

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.006

ELECTRE I 多属性评估方法在防空威胁评估中的应用

刘新科¹, 王威², 谭乐祖²

(1. 西北工业大学, 西安 710072; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对传统的多属性评估方法的局限性, 将 ELECTRE I 多属性评估方法应用到防空威胁评估中。在介绍 ELECTRE I 方法关键思路与分析步骤的基础上, 结合防空威胁评估的特性, 建立了基于 ELECTRE I 多属性评估方法的目标威胁评估模型。算例分析结果验证了该方法的有效性与合理性。

关键词: 威胁评估; ELECTRE I; 多属性评估

中图分类号: O224 **文献标志码:** A

Application of ELECTRE I Multiattribute Block Assessment in Air Defence Threat Evaluation

Liu Xinke¹, Wang Wei², Tan Lezu²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at traditional limitation of multiattribute block assessment, ELECTRE I multiattribute block assessment apply to air defence threat evaluation. On the basis of introduce ELECTRE I method key idea and analysis step, combining the characteristic of air defence threat evaluation, a threat evaluation model based on ELECTRE I Multiattribute Block Assessment is established. The example analysis proves the feasibility and practicability of the method.

Keywords: threat evaluation; ELECTRE I; multiattribute block assessment

0 引言

目标威胁评估问题是一个比较复杂的多属性决策问题。传统的多属性评估方法只考虑优/劣关系和无差别关系, 偏好结构不存在临界值, 属性值的差值决定了评估结果的优劣。ELECTRE I 方法发展了多属性评估理论, 采用伪属性表达偏好关系, 并引入严格偏好和无差异临界值, 使得威胁评估中的关键因素—偏好的描述更加准确, 故将其应用到防空威胁评估中。

1 ELECTRE I 评估方法的介绍

1.1 伪属性的概念与级别不劣于方法的关键思路^[1]

伪属性: 偏好结构涉及 2 个临界值, 即无差异临界值 q 和严格偏好临界值 p 。伪属性更能准确反映决策者的偏好。属性值的差值低于无差异临界值 q , 则决策者的偏好无差异; 属性值的差值高于严格偏好临界值 p , 则决策者具有严格偏好; 属性值的差值介于无差异临界值 q 和严格偏好临界值 p 之间, 则决策者具有弱偏好。ELECTRE I 方法的关键思路如下:

1) 评价每个方案在各个属性的表现;

- 2) 确定每个属性的相对重要性, 即权重;
- 3) 级别不劣于关系的架构以基于属性的方案两两比较为基础;
- 4) 确定每个属性的无差异临界值(或函数) q ;
- 5) 确定每个属性的严格偏好临界值(或函数) p ;
- 6) 偏好关系由原来的“严格偏好”和“无差异”扩展到 4 种可能的关系: ① 严格偏好; ② 无差异; ③ 弱偏好; ④ 不可比。

1.2 一致指数与不一致指数

ELECTRE I 法基于 2 个指数的评价, 即一致指数和不一致指数。这 2 个指数反映对方案偏好关系的支持程度和反对程度。

1) 一致指数表示任一对方案偏好关系(方案 m 不劣于方案 n)的支持程度, 表示方案 m 优于或等价于方案 n 的属性权重和占总权重的比例。其取值范围为 0~1, 取值越高表明对论断“方案 m 不劣于方案 n ”的支持程度越高。一致指数为 1 表明方案 m 在所有属性上的表现均等价于或优于方案 n 。所有方案对的一致指数构成一致指数矩阵(优势矩阵)^[1]。

2) 不一致指数表明任一对方案偏好关系(方案 m 不劣于方案 n) 的反对程度, 表示方案 n 优于方案 m 属性上加权规范化数值的最大差距占所有方案对在所有属性上的最大差距之比。不一致指数的定义没有使用权重, 其取值范围为 $0 \sim 1$, 取值越高表明方案 n 至少在 1 个属性上的表现比方案 m 要好, 以此作为反对论断“方案 m 不劣于方案 n ”的程度。若方案 m 在某属性 n 的表现低于最小可接受水平, 或方案对 m 与 n 的属性值之差 $f_j(n) - f_j(m)$ 超过某临界值(否决临界值), 则论断“方案 m 不劣于方案 n ”不可能成立。所有方案对的不一致指数构成不一致指数矩阵(劣势矩阵)。

在一致指数矩阵和不一致指数矩阵的基础上, 确定级别不劣于关系集 $S^{[2-3]}$ 。

2 基于 ELECTRE I 的防空威胁评估模型

2.1 防空威胁估计指标体系

空袭目标的威胁程度主要由防空武器系统的性能、目标执行的作战任务以及目标特性所决定。根据雷达预警探测所能提供的信息, 结合防空作战实际, 选取目标类型、目标距离、目标速度、机动特性、目标高度及目标航路捷径 6 个要素作为评估指标^[4]。

1) 目标类型: 空中目标类型不同, 雷达探测到的目标特征、攻击方式、攻击能力及速度等都不同, 从而对水面舰艇编队的威胁程度也有轻重之分。

2) 目标距离: 来袭空中目标距离越近时, 到达防空武器系统发射区边界的时间越短, 武器系统用于目标分配及发射准备的时间越短, 目标的威胁程度越大。随着距离的减少, 可认为其威胁程度值呈半正态分布; 目标飞临时间为负时, 表示目标远离, 其威胁程度逐渐降低。

3) 目标速度: 空中目标的飞行速度直接影响舰空导弹对其杀伤的概率。即使同一类型目标, 若飞行速度不同, 它们的威胁程度就不同。一般来说, 飞行速度大的目标, 其威胁程度也大; 反之威胁程度就小。

4) 目标高度: 一般情况下, 目标高度越低, 目标就越容易突防, 目标威胁程度越大。随着高度的降低, 可认为其威胁程度值呈半正态分布。

5) 机动特性: 现代反舰导弹一般都会采用末端机动形式来增加突防概率, 因此, 如果目标进行机动, 则其威胁程度明显增大。

6) 目标航路捷径: 空中目标的航路捷径是指编队舰艇到目标航路水平投影的距离。空中目标的航路捷径越小, 则攻击意图愈明显, 威胁程度越大。

2.2 基于 ELECTRE I 法的威胁评估分析步骤

1) 根据目标属性, 构造规范化决策矩阵 $R = [r_{ij}]$ 。

2) 根据目标属性权重, 构造加权规范化矩阵 $V = [v_{ij}]$ 。

3) 确定属性一致集与不一致集: 针对任何一对目标 m 和 n , 属性集合被分为一致集 C_{mn} 和不一致集 $D_{mn} = J - C_{mn}$ 2 个子集合。一致集 C_{ij} 表示 m 目标的表现不劣于(等于或优于) n 目标的属性集。

4) 计算一致指数矩阵: 在计算一致指数矩阵时, 首先需要定义一致指数 $c(m, n)$ 。 $c(m, n)$ 反映决策者支持目标 m 不劣于目标 n 的程度:

$$c(m, n) = \sum_{j \in C_{mn}} w_j \tag{1}$$

所有两两比较的目标对, 其一致指数构成一致指数矩阵 C 。

5) 计算劣势矩阵: 同计算优势矩阵一样, 首先定义一个劣势指数 $d(m, n)$, 亦称不一致指数, 也可称为不和谐指数。不一致指数表示与 n 目标相比, 选择 m 的不满意程度。

$$d(m, n) = \frac{\max_{j \in D_{mn}} |v_{mj} - v_{nj}|}{\max_{j \in J, s, t \in I} |v_{sj} - v_{tj}|} \tag{2}$$

确定了劣势指数后, 就可以确定不一致指数矩阵 D 。

6) 确定一致指数矩阵

确定一致指数矩阵即为确定满意程度的大小, 首先确定临界值 c_{\min} (某个可允许的、最小的一致性水平)。 c_{\min} 的取值可由平均优势指数代之, 即:

$$c_{\min} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{m=1, m \neq n}^{\bar{z}} \sum_{n=1, m \neq n}^{\bar{z}} c(m, n) \tag{3}$$

构造一个 $0 \sim 1$ 矩阵 $F = \{f(m, n)\}$:

$$f(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{若 } c(m, n) \geq c_{\min} \\ 0 & \text{若 } c(m, n) < c_{\min} \end{cases} \tag{4}$$

7) 确定不一致指数矩阵

确定不一致指数矩阵为确定不满意程度的大小, 确定临界值 d_{\max} (某个可允许的、最大的不一

致性水平)。\$d_{max}\$ 的取值可由决策者给定或采用不一致指数的均值:

$$d_{max} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{m=1, m \neq n}^{\bar{c}} \sum_{n=1, n \neq m}^{\bar{c}} d(m, n) \quad (5)$$

构造 0~1 矩阵 \$G = \{g(m, n)\}\$:

$$g(m, n) = \begin{cases} 1 & \text{若 } d(m, n) \leq d_{max} \\ 0 & \text{若 } d(m, n) > d_{max} \end{cases} \quad (6)$$

8) 综合优势判定矩阵

在优势矩阵和劣势矩阵的基础之上, 可以确定综合优势判定矩阵 \$E = \{e(m, n)\}\$。

$$e(m, n) = f(m, n) \times g(m, n) \quad (7)$$

9) 确定优劣关系

从 \$E\$ 矩阵分析决策结果: 若任何一列上只要有一个元素为 1, 则该方案应被剔除, 因为列方案为 1 的元素, 意味着列方案被对应的行方案“压倒”。步骤 6)~9) 构造 \$F\$、\$G\$ 和 \$E\$ 矩阵的目的是确定同时满足一致指数条件 \$c(m, n) \geq c_{min}\$ 和不一致指数条件 \$d(m, n) \leq d_{max}\$ 的目标对, 即

$$mSn \Leftrightarrow \begin{cases} c(m, n) \geq c_{min} \\ d(m, n) \leq d_{max} \end{cases} \quad (8)$$

3 算例分析

假设目标的威胁评估指标权重为 \$W = (0.25, 0.09, 0.10, 0.10, 0.21, 0.25)^T\$, 有 4 个防空威胁目标, 经过预警探测网络获取目标数据信息。

构造属性矩阵 \$M\$:

$$M = \begin{bmatrix} 8 & 6.1 & 1.8 & 20 & 4.5 & 90.6 \\ 6.3 & 12.2 & 1.8 & 24 & 3.1 & 54.3 \\ 4.6 & 10 & 2.1 & 17 & 7 & 80 \\ 5.6 & 9 & 2 & 19 & 5.1 & 57.4 \end{bmatrix}$$

1) 初始数据进行规范化处理。根据公式

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

得出矩阵 \$R = \{r_{ij}\}\$ 为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.71 & 0.30 & 0.46 & 0.50 & 0.43 & 0.60 \\ 0.56 & 0.60 & 0.46 & 0.60 & 0.30 & 0.36 \\ 0.41 & 0.49 & 0.54 & 0.42 & 0.67 & 0.53 \\ 0.50 & 0.44 & 0.51 & 0.47 & 0.49 & 0.38 \end{bmatrix}$$

2) 确定加权规范化矩阵 \$V = \{v_{ij}\}\$。由

$$V = R \cdot W = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

可得:

$$V = \begin{bmatrix} 0.1775 & 0.0270 & 0.0460 & 0.0500 & 0.0903 & 0.1500 \\ 0.1400 & 0.0540 & 0.0460 & 0.0600 & 0.0630 & 0.0900 \\ 0.1025 & 0.0441 & 0.0540 & 0.0420 & 0.1407 & 0.1325 \\ 0.1250 & 0.0396 & 0.0510 & 0.0470 & 0.1029 & 0.0950 \end{bmatrix}$$

3) 确定优势集和劣势集。优势集、劣势集分别为:

$$\begin{aligned} C_{12} &= \{1, 2, 3, 4, 5\}; C_{13} = \{1, 2\}; C_{14} = \{1, 2\}; C_{21} = \{3, 6\}; \\ C_{23} &= \{1, 6\}; C_{24} = \{1, 6\}; \\ C_{31} &= \{3, 4, 5, 6\}; C_{32} = \{2, 3, 4, 5\}; C_{34} = \{3, 4, 5\}; \\ C_{41} &= \{3, 4, 5, 6\}; C_{42} = \{2, 3, 4, 5\}; C_{43} = \{1, 2, 6\}; \\ D_{12} &= \{6\}; D_{13} = \{3, 4, 5, 6\}; D_{14} = \{3, 4, 5, 6\}; \\ D_{21} &= \{1, 2, 4, 5\}; D_{23} = \{2, 3, 4, 5\}; D_{24} = \{2, 3, 4, 5\}; \\ D_{31} &= \{1, 2\}; D_{32} = \{1, 6\}; D_{34} = \{1, 2, 6\}; D_{41} = \{1, 2\}; \\ D_{42} &= \{1, 6\}; D_{43} = \{3, 4, 5\} \end{aligned}$$

4) 确定一致指数矩阵 \$C\$。由式 (1)、式 (3) 可知:

$$C = \begin{bmatrix} NaN & 0.81 & 0.60 & 0.60 \\ 0.29 & NaN & 0.44 & 0.44 \\ 0.4 & 0.56 & NaN & 0.65 \\ 0.4 & 0.56 & 0.35 & NaN \end{bmatrix}$$

5) 确定不一致指数矩阵 \$D\$。由式 (2) 可知:

$$D = \begin{bmatrix} NaN & 0.0772 & 0.6486 & 0.7079 \\ 0.4826 & NaN & 1.0000 & 0.5135 \\ 0.9653 & 0.5470 & NaN & 0.4826 \\ 0.6757 & 0.1931 & 0.4865 & NaN \end{bmatrix}$$

6) 确定优势矩阵。由式 (3)、式 (4) 可知:

$$c_{min} = \frac{\sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 c(m, n)}{4 \times 3} = 0.5267;$$

$$F = \begin{bmatrix} NaN & 1 & 1 & 1 \\ 0 & NaN & 0 & 0 \\ 0 & 1 & NaN & 1 \\ 0 & 1 & 0 & NaN \end{bmatrix}$$

7) 确定劣势矩阵。由式 (5)、式 (6) 可知:

$$\begin{aligned} d_{max} &= 0.5650; \\ G &= \begin{bmatrix} NaN & 0 & 0 & 0 \\ 1 & NaN & 0 & 1 \\ 0 & 1 & NaN & 1 \\ 0 & 1 & 1 & NaN \end{bmatrix} \end{aligned}$$

8) 确定综合优势矩阵。由式 (7) 可知

$$E = F \times G = \begin{bmatrix} NaN & 0 & 0 & 0 \\ 0 & NaN & 0 & 0 \\ 0 & 1 & NaN & 1 \\ 0 & 1 & 0 & NaN \end{bmatrix}$$

显然, 由 E 可知: 目标 3 威胁最大, 目标 4 次之。

4 结束语

从实例分析来看, ELECTRE I 方法能够很好地解决目标威胁评估问题, 为目标威胁判断问题提供

(上接第 5 页)

根据已知条件分析可得, 此模型的状态空间为

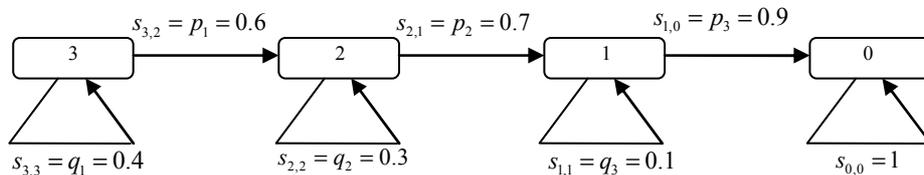


图 3 3 枚巡航导弹突破 3 层防线的模型状态转移图

对应的一步状态转移概率矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

初始时刻巡航导弹数量为 3, 故初始状态概率向量为: $\theta_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$

由式 (7)、式 (8) 可以求出: $\theta_1 = \theta_0 T = [0.4 \ 0.6 \ 0 \ 0]$

则通过第 1 层防线后巡航导弹剩余 3, 2, 1, 0 枚的概率分别为 0.4, 0.6, 0, 0。

同理可以得出: $\theta_2 = \theta_1 T = \theta_0 T^2 = [0.16 \ 0.42 \ 0.42 \ 0]$

$\theta_3 = \theta_2 T = \theta_0 T^3 = [0.064 \ 0.222 \ 0.336 \ 0.378]$

则通过第 2 层防线巡航导弹剩余 3, 2, 1, 0 枚的概率分别为 0.16, 0.42, 0.42, 0; 通过第 3 层防线后巡航导弹剩余 3, 2, 1, 0 枚的概率分别为 0.064, 0.222, 0.336, 0.378。

由以上结果可以看出, 3 枚巡航导弹全部成功突破 3 层防线的概率为 0.064, 成功率非常低, 也就是说要地防空群的抗击任务是击毁敌 2/3 以上的巡航导弹, 所以要地防空群完成任务的概率为: $0.336+0.378=0.714$, 即 71.4%。

4 结束语

笔者运用马尔可夫链的基本原理分析巡航导弹

了一种新方法。

参考文献:

[1] 杨保安, 张科静. 多目标决策分析[M]. 上海: 东华大学出版社, 2008.
 [2] 孔峰. 模糊多属性决策理论方法及其应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
 [3] 徐玖平, 陈建中. 群决策理论与方法及实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
 [4] 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.

$I = (3, 2, 1, 0)$, 首先构造用于描述模型状态概率转移的马尔可夫链, 如图 3。

突破要地防空群多层防线的过程, 建立了巡航导弹突破每一层防线后剩余情况的概率模型, 对降低巡航导弹的突防概率, 提高要地的安全性具有一定的参考意义。不足之处在于, 笔者只研究了要地防空群每层防线抗击一枚巡航导弹的情况, 对于巡航导弹大规模突袭要地时, 要地防空群每层防线需要抗击多枚巡航导弹的情况, 还有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 郑泽席. 多种防空武器混合部署时抗击效率计算的数学模型及方法[J]. 军事系统工程, 2000(3): 2-5.
 [2] 卢发兴, 吴玲, 王航宇. 多防线防御系统目标突防概率的计算[J]. 系统工程与电子技术, 2005(6): 1061-1065.
 [3] 徐品高. 三道防线是防空领域的重大军事变革[J]. 现代防御技术, 2004, 32(5): 1-7.
 [4] 高山, 李孝军. 地空导弹混编群抗击效率评价模型[J]. 战术导弹技术, 2007(1): 32-35.
 [5] 刘兴堂, 等. 复杂系统建模理论、方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
 [6] 赵晓哲, 沈治河. 海军作战数学模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
 [7] 郑江安, 马东立, 赵娟娟. 编队歼击机超视距截击效能评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(4): 459-463.
 [8] 张少锋, 等. 地空导弹混编群抗突防能力探析[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(7): 26-29.
 [9] 王弘扬. 多目标通道地空导弹武器系统抗击效率模型[J]. 兵工自动化, 2009, 28(4): 10-14.
 [10] 彭峰生, 廖振强. 弹炮结合防空武器毁伤概率分析与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(3): 63-64.