

基于 ODI 方法的防暴动能弹钝击效应影响因素分析 *

涂明聪^{1,2},汪 送^{1*}

(1.武警工程大学装备管理与保障学院,西安 710086;2.武警湖南总队参谋部勤务保障大队,长沙 410008)

摘要:为提高防暴动能弹的设计安全性和使用安全性,需要确定影响其钝击效应的关键因素,并区分因素属性,采用基于 OWA 算子集成 DEMATEL-ISM 的方法(ODI 方法),构建因素间的递阶层次结构模型,确定冲击加速度、冲击位移是影响防暴动能弹钝击效应的关键因素,比动能、动能为底层原因因素。研究结论对防暴动能弹钝击效应致伤标准制定和损伤等级评定具有借鉴意义。

关键词:防暴动能弹,钝击效应,OWA 算子,DEMATEL-ISM,因素分析

中图分类号:TJ4

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2019.11.016

引用格式:涂明聪,汪送.基于 ODI 方法的防暴动能弹钝击效应影响因素分析[J].火力与指挥控制,2019,44(11):78-83.

Analysis of the Influence Factors of Anti-riot Kinetic Energy Bomb Based on ODI Method

TU Ming-cong^{1,2}, WANG Song^{1*}

(1.Equipment Management and Guarantee Institute, Engineering University of Armed Police Force of China, Xi'an 710086, China;
2.Armed Police Headquarters Staff Service Brigade, Hunan Police Force, Changsha 410008, China)

Abstract: In order to improve the design safety and safety of anti-riot kinetic energy bombs, it is necessary to determine the key factors affecting its bludgeon effect and to distinguish the factor attributes. The method of integrating DEMATEL-ISM (ODI method) based on the OWA operator is used to construct the inter-factorial The Hierarchical Hierarchy Model determines that impact acceleration and impact displacement are the key factors affecting the bludgeon effect of anti-riot kinetic energy. The specific kinetic energy and kinetic energy are the underlying causes. The conclusions of the study have implications for the development of standard standards for damage caused by the blunt impact of riot kinetic energy bombs and the evaluation of damage levels.

Key words: anti-riot kinetic energy bomb, blunt effect, OWA operator, the DEMATEL and ISM, factor analysis

Citation format: TU M C, WANG S. Analysis of the influence factors of anti-riot kinetic energy bomb based on ODI method[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(11): 78-83.

0 引言

防暴动能弹,被广泛应用在处突、反恐等任务中,它以冲击动能打击有生目标,产生诸如强烈痛

感、失去抵抗能力或行动受到抑制等钝击效应^[1]。防暴动能弹钝击效应影响因素一直备受关注。在实际操作中,因为对弹药性能、打击部位等因素把握不当,防暴动能弹致伤、致死案例不在少数。因此,

收稿日期:2018-07-05

修回日期:2018-10-15

* 基金项目:国家自然科学基金(71401179);武警工程大学基础研究基金资助项目(WJY201608)

作者简介:涂明聪(1987-),男,湖南衡阳人,硕士研究生。研究方向:军事装备学。

* 通信作者:汪 送(1984-),男,湖南衡阳人,博士。研究方向:非致命武器。

防暴动能弹钝击效应的标准化和等级评定变得十分必要和紧迫。目前国内外对防暴动能弹钝击效应的影响因素都有研究。如据美国国防部官网资料显示,在《非致命性武器计划执行机构 2016 年规划指导手册》^[2]中,对动能弹的钝击效应影响因素有了不同程度的研究。国内如黄东^[3]等从防暴动能弹的碰撞速度以及入射角度两个因素,对防暴动能弹钝击效应进行了模拟研究,祁伟^[4]等从冲击加速度、冲击位移两个因素,对胸部的非致命动能冲击响应进行了测试等。

目前,这些研究普遍存在考虑因素单一的问题,没有综合系统去考虑防暴动能弹钝击效应影响因素,同时对于数据中由专家评判带来的主观成分没有很好地规避,不能很好地客观反映影响因素属性和识别关键因素。

鉴于此,本文采用 ODI 方法(基于一种有序加权平均(OWA)算子对专家数据进行集结后采取 DEMATEL-ISM 方法构建防暴动能弹钝击效应影响因素层次结构图)集结来自 4 个领域(弹药设计、非致命武器、外科皮肤、工程力学)9 名军地专家的 11 个方面的影响因素数据。通过 OWA 算子有效规避专家数据中的主观成分,再利用 DEDEMATEL-ISM 方法对数据进行集结,确定因素的原因度和中心度,找到关键因素,构建防暴动能弹钝击效应影响因素递阶层次结构模型,找到因素间相互影响关系,为防暴动能弹钝击效应的标准化和损伤等级评定提供参考。

有序加权平均算子(Ordered Weighted Averaging,OWA)由美国著名学者 Yager^[6]于 1988 年提出,并于 1996 年提出指标集合量化方法。对于钝击效应影响因素相互关系强度的确定,本文沿用传统的德尔非法集结。由 OWA 算子得到的集结值表示各影响因素的直接影响力。

决策实验分析法(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory DEMATEL)和解释结构模型法(Interpretive Structural Modeling ISM)是对复杂系统进行分析和决策的重要方法,两种方法自提出以来已经得到了广泛应用^[7]。吴小东^[8]等利用集成 DEMATEL-ISM 方法得出了海洋工程装备产业的发展问题之间的中心度和原因度。周德群^[9]等集成 DEMATEL-ISM 方法,使复杂系统的层次结构更加合理、直观,并对理论依据和具体步骤进行了阐述。吴彪^[10]等以集成 DEMATEL-ISM 方法构建了高速公路作业区交通安全影响因素辨识模型。张宇飞^[11]等集成 DEMATEL-ISM 方法构建防暴弹药寿命影

响因素递阶层次结构模型。鉴于 DEMATEL-ISM 方法分析因素层次结构的有效性,在对由 OWA 算子集结到的直接影响度通过 DEMATEL-ISM 构建因素之间的结构模型,可确定影响防暴动能弹钝击效应的关键因素和识别钝击效应影响因素的属性。

1 防暴动能弹钝击效应影响因素提取

防暴动能弹钝击效应与所打击的人体部位密切相关。胸腹部为主要打击部位,一般禁止对喉部以上部位进行射击。本文以胸腹部为打击部位,以 18.4 mm 布袋弹为研究对象,通过综合分析有关文献资料、咨询专家,收集和分析相关数据,得出防暴动能弹钝击效应的是由弹药性能、弹药设计、组织的力学特性、组织的力学响应等多方面因素相互作用的结果。

在防暴动能弹钝击效应影响因素如表 1 所示,防暴动能弹性能方面主要是比动能、动能、入射角度、侵彻深度等^[13-15];弹药设计方面主要是弹丸质量、弹径、弹头形状^[3-5];组织的力学特性方面主要是组织粘性性能、组织弹性性能等^[16-17];力学响应方面主要是冲击加速度、冲击位移等^[7,18]。

表 1 防暴动能弹钝击效应影响因素集

类别	序号	影响因素
弹药性能	s1	比动能
	s2	动能
	s3	入射角度
	s4	侵彻深度
弹药设计	s5	弹丸质量
	s6	弹径
	s7	弹头形状
组织的力学特征	s8	组织粘性性能
	s9	组织弹性性能
组织的力学响应	s10	冲击加速度
	s11	冲击位移

表 1 从 4 个方面提取了 11 个因素,建立防暴动能弹钝击效应影响因素集。根据基于 OWA 算子集结各领域专家因素之间强度数据,得到直接影响矩阵,进而集成 DEMATEL-ISM 方法构建结构层次模型,识别出因素重要度及因素间的层次结构。

1.1 弹药性能因素

弹药性能指弹药的杀伤性能,一般采用以下两个标准。

1) 动能标准

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \tag{1}$$

其中, m 为投射物的质量, v 为投射物的初速度。

2) 比动能标准

$$E_b = \frac{E}{F} \tag{2}$$

其中, E 、 F 分别为弹丸动能和弹丸横截面积。

实验表明, 投射物不同的碰撞速度和入射角度, 对人体的作用效果也不一样^[3]。

1.2 弹药设计因素

防暴动能弹的钝击效应传统上被视为非致命动能弹侵彻问题。对于非致命动能弹侵彻问题, 可以根据最早由 1945 年 Bishop、Hill 和 Mott 等人针对动能弹提出空腔膨胀理论^[16]来研究。依据 Poncelet 阻力定律, 弹药设计因素同动能弹侵彻程度的关系, 可由萨布斯基公式来计算。

$$L = \frac{2m}{Abj\pi d^2} \ln \left(\frac{1+bv_0^2}{1+bv^2} \right) \tag{3}$$

其中, m 为弹丸质量(kg); d 为弹径(m); j 为与弹丸形状有关的系数; L 为侵彻行程(m); A 、 b 为与介质有关的系数。

1.3 组织的力学特征

防暴弹钝击效应跟打击部位的力学特征有关。根据试验发现(Barros, Magg et al. 2014), 这里以皮肤为例, 影响防暴动能弹的钝击效应因素主要来自于皮肤的两个方面特性: 组织的粘性性能和弹性性能。

根据赫兹接触理论, 试验测定的皮肤在球-平面接触情况下的压入变形量 δ 与外载荷 F_n 的关系为:

$$\delta = \frac{1}{k^{\frac{2}{3}} r^{\frac{1}{3}}} F_n^{\frac{2}{3}} \tag{4}$$

式中, K 为综合弹性模量($\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \frac{1-\nu^2}{E}$), ν 和 E 为泊松比和弹性模量, r 为球当量半径, 对高弹性材料, 泊松比一般为 0.45。

1.4 组织的力学响应

防暴动能弹由于具有较高的动能和比动能, 在冲击时会对人体造成严重的钝性弹道损伤甚至引起死亡。祁伟等在基于 Hybrid 法对胸部的非致命动能冲击响应测试中, 以胸腹部为冲击对象, 得到

$$\bar{S}_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2} \tag{5}$$

式中, S_j 为合成加速度, 测量假人胸部 3 个方向的加

速度采样数据, 再根据防暴动能弹初速度采集到打击 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 来确定冲击位移和冲击加速度。

2 ODI 方法步骤

2.1 OWA 算子

有序加权平均算子(OWA)是一种有效的集结数据信息的方法。OWA 算子基于权重向量的排序来获取向量属性的最优权重。

定义 1 设 R^+ 为正实数集, $R^{+n} \rightarrow R^+$, 令 $G_w(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j b_j$ 。其中 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$

为与 G 相关的指数加权向量, 满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 且

$w_j \in [0, 1]$ 。 b_j 是一组 (a_1, a_2, \dots, a_n) 中第 j 大的元素。称函数 G 为有序加权平均算子, 简称 OWA 算子。因此, OWA 算子是对 n 个数 a_1, a_2, \dots, a_n 按从大到小降序排列后进行的有序加权平均, 且权重系数 w_j 与 a_j 无关, 而与降序在第 j 个位置的数 b_j 有关。

定义 2 设 OWA 集结算子中的权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 则定义集结算子的 orness 测度为 $O(W) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (n-j)w_j$ 。并且 $O(W) = \alpha$, α 表示

主观决策系数。 α 的数值大小可以反应决策者的乐观度。比如, $\alpha=1$ 表示决策者保持纯乐观态度, 此时 $w=(1, 0, \dots, 0)$, 最大属性值获得全部权重, 此时 $w=(0, 0, \dots, 1)$, 最小属性值获得全部权重, OWA 算子变成最小化算子; $\alpha=0.5$ 表示决策者保持中立态度, 此时 $w=(1/n, 1/n, \dots, 1/n)$, 所有属性值获得平均权重。

通过给定主观决策系数 α 和最大化信息熵可确定 OWA 权重向量。然后应用拉格朗日乘法规则将约束优化问题转化为多项式方程式^[19], 由此来确定能够实现最大信息熵的最优权重向量, 具体如下所示。

$$\ln w_j = \frac{j-1}{n-1} \ln w_n + \frac{n-j}{n-1} \ln w_1 \tag{6}$$

由上式可得

$$w_1 [(n-1)\alpha + 1 - nw_1]^n = ((n-1)\alpha^{n-1}) \cdot [((n-1)\alpha - n)w_1 + 1] \tag{7}$$

$$w_1 = \frac{(n-1)\alpha - n)w_1 + 1}{(n-1)\alpha + 1 - nw_1} \tag{8}$$

$$w_j = \frac{n-1}{\sqrt{w_1^{n-j} w_n^{j-1}}} \tag{9}$$

因此,通过式(7)可获得 W_j 的最优值,再根据式(8)确定 W_n ,其余权重可由式(9)确定。

2.2 DEMATEL-ISM 方法步骤

改进 DEMATEL-ISM 划分系统结构的思想如下:通过提取防暴动能弹影响因素,利用 OWA 算子对基于 Delphi 方法得到的专家数据进行集结,应用拉格朗日乘法规则实现最大信息熵的最优权重向量,进而推导出防暴动能弹钝击效应因素间的直接影响矩阵,再利用 DEMATEL 方法得到因素间综合影响矩阵并进行计算;根据整体影响矩阵和可达矩阵的关系,将整体影响矩阵转化为 ISM 中可达矩阵。根据可达矩阵和 ISM 方法划分出系统因素的层次结构。由于 DEMATEL-ISM 已经被广泛使用在各领域,已经非常成熟,具体步骤可参考文献 [9,11,19]。

3 算例分析

3.1 案例背景

下面举例说明基于 OWA 算子的 DEMATEL-ISM 方法构建层次结构的有效性和可行性。

结合 18.4 mm 布袋弹钝击效应影响因素,利用 Delphi 法邀请 9 位领域专家对上述 11 个因素按照较强、强、一般、弱、无 5 个等级分别赋值 4,3,2,1,0 来确定因素之间直接影响关系,基于 OWA 算子集结数据后,得到直接影响矩阵,见表 2。

3.2 分析计算

经计算,直接影响矩阵中行和最大值为 22.943。求得规范化矩阵 X ,进而求得综合影响矩阵 T ,见表 3。

表 2 直接影响矩阵

a_{ij}	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}
s_1	0	3.942	0	3.147	3.897	0.755	0.729	1.133	1.902	3.719	3.719
s_2	3.423	0	0.327	3	0.724	1.247	1.737	2.256	1.809	3.821	3.821
s_3	0	0	0	2.418	0	0	0	0.054	0.018	1.009	0.983
s_4	0.876	0.969	1.471	0	0	0	0	1.744	0.537	2.766	2.766
s_5	0.981	4	0.751	1.136	0	2.221	1.231	0	0	1.531	1.758
s_6	0.087	0.768	0	1.48	2.109	0	2.706	0.624	0.629	1.741	0.168
s_7	0	0	0	1.985	1.985	1.446	0	0.781	1.468	0	0
s_8	0	0	0	3.044	0	0	0	0	0	3.871	3.923
s_9	0	0	0	3.772	0	0	0	0	0	3.126	3.11
s_{10}	0	0	0	3.628	0	0	0	0	0	3.718	4
s_{11}	0	0	0	3.628	0	0	0	0	0	4	3.719

表 3 综合影响矩阵

F	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}	s_{11}
s_1	0.058	0.235	0.034	0.382	0.199	0.071	0.070	0.108	0.121	0.469	0.466
s_2	0.176	0.062	0.041	0.366	0.079	0.077	0.099	0.146	0.115	0.455	0.451
s_3	0.006	0.007	0.009	0.143	0.001	0.001	0.001	0.014	0.005	0.101	0.099
s_4	0.052	0.058	0.073	0.128	0.012	0.006	0.007	0.094	0.036	0.271	0.270
s_5	0.083	0.208	0.049	0.202	0.039	0.120	0.088	0.046	0.037	0.251	0.253
s_6	0.024	0.065	0.014	0.158	0.112	0.023	0.132	0.052	0.047	0.185	0.117
s_7	0.014	0.028	0.013	0.149	0.098	0.075	0.017	0.051	0.074	0.084	0.080
s_8	0.011	0.012	0.015	0.241	0.002	0.001	0.002	0.020	0.007	0.312	0.314
s_9	0.012	0.013	0.016	0.258	0.002	0.001	0.001	0.021	0.008	0.267	0.266
s_{10}	0.012	0.014	0.017	0.269	0.003	0.001	0.001	0.022	0.008	0.311	0.324
s_{11}	0.012	0.014	0.017	0.268	0.003	0.002	0.001	0.022	0.008	0.324	0.311

根据计算公式可得如表 4 所示的防暴动能弹钝击效应影响因素评估参数和图 2 所示的因果图。

表 4 防暴动能弹钝击效应影响因素评估参数

影响因素	影响度	被影响度	中心度	原因度
s1	2.220	0.464	2.684	1.755
s2	2.071	0.719	2.790	1.351
s3	0.390	0.304	0.694	0.086
s4	1.012	2.570	3.582	-1.558
s5	1.380	0.553	1.933	0.827
s6	0.932	0.381	1.313	0.550
s7	0.687	0.423	1.110	0.264
s8	0.941	0.601	1.543	0.339
s9	0.870	0.470	1.341	0.400
s10	0.986	3.034	4.020	-2.047
s11	0.986	2.957	3.943	-1.970

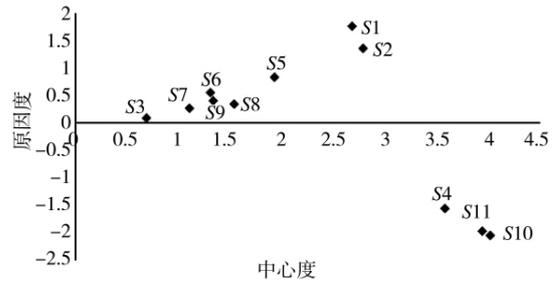


图 1 原因结果图

由图 1 可知,弹药性能方面的比动能(s10)、动能(s11)是防暴动能弹钝击效应的关键影响因素,而冲击加速度(s1)、冲击位移(s2)原因度最大,是强原因因素,取阈值 $\lambda=0.1$,可得到如表 5 所示的标准化可达矩阵。

根据公式 $R_i = R_i \cap S_i, (i=1,2,\dots,n)$, 经计算分析得到最高层影响因素集为 $L1 = \{s10, s11\}$ 。同理可得 $L2 = \{s4\}$ $L3 = \{s3, s7, s8, s9\}$ $L4 = \{s5, s6\}$, 最底层影响因素集为 $L5 = \{s1, s2\}$ 。

表 5 标准化可达矩阵

F	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11
s1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1
s2	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
s3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
s4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
s5	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
s6	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
s7	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
s8	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1
s9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1
s10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
s11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1

根据以上结果分析,可以将防暴动能弹钝击效应影响因素的递阶结构模型表示如图 2 所示。

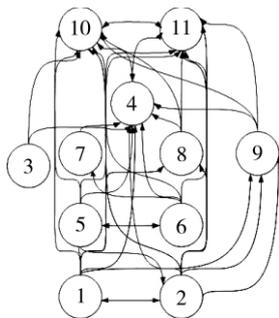


图 2 防暴动能弹钝击效应影响因素多级递阶层次结构模型

3.3 结果分析

由图 2 可知,冲击加速度(s10)、冲击位移(s11)是钝击效应影响因素递阶层次结构最高层因素。第 2 层因素是侵彻深度(s4),这是影响防暴动能弹钝击效应的浅层因素,对第 1 层因素由直接影响,第 3

层至第 4 层属于中层影响因素,起着承上启下的作用。最底层因素是比动能(s1)、动能(s2),同时原因度又最大,表明这两个因素是强原因因素,它通过不同方式对其他因素产生直接或间接的影响。同文献[20]中经实验得出钝击效应标准中的压缩速度(即冲击加速度)与压缩量(即冲击位移)(VC)的组合对伤害的预测能力高于单独的弹体能量及个体不同的耐受能量冲击的能力(BC)描述一致。

4 结论

1) 提出了一种 ODI (基于 OWA 算子集成 DEMATEL-ISM 的方法)方法。该方法与传统方法相比,有效地规避了模糊数据带来的主观成分影响,同时构建了防暴动能弹钝击效应影响因素的多级递阶层次结构模型,结果更加精确、直观、可信。

2) 通过实证,确定了冲击加速度、冲击位移是

影响防暴动能弹钝击效应的关键因素,识别了比动能、动能是影响防暴动能弹钝击效应的原因因素。

3) 利用本文建立的数学模型,对 18.4 mm 布袋弹进行了实际验证,证明了评估结果与 Cynthia Bird 等^[20]在 Design and Injury Assessment Criteria for Blunt Ballistic Impacts 中结论基本相符。本文提出的方法和构建的数学模型,可为防暴弹钝击效应标准制定和损伤等级评定提供指导和参考。

参考文献:

- [1] 赵陕东,马永忠.非致命武器与警用器材[M].北京:兵器工业出版社,2005:45-46.
- [2] U.S.Department of Defense.DoD non-lethal weapons program 2015[EB/OL].http://jnlwp.defense.gov,2015.
- [3] 黄东,何帆,李其祥.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.
- [4] 祁伟,庄弘伟,赵法栋.基于 Hybrid III 胸部的非致命动能冲击响应测试方法[J].兵器材料科学与工程,2017,40(4):20-25.
- [5] 郭三学,魏续旺.基于 F_AHP 法的非致命橡皮碰击动能弹综合效能评估[J].军械工程学院学报,2015,27(1):1-5.
- [6] YAGER R R.On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making [J].IEEE Transactions on Systems,Man and Cybernetics,1988,18:183-190.
- [7] 陆梦.基于 DEMATEL 与 ISM 集成方法的水上交通系统脆性影响因素研究[J].上海海事大学学报,2014,35(1):19-21.
- [8] 吴小东,黄剑锋,赵晶英.基于集成 DEMATEL/ISM 的海洋

工程装备产业发展问题的相互关系分析[J].科技管理研究,2015,35(4):145-148,161.

- [9] 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.
- [10] 吴彪,许洪国,戴彤焱.基于 DEMATEL-ISM 的高速公路作业区交通安全影响因素辨识[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(5):130-134.
- [11] 张宇飞,汪送,段雄义.集成 DEMATEL-ISM 的防爆弹药寿命影响因素分析[J].火力与指挥控制,2017,42(12):35-39.
- [12] DAVISON N.The contemporary development of 'Non-Lethal' weapons. In: Non-Lethal weapons [M].London:Global Issues Series.Palgrave Macmillan,2009.
- [13] 中国人民解放军总参谋部.GJBz 20262-95 中国国家军用使用标准[S].北京:总参谋部,1995.
- [14] 曾鑫,周克栋.非侵彻条件下猪体和明胶靶内压力衰减试验研究[J].振动与冲击,2014,33(8):96-100.
- [15] 马志伟,马永忠,朱光涛,等.霰弹对人体杀伤效应的试验研究[J].弹箭与制导学报,2016,36(5):63-66.
- [16] LU T J,XU F.Mechanical properties of skin:a review [J].Advances in Mechanics,2008(4):393-426.
- [17] 李远峰.人体皮肤摩擦和弹性性能的试验研究 [D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [18] 蔡志华.汽车碰撞中胸部生物力学响应与损伤评估研究 [D].广州:华南理工大学,2013.
- [19] 林晓华,贾文华.结合 OWA 算子和模糊 DEMATEL 的风险评估方法[J].计算机科学,2016,43(S2):362-367.
- [20] CYNTHIA B,DAVID C.Design and injury assessment criteria for bluntballistic impacts[J].J Trauma,2004(57):1218-1224.

(上接第 77 页)

踪环路应用中有广阔的前景。

参考文献:

- [1] RINDER P,BERTELEN N.Design of a single frequency GPS software receiver[D].Denmark:Aalborg University,2004.
- [2] LIAN P.Improving tracking performance of PLL in high dynamic application [D]. Alberta:University of Calgary,2004.
- [3] 程乃平,任宇飞,吕金飞.高动态扩频信号的载波跟踪技术研究[J].电子学报,2003,31(12):2147-2150.
- [4] 丁丹,程乃平,郝建华,等.QPSK 载波锁相环的鉴频辅助方法研究[J].遥测遥控,2006,27(1):21-24.
- [5] 刘满国,张科,高动态 GPS 卫星信号混合载波跟踪算法设计[J].火力与指挥控制,2014,39(2):68-72.
- [6] YANG Y,GAO W,ZHANG X.Robust kalman filtering with constraints a case study for integrated navigation[J].Journal of Geodesy,2010,84(3):373-381.
- [7] 金力,吕鹏,崔晓伟,等.新一代 GNSS 信号的自适应 Kalman 跟踪算法 [J].清华大学学报(自然科学版),

2012,52(9):1249-1254.

- [8] 周东华,席裕庚,张钟俊.非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波[J].控制与决策,1990,5(5):1-6.
- [9] 王熙赢,陈熙源.强跟踪滤波器在高动态 GPS 信号跟踪中的应用[J].东南大学学报,2014,44(5):946-951.
- [10] 胡辉,张雪丽,严辉煌,等.基于自适应 EKF 的高动态载波跟踪算法[J].火力与指挥控制,2016,41(6):51-55.
- [11] 戴洪德,邹杰,徐胜红,等.含预测和容错的自适应 Kalman 目标跟踪[J].南京理工大学学报,2015,39(1):108-114.
- [12] 谢钢.GPS 原理与接收机设计[M].北京:电子工业出版社,2009:363-364.
- [13] 刘军良.卫星导航系统中的弱信号跟踪研究[D].北京:中国科学院大学,2015:73-84.
- [14] SAGE A P,HUSA G W. Adaptive filtering with unknown prior statistics [C].//Proceedings of Joint Automatic Conference,1969:760-769.
- [15] 张常云.自适应滤波方法研究 [J].航空学报,1998,19(7):96-99.