计算机科学
COMPUTER SCIENCE

急件订单插入下生产系统的重调度

黄鹏鹏，赵春，郭煜

引用本文

黄鹏鹏，赵春，郭煜.急件订单插入下生产系统的重调度[J]．计算机科学, 2022, 49(11A): 211100193-6.

HUANG Peng-peng, ZHAO Chun, GUO Yu. Rescheduling of Production System Under Interference of Emergency Order [J]. Computer Science, 2022, 49(11A): 211100193-6.

相似文章推荐（请使用火狐或 IE 浏览器查看文章）

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

Android GUI自动化测试综述

Overview of Android GUI Automated Testing

计算机科学, 2022, 49(11A): 210900231-10. https://doi.org/10.11896/jsjkx.210900231

基于自反馈最优子类挖掘的视频异常检测算法

Video Abnormal Event Detection Algorithm Based on Self-feedback Optimal Subclass Mining

计算机科学, 2021, 48(7): 199-205. https://doi.org/10.11896/jsjkx.200800146

物联网声呐感知研究综述

Review of IoT Sonar Perception

计算机科学, 2020, 47(10): 9-18. https://doi.org/10.11896/jsjkx.200300138

基于手机传感器的人体活动识别综述

Review of Human Activity Recognition Based on Mobile Phone Sensors

计算机科学, 2020, 47(10): 1-8. https://doi.org/10.11896/jsjkx.200400092

分数阶微积分定义的一致性在HOL4中的验证

Formalization of Consistency of Fractional Calculus in HOL4

计算机科学, 2016, 43(3): 23-26. https://doi.org/10.11896/j.issn.1002-137X.2016.03.004

计算机科学 COMPUTER SCIENCE
http://www.jsjkx.com
DOI:10.11896/jsjkx.211100193

急件订单插入下生产系统的重调度

黄鹏鹏　赵　春　郭　煜
江西理工大学机电工程学院　江西 赣州 341000
(hpp1261@126.com)

摘　要　针对急件订单的扰动,对生产系统的重调度问题进行了研究。首先,根据产品工艺及所用设备计算急件订单与原有虚拟单元的相似度。然后,将相似的急件订单插入现有单元,调整生产资源调度方案,安排其优先生产。为了减小重调度对生产系统的冲击,兼顾生产的高效性与稳定性,构建以完成所有任务订单总流程时间及产品工序次序扰动最小为目标的数学模型,设计一个遗传-蚁群算法,借助遗传算法求得较优解后,再利用蚁群算法的正反馈求解问题。最后,将实例代入所建模型,借助MATLAB编程求解。实验结果表明,该方法能够优化重调度的生产资源分配,保证企业生产的效率与稳定。

关键词:急件订单;重调度;虚拟单元;遗传-蚁群算法
中图法分类号　TP301

Rescheduling of Production System Under Interference of Emergency Order

HUANG Peng-peng,ZHAO Chun and GUO Yu
College of Mechanical and Electrical Engineering,Jiangxi University of Science and Technology,Ganzhou,Jiangxi 341000,China

Abstract　The rescheduling of all orders is investigated after the insertion of emergency order into the mixed-flow production system. First,according to the product's technology and equipments used,the similarity between the emergency order and the original virtual cells is calculated. Similar rush orders are then inserted into existing cells and the production resource scheduling scheme is adjusted to prioritise the production of rush orders. In order to reduce the impact of rescheduling on the production system and take into account the efficiency and stability of production,a mathematical model is constructed with the goal of minimizing the total process time and product sequence disturbance for all task orders,and a genetic-ant colony algorithm is designed to solve the problem with the positive feedback of the ant colony algorithm after finding a better solution by the genetic algorithm. Finally,an example is substituted into the constructed model and solved with the help of MATLAB programming. The results show that the method could optimize the allocation of production resources for rescheduling and ensure the efficiency and stability of enterprise production.

Keywords　Emergency order,Rescheduling,Virtual cells,Genetic-ant colony algorithm

1　引言

生产系统中时常会有急件订单到达,为了保证能够及时交货,需要安排急件订单优先生产,抢占原有订单的生产资源,影响生产效率,延长了原有订单的交货期。对此,本文运用虚拟单元的技术进行生产,保证生产效率的同时兼顾生产系统的柔性[1]。

当前针对重调度的研究侧重于重调度方法[2-8],关于重调度对初始方案的影响考虑得较少。针对急件订单插入的问题,在对虚拟单元进行重调度时,有学者提出一种基于序位相似性的虚拟单元重构方案,降低了急件订单对生产系统的影响,保证了生产系统的稳定性[9-10]。在生产过程中,频繁且大规模的重构容易造成物流的混乱,增加重置及物流搬运成本,也会给工人带来更大的生产压力,降低生产效率。因此,在对虚拟单元进行重构时,不仅要考虑重构单元的高效生产,也要考虑生产系统的稳定,减小频繁的重构所带来的冲击。本文基于产品的工艺及所用的设备计算急件订单与原有虚拟单元的相似度,将相似的急件订单插入原有单元生产,对生产资源进行重调度,兼顾生产的高效性和稳定性要求,以总完工时间最小和产品工序次序扰动最小为目标建立数学模型。为了提升求解质量,基于遗传算法与蚁群算法求解NP问题的良好性能[11-12],设计了一种遗传-蚁群混合算法对问题进行求解。

2　重调度问题描述

2.1　相似性判定

急件订单插入下的生产系统重调度问题可以描述为:现有虚拟单元 $c(c=1,2,\cdots,C)$ 生产预订产品 $p(p=1,2,\cdots,P)$ 共计 d_p 件,预定完工时间 T_p,产品工序 $i(i=1,2,\cdots,I)$,需要加工能力 β,单元内现有设备 $m(m=1,2,\cdots,M)$,在设备 m 上完成工序 i 的用时为 t_{pim}。某时刻有急件订单 $j(j=1,2,\cdots,J)$ 共计 d_j 件到达,预定 T_j 时刻前完成,产品工序 $i'(i'=1,2,\cdots,I')$,在设备 m 上完成工序 i' 用时为 $t_{ji'm}$。首先基于产品工艺及所用设备计算急件订单与原有生产单元的相似度,相似度可用式(1)来计算。

$$S_{cj}=\mu_1 S_{pj}+\mu_2 S_{mj} \tag{1}$$

通信作者:赵春(847852838@qq.com)

$$S_{pj}=\frac{\sum_{i'}^{I'}\beta_{ji'}}{\sum_{i}^{I}\beta_{pi}}\cdot\frac{d_j}{(\sum_{p}^{P}p_c\cdot d_p)/p_c} \tag{2}$$

$$S_{mj}=\frac{\sum_{i'}^{I'}\alpha_{mi'}\cdot\beta_{ji'}}{\sum_{i}^{I}\alpha_{mi}\cdot\beta_{pi}}\cdot\frac{q_j}{q_m} \tag{3}$$

$$\mu_e=\frac{1}{2}(\mu_{e\text{标准差法}}+\mu_{e\text{熵权法}}),e=1,2 \tag{4}$$

式(1)中,S_{cj} 代表急件订单 j 与原有单元 c 的相似度;S_{pj} 和 S_{mj} 分别代表急件订单 j 与原有单元 c 中的订单 p 以及所用到的设备 m 的相似程度。式(2)中,$\frac{\sum_{i'}^{I'}\beta_{ji'}}{\sum_{i}^{I}\beta_{pi}}$ 代表急件订单 j 与预定订单 p 在工艺上的相似程度,$\frac{d_j}{(\sum_{p}^{P}p_c\cdot d_p)/p_c}$ 代表急件订单 j 的产量与原有单元 c 内预定订单平均产量的比。式(3)中,$\frac{\sum_{i'}^{I'}\alpha_{mi'}\cdot\beta_{ji'}}{\sum_{i}^{I}\alpha_{mi}\cdot\beta_{pi}}$ 代表拥有生产急件订单 j 所要用的加工能力的设备与现有单元内具有相应加工能力的设备的比,$\frac{q_j}{q_m}$ 代表急件订单 j 所要用到的设备量与原有单元 c 中设备总量的比。

μ_e 表示相似系数中产品工艺及所需设备的权重,综合标准差法[13]及熵权法[14]来确定。

(1)以样本数 N 为行,评价指标 M 为列,构建 a 行 b 列的原始矩阵 $\boldsymbol{X}$。根据急件订单的信息,选定 z_1,z_2,z_3,z_4 4 个评价指标,分别代表着 $\sum_{i'}^{I'}\beta_{ji'}$,$d_j$,$\sum_{i'}^{I'}\alpha_{mi'}\cdot\beta_{ji'}$,$\frac{q_j}{q_m}$,$\mu_1=z_1+z_2$,$\mu_2=z_3+z_4$。

(2)对评价指标作归一化处理,使其更具可比性。

$$Y_{ab}=\frac{X_{ab}-X_{\min b}}{X_{\max b}-X_{\min b}} \tag{5}$$

(3)通过标准差法求解权重。

$$z_b=\frac{\sqrt{\sum_{a=1}^{N}\left(y_{ab}-\frac{\sum_{a=1}^{N}y_{ab}}{N}\right)^2}}{N-1} \tag{6}$$

(4)通过熵权法求解权重。

$$z_b=\frac{1-E_b}{M-\sum_{b=1}^{M}E_b} \tag{7}$$

其中,$E_b=-(\ln N)^{-1}\sum_{a=1}^{N}P_{ab}\ln P_{ab}$,$P_{ab}=\frac{y_{ab}}{\sum_{a=1}^{N}y_{ab}}$。

最后,运用式(8)计算最终的权重。

$$z_b=\frac{1}{2}(z_{b\text{标准差法}}+z_{b\text{熵权法}});b=1,2,3,4 \tag{8}$$

急件订单到达时,首先利用式(1)计算其与原有虚拟单元的相似度。根据相关文献[15]确立一个相似度阈值 φ。相似度大于阈值时,令该急件订单与该单元合并生产并根据生产实际调整调度方案;相似度小于阈值时,根据相应的生产信息构建新的虚拟单元,安排急件订单生产。为了更加贴合实际,做出如下假设。

(1)每个订单中有且只有一种数量已知的产品。

(2)急件订单到达时若有产品正在生产,则进行中的工序不停止,待到该工序完成后对急件订单安排优先生产。

(3)只考虑急件订单的扰动。

(4)同一时间,各设备只能加工一个工序。

(5)相同产品的相同工序需在一台设备上完成。

2.2 重调度模型

得到重构的虚拟单元后,为了减小对原有调度方案的冲击,在总完工时间尽可能小的基础上,兼顾产品工序的次序,以保证生产的高效性与稳定性。以总完工时间最小和产品工序次序扰动最小为目标,建立模型。

$$\min\ \delta_1=\sum_{i'}^{I'}\sum_{j=1}^{I}t_{ji'm}\cdot d_j\cdot X_{ji'm}+\sum_{i}^{I}\sum_{p=1}^{P}t_{pim}\cdot d_p \tag{9}$$

上式表示总完工时间最小。

$$X_{ji'm}=\begin{cases}1, & \text{订单 } j \text{ 的工序 } i' \text{ 分配在设备 } m \text{ 上进行}\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

$$\min\ \delta_2=\frac{1}{\sum_{c'=1}^{C'}\sum_{i_{c'}}^{Q_{ic'}-1}\frac{r_i(\pi,\sigma)}{Q_{ic'}-1}} \tag{10}$$

上式表示产品工序次序的扰动最小,其中重构的虚拟单元 $c'(c'=1,2,\cdots,C')$ 中包含的工序 i 总数为 $Q_{ic'}$。

$$r_i(\pi,\sigma)=\begin{cases}1, & \text{原调度方案 } \pi \text{ 中的工序 } i \text{ 仍位于重调度方案 } \sigma \text{ 中原设备上第 } i+1 \text{ 道工序之前}\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

约束条件如下:

(1)急件订单在其交货期前完成。

$$\sum_{i'=1}^{I'}X_{ji'm}\cdot t_{ji'm}\cdot d_p\leqslant T_j$$

(2)预定订单在其交货期内完成。

$$\sum_{i=1}^{I}t_{pim}\cdot d_p+\sum_{i'=1}^{I'}X_{ji'm}\cdot t_{pi'm}\cdot d_p\leqslant T_p$$

(3)同一产品工艺按次序加工。

$$St_{n+1}\geqslant Et_n$$

其中,Et_n 表示工序 n 的结束时刻,St_{n+1} 表示工序 $n+1$ 的开始时刻。

(4)非负性约束。

$$T_j\geqslant 0,T_p\geqslant 0,t_{pim}\geqslant 0,t_{ji'm}\geqslant 0$$

(5)决策变量约束。

$X_{ji'm}$,$r_i(\pi,\sigma)$均为 0-1 变量

3 算法设计

此类问题是典型的 NP 问题,设计一种遗传-蚁群相结合的算法求解模型。遗传算法虽然在前期种群进化时期能够更快速地搜寻全局,但在后期却无法合理使用反馈的信息,很容易产生大规模的迭代冗余,从而大大降低了进化效能。蚁群算法能够分布式地对全局进行搜索,但其求解问题的速度依赖信息素的含量,在求解前期信息素匮乏时求解速度较慢,在积累了相当浓度的信息素以后就能够更迅速地收敛。因此,本文综合两种算法的优点设计遗传-蚁群算法,首先通过遗传算法求得问题的较优解,基于析取图模型初始化蚁群算法所需的信息素,遍历模型中的设备节点,找到问题的 Pareto 解集,在求解时间上优于常规蚁群算法,在寻优的效率上优于一般的遗传算法。具体流程如图 1 所示。

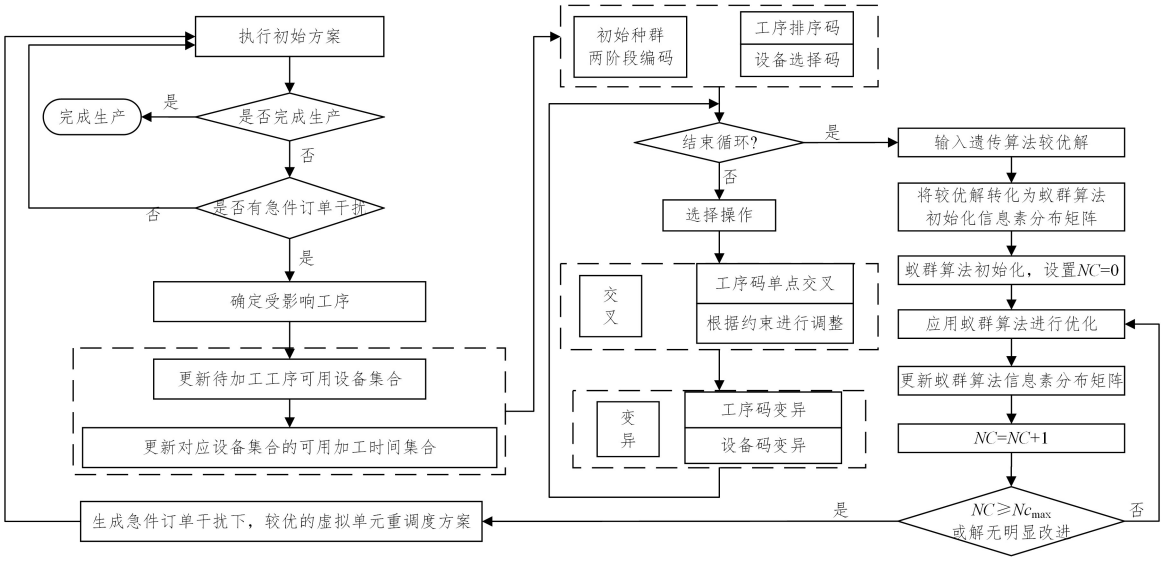


图 1　重构单元的算法流程图

Fig. 1　Algorithm flowchart of reconstruction unit

算法设置如下：

(1)编码

此处对工序顺序及设备选择两种信息同时描述，如图 2 所示。染色体：$X=(i_1,i_2,\cdots i_n,\cdots,i_Q;m_1,m_2,\cdots,m_n,\cdots,m_Q)$中，$Q$ 表示产品工序总数。前 Q 个变量表示工序的排序；后 Q 个变量表示完成工艺所选的设备。i_n 表示该产品的工艺 n，m_n 表示生产该产品的设备 n。

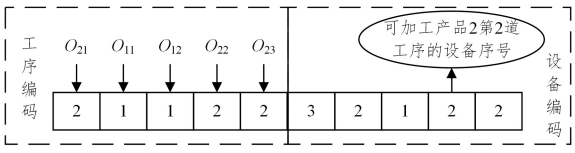


图 2　两阶段编码

Fig. 2　Two-stage coding

(2)适应度函数

综合考虑总完成时间及工序的次序扰动，定义适应度函数为：

$$fit=\frac{1}{\omega_1\min\delta_1+\omega_2\min\delta_2} \tag{11}$$

其中，$\omega_1+\omega_2=1$。

(3)选择、交叉及变异

采用轮盘赌进行选择，保留高适应度的染色体。

对于染色体的工艺段，采用两点杂交的方式，在工艺段上随机选择两点将父代染色体分为 3 段，交换前后两段并根据工艺段的变化对相应的设备选择做出调整。

变异分为两部分：首先是工艺变异，在染色体的工艺段上随机选择两个变异点，将相应的基因调换并依此交换相应的设备码；其次是设备选择变异，随机性地选择一个变异点，在相应可用的设备中选取一个替换。

设置遗传迭代的次数并计算出子辈种群最优解进化率，在此基础上设立子辈种群的最小进化速率。在所允许的次数范围之内，如果连续迭代后子代的最大进化速率低于最小进化速率，则终止遗传算法。设置遗传迭代的次数，统计子代种群最优解进化率，基于此设定子代种群的最小进化率。在允许的次数范围以内，若连续迭代后子代的进化率小于最小进化率，则判定算法终止。

(4)蚁群算法初始化

基于析取图模型[16]，根据 GA 取得的较优解，建立 ACO 所需的初始信息素矩阵。产品的工序表示为 PN，相应的设备表示为 MN，设定虚拟起点 B 及终点 F。蚂蚁从 B 点开始，遍历搜索，为各工序选择设备并确定工序顺序，以确保最短的完工时间。假设共有 $q(q=1,2,\cdots,Q)$ 只蚂蚁，将蚁群放置于 B 点，按一定规则转移向其他节点。在转移中，设定两个集合：1)蚂蚁走过的工序点所对应的设备点的集合 $tour\{\}$；2)下一步可选择的工序点所对应的设备点的集合 $allowed\{\}$，当集合 $allowed\{\}$ 为空集时，蚂蚁完成遍历，找到一个虚拟单元的可行解。在过程中，蚂蚁 q 从设备节点 a 选择转移到下个节点 b 的规则表示为：

$$b=\begin{cases}b', & p\geqslant p_0\\ rag\ \max([\tau_{ac}(t)]^{\partial}\cdot[\eta_{ac}(t)]^{\beta}), & p<p_0\end{cases} \tag{12}$$

其中，p 在 0 到 1 间取随机数，p_0 为 0 到 1 间的参数。在进行搜索时，蚂蚁通常会向$[\tau_{ac}(t)]^{\partial}\cdot[\eta_{ac}(t)]^{\beta}$值最大的节点进行转移，概率为 p_0。

相应地，偏向搜索概率为$(1-p_0)$，蚂蚁 q 从节点 a 按照 $\theta^q_{ab}(t)$的概率转移到节点 b'，在选择路径时的概率表示为：

$$\theta^q_{ab}(t)=\begin{cases}\dfrac{[\tau_{ab}(t)]^{\partial}\cdot[\eta_{ab}(t)]^{\beta}}{\sum\limits_{c\in allowed\{\}}[\tau_{ab}(t)]^{\partial}\cdot[\eta_{ab}(t)]^{\beta}}, & b\in allowed\{\}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{13}$$

其中，$\tau_{ab}(t)$表示路径(a,b)上 t 时刻的信息素浓度；∂代表信息素的启发式因子，表示信息素对蚂蚁选择路径的影响程度；β代表期望启发式因子，β越大则蚂蚁选择最近节点的概率越大；$\eta_{ab}(t)$代表启发函数，是节点 a 和节点 b 的关联性启发信息值，表示为节点 $b\pi$ 所对应的工序的最早时间 $ESt_{ab}(t)$ 的倒数。

$$ESt_{ab}(t)=\begin{cases}ME_{t_{b-1}}(t)+pt_b(t), & ME_{t_{b-1}}(t)<JE_{t_{b-1}}(t)\\ JE_{t_{b-1}}(t)+pt_b(t), & \text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

其中，$ME_{t_{b-1}}(t)$是节点 b 所代表设备上一工序结束的时间；$pt_b(t)$是节点 b 所代表工序的加工时长；$JE_{t_{b-1}}(t)$是节点 b 所

代表工序的上一工序结束的时间。

(5)更新信息素

t 时刻后，蚂蚁完成一次循环，更新剩余信息以减小影响。

$$\tau_{ab}(t+1)=(1-\rho)\cdot\tau_{ab}(t)+\Delta\tau_{ab}(t) \tag{15}$$

$$\Delta\tau_{ab}(t)=\sum_{q=1}^{Q}\Delta\tau_{ab}^{q}(t) \tag{16}$$

其中，$(1-\rho)$为残留系数；$\Delta\tau_{ab}(t)$代表路径(a,b)上的信息增量；$\Delta\tau_{ab}(0)=0$，$\Delta\tau_{ab}^{q}(t)$表示蚂蚁 q 在路径(a,b)上留下的信息量。采用全局搜索能力更优的 Ant-Cycle 模型：

$$\Delta\tau_{ab}^{q}(t)=\begin{cases}\dfrac{Z}{L_q}, & \text{若蚂蚁 } q \text{ 经过}(a,b)\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{17}$$

其中，Z 代表循环一次蚂蚁在所有路径上所留下的总信息素，L_q 表示蚂蚁 q 走过的所有路径的长度。

(6)解码

通过蚁群算法求得的较优解是蚂蚁循环 PN 节点所选择的 MN 节点的集合，从 PN 节点中获取工序码，从 MN 节点中获取设备码。例如：在解码工序时，将 PN 节点依次从左到右转化为工序顺序码，对设备解码时，将各 PN 节点选择的 MN 节点转化为设备序号。随后，根据设备码确定各工序所用设备，通过工艺顺序编码安排各设备上的加工顺序，以确保解一直处于可行域内。确定重调度的方案时，挑选各工序对应设备的最佳空闲时间，将工序依序插入进行加工。

4 实例分析

4.1 实例数据

以某企业生产车间一段时间的生产计划为例，当前有 10 个预定订单产品待产且交货期为一周，企业根据产品的特性构建虚拟单元进行生产，产品的生产信息如表 1、表 2 所列。随后陆续有 3 个急件订单插入，信息如表 3 所列。

表 1 预订订单产品各工序及对应生产设备

Table 1 Process of ordered product and its corresponding production equipment

	Product Family		Equipment group M					
	serial number	Number of production/piece	Process1	Process2	Process3	Process4	Process5	Process6
virtual cell 1	$p1$	720	2	3	7	9	11	14
	$p2$	430	2	—	7	9	11	14
	$p3$	450	—	—	7	9	11	14
	$p6$	350	—	3	7	9	11	14
virtual cell 2	$p4$	530	8	—	10	12	—	13
	$p5$	200	—	8	—	12	—	13
	$p7$	1000	10	—	—	12	—	13
virtual cell 3	$p8$	750	1	4	—	—	—	—
	$p9$	600	1	4	—	—	—	—
	$p10$	1 200	1	4	—	—	5	6

表 2 预订订单产品各工序生产时间

Table 2 Production time of each process of ordered product

	Product Family		Equipment group M					
	serial number	Number of production/piece	Process1	Process2	Process3	Process4	Process5	Process6
virtual cell 1	$p1$	720	75	20	25	70	9	25
	$p2$	430	75	—	25	67	6	25
	$p3$	450	—	—	24	72	7	24
	$p6$	350	—	21	31	72	6	26
virtual cell 2	$p4$	530	68	—	7	34	—	27
	$p5$	200	—	72	—	36	—	18
	$p7$	1 000	7	—	—	32	—	25
virtual cell 3	$p8$	750	77	24	—	—	—	—
	$p9$	600	78	18	—	—	—	—
	$p10$	1200	75	21	—	—	24	27

表 3 急件订单加工信息

Table 3 Processing information for emergency order

Number of emergency order	Number of production /piece	Arrival time /h	Process path Corresponding equipment and processing time/s
$j1$	260	8	M15(69)-M16(14)-M17(28)
$j2$	420	15	M2(77)-M7(26)-M9(67)-M11(6)-M13(26)
$j3$	870	10	M12(29)-M13(25)

4.2 急件订单插入后的虚拟单元调度

首先，基于标准差和熵权法的综合计算，得出了相似系数的权重$\mu_1=0.5729$，$\mu_2=0.4271$。其次，根据公式计算相似度，如表 4 所列。

表 4 急件订单与初始虚拟单元的相似度

Table 4 Similarity between emergency order and initial virtual cells

S_{cj}	$c1$	$c2$	$c3$
$j1$	0.199	0.122	0.097
$j2$	0.400	0.281	0.209
$j3$	0.119	0.356	0.226

结合现场调研数据确立 $\varphi=0.3424$，$S_{cj}>\varphi$ 则急件订单 j 与虚拟单元 c 合并，$S_{cj}<\varphi$ 则需要构建新虚拟单元安排急件订单 j 生产，故 $j1$ 需要构建新虚拟单元，此处不予赘述，$j2$ 与虚拟单元 1 合并，$j3$ 与虚拟单元 2 中合并。调整单元 1 和 2 的生产调度安排，更新虚拟单元 1，2 的设备与时间信息，合并后的安排如表 5 所列。

表 5　重构后的虚拟单元

Table 5　Reconfigured virtualcells

Cell	scheduled order	Equipment group
1	*p1 p2 p3 p6 j2*	*m2 m3 m7 m9 m11 m14*
2	*p4 p5 p7 j3*	*m8 m10 m12 m13*
3	*p8 p9 p10*	*m1 m4 m5 m6*
4	*j1*	*m15 m16 m17*

为有效求解急件订单插入的虚拟单元调度方案，基于蚁群-遗传算法，编写 MATLAB 程序进行求解。设置相关参数：种群规模 $pop\text{-}size=200$，选择概率 $P_x=0.8$，交叉概率 $Pc=0.6$，变异概率 $Pm=0.1$，最大最小迭代次数设置为 600 和 100，子代种群的最小进化率为 5%；取 100 只蚂蚁，信息启发因子 $\alpha=1.2$，期望启发因子 $\beta=3$，信息素挥发因子 $\rho=0.6$，设置迭代次数 200 次，信息素总量 $Z=200$，$q_0=0.6$，$count=10$。得出问题的 Pareto 解集，为保证生产的稳定性，在尽可能缩短完工时间的基础上，选择最小工序次序扰动的虚拟单元时间调度方案，如图 3 所示，总流程时间 $T=57.7$ h。

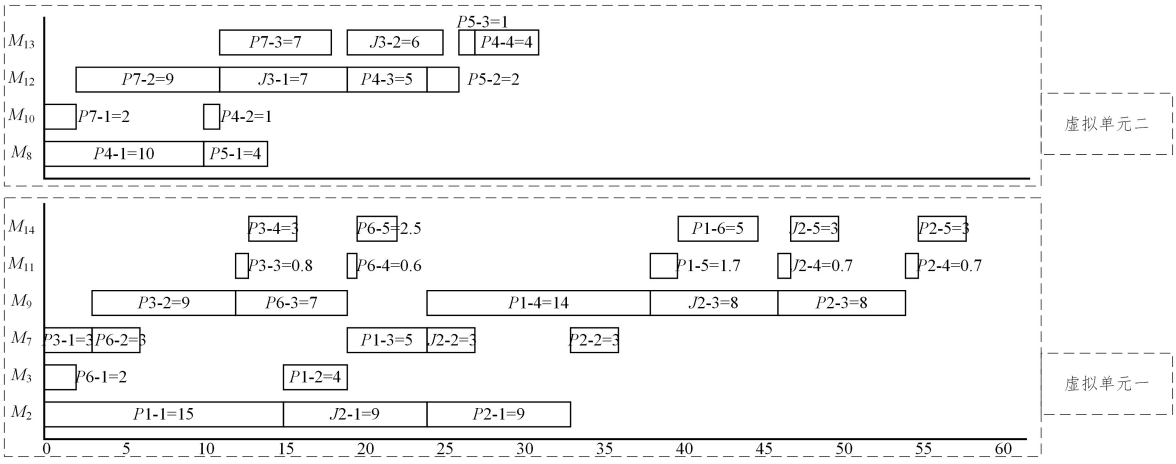


图 3　虚拟单元时间调度甘特图

Fig. 3　Gantt chart for time scheduling of virtual cells

4.3　效果评价

针对急件订单插入下生产系统的重调度问题，结合现场调研数据，将企业根据经验算法做出的调度方案与优化后重调度方案进行对比，如表 6 所列。由表可知，与该企业现行方案相比，考虑最短完成时间及最小化工序次序扰动的重调度方案中，急件订单的完成时间是 23.7 h，缩短了 19.11%，总完成时间是 57.7 h，缩短了 7.4 h，即缩短了 11.37%。此外，考虑工序次序扰动的指标小于企业现有方案，有利于减少产品在不同设备间转移带来的物流和人力浪费，提高生产系统的稳定性。

表 6　重调度方案与现有方案的对比

Table 6　Comparison of rescheduling scheme and existing scheme

	Completion time of emergency orders/ h	Total completion time/h	Disturbance index o process sequence
Rescheduling plan	23.7	57.7	1
Existing scheduling plan	29.3	65.1	1.19

综上，本文所用的遗传-蚁群算法在求解模型时切实有效，考虑总完成时间及工序次序扰动的重调度方案不但能减少生产完成时间，而且能降低产品在不同设备间转移带来的物流和人力成本。

结束语　本文研究了急件订单扰动下的生产系统重调度问题，结合虚拟单元技术综合考虑生产系统的高效性与稳定性，以完成所有订单总流程时间和产品工序次序扰动最小为目标建立多目标非线性整数模型，结合遗传算法的前期求解效率与蚁群的全局搜索能力，设计了一个遗传-蚁群混合算法求解并以生产实例代入模型，借助 MATLAB 仿真，验证该模型与算法切实有效。对比后发现，本文提出的模型和算法对于优化生产资源分配，提高生产效率和生产系统的稳定性，具有较好效果，对急件订单插入下的生产系统重调度具有借鉴意义。接下来，笔者将针对其他扰动的情况做进一步研究。

参 考 文 献

[1] WEIRT，JEVAKUMAR V. A class of nonconvex functions and mathematical programming[J]. Bulletin of the Australian Mathematical Society，1988，38(2)：177-189.

[2] YIN Y Q，CHENG T，WANG D J. Rescheduling on identical parallel machines with machine disruptions to minimize total completion time[J]. European Journal of Operational Research，2016，252(3)：737-749.

[3] WANG C，JIANG P Y. Manifold learning based rescheduling decision mechanism for recessive distur-bances in RFID-driven job shops[J]. Journal of Intelligent Manufacturing，2018，29(7)：1485-1500.

[4] SALIDO M A，ESCAMILLA J，BARBER F，et al. Rescheduling in job-shop problems for sustainable manufacturing systems[J]. Journal of Cleaner Production，2016，162(S).

[5] LIU Z，ZHANG Z M，DU X J. Rescheduling Decision Method of Manufacturing Shop Based on Improved TOPSIS[J]. Modular Machine Tool & Auto-matic Manufacturing Technique，2017(1)：157-160.

[6] WLTER J，MEHTA F D，RAO X. Aiding vehicle Scheduling and rescheduling using Machine Learning[J]. International Journal of Transport Development and Integration，2020，4(4)：308-320.

[7] ZHANG G H，LU X X，HU Y F，et al. Machine break-down re-

scheduling of flexible job shop based on improved imperialist competitive algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(8): 2242-2248.

[8] XU L Y, CHENG Z, MI H, et al. Molding Machines Batch Rescheduling Optimization Based on Improved Variable Neighborhood Search[J]. Jounal of Tongji University, 2020, 48(10): 1460-1469.

[9] CHEN T. Virtual Cellular Rescheduling Considering Lot Splitting under Interference of Emergency Orders[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.

[10] 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.

[11] YAN J G, XING L N, ZHANG Z S, et al. Dual Time Window Constrained Job-shop Scheduling Algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(26): 85-92.

[12] GUO Y, ZHU B, CHE Z Z, et al. Workshop Scheduling Prototype System Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(5): 1940-1946.

[13] SONG M S, HUANG J, ZHANG S P, et al. The Research on the Dimensionless Criterion and Methods about the Design of Multi-index Orthogonal Experiment[J]. Industrial Engineering and Management, 2014, 19(1): 41-46.

[14] OUYANG S, SHI Y L. A New Improved Entropy Method and Its Application in Power Quality Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159.

[15] KESEN S E, DAS S K, GUNGR Z. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells(VMCs)[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1148-1156.

[16] QIAO Z, HERVE M, MANIER M. A modified shifting bottleneck heuristic and disjunctive graph for job shop scheduling problems with transportation constraints[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(4): 985-1002.



HUANG Peng-peng, born in 1961, postgraduate, professor. His main research interests include lean manufacture and so on.



ZHAO Chun, born in 1997, postgradduate. His main research interests include lean manufacture and so on.