

优势变精度粗糙集在 UCAV 威胁估计中的应用

胡 杰¹, 赵 辉¹, 黄长强¹, 肖树臣²

(1.空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2.空军航空大学 军械系, 吉林 长春 130022)

摘 要:针对对象属性包含偏好信息及对象属性数据可能存在噪声或者一定程度的不完整的问题,在对经典粗糙集理论分析的基础上,引入优势变精度粗糙集方法,给出了优势变精度粗糙集算法的具体步骤,并结合 UCAV 作战特点,将其运用到 UCAV 威胁估计过程中。建立了基于优势变精度粗糙集方法的 UCAV 威胁估计决策信息系统,给出了决策系统所包含的条件属性和决策属性,并通过实例进行了分析。由结果可知,该决策方法实现简单,能正确对目标的威胁等级进行估计,且得出的规则以一定置信度给出,保证了规则的一致性,对于包含偏好属性的决策信息系统,该方法可以辨识出规则之间的不相容性。

关键词:粗糙集;优势关系;变精度;威胁估计;决策信息系统

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.006

中图分类号: V279 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0027-05

威胁估计(Threat Assessment)是完成对目标攻击过程的一个重要环节,它可以根据战场双方的态势评估结果推断对方对我方的威胁程度^[1],也可以不依靠态势评估,通过对影响目标威胁度的战场因素的分析来完成其功能描述^[2]。在无人战斗机(Unmanned Combat Air Vehicle, UCAV)的自主攻击过程中,威胁估计不仅给出了对目标威胁程度定性或定量的描述,而且为自主攻击的后续步骤如目标分配提供了决策基础。当前多数威胁估计系统将对对方作战意图和目的的推理过程放到态势评估过程中,而威胁估计主要完成对目标威胁等级的描述^[3]。解决威胁估计问题的方法和理论有很多种,关注问题的方面也各有不同。Fredrik Johansson 等人在对目标的伤害能力和作战意图研究的基础上,将作战机会作为一个重要因素加入到威胁估计过程中^[4]; Robert Suzi 提出,由于分析背景的不同,目标的威胁程度将发生变化^[5]; 武传玉等人将威胁分为静态威胁和动态威胁,使得其表示的更加完整^[6]; 美国空军外太空科技中心的研究人员使用数字威胁模型(Digital Threat Model)进行威胁估计,使得对目标威胁程度的研究精确化、模型化、通用化^[7]。

粗糙集是一种处理不确定性因素的决策方法,可以在威胁估计决策表导出的决策规则的基础上,给出在特定环境中进行威胁估计决策的建议^[8]。在实际的威胁估计过程中,决定目标威胁程度的属性往往包含了偏好信息(如“是否攻击”,如果目标攻击我方,其威胁程度将大大增加),偏好信息的出现要求在数据分析中需要考虑优势关系;另外由于信息系统中的数据可能存在噪声或某种程度的不完整,会造成不能形成确定决策的情况,即不能以小于 1 的概率推导出确定性决策,使得决策不够完整。本文对优势变精度粗糙集方法的基本理论和概念进行了详细阐述,给出了优势变精度粗糙集算法的具体步骤,并将该方法应用于 UCAV 目标威胁估计过程。

1 基本概念

定义 1 设 $S = (U, A, V, f)$ 为一个信息系统,也称为知识表示系统。其中: $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{|U|}\}$ 为有

* 收稿日期:2009-04-02

基金项目:国家“863”计划资助项目(2008AAXX50703);空军工程大学优秀博士学位论文创新基金资助项目(BC08002)

作者简介:胡 杰(1982-),男,安徽芜湖人,博士生,主要从事机载制导武器系统技术与运用研究。
E-mail:jackyhoood@163.com

限非空集合,称为论域对象空间; $A=\{A_1, A_2, \dots, A_{|A|}\}$ 为属性的有限非空集合; $V=\bigcup V_a$,其中 $a \in A, V_a$ 为属性 a 的值域; $f:U \times A \rightarrow V$ 为信息函数,对于 $\forall a \in A, \forall x \in U, f(x, a) \in V_a$ 。具有条件属性集 C 和决策属性集 $D(A=C \cup D, C \cap D = \emptyset)$ 的信息系统称为决策表。

1.1 优势粗糙集

定义2 令 $x, y \in U, P \subseteq C$,若对于 $\forall q \in P, f(y, q) \geq f(x, q)$,则 $y D_P x$ 这种关系称为优势关系。

定义3^[9] 给定 $P \subseteq C$ 且 $x, y \in U$,关于 x 的 P -优势集(P -dominating sets)和 P -劣势集(P -dominated sets)分别定义为:

$$D_P^+(x) = y D_P x; \quad D_P^-(x) = x D_P y \tag{1}$$

定义4^[9] 设 $CL_t \subseteq D$,且 $CL_n > \dots > CL_t > \dots > CL_1, CL_t^{\geq} = \bigcup_{s \geq t} CL_s, CL_t^{\leq} = \bigcup_{s \leq t} CL_s, t, s \in \{1, 2, \dots, n\}$,则 CL_t^{\geq} 的下近似和上近似分别为:

$$apr_P(CL_t^{\geq}) = \bigcup \{x \in U; D_P^+(x) \subseteq CL_t^{\geq}\}; \quad \overline{apr}_P(CL_t^{\geq}) = \bigcup \{x \in U; D_P^-(x) \cap CL_t^{\geq} \neq \emptyset\} \tag{2}$$

CL_t^{\geq} 的边界区定义为:

$$bnd_P(CL_t^{\geq}) = \overline{apr}_P(CL_t^{\geq}) - apr_P(CL_t^{\geq}) \tag{3}$$

类似的, CL_t^{\leq} 的下近似和上近似分别为:

$$apr_P(CL_t^{\leq}) = \bigcup \{x \in U; D_P^-(x) \subseteq CL_t^{\leq}\}; \quad \overline{apr}_P(CL_t^{\leq}) = \bigcup \{x \in U; D_P^+(x) \cap CL_t^{\leq} \neq \emptyset\} \tag{4}$$

CL_t^{\leq} 的边界区定义为:

$$bnd_P(CL_t^{\leq}) = \overline{apr}_P(CL_t^{\leq}) - apr_P(CL_t^{\leq}) \tag{5}$$

1.2 优势变精度粗糙集

定义5^[9] 假设信息系统 $S=(U, A, V, f)$ 为偏好属性决策表, $A=C \cup D$,给定偏好信息的集合 $P \subseteq C, X \subseteq U, CL_t \subseteq D, t \in \{1, 2, \dots, n\}$,置信阈值 $0.5 < \beta \leq 1$,则 CL_t^{\geq} 的 β -下近似和 β -上近似分别为:

$$apr_P^\beta(CL_t^{\geq}) = \bigcup \left\{ \frac{|D_P^+(x) \cap CL_t^{\geq}|}{|D_P^+(x)|} \geq \beta \right\}; \quad \overline{apr}_P^\beta(CL_t^{\geq}) = \bigcup \left\{ \frac{|D_P^-(x) \cap CL_t^{\geq}|}{|D_P^-(x)|} > 1 - \beta \right\} \tag{6}$$

类似的, CL_t^{\leq} 的 β -下近似和 β -上近似分别为:

$$apr_P^\beta(CL_t^{\leq}) = \bigcup \left\{ \frac{|D_P^-(x) \cap CL_t^{\leq}|}{|D_P^-(x)|} \geq \beta \right\}; \quad \overline{apr}_P^\beta(CL_t^{\leq}) = \bigcup \left\{ \frac{|D_P^+(x) \cap CL_t^{\leq}|}{|D_P^+(x)|} > 1 - \beta \right\} \tag{7}$$

定义6^[9] CL 的分类质量为:

$$\gamma_\beta^>(CL) = \left| \left(\bigcup \left\{ \frac{|D_P^+(x) \cap CL_t^{\geq}|}{|D_P^+(x)|} \geq \beta \right\} \right) \cup \left(\bigcup \left\{ \frac{|D_P^-(x) \cap CL_t^{\geq}|}{|D_P^-(x)|} \geq \beta \right\} \right) \right| / |U| \tag{8}$$

2 优势变精度粗糙集算法

步骤1:属性离散化。粗糙集理论只能对离散量进行处理,所以首先必须对对象属性进行离散化处理。

步骤2:属性排序。鉴于以上属性包含偏好信息,需要针对决策目的对对象的属性进行偏好排序。

步骤3:属性约简。在从决策信息数据库中提取决策规则之前,需要进行条件属性的约简。这样可以约去冗余属性,降低所提取的决策规则的复杂度,减小后续的工作量。

考虑到 β 值越小,获得的规则数越少,规则所覆盖的记录数也越小,但当 β 等于某一极限值时,所能获得的规则数达到最大^[10],在本文中,设 β 为0.8。

首先,根据决策表中的内容,按照定义3,求出每个属性的 P -优势集和 P -劣势集;其次,设 $CL_1 = \{\text{低}\}, CL_2 = \{\text{高}\}$,令 $CL_1^{\leq} = CL_1, CL_2^{\leq} = CL_1 \cup CL_2, CL_2^{\geq} = CL_2$,并根据定义6求出各个合并集合的 β -上近似和下近似;最后,根据定义6给出分类质量,并求出近似约简的最小集合。

步骤4:提取决策规则。根据约简后得到的条件属性和决策属性的映射关系,给出决策规则。 D^{\geq} 偏好概率决策规则形式为:

$$\text{if } f(x, q_1) \geq r_{q_1} \wedge f(x, q_2) \geq r_{q_2} \wedge \dots \wedge f(x, q_p) \geq r_{q_p}, \text{ then } x \in CL_t^{\geq} \tag{9}$$

D^{\leq} 偏好概率决策规则形式为:

$$\text{if } f(x, q_1) \leq r_{q_1} \wedge f(x, q_2) \leq r_{q_2} \wedge \dots \wedge f(x, q_p) \leq r_{q_p}, \text{ then } x \in CL_t^{\leq} \tag{10}$$

式中: $\{q_1, q_2, \dots, q_p\} \subseteq C; (r_{q_1}, r_{q_2}, \dots, r_{q_p}) \in V_{q_1} \times V_{q_2} \times \dots \times V_{q_p}$ 。

步骤5:规则扩展。由于决策信息数据库数据量有限,不可能提取出所有条件下的决策规则,所以对已有的决策规则进行规则扩展,给出 T 时刻所有条件下的决策规则,具体方法如下^[8] :

由决策属性 d 将 U 划分,得到 $U/D = \{D_1, D_2, \dots, D_r\}$, 对于 $D_j (j \leq r)$, 记:

$$M_j = \{(\{f_1(x_i)\}, \{f_2(x_i)\}, \dots, \{f_m(x_i)\}) \mid [x_i]_A \subseteq D_j\} \tag{11}$$

将 M_j 中的向量取并运算,得到 $F_j = (F_1^j, F_2^j, \dots, F_m^j) (j \leq m)$, 对于任意 $v_l \in V_l (l \leq m)$ 有:

$$E = (\{v_1\}, \{v_2\}, \dots, \{v_m\}) \tag{12}$$

计算 $D(F_j/E) (j \leq r)$, 若 $D(F_{j_0}/E) = \max_{j \leq m} D(F_j/E)$, 则得到全部条件下的规则:

$$\text{if } \bigwedge_{l=1}^m (a, v_l), \text{ then } D_{j_0}(D(F_{j_0}/E)) \tag{13}$$

步骤6:属性匹配及决策生成。根据未来时刻给出的对象条件属性,与所有扩展决策规则进行匹配,生成决策,完成对未来时刻对象决策属性的估计。

3 UCAV 威胁估计决策信息系统的建立

本文以无人机空战为背景,对方对象为若干架战斗机,UCAV 威胁估计决策信息系统包含以下属性:①条件属性:通过地面和机载传感器得到的与目标威胁等级有关的因素,诸如对方目标速度 a (m/s)、高度 α (m)、与我方的距离 α (km)、是否进行电子战 α 、是否锁定我方 α 、机动情况 α 以及通过态势评估系统得到的对方对象的作战意图 α ^[11];②决策属性:目标威胁等级 d 。

根据优势变精度粗糙集算法对给定的 UCAV 威胁估计决策信息系统进行决策规则的提取,找出条件属性和决策属性的映射关系。通过本机机载传感器获取目标信息(也可由它机机载传感器、地面雷达或预警机等通过数据链传给本机),根据威胁估计系统中的决策规则完成对目标威胁等级的预测和判断,给出决策结果。

4 实例分析

表1为 T 时刻对方飞机属性表。

表1 T 时刻目标属性表

Tab.1 Targets' attributes at the time of T

	a	α	α	α	α	α	α	d
t_1	335	1 300	12	否	否	小	否	低
t_2	390	3 100	4	是	是	大	是	低
t_3	290	700	8	是	是	大	否	低
t_4	410	1 500	14	否	是	小	是	高

对于每一个属性,离散化方法如下:速度大于 300 m/s,则设为“快”,反之则设为“慢”;高度大于 3 000 m,则设为“高”,低于 1 000 m,则设为“低”,其他情况设为“中”;与我机距离大于 10 km,则设为“远”,小于 5 km 则设为“近”,其他情况设为“中”;若进行电子战,则设为“是”,反之设为“否”;若锁定我方,则设为“是”,反之设为“否”;机动情况有“大”和“小”2 种情况;作战意图若为攻击,则设为“是”,反之设为“否”;目标威胁等级有“高”、“低”2 种情况。表2为离散化后的 T 时刻对方飞机属性表。

表2 T 时刻目标离散属性表

Tab.2 Scattered targets' attributes at the time of T

	a	α	α	α	α	α	α	d
t_1	快	中	远	否	否	小	否	低
t_2	快	高	近	是	是	大	是	低
t_3	慢	低	中	是	是	大	否	低
t_4	快	中	远	否	是	小	是	高

基于判断目标威胁等级的目的,对于“速度”条件属性,“快”>“慢”;对于“高度”条件属性,“高”>“中”>“低”;对于“与我机距离”条件属性,“近”>“中”>“远”;对于“是否进行电子战”条件属性,“是”>“否”;对于“是否锁定我方”条件属性,“是”>“否”;对于“机动情况”条件属性,“大”>“小”;对于“作战意图”条件属性,“是”>“否”;对于“目标威胁等级”决策属性,“高”>“低”。

由于属性约简的计算量较大,此处略去具体步骤,约简结果为: $\{a_i, \alpha\}$ 为一个 β -约简。

按照式(9)、(10),给出决策规则见表3。在表3的基础上,根据步骤5进行规则扩展,得到 $\{a_i, \alpha\}$ 所有取值的 T 时刻的扩展决策规则,见表4。

设现有一目标,速度280 m/s,高度2 200 m,与我机距离10 km,进行电子战,已锁定我方,小机动,作战意图为“攻击”,由表4可知,对应表中第二条决策规则,该目标的威胁等级为“高”。

通过对结果的分析可知:

1)如表2的数据所示, t_2 的所有偏好条件属性至少和 t_1 一样好,但威胁等级却比 t_1 低,这种情况明显不符合实际情况,通过算法的处理被剔除;

2)在表3的基础上,对提取出的决策规则进行扩展,将“if $a_i = \text{是} \wedge \alpha = \text{是}$ then $d = \text{高}$ ”这条规则补充到了决策库中。

5 结论

本文在优势变精度粗糙集理论的基础上,给出了优势变精度粗糙集算法的具体步骤,通过该方法在UCAV目标威胁估计过程中的应用,得到以下结论:

1)将粗糙集方法运用到无人战斗机决策过程中,需预先将数据库中的数据进行处理,提取出决策规则,大量的计算工作都是在地面装订时完成,无人机在空中进行决策时不需要承担过多的计算任务;

2)根据规则扩展方法,对表3的规则进行了扩展,得到了如表4所示的决策规则,完善了决策库,为下一步属性匹配并提出决策建议奠定了基础;

3)由于UCAV所处的空中作战环境复杂,可能造成由机载传感器或其他信息系统获得的目标属性数据存在噪声或某种程度的不完整性,会造成不能形成确定决策的情况。而使用变精度粗糙集的方法,得出的规则以一定置信度给出,保证了规则的一致性。如表3中所示,决策规则“if $a_i \geq \text{否}$ 且 $\alpha \geq \text{是}$ then $d = \text{高}$ ”以0.5的概率给出,而“if $a_i \leq \text{是}$ 且 $\alpha \leq \text{否}$ then $d = \text{低}$ ”以1的概率给出。根据置信度概率,若不一致性较弱,则仍可将该规则看作确定决策,若不一致性较强,则认为据此不能得到任何确定性的信息;

4)对于包含偏好性的决策信息系统,该方法可以辨识出规则之间的不相容性并加以剔除,以保证决策规则提取的正确性。

参考文献:

- [1] Duquet J R, Bergeron P, Blodgett D. Analysis of the Functional and Real-time Requirements of A Multi-Sensor Data Fusion(MSDF)/Situation and Threat Assessment(STA)/Resource Management(RM) System[C]//Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications II. Orlando: [s. n.], 1998: 198-209.
- [2] Dall, I W. Threat Assessment without Situation Assessment [C]//Proceeding of Information, Decision and Control. Adelaide: [s. n.], 1999: 365-370.
- [3] 张楠, 丁锋. 数据融合中的态势估计与威胁估计技术[J]. 电子对抗, 2007, 24(1): 37-40.
ZHANG Nan, DING Feng. Situation Assessment and Threat Assessment Technique in Data Fusion[J]. Electronic Warfare, 2007, 24(1): 37-40. (in Chinese)
- [4] Johansson, Falkman F. A Bayesian Network Approach to Threat Evaluation with Application to An Air Defense Scenario [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Information Fusion. Cologne: [s. n.], 2008: 1-7.
- [5] Robert Suzic. A Generic Model of Tactical Plan Recognition for Threat Assessment[C]//Multisensor, Multisource Information Fusion Conference. Orlando: [s. n.], 2005: 105-116.
- [6] 武传玉, 刘付显. 基于模糊评判的新防空威胁评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1069-1071.
WU Chuanyu, LIU Fuxian. New Model of Target Threat Assessment for Air Defense Operation Based on Fuzzy Theo-

表3 T 时刻决策规则表

Tab. 3 Decision-making rules at the time of T

规则	置信度	支持数
if $a_i \geq \text{否}$ 且 $\alpha \geq \text{是}$ then $d = \text{高}$	0.5	2
if $a_i \leq \text{是}$ 且 $\alpha \leq \text{否}$ then $d = \text{低}$	1	2

表4 T 时刻扩展决策规则表

Tab. 4 Extended decision-making rules at the time of T

编号	决策规则
1	if $a_i = \text{否} \wedge \alpha = \text{是}$ then $d = \text{高}$
2	if $a_i = \text{是} \wedge \alpha = \text{是}$ then $d = \text{高}$
3	if $a_i = \text{是} \wedge \alpha = \text{否}$ then $d = \text{低}$
4	if $a_i = \text{否} \wedge \alpha = \text{否}$ then $d = \text{低}$

- ry[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(8): 1069—1071. (in Chinese)
- [7] Schmalhofer J E, Jr Browder D L. System for the Management of Digital Threat Models[C]//Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference. Dayton:IEEE Press, 1992: 774—780.
- [8] 张文修, 仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 66—71.
ZHANG Wenxiu, QIU Guofang. Uncertain Decision Making Based on Rough Sets[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 66—71. (in Chinese)
- [9] 菅利荣. 面向不确定性决策的杂合粗糙集方法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 57—62.
JIAN Lirong. Mixed Rough Sets Methods in Uncertain Decision-making and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2008: 57—62. (in Chinese)
- [10] 程玉胜. 基于粗糙集理论的知识不确定性度量与规则获取方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
CHENG Yusheng. Study on Approaches for Knowledge Uncertainty Measure and Rules Extraction Based on Rough Sets Theory[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] Jeung Won Choi, Jae Woo Joo, Dong Lae Cho. Situation/Threat Assessment Fusion System[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. Annapolis: [s. n.], 2002: 1374—1380.

(编辑: 姚树峰, 徐敏)

Dominance Variable Precision Rough Sets and Its Application in Threat Assessment ofUCAV

HU Jie¹, ZHAO Hui¹, HUANG Chang-qiang¹, XIAO Shu-chen²

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Ordnance Institute, Air Force Aeronautic University, Changchun 130022, China)

Abstract: To solve the problems that some objects' attributes contain preference information and noise may exist in the objects' attributes or the attributes are incomplete, based on the analysis of traditional rough sets theory, a dominance variable precision rough sets method is put forward and the concrete steps of the dominance variable precision rough sets algorithm are given. According to theUCAV's combat characteristics, the algorithm is applied in the process ofUCAV's threat assessment. A decision-making information system ofUCAV's threat assessment based on the dominance variable precision rough sets method is brought forward, which is demonstrated in an example. Condition attributes and decision-making attributes in the decision-making system are also given. The result shows that the algorithm is a good solution to the problems above and the threat grade of the target is assessed properly. Decision-making rules are obtained with certain credibility, which ensures the consistency of the rules. Regarding the decision-making information system with preference attributes, the incompatibility among the rules can be distinguished by using this method.

Key words: rough sets; dominance relation; variable precision; threat assessment; decision-making