

# 战术弹道导弹防御中的威胁评估算法

羊彦, 张继光, 景占荣, 高田

(西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**弹道导弹防御系统中制定防御计划,确定最佳部署策略都需要实时、准确地评估 TBM 的威胁程度,依据攻防双方的能力及武器的特性,采用了多属性决策理论中的 TOPSIS 方法,提出了战术弹道导弹威胁等级评估算法,建立了导弹威胁评估的数学模型。该算法具有多属性输入和多决策优化的排序功能和实时判决能力,适应瞬变的导弹攻防态势。仿真实例证明了该算法的可行性。

**关键词:**威胁评估;战术弹道导弹;多属性决策

**中图分类号:** TJ761.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0031-05

战术弹道导弹(Tactics Ballistic Missile, TBM)是现代战争中最具有威胁力的攻击性武器之一。为了对付这一威胁,各国都先后加强了对弹道导弹防御系统的研究。实时、准确地评估 TBM 对国家安全造成的威胁程度,是制定防御计划、发展拦截武器系统以及确定最佳部署的依据。然而,随着科学技术的不断发展,导致导弹攻防双方的状态是互动的,这就使得这种威胁的程度随时都会发生变化。因此,建立完善的导弹威胁评估模型,实时掌握对方导弹的威胁程度,并有针对性地发展导弹防御(Missile Defence, MD)理论与技术,用以对抗导弹攻击,是发展 MD 的正确途径。

目前对威胁估计的研究方法很多<sup>[1]</sup>,主要有:到达时间判定法、相对距离判定法、相对方位判定法、线性加权判定法、变权理论法、属性分析法、遗传算法、神经网络方法以及模糊数学方法等<sup>[2-7]</sup>。由于多属性决策理论综合考虑了目标威胁中的多个因素,能够全面地反映多因素对最终评估的影响,已成为目标威胁研究的一个热点<sup>[8-11]</sup>。

本文在研究了针对 TBM 威胁评估诸因素的基础上,分析了决策理论中多属性决策方法的机理,提出了利用 TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Idea Solution, TOPSIS)理论<sup>[9]</sup>对 TBM 威胁进行了建模与计算,实现了对战区弹道导弹威胁程度的评估。文中给出了数学建模的方法、步骤,并针对具体事例进行了计算和分析,证明了这种评估算法对 TBM 威胁实时评估的可行性。

## 1 多属性决策理论与威胁评估模型

### 1.1 多属性决策原理

多属性决策是指备选方案为有限个,并且备选方案的特征、功能或行为由多个属性描述的决策问题。确定方案集及属性集是多属性决策的首要问题。设多属性决策问题的方案集为  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 属性集为  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ , 方案  $X_i$  对属性  $f_j$  的属性值为  $a_{ij} = (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 。由构成的决策矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times m}$  为决策方法提供了基础信息,各种分析方法均以决策矩阵作为分析的基础,建立了方案集和属性集之间的依附关系,方案集是决策分析的客观对象<sup>[10]</sup>。

本文利用代表逼近于理想解距离的排序法(TOPSIS),来建立方案集和属性集之间的关系。该方法属于

收稿日期:2007-07-06

基金项目:航天科技创新基金资助项目(N7CH0003)

作者简介:羊彦(1970-),女,四川三台人,副教授,博士生,主要从事信号与信息处理、导弹制导与控制研究。

E-mail:yy\_ld@263.net

一种与简单加权法接近的排序方法,它本质上是基于归一化后的原始数据矩阵,对各决策方案进行排序比较,找出备选方案中的最优方案(理想解)和最劣方案(负理想解),然后获得某一方案与最优方案和最劣方案间的距离,从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<sup>[12]</sup>。

这种算法的求解步骤如下:

第1步 构造决策矩阵  $A$  为

$$A = (a_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

由该矩阵构成规范决策矩阵  $R$ ,其中每个元素  $r_{ij}$  为

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

第2步 构造加权的规范决策矩阵  $R_w$ ,其中每个元素  $v_{ij}$  为

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

式中  $w_j (j = 1, 2, \dots, m)$  为第  $i$  个方案中第  $j$  个属性的权。

第3步 确定理想解和负理想解

$$x^* = \{(\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, n\} = [v_1^*, v_2^*, \dots, v_m^*] \quad (4)$$

$$x^- = \{(\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, n\} = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_m^-] \quad (5)$$

式中  $J$  是效益型的下标集;  $J'$  是成本型的下标集,  $J \cup J' = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

第4步 计算距离,每个方案到理想解与负理想解的距离可表示为

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

第5步 计算每个方案对理想解的相对接近程度因子  $C_i$

$$C_i = \frac{S_i^*}{(S_i^- + S_i^*)} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

显然,  $0 \leq C_i \leq 1$ , 若  $X_i$  与  $X^*$  越接近, 则  $C_i$  越接近于 1。

第6步 根据  $C_i$  的大小进行优先排序, 排在最前边的威胁程度最大。

## 1.2 基于决策矩阵的威胁评估模型

### 1.2.1 基本定义

用于 TBM 威胁评估的诸多因素中, 有定量的, 也有定性的, 而且由于威胁等级没有明确的界限, 也具有模糊性, 需要对各属性按其威胁程度影响的大小分类进行量化。对定性的属性采用 G. A. Miller 的 9 级量化理论进行量化, 1-9 分别表示威胁程度极小、非常小、较小、小、中、大、较大、非常大、极大, 并进行归一化处理; 对定量属性采用区间量化, 并对其进行归一化处理<sup>[11]</sup>。

影响威胁程度的各因素的重要性是不同的, 因此, 需要规定各属性的权值。确定权值的方法很多, 有离差最大化法(客观赋权法)和层次分析法(主观赋权法)<sup>[13]</sup> 以及主客观结合特征向量方法<sup>[14]</sup> 等。这里采用相邻比较法(环比评分法)<sup>[9]</sup>, 即通过群组决策, 按各属性对威胁程度的相对重要性, 给出  $f_{m-1}$  和  $f_m$  之间,  $f_{m-2}$  和  $f_{m-1}$  之间,  $\dots$ ,  $f_1$  和  $f_2$  之间的重要性比率  $u_m, u_{m-1}, \dots, u_2$ , 然后令  $w'_m = 1$ , 则  $w$  可由如下两式得到:

$$w'_k = u_{k+1} w'_{k+1} \quad (k = m-1, m-2, \dots, 1) \quad (9)$$

$$w_k = w'_k / \sum_{k=1}^m w'_k \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

从而, 可得到权值矢量  $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ , (其中 T 表示转置)。

### 1.2.2 属性集的规划

对弹道导弹攻防的威胁评估涉及很多因素: 对方实战能力、训练方法、操作规范、TBM 的型号、数量以及发射装置的类型、性能、特征, 易损部件, 弹道轨迹, 战斗部种类、突防手段等, 并包含 TBM 发射和交战的最后几分钟之前的作战情报。而且随着防御方采取相应的反导措施(包括研制和部署各类拦截武器系统, 称威胁响应), 以及对方做出的反响(即通过提高导弹参数和采取特殊突防手段来应对我方的 MD 能力, 称为响

应威胁),战场态势呈现为动态的双方互动过程。因此,威胁评估也是一个动态的过程,这就要求所建模型属性输入的多元性和评估输出的实时性<sup>[15]</sup>。

下面,针对弹道导弹攻防的威胁评估,确定属性集各元素的含义及赋值。

1)属性集  $F(f_i) (i=1,2,\dots,m)$  的定义<sup>[15-17]</sup>见表1。

表1 属性集  $F(f_i) (i=1,2,\dots,m)$  的定义及权值表

Tab.1 The define of attributes set and the attribute weighing value

属性集元素	含义	内容	权值范围
$f_1$	导弹类型	主要指导弹的射程(远、中、近)以及落点的 CEP 值等。	1-9 级
$f_2$	弹头类型	主要包括非常规(核、生、化)弹头和常规(重、中、轻量级)弹头,以及是否具有集束、子母、分导等特点。	1-9 级
$f_3$	攻击及突防能力	主要指导弹储量、突防手段(欺骗、对抗、干扰、机动规避以及机动等)。	1-9 级
$f_4$	作战理念	包括作战序列、主攻目标以及作战策略等。	1-9 级
$f_5$	拦截器能力	包括拦截概率、拦截范围、机动性、协同性,可否实施“发射-观测-发射”战法及在光电、电磁对抗中的生存能力等。	1-9 级
$f_6$	防御能力	包括部署密度,多层拦截规划,外部提示能力,预警时间,火控能力等。	1-9 级

以上各属性按其构成威胁程度或具有的能力,其权值范围均定义为 1-9 级。

2)具体参数的确定。

利用属性集定义,可求得重要性比率  $u_m$ ,再利用式(9)、(10),则可求得权值矢量  $W = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 。

举例,若通过专家确定的属性集为  $F = [4, 5, 5, 7, 6, 1]$ ,则可求得重要性比率序列为  $u_6 = 0.17, u_5 = 0.86, u_4 = 1.4, u_3 = 1, u_2 = 1.25$ ,从而求得权值向量为

$$W = [0.129, 0.103, 0.103, 0.074, 0.086, 0.505]^T$$

## 2 应用仿真

### 2.1 导弹攻防想定

在某区域发生了一场导弹攻防对抗战。根据防御方的情报,对方部署的 TBM 可能袭击 4 个城市,分别用  $DA_1$ 、 $DA_2$ 、 $DA_3$  和  $DA_4$  表示,针对不同城市,攻防双方的攻防武器性能、部署的权值如表 2 所示。

表2 攻防双方导弹部署权值表

Tab.2 The missile deployment weighing value of the opposite attack - defense sides

DA	参数					
	$(f_1)$	$(f_2)$	$(f_3)$	$(f_4)$	$(f_5)$	$(f_6)$
$DA_1(X_1)$	3	9	3	5	5	6
$DA_2(X_2)$	4	9	3	6	4	5
$DA_3(X_3)$	2	6	5	4	4	7
$DA_4(X_4)$	1	5	8	7	3	8

上表中,前 4 项的赋值代表了进攻方 TBM 的综合攻击能力,后两项代表了防御方当前的综合防御水平。

### 2.2 威胁评估的计算

利用式(1)、(2),可求得归一化决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.3103 & 0.1579 & 0.2273 & 0.3125 & 0.2308 \\ 0.4 & 0.3103 & 0.1579 & 0.2727 & 0.250 & 0.1923 \\ 0.2 & 0.2069 & 0.2631 & 0.1818 & 0.250 & 0.2692 \\ 0.1 & 0.1724 & 0.4211 & 0.3182 & 0.1875 & 0.3077 \end{bmatrix}$$

加权的规范矩阵为

$$R_w = \begin{bmatrix} 0.0744 & 0.0256 & 0.0391 & 0.0338 & 0.0465 & 0.0286 \\ 0.0763 & 0.0263 & 0.0402 & 0.0347 & 0.0477 & 0.0293 \\ 0.0662 & 0.0228 & 0.0349 & 0.0301 & 0.0414 & 0.0255 \\ 0.0519 & 0.0179 & 0.0273 & 0.0236 & 0.0325 & 0.02 \end{bmatrix}$$

理想解( $X^*$ )和负理想解( $X^-$ )分别为

$$X^* = [0.0763 \quad 0.0263 \quad 0.0402 \quad 0.0347 \quad 0.0325 \quad 0.02]$$

$$X^- = [0.0519 \quad 0.0179 \quad 0.0273 \quad 0.0236 \quad 0.0477 \quad 0.0293]$$

各解距离理想解和负理想解的距离分别为

$$S_1^* = 0.0166 \quad S_2^* = 0.0178 \quad S_3^* = 0.0165 \quad S_4^* = 0.0309$$

$$S_1^- = 0.0 \quad S_2^- = 0.0309 \quad S_3^- = 0.0196 \quad S_4^- = 0.0179$$

经过对理想解的计算,可求得针对  $DA_1$ 、 $DA_2$ 、 $DA_3$  和  $DA_4$  的相对接近程度如下:

$$C_1 = 0.3681 \quad C_2 = 0.3555 \quad C_3 = 0.4571 \quad C_4 = 0.6332$$

即在评估时刻,城市  $DA_4$  所面临的威胁程度最大,必须首先采用应对措施。

### 3 结束语

本文运用多属性决策理论对导弹威胁的评估进行建模、仿真和计算。模型考虑到形成威胁的多元性,能够反映实际威胁的情况。由于威胁评估输出的实时性、有序性和时变性,使其不但可用于和平年代的态势分析,也可用于导弹攻防的实战过程。评估结论也可用于拦截武器的发展与规划和战时的战术选择。鉴于实际作战中各因素之间的关系错综复杂,一个简单的例子不可能包含 TBM 的各个方面,工程化模型的建立需要广泛的收集各种因素,预测其变化规律,使其能更逼真地评估导弹攻防中的威胁态势。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Cui, Su Haibin, Hou Chaozhen. An Object Threat Assessment Method based on Indefinite Multiple Attribute Decision Making[J]. Journal of China Ordnance, 2007, 3(1): 38-42.
- [2] 王小艺, 刘载文, 侯朝桢, 等. 基于模糊多属性决策的目标威胁估计方法[J]. 控制与决策, 2007, 22(8): 859-863.  
WANG Xiaoyi, LIU Zaiwen, HOU Zhaozhen, et al. Method of Object Threat Assessment Based on Fuzzy Madm[J]. Control and Decision, 2007, 22(8): 859-863. (in Chinese)
- [3] 曹可劲, 江汉, 赵宗贵. 一种基于变权理论的空中目标威胁估计方法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2006, 7(1): 32-35.  
CAO Kejin, JIANG Han, ZHAO Zonggui. Air Threat Assessment Based on Variable Weight Theory[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2006, 7(1): 32-35. (in Chinese)
- [4] 王猛, 章新华, 夏志军. 基于属性分析的威胁评估技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5): 848-851.  
WANG Meng, ZHANG Xinhua, XIA Zhijun. Research on the Threat Assessment based on Cue Analysis[J]. System Engineering and Electronics, 2005, 27(5): 848-851. (in Chinese)
- [5] Tony Jan. Neural Network based Threat Assessment for Automated Visual Surveillance[C]. //Proc of 2004 IEEE Int Joint Conf on Neural Network, 2004: 1309-1312.
- [6] 姜宁, 胡维礼. 辐射源威胁等级判定的模糊多属性方法[J]. 兵工学报, 2004, 25(1): 56-59.  
JIANG Ning, HU Weili. Fuzzy Multi Attribute Method of Emitter Threatening Grade Evaluation[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(1): 56-59. (in Chinese)
- [7] Gonsalves P G, Burge J E, Harper K A. Architecture for Genetic Algorithm Based Threat Assessment[C]. //Proc. the 6th Int. Conf. of Inf. Fusion, 2003: 965-971.
- [8] Qu Changwen, He You. A Method of Threat Assessment Using Multiple Attribute Decision Making[C]. //Proc the 6th Int Conf on Signal Processing, 2002: 1091-1095.
- [9] 魏世孝, 周献中. 多属性决策理论方法及其在  $C^3I$  系统中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.  
WEI Shixiao, ZHOU Xianzhong. Theory and Method of Multiple Attribute Decision Making and Application on  $C^3I$  System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 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.

- Electronics, 2000, 22(5): 26 - 29. (in Chinese)
- [ 11 ] 周林, 娄寿春, 赵杰. 基于MADM的威胁评估与排序法[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 18 - 19.  
ZHOU Lin, LOU Shouchun, ZHAO Jie. Model of Menace Assess Ordering Based on MADM[J]. System Engineering and Electronics, 2001, 23(1): 18 - 19. (in Chinese)
- [ 12 ] 卢盈齐, 王颖龙, 祝长英. TOPSIS法用于区域防空重点保卫目标排序计算[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(2): 20 - 21, 28.  
LU Yingqi, WANG Yinglong, ZHU Changying. Application of TOPSIS to Sequencing Computation of Protected Important Targets in Area Air Defence[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(2): 20 - 21, 28. (in Chinese)
- [ 13 ] 任全, 聂成, 李为民. 基于最小偏差指标赋权法的威胁判断模型[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(5): 78 - 81.  
REN Quan, NIE Cheng, LI Weimin. The Threat Estimation Model Based on Index Weighting Method of Minimizing Deviations [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2003, 4(5): 78 - 81. (in Chinese)
- [ 14 ] Gong Yanbing, Chen Senfa. Multi Attribute Decision Making Based on Subjective and Objective Integrated Eigenvector Method [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2007, 23(1): 144 - 147.
- [ 15 ] Ben Zion Naveh, Azriel Lorber. Theater Ballistic Missile Defense [M]. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2001.
- [ 16 ] 谢春燕, 李为民, 娄寿春. 弹道导弹突防方案与拦截策略的对抗研究[J]. 现代防御技术, 2004, 32(5): 8 - 13.  
XIE Chunyan, LI Weimin, LOU Shouchun. Study on Confrontation of Penetration Scheme of Ballistic Missile and Interception Tactics [J]. Modern Defence Technology, 2004, 32(5): 8 - 13. (in Chinese)
- [ 17 ] 陈东锋, 雷英杰, 田野. 群决策中不同形式属性权重信息的集结与应用[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(6): 51 - 53.  
CHEN Dongfeng, LEI Yingjie, TIAN Ye. Aggregation and Application of the Information about Attribute Weights with Different Forms in Group Decision Making with Different Forms in Group Decision making [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2006, 7(6): 51 - 53. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

## Research On an Algorithm of Threat Assessment In Tactics Ballistic Missile Defence

YANG Yan, ZHANG Ji - guang, JING Zhan - rong, GAO Tian

(School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** Assessing the threat of TBM timely and exactly is needed in making plan and working out the strategy about Ballistic Missile Defence system. According to the offence - defence power and the weapon characteristics of both the offence and defence sides, the TOPSIS of the multi - attribute decision - making theory is adopted in this paper. And the algorithm of the Tactics Ballistic Missile threat level assessment is provided and the mathematic model of the missile threat assessment is established. The algorithm is capable of sequencing in multi - attribute inputting and multiple decision - making optimising and of adjudging timely, so it is adapted to transient missile offence - defence state. Additionally, the feasibility of the algorithm is verified by the simulation example.

**Key words:** threat assessment; multi - attribute decision - making; missile defence