

装备通用质量特性及寿命评估

# 基于模糊层次分析法的警用非致命空气炮作战效能评估

陈飞翔<sup>a</sup>, 郭三学<sup>b</sup>, 牛良超<sup>a</sup>

(武警工程大学 a.研究生大队; b.装备管理与保障学院, 西安 710086)

**摘要:** **目的** 评估警用非致命空气炮的作战效能。**方法** 首先运用层次分析法, 确立警用非致命空气炮作战效能评估指标体系, 构建作战效能的模糊层次综合评判模型, 并采用加权平均算法和平均随机一致性指标, 进行各因素权重计算和一致性检验, 最后通过模糊综合评判, 评估得出警用非致命空气炮作战效能。**结果** 警用非致命空气炮综合评估得分为82.92分, 其性能评估为“较好”。**结论** 通过评估结果, 反映出警用非致命空气炮综合作战效能较好, 具有推广价值和应用前景, 为空气炮优化设计和实战应用提供了参照。

**关键词:** 警用非致命空气炮; 层次分析法; 作战效能; 加权平均算法; 模糊综合评判

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.05.020

中图分类号: TJ399 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)05-0101-05

## Operational Effectiveness Evaluation of Police Non-lethal Air Cannon Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process

CHEN Fei-xiang<sup>a</sup>, GUO San-xue<sup>b</sup>, NIU Liang-chao<sup>a</sup>

(a. Graduate Student Brigade, b. School of Equipment Management and Support, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

**ABSTRACT: Objective** To evaluate the operational effectiveness of police non-lethal air cannon. **Methods** Firstly, the analytic hierarchy process was used to establish an operational effectiveness evaluation index system of police non-lethal air cannon and a fuzzy hierarchical comprehensive evaluation model for combat effectiveness. Then, the weighted average algorithm and the average random consistency index were used, the weight of each factor was calculated and the consistency test was carried out. Finally, operational effectiveness of police non-lethal air cannon was evaluated through the fuzzy comprehensive evaluation. **Results** The comprehensive evaluation score of police non-lethal air cannon was 82.92. Its performance was evaluated as "good". **Conclusion** The evaluation results reflect that the police non-lethal air cannon has good comprehensive operational effectiveness. It has popularization value and application prospect and provides a reference for optimum design and practical application of Air Cannon.

**KEY WORDS:** police non-lethal air cannon; analytic hierarchy process; operational effectiveness; weighted average algorithm; fuzzy comprehensive evaluation

警用非致命空气炮是利用自然空气作为工作介质近距离驱散群体目标的一种反人员非致命武器, 具

备使敌方人员装备失去作战能力以及对财产和非故意破坏降至最低的基本特性<sup>[1]</sup>。其工作原理是

收稿日期: 2018-11-04; 修订日期: 2018-12-04

作者简介: 陈飞翔(1986—), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要研究动能驱散装备建设。

通讯作者: 郭三学(1962—), 男, 陕西富平人, 博士, 教授, 主要研究方向为非致命武器。

利用电能驱动方式压缩自然空气形成高压气体,以瞬发喷爆或持续喷射方式作用于目标,拒止目标敌对行动,实现驱散行动中敌我的有效物理隔离,并实现敌我双方而非敌单方的非致命性,30L 警用非致命空气炮结构如图 1 所示,技术参数见表 1。

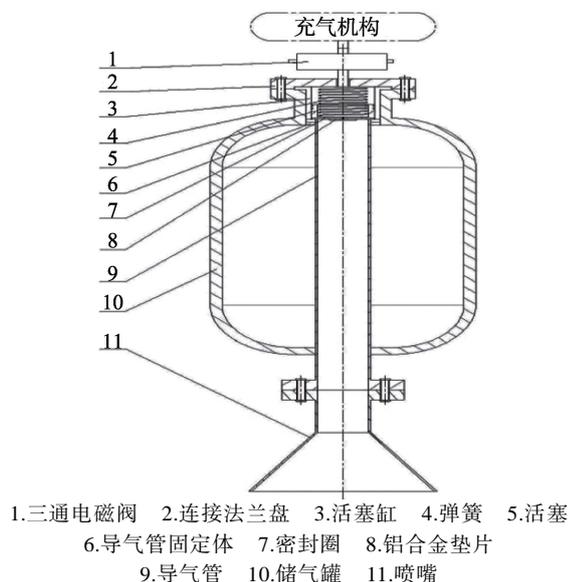


图 1 30 L 警用非致命空气炮结构

表 1 30L 警用非致命空气炮技术参数

参数类型	参数值
储气容量/L	30
总体质量/kg	35
导气管内径/mm	57
气体压力/MPa	0.4~0.8
射流冲击力/N	1176~3720
有效作用距离/m	10~20
环境温度/℃	-10~50
10 m 处射流速度/(m·s <sup>-1</sup> )	11.5
10 m 处射流半径/m	2.75
10 m 处作用动能/J	89.7

空气炮处置群体性事件尚无先例,主要在于空气炮作为新型非致命性武器,以柔性自然空气作为动能打击介质,其理论的正确、装备的研制、作用的效果,尚需要科学论证。因此,对空气炮作战效能的评估论证就显得尤为迫切。文中运用模糊层次分析法,构建了以非致命性、适用性、人文性为准则层的警用非致命空气炮作战效能评估体系,通过加权平均算法和平均随机一致性指标,进行各要素权重计算和一致性检验,对警用非致命空气炮作战效能进行评估,为空气炮优化设计和实战应用提供客观参照。

## 1 作战效能评估指标体系

空气炮作为新型警用非致命武器,既要求在作战

行动中具备可靠的非致命性、高效的机动性、稳定的作用性,又要具备新时代处置群体事件非致命作战装备特有的人文性、高度的集成性、维护的经济性,以此建立警用非致命空气炮作战效能评估指标体系,如图 2 所示。

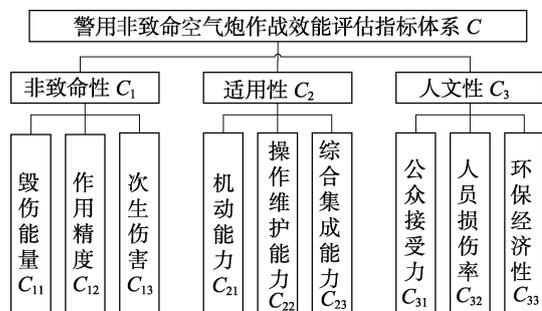


图 2 警用非致命空气炮作战效能评估指标体系

### 1.1 非致命性

警用非致命空气炮作为处置群体性事件的动能驱散装备,非致命性是其首要的考量因素,主要包括毁伤能量、作用精度和次生伤害。

1) 毁伤能量。空气炮毁伤能量集中于高压气体射流上,在有效射程内,随着作用距离的缩小,毁伤能量也逐步增强。空气炮压缩强度、发射管口径、喷爆时间、作用距离就是决定因素。因此,只要控制好压缩强度、作用距离和喷爆时间,就完全可以控制毁伤能量。

2) 作用精度。空气射流沿射流轴线作减速直线运动,射流的外边界逐渐向外扩散,作用力逐渐减小,形成以中轴线为最强动能的层级能量圈<sup>[2]</sup>。由于空气射流受重力的影响很小,其作用方向将保持稳定的射流中轴线方向,作用的精度适宜对群体目标驱散作战。

3) 次生伤害。次生伤害指空气炮作用中引起的非直接性伤害效应,包括驱离人群造成的骚乱性踩踏事件,低温环境下造成的伤寒感冒,高温天气下对人群穿着物作用可能引起的骚乱,以及瞬发喷爆产生的声响。骚乱性踩踏事件以及喷爆声响具有致命的性质,通过强化操作人员的操作技能以及作用前的安全提醒,可以实现有效预防。

### 1.2 适用性

武器装备作战适应性指机动部署能力、准备完好能力、战时执行任务能力和战场持续能力<sup>[3]</sup>。根据驱散任务行动特点,警用非致命空气炮的作战适用性参数,体现在机动能力、操作维护能力和综合集成能力三个方面。

1) 机动能力。空气炮根据任务需要,可设计 30、50、75、100 L 储气罐体,质量为 35~95 kg。行动中,

采取拖行、牵引或运载方式随队行动，也可安装在车载平台上机动作战。在巷道、建筑物等狭小空间内，通过加装高强度发射软管，延伸作战半径，提高机动能力。

2) 操作维护能力。空气炮通常由充气、储气、控制、发射机构组成，结构明了，使用简易。通过电能驱动和差压装置控制作用过程，操控简单。能够根据目标距离控制射流方向和强度，调整方便。在作用中，不太可能导致重要物件损坏和其他不可容忍后果的故障<sup>[4]</sup>，故障性低，维护性强。

3) 综合集成能力。武器装备系统的综合集成，已成为世界各国提高武器装备效能的重要战略选择<sup>[1]</sup>。空气炮加以优化改进，可以用来发射非致命动能打击弹，配备专用喷嘴后可用来喷射非致命化学制剂，持续喷射时还可以进行灭火作业，具有较高综合集成能力。

### 1.3 人文性

非致命空气炮在作战行动中，既要注重对作用目标、作战人员的影响，还要注重对国际国内社会的政治效应，因此将公众接受力、人员损伤率、环保经济性作为衡量指标。

1) 公众接受力。空气炮以空气作为动能打击介质，作用时摸不着、嗅不到，只看到烟雾状气流团，减损了装备特有的暴力性，公众在心理上具有好感，易于接受，有效缓和了公众敌对态势，减免国内外敌对势力的恶意炒作，避免处置行动过激引发的事态恶化升级。

2) 人员损伤率。人员的损伤通常由作用体直接或间接打击造成的。空气炮在有效作用距离内，目标越近受到冲击力越强，能形成敌我间有效物理隔离，减少直接接触造成的损伤率。射流对投掷物的缓冲中和，能有效耗损投掷物动能，降低投掷物造成的人员损伤。

3) 环保经济性。空气炮以自然空气为作用介质，介质体来源充足，采集方便，使用中不会发生质变，能够对装备、基础设施和环境的破坏降至最低限，达到零污染。其整体构件常见，活动部件较少，生产加工方便，组装维护简单，具有最低限经济成本。

## 2 模糊层次分析法评估模型

模糊层次分析法就是模糊理论与层次分析法相结合，以问题的层次结构模型为依据，通过模糊数学理论，研究制定解决该问题的最优方案。其首先运

用层次分析法 (AHP)，将问题分解成多个具有相互关系的不同因素，并按一定的关系组合成具有递阶性的层次结构模型。然后通过构建两两比较的重要性判断矩阵，进行各因素权重计算和一致性检验。最后，运用模糊数学理论，对各因素指标进行模糊处理，获得最底层因素对于最高层的重要性权值，进而确定最底层的最优方案。模糊层次分析法具有模糊性的判断矩阵和比较简洁的计算方法，它解决了一般层次分析法划分标度复杂、判断矩阵难以达到一致性的不足，使问题分析更加的精确和透彻<sup>[5-6]</sup>。

### 2.1 构造判断矩阵

在某一准则  $C_k$  下，对  $n$  个元素中的任意两个  $a_i$  和  $a_j$ ，通过比较可得出哪个元素更重要及重要多少。目前多使用 1~9 种比例标度，见表 2<sup>[7]</sup>。

表 2 1~9 种比例标度

元素 $i$ 和元素 $j$ 的比较情况	标度值
两个元素同样重要	1
两个元素中，元素 $i$ 稍重要	3
两个元素中，元素 $i$ 更重要	5
两个元素中，元素 $i$ 有主导作用	7
两个元素中，元素 $i$ 有强主导作用	9
折中情况	2.4.6.8 及其他中间值
两个元素的反向比较	$1/a_{ji}$

若第  $i$  个元素与第  $j$  个元素比较得  $a_{ij}$ ，则元素  $j$  与元素  $i$  比较为  $a_{ji}$ ，且  $a_{ij}=1/a_{ji}$ ，

对于  $n$  个元素来说，得到两两判断矩阵  $A$ ：

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

判断矩阵具有以下性质： $A=(a_{ij})_{m \times n}$ ，其中， $a_{ij}=1/a_{ji}$ ， $a_{ij}>0$ ， $a_{ii}=1$ 。

矩阵中的元素不一定具有传递性，即未必有  $a_{ij} \cdot a_{jk}=a_{ik}$  成立。当该等式成立时，则称  $A$  为一致性矩阵。

### 2.2 计算指标权重

用层次分析法 (AHP) 进行指标权重赋权，随机一致性指标  $RI$  (Random Index) 是经过随机抽样、取值算出的同阶随机性判断矩阵的具有一致性的一组平均值。对于不同的 1-12 阶矩阵  $RI$  的取值见表 3<sup>[8]</sup>。

表 3 1-12 阶矩阵的 RI 取值

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$RI$	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

计算步骤如下:

1) 将判断矩阵  $A$  按列归一化, 得到矩阵  $w_{ij}$ :

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

2) 将归一化矩阵各行相加, 得到向量  $A$ :

$$A = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

3) 将向量  $\bar{A}$  归一化得到特征向量  $W'$ , 即指标的权重。

### 2.3 一致性检验

通常情况下, 一致性比例  $CR$  (Consistency Ratio) 越小, 判断矩阵的一致性越好。当  $CR \leq 0.1$  时, 判断矩阵的一致性是可以被接受的; 反之, 需要对判断矩阵的数值进行修正, 直至满足一致性为止<sup>[9]</sup>。具体步骤如下:

1) 计算最大特征值  $\lambda_{max}$ :

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} \quad (3)$$

2) 计算一致性指标  $CI$ :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

3) 计算一致性比例  $CR$ , 根据表 3 确定随机一致性指标  $RI$ , 得出:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

当  $CR < 0.1$ , 认为判断矩阵的一致性是可以接受的。

### 2.4 模糊综合评判

模糊综合评判是在考虑多种因素的影响下, 运用模糊数学工具对事物作出综合评价<sup>[10-11]</sup>。

评价集由指标集  $C$ 、评价集  $V$  和评价矩阵  $R$  构成。

- 1) 指标集  $C = [c_1, c_2, \dots, c_i]$ ,  $i = 1, 2, \dots, 9$ 。
- 2) 评价集  $V = [v_1, v_2, \dots, v_k]$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。
- 3) 单指标  $c_i$  相对于评价集  $V$  的评价矩阵  $R$  为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & \dots & r_{ik} \end{bmatrix}, r_{ik} = \frac{1}{100} \cdot \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n R_x \quad (6)$$

效能评价步骤为:

1) 建立评价集。令五级术语评价集  $[v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]$  各表示 [好、较好、一般、较差、差], 转化为百分制对应 [100, 90, 75, 60, 45], 其中 [100, 90] 为“好”, [90, 75] 为“较好”, [75, 60] 为“一般”, [60, 45] 为“较差”, [45, 0] 为“差”。

2) 指标规范化。对定性指标与定量指标进行规范化处理, 并由式 (1) 计算隶属度。

3) 对向量  $A$  进行综合评价:  $A = W' \cdot R$ 。

4) 对作战效能  $E$  进行综合评价:  $E = V \cdot A = V \cdot W' \cdot R$ 。

## 3 作战效能评估

### 3.1 构建判断矩阵

将 10 位武器专家的评价结果进行整理, 得出准则层的比例标度矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 1/4 & 1 & 5 \\ 1/9 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/3 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/5 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1/2 \\ 1/5 & 1 & 1/4 \\ 2 & 4 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/5 \\ 1/2 & 5 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3.2 计算指标权重

#### 3.2.1 准则层指标权重

由式 (1)、(2), 得出矩阵向量为:

$$[0.68 \ 0.10 \ 0.22], [0.63 \ 0.26 \ 0.11], \\ [0.39 \ 0.17 \ 0.44], [0.70 \ 0.12 \ 0.18], \\ [0.50 \ 0.35 \ 0.15], [0.24 \ 0.32 \ 0.44], \\ [0.33 \ 0.26 \ 0.41], [0.37 \ 0.10 \ 0.53], \\ [0.56 \ 0.29 \ 0.15], [0.53 \ 0.10 \ 0.37]$$

则准则层权重  $w_i$  为: [0.49, 0.21, 0.30]。因为  $n=3$ , 由表 3 得  $RI=0.52$ , 由式 (3)、(4)、(5), 得出:  $\lambda_{max}=3.070 \ 83$ ,  $CI=0.035 \ 415$ ,  $CR=0.006 \ 81$ 。显然,  $CR < 0.1$ , 判断矩阵的一致性是可以接受的。

#### 3.2.2 措施层相对准则层权重

同理, 得出各措施层相对各自准则层权重指标见表 4。由此可知, 各判断矩阵的一致性均可以接受。措施层权重  $W' = W_i \cdot W_{ij}$ , 得出:  $W' = (0.269 \ 5, 0.102 \ 9, 0.117 \ 6, 0.040 \ 32, 0.133 \ 14, 0.036 \ 54, 0.116 \ 1, 0.133 \ 2, 0.050 \ 7)$ 。

### 3.3 指标规范化处理

结合 10 位武器专家对空气炮的评价结果, 由式 (2) 得到定性指标隶属度, 见表 5。

通过采集空气炮技术参数、进行市场调查, 得出定量指标隶属度参数, 见表 6。

从而得到定量指标模糊向量见表 7。

### 3.4 综合评价

由式 (6)、(7) 得作战效能综合评价  $E = V \cdot A =$

表 4 措施层相对准则层权重

	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	权重	$\lambda_{\max}$	CI	CR
$c_{11}$	1	3	2	0.550	3.018	0.009	0.017
$c_{12}$	1/3	1	1	0.210			
$c_{13}$	1/2	1	1	0.240			
	$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$	权重	$\lambda_{\max}$	CI	CR
$c_{21}$	1	1/3	1	0.192	3.009	0.005	0.010
$c_{22}$	3	1	4	0.634			
$c_{23}$	1	1/4	1	0.174			
	$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$	权重	$\lambda_{\max}$	CI	CR
$c_{31}$	1	1	2	0.387	3.018	0.009	0.017
$c_{32}$	1	1	3	0.444			
$c_{33}$	1/2	1/3	1	0.169			

表 5 定性指标隶属度

	好	较好	一般	较差	差
$c_{12}$	0.1	0.3	0.3	0.3	0.0
$c_{13}$	0.2	0.4	0.2	0.2	0.0
$c_{21}$	0.1	0.2	0.4	0.3	0.0
$c_{22}$	0.1	0.5	0.2	0.2	0.0
$c_{23}$	0.2	0.3	0.3	0.2	0.0
$c_{31}$	0.1	0.3	0.4	0.2	0.0
$c_{32}$	0.3	0.4	0.2	0.1	0.0

表 6 定量指标隶属度参数

10 m 处毁伤能量/J	89.7				
容量/L	30	50	75	100	
环保经济性/元	6000	8000	12000	15000	

表 7 定量指标模糊向量

	好	较好	一般	较差	差
$c_{11}$	0.2	0.5	0.2	0.1	0.0
$c_{33}$	0.2	0.5	0.1	0.2	0.0

$V \cdot W^T \cdot R = 82.92$ 。根据评估得分，警用非致命空气炮性能评价为“较好”。此结果反映出警用非致命空气炮综合作战效能较好，具有推广价值和应用前景，为空气炮优化设计和实战应用提供了参照。

## 4 结论

1) 基于警用非致命空气炮工作原理、结构特点、任务特性，构建的以非致命性、适用性、人文性为准则的作战效能评价指标体系，能客观准确地反映空气炮的作战效能。

2) 警用非致命空气炮评价结果为较好，反映出该装备系统具有较好驱散作战行动能力。同时，也反映出空气炮装置仍有薄弱环节，需要通过优化升级，不断提高作战效能。

3) 通过论述，反映出警用非致命空气炮作为新型驱散装备，具有人文、环保、经济的时代特征，有很好的推广价值和发展前景。

### 参考文献：

- [1] 郭三学. 非致命武器技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.
- [2] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学(第 3 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [3] 董健, 胡海波, 陈桂明, 等. 面向任务需求的武器装备作战适用性评价指标体系探究[J]. 价值工程, 2013, 26(2): 312-313.
- [4] GJB 451A—2005, 可靠性维修性保障性术语[S].
- [5] 陈璇. 武器装备作战效能评估和分析方法研究[D]. 山西: 中北大学, 2017.
- [6] 武永乐, 刘铁林, 李三群, 等. 基于模糊综合评判的武器装备体系运用风险评估[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(10): 74-78.
- [7] 李志猛, 徐培德, 刘进, 等. 武器系统效能评估理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [8] 王晗中, 卢泓钢, 夏亮, 等. 基于改进 FAHP 的大型相控阵雷达作战效能评估[J]. 空军预警学院学报, 2018, 32(3): 167-173.
- [9] 刘翔宇, 赵洪利, 杨海涛. 作战方案评估方法综述[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 79-84.
- [10] 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.
- [11] 马威, 李梅. 基于关键指标的模糊综合评判法在作战效果评估中的应用[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(4): 12-15.