

目标威胁评估的一种改进影响网络方法

陈 晖 马亚平

(国防大学公共平台中心 北京 100091)

摘 要 目标威胁评估是在进行作战决策时需要解决的关键问题。针对传统影响网络只能描述二元状态事件的局限性,对其进行了扩展,建立了描述多元状态事件的改进影响网络模型,并推导了影响参数应满足的约束条件及条件概率的计算方法。以防空系统目标为例,在分析目标威胁属性的基础上,基于云模型进行属性值的定性与定量转化,并运用改进的影响网络方法进行目标威胁评估。最后给出仿真实验,实验结果验证了改进影响网络方法的有效性和可行性。

关键词 威胁评估,影响网络,云模型,防空系统

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.08.029

Improved Influence Network Approach to Target Threat Assessment

CHEN Hui MA Ya-ping

(Public Platform Center, National Defense University, Beijing 100091, China)

Abstract Target threat assessment is the key problem to be solved in the operational decision making. Aiming at the limitations of the traditional influence network only describing binary state of events, it was extended to describe N-nary state of events. Based on this, improved influence network model was established, and constraint conditions of effect parameters and conditional probability were derived. Taking the target of air defense system as an example, based on the analysis of the target threat attribute, the cloud model was used to make the qualitative and quantitative transformation of attribute value, and the target threat assessment was carried out by using the improved influence network method. Finally, the simulation example was given. The results verify the effectiveness and feasibility of the improved influence network method.

Keywords Threat assessment, Influence network, Cloud model, Air defense system

1 引言

19世纪80年代,美军提出了一个通用的信息融合JDL模型^[1]。根据该模型的划分,威胁评估处于数据融合的第三级,属于信息融合的高层次过程。目标威胁评估的结果是指挥员进行决策的基础。现代战争越来越复杂,作战决策所涉及的目标种类和数量也越来越多,使得目标威胁评估面临越来越大的困难,因此采用智能化的目标威胁评估方法显得尤为必要。

目前,主要的威胁评估方法和理论包括多属性决策方法^[2]、直觉模糊集及其改进方法^[3-5]、直觉模糊多属性决策方法^[6]、神经网络方法^[7]、云模型方法^[8]、贝叶斯网络方法^[9-10]、云贝叶斯网络方法^[11]等。这些研究成果在一定程度上有效地解决了目标威胁评估的问题,但仍然存在问题。多属性决策方法的权重通常直接由专家给出,这使得评估的结果具有较大的主观性。神经网络方法通常需要大量的实际数据作为训练样本,而这些样本有时难以获取,使得该方法的实际

应用受到限制。云模型是实现定性问题与定量问题相互转化的有效方法;贝叶斯网络方法则具有明显的专家知识表达和不确定性信息描述的优势;云贝叶斯网络方法则结合了云模型理论和贝叶斯网络方法。在运用贝叶斯网络进行威胁评估的过程中,其网络中条件概率的获取难度将随着网络结构的日益复杂和节点数量的增加而大幅增加,由专家确定条件概率的方法将变得难以实现。

影响网络可看作是一种特殊的贝叶斯网络,但能更加方便地获得条件概率^[12]。影响网络基于因果逻辑发展而来,可以直观地描述事件之间的因果关系^[13]。影响网络中的条件概率可由影响参数计算得出,而确定影响参数的工作比贝叶斯网络中确定条件概率的工作更加简洁、直观,这无疑增强了影响网络的实用性。影响网络以其较好的实用性,得到了较为广泛的应用^[14-16]。相比于贝叶斯网络,影响网络的局限在于节点的状态只能是二元的,这在一定程度上限制了其应用范围。比如,在目标威胁评估中,影响威胁等级的各因素往往有多种状态,将各影响因素抽象为影响网络的节点后,需要各节

到稿日期:2016-10-26 返修日期:2017-03-04 本文受全军军事类研究生资助课题(2015JY046)资助。

陈 晖(1986—),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为智能信息处理、系统工程, E-mail: chamiso@126.com; 马亚平(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为系统仿真、作战模拟、系统体系结构。

点具备描述多元状态的能力。本文将在此方面对影响网络进行扩展和改进,使其能够描述多元状态。

2 基本影响网络模型

图 1 给出了影响网络的一个示意模型,其中, $\{A, B, C\}$ 为施加影响的事件集,事件 X 为被影响事件, $P(A), P(B), P(C), P(X)$ 分别为 A, B, C, X 的基准概率(先验概率)。

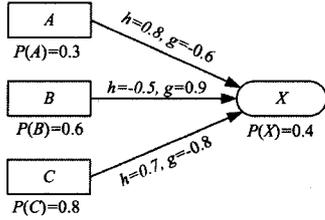


图 1 影响网络的一般模型

通常采用一个五元组 (V, E, C, B, A) 来描述影响网络, $G=(V, E)$ 表示一个满足马尔可夫条件的有向无环图。其中, V 表示影响网络中所有节点组成的节点集,且所有节点的取值均为二元随机变量。 E 表示影响网络中所有连边组成的边集,且所有连边均为有向边,边的方向表示因与果的关系。 C 表示影响网络中所有节点之间因果强度组成的集合,因果影响强度用一对影响参数 (h, g) 表示, $C=\{(h, g) | -1 \leq h, g \leq 1\}$ 。其中, h 表示当父节点的取值为 1 时,父节点对子节点的影响强度; g 表示当父节点的取值为 0 时,父节点对子节点的影响强度。 B 表示影响网络中节点的概率分布,包括基准概率和先验概率,其中,非根节点对应的是基准概率,根节点对应的是先验概率。 A 为 V 的子集,表示影响网络外部影响事件的状态。

以图 1 为例,给出计算条件概率 $P(X|A, B, C)$ 的方法。若影响事件的取值为 1,则取对应的因果强度参数对中的参数 h 作为影响参数,否则取 g 作为影响参数,由此可以得到影响参数集合。条件概率通过以下 4 个步骤计算得到^[13]。

步骤 1 聚合正影响强度:

$$C_+ = 1 - \prod_i (1 - c_i), c_i \in C, c_i \geq 0 \quad (1)$$

步骤 2 聚合负影响强度:

$$C_- = 1 - \prod_i (1 + c_i), c_i \in C, c_i < 0 \quad (2)$$

步骤 3 合并正影响强度和负影响强度,从而得到整体影响强度:

$$CI = \begin{cases} \frac{C_+ - C_-}{1 - C_-}, & \text{if } C_+ \geq C_- \\ \frac{C_+ - C_-}{1 - C_+}, & \text{if } C_+ < C_- \end{cases} \quad (3)$$

步骤 4 计算条件概率:

$$P(X|A, B, C) = \begin{cases} P(X) + CI * (1 - P(X)), & \text{if } C_+ \geq C_- \\ P(X) + CI * P(X), & \text{if } C_+ < C_- \end{cases} \quad (4)$$

3 改进的影响网络模型

3.1 单个影响事件的情况

首先,考虑单个影响事件的情况。假设施加影响的事件 A 有 $m(m > 2)$ 个状态,被影响事件 X 有 $n(n > 2)$ 个状态,将

每个状态分别用一个节点表示,事件 A 的 m 个状态表示为 $\{A_1, \dots, A_i, \dots, A_m\}$,事件 X 的 n 个状态表示为 $\{X_1, \dots, X_j, \dots, X_n\}$,如图 2 所示。

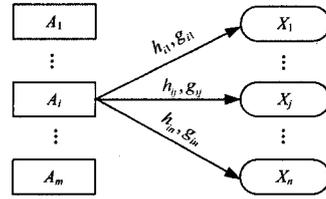


图 2 单个影响事件的影响网络

根据式(1)一式(4)给出的条件概率计算方法,当节点 A_i 的取值为 1 时,可以得到条件概率 $P(X_j | A_i)$ 为:

$$P(X_j | A_i) = \begin{cases} P_b(X_j) + h_{ij} (1 - P_b(X_j)), & \text{if } h_{ij} \geq 0 \\ P_b(X_j) + h_{ij} \cdot P_b(X_j), & \text{if } h_{ij} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $P_b(X_j)$ 表示 X_j 的先验概率。定义函数:

$$\text{sgn } \lambda = \begin{cases} 1, & \text{if } \lambda \geq 0 \\ 0, & \text{if } \lambda < 0 \end{cases} \quad (6)$$

那么,式(5)可表示为:

$$P(X_j | A_i) = P_b(X_j) - |h_{ij}| P_b(X_j) + h_{ij} \cdot \text{sgn } h_{ij} \quad (7)$$

条件概率 $P(X_j | A_i)$ 需满足条件:

$$\sum_{j=1}^n P(X_j | A_i) = 1 \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)得到:

$$\sum_{j=1}^n [P_b(X_j) - |h_{ij}| P_b(X_j) + h_{ij} \cdot \text{sgn } h_{ij}] = 1 \quad (9)$$

而先验概率 $P_b(X_j)$ 满足条件:

$$\sum_{j=1}^n P_b(X_j) = 1 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得到:

$$\sum_{j=1}^n |h_{ij}| P_b(X_j) = \sum_{j=1}^n h_{ij} \cdot \text{sgn } h_{ij} \quad (11)$$

下面讨论能使式(11)成立的 h_{ij} 值。

(1) 当 $\forall j=1, 2, \dots, n, h_{ij} \geq 0$ 时,式(11)可表示为:

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} (1 - P_b(X_j)) = 0 \quad (12)$$

由于 $\forall j=1, 2, \dots, n, P_b(X_j) \in [0, 1]$,要使式(12)成立,必须满足下列两个条件之一:

$$h_{ij} = 0, \forall j=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

或者

$$P_b(X_j) = 1, \forall j=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

显然,式(14)与式(10)矛盾。因此,在此条件下,要使式(11)成立,则必满足式(13)的条件。

(2) 当 $\exists j \in \{1, 2, \dots, n\}, h_{ij} < 0$ 时,假设所有使影响参数为负数所对应的序号组成集合 $K_1 = \{k_1, k_2, \dots, k_s\}$, 剩余的影响参数对应的序号组成集合 K_2 , 那么式(11)可表示为:

$$\sum_{j \in K_2} h_{ij} (1 - P_b(X_j)) = - \sum_{k \in K_1} h_{ik} P_b(X_k) \quad (15)$$

(3) 当 $\forall j=1, 2, \dots, n, h_{ij} < 0$ 时,式(11)可表示为:

$$\sum_{j=1}^n h_{ij} P_b(X_j) = 0 \quad (16)$$

要使式(16)成立,则必须满足条件:

$$P_b(X_j) = 0, \forall j=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

这同样与式(10)矛盾,即当 $\forall j=1, 2, \dots, n, h_{ij} < 0$ 时,任何 h_{ij} 均无法满足条件式(11)。

综上,要满足条件式(11),必须使影响参数满足条件式(13)或者条件式(15),影响参数 g_{ij} 也需满足类似的条件。在设置影响参数的过程中,应当满足上述条件的约束。特别地,在没有明确的先验知识的情况下,通常令各事件的各状态为等概率,即同一事件不同状态的基准概率(先验概率)相等,此时,条件式(15)可化简为:

$$(n-1) \sum_{j \in K_2} h_{ij} = - \sum_{k \in K_1} h_{ik} \quad (18)$$

可根据此结论指导影响参数的设定。

3.2 多个影响事件的情况

下面考虑多个影响事件的情况。以3个影响事件为例,如图3所示,施加影响的事件 A, B, C 分别有 m_a, m_b, m_c 个状态,被影响事件 X 有 n 个状态,各状态分别用单独的节点表示。

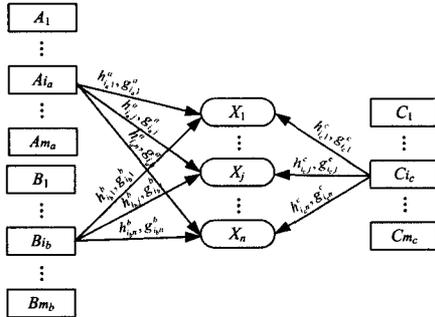


图3 多个影响事件的影响网络

对于节点 X_j , 有 $m_a + m_b + m_c$ 个对其施加影响的父节点,理论上 $2^{m_a+m_b+m_c}$ 种组合作为条件来影响 X_j 。但事实上,对于事件 A 的 m_a 个状态,在给定的条件下,只有一种状态会发生,只要确定了其中一种状态发生,也就确定了其他状态不发生;事件 B 和 C 类似。那么,条件概率具有如下的等价式:

$$P(X_j | \neg A_1, \dots, \neg A_{i_a-1}, A_{i_a}, \neg A_{i_a+1}, \dots, \neg A_{m_a}, \neg B_1, \dots, \neg B_{b-1}, B_{i_b}, \neg B_{i_b+1}, \dots, \neg B_{m_b}, \neg C_1, \dots, \neg C_{c-1}, C_{i_c}, \neg C_{i_c+1}, \dots, \neg C_{m_c}) \Leftrightarrow P(X_j | A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) \quad (19)$$

其中,事件 A, B, C 所处的状态分别为 $A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}$ 。因此,在改进后的影响网络中只需要设置参数 h 即可,无需设置参数 g 。在设定单个影响事件的影响参数后,可根据影响参数的聚合方法得到整体影响强度 $H_j(i_a, i_b, i_c)$ 。根据文献[12],条件概率 $P(X_j | A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c})$ 可表示为:

$$P(X_j | A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) = \begin{cases} P_b(X_j) + H_j(i_a, i_b, i_c)(1 - P_b(X_j)), & \text{if } h_{ij} \geq 0 \\ P_b(X_j) + H_j(i_a, i_b, i_c) \cdot P_b(X_j), & \text{if } h_{ij} < 0 \end{cases} \quad (20)$$

即

$$\sum_{j=1}^n |H_j(i_a, i_b, i_c)| P_b(X_j) = \sum_{j=1}^n H_j(i_a, i_b, i_c) \cdot \text{sgn } H_j(i_a, i_b, i_c) \quad (21)$$

类似地,要使式(21)成立, $H_j(i_a, i_b, i_c)$ 应满足下列两个条件之一:

$$H_j(i_a, i_b, i_c) = 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

或者

$$\sum_{i_a, i_b, i_c: H_j(i_a, i_b, i_c) \geq 0} H_j(i_a, i_b, i_c)(1 - P_b(X_j)) = - \sum_{i_a, i_b, i_c: H_k(i_a, i_b, i_c) < 0} H_k(i_a, i_b, i_c) P_b(X_k) \quad (23)$$

在假设事件 X 的各状态等概率的条件下,式(23)可化简为:

$$(n-1) \sum_{i_a, i_b, i_c: H_j(i_a, i_b, i_c) \geq 0} H_j(i_a, i_b, i_c) = \sum_{i_a, i_b, i_c: H_k(i_a, i_b, i_c) < 0} H_k(i_a, i_b, i_c) \quad (24)$$

对于给定的 X_j , 应满足一致性条件^[12], 即服从贝叶斯准则:

$$\sum_{i_a, i_b, i_c} \{P_b(A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) H_j(i_a, i_b, i_c) \cdot [(1 - P_b(X_j)) P_b^{-1}(X_j)]^{\text{sgn } H_j(i_a, i_b, i_c)}\} = 0 \quad (25)$$

即

$$P_b(X_j) \sum_{i_a, i_b, i_c} P_b(A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) |H_j(i_a, i_b, i_c)| = \sum_{i_a, i_b, i_c} P_b(A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) H_j(i_a, i_b, i_c) \text{sgn } H_j(i_a, i_b, i_c) \quad (26)$$

在假设事件 A, B, C, X 的各状态均为等概率,且 A, B, C 相互独立的条件下,有 $P_b(A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) = \frac{1}{m_a m_b m_c}$, 则式(26)可化简为:

$$\sum_{i_a, i_b, i_c} |H_j(i_a, i_b, i_c)| = n \sum_{i_a, i_b, i_c} H_j(i_a, i_b, i_c) \text{sgn } H_j(i_a, i_b, i_c) \quad (27)$$

将式(27)化简后,可得到与条件式(24)完全相同的结论。

事实上,根据式(15)设定的影响参数,在聚合之后,不一定满足条件式(26),在实际应用过程中,可将计算得到的条件概率进行相应的归一化处理,从而得到近似的条件概率。

对于给定的 X_j , 其边缘概率为:

$$P_i(X_j) = \sum_{i_a, i_b, i_c} P(X_j | A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) \cdot P(A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) \quad (28)$$

由于事件 A, B, C 相互独立,因此有:

$$P(A_{i_a}, B_{i_b}, C_{i_c}) = P(A_{i_a}) P(B_{i_b}) P(C_{i_c}) \quad (29)$$

4 基于改进影响网络的防空系统目标威胁评估

在筹划对地目标进行空地联合火力打击的过程中,需要考虑地面防空系统对来袭兵力的威胁情况。下面以防空系统为背景,利用改进的影响网络进行威胁评估。

4.1 防空系统目标的威胁属性

防空系统主要由火力单元、预警雷达、指挥所3类目标组成,其中,火力单元主要包括防空导弹和高射炮。防空系统中,火力单元和预警雷达对来袭兵力造成的威胁更为直接和紧迫,下面便以其为例来进行威胁评估(指挥所目标的威胁评估方法类似,区别仅在于评估属性不同)。分析目标的威胁属性是进行目标威胁评估的基础,下面给出火力单元和预警雷达的威胁属性。

火力单元的威胁属性包括^[17]: 杀伤概率、反应时间、抗干扰能力、作战半径、可靠性。杀伤概率是指单发武器杀伤来袭兵器的概率;反应时间是指从火力单元的跟踪设备发现目标到发出第一发弹药的时间间隔;抗干扰能力是指火力单元的跟踪和制导设备的抗干扰能力;作战半径是指火力单元武器的射程;可靠性是指火力单元正常发挥作战效能的能力。

预警雷达的威胁属性包括^[17-18]: 搜索能力、反应时间、抗干扰能力、作用距离、可靠性。搜索能力是指预警雷达能够同时探测的目标批次、信息处理能力等;反应时间是指预警雷达

从首次探测到目标到将目标信息传递给火力单元和指挥所的时间间隔;抗干扰能力、作用距离、可靠性的含义与火力单元的抗干扰能力、作用距离、可靠性相似。

4.2 基于云模型的目标威胁属性的定性与定量转化

云模型通过期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 3 个数字特征来描述定性概念,可以较好地反映人在认知过程中存在的不确定性,并利用正向云发生器和逆向云发生器实现定性与定量概念的相互转化^[19]。可利用以上 3 个数字特征将云表示为 (Ex, En, He) 。将目标的各项威胁属性均划分为 3 个等级,并统一采用云族 $(0, 0.125, 0.02)$, $(0.5, 0.125, 0.02)$, $(1, 0.125, 0.02)$, 分别对应概念中的低(弱)、中、高(强)3 个定性概念,如图 4 所示。

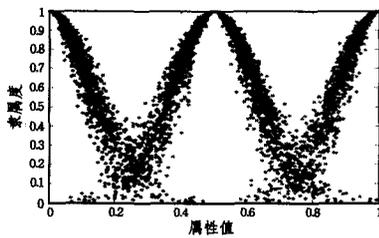


图 4 威胁属性云族

由于各威胁属性均采用统一的云族,需要将各威胁属性值进行归一化和规范化处理。火力单元和预警雷达威胁属性中,一部分是定性属性,包括搜索能力、抗干扰能力、可靠性,剩余的威胁属性为定量属性。将定性属性(即预警雷达的搜索能力、火力单元(预警雷达)的抗干扰能力、火力单元(预警雷达)的可靠性)由弱到强依次量化为 $[0, 1]$ 之间的数。根据上述所确定的云族 $(0, 0.125, 0.02)$, $(0.5, 0.125, 0.02)$, $(1, 0.125, 0.02)$, 将各类定量属性归一化和规范化处理为 3 个等级,并使处理后的值越大时威胁越大。

(1)火力单元的杀伤概率。杀伤概率的取值范围为 $[0, 1]$, 采用下式进行处理,分别对应 3 个杀伤概率等级:

$$P_k = \begin{cases} p/2.4, & p \in [0, 0.6] \\ (p-0.7)/0.4+0.5, & p \in [0.6, 0.8] \\ (p-1)/0.8+1, & p \in [0.8, 1] \end{cases} \quad (30)$$

(2)火力单位的反应时间。根据目前大部分火力单位的情况,将反应时间的取值范围设置为 $[5, 30]$ 。采用下式进行处理,分别对应 3 个反应快慢的等级:

$$T_f = \begin{cases} (5-t_f)/20+1, & t_f \in [5, 10] \\ (15-t_f)/20+0.5, & t_f \in [10, 20] \\ (30-t_f)/40, & t_f \in [20, 30] \end{cases} \quad (31)$$

(3)火力单位的作战半径。作战半径的取值范围为 $[10, 300]$, 采用下式进行处理,分别对应远、中、近 3 个作战距离的等级:

$$R_f = \begin{cases} (r_f-10)/160, & r_f \in [10, 50] \\ (r_f-100)/200+0.5, & r_f \in [50, 150] \\ (r_f-300)/600+1, & r_f \in [150, 300] \end{cases} \quad (32)$$

(4)预警雷达反应时间。反应时间的取值范围为 $[7, 80]$, 采用下式进行处理,分别对应 3 个反应快慢的等级:

$$T_r = \begin{cases} (7-t_r)/52+1, & t_r \in [7, 20] \\ (35-t_r)/60+0.5, & t_r \in [20, 50] \\ (80-t_r)/120, & t_r \in [50, 80] \end{cases} \quad (33)$$

(5)预警雷达作用距离。作用距离的取值范围为 $[50, 600]$, 采用下式进行处理,分别对应远、中、近 3 个预警距离的等级:

$$R_r = \begin{cases} (r_r-50)/400, & r_r \in [50, 150] \\ (r_r-225)/300+0.5, & r_r \in [150, 300] \\ (r_r-600)/1200+1, & r_r \in [300, 600] \end{cases} \quad (34)$$

式(30)~式(34)中的各表达式参数均依据事先设定的云族 $(0, 0.125, 0.02)$, $(0.5, 0.125, 0.02)$, $(1, 0.125, 0.02)$ 的参数进行确定,以保证归一化后的属性值正好处于各云的范围之内。对于给定的具体目标,根据上述归一化和规范化方法对其威胁属性值进行转换,并利用前件云发生器实现定性与定量的转化,转化步骤如下:

Step1 生成一个期望为 En 、标准差为 He 的正态随机数 En' ;

Step2 给定属性值 x , 计算该值的隶属度 $\mu(x) = e^{-(x-En')^2/2(En')^2}$;

Step3 对云族中的每个云重复 Step1 和 Step2, 从而得到 x 在不同云中的隶属度。

4.3 威胁评估流程

对目标进行威胁评估的基本思路是:基于本文提出的改进影响网络建立威胁评估的模型,并在此基础上给出威胁评估实施的步骤。具体的步骤和流程如下:

Step1 类似图 3 示出的多影响事件示意结构,分别对火力单元和预警雷达构建威胁评估的影响网络。具体方法为:采用两层影响网络结构,根节点为威胁属性,叶节点为威胁等级。其中,每个事件均有 3 种状态,对应地采用 3 个节点表示。建立如图 5 所示的影响网络模型,火力单元和预警雷达均采用该通用模型。

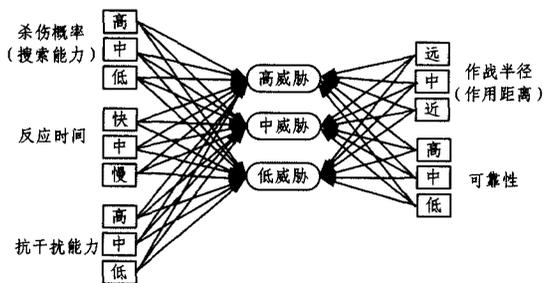


图 5 火力单元和预警雷达的改进影响网络

Step2 根据式(13)和式(15)所确定的影响参数间的约束,分别确定节点之间的影响参数。

Step3 根据给定的目标威胁属性值,对属性值进行归一化和规范化处理,并计算各属性值相关的隶属度。

Step4 利用式(35)实现隶属度向概率的转换。其中, $\mu_i(x)$ 为 x 在云族中第 i 个云的隶属度, $p_i(x)$ 为对应的第 i 个状态的输入概率, J 为云的数量。

$$p_i(x) = \frac{\mu_i(x)}{\sum_{j=1}^J \mu_j(x)} \quad (35)$$

Step5 根据改进影响网络的规则式(28),计算威胁等级的边缘概率。

Step6 由于前件云发生器得到的隶属度具有随机性,因此对 Step3~Step5 进行 L 次独立重复的实验,得到 L 组概

率,其中第 l 组可表示为 $(P_l(X_1), P_l(X_2), \dots, P_l(X_n))$ 。对这 L 组概率进行合成,从而得到各威胁等级的最终概率。合成方法如下:

$$P(X_j) = \frac{\sum_{l=1}^L P_l(X_j)}{\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^n P_l(X_k)} \quad (36)$$

5 仿真分析

假定有 20 个目标,其威胁属性如表 1 所列,其中,前 10 个目标为火力单元目标,后 10 个目标为预警雷达目标。设定影响参数如表 2 所列,其中,上半部分为火力单元目标影响网络的影响参数,下半部分为预警雷达目标影响网络的影响参数,表中每个括号内的 3 个数据分别表示威胁属性的 3 种状态对威胁度的影响参数。假定所有事件的各状态先验概率均为等概率,即影响网络所有节点取值为 1 的先验概率为 1/3。取 $L=100$,即进行 100 次重复的推理评估。

表 1 目标威胁属性

目标序号	杀伤概率/%	反应时间	抗干扰能力	作战半径	可靠性	目标序号	搜索能力	反应时间	抗干扰能力	作用距离	可靠性
1	80	21	0.65	280	0.55	11	0.85	75	0.60	560	0.55
2	40	25	0.50	220	0.80	12	0.60	45	0.75	480	0.60
3	60	8	0.75	180	0.70	13	0.55	62	0.50	350	0.85
4	88	12	0.20	160	0.45	14	0.45	38	0.85	280	0.38
5	50	18	0.40	120	0.20	15	0.75	18	0.70	230	0.80
6	45	20	0.88	90	0.45	16	0.20	58	0.35	200	0.40
7	75	6	0.30	60	0.25	17	0.56	13	0.50	150	0.20
8	30	15	0.60	45	0.65	18	0.25	36	0.30	80	0.35
9	60	10	0.70	30	0.55	19	0.35	9	0.35	65	0.50
10	80	20	0.45	15	0.83	20	0.60	23	0.55	55	0.70

表 2 影响参数

	高威胁	中威胁	低威胁
杀伤概率	(0.65, -0.5, -0.8)	(-0.4, 0.6, -0.8)	(-0.8, -0.6, 0.7)
反应时间	(0.2, 0.1, -0.6)	(-0.1, 0.35, -0.6)	(-0.5, -0.1, 0.3)
抗干扰能力	(0.75, -0.6, -0.9)	(-0.2, 0.5, -0.8)	(-0.8, -0.7, 0.75)
作战半径	(0.8, -0.7, -0.9)	(-0.7, 0.75, -0.8)	(-0.9, -0.7, 0.8)
可靠性	(0.3, -0.1, -0.5)	(-0.3, 0.4, -0.5)	(-0.8, 0.1, 0.3)
搜索能力	(0.7, -0.5, -0.9)	(-0.6, 0.65, -0.7)	(-0.7, -0.7, 0.7)
反应时间	(0.3, -0.3, -0.3)	(-0.3, 0.35, -0.4)	(-0.4, -0.2, 0.3)
抗干扰能力	(0.65, -0.6, -0.7)	(-0.5, 0.6, -0.7)	(-0.8, -0.4, 0.6)
作用距离	(0.8, -0.7, -0.9)	(-0.7, 0.75, -0.8)	(-0.9, -0.7, 0.8)
可靠性	(0.4, -0.2, -0.6)	(-0.3, 0.3, -0.3)	(-0.6, -0.2, 0.4)

仿真结果如表 3 所列,表 3 给出了所有目标对应的高、中、低威胁等级的概率,其结果体现出了各目标处于不同威胁等级的情况,较为符合实际情况,证明了改进影响网络方法的有效性和可行性。若要在这些概率中确定每个目标的最终威胁等级,可以设定一定的规则,将同一目标的 3 个威胁等级的

概率进行合成。例如,最简单的规则是直接取概率最大的威胁等级作为目标的威胁;也可以采用加权的方法,将 3 个威胁等级的概率进行加权和,并设定两个阈值分别对应高威胁等级阈值和中威胁等级阈值。诸如此类的合成规则可根据实际的应用环境进行确定。

表 3 目标处于不同威胁等级的概率

目标序号	高威胁	中威胁	低威胁	目标序号	高威胁	中威胁	低威胁
1	0.5797	0.4136	0.0066	11	0.8488	0.1450	0.0062
2	0.6609	0.1925	0.1466	12	0.4644	0.5332	0.0024
3	0.5865	0.3901	0.0234	13	0.4097	0.5853	0.0050
4	0.5416	0.3890	0.0694	14	0.1841	0.8117	0.0042
5	0.0147	0.8077	0.1776	15	0.2357	0.7601	0.0042
6	0.1062	0.6845	0.2093	16	0.0039	0.8026	0.1936
7	0.0186	0.8598	0.1217	17	0.0117	0.7847	0.2036
8	0.0061	0.3231	0.6708	18	0.0020	0.3766	0.6214
9	0.0282	0.4316	0.5403	19	0.0100	0.7437	0.2464
10	0.1689	0.5799	0.2513	20	0.0107	0.8275	0.1617

结束语 传统影响网络中节点的取值是二元的,因此只能描述二元状态的事件。对此,对传统的影响网络进行了扩展,使其能够描述具有多元状态的事件,并建立了改进的影响网络模型,推导了影响参数应满足的约束条件,给出了确定影响参数和计算条件概率的方法。改进后的影响网络可以较好地适用于目标的威胁评估。本文以防空系统目标为例,利用改进后的影响网络进行威胁评估。根据威胁评估的一般流程,分析了防空系统目标的威胁属性,并利用云模型方法对目标的威胁属性进行了定性与定量的转化,最后通过仿真实验验证了所提方法的有效性和可行性。

参考文献

[1] LLINAS J, BOWMAN C, ROGOVA G, et al. Revisiting the JDL Data Fusion Model II [C]// Proceedings of Seventh International Conference on Information Fusion. Stockholm, 2004: 1218-1230.

[2] LI F, LIU B, XU H F. Threat assessment of hybrid multiple attribute targets based on set pair analysis[J]. Journal of Naval Aeronautical Engineering Institut, 2012, 27(2): 219-222. (in Chinese)

栗飞, 刘博, 徐海峰. 基于集对分析的混合型多属性目标威胁评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(2): 219-222.

[3] WANG Y, MIAO X. Intuitionistic fuzzy perceiving methods for situation and threat assessment [C]// International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2012: 578-582.

[4] ZHANG K, WANG X, ZHANG C K, et al. Evaluating and sequencing of air target threat based on IFE and dynamic intuitionistic fuzzy sets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014(4): 697-701. (in Chinese)

张堃, 王雪, 张才坤, 等. 基于 IFE 动态直觉模糊法的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2014(4): 697-701.

[5] WU H, SU X Q. Threat assessment of aerial targets based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1462-1468. (in Chinese)

武华, 苏秀琴. 基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1462-1468.

- [6] WANG Y, LIU S Y, ZHANG W, et al. Threat Assessment Method with Uncertain Attribute Weight Based on Intuitionistic Fuzzy Multi-Attribute Decision[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(12): 2509-2514. (in Chinese)
王毅,刘三阳,张文,等. 属性权重不确定的直觉模糊多属性决策的威胁评估方法[J]. *电子学报*, 2014, 42(12): 2509-2514.
- [7] WANG G G, GUO L H, DUAN H, et al. The Model and Algorithm for the Target Threat Assessment Based on Elman-AdaBoost Strong Predictor [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(5): 901-906. (in Chinese)
王改革,郭立红,段红,等. 基于 Elman_AdaBoost 强预测器的目标威胁评估模型及算法[J]. *电子学报*, 2012, 40(5): 901-906.
- [8] MA S D, HAN L, GONG G H, et al. Target threat assessment technology based on cloud model[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(2): 150-153. (in Chinese)
麻士东,韩亮,龚光红,等. 基于云模型的目标威胁等级评估[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(2): 150-153.
- [9] GAO X G, LI Q Y, DI R H. MPC three - dimensional dynamic path planning for UAV based on DBN threat assessment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(11): 2199-2205. (in Chinese)
高晓光,李青原,邸若海. 基于 DBN 威胁评估的 MPC 无人机三维动态路径规划[J]. *系统工程与电子技术*, 2014, 36(11): 2199-2205.
- [10] DI R H, GAO X G, GUO Z G. The Modeling Method with Bayesian Networks and Its Application in the Threat Assessment Under Small Data Sets[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(6): 1504-1511. (in Chinese)
邸若海,高晓光,郭志高. 小数据集 BN 建模方法及其在威胁评估中的应用[J]. *电子学报*, 2016, 44(6): 1504-1511.
- [11] ZHANG Y Y, LI B C, CUI J W. Method of Target Threat Assessment Based on Cloudy Bayesian Network [J]. *Computer Science*, 2013, 40(10): 127-131. (in Chinese)
张银燕,李弼程,崔家玮. 基于云贝叶斯网络的目标威胁评估方法[J]. *计算机科学*, 2013, 40(10): 127-131.
- [12] ZAIDI A K, MANSOOR F, PAPANTONI-KAZAKOS T P. Theory of Influence Networks[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2010, 60(3): 457-491.
- [13] ROSEN J A, SMITH W L. Influence Net Modeling with Causal Strengths: An Evolutionary Approach[C]// *Proceedings of the Command and Control Research and Technology Symposium*. Monterey, 1996: 25-28.
- [14] CHEN Y X, WU X Y, BU X W, et al. Simulation credibility control based on risk analysis[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2014, 34(9): 2411-2416. (in Chinese)
陈永兴,吴晓燕,卜祥伟,等. 基于风险分析的仿真可信性控制[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(9): 2411-2416.
- [15] MA Y H, ZHANG Y Z, ZHANG Y. Situation Assessment Based on Influence Net[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(6): 90-93. (in Chinese)
马延豪,张耀中,张莹. 基于影响网络的态势估计[J]. *火力与指挥控制*, 2014, 39(6): 90-93.
- [16] DU Z J, CHEN C, JIANG X. Modeling and solution method of course of action based on influence net and multi-stage games with incomplete information[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(3): 63-67. (in Chinese)
杜正军,陈超,姜鑫. 基于影响网络与不完全信息多阶段博弈的作战行动序列模型及求解方法[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(3): 63-67.
- [17] 娄寿春. 面空导弹武器系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 50-230.
- [18] ZHENG Y J, TIAN K S, CHEN G, et al. Operational Efficiency Evaluation for Anti-missile Early Warning Radar Based on Grey AHP[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2016, 27(1): 111-115. (in Chinese)
郑玉军,田康生,陈果,等. 基于灰色 AHP 的反导预警雷达作战效能评估[J]. *装备学院学报*, 2016, 27(1): 111-115.
- [19] 李德毅,刘常昱,杜鹤,等. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 137-186.
- (上接第 145 页)
- [9] CAU T, NIE Q B, OUYANG K, et al. Role-extended-based RBAC model [J]. *Application Research of Computers*, 2016, 33(3): 882-885. (in Chinese)
蔡婷,聂清彬,欧阳凯,等. 基于角色扩展的 RBAC 模型[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(3): 882-885.
- [10] DENG J B, HONG F. Task-Based Access Control Model[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(1): 76-82. (in Chinese)
邓集波,洪帆. 基于任务的访问控制模型[J]. *软件学报*, 2003, 14(1): 76-82.
- [11] LAPIN S. Access control model D-TBAC subject to the requirements to tasks' performing[C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Security of Information and Networks*. ACM, 2015: 42-45.
- [12] SHI J F, LI J H, XUE Z. Research of Authorization Model Based TBAC[J]. *Communications Technology*, 2002(11): 95-97. (in Chinese)
施教芳,李建华,薛质. 一种扩展的 TBAC 访问控制模型研究[J]. *通信技术*, 2002(11): 95-97.
- [13] ZHANG Q P. Research on Tasks and Role Based Access Control Model[J]. *Computer Security*, 2008(9): 74-75. (in Chinese)
张庆萍. 基于任务和角色的访问控制模型研究[J]. *计算机安全*, 2008(9): 74-75.
- [14] SCHMIDT P J, PINTAR K D, FAZIL A M, et al. Harnessing the Theoretical Foundations of the Exponential and Beta-Poisson Dose-Response Models to Quantify Parameter Uncertainty Using Markov Chain Monte Carlo [J]. *Risk Analysis*, 2013, 33(9): 1677-1693.
- [15] WANG H, YAJIMA A, LIANG R Y, et al. Bayesian Modeling of External Corrosion in Underground Pipelines Based on the Integration of Markov Chain Monte Carlo Techniques and Clustered Inspection Data[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2015, 30(4): 300-316.
- [16] ISO. IEC14882: 2011 Information technology--Programming languages--C++ [S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2011.