

## 基于改进遗传算法的虚拟制造单元继承性重构调度技术

赵霖<sup>1</sup>, 王爱民<sup>2\*</sup>, 王崑声<sup>1</sup>, 于成龙<sup>3</sup>

- (1. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048;
2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;
3. 北京计算机技术及应用研究所, 北京 100854)

**摘要:** 针对多品种变批量生产下效率与柔性兼顾的需求以及既有制造单元难以支持碎片化订单下的关键零件高质量一致性和高效率生产的问题, 建立了以最小化 $C_{max}$ 和最小化重构前后的虚拟制造单元构成差异性为目标的数学模型, 提出了一种基于继承性重构解码策略的改进的遗传算法, 同时设计了一种已知单元构型下的订单与原制造单元之间的相似性计算方法, 并通过量化对原制造单元重构的继承程度, 保证了制造单元的最大化的继承原制造单元的构型而进行重构, 最后结合某光电观测产品零件的实际生产数据, 验证了所提模型与算法的有效性与可行性。

**关键词:** 虚拟制造单元重构; 继承性重构; 遗传算法; 柔性作业车间; 光电观测产品零件  
**中图分类号:** F406      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20220510

## Research on inheritance reconfiguration scheduling of virtual manufacturing cell based on improved genetic algorithm

Zhao Lin<sup>1</sup>, Wang Aimin<sup>2\*</sup>, Wang Kunsheng<sup>1</sup>, Yu Chenglong<sup>3</sup>

- (1. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. Beijing Institute of Computer Technology and Application, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Aiming to the demand for efficiency and flexibility under multi variety and variable batch production and the problem that existing manufacturing units were difficult to support high quality consistency and efficiency of key parts under fragmented orders, a  $C_{max}$  and minimizing the difference of virtual manufacturing cell composition before and after reconfiguration, an improved genetic algorithm based on inherited reconfiguration decoding strategy was proposed, and a similarity calculation method between orders under known cell configuration and the original manufacturing cell was designed. It ensures the maximization of the manufacturing cell and carries out reconstruction by inheriting the configuration of the original manufacturing cell. Finally, the validity and feasibility of the proposed model and algorithm are verified by the actual production data of a photoelectric observation product.

**Key words:** virtual manufacturing cell reconfiguration; inheritance reconstruction; genetic algorithm; flexible workshop; photoelectric observation product parts

收稿日期: 2022-04-21; 修订日期: 2022-05-22

基金项目: 国防基础科研项目 (JCKY2020210B006, JCKY2019204A004)

作者简介: 赵霖, 男, 博士生, 主要从事系统工程与生产管理方面的研究。

导师简介: 王崑声, 男, 研究员, 博士, 主要从事系统工程方面的研究。

通讯作者: 王爱民, 男, 副教授, 博士, 主要从事数字化制造方面的研究。

## 0 引言

制造业是国之根本,是国民经济的基础,是国家综合国力的重要体现。随着市场经济的快速发展,制造订单越来越呈现多品种、变批量的结构模式,产品种类层出不穷,产品生产周期不断缩短,传统的大批量规模式生产已经无法适应当前的市场需求,很多企业迫切需要进行制造方式的转型,即转变为面向订单的大规模定制生产模式,以便更快速地适应市场变化、更高效地响应客户个性化需求。

为了追求生产效率、质量一致性和生产柔性之间的平衡,企业多利用成组技术将工艺路径相似的工件归为同一零件族,然后将各个零件族中的零件加工需要的设备划分在一起,形成制造单元,零件族在各制造单元中独立完成。可见制造单元的划分多取决于需求订单的稳定性,其组成随着订单结构的变化而进行相应的调整。但面对市场需求的瞬息万变、产品种类的快速迭代,使得大多数企业难以应对构建持续变化的物理单元带来的时间和成本损失<sup>[1]</sup>。Altom 首次提出了虚拟制造单元<sup>[2]</sup>,虚拟制造单元是逻辑型制造单元,零件在其中进行流水式生产,但单元内的设备并不像物理单元那样具有物理上的构型。因此,当订单结构发生变化时,虚拟制造单元的构成随之变化,但设备的物理位置等硬件条件却无需发生改变,这使得虚拟单元的演变和继承变得简单<sup>[3]</sup>。

尤其是在航天精导武器系统特别是光电制导或光电观测产品等典型产品的研制生产过程中,由于零件加工精度高,为了保证加工精度及其质量的一致性,建设了专门的制造单元进行生产。但随着多批次碎片化订单成为常态,专门制造单元及其内部的设备利用率难以始终保持满负荷利用而出现下降趋势,其核心原因在于物理单元的配置限制了其内设备的灵活运用问题。

因此,在客户需求多样性、订单及批量多变的背景下,根据车间的实际约束情况,根据订单需求的变化,构建持续性变化的虚拟制造单元,使得关键零件、紧急订单在虚拟制造单元中进行高效流水式生产,非关键零件进行离散式生产,实现低成本、高效率生产目标。

图 1 为虚拟制造单元持续性重构示意图。文中研究的虚拟制造单元重构调度问题涉及两个方面的

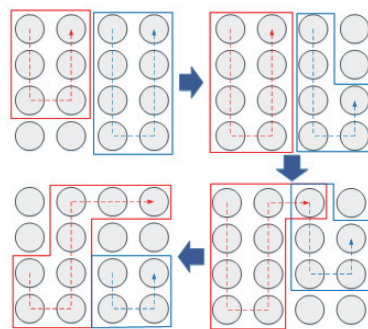


图 1 虚拟制造单元持续性重构示意图

Fig.1 Schematic diagram of continuous reconfiguration of virtual manufacturing cell

内容:

(1) 面向持续变化的订单结构,基于原制造单元构建方案对制造单元进行继承性重构

Ratchev<sup>[4]</sup>针对虚拟制造单元的动态演变,提出了一种四阶段方法。Safaei 等<sup>[5]</sup>研究了制造单元的动态重构问题,采用模拟退火算法对提出的混合整数规划模型进行求解,通过案例验证了所提模型与算法的有效性。Deep 和 Singh<sup>[6]</sup>针对动态单元制造系统中多个阶段的单元构建问题,提出了一种整数规划模型。Nomden 等<sup>[7]</sup>对即将进入系统的工件数据进行分析,完成零件族的划分,并在此基础上提出了一种新的基于零件族的调度方法,并考虑订单的交付期约束。Kesen 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于启发式规则的遗传算法,求解了具有并行机和工件分批的 VMCs 调度问题,并通过对比验证了所提算法性能优于混合整数规划模型。考虑到订单的动态到达,Baykasoğlu 和 Gorkemli<sup>[9]</sup>提出了一种基于代理的建模方法,实现了零件族建立、VMCs 构建和 VMCs 调度过程的协调。Delgoshai 等<sup>[10]</sup>利用遗传算法和模拟退火算法的混合算法实现了 DCMS 的调度。Azadeh 等<sup>[11]</sup>在多目标 DCMS 中加入考虑了加工人员的可靠性,并使用非支配排序遗传算法和多目标粒子群优化算法提供了解决方案。Bayram 和 Şahin<sup>[12]</sup>针对多阶段单元制造系统设计问题,提出了线性规划模拟退火算法和遗传算法,实现了流水式工件作业模式下的 VMCs 的持续构建。

(2) 基于重构后的制造单元的任务调度

Kesen S E<sup>[8]</sup>提出了一个多目标混合整数规划模型,解决了具有并行机及任务分批的虚拟制造单元调度问题。Zhu J 等<sup>[13]</sup>研究了生产调度周期动态变化过

程中的调度问题。Kesen S E<sup>[8]</sup> 还针对制造单元调度问题, 建立以最小化物流距离和工件总完工时间为目标的数学模型, 采用改进的遗传算法进行求解, 通过案例验证了算法的可行性与有效性。针对同样的问题, Aksoy A 等<sup>[14]</sup> 建立了以最小化交货延期时间和物流距离为目标的调度模型, 结合混合模拟退火算法进行求解, 并通过实际案例验证了所提模型与算法的可行性与优越性。Sakhaii 等<sup>[15]</sup> 针对制造单元调度问题建立了以最小化总成本为目标的设备存在不稳定性的调度模型。Jiang 等<sup>[16]</sup> 提出了一种具有自适应算子和可变搜索深度的人工蜂群算法 (Artificial Bee Colony, ABC), 通过将可变搜索深度方法引入雇佣蜂的搜索阶段, 使得相应的搜索深度能够根据历史信息自适应的确定, 解决了具有有限运输能力的单元调度问题。Tang 等<sup>[17]</sup> 考虑了零件的跨单元次数, 使用分散搜索算法解决了以最小化总加权拖期时间为目标的作业车间单元调度问题。

综上, 文中针对虚拟制造单元重构调度的背景与现状, 重点研究虚拟制造单元继承性重构调度问题, 以最小化 $C_{max}$ 和最小化重构前后虚拟制造单元构成差异性为目标, 提出一种基于继承性重构解码策略的改进的遗传算法。该算法通过对原制造单元重构的继承性进行量化, 在保证调度目标的同时, 最大的继承了原制造单元划分方案, 实现订单结构变化下的虚拟制造单元的继承性重构与计划排产。

## 1 问题描述与数学建模

### 1.1 问题描述

文中研究的是离散生产车间虚拟制造单元继承性重构调度问题, 其应用背景是传统的柔性作业车间。与传统柔性作业车间调度问题相同点为: (1) 均涉及  $n$  种订单  $J_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 、 $m$  台设备; (2) 每一种工件  $J_i$  的加工均需要经过一系列具有严格顺序的工序,  $O_{ij}$  表示订单  $J_i$  的第  $j$  道工序; (3) 每一道工序都可以由一台或者多台设备进行加工, 因此每一个订单  $J_i$  都有多个可选工艺路线。

与传统柔性作业车间调度问题不同的是, 每个订单均有一定的批量  $N_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 还要考虑原虚拟制造单元的构成。从订单的角度看, 文中研究的问题需要为每一个订单安排加工设备, 实现关重/紧急订

单在虚拟制造单元中的流水式生产; 从运行时间的角度看, 该问题涉及的虚拟制造单元的构成随着订单结构的变化而持续性变化。因此文中研究的虚拟制造单元继承性重构调度问题涉及 3 个子问题: 分配、排序和单元重构, 从而达到订单的最大完工时间 ( $C_{max}$ ) 最小, 并且重构前后虚拟制造单元构成差异性最小化。为了更好地解决问题, 文中提出一些假设:

- (1) 所有的设备均在 0 时刻可用;
- (2) 所有的工件都可以在 0 时刻开始被加工;
- (3) 同一工序在不同设备上加工所需的处理时间相同;
- (4) 属于不同工件的工序之间没有顺序约束;
- (5) 一台设备在同一时刻只能加工一道工序;
- (6) 任意一道工序在加工时不能被打断, 直到该工序加工结束;
- (7) 不考虑设备故障的情况;
- (8) 不考虑工序周转需要的时间;
- (9) 所有设备的加工日制一致。

### 1.2 数学建模

文中涉及的虚拟制造单元继承性重构调度的数学模型所用的相关符号定义和说明如下:

$J_i$ : 订单  $i, i = 1, 2, \dots, n$ ;

$N_i$ : 订单  $i$  的数量;

$O_{ij}$ : 订单  $i$  的第  $j$  道工序,  $j = 1, 2, \dots, R_i$ ;

$T_{ij}$ : 订单  $i$  的第  $j$  道工序的单元工时;

$ST_{ij}$ : 订单  $i$  的第  $j$  道工序的实际开始时间;

$ET_{ij}$ : 订单  $i$  的第  $j$  道工序的实际结束时间;

$K$ : 设备类型的数量,  $k = 1, 2, \dots, K$ ;

$M_l$ : 设备  $l, l = 1, 2, \dots, m$ ;

$count_{l-l'}$ : 设备  $l$  和设备  $l'$  之间的距离;

$L$ : 一个足够大的常数;

$IK_{lk} = \begin{cases} 1, & \text{设备 } l \text{ 属于类型 } k \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$ ;

$OC$ : 重构前的原制造单元数量;

$OC_a$ : 第  $a$  个原制造单元,  $a = 1, 2, \dots, OC$ ;

$AM_{OC_a}$ : 第  $a$  个原制造单元中包含设备的数量,  $a = 1, 2, \dots, OC$ ;

$IOC_{la} = \begin{cases} 1, & \text{设备 } l \text{ 属于单元 } OC_a \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$ ;

$IOC_{ka} = \begin{cases} 1, & \text{设备类型 } k \text{ 属于单元 } OC_a \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$ ;

$OC'$ : 重构后的制造单元数量;

$$IOC'_{la} = \begin{cases} 1, & \text{设备} l \text{ 属于单元 } OC'_a; \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$PJ_{OC_a}$ : 制造单元  $OC_a$  中的零件族;

$PM_{OC_a}$ : 制造单元  $OC_a$  中包含的设备组;

$PMK_{OC_a}$ : 制造单元  $OC_a$  中包含的设备组种类;

$W_{iq}$ : 订单  $i$  的可选加工路径,  $q = 1, 2, \dots, WO$ ;

$S_{W_{iq}OC_a}$ : 订单  $i$  的选择加工路径是  $W_{iq}$  时与原制造单元  $OC_a$  的相似度值;

$S_{W_{iq}PJ_{OC_a}}$ : 订单  $i$  的选择加工路径是  $W_{iq}$  时与原制造单元  $OC_a$  中的零件族  $PJ_{OC_a}$  相似度值;

$S_{W_{iq}PM_{OC_a}}$ : 订单  $i$  的选择加工路径是  $W_{iq}$  时与原制造单元  $OC_a$  中的设备组  $PM_{OC_a}$  相似度值;

$AQ_{W_{iq}PJ_{OC_a}}$ : 订单  $i$  的选择加工路径是  $W_{iq}$  时在原制造单元  $OC_a$  中的零件族  $PJ_{OC_a}$  中的加工工序总数量;

$AQ_{PJ_{OC_a}}$ : 原制造单元  $OC_a$  中的零件族  $PJ_{OC_a}$  中的加工工序总数量;

$TQ_{W_{iq}PJ_{OC_a}}$ : 订单  $i$  的选择加工路径是  $W_{iq}$  时在原制造单元  $OC_a$  中的零件族  $PJ_{OC_a}$  中的加工工序总工时;

$TQ_{PJ_{OC_a}}$ : 原制造单元  $OC_a$  中的零件族  $PJ_{OC_a}$  中的加工工序总工时;

$$X_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{如果设备} l \text{ 是工序 } O_{ij} \text{ 的可选加工设备}; \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$Y_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{工序 } O_{ij} \text{ 在设备 } l \text{ 上加工}; \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$B_{ijl-r'j'l} =$$

$$\begin{cases} 1, & \text{如果工序 } O_{ij} \text{ 紧接着工序 } O_{i(j+1)} \text{ 在设备 } l \text{ 上加工}; \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$$U_{ij-(j+1)} = \begin{cases} 1, & \text{工序 } O_{ij} \text{ 和工序 } O_{i(j+1)} \text{ 之间流水生产}; \\ 0, & \text{否则} \end{cases};$$

$C_{max}$ : 所有工序的最大完工时间;

$\bar{\delta}$ : 重构前后制造单元间的平均差异度;

$\beta_a$ : 重构后制造单元与对应原制造单元的差异度;

$\varepsilon$ : 常数, 订单和原有制造单元对应零件族间相似度权重系数;

$\tau$ : 常数, 订单和原有制造单元包含的设备集合间相似度权重系数。

$$\min : C_{max} \quad (1)$$

$$\min : \bar{\delta} \quad (2)$$

公式 (1) 和公式 (2) 表示问题的两个调度目标, 即

最小化所有工序的最大完工时间, 最小化重构前后制造单元间的平均差异度。

$$C_{max} = \max(ET_{ij}), \forall i, j \quad (3)$$

$$ET_{ij} = ST_{ij} + T_{ij} \times N_i, \forall i, j \quad (4)$$

公式 (3) 和公式 (4) 描述了工序最大完工时间的具体计算方法, 其中公式 (4) 描述了工序的开始时间、结束时间、单件工时和订单数量之间的关系。

$$\bar{\delta} = \frac{OC'}{OC} \times \frac{\sum_a^{OC'} \beta_a}{OC'}, \forall a \quad (5)$$

$$\beta_a = \frac{AQ_{PJ_{OC_a}}}{AQ_{PJ_{OC_a}}} \times \frac{TQ_{W_{iq}PJ_{OC_a}}}{TQ_{W_{iq}PJ_{OC_a}}} \times \frac{\sum_{l=1}^m M_l \times IOC'_a}{\sum_{l=1}^m M_l \times IOC_a} \times \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^m M_l \times IOC'_a \times IOC'_{ka} \times IK_{lk}}{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^m M_l \times IOC_a \times IOC_{ka} \times IK_{lk}} \quad (6)$$

公式 (5) 和公式 (6) 描述了重构前后制造单元间的平均差异度的具体计算方法, 其中公式 (5) 表示两个方面: (1) 重构后存在的制造单元总数量与重构前存在制造单元总数的差异; (2) 重构后的各个制造单元与原制造单元的间的差异。公式 (6) 描述了公式 (5) 的重构后的各个制造单元与原制造单元的间的差异度的计算方法, 主要包括 4 个方面: (1) 重构后对比重构前的制造单元对应零件族的总加工工序数量的差异度; (2) 重构后对比重构前的制造单元对应零件族的加工工序总加工工时的差异度; (3) 重构后对比重构前的制造单元所包含设备数量的差异度; (4) 重构后对比重构前的制造单元所包含设备种类的差异度。

$$\sum_{l=1}^m X_{ijl} > 0, \forall i, j \quad (7)$$

$$X_{ijl} - Y_{ijl} \geq 0, \forall i, j \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^m Y_{ijl} = 1, \forall i \quad (9)$$

$$ST_{i(j+1)} \geq ET_{ij}, U_{ij-(j+1)} = 0, \forall i, j \quad (10)$$

$$ST_{i(j+1)} \geq ST_{i'j'} + T_{i'j'}, U_{ij-(j+1)} = 1, \forall i, j \quad (11)$$

$$ET_{i(j+1)} \geq ET_{ij} + T_{i(j+1)}, U_{ij-(j+1)} = 1, \forall i, j \quad (12)$$

$$ST_{ij} + (1 - B_{ijl-r'j'l}) \times L \geq ST_{i'j'} + T_{i'j'} \times N_{i'} \quad (13)$$

公式 (7)~(9) 为排产设备约束。公式 (7) 表示任意一道工序都必须至少有一台可选设备, 公式 (8) 表示工序必须在其可选设备上选择一个安排, 公式 (9) 表示任意一个工序的加工设备仅有一台, 且属于其可选设备集合, 公式 (10) 表示工序间离散生产时, 后一道工序必须在前一道工序全部结束之后才能开始, 公式 (11) 和公式 (12) 表示工序间流水生产时, 后一道工序的开始时间和结束时间应同时满足的约束, 公式 (13) 保证了每一台设备在同一时刻最多只能加工一道工序。

## 2 基于继承性重构的改进遗传算法

从排产结果的角度看, 虚拟制造单元可以在排产结束后自然形成。在一定的调度规则下, 只要改变工序的安排顺序, 虚拟制造单元就会随着任务的变化发生改变。文中从原制造单元以及新订单信息为输入依据, 判断新订单和原制造单元的零件族、原制造单元的设备能力间的相似度, 并根据新订单集合的相似度进行聚类分析, 通过对原有制造单元进行继承性重构, 最终得到随着新订单任务结构变化而变化的新制造单元的构型。文中设计了一种针对持续性变化的订单需求的柔性离散车间虚拟制造单元调度问题处理机制, 该机制以改进的遗传算法为核心, 基于继承性重构的解码策略, 实现虚拟制造单元构型随着订单结构变化的持续重构以及订单任务的持续调度。

文中所提的基于继承性重构的改进遗传算法流程如图 2 所示, 其步骤如下:

步骤 1: 对输入的订单信息和原制造单元的信息进行相似性分析;

步骤 2: 根据计算的得到的相似度进行排序, 并组装成订单的相似单元链;

步骤 3: 初始化算法的种群个体;

步骤 4: 基于继承性重构解码规则进行解码, 并计算个体的适应度值;

步骤 5: 判断是否满足算法终止条件, 若是, 则转到步骤 8, 否则转到步骤 6;

步骤 6: 对种群进行交叉、变异操作;

步骤 7: 对种群进行选择操作, 转到步骤 4;

步骤 8: 输出种群的排产方案和制造单元重构方案。

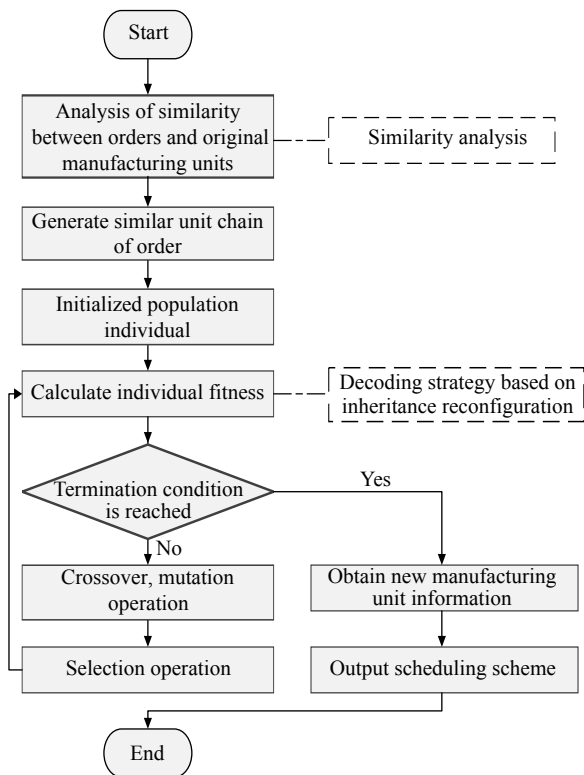


图 2 基于继承性重构的改进遗传算法流程图

Fig.2 Flow chart of improved genetic algorithm based on inheritance reconstruction

### 2.1 基于工序的编码

文中采用基于工序的编码方式生成染色体个体, 染色体的每一个基因表示对应的订单的编号, 相同的基因表示属于同一个订单的不同的工序, 按照顺序依次生成。

图 3 所示为一个具有 3 个订单的染色体编码示意图, 其表示所有工序的安排顺序为  $O_{11} \rightarrow O_{21} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{31} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{33} \rightarrow O_{22} \rightarrow O_{23} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{24}$ 。



图 3 一个包含 3 个订单的个体编码示意图

Fig.3 Schematic diagram of an individual code containing 3 orders

### 2.2 订单与原制造单元的相似性计算

在单元的构建过程中常常需要将订单相似性聚类为一个零件族, 并对其合理分配设备资源, 实现制造单元的构建。这种将订单相似性聚类, 对具有相似性的订单零件族在单元内加工生产可减少生产准备时间, 增加工人的技术熟练程度, 从而提高车间的生

产效率,有效保证生产质量的一致性。在已有制造单元构型的时候,面对新订单结构的差异,原有制造单元的组织构型可能不再适应新订单的生产,必须对其进行调整重构来满足新产品的高效生产。所以在针对既有制造单元构型的制造单元重构调度问题研究中,需要对新订单和原有制造单元对应的零件族、包含的设备组进行相似性分析,通过量化相似性以判断原有制造单元对新订单的适用程度,对适用度低的制造单元进行继承性重构,以达到对制造单元的低成本的持续性重构。现有的一些相似系数的计算都是应用在制造单元的构建时期,已经不能满足已知制造单元构型、对其进行重构的问题。因此,文中在参考文献 [18] 基础上进行改进,并参考文献 [19] 进行优化,形成一种针对已经存在的制造单元和新订单的相似性系数计算方法,这种新的相似性系数主要是针对新订单和原有制造单元适用的订单产品族、原有制造单元包含的设备集合进行的相似性分析,从而量化新订单与已存在的各个制造单元集合之间的相似关系。其对应的表达式如公式 (14)~(16) 所示:

$$S_{W_{iq}OC_a} = \varepsilon \times S_{W_{iq}PJOC_a} + \tau \times S_{W_{iq}PMOC_a}, \forall a, i \quad (14)$$

$$S_{W_{iq}PJOC_a} = \frac{AQ_{W_{iq}PJOC_a}}{AQ_{PJOC_a}} \times \frac{TQ_{W_{iq}PJOC_a}}{TQ_{PJOC_a}}, \forall a, i \quad (15)$$

$$S_{W_{iq}PMOC_a} = \frac{\sum_{j=1}^{R_i} \sum_{l=1}^m X_{ijl} \times IOC_{la}}{PM_{OC_a}} \times \frac{\sum_{j=1}^{R_i} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^m X_{ijl} \times IOC_{ka} \times IK_{lk}}{PMK_{OC_a}}, \forall a, i \quad (16)$$

公式 (14) 表示订单  $J_i$  和原制造单元  $OC_a$  的相似度值的计算方法,其主要包括两部分:(1) 订单  $J_i$  和原制造单元  $OC_a$  对应的零件族之间的相似度  $S_{W_{iq}PJOC_a}$ ; (2) 订单  $J_i$  和原制造单元  $OC_a$  包含的设备集合之间的相似度  $S_{W_{iq}PMOC_a}$ 。通过公式可看出,相似度值越大,相似关系越强。

其中公式 (15) 描述了  $S_{W_{iq}PJOC_a}$  的具体计算方法,其包含了:(1) 订单  $J_i$  可在制造单元  $OC_a$  中加工的工序数量和制造单元  $OC_a$  对应零件族在单元中的平均加工工序数量比值;(2) 订单  $J_i$  可在制造单元  $OC_a$  中加工的工序总时长和制造单元  $OC_a$  对应零件族在单元中的平均

加工工序总时长比值;

公式 (16) 描述了  $S_{W_{iq}PMOC_a}$  的具体计算方法,其包含了:(1) 订单  $J_i$  可选设备且属于制造单元  $OC_a$  的数量和制造单元  $OC_a$  包含的设备数量比值;(2) 订单  $J_i$  可选设备种类且属于制造单元  $OC_a$  的数量和制造单元  $OC_a$  包含的设备种类比值;

通过对订单和制造单元间相似分析并量化为相似度值,可将其递减排序,并与订单绑定、组装为订单-原制造单元相似链,方便后续的计算。

### 2.3 基于继承性重构解码策略

基于继承性重构解码策略保证在对工序进行设备选择时优先选择相似程度高、最早开工的制造单元中的可选设备,对制造单元进行最大程度的继承的同时,减少了订单延期的风险。基于继承性重构解码策略如图 4 所示。

基于继承性重构解码策略的具体步骤如下:

步骤 1: 根据种群个体的基于工序的编码获得待排产工序集合  $R$ ;

步骤 2: 令  $i=0$ ;

步骤 3: 判断  $i$  是否大于待排产工序集合的上限,若是,则转到步骤 12, 否则, 转到步骤 4;

步骤 4: 找到  $R_i$  对应的订单  $O_j$  及其对应的制造单元相似链集合  $C$ ;

步骤 5: 令  $h=0$ ;

步骤 6: 判断  $h$  是否超过相似链集合  $C$  的上限,若是,则令  $i=i+1$ , 转到步骤 3, 否则转到步骤 7;

步骤 7: 判断  $C_h$  中是否包含工序  $R_i$  的可选设备,若是则转到步骤 8, 否则, 令  $h=h+1$ , 转到步骤 6;

步骤 8: 计算选择该设备时工序  $R_i$  的最早开始时间  $t$ , 并更新  $ET_i = \max(t, ET_i)$ ;

步骤 9: 判断工序  $R_i$  的最早开始时间是否未被更新,若是,则转到步骤 10, 否则, 转到步骤 11;

步骤 10: 在工序  $R_i$  的可选设备中选择具有最早开始时间的设备, 令  $i=i+1$ , 转到步骤 3;

步骤 11: 选择与工序  $R_i$  相似度高、包含可选设备的制造单元中的设备, 令  $i=i+1$ , 转到步骤 3;

步骤 12: 输出排产结果并退出流程。

### 2.4 适应度函数

文中研究的虚拟制造单元继承性重构调度问题具有两个目标函数: 最小化工件的最大完工时间和最

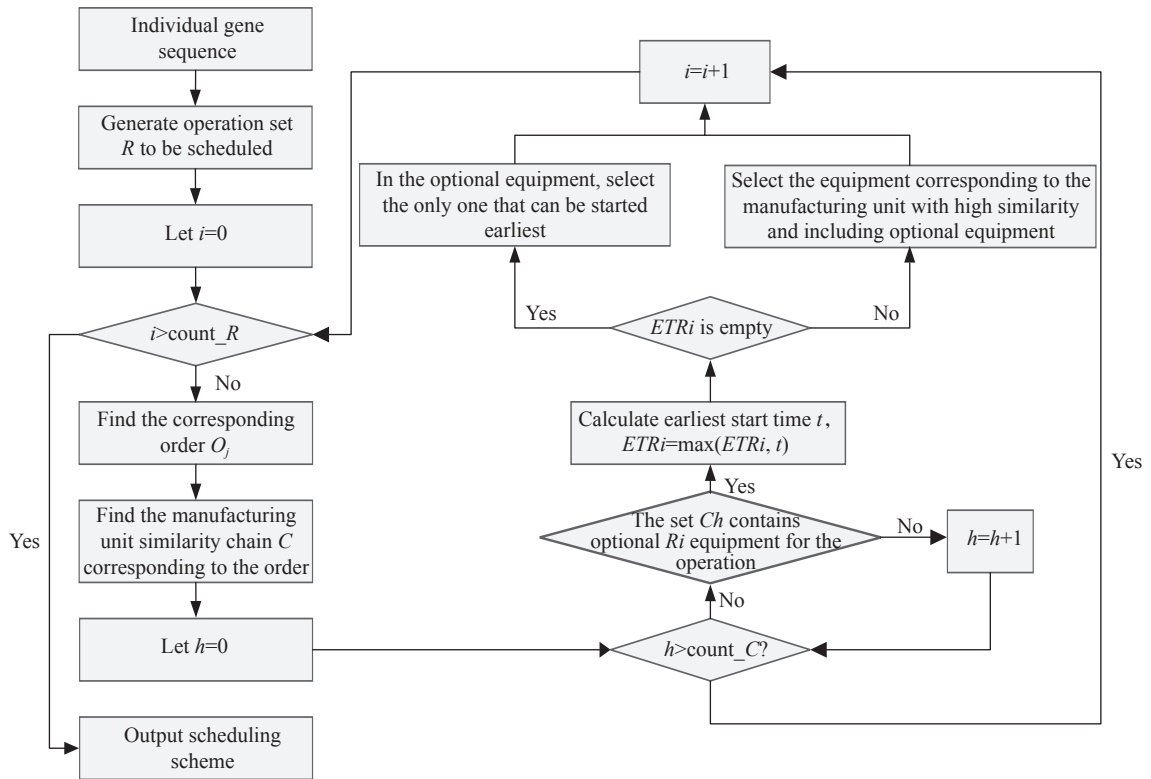


图 4 基于继承性重构的解码策略流程

Fig.4 Decoding strategy flow based on inheritance reconstruction

小化重构前后虚拟制造单元构成之间的差异。由于解码操作中已经对重构前后虚拟制造单元构成的差异进行了控制,此处仅以 $C_{max}$ 的值作为个体的适应度值。

### 2.5 交叉变异操作

文中的交叉算子采用传统的 POX 交叉产生可行子代,图 5 所示为 POX 交叉算子示意图。

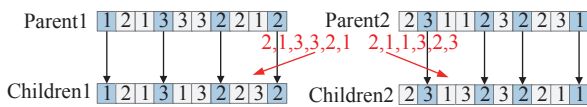


图 5 POX 交叉算子

Fig.5 POX crossover operator

文中的变异算子通过随机交换染色体中的两个基因来实现个体的变异,图 6 所示为变异操作示意图。

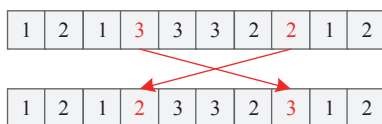


图 6 变异算子

Fig.6 Mutation operator

## 3 实例验证

### 3.1 案例数据

文中结合某企业光电观测产品的机加零件生产车间,对文中所提的虚拟制造单元继承性重构调度问题的算法与策略进行了验证。该光电观测产品零件生产具有较高的加工精度,为了保证加工效率同时兼顾加工柔性,采用针对部分零件进行逻辑制造单元的构建,并随任务的结束与解散,同时支持新订单组合模式下制造单元的继承性演变,提高系统的动态优化配置能力。下面以该车间规模为 $12 \times 8 \times 4$ 的一组数据为例说明文中所提模型的建立和算法的求解过程。

该车间共有 8 种类型的共 12 台加工设备,各个设备种类与加工设备之间的映射关系如表 1 所示。

表 1 各设备种类与加工设备映射关系

Tab.1 Mapping relationship between each equipment type and processing equipment

Type	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$
Number	$M_2, M_7$	$M_5$	$M_8$	$M_4, M_6$	$M_{11}$	$M_9, M_{12}$	$M_1, M_{10}$	$M_3$

统计了车间原有的制造单元的信息与各个设备之间的零件族的基本信息如表 4 所示。文中所涉及的需要排产的新订单的基本信息如表 5 所示。

表 2 各个设备之间的距离

Tab.2 Distance of each equipment

	Equipment number											
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$	$M_{11}$	$M_{12}$
$M_1$	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$M_2$	3	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$M_3$	10	8	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$M_4$	12	11	2	0	-	-	-	-	-	-	-	-
$M_5$	10	13	4	3	0	-	-	-	-	-	-	-
$M_6$	8	9	13	15	15	0	-	-	-	-	-	-
$M_7$	10	12	9	12	9	3	0	-	-	-	-	-
$M_8$	8	7	12	14	11	4	2	0	-	-	-	-
$M_9$	19	16	23	26	25	17	14	12	0	-	-	-
$M_{10}$	17	15	19	16	17	9	11	14	23	0	-	-
$M_{11}$	5	8	10	12	13	8	7	10	15	17	0	-
$M_{12}$	18	20	13	14	16	6	7	9	19	26	5	0

表 3 原有制造单元信息

Tab.3 Original manufacturing unit information

Manufacturing cell	Cell 1	Cell 2
Part family	$J_1, J_5$	$J_2, J_3, J_4, J_6$
Machine	$M_2, M_3, M_7, M_{10}, M_{11}$	$M_4, M_6, M_9, M_{12}$

表 4 原制造单元对应的零件族的基本信息

Tab.4 Basic information of the part family corresponding to the original manufacturing unit

Order	Count	Process	Can use machine	Time
$J_1$	39	$O_{11}$	$M_1/M_2$	152
		$O_{12}$	$M_3/M_4/M_5$	222
		$O_{13}$	$M_6/M_7/M_8$	277
		$O_{14}$	$M_{10}$	207
		$O_{15}$	$M_{11}$	126
$J_2$	54	$O_{21}$	$M_3/M_4/M_5$	150
		$O_{22}$	$M_6/M_7/M_8$	223
		$O_{23}$	$M_9$	171
$J_3$	45	$O_{31}$	$M_3/M_4/M_5$	190
		$O_{32}$	$M_6/M_7/M_8$	260
		$O_{33}$	$M_9$	168
		$O_{34}$	$M_{12}$	216
$J_4$	138	$O_{41}$	$M_3/M_4/M_5$	100
		$O_{42}$	$M_6/M_7/M_8$	130
		$O_{43}$	$M_9$	150
$J_5$	75	$O_{51}$	$M_1/M_2$	260
		$O_{52}$	$M_3/M_4/M_5$	340
		$O_{53}$	$M_6/M_7/M_8$	204
		$O_{61}$	$M_3/M_4/M_5$	279
$J_6$	36	$O_{62}$	$M_6/M_7/M_8$	126
		$O_{63}$	$M_{12}$	457
		$O_{64}$	$M_9$	105
		$O_{65}$	$M_{11}$	568



表 5 新增订单的基本信息

**Tab.5 Basic information of new order**

Order	Count	Process	Can use machine	Time
$J_7$	45	$O_{71}$	$M_1/M_2$	176
		$O_{72}$	$M_3/M_4/M_5$	470
		$O_{73}$	$M_6/M_7/M_8$	300
		$O_{74}$	$M_{11}$	324
		$O_{81}$	$M_1/M_2$	386
$J_8$	32	$O_{82}$	$M_3/M_4/M_5$	160
		$O_{83}$	$M_6/M_7/M_8$	145
		$O_{84}$	$M_{10}$	78
		$O_{85}$	$M_{11}$	237
		$O_{91}$	$M_3/M_4/M_5$	90
$J_9$	98	$O_{92}$	$M_6/M_7/M_8$	190
		$O_{93}$	$M_9$	93
		$O_{94}$	$M_{12}$	264

3.2 结果验证

所用算法使用 C#进行编程, 在 64 位 windows 操作系统、Intel(R) Core(TM) i5-7600 处理器、16 GB 运行内存的环境中运行。算法参数设置为: 初始种群规模为 100, 最大迭代次数为 100, 取  $\varepsilon=0.57$ ,  $\tau = 0.43$ 。

3.2.1 相似性分析

由表 6 可看出订单  $J_7$  的制造单元相似链为单元 1→单元 2, 订单  $J_8$  的制造单元相似链为单元 1→单元 2; 订单  $J_9$  的制造单元相似链为单元 2→单元 1。在执行基于继承性重构解码策略时, 针对每一个订单的任意一个工序的安排设备时, 优先考虑相似性大的单元。

表 6 订单与原制造单元的相似性分析

Tab.6 Similarity analysis between order and original manufacturing unit

Original manufacturing cell	Orders		
	$J_7$	$J_8$	$J_9$
Cell 1	0.49	0.31	0.13
Cell 2	0.22	0.04	0.89

3.2.2 排产及重构结果

将新增订单  $J_7, J_8, J_9$  的基本信息、原制造单元的基本信息及其对应的零件族的基本信息等信息作为算法的输入, 使用文中所提算法进行求解, 最终得到的排产结果甘特图如图 7 所示, 对应的重构后的制造单元结果如表 7 所示, 其继承关系如图 8 所示。算法运行的收敛图如图 9 所示。

通过对比原制造单元和重构后制造单元, 可以看出制造单元的构成形态具有较大的相似性, 重构后的单元 1 和单元 2 对原制造单元具有完全的继承性, 只是在具体设备方面具有一定的调整, 这样不仅实现对原制造单元构成的继承, 同时也继承了原制造单元所具有的协同团队生产的经验, 对于支持精密光电观测产品零件的精密生产的精度一致性保证以及单元化生产效率的提升具有重要的促进作用。

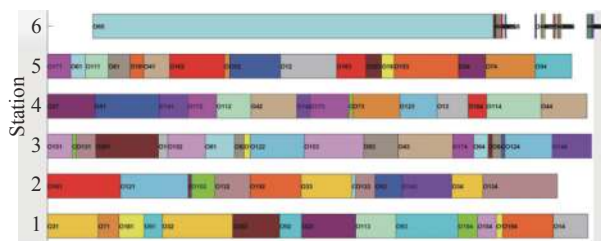


图 7 排产调度甘特图

Fig.7 Sweet potato chart of scheduling

表 7 制造单元继承性重构对比

Tab.7 Comparison of manufacturing cell inheritance reconstruction

Manufacturing cell	Content	Cell 1	Cell 2	Cell 3
Original manufacturing cell	Part family	$J_1, J_5$	$J_2, J_3, J_4, J_6$	-
	Devices	$M_2, M_3, M_7, M_{10}, M_{11}$	$M_4, M_6, M_9, M_{12}$	-
Reconfigurable cell	Part family	$J_5$	$J_2, J_3, J_4,$	$J_1, J_7, J_9$
	Devices	$M_2, M_3, M_7, M_{10}$	$M_4, M_6, M_9$	$M_1, M_5$

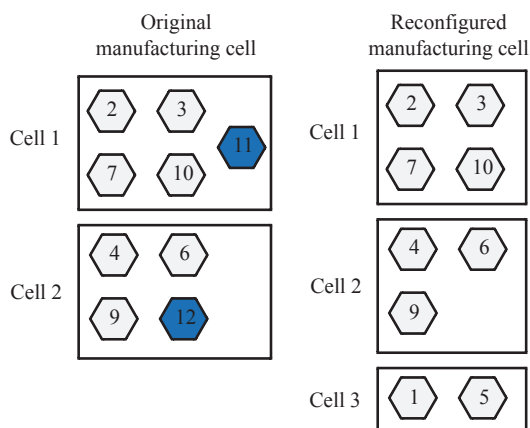


图 8 制造单元继承性重构示意图

Fig.8 Schematic diagram of manufacturing cell inheritance reconstruction

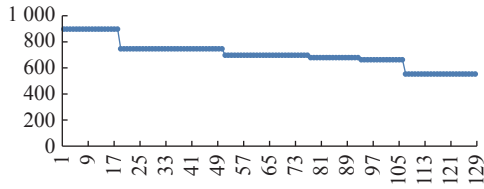


图 9 算法收敛图

Fig.9 Algorithm convergence graph

## 4 结论

文中针对多品种、变批量的背景与现状,研究了虚拟制造单元继承性重构调度问题,建立了以最小化  $C_{max}$  和最小化重构前后虚拟制造单元构成差异性为目标的数学模型,提出了一种基于继承性重构解码策略的改进的遗传算法,通过量化对原制造单元重构的继承程度,使得在最优化调度目标的同时,保证了订单最大程度的在虚拟制造单元中进行流水式生产,同时对原制造单元划分方案进行继承,减少了制造单元的构型信息的频繁变化,实现了订单结构变化下的虚拟制造单元的继承性重构与计划排产。最后通过某光电产品零件生产实际数据,对文中所提的虚拟制造单元继承性重构调度技术进行了有效验证。

### 参考文献:

[1] Gao J, Sun L, Gen M. A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems [J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(9): 2892-2907.

[2] Altom R J. Costs and savings of group technology, Research Report[R]. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1978.

[3] Nomden, Slomp J, Suresh N C. Virtual manufacturing cells: A taxonomy of past research and identification of future research issues. [J]. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2006, 17(2): 71-92.

[4] Ratchev S M. Concurrent process and facility prototyping for formation of virtual manufacturing cells [J]. *Integrated Manufacturing Systems*, 2001, 12(4): 306-315.

[5] Safaei N, Saidi-Mehrabad M, Jabal-Ameli M S. A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 185(2): 563-592.

[6] Deep K, Singh P K. Dynamic cellular manufacturing system design considering alternative routing and part operation tradeoff using simulated annealing based genetic algorithm [J]. *Sādhanā*, 2016, 41(9): 1063-1079.

[7] Gert Nomden, Durk-Joukevan der Zee. Virtual cellular manufacturing: configuring routing flexibility [J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 112(1): 439-451.

[8] Kesen S E, Das S K, Güngör Z. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (VMCs) [J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(6): 1148-1156.

[9] Gorkemli, Latife, Baykasoglu, et al. Dynamic virtual cellular manufacturing through agent-based modelling [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 30(6): 564-579.

[10] Delgoshaei A, A Ariffin M K, Gomes C, et al. A multi-period scheduling of dynamic cellular manufacturing systems in the presence of cost uncertainty [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 100: 110-132.

[11] Azadeh A, Elahi S, Farahani M H, et al. A genetic algorithm-taguchi based approach to inventory routing problem of a single perishable product with transshipment [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 104: 124-133.

[12] Bayram H, Sahin R. A comprehensive mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design and linear programming embedded hybrid solution techniques [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 91(1): 10-29.

[13] Hu J, Gu X, Gu W. Robust optimization approach for short-term scheduling of batch plants under demand uncertainty [J]. *Kybernetes*, 2011, 40(5/6): 860-870.

[14] Aksoy A, Öztürk N. Simulated annealing approach in scheduling of virtual cellular manufacturing in the automotive industry [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2010, 52(1/2/3/4): 82-95.

[15] Sakhaii M, Tavakkoli-Moghaddam R, Bagheri M, et al. A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 40(1): 1-13.

[16] Jiang Y, Zhou P, Zhan R, et al. An artificial bee colony with self-adaptive operators and alterable search depth approach for intercell scheduling [C]//2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), 2016: 112-119.

[17] Tang J, Wang X, Kaku I, et al. Optimization of parts scheduling in multiple cells considering intercell move using scatter search approach [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2010, 21(4): 525-537.

[18] Di Tong. Study on virtual cellular dynamic formation and scheduling with new task insertion [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[19] Xu Y. Research on manufacturing cell reconfiguration technology of discrete production line[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese)