第21卷 第11期 控 制 与 决 策 2006年11月
Vol 21 No. 11 Control and Decision Nov. 2006

文章编号: 1001-0920(2006)11-1253-04

信息不完全确定的多准则区间直觉模糊决策方法

王坚强
(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘 要: 提出了一种权系数信息不完全确定且准则值为区间直觉模糊集的多准则排序方法. 该方法利用证据推理算法对准则进行集成, 得到各方案的区间直觉模糊集, 计算各方案与理想方案和负理想方案的距离, 并结合不完全确定的权系数信息建立非线性规划模型, 利用粒子群算法求解所得优化模型, 得出最优准则权系数, 通过比较方案的区间直觉模糊集与理想方案和负理想方案的距离, 得到方案集的排序. 最后的数值算例说明了该方法的有效性和可行性.

关键词: 多准则决策; 区间直觉模糊集; 证据推理; 信息不完全确定; 粒子群算法
中图分类号: C934 **文献标识码**: A

Multi-criteria Interval Intuitionistic Fuzzy Decision-making Approach with Incomplete Certain Information

WANG Jian-qiang
(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China. E-mail: jqwang@csu.edu.cn)

Abstract: A multi-criteria ranking method is proposed in which the information on the criteria's weights is incomplete certain and criteria's values is interval intuitionistic fuzzy set. Using evidential reasoning algorithms, the criteria values are aggregated, and the interval intuitionistic fuzzy sets of alternatives are abtained. The distances between alternatives and idea/anti-idea alternatives are computed. Considering the incomplete certain information on weights, a nonlinear programming model is developed. By using particle swarm optimization algorithms to solve the nonlinear programming models, the optimal criteria weights are gained. And ranking is performed through the comparison of the distances between the alternatives and idea/anti-idea alternative. Finally, an example shows the feasibility and availability of this method.

Key words: Multi-criteria decision-making; Interval intuitionistic fuzzy set; Evidential reasoning; Incomplete certain information; Particle swarm algorithms

1 引 言

在社会经济生活中, 存在大量多准则决策问题. 目前有很多方法求解多准则决策问题, 如TOPSIS, PROMETHEE, ELECTRE 和UTA/UTADIS 等. 但在实际决策中, 由于决策问题自身的模糊性和不确定性, 导致方案的准则值和准则权系数等参数不准确、不确定和不完全确定, 因而模糊多准则决策成为当前研究的一个热点. 模糊集有多个扩展, 其中重要的一个是直觉模糊集. 直觉模糊集能模拟人类的决策过程以及反映经验和知识的行为[1], 因而一些研究人员对其进行了研究, 但主要集中在其性质、运算和相关性等的研究上[2~4]. 而对多准则直觉模糊决策的研究较少, 只有文献[5]研究了准则权系数和准则值均为直觉模糊集的多准则决策问题, 提出了一种相应的解决方法. 区间直觉模糊集是直觉模糊集的扩展[6], 目前主要研究其性质、相关性等方面[4,6,7], 而未见有文献讨论多准则区间直觉模糊决策问题. 在这类决策中, 由于没有常数与区间直觉模糊集中的元素进行运算的定义, 使得对其准则进行集成变得相当困难. 同时, 在实际决策中, 决策者较难给出准则权系数的确定值, 或者较难对准则的重要性程度进行两两比较, 因而不能使用AHP, ANP

收稿日期: 2005-09-05; **修回日期**: 2005-11-18.
基金项目: 国家自然科学基金项目(70572060); 博士点基金项目(2004053357); 湖南省社科基金项目(05YB74).
作者简介: 王坚强(1963—), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士, 从事决策理论与应用、物流管理等研究.

和CNP等方法确定准则权系数.

为此,本文利用证据推理算法提出一种准则权系数信息不完全确定且准则值为区间直觉模糊集的多准则决策方法,以满足这类决策的需要.

2 权系数的不完全确定信息与区间直觉模糊集

2.1 权系数的不完全确定信息

在实际决策中,决策者很难准确地给出准则权系数的确定值,或不能对准则间的重要性程度进行两两比较,进而不能由AHP,ANP和CHP等方法确定准则权系数.但通常能以不完全确定信息的形式给出准则权系数间的关系,如某一准则的权系数在某一区间内变化,一个准则比另一准则更重要等.在此,假定准则权系数的不完全确定信息可以是线性不等式和线性等式的形式,它可分为以下3类:

1) $\{\omega | A_1\omega \geq b, \omega > 0, b \geq 0\}$;

2) $\{\omega | A_1\omega \leq b, \omega > 0, b \geq 0\}$;

3) $\{\omega | A_1\omega = b, \omega > 0, b \geq 0\}$.

其中A_1是一个$l \times t$的矩阵,$\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_t)^{\mathrm{T}}$.上述3类不完全确定信息是不完全信息、不确定信息、部分确定信息等的扩展.

2.2 区间直觉模糊集

直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Sets)由Atanassov提出[1],是传统模糊集的一种扩充和发展.直觉模糊集增加了一个新的属性参数:非隶属度函数,它能够更加细腻地描述和刻画客观世界的模糊性本质.区间直觉模糊集是直觉模糊集的扩展,它更能描述和反映客观世界的本质特征.

定义1 设X是一个给定论域,则X上的一个区间直觉模糊集A定义为[6]

$$A = \{\langle x, \mu_A(x), v_A(x)\rangle | x \in X\}.$$

其中:$\mu_A(x): X \to \mathrm{int}([0,1])$和$v_A(x): X \to \mathrm{int}([0,1])$分别为$A$的隶属函数$\mu_A(x)$和非隶属函数$v_A(x)$,且对于$A$上的所有$x \in X$, $0 \leq \sup(\mu_A(x)) + \sup(v_A(x)) \leq 1$成立.其中$\mathrm{int}([0,1])$表示$[0,1]$区间中所有闭子区间的集合.

为方便,将区间直觉模糊集记为

$$A = \{\langle x, [\mu_A^L(x), \mu_A^U(x)], [v_A^L(x), v_A^U(x)]\rangle | x \in X\},$$

其中

$$x \in X, \ 0 \leq \mu_A^U(x) + v_A^U(x) \leq 1, \ \mu_A^L(x) \geq 0, \ v_A^L(x) \geq 0.$$

称

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x) = [1 - \mu_A^U(x) - v_A^U(x), 1 - \mu_A^L(x) - v_A^L(x)]$$

为A中x的直觉模糊区间.定义在论域X上的区间直觉模糊集记作$\mathrm{IVIFS}(X)$.

定义2 设X是n个元素的论域,$A, B \in \mathrm{IVIFS}(X)$,且

$$A = \{\langle x, [\mu_A^L(x), \mu_A^U(x)], [v_A^L(x), v_A^U(x)]\rangle | x \in X\},$$

$$B = \{\langle x, [\mu_B^L(x), \mu_B^U(x)], [v_B^L(x), v_B^U(x)]\rangle | x \in X\},$$

则两区间直觉模糊数的Hamming距离定义为

$$D(A, B) = \frac{1}{4n}\sum_{j=1}^{n}(|\mu_A^L(x_j) - \mu_B^L(x_j)| + |\mu_A^U(x_j) - \mu_B^U(x_j)| + |v_A^L(x_j) - v_B^L(x_j)| + |v_A^U(x_j) - v_B^U(x_j)| + |\pi_A^L(x_j) - \pi_B^L(x_j)| + |\pi_A^U(x_j) - \pi_B^U(x_j)|). \tag{1}$$

其中

$$\pi_A^L(x) = 1 - \mu_A^U - v_A^U(x),$$
$$\pi_A^U(x) = 1 - \mu_A^L - v_A^L(x),$$
$$\pi_B^U(x) = 1 - \mu_B^L - v_B^L(x),$$
$$\pi_B^L(x) = 1 - \mu_B^U - v_B^U(x).$$

上述距离公式是由直觉模糊集的Hamming距离[4]和区间数的距离扩展得到的.

3 一种信息不完全确定的多准则区间直觉模糊决策方法

设有m个方案,记为$A = \{a_1, a_2, \cdots, a_m\}$, t个准则$C = \{C_1, C_2, \cdots, C_t\}$.设$[\mu_{li}^L(x), \mu_{li}^U(x)]$, $[v_{li}^L(x), v_{li}^U(x)]$分别为方案$a_l$关于准则$C_i$相对于模糊概念“优秀”的隶属度区间和非隶属度区间,其中$0 \leq \mu_{li}^U(x) + v_{li}^U(x) \leq 1$, $\mu_{li}^L(x) \geq 0$, $v_{li}^L(x) \geq 0$,设准则C_i的权系数为ω_i, G表示准则权系数的不完全确定信息的集合,试确定方案集A的排序.

令$H_1 = \{$优秀$\}$, H_2表示属于优秀的隶属度为0且其非隶属度为1的方案所在的等级,则方案a_l在准则C_i下的评价值可以表示如下:

$$S(C_i(a_l)) = \{(H_n, \beta_{n,i}(a_l)), n = 1, 2\},$$

其中

$$\beta_{1,i}(a_l) = [\mu_{li}^L(a_l), \mu_{li}^U(a_l)],$$
$$\beta_{2,i}(a_l) = [v_{li}^L(a_l), v_{li}^U(a_l)].$$

$\beta_{n,i}(a_l)$表示决策者认为方案a_l在准则C_i下属于等级H_n的相信程度区间.

3.1 方案的准则值集成

将各方案在准则下的值看作证据,对于确定的准则权系数$\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_t)$和确定的信用度值$\beta'_{n,i}(a_l) \in \beta_{n,i}(a_l)$,利用基于证据推理的算法将方案的准则值按下列方式集成[8].

令 H 表示由于准则值未知所产生的没有指定到任何一个等级的信任度的所在等级, 即为直觉模糊指数值指定的等级

$$m_{j,i}(a_l)=\omega_i\beta'_{j,i}(a_l),$$

$$m_{H,i}(a_l)=1-\sum_{j=1}^{2}m_{j,i}(a_l)=1-\omega_i\sum_{j=1}^{2}\beta'_{j,i}(a_l).$$

对于每一个等级 H_j, 有

$$m_{j,I(i+1)}(a_l)=$$
$$K_{I(i+1)}(a_l)[m_{j,I(i)}(a_l)m_{j,i+1}(a_l)+$$
$$m_{H,I(i)}(a_l)m_{j,i+1}(a_l)+m_{j,I(i)}(a_l)m_{H,i+1}(a_l)].$$

对于 H, 有

$$m_{H,I(i+1)}(a_l)=K_{I(i+1)}(a_l)m_{H,I(i)}(a_l)m_{H,i+1}(a_l).$$

取初始值为

$$m_{j,I(1)}(a_l)=m_{j,1}(a_l),\ j=1,2,$$
$$m_{H,I(i)}(a_l)=m_{H,1}(a_l),$$
$$K_{I(i+1)}(a_l)=\left[1-\sum_{t=1}^{2}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq t}}^{2}m_{t,I(i)}(a_l)m_{j,i+1}(a_l)\right]^{-1},$$
$$i=1,2,\cdots,t-1.$$

利用上面的递归算法可得方案 a_l 在等级 H_j 下的信任度为

$$\beta_j(a_l)=\frac{1-\beta_H(a_l)}{1-m_{H,I(t)}(a_l)}m_{j,I(t)}(a_l),\quad j=1,2. \tag{2}$$

其中

$$\beta_H(a_l)=\sum_{i=1}^{t}\omega_i\left(1-\sum_{j=1}^{2}\beta'_{j,i}(a_l)\right)$$

为未知的准则值产生的信任度[8].

由式(2)可得 $\beta_1(a_l)+\beta_2(a_l)+\beta_H(a_l)=1$. 上述递归算法克服了简单加权法假定效用线性、偏好独立以及各准则需完全互补等不足, 能以理性方式处理不完全或不确定的多准则信息的集成问题. 以上得到的 $\beta_H(a_l)$ 和 $\beta_n(a_l)$ $(l=1,2,\cdots,m,\ n=1,2)$ 是准则权系数 $\omega=\{\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_t\}$ 的非线性函数, 记为 $\beta_n(a_l,\omega)$ 和 $\beta_H(a_l,\omega)$. 不难证明, 方案 a_l 在等级 H_n 下的信任度 $\beta_n(a_l,\omega)$ 是关于准则 C_j 下的信任度 x 的增函数, $\beta_H(a_l,\omega)$ 是关于准则 C_j 下的信任度 x 的减函数, 其中 $x\in[\beta^L_{n,j}(a_l),\beta^U_{n,j}(a_l)]$.

3.2 模型的建立

由上可得到每一方案 a_l 的区间直觉模糊集 $\langle a_l,[\beta^L_1(a_l,\omega),\beta^U_1(a_l,\omega)],[\beta^L_2(a_l,\omega),\beta^U_2(a_1,\omega)]\rangle$, 其直觉模糊区间为 $[\beta^L_H(a_l,\omega),\beta^U_H(a_l,\omega)]$. 其中 $\beta^L_1(a_l,\omega),\beta^L_2(a_l,\omega),\beta^U_H(a_l,\omega)$ 是由方案 a_l 在准则 C_j 下的信任度 $\beta^L_{n,j}(a_l)$ 通过 3.1 中的递归算法得到的, $\beta^U_1(a_l,\omega),\beta^U_2(a_l,\omega)$ 和 $\beta^L_H(a_l,\omega)$ 是由方案 a_l 在准则 C_j 下的信任度 $\beta^U_{n,j}(a_l)$ 通过 3.1 中的递归算法得到的.

理想方案 G^+ 相对于模糊概念"优秀"的隶属度为 1 和非隶属度为 0, 即有 $\langle G^+,1,0\rangle$, 负理想方案 G^- 相对于模糊概念"优秀"的隶属度为 0 和非隶属度为 1, 即有 $\langle G^-,0,1\rangle$. 如果 $G^+\notin X$ 或 $G^-\notin X$, 则将其添加到 X 中.

方案 a_l 与理想方案 G^+ 的距离为

$$D_l^+=D(a_l,G^+)=$$
$$\frac{1}{4}\left[\left|\beta^L_1(a_l,\omega)-1\right|+\left|\beta^U_1(a_l,\omega)-1\right|+\beta^L_2(a_l,\omega)+\beta^U_2(a_l,\omega)+\beta^L_H(a_l,\omega)+\beta^U_H(a_l,\omega)\right],$$

方案 a_l 与负理想方案 G^- 的距离为

$$D_l^-=D(a_l,G^-)=$$
$$\frac{1}{4}\left[\beta^L_1(a_l,\omega)+\beta^U_1(a_l,\omega)+\left|\beta^L_2(a_l,\omega)-1\right|+\left|\beta^U_2(a_l,\omega)-1\right|+\beta^L_H(a_l,\omega)+\beta^U_H(a_l,\omega)\right].$$

可以看出, 方案 a_l 离理想方案 G^+ 越近, 方案越优; 离负理想方案 G^- 越远, 方案越优. 因而, 对每个方案 a_l, 得到优化模型为

$$\min D_l^+=D(a_l,C^+),\quad \text{s.t.}\begin{cases}\omega\in G,\\ \sum_{j=1}^{t}\omega_j=1,\ \omega_j\geq 0.\end{cases} \tag{3}$$

$$\max D_l^-=D(a_l,C^-),\quad \text{s.t.}\begin{cases}\omega\in G,\\ \sum_{j=1}^{t}\omega_j=1,\ \omega_j\geq 0.\end{cases} \tag{4}$$

由于各方案是公平竞争的, 每一方案与理想方案与负理想方案的距离应该来自同一组准则权系数, 因此必须对式(3)和(4)进行综合[9]. 综合式(3)和(4)得

$$\min X=\sum_{i=1}^{m}\frac{D(a_i,G^+)}{D(a_i,G^+)+D(a_i,G^-)},\quad \text{s.t.}\begin{cases}\omega\in G,\\ \sum_{j=1}^{t}\omega_j=1,\ \omega_j\geq 0.\end{cases} \tag{5}$$

3.3 模型的求解

模型(5)是一非线性规划模型, 使用传统优化方法求解较为困难. 本文利用改进的惯性权重粒子群算法[10]求解模型(5). 对于粒子迭代之后产生的不可行解, 通过构造惩罚函数惩罚不可行解, 将约束问题转化为无约束问题. 在第一代粒子群之后的每一代粒子群中保持部分不可行解粒子, 从而可以从可行解域和不可行解域两边同时搜索寻找最优解. 求解算法的关键环节设计如下:

1) 粒子预处理. 采用实数编码, 将 $t-1$ 个权系数 $\omega_i(i=1,2,\cdots,t-1)$ 构成一个粒子. 另一个权系

数可由 $\omega_t = 1 - \omega_1 - \omega_2 - \cdots - \omega_{t-1}$ 计算得出, 这样才能保证粒子更新运算后, 权系数之和仍为 1.

2) 粒子群初始化. 通过求解下列线性规划:

$$\min 0,\quad \text{s.t.} \begin{cases} \omega \in G, \\ \sum_{i=1}^{t} \omega_i = 1,\ 0 \le \omega_i \le 1, \end{cases} \tag{6}$$

确定其最优解 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_t)$ 的前 $t-1$ 个元素作为初始粒子. 如果式(6) 的最优解不存在, 则说明准则权系数的不完全确定信息中存在矛盾, 需要重新调整, 调整后再继续.

3) 粒子的速度和位置更新. 为提高算法的收敛速度和性能, 利用线性变化的惯性权重粒子群算法对粒子的速度进行更新[10]. 即

$$v_{id}^{k+1} = w v_{id}^{k} + c_1 \mathrm{rand}_1^k (p\mathrm{best}_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \mathrm{rand}_2^k (g\mathrm{best}_d^k - x_{id}^k),$$
$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}.$$

其中: w 为惯性权重, 用来控制前面粒子的速度对更新后的粒子速度的影响; c_1 和 c_2 为粒子加速系数, 分别调节当前粒子向全局最优粒子和个体最优粒子方向飞行的最大步长.

4) 计算粒子的适应度值. 对于每一代确定的粒子, 式(5) 的目标函数值即为该粒子的适应度值.

5) 算法收敛条件. 当算法迭代次数超过指定的次数时, 则算法结束. 取适应度值最小的粒子为最优解.

3.4 方案的排序

设模型(5) 的最优准则权系数为 ω^*, 代入式(2) 计算得到方案 a_i 的区间直觉模糊集为

$$\langle a_i, [\beta_1^L(a_i, \omega^*), \beta_1^U(a_i, \omega^*)], [\beta_2^L(a_i, \omega^*), \beta_2^U(a_i, \omega^*)] \rangle,$$

计算 D_i^+ 和 D_i^-, 并计算

$$d_i = \frac{D_i^+}{D_i^+ + D_i^-}.$$

按 d_i 从小到大排序, 得到方案集的排序, d_i 值越小, 方案越优.

4 数值算例

1 个多准则决策问题, 有 5 个方案 $a_1, a_2, \cdots, a_5$, 5 个准则 $C_1, C_2, \cdots, C_5$, 决策者根据自己的知识、经验和统计数据等确定各方案关于每一准则相对于“优秀”的隶属度和非隶属度, 其数据如表 1 所示.

表 1 方案的准则值

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
a_1	([0.7, 0.8], [0.05, 0.15])	(0.8, [0.1, 0.2])	([0.38, 0.42], [0.4, 0.5])	([0.3, 0.4], [0.4, 0.5])	([0.4, 0.5], [0.4, 0.5])
a_2	([0.55, 0.65], [0.2, 0.3])	(0.68, 0.2)	([0.70, 0.80], 0.05)	([0.75, 0.80], 0.15)	([0.60, 0.75], 0.2)
a_3	(0.8, 0.2)	([0.4, 0.5], 0.5)	([0.56, 0.64], [0.25, 0.35])	([0.5, 0.6], [0.2, 0.3])	([0.55, 0.65], [0.25, 0.35])
a_4	([0.6, 0.8], [0.1, 0.15])	([0.6, 0.7], 0.3)	([0.86, 0.94], [0.05, 0.06])	([0.6, 0.7], 0.3)	([0.4, 0.5], [0.3, 0.4])
a_5	(0.9, [0.05, 0.1])	([0.8, 0.9], 0.1)	([0.7, 08], [0.15, 0.20])	(0.95, 0)	(0.8, [0.15, 0.2])

决策者给出准则权系数的不完全确定信息如下:

$$\omega_1 > \omega_3 > \omega_2 > \omega_5 > \omega_4,$$
$$0.2 \le \omega_1 \le 0.3,\ 0.15 \le \omega_2 \le 0.25,$$
$$0.1 \le \omega_3 \le 0.3,\ 0.1 \le \omega_4 \le 0.2,$$
$$0.1 \le \omega_5 \le 0.25.$$

利用式(5) 建立模型, 在MATLAB 中编程求解, 得到准则的最优权系数为: 0.300 0, 0.200 0, 0.299 0, 0.100 0, 0.101 0. 各方案的区间直觉模糊集分别为: $\langle a_1$, [0.581 3, 0.648 8], [0.207 8, 0.302 2]$\rangle$, $\langle a_2$, [0.672 7, 0.760 2], [0.123 3, 0.145 9]$\rangle$, $\langle a_3$, [0.623 5, 0.693 8], [0.249 5, 0.293 3]$\rangle$, $\langle a_5$, [0.691 4, 0.828 7], [0.131 4, 0.146 2]$\rangle$, $\langle a_4$, [0.840 5, 0.898 9], [0.069 6, 0.096 1]$\rangle$. 各方案的综合值 d_i 分别为: 0.340 3, 0.245 5, 0.318 2, 0.214 6, 0.123 5. 因此方案的排序为: $a_5 > a_4 > a_2 > a_3 > a_1$. 通过对表 1 中数据进行分析, 可知上述结果是合理的.

5 结 语

本文针对准则权系数信息不完全确定且准则值为区间直觉模糊集的多准则排序问题, 利用证据理论建立了一种优化模型, 利用粒子群算法求解该优化模型, 并详细讨论了其实现过程. 该方法能适应模糊决策环境, 又能满足决策者给出不完全确定信息的准则权系数的要求. 实际应用表明, 本文方法操作性较强, 能够运用于经济管理中的相应决策问题, 具有广泛的应用价值.

参考文献(References)

[1] Atanassov K T. Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.

[2] De S K, Biswas R, Roy A R. An Application of Intuitionistic Fuzzy Sets in Medical Diagnosis[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 117(2): 209-213.

(下转第1263 页)

况下由于观测手段不充分、对控制事件本质研究不够透彻等造成的缺陷, 因此这一方法在实际应用中是完全可行的

6 结　　语

FDES 是最近几年产生的关于离散事件系统的一个新的研究方向, 适合于描述一类与人的主观观察/判断密切相关的系统 本文介绍了FDES 的特点以及在实际中如何应用它去解决一些实际问题; 并在一般FDES 概念的基础上, 引入了基于模糊规则描述的FDES 系统, 为这一理论方法的具体实施提供了一种有效的途径, 同时还对FDES 监督控制应用进行了一般意义上的描述总结 当然FDES 的状态不完全可观测性在理论上也具有一定的研究价值[11, 12], 如何与实际应用很好地结合是目前待研究的课题

参考文献(References)

[1] Cassandras C G, Lafortune S. *Introduction to Discrete Event Systems* [M]. Norwell: Kluwer, 1999.

[2] Ramadge P J, Wonham W M. The Control of Discrete Event Systems[H]. *Proc of the IEEE, Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems*, 1989, 77(1): 81-98.

[3] Zadeh L A. Fuzzy Sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.

[4] Lin F, Ying H. Modeling and Control of Fuzzy Discrete Event Systems[J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics — Part B*, 2002, 32(4): 408-415.

[5] Lin F, Ying H. Fuzzy Discrete Event Systems and Their Observability[A]. *Proc Joint Int Conf 9th Int Fuzzy Systems Association and World Congregation 20th North American Fuzzy Information Processing Society* [C]. Vancouver, 2001: 1271-1276.

[6] 王立新. *自适应模糊系统与控制. 设计与稳定性分析* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
(Wang L X. *Adaptive Fuzzy System and Control: Design and Stability Analysis* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.)

[7] Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes[J]. *SIAM J Control Optimization*, 1987, 25(1): 206-230.

[8] Chen Y L, Lin F. Safety Control of Discrete Event Systems Using Finite State Machines with Parameters [A]. *Proc of the 2001 American Contrl Conf* [C]. Arlington, 2001: 975-981.

[9] Li Y, Lin F, Lin Z H. A Generalized Framework for Supervisory Control of Discrete Event Systems[J]. *Int J of Intellgent Control and Systems*, 1998, 2(1): 139-159.

[10] Chung S L, Lafortune S, Lin F. Limited Look-ahead Policies in Supervisory Control of Discrete Event Systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(12): 1921-1935.

[11] Lin F, Wonham W M. On Observability of Discrete Event Systems[J]. *Information Sciences*, 1988, 44(3): 173-198.

[12] Cieslak R, Desclaux C, Fawaz A, et al. Supervisory Control of Discrete Event Processes with Partial Observation[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1988, 33(3): 249-260.

(上接第1256 页)

[3] Li D F, Cheng C T. New Similarity Measures of Intuitionistic Fuzzy Sets and Application to Pattern Recognitions[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2002, 23(1-3): 221-225.

[4] Przemysław Grzegorzewski. Distances Between Intuitionistic Fuzzy Sets and/or Interval-valued Fuzzy Sets Based on the Hausdorff Metric[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 148(2): 319-328.

[5] Li D F. Multiattribute Decision Making Models and Methods Using Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. *J of Computer and System Sciences*, 2005, 70(1): 73-85.

[6] Atanassov K T, Gargov G. Interval Valued Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 31(3): 34-349.

[7] Atanassov K T. Operators Over Interval Valued Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1994, 64(2): 159-174.

[8] Yang J B. Rule and Utility Based Evidential Reasoning Approach for Multiattribute Decision Analysis under Uncertainty[J]. *European J of Operational Research*, 2001, 131(1): 31-61.

[9] 尤天慧, 樊治平. 区间数多指标决策的一种TOPSIS 方法[J]. *东北大学学报*, 2002, 23(9): 840-843.
(You T H, Fan Z P. TOPSIS Method for Multiple Attribute Decision Making with Intervals[J]. *J of Northeastern University*, 2002, 23(9): 840-843.)

[10] Shi Y, Eberhart R C. Empirical Study of Particle Swarms Optimization [A]. *Proc of the Congress on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1999: 1945-1949.