

# 基于分散搜索的多目标动态单元构建方法<sup>①</sup>

王晓晴, 唐加福, 宫俊

(东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室, 沈阳 110004)

**摘要:** 研究市场需求变化的情况下生产单元内部配置可调整的多周期多目标动态单元构建方法. 考虑单元构建费用、设备利用率和跨单元移动数目, 提出了动态单元构建方法的非线性多目标数学规划模型. 为有效求解该模型, 开发了一种分散搜索算法. 该算法利用多样性初始解产生方法、全局判断方法、参考集更新方法和解改进方法等实现了生产单元的动态构建. 对大规模的单元构建实例进行仿真分析, 通过与基准算法进行比较, 验证了模型与算法的有效性.

**关键词:** 单元生产; 动态单元构建; 分散搜索; 局域搜索

**中图分类号:** TP29    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-9807(2009)05-0044-09

## 0 引言

单元生产方式 (cellular manufacturing, CM) 作为成组技术的应用, 是在生产单元中根据设备功能的相似性对其进行分组从而以零件族的形式进行生产加工的一种先进生产方式. 单元生产方式提高了生产制造的柔性, 能够快速响应市场对多品种、少批量的需求, 同时基于单元生产方式的设备布局是实现精益生产的重要硬件支撑. 实践证明, 单元生产系统具有在制品库存少、订单响应时间短、生产物流量小、以及生产费用低等优点<sup>[1]</sup>.

在单元生产方式发展的 20 多年中, 生产单元的构建方法 (cell formation, CF) 受到学者们的广泛关注<sup>[2~4]</sup>, 但多数研究假设市场需求是均衡、静态不变的. 而当今市场呈现出产品生命周期短、交货时间短以及客户个性化需求增加等新的特点, 这导致针对前阶段市场需求所设计的单元生产系统将不再适应当前的市场需求. 因此单元生产系统的内部配置需要不断地随市场需求的变化而调

整, 从而使单元生产系统能够在动态变化的环境中仍然高效地运作. 为此, 一些学者目前提出根据市场需求的变化来调整单元生产系统内部配置的方法, 即动态构建生产单元的方法<sup>[5~9]</sup>, 从而保证制造企业能够对市场变化迅速且准确地做出反应, 及时为客户提供优质的产品与服务. 然而, 这些研究只是考虑动态单元构建问题中的某一个目标, 如: 构建费用或跨单元零部件数目等. 但单元构建问题本身是一个多目标、多阶段的复杂的决策问题, 通过对多个冲突目标进行权衡, 来设计生产系统的方法更能符合实际的生产情况<sup>[10]</sup>. 同时, 这些研究很少考虑生产单元中设备利用率的情况, 而较低的设备利用率将直接导致企业生产资源的浪费.

因此, 本文在以上研究的基础上, 从多目标角度动态构建单元生产系统, 同时考虑了单元生产系统调整过程中的设备重置费用、各生产单元中设备利用率情况以及零部件跨单元移动总次数三个目标, 并提出了动态单元构建问题的多目标数学模型.

① 收稿日期: 2007-08-22; 修订日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70625001; 70721001); 教育部科技研究重点资助项目 (104064); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目 (NCET-04-280).

作者简介: 王晓晴 (1981-), 男, 辽宁沈阳人, 博士生. Email: swxq19@163.com

同时, 本文针对多目标动态单元构建问题的特点, 开发了一种分散搜索算法, 来实现对该问题的有效求解, 这是分散搜索算法在单元构建领域的首次应用. 分散搜索算法是近些年在国外被广泛应用的一种亚启发式算法, 这种算法通过对解集的合并、参考集的更新, 以及新解的改进来实现“分散-收敛集聚”的智能机制<sup>[11]</sup>. 分散搜索算法整合了多种有效机制, 包括多样性生成方法, 局部搜索方法, 以及路经重连接方法等<sup>[12]</sup>. 同时, 分散搜索算法具有柔性的框架, 其中的每个机制都可用多种方法予以实现, 这使得该算法能够有效求解诸多组合优化问题.

## 1 问题的描述

基于当今市场产品生命周期缩短、客户个性化需求增加和交货时间大大缩短等特点, 制造企业针对前阶段市场需求所设计的单元生产系统将不再适应当前的市场需求. 为此制造企业需要提前预测出连续多个计划期的市场需求和波动, 据此来不断调整单元生产系统的内部配置. 实际生产中的计划期可以是一周、一个月、一季度或是一年.

考虑某制造企业根据未来连续多个计划期的市场需求, 在其单元生产系统中对多种类型的零部件进行生产加工. 假设每种类型的零部件需要多种类型的设备对其进行加工; 每种类型的设备能够生产加工多种类型的零部件; 在一个计划期中每种类型的设备仅被分配到一个生产单元中; 每个生产单元中设备的最大与最小数量提前确定且保持不变; 每种零部件的安装费用和拆卸费用已知; 在每个计划期中每种零部件的需求数量可以预测, 并且总的生产能力可以满足需求; 零部件分批地在生产单元间进行移动, 每种零部件的生产批量确定且保持不变; 每种零部件的加工工艺顺序已知; 每种零部件在设备上的加工时间已知; 没有设备故障发生. 为了适应市场需求的变化和保持单元生产系统的高效性, 企业需要根据未来连续多个计划期的市场需求对单元生产系统的动态构建问题进行决策, 即确定在哪一个或哪几个计划期的开始时刻对单元生产系统进行重新构建, 并解决如何构建的问题.

## 2 动态单元构建的多目标规划模型

### 2.1 参数

$S_k$  —— 设备  $k$  的安装费用;

$R_k$  —— 设备  $k$  的卸载费用;

$A_k$  —— 设备  $k$  的生产能力 ( $h$ );

$B_j$  —— 零部件  $j$  的生产批量;

$D_{jt}$  —— 在计划期  $t$  中零部件  $j$  的需求量;

$O_{jk}$  —— 单位生产批量的零部件  $j$  在设备  $k$  上的加工时间;

$W_1$  —— 每个生产单元中设备的最少数目;

$W_2$  —— 每个生产单元中设备的最大数目;

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{如果当前计划期为第一个计划期} \\ 1 & \text{否则} \end{cases}$$

$$\alpha_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{如果零部件 } j \text{ 的第 } i \text{ 道工序需要} \\ & \text{设备 } k \text{ 对其进行} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

### 2.2 决策变量

$X_{kl}$  —— 在计划期  $t$  中分配到生产单元  $l$  中第  $k$  类设备的数目;

$Y_{klt}$  —— 在计划期  $t$  的开始时刻安装到生产单元  $l$  中第  $k$  类设备的数目;

$Z_{kl}$  —— 在计划期  $t$  的开始时刻从生产单元  $l$  中拆卸第  $k$  类设备的数目;

$$U_{ijh} = \begin{cases} 1 & \text{如果在计划期 } t \text{ 中零部件 } j \text{ 的第 } i \\ & \text{道工序被分配到生产单元 } l \text{ 中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$V_{klt} = \begin{cases} 1 & \text{如果在计划期 } t \text{ 中设备 } k \text{ 被分配到} \\ & \text{生产单元 } l \text{ 中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

### 2.3 多目标规划模型

由于生产产品的种类和数量需要随着市场需求的变化而调整, 因此为了使单元生产系统在每个计划期中都保持高效, 生产单元中的设备不得根据生产需求的变化不断地被安装和拆卸. 但单元生产系统的频繁变更需要制造企业为之付出大量财力, 有时这些费用令企业难以承担, 设备重置费用最小化是构建动态单元生产系统首要考虑的目标, 可以描述为

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (S_k Y_{klt} + R_k Z_{kl}) \quad (1)$$

设备利用率也是衡量生产单元性能的重要指标之一<sup>[13]</sup>. 较低的设备利用率将导致设备投资费用增加、人员费用增加、资产回报率低等问题. 因此, 本文考虑的第二个目标是最大化设备利用率, 用最小化设备负载与能力间的最大偏差来描述.

$$f_2 = \text{Min}_k \max \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L A_{lk} X_{klt} - \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J D_{jt} O_{jk} \right\} \quad (2)$$

在实际的生产加工过程中, 异常件以批量的形式跨单元移动, 所以零部件跨单元移动的总次数也应是衡量单元生产系统性能的重要指标之一<sup>[14-15]</sup>. 零部件跨单元移动的总次数过多, 将极大地降低单元生产系统的性能. 因此, 考虑最小化零部件跨单元移动的总次数, 其表达式如下

$$f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \frac{D_{jt}}{r_{Bj}} \sum_{k=2}^{I_j} U_{jlt} (1 - U_{i-1, jlt}) \quad (3)$$

因此, 在市场需求变化的环境下, 设计性能卓越的动态单元生产系统可以描述为如下多目标规划模型 (DCFM)

$$\text{Min} \{f_1(X), f_2(X), f_3(X)\} \quad (4)$$

s t

$$X_{klt-t-1} + Y_{klt} - Z_{klt} = X_{klb}, \quad \forall k, l, t = 2, \dots, T \quad (5)$$

$$Y_{klt} = \max\{\lambda(X_{klt} - X_{kl-t-1}), 0\}, \quad \forall l, k, t \quad (6)$$

$$Z_{klt} = \max\{\lambda(X_{kl-t-1} - X_{klt}), 0\}, \quad \forall l, k, t \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{klt} \leq W_2, \quad \forall l, t \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{klt} \geq W_1, \quad \forall l, t \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J D_{jt} O_{jk} \leq \sum_{l=1}^L A_{lk} X_{klb}, \quad \forall k, t \quad (10)$$

$$\sum_{l=1}^L V_{klb} = 1, \quad \forall k, t \quad (11)$$

$$\sum_{l=1}^L U_{jlt} = 1, \quad \forall i, j, t \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{I_j} U_{ijlt} \alpha_{ijk} \leq V_{klb}, \quad \forall j, l, k, t \quad (13)$$

$$X_{klb} \leq W_2 V_{klb}, \quad \forall k, l, t \quad (14)$$

$$X_{klb} \geq V_{klb}, \quad \forall k, l, t \quad (15)$$

$$X_{klb}, Y_{klt}, Z_{klt} \in \{0, 1, 2, \dots\}, \quad \forall l, k, t \quad (16)$$

$$U_{ijlb}, V_{klt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j, k, l, t \quad (17)$$

其中, 目标 (4) 表示同时最小化设备重置费用、设备负载与能力间的最大偏差以及零部件跨单元移

动的总次数, 约束 (5) 确保在两个邻近的计划期中每种设备的数目保持平衡; 约束 (6) 和 (7) 分别表示在计划期  $t$  内在生产单元  $l$  中设备  $k$  的安装和拆卸数量; 约束 (8) 和 (9) 分别限制了每个生产单元中设备的最大和最小数量; 约束 (10) 确保每个生产单元中设备的生产能力能够满足需求; 约束 (11) 确保在每个计划期中每种类型的设备仅被分配到一个生产单元中; 约束 (12) 确保在每个计划期中零部件的每一道工序仅被分配到一个生产单元中; 约束 (13) 确保生产单元中的设备能够加工分配到该单元的零部件; 约束 (14) 和 (15) 限制了每种类型的设备在生产单元中的最大和最小数量; 约束 (16) 和 (17) 为完整性约束.

### 3 分散搜索方法

DCFM 模型是一个多目标非线性 0-1 混合整数规划模型, 采用传统的优化方法难以求解, 而且随着零部件、设备、生产单元和计划期数目的增加, 决策变量和约束的数量将迅速增加, 计算和求解过程变得更加复杂和困难.

分散搜索算法作为一种亚启发式算法, 很少依赖搜索过程的随机性, 而是采用其框架中一系列系统性方法来实现对优化问题的求解, 其本质是一种基于整数编码的具有保优思想的亚启发式算法. 分散搜索算法常用流程中包含 5 个系统性的子方法, 即初始解产生方法、参考集更新方法、子集产生方法、子集合并方法和解改进方法<sup>[11]</sup>.

由于分散搜索算法是一个柔性的框架<sup>[11]</sup>, 其流程中每种方法的实现方式都是不确定的, 将根据求解问题的不同而变化; 同时, 分散搜索算法的流程也不是固定不变, 可以对其作一定程度的修改, 如: 当分散搜索算法在实时环境下运作时, 可以不采用解改进方法, 从而提高满意解产生的速度. 正是由于分散搜索算法的柔性, 使其能够有效求解诸多组合优化问题, 目前已经广泛应用于许多自然科学与工程科学领域, 并显示出强大的优势和潜力<sup>[16-18]</sup>.

鉴于分散搜索算法性能的优越性和应用的广泛性, 本文在分散搜索算法基本框架的基础上, 针对多目标动态单元构建问题的特点, 开发了一种分散搜索算法来有效地求解该问题, 此

算法包含了多样性初始解产生方法、目标值评估方法、参考集更新方法、子集产生方法、子集合并方法和解改进方法. 图 1 显示了该分散搜索算法的流程图.

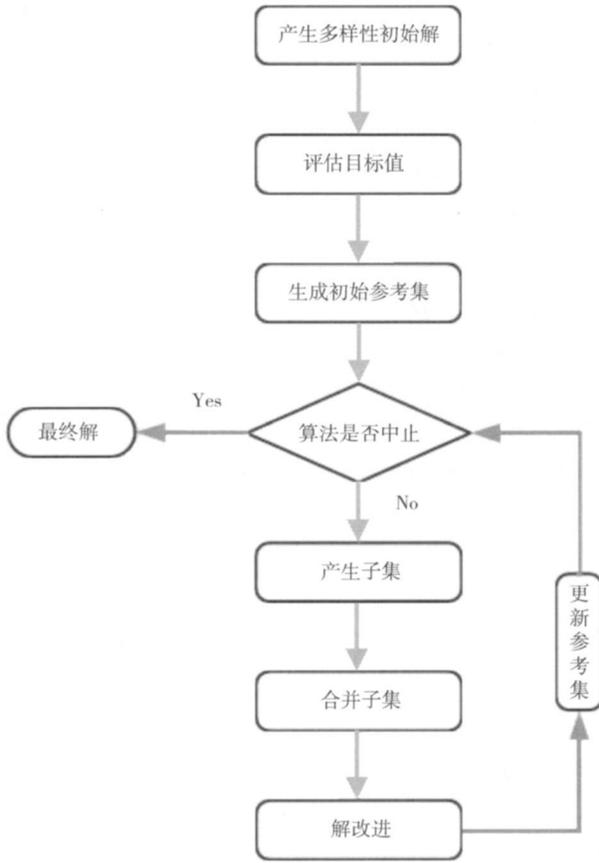


图 1 针对多目标动态单元构建问题的分散搜索算法流程图

Fig. 1 Flow chart of scatter search for DCEM problem

### 3.1 产生多样性初始解

多样性的初始解通常可以采用随机方法来产生, 但为了进一步提高初始解的多样性, 本文改进了 Glover 提出的多样性产生器<sup>[12]</sup>, 使算法在初始阶段生成一系列多样性的种子解 (初始解).

首先对生成的解进行编码, 解的编码方式对算法的求解效果起着至关重要的作用. 在本文描述的动态单元构建问题中, 任意一个计划期  $t$  包含如下的编码片段  $(c_{t1} \dots c_{tk} \dots c_{tK} \mid n_{t1} \dots n_{tk} \dots n_{tK})$ . 计划期  $t$  分为两部分, 其中前半部分的  $c_{tk}$  表示在计划期  $t$  中设备  $k$  被分配到生产单元  $c_{tk}$  中, 其中后半部分的  $n_{tk}$  表示在计划期  $t$  中设备  $k$  被分配到生产单元  $c_{tk}$  中的数量为  $n_{tk}$ . 如果考虑  $T$  个计划期的动态单元构建问题, 该问题的解将包含  $T$  个这样的编码片段. 这种编码方式满足了除式 (8) (9) 和

(10) 以外的所有约束. 根据解的编码方式, 每个初始解的产生流程如下:

步骤 1 设置  $t \leftarrow 1$

步骤 2 随机产生一个生产单元序列  $C = (c_k \dots, a_k)$ .

步骤 3 按照 Glover 的多样性产生器, 产生序列  $P(j)$ .

步骤 4 按照序列  $P(j)$  中元素所指定的位置, 依次将单元序列  $C$  中的元素放置到序列  $L(C \mid P(j))$  中, 生成序列  $L(C \mid P(j)) = (l_1, \dots, l_k, \dots, l_k)$ , 其长度与序列  $P(j)$  的长度相等.  $L(C \mid P(j))$  即为计划期  $t$  前半部分的编码.

步骤 5 根据计划期  $t$  前半部分编码, 计算分配到各生产单元内设备类型的总数量.

步骤 6 根据设备类型的总数量分配相应数量的设备到各生产单元中, 以形成计划期  $t$  后半部分编码.

步骤 7 如果  $t > T$ , 使  $t = t + 1$  返回步骤 2; 否则, 按生成的先后顺序合并  $T$  个编码片段形成一个初始解, 流程终止.

### 3.2 评估目标值

由于模型 DCEM 包含三个冲突的目标, 难以评估解的优劣, 因此本文应用全局判断方法<sup>[19]</sup>对动态单元构建问题的三个冲突目标进行权衡. 全局判断方法是在解空间中搜索与理想解距离最近的解, 并将该解作为满意解的一种搜索方法. 在全局判断方法中, 理想解被定义为一个虚拟的解, 该解在满足相关约束的前提下使每个目标分别获得了最小值 (最大值), 同样, 反理想解被定义为在满足相关约束的前提下使每个目标分别获得了最大值 (最小值) 的解. 由于每个目标很可能在解空间中不同的位置达到最小值 (最大值), 因此, 理想解和反理想解并不一定真实存在, 而是在虚拟空间中存在的解<sup>[12]</sup>.

根据全局判断方法, 模型 DCEM 的总目标可以用可行解与理想解之间的距离 ( $L_\infty$ ) 来表示, 其定义如下

$$L_\infty = \sum_{i=1}^I w_i \frac{f_i - f_i^{\text{in}}}{(f_i^{\text{ax}} - f_i^{\text{in}})} \quad (18)$$

其中,  $f_i$ ,  $f_i^{\text{in}}$  和  $f_i^{\text{ax}}$  分别表示可行解、理想解和反理想解所对应第  $i$  个目标的函数值,  $w_i$  是第  $i$  个目

标的权重.

此外, 为了使产生的解满足包含式 (8) (9) 和 (10) 在内的所有约束条件, 将子目标函数 (1) 转化为式 (19), 子目标函数 (2) 转化为式 (20), 其中,  $p_1$ ,  $p_2$  和  $p_3$  分别为相应约束的惩罚系数.

$$f'_1 = f_1 + p_1 \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^L (\max(W_1 - \sum_{k=1}^K X_{klt}, 0)) + p_2 \sum_{i=1}^T \sum_{l=1}^L (\max(\sum_{k=1}^K X_{klt} - W_2, 0)) \quad (19)$$

$$f'_2 = f_2 + p_3 \sum_{i=1}^T (\max(\sum_{j=1}^J D_{jt} O_{jt} - \sum_{l=1}^L A_{lk} X_{klt}, 0)) \quad (20)$$

### 3.3 更新参考集

本文的参考集更新方法用于在种群中收集  $b_1$  个高质量的解和  $b_2$  个多样性的解, 来生成初始参考集, 并在每次迭代中不断更新该参考集. 通过式 (18) 计算  $L_{\infty}$ , 选取与理想解距离最近的  $b_1$  个解作为高质量解. 为了产生  $b_2$  个多样性解, 首先需要评估解的多样性程度, 多样性测量准则被定义为

$$D(S_b, S_2) = \sum_{n=1}^N (s_{1n} \oplus s_{2n}), \quad \forall S_i = (s_{i1}, \dots, s_{iN}) \quad (21)$$

$$s_{1n} \oplus s_{2n} = \begin{cases} 0 & \text{如果 } s_{1n} = s_{2n} \\ 1 & \text{否则} \end{cases} \quad (22)$$

通过式 (21) 和 (22), 可以从当前种群中选取与其它解距离之和最小的解作为一个多样性的解, 重复此过程直到产生  $b_2$  个多样性解为止.

### 3.4 产生子集

子集产生方法是通过对参考集的操作产生一系列用于合并的解集. 子集数量很大程度上影响着分散搜索算法的执行时间. 为了简化新解的产生、提高算法的效率, 本文从参考集中产生其所有的三元组, 每个三元组作为一个子集, 用来产生新解.

### 3.5 合并子集

合并子集方法用于对子集中的解进行合并来产生新的解. 本文采用线性合并方法合并子集中的解, 以此来获得新解. 产生 0 到 1 之间三个随机数  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ , 且满足  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ . 新解 ( $S_i$ ) 由三元组 ( $E_1$ ,  $E_2$  和  $E_3$ ) 按如下的线性合并方法产生

$$s_{in} = \lceil \lambda_1 e_{1n} + \lambda_2 e_{2n} + \lambda_3 e_{3n} \rceil$$

$$\forall S_i = (s_{i1}, \dots, s_{iN}), E_i = (e_{i1}, \dots, e_{iN}) \quad (23)$$

### 3.6 解改进

解改进方法是将新解转变为高质量解的一种局部搜索方法. 解改进方法是分散搜索常用流程中唯一可省略的子方法<sup>[11]</sup>, 但本文为了进一步提高新解的质量, 采用了启发式方法对新解进行改进. 基于给定的一个新解, 分别移动每种类型的设备从所在的生产单元到另一个生产单元中, 对应生成一系列解. 然后重新分配每个解中被移动到另一个生产单元的设备数量; 再根据式 (18) 计算每个解的总目标, 选取目标值最小的解作为改进后的解.

## 4 仿真分析

本文以 Gupta 等人提出的 15 个设备、30 个零部件、4 ~ 6 个生产单元的大规模的单元构建问题为例<sup>[20]</sup>, 来验证本文提出的分散搜索算法求解动态单元构建问题的效果. 由于 Gupta 等人的研究没有考虑市场需求的变化以及动态单元构建过程中特定的目标和约束, 因此, 本文在原问题<sup>[20]</sup>的基础上, 对参数进行了扩充来适应动态单元构建问题. 在本文中, 3 个计划期内零部件的需求量在区间 [0, 350] 上随机产生, 零部件的安装费用和拆卸费用分别在区间 [100, 700] 上和区间 [50, 300] 上随机产生, 零部件的每道工序在设备上的加工时间按照文 [20] 给出的数据赋值, 三个目标的权值分别为  $w_1 = 0.35$ ,  $w_2 = 0.2$ ,  $w_3 = 0.45$ . 利用 CPLEX 10.1 求得三个实例的理想解与反理想解如表 1 所示.

表 1 理想解和反理想解表

Table 1 Ideal solutions and anti ideal solutions for the test problems

生产单元	理想解			反理想解		
	重置费用	能力偏差	移动次数	重置费用	能力偏差	移动次数
4	0	46.763	88	675.86	962.880	527
5	0	46.763	104	857.2	962.880	545
6	0	46.763	159	1 014.3	962.880	546

由于分散搜索算法中初始解产生方法通常采用随机方法来产生初始解, 而解改进方法又是可以省略的子方法, 所以为了验证本文提出的分散搜索算法中多样性初始解产生方法和解改进方法的必要性, 本文按照以上参数, 分别应用随机产生初始解的分散搜索算法 (SSAS)、无解改进方法

的分散搜索算法 (SSNI) 以及包含多样性初始解产生方法和解改进方法的分散搜索算法 (SS), 对文献 [20] 中的问题进行求解. 结果如表 2 所示.

从表 2 中可以看出 SS 算法对文献 [20] 中三个大规模单元构建实例的求解结果, 其总目标都优于 SSAS 算法和 SSNI 算法的求解结果, 因此, 文中的多样性初始解产生方法和解改进方法对于高质量满意解的生成起着至关重要的作用, 对于本文提出的求解多目标动态单元构建问题的分散搜索算法是必不可少的.

为了进一步验证 SS 算法的有效性, 分别应用 SS 算法和文献 [20] 中提出的 GA 算法对以上三

个实例进行求解, 结果如表 3 所示. 该 GA 算法不仅包括传统 GA 算法中选择、交叉、变异以及替代策略等<sup>[21, 22]</sup>, 还包括再生策略和收敛策略等. 同时, 该算法对于不同的单元布局形式可以分别求解单目标和多目标的生产单元构建问题, 因此被大量的研究所应用<sup>[23, 24]</sup>.

图 2 显示了 SS 算法和 GA 算法求得的各目标值随着时间的变化趋势 (以开启 5 个生产单元为例). 图 3 显示了生产单元数目对各个目标值的影响.

为了进一步体现两种算法在求解时间和收敛速度上的优劣, 本文对三个实例分别进行试验, 结果如图 4 所示.

表 2 SS 算法、SSAS 算法和 SSNI 算法的求解结果

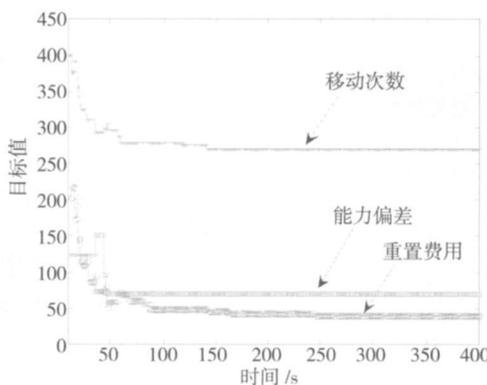
Table 2 Results for SS, SSAS and SSNI

	算法	重置费用	能力偏差	移动次数	总目标
4 个生产单元	SSAS	100.12	50.249	242	0.2105
	SSNI	134.51	67.425	324	0.3161
	SS	35.53	66.882	241	0.1796
5 个生产单元	SSAS	158.98	49.780	276	0.2411
	SSNI	202.32	85.462	323	0.3145
	SS	42.68	67.264	269	0.1903
6 个生产单元	SSAS	260.07	99.263	323	0.2919
	SSNI	276.94	96.082	353	0.3319
	SS	180.83	122.882	324	0.2709

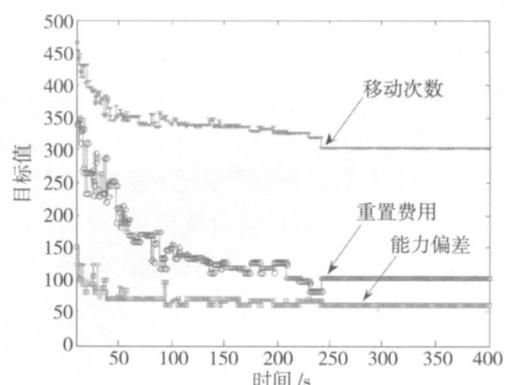
表 3 SS 算法和 GA 算法的求解结果

Table 3 Results for SS and GA

生产单元	SS				GA			
	重置费用	能力偏差	移动次数	总目标	重置费用	能力偏差	移动次数	总目标
4	35.53	66.882	241	0.1796	75.71	54.020	246	0.2028
5	42.68	67.264	269	0.1903	104.54	61.449	303	0.2490
6	180.83	122.882	324	0.2709	247.52	68.782	351	0.3135



(a) SS 算法



(b) GA 算法

图 2 开启 5 个生产单元时三个目标随时间的变化趋势

Fig. 2 Convergence history of three objectives for opening five cells

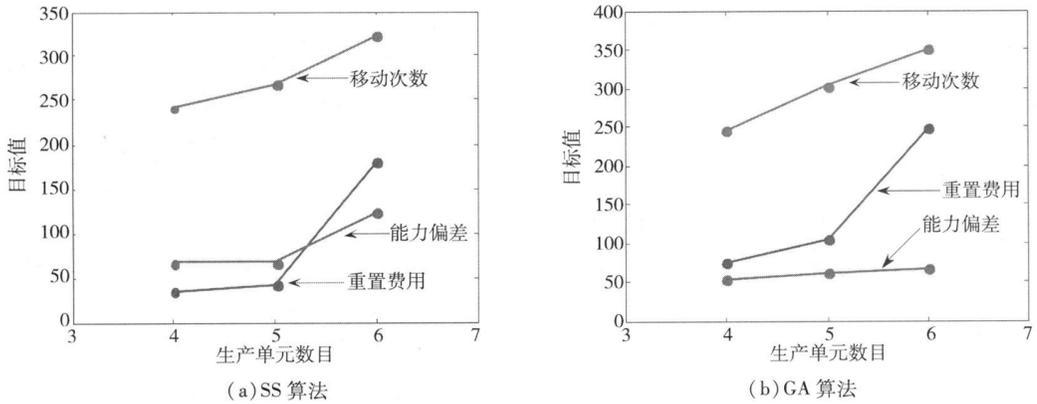


图3 生产单元数量与三个目标之间变化关系

Fig. 3 Relationship between cell number and three objectives

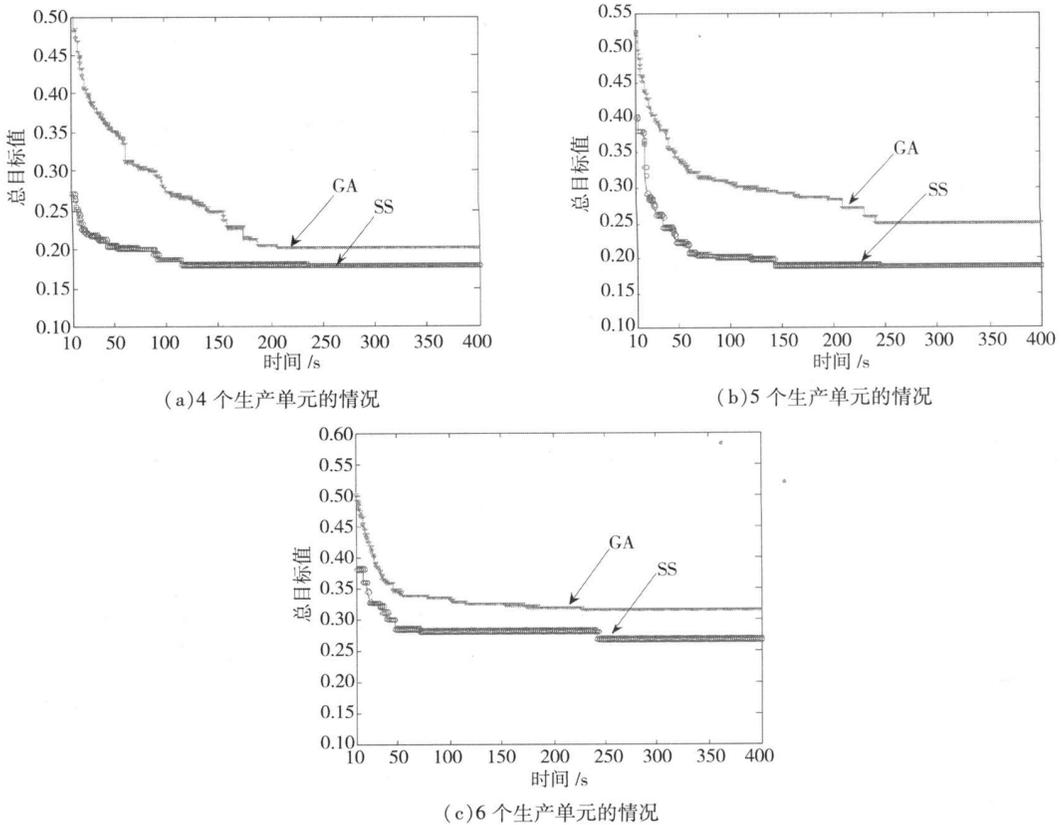


图4 SS算法和GA算法的收敛曲线

Fig. 4 Convergence history of SS and GA

在图 2中, 针对开启 5 个生产单元的实例, 通过 SS 算法和 GA 算法分别求得设备重置费用、最大能力偏差和跨单元移动总次数三个子目标随时间的变化趋势. 可以看出在满意解的搜索过程中三个子目标的值不断减小直至全部收敛, 且与 GA 算法相比, SS 算法在各个目标的求解过程中都具有更好的初始解和更快的收敛速度. 图 3 显示了生产单元数目逐一增加时, 各个子目标值以不同的趋势随之增加. 这表

明生产单元数目的增加将导致单元生产系统性能的下降. 从表 3 和图 4 中可以看出, SS 算法对三个实例总目标的求解结果均优于 GA 算法, 且多样性初始解产生方法、解改进方法等机制的应用使 SS 算法在搜索全程中较 GA 算法产生了更好的可行解.

同时本文不仅通过以上大规模实例对 SS 算法进行验证, 还通过复杂体系的实例对 SS 算法进行了考证. 复杂体系的实例为 100 个设备、40 个零

部件、10个生产单元和4个计划期的单元构建问题。由于篇幅所限, 本文只给出了应用SS算法和GA算法对复杂体系实例的求解结果。SS算法求取的重置费用、能力偏差、移动次数以及总目标分别为488.24, 23.693, 232.6813, 0.4100, 而GA算法求取的以上目标分别为620.95, 16.648, 156.7417, 0.4441。由此可见, 本文提出的SS算法对于复杂体系的多目标动态单元构建问题仍为有效, 且具有较好的求解效果。

## 5 结 论

本文研究了市场需求变化的情况下多目标动

态单元构建方法, 同时考虑了设备重置费用、设备利用率和零部件跨单元移动的总次数这三个目标, 建立了动态单元构建问题的非线性多目标数学模型。在分散搜索算法基本框架的基础上, 开发了针对多目标动态单元构建问题特点的分散搜索算法。该算法产生了多样性好的初始解, 采用了全局判断方法来权衡这三个冲突的目标, 并应用了参考集更新方法、子集产生方法、子集合并方法和解改进方法等来实现生产单元的动态构建。对复杂体系的大规模单元构建实例进行仿真分析, 通过与基准算法进行比较, 表明了提出的分散搜索算法能够有效求解此模型, 获得多目标动态单元构建问题的满意解。

## 参 考 文 献:

- [1] Wemmerlov U, Johnson D J. Cellular manufacturing at 46 user plants: Implementation experiences and performance improvements[J]. *International Journal of Production Research*, 1997, 7(3): 29—49.
- [2] Askin R G, Chiu K S. A graph partitioning procedure for machine assignment and cell formation in group technology[J]. *International Journal of Production Research*, 1990, 28(8): 1555—1572.
- [3] Selim H M, Askin R G, Vakharia A J. Cell formation in group technology: Review, evaluation and direction for future research[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1998, 34: 2—30.
- [4] Wu X, Chu C H, Wang Y, *et al*. A genetic algorithm for cellular manufacturing design and layout[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(1): 156—167.
- [5] Chen M. A mathematical programming model for systems reconfiguration in a dynamic cell formation condition[J]. *Annals of Operations Research*, 1998, 77(1): 109—128.
- [6] Mungwatana A. Design of Cellular Manufacturing Systems for Dynamic and Uncertain Production Requirements with Presence of Routing Flexibility[D]. Virginia: United States Blacksburg State University, 2000.
- [7] Tavakkoli Moghaddan R, Arianezhad M B, Safaei N, *et al*. Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2005, 170(1): 761—780.
- [8] Jaydeep B, Chun H C. Dynamic cellular manufacturing under multiperiod planning horizons[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2005, 16(5): 516—530.
- [9] Fantahun M, Chen D M. Machine cell formation using a mathematical model and a genetic algorithm-based heuristic[J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(12): 2421—2444.
- [10] Wemmerlov U, Johnson D J. Empirical findings in manufacturing cell design[J]. *International Journal of Production Research*, 2000, 38(3): 481—507.
- [11] Marti R, Laguna M, Glover F. Principles of scatter search[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 169(2): 359—372.
- [12] Glover F. A Template for Scatter Search and Path Relinking[C]. *Artificial Evolution, Lecture Notes in Computer Science* 1363. Berlin: Springer, 1998, 13—54.
- [13] Steele D C, Mahotra M K. Factors affecting performance of period batch control systems in cellular manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 1997, 35(2): 421—446.
- [14] Adil G K, Rajamani D, Strong D. Cell formation considering alternate routings[J]. *International Journal of Production Research*, 1996, 34(5): 1361—1380.
- [15] Song S, Hinton K. GT cell formation for minimizing the intercell parts flow[J]. *International Journal of Production Research*

- search, 1992, 30(12): 2737—2753.
- [16] Pino IH, Beasley J E. Scatter search and bionomic algorithms for the aircraft landing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(2): 439—462.
- [17] Egea J A, Rodríguez-Fernández M, Banga J R. Scatter search for chemical and bioprocess optimization [J]. *Journal of Global Optimization*, 2007, 37(3): 481—503.
- [18] Gomes da Silva C, Climaco J, Figueira J. A scatter search method for bicriteria {0,1}-knapsack problems [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 169(2): 373—391.
- [19] Molina J, Laguna M, Marti R, Caballero R. SSFMO: A scatter tabu search procedure for non-linear multiobjective Optimization [J]. *Informatics Journal on Computing*, 2007, 19(1): 91—100.
- [20] Gupta Y, Gupta M, Kumar A, Sundaram C. A genetic algorithm-based approach to cell composition and layout design problems [J]. *International Journal of Production Research*, 1996, 34(2): 447—482.
- [21] 肖人彬, 陶振武. 群集智能研究进展 [J]. *管理科学学报*, 2007, 10(3): 80—96.  
Xiao Renbin, Tao Zhenwu. Research progress of swarm intelligence [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2007, 10(3): 80—96 (in Chinese).
- [22] 王金祥, 吴育华, 张慎峰. 基于遗传算法的前沿生产函数构造及其应用 [J]. *管理科学学报*, 2004, 7(2): 13—17.  
Wang Jinxiang, Wu Yuhua, Zhang Shenfeng. Construction of frontier production function with genetic algorithm and its application [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2004, 7(2): 13—17 (in Chinese).
- [23] Singh G, Choudhary A K, Tiwari M K. An Evolutionary Approach for Multipass Turning Operations [C]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 2006, 220: 145—162.
- [24] Dinopoulos C, Mort N. Evolving knowledge for the solution of clustering problems in cellular manufacturing [J]. *International Journal of Production Research*, 2004, 42(19): 4119—4133.

## Multi-objective dynamic cell formation approach based on scatter search

WANG Xiao-qing, TANG Jia-fu, GONG Jun

Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China

**Abstract** A multiperiod, multiobjective dynamic cell formation problem with alterable cell configuration under varying market demands environment is studied. Machine relocation cost, utilization rate of machine capacity and total number of inter-cell moves are considered, and a nonlinear multiobjective mathematical programming model of dynamic cell formation approach is proposed. To solve the model effectively, a scatter search approach is developed, which includes diversification generation method, global criterion method, reference set update method and solutions improvement method to implement dynamic cell formation. Compared with a benchmark algorithm, the simulation results show the effectiveness of the model and the approach with large size instances.

**Key words** cellular manufacturing; dynamic cell formation; scatter search; local search