

文章编号: 1001-0920(2011)08-1163-06

基于直觉模糊推理的目标识别方法

雷 阳, 雷英杰, 冯有前, 孔韦韦

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘 要: 针对目标识别特征值的不确定性问题, 提出一种基于直觉模糊推理的目标识别方法. 首先, 分析现有目标识别方法的不确定性与局限性, 并对空中目标识别问题及目标特征进行描述; 然后, 设计系统状态属性变量的隶属度函数与非隶属度函数; 最后, 建立直觉模糊推理规则, 设计推理合成算法和解模糊算法, 并检验所建规则的合理性. 仿真实例验证了所提方法的有效性与适用性.

关键词: 目标识别; 直觉模糊集; 直觉模糊推理; 推理规则; 推理算法; 解模糊

中图分类号: TP182

文献标识码: A

Techniques for target recognition based on intuitionistic fuzzy reasoning

LEI Yang, LEI Ying-jie, FENG You-qian, KONG Wei-wei

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, China. Correspondent: LEI Yang, E-mail: surina526@163.com)

Abstract: To the problems of uncertain property values of target recognition(TR), a target recognition method based on intuitionistic fuzzy reasoning(IFR) is proposed. Firstly, the inaccuracy and vulnerabilities of the existing TR methods are analyzed as well as the specific aerial TR and the characteristics of recognition issues stated. Then, the membership and nonmembership functions of property variables of system are designed. Finally, the inference rules of the system are constructed, algorithms of reasoning and defuzzification are designed, and the rationality of constructed rules is checked. Simulation results show the effectiveness and applicability of the proposed method.

Key words: target recognition; intuitionistic fuzzy sets; intuitionistic fuzzy reasoning; inference rules; reasoning algorithms; defuzzification

1 引 言

直觉模糊集(IFIS)^[1-4]是对Zadeh模糊集(ZFS)的有效扩充和发展. IFS增加了一个新的属性参数——非隶属度函数, 亦即IFS的隶属度、非隶属度和直觉指数可以分别表示支持、反对和中立这3种状态, 在处理模糊概念的不确定性问题等方面更具灵活性和实用性. IFS已在多属性决策、图像处理、模式识别、信息融合、网络安全等领域取得了成功应用, 因而引起众多学者的关注.

对于目标识别问题, 因为特征值具有很大程度的不确定性与模糊性, 所以目标识别方法的研究大都是基于不确定性理论的. 文献[5]研究了D-S证据理论数据融合方法在目标识别中的应用, 由D-S方法得到基本可信度分配后, 决策结果并没有一般性的统一方法, 必须根据具体问题具体分析; [6]研究了基于贝

叶斯网络的多传感器目标识别算法, 贝叶斯网络的节点与结构通过专家指导确定, 由于专家知识的有限性, 所构建的网络常与实际数据有较大偏差; [7]研究了模糊集在目标识别上的应用, ZFS在不确定性信息的描述和推理结果可信性等方面存在局限性.

理论分析与实践表明, IFS克服了ZFS处理信息的不准确性与局限性, 弥补了贝叶斯网络过分依赖先验知识的不足, 进而通过直觉模糊推理建立了基于规则的统一合理算法. 鉴于此, 本文提出一种基于直觉模糊推理的目标识别方法, 并通过仿真实例验证了该方法的有效性与适用性.

2 目标识别问题描述

在现代化战争中, 特别对于空天战场而言, 战争具有突发性、快速性、大纵深、全方位、持续时间短的特点. 战场的瞬息万变, 要求地面指挥员在极短时间

收稿日期: 2010-04-26; 修回日期: 2010-06-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60773209).

作者简介: 雷阳(1984—), 女, 博士生, 从事智能信息处理与信息融合的研究; 雷英杰(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理与智能决策等研究.

内作出准确的指挥决策是一件非常困难的事情,因此快速、准确及可靠地识别战场目标显得十分重要,而空中目标类型识别正确与否,将直接影响到防空火力的部署、分配及有效打击.目标识别主要是根据各种传感器获得的目标特征信息进行融合推理,以得到对目标的准确描述.目标识别领域的主攻方向是研究如何提取目标的特征量,利用特征量来区分不同的目标.为了获得对目标较为完整的描述,提高识别精度,通常利用多传感器进行融合识别.各类运动目标在每个特征值上的取值并非一成不变,而是具有很大程度的不确定性、模糊性和不稳定性,甚至特征值会有一定的重叠.目前,目标识别的有效途径主要有:目标特征识别、目标成像识别、无源探测识别、激光雷达识别、毫米波识别以及多传感器数据融合识别等.

在信息融合系统(JDL)模型中,目标识别过程为一级(即目标评估)过程,可为二、三级的态势评估和威胁评估提供准确的目标身份信息.目标识别问题包括敌我识别、类间识别和类型识别3个识别层次,均具有复杂的不确定性.本文只分析类型识别这一层次.

空中目标类型多种多样,有战术弹道导弹(TBM),空地导弹(AGM),巡航导弹(CM),隐身飞机(SA),反辐射导弹,战斗机,轰炸机,武装直升机,运输机以及预警监视机等.本文主要研究识别4个典型目标类型,即TBM,AGM,CM和SA,其他均归为普通目标(CT).空中目标特征可描述为:雷达反射截面积(S),巡航速度(V_H),垂直速度(V_V),飞行高度(H)和加速度(A).

在防空作战中,目标识别的使命是消除信息的不确定性并最终获得目标的类属解,通过每一批目标的属性特征值和推理合成算法确定其目标类型,并给出各种目标类型的隶属度、非隶属度及可信度.

3 目标识别的直觉模糊推理方法

在运用直觉模糊推理进行目标识别时,首先应建立系统状态变量的属性函数;然后建立推理规则,设计推理合成算法,并将推理结果解模糊;最后通过输出映射曲面检验规则的合理性.

3.1 状态变量的属性函数

根据空中目标的特征,设计出雷达反射截面积 s ,巡航速度 v_H ,垂直速度 v_V ,飞行高度 h 和加速度 a 等的隶属度函数与非隶属度函数.为便于研究,本文采用Gaussian型隶属度函数,即

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

$$\gamma_A(x) = \delta_A(x) - \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

其中: $\delta_A(x) = 1 - \pi_A(x)$; σ 和 c 为函数的参数,分别

表示宽度和中心; $\pi_A(x)$ 为直觉指数,根据具体情况给出.这样得到的 $\mu_A(x)$ 与 $\gamma_A(x)$ 会更加合理确切,所得结果的可信度会更高、更有效,且 $\delta_A(x)$ 是非犹豫指数.

可见,首先应确定各个状态变量论域,划分对应于每个论域的直觉模糊子集,得到参数 σ 和 c ;然后,确定各状态变量属性函数,即确定各个子集对应于函数 $(x-a)/b+c$ 的参数值 a, b, c .具体步骤如下:

Step 1: 根据各属性特性确定 x 的变化范围.

Step 2: 确定各个子集对应的值域 $[A, B]$.其中: A 为上限,是间隔连续点; B 为下限, $B = \sigma + c$.

Step 3: 确定参数 a, b, c .设子集变化范围是 $C < x \leq D$,有 $a = C + (D - C)/2$.将已确定的值域 $[A, B]$ 与子集变化范围 $C < x \leq D$ 代入 $(x-a)/b+c$ 中可确定 b, c 为各区域的中心点.

Step 4: 在每个子集对应的变化范围内,以 a 为节点,选取不同的小区域,多次代值以验证 x 前后的数值与相关正负,同时进行数值调整,并查看其合理性,观察该范围中的每一个值是否均可取到.

根据以上方法步骤确定各状态变量属性函数.

1) 雷达反射截面积(RCS)论域 S .雷达反射截面积可按大、中、小划分为3个区域: $[0.225, 0]$, $[0.225, 0.5]$, $[0.225, 1]$.它们分别对应于直觉模糊子集 s_1, s_2, s_3 ,其中 $\sigma = 0.225$.

输入变量 s 为

$$s = \begin{cases} (x - 7.5)/33.3333, & x > 15 \text{ m}^2; \\ (x - 8.5)/30.01 + 0.5, & 2 < x \leq 15 \text{ m}^2; \\ (-x)/3.6363 + 1, & x \leq 2 \text{ m}^2. \end{cases} \quad (3)$$

2) 巡航速度论域 V_H .来袭目标的合成速度变化范围为 $[0, 2200 \text{ m/s}]$,对状态变量定义6个函数,即:超高速 $[0.1, 0]$,高速 $[0.1, 0.2]$,次高速 $[0.1, 0.4]$,中速 $[0.1, 0.6]$,低速 $[0.1, 0.8]$ 和超低速 $[0.1, 1]$.它们分别对应于直觉模糊子集 $V_{H1}, V_{H2}, V_{H3}, V_{H4}, V_{H5}, V_{H6}$,其中 $\sigma = 0.1$.

输入变量 v_H 为

$$v_H = \begin{cases} 0.5x/2000, & 1800 < x \leq 2200 \text{ m/s}; \\ (x - 1500)/3000 + 0.2, & 1200 < x \leq 1800 \text{ m/s}; \\ (x - 900)/3000 + 0.4, & 600 < x \leq 1200 \text{ m/s}; \\ (x - 500)/1000 + 0.6, & 400 < x \leq 600 \text{ m/s}; \\ (x - 300)/1000 + 0.8, & 200 < x \leq 400 \text{ m/s}; \\ (-x)/1000 + 1, & x \leq 200 \text{ m/s}. \end{cases} \quad (4)$$

3) 垂直速度论域 V_V .来袭目标速度纵向变化

范围为 [0, 500 m/s], 同样分为低速、中速、高速和超高速4个层次. 对状态变量定义4个函数 [0.1667, 0], [0.1667, 0.3333], [0.1667, 0.6667], [0.1667, 1]. 它们对应的直觉模糊子集分别是 $V_{V_1}, V_{V_2}, V_{V_3}, V_{V_4}$, 其中 $\sigma = 0.1667$.

输入变量 v_v 为

$$v_v = \begin{cases} x/89.982, & 0 < x \leq 30 \text{ m/s}; \\ (x - 65)/209.958 + 0.3333, & 30 < x \leq 100 \text{ m/s}; \\ (x - 200)/599.88 + 0.6667, & 100 < x \leq 300 \text{ m/s}; \\ (-x)/600.24 + 1, & 300 < x \leq 500 \text{ m/s}. \end{cases} \quad (5)$$

4) 飞行高度论域 H . 来袭目标飞行高度变化范围为 [0, 30000 m], 对状态变量飞行高度 h 可划分为5个区域, 即: 超低空 [0.125, 0], 低空 [0.125, 0.25], 中空 [0.125, 0.5], 高空 [0.125, 0.75], 超高空 [0.125, 1]. 它们分别对应于直觉模糊子集 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 , 其中 $\sigma = 0.125$.

输入变量 h 为

$$h = \begin{cases} x/2400, & 200 < x \leq 800 \text{ m}; \\ (x - 3900)/24800 + 0.25, & 800 < x \leq 7000 \text{ m}; \\ (x - 11000)/32000 + 0.5, & 7000 < x \leq 15000 \text{ m}; \\ (x - 19000)/32000 + 0.75, & 15000 < x \leq 27000 \text{ m}; \\ (x - 30000)/12000 + 1, & 27000 < x \leq 30000 \text{ m}. \end{cases} \quad (6)$$

5) 加速度论域 A . 其变化范围为 [0, 30 m/s²], 来袭目标加速度可按大、中、小划分为3个区域 [0.225, 0], [0.225, 0.5], [0.225, 1], 它们对应的直觉模糊子集分别是 A_1, A_2, A_3 , 其中 $\sigma = 0.225$.

输入变量 a 为

$$a = \begin{cases} x/66.6667, & x \geq 30 \text{ m/s}^2; \\ (x - 22.5)/27.2727 + 0.5, & 15 \leq x < 30 \text{ m/s}^2; \\ (-x)/27.2727 + 1, & 0 \leq x < 15 \text{ m/s}^2. \end{cases} \quad (7)$$

6) 输出论域 U . 来袭目标的类型有5种: 战术弹道导弹 (TBM), 空地导弹 (AGM), 巡航导弹 (CM), 隐身飞机 (SA) 及普通目标 (CT), 分别对应5个直觉模糊子集 U_1 [0.125, 0.000], U_2 [0.125, 0.250], U_3 [0.125, 0.500], U_4 [0.125, 0.750], U_5 [0.125, 1.000], 其中 $\sigma = 0.125$.

3.2 推理规则

目标识别的输入参数 s, v_H, v_v, h 及 a 等状态变

量属性函数的个数分别为: $N_s = 3, N_{v_H} = 6, N_{v_v} = 4, N_h = 5, N_a = 3$. 目标识别输出量的属性函数个数 $N_u = 5$.

从理论上讲, 目标识别 (TR) 系统推理规则数量 $N = N_s \times N_{v_H} \times N_{v_v} \times N_h \times N_a = 1080$. 从实际情况考虑, 根据空中目标特性可知, 当 RCS 取 S_1 或 S_2 时, 目标类型均为普通目标. 因此, 系统推理规则总数显著减少为 $N' = N_{v_H} \times N_{v_v} \times N_h \times N_a + 2 = 362$.

推理规则是多重多维的, 其形式如下:

If s is S_{i_s} and v_H is $V_{H_{i_{v_H}}}$ and v_v is $V_{V_{i_{v_v}}}$ and h is H_{i_h} and a is A_{i_a} ,

Then z is C_j ($CF_i(C_j)$);

$i_s = 1, 2, \dots, N_s, i_{v_H} = 1, 2, \dots, N_{v_H},$

$i_{v_v} = 1, 2, \dots, N_{v_v}, i_h = 1, 2, \dots, N_h,$

$i_a = 1, 2, \dots, N_a, j = 1, 2, \dots, N_u,$

$i = 1, 2, \dots, N'$.

其中: s, v_H, v_v, h, a 是输入变量; z 是输出变量. $S_{i_s}, V_{H_{i_{v_H}}}, V_{V_{i_{v_v}}}, H_{i_h}, A_{i_a}$ 是前提部分语言项, 分别为 $\langle S, \mu_{S_i}, \gamma_{S_i} \rangle, s \in S; \langle v_H, \mu_{v_{H_i}}, \gamma_{v_{H_i}} \rangle, v_H \in V_H; \langle v_v, \mu_{v_{v_i}}, \gamma_{v_{v_i}} \rangle, v_v \in V_v; \langle h, \mu_{H_i}, \gamma_{H_i} \rangle, h \in H; \langle a, \mu_{A_i}, \gamma_{A_i} \rangle; a \in A. C_j$ 是输出论域中的一个直觉模糊子集 $U_k, k = 1, 2, \dots, N_u$, 即 $\langle z, \mu_{U_k}, \gamma_{U_k} \rangle, z \in U$.

3.3 推理合成算法

TR 系统的基本结构模型为: 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

$$R(S_{i_s}, V_{H_{i_{v_H}}}, V_{V_{i_{v_v}}}, H_{i_h}, A_{i_a}, CF_i; C_j) =$$

$$R_c(S_{i_s}, V_{H_{i_{v_H}}}, V_{V_{i_{v_v}}}, H_{i_h}, A_{i_a}, CF_i; C_j). \quad (8)$$

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为

$$R_k =$$

$$R(S_{i_s} \cap V_{H_{i_{v_H}}} \cap V_{V_{i_{v_v}}} \cap H_{i_h} \cap A_{i_a} \cap CF_i) \rightarrow C_j = R(S_{i_s}, V_{H_{i_{v_H}}}, V_{V_{i_{v_v}}}, H_{i_h}, A_{i_a}, CF_i; C_j). \quad (9)$$

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

$$R =$$

$$(\cup \dots \cup) R(S_{i_s}, V_{H_{i_{v_H}}}, V_{V_{i_{v_v}}}, H_{i_h}, A_{i_a}, CF_i; C_j) =$$

$$(\cup \dots \cup) R(S_{i_s} \cap V_{H_{i_{v_H}}} \cap V_{V_{i_{v_v}}} \cap H_{i_h} \cap A_{i_a} \cap C_j, CF_i, i = 1, 2, \dots, N').$$

即

$$\begin{aligned} \mu_R(s, v_H, v_V, h, a, z) = & (\bigvee \cdots \bigvee)(\mu_{S_i}(s) \wedge \mu_{v_{H_i}}(v_H) \wedge \mu_{v_{V_i}}(v_V) \wedge \mu_{H_i}(h) \wedge \\ & \mu_{A_i}(a) \wedge \mu_{U_j}(z) \wedge CF_i), \\ \gamma_R(s, v_H, v_V, h, a, z) = & (\bigwedge \cdots \bigwedge)(\gamma_{S_i}(s) \vee \gamma_{v_{H_i}}(v_H) \vee \gamma_{v_{V_i}}(v_V) \vee \gamma_{H_i}(h) \vee \\ & \gamma_{A_i}(a) \vee \gamma_{U_j}(z) \vee CF_i). \end{aligned}$$

其中: $\forall s \in S, \forall v_H \in V_H, \forall h \in H, \forall a \in A, \forall z \in U$; $S_{i_s}, V_{H_{i_vH}}, V_{V_{i_vV}}, H_{i_h}, A_{i_a}$ 分别为定义在雷达反射截面积论域 S , 巡航速度论域 V_H , 垂直速度论域 V_V , 飞行高度论域 H 以及加速度论域 A 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 ; CF_i 为直觉模糊推理规则带来的可信度因子。

设某一时刻的输入为 S', V'_H, V'_V, H' 和 A' , 由推理合成规则, 得到输出 C' 为

$$C' = (S' \times V'_H \times V'_V \times H' \times A') \circ R. \quad (10)$$

即

$$\begin{aligned} \mu_{C'}(z) = & \bigvee(\mu_{s'}(s) \wedge \mu_{v_{H'}}(v_H) \wedge \mu_{v_{V'}}(v_V) \wedge \mu_{H'}(h) \wedge \\ & \mu_{A'}(a) \wedge \mu_R(s, v_H, v_V, h, a, z)), \\ \gamma_{C'}(z) = & \bigvee(\gamma_{s'}(s) \wedge \gamma_{v_{H'}}(v_H) \wedge \gamma_{v_{V'}}(v_V) \wedge \gamma_{H'}(h) \wedge \\ & \gamma_{A'}(a) \wedge \gamma_R(s, v_H, v_V, h, a, z)). \end{aligned}$$

其中: $\forall s \in S, \forall v_H \in V_H, \forall h \in H, \forall a \in A, \forall z \in U$.

注 1 以上算法使用的是 Mamdani 蕴涵算子 R_c , 运用不同的算子, 可得到不同的 μ_R 和 γ_R , 所以结果不唯一. 在直觉模糊推理系统中, R_c 性能较好且便于计算^[8], 因此选取 R_c 进行推理计算.

3.4 解模糊算法

直觉模糊集的解模糊算法^[9]通常有最大真值法、重心法和加权平均法等. 本文采用重心法. 直觉模糊重心法是取隶属度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

$$\begin{aligned} z_0 = & \frac{\int_U z \left(\mu_F(z) + \frac{1}{2} \pi_F(z) \right) dz}{\int_U \left(\mu_F(z) + \frac{1}{2} \pi_F(z) \right) dz} = \\ & \frac{\int_U z \left(1 + \mu_F(z) + \gamma_F(z) \right) dz}{\int_U \left(1 + \mu_F(z) + \gamma_F(z) \right) dz}. \quad (11) \end{aligned}$$

其中: 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

$$\begin{aligned} \mu_0 = & \frac{\sum_{k=1}^{N_u} u \cdot \left(\mu_{U_k}(u) + \frac{1}{2} \pi_{U_k}(u) \right)}{\sum_{k=1}^{N_u} \left(\mu_{U_k}(u) + \frac{1}{2} \pi_{U_k}(u) \right)} = \\ & \frac{\sum_{k=1}^{N_u} u \cdot \left(1 + \mu_{U_k}(u) + \gamma_{U_k}(u) \right)}{\sum_{k=1}^{N_u} \left(1 + \mu_{U_k}(u) + \gamma_{U_k}(u) \right)}. \quad (12) \end{aligned}$$

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有所变化, 这种变化明显且比较平滑.

3.5 规则检验

将目标识别系统的推理规则植入 TR 推理系统, 可以得到其控制输出映射曲面如图 1 所示.

推理规则的合理性可通过推理系统输出的三

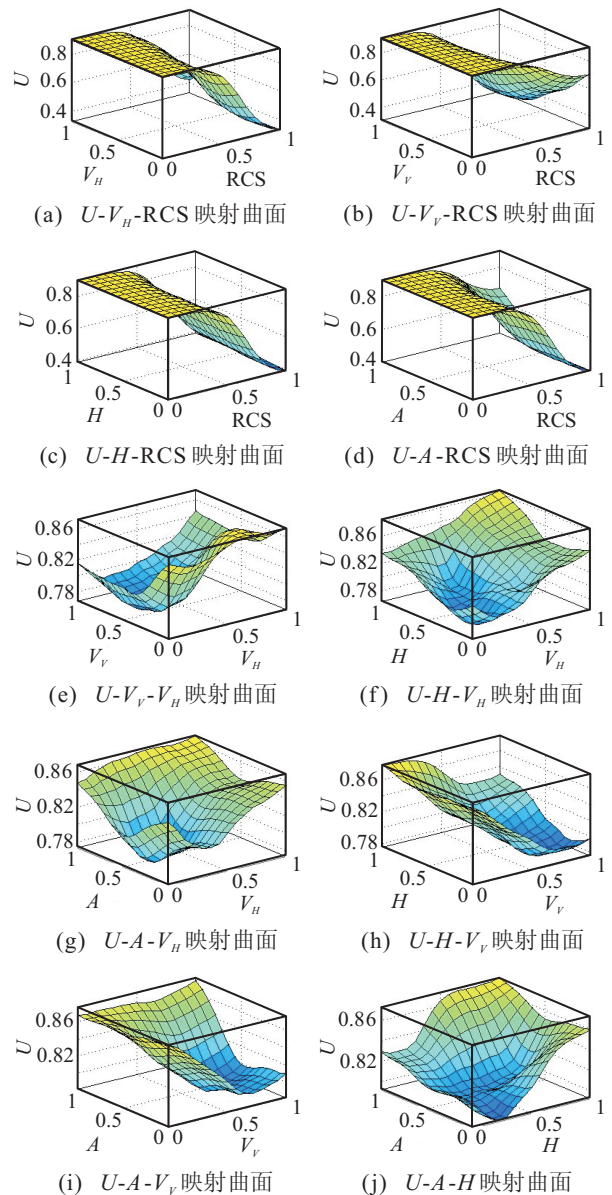


图 1 输出三维空间映射曲面

维空间映射曲面是否平滑得到验证. 图 1 中, 由 5 个状态变量属性函数中任意两个属性函数组合 (V_H -RCS, V_V -RCS, H -RCS, A -RCS, V_V - V_H , H - V_H , A - V_H , H - V_V , A - V_V , A - H) 得到的输出映射曲面 (U - V_H -RCS, U - V_V -RCS, U - H -RCS, U - A -RCS, U - V_V - V_H , U - H - V_H , U - A - V_H , U - H - V_V , U - A - V_V , U - A - H) 均是平滑的. 因此, 3.2 节中所建推理规则是合理的.

4 仿真实例

选取 20 批典型目标属性参数值如表 1 所示. 对目标类型识别过程主要有 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 目标属性测量值

目标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
RCS/m ²	0.50	0.70	0.33	0.50	0.42
V_H /(m/s)	1 800	1 450	340	400	450
V_V /(m/s)	1 700	1 200	0	17	8
H /m	30 000	10 000	50	12 000	20 000
A /(m/s ²)	400	300	0.2	0.5	0.2

目标	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
RCS/m ²	0.30	0.39	0.55	0.71	0.75
V_H /(m/s)	300	500	460	450	2 000
V_V /(m/s)	12	16	10	9	2 000
H /m	17 500	14 000	10 000	16 000	70 000
A /(m/s ²)	0.7	0	0	0.1	450

目标	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
RCS/m ²	0.72	0.64	0.80	0.61	0.65
V_H /(m/s)	1 300	1 400	1 350	300	340
V_V /(m/s)	1 500	1 350	1 400	0	0
H /m	9 000	15 000	8 000	90	100
A /(m/s ²)	370	340	330	0.2	0

目标	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}
RCS/m ²	0.37	0.70	0.60	0.51	0.48
V_H /(m/s)	320	300	500	450	420
V_V /(m/s)	0	3	5	12	7
H /m	80	11 000	15 000	20 000	18 000
A /(m/s ²)	0.1	0	0	0.5	0.3

例 1 以表 1 中目标 x_9 为例. 空中来袭目标反射截面积为“小”, 反射截面变量 $s = 0.805$; 巡航速度 450 m/s 为“中速”, 巡航速度变量 $v_H = 0.550$; 垂直速度 9 m/s 为“低速”, 垂直速度变量 $v_V = 0.100$; 飞行高度 16 000 m 为“高空”, 飞行高度变量 $h = 0.656$; 加速度 0.1 m/s² 为“小”, 加速度变量 $a = 0.996$. 故此, 得到参数输入向量为

$$I_9 = [s \quad v_H \quad v_V \quad h \quad a] = [0.805 \quad 0.550 \quad 0.100 \quad 0.656 \quad 0.996].$$

将向量 I_9 作为 TR 推理机的输入, 根据推理规则可知

其为“隐型飞机 SA”, 由此求得隶属度 $\mu = 0.809$. 推理求解过程及结果如图 2 所示.

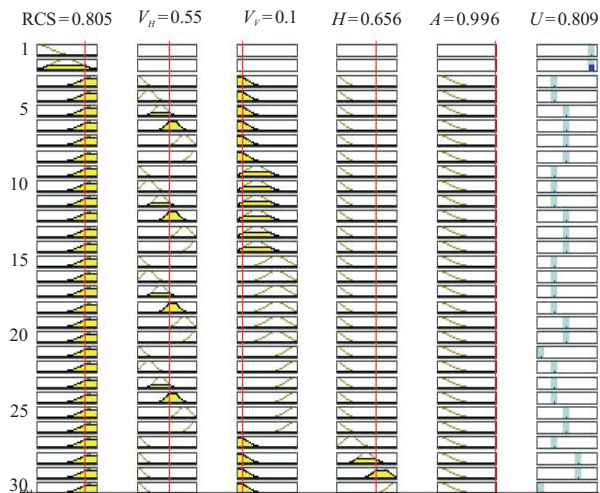


图 2 目标 x_9 类型识别推理求解图

例 2 以表 1 中目标 x_{10} 为例. 空中来袭目标反射截面积为“小”, 反射截面变量 $s = 0.794$; 巡航速度 2 000 m/s 为“超高速”, 巡航速度变量 $v_H = 0.500$; 垂直速度 2 000 m/s 为“超高速”, 垂直速度变量 $v_V = 0.250$; 飞行高度 70 000 m 为“超高空”, 飞行高度变量 $h = 0.875$; 加速度 450 m/s² 为“大”, 加速度变量 $a = 0.600$. 故此, 得到参数输入向量

$$I_{10} = [s \quad v_H \quad v_V \quad h \quad a] = [0.794 \quad 0.500 \quad 0.250 \quad 0.875 \quad 0.600].$$

将向量 I_{10} 作为 TR 推理机的输入, 根据推理规则可知其为“战术弹道导弹 TBM”, 由此求得隶属度 $\mu = 0.779$. 推理求解过程及结果如图 3 所示.

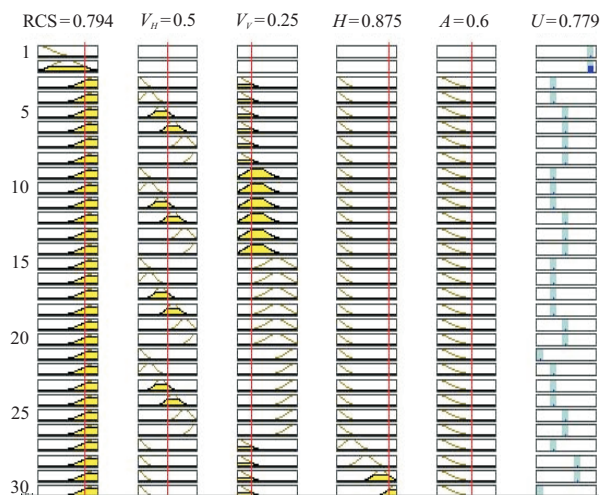


图 3 目标 x_{10} 类型识别推理求解图

仿此方法步骤, 可将表 1 中所列目标进行处理, 得到目标类型识别处理结果如表 2 所示.

表 2 目标属性输入值与 TR 推理结果

x_i	s	v_H	v_V	h	a	u	U	CF
x_1	0.862	0.300	0.348	0.173	0.600	0.894	$U_1(\text{TBM})$	1.0
x_2	0.807	0.183	0.750	0.469	0.482	0.856	$U_2(\text{AGM})$	1.0
x_3	0.909	0.840	0.000	0.154	0.993	0.791	$U_3(\text{CM})$	1.0
x_4	0.862	0.900	0.189	0.531	0.982	0.666	$U_4(\text{SA})$	1.0
x_5	0.884	0.550	0.089	0.781	0.993	0.811	$U_4(\text{SA})$	1.0
x_6	0.917	0.800	0.133	0.703	0.974	0.620	$U_4(\text{SA})$	1.0
x_7	0.893	0.600	0.178	0.594	0.000	0.541	$U_4(\text{SA})$	1.0
x_8	0.849	0.560	0.111	0.469	1.000	0.778	$U_4(\text{SA})$	1.0
x_9	0.805	0.550	0.100	0.656	0.996	0.809	$U_4(\text{SA})$	1.0
x_{10}	0.794	0.500	0.250	0.875	0.600	0.779	$U_1(\text{TBM})$	0.9
x_{11}	0.802	0.333	0.167	0.838	0.992	0.645	$U_2(\text{AGM})$	0.9
x_{12}	0.824	0.167	0.262	0.625	0.372	0.778	$U_2(\text{AGM})$	0.9
x_{13}	0.780	0.150	0.667	0.406	0.482	0.474	$U_2(\text{AGM})$	0.9
x_{14}	0.832	0.800	0.000	0.238	0.993	0.632	$U_3(\text{CM})$	0.9
x_{15}	0.821	0.840	0.000	0.592	1.000	0.654	$U_3(\text{CM})$	0.9
x_{16}	0.898	0.820	0.000	0.300	0.996	0.612	$U_3(\text{CM})$	0.9
x_{17}	0.807	0.800	0.033	0.500	1.000	0.678	$U_4(\text{SA})$	0.9
x_{18}	0.835	0.600	0.056	0.625	1.000	0.999	$U_4(\text{SA})$	0.9
x_{19}	0.860	0.550	0.133	0.781	0.982	0.849	$U_4(\text{SA})$	0.9
x_{20}	0.868	0.520	0.778	0.719	0.989	0.782	$U_4(\text{SA})$	0.9

由仿真结果可知:

1) 目标 x_1 的 RCS 很小, 比飞机小 1 到 2 个数量级; V_H 为超高速, V_V 很快, 均为声速的几倍; H 为高空, 即飞行高度很高; A 很大. 显然, 目标 x_1 的参数属性值均满足战术弹道导弹 (TBM) 的各项性能指标, 由此实际理论分析知 x_1 的类型为 TBM; 而通过以上仿真及规则推理得知 x_1 目标类型也是 TBM, 且可信度为 1.

2) 目标 x_4 的 RCS 很小, V_H 为高速, V_V 很小, H 为中空, A 很小. 显然, 目标 x_4 的参数属性值均达到隐身飞机 (SA) 的各项性能指标. 理论分析表明目标 x_4 的类型为 SA; 而推理仿真得知 x_4 目标类型也是 SA, 且可信度为 1.

3) 目标 x_{11} 的 RCS 很小, V_H 为高速, V_V 很快, H 为低空, A 中等. 由此, 目标 x_{11} 的参数属性值均满足空地导弹 (AGM) 的各项性能指标. 通过实际理论分析知目标 x_{11} 的类型为 AGM; 而通过仿真及规则推理知 x_{11} 目标类型也是 AGM, 且可信度为 0.9.

4) 目标 x_{14} 的 RCS 很小, V_H 为中速, V_V 为低速, H 为超低空, A 很小. 给出的目标 x_{14} 参数属性值均满足巡航导弹 (CM) 的各项性能指标. 由实际理论分析知目标 x_{14} 的类型为 CM; 通过仿真表明 x_{14} 目标类型也是 CM, 且可信度为 0.9.

目标 x_1, x_4, x_{11}, x_{14} 的仿真识别类型均与实际理论分析一致, 表明直觉模糊推理具有较强的处理不确定性信息的能力, 它适用于目标类型识别, 且目标识别的直觉模糊推理方法能较好地识别以上 4 种典型目标类型, 具有较强的适用性, 因而可推广应用于其他普通目标类型识别.

5 结 论

本文的主要贡献是将直觉模糊推理引入信息融合领域并进行空中目标类型识别研究. 理论分析与实例研究表明, 基于直觉模糊推理的目标识别方法具有以下优点: 1) 能够较精准地将每一批空中目标进行类型识别, 并具有较高的可信度; 2) 推理规则明确, 思路清晰, 准确度较高. 因此, 本文方法是一种有效的目标识别方法, 具有较大的应用价值和较强的适用性.

关于目标识别问题中的敌我识别和类间识别将是进一步有待解决的问题.

参考文献(References)

- [1] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [2] Atanassov K. More on intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 33(1): 37-46.
- [3] Atanassov K, George G. Elements of intuitionistic fuzzy logic[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 95(1): 39-52.
- [4] Burillo P, Bustince H. Construction theorems for intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 84(3): 271-281.
- [5] 蓝金辉, 马宝华, 蓝天, 等. D-S 证据理论数据融合方法在目标识别中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(2): 53-55.
(Lan J H, Ma B H, Lan T, et al. D-S evidence reasoning and its data fusion application in target recognition[J]. J of Tsinghua University: Science and Technology, 2001, 41(2): 53-55.)
- [6] 史志富, 张安, 何胜强. 基于贝叶斯网络的多传感器目标识别算法研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(4): 921-924.
(Shi Z F, Zhan A, He S Q. Research on multisensor target recognition algorithm based on Bayesian networks[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 921-924.)
- [7] 陈海燕, 戚飞虎. 模糊集在目标识别上的应用[J]. 计算机应用研究, 2000, 20(2): 106-108.
(Chen H Y, Qi F H. Technique for fuzzy sets and its application in target recognition[J]. Computer Application Research, 2000, 20(2): 106-108.)
- [8] 王坚. 直觉模糊推理系统的设计与实现[D]. 西安: 空军工程大学导弹学院, 2006.
(Wang J. Design and implementation of intuitionistic fuzzy reasoning system[D]. Xi'an: Missile Institute, Air Force Engineering University, 2006.)
- [9] 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.
(Lei Y J, Wang B S, Wang Y. Technique for threat assessment based on intuitionistic fuzzy reasoning[J]. J of Electronics and Information Technology, 2007, 29(9): 2077-2081.)