

引用格式: 闵绍荣, 陈卫伟, 朱忍胜, 等. 基于变权TOPSIS法的舰艇对空防御威胁评估模型[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(4): 100–105.

MIN Shaorong, CHEN Weiwei, ZHU Rensheng, et al. Threat evaluation method of warships to defend air targets based on variable weights TOPSIS[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(4): 100–105.

基于变权TOPSIS法的舰艇对空防御威胁评估模型

闵绍荣, 陈卫伟, 朱忍胜, 谢红胜

中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: 威胁评估是舰艇对空防御指挥控制的关键环节之一。针对传统威胁评估方法在确定指标权重时采用常权重加权求和所带来的评估不合理的问题, 将变权理论引入到舰艇对空防御的威胁评估中, 构造状态变权向量表达式, 使得权重随态势变化而做出相应调整。综合考虑目标属性与本舰防空武器性能, 给出威胁评估指标体系, 并结合“逼近于理想排序法”(TOPSIS)构建舰艇对空防御威胁评估模型。实例分析表明, 该模型得到的评估结果较为科学合理, 为舰艇对空防御威胁评估提供了理论与方法的参考。

关键词: 威胁评估; 变权; TOPSIS; 多属性决策

中图分类号: U674.7*03.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2015.04.015

Threat evaluation method of warships to defend air targets based on variable weights TOPSIS

MIN Shaorong, CHEN Weiwei, ZHU Rensheng, XIE Hongsheng

China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: Threat evaluation is of vital significance to the ship's command and control system of air defense. As the conventional threat evaluation method is based on constant weight summation and, therefore, leads to unreasonable results, this paper incorporates a variable weight mechanism into the threat evaluation system. State variable weight vectors are first constructed and adjusted under different conditions. The threat evaluation index system is presented after a thorough consideration that combines target attributes and the efficiency of air defense combat. Based on variable weights TOPSIS, the threat evaluation model is established for warships to defend air targets. Finally, case analysis shows that the proposed model is scientifically effective, which provides theoretical and methodological reference to the threat evaluation of warships in air target defense.

Key words: threat evaluation; variable weights; TOPSIS; multiple attribute decision making

0 引言

在当前高技术条件下的海战中, 空袭方采取高、中、低空相结合的多层次、多批次、多方向同时饱和攻击的战术, 使舰艇的防空作战面临严峻的挑战。同时, 空中目标机动性、隐身性能和速度的提高, 压缩了舰艇的防御时间, 使得舰艇对防御实时性要求日益增加。如何处理来自传感器系统的

有限空中目标的属性信息, 从而对空中目标进行正确的威胁排序, 以满足对空防御的实时性要求, 是舰艇对空防御指挥控制中的重要组成部分^[1-2]。

舰艇对空防御威胁评估的研究方法主要根据当前目标速度、高度、距本舰距离、航路捷径、航向等属性参数, 确定威胁度隶属函数, 采用基于常权的线性加权综合方法得到单属性综合评估值^[3-5]。在实际评估的过程中, 各属性之间蕴含着错综复

收稿日期: 2014-11-06

网络出版时间: 2015-7-29 9:23:51

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 闵绍荣(通信作者), 男, 1961年生, 研究员。研究方向: 舰载信息系统集成。E-mail: 1724512586@qq.com
陈卫伟, 男, 1989年生, 硕士。研究方向: 舰载信息系统集成。E-mail: chenweiwei_cool@sina.com

杂的非线性动态关系,常权向量在一定程度上反映了各属性的相对重要程度,但无法客观反映各属性状态值的变化以及各属性之间的相关性对权重的影响,不能科学反映各属性在评估过程中所起的作用。另外,指标体系中忽略了我方防空火力防御能力对目标威胁程度的重要影响,使得评估结果具有片面性。

鉴于此,本文将根据汪培庄^[6]提出的变权思想给出用于舰艇对空防御威胁评估的变权TOPSIS模型,综合考虑目标属性与本舰的防御性能,以使威胁评估结果更为科学合理。

1 威胁评估变权TOPSIS模型

1.1 评估模型

设空中来袭目标威胁域为 $D=(D_1,D_2,\cdots,D_n)$, 其中 n 为来袭目标数量。记目标的指标威胁属性集合 $u=(u_1,u_2,\cdots,u_m)$, 其中 m 为指标个数, $u\in[0,1]$ 。设常权向量为 $W=(W_1,W_2,\cdots,W_m)$, 则变权向量可以表示为 $W(u)=(W_1(u),W_2(u),\cdots,W_m(u))$ 。

基于变权TOPSIS法的舰艇对空自防御威胁评估模型的步骤如下:

- 1) 分析舰艇对空自防御作战过程中威胁评估的影响因素,构建威胁评估指标体系集 u ;
- 2) 构建各指标隶属函数,得到标准化的威胁属性值 u_i ;
- 3) 参照变权向量定义,在常权向量 W 基础上构造变权向量,得到指标权重集 $W(u)$;
- 4) 根据目标威胁属性值与各指标权重,利用TOPSIS法对威胁目标进行排序,得到排序后的目标集。

1.2 威胁评估指标体系

在具体的战术环境下,凡是对本舰有攻击意图,并且能造成损伤、击毁后果的空中来袭目标,都为威胁目标。故威胁评估影响因素来自威胁能力与威胁意图2个方面。

在实际作战过程中,敌我双方均相互保密,作为防御方,信息来源主要为传感器探测到的信息,一般可以得到目标的类型、速度、航向角、高度、距本舰的距离、目标的干扰能力等信息。同时,还应该考虑防空火力的性能,尤其是我方防空火力的射界、反应时间、转火时间、命中概率等火力特性对目标威胁度评估的影响。

其中,目标类型、速度、高度以及多火力通道下的目标突防概率,直接关系到目标威胁能力;目

标航路捷径、机动特性、距本舰距离表明了目标的攻击意图,由此构建的舰艇对空防御威胁评估指标体系如图1所示。

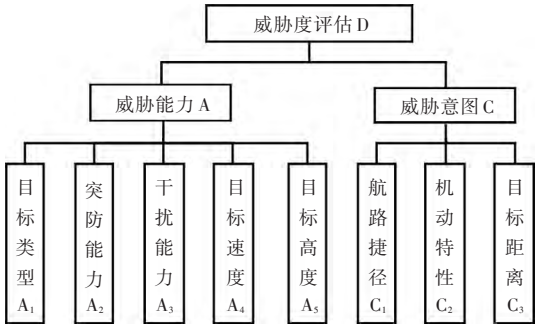


图1 舰艇对空防御威胁评估指标体系
Fig.1 The threat evaluation index system of warships to defend air targets

1.3 威胁评估量化指标

1.3.1 威胁能力

1) 目标类型。

为了定量描述不同类型目标的相对威胁程度,针对对空防御作战的实际情况,可对目标类型的威胁能力 u_{A1} 由高到低进行赋值(表1),数据来源可以由专家打分或运用效能评估方法量化得到。

表1 目标类型的威胁能力量化值	
Tab.1 Threat values of target type	
类型	量化值
反舰导弹	0.9
隐身飞机	0.75
轰炸机	0.6
武装直升机、干扰机	0.45
预警机、侦察机	0.3
未知机型	0.15

2) 突防能力。

对空防御过程中,为保证本舰安全,对所有威胁目标都应保证至少有一次拦截机会,并保证一定的拦截概率。目标的突防能力一般用其突防概率定量表示,且与舰艇对该目标的拦截概率成反比关系。受舰艇防空火力数量、射界、性能的影响,尤其是火力覆盖范围小于 360° 的斜发防空武器,处于其交叉火力区的目标的威胁能力相对较小,因此来袭方位、微波特性、速度、距离不同的目标,具有不同的突防概率。突防概率越大的目标,其威胁能力越大。突防概率的威胁能力 u_{A2} 的隶属函数表示为

$$u_{A2}(n_i,p_i)=\prod_{i=1}^N(1-p_i)^{n_i} \tag{1}$$

式中: N 为舰艇火力通道数; p_i 为火力通道 i 对

该目标单次拦截概率; n_i 为不考虑目标被击毁条件下, 火力通道 i 对该目标的最大拦截次数, n_i 可采用如下简化模型表示

$$n_i = t_{st} / \left(t_{itv} + \frac{L_{far} + L_{near}}{2v_m} \right) \quad (2)$$

式中: t_{st} 为目标在火力通道杀伤区预计逗留时间, 对于反舰导弹目标, t_{st} 可用其通过火力区剩余距离除以速度得到; t_{itv} 为火力通道从上次开火, 到能够第2次开火的最短间隔时间; L_{far} , L_{near} 分别表示杀伤区的远界与近界; v_m 为舰对空导弹的飞行速度。

3) 干扰能力。

空袭方在攻击过程中辅助以电子干扰, 主要用于干扰雷达的搜索、跟踪以及舰载电子设备, 可在一定程度上增加突防概率, 增加威胁能力。可对干扰的威胁能力 u_{A3} 进行赋值(表2)。

表2 干扰能力的威胁量化值
Tab.2 Threat values of interference ability

干扰能力	量化值
强	0.9
较强	0.7
中	0.5
小	0.3
无	0.1

4) 目标速度。

空中目标的飞行速度直接影响防空导弹的杀伤区范围。同时, 目标速度越快, 舰对空导弹武器系统对目标的跟踪精度和稳定性越低, 舰对空武器系统的杀伤概率降低。

一般来说, 目标速度越快, 威胁度越高, 高超音速 ($> 5 \text{ Mach}$) 的目标威胁最大, 亚音速 ($< 1 \text{ Mach}$) 最小, 当速度 v_t 为 $1 \sim 5 \text{ Mach}$, 其威胁能力随速度值递增。因此速度 v_t 的威胁能力 u_{A4} 隶属函数可表示为

$$u_{A4}(v_t) = \begin{cases} 0.8(1 - e^{k_v(v_t - 1)^2}) + 0.2, & v_t \in [1, 5] \\ 0.2, & v_t \in [0, 1) \end{cases} \quad (3)$$

式中, k_v 为对应的增益系数, 它反映了目标威胁能力的变化趋势和范围, 取典型值 $k_v = -0.8 \text{ Mach}^{-2}$ 。

5) 目标高度。

降低目标飞行高度能明显降低其被发现的概率, 尤其是突然出现的近距离掠海飞行目标, 对本舰的威胁度会明显提高。一般而言, 目标飞行高度越低, 其威胁能力越大。高度低于 100 m 的低空目标威胁最大, 目标高度为 $100 \sim 10\,000 \text{ m}$, 其威胁能力随高度值递减, 因此高度 h_t 的威胁能

力 u_{A5} 隶属函数可表示为

$$u_{A5}(h_t) = \begin{cases} 0.8(e^{k_h(h_t - 0.1)^2}) + 0.2, & h_t \in [0.1, 10] \\ 1, & h_t \in [0, 0.1) \end{cases} \quad (4)$$

式中, k_h 为对应的衰减系数, 它反映了目标威胁能力随高度变化的趋势, 取典型值 $k_h = -0.5 \text{ km}^{-2}$ 。

1.3.2 攻击意图

1) 航路捷径。

航路捷径反映出目标的攻击企图。航路捷径越小, 攻击意图越明显; 当航路捷径超出反舰导弹最大航路捷径区间范围时, 可以认为该目标对舰艇几乎没有威胁。

故目标航路捷径威胁隶属函数应满足航路捷径越小, 威胁度越大; 当航路捷径逐渐增大时, 威胁度逐渐减少; 当航路捷径为 0 时, 威胁度最大; 当航路捷径超出舰空导弹最大航路捷径值时, 目标对舰艇的威胁较小。航路捷径 L_t 的攻击意图 u_{C1} 的隶属函数为

$$u_{C1}(L_t) = e^{k_L} \quad (5)$$

式中, k_L 为对应的衰减系数, 根据实际情况, 航路捷径大于 5 km 时, 其攻击意图趋近于 0 , 航路捷径在 3 km 时, 威胁意图具有最大的变化趋势, 故取典型值 $k_L = -0.2 \text{ km}^{-2}$ 。

2) 机动特性。

对典型反舰导弹战术攻击意图和运动特性进行深入分析, 发现大多数空袭比例在接近本舰一定距离内都会采取机动攻击过程, 如反舰导弹的跃升俯冲攻击过程以及俯冲攻击过程。因此, 发现目标在近距离机动, 意味着其攻击意图明显。可对机动特性的攻击意图 u_{C2} 赋值, 如表3所示。

表3 机动特性攻击意图量化值
Tab.3 Attack intention values of maneuverability

机动特性	量化值
跃升俯冲	0.9
降高	0.7
爬升	0.5
平直飞行	0.3

3) 目标距离。

目标距本舰距离的远近直接反映出目标的攻击意图, 距离越近, 攻击意图越明显。对于反舰导弹来说, 舰艇进入其制导雷达作用范围内, 其攻击意图最为明显, 在此范围之外, 攻击意图随距离的增大而减小。目标距离 s_t 的攻击意图 u_{C3} 隶属函数为

$$u_{c3}(s_i) = \begin{cases} e^{k_s(s_i-6)^2}, & s_i \in [6, +\infty] \\ 1, & s_i \in [0, 6) \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_s 为对应的衰减系数, 考虑雷达探测距离与本舰火力范围, 本文认为目标距离大于 40 km 时, 威胁意图趋近于 0, 目标距离在 25 km 附近时, 威胁意图具有最大变化趋势, 故取典型值 $k_s = -6 \times 10^{-3} \text{ km}^{-2}$ 。

1.4 基于变权的指标权重计算

变权向量和状态变权向量概念首先由汪培庄^[6]提出, 李洪兴^[7]进一步给出了惩罚型变权向量和激励型变权向量的定义。

参考线性加权综合评估模型, 变权威胁评估模型可表示为 $D = \sum_{j=1}^m W_j(u_1, u_2, \dots, u_m)u_j$, 式中, $W_j(u_1, u_2, \dots, u_m)$ 为相对常权 W_j 的变权, 则称 $W(u) = (W_1(u), W_2(u), \dots, W_m(u))$ 为威胁属性集合 u 的变权向量。按变权理论变权向量满足如下公理^[8-9]:

- 1) 归一化条件: $\sum_{j=1}^m W_j(u_1, u_2, \dots, u_m) = 1$;
- 2) 连续性: $W_j(u_1, u_2, \dots, u_m)$ 关于自变量 $u_j (j=1, 2, \dots, m)$ 连续;
- 3) 惩罚性或激励性: 对于每个 $j (j=1, 2, \dots, m)$, $W_j(u_1, u_2, \dots, u_m)$ 关于 u_j 的单调不增(减)函数, 则称 $W(u)$ 是以 $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 为惩罚(激励)策略的变权向量。

变权向量主要依靠构造状态变权向量 $S(u) = (S_1(u), S_2(u), \dots, S_m(u))$, 根据指标威胁属性值的组态水平, 调整各指标权重值。 $S(u)$ 除满足公理 1 与 2 外, 还满足 Hadamard 乘积

$$W_j(u) = W_j \cdot S_j(u) / \sum_{k=1}^m W_k S_k(u) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

分析舰艇对空防御威胁评估过程可以发现, 只要有一个指标的威胁属性值过低, 哪怕该指标常权重非常小, 其整体威胁度也会显著降低。如目标距离威胁属性值过低, 则意味着目标距离本舰尚有一段距离, 甚至远在本舰防空火力打击范围之外, 该目标暂时对本舰不构成严重威胁; 同样, 如果某个指标的威胁属性值过高, 哪怕这个常权重非常小, 也会在一定程度上显著提高其威胁度, 即权重需要根据指标的威胁属性值做出适当调整, 对威胁属性值低的指标权重进行惩罚, 对威胁属性值高的指标权重进行激励。

独立分析单个指标威胁属性值, 发现当单一的指标威胁属性值偏低, 如目标航路捷径过大, 整体的威胁度显著降低, 但是, 当单一指标威胁属性值偏高, 却没有显著提高整体威胁度。仍以目标航路捷径为例, 假设目标航路捷径过大, 其他指标处于常规水平, 其整体威胁度没有显著提升, 故状态变权向量应满足惩罚幅度大于激励幅度的要求。

常权重在一定程度上反映了各属性的相对重要性, 威胁评估结果更加取决于权重相对较大的指标, 故状态变权向量应能实现对常权重相对较大的指标, 惩罚或激励也要相对加大。

根据状态变权向量的性质, 并在满足上述 3 点分析的基础上, 构造状态变权向量表达式

$$S_j(u_j) = \begin{cases} e^{-NmW_j \cdot (u_j - k\bar{u})^2}, & u_j \in [0, k\bar{u}) \\ 1, & u_j \in [k\bar{u}, \bar{u}/k] \\ e^{mW_j \cdot (u_j - \bar{u}/k)^2}, & u_j \in (\bar{u}/k, 1] \end{cases} \quad (8)$$

式中: m 为指标个数; $j=1, 2, \dots, m$; $\bar{u} = (\sum_{j=1}^m u_j) / m$ 为平均威胁属性值; $N \in [1, +\infty)$ 为惩罚与激励幅度比, 取 $N=1.8$; $k \in [0, 1]$ 为惩罚阈值系数, 取 $k=0.7$;

1.5 利用 TOPSIS 的威胁度求解

“逼近于理想排序法”(TOPSIS)作为一种常用多属性决策方法, 其基本思想是利用归一化后的原始数据矩阵, 对各决策方案进行排序, 找出其中的最优方案(正理想解)和最劣方案(负理想解), 然后计算某一方案分别与最优方案和最劣方案间的距离, 进而得出该方案与最优方案的接近程度, 并以此作为评价各方案优劣的依据^[10]。具体步骤如下:

1) 对 n 个来袭目标, 根据各指标的隶属函数, 计算各指标的威胁属性值, 得到威胁属性矩阵 $u_{n \times 8}$ 。

2) 由专家打分, 或有序比值法^[11]确定上述 8 个指标的常权重 W , 由式(7)与式(8)计算得到变权重矩阵 $W(u)_{n \times 8}$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

3) 归一化矩阵 $u_{n \times 8}$, 得到归一化后的矩阵 $U = (U_{ij})_{n \times 8}$, 其中 $U_{ij} = u_{ij} / \sum_{i=1}^n u_{ij}$, $i=1, 2, \dots, n$ 。由变权重矩阵计算决策矩阵 $x = (x_{ij})_{n \times 8}$, 其中, $x_{ij} = U_{ij} \cdot W(u)_{ij}$ 。

4) 确定正理想解 U^+ 和负理想解 U^- ^[10]

$$\begin{cases} U^+ = \{\max = x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\} = \{x_1^+, x_2^+, \dots, x_8^+\} \\ U^- = \{\min = x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\} = \{x_1^-, x_2^-, \dots, x_8^-\} \end{cases}$$

(9)

5) 计算每个目标的威胁属性值到理想正解 U^+ 与理想负解 U^- 的距离^[10]

$$\begin{cases} L_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (x_{ij} - x_j^+)^2} \\ L_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (x_{ij} - x_j^-)^2} \end{cases} \quad (10)$$

6) 计算每个目标威胁属性值到理想正解的相近接近度

$$L_i = \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \quad (11)$$

7) 按 L_i 由大到小的顺序排列目标,即得出威胁排序后的目标序列。

2 实例分析

假设水面舰艇前后各装有一座近程防空导弹发射器,火力区覆盖角度分别为 $[-120^\circ, 120^\circ]$, $[60^\circ, -60^\circ]$ (以本舰航向为 0° , 顺时针为正);火力区近界、远界分别为 1 和 8 km;单发拦截成功率为 70%;防空导弹速度为 1.8 Mach; $t_{itv} = 2$ s。某时刻,由传感器信息采集和数据融合后得到 5 个空中来袭目标,目标集 $D = (D_1, D_2, \dots, D_5)$,其参数数值如表 4 所示。

表 4 目标参数值

Tab.4 Values of target parameter

目标 ID	目标类型	目标舷角/(°)	距离/km	高度/km	目标速度/Mach	干扰能力	航路捷径/km	机动特性
D_1	隐身飞机	0	15.0	10	3.0	强	0.8	平直飞行
D_2	反舰导弹	30	8.0	0.9	0.8	无	1.5	跃升俯冲
D_3	反舰导弹	45	30.0	0.8	2.2	较强	1.0	平直飞行
D_4	反舰导弹	90	30.0	0.8	2.2	较强	1.0	平直飞行
D_5	未知类型	180	21.0	2	1.1	小	0	平直飞行

综合专家经验,根据有序比值法得到常权重向量 $W = (0.03, 0.21, 0.09, 0.19, 0.08, 0.14, 0.1, 0.16,$

计算得到目标各指标威胁属性值以及变权后的权重值(表 5 和表 6)。

表 5 目标各指标威胁属性值

Tab.5 Threat values of each target index

目标 ID	目标类型	突防能力	干扰能力	目标速度	目标高度	航路捷径	机动特性	目标距离
D_1	0.75	0.493 34	0.90	0.967 39	0.200 00	0.938 01	0.30	0.615 08
D_2	0.90	0.156 50	0.10	0.200 00	0.780 92	0.798 52	0.90	0.976 29
D_3	0.90	0.381 56	0.70	0.747 20	0.826 16	0.904 84	0.30	0.031 56
D_4	0.90	0.145 59	0.70	0.747 20	0.826 16	0.904 84	0.30	0.031 56
D_5	0.15	0.145 59	0.30	0.206 37	0.331 58	1.000 00	0.30	0.259 24

表 6 目标各指标变权后的权重值

Tab.6 Variable weights of each target index

目标 ID	目标类型	突防能力	干扰能力	目标速度	目标高度	航路捷径	机动特性	目标距离
D_1	0.026 6	0.186 1	0.079 8	0.252 3	0.065 9	0.161 7	0.085 7	0.141 8
D_2	0.031 0	0.165 9	0.076 9	0.162 3	0.078 1	0.136 7	0.117 3	0.231 8
D_3	0.031 9	0.210 3	0.090 5	0.191 1	0.080 5	0.183 4	0.098 5	0.113 8
D_4	0.032 6	0.177 1	0.092 1	0.194 4	0.092 0	0.190 9	0.100 9	0.120 0
D_5	0.026 6	0.182 4	0.080 1	0.168 7	0.071 2	0.239 7	0.089 0	0.142 4

采用变权调整后的权重向量,结合 TOPSIS 法得到的来袭目标的威胁排序为: $D_1 > D_2 > D_3 > D_4 > D_5$ 。若采用基于常权重的加权求和,可得到来袭目标威胁度排序为 $D_1 > D_3 > D_2 > D_4 > D_5$ 。

分析比较目标 D_2 与 D_3 ,目标 D_2 虽然为亚音速反舰导弹,但是其为近距离目标,且正在进行跃升俯冲,攻击意图十分明显;而 D_3 虽然为超音

速反舰导弹,但距离本舰尚有一段距离,根据经验其威胁度理应小于 D_2 ,由此可见,基于常权重的威胁评估方法无法针对具体的态势变化做出相应的调整,存在一定的局限性。

从表 6 分析可知,根据指标的威胁属性值适当调整权重,对威胁属性值低的指标权重进行惩罚,对威胁属性值高的指标权重进行激励,更加体

现目标各指标威胁值的相关性与威胁评估结果的紧密联系。

另外,对比分析目标 D_3 与 D_4 发现,两者之间参数的区别在于,目标 D_3 从左舷 30° 攻击本舰,而目标 D_4 从本舰左舷 90° 垂直于本舰发起攻击,考虑到本舰的防空性能, D_4 在攻击过程中会穿过舰艇的2座近程防空导弹发射器的交叉火力区,有更大的可能性被拦截,其威胁度应该小于 D_3 ,与仿真结果一致。

3 结 语

本文针对舰艇对空防御威胁评估问题,在综合考虑目标属性与本舰防空性能的基础上,构建了较为完善的威胁评估指标体系,并结合变权原理,提出了基于变权TOPSIS法的舰艇对空防御威胁评估模型。该模型能基于目标各指标的威胁属性值的变化合理地调整权重,可得出较为合理可行的威胁评估结果,为舰艇对空防御威胁评估提供了一种有效的参考处理方法。

参考文献:

- [1] 陈维义,王少蕾,周菲. 基于加权核主成分TOPSIS方法的舰艇防空威胁评估[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(1): 87-91, 107.
CHEN Weiyi, WANG Shaolei, ZHOU Fei. Threat evaluation of air targets to ships in air defense based on weighted KPCA-TOPSIS[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(1): 87-91, 107.
- [2] 刘蜀,李登峰. 舰艇对抗反舰导弹威胁判断变权评估方法[J]. 现代防御技术, 2009, 37(5): 1-4.
LIU Shu, LI Dengfeng. A variable weight assessment method of threat judgment for warship vs antiship missiles[J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(5): 1-4.
- [3] 张善,李银萍. 一种防空系统目标威胁评估方法[J]. 现代雷达, 2010, 32(9): 6-9.
ZHANG Shan, LI Yinping. Method of target threat evaluation for air defense system [J]. Modern Radar, 2010, 32(9): 6-9.
- [4] 张元瀚,李相民,代进进. 基于灰色区间关联决策的海上编队反导威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(5): 95-98.
ZHANG Yuanhan, LI Xiangmin, DAI Jinjin. Antimissile threat evaluation of naval formation based on grey interval-number relationship decision-making [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(5): 95-98.
- [5] 尹高扬,周绍磊,张文广. 舰艇对来袭反舰导弹威胁评估算法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(12): 1-4.
YIN Gaoyang, ZHOU Shaolei, ZHANG Wenguang. Threat evaluation algorithm of warship to defend anti-warship missile[J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(12): 1-4.
- [6] 汪培庄. 模糊集与随机集落影[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1985: 47-59.
- [7] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII)—变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995, 9(3): 1-9.
LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII)—variable weights analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995, 9(3): 1-9.
- [8] 朱勇珍,李洪兴. 状态变权的公理化体系和均衡函数的构造[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(7): 116-118, 131.
ZHU Yongzhen, LI Hongxing. Axiomatic system of state variable weights and construction of balance functions [J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 1999, 19(7): 116-118, 131.
- [9] 李德清,李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2002, 38(4): 455-461.
LI Deqing, LI Hongxing. The properties and construction of state variable weight vectors [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2002, 38(4): 455-461.
- [10] 范学渊,邢清华,黄沛,等. 基于TOPSIS的战区高层反导威胁评估[J]. 现代防御技术, 2012, 40(4): 108-112.
FAN Xueyuan, XING Qinghua, HUANG Pei, et al. Threat assessment of the high altitude area ballistic missile defense based on TOPSIS [J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(4): 108-112.
- [11] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[责任编辑:胡文莉]