

潜艇水下毁伤试验综合测量与分析方法研究

韩大伟, 张东俊, 王天忠, 杨卫东

(中国人民解放军 92337 部队, 大连 116023)

摘要: 为解决潜艇水下毁伤单次试验中测试测量要素与数据分析不够完备的问题, 着眼单次试验获取尽可能多的有效试验数据, 提出一种潜艇水下爆炸毁伤试验的综合测试测量方法, 分试验前、试验中和试验后 3 个阶段对测量要素进行了较为全面的分析, 并提出了相应的测点布设方案和试验数据处理方法, 通过仿真试验对综合测量与分析方法进行探讨, 指出了测试测量与数据分析时需要注意的问题, 可为潜艇水下毁伤试验的开展提供参考。

关键词: 水下爆炸; 潜艇; 毁伤试验; 测试测量; 分析方法

Study on Comprehensive Measuring and Analyzing Method of Underwater Submarine Damage Test

HAN Dawei, ZHANG Dongjun, WANG Tianzhong, YANG Weidong

(92337 Troops of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to solve the incompleteness of measuring elements and data analyzing in a single underwater submarine damage test, and aiming to acquire more effective test data, a comprehensive testing and measuring method was proposed. The measuring elements were analyzed comprehensively in pre-testing, testing and post-testing stages, and the corresponding measuring point laying scheme and data processing method were proposed. A simulative experiment was executed as an example for research and discussion, and several problems needing to be cared in measuring and data processing were proposed, which can give reference to underwater submarine damage tests.

Keywords: underwater explosion; submarine; damage test; test and measurement; analyzing method

0 引言

潜艇以其良好的隐身性能在各海军强国军事装备发展中占有重要地位, 但由于受水下操纵难、损管消防难等多种因素制约, 在当今信息化条件下水下体系作战中, 其生命力受到巨大威胁。有效评估水下爆炸下潜艇的抗爆抗冲击能力, 对于潜艇装备作战运用与改进设计意义重大。实装试验无疑是最可靠最直接的检验评估手段, 但其动用人力、物力、财力成本高且风险和难度较大, 大范围大批次开展的可能性小, 试验样本量受到大大限制, 仿真分析和模型试验在一些规律性问题的研究上仍不失为辅助分析评估的有效手段。在实船水下爆炸毁伤试验中, 潜艇相比于水面舰船面临更大难度和更高风险, 如何在单次试验中测量获取尽可能完备的试验数据, 是摆在试验设计和测试人员面前的一个重要难题。

以往文献对舰艇结构水下爆炸理论、仿真与试验测量技术方法开展了大量研究^[1-19], 取得了许多有价值的成果。文献 [1] 通过大量试验数据拟合, 给出了水下爆炸压力场计算的经典公式, 文献 [2] 完善发展了 Cole 的水下爆炸理论, 提出了水下爆炸冲击波和气泡脉动载荷在同一时间维

度下的半理论半经验公式, 大量学者针对水下爆炸气泡产生的冲击波以及气泡与其作用边界的相互作用开展了理论与数值仿真研究^[3-7], 文献 [8] 基于五方程简化模型对近水面水下爆炸开展了数值模拟, 通过应用 MUSCL-Hancock 策略获得了二阶精度, 与相关文献中给出的试验结果吻合良好; 文献 [9] 基于 Mie-Grüneisen 状态方程开展了多介质可压缩流动的水下爆炸数值模拟, 并通过算例验证了该方法的可靠性; 这些都为水下爆炸载荷场的测试测量方法奠定了良好的理论基础。文献 [10] 利用 Hopkinson 杆作为应力波信号感知元件, 给出了一种用于评估高压电爆气泡载荷的新的试验方法和测试系统, 提供了一种新的获取和研究水下气泡冲击壁压的方式方法, 文献 [11] 利用该试验系统对一系列尺度的水下电爆气泡引起的壁压开展测量试验, 并根据试验结果指出二次气泡冲击压力同样需要引起足够的重视, 但该测量方法难以实现开阔水域下的大当量水下爆炸测量工程应用。文献 [12] 在分析水下爆炸下水面舰艇结构毁伤模式的基础上, 提出针对舰体结构薄弱环节的测点布置优化方案, 为水面舰体结构毁伤测量提供参考, 但典型设备和人员战位处冲击响应参数测量

收稿日期: 2021-02-17; 修回日期: 2021-03-19。

基金项目: “十三五”军队专项(2019HJHS26); 中国博士后科学基金项目(2017M613384)。

作者简介: 韩大伟(1986-), 男, 山东潍坊人, 博士, 工程师, 主要从事装备作战实验与舰艇抗爆抗冲击方向的研究。

引用格式: 韩大伟, 张东俊, 王天忠, 等. 潜艇水下毁伤试验综合测量与分析方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 132-136.

的缺失无法准确对舰艇功能毁伤情况进行评估; 文献 [13] 分析了近场爆炸下舰船毁伤测量的关键环节, 重点提出采用缓冲器对测试模块进行抗冲击防护, 并通过无线方式对数据进行转存备份, 为近场爆炸毁伤测量提供了思路和参考; 文献 [14] 对水下爆炸中自由场压力和船体壁压进行测量分析, 研究结果表明船体壁压的反射系数与冲击波的人射角度有关, 同时验证了自由场压力的水面截断效应; 文献 [15] 从实船测量需求、测点管理、测量控制及测量数据库等多个方面进行了较为全面的论述, 为后续实船试验测量技术研究搭建了较为完整的基础框架; 文献 [16] 对水下爆炸气泡脉动载荷在加筋板塑性变形中所占比例开展仿真与试验研究, 结果表明气泡脉动载荷在塑性变形中所占贡献比例一定范围内随爆距减小而增大; 文献 [17] 通过仿真分析结果给出了一种船用柴油机抗冲击试验测点布设方案, 由于计算时以组合半正弦波替代水下爆炸载荷下甲板处的真实响应作为载荷输入, 结果的准确度有待进一步评估; 文献 [18] 分析了我国开展水下爆炸毁伤效能试验与评估的现状, 指出由于多种因素制约试验结果可信度, 亟需开展实战环境下的水下爆炸毁伤试验以获取真实的试验数据; 文献 [19] 分析论述国外舰艇抗水下爆炸研究情况时指出, 西方国家在 20 世纪就曾开展了多次潜艇实装水下爆炸毁伤试验, 但由于保密原因, 公开的文献很少。纵观已有文献, 对潜艇水下爆炸毁伤试验测量与分析方法的系统性完备性研究不够, 大多研究还是集中在结构毁伤的测量与分析上, 针对与潜艇生命力息息相关的功能毁伤评估需求的测量与分析研究甚少。我国在潜艇抗水下爆炸毁伤试验与评估方面, 无论从技术上还是经验上, 与西方国家还存在较大差距, 开展潜艇水下毁伤试验测试测量与分析方法研究, 完善水下爆炸毁伤试验的理论与技术体系, 具有重要的应用价值和军事迫切性。

本文提出一种潜艇水下爆炸毁伤试验的综合测试测量方法, 分试验前、试验中和试验后 3 个阶段对测量要素进行了较为全面详尽的分析论述, 并提出了相应的测点布设方案和试验数据处理方法, 通过仿真试验对综合测量与分析方法进行探讨, 指出了测试测量与数据分析时需要注意的问题, 对潜艇实装水下爆炸毁伤试验的数据采集与分析具有较好的参考价值。

1 测试测量系统总体设计

从时间维度上划分, 可以将整个测试测量系统分为三大部分: (1) 试验前的测试测量; (2) 试验过程中的测试测量; (3) 试验后的测试测量。其中, 试验过程中的测试测量又可以从空间维度上划分为艇外测试测量和艇内测试测量。

1.1 试验前的测试测量

试验前的测试测量是整个试验测试测量系统的重要组成部分, 是试验数据处理分析的初始基准, 也是开展仿真分析、试验方案预案制定和试验数据评估的重要依据。水下爆炸下潜艇综合毁伤试验前的测试测量内容主要包括潜艇艇体结构尺寸布局, 重要系统设备、人员、管系、阀门、

水舱、油路、电路等空间布局, 材料的静态、动态力学性能, 炸药重量和体积, 以及各测点、炸药与艇体的相对空间位置等。

1.2 试验过程中的测试测量

试验过程中的测试测量是整个试验测试测量系统的核心部分, 该部分的特点是涉及要素多、实时度高、难度大, 很大一部分参数的测量采集在秒级甚至毫秒级完成, 为分析水下爆炸与结构的耦合响应, 艇内艇外测试测量设备数据采集起点统一由炸药附近的压力传感器压感触发, 确保输入和输出置于统一的时间维度下。

1.2.1 艇外测试测量

艇外测试测量一是通过不同测点处压力传感器采集冲击波载荷和气泡脉动载荷的压力-时间曲线, 完成对艇体外部载荷环境的重构; 二是通过水下高速摄像机采集气泡脉动、射流、艇体迎爆面的动态响应过程等视频信息, 用于试验后比对分析。

1.2.2 艇内测试测量

艇内测试测量一是通过不同测点处加速度、应变、位移等传感器记录水下爆炸下结构的实时动态响应特征; 二是通过横倾仪、纵倾仪、液位计等记录潜艇的随动响应特征; 三是通过各舱室内部视频监控记录舱室破损情况、开机设备的运行情况等视频信息。

1.3 试验后的测试测量

试验后的测试测量是整个试验测试测量系统不可或缺的部分, 该部分测量数据在潜艇抗毁伤评估体系中至关重要。作为试验中测试测量的补充测量方式方法, 试验后的测试测量主要包括艇体破口和裂纹情况、塑性变形区域和变形量, 以及艇载设备、仪器开机运行检查等内容。

2 测点布设方案

2.1 艇外测阵布设方案

艇外测阵用于完成艇外冲击环境的测试测量, 主要由艇体基座阵、三角固定支架、压力传感器和 underwater 高速摄像机 (与水下强光源搭配使用) 组成, 如图 1 所示, 各测点编号按测量设备类型以首大写字母作为 1 级区分, 相同类型设备按功能作用以小写字母作为 2 级区分, 相同类型相同功能作用的测点纵向沿艇首至艇艉方向、环向沿以艇底部为起点的顺时针方向顺次编号。例如, 图 1 中 Pz2 表示第二个用于测量自由场压力的压力传感器。

艇体基座分别沿艇纵向 (以中轴线为纵向) 和环向等间隔分布, 作为艇外传感器安装布设的基础, 也可作为水下爆源和潜艇的吊放环, 基座的数量和位置可根据艇外测量总体需求选择。

三角固定支架在潜艇首部和尾部布置, 其根部通过螺栓连接于艇体基座, 用于搭载艇外测试设备。支架应具备足够的刚度, 并满足试验工况下的抗冲击要求, 可通过水下爆炸建模仿真开展校核; 为了不影响水下爆炸气泡的膨胀和收缩, 首尾支架之间距离应大于两倍气泡最大半径, TNT 水下爆炸产生的气泡最大半径 R_{\max} 可由式 (1) 确定^[1]:

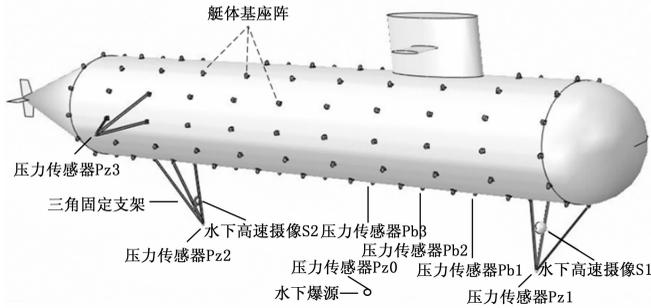


图 1 艇外测阵示意图

$$R_{\max} = 3.8 \frac{W^{1/3}}{(h+10)^{1/3}} \quad (1)$$

其中: W 为炸药质量, kg; h 为炸药水下深度, m。

根据 Cole 经典水下爆炸理论^[1], 水下爆炸冲击以球面波的形式向外传播, 载荷函数形式为:

$$P(t) = P_m \cdot e^{-t/\theta} \quad 0 \leq t < \theta \quad (2)$$

其中: P_m 为载荷峰值, θ 为时间衰减系数, P_m 、 θ 均与 $\sqrt[3]{W}/R$ 成正比。

为满足艇外载荷环境的重构需求, 通过三角固定支架在艇外布设不少于 3 个压力传感器用于采集水下爆炸自由场的冲击波压力-时间曲线, 3 点不应位于以炸药中心为球心的同一球面上, 且需远离艇体一定距离以避免艇体对自由场流体的影响; 在炸药附近布设 1 个压力传感器, 作为测量系统数据采集起始点的统一触发信号; 在艇体迎爆面纵向布设不少于 3 个壁压传感器, 用于测量艇体壁压。

水下高速摄像机需外加抗冲击防护罩, 并配备强光源以提高水下能见度, 原则上应不少于两台。其中, 测点 S1 处高速摄像机用于捕捉水下爆炸气泡脉动过程, 如果气泡行程较长, 可以考虑在高速摄像机前方加装曲面透镜或增加一台高速摄像机的方式来增大捕捉视角; 测点 S2 处高速摄像机用于捕捉艇体局部大变形过程、破口和裂纹扩展过程, 整体“鞭状运动”过程, 以及气泡边缘接触艇体后产生的水射流等。

2.2 艇内测阵布设方案

艇内测阵用于完成艇内状态及各关键部位冲击响应的测试测量, 主要由各类传感器、状态监测设备、数据采集存储设备及控制模块等组成, 各类设备在艇内需可靠固定, 并采取必要的抗冲击隔振防护措施, 通过穿舱电缆与各传感器和仪器仪表连接。

加速度传感器布置于艇载重要设备基座处, 以及艇员、甲板板等位置, 用于测量水下爆炸下重要设备、人员处的冲击响应, 主要设备和它们的基座之间布置位移计, 测量其位移响应, 通过层次分析法等方法确定引起重要设备和人员毁伤的关联因素及各关联因素的贡献度, 以用于潜艇各功能的毁伤分析。

应变计或应变片布置位置包括: 各舱室中部、前后各 1/4 处耐压壳和肋骨处, 离爆源最近的舱室迎爆面适当增加布置数量密度, 用于塑性大变形测量; 沿潜艇背爆面耐压

壳体母线与舱壁连接点及各舱中点位置布置若干应变片, 在舱壁中心位置布置应变片作为其他应变片的参考基准, 用于分析艇体在水下爆炸气泡脉动下产生的“鞭状运动”; 沿潜艇底部龙骨位置纵向布置若干位移计和速度计, 用于测定潜艇水下爆炸冲击下的刚体运动。

每舱舱内安装若干路监控, 用于监视各舱破损情况和主要设备的运转情况; 安装横倾仪、纵倾仪、进水、火灾、氢气浓度等监测报警设备传感器若干, 用于艇内状态监控。

3 数据分析方法与仿真试验

3.1 艇外冲击环境反演重构

由于受海流等因素影响, 爆源、目标实际位置与预设位置之间可能存在动态偏差, 其爆炸瞬间的相对位置往往无法准确测量, 需要通过自由场压力传感器信号时差进行反演推算。图 1 中, 假设自由场压力测点 Pz1、Pz2、Pz3 与爆源附近测点 Pz0 的信号时差分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 , 水下爆炸冲击波以水中声波速度 c 以球面波的形式向外传播, 爆源实际水下爆炸位置点可通过分别以 ct_1 、 ct_2 、 ct_3 为半径的 3 个球面的交点确定, 然后以此为位置点输入对水下爆炸冲击环境进行理论计算, 并与试验测量数据进行比对, 修正理论计算结果, 完成水下爆炸冲击波载荷和气泡脉动载荷的时间历程与空间分布的反演重构。通过压力传感器记录分析气泡脉动载荷的幅值、周期和载荷历程曲线, 与水下高速摄像机采集的气泡动态视频信息以及理论计算结果进行多维度比对, 对理论计算结果进行修正, 作为仿真试验的输入。以某型潜艇为算例, 用于仿真分析的潜艇耐压壳体直径 9 m, 全长 87.25 m, 水下全排水量 4 997 t, 分 7 个耐压水密舱室, 内部双层甲板。潜艇位于水下 30 m, 爆炸源 TNT 当量 25 kg, 布置于潜艇 IV 舱中部正下方 15 m, 水下爆炸载荷形式取 Geers-Hunter 模型^[2]中的冲击波阶段和一次气泡脉动阶段, 潜艇迎爆点的载荷历程如图 2 所示。

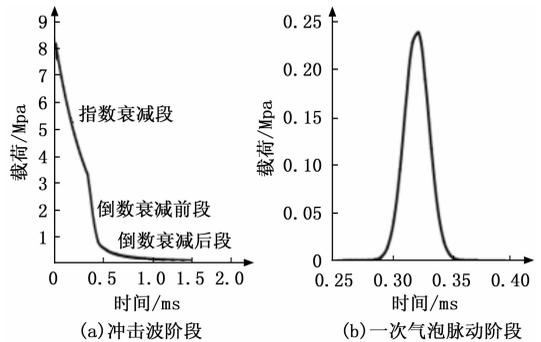


图 2 水下爆炸载荷时间历程

3.2 艇体塑性变形及破口

采用 ABAQUS 声固耦合算法^[20]开展仿真计算, 结果表明, 在水下爆炸冲击下, 潜艇迎爆面 (IV 舱中部正下方) 产生局部内凹塑性大变形, 其它位置未产生明显塑性变形, 如图 3 所示, 塑性变形区最大变形量为 0.246 m, 位于迎爆点处肋骨与相邻肋骨之间耐压壳体中间位置, 塑性变形区域遍及迎爆点处肋骨直至相邻两肋距区域, 约 2.4 m, 其中

迎爆点处肋骨最大塑性变形量为 0.236 m, 与迎爆点处肋骨相邻的第一根肋骨处最大塑性变形量为 0.150 m, 与迎爆点处肋骨相邻的第二根肋骨处最大塑性变形量为 0.040 m。

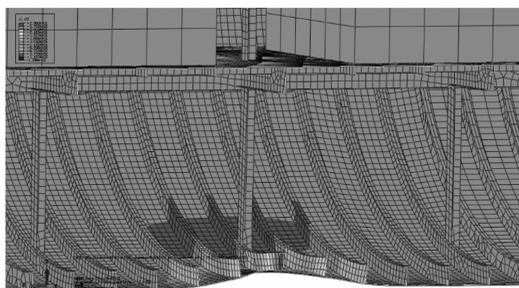


图 3 结构局部塑性变形剖视图

在迎爆点布设测点 A, 在 III 舱与 IV 舱之间的舱壁中部布设测点 C, 通过 A 点与 C 点位移历程的差值得出迎爆点的相对位移历程曲线, 如图 4 所示。由仿真结果可以发现, 迎爆点在冲击波加载阶段并未产生塑性变形, 仅产生了弹性范围内的微幅震荡, 而是在一次气泡脉动阶段产生较大塑性变形, 之后产生较大幅度震荡, 可见在实艇水下爆炸冲击响应分析中, 气泡脉动载荷的影响不可忽视, 这是因为潜艇作为细长的船体梁结构, 在外部冲击载荷下的垂向/横向振动效应明显, 整体弯曲振动产生的拉压载荷与外部冲击载荷联合作用下容易产生壳体局部应力超出弹性极限而产生塑性变形。

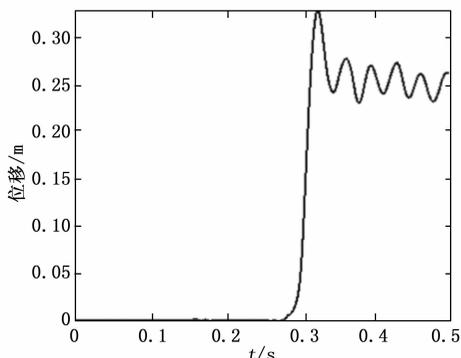


图 4 迎爆点位移历程曲线

3.3 潜艇刚体位移响应

潜艇在底部垂直方向受到水下爆炸冲击作用, 平面舱壁中部四周受到约束而不易产生垂向变形, 故以 III 舱与 IV 舱之间的舱壁中部测点 C 记录潜艇刚性位移响应, 如图 5 所示。

由仿真结果可以看出, 潜艇在冲击波载荷加载阶段刚性位移不明显, 刚性位移主要发生在气泡脉动载荷加载阶段, 在水下爆炸冲击后的 0.5 s 时间内产生了约 5 cm 左右的刚体位移。

在 II 舱下甲板中部布设加速度测点, 用于提取其垂向加速度响应, 仿真计算结果如图 6 所示。

冲击波加载阶段 (0~1.5 ms), 产生较大幅值的垂向加速度响应, 之后衰减, 在一次气泡脉动载荷加载阶段

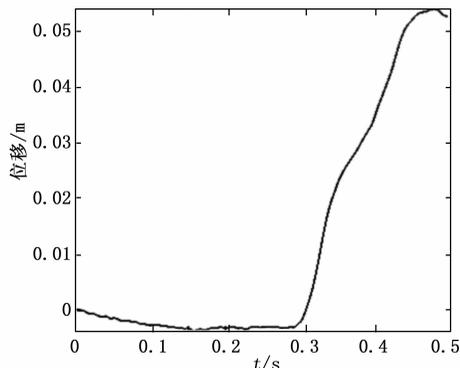


图 5 潜艇的刚体位移历程曲线

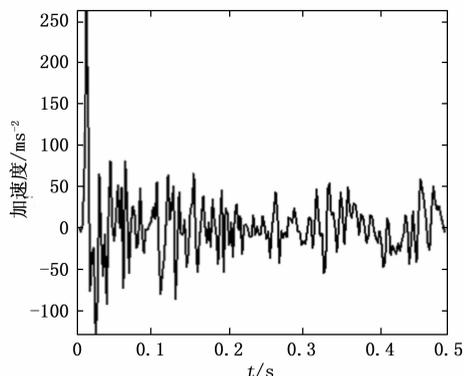


图 6 加速度测点响应历程曲线

(0.3~0.35 ms) 垂向加速度响应又有较大幅值的增长。

3.4 艇体“鞭状运动”重构

水下爆炸冲击下, 潜艇背爆面不易产生塑性变形, 在潜艇顶部耐压壳体与各舱壁交点处布设测点 B1~B7, 通过各测点与测点 C 的相对位移响应分析艇体的“鞭状运动”情况, 仿真结果如图 7 所示, 可以看出, 艇体从一次气泡脉动载荷加载中后段开始产生了明显的“鞭状运动”效应, 其振型为二阶模态, 这是冲击波载荷和气泡脉动载荷联合作用的结果。

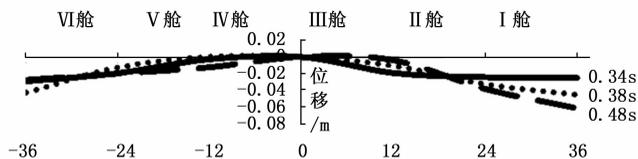


图 7 艇体“鞭状运动”效应

4 结束语

本文提出一种潜艇水下爆炸毁伤试验的综合测试测量方法, 分试验前、试验中和试验后 3 个阶段对测量要素进行了较为全面的分析, 并提出了相应的测点布设方案和试验数据处理方法, 通过仿真试验对综合测量与分析方法进行探讨, 通过分析可以发现, 在测试测量和数据分析时需着重注意以下几个方面问题:

1) 在依托计算机测量与控制开展的潜艇毁伤试验中, 应设置统一的时间度量, 便于数据处理与冲击响应分析。

2) 气泡脉动载荷虽然幅值不高,但在与冲击波载荷联合作用下会对结构冲击响应产生较大影响,在载荷测量中不可忽视,在冲击波压力和动态响应的测量中应设置足够的采集时长。

3) 在依托测点动态应变响应的数据测量与分析时,应避免冲击位移带来的影响;同样,在依托测点冲击位移的数据测量与分析时,应避免大的动态应变带来的影响。

本文较为全面地分析阐述潜艇毁伤试验测量与数据分析方法,对潜艇等水下结构物毁伤试验的开展具有较好的参考价值,但由于潜艇系统设备复杂,开展典型设备多参数测量并分析其联合作用下的失效机理是后续测量与分析研究的重难点。

参考文献:

[1] COLE R H. Underwater explosions [M]. Princeton: Princeton University Press, 1948.

[2] GEERS T L, HUNTER K S. An integrated wave-effects model for an underwater explosion bubble [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111 (4): 1584-1601.

[3] ISHII K, WATANABE N. Shock wave generation by collapse of an explosive bubble in water [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37 (3): 3653-3660.

[4] ZHANG A M, YANG W S, YAO X L. Numerical simulation of underwater contact explosion [J]. Applied Ocean Research, 2013, 34 (1): 10-20.

[5] LI S, LI Y B, ZHANG A M. Numerical analysis of the bubble jet impact on a rigid wall [J]. Applied Ocean Research, 2015, 50: 227-236.

[6] WANG L K, ZHANG Z F, WANG S P. Pressure characteristics of bubble collapse near a rigid wall in compressible fluid [J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 183-192.

[7] HAN R, ZHANG A, LIU Y. Numerical investigation on the dynamics of two bubbles [J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 325-338.

[8] 刘忠超,肖东岳,等. AVR 单片机控制的多轴机械臂系统设计 [J]. 自动化仪表, 2015, 36 (5): 40-42.

[9] 刘祚时,等. 红外传感器 PAJ7620 凌空手势快速识别方法 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (11): 140-144.

[10] LU Z, CHEN X, LI Q, et al. A Hand Gesture Recognition Framework and Wearable Gesture-Based Interaction Prototype for Mobile Devices [J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2014, 44 (2): 293-299.

[11] 刘恒,黄晓钰,等. 手势识别实验系统设计 [J]. 实验技术与管理, 2019, 36 (3): 92-97.

[12] CANAL G, ESCALERA S, ANGULO C. A real-time human-robot interaction system based on gestures for assistive scenarios [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2016, 149: 65-77.

[13] 刘雪花,洪琴,等. 基于数据手套的手势识别系统 [J].

[8] DARAMIZADEH A, ANSARI M R. Numerical simulation of underwater explosion near air-water free surface using a five-equation reduced model [J]. Ocean Engineering, 2015, 110 (12): 25-35.

[9] 吴宗锋,严谨,蒋颀,等. 基于 Mie-Grüneisen 状态方程的水下爆炸数值模拟 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (7): 29-33.

[10] YAO X, GUO K, CHEN Y, et al. A new experimental methodology to assess the wall pressure generated by a high-voltage underwater spark-generated bubble [J]. Results in Physics, 2019, 12: 571-574.

[11] YAO X L, CUI X W, GUO K, et al. An experimental approach to the measurement of wall pressure generated by an underwater spark-generated bubble by a Hopkinson Bar [J]. Shock and Vibration, 2019: 1-14.

[12] 李琛,王巍,刘文思. 水下爆炸作用下水面舰艇舰体结构毁伤测量方法 [J]. 水雷战与舰船防护, 2016, 24 (3): 45-48.

[13] 宋敬利,李琛,沈晓乐. 近场爆炸下舰船毁伤测量方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3690-3692, 3670.

[14] 张颖,赵生伟,王占江,等. 水下爆炸气泡脉动测量与分析 [J]. 实验力学, 2011, 26 (1): 67-72.

[15] 金辉,周学斌,周华,等. 水下爆炸中自由场压力和船体壁压的测量与分析 [J]. 海军工程大学学报, 2009, 21 (5): 82-87.

[16] 吴静波,汪玉,李兆俊,等. 实船水下爆炸冲击试验测量技术 [J]. 科技导报, 2009, 27 (14): 42-47.

[17] 高浩鹏,宋敬利,冯麟涵,等. 船用柴油机抗冲击试验中测点布设方法研究 [J]. 中国测试, 2016, 42 (5): 140-144.

[18] 徐功慧,李家波,赵红光,等. 水中兵器毁伤效能评估现状及发展 [J]. 工程爆破, 2016, 22 (2): 38-42.

[19] 宫国田,金辉,张姝红,等. 国外舰艇抗水下爆炸研究进展 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (增刊 1): 293-298.

[20] 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.

[21] 单片机与嵌入式系统应用, 2020 (6): 16-18.

[16] 姜彪,李荣正. 基于动态手势的人机交互系统的研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (8): 203-205.

[17] 张平,刘祚时. 基于惯性传感器 MPU6050 的手势识别方法 [J]. 传感器与微系统, 2018, 37 (1): 47-49.

[18] AKL A, FENG C, VALAEE S. A novel accelerometer-based gesture recognition system [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59 (12): 6197-6205.

[19] QIAN K, NIU J, YANG H. Developing a gesture based remote human-robot interaction system using kinect [J]. International Journal of Smart Home, 2013, 7 (4): 203-208.

[20] 徐军,刘春花,等. 可穿戴手势识别控制器木 [J]. 电子技术应用, 2016, 42 (7): 69-71.

[21] 文小冬,裴以建,等. 基于 APP 操控平台的手势识别机械臂控制系统 [J]. 现代电子技术, 2018, 42 (22): 72-74.

[22] 孙亚星,黄帅铭,等. 基于电容传感器的手势识别系统设计 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (2): 10-13.