

DOI:10.13196/j.cims.2018.10.007

基于混合优化算法的飞机总装脉动 生产线平衡问题

潘志豪¹, 郭宇¹, 查珊珊¹, 章诗晨¹, 王彬²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 北京卫星制造厂, 北京 100190)

摘要:为提高飞机装配效率和人员利用率,根据飞机总装脉动生产线的特点和平衡优化需求,构建多目标多约束的 E 类飞机总装脉动生产线平衡问题模型,并设计一种结合非支配排序遗传算法、布谷鸟搜索算法和动态搜索算法的混合优化算法进行求解。其中动态搜索算法解决 E 类装配线平衡问题求解效率低下以及质量不佳的问题;非支配排序遗传算法通过改进个体距离计算方法提高装配序列的优化效果;布谷鸟搜索算法则借助改进莱维飞行距离计算式提高最优站位数量的搜索能力。最后通过基准问题测试证明算法的性能优于相关问题算法,并借助应用实例验证了模型的有效性。

关键词:飞机总装脉动生产线;平衡优化;非支配排序遗传算法;布谷鸟搜索算法;动态搜索算法;E 类装配线平衡问题

中图分类号:TH166 文献标识码:A

Aircraft pulsating assembly line balancing problem based on hybrid algorithm

PAN Zhihao¹, GUO Yu¹, ZHA Shanshan¹, ZHANG Shichen¹, WANG Bin²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Beijing Spacecraft Manufacturing Factory, Beijing 100190, China)

Abstract: To improve aircraft assembly efficiency and personnel utilization, a multi-objective and multi-constrained model of the type-E aircraft pulsating assembly line balancing problem was constructed according to the characteristics of aircraft pulsating assembly line, and a hybrid algorithm which combined Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA), cuckoo search algorithm and dynamic search algorithm was designed to solve the problem. The dynamic search algorithm solved the low efficiency and poor quality of the solution to type-E assembly line balancing problem; the NSGA raised the optimization effect of assembly sequence by improving the individual distance calculation method; the cuckoo search algorithm improved Lévy flight distance calculation equation to search the optimal station number. The algorithm was proved to be senior to that in the related research, and the validity of the model was verified by the application example.

Keywords: aircraft pulsating assembly line; balancing optimization; non-dominated sorting genetic algorithm; cuckoo search algorithm; dynamic search algorithm; type-E assembly line balancing problem

收稿日期:2017-05-17;修订日期:2018-01-03。Received 17 May 2017; accepted 03 Jan. 2018.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575274,51775279);中央高校基本科研业务费青年基金资助项目(1005-YAH15055,NS2017034)。

Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 51575274,51775279), and the Youth Fund for Basic Research Services of the Central Universities, China(No. 1005-YAH15055,NS2017034).

0 引言

随着我国航空产业的加速发展,军民各型飞机的生产订单快速增长,产品需求日趋多样化。在这一背景下,为解决传统的飞机总装固定站位生产模式中存在的装配效率低、生产现场混乱、质量难保证^[1]等不足,各生产厂商将装配效率更高、产品质量更稳定的移动生产模式应用于飞机总装生产线。现有飞机总装的移动生产模式主要分为连续移动式 and 脉动式,其中脉动生产模式相对于连续移动生产模式具有生产柔性更高、产线运行更平稳、任务划分更合理等优势,能够更好地应对多变的生产需求和复杂的飞机构型。目前脉动生产模式已经在阿帕奇、F-35 和波音 787 等飞机的总装中成功应用,极大地提高了飞机总装的生产能力和经济效益^[2]。脉动生产模式在飞机总装中的成功应用离不开合理的生产线平衡方案,因此有必要结合飞机总装以及脉动生产模式的特点开展飞机总装脉动生产线平衡问题(Aircraft Pulse Assembly Line Balancing Problem, APALBP)的研究工作。

由于移动生产模式应用于现代飞机总装的时间较短,APALBP 的相关研究文献数量较少,亟需进一步深入研究。其中 Ríos 等^[3]以作业负载平滑为优化目标,通过仿真优化获取飞机总装线平衡优化结果;徐剑等^[4]借助面向对象分层赋时 Petri 网建立飞机总装生产线模型,并基于该模型运用启发式方法对第二类装配线平衡问题进行优化求解;张超等^[5]通过粒子群算法对第二类飞机总装移动生产线平衡问题进行优化求解,并借助仿真软件进行结果分析。相关研究主要基于简单装配线平衡问题(Simple Assembly Line Balancing Problem, SALBP)和一般装配线平衡问题(General Assembly Line Balancing Problem, GALBP)模型对飞机总装线进行平衡优化,而未针对性地构建 APALBP 模型,所得平衡优化结果难以有效反映飞机总装的实际生产情况。为提高研究的应用价值,本文针对飞机总装脉动生产线多工种协同装配以及多区域并行作业等特点建立多目标多约束的 APALBP 数学模型,从而确保基于该模型的飞机总装脉动生产线平衡优化结果的有效性。

为获取生产能力和经济效益综合提升的平衡优

化结果,将装配线平滑指数最小和人员总数最少作为飞机总装脉动生产线平衡优化的目标,同时根据生产线升级改造的实际需求和四类装配线平衡问题的特点^[6],选择 E 类飞机总装脉动生产线平衡问题(APALBP-E)为具体研究对象。其中因为装配线平衡问题属于 NP-hard 问题,同时 E 类装配线平衡问题(Assembly Line Balancing Problem Type E, ALBP-E)中装配节拍和站位数量均不确定,使得目标函数具有多极值特点,进一步提高了优化求解的难度,所以传统的精确求解算法难以在有限时间内获取高质量的优化结果,需采用近似求解算法进行优化求解。近年针对 ALBP-E 优化方法的研究有:Masitah 等^[7]通过离散粒子群算法优化求解多目标 E 类单边装配线平衡问题;Wei 等^[8]改进了 E 类单边装配线平衡问题数学模型,并通过启发式算法优化获取优化结果;Zacharia 等^[9]运用改进遗传算法优化求解模糊作业时间 E 类单边装配线平衡问题。上述优化求解方法主要是将 ALBP-E 分解为多个第二类装配线平衡问题并依次进行求解,导致算法的求解的效率低下且效果不佳。为提高 ALBP-E 求解效率和结果质量,本文设计一种混合优化算法对 APALBP-E 进行优化求解,在求解过程中主要通过动态搜索算法提高算法的求解效率和结果质量,并通过改进种群个体距离和莱维飞行距离计算方法来提高第二类非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)和布谷鸟搜索(Cuckoo Search, CS)算法的寻优能力。

本文对飞机总装脉动生产线的特点和平衡优化需求进行分析,并根据分析结果建立多目标多约束的 APALBP-E 模型,同时针对模型特点设计一种混合优化算法进行优化求解。最后通过标准案例测试以及应用案例分析,证明本文算法性能优异且能够有效求解 APALBP。

1 飞机总装脉动生产线平衡问题描述

飞机总装脉动生产线的特点有:①在整线装配中产品按节拍脉动式向前移动,在作业站位中产品采取类似固定站位装配的作业方式,如图 1 所示;②飞机由多系统组成且体型较大,各作业任务在站位中特定区域进行,根据本文的应用案例作业区域划分为 10 个区域,如图 1 站位 5 所示;③飞机装配自动化程度较低,并涉及多个技术领域,各作业任务需由相应工种人员进行。

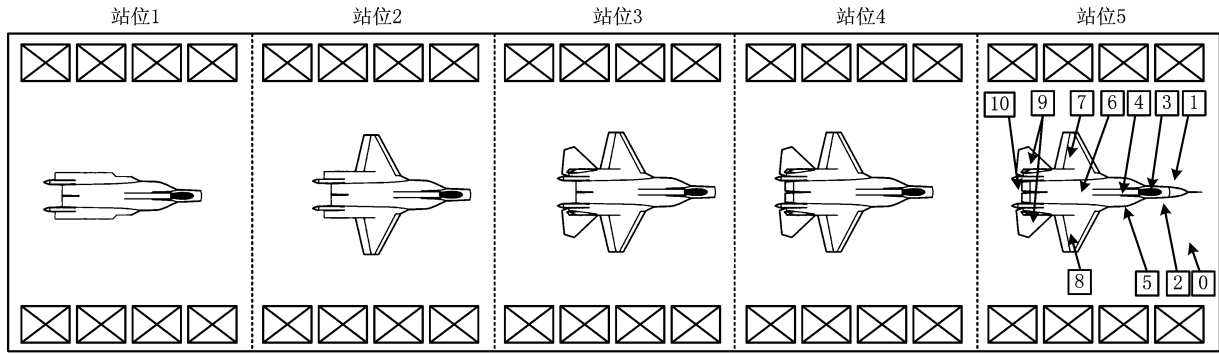


图1 飞机总装脉动生产线示意图

根据以上特点对 APALBP 提出以下假设：①作业任务装配时间确定；②所有任务都必须被分配到作业站位中；③人员被划分为多个工种，各工种仅能参与相应的作业任务；④同工种的人员装配作业熟练度一致；⑤各作业站位间不进行人员流动；⑥在作业站位内将装配空间划分为多个作业区域；⑦在作业站位中满足装配先后顺序约束和作业区域互不干涉的约束条件下，允许不同工种参与的装配任务并行作业，以 5 作业任务 2 工种的某作业站位为例，其中一个可行装配序列根据 SALBP 的假设获得的装配甘特图，如图 2a 所示，而根据 APALBP 的假设将作业站位的装配空间划分为两个作业区域，其中作业任务 1,4 的作业区域为 1 区域，作业任务 2,3,5 的作业区域为 2 区域，按照假设⑦可以得到作业站位的装配甘特图，如图 2b 所示，作业任务 1 和 3、2 和 4 并行装配。

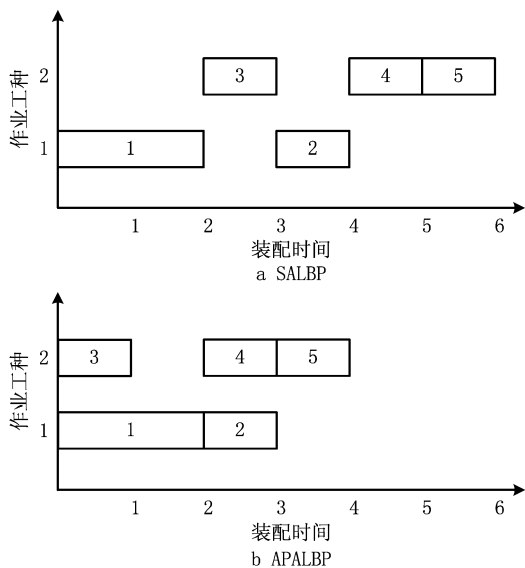


图2 案例作业站位的装配甘特图

2 飞机总装脉动生产线平衡问题模型构建

为进一步挖掘飞机总装脉动生产线的生产能力，提高生产线的装配效率和人员利用率，建立 APALBP 模型，并考虑人员工种约束和作业区域约束。

2.1 变量定义

n 为装配作业任务数量；

m 为装配线站位数量；

m_{\min} 为允许站位数量的下限；

m_{\max} 为允许站位数量的上限；

o 为装配线工种数量；

a 为装配作业区域数量；

i 为装配作业任务序号, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

j 为装配线站位序号, $j=1, 2, 3, \dots, m$;

k 为装配线工种序号, $k=1, 2, 3, \dots, o$;

l 为装配作业区域序号, $l=1, 2, 3, \dots, a$;

s_i 为作业任务的开始时间；

c_i 为作业任务的完成时间；

t_i 为作业任务 i 的装配时间；

p_i 为作业任务 i 的参与人员数量；

CT 为装配线装配节拍；

$PK(i)$ 为作业任务 i 同工种的前一作业任务；

$PL(i)$ 为作业任务 i 同作业区域的前一作业任务；

G 为装配作业任务优先关系集合；

x_{ij}

$$= \begin{cases} 1 & \text{如果作业任务 } i \text{ 被安排到作业站位 } j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

y_{ik}

$$= \begin{cases} 1 & \text{如果工种为 } k \text{ 类的人员参与作业任务 } i \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$z_{il} = \begin{cases} 1 & \text{如果作业任务 } i \text{ 在作业区域 } l \text{ 装配} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

2.2 目标函数

本文模型为最小规划模型,为获取装配效率和人员利用率最优的装配线方案,选取平滑指数和作业人员总数作为 APALBP 的目标函数。

(1)平滑指数

平滑指数(SI)反映各作业站位空闲时间的离散程度,用以评价生产线的装配效率,

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (CT - T_j)^2}{m}} \quad (1)$$

式中 T_j 为作业站位 j 的总装配时间。

(2)作业人员总数

作业人员总数(SN)反映装配线的人员配置情况,用以评价生产线的人员利用率,

$$SN = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^o P_{jk} \quad (2)$$

式中 P_{jk} 为作业站位 j 中工种为 k 类的作业人员总数。

2.3 约束条件

根据飞机总装脉动生产线的特点以及平衡问题的假设建立相应的约束条件,约束条件的数学表达如下:

$$c_{PK(i)} \leq s_i, i = 2, 3, \dots, n; \quad (3)$$

$$c_{PL(i)} \leq s_i, i = 2, 3, \dots, n; \quad (4)$$

$$c_i = \max(c_{PL(i)}, c_{PK(i)}) + t_i; \quad (5)$$

$$T_j = \max(c_i \cdot x_{ij}), i = 1, 2, \dots, n; \quad (6)$$

$$T_j \leq CT, j = 1, 2, \dots, m; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} x_{ij} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{\max}} j \cdot x_{ij} \leq \sum_{j=1}^{m_{\max}} j \cdot x_{kj}, \forall (i, k) \in G; \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{il} > 0, l = 1, 2, \dots, a; \quad (10)$$

$$P_{jk} = \max(p_i \cdot x_{ij} \cdot y_{ik}), i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

其中:式(3)表示作业任务必须在同工种的前一任务完成以后才能开始装配;式(4)表示作业任务必须在同作业区域前一任务完成以后才能开始装配;式(5)表示作业任务装配完成时间为最早开始时间加装配时间;式(6)表示作业站位的所有作业任务完成时间为作业任务完成时间的最大值;式(7)表示作

业站位的所有作业任务完成时间不能大于装配节拍;式(8)表示每个作业任务只能被安排在一个作业站位;式(9)表示各作业任务互相之间的装配先后顺序关系;式(10)表示在装配线中各作业区域一定会有作业任务进行装配;式(11)表示同站位中各工种的人数取该工种在该站位中单作业任务参与人数的最大值。

3 多目标多约束优化模型的求解算法及其性能测试

3.1 多目标多约束优化模型的求解算法设计

针对所建 APALBP-E 模型,设计一种混合优化算法进行求解。该算法混合改进的 NSGA、NS 算法以及动态搜索算法,其中改进的 NSGA 优化生产线装配序列,NS 算法寻找装配线的最优站位数量,动态搜索算法则在多重解码过程中寻找各装配序列对应的最优站位数量和装配节拍,图 3 所示为混合优化算法的运行流程图。

3.1.1 编码和解码

在个体的编码上采用面向装配序列的编码方式^[10],该编码方式保证优化算法能够完全搜索 APALBP 的装配序列空间,但种群中会出现不满足约束条件的个体编码。以标准测试案例 Mertens 为示例,按照面向装配序列的编码方式可以得到示例编码 {1, 3, 2, 4, 6, 7, 5}, 但由图 4 左图中的案例装配先后关系有向图可知,当前编码不满足装配先后顺序约束,需根据图 4 右图中的装配先后关系矩阵对编码从左向右依次进行约束检查和次序调整,示例编码经调整后得到编码 {1, 2, 3, 4, 7, 5, 6}, 满足装配先后顺序约束。

因为所建模型为 APALBP-E 模型,在 ALBP-E 中装配节拍和站位数量均未知且二者相互影响,需要同时搜索二者的求解空间,其中站位数量的求解空间明显小于装配节拍的求解空间,所以图 3 中的装配序列解码采用确定站位数量的第二类 SALBP(SALBP-II)解码方法,其流程如下:

步骤 1 获取站位数量种群中与当前装配序列个体对应的站位数量 m 。

步骤 2 根据装配序列个体编码求解获得单一作业站位最大装配节拍 CT_{\max} , 获得该装配序列个体的初始装配节拍 $CT = \max\left(\frac{CT_{\max}}{m}, t_{\max}\right)$ 。

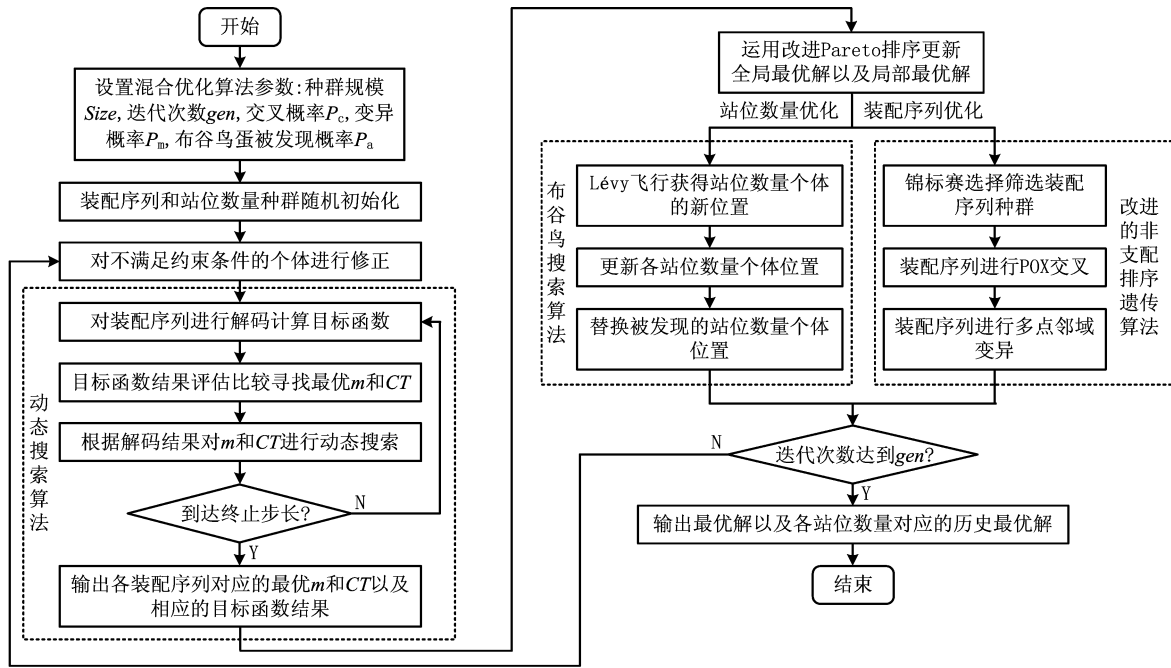


图3 混合优化算法流程图

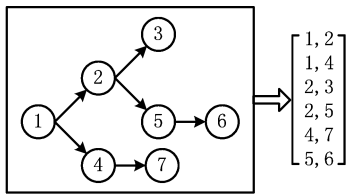


图4 示例的装配先后关系有向图及关系矩阵

步骤 3 从左向右将个体编码中未被分配的前 s 个作业任务分配到工作站位中,并以第 s 作业任务为工作站位中的最后一个作业任务,使第 s 个作业任务满足 $c_s \leq CT < c_{s+1}$ 。

步骤 4 如果作业任务还有未分配的,且未分配到最后作业站位,则转步骤 3,否则进行下一步操作。

步骤 5 当作业任务分配到最后作业站位时,将个体编码中所有未被分配的作业任务都分配到最后作业站位。

步骤 6 计算各作业站位的装配时间和目标函数,取当前站位装配时间的最大值作为装配节拍 CT 。

3.1.2 动态搜索算法

为提高解码质量和混合算法的求解效率,设计并运用动态搜索算法在多重解码过程中搜索各装配序列相应的最优站位数量和装配节拍,如图 3 所示。该算法根据前一次解码结果动态调整站位数量,减少对应低质量解的站位数量的解码次数,提高解码质量和求解效率,算法具体步骤如下:

步骤 1 对个体解码所得到的各站位装配时间和装配节拍 CT 进行分析,以 5 站位的装配线为例,可获得以下 3 种情况:①最后一个作业站位的装配时间远大于其余站位的装配时间平均值,如图 5a 所示,对二者的比值取整,其值大于 1,转步骤 2;②最后一个作业站位的装配时间远小于其余站位的装配时间平均值,如图 6a 所示,对二者的比值取整,其值小于 1,转步骤 3;③最后一个作业站位的装配时间接近其余站位的装配时间平均值,如图 7a 所示,对二者的比值取整,其值等于 1,转步骤 4。

步骤 2 如果 $m_{\min} \leq m < m_{\max}$,则 $m = m + 1, CT = \max\left(\frac{CT_{\max}}{m}, t_{\max}\right) + r_1 \cdot \bar{t}$,其中 r_1 为 $(-1, 1)$ 范围内的随机数, \bar{t} 为作业任务装配时间的平均值,对 CT 取整后得到的装配情况,如果结果如图 5b 所示,转步骤 6,否则转步骤 5。

步骤 3 如果 $m_{\min} < m \leq m_{\max}$,则 $m = m - 1, CT = CT + r_2 \cdot \frac{T_{last}}{m}$,其中 r_2 为 $(0, 1)$ 范围内的随机数, T_{last} 为最后一个作业站位的装配时间,对 CT 取整后得到的装配情况,如果结果如图 6b 所示,转步骤 6,否则转步骤 5。

步骤 4 如果 $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$,则 $CT = CT + r_3 \cdot t_{\min}$,其中 r_3 为 $(-1, 1)$ 范围内的随机数, t_{\min} 为各作业任务装配时间最小值,对 CT 取整后得到的装配情况,如果结果如图 7b 所示,转步骤 6,否则转步骤 5。

步骤 5 如果 $m > m_{\max}$, 则 $m = m_{\max}$; 如果 $m < m_{\min}$, 则 $m = m_{\min}$; 如果 $m_{\min} \leq m \leq m_{\max}$, 则 m 保持不变, $CT = \max(\frac{CT_{\max}}{m}, t_{\max}) + r_4 \cdot \bar{t}$, 最后对 CT 取整, 转步骤 6。

步骤 6 根据 CT 和 m 进行解码, 获取新的解并与之前解码结果进行支配关系比较, 若新解支配当前的最优解或达到终止步长, 则跳出结束输出本次搜索所得的非支配解及对应的 CT 和 m , 否则转步骤 1。

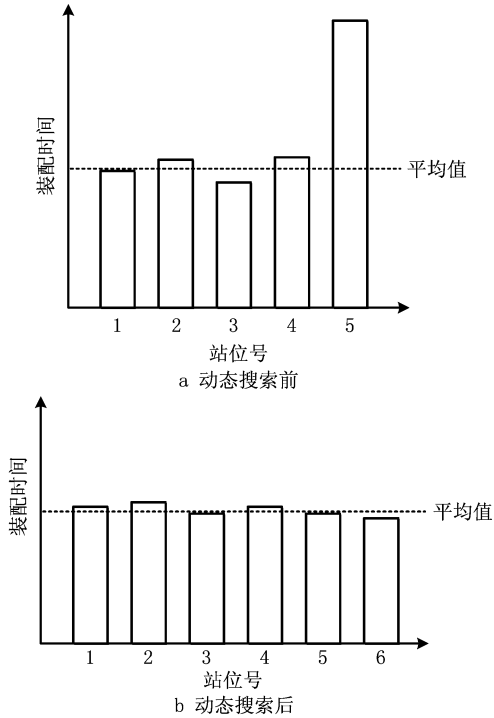


图5 情况①的各作业站位装配情况

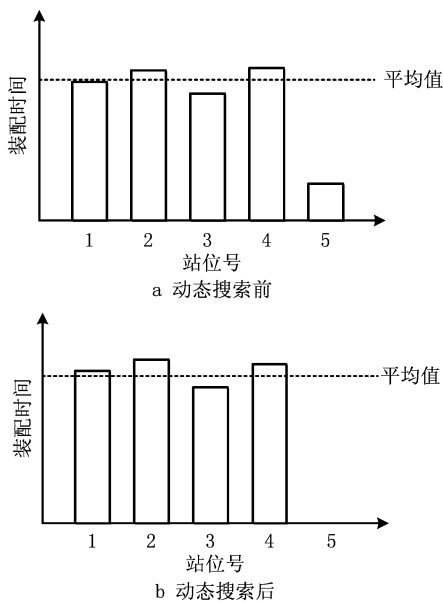


图6 情况②的各作业站位装配情况

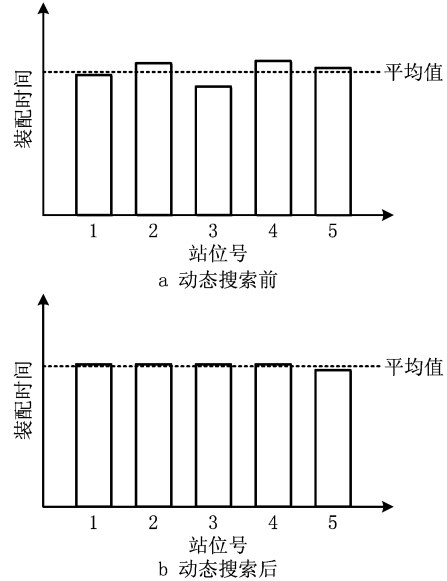


图7 情况③的各作业站位装配情况

3.1.3 布谷鸟搜索算法

CS 算法由 Yang 等^[11]于 2009 年提出, 与其他群智能优化算法相比具有收敛速度快、算法精度高、寻优效果好等特点, 本文根据站位数量寻优的特点对 CS 算法进行改进, 在莱维飞行的随机步长计算中增加当前最优站位数量的影响因式, 从而提高 CS 算法搜索最优站位数量的效率和质量。

如图 3 所示, 根据动态搜索算法的寻优结果, 运用 CS 算法搜索装配线的最优站位数量, 其中的 CS 算法在文献[12]所提算法基础上进行改进, 在进行全局随机搜索时, 所有鸟巢都将被新解替代, 通过式 (12) 产生第 i 只布谷鸟在第 $t + 1$ 代的鸟巢位置 $x_i^{(t+1)}$,

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + r_5 \cdot stepsize, i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

式中: $x_i^{(t)}$ 表示第 i 只布谷鸟在第 t 代的鸟巢位置; $r_5 \sim N(0, 1)$; $stepsize$ 为实际的随机步长,

$$stepsize = \alpha \cdot step \cdot (x_i^{(t)} - x_{best}^{(t)}). \quad (13)$$

式中: $\alpha > 0$ 是步长比例因子, 此处取 $\alpha = 0.5$; $x_{best}^{(t)}$ 表示第 t 代对各站位数量对应的最优解进行 Pareto 排序获取的全局最优解的位置; 参数 $step$ 为随机步长, 本文采用 Mantegna 算法执行莱维飞行^[13],

$$step = \frac{u}{|v|^{1/\beta}}. \quad (14)$$

式中: β 是一个 $[1, 2]$ 之间的参数, 此处取 $\beta = 1.5$; u 和 v 服从正态分布, 即

$$u \sim N(0, \sigma_u^2), v \sim N(0, \sigma_v^2); \quad (15)$$

$$\sigma_u = \left[\frac{\Gamma(1 + \beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1 + \beta)/2] \beta 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta}, \sigma_v = 1. \quad (16)$$

在局部搜索的过程中,采用随机步长数组 S 更新布谷鸟蛋被发现的鸟巢,其表达为

$$S_i = r_6(x_i^{(t)} - x_{\text{best}}^{(t)}). \quad (17)$$

式中 r_6 为 $(0,1)$ 的随机数。此外 P_a 表示布谷鸟蛋被发现的概率,这里 $P_a = 0.25$,每个鸟巢是否被发现采用数组 K 表示,

$$K_i = \begin{cases} 0, & R_a \leq P_a; \\ 1, & R_a > P_a. \end{cases} \quad (18)$$

其中随机数 $R_a \in [0,1]$ 。若 $R_a > P_a$,则鸟巢主人发现布谷鸟蛋, K_i 置一;否则鸟巢主人未发现布谷鸟蛋, K_i 置零,第 $t+1$ 代站位数量位置

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + K_i \cdot S_i. \quad (19)$$

3.1.4 第二类非支配排序遗传算法

NSGA-II 由 Deb^[14] 等于 2002 年对 NSGA 进行改进所得,其最大的改进就是采用对结果进行相似度计算遴选个体参与后续操作,从而避免种群早熟。而 APALBP 问题的各代结果集中度高,因此改由相同解集中随机选取来进行个体筛选。改进后的 NSGA-II 如图 3 所示对装配序列进行优化,具体过程如下:

步骤 1 由于个体的解相似度高且有大量个体对应结果相同,采取从相同结果的个体中随机选出代表个体,而不是如传统 NSGA-II 采用个体之间距离衡量相似度来进行个体遴选。

步骤 2 对遴选后的种群进行锦标赛选择操作,个体的优劣评价采取 Pareto 排序,选择每次随机规模中的非支配解,组成随后参与遗传操作的新种群。

步骤 3 交叉操作,采用优先交叉操作(Precedence Operation Crossover, POX)^[15],交叉父代染色体中作业任务的装配顺序。操作过程如图 8 所示,以案例 Mertens 的两个装配序列染色体 P_1 和 P_2 的 POX 交叉为例,将所有作业任务随机划分为作业任务集合 J_1 和 J_2 ,将 P_1 中集合 J_1 和 P_2 中集合 J_2 的作业任务分别复制到子代 C_1 和 C_2 ,再将集合 J_1 和 J_2 的作业任务分别按 P_2 和 P_1 的装配顺序补充到子代 C_2 和 C_1 中,完成 POX 交叉操作。

步骤 4 变异操作,采用多点邻域变异。在染色体中随机选取个别作业任务,并从该作业任务集合的排序邻域中随机选取一个替代当前排序,如图 9 所示,从染色体 P_1 中随机选取 3 个作业任务,其排序为 $\{4,5,3\}$,从该排序邻域中随机获取新的排序

$\{5,3,4\}$,并按照新的排序更新染色体获取子代 C_1 ,完成多点邻域变异操作。

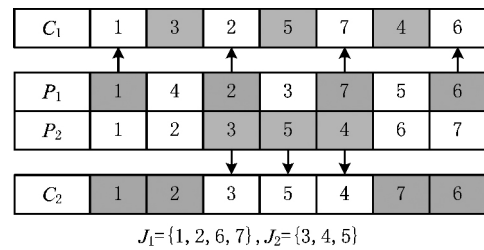


图8 POX交叉

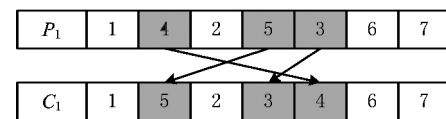


图9 多点邻域变异

3.2 算法复杂度分析

本文混合优化算法的时间复杂度主要由 4 部分组成:动态搜索算法、CS 算法、改进 NSGA 以及全局最优解和局部最优解更新操作。设定该算法中,装配序列和站位数量种群规模均为 N 、目标矢量的维度为 m_0 、全局最优解规模为 N_g 、动态搜索算法终止步长为 l_D 、布谷鸟蛋被发现概率为 P_a 、锦标赛选择的规模为 N_s 、改进 NSGA-II 的交叉概率和变异概率分别为 P_c 和 P_m 、最大迭代次数为 gen ,则装配序列和站位数量种群初始化的时间复杂度为 $O(2N)$,不满足约束的个体修正操作的时间复杂度为 $O(N)$,动态搜索算法和多重解码的时间复杂度为 $O(m_0 l_D N)$,全局最优解更新的时间复杂度为 $O(m_0(N + N_g)^2)$,局部最优解更新的时间复杂度为 $O(m_0 N)$,CS 算法莱维飞行位置更新的时间复杂度为 $O(N)$,布谷鸟蛋被发现个体随机替换的时间复杂度为 $O(P_a N)$,改进 NSGA-II 的锦标赛选择、交叉操作和变异操作的时间复杂度分别为 $O(m_0 N_s^2)$, $O(P_c N)$, $O(P_m N)$ 。因此,本文混合优化算法在完成迭代次数 g_{\max} 以后,总的时间复杂度为

$$\begin{aligned} & O(2N) + O(N) + gen[O(m_0 l_D N) + O(m_0(N + N_g)^2) + O(m_0 N) + O(N) + O(P_a N) + \\ & O(m_0 N_s^2) + O(P_c N) + O(P_m N)] \\ & = O(gen(m_0(N + N_g)^2 + (m_0 l_D + m_0 + P_a + P_c + P_m + 1)N + m_0 N_s^2)). \quad (20) \end{aligned}$$

3.3 算法性能测试

本文优化算法程序采用 MATLAB 2012a 编写,在 Windows7 64 位操作系统环境下运行,运行

计算机配置为内存 8 G、处理器 Intel(R)Core(TM) i7-3770。优化算法参数设置如下:装配序列和站位数量种群个数 $Size=100$,最大迭代次数 $gen=100$,交叉概率 $P_c=0.8$,变异概率 $P_m=0.8$,动态搜索算法的终止步长 $L=m_{max}-m_{min}+1$ 。

为测试本文算法性能,采用由文献[16]提供的 SALBP-E 测试案例,测试案例数据可从 <http://alb.mansci.de/> 获得,选取文献[8-9]的优化结果进行算法性能分析,对各测试案例连续运行 10 次,从中选取最优结果,为便于优化结果进行比较,采用相同的目标函数

$$IT = CT \cdot m - \sum_{i=1}^n t_i \quad (21)$$

式中 IT 为装配线空闲时间,运行结果如表 1 所示,其中 $Scale$ 为测试案例的装配作业任务规模。各测试案例优化求解的平均运行时间均不超过 20 s,由表 1 中优化结果对比可知本文算法在多数测试案例上的表现优于文献[8-9],且在个别案例中优化结果较历史结果减少近数倍。以测试案例 Hahn 为例,在站位数量范围[3,8]的条件下,本文算法所得最优解减小到仅有文献[9]历史最优解的 38%,装配线空闲时间大幅减少,图 10 所示为案例 Hahn 最优解的甘特图,同时本文算法求解个别案例可获取多组优化解,证明本文算法能够有效克服目标函数的多峰特性,较文献[8-9]的算法有显著提升。

表 1 测试案例优化求解结果

| 标准案例 | 规模 | m_{min} | m_{max} | 文献[8] | | | 文献[9] | | | 本文算法 | | |
|-----------|----|-----------|-----------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------------|---------------|-----------|
| | | | | m^* | CT^* | IT^* | m^* | CT^* | IT^* | m | CT | IT |
| Mitchell | 21 | 3 | 9 | 3 | 36 | 0 | 3 | 36 | 0 | 3 | 36 | 0 |
| | | 7 | 9 | — | — | — | 8 | 14 | 7 | 8(7) | 14(16) | 7 |
| Heskia | 28 | 2 | 10 | 2 | 512 | 0 | 2 | 512 | 0 | 2 | 512 | 0 |
| Buxey | 29 | 3 | 13 | 3 | 108 | 0 | 3 | 108 | 0 | 3 | 108 | 0 |
| Sawyer | 30 | 3 | 13 | 3 | 108 | 0 | 3 | 108 | 0 | 3 | 108 | 0 |
| Lutz1 | 32 | 2 | 11 | 2 | 7 076 | 12 | — | — | — | 2 | 7 074 | 8 |
| | | 3 | 11 | — | — | — | 4 | 3 574 | 156 | 3 | 4 716 | 8 |
| | | 5 | 11 | — | — | — | 5 | 2 872 | 220 | 5 | 2 842 | 70 |
| Gunther | 35 | 3 | 13 | 3 | 161 | 0 | 3 | 161 | 0 | 3 | 161 | 0 |
| | | 6 | 13 | — | — | — | 6 | 84 | 21 | 6(9) | 81(54) | 3 |
| Kilbridge | 45 | 3 | 11 | 3 | 184 | 0 | 3 | 184 | 0 | 3 | 184 | 0 |
| Hahn | 53 | 2 | 8 | 2 | 7 014 | 2 | — | — | — | 2 | 7 013 | 0 |
| | | 3 | 4 | — | — | — | 3 | 4 787 | 335 | 4 | 3 515 | 34 |
| | | 3 | 8 | — | — | — | 5 | 2 823 | 89 | 5 | 2 812 | 34 |
| Lutz2 | 89 | 3 | 49 | — | — | — | 1 | 3 | 162 | 5 | 97 | 0 |

为检验算法的收敛性能,选取表 1 中的 4 个测试案例在各自站位数量搜索范围最大的条件下优化求解连续运行 10 次的所得解,对每代最优解的目标函数取平均值,获得装配空闲时间收敛曲线,如图 11 所示,由图可知本文算法能够在给定的有限迭代次数中获取最优解,有效避免陷入局部最优解。

4 应用实例

为验证所建模型和求解算法的有效性,选取某飞机脉动总装生产线进行应用分析。该实例的装配任务总共有 76 个,作业人员根据装配工艺类别被划分为 7 个工种,各站位根据装配任务的作业区域被划分为 11 个作业区域,如图 1 中作业站位 5 所示,装配任务的数据信息和先后次序关系如表 2 所示。

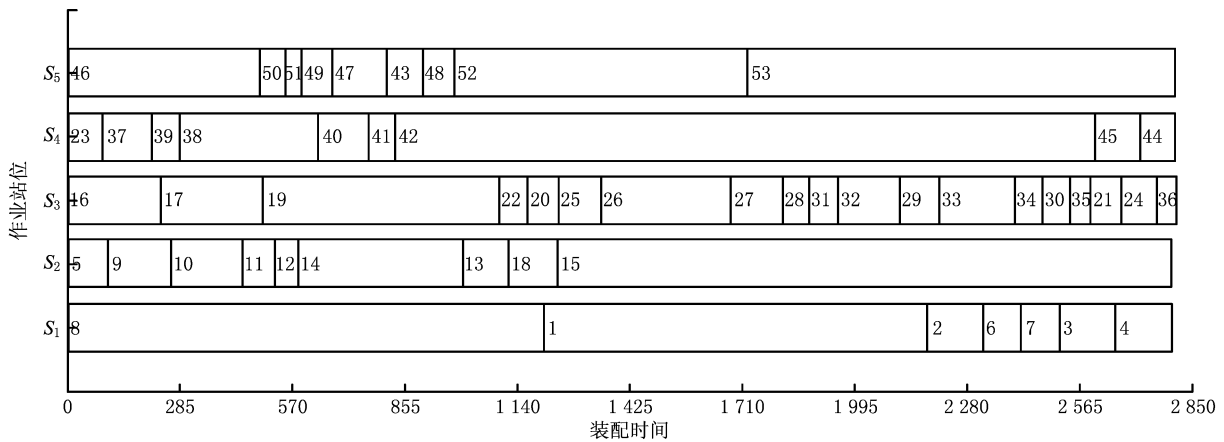


图10 案例Hahn最优解的甘特图

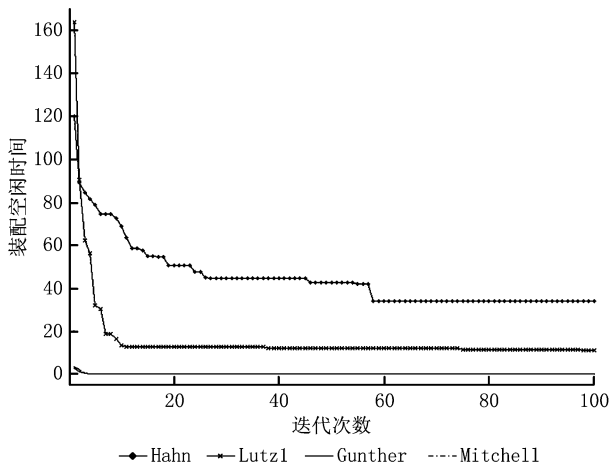


图11 案例Hahn的装配空闲时间迭代收敛曲线

续表 2

| | | | | | |
|----|----|---|---|---------|-------|
| 15 | 3 | 1 | 6 | 2 | 9 |
| 16 | 8 | 3 | 5 | 1 | 10 |
| 17 | 4 | 2 | 1 | 3 | 11 |
| 18 | 8 | 1 | 1 | 10,10 | — |
| 19 | 8 | 2 | 7 | 2,3,9 | 12 |
| 20 | 8 | 1 | 1 | 3,4 | 13 |
| 21 | 4 | 3 | 5 | 4,5,7,8 | 13 |
| 22 | 8 | 1 | 7 | 4,5 | 13 |
| 23 | 3 | 1 | 7 | 4,5 | 13 |
| 24 | 3 | 2 | 6 | 6 | 13 |
| 25 | 3 | 2 | 1 | 5 | 14 |
| 26 | 8 | 1 | 1 | 2 | 15 |
| 27 | 3 | 2 | 1 | 3,5 | 17,18 |
| 28 | 4 | 2 | 7 | 2,3,4,5 | 19 |
| 29 | 4 | 1 | 7 | 3,4 | 20 |
| 30 | 8 | 1 | 5 | 3,4 | 21 |
| 31 | 20 | 1 | 7 | 3,4 | 22 |
| 32 | 16 | 1 | 7 | 5 | 23 |
| 33 | 4 | 4 | 5 | 6 | 24 |
| 34 | 8 | 4 | 1 | 4,5 | 25 |
| 35 | 3 | 1 | 1 | 3,9 | 26 |
| 36 | 3 | 1 | 1 | 10 | — |
| 37 | 16 | 2 | 2 | 10 | — |
| 38 | 16 | 2 | 7 | 2,3 | 28 |
| 39 | 8 | 1 | 7 | 4,5 | 29 |
| 40 | 4 | 1 | 7 | 4,7,8 | 30 |
| 41 | 4 | 1 | 5 | 4,5 | 31 |
| 42 | 4 | 1 | 1 | 5 | 32 |

表 2 某飞机脉动总装生产线装配信息

| 任务序号 | 装配时间/h | 装配人数 | 人员工种 | 装配区域 | 紧前任务 |
|------|--------|------|------|---------|------|
| 1 | 3 | 6 | 1 | 0 | — |
| 2 | 3 | 8 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 4 | 4 | 1 | 7 | 1 | 2 |
| 5 | 4 | 3 | 6 | 3 | 2 |
| 6 | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| 7 | 8 | 6 | 3 | 3 | 2 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 7,8 | — |
| 9 | 8 | 1 | 7 | 2 | 3 |
| 10 | 4 | 3 | 6 | 1 | 4 |
| 11 | 8 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| 12 | 8 | 1 | 7 | 2,3,9 | 6 |
| 13 | 8 | 4 | 1 | 4,5,7,8 | 7 |
| 14 | 4 | 4 | 1 | 7,8 | 8 |

续表 2

| | | | | | |
|----|----|---|---|-------------|-------|
| 43 | 16 | 2 | 7 | 4,7,8 | 34 |
| 44 | 3 | 1 | 1 | 2 | 35,36 |
| 45 | 28 | 3 | 5 | 2,3,9 | 37,38 |
| 46 | 3 | 2 | 1 | 3,4 | 39 |
| 47 | 8 | 2 | 1 | 5 | 41 |
| 48 | 8 | 1 | 7 | 4,5 | 42 |
| 49 | 8 | 4 | 5 | 4,7,8 | 43 |
| 50 | 4 | 2 | 2 | 3,9 | 45 |
| 51 | 4 | 2 | 5 | 2,3,4 | 46 |
| 52 | 3 | 1 | 6 | 4,5 | 48 |
| 53 | 12 | 2 | 1 | 10 | — |
| 54 | 8 | 2 | 5 | 4,7,8 | 49 |
| 55 | 8 | 4 | 5 | 2,3,9 | 50 |
| 56 | 8 | 2 | 4 | 4,5 | 51 |
| 57 | 8 | 3 | 4 | 5,5 | 52,53 |
| 58 | 12 | 2 | 3 | 7,8 | 54 |
| 59 | 4 | 2 | 1 | 10 | — |
| 60 | 12 | 4 | 3 | 2,3,4,9 | 55 |
| 61 | 8 | 3 | 4 | 5 | 57 |
| 62 | 4 | 1 | 1 | 10 | — |
| 63 | 3 | 2 | 1 | 4,5 | 58,59 |
| 64 | 16 | 3 | 2 | 2,3,6,7,8,9 | 60 |
| 65 | 3 | 3 | 1 | 4,5 | 62,63 |
| 66 | 12 | 1 | 5 | 2,3,4,9 | 64 |
| 67 | 12 | 4 | 5 | 2,3,4,9 | 66 |
| 68 | 6 | 3 | 1 | 3,9 | 67 |
| 69 | 3 | 2 | 4 | 3,5,9 | 68 |
| 70 | 8 | 3 | 7 | 2,3,4,9 | — |

续表 2

| | | | | | |
|----|---|---|---|-------|-------|
| 71 | 4 | 2 | 1 | 10 | 69 |
| 72 | 6 | 2 | 7 | 3,4,5 | 70,71 |
| 73 | 4 | 3 | 5 | 3,4,9 | 72 |
| 74 | 8 | 5 | 1 | 0 | 73 |
| 75 | 8 | 5 | 1 | 0 | 74 |
| 76 | 8 | 8 | 1 | 0 | 75 |

在与算法性能测试相同的计算机环境下,运用所提出的混合优化算法分别对案例的 SALBP-E 和 APALBP-E 模型进行平衡优化,并根据不同的装配线实施条件设置多组站位数量范围,分别对不同的站位数量范围连续运行 10 次,平衡优化所得结果如表 3 所示,其中 $averT$ 为连续优化求解 10 次的运行时间平均值。

由表 3 可知,在不同的站位数量范围条件下,APALBP-E 模型平衡优化所得的装配线方案在装配效率上均较 SALBP-E 模型平衡优化所得方案有大幅提高,并且二者优化解的人员规模相当。以站位数量范围[4,7]为例,APALBP-E 模型平衡优化所得方案在装配节拍和平滑指数上均优于 SALBP-E 模型,在作业人员数量也较 SALBP-E 模型有所减少,实现了在合理的人员配置条件下提高装配效率的目标。从各最优装配线方案中选取第一作业站位作为分析对象的装配甘特图如图 12 和图 13 所示,对比发现在 APALBP-E 模型中在满足多约束的条件下,优化结果充分体现了飞机总装脉动生产线多工种协同装配、多区域并行作业的特点,整线装配周期大幅减小,接近实际生产情况,证明基于该模型的平衡优化结果能够有效反映飞机总装脉动生产线的实际生产。

表 3 案例平衡优化的结果

| m_{min} | m_{max} | SALBP-E | | | | | APALBP-E | | | | |
|-----------|-----------|---------|------|------|-----------|----|----------|------|-----|-----------|----|
| | | m | CT/h | SI | $averT/s$ | SN | m | CT/h | SI | $averT/s$ | SN |
| 4 | 7 | 4 | 134 | 0.25 | 38 | 68 | 4 | 96 | 0 | 432 | 67 |
| 5 | 7 | 5 | 107 | 0 | 38 | 74 | 5 | 87 | 0 | 369 | 80 |
| 6 | 7 | 6 | 90 | 0.83 | 40 | 81 | 6 | 68 | 0.5 | 309 | 81 |

5 结束语

本文针对飞机总装脉动生产线多工种协同装配、多区域并行作业的特点,在对 SALBP-E 的假设条件和约束条件进行补充细化的基础上建立多目标

多约束的 APALBP-E 模型,并运用一种混合优化算法求解模型获取最优装配线方案,经算法性能测试和生产案例应用分析得出以下结论:

(1)通过应用案例分析证明,由 APALBP-E 模型平衡优化所得的最优装配线方案较 SALBP-E 模型

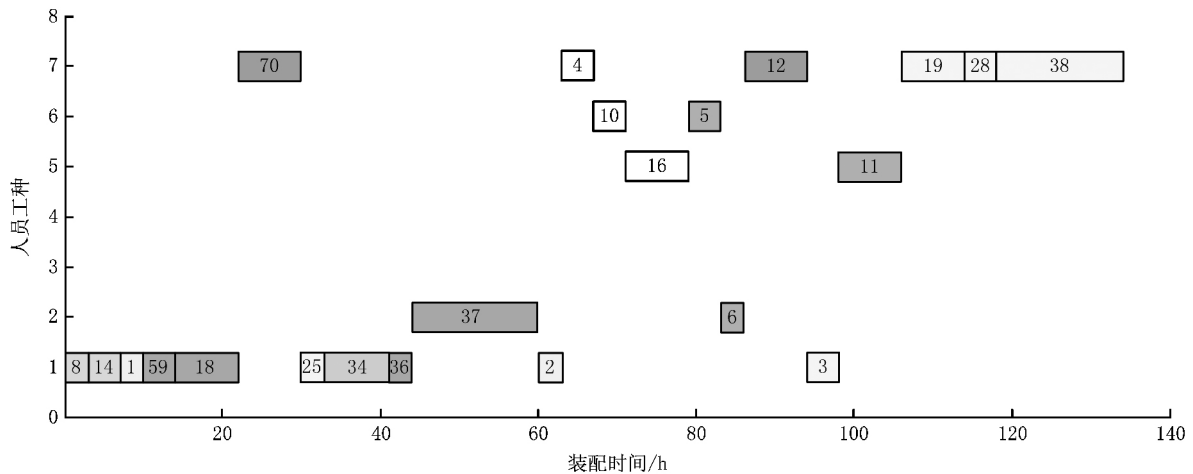


图12 SALBP-E最优解的单个作业站位装配甘特图

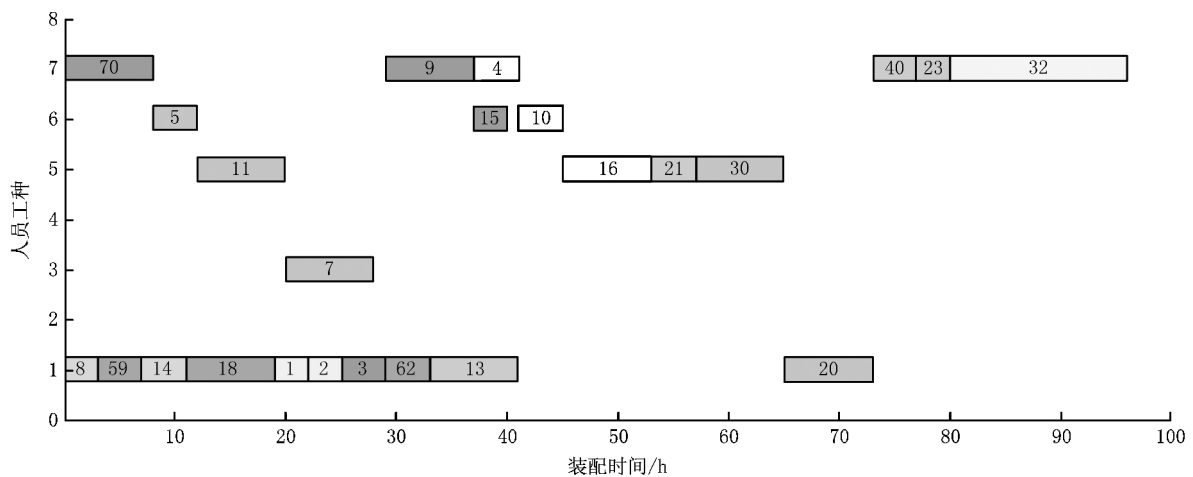


图13 APALBP-E最优解的单个作业站位装配甘特图

的优化方案在人员规模基本不变情况下的装配效率显著提升,且有效反映飞机总装脉动生产线的实际生产情况。

(2)所提出的混合优化算法在标准案例的测试中优于近年文献中的优化算法,并在个别案例中提供多组优化方案,证明该算法性能优异并能够有效解决 APALBP-E 的多极值问题。

综上所述,本文所建 APALBP-E 模型及混合优化算法可以有效解决 APALBP。在后续研究中,可考虑在该模型的基础上进一步完善 APALBP 模型,并改进优化算法提高 APALBP 的结果质量和求解效率。

参考文献:

- [1] XUE Liangchang. Application and research of pulsating aircraft assembly production line and its information management system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 462(18): 89-91(in Chinese). [薛良昌. 飞机总装脉动生产线及其信息管理系统的应用与研究[J]. 航空制造技术, 2014, 462(18): 89-91.]
- [2] LI Jinlong, DU Baorui, WANG Biling, et al. Application and development of pulse assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 437(17): 44-46(in Chinese). [李金龙, 杜宝瑞, 王碧玲, 等. 脉动装配生产线的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2013, 437(17): 44-46.]
- [3] RÍOS J, MAS F, MENÉNDEZ J L. Aircraft final assembly line balancing and workload smoothing; a methodological analysis[J]. Key Engineering Materials, 2012, 502: 19-24.
- [4] XU Jian, YE Wenhua, YANG Bin, et al. Research on assembly line modeling of aircraft based on extended Petri net[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(10): 2596-2603(in Chinese). [徐剑, 叶文华, 杨斌, 等. 基于扩展 Petri 网的飞机装配线建模及平衡方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(10): 2596-2603.]
- [5] ZHANG Chao, LI Hui. Study of aircraft assembly line balancing based on PSO algorithm and discrete event simulation[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016(11): 61-67. [张

- 超,李慧等.基于粒子群算法和仿真分析的飞机移动装配线平衡研究[J].航空科学技术,2016(11):61-67.]
- [6] SCHOLL A. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing[J]. European Journal of Operational Research,2006,168(3):666-693.
- [7] TOROUDI H P, MADANI M S, SARLAK F, et al. A multi-objective method for solving assembly line balancing problem [J]. Decision Science Letters,2017,6(1):1-10.
- [8] WEI N C, CHAO I M. A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem[J]. Computers & Industrial Engineering,2011,61(3):824-830.
- [9] ZACHARIA P T, NEARCHOU A C. A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem[J]. Computers & Operations Research,2013,40(12):3033-3044.
- [10] DINI G, FAILLI F, LAZZERINI B, et al. Generation of optimized assembly sequences using genetic algorithms [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology,1999,48(1):17-20.
- [11] YANY X S, DEB S. Cuckoo search via Levy flights[C]// Proceedings of World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing. Washington, D. C., USA: IEEE, 2009: 210-214.
- [12] YAO Yuanyuan, YE Chunming. Solving job-shop scheduling problem by cuckoo search algorithm[J]. Computer Engineering and Applications,2015,51(5):255-260(in Chinese). [姚远远,叶春明.作业车间调度问题的布谷鸟搜索算法求解[J].计算机工程与应用,2015,51(5):255-260.]
- [13] MORGAN D R, MA Z, KIM J, et al. A Generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2006,54(10):3852-3860.
- [14] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [M]//Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2000: 849-858.
- [15] ZHANG Chaoyong, DONG Xing, WANG Xiaojuan, et al. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(11):156-164(in Chinese). [张超勇,董星,王晓娟,等.基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J].机械工程学报,2010,46(11):156-164.]
- [16] SCHOLL A. Balancing and sequencing of assembly lines [M]. 2ed. Berlin, Germany: Physica-Verlag, 1995.

作者简介:

潘志豪(1993—),男,上海人,南京航空航天大学硕士研究生,研究方向:制造系统规划调度、装配线平衡优化, E-mail: black4pm2008@163.com;

郭宇(1971—),男,江苏南京人,教授,博士,博士生导师,研究方向:数字化设计制造、制造物联网技术、制造系统仿真与优化;

查珊珊(1985—),女,安徽合肥人,博士研究生,研究方向:智能算法优化、制造系统建模仿真;

章诗晨(1993—),男,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向:制造系统建模仿真;

王彬(1972—),男,湖北麻城人,高级工程师,博士,研究方向:制造系统仿真与优化。