【其他研究】

基于区间数熵的 TOPSIS 防空作战威胁评估方法

王　毅[1a]，赵建军[1b]，付龙文[2]，陈令新[2]

（1. 海军航空工程学院　a. 研究生管理大队；b. 兵器科学与技术系，山东 烟台　264001；
2. 中国科学院烟台海岸带研究所 海岸带环境过程重点实验室，山东 烟台　264003）

摘要：针对空中目标威胁评估问题，结合多目标决策问题，将区间数理论和信息熵理论相结合提出一种基于区间数熵权分析的空中目标威胁评估方法。首先，将效益型指标和成本型指标进行规范化处理，建立了基于区间值的空中目标威胁评估决策矩阵。然后，依据多属性决策中传统熵权确定方法的思路，结合区间数决策矩阵的特点提出了一种确定属性熵权的方法。最后，运用经典的 TOPSIS 方法，计算各目标的综合威胁指数，对空中目标进行威胁程度排序，并通过防空作战空中目标威胁评估的实例，验证了该方法的实用性和有效性。

关键词：防空作战；威胁评估；熵权分析

中图分类号：TP301　　文献标识码：A　　文章编号：1006－0707（2011）12－0114－03

现代空袭环境越来越来复杂，空袭模式均采用全空域、多架次、多批次、多方向、多层次、连续饱和攻击方式。因此，实际作战中，必须对空袭目标进行威胁判断，确定目标的威胁程度，根据目标的威胁程度对其进行目标优化分配，才能用有限的火力攻击威胁程度大的目标，取得最佳的作战效果。

威胁评估常见的方法是模糊综合评判，该方法只应用了隶属向量中最大值所提供的信息（清晰数），各非最大值的大小不起作用，存在结果失真的情况。事实上，在军事领域中，获得的决策信息通常不确切，但可大致确定其上下界，即有一定范围，存在一个区间。因而，采用区间数来表示更有实际意义。本文将区间数与 TOPSIS 理论结合应用于目标威胁评估中，该方法具有计算简便、分析结果较合理、应用灵活等特点。同时采用信息熵理论来计算权重，考虑了各个指标的重要性权重，将重要性权重与信息熵权相结合，既克服了单纯的客观权重不能考虑指标重要性的不足，又避免了传统的专家打分给出的重要性权重不够客观的弊端，进而科学、合理地对研制方案进行优选，大大简化了计算量，对实际问题的解决，具有很强的实用价值。

1　目标威胁判断模型

1.1　目标威胁评估指标选取

对多个空中目标威胁程度的评估，必须在对目标进行跟踪和识别，通过雷达探测获得各目标的几何特性和飞行参数后进行。空中目标威胁程度的大小主要由防空武器系统的性能及空中目标的特性决定。对防空武器系统而言，影响空中目标威胁程度的主要因素有：目标飞临时间，目标距离，目标速度，目标类型及目标航路捷径。理论分析和实战经验都表明：在目标航向指向舰艇方位的情况下，时间越长，武器系统用于目标分配及射击准备的时间越充分，目标的威胁程度就越小；目标距离越小攻击威胁越大；目标类型不同对水面舰艇的威胁程度也不同；空中目标的航路捷径越少对舰艇的威胁也越大。

表 1　常见目标的威胁程度

目标类型	反舰导弹	歼轰机	歼击机	直升机	电子战飞机	其他飞机
威胁程度	1.0	0.8	0.7	0.6	0.3	0.2

1.2　区间数预备知识

定义 1　若 $\forall a^L, a^H \in R$ 且 $a^L \leqslant a^H$，则称闭区间 $[a^L, a^H]$ 为实数域 R 上的区间数。

定义 2　若 $\forall a^L, a^H \in R$ 且 $a^H \leqslant a^L$，则称闭区间 $[a^L, a^H]$ 为实数域 R 上的逆区间数。

定义 3　若 $\forall a^L, a^H \in R$ 且 $0 < a^L \leqslant a^H$，则称闭区间

收稿日期：2011－10－18
基金项目：山东省科技攻关计划项目（2008GG20005005）；中国科学院“百人计划”项目
作者简介：王毅（1983—），男，博士研究生，主要从事武器装备与作战指挥一体化技术研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$[a^L, a^H]$ 为实数域 R 上的正区间数。

定义 4　若 $\forall a^L, a^H \in R$ 且 $0 < a^H \leqslant a^L$,则称闭区间 $[a^L, a^H]$ 为实数域 R 上的逆正区间数。

定义 5　若 $a^L = a^H$,则区间数 $[a^L, a^H]$ 退化为一实数 $a^L(a^H)$。

对于区间数的运算,遵循定理 1 的运算法则

定理 1　设 $[a^L, a^H]$ 和 $[b^L, b^H]$ 为 2 个区间数,$\lambda > 0$,则有:

1) $[a^L, a^H] + [b^L, b^H] = [a^L + b^L, a^H + b^H]$;

2) $[a^L, a^H]\ [b^L, b^H] = [a^L b^L, a^H b^H]$;

3) $\lambda\ [a^L, a^H] = [\lambda a^L, \lambda a^H]$;

4) $\dfrac{[a^L, a^H]}{[b^L, b^H]} = [\dfrac{a^L}{b^L}, \dfrac{a^H}{b^H}]$;

5) $\dfrac{1}{[a^L, a^H]} = [\dfrac{1}{a^L}, \dfrac{1}{a^H}]$。

1.3　基于熵的目标属性权重确定方法

合理地确定权重非常重要,它对排序结果将产生很大影响。为克服主观因素影响,客观反映各因素之间的权重比例,本文采用熵权法求权重。熵是对系统状态不确定性的一种度量,采用熵的概念来衡量空袭目标的威胁程度,能够比较客观准确地计算出权重。计算步骤:

第 1 步,设有 n 个评价对象(空中目标),m 个评价指标(威胁因素),构造目标属性矩阵 $A = [a_{ij}]_{n\times m}$,a_{ij} 表示第 i 个目标的第 j 个指标值。

$$A = (a_{ij})_{n\times m}, (i \in n, j \in m) \tag{1}$$

第 2 步,将目标属性数据规范化。

因区间数可视为一类特殊的模糊数,故可采用模糊排序的方法和技术对其进行研究,在进行区间数多属性决策时,主要面临如何表示区间数判断以及如何从区间数决策矩阵导出方案的排序问题。

定义 1 规范化区间数矩阵 $A = [a_{ij}]_{n\times m}$ 为决策矩阵 $R = [r_{ij}]_{n\times m}$,$r_{ij} = [r_{ij}^L, r_{ij}^U]$,且 $r_{ij}^L, r_{ij}^U \in [0,1]$

$$\begin{cases} r_{ij}^L = a_{ij}^L \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (a_{ij}^U)^2} \\ r_{ij}^U = a_{ij}^U \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (a_{ij}^L)^2} \end{cases}, i \in N, j \in T_1 \tag{2}$$

$$\begin{cases} r_{ij}^L = (1/a_{ij}^U) \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (1/a_{ij}^L)^2} \\ r_{ij}^U = (1/a_{ij}^L) \Big/ \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (1/a_{ij}^U)^2} \end{cases}, i \in N, j \in T_2 \tag{3}$$

其中 T_1,T_2 分别为效益性属性和成本性属性。

第 3 步,求权重,即熵权。又根据信息论可知,第 j 个属性 r_j 的熵为

$$E_j = \lambda\left(-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^L \ln r_{ij}^L\right) + (1-\lambda)\left(-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^U \ln r_{ij}^U\right) \tag{4}$$

其中 $0 < \lambda < 1$,是决策者对区间数的平衡系数,本文 λ 取 0.8。

求解指标的差异度

$$G_j = 1 - E_j \tag{5}$$

最后,得出第 j 个威胁属性的权重

$$w_j = G_j / \sum_{i=1}^{n} G_i \tag{6}$$

式中 $0 \leqslant w_j \leqslant 1$,$j \in m$。

2　基于 TOPSIS 的目标威胁排序模型

"逼近于理想排序法"(TOPSIS)是系统工程中有限方案多属性决策分析中一种常用决策技术,借助多属性问题的正理想解和负理想解对评价对象进行排序,它是解决威胁评估问题的理想方法。

计算步骤:

将规范化的的决策矩阵与所求得权重相乘可得,加权规范决策矩阵 V,其元素 $v_{ij} = [v_{ij}^L, v_{ij}^U]$ 为

$$v_{ij} = \omega_j r_{ij} \tag{7}$$

确定正理想解 $A^+ = (v_1^+, v_2^+, \cdots v_m^+)$ 和负理想解 $A^- = (v_1^-, v_2^-, \cdots v_m^-)$。正理想解为所有威胁指标值最大的解,负理想解为所有威胁指标值最小的解。其中

$$\begin{aligned} v_j^+ &= [v_j^{+L}, v_j^{+U}] = \{\max_i(v_{ij}^L), \max_i(v_{ij}^U)\}, j \in M \\ v_j^- &= [v_j^{-L}, v_j^{-U}] = \{\min_i(v_{ij}^L), \min_i(v_{ij}^U)\}, j \in M \end{aligned} \tag{8}$$

确定目标到正理想解和负理想解的距离为

$$\begin{aligned} S_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^{m} [(v_{ij}^L - v_j^{+L})^2 + (v_{ij}^U - v_j^{+U})^2]}, i \in N \\ S_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^{m} [(v_{ij}^L - v_j^{-L})^2 + (v_{ij}^U - v_j^{-U})^2]}, i \in N \end{aligned} \tag{9}$$

目标到理想解的相对接近度

$$C_i = \frac{S_i^-}{(S_i^- + S_i^+)} \tag{10}$$

显然 $0 \leqslant C_i \leqslant 1$,若目标与 A^+ 越接近,则 C_i 越接近 1,威胁度越大。根据 C_i 值的大小可得出各批目标的威胁程度排序。

3　仿真分析

对于一批空中目标,在一段时间内,多传感器探测到的目标属性值区间数如表 2 所示。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表2 来袭目标属性值

指标	目标类型	目标飞临时间	目标速度	目标高度	目标航路捷径
目标1	反舰导弹	[160,200]	1 200	280	9
目标2	歼击机	[320,600]	[360,400]	[5 000,7 500]	[10,12]
目标3	歼击机	[300,520]	[380,400]	[3 000,3 700]	[9,10]
目标4	反舰导弹	[90,110]	1 300	300	5
目标5	直升机	[520,780]	[50,90]	[560,800]	[20,25]
目标6	其他飞机	[390,580]	[280,300]	[3 500,4 000]	[30,35]

根据式(1)、(2)可得规范化矩阵 $R=[r_{ij}]_{n\times m}$

$$R=\begin{bmatrix} [0.527\,8,0.527\,8] & [0.360\,3,0.573\,6] & [0.6317,0.6427] & [0.683\,8,0.706\,1] & [0.397\,1,0.414\,9] \\ [0.369\,4,0.369\,4] & [0.120\,1,0.286\,8] & [0.191\,1,0.214\,2] & [0.025\,5,0.033\,0] & [0.297\,8,0.373\,4] \\ [0.369\,4,0.369\,4] & [0.138\,6,0.305\,9] & [0.201\,7,0.214\,2] & [0.051\,8,0.065\,9] & [0.714\,7,0.746\,9] \\ [0.527\,8,0.527\,8] & [0.655\,1,1.019\,7] & [0.690\,2,0.696\,3] & [0.638\,3,0.659\,0] & [0.714\,7,0.746\,9] \\ [0.316\,7,0.316\,7] & [0.092\,4,0.148\,0] & [0.031\,9,0.048\,2] & [0.239\,3,0.353\,1] & [0.142\,9,0.186\,7] \\ [0.263\,9,0.263\,9] & [0.124\,2,0.235\,3] & [0.148\,6,0.160\,7] & [0.047\,9,0.056\,5] & [0.102\,1,0.124\,5] \end{bmatrix}$$

属性值权重为 $w=[0.069\,6,0.236\,4,0.236\,7,0.237\,1,0.220\,2]$;

理想解和负理想解的距离表为

$$S_i^+=[0.001\,1,0.003\,7,0.003\,7,0.000\,5,0.005\,0,0.136\,2]$$

$$S_i^-=[0.837\,5,0.394\,5,0.404\,8,0.999\,8,0.188\,5,0.020\,7]$$

目标威胁度排序表为

$$C=[0.837\,5,0.394\,5,0.404\,8,0.899\,8,0.188\,5,0.132\,2]$$

最终威胁排序为 $m_4>m_1>m_3>m_2>m_5>m_6$,而这与经过专家系统评估所得到的结论是一致的。

4 结束语

采用了基于区间数熵的TOPSIS防空威胁评价方法,通过基于区间数的信息熵来确定指标的权重系数,进而将TOPSIS法与信息熵系数综合集成进行方案的优选。并结合Matlab7.0进行编程,大大减少了计算工作量。当有更多价指标时,同样可以采用文中提出的优选方法,这种优选方法的思路明确,结论可靠。

参考文献:

[1] 刘玉全,李为民,王君.基于排列法的目标威胁评估模型[J].现代防御技术,2004,32(1):20-23.

[2] 刘军,贾宏慧.基于改进的排列法的目标威胁评估与排序模型[J].计算机工程与设计,2007,28(19):4750-4751.

[3] 王永杰,张喜斌,张恒喜,等.基于TOPSIS方法的空战威胁评估研究[J].电光与控制,2008,15(5):32-34.

[4] 张堃,周德云.基于熵的TOPSIS法空战多目标威胁评估[J].系统工程与电子技术,2007,29(9):1493-1495.

[5] 张堃,周德云.熵权与群组AHP相结合的TOPSIS法多目标威胁评估[J].系统仿真学报,2008,20(7):1661-1664.

(责任编辑 陈 松)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net