

doi: 10.7690/bgzdh.2024.02.021

## 基于可拓学的无人机边境侦察巡逻能力评估

杨根庆<sup>1,2</sup>, 胥辉旗<sup>1</sup>, 毛廷鏊<sup>1,2</sup>, 吴一乔<sup>1</sup>

(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 77606 部队, 拉萨 850000)

**摘要:** 为解决无人机边境侦察巡逻能力有效评估问题, 采用基于可拓学的原理物元分析方法, 结合无人机在高原边境的使用, 分析影响无人机侦察巡逻能力的主要因素, 选取恰当的指标参数, 构建无人机侦察巡逻能力指标评价模型, 最终得到无人机所属效能等级。结果表明: 该方法可较好地保证评估结果的客观性和完备性, 能够对高原环境下指挥员和操作手利用无人机侦察巡逻提供一定参考。

**关键词:** 无人机; 侦察巡逻能力; 可拓学

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A

## Evaluation of UAV Border Reconnaissance and Patrol Capability Based on Extenics

Yang Genqing<sup>1,2</sup>, Xu Huiqi<sup>1</sup>, Mao Tingliu<sup>1,2</sup>, Wu Yiqiao<sup>1</sup>

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

2. No. 77606 Unit of PLA, Lhasa 850000, China)

**Abstract:** In order to effectively evaluate the reconnaissance and patrol capability of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the border area, the principle of matter element analysis based on extenics is used to analyze the main factors affecting the reconnaissance and patrol capability of UAVs in combination with the use of UAVs in the plateau border area, and appropriate index parameters are selected to build an index evaluation model for the capability of UAV reconnaissance and patrol. The results show that this method can better ensure the objectivity and completeness of the evaluation results, and can provide a reference for commanders and operators to use UAV reconnaissance and patrol in the plateau environment.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV); reconnaissance and patrol capability; extenics

### 0 引言

随着现代战争形态的发展, 无人机的军事运用越来越广泛<sup>[1]</sup>, 凭借其智能化和无人化的特点, 在部分领域能够代替军事人员执行某些危险系数高、难度系数大的军事任务。高原边境巡逻就是一项比较危险的军事任务, 既要和恶劣的自然环境斗争, 又要时刻提防随时可能出现的敌人。无人机的运用保证了指挥员和操作手能够远离恶劣的自然环境, 节省了大量人力物力, 而且以其自主化程度高、监测能力强、侦察巡逻范围广的特点能够有效保护我国领土安全。未来高原无人区边境的巡逻, 无人装备的运用是必然趋势。无人机以其机动性好、展开迅速、作用范围大、侦察区域广、实时性强、可靠性高和综合能力突出等特点, 更能适应高原战场的复杂环境, 缓解我边防部队的压力。

目前, 已经有许多民用无人机在高原地区广泛运用, 如线路巡检、航拍遥感等<sup>[2]</sup>, 但在高海拔边境地区的运用很少。高原边境的空气稀薄、地形复杂给无人机安全运行带来了严峻挑战, 对无人机高

原侦察巡逻能力的评估是其边境运用不可或缺的环节。目前, 无人机高原运用能力的评估手段十分缺乏。笔者基于高原环境下边境巡逻的战场态势, 在吸收以往研究相关成果的基础上<sup>[3-5]</sup>, 优化了无人机边境侦察巡逻能力评估指标体系, 采用定量与定性 2 方面分析的可拓学理论物元分析法, 建立无人机侦察巡逻能力评估模型, 通过使用 Matlab 软件进行实例仿真实验, 定量评估出体系效能所属等级。

### 1 无人机边境侦察巡逻能力分析

无人机边境侦察巡逻是指使用无人机在高原环境下替代士兵完成国防线上一些难以通行路段的巡逻监控<sup>[6]</sup>。其侦察巡逻能力要综合考虑各类影响无人机完成任务的因素, 高原高寒边境地区恶劣的自然环境对武器装备的使用效能和适用性影响巨大<sup>[7]</sup>。选取的指标一要切实考虑影响高原实战的因素, 二要客观全面地反映无人机的性能。按照高原环境下边境巡逻的作战效能评估需求, 选取基本能力、环境适应能力、侦察能力 3 个无人机边境侦察巡逻能力主要指标。结合无人机作战任务特点和主

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2023-11-23

第一作者: 杨根庆(1995—), 男, 云南人, 硕士。

要指标，选取次要指标：

1) 续航能力。

续航能力是指无人机滞空的时间，续航能力越大，滞空时间越久，就能更好地完成侦察监控任务。在边境巡逻中就能够巡逻监控更大的面积。

2) 信息传输能力。

信息传输能力指无人机对数据处理后的传输能力。高原边境的低温、电离层较低等因素，会对通信设备的影响干扰增大，使通信效能降低；同时，边境地形崎岖、环境复杂，对通信影响大，因此信息传输能力是无人机边境运用的一个重要因素。

3) 机动性能。

在高原环境下，恶劣的环境对无人机的要求极高，无人机气动升力与发动机动力都明显下降，升限高度都有所限制。在缺氧环境中，故障概率增大，机动性能持续减弱。

4) 自然环境适应能力。

无人机在完成任务的过程中要克服自然环境的影响，高原地区山高层叠、地形复杂、低温、低压和缺氧等恶劣的自然环境对无人机的使用效能和适用性影响巨大。

5) 电磁对抗能力。

电磁对抗能力即为电磁防护能力，无人机在高原运用时，机载设备或关键性器件由于会受到电磁脉冲(高原产生的电磁环境或敌人释放的电磁波)的干扰，导致整个系统性能下降，使无人机失去操控或者坠毁。

6) 目标发现能力。

目标发现能力指无人机在巡逻区域内，对目标或疑似目标发现的概率。利用无人机携带的光电吊舱判断边界是否被破坏和接近。

7) 目标识别能力。

目标识别能力指发现疑似目标后，对目标的识别判断能力。通常情况下边境巡逻的目标一般包括敌人的活动轨迹、简易工事和哨所等。

8) 目标定位能力。

目标定位能力指发现识别目标后能够快速地对位其所在位置的能力，以便引导我方人员赶到现场进行处置。

根据以上分析，构建出无人机边境侦察巡逻能力指标评估体系，如图 1 所示。

## 2 基于可拓学的评估模型

可拓学又称物元分析法<sup>[8]</sup>，是我国学者蔡文等

的研究成果。可拓学的理论基础是物元理论和可拓集合理论，把评价对象的特征和对象关于特征的量值转化成物元来研究，然后用可拓集合的关联函数值来体现特征参数与评价对象之间的从属关系，进而将定性评价拓展为定量评价。可拓学最主要的构成要素有经典域、节域和待评物元矩阵以及关联度。

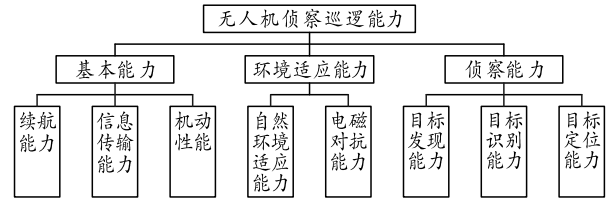


图 1 无人机侦察巡逻能力评估指标体系关系

### 2.1 经典域

设待评估对象有  $n$  个评估指标： $c_1, c_2, \dots, c_n$ ，分为  $j$  个评价等级， $v$  为评价值的量值区间，当评价等级  $N$  的特征  $C$  发生时，特征  $C$  所对应的量值区间即为经典域<sup>[9]</sup>。经典域物元模型：

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $N_j$  为第  $j$  个评价等级； $c_i$  为  $N_j$  的评估指标； $v_{ji} \langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$  为  $N_j$  关于评价指标  $c_i$  的取值区间。

### 2.2 节域

节域<sup>[10]</sup>即为所有经典域的集合，节域物元模型如下：

$$R_p = (P, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} P & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $P$  为所有评估等级的集合； $V_{pi}$  为  $P$  关于  $c_1, c_2, \dots, c_n$  的取值范围，即  $P$  的节域为  $\langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 。

### 2.3 待评物元矩阵

对于待评价的对象，经典域和节域确定之后，把所检测得到的数据或分析的结果用物元  $R_0$  表示，称为待评物元<sup>[11]</sup>：

$$R_0 = (P_0, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $P_0$  为评价对象； $V_i$  为  $P$  关于  $c_i$  的相应评估指标的数值。

### 2.4 关联度的计算及评估等级的确定

根据可拓学集合理论，第  $i$  个指标数值域属于第  $j$  个等级的关联度函数<sup>[12]</sup>：

$$K_j(v_i) = \begin{cases} \rho(v_i, v_{ji}) / (\rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{ji})) & v_i \in v_{ji} \\ -\rho(v_i, v_{ji}) / |v_{ji}| & v_i \notin v_{ji} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $v_i$  为特征值； $v_{ji}$  为  $v_i$  的取值范围； $\rho(v_i, v_{ji})$  与  $\rho(v_i, v_{pi})$  的计算公式如下：

$$\rho(v_i, v_{ji}) = |v_i - (a_{ji} + b_{ji}) / 2| - (b_{ji} - a_{ji}) / 2; \quad (5)$$

$$\rho(v_i, v_{pi}) = |v_i - (a_{pi} + b_{pi}) / 2| - (b_{pi} - a_{pi}) / 2. \quad (6)$$

则评价指标  $C_n$  关于等级  $j$  的关联度为：

$$K_j(p_0) = \sum_{i=1}^n \omega_{ij} K_j(v_i). \quad (7)$$

式中： $K_j(p_0)$  为  $j$  等级的关联度； $\omega_{ij}$  为指标权重<sup>[13]</sup>。若存在：

$$K_j(p) = \max \{K_j(p_0), j=1, 2, \dots, m\}. \quad (8)$$

即可判断出评估对象所属的等级。

## 3 实例分析

### 3.1 某型无人机评价指标体系的确立及其权重

某型无人机已在高原边境巡逻中实践运用，下面以该型无人机为例，定量评估其体系效能所属等级。无人机翼展 3.8 m，长度 2.15 m，起降定位精度 0.5 m，工作环境 -20~55 °C，实用升限 > 7 000 m。其他性能参数如表 1 所示。

表 1 某型无人机性能参数

载荷或起飞重量/kg	续航时间/h	航程/km	经济巡航速度/(km/h)
1	>3.5	>265	—
5	>2.5	>225	—
10	>1.5	>150	—
27	—	—	75
32	—	—	86
36	—	—	94

根据无人机边境侦察巡逻能力分析中所选取的指标，结合该型无人机边境运用的各项数据采集，并使用 Delphi 法<sup>[14]</sup> 为各指标打分，确定各项评估指标的权重系数，如表 2 所示。

### 3.2 确定某型无人机经典域及节域

结合边防部队运用实践和无人机相关领域专家评判，将无人机侦察巡逻能力评估指标划分为优秀(A)、良好(B)、合格(C)和不合格(D)4 个等级，区分

出无人机侦察巡逻能力优劣程度。每个等级的评价标准对应于表 3 中，则相应的经典域  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  如下：

$$R_1 = (A, C_i, V_{1i}) = \begin{bmatrix} A & \text{续航能力 } c_1 & \langle 0.75, 1 \rangle \\ & \text{信息传输能力 } c_2 & \langle 0.75, 1 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & \text{目标定位能力 } c_8 & \langle 0.75, 1 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_2 =$$

$$(B, C_i, V_{2i}) = \begin{bmatrix} B & \text{续航能力 } c_1 & \langle 0.5, 0.75 \rangle \\ & \text{信息传输能力 } c_2 & \langle 0.5, 0.75 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & \text{目标定位能力 } c_8 & \langle 0.5, 0.75 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_3 =$$

$$(C, C_i, V_{3i}) = \begin{bmatrix} C & \text{续航能力 } c_1 & \langle 0.25, 0.5 \rangle \\ & \text{信息传输能力 } c_2 & \langle 0.25, 0.5 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & \text{目标定位能力 } c_8 & \langle 0.25, 0.5 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_4 = \lim_{x \rightarrow \infty} (D, C_i, V_{4i}) =$$

$$\begin{bmatrix} D & \text{续航能力 } c_1 & \langle 0, 0.25 \rangle \\ & \text{信息传输能力 } c_2 & \langle 0, 0.25 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & \text{目标定位能力 } c_8 & \langle 0, 0.25 \rangle \end{bmatrix}.$$

表 2 无人机边境侦察巡逻能力评估指标体系权重

一级指标	打分	权重	二级指标	打分	权重
基本能力	32	0.32	续航能力 $c_1$	12	0.12
			信息传输能力 $c_2$	11	0.11
			机动性能 $c_3$	9	0.09
环境适应能力	38	0.38	自然环境适应能力 $c_4$	25	0.25
			电磁对抗能力 $c_5$	13	0.13
侦察能力	30	0.30	目标发现能力 $c_6$	11	0.11
			目标识别能力 $c_7$	10	0.10
			目标定位能力 $c_8$	9	0.09

表 3 无人机边境侦察巡逻能力评估指标分级标准

指标	A 级	B 级	C 级	D 级
续航能力 $c_1$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
信息传输能力 $c_2$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
机动性能 $c_3$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
自然环境适应能力 $c_4$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
电磁对抗能力 $c_5$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
目标发现能力 $c_6$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
目标识别能力 $c_7$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$
目标定位能力 $c_8$	$\langle 0.75, 1 \rangle$	$\langle 0.5, 0.75 \rangle$	$\langle 0.25, 0.5 \rangle$	$\langle 0, 0.25 \rangle$

节域为经典域的集合：

$$R_p = (p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} A-D & \text{续航能力}c_1 & \langle 0,1 \rangle \\ & \text{信息传输能力}c_2 & \langle 0,1 \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & \text{目标定位能力}c_8 & \langle 0,1 \rangle \end{bmatrix}。$$

### 3.3 待评无人机物元矩阵

现对该型无人机边境侦察巡逻能力评估，通过对边防实际运用调研及数据收集处理分析得到 8 个指标的归一化数据，得到物元矩阵为：

$$R_0 = (p_0, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} p_0 & c_1 & 0.71 \\ & c_2 & 0.66 \\ & c_3 & 0.58 \\ & c_4 & 0.78 \\ & c_5 & 0.72 \\ & c_6 & 0.68 \\ & c_7 & 0.65 \\ & c_8 & 0.60 \end{bmatrix}。$$

### 3.4 计算关联度及确定评估等级

根据式(1)–(7)，结合 Matlab 软件进行计算，该型无人机边境侦察巡逻能力关于各等级的关联度如表 4 所示。

表 4 无人机边境侦察巡逻能力评估各指标关联度

指标	$K_1(V_i)$	$K_2(V_i)$	$K_3(V_i)$	$K_4(V_i)$
续航能力 $c_1$	-0.121 2	0.160 0	-0.420 0	-0.613 3
信息传输能力 $c_2$	-0.209 3	0.360 0	-0.320 0	-0.546 7
机动性能 $c_3$	-0.288 1	0.320 0	-0.160 0	-0.440 0
自然环境适应能力 $c_4$	0.120 0	-0.120 0	-0.560 0	-0.706 7
电磁对抗能力 $c_5$	0.096 8	0.120 0	0.440 0	-0.626 7
目标发现能力 $c_6$	-0.179 5	0.280 0	-0.360 0	-0.573 3
目标识别能力 $c_7$	-0.222 2	0.400 0	-0.300 0	-0.533 3
目标定位能力 $c_8$	-0.272 7	0.400 0	-0.200 0	-0.466 7
$K_j(P_0)$	-0.112 6	0.180 0	-0.384 8	-0.589 9

根据式(8)，可以判断出  $K_j = \max K_j(P_0) = 0.180 0$ ,  $j=1, 2, 3, 4$ 。

按照可拓学的最大隶属原则<sup>[15]</sup>，表明该型无人机边境侦察巡逻能力为良好等级。 $K_3(V_3) = 0.440 0$ ，属于合格等级，表明该型无人机电磁对抗能力较弱，后续应重点加强该方面能力的改进提升。指挥员和无人机操作手在任务区域执行侦察巡逻任务时，应当重点关注该地区的电磁环境。

## 4 结论

笔者基于高原环境下边境巡逻的战场态势，在吸收以往研究的相关成果上，优化了无人机边境侦

察巡逻能力评估指标体系，使评估结论更加满足实际作战需求；采用可拓学原理中物元分析对无人机侦察巡逻指标效能进行评估的方法，使用 Delphi 法确定指标并赋予权重，从计算各指标与等级关联度出发，最终获得无人机侦察巡逻指标能力与等级的关联度为良好，提出无人机在高原运用时后续应着重在电磁对抗能力方面进行提升的建议。

### 参考文献：

- [1] 韩亮, 任章, 董希望, 等. 多无人机协同控制方法及运用研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 1-9.
- [2] 高坤, 李昶君, 杨金波, 等. 无人机在高原山区线路巡检中的应用[J]. 电气技术, 2015(4): 130-131, 133.
- [3] 葛峰, 韩建立, 林云, 等. 基于 AHP-可拓学的无人机可靠性综合评价模型研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 172-175.
- [4] 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, 34(7): 134-137.
- [5] 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): 77-80.
- [6] 黄兆麟, 关万隆, 李嘉伟. 无人机在边境管控中的运用研究[C]// 2017 年(第三届)中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2017.
- [7] 高强, 庞志兵, 魏赫. 高原高寒环境对武器装备的影响研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 118-122.
- [8] 蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系[J]. 科学通报, 2013(13): 1190-1199.
- [9] 杜栋. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 230-248.
- [10] 赵丁选, 王倩, 张祝新. 基于层次分析法的可拓学理论对舰载直升机可靠性的评估[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1528-1531.
- [11] 刘旭, 桂云秋, 朱臣. 基于可拓学理论的航材库管理质量评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(3): 319-324.
- [12] 邢鹏, 贾希胜, 郭驰名, 等. 基于可拓学理论的传感器选型优化研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 75-79.
- [13] 王丰, 林瑜, 农元苑. 反舰导弹类型的 Bayes-可拓识别模型[J]. 航天控制, 2019, 37(3): 13-17.
- [14] 张姣姣, 刘云. 基于 Delphi 法和 BP 神经网络的技术预见模型研究[J]. 科技和产业, 2017, 17(12): 81-88.
- [15] 高松, 韩建立, 陈健, 等. 基于可拓学的武器装备体系效能评估[J]. 海军航空工程学院学报, 2018, 33(6): 546-552.