

doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.10.001



中型浮动冲击平台试验爆源定位方法研究

金辉, 贾则, 张永坤, 奚慧巍

(中国人民解放军91439部队, 辽宁大连116041)

摘要: 中型浮动冲击平台海上试验受环境影响因素多、实施难度大, 水下爆源爆炸作为中型浮动冲击平台的冲击载荷, 试验中对爆源的高精度定位具有重要意义。该文通过对比分析水下爆源定位的各种技术, 总结其特点和应用条件, 并针对浮动冲击平台水下爆炸试验时爆源受海况影响情况进行研究, 设计适用于浮动冲击平台海上试验爆源定位的高精度机械定位方法。计算结果表明该方案简洁、高效, 定位精度高, 生产布置成本低。该研究结果可为中型浮动冲击平台试验成功实施提供参考, 并且也能够适用于其他水下爆炸试验的爆源定位。

关键词: 中型浮动冲击平台; 海上试验; 爆源定位; 高精度

中图分类号: U661.44

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)10-0001-06

Research on locating method of explosion source for medium floating impact platform test

JIN Hui, JIA Ze, ZHANG Yongkun, XI Huiwei

(Unit 91439 of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract: The test at sea of medium floating impact platform is affected by many environmental factors and it is difficult to implement. Underwater explosion source explosion is an impact load of a medium floating impact platform. It is of great significance to locate the source accurately. This paper compares and analyzes various techniques applied to underwater explosion source location, summarizes their characteristics and application conditions, and studies the influence of sea conditions on explosion source during underwater explosion test on floating impact platform, and designs a high precision mechanical positioning method for explosion source location in floating impact platform. The calculation results show that the proposed method has high positioning precision and low production layout cost. The results can provide reference for the successful implementation of the medium floating impact platform test, and can also be applied to other underwater explosion tests.

Keywords: medium floating shock platform; sea test; explosive position; high-precision

0 引言

我国目前建立了多个可用于中小型设备考核的

陆上冲击机, 而大中型舰载设备则需在浮动冲击平台上进行实验考核^[1]。美国根据 MIL-S-901D 设备

收稿日期: 2018-05-26; 收到修改稿日期: 2018-06-12

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(613157)

作者简介: 金辉(1971-), 男, 浙江临海市人, 高级工程师, 博士, 主要从事水下爆炸研究。

抗冲击考核规范,应用浮动冲击平台对大中型舰载设备的抗冲击性能进行考核试验^[2-3]。相比而言,我国在浮动冲击平台建设上还存在一定差距,目前我国缺少相关试验装置对大中型舰载设备进行冲击考核^[4-5]。因此,进行中型浮动冲击平台建设可以提升我国舰载抗冲击能力,能够更加准确地对舰载设备抗冲击性能进行评估^[6-8]。

利用中型浮动冲击平台开展设备抗冲击的水下爆炸试验时,需保证对水下爆源的准确定位,因为这直接关系到整个浮动冲击平台系统输入条件的正确性。浮动冲击平台抗冲击试验要求爆源位于浮动冲击平台横行一侧或者首尾一侧,并且悬浮水中进行爆炸。爆源布放入水至起爆过程会受到水流、风力、涌浪等因素的影响,使浮动冲击平台和爆源的相对位置和态势产生较大不确定性,这直接影响到对爆炸威力和目标毁伤效果的评定。目前,水下爆炸试验中常用的爆源定位方法包括机械定位法、冲击波零时法、GPS水面定位法和水声GPS联测法等^[9-10],每种都有它的优势,但也有其局限性。本文针对传统爆源定位方法在海上试验中适用性进行分析的基础上,提出了一种适用于浮动冲击平台海上试验爆源定位的高精度机械定位方法。

1 传统爆源定位方法适用性分析

我国海军进行了多次水下爆炸试验,包括缩比模型试验和海上实船爆炸试验,对爆炸爆源的威力以及被试目标的毁伤效果和抗冲击能力进行了评定。随着科学技术的发展,每次试验所采用的爆源定位技术也不断地改变。

1) GPS水面定位法

爆源位置GPS水面定位法是分别在浮动冲击平台及爆源上方架设定位天线,把爆源水面坐标点近似作为水下爆源位置,计算定位天线位置差得到爆源与浮动冲击平台的相对位置。浮动冲击平台海

上试验时,爆源布放后的长、短起爆电缆对接等工作时间比较长,如果爆源沉底布放,则爆源位置不易发生变化;如果爆源悬浮布放,则爆源受海流影响较大。

根据GPS水面定位法的特点,其适合于爆源沉底的布放方式。同时,爆源水面位置测量时机选择极为重要,必须与布放实施紧密配合、协调一致,方能保证最佳测量效果。对于浮动冲击平台试验中悬浮布放的爆源定位精度相对较差。

2) 冲击波零时法

爆源位置冲击波零时定位法是分别在浮动冲击平台及爆源上安装传感器(零时传感器),通过测量爆源起爆零时信号与浮动冲击平台冲击响应信号的时间差,计算爆源与浮动冲击平台的相对位置。

冲击波零时法一般只能作为一种事后爆源位置辅助定位测量手段,不能直接用于爆源定位。并且随着爆距的增加,其误差也不断增大,不适宜远距离试验。

3) 机械定位法

爆源位置爆源机械定位法是一种浮动冲击平台处于抛锚状态下,使用机械绳索来保证爆源与浮动冲击平台相对位置的方法。当浮动冲击平台固定后,在爆源方向的远处再固定一个点,采用定位索将爆源与浮动冲击平台进行连接,根据试验工况设计,在定位索适当位置悬浮布放爆源。

该方法实施简捷,在良好海况条件下对于较短爆距试验具有较好的定位精度。但在实际试验中,由于浮动冲击平台会受风、流及浪的影响,同时受浮动冲击平台舷高影响,爆源定位索漂浮水面部分与悬空部分也不是绝对的直线,这些不确定因素都会增加爆距确定的误差,需要结合冲击波零时法或冲击波时差法对试验的爆距进行计算修正。传统机械定位法受海区环境影响情况如图1、图2所示。

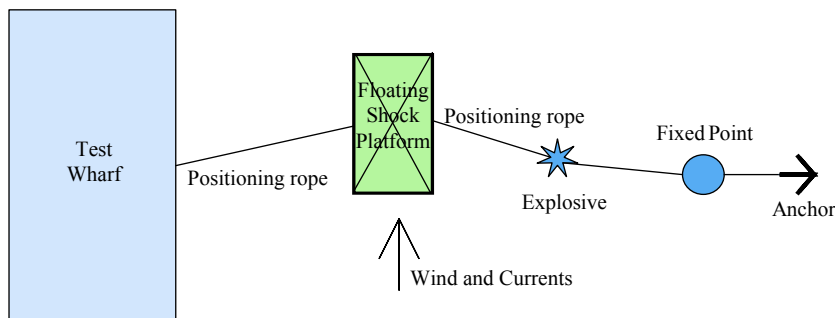


图1 传统机械定位装置导致爆源偏移俯视图

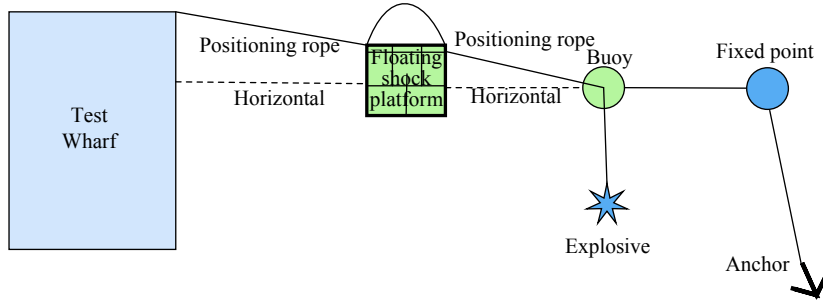


图 2 传统机械定位装置导致爆源偏移侧视图

4) 水声 GPS 联测法

水声定位采用爆源爆炸时自身的冲击波声辐射信号对爆源进行定位, 并结合 GPS 测量其位置坐标。其采用水声长基线定位原理, 在海底布放一定数量的水声应答器以及测距仪, 悬浮爆源的定位精度在 2.5 m 左右。

在实际的试验中, 操作难度较大, 需要的成本也比较高, 同时试验时的平台以及爆源的布置方式都对测量精度有较大的影响。

2 高精度机械定位法设计

如前所述, 4 种爆源定位方法均有不足, 而浮动冲击平台爆源定位具有定位要求高、试验前能准确确定爆源位置等特点, 因此提出一种改进的高精度机械定位法, 以满足浮动冲击平台爆源定位要求。

本方法能够确保爆源受风浪流的影响最低, 减少爆炸冲击波对定位支架的影响。

1) 定位杆关键结构设计

为了保证爆源水平定位的精度, 设计如图 3、图 4 所示的水平支撑臂结构。在浮动冲击平台上安装 3 条滑轨 D, 使定位杆可以根据平台吃水深度进行高低调节, 确保定位杆始终位于水面上。为减小爆炸过程中爆炸冲击波和水泵对定位支架的影响, 将水平支撑臂设计为多关节结构。在平台近端安装三角架, 其与平台采用铰接连接以方便收放, 同时使定位杆不发生水平方向偏移, 连接点结构如图 5(a) 所示。为避免支撑臂上扬时损毁平台本体, 连接杆 C1、C2、C3 的连接点 B1、B2 加装垫板结构, 如图 5(b) 所示。支撑臂最前端连接浮筒, 一方

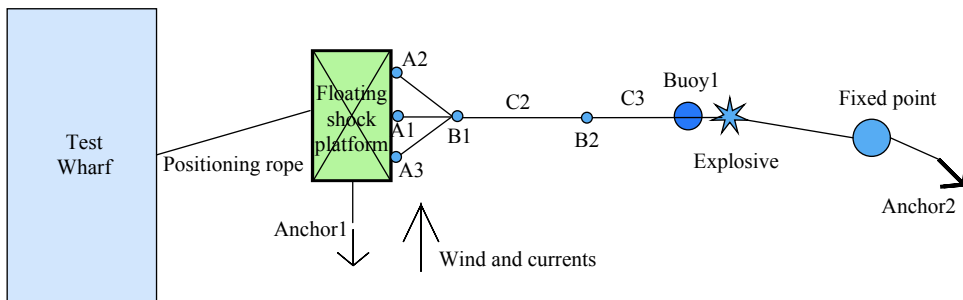


图 3 改进的机械定位装置俯视图

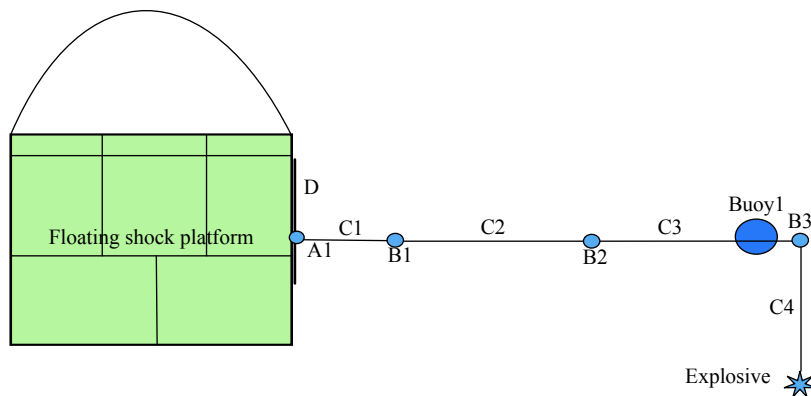


图 4 改进的机械定位装置侧视图

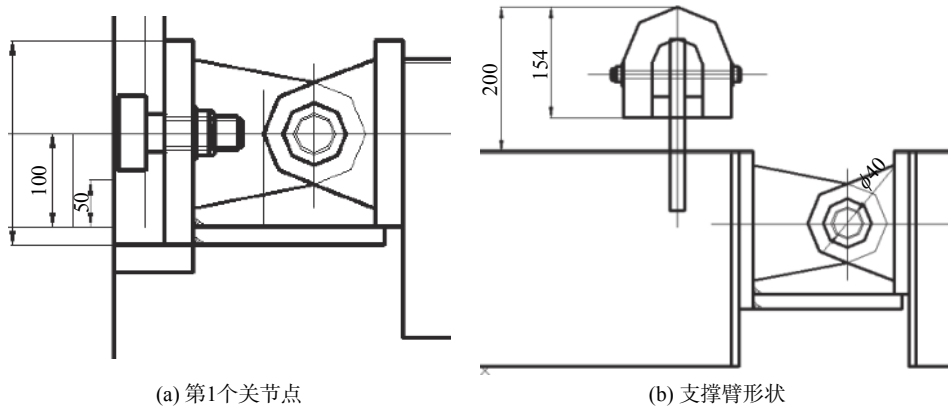


图5 水平支撑臂节点结构 (单位: mm)

面为水平支撑臂提供浮力,避免下垂挠度,另一方面为垂直立杆和药包提供浮力。

为了减小波浪对爆源影响,爆源与浮桶采用垂直立杆 C4 进行连接。图 6(a)为垂直立杆与浮筒间的联接结构,图 6(b)为定位杆下端与药包的联接结构。

2) 水动力载荷影响分析

浮动冲击平台需要在三级海况下正常试验。此时波浪的统计波长 $\lambda=146.75$ mm,波浪周期 $T=9.7$ s,有义波高极限 $H=4.0$ mm。试验地点在海面上,波高相对波长是小量,因此可采用无限水深线性波浪理论进行波浪的受力分析。

根据浮动冲击平台实际情况,设计的垂直立杆直径为 0.03 m,长度为 8.2 m,此处计算斜柱受力时斜柱直径 D 取为 0.05 m。斜柱的特征直径与海浪的特征长度的比值 $D/\lambda=0.0003 < 0.05$,因此在计算立杆受到的波浪力时可以采用莫里森公式^[4]。莫里森公式的计算方法可表示为

$$f = f_D + f_I \quad (1)$$

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho D |U_n| U_n \quad (2)$$

$$f_I = \frac{1}{2} C_M \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial U_n}{\partial t} \quad (3)$$

式中: f_D 和 f_I ——水平拖曳力和水平惯性力, N;

C_D 、 C_M ——拖曳力系数和惯性力系数;

D ——圆柱体直径, m;

ρ ——水密度, kg/m^3 ;

U_n ——与圆柱正交的水质点的速度矢量。

设 e 为沿圆柱轴线的单位矢量,在直角坐标系下时:

$$e = e_x i + e_y j + e_z k \quad (4)$$

波浪水质点的速度矢量 u 为

$$u = u_x i + u_y j + u_z k \quad (5)$$

与柱轴正交的速度矢量 U_n 可通过三矢量乘积得出:

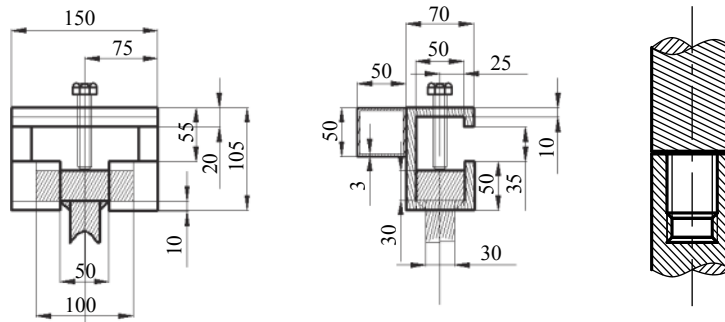
$$U_n = e \times (u \times e) \quad (6)$$

设与圆柱轴正交的速度矢量在 3 个坐标轴上的投影为 $\{U_x, U_y, U_z\}$,即:

$$U_n = U_x i + U_y j + U_z k \quad (7)$$

将式(4)和式(5)代入式(6),得:

$$U_z = u_z(1 - e_z^2) - e_z(u_y e_y + u_x e_x) \quad (8)$$



(a) 垂直立杆与浮筒间的联接结构

(b) 下端与药包的联接

图6 垂直立杆上端和下端的联接方式 (单位: mm)

$$|\mathbf{U}_n| = \sqrt{(U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2 - (u_x e_x + u_y e_y + u_z e_z)^2} \quad (9)$$

采用数值计算方法计算立杆与流场间的流固耦合规律, 会形成如图 7 所示的卡门漩涡街现象。迎流面和背流面的压力差是导致立杆沿中垂线偏转的主要原因。

根据立杆所处的试验环境, 结合莫里森公式, 计算得到立杆在流场作用下的载荷特性, 如图 8 所示。保持流场环境不变, 调整立杆直径, 得到其所受的最大力与最大力矩, 如图 9 所示。从图中可清楚地观察到, 立杆所受流场载荷随着其直径的增加呈线性增加。

3) 定位精度分析

本文设计的爆源定位装置的防漂移效果需要进行考核, 主要计算刚性杆定位装置受海流拖曳力下的爆源偏移量。55 kg TNT 当量的药包为圆柱装药, 该药包自身可提供的浮力 F 为 326.15 N。柔性绳索长 8.2 m, 海水来流速度为 v 。上述圆柱扰流计算公式为

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d d^2 h \quad (10)$$

式中: ρ ——水密度, kg/m^3 ;

v ——海水来流速度, m/s ;

C_d ——拖曳力系数;

d ——圆柱杆直径, m ;

h ——圆柱杆长度, m 。

可得该 55 kg TNT 当量的药包在不同来流速度的水平距离偏移量, 如表 1 所示。进一步考虑, 在不同配重条件下 55 kg TNT 当量药包的偏移距离, 如图 10 所示, 即配重在 0~90 kg 的区间内, 该药包在不同来流速度条件下的偏移距离。

由以上分析, 发现在 0.5 m/s 及以下的流速条件下, 可以将爆源水平偏移量控制在 0.1 m 左右, 但需要配重 30 kg。若采用本文定位方法中的刚性连接, 钢管尺寸为直径 0.05 m, 厚度为 0.006 m, 其弯曲刚度为

$$EI = 2.1 \times 10^{11} \times \pi D^4 [1 - (d/D)^4] / 64 = 4.2933 \times 10^4 \quad (11)$$

根据悬臂梁的挠度计算公式可得其悬臂端挠度:

$$w = \frac{Fl^3}{3EI} = 0.1 \text{ m} \quad (12)$$

对比计算结果, 可明显发现传统机械定位中采用缆绳吊装爆源可产生近 1 m 的偏移误差, 而要保证其在 0.1 m 的误差之内, 需配重近 30 kg, 增加了海上操作的复杂性和危险性。而采用本文的爆源定位方法, 一方面多关节结构, 可有效地简化水平方向上的定位操作, 提高水下爆炸过程中的安全性; 另一方面结合立杆的载荷特点和流固耦合分析, 发现其在同等海况下的端部位移均小于传统的机械定位方法, 故该爆源定位装置在限制爆源与平台相对位移实现爆源准确定位方面具有更好的效果。

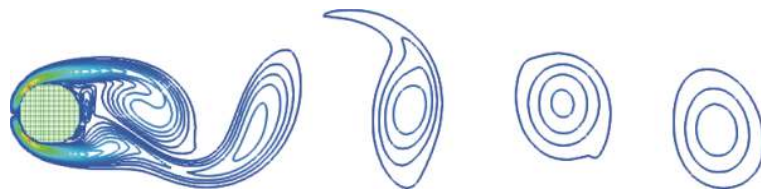
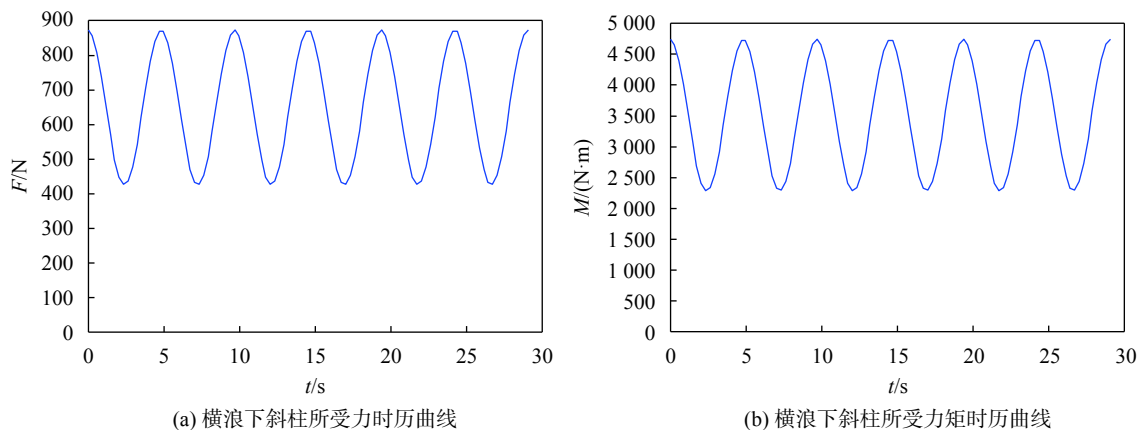


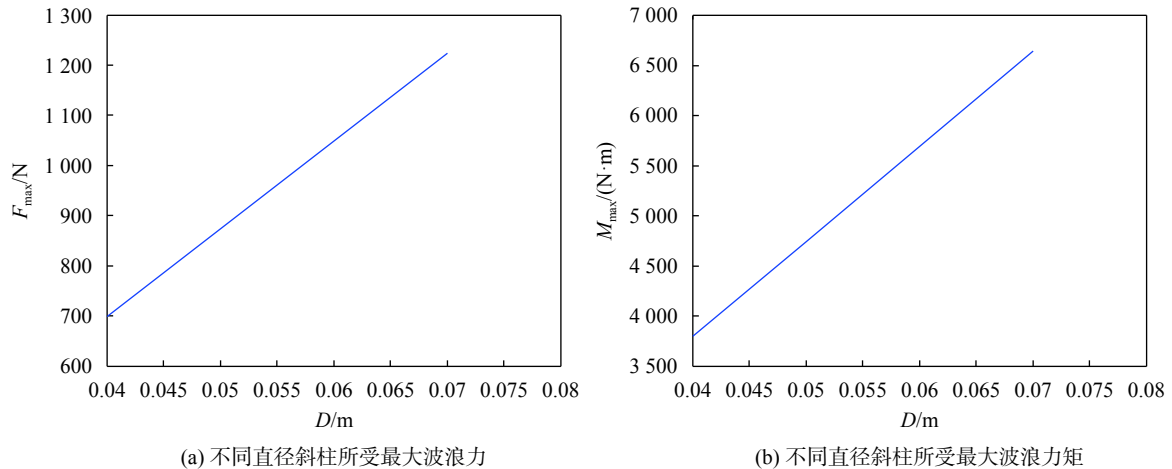
图 7 立杆在流场中绕流仿真涡量图



(a) 横浪下斜柱所受力时历曲线

(b) 横浪下斜柱所受力矩时历曲线

图 8 立杆所受的最大波浪力与波浪力矩



(a) 不同直径斜柱所受最大波浪力

(b) 不同直径斜柱所受最大波浪力矩

图9 不同直径下立杆所受的最大波浪力与力矩

表1 55 kg TNT 当量的药包在不同来流速度条件下的偏移量统计

参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
流速/(m·s ⁻¹)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2
偏移/m	0.034	0.075	0.134	0.210	0.302	0.411	0.536	0.677	0.834	1.007	1.195

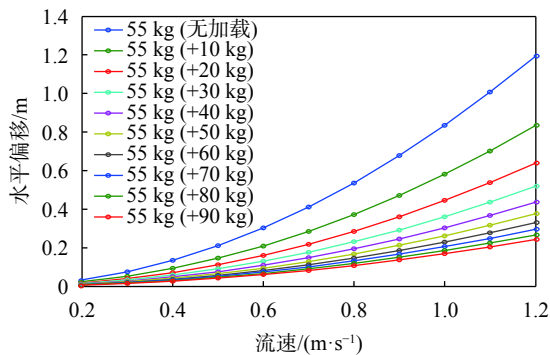


图10 55 kg TNT 当量的药包在不同配重条件下的偏移距离

3 结束语

针对浮动冲击平台海上试验爆源定位过程中, 试验环境恶劣、爆源定位精度难以控制等问题, 在对传统爆源定位方法适用性分析的基础上, 提出了一种适用于浮动冲击平台海上试验爆源定位的高精度机械定位方法。应用该海上试验爆源定位方法, 浮动冲击平台受海流冲击位置发生变化过程中, 刚性定位杆会随浮动冲击平台同步运动, 相对位置变化小, 爆源位置定位误差不受浮动冲击平台绝对位置影响, 只与竖直定位杆在海流作用下的挠度相关。通过分析计算, 海流作用下该方法的偏移误差可精确预测和控制, 且刚性定位杆采用的折叠式结构, 在海上具有良好的可操作性, 可作为中型浮动冲击平台试验海上实施方法。

参考文献

- [1] 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.
- [2] CHRIS G. Heavyweight high impact shock testing[R]. Arvonnia, Virginia: HI-TEST Laboratories, 2007.
- [3] 梁卓中, 陈立贤. 应用美规 MIL-STD-901D 标准水中爆震平台进行舰船重装备之抗震能力分析[J]. 科学与工程技术期刊, 2009, 5(2): 35-50.
- [4] 何斌. 舰船设备在标准浮动冲击平台上冲击考核试验概述[C]// 第十届全国冲击动力学学术会议, 2011.
- [5] 张磊, 汪玉, 温肇东, 等. 舰载设备冲击试验系统研制现状及其发展趋势[J]. 科技导报, 2009, 27(1): 96-101.
- [6] 张海华. 冲击载荷作用下船用设备与构件强度评估数值实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [7] 张玮. 利用浮动冲击平台考核船用设备抗冲击能力的数值仿真研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 60-63.
- [8] JEN C Y. Coupled acoustic-structural response of optimized ring-stiffened hull for scaled down submerged vehicle subject to underwater explosion[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 52(2): 96-110.
- [9] 李兵, 宁永成, 董忠臣, 等. 水面舰艇抗冲击试验定位方法研究[J]. 测绘科学, 2010, 35(S1): 117-119.
- [10] 张姝红, 权琳, 金辉, 等. 水下爆炸试验爆源定位方法研究[J]. 爆破, 2015, 32(2): 118-121.
- [11] 张阿漫, 戴绍仕. 流固耦合动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 176-182.

(编辑: 商丹丹)