

# 面向航空发动机装配线的知识化制造系统重调度和自重构

万晓琴<sup>1†</sup>, 严洪森<sup>2</sup>

(1. 东南大学自动化学院, 江苏南京 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, 江苏南京 210096)

**摘要:** 为了解决航空发动机装配过程中存在的不确定返工问题, 建立了面向航空发动机装配线的知识化制造系统(knowledgeable manufacturing system, KMS)重调度和班组自重构优化模型, 提出装配线重调度及自重构集成优化算法. 在算法调度层, 证明了以加权完工成本为优化目标的工序排序性质, 并对工序进行初始排序. 定义了3种邻域结构, 用变邻域搜索(variable neighborhood search, VNS)对工序在并行装配组上的指派问题和调度问题进行优化. 在重构层, 在不违背装配组装配技能约束的前提下利用装配线负载均衡原则对装配班组进行配置, 并采用禁忌搜索(tabu search, TS)对班组配置进行优化. 仿真实验结果表明了模型与算法的有效性.

**关键词:** 知识化制造; 自重构; 装配; 重调度

**中图分类号:** TH165      **文献标识码:** A

## Rescheduling and self-reconfiguration of knowledgeable manufacturing system oriented to aircraft engine assembly line

WAN Xiao-qin<sup>1†</sup>, YAN Hong-sen<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex System Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** To solve the assembly problem of the aircraft engine with uncertain rework, an optimization model of rescheduling and teams self-reconfiguration of knowledgeable manufacturing system (KMS) oriented to aircraft engines assembly line is build, and an integrated optimization algorithm of both is proposed. In the scheduling phase, dominance relations of operations aiming at optimizing weighted completion cost are derived and applied to generating an initial operation sequence. Three neighborhood structures are defined. A variable neighborhood search (VNS) is used to optimize the the assignment and the schedule of operations on parallel assembly teams. In the self-reconfiguration phase, the configuration of the assembly teams is generated according to the assembly line workload balancing without violating the assembly skills constraints, and then optimized by a tabu search (TS). The simulation experiments validate the effectiveness of the proposed model and algorithm.

**Key words:** knowledgeable manufacturing; self-reconfiguration; assembly; rescheduling

### 1 引言(Introduction)

知识化制造是一种新的制造理念, 将各种先进制造模式映射成知识网并纳入知识化制造系统(knowledgeable manufacturing system, KMS)<sup>[1-2]</sup>. KMS 强调对制造系统中的知识进行描述、发现和挖掘, 并根据获取的新知识适当地对系统运行模式和参数进行相应的调整, 以期系统始终运行在一个较好的状态. 它

具备自适应、自进化和自重构等特征<sup>[1]</sup>, 其中自重构问题致力于解决在生产需求有剧烈波动的情况下, 如何对生产工艺路线、生产调度方案、生产能力分配、生产与采购计划、物料配送方案、生产管理系统的结构等进行全局性的重构, 使得剧变后的需求能够得到正确和及时的满足, 同时用于完成上述重构的成本最小<sup>[3]</sup>. 本文从KMS执行层面上研究制造系统自重构问

收稿日期: 2016-10-28; 录用日期: 2017-03-30.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: xqwan87@163.com; Tel.: +86 15951852678.

本文责任编辑: 薛安克.

国家自然科学基金项目(61673112, 60934008), 东南大学优秀博士论文基金项目(YBJJ1446), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2242014K10031), 江苏高校优势学科建设工程资助项目资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61673112, 60934008), Scientific Research Foundation of Graduate School of Southeast University (YBJJ1446), Fundamental Research Funds for the key Universities of China (2242014K10031) and Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

题,通常不同制造系统间存在本质差别,对其重构的研究应具体问题具体分析。

航空发动机是飞机的核心部分,对其质量和精度要求极高.其装配过程除了具有装配作业车间调度问题(assembly job shop scheduling problem, AJSSP)<sup>[4]</sup>的一般特征外,还存在多次分解洗涤后重新装配的过程.每台发动机在装配完成后需进行检验试车,若试车结果不符合相关技术标准则需要对其进行分解洗涤和故障检验,然后重新装配(称之为返工),直至试车合格为止.由于返工产品的数量和返工时间未知,很多企业在制定最初的生产计划时,没有考虑返工工件的调度问题.返工产品的出现使得原调度方案不能正常执行,需要对已经安排好的调度进行重调度。

目前关于航空发动机的装配研究主要集中于静态环境下的系统建模和调度<sup>[3, 5-6]</sup>,对于动态环境下的调度问题研究较少.文献[7]研究了不确定生产环境下航空发动机装配的自适应调度问题,提出了基于双层Q学习的自适应优化调度算法.文献[8]针对产品动态到达的航空发动机装配车间自进化问题提出一种基于可行域的双层遗传算法.对于存在返工产品重调度问题的研究主要从组批调度<sup>[9-10]</sup>和加工排序<sup>[11-12]</sup>角度考虑.目前关于重调度研究的文献中制造系统的参数是固定的,而在航空发动机装配过程中,工人手工操作的工序占有很大比重,所以当扰动发生时,不仅可以对生产调度进行调整,还可以对人力资源重新配置.文献[3]研究了静态环境下的航空发动机装配车间生产调度与班组自重构问题,并未考虑装配过程中存在的不确定返工问题以及车间内班组的技能约束。

本文在已有研究基础上,考虑班组的装配技能约束,以产品完工成本和班组重构成本加权和为优化目标,研究了存在不确定返工的航空发动机装配线重调度和装配班组自重构问题.当返工产品到达时,收集待装配产品的信息,判断是否需要重新配置各装配班中装配组的数量.若需要重构,则根据装配负载平衡原则来确定装配班组的初始配置,然后用禁忌搜索(tabu search, TS)优化班组配置.在调度优化过程中,定义了产品的理想调度,根据工序在装配组上装配时间的重叠情况对工序在并行装配组上进行指派,并用变邻域搜索(variable neighborhood search, VNS)对工序的指派问题和调度问题进行优化.提出了装配线重调度及班组自重构集成优化算法,实例仿真结果表明该算法是有效的。

## 2 问题描述与建模(Problem description and model formulation)

### 2.1 问题描述(Problem description)

航空发动机是由数以千计的零件以及由这些零件组成的组件、部件、单元体、系统附件和成品件按照

规定的技术标准、技术要求组装在一起.班组是航空发动机装配车间内基本的作业单位.车间内配备了不同职能的装配班,例如总装班、传装班、加力班、机匣班等.为了增加产能,装配班中包含一个或多个装配组,组内配备一定数量的工人、专用工具和设备.为了简化问题,将由同一装配组在固定的工作地用相同的设备装配一个组件或者部件时所进行的一系列工作总和定义为一个完整的装配工序.航空发动机的装配流程可用树状的结构图表示,如图1所示.树上的每个结点均表示发动机装配过程中的一道工序.结点中数字的含义为:工序编号-装配班-装配时间。

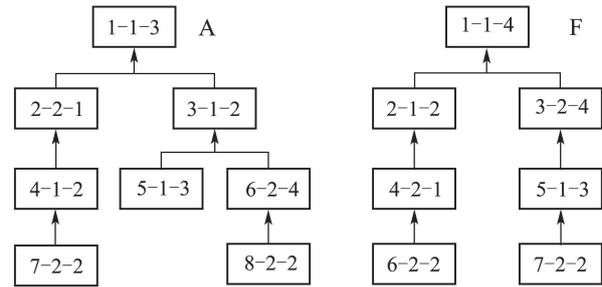


图1 产品装配树状装配结构图

Fig. 1 Tree structure of assembly products

航空发动机试车不合格导致的返工可以看成是一个扰动事件,它的出现使得预先制定的调度方案不能正常执行,需要在短时间内重新调度.返工事件发生时,需要记录各装配组的状态,统计正在装配的工序集,将未装配的工序和返工工序一起加入到待调度集合中,并判断是否需要重构班组配置。

针对该类问题作如下假设:重调度前已经存在一个正在执行的生产调度方案;重调度发生时,装配组正在装配的工序不中断,直到其装配完为止;每个装配组在同一时刻只能装配一道工序;工序一旦开始装配就不能被中断;所有子工序完成后才能进行父工序的装配;装配组具备多种装配技能,各装配班之间可以相互调用装配组。

### 2.2 数学模型(Mathematical model)

本文以存在不确定返工的航空发动机装配线为研究背景,建立航空发动机装配线重调度和班组自重构集成优化模型.定义符号和变量如下:

$tr$ : 重调度开始时间;  $J$ : 重调度时正在装配的工序集合;  $n$ : 待装配的发动机数量,包括未完工的和返工的发动机,  $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $m$ : 装配班总数,  $l \in \{1, 2, \dots, m\}$ ;  $p$ : 装配组总数,  $h \in \{1, 2, \dots, p\}$ ;  $K_i$ : 第*i*台发动机的待装配工序数,  $k \in \{1, 2, \dots, K_i\}$ ;  $o_{ik}$ : 第*i*台发动机编号为*k*的工序,记 $o_{ik}$ 为 $o_{ik}$ 父工序;  $\pi_{ik}$ :  $o_{ik}$ 所在的装配班,  $\pi_{ik} \in \{1, 2, \dots, m\}$ ;  $\varepsilon_{ik}$ :  $o_{ik}$ 所在的装配组,  $\varepsilon_{ik} \in \{1, 2, \dots, p\}$ ;  $\omega_h$ : 第*h*个装配组

可开始进行装配操作的时间;  $s_{ik}$ :  $o_{ik}$  开始时间;  $c_{ik}$ :  $o_{ik}$  完工时间;  $t_{ik}$ :  $o_{ik}$  装配时间;  $C_i$ : 第  $i$  台发动机的完工时间;  $M$ : 一个较大的正数;  $\varphi_h$ : 第  $h$  个装配组的调动成本, 包括因工人熟练程度不一等因素带来的生产成本;  $\xi_i$ : 第  $i$  台发动机的完工成本;  $X_{ikjk'}$ : 若  $o_{ik}$  和  $o_{jk'}$  由相同编号的装配组装配且  $o_{ik}$  在  $o_{jk'}$  之前装配, 则为1, 否则为0;  $Y_{lh}$ : 若第  $h$  个装配组被分配到第  $l$  个装配班, 则为1, 否则为0.  $Y_{lh}^0$  为初始班组分配方案;  $A_{lh}$ : 若第  $h$  个装配组具备第  $l$  个装配班的装配能力, 则为1, 否则为0;  $\alpha, \beta$ : 成本权重系数.

在处理重调度问题时, 为方便表述, 将所有待装配的发动机和工序重新编号, 在每个工序  $o_{i\bar{k}}$  的前面加一道虚拟子工序  $o_{ik}$ , 且虚拟子工序的装配时间为零. 在重调度发生那一时刻, 若  $o_{i\bar{k}}$  存在某些子工序恰好正在进行装配操作, 则  $o_{i\bar{k}}$  的虚拟子工序  $o_{ik}$  的完工时间等于这些子工序的最大完工时间; 否则虚拟子工序  $o_{ik}$  的完工时间为  $tr$ .

基于上述问题描述和参数定义, 考虑航空发动机装配车间重调度和重构过程中的目标和约束, 建立如下数学模型:

$$\min \alpha \sum_{i=1}^n \xi_i (C_i - tr) + \beta \sum_{h=1}^p \varphi_h \max(Y_{lh} - Y_{lh}^0, 0), \quad (1)$$

$$c_{ik} - s_{ik} = t_{ik}, \quad \forall i, k, \quad (2)$$

$$\omega_h \geq \max(tr, c_{ik}), \quad \forall o_{ik} \in J, \quad \forall \varepsilon_{ik} = h, \quad (3)$$

$$s_{i\bar{k}} \geq \max(\omega_h, c_{ik}), \quad \forall \varepsilon_{i\bar{k}} = h, \quad (4)$$

$$c_{jk'} - c_{ik} + M(1 - X_{ikjk'}) \geq t_{jk'}, \quad \forall i, j, k, k', \quad (5)$$

$$c_{ik} - c_{jk'} + M X_{ikjk'} \geq t_{ik}, \quad \forall i, j, k, k', \quad (6)$$

$$Y_{\pi_{ik}, \varepsilon_{ik}} = 1, \quad \forall i, j, k, \quad (7)$$

$$Y_{lh} \leq A_{lh}, \quad \forall l, h, \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^m Y_{lh} \leq 1, \quad \forall h, \quad (9)$$

$$X_{ikjk'} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k, k', \quad (10)$$

$$A_{lh} \in \{0, 1\}, \quad \forall l, h, \quad (11)$$

$$Y_{lh} \in \{0, 1\}, \quad \forall l, h. \quad (12)$$

式(1)为优化目标, 使产品完工成本和班组重构成本之和最小; 式(2)表明工序一旦开始就不允许中断; 式(3)确定在重调度发生时, 装配组最早可开始进行装配操作的时间; 式(4)表示所有工序的开工时间约束; 式(5)和式(6)确保一个装配组在同一时刻只能装配一道工序; 式(7)保证重构后工序所指派的装配组具备所在装配班所需的技能; 式(8)为装配组的装配技能约束; 式(9)保证重构后装配组只属于某一个装配班; 式(10)–(12)定义了变量的取值范围.

### 3 算法设计(Algorithm design)

针对航空发动机装配过程中存在不确定返工这一问题, 提出一种产品重调度和班组自重构集成优化算法. 首先利用装配线平衡原则给出装配班组配置, 然后根据产品的理想调度以及工序的排序性质给出工序在并行装配组上的指派方案和调度方案. 最后利用禁忌搜索和变邻域搜索算法分别对装配班组配置、工序指派方案和调度方案进行优化.

下面详细介绍了算法各部分的实施步骤: 第3.1节介绍了在不违背装配组装配技能约束的条件下, 对装配班组进行初始配置, 设计了禁忌搜索算法的搜索邻域结构, 使算法能在可行域内对班组配置进行优化搜索; 第3.2节给出了工序在并行装配组上的指派方案以及工序排序性质的推导过程, 设计了3种邻域结构, 用变邻域搜索算法优化调度方案; 最后第3.3节给出算法的详细步骤.

#### 3.1 班组重构及优化(Reconfiguration and optimization of teams of groups)

在启发式算法中, 初始解的质量很大程度上影响了搜索的时间以及最终解的优劣. 在班组重构优化过程中, 根据各装配组的装配技能约束以及装配班组的负载平衡需求确定各装配班中装配组的数量, 然后采用禁忌搜索算法进行优化.

##### 3.1.1 初始班组配置 (Initialization of teams of groups)

首先根据式(13)计算各装配班中的理想装配组数

$$b_l^* = \frac{Lb_l}{Ld}, \quad (13)$$

其中:  $Lb_l = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} t_{ik}$ ,  $\forall \pi_{ik} = l$  是各装配班的实际负载;  $Ld = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} t_{ik}/p$  为装配线上装配组的平均负载.

根据式(13)所得的各装配班中的理想装配组数  $b_l^*$  不一定是整数, 为解决这一问题执行下面步骤:

1) 令  $\Delta_l \leftarrow b_l^*$ ,  $b_l = 0_{1 \times m}$ ;

2) 将  $\Delta_l$  从大到小排序, 依次将满足  $b_l < \sum_{h=1}^p A_{lh}$  条件的组执行  $b_l \leftarrow b_l + 1$ , 令  $\Delta_l \leftarrow b_l^* - 1$ ;

3) 重复上一步骤直到满足  $\sum_{l=1}^m b_l = p$  条件为止.

在已知了装配班中装配组的数量  $b_l$  以及装配组装配能力  $A_{lh}$  后, 需要将各装配组分配到具体的装配班中. 建立一个0-1规划模型解决该问题, 优化目标为最小化装配组重构成本, 变量为  $Y_{lh}$ .

$$\min f = \sum_{l=1}^m \sum_{h=1}^p \varphi_h (A_{lh} - Y_{lh}^0) Y_{lh}, \quad (14)$$

$$Y_{lh} \leq A_{lh}, \forall l, h, \tag{15}$$

$$\sum_{l=1}^m Y_{lh} \leq 1, \forall h, \tag{16}$$

$$\sum_{h=1}^p Y_{lh} = b_l, \forall l, \tag{17}$$

$$Y_{lh} \in \{0, 1\}, \forall l, h. \tag{18}$$

上述0-1规划模型若存在可行解, 则初始装配班组重构完毕, 否则需要重新配置装配班中装配组的数量, 下面给出装配班组重构算法的具体步骤.

**步骤 1** 已知了装配班中装配组的数量 $b_l$ 以及装配组装配能力 $A_{lh}$ , 建立0-1规划模型并求解 $Y_{lh}$ , 若有解则转至步骤4; 否则, 令 $\delta b_l = b_l - b_l^*$ , 转至步骤2.

**步骤 2** 在满足 $b_l < \sum_{h=1}^p A_{lh}$ 条件的装配班中, 根据 $\delta b_l$ 的大小给装配班的适应度赋值,  $\delta b_l$ 值越小, 该装配班的适应度值越大, 采用轮盘赌的方法选择装配班 $l^+$ , 令 $b_{l^+} \leftarrow b_{l^+} + 1$ .

**步骤 3** 在满足 $b_l > 1$ 条件的装配班中, 根据 $\delta b_l$ 的大小给装配班的适应度赋值,  $\delta b_l$ 值越大, 该装配班的适应度值越大, 采用轮盘赌的方法选择装配班 $l^-$ , 令 $b_{l^-} \leftarrow b_{l^-} - 1$ , 转至步骤1.

**步骤 4** 算法结束. 返回班组配置.

### 3.1.2 禁忌搜索(Tabu search)

禁忌搜索是模拟人的思维的一种智能搜索算法, 其迭代改进过程就是通过不断在当前解的邻域中搜索更好的解来实现的, 并通过相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 广泛应用于组合优化问题的求解<sup>[13-14]</sup>.

邻域结构是禁忌搜索算法的基本要素之一, 针对本文班组重构问题的特点, 设计邻域结构如下: 选择一个装配组, 根据其具备的装配技能, 变更其所在的装配班. 即若装配组 $h$ 满足条件 $A_{lh} = 1, A_{l'h} = 1$ 和 $Y_{lh} = 1$ , 则令 $Y_{lh} = 0$ 和 $Y_{l'h} = 1$ . 这种邻域结构可在可行域内搜索装配班中的组数.

禁忌表用于记录邻域变换的操作, 用 $m \times m$ 的二维矩阵 $T_a$ 表示. 每当算法从当前解向选定的邻点移动时, 该移动的逆向移动加入到禁忌列表中. 例如: 若第 $h$ 个装配班的组数加1而第 $h'$ 个装配班组数减1, 则令 $Ta(h', h) = Tm$ , 其中 $Tm$ 为禁忌表长度. 所有位于禁忌列表中的逆向移动都是被禁止的, 但是如果一个被禁止的逆向移动能够生成比当前最好解还要好的邻点时, 那么它的禁忌状态可以被赦免, 从而避免错失问题的最好解.

### 3.2 调度优化(Optimization of scheduling)

航空发动机装配车间内配备了多种装配班, 而不同装配班内又包含多个并行装配组, 可以同时进行装

配操作. 因此航空发动机的调度问题既包括了工序在并行装配组上的指派问题又包括工序在装配组的排序问题. 以图1所示的产品装配结构图为例说明工序指派方法以及排序性质的推导过程.

首先构造产品的“理想调度”<sup>[3]</sup>, 即忽略装配组的装配能力, 仅考虑单个产品的装配顺序约束, 从产品的根节点开始, 按照子工序的完工时间等于父工序的开工时间依次向下递推, 获得产品的理想调度, 如图2所示.

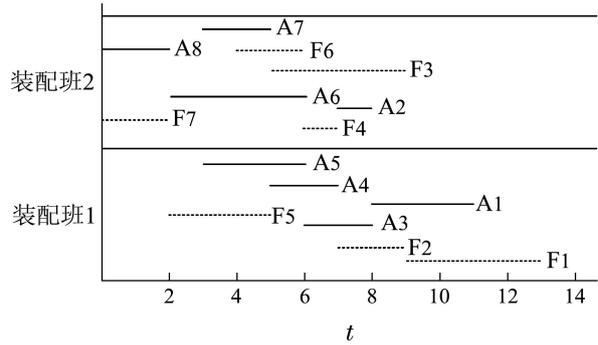


图2 产品理想调度

Fig. 2 Ideal schedule for products

显然, 图2不是一个可行的调度方案, 工序的装配时间之间存在冲突. 为了解决这种冲突问题, 一方面可以将有冲突的工序指派给不同的装配组进行装配, 另一方面可以将工序的装配时间提早或者推迟.

为解决工序冲突问题, 下面给出两个定义:

$Pre_{ik}$ 为 $o_{ik}$ 的子工序集;  $Suc_{ik}$ 为父工序集;  $\omega_h$ 为 $o_{ik}$ 所在的装配组最早可以开始进行装配操作的时间.

**定义 1**  $o_{ik}$ 最早可开工时间 $SP_{ik}$ : 若 $Pre_{ik}$ 为空集, 则 $SP_{ik} = \omega_h$ ; 否则,  $SP_{ik} = \max(\omega_h, C_{Pre_{ik}})$ , 其中 $C_{Pre_{ik}}$ 为 $o_{ik}$ 的所有子工序的完工时间集合.

**定义 2**  $o_{ik}$ 最迟完工时间为 $DP_{ik}$ , 并且 $DP_{ik} = \min(S_{Suc_{ik}})$ , 其中 $S_{Suc_{ik}}$ 为 $o_{ik}$ 的所有父工序的开始时间集合.

### 3.2.1 工序在并行装配组上的初始指派方案(The initial assignment of operations on parallel assembly teams)

工序在并行装配组上的初始指派方案的主要思想是尽可能将有冲突的工序指派到不同的装配组上进行装配. 算法步骤如下:

**步骤 1** 初始化. 令 $l = 1$ .

**步骤 2** 找可由第 $l$ 个装配班进行装配的工序集, 记为 $AS_l$ , 该工序集中工序数目为 $e_l$ . 第 $l$ 个装配班中包含的装配组数为 $b_l$ .

**步骤 3** 将 $AS_l$ 中工序按照SP值从小到大的顺序

排列.

**步骤 4** 从  $AS_l$  中第一道工序开始, 依次计算该工序与各装配组中已指派的工序的装配重叠时间之和(若装配组还未被指派工序, 则装配重叠时间之和为零), 并将该工序指派到装配时间重叠之和最小的装配组上进行装配. 重复此步骤直到  $e_l$  个工序全部指派完毕.

**步骤 5**  $l \leftarrow l + 1$ , 若  $l < m$ , 转至步骤 2; 否则转下一步.

算法结束.

### 3.2.2 工序排序性质 (Properties for operation sequence)

以同一装配组上两个装配时间相互冲突的工序为例说明工序的排序性质. 如图 3 所示, 两工序  $O_{ik}$  和  $O_{jk'}$  的最早可开工时间分别为  $SP_{ik}$  和  $SP_{jk'}$ , 最迟完工时间分别为  $DP_{ik}$  和  $DP_{jk'}$ . 若要解决冲突问题, 需要将工序的装配时间提早或者推迟. 由图 2 可以看出, 若工序的装配时间向后推迟, 则会导致该工序的所有父工序及其后续工序的装配时间也相应延迟, 最终使产品完工时间增加.

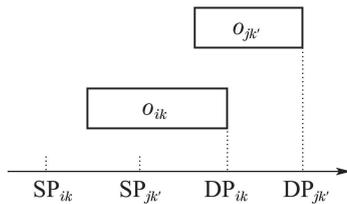


图 3 工序冲突示意图

Fig. 3 The conflict of operations

以最小化加权完工成本为优化目标, 对工序装配时间冲突问题提出以下性质:

**定理 1** 对于满足  $DP_{jk'} - t_{ik} - t_{jk'} < SP_{ik} \leq DP_{ik} - t_{ik}$  和  $DP_{ik} - t_{ik} - t_{jk'} < SP_{jk'} \leq DP_{jk'} - t_{jk'}$  条件的装配时间相互冲突的两个工序  $O_{ik}$  和  $O_{jk'}$ , 若

$$\frac{\xi_j}{\xi_i} < \frac{SP_{jk'} + t_{jk'} + t_{ik} - DP_{ik}}{SP_{ik} + t_{ik} + t_{jk'} - DP_{jk'}}, \quad (19)$$

则  $O_{ik}$  在  $O_{jk'}$  之前装配较优, 且有  $s_{ik} = SP_{ik}$ ,  $s_{jk'} = SP_{jk'} + t_{ik}$ ; 否则,  $O_{jk'}$  在  $O_{ik}$  之前装配较优, 且有  $s_{ik} = SP_{jk'} + t_{jk'}$ ,  $s_{jk'} = SP_{jk'}$ .

**证** 对于如图 3 所示的两个装配时间相互冲突的工序  $O_{ik}$  和  $O_{jk'}$ , 当满足  $DP_{jk'} - t_{ik} - t_{jk'} < SP_{ik} \leq DP_{ik} - t_{ik}$  和  $DP_{ik} - t_{ik} - t_{jk'} < SP_{jk'} \leq DP_{jk'} - t_{jk'}$  条件时, 若工序  $O_{ik}$  在  $O_{jk'}$  之前装配, 两个工序的相对位置有两种, 如图 4(a) 所示. 显然, 当  $O_{ik}$  和  $O_{jk'}$  从 P1 位置逐渐向右移动到 P2 位置时, 两个工序的完工时间都会超过各自的最迟完工时间, 从而导致产品总完工时间增加. 且两工序向右移动越多, 产品总完工时间增加越多. 所以, 图 4(a) 中工序  $O_{ik}$  和  $O_{jk'}$  在 P1 位置使

得总完工成本增量最小. 同理, 若  $O_{jk'}$  在  $O_{ik}$  之前装配, 如图 4(b) 所示, 工序在 P3 位置最优. 根据上述分析只需比较图 4 中工序处在 P1 和 P3 位置的完工成本的增量大小即可.

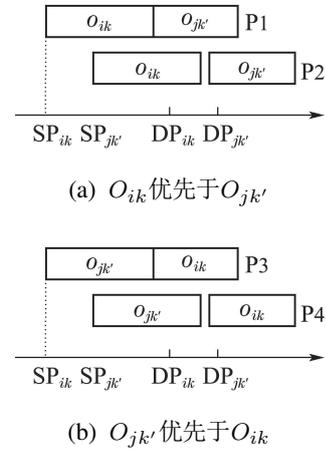


图 4 工序排序示意图

Fig. 4 The positions of operation sequences

工序处在 P1 位置时, 总完工成本增量为  $\Delta Z_{P1} = \xi_j (SP_{ik} + t_{ik} + t_{jk'} - DP_{jk'})$ . 工序在 P3 位置时总成本增量为  $\Delta Z_{P3} = \xi_i (SP_{jk'} + t_{jk'} + t_{ik} - DP_{ik})$ . 当

$$\frac{\xi_j}{\xi_i} < \frac{SP_{jk'} + t_{jk'} + t_{ik} - DP_{ik}}{SP_{ik} + t_{ik} + t_{jk'} - DP_{jk'}}$$

成立时, 可推导出  $\Delta Z_{P1} < \Delta Z_{P3}$ , 即工序  $O_{ik}$  在  $O_{jk'}$  之前装配较优, 根据图 4 中 P1 可以看出  $s_{ik} = SP_{ik}$ ,  $s_{jk'} = SP_{jk'} + t_{ik}$ .

同理当

$$\frac{\xi_j}{\xi_i} \geq \frac{SP_{jk'} + t_{jk'} + t_{ik} - DP_{ik}}{SP_{ik} + t_{ik} + t_{jk'} - DP_{jk'}}$$

成立时, 可推导出  $\Delta Z_{P1} \geq \Delta Z_{P3}$ , 工序  $O_{jk'}$  在  $O_{ik}$  之前装配较优, 根据图 4 中 P3 可以看出  $s_{ik} = SP_{jk'} + t_{jk'}$ ,  $s_{jk'} = SP_{jk'}$ .

**定理 2** 对于两个装配时间相互冲突的工序  $O_{ik}$  和  $O_{jk'}$ , 当满足  $SP_{ik} \leq DP_{jk'} - t_{ik} - t_{jk'}$  条件时,  $O_{ik}$  在  $O_{jk'}$  之前装配较优; 当满足  $SP_{jk'} \leq DP_{ik} - t_{ik} - t_{jk'}$  条件时, 工序  $O_{jk'}$  在  $O_{ik}$  之前装配较优.

**证** 同性质 1 证明.

根据上面提出的 2 个性质, 结合文献 [3] 中算法 1 和 2 可以得到一个工序局部最优的排序方案和调度方案. 算法步骤见文献 [3], 这里不再详述.

### 3.2.3 变邻域搜索 (Variable neighborhood search)

VNS 是 Hansen 等 [15] 提出的一种元启发近似算法, 它通过在不同的邻域结构内跳转搜索, 能够避免陷入局部最优解. 算法主要分为两部分: 一是局部搜索, 在相同邻域结构内寻求局部最优解; 二是改变邻域, 在局部最优解的基础上改变邻域结构. 上述两步交替迭代

从而达到全局最优. 利用VNS较强的搜索能力对工序的指派问题和工序排序问题进行优化.

1) 编码和解码(Encoding and decoding).

类似于遗传算法中的染色体编码, “染色体”为一个  $2 \times L$  的矩阵, 其中  $L$  为所有待装配工序数目之和. 染色体中第1行为工序优先权, 先开始装配的工序比后装配的工序赋更高的优先权, 第2行为工序所指

派的装配组编号. 以图1中产品为例, 假设每个班中配备两个能力相同的装配组(即装配班1中配备了组1和组2, 装配班2中配备了组3和组4), 各工序的装配顺序为  $A8 \rightarrow F7 \rightarrow A7 \rightarrow A6 \rightarrow F5 \rightarrow A5 \rightarrow F6 \rightarrow A4 \rightarrow A3 \rightarrow F3 \rightarrow F4 \rightarrow A2 \rightarrow F2 \rightarrow A1 \rightarrow F1$ , 各工序对应的装配组为  $4 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2$ , VNS初始解的编码如图5所示.

工序	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
优先权	2	4	7	8	10	12	13	15	1	3	6	5	11	9	14
装配组	1	3	1	2	1	3	4	4	2	2	4	3	2	4	3

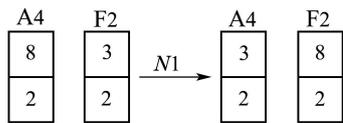
图5 编码

Fig. 5 Encoding

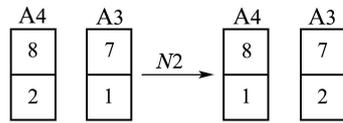
工序装配顺序解码原则为: 满足装配条件的工序优先权越高越先进行装配.

2) 邻域结构(Neighborhood structures).

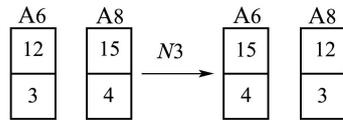
针对问题特点, 设计3种邻域结构, 用于振动和局部搜索环节, 如图6所示.



(a) 第1种邻域结构



(b) 第2种邻域结构



(c) 第3种邻域结构

图6 3种邻域结构

Fig. 6 Three neighborhood structures

第1种邻域结构  $N_1$ : 选择由同一个装配组进行装配的两工序, 交换工序的优先权, 如图6(a)所示. 此种邻域结构用于改变工序的装配顺序.

第2种邻域结构  $N_2$ : 选择由同一个装配班不同装配组进行装配的两工序, 交换工序的装配组, 如图6(b)所示. 此种邻域结构用于改变工序的装配组.

第3种邻域结构  $N_3$ : 选择由同一个装配班不同装配组进行装配的两工序, 交换工序的优先权和装配组, 如图6(c)所示. 此种邻域结构用于改变工序的装配顺序以及装配组.

3) 局部搜索(Local search).

局部搜索作为VNS算法中的关键操作, 在当前的邻域内搜索局部最优解. 本文采用基于阈值接受的局部搜索方法<sup>[16]</sup>. 设定一个目标值的容许阈值  $\rho$ , 如果局部搜索得到的调度解和当前解的目标值偏差小于阈值, 则接受局部最优解.

3.3 算法步骤(Steps of the algorithm)

面向航空发动机的重调度和班组自重构集成优化算法步骤如下:

算法1 班组重构算法.

步骤1 初始化算法参数, 记录各装配组的状态, 统计正在装配的工序集, 将未装配的工序和返工工序一起加入到待调度集合中.

步骤2 读取待调度集的工序装配信息确定装配组的初始配置. 调用算法2, 获得返回值: 最优生产调度方案  $S$  和生产成本  $Z$ .

步骤3 根据禁忌搜索算法定义的邻域产生规则随机产生一些候选解集.

步骤4 调用算法2, 计算候选解的目标函数值, 从候选解集中的非禁忌移动或满足特赦准则的禁忌移动中选出最好的解. 记录当前最优解, 更新禁忌表.

步骤5 判断是否达到最大迭代次数, 若是, 转至步骤6; 否则, 转至步骤3.

步骤6 算法结束, 返回最优生产调度方案  $S^*$ , 最优班组配置  $Y^*$  和生产成本  $Z^*$ .

算法2 调度优化算法.

步骤1 初始化算法参数, 最大迭代次数. 读取装配信息和班组配置.

步骤2 根据工序指派方法和工序排序方法生成初始调度方案.

**步骤 3** 利用VNS优化调度方案.

**步骤 4** 算法结束, 返回最优生产调度方案和生产成本.

#### 4 仿真实验(Simulation experiments)

仿真实验分为两部分内容: 1) 通过仿真验证重构的必要性以及模型和算法的有效性; 2) 通过与其他调度规则的对比验证工序排序性质的有效性. 所有程序在MATLAB平台上运行, 运行环境为Intel(R) Core (TM) i5-2400 CPU@3.10 GHz, RAM 4G. 以某航空发动机装配车间为研究背景, 该装配车间有10个不同职能的装配班, 分别为: 装配班、平衡班、加力班、机加班、传装班、钣焊班、前后机匣班、附件机匣班、机匣导向班和总装班. 假设装配车间内共有20个装配组, 可装配A, B和C3种型号的发动机, 限于篇幅, 表1仅列出了A型发动机的部分装配信息.

表 1 某航空发动机装配信息

Table 1 Information for aircraft engine assembly

工序	父工序	部组件	装配班	装配时间/h
1	-	航空发动机A	总装班	10
2	1	电气附件	加力班	40
3	1	可调喷口	钣焊班	32
4	1	扩散器	钣焊班	27
5	1	子装配体	传装班	3
6	5	II级涡轮	前后机匣班	30
7	6	II级涡轮	装配班	11
8	7	II级涡轮	前后机匣班	9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
26	25	燃油总管	加力班	8
27	25	后机匣	前后机匣班	8
28	24	子装配体	传装班	4
29	28	处理机匣	前后机匣班	23
30	28	高压压气机转子	装配班	10
31	30	高压压气机转子	机加班	5
32	31	高压压气机转子	装配班	44
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
45	35	回油泵	前后机匣班	16
46	35	通风器	前后机匣班	3

为了验证装配线重调度及自重构集成优化算法的有效性, 针对不同的问题规模和参数构造测试问题. 参数设置如下:

初始调度中包含的发动机数量  $n_0$  分别为4台(包括2台A型, 1台B型, 1台C型)、6台(包括2台A型, 2台B型, 2台C型)和8台(包括3台A型, 3台B型, 2台C型); 返工发动机数量为2台和4台, 型号在A, B和C型中随机选取; 装配组具备的装配技能分别为2种( $F=2$ )、5种( $F=5$ )和10种( $F=10$ ); 成本权重系数

$\alpha, \beta \in \{0.2, 0.5, 0.8\}$ ; 装配组的调动成本  $\varphi$  服从[10, 50]的均匀分布; 发动机单位时间完工成本  $\xi$  服从[1, 6]的均匀分布; 重调度时间  $tr \in [0.3C_{\max}^0, 0.8C_{\max}^0]$ , 其中:  $C_{\max}^0$  为重调度发生之前车间内正在执行的调度的产品最大完工时间; TS算法中禁忌表长度为5, 最大迭代次数为10; VNS算法中最大外循环次数为100, 最大内循环次数为50.

根据上述参数定义, 共构造54组测试问题, 每组测试问题独立运行10次.

令  $tr = 0, \beta = 0$ , 运行本文提出的算法可得到初始班组配置和生产调度方案.

针对航空发动机装配线班组重构和不重构两种情况进行了仿真对比, 仿真结果如表2-3所示.

定义装配线重构改善率为

$$Gap = 100 \times (\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1) / \bar{Z}_0, \quad (20)$$

其中:  $\bar{Z}_0$  为班组不重构情况下装配线的总成本均值,  $\bar{Z}_1$  为重构后的总成本均值.

由表2-3中的数据可以看出, 相较于原先的装配线, 重构后的装配线总成本更低, 这说明重构后的班组配置和调度方案更加合理. 在相同规模问题下, 随着重构成本权重系数  $\beta$  的降低, 重构后的平均改善率逐渐提高. 装配组在具备2种、5种和10种装配技能情况下的平均改善率分别为5.52%, 7.84%和8.33%. 由此可见, 随着装配组的技能柔性程度的提高, 重构后装配线的装配效率有提高的趋势.

另外, 从表2-3中可以发现存在一些装配组技能柔性程度较高但重构后的改善率却小于柔性程度较低时的情况, 这是因为装配组柔性程度较低时候具备的装配技能恰好可以满足装配线重构后对班组配置的需求, 而当装配组柔性程度提高后, 扩大了可行域的空间, 增加了搜索难度.

文献[16]将ECT/LFT, LFT/ECT和EFT/ECT规则进行改进, 使之在有关产品流水时间的性能指标中表现较优. 为了验证本文提出的工序排序性质在解决装配作业车间调度问题上的作用, 采用上述3种改进的调度规则作为对比, 在已知表2-3中重构后得到的较优班组配置和工序指派的基础上, 采用不同调度规则对各装配工序进行排序优化, 将文本提出的排序性质记为H, 仿真结果如表4所示.

由表4可以看出, 在不同规模的测试问题下, 本文提出的工序排序方法在以最小化产品完工时间为优化指标的调度问题中均表现较优. 采用ECT/LFT, LFT/ECT和EFT/ECT这三种调度规则对表4中任何一种规模问题进行求解时所消耗的时间均在1s以内, 而用本文提出的工序排序方法所消耗的时间均在5s以内, 亦在可接受的范围.

表2 仿真结果对比( $n = 2$ )

Table 2 Computational results for experiments ( $n = 2$ )

$n_0$	$\alpha$	$\beta$	$F = 2$			$F = 5$			$F = 10$			$G_{ap}/\%$
			重构	不重构	$G_{ap}/\%$	重构	不重构	$G_{ap}/\%$	重构	不重构	$G_{ap}/\%$	
4	0.2	0.8	429.42	436.82	1.69	418.58	433.48	3.44	410.20	431.06	4.84	3.32
	0.5	0.5	885.43	936.98	5.50	887.55	940.90	5.67	885.40	947.38	6.54	5.90
	0.8	0.2	1137.28	1206.36	5.73	1127.28	1211.76	6.97	1115.50	1204.72	7.41	6.70
6	0.2	0.8	575.31	582.04	1.16	554.79	576.44	3.76	555.95	582.67	4.59	3.17
	0.5	0.5	1239.98	1295.18	4.26	1196.93	1301.13	8.00	1188.28	1288.65	7.79	6.68
	0.8	0.2	2007.80	2149.68	6.60	1908.34	2138.52	10.76	1910.00	2137.52	10.64	9.33
8	0.2	0.8	863.60	882.00	2.08	843.33	883.50	4.55	834.48	885.78	5.79	4.14
	0.5	0.5	1865.55	1967.02	5.16	1843.33	1980.43	6.92	1856.43	1978.08	6.15	6.08
	0.8	0.2	2962.72	3124.90	5.19	2835.38	3149.00	9.96	2837.38	3147.04	9.84	8.33

表3 仿真结果对比( $n = 4$ )

Table 2 Computational results for experiments ( $n = 4$ )

$n_0$	$\alpha$	$\beta$	$F = 2$			$F = 5$			$F = 10$			$G_{ap}/\%$
			重构	不重构	$G_{ap}/\%$	重构	不重构	$G_{ap}/\%$	重构	不重构	$G_{ap}/\%$	
4	0.2	0.8	772.10	790.10	2.28	755.61	786.69	3.95	749.61	782.83	4.24	3.49
	0.5	0.5	1784.48	1914.83	6.81	1753.85	1921.23	8.71	1734.93	1913.03	9.31	8.28
	0.8	0.2	3040.06	3264.40	6.87	2963.50	3272.00	9.43	2932.88	3259.16	10.01	8.77
6	0.2	0.8	800.24	848.09	5.64	777.13	846.41	8.19	778.52	852.40	8.67	7.50
	0.5	0.5	2330.03	2525.30	7.73	2308.13	2542.93	9.23	2290.28	2547.47	10.01	8.99
	0.8	0.2	3559.82	3940.04	9.65	3590.66	3959.88	9.32	3535.06	3931.84	10.09	9.69
8	0.2	0.8	1189.56	1283.84	7.34	1152.93	1286.14	10.36	1142.81	1282.67	10.90	9.53
	0.5	0.5	2125.88	2296.33	7.42	2047.38	2285.85	10.43	2049.28	2301.55	10.96	9.60
	0.8	0.2	4094.06	4465.40	8.32	3988.00	4504.96	11.48	3913.36	4456.60	12.19	10.66

表4 结果比较

Table 2 Comparison for computational results

$n_0$	算法	$n = 2$			$n = 4$		
		$F = 2$	$F = 5$	$F = 10$	$F = 2$	$F = 5$	$F = 10$
4	H	1923.50	1893.23	1915.28	4120.30	4138.73	4210.80
	ECT/LFT	2537.92	2531.22	2467.55	5624.67	5686.87	5645.17
	LFT/ECT	2636.47	2650.87	2588.40	6094.65	6015.78	6079.90
	EFT/ECT	2653.48	2723.52	2620.77	6223.61	6278.07	6405.07
6	H	3045.27	3069.47	3037.08	4888.90	4939.38	4809.75
	ECT/LFT	4011.47	4056.45	4060.32	6415.33	6433.08	6418.11
	LFT/ECT	4436.92	4430.58	4354.03	7428.57	7369.75	7466.37
	EFT/ECT	4438.03	4439.52	4634.05	6841.67	7039.45	6953.17
8	H	4193.35	4198.02	4172.58	5641.15	5591.25	5618.78
	ECT/LFT	5489.75	5508.52	5480.27	7335.15	7399.20	7372.33
	LFT/ECT	5978.02	6038.58	6073.50	8377.65	8266.07	8155.85
	EFT/ECT	6132.10	6115.13	6053.38	8159.60	8289.48	8118.80

5 结论(Conclusions)

本文研究了存在不确定返工的航空发动机装配问题,建立了重调度和班组自重构优化模型,并设

计了一种有效的装配线重调度及自重构集成优化算法.实验结果表明重构后的装配线具备更低的装配成本,验证了重构的必要性.与3种调度规则ECT/

LFT、LFT/ECT 和 EFT/ECT 的对比结果中可以看出, 本文提出的工序排序方法在以最小化产品完工时间为优化指标的调度问题中表现较优。

具有柔性人力资源的航空发动机装配车间是一个复杂系统, 装配组的技能柔性配置与车间装配效率有密切关系, 如何根据具体的环境通过培训等方式合理地优化装配组的技能分布无疑将是进一步研究的重点。

### 参考文献(References):

- [1] YAN Hongsen, LIU Fei. Knowledgeable manufacturing system-a new kind of advanced manufacturing system [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2001, 7(8): 7-11.  
(严洪森, 刘飞. 知识化制造系统-新一代先进制造系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(8): 7-11.)
- [2] YANG Renzi, YAN Hongsen. Selection of knowledge mesh based on fuzzy relational clustering [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(1): 8-16.  
(杨人子, 严洪森. 基于模糊聚类的知识网选择方式 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(1): 8-16.)
- [3] WAN Xiaoqin, YAN Hongsen, WANG Zheng. Scheduling and self-reconfiguration of an aircraft engine assembly line in knowledgeable manufacturing [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(1): 136-146.  
(万晓琴, 严洪森, 汪峥. 知识化制造环境下航空发动机装配线调度及自重构 [J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 136-146.)
- [4] PATHUMNAKUL S, EGBELU P J. An algorithm for minimizing weighted earliness penalty in assembly job shops [J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 103(1): 230-245.
- [5] WANG Chengen, YU Hong, ZHANG Wenlei, et al. Object-oriented aero-engine assembly models [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(5): 942-948.  
(王成恩, 于宏, 张闻雷, 等. 面向对象的航空发动机装配模型 [J]. 计算机集成制造, 2010, 16(5): 942-948.)
- [6] TANG Xinmin, ZHONG Shisheng. Aero-engine assembly sequence planning based on discrete-time pontryagin's minimum principle [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(11): 1221-1225.  
(汤新民, 钟诗胜. 基于离散时间最优控制的航空发动机装配序列规划 [J]. 控制与决策, 2008, 23(11): 1221-1225.)
- [7] WANG Haoxiang, YAN Hongsen, WANG Zheng. Adaptive assembly scheduling of aero-engine based on double-layer Q-learning in knowledgeable manufacturing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(12): 3000-3010.  
(汪浩祥, 严洪森, 汪峥. 知识化制造环境中基于双层Q学习的航空发动机自适应装配调度 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(12): 3000-3010.)
- [8] JIANG Tianhua, YAN Hongsen, WANG Zheng. Self-evolution of aircraft engine assembly workshop in the knowledgeable manufacturing environment [J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7): 1217-1225.  
(姜天华, 严洪森, 汪峥. 知识化制造环境下航空发动机装配车间自进化 [J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1217-1225.)
- [9] BUSCHER U, LINDNER G. Optimizing a production system with rework and equal sized batch shipments [J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(2): 515-535.
- [10] SARKER B R, JAMAL A M M, MONDAL S. Optimal batch sizing in a multi-stage production system with rework consideration [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 184(3): 915-929.
- [11] GUO Yandong, WANG Qing, HUANG Min. Rescheduling with release time to minimize sum of waiting time considering waiting constraint of original loads [J]. *Acta Automation Sinica*, 2013, 39(12): 2100-2110.  
(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.)
- [12] KANG Y H, SHIN H J. An adaptive scheduling algorithm for a parallel machine problem with rework processes [J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(1): 95-115.
- [13] LI Lin, LIU Shixin, TANG Jiafu. Multistage order-delivery problem with information flow under B2C environment [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(10): 1293-1299.  
(李琳, 刘士新, 唐加福. B2C环境下带信息流的多阶段订单配送问题 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(10): 1293-1299.)
- [14] ZHANG L, GAO L, LI X. A hybrid genetic algorithm and tabu search for a multi-objective dynamic job shop scheduling problem [J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(12): 3516-3531.
- [15] HANSEN P, MLADENOVIC N. Variable neighborhood search: principles and applications [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 449-467.
- [16] BOUFFARD V, FERLAND J A. Improving simulated annealing with variable neighborhood search to solve the resource-constrained scheduling problem [J]. *Journal of Scheduling*, 2007, 10(6): 375-386.
- [17] NATARAJAN K, MOHANASUNDARAM K M, BABU B S, et al. Performance evaluation of priority dispatching rules in multi-level assembly job shops with jobs having weights for flowtime and tardiness [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 31(7/8): 751-761.

### 作者简介:

**万晓琴** (1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为知识化制造系统生产调度与自重构, E-mail: xqwan87@163.com;

**严洪森** (1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为知识化制造、生产计划与调度, E-mail: hsyang@seu.edu.cn.