

海上要地防空反导阵地优度排序研究

王 奕¹, 赵文飞^{1,*}, 陈 健¹, 高 松¹, 周 璐²

(1. 海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92199 部队, 山东 青岛 266000)

摘 要: 针对海上要地防空反导作战中发射阵地优度排序问题, 结合要地面积较小、各备选阵地自然环境条件差别不大的实际情况, 提出一种以各阵地与保卫目标间距离来衡量阵地优度的评价指标体系构建方法。首次将各己方目标的重要度作为对应评价指标的权值, 并提出一种基于网页排名(PageRank, PR)算法的评价指标赋权方法。通过算例仿真可得, 本文提出的方法能够给出科学、准确的备选阵地优度排序, 为解决海上要地防空反导阵地选择问题提供了一种新思路、新方法。

关键词: 海上要地; 防空反导; 阵地; 排序; PageRank 算法

中图分类号: TP 303, E 074

文献标志码: A

DOI:10.12305/j.issn.1001-506X.2022.06.18

Research on priority ranking of air defense and anti-missile positions in important place at sea

WANG Yan¹, ZHAO Wenfei^{1,*}, CHEN Jian¹, GAO Song¹, ZHOU Lu²

(1. School of Coastal Defense, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. Unit 92199 of the PLA, Qingdao 266000, China)

Abstract: Aiming at the issue of the priority ranking of launching positions in air defense and anti-missile operations at sea, combined with the fact that the area of the key regions is small and the natural environmental conditions of the alternative positions are not very different, this paper proposes an evaluation index system construction method that measures the superiority of positions by the distance between each position and the defended target. For the first time, the importance of each target on our own side is used as the weight value of the corresponding evaluation index, and an evaluation index assignment method is proposed based on the PageRank (PR) algorithm. The method proposed in this paper can give a scientific and accurate ranking of the superiority of alternative positions, which provides a new idea and a new method to solve the problem of choosing air defense and anti-missile positions in island strongholds.

Keywords: important place at sea; air defense and anti-missile; position; ranking; PageRank (PR) algorithm

0 引 言

海军岸防兵部队的防空反导阵地主要指海军岸防兵部队部署作战装备的基本场所,阵地的优劣对岸防部队技战术性能的发挥有着重要的影响。在现代高技术条件下的海上要地防空反导作战任务中,合理的阵地选择不仅能最大限度地保卫己方重点目标安全,而且能够确保我方防空兵力的装备保障和快速机动。因此备选阵地的优良程度是影响系统

作战效能发挥的重要因素之一,不少学者针对此类问题从不同角度进行了研究。邱学军^[1]提出了一种先进行局部优化再组合赋权的指标权值计算方法,避免了获取有关地空导弹部队评价指标偏好信息的困难;文献[2]针对战时导弹阵地快速选择问题,建立了改进的反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)评价模型,并通过数值仿真验证了模型的可用性;唐克等^[3]运用模糊决策思想,分别采用评分法与布林法对基本炮阵地选择问题进行了分析。

收稿日期:2021-04-07; 修回日期:2021-11-15; 网络优先出版日期:2022-03-10。

网络优先出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20220310.1753.014.html

基金项目:全军军事类研究生资助课题(JY2019B118)资助课题

* 通讯作者。

引用格式:王奕, 赵文飞, 陈健, 等. 海上要地防空反导阵地优度排序研究[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(6): 1920-1926.

Reference format: WANG Y, ZHAO W F, CHEN J, et al. Research on priority ranking of air defense and anti-missile positions in important place at sea[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(6): 1920-1926.

虽然相关研究较多,但未见针对海上要地防空反导阵地优度排序的论文。海军岸防兵防空反导阵地的选择需满足武器装备自身性能和实际作战相关要求,因而通常需考虑发射阵地的自然条件、附近的设施设备状态、与保卫目标位置等关系。但在保卫海上要地作战时由于海上面积较小,自然条件差异较小,各阵地受周边设施的影响较大。因此本文构建了基于阵地与保卫目标距离的指标评价体系,并提出了一种基于网页排名(PageRank, PR)算法的评价指标赋权方法。

1 PR 算法概述

PR 算法是谷歌公司发明的一种算法,其应用使得搜索的相关性有了质的飞跃,较好地解决了网页搜索结果中的排序问题。其核心思想是在因特网上若某一网页被很多其他网页链接,则说明其受到普遍的承认和信赖,则其排名越高。具体计算步骤如下:

设向量 $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_N)^T$ 为 N 个网页的排名。矩阵 \mathbf{A} 为各网页间的链接数目:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} & \cdots & a_{1M} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} & \cdots & a_{2M} \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} & \cdots & a_{mM} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{Mn} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix}$$

式中: a_{mn} 代表第 m 个网页指向第 n 个网页的链接数。

设 \mathbf{B}_i 为第 i 次迭代结果,则

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{A}\mathbf{B}_{i-1} \quad (1)$$

在计算 PR 向量 \mathbf{B} 时,假设所有 PR 均为 $1/N$,即

$$\mathbf{B}_0 = \left(\frac{1}{N}, \frac{1}{N}, \dots, \frac{1}{N} \right)$$

显然,通过式(1)的迭代计算, \mathbf{B}_i 最终会收敛,即 \mathbf{B}_i 无限趋近于 \mathbf{B} ,此时 $\mathbf{B} = \mathbf{A} \times \mathbf{B}$,停止迭代运算,此时的向量 \mathbf{B} 即为网页的排名。

本文考虑借鉴 PR 算法思想,将海上防空要地反导作战时己方每个目标视作一个网页,将各目标在不同关系下的连接视作各网页之间的链接数。通过上述步骤计算后得到的向量 \mathbf{B} 即为各己方目标的重要程度,也是阵地优度评价指标体系中各指标的权值。运用此权值矩阵乘以各指标的取值即可获得各阵地的优度排序。

提出的基于 PR 算法的赋权方法,省去了采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定指标权值时,需要人为分析各指标间重要程度的步骤,避免了主观因素对评估结果的影响。与接近理想点法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)相比,本文的方法省去了确定最优、最劣阵地属性与计算各阵地属性向量与样本向量距离的过程,降低了阵地排序过程的复杂程度。同时提出的方法能够较为全面地分析不同关系下各己方目标的重要程度,为阵地优度排序提供合理指标权值,给出合理准确的阵地排序结果。

2 模型假设与评价步骤

在进行海上要地防空反导阵地的选择时往往需要考虑阵地自然属性(如攻击扇面、水平高度、平整度等)与来袭目标特征(目标类型、目标高度、攻击角度等因素)。但由于海上要地具有地域狭小,要地 360° 全向遭受空袭概率相等以及海拔高度、地面平整度基本一致等自身特点。本文从实际战场环境出发,同时为简化研究复杂程度,突出验证本文提出阵地优度评价方法的目的,做出以下假设。

2.1 模型假设

- (1) 假设海上要地各个方向受到敌方空袭的概率相同;
- (2) 由于海上要地面积较小,认为各备选阵地的海拔高度、平整度、攻击扇面等自然条件一致;
- (3) 当自然条件差别不大时,主要考虑将防空反导阵地选址在离我方重点保护设施尽量远的地方,以减少防空反导装备被袭击时对重要设施的毁伤;同时应离维修、保障装备尽量近,以提高维修保障速度^[4-7];
- (4) 构建海上要地防空反导作战体系想定如图1所示。

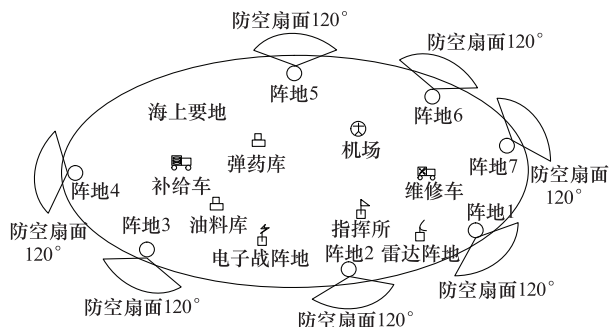


图1 某海上要地防空反导作战体系示意图

Fig.1 Schematic diagram of air defense and anti-missile warfare system for an important place at sea

2.2 海上要地防空反导阵地评价步骤

步骤1 构建海上要地防空反导阵地评价指标体系。

步骤2 明确海上要地己方目标个数及所有相互关系数目。

步骤3 构建海上要地己方目标相互关系模型,得出己方目标相互关系矩阵。

步骤4 参照文献[8]中的方法计算出各己方目标的重要度值 r_i ,并按下式计算出各评价指标的权值 w_i :

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n (r_1 + r_2 + \dots + r_n)} \quad (2)$$

步骤5 按下式计算得出各阵地的优度值:

$$C = \sum_{i=1}^n (w_1 l_1 + w_2 l_2 + \dots + w_n l_n) \quad (3)$$

式中: l_i 为各评价指标的归一化取值^[9-14]。

3 构建阵地评价指标体系

对防空反导阵地进行优度排序时,首先要确定对阵地优劣程度影响较大的性能指标,在其他阵地评价论文中往

往会选取备选阵地的攻击扇面、阵地海拔、隐蔽性、道路便捷性等评价指标来构建评价指标体系。但受海上要地特殊自然环境的影响,海上要地各备选阵地的自然条件相差一般不大,阵地的优劣往往受海上要地的建筑及装备影响较大^[15-18]。因此本文根据战场实际情况,以各备选阵地距海上要地主要装备设施的距离来构建防空反导阵地优度评价指标体系,如图 2 所示^[19-20]。

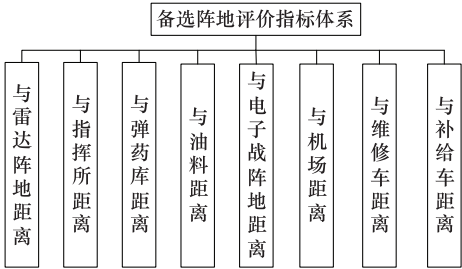


图 2 海上要地防空反导阵地评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of air defense and anti-missile positions for important place at sea

4 基于 PR 算法的指标赋权方法

在确定评价指标体系后,需要对各评价指标的权重进行赋值,才能够计算备选阵地的优度。由于本文以阵地距各己方单位的距离作为评价指标,因此考虑将各己方单位的重要程度作为衡量各评价指标权重取值^[21-24]。文献[8]采用 PR 算法对己方目标的重要性进行了评估,借鉴该模型,结合本文算例特殊性,构建海上目标间的关系模型。首先结合海上要地防空反导作战实际,确定己方目标间的相互关系如表 1 所示。

表 1 己方目标间相互关系

Table 1 Interrelationship between targets

| 相互关系 | 关系含义 |
|--------|---|
| 指挥关系 | 指挥关系指各己方目标间的指挥控制关系,即目标 i 给目标 j 下达指控命令则相连,否则不相连。 |
| 隶属关系 | 隶属关系指各己方目标间的直接上下级关系,即目标 i 是目标 j 直接上级则相连,否则不相连。 |
| 信息保障关系 | 通信关系指各己方目标间的情报保障关系,即目标 i 给目标 j 提供作战情报则相连,否则不相连。 |
| 电磁掩护关系 | 电磁掩护关系指各己方目标间的电子战保护关系,即目标 i 给目标 j 提供以电子战手段的保护措施则相连,否则不相连。 |
| 毁伤影响关系 | 毁伤影响关系,指目标 i 被毁伤会导致目标 j 也造成一定程度的毁伤,若造成毁伤则相连,否则不相连。 |
| 战术保护关系 | 战术保护关系,指目标 i 能够通过采取一定的战术行动对目标 j 形成一定程度的保护,若能够保护则相连,否则不相连。 |
| 战场维修关系 | 战场维修关系,指在防空反导作战时目标 i 能为目标 j 提供维修则相连,否则不相连。 |
| 战场补给关系 | 战场补给关系,即目标 i 能为目标 j 提供作战装备物资补给则相连,否则不相连。 |

具体构建的相互关系模型如图 3~图 6 所示。

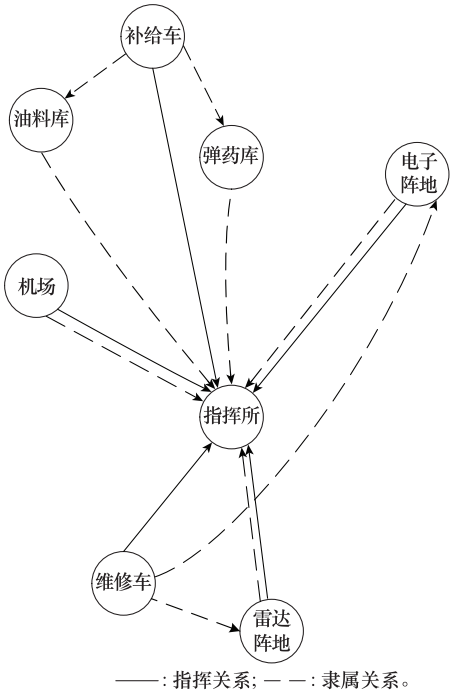


图 3 海上要地防空反导指挥与隶属关系模型

Fig. 3 Air defense and anti-missile command and affiliation model for important place at sea

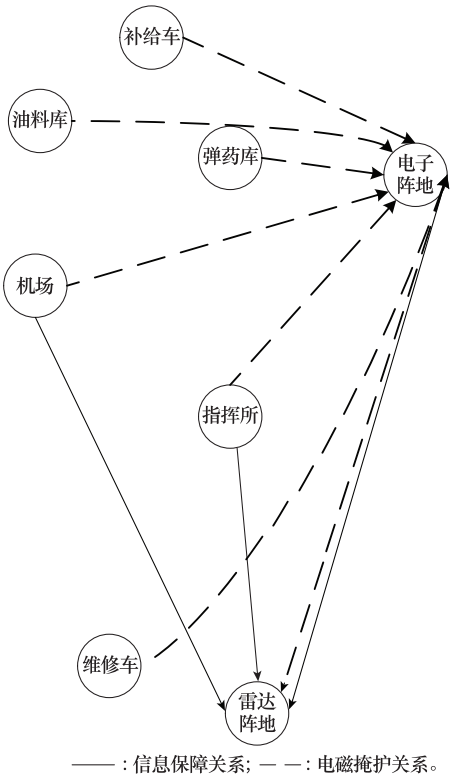


图 4 海上要地防空反导信息保障与电磁防护关系模型

Fig. 4 Model of the relationship between air defense and anti-missile information security and electromagnetic protection for important place at sea

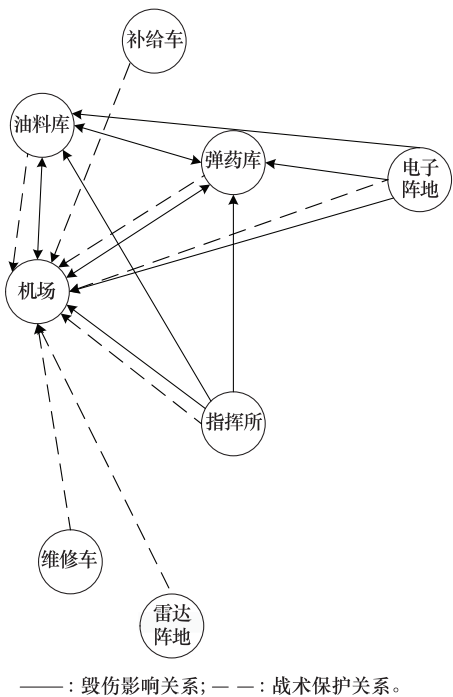


图 5 海上要地防空反导毁伤影响与战术保护关系模型

Fig. 5 Model of the relationship between air defense and anti-missile destructive impact and tactical protection for important place at sea

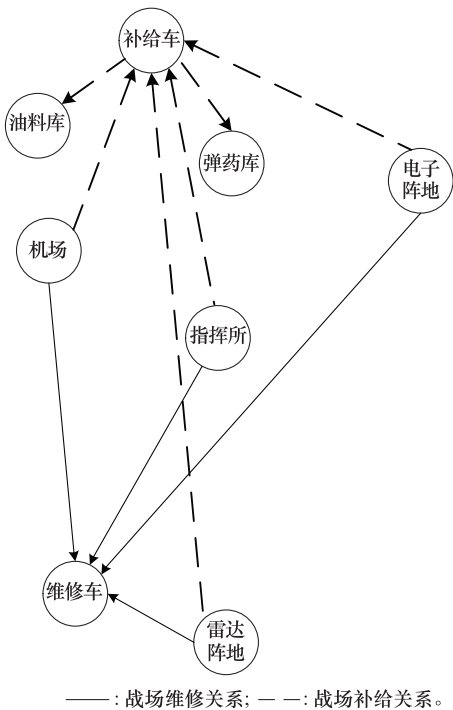


图 6 海上要地防空反导战场维修与战场补给关系模型

Fig. 6 Model of the relationship between air defense and anti-missile battlefield maintenance and battlefield resupply for important place at sea

指挥所在作战时主要对雷达阵地、电子战阵地等主要作战设施进行指挥控制。补给车由于自身任务性质原因直接隶属于弹药库和油料库，维修车直接隶属于电子战阵地和雷达阵地，这样更加方便其执行任务。

如图 4 所示，雷达阵地只对需要空情信息的我方单元提供信息保障，电子战阵地由于自身作用距离较大能够对海上要地所有己方目标提供电磁掩护。

如图 5 所示，油料库、弹药库、机场由于其储藏的物资有相当的爆炸性，若遭到空袭会对周围目标产生一定程度的毁伤。而补给车由于具有机动性，认为其可以躲避爆炸造成的毁伤，因此不受以上单元的爆炸影响。

机场可以通过起降战斗机对海上的所有目标形成保护，所以与其余目标均构成战术保护关系。

如图 6 所示维修车能在作战时为指挥所、电子战阵地等我方单位提供维修保障；补给车能够为电子战阵地、指挥所等单位提供物资保障，油料库与弹药库能够为补给车提供物资保障。

5 算例分析

按照第 3 节中构建的关系模型，首先确定各己方目标间的关系矩阵 H 。假设各目标的初始重要度值相等，均为 $1/8$ ，则目标重要度初始向量为 $R_0 = (1/8, 1/8, \dots, 1/8)_{1 \times 8}$ ，代入式 $R_r = HR_{r-1}$ 。

利用 Matlab 软件进行迭代 10 次计算可最终得出各己方目标的重要度^[25-30]。根据式(2)，求出各己方单位的指标权值，如表 2 所示。

| 表 2 己方目标重要度数值及对应权值 | | | |
|--|-------|----------------------------|------|
| Table 2 Importance values of targets on our own side and corresponding weights | | | |
| 编号 | 单位名称 | 重要度数值 ($\times 10^7$) | 对应权值 |
| 1 | 指挥所 | 2.440 1 | 0.18 |
| 2 | 雷达阵地 | 0.838 4 | 0.06 |
| 3 | 维修车 | 1.163 4 | 0.09 |
| 4 | 机场 | 2.534 9 | 0.19 |
| 5 | 油料库 | 1.645 0 | 0.13 |
| 6 | 补给车 | 1.163 4 | 0.09 |
| 7 | 弹药库 | 1.645 0 | 0.13 |
| 8 | 电子战阵地 | 1.756 7 | 0.13 |

根据图 1 的想定假设设备选阵地与各己方单位间的距离如表 3 所示。

表 3 备选阵地与己方单位间距离表

Table 3 Table of distances between alternative positions and our own units m

| 阵地编号 | 参数名称 | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | D_5 | D_6 | D_7 | D_8 |
| 1 | 300 | 200 | 200 | 600 | 1 100 | 1 100 | 900 | 800 |
| 2 | 280 | 260 | 400 | 600 | 700 | 800 | 700 | 400 |
| 3 | 800 | 1 000 | 1 000 | 900 | 300 | 350 | 500 | 400 |
| 4 | 1 000 | 1 300 | 1 200 | 1 000 | 400 | 350 | 600 | 750 |
| 5 | 400 | 600 | 700 | 200 | 400 | 700 | 300 | 500 |
| 6 | 300 | 500 | 350 | 170 | 1 000 | 900 | 650 | 800 |
| 7 | 380 | 480 | 200 | 300 | 1 200 | 1 200 | 920 | 1 000 |

备选阵地雷达阵地、指挥所等单位的距离越远越好,对于此类指标采用下式进行归一化处理:

$$l_{ij}=\frac{d_i}{\max d_i}$$

(4)

式中: l_{ij} 为各备选阵地与己方单位的归一化距离, $i=1,2,4,5,7, j=1,2,\cdots,7$; d_i 为各阵地与己方单位间的距离; $\max d_i$

为各阵地与己方单位间距离最大值。

备选阵地与维修车、补给车等单位的距离越近越好,对于此类指标采用下式进行归一化处理:

$$l_{ij}=1-\frac{d_i}{\max d_i}, i=3,6,8; j=1,2,\cdots,7$$

(5)

归一化处理后的数据如表 4 所示。

表 4 归一化的备选阵地与己方单位间距离

Table 4 Normalized distance between alternative positions and our own units

| 阵地编号 | 参数名称 | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | L_1 | L_2 | L_3 | L_4 | L_5 | L_6 | L_7 | L_8 |
| 1 | 0.30 | 0.15 | 0.17 | 0.60 | 0.92 | 0.92 | 0.98 | 0.80 |
| 2 | 0.28 | 0.20 | 0.33 | 0.60 | 0.58 | 0.67 | 0.76 | 0.40 |
| 3 | 0.80 | 0.77 | 0.83 | 0.90 | 0.25 | 0.29 | 0.54 | 0.40 |
| 4 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.33 | 0.29 | 0.65 | 0.75 |
| 5 | 0.40 | 0.46 | 0.58 | 0.20 | 0.33 | 0.58 | 0.33 | 0.50 |
| 6 | 0.30 | 0.38 | 0.29 | 0.17 | 0.83 | 0.75 | 0.71 | 0.80 |
| 7 | 0.38 | 0.37 | 0.17 | 0.30 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

将表 4 数据代入下式:

$$C_i=W\cdot L_i$$

式中: C_i 为备选阵地优度; W 为各己方单位重要度矩阵,具体形式为 $W=[w_1,w_2,\cdots,w_j]$; L_i 为各备选阵地与己方单位归一化距离矩阵,具体形式为 $L_i=[l_{1j},l_{2j},\cdots,l_{ij}]^T$,其中, $i=1,2,\cdots,8, j=1,2,\cdots,7$ 。

得到各备选阵地的优度值如表 5 所示。

表 5 备选阵地优度值

Table 5 Superiority values of alternative positions

| 阵地编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 优度值 | 0.63 | 0.49 | 0.62 | 0.77 | 0.39 | 0.51 | 0.64 |

因此,各阵地的优度排名如表 6 所示。

表 6 备选阵地排名

Table 6 Ranking of alternative positions

| 排名 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|------|---|---|---|---|---|---|---|
| 阵地编号 | 4 | 7 | 1 | 3 | 6 | 2 | 5 |

由表 6 的最终排序可见,排序结果基本符合远离重要目标、靠近维修车辆的原则,且阵地排名结果科学合理,符合海上要地防空反导作战需求。

6 结 论

本文结合海上要地防空反导作战实际特点,构建了以阵地与己方距离为衡量标准的阵地优度评价指标体系。并利用 PR 算法计算了各评价指标的权重,最后通过算例仿真验证了本文提出的阵地优度排序方法的正确性与可行性。为海上要地防空反导阵地的堪选提供了一种有一定借鉴意义的方法。

参考文献

[1] 邱学军. 城市防空中空掩护目标的重要性层次分析[J]. 现代防御技术, 2002, 30(1): 6-10.

QIU X J. Hierarchical analysis of importance of defence aim needed in city air defence[J]. Modern Defence Technology, 2002, 30(1): 6-10.

[2] 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(2): 20-21, 28.

LU Y Q, WANG Y L, ZHU C Y. Application of TOPSIS to sequencing computation of protected important targets in area air defence[J]. Fire Control and Command Control, 2006(2): 20-21, 28.

- [3] 唐克, 王存威, 杜涛. 基于线性排序法的基本炮阵地选择[J]. 兵工自动化, 2010, 29(2): 20-22, 26.
TANG K, WANG C W, DU T. Choosing basic artillery position based on linear order method[J]. Ordnance Industry Automation, 2010, 29(2): 20-22, 26.
- [4] 韩锋, 陈岗. 岛礁防空的特点和对策[C]//第四届中国指挥控制大会, 2016: 332-336.
HAN F, CHEN G. Characters and countermeasures of island air defense[C]//Proc. of the 4th China Conference on Command and Control, 2016: 332-336.
- [5] 马新星, 滕克难, 侯学隆. 海军要地防空兵力需求分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 58-62.
MA X X, TENG K N, HOU X L. Troops demand analysis of naval point area air defense[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(1): 58-62.
- [6] 马新星, 滕克难, 代进进. 水面舰艇支援岛礁防空作战合理配置仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(5): 21-25.
MA X X, TENG K N, DAI J J. Research on reasonable configuration simulation of warship in supporting operations of reef air defense[J]. Computer simulation, 2019, 36(5): 21-25.
- [7] 周桂银. 中国南沙岛礁建设的战略战术博弈[J]. 世界经济与政治论坛, 2017, 4: 48-63.
ZHOU G Y. The strategic and tactical game of China's Nansha Island construction[J]. Forum of World Economics & Politics, 2017, 4: 48-63.
- [8] 王葵, 滕克难, 程业, 等. 基于图论与 PageRank 的要地反导己方目标重要性排序[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 710-715.
WANG Y, TENG K N, CHENG Y, et al. Importance ranking of anti-missile targets in important places based on graph theory and PageRank[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(3): 710-715.
- [9] 刘新运, 管莹莹, 朱德法. 舰载航空兵对陆攻击航路规划评价指标体系研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(9): 40-43.
LIU X Y, GUAN Y Y, ZHU D F. Route planning evaluation index of carrier aviation anti-ground attack[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(9): 40-43.
- [10] 冯卉, 毛红保, 龙光正. 基于 Vague 集的地面防空武器系统作战效能评估[J]. 现代防御技术, 2016, 44(2): 26-31.
FENG H, MAO H B, LONG G Z. Operational efficiency evaluation of air defense weapon system based on vague sets[J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(2): 26-31.
- [11] 杨昱, 杨海强, 程彦杰, 等. 基于 ANP 的作战筹划能力模糊评价方法[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(4): 69-72.
YANG Y, YANG H Q, CHEN Y J, et al. Fuzzy evaluation method of operational planning ability based on ANP[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(4): 69-72.
- [12] 张金春, 张晶, 金哲, 等. 航母编队信息作战能力评估指标体系研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(6): 1-3.
ZHANG J C, ZHANG J, JIN Z, et al. Research on index system of information warfare ability evaluation of aircraft carrier formation[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(6): 1-3.
- [13] 左文博, 赵英俊, 张迪哲, 等. 一种防空反导装备的单元重要度评价方法[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(3): 104-108.
ZUO W B, ZHAO Y J, ZHANG D Z, et al. A method of air and missile defense equipment importance degree evaluation[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(3): 104-108.
- [14] 王丰, 顾佼佼, 林瑜. 3 级优度评估的联合作战方案优选方法研究[J]. 现代防御技术, 2019, 47(2): 116-121.
WANG F, GU J J, LIN Y. Optimization method of joint operation plan based on 3 level optimization evaluation[J]. Modern Defence Technology, 2019, 47(2): 116-121.
- [15] 何苹, 左文博, 王莹莹. 多指标约束下的防空反导装备修理级别建模[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(3): 42-47.
HE P, ZUO W B, WANG Y Y. Modeling for repair level of air and missile defense equipment under multi-constraints[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(3): 42-47.
- [16] 张家瑞, 王刚, 王思远. 防空反导战术级指控系统体系架构研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(1): 9-13, 19.
ZHANG J R, WANG G, WANG S Y. Research on the architecture of air and missile defense of tactics-level command and control system[J]. Fire Control and Command Control, 2021, 46(1): 9-13, 19.
- [17] 张高峰, 吴亮. 复杂电磁环境下水面舰艇防空反导作战效能评估[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(3): 640-650.
ZHANG G F, WU L. Effectiveness evaluation of surface ship air defense and antimissile combat in complex electromagnetic environment[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 640-650.
- [18] 曹冠平, 王跃利, 高明. 基于 UAF 的联合防空反导体系能力指标需求生成方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(2): 13-19.
CAO G P, WANG Y L, GAO M. Study on the requirement generation method of joint air defense and countermeasures system capability indicators based on UAF[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2020, 34(2): 13-19.
- [19] 独林, 谭贤四, 喻晨龙. 雷达阵地优化效果评估指标体系研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 42(5): 32-37.
DU L, TAN X S, YU C L. Research into index system of radar site optimization effect[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 42(5): 32-37.
- [20] 姚晓毅, 郭圣明, 胡晓峰. 基于 RF-GLR 组合机器学习算法的防空体系能力指标挖掘方法研究[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(3): 269-277.
YAO X Y, GUO S M, HU X F. Research into index system of radar site optimization effect[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(3): 269-277.
- [21] GAO F, ZHANG A, BI W H. Weapon system operational effectiveness evaluation based on the belief rule-based system with interval data[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 39(5): 6687-6701.
- [22] WANG J J, TAO Y, LIU X L, et al. Research on operational effectiveness evaluation based on information entropy method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1633(1): 121-133.
- [23] 雷宇曜, 杨历彪, 高健. 外部预警支援下地空导弹要地反导作

战建模与仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(1): 95–98.

LEI Y Y, YANG L B, GAO J. Modeling and simulation of ground-to-air missile anti-missile operation in reef area supported by external early warning[J]. Command Control & Simulation, 2019, 41(1): 95–98.

[24] 马新星, 滕克难, 侯学隆. 岛礁防空火力单元配置距离计算模型[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 38–41, 79.

MA X X, TENG K N, HOU X L. Models to calculate the deployment distance of reef air defense fire units[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(10): 38–41, 79.

[25] GUANG F C, CHEN X, JING Y, et al. Nonnegative matrix factorization for link prediction in directed complex networks using PageRank and asymmetric link clustering information[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 148: 113–119.

[26] JIUNG L, MARIANA O. PageRank on inhomogeneous random digraphs[J]. Stochastic Processes and their Applications, 2020, 130(4): 2312–2348.

[27] FAN C, ZHANG Y N, KARL R. Targeted sampling from massive block model graphs with personalized PageRank[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 2020, 82(1): 99–126.

[28] KIM E, JEON M. Proposal for implementation of a ranking model for Olympic Taekwondo competitions using PageRank[J]. International Journal of Performance Analysis in Sport, 2019, 19(2): 227–235.

[29] HENNI K, MEZGHANI N, GOUIN C. Unsupervised graph-based feature selection via subspace and pagerank centrality[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 114: 46–53.

[30] EKATERINA M, ANDREA L B, FAN C. A semi-supervised heat kernel pagerank MBO algorithm for data classification[J]. Communication in Mathematical Sciences, 2018, 16(5): 1241–1265.

作者简介

王 葵(1989—),男,助理工程师,博士研究生,主要研究方向为要地反导体体系构建与评估。

赵文飞(1986—),男,副教授,博士研究生,主要研究方向为要地反导体体系构建与评估。

陈 健(1985—),男,讲师,博士,主要研究方向为要地反导体体系构建与评估。

高 松(1990—),男,讲师,硕士,主要研究方向为要地反导体体系构建与评估。

周 璐(1997—),女,助理工程师,硕士,主要研究方向为体系需求分析。