

基于萤火虫算法和粒子群算法在产线平衡中的应用研究

聂湘萍

(广西柳工机械股份有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要 针对目前装配线存在的“早熟”问题和容易陷入局部极值等问题, 本文选用粒子群算法和萤火虫算法, 构建混合粒子群算法, 并利用其遍历性、随机性和规律性对粒子运动速率进行调节, 从而达到多目标优化平衡。仿真试验表明, 该方法能有效地克服“早熟”问题, 并在一定范围内以变化的概率接受较差解的特点, 从而达到最优生产任务的目的。

关键词 萤火虫算法; 粒子群算法; 融合优化; 产线平衡

中图分类号: TP3

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2024)02-0013-03

装配作为生产制造的最终阶段, 在生产流程中起着非常关键的作用。装配问题是指在一定的限制下, 将多个相互关联且相互制约的工艺节点进行有效的配置。装配线平衡需要确保各个工位能高效、有序生产, 达到减少人力和资源浪费、提高装配效率和减少成本的目的。传统的单产品装配线已不能适应当下社会需求, 因此, 混流生产线逐渐被汽车和电子产品等制造业所采用。产线平衡 (ALBP) 是制造业领域中非常关键的研究方向, ALBP 平衡性关系到企业的生产效率、成本以及市场竞争力。Bryton 在 1954 年首先对装配线平衡问题进行了较为全面的探讨。Scholl 等针对装配线平衡问题所使用的分支定界方法, 利用“局部下界”思想, 提高了算法的计算效率; McMullen 等人利用萤火虫算法求解多目标的产线平衡问题; 彭慧等针对混合流水装配线二级平衡问题, 构建了生产节拍加权和平均负荷模型, 并借助粒子群算法进行求解^[1]。在现实生产中, 多个度量因素都会对装配线是否达到平衡状态产生一定的影响, 而单个指标的度量并不能精确地实现最佳平衡。基于此, 萤火虫算法和粒子群算法在产线平衡中的应用价值, 根据装配线平衡率与平滑指数来分析产线平衡。

1 装配线平衡模型构建

产线平衡问题即在装配线上, 被处理的对象有序地沿着装配线运行, 在保证每个工件的装配和生产优先次序的条件下, 将各个工件进行适当地配置到特定数目的在线工作站, 保证每个工作站的工作时长大致相同, 并且不会超出生产节拍, 尽量降低人员和机器

的停留等情况, 以达到生产目标最优化。具体研究内容为: (1) ALBP-I: 在给定的生产线上得到了加工时间, 并求解了极小化车间数目; (2) ALBP-II: 已知流水线上的全部工位数目, 并求出其最优加工时间; (3) ALBP-III: 已知生产线上的机床数量, 求出一种使生产线平滑指数最少的优化方案。

在平衡最优时, 企业相当重视装配线平衡率与平滑指数, 平衡率愈高, 整个装配线的生产效益就愈好; 此外, 本项目还将重点研究装配线的平滑指数, 该指标较低说明装配线上的各个工作站之间的负载更加平衡, 从而使装配线的总体平衡更加完美^[2]。为此, 本项目拟利用基于目标权重平均的优化思想, 综合考虑装配线平衡率与平滑指数, 实现装配线的平衡度与平滑指数的有机结合, 形成最优目标函数, 描述如下。

1. 平衡建模假设。在一条装配线上, 只能制造某种类型的一种商品; 工作单元是最小的、不能重新划分的工作单元, 它的工作时间是一定的; 工件可以根据工件的先后顺序, 将工件配置到任何一台机床上, 但任何工件都要并且只能够被指派到确定的工作站; 工件单元没有被工作站限制, 工件单元的工作时间在各个工作站之间没有变化; 在任何工作站上, 其工作站工作时间均要大于产线上的生产节拍; 装配线上没有平行工作站; 装配线上的工人技术等级没有差别, 可以在任何工作站上进行装配; 对车间闲置资源、成本等要素的没有合理使用, 忽略了工作人员在车间的行走时间。

2. 目标函数。在没有多余空闲的情况下, 在装配

线上有很高的生产率, 这就是最大的装配线平衡率, 表示为:

$$F_1 = \max \sum_{i=1}^N t_i / (M \cdot CT) \quad (1)$$

式中, N 表示为装配线上所有作业元素数量; M 表示为所有工作站数量; CT 表示装配线上的生产节拍; t_i 表示为装配线上 i 作业元素的作业时间。

在装配线上, 各工作站的工作负荷均一致, 平衡性较优, 即装配线平衡指标最小化, 表示为:

$$F_2 = \min \sqrt{\sum_{k=1}^M (CT - T_k)^2 / M} \quad (2)$$

式中, T_k 表示为装配线上 k 工作站的作业时间。

目标函数 F 的表达为:

$$\min F = -F_1 + F_2 = -\max \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{M \cdot CT} + \min \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (CT - T_k)^2}{M}} \quad (3)$$

约束条件为:

$$S_a \cap S_b = \Phi(a, b = 1, 2, \dots, M \text{ 且 } a \neq b) \quad (4)$$

$$\bigcup_{k=1}^M S_k = S \quad (5)$$

$$T_k \leq CT \quad (6)$$

$$k = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$\forall i, \text{ 如果 } P_{ij} = 1, i \in S_a, j \in S_b, \text{ 则 } a \leq b \quad (7)$$

式中, S_a, S_b 在装配线 a, b 工作站上被指派的工件要素的组合; S 是装配线上各工作站上各工件单元的组; $P_{ij}=1$ 代表 j 的紧前作业元素; $i \in S_k (k=1, 2, \dots, M)$ 代表工件 i 已在工作站 k 上进行。公式 (3) 是装配线平衡度与装配线平滑指数综合构成的装配线平衡最优目标方程。公式 (4) 代表每个工件可以被指派到一个确定的工作站; 公式 (5) 代表工作站中全部任务单元要被分配到装配线; 公式 (6) 任意工作站的工作时间均要小于产线上生产节拍; 公式 (7) 代表任务要素都要满足任务的顺序。

2 混合粒子群算法设计

当下针对产线平衡问题, 可运用萤火虫算法、粒子群算法、遗传算法等解决。每一种算法都有着各自的特色, 但是也都有着各自的缺点。1995年, Kennedy 和 Eberhart 共同提出了粒子群算法, 虽然粒子群算法的概念便于理解, 但参数设置较多, 易于实施, 但是在搜索中容易出现“早熟”和容易陷入局部最优^[3]。基于此, 将萤火虫算法与粒子群算法结合, 以二者结

合后的混合粒子群算法来求解产线平衡问题。

根据 NFL 理论, 任何一种算法在面对求解问题时, 都会有失效的时候, 但每一种算法都在各领域中具有应用价值。为此, 针对产线平衡问题, 功能模型复杂, “早熟”现象及粒子群算法存在的问题, 故在运用粒子群算法的基础上联合萤火虫算法来改善存在问题。

2.1 基本粒子群算法

粒子群算法 (PSO) 实质上是一种生物启发式的迭代优化方法, 它通过对两个“极值”的比对, 实现对自己搜索到的最佳点的搜索, 从而获得最优的搜索结果, 从而实现对搜索结果的优化。

D 维空间内 i 粒子的飞行速度和位置则为:

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id} - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd} - X_{id}^k) \quad (8)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (9)$$

其中, V_{id}^{k+1} 为 D 维度上的颗粒在第 +1 次迭代中的移动速率; V_{id}^k 指的是在 D 维度上, 第 k 个迭代中粒子的移动速率; X_{id}^{k+1} 是一个包含了 $k+1$ 个迭代步骤的三维点的位置。 X_{id}^k 是在 D 维空间中, 在第 k 个迭代中的位置; P_{id} 迄今已找到的微粒 i 的最优位置; P_{gd} 指到现在为止, 微粒群所能找到的最优解; k 是迭代数; c_1, c_2 为最大阶梯, 用于调节总和; r_1 与 r_2 为任意数字 (0, 1)。

2.2 混合粒子群算法描述

粒子群算法在解决这一问题时具有很大的优越性, 但是它依赖于初值的设置和灵敏度, 且具有较低的全局寻优能力, 从而降低了优化的准确性。因此, 将萤火虫算法应用于粒子群算法中, 以提高其寻优能力^[4]。

2.3 装配线平衡模型与算法的映射

针对产线平衡问题中存在的一类具有离散形式的组合最优问题, 传统的 H-CPSO 方法无法对其进行有效的处理, 而必须对其进行适当的匹配。

1. 在 D 维空间内, 粒子速度表示为 $v_i = (v_1, v_2 \dots v_n)$, 粒子的初始速度不定。

2. 在装配线上, 每一个独立的粒子都表示在一个装配线的工位, $x_i(k)$ 表示第 i 个粒子在 k 次迭代后的位置。

3. 粒子的适应度函数。以产线平衡率和平滑指数为多目标平滑函数, 同时将适合度功能与分配到工作站的总数量 M 相对应, 其表达式如下:

$$F = -\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{M \cdot CT} + \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M (CT - T_k)^2}{M}} \quad (10)$$

2.4 求解装配线平衡模型的混合算法设计

1. 种群初始化。为了保证 H-CPSO 中的微粒群体产生方法的多样化和合理性, 采用了基于随机产生的任

3.2 实例计算结果

工作站数量为 4~9 个的 6 种情况下, 基本粒子群算法与混合粒子群算法装配线作业分配方案见表 1。

表 1 MITCHELL 问题求解结果对比

工作站数 / 个	生产节拍 /s	标准粒子群算法			混合粒子群算法			
		装配线平衡率 /%	平滑指数	目标函数值	生产节拍 /s	装配线平衡率 /%	平滑指数	目标函数值
4	28	90.416	3.400	2.483	26	96.111	0.755	-0.105
5	22	90.203	1.736	0.822	20	100.000	0	-1.000
6	18	91.104	1.274	0.352	17	96.111	0.715	-0.145
7	16	87.124	2.544	1.661	15	92.640	1.143	0.215
8	14	86.400	3.015	2.131	13	92.640	1.051	0.112
9	14	76.667	8.676	8.008	12	88.633	2.107	1.110

务顺序和基于位置加权的方法对群体进行了初始化, 通过对各问题的随机选择, 将权重高的问题按顺序排列^[5]。对粒子群产生、速率和位置进行初始化的运算如下:

$$I = \{x_{10}, x_{20}, \dots, x_{m0}\} \quad (11)$$

$$V_{id}^0 = V_{\min} + (V_{\max} - V_{\min}) \cdot \text{random}[0,1] \quad (12)$$

$$X_{id}^0 = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \cdot \text{random}[0,1] \quad (13)$$

2. 粒子速度与位置更新。按照迭代方程, 在确定了初始参数 $\omega, c1, c2$ 后, 可以用与这个粒子的最优位置相对应的一个随机数目, 用同样的方法, 把这个粒子的全球最优位置的随机数字减到这个粒子的现在所在的那个随机数字, 并与 $c1r1$ 和 $c2r2$ 作积, 这个计算表达式如 (8) 所示; 在此基础上, 采用逻辑分析方法, 对离子流速计算公式中的 $r1, r2$ 进行了优选, 计算如下:

$$r_i(0) = \text{random}[0,1] \quad (14)$$

$$r_{i1}(k) = r_{i2}(k) = r_i(k) \quad (15)$$

$$r_i(k+1) = 4r_i(k) \cdot (1-r_i(k)) \quad (16)$$

3 计算实例

3.1 参数设定

在已有的试验研究基础上, 从求解精度、搜索性能和计算速度三个方面, 提出了一种基于遗传算法的新型混合微粒群优化算法, 参数为: 种群规模 $m=40$; 惯性权重 $\omega=0.9$; 学习因子 $c_1=c_2=2$; 初始接受概率 $P_r=0.8$; 最大迭代次数 $G_{\max}=300$ 。

实验结果表明, 不管工作站数量有多少, 粒子群算法对应的目标函数值应大于混合粒子群算法对应的目标函数, 因此, 在产线均衡问题上, 采用混合粒子群算法进行产线均衡问题的优化, 并通过试验验证了该方法的有效性。

4 结语

本项目基于标准粒子群算法, 结合多个度量装配线运行状态的基准参数, 构建基于多个参数的装配线平衡均衡模型。通过仿真实验, 验证了 H-CPSO 在整体搜索性能上优于传统 PSO, 提高了系统的运行速度和稳定性, 为装配线平衡问题提供了更好的解决方案。

参考文献:

[1] 张灿然, 窦建平, 王帅, 等. 混合离散粒子群算法求解机器人装配线平衡问题[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023,53(02):349-355.
 [2] 曾培莹, 郑巧仙. 基于多种群粒子群算法求解多目标第 I 类混流装配线平衡问题[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2022,44(05):508-513.
 [3] 肖晖, 郑巧仙. 面向第二类装配线平衡问题的改进粒子群算法[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2023,45(02):164-170.
 [4] 杨承武. 基于粒子群算法的 A 公司装配线平衡与仿真研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2022.
 [5] 邓超, 胡瑞飞, 蒋捷峰, 等. 基于 Witness 与粒子群算法的连接器装配仿真与优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11):1-4,10.