

基于D-S证据理论的不完全信息作战方案优选

陈向勇¹, 公茂水², 井元伟¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对带有不完全信息的作战方案优选问题,提出了一种基于D-S证据理论的多属性决策方法。首先由属性值构建残缺决策矩阵(矩阵中有某些未知元素),然后根据属性值的特征确定各属性对应的焦元。利用信任函数、似然函数和证据推理算法求得每个方案的效用区间和优先度,并根据优先度对所有方案进行排序,从而完成方案优选。该方法通过对作战方案优选过程中繁杂、不确定信息进行融合,可以较好地处理作战信息不完全对作战指挥决策的影响。以一类炮兵作战方案优选为应用算例,证明了该方法的有效性。

关 键 词: 作战方案;不完全信息;D-S证据理论;多属性决策

中图分类号: E 072; N 945.25

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2012)08-1069-05

Selection of Operation Schemes with Incomplete Information Based on D-S Evidence Theory

CHEN Xiang-yong¹, GONG Mao-shui², JING Yuan-wei¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: CHEN Xiang-yong, E-mail: cxy8305@163.com)

Abstract: Given operation schemes with incomplete information, a multi-attribute decision-making method for selecting an optimal scheme is proposed on the basis of the D-S evidence theory. An incomplete decision matrix is built of attribute values, in which some elements are not given, and then focal elements of every attribute are determined according to the characteristics of the attribute values. Using the belief function, plausibility function and evidential ratiocination algorithm, the utility interval and priority of each scheme are derived. All the schemes are ranked by the priorities, by which the optimal one is selected. The proposed method can weaken the influence of incomplete information on decision-making by integrating miscellaneous uncertain information. A case of selecting an optimal scheme of artillery operations demonstrates the effectiveness of the method.

Key words: operation scheme; incomplete information; D-S evidence theory; multi-attribute decision-making

作战方案优选是作战指挥活动的核心内容,作战决策正确与否,对作战过程和结局有重大影响。由于作战决策信息具有不完全性,如何有效地处理不完全信息来获得最优作战方案引起了研究者的关注。近年来,学者们已经提出了许多方法来处理带有不完全信息的作战方案优选问题,如集对分析^[1]、D-S证据理论^[2]等。

D-S证据理论^[2]是一种不精确推理理论,它具有处理不确定信息的能力,自被提出以来得到了广泛的关注和应用^[3-6]。目前,D-S证据理论在作战指挥决策方面的应用也已经成为研究热点之一。文献[7]利用D-S证据理论对多空中作战平台协同对抗多目标态势分析问题进行研究;文献[8]提出了一种基于D-S证据理论的炮兵作

收稿日期: 2011-12-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N100604019); 国家自然科学基金资助项目(60774097)。

作者简介: 陈向勇(1983-),男,山东临沂人,东北大学博士研究生;井元伟(1956-),男,辽宁西丰人,东北大学教授,博士生导师。

战方案优选方法, 将具有主观不确定性信息的作战方案优选问题转化为普通的确定性决策问题。

受文献[2, 7—8]的启发, 本文利用 D—S 证据理论研究了一类不完全信息作战方案优选问题。通过采用证据理论对作战方案在不同属性下的焦元进行识别, 考虑属性权重计算每一个焦元的基本效用分配值, 基于信任函数和似然函数得到各个作战方案的效用区间并进行排序, 从而获得最优作战方案, 为研究作战指挥决策的不确定性问题奠定了基础。

1 预备知识

首先给出本文研究需要用到的 D—S 证据理论的基本概念。

定义 1^[2] 设 Θ 为识别框架, 基本信任分配函数 m 是一个从集合 2^Θ 到 $[0, 1]$ 的映射, A 表示识别框架 Θ 的任一子集, 记作 $A \subseteq \Theta$, 且满足

$$\left. \begin{aligned} m(\emptyset) &= 0, \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $m(A)$ 称为事件 A 的基本概率分配函数, 它表示证据支持命题 A 发生的程度。

定义 2^[2] 信任函数 Bel 是一个从集合 2^Θ 到 $[0, 1]$ 的映射, 如果 A 表示识别框架 Θ 的任一子集, 记作 $A \subseteq \Theta$, 且满足

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B), \quad (2)$$

则 $\text{Bel}(A)$ 称为 A 的信任函数(belief function), 表示证据对 A 为真的信任程度。

定义 3^[2] 设 Θ 是一个识别框架, Bel 为 Θ 上的信任函数, 则称由

$$\text{Pl}(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B), \quad \forall A, B \subseteq \Theta \quad (3)$$

所定义的函数 $\text{Pl}: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为 Θ 上的似然函数(plausibility function), $\forall A \subseteq \Theta$, $\text{Pl}(A)$ 称为 A 的似真度, 它表示不否定 A 的程度。 $\text{Pl}(A)$ 包含了所有与 A 相容的那些集合(命题)的基本可信度。

2 原理和方法

设定决策方提供的作战方案集为 $U = \{a_1, \dots, a_n\}$, 用于评估作战方案的属性集为 $C = \{C_1, \dots, C_m\}$, 其中, $C_j (j=1, \dots, m)$ 为决策属性。设定 V_{ij} 为决策方案 $a_i (i=1, \dots, n)$ 在决策属性 C_j 下的属性值。设定至少存在一个属性 C_j 使得对应的属性值 $V_{ij} (j=1, 2, \dots, m)$ 至少含有一个空缺值(用“*”表示), 对应的决策矩阵为 $V = (V_{ij})_{n \times m}$, 则

$$f: U \times C \rightarrow V; f(a_i, C_j) \in V_{ij}. \quad (4)$$

由此可知, 此类作战指挥决策问题称为带有不完全信息的作战方案优选问题。

本文要解决的问题是: 考虑不完全信息对作战决策的影响, 如何对备选方案集 $U = \{a_1, \dots, a_n\}$ 进行排序并选择。下面给出解决该问题的计算步骤。

步骤 1 构建残缺判断矩阵和各属性对应的焦元。由于不完全信息的影响, 决策者不能给出某些方案的属性值, 此时定义 $V = (V_{ij})_{n \times m}$ 为残缺判断矩阵(属性残缺值用“*”表示)。

设定所有方案集为一个识别框架 Θ , 定义对于 $\forall a_s, a_r \in \Theta$, 且 $a_s \neq a_r$, 如果

$$f(a_s, C_j) = f(a_r, C_j) \quad (5)$$

成立, 那么 a_s 和 a_r 属于同一焦元。由此可以确定所有作战决策属性 C_j 对应的焦元构成表示为 $A_k^j, j=1, \dots, m, k=1, \dots, t, t \leq 2^n$ 。

步骤 2 决策矩阵属性值的转换处理。首先确立作战方案的评价等级为 $G_j^l (l=1, \dots, L)$, 对应评价等级的效用值为 $u(G_j^l)$, 同时设定不同属性下等价于评价等级的定量(性)值为 $G(C_j) = \{g_j^1, \dots, g_j^L\}$, 由此根据隶属度函数的计算公式对决策矩阵的属性值进行转换处理, 具体计算过程如下:

1) 如果 $\forall V_{ij} \in [g_j^l, g_j^{l+1}]$ 为点值, 则 V_{ij} 对于 G_j^l 和 $G_j^{l+1} (l \in \{1, \dots, L-1\})$ 的隶属度表示为

$$\left. \begin{aligned} G_j^l(V_{ij}) &= \frac{g_j^{l+1} - V_{ij}}{g_j^{l+1} - g_j^l}, \\ G_j^{l+1}(V_{ij}) &= 1 - G_j^l(V_{ij}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2) 如果 V_{ij} 是一个区间值, 即 $V_{ij} = [a, b]$, 当满足 $g_j^l \leq a \leq b \leq g_j^{l+1}$ 时, 则可得

$$\left. \begin{aligned} G_j^l(V_{ij}) &= \frac{(g_j^{l+2} - g_j^{l+1}) + (b - a)}{2(g_j^{l+1} - g_j^l)}, \\ G_j^{l+1}(V_{ij}) &= 1 - G_j^l(V_{ij}). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3) 如果对于区间值 $V_{ij} = [a, b]$, 满足 $g_j^l \leq a \leq g_j^{l+1}, g_j^{l+1} \leq b \leq g_j^{l+2} (l \in \{1, \dots, L-2\})$ 时, 则可知属性值对于 G_j^l, G_j^{l+1} 和 G_j^{l+2} 的隶属度表示为

$$\left. \begin{aligned} G_j^l(V_{ij}) &= \frac{1}{2(b-a)} \frac{(g_j^{l+1} - a)^2}{(g_j^{l+1} - g_j^l)}, \\ G_j^{l+2}(V_{ij}) &= \frac{1}{2(b-a)} \frac{(b - g_j^{l+1})^2}{(g_j^{l+2} - g_j^{l+1})}, \end{aligned} \right\}$$

$$G_j^{l+1}(V_{ij}) = 1 - G_j^{l+2}(V_{ij}) - G_j^l(V_{ij}) .$$

4) 如果对于区间值 $V_{ij}=[a, b]$, 满足

$$g_j^l \leq a \leq g_j^{l+1}, g_j^p \leq b \leq g_j^{p+1} \\ (p, l \in \{1, \dots, L-1\}; p > l+1)$$

时, 属性值对于 G_j^l, \dots, G_j^p 的隶属度表示为

$$G_j^l(V_{ij}) = \frac{1}{2(b-a)} \frac{(g_j^{l+1}-a)^2}{(g_j^{l+1}-g_j^l)}, \\ G_j^{l+1}(V_{ij}) = \frac{1}{2(b-a)} \left[\left(\frac{a-g_j^l}{g_j^{l+1}-g_j^l} + 1 \right) \times \right. \\ \left. (g_j^{l+1}-a) + (g_j^{l+2}-g_j^{l+1}) \right], \\ G_j^{l+2}(V_{ij}) = \frac{1}{(b-a)} (g_j^{l+2}-g_j^{l+1}), \\ \vdots \\ G_j^{p-2}(V_{ij}) = \frac{1}{(b-a)} (g_j^{p-2}-g_j^{p-3}), \\ G_j^{p-1}(V_{ij}) = \frac{1}{2(b-a)} \left[\left(\frac{g_j^{p-1}-b}{g_j^p-g_j^{p-1}} + 1 \right) \times \right. \\ \left. (b-g_j^{p-1}) + (g_j^{p-1}-g_j^{p-2}) \right], \\ G_j^p(V_{ij}) = \frac{1}{2(b-a)} \frac{(b-g_j^{p-1})^2}{(g_j^p-g_j^{p-1})} .$$

步骤 3 确定每一个焦元的基本概率分配值.

设定各属性权重为 ω_j , 且满足 $0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^m \omega_j = 1$, 则各焦元的效用偏好程度的计算公式定义为

$$p(A_k^j) = \begin{cases} \omega_j V_{ij}, & A_k^j \neq \Theta; \\ 1, & A_k^j = \Theta. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, t; t \leq 2^n$. 具体计算过程如下:

1) 决策矩阵中属性值为定量值. 对于属性值为一个点值或区间值 V_{ij} 时, 如果 $g_j^l \leq a \leq b \leq g_j^{l+1} (l \in \{1, 2, \dots, \})$, 则该焦元的效用偏好程度 $p(A_k^j)$ 为

$$p(A_k^j) = \omega_j [G_j^l(V_{ij}) u(G_j^l) + G_j^{l+1}(V_{ij}) u(G_j^{l+1})] .$$

对于属性值为一个区间值 $V_{ij}=[a, b]$ 时, 如果 $g_j^l \leq a \leq g_j^{l+1}, g_j^{l+1} \leq b \leq g_j^{l+2} (l \in \{1, 2, \dots, \})$, 则该焦元的效用偏好程度为

$$p(A_k^j) = \omega_j [G_j^l(V_{ij}) u(G_j^l) + \dots + G_j^{l+2}(V_{ij}) u(G_j^{l+2})] .$$

对于属性值为区间值 $V_{ij}=[a, b]$ 时, 如果有 $g_j^l \leq a \leq g_j^{l+1}, g_j^p \leq b \leq g_j^{p+1} (p, l \in \{1, 2, \dots, \}; p > l+1)$, 则该焦元的效用偏好程度为

$$p(A_k^j) = \omega_j [G_j^l(V_{ij}) u(G_j^l) + \dots + G_j^p(V_{ij}) u(G_j^p)] .$$

2) 当属性值为定性值时, 该焦元的效用偏好程度为 $p(A_k^j) = \omega_j u(G_j^l)$, 由此确定在属性 G_j 下每个焦元 A_k^j 的基本概率分配值 $m_j(A_k^j)$ 为

$$m_j(A_k^j) = \frac{p(A_k^j)}{\sum_k p(A_k^j)} . \quad (9)$$

在定性值计算中, 当 $A_k^j = \Theta$ 时, 定义 $p(A_k^j) = 1$.

步骤 4 确定综合属性下所有焦元交集 A 的基本概率函数分配值 $m(A)$. 由步骤 3 可知, $m_j(j=1, \dots, m)$ 是同一识别框架 Θ 上的基本信任分配函数. 当 $m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_m$ 存在时, 根据多个证据的合成规则, 利用正交和运算将多个基本概率分配值 $m_j(A_k^j)$ 合成为一个基本概率分配值 $m(A)$. 具体的合成规则如下:

$$m(A) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_m)(A) = \begin{cases} \sum_{\substack{A_k^1, \dots, A_k^m \in \Theta \\ A_k^1 \cap \dots \cap A_k^m = A}} \prod_{1 \leq j \leq m} m_j(A_k^j) \\ \frac{1}{1-K}, & A \neq \emptyset; \\ 0, & A = \emptyset. \end{cases} \quad (10)$$

式中

$$K = \sum_{\substack{A_k^1, \dots, A_k^m \in \Theta \\ A_k^1 \cap \dots \cap A_k^m = \emptyset}} \prod_{1 \leq j \leq m} m_j(A_k^j) \quad (11)$$

反映了各个证据间的冲突程度, 系数 K 的值越大, 说明证据的冲突程度也越大. $1/(1-K)$ 称为正则化因子, 表明在合成时将非 0 的信任赋给空集 \emptyset , 如果 $K < 1$ 不成立, 则 $m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_m$ 不存在.

步骤 5 构造决策方案的效用区间. 根据步骤 4 的求解结果来确定方案 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的 $\text{Bel}(\{a_i\})$ 和 $\text{Pl}(\{a_i\})$ 值分别为

$$\left. \begin{aligned} \text{Bel}(\{a_i\}) &= \sum_{A=\{a_i\}} m(A), \\ \text{Pl}(\{a_i\}) &= \sum_{a_i \in A} m(A) (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

依据式 (12), a_i 的信任区间为 $[\text{Bel}(\{a_i\}), \text{Pl}(\{a_i\})]$. 对应两个端点由 a_i 的 $u_{\min}(a_i)$ 和 $u_{\max}(a_i)$ 构成, 即

$$\left. \begin{aligned} u_{\min}(a_i) &= \text{Bel}(\{a_i\}) = \sum_{A=\{a_i\}} m(A), \\ u_{\max}(a_i) &= \text{Pl}(\{a_i\}) = \sum_{a_i \in A} m(A). \end{aligned} \right\}$$

(13)

运用式(13),得到不完全决策矩阵下的每个决策方案的效用区间 $[u_{\min}(a_i), u_{\max}(a_i)]$ 。

步骤 6 方案排序.首先对于 $\forall a_s, a_r \in \Theta$,如果 a_s 和 a_r 的信任区间为 $[\text{Bel}(\{a_s\}), \text{Pl}(\{a_s\})]$ 和 $[\text{Bel}(\{a_r\}), \text{Pl}(\{a_r\})]$,则 a_l 优于 a_k 的程度为

$$P(a_l > a_k) = \frac{\max[0, \text{Pl}(\{a_l\}) - \text{Bel}(\{a_k\})] - \max[0, \text{Bel}(\{a_l\}) - \text{Pl}(\{a_k\})]}{[\text{Pl}(\{a_l\}) - \text{Bel}(\{a_l\})] + [\text{Pl}(\{a_k\}) - \text{Bel}(\{a_k\})]}.$$

(14)

其中, $P(a_l > a_k) \in [0, 1]$ 。

决策方案排序规则如下:当 $P(a_l > a_k) > 0.5$,则 a_l 优于 a_k (记为 $a_l \succ a_k$);当 $P(a_l > a_k) < 0.5$,则 a_l 劣于 a_k (记为 $a_l \prec a_k$);当 $P(a_l > a_k) = 0.5$,则 a_l 与 a_k 没有差别(记为 $a_l \approx a_k$);对于任意 3 个方案 a_l, a_k, a_q ,如果 $P(a_l > a_k) > 0.5, P(a_k > a_q) > 0.5$,则 a_l 优于 a_k ,并且 a_k 优于 a_q (记为 $a_l \succ a_k \succ a_q$)。由此可以得到所有决策方案 a_i ($i=1, 2, \dots, n$)的排序。

3 应用算例

以一类炮兵作战方案优选问题为例,作战决

策者欲对 5 种炮兵作战方案进行评价.决策者根据 5 个属性,即总的资源消耗(C_1)、所需兵力大小(C_2)、炮弹平均发射次数(C_3)、完成任务的概率(C_4)和反应能力(C_5),进行评价和选择.然而由于作战经验不足,决策者不能够完全提供各个方案在某些属性下的决策偏好值,这样决策矩阵含有空缺值.由此,给出带有不完全信息的决策矩阵(见表 1)。

设定作战方案集为该命题的一个识别框架 Θ ,即 $\Theta = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$,依据步骤 1 和表 1 可知属性 C_j ($j=1, 2, \dots, 5$)下的焦元 A_k^j 的构成: A_k^1 为 $\{a_1\}, \{a_2\}, \{a_4\}, \{a_5\}$ 和 Θ ; A_k^2 为

表 1 不完全信息下的决策矩阵

Table 1 Decision matrix with incomplete information

方案	资源消耗/万元	兵力大小/人	炮弹平均发射次数/(万发·h ⁻¹)	完成任务概率	反应能力
a_1	1 460	7 250	[1.30, 1.40]	*	正常
a_2	[1 250, 1 350]	6 050	1.66	0.85	*
a_3	*	7 800	1.48	0.70	迅速
a_4	950	7 250	*	0.85	较慢
a_5	1 140	*	1.66	0.55	迅速

$\{a_1, a_4\}, \{a_2\}, \{a_3\}$ 和 Θ ; A_k^3 为 $\{a_1\}, \{a_2, a_5\}, \{a_3\}$ 和 Θ ; A_k^4 为 $\{a_2, a_4\}, \{a_3\}, \{a_5\}$ 和 Θ ; A_k^5 为 $\{a_1\}, \{a_3, a_5\}, \{a_4\}$ 和 Θ 。

设定方案的评价等级为: G_j^1 , 不好; G_j^2 , 一般; G_j^3 , 好; G_j^4 , 很好; G_j^5 , 非常好.对应评价等级的效用值为

$$u(G_j^1) = 0, u(G_j^2) = 0.25, u(G_j^3) = 0.5,$$

$$u(G_j^4) = 0.75, u(G_j^5) = 1.$$

设 C_j 的权重为 $\omega = (0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.10)$,同时假设不同属性下等价于 G_j^l 的定量(性)值分别为:

$$G(C_1) = \{1\ 600, 1\ 400, 1\ 200, 1\ 000, 800\},$$

$$G(C_2) = \{8\ 000, 7\ 500, 7\ 000, 6\ 500, 6\ 000\},$$

$$G(C_3) = \{1.8, 1.6, 1.4, 1.2, 1.0\},$$

$$G(C_4) = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\},$$

$$G(C_5) = \{\text{迟缓, 较慢, 正常, 快速, 敏捷}\}.$$

根据步骤 2~步骤 5, 可得每个决策方案 a_i 的 $\text{Bel}(\{a_i\})$ 和 $\text{Pl}(\{a_i\})$ 值(见表 2)。

表 2 方案的 $\text{Bel}(\{a_i\})$ 和 $\text{Pl}(\{a_i\})$ 值

Table 2 Values of $\text{Bel}(\{a_i\})$ and $\text{Pl}(\{a_i\})$

方案	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\text{Bel}(\{a_i\})$	0.107 8	0.147 1	0.129 6	0.096 2	0.115 5
$\text{Pl}(\{a_i\})$	0.376 5	0.460 0	0.346 8	0.458 8	0.354 2

依据表 2 和步骤 6, 对作战方案效用偏好区间进行比较, 得到:

$$P(a_2 > a_4) = 0.53 > 0.5 \Rightarrow a_2 \succ a_4;$$

$$P(a_1 > a_4) = 0.44 < 0.5 \Rightarrow a_1 \prec a_4;$$

$$P(a_1 > a_3) = 0.52 > 0.5 \Rightarrow a_1 \succ a_3;$$

$$P(a_3 > a_5) = 0.51 > 0.5 \Rightarrow a_3 \succ a_5.$$

由此, 本文研究的作战方案的最终排序为 $a_2 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_3 \succ a_5$, 最优方案是 a_2 。

4 结 语

本文运用 D—S 证据理论,给出了一种用于作战方案优选的多属性决策方法。该方法根据决策矩阵中属性值的特征对不同属性下焦元进行识别,考虑属性的权重确定每个焦元的基本概率分配值;运用 D—S 证据组合方法获得所有决策方案的效用区间并进行排序,从而完成作战方案的优选。该方法有效地分析了作战方案的不确定性对作战决策的影响,从一个全新的角度揭示出蕴含在数据中的作战信息,对从整体上把握作战决策具有借鉴意义,为解决作战方案优选问题提供了一个新的思路,具有较好的应用价值。

参考文献:

[1] Chen X Y, Jing Y W, Zheng Y, et al. An approach to warfare command decision making with uncertainty based on set pair analysis[C]//Proceedings of the 22nd Chinese Control and Decision Conference. Xuzhou,China University of Mining and Technology, 2010;1354—1358.

[2] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton:

Princeton University Press, 1976.

[3] Guan J W, Bell D A. Evidence theory and its applications [M]. New York: North-Holland, 1991.

[4] Xu D L, Yang J B, Wang Y M. The evidential reasoning approach for multi-attribute decision analysis under interval uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006,174(3);1914—1943.

[5] Beynon M, Curry B, Morgan P. The Dempster-Shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modeling[J]. *Omega*, 2000,28(1);37—50.

[6] Yang J B, Xu D L. On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 2002,32(3);289—304.

[7] Wei X X, Duan H B, Wang Y R. Hybrid game theory and D-S evidence approach to multiple UCAVs cooperative air combat decision[J]. *Lecture Notes in Computer Science; Part III*, 2009,5553;236—246.

[8] 王超,王西田,张道延. 基于 D—S 证据理论的炮兵作战方案优选[J]. *兵工自动化*, 2008,7(6);32—35.

(Wang Chao, Wang Xi-tian, Zhang Dao-yan. Optimizing operational schemes of artillery based on D-S theory [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2008,7(6);32—35.)

(上接第 1068 页)

参考文献:

[1] Chen X S, Li Q, Fei S M. Supervisory expert control for ball mill grinding circuits[J]. *Expert System with Application*, 2008,34(3);1877—1885.

[2] Li H X, Guan S P. Hybrid intelligent control strategy. supervising a DCS-controlled batch process[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001,21(3);36—48.

[3] Lu Y Z, Min H, Xu C W. Fuzzy modeling and expert optimization control for industrial process [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1997,5(1);2—12.

[4] Chai T Y, Tan M H. Intelligent optimization control for laminar cooling [C]//Proceedings of the 15th IFAC World Congress. Barcelona, 2002;181—186.

[5] Wang J, Gao W Z, Wang F L. Knowledge-based controller

with fuzzy reasoning used in process control[J]. *International Journal of Systems Science*, 1997,28(6);579—585.

[6] 刘金鑫,柴天佑,白锐. 赤铁矿强磁选过程综合自动化系统 [J]. *控制工程*, 2008,15(5);583—586.

(Liu Jin-xin, Chai Tian-you, Bai Rui. Integrated automation system for high intensity magnetic separating process of hematite ore [J]. *Control Engineering of China*, 2008, 15 (5);583—586.)

[7] Liu J X, Liu J L, Ding J L, et al. Intelligent control for operation of iron ore magnetic separating process [C]//World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, 2008;2798—2803.

[8] Zhou P, Chai T Y, Wang H. Intelligent optimal-setting control for grinding circuits of mineral processing process[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009,6(4);730—743.