

引用格式:李涛,张刚,成建波.采用贝叶斯网络的应召反潜目标态势评估[J].电光与控制,2019,26(6):40-44. LI T, ZHANG G, CHENG J B. Situation assessment in on-call anti-submarine warfare using Bayesian network[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(6):40-44.

采用贝叶斯网络的应召反潜目标态势评估

李涛, 张刚, 成建波
(中国人民解放军92728部队, 上海 200436)

摘要:反潜目标态势评估是反潜指挥决策的重要依据,针对反潜作战中目标信息不充分、不确定程度高的问题,通过对直升机编队反潜的敌我对抗过程进行分析,提出基于贝叶斯网络的态势评估算法。算法通过构建敌我对抗过程的敌我关联网络、建立因果概率表、基于贝叶斯网络进行推理,实现目标类型和目标意图的识别。实验结果表明了网络推理的有效性。算法可以有效利用侦察到的目标信息,结合经验模型进行推理和识别,对指挥员的作战决策具有很好的参考价值。

关键词:反潜战;直升机编队;态势评估;贝叶斯网络;目标识别

中图分类号: E917; TB566 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.06.008

Situation Assessment in On-Call Anti-submarine Warfare Using Bayesian Network

LI Tao, ZHANG Gang, CHENG Jian-bo
(No. 92728 Unit of PLA, Shanghai 200436, China)

Abstract: Situation assessment of the target is the basis for making military decision in anti-submarine warfare. Through analyzing the antagonistic process between the helicopter formation and the target, and considering the insufficiency and uncertainty of target information in the anti-submarine warfare, we proposed a kind of situation assessment algorithm based on Bayesian network. By establishing an association network between the two sides and the relevant causality and probability tables, we used Bayesian network for ratiocination, and thus to identify the target and its intention. The experiment results showed the validity of the algorithm, which can provide a good reference for military decision-making in anti-submarine warfare by using the target information effectively together with the empirical model for ratiocination and identification.

Key words: anti-submarine warfare; helicopter formation; situation assessment; Bayesian network; target identification

0 引言

态势评估是将获得的敌方兵力部署、活动和战场环境等信息与兵力结构、使用特点结合起来,推断敌方作战意图,形成战场态势的过程。态势评估接近于人的思维过程,需要基于领域知识、模拟人脑思维进行推理。目前,在态势评估方面主要应用认知模型的方法作为实现技术^[1-3],其中,贝叶斯网络是根据贝叶斯推理理论建立的图形模型,基于贝叶斯网络的态势评估技术已成为一种重要的方法^[4-9]。在反潜作战中,由

于潜艇的隐蔽性以及水声环境的不确定性,在战场态势变化快的真实情况下,建立有效的潜艇目标类型识别和意图评估模型更加困难,同时,指挥员基于因果推理得出的认知经验也是反潜战的重要信息来源,考虑到贝叶斯网络在处理不确定性信息和因果推断上的优越性,本文采用贝叶斯网络研究直升机编队反潜的目标态势评估问题。

1 贝叶斯网络原理

贝叶斯网络由以下两个元素组成:1) 模型结构,以非循环有向图表示模型结构属性,非循环有向图的节点对应于模型中的变量,有向边代表变量的条件依赖关系;2) 模型参数,是指为每一个变量指定的条件概率表(CPT)。图1为贝叶斯网络的示意图。

收稿日期:2018-07-11 修回日期:2019-04-19

作者简介:李涛(1981—),男,湖南汨罗人,博士,工程师,研究方向为航空反潜战术。

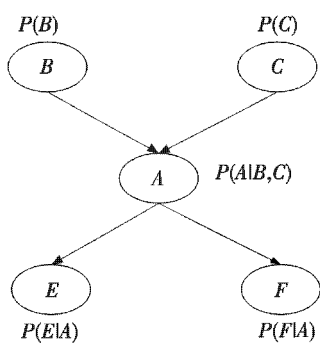


图1 贝叶斯网络示意图

Fig.1 Diagram of Bayesian network

节点之间的有向弧表示节点的依赖关系,依赖程度则由条件概率表示。设 V_i 为网络中的某一节点, $A(V_i)$ 为网络中非 V_i 子节点的那些节点的任一子集, $P_a(V_i)$ 为网络中节点 V_i 的父节点,则有

$$P(V_i|A(V_i), P_a(V_i)) = P(V_i|P_a(V_i)) \quad (1)$$

由式(1)的结果可得

$$P(V_i, A(V_i) | P_a(V_i)) = P(V_i | P_a(V_i)) \cdot P(A(V_i) | P_a(V_i)) \quad (2)$$

式(2)反映的关系为条件独立性,即在以 $P_a(V_i)$ 为条件时, $A(V_i)$ 和 V_i 为独立关系。

利用贝叶斯网络模型解决实际问题的过程实际上是一种贝叶斯网络推理过程,根据建立的有向图模型,利用条件概率表和式(2),根据某个(些)节点的状态,逐级对单个对象状态、网络状态、子态势进行推理,获得各个节点状态的估计。

2 基于贝叶斯网络的直升机编队应召反潜目标态势评估

2.1 直升机编队联合反潜

在直升机编队应召反潜时,直升机编队通常综合使用多种探测器搜索潜艇,例如分别携带声呐浮标、吊放声呐或者磁探仪。根据已知的潜艇信息,战术群飞至应召区域,携带声呐浮标的直升机 R1 首先布设圆形包围阵(1~7)包围潜艇,如图2所示,或者在敌潜艇可能驶离方向布设拦截阵,以断敌退路;携带吊放声呐的直升机 R2 在浮标阵内进行扩展搜索;发现疑似目标后,由携带磁探仪的直升机进行精确定位和识别;直升机之间通过数据链及超短波通信保持实时联系,随时共享情报信息。

直升机编队联合反潜的优势是对潜艇的搜索概率和效率高,且由于形成包围/拦截浮标阵,潜艇难以规避,利于吊放声呐使用主动探测的方式。

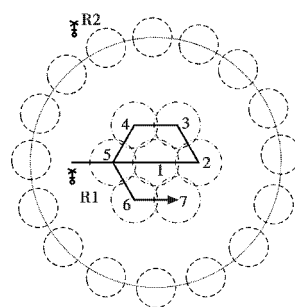


图2 直升机编队联合搜潜

Fig.2 Helicopter formation searching submarine in teamwork

2.2 网络结构设计

在直升机编队应召反潜过程中,被动全向声呐浮标通常用来进行大面积的区域覆盖搜索,或者包围圈、拦截线搜索,能够获取的目标信息主要是潜艇的辐射噪声信息。由潜艇的辐射噪声可以分析噪声的特征谱,用来识别潜艇特有的谱结构信息;另外,由于潜艇的辐射噪声与其航速有关,航速越大,辐射噪声越强,因此由辐射噪声的强弱变化可以分析潜艇的航速信息。主动全向浮标和被动定向浮标一般用来进行目标定位,其中,主动全向浮标通过目标的回波对目标进行定位,通常潜艇回波的强弱与潜艇航向有关,一般正横方向的目标回波最强。在主动探测方式下,由于潜艇能够更早地发现主动探测的声信号并实施转向、下潜等规避动作,导致潜艇航向变化并进一步影响目标回波强度,因此主动探测的回波强弱特征一定程度上可以识别潜艇的规避行动。对于使用吊放声呐的情形,存在主动/被动两种工作方式,能够获取的目标信息与声呐浮标类似。磁探仪由于作用距离近,一般用来进行目标的定位、识别和跟踪,明显的磁异常信号可以作为识别潜艇的有利依据。

基于上述分析,根据测量量(包括磁特性、噪声特征、回波的强度、噪声辐射的强弱、航向、航速和深度)和估计量(包括目标类型、目标意图),以及探测方式与目标的相对位置之间的大致因果关系,可以建立图3所示的态势评估贝叶斯网络。

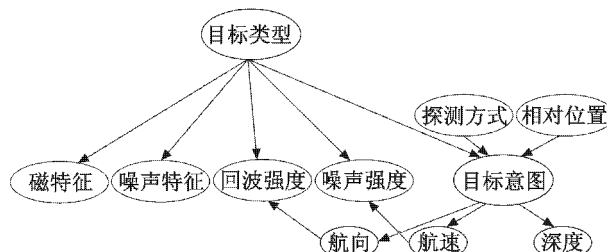


图3 直升机应召反潜态势评估的贝叶斯网络模型

Fig.3 Bayesian network model for situation assessment of on-call submarine search by helicopter

各个网络节点的取值状态集合如下。

目标类型(A): { 潜艇, 鱼群(环境干扰), 假目标 } = { A_1, A_2, A_3 }。

探测方式(B): { 主动, 被动 } = { B_1, B_2 }。

目标意图(D): { 攻击, 突防, 规避, 未知 } = { D_1, D_2, D_3, D_4 }。

目标位置(E): { 远, 中, 近 } = { E_1, E_2, E_3 }。

目标航速(F): { 快速, 低速/静止 } = { F_1, F_2 }。

下潜深度(G): { 下潜, 上浮, 保持 } = { G_1, G_2, G_3 }。

目标航向(H): { 接近, 远离 } = { H_1, H_2 }。

回波强度(I): { 强, 保持, 弱/无 } = { I_1, I_2, I_3 }。

噪声强度(J): { 强, 保持, 弱/无 } = { J_1, J_2, J_3 }。

噪声特征(K): { 潜艇, 未知, 非潜艇 } = { K_1, K_2, K_3 }。

磁特征(L): { 磁异常, 无异常 } = { L_1, L_2 }。

其中, 目标类型和目标意图为需要估计的节点, 探测方式和相对位置节点为输入条件, 其他节点为测量节点。

图 3 所示的因果关系是明显的: 由传感器测量的航向、速度和信息构成识别目标意图的信息输入, 反过来, 目标意图的改变导致其航向、速度和深度产生相应的改变; 由传感器测量的磁特征、噪声特征、噪声强度和回波强度构成目标类型识别的信息输入, 主动探测导致目标意图的改变, 进而影响目标的航向、速度、深度和相对位置信息, 最终影响目标类型的识别过程。进

行网络推理时, 首先根据经验建立模型内各节点之间的条件概率; 在获得目标位置信息后, 根据目标位置进行远、中、近的划分, 然后根据当前采用的探测方式, 依据经验确定目标类型的先验概率, 利用目标意图的条件概率表确定目标意图的先验概率; 在获得目标的噪声强度、回波强度、噪声特征、磁特征信息后, 根据相应的条件概率表确定目标类型和目标意图的后验概率。

2.3 条件概率表设计

根据反潜作战经验规律, 在被动探测方式下, 由于潜艇无法感知探测行动, 在潜艇距离攻击目标远和中两种状态下, 其可能的意图以采用潜射导弹攻击和进一步突防为主, 而规避的概率最低, 因此应以均匀分配的形式将概率分配给攻击和突防意图, 而分配给规避的概率最低; 在潜艇距离攻击目标近的状态下, 其最可能的意图是采用鱼雷攻击, 因为攻击目标很可能已经进入其射距以内, 其次是规避, 而最低的是突防。在主动探测方式下, 由于潜艇发现探测行动的概率提高, 因此, 其规避的概率大幅升高; 当目标类型为鱼群时, 无论其距离远近, 或者发现探测行动与否, 都不会出现攻击、突防或者规避的意图, 因此, 此时其意图定义为未知; 当目标类型为假目标时, 无论其距离远近, 或者发现探测行动与否, 都不会出现攻击的意图, 因此, 此时其可能意图为突防和规避。综合上述经验, 表 1 给出了目标类型、探测方式和目标相对位置为已知条件下目标意图的条件概率。

表 1 目标意图条件概率表: $P(D_k | A_j B_n E_m)$

Table 1 Conditional probability of D_k of the target

D_k	$A_j B_n E_m$																	
	$A_1 B_1 E_1$	$A_1 B_1 E_2$	$A_1 B_1 E_3$	$A_1 B_2 E_1$	$A_1 B_2 E_2$	$A_1 B_2 E_3$	$A_2 B_1 E_1$	$A_2 B_1 E_2$	$A_2 B_1 E_3$	$A_2 B_2 E_1$	$A_2 B_2 E_2$	$A_2 B_2 E_3$	$A_3 B_1 E_1$	$A_3 B_1 E_2$	$A_3 B_1 E_3$	$A_3 B_2 E_1$	$A_3 B_2 E_2$	$A_3 B_2 E_3$
D_1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D_2	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
D_3	0.7	0.7	0.6	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
D_4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

根据反潜作战经验规律: 当目标意图为攻击和突防时, 更加趋向于接近攻击目标, 当目标意图为规避时, 更加趋向于远离攻击目标; 当目标意图为攻击和突防时, 保持低速的概率更高, 当目标意图为规避时, 更加趋向于高速脱离, 或者保持低速以降低自身噪声辐射, 因此两者概率相等; 当目标意图为突防时, 更加趋向于保持中等深度, 上浮的概率最低, 当目标意图为规避时, 更加趋向于下潜, 基本上不会上浮至水面附近。表 2 给出了目标意图为已知条件下目标特性(航向、航速和深度)的条件概率。

表 2 目标航向等特性条件概率表: $P(H_i | D_k), P(F_i | D_k), P(G_i | D_k)$

Table 2 Conditional probability of H_i, F_i, G_i of the target

H_i, F_i, G_i		D_k			
		D_1	D_2	D_3	D_4
目标航向 H	H_1 : 接近	0.8	0.8	0.3	0.5
	H_2 : 远离	0.2	0.2	0.7	0.5
目标航速 F	F_1 : 快速	0.2	0.2	0.5	0.5
	F_2 : 低速	0.8	0.8	0.5	0.5
下潜深度 G	G_1 : 下潜	0.1	0.3	0.8	1/3
	G_2 : 上浮	0.1	0.1	0	1/3
	G_3 : 保持	0.8	0.6	0.2	1/3

根据反潜作战经验规律:当目标类型为潜艇时,其辐射噪声的潜艇噪声特征和磁异常特征会更明显;当目标类型为鱼群时,其辐射噪声的非潜艇噪声特征和无磁异常特征会更明显;当目标类型为假目标时,其辐射噪声的潜艇噪声特征将与潜艇类似,但磁异常特征会更弱。表3给出了目标类型为已知条件下目标特性(噪声特性、磁特性)的条件概率。

表3 目标噪声和磁特性条件概率表: $P(K_p, L_i | A_j)$

Table 3 Conditional probability of K_p, L_i of the target

K_p, L_i	A_j			
	A_1	A_2	A_3	
噪声特性 K	K_1 : 潜艇	2/3	0	2/3
	K_2 : 未知	1/3	1/3	1/3
	K_3 : 非潜艇	0	2/3	0
磁特性 L	L_1 : 磁异常	0.9	0.1	0.2
	L_2 : 无异常	0.1	0.9	0.8

根据反潜作战经验规律:当目标为潜艇、处于远离状态时,其回波强度会弱,在处于接近状态时,其回波强度会强;当目标类型为鱼群时,由于鱼群的状态基本上可以认为是独立于其他节点状态的,因此其回波特征保持不变的概率最高;当目标类型为假目标时,无论其状态如何,都会有较强的回波强度,这符合假目标的特征。表4给出了目标类型和目标航向为已知条件下目标回波强度的条件概率。

表4 目标回波强度条件概率表: $P(I_o | A_j H_i)$

Table 4 Conditional Probability of I_o of the target

I_o	$A_j H_i$					
	$A_1 H_1$	$A_1 H_2$	$A_2 H_1$	$A_2 H_2$	$A_3 H_1$	$A_3 H_2$
I_1 : 强	0	2/3	1/6	1/6	0.8	0.8
I_2 : 保持	1/3	1/3	2/3	2/3	0.1	0.1
I_3 : 弱	2/3	0	1/6	1/6	0.1	0.1

根据反潜作战经验规律:当目标为潜艇、其航速快时,其辐射噪声强,在处于低速状态时,其辐射噪声弱;当目标类型为鱼群时,由于鱼群的状态基本上可以认为是独立于图3中其他节点状态的,因此其辐射噪声一般变化很小;当目标类型为假目标时,无论其状态如何,都会有较强的辐射噪声,这符合假目标的特征。表5给出了目标类型和目标航速为已知条件下目标辐射噪声强度的条件概率。

表5 目标辐射噪声强度条件概率表: $P(J_y | A_j F_i)$

Table 5 Conditional probability of J_y of the target

J_y	$A_j F_i$					
	$A_1 F_1$	$A_1 F_2$	$A_2 F_1$	$A_2 F_2$	$A_3 F_1$	$A_3 F_2$
J_1 : 强	2/3	0	1/8	1/8	0.8	0.8
J_2 : 保持	1/3	1/3	3/4	3/4	0.1	0.1
J_3 : 弱	0	2/3	1/8	1/8	0.1	0.1

3 算例及结果分析

假设某一时刻情报通报某一位置存在疑似潜艇目

标后,直升机编队出动进行应召反潜。根据目标位置信息,将目标位置划定为相对距离远状态,采用吊放声呐主动探测方式,在没有获取目标任何信息时,假定目标类型的先验概率为 $P(A_1) = P(A_2) = P(A_3) = 1/3$, 即3个状态为均匀分布。在吊放声呐实施主动探测后,其监听到很强的辐射噪声(J_1),要求此时目标类型的后验概率 $P(A_j | J_1)$ 。

初步定性分析,主动声呐的使用使得目标潜艇发现探测信号的概率升高,如果潜艇发现主动探测信号,采取规避的概率会升高,其可能释放假目标、降低航速以降低噪声辐射,或者提高航速以逃离,因此,如果检测到很强的辐射噪声,最大可能是潜艇释放了假目标,因为无论假目标航速如何,其辐射噪声都会很大;其次为潜艇,因为其可能提高航速逃离,导致辐射噪声增大;最不可能的是鱼群,因为鱼群的辐射噪声应该不受吊放声呐主动探测的影响,不论在何种状态都很低。定量的计算过程为

$$P(A_j | J_1) = \frac{P(A_j J_1)}{P(J_1)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 P(J_1 F_i D_k A_j)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^3 P(J_1 F_i D_k A_j)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 P(J_1 | F_i D_k A_j) P(F_i | D_k A_j) P(D_k | A_j) P(A_j)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^3 P(J_1 | F_i D_k A_j) P(F_i | D_k A_j) P(D_k | A_j) P(A_j)} \quad (3)$$

根据图1中条件概率条件所反映的马尔可夫性,式(3)可以简化为

$$P(A_j | J_1) = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 P(J_1 | F_i A_j) P(F_i | D_k) P(D_k | A_j) P(A_j)}{\sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^3 P(J_1 | F_i A_j) P(F_i | D_k) P(D_k | A_j) P(A_j)} \quad (4)$$

代入表1~表5中的条件概率值,可得 $P(A_1 | J_1) = 0.23$, $P(A_2 | J_1) = 0.10$, $P(A_3 | J_1) = 0.67$ 。由此可知,定量计算与定性分析的结果一致,目标类型最有可能是假目标,其次是潜艇,概率最小的是鱼群。

假设进一步采用磁探仪进行定位识别时检测到了磁异常信号(L_1),则此时目标类型的后验概率分布为

$$P(A_j | J_1 L_1) = \frac{P(L_1 | A_j) P(J_1 A_j)}{\sum_{j=1}^3 P(A_j J_1 L_1)} = \frac{P(L_1 | A_j) P(A_j J_1)}{\sum_{j=1}^3 P(L_1 | A_j) P(A_j J_1)} \quad (5)$$

代入表1~表5中的条件概率值可得 $P(A_1 | J_1 L_1) = 0.63$, $P(A_2 | J_1 L_1) = 0.03$, $P(A_3 | J_1 L_1) = 0.34$ 。由此可知,由于进一步检测到了磁异常信号导致目标为潜艇的概率最高,其次为假目标,最不可能的是鱼群。

为计算目标意图的后验概率,首先在假定的目标类型先验概率条件下,代入表 1~表 5 中的条件概率值,可得目标意图的先验概率为: $P(D_1|B_1E_1)=0.07$, $P(D_2|B_1E_1)=0.20$, $P(D_3|B_1E_1)=0.40$, $P(D_4|B_1E_1)=0.33$ 。

在目标类型的 3 个状态为均匀分布的条件下,目标意图除攻击意图很小之外,规避、突防和未知 3 种意图的概率分布大致接近。在吊放声呐实施主动探测后,其监听到很强的辐射噪声(J_1),此时目标意图的后验概率 $P(D_k|J_1)$ 的计算过程为

$$P(D_k|J_1) = \frac{P(D_kJ_1)}{P(J_1)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(J_1F_iD_kA_j)}{P(J_1)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(J_1|F_iA_j)P(F_i|D_k)P(D_k|A_j)P(A_j)}{P(J_1)} \quad (6)$$

代入表 1~表 5 中的条件概率值可得: $P(D_1|J_1)=0.02$, $P(D_2|J_1)=0.31$, $P(D_3|J_1)=0.55$, $P(D_4|J_1)=0.12$ 。由此可知,在吊放声呐实施主动探测后,其监听到很强的辐射噪声的条件下,目标意图为规避/投放假目标的概率最大,其次为突防,这与经验相符。采用磁探仪进行定位识别时检测到了磁异常信号(L_1)后,目标意图的后验概率分布为

$$P(D_k|J_1L_1) = \frac{P(D_kJ_1L_1)}{P(J_1L_1)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(L_1J_1F_iD_kA_j)}{\sum_{j=1}^3 P(A_jJ_1L_1)} = \frac{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(L_1|A_j)P(J_1|F_iA_j)P(F_i|D_k)P(D_k|A_j)P(A_j)}{\sum_{j=1}^3 P(L_1|A_j)P(A_jJ_1)} \quad (7)$$

代入表 1~表 5 中的条件概率值可得: $P(D_1|J_1L_1)=0.04$, $P(D_2|J_1L_1)=0.22$, $P(D_3|J_1L_1)=0.72$, $P(D_4|J_1L_1)=0.02$ 。由此可知,采用磁探仪进行定位识别时检测到了磁异常信号后,目标意图的最大概率为规避,这是由于经过磁探仪的识别后,目标为潜艇的概率增

大,而潜艇在主动声呐探测的情形下最有可能采用的是规避动作,与事实相符。

4 结论

综上所述,本文提出一种基于贝叶斯网络的直升机编队应召反潜目标态势评估算法。算法通过构建直升机应召反潜过程中敌我对抗过程的敌我关联网络、建立因果概率表,基于贝叶斯网络进行推理,实现目标类型和目标意图的识别。实验结果表明,算法可以有效利用侦察到的目标信息,结合经验模型进行推理和识别,实现基于目标信息与经验规律融合的目标态势评估。

参考文献

- [1] 王晓帆, 王宝树, 柴慧敏. 一种基于属性值树的求核与约简方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(6): 1111-1118.
- [2] 王琳, 寇英信. Dempster-Shafer 证据理论在空战态势评估方面的应用[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 156-157.
- [3] 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): 2176-2179.
- [4] 吴天侯, 张安, 李亮. 基于离散模糊动态贝叶斯网络的空战威胁估计[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 56-59.
- [5] 柴慧敏, 王宝树. 态势评估中的贝叶斯网络模型研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(3): 491-495.
- [6] HATAKEYA N, FURUTA K. Bayesian network modeling of operator's intent inference[C]//The 7th Human Factors Meeting, IEEE, 2002: 55-60.
- [7] 吴文龙, 黄文斌, 刘剑. 潜艇对水面舰艇编队攻击意图推理研究[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(9): 101-105.
- [8] 马静. 贝叶斯网络的战场作战意图评估方法[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(4): 397-401.
- [9] 赵晓辉, 姚佩阳, 张鹏. 动态贝叶斯网络在战场态势估计中的应用[J]. 电光与控制, 2010, 17(1): 44-47.