文章编号:1000-8608(2023)03-0282-09

基于 ALE 的充气式海上围栏系统气囊单元优化设计

卢正起1,李 楷*1,常松亮1,苑志江2,蒋晓刚2

(1.大连理工大学 船舶工程学院,辽宁 大连 116024;
2.海军大连舰艇学院 航海系,辽宁 大连 116018)

摘要:针对充气式海上围栏系统的气囊单元选型,在单层单气室气囊的基础上提出单层多 气室气囊、双层多气室气囊两种改进型,建立静水海域中小艇以10、20、30 m/s的初速度垂直 撞击气囊中部3种典型拦截场景.基于任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法,应用有限元软件 LS-DYNA进行数值模拟,通过小艇的最大碰撞力、最大反向加速度、单元失效比等数据,分析单 层单气室气囊、单层多气室气囊、双层多气室气囊3种气囊单元对来袭小艇的拦截效果,发现 双层多气室气囊的拦截能力最强.借助正交试验进一步优化双层多气室气囊的设计参数.通 过优化后的结果发现,优化后的双层多气室气囊的最大碰撞力相比原设计方案提高了9%, 显著提高了气囊的拦截能力.

关键词:充气式海上围栏系统;气囊优化;ALE 算法;正交试验 中图分类号:U662.2 文献标识码:A doi:10.7511/dllgxb202303008

0 引 言

为保护港口船只和设施,防御水面快艇的冲击,多种不同形式的港口安全防护系统应运而生. 在这些防护系统中以气囊为主要单位的港口安全防护系统(即充气式海上围栏系统)以其成本较低、方便安装和部署且容易维护的特点,受到广泛关注.气囊在受到冲击后,主要靠压缩气囊内部气体做功来消耗冲击动能.而且气囊具有一定的弹性,与采用刚性防护单元的港口安全阻拦系统相比,不易受损,有利于长期部署.

对气囊受冲击特性的研究主要是通过试验、 理论计算和数值模拟开展.试验研究所需的成本 较高,理论计算比较复杂且需要人为计算简化整 个物理过程^[1].随着仿真技术逐渐趋于成熟,数值 模拟被广泛应用到多个领域中,在大量数值模拟 的基础上再确定关键设计参数,能够大幅降低试 验成本.

葛如海等针对大体形乘员易击穿气囊的问题,设计了一款新型的前后双气室安全气囊,提高

对大体形乘员的保护效果,并利用正交试验对双 气室气囊的参数进行优化,证明新型气囊提高了 约束系统的安全性能[2]. 许鹏伟结合遗传算法、试 验设计等方式,以当前的气囊缓冲系统为基础,对 气囊缓冲系统的各项参数进行建模,设计出可以 搭载不同空投装备并且具有良好缓冲性能的气囊 结构[3].牛四波等简述了气囊缓冲的机理及工作 过程,建立了气囊缓冲过程的理论分析模型及气 囊参数优化数学模型,选择遗传算法对气囊进行 优化[4]. 王红岩等建立了空降车-气囊系统非线性 有限元模型,采用建立等效响应模型方法进行缓 冲气囊的参数优化[5].张鹏飞针对大载重装置的 着陆缓冲问题,以组合气囊系统为基础,借助数值 模拟的方式对其缓冲特性进行研究,并通过多目 标优化算法对组合气囊的参数进行优化[6]. Aboshio 等采用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)公式 的有限元方法,对包含 98%以上复合材料的气囊 进行了冲击荷载下的动力学分析,所建立的模型 和数值结果对气囊的性能分析和结构设计提供了 很大帮助[7].

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2023-03-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509033);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT19JC51).

作者简介: 卢正起(1997—),男,硕士生,E-mail;zqlu22003162@mail.dlut.edu.cn;李 楷*(1984—),男,博士,副教授,硕士生导师,E-mail;likai@dlut.edu.cn.

俄罗斯卡拉什尼科夫集团公司研制的"BK-16"高速艇最大航速超过42 kn,美国耐特卡弗公 司制造的"短剑 M80"隐形作战快艇最大航速超 过 50 kn,意大利著名的 FB 设计公司设计的 "FB-55"高速拦截艇最大航速可达 70 kn.在国内 也有很多部门进行快艇的研制,由广东宝达游艇 制造有限公司为海关总署设计建造的"宝达"海关 快艇最快航速达 62 kn,由中航工业兰翔常玻有 限公司研制的"CB1800H"高速艇最大航速同样 可达 62 kn^[8].

为了使拦截场景更加符合真实情况,针对充 气式海上围栏系统的气囊单元选型,本文建立小 艇以 10、20、30 m/s 的初速度垂直撞击气囊中部 3 种典型拦截场景,暂不考虑其他入射角和撞击 点,同时小艇尺度及船艏形状保持不变.为简化计 算,本文碰撞场景均建立在静水海域,暂不考虑风 浪影响.基于任意拉格朗日-欧拉(ALE)算法,应 用 LS-DYNA 软件进行数值模拟,通过分析小艇 的最大碰撞力、最大反向加速度、单元失效比等数 据,对比单层单气室气囊、单层多气室气囊、双层 多气室气囊 3 种气囊单元对来袭小艇的拦截效 果.在气囊选型的基础上,以最大碰撞力为优化目 标,进行优化设计.

1 ALE 算法

在数值模拟中,Lagrange 算法、Euler 算法、 ALE算法被广泛应用于处理连续介质模型.其 中,Lagrange算法通常用于固体的变形及应力的 分析,其描述的网格可以随着物体的变形而变形, 当质点位置发生改变时物理量随时间变化的规律 也会被记录下来.在Lagrange算法中,流体的流 动是通过将所有质点的运动综合起来构建而成 的. Lagrange 算法可以非常精确地描述模型边界 的运动,但当处理大变形问题时,可能使网格纠 缠,影响单元的近似精度. Euler 算法通常用于模 拟流体的变形,其描述的网格不随物质变化,即网 格是固定的,流体在网格内流动. Euler 算法在处 理大变形问题时,没有网格纠缠问题,但无法精确 确定物体的运动边界^[9-11]. ALE 算法克服了 Lagrange算法和 Euler 算法的不足,网格可以相 对于坐标系做任意运动.目前,ALE 算法已被广 泛应用于加工成型、大变形问题、液体大幅度晃 动、流-固耦合等领域.

小艇撞击充气式海上围栏系统的过程中,涉

及小艇水面运动、气囊变形、气体做功、船体大变 形等情形,是典型的流-固耦合问题,具体的应力 应变分析包括流体和固体两部分.LS-DYNA 软 件可以综合 Lagrange 算法、Euler 算法和 ALE 算 法的优点,将一个网格中的能量、位移等信息传递 到下一个网格,依次进行,直至求解完成整个流-固耦合问题.

2 气囊拦截小艇及改进型气囊有限 元模型的建立

2.1 气囊有限元模型

充气式海上围栏系统包含多个气囊单元、连接件、系泊浮筒和锚泊系统. 气囊壁是由帘线和橡胶基体复合制成的复合材料, 通常采用尼龙 6 (PA6)材料进行分析建模. 在 LS-DYNA 软件中可采用 * MAT003_PLASTIC_KINEMATIC 本构模型进行模拟, 这种本构模型考虑了材料的应变率效应, 其中采用了 Cowper-Symonds 准则^[12]进行建模. 该准则可以表述为

$$\sigma = 1 + \left(\frac{\varepsilon}{C}\right)^{1/P} \tag{1}$$

式中: σ 为屈服应力, ε 为应变率,C、P为 Cowper-Symonds 模型参数.

本文基于典型的充气式海上围栏系统的配置,建立了一个15 m×2.5 m 的单层单气室气囊 模型.模型中的气囊厚度为10 mm,初始内部压 力设置为50 kPa,该内部压力的值是通过在LS-DYNA 软件中使用 * SIMPLE_PRESSURE_ VOLUME^[11]命令来设定的.

2.2 小艇船体结构有限元模型

小艇的船体采用了 GFRP (glass fiber reinforced plastic)复合材料.GFRP 是一种由玻 璃纤维和环氧树脂制成的材料,它具有比强度高、 比模量高、密度低、耐腐蚀、结构可设计性强等特 点.在 LS-DYNA 软件中,使用 * MAT022_ COMPOSITE_DAMAGE 本构模型来模拟 GFRP 材料.该本构模型采用了 Chang-Chang 失 效准则^[13],其中小艇 GFRP 层合板单层厚度为 1.25 mm,铺层角度为[0°,45°,-45°,90°],铺层 之后的总厚度为 10 mm.

2.3 拦截场景模型

本文将小艇分别以 10、20、30 m/s 的速度撞 击气囊定义为场景 1、场景 2、场景 3.为了更加真 实地模拟气囊拦截小艇的过程,需要加入水域和 空气域,其中,选择 * MAT140_VACUUM 本构 模型来模拟空气介质,选择 * MAT009_NULL 本 构模型来模拟水介质.最后,在关键字 * EOS_ GRUNEISEN 中进行设置,对空气和水的两个本 构模型进行设定.本文中水域和空气域的大小均 选取 20 m×15 m×2 m,可以采用六面体网格对 水域和空气域模型进行网格划分,网格大小为 200 mm×200 mm×200 mm.划分网格之后,对 水域和空气域网格进行共节点处理,使两侧区域 约束在一起.为验证该计算域大小是否合适,使小 艇以最低速度撞击单层单气室气囊,整个计算过 程中小艇行波并未与边界接触,没有边界反射,因 而可以认为该计算域为拦截场景模型中的无限水 域,边界对计算效果几乎没有影响.整体拦截场景 模型如图 1 所示,小艇行波如图 2 所示



图1 整体拦截场景模型





图 2 小艇行波 Fig. 2 Boat traveling wave

2.4 两种改进型气囊

为了提升气囊的拦截性能,本文在文献[14] 的基础上进行改进,在单层单气室气囊内部设置 4 道双层隔墙形成单层多气室气囊,隔墙结构既 可以作为增强防撞结构,同时也可以作为挡流板 阻拦撞击时气囊内部气体的流动,起到增加气囊 结构强度和改善拦截性能的作用.4 道隔墙将气 囊分成5个部分,每道隔墙由两个间隔 200 mm 的圆形帘布组成,隔墙采用与气囊外壳相同的尼 龙 6(PA6)材料,直径 2 500 mm,厚度 10 mm,单 层多气室气囊内部结构及整体有限元模型如图 3 所示.



图 3 单层多气室气囊内部结构及整体 有限元模型

Fig. 3 Internal construction and overall finite element model of single-layer multi-chamber airbag

在单层多气室气囊的基础上,进一步提出双 层多气室气囊的形式,即设置内外两层气囊,用多 道单层隔墙形成多个气室,内外气囊以及隔墙仍 采用尼龙6(PA6)材料,内气囊直径为1900mm, 内气囊隔墙间距为2400、1800、1200、1800、 2400mm.外气囊直径为2500mm,外气囊隔墙 间距为2400mm,双层多气室气囊内部结构及整 体有限元模型如图4所示.



图 4 双层多气室气囊内部结构及整体 有限元模型

Fig. 4 Internal construction and overall finite element model of double-layer multi-chamber airbag

3 仿真结果及网格无关性验证

3.1 仿真结果验证

在文献[15]中,通过对我国7艘代表性船舶 的船撞桥梁进行统计得到桥梁的船舶撞击力估算 公式:

$$F = 0.015 \cdot M^{0.70} \cdot v$$
 (2)

式中:F为船舶撞击力,MN;M为满载排水量,t; v为船舶撞击速度,m/s.

为了验证气囊拦截小艇有限元仿真结果的正确性,本文模拟了3种碰撞场景,即小艇分别以10、20、30 m/s的速度撞击3种气囊,提取撞击过程中所产生的最大碰撞力,将得到的数据与公式计算值进行对比.表1列出了3种气囊的最大碰撞力数值模拟结果与船舶撞击力设计值具体数据.

- 表1 3种气囊的最大碰撞力数值模拟结果与 船舶撞击力设计值
- Tab.1 Numerical simulation results of maximum impact force of three types of airbags and design value of ship impact force

小艇速度/ (m•s ⁻¹)	单层单气 室气囊最 大碰撞力/ kN	单层多气 室气囊最 大碰撞力/ kN	双层多气 室气囊最 大碰撞力/ kN	船舶 撞击力 设计值/ kN
10	230.42	237.66	267.85	323.65
20	352.57	466.76	729.13	647.30
30	610.61	828.45	941.10	970.95

从表1中可看出,单层单气室气囊的数值模 拟结果与船舶撞击力设计值的重合度不高,而单 层多气室气囊和双层多气室气囊的数值模拟结果 与船舶撞击力设计值的重合度依次提升,双层多 气室气囊在30 m/s 的最大碰撞力与船舶撞击力 设计值的重合度可达97%,这是因为式(2)的推 导是基于钢质船体与桥梁碰撞的数据,而本文研 究问题为GFRP船体与弹性气囊碰撞,单层单气 室气囊系统刚度明显减小,而改进后的气囊提高 了系统刚度,使仿真结果更加接近理论值.综上可 以认为,使用本文的数值模型来研究这类问题是 合理的.

3.2 网格无关性验证

为对气囊拦截小艇有限元仿真中的网格无关 性进行验证,本文模拟了3种碰撞场景,即小艇以 30 m/s的速度撞击 100、75、50 mm 网格尺寸下 双层多气室气囊,通过小艇撞击不同网格尺寸的 气囊产生的碰撞力曲线来验证网格无关性.图 5 为3种网格尺寸下小艇撞击双层多气室气囊的碰 撞力曲线,表2给出了具体的收敛数据.



图 5 3 种网格尺寸下小艇撞击双层多气室 气囊的碰撞力曲线

Fig. 5 Impact force curves of double-layer multichamber airbag in boat impact with three different grid sizes

表2 收敛数据

Tab. 2 Convergence data

双层多气室气囊 网格尺寸/mm	双层多气室气囊 网格单元总数	最大碰 撞力/kN	计算 时间/h
100	24 510	941.10	17
75	43 275	898.07	28
50	98 295	879.70	38

根据图 5 和表 2 可知,小艇以 30 m/s 速度撞 击各网格尺寸下气囊的碰撞力曲线结果非常相 似,最大碰撞力也十分接近,但如果使用 100 mm 单元,计算时间将大大缩短.为了平衡计算精度和 计算成本,本文采用 100 mm 的网格.

4 3种气囊模型对小艇拦截效果

将 3 种气囊模型置于拦截场景中,小艇分别 以 10、20、30 m/s 的速度进行撞击,通过 9 种计算 工况下小艇撞击气囊后的速度、反向加速度、碰撞 力及单元失效比的对比,评价 3 种气囊对小艇的 拦截效果,具体数值见表 3.

图 6、7、8 分别为场景 1、2、3 中,小艇在撞击 单层单气室气囊、单层多气室气囊、双层多气室气

表 3 小艇撞击 3 利	中气囊后数据对比
--------------	----------

Tab. 3 Data comparison of three types of airbags after boat impact

气囊 类型	初速度/ (m•s ⁻¹)	最大碰撞 力/kN	最大反向 加速度/ (m•s ⁻²)	最终速度 (x方向)/ (m•s ⁻¹)	单元失 效比/%
单层	10	230.42	81.52	-1.83	0
单气室	20	352.57	121.43	4.20	12.1
气囊	30	610.61	189.29	4.45	20.6
	10	237.66	85.95	-1.98	0
多气室	20	466.76	167.48	4.00	13.0
气囊	30	828.45	292.50	2.43	34.8
双层	10	267.85	98.63	-2.25	0
多气室 气囊	20	729.13	248.32	2.94	34.2
	30	941.10	353.74	0.51	43.9



图6 场景1中小艇反向加速度曲线

Fig. 6 Deceleration curves of small boat in Case 1





囊前后的反向加速度情况.

图 9、10、11 分别为场景 1、2、3 中,小艇分别 撞击单层单气室气囊、单层多气室气囊、双层多气 室气囊前后速度的变化情况.



图 8 场景 3 中小艇反向加速度曲线 Fig. 8 Deceleration curves of small boat in Case 3



图 9 场景 1 中小艇速度曲线

Fig. 9 Velocity curves of small boat in Case 1



图 10 场景 2 中小艇速度曲线 Fig. 10 Velocity curves of small boat in Case 2

图 12、13、14 分别为场景 1、2、3 中,小艇撞击 单层单气室气囊、单层多气室气囊、双层多气室气 囊过程中船体碰撞区域受到的碰撞力曲线.

图 15 展示了场景 1、2、3 中小艇分别撞击 3 种气囊后船体的受损情况,其中(a)、(b)、(c)分 别对应场景 1、2、3. 图中每列小艇从上至下分别 撞击单层单气室气囊、单层多气室气囊、双层多气 室气囊,黄色网格单元表示正常单元,蓝色网格单



图 11 场景 3 中小艇速度曲线

Fig. 11 Velocity curves of small boat in Case 3



Fig. 13 Impact force curves of small boat in Case 2



图 12 场景 1 中小艇碰撞力曲线

Fig. 12 Impact force curves of small boat in Case 1



图 14 场景 3 中小艇碰撞力曲线

at in Case 2 Fig. 14 Impact force curves of small boat in Case 3



图 15 3 种场景下小艇撞击不同气囊后单元失效情况

Fig. 15 Element failure conditions after the boat impacting different airbags in three scenarios

元表示失效单元.

在碰撞场景中,放置气囊单元的主要目的在 于将冲击小艇拦住甚至破坏,使小艇前进方向速 度急剧下降,达到拦截的效果,保护港口财产安 全.由图 6~15 和表 3 中数据可知,与单层单气室 气囊相比,小艇在撞击单层多气室气囊和双层多 气室气囊后产生的最大反向加速度、最大碰撞力、 单元失效比均有显著的提升,并且双层多气室气 囊的提升更大,在同一初速度下小艇撞击双层多 气室气囊后 x 方向最终速度也是最小的,这说明 随着气囊内部结构的加强,气囊拦截效果逐渐提 高.3 种气囊中双层多气室气囊对小艇的拦截效 果最好.因此将以双层多气室气囊作为基本气囊 模型,对气囊的设计参数进行优化,旨在寻找最优 的参数匹配,实现气囊对小艇最好的拦截效果.

5 优化研究

5.1 优化目标

通过对 3 种碰撞场景 9 种计算工况的有限元 仿真分析可以发现,小艇以低速撞击气囊后不会 产生失效单元,无法通过单元失效比来判断小艇 受到气囊拦截的影响程度,但不论小艇以高速还 是低速撞击气囊,其碰撞后的最大碰撞力都会准 确地反映出小艇撞击气囊后受到的影响,因此气 囊参数优化以小艇撞击气囊后产生的最大碰撞力 为优化目标.

5.2 约束条件和设计变量筛选

为了让气囊设计参数的改变使有限元仿真结 果的变化更加直观,本次优化选取双层多气室气 囊为初始气囊,且设定小艇以 30 m/s 的速度撞击 气囊.根据充气式海上围栏系统气囊单元的特性, 选择气囊的长度、直径、厚度、内部气压 4 个因素 对气囊的拦截性能进行灵敏度分析,这 4 个因素 各自上下浮动 1/5,通过灵敏度分析确定气囊对 小艇拦截性能的主要影响因素.

5.3 正交试验

以四因素三水平正交试验表为基础生成 9 个 实验组,分别计算出每组的响应值和极差,见 表 4~6,表 6 中 K_i为每一列上因素取水平 *i* 时所 得结果的平均值,*R* 为极差.

表 4 因素水平表 Tab. 4 Factor level table

水平	A长度/ m	B 直径/ m	C 厚度/ mm	D 内部气压/ kPa
1	12	2.0	8	40
2	15	2.5	10	50
3	18	3.0	12	60

表 5 正交试验表

Tab. 5 Orthogonal test table

计心旦		水	平	昌十7举榜五/LN	
风驰 与 —	А	В	С	D	取入碰撞刀/ 船
1	1	1	1	1	522.97
2	1	2	2	2	871.61
3	1	3	3	3	997.30
4	2	1	2	3	559.39
5	2	2	3	1	844.23
6	2	3	1	2	592.43
7	3	1	3	2	577.63
8	3	2	1	3	715.42
9	3	3	2	1	821.49

表6 响应值和极差

Tab. 6 Response value and range

因素	K_1	K_2	K_3	R
А	797.29	665.35	704.85	131.94
В	553.33	810.42	803.74	257.09
С	610.27	750.83	806.39	196.12
D	729.56	680.56	757.37	76.81

5.4 结果分析

从极差值上可以看出, $R_{\rm B} > R_{\rm C} > R_{\rm A} > R_{\rm D}$,即 气囊的4个设计参数对拦截性能影响的主次顺序 为直径、厚度、长度和内部气压.根据均值选取各 因素的最优水平值,其最优组合为A1B2C3D3,在 此优化设计下小艇最大碰撞力达到了1025.84 kN. 相比较最初的双层多气室气囊(A2B2C2D2),参 数优化后的双层多气室气囊使小艇的最大碰撞力 提高了9%,证明了参数优化的有效性.

6 结 语

针对充气式海上围栏系统中气囊单元对冲击 小艇的拦截过程,本文采用 LS-DYNA 软件对整 个场景进行了数值模拟,并验证了气囊拦截冲击 小艇的有效性.为了提升气囊的防撞性能,实现对 冲击小艇更为有效的拦截效果,进一步提高港口 安全防护能力,本文针对气囊内部结构进行了合 理优化,同时结合3种碰撞场景下的数值模拟以 及计算数据分析,证明结构优化后的气囊对小艇 的拦截能力明显提高.接着针对气囊的设计参数 以设计正交试验的方式对其进行进一步优化,得 到气囊的最优匹配参数.结果表明,选用双层多气 室气囊的内部结构,气囊长度为12m,气囊直径 为2.5m,气囊厚度为12mm,气囊内部气压为 60kPa时,气囊对小艇的拦截效果最佳.需要注 意的是,本文仅考虑小艇以90°垂直撞击气囊中央 位置,并未考虑其他人射角和撞击点,也没有对小 艇本身形状加以改变,相关分析需要后续试验加 以验证.

参考文献:

- [1] 黄 刚,李良春,林 健. 着陆气囊的缓冲机理与技术分析 [J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 86-89,108.
 HUANG Gang, LI Liangchun, LIN Jian. Analysis of cushion mechanism and technology of landing airbag [J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(4): 86-89, 108. (in Chinese)
- [2] 葛如海,顾瑶芝,蔡朝阳,等.正面碰撞前后双气 室气囊的设计与优化[J].汽车工程,2019,
 41(4):411-416.

GE Ruhai, GU Yaozhi, CAI Chaoyang, *et al*. Design and optimization of a tandem airbag with double chambers for frontal crash [J]. **Automotive Engineering**, 2019, **41**(4): 411-416. (in Chinese)

- [3] 许鹏伟. 伞兵战车气囊缓冲系统仿真及优化设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
 XU Pengwei. Simulation of airborne vehicle landing and optimal design of airbags [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [4] 牛四波,王红岩,迟宝山. 空投设备缓冲气囊的优化设计 [J]. 装甲兵工程学院学报,2010,24(5): 36-40.
 NIU Sibo, WANG Hongyan, CHI Baoshan. Optimal design of airbag cushion process for airdropping equipment [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2010, 24(5): 36-40. (in Chinese)
- [5] 王红岩,洪煌杰,李建阳,等.空降车缓冲气囊系统特性仿真及其参数优化方法研究[J]. 兵工学报,2012,33(12):1461-1466.

WANG Hongyan, HONG Huangjie, LI Jianyang, *et al*. Research on simulation and optimization of cushion characteristic of airbags for airborne vehicle [J]. Acta Armamentarii, 2012, **33**(12): 1461-1466. (in Chinese)

- [6] 张鹏飞.组合气囊着陆缓冲特性及优化设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
 ZHANG Pengfei. Study on landing attenuation characteristics and optimum design of combined airbags[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] ABOSHIO A, GREEN S, YE Jianqiao. Structural performance of a woven-fabric reinforced composite as applied in construction of inflatable offshore fender barrier structures [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, 15(1): 1450036.
- [8] 吴振学,赵 倩,吴天博."短剑"出鞘——美军新 型高速隐形快艇 M80 Stiletto [J].环球军事, 2006(8):48-49.

WU Zhenxue, ZHAO Qian, WU Tianbo. "Short dagger" out of its sheath - The US army's new highspeed stealth boat M80 Stiletto [J]. Global Military, 2006(8): 48-49. (in Chinese)

- [9] 陈 锋,王春江,周 岱.流固耦合理论与算法评述[J].空间结构,2012,18(4):55-63.
 CHEN Feng, WANG Chunjiang, ZHOU Dai. Review of theory and numerical methods of fluidstructure interaction [J]. Spatial Structures, 2012, 18(4):55-63. (in Chinese)
- [10] 那立民,古 滨,孙 波,等.近水面爆炸气 泡——自由面动态耦合演化特征研究 [J]. 兵器装 备工程学报,2021,42(1):185-193.
 NA Limin, GU Bin, SUN Bo, *et al*. Research on dynamic evolving characteristic of underwater explosion bubble coupling with free surface under shallow water [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(1): 185-193. (in Chinese)
- [11] 汪 振,吴茂林,孙玉松,等. 基于多介质 ALE 算法的柱体高速垂直入水仿真 [J]. 水下无人系统学报,2020,28(1):81-88.
 WANG Zhen, WU Maolin, SUN Yusong, et al. Multi-medium ALE algorithm-based simulation of vertical and high-speed water entry of cylinder [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2020, 28(1):81-88. (in Chinese)
- [12] HALLQUIST J O. LS-DYNA Theory Manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology

Corporation, 2006.

- [13] 徐婷婷. 大载重缓冲气囊性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
 XU Tingting. Study on the performance of cushioning airbag with heavy load [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [14] ABOSHIO A, YE Jianqiao. Numerical study of the dynamic response of inflatable offshore fender barrier structures using the coupled Eulerian-

Lagrangian discretization technique [J]. Ocean Engineering, 2016, 112: 265-276.

[15] 中华人民共和国交通运输部.公路桥梁抗撞设计规范:JTG/T 3360-02—2020 [S].北京:人民交通出版社,2020.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Collision Design of Highway Bridges: JTG/T 3360-02-2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)

Optimization design of airbag unit for inflated offshore fender system based on ALE

LU Zhengqi¹, LI Kai^{*1}, CHANG Songliang¹, YUAN Zhijiang², JIANG Xiaogang²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: Aiming at type selection of airbag unit for inflated offshore fender system, two improved types of single-layer multi-chamber airbag and double-layer multi-chamber airbag are proposed on the basis of single-layer single-chamber airbag, and three typical interception scenarios of small boat with initial speeds of 10, 20 and 30 m/s vertically impacting the middle of the airbag are built. Based on arbitrary Lagrange-Euler (ALE) algorithm, numerical simulation is conducted by using FE software LS-DYNA to compare interception effects of three types of airbag units, which are single-layer single-chamber airbag, single-layer multi-chamber airbag and double-layer multi-chamber airbag, via the data including the maximum impact force, the maximum deceleration and element failure ratio of the boat. Double-layer multi-chamber airbag turns out to be with the strongest interception ability. The design parameters of the double-layer multi-chamber airbag are further optimized by means of orthogonal test. The results of the optimization reveal that the maximum impact force of the optimized double-layer multi-chamber airbag is increased by 9% compared to the original design, so the interception capacity of the airbag is significantly improved.

Key words: inflated offshore fender system; airbag optimization; ALE algorithm; orthogonal test