第 12 卷　第 6 期
2004 年　12 月

中国管理科学
Chinese Journal of Management Science

Vol. 12, No. 6
Dec., 2004

文章编号: 1003- 207(2004)06- 0052- 04

基于模糊逻辑的偏柔性工作车间调度模型

卢冰原, 陈华平, 古春生, 谷　峰

(中国科学技术大学信息管理与决策科学系, 合肥　230026)

摘　要: 文章首先介绍了局部柔性工作车间调度以及模糊环境下的调度目标函数等相关概念, 然后从预处理、个体编码、算子设计等方面分阶段详细描述了基于模糊逻辑的局部柔性工作车间调度模型, 最后通过实例验证了模型的可行性和有效性。

关键词: 运筹学; 局部柔性工作车间调度; 遗传优化; 模糊逻辑

中图分类号: C931　　文献标识码: A

1　引言

Flexible Job- Shop Scheduling(FJSS) 是柔性生产系统计划和操作中的典型问题。根据操作可以选用的机器集合范围, FJSS 可以细分为 Total Flexible Job- Shop Scheduling(TFJSS) 和 Partial Flexible Job - Shop Scheduling(PFJSS), 在 PFJSS 问题中, 某些操作只能选择可用机器集合中的部分机器来执行。现有的针对 FJSS 问题的研究大都假设操作时间已经预先确定[1, 6, 7], 而现实生产系统中, 由于人力介入等原因, 存在着大量的不确定性因素[9, 10, 11], 操作时间具有模糊性。在此类模糊环境下的 PFJSS 问题被归为 Fuzzy PFJSS 问题。

针对调度问题中的不确定性因素的研究已经取得了一定的进展, Mitsuru Kuroda[11] 采用三角模糊数对模糊加工时间、模糊惩罚函数等问题进行了分析, Samir Allet[7] 采用模拟退火算法解决模糊操作间隔和模糊交货期问题。然而对于不确定性问题的探讨大都集中在经典工作车间调度问题中, 对更加复杂的偏柔性工作车间调度问题的探讨尚未发现相关文献。

近年来, 遗传算法被成功地用来解决 Job-shops 调度问题[7, 11]。本文在此基础上, 结合 Fuzzy PFJSS 问题的特点, 给出了一种基于模糊逻辑的柔性工作车间调度模型, 该模型的可行性已通过实例验证。

收稿日期: 2004- 04- 23; 修订日期: 2004- 10- 12

基金项目: 中国科技大学资助项目: 高水平大学建设项目; 归国留学人员科研启动基金

作者简介: 卢冰原(1977-), 男(汉族), 安徽阜阳人, 中国科学技术大学信息管理与决策科学系博士生, 研究方向: 商务智能.

2　模糊 PFJSS 问题描述

2.1　模糊 PFJSS 基本概念

PFJSS 问题可以被定义为: 有 n 个相互独立的工件(job), 第 j 个工件表示为 job_j $j \in \{1\ n\}$。对某个工件 job_j, 包含 n_j 个操作(operation), 表示为一组有序操作集合 O_{ij}, $i \in \{1\ n_j\}$, 这组操作序列用 J_i 表示。有 m 台机器(machine), 第 k 台机器表示为 M_k。对每个操作 O_{ij}, 有一组机器可以用来加工, 这组机器表示为 M_{ij}, $|M_{ij}| \leqslant m$ 并且 $\sum\sum |M_{ij}| < \sum\sum m$。每个操作 O_{ij} 在加工期间不可以被中断, 并且在任一时刻, 一台机器至多只能处理一个操作。目标是发现一种 makespan 最小的调度方案。文中考虑模糊操作时间的情况, 即操作 O_{ij} 在机器 M_k 上的加工时间 T_{ijk} 是不确定, 用三角模糊数(Trigangular Fuzzy Number, TFN) 表征[10], 具体表示为三元组(t^o_{ij}, t^m_{ij}, t^p_{ij}), 如图 1 所示。Makespan 同样为模糊数。

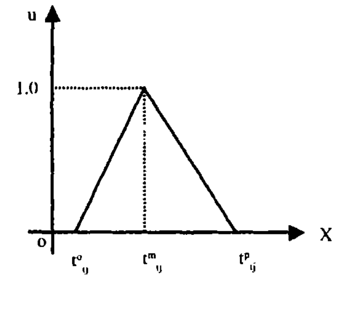

图 1　模糊加工时间

Fuzzy PFJSS 问题可以用加工时间矩阵来表示, $T = \{T_{ijk} | 1 \leqslant i \leqslant n_j, 1 \leqslant j \leqslant n, 1 \leqslant k \leqslant m\}$。本文给

出一个 3×3 的 PFJSS 问题的例子。$J_1=\{O_{11},O_{21},O_{31}\}$, $J_2=\{O_{12},O_{22},O_{32},\}$, $J_3=\{O_{13},O_{23}\}$, 处理时间矩阵如表 1 所示。$T_{ijk}=(^*,^*,^*)$ 表示该操作不能在该机器上执行。

表 1　3×3 Fuzzy PFJSS 问题

		M_1	M_2	M_3
J_1	O_{11}	(0.9,1,1.1)	(2.9,3,3.1)	(*,*,*)
	O_{21}	(2.9,3,3.1)	(1.9,2,2.1)	(5.9,6,6.1)
	O_{31}	(5.9,6,6.1)	(*,*,*)	(3.9,4,4.1)
J_2	O_{12}	(0.9,1,1.1)	(4.9,5,5.1)	(2.9,3,3.1)
	O_{22}	(1.9,2,2.1)	(3.9,4,4.1)	(*,*,*)
	O_{32}	(8.9,9,9.1)	(0.9,1,1.1)	(1.9,2,2.1)
J_3	O_{13}	(0.9,1,1.1)	(*,*,*)	(2.9,3,3.1)
	O_{23}	(4.9,5,5.1)	(1.9,2,2.1)	(3.9,4,4.1)

2.2　模糊目标函数

操作 O_{ij} 在机器 M_k 上的加工时间 T_{ijk} 表示为三元组 $(t^o_{ijk},t^m_{ijk},t^p_{ijk})$，其中 t^o_{ijk} 表示最优加工时间，t^m_{ijk} 表示最可能加工时间，t^p_{ijk} 表示最坏加工时间，操作时间分布函数为 $\mu_{ijk}(t)$，当 $t^o_{ijk}\leqslant t<t^m_{ijk}$ 时，$\mu_{ijk}(t)=(t-t^o_{ijk})/(t^m_{ijk}-t^o_{ijk})$；当 $t^m_{ijk}\leqslant t<tp_{ijk}$ 时，$\mu_{ijk}(t)=1-(t-t^m_{ijk})/(t^p_{ijk}-t^m_{ijk})$；当 $t<t^o_{ij}$ 或 $t>t^p_{ij}$ 时，$\mu_{ij}(t)=0$。

对此类调度问题，定义以下模糊操作：

TFN 加法操作：累加计算用于获得工件的完成时间。设 R^* 和 Q^* 为三角模糊数，$R^*=(t^o_R,t^m_R,t^p_R)$, $Q^*(t^o_Q,t^m_Q,t^p_Q)$，则其和 $R^*+Q^*=(t^o_R+t^o_Q,t^m_R+t^m_Q,t^p_R+t^p_Q)$。

TEN 取大操作：取大操作用于确定工件的加工开始时间。设 R^* 和 Q^* 为三角模糊数，$R^*=(t^o_R,t^m_R,t^p_R)$, $Q^*(t^o_Q,t^m_Q,t^p_Q)$，R^*、Q^* 隶属度函数分别表示为 μ_R 和 μ_Q，用 $\vee$ 表示取大操作，根据扩展规则，$\mu_{R\vee Q}(Z)=\sup_{z=x\vee y}\min(\mu_R(X),\mu_Q(y))$，取大操作不能保证模糊数的三角性，所以 $R^*\vee Q^*\approx(t^o_R\vee t^o_Q,t^m_R\vee t^m_Q,t^p_R\vee t^p_Q)$。

由于操作时间用 TFN 表示，makespan 也是模糊数，表示为 $C_{max}=\max_k(\max_j\max_i(C_{ijk}))$, $k\in\{1\cdots m\}$, $j\in\{1\cdots n\}$, $i\in\{1\cdots n_j\}$。$C_{ijk}=S_{ijk}+T_{ijk}$。S_{ijk}、T_{ijk} 和 C_{ijk} 分别表示 O_{ij} 在机器 M_k 上的开始时间、加工时间和结束时间。

C_{ijk}、S_{ijk} 和 T_{ijk} 都是用 TFN 三元组表示，可通过 TFN 函数进行计算。对应三元组中三个参数，有 $C^1_{ijk}=S^1_{ijk}+T^1_{ijk}$、$C^1_{max}=\max_k(\max_j\max_i(C^1_{ijk}))$, $1\in\{1\ 3\}$ 分别对应 TFN 三元组中的三个分量。$C_{max}=\vee_k\vee_j\vee_i(C^o_{ijk},C^m_{ijk},C^p_{ijk})$。

给定三角模糊数 $T=(t^o,t^m,t^p)$, $\mu(t)$ 为 T 的隶属函数。左侧积分值 $V_L(T)=t^m_{ij}-\int_{t^o}^{t^m}\mu(t)\,dt$，$V_L(T)$ 代表 T 的乐观状态；右侧积分值 $V_R(T)=t^m_{ij}+\int_{t^m}^{t^p}\mu(t)\,dt$，代表 T 的最坏可能。则 T 的全积分 $V^\omega(T)$ 可定义为 $V_L(T)$ 和 $V_R(T)$ 的加权和[4]，即 $V^\omega(T)=\omega V_L(T)+(1-\omega)V_R(T)$, $0\leqslant\omega\leqslant1$。$\omega$ 是乐观系数，取决于调度决策者的态度。

$$V^\omega(T)=\omega\left(t^m-\int_{t^o}^{t^m}\mu(t)\,dt\right)+(1-\omega)\left(t^m_{ij}+\int_{t^m}^{t^p}\mu(t)\,dt\right)=[\omega t^o+t^m+(1-\omega)t^p]/2$$

对于任何两个 TFN A、B，如果 $V^\omega(A)<V^\omega(B)$，则 $A<B$。

目标函数 $C_f=\min(makespan)=V^\omega(\vee_k\vee_j\vee_i(C^o_{ijk},C^m_{ijk},C^p_{ijk}))$

3　基于遗传优化的调度模型

针对 PFJSS 问题的特点，在调度模型中首先对 PFJSS 时间矩阵进行预处理，消除不可用机器，为下一步的进化操作生成局部优化的初始种群，同时在经典遗传算法的理论基础上，对评估函数、编码方案和相应的操作算子进行了改进。

3.1　预处理

调度期望每个操作都尽可能分派给处理时间较短的机器来执行，从而获得最小的 makespan。针对 PFJSS 问题，在算法中首先将 $T_{ijk}=(^*,^*,^*)$ 的机器 k 从 O_{ij} 可用机器集合中删除。由于分派方案和 PFJSS 问题矩阵中 job 和 machine 的行列位置直接相关，在传统的搜索方式下，总是选择行和列靠前的作为最优结果，如此将可能导致机器负载不平衡。这里在算法中随机交换两组 job 的位置，并随机选择候选机器号[1]。

算法 1：机器预分派

输入：FJSS 问题三纬矩阵 T。$T=\{T_{ijk}=(t^o,t^m,t^p)\mid 1\leqslant i\leqslant n, 1\leqslant j\leqslant n_j, 1\leqslant k\leqslant m\}$

输出：机器分派矩阵 A。

step1　构建和 T 等构的三纬矩阵 A，A 内各元素初始为 0，构建空集合 sel] machine;

step2　构建和 T 等构的三纬矩阵 D，$D_{ijk}=T_{ijk}$;

step3　随机选择 D 中两个 job，交换它们的行列位置;

step4　For D 中每一对 (i, j) 执行操作 step4.1 ~ step4.6

step4.1 集合 sel_machine 清空;

step4.2 for (k = 1 to m) if (D_{ijk} ≠ (*,*,*)) then $k \rightarrow$ sel_machine;

step4.3 for (k = 1 to m) if (D_{ijk}, t^p < $Min_{sel\_machine^-\{k\}}$ D_{ijk} 。 t^o) then sel_machine = {k};

step4.4 if(|sel_machine| ≥1) then index = random(sel_machine);

step4.5 $A_{ij,index}$ = 1 ;

step4.6 D 内 index 列位置在(i, j)后面的各元素值都增加 $T_{ij\,index}$;

//TFN 加法操作

step5 输出分派矩阵 A。

通过该算法,可以得到机器预分派矩阵 A,如果 A_{ijk} = 1,表示工件 j 的第 i 个操作被预先分派给机器 k。该算法着眼于寻找具有最短处理时间的机器,有利于产生具有最小 makespan 的高度方案,同时解决了 PFJSS 中的 Partial Flexible 问题,显著减少了搜索空间。

3.2 个体编码

在该模型中,采用遗传算法来处理个体种群,每个个体表示 Fuzzy PFJSS 问题的一个解决方案。柔性车间调度中包含机器的分派和每台机器上操作序列排序两个问题,相应的,在编码中,每个个体包含两个染色体[8],染色体 α 和染色体 β,前者的基因描述了把操作落实到每台机器上的具体分派,后者的基因描述了每台机器上的操作的预序,染色体 β 的构建以染色体 α 为基础。染色体 α 表示为串 a: MO_{11}, MO_{21}, MO_{ij}, MO_{nj_n}, MO_{ij}表示处理操作 O_{ij}的机器,染色体 α 的初始种群可通过算法 2 获得。

算法 2:

输入:机器预分派矩阵 A

输出:染色体 a

step1 串 α 初始为空串。

Step2 For(j = 1 to n)

For(i = 1 to n_j)

For(k = 1 to m)

If(A_{ijk} = 1) then 将 k 追加到串 a

染色体 β 表示为一系列子串的集合: OM_1、OM_k、OM_m,子串 OM_k 表示机器 M_k 上的有序操作序列,β 染色体初试种群中的对应个体可通过对相关机器上的操作序列随机排序来完成。

3.3 交叉和变异算子

对染色体 α,采用单点交叉。对染色体 β 采用保护顺序的单点交叉法。

对染色体 α 进行变异操作,随机选择一个有多个可选机器的操作,把它随机分派给和当前机器不同的其它机器。染色体 β 的变异操作即随机选择机器 K 和该机器上的两个操作,交换这两个操作的位置。

3.4 调度模型

输入:Fuzzy PFJSS 问题实例、遗传算法各控制参数

输出:具有良好 makespan 的 Fuzzy PFJSS 方案。

step1. 执行机器预分派算法,生成预分派矩阵 A;

step2. 执行算法 2 初始化 α 染色体种群,参数 G、I 和平均适应度初始为 0;

step3. 初始化 β 染色体种群,J 初始为 0;

step4. 对个体进行有效性检查、修正;

step5. 计算个体适应度 C_f,统计平均适应度;

step6. 如果 G > 0,则用子代群体中适应度高的个体代替父代群体中适应度低的个体,生成新一代,G = G + 1;

step7. 如果 J < J_{max}, J = J + 1,并对该代 β 染色体个体进行选择、交叉和变异操作,生成子代群体,转到 step4;

step8. 如果 I < I_{max}并且 G < G_{max}或者当前平均适应度- 上一代平均适应度 > ε, I = I + 1,并对该代 α 染色体个体进行选择、交叉和变异操作,生成子代群体,转到 step3;

Step9. 输出 Fuzzy PFJSS 调度方案。

4 案例与性能分析

本文采用表 1 中的 3×3Fuzzy PFJSS 问题作为试验案例,设定交叉概率为 0.95,变异概率为 0.05,乐观系数 ω 为 0.6,初始种群规模为 100,最大进化代数为 500。采用该模型进行试验,结果表明:进化 245 代后收敛,每个操作分派的机器号见表 2,例如操作 O_{11}被分配给机器 M_2,操作 O_{23}被分配给机器 M_2;对应机器上各操作的先后顺序见表 3,例如机器 M_2 负责完成操作 O_{11}和 O_{23},根据调度方案,先执行操作 O_{11}再执行 O_{23};该问题的目标函数值以及结束时间见表 4,结束时间控制在区间(9.7, 10.04)内。采用该模型,运行 5 次,在 245 代内都可以收敛并得

到最优目标值, 其中 3 次得到最优值。

表 2　操作的机器分配

O_{11}	O_{21}	O_{31}	O_{12}	O_{22}	O_{32}	O_{13}	O_{23}
M_2	M_1	M_3	M_1	M_1	M_3	M_3	M_2

表 3　机器的操作顺序

M_1	M_2	M_3
$O_{12}O_{22}O_{21}$	$O_{11}O_{23}$	$O_{11}O_{32}O_{31}$

表 4　目标函数和结束时间

运行次数	初始种群	最坏 V (c_{max})	最优 C_{max}	最优 V (C_{max})	最大收敛代数	最优值比率
5	100	11. 99	(9. 7, 10, 10. 4)	9. 99	245	60%

鉴于 PFJSS 问题缺乏经典案例, 本文选择了具有更大规模的 8 × 8 的 PFJSS 实例[1], 将其中的操作时间 t 由确定值调整为三角模糊数($\delta^* t, t, \phi^* t$), 令 $\delta = 0.9$, $\phi = 1.15$, 从而构造出 8 × 8FuzzyPFJSS 问题, 对该案例进行测试表明, 模型具有较为理想的收敛速度(355gen) , 可以有效减少机器负载失衡问题。模型收敛速度在一定程度上受到试验案例数据排列以及预处理算法处理结果的影响, 对预处理算法做进一步优化, 同时对模型中部分参数进行调整后, 有望降低收敛所需进化代数。权 ω 可由调度决策者根据实际生产环境灵活控制, 从而可以对最佳和最坏情况下的调度结果更加全面的认知。更多试验表明, 该模型也适用与解决 TFJSS 问题。

5　结论

文中给出了基于模糊逻辑的 PFJSS 调度模型, 该模型将模糊理论、遗传优化理论有机地融合在一起, 较好的解决了模糊生产环境下的局部柔性工作车间调度问题。试验证明该方法具有可行性和实用性, 我们还将对此做进一步的研究。

参考文献:

[1] Imed Cacem, Slim Hammadi. Approach by Localization and Multiobjective Evolutionary Optimization for Flexible Job-shop Scheduling Problems[J]. IEEE, 2002.

[2] Hisao Ishibuchi, Tadahiko Murata, Kyuhung Lee. Relations between conventional scheduling problems and Fuzzy Scheduling Problems[C]. Proceedings of 35th conference on Decision and Control Kobe, Japan, December 1996.

[3] Paul M. Stanfield, Russell E. King, Jeff A. Joines Scheduling arrivals to a production system in a fuzzy environment[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 93: 75-87.

[4] T. Liou, M. J. Wang. Ranking fuzzy numbers with integral value[J]. Fuzzy Sets system, 1992, 247- 255

[5] Tiente Hsu, Remy Dupas, Daniel Jolly, Gilles Goncalves. Evaluation of mutation heuristics for the solving of multiobjective flexible job shop by an evolutionary algorithm[J]. IEEE SMC, 2002.

[6] Hisashi Tamami ONO, Hajime Murao, Shinzo Kitamura. Modeling and Genetic Solution of a class of Flexible Job Shop Scheduling Problem[J]. IEEE, 2001.

[7] Samir Allet. Handling flexibility in a"generalized job shop" with a fuzzy approach[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147: 312- 333.

[8] Haoxun Chen, Jurgen Ihlow, Carsten Lehmann A Genetic Algorithm for Flexible job shop scheduling[C]. International conference on robitics & Automation, 1999.

[9] Juite wang. Afuzzy scheduling approach for product development projects[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 152: 180- 194.

[10] Mitsuru Kuroda, Zeng wang. Fuzzy job shop scheduling[J] Int. J. Production Economics, 1996, 44: 45- 51.

[11] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

The Model for Partial Flexible Job-Shop Scheduling Problem Based on Fuzzy Logic

LU Bing-yuan, CHEN Hua-ping, GU Chun-sheng, GU Feng

(Department of Information Management and Decision Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The corresponding conceptions of Partial Flexible Job-Shop Scheduling problems is described in this paper firstly, then an improved scheduling model based on fuzzy logic is given to deal with the partial flexible job-shop scheduling problems in fuzzy environment. Finally, an example is described to approve its effectiveness.

Key words: operational research; partial flexible job-shop scheduling; genetic optimization; fuzzy logic