

# 基于灰关联分析的多目标装配线平衡优化研究

常松鸽

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471000)

**摘要:** 本文提出了一种基于灰关联分析与模拟退火算法的多目标装配线平衡优化方法。针对装配线平衡中的多个优化目标, 首先通过灰关联分析将不同目标的相对重要性综合为单一目标函数, 减少了多目标优化的复杂度。随后利用模拟退火算法, 在全局搜索中考虑目标之间的权重关系, 逐步逼近最优解。通过仿真验证, 不同权重组合对各工位工作负荷和生产节拍的分布产生了显著影响。结果表明, 该方法能够有效平衡不同目标, 实现工位负荷的均衡分配, 并优化生产节拍。尤其是在减少工位间工作负荷差异和缩短生产节拍方面, 提出的模型表现出较好的全局优化能力, 为装配线平衡的实际应用提供了一种可行的解决方案。

**关键词:** 灰关联分析; 模拟退火算法; 多目标优化; 装配线平衡

**中图分类号:** F273.1      **文献标志码:** A

## Research on Multi-Objective Assembly Line Balancing Optimization Based on Grey Relational Analysis

CHANG Songge

(China Airborne Missile Academy, LuoYang 471000, China)

**Abstract:** This paper presents a multi-objective assembly line balancing optimization method based on grey relational analysis and simulated annealing algorithm. For the multiple optimization objectives in assembly line balancing, grey relational analysis is first used to integrate the relative importance of different objectives into a single objective function, thereby reducing the complexity of multi-objective optimization. Then, the simulated annealing algorithm is employed to globally search while considering the weight relationships between objectives, gradually approaching the optimal solution. Simulation results verify that different weight combinations significantly impact the distribution of workload and production cycle time across workstations. The results show that the proposed method effectively balances multiple objectives, achieves an equitable workload distribution, and optimizes the production cycle time. Particularly, in reducing workload differences between workstations and shortening production cycle time, the proposed model demonstrates strong global optimization capabilities, offering a feasible solution for the practical application of assembly line balancing.

**Keywords:** grey relational analysis; simulated annealing algorithm; multi-objective optimization; assembly line balancing

### 1 引言

随着市场竞争的不断升级, 制造企业尤其是复杂装备制造企业面临的要求愈发严苛, 客户对快速响应和成

本效益的需求日益增长, 企业必须不断追求短周期、低成本的交付模式才能提高自身竞争力。装配线平衡优化作为提升生产效率、降低生产成本、缩短生产周期的关

键策略<sup>[1]</sup>，对企业竞争力提升至关重要。

近年来，国内外学者对生产装配线平衡优化进行了大量研究。传统的装配线平衡方法主要通过建立数学模型来描述生产过程中的各种约束和目标，在面对复杂的混流装配线时，往往难以达到理想的优化效果。而通过智能优化算法，如蚁群算法、模拟退火算法、遗传算法等来寻找最优或近似最优解<sup>[2]</sup>，在装配线平衡优化中展示出了较好的应用前景，其中模拟退火算法与其他模型相比通用性更好，更适用于在复杂解空间中找到接近全局最优解的解决方案<sup>[3]</sup>。Wang<sup>[4]</sup>等提出了一种基于模拟退火算法的混合血清生产优化模型，以解决血清生产系统中的优化问题，从而提高血清的生产效率。Nourmohammadi<sup>[5]</sup>等提出了一种基于灰关联的变量域搜索混合遗传算法，用于优化零件配送，从而提高装配线上的物料配送效率。此外，Li<sup>[6]</sup>等提出了一种基于模拟退火算法结合下界加速机制的退火算法模型，用于解决双边装配线的平衡问题，该模型能够逃避局部最优值，提高装配线任务处理的时间效率。

尽管使用退火算法优化的混流装配模型在局部搜索中表现良好，但在全局搜索中可能存在多目标冲突等缺陷<sup>[7]</sup>。苑明海<sup>[8]</sup>等利用混合遗传算法解决了混流装配线平衡问题，但在多目标和多约束情况下，需要进一步研究和试验来验证该方法的有效性和应用性；原丕业<sup>[9]</sup>等对混流装配线的多目标优化问题进行了研究，但未详细对多目标的不同权重的设置及影响进行说明。

在多目标装配线平衡问题中，通常需要同时优化多个目标，且这些目标之间往往存在相互冲突的关系，因此在优化过程中，需要采用有效的方法来平衡这些目标。为此，本研究通过引入灰关联分析方法，在装配线平衡研究中考虑多个目标之间的关联度，将多个目标综合考虑为单一目标，从而减少多目标优化的复杂度。在此基础上，构建模拟退火算法的装配平衡模型，既可以充分考虑不同优化目标之间的关系，又能通过模拟退火算法有效地找到全局最优或近似全局最优的装配线平衡方案。

## 2 装配线平衡模型

为了能够有效兼顾负荷平衡、资源利用和生产效率，本文研究的多目标装配线平衡问题主要围绕生产线中平衡率最高、工位数量最少、节拍最小三个目标建立数学模型<sup>[10]</sup>。平衡率最高即工站间工作负荷差异最小化，可以通过优化分配任务，尽量减少每个工位的负荷差异，确

保工作量分布更加均衡，防止某些工位过载，减少瓶颈的出现。最小工位数量（人员数）即在满足生产节拍的前提下，尽可能减少工位数量，实现资源的最优利用，降低人工和设备成本。周期时间的最小化，可以通过缩短生产周期时间，确保生产过程高效。

### 2.1 多目标平衡模型

工站间工作负荷差异最小化，目标是让所有工站的工作负荷尽量相近，避免某些工站负荷过高或过低，表达如下：

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \left| L_i - \frac{L_{\text{total}}}{n} \right| \quad (1)$$

式中， $L_i$ 为工位*i*的工作负荷， $L_{\text{total}}$ 为所有工位的总工作负荷， $n$ 为工位数量。

最小工位数量如式（2），工位数量越少，生产所需资源和成本越低，系统效率越高。但需要注意的是，减少工位数量必须在满足其他约束条件（如工作负荷均衡和周期时间）下进行，因此在优化过程中限制工位数量的下限或通过权重将其与其他目标函数结合。

$$f_2 = n \quad (2)$$

周期时间*C*是单个工位上执行任务的总时间。如果某个工位的任务总时间超过预定周期时间，则影响整体生产节奏，因此最小化周期时间如下：

$$f_3 = \max(T_1, T_2, \dots, T_i) \quad (3)$$

式中， $T_i$ 为工位*i*的生产时间。生产周期时间是装配线中任务的最大完成时间。

### 2.2 灰关联分析模型

为了综合上述三个目标，本文采用灰关联分析进行处理，将多目标优化问题转化为单一目标的优化问题，可以评估不同目标之间的权衡，避免过度压缩生产节拍、工位数量，确保生产效率与负荷均衡之间的平衡。灰关联分析的具体应用步骤如下。

1) 目标函数归一化：对三个目标函数值进行无量纲化处理，使得不同目标的数值量级一致。对于本文模型的最小化问题，采用归一化公式对目标函数进行处理：

$$f'_i = \frac{f_i - (f_i)_{\min}}{(f_i)_{\max} - (f_i)_{\min}} \quad (4)$$

式中， $f_i$ 为三个目标函数值，即工作负荷差异、工位数量及周期时间，而 $(f_i)_{\max}$ 和 $(f_i)_{\min}$ 分别为各目标函数的最大值和最小值。

2) 计算灰关联度：设定参考序列为理想解（即三个目标函数的最优值），计算当前解与理想解之间的灰关

联度。各目标函数的灰关联度为

$$f_i = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_i + \rho\Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中， $\Delta_i$  是目标函数值与参考值的差异， $\Delta_{\min}$  和  $\Delta_{\max}$  分别是最小和最大差异， $\rho$  是分辨系数（通常取值 0.5）。

3) 加权求和综合关联度：

$$f_{\text{total}} = \alpha_1 \times f_1 + \alpha_2 \times f_2 + \alpha_3 \times f_3 \quad (6)$$

式中， $f_{\text{total}}$  为上述模型的加权求和综合关联度， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为模三个目标函数的权重，代表工作负荷差异、工位数量及周期时间目标在优化中的相对重要性。根据研究需求，这些权重可以根据实际情况灵活设定。

### 2.3 算法求解

模拟退火算法是一种基于物理退火过程的随机优化算法，适合求解大规模组合优化问题。其核心思想是通过控制一个模拟温度，逐步减少随机扰动的幅度，以避免陷入局部最优，算法步骤如下。

步骤 1：初始解生成。在算法开始时，随机生成一个初始任务分配方案，即将每个任务随机分配到一个工位。

步骤 2：目标函数评估。根据上述目标函数计算当前解的目标函数值，目标函数包括工作负荷差异、工位数量和节拍时间，计算当前解的总灰关联度  $\zeta_{\text{total}}$ 。

步骤 3：解的邻域搜索。通过扰动当前解生成新的解，扰动方式为随机选择一个任务并重新分配工位。

步骤 4：接受准则。根据当前解与新解之间的目标函数差异，采用 Metropolis 准则决定是否接受新解。如果新解的目标函数值更优，则直接接受；否则，以一定的概率接受新解，该概率与目标函数差异和当前温度有关。

步骤 5：温度更新与迭代。通过降温系数逐步降低温度，直到温度达到预设的最终温度或达到最大迭代次数，算法停止并输出最优解。

## 3 实例仿真分析

### 3.1 实例仿真

本文以一个复杂装备产品的组件装配为例，进行产品装配线平衡优化实例分析。该组件装配线由 27 道工序组成，原生产线由 3 个工位组成，运用作业写实与时间观测，对每个工序进行时间观测，计算各工序的标准作业时间见表 1，各工序间的优先级关系如图 1 所示。

按照本文算法思路，运用上述数据通过 MATLAB 进行实例仿真，目标生产节拍为 40min，工位数量不少于 5

个，考虑人员配置和生产线柔性，各项优化目标的权重设置相同。得到了工位数为 5 的工位切割平衡方案见表 2，不同工位的工作负荷分布如图 2 所示。可以看出各工位的最大负荷为 36.9min，最小负荷为 20.4min，差异较大，优化前的装配线平衡率为 62.0%，优化后的装配线平衡率约为 74.1%。表明在当前权重组合下，装配线的平衡效果有一定的提升，但尚未达到理想水平。生产节拍为 36.9min，满足目标节拍时间的要求，但仍有优化空间。

表 1 各工序标准时间

| 工位编号 | 工序编号 | 工序时间 /min | 工位时间 /min |
|------|------|-----------|-----------|
| 1    | 1    | 2.1       | 18.7      |
|      | 2    | 6.7       |           |
|      | 3    | 3.6       |           |
|      | 4    | 4.0       |           |
|      | 5    | 2.3       |           |
| 2    | 6    | 6.3       | 44.9      |
|      | 7    | 5.0       |           |
|      | 8    | 8.0       |           |
|      | 9    | 4.7       |           |
|      | 10   | 4.6       |           |
|      | 11   | 4.2       |           |
|      | 12   | 7.6       |           |
|      | 13   | 4.5       |           |
|      | 14   | 4.7       |           |
| 3    | 15   | 6.0       | 73.9      |
|      | 16   | 9.0       |           |
|      | 17   | 4.0       |           |
|      | 18   | 6.5       |           |
|      | 19   | 3.3       |           |
|      | 20   | 5.8       |           |
|      | 21   | 4.5       |           |
|      | 22   | 3.0       |           |
|      | 23   | 6.0       |           |
|      | 24   | 5.2       |           |
|      | 25   | 5.0       |           |
|      | 26   | 6.3       |           |
|      | 27   | 4.6       |           |

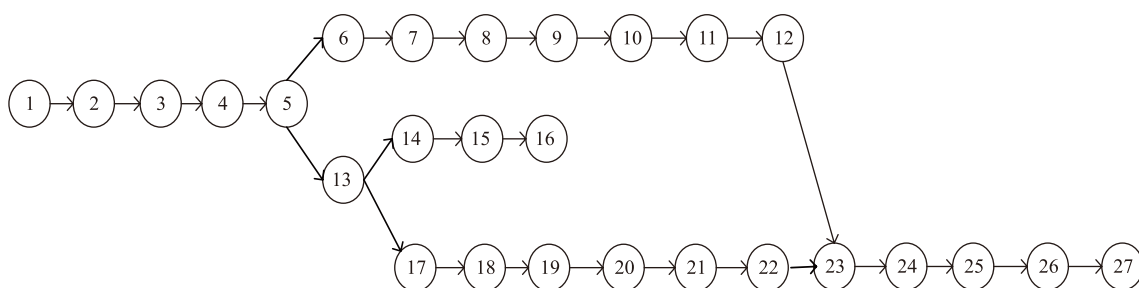


图1 某装配线的工序关系图

表2 工位平衡方案

| 工位编号 | 工序编号              | 作业时长 /min |
|------|-------------------|-----------|
| 1    | 1、2、3、4、5、13      | 23.2      |
| 2    | 6、7、8、9           | 24.0      |
| 3    | 10、11、12、17       | 20.4      |
| 4    | 14、15、16、20、21、22 | 32.3      |
| 5    | 18、19、23-27       | 36.9      |

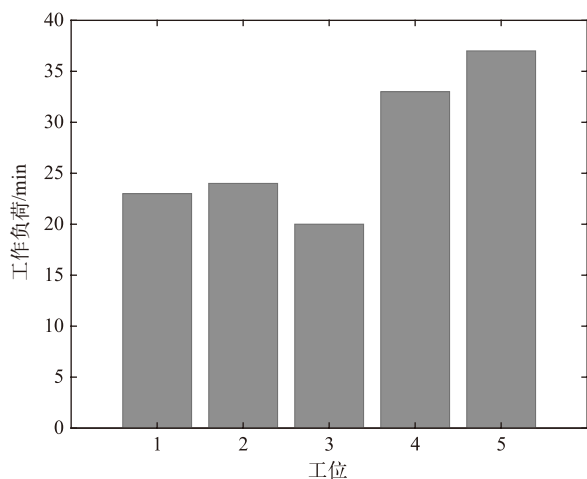


图2 最优工位工作负荷分配

此外,从以上仿真结果可以看出,运用模型仿真对生产线工位进行重新组合划分,装配线平衡率从优化前的62.0%提升到了74.1%,该结果为基于当前的工位划分现状可以实现的相对较为平衡的方案。而在实际运用中对生产线的平衡优化模型还应结合工业工程方法使用,在设计研究阶段对工艺流程、工序设计进行优化,提升生产操作的灵活性,为装配线的平衡、优化、改进提供更好的基础。同时,还可以运用工业工程理论工具如ECRS、动作分析等理论知识,结合作业写实与时间观测的开展,对生产线作业中的操作流程、作业动作、产线

布局不合理等问题进行持续改善<sup>[11]</sup>,减少作业过程中的动作、时间及人力资源的浪费。在此基础上运用模型算法对生产线进行作业工序分割实现生产线平衡,从根本上提升生产线运作效率。

### 3.2 分析讨论

为证明该优化方案在多目标情况下的有效性,本文通过权重组合的变化,展示工作负荷差异、工位数量和生产节拍三者之间的相互作用,演示算法如何根据不同权重组合的调整优化结果。通过改变灰关联分析中的权重组合,可以观察到工作负荷差异和生产节拍的不同表现。设置权重组合1为[0.4, 0.3, 0.3],权重组合2为[0.3, 0.4, 0.3],权重组合3为[0.3, 0.3, 0.4],通过算法模型仿真的结果如图3所示。仿真结果表明,当权重组合为组合1时,工作负荷差异为20.0min,生产节拍为34.8min;而当权重组合为组合2时,工作负荷差异有所减小,为17.7min,但生产节拍增加到40.0min;而当权重组合为组合3时,工作负荷差异增加为22.5min,但生产节拍减少到30.0min。

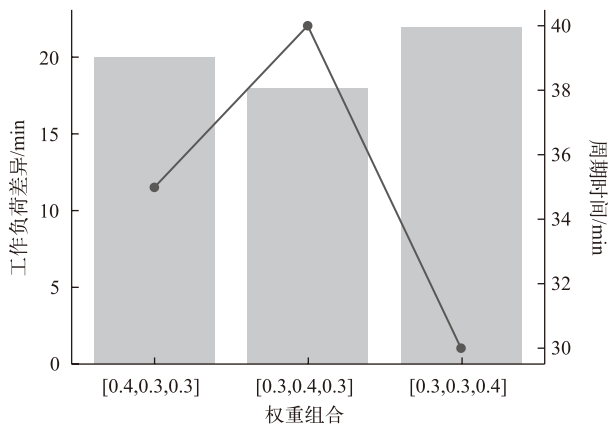


图3 不同权重组合下的工作负荷差异及周期时间

可以看出当不同权重组合对工作负荷差异和生产节

拍产生了明显的影响更加追求各工位间的工作负荷的平衡,增加该目标的权重时,即权重组合为 $[0.3, 0.4, 0.3]$ 时,负荷差异较小,意味着较均衡的分配,相应的会对生产节拍有所影响,在一定程度上影响整体生产效率;而当更加追求生产效率,增加生产节拍这一目标的权重时,即权重组合为 $[0.3, 0.3, 0.4]$ 时,生产节拍最低,但也会降低工作负荷的平衡度。

综上所述,随着优化过程的进行,工作负荷差异逐步减少,表明装配线平衡问题得到了较好地改善。同时,工位数量较为合理,不会出现过多工位闲置的情况。但在某些权重组合下,生产节拍有所增加,需权衡负荷平衡与生产效率之间的关系。因此,可以根据实际需求,设置不同的装配线平衡优化目标,并通过调节各目标函数的权重值体现对不同需求的偏好程度,寻求相应情景下的综合最优方案。本文的仿真模型在寻求不同优化目标间的平衡关系,提升综合效率方面体现出了一定优势。通过从整体出发建立协同优化模型,综合考虑实际生产中的多方面需求,可以在较短时间内获得综合效果最优的解。

## 4 结论

本文通过引入灰关联分析与模拟退火算法,对多目标的装配线平衡问题进行了研究,构建了一个有效的多目标装配线平衡优化模型,采用模拟退火算法对模型进行优化求解,并通过 MATLAB 软件运行仿真,验证了该算法解决问题的有效性,为复杂的装配线平衡问题提供了新的解决思路。虽然该模型能够有效减少装配线的工作负荷差异,并优化生产节拍,但在不同权重组合下,生产效率与负荷平衡之间仍存在一定的矛盾。未来的研究可以考虑更复杂的约束条件,如任务优先级、工位间的物理距离等,以进一步提高模型的实用性。IM

### 参考文献

- [1] 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):165.
- [2] 陈丹丹,曹慕昆.基于改进遗传算法的U型装配线平衡问题求解模型[J].管理工程学报,2021,36(3):149-156.
- [3] ZHANG Z. Balancing and sequencing of mixed-model assembly line with a variable neighborhood simulated annealing algorithm[J]. World Scientific Research Journal, 2021: 285-292.
- [4] WANG L, ZHANG Z, SONG X, et al. Improved genetic-simulated annealing algorithm for seru loading problem with downward substitution under stochastic environment[J]. Journal of Operational Research Society, 2022, 73(8): 1800-1811.
- [5] NOURMOHAMMADI A, ESKANDARI H, FATHI M, et al. Integrated locating in-house logistics areas and transport vehicles selection problem in assembly lines[J]. International Journal of Production Research, 2021, 59(2): 598-616.
- [6] LI Y, KUCUKKOC I, TANG X. Two-sided assembly line balancing that considers uncertain task time attributes and incompatible task sets[J]. International Journal of Production Research, 2020(59): 1736-1756.
- [7] YANG H. Y. Balance of mixed flow assembly line based on industrial engineering mathematics and simulated annealing improved algorithm[J]. Results in Engineering, 2024(22): 1-12.
- [8] 苑明海,李东波,于敏建.面向大规模定制的混流装配线平衡研究[J].计算机集成制造系统,2008,14(1):79-83.
- [9] 原丕业,刘佳楠,刘畅,等.混流装配线平衡问题的多目标优化方法研究[J].运筹与管理,2022,31(10):26-32.
- [10] 李爱平,赵亚西,张家骅,等.考虑装配关系复杂性的多目标装配线平衡优化方法[J].计算机集成制造系统,2019,25(27):1665-1675.
- [11] 岳志春,韩钥.基于工业工程方法的H公司插线板装配线平衡优化研究[J].机电工程技术,2023,52(8):129-133.

作者简介:常松鸽(1997—),女,硕士,助理工程师,主要研究方向为工业工程、生产管理。

收稿日期:2024-12-25