

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0214

## 浮动冲击平台横向冲击谱受外形结构的影响\*

王志凯, 王逸南, 孙贝生, 姚熊亮, 杨娜娜

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 基于 ABAQUS 软件中的声固耦合法, 采用设备、平台一体化分析方法, 展开对中型浮动冲击平台的研究, 探讨平台外形结构形式对平台冲击环境的影响, 并提出了提高平台横向冲击谱谱值的设计方案。首先对外形结构进行初步设计, 分析其对平台冲击谱的影响, 并找到决定影响程度的关键因素。然后针对结构进行优化, 使其更大幅度地提高平台冲击谱谱值。计算表明: 在平台外部下方加装挡板结构不会明显影响平台垂向冲击谱, 但可以提高平台横向冲击谱; 舷侧底端向下延伸加装垂直挡板由于受到冲击波绕射和阻力的影响, 增加横向谱值的效果不是很明显; 平台底部流线型挡板可以有效增加平台对爆炸载荷的接收效果, 同时可以尽量减小阻力影响, 从而明显提高平台横向冲击谱谱值。

**关键词:** 水下爆炸; 冲击平台; 冲击环境; 冲击谱

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

舰载设备抗冲击能力是舰艇生命力的重要组成部分, 轻级、中级舰载设备用冲击机进行考核, 重级舰载设备用浮动冲击平台进行考核<sup>[1]</sup>。浮动冲击平台作为检验设备抗冲击能力的重要工具, 它所能提供的冲击谱谱值大小直接影响了其检验能力的阈值<sup>[2-3]</sup>。设备安装在平台内底上如图 1 所示, 当受到舷侧方向爆炸载荷作用后, 会产生横向、纵向、垂向 3 个方向的振动。其中纵向振动不在爆炸主要冲击方向, 相比横向和垂向振动幅度小很多, 由此可见横向和垂向的冲击震动谱值过大是导致设备损坏的主要原因。

不同舰载设备有不同的抗冲击要求, 检验重级设备抗冲击能力需要使用浮动冲击平台, 因为浮动冲击平台能够提供足够严厉的冲击环境。工程上常用设计谱的低频谱位移、中频谱速度和高频谱加速度来量化冲击环境的严厉程度<sup>[4]</sup>, 更高的谱值对应着更严厉的冲击环境。对于设计谱的 3 个谱值, 谱速度和谱位移过大往往是导致设备损坏的直接原因<sup>[5]</sup>, 因此如何提高平台谱速度、谱位移成为了冲击平台研究领域内的一个核心问题<sup>[6]</sup>。此外, 高频段谱值很大程度上受滤波影响, 因此冲击谱高频段不作为研究重点。对于某些设备, 不仅要考虑垂向谱速度, 横向谱速度也是考核重点, 此时应在不会明显影响垂向谱速度的同时尽量提高横向谱速度。改变结构形式是实现目的的一种有效手段, 张磊等<sup>[7]</sup>发现浮动冲击平台的导流装置能够很好的在低频段调节垂向和横向的冲击强度比例。王军等<sup>[8]</sup>经过四种形式的对比发现外板夹层箱形梁结构形式的平台强度最好, 能够提供尽可能高的谱值。通过改变基础的结构形式可以改变结构振动的主振型, 也可改变其上冲击谱的整体趋势、峰值频率和峰值高度<sup>[9]</sup>。本文结合特定中型浮动冲

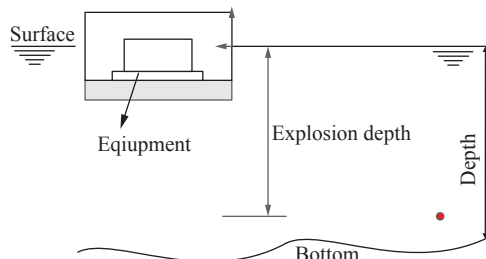


图 1 水下爆炸示意图

Fig. 1 Underwater explosion sketch

\* 收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(11602069, 51779056); 中国博士后科学基金(2017M611359); 黑龙江省自然科学基金(E2017026)

第一作者: 王志凯(1989—), 男, 讲师, wangzhikai@hrbeu.edu.cn;

通信作者: 姚熊亮(1963—), 男, 博导, 教授, yaoxiongliang@hrbeu.edu.cn。

击平台,对平台外形结构进行设计,利用有限元软件研究平台外形结构特征对其冲击环境的影响,重点分析怎样的结构形式能够提高冲击平台横向冲击谱谱速度和谱位移。

## 1 数值计算方法及数据处理方法介绍

### 1.1 平台模型介绍

作者参考多篇文献,所用平台模型引用王军<sup>[10]</sup>的设计,如图 2~3 所示,平台外形参数如表 1 所示。为防止平台进水,需要在上面加一个顶盖,顶盖上覆盖幕布,顶盖质量不可忽略,数值模拟时需考虑顶盖的影响。

材料选用强度较高的 921A 钢。平台设备放置于内底上,针对各种设备质量,利用 ANSYS 建出不同深度流场,在 ABAQUS 中完成组装,组装完成如图 4 所示。

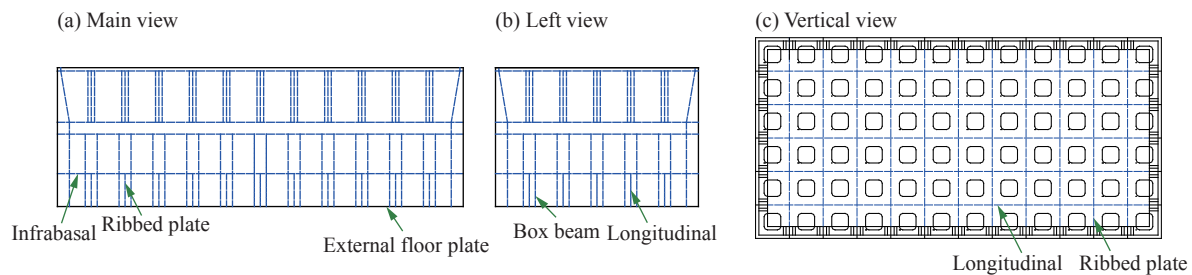


图 2 浮动冲击平台三视图<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Three views of floating impact platform<sup>[10]</sup>

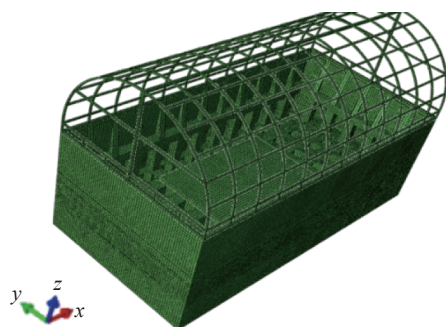


图 3 平台模型图

Fig. 3 Platform model diagram

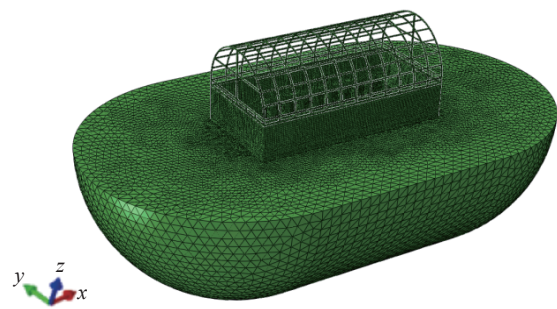


图 4 平台流场装配图

Fig. 4 Assembly drawing of platform flow field

表 1 中型浮动冲击平台外形尺寸

Table 1 Size of medium floating impact platform

长度/m	宽度/m	本体高度/m	顶盖高度/m	内底高度/m	质量/t	吃水深度/m
12.2	6.1	4.22	3.05	1.0	92.27	1.33

### 1.2 声固耦合法及后处理方法介绍

水下爆炸研究通常采取 arbitrary Lagrange-Euler (ALE) 法或声固耦合法<sup>[11]</sup>。ALE 法要求流场包含炸药在内,且对网格要求较高,计算近场爆炸也能得到较准确的结果,但对于远场爆炸,其网格数量过多会导致计算时间变得很长甚至直接计算失败。而声固耦合法通过模拟声学介质和边界无反射技术允许流场不包含炸药,对于远场爆炸可以得到较准确的结果,相比 ALE 方法花费时间更少、计算更稳定<sup>[12]</sup>。本文涉及的水下爆炸工况均属远场爆炸,因此选用声固耦合法对平台冲击响应进行分析。

声音在弹性介质中的传播体现为振动的传播,而振动在流体介质中的传播体现为压缩波的传播,即

声音在水中传播表现为纵波, 衰减很慢。实际海洋流场是无限大的, 不存在声波反射问题, 而有限元软件中的流场模型是有限大, 流场边界对声波的反射会导致计算结果产生错误, 因此声固耦合法利用边界阻抗技术模拟无限流畅, 即无反射边界条件。

本计算方法已在文献 [11] 中加以验证, 结果显示声固耦合法能够比较准确的模拟舰船遭受水下爆炸冲击时产生的响应。本文后续部分将用这种数值方法对一特定中型浮动冲击平台的冲击响应特性进行研究。

中型浮动冲击平台最大考核设备质量为 113 t, 据分析计算可知设备越轻, 平台冲击响应越大, 冲击谱谱值越大, 为使冲击谱的变化更明显, 运用文献 [4] 工况中最近的工况, 即装药 55 kg TNT、水深 8.2 m、舷侧水平距离 6.71 m (参考图 1), 安装 10 t 设备采用一体化分析方法<sup>[13]</sup>进行数值模拟。仿真时间设为 0.25 s, 已经包含了整个冲击波作用阶段。

在结果文件中提取出内底板上如图 5 所示 3 个纵横桁材交叉点上的时历加速度响应。所提取的时历响应含有很多高频成分, 而实际工程中, 设备安装频率一般较低, 普遍低于 250 Hz。时历响应中的高频段成分对其影响很小, 因此需要对初始响应进行滤波操作, 把研究重点放在中低频。参考实际舰船冲击环境及其他相关领域研究材料, 本文采用 250 Hz 低通滤波, 滤波前后平台内底时历加速度响应如图 6 所示。

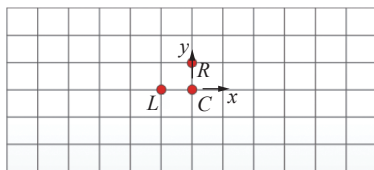


图 5 内底测点

Fig. 5 Inner bottom point

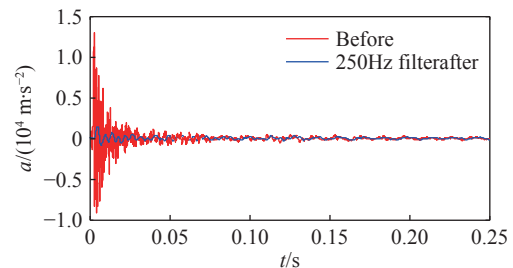


图 6 250 Hz 滤波前后平台内底时历加速度响应

Fig. 6 The acceleration response of the front and rear platform of the 250 Hz filter is obtained

图中红色曲线是原始时历曲线, 蓝色曲线是 250 Hz 低通滤波之后的时历曲线, 用此曲线绘制冲击谱。利用自主开发程序首先根据冲击谱理论完成 Duhamel 积分得到原始冲击谱, 然后将原始谱圆整为设计谱, 即可得到各测点处谱位移、谱速度和谱加速度。

## 2 外形结构对冲击谱影响规律研究

### 2.1 外形结构设计分析

浮动冲击平台通过水面以下的湿表面接收冲击波载荷<sup>[14]</sup>, 在质量不变的情况下, 受到的力越大, 则冲击谱谱值越大, 因此考虑如何在不明显改变平台质量的情况下增加横向载荷的接收。平台所受的水下爆炸冲击波载荷大小与湿表面积密切相关, 因此考虑在平台舷侧底端迎爆面加装竖直挡板, 在不明显改变平台质量的情况下增加横向湿表面积, 从而提高横向载荷的接收, 达到提高谱值的目的。竖直挡板位于舷侧下方, 厚 0.032 m, 长 1 m, 如图 7 所示。中型浮动冲击平台最大考核设备质量为 113 t, 据分析计算知设备越重, 平台距药包越近, 塑性变形越大, 现将流场和 113 t 设备组装好进行安全性分析, 检验挡板结构能否满足平台考核设备时的强度要求, 结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出, 载荷作用时间结束后等效塑性应变为 0.038, 满足强度要求, 可展开下一步研究。在此结构上施加不变的工况, 分析此结构内底上的横向冲击谱, 与相同载荷下无挡板结构横向冲击谱进行对比。为保证冲击载荷不变, 药包水深随着吃水改变而改变, 保证爆距不变, 冲击因子不变<sup>[15]</sup>。取图 5

中的平台内底上 C、L、R 三个测点, 横向冲击谱(谱位移  $u$ 、谱速度  $v$ 、谱加速度  $a$ )如图 9 所示。由图可以看出, 能略微提高横向谱速度值但效果并不明显, 下一节分析其主要原因。

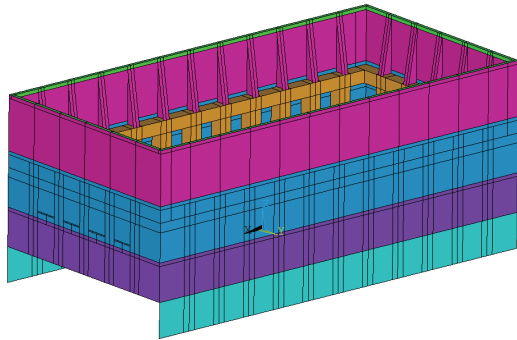


图 7 舷侧垂直挡板  
Fig. 7 Side vertical baffle

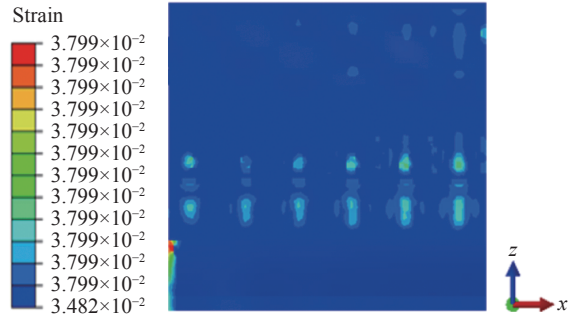


图 8 加舷侧挡板后塑性应变  
Fig. 8 Plastic strain after adding side baffle

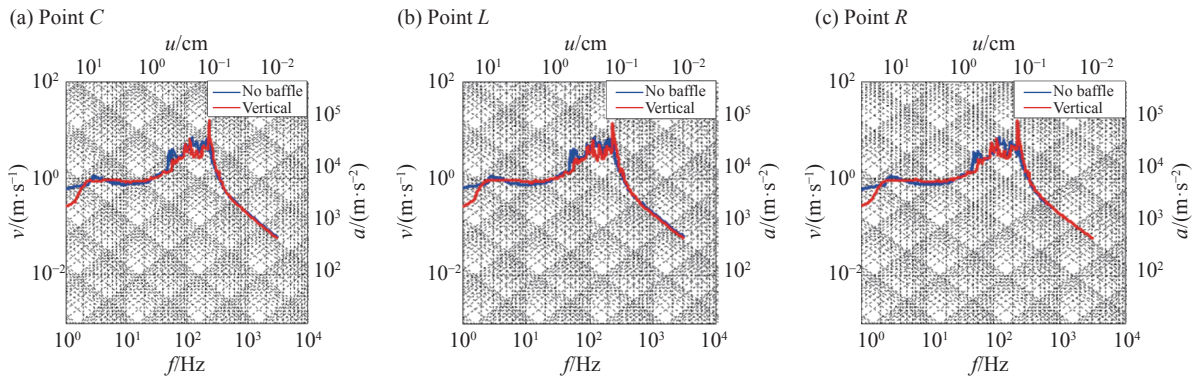


图 9 舷侧垂直挡板与无挡板的各测点水平冲击谱对比  
Fig. 9 Horizontal shock spectrum with and without vertical baffle plates

### 2.2 外形结构作用效果影响因素

由图 9, 垂直挡板受某些因素影响不能发挥预想的效果, 查阅相关文献资料, 将主要影响因素归结为以下两点。

(1) 冲击波的绕射: 当冲击波被一个小于其波长的物体阻挡, 就会绕过这个物体继续进行<sup>[16]</sup>。挡板尺寸远小于冲击波波长, 冲击波绕过挡板两侧和底部后会产生指向挡板背面的力, 与挡板正面的力相抵消, 如图 10 所示, 由于挡板厚度很小, 绕射波不会有很大的衰减, 即增加舷侧挡板不能明显增加横向载荷的接收。

(2) 阻力的增加: 垂直挡板在船体做横向振动时无疑会增加阻力, 阻碍振动, 降低谱速度。

综合以上两点, 如图 9 所示, 垂直挡板几乎不能提高冲击平台谱速度。冲击波绕射现象广泛存在于水下爆炸作用过程中, 与阻力一样, 二者都是不可避免的, 但可以通过合理的结构设计进行尽量削弱其影响。图 10 只给出了增加的垂直挡板处的冲击波绕射现象, 但实际上平台本体也一样受到绕射波的作用, 如图 11 所示。但由图 9 所示, 平台依然由很大的横向振动, 这是由于平台横向尺寸很大绕射波传到平台另一侧后

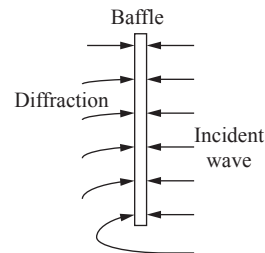


图 10 垂直挡板冲击波绕射现象  
Fig. 10 Vertical baffle wave diffraction phenomenon

有明显衰减。考虑到这一点, 下一节将对平台外形结构进行优化, 以尽量削弱冲击波绕射和阻力增加的影响。

### 2.3 外形结构的优化

针对垂直挡板存在的问题, 作者提出流线型挡板优化方案, 为方便对比分析, 取图 12 和图 13 所示大小不同两个尺寸, 其为参考文献 [17] 中流线型结构进行设计, 装配图如图 14 和图 15 所示。

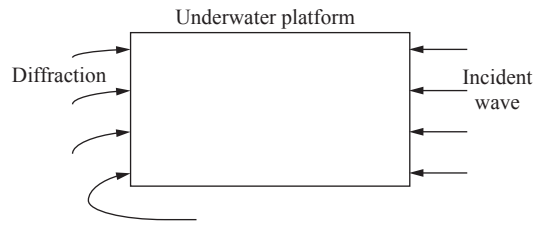


图 11 平台本体冲击波绕射现象

Fig. 11 Platform body wave diffraction phenomenon.

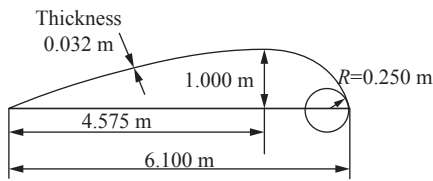


图 12 挡板 1 截面线型

Fig. 12 Baffle 1 section type

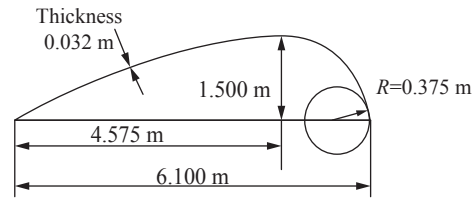


图 13 挡板 2 截面线型

Fig. 13 Baffle 2 section type

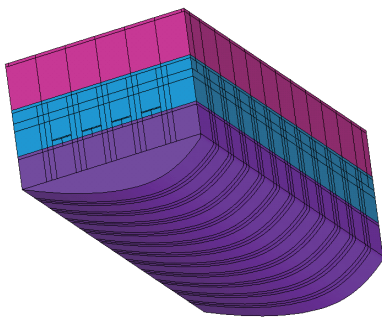


图 14 挡板 1 模型图

Fig. 14 Baffle 1 model diagram

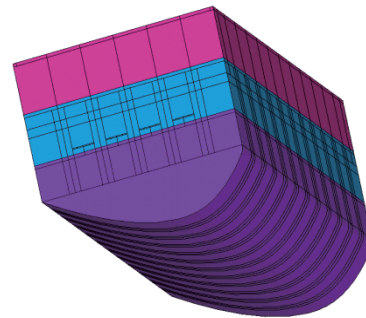


图 15 挡板 2 模型图

Fig. 15 Baffle 2 model diagram

当冲击波从迎流一侧传来时, 会从挡板底部绕到挡板另一面并产生指向挡板的压力, 挡板表面受力如图 16 所示。

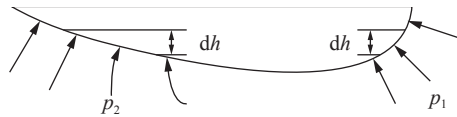


图 16 底部流线挡板冲击波绕射现象

Fig. 16 The bottom streamline baffle wave diffraction phenomenon

在同一高度微元  $dh$  处冲击波水平方向合力为:

$$F = p_1 dL_1 \cos \theta_1 - p_2 dL_2 \cos \theta_2 = (p_1 - p_2) dh \tag{1}$$

式中:  $\theta_1$  为  $p_1$  方向与水平方向夹角;  $\theta_2$  为  $p_2$  方向与水平方向夹角;  $L_1$  为  $dh$  对应的迎流面长度;  $L_2$  为  $dh$  对应的背流面长度。由式 (1),  $F$  仅与冲击压力波衰减有关, 而冲击波在流线挡板两侧的衰减要比垂直挡板的正反两面明显得多, 流线型挡板所受合力显然更大。并且采用流线造型可以大幅度的降低挡板所受阻力, 减少阻力对振动的阻碍作用, 流线型挡板设计很好地解决了垂直挡板存在的两个问题。

流线型挡板重心不在平台中心处,在其重心对称位置沿长度方向一条线上加上若干压载,使重心回到平台中心处,并将爆点位置随平台吃水的改变竖直移动,保证与平台相对位置不变。对流线型挡板进行安全性分析,如图 17 和图 18 所示。由图可以看出,两种流线挡板等效塑性应变分别为 0.029 3 和 0.035 1,满足强度要求。

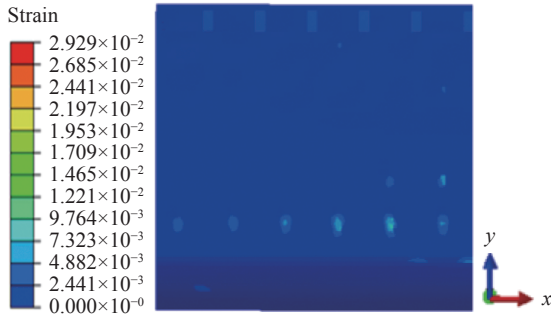


图 17 挡板 1 塑性变形

Fig. 17 Plastic deformation of baffle 1

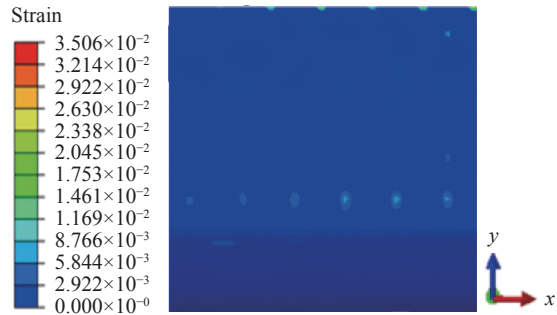


图 18 挡板 2 塑性变形

Fig. 18 Plastic deformation of baffle 2

在两种结构上施加与之前相同的工况,分析内底上 *C*、*L*、*R* 三个测点冲击谱,与相应载荷下无挡板结构垂向及横向冲击谱进行对比,如图 19 所示。由图可以看出流线型挡板对平台垂向冲击谱几乎无影响,但却可以明显提高平台横向冲击谱中低频段谱值。对于无挡板、挡板 1、挡板 2 分别取 *C*、*L*、*R* 三测点设计谱谱速度和谱位移进行对比,如表 2 所示。挡板 2 由于尺寸比挡板 1 大一些,对横向载荷接收较大,相应的平台冲击谱谱值也比较大。

由表 2 看出,流线型挡板可以在几乎不影响(影响小于 4%)平台垂向谱速度和谱位移的同时提高平

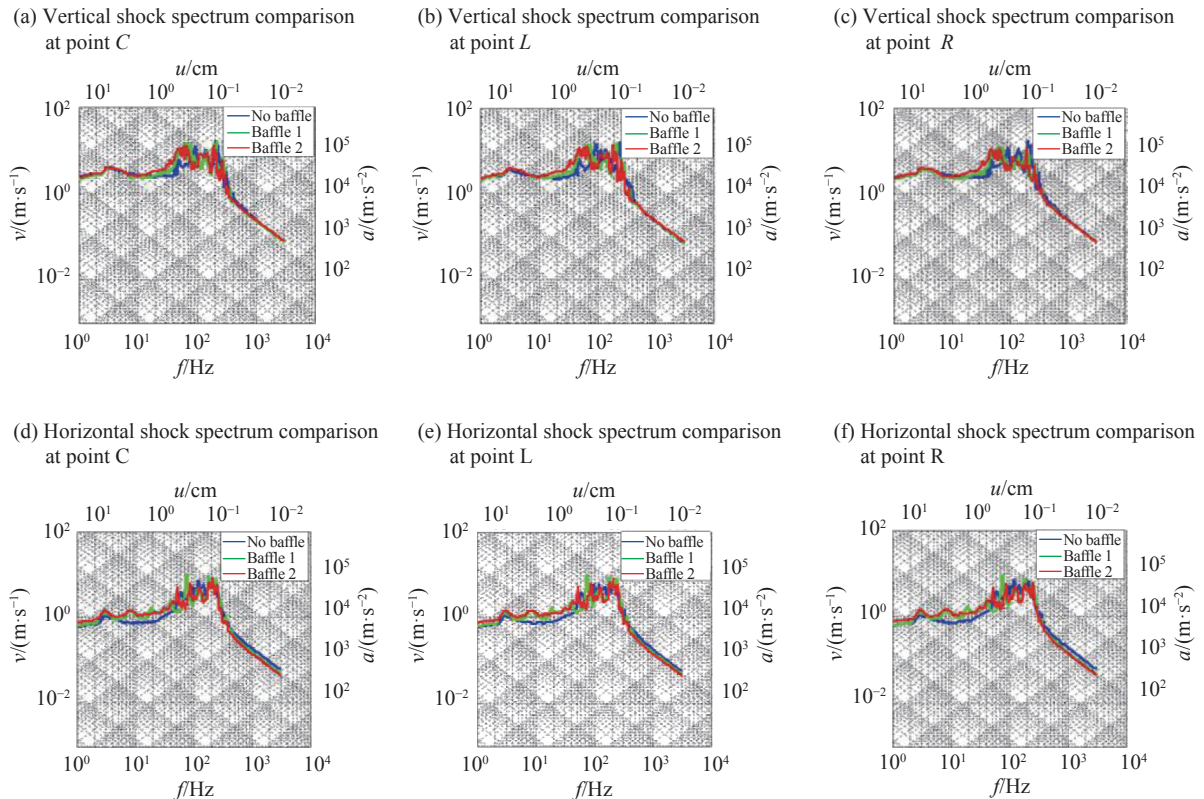


图 19 流线挡板结构与无挡板结构各测点冲击谱对比

Fig. 19 Comparison of the impact spectrum between the flow baffle structure and the non-baffle structure

表 2 有无挡板 4 测点谱值平均值对比

Table 2 comparison of the mean value of the four measuring points

结构	垂向谱速度/(m·s <sup>-1</sup> )	垂向谱位移/cm	横向谱速度/(m·s <sup>-1</sup> )	横向谱位移/cm
无挡板	2.698	11.81	0.846	3.08
挡板1	2.616	11.94	1.078	3.22
挡板2	2.773	12.26	1.238	3.65

台横向谱速度和谱位移。挡板 2 可以将横向谱速度提高 46.3%, 谱位移提高 18.5%, 可见效果十分显著。当待考核舰载设备对横向冲击环境有较高要求的时候, 应考虑添加流线型挡板。而流线挡板几乎不会影响垂向冲击环境, 这就说明在设计好内底隔板数量和决定是否使用甲板模拟器之后, 可以再进行挡板的考虑, 而不会干扰到内底隔板和甲板模拟器对冲击谱的影响。

### 3 结 论

本文对浮动冲击平台外形结构进行了结构设计和优化, 研究了外形结构特征对其冲击环境的影响并提出了提高横向冲击谱谱值的方法。由于冲击谱谱加速度很大程度受滤波影响, 平台结构特征对冲击环境的影响主要体现在冲击谱谱位移和谱速度上。研究得出以下结论: (1) 增加舷侧垂直挡板对垂向和横向冲击谱均没有明显影响; (2) 增加底部流线型挡板对垂向冲击谱影响很小, 小于 4%; (3) 增加底部流线型挡板对横向冲击谱有很大影响, 能明显提高谱值。随着流线型挡板尺寸变大, 对横向冲击谱的影响也会变大, 对于美军标中最近工况, 采用图 13 所示挡板 2 结构, 可使横向冲击谱谱位移提高 18.5%, 谱速度提高 46.3%。而何种尺寸挡板形式最优, 高度应如何选取最佳等相关问题将在之后的工作中进一步探索和研究。

### 参考文献:

- [1] Naval Sea Systems Command. Shock design criteria for surface ship: NAVSEA 0908-LP-000-3010 [R]. 1995.
- [2] CHRIS G. Heavyweight high impact shock testing [R]. Arvonion, Virginia: HI-TEST Laboratories Inc, 2007.
- [3] 宋敬利, 王永亮, 贾则. 冲击谱在舰载设备抗冲击设计中的应用 [J]. 水雷战与舰船防护, 2009(4): 19–22.  
SONG Jingli, WANG Yongliang, JIA Ze. Applications of shock spectrum on shock resistance design of shipborne equipment [J]. Mine Warfare and Ship Self-Defence, 2009(4): 19–22.
- [4] MIL-S-901D, Shock tests, HI(high impact) shipboard machinery equipment and systems, requirements for [S]. United States Department of Defense, 1989.
- [5] 王军, 姚熊亮, 杨隼. 浮动冲击平台冲击环境对设备响应的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 236–242. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0236-07.  
WANG Jun, YAO Xiongliang, YANG Li. Impact analysis of shock environment for floating shock platform on equipment response [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(2): 236–242. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0236-07.
- [6] FATHALLAH E, QI H, TONG L, et al. Numerical investigation of the dynamic response of optimized composite elliptical submersible pressure hull subjected to non-contact underwater explosion [J]. Composite Structures, 2015, 121: 121–133. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.11.016.
- [7] 张磊, 杜志鹏, 吴静波, 等. 200 t 级浮动冲击平台水下爆炸试验低频冲击响应数据分析 [J]. 中国舰船研究, 2018(3): 60–65.  
ZHANG Lei, DU Zhipeng, WU Jingbo, et al. Low-frequency shock response data analysis of underwater explosion test of 200-ton class floating shock platform [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018(3): 60–65.
- [8] 王军, 姚熊亮, 郭君. 中型浮动冲击平台结构设计研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(7): 86–91. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.07.015.  
WANG Jun, YAO Xiongliang, GUO Jun. Structural design for an intermediate floating shock platform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(7): 86–91. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.07.015.
- [9] 李国华, 李玉节, 张效慈, 等. 浮动冲击平台水下爆炸冲击谱测量与分析 [J]. 船舶力学, 2000(2): 51–60.

- LI Guohua, LI Yujie, ZHANG Xiaoci, et al. Measurement and analysis of underwater explosive impact spectra of floating shock platform [J]. *Ship Mechanics*, 2000(2): 51–60.
- [10] 王军. 浮动冲击平台冲击动力特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [11] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军. 声固耦合方法在舰船水下爆炸中的应用 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2005, 26(6): 707–712. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2005.06.003.
- YAO Xiongliang, ZHANG Aman, XU Weijun. Application of acoustic solid coupling method in underwater explosion of ships [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2005, 26(6): 707–712. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7043.2005.06.003.
- [12] LIU Y, YU F, LIU J. Modal analysis of vehicle compartment with acoustic-structure coupling [J]. *Noise and Vibration Control*, 2005.
- [13] 姚熊亮, 戴绍仕, 周其新, 等. 船体与设备一体化抗冲击分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 367–374. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0367-08.
- YAO Xiongliang, DAI Shaoshi, ZHOU Qixin, et al. Numerical experiment methods for ship hull and equipment integrated analysis on shock resistance of shipboard equipments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 367–374. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0367-08.
- [14] COLE P. Underwater explosion [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1960.
- [15] 陆鑫森, 金咸定, 刘涌康. 船体振动学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [16] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆炸冲击波作用于墙体及对墙体绕射的实验研究 [J]. *实验力学*, 2008, 23(2): 169–174.
- MUChaoMin, RENHuiqi, LIYongchi, et al. Experimental study on the effect of blast wave on wall and wall diffraction [J]. *Experimental Mechanics*, 2008, 23(2): 169–174.
- [17] DICKINSONMH, LEHMANN F-O, SANE S P. Wing rotation and the aerodynamics basis of insect flight [J]. *Science*, 1999, 284(5422): 1954. DOI: 10.1126/science.284.5422.1954.

## Influence of shape structure for floating shock platform on transverse shock spectrum

WANG Zhikai, WANG Yinan, SUN Beisheng, YAO Xiongliang, YANG Nana

(*Marine Engineering College, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China*)

**Abstract:** Based on the acoustic coupling method in ABAQUS software, this paper adopts the equipment and platform integration analysis method on the study of medium floating shock platform. Discusses the impact of platform shape structure on platform shock environment, and proposes the design scheme to increase the transverse shock spectrum of the platform. First, the preliminary design of the shape structure is carried out to analyze its influence on the platform shock spectrum, and find the key factors which determine the influence degree. Then, optimize the structure to increase the shock spectrum of the platform. The calculation shows that the vertical shock spectrum of the platform is not significantly affected by the addition of baffle structure below the external platform, but the transverse shock spectrum will be improved. Due to the influence of shock wave diffraction and resistance, installing the vertical baffle at the bottom of the side can't obviously increase the transverse shock spectral. The streamlined baffle at the bottom can effectively increase the receiving capacity of the platform on the explosive load. And at the same time, it can also reduce the influence of resistance as far as possible, so as to significantly increase the transverse shock spectrum of the platform.

**Keywords:** underwater explosion; floating shock platform; shock environment; shock spectrum

(责任编辑 王小飞)