

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.001

舰艇对来袭反舰导弹威胁评估算法

尹高扬, 周绍磊, 张文广
(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对传统层次分析法在确定权重系数上的缺陷和不足, 提出一种基于主成分分析法、模糊理论和层次分析法的威胁评估算法。在综合考虑主观和客观因素的基础上, 运用主成分分析法得出指标层中各指标的重要性大小, 并应用到层次分析法中判断矩阵的确定, 求解出指标层对于目标层的相对权重, 与运用模糊理论中威胁隶属度函数的建立求解出的各指标对于方案层中不同目标的威胁属性值融合, 得到总的组合权重。通过 Matlab 仿真实例结果表明: 该算法得到的威胁排序结果客观、合理。

关键词: 主成分分析法; 威胁评估; 层次分析法; 模糊隶属函数

中图分类号: TJ761.1⁺4 **文献标志码:** A

Threat Evaluation Algorithm of Warship to Defend Anti-Warship Missile

Yin Gaoyang, Zhou Shaolei, Zhang Wenguang
(Dept. of Control Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In allusion to the shortage of traditional analytic hierarchy process (AHP) in the determination of weight coefficient, a threat evaluation algorithm based on the principle components analysis, fuzzy theory and AHP was proposed in the article. The subjective and objective factors were comprehensive considered. The importance of each index in index layer obtained by the principal components analysis method was used to gain the judge matrix in the AHP, then the relatively weight of index layer to target layer was obtained. The threat attribute value of different targets in scheme layer was gained by establishing fuzzy membership function. Then, the total combination weight of each target was gained. The simulation proved that the result obtained was objective and reasonable.

Keywords: the principle components analysis; threat evaluation; AHP; fuzzy membership function

0 引言

如何有效地防御反舰导弹已成为水面舰艇执行海上作战任务时急需解决的问题, 而对来袭反舰导弹的威胁评估是舰载反导武器进行火力分配的依据。目前, 对目标威胁度的判断, 大多采用层次分析法、多属性决策法和主成分分析法等^[1-4]。文献[5]应用模糊综合评判和成对比较法构造判断矩阵, 提出了改进的层次分析法, 较之传统的层次分析法有一定的进步, 但是在确定影响目标威胁度指标的权重时, 依然受专家评判的主观因素的影响; 文献[6]通过将原始变量转化为主成分, 提出了基于主成分分析法的目标威胁评估模型, 在指标权重的选择上较好地克服了主观因素的影响, 较客观地反映样本间的现实关系, 但是主成分分析法选取少量的主成分来进行综合评价, 没有充分利用数据信息。因此, 笔者在文献[5]和文献[6]的基础上, 采用主成分分析法、模糊理论和层次分析法的威胁评估算法, 不仅

解决了主观因素的影响, 也比较客观地反映了样本间的现实关系, 同时使数据信息得到充分利用。

1 问题描述

设来袭反舰导弹构成的目标威胁域为 $D = \{D_i | (i=1, 2, \dots, n)\}$, 其中 n 代表来袭目标数量。任一目标 i 的指标集合为 $C = \{C_j | (j=1, 2, \dots, p)\}$, 其中 p 代表指标个数。目标威胁等级的确定步骤如下:

- 1) 确定进行目标威胁等级评估的指标集 C 。
- 2) 建立层次结构模型; 运用主成分分析法得到各指标 C_j 的重要性大小, 构造成对比较判断矩阵; 计算各指标 C_j 的权重; 进行一致性检验。
- 3) 应用威胁隶属度函数求解出的各指标 C_j 对于来袭 n 个目标的威胁属性值。
- 4) 将目标的威胁属性值与各指标的权重融合, 计算各个目标的组合权重大小, 得到最终目标威胁排序。

收稿日期: 2011-08-14; 修回日期: 2011-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(61004002)

作者简介: 尹高扬(1987—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 从事导航、制导与控制研究。

2 威胁评估算法设计

2.1 建立递阶层次模型

对于来袭反舰导弹的威胁评估, 综合考虑目标威胁因素的 5 个指标: 目标速度、航路捷径、目标距离、目标俯仰角、目标高度, 可建立反舰导弹威胁等级的层次结构模型^[5], 如图 1。

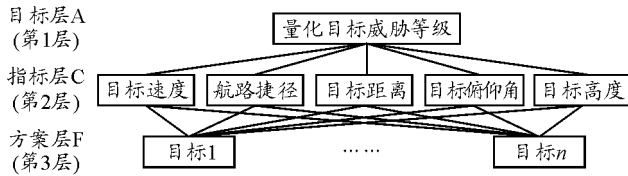


图 1 层次分析模型图

2.2 构造两两比较矩阵

2.2.1 原始指标数据的标准化^[6]

设有 n 个来袭反舰导弹, 可得数据矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n 为目标个数; 指标个数为 p , 且 $n > p$ 。

在实际运用中, 为了消除原变量纲、数量级的不同带来的影响, 通常对各个变量作标准化变换, 在此用 Z-score 法对数据进行标准化变换, 公式为:

$$z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / s_j \quad (2)$$

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} / n \quad (3)$$

$$s_j^2 = \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / (n-1) \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, p$ 。经过变换后的数据均值为 0, 方差为 1。

2.2.2 求指标数据的相关矩阵

指标数据的相关矩阵 $R = (r_{jk})_{p \times p}$ 为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 r_{jk} 为指标 j 和指标 k 的相关系数, 其中 $j=1, 2, \dots, p$; $k=1, 2, \dots, p$ 。

$$r_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / s_j][x_{ik} - \bar{x}_k]^2 / s_k] \quad (6)$$

即

$$r_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n z_{ij} \times z_{ik} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p) \quad (7)$$

从而有: $r_{ii} = 1, r_{jk} = r_{kj}$ 。

2.2.3 求相关矩阵 R 的特征根 $\lambda_g (g=1, 2, \dots, p)$ 。

由特征方程式 $|\lambda I - R| = 0$, 可求得 p 个特征根 λ_g , 按其大小顺序排列为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$, 它是主成分的方差, 其大小描述了被评价对象所起作用的大小。

2.2.4 求方差贡献率 d_i , 确定各指标的重要性。

$$d_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^p \lambda_j \quad (i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, p) \quad (8)$$

指标 C_j 之间的重要程度对比采用表 1 所示的 1~9 的比例标度来度量。通过使用 1~9 的比例标度, 比较得出哪个指标更重要, 即 p 个指标的两两判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pp} \end{bmatrix} \quad (9)$$

判断矩阵具有以下性质: $a_{ij} > 0$; $a_{ij} = 1/a_{ji}$; $a_{ii} = 1$ 。

表 1 标度的含义

| 标度值 | 含义 |
|-----|----------------------------|
| 1 | 表示 2 个元素相比, 同等重要 |
| 3 | 表示 2 个元素相比, 一个元素比另一个元素稍微重要 |
| 5 | 表示 2 个元素相比, 一个元素比另一个元素明显重要 |
| 7 | 表示 2 个元素相比, 一个元素比另一个元素强烈重要 |
| 9 | 表示 2 个元素相比, 一个元素比另一个元素极端重要 |

注: 2, 4, 6, 8 为上述相邻判断的中值

2.3 计算指标的相对权重

1) 计算判断矩阵 A 的最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量 Y ^[4]

$$AY = \lambda_{\max} Y \quad (10)$$

2) 将所得到的特征向量 Y 归一化后作为指标 $C_j (j=1, 2, \dots, p)$ 在目标层下的排序权重。

2.4 判断矩阵的一致性检验

根据层次分析法原理, 首先要对判断矩阵进行

一致性检验, 若不满足一致性条件, 每个层次全部要素的相对权重就无法确定。因此必须修改判断矩阵, 直到满足条件为止。从理论上分析得到: 如果 A 是完全一致的成对比较矩阵, 应该有 $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$ 。但实际上在构造判断矩阵时要求满足上述众多等式是不可能的, 为此要求判断矩阵具有一定的一致性, 即允许存在一定程度的不一致性^[7]。

由分析可知, 成对比较矩阵 A 具有一致性的充分必要条件是: 其绝对值最大的特征根等于该矩阵的阶数 n 。

计算一致性指标 $C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)$, 依据判断矩阵的阶数 n 从表 2 中查出平均一致性指标 $R.I.$, 可得到检验判断矩阵的相对一致性指数 $C.R.$:

$$C.R. = C.I. / R.I. \quad (11)$$

当 $C.R. \leq 0.1$ 时, 一般认为判断矩阵的一致性是可以接受的。

表 2 平均一致性指标

| | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| n | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $R.I.$ | 0.52 | 0.89 | 1.12 | 1.26 | 1.36 | 1.41 | 1.46 |

2.5 威胁指标模糊隶属度函数

在某舰载防空作战系统中, 距离 r 的威胁隶属函数可选定为分级降半梯形分布^[8], 其函数形式为

$$u_{D_i}(r) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r \leq r_1 \\ 1 - \left(\frac{r-r_1}{r_2-r_1}\right)^2 \times 0.2, & r_1 \leq r \leq r_2 \\ \left(\frac{r_3-r}{r_3-r_2}\right)^2 \times 0.8, & r_2 \leq r \leq r_3 \\ 0, & r \leq r_3 \end{cases} \quad (12)$$

式中 $r_1=3.5$ km, $r_2=100$ km, $r_3=300$ km。

速度 v 的威胁函数形式^[9]为

$$u_{D_i}(v) = 1 - e^{-\alpha v} \quad (13)$$

式中 $\alpha = -0.005$, $v > 0$ m/s。

俯仰角 θ 的威胁函数形式为

$$u_{D_i}(\theta) = e^{-3.5\theta^2} \quad (14)$$

高度 h 的威胁函数形式^[10]为

$$u_{D_i}(h) = \begin{cases} 1 & 0 \leq h \leq 10 \\ e^{-k(h-\alpha)^2} & 10 \leq h \leq 1\,000, k > 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $k=10^{-5}$, $\alpha=10$ m。

航路捷径 p' 的威胁隶属度函数为

$$u_{D_i}(p') = e^{-k(p'-\alpha)^2} \quad -3 \leq p' \leq 3 \quad (16)$$

式中, $k=0.5$, $\alpha=0$ km。

2.6 计算组合权重

设已经计算出的指标层相对于总目标的权重向量 $a = (a_1, \dots, a_p)$, 应用威胁隶属度函数求解出的各指标对于 n 个目标的威胁属性值矩阵为 B

$$B = \begin{bmatrix} u_{D_1}(p_1) & u_{D_1}(p_2) & \dots & u_{D_1}(p_p) \\ u_{D_2}(p_1) & u_{D_2}(p_2) & \dots & u_{D_2}(p_p) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{D_n}(p_1) & u_{D_n}(p_2) & \dots & u_{D_n}(p_p) \end{bmatrix}$$

将矩阵 B 中元素逐行归一化, 即计算

$$b_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p) \quad (17)$$

则 n 个目标组合排序权重向量 F_i 由下式给出:

$$F_i = \sum_{j=1}^p b_{ij} a_j \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (18)$$

3 仿真算例

假设有 6 个来袭反舰导弹目标, 目标集为 $D = (D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6)$, 它们的参数如表 3。

表 3 各目标的威胁因素参数

| 目标代号 | 目标速度 v/Ma | 航路捷径 P'/km | 目标距离 r/km | 目标俯仰角 θ/rad | 目标高度 h/m |
|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------------|
| D_1 | 0.7 | 0.8 | 10 | -0.87 | 20 |
| D_2 | 0.9 | 0 | 15 | -1.05 | 15 |
| D_3 | 1.5 | 1.5 | 20 | -0.78 | 150 |
| D_4 | 2.5 | 2.0 | 30 | -0.51 | 200 |
| D_5 | 0.8 | 0.2 | 12 | -0.60 | 60 |
| D_6 | 2.0 | 1.8 | 25 | -0.90 | 180 |

就评估目的而言, 表 3 中的速度为正向数据, 即其值越大, 目标的威胁程度越高, 而航路捷径、目标距离、目标俯仰角和目标高度都是反向数据, 在处理过程中, 必须以它的倒数为原始数据进行计算。由式 (1)~(8) 计算目标各指标的方差和贡献率 d 如表 4。

表 4 目标各指标的方差和贡献率

| 指标 | 目标速度 | 航路捷径 | 目标距离 | 目标俯仰角 | 目标高度 |
|-----|---------|----------|---------|---------|---------|
| 方差 | 2.883 4 | 1.624 1 | 0.362 5 | 0.028 7 | 0.101 3 |
| 贡献率 | 57.67 | 32.480 0 | 7.25 | 0.57 | 2.03 |

由表 1、表 4 和式 (9) 可得, 判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 6 \\ \frac{1}{3} & 1 & 4 & 5 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & 1 & 4 & 2 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

由式 (10) 和 2.3 节中第 2 点, 计算得到指标层相对权重如表 5。

表 5 指标层相对权重

| 量化等级 | 目标速度 | 航路捷径 | 目标距离 | 目标俯仰角 | 目标高度 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 权重 | 0.484 7 | 0.292 0 | 0.115 3 | 0.036 4 | 0.071 6 |

对于判断矩阵 A , 由式 (10) 得 $\lambda_{\max} = 5.371 9$ 。由式 (11), $C.I.=0.093$, $R.I.=1.12$, 因此 $C.R.=0.083 < 0.1$, 说明判断矩阵 A 具有良好的一致性。

由式 (12)~(16) 计算得到各目标的隶属度值, 由式 (17) 计算得到表 6 中方案层相对权重。

表 6 方案层相对权重

| 目标代号 | 目标速度 | 航路捷径 | 目标距离 | 目标俯仰角 | 目标高度 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| D_1 | 0.136 5 | 0.215 8 | 0.167 5 | 0.074 5 | 0.212 3 |
| D_2 | 0.153 7 | 0.297 4 | 0.167 2 | 0.021 3 | 0.212 5 |
| D_3 | 0.180 9 | 0.096 6 | 0.166 7 | 0.127 7 | 0.174 7 |
| D_4 | 0.193 4 | 0.040 2 | 0.165 1 | 0.425 5 | 0.142 5 |
| D_5 | 0.145 8 | 0.291 5 | 0.167 4 | 0.297 9 | 0.198 0 |
| D_6 | 0.189 6 | 0.058 9 | 0.166 0 | 0.053 2 | 0.059 9 |

由式 (18), 计算组合权重如表 7 所示。

表 7 组合权重

| 目标 | D_1 | D_1 | D_1 | D_1 | D_1 | D_1 |
|----|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 权重 | 0.166 | 0.196 | 0.152 3 | 0.150 | 0.200 | 0.134 |

由表 7 可知, 威胁度最大的是 D_5 , 其次是 D_2 、

D_1 、 D_3 、 D_4 、 D_6 。此排序结果与经过专家集体议的结果一致, 较为合理、客观。虽然目标 D_1 距舰艇距离最近, 但对舰艇的威胁却并非最大。在实际作战过程中, 对来袭反舰导弹的威胁评估不能仅仅考虑一个或几个因素, 而应综合考虑实际作战情况和战场数据。

4 结束语

该评估算法综合考虑主观和客观因素, 有效地发挥了层次分析法、主成分分析法和模糊理论各自的优越性。结合某舰载防空作战系统给出了该算法的计算过程, 通过具体的示例分析对算法进行了 Matlab 仿真, 所得结果比较真实地反应了目标的真实威胁程度, 具有一定的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 田树新, 孙胜春. 基于多属性目标决策的威胁评估排序模型[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(6): 4-6.
- [2] 高青, 刘贵喜, 杨涨辉. 基于层次分析法与模糊运算的威胁评估算法[J]. 电子科技, 2008, 21(5): 10-14.
- [3] 朱胜伟, 周德云, 李兆强. 基于改进的主成分分析法的目标威胁评估[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 24-26.
- [4] 符永军, 方棉佳, 张永顺. 模糊多因素多层次综合评判在目标威胁度评估中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 33(2): 231-234.
- [5] 百晓川, 李昂, 陈国生. 单舰对反舰导弹威胁等级的模糊评估[J]. 舰船电子工程, 2008, 49(1): 5-7.
- [6] 洪利华, 罗均平, 刘已斌. 基于主成分分析法的目标威胁评估[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(2): 12-15.
- [7] 陈立新. 防空导弹网络化体系效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [8] 曲长文, 何友, 马强. 应用多属性决策的威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(5): 26-29.
- [9] 李洪兴, 汪培庄. 模糊数学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [10] 张肃. 空中目标威胁评估技术[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(1): 10-11.