

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210139

# 无线多通道冲击波采集存储技术\*

周诗超<sup>1,2</sup> 李凯<sup>1,2</sup> 温鹏<sup>1,2</sup> 刘威<sup>1,2</sup> 孙建港<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030051)

**摘要:** 针对存储式爆炸冲击波超压测试系统需要实时反馈测试状态的需求,设计了一种基于数传电台组网的无线多通道冲击波超压采集存储系统。该系统以 XC6SLX16 为核心,可同时进行四路冲击波超压数据的采集存储,每通道采样速率 1 MSPS,触发阈值可设置,同时以数传电台进行组网,可实现 15 km 以内、1 Mbps 通信的实时监测。并对系统进行了集成化设计,提高了系统的适应性,适用于多种实验环境。在靶场进行了小当量静爆试验验证,系统成功获取到了准确的冲击波超压数据,与 HBM 标准设备比较,误差在 5% 以内。试验结果证明该系统获取数据的准确性,为新型武器的毁伤评估提供一种测试技术。

**关键词:** 冲击波超压;多通道采集存储;数传电台;FPGA

**中图分类号:** TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Wireless multi-channel shock wave acquisition and storage technology

Zhou Shichao<sup>1,2</sup> Li Kai<sup>1,2</sup> Wen Peng<sup>1,2</sup> Liu Wei<sup>1,2</sup> Sun Jianguang<sup>1,2</sup>

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

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Information Detection and Processing, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the requirement of real-time feedback of test status in the storage-type explosion shock wave overpressure test system, a wireless multi-channel shock wave overpressure acquisition and storage system based on data transmission radio network is designed. The system takes XC6SLX16 as the core, which can simultaneously collect and store four channels of shock wave overpressure data. The sampling rate of each channel is 1 MSPS. The trigger threshold can be set. The integrated design of the system has been carried out to improve the adaptability of the system, and it is suitable for various experimental environments. A small-equivalent static explosion test was carried out at the shooting range, and the system successfully obtained accurate shock wave overpressure data. Compared with the HBM standard equipment, the error was within 5%. The test results prove the accuracy of the data obtained by the system, and provide a test technology for the damage assessment of new weapons.

**Keywords:** shock wave overpressure; multi-channel acquisition and storage; digital radio; FPGA

## 0 引言

在各种静爆、动爆试验中,测量爆炸产生的冲击波是评定武器装备爆炸毁伤效果的重要途径之一<sup>[1]</sup>,爆炸冲击波信号一般为瞬态信号,动态范围较大,且测试环境较为复杂<sup>[2]</sup>,对测试系统的要求较高<sup>[3]</sup>。目前爆炸冲击波测试主要采用电测法,可分为引线式与存储式两大类。存储式测试设备布设在爆炸场周围,将测得的冲击波信号存储在系统内部,爆炸结束后回收设备,然后读取数据。引线式设备将传感单元布设在爆炸场周围,将传感器信号通过引线传送至放置在掩体处的采集单元<sup>[4]</sup>。存储式设备数据不易丢失,但不能实时反馈测试状态;引线式布线较为麻烦,且传

感单元与采集单元不能相距太远,遇到大当量实验时人员也要撤离,也无法第一时间查看测试效果。

所以近些年无线冲击波压力采集系统受到了广泛研究,南京理工大学利用 Lora, WIFI 进行无线数据传输<sup>[5]</sup>;北京理工大学利用 4G 无线通信技术和平地天线进行数据传输<sup>[6]</sup>;北京理工大学还利用卫星通信采集空中爆炸冲击波威力<sup>[7]</sup>;中北大学研究利用 WIFI<sup>[8]</sup>、ZigBee<sup>[9]</sup>进行数据通信,最远距离可达 2 km。Gao 等<sup>[10]</sup>自行研制了一种 LFWON 无线超压测试系统,误差与有线系统相比低于 20%。Lora、WIFI 一般通信距离较近,4G、ZigBee 又要求测试环境有相应的信号,卫星通信又不具有普适性,成本较

收稿日期:2022-05-27

\* 基金项目:山西省青年科学基金项目(201901D211251)、山西省基础研究计划项目(20210302123058)资助

高、传输速率较慢。因此,研究一种能适用于远距离实时检测的超压测试系统至关重要。

根据以上研究的特点,本文设计了一种基于数传电台组网的无线多通道冲击波采集存储装置,既可以将冲击波信号存储在设备内部,也可以第一时间获取实验信息,满足了存储可靠性的同时,又提高了数据获取的效率。本设备体积小重量较小,也可挂载在无人机上采集冲击波信号,传输距离可达 15 km,传输速度可达 1 Mbps。

### 1 爆炸冲击波检测原理

爆炸试验中,评价冲击波对目标毁伤威力主要靠冲击波超压曲线的 3 个参数:超压峰值;正压时间和比冲量<sup>[11]</sup>。

#### 1) 超压峰值

冲击波超压峰值是爆炸毁伤测试中较为关键的参数<sup>[12]</sup>,其计算公式为:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{0.084}{\bar{R}} + \frac{0.27}{\bar{R}^2} + \frac{0.7}{\bar{R}^3}, & 0.01 \leq \bar{R} \leq 1 \\ \frac{0.67}{\bar{R}^3} + 0.1, & \bar{R} > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$\bar{R} = \frac{r}{\sqrt[3]{\omega}} \quad (2)$$

其中,  $r$  为测试点到爆心的距离;  $\omega$  为炸药 TNT 当量。

#### 2) 正压时间

正压测试时间的公式为:

$$\tau_1 = 1.5 \times 10^{-3} \cdot \sqrt{r} \cdot \sqrt[6]{\omega} \quad (3)$$

#### 3) 比冲量

比冲量为冲击波超压在正压时间上的积分<sup>[13]</sup>,公式为:

$$I = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau_1} P(t) dt \quad (4)$$

式中:  $P(t)$  为冲击波衰减曲线。

### 2 系统整体框架设计

整个系统如图 1 所示,分为采集存储单元和无线控制终端,采集存储单元负责在爆炸场采集冲击波信号,将其存储,待收到无线控制终端指令后,配合其完成相应的操作。

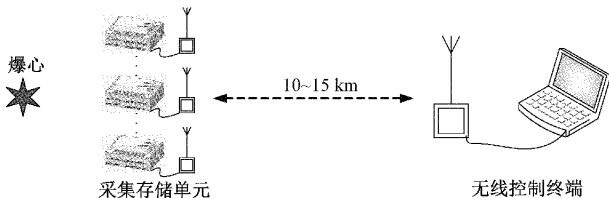


图 1 冲击波采集存储装置总体设计

整个采集存储单元采用模块化设计,控制中心为 FPGA,由于该设备将挂载在无人机上对爆炸场进行采集,所以要做到高度集成化和系统化,以减少设备重量。该系

统主要完成数据采集,实时存储,无线传输等操作,具有无线指令控制、文件管理、负延时采集、内触发、断靶线控制、频率及采样时长可调等功能。系统整体结构如图 2 所示。

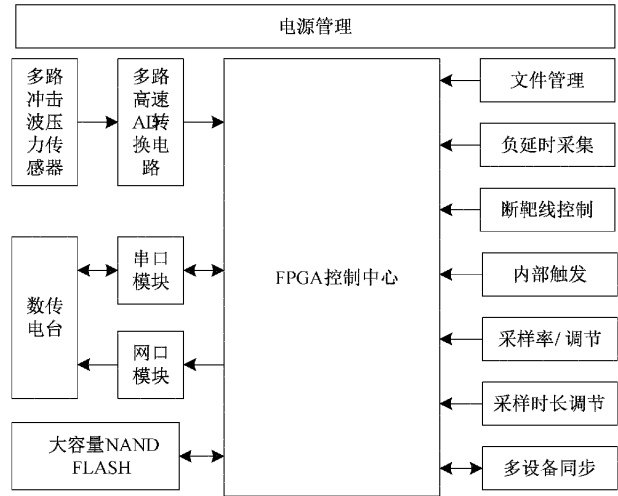


图 2 采集存储单元整体框架设计

### 3 系统电路设计

#### 3.1 电路整体设计

整个系统电路设计图如图 3 所示,采用 XC6SLX16 作为主控 FPGA 芯片<sup>[14]</sup>;冲击波传感器采用 PCB 公司的 113B28 系列压电传感器;经 ADA4610 信号调理后接到数据采集部分;数据采集部分选用 4 片 ADS8681 芯片并行使用;数据存储模块采用镁光公司的大容量 NANDFLASH 芯片<sup>[15]</sup>;数据传输模块采用 W5500 芯片;指令收发选用 RS232 通信;数传电台负责与 PC 控制终端传输数据和指令。

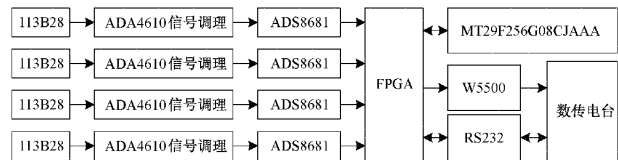


图 3 电路整体设计图

#### 3.2 采集系统

本设计为多通道采集装置,可同时进行 4 路冲击波信号的采集<sup>[16]</sup>,每路 ADC 的最高采样率为 1 MSPS,采样精度为 16 bit,电压输入范围为 ±10.24 V,传感器得到的电压范围为 -10~10 V,完美适应该采集系统。在设备工作过程中,由于本设备挂载在无人机上,距离爆心较远,所采集到的超压数值较小,所以应具有较高的灵敏度和较低的触发阈值选择,根据采样精度和电压电压输入范围可得采集系统的电压灵敏度为:

$$s_v = \frac{V}{2^n - 1} = \frac{10.24 \times 2}{2^{16} - 1} \approx 0.3 \text{ mV} \quad (5)$$

113B28 传感器的灵敏度约为 14.5 mV·kPa<sup>-1</sup>,可得到

采集系统的灵敏度为:

$$s = \frac{s_v}{s_{传}} = \frac{0.3}{14.5} = 0.02 \text{ kPa} \quad (6)$$

### 3.3 存储单元设计

为了将采集到的爆炸场信号存储起来,要做到不因环境的原因而丢失数据,就要使存储介质具有掉电不丢失的特性,而且采集的时间一般比较长,数据存储速度较快,就需要存储介质的容量够大,读写速度够快<sup>[17]</sup>。本单元打算采用镁光公司的 MT29F128G08CJAAA 芯片,该芯片单片容量 16 G,可使 4 通道 ADC 在最高采样频率下工作 1 h,写入速度可达 8 M/s。

### 3.4 网口数据传输模块

为了配合数传电台将采集到的数据发送出去,就需要数据传输模块,而串口在进行远距离传输时,传输速率比较低,为了提高无线传输速率,所以利用 W5500 芯片开发网口模块。该芯片内含精简 TCP/IP 协议栈,能帮助工程师快速的实现网络设备研发。W5500 芯片使用 SPI 外部串行接口,即不需要开发专门网络专用接口驱动,大大方便了控制器对它的操作连接。

## 4 系统程序设计

### 4.1 采集模块基本功能实现

采集模块的基本功能包括驱动 ADC,负延时采集和触发控制。ADS8681 主要采用 SPI 进行寄存器访问和数据通信。

负延时也被称为提前传输,是指在接收到采集信号前就开始传输,即在触发前的一段时间开始传输。这样就要用到一个缓存,把触发信号之前的数据进行存储,本设计采用 FPGA 自带的 FIFO 核作为缓存,其工作流程如图 4 所示。从 ADC 得到的数据首先存储在 FIFO 中,当 FIFO 存满后,如果还没有接收到触发信号,则进入负延时模式,即一边空读 FIFO,一边写 FIFO,由于 FIFO 具有“先入先出”的特点,这样就可以保证 FIFO 中的数据始终是最新采集到的数据。接受到采集信号后,停止空读,将 FIFO 中的数据读到 NAND 中,即可实现负延时存储。

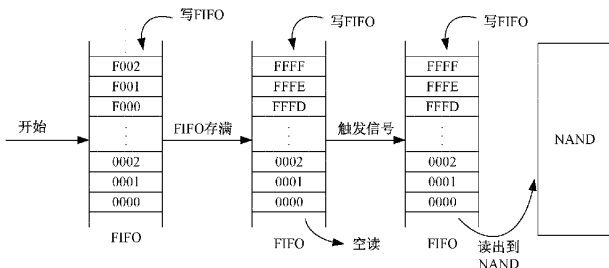


图4 负延时存储

### 4.2 存储模块基本功能实现

存储部分使用的是镁光公司的 NAND 芯片, MT29F256G08CJAAA 的全部存储单元分 16 384 块,每个

块又分为 256 页,每页 8K 字节。该 Flash 基本的读写操作方式以一页面为最小单位,而擦除操作方式则是以块为最小基本单位。Flash 写入时将‘1’变为‘0’,不可以将‘0’变为‘1’。只有在收到块擦除指令后内部全部为‘1’。

Nand Flash 存储芯片的基本操作主要由页编程、页读取、块擦除 3 种行为构成。其中,读写操作是以页为最小单位的,擦除是以块为最小单位的,图 5 为 NAND Flash 操作的基本操作流程。

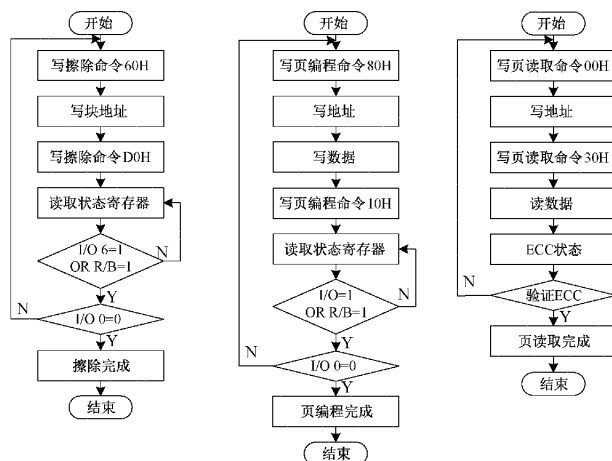


图5 Nand Flash 操作流程

FLASH 的擦除操作首先发送擦除 60 h 命令,再发送具体需要擦除的块地址,以 D0h 命令结束。通过回读状态标识位的值可有效判断本次擦除效果。写操作基本流程与擦除基本相似,只不过多了一步写数据,即在发送完页编程命令 80 h 和目的页地址后,将要写入的数据流依次进行加载,所有数据写入完成后最终以 10 h 向 FLASH 写入编程结束命令。当完成上述流程操作后即可对状态寄存器内的状态信息进行读取,以回读状态信息判断该写入操作是否有效。FLASH 的读操作流程最为简单。同样在装载完页读取命令 00 h 后,再次向 FLASH 中写入要进行读取的页地址及读命令 30 h,就可以读到 FLASH 相应位置的数据了。当所有操作完成后可通过 ECC 位进行验证上述读取操作是否有效。若无效,重复读取一边即可。

搭建完 FLASH 基本操作的程序后,就要考虑用其来实现相应的功能,由于本设计涉及到多次采集存储,所以需要建立相应的文件管理系统,需要存储每次采集的时长,采样频率以及存放地址等信息。而且 Nand Flash 在出厂时会包含一定数量的初始无效块,这些坏块会影响数据的读写操作,所以还要建立相应的坏块管理模块。坏块管理较为简单,首先建立初始坏块 RAM,读取 NAND Flash 中的固有坏块信息,即判断其标志位,若标志位为 0xFF,表示此块为正常块,累加块地址,当标志位为非 0xFF 时,表示此块为坏块,则将其加入到坏块 RAM 中,直到读出存储器中所有块是否有效的标志位,从而建立该存储器的坏块列表。

其次,在系统接收到了 NAND Flash 的擦除命令后,根据擦除当前块的操作是否成功来判断当前块的好坏,更新坏块 RAM。文件管理属于整个设计的顶层,其工作流程如图 6 所示。

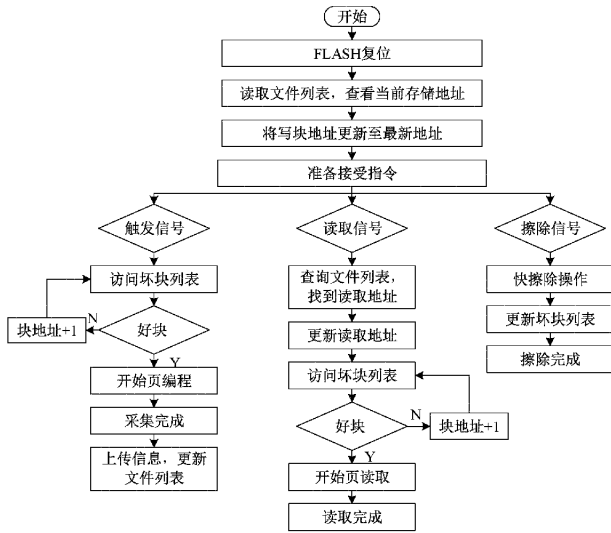


图 6 顶层设计流程

### 5 系统测试

对本设计进行测试,首先进行实验室测试,给装置的 4 个通道接入信号发生器,分别输入 15、10、1、5 kHz 正弦波信号。用来测试多路采集信号,采集到的信号效果如图 7 所示。

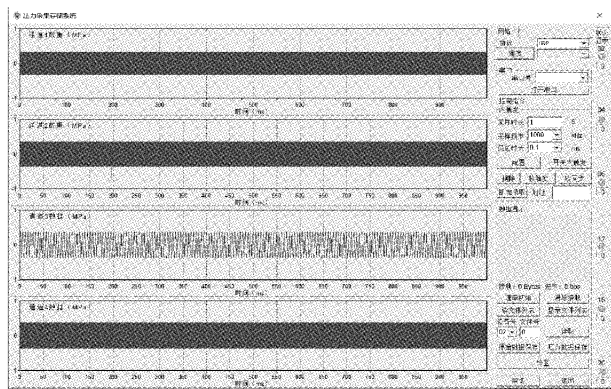


图 7 实验室测试结果

然后接入传感器进行测试,在装置的 4 个通道上接入冲击波压力传感器,通过模拟输入冲击波信号给到 4 个传感器,测试 4 个通道的采集情况。接入传感器测试如图 8 所示。

最后进行现场实验测试,将本设计与 HBM 采集设备进行比较实验,在静爆场对 500 g TNT 装药的静爆试验进行了测试,布置情况如图 9、10 所示。实验采用扇形测点布设法,在距离炸点 2 m 的扇形范围内均匀布设测试点,炸点高度 1 m。其中 A1~A8 为本设计的 8 个传感器布设点,

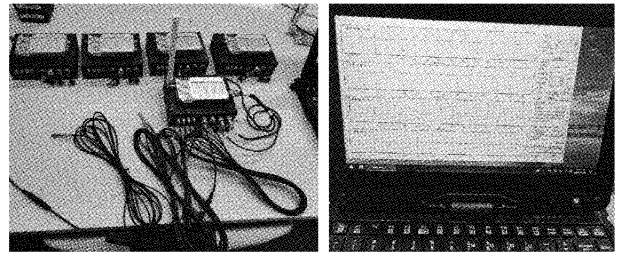


图 8 接入传感器测试

B1~B4 为 HBM 采集设备传感器布设点。图 11、12 为本设备实物图。

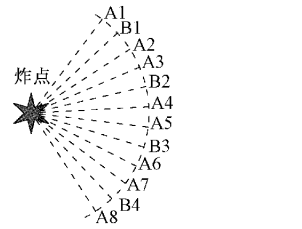


图 9 传感器布设示意图



图 10 现场布设图

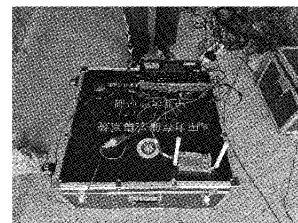


图 11 无线控制终端

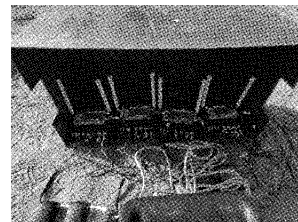


图 12 采集存储单元

试验结束后,将两种设备所采集到的数据读出,并进行对比,静爆实验采集数据如图 13 所示,可以看出本设备所采集的信号与标准 HBM 采集设备采集到的信号基本相同,冲击波测试结果如表 1 所示,分析后误差在 5% 以内。

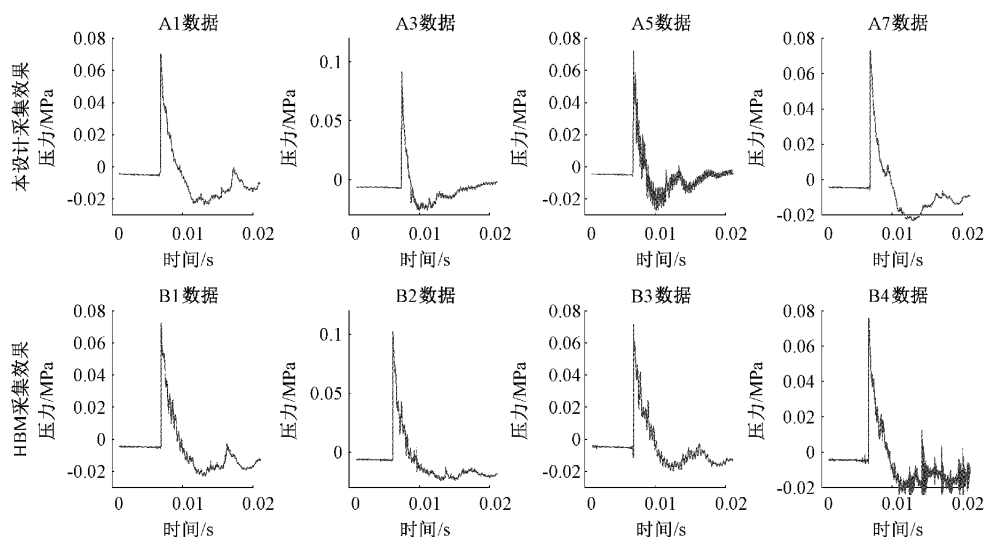


图13 实验结果图

表1 冲击波测试结果表

位置	超压峰值 $\Delta p/\text{MPa}$	位置	超压峰值 $\Delta p/\text{MPa}$	误差/ %
A1	0.074 7	B1	0.076 7	2.6
A3	0.097 9	B2	0.108 7	9.9
A5	0.076 9	B3	0.075 8	1.4
A7	0.077 2	B4	0.080 6	4.2
均值	0.081 6	均值	0.085 4	4.4

## 6 结 论

文中研究了一种无线测量冲击波信号高速采集存储测试系统。该系统分为采集存储单元与无线控制终端。采集存储单元具体使用方案为FPGA搭载大容量NAND Flash,该存储结构可实现爆炸数据的高速无损存储。无线控制终端结合数传电台组网、远距离通信、低功耗的优势,可保证指令与数据的高效稳定性。并于HBM相关设备进行实较。与传统的冲击波测量装置相比,本测试系统布设便捷、多测试点无线组网迅速稳定、测试精度高、能快速获取测试超压峰值关键数据。传输距离可达15 km,传输速率可达1 Mbps。

### 参考文献

[1] 贾云飞,张春棋,康金. 爆炸冲击波信号测试与小波分析[J]. 火箭与制导学报,2014,34(5):86-89.  
 [2] 单宝琛,陈晔,郑宾. 高精度弹载压力测试系统的设计与改善[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(4):225-231.  
 [3] 尤文斌,丁永红. 基于WPSO-PO的冲击波测试适配器参数优化研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(10):221-228.

[4] 熊振宇. 爆炸冲击波信号处理方法研究[D]. 太原:中北大学,2021.  
 [5] 章天平,孔德仁,王良全. 基于无线组网技术的爆炸冲击波压力存储测试系统[J]. 测试技术学报,2021,35(4):317-322.  
 [6] 吕中杰,李慧武,高晨宇,等. 无线超压测试系统平地天线传输性能研究[J]. 北京理工大学学报,2021,41(6):642-648.  
 [7] 吕中杰,韩金良,黄风雷. 基于卫星通信的空中爆炸冲击波威力测试系统[J]. 北京理工大学学报,2019,39(4):331-336,440.  
 [8] 翟永,翟涛,王代华,等. 冲击波超压无线存储测试系统研究[J]. 传感技术学报,2015,28(12):1893-1898.  
 [9] 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.  
 [10] GAO S, TIAN G, DAI X, et al. A lightweight wireless overpressure node based efficient monitoring for shock waves[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 26(1): 448-457.  
 [11] 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.  
 [12] 李旭,安丰江,吴成,等. 一种基于PDV的近场冲击波高压测量技术[J]. 中国测试,2018,44(10):134-138.  
 [13] 朱金瑞,王代华,苏尚恩. 一种可编程高可靠性存储式爆炸冲击波测试系统[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(2):153-157.  
 [14] 高国旺,侯大森,余大伟,等. 基于FPGA的多参数测量系统的设计[J]. 国外电子测量技术,2020,39(4):110-114.  
 [15] 赵佳,任伟,杨勇,等. 基于FPGA的示波记录仪采集

- 模式设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(11): 132-137.
- [16] 孟繁悦, 韩赞东, 石承昊. 多通道在线涡流检测系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 51-57.
- [17] 孙巍, 孙芹东, 马士全, 等. sssSTM32H743 系列水声数据  
采集存储系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(16): 98-102.

### 作者简介

**周诗超**, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器与测试技术, 信息探测与处理。

E-mail: S2005021@st.nuc.edu.cn

**李凯**, 博士, 副教授, 主要研究方向为信息探测与处理、电磁信号感知、导航与制导、制导传感器研制、无损检测等。

E-mail: likai@nuc.edu.cn