

控制与决策

Control and Decision

火箭壳体加工的虚拟单元重构方法

杨从林, 向竹, 杨志伟, 谭跃进

引用本文:

杨从林, 向竹, 杨志伟, 谭跃进. 火箭壳体加工的虚拟单元重构方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 2818–2826.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0440>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

技能组合可选择的赛汝生产系统多能工配置问题

Skill configuration of Seru production systems considering selectable skill set

控制与决策. 2022, 37(3): 737–745 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1553>

基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers

控制与决策. 2021, 36(1): 159–165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

一种求解约束多目标问题的协作进化算法

A collaborative evolutionary algorithm for solving constrained multi-objective problems

控制与决策. 2021, 36(11): 2656–2664 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0791>

基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589–598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

基于迁移学习灰支持向量回归机的交互式进化计算

Interactive evolutionary computation based on transfer learning grey support vector regression

控制与决策. 2021, 36(10): 2399–2408 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0420>

火箭壳体加工的虚拟单元重构方法

杨从林, 向竹, 杨志伟[†], 谭跃进

(国防科技大学 系统工程学院, 长沙 410000)

摘要: 针对火箭壳体加工车间新订单连续到达, 排产方案重构频繁导致重构时间花销大、排产方案低效等问题, 首先建立虚拟单元重构的多目标规划模型, 以多批订单总生产时间、运输设备总运输距离以及车间生产设备负荷均衡因素为目标函数, 以车间设备加工能力和火箭壳体加工工艺限制为约束条件; 其次提出一种改进的 NSGA-II 算法对模型进行优化求解, 针对 NSGA-II 算法局部搜索能力的不足, 在 NSGA-II 算法交叉过程中引入“首次改进”和“随机改进”两种局部搜索策略, 提高该算法的局部搜索能力; 最后基于超体积、均匀性两个多目标评价指标对提出的改进 NSGA-II 算法与传统的 NSGA-II 算法以及 NSGA-III 算法进行比较, 结合实例验证了改进 NSGA-II 算法在进行火箭壳体虚拟单元重构时更加高效。

关键词: 火箭壳体; 虚拟单元重构; 负荷均衡; NSGA-II 算法; 局部搜索

中图分类号: V19 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0440

引用格式: 杨从林, 向竹, 杨志伟, 等. 火箭壳体加工的虚拟单元重构方法[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2818-2826.

Virtual cellular reconstruction method of rocket shell processing

YANG Cong-lin, XIANG Zhu, YANG Zhi-wei[†], TAN Yue-jin

(College of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: In view of the problems such as the continuous arrival of new orders in the rocket shell processing workshop, and the frequent reconstruction of the production scheduling scheme which leads to the high cost of reconstruction time and low efficiency of the production scheduling scheme, this paper establishes the mathematical model of multi-objective constraint virtual unit production. It takes the total production time of multiple orders, the total transportation distance of transportation equipment and load balancing factors of workshop production equipments as objective functions, workshop equipment processing capacity and rocket shell processing technology as constraint conditions. Then, an improved NSGA-II algorithm is proposed to solve the mathematical model. In order to improve the NSGA-II algorithm's local search ability, both the “first improvement” strategy and the “random improvement” strategy which improve the local search ability of the algorithm are introduced in interlace operation. Finally, the improved NSGA-II algorithm is compared with the NSGA-II algorithm and the NSGA-III algorithm on the hypervolume and the spacing in a instance. As a result, the improved NSGA-II algorithm performs more efficiently on virtual cellular reconstruction of rocket shell processing.

Keywords: rocket shell; virtual cellular reconstruction; load balancing; NSGA-II algorithm; local search

0 引言

随着世界航空航天产业的飞速发展, 运载火箭被赋予更多、更高、更个性化的产品要求^[1], 这便使火箭壳体产品迭代速度加快, 生产周期不断缩短, 生产模式由小品种大批量向着多品种小批量转变。且由于火箭负载弹头高精度、高可靠性的设计, 火箭壳体的结构特征复杂度、特征集成度、工艺精度越来越高。同时, 分布到各研究所的火箭壳体的需求任务量不稳定, 需求波动性较大。

目前, 国内火箭壳体主流的生产方式是单元制造系统, 车间设备单元化布局从而成为火箭壳体制造研究热点。单元制造在一定的生产区域内依据产品工艺布置生产设备与辅助设施, 并将其固化为对应加工单元的生产模式^[2]。单元制造即为在一定的生产区域内依据产品工艺布置生产设备与辅助设施, 进而固化为对应的加工单元^[3]。叶启付等^[4]建立了多品种小批量壳体生产单元的多个布局仿真模型, 缩短了设计与制造周期, 降低了生产与物流成本, 提高了设备利用

收稿日期: 2021-03-17; 录用日期: 2021-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71690233, 72071206).

责任编辑: 林崇.

[†]通讯作者. E-mail: zhwyang@nudt.edu.cn.

率;李国丛等^[5]通过产品现状诊断分析和分组技术,设计了壳体机加生产单元布局,缩短了产品流转周期,提高了车间产能;蒋清等^[6]以航天大型铝合金壳体为对象,通过综合造型单元构建技术研究,单个产品的树脂砂铸型生产效率得到了大幅度提升。然而,单元制造系统是通过设备物理上的相连实现的,生产线较为固定,柔性较差,不同单元设备的利用率差异较大导致负荷不均衡,且难以对火箭壳体新订单到达、设备损坏等扰动事件作出快速反应,难以满足多品种小批量的市场需求。

虚拟单元制造系统(简称虚拟单元)建立在成组技术和单元制造基础上,是一种能够很好地适应市场需求多变的现代化柔性生产方式,只需在逻辑上对车间设备进行配置布局,而不改变其物理位置,实现逻辑上多条生产线并行生产,有着动态可调、运行稳定、生产效率高、市场需求反应速度快等特点^[7]。与传统制造单元相比,虚拟制造单元既结合了单元生产的生产效率,又具有更高的柔性应对市场需求变化,同时,虚拟制造单元根据用户需求而非工艺相似性来安排生产,能更好地满足多品种小批量的用户需求,可以极大推动我国火箭壳体制造业的发展。

国内外学者也对虚拟单元进行了大量的研究。例如,韩文民等^[8]基于订单与时间窗口结合的混合驱动方式,考虑铲平工艺相似性、设备利用率、物流成本等目标,构建非线性多目标整数规划模型,并提出了一种基于动态层次分析的多目标遗传算法求解模型;Kawamoto等^[9]面向基于远程广域网协议的物联网网络,提出了一种基于多层虚拟单元的空间时分多址(STDMA)资源分配策略,不仅可以简化资源冲突的计算,而且可以调整单元半径以适应通信距离;韩文民等^[10]对船舶建造中虚拟单元的调度进行了研究,采用阻塞理论将调度问题转交为最小时间最大流问题进行求解;Aalaei等^[11]构建了供应链设计与动态虚拟元胞制造系统集成的双目标优化模型,提出一种改进的多选择目标规划方法,并制定了Gearboxes & Axles汽车制造公司的一个工业案例的生产计划;Rostami等^[12]考虑新产品开发问题,将虚拟单元制造系统集成到供应链中建立多目标数学模型,实现总利润、分组效能和新产品开发量3个目标上均达最大;Decker等^[13]采用完全因子设计和方差分析在多品种、小批量的订单式生产(Make-To-Order manufacturing, MTO)系统模拟作业车间、单元制造和虚拟单元布局的生产效能,表明了虚拟单元制造在单元吞吐量、交货期和资源利用率等方面相比单元

制造有着更高的效率;Forghani等^[14]建立了基于可选加工路径的单元构建、单元布局以及单元调度的虚拟单元模型,并采用一种启发式和基于线性规划的算法进行求解。

尽管虚拟单元制造对变化的环境具有良好的适应性和处理排产的高效性,但目前国内外对虚拟单元的应用研究主要集中在船舶制造等民用产品上,对于军用产品,特别是火箭壳体加工的运用研究较少,不能够很好地服务于火箭壳体的实际生产。且现阶段求解虚拟单元多目标问题通常是将多个目标转为单目标求解,或者提出帕累托最优策略进行多目标帕累托前沿的选择。以上方法受目标函数影响较大,不能很好地解决虚拟单元多目标问题。而NSGA-II算法作为一种成熟高效、应用广泛的多目标算法,可以很好地解决虚拟单元多目标问题。

为了解决火箭壳体加工单元制造车间柔性不足、波动性市场需求适应性差、人工经验排产效率低等问题,本文结合虚拟单元建立多目标多约束火箭壳体加工数学模型,并以火箭壳体加工新订单到达为扰动事件,综合考虑产品总生产时间、总运输距离和设备负荷均衡,采用基于“首次改进”和“随机改进”两种局部搜索策略的NSGA-III^[15]算法进行优化求解。利用TOPSIS方法对该算法产生的非支配解集进行排序,生成最优重构方案。最后以超体积、均匀性和多样性为算法指标将改进NSGA-II算法与NSGA-II算法、NSGA-III算法进行比较,以验证算法的可行性和有效性。

1 虚拟单元重构模型

虚拟单元重构是指再生产过程中生成新的调度方案^[16]。当车间扰动事件发生时,新订单到达、生产设备出现故障等,需要重新对事先构建的虚拟单元生产计划进行重构,生成新的生产计划。本文以新订单到达作为扰动事件,研究新订单到达时,将新订单生产计划纳入到原有生产计划中,即可实现虚拟单元生产计划重构^[17],如图1所示。

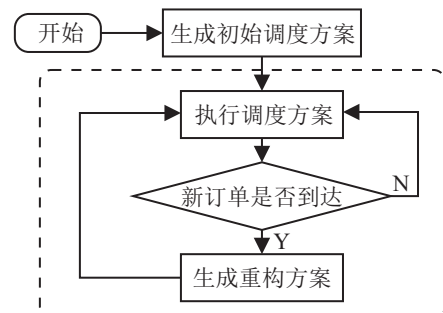


图1 新订单到达虚拟单元重构模型

1.1 多目标优化模型

针对火箭壳体虚拟单元生产方式,参考现有虚拟单元研究现状,结合智能制造生产线布局以及火箭壳体的工艺要求,提出以下火箭壳体生产过程中的优化目标:

1) 最大完工时间,即同一批订单中所有零件都完成加工的时间. 航天产品特别是火箭壳体未来将长期面临“多型号并举、研制与批产并存”的任务形式,将持续呈现研制周期短、批产按需交付、任务分布不均、制造资源周期性紧张的特点,为了按时完成多批订单任务,提高火箭壳体零件加工的生产效率,必须缩短订单加工完成时间,即减小最大完工时间.

2) 总运输距离^[18]. 虚拟单元之间的连接由AGV等设施组成的物流系统构建,在虚拟单元生产过程中不可避免会带来运输成本,而且火箭壳体零件在加工设备之间的转换也是需要以时间代价来完成的. 虚拟单元制造系统配备物流系统较为复杂,包括了虚拟单元内以及虚拟单元之间的多条配送线,而且在虚拟单元重构之后,会重新生成与之配备的物流路线. 为了简化模型,本文忽略了运输时间以及加工设备安装零件时间等带来的时间损耗,将总运输距离作为第2个目标. 物流路线设计的好坏直接影响虚拟单元的效率,从而影响虚拟单元的生产效率,总运输距离越小,虚拟单元生产效率越高.

3) 设备最大负荷差. 设备负荷均衡对设备的使用寿命和工作效率具有重要作用,且设备负荷均衡也是保证设备长期稳定工作的有效途径. 设备负荷的均衡性直接表明了排产方案的合理性,设备负荷越均衡,排产方案越符合实际. 在本文中,通过控制设备负荷差异来控制设备负荷均衡,设备负荷差异越小,设备负荷越均衡.

1.2 虚拟单元重构数学模型

变量说明如表1所示.

由表1可以较为简单地得到该问题3个目标函数的表达方式. 其中:最大完工时间为 FT_{\max} ,有

$$FT_{\max} = \max(FT_n), n = 1, 2, \dots, N; \quad (1)$$

零件的总运输距离为 D ,可计算为

$$D = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n-1} d_{s_n^i}^{s_n^{i+1}}. \quad (2)$$

假定车间内部所有设备的耐损能力相同,不考虑人为以及环境因素,设备在生产过程中所承受的负荷由且仅由设备加工时间决定,所以在该问题中,可以直接将设备加工时间看作设备所承受的负荷,其中设备最大负荷差可计算为

$$w_{\max} = \max(w_m) - \min(w_m), m = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

表1 变量说明

变量	说明
n	零件的序号 ($n = 1, 2, \dots, N$), N 为零件的总数
i	零件的工序序号 ($i = 1, 2, \dots, I_n$), I_n 为工件 n 的工序总数
k, m	设备的序号 ($k, m = 1, 2, \dots, M$), M 为设备总台数
st_n^i	开始加工零件 n 的第 i 道工序的时刻
ft_n^i	结束加工零件 n 的第 i 道工序的时刻
$c_m^{n,i}$	设备 m 加工零件 n 第 i 道工序的能力,能加工为1,不能加工为0
$T_m^{n,i}$	设备 m 加工零件 n 第 i 道工序所需时间
FT_n	零件 n 的加工完成时间
d_m^k	零件从设备 m 到设备 k 的运输距离
s_n^i	零件 n 第 i 道工序加工的设备号
$j_m^{n,i}$	零件 n 第 i 道工序是否由设备 m 加工,是为1,不是为0
w_m	设备 m 累积工作时间,即设备 m 所承载的负荷

考虑虚拟单元重构的约束条件和目标函数,可以得到相应的数学模型. 目标函数为

$$\begin{cases} \min (FT_{\max}), \\ \min (D), \\ \min (w_{\max}). \end{cases} \quad (4)$$

本文从最大完工时间、总运输距离和设备最大负荷差3个维度考虑目标对虚拟单元重构的影响,而不是对3个目标进行简单的权重累加,排除了个别指标影响过大引起的不合理性以及权重设置带来的主观影响. 在模型优化过程中,不断产生混流排产方案的帕累托最优解集,综合考虑3个目标的影响,最终得到较优的混流排产方案.

约束条件为

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{I_n} c_m^{n,i} \geq 1, \forall m; \quad (5)$$

$$st_n^i + T_{s_n^i}^{n,i} \leq st_n^{i+1}, \forall n, i; \quad (6)$$

$$st_n^i + T_{s_n^i}^{n,i} = ft_n^i, \forall n, i; \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M s_m^{n,i} = 1, \forall n, i; \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M j_m^{n,i} \geq 1, \forall n, i; \quad (9)$$

$$st_n^i \geq 0, \forall n, i; \quad (10)$$

$$T_m^{n,i} \geq 0, \forall m, n, i; \quad (11)$$

$$s_m^{n,i} \in \{0, 1\}, c_m^{n,i} \in \{0, 1\}, j_m^{n,i} \in \{0, 1\}, \forall m, n, i. \quad (12)$$

在约束条件中,式(5)表示每台设备至少拥有一种加工能力;式(6)确保了前一道工序加工完成后才

能进行下一道工序的加工,满足零件的加工工艺;式(7)保证了零件工序在加工过程中不间断,零件某一工序在一台设备上加工过程中不能中断换到其他设备上再进行加工,保证了在虚拟单元重构过程中只对零件未加工工序进行调整;式(8)表示零件的同一道工序只能分配到一台设备上加工;式(9)表示零件的每一道工序都能够被加工,保证了虚拟单元重构后整个加工过程能够正常完成;式(10)表示工序开始时间都为正,保证了模型的可行性;式(11)规定了设备完成零件各道工序所需要的时间都大于0;式(12)表明决策变量为二进制变量,其值为0或1.

2 NSGA-II算法改进

2.1 算法简介

NSGA-II算法是目前最流行的多目标遗传算法之一,具有运行速度快、解集收敛性好的优点. NSGA-III算法是在NSGA-II算法的基础上通过改进提出的新一代非支配排序多目标优化算法. 两种算法都采用精英策略,保留了种群中较优的个体,即先将父代种群与子代种群合并,再利用帕累托支配关系将种群中个体分为若干不同的非支配层,处于前列的非支配层的个体优先被选中进入新种群. 不同的是,NSGA-

II算法通过拥挤度算子^[19]保证子代种群多样性,而NSGA-III算法通过参考点^[20]算子保证子代种群多样性.

2.2 算法改进

针对问题特性,结合NSGA-II算法作出以下两点改进:

1) NSGA-II算法动态化. NSGA-II算法一般用于解决静态问题,动态性较差,将新订单到达作为算法的触发器,即新订单到达时运行该算法,并将收敛后的解作为虚拟单元重构方案,以此实现NSGA-II算法动态调用.

2) 加入局部搜索策略. NSGA-II算法是一种全局搜索算法,具有全局搜索能力强、收敛速度快等特点,但局部搜索能力不足. 为了增强算法的局部搜索能力^[21],在交叉过程中引入爬山策略^[22],即在交叉后对交叉个体进行邻域定义,从而进行局部搜索得到更优的个体.

改进NSGA-II算法流程如图2所示.

1) 目标函数. 为了实现有效搜索,根据火箭壳体生产虚拟单元重构模型的目标函数,构造 FT_{max} 、 D 、 w_{max} 三个目标函数,具体计算方法分别参照式(1)、(2)、(3),目标函数值越低表明解的质量越高.

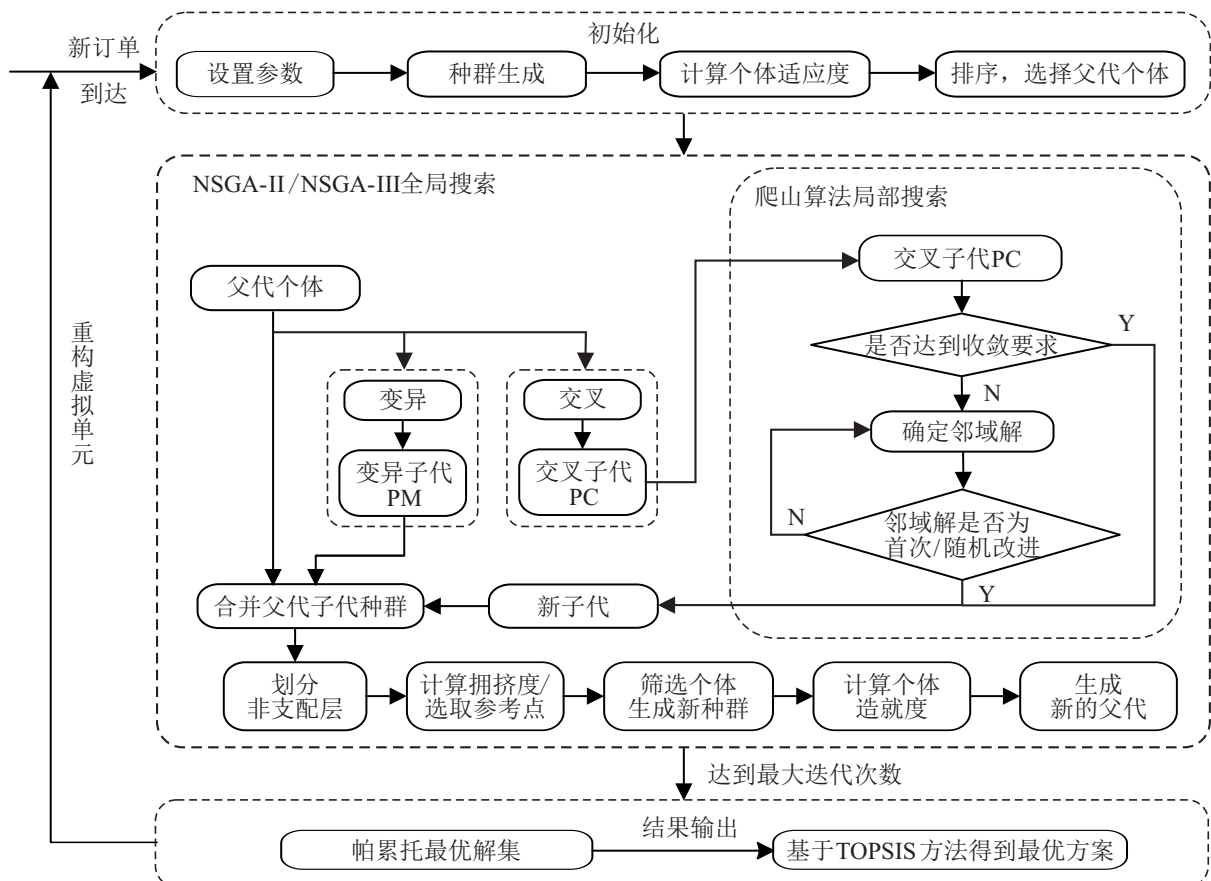


图2 算法流程

2) 粒子编码. 虚拟单元内有多台设备,且每台设备都具有多种加工功能,同一零件也拥有多道加工工序. 在混流排产方案中,同一零件可以分配到不同设备加工,但同一零件同一道工序只能由一台设备加工,且零件在加工过程中必须按照加工工艺给定的加工顺序对工序进行加工. 所以该问题的编码不仅要体现设备对零件工序的选择,更要体现零件工序的加工顺序.

本文采用二倍体编码,第1条染色体体现工序排序信息,第2条体现设备信息,即工序染色体

[1 2 2 3 1 2 ...],

设备染色体

[3 5 4 1 4 2 ...].

工序染色体中同一零件的工序用同一个数字表示,同一数字出现的次数则表示某一零件的工序号,可对零件相应的工序,比如所示编码中的第2个“1”,表示零件1的第2道工序. 设备染色体则表示工序染色体中工序对应位置的加工设备,如所示编码中的“3”表示零件1的第1道工序由设备3加工.

3) 种群生成. 新订单到达前,虚拟单元按照原有调度方案进行生产. 当新订单到达时,原有零件更新加工状态,即去掉已加工工序,留下正在加工和未加工工序. 对照现有零件序号,对新订单零件的序号进行重排序,并按照概率生成新订单零件工序加工的设备,其中选取某设备的概率与其对应工序的加工时间成反比. 将新订单零件工序随机插入更新后的原有调度方案中. 重复上述操作即可得到初始种群.

算法1 种群生成.

输入: npop: 种群规模; old_solution: 原有调度方案; t: 新订单到达时间; new_seq: 新订单零件工序; T: 设备加工工序时间.

输出: pop: 初始种群.

old_seq = UpdateSeq(old_seq, t); // 新订单到达,更新原有零件加工状态

old_machine = UpdateMachine(old_machine, t);

new_seq = resort(new_seq, old_solution);

new_machine = GetMachine(new_machine, T);

for $i = 1$: npop

for $j = 1$: len(new_seq)

location = randi([1, len(old_seq)]);

pop($i, 1$) = insert(old_seq, new_seq(j), location);

pop($i, 2$) = insert(old_machine, new_machine(j),

location);

end

return pop

4) 交叉变异. 不同于单倍体交叉变异,二倍体可以采用不同的策略对染色体进行交叉变异操作.

① 交叉. 工序染色体和设备染色体均采用单点交叉,但为了保证零件工序在交叉过程中不发生变化,需对交叉后的工序染色体进行修复,即对交叉过程进行改进,工序染色体交叉如图3和算法2所示.

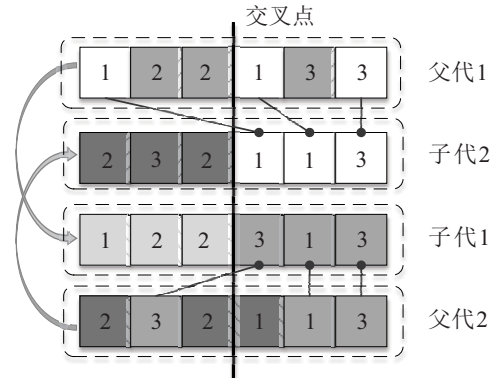


图3 工序染色体交叉操作示意图

② 变异. 采用二倍体变异方式. 工序染色体进行两点互换变异,即随机选择染色体上两点进行基因交换,从而保证染色体在发生变异时,各个零件的工序不发生变化. 设备染色体采用单点变异,且变异时选取某设备的概率与其对应工序的加工时间成反比.

5) 局部搜索. 爬山算法是经典且高效的局部搜索算法,该算法从初始解开始,不断从邻居解中选择一个最优解作为当前解,直到达到一个局部最优解. 它与NSGA-II算法结合很大程度上弥补了NSGA-II算法局部搜索能力不强的问题. 本文的爬山算法运用于交叉操作,对交叉后的个体进行局部搜索.

① 邻域动作. 工序染色体和设备染色体相邻位置的基因同时进行交换,即长度为 n 的染色体,其邻域空间大小为 $n - 1$.

② 两种策略. “首次改进”(“first improvement” strategy on NSGA-II/NSGA-III, FI-NSGA-II/FI-NSGA-III)和“随机改进”(“random improvement” strategy on NSGA-II/NSGA-III, RI-NSGA-II/RI-NSGA-III). “首次改进”是指当邻域中首次遇到可以支配当前解的邻居解时,进行邻域移动,直到满足局部搜索收敛要求,即邻域无可支配当前解的邻居解或者达到最大迭代次数,退出局部搜索. “首次改进”伪代码如算法3所示. “随机改进”是指搜索邻域中可以支配当前解的邻居解即得到非支配解,然后再从非支配解中随机选择其中一个解作为当前解,直到满足局部搜索收敛要求退出局部搜索. “随机改进”伪代码如算法4所示.

算法2 工序染色体交叉.

输入: parents: 两个父代个体;

输出: offsprings: 两个子代个体.

$r = \text{randi}([1, \text{len}(\text{parents}(1,:)) - 1]);$ // 随机产生交叉点

for $i = 1 : 2$

offsprings($i, 1:r$) = parents($i, 1:r$); // 确定不交叉部分

end

tmp = parents;

for $i = 1 : 2$

for $j = 1 : r$ // 确定交叉部分

location = find(parents($3 - i, :$) == offsprings(j));

tmp($3 - i, \text{location}$) = [];

end

offsprings($i, r:\text{end}$) = tmp($3 - i, :$); // 进行交叉

end

return offsprings

算法3 首次改进.

输入: PC: 经过交叉操作后生成的子代; cost: PC 的目标函数值.

输出: PC1: 经过“首次改进策略”局部搜索后的子代.

improvement = false;

for $i = 1 : n - 1$

newcost = CheckMove(PC, $i, i + 1$);

if cost is dominated by newcost // 是否改进

cost = newcost;

PC1 = ApplyMove(PC, $i, i + 1$); // 邻域移动

improve = true;

break;

end

end

算法4 随机改进.

输入: PC: 经过交叉操作后生成的子代; cost: PC 的适应度值.

输出: PC2: 经过“随机改进策略”局部搜索后的子代.

improvement = false;

MemorizeMove = [];

for $i = 1 : n - 1$

newcost = CheckMove(PC, $i, i + 1$);

if cost is dominated by newcost // 是否改进

MemorizeMove.append(i);

end

end

$r = \text{randi}([1, \text{len}(\text{MemorizeMove})]);$

PC2 = ApplyMove(PC, MemorizeMove(r),

MemorizeMove(r) + 1);

cost = CheckMove(PC, MemorizeMove(r),

MemorizeMove(r) + 1);

improve = true;

return PC2

2.3 多目标评价指标

1) 超体积 (hypervolume, HV): 算法获得的非支配解集与参照点围成的目标空间中区域的体积超体积值越大, 表明算法的综合性能越好, 有

$$HV = \sum_{i=1}^{|P|} V_i. \quad (13)$$

其中: $|P|$ 为解集的大小, V_i 为第 i 个解与参照点构成的超体积.

2) 均匀性 (spacing): 计算每个解到其他解的最小距离的标准差, 用于度量解集的均匀性. spacing 值越小, 表明解集越均匀, 有

$$\text{spacing} = \sqrt{\frac{1}{|P| - 1} \sum_{i=1}^{|P|} (\bar{d} - d_i)^2}. \quad (14)$$

其中: $|P|$ 为解集的大小, d_i 为连续解之间的距离, \bar{d} 为距离的平均值.

3 算例分析

3.1 数据生成

选取 A 航天机械公司中的某火箭壳体加工车间为对象, 应用实例数据, 研究所提出虚拟单元重构算法的可行性和有效性. 在本案例中, 已参与调度的零件数量为 5, 新到达零件数量为 4, 加工设备为 5 台, 零件的工序数和加工设备生产工序时间利用均匀分布随机产生, 范围设置如表 2 所示. 通过在初始虚拟单元生产计划中随机产生断点来模拟新订单随机到达, 断点为已加工工序, 断点后为未加工工序. 通过将未加工工序以及新订单的全部工序重排, 从而实现虚拟单元生产计划的重构. 由于实验要进行算法比较, 数据生成后固定不变, 便于算法之间性能的比较.

表 2 变量参数设置

变量	取值范围
工序数	5 ~ 10
加工时间	1 ~ 5

3.2 结果分析

参数设置如表 3 所示. 通过迭代运算最后得出解空间中一组帕累托的最优解, 再基于现有帕累托最优

解集,将其拟合为解空间中的帕累托最优解曲面,即帕累托前沿.图4分别展示了6种算法的帕累托前沿.

算法最后生成的帕累托前沿中包含了多个解,即多个重构方案,并不能直接为生产车间提供唯一虚拟单元重构最优方案. TOPSIS 是基于理想解和非理想解双基点常用的排序方法,可以很好地解决多属性方案排序问题. 为了得到火箭壳体加工的虚拟单元最优重构方案,采用 TOPSIS 方法对算法生成的帕累托

最优解集进行排序,最终选出最优重构方案,其中最大完工时间、总距离和设备最大负荷差的权重分别为0.4、0.3、0.3.图5展示了由TOPSIS方法筛选后6种算法最优重构方案的甘特图.

表3 算法参数设置

种群大小	迭代次数	交叉概率	突变概率
100	500	0.9	0.1

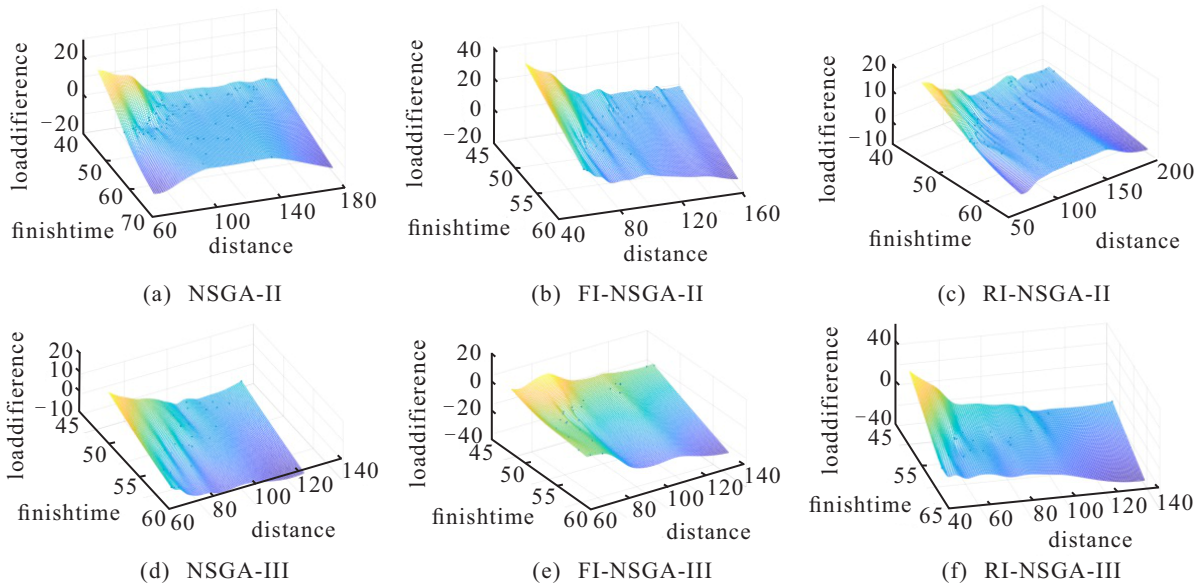


图4 帕累托前沿

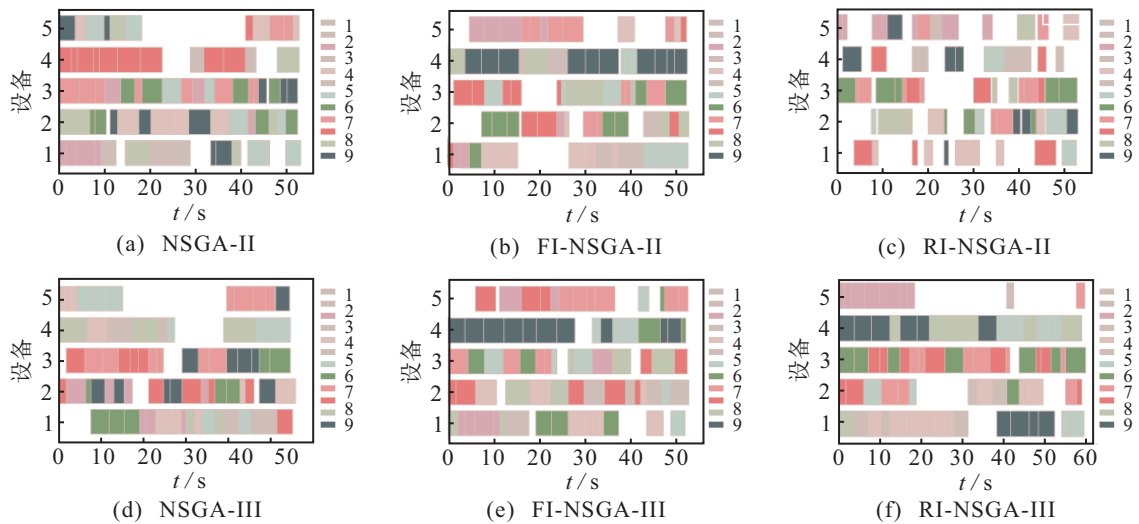


图5 TOPSIS最优重构方案甘特图

3.3 结果对比

为了验证混合算法的有效性和可行性,在给定工序规模下,分别采用NSGA-II、NSGA-III、FI-NSGA-II、FI-NSGA-III、RI-NSGA-II、RI-NSGA-III六种算法进行独立25次实验,最后通过统计分析给定的多目标评价指标值判断算法的优劣.算法比较结果见表4.

本文从两个指标角度出发采用先均值再方差最

后范围(最小最大值形成的区间)的标准评价算法性能.由表3可知,NSGA-II算法普遍优于NSGA-III算法,且FI-NSGA-II算法优于RI-NSGA-II算法,更优于NSGA-II算法,表明FI-NSGA-II算法和RI-NSGA-II算法生成的帕累托前沿更加接近真实帕累托前沿,在目标值上更优.在均匀性指标上,FI-NSGA-II算法和RI-NSGA-II算法明显优于其他算法,且FI-NSGA-

表 4 算法指标比较结果

指标	算法	最小值	最大值	平均值	方差
HV	NSGA-II	0.401	0.531	0.465	0.034
	FI-NSGA-II	0.450	0.570	0.497	0.029
	RI-NSGA-II	0.431	0.621	0.500	0.043
	NSGA-III	0.323	0.521	0.439	0.043
	FI-NSGA-III	0.388	0.537	0.447	0.055
	RI-NSGA-III	0.283	0.538	0.445	0.042
spacing	NSGA-II	1.006	3.981	1.739	0.834
	FI-NSGA-II	0.597	3.568	1.473	0.730
	RI-NSGA-II	0.673	6.764	1.910	1.504
	NSGA-III	1.010	15.438	2.855	2.721
	FI-NSGA-III	0.903	6.126	2.412	1.350
	RI-NSGA-III	1.037	7.900	2.908	2.074

II 算法最优,其次是 RI-NSGA-II 算法,表明 FI-NSGA-II 算法和 RI-NSGA-II 算法生成的帕累托前沿更加均匀,效果更好. 总体而言,“首次改进”和“随机改进”两种策略提高算法的局部搜索能力,使得算法生成的帕累托前沿更接近真实帕累托前沿,同时使得帕累托前沿更加均匀. 而且 NSGA-II 算法较 NSGA-III 算法在两个或者三个目标的问题上更高效,因此结合两种局部搜索策略的 FI-NSGA-II 算法和 RI-NSGA-II 算法明显优于其他算法,算法性能有较大提升,在进行火箭壳体虚拟单元重构时更加高效.

4 结论

基于火箭壳体订单到达为扰动事件的虚拟单元快速重构极大缩短了车间调整时间,提高了车间生产的效率和生产系统的自适应性. 本文构建虚拟单元重构的数学模型,提出了虚拟单元的最大完工时间、总运输距离、设备最大负荷差 3 个目标,利用改进 NSGA-II 算法对虚拟单元的重构方案进行优化求解,再基于 TOPSIS 方法从中选出最优解,解决了火箭壳体新订单到达,车间如何快速调整生成新的调度方案的问题.

为了进一步探索改进算法的性能,通过计算改进 NSGA-II 算法与 NSGA-II 算法、NSGA-III 算法在超体积、均匀性指标的值,进行算法性能的比较. 结果表明,基于两种局部搜索策略的改进 NSGA-II 算法在超体积、均匀性指标上较 NSGA-II 算法、NSGA-III 算法均有明显提升,体现了混合算法的优越性,也验证了 NSGA-II 算法在 3 个目标上比 NSGA-III 算法更加高效.

未来的研究中,需要在进行虚拟单元重构的过程

中考考虑工人、物流系统的运输能力、其他扰动事件等因素,使其更加贴近于实际生产,更好地为实际生产服务.

参考文献(References)

- [1] 唐晓梅, 单超, 梁晓康, 等. 新一代运载火箭壳体的装配样板设计与应用[J]. 航天制造技术, 2019(2): 57-59. (Tang X M, Shan C, Liang X K, et al. Design and application of assembly template for the shell of new generation carrier rocket[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019(2): 57-59.)
- [2] Forghani K, Fatemi Ghomi S M T, Kia R. Concurrent scheduling and layout of virtual manufacturing cells considering assembly aspects[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers — Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2021, 235(6/7): 1036-1049.
- [3] 俞武扬, 方俊俊. 制造单元布局问题的双目标模型与算法研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(6): 100-106. (Yu W Y, Fang J J. Research on Bi-objective model and its algorithm in cellular manufacturing facility layout problem[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(6): 100-106.)
- [4] 叶启付, 李国丛, 单振刚, 等. 多品种小批量壳体生产单元布局仿真优化[J]. 航天制造技术, 2015(6): 53-57. (Ye Q F, Li G C, Shan Z G, et al. Simulation and optimization in a multi-varieties and small-batch shell manufacturing cells layout[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(6): 53-57.)
- [5] 李国丛, 何伟, 单振刚, 等. 机加车间壳体生产单元的设计及关键技术[J]. 航天制造技术, 2016(5): 58-62. (Li G C, He W, Shan Z G, et al. Design and key technologies of shell manufacturing cells of machining workshop[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016(5): 58-62.)
- [6] 蒋清, 孟祥炜, 王建, 等. 航天大型铝合金壳体树脂砂铸型快速制造单元设计研究[J]. 铸造, 2019, 68(8):

- 916-920.
(Jiang Q, Meng X W, Wang J, et al. Research on rapid prototyping unit design of resin bonded sand mold for aerospace large-scale aluminum alloy castings[J]. Foundry, 2019, 68(8): 916-920.)
- [7] Mahdavi I, Aalaei A, Paydar M M, et al. Multi-objective cell formation and production planning in dynamic virtual cellular manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2011(21): 6517-6537.
- [8] 韩文民, 余义, 高龙龙, 等. 新订单与时间窗口混合驱动的继承性虚拟单元重构[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(5): 1317-1326.
(Han W M, Yu Y, Gao L L, et al. Virtual cellular inheritance reconfiguration driven by random arrival orders and time window[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(5): 1317-1326.)
- [9] Kawamoto Y, Sasazawa R, Mao B M, et al. Multilayer virtual cell-based resource allocation in low-power wide-area networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10665-10674.
- [10] 韩文民, 高龙龙, 翁红兵, 等. 基于阻塞流理论的船舶建造中管件加工虚拟单元调度问题研究[J]. 中国造船, 2016, 57(3): 164-175.
(Han W M, Gao L L, Weng H B, et al. Research on virtual cell scheduling of pipe processing in ship building based on theory of blocking flow[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(3): 164-175.)
- [11] Aalaei A, Davoudpour H. Revised multi-choice goal programming for incorporated dynamic virtual cellular manufacturing into supply chain management: A case study[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016, 47: 3-15.
- [12] Rostami A, Paydar M M, Asadi-Gangraj E. A hybrid genetic algorithm for integrating virtual cellular manufacturing with supply chain management considering new product development[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 145: 106565.
- [13] Decker C J, Ferreira J C E, Henning E, et al. Assessment of shop floor layouts in the context of process plans with alternatives[J]. Production, DOI: 10.1590/0103-6513.20180078.
- [14] Forghani K, Fatemi Ghomi S M T. Joint cell formation, cell scheduling, and group layout problem in virtual and classical cellular manufacturing systems[J]. Applied Soft Computing, 2020, 97: 106719.
- [15] Huang Y K, Xue X S, Jiang C. Optimizing ontology alignment through improved NSGA-II[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020, 2020: 8586058.
- [16] 韩文民, 陈婷, 高龙龙, 等. 急件订单干扰下虚拟单元重调度[J]. 运筹与管理, 2018, 27(2): 68-78.
(Han W M, Chen T, Gao L L, et al. Virtual cellular rescheduling under interference of emergency order[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(2): 68-78.)
- [17] 韩文民, 朱萍萍. 虚拟单元跨单元动态调度问题研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(17): 41-48.
(Han W M, Zhu P P. Research on the cross-cell dynamic scheduling in virtual cell[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(17): 41-48.)
- [18] 韩文民. 订单陆续到达下单元调度驱动决策[J]. 运筹与管理, 2017, 12: 126-137.
(Han W M. The orders arrive continuously and the scheduling of the next unit drives the decision[J]. Operations Research and Management, 2017, 12: 126-137.)
- [19] Liu X, Sun J, Zheng L, et al. Parallelization and optimization of NSGA-II on sunway TaihuLight system[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(4): 975-987.
- [20] 毕晓君, 王朝. 一种基于参考点约束支配的NSGA-算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 369-376.
(Bi X J, Wang C. A reference point constrained dominance-based NSGA-III algorithm[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 369-376.)
- [21] Govindan K, Jafarian A, Azbari M E, et al. Optimal Bi-objective redundancy allocation for systems reliability and risk management[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(8): 1735-1748.
- [22] Kato E R R, de Aguiar Aranha G D, Tsunaki R H. A new approach to solve the flexible job shop problem based on a hybrid particle swarm optimization and Random-Restart Hill Climbing[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 125: 178-189.

作者简介

杨从林(1997—), 男, 硕士生, 从事系统优化、智能优化算法的研究, E-mail: yangcl@nudt.edu.cn;

向竹(1997—), 女, 硕士生, 从事体系建模与分析的研究, E-mail: xiangzhu_xz@163.com;

杨志伟(1988—), 男, 副教授, 博士, 从事系统优化、供应链优化等研究, E-mail: zhwyang@nudt.edu.cn;

谭跃进(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统理论、武器装备体系论证等研究, E-mail: yjtan@nudt.edu.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)