

## A Stored Overpressure Measurement System Based on ICP Sensor for Shock Wave \*

WANG Daihua, SONG Linli, ZHANG Zhijie \*

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Considering the deficiency of measuring method for shock wave, an overpressure measurement system is designed by applying the storage measurement theory. An ICP pressure sensor with excellent performance is selected as the sensing component based on the performance comparison between different pressure sensors, then the excitation circuit and signal conditioning circuit are designed seriously. The digital logic circuit is performed by using a microcontroller in combination with a CPLD, which improves the intelligence and reliability of the system with a reduction in size. After calibration, the reliability and validity of the proposed system are further verified by applying it to actual measurement experiments. The measurement results for a certain bomb are also given out, including overpressure curves, positive pressure time and impulse.

**Key words:** storage measurement; shock wave; overpressure; impulse; ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) sensor  
EEACC: 7210G; 7320V      doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.04.012

## 基于 ICP 传感器的存储式冲击波超压测试系统 \*

王代华, 宋林丽, 张志杰 \*

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

**摘要:** 针对冲击波超压测试方法不足的现状, 采用存储测试原理进行了冲击波超压测试系统设计。对比了不同类型压力传感器的优缺点, 选用性能优良的 ICP 压力传感器并配套设计了驱动电路和信号调理电路。采用单片机和 CPLD 进行数字逻辑电路的集成设计, 提高测试系统的智能化和可靠性并减小系统体积。系统标定后参加了多次实弹测试试验, 验证了其可靠性和有效性。文中给出了某型弹的冲击波超压测试曲线、正压持续时间和冲量数据。

**关键词:** 存储测试; 冲击波; 超压; 冲量; ICP 传感器

中图分类号: TJ410.6; TP23

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)04-0478-05

爆炸冲击波是表征武器毁伤效能的重要组成部分, 冲击波超压和冲量则是评价常规兵器毁伤效能的主要技术指标<sup>[1]</sup>。当前, 针对冲击波超压和冲量的研究途径主要有两种: 一是数值模拟, 二是试验研究。数值模拟通过理论分析或利用分析软件(如 LS-DYNA、AUTODYN)对目标物和爆炸载荷建模, 通过数值分析来研究冲击波的传播规律和毁伤机理<sup>[2-8]</sup>。数值模拟是研究近爆、内爆冲击波特征的有效手段, 但存在精度低的问题<sup>[6-8]</sup>, 往往需要由试验结果验证<sup>[8-10]</sup>。试验研究能真实反映被测冲击波特征, 常用的方法有: 等效靶板法和引线电测法。等效靶板法根据靶板变形计算冲击波能量<sup>[11-12]</sup>, 精度较差。引线电测法通过电线将传感器和后续记录仪

表相连, 传感器置于爆炸现场, 记录仪则远离爆炸现场以做到自身的有效防护。由于引线电测法组建系统简单易行, 在各类弹药的科研工作中得到了较为普遍的应用<sup>[10, 13-14]</sup>。但是, 由于传感器和后续记录仪分离, 其间的长电线成为测试系统防护的薄弱环节。作者亲历了大量实弹测试试验, 对引线电测法的现场防护工作量深有体会。即便如此, 由弹片击中或信号漂移等因素引起的测试失效时有发生, 数据捕获率低。

针对引线电测法的固有缺点, 本文根据存储测试原理<sup>[15-16]</sup>, 将传感器及信号调理电路、后续采集存储电路、控制电路、电源等集成为一体, 构成一个可植入爆炸现场独立工作的微小系统, 具有很高的

项目来源: 仪器科学与动态测试教育部重点实验室青年基金项目(2011YF003)

收稿日期: 2011-12-30      修改日期: 2012-03-05

可靠性。根据弹药爆炸威力评价的实际需要,共组建了12套测试系统,并通过实弹试验验证了系统的可靠性。文中给出了获取的某型弹的冲击波超压曲线,并计算得到了正压持续时间和冲量。

## 1 ICP传感器及调理电路

传感器是测试系统的一个重要组成部分。爆炸冲击波的压力测试是一个瞬态过程,因此对传感器的响应时间要求很高,一般需要达到数个 $\mu\text{s}$ 以内。目前,可以较好满足冲击波压力测试要求的传感器主要有两种:压电式压力传感器和压阻式压力传感器。压电式压力传感器具有相对较低的谐振频率和高的输出阻抗,其电荷输出需经外部放大器变换为低阻抗的电压输出,两者之间的连接电缆及接头对绝缘阻抗要求很高,周围环境中的水汽、灰尘以及油脂等都会使绝缘阻抗降低,从而导致信号漂移。而且,连接电缆的振动、环境温度的变化等因素都会加剧信号的漂移,这使得压电式压力传感器的应用受到了一定限制。压阻式压力传感器的谐振频率相对较高,如ENDEVCO公司的8530C型压力传感器的谐振频率可以达到500kHz。但是,压阻式压力传感器具有较强的光效应,这一现象在爆炸火球范围内非常明显,爆炸产生的强火光会给压力测试信号带来严重干扰,这一点在我们前期的科研实践中得到了验证<sup>[17]</sup>。

近年来,随着集成电路技术的不断发展,出现了内置电荷放大器的压电式压力传感器,即ICP(Integrated Circuits Piezoelectric)传感器。由于电荷放大器已经内置,ICP传感器较好地克服了传统压电传感器的不足,具有很强的抗干扰能力。而且,ICP传感器输出的就是已放大信号,信噪比高。与传统压电传感器相比,ICP传感器大大提高了测试精度和可靠性,特别适用于现场测试及在线监测等应用领域。

本设计选用PCB公司的113系列ICP传感器作为系统的敏感单元。该系列传感器的量程范围是50 psi~10 000 psi,谐振频率大于500 kHz,响应时间小于1 $\mu\text{s}$ ,非线性小于1% FS,非常适用于冲击波压力信号的测试。而且,其输出阻抗小于100 $\Omega$ ,便于后续信号调理电路的设计且能保证稳定性。ICP传感器对激励电源要求在20 V~30 V之间,且为恒流源供电。由于测试系统需要电池供电,综合考虑容量及体积要求,本设计选用8.4 V锂电池组作为系统电源。为达到ICP传感器的驱动要求,专门设计了DC-DC升压变换及恒压-恒流变换电路。该变换电路以MAXIM公司的MAX1606为核心器件,通过外围电容和电感元件的匹配设计,实现了电源电压从8.4 V到

24 V的升压变换,再经恒流管变换成电流输出。

测试系统的模拟电路如图1所示。其电源部分除了DC-DC升压变换及恒压-恒流变换电路以外,还有LDO(Low Dropout Regulator)转换电路(+5 V)以及负电压转换电路(-5 V)。LDO转换电路用于提供整个信号调理电路所需的+5 V工作电源,为了降低模拟系统的噪声,选用NS公司的LP2985为核心器件进行设计。负电压转换电路用于提供程控放大器和信号偏置电路所需的-5 V电源,选用MAXIM公司的MAX860进行设计。为了有效控制整个模拟电路的噪声,不同电压转换电路间都采用LC- $\pi$ 型滤波器进行隔离。为了最大限度的降低系统功耗,电源管理模块根据测试系统的运行状态决定各电源转换电路是否开启。由于ICP传感器的输出信号带有8 V~14 V偏置电压,电路作交流耦合处理后输送至程控放大器。程控放大器设计为八档可编程增益,测试前需要根据爆炸当量及测试距离确定增益,然后由计算机软件通过USB接口进行编程设置。放大后的信号经偏置电路处理成0~2.5 V范围内的信号,然后进入二阶低通滤波器进行滤波降噪处理。综合考虑冲击波信号特点及传感器特性,滤波器的截止频率设置为300 kHz。信号经滤波处理后即可输出至A/D变换电路进行数字化处理。

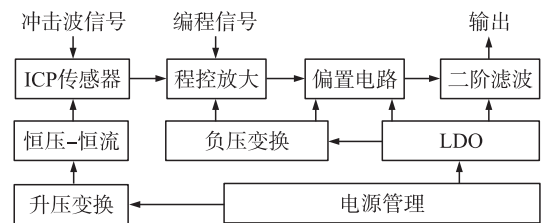


图1 模拟电路原理框图

## 2 采集存储电路

采集存储电路负责冲击波信号的量化采集和存储记录,其基本原理如图2所示。为了提高测试系统可靠性并减小系统体积,本设计采用单片机和CPLD组合控制的方法。CPLD主要用于控制A/D变换器

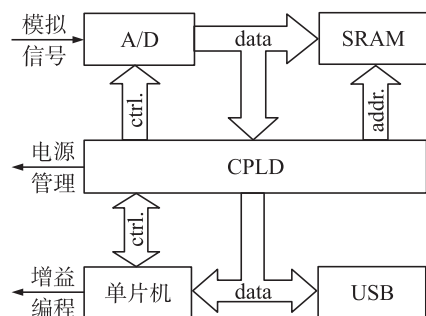


图2 数字电路原理框图

和 SRAM,产生数据采集和存储所需的工作时序和地址;实现 A/D 采样频率和系统触发电平的编程控制;完成数据存储的负延时控制等等。单片机主要负责 USB 驱动器的控制,接收来自计算机的编程指令,根据不同指令控制 CPLD 完成采样频率、触发电平、负延时长度等的编程,并向计算机回馈编程状态;接收来自计算机的状态查询指令,将测试系统的工作参数及当前运行状态回馈给计算机;接收来自计算机的读取数据指令,控制 CPLD 将存储在 SRAM 中的数据传输给计算机;接收来自计算机的增益编程指令,实现程控放大器的增益编程控制;等等。A/D 变换器选用逐次逼近型器件 AD7482,其分辨率为 12 bit,最高采样频率可达 3 MHz。系统设置的可编程采样频率为 3 MHz、2 MHz、1 MHz 和 500 kHz。为了实现数据的快速存取,系统选用 SRAM 作为存储器件,存储容量为 512 kW(16 bit)。由于系统采用内触发方式,触发电平设置为 16 档可编程,编程范围是 0.5 V ~ 2 V。根据波前信号的记录需要,可编程负延时长度设置为 128 kW、64 kW、32 kW 和 16 kW。

### 3 电路标定及实测试验

系统设计完成后,进行了电路调试及标定实验。在标定过程中,选用 Agilent 公司的信号发生器 33210A 作为标准信号源,产生一个 100 kHz 的正弦波信号(幅值范围 0.5 V ~ 4 V),由测试系统进行采集记录。采样过程结束后,将存储数据传输进计算机,通过软件读取信号幅值的数字量。改变正弦信号的幅值(以 0.5 V 为步长),重复上述实验过程 8 次,得到 8 组标定数据(数字量相对电压量)。然后利用最小二乘法对标定数据进行线性拟合,设电压量为  $x_i$ ,对应的数字量为  $y_i$ ,则满足如下回归方程:

$$y_i = ax_i + b + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, 8 \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon_i$  表示其他随机因素对数字量  $y_i$  的影响,服从正态分布  $N(0, \sigma)$ 。12 套电路系统的拟合结果如表 1 所示。

装配完成的测试系统见图 3。ICP 传感器安装在机械外壳的中心位置,传感器敏感面与外壳的上表面平齐。上表面外围是一个螺纹连接的保护盖,保护盖下方是系统的控制面板。控制面板主要包括电源开关、充电接口、USB 接口及状态指示灯 4 部分。测试前,打开电源开关,测试系统自动加载之前的工作参数,随即进入待触发状态。若需要修改工作参数,可通过 USB 接口连接计算机,由专用软件进行参数编程。编程结束后,系统的工作参数随即刷新并保存在内部的 E<sup>2</sup>PROM 中,掉电非易失。

表 1 电路系统标定结果

装置号	斜率 $a/(\text{bit} \cdot (\text{mV})^{-1})$	截距 $b/\text{bit}$	标准差 $\sigma/\text{bit}$
1	0.670	1.937	4.602
2	0.670	3.489	1.917
3	0.666	0.947	4.219
4	0.664	5.975	2.881
5	0.658	1.494	1.440
6	0.672	3.478	2.693
7	0.667	6.492	1.605
8	0.666	1.429	4.856
9	0.665	5.995	1.255
10	0.664	4.947	4.183
11	0.661	1.995	1.342
12	0.666	5.992	1.636

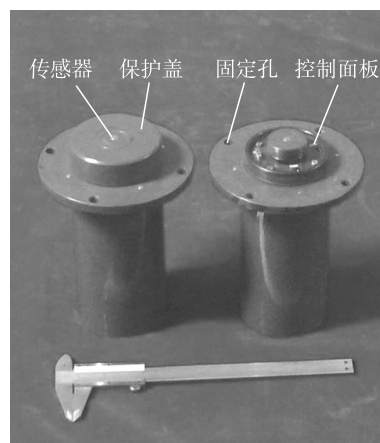


图 3 测试系统照片

研制完成的 12 套测试系统参加了多次实弹测试试验,其可靠性和试验效率得到了充分验证。图 4 是参加某型弹静爆试验的照片。被测弹由木质支架架高 1.5 m,支架下面铺设钢板,取弹的中轴线到钢板上的投影为爆心。测试系统以爆心为圆心在地面上按 3 个方向(夹角约 120°)呈放射状布设,每个方向布设 4 个测点,布设半径(测点到爆心的距离)分别是 5 m、7 m、10 m 和 15 m。图 4 是其中方向 1 的测点。图 5 是该方向在一发爆炸试验后记录的冲击波超压测试曲线。需要说明的是:由于各测点采用信号内触发,图中的曲线不具备统一时基。表 2 给出了该发弹 3 个方向测试数据的处理结果。从结果可以看出,随着测点远离爆心冲击波超压峰值总体符合单调递减的规律<sup>[18]</sup>,这充分体现了爆炸冲击波的传播特性。另外,虽然冲击波的正压持续时间随着测点距离的增加而延长,但表征爆炸能量的冲量值是随着测点距离的增加而严格单调递减的,这真实反映了冲击波传播过程中的动量守恒原则。

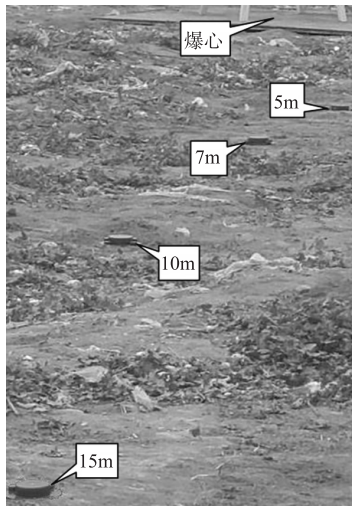
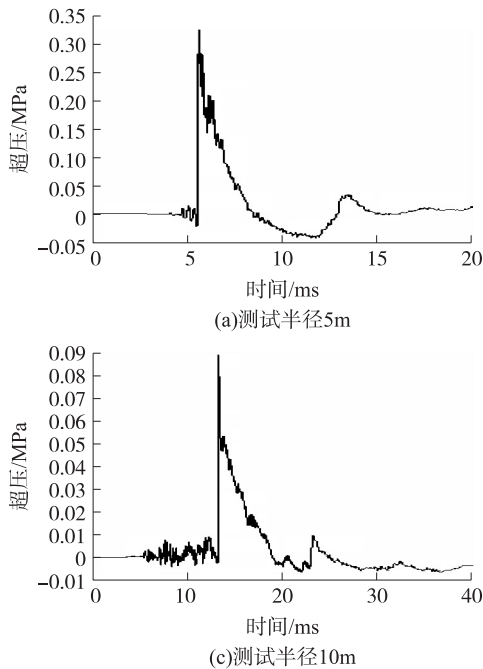


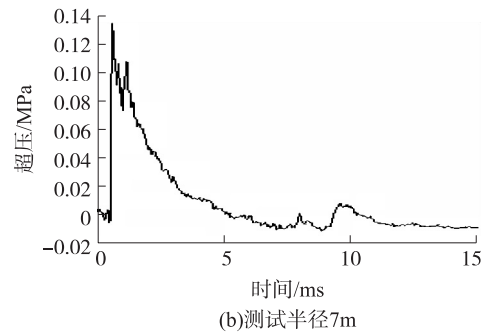
图4 某型弹现场实测照片

表2 某型弹一发试验测试结果

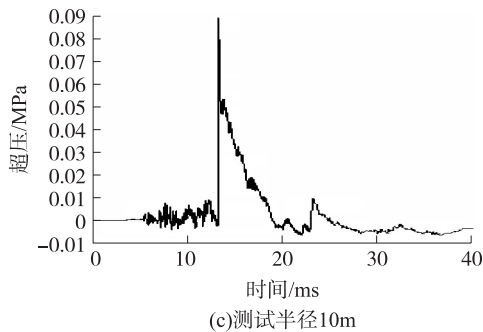
半径/m	方向	超压值/MPa	持续时间/ms	冲量/(Pa·s)
5	1	0.324	3.0	317
	2	0.286	2.9	347
	3	0.320	2.7	308
7	1	0.137	4.3	169
	2	0.128	4.4	163
	3	0.179	2.7	148
10	1	0.089	5.9	157
	2	0.077	6.3	159
	3	0.099	6.4	144
15	1	0.031	6.5	81
	2	0.041	7.6	103
	3	0.041	8.9	112



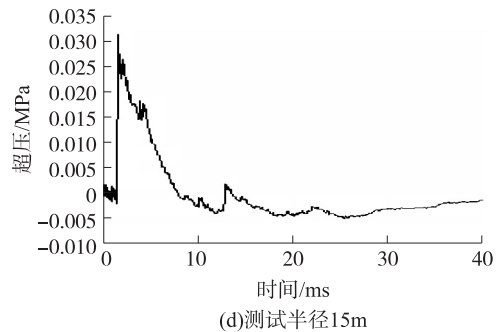
(a)测试半径5m



(b)测试半径7m



(c)测试半径10m



(d)测试半径15m

图5 某型弹冲击波超压测试曲线

## 4 结论

与传统的引线测试系统相比,研制的存储式冲击波超压测试系统具有体积小、功耗低、可靠性高、试验效率高等突出优点,可方便地嵌入爆炸现场实时完成冲击波超压测试,并计算得到正压持续时间和冲量。系统的多项工作参数可编程设置,满足不同被测对象的测试需求。该系统历经多次实弹测试试验的检验,数据捕获率达到95%以上。该系统可为各类弹药的科研研制和定型试验提供实测依据,为武器系统的爆炸威力评价提供了可靠有效的测试手段。

### 参考文献:

[1] 张少杰,马铁华,沈大伟. 低功耗爆炸冲击波应变测试系统[J]. 传感技术学报,2011,24(9):1359-1362.

[2] 屈康康,闫云聚,刘洋,等. 爆炸冲击波在长直坑道和复杂坑道内传播规律的对比研究[J]. 应用力学学报,2011,28(4):434-438.

[3] 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.

[4] 高轩能,刘颖,王书鹏. 基于 LS-DYNA 的大空间柱壳结构爆炸波压力场分析[J]. 振动与冲击,2011,30(9):70-75.

[5] 龚顺风,夏谦,金伟良. 近爆作用下钢筋混凝土柱的损伤机理研究[J]. 浙江大学学报,2011,45(8):1405-1410.

[6] 卢红琴,刘伟庆. 空中爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,31(19):105-108.

[7] 贾宪振,胡毅亭,董明荣,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 模拟水下爆炸冲击波的等效质量法[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(3):159-162.

[8] 张亚军,徐胜利. 中心内爆引起的圆柱壳流固耦合问题数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报,2007,37(1):6-12.

- [9] 孙百连, 顾文彬, 蒋建平, 等. 浅层水中沉底的两个装药爆炸的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 460-465.
- [10] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of an Underwater Explosion Bubble Near A Resilient/Rigid Structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 537:387-413.
- [11] 王芳, 冯顺山. FAE 战斗部毁伤威力评价的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 179-182.
- [12] 吴成, 金俨, 李华新. 固支方板对水中爆炸作用的动态响应研究[J]. 高压物理学报, 2003, 17(4): 275-282.
- [13] 曲霞, 唐德高, 伍俊, 等. 爆炸冲击波作用下钢板-砂土组合防爆墙的实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(1): 134-137.
- [14] 李秀地, 郑颖人. 坑道中冲击波冲量传播模型的试验[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(5): 425-428.
- [15] 张文栋. 存储测试系统的设计理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [16] 董冰玉, 杜红棉, 祖静. 基于无线控制的冲击波超压测试系统[J]. 传感技术学报, 2010, 23(2): 279-281.
- [17] 杜红棉, 祖静, 张志杰. 压阻传感器 8530B 闪光响应规律研究[J]. 测试技术学报, 2011, 25(1): 78-81.
- [18] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.



王代华(1977-), 男, 汉族, 山东日照人。中北大学博士研究生, 讲师。在国内外学术刊物上发表论文多篇, 其中EI收录4篇。现工作于中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 主要研究方向为动态测试技术及智能传感器系统, wangdaihua@nuc.edu.cn;



张志杰(1965-), 男, 汉族, 山西太原人。中北大学教授, 博士生导师, 北京理工大学博士。提出动态测试环境因子概念, 提出动态测试系统中反滤波修正算法。主持和参与完成了省部级基金四项, 横向课题20余项。获国家、省部级科技进步奖五项, 在国际会议和国内学报上发表论文30余篇。主要从事动态测试技术与智能

仪器及通信技术的应用研究, zhangzhijie@nuc.edu.cn。