

知识化制造环境下航空发动机装配车间自进化

姜天华, 严洪森, 汪 峥

(东南大学 a. 自动化学院, b. 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 南京 210096)

摘要: 针对产品动态到达的航空发动机装配车间, 对知识化制造系统的自进化问题进行研究. 将自进化的思想应用于该装配车间, 提出了知识化制造环境下该装配车间自进化问题的求解算法. 根据双层规划理论, 建立了系统在每个决策时刻静态决策问题的一般数学模型, 并设计了一种基于可行域搜索的双层遗传算法 (FR-BiGA) 对模型进行求解. 仿真结果验证了该模型与算法的有效性和可行性, 且实验数据表明, 自进化的系统具有相对较优的生产性能.

关键词: 知识化制造; 自进化; 航空发动机装配车间; 可行域; 双层遗传算法

中图分类号: TH165

文献标志码: A

Self-evolution of an aircraft engine assembly workshop in the knowledgeable manufacturing environment

JIANG Tian-hua, YAN Hong-sen, WANG Zheng

(a. School of Automation, b. Key Laboratory of Measurement and Control of CSE, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: JIANG Tian-hua, E-mail: jth1127@163.com)

Abstract: For an aircraft assembly workshop with dynamic products arrival, the self-evolution problem of knowledgeable manufacturing systems is studied. The principle of self-evolution is applied to the workshop. An algorithm is proposed to solve the self-evolution problem of the workshop in the knowledgeable manufacturing environment. According to the bi-level programming theory, a general mathematical model of the static decision problem at each decision moment is established, and a bi-level genetic algorithm based on feasible region (FR-BiGA) is designed to solve the model. Simulation results demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed model and algorithms. Experimental data show that the system with self-evolution operations has comparatively better production performance.

Key words: knowledgeable manufacturing; self-evolution; aircraft engine assembly workshop; feasible region; bi-level GA

0 引言

知识化制造系统 (KMS) 是一种新的制造理念^[1]. 经过 10 余年的发展, 现已取得了显著的成果. 自进化是知识化制造系统的一个重要特征, 其基本思想是在不改变原有生产控制策略的前提下, 通过对制造系统自身进行调整或改进来提高生产性能, 实现预期目标, 并使系统能够及时响应动态环境的变化. 知识化制造系统的自进化与自适应^[2]的不同之处在于: 自适应的着眼点是生产控制范畴, 通过改变生产控制策略来适应环境的变化; 而自进化的着眼点是制造系统本身, 通过对制造系统自身的调整来实现生产性能的提高.

航空发动机的装配一直是航空发动机制造的瓶

颈环节, 其工作量占全机生产的一半以上^[3]. 航空发动机的结构可以用树状图表示, 树上的结点代表各种零件、部件及装配体. 为了便于表述, 本文将所有结点统称为工件, 将零件的加工及零部件之间的装配操作统称为加工. 通常这类产品的生产调度问题被称为装配作业车间调度问题 (AJSSP)^[4]. 目前还没有针对航空发动机装配车间调度问题的研究, 而且现有关于 AJSSP 的研究内容大都属于静态调度问题^[4-7]. 此外, 在现实的航空发动机装配生产中, 系统面临多种动态因素, 例如: 产品动态达到、紧急订单插入、订单突然撤销、装配组内可用资源量变化等, 这些因素使得静态调度方法不再适用. 对此, 动态调度是一个有效的解决办法, 但在现有的文献中, 大都以传统的车间作

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60934008).

作者简介: 姜天华(1983-), 男, 博士生, 从事知识化制造系统的自进化的研究; 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.

为研究对象,将研究的重点集中于调度算法的改进和调度规则的选择^[8-11].当动态事件发生时,系统将调整原有调度方案或重新制定新的方案,而其自身并不发生任何变化.系统参数的调整是实现制造系统自身调整的途径之一,因此本文着眼于系统自身参数调整,对知识化制造系统的自进化问题进行初步研究.对于航空发动机装配车间而言,因为航空发动机的装配工作主要依靠手工来完成^[3],工件的加工时间可能与其所在装配组内的工人数有关,所以每个装配组内的工人数被视为系统可调整的参数.生产管理者可以通过调整这些参数来提高或改善生产性能.

本文将知识化制造系统自进化的思想应用于产品动态到达的航空发动机装配车间.当新产品到达时,首先调整各装配组内的工人数,然后在此基础上合理地安排各工件的装配生产.文中提出了该航空发动机装配车间自进化问题的求解算法.根据航空发动机装配生产的特点,建立了系统在每个决策时刻的静态决策问题的数学模型,并提出了一种基于可行域搜索的双层遗传算法(FR-BiGA)对静态决策问题进行求解.实例研究表明,该模型和算法是有效且可行的.

1 自进化问题相关定义

定义 1 假设初始零时刻各机器均处于空闲状态,根据车间内已知生产信息获得的系统自身调整方案和生产调度方案,称为初始决策方案.

定义 2 根据已知的生产信息重新调整系统并制定生产调度方案的一系列动作,称为自进化操作.

定义 3 系统通过自进化操作得到的自身调整方案和生产调度方案称为自进化决策方案.

定义 4 系统开始执行自进化决策方案的时刻称为自进化时刻.

2 航空发动机装配车间介绍

航空发动机的装配分为一次装配和二次装配两个阶段.一次装配完成后,若工厂试车合格,则分解发动机,对各零部件进行洗涤和故障检验,然后进入二次装配阶段重新装配发动机,并进行检验试车.若检验试车合格,则发动机即可出厂.在任何一个装配阶段内,若试车不合格,则对发动机进行分解洗涤和故障检验,替换掉故障件,然后重复本阶段的装配,直至试车合格.因此,每台发动机至少要经历两次装配.

航空发动机装配车间内包含若干具有不同功能的装配班,如机匣班、钣焊班、总装班等,每个班内包含若干具有相同功能的装配组,组内配备一些装配工人和专用工具及设备.此外,为了便于装配,确保装配质量,提高劳动生产率和减轻劳动强度,车间内还配有装配车,如发动机总装配车、部件装配车等,装配车

可以根据工序的不同在装配组间移动^[12].

3 航空发动机装配车间自进化

在制定生产调度方案时,采用重新调度法^[13],将原有发动机剩余的未加工工序和新到达发动机的所有工序一起放入待调度工序集中重新调度.

定义 5 由产品各工件间的装配约束关系映射成的树状图称为产品加工树.

3.1 自进化问题求解算法

3.1.1 动态事件的处理

本文只考虑产品动态到达这一动态事件.当新的发动机到来时,原有的一些发动机可能已经全部装配完,而另一些发动机还未完工.对于未完工的发动机而言,一部分工序已经加工完或正在加工,另一部分工序(剩余工序)还没有开始加工.因为航空发动机的装配是从叶子结点向根结点进行,所以未完工发动机的剩余工序仍然具有树状的结构^[14].当新的发动机到来时,统计各个装配组当前的工作状态(忙/闲),记录各装配组的剩余在加工时间,剔除未完工发动机原有产品加工树上已完工和正在加工的工序,构造剩余工序的产品加工树.获取新到达发动机的产品信息,构造新到达发动机的产品加工树,然后将新到达发动机的工序和未完工发动机的剩余工序一起加入到待调度工序集中.

3.1.2 自进化问题求解算法的步骤

算法的具体步骤如下.

Step 1: 获取初始产品信息,构造产品加工树.

Step 2: 执行FR-BiGA算法,为各个装配组分配工人并生成最优的调度方案,然后按照调度结果进行生产.

Step 3: 判断系统中是否有新发动机到达.若是,则转到Step 4,否则继续按照Step 2得到的决策方案进行生产.若工件全部加工完,则转到Step 7.

Step 4: 统计各装配组当前工作状态,记录各装配组的剩余在加工时间,剔除未完工发动机原有产品加工树上已完工和正在加工的工序,得到剩余工序的产品加工树.

Step 5: 获取新到达发动机的产品信息,构造新到达发动机的产品加工树.

Step 6: 确定待调度工序集合,转到Step 2.

Step 7: 算法结束.

3.2 静态决策问题的数学模型

虽然整个自进化的过程是动态的,但在每个决策时刻(动态事件发生时刻)系统的生产信息(待调度的工件、装配组工作状态等)都是确定的,所以此时系统

中仍存在一个静态决策问题, 它包括人员分配和生产调度两个子问题.

3.2.1 问题假设

针对本文的航空发动机装配车间进行如下假设:

- 1) 工件一旦开始加工就不允许被中断;
- 2) 一个装配组在同一时刻只加工一个工件;
- 3) 工序的加工时间是关于装配组内工人数的单调递减函数, 且最大加工时间是已知的;
- 4) 工序一旦确定了装配组就一直保持在该装配组内加工, 直到该道工序完工为止;
- 5) 由于工人所具备的生产技能与其所在的装配班有关, 不同装配班之间不存在人员流动;
- 6) 每台发动机只需两次装配;
- 7) 工厂试车、分解洗涤和故障检验 3 个环节能力充足, 即每台发动机两次装配间隔时间固定且已知;
- 8) 各装配组内的工人数一旦确定, 将一直保持到下一个自进化时刻的到来;
- 9) 各种装配车的数量充足;
- 10) 各装配班内允许有空闲的工人;
- 11) 不考虑装配组调整时间和工人迁移时间.

3.2.2 模型建立

装配组内的工人数决定了工序加工时间的长短, 从而影响生产调度的结果. 根据双层规划理论, 人员分配问题应处于决策模型上层, 生产调度问题应处于决策模型下层. 定义相关符号及变量如下.

Z : 生产成本, 即人员变动成本与调度成本的加权和;

F : 调度成本, 其最小值为 F_{\min} ;

h : 装配班的编号, $h = 1, 2, \dots, H$;

M_h : 第 h 个装配班内的装配组的集合;

R_h : 第 h 个装配班内的总工人数;

G : 装配组的总数, $g = 1, 2, \dots, G$;

r_g : 第 g 个装配组内的工人数, $r_g \in [r_{g\min}, r_{g\max}]$;

r'_g : 第 g 个装配组内原工人数, $r'_g \in [r_{g\min}, r_{g\max}]$;

φ_g : 人员变动成本系数;

α : 权重系数向量, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$;

I : 发动机台数;

J_i : 第 i 台发动机所包含工件数;

K_{ij} : 第 i 台发动机第 j 个工件的工序数;

O_{iajk} : 第 i 台发动机在第 a 个装配阶段内的第 j 个工件的第 k 道工序;

E_{iajk} : O_{iajk} 的提前完工成本系数;

λ_i : 第 i 台发动机的完工时间成本系数;

C_{iajk} : O_{iajk} 的完工时间;

C_i : 第 i 台发动机的装配完工时间;

C_{i1} : 第 i 台发动机一次装配的完工时间;

S_{iajk} : O_{iajk} 的开始时间;

$O_{P(iajk)}$: O_{iajk} 的后续工序 (需要说明的是, 发动机在每个装配阶段内最后一道工序是没有后续工序的, 为了便于数学表达, 给最后一道工序设置一个虚拟后续工序, 虚拟后续工序的开始时间总是等于其前道工序的完工时间);

$S_{P(iajk)}$: $O_{P(iajk)}$ 的开始时间;

T : 动态事件发生的时刻;

t_i : 第 i 台发动机两次装配的间隔时间;

β : 一个较大的常数;

μ : 一个 $0 \sim 1$ 之间的常数, 其大小反映了工人数对加工时间的影响程度, μ 越大, 工人分配在改变工序加工时间方面发挥的作用越大, 文中取为 0.5;

q_{iajk} : O_{iajk} 允许的提前完工时间;

$\Delta t'_g$: 动态事件发生时刻第 g 个装配组在原参数下的剩余在加工时间;

Δt : 生成自进化决策方案的时间, 可通过实验或根据调度人员的经验估计得到;

T' : 自进化时刻, $T' = T + \Delta t$;

$\Delta \bar{t}_g$: 自进化时刻第 g 个装配组在原参数下的剩余在加工时间, $\Delta \bar{t}_g = \max\{\Delta t'_g - \Delta t, 0\}$;

Δt_g : 自进化时刻第 g 个装配组在新参数下的剩余在加工时间;

p_{iajkg} : O_{iajk} 在第 g 个装配组内的加工时间, 其最大值为 \hat{p}_{iajkg} ;

p_{iajk} : O_{iajk} 的实际加工时间;

x_{iajkg} : O_{iajk} 在第 g 个装配组内加工为 1, 否则为 0;

$y_{iajki'a'j'k'g}$: 第 g 个装配组内 O_{iajk} 在 $O_{i'a'j'k'}$ 前加工为 1, 否则为 0.

静态决策问题的数学模型为

$$\text{上层: } \min Z = \alpha_1 \sum_{g=1}^G \varphi_g |r_g - r'_g| + \alpha_2 F_{\min}. \quad (1)$$

$$\sum_{g \in M_h} r_g \leq R_h, \forall h; \quad (2)$$

$$r_{g\min} \leq r_g \leq r_{g\max}, \forall g. \quad (3)$$

$$\text{下层: } \min F = \sum_{i=1}^I \left[\sum_{a=1}^2 \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}} E_{iajk} \cdot \max(S_{P(iajk)} - C_{iajk} - q_{iajk}, 0) + \lambda_i C_i \right]. \quad (4)$$

$$C_{iajk} - S_{iajk} = p_{iajk}, \forall i, a, j, k; \quad (5)$$

$$S_{P(iajk)} - C_{iajk} \geq 0, \forall i, a, j, k; \quad (6)$$

$$S_{iajk} \geq T' + \sum_{g=1}^G x_{iajkg} \Delta t_g, \forall i, a, j, k; \quad (7)$$

$$S_{i2j1} \geq C_{i1} + t_i, \forall i, j; \quad (8)$$

$$C_{iajk} - C_{i'a'j'k'} + \beta y_{iajki'a'j'k'g} \geq p_{iajk}, \quad (9)$$

$$\forall i, i', a, a', j, j', k, k', g;$$

$$C_{i'a'j'k'} - C_{iajk} + \beta(1 - y_{iajki'a'j'k'g}) \geq p_{i'a'j'k'}, \quad (10)$$

$$\forall i, i', a, a', j, j', k, k', g;$$

$$\sum_{g=1}^G x_{iajkg} = 1, \forall i, a, j, k; \quad (11)$$

$$p_{iajkg} = [1 - \mu(1 - r_{g\min}/r_g)] \hat{p}_{iajkg}, \quad (12)$$

$$\forall i, a, j, k, g;$$

$$p_{iajk} = \sum_{g=1}^G x_{iajkg} p_{iajkg}, \forall i, a, j, k; \quad (13)$$

$$\Delta t_g = \frac{[1 - \mu(1 - r_{g\min}/r_g)] \Delta \bar{t}_g}{1 - \mu(1 - r_{g\min}/r'_g)}, \forall m; \quad (14)$$

$$x_{iajkg} \in \{0, 1\}, \forall i, a, j, k, g; \quad (15)$$

$$y_{iajki'a'j'k'g} \in \{0, 1\}, \forall i, i', a, a', j, j', k, k', g. \quad (16)$$

式(1)为上层目标函数,使生产成本最小(需要指出的是,人员变动意味着装配组从一种加工模式切换到另一种加工模式,这里的人员变动成本是指加工模式的切换成本,例如,当加工模式切换时,需要在工人之间选择一种新的合作方式,并且装配组内某些专用工具或设备需要重新布置,这些都会带来一定的成本);式(2)表示装配组内的工人数之和不能超过其在装配班内的工人总数;式(3)表示各装配组内工人数的取值范围;式(4)为下层目标函数,使调度成本最小(调度成本包括两部分,一部分是工序提前完工引起的库存成本,另一部分是与发动机装配完工时间相关的成本);式(5)表示工序一旦开始就不允许被中断;式(6)表示后续工序的开始时间不能小于其前道工序的完工时间;式(7)表示工序的开始时间不能小于自进化时刻 T' 与工序所在装配组的剩余在加工时间 Δt_g 之和;式(8)表示二次装配阶段工件的第一道工序必须在一次装配结束并完成工厂试车、分解洗涤和故障检验之后开始;式(9)和(10)表示装配组在同一时刻只能加工一个工件;式(11)表示工序一旦被分配到某一个装配组,将一直保持在该装配组内加工,直到该工序完工;式(12)表示工序加工时间是关于装配组内工人数的单调递减函数;式(13)表示工序实际加工时间;式(14)表示自进化时刻装配组在新参数下的剩余在加工时间,由式(12)易得。

4 基于可行域搜索的双层遗传算法

本文提出一种具有两层结构的基于可行域搜索的遗传算法.上层遗传算法的作用是解决人员分配问题,下层遗传算法的作用是根据上层算法提供的参数确定各工序的加工顺序.

4.1 上层遗传算法

1) 编码方案.

采用整数编码.根据车间内装配班的个数将染色体分为 H 个基因块,每个基因块的长度为对应装配班内装配组的个数 $|M_h|$,染色体的长度为所有装配组的个数之和,即 $\sum_{h=1}^H |M_h|$.

2) 初始种群的生成.

保证式(2)成立的前提下,在各基因的取值范围内随机选取一个整数来生成染色体个体,最终生成初始种群.

3) 选择算子.

采用经典轮盘赌方法对染色体进行选择操作.

4) 交叉算子.

采用部分匹配交叉方法.随机选取一个基因块,将两个父代个体中该基因块内的基因值进行互换,形成两条新的染色体.

5) 变异算子.

保证式(2)成立的前提下,采用单点变异方法.

4.2 下层遗传算法

为了区分各工件,将产品加工树上的结点表示为:发动机编号|装配阶段|工件编号|工序个数.其中前3项合称为工件代号.图1为发动机A和发动机B的产品加工树, A|1|1|2表示处于一次装配阶段的发动机A的1号工件,且该工件具有两道工序, A|1|1|1为工件代号.

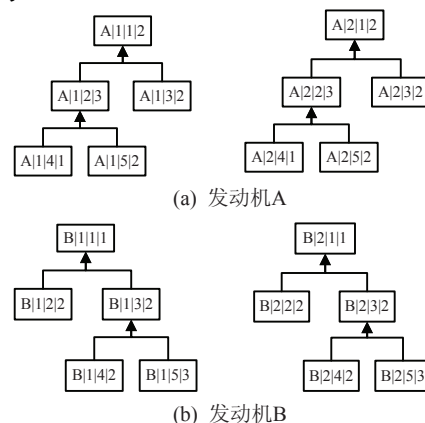


图1 发动机A和发动机B的产品加工树

定义6 根据工件在产品加工树上所处的位置,本文将所有工件分为0型、1型和2型.其中:处于叶子结点上的工件称为0型工件,处于根结点上的工件

称为 2 型工件, 其余工件称为 1 型工件. 图 1 中, A|1|1 为 2 型工件, 其子工件为 A|1|2 和 A|1|3, 后代工件为 A|1|2、A|1|3、A|1|4 和 A|1|5.

定义 7 满足工件间的装配约束关系, 并能保证每道工序都在其可加工装配组内加工的染色体称为下层可行染色体. 染色体中工件间的装配约束关系体现为: 1) 同一台发动机处于二次装配阶段的工件在染色体中的位置必须排在处于一次装配阶段的工件之后; 2) 同一台发动机同一个装配阶段内父工件在染色体中的位置必须排在子工件之后.

当上层参数给定后, 工序在各装配组内的加工时间即可由式 (12) 得到, 此时下层问题就是一个 AJSSP 问题. 文献 [4] 采用了基于工序顺序的编码方式, 然而在航空发动机装配车间内一道工序可以在多个装配组内加工, 上述编码方式显然是行不通的. 此外, 航空发动机装配车间内往往需要同时装配多台发动机, 并且每台发动机要经历两次装配. 本文对文献 [4] 中的算法进行改进, 采用基于工序顺序和装配组分配的编码方式, 并重新设计修复算子、交叉算子和变异算子. 为便于介绍下层遗传算法, 这里假设某车间内有 6 个装配组, 需装配图 1 中 A 和 B 两台发动机.

1) 编码方案.

每条染色体分为长短相等的两段, 每段的长度均为待调度工序的总数. 前半段染色体为字符串编码, 采用基于工序顺序的编码方式, 基因值为工件代号, 如图 2(a) 所示. 同一工件的工序用相同的基因值表示. 从左到右扫描染色体, 某一工件代号出现的次数表示该工件工序的序号. 例如, 图 2(a) 中第 2 个 A|1|2 表示工件 A|1|2 的第 2 道工序. 后半段染色体为整数编码, 采用基于装配组分配的编码方式, 基因值为各道工序

所分配的装配组的编号. 各基因值按照固定的顺序存放在染色体中, 如图 2(b) 所示.

2) 初始种群的生成.

前半段染色体根据产品加工树上的工件数和每个工件的工序数随机生成; 后半段染色体则从每道工序的可加工装配组集合内随机选择一个装配组, 并将所选的装配组的编号作为基因的基因值.

3) 修复算子.

根据初始种群生成方法, 后半段染色体中各基因的基因值总在工序的可加工装配组集合内取值, 因此总是可行的; 而前半段很可能会有违背装配约束关系的情况出现, 因此必须对染色体前半段进行修复操作.

具体修复步骤如下.

Step 1: 设置 $k_1 = 1$, 进行第 1 次修复.

Step 2: 将第 k_1 个发动机的所有基因从染色体中抽出来, 同时保持余下基因的位置不变. 对抽出来的基因重新排序, 将二次装配阶段的工件排到一次装配阶段的工件后面, 然后将调整好的基因序列按照调整后的顺序依次放回染色体的空位中.

Step 3: 令 $k_1 = k_1 + 1$, 判断 k_1 是否大于发动机总数 I . 若是, 则执行 Step 4, 否则转到 Step 2.

Step 4: 重新设置 $k_1 = 1$, 进行第 2 次修复.

Step 5: 对第 k_1 个发动机的产品加工树执行文献 [4] 中的自顶向下递归调整法, 使所有父工件排在子工件之后.

Step 6: 令 $k_1 = k_1 + 1$, 判断 k_1 是否大于发动机总数 I . 若是, 则终止修复操作, 否则转到 Step 5.

根据定义 7, 图 2 为一条不可行染色体, 经过修复操作后可以得到一条可行染色体, 如图 3 所示.



图 2 下层编码方案



图 3 修复后的染色体

4) 选择算子.

采用经典轮盘赌方法对染色体进行选择操作.

5) 交叉算子.

前半段染色体交叉操作的具体步骤如下.

Step 1: 随机选取一个 1 型或 2 型工件 J' .

Step 2: 从两个父代染色体 U_1 和 U_2 中把所有代表 J' 的后代工件的基因抽出来, 从而得到两个集合 N_1 和 N_2 .

Step 3: 将 N_1 和 N_2 内的基因值互换后, 再分别把 N_1 和 N_2 内的基因值依次放回 U_1 和 U_2 的空位中.

Step 4: 交叉结束.

后半段染色体采用部分匹配交叉法, 即随机选取两个交叉点, 交换两父代染色体在交叉点间的基因值.

6) 变异算子.

对于前半段染色体, 对文献[4]中的可行域变异算子进行改进, 使其适用于航空发动机装配车间. 在不违背装配约束关系和保持变异前后同工件的基因个数不变的前提下, 在某一范围内改变变异基因的基因位索引. 本文将这一范围称为可行的跳跃范围, 其左右边界需根据变异基因所代表的工件的类型和所处的装配阶段来确定.

前半段染色体变异操作的具体步骤如下.

Step 1: 随机选取一个基因作为变异基因, 记录其基因位索引 K' .

Step 2: 根据变异基因所代表的工件 J' 的类型及所处的装配阶段, 确定其可行的跳跃范围 (L, R) .

Step 2.1: 确定左边界 L 的值.

① J' 为 0 型工件.

若 J' 处于一次装配阶段, 则 $L = 0$; 若 J' 处于二次装配阶段, 则以 K' 为起点向左遍历, 找到第 1 个基因值所代表的工件与 J' 属于同一发动机且处于一次装配阶段的基因, 记录该基因的基因位索引, 并将其赋给 L .

② J' 为 1 型或 2 型工件.

以 K' 为起点向左遍历, 找到第 1 个基因值所代表的工件是 J' 的子工件的基因, 记录该基因的基因位索引, 并将其赋给 L .

Step 2.2: 确定右边界 R 的值.

① J' 为 0 型或 1 型工件.

以 K' 为起点向右遍历, 找到第 1 个基因值所代表的工件是 J' 的父工件的基因, 记录该基因的基因位索引, 并将其赋给 R .

② J' 为 2 型工件.

若 J' 处于一次装配阶段, 则以 K' 为起点向右遍历, 找到第 1 个基因值所代表的工件与 J' 属于同一

发动机且处于二次装配阶段的基因, 记录该基因的基因位索引, 并将其赋给 R ; 若 J' 处于二次装配阶段, 则 $R = \text{染色体长度} + 1$.

Step 3: 将可行跳跃范围内的所有基因都抽出来, 先把变异基因放到可行跳跃范围内任意一个空基因位上, 然后将余下的基因按原有的顺序依次放回.

Step 4: 变异结束.

后半段染色体的变异过程为随机选取一个基因作为变异基因, 在该基因对应工序的可加工装配组集合中随机选取一个装配组, 用该装配组的编号替换原来的基因值.

4.3 FR-BiGA 算法步骤

算法具体步骤如下.

Step 1: 初始化算法参数, 如上下两层遗传算法的种群大小、进化代数、交叉概率、变异概率等.

Step 2: 构造上层染色体, 产生上层初始种群, 并设置 $k_2 = 1$.

Step 3: 根据上层个体 k_2 提供的参数求解其对应的下层生产调度问题.

Step 3.1: 按式 (12) 计算工序在各装配组内的加工时间.

Step 3.2: 构造下层初始种群.

Step 3.3: 采用修复算子对下层染色体进行修复操作.

Step 3.4: 以 γ/F 作为下层适应度函数, γ 为一常数, 计算下层个体的适应度值.

Step 3.5: 对下层染色体进行选择操作.

Step 3.6: 对下层染色体进行交叉操作和变异操作.

Step 3.7: 判断是否达到进化代数. 若是, 则执行 Step 4, 否则转到 Step 3.4.

Step 4: 将下层遗传算法得到的最小调度成本 F_{\min} 代入 Z , 并以 η/Z 作为上层适应度函数, η 为一常数, 计算上层个体 k_2 的适应度值.

Step 5: 令 $k_2 = k_2 + 1$, 判断 k_2 是否大于上层种群规模. 若是, 则重新设置 $k_2 = 1$, 并执行 Step 6, 否则转到 Step 3.

Step 6: 对上层染色体进行选择操作.

Step 7: 对上层染色体进行交叉操作和变异操作.

Step 8: 判断是否达到进化代数. 若是, 则算法终止, 输出结果, 否则转到 Step 3.

5 仿真研究

本文在内存 4 G 的计算机 (Intel Core(TM) i5-2400 CPU 3.10 GHz) 上, 采用 Fortran 与 Matlab 语言混

合编程的方式, 对产品动态到达的航空发动机装配车间自进化问题的算例进行仿真研究. FR-BiGA 算法参数如表 1 所示.

表 1 FR-BiGA 算法参数

层级	种群规模	进化代数	交叉概率	变异概率
上层	20	70	0.8	0.1
下层	40	250	0.7	0.15

航空发动机装配车间的各装配班内资源配置情况如表 2 所示. 假设初始零时刻车间内有 C 和 D 两台不同类型的发动机需要装配, 各装配组均处于空闲的状态, 各装配组内最初的工人数为 [4, 5, 5, 4, 4, 6, 3, 3, 4, 3, 3, 3, 6, 5, 5, 4, 4, 3, 3, 4]. 限于篇幅, 这里只列出发动机 C 的部分数据, 如表 3 所示. 图 4 为发动机 C 一次装配阶段的产品加工树. 采用 FR-BiGA 算法得到初始决策方案, 各装配组内工人数为 [2, 5, 5, 4, 4, 4, 4, 3, 3, 2, 3, 4, 5, 3, 5, 2, 4, 2, 3, 3], 生产调度的结果如图 5 所示.

表 2 装配班内资源配置

装配班名称	组数	装配组编号	总人数	组内人数上下限
附件机匣班	1	1	4	[2, 4]
前后机匣班	2	2, 3	10	[3, 7]
机匣导向班	2	4, 5	8	[3, 5]
机匣班	1	6	6	[3, 6]
装配班	3	7, 8, 9	10	[2, 6]
机加班	3	10, 11, 12	9	[2, 5]
平衡班	1	13	6	[2, 6]
钣焊班	2	14, 15	10	[3, 7]
加力班	2	16, 17	8	[2, 6]
传装班	2	18, 19	6	[2, 4]
总装班	1	20	4	[2, 4]

随着车间内装配生产的不断进行, 假设 $T = 102$ h 时新到达两台发动机 E 和 F. 通过实验得知, 自进化决策方案的生成时间 $\Delta t = 3$ h, 则自进化时刻为 $T' = T + \Delta t = 105$ h. 根据航空发动机装配车间自进化问题

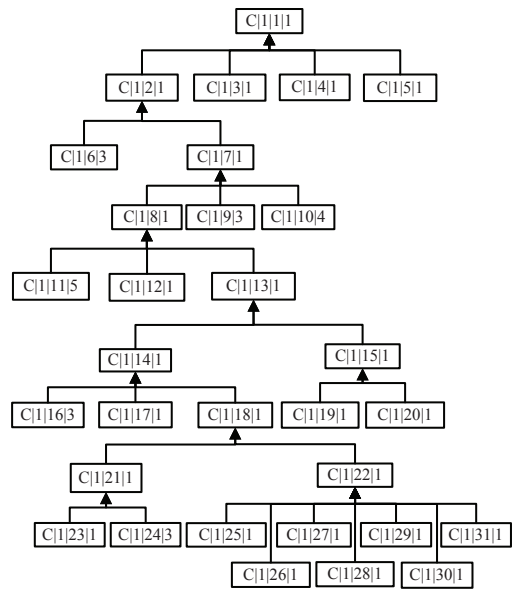


图 4 发动机 C 一次装配阶段的产品加工树

的求解算法得到自进化决策方案, 各装配组内的工人数为 [3, 6, 3, 4, 4, 3, 3, 4, 3, 3, 3, 3, 3, 5, 5, 2, 3, 3, 2, 3], 生产调度方案如图 6 所示. 由于图中标注空间有限, 圆角矩形框内工序的编号从左到右依次为 F|1|19|1、F|1|18|1、F|1|15|1、F|1|2|1、D|2|22|1、C|2|14|1、D|2|19|1、D|2|18|1、C|2|8|1. 从上述实验结果可以看出, 本文提出的模型和算法是可行的.

注 1 图 5 和图 6 中每个方框都代表一道工序, 方框下方的工序名称虽然在形式上与产品加工树上结点表示方法相同, 但意义稍有不同. 例如, C|2|8|1 表示处于二次装配阶段的发动机 C 的 8 号工件的第 1 道工序.

为了比较新产品到达时系统在进化(调整参数)和未进化(不调整参数, 只执行下层遗传算法)两种情况下的生产性能, 同样采用上述实例进行 10 组仿真实验. 每组实验内采用公共随机数策略(CRN)产生两个相同的随机数序列^[15], 生成相同的初始决策方案,

表 3 发动机 C 的部分相关信息

工件代号	工件名称	工序序号	所需装配班	最大加工时间/h	允许提前时间/h	提前完工成本系数
C 1 1	发动机 C	1	总装班	10	-	-
C 1 2	装配体 1	1	传装班	3	1	0.8
C 1 3	扩散器	1	钣焊班	27	2	1.5
C 1 4	可调喷口	1	钣焊班	32	1.5	2.1
C 1 5	电气附件	1	加力班	40	1	1.0
C 1 6	二级涡轮	1	装配班	9	2	0.9
		2	机加班	11	2	1.2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
C 1 29	油气分离器	1	前后机匣班	2	3	1.2
C 1 30	滑油附件	1	前后机匣班	16	2	1.0
C 1 31	附件机匣	1	附件机匣班	24	2	0.8

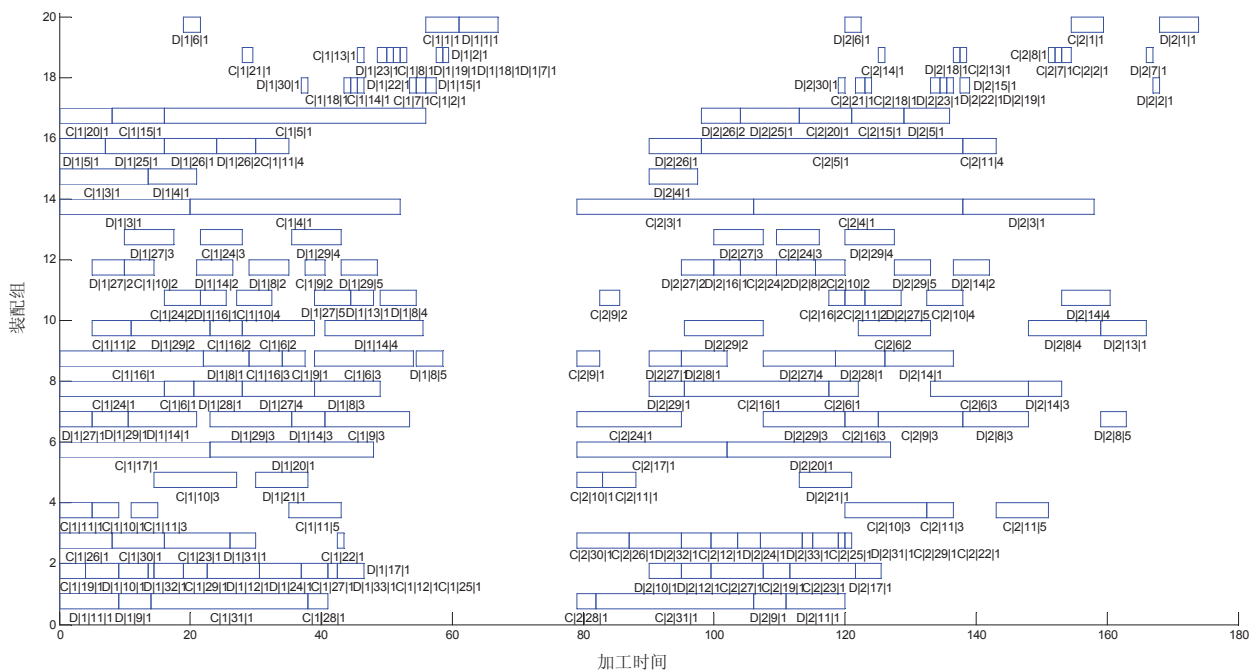


图 5 初始调度结果

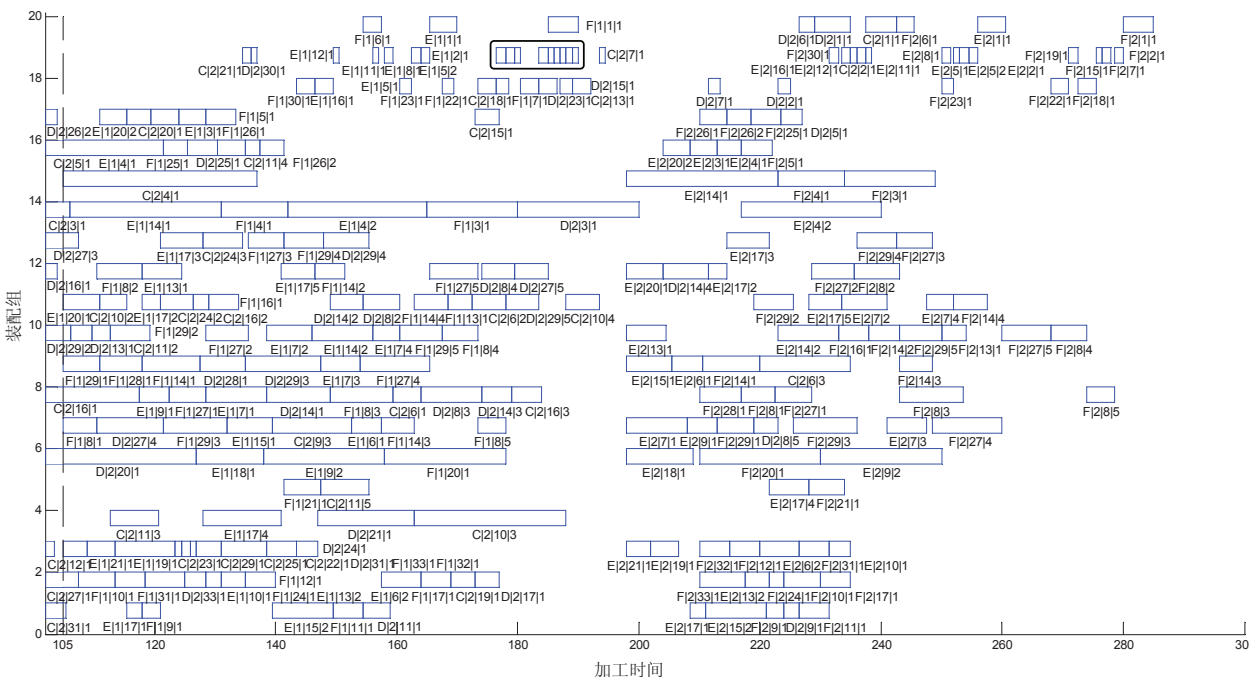


图 6 自进化后的调度结果

表 4 实验数据

生产性能	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
F^*	7 869.39	7 622.27	7 670.99	7 677.94	7 973.24	8 492.91	8 036.93	8 690.09	7 900.57	7 690.21	7 962.45
Z^*	5 518.17	5 343.09	5 376.89	5 382.66	5 588.77	5 950.74	5 633.95	6 090.56	5 539.40	5 389.45	5 631.37
F'	9 702.37	8 939.07	8 796.20	9 313.64	9 302.77	9 273.61	8 738.94	10 237.22	9 373.31	9 018.70	9 412.44
Z'	6 791.67	6 257.35	6 157.34	6 519.55	6 511.94	6 491.53	6 117.26	7 166.04	6 561.32	6 313.08	6 588.71

以确保两次实验中系统在新产品到达时具有相同的生产状态. 实验结果如表 4 所示. 其中: F^* 和 Z^* 分别表示自进化系统的调度成本和生产成本, F' 和 Z' 表示未进化系统相应的生产性能. 从实验数据可以看出, 进化后的系统在生产性能上有了较大的提升.

6 结 论

本文以产品动态到达的航空发动机装配车间为例, 研究了知识化制造系统的自进化问题, 给出了自进化问题的相关定义, 提出了知识化制造环境下航空发动机装配车间自进化问题的求解算法. 根据航空发

动机装配生产的特点, 在双层规划理论的基础上, 建立了每个决策时刻瞬时静态决策问题的数学模型, 并提出了一种基于可行域搜索的双层遗传算法对该模型进行求解. 最后通过实例仿真验证了模型和算法的有效性和可行性, 表明了进化后的系统的生产性能明显优于未进化的系统.

制造系统自身调整的途径有很多, 本文只通过调整制造系统自身参数这一途径初步研究了知识化制造系统的自进化问题, 今后需对自进化的内涵进行深入挖掘, 进一步体现出自进化的优势所在.

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] 汪浩祥, 严洪森. 基于多Agent可互操作知识化制造动态自适应调度策略[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 161-168.
(Wang H X, Yan H S. Interoperable dynamic adaptive scheduling strategy in knowledgeable manufacturing based on multi-agent[J]. Control and Decision, 2013, 28(2): 161-168.)
- [3] 徐延锋. 航空发动机装配数字化关键技术研究与应用[D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2006.
(Xu Y F. Research on key technology for digital assembly based on aero-engine[D]. Xi'an: School of Mechanical Engineering, Northwest Poly-technical University, 2006.)
- [4] 王福吉, 赵国凯, 贾振元, 等. 基于可行域遗传算法的装配作业调度[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 115-120.
(Wang F J, Zhao G K, Jia Z Y, et al. Assembly job-shop scheduling based on feasible solution space genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 115-120.)
- [5] Supachai P, Pius J E. An algorithm for minimizing weighted earliness penalty in assembly job shops[J]. Int J of Production Economics, 2006, 103(1): 230-245.
- [6] 王林平, 贾振元, 王福吉, 等. 含装配约束的作业调度问题及遗传解码算法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(4): 535-539.
(Wang L P, Jia Z Y, Wang F J, et al. Job-shop scheduling problem incorporating assembly constraint and its solution using genetic decoding approach[J]. J of Dalian University of Technology, 2010, 50(4): 535-539.)
- [7] 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.
- [8] 高春华, 李人厚, 陈浩勋. 智能选择启发规则的FMS实时调度方法[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 361-364.
(Gao C H, Li R H, Chen H X. Intelligent extraction of heuristic rules in FMS real-time scheduling[J]. Control and Decision, 1998, 13(4): 361-364.)
- [9] 魏英姿, 赵明扬. 一种基于强化学习的作业车间动态调度方法[J]. 自动化学报, 2005, 31(5): 765-771.
(Wei Y Z, Zhao M Y. A reinforcement learning-based approach to dynamic job-shop scheduling[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(5): 765-771.)
- [10] Zhang L P, Gao L, Li X Y. A hybrid genetic algorithm and tabu search for a multi-objective dynamic job shop scheduling problem[J]. Int J of Production Research, 2013, 51(12): 3516-3531.
- [11] Nguyen S, Zhang M J, Johnston M, et al. Learning iterative dispatching rules for job shop scheduling with genetic programming[J]. J of Intelligent Manufacturing, 2013, 67(1/2/3/4): 85-100.
- [12] 航空制造工程手册总编委会. 航空制造工程手册—发动机装配与试车[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996: 76-79.
(The general editor committee of manual for aviation manufacturing engineering. The manual for aviation manufacturing engineering—Engine assembly and test[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996: 76-79.)
- [13] 王世进. 基于自治与协商机制的柔性制造车间智能调度技术研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2008.
(Wang S J. Intelligent scheduling technology in flexible manufacturing shop floor based on mechanism of autonomy and coordination[D]. Shanghai: School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, 2008.)
- [14] 谢志强. 工件间有约束的复杂产品工序调度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 2009.
(Xie Z Q. Study on operation scheduling of complex product with constraint among jobs[D]. Harbin: School of Mechanical Engineering, Harbin University of Science and Technology, 2009.)
- [15] 周亚平, 刘剑宇, 殷保群, 等. 半Markov过程性能势的并行仿真估计[J]. 系统工程, 2005, 23(12): 103-108.
(Zhou Y P, Liu J Y, Yin B Q, et al. The estimation of the semi-Markov process performance potentials based on parallel simulation[J]. Systems Engineering, 2005, 23(12): 103-108.)