

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.013

# 基于 FPGA + ARM + WIFI 的炸药冲击波超压采集系统设计\*

夏永乐<sup>①②</sup> 张志杰<sup>①②</sup> 翟永<sup>①②</sup> 贾振华<sup>①②</sup> 王瑞<sup>①②</sup>

①中北大学电子测试技术国家重点实验室(山西太原,030051)

②中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室(山西太原,030051)

[摘要] 针对冲击波超压测试中的通用测试系统布置繁杂、存储测试系统状态无法监测和难以远程控制等问题,设计了基于 FPGA、ARM 和 WIFI 的冲击波超压采集系统,实现了对测试装置远程控制和系统工作状态的监测,省去了繁琐的布线。测试数据通过无线 WIFI 传送到上位机进行处理、显示。为了防止数据丢失,设计了 USB 接口用于数据的有线读取。多次靶场实爆试验表明:系统稳定、无线通信可靠;给出了某当量炸药的冲击波超压曲线。

[关键词] 冲击波;采集系统;FPGA;ARM;WIFI

[分类号] TJ510.6

## 引言

准确测量炸药爆炸产生的冲击波超压和冲量,可以为武器研发中的爆炸类型判别、威力对比、毁伤效能以及地面防护提供重要依据<sup>[1-2]</sup>。目前,国内外冲击波超压测试主要有 2 种技术:引线电测法和存储测试法。引线法组建系统简单易行,得到了较为普遍的应用<sup>[3-5]</sup>;但因传感器和后续记录仪表分离,其间的长电线成为测试系统防护的薄弱环节,由弹片击中或信号漂移等因素致使测试失效的现象时有发生,数据捕获率低<sup>[6]</sup>;另外还存在着布线繁杂、电磁干扰造成误触发以及给信号掺杂很大的噪声等问题<sup>[7]</sup>。存储法具有抗干扰性强和无需电缆引线的优点,尤其适宜于大范围多点测试<sup>[8]</sup>;但是无法监测系统工作状态,并且需要事后回收测试装置读取数据,有可能在途中因系统掉电导致数据丢失<sup>[9]</sup>。

针对以上两种方法的不足,本文根据存储测试原理和无线 WIFI 技术,并结合 FPGA、ARM 控制器的特点,提出了基于 FPGA、ARM 和无线 WIFI 的冲击波超压采集系统,实现了对采集装置远程控制、系统工作状态的监测和测试数据无线传输。

## 1 设计方案

系统主要由采集节点、无线通信装置和控制中心 3 部分组成。采集节点分布于测试场内采集信号;系统采用无线 WIFI 通信方式进行数据传输;控

制中心通过无线对采集节点进行监控并对测试数据进行分析处理。另外,采集节点具有存储的功能,当无线通信故障时可通过 USB 接口来读取数据,确保数据不丢失,提高了系统的通用性和可靠性。采集节点由传感器模块、控制模块、存储单元等组成。无线通信装置由覆盖 AP、中继传输 AP 以及场内节点的无线模块组成。控制中心主要由计算机和相应的上位机软件组成。系统总体设计框图见图 1。

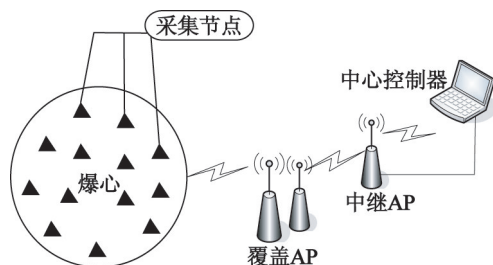


图 1 系统总体设计框图

Fig. 1 Design diagram of overall system

## 2 采集节点

采集节点硬件原理图如图 2,采集节点能完成对目标信号的采集并及时响应控制中心的各项指令,将数据回传到控制中心进行后续的处理。

### 2.1 传感器的选择

爆炸冲击波具有初值高、衰减快、持续时间短等

\* 收稿日期:2014-06-17

作者简介:夏永乐(1990~),男,硕士研究生,主要从事动态测试与智能仪器、冲击波超压测试的研究。E-mail:nucxyl@163.com

通信作者:张志杰(1965~),男,博导,教授,主要从事现代测试理论与技术、动态测试与智能仪器的研究。E-mail:zhangzhijie@nuc.edu.cn

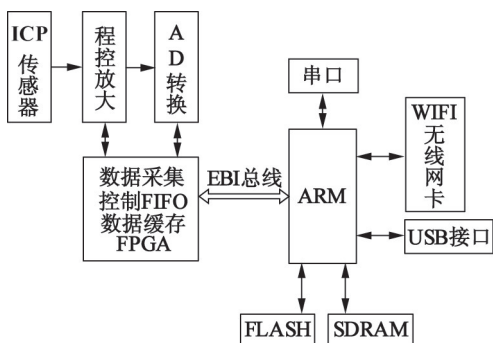


图 2 采集节点硬件原理图

Fig. 2 Hardware circuit diagram of the acquisition node

不同于其他动力载荷的特点<sup>[10]</sup>,选择合适的传感器来准确捕捉信号是系统的关键,系统选择了 PCB 公司的 113 系列 ICP 压电式压力传感器。其内部高度集成了将高阻抗电荷转为低阻抗电压输出的微电子放大器,输出正比于压力的电压信号。相比于传统压电传感器,具有抗干扰能力强、灵敏度高、噪声小等优点,并提高了测试精度和可靠性,尤其适用于现场测试。ICP 传感器获取的信号经程控放大电路、抗混叠滤波电路后接入 AD。通过 FPGA 控制程控放大器完成 8 种不同放大倍数的设定,以满足不同测试场合,在上位机中通过参数设置即可实现放大倍数的设定。

## 2.2 主控电路及 AD 选择

主控电路以 ARM 为核心负责数据的处理,采用 FPGA 专门完成数据的采集。FPGA 时钟频率高、内部延时小,全部控制逻辑由硬件完成,效率高、速度快,适用于大数据量的高速传输控制<sup>[11]</sup>。系统选用的 FPGA 是 Altera 公司 EP2C20240QI8N,该芯片内部具有 18752 个逻辑单元,52 个 4KB 的 RAM 存储块,可以配置为广泛的操作模式,包括 RAM、ROM、FIFO 缓冲器等模式。ARM9 处理器是一个 32 位元精简指令 (RISC) 处理器架构,具有运算速度快、功耗低、支持操作系统等特点,适合大量数据的处理<sup>[12]</sup>。ARM 选用了 AT91SAM9260 芯片,该芯片基 ARM926EJ-S 内核,包含了 8KB SRAM 以及 32KB ROM,并带有外部总线接口,芯片内部集成多个外围设备接口,包括音频接口、10/100M 以太网接口、高速 USB 接口等。FPGA 与 ARM 之间采用 EBI 总线通信。

考虑到测试系统的精度及功耗,AD 转换器选用 12 位高速、低功耗、逐次逼近型的 AD7482,最高可达 3 MHz 的采样频率。正常工作模式下其功耗为 90 mW,睡眠模式下功耗仅为 2.5 mW,待机模式下功耗仅为 10  $\mu$ W。由 FPGA 控制电路产生 AD 转

换器的所需工作时序,实现了 AD 的采样频率的可编程,采样频率可设为 3 MHz、2 MHz、1 MHz 和 500 kHz,可通过上位机中的参数设置设定采样频率。

## 2.3 USB 接口设计

采用 FTDI 公司的 FT245RL 芯片来实现 USB 通信。该芯片体积微小、传输速度快、与微处理器易对接。其主要管脚按功能可分为数字 I/O、USB 接口、发送缓冲区空标志、接收缓冲区非空标志和读、写控制信号等<sup>[13]</sup>,利用该芯片实现 USB 和并行接口间的协议转换。芯片的数字 I/O 口和 ARM 的 I/O 口相连,ARM 通过控制其读、写信号使其工作。为提高系统的可靠性,提供了两路 USB 接口:其中一个用于驱动 WIFI 无线网卡建立通信链路和上位机之间进行数据传输,另一个用于测试数据的有线读取或设置参数。

## 3 软件设计

系统软件设计包括:嵌入式 Linux 系统和 FPGA 数据采集。

### 3.1 嵌入式 Linux 系统

作为多用户、多任务的操作系统,嵌入式 Linux 系统具有开放性良好、可靠性高等优点。设计的主要内容包括嵌入式操作系统的配置与移植、Linux 下设备驱动程序和应用程序的开发。其中设备驱动程序设计中主要包括:基于 FT245 的 USB 接口驱动、基于 RT3070 的 WIFI 模块的驱动和 EBI 总线驱动。

为保障无线网络的安全畅通,提高系统的安全性和稳定性,无线模块采取自动加载和循环连接方式。无线网卡驱动的移植完成后,首先需要完成网卡驱动程序自动安装和无线模块能自动连接监测到的 AP 等工作,然后完成 WIFI 无线网络的关联,设置客户端 IP 地址、端口号,即对无线数据采集终端进行设置。在 Linux 系统中把无线网卡关联到 AP 上的工具 LWE (linux wireless extensions),通过指令 “Iwconfig ra0 essid ubnt” 完成对 AP 的连接。由于测试的环境复杂,为确保 AP 在有效覆盖范围内,采用侦听、监测的方式,对 AP 进行搜索,锁定目标后进行连接。周期性监测网络连接,如果连接存在则继续侦听;如果连接断开则再次搜索连接(图 3)。

### 3.2 FPGA 控制数据采集

FPGA 主要用于数据采集(图 4)。FPGA 控制程控放大器和 AD 芯片的转换,模拟信号转换成数字信号后,由 FPGA 将数据读取到内部 FIFO 中缓存,并响应 ARM 读取数据。ARM 对数据进行分析处理并存储。采集节点接收到控制中心发出的传输数据命令时,通过无线 WIFI 将数据传输到上位机。

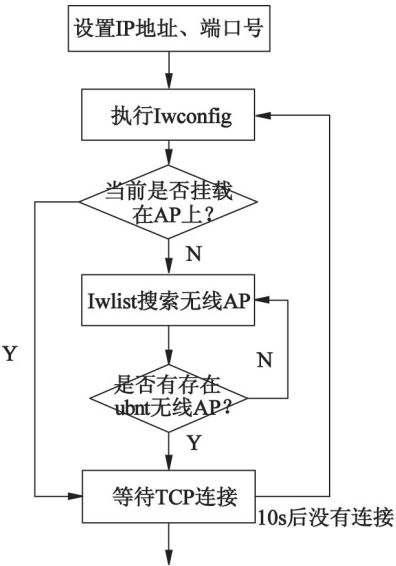


图3 无线模块循环连接流程图

Fig. 3 Flow chart of wireless module loop connection

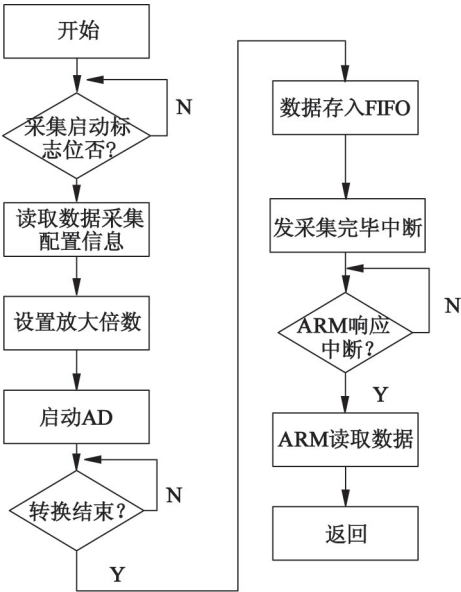


图4 FPGA控制数据采集流程图

Fig. 4 Flow chart of the FPGA data collection

3.3 应用程序设计

系统应用程序可分为客户端和上位机。在 ARM 中运行的客户端是采集节点和服务器的桥梁。上位机是系统控制中心,通过无线给客户端发送操作命令,完成以下工作:读取 FPGA 采集的数据并进行压缩、存储等处理;设置网络与上位机建立无线通信,等待 TCP 连接并检测通信链路状态;和服务器建立 SOCKET 通信,根据接收到的命令完成对应的操作。上位机采用 Labview 编写,具有良好的人机交互界面,实现了以下功能:通信方式选择、参数设置、系统状态监测、数据读取和处理及波形显示等。

4 系统标定与测试试验

4.1 系统标定

用于冲击波测试系统校准的激励,带宽至少要达 100 kHz。激波管产生的激波特点有:1) 压力值易改变、幅值范围广;2) 频率范围宽(2.0 kHz ~ 2.5 MHz),能充分覆盖被校压力传感器的各种模态;3) 近似于理想的阶跃压力信号。另外,激波管结构简单、方法可靠,被选为系统校准的激励装置(图 5)。激波管工作时,高压气源经减压阀通向高压室,调节减压阀使高压室压力逐渐增大,到某一值时,膜片受压瞬间破裂,从而在低压室形成激波,并以很高的速度沿低压室方向传播,在激波前后形成很理想的阶跃压力,作用于被校准的压力传感器。

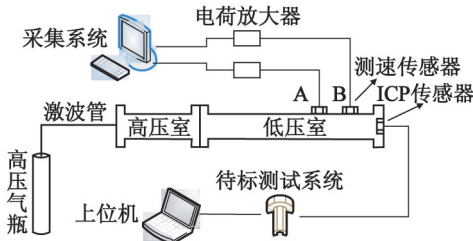


图5 激波管结构框图

Fig. 5 Structural diagram of the shock wave tube

系统标定方法:将被校准的 ICP 压电式压力传感器安装在激波管低压室尾部的端面上,其输出端接入与之配套的测试系统。利用该测试系统采集激波信号,采集完毕后,通过上位机读取电压值  $U$  (首个峰值),并根据传感器灵敏度换算出超压值  $p_0$ 。然后利用激波管配套的采集系统,精确读出激波通过 A、B 测速传感器的时间差,根据兰基涅-胡果尼方程及相关公式,准确计算出激波实际压力值  $p$  和系统的误差  $\varepsilon$ 。为了便于计算,测试系统放大倍数均设为 1 倍。表 1 为某一套系统的标定结果,ICP 传感器灵敏度为 15.24 mV/kPa。试验结果表明:系统误差均在 2% 以内,满足设计精度与测试要求。

4.2 测试试验

炸药爆炸瞬间具有高温、高压等特点,为了提高测试系统在恶劣环境下的可靠性及抗干扰能力,采集节点中选用了具有存储量大、掉电数据不丢失特点的 NAND 型闪存存储器,以避免因掉电导致的数据丢失。将采集节点中的传感器模块、控制模块、存储单元、无线模块、电源等集成为一体并合理装配于耐冲击的钢体结构内,其中 ICP 传感器安装在钢体结构的上表面,并使其敏感面与上表面齐平。采用可充电的锂电池供电,实现了单节点的便捷性,使采集节点能方便地植入爆炸现场并能独立工作,这大大提高了系统在野外的工作能力。在试验前可通过



表 1 某套系统的标定结果

Tab. 1 Calibration results of a set of system				
序号	$U/V$	$p_0/\text{MPa}$	$p/\text{MPa}$	$\varepsilon/\%$
1	2.040	0.133858	0.131806	1.557
2	2.704	0.177427	0.175293	1.217
3	2.148	0.140945	0.139827	0.799
4	3.116	0.204462	0.205911	-0.704
5	3.072	0.201575	0.204878	-1.612
6	2.624	0.172178	0.175302	-1.782
7	2.640	0.173228	0.174994	-1.009
8	1.396	0.091612	0.090119	1.656
9	1.452	0.095276	0.096076	-0.833
10	1.752	0.114961	0.113076	1.667
系统误差				1.42

控制中心进行系统状态扫描,获知采集节点是否处于正确的工作状态。其中因人为或其他因素造成的误触发,可通过上位机远程控制对采集节点进行软件复位,以重新回到待测状态。

测试试验方法:被测的某型号炸药由木质支架架高 1 m,并以炸药在地面的投影为爆心。6 套测试设备按 3 个方向分别埋设在距离爆心 7、10 m 处,并保持设备的上表面与地面齐平,这一方面使传感器能有效地捕捉信号,另一方面更好地保护系统。测试节点现场布置如图 6 所示。另外,覆盖 AP 架高 4 m 并布置在距离爆心 80 m 处,中继 AP 架高 4 m 并同计算机布置在距离爆心 800 m 处。图 7 是一发炸药爆炸试验后在布设方向 1<sup>#</sup>上记录的冲击波超压测试曲线。表 2 为该发炸药 3 个方向测试数据的处理结果。可以看出,随着测点离爆心距离增大,冲击波超压峰值减小,正压持续时间延长,这充分体现了爆炸冲击波的传播特性<sup>[1]</sup>。

5 结语

设计了基于 ARM、FPGA 和无线 WIFI 的冲击波超压采集系统,以 ARM 为核心,采用嵌入式 Linux

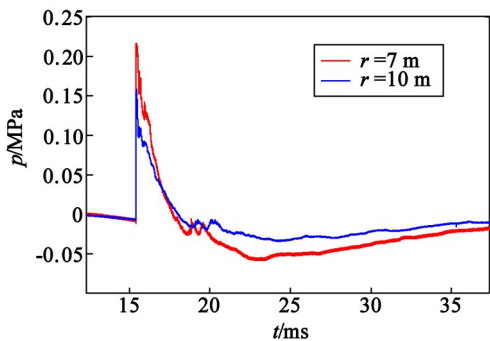


图 7 在方向 1<sup>#</sup>上的冲击波超压测试曲线  
Fig. 7 Overpressure test curves on the direction 1<sup>#</sup>

表 2 某型号炸药试验测试结果

Tab. 2 Test results of a type of explosive				
半径/ m	方 向	超压值/ MPa	持续时间/ ms	冲量/ (Pa · s)
7	1 <sup>#</sup>	0.221	3.1	308
7	2 <sup>#</sup>	0.243	2.8	329
7	3 <sup>#</sup>	0.226	2.9	296
10	1 <sup>#</sup>	0.157	4.1	153
10	2 <sup>#</sup>	0.172	3.7	165
10	3 <sup>#</sup>	0.163	4.3	148

操作系统,使系统功能更丰富。采用 FPGA 专门负责数据的采集,确保了数据采集的速度和准确度,同时减少了 ARM 系统的工作量,让 ARM 更专力于数据处理及其他工作。采用高传输速率的无线 WIFI 技术,发挥了无线控制的优越性,实现了对采集系统的远程控制以及系统状态的监测,有效保证了试验人员的安全。通过无线可对测试节点进行灵活多变的参数设置,以适应不同测试环境和测试要求,另外通过有规律的布置采集节点实现爆炸场的多点测试,为测试结果提供了更全面的依据。

目前该系统已成功应用于某型号炸药定点爆炸冲击波场测试。该系统为冲击波超压测试提供了可靠有效的方法,具有很好的应用价值和发展前景。

参 考 文 献

[1] 黄正平. 爆炸与冲击电测技术[M]. 北京:国防工业出版社,2006:26-49.  
Huang Zhengping. Explosion and shock electrical measurement technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2006:26-49.

[2] 朱满林,石成英,蔡星会,等. 基于 ICP 技术的炸药冲击波压力测定[J]. 爆破器材,2012,41(4):30-32.  
Zhu Manlin, Shi Chengying, Cai Xinghui, et al. Shock wave pressure measurement of explosive based on ICP technology[J]. Explosive Materials, 2012, 41(4):30-32.

[3] Klaseboer E, Hung K C, Wang C, et al. Experimental and

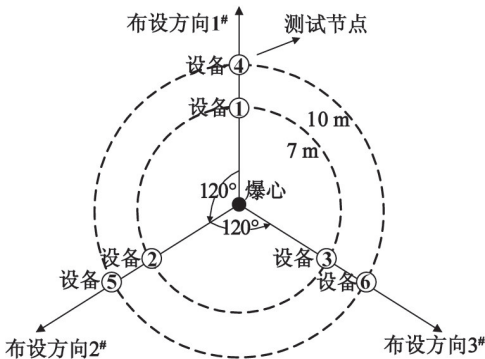


图 6 测试节点现场布置图  
Fig. 6 Site layout of test nodes

- numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 537: 387-413.
- [4] 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.
- Qu Xia, Tang Degao, Wu Jun, et al. Experimental study of steel plate-sandy soil composite blast wall under the effect of blast wave[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(1): 134-137.
- [5] 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: 自然科学版, 2007, 8(5): 425-428.
- Li Xiudi, Zheng Yingren. Scale model tests to determine in-tunnel blast impulse from HE-charges at tunnel entrance[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(5): 425-428.
- [6] 王代华,宋林丽,张志杰. 基于 ICP 传感器的存储式冲击波超压测试系统[J]. 传感技术学报, 2012, 25(4): 478-482.
- Wang Daihua, Song Linli, Zhang Zhijie. A stored overpressure measurement system based on ICP sensor for shock wave[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(4): 478-482.
- [7] 赵岩,马铁华,杜红棉,等. 基于 FPGA 和无线通信的冲击波超压采集系统设计[J]. 工程设计学报, 2011, 18(6): 449-452.
- Zhao Yan, Ma Tiehua, Du Hongmian, et al. Design of shock wave overpressure acquisition system based on FPGA and wireless communication [J]. Journal of Engineering Design, 2011, 18(6): 449-452.
- [8] 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(增刊 4): 134-135, 146.
- Ma Tiehua, Zu Jing. Shock wave pressure measurement by memorized technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Suppl. 4): 134-135, 146.
- [9] 张哲,李宝珠,王存宝,等. 基于无线数据传输的冲击波超压测试系统的研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(6): 7-9.
- Zhang Zhe, Li Baozhu, Wang Cunbao, et al. Study on shock wave test system based on wireless data transmission [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(6): 7-9.
- [10] 鲁建霞. 测试仪器防护技术在爆炸环境中的仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2009.
- Lu Jianxia. The simulation study on protective technology of testing instrument in the explosion environment[D]. Taiyuan: North University of China, 2009.
- [11] 秦奎,张卫平,陈文元. 基于 ARM 和 FPGA 的微加速度计数据采集系统设计[J]. 现代电子技术, 2010(2): 25-27, 30.
- Qin Kui, Zhang Weiping, Chen Wenyuan. Design of data acquisition system for micro-accelerometer based on ARM and FPGA[J]. Modern Electronic Technique, 2010(2): 25-27, 30.
- [12] 程燕胜,宗群,吴宏硕. 基于 ARM + FPGA 的微陀螺仪数据采集处理系统设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(8): 75-77.
- Cheng Yansheng, Zong Qun, Wu Hongshuo. Design of data acquisition and processing system for micro-gyroscope based on ARM and FPGA [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(8): 75-77.
- [13] 王志,王文廉,张志杰. SPI 及 USB 双通信接口的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2010, 31(1): 72-75.
- Wang Zhi, Wang Wenlian, Zhang Zhijie. Design and realization of SPI and USB dual communication interface[J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(1): 72-75.

## Design of Explosive Acquisition System for Shock Wave Overpressure Based on FPGA + ARM + WIFI

XIA Yongle<sup>①②</sup>, ZHANG Zhijie<sup>①②</sup>, ZHAI Yong<sup>①②</sup>, JIA Zhenhua<sup>①②</sup>, WANG Rui<sup>①②</sup>

① Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory,  
North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

② Key Laboratory for Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,  
North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] To solve the problem sincluding complicated wiring of universal test system, unable monitoring to the stored testing system and difficult remote control in the shock wave overpressure measurement, a new overpressure measurement system was designed based on the technologies of FPGA, ARM and WIFI. It has the function of controlling the test sets remotely, monitoring the system state and eliminating the cumbersome wirings. Data is transferred to the PC for processing and displaying by WIFI. To prevent data loss, it also designed the USB interface to read the data. In the several real explosion experiments of shooting range, the results show that: the system is stable and the wireless data transmission is reliable. The shock wave overpressure curves for a certain explosive were also given out.

[KEY WORDS] shock wave; acquisition system; FPGA; ARM; WIFI