

基于浮动冲击平台的大型设备冲击环境及 平台响应非线性特征分析

程凯笛¹, 王志凯^{1*}, 杨 洋², 姚熊亮¹, 史 迪¹

(1. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶集团工程管理中心, 北京 100000)

摘 要: 针对已有的基于浮动冲击平台的大型舰载设备抗冲击考核研究中缺乏对设备冲击环境及平台响应非线性特征研究的问题, 以中型浮动冲击平台作为基础, 通过数值仿真进行大型设备冲击环境研究。明确了冲击因子、爆炸攻角及压载质量对于设备抗冲击考核过程中冲击环境的影响。同时, 结合试验和仿真, 将Hurst指数作为衡量指标, 进行了大型设备抗冲击试验过程中平台响应非线性特征研究, 并且提供了水下爆炸冲击响应的Hurst指数分级表。结果表明: 试验和仿真所得的Hurst指数总体误差小于20%, 而对于水下爆炸作用下的浮动冲击平台响应非线性研究, 数值仿真方法对于真实试验具有较好的替代性。

关键词: 浮动冲击平台; 水下爆炸; 非线性; Hurst指数

中图分类号: TJ01

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-001-09

Analysis of Nonlinear Characteristics of Platform and Large Equipment Impact Environment Based on Floating Shock Platform

CHENG Kaidi¹, WANG Zhikai^{1*}, YANG Yang²

YAO Xiongliang¹, SHI Di¹

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang;

2. Engineering Management Center, China State Shipbuilding Corporation Limited, Beijing 100000)

ABSTRACT: Considering the research status of the shock resistance assessment of large-scale shipborne equipment based on floating shock platform that studies on nonlinear characteristics of platform response and equipment impact environment are rare, a numerical simulation of large equipment impact environment based on the medium floating shock platform (FSP) was carried out. Accordingly, the influence of shock factor, explosion angle of attack and loading mass on the impact environment of the FSP during the process of equipment shock resistance assessment were clarified. Additionally, nonlinear characteristics of the platform response during large equipment shock resistance experiments were investigated by taking the Hurst exponent as the measurement

收稿日期: 2023-10-11

基金项目: 国家科技重大项目 (J2019-I-0017-0016); 黑龙江省重点研发计划项目 (GZ20210210); 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金 (YQ2021E009)

第一作者: 程凯笛 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事设备抗冲击研究。E-mail: ckd253c@163.com

***通信作者:** 王志凯 (1989—), 男, 博士, 预聘教授, 主要从事舰船爆炸毁伤与防护研究。E-mail: wangzhikai@hrbeu.edu.cn

引用格式: 程凯笛, 王志凯, 杨洋, 等. 基于浮动冲击平台的大型设备冲击环境及平台响应非线性特征分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 1-8, 16.

index. Furthermore, the Hurst exponent scale for the structure response under the underwater explosion was obtained. Results showed that the overall error between Hurst exponents of experimental results and simulation results is less than 20%. It indicated that the numerical simulation is a good substitute for experiments in researching nonlinear characteristics of the floating shock platform under the underwater explosion.

KEYWORDS: floating shock platform; underwater explosion; nonlinear; Hurst exponent

浮动冲击平台是考核大型舰载设备在水下爆炸作用下抗冲击能力的实验装置,为舰载设备提供冲击环境。浮动冲击平台的结构形式、水下爆炸工况设置和设备安装方式都对舰载设备冲击环境和冲击响应具有重要影响^[1]。美国和德国相继推出了舰载设备抗冲击标准 MIL-S-901D 和 BV043/85,制定了根据设备质量选择冲击试验工具的规则,规定了时域冲击加速度的具体形式^[2]。Wang 等^[3]研究了近场水下爆炸对船舶表面结构的毁伤情况,采用声-固耦合法计算了船型箱体结构在水下爆炸作用下的结构响应,计算结果与实爆试验结果吻合良好,确定了全局纵向屈曲与局部皱皮、舱壁间船体及底部局部船体塑性变形是主要的 3 种失效模式,为本文研究提供了理论参考。李聪等^[4]进行了水下非接触爆炸作用下设备冲击环境研究,分析了不同建模方式对设备冲击环境预报结果的影响,提出了舰船总振动应变的间接测试方法。王军等^[5-6]通过试验与仿真相结合的方式,设计了一种中型浮动冲击平台,基于浮动冲击平台开展设备抗冲击考核试验,对浮动冲击平台冲击动力学特性和冲击响应谱进行了详细研究,揭示了设备冲击过程中谱跃现象的产生原因。

由于水下爆炸载荷具有较强的非线性特征,采用浮动冲击平台对大型舰载设备进行抗冲击考核时,平台和设备冲击响应也必定具有非线性特征^[7],但以上研究都没有研究浮动冲击平台及舰船结构在水下爆炸作用下冲击响应的非线性特征。姚熊亮等^[8]指出水下爆炸载荷和设备冲击响应信号具有强非线性特征,采用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)对舰船燃气轮机冲击响应信号进行分析,得出了水下爆炸冲击载荷在舰船燃气轮机中的传递特性。Weron^[9]基于 R/S 分析提出了关于 Hurst 指数的估算方法,该方法在样本采样点数较少时对 Hurst 指数进行修正,通过 Hurst 指数判断时域信号非线性特征,该方法可应用于舰船结构冲击响应非线性特征分析,为水下爆炸信号非线性分析提供理论依据。

综上所述,国内外学者虽然开展了一些浮动冲击平台及舰船结构在水下爆炸作用下冲击环境和冲击响应特征的研究工作,但缺少基于浮动冲击平台的大型设备冲击环境与水下爆炸参数之间的灵敏度分析研究,更鲜有浮动冲击平台冲击响应非线性特征的研究。因此,本文开展了基于浮动冲击平台的大型设备冲击环境及平台响应非线性特征分析。首先,通过数值仿真研究冲击因子、爆炸攻角和压载质量对浮动冲击平台设备冲击环境的影响情况;其次,以 Hurst 指数为冲击响应非线性特征衡量指标,分析冲击响应数据计算截断时间、低通滤波和去趋势项处理对平台响应非线性特征的影响情况;最后,对比分析设备抗冲击试验中平台响应试验数据和仿真数据 Hurst 指数,以验证水下爆炸作用下结构响应非线性研究中,数值仿真方法对真实试验具有较好的替代性,并提供水下爆炸机构冲击响应的 Hurst 指数分级表。该研究可用于大型舰载设备水下爆炸作用下冲击环境的预测,为舰载设备冲击响应非线性研究提供理论参考。

1 浮动冲击平台冲击环境研究

基于本团队此前设计的中型浮动冲击平台,通过数值仿真的方式研究浮动冲击平台大型舰载设备垂向冲击环境随爆炸攻角、冲击因子和压载质量的变化规律。采用的浮动冲击平台总体尺寸为 12.2 m×6.1 m×4.22 m,最大载重 118 t,可在多次水下爆炸作用下保持不变形^[5]。利用 ANSYS 对浮动冲击平台主体建模,采用单元类型为 S4R 的 SHELL181 壳单元,网格大小为 0.1 m,单元总数为 65 248 个。流场半径为结构半径的 6 倍,流场单元用 AC3D4 声学单元。通过软件 ABAQUS 进行水下爆炸声-固耦合模拟计算,平台有限元模型和平台-流场耦合模型如图 1 和图 2 所示。文献[10]的第 2 章和第 3 章分别对水下爆炸载荷算法和声固耦合算法进行详细介绍。数值仿真计算工况

如表 1 所示。

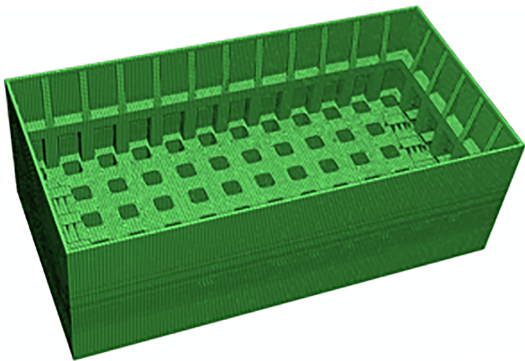


图 1 浮动冲击平台有限元模型

Fig. 1 Finite element model of floating shock platform

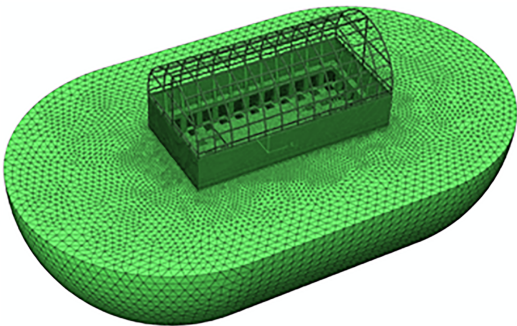


图 2 平台-流场耦合模型

Fig. 2 Platform-flow field coupling model

表 1 浮动冲击平台冲击环境计算工况
Tab. 1 Calculation conditions of floating shock platform impact environment

工况编号	压载质量/t	冲击因子	爆炸攻角/(°)
1	0	0.60	90
2	10	0.60	90
3	30	0.60	90
4	50	0.15	90
5	50	0.30	90
6	50	0.45	90
7	50	0.60	15
8	50	0.60	30
9	50	0.60	45
10	50	0.60	60
11	50	0.60	75
12	50	0.60	90
13	50	0.75	90
14	70	0.60	90

1.1 爆炸攻角对浮动冲击平台冲击环境的影响
本节对表 1 中工况 7~12 进行数值仿真计算。

设置炸药当量为 55 kg，平台压载质量为 50 t，冲击因子为 0.6，爆炸攻角分别为 15°、30°、45°、60°、75°、90°，以浮动冲击平台各测点冲击环境平均值为指标，考察爆炸攻角对浮动冲击平台冲击环境的影响。平台各测点冲击环境平均计算结果如表 2 和图 3 所示。

表 2 不同攻角下浮动冲击平台测点频率
Tab. 2 Frequencies of floating shock platform measurement points under different angles of attack

攻角/(°)	左频率/Hz	右频率/Hz
15	2.01	79.53
30	1.97	76.70
45	2.16	81.12
60	2.17	79.37
75	2.27	88.06
90	2.25	83.55

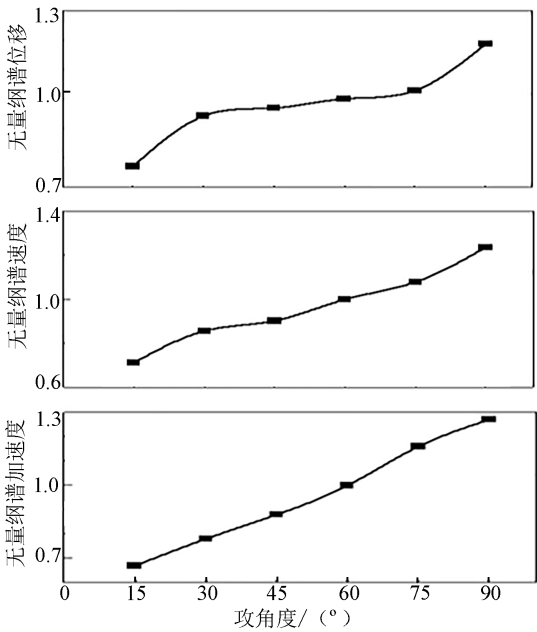


图 3 浮动冲击平台冲击环境随攻角变化曲线
Fig. 3 Variation curves of impact environment of floating shock platform along with angles of attack

可以看出：攻角的变化对浮动冲击平台冲击环境影响明显，谱位移、谱速度和谱加速度都随着攻角的增加单调递增；谱位移和谱速度的斜率在攻角 15°~30° 和 75°~90° 期间较大，说明在这两个区间谱位移和谱速度变化较大；谱位移在攻角 30°~75° 之间变化缓慢；谱加速度随着攻角

的增加近似于线性递增。

1.2 冲击因子对浮动冲击平台冲击环境的影响

冲击因子是由药包质量和爆距决定的^[10]，本节对表 1 中的工况 4、5、6、12 和 13 进行数值仿真计算。炸药当量为 55 kg，爆炸攻角为 90°，平台压载质量为 50 t，研究不同冲击因子对浮动冲击平台冲击环境的影响。将各测点计算得到的冲击环境平均值进行统计，结果如表 3 和图 4 所示。可以看出：在药包质量一定时，随着冲击因子的增加，垂向谱位移、谱速度和谱加速度可以近似看作线性增加。

表 3 不同冲击因子下浮动冲击平台频率
Tab. 3 Frequencies of floating shock platform measurement points under different impact factors

冲击因子	左频率/Hz	右频率/Hz
0.15	2.16	89.49
0.30	2.07	100.62
0.45	2.18	86.98
0.60	2.25	83.55
0.75	2.27	82.27

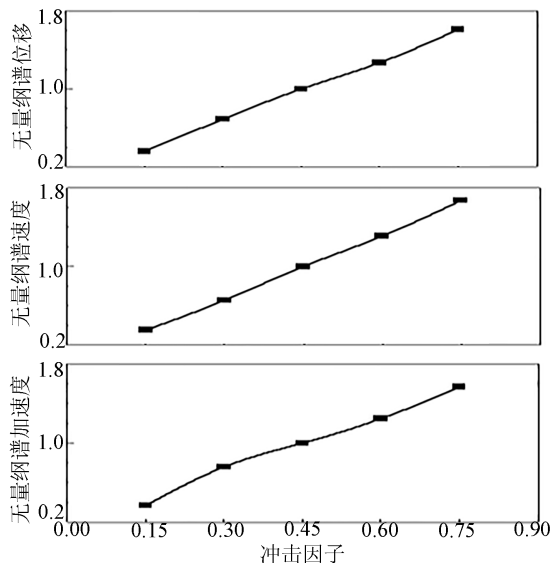


图 4 浮动冲击平台冲击环境随冲击因子变化曲线

Fig. 4 Variation curves of impact environment of floating shock platform along with impact factors

1.3 压载质量对浮动冲击平台冲击环境的影响

浮动冲击平台是用来考核设备抗冲击性能的装置，被测设备自身质量对浮动冲击平台有着很大影响。对表 1 中工况 1、2、3、12 和 14 进行数值

仿真计算。在药包质量、爆距和攻角一定的情况下，研究不同质量压载对浮动冲击平台冲击环境的影响，各组工况下各测点冲击环境平均值如表 4 和图 5 所示。

表 4 不同压载质量下浮动冲击平台测点频率
Tab. 4 Frequencies of floating shock platform measurement points under different ballast mass

压载质量/t	左频率/Hz	右频率/Hz
0	2.32	119.92
10	2.41	107.18
30	2.45	99.83
50	2.25	83.55
70	2.15	96.00

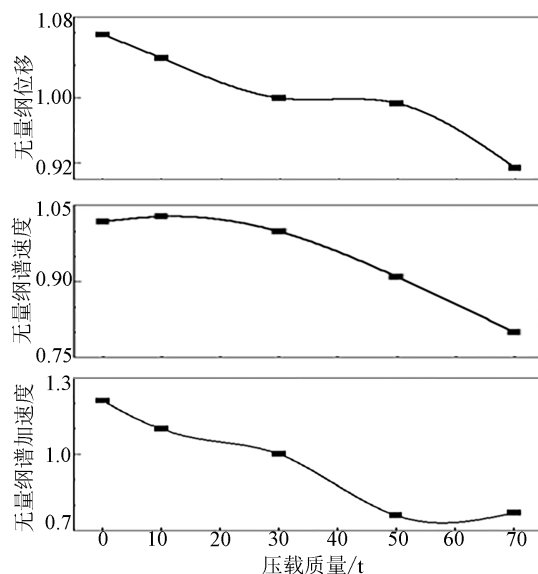


图 5 浮动冲击平台冲击环境随压载质量变化曲线

Fig. 5 Variation curves of impact environment of floating shock platform along with ballast mass

从图 5 可以看出：当爆炸攻角、药包当量和爆距一定，压载质量从 0 到 30 t 变化时，谱位移接近于线性递减，谱速度先增大后减少且变化极为平缓，谱加速度减小速率逐渐变缓；压载质量从 30 t 到 70 t 变化时，谱位移先平缓变化后接近于线性递减；压载质量从 30 t 到 50 t 变化时，谱位移近似相等，谱速度和谱加速度接近于线性递减；压载质量从 50 t 到 70 t 变化时，谱加速度先减小后增大；随着压载质量逐渐增大，谱位移、谱速度和谱加速度总体变化趋势是逐渐减小的。

2 浮动冲击平台冲击试验与仿真结果 Hurst 指数对比分析

2.1 Hurst 指数表征方法

开展水下爆炸作用下浮动冲击平台响应非线性特征分析, 必须选择合适的非线性表征方法。舰船结构在水下爆炸作用下的纵向冲击响应符合一维非线性非平稳布朗运动, Hurst 指数 H 作为表征布朗运动的非线性指标, 其值可反映冲击响应时域信号非线性特征的强弱和变化趋势, H 的取值范围为 $[0, 1]$ 。当 $0 \leq H < 0.5$ 时, 表明该时域信号未来的总体趋势与过去相反, 过程具有反持续性, H 值越接近 0.5, 表明信号的非线性越强, 反之表示其反持续性越强; 当 $0.5 < H \leq 1$ 时, 表明该时域信号未来的总体趋势与过去一致, 过程具有持续性, H 值越接近 0.5, 表明信号的非线性越强, 反之表示其持续性越强。Weron^[9] 给出了 Hurst 指数的计算方法, 计算过程如下。

假设有一时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$, 长度为 N , i 为序列中的某个索引, 现对其进行如下操作。

1) 将时间序列分为 d 个长度为 n 的等长子序列, 即满足 $N = d \cdot n$ 。 X_a 为第 a 个子序列的均值:

$$X_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ai}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中: x_{ai} 为第 a 个子序列的第 i 个元素。

2) 第 a 个子序列的标准差为

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ai} - X_a)^2}$$

3) 第 a 个子序列的第 i 个元素的累积离差为

$$X_{ai} = \sum_{j=1}^i (x_{aj} - X_a)$$

4) 第 a 个子序列的极差为

$$R_a = \max X(x_{ai}) - \min X(x_{ai})$$

5) R_a/S_a 为第 a 个子序列的重标极差, 那么长度为 N 的序列的重标极差为

$$(R/S)_n = \frac{1}{d} \sum_{a=1}^d (R_a/S_a)$$

式中: R 为极差; S 为均方差。

6) 对 Hurst 指数的经验公式两边取对数有

$$\ln((R/S)_n) = H \ln n$$

7) 重标量程服从如下经验规律

$$(R/S)_n = cn^H$$

式中: c 为常数。

因此, 可通过线性拟合来计算 H , 即

$$\log(R/S)_n = \log c + H \log n$$

对原始数列进行分割时, 根据 n 的不同取值得到相应的 $(R/S)_n$, 然后对 $((R/S)_n)$ 和 $\ln n$ 进行最小二乘回归运算, 可得到 Hurst 指数的值。故最终 Hurst 指数的经验公式为

$$R/S = (\tau/2)^H$$

式中: τ 为增量区间长度。

最终, 在双对数坐标系下画出 $(R/S)_n$ 与 n 的关系曲线, 其斜率即为 H 。对于完全随机信号有 $H = 0.5$, 把 $1/2 < H < 1$ 的信号称为持久的, 而把 $0 < H < 1/2$ 的信号称为反持久的。所谓持久就是指被测信号中的规则成分相对多些, 而随机性较弱。文献[9]研究表明, 对于高斯白噪声信号, 当 n 较小时, $(R/S)_n$ 曲线明显偏离斜率为 0.5 的直线。因此, R/S 统计分析理论值可由下式估计:

$$E(R/S)_n = \begin{cases} \frac{n - \frac{1}{2}}{n} \frac{\Gamma((n-1)/2)}{\sqrt{\pi} \Gamma(n/2)} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{n-i}{i}}, & n \leq 340 \\ \frac{n - \frac{1}{2}}{n} \frac{1}{\sqrt{n\pi/2}} \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{\frac{n-i}{i}}, & n > 340 \end{cases}$$

式中: Γ 是欧拉 gamma 函数; E 为期望值。

上式第一项是为增加较小的 n 的作用引入的。上式用作所有 R/S 经验统计分析的基准, H 通过 0.5 加上 $(R/S)_n - E(R/S)_n$ 的斜率求得^[10]。

2.2 试验数据与仿真数据 Hurst 指数对比分析

为了研究浮动冲击平台冲击环境特性, 根据美军标 MIL-S-901D, 利用上文所述的中型浮动冲击平台进行了一系列海上试验, 药包当量为 55 kg。标定试验工况设置如图 6 所示, 在内底板上布置共 11 个加速度传感器, 测点位置如图 7 所示。

试验采集的信号存在大量冗余部分, 这些冗余部分严重降低信号分析处理的效率。同时, 实测数据会出现低频段零点漂移和高频段噪声波动, 这使得获取的信号与真实信号之间有所差异。所以, 信号数据分析前, 需要对冲击响应信号进行数据截断、低通滤波和去趋势项处理。对试验和仿真数据 Hurst 指数进行分析的过程中, 需要对试验和仿真数据进行预处理, 根据本团队此前研究成果, 将浮动冲击平台响应信号截断时间设为 0.25 s, 对信号进行 250 Hz 的低通滤波处理, 采用 EMD 方法消除试验数据趋势项^[11]。与试验数据相比, 仿真数据不存在趋势项问题, 且仿真过程中

只需要将计算时长设为 0.25 s，因此只需要对仿真数据进行低通滤波处理即可。

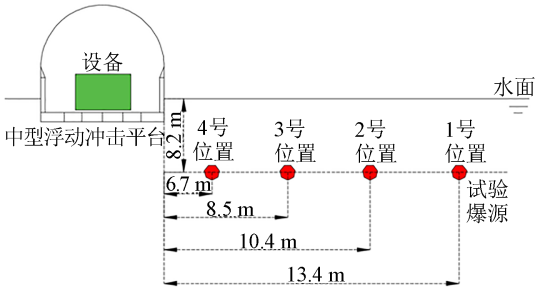


图 6 标定试验工况设置

Fig. 6 Setting of calibration test condition

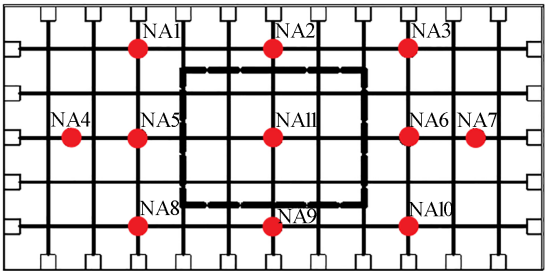


图 7 内底加速度传感器位置

Fig. 7 Positions of insole acceleration sensors

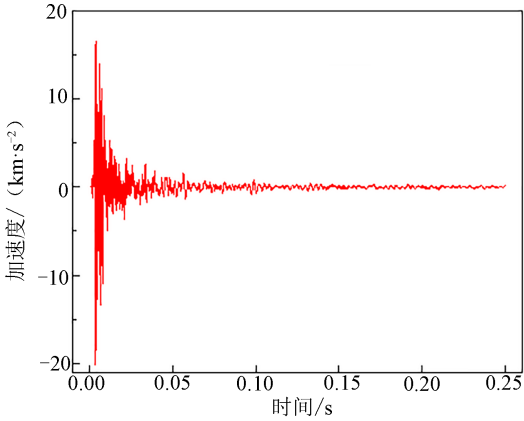
选取一个典型浮动冲击平台水下爆炸试验工况进行研究，工况为：压载质量 50 t，药包方向正横，药包深度 8.2 m，药包到舷侧水平距离 6.7 m，药包当量 55 kg。表 5 为该工况下的原始仿真加速度信号和滤波处理后 Hurst 指数对比结果。可知，经过滤波后数据的 Hurst 指数变大。

表 5 仿真测点 Hurst 指数

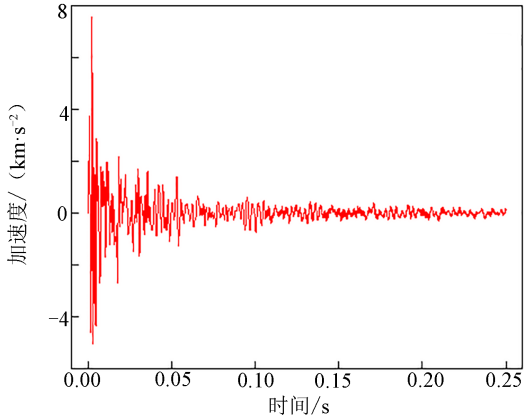
Tab. 5 Hurst exponents of measurement points in numerical simulation

测点	Hurst 指数	
	原始数据	滤波数据
2	0.715 649	0.748 615
3	0.685 620	0.725 397
5	0.684 346	0.733 393
8	0.653 670	0.744 156
9	0.715 171	0.755 107

图 8 为仿真测点 2 的加速度时历曲线。可以看出，滤波后加速度幅值显著降低，表明平台冲击加速度响应信号滤除高频响应后，数据中的低频响应占比增加，响应幅值降低， H 升高。



(a) 原始数据



(b) 滤波处理数据

图 8 仿真测点 2 加速度曲线

Fig. 8 Acceleration curves of measurement point 2 in numerical simulation

由于试验数据要比仿真数据复杂得多，采用上文的信号预处理方法对上述工况下测点 2、3、5、8、9 的试验加速度响应数据进行预处理，原始数据和预处理后数据的 Hurst 指数如表 6 所示。

表 6 试验测点 Hurst 指数

Tab. 6 Hurst exponents of measurement points in experiment

测点	Hurst 指数			
	原始数据	截断数据	滤波数据	去趋势项数据
2	0.973 355	0.748 517	0.846 285	0.698 312
3	0.996 193	0.899 167	0.894 432	0.626 617
5	0.966 234	0.835 005	0.882 219	0.623 166
8	0.911 921	0.867 692	0.801 964	0.752 752
9	0.972 223	0.897 261	0.852 145	0.711 514

由表 6 可知，原始数据的 Hurst 指数为 0.9~1。原始试验数据过长，包含了水下爆炸载荷结束后的结构低频响应部分，导致 Hurst 指数受后面冗余数据的低频响应部分影响较大。首先，采用前文

所述的截断时间 0.25 s 对原始试验数据进行截断, 截断后 Hurst 指数降低到 0.74~0.9。其次, 再对截断后的数据进行低通滤波, 与仿真数据不同, 滤波后各测点 Hurst 指数并不都是增大的, 稳定在 0.8~0.9。最后, 对滤波后的数据进行去趋势项处理, Hurst 指数降低到 0.6~0.8, 降低明显。

图 9 为测点 2 加速度响应数据预处理过程的时历曲线。可以看出: 数据截断后, 去除了信号后期的低频信号; 对截断信号进行低通滤波后, 加速度响应幅值降到原始数据幅值的 1/2 以内, 且信号趋势项成分明显显现; 去除趋势项操作后, 低通滤波后的失真数据明显得到修复。

综上可知: 浮动冲击平台水下爆炸响应加速度信号具有较强的持续性; 数据冗余部分的低频响应对平台冲击响应非线性研究具有很大影响; 数据截断后的低通滤波操作对平台冲击响应信号的非线性影响较小, 但会使响应信号趋势项失真显露出来; 对其进行去趋势项修复后, 平台冲击响应非线性增强。表明水下爆炸作用下浮动冲击平台冲击响应信号具有较强的非线性特征。

将上述试验和仿真响应数据 Hurst 指数进行对比, 结果如表 7 所示, 其中:

误差=|数值仿真值-试验值|/试验值×100%

表 7 试验数据与仿真数据 Hurst 指数对比
Tab. 7 Comparison of Hurst exponents of experimental data and simulation data

测点	Hurst 指数		
	实验数据	仿真数据	误差/%
2	0.698 312	0.748 615	7.20
3	0.626 617	0.725 397	15.76
5	0.623 166	0.733 393	17.69
8	0.752 752	0.744 156	1.14
9	0.711 514	0.755 107	6.13

可以看出, 试验数据计算得到的 Hurst 指数小于由仿真计算得到的 Hurst 指数, 两者测点间最大误差为 17.69%, 最小误差为 1.14%, 总体误差小于 20%。对比结果表明, 在水下爆炸作用下基于浮动冲击平台的大型设备抗冲击性能的研究过程

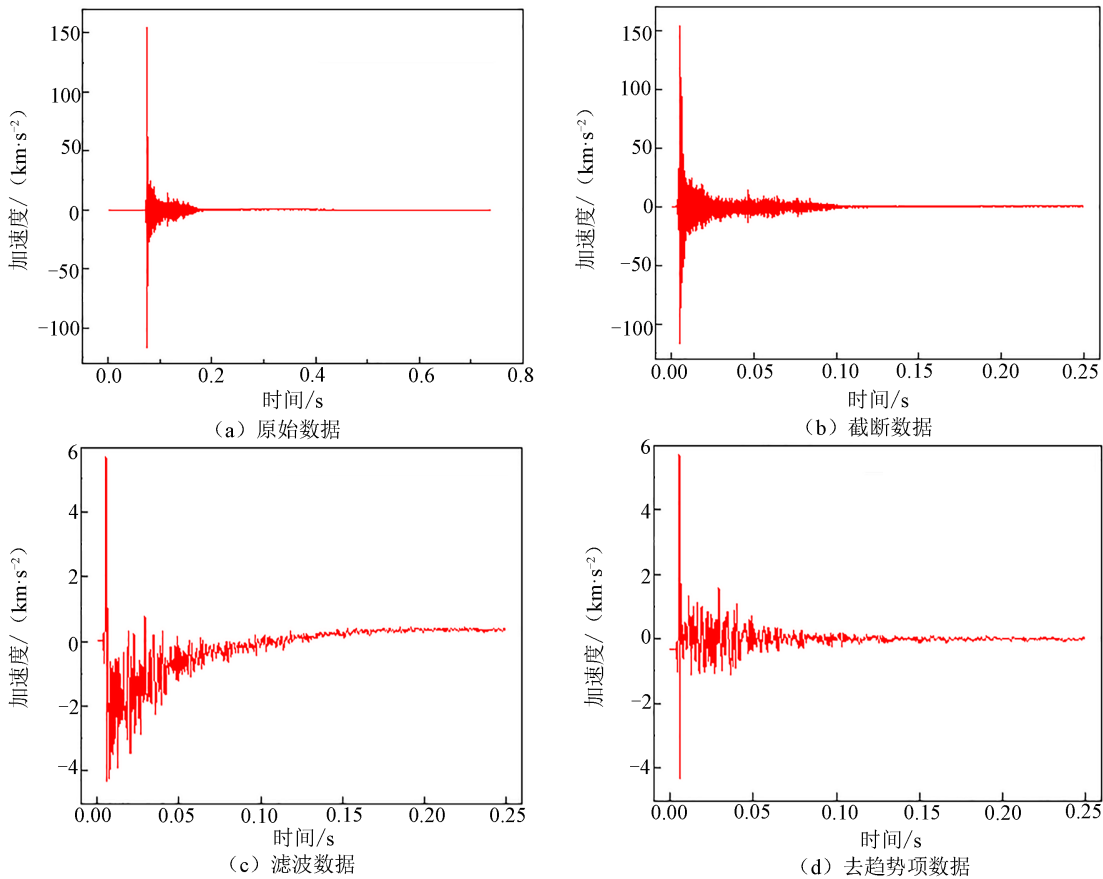


图 9 试验测点 2 加速度曲线
Fig. 9 Acceleration curves of measurement point 2 in experiment

中,数值仿真虽然会减弱结构响应的非线性特性,但数值仿真对实爆试验具有较好的替代性。

根据本文水下爆炸作用下浮动冲击平台响应 Hurst 指数分析结果可知,水下爆炸结构响应 Hurst 指数范围为 (0.5, 1), Hurst 指数越接近于 0.5,说明响应序列越无规则,非线性特征越强。参考云南干热河谷流量降水变化 Hurst 指数分级表^[12],制定了基于水下爆炸冲击响应的 Hurst 指数分级表,如表 8 所示,将水下爆炸结构响应非线性分为 4 级:结构响应 Hurst 指数 $0.5 < H \leq 0.6$,代表结构响应非线性强; Hurst 指数 $0.6 < H \leq 0.8$,代表结构响应非线性较强; Hurst 指数 $0.8 < H \leq 0.9$,代表结构响应非线性较弱; Hurst 指数 $0.9 < H \leq 1$,代表结构响应非线性弱。

表 8 基于水下爆炸冲击响应的 Hurst 指数分级
Tab. 8 Hurst exponent scales based on underwater explosion shock response

分级	Hurst 指数	数据类型	非线性
I	$0.5 < H \leq 0.6$	—	强
II	$0.6 < H \leq 0.8$	平台试验、仿真加速响应、 实船仿真加速度响应	较强
III	$0.8 < H \leq 0.9$	—	较弱
IV	$0.9 < H \leq 1.0$	位移、速度响应	弱

3 结论

本文通过数值仿真的方式,基于浮动冲击平台对大型设备冲击环境与其影响因素之间的关系进行研究。结合浮动冲击平台水下爆炸响应试验,以结构响应 Hurst 指数为衡量指标,开展了浮动冲击平台冲击响应非线性研究。得出结论如下。

1) 爆炸攻角和冲击因子对浮动冲击平台的冲击环境影响明显,各冲击谱值都随攻角和冲击因子的增加单调递增。其中,随着冲击因子的增加,浮动冲击平台垂向谱位移、谱速度和谱加速度都近似于线性增加。压载质量对浮动冲击平台冲击环境影响复杂,随着压载质量的增加,平台各冲击谱值总体变化趋势是减小的。其中,浮动冲击平台垂向谱位移随着压载质量的增加呈单调递减趋势,谱速度随着压载质量的增加先增大后减小,谱加速度随着压载质量的增加先减小后增大。以上研究可用于大型舰载设备水下爆炸作用下的冲击环境预测,为舰载设备抗冲击提供理论指导。

2) 对于水下爆炸结构冲击响应非线性特性研究表明,数值仿真计算对实爆试验具有较好的替代性。以水下爆炸作用下结构冲击响应非线性 Hurst 指数为衡量指标,结构响应的试验数据 Hurst 指数小于仿真计算得到的 Hurst 指数,测点间最大误差为 17.69%,总体误差小于 20%。

3) 水下爆炸作用下大型设备冲击响应信号具有较强的非线性特征。基于水下爆炸冲击响应的 Hurst 指数提出了结构冲击响应非线性分级表。浮动冲击平台在水下爆炸作用下的响应 Hurst 指数取值范围为 (0.6, 0.8),可为后续舰载设备冲击响应非线性考核标准研究提供参考。

参考文献:

- [1] 王志凯,王逸南,孙贝生,等. 浮动冲击平台横向冲击谱受外形结构的影响[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10): 94-101.
WANG Z K, WANG Y N, SUN B S, et al. Influence of shape structure for floating shock platform on transverse shock spectrum[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(10): 94-101.
- [2] 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.
- [3] WANG H, ZHU X, CHENG Y S, et al. Experimental and numerical investigation of ship structure subjected to close-in underwater shock wave and following gas bubble pulse[J]. Marine Structures, 2014, 39(1): 90-117.
- [4] 李聪,王伟,郝宁,等. 舰船设备冲击环境预报动力学建模方法[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(12): 43-47.
LI C, WANG W, HAO N, et al. The dynamic modeling method of ship equipment shock environment prediction[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(12): 43-47.
- [5] 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: 29-88.
WANG J. Research on the impact dynamic characteristics of the floating shock platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015: 29-88.
- [6] 张永坤,史晓春,沈晓乐,等. 水下爆炸作用下中型

- 浮动冲击平台运动响应试验研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51(12): 109-117.
- ZHANG Y K, SHI X C, SHEN X L, et al. Experimental study of the shock response of a medium floating shock platform subject to an underwater explosion[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(12): 109-117.
- [7] 张阿漫, 王诗平, 彭玉祥, 等. 水下爆炸与舰船毁伤研究进展[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(3): 1-13.
- ZHANG A M, WANG S P, PENG Y X, et al. Research progress in underwater explosion and its damage to ship structures[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(3): 1-13.
- [8] 姚熊亮, 熊帮虎, 王志凯, 等. 水下爆炸冲击波载荷沿燃气轮机结构传递特征[J]. 兵工学报, 2022, 43(9): 2367-2378.
- YAO X L, XIONG B H, WANG Z K, et al. Characteristics of underwater explosion of the shock wave loads transfer in the gas turbine structure[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(9): 2367-2378.
- [9] WERON R. Estimating long-range dependence: Finite sample properties and confidence intervals[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2002, 312(1-2): 285-299.
- [10] 宗智, 赵延杰, 邹丽. 水下爆炸结构毁伤的数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 16-56.
- [11] YAO X L, ZHANG W Q, WANG Z K, et al. Acceleration signal processing method of impact response of floating shock platform based on rigid body motion model[J]. Shock and Vibration, 2020(1): 1-15.
- [12] 樊毅, 李靖, 仲远见, 等. 基于R/S分析法的云南干热河谷降水变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2008, 26(2): 24-27.
- FAN Y, LI J, ZHONG Y J, et al. Analysis on change trend of precipitation in Yunnan dry-hot valley region based on rescaled range analysis method[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(2): 24-27.