻已分配工作站的最大的

值 $PS_i (PS_i = 1, 2, \dots, S)$, 通过随机数的生成办法, 得到一个介于 PS_i 和 S 之间的整数 g_i , 作为第 i 个基因位的内容. 第二阶段选用任意一个 1 到 S 的排列组合即可, 种群规模大小设为 $NIND$.

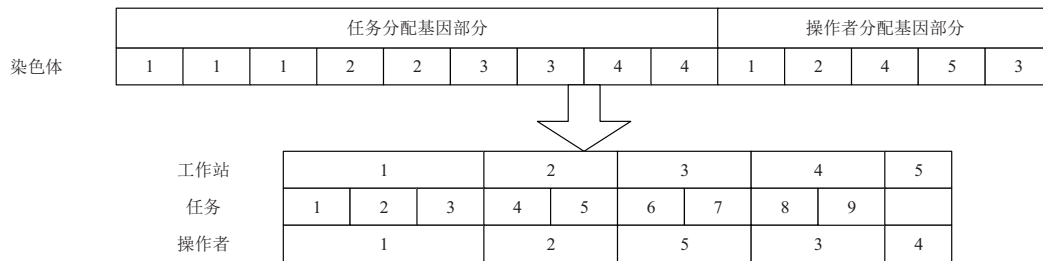


图 2 染色体编码及解码过程图

Fig. 2 Chromosome coding and decoding diagram

2) 适应度值计算

根据染色体 $n (n = 1, 2, \dots, NIND)$ 解码后所得的解是否满足循环时间约束以及人因约束, 现规定如下的适应度值设置方法:

若两个约束均满足, 则可得到 n 的目标函数值 $z(n)$, 一般来讲, 适应度值越大越好, 但这与本模型中的目标值最小化相违背, 因此可以对目标函数取倒数, 即

$$\text{fitness}(n) = \frac{1}{z(n)}.$$

若染色体 n 得到的解只符合循环时间的约束条件, 而并不符合人因约束条件, 由于三个子目标函数中, 规定工作站数必须取整数, 而空闲时间平衡指数和人体负荷平衡指数都是大于 0 小于 1 的数, 因此可将 n 的目标函数值设为 $z(n) + 2$, 对应的适应度值为

$$\text{fitness}(n) = \frac{1}{z(n) + 2}.$$

若循环时间约束无法得到满足, 说明工作站上的空闲时间取了负值, 那么无法正常计算总循环时间, 此时, 可将 $S + 2$ 作为目标函数的调整值, 相应地, 适应度值为

$$\text{fitness}(n) = \frac{1}{S + 2}.$$

3) 选择

为了有效淘汰劣解, 采用轮盘赌法与最佳保留法融合的方法.

4) 交叉

采取单点交叉的方法进行交换配对, 交叉概率为 P_c . 从选择操作生成的交配库中任取两个染色体, 随机在同一位置产生一个交叉点, 将个体分成左右两部分, 交换这两个染色体的对应部分. 如果交叉点出现在操作者分配基因部分, 交叉后的染色体一般都不能再满足每个操作者只能分配到一个工作站、每个工作站上只能容纳一个操作者的条件, 即产生的新个体可能是非可行解, 因此交叉点只能在任务分配基因部分产生.

5) 变异

该模型染色体是由两部分组合而成的, 为了保证变异后的种群有更好的适应度, 应分别对这两部分进行变异操作, 变异概率为 P_m . 在任务分配基因部分变异时, 可以随机产生一个 1 到 N 之间的数值 i , 作为进行变异的任务基因位, 对其值进行判断是否需要变异. 若需变异, 则寻找该任务 i 的前置任务中最大工作站值 $PS_i (PS_i = 1, 2, \dots, S)$ 和所有以任务 i 为前置的任务中最小工作站值 $PB_i (PB_i = 1, 2, \dots, S)$, 若 $PS_i \leq PB_i$, 则随机产生一个 PS_i 到 PB_i 之间的整数作为变异结果; 若 $PS_i > PB_i$, 说明此染色体无法满足任务优先关系, 产生的解不可行, 则随机产生 1 到 PB_i 之间的整数作为变异结果, 以此促进有效的工作

站数减少, 保证算法向最优解逼近. 在操作者分配基因部分变异时, 随机选取两个操作者基因位进行交换, 这样可以满足每个操作者只能分配到一个工作站、每个工作站上只容纳一个操作者的约束条件.

由于本文中的染色体是由任务分配和操作者分配两部分基因构成, 为了使变异得到的新解跳出局部最优, 应对这两部分均执行变异, 变异概率设为 P_m . 在前一部分变异时, 可以随机产生一个基因位, 将当前任务 i 前置任务中工作站的最大值 PS_i ($PS_i = 1, 2, \dots, S$) 同所有以任务 i 为前置任务的工作站最小值 PB_i ($PB_i = 1, 2, \dots, S$) 进行对比, 如果 $PS_i \leq PB_i$, 则用一个 PS_i 到 PB_i 之间的任意整数替换当前值; 如果 $PS_i > PB_i$, 说明此解不符合任务优先顺序的设定, 则用 1 到 PB_i 之间的任意整数替换当前值. 在后一部分变异时, 调换该部分的任意两个基因位即可.

6) 停止条件

当遗传代数达到 MAXGEN 停止计算.

3 算例分析

3.1 算例描述

下面通过一个包含 11 个任务的混流装配线的算例证明提出的模型的合理性. 图 3~图 6 分别给出了这些操作任务在 3 个不同的装配模型下的优先顺序. 3 个模型所占比重不同, 比重分布为 0.2, 0.4 和 0.4.

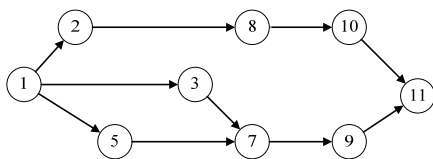


图 3 模型 1 的任务图

Fig. 3 Precedence diagram of product model 1

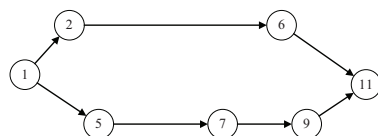


图 5 模型 3 的任务图

Fig. 5 Precedence diagram of product model 3

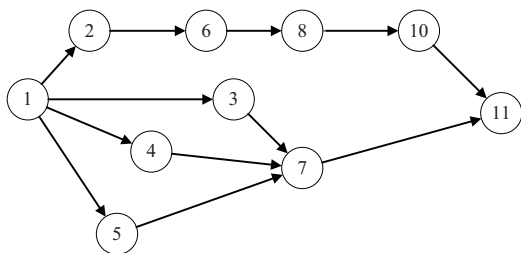


图 4 模型 2 的任务图

Fig. 4 Precedence diagram of product model 2

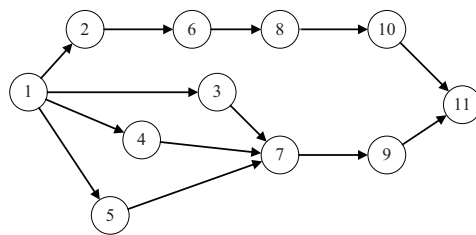


图 6 模型 1, 2 和 3 的综合任务图

Fig. 6 Integrated precedence diagram of model 1, model 2 and model 3

全部的 11 个任务可以分配给任意一名操作者和任意一个工作站, 但各个操作者在完成各项装配任务所需要的时间并不一样, 具体如表 2 所示.

疲劳指数 λ 的取值与疲劳产生的快慢有关, 数值越高意味着任务越繁重, 操作者会越快产生疲劳^[30], 本模型中疲劳指数如表 3 所示. 恢复指数为 $\mu = 0.05$.

3.2 求解与分析

利用遗传算法进行模型求解. 采用 MATLAB R2012a 软件进行程序编写.

设置参数 $\alpha = 1$, $\beta = 1$ 和 $\gamma = 0$, 即不考虑人因约束, 得到的最小循环时间为 14, 任务分配和体力负荷情况如表 4 所示. 可以看到, 操作者 2 的体力负荷值已经显著高于其他人. 这样, 随着生产任务的持续进行, 操作者 2 的疲劳会不断积累, 长此以往, 容易引发职业疾病, 危害操作者健康. 此时, 两个平衡指数分别

为 $z_2 = 0.428\ 7$ 和 $z_3 = 0.025\ 1$.

在模型目标中加入人因变量, 设置参数 $\alpha = 1$, $\beta = 0$ 和 $\gamma = 1$ 来重新进行求解. 得到的最小循环时间仍是 14, 此时各个操作者的体力负荷值比较相近, 通过计算得到两个平衡指数的值为 $z_2 = 0.626\ 6$ 和 $z_3 = 0.003\ 3$.

表 2 各个操作者在执行各任务的操作时间(单位: min)

Table 2 The operating time for each operator to perform each task (unit: min)

任务	模型 1				模型 2				模型 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	10.0	13.0	12.0	13.0	7.0	8.0	7.0	8.0	10.0	13.0	12.0	13.0
2	4.0	4.0	4.0	5.0	3.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0
3	5.0	4.5	4.2	5.0	5.0	4.5	4.2	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	2.2	2.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	8.0	8.3	8.2	8.0	8.0	8.3	8.2	9.0	8.0	8.3	8.2	8.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.5	0.4	1.0	0.8	0.5	0.4	1.0
7	2.5	3.6	2.5	3.0	3.2	2.6	2.0	3.0	3.0	3.5	2.5	3.0
8	4.3	4.1	4.5	5.0	4.1	4.3	4.6	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	1.0	1.1	1.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.1	1.2	1.0
10	3.0	3.4	3.5	4.0	3.3	4.0	4.2	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	11.0	12.0	13.0	10.0	11.0	13.0	10.0	10.0	10.0	12.0	12.0	10.0

表 3 各操作任务的疲劳指数

Table 3 The fatigue accumulation rates of tasks

任务	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
λ_i	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.05	0.01

表 4 不考虑人因风险运算结果 ($\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 0$)

Table 4 The optimal solution of the problem without considering ergonomic risks ($\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 0$)

工作站	任务	操作者	空闲时间 / min			体力负荷
			模型 1	模型 2	模型 3	
1	1,2,4	1	0.0	1.7	0.0	0.151 0
2	3,5	3	1.6	1.6	5.8	0.184 7
3	6,7,8,10	2	2.9	2.6	10.0	0.202 3
4	9,11	4	3.0	4.0	3.0	0.089 6

表 5 考虑人因风险运算结果 ($\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 1$)

Table 5 The optimal solution of the problem with considering ergonomic risks ($\alpha = 1, \beta = 0, \gamma = 1$)

工作站	任务	操作者	空闲时间 / min			体力负荷
			模型 1	模型 2	模型 3	
1	1,2,4	1	0.0	1.7	0.0	0.151 0
2	3,5	3	1.6	1.6	5.8	0.184 7
3	6,8,10	2	6.5	5.2	13.5	0.143 0
4	7,9,11	4	0.0	1.0	0.0	0.155 1

通过对比可以发现, 原来模型中操作者 2 的体力负荷值显著高于其他人, 在考虑人因约束的情况下, 模型自动将操作者 2 的任务 7 重新安排给了负荷较低的操作者 4, 同时平衡了各工作站的空闲时间. 值得注意的是, 这种分配结果并没有对装配线的生产效率产生太大改变, 却能通过合理利用工作站的空闲时间缓解操作者的疲劳.

3.3 算法分析

遗传算法的迭代过程如图 7 所示, 种群均值和最优目标值都可以较为快速的收敛. 这是由于初始解的生成办法能够确保符合任务之间的优先顺序的约束, 适应度的计算法则能够将总循环时间过长的解先行除去, 然后在剩余的范围内寻找更好的解, 有效提升了计算效率.

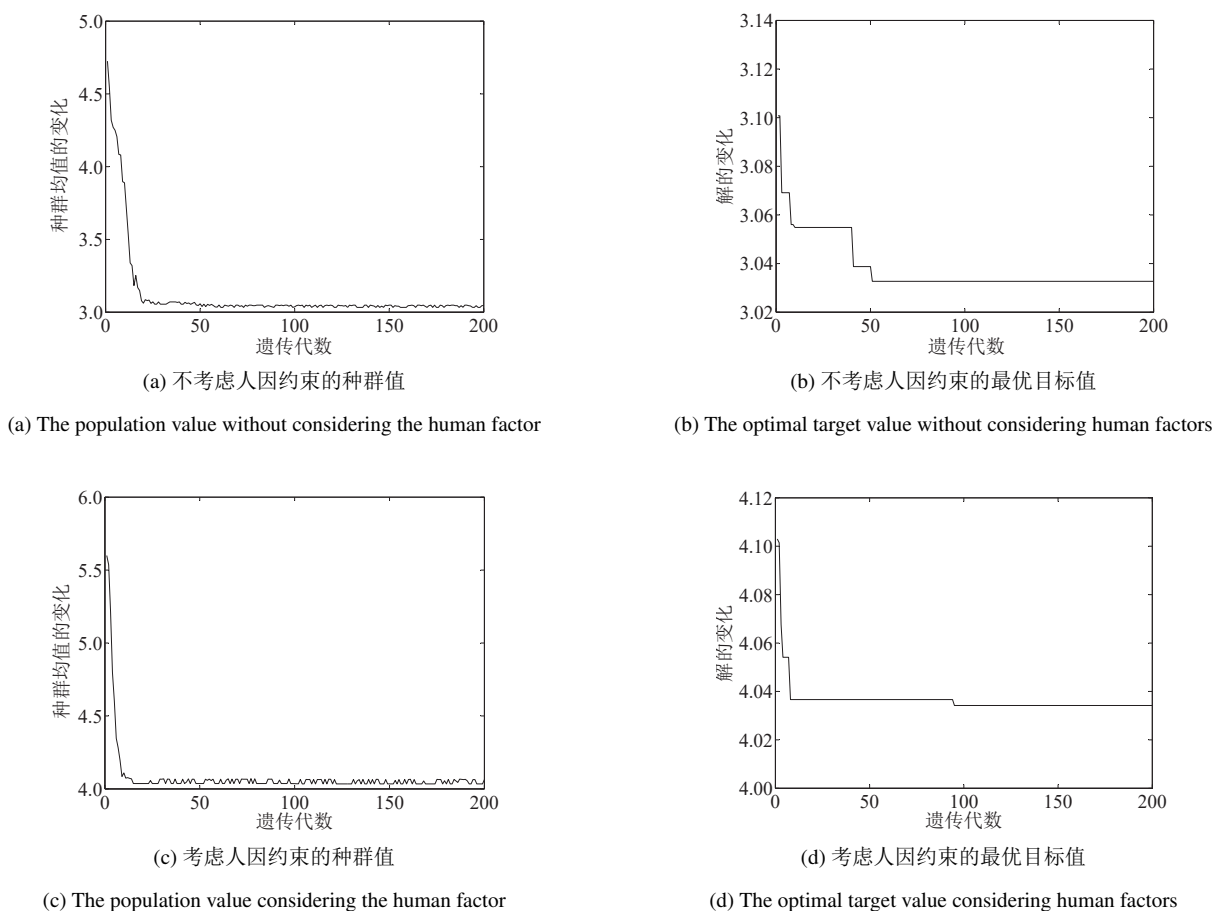


图7 遗传算法进化过程

Fig. 7 The genetic algorithm evolution process

4 结束语

装配线上操作者所承受的负荷如果过大,则可能会提升出现差错的概率,影响产出效率,增加不必要的成本。

本文以第Ⅱ类混流装配线平衡问题为研究对象,以总循环时间最小化、均衡工作站上的空闲时间和操作者的身体负荷为目标,建立了多目标规划模型,并以3种不同的装配模型为例,采用遗传算法分别对不考虑人因风险和考虑操作者的疲劳和恢复两种情况进行求解。在不考虑人因风险的情况下,经过多次循环后,发现操作者的疲劳会不断累积,这样容易给操作者的身体带来伤害。当将操作者的疲劳和恢复纳入模型的情况下,可以根据工作站的空闲时间重新分配装配任务,使得操作者的人体疲劳得到适当恢复。在调节人体负荷的同时,并不会对原来模型中的生产效率形成比较大的影响。

后续研究可以在本文的研究基础之上,进一步扩展到其它类型的装配线,并考虑更多的人因约束。本文采用的遗传算法在解决大规模计算量问题上存在一定的缺陷,之后研究可以采用遗传算法的衍生算法辅助实现。另外,文章中的模型假设是在初始状态下开始运行的,后续可以研究循环迭代过程对结果的影响。

参考文献:

- [1] Battaia O, Dolgui A. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 2013, 142(2): 259–277.

- [2] Zeng X, Wong W K, Leung S Y S. An operator allocation optimization model for balancing control of the hybrid assembly lines using Pareto utility discrete differential evolution algorithm. *Computers and Operations Research*, 2012, 39(5): 1145–1159.
- [3] Moon I, Logendran R, Lee J. Integrated assembly line balancing with resource restrictions. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(19): 5525–5541.
- [4] 刘雪梅, 陈佳炜, 兰琳琳, 等. 基于工位复杂性测度的随机型装配线平衡优化. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(5): 1191–1199.
Liu X M, Chen J W, Lan L L, et al. Stochastic assembly line balancing based On workstation complexity measurement. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(5): 1191–1199. (in Chinese)
- [5] 张则强, 汪开普, 李六柯, 等. 随机作业时间的U型拆卸线平衡多目标优化. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 89–100.
Zhang Z Q, Wang K P, Li L K, et al. Multi-objective optimization of U-shaped disassembly line balancing for random operation time. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 89–100. (in Chinese)
- [6] 曹振新, 许少华, 朱建昌. 混合遗传算法在汽车混流装配线平衡中的应用研究. *机械制造*, 2014, 52(7): 40–43.
Cao Z X, Xu S H, Zhu J C. Study on the application of hybrid genetic algorithm in vehicle mixed-flow assembly line balance. *Machinery*, 2014, 52(7): 40–43. (in Chinese)
- [7] 李爱平, 赵亚西. 基于 Bagging 集成聚类的改进遗传算法在装配线平衡中的应用. *机械制造*, 2018, 56(642): 91–96.
Li A P, Zhao Y X. The application of improved genetic algorithm based on Bagging integrated clustering in assembly line balance. *Machinery*, 2018, 56(642): 91–96. (in Chinese)
- [8] 张子凯, 唐秋华, 张利平, 等. 改进遗传算法求解大规模混流U型装配线问题. *机械设计与制造*, 2016(1): 137–139.
Zhang Z K, Tang Q H, Zhang L P, et al. Balancing large-size mixed-model U-type assembly lines via improved genetic algorithm. *Machinery Design and Manufacture*, 2016(1): 137–139. (in Chinese)
- [9] 吴永明, 戴隆州, 李少波, 等. 基于改进粒子群优化算法的混流装配线演进平衡. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4): 781–790.
Wu Y M, Dai L Z, Li S B, et al. Mixed assembly line evolution balancing based on improved particle swarm algorithm. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 781–790. (in Chinese)
- [10] 刘海江, 汤伟, 张含叶. 基于改进粒子群算法求解第二类装配线平衡问题. *中国工程机械学报*, 2014, 12(6): 508–513.
Liu H J, Tang W, Zhang H Y. Improved particle swarm algorithm for second-type assembly-line balancing problem. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2014, 12(6): 508–513. (in Chinese)
- [11] 付亚平, 王洪峰, 黄敏, 等. 基于自适应多种群策略的混合多目标优化算法. *系统工程学报*, 2017, 32(6): 738–748.
Fu Y P, Wang H F, Huang M, et al. Adaptive multipopulation strategy based hybrid multiobjective optimization algorithm. *Journal of Systems Engineering*, 2017, 32(6): 738–748. (in Chinese)
- [12] Gunther R E, Johnson G D, Peterson R S. Currently practiced formulations for the assembly line balance problem. *Journal of Operations Management*, 1983, 3(4): 209–221.
- [13] Carnahan B J, Norman B A, Redfern M S. Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *Institute of Industrial Engineers Transactions*, 2001, 33(10): 875–887.
- [14] Choi G. A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload. *Computers and Industrial Engineering*, 2009, 57(1): 395–400.
- [15] Battini D, Faccio M, Persona A, et al. New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2011, 41(1): 30–42.
- [16] Otto A, Scholl A. Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 2011, 212(2): 277–286.
- [17] Bautista J, Batalla C, Alfaro R, et al. Extended models for TSALBP with ergonomic risk constraints // 7th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control. Saint Petersburg: Elsevier, 2013: 839–844.
- [18] Bautista J, Batalla C, Alfaro R. Models for assembly line balancing by temporal, spatial and ergonomic risk attributes. *European Journal of Operational Research*, 2016, 251(3): 814–829.
- [19] Bautista J, Alfaro R, Batalla C. Maximizing comfort in assembly lines with temporal, spatial and ergonomic attributes. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2016, 9(4): 788–799.
- [20] Xu Z, Ko J, Cochran D J, et al. Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers and Industrial Engineering*, 2012, 62(2): 431–441.
- [21] Mutlu. A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(18): 5281–5291.
- [22] Kara Y, Atasagun Y. An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014, 27(11): 997–1007.

- [23] Sternatz J. Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry. *European Journal of Operational Research*, 2014, 235(3): 740–754.
- [24] Azizoglu M, Imat S. Workload smoothing in simple assembly line balancing. *Computers and Operations Research*, 2018(89): 51–57.
- [25] Akyol S D, Baykasoğlu A. A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016, 27(1): 1–17.
- [26] Jaturanonda C, Nanthavanij S. Heuristic procedure for Two-criterion assembly line balancing problem. *Industrial Engineering and Management Systems*, 2006, 5(2): 1–13.
- [27] Jaturanonda C, Nanthavanij S, Das S K. Heuristic procedure for the assembly line balancing problem with postural load smoothness. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2013, 19(4): 531–541.
- [28] Otto A, Battaia O. Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 111(9): 467–480.
- [29] Jaber M Y, Givi Z S, Neumann W P. Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(12/13): 7287–7299.
- [30] Yoon S Y, Ko J, Jung M C. A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines. *Applied Ergonomics*, 2016, 55(5): 8–15.

作者简介:

赵小松(1971—), 女, 山东济南人, 博士, 副教授, 研究方向: 人因工程, 医疗服务管理, 质量管理, Email: zhaoxs.tju@tju.edu.cn;

赵舒萌(1992—), 女, 辽宁抚顺人, 硕士生, 研究方向: 人因工程, 医疗服务管理, Email: sweetty_zhao@tju.edu.cn;

刘娜(1995—), 女, 河北沧州人, 硕士生, 研究方向: 人因工程, 医疗服务管理, Email: zxcliuna@163.com;

樊锐(1989—), 男, 山东潍坊人, 硕士生, 研究方向: 人因工程, 质量管理, Email: fr123456770@163.com;

何桢(1967—), 男, 河南濮阳人, 博士, 教授, 研究方向: 质量管理, Email: zhhe@tju.edu.cn.