

基于直觉模糊产生式规则推理的空袭目标威胁等级判断

孙海文, 谢晓方, 孙涛, 王诚成

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要:提出了一种基于直觉模糊产生式规则推理的威胁等级判断方法;分析了影响威胁等级判断的主要因素、威胁等级划分、威胁等级判断的不确定性以及各因素属性的模糊性;构建了直觉模糊产生式规则模型和威胁判断的推理规则;通过对多批典型空袭目标进行威胁等级判断仿真分析,验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词:威胁等级判断;直觉模糊产生式规则推理;模糊性;不确定性;知识表示及推理

本文引用格式:孙海文,谢晓方,孙涛,等.基于直觉模糊产生式规则推理的空袭目标威胁等级判断[J].兵器装备工程学报,2019,40(5):33-37.

Citation format:SUN Haiwen, XIE Xiaofang, SUN Tao, et al. Air Raid Targets Threat Level Judgment Method Based on Intuitionistic Fuzzy Production Rule Reasoning[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(5): 33-37.

中图分类号:E925; TP18; TP391

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)05-0033-05

Air Raid Targets Threat Level Judgment Method Based on Intuitionistic Fuzzy Production Rule Reasoning

SUN Haiwen, XIE Xiaofang, SUN Tao, WANG Chengcheng

(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: A threat level judgment method based on intuitionistic fuzzy production rule reasoning was proposed. The main factors affecting the threat level judgment, the classification of threat level, the uncertainty of threat level judgment and the fuzziness of each factor attribute were analyzed. The intuitionistic fuzzy production rule model was constructed, and the inference rules of threat judgment were established. The feasibility and validity of the proposed method were verified by simulating the threat level judgment of the typical air-raid targets.

Key words: threat level judgment; intuitionistic fuzzy production rule reasoning; fuzziness; uncertainty; knowledge representation and reasoning

现代高技术局部战争表明:以空中打击为主的陆、海、空、天、电一体化的多维立体战已成为现代空袭的主要样式,它实现了对打击对象的大纵深、多层次、多批次、多方向的全方位空袭^[1]。面对复杂和庞大的空袭目标信息,为了提高防空作战系统反应速度,避免不必要的数据处理,需要预先对

空袭目标信息进行分类处理,即进行目标威胁等级判断。威胁等级判断是威胁评估中重要的组成部分^[2],它能有效剔除无威胁信息,着重对威胁等级高的目标进行防御拦截。

威胁等级判断是一个典型的模糊不确定性推理过程。模糊性体现在威胁等级判断指标属性中所出现的某些言词

收稿日期:2018-12-20;修回日期:2019-01-24

基金项目:中国博士后科学基金项目(2013T60923)

作者简介:孙海文,男,博士研究生,主要从事武器系统建模与仿真、舰空导弹综合控制技术研究, E-mail: 842904820@qq.com;谢晓方,男,博士生导师,主要从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制研究, E-mail: xiexf06@yohoo.com.cn;孙涛,男,博士,讲师,主要从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制研究, E-mail: tgzydz@163.com;王诚成,男,博士,讲师,主要从事武器系统建模与仿真、火力指挥与控制研究, E-mail: ml5666156198@qq.com。

涵义不够确切,没有硬性的标准或条件,其外延没有硬性的边界;不确定性体现在指标取值和推理规则的真实性不能完全肯定,而只能对其为真的可能性进行估计。常用判断方法有:贝叶斯网络^[3-4]、D-S 证据理论^[5]、多属性决策理论^[6]、模糊理论^[7]等多种方法,这些方法各有优缺点,适用于不同情况下的判断推理过程。为了在威胁等级判断中准确表达信息的隶属度、非隶属度以及犹豫度等特点以及保证推理过程完备性和直观合理性,本文提出了一种基于直觉模糊产生式规则推理的威胁等级判断方法,利用直觉模糊集对判断过程中的模糊性和不确定性进行处理,同时用产生式规则来进行威胁等级判断的知识表示,建立规则库,通过深度优先搜索和匹配进行威胁等级判断。最后,通过算例仿真,验证所提方法的可行性和有效性。

1 威胁等级判断的问题描述

根据来袭目标的特性^[8],可将来袭目标对我编队的威胁程度分为 3 个等级,具体划分如下:

I 级威胁(W_1):敌我识别为敌方目标,目标类型为反舰武器(反舰导弹、反辐射导弹及制导炸弹等)以及携带有反舰武器的有人机和无人机,目标攻击意图明显,且位于我方防御方位内,必须立即采取对抗措施。

II 级威胁(W_2):敌我识别为敌方目标,目标类型为:侦察机、预警机、反潜机等辅助作战飞机,目标没有明显攻击意图,且位于我防区外,暂缓采取对抗措施;

III 级威胁(W_3):敌我识别为我方及中立方,或者是目标类型为非军用飞行器,对我方不构成威胁,无需采取对抗措施。

分析以上威胁等级划分定义可知, I 级和 II 级威胁为我方主要探测跟踪的目标。其中, I 级威胁为我方着重进行威胁评估排序和火力分配拦截的对象。III 级威胁的目标无需继续进行探测跟踪和数据处理。

威胁等级判断涉及较多模糊性的因素,这里主要考虑 4 个方面因素,包括:敌我识别,目标类型,攻击意图,拦截紧急程度。当敌方目标为反舰导弹或携带反舰导弹的飞机,且攻击意图明显,需要立即进行拦截时,对我方威胁程度最大;当敌我识别为我方或中立方目标时,则该目标不具有威胁性。分析这 4 个因素发现,这些因素的属性都是模糊语言概念,表达意义较抽象,同时威胁等级判断过程存在一定的不确定性。因此,来袭目标威胁等级判断属于模糊和不确定性推理决策问题。

2 基于直觉模糊产生式规则的知识表示

利用直觉模糊产生式规则进行威胁等级判断知识表示,需要对威胁等级判断的各指标因素进行直觉模糊处理获取直觉模糊数;同时,要明确各因素属性与威胁等级之间的关系以及关系间的不确定性;最后根据产生式规则推理结构进

行知识表达。

2.1 直觉模糊集

直觉模糊集^[9-10]定义如下:

设 X 是一个给定论域,则 X 上的一个直觉模糊集 A 为:

$$A = \{(x, \mu_A(x), \gamma_A(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

式(1)中, $\mu_A(x) \in [0, 1]$, $\mu_A(x)$ 表示隶属度函数; $\gamma_A(x) \in [0, 1]$, $\gamma_A(x)$ 表示非隶属度函数; $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \gamma_A(x)$ 表示直觉指数即不确定函数。

当 X 为连续空间时,直觉模糊集 A 的表示为:

$$A = \int_X (\mu_A(x), \gamma_A(x)) / x, x \in X \quad (2)$$

当 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为离散空间时,直觉模糊集 A 的表示为:

$$A = \sum_{i=1}^n (\mu_A(x_i), \gamma_A(x_i)) / x_i, x_i \in X \quad (3)$$

2.2 直觉模糊产生式规则

直觉模糊产生式规则是一种不确定性推理方法。其将产生式规则知识表示和直觉模糊推理的功能相结合。

假设 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 为直觉模糊产生式规则集。规则 R_i 的结构如下:

$$R_i: \text{if } P_j(\mu_a, \gamma_a) \text{ then } P_c(\mu_c, \gamma_c)(CF_i, \lambda_i)$$

其中, P_j 和 P_c 为直觉模糊命题,分别表示 R_i 规则的前提条件和结论; (μ_a, γ_a) 和 (μ_c, γ_c) 为直觉模糊数,表示命题取值的不确定性; (CF_i, λ_i) 分别表示规则的可信度和执行该规则推理的阈值。

2.3 威胁等级判断指标因素的属性函数

根据威胁等级判断分类原则,可选择敌我识别、目标类型、攻击意图、拦截紧急程度等作为判断的主要因素,同时构建 4 个因素的隶属度函数和非隶属度函数。为了使规则具备完备性和相容性,这里隶属度函数采用 Gauss 型^[11]:

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

非隶属度函数为:

$$\gamma_A(x) = 1 - \pi_A(x) - e^{-\frac{(x-E)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式(4)~(5)中, $\pi_A(x)$ 设为定值; E 和 σ 分别表示函数的中心和宽度。

设某一区间为 $[e, f]$, 采用指标近似法确定^[12] 函数模型的参数 E 和 σ 的值:

$$\begin{cases} E = (e + f) / 2 \\ \sigma = (f - e) / 6 \end{cases} \quad (6)$$

设计各判断指标的论域及其直觉模糊子集,具体如下。

2.3.1 敌我识别

在防空作战中,敌我识别是对空中目标探测识别的首要因素。敌我识别的论域为 H , 通常敌我识别分为敌方、我方和中立方,经模糊处理得到直觉模糊子集:敌方为 $H_1 [0, 0.333]$, 中立方为 $H_2 [0.333, 0.667]$, 我方为 $H_3 [0.667, 1]$ 。隶属度函数曲线如图 1 所示。

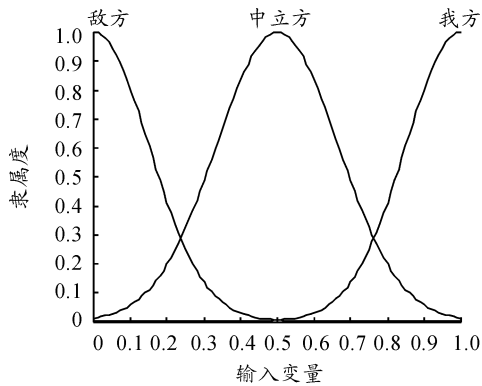


图1 敌我识别属性隶属度函数曲线

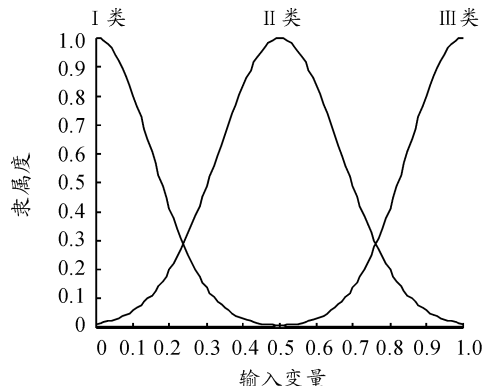


图2 目标类型属性隶属度函数曲线

2.3.2 目标类型

在编队防空作战中,不同的目标类型影响着编队防空威胁等级,随着编队防空作战范围的增大,其面临的目标也更复杂。根据目前对目标的识别能力,可将目标区分为导弹、大飞机、小飞机、直升机以及非军用飞行物等5类。具体分类如表1所示。

表1 目标类型

类别	主要目标	主要特征
A类	各种反舰导弹、反辐射导弹以及制导炸弹等	发现距离较近、目标速度快、目标反射面积小,是严重的现实威胁
B类	歼击机、歼轰机、强击机、轰炸机	探测距离相对较远,反射面积相对较大,可构成直接威胁,是较严重的现实威胁。
C类	携有反舰武器的直升机	速度较慢,可构成直接威胁,是一般的现实威胁
D类	预警机、侦察机(包括侦察无人机)、加油机、反潜机、干扰机	发现距离较远、一般不构成直接威胁,但对敌空袭体系具有重要意义
E类	鸟类、空飘物、虚假目标等	一般不构成威胁

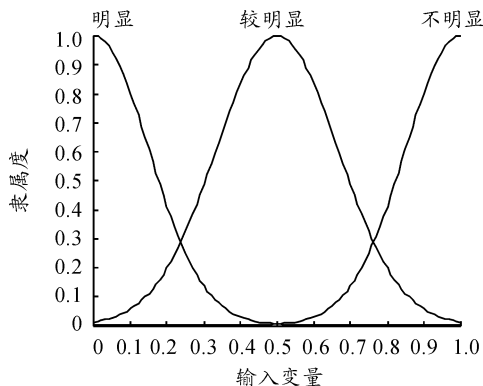


图3 攻击意图属性隶属度函数曲线

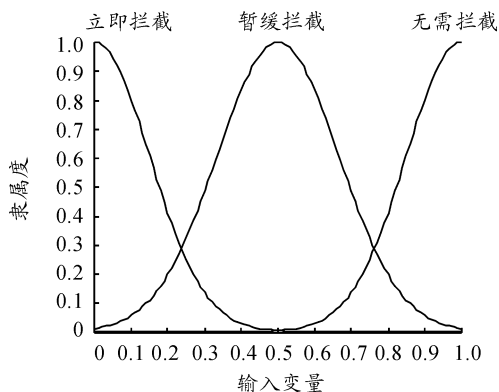


图4 拦截紧急程度隶属度函数曲线

目标类型的论域为 T 。这里将A类、B类和C类作为I类目标,D类作为II类目标,E类作为III类目标。对应的直觉模糊子集为 $T_1[0,0.333]$, $T_2[0.333,0.667]$, $T_3[0.667,1]$ 。其隶属度函数曲线如图2所示。

2.3.3 攻击意图

攻击意图是威胁判断的重要因素之一。攻击意图的论域为 F 。这里将攻击意图分为明显、较明显和不明显等3类。直觉模糊子集为 $F_1[0,0.333]$, $F_2[0.333,0.667]$, $F_3[0.667,1]$ 。其隶属度函数曲线如图3所示。

2.3.4 拦截紧急程度

拦截紧急程度的论域为 L 。分为立即拦截、暂缓拦截和无需拦截。直觉模糊子集为 $L_1[0,0.333]$, $L_2[0.333,0.667]$, $L_3[0.667,1]$ 。其隶属度函数曲线如图4所示。

2.4 威胁等级判断的知识表示

采用产生式规则结构对空中来袭目标威胁等级判断进行知识表示,构建威胁等级判断规则库。威胁等级判断规则集合主要由以下3个规则构成:

$$R_1: \text{if } P_{H_1} \text{ and } P_{T_1} \text{ and } (P_{F_1} \text{ or } P_{F_2}) \text{ and } (P_{L_1} \text{ or } P_{L_2}) \text{ then } P_{W_1}(CF_1, \lambda_1);$$

$$R_2: \text{if } P_{H_1} \text{ and } P_{T_2} \text{ and } (P_{F_2} \text{ or } P_{F_3}) \text{ and } P_{L_2} \text{ then } P_{W_2}(CF_2, \lambda_2);$$

$$R_3: \text{if } P_{H_2} \text{ or } P_{H_3} \text{ or } P_{T_3} \text{ or } P_{L_3} \text{ then } P_{W_3}(CF_3, \lambda_3).$$

其中 P_{H_1} 、 P_{H_2} 和 P_{H_3} 分别表示敌我识别为敌方、中立方和我方的直觉模糊命题; P_{T_1} 、 P_{T_2} 和 P_{T_3} 分别表示目标类型为 I

类、Ⅱ类和Ⅲ类的直觉模糊命题; P_{F_1} 、 P_{F_2} 和 P_{F_3} 分别表示攻击意图为明显、较明显和不明显的直觉模糊命题; P_{L_1} 、 P_{L_2} 和 P_{L_3} 分别表示拦截紧急程度为立即拦截、暂缓拦截和无需拦截的直觉模糊命题; P_{W_1} 、 P_{W_2} 和 P_{W_3} 分别表示威胁等级为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级的直觉模糊命题。

3 基于直觉模糊产生式规则的推理算法

直觉模糊产生式规则推理具有3种基本结构,本文给出这3种基本推理结构的推理方法,具体如下:

① 单命题条件推理

if $P_a(\mu_a, \gamma_a)$ then $P_c(\mu_c, \gamma_c)$, ($CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$, $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$)

当 $\mu_a \geq \alpha_i, \gamma_a \leq \beta_i$, 则触发规则, 得到:

$$\begin{cases} \mu_c = \mu_a \times C\mu_i \\ \gamma_c = \gamma_a + C\gamma_i - \gamma_a \times C\gamma_i \end{cases} \quad (7)$$

② 多命题条件合取推理

if $P_{a1}(\mu_{a1}, \gamma_{a1})$ and $P_{a2}(\mu_{a2}, \gamma_{a2})$ and \dots and $P_{aj}(\mu_{aj}, \gamma_{aj})$ then $P_c(\mu_c, \gamma_c)$, ($CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$, $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$)

当 $\min(\mu_{a1}, \mu_{a2}, \dots, \mu_{an}) \geq \alpha_i, \max(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \dots, \gamma_{an}) \leq \beta_i$, 则触发规则, 得到:

$$\begin{cases} \mu_c = \min(\mu_{a1}, \mu_{a2}, \dots, \mu_{an}) \times C\mu_i \\ \gamma_c = \max(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \dots, \gamma_{an}) + C\gamma_i - \max(\gamma_{a1}, \gamma_{a2}, \dots, \gamma_{an}) \times C\gamma_i \end{cases} \quad (8)$$

③ 多命题条件析取推理

if $P_{a1}(\mu_{a1}, \gamma_{a1})$ or $P_{a2}(\mu_{a2}, \gamma_{a2})$ or \dots or $P_{aj}(\mu_{aj}, \gamma_{aj})$ then $P_c(\mu_c, \gamma_c)$, ($CF_i = (C\mu_i, C\gamma_i)$, $\lambda_i = (\alpha_i, \beta_i)$)

当所有条件同时满足 $\mu_{an} \geq \alpha_i, \gamma_{an} \leq \beta_i$, 则触发规则, 得到:

$$\begin{cases} \mu_c = \max(\mu_{a1} \times C\mu_i, \mu_{a2} \times C\mu_i, \dots, \mu_{an} \times C\mu_i) \\ \gamma_c = \min(\gamma_{a1} + C\gamma_i - \gamma_{a1} \times C\gamma_i, \gamma_{a2} + C\gamma_i - \gamma_{a2} \times C\gamma_i, \dots, \gamma_{an} + C\gamma_i - \gamma_{an} \times C\gamma_i) \end{cases} \quad (9)$$

其他直觉模糊产生式规则结构推理方法均可由以上3种基本结构推理得到。

基于直觉模糊产生式规则的威胁等级判断方法具体步骤如下:

步骤1:对空中目标的属性数据进行模糊处理;

步骤2:根据已处理的属性数据,通过隶属度函数和非隶属度函数,得到直觉模糊数;

步骤3:结合威胁判断等级规则库以及推理方法,对目标进行威胁等级推理划分。

4 仿真试验

参考文献[8]的仿真案例,选取16批典型空中目标的属性参数值如表2所示。

表2 典型空中目标威胁等级判断指标属性参数值

目标	敌我识别	目标类型	攻击意图	拦截紧急程度
M_1	敌方	反舰导弹	明显	立即拦截
M_2	敌方	歼轰机	明显	立即拦截
M_3	敌方	歼击机	较明显	立即拦截
M_4	敌方	干扰机	较明显	暂缓拦截
M_5	敌方	预警机	不明显	暂缓拦截
M_6	敌方	干扰机	较明显	暂缓拦截
M_7	敌方	加油机	不明显	无需拦截
M_8	敌方	武装直升机	明显	立即拦截
M_9	敌方	侦察机	不明显	暂缓拦截
M_{10}	敌方	轰炸机	明显	暂缓拦截
M_{11}	敌方	反潜机	不明显	暂缓拦截
M_{12}	敌方	侦察无人机	不明显	无需拦截
M_{13}	中立方	反潜机	不明显	无需拦截
M_{14}	中立方	歼击机	不明显	无需拦截
M_{15}	我方	预警机	不明显	无需拦截
M_{16}	我方	民航飞机	不明显	无需拦截

根据实际情况将表2中的属性参数模糊处理,得到如表3所示数据。

表3 经模糊处理后的属性值

目标	敌我识别	目标类型	攻击意图	拦截紧急程度
M_1	0.10	0.10	0.10	0.10
M_2	0.15	0.15	0.15	0.15
M_3	0.10	0.10	0.60	0.15
M_4	0.10	0.60	0.60	0.60
M_5	0.15	0.60	0.90	0.60
M_6	0.10	0.60	0.40	0.60
M_7	0.10	0.60	0.90	0.90
M_8	0.15	0.10	0.15	0.15
M_9	0.15	0.60	0.90	0.60
M_{10}	0.15	0.10	0.1	0.60
M_{11}	0.15	0.60	0.90	0.60
M_{12}	0.15	0.60	0.90	0.90
M_{13}	0.60	0.60	0.90	0.90
M_{14}	0.60	0.10	0.90	0.90
M_{15}	0.90	0.60	0.90	0.90
M_{16}	0.90	0.85	0.90	0.90

根据表3数据求取相应指标属性的隶属度和非隶属度

信息,并将其作为威胁等级判断推理机的输入,得到威胁等级的直觉模糊数如表4所示。

表4 目标威胁等级直觉模糊数

目标	I级威胁	II级威胁	III级威胁
M_1	$\langle 0.740\ 7, 0.069\ 9 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.144\ 4 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.946\ 7 \rangle$
M_2	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.139\ 0 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.895\ 3 \rangle$
M_3	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.144\ 4 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.946\ 7 \rangle$
M_4	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.740\ 7, 0.069\ 9 \rangle$	$\langle 0.0519, 0.946\ 7 \rangle$
M_5	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.895\ 3 \rangle$
M_6	$\langle 0.0003, 0.1500 \rangle$	$\langle 0.740\ 7, 0.069\ 9 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.946\ 7 \rangle$
M_7	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.0519, 0.144\ 4 \rangle$	$\langle 0.740\ 7, 0.239\ 3 \rangle$
M_8	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.0519, 0.144\ 4 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.895\ 3 \rangle$
M_9	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.895\ 3 \rangle$
M_{10}	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.144\ 4 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.895\ 3 \rangle$
M_{11}	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.561\ 0, 0.089\ 3 \rangle$	$\langle 0.102\ 0, 0.895\ 3 \rangle$
M_{12}	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.051\ 9, 0.144\ 4 \rangle$	$\langle 0.740\ 7, 0.239\ 3 \rangle$
M_{13}	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.772\ 6, 0.206\ 5 \rangle$
M_{14}	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.000\ 3, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.772\ 6, 0.206\ 5 \rangle$
M_{15}	$\langle 0.000\ 0, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.000\ 0, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.740\ 7, 0.239\ 3 \rangle$
M_{16}	$\langle 0.000\ 0, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.000\ 0, 0.150\ 0 \rangle$	$\langle 0.740\ 7, 0.239\ 3 \rangle$

由表4分析可知,目标 M_1 的威胁等级判断结果:I级威胁的隶属度为0.7407,非隶属度为0.0699,II级和III级威胁等级隶属度都为0.0519,非隶属度分别为0.1444和0.9467,这说明目标 M_1 威胁等级属于I级威胁的可能性较高。分析目标 M_1 的因素属性,敌我识别为敌方目标,目标类型为反舰导弹属于I类目标,对我方编队构成严重现实威胁,且攻击意图明显或较明显,需要立即进行拦截;目标 M_5 的威胁等级判断结果:I级威胁的隶属度为0.0003,非隶属度为0.1500,II级和III级威胁等级隶属度分别为0.5610和0.1020,非隶属度分别为0.0893和0.8953,这说明目标 M_5 威胁等级属于II级威胁的可能性较高。分析目标 M_5 的因素属性,敌我识别为敌方目标,目标类型为预警机属于II类目标,对我方编队不构成直接威胁,且由于距离较远,无法进行拦截; M_{13} , M_{14} , M_{15} , M_{16} 均属于我方或中立方目标,对我编队不构成威胁,因此属于III级威胁; M_7 由于其拦截紧急程度为无需拦截,所以其判断结果为III级威胁。分析文献[8]中案例的仿真结果,目标类型为导弹类目标,攻击意图越明显、飞行速度越快、距离越近,则该目标的威胁等级就越高。综合分析,采用本文所提方法的目标威胁等级判断仿真结果与采用文献[8]所提方法的威胁等级判断结果相同,且结果中包含了隶属度、非隶属度及犹豫度等多种丰富的推理信息,能够准确地描述实际作战空袭目标威胁情况。仿真结果有效

验证了本文所提算法的可行性和有效性。

5 结论

基于直觉模糊产生式规则推理的空袭目标威胁等级判断方法能够准确有效地对典型目标数据信息进行模糊处理和不确定性推理,得到准确的分类结果。该方法威胁等级判断后可以有效过滤不必要的目标数据信息,提取重点需要探测跟踪处理的防空目标信息,减少防空作战指挥系统中威胁评估排序和火力资源分配的数据信息量,提高防空作战效率。

参考文献:

- [1] 昌飞,张欣毅,林莹.防空作战多目标威胁度排序决策研究[J].兵器装备工程学报,2009,30(1):105-107.
- [2] 陈绪龙,高剑,韩星.空中目标威胁等级评估方法研究[J].火控雷达技术,2015,44(1):19-23.
- [3] 田福平,汶博,郑鹏鹏.基于贝叶斯网络的作战目标评估[J].火力与指挥控制,2017(2):79-82.
- [4] 赵建军,王毅,杨利斌,等.基于动态贝叶斯网络的防空作战威胁估计[J].计算机技术与发展,2012,22(11):138-140.
- [5] BENAVALI A, RISTIC B, FARINA A, et al. An application of evidential networks to threat assessment[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2):620-639.
- [6] 伍之前,李登峰.基于推理和多属性决策的空中目标攻击意图判断模型[J].电光与控制,2010,17(5):10-13.
- [7] 黄文斌,陈颜辉,李洪联.基于模糊推理的目标攻潜武器判断[J].火力与指挥控制,2006,31(6):63-66.
- [8] 代进进,李相民.舰艇编队网络化防空作战空袭目标威胁评估[J].系统工程与电子技术,2013,35(3):532-538.
- [9] 孟飞翔,雷英杰,雷阳,等.基于直觉模糊Petri网的混合推理方法[J].电子学报,2017,45(8):1937-1945.
- [10] 孟飞翔,雷英杰,余晓东,等.基于直觉模糊Petri网的知识表示和推理[J].电子学报,2016,44(1):77-85.
- [11] 雷英杰,王宝树,王毅.基于直觉模糊推理的威胁评估方法[J].电子与信息学报,2007,29(9):2077-2081.
- [12] 张成,石全,刘铁林.云重心评判法在目标毁伤效果评估中的应用[J].计算机仿真,2012,62(7):118-124.