

## 不确定环境下可再制造零件加工车间调度\*

罗瑶, 高更君

(上海海事大学 物流科学与工程研究院, 上海 201306)

**摘要:**【目的】可再制造零件的质量状况、加工时间以及交货期的不确定性使得调度过程十分复杂,如何在不确定环境下对可再制造零件加工车间进行合理地调度与优化意义重大。【方法】首先采用模糊聚类分析法对可再制造零件进行质量等级划分,以减少调度过程中不确定因素的影响,然后对不确定环境下可再制造零件加工车间调度问题进行建模,并采用多层编码遗传算法进行求解。【结果】通过算例验证了模型的正确性,并且得到:1)对可再制造零件进行质量等级划分后可以明显地减少调度过程中不确定因素的干扰。2)决策者对最大完工时间和加工成本的重视程度会影响调度方案的选择,决策者应根据自身关注的重点来选择合适的调度方案,得到相对协调的结果。【结论】综合考虑可再制造零件加工车间存在的不确定性更加符合实际情况,可以为解决不确定环境下可再制造零件加工车间调度问题提供一种新思路。

**关键词:**不确定性;模糊聚类分析法;质量等级划分;再制造加工车间;调度优化;多层编码遗传算法

**中图分类号:**O223

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2018)05-0026-07

再制造是实现资源再利用的一个重要途径,然而再制造过程存在巨大的不确定性使得调度过程十分复杂。如何在不确定环境下对可再制造零件加工车间进行合理地调度与优化,已成为提高效率,降低成本的关键环节之一。

目前国内外学者已对不确定环境下的调度进行了初步探索。在时间方面,卢冰原等人<sup>[1]</sup>用三角模糊数表示操作间的不确定性延迟时间,以最小 makespan 为目标建立了基于模糊逻辑和遗传算法的调度模型。Giglioia 等人<sup>[2]</sup>在制造/再制造系统中综合考虑生产计划与调度,建立了加工时间可控的节能模型,通过算例说明该模型不仅降低了能耗和机器空闲时间,而且降低了系统的整体成本。Itoh 和 Ishii<sup>[3]</sup>在单机调度问题中,把交货期看作模糊随机变量,并利用启发式方法求解该问题。在回收品质量状况方面,Zhang 等人<sup>[4]</sup>在再制造系统中综合考虑生产计划与调度,并且设计了基于模拟的遗传算法来解决回收品质量状况不确定问题。Behret 和 Korugan<sup>[5]</sup>分析得出,在制造/再制造混合系统中,根据回收品质量分类会降低成本。Denizel 等人<sup>[6]</sup>设计了随机规划来解决多阶段再制造规划中回收品质量不确定的情况,得到了最大化预期利润总额的方案。在工艺路线方面,李成川等人<sup>[7]</sup>建立基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型,描述了废旧零部件所有可能经过的工艺路线。温海骏<sup>[8]</sup>利用 FGERT 方法研究废旧工件不确定的再制造工艺路线,并对发动机曲轴的再制造工艺路线进行分析。上述研究从不同角度对不确定环境下的调度进行探讨,给不确定环境下可再制造零件加工车间调度提供了理论基础。但一方面,这些研究往往仅考虑一种不确定因素,且主要集中在加工时间方面,很少将不确定因素综合起来考虑。另一方面,随着企业间竞争日趋激烈,如何降低成本是企业关注的重点,而不仅仅考虑缩短时间,提高效率,但是大部分研究仅仅从完工时间方面进行考虑,而忽略了加工成本这一重要因素。

基于此,本文考虑了多种主要的不确定因素(可再制造零件质量状况、加工时间和交货期),在采用模糊聚类分析法对可再制造零件进行质量等级划分的基础上,以加权最大完工时间以及加权加工成本最小为目标,建立不确定环境下可再制造零件加工车间调度模型,并将该模型转化为确定的调度模型。使用多层编码遗传算法进行求解,通过算例验证了模型的正确性,以期为不确定环境下可再制造零件加工车间调度作业提供理论指导和实践参考。

\* 收稿日期:2017-12-21 修回日期:2018-04-16 网络出版时间:2018-09-26 13:26

资助项目:国家自然科学基金(No. 71601114);上海市科委工程中心能力提升项目(No. 14DZ2280200);上海市科委重点项目(No. 12510501600)

第一作者简介:罗瑶,女,研究方向为逆向物流,E-mail:2228217145@qq.com;通信作者:高更君,讲师,博士,E-mail:86404791@qq.com。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180926.1325.022.html>

## 1 可再制造零件质量等级划分

可再制造零件经过消费者的长期使用,存在着不同程度的损坏,但是对于损坏方面的评价具有一定的模糊性,难以量化,只能通过一些定性指标来进行描述。模糊聚类分析法是按照一定要求在涉及事物之间的模糊界限对事物进行分类的方法,本文采用模糊聚类分析法对可再制造零件进行分类符合现实情况。

模糊聚类分析法一般分为4个步骤。

第1步:数据归一化。 $n$ 个可再制造零件分别为 $\{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\}$ ,每个可再制造零件根据 $a$ 个损坏指标进行评价,即 $\{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{ia}\}, i=1, 2, \dots, n$ ,原始数据矩阵为 $(X_{ij})_{n \times a}$ 。由于不同类型的数据具有不同的量纲,为了使数据进行比较,需要将数量进行归一化处理。

第2步:建立模糊相似矩阵。利用海明距离确定 $X_i, X_j$ 的相似程度 $r_{ij}$ ,  $\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times n}$ ,其中,  $r_{ij} = \sum_{b=1}^a |X_{ib} - X_{jb}|$ 。

第3步:聚类。使用传递闭包法,并用二次方法变相似关系为等价关系,使 $\mathbf{R}^2 = \mathbf{R} \times \mathbf{R}, \mathbf{R}^4 = \mathbf{R}^2 \times \mathbf{R}^2, \dots$ ,直到 $\mathbf{R}^{2d} = \mathbf{R}^d \times \mathbf{R}^d = \mathbf{R}^d$ ,即可得到 $t(\mathbf{R}) = \mathbf{R}^d$ 。

第4步:选择最佳阈值 $\lambda$ 。

## 2 问题描述与符号说明

### 2.1 问题描述

在可再制造零件加工车间,可再制造零件等待再制造,每个零件需要经过多道工序,每道工序必须在指定的机器上进行修复和改造<sup>[9-10]</sup>,经过再制造的零件需要按照重新装配子系统进度交货。否则,提前交货会造成重新装配子系统内的零件堆积,而延迟交货又会影响到重新装配子系统操作进度,这都会使得系统缺乏柔性,不利于再制造的稳定性。其中,机器加工零件所花费的时间由零件的损伤程度决定,并且重新装配子系统对每一个零件都有交货期要求,用梯形模糊数 $\tilde{D}_j(d_j^a, d_j^b, d_j^c, d_j^d)$ 表示,隶属度函数为:

$$\mu_d(T_j^D) = \begin{cases} 0, & x \leq d_j^a, x \geq d_j^d \\ \frac{x-d_j^a}{d_j^b-d_j^a}, & d_j^a < x < d_j^b \\ \frac{d_j^d-x}{d_j^d-d_j^c}, & d_j^c < x < d_j^d \\ 1, & d_j^b < x < d_j^c \end{cases}$$

在满足机器约束、工序顺序约束以及交货时间满意度等条件下,以加权最大完工时间以及加权加工成本为目标建立模型。该模型需要满足以下假设:1) 每道工序必须在其前面的工序完成后再进行加工。2) 任一时刻,一台机器最多只能加工一个零件,一个零件至多在一台机器上被加工<sup>[11]</sup>,零件在任一机器上一旦开始被加工就不允许中断。3) 不同的零件间没有先后顺序,即具有相同的优先级。4) 从零时刻开始再制造操作,并在零时刻所有零件都可以被加工。5) 将再制造加工开始前零件运送时间以及准备时间都计入加工时间。6) 再制造过程的机器不会发生故障。7) 零件需要经过多道工序并且每道工序必须在指定机器上加工。8) 零件被加工完成后立即交货到重新装配子系统,中间没有等待时间。

### 2.2 符号说明

根据问题描述和模型假设,对不确定环境下可再制造零件加工车间调度问题涉及的符号进行定义。 $p$ :工序编号,  $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ ;  $m$ :机器编号,  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ ;  $j$ :零件编号,  $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ ;  $Z$ :目标函数值,即加权最大完工时间和加权加工成本;  $M'$ :正无穷大;  $\psi_1$ :决策者对最大完工时间的重视程度;  $\psi_2$ :决策者对加工成本的重视程度;  $T_{mj}^s$ :零件 $j$ 由机器 $m$ 加工的开始时间;  $T_{mj}^p$ :零件 $j$ 由机器 $m$ 加工所花费的时间;  $T_{mj}^f$ :零件 $j$ 由机器 $m$ 加工的完成时间;  $T_j^D$ :零件 $j$ 的交货时间;  $c_m$ :机器 $m$ 加工零件的单位时间成本;  $C$ :零件的加工成本;  $\mu_d(T_j^D)$ :重新装配子系统对交货时间的满意度;  $D_j$ :零件 $j$ 的交货期;  $\sigma$ :重新装配子系统对交货时间满意度规定的阈值;  $\xi$ :判断零件 $j$ 由机器 $m$ 加工与零件 $j'$ 由机器 $m'$ 加工的先后顺序,  $\xi$ 为0-1变量,当零件 $j$ 由机器 $m$ 加工的顺序在零件 $j'$ 由机器 $m'$ 加工的前面时,  $\xi=1$ ,否则,  $\xi=0$ ;  $\omega_{jpm}$ :判断零件 $j$ 的工序 $p$ 是否由机器 $m$ 加工,  $\omega_{jpm}$ 为0-1变量,当 $\omega_{jpm}=0$ 时,表示零件 $j$ 的工序 $p$ 不由机器 $m$ 加工,当 $\omega_{jpm}=1$ 时,表示零件 $j$ 的工序 $p$ 由机器 $m$ 加工。

### 3 调度模型

在可再制造零件质量状况、加工时间以及交货期不确定的环境中,考虑最大完工时间以及加工成本,以加权最大完工时间以及加权加工成本最小为目标,在满足机器约束、工序顺序约束以及交货时间满意度等条件下,建立的不确定环境下可再制造零件加工车间调度模型如下:

$$\min \tilde{Z} = \psi_1 \max(\tilde{T}_{mj}^F) + \psi_2 \tilde{C}, 1 \leq m \leq M; 1 \leq j \leq J; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{m=1}^M c_m \times \tilde{T}_{mj}^P \times \omega_{jpm} = \tilde{C}, \quad (2)$$

$$\tilde{T}_{mj}^S + \tilde{T}_{mj}^P = \tilde{T}_{mj}^F, 1 \leq m \leq M, 1 \leq j \leq J, \quad (3)$$

$$\psi_1 + \psi_2 = 1, \quad (4)$$

$$\max(\tilde{T}_{mj}^F) = \tilde{T}_j^D, 1 \leq m \leq M, 1 \leq j \leq J, \quad (5)$$

$$\tilde{T}_{mj}^S + \tilde{T}_{mj}^P - M'(1 - \xi) \leq \tilde{T}_{m'j'}, m, m' \in \{1, \dots, M\}, j, j' \in \{1, \dots, J\}, \quad (6)$$

$$\tilde{T}_{m'j'}^S + \tilde{T}_{m'j'}^P - M'\xi \leq \tilde{T}_{mj}^S, m, m' \in \{1, \dots, M\}, j, j' \in \{1, \dots, J\}, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J \mu_d(T_j^D) \geq \sigma, \quad (8)$$

$$T_{mj}^S, T_{mj}^P, T_{mj}^F, T_j^D, c_m \geq 0, 1 \leq j \leq J, 1 \leq m \leq M, \quad (9)$$

$$\omega_{jpm}, \xi \in \{0, 1\}, 1 \leq j \leq J; 1 \leq p \leq P, 1 \leq m \leq M, \quad (10)$$

其中,(1)式是目标函数,表示可再制造零件加权最大完工时间与加权加工成本之和最小;(2)式表示零件  $j$  的加工成本;(3)式表示零件  $j$  由机器  $m$  加工的开始时间、花费时间以及完成时间的关系;(4)式表示对  $\psi_1$  和  $\psi_2$  进行归一化处理;(5)式表示加工完零件  $j$  后立即交货到重新装配子系统;(6)式和(7)式表示任一时刻,一台机器只能加工一个零件的一道工序;(8)式表示可再制造零件需要达到重新装配子系统对交货时间的满意度;(9)式是参数的取值范围,表示参数均为非负数;(10)式是参数的取值范围,表示参数均为 0-1 变量。

### 4 模型转化与求解算法

由(1)式可知,目标函数是模糊规划问题,需要将其转化为确定的调度模型<sup>[12-13]</sup>。将目标函数  $\tilde{Z}$  中最乐观、最可能、最悲观估计值分别最优化后,原有的模糊规划模型可以近似表示为如下确定的多目标非线性规划。

$$\min Z_1 = Z^L, \min Z_2 = Z^M, \min Z_3 = Z^U。$$

将上述 3 个目标函数值分别定义为:  $Z_1^{\text{PIS}} = \min Z^L; Z_2^{\text{PIS}} = \min Z^M; Z_3^{\text{PIS}} = \min Z^U$ 。其中,  $Z_1^{\text{PIS}}, Z_2^{\text{PIS}}, Z_3^{\text{PIS}}$  分别代表决策者对于最乐观、最可能和最悲观情况下的最优解。

确定的多目标非线性规划可以转化为确定的单目标非线性规划:

$$T = \min[v_1 Z_1^{\text{PIS}} + v_2 Z_2^{\text{PIS}} + v_3 Z_3^{\text{PIS}}], v_1 + v_2 + v_3 = 1。$$

其中,系数  $v_1, v_2, v_3$  反映了决策者对于最乐观、最可能和最悲观情况下最优解的不同重视程度,是综合考虑了不同情况的最优决策。 $v_1, v_2, v_3$  的值由决策者给定,一般  $v_2$  的值大于  $v_1$  和  $v_3$  的值,使其在最可能的情况下取得最优解。 $v_1$  和  $v_3$  表示所作决策的消极与积极程度, $v_1$  值越小, $v_3$  值越大,在目标函数中  $Z_1^{\text{PIS}}$  占比越小而  $Z_3^{\text{PIS}}$  占比越大,决策越积极,反之,决策越消极。

对所建模型运用 Lingo 11.0 进行编程求解,在机器数量以及工序数量均为 3 的情况下,得到的数据如表 1 所示。当零件数量较少时,Lingo 11.0 可以在较短的时间内以较少的迭代次数对问题进行求解,验证了模型的正确性。但是随着零件数量的增加,迭代次数以及运行时间骤增。为了在短时间内获得一个相对理想的解,需要设计相应的启发式算法进行求解。

遗传算法作为一种并行搜索算法<sup>[14]</sup>,能够有效地进行全局搜索,在解决调度问题方面非常有效。针对不确定环境下再制造零件加工车间调度问题,本文采用多层编码遗传算法进行求解。

染色体编码:采用整数编码方法,每个零件  $P$  个工序的  $J$  个零件,染色体长度为  $2 \times J \times P$ 。其中,染色体前

表 1 Lingo 11.0 求解记录表

Tab. 1 Lingo 11.0 solution record table

零件数量	迭代次数	时间/s
1	1 358	1
2	267 069	27
3	1 572 553	136
4	13 778 605	1 112

半部分每一个基因表示一个零件编号,编号在染色体中出现的次数表示零件加工工序,后半部分每一个基因表示零件对应工序上指定的机器。

适应度函数:将  $T = \min[v_1 Z_1^{PIS} + v_2 Z_2^{PIS} + v_3 Z_3^{PIS}]$  作为适应度函数,值越小表示该染色体的适应度越高。

选择操作:采用轮盘赌法选择适应度较好的染色体。

交叉操作:采用整数交叉法。在染色体前半部分随机生成一个交叉位置,将两条染色体中交叉位置以及交叉位置之前的基因进行互换,针对互换后某些零件工序多余缺失问题,将零件工序多余的基因变为零件工序缺失的基因,且染色体后半部分按照交叉操作之前基因对应的机器来调整。

变异操作:采用随机交换两个基因法,即随机选取两个位置,将两个位置对应的加工工序以及机器编号进行互换。

终止条件判断:以遗传最大代数作为终止条件,事先设定一个合适的最大遗传代数,当遗传代数小于最大遗传代数时,继续迭代;若遗传代数大于或等于最大遗传代数时,迭代停止,同时输出最优解。

### 5 算例分析

以再制造叉车轴承为例,现准备在 3 台机器上加工 7 个废旧轴承,选取磨损程度、断裂程度、腐蚀程度、变形程度、老化程度这 5 个主要指标反映轴承的损坏程度,对指标的评估打分如表 2 所示(分值越高表示损坏程度越严重)。每个废旧轴承包含多道工序并且每道工序对应的机器已经确定,其中,废旧轴承的单位加工时间成本如表 3 所示,加工工序对应的机器编号以及交货期如表 4 所示,不同损坏程度的废旧轴承被机器加工所花费的时间如表 5 所示。

本文用 Matlab R2014b 对算例进行编程,计算机具体配置:CPU 为 Inter(R)core(TM)i7-5657U、主频为 3.30GHz、内存为 4.00GB。通过模糊聚类分析法得到如图 1 所示的动态聚类图,根据现实情况,取  $\lambda = 0.9739$ ,即将 7 个废旧轴承分成 3 类,  $\{X_1, X_4, X_7\}$  为重度损伤,  $\{X_2, X_5\}$  为轻度损伤,  $\{X_3, X_6\}$  为中度损伤。

将得出的结果代入到遗传算法中,其中,遗传算法的具体参数设置为:种群数量为 100,代沟为 0.9,交叉概率为 0.95,变异概率为 0.1,最大遗传代数为 100 次。由于可再制造零件不同程度的损坏会使得加工时间具有高度的不确定性,一般企业为了应对再制造过程中的不确定性,往往按照可再制造零件加工时间最长情况进行调度安排,为了探究可再制造零件质量状况对调度问题的影响,分别在两种情况下运行 10 次取最大完工时间最小值的平均值,得出对质量进行等级划分与未划分两种情况的对比情况如表 6 所示。可以看出,对可再制造零件进行质量等级划分后可以明显地减少调度过程中不确定因素的干扰,能够缩短时间,提高效率,且时间缩短了 24.35%。

为了探究决策者不同重视程度对目标函数值的影响,在  $v_1 = 0.25, v_2 = 0.5$  以及  $v_3 = 0.25$  的情况下,设置  $\phi_1$  的初始值为 0,  $\phi_2$  的初始值为 1,逐渐调

表 2 指标打分表

Tab. 2 The score table for evaluation

轴承编号	磨损程度	断裂程度	腐蚀程度	变形程度	老化程度
1	82	81	78	87	88
2	10	8	20	14	17
3	59	48	30	56	78
4	97	78	86	93	92
5	9	12	23	17	20
6	56	52	28	63	82
7	85	79	84	90	91

表 3 单位加工时间成本

Tab. 3 The cost per unit reprocessing time

机器编号	1	2	3
单位加工时间成本/(元·小时 <sup>-1</sup> )	60	55	73

注:单位加工时间成本包含了工人的工资、机器磨损造成的损失以及日常维护管理费用等

表 4 轴承加工工序对应的机器编号以及交货期

Tab. 4 Machine number and delivery date corresponding to working procedure

轴承编号	工序编号			交货期/min
	1	2	3	
1	1	2	3	(70,80,90,100)
2	3	1	2	(85,95,105,115)
3	3	2	1	(100,110,120,130)
4	2	1	3	(115,125,135,145)
5	2	3	1	(130,145,160,175)
6	1	3	2	(150,165,180,195)
7	2	3	1	(170,185,200,220)

整两者的数值,得到的结果如表 7 所示。可以看出,随着  $\psi_1, \psi_2$  值的不断变化,调度方案是变化的。这说明决策者对最大完工时间和加工成本的重视程度会影响调度方案的选择,决策者应根据自身关注的重点来选择合适的调度方案,得到相对协调的结果。限于篇幅,本文仅给出  $\psi_1 = 0.3, \psi_2 = 0.7$  的加工顺序甘特图与迭代过程图,见图 2,图 3。其中,加工顺序甘特图同一种颜色的矩形表示同一废旧轴承的不同工序在指定机器上的加工顺序,并且矩形中第一位数字表示轴承的编号,最后一位数字表示加工的工序。

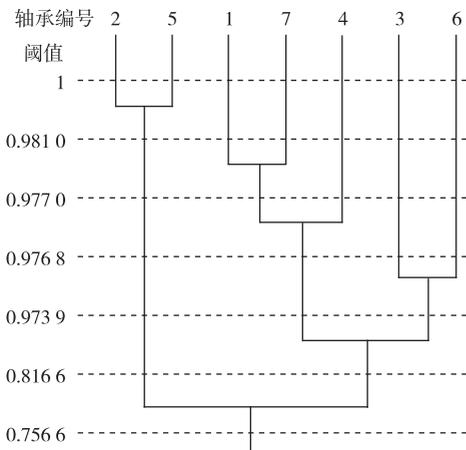


图 1 动态聚类图  
Fig. 1 Dynamic clustering diagram

为了验证多层编码遗传算法的有效性,与差分进化算法以及粒子群算法进行对比,效果如图 4 所示。从图中可以看出,遗传算法、差分进化算法、粒子群算法的收敛代数分别为:6,22,32。在算法收敛方面,遗传算法相比粒子群算法以及差分进化算法较优。在结果方面,粒子群算法相比遗传算法以及差分进化算法较优,但是遗传算法所求结果与粒子群算法所求结果差距不大。因此,多层编码遗传算法在解决此问题时是有效的。

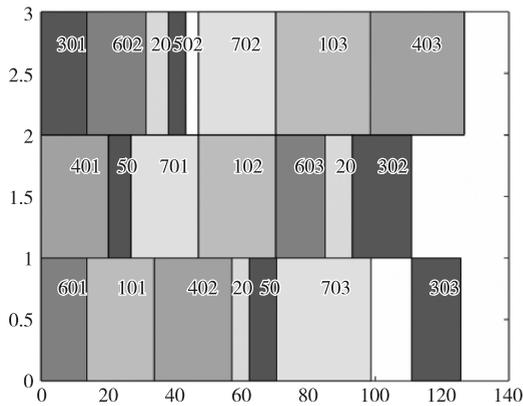


图 2 加工顺序甘特图  
Fig. 2 Gantt chart

表 5 不同损坏程度的轴承被机器加工所花费的时间

Tab. 5 The time taken for machine to reprocess bearings with different degrees of damage min

机器编号	损坏程度		
	轻度	中度	重度
1	(6.7, 7.2, 7.7)	(13.7, 14.2, 14.7)	(20.2, 20.7, 21.2)
2	(5.2, 6.2, 6.7)	(17.7, 18.2, 18.7)	(23.2, 24.2, 25.2)
3	(8.2, 8.7, 9.2)	(14.7, 15.2, 15.7)	(28.2, 28.7, 29.2)

表 6 对比表

Tab. 6 Comparison table

	划分后	划分前	缩短比率
最大完工时间最小值/min	103.11	136.305	24.35%

表 7 调度方案表

Tab. 7 Schedule table

$\psi_1$	$\psi_2$	调度方案
0	1	6-5-7-4-5-2-5-1-7-6-1-4-6-3-1-2-4-2-7-3-3
0.3	0.7	4-5-6-3-6-2-7-1-5-4-7-2-1-1-5-6-2-7-4-3-3
0.5	0.5	4-2-6-2-5-3-2-6-5-4-5-7-4-1-3-3-7-7-1-1-6
0.7	0.3	5-2-3-5-6-6-2-4-7-2-1-5-1-7-4-7-3-4-3-6-1
1	0	3-7-1-7-5-6-4-5-1-7-3-4-6-1-6-5-2-2-4-2-3

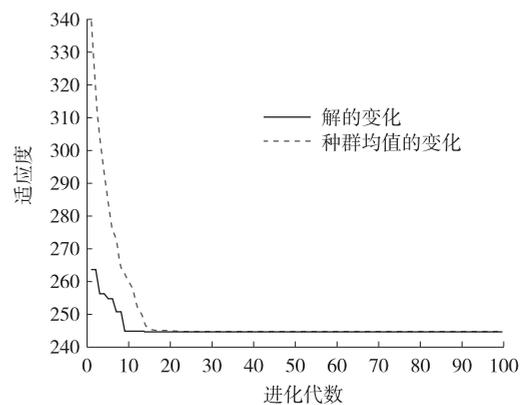


图 3 迭代过程图  
Fig. 3 Iterative procedure diagram

通过以上分析可以看出,对可再制造零件进行质量等级划分后可以明显地减少调度过程中不确定因素的干

扰,并且决策者对最大完工时间和加工成本的重视程度会影响调度方案的选择,决策者应根据自身关注的重点来选择合适的调度方案,得到相对协调的结果。

## 6 结论

本文针对可再制造零件质量状况、加工时间以及交货时间不确定的加工车间调度问题进行了研究。以加权最大完工时间以及加权加工成本最小为目标,在满足机器约束、工序顺序约束及交货时间满意度等条件下,建立了不确定环境下可再制造零件加工车间调度模型,并将其转化为确定的调度模型。通过对算例求解分析可知,对可再制造零件进行质量等级划分后可以明显地减少调度过程中不确定因素的干扰,并且决策者的偏好与自身所关注的重点对调度方案有影响,决策者需要根据自身关注的重点做出决策,以期为不确定环境下可再制造零件加工车间调度作业提供理论指导和实践参考。

### 参考文献:

- [1] 卢冰原,陈华平,古春生,等.模糊环境下的柔性工作车间调度模型的研究[J].运筹与管理,2004,13(16):157-160.  
LU B Y, CHEN H P, GU C S, et al. The research of fuzzy flexible job-shop scheduling model[J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(16): 157-160.
- [2] GIGLIO D, PAOLUCCI M, ROSHANI A. Integrated lot sizing and energy-efficient job shop scheduling problem in manufacturing/remanufacturing systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 148: 624-641.
- [3] ITOH T, ISHII H. One machine scheduling problem with fuzzy random due-dates[J]. Fuzzy Optimization and Decision Making, 2005, 4(1): 71-78.
- [4] ZHANG R, ONG S K, NEE A Y C, et al. A simulation-based genetic algorithm approach for remanufacturing process planning and scheduling[J]. Applied Soft Computing, 2015, 37: 521-532.
- [5] BEHRET H, KORUGAN A. Performance analysis of a hybrid system under quality impact of returns[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 56(2): 507-520.
- [6] DENIZEL M, FERGUSON M, SOUZA G, et al. Multi-period remanufacturing planning with uncertain quality of inputs[J]. Engineering Management, 2010, 57(3): 394-404.
- [7] 李成川,李聪波,曹华军,等.基于GERT图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型[J].计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 298-305.  
LI C C, LI C B, CAO H J, et al. Uncertain remanufacturing process routings model for used components based on GERT network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 298-305.
- [8] 温海骏.不确定环境下再制造生产计划与车间调度集成优化研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.  
WEN H J. Integrated optimization of remanufacturing production planning and scheduling under uncertain environment[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [9] 苏春施,杨梅,郑玉巧,等.基于分派规则和离散人工蜂群算法的再制造系统生产调度[J].工业工程与管理,2016,21(5):56-61.  
SU C S, YANG M, ZHENG Y Q, et al. Scheduling for remanufacturing system based on dispatching rules and discrete artificial bee colony algorithm [J]. Industrial Engineering and Management, 2016, 21(5): 56-61.
- [10] FANG C C, LAI M H, HUANG Y S, et al. Production-planning of new and remanufacturing products in hybrid production systems[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 108: 88-99.
- [11] 温海骏,刘明周,刘长义,等.不确定环境下回收发动机拆卸调度方法[J].计算机集成制造系统,2015,21(5):1279-1286.  
WEN H J, LIU M Z, LIU C Y, et al. Scheduling method for recycled engine disassembly under uncertainty [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(5): 1279-1286.
- [12] 郑璐,顾幸生.不确定条件下的零等待Flowshop生产调度问题[J].华东理工大学学报,2004,30:188-193.  
ZHENG L, GU X S. Flow shop production scheduling with no-wait restrictions under uncertainty [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2004, 30: 188-193.
- [13] 俞胜平,庞新富,柴天佑,等.加工时间不确定的炼钢连铸生产调度问题研究[J].控制与决策,2009,24(10):1467-1472.  
YU S P, PANG X F, CHAI T Y, et al. Research on production scheduling for steel-making and continuous casting with processing time uncertainty[J]. Control and Decision, 2009, 24(10): 1467-1472.

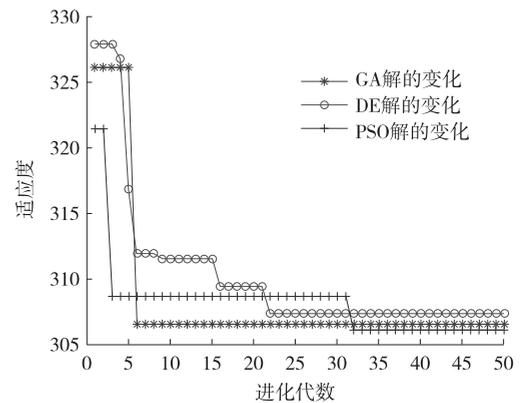


图4 算法效果对比

Fig. 4 Comparison of algorithm results

sion, 2009, 24(10): 1467-1472.

- [14] 莫建麟, 吴喆. 基于混合遗传禁忌的多目标柔性作业车间调度[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2013, 30(2): 87-91.

MO J L, WU Z. Multi-objective flexible job-shop scheduling problem based on compound gene and tabu algorithm [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2013, 30(2): 87-91.

## Operations Research and Cybernetics

### Remanufacturing Shop Scheduling of Parts under Uncertain Environment

LUO Yao, GAO Gengjun

(Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** [Purposes] The scheduling process is complex because of the uncertainty of the remanufacturing parts' quality, processing time, and delivery time. It is of a great significance to schedule and optimize the processing workshop of remanufacturing parts in the uncertain environment. [Methods] To reduce the impact of uncertain factors in the scheduling process, the quality grade of remanufacturing parts was divided by fuzzy cluster analysis firstly. Then the model of the scheduling of remanufacturing parts processing workshop was established under uncertain environment, and the multilayer coding genetic algorithm was used to solve the problem. [Findings] The correctness of the model was verified by an example. And the following conclusions were obtained: 1) the interference of uncertain factors in the scheduling process was reduced obviously as the quality grade division of remanufacturing parts. 2) the selection of the scheduling scheme was influenced by the degree of attention of decision makers to the maximum makespan and the processing cost. The relative coordination results can be obtained as the decision makers choose the scheduling scheme according to the focus of their own attention. [Conclusions] It is more realistic to consider the uncertainty existing in remanufacturing workshop, which can provide a new way to solve the problem of remanufacturing shop scheduling under uncertain environment.

**Keywords:** uncertainty; fuzzy cluster analysis; quality level division; remanufacturing parts processing workshop; scheduling optimization; multilayer coding genetic algorithm

(责任编辑 陈 乔)