

用于爆炸冲击波测试的球形自由场传感器研究

张泽腾^{1,2} 王 玉³ 王文廉^{1,2}

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051;
3. 中北大学信息与通信工程学院 太原 030051)

摘 要: 冲击波自由场压力测试是武器弹药爆炸试验中的一种重要测试方法,目前常用的笔式传感器需要对准爆心,而动爆或复杂爆炸中难以实现准确对准,会造成较大的测试误差。针对上述问题,设计了一种用于空气爆炸场测试的球形传感器结构,该设计有效地实现了对多个方向冲击波的测量,克服了传统传感器对爆心位置敏感的缺陷,传感器采用压电陶瓷作为敏感元件,连接传感器端采用一锥形结构,以提升其在复杂爆炸环境中的性能和稳定性。在激波管平台上进行了性能标定,并完成了实际爆炸验证试验。测试结果表明,传感器上升时间为 1.23 ms,灵敏度为 100.34 pC/kPa,传感器测试了 6 个方向的自由场压力,分布偏差在 $\pm 7.1\%$ 以内。

关键词: 冲击波测试;自由场球形;多个方向;性能标定

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on spherical free field sensor for blast wave measurement

Zhang Zeteng^{1,2} Wang Yu³ Wang Wenlian^{1,2}

(1. School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The shock wave free field pressure test is an important test method in the explosion test of weapons and ammunition. Currently, the commonly used pen sensor needs to be aligned with the detonation core, but it is difficult to achieve accurate alignment in dynamic explosion or complex explosion, which will cause large test errors. To solve the above problems, a spherical sensor structure for air explosion field testing is designed. The design effectively realizes the measurement of shock wave in multiple directions and overcomes the defect of the traditional sensor which is sensitive to the location of the detonation core. The sensor adopts piezoelectric ceramic as the sensitive element and adopts conical structure at one end of the connected sensor to improve its performance and stability in the complex explosion environment, and its performance is calibrated on the shock tube platform to complete the explosion verification test. The test results show that the sensor's rise time is 1.23 ms, the sensitivity is 100.34 pC/kPa, The sensor tested free field pressures in six directions, and the distribution deviation is within $\pm 7.1\%$.

Keywords: shock wave test; free field sphericity; multiple directions; performance calibration

0 引 言

在武器弹药毁伤效能评估的领域中,爆炸冲击波的压力大小被视作一个至关重要的评估指标。为了深入探究冲击波的特性,多种试验方法得以广泛实施^[1]。弹药引爆后,其释放的高温高压产物会引发周边介质温度和压力的

显著阶跃增长,进而形成具有毁伤能力的冲击波^[2]。因此,冲击波的精确测量构成了评估弹药毁伤效应的重要基石。

现阶段,冲击波测试技术主要划分为地面超压测试与自由场超压测试两大类。地面超压测试在实施过程中易受环境因素的显著干扰,这种干扰潜在地引入了测试结

果与实际弹药威力评估之间的较大误差。相较之下,自由场超压测试通过有效降低地面反射的干扰,显著提升了测试数据的准确性。鉴于此,自由场超压测试在冲击波测量领域中被公认为一种更具可靠性的方法^[3-5]。

在自由场冲击波压力测量中,传统传感器设计通常采用流线型,以减少对冲击波波阵面流场的扰动,降低反射和绕射的影响,使冲击波以接近“掠入射”角度作用于传感器^[6]。然而,当传感器敏感面与冲击波波阵面法线的夹角不符时,容易出现绕射现象,导致测量误差,尤其在爆心位置不明确的情况下更为明显^[7-10]。

为解决这一问题,本文提出了一种球形传感器结构,该设计能够测量来自多个方向的冲击波,克服了传统传感器对爆心位置敏感的缺陷^[11]。球形传感器采用非平面检测方式,确保各方向上传感特性一致。该传感器采用压电陶瓷作为敏感元件,具备结构简单、频带宽、性能稳定及良好的多方向性,特别适合在爆心难以准确对准的空气爆炸场中使用,能显著提高测量准确性和可靠性^[12-13]。

1 传感器工作原理及结构设计

1.1 工作原理

本文使用的球形传感器采用了径向极化的压电球壳,其结构如图1所示。该传感器的工作原理基于压电陶瓷的正压电效应,当传感器受到外部冲击波或压力作用时,压电材料内部的电偶矩会因受到应力而发生长度变化。这种应力导致材料表面产生等量的正负电荷,用以抵消电偶矩的变化,从而维持材料的电气平衡。这一正压电效应是球形传感器实现其测试功能的基础。

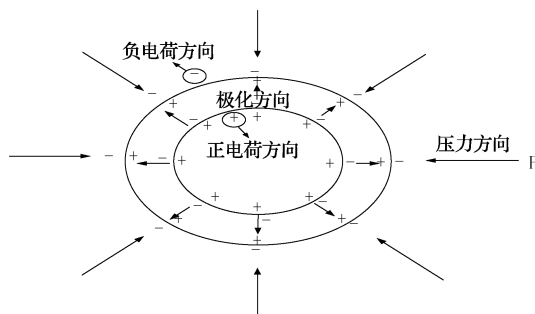


图1 球形压电陶瓷

Fig. 1 Spherical piezoelectric ceramics

1.2 传感器设计思路

在实际工作中,球形传感器会受到两种主要压力源的影响:1)冲击波压力引起的电荷变化;2)由于结构震动所产生的电荷。为了减少自然震动对传感器读数的干扰,本文采用了一种高效的缓震材料。这种缓震材料能够显著降低震动和冲击波对传感器电荷产生的影响,从而有效提高实验测量的精度和准确性。通过这种改进,球形传感器在面对复杂的测试环境时,能够提供更加稳定和可靠的测

量结果。

本文设计的球形传感器由两个半球压电陶瓷壳组合而成,传感器采用单端开孔的方式引出信号线与地线当作连接其他设备的桥梁。由于在爆炸场下传感器的测量过程中会伴随着强光、高温高热的冲击,因此有必要对传感器本身添加耐高温防冲击材料。环氧树脂具有出色的粘附性、耐高温性和耐湿性,对球形压电传感使用环氧树脂进行灌封,实现传感器各部件之间的黏接,同时形成保护层以此来达到延长传感器使用寿命的目的。

实际爆炸中,由于爆炸压力场的特殊性,传感器在测量过程中会伴随着机械振动、电磁干扰和地震波的影响等诸多因素,这些影响往往会造成系统所测数据不够准确。大量研究也表明,爆炸作用于地面产生的地震波引起的安装夹具震动和冲击波直接作用于传感器安装结构引发的机械冲击产生的测量误差最为严重。因此,需要将传感器固定且尽可能减少震动对测试结果的影响,由此设计了一种结构用于固定传感器。

1.3 整体结构

图2所示为结构的轮廓图,由于敏感面为球形的特殊性,在实际测量中,与其接触的结构会产生扰流也会对实验结果造成影响,为了尽量减少扰流对测试结果影响,结构在连接传感器的一端使用一锥形结构,其尖端部分恰好可以将传感器的缓震阻尼器插入并穿过信号线与地线,这样既可以降低爆炸时结构振动对于传感器的数据测量影响又可以减少冲击波绕流的干扰,另一端则用一柱形结构方便与夹具固定,柱形尾部设计了一个小凹槽用以密封结构。鉴于铝具有轻质、耐腐蚀性、易于加工等优点,并且尽管铝很轻,但它的强度与重量的比率非常高,使得它在结构应用中表现良好,通过合金化和处理,铝的强度可以大大提高,适用于许多结构性应用。因此,结构整体采用铝材料。

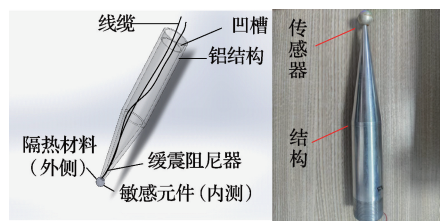


图2 传感器结构

Fig. 2 Sensor structure

2 激波管标定实验

本文针对球形传感器的灵敏度等特性进行了激波管标定实验,图3所示为压力传感器动态校准系统的原理框图,主要由如下3部分构成:压力产生部分,数据采集部分以及数据处理部分。其中压力产生部分包括气压源、压力

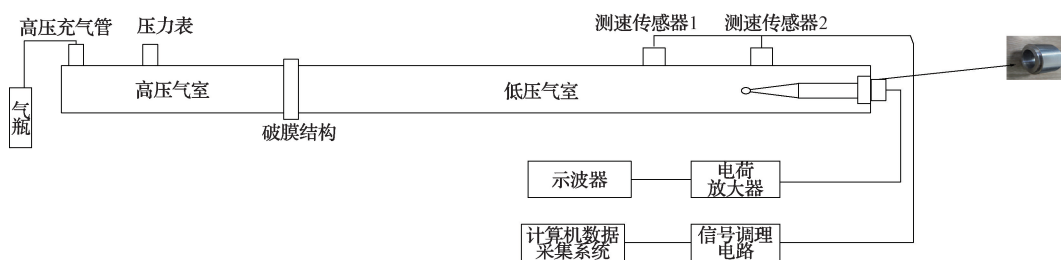


图3 激波管标定装置系统原理

Fig. 3 System schematic diagram of shock tube calibration device

控制以及高低压气室,数据采集部分包括球形传感器、测速模块,数据处理部分包括电荷放大器、信号调理电路、示波器、上位机等组成^[14]。

其中,两个用于检测激波传播速度的传感器安装在激波管的侧壁,另外对于球形传感器的安装,将传感器的一体式结构通过一适配的固定环安装在激波管低压区的顶端堵头上,使其能够将传感器稳定在激波管内不会产生震动,同时对其进行密封处理以防止漏气。

通过实际测试数据和曲线对系统的动态特性进行标定。本文在测试量程范围内进行了6次不同平台压力值的测试,旨在通过标定不同测试压力下的系统表现,以观察其动态特性,图4所示为传感器的电压幅值 $e(t)$ 与时间

t 的曲线数据。此外,还计算了传感器的响应时间和灵敏度,以评估其性能。

激波管实验所获得的各项数据如表1所示,在所有6次测试中,实验环境条件保持一致,即大气压力为0.092 MPa,环境温度为26.8℃,音速为347.3 m/s。测试中使用的两个传感器间距为0.2 m,电荷放大器的增益设定为0.3 mV/pC,低压室的压力设为0.092 MPa。

表1 激波参数

Table 1 Shock wave parameters

试验编号	时间差 $\Delta t/\text{ms}$	激波速度 v_s $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	马赫数/Ma
a	0.534	374.531 835 2	1.078 305 05
b	0.536	373.134 328 4	1.074 281 524
c	0.545	366.972 477 1	1.056 541 095
d	0.542	369.003 690 4	1.062 389 109
e	0.539	371.057 513 9	1.068 302 22
f	0.529	378.071 833 6	1.087 229 063

根据传感器的安装位置,在激波管低压区端口的压力传感器所受到的压力是反射式的,其压力大小为:

$$\Delta P = \frac{7}{3} (Ma^2 - 1) \frac{2 + 4Ma^2}{5 + Ma^2} p_0 \quad (1)$$

式中: Ma 为马赫数, $Ma = v_s / c$, v_s 等于两测速传感器的距离与时间差的比值, $c = 20.1 \sqrt{T}$ 为低压室气体的音速, T 为气体的温度; p_0 代表破膜前低压室的压力大小。通过上述公式,能够计算出6次试验中的激波压力,结果如表2所示,根据标定传感器的电压幅值 $e(t)$ 与时间 t 的曲线数据,通过电压灵敏度公式 $S_0 = e(t) / \Delta P$ 可得6次实验中的电压灵敏度,6次试验的电压灵敏度平均值为30.10 mV/kPa。考虑到电荷放大器增益为0.3 mV/pC,计算得到标定传感器的电荷灵敏度 $S = S_0 / 0.3$,从而得出电荷灵敏度大小是100.34 pC/kPa,同时可得传感器响应上升时间平均值为1.23 ms。

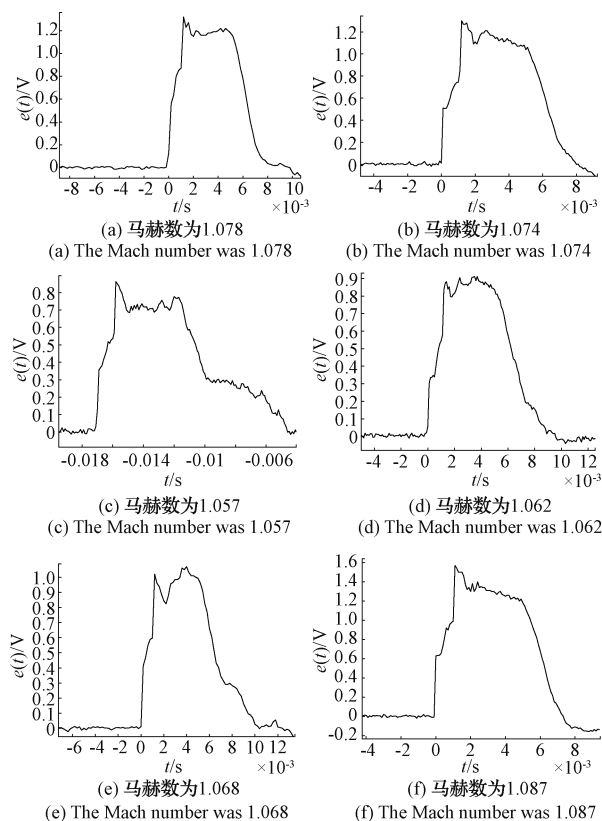


图4 传感器响应曲线

Fig. 4 Sensor response curve

表 2 试验结果各参数分析对比

Table 2 The test results were analyzed and compared

试验编号	激波压力 ΔP /MPa	电压幅值 $e(t)$ /mV	响应时间 t /s	电压灵敏度 S_0 /(mV·kPa ⁻¹)	电荷灵敏度 S /(pC·kPa ⁻¹)
a	0.037 702 878	1.20	1.2	31.83	106.10
b	0.035 560 400	1.15	1.2	32.34	107.80
c	0.026 384 889	0.72	1.3	27.29	90.97
d	0.029 361 009	0.86	1.4	29.29	97.63
e	0.032 418 670	0.95	1.2	29.30	97.67
f	0.042 536 869	1.30	1.1	30.56	101.87

3 建立传感器工作方式

3.1 传感器连接方式

在实际的爆炸测试过程中,为了将电荷量信号准确地转换成电压信号,本文通过 M5 接头将传感器与电荷放大器连接,如图 5 所示。球形压电传感器在爆炸压力作用下,会在电介质表面产生电荷,从而实现了对非电量的精确测量。接着,电荷放大器将传感器的高内阻电荷源转换为低内阻的电压源。最后,通过 BNC 转接头将转换后的电压信号连接至示波器,以验证信号波形的准确性和稳定性。

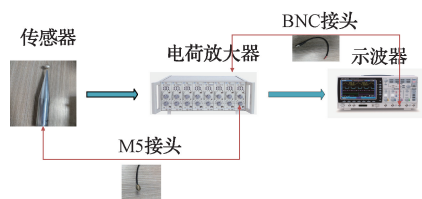


图 5 传感器连接方式

Fig. 5 Sensor connection mode

这种设计不仅能够有效地确保测试数据的可靠性,还能够提高数据的精确性,确保实验结果的科学性。

3.2 传感器的安装

在自由场测试中,随着测点距离爆心的增加,三波点的高度逐渐上升。因此,在现场爆炸测试实验中,对传感器的安装位置提出了具体要求。为减少马赫波的影响,在自由场测试中需要将传感器安装在三波点以上^[15]。如图 6 所示,为满足这一要求,实验搭建了一个支架,考虑本次炸药威力很小,为了减少地面反射波的影响,使传感器固定在距离地面 1 m 的半悬挂状态,爆炸试验中选择了空爆的方式进行实验^[16]。

4 自由场下的爆炸模拟实验

本文实验旨在验证球形传感器的多向性,采用模拟自由场的爆炸实验。如图 7 所示,以传感器为球心,半径为 20 cm 的球面空间内随机选取 6 个炸点,各自引爆相同当

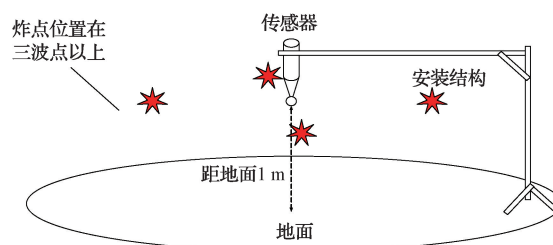


图 6 传感器在自由场中安装

Fig. 6 Sensor installation in a free field

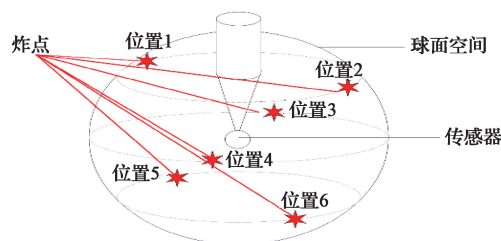


图 7 炸点分布

Fig. 7 Distribution of burst points

量的小型炸药。通过传感器采集信号,并利用连接好的电荷放大器记录冲击波信号。最终,在示波器上对测试结果进行对比验证,以确定传感器是否能够有效测量来自不同方向的冲击波信号。

针对本文设计的球形传感器的爆炸模拟实验,整体实验布置如图 8 所示。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传



图 8 实验现场

Fig. 8 Experimental site diagram

传感器本体。传感器接线方式如下:红黑绕线中的黑线连接到信号端,红线不进行连接。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。电荷放大器的设置参数为电源采用交流电,放大器灵敏度设定为 0.3 mV/pC ,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,确保测试结果的可靠性。试验结束后,对各个炸点所采集的数据进行读出,6个方向得到的冲击波变化曲线如图9(a)~(f)所示。从数据分析中可以观察到,各个炸点所得到的超压曲线基本相近。

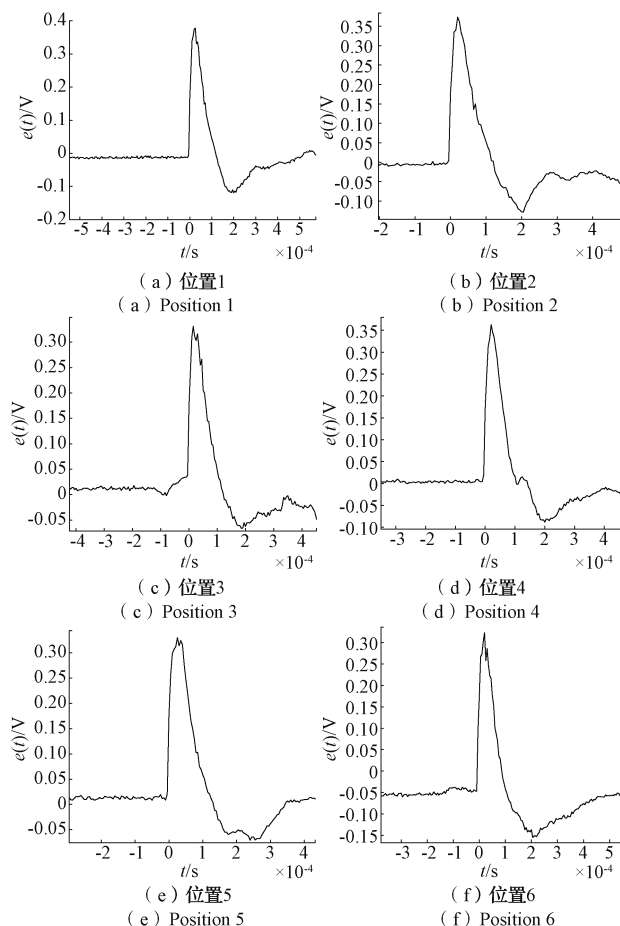


图9 压力曲线
Fig. 9 Pressure curve

由于传感器测试系统测得的是电压时程,将该电压时程除以传感器测试系统的电荷灵敏度即可得到对应炸点的超压时程。通过计算各个炸点的超压时程,结果汇总如表3所示。分析表明,各个位置采集到的信号非常接近,超压峰值大致相同,所有方向的超压峰值平均值为 0.00845 MPa ,且分布偏差在 $\pm 7.1\%$ 以内,这一结果验证了该球形传感器的多向性特点。经过反复实验验证,表明该球形传感器能够有效地测量多个方向的自由场压力。

表3 各位置超压峰值对比

Table 3 Comparison of peak overpressure at each position

位置	信号值 $e(t)/\text{V}$	超压峰值 $\Delta P/\text{MPa}$
位置 1	0.378	0.009 05
位置 2	0.373	0.008 93
位置 3	0.331	0.007 92
位置 4	0.363	0.008 69
位置 5	0.330	0.007 90
位置 6	0.343	0.008 21

5 结 论

本文采用压电陶瓷材料,成功设计并制造了一种用于爆炸测试的球形结构传感器。该传感器整体采用单端开孔设计,通过环氧树脂将压电陶瓷壳体与电极引线固定。通过激波管标定实验,测得该传感器的电荷灵敏度为 139.267 pC/kPa 。进一步对设计的传感器进行了空间内不同方向的爆炸测试,结果表明所制备的球形压电传感器具有良好的频率响应和较高的灵敏度,且能够实现球形多向信号接收的功能。

参 考 文 献

- [1] 周诗超,李凯,温鹏,等. 无线多通道冲击波采集存储技术[J]. 电子测量技术, 2022, 45(24): 85-90.
ZHOU SH CH, LI K, WEN P, et al. Wireless multi-channel shock wave acquisition and storage technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(24): 85-90.
- [2] 张家洪,王欣,陈福深. 用于爆炸辐射电磁脉冲时域测量的集成光波导电场传感器研制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 149-156.
ZHANG J H, WANG X, CHEN F SH. Development of integrated optical waveguide electric field sensor for time domain measurement of explosive radiation electromagnetic pulse [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 149-156.
- [3] GHEMARI Z, BELKHIRI S, SAAD S. A piezoelectric sensor with high accuracy and reduced measurement error [J]. Journal of Computational Electronics, 2024, 23(2): 448-455.
- [4] XUE Z, LI S, XIN C, et al. Modeling of the whole process of shock wave overpressure of free-field air explosion [J]. Defence Technology, 2019, 15(5): 815-820.
- [5] XU Q, LI Z, WANG X, et al. Experimental performance assessment of thermobaric explosives in free field and internal blast tests [J]. Combustion Explosion and Shock Waves, 2022, 58(1): 93-105.
- [6] SHI Y, KONG D, ZHANG C. Research of a sensor

- used to calculate the dynamic pressure of chemical explosions[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 21(24): 27325-27334.
- [7] 刘东来, 王伟魁, 李文博, 等. 冲击波超压传感器研究现状[J]. 遥测遥控, 2019, 40(5): 7-15.
LIU D L, WANG W K, LI W B, et al. Research status of shock wave overpressure sensor [J]. Telemetry and Remote Control, 2019, 40(5): 7-15.
- [8] WANG L, KONG D. Influence of sensor installation tilt angle on explosion shock wave pressure test[J]. Measurement and Control, 2024, 57(3): 227-239.
- [9] GAO S, LIN Y, ZHU J. The effect of mounting structure and piezoelectric pressure probe sensor incident angle on the free-field measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7226-7233.
- [10] 李麦亮, 黄铎佳, 蔡玉红, 等. 自由场点爆强冲击波超压分布数值模拟分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2024, 42(2): 1-6.
LI M L, HUANG D J, CAI Y H, et al. Numerical simulation analysis of overpressure distribution of strong shock wave from free field point explosion [J]. Electronic Products Reliability and Environmental Testing, 2024, 42(2): 1-6.
- [11] 施宇成, 孔德仁, 徐春冬, 等. 爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析[J]. 测控技术, 2022, 41(11): 1-10, 34.
SHI Y CH, KONG D R, XU CH D, et al. Analysis of current situation of shock wave pressure measurement and sensor technology in explosion field[J]. Measurement and Control Technology, 2022, 41(11): 1-10, 34.
- [12] 王桂从, 赵鹏, 李映君, 等. 压电薄膜三维重载力传感器设计与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 11-19.
WANG G C, ZHAO P, LI Y J, et al. Design and experiment of piezoelectric thin film three-dimensional heavy load sensor [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 11-19.
- [13] LOBASTOV S A, GERASIMOV S I. Spherical piezoceramic sensors for measuring shock-wave parameter [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2017, 60(1): 107-111.
- [14] 潘绪仲, 彭澎, 狄长安, 等. 贴合材料硬度对 PVDF 薄膜传感器冲击波测量的影响研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(5): 78-83.
PAN X ZH, PENG P, DI CH AN, et al. Influence of hardness of adhesive material on shock wave measurement of pvdf thin film sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(5): 78-83.
- [15] 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 CH D, WANG L Q. Influence of three wave points on shock wave pressure measurement in explosion field [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2021, 35(5): 369-374.
- [16] 唐亦康, 孔德仁. TNT 炸药爆炸场中三波点轨迹的数值模拟研究[J]. 测试技术学报, 2021, 35(4): 352-357.
TANG Y K, KONG D R. Numerical simulation of three-wave trajectory in TNT explosion field [J]. Journal of Test Technology, 2021, 35(4): 352-357.

作者简介

张泽腾, 硕士研究生, 主要研究方向为动态测试和智能仪器仪表设计。

E-mail: 142443899@qq.com

王玉, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为医学图像配准和融合、多维信号处理、三维可视化、荧光分子成像、工业无损检测等。

E-mail: wangyu0821@nuc.edu.cn

王文廉(通信作者), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为半导体功率器件、智能仪表和动态测试等。

E-mail: wangwenlian@nuc.edu.cn