

动爆试验中的自适应冲击波超压测试传感研究

徐洪亮¹, 王 玉², 赖富文³, 王文廉^{1*}

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;
3. 中国人民解放军 63853 部队, 吉林 白城 137001)

摘 要: 在动态爆炸试验中, 爆心随机偏移会导致冲击波入射方向多变和压力幅值跨度大的问题, 进而使传感器入射角变化显著、测点超压幅值波动剧烈, 传统测试装置难以同时满足全向响应与宽量程精准测量的要求。针对上述工程难题, 本文研制了一种方向与量程双重自适应的自由场冲击波超压测试装置。装置采用“棒棒糖”结构, 以直径 15 mm 的球形压电陶瓷为敏感单元, 利用球面均匀敏感特性实现对入射方向 $\pm 90^\circ$ 范围内超压的近似全向响应; 信号调理模块集成量程自适应控制电路, 构建四通道并行采集结构, 并根据幅值判定实现最优量程通道的自适应选择, 使其兼顾低压段测量精度与高压段抗过载能力, 实现宽动态范围冲击波信号的高精度测量与量程自适应匹配。采用激波管动态校准与爆炸试验进行了联合验证, 实验结果表明, 该传感器动态灵敏度为 $83.2 \mu\text{V}/\text{Pa}$, 入射方向为 $\pm 90^\circ$ 范围内的灵敏度衰减不超过 3%, 在爆心位置随机偏移、冲击波强度大幅变化条件下仍可实现稳定可靠的自由场超压测量。该研究为动态爆炸宽量程、全向响应冲击波测试提供了新型传感技术方案, 验证了方向与量程双自适应传感原理在爆炸测试中的可行性与工程实用价值。

关键词: 动爆试验; 球形压电传感器; 自适应读取; 冲击波超压; 宽量程测量

中图分类号: TJ06 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0014

引用格式: 徐洪亮, 王玉, 赖富文, 等. 动爆试验中的自适应冲击波超压测试传感研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 449-456.

Xu Hongliang, Wang Yu, Lai Fuwen, et al. Adaptive shock wave overpressure sensing for dynamic explosion testing[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(4): 449-456.

Adaptive Shock Wave Overpressure Sensing for Dynamic Explosion Testing

Xu Hongliang¹, Wang Yu², Lai Fuwen³, Wang Wenlian^{1*}

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. Unit 63853 of PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract: In dynamic explosion tests, the random offset of the detonation center leads to variable incident directions of shock waves and a wide span of pressure amplitudes. This results in significant variations in the incident angle of the sensor and large fluctuations in the overpressure amplitude at measuring points. Conventional testing devices can hardly meet the requirements of both omnidirectional response and high-precision wide-range measurement simultaneously. To address the above engineering challenges, this

收稿日期: 2025-12-15

作者简介: 徐洪亮(2000—), 男, 硕士生, 主要从事动态测试技术与智能仪器仪表设计的研究。

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

paper develops a free-field shock wave overpressure testing device with dual adaptability in direction and range. The device adopts a “lollipop” structure and uses a spherical piezoelectric ceramic with a diameter of 15 mm as the sensing unit. By utilizing the uniform sensitivity characteristic of the spherical surface, an approximately omnidirectional response to overpressure within an incident angle range of $\pm 90^\circ$ is achieved. The signal conditioning module integrates a range adaptive control circuit, builds a four-channel parallel acquisition structure, and realizes the adaptive selection of the optimal range channel based on amplitude determination, which achieves a balance between the measurement accuracy in the low-pressure section and the overload resistance capacity in the high-pressure section, and realizes high-precision measurement and range adaptive matching of shock wave signals within a wide dynamic range. The performance of the device is verified by a combination of shock tube dynamic calibration and explosion tests. Experimental results show that the dynamic sensitivity of the sensor is $83.2 \mu\text{V}/\text{Pa}$, and the sensitivity attenuation is less than 3% within the incident angle range of $\pm 90^\circ$. Stable and reliable free-field overpressure measurement can still be realized under the conditions of random detonation center offset and large variations in shock wave intensity. This study provides a novel sensing technical solution for wide-range and omnidirectional shock wave measurement in dynamic explosions, and validates the feasibility and engineering practical value of the dual-adaptive sensing principle in explosion testing.

Key words: dynamic blast testing; spherical piezoelectric sensor; adaptive reading; shock wave overpressure; wide-range measurement

0 引言

爆炸冲击波压力的测量是毁伤评估与防护设计研究中的关键环节,其数据精度直接关系到武器效能分析、防护结构优化及安全阈值的科学制定^[1-3]。传统的自由场冲击波传感器(如笔式与盘式结构)虽能在静爆条件下获得较高测量精度,但其方向响应高度依赖于传感器的朝向:笔式传感器必须使尖端严格指向爆心^[4],盘式传感器的有效测量仅限于其法向平面。此类结构在静爆环境中可有效减弱流场干扰,但在动爆环境下,由于爆心位置存在随机偏移且冲击波场分布高度非均匀^[5-6],其方向依赖性导致测量误差显著增加^[7-8],难以满足多变爆炸条件下的自由场测试需求。与此同时,动爆冲击波的信号普遍具有幅值跨度大、上升沿陡峭、持续时间短等特点^[9-11],传统固定增益放大与触发采集方案难以同时兼顾低幅值与高幅值信号,易出现高压信号饱和、低压信号分辨率不足的问题^[12],从而限制了动爆条件下冲击波参数的准确获取。现有解决方法多采用可编程增益放大或动态切换量程策略,但对于冲击波这类上升沿极陡、持续时间极短的瞬态信号,实时增益切换易引入瞬态失真甚至导致关键信息丢失。

针对上述问题,本文从传感器结构和信号采集两方面开展创新设计,提出一种兼具方向自适应与量程自适应选择特性的动爆冲击波测试方案。在方向自适应方面,在已有球形压电结构理论^[13]研究的基础上,设计了一种基于径向极化球形压电元件的自由场冲击波传感器,实现对入射冲击波的多方向均匀响应,显著降低传感器对爆心方位的敏感性,实现冲击波的方向自适应测量;在量程自适应方面,构建了基于FPGA的多增益自适应采集电路,通过多档增益并行放大、动态判断与同步采集,实现对幅值跨度较大的冲击波信号的有效记录。实验结果验证了该测试方案在复杂爆炸场环境中对冲击波方向与幅值变化的自适应测量能力,为动爆条件下的自由场超压精确测试提供了一种可行的技术途径。

1 整体方案

为实现动爆环境下冲击波超压的方向自适应与量程自适应测量,提出了一种基于球形压电敏感单元与多增益自适应采集电路的综合测试方案。该方案通过传感器结构对称性与自适应策略的协同设计,实现了在爆点位置不确定、冲击强度变化范围较大的条件下的高精度冲击波超压信号测量。

该测试方案主要由球形压电传感器、自适应采集两部分组成,其整体方案如图 1 所示。

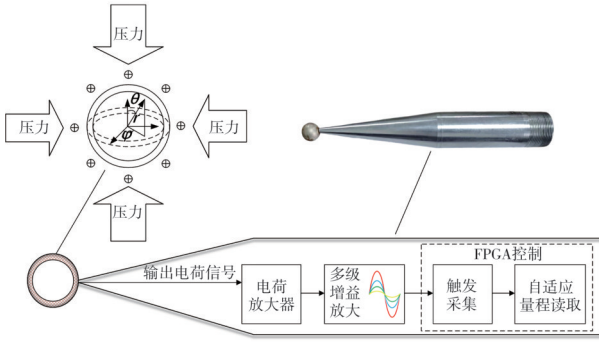


图 1 整体方案

Fig. 1 Overall scheme

1.1 球形压电感知

压电传感器的信号获取基于压电材料的正压电效应,图 2(a)为传统片状压电陶瓷示意图。其压电本构方程可描述为

$$D_i = \epsilon_{ij}^T E_j + d_{ij} T_i, \quad (1)$$

式中: T_i 为压电材料所受应力分量; d_{ij} 为压电应变常数矩阵; D_i 为电位移矢量; E_i 为电场强度; ϵ_{ij}^T 为介电常数矩阵。

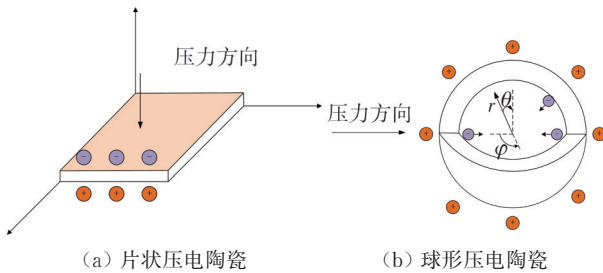


图 2 压电陶瓷工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of piezoelectric ceramic operation

传统片状压电传感器通常沿材料厚度方向极化,其敏感面为平面结构且有效响应区域具有明显的方向性依赖。由于冲击波压力的作用效果与敏感面的受力方向直接相关,当冲击波入射方向偏离传感器预设的最优响应方向(通常为垂直于敏感面方向)时,实际作用于敏感面的有效压力分量会显著减小,导致传感器输出信号幅值下降,因此片状压电传感器的响应具有明显的方向依赖性,在复杂冲击波场中难以实现稳定的全向测量。

针对动爆试验中爆心位置不确定、冲击波入射方向变化大的问题,本文设计了一种以径向极化压电陶瓷球壳为核心敏感单元的压力传感器,其工作示意图如图 2(b) 所示。陶瓷球外径 15 mm、壁厚 1 mm,凭借球形结构良好的几何对称

性,当不同方向入射的冲击波作用于球壳表面时,均会在壳内产生以径向为主的变形。在压电效应的作用下,球形内外分别积累电荷,因此相较于片状压电元件,球形压电陶瓷壳能够实现冲击波信号的全向响应。

球形压电陶瓷壳的弹性-电学耦合关系可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = c_{33}\epsilon_{rr} + 2c_{13}\epsilon_{\theta\theta} + e_{33}E_r, \\ \sigma_{\theta\theta} = c_{13}\epsilon_{rr} + (c_{11} + c_{12})\epsilon_{\theta\theta} + e_{31}E_r, \\ \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{\theta\theta}, \\ D_r = e_{33}\epsilon_{rr} + 2e_{31}\epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{33}E_r, \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为应力分量; ϵ_{rr} 与 $\epsilon_{\theta\theta}$ 分别为径向与切向应变; D_r 为径向电位移; E_r 为径向电场强度; c_{ij} 为弹性常数; ϵ_{33} 为径向介电常数; e_{ij} 为压电常数。压电传感应用中通常取 $E_r = 0$, 且球壳结构轴对称,满足 $\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = -p$, 代入弹性本构方程(2)可得

$$\begin{cases} \epsilon_{rr} = -p(s_{33} + 2s_{13}), \\ \epsilon_{\theta\theta} = -p(s_{13} + s_{11} + s_{12}), \\ D_r = -p[e_{33}(s_{33} + 2s_{13}) + 2e_{31}(s_{13} + s_{11} + s_{12})], \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为冲击波超压; s_{ij} 为弹性常数。设 $D_r = -k_p p$, 若球形电极面积为 S , 则由麦克斯韦方程 $Q = \int D_r dS$ 可得电荷-压强方程

$$Q = -k_p p S, \quad (4)$$

式中: S 压电元件的有效电极面积; k_p 为压电材料等效压力系数。由式(4)可知,球形压电陶瓷在多方应力作用下也能保证良好的线性关系。

1.2 多增益并行采集与量程自适应选择

1.2.1 多增益放大

针对动爆实验中冲击波幅值变化范围大的特点,设计了一种多增益并行放大的信号采集方案。该方案采用四路并行放大结构,对应不同增益档位(0.5倍、1倍、2倍及4倍),以覆盖冲击波信号从低幅值到高幅值的宽动态范围。图 3 为整体自适应采集部分电路示意图。该结构通过多增益冗余设计为后续量程自适应选择提供基础。

球形压电传感器输出的原始信号经前级调理后,被同步分配至各放大通道,实现同一冲击波信号在不同增益条件下的并行放大与采样。不同增益条件下的输出波形示意如图 4 所示。

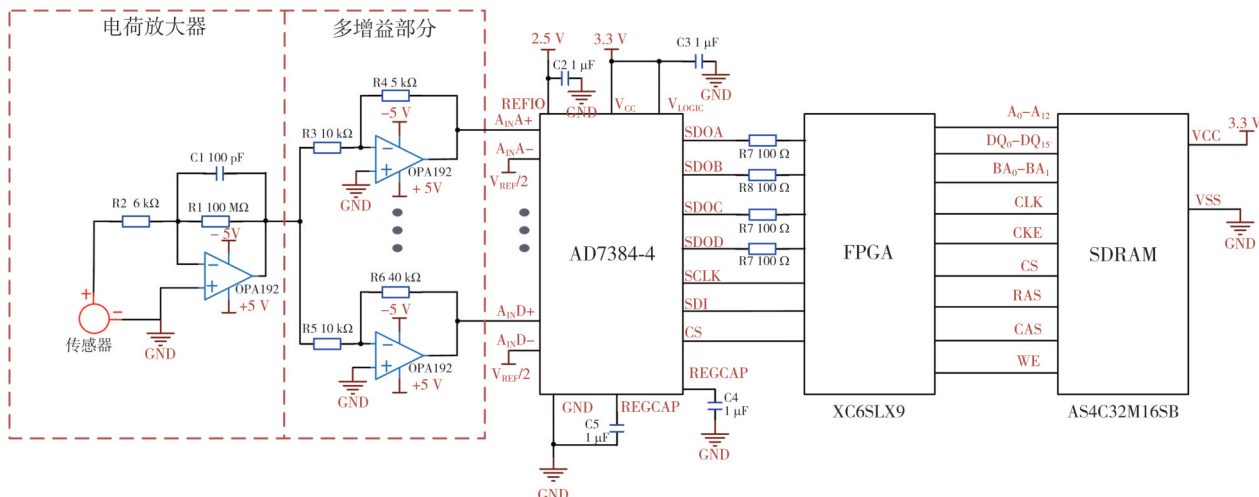


图3 自适应采集电路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of adaptive acquisition circuit

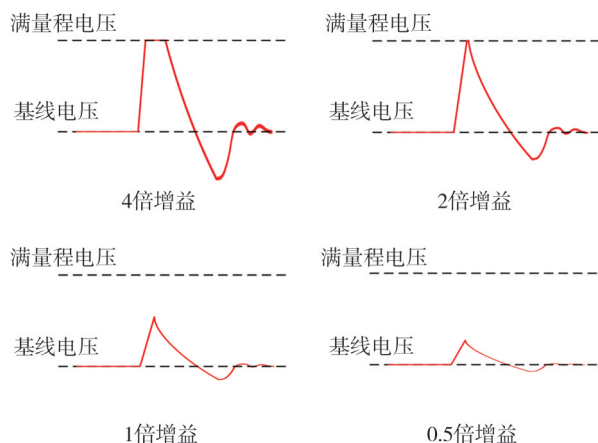


图4 4种不同增益下的信号输出波形

Fig. 4 Signal output waveforms under four different gain settings

1.2.2 触发采集

模数转换单元选用 AD7384-4 芯片，该器件为四通道、14 bit 分辨率的高速模数转换器，可对多路信号进行同步采样，能够有效捕获冲击波信号陡峭上升沿等快速变化特征。结合动爆冲击波信号高频段可达 200 kHz 的特性，为确保完整捕获高频成分、避免信号混叠，系统采样率设计为 4 Msps。系统核心控制单元采用 Xilinx Spartan-6 系列的 FPGA，负责完成信号触发判定、多增益通道管理以及采样数据的实时采集与存储。

触发判据基于最高增益通道的实时幅值比较，当信号超过设定阈值时启动采集流程，并保留预触发数据以完整记录冲击波上升沿。触发后，各增益通道的采样数据被同步写入 SDRAM 对应的数据缓存区中，实现单次动爆事件下多量程信号的并行记录。

1.2.3 多增益存储与自适应读取

在数据存储时，FPGA 将 SDRAM 分成 4 个独

立的分区，对各增益通道的采样结果进行独立缓存管理，避免不同量程信号之间的相互干扰。

数据读取阶段，FPGA 根据各通道峰值与 ADC 满量程值进行比较，判断各通道是否发生截幅，并按照由高增益向低增益逐级筛选的原则，选取未发生截幅的通道作为最终有效测量结果，从而实现测量结果最优量程匹配。该方法兼顾了高灵敏度与大动态范围需求，实现了冲击波超压测量量程的自适应匹配。图 5 为自适应采集整体流程图。

1.3 结构-电路协同自适应机制

在动爆试验中，爆心位置的随机性会同时引起冲击波入射方向与超压幅值的显著变化。球形压电敏感单元通过其几何对称结构和径向极化方式，从结构层面降低了方向变化对测量结果的影响，为后续电路提供了稳定一致的信号输出。

在此基础上，多增益自适应采集电路能够对冲击波信号进行量程判断与通道选择，实现对不同爆距、不同爆炸强度条件下超压信号的可靠测量。二者的协同作用使所提出方案在复杂动爆条件下同时具备方向自适应与量程自适应能力。

2 球形传感器性能标定

在激波管动态标定平台上对传感器进行性能校准。通过测量激波传播速度及入射压力，可计算出传感器的灵敏度与响应特性等性能参数。图 6 为激波管标定系统简易视图。

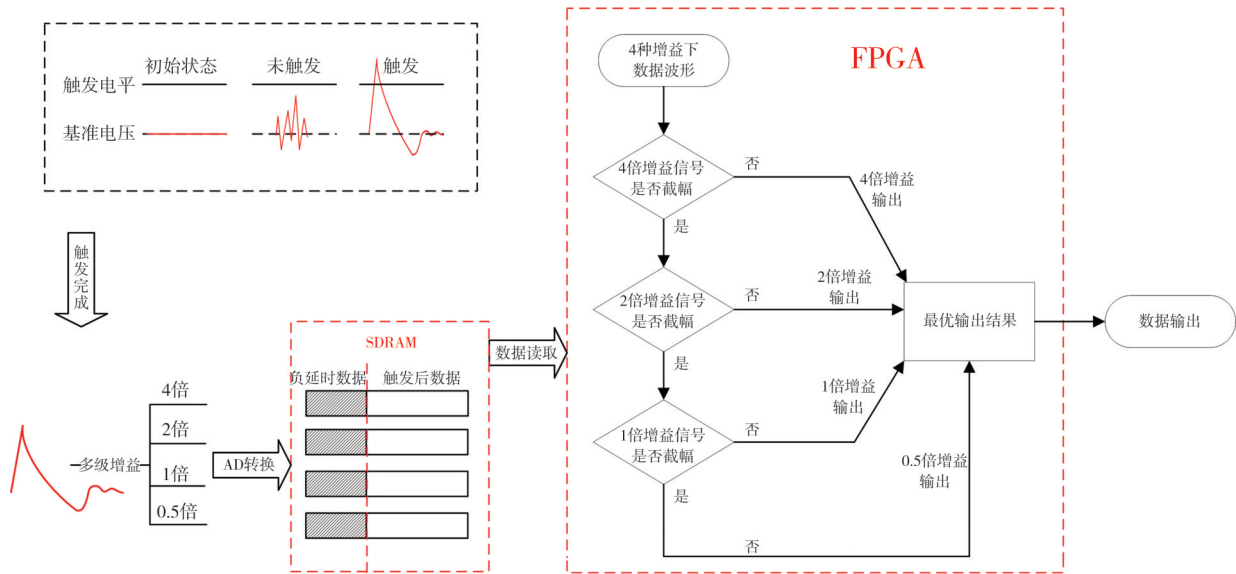


图 5 自适应采集整体流程图

Fig. 5 Overall flowchart of the adaptive acquisition scheme

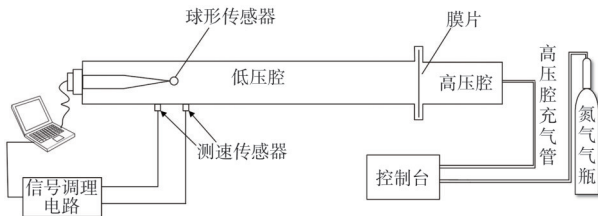


图 6 激波管标定平台结构图

Fig. 6 Schematic diagram of the shock tube calibration platform

采用该标定系统分别对传感器的灵敏度及其重复性进行标定实验,在标定过程中,低压段空气温度为室温 20°C ,此时声速 $c_0=343\text{m/s}$,大气压强 $p_1=92\,700\text{Pa}$,空气比热比 $\gamma=1.4$,两个测速传感器距离为 20cm 。根据两测速传感器测得的冲击波传播时间差,计算冲击波掠过球形传感器时的激波速度,进而利用 Rankine-Hugoniot 关系式计算各次实验中的实际冲击波超压峰值^[14-15]。图 7 为上述条件下超压峰值在 100kPa 以内时,激波管内冲击波速度与超压关系的曲线。

取激波管内球形传感器输出信号中第一个超压峰值平台的平均值作为激波管内测量得到的超压峰值。图 8 为激波管内多次测试的实验测量数据波形。

由于激波信号在上升沿之后存在一定振荡,

压力曲线平台段不够稳定,若采用平台区间平均值作为特征值,则平均区间长度与选取位置会对结果产生较大影响。为提高标定结果的一致性与可重复性,本文采用压力首个超压峰值电压作为特征参数,并与对应输出电压峰值进行对应分析。表 1 为传感器经电荷放大器输出的电压幅值与激波管内实测超压峰值的对应关系。实验结果表明,在 4 组不同激波压力条件下,传感器输出电压与压力呈良好线性关系,电压灵敏度均值为 $83.2\,\mu\text{V/Pa}$,上升时间约为 $10\,\mu\text{s}$ 。

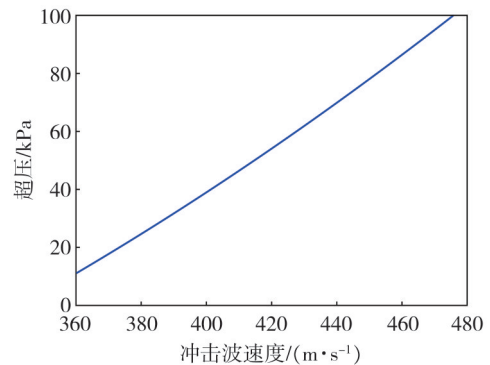


图 7 标定环境下的激波速度与超压关系曲线

Fig. 7 The relationship curve between shock wave velocity and overpressure in the calibration environment

表 1 多次测量下的数据对比

Tab. 1 Data comparison after multiple measurements

测试编号	电压幅值 V_p/V	激波速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	上升时间 $t_r/\mu\text{s}$	实际压力 p/kPa	电压灵敏度 $S_v/(\mu\text{V}\cdot\text{Pa}^{-1})$
a	1.03	362.2	10	12.5	82.4
b	1.99	377.3	8	22.7	87.6
c	2.37	388.2	9	30.4	77.9
d	3.24	398.8	9	38.1	85.0

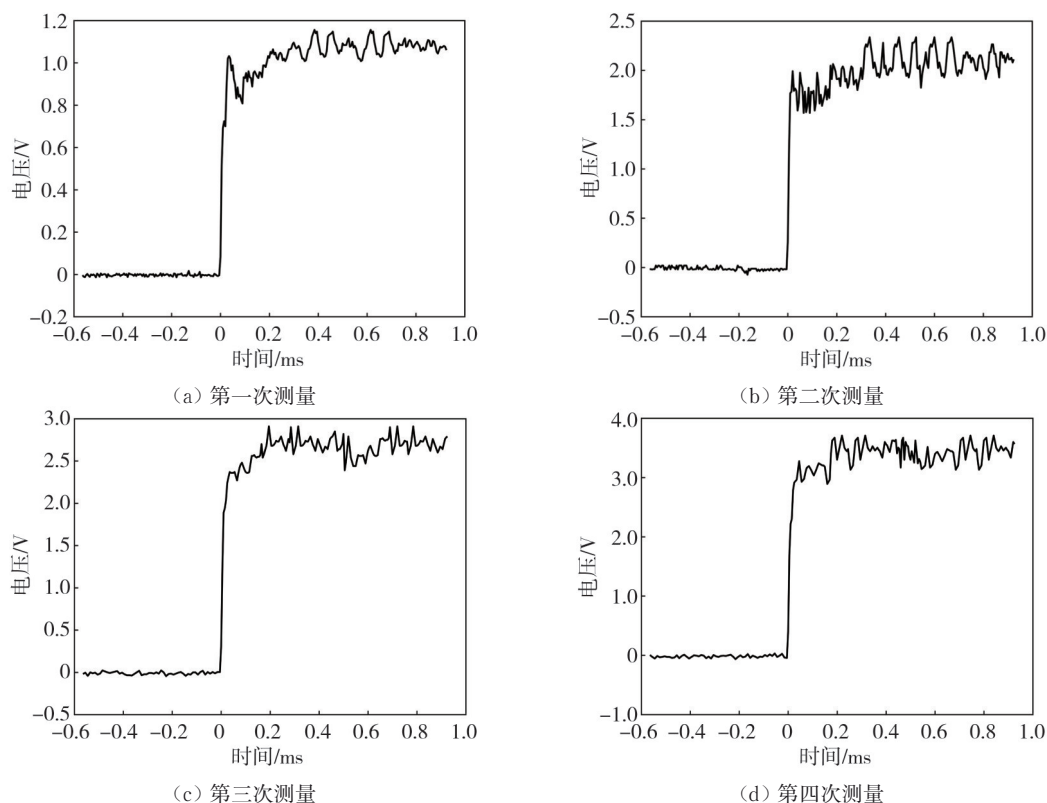


图8 标定实验超压波形曲线

Fig. 8 Overpressure waveform of the calibration experiment

3 自适应功能验证

3.1 方向自适应验证

为验证球形压电传感器在不同方向上的响应一致性,开展多方向自由场爆炸实验。以传感器安装位置为球心,在半径为20 cm的球面上设置多个炸点,通过改变爆心相对于传感器的相对位置,模拟不同方向冲击波的入射情况。现场实验布局示意图如图9所示。

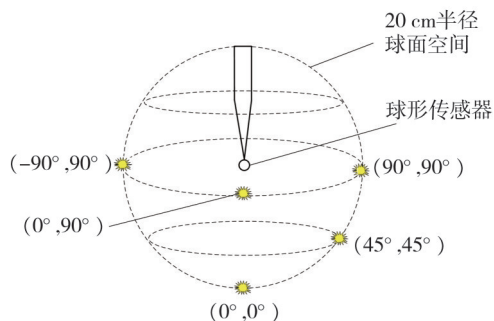


图9 多向性实验不同炸点示意图

Fig. 9 Schematic diagram of different detonation points in the multidirectional experiment

实验中采用相同规格与装药方式的小鞭炮作为炸药,其等效TNT当量约为0.1 g,确保各测点爆炸

条件一致。以方位角与俯仰角均为0°的爆心位置作为基准工况,对其他方向测得的信号进行对比分析。不同方位条件下的测量结果列于表2。

表2 不同方位测点爆炸测量数据

Tab. 2 Explosion measurement data from measurement points in different directions

爆心位置 (方位, 俯仰)	信号峰值 V_p/mV	超压峰值 $\Delta p/\text{kPa}$	相对偏差/%
(0°, 0°)	363	4.06	基准
(45°, 45°)	354	3.96	-2.42
(90°, 90°)	353	3.95	-2.66
(0°, 90°)	372	4.16	2.42
(-90°, 90°)	370	4.14	1.69

由表2可知,不同方向条件下测得的冲击波超压峰值整体分布较为集中,各方向超压峰值平均为4.12 kPa,最大相对偏差控制在±3%以内。测试结果表明,球形压电传感器在冲击波入射方向发生显著变化时仍能保持较为一致的响应特性,验证了其良好的方向自适应能力。

3.2 量程自适应选择功能验证

为验证量程自适应技术在实际爆炸环境下的适用性和可靠性,开展自由场冲击波测试实验。由于真实炸药动爆实验存在安全风险高、试验条

件负载、重复性差等问题,本次试验在可控条件下采用小规模当量炸药进行爆炸试验,该方法能够在保证安全与可控性的前提下,产生典型的短上升沿、高峰值、快速衰减的冲击波形,可用于验证传感器及采集系统的量程自适应特性。

实验场地选择室外开阔场地,以尽量减小反射波和环境干扰对测试结果的影响。为确保测试安全与数据稳定性,所有电缆及采集设备均布置在安全防护距离外。

实验中采用直径为 0.2 mm、长度为 10 cm 的铜制电爆炸丝作为爆源,其等效 TNT 当量约为 1 g^[16]。以电爆炸丝几何中心为初始参考点,在该条件下,分别在距爆心 20, 30, 40 和 50 cm 距离处布置传感器进行自由场冲击波测试。通过改变测试距离,实现对不同冲击强度条件的模拟,从而检验量程自适应采集方法在宽幅值变化范围内的性能。实测冲击波曲线如图 10 所示,超压测试结果与自适应量程选取结果见表 3。

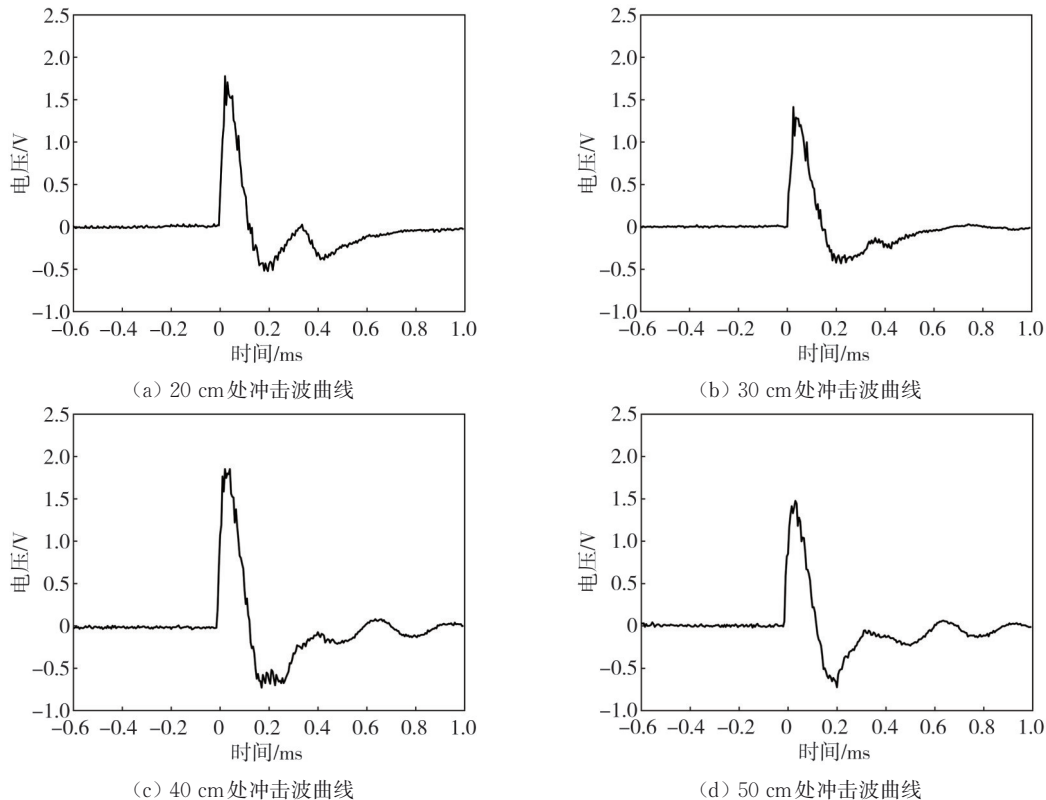


图 10 不同距离下的实测冲击波曲线

Fig. 10 Measured shock wave curves at different distances

表 3 不同测试距离下冲击波超压与自适应增益选取结果

Tab. 3 Results of overpressure measurement and adaptive gain selection at different distances

测试距离 R/cm	峰值电压 V_p/V	增益档 位	等效输入电压 V_m/mV	超压峰值 $\Delta p/\text{kPa}$	是否 截幅
20	1.72	1	1 720	19.24	否
30	1.46	1	1 460	16.33	否
40	1.90	2	950	10.63	否
50	1.51	4	377.5	4.22	否

由表 3 可知,随着爆心距离增大,冲击波超压峰值呈明显的递减趋势,整体变化符合自由场爆炸冲击波随距离衰减的规律。在近距离条件下(20 cm 和 30 cm),冲击波幅值较大,自动选取较低增益进行采集,避免了信号截幅;在较远距离下(40 cm 和 50 cm),冲击波幅值较小,自适应机

制自动选取高增益通道作为有效测量通道,保证了信号幅值的分辨率。

进一步比较经自适应量程选取后的波形可以发现,各距离下冲击波信号均具有典型的陡峭上升沿和快速衰减特征,波形未出现明显失真或噪声放大的现象。该结果证明了多增益自适应采集方案能够在单次爆炸条件下兼顾大幅值与弱信号测量需求。

4 结 论

本文围绕动爆条件下冲击波超压测试中普遍存在的方向敏感性强、量程适应能力不足等问题,提出并验证了一种结构-电路协同自适应的冲击波测试方法。

研究表明,球形压电敏感单元通过几何对称结构与径向极化方式,可在较大入射角变化范围内保持压力响应一致性。在此基础上,多增益自适应采集电路通过并行采样与幅值判别,实现了对不同爆距和强度条件下超压信号的动态匹配。

实验结果证明,该协同自适应机制能够显著提升自由场冲击波超压测试的动态范围。相比于动态增益切换,该方法可以避免因冲击波瞬态过程中产生的信号失真问题,更适用于高动态、短时冲击信号测量。本文方法为复杂爆炸环境下的超压测量提供了一种可行的技术思路,同时可为动爆条件下爆心定位与超压场空间分布重构研究提供了参考。

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] 童晓. 爆炸场冲击波压力测量及数据处理方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [2] 徐其鹏, 李芝绒, 陈君, 等. 地形对地面爆炸空中冲击波传播规律的影响[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 96-101.
Xu Qipeng, Li Zhirong, Chen Jun, et al. Influence of terrain on propagation characteristics of air shock waves from ground explosions[J]. Journal of Ballistics, 2020, 41(S2): 96-101. (in Chinese)
- [3] Zhang Y, Cao W G, Shu C M, et al. Dynamic hazard evaluation of explosion severity for premixed hydrogen-air mixtures in a spherical pressure vessel[J]. FUEL, 2020, 261: 116433.
- [4] 康耕新, 张亚栋, 马浩伟, 等. 笔式传感器安装方向对爆炸冲击波测试影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(10): 210-217.
Kang Gengxin, Zhang Yadong, Ma Haowei, et al. Investigation on the effects of installation direction of pen-type sensor in blast wave measuring[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(10): 210-217. (in Chinese)
- [5] 田壮, 杜红棉, 祖静, 等. 战斗部动爆冲击波存储测试方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(3): 66-69.
Tian Zhuang, Du Hongmian, Zu Jing, et al. Test method of dynamic explosion shock wave[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(3): 66-69. (in Chinese)
- [6] 姚成宝, 王宏亮, 浦锡锋, 等. 空中强爆炸冲击波地面反射规律数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 21-28.
Yao Chengbao, Wang Hongliang, Pu Xifeng, et al. Numerical simulation of intense blast wave reflected on rigid ground[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(11): 21-28. (in Chinese)
- [7] 徐泽辉, 秦建, 王玉, 等. 具有高精度时空定位的动爆冲击波测试系统[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 148-156.
Xu Zehui, Qin Jian, Wang Yu, et al. Highly accurate spatio-temporal localization shockwave test system for dynamic explosive environments[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(2): 148-156. (in Chinese)
- [8] 姬建荣, 苏健军, 陈君, 等. 动爆冲击波传播特性实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(12): 20-24.
Ji Jianrong, Su Jianjun, Chen Jun, et al. Experimental study on propagation characteristics of dynamic blast wave[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 20-24. (in Chinese)
- [9] 王良全, 商飞, 孔德仁. 静动爆冲击波数值仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 208-213.
Wang Liangquan, Shang Fei, Kong Deren. Numerical simulation analysis of static and dynamic shock waves[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 208-213. (in Chinese)
- [10] 蒋海燕, 李芝绒, 张玉磊, 等. 运动装药空中爆炸冲击波特性的研究[J]. 高压物理学报, 2017, 31(3): 286-294.
Jiang Haiyan, Li Zhirong, Zhang Yulei, et al. Characteristics of air blast wave field for explosive charge moving at different velocities[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2017, 31(3): 286-294. (in Chinese)
- [11] 徐春冬, 王良全. 爆炸场中三波点对冲击波压力测试的影响研究[J]. 测试技术学报, 2021, 35(5): 369-374.
Xu Chundong, Wang Liangquan. Research on the influence of triple point in explosion field on shock wave pressure test[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2021, 35(5): 369-374. (in Chinese)
- [12] 王毛凯. 动爆冲击波超压智能存储测试系统设计[D]. 太原: 中北大学, 2022.

(下转第481页)