基于主客观权重的临近高超声速武器威胁评估方法

郝问裕，李奇峰，张 峰，边瑶慧，陆泽健

中国电子科学研究院 北京

【摘要】临近空间高超声速武器具有飞行速度快、突防能力强、轨迹机动多变等突出特征，对传统防空反导体系构成了前所未有的严峻挑战。对其威胁程度的准确评估是实施合理资源分配与火力拦截的重要前提。针对高超声速武器威胁评估中单一赋权方法存在的固有不足，本文提出了一种融合模糊层次分析法与主成分分析法的主客观综合赋权威胁评估方法。首先，依据高超声速武器的飞行特性与物理属性，从多个维度建立威胁评估指标体系；其次，借助模糊层次分析法从专家经验中提取主观权重，同时运用主成分分析法从数据自身的方差特征中挖掘客观权重；最后，以离差最大化方法构建目标函数，并利用拉格朗日乘子法求解得到最优的组合权重系数。仿真实验中采用 10 批次高超声速目标仿真数据对所提方法进行验证，结果表明该主客观组合赋权模型能够更加客观、准确地反映目标的真实威胁排序，有效削弱了评估过程中的主观随意性与数据片面性对结果的影响。

【关键词】高超声速武器；威胁评估；模糊层次分析法；主成分分析；离差最大化；拉格朗日求解

【收稿日期】2026 年 6 月 12 日 【出刊日期】2026 年 7 月 15 日 【DOI】10.12208/j.jer.20260033

A threat assessment method for near-hypersonic weapons based on subjective and objective weights

Wenyu Hao, Qifeng Li, Feng Zhang, Yaohui Bian, Zejian Lu

China Academy of Electronic and Information Technology, Beijing

【**Abstract**】Near-space hypersonic weapons possess prominent features such as high flight speed, strong penetration capability, and highly variable maneuvering trajectories, posing unprecedented severe challenges to traditional air and missile defense systems. Accurate assessment of their threat level serves as an essential prerequisite for rational resource allocation and fire interception. To address the limitations of single weighting methods in hypersonic weapon threat assessment, we proposes a subjective-objective comprehensive weighting threat assessment method that integrates the fuzzy analytic hierarchy and principal component analysis. Firstly, we establish a threat assessment system based on the flight and physical attributes of hypersonic weapons. Second, subjective weights are learned from expert experience via the fuzzy analytic hierarchy process. Meanwhile, objective weights are computed from the data variance through principal component analysis. Finally, we construct an objective function by using the maximum deviation method, and the optimal combination weight coefficients are obtained by solving the function with the Lagrange multiplier method. To validate the effectiveness of proposed method, simulation experiments are conducted by using 10 batches of hypersonic target simulation data. The results demonstrate that the subjective-objective combination weighting model can reflect the true threat ranking of targets more objectively and accurately, effectively mitigating the influence of subjective arbitrariness and data one-sidedness on the assessment results.

【**Keywords**】Hypersonic weapons; Threat assessment; Fuzzy AHP; Principal component analysis; Maxi-mum deviation; Lagrange multiplier

引言

随着现代战争形态的快速演变，空天安全领域正发生着结构性变革。近年来，以临近空间高超声速武器为代表的新一代战略武器攻击手段日趋成熟，已成为大国战略博弈的关键组成。临近空间高超声速武器通常指飞行速度能够达到 5 马赫以上、飞行高度介于 20 至 100 公里的航空武器系统。这一定义同时融合了航空空间与航天空间的物理特性信息，使得该类武器在作战应用层面具备独特的战略价值[1,2]。

从技术层面而言，高超声速武器存在的核心优势

为，一方面，这类武器继承了弹道导弹的高速度属性，能够在极短时间内抵达攻击区域，大幅压缩防御方的反应时间裕度；另一方面，高超声速武器又具备巡航导弹的机动飞行能力，可以在飞行过程中进行大范围轨迹变化与机动调整，从而使得防空系统的难以拦截预测。正是这种“高速”与“高机动”并存的特性，使得高超声速武器在突防能力上远超传统武器，成为现代作战体系中至关重要的一环。

面对高超声速武器强机动、轨迹难以预测的特点，传统的威胁评估方法往往难以发货作用。如何在反应时间内快速、准确地评估目标的威胁程度，确定合理的目标优先级，已成为当前各国亟待解决的关键技术问题。

当前，传统的威胁评估方法主要针对弹道导弹目标，国内外学者对此展开了大量研究。李高飞等学者[3]提出基于层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）的弹道目标威胁评估方法，从弹道导弹重要参数以及对欲攻击目标的重要程度两个方面建立评估指标集，助力提升防御系统拦截能力；许有玺等学者[4]，提出了基于梯度模糊 TOPSIS 的导弹目标威胁评估方法，该方法通过引入梯度模糊算法计算模糊矩阵，有效解决了各因素数据指标量级差异过大而引起的权重值偏差问题，提升了导弹目标威胁评估的可信性。徐浩等学者[5]，提出了基于证据理论的助推段弹道导弹目标威胁评估方法，该方法利用证据理论处理不确定信息的能力，实现了助推段目标的威胁等级判定。Qiu 等学者[6]，提出了基于改进双变权（Improved Dual Variable Weight）的多目标威胁评估方法，该方法利用层次分析法和改进熵权法分别计算主客观权重，构建综合均衡函数并融合变权理论，最终采用改进的理想解与灰色关联方法获得多目标威胁评估结果，仿真表明该方法更符合实际情况。Zhao 等学者[7]，提出了基于 ReLU 深度神经网络（RL-DNN）的空中目标威胁评估方法，该方法在 BP 神经网络基础上增加网络层数，采用 ReLU 作为激活函数并结合 Adam 反向传播算法，有效避免了学习率慢和陷入局部极值的问题，实验证明该方法预测精度高于传统算法。

然而，上述方法在面对高超声速武器目标进行威胁评估时存在一定的局限性。一方面，高超声速武器的物理特性不同于传统弹道目标，使用现有的评估指标体系无法完整刻画其特点；另一方面，传统的威胁评估方法如层次分析、灰度分析等方法[8-11]高度依赖于专家的主观经验判断，难以赋予指标准确、合理的权重。尽管基于深度学习的评估方法[7,12]具备强大的学习、推理能力，但这类方法往往需要大量的训练数据，难以在实际工程中应用。

为解决上述问题，本文提出了一种基于主客观权重相结合的临近空间高超声速武器威胁评估方法。该方法根据设高超声速武器特性，设计相应的评估指标体系。在进行权重设置时，采用模糊层次分析法（Fuzzy-AHP）与主成分分析法（PCA）相结合的主客观综合赋权方法，计算得到各指标权重值。将权重值与各指标取值进行加权计算得出目标威胁度值，实现对高超声速武器科学、稳健的威胁评估。

1 高超声速武器威胁指标集构建

威胁评估本质上是通过综合考虑目标的多种特征信息，采用科学的量化方法对目标的威胁程度进行综合判定。针对临近空间高超声速武器，高机动与强实时的特点，本方法从物理能力及战略意图出发，选取目标瞬时速度、目标射程、飞行高度、雷达散射截面积、剩余到达时间、落点战略价值、国别威胁系数共 7 个相关指标构建高超声速武器威胁评估指标体系。建立的临超目标评估指标体系如图 1 所示，对于每个指标的具体定义及计算方法如下。

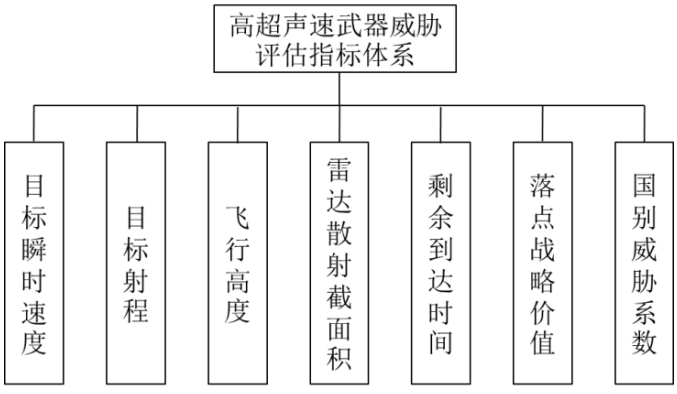


图 1　高超声速武器威胁评估指标体系

（1）目标瞬时速度

目标瞬时速度为临近空间高超声速武器在飞行过程中的瞬时速率，以马赫数（音速）表示。目标瞬时速度与威胁程度呈正相关关系，更高的飞行速度意味着更短的拦截时间窗口。对于该指标计算采用指数型归一化函数，计算公式如下：

$$\mathrm{I_{vel}} = 1 - \mathrm{e}^{-\alpha \cdot \max(0,\ \mathrm{V} - \mathrm{V_{th}})} \qquad (1)$$

式中，V代表目标当前探测速度，单位为马赫。V_{th}代表速度阈值，设定为 3 马赫。α表示衰减系数，其值设定为 0.25。

（2）目标射程

目标射程的定义为临近空间高超声速武器从发射点到打击目标点的最大飞行距离。射程直接决定了该武器的火力覆盖范围，其值越远意味着打击范围越广、对防御方形成的战略威慑越大。对该指标的构建采用数型归一化函数，计算公式如下：

$$I_{Range} = \frac{\ln(1+\alpha R)}{\ln(1+\alpha R_{max})} \qquad (2)$$

其中，R代表目标的实际射程，单位为千米；R_{max}为射程参考上限，设定为 12000km，略高于典型洲际弹道导弹的最大射程；α为对数压缩系数，取值一般为 0.001。

（3）飞行高度

飞行高度是指来临近高超声速武器位置相对于海平面的垂直距离。高超声速武器的飞行高度涵盖临近空间到大气层内低空的广阔范围，不同高度下的目标被探测、跟踪和拦截的能力各有不同。目标高度与威胁程度呈非线性关系，在 20 至 50 公里范围内威胁程度随高度增加而上升；超出该范围后被稳定探测跟踪概率和拦截可行性下降，威胁程度值趋于稳定。对于该指标设计为基于正态分布的非线性函数，具体计算公式如下：

$$I_{height} = e^{\left(-\frac{\left(H-H_{opt}\right)^2}{2\sigma^2}\right)} \qquad (3)$$

式中，H为目标的实际飞行高度（km）；H_{opt}为最优威胁高度，设定为50 km；σ为高度敏感参数，设定为 15km。

（4）雷达散射截面积

目标雷达散射截面积（RCS）能够反映目标的隐身特性。高超声速武器通常采用乘波体等特殊气动外形，并伴有等离子鞘套现象，导致 RCS 极小，极易造成雷达脱靶。RCS 越小，雷达发现概率越低，目标的隐蔽突防能力越强，因此威胁度越高。对该指标采用负指数归一化函数构建 RCS 威胁评估模型，具体公式如下：

$$I_{RCS} = e^{-\beta * RCS} \qquad (4)$$

式中，RCS为目标的有效雷达散射截面积（㎡）；β为探测难度系数，一般设置为 0.3。

（5）剩余到达时间

剩余飞行时间是指从当前时刻到目标预计到达攻击区域的时间间隔，用于表征防御系统的拦截时间裕度。该指标与目标威胁程度呈负相关关系，时间越短，防御系统面临的时间压力越大，决策和行动的容错空间越小，因此采用指数衰减型函数，具体公式如下：

$$I_{time} = e^{(-\frac{T}{\lambda})} \qquad (5)$$

式中，T为目标的剩余到达时间（min）；λ为时间敏感系数，一般取值为 2.5。

（6）落点战略价值

落点战略价值是指高超声速武器打击对象（保卫目标）在军事、经济、政治等方面的综合价值表示。保卫目标可能包括军事设施、政治设施、经济设施以及民用设施等不同类型，其重要性与威胁程度呈正相关关系，针对高价值目标即使临近高超武器能力处于中等水平，也应该给予更高优先级。对该指标采用分级赋值法量化落点战略价值，具体公式如下：

$$I_{value} = \sum_{i=1}^{n} \omega_i \cdot V_{\mathrm{i}},\quad \sum_{i=1}^{n} \omega_i = 1 \qquad (6)$$

式中，V_i为第i类目标的战略价值等级得分，取值范围建议为0~1；ω_i为第i类目标的权重系数，满足归一化约束。根据高超声速武器的主要打击场景，设定赋值如下：战略指挥中心（$V_1 = 0.95$，$\omega_1 = 0.30$）、重要军事基地（$V_2 = 0.80$，$\omega_2 = 0.25$）、经济枢纽设施（$V_3 = 0.65$，$\omega_3 = 0.20$）、核武器存放点（$V_4 = 1.00$，$\omega_4 = 0.15$）、一般目标（$V_5 = 0.30$，$\omega_5 = 0.10$），非领土范围目标（$V_6 = 0$，$\omega_6 = 0$）。

（7）国别威胁系数

国别威胁系数是指临近空间高超声速武器所属国家在该领域的发展程度，可从侧面反映临近高超武器的攻击能力。该指标主要从不同国家在高超声速武器技术方面的研制情况、发展水平进行考虑。

$$I_{Nation} = T_d \qquad (7)$$

式中，T_d为技术发展水平系数，取值范围为[0，1]，反映该国高超声速武器的技术先进程度，对于技术领先国家，设定T_d为 0.95 至 0.9 之间数值；对于已研制

成功国家，根据其技术水平，设定取值范围为 0.2-0.6；其余未具备国家设定其值为 0。

2 基于主客观权重的综合评估模型

在临近高超声速武器指标体系构建完成后，各指标权重的合理确定是影响评估结果客观性与可靠性的关键环节。一般而言，主观赋权法侧重于借助专家经验与领域知识对各指标的重要性加以判别，客观赋权法则从评估对象各指标的实际数据出发，借助数学统计手段挖掘指标间的差异与关联信息。考虑到单一赋权方法各有局限，本文设计了一种主客观权重相结合的综合评估模型。该模型首先采用模糊层次分析法确定主观权重，通过引入三角模糊数对判断过程中的不确定性与模糊性加以刻画，从而在一定程度上缓解传统 AHP 判断矩阵难以满足一致性要求的矛盾；其次利用主成分分析法从评估数据自身特征中提取客观权重，分析指标间的线性相关结构；最后通过离差最大化方法对主客观权重进行组合优化，以加权评价值差异最大化为目标构建优化模型，使权重向量在主客观之间实现自适应寻优与动态平衡。所提方法的整体流程如图 2 所示。

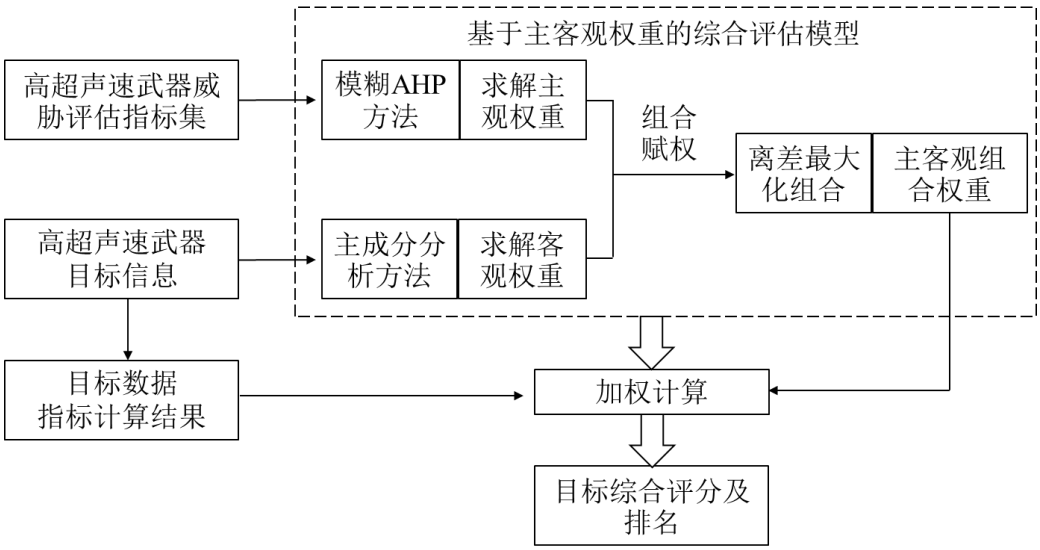


图 2　高超声速武器威胁评估整体流程图

2.1 模糊层次分析法（Fuzzy AHP）主观权重计算

模糊层次分析法是在传统层次分析法基础上延伸出的权重确定方法，其关键改进在于借助模糊集合理论来应对决策判断中普遍存在的模糊性与不确定性[13]。在传统 AHP 框架下[14]，专家需对任意两个指标的相对重要性给出精确的数值判断，但这一要求在实际决策情境中往往难以完全满足，因为专家在表达偏好时更倾向于给出具有一定弹性的判断，而非一个确定的数值。针对这一问题，模糊 AHP 通过引入三角模糊数来刻画这种模糊判断，将原本精确的点值判断拓展为模糊区间估计，使之更贴合人们的实际认知方式。Fuzzy AHP 方法主要由模糊判断矩阵构建和模糊权重计算两个部分组成。

（1）模糊判断矩阵构建

在模糊层次分析法中，对于某一准则层下的n个被评估指标，专家需要对所有两两比较对给出相对重要性的模糊判断。设共有L位专家参与评估，对于指标i与指标j的相对重要性判断，第k位专家给出的三角模糊数记为$\tilde{a}_{ij}^{(k)} = (l_{ij}^{(k)}, m_{ij}^{(k)}, u_{ij}^{(k)})$，其中$k = 1, 2, \ldots, L$。其中，参数$l$（Lower bound）表示模糊数下界，代表专家判断的最保守估计；专家的模糊判断通常基于 Saaty 的 1-9 标度进行扩，参数m（Most possible value）表示模糊数的核值，代表专家最倾向的判断值；参数u（Upper bound）表示模糊数上界，代表专家判断的最大容忍范围。

为综合多位专家的判断意见，采用算术平均法进行群体意见聚合，其公式如下所示。

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{1}{L} \otimes \left(\tilde{a}_{ij}^{(1)} \oplus \tilde{a}_{ij}^{(2)} \oplus \cdots \oplus \tilde{a}_{ij}^{(L)}\right) = \left(\frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L} l_{ij}^{(k)},\ \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L} m_{ij}^{(k)},\ \frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L} u_{ij}^{(k)}\right) \tag{8}$$

聚合后的群体模糊判断矩阵表示为$\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n\times n}$。

（2）模糊权重计算

对于模糊判断矩阵$\tilde{A}$，模糊权重的计算是模糊 AHP 方法的核心环节。本文采用模糊几何平均法进行权重计算。

首先计算第i个指标的模糊几何平均数$\tilde{r}_i$：

$$\tilde{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \cdots \otimes \tilde{a}_{in})^{\frac{1}{n}} = \left(\left(\prod_{j=1}^{n} l_{ij}\right)^{\frac{1}{n}},\ \left(\prod_{j=1}^{n} m_{ij}\right)^{\frac{1}{n}},\ \left(\prod_{j=1}^{n} u_{ij}\right)^{\frac{1}{n}} \right) \tag{9}$$

其次，将所有指标的模糊几何平均值进行归一化处理，得到模糊权重$\tilde{w}_i$

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \cdots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = \left(\frac{l_i}{S},\ \frac{m_i}{S},\ \frac{u_i}{S}\right) \tag{10}$$

其中，$S = \sum_{k=1}^{n}(l_k + m_k + u_k)$为归一化因子。归一化后的模糊权重满足$\sum_{i=1}^{n} \tilde{w}_i \approx (1,\ 1,\ 1)$，确保了权重向量的完备性。

对于三角模糊数$\tilde{w}_i = (l_i,\ m_i,\ u_i)$，使用重心法进行去模糊化，计算公式为：

$$w_i = \frac{l_i + m_i + u_i}{3} \tag{11}$$

最后，对去模糊化权重进行归一化处理，公式如下：

$$w_i' = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i},\quad \sum_{i=1}^{n} w_i' = 1 \tag{12}$$

2.2 主成分分析法（PCA）客观权重计算

对于客观权重对分析，本文采用主成分分析法（PCA）。该方法对原理是通过线性变换将高维数据投影到低维空间，在保留主要信息的前提下实现数据的有效简化。当面对权重确定问题时，PCA 的基本假设是指标的权重应与其在评估体系中的信息贡献度成正比，即方差较大的指标通常能够提供更多的区分信息，因而应赋予较高的权重；反之，变异程度较小的指标提供的信息量有限，权重应相对较低。主成分分析法客观权重计算包含协方差矩阵计算、特征值及特征向量求解以及最终的客观权重计算。

（1）协方差矩阵计算

设原始评估数据矩阵为$X = (x_{ij})_{m\times n}$，其中m为评估对象（或样本）数量，n为指标数量，x_{ij}表示第i个评估对象在第j个指标上的取值。

首先，采用 Z-score 标准化方法去除数据量纲的影响，将其转换为 0 均值、标准差为 1 的正态分布，确保所有指标在后续分析可互相比较。Z-score 标准化计算公式为：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x_j}}{s_j} \tag{13}$$

式中，$\bar{x_j} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} x_{ij}$为第$j$个指标的样本均值，$s_j = \sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}\left(x_{ij} - \bar{x_j}\right)^2}$为第$j$个指标的样本标准差，$z_{ij}$为标准化后的数据值。标准化后的数据矩阵记为$Z = \left(z_{ij}\right)_{m\times n}$。

则协方差矩阵 R 定义为：

$$R = \frac{1}{m-1} Z^{\top} Z \tag{14}$$

（2）特征值与特征向量求解

主成分分析的核心是求解相关矩阵 R 的特征值与特征向量。对于$n \times n$的对称正定矩阵R进行特征值分解，有：

$$Ru_i = \lambda_i u_i,\ i = 1,\ 2,\ \ldots,\ n \tag{15}$$

其中，$u_i = (u_{1i},\ u_{2i},\ \ldots,\ u_{ni})^{\top}$为第$i$个主成分的载荷向量，表示原始指标与该主成分之间的线性关系。特征值λ_i的物理含义是第i个主成分的方差，即该主成分所携带的信息量。上述公式可通过 eig 函数求解得到。

（3）客观权重计算

基于特征值与特征向量，计算各主成分的贡献率。第i个主成分的方差贡献率定义为：

$$\eta_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^{n}\lambda_j} = \frac{\lambda_i}{n} \tag{16}$$

综合考虑各主成分的贡献率，每个指标的客观权重可通过载荷向量与贡献率向量的加权计算得到：

$$w_i^{PCA} = \sum_{j=1}^{n} \eta_j \cdot \sqrt{\lambda_j} u_{ij} \tag{17}$$

对得到的客观权重向量进行归一化处理，得到每个指标的客观权重值。

$$w_i^{PCA\prime} = \frac{w_i^{PCA}}{\sum_{i=1}^{n} w_i^{PCA}} \tag{18}$$

2.3 离差最大化权重组合方法

为避免主观权重与客观权重的简单加权平均掩盖高威胁目标，本文引入离差最大化理论[15]。该理论遵循若某评价指标下各目标的指标值差异越大，该指标在排序中的区分作用就越强，应赋予更大权重的原则。

为此，本文设综合权重 $w_j = \mu w_j' + \nu w_j^{PCA\prime}$，则指标差异最大化目标函数构建为：

$$\max Z(\mu，\nu)=\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|\left(\mu w_j'+\nu w_j^{PCA'}\right)\left(x_{ij}-x_{kj}\right)\right| \tag{19}$$

其中，$\mu^2+\nu^2=1$，$\mu，\nu\geq 0$。

为求解该目标函数，采用拉格朗日乘子法，令 $D_j=\sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m}\left|x_{ij}-x_{kj}\right|$，构造拉格朗日函数如下，

$$L(\mu，\nu，\lambda)=\sum_{j=1}^{n}\left(\mu w_j'+\nu w_j^{PCA'}\right)D_j+\frac{\lambda}{2}(1-\mu^2-\nu^2) \tag{20}$$

对μ和ν求偏导并令其为 0 得到，

$$\frac{\partial L}{\partial \mu}=\sum_{j=1}^{n}w_j'D_j-\lambda\mu=0 \tag{21}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \nu}=\sum_{j=1}^{n}w_j^{PCA'}D_j-\lambda\nu=0 \tag{22}$$

解得最优组合系数 μ^* 和 ν^*：

$$\mu^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_j'D_j}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{n}w_j'D_j\right)^2+\left(\sum_{j=1}^{n}w_j^{PCA'}D_j\right)^2}} \tag{23}$$

$$\nu^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_j^{PCA'}D_j}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^{n}w_j'D_j\right)^2+\left(\sum_{j=1}^{n}w_j^{PCA'}D_j\right)^2}} \tag{24}$$

对μ^* 和 ν^*进行归一化处理，再计算$w_j=\mu w_j'+\nu w_j^{PCA'}$，得到最终的归一化组合权重矩阵。

将得到的综合权重矩阵与指标值相乘求和，即可得到对于目标 j 的威胁评估结果。

$$O_j=\sum_{i=1}^{n}w_i*X_{ji} \tag{25}$$

表 1　目标处理结果信息表

序号	目标号	目标瞬时速度/Mach	目标射程/km	飞行高度/km	雷达散射截面积/m²	剩余到达时间/min	落点位置	国别
1	T001	5.8	6400	36	0.1	5.8	区域 1	B 国
2	T002	11.8	3400	25.0	0.26	5.0	区域 3	A 国
3	T003	11.0	5200	31.0	0.06	3.5	区域 2	B 国
4	T004	8.8	10200	27.0	0.15	8.5	区域 2	C 国
5	T005	6.1	6800	39.0	0.22	4.3	区域 4	A 国
6	T006	8.1	3000	23.0	0.15	3.5	区域 2	D 国
7	T007	5.8	2200	46.0	0.4	7.8	区域 4	C 国
8	T008	10.2	2200	31.0	0.1	7.5	区域 3	D 国
9	T009	6.8	2200	58.0	0.4	8.5	区域 4	C 国
10	T010	11.0	6400	58.0	0.4	2.0	区域 1	C 国

3 仿真验证与结果分析

为验证模型的有效性，本文设计如下仿真案例：设定攻击方同时发射 10 枚高超声速武器对防御方多地进行打击，打击位置设定为区域 1-4，分别代表不同的战略价值。防御方拥有 6 部探测传感器装备，通过综合预警信息处理系统获得对来袭目标的速度、射程、飞行高度、雷达散射截面积、剩余到达时间、落点位置以及国别信息。在该仿真实验中，高超声速目标仿真弹道采用理想轨迹模型，简化了临近空间气动扰动、随机机动等非线性时变特性；预警信息处理系统对目标探测解算未考虑电磁传播损耗等环境误差以及传感器测量噪声等设备系统误差。因此，该实验仅适用于模型机理与算法有效性验证，难以完全刻画实战复杂对抗情况。仿真目标的处理结果信息如表 1 所示。

表中，A 国、B 国、C 国、D 国分别代表具备不同能力的高超声速武器发展能力的国家。将 10 个目标的处理信息数据结合本文定义的临近高超武器威胁评估体系进行指标计算，得到 10 个目标的得分矩阵如表 2 所示。

结合模糊层次分析法，每位专家直接给出各自三角模糊判断矩阵，再对对应位置的三角模糊数做算术平均，计算得到群体模糊判别矩阵，再进行归一化后，得到归一化后的主观权重计算结果如表 3 所示。

针对客观权重，采用主成分分析法 PCA 对表 2 数据进行计算，得到客观权重计算结果如表 4 所示。

利用计算得到的主观权重与客观权重结果，带入离差最大化公式，计算得到组合后权重结果如表 5 所示。

在得到针对临近高超目标的主观权重、客观权重以及组合权重后，本文对各指标权重进行对比，结果如图 3 所示。针对飞行高度、剩余到达时间等主客观权重赋值差距较大的指标项，组合权重同时考虑了数据层面的客观性与专家打分的经验性，以离差最大化为目标，给出了更为合理的指标权重，避免了主观随意性与数据片面性。

将最终计算得到的组合权重与目标探测信息指标计算结果进行加权计算，得到每个目标的综合得分，并按照得分高低给出威胁等级排序。组合权重与属性值评分结果如表 6 所示。

表 2　指标计算结果表

序号	目标号	目标瞬时速度	目标射程	飞行高度	雷达散射截面积	剩余到达时间	落点战略价值	国别威胁系数
1	T001	0.503	0.780	0.647	0.970	0.098	0.800	0.200
2	T002	0.889	0.578	0.249	0.925	0.135	0.300	0.950
3	T003	0.865	0.711	0.448	0.982	0.246	1.000	0.200
4	T004	0.765	0.942	0.309	0.956	0.033	1.000	0.400
5	T005	0.539	0.801	0.764	0.936	0.179	0.650	0.950
6	T006	0.721	0.540	0.197	0.955	0.246	1.000	0.600
7	T007	0.503	0.453	0.965	0.886	0.044	0.650	0.400
8	T008	0.835	0.453	0.448	0.970	0.049	0.300	0.600
9	T009	0.613	0.453	0.867	0.886	0.033	0.650	0.400
10	T010	0.865	0.780	0.867	0.886	0.449	0.800	0.400

表 3　模糊层次分析法主观权重计算结果表

指标名称	模糊权重	去模糊权重	归一化主观权重
目标瞬时速度	（0.105，0.172，0.273）	0.184	0.168
目标射程	（0.071，0.110，0.191）	0.124	0.115
飞行高度	（0.045，0.071，0.136）	0.084	0.077
雷达散射截面积	（0.052，0.086，0.168）	0.102	0.095
剩余到达时间	（0.118，0.209，0.340）	0.223	0.205
落点战略价值	（0.116，0.203，0.328）	0.216	0.198
国别威胁系数	（0.088，0.144，0.233）	0.155	0.142

表 4　基于 PCA 的客观权重计算结果表

指标名称	目标瞬时速度	目标射程	飞行高度	雷达散射截面积	剩余到达时间	落点战略价值	国别威胁系数
客观权重计算结果	0.157	0.137	0.155	0.147	0.123	0.145	0.136

表 5　组合权重计算结果表

指标名称	目标瞬时速度	目标射程	飞行高度	雷达散射截面积	剩余到达时间	落点战略价值	国别威胁系数
组合权重计算结果	0.163	0.126	0.116	0.119	0.163	0.174	0.139

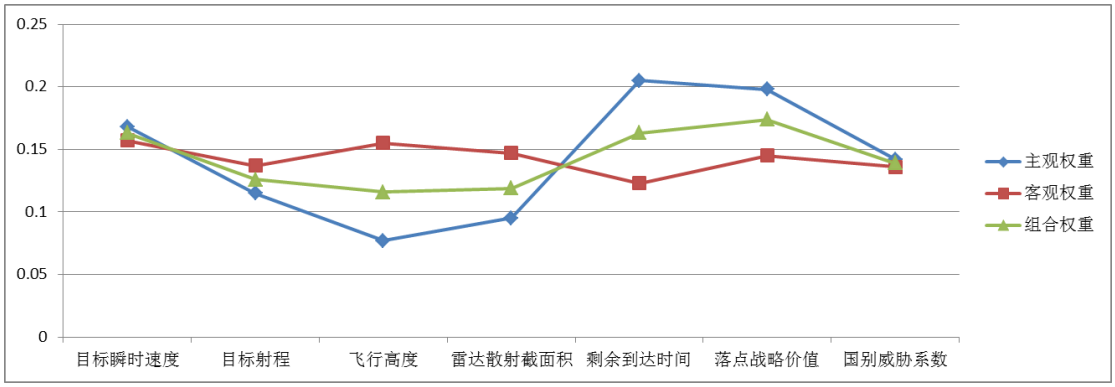


图 3　权重计算结果对比图

表 6　目标综合评估结果表

目标编号	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10
评价得分	0.553	0.563	0.640	0.626	0.663	0.618	0.532	0.504	0.536	0.712
排序结果	7	6	3	4	2	5	9	10	8	1

表中数据显示，当临近高超声速武器攻击重要地区，且剩余落地时间极短时，此时面临的威胁是极高的，如目标 T10；当攻击重要程度较低地区且具有较长时间的落地时间的临近高超目标，其威胁程度则相对较小，如目标 T8，这一威胁度值的评估结果与专家给出的威胁度结果吻合，表明本文建立的威胁度评估模型是合理的。

4 结论

本文通过对临近高超声速武器特点进行研究，设计了相关的威胁评估指标体系。为克服使用单一赋权法的偏见性，提出了一种基于主客观权重融合的综合评估模型方法，该方法由模糊层次分析法、主成分分析法和离差最大化组合赋权三部分组成，其中，模糊 AHP 通过引入三角模糊数处理专家判断的不确定性，利用模糊几何平均和重心去模糊化技术获得符合领域共识的主观权重；PCA 通过协方差矩阵特征值分解和方差贡献率分析，基于数据的统计特征确定客观权重；离差最大化方法以加权评价值区分度最大化为准则，通过拉格朗日乘数法求解带约束优化问题，实现主客观权重的最优融合。为验证所提方法的合理性，本文设计了仿真实验，通过综合评价结果体现了所提方法的有效性。在后续研究中，将进一步融入战场环境因素、拦截资源约束等决策要素，增强模型实用性。

参考文献

[1] 张晶.临近空间高超声速飞行器发展及防御策略研究[J].飞航导弹，2015(4):25-29.

[2] 王鹏飞,王光明,蒋坤,等.临近空间高超声速飞行器发展及关键技术研究 [J].飞航导弹,2019 (8):22-28.

[3] 李高飞,冯占林,陆泽健.单枚弹道导弹目标的威胁度评估方法研究[J].中国电子科学研究院学报,2021,16(1):46-50+61.

[4] 许有玺, 赫健, 陈雪波. 基于梯度模糊 TOPSIS 导弹目标的威胁评估[J]. 现代防御技术, 2024, 52(6): 33-40.

[5] 徐浩, 邢清华. 基于证据理论的助推段弹道导弹目标威胁评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(2): 9-14.

[6] Qiu S, Wang J, Zhang X, et al. Multi target threat assessment method based on improved dual variable weight[C]//Advanced Manufacturing and Automation X. Springer, 2021: 475-485.

[7] Zhao J, Guo Q, Teng L, et al. Application of Deep neural Network in Air Target Threat Assessment[C]//2019 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering. IEEE, 2019.

[8] 谢常达,范玺斌,王雪峰. 基于层次分析法对舰队防空威

胁度研究[J]. 舰船电子工程,2022,v.42;No.331(01):23-27+32.

[9] 汪伟,顾竹鑫,李海波. 基于层次分析法的低空慢速小目标威胁评估方法[J]. 信息化研究,2019,v.45;No.285(04):20-24.

[10] 赵永,李为民,刘彬,崔超. 基于改进灰色关联法的高超声速目标威胁评估模型[J]. 探测与控制学报,2014,v.36;No.166(05):80-85.

[11] 杨璐,刘付显,张涛,朱丰. 基于组合赋权 TOPSIS 法的舰艇编队空中目标威胁评估模型[J]. 电光与控制,2019,v.26;No.254(08):6-11.

[12] 李丹一. 基于贝叶斯网络的水下威胁评估方法研究[D]. 浙江大学,2021.

[13] 李继广,布国亮,董彦非,袁盼盼,樊佳乐,刘天栋. 基于改进模糊层次分析法通信无人机机场选址[J]. 兵工自动化,2023,v.42;No.301(11):83-87+96.

[14] 周华任,马亚平,郭杰,等.基于五力的武器装备作战能力评估模型[J]. 火力与指挥控制,2011,36(2):11-14.

[15] 李京峰,项华春,严雅榕,李正欣. 基于离差最大化的组合赋权评价方法及其应用[J]. 火力与指挥控制,2020,v.45;No.303(06):18-23+29.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS