一种模糊偏好排序的FJSP蚁群算法*

李欣娜，朱晶晶，樊文清
（兰州交通大学 交通运输学院，甘肃 兰州 730070）

摘　要：针对柔性作业车间调度问题，选取三个性能指标作为求解目标。将蚁群算法与模糊属性权重结合在一起，提出了求解FJSP的新算法。该算法利用了蚁群算法的正反馈机制，在逐步构造解的过程中利用最优解信息和启发式信息增强全局求解能力，寻求各目标较好的全局最优解。采用模糊属性权重对各目标进行综合评价，最终求解出FJSP问题的最优解集。

关键词：柔性作业车间调度；蚁群算法；模糊属性权重；信息素更新规则

中图分类号：TP301　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-7720(2012)09-0072-03

A FJSP ant colony algorithm of fuzzy preference sorting

Li Xinna，Zhu Jingjing，Fan Wenqing
（School of Traffic & Transportation，Lanzhou Jiaotong University，Lanzhou 730070，China）

Abstract： According to the characteristics of flexible job-shop scheduling problem，selecting three performance indexes as solving target，and combining ant colony algorithm with fuzzy attribute weight，it proposes a new algorithm to solve FJSP. This algorithm uses the positive feedback mechanism of ant colony algorithm，and takes advantage of optimal solution information and heuristic information to enhance global solving ability in process of gradual constructing solution，which is in order to seek better global optimal solution for each target. Then it applies fuzzy attribute weight to take comprehensive evaluation on each target which finally concludes the optimal solution set of FJSP.

Key words： flexible job-shop scheduling problems；ant colony algorithm；fuzzy attribute weight；pheromone updating rule

由于传统作业车间调度有很大的局限性，不能很好地贴合实际生产情况，对此学者们提出了柔性作业车间调度FJSP（Flexible Job-shop Scheduling Problem），其允许工序由一组机器中的任意一台加工，且由于加工机器的性能差异，其加工时间长短也不同，使得调度的灵活性得到增加。

目前求解FJSP的研究主要集中在基于智能的启发式方法[1-3]。本文先将多目标问题转化为单目标问题，由于蚁群算法具有较强的鲁棒性和发现较好解的能力[4]，因此采用蚁群算法求解单目标问题。然后结合模糊属性权重对每个目标赋予不同的权重系数，以此来解决FJSP问题。

1 多目标FJSP问题的数学模型

1.1 FJSP问题描述

假定加工系统有M台设备和N个工件，每个工件包含一道或多道工序，工序顺序是预先确定的，每道工序可以在多台不同设备上加工。同一工件的工序之间有先后约束，不同工件的工序之间没有先后约束。每个工件在某一时刻只能在一台设备上加工，任一工件的工序必须顺序完成。调度目标是选择最佳的工序加工设备，并确定每台设备上工件的最佳加工顺序，使各工件的加工时间、关键设备负载和设备总负载最小。

1.2 符号变量说明

N为工件数量；M为设备数量；J为所有设备集合；J_{ij}为工件$i(i=1,\cdots,N)$的第$j(j=1,\cdots,P_i)$道工序可选加工设备集，$J_{ij}\subseteq J$；P_i为工件i需加工的工序数；t_{ijm}为工件i的第j道工序在设备$m(m\subseteq J_{ij})$的加工时间；S_{ijm}为工件i的第j道工序在设备m上的开始时间；E_{ijm}为工件i的第j道工序在设备m上的完工时间；AE_m为所有工件在设备m上完工的时间；AE为所有工件最后完工的时间；F_m为设备m的负载（所承载加工时间之和）；F_k为关

* 基金项目：兰州交通大学大学生科技创新项目（DXS2011-023）；兰州交通大学大学生创新性实验（201062）

键设备负荷；F_T 为设备总负荷。

$$X_{ijm}=\begin{cases}0,\text{工件 } i \text{ 的第 } j \text{ 道工序在设备 } m \text{ 上加工}\\1,\text{其他}\end{cases}$$

$$R_{ijeg}=\begin{cases}1,\text{工件 } i \text{ 的第 } j \text{ 道和 } e \text{ 的 } g \text{ 道工序在同一设备加工，其工序 } j \text{ 紧先于工序 } g\\0,\text{其他}\end{cases}$$

1.3 目标函数

本文将多目标问题转换成如下三个单目标问题：

(1)各工件的加工时间最小

$$f_1=\min(AE)=\max_{m=1,\cdots,M}(AE_m) \tag{1}$$

(2)关键设备负载最小

$$f_2=\min(F_k)=\max_{m=1,\cdots,M}(F_m) \tag{2}$$

(3)设备总负载最小

$$f_3=\min(F_T)=\sum_{m=1}^{M}F_m \tag{3}$$

通过对各单目标问题的求解，采用三角模糊数的方法对所拆分的单目标问题进行整合，从而得出该 FJSP 多目标问题的最优解集。由于各单目标问题的单位并不相同，因此，需要对单目标问题的解进行规范化处理。对于成本型目标和收益型目标分别采用式(4)、(5)进行规范化。

$$f_i'=\frac{f_i^{\max}-f_i}{f_i^{\max}-f_i^{\min}} \tag{4}$$

$$f_i'=\frac{f_i-f_i^{\min}}{f_i^{\max}-f_i^{\min}} \tag{5}$$

其中，$f_i^{\max}$、$f_i^{\min}$ 分别表示第 i 目标的最大值和最小值，通常根据研究问题的特性来选定。

假设各单目标问题的模糊权重分别为 ω_1、ω_2、ω_3，并通过对各单目标问题的无量纲化处理(在采用模糊权重的时候，是针对极大化目标函数，对于极小化问题可转化为极大化问题，令 $f_i'=-f_i$)，可以得到该 FJSP 多目标问题的最终目标函数为：

$$F=\omega_1 f_1'+\omega_2 f_2'+\omega_3 f_3' \tag{6}$$

1.4 约束条件

(1)工艺约束

$$S_{ijm}-E_{i(j-1)n}\geqslant 0 \quad X_{ijm}-X_{i(j-1)n}=1 \tag{7}$$

工件 e 的第 j 道工序必须在第 j-1 道工序完成后才能开始。

(2)独占约束

$$S_{egn}-E_{ijm}\geqslant 0 \quad X_{egn}=X_{ijm}=1,R_{ijeg}=1 \tag{8}$$

任一确定时刻，机器 m 不能同时加工任意两个不同的工件，也不能同时加工任意两道不同的工序。

2 蚁群算法解决多目标 FJSP 问题

2.1 状态转移规则

为了避免停滞现象的出现，蚁群算法采用了确定性选择和随机性选择相结合的选择策略，并在搜索过程中动态调整状态转移概率。即对位于加工工序 σ_{ij} 的机器 c 的蚂蚁 k 按式(9)选择机器 m 加工下一工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$：

$$j=\begin{cases}\arg\max\limits_{m\in M(i+1)(j+1)}\{[\tau(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})]^{\alpha}[\eta(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})]^{\beta}\},q\leqslant q_0\\ \text{式(10)}, \quad \text{其他}\end{cases} \tag{9}$$

其中，$M(i+1)(j+1)$ 表示可用于加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 的候选设备集合；$\tau(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})$ 表示加工工序 σ_{ij} 的机器 c 与加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 的机器之间的信息素浓度；$\eta(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})$ 表示机器 c 加工完工序 σ_{ij} 后，由机器 m 加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 的期望程度；α 表示信息素启发式因子；β 表示期望启发式因子；q 是一个在区间[0,1]内的随机数；q_0 是一个算法参数($0\leqslant q_0\leqslant 1$)；当 $q>q_0$ 时，蚂蚁 k 根据式(10)确定由机器 C 向下转移用来加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 的目标设备：

$$P_{ijm}^{k}=\begin{cases}\dfrac{[\tau(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})]^{\alpha}[\eta(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})]^{\beta}}{\sum\limits_{m\in M(i+1)(j+1)}[\tau(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})]^{\alpha}[\eta(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})]^{\beta}}, & m\in M_{(i+1)(j+1)}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{10}$$

其中，求解关键设备负载最小以及设备总负载最小问题，其期望程度可采用式(11)；对于求解各工件的加工时间最小问题，期望程度可采用式(12)：

$$\eta=\frac{1}{C_M(m)+C(\sigma_{(i+1)(j+1)m},m)} \tag{11}$$

$$\eta=\frac{1}{t_M(m)+t(\sigma_{(i+1)(j+1)m},m)} \tag{12}$$

其中，$C(\sigma_{(i+1)(j+1)m},m)$ 表示机器 m 加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 所需的负载，$C_M(m)$ 表示机器 m 加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 之前已产生的负载；$t(\sigma_{(i+1)(j+1)m},m)$ 表示机器 m 加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 所需的时间，$t_M(m)$ 表示加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$ 前机器 m 上所完成工序累计时间和式(9)所确定的蚂蚁转移到下一个设备的方法，称为自适应随机概率选择规则。在这种规则下，每当蚂蚁要选择向一个设备转移时，就产生一个在[0,1]范围内的随机数，根据这个随机数的大小按式(9)确定用哪种方法产生蚂蚁转移的方向。

2.2 信息素的更新规则

(1)全局更新规则

全局更新规则只为每一次循环中最优的蚂蚁使用。更新规则如式(13)：

$$\tau(\sigma_{ijc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})\leftarrow(1-\rho)\cdot\tau(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})+\rho\cdot\Delta\tau(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m}) \tag{13}$$

且

$$\Delta\tau(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})=\begin{cases}Q/C_{gb},(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})\text{为全局最优设备选择且 } C_{gb} \text{ 是最小负载}\\0,\text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

$$\Delta\tau(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})=\begin{cases}Q/t_{gb},(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})\text{为全局加工工件时间最短且 } t_{gb} \text{ 是最小时间}\\0,\text{其他}\end{cases} \tag{15}$$

其中，C_{gb} 为蚁群当前循环中所求得的最小负载；t_{gb} 为蚁群当前循环中所求得的工件加工最短时间；ρ 为一个

(0,1)区间的参数，其意义相当于蚁群算法基本模型中的信息素挥发系数；Q 为常量，表示蚂蚁循环一周或一个过程在所经过的路径上释放的信息素总量。

(2)局部更新规则

局部更新规则是在所有的蚂蚁完成一次转移后执行式(13)，其中：

$$\Delta\tau(\sigma_{iqc},\sigma_{(i+1)(j+1)m})=\gamma\cdot\max_{z\in M(i+1,j+1)}\tau(\sigma_{(i+1)(j+1)m},\sigma_{(i+2)(j+2)z}) \quad (16)$$

$M(i+1,j+1)$表示第 k 只蚂蚁在访问到加工工序 $\sigma_{(i+1)(j+1)}$的设备后加工工序 $\sigma_{(i+2)(j+2)}$的可选设备集合。

3 模糊属性权重的确定

三角模糊数能够有效地克服评判过程中主观因素的影响，使多目标决策方法更客观、更准确地反映问题。因而本文采用三角模糊数将式(6)单目标问题整合成多目标，使得对 FJSP 问题的求解更加精准。

模糊属性权重的确定过程[5]如下：

(1)获得决策者的模糊评判信息。设决策者对各收益类目标评价 P={差，较差，一般，较好，好}，对成本类目标评价 C={高，较高，一般，较低，低}。

(2) 将决策者的模糊评判信息转换为三角模糊数。利用语义函数 F（收益类指标/成本类指标）=(m_1，m_2，m_3)，将消费者的语言指标转换成三角模糊数的形式。F(好/低)=(0.8，1，1)，F(较好/较低)=(0.6，0.75，0.9)，F（一般/一般）=(0.35，0.5，0.65)，F（较差/较高）=(0.2，0.35，0.5)，F(差/高)=(0，0，0.2)。

(3)模糊属性权重的归一化处理。设给定的 I 个模糊权重 $\omega_i=(\omega_{1i},\omega_{2i},\omega_{3i})$，$i=1,\cdots,I$ 归一化后的模糊属性权重为 $\omega_i'=(\omega_{1i}',\omega_{2i}',\omega_{3i}')$，则有：

$$\omega_{2i}'=\omega_{2i}/\sum_{i=1}^{l}\omega_{2i},\ \omega_{1i}'=\omega_{1i}/(\omega_{2i}/\omega_{2i}')=(\omega_{1i}/\omega_{2i}')\omega_{2i},$$

$$\omega_{3i}'=\omega_{3i}/(\omega_{2i}/\omega_{2i}')=(\omega_{3i}/\omega_{2i}')\omega_{2i} \quad (17)$$

(4)根据决策者权重计算决策者综合属性评判矩阵 A。此时采用三角模糊数的标量乘法运算。设$\widetilde{M}$是一个三角模糊数，$\widetilde{M}=(m_1,m_2,m_3)$，$\alpha$ 是一个实数，则：

$$\alpha\times\widetilde{M}=(\alpha m_1,\alpha m_2,\alpha m_3) \quad (18)$$

(5) 归一化后的属性权重 ω_i'与决策者综合属性评判矩阵 A，得到加权的综合评判矩阵 A'。此时的处理需要引入三角模糊数的近似乘法[6]运算。设$\widetilde{M}$和$\widetilde{N}$是两个三角模糊数，$\widetilde{M}=(m_1,m_2,m_3)$，$\widetilde{N}=(n_1,n_2,n_3)$，则：

$$\widetilde{M}\otimes\widetilde{N}=(m_1',m_2',m_3') \quad (19)$$

其中：

$$m_1'=m_2n_2+(m_2-m_1)(n_2-n_1)-m_2(n_2-n_1)-n_2(m_2-m_1);$$

$$m_2'=m_2n_2$$

$$m_3'=m_2n_2+(m_2-m_1)(n_2-n_1)+m_2(n_2-n_1)+n_2(m_2-m_1)$$

(6)采用模糊加权平均法计算各目标函数的模糊综合效用矩阵$\widetilde{A}'$。在此引入三角模糊数的广义加法[6]运算。设$\widetilde{M}$和$\widetilde{N}$是两个三角模糊数，$\widetilde{M}=(m_1,m_2,m_3)$，$\widetilde{N}=(n_1,n_2,n_3)$，则：

$$\widetilde{M}\oplus\widetilde{N}=(m_1+n_1,m_3+n_3,m_3+n_3) \quad (20)$$

(7)计算相应目标函数偏好的均值和方差。设三角模糊数$\widetilde{M}$的均值 $mean(\widetilde{M})$和方差 $\sigma^2(\widetilde{M})$，则：

$$mean(\widetilde{M})=(m_1+m_2+m_3)/3 \quad (21)$$

$$\sigma^2(\widetilde{M})=(m_1^2+m_2^2+m_3^2-m_1m_2-m_1m_3-m_2m_3)/18 \quad (22)$$

(8)计算模糊排序指标 $F(\widetilde{M})$。

$$F(\widetilde{M})=\beta mean(\widetilde{M})+(1-\beta)(1-\sigma(\widetilde{M})) \quad (23)$$

β 是一个预先设定的权值，它反映了均值和方差在模糊排序中的相对重要性，通常取 $\beta=0.5$。

本文采用蚁群算法，结合模糊权重法，将车间工件加工的多目标问题转化为单目标问题，以此建立柔性作业车间调度模拟方案。得益于蚁群算法较好的鲁棒性和解的全局性，该方案在车间生产调度工作中能够较理想地满足实际加工的需求，使得生产调度更加合理化、统筹化、柔性化，从而节约生产成本，有利于生产效率的进一步提高。随着信息技术及经济的不断发展，利用基于智能优化算法的 FJSP 解决生产调度问题将会成为主流，而在此领域的探索与研究也将具有深远的意义。

参考文献

[1] SHENG L, Wei Xiaobin, WENY Z. Improved aco schedulingalgorithm based on flexible process [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (S1005-1120),2006,23(2):154-160.

[2] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabusearch[J]. Annals of Operations Research，1993，22(2)：157-183.

[3] KACEM I. Genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. IEEE International Conference on Systems,Man,and Cybernetics,2003(4):3464-3469.

[4] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B (S1094-6977),1996, 26(1):29-41.

[5] 李世威，王建强，曾俊伟.一种模糊偏好排序的多目标粒子群算法[J].计算机应用研究,2011,28(2):477-480.

[6] BONISSOE P P. A pattern recognition approach to the problem of linguistic approximation in system analysis[A]. IEEE 1976 International Conference on Cybernetics and Society[C]. NewYork,USA: IEEE,1979.793-798.

(收稿日期：2011-12-09)

作者简介：

李欣娜，女，1989 年生，主要研究方向：信息处理与数据挖掘。

朱晶晶，女，1990 年生，主要研究方向：智能优化算法。

樊文清，女，1990 年生，主要研究方向：信息处理与数据挖掘。