

doi: 10.7690/bgzdh.2021.10.005

海上预警侦察系统效能评估

巫银花

(海军指挥学院作战实验室, 南京 210016)

摘要: 针对海上重要运输线的畅通运行问题, 提出保障海上交通运输线的预警侦察系统效能评估指标体系。对海上预警侦察系统的影响因素进行分析, 建立效能评估模型结合实例对预警侦察系统效能进行仿真计算。计算结果表明, 该系统可为海上主要交通运输线的运输安全提供理论依据。

关键词: 海上交通运输线; 预警侦察系统; 效能评估

中图分类号: TJ99 **文献标志码:** A

Study on Effectiveness Evaluation of Maritime Early Warning and Reconnaissance System

Wu Yinhua

(Navy Wargame Center, Naval Command College, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the smooth operation of important maritime transportation lines, puts forward the efficiency evaluation index system for early warning and reconnaissance system to guarantee the maritime transportation lines. This paper analyzes the influence factors of the maritime early warning and reconnaissance system, establishes the effectiveness evaluation model and simulates the effectiveness with examples. The calculation results show that the model can provide a theoretical basis for the security of important maritime transportation lines.

Keywords: maritime transportation lines; reconnaissance and early warning system; effectiveness evaluation

0 引言

海上交通运输的安全畅通无论是平时还是战时都是国家经济、军事的重要支撑。信息化、智能化战争的步伐正在加速, 海战战场空间不断扩大, 节奏不断加快, 要求各种作战力量高效快速聚合, 对物资运输的速度、数量要求更高。有效保持己方交通运输线畅通, 已成为各军事强国争夺军事行动自由权和主动权的焦点。完备的海上预警侦察系统是平时经济快速发展和战时快速高效指挥的前提。目前有关海上交通运输线的预警侦察体系定量分析内容偏少, 没有专门用于海上交通线的预警侦察专属装备。笔者按照海上任务需求并依托现有军民装备体系进行重组应用, 构建海上交通运输线预警侦察系统效能评估指标体系和模型。

1 海上预警侦察系统影响因素分析

海上预警侦察系统以各军种和军民系统结合为基础。任何一国都难以同时维持军民 2 套航天系统, 弹道导弹预警和航天预警在技术层面相似性极强, 具备军民共用的特点, 可以做到军民兼容, 建立互相合作的空天预警侦察, 保证信息的高效可靠。卫

星侦察是海上预警侦察系统的前提, 空中预警是核心, 通过建立太空、空中、水面、水下立体多维的空海天机电一体化预警侦察系统, 才能实现对海上交通运输线的全天候实时预警。

1.1 对电磁情况的侦察预警效能影响因素分析

战场电磁环境的侦察^[1]是指为了感知和掌握战场电磁环境的状态, 利用专门的探测技术, 对电磁辐射进行侦察识别所使用的手段方法及其行动的总称。根据海上任务, 战场电磁辐射源的侦察应在指挥员的统一部署下, 由各军队和地方专业部队的侦察力量共同组织实施。对电磁环境的侦察涉及电磁辐射源的侦查、辐射源特征提取及识别, 目的是给出海区电磁态势。侦察力量在执行对电磁环境的侦察任务时, 要在侦察预警系统指挥中心的指挥下, 按预定计划实施侦察, 主要侦察海区的雷达、无线通信、电子对抗等各种电磁信号的情况, 将所获信息汇总到情报中心进行分析处理, 为实施电子进攻和防御做好预先准备。

1.2 对空中情况的侦察预警效能影响因素分析

预警机是对空侦察部署中的核心力量, 通常装

收稿日期: 2021-06-26; 修回日期: 2021-07-29

作者简介: 巫银花(1968—), 女, 江苏人, 博士, 教授, 从事军事运筹学、军种战役学、计算机网络研究。E-mail: 2524308953@qq.com。

有预警雷达、目标识别、指挥控制、信息处理、通信、导航及电子侦察等设备；预警雷达具有多种工作方式，上升至 9 000 m 高度时，对空中目标的最大探测距离达 400~500 km。多功能的电子侦察机也是重要的对空侦察平台，现代电子侦察机装备了雷达和电子侦察设备，通过获取和分析敌方电磁辐射信号，实现对目标的测向和定位。此外，装备对空警戒雷达的水面舰船、雷达站、观通站和技侦站均能担负相应的对空侦察任务。

将遍布多维空间的对空侦察力量组网^[2]，主要依靠海上综合通信系统。该系统是综合信息系统的组成部分，可为对空中情况的侦察预警提供通信支援，实现信息融合。此外，各种侦察平台或岸基台站可进行更加灵活的配置，如针对不同高度和种类的空中目标，根据侦察装备的技战术性能进行纵深多层配置，在远、中、近、高、中、低各个维度实施探测跟踪，为海区空情提供近实时预警。

1.3 对海面情况的侦察预警效能影响因素分析

在对海侦察中，各种照相侦察、电子侦察及雷达侦察卫星将完成远程对海侦察预警^[3]，由预警机、警戒机和岸基地波超视距雷达进行中程对海侦察预警；由侦察机、无人侦察机精确查明敌海上目标的情况；观通站、技侦站及电子对抗侦察站可使用相应的主被动传感器进行对海侦察预警；水面舰艇也可担负相应的对海侦察任务，但不作为主要手段。

各种传感器、平台、岸站通过卫星通信或数据链系统实时交换情报及战术数据，并与相应的岸基指挥自动化系统、平台指控系统及目标指示系统联网，进行目标数据融合、海上态势综合和实时目标指示，实现对海情的侦察预警。

1.4 对水下情况的侦察预警效能影响因素分析

对水下情况侦察部署的组成主要包括反潜巡逻机、反潜直升机、水下固定水声站和无人潜航器。反潜巡逻机是一种有效的对水下目标侦察平台，可携带声呐浮标、磁探仪、红外探测仪、机载雷达或目视搜索水下目标，能对大面积海域进行搜索和监视；水下无人潜航器装备主被动声呐探测器材，也是一种主要的水下侦察力量。对水下情况的侦察部署与对空情况侦察部署类似，各水面、空中平台及岸站依靠卫星通信系统、数据链系统进行实时的战术数据交换。

2 效能评估指标体系

基于上述分析，海上预警侦察系统的主要任务是综合利用各种侦察手段，查明海区情况，进行侦察取证及情报搜集，为海上交通线安全运输提供及时、准确的情报保障。

系统效能评估涉及众多指标因素，按照其属性影响特性分析构建海上交通运输线预警侦察系统效能评估指标体系如图 1 所示。

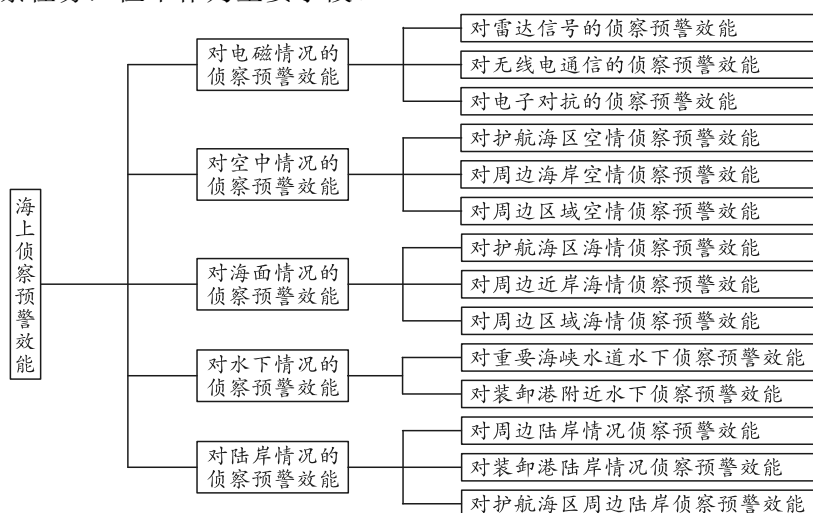


图 1 海上预警侦察系统效能评估指标体系

3 效能评估模型

3.1 各级指标权重的确定

由于预警侦察系统效能涉及因素较多，指标特性差异大，用定性定量相结合的方法进行系统评估

比较合理。笔者用改进层次法确定指标权重时。层次分析法确定权重的前提是判断矩阵的一致性条件必须满足，当一致性检验不通过时，要进行判断矩阵的修正，通常根据领域专家的经验进行修正，主观性大、实时性差；因此，对层次分析法进行改

进^[4-6]。通过建立满足一定条件的数学规划模型来检验判断矩阵的一致性，针对模型的复杂性用遗传算法借助 Matlab 软件计算权重并进行一致性检验。

过程如下：

1) 以图 1 海上预警侦察系统的二级评估指标体系为例。目标层有 1 个指标，设一级指标层有 m 个评估指标，用 W 代表综合评估值， U 代表一级评估指标 U_i 所组成的集合，记为 $U=(U_1, U_2, \dots, U_m)$ ， $V_i=(i=1, 2, \dots, m)$ 代表二级评估指标 V_{ij} 所组成的集合，记为 $V_i=(V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in})$ 。

2) 建立判断矩阵。以确定一级指标层的 m 个指标的权重为例，根据层次分析法的九级标度建立的一级指标层 m 个指标的判断矩阵 A 为：

$$A = \{a_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, M\}_{m \times m} \quad (1)$$

3) 各判断矩阵的一致性检验和计算权重。假设一级指标层各指标的权重为 $w_k(k=1, 2, \dots, m)$ ，其中：

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (2)$$

根据一致性判断矩阵的定义：

$$a_{ij} = w_i / w_j (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

必须满足：

$$a_{ij} = w_i / w_j = 1 \quad (4)$$

$$a_{ij} = w_i / w_j = 1 / a_{ji} \quad (5)$$

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = (w_i / w_j) \cdot (w_j / w_k) = a_{ik} \quad (6)$$

式(5)说明决策者能准确度量 $a_{ij} = w_i / w_j$ ，即有

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} w_j - w_i| = 0 \quad (7)$$

由于人脑决策思维的主观片面性加之具体决策问题的复杂性，专家给出的判断矩阵往往很难满足一致性条件，在用层次分析法分析决策问题时仅要求判断矩阵的一致性条件相对满意即可，如果判断矩阵的一致性不满意，就要重新修正判断矩阵。

若矩阵 $Y = \{y_{ij}\}_{m \times m}$ 为满足一致性条件的判断矩阵， Y 各因素权重为 $w_k(k=1, 2, \dots, m)$ ，应该满足：

$$\begin{aligned} \min \text{CIC}(m) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |y_{ij} - a_{ij}| / m^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |y_{ij} w_j - w_i| / m^2 \\ \text{s.t.} & \\ y_i &= 1 (i=1, \dots, m), \\ 1 / y_{ji} &= y_{ij} \in [a_{ij} - da_{ij}, a_{ij} + da_{ij}] (i, j=1, \dots, m), \\ w_k &> 0 (k=1, \dots, m), \\ \sum_{k=1}^m w_k &= 1. \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $CIC(m)$ 为一致性指标系 (consistency index coefficient)； d 为非负参数，一般在 $0 \sim 0.5$ 内选取。

式(8)是一个用通常方法难求解的规划问题，优化变量是判断矩阵 Y 中的元素和权重 $W_i(i=1 \sim m)$ 值， $CIC(m)$ 的值越小，表示判断矩阵 A 的一致性越好。当 $CIC(m)=0$ 时， Y 与 A 相等， A 是完全一致性矩阵。

可用遗传算法求解式(8)。判断矩阵的阶数 m 不同，其 $CIC(m)$ 的值也不同。显然，当 $CIC(m) < 0.10$ 时，判断矩阵可认为满足一致要求，各指标的权重值便可确定；否则可通过提高参数 d 的值，使判断阵满足一致性的要求。

用遗传算法对式(8)求解，能实时进行判断矩阵 A 的一致性检验和各指标权重值的确定，避免传统层次分析法一致性条件不满足时对判断矩阵重新修正的不足，不仅具备较强的通用性，而且能智能化实时对判断矩阵进行一致性检验；同时能确定判断矩阵的权重，满足预警侦察系统对权重确定实时性的要求。

3.2 灰色评估法对定性指标的量化

针对海上预警侦察的特点：1) 信息的特征是部分已知和部分未知，实属灰色系统；2) 评估指标数据具有确定性和不确定性之分，即具有灰色特性，采用灰色理论^[7-9]进行评估可提升评估结论的客观科学性。

3.2.1 评估指标 V_{ij} 评分等级的确定

当指标 V_{ij} 是定性指标时，必须将定性指标转化为定量指标。为尽可能地考虑人类思维的最大分辨力，将指标 V_{ij} 的高低等级划分 4 级，分别给予分值 4, 3, 2, 1 分，评分在指标等级之间时，所给分值为 3.5, 2.5, 1.5 分。

3.2.2 组织评估专家评分

假设 $k(k=1, 2, \dots, p)$ 是 p 个评估专家的序号。组织评估专家按评分标准等级给分并填写评分表。

3.2.3 确定评估样本矩阵

根据所给评分表，即根据评估指标 V_{ij} ，按第 k 个专家的评分为 d_{ijk} ，得到评估样本矩阵 D ：

$$D = (d_{11i}, d_{12i}, \dots, d_{1ni}, d_{21i}, \dots, d_{2ni}, \dots, d_{m1i}, \dots, d_{mni})^T (i=1, 2, \dots, p)$$

3.2.4 评估灰类的确定

评估灰类的确定包括灰类等级的确定、灰数和

白化权函数的确定。将评估指标 V_{ij} 的灰类评分等级设为 4 个标准， e 是灰类的序号，即 $e=1, 2, 3, 4$ ，记为“优”“良”“中”“差”，其对应的灰数及白化权函数如下：

1) 如图 2 所示，当 $e=1$ 时， $\otimes_1 \in (4, \infty)$ 是灰数， f_1 是白化权函数：

$$f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/4, & d_{ijk} \in [0, 4] \\ 1, & d_{ijk} \in [4, \infty) \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, \infty) \end{cases}$$

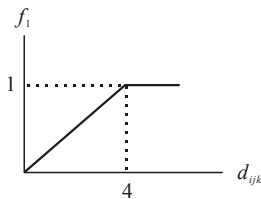


图 2 白化函数 f_1

2) 如图 3 所示，当 $e=2$ 时， $\otimes_2 \in [0, 3, 6]$ 是灰数， f_2 是白化权函数：

$$f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/3, & d_{ijk} \in [0, 3] \\ (d_{ijk} - 6)/(-3), & d_{ijk} \in [3, 6] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 6] \end{cases}$$

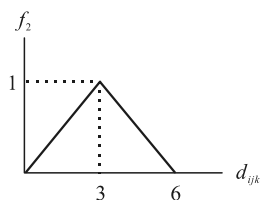


图 3 白化权函数 f_2

3) 如图 4 所示，当 $e=3$ 时， $\otimes_3 \in [0, 2, 4]$ 是灰数， f_3 是白化权函数：

$$f_3(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/2, & d_{ijk} \in [0, 2] \\ (d_{ijk} - 4)/(-2), & d_{ijk} \in [2, 4] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 4] \end{cases}$$

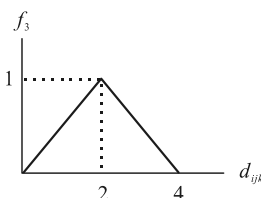


图 4 白化权函数 f_3

4) 如图 5 所示，当 $e=4$ 时， $\otimes_4 \in [0, 1, 2]$ 是灰数， f_4 是白化权函数：

$$f_4(d_{ijk}) = \begin{cases} 1, & d_{ijk} \in [0, 1] \\ (d_{ijk} - 2)/(-1), & d_{ijk} \in [1, 2] \\ 0, & d_{ijk} \notin [0, 2] \end{cases}$$

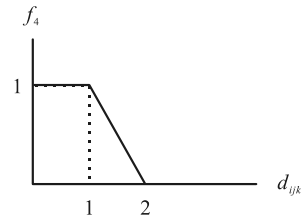


图 5 白化权函数 f_4

3.2.5 灰色评估系数的计算

对评估指标 V_{ij} 属于第 e 个评估灰类的灰色评估数记为 x_{ijk} ，则有：
$$x_{ijk} = \sum_{k=1}^p f_e(d_{ijk})。$$

对评估指标 V_{ij} 属于各个评估灰类的总灰色评估数记为 x_{ij} ，则有
$$x_{ij} = \sum_{e=1}^4 x_{ije}。$$

3.2.6 计算灰色评估权向量及权矩阵

所有评估专家就评估指标 V_{ij} 对主张第 e 个灰类的灰色评估权记为 r_{ije} ，则：
$$r_{ije} = x_{ije} / x_{ij}。$$

考虑到灰类有 4 个，即 $e=1, 2, 3, 4$ ，便有评估指标 V_{ij} 对于各灰类的灰色评估权向量 r_{ij} ：

$$r_{ij} = (r_{ij1}, r_{ij2}, r_{ij3}, r_{ij4})。$$

从而得 V_i 所属指标 V_{ij} 对于各评估灰类的灰色评估权矩阵 R_i ：

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in_i})^T。$$

4 海上预警侦察系统效能评估模型应用

海上预警侦察系统是以信息系统为基础，采用模块化形式编组部署，可根据具体情况快速搭建，进行灵活调整重组，完成太空、空中、海上电磁环境、海面和水下情况的预警侦察。

以 1 次保护海上交通运输线作战的训练为例，对海上预警侦察系统效能进行分析评估。采用层次灰色评估法的步骤如下。

4.1 确定评估指标 U_i 和 V_{ii} 的权重

利用改进层次分析法(过程略)确定一级评估指标 $U_i(i=1, 2, 3, 4)$ 的权重为： $A=(a_1, a_2, a_3, a_4)=(0.10, 0.30, 0.20, 0.10)$ ；二级评估指标的权重为： $A_1=(0.40, 0.50, 0.10)$ ， $A_2=(0.40, 0.40, 0.20)$ ， $A_3=(0.30, 0.30, 0.40)$ ， $A_4=(0.40, 0.40, 0.20)$ 。

4.2 组织评估专家评分

根据评估指标 V_{ij} 的评分等级标准，组织 6 名指挥员和领域专家打分，并填写专家打分表。根据打

分表, 确定底层 14 个指标的样本矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} 2.5 & 4.0 & 2.5 & 3.0 & 3.0 & 4.0 \\ 4.0 & 4.0 & 2.5 & 5.0 & 4.0 & 3.0 \\ 1.0 & 1.5 & 2.0 & 2.5 & 2.0 & 1.0 \\ 3.0 & 4.0 & 3.0 & 3.5 & 4.0 & 3.5 \\ 4.0 & 3.0 & 3.5 & 4.0 & 3.0 & 3.5 \\ 3.0 & 3.5 & 2.5 & 4.0 & 3.0 & 3.5 \\ 2.5 & 2.0 & 3.0 & 3.5 & 3.0 & 1.5 \\ 2.0 & 1.5 & 2.5 & 3.5 & 3.0 & 1.5 \\ 3.0 & 4.0 & 3.5 & 2.5 & 2.0 & 3.0 \\ 2.0 & 2.5 & 3.0 & 3.5 & 2.0 & 1.5 \\ 2.0 & 3.0 & 2.5 & 1.5 & 2.5 & 2.0 \\ 1.5 & 2.0 & 1.5 & 1.0 & 1.5 & 2.0 \\ 1.5 & 1.0 & 2.0 & 2.5 & 1.5 & 1.0 \\ 1.5 & 1.0 & 2.0 & 1.5 & 2.0 & 1.5 \end{bmatrix}。$$

4.3 灰色评估系数的确定^[8-9]

评估指标 V_{11} (对雷达信号的预警侦察效能), 属于第 e 个评估灰类的灰色评估系数 X_{11e} 的计算:

$e=1$,

$$x_{111} = \sum_{k=1}^6 f_1(d_{11k}) = f_1(d_{111}) + f_1(d_{112}) + f_1(d_{113}) + f_1(d_{114}) + f_1(d_{115}) + f_1(d_{116}) = f_1(2.5) + f_1(4) + f_1(2.5) + f_1(3) + f_1(3) + f_1(4) = 0.625 + 1 + 0.625 + 0.75 + 0.75 + 1 = 4.85。$$

$e=2$,

$$x_{112} = f_2(2.5) + f_2(4) + f_2(2.5) + f_2(3) + f_2(3) + f_2(4) = 5。$$

$e=3$,

$$x_{113} = f_3(2.5) + f_3(4) + f_3(2.5) + f_3(3) + f_3(3) + f_3(4) = 2.3。$$

$e=4$,

$$x_{114} = f_4(2.5) + f_4(4) + f_4(2.5) + f_4(3) + f_4(3) + f_4(4) = 0。$$

评估指标 V_{11} , 属于各评估灰类的总灰色评估数 x_{11} 为:

$$x_{11} = \sum_{e=1}^4 x_{11e} = x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} = 12.15。$$

指标 V_{11} , 第 e 个灰类的灰色权值 r_{11e} :

$$e=1, r_{111} = x_{111}/x_{11} = 0.399,$$

$$e=2, r_{112} = x_{112}/x_{11} = 0.412,$$

$$e=3, r_{113} = x_{113}/x_{11} = 0.189,$$

$$e=4, r_{114} = x_{114}/x_{11} = 0。$$

指标 V_{11} 的各灰类灰色评估权向量 r_{11} :

$$r_{11} = (r_{111}, r_{112}, r_{113}, r_{114}) = (0.399, 0.412, 0.189, 0)。$$

其他各指标对于各灰类的灰色权向量 r_{ij} 的计算

从略, 所得到的 U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 , 所属指标的各评估灰类的灰色权矩阵:

$$R_1 = \begin{Bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.399 & 0.412 & 0.109 & 0 \\ 0.350 & 0.442 & 0.208 & 0 \\ 0.308 & 0.411 & 0.281 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_2 = \begin{Bmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.292 & 0.389 & 0.319 & 0 \\ 0.325 & 0.433 & 0.242 & 0 \\ 0.325 & 0.408 & 0.267 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{Bmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.325 & 0.433 & 0.242 & 0 \\ 0.370 & 0.384 & 0.246 & 0 \\ 0.307 & 0.356 & 0.337 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_4 = \begin{Bmatrix} r_{41} \\ r_{42} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.333 & 0.408 & 0.259 & 0 \\ 0.308 & 0.411 & 0.281 & 0 \end{bmatrix},$$

$$R_5 = \begin{Bmatrix} r_{51} \\ r_{52} \\ r_{53} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.201 & 0.150 & 0.105 & 0 \\ 0.208 & 0.152 & 0.202 & 0 \\ 0.185 & 0.205 & 0.216 & 0 \end{bmatrix}。$$

4.4 一级指标 U_i 的综合评估

U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 的综合评估结果 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 为:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0.3654, 0.4269, 0.1321, 0),$$

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = (0.3134, 0.4117, 0.2740, 0),$$

$$B_3 = A_3 \cdot R_3 = (0.3260, 0.3891, 0.2846, 0),$$

$$B_4 = A_4 \cdot R_4 = (0.3380, 0.4153, 0.2428, 0),$$

$$B_5 = A_5 \cdot R_5 = (0.1020, 0.2030, 0.4301, 0)。$$

4.5 海上预警探测系统的综合评估

根据 B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 的评估结果计算海上预警侦察系统总灰色评估权矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.3654 & 0.4269 & 0.1321 & 0 \\ 0.3134 & 0.4117 & 0.2740 & 0 \\ 0.3260 & 0.3891 & 0.2849 & 0 \\ 0.3380 & 0.4153 & 0.2468 & 0 \\ 0.1020 & 0.2030 & 0.4301 & 0 \end{bmatrix}。$$

海上预警侦察系统的综合评估值 B 为:

$$B = A \cdot R = (0.3285, 0.4022, 0.2390, 0)。$$

4.6 综合评估值的计算

海上预警侦察系统效能的综合评估值:

$$W = B \cdot C^T = (0.3285, 0.4022, 0.2390, 0) \cdot$$

$$(4, 3, 2, 1)^T = 2.9878。$$

根据评估结果表明: 基于本次训练数据的海上预警探测系统的综合效能良好以上。

有时，决策者不仅需要总的评估结果，还需要该系统某方面的效能值，以便对系统进行优化完善。基于上文计算的灰色权向量和权矩阵，做进一步改进，可用二级指标灰类权矩阵的计算值和灰类等级值化向量值计算出二级指标的评估结果，再根据各指标的权重计算上一级指标的评估结果值，最后得出总评价结果。计算过程如下。

二级指标评估结果的计算：

$$W_{R_1} = R_1 C^T = \begin{bmatrix} 0.399 & 0.421 & 0.104 & 0 \\ 0.350 & 0.442 & 0.208 & 0 \\ 0.308 & 0.411 & 0.281 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.067 \\ 3.142 \\ 3.027 \end{bmatrix}。$$

同理，进行其他指标评估结果的计算。

接着，一级指标评估结果的计算：

$$W_{A_1} = A_1 W_{R_1} = (0.40, 0.50, 0.10) \begin{bmatrix} 3.067 \\ 3.942 \\ 3.027 \end{bmatrix} = 3.1005。$$

同理，其他一级指标评估结果的计算：

$$W_{A_2} = 3.486, W_{A_3} = 3.316, W_{A_4} = 3.006, W_{A_5} = 3.676。$$

最后，海上预警侦察系统的综合评估值为：

$$W = W_A A = \begin{bmatrix} 3.0997 \\ 3.4860 \\ 3.3160 \\ 3.0060 \\ 3.6760 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.3 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.1 \end{bmatrix} = 2.9878。$$

从而得出总的评估效能值是 2.9878。

综上所述，改进后计算方法的结果与前面计算结果一致，但利用改进后的算法可得出各一级和二

级指标的评估分值，可以更全面地掌握海上预警侦察系统各方面能力的强弱情况，有利于决策者全面分析各分指标效能值的优劣，为制定海上预警侦察系统某个方面具体的改进措施提供依据。

5 结束语

笔者建立的保护海上交通运输线预警侦察系统效能评估指标体系和模型，能为远海保护海上交通运输线作战指挥自动化系统提供模型支撑，也可可为其他系统的效能评估提供参考。

参考文献：

- [1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京：解放军出版社，2006：81-88.
- [2] 黄山良. 防空探测预警系统与技术[M]. 北京：国防工业出版社，2015：112-122.
- [3] 张万层. 美国红外预警卫星系统发展概述[J]. 兵工自动化，2018，37(6)：1-5.
- [4] 金菊良，魏一鸣. 复杂系统广义智能评估方法与应用[M]. 北京：科学出版社，2007：42-44.
- [5] 任芳，沈文辉，范迪. 基于爬山算法的自适应遗传算法[J]. 工业控制计算机，2018，31(7)：92-93.
- [6] 刘相利. 层次分析法的一致性改进及其应用[J]. 舰船电子对抗，2015，38(5)：5-9.
- [7] 刘思峰，党耀国，方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京：科学出版社，2010：113-130.
- [8] 赵新爽，汪厚祥，蔡益朝. 基于 TOPSIS 法的反导预警系统作战效能评估[J]. 现代防御技术，2014，42(1)：8-13.
- [9] 万鹏，屈洋. 指挥信息系统防御效能灰色聚类评估[J]. 现代防御技术，2012，40(5)：111-115.
- [10] 状态评估与故障预测研究综述[J]. 机械强度，2017，39(3)：511-517.
- [11] 谢松汕，许宝杰，吴国新，等. 基于 HMM/SVM 的风电设备故障趋势预测方法研究[J]. 计算机测量与控制，2014，22(1)：39-41.
- [12] 盛兆顺，尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术及应用[M]. 北京：中国工业出版社，2006.
- [13] 朱嘉瑜，高鹰. 基于改进粒子群算法的隐马尔可夫模型训练[J]. 计算机工程与设计，2010，31(1)：157-160.
- [14] 张迅，王平，邢建春，等. 基于高斯函数递减惯性权重的粒子群优化算法[J]. 计算机应用研究，2012，29(10)：3710-3712，3724.

(上接第 15 页)

- [14] 曹亮，王景霖，沈勇，等. 基于 HMM 的轴承故障诊断方法[C]//2018 年中国航空测控技术专刊. 航空工业测控技术发展中心、中国航空学会测试技术分会、状态监测特种传感技术航空科技重点实验室：中国航空学会，2018：3.
- [15] 许庆阳，刘中田，赵会兵. 基于隐马尔科夫模型的道岔故障诊断方法[J]. 铁道学报，2018，40(8)：98-106.
- [16] 江金源. 基于 HMM 的滚动轴承故障诊断方法研究及硬件实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2018.
- [17] 季云，王恒，朱龙彪，等. 基于 HMM 的机械设备运行