



系统工程与电子技术
Systems Engineering and Electronics
ISSN 1001-506X, CN 11-2422/TN

《系统工程与电子技术》网络首发论文

题目：基于 IAHP-CRITIC-MARCOS 的多种类目标威胁评估
作者：杨天建，王星，程嗣怡，陈游，张曦，张志恒
收稿日期：2024-04-10
网络首发日期：2024-12-06
引用格式：杨天建，王星，程嗣怡，陈游，张曦，张志恒. 基于 IAHP-CRITIC-MARCOS 的多种类目标威胁评估[J/OL]. 系统工程与电子技术.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2422.tn.20241206.0929.016>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 IAHP-CRITIC-MARCOS 的 多种类目标威胁评估

杨天建¹, 王 星¹, 程嗣怡¹, 陈 游^{1,*}, 张 曦¹, 张志恒²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038;

2. 中国人民解放军 93161 部队, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 针对传统的目标威胁评估往往只面向单种类目标的问题, 从体系角度构建目标威胁评估指标体系, 并提出一种基于 IAHP-CRITIC-MARCOS 的体系目标威胁评估方法。首先, 利用区间层次分析法 (Interval Analytic Hierarchy Process, IAHP) 和基于指标相关性的权重确定方法 (Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation, CRITIC) 分别计算出各项指标的主、客观权重。在此基础上, 利用最小信息鉴别原理进行组合赋权, 以此避免单独赋权的缺陷。然后, 基于折衷解的备选方案排序法 (Measurement Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution, MARCOS) 计算各个目标威胁值, 并进行威胁排序。最后, 通过仿真实例对比分析了采用灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA)、逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)、GRA-TOPSIS 以及 MARCOS 得出的目标威胁排序结果, 验证了所提方法的科学性和有效性。

关键词: 目标威胁评估; 指标体系; 组合赋权; 基于折衷解的备选方案排序法 (MARCOS)

中图分类号: TJ 7; TN 95

文献标志码: A

Multi-type target threat evaluation based on IAHP-CRITIC-MARCOS

YANG Tianjian¹, WANG Xing¹, CHENG Siyi¹, CHEN You^{1,*}, ZHANG Xi¹,
ZHANG Zhiheng²

(1. Aviation Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;

2. Unit 93161 of the PLA, Shenyang Liaoning 110015, China)

Abstract: For the problem that traditional target threat evaluation is usually oriented only to a single type of target, a target threat evaluation index system is constructed from a system perspective and a system target threat evaluation method based on IAHP-CRITIC-MARCOS is proposed. Initially, the Interval Analytic Hierarchy Process (IAHP) and the Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation (CRITIC) method are utilized to determine the subjective and objective weights of each criterion, respectively. Subsequently, based on the principle of minimal information loss, these weights are integrated to form a comprehensive weighting system, aimed at overcoming the limitations inherent to relying solely on single-weight methodologies. Then, the Measurement Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution (MARCOS) is used to calculate each target threat value and perform threat ranking. Finally, the results of target threat ranking using Grey Relational Analysis (GRA), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), GRA-TOPSIS, and MARCOS are compared and analyzed, and the simulation example validated the scientificity and effectiveness of the proposed method.

Keywords: target threat evaluation; index system; combinatorial weighting; Measurement Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution (MARCOS)

0 引言

在现代战争中,飞机在突防过程中通常需要面对的是敌方作战体系,造成飞行员面临的战场态势复杂多变。作为执行突防作战任务的关键一环,有效的目标威胁评估能够帮助飞行员估计目标威胁大小,是飞行员能够迅速做出正确决策的基础,具有重要的现实意义^[1]。

目标威胁评估是一项涉及多项指标的多属性决策问题^[2-4]。针对此问题,不少学者展开相关研究,并取得了丰硕的成果。文献^[5-7]针对空战对抗目标,基于空间态势威胁,建立空战目标威胁评估体系,用于评估不同空战对抗目标的威胁值;文献^[8]基于辐射源行为特征构建了一个辐射源威胁评估体系,并采用改进的雷达图法进行目标威胁评估;文献^[9]以飞机突防地空导弹为背景,分析了地空导弹对突防飞机的威胁因素,构建目标威胁评估指标体系。以上文献针对战斗机以及地空导弹构建的指标体系已经比较完善,然而,这些文献往往只针对单一种类目标进行威胁评估,未成体系,并且鲜有文献对预警机的威胁指标体系进行研究。2014年10月10日,美国海军宣布E-2D已具备一定作战能力^[10],并且文献^[11]也表明预警机可直接或间接指挥控制导弹,使得对于预警机所造成的威胁不可忽略。

在对不同目标进行威胁排序时,除去传统的简单加权法外,文献^[3]采用逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS),计算不同方案与理想解的贴近程度从而进行排序。文献^[12]将灰色关联分析法(Grey Relational Analysis, GRA)和TOPSIS进行结合,进一步提升了威胁排序的准确性。实际上,文献^[13]提出了基于折衷解的备选方案排序法(Measurement Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution, MARCOS),并且该方法已在交通^[14]、选址^[15]、供应商选择^[16]、配电网设备风险评估^[17]和安全风险^[18]等方面进行了应用,但未应用到目标威胁评估领域。MARCOS与TOPSIS原理上具有一定的相似性,但MARCOS更加简便且稳定性更强。因此,本文使用MARCOS方法进行目标威胁排序。

本文的目标威胁评估对象包括预警机、战

斗机和地空导弹等三种不同种类的目标,在传统的威胁评估指标体系的基础上,补充了信息因素对目标威胁值的影响。然后,分别利用区间层次分析法(Interval Analytic Hierarchy Process, IAHP)方法和基于指标相关性的权重确定方法(Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation, CRITIC)得到各项指标主、客观权重,再利用最小信息鉴别原理对二者进行结合,得到各项指标的组合权重。在此基础上,基于MARCOS方法对各个目标威胁值进行综合评估,并根据去效用函数值进行威胁排序。最后,通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 目标威胁评估指标体系

在体系条件下,参战双方对抗过程中,除依赖本身固有能力进行作战外,还能通过信息化手段,与其他目标交换信息,辅助提升作战效能。因此,在建立目标威胁评估指标体系时,除考虑目标单独作战能力外,还需将其协同作战能力纳入其中进行考虑。在面对敌方包含战斗机,预警机和地空导弹部队的突防作战场景中,需从物理域、行为域和信息域进行全面考虑^[19,20]。本文建立了一个包含目标固有能力强、空间态势威胁、辐射源威胁和信息能力威胁四个方面的目标威胁评估数学模型。

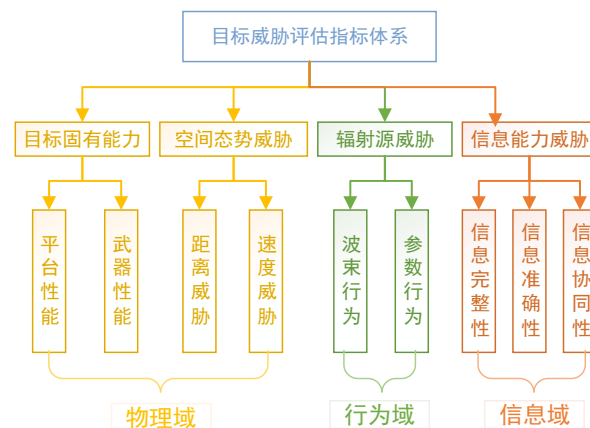


图1 目标威胁评估指标体系

Fig. 1 Target threat evaluation index system

1.1 目标固有能力强

目标的固有能力强,由平台的性能和武器作战能力两个方面组成。

指标1:平台固有能力强指标,是反映作战平台性能的测度。包括平台机动性能 M_o 、目标

探测能力 Pr 、目标跟踪制导能力 Gui 、生存力 Sur 和作战范围 R 等 5 个主要因素。将平台固有性能定义为：

$$T_{11} = (\ln Mo + \ln Pr + \ln Gui) \cdot Sur \cdot R \quad (1)$$

指标 2：武器固有性能，是反映武器对己方突防飞机毁伤性能的测度，主要受目标挂载武器数量 N 、类型 L 以及电子战能力 EW 共同决定。定义武器固有性能为：

$$T_{12} = \ln(N * L + EW + 1) \quad (2)$$

1.2 空间态势威胁

指标 1：距离威胁^[21]，体现了敌我之间距离 D 的变化对雷达探测概率和导弹杀伤概率的影响。将距离威胁定义为：

$$T_{21} = \begin{cases} 0 & D \geq D_{Rmax} \\ 0.5e^{-\frac{D-D_{MAmax}}{D_{Rmax}-D_{MAmax}}} & D_{MAmax} \leq D < D_{Rmax} \\ 2^{-\frac{D-D_{MEmax}}{D_{MAmax}-D_{MEmax}}} & D_{MEmax} \leq D < D_{MAmax} \\ 1 & D_{MEmin} \leq D < D_{MEmax} \end{cases} \quad (3)$$

式中， D_{Rmax} 为雷达最大探测距离， D_{MAmax} 和 D_{MAmin} 为攻击区边界距离， D_{Emax} 和 D_{Emin} 为不可逃逸距离。

指标 2：速度威胁^[8]，是能够反映敌我双方位置相对变化的快慢和趋势的一项指标，本文将其划分为 5 个等级，分别为 $V_1 = \{\text{高速远离}\}$ 、 $V_2 = \{\text{低速远离}\}$ 、 $V_3 = \{\text{盘旋}\}$ 、 $V_4 = \{\text{低速接近}\}$ 、 $V_5 = \{\text{高速接近}\}$ 。其威胁值定义如表 1 所示

表 1 速度威胁对应表

Table 1 Velocity threat mapping table					
威胁等级	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
T_{22}	0.15	0.46	0.51	0.54	0.85

1.3 辐射源威胁

指标 1：波束行为，主要反映的是目标发射窄波束在指定空域的扫描情况。根据波束行为，将其威胁划分为 3 个等级，即 $Beam_1 = \{\text{短暂驻留}\}$ 、 $Beam_2 = \{\text{循环驻留}\}$ 和 $Beam_3 = \{\text{长时驻留}\}$ ，不同波束行为的威胁值如表 2 所示。

表 2 波束行为威胁对应表

Table 2 Beam behavior threat mapping table			
威胁等级	$Beam_1$	$Beam_2$	$Beam_3$
T_{31}	0.14	0.5	0.86

指标 2：参数行为，主要是通过雷达工作状态变化反映导弹发射的相关信息。主要包括载频 RF 、脉宽 PW 和信号重频 PRI 等要素。通常，载频越高，获取的数据率越高，对于速度信息的探测越准确。而脉宽和信号重频则会影响距离探测的精度和最大范围。综合二者因素影响，引入占空比 DR ，其定义为：

$$DR = \frac{PW}{PRI} \quad (4)$$

将参数行为的威胁程度定义如表 3 所示

表 3 参数行为威胁对应表

Table 3 Parameter behavior threat mapping table

威胁等级	低占空比	高占空比	低载频	高载频	低占空比	高占空比
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
T_{32}	0.055	0.11	0.18	0.43	0.25	0.695

1.4 信息能力威胁

指标 1：信息完整性，是反映获取到的目标关键参数和非关键参数数量的多少。通常，载机会集中探测资源优先对默认威胁程度大的目标进行探测，以完整掌握目标信息。因此，目标完整性越大，代表目标威胁等级越大。但当目标执行电子对抗措施时，会降低载机获取目标信息的完整性，目标信息完整性与威胁程度不成正比。定义信息完整性指标函数为：

$$T_{41} = \delta_1 \frac{1}{F_r} \sum_{i=1}^{F_r} \frac{n_r(t)}{n(t)} + \delta_2 \frac{1}{F_r} \sum_{i=1}^{F_r} \frac{m_r(t)}{m(t)} + U \quad (5)$$

式中， δ_1 、 δ_2 分别代表关键参数和非关键参数的重要程度，本文中取 $\delta_1 = 0.8$ ， $\delta_2 = 0.2$ ； $m_s(t)$ 与 $n_s(t)$ ， $m_r(t)$ 与 $n_r(t)$ 分别代表战场中目标实际的与己方侦测的关键参数和非关键参数信息； F_r 代表目标信息更新频次； U 代表目标是否使用电子对抗手段， $U = 1$ 和 $U = 0$ 分别代表使用和不使用。

指标 2：信息准确性指标，是己方侦测到的特征信息与战场实际的吻合程度^[19]。吻合程度越高，代表对目标信息掌握程度越高，敌方威胁指数越高。假设，对抗过程中 $G(t)$ 和 $H(t)$ 分别代表 t 时刻己方侦测的和敌方实际的 n 维特征向量，分别表示为：

$$\begin{cases} G(t)=[g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)] \\ H(t)=[h_1(t), h_2(t), \dots, h_n(t)] \end{cases} \quad (6)$$

电子对抗手段同样会影响载机对目标信息探测的准确性。因此,定义信息准确性指标函数为:

$$T_{42}=1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{|g_i(t)-h_i(t)|}{|g_i(t)|}+U \quad (7)$$

指标 3: 信息协同性,是反映各个目标在将多个平台有机联系形成作战体系时的作用。在作战体系中,某个平台能够与其他更多的平台进行信息交互,代表该平台在作战体系中的节点支撑作用越强,为作战体系效能贡献越大。定义信息协同性指标函数为:

$$T_{43}=\frac{IN_i}{\sum_{j=1}^P IN_j} \quad (8)$$

式中, IN_i 代表与第 i 个作战平台存在信息交互的平台数量。

2 组合赋权法

实际对抗过程中,仅仅依靠人为经验判断或飞机传感器测量结果进行主观、客观赋权,容易忽略信息,造成赋权不准确^[22,23]。在确定各指标权重时,应采用组合赋权方法,将利用主观经验和客观信息,减少信息损失。

2.1 基于 IAHP 的主客观权重确定

IAHP 是一种在信息不足条件下,处理模糊问题的一种方法,能够有效体现事物的不确定性和模糊性^[24]。其计算步骤如下:

(1) 构建区间判断矩阵

依据九标度法获取指标 i 和指标 j 的相对重要程度 $[a_{ij}^l, a_{ij}^u]$, 进而区间判断矩阵 A 可表示为:

$$A=\begin{bmatrix} [1,1] & [a_{12}^l, a_{12}^u] & \dots & [a_{1n}^l, a_{1n}^u] \\ [a_{21}^l, a_{21}^u] & [1,1] & \dots & [a_{2n}^l, a_{2n}^u] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [a_{n1}^l, a_{n1}^u] & [a_{n2}^l, a_{n2}^u] & \dots & [1,1] \end{bmatrix} \quad (9)$$

(2) 一致性检验

计算 k 和 l , 公式如下:

$$k=\sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^u}}{1}} \quad (10)$$

$$m=\sqrt[n]{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^l}}{1}} \quad (11)$$

当 $k \leq 1$ 且 $l \geq 1$ 时, 区间判断矩阵一致性较好, 否则该判断矩阵需要重新构建。

(3) 求解权重

本文依据区间特征根方法计算指标对应的权重向量 W_z , 计算公式如下。

$$W_z=(w_z^l, w_z^2, \dots, w_z^j, \dots, w_z^n) \quad (12)$$

$$\sigma_j=(ka_j^l+la_j^u)/2 \quad (13)$$

$$w_z^j=\sigma_j/\sum_{j=1}^n \sigma_j \quad (14)$$

2.2 基于 CRITIC 法的客观权重确定

CRITIC 法^[25,26]是一种依据客观数据中的信息量大小计算客观权重的赋权方法。相较于熵权法, CRITIC 法在体现指标间的差异性和冲突性上效果更佳。假设共有方案 m 个, 指标 n 个, 运用 CRITIC 法确定客观权重的步骤如下:

(1) 指标标准化

为将多项指标统一到同一量纲, 需要进行标准化处理, 使各指标具有同等的效益属。针对不同类型指标的处理方法为

效益型指标:

$$s'_{ij}=\frac{s_{ij}-\min(s_j)}{\max(s_j)-\min(s_j)} \quad (15)$$

成本型指标:

$$s'_{ij}=\frac{\max(s_j)-s_{ij}}{\max(s_j)-\min(s_j)} \quad (16)$$

(2) 计算指标波动性和冲突性

指标的波动性通过标准差体现, 标准差越大, 其中反映的有用信息越多; 指标冲突性通过指标间相关系数体现, 指标与其他指标相关性越强, 表明其内容重复越多, 有用信息越少。标准差和相关系数的计算公式分别如下:

$$\xi_j=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m (s'_{ij}-\bar{s}_j)^2} \quad i=1,2,\dots,n \quad (17)$$

$$r_{ij}=\text{cov}(S'_i, S'_j)/(\xi_i \xi_j) \quad i,j=1,2,\dots,n \quad (18)$$

式中, S'_i 和 S'_j 分别表示 s' 的第 i 列和第 j 列。

(3) 客观权重计算

指标 j 的信息量 I_j 可表示为

$$I_j = \xi_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (19)$$

信息量越大, 表明其有用信息越多, 权重应取更多。则指标 j 的客观权重 w_k^j 的计算公式为

$$w_k^j = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^n I_j} \quad (20)$$

2.3 组合权重

本文依据最小鉴别信息原理确定组合权重 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$, 通过缩小组合权重与指标主、客观权重的偏差, 以此克服指标权重选取时的主观或客观局限性。确定组合权重的数学模型如下:

$$\begin{cases} \min \mathbf{W} = \sum_{i=1}^n (\omega_j \ln \frac{\omega_j}{w_z^j} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{w_k^j}) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (21)$$

由此得到组合权重为

$$w_j = \frac{\sqrt{w_z^j w_k^j}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_z^j w_k^j}} \quad (22)$$

3 基于 MARCOS 的目标威胁评估

流程

本文建立一个基于 MARCOS 的目标威胁评估体系, 如图 2 所示。首先, 基于目标的物理域、行为域和信息域特点构建目标威胁指标体系, 再利用最小鉴别信息原理, 将 IAHP 法和 CRITIC 法所计算的各项指标主观、客观权重进行结合, 得到组合权重。最后, 按照 MARCOS^[13] 的方法得到效用函数, 并进行目标威胁排序, 其处理步骤为

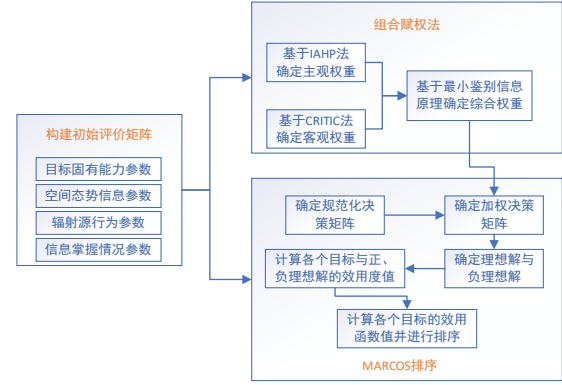


图2 目标威胁评估流程图

Fig. 2 Target threat evaluation process

(1) 形成初始评价矩阵 \mathbf{S} , 并对矩阵内各项指标参数进行标准化处理, 得到标准化矩阵 \mathbf{S}' 。

(2) 通过引入理想解 (AI) 和负理想解 (AAI), 对矩阵 \mathbf{S}' 进行扩展, 得到矩阵 \mathbf{S}_k 。

$$\mathbf{S}_k = \begin{matrix} & \begin{matrix} AI & A_1 & A_2 & \dots & A_m & AAI \end{matrix} \\ \begin{matrix} s_{AI1} & s_{AI2} & \dots & s_{AI n} \\ s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1 n} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2 n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{m n} \\ s_{AAI1} & s_{AAI2} & \dots & s_{AAI n} \end{matrix} \end{matrix} \quad (23)$$

式中, AI 和 AAI 分别表示最差和最佳的方案, 其取值方法如下:

$$s_{AIj} = \max_j (s_{ij}), i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (24)$$

$$s_{AAIj} = \min_i (s_{ij}), i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (25)$$

接着将矩阵 \mathbf{S}_k 中元素按照式 (26) 进行规范化处理, 得到 \mathbf{N}_k

$$n_{ij} = \frac{s_{ij}}{s_{ai}} \quad (26)$$

(3) 结合第 3 节求得的各指标权重系数, 得到加权矩阵 $\mathbf{V} = [v_{ij}]_{m \times n}$, 计算方法如下

$$v_{ij} = n_{ij} \times w_j \quad (27)$$

(4) 计算备选方案 i 相较于 AI 和 AAI 的效用度, 计算公式分别为

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{ai}} \quad (28)$$

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{aai}} \quad (29)$$

式中, S_i , S_{ai} 和 S_{aai} 分别表示加权矩阵 \mathbf{V} 第 i , 1 和 m 行的元素之和。 K_i^+ 和 K_i^- 的值越大, 分别代表备选方案 i 与理想解的接近程度和与负理想解距离越大, 对应目标威胁度越大。

(5) 确定备选方案 i 的效用函数值

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (30)$$

式中, $f(K_i^+) = K_i^+ / (K_i^+ + K_i^-)$, $f(K_i^-) = K_i^- / (K_i^+ + K_i^-)$ 。

4 仿真分析

4.1 仿真场景设置

在体系对抗中, 作战力量呈现复杂多元化特征, 包括地面和空中作战力量, 并且涵盖预警机用于全局指挥控制, 具有高度协同和综合作战的特点。基于此, 本文进行仿真场景设置。

假设己方为 1 架飞机配合编队其余飞机执行空战任务; 作战区域内的敌方作战力量包括: 预警机 1 架, 编号 P_1 ; 飞机三架, 编号分别为 P_2 , P_3 和 P_4 ; 地空导弹部队 2 个, 编号 P_5 和 P_6 。其中, 目标 P_1 和 P_4 具备电子对抗能力; 目标 P_2 和 P_3 均携带中距空空导弹; 目标 P_5 和 P_6 分别为中、远程地空导弹。根据战场作战信息, 参考各类型平台相关作战参数^[8,11,27], 综合得到目标的威胁属性如表 4。

4.2 目标威胁评估实验

结合第 1 节所建立的目标威胁评估模型, 将表 4 所提供的参数转化为初始评价矩阵 \mathbf{S} , 按照式 (26) 和式 (27) 进行标准化, 得到标准化矩阵 \mathbf{S}' , 如表 5 所示。

按照第 2 节组合赋权步骤, 首先确定各指标主观权重。根据专家咨询分别构造目标层和准则层区间判断矩阵。

表 4 目标参数信息

Table 4 Target parameter information

目标编号	平台固有能力	武器固有能力	距离	速度	波束行为	参数行为	信息完整性	信息准确性	信息协同性
P_1	8.6	2.8	185	V_2	$Beam_3$	C_5	0.77	0.93	0.31
P_2	10.5	4.8	102	V_4	$Beam_1$	C_1	0.86	0.90	0.15
P_3	15.8	4.8	110	V_5	$Beam_3$	C_5	1.43	1.39	0.23
P_4	10.5	2.2	95	V_4	$Beam_2$	C_4	1.58	1.78	0.23
P_5	11.0	5.6	90	V_3	$Beam_1$	C_2	0.90	0.85	0
P_6	11.0	6.0	140	V_3	$Beam_2$	C_3	0.82	0.80	0.08

表 5 规范化矩阵

Table 5 Normalization matrix

目标	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	T_{31}	T_{32}	T_{41}	T_{42}	T_{43}
AI	1	1	1	0.85	0.86	0.43	1	1	1
P_1	0	0.16	0.24	0.46	0.86	0.25	0	0.13	1
P_2	0.27	0.68	0.10	0.54	0.14	0.06	0.11	0.10	0.48
P_3	1	0.68	0	0.85	0.86	0.25	0.81	0.60	0.74
P_4	0.27	0	0.56	0.54	0.5	0.43	1	1	0.74
P_5	0.33	0.79	0.61	0.51	0.14	0.11	0.16	0.05	0
P_6	0.33	1	1	0.51	0.5	0.18	0.06	0	0.26
AAI	0	0	0	0.46	0.14	0.06	0	0	0

$$A = \begin{bmatrix} [1,1] & [1/2,1] & [1,2] & [1/2,2] \\ [1,2] & [1,1] & [3/2,3] & [1,3] \\ [1/2,1] & [1/3,2/3] & [1,1] & [3/2,2] \\ [1/2,2] & [1/3,1] & [1/2,3/2] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$B1 = \begin{bmatrix} [1,1] & [1,3/2] \\ [2/3,1] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$B2 = \begin{bmatrix} [1,1] & [2/3,2] \\ [1/2,3/2] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$B3 = \begin{bmatrix} [1,1] & [1/3,1/2] \\ [2,3] & [1,1] \end{bmatrix}$$

$$B4 = \begin{bmatrix} [1,1] & [1/3,1/2] & [1/3,2] \\ [2,3] & [1,1] & [1,3] \\ [1/2,3] & [1/3,1] & [1,1] \end{bmatrix}$$

对矩阵逐一进行一致性检验，得到 $k_A = 0.8353$ ， $l_A = 1.1257$ ； $k_{B1} = 0.9487$ ， $l_{B1} = 1.0488$ ； $k_{B2} = 0.8563$ ， $l_{B2} = 1.1255$ ； $k_{B3} = 0.9574$ ， $l_{B3} = 1.0408$ ； $k_{B4} = 0.8423$ ， $l_{B4} = 1.1464$ ，均符合一致性判断条件。因此，区间判断矩阵符合一致性要求，进而可计算得到准则层和指标层主观权重分别为， $W_A = [0.2330, 0.1494, 0.2965, 0.3212]$ ， $W_{B1} = [0.4487, 0.5513]$ ， $W_{B2} = [0.4604, 0.5396]$ ， $W_{B3} = [0.7126, 0.2847]$ 和 $W_{B4} = [0.4556, 0.1773, 0.3672]$ ，进而可求得指标主观权重向量为 $W_z = [0.1045, 0.1284, 0.0688, 0.0806, 0.2113, 0.0852, 0.1463, 0.0569, 0.1179]$ 。

根据 2.2 节中的 CRITIC 法确定客观权重，首先通过式 (17) 和式 (18) 计算各指标的标准差以及指标间的相关系数，其中标准差为 $\xi = [0.9798, 0.9945, 0.9925, 0.9837, 1, 0.8302, 0.9766, 0.9600, 0.9985]$ ，相关系数如图 3 所示。然后，计算各指标包含的信息量为 $I = [8.0246, 8.5140, 8.4155, 8.5271, 8.4150, 7.1722, 7.8578, 7.7578, 8.3046]$ ，进而得到指标的客观权重向量为 $W_k = [0.1100, 0.1166, 0.1153, 0.1168, 0.1153, 0.0983, 0.1077, 0.1063, 0.1138]$ 。

最终，运用最小信息鉴别原理进行组合赋权，得到组合权重向量为 $W = [0.1091, 0.1246, 0.0906, 0.0988, 0.1589, 0.0931, 0.1277, 0.0792, 0.1179]$ 。主观、客观赋权以及组合赋权法的对比如图

4 所示，表明组合权重可以有效避免单独赋权的不足，既能利用专家的经验价值，又能体现各项指标对目标威胁评估的客观影响。在各项指标中，波束行为和信息完整性指标占据权重最大，而这两个指标也最能体现敌我双方对战场态势掌握情况，说明组合赋权法的合理性。

依据 MARCOS 处理流程，首先对扩展矩阵 S_k 按照式 (26)，式 (27) 进行处理，得到加权矩阵如表 6 所示。

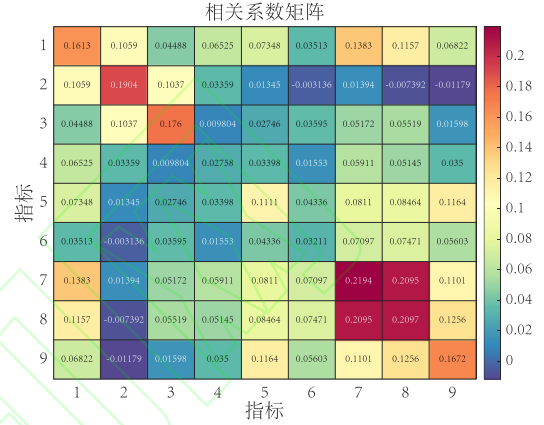


图 3 指标相关系数图

Fig. 3 Index correlation coefficient graph

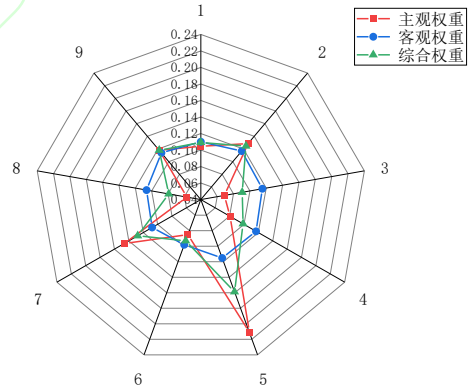


图 4 评价指标权重雷达图

Fig. 4 Evaluation index weight radar chart

根据式 (28)~式 (30) 计算得到各个方案分别与理想解和负理想解的效用度，以及效用函数值，如表 7 所示。

将本文中的 MARCOS 模型求得的目标威胁评估结果分别与 GRA^[28]，TOPSIS^[29]以及 GRA-TOPSIS 法^[12]进行对比，结果图 5 所示。

表 6 加权矩阵

Table 6 Weighting matrix

目标	T_{11}	T_{12}	T_{21}	T_{22}	T_{31}	T_{32}	T_{41}	T_{42}	T_{43}
AI	0.1091	0.1246	0.0906	0.0988	0.1589	0.0931	0.1277	0.0792	0.1179
P_1	0	0.0199	0.0218	0.0535	0.1589	0.0542	0	0.0103	0.1179
P_2	0.0295	0.0847	0.0091	0.0628	0.0259	0.0130	0.0141	0.0079	0.0566
P_3	0.1091	0.0847	0	0.0988	0.1589	0.0542	0.1035	0.0475	0.0872
P_4	0.0295	0	0.0508	0.0628	0.0924	0.0931	0.1277	0.0792	0.0872
P_5	0.0360	0.1121	0.0553	0.0593	0.0259	0.0238	0.0204	0.0040	0
P_6	0.0360	0.1246	0.0906	0.0593	0.0924	0.0390	0.077	0	0.0307
AAI	0	0	0	0.0535	0.0259	0.0130	0	0	0

表 7 效用函数值

Table 7 Utility function value

目标编号	正理想解 效用度	负理想解 效用度	效用 函数值
1	0.4364	4.7268	0.4330
2	0.3034	3.2869	0.3011
3	0.7439	8.0581	0.7381
4	0.6227	6.7449	0.6178
5	0.3368	3.6483	0.3342
6	0.4802	5.2016	0.4765

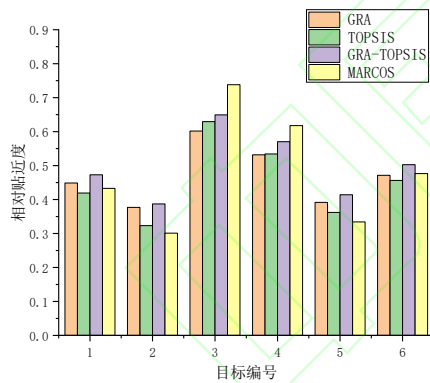


图 5 威胁评估结果

Fig. 5 Results of Threat evaluation

由图 5 可知,在四种不同方法进行威胁排序的结果中,目标 3 和目标 4 具有最大的威胁值,目标 2 和目标 5 关于权重最大的波束行为指标处于最低级的短暂驻留状态,且其他指标优势不明显,因此这两个目标威胁值最小,目标 1 和目标 6 的威胁值居中。因此,本文所采用的排序方法较为合理。同时,可以看出基于 GRA、TOPSIS 和 GRA-TOPSIS 法所得结果中,目标 2 和目标 5 的计算结果非常接近,区分度

过小,容易导致判断过程中出现优先级不清,增加误判风险等问题。因此,基于 MARCOS 模型得到的目标威胁值的区分度更大,且各个目标威胁排序结果为 $3>4>6>1>5>2$,与客观事实相符,更为合理。

在传统目标威胁评估指标体系中,通常局限在物理域与行为域对目标威胁程度进行评价,如文献^[5,6,8,30]仅包含目标固有威胁、空间态势威胁,辐射源威胁,而忽略了信息域的影响因素。为分析信息因素对目标威胁排序的影响,分别基于传统不包含信息因素的指标体系和包含信息因素的指标体系进行分析,得到目标威胁排序结果如图 6 所示。

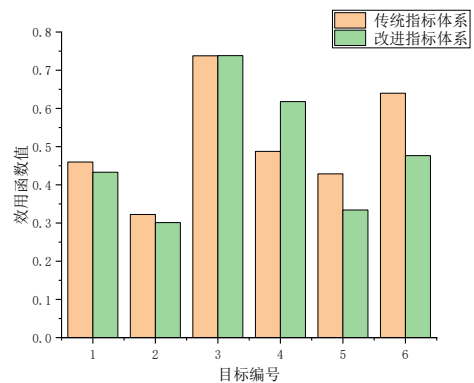


图 6 基于不同指标体系的威胁评估结果

Fig. 6 Results of threat evaluation based on different index system

由图 6 可知,基于传统目标威胁评估指标体系的目标威胁评估结果为 $3>6>4>1>5>2$,该结果与基于改进指标体系的评估结果主要差异体现在对目标 4 和 6 的排序上。在体系作战条件下,支持与其他平台进行态势共享的能力,

对于支撑体系作战而言极为重要。目标 4 能够采取有效的电子对抗手段,在博弈对抗中占据信息优势,并且目标 4 能够与体系中的 3 个平台进行连接,可将信息优势辐射到体系之中,扩大信息优势,目标 4 的威胁值应适当提高。目标 6 只有 1 个平台与其连接,态势共享能力相对较弱,其目标威胁值应适当降低。因此,基于本文所构建的指标体系的目标威胁排序结果中,目标 4 的威胁值高于目标 6 的结果合理,证明了本文所构建指标体系的合理性。

5 结论

针对以往仅面向单种类的目标威胁评估,与当前体系作战趋势不符,以及传统 TOPSIS 法在目标威胁评估时,评价结果与客观事实不一致的问题。提出一种基于 IAHP-CRITIC-MARCOS 方法进行威胁评估。主要工作包括:

(1) 从体系作战角度分析多种类目标的威胁因素,在传统目标威胁评估指标体系中,加入信息能力威胁,构建出面向多种类目标的威胁评估指标体系,提升了指标体系的完备性,仿真分析了指标的合理性。

(2) 运用最小鉴别信息原理,将基于 IAHP 法所得各项指标主观权重与基于 CRITIC 法所得客观权重进行结合,仿真验证了组合赋权方法相较于单一赋权方法具有更高的合理性与鲁棒性。

(3) 在目标威胁评估过程中引入 MARCOS 方法,并通过对比分析,验证基于 MARCOS 方法能够获得合理威胁排序结果的同时与增大了排序结果之间的区分度。

参考文献

- [1] LI J, WU Q, HUANG Y, et al. Research Analysis of Electromagnetic Target Threat Assessment in Electromagnetic Spectrum Warfare[C]//2023 International Conference on Ubiquitous Communication (Ucom).
- [2] YU X, WEI S, FANG Y, et al. Low-Altitude Slow Small Target Threat Assessment Algorithm by Exploiting Sequential Multifeature With Long Short-Term Memory[J]. IEEE SENSORS JOURNAL, 2023, 23(18): 21524-21533.
- [3] GAO Y, LI D, ZHONG H. A novel target threat assessment method based on three-way decisions under intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making environment[J]. ENGINEERING APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 2020, 87: 103276.
- [4] XU Y, WANG Y, MIU X. Multi-attribute decision making method for air target threat evaluation based on intuitionistic fuzzy sets[J]. JOURNAL OF SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS, 2012, 23(6): 891-897.
- [5] XI Z, KOU Y, LI Y, et al. A Dynamic Air Combat Situation Assessment Model Based on Situation Knowledge Extraction and Weight Optimization[J]. Aerospace, 2023, 10(12): 994.
- [6] ZHAO R, YANG F, JI L. An Extended Fuzzy CPT-TODIM Model Based on Possibility Theory and its Application to Air Target Dynamic Threat Assessment[J]. IEEE ACCESS, 2022, 10: 21655-21669.
- [7] ZHANG J, YU Y, ZHENG L, et al. Situational continuity-based air combat autonomous maneuvering decision-making[J]. DEFENCE TECHNOLOGY, 2023, 29(8): 66-79.
- [8] 王俊迪, 王星, 田元荣, 等. 基于行为特征的雷达辐射源威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 08(48): 1-16.
WANG J D, WANG X, TIAN Y R, et al. Threat Assessment of Radar Radiation Sources Based on Behavioral Characteristics[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 08(48): 1-16.
- [9] 田秀丽, 崔亦斌, 马宏刚. 地空导弹对突防飞机的威胁评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(11): 24-27.
TIAN X L, CUI Y B, MA H G. Threat Assessment Model Study for SAM to Penetration Plane[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31 (11): 24-27.

- [10] J L. E-2D Advanced Hawkeye Aircraft (E-2D AHE) selected acquisition report-SAR[R]. (2013) .
- [11] 张先超, 傅宇龙, 叶海军, 等. 以预警机为核心的空中联合作战导弹武器打击能力分析[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(1): 50-56.
ZHANG X C, FU Y L, YE H J, LU J. Missile Combat Capability Analysis in Air Joint Operations with Airborne Warning and Control System as the Center[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8 (1) :50-56.
- [12] YIN Y, ZHANG R, SU Q. Threat assessment of aerial targets based on improved GRATOPSIS method and three-way decisions[J]. MATHEMATICAL BIOSCIENCES AND ENGINEERING, 2023, 20(7): 13250-13266.
- [13] STEVIĆ Ž, PAMUČAR D, PUŠKA A, et al. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS)[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106231.
- [14] STANKOVIĆ M, STEVIĆ Ž, DAS D K, et al. A New Fuzzy MARCOS Method for Road Traffic Risk Analysis[J]. Mathematics, 2020, 8(3): 457.
- [15] ZENG S, YE A, SU W, et al. Site evaluation of subsea tunnels with sightseeing function based on dynamic complex MARCOS method[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2024, 199: 123041.
- [16] WANG Y, WANG W, WANG Z, et al. Selection of sustainable food suppliers using the Pythagorean fuzzy CRITIC-MARCOS method[J]. INFORMATION SCIENCES, 2024, 664: 120326.
- [17] 王敏, 邹婕, 王惠琳, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC-MARCOS 配电网设备风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 164-172.
WANG M, ZOU J, WANG H L, et al. Improved AHP-CRITIC-MARCOS-based risk assessment method for distribution network equipment[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 164-172.
- [18] CELIK E, GUL M. Hazard identification, risk assessment and control for dam construction safety using an integrated BWM and MARCOS approach under interval type-2 fuzzy sets environment[J]. AUTOMATION IN CONSTRUCTION, 2021, 127: 103699.
- [19] 臧垒, 蒋晓原, 王钰, 等. C⁴ISR 系统作战效能评估指标体系研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 574-577, 611.
ZANG L, JIANG X Y, WANG Y, et al. Research on Metrics of Measure of Force Effectiveness for C⁴ISR System[J]. Journal of System Simulation, 2008(3): 574-577, 611.
- [20] WANG Q, SONG G, YANG X. Mixed-attitude three-way decision model for aerial targets: Threat assessment based on IF-VIKOR-GRA method[J]. MATHEMATICAL BIOSCIENCES AND ENGINEERING, 2023, 20(12): 21514-21536.
- [21] ZHANG K, KONG W, LIU P, et al. Assessment and sequencing of air target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and dynamic VIKOR[J]. JOURNAL OF SYSTEMS ENGINEERING AND ELECTRONICS, 2018, 29(2): 305-310.
- [22] CHEN X, WANG X, ZHANG H, et al. Interval TOPSIS with a novel interval number comprehensive weight for threat evaluation on uncertain information[J]. JOURNAL OF INTELLIGENT & FUZZY SYSTEMS, 2022, 42(4): 4241-4257.
- [23] YU D, WANG H, LI B, et al. PROMETHEE-Based Multi-AUV Threat Assessment Method Using Combinational Weights[J]. JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING, 2023, 11(7): 1422.
- [24] YANG Y, CHEN G, WANG D. A Security Risk Assessment Method Based on Improved FTA-IAHP for Train Position

- System[J]. ELECTRONICS, 2022, 11(18): 2863.
- [25] DU X, WANG Y, CHEN F. Evaluation of coal-resource-based cities transformation based on CRITIC-TOPSIS model[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 103: 105271.
- [26] ZHANG B, LIU S, DONG H, et al. Data-Driven Abnormity Assessment for Low-Voltage Power Consumption and Supplies Based on CRITIC and Improved Radar Chart Algorithms[J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 27139-27151.
- [27] 王俊敏, 李涛, 贾子英. 信息化条件下空战威胁评估指标体系[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 36(5): 17-22.
- WANG J M, LI T, JIA Z Y. Threat Assessment Indexes of Air Combat Target in Conditions of Informationalization[J]. Command Control & Simulation, 2014, 36(5): 17-22.
- [28] WEI G-W. GRA method for multiple attribute decision making with incomplete weight information in intuitionistic fuzzy setting[J]. Knowledge-Based Systems, 2010, 23(3): 243-247.
- [29] LAI Y-J, LIU T-Y, HWANG C-L. TOPSIS for MODM[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 76(3): 486-500.
- [30] GAO Y, LYU N. A New Multi-Target Three-Way Threat Assessment Method with Heterogeneous Information and Attribute Relevance[J]. Mathematics, 2024, 12(5): 691.

方向为电子对抗原理与技术。

张曦 (1979-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

张志恒 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电子对抗作战指挥。

作者简介

杨天建 (2001-), 男, 硕博连读研究生, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

王星 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

程嗣怡 (1980-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

陈游 (1983-), 男, 副教授, 博士, 主要研究