

## 不确定条件下基于遗传算法的作业车间调度问题

彭运芳<sup>1</sup>, 高雅<sup>1</sup>, 夏蓓鑫<sup>2</sup>

(1. 上海大学 管理学院, 上海 200444;

2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 考虑到产品不同的交货期, 研究了不确定条件下的作业车间调度问题, 用三角模糊数表示产品处理时间, 建立了调度问题的模型, 并结合模糊理论设计了一种改进的遗传算法进行求解. 该算法通过整数编码的方法产生初始种群, 结合轮盘赌方法和精英保留策略进行选择操作, 采用基于优先工序交叉(precedence operation crossover, POX)算子和互换变异方法进行交叉和变异操作, 并通过动态调整交叉概率和变异概率的方法来提高算法的性能以及计算效率. 最后, 通过算例和企业实例验证了该模型和算法的有效性.

**关键词:** 作业车间调度; 不确定性; 提前/拖期; 不同交货期窗口; 遗传算法

**中图分类号:** O 224

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-2861(2016)06-0793-11

## Job shop scheduling with uncertainty based on genetic algorithm

PENG Yunfang<sup>1</sup>, GAO Ya<sup>1</sup>, XIA Beixin<sup>2</sup>

(1. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** A mathematical model representing uncertain processing time by triangular fuzzy number was built to deal with the job shop scheduling problem with different due date windows. An improved genetic algorithm was developed to solve the problem. The algorithm generated initial population using an integer coding method combined with a roulette method and the elitist strategy in the selection operator. Precedence operation crossover (POX) and swap mutation methods were used in crossover and mutation operators. Meanwhile, crossover and mutation probabilities were dynamically adjusted to improve the algorithm's performance. An example was given to verify validity of the model and algorithm.

**Key words:** job shop scheduling; uncertainty; earliness/tardiness; different due date window; genetic algorithm

作业车间调度问题(job shop scheduling problem, JSSP)是众所周知的一个调度热点问题. 生产调度优化是现代管理技术以及先进制造技术的核心, 是实现企业高效生产的关键因素. 随着经济全球一体化的不断发展, 客户的需求更加个性化和多元化, 如何进行多品种小批量生产是企业目前所面临的难题. 基于此, 作为一种多品种小批量生产条件下的高质量、低消耗的生

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51405283, 71401098)

通信作者: 夏蓓鑫(1984—), 男, 博士, 研究方向为系统调度、系统建模分析. E-mail: bxxia@shu.edu.cn

产方式,准时制(just in time, JIT)生产方式便应运而生. JIT规定零件必须在要求时间内作业加工,并且按时交货. 作为调度问题的评价指标,能够“准时交货”越来越受到关注. 而作为提前/拖期调度问题的一般表达形式,考虑到交货期窗口的调度问题,规定作业的完工时间只要在一定范围内就不会受到惩罚,超出这个范围将受到惩罚<sup>[1]</sup>.

在已有的车间调度研究中,对生产中的不确定性因素考虑较少,但在实际生产加工过程中有许多不确定因素,如产品处理时间的不确定性、应急突发事件的不确定性等<sup>[2]</sup>. 工件处理时间是调度问题的核心数据. 针对处理时间不确定的情况,杨宏安等<sup>[3]</sup>用区间数表示处理时间,以提前/拖期惩罚的取值区间为优化目标构建了区间调度模型,通过区间可能度方法解决了遗传算法求解区间调度模型时适应度值的比较问题. Lei<sup>[4]</sup>建立了一个作业车间调度模型,同时考虑了处理时间的不确定性,并提出了一种邻域搜索算法来优化最大完工时间. Azadeh等<sup>[5]</sup>针对不确定作业车间调度问题,提出了一种基于计算机模拟和人工神经网络相结合的启发式算法,通过对每个机器选择最优的分配规则来实现Makespan的优化. Hu等<sup>[6]</sup>研究了模糊处理时间和模糊交货期作业车间调度问题,并提出了一种差分评价(differential evolution, DE)算法来进行多目标的优化. 李俊青等<sup>[7]</sup>针对模糊作业车间调度问题进行研究,提出了一种化学反应的优化和禁忌搜索相混合(chemical reaction optimization combined with Tabu search, CROTS)的启发式算法. 杨建斌等<sup>[8]</sup>针对模糊作业车间调度问题,以最大化最小客户的满意度为调度目标,建立了模糊环境下作业车间调度问题的模型. 在不确定性的描述上,以上研究主要采用随机变量和模糊数等方法. 随机数方法需要获取大量的样本数据来得到处理时间的概率分布. 但在实际生产中,尤其是多品种小批量的生产环境下,受统计方法和数据采集工具的影响,大量样本数据的获取比较困难. 模糊集理论提供了一种在精确性和计算困难度之间的折中方法. 三角模糊数被广泛用来描述具有不确定性的各种参数,它由最悲观值、最可能值、最乐观值组成. 实际生产现场的相关专家可以根据以往经验给出处理时间的区间,在这个区间范围内的时间都是可接受的,因此本研究使用三角模糊数来描述处理时间.

在已有的大多数对模糊作业车间调度问题的研究中,考虑的目标函数大多是产品的完工时间或者满足交货期限. 但在实际生产中,生产者对生产效率、成本最小化、产品利润最大化等问题更加看重. 因此,本研究以降低产品生产总成本为目标,既考虑机器的空闲成本,又考虑提前/拖期惩罚值,结合模糊理论设计了一种改进的遗传算法. 该算法通过整数编码的方法产生初始种群;采用轮盘赌方法,并实行精英保留策略进行选择操作,将适应度高的染色体保存下来;运用优先工序交叉(precedence operation crossover, POX)算子进行交叉操作,确保子代的可行性;选择互换变异方法进行变异操作. 为了改善遗传算法的早熟现象<sup>[9]</sup>,本研究引入文献<sup>[10]</sup>中提到的自适应算子的方法,动态调整遗传算法的交叉概率和变异概率. 最后,通过算例比较验证了该改进算法的有效性,并结合某机械制造厂的实例验证了模型和算法的实用性.

## 1 问题描述

### 1.1 调度问题的一般描述

关于不确定条件下的作业车间调度问题的定义如下:假如有 $m$ 台设备,需要对 $n$ 个工件进行加工,每个工件 $j$ 都由 $d_j$ 道工序组成. 本研究用 $O_{jh}$ 代表工件 $j$ 上的第 $h$ 个操作,每道工序的模糊处理时间都已经给出. 此外,在加工过程中,还有以下的约束条件需要满足:①相同时刻相同设备上只能加工一个工件;②在某一时刻每个工件只能在一台设备上加工,而且每一个操作都不可以半途终止;③不同工件的工序之间没有先后的约束;④所有工件都没有优先加

工权.

## 1.2 模糊数及其运算

本研究使用三角模糊数对处理时间进行描述. 三角模糊数可以记作  $\tilde{d} = (d^L, d^M, d^U)$ , 其隶属度函数表示如下:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x \leq d^L, \\ \frac{x - d^L}{d^M - d^L}, & d^L < x \leq d^M, \\ \frac{d^U - x}{d^U - d^M}, & d^M < x \leq d^U, \\ 0, & x > d^U, \end{cases} \quad (1)$$

隶属度函数如图1所示.

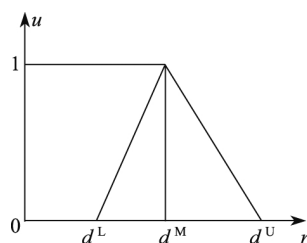


图1 隶属度函数

Fig. 1 Membership function

在求解模糊车间调度问题时, 三角模糊数主要涉及求和、取大和排序3种运算. 给定两个三角模糊数:  $\tilde{s} = (s_1, s_2, s_3)$  和  $\tilde{t} = (t_1, t_2, t_3)$ .

(1) 求和运算. 求和运算用于计算工序的模糊开工时间和模糊处理时间之和, 即工序的完工时间, 计算公式为

$$\tilde{s} + \tilde{t} = (s_1 + t_1, s_2 + t_2, s_3 + t_3). \quad (2)$$

(2) 取大运算. 取大运算用于比较并选取工序的释放时间和机器的空闲时间的最大值, 进而计算工序的最早模糊开工时间, 计算公式为

$$\tilde{s} \vee \tilde{t} = (s_1 \vee t_1, s_2 \vee t_2, s_3 \vee t_3). \quad (3)$$

(3) 模糊数的评价. 本研究采纳Sakawa等<sup>[11]</sup>所给出的方法来进行比较. 当模糊数为三角模糊数  $\tilde{s} = (a_1, a_2, a_3)$  时, 根据以下准则来判断.

准则1  $C_1 = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$ . 先根据  $C_1$  值来比较三角模糊数的大小,  $C_1$  值越大的模糊数越大.

准则2  $C_2 = a_2$ . 若是三角模糊数的  $C_1$  值都相同, 可以依据  $C_2$  值来比较三角模糊数的大小,  $C_2$  值越大的模糊数越大.

准则3  $C_3 = a_3 - a_1$ . 若是三角模糊数的  $C_1$  值和  $C_2$  值都相同, 可以依据  $C_3$  值来比较三角模糊数的大小,  $C_3$  值越大的模糊数越大.

(4) 模糊数的去模糊化. 关于模糊数的求解可采用期望值求法<sup>[12]</sup>. 当模糊数为三角模糊数  $\tilde{s} = (a_1, a_2, a_3)$  时, 令  $E_1, E_2$  分别为期望区间的下限和上限, 则

$$E_1 = a_2 - \int_{a_1}^{a_2} f(x) dx,$$

$$E_2 = a_2 + \int_{a_2}^{a_3} g(x) dx,$$

式中,

$$f(x) = \frac{x - a_1}{a_2 - a_1},$$

$$g(x) = \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2},$$

则其期望值为

$$E_s = \frac{1}{2}(E_1 + E_2) = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}. \quad (4)$$

## 2 模糊调度问题的数学模型

为了方便后续的描述, 定义如下符号:  $n$  为工件总数;  $m$  为机器总数;  $i, e$  为机器序号,  $i, e=1, 2, \dots, m$ ;  $j, k$  为工件序号,  $j, k=1, 2, \dots, n$ ;  $d_j$  为第  $j$  个工件的工序总数;  $O_{jh}$  为第  $j$  个工件的第  $h$  道工序;  $\tilde{p}_{jh}$  为第  $j$  个工件的第  $h$  道工序的处理时间, 用三角模糊数  $\tilde{p}_{jh} = (a, b, c)$  表示, 其中  $a$  表示最悲观处理时间,  $b$  表示最可能处理时间,  $c$  表示最乐观处理时间;  $\tilde{s}_{jh}$  为第  $j$  个工件的第  $h$  道工序的加工开始时间;  $\tilde{c}_{jh}$  为第  $j$  个工件的第  $h$  道工序的加工完成时间;  $L$  为足够大的正数;  $\tilde{c}$  为每个工件的完工时间;  $\tilde{C}_{\max}$  为最大完工时间;  $[E_j, T_j]$  为交货期窗口, 其中  $E_j, T_j$  分别为最早和最晚交货期, 当  $\tilde{c}_j < E_j$  称工件  $j$  提前, 当  $\tilde{c}_j > T_j$  称工件  $j$  拖期, 如果工件在交货期窗口内完工, 就不会受到惩罚, 反之, 工件  $j$  提前或者拖期交货, 都将对工件  $j$  进行惩罚;  $C_I$  为单位时间机器空闲成本;  $C_T$  为单位时间工件拖期费用;  $C_E$  为单位时间工件提前费用, 一般  $C_E \leq C_T$ ;  $\tilde{g}_j(\tilde{c}_j)$  为工件  $j$  的提前/拖期惩罚值;  $y_{jhkl}$  为一个 0, 1 决策变量, 用于描述在同一机器上加工的两个工序间的顺序关系, 如果  $O_{jh}$  先于  $O_{kl}$  加工, 则  $y_{jhkl} = 1$ , 否则  $y_{jhkl} = 0$ .

问题目标函数是总成本最小化, 总成本包括机器的空闲成本和提前/拖期惩罚值. 机器的空闲成本是保证产品的空闲时间尽量少, 而提前/拖期惩罚值则要求工件按时交货, 提前或者拖期都将增加成本费用. 定义调度目标函数为

$$\min \tilde{Z} = C_I \cdot \left( m \cdot \tilde{C}_{\max} - \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^{d_j} \tilde{p}_{jh} \right) + \sum_{j=1}^n \tilde{g}_j(\tilde{c}_j), \quad (5)$$

式中,

$$\tilde{g}_j(\tilde{c}_j) = C_E \cdot \max(0, E_j - \tilde{c}_j) + C_T \cdot \max(0, \tilde{c}_j - T_j).$$

根据前述模糊数加法运算的定义, 目标函数值  $\tilde{Z}$  同样为三角模糊数. 用模糊数的期望值法求得总成本的期望值, 约束条件为

$$\tilde{c}_j = \tilde{s}_{jd_j} + \tilde{p}_{jd_j}, \quad (6)$$

$$\tilde{c}_{jh} \leq \tilde{s}_{j(h+1)}, \quad (7)$$

$$\tilde{c}_{jd_j} \leq \tilde{C}_{\max}, \quad (8)$$

$$\tilde{s}_{jh} + \tilde{p}_{ijh} \leq \tilde{s}_{kl} + L(1 - y_{jhkl}), \quad (9)$$

$$\tilde{c}_{jh} \leq \tilde{s}_{j(h+1)} + L(1 - y_{klj(h+1)}), \quad (10)$$

$$s_{jh} \geq 0, \quad c_{jh} \geq 0. \quad (11)$$

式(5)为目标函数, 要求生产总成本最小, 等待成本为等待时间与单位时间的等待成本之积, 惩罚成本为提前/拖期时间与单位时间提前/拖期费用之积. 约束(6)表示工件完工时间等于最后一个工件开始时间与处理时间之和. 约束(7)描述了工件不同工序的加工顺序约束. 约束(8)描述了工件的完工时间约束. 约束(9)~(10)表示同一时刻同一设备上有且只有一道工序在加工. 约束(11)表示各个参数变量必须是正数.

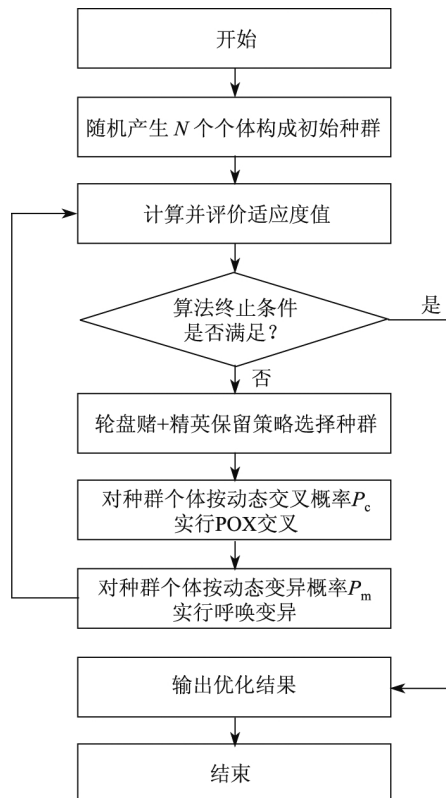


图 2 改进遗传算法流程

Fig. 2 Flow chart of the improved genetic algorithm

### 3 改进遗传算法的设计

#### 3.1 改进遗传算法的基本流程

遗传算法是一种模拟自然界生物进化的随机优化算法, 由于其具有实用性和鲁棒性强等特点, 被广泛应用于优化调度、交通运输、人工智能、组合优化等领域. 然而遗传算法也有不

足之处,比如容易陷入局部最优、过早收敛等.因此,本研究针对上述问题在作业车间调度中采用自适应算子动态调整交叉概率和变异概率的方法,并取得了良好的效果.具体的算法流程如图2所示.

### 3.2 种群初始化

种群初始化过程是以染色体编码的方式给出初始解,但使用二进制编码或浮点编码将使问题复杂化,不利于编程和计算.本研究采用整数编码方法,每条染色体表示全部工件的加工顺序.按照工件和工序数随机产生初始的种群,并对其进行迭代.例如,有4个工件,每个工件有3道工序.用染色体表示为 $C=[2, 4, 2, 3, 1, 3, 4, 1, 2, 3, 1, 4]$ ,其中染色体基因表示每个工件,相同基因的次序表示该工件的工序.

### 3.3 选择操作

选择操作是从一个旧种群中选择淘汰适应度低的个体,并选择适应度高的优秀个体的过程.本研究采取轮盘赌方法选择和精英保留的策略进行选择操作,适应度越大的个体被选中的概率越大.首先,通过一对一的方法将个体映射到范围为 $[0, \text{sum}]$ 的一个连续区间内,其中 $\text{sum}$ 表示当前种群所有个体适应度的总值.然后,在 $[0, \text{sum}]$ 的范围内产生一个随机数,与之对应的个体被选中.重复此过程,直到满足种群数量为止.

### 3.4 交叉操作

交叉操作是将个体的某些基因随机进行交接以产生新的基因组合.普通遗传算法进行交叉操作时多采用两点交叉的方法,将父代个体随机产生的两个交叉点之间的部分进行交换,得到子个体.但交叉后可能会出现某些工序多余、某些工序缺失的情况,需要对交叉个体进行调整来产生可行解,因而降低了遗传算法的运行效率.为了克服此缺陷,本研究采用的是基于POX的算子.该算子能很好地继承父代优良特征并适用于子代<sup>[13]</sup>,其具体流程如下:

- (1) 对于非空的集合 $J_1$ 和 $J_2$ ,将工件集合 $\{1, 2, \dots, n\}$ 随机分配到两个集合当中;
- (2) 将Parent 1中含有 $J_1$ 的基因按照其原来所在的位置复制到Children 1中,Parent 2中含有 $J_1$ 的基因复制到Children 2中;
- (3) 将Parent 2中含有 $J_2$ 的基因复制到Children 1中,Parent 1中含有 $J_2$ 的基因复制到Children 2中,并按照其原来的顺序放在空余的位置上.

例如,有染色体 $C_1=[1, 3, 1, 2, 4, 4, 3, 2, 1, 3, 2, 4]$ , $C_2=[4, 1, 3, 4, 2, 3, 1, 3, 4, 2, 1, 2]$ ,将工件集 $\{1, 2, 3, 4\}$ 随机划分为 $J_1=\{1, 4\}$ 和 $J_2=\{2, 3\}$ ,则交叉后产生的子代染色体为 $C_3=[1, 3, 1, 2, 4, 4, 3, 3, 1, 2, 2, 4]$ , $C_4=[4, 1, 3, 4, 2, 3, 1, 2, 4, 3, 1, 2]$ .具体的交叉过程如图3所示.

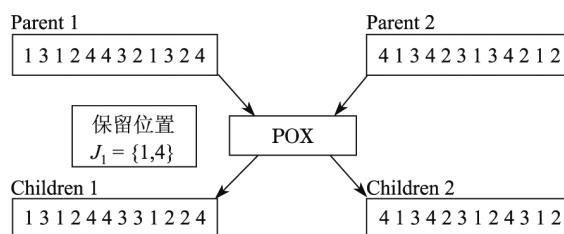


图3 POX交叉操作

Fig. 3 POX crossover operator

在染色体交叉阶段,每个染色体能否交叉由交叉概率 $P_c$ 决定.为了克服遗传算法过早陷入

早熟, 本研究对遗传算法中的交叉概率进行动态调整, 即

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_a}, & f \geq f_a, \\ k_2, & f < f_a, \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $f_{\max}$  代表种群中最大的适应度值,  $f_a$  代表每代种群的平均适应度值,  $f$  代表选中的两个交叉个体中较大的适应度值,  $k_1, k_2$  取  $[0, 1]$  区间值.

### 3.5 变异操作

在遗传算法中, 变异操作能够产生新的个体, 增加种群的多样性, 提高算法的局部搜索效率, 避免过早出现收敛. 本研究采用互换变异(reciprocal exchange mutation, REM)的方法进行变异操作. 首先, 变异算子从种群中随机选择变异个体. 然后, 随机选择变异位置 1 和变异位置 2. 最后, 把个体中变异位置 1 和变异位置 2 的加工工序进行对调. 具体的变异过程如图 4 所示.

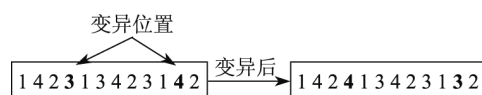


图 4 REM操作

Fig. 4 REM operator

在染色体变异阶段, 每个染色体能否交叉由交叉概率  $P_m$  决定. 和交叉算子一样, 本研究采用动态调整的方法改变遗传算法中的交叉概率, 即

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_a}, & f \geq f_a, \\ k_4, & f < f_a, \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $k_3, k_4$  取  $[0, 1]$  的区间值.

### 3.6 停止准则

本研究所设计的终止条件如下: 达到预先设定的最大迭代次数, 或者种群适应度平均值等于该代最优的运算结果.

## 4 算例仿真

为了验证本研究提出的改进遗传算法对求解模糊作业车间调度的有效性, 对小规模、中等规模、大规模 3 组算例进行了比较分析, 其中  $3 \times 3$  算例的加工时间参数源自文献[14], 并将其拓展为  $3 \times 4, 4 \times 5$  算例, 而  $6 \times 6, 10 \times 10$  算例的数据源于文献[15-16]. 单位时间的机器空闲成本、拖期和提前惩罚值分别为 5, 4 和 3. 运行环境如下: 操作系统为 Windows 7, 内存为 2 GB, CPU 2.1 GHz, 程序设计语言为 MATLAB. 取种群数  $P=40$ , 进化代数  $G=200$ . 普通遗传算法采用两点交叉的方式, 交叉概率  $P_c=0.8$ , 变异概率  $P_m=0.1$ . 改进后的遗传算法采用动态概率的方法, 其中  $k_1 = 1.0, k_2 = 1.0, k_3 = 0.5, k_4 = 0.5$ . 对问题共进行 20 次仿真, 记录最优值、最差值、平均值. 采用普通遗传算法和改进后的遗传算法得到的结果如表 1 所示.

由表中结果可以看出: 对于小规模问题, 改进遗传算法与普通遗传算法每次运行都能达到最优值, 性能相当, 但是改进遗传算法的运行时间更短; 对于中等规模问题, 改进遗传算法总体求解质量要优于普通遗传算法, 二者的运行时间相当; 对于大规模问题, 改进遗传算法虽然运

行时间稍长,但是求解质量要明显优于普通遗传算法.随着算例规模的扩大,改进遗传算法在求解质量上比普通遗传算法更有优势,其中普通遗传算法与改进遗传算法的第一个 $10 \times 10$ 算例迭代曲线如图 5 所示.可以看到,改进遗传算法最优解优于普通遗传算法,且随着迭代代数的增加,所求目标函数逐渐趋于稳定并最终收敛,说明了改进遗传算法的有效性和收敛性.

表 1 普通遗传算法和改进遗传算法运行结果的比较

Table 1 Comparisons of the results of the general and the improved genetic algorithm

算例 规模	算例	目标值为总成本最小							
		普通遗传算法				改进遗传算法			
		最优值	最差值	平均值	运行 时间/s	最优值	最差值	平均值	运行 时间/s
小规模	3×3	60.120	60.120	60.120	35.6	60.120	60.120	60.120	29.1
	3×4	70.400	70.400	70.400	38.4	70.400	70.400	70.400	30.6
	4×5	460.920	460.920	460.920	40.3	460.920	460.920	460.920	34.2
中等 规模	6×6	518.750	552.000	533.325	92.3	518.750	541.750	525.750	89.2
	6×6 1	314.000	1 342.000	1 326.500	76.2	1 314.000	1 314.000	1 314.000	94.5
	6×6 1	031.000	1 130.000	1 092.500	80.5	1 016.000	1 078.000	1 047.000	92.4
大规模	10×10	1 068.300	1 319.500	1 153.710	229.2	926.250	1 046.800	979.800	282.3
	10×10 3	682.000	3 966.000	3 788.750	238.5	3 358.000	3 559.000	3 476.800	301.6
	10×10	3 620.000	3 918.000	3 791.200	264.8	3 340.000	3 750.000	3 549.000	287.4

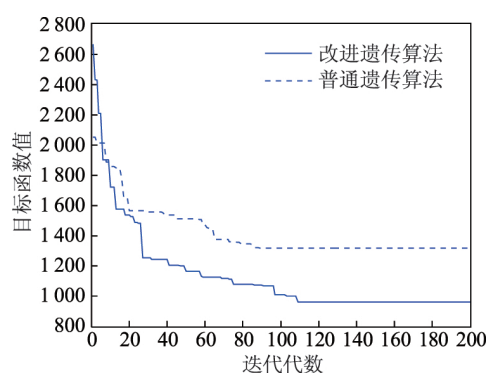


图 5 最优值进化曲线

Fig. 5 Curves of the optimal results

## 5 调度实例

某制造厂是一家生产轴承制品的国营单位,其主营业务是对精密轴承零部件的研发以及生产工作,其中的一个制造车间主要负责零部件的加工.经了解,该车间的生产模式是一类典型的作业车间调度问题,因此对该厂某一个计划生产周期内的一个实例进行了研究.该车间需要生产 4 种型号的轴承零部件,具体工艺和加工数据如表 2 和 3 所示,其中 M1, M2, M3, M4,



M5分别代表设备车床、磨床、铣床、表面淬火机、探机.

表2 产品工艺流程

Table 2 Process of the products

零部件名称	加工工序(设备)				
	1	2	3	4	5
深沟球轴承	钻削 (M3)	磁力探伤 (M5)	感应加热 (M4)	车削加工 (M1)	磨内端面 (M2)
圆柱滚子轴承	磁力探伤 (M5)	镗孔加工 (M3)	车削加工 (M1)	磨轴身 (M2)	感应加热 (M4)
角接触球轴承	感应加热 (M4)	镗孔加工 (M3)	精车 (M1)	磨面 (M2)	磁力探伤 (M5)
推力球轴承	铣削 (M3)	精车 (M1)	精磨弧面 (M2)	磁力探伤 (M5)	感应加热 (M4)

表3 加工数据

Table 3 Processing data

零部件名称	设备(时间/h)					交货期
	1	2	3	4	5	
深沟球轴承	M3 (0.6, 0.8, 1.1)	M5 (0.4, 0.5, 0.6)	M4 (5.1, 6.0, 6.7)	M1 (0.8, 1.0, 2.8)	M2 (8.1, 8.5, 9.3)	[13, 15]
圆柱滚子轴承	M5 (0.4, 0.5, 0.6)	M3 (0.2, 0.4, 0.8)	M1 (0.7, 0.9, 2.6)	M2 (6.2, 7.5, 8.0)	M4 (4.6, 5.8, 7.3)	[18, 20]
角接触球轴承	M4 (8.0, 9.1, 9.6)	M3 (0.4, 0.6, 1.8)	M1 (1.3, 3.5, 4.6)	M2 (6.8, 8.2, 9.3)	M5 (0.2, 0.3, 0.6)	[10, 17]
推力球轴承	M3 (2.6, 3.5, 4.2)	M1 (1.7, 2.0, 4.4)	M2 (7.3, 8.3, 9.2)	M5 (0.3, 0.4, 0.6)	M4 (3.2, 4.6, 6.5)	[15, 18]

结合以上数据, 利用改进遗传算法对实例进行仿真, 所得的调度甘特图如图6所示.

## 6 结束语

本工作研究了不确定条件下的作业车间调度问题, 产品处理时间用三角模糊数表示, 并考虑了交货期对产品生产进度的影响, 建立了以降低产品生产过程总成本为目标的数学模型, 提出了一种求解该问题的改进遗传算法. 通过经典算例进行验证, 说明了本算法的有效性, 并对某机械制造企业的生产周期进行了调度. 调度结果证明, 本算法对于不确定条件下对的作业车间调度有较好的适用性. 此外, 本算法具有较好的拓展性, 其中模糊数及其运算不仅可以描述处理时间, 而且对更为复杂的调度问题, 如考虑切换时间的模糊调度问题也具有参考价值. 本改进遗传算法中的自适应交叉和变异算子通过提高种群中适应度高的个体的交叉率和变异率, 改善了一般遗传算法的早熟问题, 同样可以运用到其他车间调度问题中, 以提高求解算法的搜

索效率. 现实生产系统中的不确定性因素还有很多, 对于解决更为复杂的不确定性问题以及如何实现多个目标之间的折中平衡将是今后的研究方向.

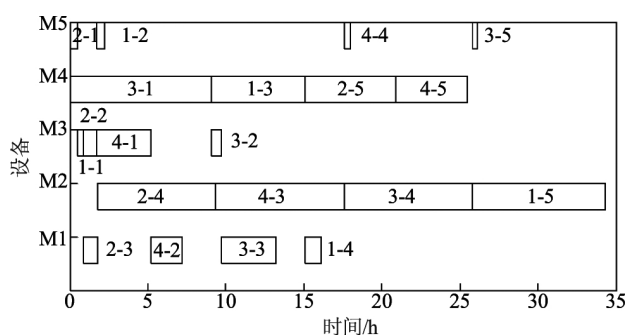


图 6 最优值甘特图

Fig. 6 Gantt chart of the optimal results

## 参考文献:

- [1] 李平, 顾幸生. 不确定条件下不同交货期窗口的Job Shop调度 [J]. 管理科学学报, 2004, 7(2): 22-26.
- [2] PISTIKOPOULOS E N. Uncertainty in process design and operations [J]. Computers & Chemical Engineering, 1995, 19: 553-563.
- [3] 杨宏安, 王周锋, 吕阳阳, 等. 工序加工时间不确定条件下作业车间调度问题的区间数求解方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(9): 2231-2240.
- [4] LEI D. Population-based neighborhood search for job shop scheduling with interval processing time [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(4): 1200-1208.
- [5] AZADEH A, NEGAHBAN A, MOGHADDAM M. A hybrid computer simulation-artificial neural network algorithm for optimization of dispatching rule selection in stochastic job shop scheduling problems [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(2): 551-566.
- [6] HU Y, YIN M, LI X. A novel objective function for job-shop scheduling problem with fuzzy processing time and fuzzy due date using differential evolution algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56(9): 1125-1138.
- [7] 李俊青, 潘全科. 求解模糊作业车间调度问题的混合优化算法 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(23): 142-149.
- [8] 杨建斌, 孙树栋, 牛刚刚, 等. 自适应遗传算法求解模糊作业车间调度问题 [J]. 机械科学与技术, 2013, 32(1): 16-21.
- [9] 曹俊, 朱如鹏. 一种改善遗传算法早熟现象的方法 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2003, 9(3): 229-231.
- [10] 张凯燕, 莫云辉, 邓召义, 等. 改进遗传算法的行星齿轮传动多目标模糊物元可靠性优化 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2007, 13(1): 22-27.
- [11] SAKAWA M, KUBOTA R. Fuzzy programming for multi objective job shop scheduling with fuzzy processing time and fuzzy due date through genetic algorithms [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120(2): 393-407.

- [12] HEILPERN S. The expected value of a fuzzy number [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 47(1): 81-86.
- [13] 张超勇, 饶运清, 刘向军, 等. 基于POX 交叉的遗传算法求解Job-Shop 调度问题 [J]. 中国机械工程, 2005, 15(23): 2149-2153.
- [14] 耿兆强, 邹益仁. 基于遗传算法的作业车间模糊调度问题的研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(8): 616-620.
- [15] SAKAWA M, MORI T. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date [J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(2): 325-341.
- [16] PALACIOS J J, PUENTE J, VELA C R, et al. Benchmarks for fuzzy job shop problems [J]. Information Sciences, 2016, 329: 736-752.