

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.07.014

本文引用格式:王成军,刘佳敏.考虑操作者工作负荷的混流装配线平衡问题研究[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(7):100-107.

Citation format: WANG Chengjun, LIU Jiaming. Research on Balance Problem of Mixed-Flow Assembly Line with Operator's Workload[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(7): 100-107.

# 考虑操作者工作负荷的混流装配线 平衡问题研究

王成军,刘佳敏

(西安建筑科技大学 管理学院, 西安 710055)

**摘 要:**针对混流装配线上的任务分配和操作者分配问题,引入了考虑装配关系复杂度和操作者经验的脑力负荷模型与考虑能量消耗量的体力负荷模型,以最小化工作节拍、最小化时间均衡指数、最小化负荷均衡指数为目标,建立考虑操作者工作负荷的混流装配线平衡模型。针对此多目标优化问题,运用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求得 Pareto 解集,并用 Matlab 编程进行实例验证。结果表明,优化后的模型在保证前两个目标优化结果的同时,能更好地均衡各个工位间的工作负荷,验证了模型和方法的有效性。

**关键词:**工作负荷;混流装配线;装配线平衡;NSGA-II

**中图分类号:**TH16;F279.21 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-8425(2020)07-0100-08

## Research on Balance Problem of Mixed-Flow Assembly Line with Operator's Workload

WANG Chengjun, LIU Jiaming

(College of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** For the problem of task assignment and operator assignment on mixed-flow assembly lines, a mental load model considering the complexity of assembly relationship and operator experience and a physical load model considering energy consumption are introduced to minimize the working beat and minimize the time balance. The indicator and the minimum load balancing indicator are the targets, and a mixed-flow assembly line balance model considering the operator's workload is established. Aiming at this multi-objective optimization problem, the fast non-dominated sorting genetic algorithm with elite strategy (NSGA-II) is used to obtain the Pareto frontier solution set that satisfies multiple target requirements simultaneously. Through a case study, the optimized model can better balance the load between the stations while ensuring the optimization results of the first two objectives, thus

收稿日期:2019-05-22

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71872141)

作者简介:王成军,男,教授,博士生导师,主要从事系统工程、人因工程等方面研究,E-mail:879349847@qq.com。

achieving the overall optimization of the problem. The validity of the model and method was verified.

**Key words:** workload; mixed flow assembly line; assembly line balance; NSGA-II

近年来,混流装配线因其高效率、柔性化的优势被离散制造企业广泛采用。在混流装配线上,不同产品的工艺流程是有所区别的,为了减少人员和设备成本,混装线上不同产品的相似任务通常放在同一个工位上装配。因此当产品种类急剧增多时,操作者不仅需要掌握装配技术,还需在不同装配模型转换中选择正确的零件和装配工艺,同时承受着体力负荷和脑力负荷。仅靠时间平衡的结果导致各个工位间负荷不均、出现瓶颈工位,极大地影响了系统的整体性能。因此在研究装配线平衡问题时,考虑工作负荷有助于优化平衡效果,此外,还能有效降低操作者人体工程学风险。

国内外学者围绕混流装配线平衡问题主要进行了平衡模型与模型求解两类研究。

在平衡模型研究上,学者们通过考虑不同的约束条件和优化目标建立平衡模型。Neda-Manavizadeh 等<sup>[1]</sup>在定制与随机环境约束下建立优化模型;Razali 等<sup>[2]</sup>考虑了问题建模中的资源约束建立优化模型,Mohd Azmi 等<sup>[3]</sup>在考虑物料运输间隔和分配限制约束,生成混合整数线性规划模型;Ibrahim<sup>[4]</sup>以最小化生产节拍和最小化工作地数为目标建立了多目标数学模型;Bautista 等<sup>[5]</sup>以混流装配线平衡延迟率为优化目标建立平衡模型;童小英等<sup>[6]</sup>考虑多边装配约束条件,采用启发式方法进行作业元素工位划分,使各工位负荷均衡;李金霖等<sup>[7]</sup>引入多能工概念以达到最小化人工成本并满足需求波动下不同情境需求的目的,这些研究均在特定约束下求得了相关优化目标的满意解,但忽视了操作者在操作过程中的工作负荷带来的不确定性,将工人视为完全相同的个体;并以工作时间的平衡来衡量负载的平衡,不符合生产实际。

人是生产系统的核心,越来越多的企业将人的因素考虑到在生产系统中。Battini 等<sup>[8]</sup>使用 PMES 快速估计操作工人的体力负荷并评估其人因工程水平,建立考虑人因工程水平的平衡模型;

赵小松等<sup>[9]</sup>在人工拣选货品排程问题中引入了人因失误率和能量阈值建立模型,优化了排程结果;曾旭等<sup>[10]</sup>在车间布局问题中提出车间作业负荷函数,使得搬运工人作业效率提高的同时,累计疲劳指数也下降,这些生产系统中的人因考虑方式为本研究提供了理论参考。在这些研究的基础上,本研究考虑混流装配线产品多样性带来的装配选择复杂性与操作者自身工作经验的差异,建立脑力负荷模型;并将其与考虑能量消耗量的体力负荷模型整合为工作负荷模型,研究混流装配线平衡问题。

在求解方法的研究上,传统的精确求解算法难以在有限时间内获取高质量的优化结果,智能算法是最为有效的解决方式。学者们根据模型的特点选择设计不同的算法解决装配线平衡问题。徐立云<sup>[11]</sup>、韩煜东<sup>[12]</sup>、吴永明<sup>[13]</sup>等采用了蚁群算法、改进遗传算法、粒子群算法等对建立的模型进行求解,但这些算法均是通过加权求和平均法实现多目标问题到单目标问题的转化,存在多个目标间的量级不同,权重设置太过主观等问题。因此,本研究直接选用多目标遗传算法(NSGA-II)求得 Pareto 解集,为企业选择调度方案提供参考。

## 1 模型建立

### 1.1 脑力负荷评价模型构建

脑力负荷是脑力资源占用程度或所用信息处理能力等认知方面的负荷。一定时间内要求处理的信息量越大或者系统内信息越复杂,在该时间内脑力资源占用的就会越多,脑力负荷相应的也就越大<sup>[14]</sup>。而信息熵可以描述系统所处状态的复杂程度,熵的数值越大,表明系统所包含的信息量越大,故本研究考虑用信息熵来衡量脑力负荷;同时,研究发现,操作者经验水平对脑力负荷存在负向影响<sup>[15]</sup>。因此,本研究将操作者的经验水平作为内部因素,混流装配线上的装配选择复杂性

作为外部因素,构建操作者脑力负荷评价模型。

$$Q_j = e_i \times (1 - \rho EL_j) \quad (1)$$

$$e_i = - \sum_{m=1}^M e_{mi} \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

其中,

$$e_{mi} = \begin{cases} 0 & \lambda_{mi} = 0 \\ \frac{q_m \lambda_{mi}}{\sum_{m=1}^M q_m \lambda_{mi}} \log_2 \frac{q_m \lambda_{mi}}{\sum_{m=1}^M q_m \lambda_{mi}} & \lambda_{mi} \neq 0 \end{cases}$$

$$i = 1, \dots, N; m = 1, \dots, M$$

式中: $Q_j$ 表示操作者 $j$ 的脑力负荷; $e_i$ 表示操作任务的选择复杂度; $EL_j$ 表示操作者 $j$ 的经验水平; $\rho$ 表示经验水平对操作者脑力负荷的影响系数(本文中的值参考李莉等<sup>[14]</sup>的研究,定位为0.32)。

### 1.2 基于能量消耗值的体力负荷测量

对于装配线上不同的操作任务,由于构件大小、形状、质量等差异具有不同的体力负荷;对于装配线上相同的操作任务,不同的操作者由于生理差异承受的体力负荷也是不同的。目前主要有两种衡量体力负荷的方式;一种是采用相对指标,比如相对代谢率,一种是采用绝对指标,比如,卡路里消耗量。本研究采用一种赵小松等<sup>[8]</sup>提出的简易的人体运动时的热量消耗方法来计算能量消耗值。

$$M_j = (RMR_j + 1.2)(BMR \times BSA \div 60) \quad (3)$$

其中: $RMR$ 表示相对代谢率; $BMR$ 表示基础代谢率; $BSA$ 表示人体表面积。

### 1.3 考虑操作者工作负荷的混流装配线平衡模型

实际问题中,装配线已经建立,现场布局和生产设备基本固定,改建或扩建成本高昂,故本文选择第二类装配线平衡问题进行研究,即以最小化工作节拍和最小化时间均衡指数为目标,以提高人员和设备利用率,并增加装配线产出。此外,由于操作者生理指标、工作经验的差异和工作站上任务组合的不同,导致操作者承受的体力负荷和脑力负荷也不同,分别达到平衡难度大且没有必要。故本研究拟将脑力负荷和体力负荷综合考虑为工作负荷,将最小化工作负荷均衡指数也作为

目标之一,旨在减少脑力和体力负荷双高的瓶颈工位。

问题可描述为:在混流装配线中的 $S$ 个工作站上装配 $M$ 个产品的 $N$ 种任务,在一定的约束条件下完成对任务和操作者的分配。

基本假定如下:

1) 同一产品的各变体的相同任务分配到同一个工作站;

2) 任务之间的先后顺序已知,不同产品的任务先后顺序图可综合为一个先后顺序图;

3) 不同操作者执行不同产品变体的同一任务时操作时间可能不同;

4) 每个工作站只有1个人。

模型中涉及的参数有:

$i$ 表示操作任务, $i = 1, \dots, N$ ;

$j$ 表示操作者, $j = 1, \dots, S$ ;

$k$ 表示工作站, $k = 1, \dots, S$ ;

$m$ 表示装配模型, $m = 1, \dots, M$ ;

$q_m$ 表示装配模型 $m$ 的比例;

$C$ 表示工作节拍;

$t_{ijm}$ 表示在操作者 $j$ 在装配模型 $m$ 中的任务 $i$ 时的操作时间;

$F_i$ 表示任务 $i$ 的前置任务集合;

$Q_j$ 表示操作者 $j$ 在装配任务中的脑力负荷;

$M_j$ 表示操作者 $j$ 在循环过程中的体力负荷;

$\alpha$ 表示脑力负荷和体力负荷对作业负荷的影响系数;

$W_j$ 表示操作者 $j$ 在循环时间内的平均工作负荷值;

$W_j$ 表示操作者 $j$ 在循环时间内的平均工作负荷值,是综合考虑脑力负荷与体力负荷的结果,取二者的几何平均数;

$P_j$ 表示操作者 $j$ 的工作负荷在所有操作者工作负荷和中的比例;

$s_{km}$ 、 $S_{km}$ 分别表示在每个工作stations上装配不同模型时的空闲时间及占总空闲时间的比例;

决策变量引入0-1变量:

$\lambda_{mi}$ :若模型 $m$ 包含操作任务 $i$ , $\lambda_{mi}$ 为1,否则

为0;

$x_{ik}$ :若任务  $i$  分配到工作站  $k$  上, $x_{ik}$  为 1,否则为 0;

$y_{jk}$ :若操作者  $j$  分配到工作站  $k$  上, $y_{jk}$  为 1,否则为 0;

模型表示:

$$\text{Min } z_1 = C \quad (4)$$

$$\text{Min } z_2 = \frac{M}{S(M-1)} \sum_{k=1}^S \sum_{m=1}^M \left( S_{km} - \frac{1}{M} \right)^2 \quad (5)$$

$$\text{Min } z_3 = \frac{S}{S-1} \sum_{j=1}^s \left( P_j - \frac{1}{S} \right)^2 \quad (6)$$

约束条件为:

$$\sum_{k=1}^s x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^s y_{jk} = 1 \quad j = 1, \dots, S \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^s y_{jk} = 1 \quad k = 1, \dots, S \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^s kx_{ak} \geq \sum_{k=1}^s kx_{bk} \quad (10)$$

$$a = 1, \dots, N, b \in F_a$$

$$S_{km} \geq 0 \quad k = 1, \dots, S; m = 1, \dots, M \quad (11)$$

$$C = \max \left( \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^N t_{ijm} x_{ik} y_{jk} \right) \quad (12)$$

$$k = 1, \dots, S; m = 1, \dots, M$$

$$\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^N t_{ijm} x_{ik} y_{jk} + s_{km} = C \quad (13)$$

$$k = 1, \dots, S; m = 1, \dots, M$$

$$S_{km} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{m=1}^M q_m s_{km} = 0 \\ \frac{q_m s_{km}}{M} & \text{否} \end{cases} \quad (14)$$

$$k = 1, \dots, S; m = 1, \dots, M$$

$$W_j = \sqrt{Q_j \times M_j} \quad j = 1, \dots, S \quad (15)$$

$$P_j = \frac{W_j}{\sum_{j=1}^s W_j} \quad j = 1, \dots, S \quad (16)$$

其中,式(4)~(6)给出了该模型的最小化工作节拍、最小化时间均衡指数以及最小化负荷均衡指

数 3 个目标函数;式(7)~(10)给出了装配线问题的一般约束;式(11)用于保证工作站上的空闲时间不为负值;式(12)~(16)给出模型中主要数值的计算公式。

## 2 NSGA-II 求解模型

### 2.1 基本算法

针对此多目标问题,本文选用带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解,算法流程图如图1所示。

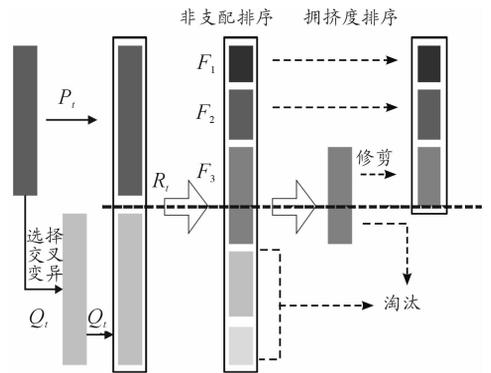


图1 NSGA-II 算法流程图

### 2.2 编码设计

本研究采用基于随机键的编解码方法,将编码分为任务分配基因部分和操作者分配基因部分,任务分配染色体数目为任务数+工作站数-1,操作者分配染色体数目为工作站数。此种编码方式已经满足约束(7)、(8)、(9)。假设有 7 个任务,将 3 个操作者分配到 3 个工位上,具体编解码如图 2 所示。

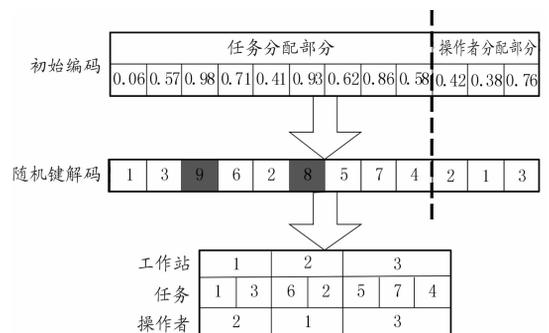


图2 基因编码与解码

### 2.3 求解步骤

1) 确定  $N$  项任务和  $S$  个操作者的基本信息, 基于基础代谢率、相对代谢率, 操作者身体表面积进行初始数据计算得到体力负荷。

2) 采用随机键编码方式, 将现有分配方案作为第 1 个编码, 以保证结果的优化, 然后随机产生其余  $n-1$  个个体构成初始种群。

3) 随机选择个体进行 NDX 交叉、高斯变异生成子代种群。

4) 父子代合并生成新种群, 设置惩罚函数, 根据违反约束的程度赋予惩罚值, 并乘以惩罚系数, 剔除不满足约束关系的解, 进行快速非支配排序并计算拥挤度。

5) 使用精英策略得到新种群。

6) 循环步骤 3) ~ 5), 直至达到种群迭代次数时结束, 记录优化结果。

### 3 算例分析

某汽车变速箱装配线共有 4 个工作站、4 个操作者生产 3 种类型的变速箱, 各个类型的装配比例如表 1 所示, 各个操作者的经验系数可采用主管打分法测得, 如表 2 所示, 任务顺序图如图 3 ~ 6 所示, 相同编号的任务相似但不完全相同, 各个任务以及操作者参数如表 3、表 4 所示。

表 1 模型装配比例

$m$	1	2	3
$q_m$	0.3	0.5	0.2

表 2 操作者经验水平

$j$	1	2	3	4
$EL_j$	0.9	0.85	0.85	0.75

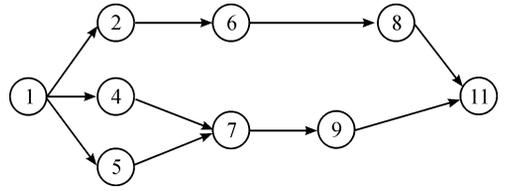


图 4 B 产品作业顺序图

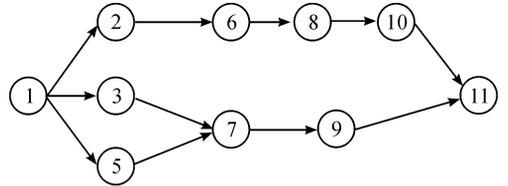


图 5 C 产品作业顺序图

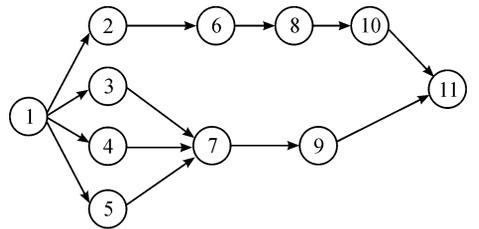


图 6 综合作业顺序图

由于操作者生理差异和经验水平差距, 导致在操作不同模型中任务时所花费的时间以及所承受的体力负荷也不同, 因此安排合适的工人去对应的工作站以均衡站之间的工作负荷, 在混流装配线平衡中就显得很有实际价值。操作者操作不同模型中任务所需时间和体力负荷经标准状态下测定如表 3、表 4 所示。如果模型中不包含某项装配任务, 则表中时间和负荷值为 0。

算法采用 Matlab 编程, 取初始种群 40, 迭代次数 500, 交叉概率 0.7, 变异概率 0.4, 惩罚系数 100, 对考虑操作者工作负荷的模型进行多次运算, 选取一组最优的 Pareto 解。由 Pareto 解在空间分布状态来看, 此组解均匀性良好。

从图 7 中可以看到 3 个目标之间呈现冲突, 因此可以根据企业需求确定以某一个目标为主进行权衡选择。由于第二类装配线平衡问题的主要目标是 minimized work cycle time, 所以在选择装配方案时, 以节拍为首要考虑对象, 在帕累托前沿解集中选取按节拍排序的前 5 个解进行分析。

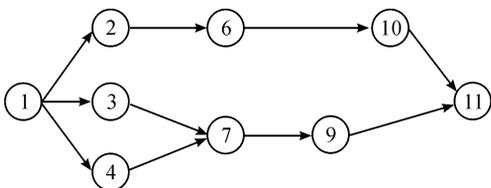


图 3 A 产品作业顺序图

表3 操作者操作不同模型中任务所需时间

任务	模型 1				模型 2				模型 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	7	9	8	9	7	8	7	8	7	9	9	10
2	4	4	4	5	3	3	3	3	4	4	4	4
3	5	4.5	4.2	5	0	0	0	0	5	4.5	4.2	5
4	3	2	2	0	2.3	2.2	2	3	0	0	0	0
5	0	0	0	0	5	5.3	5.2	6	5	5.2	5.1	6
6	3	4	3	2.9	3	3.1	2.8	3	3	3.4	2.5	3
7	2.5	3.6	2.5	3	3.2	2.6	2	3	3	3.5	2.5	3
8	0	0	0	0	4.1	4.3	4.6	5	4	4.3	4.5	5
9	1	1.1	1.2	1	1	1.2	1.3	1	1	1.1	1.2	1
10	3	3.4	3.5	4	0	0	0	0	3	4	4	4.5
11	8	10	7	7	9	7	8	8	8	7	7	8

表4 操作者操作不同模型中任务消耗体力负荷

任务	模型 1				模型 2				模型 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	64.3	63	68.6	62.2	59.8	57	61.4	57.6	61.3	60	62.4	59.8
2	36.5	35.4	37	35	36.2	36	37.1	35.9	35.9	34.4	36	34
3	32.4	32.1	33	32.1	0	0	0	0	33.5	32.7	34.6	32
4	12.9	11.5	13.4	11.3	21.5	20.4	22.5	20.1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	36.4	34.3	36.7	34	32.2	31	33.2	30.9
6	8	7	7.2	8.9	6.9	7.1	8.2	7.6	6.2	5.8	7	6
7	25.4	25.1	25.7	24.8	20.2	22	21	19.8	23.2	22.5	24	21.8
8	0	0	0	0	20.9	20	31.4	19.8	18.3	17.2	19	16.8
9	12.9	11.5	13.4	11.3	21.5	20.4	22.5	20.1	15.4	14.8	16.3	14.2
10	25.4	25.1	25.7	24.8	0	0	0	0	23.2	22.5	24	21.8
11	53	52	52	50	59.8	57	61.4	57.6	56	54	55	53

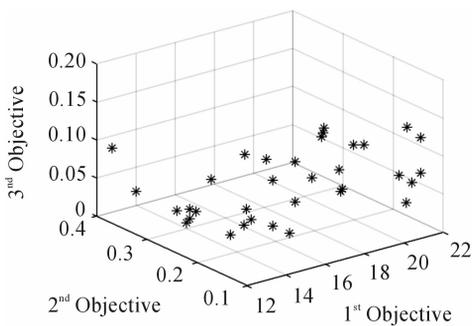


图7 Pareto 解

将优化后选择的5种分配方案与原方案进行对比发现,3个目标均不劣于现有方案。其中,比较方案2和方案3发现相同的任务分配对应不同的操作者分配,产生的时间均衡指标和负荷均衡指标不同,这与现实是相符的。通过对考虑操作者负荷的模型求解,所得的分配方案在满足了基本的时间相关目标的基础上,进一步均衡分配了操作者负荷,可以维持装配线长期稳定的运行。

表5 分配方案表

方案	工作站	任务	操作者	工作节拍	空闲时间均衡指数	操作者负荷均衡指数
原方案	1	[1]	2	13.5	0.458 1	0.114 3
	2	[4,3,2,6]	4			
	3	[5,8,7]	3			
	4	[10,9,11]	1			
1	1	[1]	4	12.3	0.380 9	0.092 6
	2	[2,5,6]	3			
	3	[4,3,7,8]	2			
	4	[10,9,11]	1			
2	1	[1,4]	4	12.6	0.245 1	0.034 2
	2	[2,5,6]	2			
	3	[3,8,7,9]	3			
	4	[10,11]	1			
3	1	[1,4]	2	13	0.254 0	0.034 0
	2	[2,5,6]	4			
	3	[3,8,7,9]	3			
	4	[10,11]	1			
4	1	[1,3]	3	13.2	0.367 3	0.033 4
	2	[2,6,5]	2			
	3	[4,8,7,9]	4			
	4	[10,11]	1			
5	1	[1]	4	13.3	0.222 3	0.093 7
	2	[2,5,4,3]	3			
	3	[6,7,8]	2			
	4	[10,9,11]	1			

## 4 结束语

本文针对混流装配线平衡研究中忽视人因差异、以时间均衡表示负荷均衡等问题,从脑力负荷的内外部影响因素出发建立脑力负荷模型,并与体力负荷模型综合考虑为工作负荷模型研究混流装配线平衡问题。使用 NSGA-II 对模型求解,所求得的结果充分考虑了操作者的人因差异,减少了脑力负荷和体力负荷双高的瓶颈工位。为减少人因失误率、降低操作者人体工程学风险作出贡献。但仍存在下列不足:为了突出混流的特点,在

衡量脑力负荷时,内外部影响因素仅考虑了装配选择复杂性和操作者经验两个主要因素。后续研究可以综合考虑其他复杂性以及其他可能影响脑力负荷的因素以丰富模型;研究中体力负荷是一个定值,但实际生产中,体力负荷会随休息时间的不同有一定的恢复。后续研究可以将体力负荷和休息时间等建立起一个动态的函数,将会更加贴合实际。

## 参考文献:

- [1] MANAVIZADEH N, RABBANI M, MOSHTAGHI D, et

- al. Mixed-model assembly line balancing in the make-to-order and stochastic environment using multi-objective evolutionary algorithms[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(15): 12026 – 12031.
- [2] RAZALI M M, AB RASHID M F F, MAKE M R A. Mathematical Modelling of Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem with Resources Constraints [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 160(1): 012002.
- [3] MOHD AZMI N I L, AHMAD R, ZAINUDDIN Z M. MILP model for integrated balancing and sequencing mixed-model two-sided assembly line with variable launching interval and assignment restrictions[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 890: 012107.
- [4] KUCUKKOC I, ZHANG D Z. Type-E parallel two-sided assembly line balancing problem: Mathematical model and ant colony optimisation based approach with optimised parameters [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 84(C): 56 – 69.
- [5] BAUTISTA J, ALFARO-POZO R, BATALLA-GARCÍA C. Minimizing Lost-Work Costs in a Mixed – Model Assembly Line[J]. *Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering*, 2018: 213 – 221.
- [6] 童小英, 滕瑞飞, 孙丽. 仿真环境下基于遗传算法的混流装配线排产优化研究[J]. *制造技术与机床*, 2018(11): 29 – 35.
- [7] 李金霖, 陈晓红, 高杰. 用多能工应对需求波动的混流装配线平衡问题[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(4): 923 – 933.
- [8] SGARBOSSA F. Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model [J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 54(3): 1 – 22.
- [9] 赵小松, 武锦慧, 何楨. 考虑疲劳和工作负荷的人工拣选货品排程研究[J]. *系统工程学报*, 2015, 30(5): 703 – 10.
- [10] 曾旭, 杨铭, 陆刚, 等. 车间布局人因优化模型与应用研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(7): 158 – 160.
- [11] 徐立云, 蔡炳杰, 曲宝升, 等. 任务分区及工位约束下装配线第二类平衡研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 269 – 75.
- [12] 韩煜东, 董双飞, 谭柏川. 基于改进遗传算法的混装线多目标优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(6): 1476 – 85.
- [13] 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[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4): 781 – 90.
- [14] 李莉. 基于脑负荷的混流装配产品质量与效率平衡优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [15] 戢晓峰, 连晨希, 冯川, 等. 多源信息下驾驶员认知负荷的测度方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(12): 34 – 39.

(责任编辑 何杰玲)