

面向高空爆炸试验的冲击波测试系统

周珺珺, 王文廉*

(中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对空爆条件下冲击波传播特性与地面爆炸存在显著差异, 且传统冲击波测试装置难以适用于空中布设及多方向冲击波测量的问题, 设计并研制了一种轻量化空爆冲击波测试系统。该系统以径向极化球形压电传感器为核心敏感单元, 利用其几何对称结构实现冲击波超压信号的全向响应测量。构建了由信号调理电路、高速模数转换模块、空间信息获取模块及本地存储单元组成的存储式测试系统, 实现了冲击波信号的自动触发、高速采集与本地记录。系统采样速率为1 MSPS, 模数转换分辨率为12位, 并通过紧凑化结构设计与轻量化封装, 使整体装置能够满足空中悬挂布设的试验需求。通过悬挂式室外爆炸试验对系统性能进行了验证, 在不同爆炸高度和方位角条件下, 测试系统均能够稳定获取完整的冲击波超压时程曲线。试验结果表明, 各测点记录的冲击波超压峰值分布集中, 相对标准偏差为4.8%, 系统具有良好的动态响应能力和测量一致性。本文所研制的测试系统能够在空中环境下稳定获取冲击波压力时程数据, 可为空爆冲击波传播规律研究及高空毁伤效应评估提供有效的测试手段。

关键词: 空爆测试; 冲击波超压测试; 球形全向传感器

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0001

引用格式: 周珺珺, 王文廉. 面向高空爆炸试验的冲击波测试系统[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 464-471.

Zhou Junyu, Wang Wenlian. A shock wave testing system for high-altitude explosion experiments[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(4): 464-471.

A Shock Wave Testing System for High-Altitude Explosion Experiments

Zhou Junyu, Wang Wenlian*

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For the problem that the shock-wave propagation characteristics have significant differences with ground explosion under airburst conditions, and traditional shock-wave test devices are difficult to be applicable to in-air deployment and multi-direction shock-wave measurement, a lightweight airburst shock-wave test system was designed and developed. This system took the radially polarized spherical piezoelectric sensor as the core sensitive unit, and used its geometrical symmetric structure to realize omnidirectional response measurement of shock-wave overpressure signals. A storage-type test system composed of signal-conditioning circuit, high-speed analog-to-digital conversion module, spatial-information acquisition module and local storage unit was constructed, realizing automatic triggering, high-speed acquisition and local recording of shock-wave signals. The system sampling rate was 1 MSPS, the analog-to-digital conversion resolution was 12 bit, and through compact structure design and lightweight packaging, the whole

收稿日期: 2026-01-02

作者简介: 周珺珺(2000—), 男, 硕士生, 主要从事动态测试与智能仪器仪表的研究。

* 通信作者: 王文廉(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事测试系统与仪器、信号与信息处理的研究。E-mail: wangwenlian@nuc.edu.cn。

device could meet the test requirements of in-air suspended deployment. Through suspended outdoor explosion tests, the system performance was verified, under different explosion heights and azimuth-angle conditions, the test system could stably acquire complete shock-wave overpressure time-history curves. The test results show that the shock-wave overpressure peak values recorded by each measuring point are distributed concentratedly, the relative standard deviation is 4.8%, and the system has good dynamic response ability and measurement consistency. The developed test system can stably acquire shock-wave pressure time-history data under in-air environment, and can provide an effective test means for airburst shock-wave propagation law research and high-altitude damage-effect evaluation.

Key words: airburst experiments; shock wave overpressure measurement; spherical omnidirectional sensor

0 引言

随着无人机、高空高速飞行器等装备的快速发展,对高空冲击波测试的需求日益凸显^[1]。高空环境空气稀薄,气压和温度与地面差异显著,导致冲击波传播规律发生根本性变化^[2],相同装药在高空环境中冲击波的超压峰值、作用距离和衰减特性均与地面试验结果存在显著差异^[3]。若仅依靠地面试验数据或传统理论模型来评估武器在高空环境下的毁伤效应,会带来巨大误差,可能严重高估或低估其实际威力^[4]。因此,发展专门的高空冲击波测试系统,获取真实高空环境下冲击波传播的数据,对于新型高空武器系统的精确威力评估、目标毁伤效应研究以及飞行器自身的防护设计具有不可替代的价值。通过构建能够耐受高空恶劣条件并实现精准测量的测试系统,可以为相关装备的研发和实战化提供关键数据支撑。

冲击波的测量方法涵盖了多种技术手段,广泛应用于军事、航天、建筑防护等领域。地面与空中的压力传感器阵列^[5]主要利用多个传感器实时监测爆炸现场冲击波的压力变化^[6],其适用于大范围爆炸监测。高速摄影^[7]通过捕捉冲击波的动态变化,为研究提供清晰的视觉数据^[8],而激光干涉仪则通过激光束干涉^[9]分析空气分子位移,精确测量冲击波的传播^[10]。光纤传感器凭借耐高温和抗电磁干扰的特点,能够在恶劣环境中有效监测压力变化,尤其适合远程监测^[11]。无人机和卫星技术则能在空中或远程对爆炸区域进行监测^[12],减少人员风险并获取大范围数据。计算流体动力学模型用于预测爆炸后气流和冲击波的传播路径,可以帮助进行环境评估与防护设计^[13]。上述方法各有其优缺点,通常依据具体的测量目标和环境条件来选择适当的方法和技术。

现有基于压电传感器的冲击波测试技术虽可实现冲击波信息的完整获取,但大多局限于地面应用,难以直接推广至空中测试场景^[14]。本文面向高空环境下冲击波参数快速、准确测量的需求,研制了一种具备多向测量能力并兼具自身定位功能的高空冲击波测试系统。该系统采用径向极化球形压电传感器,可实现冲击波压力信号的多向响应,集成定位模块可实现冲击波压力数据与空间位置的同步获取,系统可实现集成化设计。

1 设计原理

常规的测试系统通过拉线或者存储测试装置来完成,其安装方式和装置重量都不能直接应用于空爆测试环境。特别是在近地爆炸测试中,冲击波传感器安装在地面或者对准爆心,所以常采用壁面冲击波传感器或者笔式自由场传感器,这种方法也难以在空爆试验中应用。为此本文提出一种基于全向冲击波传感器的悬挂式安装测试系统,测试应用构想如图 1 所示。

测试系统采用悬挂式布置方式,将全向冲击波传感器与轻量化存储测试装置集成后悬挂于空中。地面主控计算机利用无线传输技术对测试装置进行状态监测和数据传输,根据需求可以采用不同的悬挂安装方式。存储测试装置可以自动触发并记录冲击波超压数据,并根据自定位信息记录自身的位置信息。

测试系统围绕球形传感器及小型化测试装置进行设计,系统原理如图 2 所示。系统分为球形传感器、测试装置和测试分析软件三部分。

传统壁面传感器由于仅在极化轴方向具有较高灵敏度,其输出信号随冲击波入射方向与敏感轴夹角的增大而显著衰减,在多方向冲击波测试中存在明显局限。针对上述问题,本研究利用球

形压电陶瓷壳在几何结构上的球对称特性,构建了一种径向极化的压电传感单元。当冲击波从任意方向作用于球形压电陶瓷壳时,其外表面在压力作用下均会产生以球半径方向为主的应力与应变分量,在正压电效应作用下,球壳内外表面形成稳定的电荷分布,从而实现冲击波压力信号向电信号的可靠转换。在径向极化条件下,球形压电陶瓷壳的本构方程为

$$\sigma_{rr} = c_{33}\epsilon_{rr} + 2c_{13}\epsilon_{\theta\theta} - e_{33}E_r, \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = c_{13}\epsilon_{rr} + (c_{11} + c_{12})\epsilon_{\theta\theta} - e_{31}E_r, \quad (2)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\theta\theta}, \quad (3)$$

$$D_r = e_{33}\epsilon_{rr} + 2e_{31}\epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{33}E_r, \quad (4)$$

式中: σ_{ij} 为应力分量; $\epsilon_{\theta\theta}$ 与 ϵ_{rr} 为应变分量; D_r 为电位移; E_r 为径向电场量; C_{ij} 为弹性常数; e_{33} 为径向介电常数; e_{ij} 为压电常数。当应用压电材料的传感

特性时, $E_r=0$, 不同方向上产生的应力波信号均会引起压电陶瓷壳的径向应变,从而产生表面电荷,上述本构方程阐释了球形压电陶瓷壳作为压电元件接收信号的工作原理。

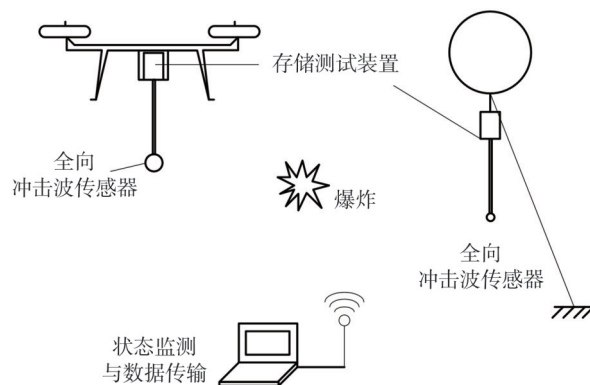


图1 空爆冲击波超压测试构想

Fig. 1 Conceptual design of airburst shock wave overpressure test

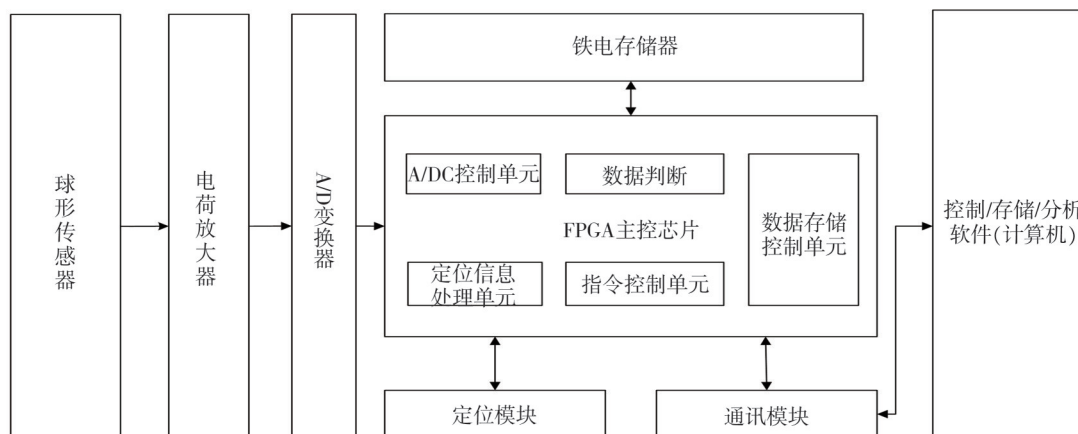


图2 测试系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of the test system

基于球形压电陶瓷壳的弹性-压电本构关系,不同方向入射的冲击载荷均可引起径向应变并产生相应的电位移响应,避免了传统单轴压电传感器的测量结果对入射方向高度依赖的问题。该结构显著提升了压力传感器对冲击波的全向敏感能力,为高空复杂冲击波环境下的多方向压力测量提供了可靠的传感基础。

测试系统基于存储测试法进行设计与研制,主要由信号调理与A/D转换单元、运算处理器、定位模块、数据存储模块以及标准通信接口等组成。系统在测试过程中无需外部供电与有线数据传输,通过内部触发与高速采集机制,实现对爆炸冲击波超压信号的自主识别、实时采集与本地存储。球形传感器将冲击波作用下的瞬态压力变化转换为电信号,经信号调理和模数转换后由运算处理器进行管理与

存储,从而完成对测试点处空气冲击波超压时程的独立、精确测量。基于存储测试方式,系统可在强冲击、高过载等恶劣环境下稳定工作,提高了冲击波超压测量的准确性与可靠性。

为了适应空爆试验对安装方式和系统重量的严格要求,测试装置在结构与功能上采用高度集成化与轻量化设计。将采集、存储与控制功能集成于单一模块内,省去了传统测试系统中大量外接电缆与地面配套设备,显著降低了系统总体质量和体积。轻量化的结构不仅减小了测试装置对冲击波流场的扰动,也使其能够以悬挂方式稳定布置于空中爆炸区域,避免了地面安装或定向布置在空爆条件下难以实现的问题。因此,该测试系统在保证测量精度的同时具备良好的环境适应性和布置灵活性,特别适合用于空爆冲击波超压测试等复杂工况。

2 测试系统研制

根据空中冲击波测试对多向响应能力和系统可靠性的要求,本文研制了全向球形压电传感器及空中冲击波测试系统。

2.1 球形传感器研制

2.1.1 设计思路

对传统的壁面传感器而言,冲击波入射方向在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 范围内时可形成有效测试,但是测试结果与入射角度有关。在入射为 90° 时为正反射,其他角度为斜反射或掠入射。对球形传感器而言,若忽略支撑杆的影响,冲击波入射角度在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 范围内均可认为是正反射,测试结果分析时不再需要入射角度参数,从而可实现全向测试。球形传感器与传统壁面传感器的对比示意如图 3 所示。

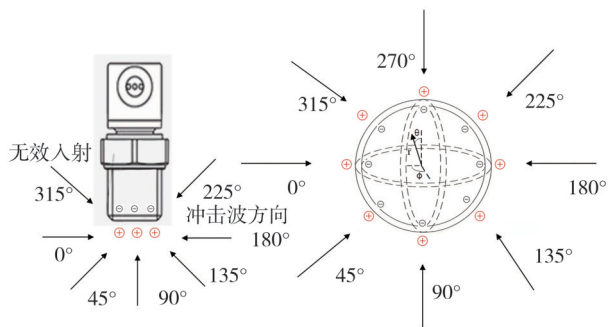


图 3 球形传感器与壁面传感器对比

Fig. 3 Comparison between spherical and flush-mounted sensors

为了适应空中冲击波的多方向传播特性,所研制的球形压电传感器采用径向极化球形压电陶瓷壳作为敏感单元。在冲击波作用下,无论冲击波从何种方向入射,球形压电陶瓷壳外表面均承受以径向分量为主的瞬态压力载荷,并在球壳结构中引起一致的径向应变响应,从而沿径向极化方向产生稳定的电荷输出。由于球形结构在空间各方向上的受力形式与变形模式具有良好的一致性,不同入射方向下传感器整体输出响应保持稳定,从而降低了测量结果对安装姿态和入射方向的依赖,实现了冲击波超压信号的全向测量。

球形压电传感器未采用传统整体球壳烧结方法,而是选用由两个半球压电陶瓷壳组合成型的制备方案。通过该方式可有效降低烧结过程中的结构变形风险,保证球壳壁厚的一致性与结构对称性。在外表面与内表面分别制备电极层,通过单端开孔引出信号线与地线,实现与外部测试电路的连接。为适

应爆炸冲击波测试中强光、高温及高压冲击等复杂工况,在传感器装配完成后对球壳进行环氧树脂灌封处理。灌封层不仅可以起到固定内部结构、增强机械强度的作用,同时可以形成耐高温、防冲击的保护层,有效提升了传感器在自由场爆炸环境下的可靠性与使用寿命。球形传感器实物如图 4 所示。



图 4 球形传感器

Fig. 4 Spherical pressure sensor

2.1.2 球形传感器参数及全向性验证

为了定量评估球形压电传感器的动态响应性能与测量一致性,在开展多方向冲击波试验前,对传感器进行了激波管标定。标定结果表明,该球形传感器的电荷灵敏度系数 K 为 439.29 fC/Pa ,上升时间为 $10 \mu\text{s}$,具备较高的幅值响应能力和良好的瞬态动态响应特性,能够满足空爆冲击波超压快速变化过程的测量需求。

在球形传感器的多向性验证试验中,采用模拟自由场爆炸实验,以传感器为中心,在半径为 20 cm 的球面空间内进行多次小当量爆炸测试,试验中选用电爆炸丝作为爆源,其冲击波效应经反算等效为约 0.15 g TNT 当量,整体实验布置如图 5 所示。



图 5 实验现场图

Fig. 5 Experimental site diagram

实验系统的组成包括示波器、电荷放大器、传感器支架、传感器固定结构以及球形传感器。试验过程中,传感器被悬挂于支架上,以确保其稳定性和准确性。电荷放大器的设置如下:电源采用交流电,放大器灵敏度设定为 0.2 GV/C ,带宽为 100 kHz 。这些配置和设置均旨在优化实验数据的采集与分析,以确保测试结果的可靠性。试验结束后,读取各个炸点所采集的数据,得到的冲击波变化曲

线如图6所示。

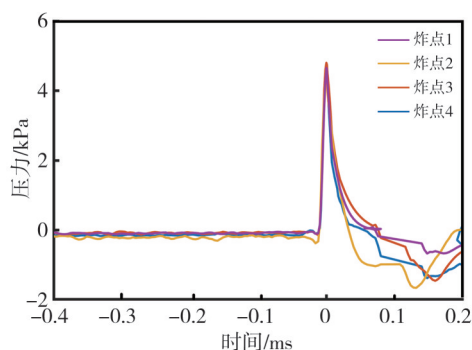


图6 冲击波变化曲线

Fig. 6 Shock wave variation curves

由图6可以看出,各方向冲击波超压响应保持一致,未表现出明显的方向相关性,说明传感器输出对冲击波入射方向不敏感,具备良好的全向测量能力。

为了评估球形传感器测量精度,在与全向性验证相同的实验条件下,采用PCB公司生产的113系列标准传感器进行对照试验,得到冲击波变化曲线如图7所示。

由图7可以看出,PCB传感器测量超压峰值为4.52 kPa,而球形传感器4次测量的平均超压峰

值为4.66 kPa,两者相对偏差约为3.1%。该偏差值远小于球形传感器自身全向测量的标准偏差,表明其在具备良好方向一致性的同时,绝对测量准确度亦满足工程测试的精度要求。

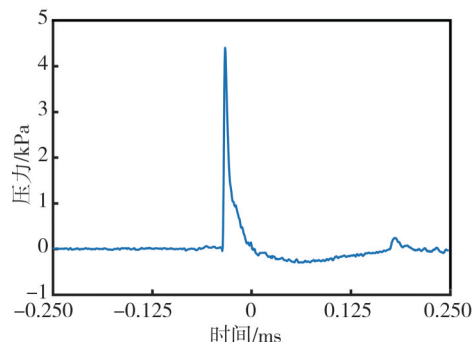


图7 PCB传感器冲击波变化曲线

Fig. 7 Shock wave variation curve of PCB sensor

2.2 采集系统研制

为满足高空冲击波测试对设备轻量化的需求,在保证信号采集、时空定位、存储、通信及控制功能完整性的前提下,本文完成了高空冲击波采集系统的整体研制,测试系统电路示意图如图8所示。

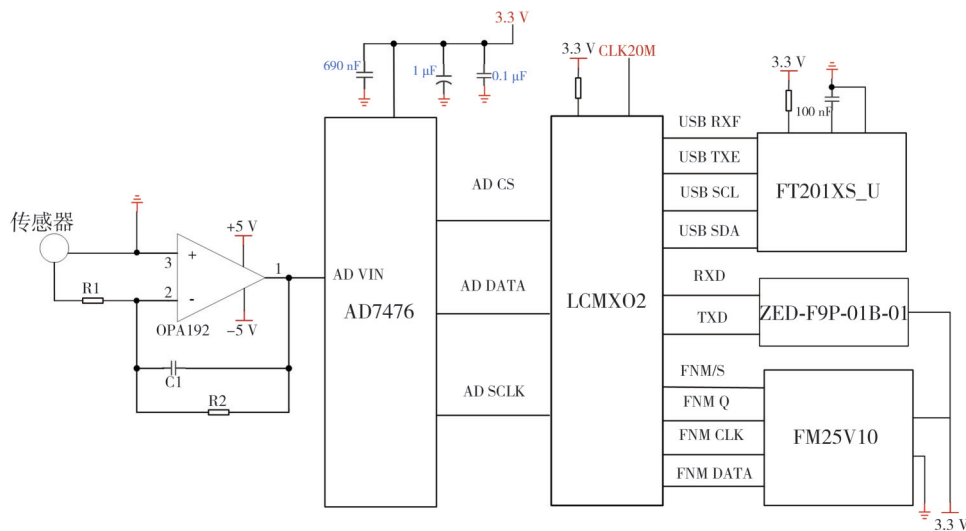


图8 采集系统电路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the test system circuit

系统上电后进入初始化状态,进行参数配置与回读;初始化完成后,系统进入待触发状态,FPGA控制存储器在指定地址区间内进行循环写入,以保证爆炸前后的关键数据均被完整记录;当冲击波信号到达并触发系统后,自动完成冲击波信号及时空信息的存储。测试结束后,上位机

通过有线通信方式读取存储数据,实现冲击波超压信号的完整获取与分析。通过上述软硬件协同设计,系统在满足轻量化、可靠性及环境适应性要求的同时,实现了空中冲击波测试所需的核心功能。测试系统的工作流程如图9所示,系统实物如图10所示。

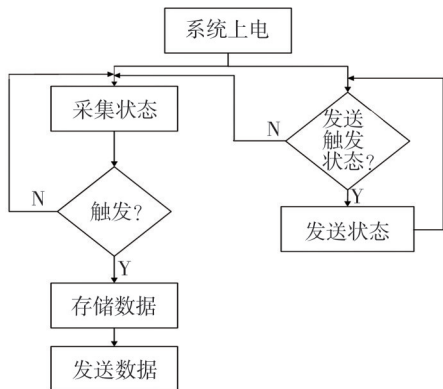


图 9 系统工作流程图

Fig. 9 Flowchart of the test system

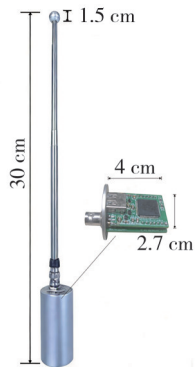


图 10 测试系统实物图

Fig. 10 Photograph of the test system prototype

3 实验测试及数据分析

目前还没有高空空爆的真实测试试验,为了验证所研制测试装置在空中工况下的可行性与工作可靠性,采用悬挂方式对测试系统进行了室外实验验证。通过将轻量化冲击波测试装置悬挂于空中,使其处于近似自由场的工作状态,以模拟空爆条件下传感器的受载环境与安装形式,测试炸点分布图如图 11 所示,现场测试图如图 12 所示。

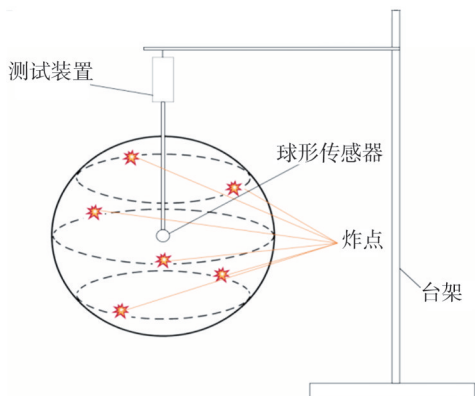


图 11 测试炸点分布图

Fig. 11 Distribution of simulated test detonation points



图 12 现场测试

Fig. 12 Photograph of the field test

3.1 实验条件

为模拟空爆工况,试验采用台架悬挂方式布设测试系统。测试台架高度为 1 m,并整体安置于 1 m 高的平台上,使球形传感器在悬挂状态下距地面高度约为 1.7 m,从而减弱地面反射对冲击波测量结果的影响。经现场精确测量与定位,以球形传感器几何中心为球心,在半径为 20 cm 的球面空间内选取 6 个炸点,分布在不同的空间方位上,用于模拟冲击波从多方向入射的空爆条件。

试验中选中电爆炸丝作为爆源,其冲击波效应经反算等效为约 0.2g TNT 当量。电爆炸丝通过细线悬挂于预定炸点位置,以保证爆炸中心位置的准确性和重复性。各炸点依次起爆,在爆炸丝相同的条件下获取不同空间方位处的冲击波超压数据,从而为分析球形传感器的全向响应特性及系统在空中工况下的测试性能提供了实验基础。

3.2 数据分析

试验结束后,读取各炸点的数据,6 个方向的冲击波变化曲线如图 13 所示。由图 13 可以看出,各个炸点所得到的超压曲线基本相近,超压峰值大致相同。测点数据相关信息如表 1 所示,其中记录角度 θ 时,支架横杆映照圆面对应为 0° 。

由表 1 实验结果可以看出,测试系统在悬挂式空中布设条件下能够稳定完成冲击波超压信号的触发、采集与存储。各测点在不同高度、方位角及空间位置条件下均成功获取了完整的冲击波超压数据,未出现触发失败或数据缺失现象,表明所研制的空中冲击波测试系统在结构设计、信号采集与数据传输等方面工作可靠,整体功能已达到设计要求,系统研制工作顺利完成。

从测试结果来看,各测点测得的冲击波超压

峰值 Δp 分布在5.73~6.48 kPa范围内,相对标准偏差为4.8%,且在空间位置和方位角存在差异的情况下仍保持较好的一致性。同时,测试系统能够同步记录测试装置的空间位置信息与冲击波到达时间。这表明测试系统具备良好的环境适应性

和测量稳定性,能够有效反映空中冲击波在不同方向上的传播特性。实验结果验证了所采用悬挂式空中测试方案的可行性,为后续空中冲击波多向性特性研究及相关实验提供了可靠的测试手段和数据基础。

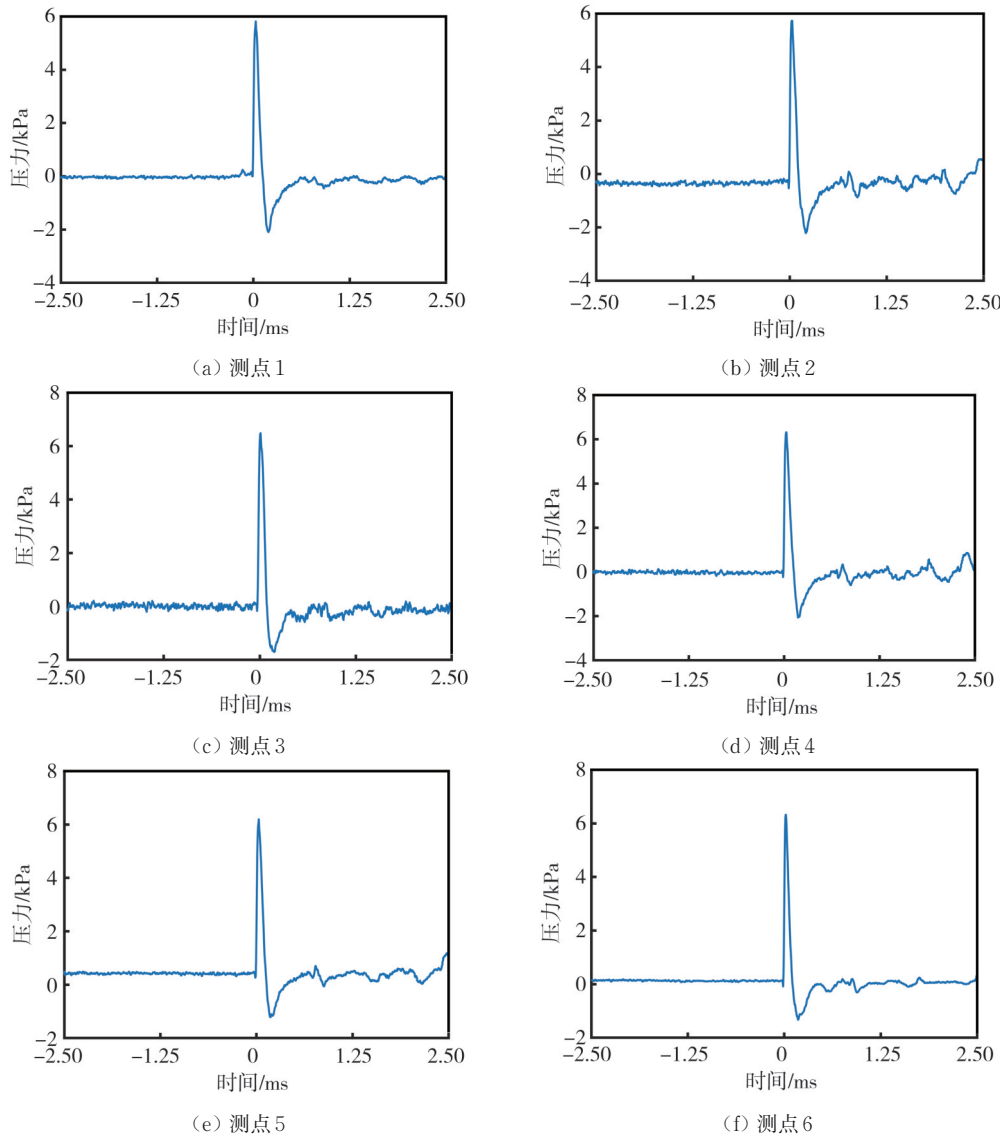


图 13 超压曲线

Fig. 13 Shock wave variation curves

表 1 测试相关信息

Tab. 1 Test information

测点	H/m	$\theta/(^{\circ})$	R/cm	$\Delta p/kPa$	装置经度/ $(^{\circ})$	装置纬度/ $(^{\circ})$
1	1.57	-44.3	19.8	5.81	112.591 413 1	33.417 541 3
2	1.49	133.3	20.1	5.73	112.591 413 3	33.417 541 2
3	1.66	137.0	20.3	6.32	112.591 413 1	33.417 541 2
4	1.72	-89.9	19.7	6.48	112.591 413 2	33.417 541 1
5	1.87	43.7	19.4	6.30	112.591 413 1	33.417 541 3
6	1.83	223.4	20.2	6.19	112.591 413 0	33.417 541 0

4 结 论

本文围绕高空空爆冲击波测试需求,研制了一种基于球形压电传感器的轻量化空中冲击波测试系

统,并通过悬挂式室外试验对其性能进行了验证。研究表明,所设计的径向极化球形压电传感器能够有效克服传统单轴传感器方向敏感性强的问题,实现了对冲击波超压信号的多向响应。在悬挂式空

中布设条件下,系统在不同高度和方位角测点均获得了完整、连续的冲击波超压时程数据,各测点超压峰值分布集中,相对标准偏差较小,表明系统具有良好的测量一致性与稳定性。实验结果验证了该测试系统在空中工况下的可行性与可靠性,证明其已具备开展空中冲击波测试的基本能力,可为空爆冲击波传播特性研究及高空毁伤效应评估提供有效的实验手段和数据支撑。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 王强. 空中与地面冲击波超压对比测试分析[J]. 中国检验检测, 2021, 29(6): 14-16.
Wang Qiang. Comparative test and analysis of shock wave overpressure between air and ground[J]. China Inspection Body & Laboratory, 2021, 29(6): 14-16. (in Chinese)
- [2] 王岩, 王华, 崔村燕, 等. 火箭空中爆炸冲击波峰值超压预测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(7): 1371-1378.
Wang Yan, Wang Hua, Cui Cunyan, et al. Prediction method of shock wave peak overpressure generated by air explosion of rocket[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(7): 1371-1378. (in Chinese)
- [3] Wang L Q, Kong D R. Research on the distribution characteristics of explosive shock waves at different altitudes[J]. Defence Technology, 2023, 24: 340-348.
- [4] 陈龙明, 李志斌, 陈荣, 等. 高原环境爆炸冲击波传播特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(5): 51-61.
Chen Longming, Li Zhibin, Chen Rong, et al. An experimental study on propagation characteristics of blast waves under plateau environment[J]. Explosion And Shock Waves, 2022, 42(5): 51-61. (in Chinese)
- [5] Zhang Y J, Peng P, Lin T, et al. Research on the shock wave overpressure peak measurement method based on equilateral ternary array[J]. Sensors, 2024, 24(6): 1860.
- [6] Ma X J, Kong D R, Shi Y C. Measurement and analysis of shock wave pressure in moving charge and stationary charge explosions [J]. Sensors, 2022, 22(17): 6582.
- [7] Kurahara H, Ando K. Ultra-high-speed photography and hydrophone measurement of laser-induced shock waves in liquids: Viscous effects on spherical shock dynamics[J]. Nihon Reorji Gakkaishi, 2024, 52(5): 313-321.
- [8] 畅里华, 温伟峰, 冉茂杰, 等. 炸药多点起爆超高速光电分幅摄影技术研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(4): 83-88.
Chang Lihua, Wen Weifeng, Ran Maojie, et al. Study on ultra-high speed photoelectric framing photography of the multi-point initiation of explosive [J]. Explosion And Shock Waves, 2022, 42(4): 83-88. (in Chinese)
- [9] 李博, 王霞, 黄澄玉, 等. 气体脉冲压力的激光干涉法测量[J]. 计量学报, 2023, 44(9): 1417-1422.
Li Bo, Wang Xia, Huang Chengyu, et al. Laser interferometry measurement of gas pulse pressure[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(9): 1417-1422. (in Chinese)
- [10] Gao L, Zhang H C, Lu J, et al. High-precision diagnosis of the whole process of laser-induced plasma and shock waves using simultaneous phase-shift interferometry[J]. Photonics, 2025; 12(6): 601.
- [11] Wang Y H, Chen B T, Wu G R, et al. Fiber-optic pressure sensors: recent advances in sensing mechanisms, fabrication technologies, and multidisciplinary applications[J]. Sensors, 2025, 25(20): 6336.
- [12] 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.
Lü Zhongjie, Han Jinliang, Huang Fenglei. Test monitoring system of air blast shockwave power based on satellite communication [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(4): 331-336. (in Chinese)
- [13] Noorpoor Z, Tavangar S, Soury H, et al. A computational fluid dynamics approach for air blast propagation using open FOAM and Becker-Kistiakowsky-Wilson equation of state[J]. Heliyon, 2020, 28(12): e05852.
- [14] 郭庆, 王毛凯, 王文廉. 基于压电薄膜的一体式冲击波测试系统[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 162-167.
Guo Qing, Wang Maokai, Wang Wenlian. Integrated shockwave measurement system based on piezoelectric film[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2023, 44(2): 162-167. (in Chinese)