

利用 GIS 技术与改进 TOPSIS 的常规导弹发射阵地局部选址方法

李亚雄*, 张鑫伟, 赵久奋, 王顺宏, 杨新智
(火箭军工程大学 作战保障学院, 陕西 西安 710025)

摘要:为准确有效地确定导弹发射阵地选址位置,克服目前阵地选址过程中主观因素较强和难以判断选址方案优劣的弊端,提出基于地理信息系统(geographic information system, GIS)与改进优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)的两阶段阵地选址方法。初选阶段,构建影响发射阵地选址的指标体系,利用改进层次分析法得到各指标综合权重,针对定量指标,采用 GIS 技术建立多环缓冲区进行空间分析,得到发射阵地选址备选方案;精选阶段,结合备选方案各指标得分,针对定性指标,利用灰色关联改进的 TOPSIS 进行综合评价,得到导弹发射阵地最优选址方案。实例验证表明:该方法具有较好的可操作性和适用性,主观因素影响较小,能够为导弹发射阵地选址提供决策依据。

关键词: 选址分析;地理信息系统;改进优劣解距离法;灰色关联分析;方案决策

中图分类号: V552+.3;P208;E253 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-2486(2024)06-077-11



论
文
拓
展

Local site selection method of conventional missile launching position based on GIS technology and improved TOPSIS

LI Yaxiong*, ZHANG Xinwei, ZHAO Jiufen, WANG Shunhong, YANG Xinzhi

(College of Operational Support, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to accurately and effectively determine the location selection of missile launch position, overcome the disadvantages of strong subjective factors and the difficulty to judge the pros and cons of the location selection scheme in the current position location process, a two-stage position location selection method based on GIS(geographic information system) and improved TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution) was proposed. In the primary selection stage, the index system affecting the location selection of launch position was constructed, and the comprehensive weight of each index was obtained by using the improved analytic hierarchy process. Aiming at the quantitative index, the multi-loop buffer zone was established by GIS technology for spatial analysis, and the selection scheme of launch position location selection was obtained. In the precise selection stage, combined with the scores of each index of the alternative scheme, and aiming at the qualitative index, the grey correlation improved TOPSIS was used for comprehensive evaluation to obtain the optimal location scheme of missile launching position. Example verification shows that this method has good operability and applicability, and the influence of subjective factors is small, which can provide decision-making basis for the location selection of missile launching positions.

Keywords: location selection; geographic information system; improved technique for order preference by similarity to an ideal solution; grey relational analysis; scheme decision-making

导弹武器因射程远、精度高等突出特点,已成为信息化战争中的主战装备。导弹发射阵地作为导弹武器执行作战任务的重要依托,其选址的优劣对导弹武器的效能发挥具有重要意义。因此,有必要针对导弹发射阵地选址问题进行深入

研究。

针对导弹发射阵地选址问题,许诚等^[1]最先讨论了陆基远程巡航导弹发射阵地选址的影响因素,建立了量化模型,但模型考虑的因素较少,不够全面。在此基础上,刘海燕等^[2]扩充了选址影

收稿日期:2022-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12171481);陕西省自然科学基金资助项目(2020JQ-485)

*第一作者:李亚雄(1979—),男,云南大理人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:z18229099507@163.com

引用格式:李亚雄,张鑫伟,赵久奋,等.利用 GIS 技术与改进 TOPSIS 的常规导弹发射阵地局部选址方法[J].国防科技大学学报,2024,46(6):77-87.

Citation: LI Y X, ZHANG X W, ZHAO J F, et al. Local site selection method of conventional missile launching position based on GIS technology and improved TOPSIS[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(6): 77-87.

响因素,并提出一种基于模糊数的阵地选址方法;姜青山等^[3]利用层次分析法讨论了阵地选址模型;王晶等^[4]也将层次分析法应用于发射阵地选址中,取得了可观的效果。但上述方法都过分依赖于专家评判,有失客观。为减小主观因素影响,宋昭峰等^[5]结合指派问题的思想,利用匈牙利法对阵地选址进行了求解;田丰等^[6]利用 Vague 集理论,实现了备选方案的选择。上述方法虽减少了对专家主观评价的依赖,但难以确定初始选址方案,具有一定的局限性。此后,也有许多学者对阵地选址问题进行了研究,其中,徐长江等^[7]利用多属性决策原理对导弹阵地进行优选,克服了权重信息不确定的问题,但该方法计算步骤烦琐,不利于快速决策。陈国生等^[8]基于反向传播(back propagation, BP)神经网络,构建了选址决策模型,但该方法需要大量样本进行学习和训练,在样本有限的前提下难以保证选址准确性。李奇等^[9]基于 Voronoi 图和邻域搜索,在配置阵地体系的同时实现了高效选址,但该方法未考虑阵地环境、社情等具体因素,方法有效性有待提高。

综上,目前导弹发射阵地选址主要存在以下问题:一是选址过程依赖于主观评价,客观性不足;二是难以判断初始选址方案的优劣;三是阵地选址的准确性和可操作性有待加强。近年来,随着地理信息系统(geographic information system, GIS)的不断发展成熟,利用 GIS 进行辅助选址取得了较为可观的效果。在这方面,刘海燕等^[10]将模糊层次分析法与 GIS 结合,研究了南极考察站的选址问题;温包谦等^[11]利用 GIS 技术和模糊综合评判,对雷达阵地选址问题进行了探讨;Rehman 等^[12]针对风力发电场的选址问题,利用 GIS 技术进行了研究;Banerjee 等^[13]将 GIS 技术应用于共享单车的选址优化问题中,确定了人口覆盖率最高的自行车站位置。

因此,针对现有发射阵地选址方法的不足,提出基于 GIS 技术与改进优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)的两阶段阵地选址方法。在初选阶段,对发射阵地选址的影响因素进行分析,并对层次分析法进行改进,得到各指标因素权重,再利用 GIS 技术对定量指标进行缓冲区分析和叠加分析,得到发射阵地选址备选方案;在精选阶段,利用灰色关联的思想对 TOPSIS 进行改进,量化定性指标,结合指标权重进行备选方案排序,最终得到发射阵地最优选址区域。

1 基于 GIS 的导弹发射阵地初选

1.1 发射阵地选址指标体系建立

导弹发射阵地的选址不同于一般民用设施,有其自身的特殊性与复杂性。在分析查阅相关文献^[1-9,14-15]的基础上,将选址因素归纳为 5 个维度作为准则层,分别为:阵地交通条件、生存防护能力、指挥通信条件、自然环境条件和社情状况。综合考虑发射阵地选址的基本要求,在各个维度下设立二级指标作为因素层。构建发射阵地选址指标体系如图 1 所示。

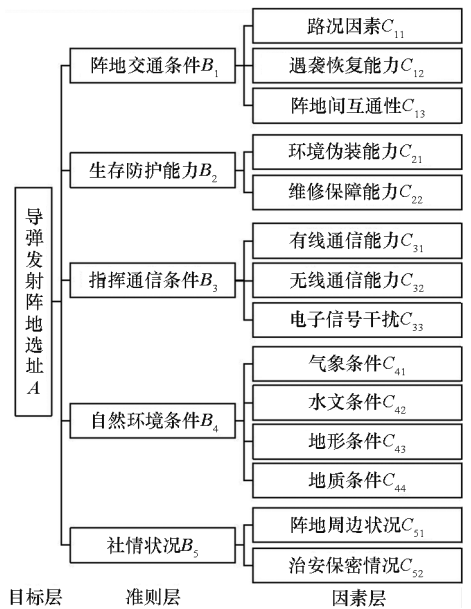


图 1 导弹发射阵地选址指标体系
Fig. 1 Index system of missile launch site selection

1.2 GIS 空间分析初选

GIS 即地理信息系统,因其强大的空间分析功能在城市规划、资源配置、交通运输等领域都发挥着重要作用^[16]。在得到发射阵地选址指标体系后,从因素层中提取出可矢量化因素,利用 GIS 空间分析进行初选,分别为:路况因素、伪装能力、气象条件、水文条件、地形条件和阵地周边状况。

1) 路况因素。导弹武器机动性强,机动时的配套装备多,且大都为大型车辆,转弯半径大,对交通条件的要求较高。在发射阵地选址过程中,应充分考虑阵地与高速公路、主要道路和二级道路的相对距离,以确保发射阵地满足机动作战的要求。因此,根据选址地区与高速公路、主要道路和二级道路的距离大小,对该项指标进行分级评分。

2) 伪装能力。随着卫星侦察技术和精确制导武器的不断发展,在进行阵地选址时,必须考虑到阵地的伪装能力,以降低被敌侦察系统发现的

概率。这就要求阵地周边地貌起伏大,垂直遮障效果好,有良好的植被覆盖便于伪装。因此,根据选址地区与森林的相对距离大小对该项指标分级评分。

3)气象条件。暴雨、冰雹等极端天气会极大影响导弹部队的作战行动。在进行发射阵地选址时,要避免极端天气频繁发生的地区。因此,根据选址地区降水量的大小,进行分级评分。

4)水文条件。发射阵地应避开河流沼泽等难以通行的区域。因此,根据选址地区距河流水系的距离大小,进行分级评分。

5)地形条件。发射阵地所选地区应地形平

坦,易于车辆机动和装备展开作业。因此,根据选址地区的坡度大小,进行分级评分。

6)阵地周边状况。由于导弹武器的敏感性和特殊性,极有可能使阵地所处区域成为敌方的重点打击对象。因此,发射阵地的选址必须远离城市建筑和村落。根据选址地区与城市建筑及村落的相对距离大小,进行分级评分。

根据发射阵地选址的具体特征及各指标因素的评价标准,将每个因素都划分为4个选址适宜等级,每个等级对应各自评分,即最适宜(4分)、较适宜(3分)、一般适宜(2分)、不适宜(1分)。具体分级标准见表1。

表1 GIS 指标评价分值
Tab.1 GIS index evaluation score

指标	分级标准	单位	最适宜 (4分)	较适宜 (3分)	一般适宜 (2分)	不适宜 (1分)
路况因素	根据与高速公路、主要道路和二级道路的相对距离划分为4个等级	km	[0,1)	[1,3)	[3,5)	[5,+∞)
伪装能力	根据与森林用地的相对距离划分为4个等级	km	[0,0.5)	[0.5,1)	[1,2)	[2,+∞)
气象条件	根据与年度降水量的大小划分为4个等级	mm	[0,300)	[300,315)	[315,330)	[330,+∞)
水文条件	根据与河流水系的相对距离划分为4个等级	km	[5,+∞)	[3,5)	[1,3)	[0,1)
地形条件	根据坡度的不同划分为4个等级	%	[0,5)	[5,10)	[10,15)	[15,+∞)
阵地周边状况	根据与城市建筑和村落的相对距离划分为4个等级	km	[5,+∞)	[3,5)	[1,3)	[0,1)

构建评价指标分值后,再利用改进层次分析法确定发射阵地选址指标体系中的各指标权重。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种解决多目标决策问题的系统分析方法^[17-18]。传统AHP仅采用特征向量法计算权重,计算简便。但采用单一方法时,结果稳定性不足,指标赋权时易造成失准现象^[19]。因此,利用包含特征向量法、算术平均法、几何平均法的组合算法进行改进。计算步骤如下。

Step 1: 构造判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, a_{ij} 为因素*i*相对因素*j*的重要程度,取值由Saaty 1~9 标度法^[20-21]得到。

Step 2: 对矩阵A中的各行向量进行几何平均,各列向量求和:

$$M_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

归一化求权重:

$$w_{i1} = M_i / \sum_{i=1}^n M_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

算术平均法求权重:

$$w_{i2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_k a_{kj}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

几何平均法求权重:

$$w_{i3} = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

计算综合权重:

$$w_i = (w_{i1} + w_{i2} + w_{i3}) / 3 \quad (7)$$

Step 3: 层次单排序及一致性检验。计算最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n w_i S_i \quad (8)$$

计算一致性指标 CI 和一致性比例 CR :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

式中, 随机一致性指标 RI 与判断矩阵的阶数有关, 取值见文献[22]。

若 $CR \leq 0.1$, 则认为通过一致性检验, 否则需调整判断矩阵, 直至满足条件。

Step 4: 层次总排序及一致性检验。

若本层次因素与上一层中各因素的层次单排序一致性指标为 $CI_i (i = 1, 2, \dots, k)$, 随机一致性指标为 RI_i , 上层各因素权重为 a_i , 则层次总排序一致性比例为:

$$CR = \frac{a_1 CI_1 + a_2 CI_2 + \dots + a_k CI_k}{a_1 RI_1 + a_2 RI_2 + \dots + a_k RI_k} \quad (11)$$

当 $CR \leq 0.1$ 时, 认为通过一致性检验。

在得到指标权重后, 利用中国地理国情监测云、地理空间数据云等开源平台搜集研究区域内的地理信息数据, 将获得的数据利用 Arc GIS 平台进行处理, 统一数据格式, 进行发射阵地选址的空间分析。具体步骤如下:

Step 1: 建立缓冲区。根据研究区域内各项指标的地理信息数据, 按照分级标准建立多环缓冲区。

Step 2: 缓冲区分析。按照指标评价分值, 对每一环缓冲区赋予相应评分。

Step 3: 叠加分析。将各指标的多环缓冲区进行叠加, 得到发射阵地选址适宜区的备选方案。若无备选方案, 则需调整指标分级标准, 重新进行分析。

Step 4: 加权计算。结合改进层次分析法得到的指标权重, 利用栅格计算器得到地区评分。计算公式为:

$$Q = \sum_{k=1}^6 w_k q_k \quad (12)$$

其中, Q 为总区域评分, w_i, q_i 分别为 6 个指标因子的综合权重及区域评分。

得到区域评分后, 通过自然断裂法进行筛选, 最终得到发射阵地选址备选方案。

2 基于改进 TOPSIS 的发射阵地精选

初选阶段, 利用 GIS 空间分析对量化指标进行分析, 得到了发射阵地的备选选址方案。在此基础上, 针对定性指标, 通过专家打分进行量化, 再利用灰色关联改进的 TOPSIS 进行备选方案的综合评价, 得到最优选址方案。

TOPSIS 是多目标决策中的一种常用方法。^[23] 该方法能够利用相对正、负理想解的欧式距离作为各方案优劣的分析依据, 客观性强。但距离仅体现了位置关系, 难以反映各方案之间的态势变化和关联程度^[23-25]。为克服这一不足, 利用灰色关联的思想对 TOPSIS 进行改进。

灰色关联是根据各因素之间变化趋势的相似性来衡量因素间关联程度的一种方法^[26]。灰色关联能够量化系统中各因素的态势变化, 较好地反映各方案之间的相似程度^[27]。因此, 将灰色关联引入 TOPSIS 中, 利用关联度量方案的相似程度, 对各备选方案进行综合评价。

精选阶段, 利用灰色关联对 TOPSIS 进行改进, 建立选址备选方案的综合评价模型, 对备选方案进行优劣排序, 最终得到最优选址方案。具体步骤如下:

Step 1: 构造决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 。将初选阶段的区域评分作为定量指标分值, 通过专家打分获得定性指标分值, 得到矩阵 A 。

Step 2: 构建标准化矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Step 3: 构造加权矩阵 C 。利用初选阶段得到的权重向量 w 求得 C 中各元素, 即:

$$c_{ij} = b_{ij} w_j \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

Step 4: 计算正负理想解。设正理想解为 C^* , 负理想解为 C° 。

$$c_j^* = \max_i c_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$c_j^\circ = \min_i c_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

Step 5: 计算各备选方案至正理想解与负理

想解的欧式距离:

$$\begin{cases} D_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^*)^2} \\ D_i^\circ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^\circ)^2} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

Step 6: 计算各备选方案至正理想解与负理想解的灰色关联度 G_i^* 、 G_i° 。其中,第 i 个备选方案与正负理想解关于第 j 个评价指标的灰色关联度 g_{ij}^* 、 g_{ij}° 为:

$$\begin{cases} g_{ij}^* = \frac{\min_i \min_j |c_j^* - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |c_j^* - c_{ij}|}{|c_j^* - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |c_j^* - c_{ij}|} \\ g_{ij}^\circ = \frac{\min_i \min_j |c_j^\circ - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |c_j^\circ - c_{ij}|}{|c_j^\circ - c_{ij}| + \rho \max_i \max_j |c_j^\circ - c_{ij}|} \end{cases} \quad (18)$$

其中, ρ 为分辨系数,一般取 $0.5^{[28]}$ 。

则各备选方案至正、负理想解的灰色关联度为:

$$\begin{cases} G_i^* = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g_{ij}^* \\ G_i^\circ = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m g_{ij}^\circ \end{cases} \quad (19)$$

Step 7: 对备选方案的欧式距离和灰色关联度进行归一化处理并合并分析。归一化公式为:

$$Y_i^{\text{new}} = \frac{Y_i}{\max_{1 \leq i \leq m} Y_i} \quad (20)$$

其中, Y_i 表示 D_i^* 、 D_i° 、 G_i^* 、 G_i° 。当备选方案距正理想解越近时, D_i° 和 G_i^* 越大,反之越小。因此,合并公式为:

$$\begin{cases} s_i^* = \alpha D_i^\circ + \beta G_i^* \\ s_i^\circ = \alpha D_i^* + \beta G_i^\circ \end{cases} \quad (21)$$

其中, α 和 β 分别代表决策者对位置和形状的偏好程度, $\alpha, \beta \in [0, 1]$ 且 $\alpha + \beta = 1$ 。

Step 8: 计算备选方案的综合评价价值。

$$f_i^* = \frac{s_i^*}{s_i^* + s_i^\circ} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

Step 9: 根据综合评价价值的大小对各备选方案进行排序,最终得到最优方案。

3 实证研究

本文以某地区为研究对象进行实证分析。该地区面积约 915 km^2 。

3.1 基于 GIS 的方案初选

3.1.1 确定选址指标体系权重

根据图 1 的选址指标体系,邀请相关导弹专家按照 1~9 标度对准则层和因素层进行打分,得到决策矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7/3 & 5/8 & 7/2 & 3/5 \\ 3/7 & 1 & 2/5 & 4/7 & 5/6 \\ 8/5 & 5/2 & 1 & 3/8 & 5/6 \\ 2/7 & 7/4 & 8/3 & 1 & 3/5 \\ 5/3 & 6/5 & 6/5 & 5/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{cases} B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5/4 & 5/3 \\ 4/5 & 1 & 2 \\ 3/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \\ B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 \\ 3/2 & 1 \end{bmatrix} \\ B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 5/4 \\ 2 & 1 & 2 \\ 4/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \\ B_4 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5/4 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 4/5 & 2 & 1 & 1/3 \\ 2 & 4 & 3 & 1 \end{bmatrix} \\ B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 5/3 \\ 3/5 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (24)$$

计算权重并进行层次单排序及一致性检验。结果见表 2。

表 2 一致性检验结果
Tab.2 Consistency test results

指标	CI	RI	CR
A	0.109 5	1.12	0.097 7
B ₁	0.009 0	0.52	0.018 0
B ₂	2.000 0	0	0
B ₃	0.003 0	0.52	0.005 0
B ₄	0.005 0	0.89	0.006 0
B ₅	2.000 0	0	0

由表 2 可知,判断矩阵均通过一致性检验。进行层次总排序及一致性检验,由式(11)得:

$$CR_{\text{总}} = 0.000 6 < 0.1 \quad (25)$$

因此,层次总排序满足一致性检验。最终得到发射阵地选址指标体系权重,见表 3。

表 3 选址模型指标权重

Tab. 3 Index weight of location model

目标层	因素层	权重	准则层	指标权重
A	B ₁	0.258 7	C ₁₁	0.106 0
			C ₁₂	0.097 1
			C ₁₃	0.055 6
	B ₂	0.117 3	C ₂₁	0.046 9
			C ₂₂	0.070 4
			C ₃₁	0.046 2
			C ₃₂	0.085 7
	B ₃	0.171 7	C ₃₃	0.039 8
			C ₄₁	0.045 0
			C ₄₂	0.021 3
			C ₄₃	0.036 5
	B ₄	0.197 1	C ₄₄	0.094 3
			C ₅₁	0.159 5
			C ₅₂	0.095 7

图 2 给出了改进方法与传统 AHP 单一方法的因素层权重对比。

由图 2 可知,传统 AHP 在计算指标权重时,由于方法不同,计算结果之间存在差异,在指标 B₁、B₂ 和 B₅ 处的权重值差异明显。其中,在指标 B₁ 处,利用特征值法和几何平均法计算得出的权重差值比最大,达 14.9%。这反映出 AHP 单一方法在计算权重时存在稳定性不强、计算误差大的弊端。而综合算法计算的权重值均介于单一方法计算的权重值之间,较好地减小了单一方法所带来的计算差异,提高了权重分析的精确性和可靠性。

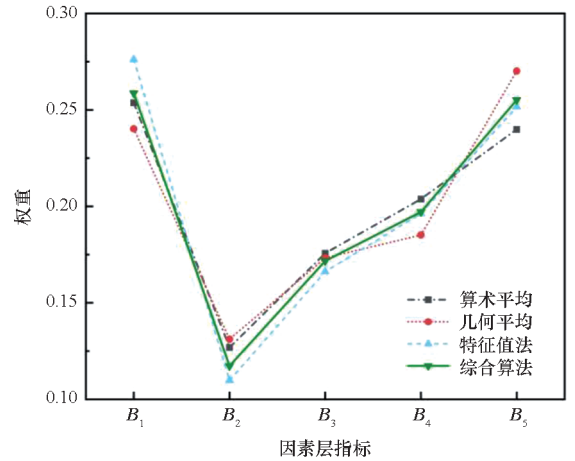


图 2 权重计算结果对比

Fig. 2 Comparison of weight calculation results

3.1.2 定量指标 GIS 空间分析

针对研究地区,基于 GIS 空间分析,分别按照路况因素、伪装能力、气象条件、水文条件、地形条件和周边状况 6 个定量指标对选址适宜区进行初选分析,具体过程见图 3。

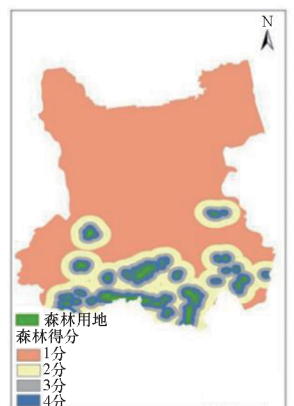
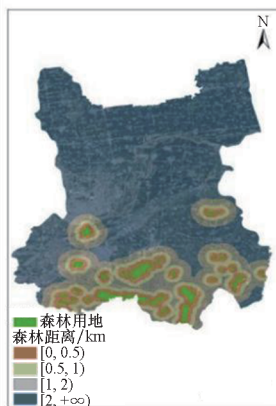
1) 路况因素:根据研究区域内的高速公路、主要道路和二级道路,建立路况缓冲区,如图 3(a)所示。按照与各级道路的相对距离对研究区域进行评分,结果见图 3(b)。

2) 伪装能力:根据区域内森林用地分布,建立森林缓冲区,见图 3(c)。可以看出,该地区植被分布主要在南部。评分结果见图 3(d)。

3) 气象条件:根据区域内的年度降水量分布(此处采用 2020 年数据),建立降水量缓冲区,见图 3(e)。评分见图 3(f)。

4) 水文条件:根据河流湖泊分布,建立水系缓冲区,见图 3(g)。评分见图 3(h)。

5) 地形条件:根据坡度分布,建立坡度缓冲区,见图 3(i)。评分见图 3(j)。



(a) 路况缓冲区分析

(b) 路况因子得分

(c) 森林缓冲区分析

(d) 伪装能力得分

(a) Buffer analysis of road conditions (b) Road condition factor score

(c) Buffer analysis of forest

(d) Fake ability score

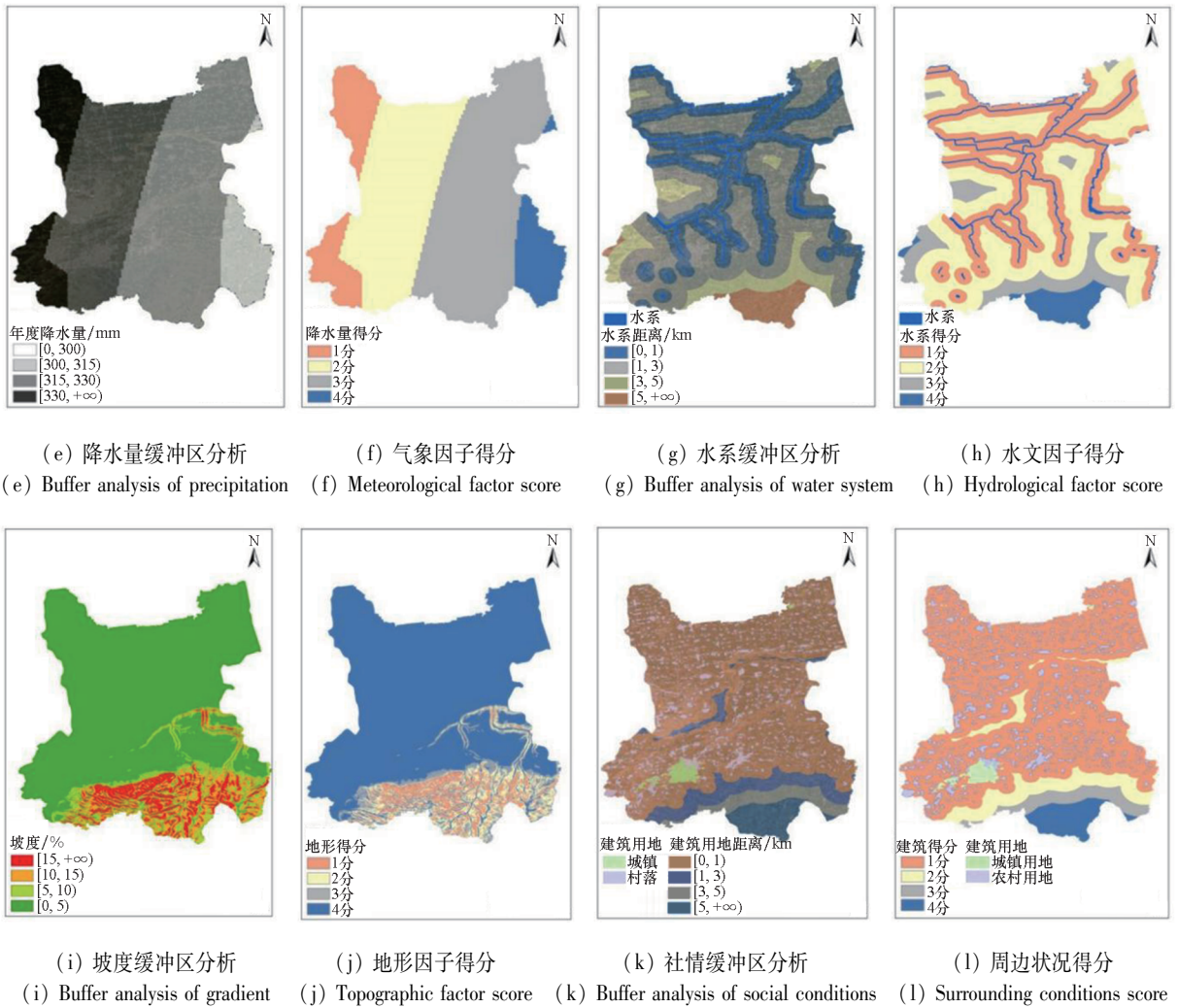


图3 GIS 初选分析过程

Fig. 3 GIS primary selection analysis process

6) 周边状况:根据城镇及村落分布,建立社情缓冲区,见图 3(k)。评分见图 3(l)。

3.1.3 备选方案确定

得到各指标因子评分后,对研究区域进行叠加分析。利用式(12),计算区域评分。得到区域评分后,通过自然断裂法进行筛选,最终得到阵地选址备选方案,如图 4 所示。

由图 4 可知,根据初选结果,在研究地区内得到了 A、B 两处阵地选址适宜区。两处区域都邻近森林植被,有利于发射任务和阵地的伪装,与河流湖泊和城镇村落距离较远,靠近主要道路,有利于装备的展开和快速机动。

3.2 基于改进 TOPSIS 的方案精选

3.2.1 定量指标评分确定

在初选阶段的基础上,通过 GIS 的属性查询功能,分别查询 A、B 两区域内 6 项定量指标的综合评分值,见表 4。

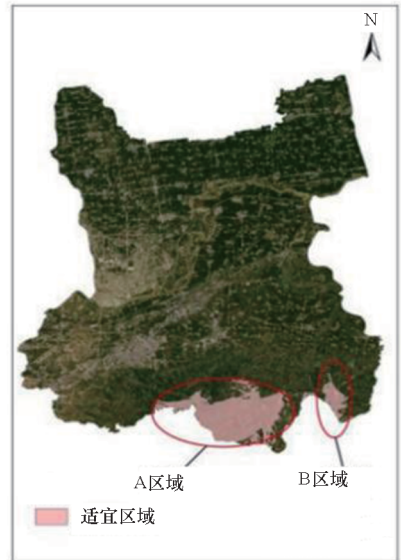


图4 阵地选址备选方案

Fig. 4 Position selection alternative programme

表 4 定量指标综合评分

Tab.4 Comprehensive score of quantitative indicators

区域	C_{11}	C_{21}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{51}
A	0.424	0.188	0.135	0.085	0.120	0.638
B	0.424	0.188	0.180	0.064	0.120	0.479

3.2.2 定性指标评分确定

邀请相关导弹专家按照 1~9 标度对 A、B 两区域的定性指标因子进行打分评价,分值取平均。评分见表 5。

表 5 定性指标综合评分

Tab.5 Comprehensive score of qualitative indicators

区域	C_{12}	C_{13}	C_{22}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{44}	C_{52}
A	3.4	3.1	4.6	4.3	5.2	3.5	3.6	4.8
B	2.8	2.8	4.6	4.5	4.9	4.7	3.2	5.2

3.2.3 TOPSIS 精选确定最优方案

Step 1:由发射阵地选址指标体系的各因子评分得到决策矩阵 **A**,对矩阵 **A** 中各元素进行标准化处理,得到标准化矩阵 **B**。矩阵具体数据以表格形式给出,矩阵 **B** 数据见表 6。

表 6 标准化矩阵数据

Tab.6 Standardized matrix data

区域	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}
A	0.707	0.772	0.742	0.707	0.707	0.691	0.728
B	0.707	0.636	0.670	0.707	0.707	0.723	0.686

区域	C_{33}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	C_{52}
A	0.597	0.600	0.799	0.707	0.747	0.800	0.678
B	0.802	0.800	0.602	0.707	0.664	0.600	0.735

Step 2:根据初选阶段得到的指标体系权重,由式(14)得到加权矩阵 **C**,数据见表 7。

表 7 加权矩阵数据

Tab.7 Weighted matrix data

区域	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}
A	0.075	0.075	0.041	0.033	0.050	0.032	0.062
B	0.075	0.062	0.037	0.033	0.050	0.033	0.059

区域	C_{33}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	C_{52}
A	0.024	0.027	0.017	0.026	0.070	0.128	0.065
B	0.032	0.036	0.013	0.026	0.063	0.096	0.070

Step 3:确定备选方案的正理想解 C^* 和负理

想解 C° ,见表 8、表 9。

表 8 备选方案正理想解

Tab.8 Positive ideal solution of options

定量指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}
C^*	0.075	0.075	0.041	0.033	0.050	0.033	0.062

定量指标	C_{33}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	C_{52}
C^*	0.032	0.036	0.017	0.026	0.070	0.128	0.070

表 9 备选方案负理想解

Tab.9 Negative ideal solution of options

定量指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}
C°	0.075	0.062	0.037	0.033	0.050	0.032	0.059

定量指标	C_{33}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	C_{52}
C°	0.024	0.027	0.013	0.026	0.063	0.096	0.065

Step 4:计算备选方案至正理想解和负理想解的欧式距离 D_i^* 和 D_i° 。由式(17)可得:

$$\begin{cases} D_i^* = (0.013\ 1, 0.038\ 1) \\ D_i^\circ = (0.038\ 1, 0.013\ 1) \end{cases} \quad (26)$$

其中,括号中的参数对应(A区域取值,B区域取值)。

Step 5:计算备选方案至正理想解和负理想解的灰色关联度 G_i^* 和 G_i° 。由式(18)、式(19)可得:

$$\begin{cases} G_i^* = (0.929, 0.859) \\ G_i^\circ = (0.859, 0.929) \end{cases} \quad (27)$$

Step 6:对备选方案的欧式距离和灰色关联度进行归一化处理。由式(20)得归一化后数据为:

$$\begin{cases} D_i^* = (0.343\ 8, 1.000\ 0) \\ D_i^\circ = (1.000\ 0, 0.343\ 8) \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} G_i^* = (1.000\ 0, 0.924\ 7) \\ G_i^\circ = (0.924\ 7, 1.000\ 0) \end{cases} \quad (29)$$

由式(21),对欧式距离和灰色关联度进行合并,其中 α 和 β 都取 0.5。

$$\begin{cases} s_i^* = (1.000\ 00, 0.634\ 25) \\ s_i^\circ = (0.634\ 25, 1.000\ 00) \end{cases} \quad (30)$$

Step 7:计算备选方案的综合评价值并排序,由式(22)得:

$$f_i^* = (0.611\ 9, 0.388\ 1) \quad (31)$$

得到方案排序为A优于B。

综上,最优方案为A区域。

3.3 结果分析及讨论

3.3.1 选址方法结果分析

利用本文提出的发射阵地选址方法,初选阶段,在研究地区内筛选出了A、B两处阵地选址备选方案。在6项定量指标中,2项指标A优于B,1项指标B优于A,其余指标持平。

精选阶段,对A、B两区域进行方案排序。结合发射阵地选址指标体系,在8项定性指标中,4项指标A优于B,3项指标B优于A,1项指标持平。最终得到A区域方案得分为0.6119分,B区域方案得分为0.3881分,最优阵地选址方案为A区域。

A区域位于研究地区南部,在路况方面,区域内包含二级道路,邻近主要道路和高速公路,适合导弹武器机动;在伪装能力方面,区域内存在大量森林植被,利于发射阵地的天然伪装;在气象条件方面,年度降水量低,自然灾害与极端天气发生概率小;在水文方面,远离河流湖泊,避开了难以通行地域;在地形方面,区域内包含大量平缓地域,在确保伪装能力的同时保证了装备的展开作业;在社情方面,远离城市建筑及村落,利于导弹部队的任务执行。整体上多方面满足了发射阵地选址条件,体现了本文发射阵地选址方法的适用性和科学性。

3.3.2 选址方法适用性分析

本文提出的两阶段选址方法主要针对导弹发射阵地选址优化问题。初选阶段基于GIS空间分析,得到满足选址要求的发射阵地备选方案;精选阶段基于改进TOPSIS,对备选方案进行综合评价和优劣排序,从而得到最优方案。经过实例验证,方法的适用性和可操作性较好。同时,该选址方法也可应用于机场、仓库、训练场坪、指挥所等其他设施选址。只需根据相应设施的选址特点,建立满足该设施选址要求的指标体系即可。

利用该方法进行选址优化也需要满足一定的前提条件。一是需建立满足选址要求的指标体系;二是需通过地理国情监测云、地理空间数据云等平台提前搜集获取所研究地区的高程坡度、交通路网、水系分布、土地利用分类等地理信息数据。

3.3.3 选址方法对比分析

现阶段,针对导弹发射阵地选址的方法研究还不多,典型方法主要有:实地勘察、模糊评

判^[2]、层次分析^[3-4]、模糊指派^[5]等。与本文所提出的两阶段选址方法相比,实地勘察法人力物力耗费大,从确定区域、勘察选点到最终确定选址方案,通常需数周时间,时间周期长,选址效率低;模糊评判和层次分析法计算简单,方法所需的定量数据较少,但选址过程中过度依赖专家的主观意见,客观分析不足,选址方案的准确性和科学性有待提高;模糊指派法基于指派思想,原理简单,但仅能在多个备选方案已知的前提下进行方案的指派分配,更适用于已有阵地使用选择问题。同时,除实地勘察法以外,上述方法均难以确定发射阵地初始选址方案,更适用于在已有选址点中进行优选。

本文提出的两阶段选址方法,能够在初选阶段确定初始方案,在精选阶段确定最优方案,减少了实地勘察的人力物力耗费,克服了过度依赖专家主观意见的弊端,并能有效确定阵地初始选址方案,实现导弹发射阵地的全流程选址。由上述对比分析可知,本文提出的两阶段选址方法的可操作性和应用性更强。

4 结论

本文针对导弹发射阵地选址问题进行了研究,提出基于GIS和改进TOPSIS的两阶段选址方法。主要结论如下:

1)方法实现了导弹发射阵地选址可视化研究,针对具体研究区域的适用性和可操作性强,能够根据选址指标得到阵地选址方案。

2)方法将GIS技术和TOPSIS进行结合,克服以往阵地选址主观性较强的弊端,避免了现场勘查的人力物力损耗。能够得到多个选址方案,可为导弹部队战备建设提供参考依据。

3)方法引入灰色关联对TOPSIS进行改进,考虑了备选方案之间的位置关系和关联程度,能够更加全面客观地得到备选方案优劣排序。

4)方法在权重确定上进行改进,使用综合方法得到选址指标体系权重,克服了单一方法计算权重的不稳定性,削减了由于方法不同导致的计算差异。

为增强本文所提方法的科学性和适应性,下一步主要从两方面进行改进:一是根据实际需求丰富阵地选址指标模型;二是优化选址指标因子与GIS空间分析的信息交互。

致谢

火箭军工程大学研究生院尤浩博士在实验数

据处理方面提供了帮助和指导,特此感谢!

参考文献 (References)

- [1] 许诚, 姜雪林, 周文松. 陆基远程巡航导弹发射阵地选址多目标决策[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(7): 41-43.
XU C, JIANG X L, ZHOU W S. Multi-targets decision on choosing launching position for ground-based long-range cruise missile [J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(7): 41-43. (in Chinese)
- [2] 刘海燕, 史志富. 基于模糊数的导弹发射阵地选址方案评价[J]. 战术导弹技术, 2004(3): 36-39.
LIU H Y, SHI Z F. Evaluation based on fuzzy number for selecting missile launch position [J]. Tactical Missile Technology, 2004(3): 36-39. (in Chinese)
- [3] 姜青山, 郑保华, 周勇. AHP 在机动岸舰导弹发射阵地选址中的应用[J]. 战术导弹技术, 2004(1): 40-43.
JIANG Q S, ZHENG B H, ZHOU Y. The application of AHP in launch position selection of mobile coast-ship missile[J]. Tactical Missile Technology, 2004(1): 40-43. (in Chinese)
- [4] 王晶, 武昌. 层次分析法在导弹发射阵地选址中的应用[J]. 电子世界, 2020(6): 157-158.
WANG J, WU C. Application of AHP in location of missile launching position[J]. Electronics World, 2020(6): 157-158. (in Chinese)
- [5] 宋昭峰, 刘付显. 基于模糊指派的阵地选址决策[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(7): 34-36.
SONG Z F, LIU F X. Multi-factor decision-making method for site selection of missile position based on fuzzy assignment[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(7): 34-36. (in Chinese)
- [6] 田丰, 邢清华, 刘侃. 基于 Vague 集的地空导弹阵地优选模型[J]. 战术导弹技术, 2010(6): 60-64, 71.
TIAN F, XING Q H, LIU K. Position selection model of surface-to-air missile troops with TOPSIS method based on Vague set theory[J]. Tactical Missile Technology, 2010(6): 60-64, 71. (in Chinese)
- [7] 徐长江, 王乐群, 谭良才. 属性权重信息未知的地空导弹阵地优选模型[J]. 现代防御技术, 2013, 41(4): 1-4, 21.
XU C J, WANG L Q, TAN L C. Position selection model of antiaircraft missile based on unknown attribute weights[J]. Modern Defence Technology, 2013, 41(4): 1-4, 21. (in Chinese)
- [8] 陈国生, 谭良才, 徐长江. 基于 BP 神经网络的防空预警雷达阵地选址决策方法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(6): 26-29, 33.
CHEN G S, TAN L C, XU C J. Air defense early warning radar position location decision-making method based on BP neural network[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(6): 26-29, 33. (in Chinese)
- [9] 李奇, 秦大国, 李稀媛. 基于 Voronoi 图和邻域搜索的阵地体系构建[J]. 军事运筹与系统工程, 2021, 35(4): 12-18.
LI Q, QIN D G, LI X Y. Design of battle field system based on Voronoi diagram and neighborhood search [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2021, 35(4): 12-18. (in Chinese)
- [10] 刘海燕, 庞小平. 利用 GIS 和模糊层次分析法的南极考察站选址研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2): 249-252, 257.
LIU H Y, PANG X P. Selection of Antarctic research stations based on GIS and fuzzy AHP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(2): 249-252, 257. (in Chinese)
- [11] 温包谦, 王涛, 成坤, 等. 基于 GIS 与模糊评价法的防空雷达阵地选址[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(10): 48-53, 62.
WEN B Q, WANG T, CHENG K, et al. Air defense radar position selection based on GIS and fuzzy evaluation method[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(10): 48-53, 62. (in Chinese)
- [12] REHMAN S, BASEER M A, ALHEMS L M. GIS-based multi-criteria wind farm site selection methodology[J]. FME Transactions, 2020, 48(4): 855-867.
- [13] BANERJEE S, KABIR M M, KHADEM N K, et al. Optimal locations for bikeshare stations: a new GIS based spatial approach [J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2020, 4: 100101.
- [14] 季军亮, 汪民乐, 韩慧华, 等. AHP 法在末段高层反导阵地防空方案选择中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(4): 126-130.
JI J L, WANG M L, HAN H H, et al. Application of AHP method for top end of anti missile system positions air defense[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(4): 126-130. (in Chinese)
- [15] 雷蕾, 辛永平, 龙正国. 基于 FAHP 和改进模糊综合评判的地空导弹阵地优选[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9): 150-153, 157.
LEI L, XIN Y P, LONG Z G. Position selection of ground-to-air missile based on FAHP and improve fuzzy synthetical evaluation [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(9): 150-153, 157. (in Chinese)
- [16] 邓旭东, 王晶. 基于 GIS 选址的文献综述[J]. 物流技术, 2015, 34(16): 45-47.
DENG X D, WANG J. Literature review of site selection based on GIS [J]. Logistics Technology, 2015, 34(16): 45-47. (in Chinese)
- [17] XIE Y H, ZHANG B H, LIU Y X, et al. Evaluation of the Karst collapse susceptibility of subgrade based on the AHP method of ArcGIS and prevention measures: a case study of the Quannan expressway, section K1379 + 300 - K1471 + 920 [J]. Water, 2022, 14(9): 1432.
- [18] 张耀天, 张旭成, 贾明顺, 等. 基于层次分析法的自适应决策评价方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(5): 1065-1070.
ZHANG Y T, ZHANG X C, JIA M S, et al. Adaptive evaluation method based on analytic hierarchy process [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(5): 1065-1070. (in Chinese)
- [19] 何璇, 高崇, 曹华珍, 等. 基于改进层次分析法的配电网指标评估[J]. 电测与仪表, 2022, 59(10): 93-99.
HE X, GAO C, CAO H Z, et al. Index evaluation of distribution network based on improved analytic hierarchy process [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 93-99. (in Chinese)
- [20] 夏亮, 杨江平, 刘根, 等. 大型相控阵雷达系统安全性综合评价[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1):

- 108 - 114.
- XIA L, YANG J P, LIU G, et al. Safety comprehensive evaluation of large phase array radar system [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(1): 108 - 114. (in Chinese)
- [21] 夏亮, 杨江平, 常春贺, 等. 大型相控阵雷达软件系统安全性研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(8): 1755 - 1762.
- XIA L, YANG J P, CHANG C H, et al. Safety study of large phased array radar software system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(8): 1755 - 1762. (in Chinese)
- [22] SHALOO, SINGH R P, BISHT H, et al. Crop-suitability analysis using the analytic hierarchy process and geospatial techniques for cereal production in North India [J]. *Sustainability*, 2022, 14(9): 5246.
- [23] 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 基于博弈论的 GRA-TOPSIS 辐射源威胁评估方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2020, 46(10): 1973 - 1981.
- DONG P Y, WANG H W, CHEN Y. GRA-TOPSIS emitter threat assessment method based on game theory [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(10): 1973 - 1981. (in Chinese)
- [24] 李勤, 李文龙, 崔凯. 基于改进 TOPSIS 法的民用建筑再生利用方案决策 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(2): 160 - 167.
- LI Q, LI W L, CUI K. Decision-making of civil building regeneration scheme based on improved TOPSIS method [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(2): 160 - 167. (in Chinese)
- [25] BU F K, HE J, LI H R, et al. Interval-valued intuitionistic fuzzy MADM method based on TOPSIS and grey correlation analysis [J]. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 2020, 17(5): 5584 - 5603.
- [26] LIANG X Y. Edge detection based on gray correlation [J]. *International Core Journal of Engineering*, 2021, 7(6): 7 - 12.
- [27] DONG H, YANG K, BAI G Q. Evaluation of TPGU using entropy-improved TOPSIS-GRA method in China [J]. *PLoS One*, 2022, 17(1): e0260974.
- [28] 靳冰洋, 刘峥, 秦基凯. 基于灰色关联度的两级实时航迹关联算法 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(7): 1330 - 1338.
- JIN B Y, LIU Z, QIN J K. Two-stage real-time track correlation algorithm based on gray correlation [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(7): 1330 - 1338. (in Chinese)