

基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型及其应用



陈玉金 徐吉辉 史佳辉 刘宇

空军工程大学装备管理与无人机工程学院 西安 710051

(ivan@mail.dlut.edu.cn)

摘要 决策者本身的能力限制以及被评价对象存在的不确定性,导致三支决策模型在处理信息模糊以及由主观认知概念模糊而产生犹豫的决策问题时表现力不足。为解决上述问题,文中引入直觉犹豫模糊集建立相应的三支决策模型。首先,考虑到直觉犹豫模糊集包含多个隶属度的特性,建立单一直觉模糊数的三支决策方法。基于此,在风险代价矩阵确定的情况下,以直觉犹豫模糊集为论域建立基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型。然后,考虑到特定应用环境的语义解释,形成了乐观、悲观以及少数服从多数的决策规则。最后,结合航空领域的安全风险评估方法,给出了基于双评价函数的航空安全风险三支决策方法,并通过算例说明所提模型的具体应用过程。

关键词 决策粗糙集;三支决策;直觉犹豫模糊集;风险分析

中图分类号 TP181

Three-way Decision Models Based on Intuitionistic Hesitant Fuzzy Sets and Its Applications

CHEN Yu-jin, XU Ji-hui, SHI Jia-hui and LIU Yu

College of Equipment Management & UAV Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China

Abstract Due to the ability limitations of decision makers and the uncertainty of the objects being evaluated, the three-way decision models have insufficient expressive power in dealing with hesitant and fuzzy decision problems caused by fuzzy information and subjective cognitive concepts. In order to solve the above shortcomings, the intuitionistic fuzzy set is introduced to establish the corresponding three-way decision models. Firstly, considering that intuitionistic hesitant fuzzy set contains the characteristics of multiple membership degrees, the three-way decision method based on single intuitionistic fuzzy number is established in the case of determining the risk cost matrix. On this basis, three-way decision models based on intuitionistic hesitation fuzzy sets are established by using intuitionistic hesitation fuzzy sets as the domain. Then, taking into account the semantic interpretation of particular environment, decision-making rules based on optimism, pessimism, and minority obedience are formed. Finally, combining with the safety risk assessment methods in the aviation field, three-way decision methods of aviation safety risk based on double evaluation function are presented, and the concrete application process of the model is illustrated by an example.

Keywords Decision-theoretic rough sets, Three-way decision method, Intuition hesitant fuzzy sets, Risk analysis

1 引言

三支决策模型是加拿大学者 YAO^[1-3] 于 2009 年提出的一种包含风险语义的决策模型。为了解决信息系统不完备、不精确时难以简单给出承诺的问题,三支决策模型在传统接受/拒绝二支决策的基础上,借鉴决策粗糙集风险代价和边界域的基本思想,引入了第三支决策——延迟决策。延迟决策采取非承诺措施,将承诺可能带来的风险的发生概率降至最低^[4]。该模型在高度总结朴素三支决策思想的基础上,发展决策粗糙集理论,是决策粗糙集在实际应用层面的一种语义解释^[5]。

目前,对三支决策理论模型扩展的研究正日益受到研究者的关注。从模糊风险代价的角度,文献[6]、文献[7]、文献[8-9]分别引入三角模糊数、区间值、直觉模糊集等概念,建立了不同应用环境下包含模糊风险语义的三支决策模型。文献[10]以决策粗糙集为基础,建立了基于对偶犹豫模糊信息的三支决策模型。文献[8-9]、文献[11]、文献[12]、文献[13]的共同点在于引入了直觉模糊的概念建立模型,区别在于结合方式不同:文献[8-9]用直觉模糊描述模糊的风险代价,表达人们对风险认知和决策的模糊性;文献[11]以直觉模糊集为论域建立模型,将犹豫度作为纠偏参数,凸显了非隶属度在决策中的作用;文献[12]提出了一种基于直觉模糊可能性分布

到稿日期:2019-08-09 返修日期:2019-11-18 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金(71701210)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (71701210).

通信作者:徐吉辉(changan6018@163.com)

的测度;文献[13]提出了多伴随直觉模糊粗糙集。此外,文献[14]、文献[15]、文献[16]分别将证据理论、概率图、粒度重要度与三支决策模型相结合,从其他侧面很好地发展了模糊语义下的三支决策模型。

在具体的应用实践中,决策者本身的能力限制以及被评价对象存在的不确定性,导致人们往往会在几个“似是而非”的结果上犹豫不决。因此,对人们认知的描述不能简单地应用“亦此亦彼”“非此非彼”的模糊概念进行表达。为表达这种由于主观认知概念模糊而产生的犹豫,本文引入直觉犹豫模糊集建立了三支决策模型。三支决策模型将直觉模糊逻辑、犹豫模糊逻辑相结合,同时考虑了“亦此亦彼”“非此非彼”“似是而非”的模糊概念,在处理信息不确定情况下的决策问题时更具有表现力,从而能够更加细腻地表达对决策承诺的模糊认识。本文讨论的是风险代价确定但存在多种可能的隶属度和非隶属度概率的风险决策问题。同时,本文根据实际语义解释,形成了乐观、悲观以及少数服从多数的决策规则。最后通过实例验证了该模型的有效性。

2 基本知识

2.1 经典三支决策模型

设信息系统为一个三元组 $\langle U, AT, f \rangle$,其中论域 U 是所有对象的有限非空集合, AT 是所有属性的有限非空集合, f 表示 U 与 AT 之间的映射或者关系。根据贝叶斯风险决策过程,构造状态空间 $\Theta = \{X, \sim X\}$ 表示对象 x 是否属于集合 X ,决策动作集 $A = \{a_P, a_B, a_N\}$ 表示对象 x 进行分类决策时采取的行动。 a_P, a_B, a_N 分别表示对象确定属于、可能属于、确定不属于集合 X 的行动,不同状态下对应的3种不同行动的代价函数如表1所列。

表1 不同状态下不同行动的代价函数

Table 1 Cost functions of different actions in different states

	X	$\sim X$
a_P	λ_{PP}	λ_{PN}
a_B	λ_{BP}	λ_{BN}
a_N	λ_{NP}	λ_{NN}

当一个对象 x 属于集合 X 时,采取 a_P, a_B, a_N 决策时所需的代价记为 $\lambda_{PP}, \lambda_{BP}, \lambda_{NP}$;当一个对象 x 不属于集合 X 时,采取 a_P, a_B, a_N 决策时所需的代价记为 $\lambda_{PN}, \lambda_{BN}, \lambda_{NN}$; $P(X|[x])$ 表示对象 x 所在的等价类属于集合 X 的条件概率。对于特定对象 x ,采取一个决策行动时的期望代价 $R(a_i|[x])$ 表示如下:

$$\begin{aligned} R(a_P|[x]) &= \lambda_{PP}P(X|[x]) + \lambda_{PN}P(\sim X|[x]) \\ R(a_B|[x]) &= \lambda_{BP}P(X|[x]) + \lambda_{BN}P(\sim X|[x]) \\ R(a_N|[x]) &= \lambda_{NP}P(X|[x]) + \lambda_{NN}P(\sim X|[x]) \end{aligned} \quad (1)$$

那么,由贝叶斯风险决策过程给出最小代价决策规则如下:

(P)如果 $R(a_P|[x]) \leq R(a_B|[x])$ 且 $R(a_P|[x]) \leq R(a_N|[x])$ 成立,那么 $x \in POS(X)$ 。

(B)如果 $R(a_B|[x]) \leq R(a_N|[x])$ 且 $R(a_B|[x]) \leq R(a_P|[x])$ 成立,那么 $x \in BND(X)$ 。

(N)如果 $R(a_N|[x]) \leq R(a_P|[x])$ 且 $R(a_N|[x]) \leq R(a_B|[x])$

成立,那么 $x \in NEG(X)$ 。

考虑以下两个原因:1) $P(X|[x]) + P(\sim X|[x]) = 1$; 2) $\lambda_{PP} \leq \lambda_{BP} \leq \lambda_{NP}, \lambda_{NN} \leq \lambda_{BN} \leq \lambda_{PN}$ 。得到简化的最小代价决策规则:

(P)如果 $P(X|[x]) \geq \alpha$ 且 $P(X|[x]) \geq \gamma$ 成立,那么 $x \in POS(X)$ 。

(B)如果 $P(X|[x]) \leq \alpha$ 且 $P(X|[x]) \geq \beta$ 成立,那么 $x \in BND(X)$ 。

(N)如果 $P(X|[x]) \leq \beta$ 且 $P(X|[x]) \leq \gamma$ 成立,那么 $x \in NEG(X)$ 。

其中:

$$\alpha = \frac{\lambda_{PN} - \lambda_{BN}}{(\lambda_{PN} - \lambda_{BN}) + (\lambda_{BP} - \lambda_{PP})}$$

$$\beta = \frac{\lambda_{BN} - \lambda_{NN}}{(\lambda_{BN} - \lambda_{NN}) + (\lambda_{NP} - \lambda_{BP})}$$

$$\gamma = \frac{\lambda_{PN} - \lambda_{NN}}{(\lambda_{PN} - \lambda_{NN}) + (\lambda_{NP} - \lambda_{PP})}$$

2.2 直觉犹豫模糊集

定义1 设 U 为非空论域,则称 $\tilde{B} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{B}}(x), \nu_{\tilde{B}}(x) \rangle | x \in U \}$ 为 U 的直觉模糊集。其中, $\mu_{\tilde{B}}(x)$ 和 $\nu_{\tilde{B}}(x)$ 表示元素 x 对于集合 \tilde{B} 的隶属度和非隶属度。对于任意 $x \in U$,都有 $\mu_{\tilde{B}}(x): U \rightarrow [0, 1], \nu_{\tilde{B}}(x): U \rightarrow [0, 1]$ 且 $0 \leq \mu_{\tilde{B}}(x) + \nu_{\tilde{B}}(x) \leq 1$ 。设 $\pi_{\tilde{B}}(x)$ 为元素 x 对于集合 \tilde{B} 的犹豫度,且 $\pi_{\tilde{B}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{B}}(x) - \nu_{\tilde{B}}(x)$ 。

定义2 设 U 为非空论域,则称 $\tilde{E} = \{ \langle x, h_{\tilde{E}}(x) \rangle | x \in U \}$ 为 U 的直觉犹豫模糊集。其中, $h_{\tilde{E}}(x)$ 表示元素 x 隶属于集合 \tilde{E} 的有限个可能的隶属度和非隶属度的集合。如果 $b \in h_{\tilde{E}}(x)$,那么 b 是一个直觉模糊数,即 $b = \langle \mu_b, \nu_b \rangle$ 。

3 基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型

3.1 基于单个直觉模糊数的三支决策模型

在直觉犹豫模糊集 U 中,每个元素 x 的决策动作都可以通过有限个可能的三元组进行描述。这些三元组表征的是决策者对元素 x 采取决策动作时能够给出的所有可能结果。对于同一元素 x ,所有三元组相互独立。每个三元组包含唯一确定的隶属度、非隶属度和犹豫度。因此,要建立基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型,首先需要讨论单个三元组(直觉模糊数)对元素 x 的影响。

由文献[11]得,若直接利用犹豫度建立三描述模型(隶属描述、非隶属描述、犹豫描述),犹豫决策产生的代价会在推导过程中被消元,不能达到提高决策精度的目的。因此,将犹豫度 $\epsilon (0 \leq \epsilon < 1)$ 作为独立的纠偏参数,建立三支决策模型。每个直觉犹豫模糊数由 n 个直觉模糊数表示,即 $b_1, b_2, \dots, b_n (n \geq 1), b_i = \langle \mu_i(x), \nu_i(x) \rangle$ 。

根据贝叶斯风险决策过程,构造状态空间 $\Theta = \{X, X^R\}$ 表示对象 x 是否隶属于集合 X ,且满足 $X \cup X^R \subseteq U$ 。当且仅当 $\mu_i + \nu_i = 1$ 时, $X \cup X^R = U$ 成立。那么,特定对象 x 对于第 i 个直觉模糊数 $b_i = \langle \mu_i(x), \nu_i(x) \rangle$,采取接受隶属、延迟接受

隶属、拒绝接受隶属于集合 X 的行动的期望代价 $R(a_i|[x])$ 表示如下:

$$\begin{cases} R_i(a_P|[x]) = \lambda_{PP}\mu_i(x) + \lambda_{PN}\nu_i(x) \\ R_i(a_B|[x]) = \lambda_{BP}\mu_i(x) + \lambda_{BN}\nu_i(x) \\ R_i(a_N|[x]) = \lambda_{NP}\mu_i(x) + \lambda_{NN}\nu_i(x) \end{cases} \quad (2)$$

那么,由贝叶斯风险决策过程,给出对象 x 对于第 i 个直觉模糊数的最小代价决策规则如下:

(P1) 如果 $R_i(a_P|[x]) \leq R_i(a_B|[x])$ 且 $R_i(a_P|[x]) \leq R_i(a_N|[x])$ 成立,那么 x 接受隶属于 X 的决策行动。

(B1) 如果 $R_i(a_B|[x]) \leq R_i(a_N|[x])$ 且 $R_i(a_B|[x]) \leq R_i(a_P|[x])$ 成立,那么 x 延迟接受隶属于 X 的决策行动。

(N1) 如果 $R_i(a_N|[x]) \leq R_i(a_P|[x])$ 且 $R_i(a_N|[x]) \leq R_i(a_B|[x])$ 成立,那么 x 拒绝接受隶属于 X 的决策行动。

考虑以下两方面原因:1) $\mu_i(x) + \nu_i(x) + \epsilon_i(x) = 1$;2) 根据实际语义,对于实际上隶属于 X 的对象 x 而言,采取接受隶属决策的代价最低,延迟接受次之,拒绝接受最高,即 $\lambda_{PP} \leq \lambda_{BP} \leq \lambda_{NP}$,反之,对于实际上不隶属于 X 的对象 x 而言,采取拒绝接受隶属决策的代价最低,延迟接受次之,接受最高,即 $\lambda_{NN} \leq \lambda_{BN} \leq \lambda_{PN}$ 。对上述最小代价决策规则进行如下简化,以接受隶属决策(P1)为例。

$$\begin{cases} \mu_i(x) + \nu_i(x) + \epsilon_i(x) = 1 \\ R_i(a_P|[x]) \leq R_i(a_B|[x]) \\ R_i(a_P|[x]) \leq R_i(a_N|[x]) \\ R_i(a_P|[x]) = \lambda_{PP}\mu_i(x) + \lambda_{PN}\nu_i(x) \\ R_i(a_B|[x]) = \lambda_{BP}\mu_i(x) + \lambda_{BN}\nu_i(x) \\ R_i(a_N|[x]) = \lambda_{NP}\mu_i(x) + \lambda_{NN}\nu_i(x) \\ \lambda_{PP} \leq \lambda_{BP} \leq \lambda_{NP} \\ \lambda_{NN} \leq \lambda_{BN} \leq \lambda_{PN} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \nu_i(x) = 1 - \mu_i(x) - \epsilon_i(x) \\ \lambda_{PP}\mu_i(x) + \lambda_{PN}\nu_i(x) \leq \lambda_{BP}\mu_i(x) + \lambda_{BN}\nu_i(x) \\ \lambda_{PP}\mu_i(x) + \lambda_{PN}\nu_i(x) \leq \lambda_{NP}\mu_i(x) + \lambda_{NN}\nu_i(x) \\ \lambda_{PP} \leq \lambda_{BP} \leq \lambda_{NP} \\ \lambda_{NN} \leq \lambda_{BN} \leq \lambda_{PN} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} (\lambda_{PP} - \lambda_{BP})\mu_i(x) \leq (\lambda_{BN} - \lambda_{PN})(1 - \mu_i(x) - \epsilon_i(x)) \\ (\lambda_{PP} - \lambda_{NP})\mu_i(x) \leq (\lambda_{NN} - \lambda_{PN})(1 - \mu_i(x) - \epsilon_i(x)) \\ \lambda_{PP} \leq \lambda_{BP} \leq \lambda_{NP} \\ \lambda_{NN} \leq \lambda_{BN} \leq \lambda_{PN} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \mu_i(x) \geq \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}{(\lambda_{BP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{BN})} \\ \mu_i(x) \geq \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{NN})} \end{cases}$$

那么,接受隶属决策(P1)可写为:

(P1) 如果 $\mu_i(x) \geq \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}{(\lambda_{BP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}$ 且 $\mu_i(x) \geq$

$\frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{NN})}$ 成立,那么 x 接受隶属于 X 的决策行动。

类似地,延迟接受隶属决策(B1)、拒绝接受隶属决策(N1)可写为:

(B1) 如果 $\mu_i(x) \leq \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}{(\lambda_{BP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}$ 且 $\mu_i(x) \geq$

$\frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{BP}) + (\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}$ 成立,那么 x 延迟接受隶属于 X 的决策行动。

(N1) 如果 $\mu_i(x) \leq \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{BP}) + (\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}$ 且 $\mu_i(x) \leq$

$\frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{NN})}$ 成立,那么 x 拒绝接受隶属于 X 的决策行动。

令:

$$\alpha_i(x) = \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}{(\lambda_{BP} - \lambda_{PP}) + (\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}$$

$$\beta_i(x) = \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{BP}) + (\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}$$

$$\gamma_i(x) = \frac{(1 - \epsilon_i(x))(\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{NP} - \lambda_{BP}) + (\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}$$

为保证(B1)有明确的解空间,易得 $\alpha_i(x) > \beta_i(x)$,且 $0 \leq$

$\epsilon_i(x) < 1$,故可得 $\frac{\lambda_{BP} - \lambda_{PP}}{\lambda_{PN} - \lambda_{BN}} < \frac{\lambda_{NP} - \lambda_{BP}}{\lambda_{BN} - \lambda_{NN}}$ 。又因为 $\frac{a}{b} < \frac{c}{d} \Rightarrow$

$\frac{a}{b} < \frac{a+c}{b+d} < \frac{c}{d}$ ($a, b, c, d > 0$),可得 $\frac{\lambda_{BP} - \lambda_{PP}}{\lambda_{PN} - \lambda_{BN}} < \frac{\lambda_{NP} - \lambda_{BP}}{\lambda_{PN} - \lambda_{NN}}$

,即 $0 \leq \beta_i(x) < \gamma_i(x) < \alpha_i(x) \leq 1$ 。那么,决策规则

(P1)-(N1)可进一步简化为:

(P1) 如果 $\mu_i(x) \geq \alpha_i(x)$ 成立,那么 x 接受隶属于 X 的决策行动。

(B1) 如果 $\beta_i(x) < \mu_i(x) < \alpha_i(x)$ 成立,那么 x 延迟接受隶属于 X 的决策行动。

(N1) 如果 $\mu_i(x) \leq \beta_i(x)$ 成立,那么 x 拒绝接受隶属于 X 的决策行动。

令 $\alpha_i(x)$ 表示特定对象 x 依据第 i 个直觉模糊数采取的行动,那么:

$$\alpha_i(x) = \begin{cases} a_P, & \mu_i(x) \in [\alpha_i(x), 1] \\ a_B, & \mu_i(x) \in (\beta_i(x), 1\alpha_i(x)) \\ a_N, & \mu_i(x) \in [0, \beta_i(x)] \end{cases} \quad (3)$$

下面讨论纠偏参数 $\epsilon_i(x)$ 对上述三支决策模型的影响。对于特定对象 x 和特定直觉模糊数 $b_i, \epsilon_i(x)$ 是唯一确定的。当 $\epsilon_i(x) = 0$ 时,不存在犹豫度,决策行动直接由隶属度、非隶属度决定,各决策域边界明确且清晰。随着 $\epsilon_i(x)$ 变大, α 和 β 变小,论域 U 中的对象 x 将更多选择接受隶属于 X 的决策行动,不轻易选择拒绝接受隶属于 X 的决策行动。由于 $BND_i(X)$ 的解空间大小等于 $\beta - \alpha$,即 $(1 - \epsilon_i(x))$

$\left(\frac{1}{\frac{\lambda_{BP} - \lambda_{PP}}{\lambda_{PN} - \lambda_{BN}} + 1} - \frac{1}{\frac{\lambda_{NP} - \lambda_{BP}}{\lambda_{BN} - \lambda_{NN}} + 1} \right)$ 随着 $\epsilon_i(x)$ 变大,对象 x 延迟

接受隶属于 X 的可能性也在减小。换言之, $POS_i(X)$ 解空间的生长速率大于 $NEG_i(X)$ 解空间的缩小速率。推至极限,当 ϵ 无限趋近于 1 时,任意对象 x 都会选择接受隶属于 X 的决策行动。

3.2 基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型

在 3.1 节的基础上,本节讨论基于直觉犹豫模糊集的三

支决策模型。特定对象 x 对于直觉模糊数 b_i 存在确定的决策行动:接受隶属的决策行动 a_P 、延迟接受隶属的决策行动 a_B 、拒绝接受隶属的决策行动 a_N 。那么,对于任一对象,对象 x 对应的直觉模糊数中都存在一定数量的直觉模糊数接受隶属的决策行动,则采取隶属决策(P2),即:

$$(P2) \text{ 如果 } \frac{|\{i|a_i(x)=a_P, 1 \leq i \leq n\}|}{n} \geq \theta \text{ 成立, 那么 } x \text{ 接受隶属属于 } X \text{ 的决策行动。}$$

在(P2)的基础上,对象对应的直觉模糊数中存在一定数量的直觉模糊数接受隶属/延迟接受隶属的决策行动,则采取隶属决策(B2),即:

$$(B2) \text{ 如果 } \frac{|\{i|(a_i(x)=a_P) \vee (a_i(x)=a_B), 1 \leq i \leq n\}|}{n} \geq \theta$$

且 $\frac{|\{i|a_i(x)=a_P, 1 \leq i \leq n\}|}{n} < \theta$ 成立,那么 x 延迟接受隶属于 X 的决策行动。

不满足(P2)和(B2)规则,则采取隶属决策(N2),即:

$$(N2) \text{ 如果 } \frac{|\{i|(a_i(x)=a_P) \vee (a_i(x)=a_B), 1 \leq i \leq n\}|}{n} <$$

θ ,那么 x 拒绝接受隶属于 X 的决策行动。

其中, $|\cdot|$ 表示集合 \cdot 中元素的个数; $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ 为可调节参数,以提供多样化、满足不同决策者决策偏好的决策方案。上述方案中,当 $n=1$ 时,这与(P1)-(N1)规则等价。

令 $a(x)$ 表示特定对象 x 依据直觉犹豫模糊数采取的行动,那么:

$$a(x) = \begin{cases} a_P, & \frac{|\{i|a_i(x)=a_P, 1 \leq i \leq n\}|}{n} \geq \theta \\ a_B, & \left(\frac{|\{i|(a_i(x)=a_P) \vee (a_i(x)=a_B), 1 \leq i \leq n\}|}{n} \geq \theta \right) \\ & \wedge \left(\frac{|\{i|a_i(x)=a_P, 1 \leq i \leq n\}|}{n} < \theta \right) \\ a_N, & \frac{|\{i|(a_i(x)=a_P) \vee (a_i(x)=a_B), 1 \leq i \leq n\}|}{n} < \theta \end{cases} \quad (4)$$

下面对可调节参数 θ 的取值进行讨论。当 $\theta=0$ 时,决策规则(P2)的语义变为只要存在一个直觉模糊数满足接受隶属决策即认为对象 x 接受隶属决策,是最宽松的决策方式,记为乐观决策方案。那么此时,决策规则可记为:

(P2)如果 $\exists a_i$ 满足 $a_i = a_P$,那么 x 接受隶属属于 X 的决策行动。

(B2)如果 $\exists a_i$ 满足 $a_i = a_B$ 且 $\forall a_i$ 满足 $a_i \neq a_P$,那么 x 延迟接受隶属属于 X 的决策行动。

(N2)如果 $\forall a_i$ 满足 $a_i = a_N$,那么 x 拒绝接受隶属属于 X 的决策行动。

即:

$$a(x) = \begin{cases} a_P, & \exists a_i, a_i = a_P \\ a_B, & (\exists a_i, a_i = a_B) \wedge (\forall a_i, a_i \neq a_P) \\ a_N, & \forall a_i, a_i = a_N \end{cases} \quad (5)$$

当 $\theta=1$ 时,决策规则(P2)的语义变为只有所有直觉模糊

数满足接受隶属决策时,对象 x 才接受隶属决策,是最严格的决策方式,记为悲观决策方案。那么此时,决策规则可记为:

(P2)如果 $\forall a_i$ 满足 $a_i = a_P$,那么 x 接受隶属属于 X 的决策行动。

(B2)如果 $\exists a_i$ 满足 $a_i \neq a_P$ 且 $\forall a_i$ 满足 $a_i \neq a_N$,那么 x 延迟接受隶属属于 X 的决策行动。

(N2)如果 $\exists a_i$ 满足 $a_i = a_N$,那么 x 拒绝接受隶属属于 X 的决策行动。

即:

$$a(x) = \begin{cases} a_P, & \forall a_i, a_i = a_P \\ a_B, & (\exists a_i, a_i \neq a_B) \wedge (\forall a_i, a_i \neq a_N) \\ a_N, & \exists a_i, a_i = a_N \end{cases} \quad (6)$$

当 $\theta < 0.5$ 时,决策方案相对宽松。当 $\theta \geq 0.5$ 时,决策规则(P2)的语义变为存在过半数的直觉模糊数满足接受隶属决策即认为对象接受隶属决策,是按照“少数服从多数”逻辑建立的决策方式,相对严格,记为投票决策方案。

4 基于双评价函数的航空安全风险三支决策方法

4.1 基本方法

安全是航空领域永恒的主题。在航空领域内,安全是一种状态,即把航空器运行相关或直接支持航空器运行的各种航空活动相关的风险降至可接受的水平或以下并保持^[18]。

国际民航组织^[18]给定的方法通过两个评价函数对安全风险进行刻画:安全风险发生的可能性(发生概率, P)和严重性(危害程度, S)。其中,可能性包含频繁的(5)、偶然的(4)、少有的(3)、不大可能的(2)、极不可能的(1) 5个类别;严重性包括灾难性的(A)、危险的(B)、重大的(C)、较小的(D)、可忽略不计的(E) 5个类别。表2的风险评估矩阵展示了可能性和严重性的不同组合。其中,红色格子表示安全风险不可容忍,需要立即采取措施;黄色格子表示安全风险可容忍,可暂缓采取措施;绿色格子表示安全风险可接受,不需要采取措施。

表2 风险评估矩阵(电子版为彩色)

Table 2 Risk assessment matrix

可能性	严重性				
	灾难性的(A)	危险的(B)	重大的(C)	较小的(D)	可忽略不计的(E)
频繁的(5)	5A	5B	5C	5D	5E
偶然的(4)	4A	4B	4C	4D	4E
少有的(3)	3A	3B	3CE	3D	3E
不大可能的(2)	2A	2B	2C	2D	2E
极不可能的(1)	1A	1B	1C	1D	1E

下面利用基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型建立基于双评价函数的航空安全风险三支决策方法。首先构造状态空间 $\Theta = \{X, X^R\}$ 表示当前时空环境下,是否需要立即对安全风险源采取控制措施;构造决策动作集 $A = \{a_P, a_B, a_N\}$ 表示对风险源进行风险评估时采取的行动,即接受、暂缓接受、拒绝对风险源采取措施。

通过专家打分等方法^[19],建构风险源的风险代价矩阵和两个评价函数共 10 个类别的直觉犹豫模糊数。依据决策规

则(P1)-(N1)、(P2)-(N2)进行分类决策,可得风险源对10个类别采取的决策行动结果。其中,按照决策规则(P2)-(N2),分别给出 $\theta=1$ (悲观)、 $\theta=0.5$ 、 $\theta=0$ (乐观)3种不同情况下的决策结果。

记 $R_p^1(x) = \{i | a_i^1 = a_p\}$, $R_p^{0.5}(x) = \{i | a_i^{0.5} = a_p\}$, $R_p^0(x) = \{i | a_i^0 = a_p\}$ ($i=1,2,3,4,5$)表示3种不同情况下,5种可能性类别中选择接受隶属的类别的集合;记 $R_s^1(x) = \{i | a_i^{0.5} = a_p\}$, $R_s^{0.5}(x) = \{i | a_i^0 = a_p\}$, $R_s^0(x) = \{i | a_i^0 = a_p\}$ ($i=A, B, C, D, E$)表示3种不同情况下,5种严重性类别中选择接受隶属的类别的集合;记 $T_p^0(x) = \{i | (a_i^0 = a_p) \vee (a_i^0 = a_B)\}$, $T_s^0(x) = \{i | (a_i^0 = a_p) \vee (a_i^0 = a_B)\}$ 分别表示 $\theta=0$ 时,5种可能性、严重性类别中选择延迟接受隶属的类别的集合。

对于上述集合,以下关系显然成立:

$$\begin{cases} R_p^1(x) \subseteq R_p^{0.5}(x) \subseteq R_p^0(x) \subseteq T_p^0(x) \\ R_s^1(x) \subseteq R_s^{0.5}(x) \subseteq R_s^0(x) \subseteq T_s^0(x) \end{cases} \quad (7)$$

即 $R_p^1(x)$ 和 $R_s^1(x)$ 是最严格的接受隶属决策的集合,其结果也是最可信的。 $T_p^0(x)$ 和 $T_s^0(x)$ 是最宽松接受隶属决策集合,其结果可信度不高,但也具有一定的参考价值。其余集合的可信度介于上述两者之间。

按照决策结果的可信程度,文献[20]给出决策规则,如图1所示。其中, $|\cdot|$ 表示集合中元素的个数; $(\cdot) \wedge (\cdot) = 1$ 表示两者同时成立。由判据 C_1, C_2, C_3 给出的决策结果的可信程度依次为完全可信、可信、基本可信。判据 C_4, C_5, C_6 给出的决策结果可信程度不高,仅供参考。

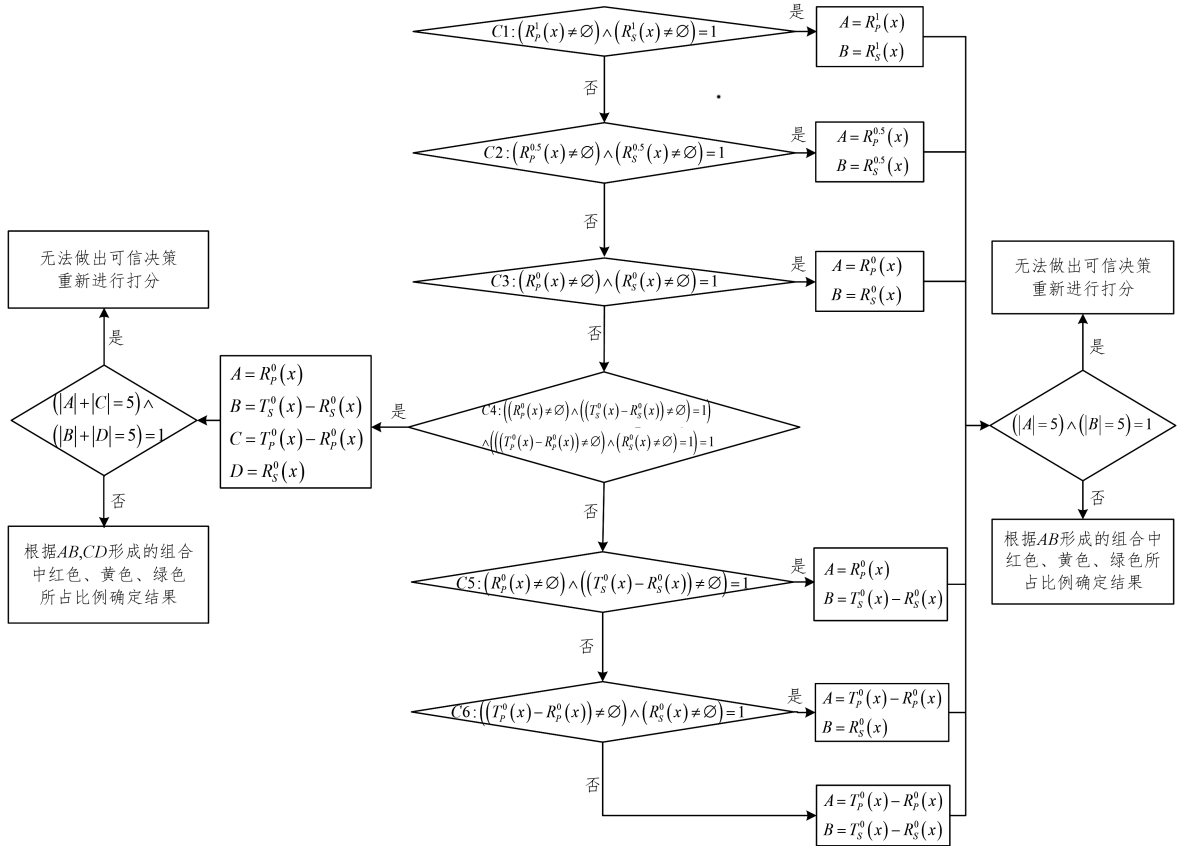


图1 基于双评价函数的航空安全风险三支决策方法

Fig. 1 Three-way decision methods of aviation safety risk based on double evaluation function

需要说明的是,由于打分结果分散,专家专业素养不一,选取方法不当等原因,可能无法给出相对可信的决策结果,需要重新打分进行决策。

4.2 应用算例

假设有6个典型的航空安全风险源组成某航空公司核心风险源库 $U = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, 其中 x_1 表示发动机空中停车, x_2 表示航材失控, x_3 表示应急设备非正常释放, x_4 表示勤务缺陷, x_5 表示工作遗漏, x_6 表示飞机地面受损。如表4所列,当需要对风险源采取措施时,采取 a_p, a_B, a_N 决策所需的代价记为 $\lambda_{PP}, \lambda_{BP}, \lambda_{NP}$; 当不需要对风险源采取措施时,采取 a_p, a_B, a_N 决策所需的代价记为 $\lambda_{PN}, \lambda_{BN}, \lambda_{NN}$ 。

表3 风险源的风险代价

Table 3 Risk cost of risk resource

	λ_{PP}	λ_{BP}	λ_{NP}	λ_{PN}	λ_{BN}	λ_{NN}
x_1	3.3	5	8.1	19.3	5.2	0
x_2	8.8	10.1	19	22.8	10.8	1.6
x_3	6	8.4	10.9	14.4	6.8	3.1
x_4	5.4	6.2	16.7	16.3	11.1	5.2
x_5	1.4	4.9	13.4	38.3	6.9	0.2
x_6	5.8	6.9	9.5	16.6	9.3	3.7

根据专家组的打分,分别给出各风险源的可能性和严重性的直觉犹豫模糊数并据此开展评估,如表4所列。根据3.1节给出的方法,对所有直觉模糊数进行三支决策,以 x_6

严重度 C(重大的)类别为例,结果如表 5 所列。 $\langle 0.7,0 \rangle$ 和 $\langle 0.7,0.1 \rangle$ 表示选择接受隶属, $\langle 0.7,0.2 \rangle$ 和 $\langle 0.6,0.1 \rangle$ 表示选择延迟隶属, $\langle 0.6,0.3 \rangle$ 表示选择拒绝隶属。按照 3.2 节的方法可得 $\theta=1$ (悲观)、 $\theta=0.5$ (平均)、 $\theta=0$ (乐观)3种不同情况下的决策结果。当 $\theta=1$ 时, $\exists a_i, a_i = a_N$,故 $a(x) = a_N$ 。当

$\theta=0$ 时, $\exists a_i, a_i = a_P$,故 $a(x) = a_P$ 。当 $\theta=0.5$ 时, $\frac{1}{5} |\{i | (a_i(x) = a_P) \vee (a_i(x) = a_B), 1 \leq i \leq N\}| \geq 0.5$ 且 $\frac{1}{5} |\{i | a_i(x) = a_P, 1 \leq i \leq n\}| < 0.5$,故 $a(x) = a_B$ 。其他危险源的决策结果如表 6—表 8 所列。

表 4 风险源的直觉犹豫模糊集

Table 4 Intuition hesitation fuzzy set of risk resource

	可能性					严重度				
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E
x_1	$\langle 0.3,0.3 \rangle$ $\langle 0.4,0.2 \rangle$	$\langle 0.8,0.1 \rangle$	$\langle 0.8,0.1 \rangle$ $\langle 0.9,0.1 \rangle$ $\langle 0.9,0 \rangle$	$\langle 0.6,0.3 \rangle$ $\langle 0.6,0.4 \rangle$	$\langle 0.2,0.5 \rangle$	$\langle 1,0 \rangle$ $\langle 0.9,0 \rangle$	$\langle 0.8,0.1 \rangle$	$\langle 0.6,0.2 \rangle$ $\langle 0.7,0.3 \rangle$	$\langle 0.4,0.5 \rangle$	$\langle 0.1,0.6 \rangle$
x_2	$\langle 0.2,0.5 \rangle$	$\langle 0.6,0.1 \rangle$ $\langle 0.4,0.3 \rangle$	$\langle 0.9,0 \rangle$ $\langle 0.8,0 \rangle$	$\langle 0.8,0 \rangle$ $\langle 0.8,0.1 \rangle$ $\langle 0.7,0 \rangle$	$\langle 0.4,0.5 \rangle$ $\langle 0.4,0.4 \rangle$	$\langle 0.4,0.5 \rangle$ $\langle 0.4,0.6 \rangle$	$\langle 0.6,0.1 \rangle$ $\langle 0.4,0.4 \rangle$	$\langle 0.6,0.2 \rangle$ $\langle 0.6,0 \rangle$	$\langle 0.6,0.3 \rangle$ $\langle 0.7,0.1 \rangle$ $\langle 0.6,0.4 \rangle$	$\langle 0.6,0 \rangle$
x_3	$\langle 0.4,0.3 \rangle$ $\langle 0.5,0.2 \rangle$	$\langle 0.6,0.1 \rangle$ $\langle 0.6,0.3 \rangle$ $\langle 0.6,0.2 \rangle$ $\langle 0.5,0 \rangle$	$\langle 0.7,0.1 \rangle$	$\langle 0.5,0.3 \rangle$ $\langle 0.5,0.2 \rangle$	$\langle 0.5,0.5 \rangle$	$\langle 0.8,0 \rangle$ $\langle 0.6,0.4 \rangle$	$\langle 0.9,0.1 \rangle$ $\langle 0.9,0 \rangle$	$\langle 0.8,0 \rangle$ $\langle 0.9,0 \rangle$	$\langle 0.5,0.4 \rangle$	$\langle 0.4,0.5 \rangle$ $\langle 0.5,0.4 \rangle$
x_4	$\langle 0.4,0.4 \rangle$	$\langle 0.3,0.6 \rangle$	$\langle 0.7,0 \rangle$	$\langle 0.7,0.3 \rangle$	$\langle 0.8,0.1 \rangle$ $\langle 0.6,0.2 \rangle$	$\langle 0.1,0.2 \rangle$ $\langle 0.1,0.5 \rangle$	$\langle 0.2,0.1 \rangle$ $\langle 0.3,0.1 \rangle$	$\langle 0.5,0.3 \rangle$	$\langle 0.6,0.2 \rangle$	$\langle 0.3,0.6 \rangle$
x_5	$\langle 0.3,0.3 \rangle$ $\langle 0.3,0.4 \rangle$	$\langle 0.5,0.2 \rangle$	$\langle 0.6,0.1 \rangle$ $\langle 0.7,0.1 \rangle$ $\langle 0.7,0 \rangle$	$\langle 0.7,0.1 \rangle$ $\langle 0.8,0.1 \rangle$	$\langle 0.7,0.1 \rangle$	$\langle 0.4,0.4 \rangle$ $\langle 0.6,0.3 \rangle$	$\langle 0.6,0.1 \rangle$ $\langle 0.7,0.2 \rangle$	$\langle 0.8,0 \rangle$ $\langle 0.9,0 \rangle$	$\langle 0.9,0 \rangle$ $\langle 0.9,0.1 \rangle$	$\langle 0.8,0.1 \rangle$ $\langle 0.8,0.2 \rangle$
x_6	$\langle 0.2,0.3 \rangle$	$\langle 0.7,0.2 \rangle$	$\langle 0.6,0.2 \rangle$ $\langle 0.7,0.3 \rangle$	$\langle 0.4,0.2 \rangle$	$\langle 0.1,0.7 \rangle$	$\langle 0.9,0.1 \rangle$	$\langle 0.8,0.2 \rangle$	$\langle 0.7,0 \rangle$ $\langle 0.7,0.1 \rangle$ $\langle 0.7,0.2 \rangle$ $\langle 0.6,0.3 \rangle$ $\langle 0.6,0.1 \rangle$	$\langle 0.5,0.5 \rangle$ $\langle 0.5,0.4 \rangle$	$\langle 0.5,0.2 \rangle$ $\langle 0.4,0.6 \rangle$

表 5 单个直觉模糊数的三支决策结果

Table 5 Decision result of single IHFS

	$\mu_i(x)$	$\nu_i(x)$	$\epsilon_i(x)$	$\alpha_i(x)$	$\beta_i(x)$	$a_i(x)$
$x_5(1)$	0.3	0.3	0.4	0.54	0.26	a_B
	0.3	0.4	0.3	0.63	0.31	a_N
	0.7	0	0.3	0.61	0.48	a_P
$x_6(C)$	0.7	0.1	0.2	0.70	0.55	a_P
	0.7	0.2	0.1	0.78	0.61	a_B
	0.6	0.3	0.1	0.78	0.61	a_N
$x_2(2)$	0.6	0.1	0.3	0.61	0.48	a_B
	0.8	0	0.2	0.72	0.41	a_P
	0.8	0.1	0.1	0.81	0.46	a_B
	0.7	0	0.3	0.63	0.36	a_P

从表 5 的 3 组数据可以看出将犹豫度 $\epsilon_i(x)$ 作为纠偏参数^[11]的作用;凸显非隶属度在决策中的作用。即使是相同的隶属度,由于非隶属度不同,也有可能做出不同的决策。

表 6 悲观语义下的决策结果

Table 6 Decision result in pessimistic semantic

悲观	可能性					严重度				
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E
x_1	a_N	a_B	a_B	a_N	a_N	a_P	a_B	a_B	a_N	a_N
x_2	a_N	a_B	a_P	a_B	a_N	a_N	a_N	a_B	a_B	a_P
x_3	a_N	a_B	a_P	a_B	a_N	a_B	a_P	a_P	a_N	a_N
x_4	a_N	a_N	a_P	a_B	a_B	a_N	a_B	a_B	a_B	a_N
x_5	a_N	a_B	a_B	a_B	a_B	a_B	a_B	a_P	a_P	a_B
x_6	a_N	a_B	a_B	a_N	a_N	a_P	a_B	a_N	a_N	a_N

表 7 平均语义下的决策结果

Table 7 Decision result in average semantic

0.5	可能性					严重度				
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E
x_1	a_B	a_B	a_P	a_B	a_N	a_P	a_B	a_B	a_N	a_N
x_2	a_N	a_B	a_P	a_P	a_N	a_N	a_B	a_P	a_B	a_P
x_3	a_B	a_P	a_P	a_B	a_N	a_B	a_P	a_P	a_N	a_N
x_4	a_B	a_N	a_P	a_B	a_P	a_N	a_B	a_B	a_B	a_N
x_5	a_B	a_B	a_B	a_B	a_B	a_B	a_B	a_P	a_P	a_B
x_6	a_N	a_B	a_B	a_N	a_N	a_P	a_B	a_B	a_N	a_B

表 8 乐观语义下的决策结果

Table 8 Decision result in optimistic semantic

乐观	可能性					严重度				
	1	2	3	4	5	A	B	C	D	E
x_1	a_B	a_B	a_P	a_B	a_N	a_P	a_B	a_B	a_N	a_N
x_2	a_N	a_B	a_P	a_P	a_N	a_N	a_B	a_P	a_B	a_P
x_3	a_B	a_P	a_P	a_B	a_N	a_P	a_P	a_P	a_N	a_N
x_4	a_B	a_N	a_P	a_B	a_P	a_N	a_B	a_B	a_B	a_N
x_5	a_B	a_B	a_P	a_B	a_B	a_B	a_B	a_P	a_P	a_B
x_6	a_N	a_B	a_B	a_N	a_N	a_P	a_B	a_P	a_N	a_B

以风险源 x_4 为例解释具体决策过程: $R_S^1(x_4) = R_S^{0.5}(x_4) = R_S^0(x_4) = \emptyset$ 且 $T_S^0(x_4) - R_S^0(x_4) \neq \emptyset, R_P^0(x_4) \neq \emptyset$ 。因此,根据图 1, $A = \{3,5\}, B = \{B,C,D\}$ 。在形成的 6 种可能性、严重性组合中,3B,3C,3D,5D 为黄色格子;5B,5C 为红色格子。因此,有 67% 的把握认为可暂缓采取措施,有 33% 的把握认为须立即采取措施,整体上属于比较紧急的情况。其他风险源的决策结果如表 9 所列。

表 9 综合决策结果

Table 9 Final decision result

安全风险源	控制策略	可信程度
发动机空中停车 x_1	立即采取措施	可信
航材失控 x_2	不需采取措施	完全可信
应急设备非正常释放 x_3	暂缓采取措施	完全可信
勤务缺陷 x_4	67% 暂缓, 33% 立即采取措施	供参考
工作遗漏 x_5	暂缓采取措施	基本可信
飞机地面受损 x_6	75% 暂缓, 25% 立即采取措施	供参考

需要说明的是,对安全风险源的控制策略随具体时空环境的变化而发生变化,需要通过持续的风险识别和控制才能保证持续安全^[18]。

结束语 为了表达信息模糊以及主观认知概念模糊而产生的犹豫模糊,本文引入直觉模糊集建立相应的三支决策模型。首先,在风险代价矩阵确定的前提下,建立基于单一直觉模糊数的三支决策方法。在此基础上,以直觉犹豫模糊集为论域建立基于直觉犹豫模糊集的三支决策模型。然后,考虑到特定环境的语义解释,形成了乐观、悲观以及少数服从多数的决策规则。最后,利用该模型解决了航空安全风险评估与决策问题,并说明了应用过程。该应用过程还可应用于评价打分等包含犹豫模糊风险语义的风险决策问题,但过程需要进一步凝练。下一步,将对本文所提模型在具体工程领域的应用加以探讨。

参 考 文 献

- [1] YAO Y Y. Three-way decision; an interpretation of rules in rough set theory[J]. *Information Sciences*, 2010, 180(3): 341-353.
- [2] YAO Y Y. Three-way decisions with probabilistic rough sets [J]. *Information Sciences*, 2010, 180(3): 341-353.
- [3] YAO Y Y, WONG S K. A decision theoretic framework for approximating concepts[J]. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1992, 37(6): 793-809.
- [4] LIANG D C, CAO W. Three-way decisions; model and the state of the art[J]. *Journal of UESTC (Social Sciences Edition)*, 2019, 21(1): 104-112.
- [5] 于洪, 王国胤, 李天瑞, 等. 三支决策: 复杂问题求解方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [6] LIANG D C, LIU D, PEDRYCZ W, et al. Triangular fuzzy decision-theoretic rough sets[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2013, 54(8): 1087-1106.
- [7] LIANG D C, LIU D. Systematic studies on three-way decisions with interval-valued decision-valued decision-theoretic rough sets[J]. *Information Sciences*, 2014, 276(C): 186-203.
- [8] LIANG D C, LIU D. Deriving three-way decisions from intuitionistic fuzzy decision-theoretic rough sets [J]. *Information Sciences*, 2015, 300: 28-48.
- [9] LIANG D C, XU Z S, LIU D. Three-way decisions with intuitionistic fuzzy decision-theoretic rough sets based on point operators[J]. *Information Science*, 2017, 375(C): 183-201.
- [10] LIANG D C, XU Z, LIU D. Three-way decisions based on decision-theoretic rough sets with dual hesitant fuzzy information [J]. *Information Sciences*, 2017, 396: 127-143.
- [11] XUE Z A, ZHU T Y, XUE T Y, et al. Model of three-way decision theory based on intuitionistic fuzzy sets [J]. *Computer Science*, 2016, 43(6): 283-288.
- [12] XUE Z A, XIN X W, YUAN Y L, et al. Study on three-way decisions based on intuitionistic fuzzy probability distribution [J]. *Computer Science*, 2018, 45(2): 136-139.
- [13] ZAO T N, MI J S, XIE B, et al. Three-way decisions with multi-adjoint intuitionistic fuzzy rough sets [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Science)*, 2017, 53(6): 1081-1090.
- [14] CHEN Y J, LI X W, XING R K. Three-way Decisions Model Based on Evidence Theory[J]. *Computer Science*, 2018, 45(6): 241-246.
- [15] XUE Z A, WANG P H, LIU J, et al. Three-way decision model based on probabilistic graph[J]. *Computer Science*, 2012, 43(1): 30-34.
- [16] XUE Z A, HAN D J, LV M J, et al. New three-way decisions model based on granularity importance degree [J]. *Computer Science*, 2019, 46(2): 236-241.
- [17] WEI Y R. Interval-valued Intuitionistic Hesitant Fuzzy Multiple Attribute TOPSIS decision-making method and its application [D]. Baoding: Hebei University, 2015.
- [18] Safety Management Manual(4th Edition)[S]. Canada: International Civil Aviation Organization, 2018.
- [19] 韩晓明, 赵杰. 决策理论与实用决策技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2002.
- [20] ZHANG C, LI D Y, ZHAI H Y. Hesitant fuzzy linguistic multi-granulation rough set over two universes and its application[J]. *Control & Decision*, 2017, 32(1): 105-110.



CHEN Yu-jin, born in 1992, Ph.D. His main research interests include rough set & three-way decision-making, and analysis of equipment system safety.



XU Ji-hui, born in 1974, Ph.D, professor, Ph.D supervisor. His main research interests include equipment safety and airworthiness management.