

多级指标下的战场电磁环境复杂度评价研究

王帅, 李婷

(陆军工程大学 石家庄校区装备模拟训练中心, 石家庄 050003)

摘要: **目的** 为有效解决战场电磁环境复杂度定量评估问题, 针对战场电磁环境复杂度评估特性提出一种多级指标综合评价方法。**方法** 该方法以层次分析法和灰色综合评价作为理论基础, 对战场电磁环境的电磁辐射、电磁适应能力和电磁干扰要素进行考察, 建立目标层、指标层、准则层五级评价指标体系。**结果** 选取11种评价指标, 采用和法原理和熵权法计算其综合权重, 采用专家打分法建立了评价指标矩阵, 应用灰色评价理论开展综合评价, 结合指标权重得出量化评价数值。**结论** 该方法具有普适性, 能够适用不同指标评价, 评价过程也可以结合具体试验数据, 能够为开展战场电磁环境复杂度评估提供有价值的参考。

关键词: 电磁环境; 复杂度; 层次分析法; 灰色评价

中图分类号: E919

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0108-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.019

Research on Evaluation of Battlefield Electromagnetic Environment Complexity Based on Multi-level Index

WANG Shuai, LI Ting

(Equipment Simulation Training Center, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

ABSTRACT: In order to effectively solve the problem of quantitative evaluation of battlefield electromagnetic environment complexity, a multi-level index comprehensive evaluation method is proposed. Based on the analytic hierarchy process (AHP) and grey comprehensive evaluation, the electromagnetic radiation, electromagnetic adaptability and electromagnetic interference factors of the electromagnetic environment in the battlefield are analyzed, and the five level evaluation index system of target level, index level and criterion level is established by this method. Eleven kinds of evaluation indexes are selected, and their comprehensive weights are calculated by the principle of sum method and entropy weight method. The evaluation index matrix is established by the expert scoring method, the comprehensive evaluation is carried out by the grey evaluation theory, and the quantitative evaluation value is obtained by combining the index weight. The calculation process and results show that the method is universal, and widely applied to different index evaluation. The evaluation can also be performed in combination with specific test data, which can provide valuable reference for the complexity evaluation of battlefield electromagnetic environment.

KEY WORDS: electromagnetic environment; complexity; analytic hierarchy process; grey evaluation

收稿日期: 2020-07-30; 修订日期: 2020-09-01

Received: 2020-07-30; Revised: 2020-09-01

基金项目: 国家社会科学基金军事学项目 (15GJ003)

Fund: Supported by the National Social Science Foundation Military Science Project (15GJ003)

作者简介: 王帅 (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为战场网络对抗。

Biography: WANG Shuai(1981—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: battlefield network confrontation.

引文格式: 王帅, 李婷. 多级指标下的战场电磁环境复杂度评价研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 108-114.

WANG Shuai, LI Ting. Research on evaluation of battlefield electromagnetic environment complexity based on multi-level index [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 108-114.

信息化条件下的战争中，电子设备和信息化武器装备得到广泛应用，战场上大量电磁信号交织叠加，动态多样，形成了复杂的战场电磁环境，对武器装备及其效能产生严重影响，成为未来战场争夺的焦点^[1]。因此，对复杂电磁环境复杂度开展研究，认识电磁环境复杂度对作战训练的影响，发挥其在作战训练中的作用，对提高部队在信息化战场上的作战能力和训练效益具有重要意义^[2-3]。目前，关于电磁信号产生的一般干扰环境对应的电磁环境复杂度的评估通常采用层次分析法或灰色评价方法等单一评价方法，误差往往较大，而采用集层次分析法、熵权法和灰色评价理论为一体的综合评价方法有助于充分消除人为因素，减少误差，从而得到客观评价结果。

1 评价方法理论

1.1 层次分析法

层次分析法适用于多目标决策复杂系统的评价，它将目标评价系统分解为多个目标或准则。这些目标或准则对应着目标评价系统的不同影响因素，形成递进式的多层次评价结构，按照层次分析法标度，给各影响因素赋值，进而构造判断矩阵。利用求解判断矩阵特征向量方法获得低层次各影响因素相对高层次准则的权重，将所得不同层次影响因素权重与具体量化值相结合，最终可得复杂系统评价的量化分析结果^[4-5]。

在层次分析法的基础上，通过构造判断矩阵，并对判断矩阵进行归一化处理、一致性检验等，然后分别采用熵权法和“和法原理”对层次分析法中的综合权重进行计算和排序。由此，可得战场复杂电磁环境复杂度评价指标权重计算流程，如图 1 所示^[6]。

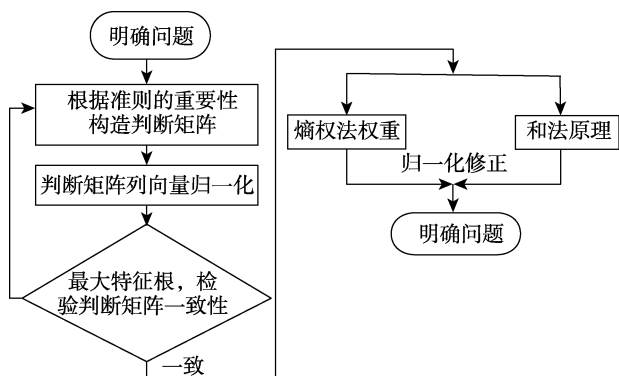


图 1 战场复杂电磁环境复杂度评价指标权重计算流程
Fig.1 Evaluation process of complexity evaluation index weights of battlefield electromagnetic environment

1.2 和积法原理

层次分析法应用中需要求解各影响因素权重，由于层次分析法构建的判断矩阵属于正互反矩阵，其权

重计算可以转换为权向量的计算，即要计算判断矩阵的最大特征根及其特征向量，归一化的特征向量即为权向量。权向量计算常用的方法包括“和积法”、“根法”以及“幂法”等，此处采用“和积法”计算权向量。

采用“和积法”计算权向量时，对于一致性判断矩阵，对其进行列向量归一化就是相应的权重；对于非一致性判断矩阵，对其列向量进行归一化再取其算术平均值作为权向量。为了对判断矩阵进行一致性判断，需要求取其最大特征根 λ_{\max} ，假定判断矩阵 A 的表达式为：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

权向量 W 的计算过程如下：

1) 将矩阵 A 的每一列向量归一化得：

$$w_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

2) 对 w_{ij} 按行求和得：

$$w_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2)$$

3) 归一化处理：

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T, \quad W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (3)$$

4) 计算 AW ，则其最大特征根 λ_{\max} 值为：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (4)$$

1.3 熵权权重

层次分析法构造的判断矩阵过程中对指标赋值的主观性，导致判断矩阵可能会出现一致性、各指标权重相差过大等问题，因此文中采用熵权法来进一步计算综合权重，以保证权重的可靠性。熵权法建立在信息熵基础上，而信息熵来源于信息论，定义为随机变量的不确定性量度，用于衡量一个系统的有序程度，即一个系统有序程度越高，则熵就越小，所含信息量就越大。信息熵具有非负性、确定性、对称性、可加性。

以归一化后的判断矩阵 $R(r_{ij})$ 作为研究系统， $H(i)$ 为系统中第 i 个评价因素的熵值，按照信息熵定义可表示为：

$$H(i) = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \quad (5)$$

式中： n 为评价指标数； r_{ij} 满足 $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$ ，且规定，当 $r_{ij} = 0$ 时， $H(i) = 0$ 。

则第 i 个指标的熵权 v_i 可表示为：

$$v_i = \frac{1 - H(i)}{\sum_{i=1}^m (1 - H(i))} \quad (6)$$

式中： m 为指标个数。

同理，通过式 (6) 对其他评价指标进行解算，

分别得出其对应的权重,最终可得基于熵权的评价指标权重向量^[7]: $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。

1.4 评价指标综合权重

将“和积法”和熵权法分别计算所得的指标权重进行综合,然后对各综合指标进行归一化处理,便可得到修正后的各指标的综合权重。其综合计算和归一化处理过程计算公式为:

$$W'_i = w_i v_i / \sum_{i=1}^n w_i v_i \quad (7)$$

2 评价指标体系构建

电磁环境本质上是电磁辐射和辐射传播综合作用的结果,其中电磁辐射包括自然电磁辐射和人为电磁辐射,辐射传播是地理环境、电离层和气象环境等传播媒介对电磁辐射产生的作用。因此,评价电磁环境复杂度首要对电磁辐射以及电磁适应能力进行考察^[8-9]。

在 GJB 6520—2008《战场电磁环境分类与分级

方法》中,确定了一种对复杂电磁环境的分级方法。该电磁环境分级依据频谱占用度 FO、时间占用度 TO 和空间覆盖率 SO 三个指标,通过计算总的频谱占用度、时间占有度、空间覆盖率及平均功率密度谱,综合确定战场电磁环境的复杂度等级。同时,由于平均功率密度谱 AP 描述了在一定的作战时间段、作战空间和作战用频范围内,电磁环境的平均功率密度谱的大小。环境电平门限 So 描述了电磁环境的功率密度谱对环境内工作的电子设备产生干扰的电平限值。因此,首先选取上述五个指标用于评价电磁辐射因素。

对于电磁适应能力的考察,选用电磁干扰度、电磁灵敏度和电磁稳定性^[10-14]等三个评价指标。此外,由于复杂电磁环境包含大量的电磁信号源,存在各种形式的干扰,评价复杂电磁环境复杂度还需要考虑干扰因素。因此,选取了多径干扰、同频干扰和互调干扰等三种典型的干扰指标作为评价依据。文中考察的是一般意义上的电磁环境复杂度评价,评价过程中,上述评价指标值均通过专家打分法获取。综合以上评价指标,建立的战场电磁环境复杂度层次评价指标体系如图 2 所示。

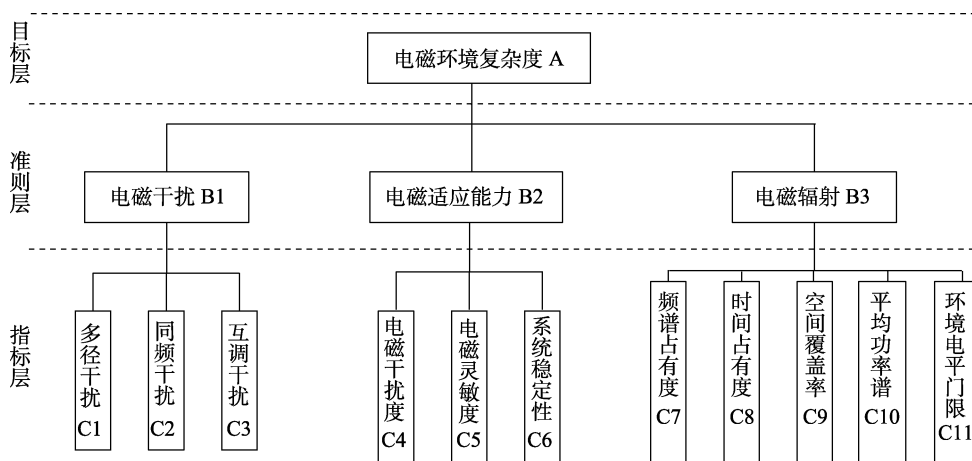


图 2 战场电磁环境复杂度评价指标体系与指标

Fig.2 Evaluation index system and index of complexity of battlefield electromagnetic environment

3 评价步骤

1) 构造层次结构模型。按照第 2 节构建的评价层次与指标体系梳理评价层次结构模型,为构建判断矩阵做准备。

2) 构造判断矩阵。引入一种标度用于各指标之间进行量化比较并得到判断矩阵,以“1—9 标度”为例,指标 i 与指标 j 相互比较时,其中,1、3、5、7 分表表示指标 i 与指标 j 同等重要、略微重要、明显重要、强烈重要、绝对重要,2、4、6、8 为上述重要性的中间值。反之,指标 i 与指标 j 重要时,则取上述标度的倒数。

3) 判断矩阵一致性检验与指标权重计算。采用

和积法原理计算判断矩阵最大特征根和权向量,得到判断矩阵的特征向量和最大特征值分别为 $\omega=[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 和 λ_{max} 。判断矩阵构造过程中,由于人的主观性存在偏差,需要对判断矩阵做一致性检验以提高权重计算的可靠性。首先计算一致性指标 CI ,其表达式为:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

其次,利用层次分析法解决问题时,要对通过两两比较得出的判断矩阵进行一致性检验,而作为参与计算检验的平均随机一致性指标的值,一般需要查找 Saaty 计算好的 1—8 阶矩阵的 RI 值表进行比对。Saaty 根据 1000 次正互反矩阵计算结果得到矩阵维数在 1

—8 阶时对应的 RI 值，见表 1。

表 1 平均随机一致性指标 RI 表
Tab.1 Mean random consistency index RI table

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41

然后计算一致性比例 CR ，其值为：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (9)$$

当 $CR < 0.1$ 时，判断矩阵满足一致性，此时在判断矩阵 A 归一化操作的基础上，结合信息熵、熵权以及和法原理进行各指标权重计算；当 $CR > 0.1$ 时，判断矩阵不满足一致性，要对判断矩阵做适当修正。最后采用熵权法计算指标权重，结合上面计算所得权向量，归一化处理得到指标综合权重。

4) 确定评价指标矩阵。针对目标复杂系统，有 n 个专家对其中的 m 个指标进行评价， d_{ij} 表示第 j 个专家对第 i 个指标的评价值，则可得目标复杂系统的评价矩阵为：

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

5) 确定评价灰类。确定评价灰类，本质上就是要确定战场电磁环境复杂度的灰类评价等级数、灰数和白化权函数。评价灰类根据评价等级，定性分析确定。文中电磁环境复杂度对应 4 个评价灰类，分别是“重度”、“中度”、“轻度”、“洁净”，设定的评价等级集合为 $V = \{9, 7, 5, 3\}$ ，则第一灰类“重度”， $k=1$ ，灰数为 $\oplus \in [9, +\infty)$ ，其白化权函数为 $f_1(d_{ijk})$ ；第二灰类“中度”， $k=2$ ，其灰数为 $\oplus \in [0, 7, 14]$ ，其白化权函数为 $f_2(d_{ijk})$ ；第三灰类， $k=3$ ，其灰数为 $\oplus \in [0, 5, 10]$ ，白化权函数为 $f_3(d_{ijk})$ ；第四灰类， $k=4$ ，其灰数为 $\oplus \in [0, 3, 6]$ ，其白化权函数为 $f_4(d_{ijk})$ 。其白化权函数 $f_1(d_{ijk})$ 、 $f_2(d_{ijk})$ 、 $f_3(d_{ijk})$ 、 $f_4(d_{ijk})$ 如式 (11) 所示。

$$f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/9 & d_{ijk} \in [0, 9] \\ 1 & d_{ijk} \in (9, +\infty) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/7 & d_{ijk} \in [0, 7] \\ (14-d_{ijk})/7 & d_{ijk} \in (7, 14] \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$f_3(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/5 & d_{ijk} \in [0, 5] \\ (10-d_{ijk})/5 & d_{ijk} \in (5, 10] \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$f_4(d_{ijk}) = \begin{cases} 1 & d_{ijk} \in [0, 3] \\ (6-d_{ijk})/3 & d_{ijk} \in (3, 6] \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

上述评价灰类对应的白化权函数曲线如图 3 所示。

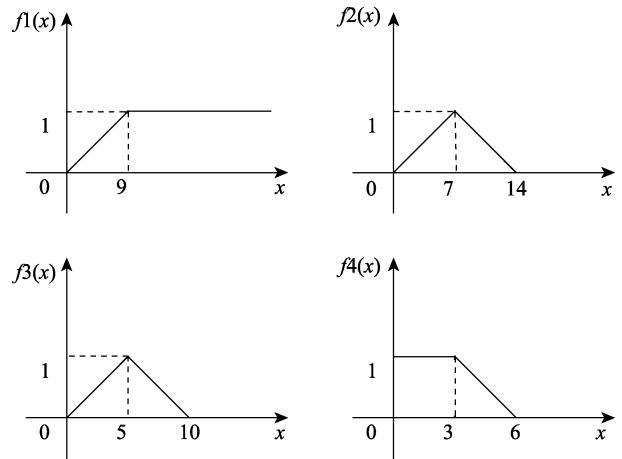


图 3 白化权函数曲线图
Fig.3 Whitening weight function curve

6) 计算灰色评价系数。对于评价指标 i ，电磁环境复杂度属于灰类 k 的评价权系数与总评价权系数为：

$$h_{ik} = \sum_{t=1}^n f_k(d_{it}) \quad (12)$$

文中将复杂度分为 4 级，则第 i 个指标属于各个评价灰类的总灰色统计数 h_i 值为：

$$h_i = \sum_{k=1}^4 h_{ik} \quad (13)$$

7) 计算灰色评价权向量和权矩阵。根据评价系数 h_{ik} 和 h_i ，计算评价指标 i 的灰色评价权向量 r_i ($r_i = (h_{i1}/h_i, h_{i2}/h_i, \dots)$)，由此可得评价矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{q1} & \cdots & r_{qk} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： q 为指标数目； k 为灰类数。

8) 开展灰色综合评价。将各级指标权重与灰色权矩阵相乘，结合灰数将计算结果归一化，可得量化数值，确定最终结论^[16-18]。

4 战场电磁环境复杂度实例化评价

4.1 确定标度，构造判断矩阵

参照层次分析法常用的 1—9 标度法，确定准则层 B 层元素对目标层 A、指标层 C 层元素对 B 层元素的标度，各元素之间的重要性标度见表 2—4。

表 2 准则 (A) —电磁环境复杂度
Tab.2 Criterion (A)-Electromagnetic environment complexity

A	B1	B2	B3
B1	1	1/2	3
B2	2	1	3
B3	1/3	1/3	1

表3 准则 (B1, B2) —电磁干扰与电磁适应能力
Tab.3 Criterion (B1, B2) - Electromagnetic interference and electromagnetic adaptability

B1/B2	C1/C4	C2/C5	C3/C6
C1/C4	1	3	5
C2/C5	1/3	1	3
C3/C6	1/5	1/3	1

表4 准则 (B3) —电磁辐射
Tab.4 Criterion (B3) - Electromagnetic radiation

B3	C7	C8	C9	C10	C11
C7	1	1	3	5	5
C8	1	1	3	5	5
C9	1/3	1/3	1	2	4
C10	1/5	1/5	1/2	1	3
C11	1/5	1/5	1/4	1/3	1

由表2—4 可得判断矩阵:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 5 & 5 \\ 1 & 1 & 3 & 5 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 2 & 4 \\ 1/5 & 1/5 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

4.2 一致性检验, 计算权向量

采用和法原理计算判断矩阵 A_1, A_2, A_3 的权向量。以矩阵 A_3 为例, 首先将 A_3 列向量归一化, 可得:

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.3659 & 0.3659 & 0.3871 & 0.3750 & 0.2778 \\ 0.3659 & 0.3659 & 0.3871 & 0.3750 & 0.2778 \\ 0.1220 & 0.3750 & 0.1290 & 0.1500 & 0.2222 \\ 0.0732 & 0.0732 & 0.0645 & 0.0750 & 0.1667 \\ 0.0732 & 0.0732 & 0.0323 & 0.0250 & 0.0556 \end{bmatrix} \quad (18)$$

对归一化矩阵按行求和得到:

$$w_3 = [1.7716 \quad 1.7716 \quad 0.7452 \quad 0.4525 \quad 0.2595]^T \quad (19)$$

对其进行归一化得到判断矩阵 A_3 的权向量:

$$W_3 = [0.3543 \quad 0.3543 \quad 0.1490 \quad 0.0905 \quad 0.0518]^T \quad (20)$$

则最大特征根 $\lambda_{\max 3}$ 值为:

$$\lambda_{\max 3} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{(A_3 W_3)_i}{w_i} = 5.1748 \quad (21)$$

同理, 也可得:

$$\lambda_{\max 1} = 3.0538, \lambda_{\max 2} = 3.0387 \quad (22)$$

由式 (8) 可得矩阵 A_1, A_2, A_3 的一致性指标 CI 分别为: 0.0269、0.0194、0.0437。由此可得三个单排序的一致性比例值分别为: 0.0517、0.0372、0.0390。 CR 值均小于 0.1, 表示每个判断矩阵的一致性都可以接受^[19]。

在式 (16) 所示的归一化判断矩阵基础上, 计算各评价指标的熵权值, 由式 (5) 计算可得 5 个评价指标的熵值, 见表 5。得: $\sum_{i=1}^5 (1 - H_3(i)) = 0.7449$ 。

表5 判断矩阵归一化后熵值计算
Tab.5 Entropy calculation after normalization of judgment matrix

评价指标	$H_3(1)$	$H_3(2)$	$H_3(3)$	$H_3(4)$	$H_3(5)$
熵值	0.8544	0.8544	0.7994	0.8119	0.9352

由式 (6) 可得 5 个指标的熵权权重:

$$V_3 = [0.1955 \quad 0.1955 \quad 0.2693 \quad 0.2526 \quad 0.0871]^T \quad (23)$$

由式 (7) 可得 5 个指标的综合权重:

$$W'_3 = [0.3362 \quad 0.3362 \quad 0.1948 \quad 0.1109 \quad 0.0219]^T \quad (24)$$

同理可得:

$$W'_1 = [0.4971 \quad 0.4038 \quad 0.0991],$$

$$W'_2 = [0.5910 \quad 0.3370 \quad 0.0720] \quad (25)$$

4.3 灰色综合评价

选定 5 名专家对 11 个评价指标进行打分, 将电磁环境复杂度分为重度、中度、轻度、洁净 4 个等级, 并分别赋值 9、7、5、3, 打分情况分别记为 $C_{31}、C_{32}、C_{33}$:

$$C_{31} = \begin{bmatrix} 9 & 8 & 6 & 7 & 9 \\ 7 & 9 & 7 & 7 & 6 \\ 8 & 6 & 5 & 8 & 8 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C_{32} = \begin{bmatrix} 9 & 7 & 6 & 5 & 4 \\ 7 & 3 & 5 & 6 & 7 \\ 4 & 5 & 6 & 3 & 5 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$C_{33} = \begin{bmatrix} 5 & 7 & 6 & 3 & 5 \\ 8 & 8 & 5 & 6 & 8 \\ 5 & 6 & 8 & 4 & 6 \\ 4 & 7 & 5 & 7 & 6 \\ 7 & 5 & 7 & 2 & 6 \end{bmatrix} \quad (28)$$

根据第 3 节和确定的四个灰类, 结合对应的白化权函数, 计算所得准则层的平均权矩阵, 分别记为 $R^{(1)}、R^{(2)}、R^{(3)}$, 结果为:

$$R^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.4059 & 0.3880 & 0.2061 & 0 \\ 0.3518 & 0.4020 & 0.2462 & 0 \\ 0.3422 & 0.3645 & 0.2640 & 0.0293 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$R^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.2793 & 0.3352 & 0.3017 & 0.0838 \\ 0.2960 & 0.3315 & 0.2578 & 0.1146 \\ 0.2134 & 0.2744 & 0.3521 & 0.1601 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$R^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.2354 & 0.3027 & 0.3260 & 0.1358 \\ 0.3422 & 0.3645 & 0.2640 & 0.0293 \\ 0.2712 & 0.3247 & 0.3199 & 0.0842 \\ 0.2649 & 0.3406 & 0.3124 & 0.0822 \\ 0.2588 & 0.3328 & 0.2933 & 0.1150 \end{bmatrix} \quad (31)$$

分别对准则层进行综合评价,以指标层 B3 为例,其综合评价结果为:

$$P_3 = W_3 \times R^{(3)} = [0.2821 \quad 0.3326 \quad 0.2317 \quad 0.0836] \quad (32)$$

同理可得: $P_1 = [0.3831 \quad 0.3911 \quad 0.2238 \quad 0.0021]$, $P_2 = [0.2802 \quad 0.3296 \quad 0.2905 \quad 0.0997]$

因此对目标层电磁环境复杂度综合评价值为:

$$P = W'_1 \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = [0.3315 \quad 0.3604 \quad 0.2585 \quad 0.0496] \quad (33)$$

各种评价灰类等级值化向量 $q = \{9, 7, 5, 3\}$, 结合目标层电磁环境复杂度综合评价结果^[20], 可得目标层电磁环境复杂度评价值 $C = P \cdot q^T = 6.9478$ 。该结果介于灰数 5 和 7 之间, 相应的电磁环境属于中度复杂。

5 结语

采用层次分析法和灰色评价法, 选取了电磁干扰、电磁适应能力和电磁辐射三类共 11 项指标, 对战场电磁环境复杂度评价过程与方法进行了研究。最后结合专家打分, 得出了多指标下的战场电磁环境复杂度量结果, 实现了战场电磁环境复杂度评价。文中对战场电磁复杂度评价过程与方法具有一般适用性, 然而本方法中的电磁环境复杂度划分主要适用于电磁信号产生的一般干扰环境, 即广泛意义上的电磁干扰环境, 而对于电子侦察装备的侦察环境及雷达、通信、导航等装备面临的特定干扰环境, 还有待于深入研究。

参考文献:

[1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 2006.
WANG Ru-qun. Battlefield electromagnetic environment[M]. Beijing: PLA Press, 2006.

[2] 金朝, 丁竑, 徐忠富, 等. 基于物元-AHP 的战场电磁

环境复杂度评价[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(12): 165-169.

JIN Zhao, DING Hong, XU Zhong-fu, et al. Complexity evaluation method of battlefield electromagnetic environment based on matter-element model and AHP[J]. Ship electronic engineering, 2010, 30(12): 165-169.

[3] 王东. 复杂电磁环境数字仿真系统研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 100-104.
WANG Dong. Digital simulation system of complex electromagnetic environment[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(1): 100-104.

[4] 金朝, 丁竑, 李冬, 等. 战场电磁环境复杂度评估及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(12): 194-197.
JIN Zhao, DING Hong, LI Dong, et al. Complexity evaluation method of battlefield electromagnetic environment and study of its application[J]. Fire control & command control, 2011, 36(12): 194: 197.

[5] 支朋飞, 高颖, 葛飞. 战场电磁环境复杂度定量评估算法研究[J]. 微处理机, 2014(3): 40-44.
ZHI Peng-fei, GAO Yin, GE Fei. Research on algorithm of quantitative evaluation of battlefield electromagnetic environment complexity[J]. Microprocessors, 2014(3): 40-44.

[6] 董志勇, 栗强. 基于层次分析法的人为电磁环境复杂度评估[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 106-112.
DONG Zhi-yong, LI Qiang. Complexity evaluation of artificial electromagnetism environment based on AHP[J]. Command control & simulation, 2008, 30(5): 106-112.

[7] 董智超, 王勇亮, 李鑫, 等. 复杂电磁环境分析研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(7): 127-129.
DONG Zhi-chao, WANG Yong-liang, LI Xin, et al. Constitution analysis of complicated electromagnetic environment[J]. Electronic design engineering, 2014, 22(7): 127-129.

[8] 李杰然, 刘宇亮. 基于模糊综合评判的战场电磁环境复杂度研究[J]. 电子元器件应用, 2012, 12(9): 84-88.
LI Mu-ran, LIU Yu-liang, LI Xin, et al. Research on complexity of battlefield electromagnetic environment based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electronic component & device applications, 2012, 12(9): 84-88.

[9] 洪丽娜, 何洪涛, 蒙洁, 等. 战场复杂电磁环境要素分析[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(S2): 71-74.
HONG Li-na, HE Hong-tao, MENG Jie, et al. Analysis of complex electromagnetic environment elements in battlefield[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(S2): 71-74.

[10] 章季阳, 王伦文. 一种改进的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 微波学报, 2011, 27(6): 37-40.
ZHANG Ji-yang, WANG Lun-wen. An improved method of the quantificational evaluation on the complexity of electromagnetic environment[J]. Journal of microwaves, 2011, 27(6): 37-40.

[11] 代强伟, 李修和, 薛磊, 等. 一种度量战场电磁环境复

- 杂度的新方法[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 105-109.
- DAI Qiang-wei, LI Xiu-he, XUE Lei, et al. A new method for measuring the complexity of the battlefield electromagnetic environment[J]. Equipment environmental engineering, 2015, 12(4): 105-109.
- [12] 文绮. 复杂电磁环境复杂度度量[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- WEN-Qi. Measurement of complexity of complex electromagnetic environments[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [13] 陈行勇, 张殿宗. 战场电磁环境复杂性层次与评估模型研究[J]. 电子信息对抗技术, 2012, 27(6): 54-58.
- CHEN Hang-yong, ZHANG Dian-zong. Complexity hierarchy and evaluation model of battlefield electromagnetic environment[J]. Electronic information warfare technology, 2012, 27(6): 54-58.
- [14] 李文臣, 张政超, 陆静, 等. 电磁环境复杂度等级评估模型[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 427-431.
- LI Wen-chen, ZHANG Zheng-chao, LU Jing, et al. Evaluation model of electromagnetic environment complexity classification[J]. Journal of CAEIT, 2012, 7(4): 427: 431.
- [15] 王成. 多指标综合评价的一种灰色模糊决策方法[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2007, 33(1): 12-15.
- WANG Chen. A grey fuzzy decision-making method of multi-index comprehensive valuation[J]. Journal of Yanbian University (natural science), 2007, 33(1): 12-15.
- [16] 孙璐璐, 李辉, 黄文亮. 基于灰色层次分析法的雷达对抗训练电磁环境复杂度评估方法研究[J]. 雷达与对抗, 2011, 31(3): 5-8.
- SUN Lu-lu, LI-Hui, HUANG Weu-liang. The evaluation method of electromagnetic environment complexity in radar countermeasure training based on grey-AHP[J]. Radar & ECM, 2011, 31(3): 5-8.
- [17] 王伦文, 孙伟, 潘高峰. 一种电磁环境复杂度快速评估方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2942-2947.
- WANG Lun-wen, SUN Wei, PAN Gao-feng. An evaluating quickly method for electromagnetic environment complexity[J]. Journal of electronics & information technology, 2010, 32(12): 2942-2947.
- [18] 刘小刚. 复杂电磁环境的复杂度度量及其仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- LIU Xiao-gang. Research on complexity of battlefield electromagnetic environment based on fuzzy comprehensive evaluation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011:.
- [19] 叶礼邦, 洪丽娜, 崔健岭, 等. 一种适合通信侦察能力试验的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 中国电子科学学报, 2014, 9(5): 531-537.
- YE Li-bang, HONG Li-na, CUI Jian-ling, et al. A quantificational method for complexity evaluation of electromagnetic environment in communication reconnaissance equipment[J]. Journal of CAEIT, 2014, 9(5): 531-537.
- [20] 赵红梅, 苏海斌, 王健. 战场电磁环境复杂度与战术通信性能的相关性研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 113-117.
- ZHAO Hong-mei, SUN Hai-bin, WANG Jian. Correlation of battle electromagnetic environment complexity and tactics communication system performance[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(11): 113-117.