

基于 NSPSO 算法的混合装配线平衡问题多目标优化*

李 智 姜兆亮 刘文平

(山东大学机械工程学院, 济南 250061)

摘要: 不同品种作业元素的作业时间差异经常引起混合品种装配线的工作站瞬时负荷瓶颈问题,依据给定的排产顺序,兼顾装配线平均负荷和瞬时负荷,考虑不同品种作业元素的作业时间差异对装配线平衡的影响,建立了以最小化工作站内装配时间波动、工作站负荷平滑指数及装配线超载时间为目标的混合品种装配线平衡模型,并设计了基于非支配排序的粒子群优化算法(NSPSO)。实例验证表明,基于非支配排序的粒子群算法在求解大规模混合品种平衡问题方面比遗传算法具有更高的求解质量和求解效率。

关键词: 混合品种装配线 平衡 多目标优化 非支配排序 粒子群算法

中图分类号: TH166 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0248-05

Multi-objective Optimization of Mixed Assembly Lines Balancing Problem Based on Non-dominated Sorting Particle Swarm Optimization

Li Zhi Jiang Zhaoliang Liu Wenping

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: The station instantaneous workload bottleneck was caused by task processing time differences among different models. According to the given production schedule and considering the average workload and instantaneous load of assembly line, mixed assembly line balancing model was built with the objective of minimum station processing time variation, station's workload smooth index and assembly line overload time. The effect of task processing time differences among different models on the assembly line balance was also taken in to account. The multi-objective optimization algorithm based on non-dominated sorting particle swarm optimization (NSPSO) was designed. The example verified that, compared with genetic algorithm, NSPSO had higher solution quality and solving efficiency in large mixed balancing problem.

Key words: Mixed assembly line Balance Multi-objective optimization Non-dominated sorting Particle swarm algorithm

引言

装配生产在制造活动中占有重要的地位,其作业成本约占制造成本的 30% ~ 50%,汽车、电脑等产品的装配作业通常在混合装配生产线上完成,它可以在基本不改变或较少改变生产设施的前提下,通过对装配线的合理组织与排产优化,用大批量生产的制造成本和响应速度,向客户提供定制的个性化产品和服务。为实现对装配线的合理组

织与排产优化,必须解决混合品种装配线平衡与排序问题。

目前,国内外学者对混合装配线平衡问题已经建立了大量数学模型,对混合装配线的影响因素由单个(如最大化装配线生产率^[1]和最小化工作站数目^[2]、生产节拍^[3]、空闲和超载时间^[4-6]等)逐渐扩展到多个,求解算法也随之取得极大进展^[7-11]。由于混合装配线平衡问题属于典型的 NP-hard 难题,求最优解比较困难,目前广泛采用的启发式方法有

收稿日期: 2012-08-13 修回日期: 2012-08-19

* 国家自然科学基金资助项目(51175304)

作者简介: 李智,博士生,主要从事生产计划和装配线研究,E-mail: lizhi1256@126.com

通讯作者: 姜兆亮,教授,主要从事数字化制造和精密制造装配方案优化研究,E-mail: jiangzhaoliang@sdu.edu.cn

模拟退火方法^[9]、分支定界^[7]、遗传算法^[8-9]和蚁群算法^[2,12-13]等。

混合品种装配线平衡问题的现有研究方法主要是将多个产品作业顺序图合并为综合作业顺序图,然后根据各个品种的需求比例,计算每个作业任务的平均作业时间,最后根据产品的综合作业顺序图及每个作业任务的平均作业时间,将作业任务分配到各个工作站。由于混合装配线上不同品种的作业任务及作业时间存在明显差异,平均作业时间在一定程度上不能代表作业元素的实际作业时间,使得实际装配过程中,容易导致装配线工作站内出现瞬时负荷瓶颈,即出现工作站超载。因此,混合装配线平衡问题研究中,作业元素集合的划分应在给定排产顺序的情况下,兼顾工作站平均负荷的基础上,确定合适的生产节拍,使得各个工作站装配不同品种产品时,工作站超载任务最小。本文提出以最小化工作站内装配时间波动、装配线负荷平滑指数及装配线超载时间为目标的混合装配线平衡问题模型,设计基于非支配排序和精英策略的粒子群优化算法对上述模型进行求解验证。

1 问题描述和数学模型

1.1 问题描述

给定待装配品种数目、需求数量、各品种作业元素集合、作业元素的作业时间及作业元素的优先关系模型,在工作站数目和排产顺序确定的情况下,满足作业元素先后约束关系后,将所有作业元素适当合并并分配到装配线各个工作站内,确定合适的生产节拍,使得装配线上不同品种装配时间波动较小,装配线负荷平滑最小及装配线工作站超载时间最短。

1.2 数学模型

(1)最小化工作站内装配时间的波动

混合装配线上不同品种的同一作业元素的作业时间存在差异,使得工作站装配不同品种装配时间不同。因此,将所有作业元素适当合并并分配到装配线各个工作站时,应充分考虑装配不同品种时工作站内装配时间的波动,尽量使得装配时间波动最小,防止工作站内出现忙闲不均的情况。

$$\min F_1 = \sqrt{\sum_{k \in S_k} (T_{lk} - T_{nk})^2 / M}$$
$$(l, n = 1, 2, \dots, M; l \neq n) \quad (1)$$

式中 M ——品种总数目

T_{lk} ——品种 l 第 k 个工作站的装配时间

S_k ——第 k 个工作站的作业元素求解集合

T_{nk} ——品种 n 第 k 个工作站的装配时间

(2)最小化装配线负荷平滑指数

$$\min F_2 = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{k \in S_k} \left[\left\lceil \frac{\sum_{j=1}^J \sigma_{jk} t_{jm}}{C} \right\rceil - \left(\frac{\sum_{j=1}^J \sigma_{jk} t_{jm}}{C} \right) \right]^2}$$
$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{k=1}^K \sigma_{jk} = 1 \\ \sum_{k=1}^K (k \sigma_{jk} - k \sigma_{lk}) \geq 0 \quad (j > l) \end{cases}$$
$$(l, j = 1, 2, \dots, J)$$

式中 J ——所有品种作业元素数目的最大值

C ——生产节拍

t_{jm} ——品种 m 第 j 个作业元素作业时间

其中, σ_{jk} 为决策变量,如果第 j 个作业元素分配到工作站为 1,否则为零。 $\lceil x \rceil$ 为上取整函数,表示不小于 x 的整数中最小的一个。约束条件确保每个作业元素只能分配到唯一的工作站上和确保作业元素的安排满足作业优先顺序。

(3)最小化装配线工作站超载时间^[5]

$$x_{ik}(S, \tau) = \min \left(\frac{L}{V} - y_{(i-1)k}(S, \tau), T_{\theta(i)k} \right) \quad (3)$$

$$y_{ik}(S, \tau) = \max \left[\min \left(T_{\theta(i)k} + y_{(i-1)k}(S, \tau), \frac{L}{V} \right) - C, 0 \right] \quad (4)$$

$$\min F_3 = \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^K \left[\max \left(T_{\theta(i)k} + y_{(i-1)k}(S, \tau) - \frac{L}{V}, 0 \right) \right] \quad (5)$$

其中

$$T_{\theta(i)k} = \sum_{j \in S_k} t_{\theta(i)m}$$

式中 L ——工作站长度 V ——传送带速度

τ ——待装产品的装配时间矩阵

θ ——最小生产循环周期内的产品投产顺序

$\theta(i)$ ——投产顺序中的第 i 个产品

$T_{\theta(i)k}$ ——第 i 个产品在第 k 个工作站的装配时间

$x_{ik}(S, \tau)$ ——求解方案 S 中第 k 个工作站中第 i 个产品装配时间

$y_{ik}(S, \tau)$ ——求解方案 S 中第 k 个工作站中第 k 个产品装配开始时间

D ——最小生产循环周期内产品投产数目

2 基于非支配排序的粒子群算法设计

混合装配线平衡属于组合优化问题,标准微粒群算法无法满足求解要求。因此,本文通过改进标准微粒群算法设计了基于非支配排序和精英策略的有序编码粒子群优化算法。它主要包括粒子编码的

生成,初始种群的确定,适应度的评估,粒子群进化操作,算法终止条件及算法流程等。

(1)粒子编码

每个粒子为一长度为 J 的数据串,粒子的维数对应了作业任务的序号,粒子的每一位数字表示该任务被分配到的工作站编号,粒子编码与解码过程如图 1 所示。

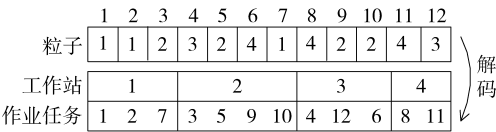


图 1 编码及解码过程

Fig. 1 Encoding and decoding process

(2)初始种群的确定

将 J 个作业元素安排在 k 个工作站,需要满足作业先后顺序及各个工作站的负荷不超过每个品种的最大生产节拍。初始化种群由一系列的粒子组成,每个粒子为一个可行解的编码。

(3)适应度的评估

在每一代的进化过程中,整个微粒群都要进行评估,以决定哪些粒子优先进入下一代的进化,其物理意义为对装配线工作站作业元素分配方案进行评估,比较哪些方案更适合 3 个优化目标,本文适应度评估函数采用目标函数式(1)、(2)、(5)。同时采用约束函数对粒子群进化操作后的粒子进行评估,剔除无效粒子,保持整个种群的优良性。

(4)粒子群进化操作

①速度定义

速度定义为点的位置的变换集。例如:假设 v 表示速度, $\|v\|$ 表示该速度所包含的交换数目,则该速度 v 可以表示为 $= \{(i_k, j_k), i_k, j_k \in \{1, 2, \dots, N\}, k \in \{1, 2, \dots, \|v\|\}\}$,它表示首先交换 n_{i_1}, n_{j_1} ,然后再交换 n_{i_2}, n_{j_2} 的位置,以此类推。

②速度与位置的加法

设 x 为某个位置, v 为速度,则定义它们的加法 $x + v$ 为依次作用 v 中的变换于 x 。例如 $x = \{1, 2, 3, 4, 5\}, v = \{(1, 2), (2, 3)\}$,则 $x + v$ 的结果为 $\{3, 1, 2, 4, 3\}$ 。

③速度与速度的加法

定义速度 v_1 与速度 v_2 的加法为两个变换集的并集。从而有 $v \oplus -v = \emptyset; v_1 \oplus v_2 = v_2 \oplus v_1$ 。

④求解混合装配线平衡问题的微粒群算法进化方程为

$$v_i(t+1) = v_i(t) \oplus c_3(P_i - x_i(t)) \tag{6}$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \tag{7}$$

其中 $P_i = P_g + \frac{1}{2}(P_i - P_g)$

式中 c_3 ——加速常数

⑤算法终止条件

每一代的粒子群种群的某个目标函数的平均适应度为

$$f_{rg} = \sum_{i=1}^N f_{rgi} / N \quad (r = 1, 2, \dots, t)$$

式中 N ——粒子群种群数目

g ——迭代次数 r ——目标函数

t ——目标函数总数

如果连续 5 代每个目标函数的平均适应度差小于判断阈值 β ,即 $\bar{f}_{r(g+1)} - \bar{f}_{rg} \leq \beta$,则算法终止。

⑥算法流程

步骤 1:初始化微粒群种群(种群数目为 $2N$)及速度 v ,对粒子群种群进行适应度计算并进行非支配前沿等级划分。

步骤 2:随机选取非支配前沿等级高的微粒子作为每个粒子的全局最好位置 P_g 。

步骤 3:根据微粒群进化方程产生新的微粒群。

步骤 4:将父代微粒群与子代微粒群合并(种群数目为 $2N$),对粒子群种群进行适应度值计算并进行非支配前沿等级划分。

步骤 5:随机选取非支配前沿等级高的微粒子作为子代每个粒子的全局最好位置 P_g 。

步骤 6:比较父代与子代微粒子非支配前沿等级,选取非支配前沿等级高的微粒子作为子代每个粒子的局部最好位置 P_i 。

步骤 7:根据全局最好位置与局部最好位置确定子代每个粒子的速度。

步骤 8:计算各个粒子的目标函数值。

步骤 9:判断是否满足终止条件。是,算法终止;否,转步骤 3。

3 实例分析

为验证所建模型的有效性,采用文献[6]给出的产品作业优先关系约束图进行分析验证。已知品种 A、B、C 的需求比例为 2:1:1,工作站数目为 13。根据设计的 NSPSO 算法,在给定排产序列(A→B→A→C)的情况下,针对不同的工作站长度,运用 Matlab 2008,在 AMD Athlon 64 X2 Dual core 3600 + 2.01 GHz,内存 2 GB 的计算机上对上述实例进行仿真,并与目前广泛求解多目标优化问题的基于非支配排序的遗传算法(NSGA II)^[14-15]进行求解效率与求解精度的比较。

执行 NSPSO 算法时,初始化粒子群种群数量 N 为 100,迭代次数为 20,加速度常数 $c_3 = 2$;执行 NSGA II 算法时,初始化粒子群种群数量 N 为 100,

迭代次数为 20,复制概率取 0.2,交叉概率取 0.8,变异概率取 0.01。算法终止阈值 β 取 0.001。

在给定排产顺序($A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C$)情况下,表 1 列出了运用 NSPSO 算法,在单位工作站长度为 24、28、31、32 和 33 时求解得到的生产节拍及不同目标函数的最优值。从表中可以看出,当 $L \geq 28$ 时,各个工作站的超载时间为零,生产节拍随着工作站长度

的增加而逐渐减小。图 2a 和图 2b 分别为工作站单位长度 $L=28$ 时,初始粒子种群和最终种群的非支配排序结果,可以发现粒子群进化过程中每个坐标方向上的适应度在逐渐减小,即整个求解方案离优化目标越来越近,最后非支配前沿等级由最初的 14 级进化为 1 级,表明最后剩下的即为最优解。图 3 表示整个求解过程中平均值与最优值进化过程。

表 1 不同工作站长度下(单位工作站长度) NSPSO 优化目标值及求解结果
Tab.1 Optimum fitness value and calculated results of NSPSO algorithm with different station lengths

L	生产节拍	F_1	F_2	F_3	工作站分配结果
24	23	78.72	9.24	12	[8,10,9],[26,4],[12,6],[7,11,1,5],[3,2],[16,23],[21,19,24,27],[15,14],[20,25],[18,22],[17,13,29][31,30,32],[28,33]
28	23	68.73	11.44	0	[12,4,9],[11,5,8],[6,3],[1,7,17],[10,2],[21,19,15],[25,23],[20,18,22],[31,16],[26,24,27],[13,32],[14,29],[30,28,33]
31	22	67.81	13.34	0	[4,6],[9,11,8,27],[7],[1,5,2],[3,13],[1,12,15],[16,14,17],[18,29,24],[21,28,22],[26,25,30],[20,23],[19,32],[31,33]
32	22	70.19	12.43	0	[1,10,11,9,4],[5,6,8],[2,3],[7,15,16],[29,17,13],[18,14,12],[23],[26,24],[20,25,27],[30,28,22],[21,19,32],[31,33]
33	21	63.25	13.34	0	[9,1,7][11,6,5,4][8,12][3,2][25,13,14][10,19][23,16][27,24,20,21,18][22][17,26,15][30,31,32][28][29,33]

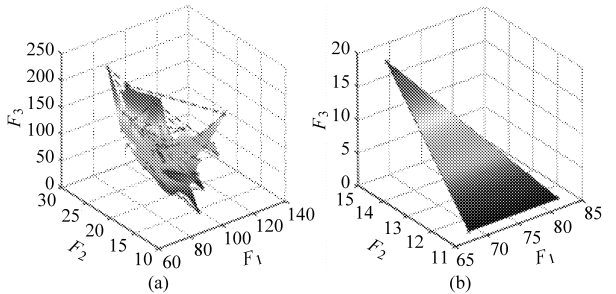


图 2 非支配排序结果
Fig.2 Non-dominated sorting results
(a) 初始粒子群 (b) 最终粒子群

表 2 为两种算法求解结果,结果表明 NSPSO 算法所得到的各目标函数值均优于 NSGA II 算法。为进一步比较两种算法的优劣,本文将上述两种算法求解过程中的各代平均值进行比较(图 4),从图 4 中可以看出,NSPSO 算法的各代目标函数值平均值均小于 NSGA II,说明 NSPSO 算法在同等数目的作

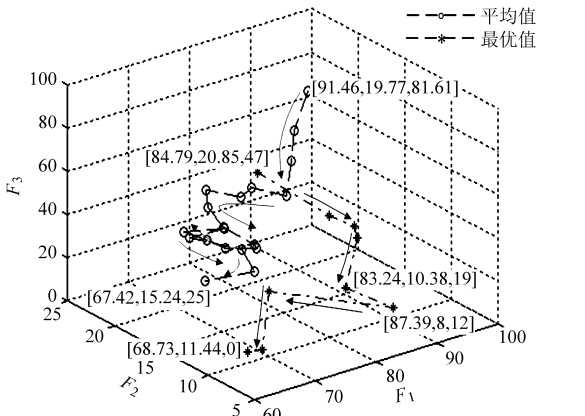


图 3 平均值与最优解进化曲线
Fig.3 Evolution curves of mean fitness and optimum fitness

业元素分配过程中,向最优值收敛的速度较快,更容易获得最优解。图 5 为上述两种算法在不同数目作业元素求解时间的对比,可以看出 NSPSO 算法在求

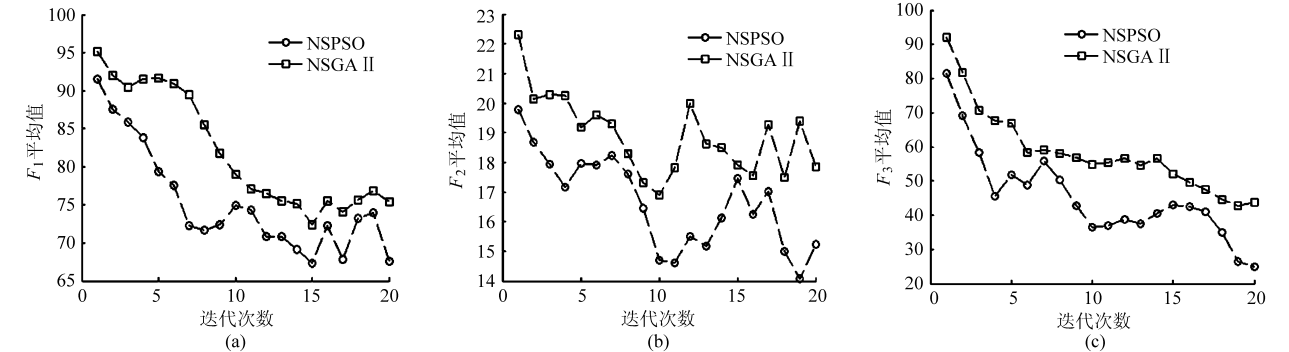


图 4 算法平均值比较
Fig.4 Comparison of mean values of the proposed algorithm

解大规模问题方面具有较好的求解效率。

表 2 $L=28$ (单位长度) 时算法求解结果比较
Tab.2 Comparison of calculated results ($L=28$)

算法	生产节拍	F_1	F_2	F_3
NPSO	23	68.73	11.44	0
NSGA II	23	83.31	16.54	31

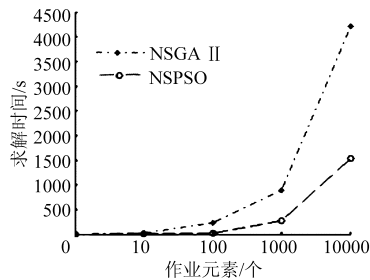


图 5 算法求解时间比较

Fig.5 Comparison of computing time

4 结束语

针对混合装配线平衡问题的第二类问题进行了研究,在兼顾装配线平均负荷与瞬时负荷的基础上,建立了以最小化工作站内装配时间波动、装配线负荷平滑指数及装配线超载时间为目标的混合装配线平衡问题数学模型,并对上述模型设计了基于非支配排序的粒子群优化算法。为验证该算法的有效性,运用 Matlab 软件对不同数目的作业元素分配进行了基于非支配排序的粒子群算法和基于非支配排序的遗传算法仿真研究,结果表明基于非支配排序的粒子群算法在求解大规模混合品种装配线平衡问题具有较大的优势。

参 考 文 献

1 Robert Klein, Armin Scholl. Maximizing the production rate in simple assembly line balancing-a branch and bound procedure[J]. European Journal of Operational Research, 1996,91(2):367~385.

2 张则强,程文明,钟斌,等. 求解装配线平衡问题的一种改进蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(8):1132~1139.

3 Gao Jie, Sun Linyan, Wang Lihua, et al. An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problem[J]. Computer & Industrial Engineering, 2009,58(3):1065~1080.

4 卫东,金烨. 给定序列的混合品种装配生产线平衡算法[J]. 机械工程学报,2004,40(4):135~138.

Wei Dong, Jin Ye. Algorithm for balancing mixed model assembly lines with predefined sequences[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2004,40(4):135~138. (in Chinese)

5 Fan Wenhua, Gao Zhenxiao, Xu Weida, et al. Balancing and simulating of assembly line with overlapped and stopped operation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(8):1069~1079.

6 蒋艳,黎向锋,左敦稳,等. 基于改进遗传算法的混流装配线的优化设计[J]. 中国机械工程,2010,21(9):2322~2327.

Jiang Yan, Li Xiangfeng, Zuo Dunwen, et al. Mixed-model assembly line optimization design based on improved genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering,2010,21(9):2322~2327. (in Chinese)

7 Yossi Bukchin, Ithai Rabinowith. A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1):492~508.

8 Gregory Levitin, Jacob Rubinovitz, Boris Shnits. A genetic algorithm for robotic assembly line balancing[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168(3):811~825.

9 于兆勤,苏平. 基于遗传算法和仿真分析的混合装配线平衡问题研究[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(6):1120~1129.

Yu Zhaoqin, Su Ping. Combining genetic algorithm and simulation analysis for mixed assembly line balancing problem[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2008,14(6):1120~1129. (in Chinese)

10 Cakir B, Altiparmak F, Dengiz B. Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing: a hybrid simulated annealing algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(3):376~384.

11 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):79~83,131.

Yuan Minghai, Li Dongbo, Yu Minjian. Mixed-model assembly line balance for mass customization[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2008, 14(1):79~83,131. (in Chinese)

12 Pedro M Vilarinho, Ana Sofia Simaria. ANTBAL:an ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations[J]. International of Production Research,2006,44(2):291~303.

13 Betul Yagmahan. Mixed-model assembly line balancing using a multi-objective ant colony optimization approach[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10):12453~12461.

14 Jiang Zhaoliang, Xuanyuan Sisi, Li Zhaoqian. Inventory-shortage driven optimization for product configuration variation[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(4):1045~1060.

15 范志君,姜兆亮,李智. 基于性能满意度的产品配置与变型设计范围界定算法[J]. 农业机械学报,2012,43(8):198~204.

Fan Zhijun, Jiang Zhaoliang, Li Zhi. Product configuration and variant design's scope definition algorithm based on customers' performance satisfaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8):198~204. (in Chinese)