

doi: 10.7690/bgzdh.2022.02.006

基于灰色层次分析法的侦察无人机生存能力评估

王晓红, 李 龙, 王盛春, 李 锐, 邓 岳
(解放军陆军工程大学通信士官学校, 重庆 400035)

摘要: 针对侦察无人机需保存生存力持续投入作战的要求, 提出一种灰色层次分析法 (grey analytic hierarchy process, GAHP) 对侦察无人机的生存能力进行评估。采用层次分析法及专家打分法构建侦察无人机生存能力指标体系, 结合灰色理论对侦察无人机生存能力进行综合定量评价, 通过层次分析法分析影响侦察无人机生存能力的参数指标, 确定关键指标。实例分析结果表明: 该方法相较于单纯采用层次分析法更客观, 具备可行性, 可为后续优化侦察无人机生存能力提供参考。

关键词: 侦察无人机; 生存能力; 灰色层次分析法
中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Assessment of Reconnaissance UAV Viability Based on GAHP

Wang Xiaohong, Li Long, Wang Shengchun, Li Rui, Deng Yue
(Communication Sergeancy School, Army Engineering University of PLA, Chongqing 400035, China)

Abstract: A grey analytic hierarchy process (GAHP) is proposed to evaluate the survivability of reconnaissance unmanned aerial vehicles (UAVs) in order to meet the requirements of maintaining the survivability of UAVs. The index system of the survivability of reconnaissance UAV is constructed by using the analytic hierarchy process and the expert scoring method, and the comprehensive quantitative evaluation of the survivability of reconnaissance UAV is carried out by combining the grey theory, and the key indexes are determined by analyzing the parameter indexes that affect the viability of reconnaissance UAV through the analytic hierarchy process. The example analysis results show that the method is more objective and feasible than simply using the analytic hierarchy process, which can provide a reference for the subsequent optimization of the survivability of reconnaissance UAV.

Keywords: reconnaissance UAV; viability; GAHP

0 引言

无人机是一种携带多种设备、执行多种任务、能重复使用的无人驾驶器, 具有低成本、低损耗、零伤亡、可重复使用等优点, 广泛应用于各个领域^[1]。无人机最普遍、应用最多的执行任务类型是侦察, 尤其在军事领域。此类任务是利用机载多传感器对特定区域或目标获取情报的过程。现有文献对无人机生存能力评估的较少, 大部分是关于作战能力、侦察能力的评估, 采用的评估方法也不尽相同, 诸如 DBN 法^[2]、灰色层次分析法 (GAHP)^[3]、SEA 法^[4]等。在现实应用中, 侦察无人机的生存能力是最基础并决定能否完成任务的关键^[5]。无人机生存能力属于“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本、贫信息”不确定性系统。为避免层次分析法忽视人对信息认知的灰色性问题, 笔者基于层次分析法, 引入灰色理论^[6], 对侦察无人机的生存能力进行评估论证。

1 灰色层次分析法

灰色层次分析法是灰色理论和层次分析法相结合的产物, 通过层次分析法确定各层次评价指标的权重, 指标的量化和比较则运用灰数和白化权函数取得, 并借助专家经验, 在定性分析基础上定量化处理, 提高评估的科学性和准确性^[7]。

1.1 层次分析法

1) 根据层次分析法的基本原理, 将评估的目标、准则和对象按其相互关系分为最高层、中间层、最底层, 绘出层次结构图。

2) 构造判断矩阵。在确定各层次、各因素之间的权重时, 如果只是定性结果, 则不易被他人接受; 因此, 采用一致矩阵法, 即采用相对重要性尺度进行两两比较, 尽可能减少性质不同的各因素相互比较的困难, 提高准确度。通过专家打分法, 即采用表 1 对各层次评价指标进行两两比较打分, 从而构成判断矩阵 E 。 e_{ij} 为第 i 个要素相对于第 j 个要素的

收稿日期: 2021-10-30; 修回日期: 2021-11-28

作者简介: 王晓红 (1991—), 女, 山东人, 硕士, 从事军事装备学通信电源研究。E-mail: wxh20210126@163.com。

比较结果，则有 $e_{ij} = 1/e_{ji}$ 。

表 1 9 标度指标重要程度判断

标度 (e_{ij})	定义
1	i 因素比 j 因素同等重要
3	i 因素比 j 因素略重要
5	i 因素比 j 因素较重要
7	i 因素比 j 因素非常重要
9	i 因素比 j 因素绝对重要
2、4、6、8	为以上 2 状态中间状态对应标度值
倒数	若 j 与 i 比较，则取倒数

3) 计算最大特征值 λ_{max} 对应的特征向量，而后进行结果一致性检验，以确保判断矩阵的合理性。通过一致性比例 CR 进行一致性检验，其中 $CR=CI/RI$ ，一致性指标 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$ ， RI 为平均随机一致性指标。表 2 给出了判断矩阵计算的平均随机一致性指标检验值。当 $CR<0.1$ 时，则认为判断矩阵通过一致性检验，否则不具有满意的一致性，就需对判断矩阵进行重新打分，直至通过一致性检验^[8]。

表 2 各阶矩阵的平均随机一致性指标

矩阵阶数 n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

4) 计算评估指标相对权重。特征向量 $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ 就是所要确定的各指标权重。

1.2 结合灰色系统理论构建评估模型

基于层次分析法引入灰色理论，灰色系统理论是以“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本、贫信息”不确定性系统为研究对象。已有的层次分析法忽视了人对信息认知的灰色性；因此，在层次分析法基础上，将不同层次的权值使用灰色系统理论来重新计算，得到一种改进后的灰色层次分析法。

1) 确定评估指标矩阵。设有 n 个专家， m 个指标， a_{ij} 为第 j 个专家对第 i 个指标的打分，则有评估指标矩阵 A ^[9]为：

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2) 确定评估灰类的等级数、灰类的灰数和灰类的白化权函数。根据具体层级的待评对象，通过定

性分析确定。常用的灰数白化函数有：灰数为 $x \in (a_1, \infty)$ ，白化函数为 $f_1(a_{ji})$ ；灰数为 $x \in (0, a_1, 2a_1)$ ，白化函数为 $f_2(a_{ji})$ ；灰数为 $x \in (0, a_1, a_2)$ ，白化函数为 $f_3(a_{ji})$ ^[3]。

3) 计算灰色评估矩阵。待评估指标 E_i 对于灰类 k 的评估权重 h_{ik} 及总评估权重 h_i 分别为：

$$h_{ik} = f_k(a_{i1}) + f_k(a_{i2}) + \dots + f_k(a_{im}); \quad (2)$$

$$h_i = \sum_{k=1}^3 h_{ik} \quad (3)$$

根据评估权重 h_{ik} 和 h_i ，得出评估指标 E_i 的灰色评估权向量 r_i 为：

$$r_i = (h_{i1}/h_i, h_{i2}/h_i, \dots, h_{ik}/h_i) \quad (4)$$

同理算得其他指标的灰色评估权向量，从而构成该能力的评估权矩阵 R 为：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mk} \end{pmatrix} \quad (5)$$

4) 综合评价结果记为 B ，则

$$B_i = W_i R_i \quad (6)$$

其中， W_i 为前文计算的指标权重，对各灰类等级进行赋值，得到各评价灰类等级值向量 $C=(C_1, C_2, \dots, C_g)$ ； g 为评估灰类个数，从而得到最终的综合评价值表示为：

$$P = B \times C^T \quad (7)$$

2 侦察无人机生存能力

2.1 建立评估指标层次结构模型

生存能力是无人机武器系统的一种特性，由无人机对敌方武器威胁的躲避和承受 2 方面能力构成。躲避通常与飞机的机动性、飞机性能以及雷达散射截面和红外、光、声等可控测特性相关；承受与飞机装甲、结构材料、飞机总体布置等相关^[5]。根据现代战争中侦察行动的特点和无人机自身特性，对侦察无人机生存能力影响较大的因素主要有设计可靠性、动力系统能力、机动反应能力和隐身能力^[3,5,7,10]。结合文献分析和德尔菲法^[6]确定侦察无人机的生存能力指标，根据层次分析法的基本原理，建立侦察无人机的生存能力指标体系如图 1 所示。

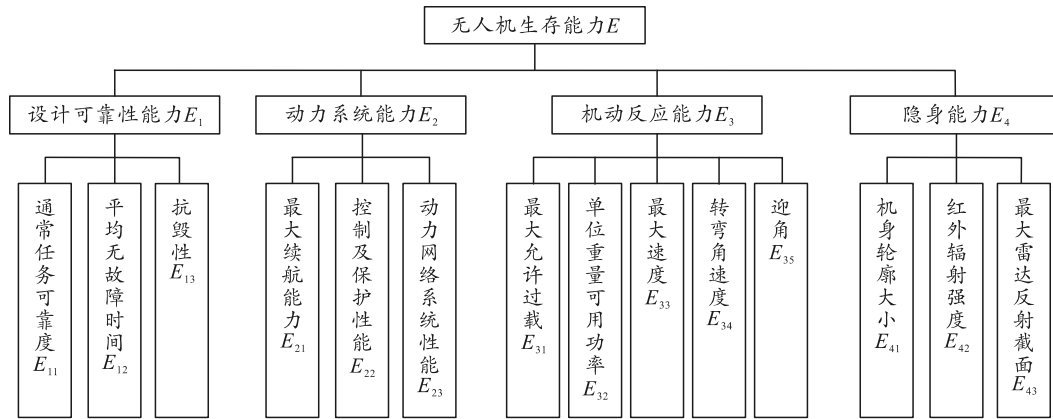


图 1 侦察无人机生存能力评估指标体系

2.2 层次分析计算特征向量

2.2.1 构建各指标判断矩阵

笔者通过邀请专家采用表 1 对各层次评价指标进行两两比较打分，得到无人机生存能力 2 级指标设计可靠性能力 E_1 、动力系统能力 E_2 、机动反应能力 E_3 、隐身能力 E_4 的判断矩阵以及 3 层指标，分别如表 3—7 所示。

表 3 无人机生存能力 2 级指标判断矩阵

标度	E_1	E_2	E_3	E_4
E_1	1	1/6	1/4	1/8
E_2	6	1	2	1/3
E_3	4	1/2	1	1/4
E_4	8	3	4	1
$\lambda_{\max}^E = 4.0875$		$CR = CI/RI = 0.0324 < 0.1$		

表 4 设计可靠性能力下层指标判断矩阵

标度	E_{11}	E_{12}	E_{13}
E_{11}	1	4	2
E_{12}	1/4	1	1/5
E_{13}	1/2	5	1
$\lambda_{\max}^E = 3.094$		$CR = CI/RI = 0.081 < 0.1$	

表 5 动力系统能力下层指标判断矩阵

标度	E_{21}	E_{22}	E_{23}
E_{21}	1	6	4
E_{22}	1/6	1	1/3
E_{23}	1/4	3	1
$\lambda_{\max}^E = 3.0536$		$CR = CI/RI = 0.0462 < 0.1$	

表 6 机动反应能力下层指标判断矩阵

标度	E_{31}	E_{32}	E_{33}	E_{34}	E_{35}
E_{31}	1	9	2	4	7
E_{32}	1/9	1	1/6	1/5	1/3
E_{33}	1/2	6	1	3	5
E_{34}	1/4	5	1/3	1	4
E_{35}	1/7	3	1/5	1/4	1
$\lambda_{\max}^E = 5.2295$		$CR = CI/RI = 0.0512 < 0.1$			

表 7 隐身能力下层指标判断矩阵

标度	E_{41}	E_{42}	E_{43}
E_{41}	1	1/5	1/9
E_{42}	5	1	1/4
E_{43}	9	4	1
$\lambda_{\max}^E = 3.0713$		$CR = CI/RI = 0.0614 < 0.1$	

其中， λ_{\max}^E 为最大特征值。上表中各矩阵计算得到的 CR 均小于 0.1，说明各比较矩阵具有满意一致性。

2.2.2 计算指标权重

由判断矩阵，计算得出各级指标权重：

$$W_E = (0.0479, 0.2485, 0.1473, 0.5563);$$

$$W_{E_1} = (0.5368, 0.0989, 0.3643);$$

$$W_{E_2} = (0.6910, 0.0914, 0.2176);$$

$$W_{E_3} = (0.4609, 0.0356, 0.2879, 0.1521, 0.0635);$$

$$W_{E_4} = (0.0603, 0.2311, 0.7085).$$

根据权重计算结果，侦察无人机生存能力 2 级指标的重要度排序为：隐身能力 $E_4 >$ 动力系统能力 $E_2 >$ 机动反应能力 $E_3 >$ 设计可靠性能力 E_1 。同理可得底层指标的重要度排序。

2.2.3 评估对象的评估矩阵和评估灰类

邀请 4 名专家对无人机生存能力的 3 级性能指标进行打分，打分方式使用 10 分制，得到评估指标矩阵：

$$A_{E_1} = \begin{pmatrix} 7 & 8 & 7 & 6 \\ 8 & 9 & 6 & 7 \\ 5 & 6 & 4 & 8 \end{pmatrix}; \quad A_{E_2} = \begin{pmatrix} 9 & 9 & 7 & 8 \\ 6 & 8 & 5 & 7 \\ 4 & 6 & 4 & 5 \end{pmatrix};$$

$$A_{E_3} = \begin{pmatrix} 9 & 8 & 8 & 7 \\ 6 & 7 & 8 & 7 \\ 7 & 9 & 9 & 8 \\ 5 & 6 & 7 & 6 \\ 4 & 5 & 6 & 4 \end{pmatrix}; \quad A_{E_4} = \begin{pmatrix} 7 & 6 & 4 & 6 \\ 8 & 9 & 7 & 7 \\ 9 & 8 & 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

将评价优劣等级划分为 3 级，即好、中、差，给出 9、6、1 分的标准。设有 3 个评估灰类“好”“中”“差”，其对应的灰数和白化权函数如图 2 所示。

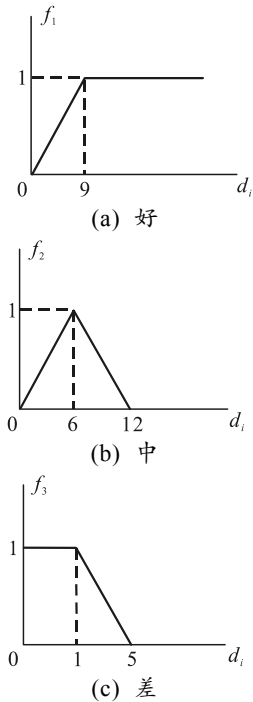


图 2 灰类的白化权函数

设第 1 类“好” $k=1$ ，灰度系数 $x \in (9, \infty)$ ；第 2 类“中” $k=2$ ，灰度系数 $x \in (0, 6, 12)$ ；第 3 类“差” $k=3$ ，灰度系数 $x \in (0, 1, 5)$ ；分别对应白化权函数图中的 f_1 、 f_2 、 f_3 。其函数表示如下：

$$f_1 = \begin{cases} x/9 & (x \leq 9) \\ 1 & (x > 9) \end{cases}; \quad (8)$$

$$f_2 = \begin{cases} x/6 & (x \leq 6) \\ 2 - x/6 & (6 < x < 12) \\ 0 & (x < 0, x > 12) \end{cases}; \quad (9)$$

$$f_3 = \begin{cases} 1 & (0 < x \leq 1) \\ 5/4 - x/4 & (1 < x \leq 5) \end{cases}. \quad (10)$$

通过式(2)–(5)可得，实例中指标 E_1 的专家组评分结果 A_{E_1} 对应的评估权矩阵 R_{E_1} 为

$$R_{E_1} = \begin{pmatrix} 0.483 1 & 0.517 5 & 0 \\ 0.526 3 & 0.473 7 & 0 \\ 0.416 4 & 0.542 9 & 0.040 7 \end{pmatrix};$$

$$R_{E_2} = \begin{pmatrix} 0.594 6 & 0.405 4 & 0 \\ 0.440 7 & 0.559 3 & 0 \\ 0.365 4 & 0.548 1 & 0.086 5 \end{pmatrix};$$

$$R_{E_3} = \begin{pmatrix} 0.571 4 & 0.428 6 & 0 \\ 0.608 7 & 0.391 3 & 0 \\ 0.594 6 & 0.405 4 & 0 \\ 0.421 1 & 0.578 9 & 0 \\ 0.365 4 & 0.548 1 & 0.086 5 \end{pmatrix};$$

$$R_{E_4} = \begin{pmatrix} 0.405 3 & 0.555 0 & 0.039 6 \\ 0.548 7 & 0.451 3 & 0 \\ 0.571 4 & 0.428 6 & 0 \end{pmatrix}.$$

2.2.4 对指标综合评价

综合评价结果记为 B ，则 $B_i = W_i R_i$ ，则可分别求出设计可靠性能、动力系统、机动反应能力、隐身能力的下层指标评价结果以及 2 级指标的综合评价结果。

$$B_1 = (0.463 1, 0.522 4, 0.014 8);$$

$$B_2 = (0.530 7, 0.450 5, 0.018 8);$$

$$B_3 = (0.543 5, 0.451 0, 0.005 5);$$

$$B_4 = (0.556 1, 0.441 4, 0.002 4).$$

由 B_i 得下层指标所属 2 级指标对于各评价灰类的灰色评判矩阵 R ，则有

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.463 1 & 0.522 4 & 0.014 8 \\ 0.530 7 & 0.450 5 & 0.018 8 \\ 0.543 5 & 0.451 0 & 0.005 5 \\ 0.556 1 & 0.441 4 & 0.002 4 \end{pmatrix}.$$

由式(6)计算得到 2 级指标评价结果：

$$B = WR = (0.047 9, 0.248 5, 0.147 3, 0.556 3)$$

$$\begin{pmatrix} 0.463 1 & 0.522 4 & 0.014 8 \\ 0.530 7 & 0.450 5 & 0.018 8 \\ 0.543 5 & 0.451 0 & 0.005 5 \\ 0.556 1 & 0.441 4 & 0.002 4 \end{pmatrix} = (0.543 5, 0.449 0, 0.007 5).$$

2.2.5 计算综合评估值

将各灰类等级按“灰水平”赋值，得各个评价灰类等级量化值向量 $C = (9, 6, 1)$ ，由式(7)计算得出 $P = (0.543 5, 0.449 0, 0.007 5)(9, 6, 1)^T = 7.592 6$ ，根据灰类等级的划分，可以将评估的结果对应到“好”“中”“差”3 个等级，参照评估结果可以得出，该侦察无人机生存能力属于中等偏好等级。

3 其他算例分析

为检验该方法的适用性，笔者邀请专家对另一型号的侦察无人机进行打分，得到的评估指标矩阵如下：

$$A_{E_1} = \begin{pmatrix} 5 & 7 & 6 & 4 \\ 8 & 8 & 7 & 7 \\ 7 & 6 & 6 & 8 \end{pmatrix}; \quad A_{E_2} = \begin{pmatrix} 4 & 5 & 5 & 6 \\ 6 & 6 & 5 & 4 \\ 5 & 6 & 4 & 5 \end{pmatrix};$$

$$A_{E_3} = \begin{pmatrix} 7 & 6 & 5 & 6 \\ 6 & 8 & 8 & 7 \\ 8 & 9 & 8 & 8 \\ 4 & 5 & 5 & 6 \\ 5 & 5 & 6 & 4 \end{pmatrix}; \quad A_{E_4} = \begin{pmatrix} 8 & 7 & 8 & 9 \\ 8 & 8 & 7 & 7 \\ 7 & 8 & 7 & 8 \end{pmatrix}.$$

同之前算例的评估过程一样，计算得到 2 级指标评价结果：

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.449 6 & 0.550 4 & 0 \\ 0.374 7 & 0.562 3 & 0 \\ 0.478 2 & 0.512 5 & 0.009 3 \\ 0.060 3 & 0.231 1 & 0.708 5 \end{pmatrix};$$

$$B = WR = (0.047 9, 0.248 5, 0.147 3, 0.556 3)$$

$$\begin{pmatrix} 0.449 6 & 0.550 4 & 0 \\ 0.374 7 & 0.562 3 & 0 \\ 0.478 2 & 0.512 5 & 0.009 3 \\ 0.060 3 & 0.231 1 & 0.708 5 \end{pmatrix} = (0.398 7, 0.505 4, 0.073 8).$$

由式(7)可得： $P=(0.398 7, 0.505 4, 0.073 8)(9, 6, 1)^T=6.694 2$ ，根据灰类等级的划分，可以将评估的结果对应到“好”“中”“差”3 个等级，参照评估结果可得出，该型号侦察无人机生存能力属于中等等级。

4 结束语

笔者采用灰色层次分析法对侦察无人机的生存

能力进行评估。实例分析结果表明：相较于单纯采用层次分析法，该方法更客观、可行，可为后续优化侦察无人机生存能力提供参考。

参考文献：

- [1] 罗贺, 秦英祥, 王国强, 等. 一种无人机侦察能力评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(2): 7-12.
- [2] 张海峰, 韩芳林, 潘长鹏. 基于 DBN 的察打一体无人机作战效能评估[J]. 电光与控制, 2019, 26(4): 81-84, 89.
- [3] 杨勇, 吴洋. 基于灰色层次分析法的察打型无人机作战能力评估[J]. 舰船电子工程, 2014(7): 134-137.
- [4] 程燕, 王鹏, 王雪琴. 基于 SEA 的炮兵无人机侦察效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(7): 126-128.
- [5] 胡仲虎, 盛怀洁. 无人机生存力评估及其在电子对抗中的应用[J]. 无人机, 2008(1): 30-31.
- [6] 赵悦岑, 姜文忠, 汪金奎, 等. 基于灰色层次分析法的无人机回收系统评估[J]. 无人系统技术, 2019, 2(5): 56-62.
- [7] 刘东洋, 孙鹏, 张杰勇. 基于 GAHP 的战斗机综合作战能力评估[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(5): 65-69.
- [8] 邓岳, 王盛春, 李龙, 等. 电源车作战全过程总体战场生存能力评估[J]. 装备环境工程, 2020, 18(2): 13-19.
- [9] 李延军. 灰色层次分析法在导弹武器系统效能评估中的应用研究[J]. 中国科技信息, 2009(21): 29-30.
- [10] 段振武, 麻建军. 隐身技术在无人机上的应用研究[J]. 无人机, 2009, 41(5): 65-69.
- [8] 邢更力, 王晓栋. 试验场综合数据采集系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6): 251-255.
- [9] 胡道畅, 欧阳中辉, 陈青华, 等. 基于 CAN 总线的特种车辆状态数据采集系统设计[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 30-32.
- [10] 王凯, 牡丹, 吴迪新. 信息化装备运行数据的采集和使用探讨[J]. 火控雷达技术, 2019, 48(4): 87-90.
- [11] 钱新桥. 装备在役考核指控通信数据采集装置的设计与应用[J]. 电子质量, 2019(8): 46-50.
- [12] 王伟, 李远哲. 坦克装甲车辆试验鉴定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019: 268-286.
- [13] 陶冠时, 彭迪, 李飞. 舰船“六性”数据收集方法研究[J]. 船舶标准化与质量, 2017(4): 50-54.

(上接第 17 页)

- [2] 毛杰. 舰船装备全生命周期试验数据采集方法研究[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(6): 88-91.
- [3] 迟明祎, 侯兴明, 周磊, 等. 对作战试验数据工程建设的思考[J]. 兵工自动化, 2020, 39(40): 30-34.
- [4] 罗晓强, 王毅刚, 游修东. 水雷武器在役考核数据采集与管理方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019(24): 70-75.
- [5] 李阿楠, 廖学军. 模糊综合评判在武器装备作战试验中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(5): 15-17.
- [6] 张宏江, 罗建华, 郭英, 等. 装备在役考核[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 116-119.
- [7] 刘国亮. 装甲某型数据采集装置的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(2): 26-27, 29.