

文章编号: 1001-1455(2013)02-0194-06

舰用动爆冲击波记录系统的设计与应用*

丁永红^{1,2}, 尤文斌^{1,2}, 马铁华^{1,2}

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
2. 中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 利用抗恶劣环境的存储测试技术, 以单片机和 CPLD 为主控芯片, 设计了一种舰用动爆冲击波记录系统。系统具备内、外触发功能, 采用光纤传输触发信号, 提高触发电路的抗干扰能力, 确保系统具有同一时间基准和可靠触发。通过激波管校准实验和舰船实验, 系统成功记录了冲击波信号, 证明了该系统具有良好的实用性和可靠性。

关键词: 爆炸力学; 冲击波测试; 存储记录仪; 动爆; 激波管

中图分类号: O389; TH7 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

舰艇抗爆抗冲击能力作为舰艇生命力最重要的技术指标, 直接影响舰艇海上作战能力^[1-3]。作用于战舰的突发冲击主要有 3 种: 导弹、鱼雷直接作用爆炸, 鱼雷和水雷等非接触的水下爆炸冲击波, 发射导弹的反向冲击。这些冲击都可能对船体、舰载装备等造成损伤。舰船毁伤主要由爆炸冲击波造成, 因此掌握爆炸冲击对舰船结构的破坏作用, 可对舰船抗爆炸冲击的设计提供帮助^[4]。受费用与实验条件限制, 实弹动爆舰体冲击波测量的报道很少。目前研究多采用有限元数值法, 许多高瞬态非线性有限元分析程序(如 ABAQUS、ADINA、DYTRAN 等)得到了广泛应用^[5]。

本文中, 采用抗恶劣环境的存储测试技术^[6-7], 将探测头安装在舰艇的不同位置, 实时记录冲击波信号, 并在船头集中安装备份单元记录每一个测点发送的数据。测试完毕后回收探测头和备份单元, 将记录数据上传到上位机, 为后续的数据分析与研究提供依据。

1 系统总体设计

舰艇在动爆完成后可能沉没, 难以回收测点记录仪, 因此本测试系统中测点采用存储模式记录冲击波, 同时在船头甲板集中备份存储。系统框图如图 1 所示, 由安装在测试点的探测头、远端备份模块、控制单元模块、传输数据的光纤等组成。探测头可以实时采集、存储测试点的压力信号, 同时将采集转换后的数字信号先进行串行化处理、光电转换, 后经光纤传输给远端的备份模块存储。存储电路在控制单元的作用下, 使存储采集电路在触发前循环记录, 存储器中始终保持最新的 2 MB 的数据。触发信号到来后, 顺序记录 8 MB 的数据。为了使各个测试点的零时刻具有统一的标准, 控制单元的触发信号同时作用于各个测试点的探测头。

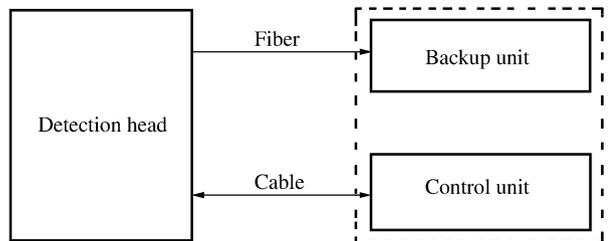


图 1 系统总体框图

Fig. 1 Block diagram of the system

探测头的外壳为圆柱形钢制壳体, 除可承受较大爆炸冲击作用外, 还可对测量电路进行电磁屏蔽, 从而大大减少外界环境干扰, 增加了测量的可靠性。采集存储电路与外界连接的光纤接头、航空接头布置在邻近的外壳里, 采用柔性材料固定, 起到减振、屏蔽的作用, 如图 2 所示。

* 收稿日期: 2011-11-16; 修回日期: 2012-02-16

作者简介: 丁永红(1980—), 女, 博士研究生, 讲师。

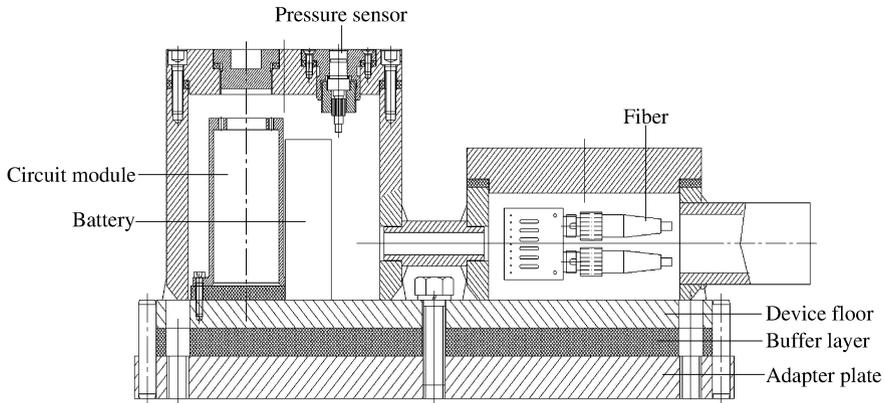


图 2 探测头结构布局图

Fig. 2 Structure layout of the detection head

2 电路设计

2.1 探测头单元设计

探测头的结构框图如图 3 所示,由压力传感器、适配电路、A/D 转换器、CPLD、单片机、Flash 存储器、光电转换接口组成。

冲击波是爆炸时气体快速膨胀形成的,具有速度快、持续时间短的特点。压电型压力传感器的频率响应高,能满足冲击波测量的要求,本方案采用 8052C 压电型传感器。传感器输出的电荷信号在输出端就近转换成电压信号,避免电荷信号经导线传输引入的干扰。A/D 转换得到的数字信号经编码单元后分成 2 路,一路经控制单元存储到 Flash 中,另一路经光电转换后传输给备份存储单元。

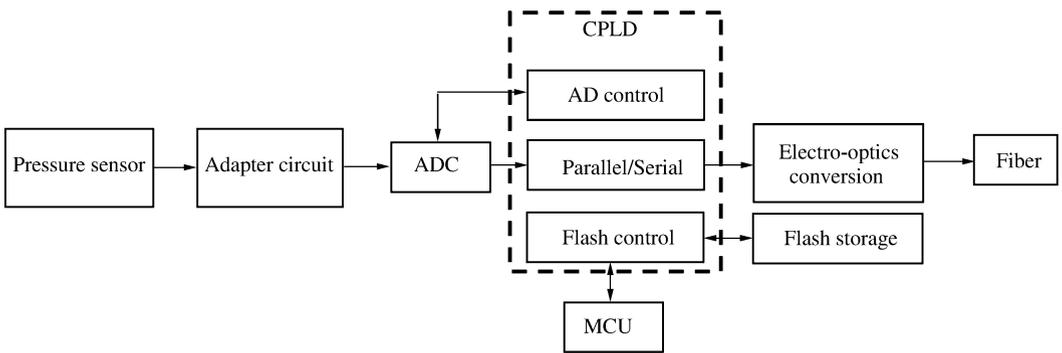


图 3 探测头工作原理框图

Fig. 3 Work principle block diagram of the detection head

2.2 触发控制单元设计

触发控制单元由探测头触发控制与集总控制单元 2 部分组成,如图 4 所示。探测头能接收集总控制单元发送的触发记录信号,同时探测头将测试信号与设定的电平比较得到的内触发信号发送给控制单元。集总控制单元通过检测探测头的触发信号、断线触发电缆状态和传输触发信号线通断作为判断触发是否到来的依据。当所有探测头中大于等于 3 个输出的内触发有效,或大于等于 3 路触发信号传输线断开,或断线触发控制连线断开,并同时经 3 次检测连续有效,控制单元输出触发信号触发所有探

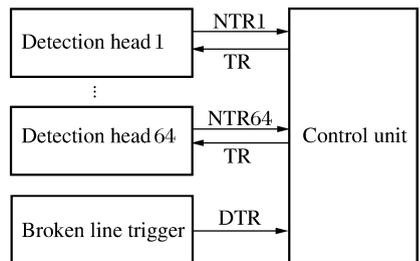


图 4 触发控制单元结构原理框图

Fig. 4 Functional block diagram of the trigger and control units

测头及备份模块。探测头将内外触发信息通过编码和压力数据同时存储,回读数据后就能确定探测头的触发源,并通过内外触发的时间差修正时间零点,测试系统由此确定了统一的时间基准。

2.3 存储电路

NAND flash 作为存储介质已广泛应用于存储测试,但由于自身按页读写和块擦除的结构特性,决定了单片存储器不能高速连续写入数据^[8]。为此,在页编程时采用 FIFO 作为数据缓冲,完成以 Flash 作为存储介质的连续数据写入。采用恒定采样速率、抽点存储的采样控制策略,实现长时间记录和有效数据的高速存储。冲击波信号在未到来之前,对 A/D 转换的数据采用抽点存储;信号到来时变为逐点完全存储,在保证有效数据容量大大压缩的情况下,触发前的瞬变数据在 FIFO 中得以完整保存。实现的数据流结构如图 5 所示,控制模拟时序如图 6 所示。图中 rclk 为 FIFO 的读时钟,上升沿数据从 FIFO 中输出;wclk 为 flash 写时钟,上升沿数据写入 flash;trg 为 0 时,从 FIFO 中读取多个数据,抽取一个进行存储,反之进行逐点存储。

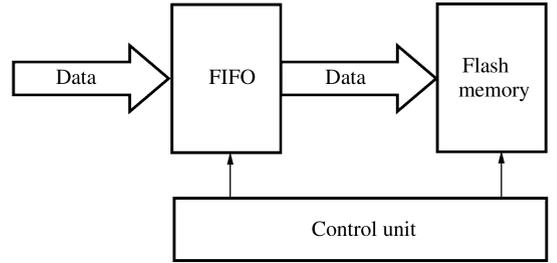


图 5 数据流程图

Fig. 5 Data flow diagram

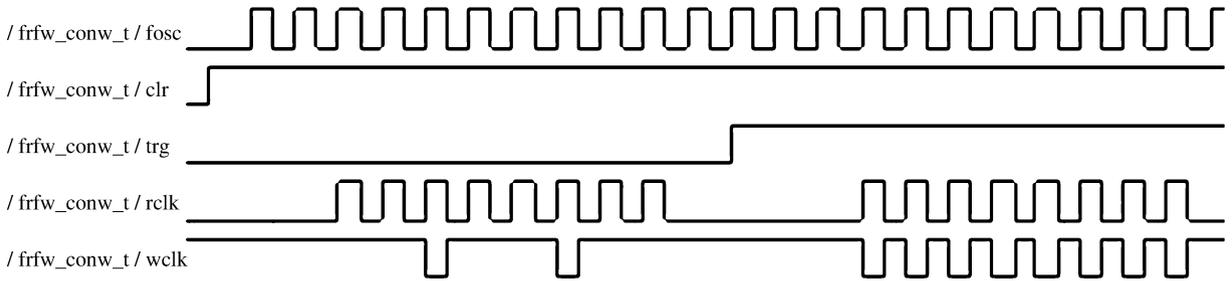


图 6 时序图

Fig. 6 Sequence diagram

3 冲击波记录系统激波管动态校准

3.1 激波管动态校准方法

传感器与测试记录电路连接后,其动态特性会发生变化,为获取整体的动态特性,利用激波管对探测头进行了动态特性测试。舰船动爆冲击波场测试中需要使用多个冲击波记录探测头,本文中只列举其中一个量程为 10 MPa 的进行动态校准。

如图 7 所示,激波管^[9]是一根内壁光滑两端封闭的直管,中间以一膜片隔开。左端充以高压气体,形成高压室;右端不充气或充以较低压力的气体,形成低压室。在低压室的右端侧壁上装了 2 个用于测定激波速度的压力传感器,这 2 个传感器中心之间的距离为 $s=0.55\text{ m}$ 。被校测试系统安装在低压室端面。

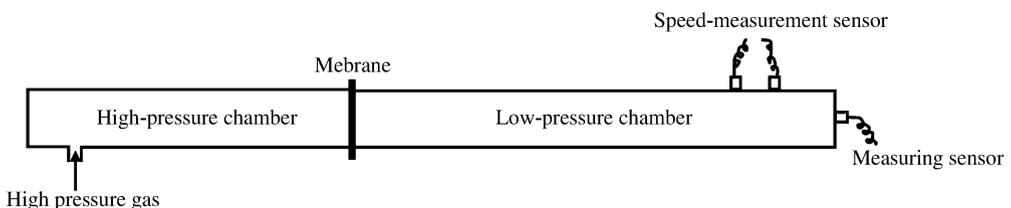


图 7 激波管实验原理示意图

Fig. 7 Experiment principle diagram of the shock tube

校准时,在高压室中充压缩气体,当气体压强超过膜片强度极限时膜片突然破裂。这时一个平面冲击波沿低压室方向传播,通过 2 个测速系统的压力上升沿,就可得到时间间隔 Δt ,利用 Δt 可求得激波速度

$$v = \frac{s}{\Delta t} \tag{1}$$

从而求得激波的马赫数

$$Ma = \frac{v}{c_0} \tag{2}$$

式中: $c_0 = 20.05 \sqrt{T}$, 为低压室未受扰动时气体的声速, T 为低压室气体的温度。

由 Ma 可计算得到反射激波超压 Δp_5 和高压室压力值 p_4 ,

$$\Delta p_5 = \frac{7}{3}(Ma^2 - 1) \left(\frac{4Ma^2 + 2}{Ma^2 + 5} \right) p_1 \tag{3}$$

$$p_4 = \frac{1}{6}(7Ma^2 - 1) \left[1 - \frac{1}{6} \left(Ma - \frac{1}{Ma} \right) \right]^{-7} p_1 \tag{4}$$

式中: p_1 为低压室气体初始压力, MPa。

3.2 动态校准实验结果

将激波管作为激励源,对所设计冲击波记录仪进行动态标定,为了使反射波超压 Δp_5 平台较平,激波速度(以马赫数 Ma 表示)控制在 1.3 左右;为了提高反射波超压 Δp_5 的幅度并保持较小马赫数,当 $Ma=1.3$ 时,由式(3)~(4)可知, $\Delta p_5/p_1 \approx 2.1$, $p_4/p_1 \approx 3.4$,根据这 2 个关系和所选择的膜片对高、低压室充气到所希望的值。标定实验共进行了 3 次,获得的典型标定曲线及其幅频、相频曲线如图 8 所示。标定结果如表 1 所示,表中 p'_4 为激波管高压室气体压力值, p' 为冲击记录系统测得的压力值。通过测量激波响应的超调算出其二阶系统阻尼比为 0.042,由振荡周期和阻尼比得到其自然振荡频率为 827 500 rad/s。由频率特性图可以看出,测量系统在 100 kHz 内增益稳定、相位差较小,满足冲击波测量的要求。

由表 1 可知,3 次动态标定实验的系统误差均小于 5%,说明测试系统是稳定可靠的,能够保证实验的准确性。

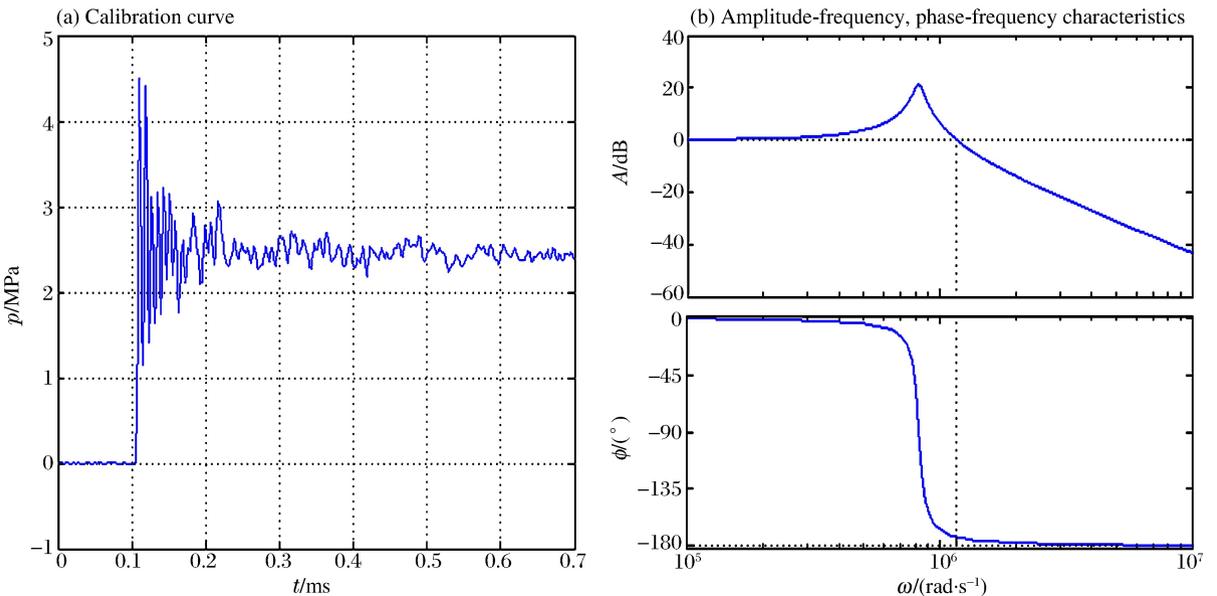


图 8 标定曲线及其幅频、相频特性

Fig. 8 Calibration curve and amplitude-frequency, phase-frequency characteristics

表1 动态标定结果

Table 1 Dynamic calibration results

T/K	$\Delta t/ms$	p_1/MPa	p'_1/MPa	$\Delta p_5/MPa$	p'/MPa	$(p' - \Delta p_5 /\Delta p_5)/\%$
293.95	1.298	1.30	3.67	1.99	2.05	3.02
292.50	1.294	1.33	3.80	2.07	2.13	2.90
292.90	1.248	1.29	4.21	2.50	2.58	3.20

4 船舱实验测试

为了评估导弹对船舱的毁伤效果,靶舰为报废油轮,将记录系统安装在船舱内的不同位置。以布置在油舱内的测试装置为例介绍,该油舱长 10.4 m、宽 1.8 m、高 5 m。导弹爆炸位置在轮机舱,探测头布置在油舱内距离底甲板 1.5 m,距离轮机舱与油舱壁 5.6 m 处。在舱内实施动爆时,大马赫数的动爆冲击波遇刚性壁面反射,形成多次反射,峰值越大,反射后压强增长的比例越大,获得的压力曲线如图 9 所示。

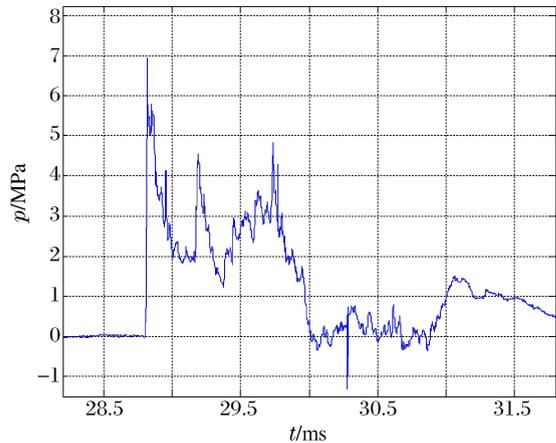


图9 实测曲线

Fig. 9 Measured curve

5 结论

(1)设计了一种具有测点存储记录、光纤实时传输、远端集总备份存储的分布式舰用动爆冲击波记录系统;

(2)利用激波管对舰用动爆冲击波记录系统进行了动态校准,系统误差均小于 5%;

(3)在现场测试中,该系统成功地获取了冲击波压力数据,为后续的数据分析与舰船抗爆抗冲击设计的研究提供了依据。

参考文献:

- [1] 汪玉,华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [2] 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(1):293-298.
Gong Guo-tian, Jin Hui, Zhang Shu-hong, et al. The advance of anti-explosion capability of foreign naval ships[J]. Acta Armamentarii, 2010,31(1):293-298.
- [3] 彭兴宁,聂武,严波. 爆炸载荷作用下舰船防护舱壁的薄膜效应研究[J]. 船舶力学,2007,11(5):744-751.
Peng Xing-ning, Nie Wu, Yan Bo. Analysis of membrane effect of surface warship's protective bulkhead subjected to blast loading[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(5):744-751.
- [4] Tong Zong-peng, Wang Yu, Li Yu-jie. Characteristic of new type shock protective layer subjected to underwater explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(6):924-932.
- [5] 梅志远,朱锡,刘润泉. 船用加筋板架爆炸载荷下动态响应数值分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24(1):80-84.
Mei Zhi-yuan, Zhu Xi, Liu Run-quan. Dynamic response researches of ship's stiffened plate structure under explosive load[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):80-84.

- [6] 祖静,申湘南,张文栋. 存储测试技术[J]. 测试技术学报,1994,8(2):25-30.
Zu Jing, Shen Xiang-nan, Zhang Wen-dong. Memorized testing and measurement technology[J]. Journal of Test and Measurement Technique, 1994,8(2):25-30.
- [7] 马铁华,祖静. 冲击波超压存储测试技术研究[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):134-135.
Ma Tie-hua, Zu Jing. Memorized testing and measurement technology for shock wave overpressure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004,25(4):134-135.
- [8] 余辉龙,何昕,魏仲慧,等. 应用 NAND 型闪存的高速大容量图像存储器[J]. 光学精密工程,2009,17(10):2548-2554.
Yu Hui-long, He Xin, Wei Zhong-hui, et al. High speed and high capacity image recorder based on NAND flash [J]. Optics and Precision Engineering, 2009,17(10):2548-2554.
- [9] 陆宏年,郑兆瑞. 信号与测试系统[M]. 北京:国防工业出版社,1988:265-269.

Design and application of a shock wave recorder used in warship subjected to dynamic explosive^{*}

Ding Yong-hong^{1,2}, You Wen-bin^{1,2}, Ma Tie-hua^{1,2}

(1. School of Information and Communication Engineering,
North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,
North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: By adopting the storage test techniques under bad environments, a shock wave recorder system was designed with MCU and CPLD as the main control chips. The recorder system has inside and outside trigger functions, in which the optical fibers are used to transmit the triggered signals. And the high anti-interference ability of the trigger circuits can ensure the recorder system have the same time standards and be triggered reliably. The shock tube calibration experiment and the warship experiment were conducted. And the shock wave signals were recorded successfully by the recorder system. So the designed recorder system has good practicability and reliability.

Key words: mechanics of explosion; shock wave testing; storage recorder; dynamic blasting; shock tube

* Received 16 November 2011; Revised 16 February 2012

Corresponding author: Ding Yong-hong, dingyonghong@nuc.edu.cn