

多通道存储式坑道冲击波测试系统设计

李警森¹, 王代华¹, 于建军², 鲁飞³, 曹海军²

- (1. 中北大学 电子测试技术重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;
2. 晋西工业集团有限责任公司 防务装备研究院, 太原 030051;
3. 陆军装备部装备项目管理中心, 北京 100072)

摘要: 随着武器装备的不断发展, 弹药威力、科学性、特殊性等方面不断提升, 针对坑道的钻地式武器也与日俱增; 因目前对于坑道内冲击波测试的需求逐渐增多, 测试要求越来越高, 设计了一种针对坑道冲击波的测试系统: 采用 FPGA 软件控制提供了多个可控参数, 赋予系统对不同药量战斗部冲击波测试的通用性; 采用数字电位器结合仪表放大器结合以 ICP 传感器直流偏置, 最大程度上降低了传感器自身直流信号对数据的干扰, 提高了系统精度与可靠性; 采用保留区替换的方法进行 FLASH 存储器坏块管理, 保证了数据存储连续性, 避免了因坏块导致通道间数据记录混乱; 系统放大器具有 1~100 倍可调增益, 滤波器截止频率 40~500 k 可调, 采样精度 16 bit, 采样频率最高可达每通道 2 MSPS。经多次实弹测试结果表明, 本系统操作便捷, 数据符合预期, 验证了本系统的可靠性, 提供了一种新的坑道内冲击波测试手段。

关键词: 冲击波; 坑道; 多通道; 存储测试; 参数可编程; 消除直流偏置; 坏块; 保留区替换; 存储连续性

Design of a Multichannel Stored Test System for Tunnel Shock Wave

Li Chasen¹, Wang Daihua¹, Yu Jianjun², Lu Fei³, Cao Haijun²

- (1. North University of China, Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;
2. Institute of Defense Equipment, Jinxi Industrial Group Co., Ltd., Taiyuan 030051, China;
3. Equipment Project Management Center, Army Armament Department, Beijing 100072, China)

Abstract: With the continuous development of weapons and equipment, the power, scientificity and particularity of ammunition are constantly improved, and the burrowing weapons for tunnels are also increasing day by day. In view of the increasing demand for shock wave test in tunnel, the test requirements are getting higher and higher. A test system for shock wave in tunnel is designed. FPGA software control provides a number of programmable parameters, endowing the system with different charge warhead shock wave testing versatility; Digital potentiometer combined with instrument amplifier combined with ICP sensor DC bias, to minimize the interference of the sensor's own DC signal to the data, improve the accuracy and reliability of the system; The bad block management of FLASH memory is carried out by using the method of reserve area replacement, which ensures the continuity of data storage and avoids the chaos of data recording between channels caused by bad blocks. The system has 1~100 times adjustable gain amplifier, the filter cutoff frequency is 40~500 K, the sampling accuracy is 16bit, the sampling frequency can be up to 2 MSPs per channel. The results of many live ammunition tests show that the system is convenient to operate and the data meet the expectation, which verifies the reliability of the system and provides a new means of shock wave test in tunnel.

Keywords: shock wave; tunnel; multichannel; stored test system; parameter programmable; elimination of DC bias; bad block; tenure replacement; storage continuity

0 引言

现阶段, 面对复杂的作战环境, 毁伤效应是现代战争中的关注焦点, 在战斗部爆炸过程中所产生的冲击波及破片是重要毁伤元。根据安全距离冲击波毁伤准则^[1], 把冲击波超压峰值和正压作用时间对人的伤害进行划分后综合得知, 冲击波测试系统精度应达到 0.01 kPa 以上, 而且数据存储必须可靠, 对测试系统性能提出更高的要求^[2]。

纵览国内外冲击波测试的发展现状, 电测法是主流测

试方法, 从信号转换存储的角度又可分为引线式和存储式。引线式测试设备基于分体式系统架构, 具有组建系统简单易行的特点, 但也造成了各功能单元分离的局面: 仅将传感器置于爆炸场内, 后续记录仪器远离爆炸场以求有效防护, 中间采用长引线连接。这使得长引线成为整个系统的薄弱环节; 存储式测试设备属于专用测试系统, 软硬件组成固化, 需不断丰富工作参数的程控能力和针对不同环境的测试能力, 提高设备的通用性。

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-01-29。

作者简介: 李警森(1997-), 男, 硕士, 山西晋城人, 主要从事动态测试方向的研究。

通讯作者: 王代华(1977-), 男, 副教授, 博士, 山东日照人, 主要从事动态测试方向的研究。

引用格式: 李警森, 王代华, 于建军, 等. 多通道存储式坑道冲击波测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 114-118.

随着现代热武器的命中率和侵彻力的提高, 具有钻地能力的武器性能不断提高, 完全有能力入侵坑道内部或附近地形中, 产生爆轰产物及破片通过涌入坑道内形成冲击波进行传播, 造成坑道内部人员和作战设备损伤^[3]。坑道内空气冲击波形成的波阵面速度较空气中冲击波大^[4]。由于坑道内墙壁面的整形和约束作用, 坑道内冲击波的传播呈现出压力长时间持续, 衰减速度较自由场空间内慢的特点^[5]。坑道内爆炸是常见的一种爆炸形式, 国内外不少研究人员已对坑道内爆炸冲击波的特征开展了研究, 但多停留于仿真分析方面, 且传统坑道内冲击波测试手段存在引线长、系统固化等缺点。针对上述问题, 本文设计了一种面向坑道内爆冲击波的多通道存储测试系统, 本系统以 FPGA 为主控芯片, 使用单片高速 AD 转换芯片, 采用高速率的模拟开关对多路信号进行切换, 通过数字电位器与仪表运放结合以直流耦合的方式消除 ICP 传感器的直流偏置, 保证了系统信号的完整性, 操作简单, 有效缩短了引线长度, 提高了系统稳定性, 可以完成坑道内冲击波测试且数据可靠。

1 系统组成及原理

坑道内冲击波具有更快的速度, 更大的威力, 需要根据以往冲击波的测试要求进行相应的指标提升, 故本方案针对坑道内冲击波测试, 提高了测试精度, 设计了程控放大倍数和滤波截止频率以适应坑道内冲击波测试, 可通过上位机对其进行灵活设置^[6]。本系统在考虑便携性及数据可靠性的基础上, 采用存储式设计^[7], 传感器对数据进行采集后, 通过信号调理及模数转换, 存储至 FLASH 存储器, 实验结束后回收系统利用 USB 接口进行回读, 将数据传输至上位机, 由上位机对其进行显示处理。系统组成框图如图 1 所示。

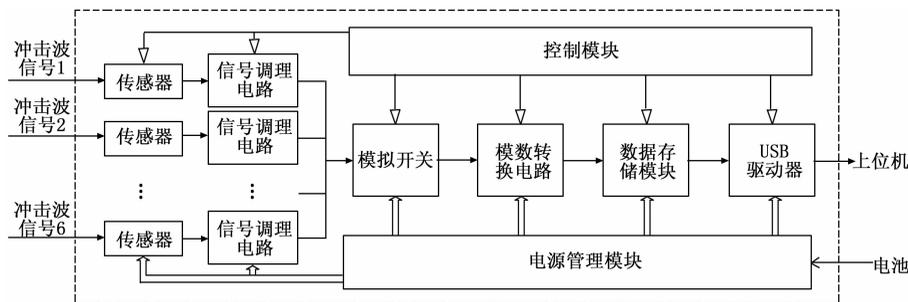


图 1 系统组成框图

试验前, 在坑道内壁或地面上进行打孔, 用于试验时安装传感器, 传感器引线通过在墙体或地面挖槽等方式引出至于坑道口附近安全位置的测试设备, 引线沟槽用角铁覆盖保护; 并通过炸药当量及测点距离对装置采样频率、放大倍数、触发电平等参数进行设置。系统选用 ICP 传感器, 将冲击波压力信号转换成电信号, 再经过适配放大器、程控放大器、滤波器等模拟电路将信号调理到适应 AD 转换

的要求。模拟信号经 AD 转换后连续存储在存储器中, 整个采集和存储过程由微控制器 FPGA 协调一致控制。待爆炸过程结束后, 现场连接 USB 数据线, 将存储数据回传计算机, 再进行数据的后续分析处理和打印等工作, 最终提供被测冲击波信号的有关特征参数。系统工作原理图如图 2 所示。

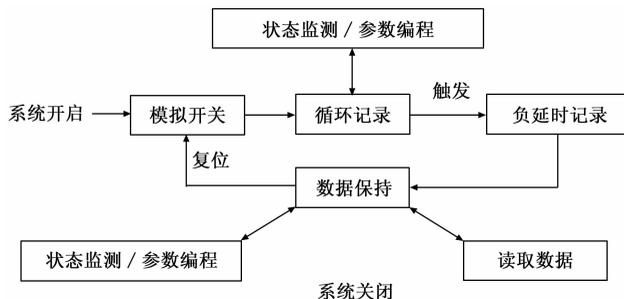


图 2 系统工作原理图

2 关键技术设计及实现

2.1 程控消除直流偏置

测试系统的信号都来源于所选用传感器, 传感器的信号调理是整个系统的重中之重。本设备采用的是美国 PCB 公司的 ICP 压力传感器, 其量程 50~1 000 psi 多种类可选, 非线性误差 $\leq 1.0\%$ FS, 谐振频率 ≥ 500 kHz, 分辨率可达 0.007 kPa, 符合坑道内爆冲击波测试相关国军标的性能及精度要求, 外形尺寸合适、输出信号调理简单, 使用便捷。

目前常规消除 ICP 压力传感器输出的直流偏置电压的方式是采用交流耦合消除, 但这种方式会使信号低频特性受到影响, 增加后续信号分析的误差。本系统使用两片数字电位器组合仪表放大器用以消除 ICP 传感器直流偏置。采用两片数字电位器级联的目的是提高精度, 其电路图如图 3 所示。

将传感器的输出信号和数字电位器的电压输出分别连接至仪表放大器同相及反相输入端, 系统上电后, 在传感器没有接收冲击波信号时, 仅输出直流偏置, 此时 AD 对仪表放大器差模输出进行采样。当仪表放大器输出为正电压时, 说明传感器直流偏置电压相对较大, 则逐级提高数字电位器级数; 当仪表放大器输出为负电压时, 说明数字电位器输出电压相对较大, 则逐级降低数字电位器级数。直至调节至仪表放大器输出信号为 0 V, 锁定数字电位器级数, 模拟开关切换至下一通道进行消除直流偏置操作。消除直流偏置原理框图如图 4 所示。

2.2 程控信号放大及噪声滤除

为使系统可以针对坑道内冲击波速度快、超压值大、

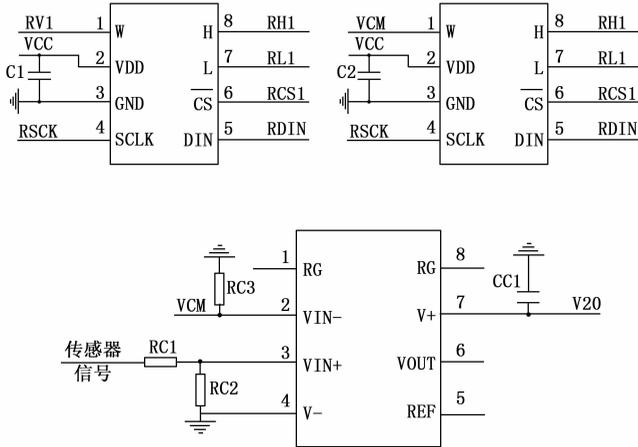


图 3 消除直流偏置电路图

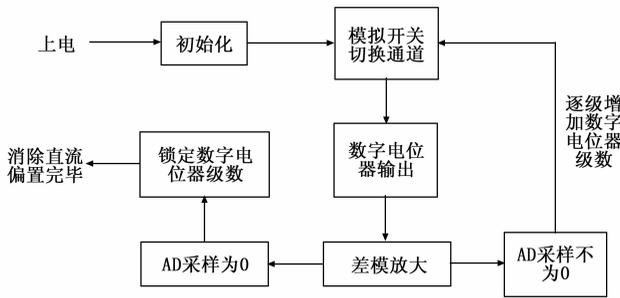


图 4 消除直流偏置原理框图

衰减速度快的特点，需要系统有更大的量程跨度。故本系统采用更大放大倍数的程控信号放大器和程控滤波器设计，可以根据测试需求和测点安排对每通道的放大倍数和滤波截止频率进行独立调整，用于满足不同药量战斗部、不同测点距离等多种测试需求^[8]，使系统更具有灵活性和通用性。

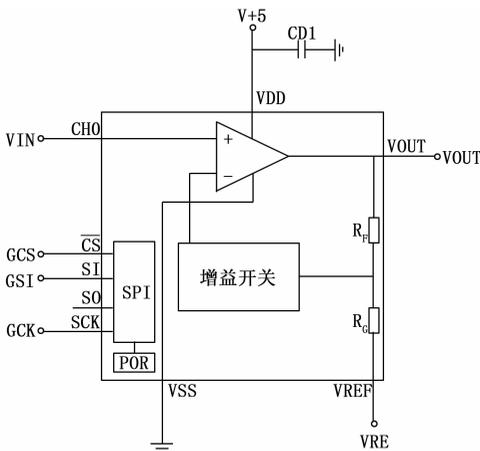


图 5 程控放大原理图

程控放大器设计为 1~100 倍可由主控芯片程控放大倍数。系统通过 GCK、GCS 和 GSI 三个引脚的信号对程控放大器的增益倍数选择和工作模式进行控制。程控放大原理

图如图 5 所示。

程控滤波器设计为可经由外部时钟进行调节的低通滤波器，截止频率 40k~500k 可调，试验前根据测点实际情况进行调节可有效降低信噪比。程控滤波原理图如图 6 所示。

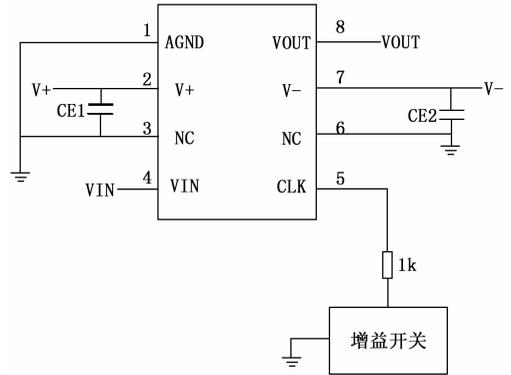


图 6 程控滤波电路图

2.3 采集存储模块设计

本系统主控芯片选择的是 Altera 公司的 FPGA 芯片，采用高速切换的多路模拟开关加单片 AD 的设计。模拟开关选用美国 ADI 公司的 8 通道多路复用器 ADG708，该芯片供电方式为 1.8~5.5 V 单电源供电或±2.5 V 双电源供电，电阻 3 Ω，导通电阻平坦度 0.75 Ω，开关时间达 14 ns，可以实现多通道快速切换^[9]。AD 转换器选用美国 ADI 公司的 16 位逐次逼近型 ADC，该芯片吞吐速率可达 12.5 MSPS，有优异的直流精度性能。存储元件上，由于 NAND FLASH 具有擦写速率高、存储密度大，适配读写速率要求快、数据量大的存储测试系统，故选择 Micron 公司的 NAND FLASH 作为存储芯片。本系统选用的 NAND FLASH 存储容量为 128 MByte。

首先 FPGA 控制模拟开关的通道地址 A0~A2 来选通某一通道，系统通过 CONVST 引脚对信号进行采样，片选信号 CS 和读信号 RD 将寄存器中的数据输出至数据总线。输出寄存器中的数据沿 BUSY 信号的上升沿更新，转换结束后立即读取，理论上每通道采样率可达 2 MSPS，满足冲击波测试要求^[10]，AD 模块的工作时序如图 7 所示。

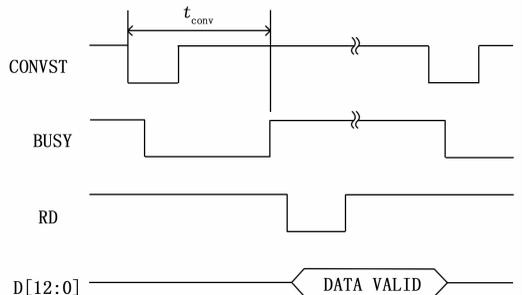


图 7 AD 模块工作时序

系统上电未触发时, 系统记录预先设置好的负延时, 即系统基线。冲击波信号来临后, 传感器开始进行数据采集。采集到的信号通过预先设置好倍数的程控放大电路进行放大, 后进入之后的程控滤波电路中滤除杂波, 提高数据可靠性。经过放大和滤波电路的信号被调理至 AD 采样芯片的输入范围, AD 芯片再经由模拟开关切换采集各信道的冲击波信号。由于 AD 芯片与 FLASH 存储器的数据传输宽度和传输速率均不相同, AD 芯片输出的数字信号先由单片机内的 FIFO 进行缓存后再存入 FLASH 存储器。读取数据时, 控制芯片将 FLASH 中的数据信息取出, 再次通过 FIFO 缓存后进入数据接口, 即可通过 USB 芯片及接口将数据传输至上位机。采集存储模块原理框图如图 8 所示。

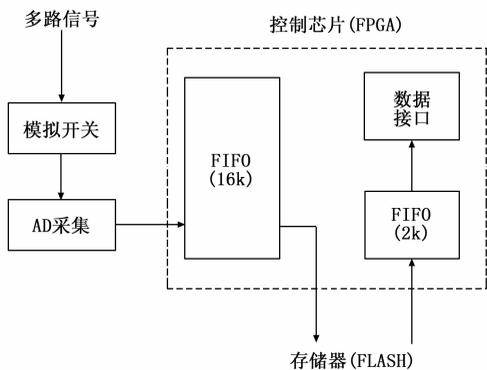


图 8 采集存储模块原理框图

2.4 坏块管理策略

由于 NAND FLASH 在出厂及之后的使用过程中会产生无效块, 即坏块, 为保证数据可靠性, 进行坏块管理十分必要^[11]。系统上电后会遍历各块的坏块标志位, 找出坏块并建立坏块表存储至 FLASH 第一块第一页中; 发现使用坏块时, 在写入或擦除操作完成后发送状态读取指令, 返回值若为高电平则此块标记为坏块并记录近坏块表中, 并将数据重新写入其他好块内。

通常发现坏块时的处理方法是在存储至这块时跳过, 但这种做法会破坏存储地址的连续性。由于本系统为多通道设备, 存储区已划分出各通道的存储地址界限, 用后面的好块简单代替发现的坏块可能会导致超出地址界限使每通道记录的数据混乱。故先划分出坏块保留区, 对发现的坏块的物理地址进行替换。此种方法可保证数据存储区域逻辑地址连续, 提高数据可靠性。本系统为方便存储区域管理及划分, 将最后 60 块用作坏块保留区。坏块替换流程图如图 9 所示。

逻辑地址和物理地址分别为存储映射表的页内地址和页内数据对应地址, 进行坏块管理时, 首先主控芯片会将 FLASH 第一页中地址映射表和坏块表读取至 RAM 进行操作。发现坏块时, 首先访问 RAM 内的坏块表, 找到坏块保

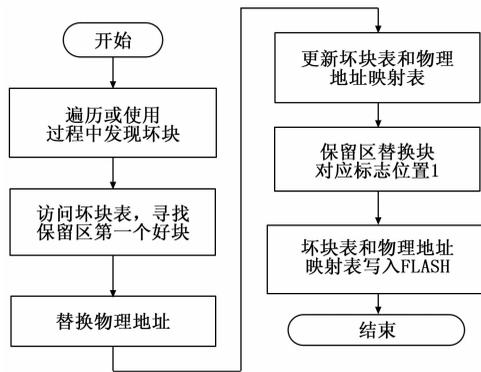


图 9 坏块替换流程图

留区中的第一个好块, 对其物理地址进行替换, 之后及时更新 RAM 内的坏块表和物理映射表, 并将替换块的坏块标志位置 1。最后将 RAM 内更新后的坏块信息写入 FLASH 第一块第一页中同步更新, 避免 FLASH 与 RAM 中的坏块表和地址映射表有信息迟滞, 造成数据丢失。物理地址映射示意图如图 10 所示。

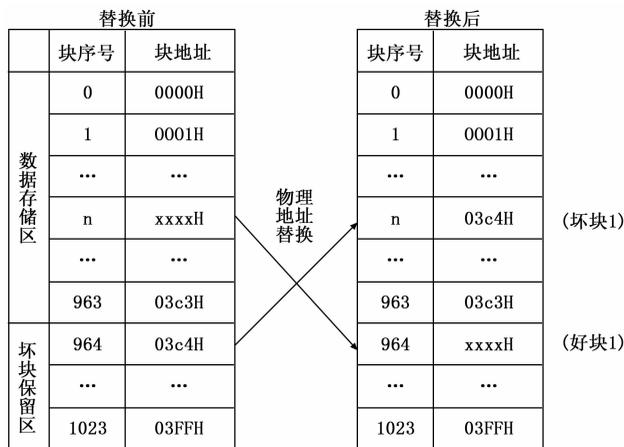


图 10 物理地址映射示意图

3 实测实验

本系统经多次实弹测试证明了其实用性及数据可靠性。图 11 为某次坑道静爆冲击波超压试验测试现场布局图, 按照试验大纲要求, 以坑道内爆心在地面上的投影为零点, 分别在距零点 6 m、12 m 和 15 m 的地面上各布设 3 个测点, 中间测点与爆心位于坑道中轴线上, 共计 9 个测点。

根据被测信号特征, 系统增益设置为 2 倍, 触发方式设置为内触发, 触发电平设置为 500 mV, 采样频率设置为 2 MHz。图 12 为本次试验的典型曲线。

4 数据处理与分析

表 1 为测试数据处理结果, 从各个测点所采集到的冲击波曲线中可以看出, 坑道内同一截面不同位置的冲击波超压并不相等, 截面中心会相对偏小。距离爆心越近的测点冲击波曲线波动越剧烈, 呈现出不止一个峰值, 且第二

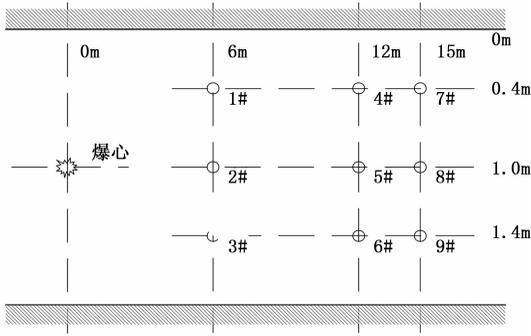


图 11 某坑道静爆冲击波超压试验测试现场布局图

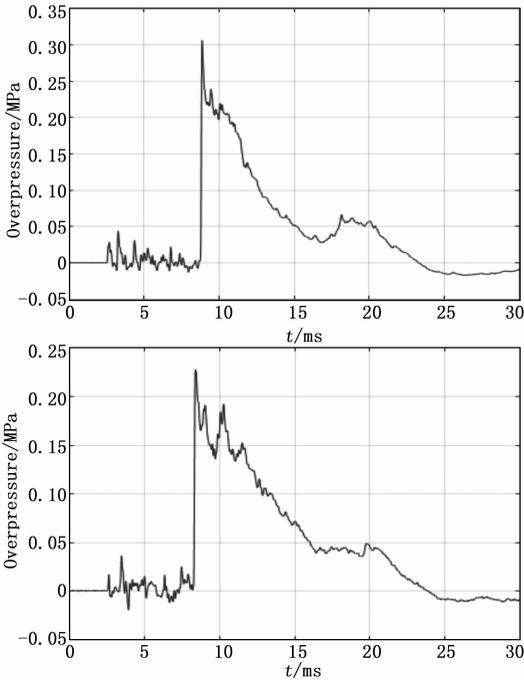


图 12 某坑道静爆冲击波超压试验曲线

个波峰为最大值，原因是距离爆心越近，引爆时化学反应界面以超音速推进形成爆轰波，受装药形状及坑道截面等因素影响波阵面以不同形状向外扩展，作用于坑道墙壁发生多次反射、叠加，未形成稳定的波阵面，有着较大的强度波动^[12]。结果表明距离爆心越近时，冲击波图像中的二次波峰越明显，甚至超过首个波峰。说明近距离坑道爆破中，起爆冲击波会与反射冲击波相叠加，产生更大的二次波峰。

表 1 某坑道冲击波超压试验测试结果

| 距离/m | 超压值/MPa | | |
|------|---------|---------|---------|
| | 0.4 | 1.0 | 1.4 |
| 6 | 1.1253 | 0.687 0 | 0.846 2 |
| 12 | 0.417 3 | 0.318 1 | 0.365 2 |
| 15 | 0.209 4 | 0.238 3 | 0.213 5 |

距离逐渐增大时，冲击波超压会逐渐减小且衰减速度随距离增大逐渐变慢，最远的测点 7#、8# 和 9# 的图像只有一个明显峰值，说明此距离下冲击波阵面经坑道内壁整形后，逐渐形成向前传播的规则平面波^[13]。

5 结束语

在坑道内爆试验中，由于坑道墙壁的限制，冲击波传播规律与自由场空间内不同。经多次实弹测试验证，本系统操作便捷，测试规模大，数据精度高，可靠性好，具有良好的灵活性与通用性，可以满足多种试验条件下对坑道内冲击波的测试。也可通过将传感器设置于地面、炮口等位置完成自由场或炮口等冲击波测试任务，具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 夏琦明. 安全距离与冲击波毁伤准则 [J]. 火炮科技与市场, 2014 (4): 48-52.
- [3] 何翔, 任新见, 陈力, 等. 结构中爆炸泄入坑道内部空气冲击波超压工程计算方法 [J]. 防护工程, 2019, 41 (3): 20-25.
- [4] 雷帅. 爆破冲击波在隧道内衰减规律及其应用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [5] 徐利娜, 雍顺宁, 王凤丹, 等. 直坑道内爆炸冲击波超压传播规律研究 [J]. 测试技术学报, 2014, 28 (2): 114-118.
- [6] 范少波, 王代华, 赵志国, 等. 一种多重触发式炮口冲击波存储测试系统设计 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (4): 46-51.
- [7] 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 (S1): 134-135.
- [8] 翟永. 冲击波存储测试系统的同步技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [9] 贾鹏程, 王代华, 范少波, 马竹新. 一种靶网自适应的多通道测速系统设计 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (3): 141-144.
- [10] 范少波. 基于 FLASH 的多次触发炮口冲击波测试系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [11] GJB 6390. 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, 2008.
- [12] 王晓楠. 弹载多通道数据采集系统的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [13] 苗朝阳, 李秀地, 杨森, 等. 坑道内爆炸冲击波相似律问题探讨 [J]. 爆破, 2016, 33 (1): 131-136.