

◇ 研究报告 ◇

# 非致命声波武器综合效能评估研究\*

蒋贤沛<sup>†</sup> 郭三学

(武装警察部队工程大学 西安 710086)

**摘要** 针对非致命声波武器使用过程中非致命性不确定的问题,介绍了非致命声波武器的作用机理,分析影响非致命声波武器综合效能的关键因素,建立以非致命性为核心的综合效能评估的指标体系,通过直觉模糊综合评判改进传统模糊评判,对非致命声波武器进行综合效能评估。评价理论对非致命武器效能的评估具有可行性,可为其他非致命武器效能评估提供借鉴。

**关键词** 非致命,非致命声波武器,效能评估,直觉模糊

中图分类号: E920.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2016)02-0122-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.02.005

## Research on effectiveness evaluation of non-lethal sonic weapons

JIANG Xianpei GUO Sanxue

(College of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

**Abstract** Concerning the uncertainty of non-lethal efficiency during using non-lethal sonic weapons, this paper introduces the mechanisms of non-lethal sonic weapons. The key factors influencing comprehensive performance of non-lethal sonic weapons are analyzed. The non-lethal evaluation comprehensive efficiency is established as the core of the index system. The intuitionistic fuzzy comprehensive evaluation has been used to improve the traditional fuzzy comprehensive evaluation, and it has been used for the comprehensive effectiveness evaluation of non-lethal sonic weapons. The evaluation theory of non-lethal weapons is feasible, and it can provide reference for the evaluation of the other non-lethal weapons.

**Key words** Non-lethal, Non-lethal sonic weapons, Effectiveness evaluation, Intuitionistic fuzzy

2015-07-02 收稿; 2015-10-21 定稿

\*国家自然科学基金军事学项目 (13GJ003-242)

作者简介: 蒋贤沛 (1988-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向: 非致命武器。

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: 18192335913@163.com

## 1 引言

声音是由物理振动而产生的机械波,其频率和强度的变化会使人体产生明显的主观感受。非致命声波武器正是利用这种特点,通过定向发射声波来达到驱散、拒止来犯人员的目的<sup>[1]</sup>。按照产生声波频率的不同,一般将声波武器分为次声波武器、噪声武器和超声波武器。次声波武器是通过发射20 Hz以下的次声波,与人体生理系统发生共振,使目标神经错乱、全身不适,从而失去战斗力;噪声武器可发射高达150 dB的强大脉冲声波,使目标听觉器官暂时致聋,产生头晕目眩、恶心,失去自我控制能力和定向能力,从而逃离作用区域;超声波武器是利用高能超声波发生器发出频率高于20000 Hz声波,产生强大的空气压力,引起视觉模糊、恶心等生理反应,从而造成人员战斗力减弱或完全丧失。非致命声波武器可用于处置暴、骚乱和反劫持行动中,对驱散闹事人群、制服自杀炸弹和驱逐隐藏在掩蔽所里的恐怖分子很有效果。因此,各国纷纷投入对声波武器的研发工作上,目前广泛用于实战且具有代表性的是远距离定向声音驱散装置(LRAD系列),它是直径约为80 cm的圆形装置,重量约为20 kg,发出声强可达到150 dB,声音频率2100~3100 Hz,声波能朝指定方向传播,作用半径达到275m~1650 m<sup>[1]</sup>,该武器可以装在装甲车顶、船艇甲板,用于驱散骚乱人群及海盗,引起敌方士兵混乱。

非致命声波武器具有广泛的应用前景,但是作为一种能量非致命武器,声波武器在使用过程中仍然面临着诸多安全问题的影响:一是确定声波非致命效能的级别还比较困难,其能量的有效范围和终点效应难以做到准确控制,对人体造成的伤害还不能准确评估,声波能量与人体器官产生共振,有可能导致死亡;二是结构小型化难。这些因素都严重制约着非致命声波武器的发展,所以客观准确评估非致命声波武器综合效能,不仅是声波武器结构创新发展的需要,也是作战实践科学应用的需要。

## 2 建立效能评估指标体系

非致命声波武器的效能评估是一个多维指标影响的综合系统,制约因素多。要实现驱散和拒止来犯人员的目的,非致命性能是首要的指标,不能对有生目标产生永久性的伤害,这和声波的声强、声波频率和作用距离有关;要形成强大的作战效能,系

统要有优越的技术性能,聚焦性强、能量方便控制、结构易实现小型化;同时武器系统应操作方便,可靠性强,性价比高。根据这些要求,非致命声波武器的效能指标设计如图1所示。

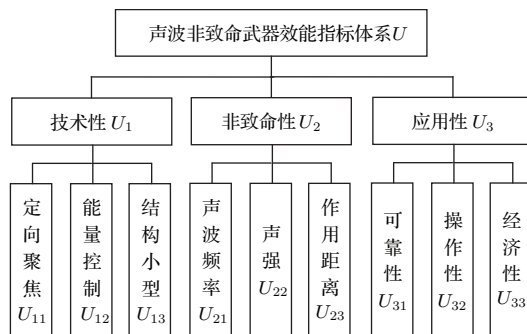


图1 指标体系

Fig. 1 The index system

### 2.1 技术性能

#### (1) 定向聚焦

当声波波长与扬声器本身的线度相当时,由于从振膜不同位置辐射的声波在空间相互发生干涉,声辐射会明显地表现出指向性<sup>[2]</sup>。次声波波长较长(比如在频率7 Hz时,波长为48.5 m),极易衍射,较难获得高指向性的声束,这会对操作者的安全带来较大影响;脉冲噪声波长比次声波短,其聚焦性相比次声波要好,比如远距离定向声音驱散装置可以灵活调整并旋转角度对准范围内的目标;窄带超声波方向性好,容易控制,易于获得集中的声能。

#### (2) 能量控制

对于非致命声波武器,实现定向驱散技术的关键部件是换能器,操作者通过控制声频信号源输出电压大小,来控制声元辐射声能的强弱,以决定非致命的程度。比如应用压电相控技术的平面阵列,一片PZT压电陶瓷声元在1 Pa声压下的声压级约为94 dB<sup>[3]</sup>,通过控制工作中的声元数目,可实现声波武器的能量控制。

#### (3) 结构小型化

声波武器一般由声波发生器、动力装置和控制系统3个主要部分组成。声波发生器较难实现小型化,比如要产生10 Hz的次声波,声源直径就需达13 m<sup>[2]</sup>,为了使次声波有很好的定向传播功能,需加抛物面反射体,这样做的结果,只能使次声装置的体积再次加大;而作用距离达到1250 m的远距离声音定向驱散装置LRAD1000X的阵列尺寸为63.5 cm×122 cm×25.4 cm。可见,结构小型化是声波武器的发展方向。

## 2.2 非致命性能

### (1) 声波频率

人体各器官的固有频率为3~17 Hz,头部的固有频率为8~12 Hz,腹部内脏的固有频率为4~6 Hz,次声波非致命武器就是选择人体敏感的声波频率4~8 Hz作用目标<sup>[4]</sup>。对于脉冲噪声,人耳对不同频率的声音感受的强度不同,根据等响曲线,对2 kHz~5 kHz频率的声音最为敏感,所以声波定向驱散器应该选择人耳最为敏感的频段作为攻击声,远距离声音定向驱散装置的发射频率为2100~3100 Hz,可以达到很好的驱散效果。相同强度下,超声波频率越高,所具有的功率越大,作用效果越显著,超声波枪发射的声波频率可达30000 Hz。

### (2) 声强

声音对机体的影响分为四个等级。一般声强小于120 dB,对机体的影响是可恢复的;大于120 dB,经一定时间的声冲击后,内耳就有可能遭受永久性损伤;大于140 dB,遭受刺激的人可能形成严重脑损伤;高达150 dB时,听觉器官会发生鼓膜破裂出血,迷路出血,螺旋器从基底膜急性剥离,一次刺激就有可能使双耳完全失去听力<sup>[4]</sup>。美国设置在装甲车上的声波驱散器的声强为145 dB,现研制的声光弹爆炸后声强也超过140 dB,所以声波驱散器声强应控制在140 dB左右。

### (3) 作用距离

声脉冲对人体的伤害取决于它的能量和攻击目标之间的距离,轻者可以使人有被轻轻拍打或沉重一击的感觉;重者能让人喘不过气、头痛休克甚至窒息死亡<sup>[1]</sup>。比如,远距离定向声音驱散装置LRAD1000X可实现2000 m范围内的语音警告,650 m范围内的噪音驱散,但在1 m处的最大声压级达到165 dB,超过了安全脉冲声压级140 dB。因此,在使用非致命声波武器拒止来犯人员时,必须选择安全的作用距离。

## 2.3 应用性

声波武器有多个关键部件组成,要产生高强度声波涉及其原理、材料和制作工艺等很多方面。对于核心部件声波发生器,主要包括信息处理模块和换能器模块。信号处理模块采用灵活性高、成本低的数字信号处理(DSP)技术。而换能器模块采用应用最为广泛的压电换能器,这种换能器机电转换效

率高,通常达到80%左右<sup>[5]</sup>,可靠性高;容易成型,可以加工成各种形状;造价低廉,性能稳定,同时作为驱散系统应用,其相对较轻的重量使得设备的机动性能提高。

## 3 声波非致命武器综合效能评估

根据直觉模糊综合评判法和评价指标体系,本文以远距离声音定向驱散装置LRAD1000X为例作为评估对象。

### 3.1 直觉模糊评判法

直觉模糊集能有效扩展传统的模糊综合评判,在处理不确定性问题中比传统模糊集更灵活有效,对模糊概念的描述更符合对象的模糊性本质,结果具有客观性<sup>[6]</sup>。

本文取五级语言评语集,设 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\} = \{\text{很好, 较好, 一般, 较差, 差}\}$ 。采用百分制打分,则设定 $V = \{95, 85, 75, 65, 30\}$ 量化分值,其中很好(90, 100),良好(80, 90),一般(70, 80),较差(60, 70),差(0, 60)。评估专家根据指标 $U_i$ 下的各项二级指标 $U_{ij}$ ,给出声波武器对评语集中各元素的直觉模糊集,则评价矩阵即为因素集与评语集之间的直觉模糊关系,用矩阵表示为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{15} \\ \vdots & r_{pq} & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{n5} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $n$ 为层下指标数, $r_{pq} = [\mu_{pq}, \gamma_{pq}]$ , $\mu_{pq}$ 、 $\gamma_{pq}$ 、 $\pi_{pq} = 1 - \mu_{pq} - \gamma_{pq}$ 分别表示根据指标 $U_p$ 给出的方案相对于评语 $V_q$ 的直觉模糊关系、隶属度、非隶属度和犹豫度。

本文采用差值修正法使直觉模糊集中具有倾向性的犹豫度取值更加符合人们的直觉,将直觉模糊集转化为对应的Fuzzy集<sup>[6]</sup>,由 $r'_{pq}$ 构成新的评价矩阵 $R' = (r'_{pq})_{n \times 5}$

$$r'_{pq} = \mu_{pq} + \pi_{pq} \cdot \left(0.5 + \frac{\mu_{pq} + \gamma_{pq}}{2}\right). \quad (2)$$

对目标进行综合评价时,可采用实数的加、乘运算来代替“取大、取小”运算<sup>[6]</sup>,得到的结果更加客观精确,评价向量为

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_5) = W \circ R'. \quad (3)$$

### 3.2 确定指标权重

以模糊九度标度<sup>[7]</sup>为基础, 将同层因素两两比较量化, 构建模糊互补判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。其中,  $a_{ij}$  表示指标  $a_i$  相对于  $a_j$  的重要性。模糊九度标度见表 1。

表 1 模糊九度标度

Table 1 Fuzzy nine degrees scale

值	含义
0.1	表示两个元素相比, 后者比前者极端重要
0.138	表示两个元素相比, 后者比前者强烈重要
0.325	表示两个元素相比, 后者比前者明显重要
0.439	表示两个元素相比, 后者比前者稍微重要
0.5	表示两个元素相比, 后者比前者同等重要
0.561	表示两个元素相比, 前者比后者稍微重要
0.675	表示两个元素相比, 前者比后者明显重要
0.862	表示两个元素相比, 前者比后者强烈重要
0.9	表示两个元素相比, 前者比后者极端重要

如果判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 对于任意的  $i, j$  均有  $0 < a_{ij} < 1$ ,  $a_{ij} + a_{ji} = 1$ , 则  $A$  为模糊互补判断矩阵。对模糊判断矩阵  $A$ ,  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  是  $A$  的排序向量, 由最小方差法确定:

$$w_i = \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} + 1 - \frac{n}{2} \right),$$

$$j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

参考 10 位专家经验后得到远距离声音定向驱散装置 LRAD1000X 相关的模糊互补判断矩阵, 以一级指标为例

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.325 & 0.675 \\ 0.625 & 0.5 & 0.862 \\ 0.325 & 0.138 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

通过公式 (4) 得出三个一级指标的权重向量为  $W = (0.333, 0.496, 0.154)$ 。

同理, 经过计算可以得出二级指标权重向量为  $W_1 = (0.399, 0.294, 0.206)$ ,  $W_2 = (0.333, 0.412, 0.255)$ ,  $W_3 = (0.412, 0.255, 0.333)$ 。

### 3.3 直觉模糊综合评价法确定指标隶属度与非隶属度

#### 3.3.1 定性指标计算

根据图 1 非致命声波武器作战效能的评估指标体系, 可知  $U_{12}, U_{13}, U_{32}, U_{33}$  为定性指标。对于定性指标, 由于较难获得具体的直觉模糊分布函数, 故采用专家打分法确定指标的直觉模糊关系比较合适。向 10 位专家咨询, 利用文献 [8] 中介绍的方法得出定性指标相对于评语集的直觉模糊关系如表 2。

表 2 定性指标直觉模糊关系

Table 2 Intuitionistic fuzzy between qualitative index

	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{32}$	$U_{33}$
$v_1$	(0.3, 0.5)	(0.1, 0.8)	(0.3, 0.5)	(0.1, 0.8)
$v_2$	(0.4, 0.4)	(0.3, 0.5)	(0.5, 0.4)	(0.3, 0.6)
$v_3$	(0.1, 0.9)	(0.3, 0.5)	(0.1, 0.7)	(0.3, 0.5)
$v_4$	(0, 1)	(0.1, 0.9)	(0, 1)	(0.1, 0.8)
$v_5$	(0, 1)	(0, 1)	(0, 1)	(0.1, 0.9)

#### 3.3.2 定量指标计算

对于定量指标, 如定向聚焦、作用距离, 声音频率等, 这些指标量纲不同, 有的要求越大越好, 如作用距离、可靠性; 有的要求越小越好, 如定向聚焦; 有的要求适中, 如声强和声波频率。为了综合评价的需要, 对这些指标进行规范化处理, 建立指标相对于评语集的隶属度函数与非隶属度函数。为了计算方便, 我们采用梯形直觉模糊数<sup>[9]</sup>, 并以偏大型举例说明。五级评语对应的隶属度函数  $f_i(x)$  与非隶属度函数  $g_i(x)$  公式及图形如公式 (5) ~ (7) 及图 2 和图 3 所示, 定量指标的相对于评语集的直觉模糊关系如表 3。

$$f_1(x) = \begin{cases} \mu_m, & 0 \leq x \leq a_1, \\ \frac{b_1 - x}{b_1 - a_1}, & a_1 \leq x \leq b_1, \\ 0, & x \geq b_1, \end{cases} \quad g_1(x) = \begin{cases} \gamma_s, & 0 \leq x \leq a_1, \\ \frac{x - a_1 + \gamma_s(b_1 - x)}{b_1 - a_1}, & a_1 \leq x \leq b_1, \\ 1, & x \geq b_1, \end{cases} \quad (5)$$

$$f_i(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_{i-1}, x \geq b_{i-1}, \\ \frac{x - a_{i-1}}{b_{i-1} - a_{i-1}} \mu_m, & a_{i-1} < x < b_{i-1}, \\ \mu_m, & b_{i-1} \leq x \leq a_i, \\ \frac{b_i - x}{b_i - a_i}, & a_i < x < b_i, \end{cases}$$

$$g_i(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_{i-1}, x \geq b_{i-1}, \\ \frac{b_{i-1} - x + \gamma_s(x - a_{i-1})}{b_{i-1} - a_{i-1}}, & a_{i-1} < x < b_{i-1}, \\ \gamma_s, & b_{i-1} \leq x \leq a_i, \\ \frac{x - a_i + \gamma_s(b_i - x)}{b_i - a_i}, & a_i < x < b_i, \end{cases} \quad i = 2, 3, 4, \quad (6)$$

$$f_5(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq a_4, \\ \frac{x - a_4}{b_4 - a_4}, & a_4 < x < b_4, \\ \mu_m, & x > b_4, \end{cases} \quad g_5(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a_4, \\ \frac{b_4 - x + \gamma_s(x - a_4)}{b_4 - a_4}, & a_4 < x < b_4, \\ \gamma_s, & x \geq b_4, \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\mu_m$  和  $\gamma_s$  分别为直觉模糊数的最大隶属度和最小非隶属度, 本文考虑到大部分实际情况与直觉经验, 取  $\mu_m = 0.8, \gamma_s = 0.1$  [6].

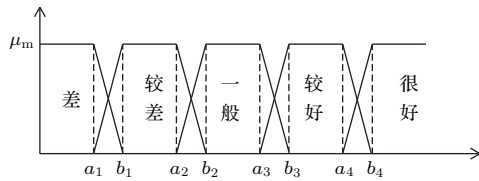


图2 隶属度函数图形

Fig. 2 Membership function of the bigger the better

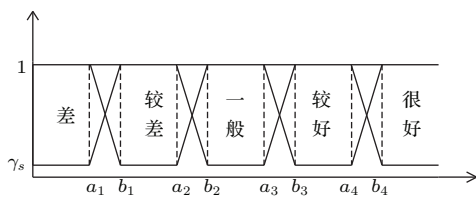


图3 非隶属度函数图形

Fig. 3 Non-membership function of the bigger the better

表3 定量指标直觉模糊关系

Table 3 Intuitionistic fuzzy between quantitative index

	$U_{11}$	$U_{21}$	$U_{22}$	$U_{23}$	$U_{31}$
$v_1$	(0,1)	(0,1)	(0.26,0.72)	(0,1)	(0.20,0.73)
$v_2$	(0.4,0.55)	(0.30,0.66)	(0.64,0.28)	(0.73,0.18)	(0.75,0.10)
$v_3$	(0.4,0.55)	(0.50,0.43)	(0,1)	(0.08,0.91)	(0,1)
$v_4$	(0,1)	(0.1,0.9)	(0,1)	(0,1)	(0,1)
$v_5$	(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,1)	(0,1)

### 3.4 综合评价

$$B = W \circ R'$$

$$= (0.333, 0.496, 0.154) \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.175 & 0.58 & 0.19 & 0 & 0 \\ 0.171 & 0.61 & 0.18 & 0 & 0 \\ 0.379 & 0.422 & 0.25 & 0.05 & 0.03 \end{bmatrix}$$

$$= (0.202, 0.56, 0.19, 0.008, 0.005),$$

若用百分制形式表示, 则该声波武器综合评价分值为

$$E = B \cdot V^T = 81.7100, \quad (8)$$

按同样步骤, 次声枪的综合评价分值为

$$E_1 = B_1 \cdot V_1^T = 75.39, \quad (9)$$

超声波枪的综合评价分值为

$$E_2 = B_2 \cdot V_2^T = 78.85. \quad (10)$$

基于直觉模糊综合评判对远距离声音驱散装置、次声枪和超声枪的综合效能进行计算分析, 通过评价结果看远距离声音定向驱散装置的综合效能评价为良好, 次声枪、超声波枪的评价为一般。

## 4 结论

(1) 本文综合考虑非致命声波武器的发展现状与作战实践, 建立了以技术性、非致命性及应用性为一级指标, 以定向聚焦、结构小型等为二级指标

的声波非致命武器效能评估指标体系,能够客观反映声波武器的非致命综合效应。

(2) 采用直觉模糊综合评判法改进传统模糊综合评判法,在处理模糊性和不确定性问题等方面更具有灵活性和实用性,对模糊概念的描述更符合对象的模糊性本质,该评估方法理论性强、过程简单、结果可信,得出的结果贴近实际情况。

(3) 对远距离声音定向驱散装置、次声枪和超声波枪的综合效能分别进行了评估,从评价结果来看,声波武器的共性技术难题是实现结构小型化,因为实现结构小型化会影响到声束的定向聚焦和声束强度。远距离声音驱散装置在技术上已经实现了能量的有效控制和较好的定向聚焦性,被广泛应用于实战;对于次声波武器,人为产生次声很难,且次声很难控制,所以次声武器的技术问题是声束难聚焦,强度低;超声波武器因为超声波在空气中易衰减,有效作用距离短,这些分别是制约各类声波武器应用作战实践的主要因素,也是今后研究的重点。

## 参 考 文 献

- [1] 张博, 梁延峰. 非火力打击武器研究[J]. 中国电子科学科学报, 2015, (1): 10-11.  
ZHANG Bo, LIANG Yanfeng. Research on development of non-fire strike weapons[J]. Journal of CAEIT, 2015, (1): 10-11.
- [2] 李德科. 基于声学参量阵的声频定向传输系统原理及应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011: 1-14.
- [3] 刘杏娟. 压电式次声相控阵列技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2014: 5-28.
- [4] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 第四版. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 159-164.
- [5] 潘仲明, 祝琴. 压电换能器阻抗匹配技术研究[J]. 应用声学, 2007, 26(6): 357-358.  
PAN Zhongming, ZHU Qin. Study of impedance matching technology for piezoelectric transducer[J]. Applied Acoustics, 2007, 26(6): 357-358.
- [6] 雷英杰, 赵杰, 贺正洪, 等. 直觉模糊集理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 28-51, 191-200.
- [7] 杨桂元, 黄己立. 数学建模[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [8] 杨海明, 李悦, 孔维成, 等. DELPHI法在直觉模糊综合评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(23): 169-172.  
YANG Haiming, LI Yue, KONG Weicheng, et al. The application of the DELPHI method to intuitionistic fuzzy comprehensive evaluation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(23): 169-172.
- [9] 王续伯, 白思俊, 白礼彪, 等. 直觉梯形模糊数航天项目组合配置属性协同研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(12): 1396-1404.  
WANG Xubo, BAI Sijun, BAI Libiao, et al. Attribute collaboration of aerospace project portfolio allocation based on intuitionistic trapezoidal fuzzy number[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(12): 1396-1404.