

混合装配线平衡排产协同优化新算法

冯丽娟, 严洪森

(东南大学复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏南京 210096;
东南大学自动化学院, 江苏南京 210096)

摘要: 装配线平衡和产品排序是紧密相关而且对目标值存在交互影响作用的两个 NP-hard 问题。文中基于这两个问题的交互影响以及贪婪随机自适应算法 (GRASP) 比较好的收敛速度和全局满意度, 设计了协同优化贪婪随机自适应算法 (COGRASP), 并行协同地优化混合装配线, 并用实例对此算法进行了仿真研究。此外, 文中还考虑了可能存在的瓶颈工序对协同优化效果的影响, 将一种基于 OPT 思想的关键资源调度方法融入原来的 COGRASP 中, 通过相应实例验证, 取得的效果也非常好。

关键词: 装配线平衡; 产品排序; 协同优化贪婪随机自适应搜索法; 瓶颈工序; 最优生产技术

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)04-0029-06

A New Algorithm about Products Sequencing Optimization for Mixed-Model Assembly Line with Consideration of Line Balancing

FENG Li-juan, YAN Hong-sen

(Ministry of Edu. Key Lab. of Measurement and Control of CSE, Southeast Univ., Nanjing 210096, China;
School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Assembly line balancing and products sequencing are both NP-hard problems and they are tightly interrelated and influence each other in mixed-model assembly line. In this paper, based on the mutual influence on makespan in the mixed-model assembly line, a co-evolutionary optimization greedy randomized adaptive search procedure (COGRASP) with better convergence rate and global satisfaction is designed to minimize makespan in parallel. The simulation example using this algorithm has been given. Further, in the assembly line, the bottleneck process may exist which will influence the collaborative optimization. Incorporate a kind of key resource scheduling based on OPT into the former COGRASP. The simulation results of corresponding example also show good efficiency.

Key words: assembly line balancing; products sequencing; COGRASP; bottleneck process; OPT

0 引言

混合装配线的设计包括两个相互独立又紧密联系的部分: 装配线平衡和产品排序^[1-3]。产品排序问题是混合装配线研究的重要内容^[4-6], 但这些研究大多没有考虑流水线平衡的影响。宋华明等人已分析过装配线平衡问题和产品排序问题的交互影响, 并用实例验证了流水线的平衡与排序对其优化目标存在的显著影响^[7]。因此考虑装配线平衡下的混合装配线的排产优化更贴近实际生产情况。1992年, Hillis最早提出了

协同进化算法的思想, 为此类需要考虑协同优化问题的解决带来了福音, 由此产生了装配线平衡和排产的协同优化及其算法。在宋明华等人的研究中采用的是协同进化遗传算法^[3], 而现有的文章也大多是关于协同遗传算法的^[8,9]。贪婪随机自适应搜索法 (greedy randomized adaptive search procedure, GRASP) 是近年来新涌现的元启发式方法, 是由 Feo 和 Resende 在 1989 年提出的^[10]。金华征等人用实例验证了 GRASP 算法在计算速度和全局收敛性能上均优于遗传算法^[11]。

基于上述考虑, 文中提出一种协同优化 GRASP (co-evolutionary GRASP, 简称 COGRASP) 来求解考虑发动机装配线平衡的混合装配线排产优化问题。文中首先简单介绍了装配线平衡下的混合装配线排产优化问题, 接着提出了考虑装配线平衡和排产并行优化的 COGRASP, 结合某航空发动机装配线调度实例用

收稿日期: 2009-07-06; 修回日期: 2009-10-25

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA04Z112); 国家自然科学基金资助项目 (50875046)

作者简介: 冯丽娟 (1985-), 女, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 研究方向为车间生产计划与调度; 严洪森, 教授, 博士生导师, 研究方向为生产计划与调度、知识化制造、并行工程等。

此算法进行计算,验证了 COGRASP 在收敛速度和全局满意度上的优越性以及考虑装配线平衡对于排产优化的重要影响。由于航空发动机往往工序多而繁杂,难免存在瓶颈工序,其在一定程度上会影响协同优化的效果,考虑近年来 OPT 在解决此类问题上的良好效果,将一种基于 OPT 思想的关键资源调度方法融入原来的 COGRASP 中,通过相应实例也验证了其有效性。

1 装配线平衡下混合装配线排产优化问题

1.1 装配线平衡优化问题

装配线平衡问题(Assembly Line Balancing Problem, ALBP)是指工程流动间负荷的差距最小,流动顺畅,减少因时间差所造成的等待或滞留现象。工作站间负荷的差距最小是生产线达到平衡的特征。混合流水生产线的平衡问题一般是转化为单一型流水生产线的平衡问题来解决的^[12]。由各种产品的装配图通过“或”逻辑运算得到一个联合装配图,联合装配图的平均作业时间计算见文献[3]。

装配线平衡问题的研究一般有三种^[13],在不同数目的工作站下,混合装配线上的 makespan 值各不相同^[3],笔者是基于固定工作站数下的装配线平衡来考虑的。对于这种装配线平衡问题,是在给定工作站数 K 和某种作业元素的分配准则下,求作业元素在工作站中的分配顺序。平衡优化设计就是寻找这样一个序列,使得在既定的分配准则下,对应于某个排产序列(排产设计方案),其系统目标最优。由于工作站的数量已经确定,有如下装配线平衡率的公式^[14]:

$$\text{装配线平衡率: } \eta = \frac{\sum_{i=1}^K ST_i}{K * C} * 100\% \quad (1)$$

其中 C 为装配线生产节拍, K 为工作站个数, ST_i 为各工作站的实际负荷。

由公式(1)可见,在工作站数固定的前提下,装配线的平衡和生产节拍有密切关系,尽可能减小生产节拍,可以提高装配线平衡率。作业元素在工作站内的分配原则有很多,基于提高平衡率的考虑,这里使用文献[3]中的分配原则 5,其分配的结果使流水线的节拍值最小,从而保证了装配线的平衡。分配原则的具体步骤见文献[3]。

1.2 装配线平衡问题和排产优化的交互影响

混合装配流水线上 makespan 优化的提法是:在一个计划期内,生产一系列产品,共有 M 种,这 M 种产品的总需求为 D ,每个品种的需求为 $D_m (m = 1, 2, \dots, M)$, $\sum_{m=1}^M D_m = D$ 。完成每种产品所需的作业元素、作业元素的时间以及作业元素之间的优先关系预先给

定。要在一定的规则下将所有的作业元素分配到流水线上的工作站中,同时确定产品的投产顺序,最小化 makespan 值。

混合装配流水线的优化存在两个方面的问题:一个是流水线的平衡问题,即在满足给定的技术约束的条件下,把完成产品所需的作业元素(或任务)分配到工作站中,我们一般给定工作站数和一个预定节拍;另一个就是排序问题,一般采用循环排序法^[15]。假设 g 为产品需求 $D_m (m = 1, 2, \dots, M)$ 的最大公因子,记 $d_m = D_m / g, d = \sum_{m=1}^M d_m$ 。把 (d_1, d_2, \dots, d_M) 称为一个最小比例集。实际的排产中,只对最小比例集中的 d 个产品排序,称为一个排产循环。重复排产循环 g 次,就达到了对 D 个产品排序的目的。循环排产的好处在于使装配过程中对各个零部件消耗速度均衡。

流水线的平衡与排序对流水线的优化目标均有显著影响,有实例验证,详见文献[7]。

1.3 装配线平衡下的混合装配线排产优化问题数学描述

装配线平衡下的混合装配线排产优化问题是:确定 M 个品种的 D 个产品在计划期 PT 内的投产顺序,优化混合装配线的预定目标。系统目标评估要在平衡设计的前提下,加上排产方案,才能得到。这里参照文献[3]建立如下装配流水线最小化 makespan 的协同优化模型。

$$\text{Objective: } \min f = \text{makespan} \quad (2)$$

$$\text{Subject to: } \sum_{k=1}^K x_{ik} = 1, \forall i \in E \quad (3)$$

$$x_{ik} \leq \sum_{j=1}^K x_{hj}, \forall i \in E, \forall h \in \text{Prec}(i), k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

$$x_{ik} = 0, 1 \forall i \in E, k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M y_{pm} = 1, p = 1, 2, \dots, D \quad (6)$$

$$\sum_{p=1}^D y_{pm} = d_m, m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

$$y_{pm} = 0, 1; p = 1, 2, \dots, D; m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

其中 x_{ik} 表示在平衡设计中把作业元素 i 分配到第 k 个工作站中 ($i = 1, 2, \dots, N; k = 1, 2, \dots, K$); y_{pm} 表示在排产序列中第 p 个位置上的是产品 m ,或者说第 p 次投产的是产品 $m (p = 1, 2, \dots, D; m = 1, 2, \dots, M)$ 。约束条件(3)~(5)是混合装配线平衡设计的约束:式(3)结合式(5)表示工作站一个时刻只能加工一个作业元素;式(4)表示只有当一个作业元素的所有前导作业均被分配到工作站内,这个作业才能被分配。约束条件(6)~(8)表示混合装配线排产设计的约束:

式(6)保证在排产序列的一个位置上有且仅有一个产品;式(7)保证在排产序列中某种产品的数量恰好为这种产品的需求量。

2 协同优化算法的基本设计思想

协同优化算法的基本思想是不同类型但又密切相关的问题在各自独立的优化搜索空间中,互相影响,协同优化,最后达到整体优化的效果。

Maher 和 Poon 等在 1996 年提出“问题-设计”协同进化模型,现在宋华明等人提出类似的“平衡-排产”模型^[7],笔者采用后者作为指导思想设计 COGRASP 的优化模型,如图 1 所示。

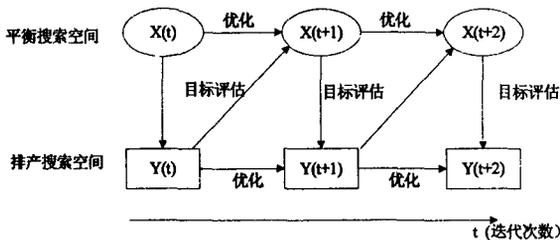


图 1 平衡-排产协同进化模型

3 协同优化 GRASP 设计

3.1 个体编码

本算法执行过程中需要涉及两个种群:平衡种群和排产种群。平衡种群中的个体编码基于产品的各联合作业编号,种群中的每个个体代表一种联合作业顺序,初始平衡序列解的搜索空间中的解建立在各作业元素的优先关系基础上,即所有的平衡序列是可行序列。排产种群中的个体编码基于各产品编号,只对最小比例集内的产品进行排序。排产种群中的每个个体代表一种投产顺序。

3.2 解码操作

解码操作包含两个部分:平衡种群中个体的解码和排产种群中个体的解码。排产结果的解码很简单,产品型号和编码数字是一一对应的。平衡种群中个体的解码因为涉及工作站的分配,比较复杂,解码的方式这里采用文献^[3]中分配原则 5 得到各工作站中作业元素的分配情况。

3.3 目标评估值计算

平衡种群中的一个个体和排产种群中的一个个体结合起来才能构成系统的一个解,两个种群均根据系统的目标函数计算评估值。两个种群中个体的不同结合方法会得到不同的适应度^[3]。这里采用遍历对应的策略:将平衡种群中的一个个体分别与排产种群中的每个个体结合,选择 makespan 最小的值作为其适应

度;对于排产种群也这样。

3.4 COGRASP 主要设计模块及其实现

COGRASP 的每次迭代过程主要包括两个阶段:构造阶段和局域搜索阶段。构造阶段负责产生一个平衡序列和一个排产序列。为了便于管理,程序中设计一个构造模块来负责这部分工作。因为 COGRASP 在局域搜索阶段涉及两个相互联系但又独立存在的搜索空间的操作,同样,这里设计一个协同进化模块,将两个种群的搜索计算包含在一起。

下面分别介绍这两个模块的实现。

●构造模块:在 COGRASP 的构造阶段,分别产生一个初始平衡序列和一个初始排产序列。在构造初始平衡解时,因为要满足作业之间的优先关系,故设置受限候选列表(Restricted candidate list, RCL)为可调度元素的集合。一个作业元素,记为 σ ;元素 σ 成为 RCL 中可调度元素必须具备如下条件: σ 的所有前导作业元素均已被安排至工作站。设置一个标志可调度状态的集合 plevel,根据元素 σ 的前导作业元素的个数来设置可调度标志。0 表示该元素没有前导作业元素,只要机器空闲,就可被调度;1 表示该元素有 1 个前导作业元素没有调度,需要等待,依此类推。采用比例选择的方法从 RCL 中随机选择一元素加入初始序列中。每次确定完一个调度元素以后,更新 plevel,将此次选中的调度元素的可调度标志值设置为一个很大的数。若某个元素 σ 的一个前导作业元素已完成调度,则其对应的调度标志值减 1。然后更新 RCL,得到新的可调度元素集,按上述原则选择下一调度元素,直到所有元素都处理完,此过程将产生一个初始可行的平衡解。初始排产序列的构造按照一般的 GRASP 构造解的方法,其调度元素间没有优先关系,故初始解的产生会容易很多。为保证初始解的质量,在构造阶段设置优化集筛选,关于优化集的操作,这里不详细论述,请参考文献^[10]。

●协同优化模块:在 COGRASP 的局域搜索阶段,以构造阶段产生的解为初始解,在一定的邻域内进一步搜索寻找局优解。将上一次迭代得到的最好平衡解和这里产生的排产种群中的每个个体相结合;进行目标评估值计算,保留最好的解(平衡序列+排产序列),更新优化集;并用最好解中的排产序列作为当前的最好排产解。接着进入平衡种群的局域搜索阶段,操作与前面类似,不再赘述。每次迭代过程结束后产生当前迭代过程中最好的平衡解和排产解,进入下一次迭代过程继续优化。此外用每次迭代过程产生的最好解来更新优化集。达到停止准则(最大迭代次数)以后,输出最后的优化结果。

基于以上分析,得到如下 COGRASP 的算法流程图如图 2 所示。

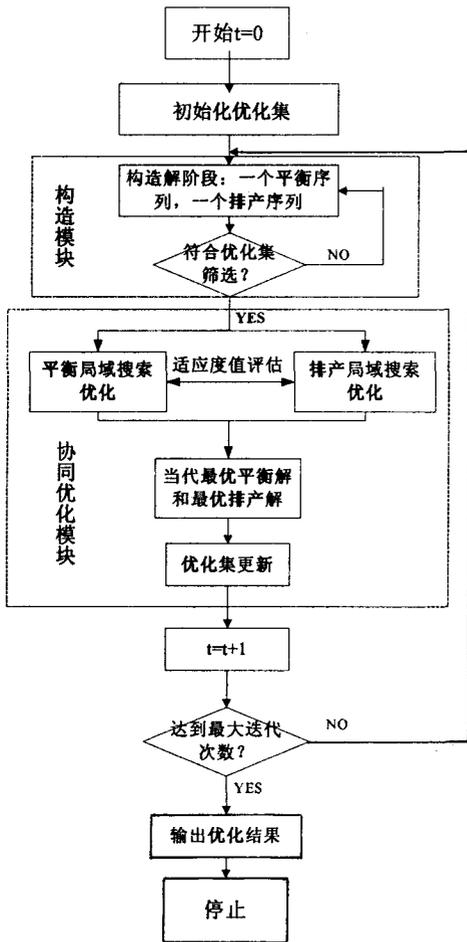
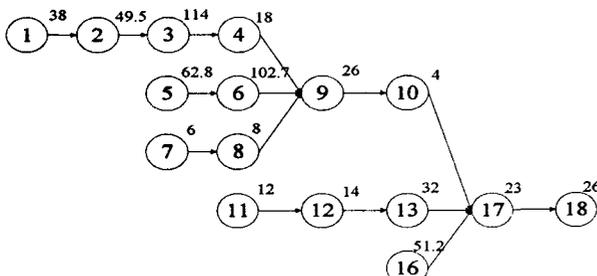
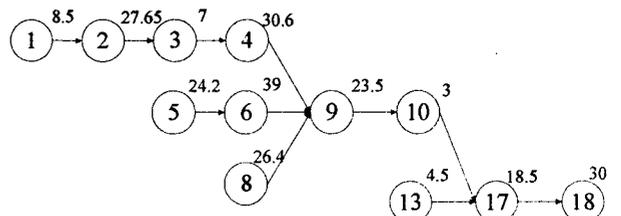


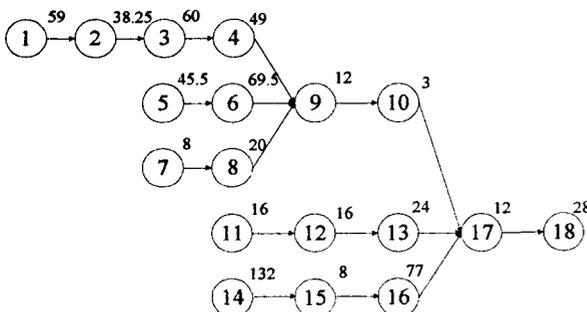
图 2 COGRASP 算法流程图



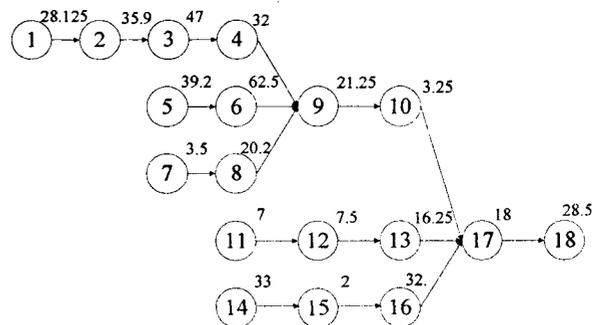
(a) 发动机 A 的装配工序图



b) 发动机 B 的装配工序图



(c) 发动机 C 的装配工序图



(d) 发动机 A,B,C 的联合装配工序图

图 3 各发动机装配工序图及联合装配工序图

4 基于 OPT 思想的关键资源调度

最优生产技术 (Optimized Production Technology, 简称 OPT) 是以色列物理学家 Eli Goldratt 博士于 1970 年提出的。它的核心思想是: 生产系统总的物流量或产出量取决于系统中关键资源的通过能力, 关键资源的负荷及生产率决定着非关键资源的生产效率和负荷的大小, 盲目地提高非关键资源的利用率和生产率, 只能生产出不配套的多余工件或产品, 其后果是增加了库存量, 积压了流动资金, 并不能提高经济效益。这种有关“瓶颈”资源的计划调度方法可以用 OPT 解决。

基于 OPT 思想的关键资源调度的核心是: “推”、“拉”结合进行优化调度^[16]。对关键资源的前导作业和后续作业采用不同的计划方法。为了使工件不在关键作业前过多地积压和在关键作业后能迅速成套, 系统利用对“瓶颈”资源的前导作业采用拉动方式编制计划, 对“瓶颈”资源的后续作业采用推动方式编制计划。这样的计划编制方式因考虑了关键资源的约束和有限的生产能力, 使计划的可实施性增强了。在算法实现中具体体现为: 以关键资源工序为中枢点, 先调度其前导工序, 然后再调度其后续工序。

5 算例及分析

算例 1 在一条混合装配流水线上生产一簇规格相似的一系列发动机产品 A、B、C, 在某一时间段内, 三种发动机的需求分别为 40 台、80 台、40 台。图 3 所示为各发动机装配工序图及联合装配工序图, 其中

a), b), c) 分别对应发动机 A 型, B 型, C 型, d) 为三种发动机联合装配工序图。图中标注的是主要部件的装配作业编号。每道作业的加工时间在图中圆圈的右上角, 本算例中无瓶颈约束。

由以上分析, 一个排产循环里发动机 A, B, C 分别需要装配 1 台, 2 台, 1 台。固定工作站数设为 4 个。COGRASP 的算法参数^[10]设置为: 贪婪系数 $\alpha = 0.5$; 差异调度指示参数 $\delta = 0.1$; popsize = 10, $q = 10$ 。

迭代 50 次后, 得到协同优化的最优个体为: 最优解中装配线平衡排序为: (14, 15, 1, 16, 2, 3, 4, 11, 12, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 17, 18); 排产序列为: (2, 2, 1, 3) 即 (B, B, A, C), 目标函数 (makespan) 为 781.95。在上面的最优装配方案下, 装配线的平衡率 (按式(1)计算) 为 94%, 说明其协同进化算法确实取得了很好的效果, 各工作站的作业分配示意图如图 4 所示。

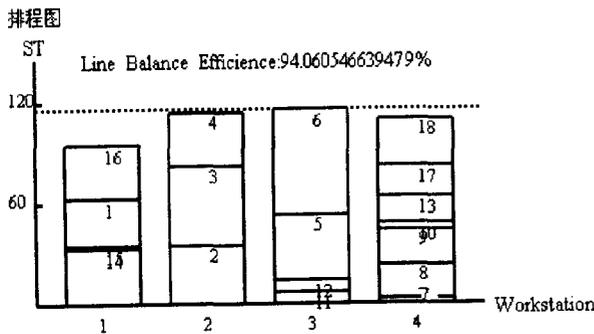


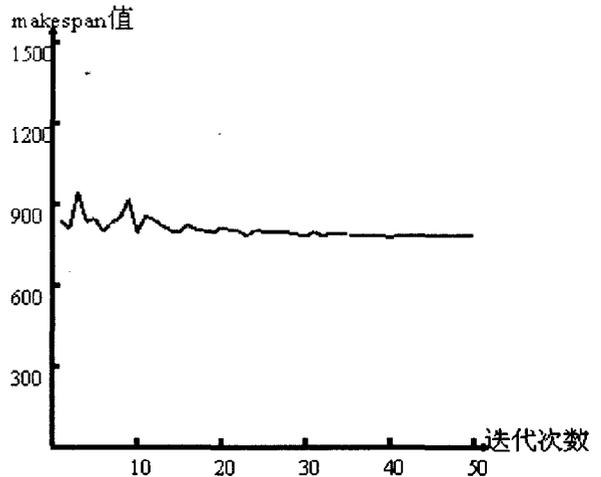
图 4 装配线各工作站作业分配示意图

为了便于比较, 笔者还采用协同遗传算法 (COGA) 和串行独立优化算法^[7]对上述算例进行计算, 每种算法迭代 50 次, 记录一次计算过程中各种算法的进化值和算法的运行时间, 如图 5 算法进化曲线图。其中 a) 是 COGRASP 的进化结果, 用时 6.8125 秒; b) 是 COGA 的运算结果, 用时 6.0125 秒; c) 是串行独立优化算法的结果, 用时 6.078125 秒。三种算法用时差不多, COGRASP 因为要对初始解进行一次筛选计算, 用时稍微多一点点。由进化曲线图可以看出, COGRASP 进化到第 32 代左右就达到收敛, 得到其最优值, 而 COGA 尽管可以达到最优值, 但收敛速度很慢, 说明 COGRASP 的收敛效率比 COGA 好多了, 并且从解的分布空间可以看出, COGRASP 解的全局满意度要好。而 COGRASP 和串行优化算法的结果比较就更加明显, 足以验证采用协同优化算法的优越性。

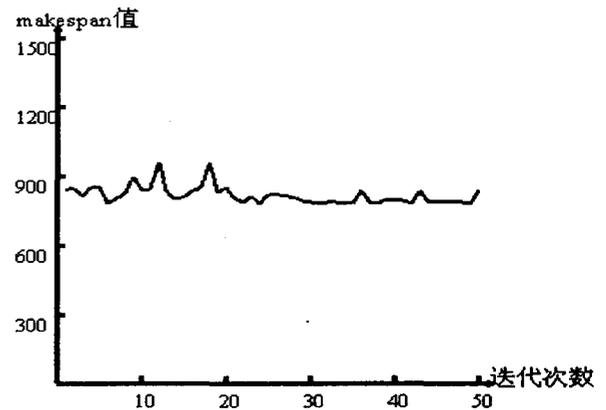
算例 2 问题数据和算法相关参数设置同算例 1, 但联合作业图 (图 3d) 中存在瓶颈约束, 现假设 9 号任务是瓶颈约束。

迭代 50 次后, 得到协同优化的最优个体为: 最优解中装配线平衡排序为: (7, 1, 2, 3, 4, 8, 5, 6, 11, 9, 12,

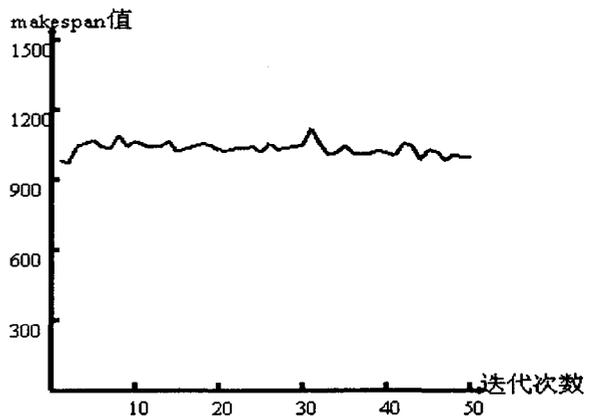
10, 13, 14, 15, 16, 17, 18); 排产序列为: (2, 2, 3, 1), 目标函数 (makespan) 为 811.75。在上面的最优装配方案下, 装配线的平衡率 (按式(1)计算) 为 92.8%, 说明融合了 OPT 思想的协同进化算法确实取得了很好的效果, 各工作站的作业分配示意图如图 6a)。



a) COGRASP 进化曲线图



b) COGA 进化曲线图



c) 串行独立优化算法进化曲线图

图 5 各算法进化曲线图

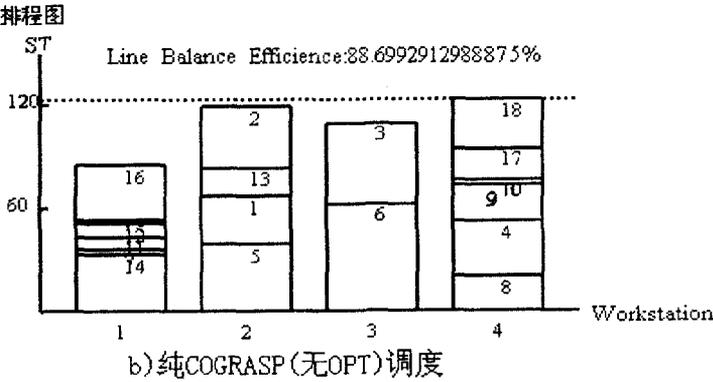
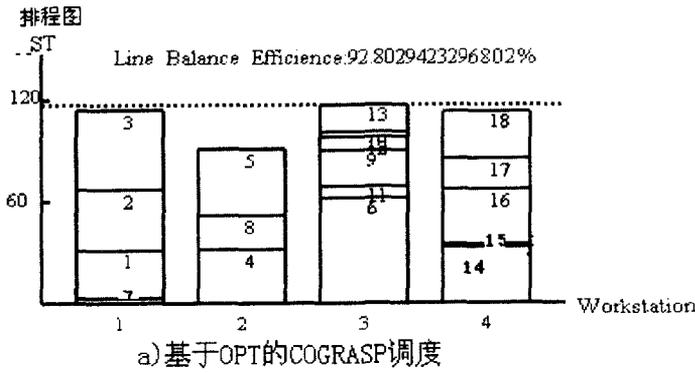


图 6 各工作站作业分配示意图

为了便于比较,采用纯 COGRASP(无 OPT 思想)计算算例 2,参数设置和迭代次数都一样,得到最优个体为:最优解中装配线平衡排序为:(14,7,11,12,15,16,5,1,13,2,6,3,8,4,9,10,17,18);最优解中装配线排产序列为:(2,2,3,1),最优解的目标函数(makespan)为 823.25。装配线的平衡率为 88.70%,各工作站的作业分配示意图如图 6b)。

由图 6b)可见,瓶颈作业所在的工作站满负荷运作,各工作站之间较大的作业时间差导致装配线的平衡率明显下降,同时也影响了目标函数的优化结果。由此可见基于 OPT 思想的协同优化算法能在一定程度上改善装配线的平衡状况。

6 结束语

在混合装配线排产优化中,平衡与排序是紧密相关的,割裂这两者之间的联系不能得到全局优化的满意解,也不符合实际生产情况。文中充分利用平衡和排序对优化目标的交互影响,提出一种 COGRASP 来解决它们的协同优化问题。模块化的设计使算法的结构清晰明了,而实例计算和分析也进一步验证了该算法可以有效地解决此类问题。此外结合装配线生产实际,在存在瓶颈作业的情况下,使用基于 OPT 思想的关键资源调度法解决了因瓶颈资源带来的生产率低下

的问题,将其融入原先的 COGRASP 算法中,也取得了比较好的效果。

参考文献:

- [1] Thomopoulos N T. Line balancing - sequencing for mixed - model assembly[J]. Management Science, 1967,14(2):59 - 75.
- [2] 陆叶,苏平.混合装配线平衡问题的建模与分析[J].电机产品开发与创新,2007,20(5):110 - 112.
- [3] 宋华明.混合流水生产系统的多目标协同优化研究[D].南京:南京理工大学,2003:25 - 33.
- [4] Yano C A, Rakamadugu R. Sequencing to minimize work overload in assembly lines with production options[J]. Management Science, 1991, 37(5):572 - 586.
- [5] Zhao X B, Katsuhisa O. Sequencing problem for a mixed - model assembly line in a JIT production system[J]. Computers & Industrial Engineering, 1994,27(1 - 4):71 - 74.
- [6] 黄刚,邵新宇,饶运清.多目标混流装配计划排序问题[J].华中科技大学学报:自然科学版,2007,35(10):84 - 86.
- [7] 宋华明,马士华.混合装配流水线上最小 makespan 的协同优化[J].系统工程理论与实践,2007(2):153 - 160.
- [8] 张运凯,王方伟,张玉清,等.协同进化遗传算法及其应用[J].计算机工程,2004,30(15):38 - 40.
- [9] 黄孔亮,雍正正.一种求解作业车间调度问题的协同进化算法[J].深圳大学学报:理工版,2004,21(3):272 - 275.
- [10] Feo T A, Resende M G C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem[J]. Operations Research Letters,1989,8(4):67 - 71.
- [11] 金华征.考虑市场环境的多目标输电网规划优化目标[D].上海:上海交通大学,2007:84 - 94.
- [12] Thomopoulos N T. Line balancing - sequencing for mixed - model assembly line balancing problem[J]. Computers and Industrial Engineering,1967,14(2):859 - 875.
- [13] 宋华明,韩玉启.多目标装配线平衡的优化算法[J].运筹与管理,2002,11(3):55 - 62.
- [14] 罗卓.装配线平衡系统研究与开发[D].广州:广东工业大学,2006:14 - 15.
- [15] Kim Y K,Hyun C J, Kim Y. Sequencing in mixed model assembly lines: a genetic algorithm approach[J]. Computers & Operation Research,1996,23(12):1131 - 1145.
- [16] 任代梅,赵保华,魏震.基于 ERP 和 OPT 的生产作业计划系统的设计与实现[J].计算机应用,2003,23(4):78 - 81.