

引用格式:李陆军,丁建江,吕金建,等.基于TOPSIS和灰色关联度的弹道目标威胁评估方法[J].电光与控制,2017,24(9):6-10. LI L J, DING J J, LYU J J, et al. Threat assessment to ballistic missile based on TOPSIS optimization and grey correlation degree[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(9):6-10.

基于 TOPSIS 和灰色关联度的弹道目标威胁评估方法

李陆军^{1,2}, 丁建江¹, 吕金建¹, 赵龙华³

(1. 空军预警学院, 武汉 430019; 2. 中国人民解放军 93975 部队, 乌鲁木齐 830000;
3. 中国人民解放军 95269 部队, 广州 510000)

摘要: 弹道目标威胁评估是反导中的重要一环,为指挥决策提供依据。为了有效评估目标威胁度,构建了威胁评估指标体系,梳理出7项重要评估指标,并对各指标进行详细分析,在此基础上提出了一种基于逼近理想点排序法(TOPSIS)和灰色关联度的弹道目标威胁评估方法,充分结合两种方法的优点,最后结合典型场景进行仿真验证。结果表明,该威胁评估方法能够综合评定目标威胁度,为弹道导弹目标威胁评估提供了一种新的评价方法,具有一定的应用价值。

关键词: 灰色关联度; 逼近理想点排序; 威胁评估; 弹道导弹目标

中图分类号: E91 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.09.002

Threat Assessment to Ballistic Missile Based on TOPSIS Optimization and Grey Correlation Degree

LI Lu-jun^{1,2}, DING Jian-jiang¹, LYU Jin-jian¹, ZHAO Long-hua³

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. No. 93975 Unit of PLA, Urumqi 830000, China; 3. No. 95269 Unit of PLA, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Threat assessment to the target of ballistic missile is an important part in anti-missile defense, which can provide scientific references for missile defense decision-making. To assess threat degree of the targets effectively, an index system is constructed and 7 kinds of important evaluation indicators are given. Then each indicator is analyzed in detail. On this basis, a new threat assessment method is proposed based on TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) and grey correlation degree, which makes full use of the advantages of two methods. Finally, it is simulated and verified in the typical scenarios. The results show that the threat evaluation method can give comprehensive assessment result of target threat degree, which has certain application value in anti-ballistic missile defense system.

Key words: grey correlation degree; TOPSIS optimization; threat assessment; ballistic missile target

0 引言

目标识别在反导作战中占有重要的地位,是其关键环节,决定其成败,可以说,目标识别贯穿于整个反导作战全程,主要包括症候识别、星弹识别、真假弹头识别、拦截效果评估、态势评估、威胁评估等。其中,威胁评估是在态势评估基础上进行的高级融合,是反导

作战任务实施、计划制定、指挥决策等的重要依据,因此,需要对其进行深入研究。

目前有关威胁评估的研究很多,文献[1-2]将贝叶斯网络应用于态势估计,该方法虽能有效解决态势估计中的不确定性问题,但在实际操作过程中,目标事件的先验概率与条件概率获取困难;文献[3]将证据理论应用于空战态势评估,能够进行不确定性推理,解决了贝叶斯网络先验概率和条件概率获取困难的问题,然而在证据冲突时会造成推理结果不合理;文献[4]提出基于对策论的威胁评估方法,通过获取敌我双方的策略集和威胁矩阵对目标进行威胁评估,该方法比较直观,流程简练,具有明确的物理意义,然而策略集主要依靠先验知识,易受主观因素影响;文献[5]将专家系统应用于空战多目标攻击排序,该方法的优点在于排序结果合理,

收稿日期:2016-11-14 修回日期:2017-07-07

基金项目:电子对抗与信息控制国防科技重点实验室基金项目;国家自然科学基金青年项目(61401503,61602506);中国博士后基金(20110491889);全军军事类研究生资助课题(2014JY545);学院创新基金(2013ZDJC0101,2014QNCX0115)

作者简介:李陆军(1986—),男,安徽六安人,博士生,研究方向为预警装备建设与发展、雷达目标识别。

能够实时更新数据库,然而不足之处是建立过程复杂,工程实现较难;文献[6]采用径向神经网络解决目标威胁排序问题,较好地解决了不同要素之间的非线性关系,具有自适应学习能力,然而该方法的实现需要大量的样本训练数据;文献[7]提出了一种基于逼近理想点排序法(TOPSIS)的战术弹道威胁评估方法,具有多属性决策的实时判决功能,该方法通过以数据序列之间的远近判断方案优劣,只要方案与理想方案相近就可以得到方案优劣的结果,然而该方法体现不出数据序列的态势变化,而灰色关联度通过衡量曲线形状的相似性,能够较好地分析态势变化,曲线的形状越接近,数据序列之间的关联度就大。本文结合两种方法的优势,提出了一种基于TOPSIS^[7-8]和灰色关联度^[9-12]的威胁评估方法,并通过实例仿真验证了该方法的合理性和有效性。

1 构建威胁评估指标体系

威胁评估不仅贯穿于整个反导过程,实际上在弹道导弹发射前已经开始,包括平时不同导弹基地对我方的威胁评估,直接影响指挥员的战略决策和武器装备的战略部署;战时实时评估直接影响指挥决策、拦截排序、目标任务分配等等。在反导作战中,弹道目标的威胁估计通常受到多种因素的影响,综合来说可以梳理为7种主要因素,具体指标体系如图1所示。

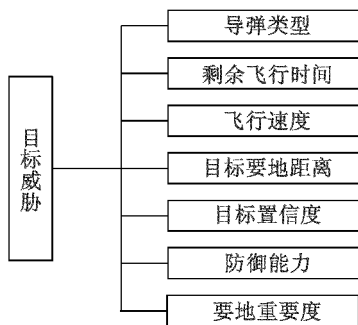


图1 弹道导弹目标威胁评估指标体系
Fig.1 Threat assessment index system of ballistic missile target

1) 导弹类型。

弹道导弹按射程一般分为近程、中程、远程、洲际4种不同导弹类型,按照弹头可分为常规和非常规(核弹、生化武器)。不同导弹具有多种突防手段,如干扰、欺骗、多弹头等。在反导作战中,导弹类型的确定需要战前长期的资料积累和更新。由于导弹类型属于定性因素,属性值通常采用9级量化标准,因此,目标量化值越大,威胁度越高。

2) 剩余飞行时间。

弹道导弹目标飞行过程中可以通过估计目标的飞行状态预测弹道和估计落点,通过后续雷达探测进行

验证。将当前时刻到落点时刻的差值称为剩余飞行时间,如图2所示,剩余时间越多,留给作战决策、拦截分配等的时间越多,相应目标的威胁度就低。

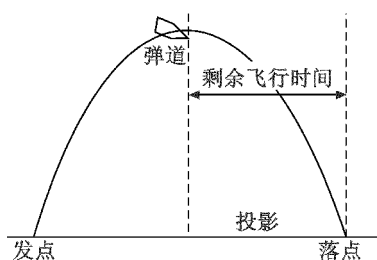


图2 剩余飞行时间

Fig.2 Remaining flight time

3) 飞行速度。

弹道导弹目标速度快,战机稍纵即逝,3000 km 射程目标再入速度为4.7 km/s;10000 km 射程目标再入速度7.2 km/s。目标速度越大,跟踪识别越困难,留给系统反应的时间越少,相应的威胁度就越高。

4) 目标要地距离。

目标要地距离指目标航线投影与要地的垂直距离,如图3所示,目标离要地距离越近,对要地的威胁度越大,反之威胁度就小。

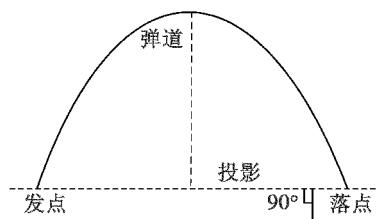


图3 目标要地距离

Fig.3 Distance between target and strategic location

5) 目标置信度。

弹道导弹整个飞行过程,伴随大量的碎片、轻重诱饵等,反导系统探测资源紧张,满足不了大量目标的识别需求,此时,弹头置信度高相应威胁度大的目标,资源规划时就应有限分配探测资源。因此目标弹头置信度也是威胁评估的一个重要指标。

6) 防御能力。

典型反导场景下通常采用两段三层拦截(中段拦截、末端高层和低层拦截),不同要地的拦截弹部署是固定的,战时机动的可能性不大,因此,在具体场景下的反导作战中,反导拦截基本确定,相应的防御能力可以评估,一般采用9级量化标准。通常防御能力强,进攻目标的威胁度就低。

7) 要地重要度。

弹道导弹一般针对重点目标发射,主要为达成一定的战略目的。不言而喻,不同要地的重要程度是不

同的,平时对重要防护点进行评级,通常采用9个量级标准。战略地位高的要地,对应的进攻导弹目标威胁程度就高,有时为达成重要地域防御胜算,有可能放弃对其他要地的防护。

2 基于 TOPSIS 和灰色关联度的综合评估方法

2.1 TOPSIS 方法

1) 采用 TOPSIS 方法评价时,需对每个指标进行同趋势化处理,将高优指标转换成低优指标,或将低优指标转换成高优指标,通常采用后一种方式。现假设原始数据中的低优指标为 X_{ij} ($i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$),可将其转换成高指标,即

$$X'_{ij} = 1/X_{ij} \quad (1)$$

2) 对同趋势化后的数据进行归一化处理,建立矩阵 A ,其归一化转换公式为

$$a_{ij} = X'_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m (X'_{ij})^2} \quad (2)$$

式中, X'_{ij} 表示为第 i 个对象中的第 j 个指标值。

3) 计算加权标准化矩阵,即

$$A = (\omega_j a_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

4) 根据矩阵 A 确定最优方案和最劣方案。

最优方案

$$A^+ = (a_{i1}^+, a_{i2}^+, \dots, a_{in}^+) \quad (4)$$

最劣方案

$$A^- = (a_{i1}^-, a_{i2}^-, \dots, a_{in}^-) \quad (5)$$

5) 分别计算各对象与最优方案和最劣方案的欧氏距离 (Euclid) D_i^+ 和 D_i^- , 即

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij}^+ - a_{ij})^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij}^- - a_{ij})^2} \end{cases} \quad (6)$$

6) 计算各对象与最优方案的相近程度,算式为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (7)$$

2.2 灰色关联度方法

1) 在原始数据归一化后,分别计算各对象与理想方案及负理想方案关于 j 个指标的灰色关联系数,即

$$\begin{cases} r_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_k \Delta i(k) + p \max_i \max_k \Delta i(k)}{\Delta i(k) + p \max_i \max_k \Delta i(k)} \\ r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_k \Delta i(k) + p \max_i \max_k \Delta i(k)}{\Delta i(k) + p \max_i \max_k \Delta i(k)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta i(k)$ 表示第 j 个指标中,第 i 个方案与正理想方案或负理想方案差值的最小绝对值; $\min_i \min_k \Delta i(k)$ 表示第 j 个指标中,所有方案与正理想方案或负理想方案差

值的最小绝对值; $\max_i \max_k \Delta i(k)$ 表示第 j 个指标中,所有方案与正理想方案或负理想方案差值的最大绝对值; p 为分辨系数,在 0 和 1 之间取值,按照惯例一般取 0.5。

2) 由 1) 可以获取各对象与理想方案和负理想方案之间的灰色关联矩阵,即

$$\begin{cases} R^+ = \begin{Bmatrix} r_{11}^+ & r_{12}^+ & \cdots & r_{1n}^+ \\ r_{21}^+ & r_{22}^+ & \cdots & r_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1}^+ & r_{m2}^+ & \cdots & r_{mn}^+ \end{Bmatrix} \\ R^- = \begin{Bmatrix} r_{11}^- & r_{12}^- & \cdots & r_{1n}^- \\ r_{21}^- & r_{22}^- & \cdots & r_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1}^- & r_{m2}^- & \cdots & r_{mn}^- \end{Bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

3) 根据灰色关联矩阵计算的各对象的灰色关联度,即

$$\begin{cases} R_i^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^+ & i = 1, 2, \dots, m \\ R_i^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ij}^- & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (10)$$

4) 计算各对象的贴近度为

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

贴近度越大方案越优,反之越差。

2.3 基于 TOPSIS 和灰色关联度的综合评估方法

1) 对原始决策矩阵进行规范化处理;

2) 计算加权规范化矩阵;

3) 确定加权规范化矩阵的正理想解和负理想解;

4) 计算各目标与正理想解和负理想解的距离 D_i^+ 和 D_i^- ;

5) 计算各个方案同正理想解与负理想解之间的灰色关联系数矩阵 R_i^+ 和 R_i^- ;

6) 对 4) 和 5) 中的距离和关联度构成矩阵,同时对其进行无纲化处理(分别除以各列向量中的最大值);

7) 如果 D_i^- 和 R_i^+ 越大,则目标方案越接近于正理想方案;如果 D_i^+ 和 R_i^- 越大,则目标方案越接近于负理想方案。因此,可以将它们合并进行分析,即

$$\begin{cases} T_i^+ = aD_i^- + bR_i^+ & i = 1, 2, \dots, m \\ T_i^- = aD_i^+ + bR_i^- & i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (12)$$

式中, a, b 满足 $a + b = 1$, 决策者可根据对位置和形状的偏好程度确定它们的取值,一般情况下取 $a = b = 0.5$;

8) 计算各方案的贴近程度,并对其进行排序,贴近度越大方案越优,反之越劣,即

$$C_i = T_i^+ / (T_i^+ + T_i^-) \quad (13)$$

9) 按照 8) 确定的大小进行目标的威胁程度排序。

3 结果分析

3.1 结果

3.1.1 指标归一化及正负理想解

表1所示为各目标指标参数,其中,导弹类型、要地重要度、防御能力的参数确定采用9个量级标准,通

常在1~9之间取整数定义3项指标具体参数。首先将收集的数据进行同趋势化处理,7项指标中剩余飞行时间、目标要地距离、防御能力为低优指标,需要采用倒数法将低优指标转化为高优指标,然后对同趋势化原始数据矩阵进行归一化处理,表2为同趋势和归一化处理后的结果。

表1 各目标指标参数

Table 1 Index parameter of the targets

目标	导弹类型	剩余飞行时间/s	飞行速度/(km·s ⁻¹)	目标要地距离/km	目标置信度	防御能力	要地重要度
1	1	100	5	40	0.7	9	1
2	1	100	5	40	0.5	9	1
3	4	200	6	20	0.5	7	3
4	4	280	5	20	0.9	5	8
5	6	330	7	20	0.5	7	5
6	6	400	7	10	0.9	7	5

表2 指标归一化处理结果

Table 2 Normalized result of index

目标	导弹类型	剩余飞行时间/s	飞行速度/(km·s ⁻¹)	目标要地距离/km	目标置信度	防御能力	要地重要度
1	0.0971	0.6285	0.3459	0.1826	0.4139	0.3131	0.0894
2	0.0971	0.6285	0.3459	0.1826	0.2957	0.3131	0.0894
3	0.3885	0.3142	0.4150	0.3651	0.2957	0.4026	0.2683
4	0.3885	0.2245	0.3459	0.3651	0.5322	0.5636	0.7155
5	0.5828	0.1904	0.4842	0.3651	0.2957	0.4026	0.4472
6	0.5828	0.1571	0.4842	0.7303	0.5322	0.4026	0.4472

根据表中结果找出指标中最优值和最劣值(正理想解和负理想解),即 $A^+ = (0.5828 \ 0.6285 \ 0.4842 \ 0.7303 \ 0.5322 \ 0.5636 \ 0.7155)$; $A^- = (0.0971 \ 0.1571 \ 0.3459 \ 0.1826 \ 0.2957 \ 0.3131 \ 0.0894)$ 。

3.1.2 各因子与正负理想解的距离

根据归一化处理结果计算各目标与威胁度最大解和最小解的距离 D_i^+ 和 D_i^- ,结果如表3所示。

表3 各目标与正负理想解的 D_i^+ 和 D_i^-

Table 3 D_i^+ and D_i^- of each target

目标	D_i^+	D_i^-	排序结果	目标	D_i^+	D_i^-	排序结果
1	1.0118	0.4860	5	4	0.5945	0.7959	2
2	1.0323	0.4713	6	5	0.6921	0.6523	3
3	0.7460	0.4333	4	6	0.5658	0.8643	1

3.1.3 各因子与正负理想解的关联度

根据归一化处理结果计算各目标与威胁度最大解和最小解的关联度 R_i^+ 和 R_i^- ,结果如表4所示。

表4 各目标与正负理想解的 R_i^+ 和 R_i^-

Table 4 R_i^+ and R_i^- of each target

目标	R_i^+	R_i^-	排序结果	目标	R_i^+	R_i^-	排序结果
1	0.5805	0.8750	4	4	0.7441	0.6330	2
2	0.5582	0.9142	6	5	0.6638	0.6950	3
3	0.5769	0.7212	5	6	0.7997	0.6090	1

3.1.4 各方案贴近度计算及排序

将各因子与正负理想解的距离和关联度分别除以所在列中的最大值进行无纲化处理,处理后的结果合并计算 T_i^+ 和 T_i^- ,最终根据式(13)计算各目标与正理想解的贴近度,并根据结果进行排序,结果如表5所示。

表5 各目标的贴近度及排序

Table 5 Approach degree and sequencing

目标	C_i	排序结果	目标	C_i	排序结果
1	0.3994	5	4	0.5934	2
2	0.3834	6	5	0.5255	3
3	0.4472	4	6	0.6222	1

3.2 结果分析

通过 TOPSIS 和灰色关联度综合评估方法计算贴近度,目标的威胁度排序为:目标6 > 目标4 > 目标5 > 目标3 > 目标1 > 目标2。其中:目标1和目标2为同一目标群中目标,前者的目标置信度为0.7,大于后者,其他指标相同,置信度高的目标威胁度大,理应受到重点关注;目标3的置信度低于目标1,剩余飞行时间多于目标1,然而目标1的其他指标都高于目标3,因而目标3的威胁度高于目标1;目标5置信度、目标要地距离及防御能力和目标3相同,虽然剩余飞行时

间大于目标 3,然而剩余其他 3 项指标优于目标 3,因而目标 5 的威胁度高于目标 3;目标 4 除导弹类型和飞行速度 2 个指标外,目标要地距离相等,其他 4 个指标高于目标 5,因而目标 4 威胁度高于目标 5;目标 6 除剩余飞行时间、防御能力及要地重要度外,其他 3 个指标远优于目标 4,因而目标 6 的威胁度高于目标 4。经过分析可知,本文提出的方法能够有效评估目标威胁度,符合逻辑分析结果。

从表 3~表 5 可知,虽然单独使用 TOPSIS 和灰色关联度进行威胁排序时,目标之间威胁度可分性稍大,但相差不是太明显,3 种方法都能够对目标进行威胁排序,目标威胁排序大体相当,然而目标 1 和目标 3 在排序上存在分歧,在距离维度上,目标 1 的威胁度小于目标 3,而在关联度维度上,目标 1 的威胁度大于目标 3,可见在目标威胁度判断上出现了冲突,本文提出的方法有效处理了冲突,研究表明,该方法在综合考虑距离和关联度两个维度数据基础上,均能够给出合理的威胁度排序结果。

4 结束语

弹道导弹目标威胁评估在反导作战中具有重要的地位,是作战决策、资源分配等的重要依据。本文提出一种基于 TOPSIS 和灰色关联度的威胁评估模型,梳理出了导弹类型、剩余飞行时间、飞行速度、目标置信度、飞行速度、防御能力、要地重要度等 7 项威胁评估指标,该方法充分吸收了 2 种方法的优点,也充分考虑到数据直线距离和曲线态势。仿真结果表明,该威胁方法能够综合评价目标威胁度,为弹道导弹目标威胁的多指标评价提供了一种全新的评价方式。

参考文献

- [1] ZACHARIAS G L, MIAO A X, ILLGEN C, et al. Sample: situation awareness model for pilot in-the-loop evaluation [C]//Proceedings of 1st Annual Symposium on Situational Awareness in the Tactical Air Environment, 1996:1-29.
- [2] DAS S, GREY R, GONSALVES P. Situation assessment via bayesian belief networks [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Information Fusion, 2002:664-671.
- [3] 王琳,寇英信. Dempster-Shafer 证据理论在空战态势评估方面的应用[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 155-157.
- [4] 曲长文,何友. 基于对策论的威胁评估模型[J]. 火力与指挥控制, 1999, 24(2): 27-30.
- [5] 赵威,周德云. 专家系统在空战多目标攻击排序中的应用[J]. 电光与控制, 2008, 15(2): 23-26.
- [6] 王向华,覃征,刘宇,等. 径向基神经网络解决威胁排序问题[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1576-1579.
- [7] 羊彦,张继光,景占荣,等. 战术弹道导弹防御中的威胁评估算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(2): 31-35.
- [8] 于会,于忠,李伟华. PAAIS 中的态势威胁评估模型[J]. 计算机仿真, 2008, 25(9): 79-81.
- [9] 孙玮玮,李雷,郑昊尧. 基于灰色关联度法的大坝风险后果综合评价[J]. 人民黄河, 2012, 34(4): 102-104.
- [10] 李莹,冯国会,于靓,等. 基于灰色关联度 TOPSIS 法在建筑能耗评价体系中的应用[J]. 建筑节能, 2013, 41(1): 47-50.
- [11] 隋礼辉. 基于 TOPSIS 法与灰色关联度的分布式电源投资效益分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 194-196.
- [12] 曾鸣,邹晖,王蕾,等. 基于灰色关联 TOPSIS 法的抽水蓄能电站效益评价模型及应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 155-157.

下 期 要 目

基于 AFDX 网络的综合模块化航电故障注入技术
高超声速飞行器姿态运动协调研究
激光主动成像制导图像去噪算法研究
考虑单目标探测需求的多传感器联盟技术研究
基于单纯形-遗传算法的导弹主动段优化设计
机载激光通信系统关键技术分析与试验验证
大口径快摆镜鲁棒控制器设计

改进滑模控制器在无人直升机控制系统中的应用
异构传感器网络基于粒子群算法的部署策略
DS-OFDM 雷达通信一体化共享信号性能分析
拦截空天高速机动目标的三维非线性导引律
ARINC661 目标符号显控方式的研究与设计
多无人机编队分组决策与一致性
一种带机动检测的权值约束多新息修正算法