

DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2020.01.012

# 防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构研究\*

江 星<sup>1,2</sup>, 汪 送<sup>1</sup>

(1 武警工程大学装备管理与保障学院, 西安 710086; 2 武警新疆总队和田支队, 新疆和田 848000)

摘 要: 为揭示防暴动能弹致伤机理, 需了解其致伤威力影响因素的相互影响关系及层次结构。在广泛提炼影响因素的基础上, 集结专家经验定量评判因素间的影响关系。根据因素影响度与被影响度, 提出了基于因素节点度三分位数约简非关键因素的 DEMATEL-ISM 改进方法, 以确定各因素的重要性、属性以及层次结构。案例分析表明, 改进的 DEMATEL-ISM 方法能够有效对防暴动能弹致伤威力影响因素进行层级划分, 研究结论奠定了防暴动能弹致伤机理研究的理论基础。

关键词: 防暴动能弹; 致伤威力; 影响因素; 改进 DEMATEL-ISM; 层次结构

中图分类号: TJ410; TJ012.4 文献标志码: A

## Research on Hierarchical Structure of Injury Power Influence Factors of Anti-riot Kinetic Energy Ammunitions

JIANG Xing<sup>1,2</sup>, WANG Song<sup>1</sup>

(1 Equipment Management and Support College, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China;

2 Hotan Detachment, Xinjiang Headquarters of Armed Police Force, Xinjiang Hotan 848000, China)

**Abstract:** In order to reveal the injury mechanism of anti-riot kinetic energy ammunitions, the relationship and hierarchy of the influence factors of its injury power, on the basis of widely extracted the influence factors of injury power, the influence relations among the factors were quantitatively evaluated by experts' experience. According to the influence degree and the influenced degree of factors, an improved DEMATEL-ISM method based on three-digit of factors' node degree to reduce non-critical factors has been proposed, to determine the importance, attribute and hierarchy of each factor. The case study showed that the improved DEMATEL-ISM method could effectively divide the influential factors of injury power of anti-riot kinetic energy ammunitions into different levels, the conclusion had laid a theoretical foundation for the research on the injury mechanism of anti-riot kinetic energy ammunitions.

**Keywords:** anti-riot kinetic energy ammunitions; injury power; influencing factor; improved DEMATEL-ISM; hierarchy

## 0 引言

防暴动能弹被军警部门在不需要或不适宜使用致命武器的情况下广泛使用, 其作用机理是利用弹丸的飞行动能使有生目标致伤致痛失去抵抗能力或行动受到抑制<sup>[1]</sup>。但由于防暴动能弹设计和使用中存在安全隐患, 导致意外伤亡的事故频繁发生。2008年云南孟连县发生的“7.19”事件就是因使用18.4 mm防暴枪发射动能橡皮弹自卫而导致两人死亡的案例。防暴动能弹的安全使用或过度伤害都与其致伤威力密切相关, 因此, 提取防暴动能弹致伤威力影响因素, 分析因素间的影响关系, 对于揭示防暴动能弹的致伤机理具有重要作用。为确保因素提炼的完备性和独立性, 通常采用文献分析、问卷函询等方式进行因素提取, 不可避免导致提炼的因素数量过

多, 给分析和计算带来困难, 因此对非关键因素进行约简就显得极为重要。

分位数法在分析武器弹药性能中具有广泛运用。王学奎等<sup>[2]</sup>为研究导弹命中给定区域的概率, 在得到导弹射击落差数据的基础上, 用分位数法确定误差的分布样式; 金星等<sup>[3]</sup>提出了基于高斯积分方法和非中心t分布函数及其分位数计算基础上的优化分析方法, 解决了导弹射程能力快速评定问题。文中拟采用三分位数对防暴动能弹致伤威力影响因素的节点度进行分析, 获取致伤威力影响因素强弱界限, 约简非关键影响因素。

DEMATEL-ISM 算法是将决策实验室分析法 (decision making trial and evaluation laboratory DEMATEL) 和解释结构模型 (interpretive structural modeling ISM) 进行集成优化的方法, 可以使复杂系统的层次

\* 收稿日期: 2018-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(71401179); 武警装备科研项目资助

第一作者简介: 江星(1991-), 男, 重庆涪陵人, 硕士研究生, 研究方向: 军事装备学。

结构划分更加合理、直观<sup>[4]</sup>。杜纯等<sup>[5]</sup>采用集成 DEMATEL-ISM 方法分析了复杂系统安全事故致因因素间的综合影响关系,明确了关键致因因素及致因因素多级递阶结构模型;付凯等<sup>[6]</sup>基于 DEMATEL-ISM 方法区分要素层次并兼顾要素权重,通过忽略不重要的影响关系合理简化系统结构;李明辉等<sup>[7]</sup>提出基于 DEMATEL-ISM 含可达影响因子的系统结构分析算法,可以在合理忽略不重要要素的基础上实现区域分解和等级划分。因此,为获得合理清晰的防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构模型,在广泛提炼影响因素的基础上,对非关键影响因素进行约简,提高 DEMATEL-ISM 的算法效率。通过将因素节点度按一定次序排列获取因素节点度三分位数,利用节点度三分位数约简影响度较小的因素,达到改进 DEMATEL-ISM 算法的目的,进而推动致伤威力影响因素递阶层次结构模型的快速构建。

### 1 致伤威力影响因素提取

防暴动能弹致伤威力影响因素较多,文中通过对国内外相关文献调研和非致命武器领域专家函询的方式分析提取防暴动能弹致伤威力影响因素,如表 1 所示。

表 1 致伤威力影响因素

序号	影响因素(弹丸)	序号	影响因素(目标)
$E_1$	弹丸质量	$E_{15}$	胸壁厚度
$E_2$	速度	$E_{16}$	钝击点位置
$E_3$	口径	$E_{17}$	钝击点衣着厚度
$E_4$	形状	$E_{18}$	钝击点最大形变率
$E_5$	射击距离	$E_{19}$	钝击点最大形变
$E_6$	冲击力	$E_{20}$	最大能量转移率
$E_7$	入射角度	$E_{21}$	最大能量转移量
$E_8$	材料	$E_{22}$	体质
$E_9$	结构	$E_{23}$	性别
$E_{10}$	密度	$E_{24}$	目标体重
$E_{11}$	硬度	$E_{25}$	年龄
$E_{12}$	动能		
$E_{13}$	比动能		
$E_{14}$	冲击脉冲		

表 1 中共提炼了 25 个影响因素  $E_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 25$ ),关于因素对致伤威力以及因素间相互影响关系的初步分析如下:

根据国内外多起防暴动能弹致残致亡的案例,发生原因都与其致伤威力有关。Daniel 等<sup>[8]</sup>指出不是影响贯穿和损伤可能性的唯一参数,弹丸的质量 ( $E_1$ )、速度 ( $E_2$ )、口径 ( $E_3$ )、形状 ( $E_4$ ) 和硬度 ( $E_{11}$ )

强烈影响钝击生理损伤;Alexandre 等<sup>[9]</sup>为分析射击距离 ( $E_5$ ) 及速度 ( $E_2$ ) 对目标的潜在伤害,设计一个特定的枪来实现不同速度发射,比传统方法更好解决了不同速度的钝击测试;黄东等<sup>[10]</sup>从防暴动能弹碰撞速度以及入射角度 ( $E_7$ ) 得到了弹丸与人体非致命效应之间的关系;美国陆军陆战实验室指出不同的动能 ( $E_{12}$ ) 会对人体造成不同程度的伤害<sup>[11]</sup>;Koene 等<sup>[12]</sup>认为造成损伤是由于冲击力 ( $E_6$ ),并且还应考虑射弹的材料 ( $E_8$ );Bir、Drapela 等<sup>[13-14]</sup>做了一系列研究,表明评估弹丸对皮肤的贯穿必须将能量和碰撞面积(比动能 ( $E_{13}$ ))与弹丸的结构 ( $E_9$ ) 和密度 ( $E_{10}$ ) 一起考虑;Sturdivan<sup>[15]</sup>提出钝性标准<sup>[16]</sup>与目标重量 ( $E_{24}$ ) 和目标体壁 ( $E_{15}$ ) 均有关系;Julien 等<sup>[17-18]</sup>通过研究表明弹丸冲击点附近的响应严重程度主要与冲击脉冲 ( $E_{14}$ ) 等因素相关;Sebastian 等<sup>[19]</sup>测试 XREP® 武器和射弹间相互作用时得出钝击点位置 ( $E_{16}$ ) 与弹丸致伤威力息息相关,通过进一步研究表明衣物 ( $E_{17}$ ) 和钝击区域弹性阻力可降低钝击风险<sup>[20]</sup>;Langlet 等<sup>[21]</sup>基于动能弹丸冲击猪胸部的实验,结果表明,冲击响应程度与转移到胸壁的剩余脉冲有关,即与能量的转移率 ( $E_{20}$ ) 和转移量 ( $E_{21}$ ) 相关;Nsiampa 等<sup>[22]</sup>利用数值模拟表示人体的力或相关的形变率 ( $E_{18}$ )、形变 ( $E_{19}$ ),从而预测弹丸对人体的影响;Mathias 等<sup>[23]</sup>提供了基于 MRI 测试健康志愿者胸壁厚度和组成数据的方法,将人的体质 ( $E_{22}$ )、性别 ( $E_{23}$ )、年龄 ( $E_{25}$ ) 等因素进行了考虑,研究其对人体胸壁厚度产生影响。

防暴动能弹致伤威力各个影响因素相互影响、相互制约。从弹丸角度分析,在弹丸质量一定时,速度越大,则能量动能、比动能和冲击力越大,与目标之间的能量转换就越大,致伤威力也就越大;相同情况下,口径越小,弹丸贯穿皮肤的可能性就越大;射击距离、材料、形状、结构、口径同样会影响弹丸作用于目标时的速度,其中,射击距离在实际运用中影响较大;弹丸射角则会直接影响受力横截面积以及能量的损失;密度会决定弹丸的质量以及体积,间接影响其他各因素;冲击脉冲主要体现在受撞击过程中动量变化,变化越大冲击威力越大。从作用目标分析,胸壁厚度会影响人体对能量的吸收,减少能量转移量;钝击位置的不同,其胸壁厚度也不同,同时,不同体质、性别、体重、年龄都会影响胸壁厚度,从而影响致伤效果;衣着厚度影响射击过程能量损失,削弱弹丸作用于人体的能量;钝击点最大形变率和最大形变量都涉及到目标受钝击后作用点发生的形变损伤,钝击点形变量、形

变率与弹丸能量转移量成正比例关系,可据此反映致伤威力大小。

## 2 改进的 DEMATEL-ISM 方法步骤

### 2.1 改进思路

针对防暴动能弹致伤威力影响因素影响强弱差别较大的特性,可以利用因素节点度分析一个因素在因素系统中的重要程度。为合理简洁的呈现防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构,在提炼的防暴动能弹致伤威力影响因素较多的情况下,在 DEMATEL-ISM 算法的基础上用三分位数进行改进,基于复杂网络理论,兼顾因素影响度(节点出度)和被影响度(节点入度),定量地给出系统中各因素节点度,采用节点度三分位数对非关键因素进行约简,减少 DEMATEL-ISM 算法的计算量和复杂度,提高计算效率,进而快速构建致伤威力影响因素递阶层次结构模型。

### 2.2 方法步骤

步骤一: 确定防暴动能弹致伤威力影响因素。

通过对相关领域的文献调研,并对尽可能多的非致命武器领域的专家问询,以最大程度降低人为因素干扰。初步得到涉及防暴动能弹致伤威力影响因素为  $E_i(i=1, 2, \dots, n)$ , 其中  $n$  为因素数目。

步骤二: 集结专家数据构建初始直接影响矩阵。

请  $t$  位非致命武器领域专家对防暴动能弹致伤威力影响因素之间的相互影响强弱进行定量评判,依据评判结果列出每位专家的初始直接影响矩阵  $A^k$  ( $A^k = (a_{ij}^k)_{n \times n}$ ), 其中  $a_{ij}^k$  表示第  $k$  位专家给出的影响因素  $i$  对影响因素  $j$  的影响程度。通常因素间的相互影响关系并非等同,因此一般情况下  $a_{ij} \neq a_{ji}$ , 当  $i = j$  时,取  $a_{ij} = 0$ , 设  $A = [A_{ij}]_{n \times n}$  为初始直接影响矩阵,有

$$A_{ij} = \frac{1}{t} \sum_{k=1}^t a_{ij}^k, (k = 1, 2, \dots, t) \quad (1)$$

其中因素  $a_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n, i \neq j)$  表示因素  $a_i$  对因素  $a_j$  的直接影响程度。

步骤三: 计算初始直接影响矩阵因素节点度。

通过计算初始直接影响矩阵  $A$  中  $i$  行和与  $i$  列和得到初始直接影响矩阵中相应因素  $i$  的节点度,其计算公式为:

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} + \sum_{j=1}^n a_{ji}, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

步骤四: 确定约简初始直接影响矩阵。

将各影响因素的节点度  $D_i$  按从小到大的顺序排列,得到新的数组  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , 取三分位数  $D_p$  和  $D_q$ , 则有

$$D_p = \frac{X_{(\frac{n}{3})} + X_{(\frac{n}{3}+1)}}{2} \quad (3)$$

$$D_q = \frac{X_{(\frac{2n}{3})} + X_{(\frac{2n}{3}+1)}}{2} \quad (4)$$

式中  $p \leq q$ 。若  $n$  是 3 的倍数可直接进行运算; 如果  $n$  不是 3 的倍数, 则具体情况具体分析, 可对权重进行分析<sup>[2]</sup>。 $m$  为约简后的因素个数, 根据  $D_i$  与  $X_i$  的对应关系, 将  $D_i \geq D_p$  的影响因素予以保留, 得到约简后的初始直接影响矩阵  $X$  ( $X = [x_{ij}]_{m \times m}$ )。

步骤五: 计算规范化直接影响矩阵。

对初始直接影响矩阵进行规范化处理, 得到规范化直接影响矩阵  $N$  ( $N = [n_{ij}]_{m \times m}$ );

$$N = \frac{X}{\max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (5)$$

式中  $0 \leq n_{ij} \leq 1$ , 且  $\max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m x_{ij}$  为行和最大值。

步骤六: 计算综合影响矩阵。

在算法中, 不同层次要素之间的判断等级代表其相互影响程度, 同一层次要素之间的判断等级代表其相对重要程度, 因此需要分类处理。对于不同层次的两个要素, 经过矩阵运算后将其直接和间接影响程度之和作为其综合影响值; 对于同一层次的两个要素, 直接将其相对重要程度作为其综合影响值。确定系统影响因素间的综合影响矩阵  $T$  ( $T = [t_{ij}]_{m \times m}$ ), 具体计算方式如下:

$$T = \lim_{m \rightarrow \infty} (N + N^2 + \dots + N^m) = N(I - N)^{-1} \quad (6)$$

式中  $I$  为单位矩阵。

步骤七: 分析各因素影响度、被影响度、中心度和原因度。

矩阵  $T$  中各行之和为相应因素的影响度, 各列之和为相应因素的被影响度。其公式为:

$$f_i = \sum_{j=1}^m t_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$e_i = \sum_{j=1}^m t_{ji}, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中:  $f_i$  和  $e_i$  分别为因素  $t_i(i=1, 2, \dots, m)$  的影响度和被影响度。影响度和被影响度相加即为对应因素的中心度, 影响度和被影响度相减即为对应因素的原因度, 则中心度  $m_i$  和原因度  $n_i$  的计算公式如下:

$$m_i = f_i + e_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$n_i = f_i - e_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

步骤八: 以因素的中心度和原因度建立笛卡尔坐标系, 在坐标系上标出每个因素的位置, 对每个因素的重要程度进行分析。

步骤九: 确定整体影响矩阵。

在综合影响计算中得到的矩阵  $T$  ,是排除同一层次要素之间的相对重要程度之后而计算得出 ,反映不同层次要素之间的直接影响和间接影响程度 ,进而计算反映完整影响关系的整体影响矩阵  $H$  ( $H = [h_{ij}]_{m \times m}$ ) ;

$$H = T + I \tag{11}$$

步骤十: 计算可达矩阵。

为简化系统结构 ,可以忽略要素之间较小的影响关系 ,只体现主要的要素影响关系 ,使要素影响关系更加简明 ,进而得到可达影响矩阵。这一步骤要设置阈值参数  $\lambda$  ,忽略影响较小的影响关系; 对于同一层次的两个要素 ,其影响关系按照研究约定 ,直接进行忽略。经过处理后的可达矩阵  $R$  中元素  $R_{ij}$  为影响程度大小  $R = [r_{ij}]_{m \times m} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m$  则有

$$R_{ij} = \begin{cases} 0 & T_{ij} < \lambda \\ 1 & T_{ij} \geq \lambda \end{cases} \tag{12}$$

当两元素在同一层次时  $R_{ij} = 0$ 。

步骤十一: 对要素进行区域等级划分。

确定各因素的可达集合以及前项集合 ,例如因素  $a_i$  的可达集合  $R_i$  以及前项集合  $S_i$  的计算公式为:

$$R_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ij} \neq 0\} \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{13}$$

$$S_i = \{a_j | a_j \in A, k_{ji} \neq 0\} \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{14}$$

对于属于同一区域的要素 ,找出集合  $R_i = R_i \cap S_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) 的要素作为最高等级 ,然后删除这些要素后按同样方法依次找出低一等级的要素 ,直到等级划分完毕。

步骤十二: 绘制影响因素层次结构图。

根据可达矩阵和要素区域等级划分 ,绘制出各因素相互影响的层次结构图。

### 3 算例分析

#### 3.1 计算初始直接影响矩阵

邀请非致命武器领域的 8 位专家为武警、公安部队大量装备的 2006 式 18.4 mm 布袋弹的致伤威力影响因素相互影响强弱对比打分 ,约定  $E_i$  对  $E_j$  影响极大为 4 分;  $E_i$  对  $E_j$  影响较大为 3 分;  $E_i$  对  $E_j$  影响一般为 2 分;  $E_i$  对  $E_j$  影响极小为 1 分;  $E_i$  对  $E_j$  没有影响为 0 分。对于 8 位专家的评判结果 ,计算其算术平均值得到初始影响矩阵  $A$  (表 2)。

表 2 初始影响矩阵  $A$

	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$E_5$	$E_6$	$E_7$	$E_8$	$E_9$	$E_{10}$	$E_{11}$	$E_{12}$	$E_{13}$	$E_{14}$	$E_{15}$	$E_{16}$	$E_{17}$	$E_{18}$	$E_{19}$	$E_{20}$	$E_{21}$	$E_{22}$	$E_{23}$	$E_{24}$	$E_{25}$
$E_1$	0	0.5	0.5	0.4	2.3	3.3	1	0.1	0.3	0.4	0.3	3.9	3.9	3.6	0	0.9	0	3.1	3.4	3.0	3.1	0	0	0	0
$E_2$	0	0	0.1	0.3	3.9	3.6	1.3	0.1	0.1	0.1	0.1	4.0	4.0	3.9	0	0.9	0	3.8	3.8	3.8	3.9	0	0	0	0
$E_3$	1.4	0.6	0	2.8	1.8	1.5	0.1	0.1	0.6	0.1	0	0.6	3.8	1.9	0	0.1	0	2.8	2.6	2.5	2.6	0	0	0	0
$E_4$	1.4	1.5	1.5	0	1.5	1.5	0.3	0.1	1.5	0	0	0.4	3.0	3.0	0	0.1	0	2.6	2.8	2.8	2.8	0	0	0	0
$E_5$	0	2.0	0.1	0.4	0	3.1	2.5	0	0.1	0	0.1	2.6	2.3	3.1	0	2.4	0	3.1	3.0	3.3	3.3	0	0	0	0
$E_6$	0	0.4	0.1	0.4	0.6	0	0.3	0	0	0	0	3.1	3.1	3.6	0	0.4	0	3.6	3.8	3.8	3.8	0	0	0	0
$E_7$	0.3	0.6	0.1	0	0.1	1.9	0	0	0	0	0	2.4	2.0	3.5	0	2.8	0	2.9	3.0	3.1	3.1	0	0	0	0
$E_8$	2.9	1.1	0.3	0.9	1.1	2.4	0.6	0	0.9	3.0	3.6	1.6	1.9	2.4	0	0.3	0	2.8	2.9	3.1	3.1	0	0	0	0
$E_9$	2.3	0.5	0.8	2.6	1.1	2	0.6	0.1	0	3.1	2.5	0.9	1.3	1.8	0	0.5	0	2.3	2.3	2.3	2.3	0	0	0	0
$E_{10}$	3.4	0.8	0.3	0.3	0.8	2.3	0.6	0.4	0.9	0	3.1	1.3	1.5	2.5	0	0.1	0	2.5	2.5	2.6	2.6	0	0	0	0
$E_{11}$	0.5	0.4	0.1	0.4	0.9	2.4	0.4	0.8	0.3	0.6	0	0.5	0.6	3.0	0	0.1	0	3.8	3.8	3.4	3.0	0	0	0	0
$E_{12}$	0.5	1.0	0.1	0.3	2.9	3.5	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1	0	3.5	3.1	0	0.6	0	3.8	3.8	4	4	0	0	0	0
$E_{13}$	0.1	0.4	0.1	0.4	0.8	3.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	1.4	0	3.8	0	0	0	3.8	3.8	3.9	3.9	0	0	0	0
$E_{14}$	0	0.1	0.3	0.1	0.8	3.1	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	1.8	1.3	0	0	0	0	3.8	3.8	3.8	3.8	0	0	0	0
$E_{15}$	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	0	0	0	3.6	3.8	3.6	3.6	0.8	0.1	0.8	0.3
$E_{16}$	0	0	0	0	0.1	0.6	1.6	0	0	0	0	0.9	0.9	2.8	1.5	0	0.8	3.3	3.8	3.0	3.1	0	0	0	0
$E_{17}$	0	0	0	0	0	2.9	1.5	0	0	0	0	0	0.3	2.8	0	0	0	3.1	3.3	3.1	3.4	0	0	0	0
$E_{18}$	0	0.4	0	0.3	0	0.4	0	0	0	0	0	1.5	1.0	1.4	0.3	0	0	4	3.8	3.9	0	0	0	0	0
$E_{19}$	0	0.4	0	0.3	0	0.4	0	0	0	0	0	1.4	0.8	1.4	0.3	0	0	3.5	0	2.9	2.9	0	0	0	0
$E_{20}$	0	0.5	0	0.1	0	0.9	0	0	0	0	0	0.9	0.8	1.5	0	0	0	3.1	3.1	0	4	0	0	0	0
$E_{21}$	0	0.3	0	0.1	0	0.9	0	0	0	0	0	1.1	0.6	1.0	0	0	0	3.3	3.3	3.5	0	0	0	0	0
$E_{22}$	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0.3	0.3	0	2.5	0.3	0	2.8	2.8	2.4	2.4	0	0.1	1.1	0.4
$E_{23}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.1	0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.4	0	1.4	0
$E_{24}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.3	0	0.3	2.3	2.0	1.9	1.9	1.9	0	0	0
$E_{25}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.1	0	0.6	1.8	1.8	1.6	1.6	2.3	0	1.6	0

### 3.2 基于三分位数进行因素约简

根据式(2) 计算所得影响因素节点度的关系:

$$D_{18} \geq D_{19} \geq D_{21} \geq D_{20} \geq D_{14} \geq D_6 \geq D_{13} \geq D_{12} \geq D_5 \geq D_2 \geq D_1 \geq D_7 \geq D_4 \geq D_8 \geq D_{10} \geq D_{11} \geq D_9 \geq D_{16} \geq D_{15} \geq D_3 \geq D_{17} \geq D_{22} \geq D_{24} \geq D_{23} \geq D_{25}$$

基于式(3)、式(4), 解出三分位数的两个节点, 位置分别在  $D_{12}$  和  $D_5$  与  $D_9$  和  $D_{16}$  之间, 将其分为高值、中值、低值三部分, 提取节点度取高值和中值的因素, 有  $D_1, D_2, D_4, D_5, D_6, D_7, D_8, D_9, D_{10}, D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{14}, D_{18}, D_{19}, D_{20}, D_{21}, 17$  个元素。

经过约简后的影响因素减为 17 个, 大大提高后续分析的速率。

### 3.3 计算综合影响矩阵

根据简约后的直接影响矩阵计算综合影响矩阵, 并根据综合影响矩阵计算各因素的影响度、被影响度、中心度和原因度, 如表 3 所示。

表 3 防暴动能弹致伤威力影响因素评估参数

因素	影响度	被影响度	中心度	原因度
$E_1$	0.176	0.024	0.200	0.152
$E_2$	0.230	0.015	0.245	0.215
$E_4$	0.102	0.009	0.111	0.093
$E_5$	0.141	0.040	0.181	0.101
$E_6$	0.138	0.139	0.277	-0.001
$E_7$	0.101	0.012	0.113	0.089
$E_8$	0.156	0.001	0.157	0.155
$E_9$	0.102	0.004	0.106	0.098
$E_{10}$	0.113	0.015	0.128	0.098
$E_{11}$	0.109	0.024	0.133	0.085
$E_{12}$	0.172	0.103	0.275	0.069
$E_{13}$	0.135	0.120	0.255	0.015
$E_{14}$	0.109	0.197	0.306	-0.088
$E_{18}$	0.066	0.308	0.374	-0.242
$E_{19}$	0.046	0.325	0.371	-0.279
$E_{20}$	0.052	0.325	0.377	-0.273
$E_{21}$	0.048	0.333	0.381	-0.285

以因素中心度为横坐标和原因度为纵坐标建立笛卡尔坐标系, 得到原因-结果图, 如图 1 所示。

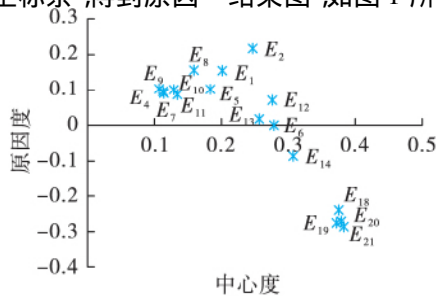


图 1 原因-结果图

从图 1 可以得出, 钝击点最大形变率( $E_{18}$ )、钝击点最大形变( $E_{19}$ )、最大能量转移率( $E_{20}$ )、最大能量转移量( $E_{21}$ ) 的中心度较大, 是关键影响因素; 质量( $E_1$ )、速度( $E_2$ )、弹丸材料( $E_8$ ) 的原因度较大, 是强原因因素。

### 3.4 计算可达矩阵

由综合影响矩阵对整体影响矩阵进行忽略影响关系的处理, 根据系统的实际情况, 通过咨询专家取阈值  $\lambda = 0.01$ , 得到可达矩阵  $R$ , 根据公式  $R_i = R_i \cap S_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ), 计算得出  $R_1 = \{E_{18}, E_{19}, E_{20}, E_{21}\}$ ;  $R_2 = \{E_6, E_7, E_9, E_{10}, E_{15}\}$ ;  $R_3 = \{E_{11}, E_{13}\}$ ;  $R_4 = \{E_4, E_5, E_8, E_{12}\}$ ;  $R_5 = \{E_1, E_2\}$ 。进而构建防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构模型, 如图 2 所示。

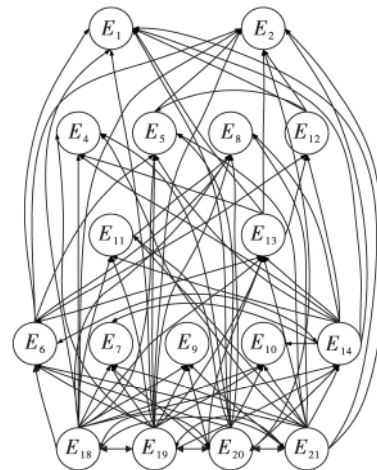


图 2 防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构图

从图 2 可知, 钝击点最大形变率( $E_{18}$ )、钝击点最大形变( $E_{19}$ )、最大能量转移率( $E_{20}$ )、最大能量转移量( $E_{21}$ ) 为最下层因素, 这 4 个因素相互影响, 同时受其他各因素影响, 为防暴动能弹造成致伤威力的最主要影响因素; 冲击力( $E_6$ )、入射角度( $E_7$ )、弹丸结构( $E_9$ )、弹丸密度( $E_{10}$ )、冲击脉冲( $E_{14}$ ) 为第四层因素, 对最底层因素影响较大; 弹丸硬度( $E_{11}$ )、比动能( $E_{13}$ ) 为第三层因素; 弹形( $E_4$ )、射击距离( $E_5$ )、弹丸材料( $E_8$ )、动能( $E_{12}$ ) 为第二层因素; 而质量( $E_1$ ) 和速度( $E_2$ ) 为系统顶层因素, 同时原因度最大, 表明这两个因素是最强原因因素。第四层、第三层、第二层、顶层因素都对最下层因素造成直接影响。其中, 第四层的弹丸结构( $E_9$ ) 和弹丸密度( $E_{10}$ )、第二层的弹丸形状( $E_4$ ) 和弹丸材料( $E_8$ ) 不受其他因素影响, 但是对底层因素和其他因素的影响发挥着至关重要的作用, 其他各因素层级影响明显; 顶层因素是底层因素的最根本原因, 也是造成防暴动能弹致伤机理的直接原因, 与防暴动能弹的致伤威力影响因素评估参数和

第 2 部分中因素分析结果相一致。因此,该算法构建的致伤威力影响因素递阶层次结构模型具有一定的可靠性。

## 4 结论

1) 提出在影响因素较多的情况下,利用因素节点度三分位数约简非关键因素,提取筛选重要影响因素的方法。该方法简化了 DEMATEL-ISM 算法在计算较复杂对象时的计算量,可快捷构建防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构模型。

2) 算例分析结果表明,作用于目标的钝击点最大形变率、钝击点最大形变、最大能量转移率、最大能量转移量是防暴动能弹致伤威力的关键影响因素,钝击点形变和弹丸的能量转移对防暴动能弹的致伤威力造成直接影响;弹丸质量和速度为最强原因因素,是对其他因素造成影响的根本原因;其余影响因素相互影响、相互制约,在防暴动能弹致伤威力影响因素系统结构中起着承上启下的作用。

参考文献:

- [1] LAW David. Next-generation non-lethal technologies [EB/OL]. [2018-12-06]. <https://spie.org/news/6484-next-generation-non-lethal-technologies?SSO=1>.
- [2] 王学奎,蒋里强. 导弹命中给定区域的模拟与实现[J]. 舰船电子工程 2010, 30(12): 108-109.
- [3] 金星,洪延姬,文明,等. 导弹射程能力评定数值分析优化方法[J]. 弹箭与制导学报 2001, 21(4): 1-3.
- [4] 周德群,章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. 管理科学学报 2008, 11(2): 20-26.
- [5] 杜纯,王瑛,汪送,等. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统安全事故致因因素分析[J]. 数学的实践与认识 2012, 42(22): 143-150.
- [6] 付凯,夏靖波. 基于 DEMATEL-ISM 的军事通信网络系统结构分析[J]. 军事运筹与系统工程 2017, 31(1): 46-51.
- [7] 李明辉,夏靖波,陈才强. 基于决策试验和评价实验法与解释结构模型的含有可达影响因子的网络谱系模型[J]. 吉林大学学报(工学版) 2012, 42(3): 782-788.
- [8] GONZALEZ D L, CONSTABLE R, DAYTON T, et al. 66 mm non-lethal grenade: human effects review: AFRL-HE-BR-TR-2003-0025 [R]. [S. l.]: Air Force Research Laboratory 2003.
- [9] PAPY A, ROBBE C, NSIAMPANA N, et al. Definition of a standardized skin penetration surrogate for blunt impacts [C]// International Research Council on Biomechanics of Injury. Proceedings of IRCOBI 2012 Conference. [S. l.]: s. n. ] 2012: 486-493.
- [10] 黄东,何帆,李其祥,等. 防暴动能弹对人体非致命效应的模拟研究[J]. 军械工程学院学报 2016, 28(1): 11-15.
- [11] ROTHSCCHILD M A, COUPL M R, THALI M, et al. Wundballistic: Grundlagen und Anwendungen [M]. Berlin: Springer-Verlag 2008: 213-276.
- [12] KOENE L, POPY A. Towards a better science-based re-evaluation of kinetic non-lethal weapons [J]. International Journal of Intelligent Defence Support Systems, 2011, 4(2): 169-186.
- [13] BIR C A, STEWART S J, WILHELM M. Skin penetration assessment of less lethal kinetic energy munitions [J]. Journal of Forensic Sciences, 2005, 50(6): 1426-1429.
- [14] LORENZO D P. How to quantify effects of non-lethal weapons [C]// IBS. Proceedings of 24th International Symposium on Ballistics. Orlando: IBS, 2008: 1284-1288.
- [15] STURDIVAN L M. Non-lethal weapons assessment: Deterrence and injury-final report [R]. Quantico: Joint Non-lethal Weapons Directorate 2000.
- [16] STURDIVAN L M, VIANO D C, CHAMPION H R. Analysis of injury criteria to assess chest and abdominal injury risks in blunt and ballistic impacts [J]. Journal of Trauma, 2004, 56(3): 651-663.
- [17] PAVIER J, LANGLET A, ECHES N, et al. On ballistic parameters of less lethal projectiles influencing the severity of thoracic blunt impacts [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015, 18(2): 192-200.
- [18] PAVIER J, LANGLET A, ECHES N, et al. Experimental study of the coupling parameters influencing the terminal effects of thoracic blunt ballistic impacts [J]. Forensic Science International, 2015, 252: 39-51.
- [19] KUNZ S N, GRAW M, PESCHEL O, et al. Evaluation of the long-distance conducted electrical weapon XREP® [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(2): 281-291.
- [20] KUNZ S N, ADAMEC J, ZINKA B, et al. Wound ballistic evaluation of the Taser® XREP ammunition [J]. International Journal of Legal Medicine, 2013, 127(1): 119-126.
- [21] LANGLET A, PAVIER J, ECHES N, et al. Study of less lethal projectiles blunt impacts on the thorax by experiments on pig thoracic cages and numerical simulations [J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2015, 18: 1970-1971.
- [22] NSIAMPANA N, ROBBE C, OUKARA A, et al. Comparison of less lethal 40 mm sponge projectile and the 37 mm projectile for injury assessment on human thorax [C]// EDP. Proceedings of 10th International Conference on the Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. [S. l.]: EDP Sciences 2012, 26: 03002-1-03002-3.
- [23] FRANK M, SCHORGE V, HEGENSCHIED K, et al. Sturdivan's formula revisited: MRI assessment of anterior chest wall thickness for injury risk prediction of blunt ballistic impact trauma [J]. Forensic Science International, 2011, 212(1): 110-114.
- [24] 焦振勇,李霄. 三分位数的意义及计算[J]. 统计与信息论坛 2006(4): 19-20.