

基于直觉模糊推理的威胁评估方法

雷英杰^{①②} 王宝树^① 王毅^②

^①(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

^②(空军工程大学导弹学院计算机系 三原 713800)

摘要: 该文针对威胁评估问题,提出一种基于直觉模糊推理的评估方法。首先,分析了联合防空作战中空天来袭目标影响威胁评估的主要因素、威胁评估的不确定性,以及现有威胁评估方法的特点与局限性,建立了威胁程度等级划分的量化模型。其次,设计了系统状态变量的属性函数,讨论了在模糊化策略方面对输入变量进行的量化和量纲变换方法。再次,建立了系统推理规则,设计了推理算法和清晰化算法,分析了规则库中所包含规则的完备性、相互作用性和相容性,给出了规则库的检验方法。最后,以20批典型目标的威胁评估实例,验证了方法的有效性。

关键词: 信息融合; 威胁评估; 直觉模糊推理; 威胁判断

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2077-05

Techniques for Threat Assessment Based on Intuitionistic Fuzzy Reasoning

Lei Ying-jie^{①②} Wang Bao-shu^① Wang Yi^②

^①(School of Computer Science and Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China)

Abstract: To the questions of Threat Assessment (TA), a technique for TA based on intuitionistic fuzzy reasoning is proposed. First, the major factors of effects of attacking targets from space or air on TA in joint air defense operations, nondeterminacy to TA, and the properties and vulnerabilities of the existing TA methods are analyzed. A model for TA measurement rank of threat degree is exposed. Then, the membership and nonmembership functions for input/output state variables are devised. The methods for quantification and measurement transformation to input variables in fuzzy strategy are addressed. The inference rules of the system are constructed with algorithms for reasoning and defuzzification devised. Subsequently, completeness and interactivity and consistency of rules contained in the rulebase are checked with a verification method to the rulebase presented. Finally, the validity is checked by providing TA instances with 20 typical targets.

Key words: Information fusion; Threat assessment; Intuitionistic fuzzy reasoning; Threat verdict

1 引言

按照JDL信息融合模型^[1,2],威胁评估(Threat Assessment, TA)处于第三级,其功能是量化判断敌方的兵力结构部署或武器装备系统对我方构成威胁的能力和敌方可能的行动意图。这一级融合接收前一级态势评估的输出作为输入,其输出为一威胁视图,描述敌方的目标位置及威胁程度,处理过程常采用贝叶斯网络、模糊推理、黑板模型、模板匹配、计划识别、D-S证据理论、指数法、对策论、多属性决策理论、条件事件代数、统计时间推理、主动权指数、Lachester方程、集对分析、案例推理、专家系统与机器学习等诸多方法^[3,4]。这些方法各有千秋,分别适应不同的情形。其共同点是在综合考虑多因素对威胁程度的影响及推理解释等方面欠缺或不足^[4-6]。有鉴于此,本文提出一种基于直觉模糊推理的威胁评估方法。

直觉模糊集^[7-9]是对Zadeh模糊集的有效扩充和发展,已

经在多属性决策、医疗图像处理、模式识别、战场态势评估等领域取得成功应用^[10]。理论分析与实践表明,直觉模糊集理论在语义表述^[11]和推理能力^[12-14]等方面都优于Zadeh模糊集。

2 威胁评估问题描述

未来防空作战环境越来越复杂,大规模的空天袭击,可能来自太空、高空、中空、低空、超低空等不同空域,而且目标类型有轰炸机、直升机、空地导弹、巡航导弹等多种多样,有时伴随假目标、诱饵和干扰等等。在这种多批次、多方向、多层次、连续饱和攻击等情况下,地面指挥员很难人为做出合理的指挥决策。因此,对空天来袭目标的威胁程度做出准确的判断,成为防空作战决策的重要环节。

空中目标特征描述为目标类型、距离、速度、加速度、数量、方位、遂行任务企图、干扰能力、空袭样式、平台机载武器装备及突防能力等多个方面。其中的每一个因素都会对综合的威胁程度产生影响,而敌目标威胁程度的大小是由多种属性共同决定的。例如,当目标的航向角处于径向临近

区域 ($\theta \leq 5^\circ$), 则该目标可能构成的威胁最大, 但当其距离极远 ($R \geq 800 \text{ km}$) 时, 则尚不能形成现实威胁。因此, 在进行威胁程度判断时, 应综合考虑各方面因素的影响。

威胁评估或判断过程涉及许多不确定性的因素, 譬如: 目标类型的不确定性, 目标攻击方式的不确定性, 作战区域气象条件、地理环境、敌方、我方、友邻、中立方军队的兵力部署情况的不确定性, 等等。因此, 威胁判断属于信息不全、信息不确定、信息模糊等条件下的在线式战术决策问题。

在防空作战中, 威胁评估或判断的使命就是根据空天来袭目标的特征因素, 确定每一批目标对我防空火力单元或保卫要地构成的威胁程度, 并给出一个综合性的威胁估计值。

3 威胁程度量化等级

假定敌方能力与意图对我方产生的综合威胁程度为 T , 则可设定威胁等级判定门限分别为 $T_0 < T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$, 再根据 T 的具体值, 综合防空作战的实用性与方便性、模型处理的可行性与实时性、指挥员的思维习惯等多方面因素, 将来袭目标的威胁等级量化为 7 级: 重大/很大(VG), 较大(GR), 大(GT), 中等(MD), 较小(ST), 极小(TT), 无(NT), 依次标识为 6-0 级。

4 威胁评估的直觉模糊推理方法

在运用直觉模糊推理方法进行威胁评估求解时, 首先应建立系统状态变量的属性函数; 其次在确定的模糊空间, 建立推理合成规则, 设计推理算法和解模糊算法; 最后进行规则库检验和威胁评估实例研究, 确定评估结果。

4.1 状态变量的属性函数

根据威胁评估的问题描述, 可以根据空中目标的特征, 设计出目标类型 x , 距离 r , 空袭样式 h , 速度 v , 航向角 θ , 干扰能力 g , 机载武器 q 及突防能力 s 等的隶属度函数和非隶属度函数。为便于研究规则的完备性、互作用性、相容性, 隶属函数采用 Gauss 型, 即

$$\mu_A(x) = \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right], \quad \gamma_A(x) = 1 - \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

这里为简化起见, 令 $\pi_A(x) = 0$, 式中 σ 和 c 为函数的参数, 分别代表宽度和中心。

需要指出, 简化条件的设置是合理的。因为当直觉指数 $\pi_A(x) = 0$ 时, 非隶属度函数 $\gamma_A(x)$ 的反制作用或形成的反对程度最强。在此情形, 如果得到的结论是可信的、有效的, 那么当直觉指数 $\pi_A(x) > 0$ 时, 亦即非隶属度函数 $\gamma_A(x)$ 的反制作用或形成的反对程度减弱时, 所得到结果的可信度将会更高、更有效。

据此, 可以设计各个状态变量论域及其直觉模糊子集。

目标类型论域 X , 来袭目标的类型可按照其反射面积分为小型目标: 战术弹道导弹(TBM)、空地导弹(AGM)、反辐射导弹(ARM)、巡航导弹、隐身飞机等; 大型目标: 轰炸机、歼击轰炸机、强击机等; 其他目标: 武装直升机等, 它们分

别对应直觉模糊子集 $X_1[0.225, 0]$, $X_2[0.225, 0.5]$, $X_3[0.225, 1]$, 其中 $\sigma = 0.225$ 。

距离论域 R , 设来袭目标的距离变化范围为 $[0, 1200 \text{ km}]$ 。状态变量 r 可划分为临空 $[0.125, 0]$, 近距 $[0.125, 0.25]$, 中距 $[0.125, 0.5]$, 远距 $[0.225, 0.75]$, 很远 $[0.225, 1]$ 。它们分别对应直觉模糊子集 R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 , 其中 $\sigma = 0.125$ 。输入变量 r 为

$$r = \begin{cases} x/480, & x \leq 60 \text{ km} \\ (x-130)/560 + 0.25, & 60 < x \leq 200 \text{ km} \\ (x-350)/1200 + 0.5, & 200 < x \leq 500 \text{ km} \\ (x-650)/1200 + 0.75, & 500 < x \leq 800 \text{ km} \\ (x-1200)/3200 + 1, & x > 800 \text{ km} \end{cases} \quad (2)$$

空袭样式论域 H , 来袭目标的高度变化范围为 $[0, 30000 \text{ m}]$ 。对状态变量空袭样式 h 划分为 4 个区域: 超低空 $[0.1667, 0]$, 低空 $[0.1667, 0.3333]$, 中空 $[0.1667, 0.6667]$, 高空 $[0.1667, 1]$ 。它们分别对应直觉模糊子集 H_1, H_2, H_3, H_4 , 其中 $\sigma = 0.1667$ 。输入变量 h 为

$$h = \begin{cases} x/4800, & x \leq 800 \text{ m} \\ (x-4400)/21600 + 0.3333, & 800 < x \leq 8000 \text{ m} \\ (x-11500)/21000 + 0.6667, & 8000 < x \leq 15000 \text{ m} \\ (x-30000)/90000 + 1, & x > 15000 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

速度论域 V , 来袭目标的速度变化范围为 $[0, 1800 \text{ m/s}]$, 对状态变量 v 定义 5 个函数: 超高速 $[0.125, 0]$, 高速 $[0.125, 0.25]$, 中速 $[0.125, 0.5]$, 低速 $[0.125, 0.75]$, 慢速 $[0.125, 1]$ 。它们分别对应直觉模糊子集 V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 , 其中 $\sigma = 0.125$ 。输入变量 v 为

$$v = \begin{cases} (1800-x)/8000, & 800 < x \leq 1800 \text{ m/s} \\ (650-x)/1200 + 0.25, & 500 < x \leq 800 \text{ m/s} \\ (360-x)/1120 + 0.5, & 220 < x \leq 500 \text{ m/s} \\ (150-x)/560 + 0.75, & 80 < x \leq 220 \text{ m/s} \\ (-x)/640 + 1, & x \leq 80 \text{ m/s} \end{cases} \quad (4)$$

航向角论域 B , 来袭目标的航向角 θ 变化范围为 $[0, 180^\circ]$, 对状态变量 θ 定义 7 个函数: 径向临近 $[0.0833, 0]$, 临近 $[0.0833, 0.1667]$, 侧翼临近 $[0.0833, 0.3333]$, 迂回临近 $[0.0833, 0.5]$, 侧迂临近 $[0.0833, 0.6667]$, 侧翼 $[0.0833, 0.8333]$, 背离 $[0.0833, 1]$, 分别对应输入直觉模糊子集 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7$, 其中 $\sigma = 0.0833$, 输入变量 θ 为

$$\theta = \begin{cases} 2x/125, & x \leq 5^\circ \\ 4(x-7.5)/125 + 0.1667, & 5 < x \leq 10^\circ \\ 4(x-12.5)/125 + 0.3333, & 10 < x \leq 15^\circ \\ 4(x-17.5)/125 + 0.5, & 15 < x \leq 20^\circ \\ (x-30)/125 + 0.6667, & 20 < x \leq 40^\circ \\ 2(x-65)/625 + 0.8333, & 40 < x \leq 90^\circ \\ 2(x-135)/1125 + 1, & 90 < x \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5)$$

干扰能力论域 G , 来袭目标的干扰能力 g 可大致分为强 $[0.1667, 0]$, 中 $[0.1667, 0.3333]$, 弱 $[0.1667, 0.6667]$, 无 $[0.1667, 1]$, 共 4 个级别, 分别对应直觉模糊子集 G_1, G_2, G_3, G_4 , 其中 $\sigma=0.125$ 。

机载武器论域 Q , 来袭目标的机载武器 q 可粗略分为核弹、常规武器装备或其他(如指挥通信设备、干扰设备、侦察设备、软杀伤等)设备 3 类, 分别对应直觉模糊子集 $Q_1[0.25, 0]$, $Q_2[0.25, 0.5]$, $Q_3[0.25, 1]$, 其中 $\sigma=0.225$ 。

在输出论域 U , 来袭目标的威胁等级共划分为 7 级: VG, GR, GT, MD, ST, TT, NT, 依次标识为 6-0 级, 分别对应于直觉模糊子集 $U_1[0.1, 1]$, $U_2[0.1, 0.8333]$, $U_3[0.1, 0.6667]$, $U_4[0.1, 0.5]$, $U_5[0.1, 0.3333]$, $U_6[0.1, 0.1667]$, $U_7[0.1, 0]$, 其中 $\sigma=0.1$ 。

由于输入空间是非线性的, 所以在模糊化策略方面对输入变量进行了量化和量程变换。其步骤是: (1) 确定函数的中心值对 (c, x_0) 和某一区间任一点值对 $(c+d, x_1)$; (2) 求取变换系数或比例因子 $k=d/(x_1-x_0)$; (3) 求得输入状态变量变换关系 $s=k(x-x_0)+c$ 。这里, c 是状态变量空间的函数中心的自变量值, x_0 是输入变量空间的该区间中心的自变量值。经此处理后, 各个输入状态变量的隶属度函数和非隶属度函数均定义在区间 $[0,1]$, 便于统一处理。

4.2 推理规则

威胁评估的输入参数 x, r, v, θ, g, h 及 q 等状态变量的属性函数个数分别为 $N_x=3, N_r=5, N_v=5, N_\theta=7, N_g=4, N_h=4, N_q=3$ 。威胁评估输出量的属性函数个数 $N_u=7$ 。

从理论上讲, 为了获得可信的推理结果, 规则越多越好, 越精细越好。但从实现考虑, 必须对规则进行简化, 以避免“组合爆炸”。为此, 可忽略一些次要的或难以获取的因素, 如突防能力 s 等; 减少某些输入变量的隶属度函数的个数, 如目标类型 x , 航向角 θ 等, 即可使系统的推理规则总数显著减少。另外, 由于其中有一些组合规则无实际意义, 如当判明为核弹载机时, 干扰能力 g , 空袭样式 h 以及其他许多因素即可不予考虑, 所以可进行合并, 从而使实现时应考虑的推理规则总数进一步减少。

推理规则是多重多维的, 其形式为

IF x is X_{ix} and r is R_{ir} and h is H_{ih}
and v is V_{iv} and θ is $B_{i\theta}$ and g
is G_{ig} and q is Q_{iq}

THEN z is C_j

$i_x=1, 2, \dots, N_x, i_r=1, 2, \dots, N_r, i_h=1, 2, \dots, N_h,$
 $i_\theta=1, 2, \dots, N_\theta, i_v=1, 2, \dots, N_v, i_g=1, 2, \dots, N_g, i_q=1,$
 $2, \dots, N_q, j=1, 2, \dots, N_u$

其中 $x, r, v, \theta, g, h, q, s$ 是输入变量, z 是输出变量。 $X_{ix}, R_{ir}, H_{ih}, V_{iv}, B_{i\theta}, G_{ig}, Q_{iq}$ 是前提部分语言项, 分别为 $\langle x, \mu_{X_i}, \gamma_{X_i} \rangle, x \in X; \langle r, \mu_{R_i}, \gamma_{R_i} \rangle, r \in R; \langle h, \mu_{H_i}, \gamma_{H_i} \rangle,$
 $h \in H; \langle v, \mu_{V_i}, \gamma_{V_i} \rangle, v \in V; \langle \theta, \mu_{B_i}, \gamma_{B_i} \rangle, \theta \in B;$

$\langle g, \mu_{G_i}, \gamma_{G_i} \rangle, g \in G; \langle q, \mu_{Q_i}, \gamma_{Q_i} \rangle, q \in Q$ 。 C_j 为输出论域中的一个模糊子集 $U_k, k=1, 2, \dots, N_u$, 即 $\langle z, \mu_{U_k}, \gamma_{U_k} \rangle,$
 $z \in U$ 。

建立威胁评估系统的推理规则, 并植入 TA 推理系统, 可以得到其控制输出映射曲面(略)。

4.3 推理合成算法

TA 系统的基本结构是这样模型, 它将输入特性映射为属性函数, 输入属性函数映射为规则, 规则映射为一组输出特性, 输出特性映射为输出属性函数, 输出属性函数映射为一个单值输出或与单值输出相关的决策。本例采用 “ \vee - \wedge ” 合成运算, 直觉模糊关系取

$$R(X_{ix}, R_{ir}, H_{ih}, V_{iv}, B_{i\theta}, G_{ig}, Q_{iq}; C_j) = R_c(X_{ix}, R_{ir}, H_{ih}, V_{iv}, B_{i\theta}, G_{ig}, Q_{iq}; C_j) \quad (6)$$

由直觉模糊逻辑推理法则可知, 对于每一条规则可以得到一个输入输出关系 R_k 为

$$R_k = R((X_{ix}) \cap (R_{ir}) \cap (H_{ih}) \cap (V_{iv}) \cap (B_{i\theta}) \cap (G_{ig}) \cap (Q_{iq}) \rightarrow C_j) \\ = R(X_{ix}, R_{ir}, H_{ih}, V_{iv}, B_{i\theta}, G_{ig}, Q_{iq}; C_j) \quad (7)$$

从而由直觉模糊规则的合成运算可得总的直觉模糊关系 R 为

$$R = \bigcup_{i_x, i_r, i_h, i_v, i_\theta, i_g, i_q=1}^{N_x, N_r, N_h, N_v, N_\theta, N_g, N_q; N_u} R(X_{ix}, R_{ir}, H_{ih}, V_{iv}, B_{i\theta}, G_{ig}, Q_{iq}; C_j) \\ = \bigcup_{i_x, i_r, i_h, i_v, i_\theta, i_g, i_q=1}^{N_x, N_r, N_h, N_v, N_\theta, N_g, N_q; N_u} R(X_{ix} \cap R_{ir} \cap H_{ih} \cap V_{iv} \cap B_{i\theta} \\ \cap G_{ig} \cap Q_{iq} \cap C_j)$$

即

$$\mu_R(x, r, h, v, \theta, g, q, z) \\ = \bigvee_{i_x, i_r, i_h, i_v, i_\theta, i_g, i_q=1}^{N_x, N_r, N_h, N_v, N_\theta, N_g, N_q; N_u} (\mu_{X_{ix}}(x) \wedge \mu_{R_{ir}}(r) \wedge \mu_{H_{ih}}(h) \\ \wedge \mu_{V_{iv}}(v) \wedge \mu_{B_{i\theta}}(\theta) \wedge \mu_{G_{ig}}(g) \wedge \mu_{Q_{iq}}(q) \wedge \mu_{U_j}(z)) \\ \gamma_R(x, r, h, v, \theta, g, q, z) \\ = \bigwedge_{i_x, i_r, i_h, i_v, i_\theta, i_g, i_q=1}^{N_x, N_r, N_h, N_v, N_\theta, N_g, N_q; N_u} (\gamma_{X_{ix}}(x) \vee \gamma_{R_{ir}}(r) \vee \gamma_{H_{ih}}(h) \\ \vee \gamma_{V_{iv}}(v) \vee \gamma_{B_{i\theta}}(\theta) \vee \gamma_{G_{ig}}(g) \vee \gamma_{Q_{iq}}(q) \vee \gamma_{U_j}(z)) \\ \forall x \in X, \forall r \in R, \forall h \in H, \forall v \in V, \forall \theta \in B, \forall g \in G, \\ \forall q \in Q, \forall z \in U$$

式中 $X_{ix}, R_{ir}, H_{ih}, V_{iv}, B_{i\theta}, G_{ig}, Q_{iq}$ 分别为定义在目标类型论域 X , 距离论域 R , 高度论域 H , 速度论域 V , 航向角论域 B , 干扰能力论域 G 及武器类型论域 Q 上的直觉模糊子集, C_j 为定义在输出论域 U 上的直觉模糊子集 U_j 。

某时刻的输入为 X', R', H', V', B', G' 和 Q' , 由推理合成规则, 得到输出 C' 为

$$C' = (X' \times R' \times H' \times V' \times B' \times G' \times Q') \circ R \quad (8)$$

即

$$\mu_{C'}(z) = \bigvee_{z \in U} (\mu_{X'}(x) \wedge \mu_{R'}(r) \wedge \mu_{H'}(h) \wedge \mu_{V'}(v) \wedge \mu_{B'}(\theta) \\ \wedge \mu_{G'}(g) \wedge \mu_{Q'}(q) \wedge \mu_R(x, r, h, v, \theta, g, q, z))$$

$$\begin{aligned}\gamma_{C'}(z) = & \bigwedge_{\forall z \in U} (\gamma_{X'}(x) \vee \gamma_{R'}(r) \vee \gamma_{H'}(h) \vee \gamma_{V'}(v) \vee \gamma_{B'}(\theta) \\ & \vee \gamma_{C'}(g) \vee \gamma_{Q'}(q) \vee \gamma_R(x, r, h, v, \theta, g, q, z)) \\ \forall x \in X, \forall r \in R, \forall h \in H, \forall v \in V, \forall \theta \in B, \forall g \in G, \\ \forall q \in Q, \forall z \in U\end{aligned}$$

4.4 解模糊算法

直觉模糊集的解模糊算法通常有最大真值法、重心法、加权平均法等。本文采用重心法。直觉模糊重心法是取隶属函数和非隶属度函数合成的真值函数曲线与横坐标围成面积的重心为直觉模糊推理的最终输出值, 即

$$\begin{aligned}z_0 &= \int_U \left[z \left(\mu_F(z) + \frac{1}{2} \pi_F(z) \right) \right] dz \bigg/ \int_U \left[\mu_F(z) + \frac{1}{2} \pi_F(z) \right] dz \\ &= \int_U \left[z \left(1 + \mu_F(z) + \gamma_F(z) \right) \right] dz \bigg/ \int_U \left[1 + \mu_F(z) + \gamma_F(z) \right] dz\end{aligned}\quad (9)$$

式中 U 为输出论域, F 为定义在输出论域 U 上的直觉模糊子集。

对于有 N_u 个输出量化级数的离散论域, 需要将各级量化输出结果进行合成, 即

$$\begin{aligned}u_0 &= \sum_{k=1}^{N_u} u \left[\mu_{U_k}(u) + \frac{1}{2} \pi_{U_k}(u) \right] \bigg/ \sum_{k=1}^{N_u} \left[\mu_{U_k}(u) + \frac{1}{2} \pi_{U_k}(u) \right] \\ &= \sum_{k=1}^{N_u} u \left[1 + \mu_{U_k}(u) + \gamma_{U_k}(u) \right] \bigg/ \sum_{k=1}^{N_u} \left[1 + \mu_{U_k}(u) + \gamma_{U_k}(u) \right]\end{aligned}\quad (10)$$

重心法具有比较平滑的输出推理控制。即对应于输入信

号的微小变化, 其推理的最终输出一般也会发生一定的变化, 且这种变化明显比较平滑。

5 规则库检验

规则库检验主要分析规则库中所包含规则的完备性 (Completeness)、相互作用性 (Interactivity) 和相容性 (Consistency), 体现规则库的合理性和有效性。

完备性要求是指对任何一种输入状态, 总可以在规则库中找到一条规则, 使这个输入状态和该规则前件的匹配度大于 ε , 该规则可以在 ε 程度上被激活。实际设计时, ε 应在区间 $[0, 1]$ 适当选取。若 ε 太小, 则规则的完备性变坏; 若 ε 太高, 则系统的推理控制作用不灵敏。对于本例, 取 $\varepsilon = 0.5$ 。由于输入论域上定义的基本直觉模糊子集是相交的, 且两两相交的基本直觉模糊子集的交点处的隶属度函数与非隶属度函数的合成真值均大于 ε , 所以系统满足完备性要求。

同理, 对本例规则库进行相互作用性和相容性检验、分析和处理, 表明所得的规则库是合理的和有效的。

6 威胁评估举例

选取 20 批典型目标的属性参数值如表 1 所示。对来袭目标的威胁评估求解过程主要有 3 步: (1) 对目标属性测量值进行直觉模糊度量; (2) 根据属性函数求取输入变量值; (3) 提供输入向量, 运用直觉模糊推理机进行求解。

表 1 敌目标属性测量值

| 目标 | 目标类型 | 距离(km) | 高度(m) | 速度(m/s) | 武器类型 | 干扰能力 | 航向角 |
|----------|------|--------|-------|---------|------|------|-----|
| x_1 | 大型 | 100 | 22000 | 300 | 核弹 | 强 | 0° |
| x_2 | 大型 | 300 | 18000 | 420 | 核弹 | 中 | 6° |
| x_3 | 大型 | 510 | 10000 | 280 | 核弹 | 弱 | 12° |
| x_4 | 大型 | 810 | 6000 | 500 | 核弹 | 无 | 18° |
| x_5 | 大型 | 100 | 25000 | 300 | 常规 | 强 | 0° |
| x_6 | 大型 | 220 | 15000 | 420 | 常规 | 中 | 6° |
| x_7 | 大型 | 290 | 10000 | 280 | 常规 | 弱 | 12° |
| x_8 | 大型 | 360 | 6000 | 500 | 常规 | 无 | 18° |
| x_9 | 小型 | 100 | 20000 | 300 | 核弹 | 强 | 0° |
| x_{10} | 小型 | 300 | 12000 | 420 | 核弹 | 中 | 6° |
| x_{11} | 小型 | 280 | 8000 | 800 | 常规 | 弱 | 8° |
| x_{12} | 小型 | 350 | 3000 | 1200 | 常规 | 中 | 5° |
| x_{13} | 小型 | 80 | 1000 | 600 | 常规 | 强 | 3° |
| x_{14} | 小型 | 100 | 800 | 420 | 常规 | 中 | 6° |
| x_{15} | 小型 | 200 | 500 | 340 | 常规 | 弱 | 0° |
| x_{16} | 小型 | 300 | 300 | 500 | 常规 | 无 | 12° |
| x_{17} | 小型 | 510 | 25000 | 1600 | 常规 | 无 | 2° |
| x_{18} | 武直 | 60 | 300 | 60 | 常规 | 强 | 6° |
| x_{19} | 武直 | 80 | 200 | 80 | 常规 | 中 | 12° |
| x_{20} | 武直 | 120 | 100 | 40 | 常规 | 中 | 18° |

表2 敌目标属性输入值与直觉模糊求解的威胁评估值

| x_i | x | r | h | v | q | g | θ | u |
|----------|-----|-------|-------|-------|-----|-------|----------|-------|
| x_1 | 0.5 | 0.196 | 0.911 | 0.554 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.936 |
| x_2 | 0.5 | 0.458 | 0.867 | 0.446 | 0.0 | 0.333 | 0.119 | 0.828 |
| x_3 | 0.5 | 0.633 | 0.595 | 0.571 | 0.0 | 0.667 | 0.317 | 0.678 |
| x_4 | 0.5 | 0.878 | 0.407 | 0.375 | 0.0 | 1.000 | 0.516 | 0.486 |
| x_5 | 0.5 | 0.196 | 0.944 | 0.554 | 0.5 | 0.000 | 0.000 | 0.912 |
| x_6 | 0.5 | 0.392 | 0.833 | 0.446 | 0.5 | 0.333 | 0.119 | 0.837 |
| x_7 | 0.5 | 0.450 | 0.595 | 0.571 | 0.5 | 0.667 | 0.317 | 0.667 |
| x_8 | 0.5 | 0.508 | 0.407 | 0.375 | 0.5 | 1.000 | 0.516 | 0.486 |
| x_9 | 0.0 | 0.196 | 0.889 | 0.554 | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.896 |
| x_{10} | 0.0 | 0.458 | 0.691 | 0.446 | 0.0 | 0.333 | 0.119 | 0.828 |
| x_{11} | 0.0 | 0.442 | 0.500 | 0.125 | 0.5 | 0.667 | 0.183 | 0.802 |
| x_{12} | 0.0 | 0.500 | 0.268 | 0.075 | 0.5 | 0.333 | 0.080 | 0.857 |
| x_{13} | 0.0 | 0.161 | 0.176 | 0.292 | 0.5 | 0.000 | 0.048 | 0.873 |
| x_{14} | 0.0 | 0.196 | 0.167 | 0.446 | 0.5 | 0.333 | 0.119 | 0.833 |
| x_{15} | 0.0 | 0.375 | 0.104 | 0.518 | 0.5 | 0.667 | 0.000 | 0.865 |
| x_{16} | 0.0 | 0.458 | 0.063 | 0.375 | 0.5 | 1.000 | 0.317 | 0.678 |
| x_{17} | 0.0 | 0.633 | 0.944 | 0.025 | 0.5 | 1.000 | 0.032 | 0.887 |
| x_{18} | 1.0 | 0.125 | 0.063 | 0.906 | 0.5 | 0.000 | 0.119 | 0.844 |
| x_{19} | 1.0 | 0.161 | 0.042 | 0.875 | 0.5 | 0.333 | 0.317 | 0.696 |
| x_{20} | 1.0 | 0.232 | 0.021 | 0.938 | 0.5 | 0.333 | 0.516 | 0.495 |

例1 以表1中目标 x_1 为例, 得到参数输入向量: $I = [x \ r \ h \ v \ q \ g \ \theta] = [0.5 \ 0.196 \ 0.911 \ 0.554 \ 0 \ 0 \ 0]$, 将向量 I 作为TA推理机的输入, 求得威胁估计值为 $u=0.936$ 。

例2 以表1中目标 x_{12} 为例, 得到参数输入向量: $I = [x \ r \ h \ v \ q \ g \ \theta] = [0 \ 0.5 \ 0.268 \ 0.075 \ 0.5 \ 1 \ 0.080]$, 将向量 I 作为TA推理机的输入, 求得威胁估计值为 $u=0.857$ 。

仿此方法步骤, 可将表1中所列目标进行处理, 得到威胁评估处理结果如表2所示。

7 结束语

本文的主要贡献是将IFS理论引入信息融合领域, 用来进行威胁评估研究。理论分析与实例研究表明, 基于直觉模糊推理的威胁评估方法能够对每一批敌空中目标给出一个综合的威胁程度判断的评估值, 因而便于对来袭目标进行威胁排队、分类, 以及目标火力分配等后续处理, 这是该方法的一大优点。该方法另一优点是推理规则明确, 思路清晰, 便于体现专家的知识。因此, 本文提出的方法是一种有效的威胁评估方法。

参考文献

- [1] Llinas J and Hall D L. An introduction to multi-sensor data fusion [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems [C]. Monterey California USA, IEEE Press, 1998, 6: 537-540.
- [2] Steinberg A, Bowman C, and White F. Revisions to the JDL data fusion model [A]. SPIE, 1999, 3719: 430-441.
- [3] 徐毅, 金德琨, 敬忠良. 数据融合研究的回顾与展望[J]. 信息与控制, 2002, 31(3): 250-255.
- [4] Hinman M L. Some computational approaches for situation assessment and impact assessment [A]. Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion [C]. Annapolis Maryland USA, ISIF & IEEE Press, 2002, 1: 687-693.
- [5] Looney C G. Exploring fusion architecture for a common operational picture [J]. *Information Fusion*, 2001, 2(4): 251-260.
- [6] Looney C G and Liang L R. Cognitive situation and threat assessments of ground battlespaces [J]. *Information Fusion*, 2003, 4(4): 297-308.
- [7] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [8] Atanassov K. More on intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 33(1): 37-46.
- [9] Abbas S E. On intuitionistic fuzzy compactness[J]. *Information Sciences*, 2005, 173(1-3): 75-91.
- [10] Li Deng-Feng. Multiattribute decision making models and methods using intuitionistic fuzzy sets [J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2005, 70(1): 73-85.
- [11] 雷英杰, 王宝树. 直觉模糊逻辑的语义算子研究[J]. 计算机科学, 2004, 31(11): 4-6.
- [12] 李晓萍, 王贵君. 直觉模糊集的扩张运算[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(1): 40-46.
- [13] 雷英杰, 王宝树. 直觉模糊关系及其合成运算[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 113-118.
- [14] 雷英杰, 王宝树, 王晶晶. 直觉模糊条件推理与可信度传播[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1790-1793.

雷英杰: 男, 1956年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理与智能决策等。
 王宝树: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理与模式识别等。
 王毅: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为智能信息处理与信息融合。