

文章编号: 1001-0920(2004)02-0162-04

## 基于不确定作业时间的 FSM P 调度问题研究

羌 磊, 肖田元, 宋士吉  
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘 要:** 针对一类加工时间不确定的 FSM P 调度问题, 建立了基于扩展期望区间数近似不确定参数的优化模型, 提出了利用扩展期望区间数构造参数近似边界的取极大运算方法, 给出了包含不确定度控制指标的多目标优化模型。基于算例, 讨论了决策因子和不确定度控制指标对调度性能的影响, 仿真结果及分析表明了该模型和算法的有效性, 与鲁棒性。

**关键词:** FSM P 调度; 模糊优化; 遗传算法; 多目标优化

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## On flexible flow shop scheduling problem with uncertain process time

Q I A N G L e i, X I A O T i a n - y u a n, S O N G S h i - j i

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China Correspondent: Q I A N G L e i, E-mail: qianglei99@mails.tsinghua.edu.cn)

**Abstract:** A n fuzzy optimization model is established for the flow shop with multiple processors scheduling problem. The presented approach replaces the uncertain parameters with extend expected interval numbers, and establishes approximate boundaries for uncertain parameters during the optimization process. A crisp multi-object programming model is presented. Effects of the variation of decision ratio and uncertainty control constraints are also concerned. Numerical experiment shows efficiency and robustness of the new algorithm.

**Key words:** FSM P scheduling; fuzzy optimization; GA; multi-object optimization

### 1 引 言

由 Salvador 定义的多阶段多机 Flow Shop 问题(简称 FSM P 问题)是一般 Flow Shop 问题的推广, 它讨论的是  $N$  个工件在某些机器阶段具有并行机的流水车间的排序问题, 也可以看成是所有工件以同样的机器阶段顺序被加工的特殊的 Job Shop 问题<sup>[1]</sup>。

以往对 FSM P 问题的研究主要集中在针对确定性问题的优化模型上<sup>[2,3]</sup>, 而对于实际生产过程中的大量不确定因素则很少考虑。它们包括加工时间、

加工批量的不确定, 以及生产过程中各种突然事件对生产造成的影响等。这些不确定因素在实际生产中是客观存在的, 因此, 为了保证理论上所产生的调度控制方案能得到有效执行, 必须进行不确定环境下的计划优化方法研究。

本文研究的是一类加工时间可以用一般 L-R 模糊数描述的 FSM P 不确定调度问题, 提出了一种基于扩展期望区间数近似和不确定度控制的优化模型, 并对算法的参数选择问题进行了讨论和分析。

收稿日期: 2002-11-13; 修回日期: 2003-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60094015)。

作者简介: 羌磊(1977—), 男, 江苏常州人, 博士生, 从事模糊优化、生产调度理论与应用仿真等研究; 肖田元(1947—), 男, 湖南祁东人, 教授, 博士生导师, 从事智能制造控制与计算机仿真的研究。

## 2 问题描述

### 2.1 L-R 模糊数定义及相关假设

定义 1 L-R 模糊数: 设模糊数  $X$  的隶属度函数定义为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in [a_1, a_2]; \\ f_L\left(\frac{a_1 - x}{\beta_1}\right), & x \in [a_1 - \beta_1, a_1]; \\ f_R\left(\frac{x - a_2}{\beta_2}\right), & x \in [a_2, a_2 + \beta_2]; \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $f_L(x)$  和  $f_R(x)$  分别是  $x \in [0, 1]$  上的严格递增和严格递减函数, 且满足  $f_L(0) = f_R(0) = 1$ ; 若  $\beta_1 > 0$ , 则称模糊数  $\tilde{X} = (a_1, a_2, \beta_1, \beta_2)$  为 L-R 模糊数

定义 2 模糊数的序: 采用 Yager 的模糊数比较方法<sup>[4]</sup>, 令模糊数  $\tilde{x}$  的  $\alpha$  平均值  $\bar{x}_\alpha = \frac{x_\alpha^L + x_\alpha^R}{2}$ , 定义  $\tilde{x}$  的均值为  $\bar{x} = \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \bar{x}_\alpha d\alpha$ , 则称模糊数  $\tilde{x}_1 > \tilde{x}_2$ , 当且仅当  $\bar{x}_1 > \bar{x}_2$ , 有关模糊数和  $\alpha$  截集的定义详见文献<sup>[4]</sup>

### 2.2 不确定作业时间条件下的 FSM P 调度模型

假设有  $N$  个工件, 需依次经过  $M$  个机器阶段进行处理, 在  $M$  个阶段中至少有一个阶段存在并行机, 设  $\tilde{t}_{ij}$  为工件  $i$  的第  $j$  阶段加工时间;  $\tilde{c}_i$  为工件  $i$  的完工时间;  $m_j$  为第  $j$  阶段中的机器数;  $n_m^j$  为分配到第  $j$  阶段的第  $m$  台机器上的工件数;  $\tilde{e}_{ij}$  为工件  $i$  的第  $j$  阶段完工时间;  $J_{jm}$  为在第  $j$  阶段的第  $m$  台机器上的工件集合;  $\tilde{b}_{ij}$  为第  $i$  工件在第  $j$  阶段的开始加工时间;  $\tilde{a}_{j,m}^0$  为第  $j$  阶段第  $m$  台设备的初始空闲时间 若工件  $i$  在阶段  $j$  的第  $m$  台机器上第  $s$  个被加工, 则令  $x_{ij}^{m,s} = 1$ ; 否则, 令  $x_{ij}^{m,s} = 0$  其中, 任务的处理时间  $\tilde{t}_{ij}$  和设备初始可用时间  $\tilde{a}_{j,m}^0$  分别为已知区间内变化的不确定量, 这里采用 L-R 模糊数  $\tilde{X} = (a_1, a_2, \beta_1, \beta_2)$  表示

由上述系统定义可知: 第  $j$  个阶段工件  $i$  的完成时间  $\tilde{e}_{ij} = \tilde{b}_{ij} + \tilde{t}_{ij}$ , 其中  $\tilde{b}_{ij}$  由决策变量  $x_{i,j}^{m,s}$  决定

设工件  $i$  在阶段  $j$  的第  $m$  台设备上第  $s$  个被加工, 可得:

1) 若  $s = 1$ , 则工件的开始加工时间

$$\tilde{b}_{i,j} = \max_{i \in J_{jm}} (\tilde{e}_{i,j-1}, \tilde{a}_{j,m}^0).$$

2) 若  $s > 1$ , 则假设工件  $i_1 \in J_m, x_{i_1,j}^{m,s} = 1$ , 可得  $b_{ij} = \max (\tilde{e}_{i,j-1}, \tilde{e}_{i_1,j})$ , 当  $j = 1$  时, 定义  $\tilde{e}_{i,0} = 0$  因此, 令  $X$  代表完成所给任务的一个分配排序, 可确定目标函数为

$$\tilde{F} = f(X, \tilde{T}) = \max_i (\tilde{c}_i), \quad (2)$$

其中

$$\tilde{c}_i = \tilde{e}_{i,M} = \max_{j=1}^J (\tilde{b}_{i,j}(x_{i,j}^{m,s}) - \tilde{e}_{i,j-1}(x_{i,j}^{m,s}) + \tilde{t}_{i,j})$$

为工件  $i$  的最终完成时间 则处理时间不确定的 FSM P 调度模型可描述如下:

$$\text{Mod1: Min } \tilde{z} = \max_i (\tilde{b}_{i,j}(x_{i,j}^{m,s}) - \tilde{e}_{i,j-1}(x_{i,j}^{m,s}) + \tilde{t}_{i,j}), \quad (3)$$

$$\text{s t } \begin{cases} x_{ij}^{m,s} = 1, & i = 1, \dots, N, \\ x_{i_2,j}^{m,s+1} \tilde{b}_{i_2,j} - x_{i_2,j}^{m,s} (\tilde{b}_{i_1,j} + \tilde{t}_{i_1,j}) = 0, & i = 1, 2, \dots, N, \\ j = 1, 2, \dots, M, S = 1, 2, \dots, n_m^j \end{cases} \quad (4)$$

### 3 基于扩展期望区间数的参数建模与运算

对于 L-R 模糊数  $\tilde{x}(a^L, a^R, \beta^L, \beta^R)$ , 可定义其扩展期望区间数为

$$E(\tilde{x}) = [E^L(x), E^R(x), a^L, a^R] \quad (5)$$

其中

$$E^L(x) = \int_0^1 f_L^{-1}(\alpha) d\alpha, \quad E^R(x) = \int_0^1 f_R^{-1}(\alpha) d\alpha$$

为原 L-R 模糊数不确定边界的隶属度期望均值, 定义为区间数的边界;  $a^L$  和  $a^R$  为扩展参数, 包含原参数的边界信息

根据模糊数加法运算规则<sup>[4]</sup>, 扩展期望区间数的加法可定义为

$$E(\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2) = [E^L(x_1) + E^L(x_2), E^R(x_1) + E^R(x_2), a_1^L + a_2^L, a_1^R + a_2^R] \quad (6)$$

与期望区间数的序关系定义类似<sup>[5]</sup>, 根据模糊数序关系的 Yager 定义, 可定义扩展期望区间数的序关系为  $E(\tilde{x}_1) > E(\tilde{x}_2)$ , 当且仅当

$$\frac{E^L(x_1) + E^R(x_1)}{2} > \frac{E^L(x_2) + E^R(x_2)}{2}. \quad (7)$$

考察期望区间数的非线性取极大运算 Max, 模糊函数  $\tilde{y} = \max(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2)$  的定义为

$$y_\alpha^L = \text{Max}(x_{1\alpha}^L, x_{2\alpha}^L), \quad y_\alpha^R = \text{Max}(x_{1\alpha}^R, x_{2\alpha}^R), \quad \forall \alpha \in [0, 1], \quad (8)$$

其中:  $x_{1\alpha}^L, x_{1\alpha}^R, x_{2\alpha}^L$  和  $x_{2\alpha}^R$  分别为模糊数  $\tilde{x}_1$  和  $\tilde{x}_2$  的  $\alpha$  截集左右边界 由于取极大运算的非线性特点, 在一般情况下

$$\bar{y} = E(\tilde{y}) = E(\max(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2))$$

$$\text{Max}(E(\tilde{x}_1), E(\tilde{x}_2)).$$

因此, 必须采用近似方法进行处理

对模糊数  $\tilde{x}$  对应的增广期望区间数  $\bar{x} [E^L(\tilde{x}), E^R(\tilde{x}), a^L, a^R]$ , 可构造近似边界函数

$$\begin{cases} \hat{f}^L(x) = 1 - \frac{a^L - x}{\beta_L}, x \in [a^L + \beta_L, a^L]; \\ \hat{f}^R(x) = 1 - \frac{x - a^R}{\beta_R}, x \in [a^R, a^R + \beta_R] \end{cases} \quad (9)$$

如图 1 所示, 选取

$$\begin{aligned} \beta_L &= 2(a^L - E^L(\tilde{x})), \\ \beta_R &= 2(E^R(\tilde{x}) - a^R), \end{aligned} \quad (11)$$

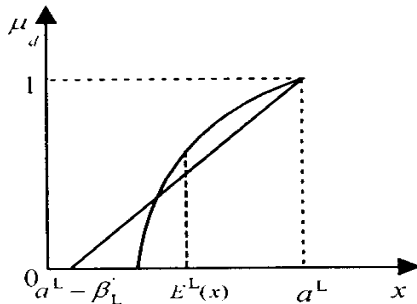
使得

$$\begin{aligned} \int_0^1 \hat{f}^L(\alpha) d\alpha &= E^L(\tilde{x}), \\ \int_0^1 \hat{f}^R(\alpha) d\alpha &= E^R(\tilde{x}). \end{aligned} \quad (12)$$

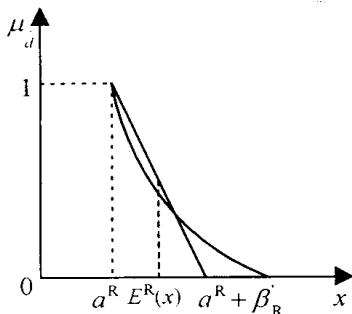
对于 L-R 模糊数  $\tilde{x}_1$  和  $\tilde{x}_2$ , 考察其左边界(或右边界), 不失一般性, 令  $\hat{\alpha}^* = \alpha^*$  (其中  $*$  = L, R).

若  $\hat{f}_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha) > \hat{f}_{2, \cdot}^{\cdot}(\alpha)$ , 即  $(2E(\tilde{x}_1)^* - a_1^*) > (2E(\tilde{x}_2)^* - a_2^*)$ , 近似边界无交点, 则易证:  $\text{Max}(f_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha), f_{2, \cdot}^{\cdot}(\alpha)) = \hat{f}_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha)$ , 对  $\forall \alpha \in (0, 1)$  成立

若  $(2E(\tilde{x}_1)^* - a_1^*) < (2E(\tilde{x}_2)^* - a_2^*)$ , 则对



(a) 左边界近似示意



(b) 右边界近似示意

图 1 构造近似边界函数

近似边界函数  $\hat{f}_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha)$  和  $\hat{f}_{2, \cdot}^{\cdot}(\alpha)$  有

$$\hat{f}_{y, \cdot}^{\cdot}(\alpha) = \text{Max}(f_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha), f_{2, \cdot}^{\cdot}(\alpha)) = \begin{cases} \hat{f}_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha), \alpha \in [\hat{\alpha}^*, 1]; \\ \hat{f}_{2, \cdot}^{\cdot}(\alpha), \alpha \in [0, \hat{\alpha}^*] \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\hat{\alpha}^* = 1 - \frac{a_{1, \cdot}^* - a_{2, \cdot}^*}{\beta_{1, \cdot}^* - \beta_{2, \cdot}^*}; * = L, R.$$

则进一步可得

$$E(\tilde{y})^* = \int_0^{\hat{\alpha}^*} \hat{f}_{2, \cdot}^{\cdot}(\alpha) d\alpha + \int_{\hat{\alpha}^*}^1 \hat{f}_{1, \cdot}^{\cdot}(\alpha) d\alpha \quad (14)$$

将式(14)右边展开并将式(12)代入, 即可得到近似边界相交条件下的取极大运算表达式

$$\begin{cases} E(\tilde{y})^L = E^L(x_1) + \frac{1}{4} \frac{[a_{1, L} - a_{2, L} - 2E^L(x_1) + 2E^L(x_2)]^2}{a_{1, L} - a_{2, L} - E^L(x_1) + E^L(x_2)}, \\ E(\tilde{y})^R = E^R(x_1) + \frac{1}{4} \frac{[a_{2, R} - a_{1, R} + 2E^R(x_2) - 2E^R(x_1)]^2}{a_{1, R} - a_{2, R} - E^R(x_1) + E^R(x_2)}. \end{cases} \quad (15)$$

#### 4 含不确定度控制指标的多目标优化方法

将模型Mod1中的所有模糊参数都以相应的扩展期望区间数代入, 模糊参数线性运算和非线性取极大运算定义如上文所述, 可得到

$$\begin{aligned} E(\tilde{z}) &= \text{Max}_i \sum_{j=1}^J (E(\tilde{b}_{i, j}(x)) - \\ &E(\tilde{e}_{i, j-1}(x)) + E(\tilde{t}_{i, j})), \\ \text{s.t. } x &\in X^k, \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $X^k$  为模型Mod1中所有满足约束的可行解集合. 考虑决策模型中的不确定度控制指标, 定义由参数不确定性引起的系统最大不确定度为

$$G = \text{Max}_{T, T} (z(x, T) - z(x, T)), \quad (17)$$

其中  $\Omega$  为设备不确定处理时间值域空间. 在扩展期望区间数模型中, 上述不确定度指标可描述为

$$\begin{aligned} G &= \text{Max}_{T, T} (M(z_{x, T}) - M(z_{x, T})) = \\ &E^R(z_x) - E^L(z_x). \end{aligned} \quad (18)$$

因此, 根据Lai和Huang等<sup>[6]</sup>人给出的模糊目标优化方法, 上述优化问题可转化为对包含系统不确定度指标的多目标确定型优化模型的求解

$$\begin{aligned} \text{Mod2: Min } \{ &E^L(z), E^R(z), G \}, \\ \text{s.t. } E(\tilde{z}) &= \text{Max}_i \sum_{j=1}^J (E(\tilde{b}_{i, j}(x)) - \\ &E(\tilde{e}_{i, j-1}(x)) + E(\tilde{t}_{i, j})), \\ G &= E^R(z) - E^L(z), x \in X^k. \end{aligned} \quad (19)$$

确定系统不确定度的控制范围  $\epsilon$ , 并在模型

Mod2 中加入约束

$$G = \text{Max}_{T,T} (z(x, T) - z(x, T)) \quad \epsilon \quad (20)$$

对目标函数中的  $E(z^L)$  和  $E(z^R)$ , 定义满意度指标

$$\Psi^* = 1 - \frac{E(z^*) - z_{\min}^*}{z_{\max}^* - z_{\min}^*} \quad (21)$$

其中:  $z_{\max}^* = \text{Max } E(z^*)$ ,  $z_{\min}^* = \text{Min } E(z^*)$ ,  $*$  = L, R. 因此优化模型的求解转化为: 在限定最大不确定度  $\epsilon$  条件下, 对于给定的系统选择决策指数  $\delta$  (0, 1), 令  $\Psi = \delta\Psi^L + (1 - \delta)\Psi^R$ . 选取可行解  $x$  使得决策满意度  $\Psi$  最大

### 5 仿真求解及结果分析

考虑如表 1 所示的 FSM P 调度问题: 需要处理的产品种类数  $N = 10$ , 处理过程阶段数  $J = 2$ , 各阶段处理器数为  $M_1 = 3$  和  $M_2 = 2$ , 考虑加工时间为不确定, 采用非线性 L-R 模糊数表示, 其隶属度函数定义为

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in [a_1, a_2]; \\ \left(1 - \frac{a_1 - x}{\beta_1}\right)^{1/2}, & x \in [a_1 - \beta_1, a_1]; \\ \left(\frac{x - a_2}{\beta_2} + 1\right)^2, & x \in [a_2, a_2 + \beta_2]; \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

表 1 算例产品参数设计

任务	A: $\tilde{r}(a_1, a_2, \beta_1, \beta_2)$	B: $\tilde{r}(a_1, a_2, \beta_1, \beta_2)$
1	(15, 19, 3, 4)	(17, 21, 3, 3)
2	(16, 18, 2, 1)	(21, 25, 3, 2)
3	(11, 15, 4, 5)	(9, 14, 5, 4)
4	(27, 30, 4, 3)	(21, 26, 2, 3)
5	(29, 32, 5, 1)	(11, 15, 2, 2)
6	(19, 21, 1, 1)	(13, 17, 5, 4)
7	(31, 35, 5, 4)	(16, 19, 3, 5)
8	(10, 13, 2, 3)	(14, 18, 4, 5)
9	(21, 23, 4, 5)	(25, 27, 2, 1)
10	(9, 15, 4, 4)	(26, 29, 3, 4)

采用基于字符编码的遗传算法进行优化求解

$$X = \{a_{ij}\}, i \in [1, n], j \in [1, m]$$

表示种群中的一个个体 其中  $a_{ij}$  表示工件  $i$  在第  $j$  阶段被分配的机器号. 分配在同一设备的加工任务按照优先级顺序进行处理, 优先级规则定义为 SPT (Shortest Time First). 遗传过程中采用两点交叉, 交叉概率设为  $P_c = 0.7$ , 变异概率设为  $P_i = 0.05$ , 采用最优保留策略以保证算法求解过程的收

敛性

采用本文提出的优化模型和算法, 取  $\epsilon = 60$ , 对于不同选择决策指数  $\delta$  下的调度结果见表 2. 由表 2 可以看出: 决策指数  $\delta$  越大, 意味着在优化过程中对乐观区域考虑越多, 对悲观区域考虑越少, 使得系统最短加工时间减小, 最长加工时间增大, 决策结果的不确定度也增大, 即调度的鲁棒性趋弱; 反之,  $\delta$  减小, 导致系统最短加工时间增大, 最长加工时间减小, 决策结果的不确定度减小, 即调度结果的鲁棒性增强

表 2 不同  $\delta$  情况下的调度结果 ( $\epsilon = 60$ )

$\delta$	目标函数	Makespan(L)	Makespan(R)	最大不确定度
0.1	0.9881	107	136.002	29
0.3	0.9818	101.667	138.996	37.33
0.5	0.9833	99.664	138.666	39.002
0.7	0.9828	96.166	148.416	52.25
0.9	0.9886	96.166	148.416	52.25

使用本文提出的算法, 取  $\delta = 0.7$  对于不同条件下的调度结果见表 3. 由表 3 可以看出: 随着对系统不确定度限制的增强, 对模型目标的优化度逐渐减弱, 系统最长加工时间和最短加工时间逐步向内压缩, 所获得的决策结果的不确定度减小

表 3  $\epsilon$  不同情况下的调度结果 ( $\delta = 0.7$ )

$\delta$	目标函数	Makespan(L)	Makespan(U)	最大不确定度
60	0.9828	96.166	148.416	52.25
50	0.9712	99.334	146.668	47.334
40	0.9712	101.666	138.996	37.33
35	0.9579	104.334	138.996	34.662
30	0.9497	107	136.002	29.002

### 6 结 论

本文考虑了 FSM P 调度问题中常见的一类不确定信息: 产品处理时间不确定, 采用一般 L-R 模糊数描述不确定参数, 建立了基于模糊规划的 FSM P 调度模型. 定义了 L-R 模糊数的扩展期望区间数, 在线性运算条件下, 利用区间数运算法则进行计算, 在非线性取极大运算条件下, 利用扩展期望区间数构造不确定参数的近似边界, 并根据取极大运算定义进行计算, 提出了包含不确定度控制指标的多目标优化模型. 算例仿真结果和分析表明了该模型与算法的有效性和鲁棒性

(下转第 170 页)

足的带约束条件的连续函数优化问题 本文设计的算法,在距离启发式信息概率的构造、重要权值系数的动态确定、可行解的有效构造以及在移动过程中为蚂蚁选定转移概率等方面,均做了一些创造性的工作 仿真实验结果验证了所设计算法的实用性和有效性

#### 参考文献(References):

- [1] Abe Y, Shikann M, Fokuda T, et al Vision based navigation system by variable template matching for autonomous mobile robot[A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation*[C]. Leaven, 1998: 952-957.
- [2] Colnri A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies[A]. *Proc of the ECAL-91* [C]. Paris, 1991: 134-142
- [3] Dorigo M, Maniezzo V, Colnri A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. *IEEE Trans on Systems, Man & Cybernetics-B*, 1996, 26(2): 29-41
- [4] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the travelling salesman problem[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66
- [5] 马良. 来自昆虫世界的寻优策略——蚂蚁算法[J]. 自然杂志, 1999, 21(3): 161-163
- (Ma Liang. Ant algorithm——Optimization strategy from the insect colony[J]. *Nature Magazine*, 1999, 21(3): 161-163)
- [6] 马良. 全局优化的一种新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(9): 61-62
- (Ma Liang. A new method for global optimization[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(9): 61-62)
- [7] 魏平, 熊伟清. 用于一般函数优化的蚁群算法[J]. 宁波大学学报, 2001, 14(4): 52-55
- (Wei Ping, Xiong W Q. Ant colony algorithm for general function optimization problems[J]. *J of Ningbo University*, 2001, 14(4): 52-55)
- [8] 易晟. 平面机器人路径规划研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002
- [9] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Inspiration for optimization from social insect behaviour[J]. *Nature*, 2000, 406(6791): 39-42
- [10] 李有梅, 王文剑, 徐宗本. 关于求解难组合优化问题的蚁群优化算法[J]. 计算机科学, 2002, 29(3): 115-118
- (Li Y M, Wang W J, Xu Z B. About ACO algorithm for hard combinatorial optimization problem [J]. *Computer Science*, 2002, 29(3): 115-118)

(上接第 165 页)

#### 参考文献(References):

- [1] Shaukat A B, Luan L L. Heuristics for scheduling in a flow shop with multiple processors[J]. *European J of Operational Research*, 1999, 113(1): 113-122
- [2] Kochlar S, Morris R J T. Heuristic methods for flexible flow line scheduling[J]. *J of Manufacturing Systems*, 1987, 6(4): 299-314
- [3] Wittrock R J. Scheduling algorithms for flexible flow lines[J]. *IBM J of Research and Development*, 1985, 29(4): 401-412
- [4] 方述诚, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [5] Grzegorzewski. Nearest interval approximation of a fuzzy number[J]. *Fuzzy Sets and System*, 2002, 130(3): 321-330
- [6] Lai L J, Huang C L. *Fuzzy Mathematical Programming* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992