

Design of Muzzle Blast Wave Overpressure Measuring System Based on Wireless and Memory Test Technology

LIU Fan¹, DU Hongmian^{1*}, Fan Jinbiao¹, LAI Fuwen², JIAO Yaohan¹,
MIAO Songzhen³, YUE Zhangkuan⁴, YAN Pengfei⁵

(1. Key Laboratory Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng Jilin 137001, China; 3. People's Liberation Army 4328 Factory, Changzhi Shanxi 046000, China;
4. State Grid Energy Xinjiang Zhundong Coal Co-Ltd, Changji Xinjiang 652300, China;
5. Changzhi City Police Fire Brigade, Changzhi Shanxi 046000, China)

Abstract: In order to evaluate the damage of relevant operators and equipments caused by muzzle blast wave, The muzzle blast wave test system applied Storage testing technology combined with Wireless transmission technology, to make the main test console monitoring effectively in a certain distance. The results of dynamic calibration based on shock tube showed the test system meets the basic requirements of military specifications on the muzzle blast wave overpressure test. The test devices in both wireless trigger state and multiple re-trigger state obtained the curves of the muzzle blast wave overpressure successfully. The results show that the designed muzzle blast wave wireless storage test system can work effectively, has the advantage of easy operation and has a good application prospect.

Key words: storage test; muzzle blast wave; wireless transmission; shock tube; multiple re-trigger

EEACC: 7210B

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.02.024

炮口冲击波超压无线存储测试系统设计

刘帆¹, 杜红棉^{1*}, 范锦彪¹, 赖富文², 焦耀晗¹, 苗松珍³, 岳掌宽⁴, 闫鹏飞⁵

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051; 2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001;
3. 中国人民解放军第四三二八工厂, 山西 长治 046000; 4. 国网能源新疆准东煤电有限公司, 新疆 昌吉 652300;
5. 长治市公安消防支队, 山西 长治 046000)

摘要: 为了评估炮口冲击波对相关操作人员及设备造成的损伤和破坏程度, 将存储测试技术应用到炮口冲击波测试中, 并结合无线传输技术, 使得测试主控制台可以在一定距离外进行有效监控。通过对测试系统进行的激波管动态校准, 符合国军标对炮口冲击波超压测试的基本要求。测试装置在无线触发状态和多次重触发状态进行了测试试验, 均成功获取到炮口冲击波超压曲线。试验结果表明所设计的炮口冲击波无线存储测试系统能有效工作, 同时具有操作简单等优点, 具有良好的应用前景。

关键词: 存储测试; 炮口冲击波; 无线传输; 激波管; 多次重触发

中图分类号: TM932

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2014)02-0272-05

炮口冲击波是各炮口气流现象中对操作人员和设备危害性最大的一个因素, 它对人体的损伤, 主要是听觉器官, 严重时内脏也将受到损伤^[1]。现代战争对火炮的综合性能提出了更高的要求, 要求火炮具有更大的威力、更强的机动性和对操作人员及设备的安全性。因此, 准确地模拟和测量炮口冲击波场是进行火炮系统研究过程中一个重要的环节。国内在炮口冲击流场研究分析上偏重于建模进行数值

模拟, 进而预测炮口冲击波场的各点压力值^[2]。而在现场测试中一般采用的是压力传感器、二次仪表与瞬态波形记录仪(或采集卡)组成的引线式测试系统。这种方法存在着布置电缆引线费时费力, 且电缆易耦合噪声进入测试系统等问题^[3]。针对炮口流场的特性及测试难点, 参考国军标中对炮口冲击波测试的要求, 研制出一种炮口冲击波超压的测试装置, 并通过了靶场火炮射击测试试验的验证。

1 炮口冲击波特性及测试难点

炮口冲击波不同于爆炸冲击波, 爆炸冲击波是能量的瞬间释放, 而炮口冲击波是能量连续释放的过程。它是通过与火药气体射流的接触而不断获得能量, 脱离接触后的膛口冲击波依靠自身的压力与速度继续向外膨胀, 直至衰减为声波。炮口冲击波场测试环境跟传统的自由场或者地面冲击波的测试环境有所不同, 其特点^[4]是: (1) 高度的瞬变(非周期性); (2) 强烈的方向性; (3) 波系结构和相互作用的复杂性。

炮口冲击波超压测试, 在兵器动态测量中具有频带宽, A-持续时间短等特点, 给超压峰值的精确测量带来一定的困难^[5]。其测试难点主要体现在以下几个方面: (1) 国军标^[6]中对火炮射角及射击发数的都有严格的规定, 为了快速测量不同编号火炮的炮口冲击波超压数据, 仪器需便于移动到不同测点来完成测量任务; (2) 在进行连发射击试验时, 要求测试仪器具有多次触发, 记录多条超压数据的功能, 因此只能测量单次瞬态信号的冲击波测试仪器已经不能满足新的测试要求; (3) 炮口冲击波具有时变性和动态性, 测试系统需进行动态校准来确保其测量精度。

2 系统方案设计及关键技术

2.1 系统结构组成及主要工作原理

测试系统主要是有主控制台及多个相同的智能传感器测点(子系统)组成, 每个子系统又包括传感器、电源管理模块、信号调理电路、A/D 转换器、FPGA 控制中心、FLASH 存储器、触发系统等模块。在靶场实测时, 主控制台放置在安全距离外的掩体中, 智能传感器测点布设于炮口冲击波场中。主控制台通过无线的方式控制智能传感器测点的工作状态, 根据现场情况进行采样频率、放大倍数和触发方式等参数的设定。测试系统原理框图如图 1 所示。

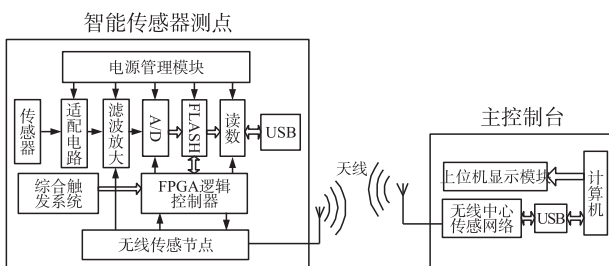


图 1 测试系统原理框图

该测试系统主要性能指标如表 1 所示。

表 1 测试系统主要性能指标

	频响范围/kHz	采样频率/(sa/s)	A/D 分辨率/bit	传感器自振频率/kHz	无线传输距离/m
国军标要求	优于 0 ~ 40	>200	8	>75	—
测试系统	0 ~ 120	1 M	14	490	>500

2.2 关键技术

2.2.1 无线传输技术

传统引线式炮口冲击波测试装置在试验时具有布线繁琐且易引入噪声、不能快速移动等问题, 将基于 IEEE802.15.4 标准的 Zigbee 协议无线通信技术引入到存储测试技术中^[7], 成功解决了上述问题。测试系统的上下电、参数配置、同步触发等功能均通过无线操作完成, 使装置在火炮进行不同射角连发射击试验中表现出操作简单、测量效率高等优势。

2.2.2 柔性化触发策略

根据炮口冲击波测试特点分析, 测试系统采用无线触发与多次重触发相结合的柔性化触发策略。火炮操作过程具有装弹换药的间歇性及射击动作的连续性, 属于多个瞬态信号测试情况^[8]。测试系统设定在无线触发工作状态时, 虽能完成一次有效数据测试, 获取到单次火炮射击的炮口冲击波超压数据, 但势必使记录装置记录许多空闲态, 浪费大量存储空间。结合多次重触发技术, 火炮每发射一枚炮弹, 触发记录装置记录一次, 然后转为待触发状态; 当火炮再发射一枚炮弹时, 再作一次记录, 直到记录装置内全部存储空间被占满, 从而达到利用有效的存储空间记录更多的有效信息的目的。

基于多次重触发技术的存储测试系统的状态链设计如图 2 所示。

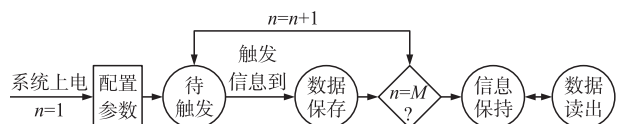


图 2 多次重触发技术的存储测试系统的状态链

测试系统上电后, 主控制台通过无线的方式给装置配置触发电平、采样频率等参数, 系统进入待触发状态。触发信号到, 则进入数据保存状态, 否则保持待触发状态。当前信号记录完成, 判断记录的波形个数 n 与要求记录的波形个数 M 是否一直, 当一致时, 则进入信息保持状态, 否则波形计数器加 1, 返回待触发状态, 在新的存储空间内循环等待下一次触发。直到规定的记录波形全部记录完全, 系统

进入信息保持状态。图3所示为系统多次重触发读取正弦波图。

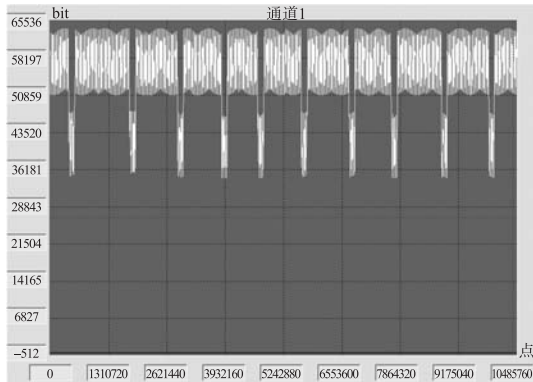


图3 多次触发读取正弦波曲线图

3 动态校准

为可靠地记录炮口冲击波超压的整个变化过程,选择 PCB 公司中高频特性良好的 113A26 型压力传感器与相应的存储测试电路构成炮口冲击波测试系统。传感器在使用前,必须进行测量超压范围内的动态校准^[9]。本次校准是在激波管中实施的,根据兰基涅—胡果尼(Rankine-Hugoniot)方程,入射超压平台与波前马赫数的关系为^[10]:

$$\Delta P_2 = \frac{7}{6}(M_s^2 - 1)p_0 - p_0 \quad (1)$$

$$M_s = \left(\frac{V_s}{344.5} \right) \sqrt{\left(\frac{298}{273 + T_1} \right)} \quad (2)$$

式中: ΔP_2 为激波波前的入射超压, P_0 为低压式气体初始压力; M_s 为激波波前的马赫数, $V_s = s/t$ 为激波波前的传播速度, s 为两测速传感器之间的距离, t 为激波经过两测速传感器的时间间隔, T_1 为未扰动时低压室空气的温度。所用激波管如图4所示。

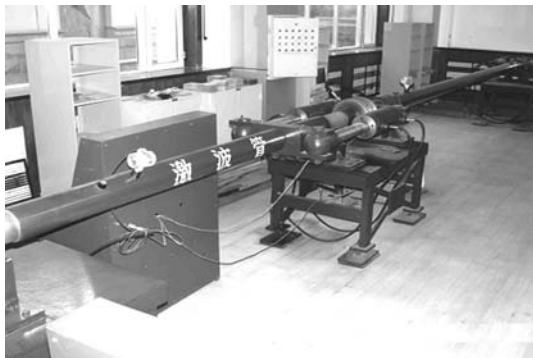


图4 激波管的实物图

典型的阶跃响应波形如图5所示,从时域响应图计算传感器的上升时间、超调量、动态灵敏度、谐振频率等动态指标及频率特性。传感器动态校准结果如表2所示。

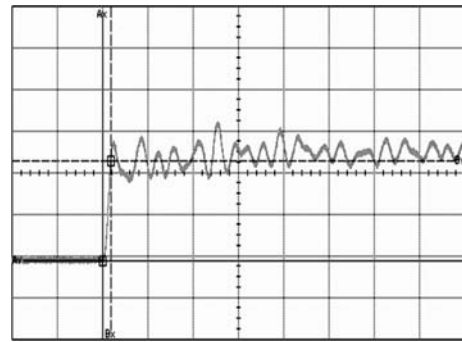


图5 阶跃响应波形图

表2 动态校准结果记录表格

N	上升时间 $t_r/\mu s$	超调量 $\delta/\%$	自振频率 f/kHz
1	1.081 82	30.24	491.07
2	0.909 09	39.98	493.27
3	0.909 09	28.89	493.27
4	1.090 90	39.04	493.27
5	0.909 09	29.89	493.27

根据相关国军标的规定,炮口冲击波测试用传感器的自振频率应大于 75 kHz,上升时间不大于 20 μs ,超调量要尽量小^[6]。从校准的结果来看,系统所用传感器满足国军标中关于炮口冲击波超压测试的要求。

4 现场试验及数据分析

为了评估炮口冲击波无线存储测试系统的可靠性,进行了某型号车载炮的炮口冲击波超压测试试验,火炮射击角度为 35°。参考国军标对炮口冲击波测试的测点布设要求^[6,11],我们选取了两套测试装置进行了对比实验,传感器的敏感面均朝上,安装距地高度分别为 1.58 m 和 1.9 m,安装角度分别在 +135°和-135°线上。分别进行了两次试验,这样就可以测量不同高度和距离下炮口冲击波的传播规律。试验测点布设情况如图6所示。测试现场如图7所示。火炮射击前,主控制台通过无线给各测点进行增益、采样频率、触发方式等参数的配置;射击

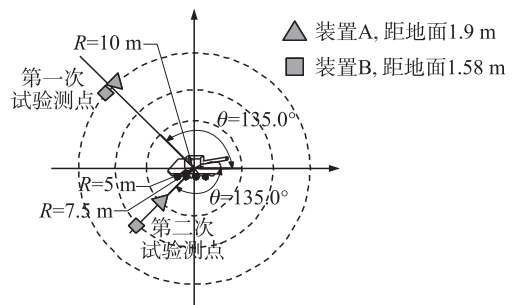


图6 测点布设图

结束后回收装置读取数据。

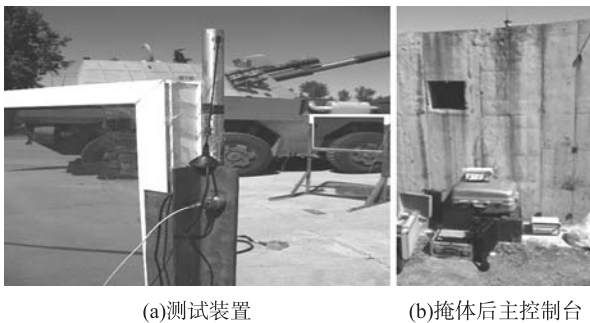


图7 测试现场

图8所示分别为10 m、7.5 m、5 m处炮口冲击波超压曲线,其中10 m超压曲线是在无线触发状态下获取的,7.5 m和5 m超压曲线是在多次重触发下获取的。试验结果数据统计表如表3所示。

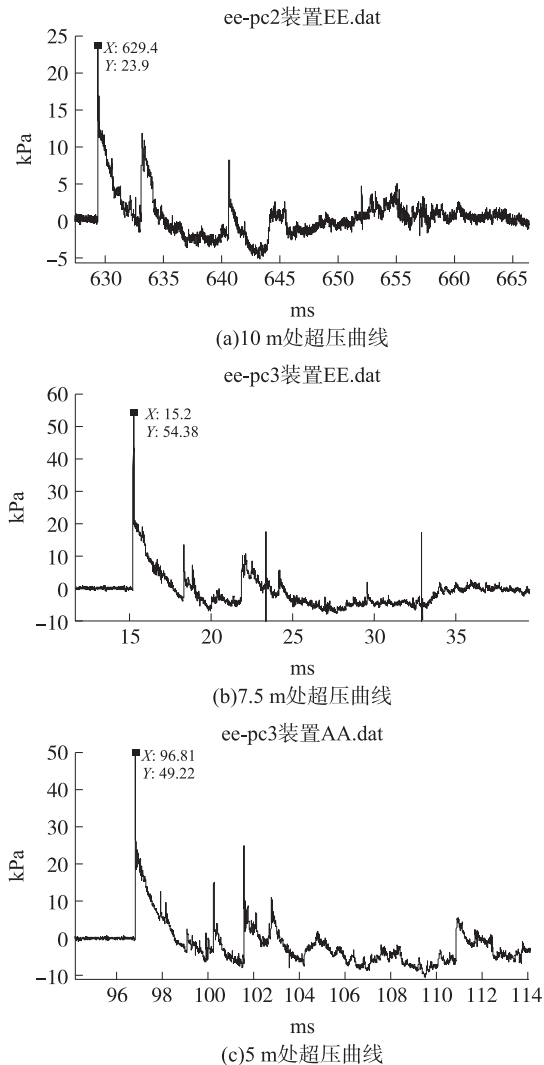


图8 实测炮口冲击波超压曲线

由试验结果分析可知,(1)超压曲线有3个峰值,第1个是炮口冲击波,第2、3个峰值可能是二次火焰冲击波或是地面反射冲击波;(2)炮口冲击波测

试中A-持续时间随测点距离的增加递增,B-持续时间随测点距离的增加递减。

表3 炮口冲击波试验数据记录

测点位置		第1超压	A-持续	B-持续
距离/m	高度/m	峰值/kPa	时间/ms	时间/ms
10	1.58	23.90	3.60	16.4
7.5	1.58	54.38	2.62	19.2
5	1.9	49.22	1.71	21.0

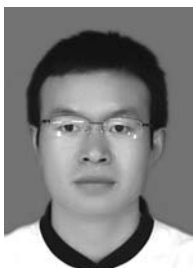
试验结果很好的反映出火炮发射过程中的二次火焰现象,以及炮口冲击波的传播规律。为火炮射击中操作人员和设备的防护提供了数据支持。

5 结语

炮口冲击波无线存储测试系统经过激波管动态校准,确保了测量的精度;引入无线传输技术,发挥了无线技术的优势,减小了试验操作的工作量,提高了测试效率;无线触发与多次重触发相结合的柔性化触发策略的运用,满足了炮口冲击波测试的特殊要求。总之,该测试系统稳定、操作简单、适用性高、数据完整、可信度高,是一套成功、实用的测试系统,在测试领域具有很好的发展前景和推广价值。

参考文献:

- [1] 李鸿志,马大为,朱忠领,等.兵器发射安全的内涵与现状[C]//中国职业安全健康协会2009年学术年会论文集.2009,11(12),288-293.
- [2] 江坤.炮口制退器优化设计理论及方法研究[D].南京:南京理工大学,2007.
- [3] 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,2004,8(4),288-293.
- [4] 尤国钊,许厚谦,杨启仁.中间弹道学[M].北京:国防工业出版社,2003:62-69.
- [5] 孙忠良.对中美两国“炮口冲击波超压测试”国军标的比较分析[C]//中国兵工学会第六届测试技术学术年会论文集,1992,8(1),745-752.
- [6] GJB349.28-90 常规兵器定型实验方法炮口冲击波超压测试[S].中华人民共和国国家军用标准,1990.
- [7] 岳瑶,张瑜,刘双峰.冲击波测试中无线同步上电系统的设计[J].传感技术学报,2013,26(7),1030-1033.
- [8] 张文栋,马宝华,祖静.瞬态波形测试系统的设计法[J].测试技术学报,1996,3(10),118-123.
- [9] 黄俊钦.测试系统动力学[M].北京:国防工业出版社,1996:18-55.
- [10] 拉赫马杜林 X A,谢苗诺夫 C C.激波管:中册[M].北京:国防工业出版社,1966.
- [11] GJB1158-91 炮口冲击波对人员非听觉器官损伤的安全限值[S].中华人民共和国国家军用标准,1992.



刘帆(1988-),男,湖北省孝感市人,中北大学硕士研究生,主要研究方向为动态测试与智能仪器,liufan1988@163.com;



杜红棉(1977-),女,辽宁省锦州市人,中北大学副教授。主要从事爆炸冲击波测试技术等方面的研究,duhongmian@nuc.edu.cn;



范锦彪(1974-),男,中北大学副教授,研究方向为高g值加速度计校准及高冲击测试技术,fanjinbiao@nuc.edu.cn;



苗松珍(1984-),女,中国人民解放军第四三二八工厂助理工程师。主要研究方向为通信导航、雷达测试等,610760025@qq.com。