

冲击波测试系统网络节点的设计

梁 杰, 张志杰, 王文廉, 李立煌, 轩志伟

(中北大学 电子测试技术国防重点实验室, 山西 太原 030051)

摘 要:设计了一种面向冲击波测试的网络节点。该节点基于间跳式的网络结构, 参数可无线设置和回读查看, 并具有无线控制上电、下电和复位等控制功能。数据可远距离无线传输, 触发由光触发结合多种触发方式可选, 并对传感器的动态响应特性进行了补偿。结合节点布设技术可组成测试大威力武器冲击波超压的测试网络。

关键词:超压测试; 光触发; 数字补偿; 间跳式; 现场可编程逻辑门阵列(FPGA)

中图分类号: TN06

文献标识码: A

Design of Network Node for Shock Wave Test System

LIANG Jie, ZHANG Zhijie, WANG Wenlian, LI Lihuang, XUAN Zhiwei

(National Defense Key Lab. of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A network node for the shockwave testing is designed. The node is based on the between-hop network structure; the parameters can be wireless setting and readback view, and the electricity, power and reset functions can be wireless controlled. The data can be wireless transmitted with long-distance; the option of the trigger can be the optical trigger or the combination of other triggers; and the dynamic response characteristics of the sensor is compensated. The network for testing the shock wave overpressure of high-power weapons can be constructed by combining with the nodes emplaced technology.

Key words: overpressure test; optical trigger; digital compensation; between-hop; FPGA

0 引言

冲击波超压是弹箭的主要破坏力之一^[1]。持续时间大于 0.25 ms, 压力值大于 3.91 kPa 时, 就会对人员听觉器官造成损伤^[1]。根据文献[1]判据, 控制终端到爆心的实际距离应在 500 m 以上, 大威力武器的安全距离应更远; 而间跳式的网络结构理论上可实现无限距离的传输^[2]。弹箭冲击波波阵面的传播速度也是武器威力评估的一项重要指标。冲击波测试网络节点的触发时机不同, 无法估计波阵面在各个距离段处的平均速度。冲击波信号上升沿陡峭, 带宽很宽, 易激起包括传感器在内的测试系统的固有频率和系统噪声的振荡, 使得冲击波超压峰值、上升时间、比冲量等关键参数的准确获取成为难题^[3]。传感器的带宽有限, 不足以覆盖冲击波超压信号的带宽, 给测试结果带来一定的失真和误差^[4]。为了改善上述不足, 设计了一种新型的冲击波测试

网络节点。

1 系统设计

本设计选用 Spartan3E 系列现场可编程逻辑门阵列(FPGA)作为主要控制和数据处理核心, 如图 1 所示。FPGA 作为开发平台具有高速并行的逻辑运算能力和完全的开发自由度。冲击波超压的数据采集和无线传输都由部署在监测区内节点完成。作为核心器件的 FPGA 采用模块化的设计方法, 分为采集控制模块、数据处理模块、存储控制模块和无线收发模块。系统由爆炸光触发开关触发, 采集到的超压曲线先送入数据处理模块进行数字补偿后, 再存入数据存储器。在等待无线指令的时间段里进入低功耗模式, 延长系统的工作时间。无线收发模块选用 WiFi 模块进行无线收发, 相对 zigbee、bluetooth 等网络技术具有传输距离远, 速度快的优势。配合间跳的网络结构可实现超远距离的数据传输。系统

收稿日期: 2012-09-21

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2002011023)

作者简介: 梁杰(1986-), 男, 山西太原人, 硕士生, 主要从事动态测试与实时处理的研究。张志杰(1965-), 男, 山西五台人, 教授, 博导, 博士, 主要从事动态测试理论、技术与应用, 信号处理理论与技术以及通信与信息系统方面的研究。

还具有无线控制、无线设定参数、参数回读、状态回读等功能,可实时监控设备。这些功能在实测中都得到了良好的验证。

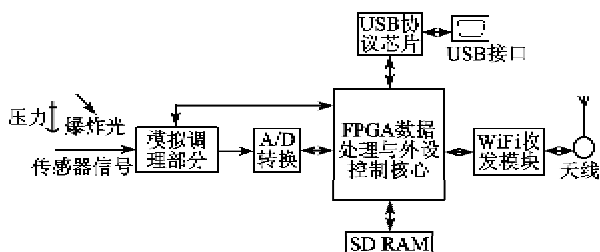


图1 网络节点系统设计框图

2 关键技术

2.1 光触发技术

为解决多测试节点时基不同步和远距离压力测试触发电平不易确定的问题,设计了一种爆炸光触发开关。利用光敏二极管响应时间短的特点,将其作为触发开关的光感元件。爆炸产生的高温范围一般在1 000~2 000 ℃。首先分析各光谱成分在此温度数量级的总辐射能。根据普朗克辐射公式: $M = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$ (式中: M 为黑体的光谱辐射出射度; c_1 、 c_2 分别为第一、二辐射常数; T 为黑体温度; λ 为波长。)可得到温度辐射能曲线,如图2所示。

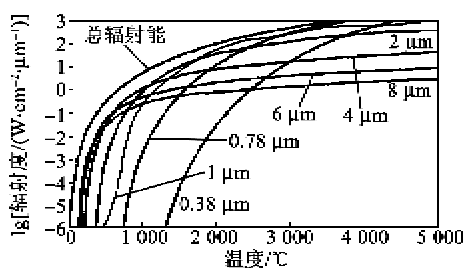


图2 温度辐射能曲线

由图2可见,近红外光在1 000~2 000 ℃内辐射能接近总辐射能,应选用响应范围在700~1 200 nm内的光电二极管PD418作为光感器件。爆炸光信号幅度跨5个数量级,线性放大器不能满足要求。故选用对数放大器作为二次仪表,可在较广输入范围内得到所需范围的幅度;放大的信号经带通滤波,上限频率设为200 kHz,用于滤除爆炸引起的高冲击以及强电离产生的高频干扰,避免误触发;下限频率设为100 Hz,用于滤除日光谱段的光信号缓慢变化,避免形成能量积累作用。

图3为爆炸光产生的触发脉冲信号。

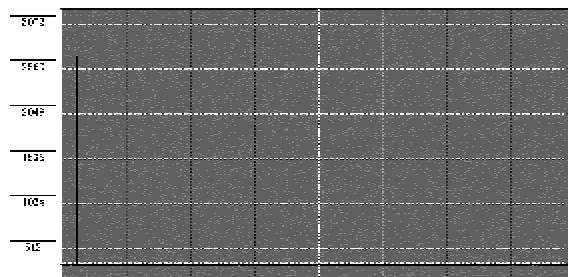


图3 爆炸光触发脉冲

2.2 动态滤波补偿技术

分布式算法在FPGA器件产生后得到了长足发展,被广泛用于数字信号处理领域^[5]。该算法实现了以加法运算和移位运算代替乘加运算。应用于具有高速平行运算处理能力的FPGA可完成大量的乘法运算,极大地提高了运算效率^[6]。本文为了补偿由传感器动态特性引起的误差和失真,在FPGA的输入端设计了一个数字补偿处理模块以提高测试精度。

本文利用PSO算法的一般原理进行传感器动态补偿设计^[7],如图4所示。图中, $x(t)$ 为输入物理量, $X(k)$ 为采样后的输入物理量, $y(k)$ 为传感器的输出, $r(k)$ 为参考模型的输出, $v(k)$ 为随机白噪声, $z(k)$ 为补偿器的输出, m 为补偿器阶数。

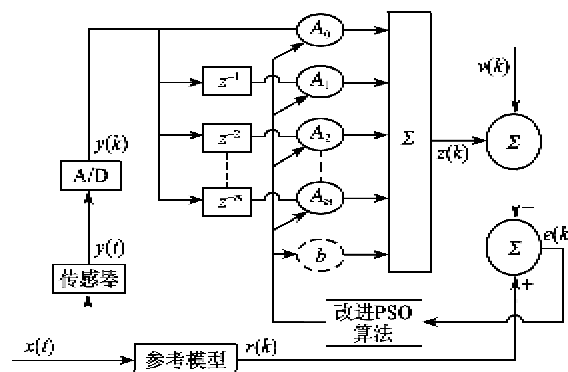


图4 补偿原理图

补偿输出为

$$z(k) = W \cdot X(k) + v(k) \quad (1)$$

卷积和形式为

$$z(k) = \sum_{l=0}^m A_l \cdot y(k-l) \quad (2)$$

$$y(k-l) = \sum_{b=0}^{B-1} y_b(k-l) \times 2^b \quad (3)$$

式(3)为A/D的第 $k-l$ 次转换结果,代入式(2)得

$$z(k) = \sum_{b=0}^{B-1} 2^b \cdot \sum_{l=0}^m [A_l \cdot y_b(k-l)] \quad (4)$$

输出

$$z(k) = W(k-1) \cdot X(k) + b(k-1) \quad (5)$$

$$W(k+1) = W(k) + \alpha \times X(k+1) \times e(k) \quad (6)$$

$$b(k+1) = b(k) + \alpha \times e(k+1) \quad (7)$$

式(5)~(7)用来更新下一次补偿时的补偿系数及阈值。 α 为学习因子,为了保证参数辨识的收敛性要求 α 不宜过大,一般取 $0 < \alpha < 1^{[5]}$ 。

$$J = \frac{1}{N} \times \sum_{k=0}^N [r(k) - z(k)]^2 \quad (8)$$

式(8)为 $z(k)$ 和 $r(k)$ 的均方误差作为系数寻优的判别式,均方误差最小所代表的参数值就是算法得到的最优解,即最终得到的补偿器系数。

在进行 FPGA 设计时, $\sum_{l=0}^m [A_l \cdot y_b(k-l)]$ 为 A/D 转换结果与补偿系数相与,指数因子用加权和来实现。式(4)得到动态补偿器高速并行结构图如图 5 所示。

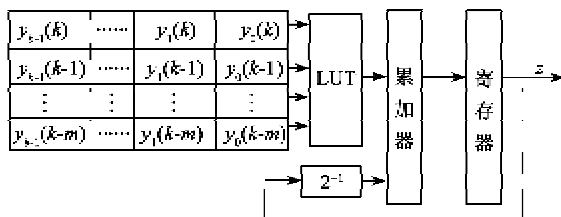


图 5 动态补偿器并行结构图

为了检验滤波效果,用二阶传感器模型设计一个二阶滤波器来模拟传感器动态特性。经激波管动态标定试验得到传感器的离散传递函数为

$$H(z) = \frac{0.012z^2 + 0.023z + 0.012}{z^2 - 1.941z + 0.9891} \quad (9)$$

将模拟的滤波器接入系统,向系统输入一个方波信号,与输出结果进行比较得到的实验结果对补偿器进行验证,如图 6、7 所示。结果表明,未经补偿的传感器输出有明显的过冲效应和强烈的震荡;经滤波补偿后的输出信号与输入信号相比失真度降低。这种对于传感器性能的动态补偿方法得到了较好的效果。

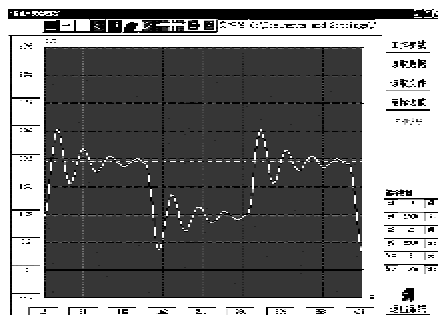


图 6 补偿前的输出波形

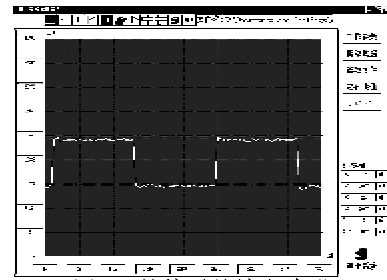


图 7 补偿后的输出波形

2.3 间跳网络结构

设计传感器测试网络首先应考虑覆盖问题,这关系到网络的性能和对测试领域的限制程度。测试网络覆盖更大的测试面积总是对测试更有利。间跳的网络结构理论上可通过不断增加站点(STA)实现无限远的通信距离。冲击波测试节点的相对爆心的位置由压力传感器的量程和布设技术方面的考虑共同决定,所以网络拓扑机构在测试开始前已基本确定。本设计采用静态的 MAC 协议,不仅可避免 STA 联网时的冲突,且可有效提高网络吞吐量。这种设计更适用于对布设有特殊要求的冲击波测试场合。间跳网络是一种松散的结构,不存在无线接入点(AP),由多个 STA 组成并由网络中的 STA 之间直接通信。通常的联网过程首先要对所有信道进行扫描或按照特定的竞争机制入网。而间跳结构的联网过程是在已知的信道中直接指定信道给 STA,这种联网方式可将无线联网时间从 2 s 降低至约 300 ms,降低了网络的复杂性,提高了稳定性和联网速度。本设计中的核心控制器件 FPGA 按功能划分为采集模块和路由模块,模块间共用一个存储器的不同段落,相互独立。采集模块的存储段落可看做本地存储器可接 USB 口直接读取;路由模块作为数据缓存接收上一节点传来的数据,且周期性地转送给下一节点起到路由中继的作用,这样每个节点即是数据的采集点又是数据流的路由点。整个网络数据类似二级流水线的结构向网络终端传送,如图 8 所示。

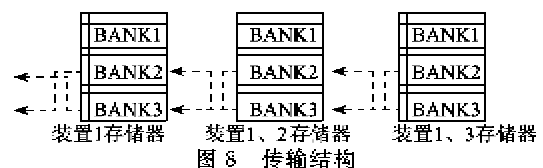


图 8 传输结构

3 实验结果

根据实验操作规程^[8]对多发大威力弹箭进行了静爆超压测试,共安装 16 套测试网络节点,传感器

都安装在地平面的位置。成功采集到多条冲击波超压测试曲线,图9~11为几条典型曲线。证明测试网络节点工作稳定,可实现预期的效果。

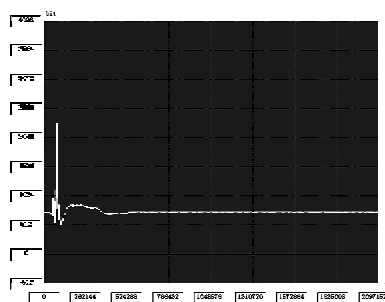


图9 20 m处测试曲线

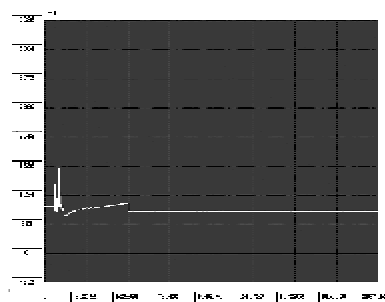


图10 150 m处测试曲线

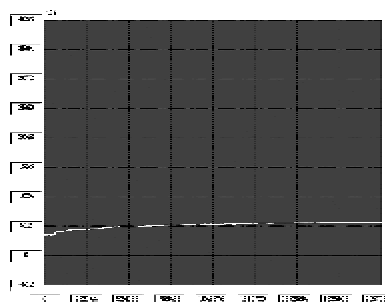


图11 300 m处地面测试曲线

4 结束语

无线测试网络是动态测试领域的发展方向。该系统利用间跳式网络结构实现了超远距离的设备控制和数据传输;光触发技术解决了恶劣环境中系统可靠的同步触发问题;分布式算法为传感器动态误差的高速在线修正提供了一个行之有效的方法;结合成熟的软硬件设计形成了较科学完整的节点系统。尚需解决的问题包括网络安全协议问题,需针对无线网络开发专门的安全机制或者协议;测试节点的布设设计与现场布设位置往往有所出入。开发

适应冲击波测试的高精度定位技术以提高设备使用的便利性。

参考文献:

- [1] 中国人民解放军第三十二试验训练基地. GJB5212-2004 云爆弹定型试验规程[S]. 北京:总装备部军标出版发行部出版, 2004.
- [2] 宋文, 王兵, 周应寒, 等. 无线传感网络器网络技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [3] 张志杰, 王代华, 王文康, 等. 张哲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.
ZHANG Zhijie, WANG Daihua, WANG Wenlian, et al. Shock wave pressure measurement system function with wireless data transmission and control[J]. Metrology & Measurement Technology, 2010, 30(1): 22-25.
- [4] 张文栋. 存储测试系统的设计理论及其在导弹动态数据测试中的实现[D]. 北京:北京理工大学, 1993.
- [5] WU Jian, ZHANG Zhijie. Real-time correction for sensor's dynamic error based on DSP[C]//Beijing: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2011: 633-638.
- [6] 张维良, 杨再初, 杨知行. 高速并行 FIR 滤波器的 FPGA 实现[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(8): 1819-1822.
ZHANG Weiliang, YANG Zaichu, YANG Zhixing. FPGA implementation of high speed parallel FIR filters[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(8): 1819-1822.
- [7] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪. 粒子群优化算法的惯性权值递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 53-56.
CHEN Guimin, JIA Jianyuan, HAN Qi. Study on the strategy of decreasing inertia weight in particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1): 53-56.
- [8] 中国工程物理研究院, 第二炮兵驻中国工程物理研究院型号办, 第二炮兵装备研究院, 航天科工集团三院. GJB6390.3-2008 面杀伤导弹战斗部静爆威力试验方法第3部分:冲击波超压测试[S]. 北京:总装备部军标出版发行部出版, 2008.