

## An Acquisition and Storage System for TNT Explosion Time Based on FPGA and WSN

LIU Shuanghong<sup>1,2</sup>, ZHANG Hailong<sup>1,2</sup>, JIN Hong<sup>1,2</sup>, CHEN Changxin<sup>1,2</sup>, MA Tiehua<sup>1,2\*</sup>

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

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

**Abstract:** TNT Explosion time is an important parameter, and its precise measurements can provide accurate time for TNT powder evaluation. TNT Explosion time recording device is introduced in the paper which is based on Field Programmable Gates Array (FPGA) and Zigbee wireless sensor networks. Particularly, the system status is monitored using wireless sensor networks, and experimental results show the system has high measuring accuracy. In a simulated environment, the rise time of flash waveform collected using this recording device is less than 20  $\mu\text{s}$ . The field tests prove the rise time is less than 15  $\mu\text{s}$  and the test error is less than 2%. The recording device has the advantages of small size, low power consumption, impact resistance, which is suitable for data acquisition and storage in harsh environments.

**Key words:** storage testing; explosion time; WSN; photoelectric device; FPGA

EEACC:7210G

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.022

## 基于 FPGA 和 WSN 的 TNT 爆炸时刻采集及存储系统

刘双红<sup>1,2</sup>, 张海龙<sup>1,2</sup>, 靳 鸿<sup>1,2</sup>, 陈昌鑫<sup>1,2</sup>, 马铁华<sup>1,2\*</sup>

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 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, 太原 030051)

**摘 要:** 火药的爆炸时刻是火药试验的重要测量参数, 精确的测量值可以为火药性能的评估提供准确的时间数据。针对爆炸冲击波参数测试的特殊环境, 设计了一种基于现场可编程门阵列 FPGA 和 zigbee 无线传感网络的 TNT 爆炸时刻采集及存储系统。该系统可通过无线网络检测系统的工作状态, 并且实验验证系统具有较高的测试精度, 模拟环境下, 采集到的瞬时光波形上升时间小于 20  $\mu\text{s}$ , 靶场试验表明: TNT 爆炸时刻记录装置采集到的闪光波形上升时间小于 15  $\mu\text{s}$  测试误差小于 2%。系统具有体积小、功耗低、耐冲击等优点, 适合恶劣环境下的数据采集和存储。

**关键词:** 存储测试; 爆炸时刻; 无线传感网络; 光电器件; FPGA

中图分类号: TN06; TN92

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-1009-05

爆炸过程产生的冲击波峰值超压和冲量是火药能量特性的一项重要参数, 也是爆炸战斗部毁坏效应的一项重要指标, 其准确测量值具有重要意义。由于测试过程的特殊性, 干扰信号(如电磁波)可能会影响测试数据的真实性<sup>[1]</sup>。为了验证测试数据的正确与否, 需要利用火药的爆炸时刻来作为参考量。在靶场试验中, 火药的爆炸时刻是火药试验鉴定的最重要的性能指标之一, 只有精确测量出这一数值, 才能为脱靶参量的计算、引战配合性能的评估提供准确的时间数据<sup>[2]</sup>。本文设计的 TNT 爆炸时刻采集及存储系统借助于 Zigbee 无线传感网络监测系统的测试状态, 控制系统数据采集和读取, 具有很高的可靠性。

## 1 系统总体设计

### 1.1 测试原理

火药爆炸时会产生冲击波和火光。TNT 爆炸时刻采集及存储系统通过测量火光来记录爆点时刻, 主要由光电转换模块(数据采集)、数据存储模块、USB 读数模块、无线模块、计算机和电源管理模块等组成。光电传感器采集到信号后送至 AD 转换器, AD 转换的数字量在 FPGA 的控制作用下保存至闪存中, 通过 USB 读数模块读取闪存中的数据也可以通过 Zigbee 无线传感网络读取装置中的数据。测试系统的原理图如图 1。

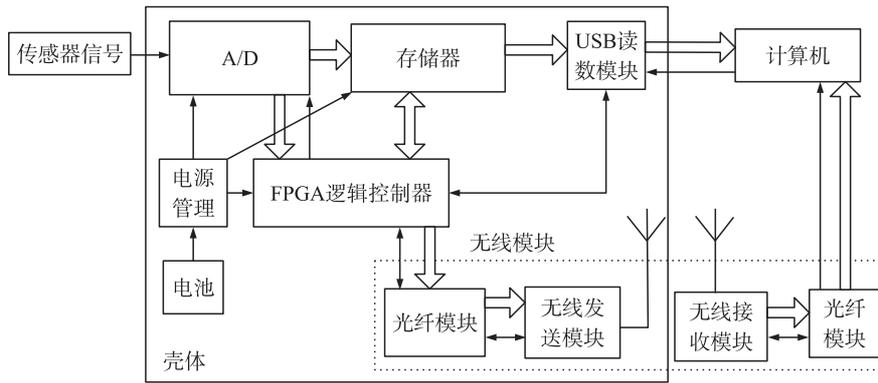


图 1 测试系统原理图

在冲击波参数测试中,考虑到测试的恶劣环境,测试电路装置在一个壳体内,壳体除了具有屏蔽作用之外还具有很强的抗冲击能力,起到保护壳体内部测试系统的硬件电路的作用。该设计的爆点时刻记录装置壳体采用高强度的刚体结构,最大能够承受 10 MPa 以上的冲击波压力。

### 1.2 光电转换模块的设计

光电转换模块需要选择合适的光电器件。根据已有文献,火药爆炸有两个发光区,如图 2。 $T_1$  和  $T_2$  分别是第一和第二发光区光峰到来的时间,其中较大峰值处即爆炸最亮点,所对应的的时间就是爆炸时刻<sup>[3]</sup>。火药爆炸时的温度为 2 800 K ~ 5 000 K<sup>[4]</sup>,根据维恩定律<sup>[5]</sup>,可得到对应的波长为 0.579  $\mu\text{m}$  ~ 1.035  $\mu\text{m}$ 。2DU 型硅功率光敏二极管的响应波长为 0.5  $\mu\text{m}$  ~ 1.11  $\mu\text{m}$ ,峰值波长为 0.94  $\mu\text{m}$ ,灵敏度为 0.4  $\mu\text{A}/\mu\text{W}$ ,波长分布曲线如图 3。2DU 型硅功率光敏二极管的光通为方形,有效面积为 1 mm  $\times$  1.3 mm,在反向电压下工作的,没有光照时,反向电流即暗电流很小(一般小于 0.1  $\mu\text{A}$ )。当有光照时,携带能量的光子进入 PN 结后,把能量传给共价键上的束缚电子,使部分电子挣脱共价键,从而产生光生载流子。光生载流子在反向电压作用下参加漂移运动,使反向电流明显变大,光的强度越大,反向电流也越大。光敏二极管在一般照度的光线照射下,所产生的电流叫光电流,2DU 型硅功率光敏二极管的光电流/正电压特性曲线如图 4。如果在外电路上接上负载,负载上就获得了电信号。

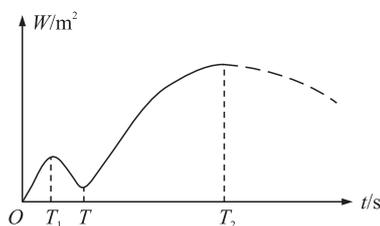


图 2 TNT 爆炸光辐射波形

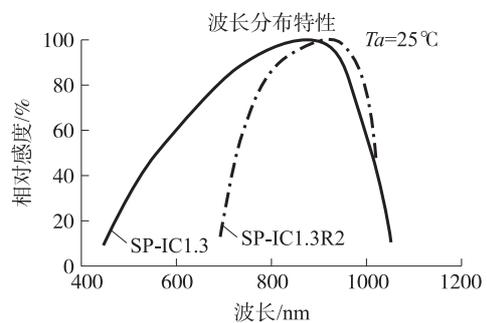


图 3 2DU 型硅功率光敏二极管波长分布曲线

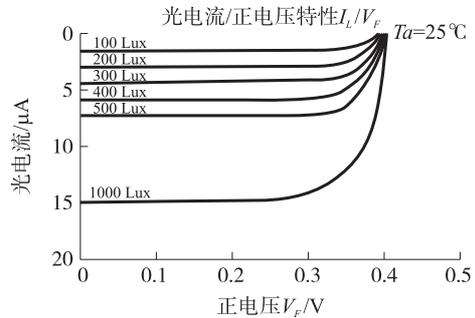


图 4 2DU 型硅功率光敏二极管光电流/正电压特性曲线

考虑到光电转换器的供电电压有限,为避免输出信号在谷点出现电压饱和,负载需要采用非线性负载<sup>[3]</sup>。光电转换模块的电路图如图 5。在实验室环境下,利用闪光灯对光电转换器进行了模拟实验,得到如图 6 所示的波形,信号的上升时间为 18  $\mu\text{s}$ ,噪声 15 bit。

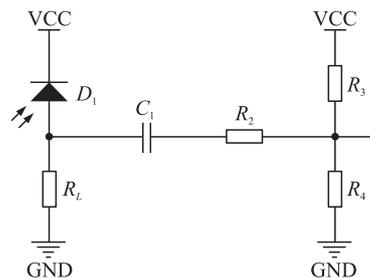


图 5 光电转换模块电路图

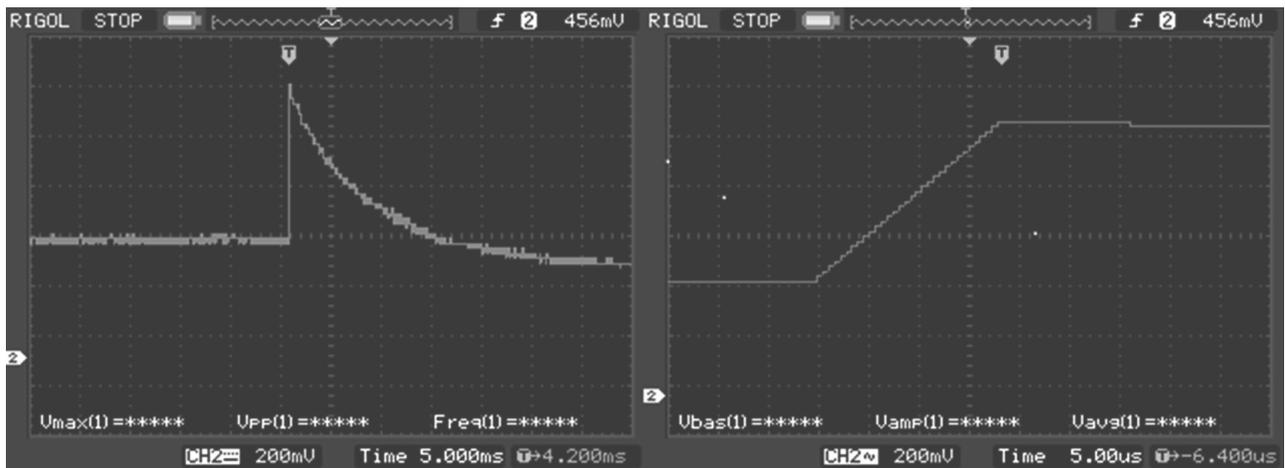


图6 模拟环境下采集的波形图及波形展开图

### 1.3 无线模块的设计

冲击波超压场具有很大的威力,控制人员必须处于超压小于0.03 MPa的位置,一般距离爆心要几百米<sup>[6]</sup>,为了在远处实现监控测试装置状态,并在第一时间获取测试数据,该系统采用SZ-05系列Zigbee无线传感网络。

Zigbee技术是一种新型的低速率传输的无线通信技术,利用全球公共频率2.4 GHz,具有低成本、低功耗、网络节点多、传输距离远等优势<sup>[7]</sup>。Zigbee无线系统可组成星型、网状以及簇状机构,该系统采用星型结构。该模块的主要功能是爆炸前检测各个装置(从节点)的状态以及给出同步触发的内触发信号,数据采集记录完成后,读取各个装置的存储信息。同步触发的内触发信号通过中断的方式给出,主节点接收到中断信号后以广播方式发送,保证触发信号的同步性。从节点在接收到触发信号前保持低功耗状态等待中断信号,接收到内触发信号后485管脚立即置低控制存储测试装置触发,保持300 ms后恢复高电平,这时停止无线模块供电,防止爆炸区电离场对测试电路的影响<sup>[8]</sup>。

### 1.4 存储测试设计

爆炸光是一种瞬态量,持续时间很短,为了保证实验数据的准确性,系统采用1 MHz的采用频率。存储器采用基于页编辑、块擦除的flash存储器K9F1208存储器,该存储器的块擦除的时间为2 ms,页编程的典型时间为200  $\mu$ s,最大页编程时间为500  $\mu$ s。一页的数据在写入flash memory时需要经过至少200  $\mu$ s的编程等待时间,为了避免这期间送过来的数据流失,系统采用FPGA控制下的两片flash memory的乒乓存储方式。

两片闪存存储器总容量为两个单元,系统上电后,计算机通过Zigbee无线网络对系统进行状态检测,完成参数设置进入循环采样状态,等待触发,此时,经AD转换的数字量数据记录在第一单元,存储的内容被不断的擦除改写。触发命令到来时,测试电路触发,负延迟计数器开始计数,达到负延迟的长度后,数据转向第二单元开始进行数据记录。在数据采集完毕后系统进入低功耗状态,等待主机以点名的方式读取数据,也可以回收装置后通过USB读数模块读取闪存中的数据<sup>[9]</sup>。

在设计中,为了保证实验的可靠性,系统使用外触发和内触发多种触发方式<sup>[10]</sup>。外触发信号是在火药引爆前,计算机利用Zigbee无线模块<sup>[11]</sup>通过中断以广播的方式发出,内触发信号由在光电传感模块采集的信号强度大于FPGA设置的触发电平的情况下产生的。

## 2 程序设计

系统的程序设计包括计算机软件程序设计、FPGA设计和USB读数程序设计<sup>[12]</sup>。计算机软件程序设计是借助于labview的人机界面,主要用于通过无线通信对测试系统发送各种操作指令实现对装置的检测和参数设置以及对测试数据进行接受、查询、显示,系统的数据显示的软件界面图如图7所示。FPGA设计是用来控制A/D的采样和完成系统的初始化、中断优先级以及判断调用各个模块,使整个系统具有严格的控制时序,保证工作的高速可靠。USB读数程序主要是通过设计GPIF固件的波形图来控制USB的读数。系统软件设计流程图如图8所示。

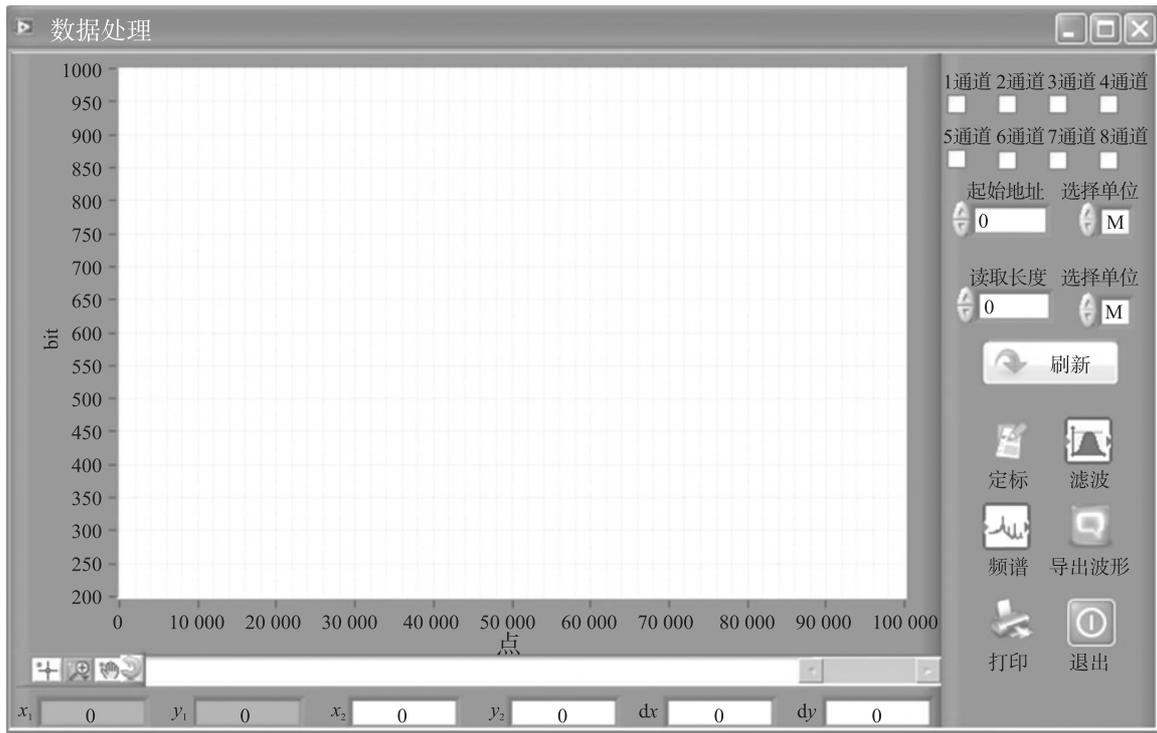


图 7 系统的数据显示软件界面图

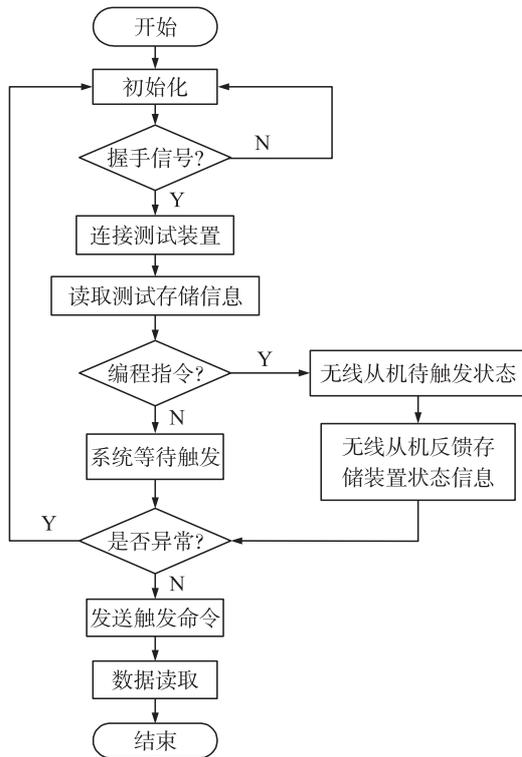


图 8 系统软件设计流程图

### 3 测试验证及数据分析

爆点时刻波形记录装置经实验室多次模拟试验后,在靶场对 3 kg 当量的 TNT 进行了冲击波参数测试实验。由于本测量是通过光学途径实现的,根据经验,自然界的非火药爆光(如太阳光)就会测量构成

一定的干扰,导致系统出现“误测”或者光敏二极管的阻值在强光下,可能已经饱和,在测量爆炸时刻时,有可能发生“漏测”,鉴于上述两种情况干扰,除了应恰当地选择触发电平外,还要对光敏电阻采取必要措施,比如加滤光片,以减小太阳光的干扰。为了保证可靠的数据记录,将爆点时刻波形记录装置置于距爆心 0.5 m 的距离。图 9 为 TNT 爆炸瞬时闪光波形曲线。图 10 为 3.5 m 处自由场冲击波超压曲线。

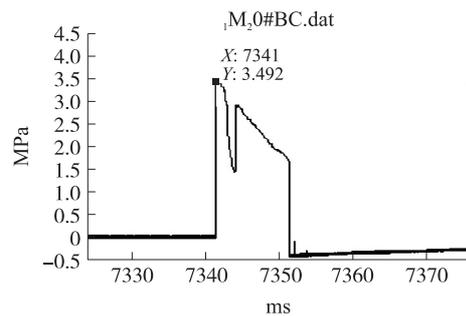


图 9 TNT 爆炸瞬时闪光波形曲线

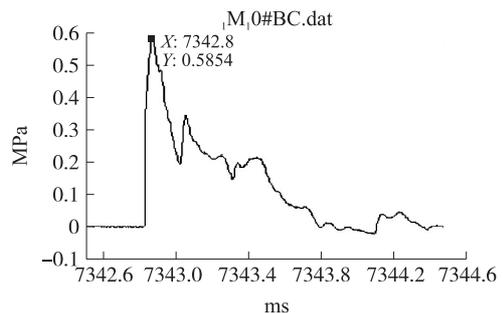


图 10 3.5 m 处自由场冲击波超压曲线

从图9中可以看出,TNT爆炸的时刻在时间轴的7341处,冲击波其他参数数据应该在7341点以后。本文以3.5m处自由场冲击波超压曲线作为验证曲线,根据相关文献,爆炸冲击波传播的速度为 $2000\text{ m/s}^{[13]}$ ,冲击波传播3.5m的距离应该在1.75ms左右,即3.5m处自由场冲击波超压峰值应该出现在时间轴的7342.75处。从图10看出,3.5m处自由场冲击波超压峰值在7342.8处,测试误差小于2%。实验验证,该爆炸时刻测试系统具有较高的测试精度。

#### 4 结束语

TNT爆炸时刻采集存储系统借助 Zigbee 无线网络监测数据的采集,实现数据的传输,大大提高了系统的可靠性。靶场试验表明,系统具有较高的测试精度,满足现代靶场对 TNT 的爆炸时间测量要求,有着广泛的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 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.

- [2] 张稳稳,欧阳娟.一种高准确度、高可靠的红外光电时刻测量系统[J].光子学报,2007,36(1):39-42.
- [3] 何艾平,王德生.大动态、抗饱和核爆炸光电变换器的研究[J].电子科技大学学报,1997,26(4):426-430.
- [4] 张伟郑,付有余,王兵.远距离炸点爆轰过程记录方法[J].长春理工大学学报,2003,26(3):95-98.
- [5] 郑锦坤,白永林.炸药爆轰瞬时温度的实时测量[J].光谱学与光谱分析,2011,31(11):3060-3063.
- [6] 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.
- [7] 佟吉钢,张振新,陈增强,等.基于FPGA的无线传感器网络节点设计[J].传感技术学报,2009,22(3):417-421.
- [8] 董玉冰,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.
- [9] 张志杰,王代华,王文廉,等.具有无线数据传输与控制功能的冲击波超压测试系统[J].计测技术,2010,30(1):22-25.
- [10] 胡宝奎,马铁华.一种冲击波超压无线式存储测试系统的研究[D].太原:中北大学,2010.
- [11] 余凯凯,杜红棉,马铁华.基于 Zigbee 无线传感网络冲击波测试系统的设计[J].传感器世界,2010,16(11):25-28.
- [12] 张建伟,马铁华,杜红棉,等.冲击波超压无线式存储测试系统的研究[J].电子测试,2012,1(1):66-69.
- [13] 李国强.爆炸冲击波测试的干扰问题[C]//2004.



刘双红(1988-),女,山东省泰安市人,硕士研究生。研究方向:动态测试,信号与信息处理;



靳 鸿(1974-),女,副教授,硕士生导师。主要研究方向:恶劣环境的动态参数测试,微型弹载测试仪和智能仪器等;在国内外核心期刊和学术会议上发表论文十余篇,其中7篇被EI、ISTP收录;



马铁华(1964-),男,教授,博士生导师。主要研究方向是动态测试与传感技术。近年来取得省部级科技进步二等奖2项、获国家发明专利1项,发表学术论文68篇,其中被SCI、EI和ISTP收录19篇。