

# 带返工的定点装配车间生产计划与调度集成优化

蒋南云<sup>1,2,3†</sup>, 严洪森<sup>1,2</sup>

(1. 东南大学 自动化学院, 南京 210096; 2. 东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096; 3. 南京工业大学 经济与管理学院, 南京 210009)

**摘 要:** 针对定点装配车间不合格品返工导致生产计划及调度不可行的情况, 提出一种基于返工延后处理的定点装配车间生产计划与调度集成优化方法. 首先制定返工延后处理的粗生产计划; 下达计划生产后, 将每周期产生的不合格品放入缓冲区, 在下周期初时重新调整生产计划并求解新计划下的最优调度, 判断其是否满足装配班组负载率要求, 不断交替迭代生产计划与调度直至达到计划与调度的均衡和优化. 最后通过算例验证了所提出方法的可行性和有效性.

**关键词:** 返工; 定点装配; 生产计划与调度集成优化; 文化基因算法

**中图分类号:** TP278      **文献标志码:** A

## Integrated optimization of production planning and scheduling for fixed-position assembly workshop with rework

JIANG Nan-yun<sup>1,2,3†</sup>, YAN Hong-sen<sup>1,2</sup>

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. The MOE Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Department of Economics and Management, Nanjing Technology University, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Considering that the rework of nonconforming product leads to the unfeasible production planning and scheduling in the fixed-position assembly workshop, an integrated optimization method for the production planning and scheduling based on delaying rework is proposed. Firstly, rough-cut production planning based on delaying rework is made. After this plan was delivered and performed, the nonconforming products of every cycle are put into the buffer. Correspondingly, at the beginning of the next cycle, the production plan is adjusted and its corresponding schedule is optimized. Both of them are identified whether to satisfy the requirement of load rate of assembly teams. Alternate iteration of the production plan and schedule is proceeded until the optimization and balance are achieved simultaneously. Finally, the examples are given to illustrate the feasibility and effectiveness.

**Keywords:** rework; fixed-position; integrated optimization of production planning and scheduling; memetic algorithm

## 0 引 言

定点装配<sup>[1]</sup>是指装配主体固定而装配人员及装配设备在各装配单元之间移动的一种特殊装配形式, 常见于大型复杂产品的装配过程, 如航空发动机装配、武器系统和重型机械设备制造等, 具有装配工艺复杂、作业周期长、小批量生产等特点. 在定点装配过程中, 需根据装配工序约束安排各工件的装配顺序, 并合理分配装配人员和装配设备, 协调各工件的装配开工时间, 生产调度十分复杂. 特别是一些大型

复杂产品, 如航空发动机、卫星等, 对产品质量要求极高, 在装配完后需对产品进行性能检测. 若不符合相关检测指标, 则需全部拆卸后重新进行装配, 直至检测合格为止. 装配过程常常发生大量返工返修情况, 返工产品数量及返工处理时间未知. 这种不确定性往往导致预先制定的生产计划和调度不可行, 给生产管理带来极大困难. 因此, 本文针对这一类含返工情况的定点装配车间, 在满足装配工艺约束条件下研究生产计划与调度的集成优化.

收稿日期: 2016-09-10; 修回日期: 2017-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61673112, 60934008); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2242014K10031, 2242017K10003); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省教育厅高校哲学社会科学基金项目 (2016SJB630025).

作者简介: 蒋南云 (1982—), 女, 博士生, 从事生产计划与调度的研究; 严洪森 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 从事知识化制造、生产计划与调度等研究.

†通讯作者. E-mail: jiangnanyun@163.com

目前,对生产计划与调度的研究大多集中在生产车间<sup>[2]</sup>和装配车间<sup>[3]</sup>,对定点装配车间的生产计划与调度研究尚不充分. Qin等<sup>[1]</sup>提出了一种两阶段遗传算法求解定点装配的装配单元调度问题; Du等<sup>[4]</sup>针对飞机工装复杂产品多项目之间存在资源竞争的问题,构造了面向飞机工装的资源受限多项目调度模型;谢志强等<sup>[5]</sup>提出了将存在零等待约束的工序虚拟成一个工序的方法解决了复杂产品装配时工序之间存在零等待约束的调度问题. 这些文献研究的都是无返工情况下定点装配车间的理想计划或调度,没有考虑返工情况对生产计划和调度的影响.

返工属于生产过程中的不确定因素. 目前对含不确定因素的生产调度研究较多,但生产计划研究尚不充分. 不确定环境下的生产调度主要分为静态调度和动态调度两大类. 静态调度研究的不确定因素主要是加工时间不精确<sup>[6-7]</sup>、生产能力波动<sup>[8]</sup>、用户需求变化<sup>[9]</sup>等,一般采用随机规划<sup>[8]</sup>、模糊规划<sup>[6]</sup>、场景描述<sup>[7]</sup>、鲁棒调度<sup>[7]</sup>等方法. 这些不确定性因素的发生仅影响调度性能,并不影响调度的排序顺序,按照既定的调度顺序车间仍然可以组织生产. 但对于定点装配过程中的返工不确定情况,一旦发生会使得预先制定的调度方案完全不可行,因此现有处理不确定环境下静态调度的方法无法解决返工返修情况的调度. 在动态调度方面,通常将不确定因素(包括返工返修情况)视为扰动事件进行重调度. 郭艳东等<sup>[10]</sup>研究了返工工件的单机重调度问题;万峰等<sup>[11]</sup>针对装配过程中返工等扰动事件,提出了面向生产扰动的动态调度算法. 但飞机发动机、卫星、武器装备等复杂产品精度高、价值高,装配工艺繁复,定点装配调度本就十分复杂,而大量存在的返工返修会导致动态调度过于频繁,直接影响生产计划的准确性和可行性,进而影响企业各部门之间的协调运作,使生产不稳定;在考虑返工情况的生产计划研究方面,胡盛强等<sup>[12]</sup>研究了合格品率服从连续随机分布及返工有效率服从离散随机分布时的计划投产量决策问题,但仅仅得到了依赖于概率分布的总投产量,没有制定具体的生产计划,而且由于返工发生的时间和对象都是未知的,更无法提前制定生产调度. 因此,目前文献都是单一地研究返工情况下的计划总产量或调度,针对定点装配车间返工影响静态调度可行性情况的研究较少见到,更没有对带返工的定点装配车间生产计划与调度集成优化这一类比较重要的问题进行深入研究.

基于以上研究,本文针对定点装配车间不合格产品返工情况,提出返工延后处理的解决方法,在每一

周期装配过程中产生的不合格产品暂时不进行返工,而是放入缓冲区,等待下一周期初时重新分配至之后的周期中与新装配品同时进行装配. 根据该处理方式对生产计划与调度集成优化,首先制定粗生产计划,下达计划生产后针对实际产生的不合格品,在下一周期初制定新的生产计划,并求解新计划下的最优调度;然后根据调度结果对应的装配班组负载率反馈回去重新调整生产计划,如此不断交替迭代直至计划与调度同时优化. 这样一来,制定的计划与调度既涵盖了不合格品的返工装配,又消除了不合格产品返工过程对生产调度可行性的影响,还对生产计划和调度进行了集成优化,兼顾了生产的不确定性、稳定性和性能优化.

## 1 问题描述及整体解决方案

### 1.1 问题描述

**定义1** 将装配产品所需的所有毛坯、零件、部件、组件统一称为工件.

**定义2** 将产品装配工艺约束关系、工件工序信息和对应装配班加工明细形成的树状图称为装配作业树形结构图.

**定义3** 根据各工件在产品装配作业树形结构图中的位置,将所有工件分为I型、II型、III型工件. I型工件为根结点工件,对应产品;III型工件为叶子结点工件,对应零件;其余工件称为II型工件,对应部件或组件.

**定义4** 装配过程中为完成某一工序所需的所有机器设备、装配人员共同构成的一个加工班称为装配班组.

根据航空发动机装配过程的生产实际抽象出含返工的定点装配车间,其特点如下:装配对象固定在型架上,根据装配作业树形结构图的装配工艺要求,各工序依次由对应的不同装配班组进行装配. 车间内共有 $M$ 个装配班,每个装配班内有 $G_m$ 个能力相同的并行装配组,装配过程中可在不同型架之间移动,共装配 $N$ 种产品,每个产品由 $I_n$ 个工件装配而成,每个工件又包含 $J_{ni}^+$ 道工序. 每道装配工序可选择对应装配班的任一装配组装配,其工件-工序-装配班之间的关系由装配作业树形结构图可知,如图1所示. 每个产品装配完成后需进行质检,若不合格则需全部拆卸后进行返工重新装配,直至质检合格后方能交付出厂,每种产品的不良品率已知. 计划期内各周期产品的用户需求为 $d_{nk}$ ,根据用户需求,在满足产品装配工艺约束并考虑返工的前提下,均衡装配班组负荷,制定生产效益最大的生产计划和装配班组完工时间最小的生产调度.

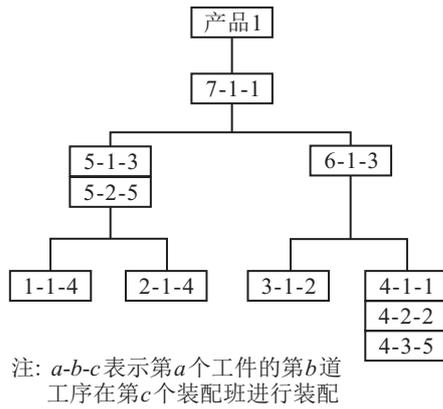


图 1 产品型号 1 的装配作业树形结构图

针对本文的定点装配车间,有如下假设:

- 1) 工序在某一装配班组上一旦开始装配,就不能停止,直到该工序装配完工;
- 2) 一个装配组在同一时刻只能装配一道工序;
- 3) 供装配时安放装配对象的型架数量充足,即每个周期开始时每个计划装配对象(待装配品)都安放在型架上,等待分配装配班组装配;
- 4) 质检及拆卸环节生产能力充足,即每个产品的质检时间和拆卸时间固定且已知;
- 5) 不考虑装配班组装配不同工件或不同工序时的移动时间、调整时间和准备时间;
- 6) 返工时各工序的装配过程与其首次装配过程完全相同,且返工时装配时间维持不变;
- 7) 不考虑装配工件的缺货情况。

### 1.2 整体解决方案的思路框架

返工导致静态调度不可行是由于返工发生时间和对象不可知,也无法预测,目前处理返工情况一般采取动态调度. 动态调度的驱动策略包括事件驱动和周期驱动: 事件驱动策略是指一旦出现使系统状态发生变化的事件时立刻进行重调度<sup>[13]</sup>; 周期驱动策略是按照预先设定的时间间隔,在每个生产周期开始前进行重调度,当周期开始后按调度结果执行<sup>[14]</sup>. 前者可以及时处理突发事件,但当突发事件频繁发生时,会导致重调度次数过多,引起生产不稳定; 后者可以提高生产的稳定性,但无法处理突发事件. 考虑到定点装配车间返工情况时常发生,本文借鉴周期驱动的动态调度方法思想,将一个周期内实际装配过程中产生的不合格品延后至后续周期进行返工,然后在下一周期期初时根据未处理的不合格品数量重新调整生产计划及调度,同时结合计划与调度集成优化方法,通过交替迭代使生产计划与调度同时达到优化. 这样既可以保持一定的生产稳定性,又可以较好地处理返工不确定情况,减少返工对正常生产的

干扰,步骤如图 2 所示.

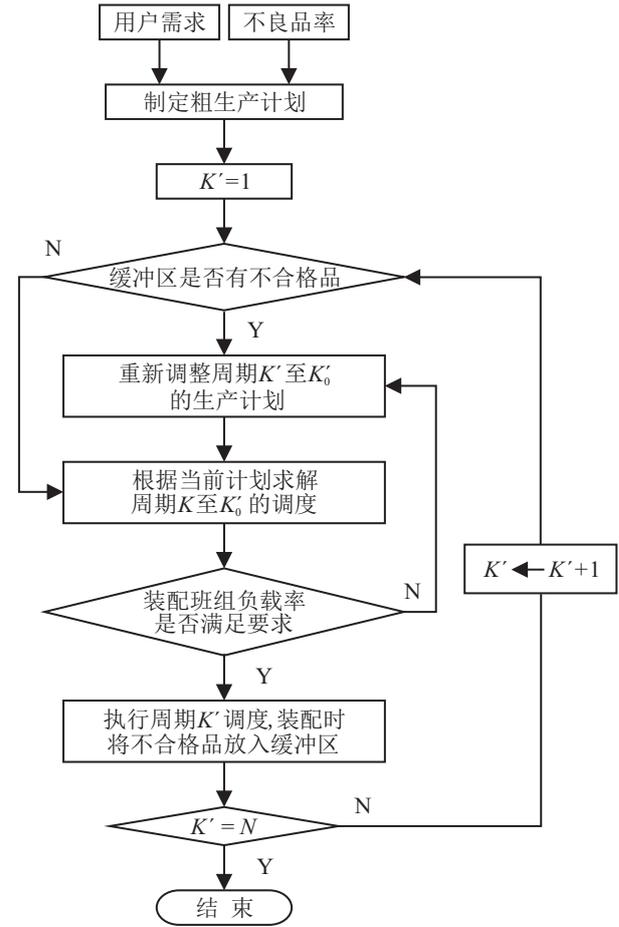


图 2 整体解决方案

Step 1: 在装配班组不加班的前提下,以用户需求和各产品不良品率为约束制定生产效益最大的粗生产计划,并令  $K' = 1$ .

Step 2: 判断周期  $K'$  期初缓冲区是否存在待重新装配的不合格品,如果有,则将缓冲区中的不合格品计为新产品,等待重新分配生产,执行 Step 3, 否则转至 Step 4.

Step 3: 根据新加入的产品和粗生产计划,利用二分法重新制定周期  $K'$  至  $K_0'$  的生产计划.

Step 4: 以完成当前生产计划的装配数量为前提,建立装配班组完工时间最小的调度模型,并采用文化基因算法求解最优调度,求解时不考虑返工操作,所有产品只装配一次.

Step 5: 计算装配班组负载率并判断是否满足均衡条件,若是则执行 Step 6, 否则转至 Step 3.

Step 6: 执行周期  $K'$  的调度方案,在装配过程中将质检不合格产品放入缓冲区.

Step 7: 判断周期  $K'$  是否为最后一个周期,若是则执行 Step 8, 否则令  $K' \leftarrow K' + 1$ , 转至 Step 2.

Step 8: 结束.

解决方案中需要解决的几个关键问题,如粗生产计划的制定、面向不合格品的生产计划调整方法、最优生产调度求解等,将在下文进行详细介绍.

## 2 考虑返工的粗生产计划制定

以往制定生产计划时大多根据用户需求和车间生产能力得到各周期各种产品的生产数量<sup>[15]</sup>,很少考虑加工过程中不合格品的返工情况,即使有不合格品也是以废品的方式处理. 本文根据整体解决方案,制定每周期粗生产计划时,将上一周期产生的不合格品也考虑进来,装配班组在不加班的前提下同时装配本周期初次装配产品和上一周期不合格需返工的产品.

### 2.1 粗生产计划模型构建

1) 符号.

$n$ : 产品种类的标号,  $n = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为产品种类的总数量.

$k$ : 周期的标号,  $k = 1, 2, \dots, K$ ,  $K$  为生产计划的时间范围.

$m$ : 装配班的标号,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $M$  为装配车间内装配班的总数量.

$g$ : 装配组的标号,  $g = 1, 2, \dots, G_m$ ,  $G_m$  为装配班  $m$  内装配组的总数量.

$J_1$ : 粗计划目标函数, 为总生产效益.

2) 参数.

$\mu_n$ : 产品种类  $n$  的单件收入.

$a_{0ni}$ : 产品种类  $n$  的第  $i$  个工件的单件毛坯成本.

$b_n^+$ : 产品种类  $n$  每周期单件产品的超产库存成本.

$b_n^-$ : 产品种类  $n$  每周期的单件产品延期交付惩罚成本.

$d_{nk}$ : 产品种类  $n$  在周期  $k$  的用户需求量.

$T_n$ : 产品种类  $n$  在关键路径上各工件的加工时间之和, 是其一次装配时的最小总装配时间.

$\beta_{mgk}$ : 装配班  $m$  内装配组  $g$  在周期  $k$  的可用装配时间.

$\alpha_{nk}$ : 产品种类  $n$  在周期  $k$  的不良品率, 即返工产品占有产品的比例.

3) 决策变量.

$x_{nk}$ : 周期  $k$  内产品种类  $n$  初次装配的产品数量.

$X_{nk}$ : 周期  $k$  内产品种类  $n$  的总产量, 包括周期  $k$  内初次加工产品的数量及周期  $k-1$  内返工产品的数量.

$R_{nk}^+$ : 周期  $k$  结束时产品种类  $n$  交付后有剩余的合格品库存量.

$R_{nk}^-$ : 周期  $k$  结束时产品种类  $n$  延迟交付的缺货数量.

4) 粗生产计划模型.

$J_1 =$

$$\max \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \mu_n x_{nk} - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} a_{0ni} x_{nk} - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (b_n^+ R_{nk}^+ + b_n^- R_{nk}^-) \right]. \quad (1)$$

s.t. 1) 产品的在制品库存约束

$$R_{nk}^+ - R_{nk}^- =$$

$$R_{n,k-1}^+ - R_{n,k-1}^- + (1 - \alpha_{nk}) X_{nk} - d_{nk}, \quad \forall n, k; \quad (2)$$

$$R_{nk}^+ \cdot R_{nk}^- = 0, \quad \forall n, k; \quad (3)$$

$$R_{n0}^+ = 0, \quad R_{n0}^- = 0, \quad \forall n. \quad (4)$$

2) 考虑返工的各周期计划产量约束

$$X_{nk} = x_{nk} + \alpha_{n,k-1} X_{n,k-1}, \quad \forall n, k; \quad (5)$$

$$X_{n0} = 0, \quad \forall n. \quad (6)$$

3) 产品的计划总产量约束

$$\sum_{k=1}^K x_{nk} = \sum_{k=1}^K d_{nk}, \quad \forall n. \quad (7)$$

4) 装配班组可加工时间约束

$$\sum_{n=1}^N (X_{nk} \cdot T_n) \leq \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^{G_m} \beta_{mgk}, \quad \forall k. \quad (8)$$

5) 非负约束

$$x_{nk} \geq 0, \quad X_{nk} \geq 0, \quad R_{nk}^+ \geq 0, \quad R_{nk}^- \geq 0, \quad \forall n, k. \quad (9)$$

### 2.2 基于遗传算法的粗生产计划求解算法

生产计划问题是一类 NP-hard 问题, 具有组合优化特征, 其解法一般有精确优化方法和智能优化算法. 精确优化方法只能求解小规模或具有特殊结构的生产计划问题, 而智能优化算法在求解组合优化问题上具有优势, 因此智能优化算法, 如遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法等, 被成功应用于求解生产计划问题. 其中遗传算法作为求解组合优化问题最成熟的智能优化算法之一, 广泛应用于求解各类生产计划问题. 考虑到本文粗生产计划模型并不复杂, 在制定粗生产计划时采用遗传算法求解.

1) 编码方式. 采用整数编码方式, 每个染色体个体的基因值为各周期内各产品种类的初次装配产品数量  $x_{nk}$ , 其他决策变量  $X_{nk}$ 、 $R_{nk}^+$ 、 $R_{nk}^-$  通过式 (2)~(6) 计算可得.

2) 初始种群生成. 在保证约束式 (7) 和 (8) 成立的

前提下,采用随机生成的方式得到初始种群.

3) 选择算子与交叉算子. 采用轮盘赌方式进行选择操作. 采用部分匹配交叉方法, 随机选择一个产品种类编号  $n$ , 将两个父代个体中该类产品对应的所有基因值提取出来并互换.

4) 变异算子. 在选择个体中, 随机选择一个产品编号  $n$  对应基因中的任意两个基因值, 并随机产生一个较小量  $\psi$ , 分别在其中一个基因值中减去  $\psi$  并在另一个基因值中加上  $\psi$ .

### 3 面向返工产品的生产计划调整方法

第  $K' - 1$  周期装配结束后, 缓冲区中存放的是之前所有周期累计未返工的不合格品, 设数量为  $y_n$ , 需根据生产实际将其安排在周期  $K'$  至  $K'_0$  返工生产, 因此需重新调整周期  $K'$  至  $K'_0$  的生产计划和调度. 由于返工是将所有不合格品全部拆卸后重新装配, 可将返工产品视为新产品. 这里设置负载均衡条件为负载率在 85%~115% 之间, 借鉴二分法思想调整生产计划的步骤如下.

Step 1: 初始参数赋值. 未安排返工的不合格品数量  $\bar{x}_n = y_n$ , 当前周期  $k = K'$ , 当前周期的粗生产计划为  $x_{nk}$ .

Step 2: 令  $a_n = 0, b_n = \bar{x}_n$ .

Step 3: 计算  $c_n = \text{INT} \left[ \frac{a_n + b_n}{2} \right]$ , 其中 INT 为取整函数. 当  $c_n \leq y_n/2$  时, 取朝负无穷方向靠近最近的整数; 当  $c_n > y_n/2$  时, 取朝正无穷方向靠近最近的整数.

Step 4: 令周期  $k$  的新计划  $\tilde{x}_{nk} = x_{nk} + c_n$ , 则剩余未安排返工的不合格品数量为  $\bar{x}_n = y_n - c_n$ .

Step 5: 求解新计划时周期  $k$  的最优调度  $\sigma_k$ , 计算最优调度下各装配班组的完工时间  $\bar{C}_{m,g,k,A_{mgk}}$ .

Step 6: 计算调度  $\sigma_k$  下的周期  $k$  装配班组负载率  $\gamma_k$ , 有

$$\gamma_k = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^{G_m} \bar{C}_{m,g,k,A_{mgk}}}{\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^{G_m} \beta_{mgk}}. \quad (10)$$

判断装配班组负载率是否满足均衡条件, 即  $85\% \leq \gamma_k \leq 115\%$ , 若是则转至 Step 9, 否则转至 Step 7.

Step 7: 判断所有产品种类  $n$  的  $c_n$  值等于 0 或  $\bar{x}_n$  是否成立, 若是则转至 Step 9 (表明即使不安排返工产品或安排完所有返工产品, 该周期装配班组负载也无法均衡, 结束本周期计划制定), 否则转至 Step 8.

Step 8: 判断装配班组负载率  $\gamma_k$  的大小, 若  $\gamma_k$  超过均衡条件的上限, 则令  $b_n = c_n$ , 转至 Step 3; 否则令

$a_n = c_n$ , 转至 Step 3.

Step 9: 判断剩余未安排计划的不合格品数量  $\bar{x}_n > 0$  且周期  $k < K'_0$  是否成立, 若是则令  $k \leftarrow k + 1$ , 转至 Step 2, 否则转至 Step 10.

Step 10: 结束, 调整后周期  $K'$  至  $K'_0$  的新计划为  $\tilde{x}_{nk}$ , 最优调度为  $\sigma_k$ , 剩余未安排计划的不合格品数量为  $\bar{x}_n$ .

## 4 基于文化基因算法的定点装配车间调度优化

根据第 3 节 Step 5 的要求, 由新制定的生产计划求解最优调度  $\sigma_k$ , 调度目标为在完成所有产品计划产量的前提下各装配班组的总完工时间最小.

### 4.1 定点装配车间调度模型构建

1) 符号.

$e$ : 产品种类  $n$  的装配数量标号,  $e = 1, 2, \dots$ ,  $\tilde{x}_{nk}, \tilde{x}_{nk}$  为调整后产品种类  $n$  在周期  $k$  的新计划装配数量.

$i$ : 工件的标号,  $i = 1, 2, \dots, I_n, I_n$  为产品种类  $n$  的工件总数量.

$j$ : 工序的标号,  $j = 1, 2, \dots, J_{ni}^+, J_{ni}^+$  为产品种类  $n$  的第  $i$  个工件的工序总数量.

$a$ : 装配组的装配次数标号,  $a = 1, 2, \dots, A_{mgk}$ ,  $A_{mgk}$  为周期  $k$  时装配班  $m$  内装配组  $g$  的总开工次数.

$O_{neij}$ : 产品种类  $n$  的第  $e$  个产品装配工件  $i$  的第  $j$  道工序.

$O_{(neij)^+}$ :  $O_{neij}$  的父工序, 为  $O_{neij}$  在产品装配作业树型结构图中的后续结点工序, 父工序必须等待其所有的子工序全部装配完成后才可开始装配.

$O_{(neij)^-}$ :  $O_{neij}$  的子工序.

$J_2$ : 生产调度目标函数, 为各装配班组的总完工时间.

$[\cdot]$ :  $\max(0, \cdot)$ , 指取 0 和  $\cdot$  两数中的较大值.

2) 集合.

$\hat{O}$ : 工序的集合.

$\hat{G}$ : 装配组的集合.

$\hat{G}_{neij}$ : 可装配工序  $O_{neij}$  的装配组集合.

$\hat{O}_{mg}$ : 可在装配班  $m$  内装配组  $g$  装配的工序集合.

3) 参数.

$\tilde{x}_{nk}$ : 周期  $k$  内产品种类  $n$  的新生产计划, 是根据粗生产计划及实际返工产品数量调整后的计划产量.

$p_{neij}$ : 产品种类  $n$  第  $i$  个工件第  $j$  道工序的装配时间.

4) 决策变量.

$$\delta_{neijgk} = \begin{cases} 1, & \text{周期 } k \text{ 内工序 } O_{neij} \text{ 被安排} \\ & \text{由装配组 } g \text{ 装配;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$\rho_{neijgk} = \begin{cases} 1, & \text{周期 } k \text{ 内工序 } O_{neij} \text{ 在对应装配} \\ & \text{班内装配组 } g \text{ 上被第 } a \text{ 个装配;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$S_{neijk}$ : 周期  $k$  内工序  $O_{neij}$  的开工时间.

$C_{neijk}$ : 周期  $k$  内工序  $O_{neij}$  的完工时间.

$\bar{S}_{mgka}$ : 周期  $k$  内装配班  $m$  内装配组  $g$  第  $a$  次装配的开工时间.

$\bar{C}_{mgka}$ : 周期  $k$  内装配班  $m$  内装配组  $g$  第  $a$  次装配的完工时间.

5) 生产调度模型.

$$J_2 = \min \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^{G_m} \bar{C}_{m,g,k,A_{mgk}}. \quad (11)$$

s.t. 1) 加工工序约束, 表示父、子工序之间的装配顺序约束

$$\begin{aligned} C_{neijk} &\leq S_{(neijk)^+}, \\ \forall n, e, i, k, j &= 1, 2, \dots, J_{ni}^+ - 1. \end{aligned} \quad (12)$$

2) 前后工序约束, 表示同一工件的前后道工序之间的装配先后顺序

$$\begin{aligned} C_{n,e,i,j-1,k} &\leq S_{neijk}, \\ \forall n, e, i, k, j &= 2, 3, \dots, J_{ni}^+. \end{aligned} \quad (13)$$

3) 工序的加工时间约束, 表示工序加工一旦开始就不能中断

$$S_{neijk} + p_{nij} = C_{neijk}, \quad \forall n, e, i, j, k. \quad (14)$$

4) 工序的装配班组约束, 表示一道工序只能在一个装配组上装配

$$\sum_{g \in \hat{G}_{neij}} \delta_{neijgk} = 1, \quad \forall g, k; \quad (15)$$

$$\sum_{g \in \hat{G} - \hat{G}_{neij}} \delta_{neijgk} = 0, \quad \forall g, k. \quad (16)$$

5) 各工序在对应装配班组的装配顺序约束

$$\sum_{a=1}^{A_{mgk}} \rho_{neijgk} = \delta_{neijgk}, \quad \forall n, e, i, j, g, k. \quad (17)$$

6) 装配班组的装配工序总数约束

$$\sum_{O_{neij} \in \hat{O}_{mg}} \delta_{neijgk} = A_{mgk}, \quad \forall g, k. \quad (18)$$

7) 装配产品总数量约束

$$\sum_{m=1}^M \sum_{g=1}^{G_m} A_{mgk} = \sum_{n=1}^N \left( \sum_{i=1}^{I_n} J_{ni}^+ \right) \times \tilde{x}_{nk}, \quad \forall k. \quad (19)$$

8) 决策变量取值范围约束

$$\delta_{neijgk} \in \{0, 1\}, \quad \forall n, e, i, j, g, k; \quad (20)$$

$$\rho_{neijgk} \in \{0, 1\}, \quad \forall n, e, i, j, g, a, k; \quad (21)$$

$$S_{neijk} \geq 0, \quad \forall n, e, i, j, k; \quad (22)$$

$$\bar{S}_{mgk1} \geq 0, \quad \forall m, g, k. \quad (23)$$

**定理1** 对于定点装配车间的一个可行调度解  $\bar{\sigma}_k = \{\delta_{neijgk}, \rho_{neijgk}, S_{neijk}, C_{neijk}, \bar{S}_{mgka}, \bar{C}_{mgka}\}$ , 只要求得  $\delta_{neijgk}$  和  $\rho_{neijgk}$ , 则其他各调度决策变量  $S_{neijk}, C_{neijk}, \bar{S}_{mgka}, \bar{C}_{mgka}$  都可通过以下递推表达式求解:

$$\begin{cases} C_{neijk} = \\ \max(C_{(neijk)^-}, C_{n,e,i,j-1,k}, \bar{C}_{m,g,k,a-1}) + (p_{nij})^a, \\ \forall O_{neij} \in \hat{O}_{mg}, \rho_{neijgk} = 1; \\ \bar{C}_{mgka} = C_{neijk}, \forall O_{neij} \in \hat{O}_{mg}, \rho_{neijgk} = 1; \\ C_{n,e,i,0,k} = 0, \quad \forall n, e, i, k; \\ \bar{C}_{m,g,k,0} = 0, \quad \forall m, g, k. \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} S_{neijk} = \\ \max(S_{(neijk)^-} + p_{nij}, S_{n,e,i,j-1,k} + \\ p_{nij}, \bar{S}_{m,g,k,a-1} + (p_{nij})^{a-1}), \\ \forall O_{neij} \in \hat{O}_{mg}, \rho_{neijgk} = 1; \\ \bar{S}_{mgka} = S_{neijk}, \forall O_{neij} \in \hat{O}_{mg}, \rho_{neijgk} = 1; \\ S_{n,e,i,0,k} = 0, \quad \forall O_{n,e,i,1} \in \text{III型工件}; \\ \bar{S}_{m,g,k,0} = 0, \quad \forall m, g, k. \end{cases} \quad (25)$$

证明过程由约束(12)~(14)迭代可得, 此略.

这样, 调度解的决策变量缩至2个. 目标函数(11)、约束(15)~(23)和(24)、(25)共同构成了定点装配车间生产调度模型.

#### 4.2 基于文化基因算法的定点装配车间调度算法

生产调度问题是一类强NP-hard问题, 模型相较于生产计划问题复杂得多. 因此学者们在成功应用遗传算法、模拟退火算法等智能优化算法求解调度问题的基础上, 不断提出一些新的基于生物行为的优化算法. 文化基因算法(MA)<sup>[16]</sup> 首先基于种群进行全局广度搜索, 然后利用大量专业知识进行局部深度搜索, 根据问题设计特定的局部搜索方法使每次迭代的所有个体都达到局部最优, 因此同时具备进化算法的全局搜索能力和面向个体的局部搜索能力, 目前在flow-shop调度<sup>[17]</sup>和job-shop调度<sup>[18]</sup>问题求解中取得了较优的性能, 但在定点装配车间调度问题的研究鲜

见. 考虑到本文定点装配车间生产调度模型的复杂程度和集成优化方法的特点, 需要性能较优的生产调度求解算法, 而传统的遗传算法虽然有着较强的全局搜索能力, 但局部搜索仅依靠小规模的随机变异, 难以达到局部最优. 因此, 本文将文化基因算法应用到定点装配车间调度问题求解中, 并针对定点装配问题特点设计相应的编码、修复、解码、全局搜索和局部搜索算子等.

### 4.2.1 编码算子

根据定理 1, 调度模型包括两个决策变量: 装配工序的顺序  $\rho_{nei j g a k}$  和装配班组的分配  $\delta_{nei j g k}$ . 每个基因块由两部分组成: 第 1 部分数值代表工件信息, 采用整数编码, 以“产品种类编号-产品数量编号-工件编号”进行编码, 同一工件的不同工序用相同字符串表示, 以该工件基因块在染色体个体中的位置表示工序; 第 2 部分代表该工件工序在对应装配班中选择的装配组编号, 同样采用整数编码, 以“装配班编号-装配组编号”形式编码, 相同“装配班编号-装配组编号”的各基因块前后关系反映了各工件工序在同一装配组的装配先后顺序. 每个个体共有  $\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} J_{ni}^+ \times \tilde{x}_{nk}$  个基因块.

### 4.2.2 初始种群生成与修复

首先构造  $\sum_{n=1}^N (\tilde{x}_{nk} \cdot I_n)$  种基因块, 每种基因块内的字符串“产品种类-产品数量编号-工件编号”在可行域范围内依次生成, 每种基因块产生的数量为工序数  $J_{ni}^+$ ; 然后随机排列这些基因块字符串顺序; 最后对每个基因块内的字符串“装配班-装配组”在可行域范围内进行初始化.

初始种群产生时, 随机生成工件信息, 但没有考虑装配约束关系, 必须进行染色体修复: 将每个染色体个体中基因块对应的工件按父-子工序关系排序, 并根据工件在染色体个体中出现的次数判断其工序编号, 选择对应装配班中的装配组, 使得每个染色体个体表示可行的调度解.

### 4.2.3 全局搜索算子

选择算子采用经典轮盘赌方式. 交叉算子考虑到工件装配约束关系, 在染色体个体的每个产品种类中随机提取出一个 I 型工件或 II 型工件对应的基因块, 在两个父代个体中将该基因块对应工件的所有子工序基因块抽取出来, 进行交换后, 依次放回各父代个体中, 这样交叉后的个体仍为可行解. 变异算子采用移动变异方法, 随机选择一个基因块, 在可行域范围内将其随机移动到一个新的位置. 考虑到装配约

束关系, 移动的可行域范围为该工件的父工序、子工序之间及同工件的其他道工序之间的交集.

### 4.2.4 局部搜索算子

**引理 1** 如果同一装配班的两个并行装配组  $g_1$  和  $g_2$  的开工时间  $ST$  和装配时间  $AT$  都完全一致, 即  $ST_1 = ST_2, AT_1 = AT_2$ , 但空闲时间  $FT_1 > FT_2$ , 则装配组  $g_1$  的装配完工时间  $CT_1$  与装配组  $g_2$  的装配完工时间  $CT_2$  之间有如下关系:  $CT_1 > CT_2$ .

**证明** 由于

$$\begin{aligned} & \text{装配班组的装配完工时间} = \\ & \text{开工时间} + \text{装配时间} + \text{空闲时间}, \end{aligned}$$

即

$$CT = ST + AT + FT, \quad (26)$$

根据已知条件有  $CT_1 > CT_2$ .  $\square$

**引理 2** 以各装配班组的装配完工时间最小为优化目标的定点装配车间调度问题, 对于两个调度序列  $\tau_1$  和  $\tau_2$ , 在同样的装配班组上进行装配, 且各工序装配时间一致, 但装配班组闲置时间  $FT_{\tau_1} > FT_{\tau_2}$ , 那么调度序列  $\tau_2$  具有更优的目标函数值.

**证明** 由于两个调度序列  $\tau_1$  和  $\tau_2$  在同样的装配班组上进行装配, 且各工序装配时间一致, 各装配班组的开工时间与装配时间都一致, 即  $ST_{\tau_1} = ST_{\tau_2}, AT_{\tau_1} = AT_{\tau_2}$ . 又已知各装配班组空闲时间  $FT_{\tau_1} > FT_{\tau_2}$ , 由引理 1 可得  $CT_{\tau_1} > CT_{\tau_2}$ , 即调度序列  $\tau_2$  具有更优的目标函数值.  $\square$

**定理 2** 以最小化各装配班组的装配结束时间为优化目标的定点装配车间调度问题, 对于两个调度序列  $\tau_1$  和  $\tau_2$ ,  $\tau_1, \tau_2$  的工件排序信息完全一致, 在  $\tau_1$  中某一工序  $O_{n'e'i'j'}$  的装配班组信息为对应装配班的任一装配组,  $\tau_2$  中该工序  $O_{n'e'i'j'}$  的装配班组为  $g'$ , 其他工件及工序的装配班组信息完全一致.  $g'$  满足如下条件, 则调度序列  $\tau_2$  具有更优的目标函数值:

1) 若

$$\begin{aligned} & \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) \leq \\ & \min_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}), \end{aligned}$$

则  $g'$  为  $\bar{C}_{m',g,k',a-1} (\forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'})$  取最小值对应的装配组, 且有

$$\bar{S}_{m'g'k'a'} = \min_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}). \quad (27)$$

2) 若

$$\begin{aligned} & \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) \geq \\ & \max_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}), \end{aligned}$$

则  $g'$  为  $\bar{C}_{m',g,k',a-1} (\forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'})$  取最大值对应的装配班组, 且有

$$\begin{aligned} \bar{S}_{m'g'k'a'} &= \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}), \\ O_{n'e'i'j'k'} &\in \hat{O}_{m'g'}, \end{aligned} \quad (28)$$

3) 若

$$\begin{aligned} \min_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}) &< \\ \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) &< \\ \max_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}), \end{aligned}$$

则  $g'$  为

$$|\max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) - \bar{C}_{m',g,k',a-1}|$$

取最小值对应的装配班组,且有

$$\begin{aligned} \bar{S}_{m'g'k'a'} &= \\ \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}, \bar{C}_{m',g,k',a-1}), \\ O_{n'e'i'j'k'} &\in \hat{O}_{m'g'}, \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}. \end{aligned} \quad (29)$$

**证明** 1) 由于  $\max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) \leq \min_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1})$ , 有

$$\begin{aligned} \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}, \bar{C}_{m',g,k',a-1}) &= \\ \bar{C}_{m',g,k',a-1}, \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}. \end{aligned} \quad (30)$$

由定理1可得

$$\begin{aligned} C_{n'e'i'j'k'} &= \\ \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}, \bar{C}_{m',g,k',a-1}) &= \\ \bar{C}_{m',g,k',a-1} + (p_{n'e'i'j'})^a, \\ \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}, \rho_{n'e'i'j'ga'k'} &= 1. \end{aligned} \quad (31)$$

又因为在调度序列  $\tau_2$  中,  $g'$  为  $\bar{C}_{m',g,k',a-1}$  ( $\forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}$ ) 取最小值对应的装配班组,可得调度序列  $\tau_2$  中  $O_{n'e'i'j'}$  的完工时间为

$$\begin{aligned} C_{n'e'i'j'k'}^{\tau_2} &= \min(\bar{C}_{m',g,k',a-1}) + (p_{n'e'i'j'})^a, \\ \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}, \rho_{n'e'i'j'ga'k'} &= 1. \end{aligned} \quad (32)$$

调度序列  $\tau_1$  中  $O_{n'e'i'j'}$  的装配班组信息为对应装配班的任一装配组,有

$$\bar{C}_{m',g,k',a-1} \geq \min(\bar{C}_{m',g,k',a-1}). \quad (33)$$

由式(31)可得

$$C_{n'e'i'j'k'}^{\tau_1} \geq C_{n'e'i'j'k'}^{\tau_2}. \quad (34)$$

又由于装配班组的装配完工时间为最后一个加工对象的完工时间,调度序列  $\tau_2$  具有更优的目标函数值.

2) 由于  $\max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) \geq \max_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1})$ , 由定理1有

$$\begin{aligned} \bar{S}_{m',g,k',a} &= \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}), \\ \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}, \rho_{n'e'i'j'ga'k'} &= 1. \end{aligned} \quad (35)$$

$O_{n'e'i'j'}$  所在装配组  $g$  的设备闲置时间为

$$\begin{aligned} FT &= \bar{S}_{m',g,k',a'} - \bar{C}_{m',g,k',a-1} = \\ \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) &- \bar{C}_{m',g,k',a-1}, \\ \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}, \rho_{n'e'i'j'ga'k'} &= 1. \end{aligned} \quad (36)$$

又由于调度序列  $\tau_2$  中,  $g'$  为  $\bar{C}_{m',g,k',a-1}$  ( $\forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}$ ) 取最大值对应的装配班组,即

$$\begin{aligned} FT_{\tau_2} &= \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) - \\ \max(\bar{C}_{m',g,k',a-1}), g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}. \end{aligned} \quad (37)$$

调度序列  $\tau_1$  中  $O_{n'e'i'j'}$  的装配班组信息为对应装配班的任一装配组,有

$$\begin{aligned} FT_{\tau_1} &= \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) - \\ \bar{C}_{m',g,k',a-1}, \\ \forall g \in \hat{G}_{n'e'i'j'}, \rho_{n'e'i'j'ga'k'} &= 1. \end{aligned} \quad (38)$$

因此有

$$FT_{\tau_1} > FT_{\tau_2}. \quad (39)$$

由引理2可得,调度序列  $\tau_2$  具有更优的目标函数值.

3) 由于

$$\begin{aligned} \min_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}) &< \\ \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'}) &< \\ \max_{g=1,2,\dots,G_{m'}} (\bar{C}_{m',g,k',a-1}), \end{aligned}$$

可将装配班组根据  $\bar{C}_{m',g,k',a-1}$  与  $\max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'})$  之间的关系分为两类:

第1类装配班组中

$\bar{C}_{m',g,k',a-1} < \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'})$ , 这时第1类装配班组情况等同于情况1),证明同1).

第2类装配班组中

$\bar{C}_{m',g,k',a-1} \geq \max(C_{(n'e'i'j'k')-}, C_{n',e',i',j'-1,k'})$ , 这时第2类装配班组情况等同于情况2),证明同2).  $\square$

将定理2作为启发式调度规则嵌入求解定点装配车间调度问题的文化基因算法局部搜索过程中,局部搜索算子流程如下.

**Step 1:** 初始化参数,令当前各装配班组的可加工时刻  $\text{momt}_{mgk} = 0$ , 加工次数  $a_{mgk} = 0$ .

**Step 2:** 从左到右依次遍历染色体个体的各基因块,计算该基因块对应工序  $O_{nej}$  的所有子工序完工时间  $C_{(nejk)-}$ 、前道工序的完工时间  $C_{n,e,i,j-1,k}$  和该工序所有可装配班组  $\hat{G}_{nej}$  的当前可加工时刻  $\text{momt}_{mgk}$ .

Step 3: 根据定理 2 中  $C_{(neijk)-}$ 、 $C_{n,e,i,j-1,k}$ 、 $momt_{mgk}$  三者之间的大小关系选择工序  $O_{neij}$  的实际装配班组,同时修改对应基因块中装配班组信息,并记工序  $O_{neij}$  的开工时间为  $S_{neijk}$ .

Step 4: 由式 (14) 计算工序  $O_{neij}$  的完工时间  $C_{neijk}$ ,并令当前装配班组的可加工时刻  $momt_{mgk}$  等于  $C_{neijk}$ ,令  $a_{mgk} \leftarrow a_{mgk} + 1$ .

Step 5: 判断当前基因块是否为染色体的最后一个基因块,如果是则执行 Step 6,否则转至 Step 2.

Step 6: 局部搜索结束,  $momt_{mgk}$  即为装配班组的总完工时间  $\bar{C}_{m,g,k,A_{mgk}}$ .

## 5 算例研究

### 5.1 仿真算例

基于以上研究,采用 Matlab R2015a 工具编制程序对考虑返工情况的定点装配车间生产计划与调度集成优化问题的算例进行仿真.程序运行环境为 CPU Intel Core i5 4210U 2.54 Hz,内存 4 G.

设定点装配车间共有 5 个装配班,每个装配班内能力相同的并行装配组个数分别为 [3, 4, 4, 3, 4],计划

期为 8 周,每周工作 40 小时,计划期内用户需求的产品种类有 5 种,分别是产品 1 在周期 5 结束时需求数量 17,产品 2 在周期 10 结束时需求数量为 38,产品 3 在周期 5 结束时需求数量为 30,产品 4 在周期 5 结束时需求为 20,产品 5 在周期 10 结束时需求为 43,其他时间各产品需求量都为 0. 每种产品的不良品率为 [25%, 12.5%, 50%, 20%, 30%], 每种产品的单件产品延期交付惩罚成本分别为 [1 000, 800, 400, 200, 600], 每种产品的超产库存成本都为 200. 限于篇幅,系统其他参数不一列出. 考虑到模型复杂度及算例规模,算法参数设定如表 1 所示.

表 1 算法参数设定

模型	算法	种群数	进化代数	交叉概率	变异概率
粗生产计划	遗传算法	50	100	0.8	0.2
生产调度	文化基因	40	20	0.8	0.2

求解得到生产计划优化结果如表 2 所示. 基于此优化结果投产后,根据实际装配过程中的不合格品重新调整生产计划并求解调度,最后的优化结果如表 3 所示.

表 2 粗生产计划优化结果

初次装配产品数量	周期 1	周期 2	周期 3	周期 4	周期 5	周期 6	周期 7	周期 8	周期 9	周期 10
产品 1	6	3	4	2	2	0	0	0	0	0
产品 2	6	5	2	4	4	4	4	3	3	3
产品 3	5	5	5	4	3	4	2	2	0	0
产品 4	0	0	0	1	3	3	3	3	3	4
产品 5	3	3	4	4	4	4	5	5	6	5

表 3 投产后的生产计划及调度优化结果

实际装配产品数量	周期 1	周期 2	周期 3	周期 4	周期 5	周期 6	周期 7	周期 8	周期 9	周期 10
产品 1	6	4	5	3	3	1	0	0	0	0
产品 2	6	6	2	4	5	4	4	4	3	4
产品 3	5	7	8	7	4	6	4	3	2	1
产品 4	0	0	0	1	3	3	4	4	4	5
产品 5	3	3	5	5	4	5	6	6	8	7
总完工时间/h	731.64	719.52	711.72	732.12	686.04	715.92	657.84	600.84	637.32	648.24

### 5.2 算法性能对比

为了验证生产调度求解算法及定理 2 的有效性,将文化基因算法中定理 2 证明的局部搜索算子去除,文化基因算法则退化为遗传算法(GA). 分别使用文化基因算法(MA)和遗传算法(GA)求解周期 1 和周期 5 的生产调度. 为方便比较,各算法中所用交叉率均取为 0.8,变异率均取为 0.2,以算法设定的最大进化代数 20 代为终止条件,每组实验均进行 10 次后求生产调度目标函数的平均值. 定义改进率为  $(\bar{j}_* -$

$\bar{j}_{MA})/\bar{j}_*$ . 其中:  $\bar{j}_{MA}$  为本文所提出算法的目标函数均值,  $\bar{j}_*$  为对比算法的目标函数均值. 周期 1 算法结果对比如表 4 所示,周期 5 算法结果对比如表 5 所示,两种算法最优目标函数值对应的周期 1 调度结果甘特图如图 3 和图 4 所示. 图中,方框内的数字分别代表“产品种类编号、产品数量编号、工件编号、工序编号”,即每个方框代表一个工件工序,纵坐标为该工件工序对应安排装配的装配班和装配组,横坐标为装配时间. 其他周期的调度结果甘特图不一给出.

表4 生产调度算法结果对比(周期1)

算法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	调度目标函数均值	运算时间均值/s
MA	751.44	767.64	740.76	747.24	731.64	753.32	738.12	746.88	745.44	750.84	747.332	116.559
GA	910.44	917.52	891.24	967.8	924.96	929.88	940.68	914.04	918.12	927.72	924.24	106.839

表5 生产调度算法结果对比(周期5)

算法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	调度目标函数均值	运算时间均值/s
MA	705.36	711.24	696.84	699.96	700.68	704.52	686.04	694.32	700.68	699	699.86	115.091
GA	857.40	889.68	837.48	860.64	830.16	865.92	842.88	820.68	899.28	837.12	854.12	105.602

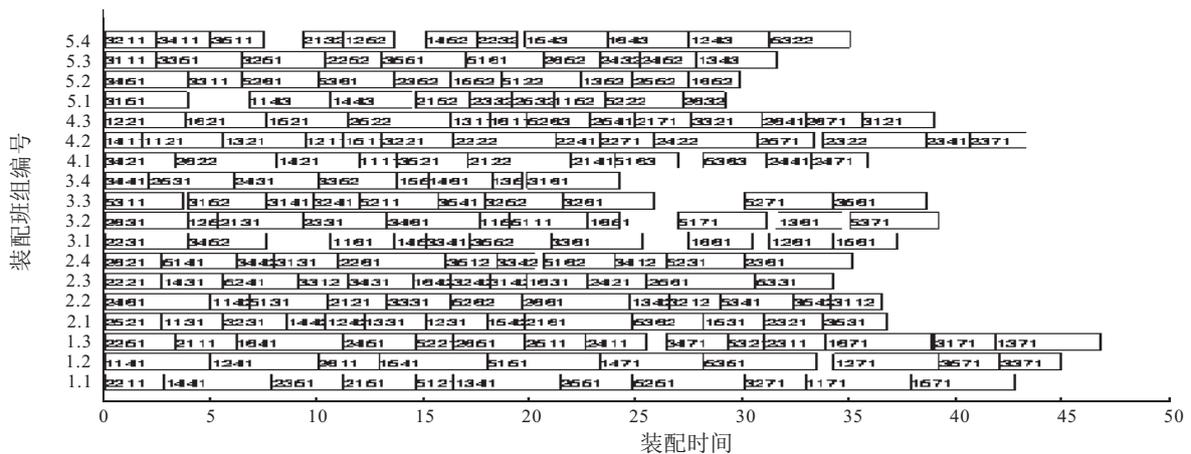


图3 文化基因算法求解周期1调度结果

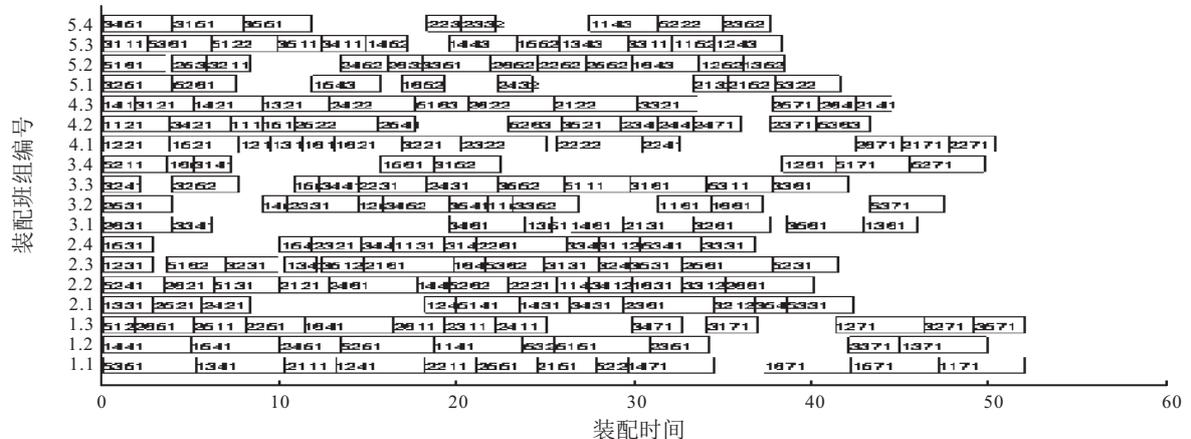


图4 遗传算法求解周期1调度结果

由实验结果可见,加入定理2局部搜索算子的文化基因算法和未进行局部搜索的遗传算法相比较,周期1生产调度目标函数改进率达19.14%,而运算时间仅增加了9.09%;周期5生产调度目标函数改进率达18.06%,而运算时间仅增加了8.98%。由此可见,加入定理2局部搜索的文化基因算法优化效果明显提高。

### 6 结论

本文从定点装配车间不合格品返工影响生产计划及调度的实际情况出发,提出了将返工延后至下一周期期初时处理的解决方案。首先根据装配班组生

产能力和每周周期装配产品的不良品率,在满足客户需求的前提下以生产效益最大为目标制定返工延迟的粗生产计划,实现对每周周期初次装配产品种类及数量的预估;然后根据实际装配过程中每周周期产生的不合格品数量重新调整生产计划,并计算新计划下的生产调度,交替迭代直至装配班组负载均衡,实现了每周周期生产计划的均衡及调度优化;最后重新制定生产计划时采用二分法,实现了生产计划快速有效的调整,优化调度时以最小化装配班组完工时间为目标建立了定点装配车间的调度模型,并采用文化基因算法

求解,实现了新计划下的最优调度.通过本文研究,为面临大量产品返工的定点装配车间提供了制定生产计划与调度的新思路.下一步将继续研究返工出现在装配各节点情况时的定点装配车间生产计划与调度集成优化问题.

#### 参考文献(References)

- [1] Qin W, Huang G Q. A two-level genetic algorithm for scheduling in assembly islands with fixed-position layouts[J]. *J of Systems Science and Systems Engineering*, 2010, 19(2): 150-160.
- [2] Akyol D E, Bayhan M. A review on evolution of production scheduling with neural networks[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2007, 53(1): 95-122.
- [3] 严洪森,夏琦峰,朱旻如,等.汽车装配车间生产计划与调度的同时优化方法[J].*自动化学报*, 2002, 28(6): 911-918.  
(Yan H S, Xia Q F, Zhu M R, et al. Approaches to simultaneous production planning and scheduling in automobile assembly workshops[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(6): 911-918.)
- [4] Du H, Lou P H, Ye W H. Application of hybrid particle swarm optimization in resource constrained multi-project scheduling[J]. *J of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, 2014, 35(5): 371-379.
- [5] 谢志强,李志敏,郝淑珍,等.工序间存在零等待约束的复杂产品调度研究[J].*自动化学报*, 2009, 35(7): 983-989.  
(Xie Z Q, Li Z M, Hao S Z, et al. Study on complex product scheduling problem with no-wait constraint between operations[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(7): 983-989.)
- [6] 刘明周,张玺,刘从虎,等.不确定环境下再制造加工车间生产调度优化方法[J].*机械工程学报*, 2014, 50(10): 206-212.  
(Liu M Z, Zhang X, Liu C H, et al. Optimization method of remanufacturing reprocessing shop scheduling under uncertain conditions[J]. *J of Mechanical Engineering*, 2014, 50(10): 206-212.)
- [7] 王冰,羊晓飞,李巧云.基于坏场景集的抗风险鲁棒调度模型[J].*自动化学报*, 2012, 38(2): 270-278.  
(Wang B, Yang X F, Li Q Y. Bad-scenario set based risk-resisting robust scheduling model[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(2): 270-278.)
- [8] 王明春,凌光,刘鑫,等.考虑外包的并行调度随机期望值模型[J].*系统工程学报*, 2011, 26(1): 91-97.  
(Wang M C, Ling G, Liu X, et al. Stochastic expected value model about parallel schedule considering outsourcing[J]. *J of Systems Engineering*, 2011, 26(1): 91-97.)
- [9] Gupta A, Maranas C D, Nald C M McDonald. Mid-term supply chain planning under demand uncertainty: customer demand satisfaction and inventory management[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2000, 24(12): 2613-2621.
- [10] 郭艳东,王庆,黄敏.就绪时间受限的负荷单机环境下返工工件重调度方法[J].*自动化学报*, 2013, 39(12): 2100-2110.  
(Guo Y D, Wang Q, Huang M. Rescheduling with release time to minimize sum of waiting time considering waiting constraint of original loads[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2100-2110.)
- [11] 万峰,刘检华,宁汝新,等.面向复杂产品装配过程的可视化生产调度技术[J].*计算机集成制造系统*, 2013, 19(4): 755-765.  
(Wan F, Liu J H, Ning R X, et al. Visual production scheduling technology for the complex product assembly process[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(4): 755-765.)
- [12] 胡盛强,张毕西,张湘伟,等.基于合格品率及返工有效率的计划投产量决策[J].*数学的实践与认识*, 2014, 44(8): 1-9.  
(Hu S Q, Zhang B X, Zhang X W, et al. Decision-making of planning input quantity based on qualified rate and effective rework rate[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, 44(8): 1-9.)
- [13] 张国辉,高亮,刘文君.基于Memetic算法的车间动态调度策略研究[J].*中国机械工程*, 2008, 19(15): 1827-1831.  
(Zhang G H, Gao L, Liu W J. Dynamic scheduling optimization strategy based on memetic algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(15): 1827-1831.)
- [14] 吴满成,韩文民,孙晓梅,等.舾装作业中考虑周期驱动的虚拟单元多阶段动态调度研究[J].*上海管理科学*, 2015, 37(3): 65-69.  
(Wu M C, Han W M, Sun X M, et al. Research on the multi-period virtual cellular dynamic scheduling with cycle-driven in outfitting[J]. *Shanghai Management Science*, 2015, 37(3): 65-69.)
- [15] 严洪森,张晓东,董昊.以正好满足产品需求为约束条件的车间最优生产计划[J].*系统工程学报*, 2001, 16(1): 24-29.  
(Yan H S, Zhang X D, Dong H. Optimal production planning for workshops with demand constraints[J]. *J of Systems Engineering*, 2001, 16(1): 24-29.)
- [16] Moscato P. An introduction to population approaches for optimization and hierarchical objective functions: A discussion on the role of Tabu search[J]. *Annals of Operations Research*, 1993, 41(1/4): 85-121.
- [17] Tavakkoli M R, Safaei N, Sassani F. A memetic algorithm for the flexible flow line scheduling problem with processor blocking[J]. *Computer Operation Research*, 2009, 36: 402-414.
- [18] Cai B, Wang S L, Hu H B. Genetic algorithm with local search for job shop scheduling problem[J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2011, 3(9): 42-49.