

基于 CIFNS 的预警机指控系统目标威胁估计

王 睿, 雷英杰, 贺正洪

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 710038)

摘 要:针对预警机指挥控制系统中的威胁估计问题,提出了一种基于补偿直觉模糊神经网络(CIFNS)的威胁估计方法。把目标的动态信息和静态信息相结合,将一般模糊推理推广到直觉模糊推理,建立了基于 CIFNS 的目标威胁估计网络结构和威胁判断模型,给出了相应的网络学习算法,对算法应用于预警机指控系统威胁估计的情况进行了仿真。结果表明,基于 CIFNS 的估计算法具有较快的收敛速度和良好的自适应性。

关键词:预警机;指挥控制;威胁估计;直觉模糊推理

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2010.02.008

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)02-0033-05

战场态势估计和目标威胁估计是决策级数据融合的 2 项主要任务^[1-2]。威胁评估是根据战场敌我双方的态势推断敌方对我方的威胁程度,并给出敌方的兵力企图,为我方的决策和指挥提供辅助信息。威胁评估所依据的前提是态势评估,它是决策级信息融合的关键组成部分之一。直觉模糊理论具备很强的处理不确定、模糊信息的能力,当输入规则增多,其威胁估计的精度也随之提高^[3]。但在实际应用中规则的增多亦将带来推理规则的“组合爆炸”的问题,这就极大的限制了算法的应用^[4-5]。

本文针对机载预警系统中的威胁估计存在信息来源多、模糊性强等问题,提出了基于补偿直觉模糊神经网络(Compensator Intuitionistic Fuzzy Neuro System, CIFNS)的威胁估计方法,把目标的动态信息和静态信息相结合,将一般模糊推理推广到直觉模糊推理,建立了相应的威胁判断模型,对其性能进行了仿真分析,并应用于指挥控制系统的评估中。

1 直觉模糊命题的真值合成方法

直觉模糊逻辑(Intuitionistic Fuzzy Logic, IFL)是一种建立在 IFS 理论基础上的扩展模糊逻辑^[3]。IFL 命题是关于某个没有明确界限的概念语言陈述,它能表达人们的主观想法,而且对每个人而言其主观含义又略有差异。赋给直觉模糊命题 P 的真值可以是区间 $[0, 1]$ 上的任何值,赋值过程实际上是从区间 $[0, 1]$ 到命题论域 U 的一个真值映射 VT , 即 $VT: u \in U \rightarrow \{0, 1\}$ 。

设命题 P 对应于直觉模糊集 A , 综合考虑其隶属度函数与非隶属度函数 2 个因素的影响,命题 P 的真值 $VT(P)$ 由下式给出^[6-8]:

$$VT(P) = k_{\alpha} \mu_A(x) + k_{\beta} \pi_A(x) \quad (1)$$

式中 k_{α}, k_{β} 分别为隶属度函数与直觉指数的合成权重。则:

$$\begin{cases} VT(P) = \mu_A(x) + \frac{\pi_A(x)}{2} & (k_{\alpha} = 1, k_{\beta} = 0.5) \\ VT(\neg P) = 1 - VT(P) = \gamma_A(x) + \frac{\pi_A(x)}{2} \end{cases} \quad (2)$$

* 收稿日期:2008-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60773209)

作者简介:王 睿(1964-),女,陕西三原人,副教授,博士生,主要从事数据融合,智能信息处理等研究;

E-mail: rui-wang641008@163.com

雷英杰(1956-),男,陕西渭南人,教授,博士生导师,主要从事数据融合,智能信息处理等研究。

上式表示命题的真实程度等于 x 对直觉模糊集 A 的隶属度与犹豫度的对称合成。式(2)中取 $k_{\beta} = 0.5$ 表明直觉指数 $\pi_A(x)$ 所表征的中立证据中,支持与反对的程度相等。

2 基于 CIFNS 的目标威胁估计

威胁评估问题是一个典型的多种属性决策问题,单一因素实际并不能最后确定来袭目标的威胁程度。关于目标特征的静态要素有:目标数量、类型、遂行任务企图、干扰能力、空袭样式、平台机载武器装备、保卫点的重要性等;动态要素主要有目标距离、速度、加速度、方位、我方防御能力等。每一个特征因素均会对最后的威胁程度产生影响。但在实际应用时,依据威胁评估时对各因素的侧重程度,重点考虑目标类型、保卫点重要性、干扰能力等静态因素和目标距离、高度、速度、航向角、我方防御性能等动态因素作为威胁估计的输入因素^[4,9]。

对威胁等级的确定,依据实际作战需求和战勤人员的思维习惯,将来袭目标的威胁等级量化为 7 级:重大(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。实际处理时,可以将某些威胁级别如“较大”与“大”等同看待,以减少组合爆炸与复杂性。

针对预警机指控系统威胁估计中输入参数的模糊性,本文给出一种基于补偿直觉模糊神经网络(Compensator Intuitionistic Fuzzy Neuro System, CIFNS)的目标威胁估计模型,见图 1。它由模糊产生器、知识库、模糊推理神经元和去模糊器组成^[10-11]。

2.1 语言值隶属函数的确定

根据威胁评估的内容和提取的威胁要素,可确定直觉模糊逻辑系统的输入语言成分。

目标类型 X : {小型目标,大型目标,其它目标}; 保卫点重要性 W : {重要,一般,不重要}; 干扰能力 G : {强,中,弱,无}; 目标距离 R : {临空,近距,中距,远距,很远}; 目标高度 H : {超低空,低空,中空,高空}; 目标航向角 B : {径向临近,临近,侧翼,迂回,侧迂,侧翼,背离}; 目标速度 V : {超高速,高速,中速,低速,慢速}; 我方防御性能 D : {强,中,弱}。输出语言成分为:威胁等级 Z 。

模糊器中每个语言成分的隶属函数可采用高斯型,若 σ, c 分别代表宽度和中心,即:

$$\mu_i(x) = \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

2.2 基于 CIFNS 的目标威胁估计

在给定了直觉模糊隶属度函数、非隶属函数的中心和宽度及模糊推理规则的基础上,通过学习训练,可得到相关参数的补偿值和推理规则的概括。从而实现系统的自学习。补偿参数的调整克服了单纯的模糊推理中主观确定隶属函数的缺点,推理规则的概括避免了规则数量随输入状态增多呈快速增长的组合“爆炸问题”,并为推理规则的自动获取和调节提供了解决途径^[12]。基于 CIFNS 的目标威胁估计系统网络结构见图 2。

第 1 层:输入变量层。每个神经元节点直接与每个输入向量相连,它把输入值传递给下一层;

第 2 层:输入语言层。对输入变量 $x_i (i=1,2,\dots,8)$, 对应定义 N_i 组隶属度函数和非隶属度函数。每个

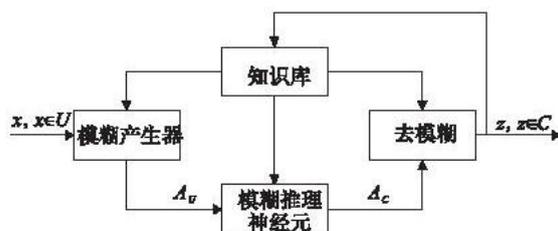


图 1 CIFNS 系统结构

Fig. 1 The structure of CIFNS

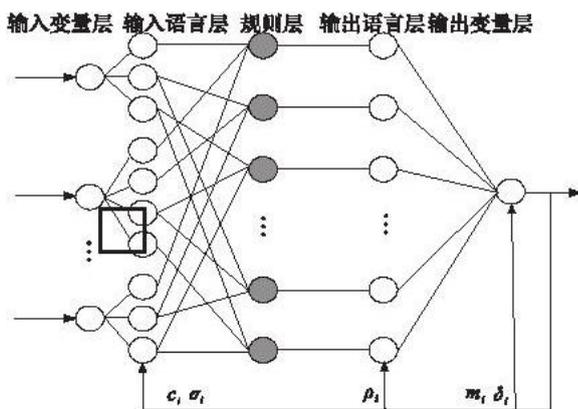


图 2 威胁估计系统网络结构图

Fig. 2 The net structure of threat assessment system

节点的输出表示一条规则的激励强度,每个神经元的输出应该是相应的隶属函数(支持证据)和非隶属度函数(拒绝证据)的合成真值。

第3层:规则层。表示模糊系统的推理规则,由第2层计算得出的威胁要素的直觉模糊子集成真值。

第4层:输出语言层。输出为语言变量的语言值,每个神经元节点表达一个真值函数。对输出目标的威胁等级,每个输出函数是一个零阶或一阶 Sugeno 线性函数。

第5层:输出变量层。该层神经元起到去模糊的作用,此处选取加权平均法。设定 m_i 和 δ_i 分别是输出变量第 i 个隶属度函数与非隶属度函数合成真值的中心和宽度,则:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^8 (m_i \delta_i) x_i^5}{\sum_{i=1}^8 \delta_i x_i^5} \quad (4)$$

2.3 基于 CIFNS 的网络学习算法

按照上述直觉模糊推理规则,并利用专家经验构造样例数据作为训练样本,使用反向传播(BP)算法^[11],对 CIFNS 网络进行训练。在规则前提部分参数固定条件下,调整输入隶属函数和非隶属函数中心 c_i 和宽度 σ_i 到最优、输出隶属函数和非隶属函数中心 m_i 和宽度 δ_i 以及自适应补偿系数 ρ_i 。采用多参数的多维补偿,使学习算法可减少原来误差传播算法的搜索空间,缩短学习训练时间。这样,最优调整后的输入隶属函数和非隶属函数中心 c_i 和宽度 σ_i 、输出隶属函数和非隶属函数中心 m_i 和宽度 δ_i 能够更加准确客观地描述专家和指挥员对各项输入语言的认识与侧重程度。网络结构确定之后,通过训练形成输入 x, r, v, θ, g, h, q 与输出 z 之间的映射,进行一定次数的反复学习就能修正网络的权值而得到期望的结果。

设平方误差函数 $E_p = \frac{(z^- - z)^2}{2}$,式中 z 为实际输出, z^- 为期望输出。根据梯度下降法,学习算法中的补偿

参量 $c_i, \sigma_i, m_i, \rho_i$ 求解模型如下:

1) 训练输出变量隶属函数中心 m_i :

$$m_i(k+1) = m_i(k) - \eta \left. \frac{\partial E}{\partial m_i} \right|_k = m_i(k) - \eta \frac{[z - z^-] \delta_i(k) F(k)}{\sum_{k=1}^m \delta_i(k) F(k)} \Big|_k \quad (5)$$

式中: $F(k) = \prod_{i=1}^m f_{A_i}(x_i), k = 0, 1, \dots; \eta$ 为学习率。

2) 训练输出变量隶属函数宽度 δ_i :

$$\delta_i(k+1) = \delta_i(k) - \eta \left. \frac{\partial E}{\partial \delta_i(k)} \right|_k = \delta_i(k) - \eta \frac{[z - z^-] [\delta_i(k) - z] F(k)}{\sum_{k=1}^m \delta_i(k) F(k)} \Big|_k \quad (6)$$

3) 训练输入隶属函数中心 c_i :

$$\left. \frac{\partial E}{\partial c_i} \right|_k = \frac{2[z - z^-] [m_i(k) - z] [x_i - c_i(k)] \delta_i(k) F(k)}{\sigma_i^2(k) \sum_{k=1}^m \delta_i(k) F(k)} \Big|_k \quad (7)$$

$$c_i(k+1) = c_i(k) - \eta \left. \frac{\partial E}{\partial c_i} \right|_k \quad (8)$$

4) 训练输入隶属函数的宽度 σ_i :

$$\left. \frac{\partial E}{\partial \sigma_i} \right|_k = \frac{2[z - z^-] [m_i(k) - z] [x_i - c_i(k)]^2 \delta_i(k) F(k)}{\sigma_i^3(k) \sum_{k=1}^m \delta_i(k) F(k)} \Big|_k \quad (9)$$

$$\sigma_i(k+1) = \sigma_i(k) - \eta \left. \frac{\partial E}{\partial \sigma_i} \right|_k \quad (10)$$

5) 训练补偿系数 ρ_i :

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) - \eta \left. \frac{\partial E}{\partial \rho_i} \right|_k \quad (11)$$

3 基于 CIFNS 的预警机指控系统威胁估计仿真分析

应用上述 CIFNS 模型,对预警机指控系统的决策级信息融合的威胁估计性能进行仿真,设定学习率 $\eta = 0.9$,模拟 100 组目标威胁评估数据作为 CIFNS 系统的训练样本。对目标类型元素 x 、保卫点重要性元素 w 、干扰能力元素 g 、目标距离元素 r 、目标高度元素 h 、目标航向角元素 θ 、目标速度元素 v 、我方防御性能元素 d 等 8 个输入数据以及已知的威胁估计期望值进行模糊化。

在相同学习训练次数和学习率的情况下,传统的模糊神经网络(FNN)算法同 CIFNS 学习后的误差相比,CIFNS 学习后误差比 FNN 算法小近一个数量级,见图 3。可见 CIFNS 模型具有较强的学习能力,且精度较高。二者的收敛情况见图 4。显然 CIFNS 具有较快的收敛速度。由此可见,CIFNS 在学习过程中应用了多参数补偿算法,使得系统向最优解搜索的速度加快,使得模型的“学习效率”有了较大提高,系统的自适应性也相应得以增强。

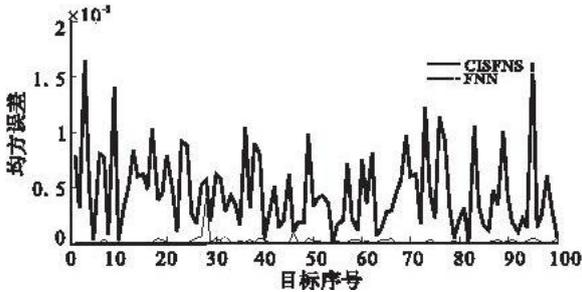


图3 CIFNS 与 FNN 输出均方误差对比
(训练次数 $N = 40$)

Fig. 3 The MSE of CIFNS and FNN ($N = 40$)

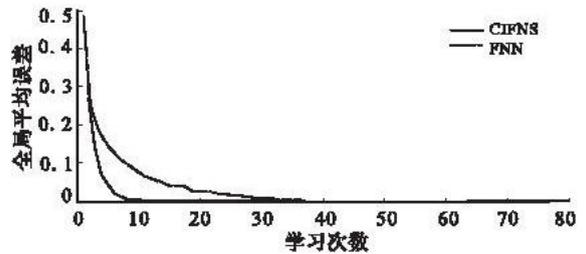


图4 CIFNS 与 FNN 收敛性对比

Fig. 4 The gathering characture of CIFNS and FNN

自适应补偿系数 ρ_i 的最优调整,可解释为推理规则的变化,实现了直觉模糊推理规则的自动生成,避免了直觉模糊推理中的“组合爆炸”问题的发生,增强了 CIFNS 的适应性和运算能力。

将训练后的参数调整数据存入知识库,对给定来袭目标信息应用 CIFNS 模型进行威胁估计。

4 结束语

仿真结果表明,在复杂战场环境下,采用基于补偿直觉模糊神经网络的目标威胁估计模型,可以对来袭目标的威胁程度进行较好的估计,将其结果同实际的战场环境的威胁程度相比对可知,CIFNS 表现出了良好的适应性及精确性,其智能化和自适应推理方式改变了指挥决策过程中威胁判断过于“武断”的现象。表明 CIFNS 模型用于对预警机指控系统的威胁估计评估时,本文给出的方法是有效的,具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] Linas J, Waltz E. Multisensor Data Fusion[M]. Boston: Artech House, 1990.
- [2] 刘同明,夏祖勋,解洪成,等. 数据融合技术及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
LIU Tongming, XIA Zuxun, XIE Hongcheng, et al. Data Fusion Techniques and Its Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [3] 雷英杰. 基于直觉模糊推理的态势与威胁评估研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2005.
LEI Yingjie. Research on Situation and Threat Assessment Based on Intuitionistic Fuzzy Reasoning [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
- [4] 陈东风,雷英杰. 威胁估计中的一种直觉模糊推理方法[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(4): 21-23.

- CHEN Dongfeng, LEI Yingjie. An Intuitionistic Fuzzy Inference Method for Threat Assessment[J]. Command Control & Simulation, 2006, 28(4): 21-23. (in Chinese)
- [5] 雷英杰, 王宝树, 王毅. 基于直觉模糊决策的战场态势评估方法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2175-2179.
LEI Yingjie, WANG Baoshu, WANG Yi. Technique for Battle Situation Assessment Based on Intuitionistic Fuzzy Decision. [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2175-2179. (in Chinese)
- [6] Atanassov K. Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [7] Chris Cornelis, Glad Deschrijver, Kerre Etienne E. Implacation in Intuitionistic Fuzzy and Interval-valued Fuzzy Set Theory: Construction Classification Application [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2004, 35(1): 55-95.
- [8] Guojun Wang, Yingyu He. Intuitionistic Fuzzy Sets and L-fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 25(2): 271-274.
- [9] 王三民. 模糊推理及态势研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
WANG Sanmin. Research on Fuzzy Reasoning and Situation Assessment[D]. Xi'an: Xidian University, 2004. (in Chinese)
- [10] Yager R R, Xu Z S. The Continuous Ordered Weighted Geometric Operator and Its Application to Decision Making[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 31(7): 1393-1402.
- [11] 权太范. 信息融合神经网络——模糊推理理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
QUAN Taifan. Information Fusion Theory and Application Based on NN-FR Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [12] 徐小来, 雷英杰, 赵学军. 基于直觉模糊熵的直觉模糊聚类[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9(2): 80-83.
XU Xiaolai, LEI Yingjie, ZHAO Xuejun. Intuitionistic Fuzzy Clustering Based on Intuitionistic Fuzzy Entropy[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(2): 80-83. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

Research on the Threat Assessment Base on CIFNS Model in ELC Plane's Command and Control System

WANG Rui, LEI Ying-jie, HE Zheng-hong

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

Abstract: To the question of threat assessment in ELC plane's control and command system (CCS), a threat assessment method based on compensator intuitionistic fuzzy neuro system (CIFNS) is proposed. By this algorithm the dynamic information is combined with the static information of the targets and the fuzzy discursion is generalized to intuitionistic fuzzy reasoning, simultaneously, the network structure and judgment model of threat assessment based on CIFNS are founded. The corresponding algorithm of network study is proposed. The simulation results demonstrate that the algorithm based on CIFNS has high convergence speed and good adaptability when applied in the evaluation of CCS.

Key words: ELC Plane; control and command system; threat assessment; intuitionistic fuzzy reasoning