

楔形体入水冲击响应的试验研究及应用*

EXPERIMENTAL STUDY AND APPLICATION ON WATER IMPACT RESPONSE OF WEDGE-SHAPED STRUCTURE

张岳青**¹ 徐 绯¹ 金思雅¹ 王永虎^{1,2}

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 中国民航飞行学院, 广汉 618307)

ZHANG YueQing¹ XU Fei¹ JIN SiYa¹ WANG YongHu^{1,2}

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

摘要 结构物在入水过程中会受到较大的冲击载荷,严重影响结构和结构内部人员的安全,因此入水问题的研究在航空航天和军事领域具有实际意义。以简单的楔形体为研究对象,进行了垂直入水的冲击试验,采用高速摄像机采集了楔形体入水过程的图像,并且考察楔形体入水过程的加速度的响应,通过滤波消除高频信号,得到合理的加速度响应值。结果表明:楔形体密闭空腔对加速度响应有重要影响。依据相似准则,通过试验模型的数据,预测了实际大尺寸的飞机结构的入水冲击响应,研究结果对入水结构的设计具有一定的参考价值。

关键词 楔形体 入水 加速度 密闭空腔效应 相似准则

中图分类号 V423.5

Abstract There will be a big load on the structure when it impacts on the water, which has an important effect on the safety of the capsule structure and the people inside. Therefore, the research of water impact has a practical significance in the aerospace and military fields. Base on a simple wedge model, the test of wedge falling on the water has been vertically investigated. The photographs of wedge into water are recorded by the high speed camera. The acceleration response of wedge impact on the water is studied and the reasonable value of acceleration is obtained by filtering. These results indicated that it can be clearly found that the airtight cavity of wedge has a great influence on the acceleration. According to the similarity criteria, the impact response of real aircraft structure is predicted by the testing data, which has a valuable reference for the design of water entry structure.

Key words Wedge-shaped structure; Water entry; Acceleration; Airtight cavity effect; Similarity criteria

Corresponding author: ZHANG YueQing, E-mail: nwpuzhyq@126.com, Fax: +86-29-88493705

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11272266), and the National Natural Science Foundation of China Civil Aviation joint fund (No. U1333133).

Manuscript received 20140903, in revised form 20140919

引言

结构物入水问题是典型的流固耦合冲击动力学问题。如飞机水上迫降、水上飞机和航天飞行器的水上回收、空投鱼雷的入水冲击等等。结构物入水过程是一个非常复杂的流固耦合过程,在入水过程中,结构物的冲击作用会激起周围流体的运动,而周围流体又会对结构物施加反作用力,尤其是在入水初始阶段,结构物会受到很大的流体砰击载荷^[1]。例如飞机水上迫降,国内外造成的伤亡屡见不鲜,因为飞机在入水过程中遭受的瞬时的冲击载荷将会对飞机结构造成损伤破

坏,对飞机内部器件造成失效,从而影响机舱内人员的安全。所以入水问题的研究对于大型客机和水上飞机等入水结构的强度设计有重要的意义。

1929年,Von Karman T^[2]基于动量守恒定律,采用附加质量法,推导出了入水冲击载荷的计算公式,最早对入水问题进行了研究。1932年,Wanger V H^[3]考虑了液面升高的影响,对Karman的算法进行了改进,使理论解更接近实际情况。早期的研究基于二人工作的基础上,主要进行的理论研究。直到20世纪50年代后期,基于美国NASA的Mercury、Gemini和Apollo载人航天计划,研究者在结构入水方面做了大量的研

* 20140903 收到初稿, 20140919 收到修改稿。国家自然科学基金项目(11272266); 国家自然科学基金民航联合基金项目(U1333133)资助。

**张岳青,男,1984年4月生,山东泰安人,汉族,西北工业大学,博士生,主要从事固体力学研究。

究,尤其是飞船入水的试验研究方面,包括飞船在垂直入水和水平入水过程中不同位置的压力情况,以及不同质量,入水速度和角度等因素的影响,较全面的对飞船入水的过程进行了试验研究^[4-8]。随后几十年,结构物入水的试验研究一直未停息,研究者对不同形状的结构物入水情况进行了试验研究,如框形体,锥形体和球形体等等,但是对于初始研究者和通过试验数据进行理论研究的研究者来说,结构还是以典型的楔形体为主。如 1993 年 Zhao 和 Faltisen 采用非线性边界元方法在楔形体结构的飞溅区引入一个附加的“射流单元”,分析了二维任意横截面结构物入水的动力学响应^[9]。2004 年 Carcaterra A 等^[10],2006 年 Mahdi Yettou 等^[11],2008 年 Tveitnes T 等^[12]和 2010 年 Tanvir Mehedi Sayeed 等^[13]分别进行了楔形体和楔形的壳体结构的入水试验,研究了结构物质量、角度和入水速度对结构表面压力的影响。近年来,随着刚性结构研究的逐步深入,国外研究者对于弹性体结构入水问题的兴趣越来越大,如 2011 年 I. Stenius^[14]等,2012 年 Hanbing Luo 等^[15]和 R Panciroli 等^[16]等对楔形弹性体入水过程进行了研究,分析了弹性结构在入水过程中的流固耦合现象,并考察了结构的动响应情况。目前研究对象多数为顶部开口或者实心楔形体为主,对于含有密闭空腔的楔形体研究较少,而且研究者仅仅局限于楔形体本身或者流场的基础性研究,并没有对其结果推广到实际结构中,体现其应用价值。

对于入水问题,国外一直有学者进行研究,近些年的关注度也越来越高,在理论和试验方面都进行了大量研究,而国内对这方面的研究还相对较少,尤其是在结构物入水的试验方面。本文以楔形体为模型,进行了自由下落的入水试验,考察了楔形体在入水冲击过程中的加速度响应情况,并依据相似准则得到实际飞机结构入水冲击的过载情况。

1 试验装置

1.1 试验系统

试验系统主要包括钢架,滑轨,滑架和水箱(图 1)。试验钢架用于支撑滑轨和滑架,高度为 3 m,宽度为 2.2 m。滑轨用于保障试验件自由下落和入水前的姿态稳定。滑轨上采用滚珠滑块,以减小试验件下落过程中的摩擦。滑架(0.7 m×0.2 m)上面与绳索连接,便于滑架沿滑轨上下滑动,下面用于支撑试验件,螺栓连接。试验件的下落高度为 0.2 m。玻璃水箱长 0.9 m,宽 0.54 m,水面高度为 0.45 m。楔形体的长度为 0.5 m,宽 0.19 m,厚度为 0.003 m,倾角为 15°,材料为铝。

1.2 测量系统

试验数据采集仪(图 2)为江苏东华测试技术股份有限公司的 DH5927N 型数据采集仪和 DH187ICP 型加速度传感器。加速度计量程为 1 000 m/s²,安装在滑架斜对角方向(图 3)。高速摄影机为 Phantom 公司生产(图 4),试验中采用的分辨率 800×600,每秒钟拍摄 10 000 帧。

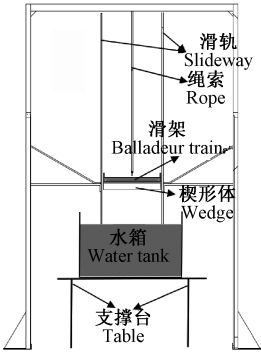


图 1 试验装置

Fig. 1 Test device

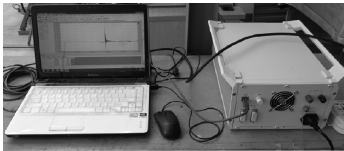


图 2 数据采集仪

Fig. 2 Data acquisition instrument

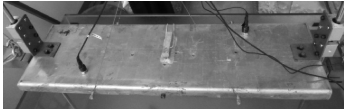


图 3 加速度计位置

Fig. 3 The position of accelerometers



图 4 高速摄影机

Fig. 4 High speed camera

1.3 装置平衡性

为了验证结构在入水时的平衡性,试验在滑架斜对角的位置安置两个加速度计。图 5 为两个加速度计所采集的原始信号。当加速度达到最大值时,两个信号所对应的时刻和数值分别为 a_1 (1.722 4 s, 151 m/s²) 和 a_2 (1.722 6 s, 147 m/s²)。两个信号时间只差

0.000 2 s,加速度最大值相差 4 m/s^2 ,而楔形体加速度响应时间大概为 0.015 s 。经过多组试验数据的验证,装置的平衡性是可以满足试验要求的。

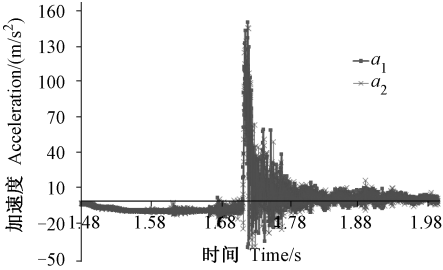


图 5 加速度信号
Fig. 5 Signals of acceleration

2 数值模拟模型

运用 LS-DYNA 中流固耦合算法对楔形体入水情况进行了模拟。楔形体采用 Lagrange 单元,空气和水都采用 Euler 单元。楔形体的模型尺寸与试验件一致。有限元模型中空气域的高度 0.1 m ,水深 0.3 m ,宽度为 0.54 m (图 6)。

楔形体采用刚体模型。空气和水的材料模型采用 NULL 模型,以得到偏应力和应变率的关系,采用 Gruneisen 状态方程计算压力。水域的压力梯度由重力产生。在流体域的周边施加了无反射边界条件。

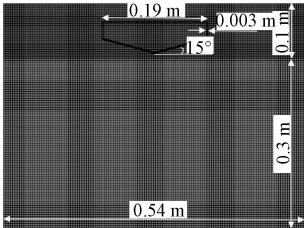


图 6 数值模拟模型
Fig.6 Numerical simulation model

3 数据分析

试验过程中采用高速摄影机拍摄楔形体入水过程。对试验数据进行了滤波处理,结果与 LS-DYNA 模拟结果进行了比较。并且通过响应分析发现楔形体密闭空腔对加速度响应有重要影响。

3.1 入水过程

选取楔形体的质量为 4 kg 。在楔形体表面作标记,运用标尺记录楔形体下落高度(图 7),由此可以计算楔形体在刚入水时的速度为 1.6 m/s 。

从高速摄影拍摄图片和数值模拟结果可以看出,楔形体在刚入水后,水面会被楔形体尖端分开,沿着楔形体表面形成两股射流,斜向上飞溅,水面逐渐升高。随着楔形体持续冲击,排开水量越来越多,表面发生的

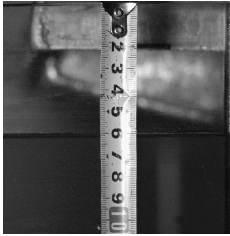


图 7 标尺
Fig.7 Ruler

水的飞溅也越来越明显。对于射流的飞溅情况,数值模拟结果没有试验明显,但是水面的变化情况与试验拍摄情况还是比较一致的(图 8)。

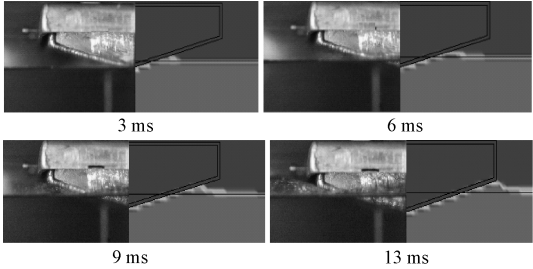


图 8 水面的变化
Fig.8 The change of water surface

3.2 加速度响应

在冲击过程中采集加速度数据时,由于结构振动和电磁干扰等造成的高频信号会参杂其中,造成加速度响应时间和峰值不准确,所以要得到准确的物理信息,需要对采集的原始数据进行滤波处理。选用工程上常用的 SAE 低通滤波器进行滤波。选取频率为 210 Hz 对原始加速度信号进行了滤波(图 9)。

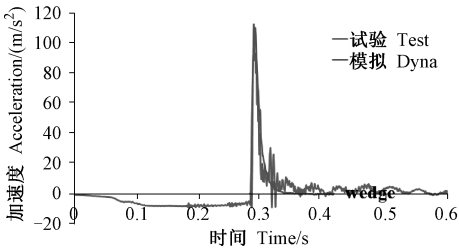


图 9 加速度曲线
Fig. 9 Curves of acceleration

运用 LS-DYNA 模拟的加速度变化趋势与试验结果比较一致,加速度最大值也比较接近(试验值为 113 m/s^2 ,模拟值为 111 m/s^2)。试验加速度曲线与模拟值最大差别在 0.315 s 时,试验值有突然的抖动。通过高速摄影查看对应时刻楔形体入水过程,发现此时滑架接触到水面(图 10)。为了便于安装滑架要比楔形体长,楔形体安装于滑架中间,滑架两侧在冲击后期会碰触水面,造成加速度值的波动,但是此时楔形体已

经完全冲击入水中,并不影响对楔形体冲击响应的考察。

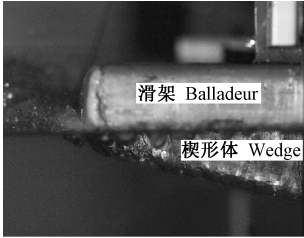


图 10 滑架冲击水面时刻
Fig. 10 The time of sliding plate impact water

3.3 密闭空腔效应

在试验过程中,首先对铝材楔形体进行了试验,楔形体的质量为 4 kg,高速摄影测得入水速度为 1.6 m/s (图 11)。

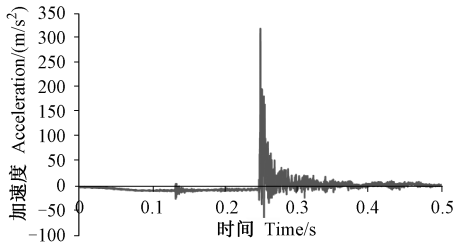


图 11 楔形体加速度信号
Fig. 11 Acceleration signals of wedge

从图 11 加速度历程曲线可以看出,在 0.25 s 时加速度突然变化,此时为楔形体冲击水面的时刻,在此之前为楔形体自由下落阶段,由于滑轨摩擦的影响,自由下落段加速度值会比重力加速度略小(加速度方向向上为正)。当楔形体冲击水面后,由于水的阻碍作用,加速度会突然增大到最大值,随后加速度又逐渐减小,说明水的阻碍作用也在减小,最后加速度减小到零值。但是加速度最大值比数值模拟的预估值要大很多。

为了寻找加速度过大的原因,在楔形体尺寸,质量和入水速度一致的情况下,又对实心木材楔形体进行了试验,试验结果显示测得加速度峰值为 155 m/s²,试验数据曲线如图 12。木材楔形体和铝材楔形体的加速度变化趋势是一致的,但是铝材楔形体的加速度峰值(319 m/s²)比木材楔形体的(155 m/s²)大了一倍,而且在楔形体入水抨击水面时,铝材楔形体明显听到“砰”的一声,木材楔形体入水时没有听到此声音。

为了分析造成加速度峰值差别的原因,我们需要找到两组试验的不同之处。试验装置,数据采集仪器和楔形体的尺寸,质量和入水速度都是一致的。不同之处有两点:(1)楔形体的材料不同(2)铝材楔形体是空心的,而木材楔形体是实心的。对于材料不同,入水

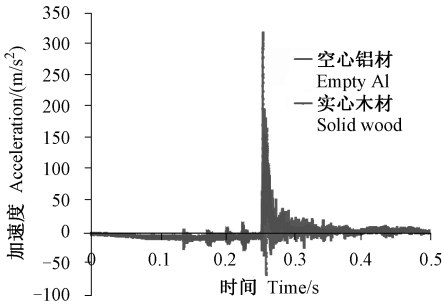


图 12 空腔和实心楔形体加速度信号
Fig. 12 Acceleration signals of cavity and solid wedge

过程中,楔形体几乎没有变形,可以将其看作刚体,所以材料性能对加速度不会有影响。另外,两种楔形体虽然材质不同,但是其表面都是非常光滑的,所以不同材质的楔形体表面对加速度的影响也很小。主要考虑是铝材楔形体空心的影响,由于楔形体上面与滑架组装在一起,所以在铝材楔形体内部是一个相对密闭的空腔。

为了验证是否是密闭空腔的影响,用泡沫塑料将铝材楔形体的密闭空腔填充。由于泡沫塑料不易吸水,而且质量很轻,所以对整个楔形体的质量不会有太大影响。然后对其进行了入水测试,加速度的测试结果如图 13。空腔填充后的楔形体加速度值(166 m/s²)与实心木材楔形体的加速度峰值比较接近,而且试验过程中听到的“砰”的声音也明显减小。由此可见,楔形体的密闭空腔对入水冲击的加速度值会有非常明显的影响。空腔造成楔形体的加速度最大值增加近一倍。

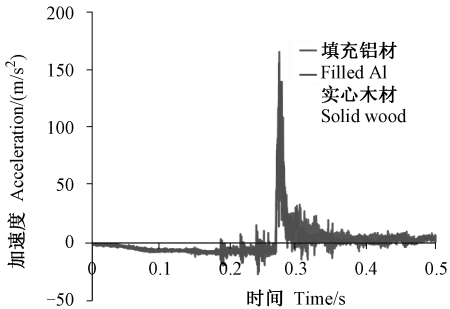


图 13 空腔填充后和实心楔形体加速度信号
Fig. 13 Acceleration signals of cavity filled and solid wedge

4 应用

4.1 相似准则

如果要通过测得的试验数据,推算实际飞机在水上迫降时的过载情况,需要满足流动相似准则。依据准则推导试验模型和实际结构参数的比例关系^[17]。

N-S 方程在 Z 方向的流动微分方程

$$\rho \frac{\partial V_z}{\partial t} + \rho \left(V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

由此公式可以得到原型和试验模型分别相对应的 N-S 方程,然后将 $x_p = C_l x_m, y_p = C_l y_m, z_p = C_l z_m, t_p = C_t t_m, V_{px} = C_v V_{mx}, V_{py} = C_v V_{my}, V_{pz} = C_v V_{mz}, P_p = C_p P_m, g_p = C_g g_m, \rho_p = C_\rho \rho_m, \mu_p = C_\mu \mu_m$ 代入原型的 N-S 方程中,可以得到

$$\frac{C_v}{C_t} \frac{\partial V_{mz}}{\partial t_m} + \frac{C_v^2}{C_l} \left(V_{mx} \frac{\partial V_{mz}}{\partial x_m} + V_{my} \frac{\partial V_{mz}}{\partial y_m} + V_{mz} \frac{\partial V_{mz}}{\partial z_m} \right) = -C_g g_m - \frac{C_p}{C_l C_\rho} \frac{1}{\rho_m} \frac{\partial P_m}{\partial z_m} + \frac{C_v C_\mu}{C_l^2 C_\rho} \frac{\mu_m}{\rho_m} \times \left(\frac{\partial^2 V_{mz}}{\partial x_m^2} + \frac{\partial^2 V_{mz}}{\partial y_m^2} + \frac{\partial^2 V_{mz}}{\partial z_m^2} \right) \quad (2)$$

比较模型可得 $\frac{C_v}{C_t} = \frac{C_v^2}{C_l} = C_g = \frac{C_p}{C_l C_\rho} = \frac{C_v C_\mu}{C_l^2 C_\rho}$, 同除

C_v^2/C_l , 可以得相似准则

$$\frac{C_l}{C_t C_v} = \frac{C_v^2}{C_l C_g} = \frac{C_p}{C_\rho C_v} = \frac{C_l C_\rho C_v}{C_\mu} = 1 \quad (3)$$

$$\textcircled{1} \frac{C_p}{C_\rho C_v^2} = 1 \text{ 欧拉数 } \frac{P_p}{\rho_p V_p^2} = \frac{P_m}{\rho_m V_m^2} = Eu = \frac{P}{\rho V^2}$$

$$\textcircled{2} \frac{C_v^2}{C_l C_g} = 1 \text{ 佛劳德数 } \frac{V_p^2}{g L_p} = \frac{V_m^2}{g L_m} = Fr = \frac{V^2}{g L}$$

$$\textcircled{3} \frac{C_l}{C_t C_v} = 1 \text{ 斯特劳哈尔数 } \frac{L_p}{V_p t_p} = \frac{L_m}{V_m t_m} = Sr = \frac{L}{V t}$$

4.2 实际结构推导

试验缩比模型的宽度为 0.19 m,按照波音 737 的数据,机身宽度为 3.8 m,由此可以得到 $\frac{L_p}{L_m} = 20$, 由

$$M = \rho v, \frac{M_p}{M_m} = \frac{L_p^3}{L_m^3} = 8\,000, \text{由} \textcircled{2} \text{式可得 } \frac{V_p}{V_m} = \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} =$$

$$\sqrt{20}, \text{由} \textcircled{3} \text{式可得 } \frac{t_p}{t_m} = \frac{V_m L_p}{V_p L_m} = \sqrt{20}, \text{由 } a = V/t,$$

$$\frac{a_p}{a_m} = \frac{V_p t_m}{V_m t_p} = 1. \text{由比例关系可以通过试验模型的参数}$$

反推得到实际飞机结构的相关参数。试验模型质量为 4 kg,冲击速度为 1.6 m/s,加速度为 113 m/s²,则飞机的质量为 32 t,冲击速度为 7.1 m/s,加速度值估计为 113 m/s²。

5 结论

本文对楔形体入水进行了试验研究。通过两个加速度计信号验证了试验装置的平衡性和可靠性。

试验得到的加速度信号会参杂高频信号,不能反

映结构受的真实加速度情况,所以试验数据在使用前一定要对加速度信号进行滤波处理。

在试验过程中,通过对空腔楔形体和实心楔形体的加速度数据比较,发现楔形体密闭空腔会对加速度信号有明显的影晌,造成加速度最大值增加近一倍。

将试验模型的数据通过相似准则推得实际飞机结构的入水冲击参数,对飞机水上迫降所受的加速度响应有参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 王永虎,石秀华. 入水冲击问题研究的现状与进展[J]. 爆炸与冲击. 2008,28(3):276-282.
WANG YongHu, SHI XiuHua. Review on research and development of water entry impact problem[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(3):276-282 (In Chinese).
- [2] von Karman T. The impact of seaplane floats during landing[R]. National Advisory Committee for Aeronautics, NACA Technical Notes 321, 1929.
- [3] Wagner V H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces[J]. Z Angew Math Mech. 1932, 12(4):193-215.
- [4] Kross DA, Keifling LA, Murphy NC et al. Space shuttle solid rocket booster initial water impact loads and dynamics—analysis, tests, and flight experience[R]. AIAA paper 83-0956, NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama, USA, January 1983.
- [5] Brooks JR, Anderson LA. Dynamics of a space module impacting water[J]. Journal of Spacecraft and Rockets. 1994, 31(3): 509-15.
- [6] Tutt B. A., Taylor A. P., The use of LS-DYNA to simulate the water landing characteristics of space vehicles [R]. 8th international LS-DYNA users conference. 2004.
- [7] C. M. Seddon, M. Moatamedi. Review of water entry with applications to aerospace structures [J]. International Journal of Impact Engineering. 2006, 32: 1045-1067.
- [8] Wang J, Lyle K. Simulating Space Capsule Water Landing with Explicit Finite Element Method[R]. AIAA. 2007.
- [9] Zhao R, Faltinsen O. Water entry of two-dimensional bodies[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive. 1993, 246: 593-612.
- [10] Carcatteraa A, Ciappi E. Hydrodynamic shock of elastic structures impacting on the water: theory and experiments [J]. Journal of Sound and Vibration. 2004, 271: 411-439.
- [11] El-Mahdi Yettou, Alain Desrochers, Yvan Champoux. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge [J]. Fluid Dynamics Research. 2006, 38: 47-66.
- [12] Tveitnes T, Fairlie-Clarke A. C, Varyani K. An experimental investigation into the constant velocity water entry of wedge-shaped sections[J]. Ocean Engineering. 2008, 35: 1463-1478.
- [13] Tanvir Mehedi Sayeed, Heather Peng, Brian Veitch. Experimental investigation of slamming loads on a wedge [R]. The International Conference on Marine Technology. 2010.
- [14] I. Stenius, A Rosen, J. Kuttenukeuler. Hydroelastic interaction in panel-water impacts of high-speed craft [J]. Ocean Engineering. 2011, 38: 371-381.
- [15] Hanbing Luo, HuiWang, C. Guedes Soares. Numerical and

experimental study of hydrodynamic impact and elastic response of one free-drop wedge with stiffened panels[J]. Ocean Engineering. 2012, 40: 1-14.

[16] R. Panciroli. Water entry of flexible wedges: Some issues on the FSI phenomena[J]. Applied Ocean Research. 2012, 39: 72-74.

[17] 宣建明, 缪 弋, 程 军, 等. 返回舱水上冲击特性的试验研究与理论计算[J]. 水动力学研究与进展, 2000, A15(3): 276-286.

XUAN JianMing, MIAO Yi, CHENG Jun, et al. Tests and calculations of water impact characteristics of a recovery module[J]. Journal OF Hydrodynamics. 2000, A15 (3): 276-286 (In Chinese).