

基于改进烟花算法的随机装配线混流调度

刘伊后^{1†}, 麻娟¹, 左敦稳², 李学伟¹

(1. 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 针对随机装配线混流调度问题, 分析作业时间随机波动对调度优化目标的影响, 提出描述随机作业时间下工位闲置时间和超载时间有效数学期望的概念, 并基于此构建以工位负荷均衡指数为优化目标的随机作业时间条件下的装配线混流调度优化模型. 在标准烟花算法中引入精英策略、变邻域搜索等技术, 设计一种改进烟花算法对模型进行求解, 并结合测试算例和生产实例对随机装配线混流调度模型及求解算法进行验证, 求解结果表明了模型和算法的有效性.

关键词: 装配线; 混流调度; 随机作业时间; 负荷均衡; 烟花算法

中图分类号: TH166

文献标志码: A

Mixed-model sequencing of stochastic assembly line based on improved fireworks algorithm

LIU Yan-hou^{1†}, MA Juan¹, ZUO Dun-wen², LI Xue-wei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the mixed-model sequencing problem of stochastic assembly line, the influence of stochastic operation time on scheduling optimization goal is analyzed, and a concept of effective mathematical expectation, describing the station's idle time and overload time, is proposed. Under stochastic operation time, an optimization model is built by taking the station load balance as the evaluating indicator. And then, the elitist strategy and variable neighborhood search are added in the standard fireworks algorithm to design a improved fireworks algorithm to solve this optimization model. Test examples and production instances are given to illustrate the effectiveness of the proposed model and algorithm.

Keywords: assembly line; mixed-model assembly sequencing; stochastic operation time; load balance; fireworks algorithm

0 引言

由于装配工序的复杂性, 目前大部分装配型企业仍以人工作业为主, 作业时间具有较强的随机波动特性. 据统计, 这种随机偏差能达到 20% 左右^[1]. 零部件供应不稳、机器设备故障等也会导致作业时间的随机波动. 本文根据作业时间特性, 将装配线分为随机装配线和确定装配线. 近年来, 随机装配线的研究主要集中在平衡问题, 如 Zhang 等^[2]设计了一种混合进化算法求解多目标随机装配线平衡问题; Fazlollahtabar 等^[3]结合蒙特卡洛模拟研究作业时间服从正态分布的装配线平衡问题; 段移庭等^[4]采用遗传算法与仿真结合求解随机双边平衡问题.

装配线平衡从生产线结构层解决负荷均衡问题, 但混流生产中还存在调度层的失衡, 且作业时间的随机波动会加剧失衡. 在调度方面, Mosadegh 等^[5]将随机型混流调度转化为最短路径问题, 并基于 Dijkstra 法设计启发式算法; Dong 等^[6]及 Ozcan 等^[7]同时考虑作业分配和投产排序对负荷均衡的影响, 建立随机 U 型装配线混流调度模型, 并分别设计了模拟退火算法和遗传算法进行求解; Tiacc^[8]采用了模拟仿真研究带缓存区的随机装配线混流调度问题; Zhu 等^[9]以零部件消耗均衡化建立优化模型, 并结合蚁群算法和禁忌搜索机制设计求解方法; 李素粉等^[10]同时考虑随机加工时间和随机故障进行流水车间调度研究;

收稿日期: 2017-09-29; 修回日期: 2018-02-24.

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2017BEE048); 国家自然科学基金项目 (51505265).

责任编委: 王凌.

作者简介: 刘伊后 (1985—), 男, 讲师, 博士, 从事信息化制造、智能制造等研究; 麻娟 (1984—), 女, 硕士生, 从事生产系统优化、智能制造的研究.

[†]通讯作者. E-mail: liuyanhou@163.com.

李扬等^[11]研究了动态随机流水车间工件的最优加工顺序问题;张毕西等^[12]提出了一个用变准则策略实现随机型装配线多目标调度的方法。

上述研究大多是直接将作业时间期望或工位完工率作为优化指标,在评价调度方案时没有结合随机分布函数的具体特点.本文考虑服从正态分布的随机装配线,针对性地提出闲置和超载时间的有效数学期望的概念,建立最小化负荷均衡指数的随机装配线混流调度模型;并结合精英保留、变邻域局部搜索等策略设计一种改进烟花算法,协调全局搜索与局部搜索,提高求解算法的收敛能力。

1 问题描述与建模

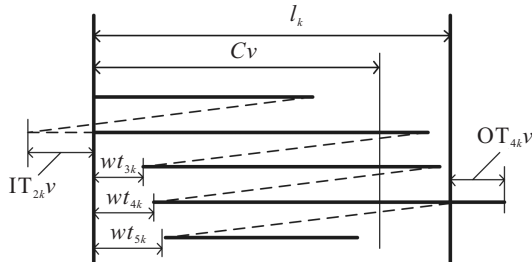
1.1 问题描述

为方便描述,记装配线节拍为 C 、传送速度为 v 、工位数为 K 、产品型号数为 M 、产品需求量为 d ,以及表1所示符号.文中出现公式和变量较多,部分变量在文中首次出现时进行定义说明。

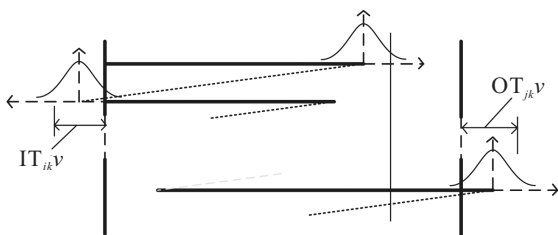
表1 变量符号定义

符号	定义
PM	产品型号集合, $PM = \{p^1, p^2, \dots, p^M\}$
S	工位集合, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\}$
P	待装配产品集合, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_d\}$
l_k	工位 s_k 长度
st_{mk}	p^m 型产品在 s_k 内的作业时间
μ_{mk}	st_{mk} 为随机量时的数学期望值
σ_{mk}	st_{mk} 为随机量时的标准差
IT_{ik}	在 s_k 内, 第 i 个产品的闲置时间
OT_{ik}	在 s_k 内, 第 i 个产品的超载时间

在确定装配线上,工位 s_k 内作业情况如图1(a)所示,第 i 个产品进入 s_k 时,若第 $i-1$ 个产品的作业尚未



(a) 确定装配线



(b) 随机装配线

图1 工位 s_k 内的作业情况

完成,则第 i 个产品需要等待,在等待时间内它的传送距离可记为 $wt_{ik}(i = 1, 2, \dots, d; k = 1, 2, \dots, K)$,此时 IT_{ik} 、 OT_{ik} 如图1中所示.第1个产品不会发生等待,即 $wt_{1k} = 0$,则 wt_{ik} 的计算公式为

$$wt_{ik} = \begin{cases} 0, & i = 1; \\ \max\left(0, \min\left(wt_{(i-1)k} + -Cv, l_k - Cv \right. \right. \\ \left. \left. v \sum_{m=1}^M x_{(i-1)m} st_{mk}\right)\right), & 2 \leq i \leq d. \end{cases} \quad (1)$$

其中: x_{im} 为决策变量, $x_{im} = 1$ 表示第 i 个产品为 p^m 型号.此时可定义一个中间变量 z_{ik} 为

$$z_{ik} = wt_{ik} + v \sum_{m=1}^M x_{im} st_{mk}, \quad (2)$$

则 IT_{ik} 和 OT_{ik} 的计算公式分别为

$$IT_{ik} = \begin{cases} 0, & i = 1; \\ \frac{\max(0, Cv - z_{(i-1)k})}{v}, & 2 \leq i \leq d; \end{cases} \quad (3)$$

$$OT_{ik} = \frac{\max(0, z_{ik} - l_k)}{v}. \quad (4)$$

在随机作业条件下,一般将人类劳动作业时间视为服从正态分布的随机变量,即 $t \sim N(\mu, \sigma^2)$ ^[1].根据正态分布的可加性, p^m 在 s_k 内的作业时间也服从正态分布,即 $st_{mk} \sim N(\mu_{mk}, \sigma_{mk}^2)$,则式(2)中的 z_{ik} 也服从正态分布,可记为

$$z_{ik} \sim N(\mu_{ik}^z, \sigma_{ik}^{z2}). \quad (5)$$

其分布参数

$$\mu_{ik}^z = wt_{ik} + v \sum_{m=1}^M x_{im} \mu_{mk}, \quad (6)$$

$$\sigma_{ik}^{z2} = v^2 \sum_{m=1}^M x_{im} \sigma_{mk}^2. \quad (7)$$

根据式(6)和(7)修正式(1)中 wt_{ik} 的表达式,即

$$wt_{ik} = \begin{cases} 0, & i = 1; \\ \max(0, \min(\mu_{(i-1)k}^z - Cv, l_k - Cv)), & 2 \leq i \leq d. \end{cases} \quad (8)$$

由于正态分布在 $(-\infty, +\infty)$ 区间连续,所有产品在任意工位内均会在一定概率下闲置或超载,则随机作业时间下 s_k 内的作业情况如图1(b)所示.修正式(3)和(4)的 IT_{ik} 和 OT_{ik} 的表达式为

$$IT_{ik} \begin{cases} = 0, & i = 1; \\ \sim N(\mu_{ik}^{IT}, \sigma_{ik}^{IT2}), & 2 \leq i \leq d; \end{cases} \quad (9)$$

$$OT_{ik} \sim N(\mu_{ik}^{OT}, \sigma_{ik}^{OT2}). \quad (10)$$

其中正态分布参数

$$\mu_{ik}^{IT} = \frac{Cv - \mu_{(i-1)k}^z}{v}, \sigma_{ik}^{IT2} = \sigma_{ik}^{z2}; \quad (11)$$

$$\mu_{ik}^{OT} = \frac{\mu_{ik}^z - l_k}{v}, \sigma_{ik}^{OT2} = \sigma_{ik}^{z2}. \quad (12)$$

1.2 IT_{ik}和OT_{ik}的有效数学期望

式(9)~(12)中的IT_{ik}和OT_{ik}如图2所示,纵轴表示工位界限(IT_{ik}时表示前界,OT_{ik}时表示后界).时间值不为负,则落在界限以外(阴影部分)时,IT_{ik}或OT_{ik}取值为相应横坐标值;落在界限以内(空白部分)时,IT_{ik}或OT_{ik}取值为0.

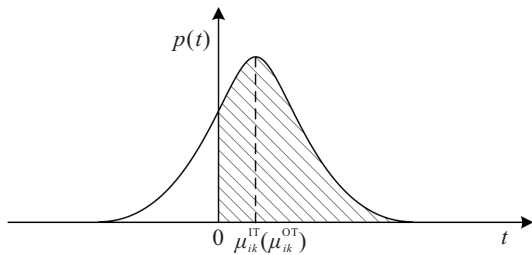


图2 闲置时间IT_{ik}和超载时间OT_{ik}的正态分布

在确定装配线中,负荷均衡的计算依据是μ_{ik}^{IT}和μ_{ik}^{OT},即取正态分布变量IT_{ik}和OT_{ik}的数学期望E(IT_{ik}) = μ_{ik}^{IT}及E(OT_{ik}) = μ_{ik}^{OT}.图2所示并非完全正态分布,而是一个截尾正态分布^[10-11],而单侧截尾正态分布的数学期望与其参数μ并不一致.若分别记IT_{ik}和OT_{ik}的有效数学期望为E^e(IT_{ik})和E^e(OT_{ik}),则可建立工位闲置时间和超载时间最小化的优化目标函数如下:

$$\min f = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^d (E^e(IT_{ik}) + E^e(OT_{ik})). \quad (13)$$

由式(13)可看出,当考虑作业时间随机波动的影响时,装配线的生产负荷均衡优化需要进行有效数学期望E^e(IT_{ik})和E^e(OT_{ik})的计算.

1.3 随机装配线混流调度的负荷均衡模型

首先讨论IT_{ik}和OT_{ik}的有效数学期望E^e(IT_{ik})和E^e(OT_{ik})的计算方法.若一个单侧截尾正态分布变量为t ~ N(μ, σ²),则由图2可得t的有效数学期望计算公式为

$$\begin{aligned} E^e(t) &= \int_{-\infty}^0 0 \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt + \\ &\int_0^{+\infty} t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt = \\ &0 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu}{\sigma}}^{+\infty} (\sigma z + \mu) e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \\ &\frac{\mu}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu}{\sigma}}^{+\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu}{\sigma}}^{+\infty} z e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \end{aligned} \quad (14)$$

标准正态分布N(0, 1)的分布函数为

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt,$$

则式(14)中第1项可用

$$1 - \Phi(x) = \int_x^{+\infty} f(t)dt$$

计算;而式中第2项是一个可积的定积分.所以式(13)可计算为

$$\begin{aligned} E^e(t) &= \mu \left(1 - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) \right) + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}} = \\ &\mu \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu^2}{2\sigma^2}}. \end{aligned} \quad (15)$$

则IT_{ik}和OT_{ik}的有效数学期望E^e(IT_{ik})和E^e(OT_{ik})可表示为

$$E^e(IT_{ik}) = \mu_{ik}^{IT} \Phi\left(\frac{\mu_{ik}^{IT}}{\sigma_{ik}^{IT}}\right) + \frac{\sigma_{ik}^{IT}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu_{ik}^{IT2}}{2\sigma_{ik}^{IT2}}}, \quad (16)$$

$$E^e(OT_{ik}) = \mu_{ik}^{OT} \Phi\left(\frac{\mu_{ik}^{OT}}{\sigma_{ik}^{OT}}\right) + \frac{\sigma_{ik}^{OT}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\mu_{ik}^{OT2}}{2\sigma_{ik}^{OT2}}}. \quad (17)$$

其中Φ(-μ/σ)的取值由标准正态分布表获得.此时建立随机装配线生产负荷均衡指数最小化的优化模型如下:

$$\min f_t = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^d (E^e(IT_{ik}) + E^e(OT_{ik}))}{Kd}. \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \sum_{m=1}^M x_{im} = 1, \forall i \in [1, d]; \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^d x_{im} = d_m, \forall m \in [1, M]. \quad (20)$$

约束式(19)中x_{im}为决策变量,x_{im} = 1表示第i个产品为p^m型号,此约束式表示在一个产品排序中的任一位置,有且只有一个待装配产品;约束式(20)表示在一个产品排序周期内,所有p^m型号产品均被投产到装配生产线上;E^e(IT_{ik})和E^e(OT_{ik})的表达式,及其中涉及的中间变量见上述各式.

与式(3)和(4)相比,式(9)~(12)所示随机装配线工位闲置和超载时间更符合实际生产环境,式(18)所示最小化负荷均衡指数优化模型的求解结果,对车间投产排序具有更实际的指导意义.但也正是由于表达式这种正态分布的特点,与确定装配线相比,模型求解时的计算量更大,解空间的分布也有所差异,求解过程更加困难.下面介绍一种改进烟花算法对式(18)模型进行求解.

2 IFWA算法

烟花算法(Fireworks algorithm, FWA)通过爆炸、变异、选择等进行爆炸式搜索^[13].FWA现已被应用

于许多领域的优化问题,且表现出优良的性能^[14-15]. FWA与遗传算法(GA)具有相似的进化过程,但却有本质上的不同:GA通过保留精英个体实现解空间信息的遗传共享,种群比较均匀地向最优区域移动,收敛性较好,但容易造成进化过程早熟;FWA基于免疫浓度思想(Immune concentration, IC)的分布式信息共享机制有利于保持种群多样性,但进化过程缺乏精英解的指导,容易陷入随机搜索,造成计算资源耗费、难以收敛.

本文结合二者优势,提出一种改进烟花算法(Improved fireworks algorithm, IFWA):针对随机模型计算量大,求解耗时的特点,IFWA在选择与爆炸操作上采取精英保留(Elitist strategy, ES)策略,指导进化过程的全局搜索;并将邻域搜索(Neighborhood search, NS)引入变异操作,改进算法的局部搜索策略,以克服随机模型解空间分布分散,难以收敛的问题.

2.1 编码方案

考虑问题特点与操作简易性要求,本文为IFWA设计了一种离散序列与多维连续编码相结合的复合编码方法.

1) 密码. 对于待装配产品集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_d\}$, 需要 d 维的密码, 密码的设置方式为 $\{1, 2, \dots, d\}$ 的任意排列. 如图3所示, $d = 5$ 时, 密码可以是12345.

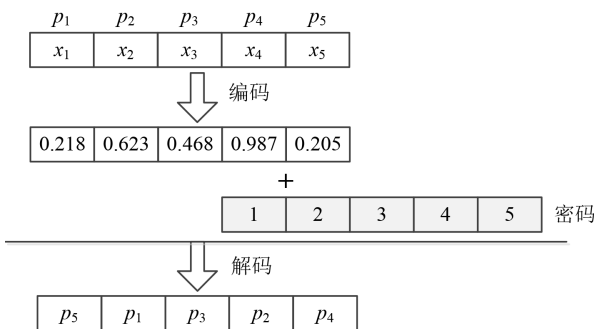


图3 IFWA的编码与解码

2) 编码. 烟花的编码为一个 d 维数组, 记为 (x_1, x_2, \dots, x_d) , p_i 的码值 x_i 是界于0和1之间的实数, 可以在初始化过程中随机生成. 如图3所示, 5维数组 $(0.218, 0.623, 0.468, 0.987, 0.205)$ 即是 $d = 5$ 时的一个烟花编码.

3) 解码. 码值 x_i 的数值大小表示 p_i 在编码中的位置顺序, 解码时, 将 p_i 所处位置顺序与密码排序相对应, 获得产品序列编码. 如图3所示的解码过程, 按照码值的大小 $x_5 < x_1 < x_3 < x_2 < x_4$ 排序, 即 $p_1(x_1)$ 处于第2位, 对应密码中的2, p_2 对应4, p_3 对应

3, p_4 对应5, p_5 对应1. 在密码12345下, 产品投产序列为 $p_5 - p_1 - p_3 - p_2 - p_4$; 若密码为23154, 则产品投产序列为 $p_1 - p_3 - p_5 - p_4 - p_2$.

IFWA的初始化是随机生成 N 个火花编码的过程, N 个火花构成烟花群 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, 然后通过操作爆炸算子、变异算子和选择策略, 在 Y 基础上完成进化搜索.

2.2 基本操作算子

1) 爆炸算子. 爆炸算子是烟花算法的核心, 决定子代火花的数量和位置. 火花 y_i 产生子代火花的个数为

$$n_i = N^e \frac{\max(Y) - f(y_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (\max(Y) - f(y_i)) + \varepsilon}. \quad (21)$$

式(21)为爆炸强度公式, 其中 N^e 是限制爆炸子代火花总数的一个常数, $f(y_i)$ 为火花 y_i 的适应度值, $\max(Y)$ 为烟花群 Y 中的最大适应度值, 极小数 ε 避免分母为零. 火花 y_i 的子代最大分布半径为

$$r_i = R^e \frac{f(y_i) - \min(Y) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(y_i) - \min(Y)) + \varepsilon}. \quad (22)$$

式(22)为爆炸幅度公式, 其中 R^e 表示最大爆炸幅度, $\min(Y)$ 为烟花群 Y 中的最小适应度值. 在发生爆炸时, y_i 第 j 维 x_i^j 位移为

$$\Delta x_i^j = x_i^j + \text{rand}(0, r_i), \quad (23)$$

其中 $\text{rand}(0, r_i)$ 表示在幅度 r_i 内的均匀随机分布. 由爆炸强度和幅度公式可知, 适应度高的火花产生较多子代, 且子代火花在其附近聚集; 适应度低的火花产生较少子代, 且呈大距离分散分布.

2) 变异算子. 在烟花群 Y 中以变异概率 p^v 随机选择火花, 并对选中火花以概率 p^{DI} 随机选择维度进行变异操作, 记变异子代规模为 N_v . IFWA采用高斯变异, 火花 y_i 第 j 维的高斯变异公式为

$$x_i^j = g x_i^j, \quad (24)$$

其中 g 服从高斯分布 $N(1, 1)$. 变异过程可能产生超出可行解空间的火花, 此时采用下式进行映射操作:

$$x_i^j = x_{\min}^j + \text{mod}(x_i^j, (x_{\max}^j - x_{\min}^j)). \quad (25)$$

其中: mod 表示取模运算函数, x_{\max}^j 和 x_{\min}^j 分别表示第 j 维的上下界, 在图3所示编码方式中分别取1和0.

3) 选择算子. 原始烟花群、爆炸子代火花和变异子代火花组成备选火花集 $Y^a = \{y_1^a, y_2^a, \dots\}$, Y^a 元素数 $N^a = N + N^e + N^v$. 从 Y^a 中选取 N 个火花进

入下一代烟花群 Y^{off} ,除最优个体外,其余 $N - 1$ 个火花采用轮盘赌规则选出,选择概率为

$$p(y_i^a) = \frac{D(y_i^a)}{\sum_{k=1}^{N^a} D(y_k^a)}, \quad (26)$$

$$D(y_i^a) = \sum_{k=1}^{N^a} \|y_i^a - y_k^a\|. \quad (27)$$

其中: $\|y_i^a - y_k^a\|$ 表示两个火花之间的欧氏距离. 由式(26)和(27)可得,若某个火花与其他火花偏离越大,则其被选中的概率越大. 这种机制避免了多样性损失,但容易陷入随机搜索过程,不利于全局优化收敛.

2.3 基于ES的选择策略

为克服基本选择算子的弊端,将GA的精英保留机制引入IFWA. 在选择操作中,产生 Y^{off} 的同时,建立精英档案集 Y^{el} . 采用轮盘赌规则选择,火花被选中概率为

$$p(y_i^a) = \frac{f(y_i^a)}{\sum_{k=1}^{N^a} f(y_k^a)}, \quad (28)$$

其中 $f(y_i^a)$ 表示火花 y_i^a 的适应度值. 在精英保留策略下,设置 Y^{off} 和 Y^{el} 规模分别为 $c^{off}N$ 和 $c^{el}N$, 其中 $0 < c^{off} < 1, 0 < c^{el} < 1$, 且 $c^{off} + c^{el} = 1$. c^{off} 取值越大,选择策略越倾向于FWA的基于免疫浓度选择,有利于烟花群多样性的保持; c^{el} 取值越大,选择策略越倾向于GA的优胜劣汰选择,通过精英解对全局搜索的指导,促进算法收敛.

2.4 改进的NS局部搜索策略

在变异算子中引入邻域结构,提高算法局部搜索能力. 通过变异算子生成邻域结构如图4所示.

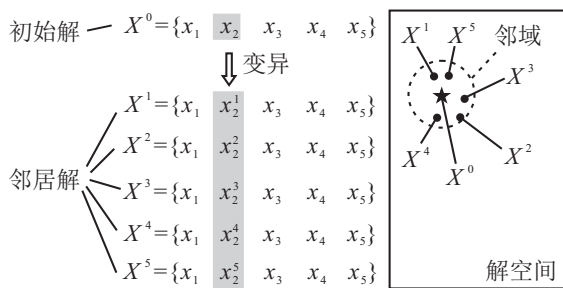


图4 变异中的邻域结构

图4所示为单维度(第2维)邻域结构. 根据高斯变异算子,变异维度数目可随机选择,即IFWA的邻域结构是一个多维度的域空间. 对邻域进行局部搜索会占用大量的计算资源,进而影响算法效率,所以在IFWA中,根据火花维度和算法迭代次数控制邻域规模,进行变邻域搜索,变邻域规则如下:

$$p^{NS} = 1 - \frac{t}{T}, \quad (29)$$

$$n^{NS} = c^{NS}n^{DI}. \quad (30)$$

式(29)表示变异操作时需进行邻域搜索的概率,其中 t 为迭代次数, T 为最大迭代次数;式(30)表示邻域规模,其中 c^{NS} 为邻域规模系数, n^{DI} 为被选中变异的维度数目. 通过变邻域可以实现种群在进化初期进行较大范围的邻域搜索,而到了进化后期,只需要进行小范围邻域搜索来达到寻优的目的,以此来提高算法局部搜索性能,同时减少了计算时间,提高了算法的搜索效率. IFWA的基本流程如图5所示.

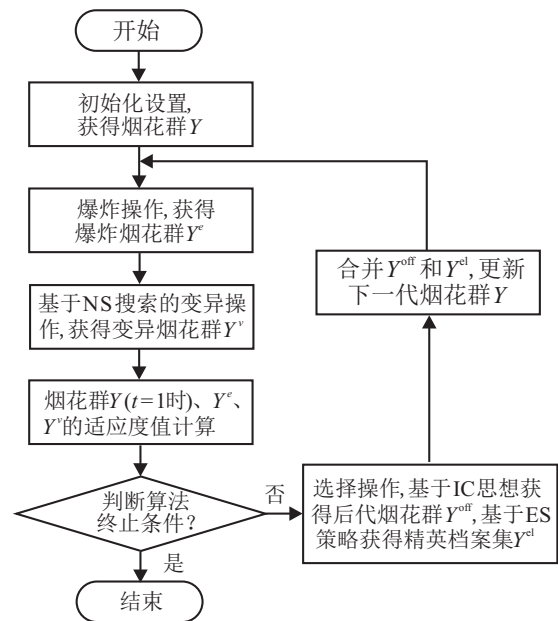


图5 IFWA的基本流程

2.5 算法性能测试

为验证算法性能,将IFWA与近年文献中的改进遗传算法^[7](IGA)、离散烟花算法^[15](DFWA)、混合人工蜂群算法^[16](HABCA)进行对比,IFWA的参数设置如表2所示,DFWA、IGA、HABCA的种群规模与IFWA一致,其余参数参照相应文献中数据. 算例采用文献^[17]的装配线混流调度问题测试集,如表3所示,其中T1~T4为小规模问题,T5~T6为大规模问题. 装配线上作业时间 st_{mk} 服从正态分布,其参数 μ_{mk} 和 σ_{mk} 分别服从均匀分布 $U(50, 90)$ 和 $U(10, 18)$.

表2 IFWA参数

符号	定义	符号	定义
烟花群规模 N	$10 \times d$	c^{off}	0.8
爆炸子代规模 N^e	$5 \times N$	c^{el}	0.2
最大爆炸幅度 R^e	1	邻域规模系数 c^{NS}	0.5
变异概率 p^v	0.25	最大迭代次数 T	200
维度选择概率 p^{DI}	0.25		

表3 测试问题集

问题	产品型号															解集规模
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
T1	7	2	1	1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4.752×10^4
T2	6	2	2	1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	1.663×10^5
T3	5	2	2	2	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4.990×10^5
T4	4	4	2	1	1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4.158×10^5
T5	35	35	10	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.673×10^{67}
T6	25	25	20	15	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.016×10^{75}
T7	20	20	15	15	10	6	6	1	1	1	1	1	1	1	1	4.901×10^{84}
T8	15	15	10	10	10	10	10	10	4	1	1	1	1	1	1	9.959×10^{92}

表4 各算法性能指标比较

问题	收敛精度				收敛速度			
	IFWA	DFWA ^[15]	IGA ^[7]	HABCA ^[16]	IFWA	DFWA ^[15]	IGA ^[7]	HABCA ^[16]
T1	7.41	7.50	7.52	7.48	0.037	0.030	0.039	0.027
T2	7.87	7.92	7.93	7.86	0.038	0.031	0.041	0.030
T3	7.57	7.63	7.72	7.57	0.039	0.035	0.047	0.031
T4	7.90	7.98	7.98	7.93	0.035	0.035	0.041	0.029
T5	25.34	26.50	27.01	26.21	0.187	0.175	0.198	0.176
T6	26.27	28.20	28.07	27.33	0.193	0.177	0.207	0.180
T7	27.63	29.70	29.83	28.21	0.191	0.180	0.203	0.186
T8	26.91	27.87	28.46	28.07	0.202	0.194	0.211	0.199

在各算法求解过程中,取IFWA精英档案集(DFWA、IGA和HABCA分别取前20%作为精英档案集)的以下两个指标进行对比.

1) 收敛精度. 记精英档案集 Y^{el} 的适应度平均值为 $\overline{X^i}$ ($i = 1, 2, \dots, T$), 其中 T 为最大迭代次数, 则可用 $\overline{X^T}$ 表示算法的收敛精度, 此值越小, 收敛精度越高.

2) 收敛速度. 记适应度平均值的变化量 $\Delta\overline{X^i} = \overline{X^{i+1}} - \overline{X^i}$, 若算法收敛越快, 则 $\Delta\overline{X^i}$ 的前期变化率越大, 后期趋于平缓, 即其值的波动越大; 反之, $\Delta\overline{X^i}$ 的波动越小. 可用方差 $D(\Delta\overline{X^i})$ 表示收敛速度, 此值越大, 收敛越快.

为减少计算量, 计算收敛速度指标 $D(\Delta\overline{X^i})$ 时, 每10次迭代计算一次适应度平均值的变化量. 各算法取20次运行结果的平均值进行各指标的对比, 如表4所示. 分析表4中数据可以看出, IFWA的收敛能力略低于IGA, 但其搜索最优解能力最好, 且随着问题规模的增加, 优势更加明显.

3 实例求解

为进一步验证IFWA算法和随机模型的有效性, 下面对两个生产实例进行求解: 实例1为某发动机总装车间, 装配线 $K = 4, M = 4, C = 90, l_k =$

$95(k = 1, 2, 3, 4), v = 1$, 其需求比例集MPS1分别为 $\{2, 2, 3, 1\}$ 、 $\{3, 2, 4, 3\}$ 、 $\{5, 3, 6, 2\}$ 和 $\{4, 7, 3, 6\}$, 作业时间如表5所示; 实例2为文献[16]的汽车装配线混流排序问题, $K = 7, M = 4, C = 50, v = 1$, 其需求比例集MPS2分别为 $\{1, 4, 3, 2\}$ 、 $\{2, 3, 5, 4\}$ 、 $\{4, 3, 2, 5\}$ 及 $\{5, 7, 8, 5\}$, l_k 及作业时间参照文献[16].

表5 实例1的工位作业时间

工位	产品型号							
	A		B		C		D	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
s_1	95	17.43	82	15.20	95	11.36	98	12.34
s_2	89	6.98	90	8.11	84	14.00	94	4.55
s_3	92	18.34	98	11.48	89	2.67	84	4.32
s_4	82	5.06	86	13.54	92	3.42	82	12.44

3.1 IFWA算法有效性分析

将IFWA与IGA、DFWA和HABCA进行对比求解, 实例1的求解结果如表6所示, 在MPS1_1求解时, 3种算法结果相同; 随着MPS1的元素增多(问题规模增大), IFWA逐渐表现出较优异的性能. 实例2的求解结果如表7所示, MPS2的规模越大, IFWA的优势越明显, 与实例1相似.

表6 实例1的最优解

No.	MPS1	优化目标 f_t			
		IFWA	DFWA ^[15]	IGA ^[7]	HABCA ^[16]
1	{2, 2, 3, 1}	6.40	6.40	6.40	6.40
2	{2, 3, 5, 4}	6.47	6.49	6.52	6.50
3	{4, 3, 2, 5}	6.72	6.77	6.80	6.75
4	{5, 7, 8, 5}	7.05	7.12	7.17	7.12

表7 实例2的最优解

No.	MPS2	优化目标 f_t			
		IFWA	DFWA ^[15]	IGA ^[7]	HABCA ^[16]
1	{1, 4, 3, 2}	8.02	8.07	8.08	8.07
2	{3, 2, 4, 3}	8.72	8.79	8.74	8.73
3	{5, 3, 6, 2}	9.60	9.68	9.72	9.65
4	{4, 7, 3, 6}	10.92	11.03	11.07	10.97

表8 IFWA 求解随机模型和确定模型的最优解

MPS	优化目标	
	随机模型	确定模型
MPS1_1	6.40	6.59
MPS1_2	6.47	6.67
MPS1_3	6.72	6.81
MPS1_4	7.05	7.12
MPS2_1	8.02	8.25
MPS2_2	8.72	8.90
MPS2_3	9.60	9.91
MPS2_4	10.92	11.18

取精英档案集的平均适应度值,观察其迭代收敛情况, MPS1_1 和 MPS2_4 如图6所示. 可以看出, IFWA 的收敛能力略低于 IGA, 但其搜索最优解能力最好, 其余 MPS 的收敛趋势与图6相似, 不再重复讨论. 此结果与测试问题集的求解结果相符.

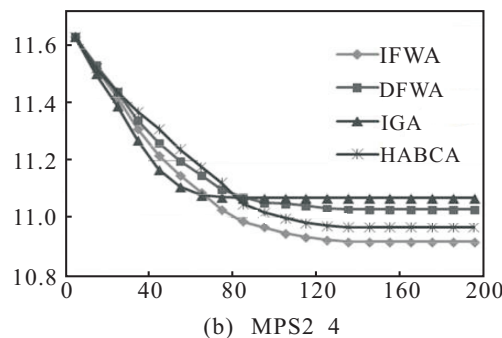
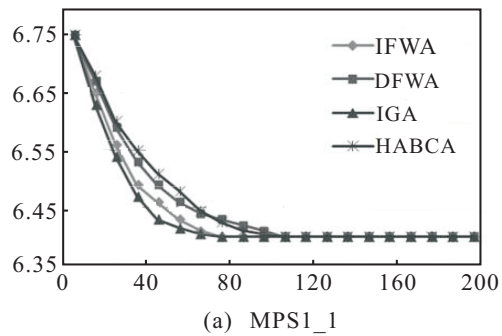


图6 求解过程中不同算法收敛对比

3.2 模型有效性分析

采用 IFWA 分别对两个实例的随机模型和确定模型进行求解. 在不考虑作业时间随机波动的影响时, p^m 型号产品在工位 s_k 内的作业时间为 $st_{mk} = \mu_{mk}$, 此时装配线工位负荷闲置和超载时间的最小化求解模型根据式(3)和(4)进行. 两个实例的随机模型和确定模型的求解结果如表8所示.

针对8个MPS,任意生成多个排序方案,并分别计算它们的 f_t 平均值. 将此平均值与表6所示的 f_t 进行比较,如图7所示. 可以看出,在随机作业时间下,实例1和实例2的随机模型求解结果均能够获得更优的 f_t , 说明此随机装配线混流调度模型是有效的.

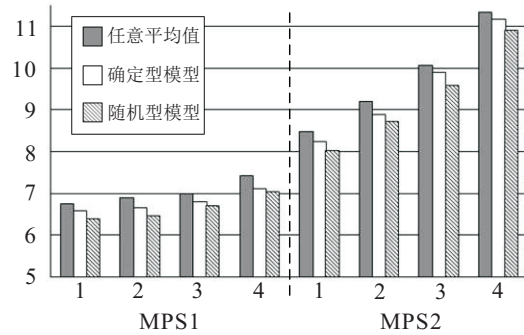


图7 不同条件下的 f_t 比较

4 结论

1) 本文针对随机装配线的混流调度问题,提出了工位闲置和超载时间有效数学期望的概念,建立了工位负荷均衡指数最小化的随机装配线混流调度优化模型.

2) 结合精英保留、变邻域搜索等策略设计了一种 IFWA 算法,并通过实例求解对算法和模型进行了验证. 结果表明: IFWA 收敛速度慢于 GA, 但其搜索最优解能力较强, 而且随着问题规模增大, IFWA 的优势更加明显; 与确定模型相比, 在随机作业时间下本文随机模型更加有效.

3) 本文研究对象是置换流水车间, 下一步将对作业车间等其他生产组织形式的随机调度问题进行建模与求解研究.

参考文献(References)

[1] 贾大龙, 王红蕾. 随机装配线平衡的仿真模型[J]. 管理工程学报, 1994, 8(4): 232-237.
(Jia D L, Wang H L. Simulation modeling for stochastic assembly line balancing[J]. J of Industrial Engineering

- and Engineering Management, 1994, 8(4): 232-237.)
- [2] Zhang W Q, Xu W T, Liu G, et al. An effective hybrid evolutionary algorithm for stochastic multiobjective assembly line balancing problem[J]. J of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(3): 783-790.
- [3] Fazlollahtabar H, Hajmohammadi H, Eshaghzadeh A. A heuristic methodology for assembly line balancing considering stochastic time and validity testing[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(1/2/3): 311-320.
- [4] 段移庭, 苏平, 郑晨鸣. 随机型双边混流装配线平衡问题的两阶段求解方法研究[J]. 工业工程, 2016, 19(2): 134-142.
(Duan Y T, Su P, Zheng C M. A two-stage method for solving the stochastic two-sided mixed-model assembly line balancing problem[J]. Industrial Engineering J, 2016, 19(2): 134-142.)
- [5] Mosadegh H, Fatemi G S, Suer G. Heuristic approaches for mixed-model sequencing problem with stochastic processing times[J]. Int J of Production Research, 2017, 55(10): 2857-2880.
- [6] Dong J T, Zhang L X, Xiao T Y, et al. Balancing and sequencing of stochastic mixed-model assembly U-lines to minimise the expectation of work overload time[J]. Int J of Production Research, 2014, 52(24): 7529-7548.
- [7] Ozcan U, Kellegoz T, Toklu B. A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem[J]. Int J of Production Research, 2011, 49(6): 1605-1626.
- [8] Tiacc L. Event and object oriented simulation to fast evaluate operational objectives of mixed model assembly lines problems[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012, 24(2): 35-48.
- [9] Zhu Q, Zhang J. Ant colony optimisation with elitist ant for sequencing problem in a mixed model assembly line[J]. Int J of Production Research, 2011, 49(15): 4605-4626.
- [10] 李素粉, 朱云龙, 尹朝万. 具有随机加工时间和机器故障的流水车间调度[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10): 1425-1429.
(Li S F, Zhu Y L, Yin C W. Flow shop scheduling with stochastic processing times and machine breakdowns[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(10): 1425-1429.)
- [11] 李扬, 曾繁慧. 加工时间服从几何分布的流水车间随机排序问题[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(3): 502-504.
(Li Y, Zeng F H. Stochastic flow shop scheduling with geometric distributed processing times[J]. J of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(3): 502-504.)
- [12] 张毕西, 刘永清. 随机型作业计划动态排序方法研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2000, 28(1): 122-129.
(Zhang B X, Liu Y Q. Dynamic scheduling of stochastic operation schemes[J]. J of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2000, 28(1): 122-129.)
- [13] Tan Y, Zhu Y C. Fireworks algorithm for optimization[C]. Proc of 1st Int Conf on Advances in Swarm Intelligence. Beijing: Springer, 2010: 355-364.
- [14] 曹磊, 叶春明, 黄霞. 应用混沌烟花算法求解置换流水车间问题[J]. 计算机应用与软件, 2016, 33(11): 188-192.
(Cao L, Ye C M, Huang X. Applying chaotic fireworks algorithm in solving permutation flow shop problem[J]. Computer Applications and Software, 2016, 33(11): 188-192.)
- [15] Lu C, Li J Y. Assembly sequence planning considering the effect of assembly resources with a discrete fireworks algorithm[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(9/10/11): 3297-3314.
- [16] 鲁建厦, 翁耀炜, 李修琳, 等. 混合人工蜂群算法在混流装配线排序中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(1): 121-127.
(Lu J S, Weng Y W, Li X L, et al. Application of hybrid artificial bee colony algorithm in mixed assembly lines sequencing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(1): 121-127.)
- [17] Mansouri S A. A multi-objective genetic algorithm for mixed-model sequencing on JIT assembly lines[J]. European J of Operational Research, 2005, 167(3): 696-716.

(责任编辑: 孙艺红)