

面向航空发动机的知识化制造系统拖期调度与自重构

万晓琴[†], 严洪森

(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)

摘要: 针对某航空发动机装配线装配效率低、工人分配不合理等问题, 建立面向航空发动机的知识化制造系统拖期调度和班组自重构优化模型. 提出一种启发式算法, 实现生产调度与班组配置的协同优化. 在算法调度层中, 针对航空发动机装配过程存在复杂约束这一特点, 证明与产品拖期优化目标相关的工序排序性质, 设计相应工序调整算法, 给出工序在并行装配组上的初始分配方案和优化方案. 在重构层, 根据系统负载均衡的原则优化各装配班中装配组的数量. 仿真实验结果表明了模型和所提出算法的有效性.

关键词: 知识化制造; 自重构; 航空发动机; 装配; 拖期

中图分类号: TH165 **文献标志码:** A

Tardiness scheduling and self-reconfiguration of knowledgeable manufacturing oriented to aircraft engine

WAN Xiao-qin[†], YAN Hong-sen

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China; b. Key Laboratory of Measurement and Control of CSE of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Aiming at the problem of low assembly efficiency and unreasonable worker assignment of an aircraft engine assembly line, an optimization model of tardiness scheduling and teams self-reconfiguration of knowledgeable manufacturing system oriented to aircraft engines is constructed. A heuristic algorithm is proposed to optimize the schedule and the numbers of teams simultaneously. In the scheduling optimization layer, according to the characteristic of an aircraft engine with complex assembly precedence constraints, the properties of dominance relations of operations involving the objective of product tardiness optimization are proved and its corresponding operation adjustment algorithm is proposed. An initial assignment of operations on parallel assembly teams is given, and a modified procedure is described. In the self-reconfiguration layer, the numbers of teams are adjusted on the basis of a workload balancing principle. The simulation experimental results show the effectiveness of the proposed model and algorithms.

Keywords: knowledgeable manufacturing; self-reconfiguration; aircraft engine; assembly; tardiness

0 引言

市场竞争的加剧对制造企业快速适应市场变化的能力提出了更高的要求. 在此背景下, 产生了知识化制造这种新的制造模式, 用于解决现有制造模式中存在的模式单一、缺乏灵活性、不能满足企业需求的多样性和重复研发等问题^[1]. 以知识化制造理念构建的知识化制造系统(KMS)具备自适应、自进化和自重构等特征. 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^[2]. 知识化制造系统通过提炼制造系统中存在的知识, 并分析其特征, 从而掌握一个制造系统与其他制造系统相似的“共性知识”和自身特有的“个性知识”. 通常不同制造系统间存在差别, 对其研究应具体问题具体分析.

航空发动机装配在整个发动机制造过程中占有十分重要的位置, 其装配过程除了具有装配作业车间调度问题(AJSSP)的一般特征, 还存在多次分解洗涤

收稿日期: 2016-02-18; 修回日期: 2016-05-03.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(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项目.

作者简介: 万晓琴(1987-), 女, 博士生, 从事知识化制造系统生产调度与自重构的研究; 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: xqwan87@163.com

后重新装配的过程. 目前关于航空发动机装配线调度问题研究得较少. 文献[3]建立了面向对象的航空发动机装配模型, 实现了装配数据的集成化管理. 文献[4]采用基于优先关系的装配子网对发动机部件装配序列建模, 将装配序列规划问题转化为最优变迁激发序列问题. 文献[5]针对发动机装配过程中自适应调度问题进行了研究, 提出一种双层Q学习算法, 将调度问题转化为强化学习问题. 文献[6]提出了一种基于可行域的双层遗传算法, 有效解决了具有产品动态到达的装配车间自进化问题. 对于一般AJSSP, 解决方案主要是基于分派规则的调度^[7-13]和元启发式调度算法^[14-17].

当生产需求发生较大变化时, 简单地对生产调度方案或生产工艺路线进行调整无法实现生产能力的提升, 此时需要对装配线进行重构. 在航空发动机的装配过程中, 工人手工操作的工序占有很大比重, 一定时期内机器设备、工装夹具等变化较小, 因此可以通过合理地重构人力资源改变系统的构形. 装配线的重构和调度是相互关联的, 目前鲜少有关于装配线调度和重构集成优化问题的研究. 文献[2]提出的基于工序局部最优排序的优化算法和基于班组利用率的重构算法在工序提前期和完工时间指标中表现较优, 但并不适用于拖期性能指标, 文献中也没有提出工序在并行装配组上的分配方案和优化算法.

鉴于此, 本文在已有研究成果的基础上, 以最小化加权拖期成本和班组重构成本为优化目标建立了航空发动机装配线调度和人力资源重构集成优化模型. 提出了将调度与重构问题协同求解的启发式算法, 依据理想调度下的工序装配时间的重叠情况对工序在并行装配组上进行初始分配, 并给出了改进方案. 给出以最小化拖期目标的工序排序方法, 并与工序局部最优排序算法^[2]相结合优化工序装配顺序. 利用装配组的平均负载作为系统负载平衡的指标, 优化装配班中的装配组数量. 仿真实验结果表明了模型和所提出算法的有效性.

1 问题描述与模型

1.1 问题描述

航空发动机由数以千计的零件和由这些零件组成的组件、部件、单元体、系统附件、成品件按照规定的技术标准、技术要求组装在一起. 由于航空发动机是飞机的核心部分, 对其质量和精度要求极高, 其装配过程至少要经过一次装配(部装-传装-总装)、工厂试车、分解洗涤、故障检验、二次装配(部装-传装-总装)、检验试车等阶段^[2]. 若发动机检验试车不合格,

则需要分解洗涤和故障检验, 然后重新进入装配阶段, 直到发动机试车合格为止.

航空发动机的装配流程可以用一种树形图来表示, 所有子工序完成后才能进行父工序的装配. 装配操作由特定的装配班完成, 如总装班、钣金班、前后机匣班等. 每个装配班中包含一个或多个相同的装配组, 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. 为方便表述, 将加工、装配操作统称为装配.

1.2 数学模型

本文以某航空发动机装配生产线为研究背景, 建立航空发动机装配调度和装配班自重构集成优化模型. 该模型数学描述为: 假设装配线需要装配 n 台发动机, 每台发动机包含的工序数为 $K_i, i = 1, 2, \dots, n$. 有 m 个装配班, 每个装配班内包含并行装配组的数量为 $b_l, l = 1, 2, \dots, m$. 假设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; 各装配班之间可以相互调用装配组; 各装配组中包含工人数相同; 每台发动机经过两次装配后即可出厂; 装配车间内工厂试车、分解洗涤、故障检验的能力充足, 时间已知.

根据以上描述, 建立航空发动机调度和装配班自重构集成优化数学模型, 参数和符号定义如下: n 为发动机数量, $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$; m 为装配班种类, $l \in \{1, 2, \dots, m\}$; K_i 为第 i 台发动机的工序数, $k, k' \in \{1, 2, \dots, K_i\}$; b_l 为第 l 个装配班配备的装配组数目; G 为装配组总数, 装配组按顺序依次进行编号, $G = \sum_{l=1}^m b_l, g, g' \in \{1, 2, \dots, G\}$; e_i 为第 i 台发动机在工厂试车、分解洗涤、故障检验阶段所需时间总和; δ 为发动机装配次数; $o_{i\delta k}$ 为第 i 台发动机第 δ 个装配阶段内台编号为 k 的工序, 记 $o_{i\delta k}$ 为 $o_{i\delta k}$ 的父工序; $\pi_{i\delta k}$ 为 $o_{i\delta k}$ 所在的装配班编号, $\pi_{i\delta k} \in \{1, 2, \dots, m\}$; $\varepsilon_{\pi_{i\delta k}}$ 为 $o_{i\delta k}$ 所在的装配组编号, 且每次重构后, 装配组按顺序重新编号; c_{i1} 为第 i 台发动机一次装配阶段的完工时间; $s_{i\delta k}$ 为 $o_{i\delta k}$ 的开工时间; $c_{i\delta k}$ 为 $o_{i\delta k}$ 的完工时间; $t_{i\delta k}$ 为 $o_{i\delta k}$ 的装配时间; D_i 为第 i 台发动机的交货期; C_i 为第 i 台发动机的完工时间; T_i 为第 i 台发动机的拖期时间; M 为一个较大的正数; χ_l 为第 l 个装配班中增加或减少的装配组数目, $\chi_l > 0$ 表示第 l 个装配班中增加 χ_l 个装配组, $\chi_l < 0$ 表示第 l 个装配班中减少 $|\chi_l|$ 个装配组; ξ_i 为第 i 台发动机的拖期惩罚成

本; φ_l 为第 l 个装配班中因装配组数增加而带来的相关成本, 包括装配组中工人培训成本和因工人熟练程度不一等因素带来的生产成本; α, β 为成本加权系数; $X_{i\delta k j\delta' k'}$ 为 1 表示工序 $o_{i\delta k}$ 和 $o_{j\delta' k'}$ 由相同编号的装配组装配且 $o_{i\delta k}$ 在 $o_{j\delta' k'}$ 之前装配, 为 0 反之。

基于上述问题描述和参数定义, 考虑调度和重构过程中的目标和约束, 建立如下数学模型:

$$\min \alpha \sum_{i=1}^n \xi_i T_i + \beta \sum_{l=1}^m \varphi_l \max(\chi_l, 0). \quad (1)$$

$$\text{s.t. } T_i = \max(0, C_i - D_i), \forall i; \quad (2)$$

$$c_{i\delta k} - s_{i\delta k} = t_{i\delta k}, \forall i, \delta, k; \quad (3)$$

$$s_{i\delta k} - c_{i\delta k} \geq 0, \forall i, \delta, k; \quad (4)$$

$$s_{i\delta k} \geq 0, \forall i, \delta, k; \quad (5)$$

$$s_{i2k} \geq c_{i1} + e_i, \forall i, k; \quad (6)$$

$$c_{j\delta' k'} - c_{i\delta k} + M(1 - X_{i\delta k j\delta' k'}) \geq t_{j\delta' k'}, \quad \forall i, j, \delta, \delta', k, k'; \quad (7)$$

$$c_{i\delta k} - c_{j\delta' k'} + M X_{i\delta k j\delta' k'} \geq t_{i\delta k}, \quad \forall i, j, \delta, \delta', k, k'; \quad (8)$$

$$|\min(\chi_l, 0)| \leq b_l, \forall l; \quad (9)$$

$$\sum_{l=1}^{l'-1} (b_l + \chi_l) < \varepsilon_{\pi_{i\delta k}} \leq \sum_{l=1}^{l'} (b_l + \chi_l), \pi_{i\delta k} = l'; \quad (10)$$

$$X_{i\delta k j\delta' k'} \in \{0, 1\}, \forall i, j, \delta, \delta', k, k'. \quad (11)$$

式(1)为优化目标, 使产品拖期惩罚成本和重构成本之和最小; 式(2)为产品拖期表达式; 式(3)表明工序一旦开始就不允许中断; 式(4)保证父工序的开工时间不能早于子工序的完工时间; 式(5)表示所有工序可以在零时刻开始操作; 式(6)表明发动机的二次装配必须在一次装配结束后并经过工厂试车、分解洗涤和故障检验之后才能进行; 式(7)和(8)确保一个装配组在同一时刻只能装配一道工序; 式(9)表示装配班中可调出的装配组数不能大于其总数; 式(10)保证重构后工序所在的装配班不变; 式(11)定义 $X_{i\delta k j\delta' k'}$ 为 0/1 变量。

2 问题求解

根据航空发动机装配问题的特点, 提出一种启发式算法。下面详细介绍算法各部分的实施步骤。

2.1 工序局部最优排列

首先以结构简单的产品装配树(图1)为例表明工序局部最优排序性质的推导过程。图1中结点表示: 工序-装配组-装配时间。例如 2-3-1 表示产品编号

为 2 的工序在编号为 3 的装配组上进行装配, 装配时间为 1 小时。产品 A 和 F 的交货期分别为 28 和 21。

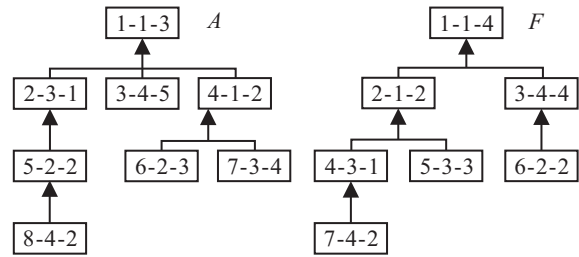


图1 产品装配结构

若忽略装配组的装配能力, 仅考虑单个产品工序间装配顺序约束, 假定每个产品的完工时间等于各自的交货期, 然后从图1中产品的根节点开始, 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, 可获得产品的一种调度方案, 称为理想调度, 如图2所示。在这种调度情况下, 两产品准时完工, 拖期惩罚为零。

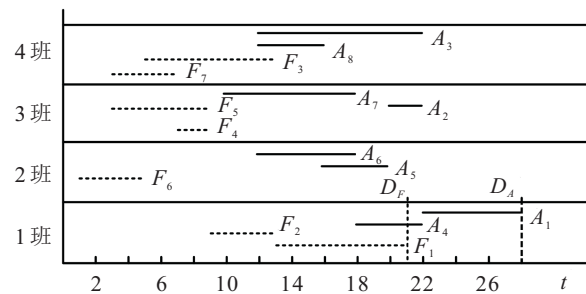


图2 产品理想调度方案

可见, 图2不是一个可行的调度方案, 违背了每个装配组在同一时刻只能装配一道工序的原则, 工序在装配组上的装配时间存在冲突。为解决这一问题, 需要将工序的开工时间提早或推迟。若工序开工时间推迟, 则导致该工序的所有父工序开工时间也相应延迟, 最终会使产品不能准时完工, 带来拖期惩罚。

为解决工序冲突问题, 给出如下两个定义。其中: $Pre(ik)$ 为第 i 个产品编号为 k 的工序的子工序集, $Suc(ik)$ 为父工序集; Mt_{ik} 为工序 k 所在的装配组可以开始进行装配操作的时刻。

定义1^[2] 第 i 个产品编号为 k 的工序最早可开工时刻 SP_{ik} 定义为: 若 $Pre(ik)$ 为空集, 则 $SP_{ik} = Mt_{ik}$, 否则, $SP_{ik} = \max(Mt_{ik}, \max(C_{Pre(ik)}))$, 其中 $C_{Pre(ik)}$ 为工序 k 的所有子工序的完工时间集合。

定义2^[2] 第 i 个产品编号为 k 的工序(根节点除外)最迟完工时刻 DP_{ik} 定义为

$$DP_{ik} = \max(S_{Suc(ik)}),$$

其中 $S_{Suc(ik)}$ 为工序 k 的所有父工序的开始时间集合。定义最后一道工序的最迟完工时刻为 D_i 。

考虑以最小化拖期惩罚 $(\sum_{i=1}^n \xi_i T_i)$ 为调度优化目标, 针对装配组上工序装配时间冲突问题, 根据工序的最早可开工时刻SP和最迟完工时刻DP的不同, 给出以下性质.

性质1 当

$$DP_{jk'} - t_{ik} - t_{jk'} \leq SP_{ik} < DP_{ik} - t_{ik},$$

$$DP_{ik} - t_{ik} - t_{jk'} \leq SP_{jk'} < DP_{jk'} - t_{jk'}$$

时, 对于装配时间相互冲突的两个工序 k 和 k' , 若满足

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

条件, 则工序 k 在 k' 之前装配较优, 且有 $s_{ik} = SP_{ik}$, $s_{jk'} = SP_{ik} + t_{ik}$, 否则, k' 在 k 之前装配较优, 且有 $s_{ik} = SP_{jk'} + t_{jk'}$, $s_{jk'} = SP_{jk'}$.

证明 两工序 k 和 k' 的装配时间相互冲突, 如图3(a)所示, 当其最早可开工时刻和最晚完工时刻满足

$$DP_{jk'} - t_{ik} - t_{jk'} \leq SP_{ik} < DP_{ik} - t_{ik},$$

$$DP_{ik} - t_{ik} - t_{jk'} \leq SP_{jk'} < DP_{jk'} - t_{jk'}$$

时, 若工序 k 在 k' 之前装配, 则两个工序的相对位置有两种, 如图3(b)中 P_1 和 P_2 所示. 当 k 和 k' 从 P_1 位置逐渐向右移动到 P_2 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, 导致产品拖期完工. 随着工序的右移, 产品的拖期时间会逐渐增加. 所以, 工序 k 和 k' 在 P_1 位置使得总拖期成本增量最小.

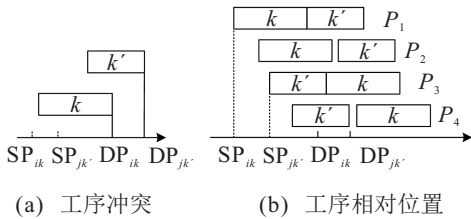


图3 工序排列示意图

同理, 若 k' 在 k 之前装配, 则工序在 P_3 位置最优. 根据上述分析, 只需比较图3(b)中工序处在 P_1 和 P_3 位置的总拖期惩罚成本的增量大小即可.

工序在 P_1 位置的总拖期成本增量为

$$\Delta Z_{P_1} = \xi_j (SP_{ik} + t_{ik} + t_{jk'} - DP_{jk'});$$

工序在 P_3 位置的总成本增量为

$$\Delta Z_{P_3} = \xi_i (SP_{jk'} + t_{ik} + t_{jk'} - DP_{ik}).$$

当

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

成立时, 可推导出 $\Delta Z_{P_1} < \Delta Z_{P_3}$, 即工序 k 在 k' 之前装配较优, 且有 $s_{ik} = SP_{ik}$, $s_{jk'} = SP_{ik} + t_{ik}$. 同理, 当

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

成立时, 可推导出 $\Delta Z_{P_1} \geq \Delta Z_{P_3}$, 工序 k' 在 k 之前装配较优, 且有 $s_{ik} = SP_{jk'} + t_{jk'}$, $s_{jk'} = SP_{jk'}$. □

性质2 当 $SP_{ik} \geq DP_{ik} - t_{ik}$, $SP_{jk'} \geq DP_{jk'} - t_{jk'}$ 时, 对于装配时间相互冲突的两个工序 k 和 k' , 若满足条件

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

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

性质3 当

$$DP_{jk'} - t_{ik} - t_{jk'} \leq SP_{ik} < DP_{ik} - t_{ik},$$

$$SP_{jk'} \geq DP_{jk'} - t_{jk'}$$

时, 对于装配时间相互冲突的两个工序 k 和 k' , 若满足条件

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

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

性质4 当 $SP_{ik} < DP_{ik} - t_{ik} - t_{jk'}$ 时, 对于装配时间相互冲突的两个工序 k 和 k' , k 在 k' 之前装配较优; 当 $SP_{jk'} < DP_{jk'} - t_{jk'} - t_{ik}$ 时, 工序 k' 在 k 之前装配较优.

根据性质1~性质4, 由文献[2]中算法1的思路可以得到一个工序局部最优的调度方案. 主要思想是: 1) 计算出理想调度情况下所有工序的DP和SP; 2) 找出DP值最小的工序, 检测是否与其他工序的装配时间存在冲突, 若没有冲突, 则该工序在其最早可开工的时刻立即装配; 若有冲突, 则根据性质1~性质4解决工序冲突问题, 并确定工序的装配时间; 3) 反复执行1)和2), 直到全部工序调度完成.

2.2 工序装配顺序调整算法

利用上述性质, 可以在工序装配时间有冲突时进行局部最优排序, 获得一个工序局部最优的调度方案 S_{du} , 工序装配顺序序列 SQ 和总成本 Z . 下面从全局优化的角度优化工序的装配顺序. 首先将拖期完工的产品所包含的工序提取出来; 然后判断集合中工序的完工时间是否晚于最迟完工时刻DP, 若是, 则在不违反装配约束的前提下, 将工序在装配组上的装配顺序提前.

算法1 工序装配顺序调整算法.

Step 1: 初始化. 循环最大次数为 r_{max} , $r \leftarrow 1$, $SQ_1 \leftarrow SQ$.

Step 2: 将 SQ_1 中可由装配组 $g (g = 1, 2, \dots, G)$ 进行装配的工序依次提取并存入矩阵 MG_g 中, 装配组 g 可装配的总工序数记为 ct_g .

Step 3: 将所有拖期完工的产品包含的工序按照装配顺序依次记入矩阵 W 中, 工序数量记为 p_{max} . 令 $p \leftarrow 1$.

Step 4: 删除 SQ_1 中的工序 $W(p)$, 找出 $W(p)$ 的所有子工序在 SQ_1 中的最大位置, 记为 d_{max} .

Step 5: 找出 $W(p)$ 所在的装配组 g , 确定 $W(p)$ 在 MG_g 中的位置 d .

Step 6: 若 $d > 1$, 则找出 MG_g 中 $d - 1$ 位置的工序在 SQ_1 中的位置, 记为 d_1 , 否则转至 Step 10.

Step 7: 若 $d > d_{max}$, 则将工序 $W(p)$ 插入到 SQ_1 中 $d_1 - 1$ 的位置, 将原 SQ_1 中 $d_1 - 1$ 位置及其后面的元素依次向后移一位并转至下一步, 否则转至 Step 10.

Step 8: 根据工序的装配顺序序列 SQ_1 可以计算调度结果 Sdu_1 和总成本 Z .

Step 9: 若 $Z_1 \leq Z$, 则有 $SQ \leftarrow SQ_1, Sdu \leftarrow Sdu_1, Z \leftarrow Z_1$, 否则, $SQ_1 \leftarrow SQ$.

Step 10: $p \leftarrow p + 1$, 若 $p > p_{max}$, 则转至下一步, 否则转至 Step 4.

Step 11: $r \leftarrow r + 1$, 若 $r > r_{max}$, 则转至下一步, 否则转至 Step 2.

Step 12: 算法结束.

2.3 工序在并行装配组上的分配

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. 下面给出工序在并行装配组上的初始分配方法, 尽可能将装配时间有冲突的工序分配到不同的装配组上进行装配.

算法 2 工序初始分配算法.

Step 1: 找装配班 $l (l = 1, 2, \dots, m)$ 可装配的工序集合为 $AS_l = \{o_{i\delta k}, \pi_{i\delta k} = l\}$, 装配班包含 b_l 个装配组.

Step 2: 将 AS_l 中的工序按照 SP 值从小到大的顺序排列.

Step 3: 将 AS_l 中前 $1 - b_l$ 个工序依次分配到第 $1 - b_l$ 个并行装配组上进行装配, 记装配组 $1 - b_l$ 上已分配的工序集分别为 $OS_1, OS_2, \dots, OS_{b_l}$.

Step 4: 从 AS_l 中第 $b_l + 1$ 个工序 $o_{i\delta k}$ 开始, 计算工序 $o_{i\delta k}$ 与 $OS_q (q = 1, 2, \dots, b_l)$ 中工序之间装配重叠时间之和, 记为 Sum_q .

Step 5: 从 $Sum_1, Sum_2, \dots, Sum_{b_l}$ 中选出最小值所对应的装配组编号, 记为 q^* , 将工序 $o_{i\delta k}$ 分配到装

配班 l 的第 q^* 个装配组进行装配.

Step 6: 重复 Step 1~Step 5, 直到所有工序分配完毕.

Step 7: 算法结束.

由于工序在装配组上的分配方案会直接影响到调度解的优劣, 下面给出工序在装配组的分配优化方案.

算法 3 工序在并行装配组上分配优化算法.

Step 1: 初始化, 循环最大次数为 r_{max} , $r = 1, d = 1$.

Step 2: 找工序 $SQ(d)$ 所在的装配班编号, 记为 l , 装配班 l 包含的并行装配组数量记为 b_l .

Step 3: 若 $b_l = 1$, 则转至 Step 4, 否则将 $SQ(d)$ 依次分配到编号为 $\sum_{l'=1}^{l-1} b_{l'} + 1, \sum_{l'=1}^{l-1} b_{l'} + 2, \dots, \sum_{l'=1}^l b_{l'}$ 的装配组上进行装配. 计算 $SQ(d)$ 在不同装配组下的产品总拖期惩罚, 选择具有最小惩罚成本的装配组作为 $SQ(d)$ 的装配班组.

Step 4: $d \leftarrow d + 1$, 若 $d > L$, 则转至 Step 5, 否则转至 Step 3.

Step 5: $r \leftarrow r + 1$, 若 $r > r_{max}$, 则转至 Step 6, 否则转至 Step 2.

Step 6: 算法结束.

在整个算法的调度过程中, 首先根据算法 2 和文献 [2] 中的算法获得工序分配和产品调度的初始方案, 然后将算法 1 和算法 3 交替迭代, 进一步全局优化调度解.

2.4 装配班重构

利用装配组的平均负载作为系统负载平衡的指标, 优化装配班中的装配组数量.

算法 4 装配班重构算法.

Step 1: 求解各装配线上装配组的平均负载为

$$Ld = \sum_{i=1}^n \sum_{\delta=1}^2 \sum_{k=1}^{K_i} t_{i\delta k} / \sum_{l'=1}^m b_{l'}. \quad (12)$$

Step 2: 求解各装配班的实际负载为

$$Lb_l = \sum_{i=1}^n \sum_{\delta=1}^2 \sum_{k=1}^{K_i} t_{i\delta k}, \pi_{i\delta k} = l. \quad (13)$$

Step 3: 计算各装配班的装配组数量 $b_l^* = Lb_l / Ld$, 令 $\delta b_l = b_l - b_l^*$.

Step 4: 在满足 $\delta b_l < 0$ 条件的装配班中, 采用轮盘赌的方法选择装配班 l^+ , 令 $b_{l^+} \leftarrow b_{l^+} + 1$.

Step 5: 在满足 $\delta b_l > 0$ 和 $b_l > 1$ 条件的装配班中, 选择 δb_l 值最大的装配班, 令 $b_{l^-} \leftarrow b_{l^-} - 1$.

Step 6: 算法结束.

2.5 算法框架

根据以上描述,给出算法框架如图4所示.算法主程序是重构层与调度层之间的循环优化.在调度

层中,首先给出了工序在并行装配组的初始分配方案和排列方案,然后由算法1和算法3交替迭代运行优化最终调度方案.

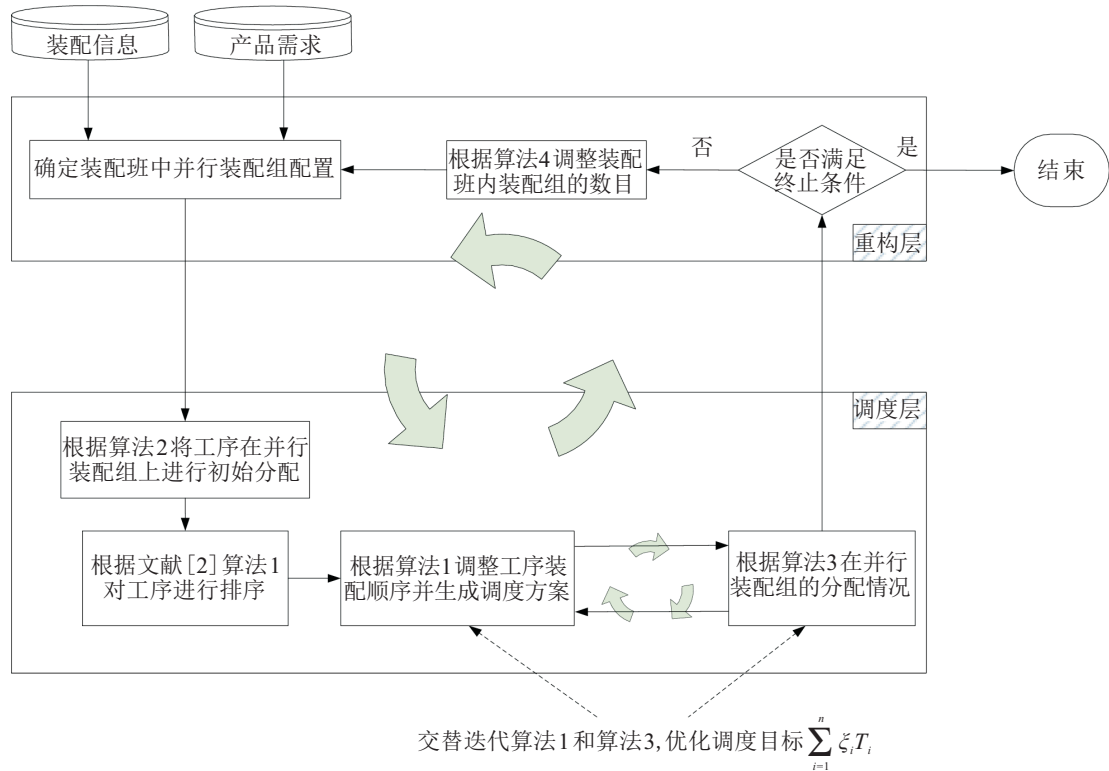


图4 算法框架

3 数值实验

数值实验由两部分组成:第3.1节通过实例表明了将生产调度和班组重构集成优化的必要性,验证了数学模型和算法的有效性;第3.2节通过与其他算法的对比来检验本文提出的工序排列性质在装配作业车间调度问题上的有效性.

3.1 应用实例

以某航空发动机装配车间为例,说明生产调度与班组重构集成优化的必要性,并验证模型与算法的有效性.该装配车间有前后机匣班、附件机匣班、装配班、机加班、平衡班、加力班、机匣导向班、传装班、钣焊班和总装班共10个装配班.装配班中因组数增加带来的培训和调整费用分别为[200, 300, 200, 250, 360, 150, 250, 310, 200, 150].假设初始时刻每个装配班有2个能力相同的装配组.装配车间可装配A、B、C三种类型的发动机,限于篇幅,表1列出了A型发动机的部分装配信息.发动机的交货期计算如下:

$$D_i = f \times \text{TWKCP}_i. \quad (14)$$

其中: f 为交货期松紧因子, TWKCP_i 为产品关键路径上工序的装配时间之和.

为了验证算法重构和调度优化性能,构造12组测试问题.测试问题参数如下:发动机需求数量为4台(包括2台A型,1台B型,1台C型)和6台(包括2台

表1 某航空发动机装配信息

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
9	5	子装配体	装配班	4.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
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	36	通风机	前后机匣班	3

表2 班组重构前后成本对比

n	α	β	$f = 1.5$		Gap%	$f = 2$		Gap%
			重构	不重构		重构	不重构	
$n = 4$	0.8	0.2	2140.6	4345.2	50.7	392.5	988.1	60.3
	0.5	0.5	1685.4	2717.0	38.0	143.1	215.3	33.5
	0.2	0.8	944.5	1148.7	17.8	133.5	170.3	21.6
$n = 6$	0.8	0.2	8865.7	16936.5	47.7	4949.9	10237.0	51.7
	0.5	0.5	6264.6	10323.1	39.3	3232.4	6574.7	50.8
	0.2	0.8	3110.8	4092.7	24.0	1943.7	2676.7	20.0

A型,2台B型,2台C型),交货期松紧因子 $f \in \{1.5, 2\}$,成本权重系数 $\alpha, \beta \in \{0.2, 0.5, 0.8\}$,拖期惩罚费用在10~20之间随机产生. 每个问题独立运行10次,仿真结果如表2所示. 定义装配线重构改善率为

$$\text{Gap} = 100 \times (\bar{Z}_0 - \bar{Z}_1) / \bar{Z}_0. \quad (15)$$

其中: \bar{Z}_0 为重构前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可见,相比于原始装配线,重构后的装配线总成本更小,平均改善率为38.0%,表明重构后的装配线调度安排和人员配置更加合理. 当装配班重构成本系数 β 逐渐减小时,重构后的装配线平均改善率分别为20.9%、40.4%和52.6%. 可以看出,重构成本在总成本中所占比例越小,重构后的装配线优势越明显.

3.2 仿真实验

为了验证本文提出的4种工序排列性质在装配作业车间调度问题中的作用,针对不同规模测试问题进行对比仿真实验. 针对如图5所示的产品树状装配结构,构造如下3种不同层次的产品装配结构树:

1) S_1 : 第1层中的工序包含的子工序数量在 $\{2, 3, 4, 5\}$ 中随机产生,第2层中的每个工序包含的子工序数量为0;

2) S_2 : 第1层中的工序包含的子工序数量在 $\{2, 3, 4, 5\}$ 中随机产生,第2层中的每个工序包含的子工序数量在 $\{1, 2\}$ 中随机产生,第3层中的每个工序包含的子工序数量为0;

3) S_3 : 第1层中的工序包含的子工序数量在 $\{2, 3, 4, 5\}$ 中随机产生,第2、3层中的每个工序包含的子工序数量在 $\{1, 2\}$ 中随机产生,第4层中的每个工序包含的子工序数量为0.

产品数量 $n \in \{10, 20, 40\}$,装配班 $m \in \{4, 8, 10\}$,每个装配班中包含一个装配组. 工序装配时间服从 $[1, 5]$ 的均匀分布,产品拖期惩罚服从 $[1, 6]$ 的均匀分布,交货期由式(14)产生,其中 $f \in \{1.5, 2\}$.

采用如下两种算法进行对比分析:

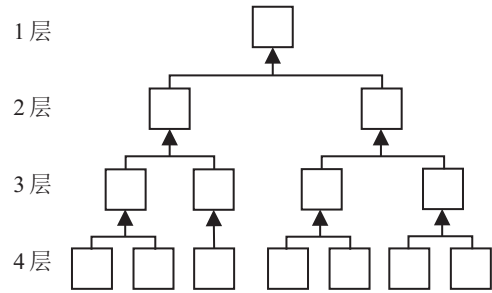


图5 树状装配图

1) 将文献[2]中算法作为本文对比算法,在算法仿真时,将单位时间提前完工惩罚参数成本置零,该算法记为HC.

2) 文献[12]提出的SEFT/ECT规则在带有拖期的性能指标中表现较优. 在对比算法中,采用SEFT/ECT规则替代工序排列性质对工序进行排序,该算法记为HS.

所有程序在Matlab平台上运行,运行环境为Intel (R) Core (TM) i5-4590 CPU @ 3.30 GHz, RAM 8 G,每个实验独立运行10次. 将本文提出的算法记为H,与算法HC和HS进行比较,表3~表5列出了各组实验中总成本平均值、算法运行时间和成本偏离率,偏离率定义为

$$\theta = 100 \times (Z - Z^*) / Z^*. \quad (16)$$

其中(在同一规模问题下): Z 为算法的平均目标值, Z^* 为算法的最优平均目标值, θ 值越小表明算法性能越优.

由表3~表5可见,相较于文献[2]的排序算法和SEFT/ECT调度规则算法,本文提出的工序排列算法在针对拖期优化目标的不同规模装配作业车间调度问题中均能获得较优解. 在 $n \in \{10, 20, 40\}$ 三种不同规模的问题下,算法HC的平均偏差率分别为10.9%、11.3%和13.3%,算法HS的平均偏差率分别为31.8%、35.8%和44.0%. 可以看出,随着问题规模变大,本文算法逐渐显露优势. 在算法运行时间方面,算法HS求解问题所需时间最短,但获得的解的质量最差. 对于产品结构复杂(S_3)的调度问题,相较于算法

表3 算法结果对比($n = 10$)

$n \times m$ 算法	$f = 1.5$									$f = 2$									
	S_1			S_2			S_3			S_1			S_2			S_3			
	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	
10×4	H	508.3	0.0	0.3	1253.6	0.0	1.3	2844.5	0.0	7.9	405.5	0.0	0.2	1138.3	0.0	1.2	2800.3	0.0	8.0
	HC	553.5	8.9	0.4	1391.3	11.0	1.8	3232.2	13.6	9.8	445.3	9.8	0.4	1270.2	11.6	1.9	3142.6	12.2	11.7
	HS	608.3	19.7	0.2	1620.2	29.2	1.0	3978.1	39.9	4.6	540.2	33.2	0.1	1635.6	43.8	0.7	3794.3	35.5	4.6
10×8	H	214.3	0.0	0.2	621.6	0.0	1.8	1349.2	0.0	6.0	138.4	0.0	0.2	435.8	0.0	0.7	1049.2	0.0	5.4
	HC	230.4	7.5	0.3	718.0	15.5	2.8	1417.8	5.1	7.9	152.0	9.8	0.3	484.1	11.1	1.1	1117.5	6.5	7.8
	HS	246.8	15.2	0.1	840.4	35.2	1.1	1768.4	31.1	3.6	170.0	22.8	0.1	592.1	35.9	0.4	1332.9	27.0	3.3
10×10	H	175.2	0.0	0.2	396.7	0.0	1.0	1040.7	0.0	5.6	111.5	0.0	0.2	324.3	0.0	1.0	766.5	0.0	4.8
	HC	188.9	7.8	0.3	491.8	24.0	1.6	1101.4	5.8	8.0	130.2	16.8	0.4	354.4	9.3	1.6	842.4	9.9	7.1
	HS	220.6	25.9	0.1	561.7	41.6	0.6	1372.2	31.9	3.0	147.0	31.8	0.1	473.7	46.1	0.5	1123.2	46.5	2.5

表4 算法结果对比($n = 20$)

$n \times m$ 算法	$f = 1.5$									$f = 2$									
	S_1			S_2			S_3			S_1			S_2			S_3			
	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	
20×4	H	1961.8	0.0	1.1	5947.9	0.0	8.8	11372.2	0.0	52.9	1784.9	0.0	0.9	5200.3	0.0	10.5	12184.8	0.0	43.4
	HC	2099.9	7.0	1.5	6824.7	14.7	12.4	13189.4	16.0	63.1	2030.8	13.8	1.3	6024.3	15.8	14.6	13804.9	13.3	81.2
	HS	2453.8	25.1	0.9	8516.8	43.2	5.6	17591.7	54.7	27.1	2306.7	29.2	0.7	7480.8	43.9	7.0	18335.5	50.5	22.1
20×8	H	771.7	0.0	0.7	2797.0	0.0	7.1	5670.8	0.0	46.0	768.1	0.0	0.8	2387.7	0.0	7.0	5126.9	0.0	46.3
	HC	793.7	2.9	1.1	3043.5	8.8	10.1	6168.9	8.8	62.0	836.9	9.0	1.5	2662.2	11.5	10.6	5724.1	11.6	64.8
	HS	893.0	15.7	0.5	3692.5	32.0	4.2	7573.0	33.5	22.5	992.0	29.1	0.6	3476.7	45.6	4.0	7167.5	39.8	21.6
20×10	H	708.2	0.0	0.8	218.1	0.0	5.2	4251.7	0.0	38.1	522.3	0.0	0.7	1645.4	0.0	7.0	3808.4	0.0	45.5
	HC	763.4	7.8	1.3	252.2	15.6	11.4	4674.8	10.0	64.5	566.7	8.5	1.5	1849.1	12.4	13.4	4405.2	15.7	90.7
	HS	925.1	30.6	0.5	299.1	37.1	3.0	5514.9	29.7	19.3	662.4	26.8	0.6	2370.9	44.1	3.7	5121.5	34.5	21.7

表5 算法结果对比($n = 40$)

$n \times m$ 算法	$f = 1.5$									$f = 2$									
	S_1			S_2			S_3			S_1			S_2			S_3			
	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	Z	$\theta\%$	Time/s	
40×4	H	9047.6	0.0	6.0	23321.1	0.0	49.2	47399.8	0.0	227.7	8051.8	0.0	6.4	22506.3	0.0	53.5	43029.2	0.0	299.1
	HC	9907.4	9.5	9.0	26412.9	13.3	66.1	56085.1	18.3	379.5	8877.4	10.3	10.7	25557.1	13.6	78.1	50899.7	18.3	403.0
	HS	12485.3	38.0	4.6	36410.5	56.1	28.6	75874.7	60.1	151.1	11165.4	38.7	4.8	36128.9	60.5	31.0	69036.4	60.4	145.5
40×8	H	4160.1	0.0	4.4	10134.7	0.0	48.5	19972.1	0.0	342.1	3700.2	0.0	4.8	9344.2	0.0	51.9	20816.9	0.0	294.1
	HC	4506.9	8.3	6.7	11321.8	11.7	65.3	22904.9	14.7	440.3	4091.9	10.6	7.7	10983.5	17.5	72.9	24315.5	16.8	370.9
	HS	5469.1	31.5	3.4	14900.0	47.0	26.5	28943.2	44.9	155.1	5084.9	37.4	3.5	13419.7	43.6	27.0	29839.7	43.3	131.1
40×10	H	3125.3	0.0	4.7	8491.7	0.0	51.8	16866.4	0.0	301.8	2619.5	0.0	4.4	7536.9	0.0	47.8	16705.5	0.0	283.1
	HC	3358.2	7.4	8.8	9468.5	11.5	70.6	19596.1	16.2	369.1	2976.1	13.6	7.0	8619.6	14.4	83.3	18837.0	12.8	346.1
	HS	4092.3	30.9	3.2	11912.6	40.3	26.6	23970.0	42.1	150.0	3616.1	38.0	3.0	10470.1	38.9	25.2	23532.7	40.9	130.5

HS, H的运行时间增加一倍. 对于产品结构简单(S_1)的调度问题, 算法H和HS运行时间相差不大, 但是本文所提出的算法得到的解更优.

4 结 论

本文以航空发动机装配车间为研究背景, 建立了装配线调度与班组自重构优化模型, 提出了基于拖期惩罚和班组重构的启发式优化算法. 实例结果表明了重构的必要性和算法的有效性. 由与算法HC和HS的实验对比结果可以看出, 所提出的局部最优排序算法在不同规模和产品复杂度情况下均能获得较优解.

进一步研究班组配置对工期的影响, 可以引导企业通过招聘、培训等方式合理增加数量偏少的工种人员, 会大大降低由于人员配备因素而造成工期无法按时完成的风险. 另外, 对于装配作业车间中并行机负载平衡指标的选取也是下一步的研究方向.

参考文献(References)

- [1] 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.
(Yan H S, Liu F. Knowledgeable manufacturing system—a new kind of advanced manufacturing system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(8): 7-11.)
- [2] 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.
(Wan X Q, Yan H S, Wang Z. Scheduling and self-reconfiguration of an aircraft engine assembly line in knowledgeable manufacturing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 136-146.)
- [3] 王成恩, 于宏, 张闻雷, 等. 面向对象的航空发动机装配模型[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5): 942-948.
(Wang C E, Yu H, Zhang W L, et al. Object-oriented aero-engine assembly models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(5): 942-948.)
- [4] 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.
(Tang X M, Zhong S S. Aero-engine assembly sequence planning based on discrete-time pontryagin's minimum principle[J]. Control and Decision, 2008, 23(11): 1221-1225.)
- [5] 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.
(Wang H X, Yan H S, Wang Z. 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.)
- [6] 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.
(Jiang T H, Yan H S, Wang Z. Self-evolution of aircraft engine assembly workshop in the knowledgeable manufacturing environment[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1217-1225.)
- [7] Adam N R, Bertrand J W M, Surkis J. Priority assignment procedures in multi-level assembly job shops[J]. IIE Transactions, 1987, 19(3): 317-328.
- [8] Philipoom P R, Russell R S, Fry T D. A preliminary investigation of multi-attribute based sequencing rules for assembly shops[J]. Int J of Production Research, 1991, 29(4): 739-753.
- [9] Reesa M K, Rajendran C. Dispatching rules for scheduling in assembly jobshop: Part 1[J]. Int J of Production Research, 2000, 38(9): 2051-2066.
- [10] Reesa M K, Rajendran C. Dispatching rules for scheduling in assembly jobshops: Part 2[J]. Int J of Production Research, 2000, 38(10): 2349-2360.
- [11] Hicks C, Pongcharoen P. Dispatching rules for production scheduling in the capital goods industry[J]. Int J of Production Economics, 2006, 104(1): 154-163.
- [12] 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]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 31(7/8): 751-761.
- [13] Lu, H L, Huang G Q, Yang H D. Integrating order review/release and dispatching rules for assembly job shop scheduling using a simulation approach[J]. Int J of Production Research, 2011, 49(3): 647-669.
- [14] Pathumnakul S, Egbelu P J. An algorithm for minimizing weighted earliness penalty in assembly job shops[J]. Int J of Production Economics, 2006, 103(1): 230-245.
- [15] Pereira M T, Santoro M C. An integrative heuristic method for detailed operations scheduling in assembly job shop systems[J]. Int J of Production Research, 2011, 49(20): 6089-6105.
- [16] Wong T C, Ngan S C. A comparison of hybrid genetic algorithm and hybrid particle swarm optimization to minimize makespan for assembly job shop[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(3): 1391-1399.
- [17] Na H, Park J. Multi-level job scheduling in a flexible job shop environment[J]. Int J of Production Research, 2014, 52(13): 3877-3887.

(责任编辑: 郑晓蕾)