

水下爆炸冲击试验海上测控系统设计与实现

韩大伟, 董金鑫, 黄伟佳, 朱广成

(辽宁某部, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为解决装备水下爆炸冲击毁伤海上试验数据采集与安全风险控制难题, 依托试验保障平台构建水下爆炸冲击试验海上测控系统, 对应变、加速度、冲击波压力和视频图像等数据采集分系统开展模块化设计, 制定相关试验流程、试验安全防护和风险控制方案, 码头联调后开展海上实装水下爆炸冲击试验测试, 试验后对测控系统可靠性、试验保障平台各设备安全性进行查验, 查验结果表明, 采取的抗冲击防护措施可行, 该测控系统稳定可靠、安全可控, 能有效实现单次毁伤试验中多方位多要素数据采集与存储, 同时指出了本次测试试验存在的不足以及后续海上实装水下爆炸冲击试验需重点关注的问题, 可为后续装备水下爆炸冲击毁伤试验的开展提供有力的经验参考及保障条件支撑。

关键词: 水下装备; 爆炸冲击; 毁伤试验; 测量控制; 系统设计

Design and Realization of the Underwater Explosion Test Measuring and Control System on the Sea

HAN Dawei, DONG Jinxin, HUANG Weijia, ZHU Guangcheng

(A Certain Department in Liaoning, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to solve experimental data collection and safety risk control in underwater explosion impact and damage sea tests of equipment, an underwater explosion test measuring and control system on the sea based on the test guarantee platform is presented. Design the modular data acquisition subsystems of the strain, acceleration, shock wave pressure, and video images, develop the experimental procedures, safety protection, and risk control. After the joint debugging of the dock, conduct the underwater explosion impact testing on the sea, and inspect and verify the reliability of the measurement and control system as well as the safety of all equipment on the platform after the test. The verified results show that, the proposed anti-impact protections are feasible, the test system runs stably, reliably, safely and controllably, which can effectively achieve multi-dimensional and multi-element collection and storage in a single damage test, also points out the shortage of the test and the issues to noted in subsequent underwater explosion impact tests, and provides a strong reference and guarantee support to subsequent underwater explosion impact and damage tests at the sea.

Keywords: underwater equipment; explosive impact; damage test; measure and control; system design

0 引言

近年来, 各海军强国对水下战场主动权的争夺日趋激烈, 为加快形成水下体系作战能力, 各式各样的水下攻防、情报收集、兵力输送等装备应运而生。为有效检验水下装备的战场生存能力, 亟需开展水下爆炸冲击试验场建设, 而可靠高效的海上测量控制系统又是建设的重点和难点。

以往文献对水下爆炸试验与测量开展了大量探索^[1-20], 对后续研究提供了很多有益的借鉴。宫国田等^[1]分析了国外舰艇抗水下爆炸研究, 指出西方国家早在 20 世纪就曾开展了多次潜艇的水下爆炸冲击毁伤试验, 但因保密因素公开的文献资料很少; 徐功慧等^[2]分析了我国水下爆炸毁伤效能试验与评估的现状, 指出试验结果可信度受多种因素制约, 亟需开展贴近实战的水下爆炸冲击毁伤试验以获取更多试验数据; 程素秋等^[3]总结分析了实船爆炸试验测量

需求和测量平台需求, 对兵器打靶和舰船抗冲击两种类型试验的测量规模开展讨论分析, 得出中型舰船毁伤评估试验的测量规模; 张姝红等^[4]开展了大当量集团装药水中沉底爆炸试验, 得到此工况下冲击波传播和气泡脉动特性, 以及爆炸测量方位角对海底反射效果的影响; 李亚伟等^[5]利用声固耦合算法研究了爆炸冲击载荷下无线起爆浮标动力响应, 研究结构可为无线起爆浮标结构及器件舱设备安装基座的抗冲击设计提供参考; 伍星星等^[6]为探究舷侧近距离爆炸对水面舰船的毁伤效应, 设计大尺度舱段模型, 开展了舷侧近距离水下爆炸试验并测量了舱段模型破坏范围及破坏模式、模型典型部位冲击环境数据、典型部位动态响应, 研究成果对舰船抗爆防护具有较好的指导意义; 杨棣等^[7]针对水面舰艇底部结构设计双层底缩比试验模型并开展水下爆炸冲击试验, 总结双层底结构在近场及接触

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2023-11-10。

基金项目: “十三五”专项项目(2019HJHS26)。

作者简介: 韩大伟(1986-), 男, 博士, 工程师。

引用格式: 韩大伟, 董金鑫, 黄伟佳, 等. 水下爆炸冲击试验海上测控系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 217-222.

爆炸载荷作用下的损伤模式；陈娟等^[8]针对典型水面舰船底部结构，设计双层板架结构试验模型和试验工况，进行水下近场爆炸试验研究，获得双层底结构的毁伤破坏模式及结构整体与局部的破坏、变形情况；宫国田等^[9]建立了冲击响应谱的数学模型，研究了用采样因子表征冲击响应谱的绝对误差与相对误差的变化规律，得出一种实船爆炸试验测量系统指标特性；张阿漫等^[10]从理论研究、数值模拟和实验研究等方面综述水下爆炸载荷及其对舰船毁伤的研究进展，并在此基础上提出未来需要进一步展开的研究工作；潘建强等^[11]对水下爆炸条件下近药包表面能量测试技术开展研究，验证了飞片速度测量系统的有效性；宋敬利等^[12]分析了近场爆炸作用下舰船的毁伤测量的关键环节，提出采用气液缓冲器作为缓冲原件对测量设备进行缓冲防护，并通过实际测试验证了该方法的可行性；姚熊亮等^[13]利用 Hopkinson 杆设计了一种评估高压电爆气泡载荷的新的试验方法和测试系统，并对一系列水下电爆气泡引起的壁压进行了测量试验^[14]，但该测量系统和方法难以推广到开阔水域大当量水下爆炸试验测量工程应用；吴静波等^[15]从实船测量需求、测点管理、测量控制和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控制系统的设计提供了较为完整的基础框架；宋敬利等^[16]分析了近场爆炸下舰船毁伤测量的关键环节，重点突出了缓冲器对测试模块的抗冲击防护作用；李琛等^[17]提出一种针对舰体结构薄弱的测点优化布置方案，可为水面舰体结构毁伤测量提供参考；金辉等^[18]对水下爆炸下船体壁压和自由场压力开展测量分析，研究了冲击波入射角度与船体壁压反射系数的关系；高浩鹏等^[19]依据仿真结果给出了一种船用柴油机抗冲击试验测点布设方案，计算结果准确度需进一步评估；韩大伟等^[20]提出一种潜艇水下爆炸毁伤试验的综合测试测量方法，对测量要素进行了较为全面的分析论述。目前，我国在水下装备抗水下爆炸毁伤试验与评估方面与西方国家差距还很大，设计与实现水下爆炸冲击试验海上测控系统，加快推进贴近实战条件的海上毁伤试验场建设，具有重要的应用价值和军事价值。

本文依托试验保障平台对水下爆炸冲击试验海上测控系统开展模块化设计搭建，对应变、加速度、冲击波压力和视频图像等数据采集分系统开展模块化设计，对该测控系统的可靠性、安全性和有效性开展海上实装水下爆炸冲击试验测试，并指出了后续试验需要注意的问题，旨在为后续装备水下爆炸冲击毁伤试验的开展提供借鉴和参考。

1 测量控制系统总体设计

海上实装或模型水下爆炸冲击试验目的是为摸清装备贴近实战条件下的抗爆抗冲击性能边界，基于此目的，水下爆炸工况往往涉及大当量装药的近场爆炸，被试装备遭受破坏性的同时，试验人员、数据采集存储设备的安全性也面临巨大考验。将测控系统的主控中心迁移至远离海上爆炸点的岸基并通过无线手段与海上测试终端互联，可有效保证试验人员安全；通过搭建海上试验保障平台为前端测

试测量设备提供布放场所，同时为设备提供必要的抗冲击保护措施。

测控系统由主控中心、无线传输控制模块、应变数据采集模块、加速度数据采集模块、压力数据采集模块、视频图像采集模块和数据存储模块等部分组成，各数据采集与存储模块位海上试验保障平台布设，主控中心位岸基指挥所布设，通过无线传输控制模块与海上各模块之间的互联互通，并通过同步时钟盒对各数据采集设备统一授时，实现对试验过程数据的同步采集存储与状态监控。测控系统总体架构如图 1 所示。

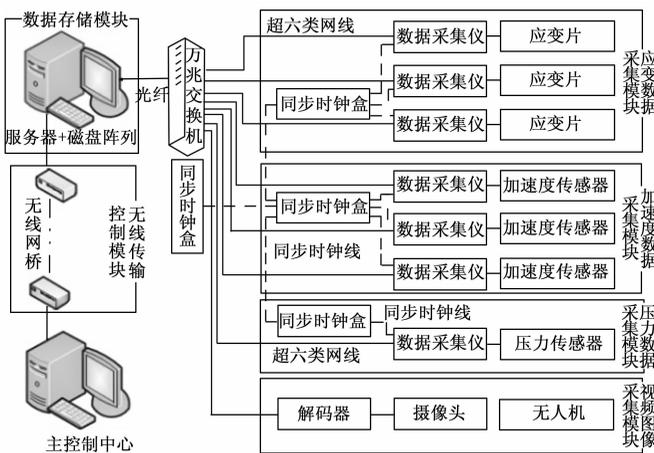


图 1 测控系统总体架构图

数据采集与存储模块主要集中布设在测量集装箱内，集装箱通过减振基座与试验保障平台甲板连接。试验保障平台采用双层底设计，双层底之间为抗爆水舱，试验前抗爆水舱注满水。试验中，试验保障平台位海上抛锚，平台设备舱内柴油机发电机组保持运行状态，为各测试测量设备提供 AC220V 不间断电源；平台甲板上两台绞车和两套液压式吊臂用于水下爆炸冲击试验模型的吊放和回收。

系统采用试验测控平台及潜艇冲击环境计算及校准专用软件，能够同时处理加速度、应变等多种测试数据，可与各测量子系统数据处理软件进行数据同步、格式兼容，主要功能包括：测量设备的初始化、设置、复位、同步触发、采集、存储、传输的软硬件连接和控制功能；对整个试验过程的控制和系统管理、用户管理；试验的数据库管理，建立包括试验模型信息、试验仪器、环境数据、标定数据、测量原始数据、试验结果数据等试验信息的数据库系统；试验数据自动传输至数据库中，并且图形化显示，直观地观察试验数据变化，便于监视试验过程；具有试验数据的积分、谱分析等时域分析和频域分析功能，并具备用户专用子程序接口；可对数据进行多维度索引调用等。

2 测量控制系统各模块功能与组成

2.1 应变数据采集模块

应变数据采集模块主要用于测量试验保障平台和试验模型结构弹性和塑性变形情况，包括高速动态数据采集仪、

应变片若干。应变片电阻 $120\ \Omega$, 量程 $\pm 50\ 000\ \mu\text{E}$, 数量根据试验测点需求确定; 高速动态数据采集仪采样频率 $\geq 1\ \text{MS/s}$, 通道数根据所需应变片数量确定。本次应变数据采集模块使用的为 32 通道高速动态数据采集仪, 如图 2 所示。



图 2 32 通道高速动态数据采集仪

2.2 加速度数据采集模块

加速度数据采集模块主要用于测量主甲板和设备舱内重要设备基座处的冲击环境和冲击响应, 包括高速动态数据采集仪、加速度传感器若干。加速度传感器量程 $20\ 000\ \text{g}$, 数量根据试验测点需求确定; 高速动态数据采集仪采样频率 $\geq 128\ \text{kS/s}$, 通道数根据所需加速度传感器数量确定。本次加速度数据采集模块使用的高速动态数据采集仪型号与应变数据采集模块所使用的相同, 如图 3 所示。

2.3 压力数据采集模块

压力数据采集模块主要用于测量水下爆炸自由场压力, 同时监控炸药爆轰情况, 包括压力数据采集仪、压力传感器若干, 压力传感器与爆源等深度布置, 量程 $200\ \text{MPa}$; 数据采集仪采样频率 $\geq 1\ \text{MS/s}$, 通道数根据所需压力传感器数量确定。本次压力数据采集模块使用的 10 通道压力数据采集仪, 如图 3 所示。



图 3 10 通道压力数据采集仪

2.4 视频图像采集模块

视频图像采集模块主要用于试验过程中对各平台、设备的状态监控, 以及收集存储试验场景视频图像资料, 包括摄像头和视频解码器 1 套、无人机 2 架。其中, 摄像头采样频率 $\geq 8\ 300\ \text{S/s}$, 摄像头和视频解码器安装布置在试验保障平台集装箱内, 如图 4 所示; 无人机位试验海域侧上方空域机动, 无线传输距离 $\geq 15\ \text{km}$, 抗风等级 ≥ 6 级, 续航时间 $\geq 5\ \text{h}$, 摄像头 $2\ 000$ 万像素。

2.5 数据存储模块

数据存储模块主要用于对应变、压力、加速度、视频

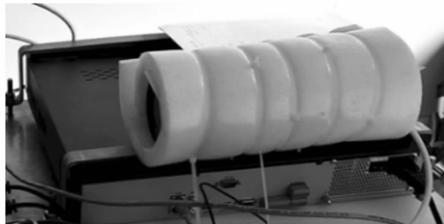


图 4 摄像头和视频解码器

等数据信号的实时存储, 主要设备为一套大容量磁盘阵列, 容量 $\geq 25\ \text{T}$, 安装布置于试验保障平台集装箱内, 如图 5 所示。



图 5 磁盘阵列

2.6 无线传输控制模块

无线传输控制模块主要用于通过岸基主控中心实现对试验保障平台上各数据采集模块的远程参数设置和操作控制, 由发射端和接收端组成, 分别安装布置于岸基指挥所和试验保障平台上, 传输距离 $8\ \text{km}$, 数据传输带宽 $700\ \text{Mbps}$ 。

3 海上实装爆炸冲击试验测试

3.1 试验流程

海上实装爆炸冲击试验主要分试验准备、试验实施和试验撤收 3 个阶段。

试验准备阶段主要完成测量控制系统各模块在试验保障平台集装箱内的安装及调试、测量传感器的布置及信号测试、试验保障平台各配套设备的状态检查、试验保障平台吃水调整、爆源定位装置和起爆线缆等其它准备工作。

试验实施阶段主要包括以下几个步骤: 1) 试验人员按分工部署就位; 2) 拖船将试验保障平台拖带至预定试验海域; 3) 开启试验保障平台柴油机发电机组等设备; 4) 试验保障平台定位锚泊; 5) 试验模型悬吊固定; 6) 测控系统开机调试; 7) 交通艇将起爆线缆拖带至试验保障平台; 8) 安装爆源定位装置; 9) 指挥部下达关闭无线通讯指令, 试验人员关闭无线网桥; 10) 炸药组装、连接起爆线缆并吊放入水; 11) 指挥部下达开启无线通讯指令, 试验人员开启无线网桥, 远程调试测控系统; 12) 爆破员完成起爆前准备, 人员撤离试验保障平台; 13) 指挥部下达起爆指令, 起爆员起爆, 试验人员记录保存试验数据, 无人机拍摄采集记录试验过程视频图像。

试验撤收阶段主要包括以下几个步骤: 1) 回收爆源定位装置、起爆线缆和试验模型等; 2) 试验保障平台起锚, 初步检查平台水密情况, 停止柴油机发电机组及其它电气

机械设备；3) 拖船将试验保障平台拖带回码头，回收测量控制系统，系统检查设备和平台各处损伤情况并视情开展修复。

3.2 试验安全防护及风险控制

被试系统安全防护：1) 被试系统的安装固定应严格按照产品技术要求；2) 被试系统作业施工时，应注意对被试系统采取防护措施；3) 所有试验工装在试验保障平台焊接固定后应及时在现场对焊接质量进行强度检查；4) 按规定路径登离试验保障平台，严禁随意攀爬被试系统；5) 针对试验模型承受水下爆炸能量较大的部位采取局部加强措施；6) 针对试验模型设计制造专用试验工装，用于试验过程中的浮力调整，利用抛弃固定载荷、排水等措施，防止试验模型沉没；7) 试验模型增加悬挂浮筒，提高浮力储备。

试验作业安全防护：1) 火工品作业由专业资质人员实施，其余参试人员不得接触、搬运火工品；2) 火工品作业为每次开展水下爆炸试验前最后一步，火工品作业开展前，任何无关人员不得擅自靠近；3) 火工品作业后，必须待专业人员确定火工品爆炸完全后，参试人员方能进入试验海域；4) 试验前后气割、焊接和起吊转运等特种作业，必须由专业人员按操作规程开展；5) 开始试验前应注意及时关闭试验保障平台舱口盖、通风口及测量集装箱门，防止海水飞溅进入试验保障平台或测量集装箱内部对测控系统或其他设备造成不必要的损害，对暴露在平台甲板等处的线缆、传感器等也要做必要的防护措施；6) 试验海区深度不宜超过 50 米，便于在极端异常情况下对试验模型进行搜索定位和打捞回收；7) 试验期间专职专岗、专人操作，所有参试人员必须听从指挥组的统一指挥；8) 根据海区当面态势、水文等情况，合理选择试验保障船只就位点；9) 试验过程中涉及炸药操作、炸药控制的安全隐患，单独拟制详细的风险评估和安全预案；10) 成立应急指挥小组，如发生突发事故，随时叫停试验并报告指挥组，现场试验人员在应急指挥小组的指导下开展处置工作；11) 被试装备和陪试装备的运输、拖带、吊放、回收等操作，要严格按照有关规定执行，严禁超负荷、超海况作业；12) 试验数据的采集、存储、处理，严格落实安全保密相关规定要求。

试验人员安全防护：1) 所有参试人员进入试验海域必须正确穿着救生衣；2) 试验过程中严禁吸烟；3) 参试人员不得随意操作本职工作范围以外的设备、设施；4) 参试人员不得使用个人电子产品对试验现场进行拍摄；5) 试验中的影像资料，只能由指定人员摄录；特殊情况需其他人员摄录时应经批准，所得影像资料应交指定人员处理；6) 试验前需制定试验安全保障措施与应急预案，对参试人员进行安全教育，设立安全监督岗；7) 执行水上作业的人员，必须穿着救生服；8) 起吊过程中，无关人员远离起吊产品，牵引绳操作员务必防止产品晃动；9) 制定专项试验保密工作方案，对参试人员进行保密教育，设立保密监督岗，防止泄密事件发生。

试验保障平台沉没风险控制：1) 爆源起爆后 15 分钟

内人员不可登上试验保障平台，时刻观察平台状态，待状态稳定后人员乘坐小艇靠近平台进行状态检查；2) 若试验保障平台结构破损，出现平台设备舱内少量漏水等短时不会造成平台沉没的情况，由拖船拖带平台至岸边，试验后安排人员进行修复；3) 若试验保障平台出现大面积破损、沉没，待水流状态稳定后，在平台吊钩上或其他强结构部位连接大型气囊，然后切断平台平衡锚。向大型气囊充压，待平台浮出水面后，由拖船拖带至安全区域进行修复。

试验模型沉没风险控制：试验过程中若发生异常情况，先通过水声通信执行抛除固定载荷指令，抛载失效的情况下通过声信标对试验模型进行定位，再通过相关措施进行准确定位，固定牵引绳后通过试验保障平台的吊车进行打捞并捆绑浮球直至试验模型为正浮力状态，由拖船缓慢拖曳回收至码头。

3.3 部分试验结果与分析

水下爆炸冲击试验海上测量控制系统搭建调试完毕后开展了海上实装试验测试，如图 6 所示。



图 6 海上实装水下爆炸冲击试验图

水下爆炸冲击试验主要对冲击波压力、结构应变和加速度响应等数据进采集分析，验证海上测控系统可靠性及试验保障平台结构和设备安全性，试验后经查验，试验过程安全顺利，各设备远程控制、数据采集传输存储、试验指挥协同、安全保护等功能正常；对试验数据回放分析表明，数据记录完整有效，无人机采集试验过程图像清晰、视频连贯。自由场压力传感器与炸药等深度布设，测得的自由场压力历程曲线如图 7 所示。

试验保障平台承受水下爆炸冲击因子 0.6，试验测得的平台甲板典型部位应变历程曲线如图 8 所示。试验保障平台主体结构材料弹性模量 210 GPa，屈服应力约 345 MPa，由图 8 可知，试验保障平台甲板典型部位的应变响应峰值约 $585.5 \mu\epsilon$ ，折算应力响应约为 123 MPa，未超过材料屈服极限，试验后检查平台底部、舷侧、甲板等部位无明显变形，各设备开机检查运行良好。

试验保障平台设备舱内重要设备安装在减振筏架上，减振筏架通过减振器与下方设备基座连接，以减缓水下爆炸对设备的冲击；数据采集设备布置在测量集装箱内，测量集装箱通过减振器与底部安装基座连接，以减缓水下爆炸对测量集装箱内部数据采集设备的冲击。在试验保障平台设备舱重要设备基座和筏架、测量集装箱安装基座和地

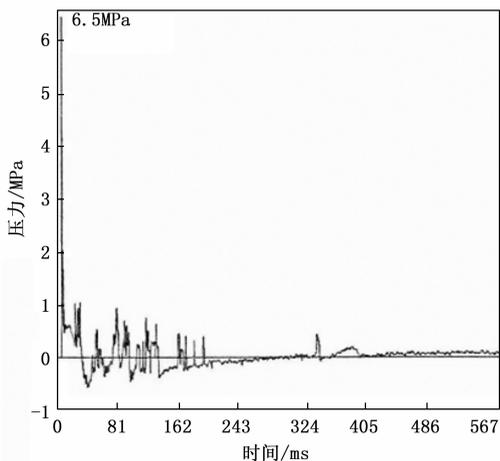


图 7 自由场压力历程曲线图

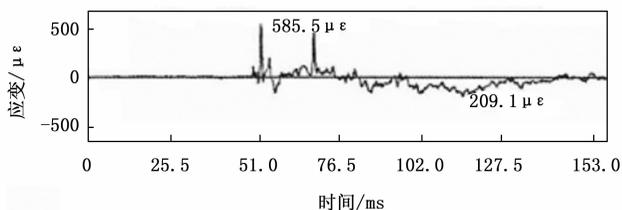


图 8 甲板典型部位应变历程曲线图

板等位置安装加速度传感器, 测量垂向加速度响应, 观察各设备遭受水下爆炸冲击后工作情况, 分析各减振器对水下爆炸冲击的缓冲减振效果, 各测点加速度峰值测试结果见表 1。

表 1 加速度峰值测试结果列表

编号	测点位置	测量方向	加速度峰值/g
A1-1	设备 1 安装基座	Z	263.1
A1-2	设备 1 安装筏架	Z	23.8
A2-1	设备 2 安装基座	Z	267.5
A2-2	设备 2 安装筏架	Z	12.4
A3-1	设备 3 安装基座	Z	175.3
A3-2	设备 3 安装筏架	Z	16.1
A4-1	测量集装箱安装基座	Z	104.0
A4-2	测量集装箱地板	Z	3.8

从表 1 可以看出, 在冲击因子 0.6 的水下爆炸冲击载荷作用下, 试验保障平台重要设备和测量集装箱安装基座处测点加速度响应峰值在 100~300 g 范围内, 经过各基座上方减振器的缓冲, 各设备筏架和测量集装箱地板处测点加速度响应峰值降低幅度均在 90% 以上, 平台各设备的抗冲击安全性得到有效提高, 测量集装箱内冲击加速度响应峰值 3.8 g, 小于交换机、服务器等数据采集存储设备的抗冲击指标, 数据采集设备的抗冲击安全性得到了有效保证。

试验过程安全顺利, 冲击因子 0.6 水下爆炸工况下试验保障平台强度、稳性及各设备性能未受显著影响, 主要有以下几个方面原因:

1) 试验保障平台采用近似方形的甲板面设计, 在相同排水量情况下可获得更好的稳性和总纵强度。

2) 试验保障平台采用双层底设计, 外底和内底之间注满水作为抗爆水舱, 自身重要设备均通过减振基座与平台连接, 部署测控系统的集装箱也通过减振器与平台基座连接, 有效减缓了水下爆炸冲击的影响。

3) 炸药和试验模型在试验保障平台舷侧吊放, 有效弱化了水下爆炸射流、水塚效应等对试验保障平台强度和稳性的影响。

4 结束语

本文对水下爆炸冲击试验海上测控系统开展模块化设计构建, 并开展了海上实装水下爆炸冲击试验测试。试验后对各项测试结果查验表明, 该测控系统稳定可靠, 试验流程清晰、试验分工明确, 试验中多方位多要素数据采集与存储协同一致、完整有效。

本文设计搭建的水下爆炸冲击试验较好地通过了海上实装试验测试, 在试验安全风险管控、试验组织指挥和数据采集等方面对后续水下结构物毁伤试验的开展提供了较好的经验借鉴与条件保障。但本次测试试验吊放的试验模型尺度较小且在试验保障平台舷侧吊放, 在后续开展位试验保障平台下方吊放的大尺度模型试验时, 还需充分分析论证水下爆炸射流、气泡脉动、水塚等对该整个测控系统的影响, 并合理控制水下爆炸安全距离。

参考文献:

- [1] 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 (s1): 293-298.
- [2] 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.
- [3] 程素秋, 董俊哲, 张姝红. 实船爆炸实验测量规模需求探讨 [J]. 水雷战与舰船防护, 2007, 15 (2): 12-15.
- [4] 张姝红, 金 辉. 大当量集团装药水中沉底爆炸特性试验研究 [J]. 舰船电子工程, 2023, 43 (5): 199-202.
- [5] 李亚伟, 雷 宇, 李志文, 等. 爆炸冲击载荷下无线起爆浮标动力响应研究 [J]. 舰船科学技术, 2023, 45 (2): 52-59.
- [6] 伍星星, 刘建湖, 汪 俊, 等. 舷侧近距离爆炸下舱段模型毁伤试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40 (11): 76-87.
- [7] 杨 棣, 姚熊亮, 张 玮, 等. 水下近场及接触爆炸作用下双层底结构损伤试验研究 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (2): 161-165.
- [8] 陈 娟, 吴国民. 船底双层板架结构水下近场爆炸试验 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14 (s1): 143-150.
- [9] 宫国田, 程素秋. 实船爆炸试验测量系统指标特性研究 [J]. 爆破, 2013, 30 (4): 5-8.
- [10] 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.
- [11] 潘建强, 盛振新, 毛海滨, 等. 水下爆炸条件下近药包表面能量测试技术研究 [J]. 中国测试, 2016, 42 (10): 1-8.
- [12] 宋敬利, 李 琛, 沈晓乐. 近场爆炸作用下舰船毁伤测量方

法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3690 - 3692, 3700.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

(上接第 216 页)

泵测控系统的有效性, 并未对系统的实际应用效果进行分析, 后续可加以改进。

参考文献:

[1] 田 磊, 王江江, 赵 磊, 等. 级联型潜热储存耦合热泵系统性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45 (3): 571 - 578.

[2] TAO H, HUASHAN S, FENG H, et al. Studies on the Temperature Control System of the Geothermal-Source Heat Pump under Different Modes [J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2020, 13 (3): 583 - 594.

[3] 李子坤, 孙育英, 王 伟, 等. 实际空气源热泵供暖系统容量超配问题测试与分析 [J]. *建筑科学*, 2023, 39 (12): 114 - 119.

[4] 赵彤航, 王俊光, 田蜀东, 等. 混合动力轿车热泵系统 NVH 控制技术研究 [J]. *汽车工程*, 2024, 46 (2): 337 - 345.

[5] LIU C, WANG Y, ZHANG M, et al. The investigation of a fuzzy-internal mode PID-based temperature control system for solid state electric storage heaters [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2023, 23 (5): 2579 - 2593.

[6] 章颖缤, 周 宇, 刘 琰, 等. 超临界二氧化碳—高温热泵联合储能发电系统设计及分析 [J]. *热力发电*, 2024, 53 (4): 53 - 62.

[7] 于 琪, 张 静. 参数在线调整的模糊自适应 PID 控制研究 [J]. *工业控制计算机*, 2024, 37 (3): 119 - 121.

[8] 李 波, 杨 炯, 李 宁, 等. 基于 PID 算法的输电线路无人机巡检路径智能自动规划技术 [J]. *微型电脑应用*, 2023, 39 (11): 174 - 177.

[9] 吕悛萌. 基于 PID 控制的防抱死制动系统实现研究 [J]. *微型电脑应用*, 2023, 39 (9): 163 - 166.

[10] 邵正日, 刘 龙, 梁金广, 等. 太阳能应用于土壤源热泵低温热源侧的实验研究 [J]. *可再生能源*, 2023, 41 (12): 1596 - 1604.

[11] 李磊磊, 陈 波, 李家春, 等. 高效空气源热泵式烤房优化设计 [J]. *中国农机化学报*, 2024, 45 (3): 81 - 89.

[12] 郭焱华, 邵双全, 李 浩, 等. 基于数据驱动研究空气源热

泵除霜效果研究 [J]. *工程热物理学报*, 2024, 45 (3): 628 - 634.

[13] 谭 心, 吴林锋, 虞启辉, 等. 基于 ANFIS 的太阳能—空气源热泵供暖系统温度控制研究 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45 (2): 16 - 22.

[14] 冯国会, 贾 敏, 张 磊, 等. 严寒地区空气源热泵耦合电磁能系统模拟运行研究 [J]. *沈阳建筑大学学报 (自然科学版)*, 2024, 40 (2): 322 - 329.

[15] ISLER Y, SAHIN S, EKREN O, et al. Design of microcontroller-based decentralized controller board to drive chiller systems using PID and fuzzy logic algorithms [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2020, 234 (1): 98 - 107.

[16] 李函龙, 聂金哲, 张 喆. 低环境温度空气源热泵适用环保工质研究 [J]. *建筑科学*, 2024, 40 (2): 38 - 48.

[17] CHU C W, ZHU Z C, BIAN H T, et al. Design of self-heating test platform for sulfide corrosion and oxidation based on Fuzzy PID temperature control system [J]. *Measurement and Control*, 2021, 54 (5-6): 1082 - 1096.

[18] 吴 鑫, 王 乐, 王娟芳, 等. 中深层地热耦合水源热泵冬季梯级供热系统性能优化 [J]. *建筑科学*, 2024, 40 (2): 56 - 62.

[19] 梁梦莹, 胡 山. 基于模糊自整定 PID 的双容水箱串级液位控制系统研究 [J]. *自动化应用*, 2024, 65 (3): 206 - 208.

[20] 陈 星, 曹太强, 邓元果. 基于改进跟踪微分器与前馈的模糊自适应 PID 控制 [J]. *控制工程*, 2024, 31 (3): 553 - 559.

[21] 祖文超, 高亚南. 太阳能—地源热泵式空调自适应模糊 PID 复合控制方法 [J]. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 2024, 55 (1): 123 - 130.

[22] 张智超, 闵淑辉, 廖 凯, 等. 基于改进模糊 PID 果园双轮移动机器人运动控制 [J]. *农机化研究*, 2024, 46 (7): 14 - 20.

[23] 段亮亮, 王 刚. 基于 PID 模糊控制的煤矿主运胶带机控制系统研究 [J]. *能源与环境*, 2023, 45 (5): 230 - 235.

[24] YAHYA S, AL TAHTAWI A R, WIJAYANTO K, et al. Adaptive fuzzy-pid controller for liquid flow control in the heating tank system [J]. *International Journal of Integrated Engineering*, 2022, 14 (1): 173 - 180.