网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20180518.1142.006.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：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，2018，13(3)：60-65.
ZHANG L, DU Z P, WU J B, 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, 13(3): 60-65.

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

张磊，杜志鹏，吴静波，计晨，张春辉，冯麟涵
海军研究院，北京 100161

摘　要：[**目的**]为了提高舰载设备抗冲击考核试验的标准性，[**方法**]分析200 t级浮动冲击平台舷侧16 m工况的水下爆炸试验低频振子冲击响应数据，给出浮动冲击平台低频冲击响应特性。[**结果**]结果表明，浮台横向和垂向的低频响应差异不明显，说明浮动冲击平台导流装置效果显著，至少在低频段可有效调节浮台垂向与横向的冲击强度比例；浮动冲击平台低频冲击谱的低频段和高频段存在拐点，低频拐点出现在约4 Hz处，高频拐点出现在约15 Hz处。[**结论**]浮动冲击平台不同部位的低频冲击响应相差不大，说明低频响应以浮台整体的刚体运动为主。

关键词：浮动冲击平台；冲击环境；低频；数据分析
中图分类号：U662.1 **文献标志码：**A **DOI：**10.19693/j.issn.1673-3185.01149

Low-frequency shock response data analysis of underwater explosion test of 200-ton class floating shock platform

ZHANG Lei, DU Zhipeng, WU Jingbo, JI Chen, ZHANG Chunhui, FENG Linhan
Naval Research Academy, Beijing 100161, China

Abstract: [**Objectives**] In order to improve the standards of the anti-shock assessment testing of shipboard equipment, [**Methods**] the shock response data of the low-frequency vibration of a 200-ton floating shock platform is analyzed. [**Results**] The difference between the horizontal and vertical low frequency response of the floating platform is not obvious, which indicates that the floating platform diversion device has a significant effect; at least in the low frequency range, it can effectively adjust the vertical and transverse shock strength ratio of the floating platform. There are inflection points in the low frequency band and high frequency band of the low frequency shock spectra of the floating platform; the low frequency inflection point appears at about 4 Hz while the high frequency inflection point appears at about 15 Hz. [**Conclusions**] The results show that the low frequency shock response of different parts of the floating platform is the same, which means that the low frequency shock response is mainly the rigid body movement of the whole floating platform.

Key words: floating impact platform; impact on the environment; low frequency; data analysis

0 引　言

浮动冲击平台(以下简称“浮台”)作为大型舰载设备抗冲击性能考核验证的标准试验装置，在世界各国得到了广泛应用[1]。以美海军为例，迄今为止已建造了至少10台4型有效承载吨位的浮

收稿日期：2018－01－02 **网络出版时间：**2018-5-18 11:42
作者简介：张磊，男，1972年生，博士，高级工程师。
杜志鹏（通信作者），男，1977年生，博士，高级工程师。

台,分别是:27 t级(FSP)、45 t级(EFSP)、113 t级(IFSP)和181 t级(LFSP)。1989年,我国研仿美军的27 t级浮台,建造了13.5 t级浮台,作为我国舰载设备抗冲击标准试验装置[2]。随着大型舰船的研制,大型舰载设备需要更大承载力的浮台开展抗冲击考核试验。近年来,国内新建造了27 t级、50 t级、100 t级和200 t级浮台,为新研大型舰载设备抗冲击性能考核验证提供了基本试验条件。

除了承载力要求外,浮台还需要满足标准冲击指标的要求。我国军标GJB150.18-1986仿照美军标MIL-S-901C,不规定浮台冲击试验的标准冲击指标,而是通过规定浮台结构、安装架、爆源当量、爆距等参数来使浮台冲击环境具有标准性。但是,这种不直接控制冲击环境的方法难以实现试验冲击环境与设备设计冲击指标的一致性,容易造成设计与考核的矛盾。虽然这种考核方法与美军冲击考核的目标吻合,即"不求准确冲击输入,但力求复现潜在的破坏[1]",但这种考核目标与我国的舰载设备抗冲击技术发展趋势并不契合。新颁布的海军标准HJB715-2016仿照德国军标BV043/85和北约标准STANAG4549,不规定冲击试验装置,而是规定三折线冲击谱并将其作为被考核设备基础冲击的环境输入。这样可以最大程度地利用各种浮台,甚至是驳船等民用船舶,只要冲击环境能够达到三折线冲击谱的指标要求。但这要求对浮台水下爆炸试验数据进行有效的分析,以满足对标准冲击指标的科学判断。

本文中的200 t级浮台于2017年6月建造完成,并开展了一系列标定试验。试验利用150 kg TNT当量的爆源,对安装了各种重量负载的浮台进行了各种爆距下的水下爆炸试验,测试得到浮台各部位的冲击环境数据。实测得到的冲击数据需要经专业的分析才能掌握其冲击环境特征,确定其冲击指标。尤其是对几赫兹到几十赫兹的低频冲击谱更为关注。因为一方面,这一区域是舰载设备的主要安装频率,冲击作用明显;另一方面,低频冲击谱易受加速度零漂噪声的影响,在积分成速度和位移数据时产生趋势项,难以准确测量[3-6]。

为了掌握低频区域冲击特征,各国开展了测试与数据分析的技术研究。李国华等[7-8]利用簧片仪、加速度计等传感器测量得到了浮动冲击平台水下爆炸冲击响应的运动数据,并通过冲击谱分析发现水下爆炸气泡膨胀产生的滞后流是浮动冲击平台数十赫兹冲击振动的主要能源。温肇东等[9]分析了500 kg级双波冲击机的冲击环境,可以与标准较好地吻合,达到了双波冲击机的设计标准。何斌等[10]对GJB150.18-86的标准冲击机冲击环境进行试验测试与分析,指出了该冲击机对冲击环境的影响因素,提出了应建立冲击机的验收标准。由于水下爆炸冲击强度高、频域范围大,常规的测量方法往往难以获取有效的冲击环境数据。陈辉等[11]提出了综合利用簧片仪、机械滤波器、低频振子等提高冲击环境数据有效性的方法。潘建强等[12]针对以往冲击环境测量用的簧片仪中采用划针记录数据时导致的采集数据困难、可靠性较低、数据误差较大等缺点,提出了簧片仪电测技术,能够满足舰船中、低频冲击环境的测量。

本文将利用200 t级浮台水下爆炸试验低频振子冲击响应数据,提出低频振子数据分析方法,分析浮台低频冲击响应特性,为浮台标准冲击谱标定提供参考。

1　浮动冲击平台试验测量

1.1　浮动冲击平台试验方法

200 t级浮台总长19 m,总宽9.1 m,总高7 m,内部有效高度6 m,双层底高度1 m,舷墙高度0.5 m,最大吃水3 m,最大可试设备重量为200 t。试验时,将150 kg TNT标准爆源置于浮台舷侧正横或正纵方向引爆。浮台上安装不同质量的重物以模拟设备对冲击环境的反作用。由于浮台内底结构比实船甲板刚度高,为了模拟实船甲板刚度,在内底上设置了甲板模拟器。标定试验工况如图1所示。

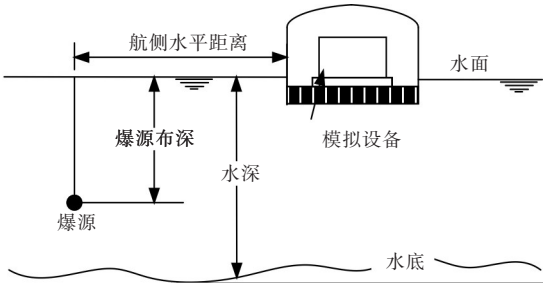


图1　200 t级浮动冲击平台试验示意图

Fig.1　Experimental schematic diagram of 200 tons floating shock platform

浮台在水下爆炸作用下的低频刚体运动特性与实船差异较大[13],其主要原因是试验采用小炸药近距离水下爆炸,爆炸产生的气泡会对浮台造成低频冲击。而浮台这种短箱体刚性结构与实船细长柔性结构不同,难以抑制低频刚体响应。为了减小这种低频误差,可以采用浅水爆炸的方式,在气泡脉动之前上浮至水面附近,从而减小对浮台的脉冲载荷。浮台试验工况如表1所示。

表1 200 t级浮动冲击平台试验工况表

Table 1 Test conditions of 200 tons floating shock platform

工况序号	舷侧水平距离/m	爆源布深/m	模拟设备重量/t	药包方向
1	16	6.5	80	正横方向
2	16	3.0	80	正横方向
3	12	6.5	80	正横方向
4	8	6.5	80	正横方向
5	16	6.5	80	正纵方向
6	12	6.5	80	正纵方向
7	8	6.5	80	正纵方向
8	12	6.5	200	正横方向
9	8	6.5	200	正横方向
10	12	3.0	200	正横方向

1.2 浮动冲击平台试验低频振子测量方法

水下爆炸瞬间冲击信号被安装在浮台各部位的传感器拾取，并存储于数据采集系统中，供后续数据分析使用。测量的物理量主要包括：安装在浮台内底、甲板模拟器等部位上的结构应变、加速度以及低频振子的位移和加速度等，如图2所示。

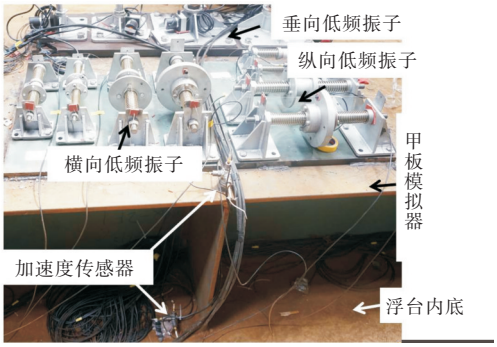


图2 浮动冲击平台测点布置照片

Fig.2 Sensor placement photo of the floating shock platform

低频振子分为垂向和水平方向。水平方向低频振子如图3所示。2根弹簧预压缩后安装在配重块两端，弹簧在工作中始终处于压缩状态；中间的光轴作为弹簧导向，同时也作为配重块滑动的导轨；配重块上安装滑动轴承，不仅能极大地降低配重块与导轨的摩擦系数，还能有效抑制配重块的摇摆，提高测量精度。

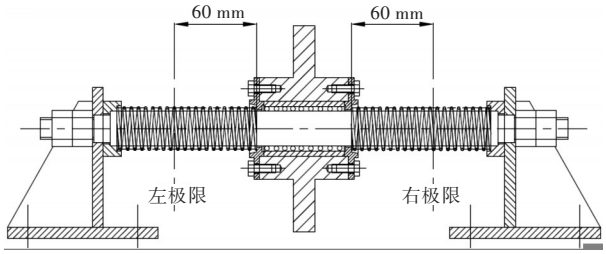


图3 水平方向低频振子

Fig.3 Low frequency oscillator in horizontal direction

垂向低频振子的振幅很大，如果选用双预压缩弹簧会导致结构过高，因此采用拉压双向弹簧，如图4所示。配重块一端与弹簧连接，内部安装滑动轴承，光轴既作为弹簧的导向也作为轴承的导轨。

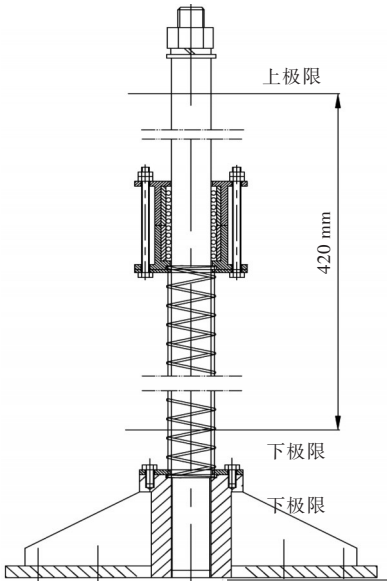


图4 垂向低频振子

Fig.4 Low frequency oscillator in vertical direction

将位移或加速度传感器安装在配重上，可以测量得出不同频率低频振子的冲击响应。根据浮台冲击环境特征预测，低频冲击谱等位移线主要位于4~20 Hz之间。因此本次试验使用了4种频率的低频振子：2，6，10和20 Hz。

2 浮动冲击平台试验低频振子数据分析

利用表1中工况1试验测量得到的低频振子数据，将给出分析浮台低频振子数据的分析方法，分析浮台的低频冲击环境特性。

2.1 低频振子位移数据分析

根据各部位上安装的不同频率低频振子的位移实测数据d，可计算得到伪速度v和等效加速度a，其关系为

$$d=\frac{v}{2\pi f}$$

$$v=\frac{a}{2\pi f} \tag{1}$$

计算结果如表2所示。

表中，用红底色标示出的数据在该频率下FFT幅值谱中对应的频率不突出，证明该数据不可信。将表2中有问题的数据去掉后绘图，如图5所示。由图可以看出，在20 Hz以下基本上是等

表2　低频振子位移数据及其衍生数据

Table 2　Low frequency oscillator displacement data and its derivative data

序号	测点	描述	频率 f/Hz	位移 d/mm	速度 v/(m·s^{-1})	加速度 a/g
1	D91	内底上缓冲平台侧垂向	6	10	0.38	1.4
2	D92	内底上缓冲平台侧垂向	10	8	0.50	3.2
3	D93	内底上缓冲平台侧垂向	20	8	1.00	12.9
4	D77	甲板模拟器上迎爆面垂向	20	9	1.13	14.5
5	D78	甲板模拟器上迎爆面垂向	10	10	0.63	4.0
6	D79	甲板模拟器上迎爆面垂向	6	12.5	0.47	1.8
7	D80	甲板模拟器上迎爆面垂向	2	15.5	0.19	0.2
8	D81	甲板模拟器上迎爆面垂向	2	25	0.31	0.4
9	D38	内底上柴油发电机侧垂向	20	10	1.26	16.1
10	D39	内底上柴油发电机侧垂向	10	22.5	1.41	9.1
11	D40	内底上柴油发电机侧垂向	10	10	0.63	4.0
12	D41	内底上柴油发电机侧垂向	6	7	0.26	1.0
13	D42	内底上柴油发电机侧垂向	2	15	0.19	0.2
14	D25	甲板模拟器上背爆面垂向	20	25	3.14	40.2
15	D26	甲板模拟器上背爆面垂向	20	8	1.00	12.9
16	D27	甲板模拟器上背爆面垂向	10	12	0.75	4.8
17	D28	甲板模拟器上背爆面垂向	6	22	0.83	3.2
18	D29	甲板模拟器上背爆面垂向	6	10	0.38	1.4
19	D30	甲板模拟器上背爆面垂向	2	22	0.28	0.4

位移特征,位移约为10 mm,测点数据一致性好。迎爆面与背爆面并不影响位移量值,说明低频位移主要是由浮台整体刚体运动贡献。对于2 Hz处位移较大的问题,可能是受到气泡脉动的影响。150 kg TNT当量水深6.5 m水下爆炸气泡脉动周期约1.1 s。2 Hz处的冲击位移对于通常安装频率为10 Hz以上的设备来说相当于静态载荷。HJB715-2016规定的考核冲击谱频域范围4~400 Hz。因此,2 Hz处的位移可以忽略。

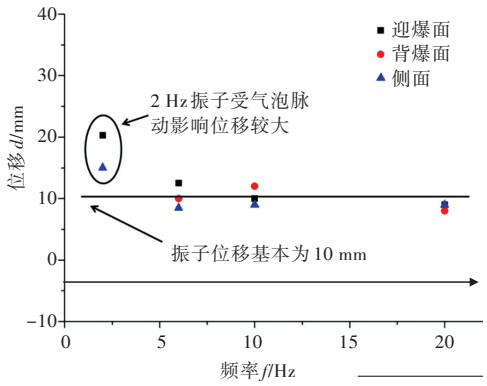


图5　工况1各低频振子垂向位移量值

Fig.5　The vertical displacement vaule of each low-frequency oscillator in working condition 1

2.2　低频振子加速度数据分析

将各部位上安装的不同频率低频振子的加速度实测数据 a 以及积分得到的位移列于表3。加速度峰值是对原始数据滤波得到。滤波频率根据FFT分析选取。如图6~图7所示,对于A19测点,由图6的FFT幅值图可以看出,在17 Hz处能量降为10 Hz峰值的1%,因此可将20 Hz作为滤波频率。从原始时域数据与20 Hz滤波数据的对比来看,滤波后数据更真实、可信。

表3　低频振子加速度数据峰值

Table 3　Peak of low frequency oscillator acceleration data

序号	测点	描述	频率/Hz	加速度/g	位移/mm
1	A19	甲板模拟器上背爆面横向	10	4.8	11.9
2	A20	甲板模拟器上背爆面横向	6	0.9	6.2
3	A21	甲板模拟器上背爆面横向	2	0.17	10.6
4	A22	甲板模拟器上背爆面纵向	10	—	—
5	A23	甲板模拟器上背爆面纵向	6	0.11	0.8
6	A24	甲板模拟器上背爆面纵向	2	0.12	7.5
7	A31	内底上柴油发电机侧纵向	2	0.08	5.0
8	A32	内底上柴油发电机侧纵向	6	—	—
9	A33	内底上柴油发电机侧纵向	10	—	—
10	A34	内底上柴油发电机侧横向	20	7.0	4.3
11	A35	内底上柴油发电机侧横向	10	4.5	11.2
12	A36	内底上柴油发电机侧横向	6	1.8	12.4
13	A37	内底上柴油发电机侧横向	2	—	—
14	A70	甲板模拟器上迎爆面横向	20	5.9	3.7
15	A71	甲板模拟器上迎爆面横向	10	3.5	8.7
16	A72	甲板模拟器上迎爆面横向	6	—	—
17	A73	甲板模拟器上迎爆面横向	2	—	—
18	A74	甲板模拟器上迎爆面纵向	10	0.12	0.3
19	A75	甲板模拟器上迎爆面纵向	6	0.19	1.3
20	A76	甲板模拟器上迎爆面纵向	2	—	—
21	A82	内底上缓冲平台侧横向	2	0.016	1.0
22	A83	内底上缓冲平台侧横向	6	1.6	11.0
23	A84	内底上缓冲平台侧横向	10	5.0	12.4
24	A85	内底上缓冲平台侧横向	20	—	—
25	A86	内底上缓冲平台侧纵向	20	1.5	0.9
26	A87	内底上缓冲平台侧纵向	10	1.1	2.7
27	A88	内底上缓冲平台侧纵向	6	0.62	4.3
28	A89	内底上缓冲平台侧纵向	2	—	—
29	A94	缓冲平台上垂向加速度	2.5	1.0	39.8

注:表中"—"表示数据未采集到。

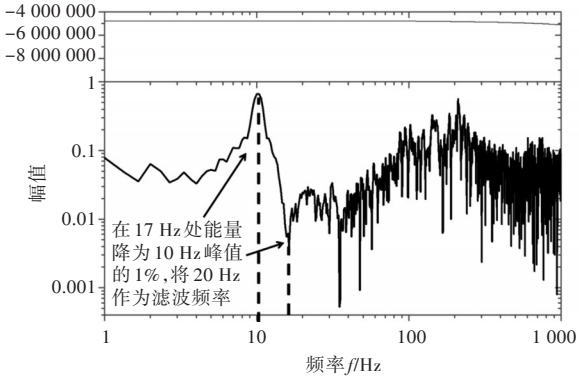
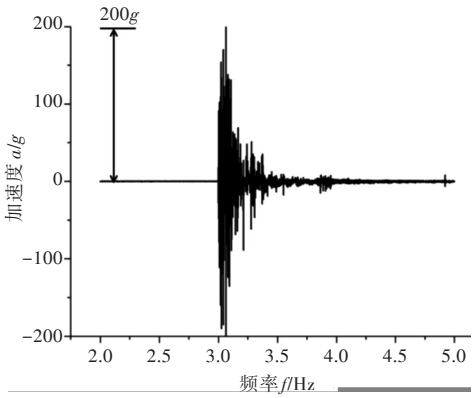
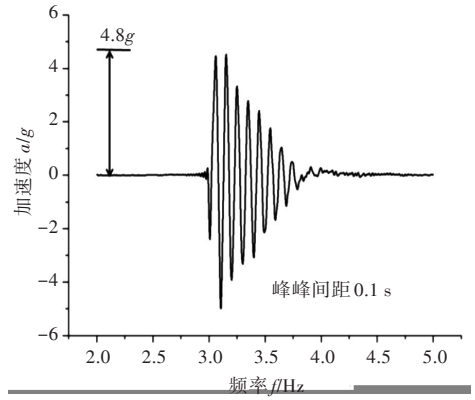


图6　工况1测点A19甲板模拟器上背爆面横向的FFT变换图

Fig.6　The transverse FFT variation of the back explosion surface of the A19 deck simulator in working condition 1



(a) 原始数据



(b) 20 Hz滤波数据

图7 工况1测点A19甲板模拟器上背爆面横向的原始时域数据与20 Hz滤波数据

Fig.7 The transverse original time domain data and the 20 Hz filtering data of the back explosion surface of the test point A19 deck simulator

将低频振子加速度峰值当作谱位移(根据冲击谱定义),按照 $d=a/(2\pi f)^2$ 的关系式转换成位移,如图8所示。可以看出,2,6,10 Hz处位移呈现出较为明显的等位移特征。横向位移基本在10 mm左右,纵向为5 mm。20 Hz处位移明显减小,估计冲击谱的转折频率在10~20 Hz之间。

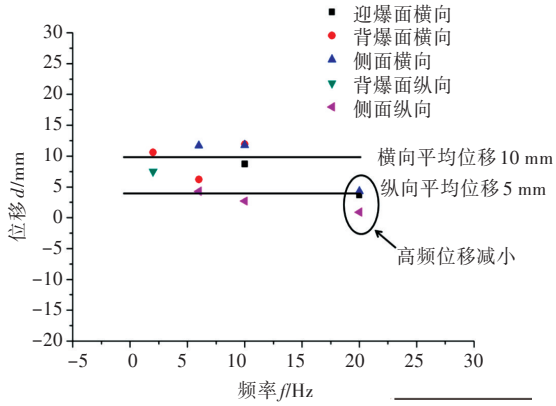


图8 工况1各部位低频振子横向和纵向加速度峰值

Fig.8 Peak values of the transverse and longitudinal acceleration of low frequency oscillator under working condition 1

3 结 论

本文分析了200 t级浮台舷侧16 m工况的水下爆炸试验低频振子冲击响应数据,给出了浮台低频冲击响应特性,得到以下主要结论:

1)共测量得到19个低频振子位移数据,29个加速度数据。其中,位移数据4个不可信,数据有效率79%;加速度数据13个不可信(包含未采集到数据),数据有效率55%。

2)在浮台低频冲击响应中,迎爆面、背爆面和侧面的位移差异并不明显,内底和甲板模拟器的位移差异不明显,横向和垂向差异也不明显。也就是说整个浮台横向和垂向低频位移谱值基本相等,约为10 mm;纵向位移和垂向、横向相比小一半,约为5 mm。整个浮台各区域低频冲击响应差异不明显,说明低频响应以浮台整体的刚体运动为主。浮台横向和垂向的低频响应差异不明显,说明浮台导流装置效果显著,至少在低频段可有效调节浮台垂向与横向冲击强度比例。

3)在低频冲击谱的低频段和高频段存在拐点,低频拐点出现在约4 Hz处,高频拐点出现在约15 Hz处。与其他频率的低频振子相比,2 Hz处的垂向位移偏大,约20 mm,主要是因为气泡脉动引起的浮台低频刚体运动;20 Hz处低频振子的横向和垂向位移偏小,约2.5 mm,说明在10~20 Hz之间靠近10 Hz处发生了较明显的拐点;垂向20 Hz除位移也偏小,但并不明显,说明垂向的拐点更靠近20 Hz处。

参考文献:

[1] US NAVY. Military specification: shock tests. H.I. (high-impact) shipboard machinery, equipment, and systems, requirements: MIL-S-901D[S]. New York, USA: U.S. NAVY, 1989: 58-60.

[2] 海军标准规范研究室. 军用设备环境试验方法—冲击试验: GJB150.18-1986[S]. 北京: 国防科工委, 1986: 169-200.
Naval Standard Specification Research Room. Environmental test methods for military equipment - Shock test: GJB 150.18-1986 [S]. Beijing: COSTIND, 1986: 169-200 (in Chinese).

[3] IRVINE T. An introduction to the shock response spectrum[OL]. (2017.10.15). www. vibrationdata. com.

[4] GABERSON H A. Pseudo velocity shock spectrum rules for analysis of mechanical shock[C]//BETHEL C T. Proceedings of the IMAC-XXV. Orlando, FL: Soci-

ety of Experimental Mechanic, 2007: 15-17.

[5] GRILLO V J. De-trending techniques: methods for cleaning questionable shock data[C]. 81st Shock and Vibration Symposium, October 2010, Orlando, USA.

[6] 刘建湖, 周心桃, 潘建强, 等. 舰艇抗爆抗冲击技术现状和发展途径[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 46-56, 71.
LIU J H, ZHOU X T, PAN J Q, et al. The state analysis and technical development routes for the anti-explosion and shock technology of naval ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 46-56, 71.

[7] 李国华, 李玉节, 张效慈, 等. 舰船设备冲击环境的能源研究[J]. 船舶力学, 1998, 2(1): 37-54.
LI G H, LI Y J, ZHANG X C, et al. Study of power source for shock environment of ship equipment[J]. Journal of Ship Mechanics, 1998, 2(1): 37-54 (in Chinese).

[8] 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, 4(2): 51-60.
LI G H, LI Y J, ZHANG X C, et al. Shock spectrum measurement and analysis of underwater explosion on a floating shock platform[J]. Journal of Ship Mechanics, 2000, 4(2): 51-60 (in Chinese).

[9] 温肇东, 张磊, 焦素娟, 等. 船用设备双波冲击试验机冲击环境研究[C]//第四届全国舰艇抗冲击技术交流会会议论文集. 2011: 149-150.
WEN Z D, ZHANG L, JIAO S J, et al. Research on shock environment of shipboard equipment dual shock Wave Tester[C]//Proceedings of the Fourth National Ship Shock Technology Exchange Conference. 2011: 149-150 (in Chinese).

[10] 何斌, 唐佳炜. 强碰撞中型冲击机冲击环境特征[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(6): 49-53.
HE B, TANG J W. Study on shock environment characteristics for high-impact medium-weighted shock machine[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(6): 49-53 (in Chinese).

[11] 陈辉, 潘建强, 唐佳炜, 等. 水下非接触爆炸条件下舰船冲击环境测试相关技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(11): 2635-2638.
CHEN H, PAN J Q, TANG J W, et al. Researches of metrical technique of shock environment UNDEX of warships[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(11): 2635-2638 (in Chinese).

[12] 潘建强, 唐佳炜, 张克明. 簧片式冲击谱测量仪电测技术[J]. 应用科技, 2010, 37(11): 14-17.
PAN J Q, TANG J W, ZHANG K M. The electromotive technology based on sheet metal-spring which is used to measure shock spectrum[J]. Applied Science and Technology, 2010, 37(11): 14-17 (in Chinese).

[13] OLIVER R E. Shock testing of FT4A gas turbine engine gas generator on the floating shock platform: ADA951577[R]. 1963: 7-8.