

# 基于0-1规划的女式衬衫生产线平衡优化

兰小春<sup>1</sup>, 袁金宏<sup>1</sup>, 于小玲<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学 经济与管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国地质大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为解决服装制造行业长期以来面临的作业负荷不均和生产效率低下等问题,以YU公司某款女式衬衫生产线为例,针对第I类和第II类生产线平衡问题,采用0-1规划模型进行优化研究。根据衬衫生产现状,以最小工作站数和最优生产节拍为目标,建立两类数学模型,并借助Lingo求解,得到作业元素最优组合,最后进行比较和选择。研究表明,第I类平衡问题的模型在提高生产效率方面表现更优。该研究对服装生产领域开展生产系统优化具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 生产线平衡; 0-1规划; Lingo软件; 平衡率改善; 作业分配

**中图分类号:** TS 941.63; TS 941.713 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2025)02-0110-06

## Production Line Balancing Optimization for Women's Shirt Manufacturing Based on 0-1 Programming

LAN Xiaochun<sup>1</sup>, YUAN Jinhong<sup>1</sup>, YU Xiaoling<sup>2</sup>

(1. School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;  
2. School of Economics and Management, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To address long-standing issues in the apparel manufacturing industry such as uneven workload distribution and low production efficiency, this study focused on the women's shirt production line at YU company. Targeting type I and type II production line balancing problems, we conducted optimization research using a 0-1 integer programming model. Based on current shirt production conditions, two mathematical models were established with objectives of minimizing workstation numbers and optimizing production cycle time. The Lingo solver was employed to obtain optimal task element combinations, followed by comparative analysis and model selection. The results demonstrate that the type I balancing model exhibits superior performance in enhancing production efficiency. This research provides valuable insights for production system optimization in the garment manufacturing sector.

**Key words:** production line balancing, 0-1 integer programming, Lingo software, improved balancing rate, task allocation

女式衬衫作为服装生产中的常见产品,其生产流程涉及多个工序和设备,每个工序都有不同的作业时间和人员配置。为使生产线产能最大化并降低成本损耗,需要合理安排各工作站的作业人员、设备及工序,使每个工作站的作业时间尽可能相等<sup>[1]</sup>,从而最大限度地实现生产线的平衡统一,加

快生产进度,提升企业产能。

针对生产线平衡优化问题,许多学者提出了不同的方法和模型,为企业提供了有效的指导和支持。唐自玉等<sup>[2]</sup>针对某车桥公司装配线生产节拍不平衡问题,运用精益生产的方法,消除多余动作,改进生产状况,提高了生产效率。文龙<sup>[3]</sup>以“一体化”

收稿日期:2023-12-27; 修订日期:2025-03-12。

基金项目:黑龙江省教育科学规划重点项目(GJB1421050)。

作者简介:兰小春(1976—),女,副教授,硕士生导师。主要研究方向为管理决策分析、公司治理。

Email: hit06@126.com

液晶屏为研究对象,分析当前液晶屏生产工序,建立两类生产线平衡问题的 0-1 规划模型,得出生产线全局作业编排最优解。TIACCI L<sup>[4]</sup> 同时考虑作业分配和装配线平衡问题,分析作业时间、工序以及各工作站间的联系,运用遗传算法提高装配线效率。ESMAEILBEIGI R 等<sup>[5]</sup> 提出了 E 型简单装配线平衡问题的混合整数线性规划模型,以工位数量最小化、周期最小化和平滑指数为目标,建立 3 种数学模型,还提出有效不等式和辅助变量两种增强技术强化模型,最大化提升装配线生产效率。蒙凯等<sup>[6]</sup> 将正常工作下和给定预防维护下的生产节拍和生产工位调整到最小化,建立多目标优化的灰狼算法,有效减少了生产线的生产成本。郭继东等<sup>[7]</sup> 为解决家具生产线平衡问题及瓶颈工序,建立 0-1 整数规划模型重新分配工位,得到优化后的车间加工流程程序,为同类产品生产提供参考。刘冠权等<sup>[8]</sup> 针对汽车投产排序问题,建立以等待装配时间最短为目标的数学模型,求解最优车型排序,同时验证了该算法的可行性。

在服装生产中,生产线平衡同样会影响生产效率和成本,为优化生产流程和资源配置,常采用数学规划方法。0-1 规划为常见的数学规划方法,其特点在于它限制了变量,只能取 0 或 1 这两个值<sup>[9]</sup>。这种特性使得 0-1 规划在处理具有明确二元选择问题时非常有效,通过合理地设定和解决 0-1 规划问题,可以找到最优的资源配置方案,从而实现生产线的平衡统一。文中结合 YU 公司女式衬衫生产的实际情况,分别建立第 I 类和第 II 类生产线平衡的数学模型,并利用专业线性规划求解软件 Lingo 设计出两类生产线最优化模型的求解程序,寻求分配最优方案。

## 1 生产现状分析

YU 公司是一家专注女性服装生产的公司,与多个品牌合作,为不同风格和需求的女性提供优质的产品和服务。随着社会的变迁和消费者需求的转变,YU 公司将服务对象定位为年轻女性。为了满足该群体的穿着需求,YU 公司与一家知名衬衫品牌签订了生产合作协议,承担该品牌新款女式衬衫的生产任务。新产品上市后受到了消费者的热捧,短时间内在市场上取得了显著的业绩。然而,随着需求的扩大,市场供应变得紧张。为了持续满足消费者需求并保持市场地位,YU 公司亟须采取措施提高产能和生产效率<sup>[10-12]</sup>。因此,公司要求工业工程部门对女式衬衫生产线进行全面的生产优化,通过

提升生产线平衡水平来提高生产力。

YU 公司所采用的女式衬衫生产线是单件流生产线模式,该生产线模式对工序平衡和流水线节拍有着较高的要求<sup>[13-14]</sup>。单件流生产线强调的是每个工序之间的顺畅衔接,只有当上一个工序的作业完成后,产品才会被传递到下一个工序,避免堆积和等待时间,从而提高整体的生产效率。通过对衬衫生产线的实地调研,发现该款女式衬衫的生产线平衡率仅为 73.72%,与行业公认的 80% 生产线平衡率标准相比,还存在一定的提升空间。

以 YU 公司女式衬衫为例,按照单件流生产方式进行生产线优化。该款女式衬衫的生产流程主要包括裁剪、缝纫、熨烫和整理等后处理过程,在这些环节中,缝纫过程尤为复杂,涉及多个细节和工艺的配合<sup>[15]</sup>。因此,文中研究重点将放在缝纫车间的生产作业上,旨在通过优化缝纫车间内的工序来提升整个生产线的平衡水平。根据现场调研绘制女式衬衫生产工艺流程,具体如图 1 所示。该女式衬衫生产线由 12 道工序组成,总作业时间为 2 691 s。

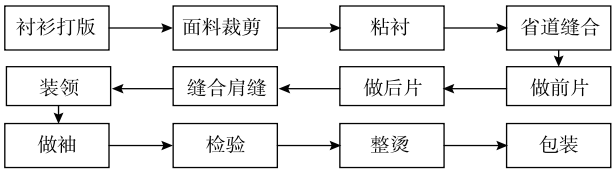


图 1 女式衬衫生产工艺流程

Fig.1 Production process of women's shirts

## 2 建立 0-1 规划模型

### 2.1 生产线平衡问题的分类

为了有效解决 YU 公司女式衬衫生产线上的平衡问题,从减少工作站和降低生产节拍两方面入手,对女式衬衫生产线进行优化。由于求解目标的不同,将分别建立两类生产线平衡问题模型,并针对不同目标对女式衬衫生产线进行优化,以期 YU 公司提供高效且经济的生产线平衡优化方案。

第 I 类:已知生产节拍,作业元素及对应时间,在满足约束条件的前提下,求出最少工作站。其数学模型为

$$\begin{cases} M, T_i, C, \text{Pred}(i, j); \\ \text{Min} \{A_k\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M$  为生产线中作业数量; $T_i$  为每道工序所需要的时间; $C$  为生产节拍; $\text{Pred}(i, j)$  表示  $i$  是  $j$  的上一道工序, $i$  和  $j$  为作业序号; $A_k$  为第  $k$  个工作站, $k$  表示工作站的序号。

第 II 类:已知工作站是固定的,求满足约束条件的前提下最优生产节拍。其数学模型为

$$\begin{cases} M, T_i, C, \text{Pred}(i, j) ; \\ \text{Min} \{ C \} . \end{cases} \quad (2)$$

2.1.1 决策变量定义

$x_{ik}$ :0-1 变量

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, \text{表示有作业 } i \text{ 被分入工作站 } k ; \\ 0, \text{表示没有作业 } i \text{ 被分入工作站 } k . \end{cases} \quad (3)$$

$A_k$ :工作站  $k$  的指示变量

$$A_k = \begin{cases} 1, \text{表示有作业被分入工作站 } k ; \\ 0, \text{表示无作业被分入工作站 } k . \end{cases} \quad (4)$$

2.1.2 约束条件 女式衬衫生产线中每个工作站都必须分配到对应元素,其约束条件及数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) . \quad (5)$$

式中: $K$  为工作站数量,即生产线有  $K$  个工作站。

女式衬衫生产线中,作业  $i$  是作业  $j$  的紧前作业,作业  $i$  一定在作业  $j$  前进行,即作业  $i$  只能分配到  $1 \sim k$  中,则约束条件及数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K k(x_{jk} - x_{ik}) \geq 0 \quad [(i, j) \in \text{Pred}] . \quad (6)$$

式中: $(i, j) \in \text{Pred}$  表示作业  $i$  是作业  $j$  的上一道工序。

女式衬衫生产线中所有工序的作业时间之和必须小于生产节拍,其约束条件及数学表达式为

$$\sum_{i=1}^M x_{ik} T \leq C \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) . \quad (7)$$

2.1.3 生产线平衡率 生产线平衡率( $L$ ) 通常用来评价生产线的平衡状态.其约束条件及数学表达式为

$$L = \frac{\sum_{i=1}^M T}{C \times K} . \quad (8)$$

2.2 第 I 类女式衬衫生产线平衡问题模型构建

在 YU 公司女式衬衫生产线的生产节拍和其他条件不变的情况下,通过合并或重新配置工作站,可以减少资源浪费和等待时间,使整个生产线更加紧凑和高效.据此建立对应目标函数

$$\text{Min} = \sum_{k=1}^K A_k . \quad (9)$$

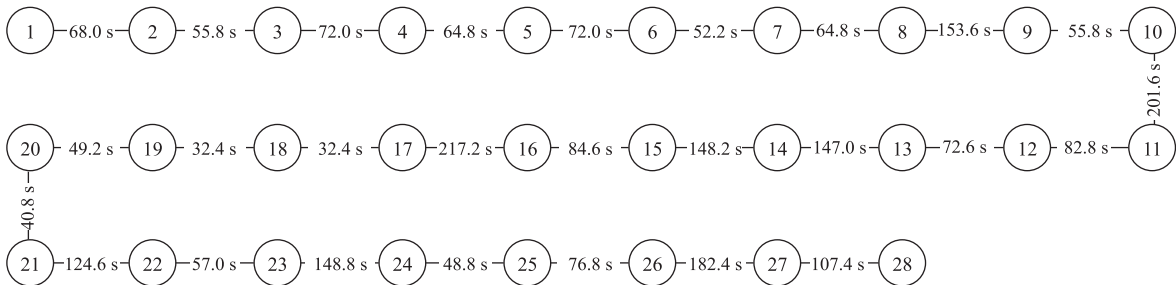


图 2 YU 公司女式衬衫生产线的作业元素优先顺序

Fig. 2 Priority sequence of task elements for the women's shirt production line at YU company

$$\text{约束条件:} \begin{cases} \sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, M) ; \\ \sum_{k=1}^K k(x_{jk} - x_{ik}) \geq 0 \quad [(i, j) \in \text{Pred}] ; \\ \sum_{i=1}^M x_{ik} T \leq C \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) ; \\ \sum_{k=1}^K x_{ik} \leq M \times A_k \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) . \end{cases} \quad (10)$$

2.3 第 II 类女式衬衫生产线平衡问题模型构建

在工作站和其他条件不变的情况下,通过调整生产节拍,可以更好地控制生产速度,确保产品在市场需求旺盛时能够迅速上市,同时避免生产过剩或库存积压.据此建立对应目标函数

$$\text{Min} = C . \quad (11)$$

$$\text{约束条件:} \begin{cases} \sum_{k=1}^K x_{ik} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, M) ; \\ \sum_{k=1}^K k(x_{jk} - x_{ik}) \geq 0 \quad [(i, j) \in \text{Pred}] ; \\ \sum_{i=1}^M x_{ik} T \leq C \quad (k = 1, 2, 3, \dots, K) . \end{cases} \quad (12)$$

3 求解 0-1 规划模型

3.1 生产线作业优先顺序图的绘制

作业优先顺序图利用有向图的方式展示生产线上各作业元素的先后关系,不仅可以保证工艺流程的顺序不会被打乱,还可以清晰看出生产线的生产结构<sup>[16]</sup>.将 YU 公司女式衬衫生产线的实际情况与作业元素划分原则相结合,并将生产线中 12 道工序细分为 28 个作业元素,通过对各元素的作业时间进行测量,绘制作业优先顺序图,为后续的优化工作提供了重要依据.图中每个圆圈内的数字表示一个作业元素的序号,横线表示元素间的优先顺序,横线上的数字则是每个元素作业时间(s),具体如图 2 所示。

3.2 第 I 类生产线平衡问题求解

按照上述作业优先顺序图,根据 Lingo 软件编程要求<sup>[17]</sup>,编写第 I 类生产线平衡问题模型的 Lingo 程序。第 I 类问题模型程序编码如图 3 所示。

```
model|
sets:
fac/ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28;
pla/ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12/a;
coo(fac,pla): x;
pred(fac,fac)/ 1,2 2,3 3,4 4,5 5,6 6,7 7,8 8,9 9,10 10,11 11,12 12,13 13,14 14,15;
endsets
data:
t=68 55.8 72 64.8 72 52.2 64.8 153.6 102.6 201.6 82.8 72.6 147 148.2 84.6 271.49.2 40.8 124.6 57 148.8 48.6 76.8 182.4 107.4 76.8;
enddata
min=@sum(pla(k):a(k));
@for(fac(i):@sum(pla(k):x(i,k))=1);
@for(pla(k):@sum(fac(i):x(i,k)*t(i))<=304.2);
@for(pred(i,j):@sum(pla(k):k*x(j,k)-k*x(i,k))>=0);
@for(coo:@bin(x));
@for(pla:@bin(a));
@for(pla(k):@sum(coo(i,k):x(i,k))<=@size(fac)*a(k));
end
```

图 3 第 I 类女式衬衫生产线平衡问题模型运行程序  
Fig.3 Operational program for the type I women’s shirt production line balancing problem model

运行软件之后得到模型的求解报告,具体如图 4 所示。

Global optimal solution found.		
Objective value:	11.00000	
Objective bound:	11.00000	
Infeasibilities:	0.000000	
Extended solver steps:	599	
Total solver iterations:	232886	
Elapsed runtime seconds:	19.82	
Model Class: PILP		
Total variables:	348	
Nonlinear variables:	0	
Integer variables:	348	
Total constraints:	80	
Nonlinear constraints:	0	
Total nonzeros:	1680	
Nonlinear nonzeros:	0	
Variable	Value	Reduced Cost
T( 1)	68.00000	0.000000
T( 2)	55.80000	0.000000
T( 3)	72.00000	0.000000
T( 4)	64.80000	0.000000
T( 5)	72.00000	0.000000
T( a)	52.20000	0.000000

图 4 第 I 类问题求解编组矩阵  
Fig.4 Solution grouping matrix for type I problems

由式(8) 计算得出,当生产节拍  $C = 304.2$  s 时,得到最优工作站数为 11 并不再分配作业,此时生产线平衡率为80.42%。

表 1 为各作业元素被分配到工作站的情况。根据表 1 得到第 I 类生产线平衡优化后的工作站工时山积图,具体如图 5 所示。

表 1 第 I 类各作业元素分配情况  
Tab.1 Task element allocation analysis for type I

工位站序号	作业元素	工作站工时 /s
1	1,2	123.8
2	3,4,5	208.8
3	6,7,8	270.6
4	9,10	304.2
5	11,12,13	302.4
6	14,15	232.8
7	16,17	303.6
8	18,19,20,21	247.0
9	22,23,24	254.4
10	25,26	259.2
12	27,28	184.2

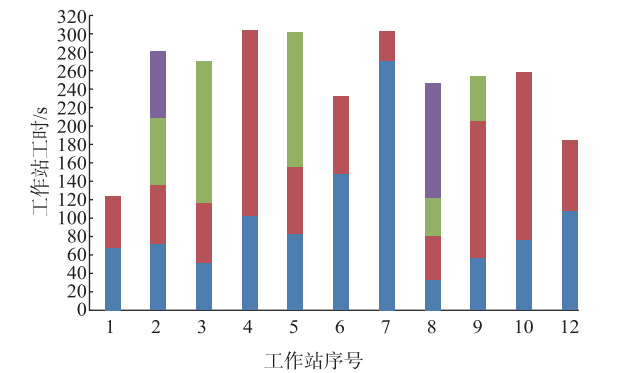


图 5 第 I 类生产线平衡后工作站工时山积图  
Fig.5 Workstation time yamazumi chart for type I production line post-balancing

3.3 第 II 类生产线平衡问题求解

考虑作业元素的优先关系和 0-1 规划模型,编写第 II 类生产线问题模型的程序。第 II 类问题模型程序编码如图 6 所示。

```
model|
sets:
fac/ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28;
pla/ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12/a;
coo(fac,pla): x;
pred(fac,fac)/ 1,2 2,3 3,4 4,5 5,6 6,7 7,8 8,9 9,10 10,11 11,12 12,13 13,14 17,18 18,19 19,20 20,21 21,22 22,23 23,24 24,25 25,26 26,27 27,28;
endsets
data:
t=68 55.8 72 64.8 72 52.2 64.8 153.6 102.6 201.6 82.8 72.6 147 148.2 84.6 271.49.2 40.8 124.6 57 148.8 48.6 76.8 182.4 107.4 76.8;
enddata
min=cycetime;
@for(fac(i):@sum(pla(k):x(i,k))=1);
@for(pla(k):@sum(fac(i):x(i,k)*t(i))<=cycetime);
@for(pred(i,j):@sum(pla(k):k*x(j,k)-k*x(i,k))>=0);
@for(coo:@bin(x));
@for(pla:@bin(a));
end
```

图 6 第 II 类女式衬衫生产线平衡问题模型运行程序  
Fig.6 Operational program for the type II women’s shirt production line balancing problem model  
模型运行后的求解报告如图 7 所示。

Global optimal solution found.		
Objective value:	279.4000	
Objective bound:	279.4000	
Infeasibilities:	0.000000	
Extended solver steps:	15	
Total solver iterations:	6773	
Elapsed runtime seconds:	1.84	
Model Class: MILP		
Total variables:	349	
Nonlinear variables:	0	
Integer variables:	348	
Total constraints:	69	
Nonlinear constraints:	0	
Total nonzeros:	1357	
Nonlinear nonzeros:	0	

Variable	Value	Reduced Cost
CYCTIME	279.4000	0.000000
I( 1)	68.00000	0.000000
I( 2)	55.80000	0.000000
I( 3)	72.00000	0.000000
I( 4)	64.80000	0.000000
I( 5)	72.00000	0.000000

图 7 第Ⅱ类问题求解编组矩阵

Fig.7 Solution grouping matrix for type II problems

由式(8) 计算得出,当工作站数量为 12 时,最优生产节拍  $C = 279.4\text{ s}$ ,此时生产线平衡率为 80.26%。第Ⅱ类各作业元素的分配情况见表 2。

表 2 第Ⅱ类各作业元素分配情况

Tab.2 Task element allocation for type II

工位站序号	作业元素	工作站工时 /s
1	1,2,3,4	260.6
2	5,6,7	189.0
3	8,9	256.2
4	10	201.6
5	11,12	155.4
6	13	147.0
7	14,15	232.8
8	16	271.2
9	17,18,19,20,21	279.4
10	22,23,24	254.4
11	25,26	259.2
12	27,28	184.2

根据表 2 得到第Ⅱ类平衡优化后的工作站工时山积图,具体如图 8 所示。

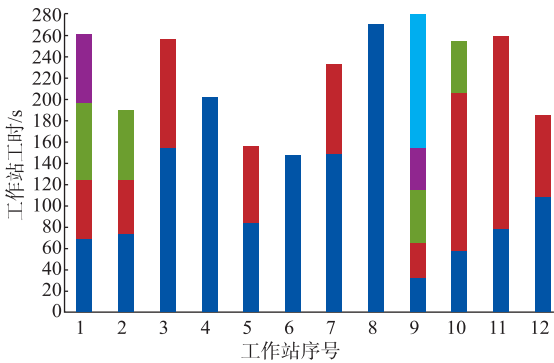


图 8 第Ⅱ类生产线平衡后工作站工时山积图

Fig.8 Workstation time yamazumi chart for type II production line post-balancing

3.4 分析与评价

两类生产线平衡前后的评价指标对比情况见表 3。

表 3 生产线平衡优化效果对比

Tab.3 Comparative analysis of production line balancing optimization effects

指标	生产节拍 /s	生产平衡率 /%	平衡损失率 /%	工位 数 / 个
平衡前	304.2	73.72	26.28	12
第Ⅰ类平衡后	304.2	80.41	19.59	11
第Ⅱ类平衡后	279.4	80.26	19.74	12

表 3 数据显示,第Ⅰ类生产线平衡模型的平衡率较平衡前提高了 6.7%,优化效果优于第Ⅱ类,因此,最终选择第Ⅰ类平衡优化方案。在重新分配作业元素后,部分员工的工作内容可能会发生变化。为了确保员工能够顺利适应新的工作内容和作业要求,需要对员工进行培训,旨在帮助员工快速、准确地掌握新的作业技能,使他们能够迅速适应环境变化,并在新的生产环境下发挥出更高的工作效率。

4 结 语

在服装制造行业,生产线平衡问题一直是制约生产效率和成本的关键因素。为了解决这一问题,以 YU 公司的女式衬衫生产线为例,结合传统工业工程与线性规划方法,对衬衫生产线进行优化研究。通过生产工艺流程明确作业元素之间的逻辑关系,基于此建立 0-1 规划模型,并借助 Lingo 软件进行求解,得到作业元素的最优分配方案,使 YU 公司女式衬衫生产线平衡率提高了 6.7%。使用优化方案不仅提高了衬衫的生产效率,还为公司节省资源,实现了更为科学合理的资源配置。

此外,文中研究不仅为 YU 公司提供了实际的生产线优化方案,也验证了 0-1 规划在服装类生产线中的实用性和可行性,为同类型企业在生产线优化中提供了一定的优化思路。但仍需注意的是,以上是针对 YU 公司单件流女式衬衫生产线平衡的研究,暂未考虑混流生产线,混流生产线更复杂,需进一步探讨。

参考文献:

[1] 许霄,夏明. 启发式算法在服装生产线平衡中的应用现状[J]. 纺织科技进展, 2022(3): 5-9.  
XU Xiao, XIA Ming. Application status of heuristic algorithm in balance of garment assembly line[J]. Progress in Textile



Science and Technology, 2022(3): 5-9. (in Chinese)

[ 2 ] 唐自玉, 朱华炳, 刘光复, 等. 汽车后桥装配生产线节拍平衡优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009(8): 109-112. TANG Ziyu, ZHU Huabing, LIU Guangfu, et al. Optimization for auto rear axle assembly line balancing[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2009(8): 109-112. (in Chinese)

[ 3 ] 文龙. C 企业液晶屏生产线平衡改善研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[ 4 ] TIACCI L. Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for the design of mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 162: 201-215.

[ 5 ] ESMAELBEIGI R, NADERI B, CHARKHGARD P. The type E simple assembly line balancing problem: a mixed integer linear programming formulation[J]. Computers and Operations Research, 2015, 64: 168-177.

[ 6 ] 蒙凯, 唐秋华, 张子凯, 等. 基于改进多目标灰狼算法的装配线平衡与预防维护集成优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(12): 3302-3312. MENG Kai, TANG Qiuhua, ZHANG Zikai, et al. Integrated optimization of assembly line balance and preventive maintenance based on improved multi-objective grey wolf algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(12): 3302-3312. (in Chinese)

[ 7 ] 郭继东, 张开彬, 江俊豪, 等. 基于程序分析和 0-1 整数规划模型的 1 号车间生产线平衡改善设计[J]. 机电工程技术, 2020, 49(2): 12-16, 64. GUO Jidong, ZHANG Kaibin, JIANG Junhao, et al. Balance improvement design of workshop 1 production line based on program analysis and 0-1 integer programming model[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2020, 49(2): 12-16, 64. (in Chinese)

[ 8 ] 刘冠权, 奚浩, 王越, 等. 基于改进遗传算法的汽车混流装配线排序优化[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(8): 78-83, 137. LIU Guanquan, XI Hao, WANG Yue, et al. Optimization of mixed-model automobile assembly line sequencing problem based on improved genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(8): 78-83, 137. (in Chinese)

[ 9 ] 郑晓敏. 0-1 规划在文胸缝制工序优化编排的应用研究[J]. 浙江纺织服装职业技术学院学报, 2021, 20(4): 25-32. ZHENG Xiaomin. On the application of 0-1 programming in the arrangement optimization of bra sewing process[J]. Journal of Zhejiang Fashion Institute of Technology, 2021, 20(4): 25-32. (in Chinese)

[ 10 ] 李军, 范丙毅, 李翔宇. 手机 Housing 检包线平衡分析及优化设计[J]. 工业工程, 2017, 20(2): 71-77. LI Jun, FAN Bingyi, LI Xiangyu. The balance analysis and optimal design in a mobile phone housing inspection line[J]. Industrial Engineering Journal, 2017, 20(2): 71-77. (in Chinese)

[ 11 ] 汤梦娜, 邵一兵, 季晓芬, 等. 基于服装吊挂流水线的瓶颈工序调度[J]. 服装学报, 2024, 9(1): 48-53. TANG Mengna, SHAO Yibing, JI Xiaofen, et al. Bottleneck process scheduling based on garment hanging assembly line[J]. Journal of Clothing Research, 2024, 9(1): 48-53. (in Chinese)

[ 12 ] 许志, 李城, 黄族健, 等. 超纤革用不定岛 LDPE/PA6 纤维生产工艺流程的研究[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(6): 66-69, 98. XU Zhi, LI Cheng, HUANG Zujian, et al. Study on the production process of LDPE/PA6 blend fibers for microfiber leather[J]. Leather Science and Engineering, 2023, 33(6): 66-69, 98. (in Chinese)

[ 13 ] 鞠宇, 王朝晖, 梁志, 等. 基于加工时间异质性的裤装吊挂流水线平衡优化[J]. 现代纺织技术, 2025, 33(3): 81-91. JU Yu, WANG Zhaohui, LIANG Zhi, et al. Balance optimization of pants' hanging assembly lines based on the heterogeneity of processing time[J]. Advanced Textile Technology, 2025, 33(3): 81-91. (in Chinese)

[ 14 ] 杨怡洁, 陈敏之, 徐慧娟. 基于 ECRS 和 SLP 的精品化单件流生产优化设计[J]. 服装学报, 2022, 7(1): 15-21. YANG Yijie, CHEN Minzhi, XU Huijuan. Design of high quality one-piece flow production line based on ECRS and SLP[J]. Journal of Clothing Research, 2022, 7(1): 15-21. (in Chinese)

[ 15 ] 王亚男. 对遗传算法下服装生产流水线平衡的研究[J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(12): 135-137. WANG Yanan. Research on the balance of garment production line based on genetic algorithm[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2021, 50(12): 135-137. (in Chinese)

[ 16 ] 田凌峰. 基于 FLEXSIM 的 A 公司生产线平衡问题优化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.

[ 17 ] 宾茂君, 蒙孜. 整数规划中的数学实验和 Lingo 教学研究[J]. 现代信息科技, 2022, 6(23): 191-194, 198. BIN Maojun, MENG Zi. Mathematical experiment in integer programming and lingo teaching research[J]. Modern Information Technology, 2022, 6(23): 191-194, 198. (in Chinese)

(责任编辑:张 雪)