

存储式高速大容量水下冲击波测试系统研究

殷梓程, 王代华*

(中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 在爆炸毁伤环境下, 存储式冲击波测试设备具有可靠性高的优势, 近年来在地面试验中得到了广泛应用。由于水下测试存在诸多困难, 目前尚无专门针对水下冲击波的存储式冲击波测试专用设备。本文基于存储测试原理, 开展了适于水下冲击波测量的高速大容量存储测试系统的研究。该系统采用FPGA作为主控制器, 选用了高速AD和大容量FLASH存储器, 重点解决现有存储式冲击波测试设备采样频率提升至10 MHz时带来的快速数据缓存问题, 以满足水下测试的指标要求。该系统增加了工作参数编程、工作状态监测、定时启动等功能, 提高了水下适用性。试验表明, 存储式冲击波测试系统能完整地记录水下爆炸所产生的冲击波超压变化的全过程, 满足水下超压测试的相关要求。

关键词: 水下冲击波测试; 高速采样; 大容量存储; FPGA; 存储测试; FLASH

中图分类号: TJ410.6

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.01.0016

引用格式: 殷梓程, 王代华. 存储式高速大容量水下冲击波测试系统研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(2): 177-183.

YIN Zicheng, WANG Daihua. A underwater shock wave test system with high-speed sampling and large-capacity memory[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(2): 177-183.

A Underwater Shock Wave Test System with High-Speed Sampling and Large-Capacity Memory

YIN Zicheng, WANG Daihua*

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the explosion damage environment, the stored shock wave test device has the advantage of high reliability, which has been widely used in ground tests in recent years. Due to the difficulties in underwater testing, there are no special stored shock wave test device for underwater shock waves at present. Based on the stored test principle, a test system suitable for underwater shock wave measurement with high-speed sampling and large-capacity memory was researched. A FPGA was used as the main controller, and a high-speed AD converter with a large-capacity FLASH memory was selected. The focus of the paper was to solve the problem of fast data storage caused by raising the sampling frequency to 10 MHz in current stored shock wave test device, and to meet the index requirements of underwater testing. Functions such as work parameter programming, work status monitoring, and timing start were added to improve the underwater suitability. The test results show that, the stored shock wave test system can completely record the entire process of shock wave overpressure changes caused by underwater explosion, and which can meet the requirements of underwater overpressure testing.

收稿日期: 2025-01-16

作者简介: 殷梓程(1997—), 男, 硕士生, 主要从事动态测试技术的研究。

* 通信作者: 王代华(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事动态测试技术的研究。E-mail: wangdaihua@nuc.edu.cn。

Key words: underwater shock wave test; high-speed sampling; large-capacity memory; FPGA; stored test; FLASH

0 引言

水下爆炸过程分为多个阶段,研究起来十分复杂,建立一个精确的数学模型并完全解析十分困难,因此进行试验研究非常必要,但也困难重重。当前可查阅到的相关工作研究很少,赵生伟等^[1]采用PCB压电传感器感知冲击波信号,外接防水电缆,利用小当量PETN球形炸药进行了水下爆炸实验;韦爱勇等^[2]提出水下小隔板测试法,减少了炸药用量,提高了安全性;马锦垠等^[3]提出了一种分布式爆炸测量系统,完成了多通道水下爆炸试验;胡宗元^[4]设计了一款满足中小型水下爆炸超压测试和应变测试的实验设备,测试系统由起爆器、示波器、电荷放大器、应变仪、压电传感器及应变传感器等组成;李科斌等^[5]提出了一种压导式连续电阻丝探针法,不借助压力传感器,使用压通电阻丝得到压力信号,利用高速采集仪采集数据。以上文献表明,目前水下冲击波的测试方法仍然停留在引线电测法上,普遍采用传感器与通用数采设备分离的测试方案,以满足在水下环境中实现高速采样率的要求。然而,这种方法在水中组建系统异常困难,尤其是在深水环境下,依托浮标承载数采设备部分负担重且抗冲击和防水都很困难,同时随着引线长度的增加会加剧信号衰减和噪声耦合,导致信噪比降低,水中引线电测法的精确性和适用性亟待提高。

为了解决引线电测法在水下冲击波测试试验中的诸多不便,本文借鉴当前地面试验中适用性较强的存储测试^[6-13]方法,充分发挥存储式测试设备体积小、重量轻、功耗低、可密封、信号传输距离短的优势,设计了一种适于水下冲击波测量的存储式冲击波测试设备。该设备在浅水环境时可掩埋于水底地面防护,只需将传感器敏感面暴露在爆炸场内,在深水环境时可搭载小型浮标防护,着重提高其抗冲击和防水性能,从而可实现对水下冲击波的可靠测量和记录,为水下冲击波传播机理研究和毁伤效能评估提供数据支撑。

1 系统总体设计

测试系统主要由测试仪与上位机组成,总体

如图1所示。测试仪由传感器、电信号调理与模数转换模块、主控模块、存储模块、USB 3.0和电源模块组成,经一体化灌封后可嵌入现场独立完成冲击波信号的采集和记录。

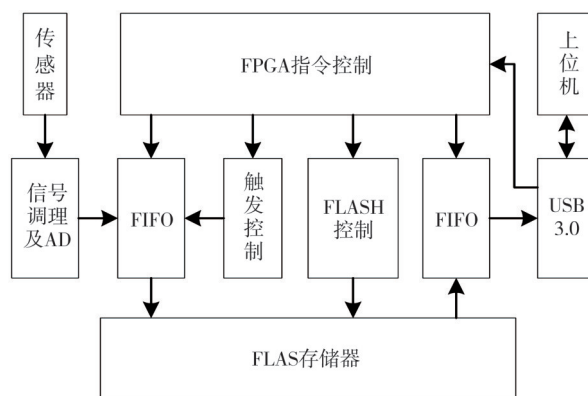


图1 系统总体图

Fig. 1 Overall view of the system

上位机通过USB 3.0设置定时功能和设备参数,将各项参数存储到FLASH中。电源模块给系统供电,待定时结束后,主控对系统复位初始化,控制模数转换器采集数据,在FIFO缓存数据并将数据存储到FLASH芯片上。上位机通过USB 3.0端口随时读取记录的数据,由专用软件绘图显示和数据分析处理。

2 硬件设计

2.1 传感器选型

当前用于测试水下冲击波超压的传感器敏感元件,其工作原理主要分为压电效应和压阻效应。压阻式传感器具有良好的低频特性,但易受到温度和火光的影响,不适用于水下实验。敏感元件具体涉及的材料有电气石、石英、PVDF压电薄膜、碳等,其中石英及电气石是最重要的且有实用价值的两种。石英晶体对静压不敏感,使用时需要增大仪器的有效尺寸,在一定程度上影响了测试效果。在晶体的涂覆材料上,蜡、硅胶、橡胶等都会在不同程度上影响传感器的线性度及频响,而油封可以使传感器性能得到极大改善。基于此,本文选用IEPE型压电式压力传感器,其将电气石晶体放置于一个装满硅油的聚乙烯软管中,晶体通过两根引线连接到一个内置放大器上,内置放大器连接同轴电缆输出。该传

传感器最大量程可达 690 MPa, 输出电压为 ± 5 V, 谐振频率大于 1 MHz, 非线性误差小于 2.0% F.S, 响应时间小于 1.5 μ s, 满足水下冲击波超压测试的要求。

2.2 信号调理与模数转换模块

传感器转化的电信号不满足 AD 转换器的输入条件, 无法直接提供给 AD 使用, 需要利用信号调理电路对电信号进行处理。为了消除 ICP 型传感器带来的直流偏置, 大多数冲击波测试系统选择使用电容交流耦合的方法, 但交流耦合会对信号进行滤波处理, 意味着信号频率会受到电容和电感的影响, 可能导致传输精度下降, 而直流耦合不受此影响。直流耦合使电路具有较高的稳定性, 且传输过程不易失真, 适用于传输高精度的水下冲击波超压信号。直流耦合后提高基线, 并进一步将电信号放大, 再使其通过低通滤波器滤除高频杂信号, 最后传递给模数转换器。信号调理流程如图 2 所示。

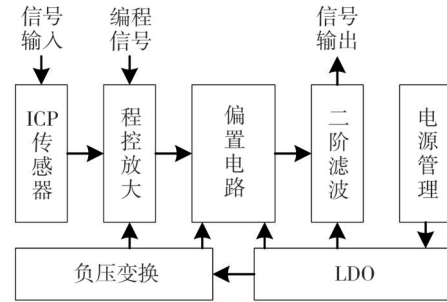


图 2 信号调理流程图

Fig. 2 Signal conditioning flowchart

根据水下冲击波超压测试的要求, 采样频率需要大于等于 10 MHz。选用 AD 公司的 14 位高精度模数转换器, 最高采样频率可达到 10 MSPS。采样开始后, FPGA 提供给模数转换器系统时钟。当模拟信号输入且模数转换器的时钟引脚被激活(拉高)时, 立即启动数据采集。采集完成后, 转换过程需要 3 个时钟周期, 随后将转换完成的数据从输出端口并行输出。AD 的时序和电路如图 3 和图 4 所示。

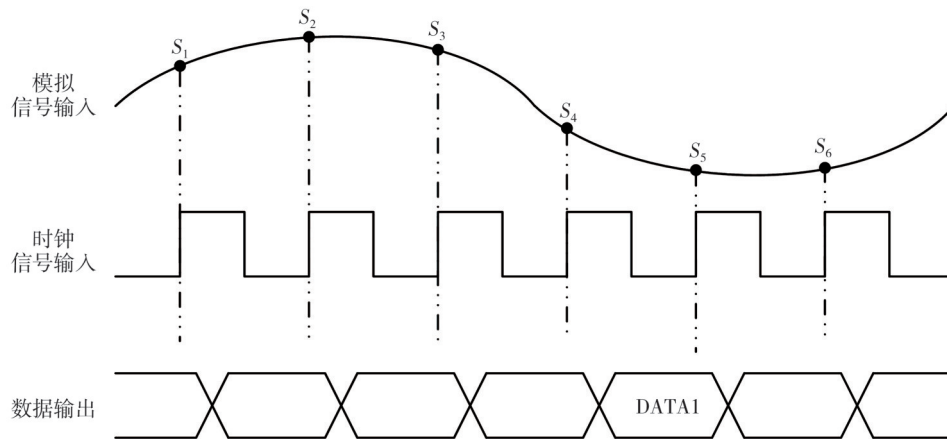


图 3 AD 时序图

Fig. 3 AD timing diagram

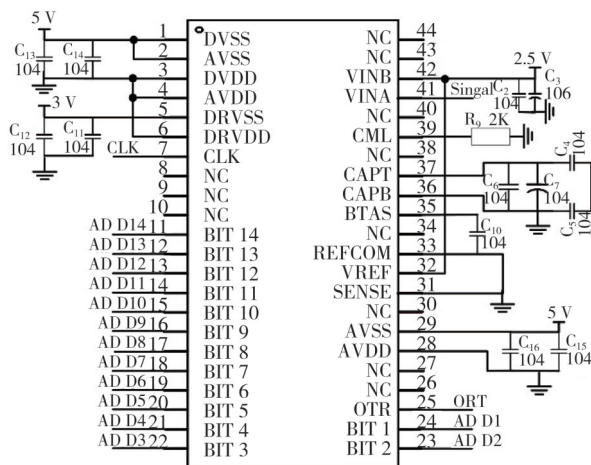


图 4 AD 电路图

Fig. 4 AD circuit diagram

2.3 主控模块

选用 Spartan-6 系列 FPGA 芯片作为主控, 它拥有强大的并行计算和高速数据处理能力, 在保持高性能、低延迟的同时兼顾高可靠性、稳定性和低功耗。供电后 FPGA 完成系统的初始化、远程控制待机系统定时上电、定时触发, 解决了现场实验误触发的问題, 确保实验数据的准确获取。此外, 其可通过有线接收上位机信号调整系统各项参数, 控制 AD 采集转化信号, 将转化好的数据缓存到配置的 FIFO 中, 控制 FLASH 读取存储 FIFO 中缓存的数据。对冲击波信号进行幅值大小判断, 当幅值超过预设值, 控制系统继续采样固定时间。当采样时间

达到预设值时, FPGA 控制系统停止采样并将系统状态调整为低功耗模式。

2.4 存储模块

存储芯片选用 Micron 公司的 8 bit 64 Gb NAND 型 FLASH 芯片。整片芯片共有 8 192 个块, 每块包含 128 页, 每页有 8 192 Byte, 可以实现 8 位并行传输数据。其页编程时间为 350 μ s, 数据写入速度为 22.32 MB/s, 满足 10 MHz 采样率下 AD 每秒生成约 17.5 MB/s 的数据吞吐。FLASH 存储芯片具有数据断电不丢失、存储速度快、存储密度高、易更新、可靠性高的特点, 适用于高密度存储和快速写入的场合。系统开始工作后, FLASH 芯片从 FIFO 中读取数据并持续记录, 直至主控判断冲击波信号幅值超过预设值后, 保留最近的一段负延时数据并继续存储一段时间数据。

FLASH 芯片在出厂和使用过程中会出现一些坏块, 因此, 需要建立坏块标记表, 标记坏块的位置。在进行块操作时, 先检查操作块是否为坏块, 坏块标记的位置在每一个块的第一个备用区域, 若为一字节的 0, 则该块为坏块。在使用过程中, 在对块进行擦除操作后, 需要读取状态寄存器中的第 0 位的值。若第 0 位的值为 0, 表示擦除操作完成, 该块为可用的块。若该值为 1, 则表示擦除操作未完成, 同时可以判断该块为坏块, 之后将一个字节的 0 写入到该块的第一个备用区域内。存储时避开这些坏块, 以确保数据的可靠性。同时采用 ECC 技术, 纠正单比特错误并检测双比特错误, 进一步确保数据的准确性和可靠性。坏块检测流程如图 5 所示。

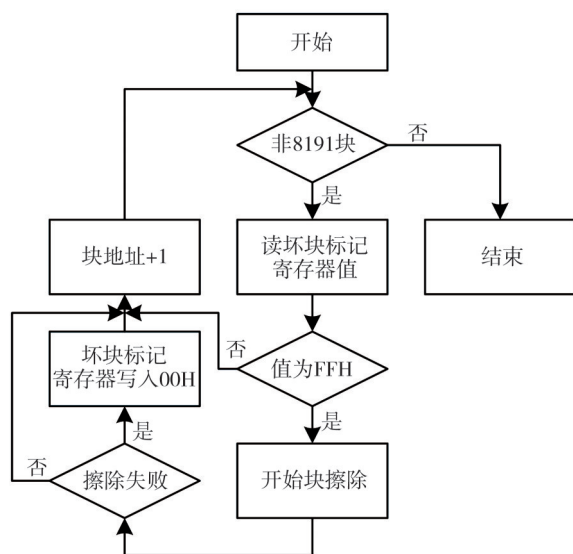


图5 坏块检测流程

Fig. 5 Bad block detection process

设置 FIFO 的存储大小为 16 384 Byte, 其中将前 8 192 Byte 用来存储负延时数据。在触发时刻到达之前, 系统不断向 FIFO 中写入负延时数据。FIFO 记录满时, 利用 FIFO 先进先出的特性, 将最前面的两个字节数据删除, 写入新的 AD 采样数据, 之后不断重复此过程。触发信号到达后, 将触发后的数据记录到 FIFO 剩下的存储空间内, 同时将 FIFO 中的数据不断向 FLASH 中存储。直到到达系统预设的采集时间, 停止继续采集数据。

2.5 数据传输模块

采用有线方式进行数据的传输和与上位机交互通信。使用 USB 3.0 作为有线模块, 其传输速度快, 理论最大传输速度可达到 5 Gbit/s, 这大大提高了工作效率, 可以在更短时间内传输更大的文件。同时, USB 3.0 有很强的兼容性, 可以向下兼容 USB 2.0 和 USB 1.0, 提供了更大的便利性和灵活性。选用 FTDI 公司的 FT600Q 芯片, 该芯片有多通道工作模式和 245 工作模式, 内置有 16 kByte 的 FIFO 缓存区, FIFO 读写时钟有 100 MHz 和 66 MHz 两种。

2.6 防水抗冲击措施

爆炸时为高温、高压的恶劣环境, 会产生强烈的冲击波并伴随着大量破片。水下爆炸还会产生强烈的气泡脉冲, 气泡脉冲会影响设备, 使系统共振, 从而使设备连接处出现缝隙, 逐渐导致设备解体。同时, 海水是良导体并且还具有腐蚀性。因此, 为了使系统能在恶劣的水下环境正常工作, 该设备采用高性能耐腐蚀合金作为主体外壳材料, 表面覆盖有先进的纳米防水涂层, 形成双重保护屏障, 能有效隔绝海水侵蚀, 抵御强大水流冲击和意外碰撞, 保障内部精密元件的安全运行。在密封设计上, 将信号调理器、A/D 转换器、FPGA、存储器、USB 驱动器、电源控制器使用环氧树脂在真空环境下一体灌封, 结合高弹性防水胶圈, 确保在水下系统能正常可靠运行。

3 系统功能验证与试验结果分析

3.1 系统功能流程

系统流程如图 6 所示。系统上电运行后, 主控芯片 FPGA 调取存在 FLASH 里的预设参数, 对各模块复位或初始化, 对系统状态进行判断, 确认是否处于可编程状态。在可编程状态下, 可使用上位机通过有线接口对系统进行各参数的调

整,包括开关定时功能、信号增益倍数调节、采样频率调节、触发阈值设定、超过阈值后记录时长设置、工作参数总表调取等。在非可编程状态下,系统处于低功耗模式,保护FLASH芯片中的数据,此时只可以查看工作参数总表和传输数据。供电运行一段时间后,系统自动转化为待触发状态。此时系统持续记录外部压力信号,等待主控判断信号幅值是否超过预设阈值。当超过阈值,系统进入触发记录模式,AD采集数据通过FIFO写入FLASH中。

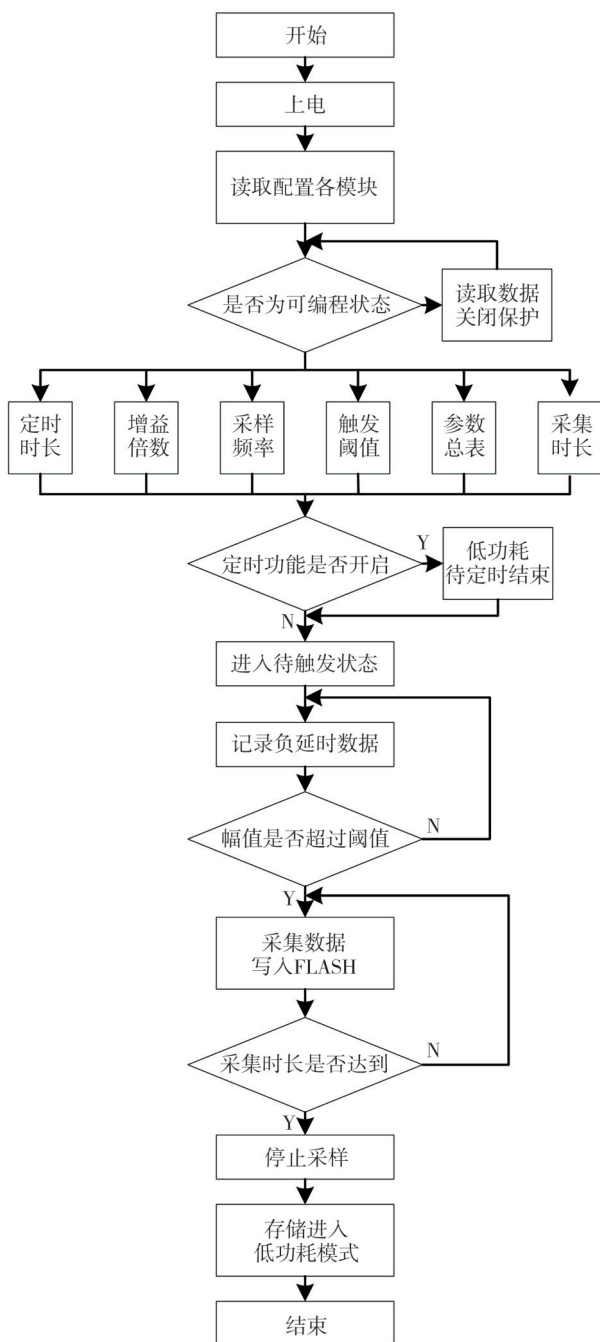


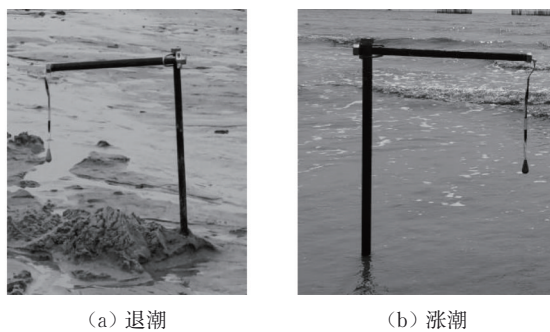
图6 系统流程图

Fig. 6 System flow chart

当写入时长达到系统设定时长后,数据采集停止、系统进入非可编程状态保护数据低功耗运行。

3.2 现场试验验证

系统研制完成后,为了进一步验证其适用性进行了现场测试试验。在试验中,充分发挥了存储式测试设备体积小、重量轻、功耗低、可密封的优势。浅水试验环境下,在测点位置将设备直接掩埋于水底地面防护。深水试验环境下,在测点位置搭载小型浮标,将设备放置于小型浮漂上固定。在完成试验测试工作的同时,验证了系统的抗冲击和防水性能,实现对水下冲击波的可靠测量和记录。试验中,同时使用传统引线电测法进行测量对比,试验结果表明,本系统在信号稳定性、信号完整性和部署效率上远优于传统引线电测法。图7为试验现场布点照片,测试设备已掩埋在沙滩下。图8为某海边浅水试验环境下冲击波超压试验现场布局图。



(a) 退潮 (b) 涨潮

图7 试验现场布点照片

Fig. 7 Photos of the test site

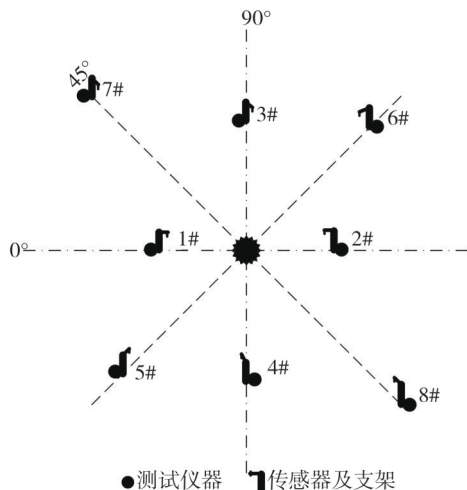


图8 试验现场测点布局示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the layout of the measurement point at the test site

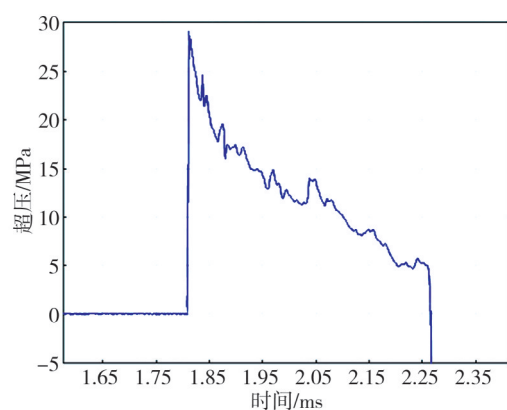
试验前,使用库尔水下爆炸压力公式对试验结果进行了理论计算和量纲分析,结果如表1所示。

可以看出:第一次试验在小药量情况下,3#、4#测点处的超压值为28.686 4 MPa;第二次试验在大药量情况下,2#测点处的超压值为66.188 7 MPa,4#测点处的超压值为41.860 1 MPa。试验结束,回收测试设备,通过USB接口连接上位机回读存储器中的测试数据,通过专用软件进行数据分析和处理。表1所示的部分测点的数据统计结果,所对应的冲击波超压变化曲线如图9和图10所示。

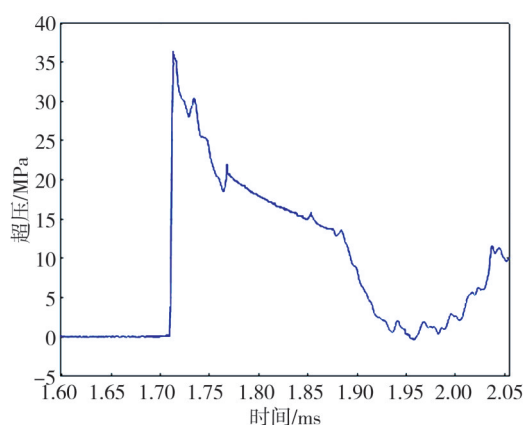
表1 水下冲击波超压数据

Tab 1 Underwater shock wave overpressure data

试验次序	测点序号	超压峰值/MPa	理论超压峰值/MPa
第一次	3#	29.070 3	28.686 4
	4#	36.872 6	28.686 4
第二次	2#	69.579 2	66.188 7
	4#	41.983 8	41.860 1



(a) 3#测点



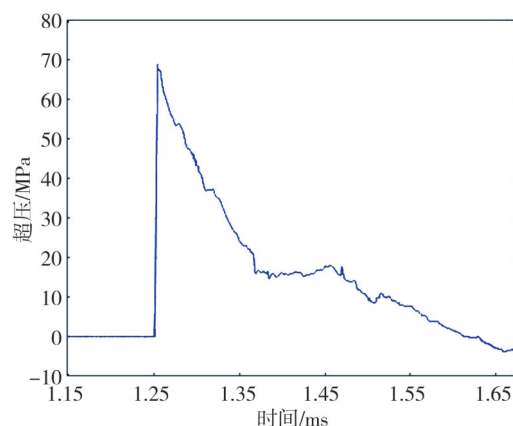
(b) 4#测点

图9 第一次试验数据曲线

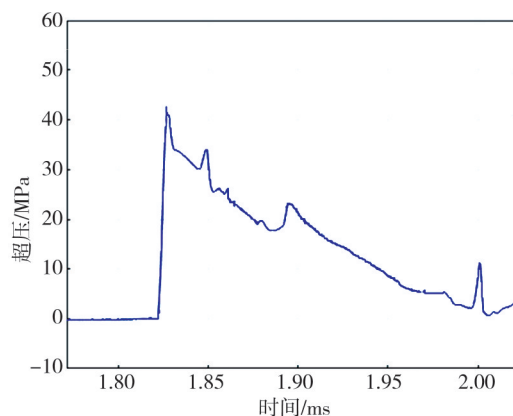
Fig. 9 Data curve of the first trial

从超压峰值和 $p-t$ 曲线可以看出,测试系统完整记录了水下冲击波超压变化曲线,符合水下爆炸所产生冲击波动态变化过程,超压峰值和正压作用时间能真实反映该测点位置的冲击波特性。由实测值与理论计算值对比分析可以看出,两者

较为吻合,由于浅水环境对测试结果存在影响,因此误差范围在合理区间内。



(a) 2#测点



(b) 4#测点

图10 第二次试验数据曲线

Fig. 10 Data curve of the second test

4 结 论

本文设计了存储式高速大容量水下冲击波测试系统,为水下冲击波超压测量提供了新的测试方法。测试设备体积小、重量轻、功耗低、密封防水性强,具有可在测点就近布设的优势,极大地提高了水中冲击波测试的适用性。实弹测试试验表明,设备各项功能正常,完整记录了水中冲击波随时间的变化曲线,分析得到的特征参数能真实反映水中冲击波的特性,满足水下爆炸冲击波超压测试的要求,可为水中冲击波的传播机理研究和战斗部水下毁伤效能评估提供可靠的数据支撑。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 赵生伟, 张颖, 王占江, 等. 小当量水中爆炸冲击波实验及数值模拟[J]. 实验力学, 2009, 24(3): 259-263.
ZHAO Shengwei, ZHANG Ying, WANG Zhanjiang, et al. Experiment and numerical simulation investigation of small scale underwater explosions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(3): 259-263. (in Chinese)
- [2] 韦爱勇, 何中其, 陈网桦, 等. 炸药冲击波感度水下小隔板测试法实验研究[J]. 爆破, 2012, 29(3): 1-6.
WEI Aiyong, HE Zhongqi, CHEN Wanghua, et al. Experimentation research of underwater explosion measurement method with small scale gap test for shock sensitivity of explosives[J]. Blasting, 2012, 29(3): 1-6. (in Chinese)
- [3] 马锦银, 吕海涛. 分布式爆炸测量系统在爆炸试验中的应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 105-108.
MA Jinyin, LÜ Haitao. The application of distributed explosion measurement system in explosion test[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(4): 105-108. (in Chinese)
- [4] 胡宗元. 一种新型水下爆炸实验设备的研究设计与实测分析[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(3): 258-260.
HU Zongyuan. Design and experimental analysis of a new underwater explosion experimental equipment[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(3): 258-260. (in Chinese)
- [5] 李科斌, 李晓杰, 王小红, 等. 球形装药水下爆炸近场测量的连续探针法研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(1): 1-7.
LI Kebin, LI Xiaojie, WANG Xiaohong, et al. Study of continuous velocity probe method for near-field underwater explosion measurement of spherical charge[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(1): 1-7. (in Chinese)
- [6] 李永超. 冲击波超压存储测试关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [7] 许辉, 文丰, 翟成瑞, 等. 水下爆炸冲击波数据记录仪的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2007(4): 143-144.
XU Hui, WEN Feng, ZHAI Chengrui, et al. Design of data recorder of shock wave generated by underwater explosions[J]. Microcomputer Information, 2007(4): 143-144. (in Chinese)
- [8] 薛瑞华. 基于FPGA的冲击波测试系统及特征参数实时提取技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [9] 王代华, 范少波, 朱金瑞, 等. 存储式冲击波测试系统的多参数程控技术[J]. 传感技术学报, 2019, 32(3): 380-384.
WANG Daihua, FAN Shaobo, ZHU Jinrui, et al. Programmable multi-parameter technology of stored testing system for shock wave[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(3): 380-384. (in Chinese)
- [10] 杨磊, 静爆场冲击波测试系统动态特性与布点优化研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [11] 刘宇, 李顺, 李新娥, 等. 冲击波超压测试系统的时基高精度同步[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(1): 119-123.
LIU Yu, LI Shun, LI Xine, et al. Time benchmark high precision synchronization method for shock wave overpressure testing system[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(1): 119-123. (in Chinese)
- [12] 宋林丽, 马竹新, 王代华, 等. 一种自适应触发门限的冲击波测试系统[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(2): 120-125.
SONG Linli, MA Zhuxin, WANG Daihua, et al. A shockwave test system with an adaptive trigger threshold[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(2): 120-125. (in Chinese)
- [13] 薛瑞华, 王代华, 李彤华, 等. 基于存储测试的冲击波特征参数快速评估技术[J]. 现代电子技术, 2023, 46(18): 43-46.
XUE Ruihua, WANG Daihua, LI Tonghua, et al. Stored testing based rapid evaluation technology for shockwave characteristic parameters[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(18): 43-46. (in Chinese)