

高频动态压电式压力传感器结构设计与实验研究

王桂从, 孟令源, 李映君, 刘源, 蔡思康

(济南大学机械工程学院, 250022, 济南)

摘要: 针对激波压力信号快速测量需求的提升,提出了一种基于压电效应的高频动态激波压力传感器结构形式及测量原理。通过分析激波信号的时频特性,确定高频动态压电式压力传感器的性能需求;采用高频动态压电式压力传感器的测量原理,对提出的激波压力测量进行了分析;基于变形协调一致原则,建立了静力学和动力学模型,分析传感器结构参数对灵敏度和固有频率的影响规律;将优化后的传感器三维模型导入 ANSYS 中进行静力学、动力学和压电耦合分析,验证了传感器结构及其测量原理的可行性。通过准静态标定和动态标定实验,得到传感器的电压灵敏度、非线性度和固有频率等测量性能指标,实验结果表明:研制的高频动态压电式激波压力传感器样机具有高灵敏度 3.19 mV/kPa、高固有频率特性 95.625 Hz 和短上升时间 10.45 μ s 特性,能够满足实际测试需求。

关键词: 力学模型;压力传感器;激波;标定实验;压电陶瓷

中图分类号: TH82 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202406019 **文章编号:** 0253-987X(2024)06-0203-12

Structural Design and Experimental Study of High Frequency Dynamic Piezoelectric Pressure Sensor

WANG Guicong, MENG Lingyuan, LI Yingjun, LIU Yuan, CAI Sikang

(School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: The structure and measurement principles of a high-frequency dynamic piezoelectric shock wave pressure sensor based on piezoelectric effect are proposed in response to the increasing demand for fast measurement of shock wave pressure signals. The performance requirements of the high-frequency dynamic piezoelectric pressure sensor are determined by analyzing the time-frequency characteristics of shock wave signal. The measurement principle of the high-frequency dynamic piezoelectric pressure sensor is used to analyze the proposed shock wave pressure measurement. Based on the principle of deformation coordination and consistency, static and dynamic models are established to analyze the influence of sensor structural parameters on sensitivity and natural frequency. The optimized three-dimensional model of the sensor is imported into ANSYS for static, dynamic, and piezoelectric coupling analyses, and the feasibility of the sensor structure and its measurement principle is verified. Through quasi-static and

收稿日期: 2023-10-28。 作者简介: 王桂从(1981—),女,副教授;李映君(通信作者),男,教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875250);山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME109);济南市“新高校20条”资助项目(202228116)。

网络出版时间: 2023-12-22

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20231221.1449.004>

dynamic calibration experiments, the measurement performance indicators of the sensor, such as voltage sensitivity, nonlinearity, and natural frequency, are obtained. The experimental results show that the developed prototype of the high-frequency dynamic piezoelectric shock wave pressure sensor has high sensitivity: 3.19 mV/kPa, high natural frequency characteristic: 95.625 Hz, and short rise time: 10.45 μ s, which can meet the requirements in actual tests.

Keywords: mechanical model; pressure sensor; shock wave; calibration experiment; piezoelectric ceramics

压力传感器是一种广泛应用于高速列车、医疗、汽车和航空航天等领域的重要传感器^[1-3]。它能够实时测量和监测物体所受到的压力,提供用于控制、监控和优化各种系统的关键信息,具有高精度、高灵敏度和高可靠性的特点。随着科学技术的不断进步,越来越多领域的压力测量迫切需要高灵敏度、高固有频率且响应速度极快的高频动态压力传感器,如爆破冲击波的测量^[4-5]、航空航天发动机振动测量^[6]及空气动力学试验^[7]等。

根据空气动力学可知,若飞行体的速度超过声速,则会沿一定角度生成激波^[8-9]。激波信号是一种瞬时微压信号,在极短时间内精确监测压力信号的变化规律对压力传感器动态特性提出了严苛的要求。目前,应用于动态测量的传感器主要有压阻式压力传感器和压电式压力传感器。压阻式压力传感器具有较好的低频特性且线性度较高^[10-11],但传感器力敏材料受温度湿度等环境因素影响严重,同时其加工工艺具有局限性,压阻式压力传感器存在灵敏度浮动、零点漂移等问题,导致测试系统精度不足^[12-13]。高性能的压电式压力传感器适合测量高动态、动态和准静态的压力变化或者压力波动,具有固有频率、信噪比及灵敏度都较高等优点,在激波测试中得到广泛的应用^[14-15]。

近年来,学者们围绕高频动态压力传感器做了部分研究。冯斌等^[16]设计了激波传感器对应的信号处理电路,实弹测试得到了较好的激波压力波形。Wang等^[17]研究了钝状壳体和锥形壳体对压电式压力传感器测量瞬态停滞压力的影响,并评估了壳体尺寸对不同流动条件下滞止压力测量的具体影响。Kim团队^[18]使用了Ga₂N薄膜替代传统的锆钛酸铅(Pb[Zr_xTi_{1-x}]₂O₇, PZT)压电陶瓷,制备了高性能的压电式压力传感器,该传感器在350℃高温下灵敏度偏漂移较小。Krause等^[19]研究了传感器在冲击波测量过程中,热冲击量对压电式压力传感器输出精度的影响。Wang等^[20]研究了高频动态压电式压力传感器的加速度寄生效应,对加速度补偿机理

进行了研究。Kenda等^[21]提出了一种用于压电式压力传感器制造过程中的双束激光焊的系统状态识别方法,对比在线监测数据和传感器焊缝质量,优化传感器封装工艺。姚贞建等^[22]通过激波管系统进行的动态校准实验,评估了压力传感器动态特性参数的不确定度。顾廷炜等^[23]基于遗传算法的反向传播神经网络,建立了落锤液压准静态标定装置的施加载荷与所产生的压力峰值和压力脉宽之间的数学模型。Gu等^[24]研究了压电式压力传感器的准静态标定,建立了落锤系统的力学模型,推导了压力传递的经验公式。Diao等^[25]分析了激波管标定系统本身的振动对压力传感器重复性、稳定性和动态特性的影响。

综上所述可知,现有研究大多集中于压力传感器的应用和标定方法的研究,而涉及传感器设计机理研究较少,高性能传感器设计缺少参考依据。为突破高频、微压的压力信号动态检测的技术瓶颈,本文以激波压力信号测量为着力点,研制了一款高频动态压电式压力传感器,从传感器结构设计及优化、仿真分析和静态标定实验方面进行详细分析。

1 传感器的结构和测量原理

1.1 激波信号的产生机理

现有研究表明,飞行体在空气介质中运动会引起空气扰动,扰动信号会以当时环境声速向周围扩散。当飞行体的运动速度小于声速时,扰动信号的扩散速度会大于飞行体的运动速度。因此,扰动信号无法叠加,呈现出均匀分布状态。然而,当飞行体的运动速度大于声速时,扰动信号的扩散速度小飞行体的运动速度。此时,扰动信号叠加,形成激波信号^[26]。激波传递过程如图1(a)所示, θ 为马赫角,激波信号沿着马赫线法线向外扩散。图1(b)为利用ANSYS对激波信号产生过程的仿真模拟。因此,激波可以认定为是一种压力信号。

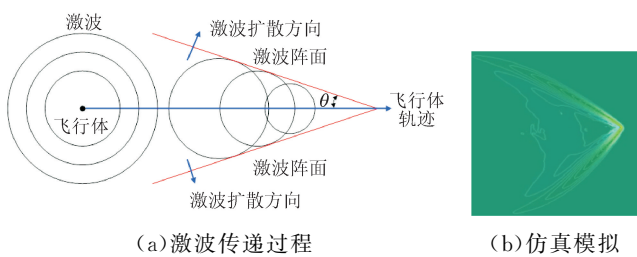
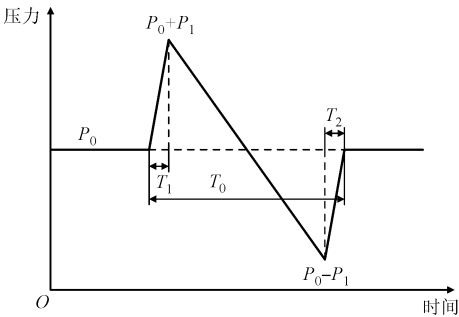


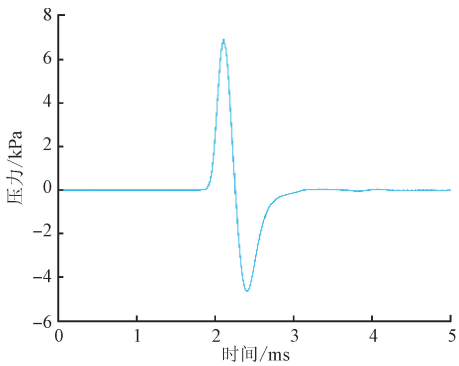
图 1 激波传递过程与模拟示意

Fig. 1 Schematic diagram of shock wave propagation process

理想激波信号呈现“N”的形状,如图 2(a)所示。图中: P_0 为大气压力; P_1 为激波信号的压力幅值; T_1 和 T_2 为激波信号的上升时间; T_0 为激波信号的持续时间。飞行体向前运动过程中,头部的凸角挤压周围的空气,使附近的压力突升,从 P_0 增加至 $P_0 + P_1$ 。凸角过后,飞行体呈柱状,对周围空气作用力变化不大,压力降至 P_0 。飞行体尾部形状突变,周围被挤压的空气不再受力作用,压力降至 $P_0 - P_1$ 。气体压力回复正常状态,压力从 $P_0 - P_1$ 增加至 P_0 。对图 1(b)中仿真模拟进行了激波压力信号的提取,仿真模拟激波压力曲线呈现明显的“N”的形状,如图 2(b)所示。可以看出,利用激波压力信号对飞行体落点位置进行检测是可行的。



(a)理想状态曲线



(b)仿真模拟曲线

图 2 激波信号示意

Fig. 2 Schematic diagram of the shock wave signal

1.2 激波信号时频域特性分析

根据空气动力学原理,激波信号的压力幅值

$P_{\max}$ 和持续时间 T_0 的经验计算公式^[27] 如下

$$P_{\max} = K_p \frac{P_0 (Ma^2 - 1)^{1/8} d}{y^{3/4} l^{1/4}} \tag{1}$$
$$T_0 = K_T \frac{Mady^{1/4}}{c(Ma^2 - 1)^{3/8} l^{1/4}} \tag{2}$$

式中: Ma 为马赫数; d 为飞行体直径; $c=340.29$ m/s 为环境声速; y 为传感器与弹道的直线距离; l 为飞行体长度; $P_0=101\,325$ Pa 为大气压力; K_T 和 K_p 为修正系数,其取值与飞行体形状相关。由式(1)、(2)联立推导可得

$$P_{\max} = \frac{K_p P_0 c (Ma^2 - 1)^{1/2}}{K_T Ma y} T_0 \tag{3}$$

为了使传感器满足激波测量的要求,需要分析激波信号频率特性。激波信号的函数可以表示压力-时间函数

$$p(t) = \begin{cases} -\frac{2P_{\max}t}{T}, & -\frac{T_0}{2} < t < \frac{T_0}{2} \\ 0, & |t| \geq \frac{T_0}{2} \end{cases} \tag{4}$$

对式(4)进行快速傅里叶变换,从而进行频谱分析。 $p(t)$ 谱函数为

$$G(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-j\omega t} dt = 2P_{\max} \tau \frac{\theta \cos \alpha - \sin \alpha}{\alpha^2} \tag{5}$$

式中: $\alpha = \omega \tau$ 表示归一化频率; $\tau = T_0/2$; $\omega = 2\pi f$ 表示角频率。因此,有 $\omega \tau = f/f_0$, $f_0 = 1/T_0$ 。根据式(5)分析可知,当频率为 $0.65f_0$ 时,激波的幅值最高。当频率为 $3f_0$ 时,激波的幅值衰减至 -12 dB。因此,激波的能量主要集中在高频段,即 $0 \sim 3f_0$ 。

由于不同型号飞行体的尺寸参数不同,计算得到的压力幅值和持续时间也不同。假设传感器与飞行体轨迹的直线距离为 1.25 m,将修正参数带入式(1)、(2)和(5)中,计算可得 3 种飞行体的不同激波信号压力幅值 $P_{\max}$ 和持续时间 T_0 ,如表 1 所示。分析可知,5.8 mm 飞行体激波的压力幅值最小,持续时间最短,其基频 f_0 最高,对传感器的动态测量性能要求最高。随着飞行体直径增大,激波的压力幅值增大,持续时间变长。

基于上述激波特性的分析可知,压电式压力传感器需要具有高固有频率、高灵敏度和高线性度等静态测量特性。为了更高的环境适应性,传感器需要体积小和质量轻。传感器的工作频段需满足测量要求,压电式压力传感器的工作频带上限为其固有频率的 $30\% \sim 40\%$,故传感器的固有频率需大于等于 75 kHz。为了保障传感器安全可靠、

应用范围更广,传感器的量程为 0~50 kPa。传感器的灵敏度应满足测量需求,激波信号为微压信

号,其理论压力幅值仅为 796.8 Pa,传感器应具有较高的灵敏度。

表 1 不同飞行体对应的激波信号参数

Table 1 Parameters of shock wave signals corresponding to different types of flying bodies

飞行体	d/mm	y/m	Ma	$P_{\max}/\text{Pa}$	T_0/ms	f_0/Hz	$3f_0/\text{Hz}$
1	5.80	1.25	1.5	796.8	1.4	7 277.7	21 833.1
2	7.62	1.25	2.0	1 092.6	1.5	6 789.5	20 368.5
3	14.50	1.25	2.9	1 947.6	2.3	4 407.9	13 223.7

1.3 传感器的结构设计

传感器结构既影响承载能力和灵敏度等静态指标,也决定了固有频率等动态特性。基于正压电效应原理,设计了高频动态压电式压力传感器结构,如图 3 所示。传感器由压电陶瓷片、上壳体、铜电极、注塑环、陶瓷环和注塑胶体等组成。压电陶瓷属于压电多晶体材料,在人工极化的情况下才显现出压电特性。压电陶瓷主要包括 BaTiO₃、PZT 等系列,其中 PZT 具有压电系数高、稳定性好等优点^[28]。为了提高传感器的灵敏度,陶瓷片和陶瓷环选择为高压电系数的 PZT-5H,其压电系数 d_{33} 约为 593 pC/N。陶瓷片、铜电极和陶瓷环共同组成测量晶组。陶瓷片和陶瓷环受力后产生电荷,电荷信号由铜电极通过导线输出。陶瓷片的上表面和陶瓷环的下表面经传感器壳体接地。上下壳体起到支撑和保护测量晶组的作用,其材料为具有较好的耐蚀性和良好的高温力学性能的 1Cr18Ni9Ti。注塑环和注塑胶体可减少震动对测量信号的干扰,同时隔绝壳体与陶瓷片和陶瓷环接触。其材料为具有绝缘能力和耐腐蚀能力的聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene,PTFE)。

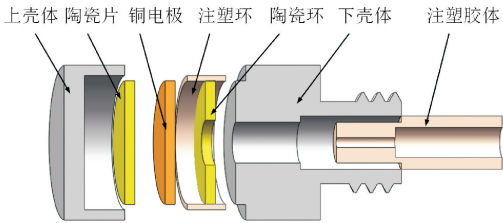


图 3 传感器结构示意图

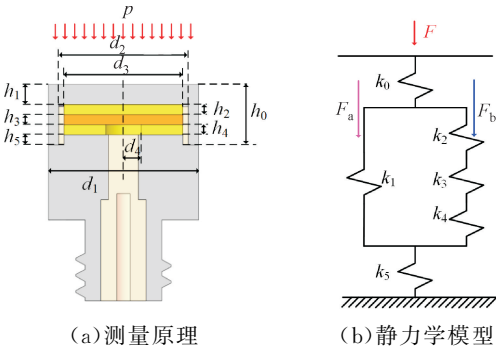
Fig. 3 Schematic diagram of sensor structure

1.4 测量原理分析和力学模型建立

为了获得传感器静态和动态性能指标,需要建立相对较准确的静动力学模型。假设传感器中使用的零件均视为理想刚体。晶组中陶瓷片和陶瓷环的介电系数矩阵、刚度系数矩阵和弹性系数矩阵均相等。激波信号均匀作用在传感器隔膜上表面,压力

信号由上向下传递。传感器的各零件之间的接触面视为理想平面,忽略微凸体等因素对接触刚度的影响。传感器载荷传递过程及力学模型的建立示意如图 4 所示。传感器在激波信号作用下测量原理如图 4(a)所示。当激波信号产生的力载荷 F 作用在传感器上表面后,会产生两个力分量 F_a 和 F_b 。 F_a 由壳体传递至传感器下壳体。 F_b 通过陶瓷片、铜电极和陶瓷环,传递至下壳体。可以看出,只有 F_b 会产生电荷信号。基于并联分载原理可知, F_a 在载荷传递过程中被传感器壳体吸收。若 F_a 增大,则外载荷信号被传感器壳体吸收的分量增大,会导致传感器电荷灵敏度和电压灵敏度降低。若 F_b 增大,则测量晶组所受的激波信号的分量增大,因而传感器的电荷灵敏度和电压灵敏度会增大。

传感器载荷传递过程及力学模型的建立示意如图 4 所示。传感器的各零件尺寸定义如图 4(a)所示。图中: d_1 为传感器的直径; d_2 为上壳体内径; d_3 为晶组的外径; d_4 为陶瓷环的内径; h_0 为传感器有效工作部分的总高度; h_1 为上壳体的厚度; h_2 为陶瓷片的厚度; h_3 为电极片的厚度; h_4 为陶瓷环的厚度; h_5 为下壳体凸台的高度。当传感器上述某一参数改变时,传感器整体结构发生变化,进而影响传感器静态测量性能。上壳体和下壳体的弹性模量用 E_1 表示,电极片的弹性模量用 E_2 表示,注塑环和注塑胶体的弹性模量用 E_3 表示,陶瓷片的弹性模量用 E_4 表示。



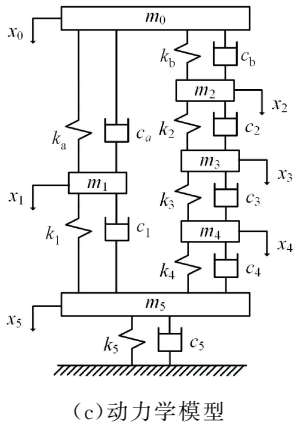


图4 传感器载荷传递过程及力学模型的建立示意

Fig. 4 Schematic diagram of sensor load transfer process and mechanical model establishment

当压力信号沿垂直隔膜方向作用与传感器隔膜上表面时,传感器各部件均受到均布载荷,产生压缩形变,且其形变量与外载荷大小呈线性关系。根据传感器的结构,基于变形协调一致原则,建立了压电

$$F_b = F[E_2 E_4 r_3^2 (r_3^2 - r_4^2) (h_0 - h_1)] \{ [E_2 E_4 r_3^2 (r_3^2 - r_4^2) (h_0 - h_1) + E_1 E_2 (r_1^2 - r_2^2) (r_3^2 - r_4^2) h_2 + E_1 E_4 (r_1^2 - r_2^2) (r_3^2 - r_4^2) h_3 + E_1 E_2 (r_1^2 - r_2^2) r_3^2 h_4] [k_2 k_3 k_4 (k_2 k_3 k_4 + k_1 (k_3 k_4 + k_2 k_4 + k_2 k_3))^{-1}] \}^{-1} \cdot \{ [[r_3^2 E_2 r_3^2 E_4 (r_3^2 - r_4^2) E_4] (h_2 h_3 h_4)^{-1}] [r_3^2 E_2 r_3^2 E_4 (r_3^2 - r_4^2) E_4 (h_2 h_3 h_4)^{-1} + (r_1^2 - r_2^2) E_1 r_3^2 E_2 (r_3^2 - r_4^2) E_4 (h_4 h_3 (h_0 - h_1))^{-1} + (r_1^2 - r_2^2) E_1 r_3^2 E_4 (r_3^2 - r_4^2) E_4 (h_0 - h_1) h_2 h_4)^{-1} + (r_1^2 - r_2^2) E_1 r_3^2 E_2 r_3^2 E_4 ((h_0 - h_1) h_2 h_3)^{-1}]^{-1} \}^{-1} \cdot \left\{ E_2 r_3^2 E_4 (r_3^2 - r_4^2) (h_2 h_3 h_4)^{-1} \left[\frac{r_3^2 E_2 E_4 (r_3^2 - r_4^2)}{h_2 h_3 h_4} + \frac{(r_1^2 - r_2^2) E_1 E_2 (r_3^2 - r_4^2)}{h_4 h_3 h_4} + \frac{(r_1^2 - r_2^2) E_1 E_4 (r_3^2 - r_4^2)}{(h_0 - h_1) h_2 h_4} + \frac{(r_1^2 - r_2^2) E_1 r_3^2 E_2}{(h_0 - h_1) h_2 h_3} \right] \right\}^{-1} \{ [E_2 E_4 r_3^2 (r_3^2 - r_4^2) (h_0 - h_1)] [E_2 E_4 r_3^2 (r_3^2 - r_4^2) (h_0 - h_1) + E_1 E_2 (r_1^2 - r_2^2) (r_3^2 - r_4^2) h_2 + E_1 E_4 (r_1^2 - r_2^2) (r_3^2 - r_4^2) h_3 + E_1 E_2 (r_1^2 - r_2^2) r_3^2 h_4]^{-1} \}^{-1} \quad (9)$$

由压电晶体工作原理及其等效电路可知,压电式传感器的电压灵敏度 S_U 计算公式为

$$S_U = \frac{Q}{P} \frac{h}{\epsilon_1 \epsilon_s} = nd_{ij} S \frac{k_c}{k_c + k_1} \frac{h}{\epsilon_0 \epsilon_s P} \quad (10)$$

式中: Q 为压电晶组受载后输出的总电荷; P 为加载在传感器受力面的压力; S 为传感器上壳体受力面的面积; n 为晶组中压电陶瓷片数量; d_{ij} 为压电陶瓷片的压电常数; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ 为压电陶瓷的介电常数; h 为压电陶瓷片的厚度; S_P 为压电陶瓷片电势面的有效面积。

为了更好地了解传感器的运行特性,根据传感器实际结构和静力学模型,建立由质量-刚度-阻尼组成的传感器动力学模型,如图 4(c) 所示。由上文分析可知,激波信号是一种瞬态的冲击信号,其作用在传感器上时,阻尼的缓冲作用有限。因此,在分析

式激波压力传感器的静力学模型,如图 4(b) 所示。

定义 k_0 为上壳体的等效刚度, k_1 为上壳体分载环的等效刚度, k_2 为陶瓷片的等效刚度, k_3 为铜电极的等效刚度, k_4 为陶瓷环的等效刚度, k_5 为下壳体的等效刚度。由于两支路为并联,因此 F_a 载荷作用下下壳体的形变量 Δl_1 与 F_b 载荷作用下晶组的总形变量 Δl_c 相等。根据串联刚度系数的计算原则,整个晶组的等效刚度 k_c 可表示为

$$\frac{1}{k_c} = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} \quad (6)$$

由胡克定律可知

$$\begin{cases} F_a = k_1 \Delta l_1 \\ F_b = k_c \Delta l_c \\ F = F_a + F_b = k_1 \Delta l_1 + k_c \Delta l_c \end{cases} \quad (7)$$

可以获得测量晶组所受的外载荷分量 F_b 为

$$F_b = F \frac{k_c}{k_c + k_1} \quad (8)$$

将各部件等效刚度带入式(8)可知,传感器测量时的有效载荷 F_b 为

$$F_b = F \frac{k_c}{k_c + k_1} \quad (8)$$

传感器振动特性时,可忽略阻尼对固有频率的影响。从而得到传感器的简化动力学模型

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为力矩阵; $\mathbf{X}$ 为质量块位移。因此,图 4(c) 中传感器的强迫振动方程的展开式为

$$\begin{cases} m_0 \ddot{x}_0 + k_a(x_1 - x_0) + k_b(x_2 - x_0) = f_0(t) \\ m_1 \ddot{x}_1 + k_1(x_5 - x_1) - k_a(x_1 - x_0) = f_1(t) \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_3 - x_2) - k_b(x_2 - x_0) = f_2(t) \\ m_3 \ddot{x}_3 + k_3(x_4 - x_3) - k_2(x_3 - x_2) = f_3(t) \\ m_4 \ddot{x}_4 + k_4(x_5 - x_4) - k_3(x_4 - x_3) = f_4(t) \\ m_5 \ddot{x}_5 + k_5 x_5 - k_4(x_5 - x_4) - k_1(x_5 - x_1) = f_5(t) \end{cases} \quad (12)$$

假设质量块的位移函数满足简谐运动方程

$$x_i = A_i \sin(\omega_i t + \varphi) \tag{13}$$

式中： A_i 为振幅； ω_i 为无阻尼固有频率； $i = 1 \sim 5$ ； φ 为相角。模态分析时候，常常假设力矩阵 $\mathbf{F}(t) = \mathbf{0}$ 。将位移函数带入式(11)可得

$$(\mathbf{M}\omega_i^2 - \mathbf{K})\mathbf{A}_i = \mathbf{0} \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix} m_0\omega_i^2 + k_a + k_b & -k_a & -k_b & 0 & 0 & 0 \\ -k_a & m_1\omega_i^2 + k_a + k_1 & 0 & 0 & 0 & -k_1 \\ -k_b & 0 & m_2\omega_i^2 + k_2 + k_b & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_2 & m_3\omega_i^2 + k_2 + k_3 & -k_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3 & m_4\omega_i^2 + k_3 + k_4 & -k_4 \\ 0 & -k_1 & 0 & 0 & -k_4 & m_5\omega_i^2 - k_5 + k_4 + k_1 \end{bmatrix} = 0 \tag{16}$$

求解式(16)可得传感器的固有频率。

2 结构参数对测量性能的影响规律

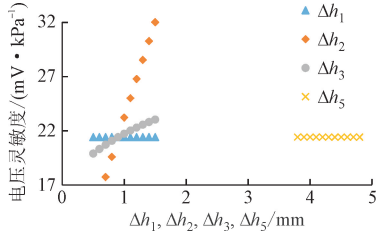
高频动态压电式压力传感器各零件的尺寸参数是影响其静动态测量性能的重要因素。从第 1 节的测量原理分析可知，传感器的灵敏度和固有频率与等效刚度相关。等效刚度与各零件结构尺寸具有直接关系。采用单因素方法分析传感器上壳体厚度 h_1 、陶瓷片厚度 h_2 、电极片厚度 h_3 、陶瓷环的厚度 h_4 、下壳体高度 h_5 、壳体外径 d_1 、下壳体内径 d_2 、晶组外径 d_3 以及陶瓷环的内径 d_4 等主要结构参数变化对传感器灵敏度和固有频率的影响规律，本文中陶瓷环的厚度 h_4 等于陶瓷片厚度 h_2 ，结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出，随着 h_1 增大，传感器固有频率呈明显下降趋势。传感器电压灵敏度几乎没有变化。随着 h_2 和 h_3 增大，传感器固有频率呈下降趋势，而传感器电压灵敏急剧上升。随着 h_5 增大，传感器固有频率呈下降趋势，从 274.0 kHz 降低至 230.8 kHz，而传感器电压灵敏稳定不变。随着 d_1 增大，传感器固有频率与电压灵敏度均呈下降趋势。随着 d_2 增大，传感器固有频率与电压灵敏度均呈上升趋势。随着 d_3 增大，传感器固有频率与电压灵敏度均呈下降趋势。但是，幅值变化较小。压电陶瓷片外径 d_3 对传感器静态测量性能影响均较小。陶瓷环内径用于传感器信号引出。随着 d_4 增大，传感器电压灵敏度呈下降趋势。因此，为了提高传感器灵敏度和减少引线接地现象的发生， d_4 固定为 2.2 mm。考虑到现有加工设备的工艺限制和传感器安装尺寸的限制，得到如表 2 所示的传感器结构尺寸参数。

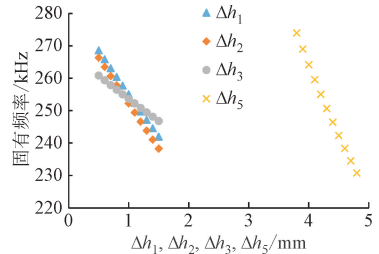
分析上述方程可知，传感器在振动状态下振幅 A_i 不能为 0，即方程存在非零解，由此可知

$$|\mathbf{M}\omega_i^2 - \mathbf{K}| = 0 \tag{15}$$

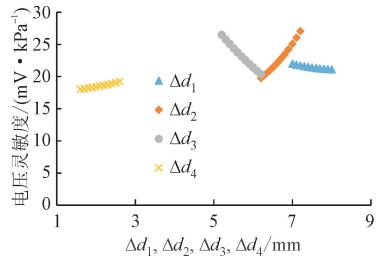
将质量矩阵 $\mathbf{M}$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 代入式(15)可得



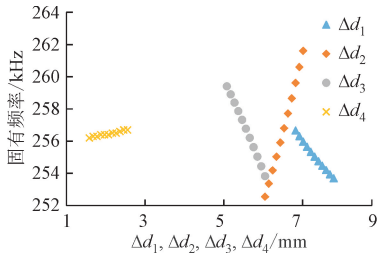
(a) 高度变化对电压灵敏度的影响



(b) 高度变化对固有频率的影响



(c) 直径变化对电压灵敏度的影响



(d) 直径变化对固有频率的影响

图 5 传感器结构参数对静动态测量性能的影响

Fig. 5 The influence of sensor structural parameters on static and dynamic measurement performance

表 2 优化后的传感器结构参数

Table 2 Optimized structural parameters of sensor

参数	数值	参数	数值
h_1/mm	0.5	d_1/mm	7.5
h_2/mm	0.5	d_2/mm	6.5
h_3/mm	0.5	d_3/mm	6.0
h_4/mm	0.5	d_4/mm	2.2
h_5/mm	4.2		

3 传感器静动态性能仿真验证

3.1 传感器静力学仿真分析

为验证传感器结构及其尺寸参数是否满足设计要求,采用 ANSYS 进行仿真分析。使用 ANSYS 建立传感器仿真模型,传感器采用自由网格划分。静力学和模态分析过程中,传感器压电陶瓷采用 Solid 186 单元。压电耦合分析过程中,采用 Solid 226 单元。其余部分均采用 Solid 186 单元。设置传感器晶组及电极的网格尺寸为 0.01 mm,传感器其他部分的网格尺寸为 0.02 mm。网格划分如图 6 所示,材料参数如表 3 所示。

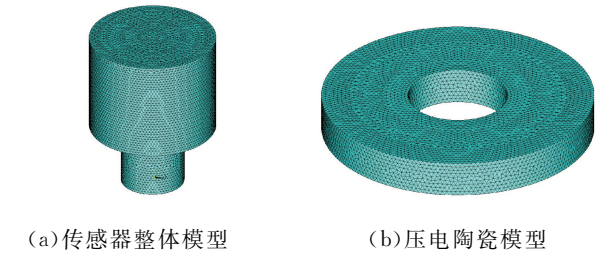


图 6 传感器有限元模型网格划分

Fig. 6 Mesh generation of sensor finite element model

表 3 传感器各部件的材料参数

Table 3 Material parameters of sensor components

零件	材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
壳体	1Cr18Ni9Ti	203.00	0.28	7 850
压电陶瓷	PZT-5H	60.90	0.35	1 780
电极片	Cu	119.00	0.33	8 900
绝缘材料	PTFE	0.28	0.40	2 200

分析传感器结构的静力学性能,对传感器底面自由度全约束。为了保证传感器使用安全,沿 Z 向对传感器施加 100 kPa 正压力。图 7 为传感器结构的应力仿真云图。其中,压电陶瓷所受应力最大,最大应力值为 278.836 kPa。传感器整体及各零件的应力均未超过其材料的应力极限。

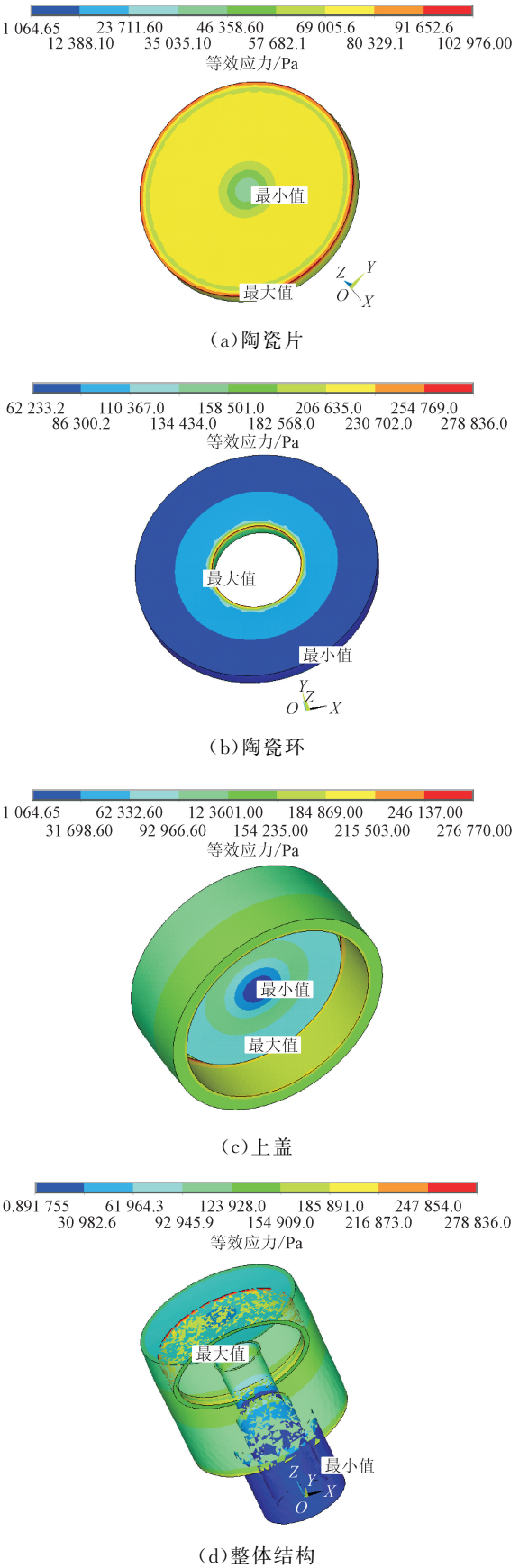


图 7 压力传感器应力仿真云图

Fig. 7 Stress simulation cloud diagram of pressure sensor

3.2 传感器动力学仿真分析

模态分析可以用来确定结构的振动特性,得出传感器固有频率和振型。在 ANSYS 中固定传感器有限元模型底部结构,对其进行动力学分析,仿真分析结果如图 8 所示。图 8 为传感器结构模态分析获得的 Z 向固有频率振型云图,固有频率为 174.793 kHz。

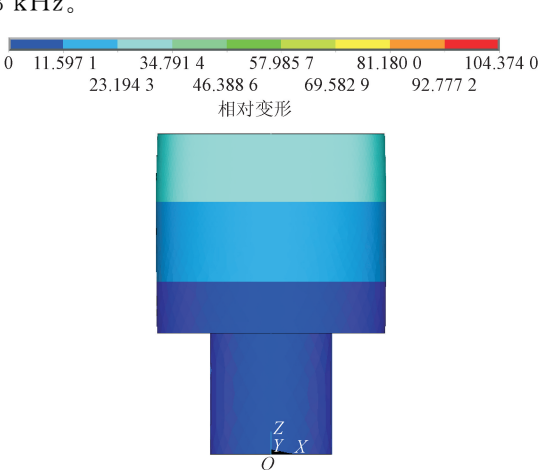


图 8 压力传感器 Z 向动力学仿真分析结果
Fig. 8 Dynamic simulation analysis results of pressure sensor in Z direction

3.3 传感器压电耦合仿真分析

为了对压力传感器灵敏度指标进行预测,在 ANSYS 多物理耦合场中对传感器模型进行压电耦合仿真分析。设置电耦合仿真参数。压电材料的弹性系数矩阵、介电系数矩阵和压电矩阵等设置可依据压电陶瓷的参数计算。本文采用的 PZT-5H 压电陶瓷的主要技术指标如表 4 所示。

表 4 PTZ-5H 压电陶瓷主要技术性能指标
Table 4 Main technical performance indicators of selected PTZ-5H piezoelectric ceramics

参数	数值
压电应变常数 $d_{31}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	-274
压电应变常数 $d_{32}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	-274
压电应变常数 $d_{33}/(\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	593
压电电压常数 $g_{33}/(\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{N}^{-1})$	19.7
相对介电常数 $\epsilon_{11} \cdot \epsilon_0^{-1}$	1 470
相对介电常数 $\epsilon_{33} \cdot \epsilon_0^{-1}$	1 700
机电耦合系数 K_{33}	0.752
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 500
泊松比 μ	0.29
弹性模量 E/MPa	60.9

对传感器上盖的隔膜依次施加 Z 向正压力载荷 20、40、60、80、100 kPa,仿真得到测量晶组在各压力载荷下的输出电压,100 kPa 压力下传感器的电势仿真云图如图 9 所示。图 10 为传感器输出电压与压力载荷之间的对应关系。分析可知,所设计的压力传感器的电压灵敏度为 0.019 9 V/kPa。

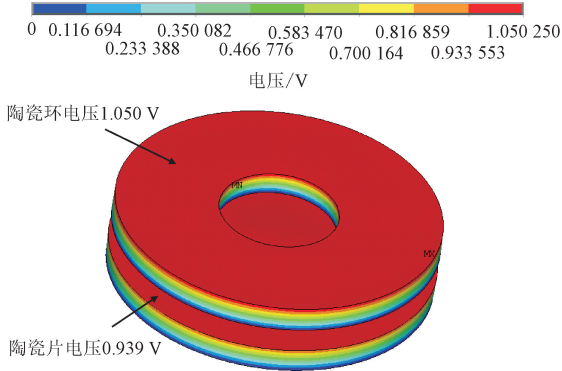


图 9 100 kPa 压力下传感器内压电陶瓷电势仿真云图
Fig. 9 Cloud simulation of piezoelectric ceramic potential inside the sensor under 100 kPa pressure

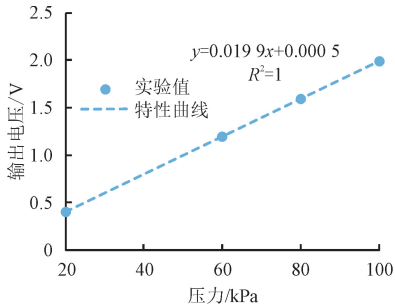


图 10 压力载荷作用下传感器电压输出特性曲线
Fig. 10 Output voltage characteristic curve of the sensor under pressure load

4 传感器样机研制及其试验研究

4.1 传感器准静态标定系统搭建及实验分析

静态校准的压力加载时间较长,会导致被校压力电测系统产生严重的静电泄漏和输出漂移问题,从而影响校准结果的准确性。准静态校准的压力加载时间通常在 ms 量级,采用该校准方式可以有效地提高校准精度,解决动态测量中的“静标动用”问题。基于负阶跃的原理,搭建了传感器准静态标定系统,如图 11 所示。该系统包括液压压力源、研制的压力传感器样机、电荷放大器、数据采集卡和测试终端,可实现准静态负阶跃力加载。

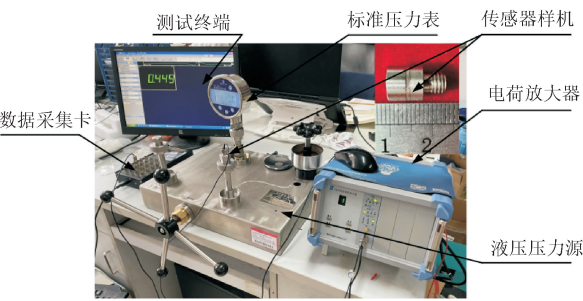


图 11 压力传感器准静态标定系统

Fig. 11 Pressure sensor quasi static calibration system

传感器标定过程中,电荷信号输出至电荷放大器,放大后输出至数据采集卡,由数据采集卡采集及信号后输出至测试终端,在数据采集软件中进行最终的计算处理。准静态标定台由介质压力源和高精度数字压力表组成。油介质压力源可提供 $-0.08\sim 6\text{ MPa}$ 压力,最小调节量为 0.01 MPa 。高精度数字压力表的量程范围为 $0\sim 6\text{ MPa}$,精度等级为 0.05% 满量程,可以满足传感器准静态标定实验需求。电荷放大器采用扬州科动公司生产的 KD5009 准静态电荷放大器,此电荷放大器能实现 $1\sim 1\,000\text{ mV/N}$ 范围内的输出增益, $1\sim 30\text{ Hz}$ 的高通滤波和 $3\sim 300\text{ kHz}$ 的低通滤波。测量频率为 $1\sim 500\text{ kHz}$,电压范围为 $\pm 5\text{ V}$,精度误差小于 1% ,符合实验要求。数据采集卡采用 DATA Translation 公司生产的 DT9804ECIBNC-16SE 型数据采集卡,其最高采样频率可达 10^{-5} s^{-1} 。电荷放大器增益设置为 1 mV/N 。沿传感器隔膜法向,对传感器加载范围为 $10\sim 100\text{ kPa}$ 、步长为 10 kPa 的压力载荷。瞬时释放压力,以产生负阶跃信号。使用数据采集软件记录每次加载时压力传感器输出的信号。由于不可避免地存在人工加载误差和视觉误差,因此将上述加载过程重复进行 3 次,取 3 次标定实验获得的传感器输出电压平均值,使用最小二乘法拟合,得到传感器的准静态标定电压特性曲线,如图 12 所示。分析可知,传感器具有较好的线型和重复性,非线性误差和重复性误差均小于 1% 。

4.2 传感器动态标定系统搭建及实验分析

压力传感器常用的动态标定方法有正弦激励法和瞬态激励法等^[29]。正弦激励法标定时对压力传感器加载正弦信号激励。在高频、高压的标定实验中,正弦信号畸变严重,故常用于小压力且低频的标定实验中。高频动态压力传感器常用瞬态激励法。由激波管产生阶跃信号,根据待标定传感器的阶跃响应,由解析方法计算其动态特性。搭建了如图 13

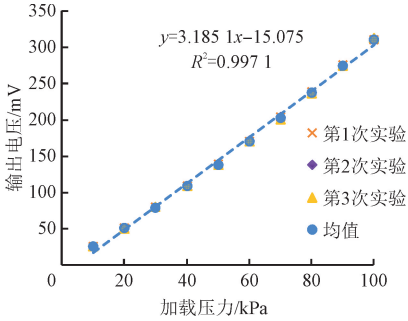


图 12 准静态标定曲线

Fig. 12 Curve of quasi static calibration

所示的压力传感器动态标定系统。由压力源提供压力,当激波管的高压室达到标定所需的压力后,高压室与低压室之间的隔膜破裂,高压气体膨胀,产生向低压室内快速移动的激波,即对传感器加载阶跃信号,传感器输出的电荷信号由电荷放大器放大或缩小后输出至数据采集系统,最后由测试终端的采集软件记录。

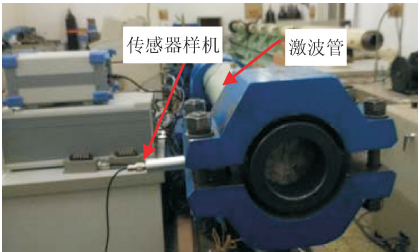
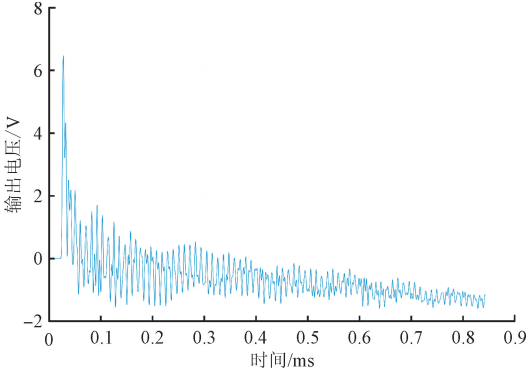


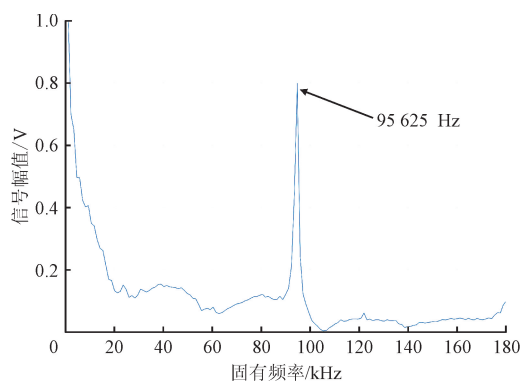
图 13 压力传感器动态标定系统

Fig. 13 Dynamic calibration system for pressure sensors

最终得到的传感器时域信号如图 14(a)所示。可以看出,本文研制的激波压力传感器可以完整地获取冲击波波形。对压力传感器的响应波形做傅里叶分析,得到压力传感器的响应频率,如图 14(b)所示。可以看出,传感器的固有频率为 95.625 kHz ,上升时间为 $10.45\text{ }\mu\text{s}$,满足高频激波信号动态测量的要求。



(a)传感器时域信号



(b)传感器幅频信号

图14 传感器动态标定曲线

Fig. 14 Dynamic calibration curves of the sensor

5 结 论

(1)基于压电效应原理,研制了一种小量程、高精度、高灵敏度、线性度好的高频动态压电式压力传感器,对传感器的结构及其工作原理进行了分析。

(2)基于机理建模法,建立了传感器的静、动力学模型。推导得到了传感器的电荷灵敏度及固有频率的理论计算公式。分析得到了传感器各结构参数对传感器静、动态测量性能的影响规律,为传感器样机研制提供理论依据。

(3)建立传感器的有限元模型并分析其静动态测量性能。利用ANSYS对传感器模型进行静力学分析,模态分析,谐响应分析和压电耦合分析。得到传感器的电压灵敏度为 0.0199 V/kPa ,固有频率为 174.793 kHz ,满足传感器的设计指标。

(4)基于阶跃原理,完成了传感器样机的准静态标定实验。传感器具有较好的线性和重复性。利用激波管完成了传感器的动态标定实验,固有频率为 95.625 kHz ,上升时间为 $10.45\text{ }\mu\text{s}$,满足高频激波动态测量的要求。研究成果为压电式压力传感器设计和性能预测提供了理论参考依据。

参考文献:

- [1] 徐锋,刘应华. 升压速率对正拱普通型爆破片爆破压力的影响规律及机理研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 69-79.
XU Feng, LIU Yinghua. Study on effect and mechanism of pressure rise rate on the bursting pressure of conventional domed bursting disc[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(2): 69-79.
- [2] 姜昌兴,宋超鑫,雷小华,等. 基于一体化探针的航空发动机内流多方向压力测量技术研究[J]. 仪器仪表

表学报, 2021, 42(10): 9-19.

- JIANG Changxing, SONG Chaoxin, LEI Xiaohua, et al. Study on the multi-direction pressure measurement technology of aero engine internal flow based on an integrated probe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 9-19.
- [3] 顾加雨,夏勋荣,张超,等. 基于传感器技术的冲击波治疗仪穿透深度检测系统的设计[J]. 中国医疗设备, 2022, 37(3): 5-8.
GU Jiayu, XIA Xunrong, ZHANG Chao, et al. Design of penetration depth detection system of shock wave therapy instrument based on sensor technology [J]. China Medical Devices, 2022, 37(3): 5-8.
- [4] 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, 175.
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, 175.
- [5] 陈学文,赖富文,牛博怀,等. 应用于炮口冲击波的生物表面压力测试系统[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 261-265.
CHEN Xuewen, LAI Fuwen, NIU Bohuai, et al. Pressure measurement system of biological surface applied to muzzle shock wave [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(5): 261-265.
- [6] 王洪悦,董全,颜杰,等. 喷气策略对多点喷射天然气发动机燃烧及排放的影响[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2): 57-65.
WANG Hongyue, DONG Quan, YAN Jie, et al. Influence of injection strategy on combustion and emissions of multi-point injection natural gas engine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(2): 57-65.
- [7] 高永卫,魏斌斌,梁栋. 翼型风洞试验技术研究现状[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(6): 85-100.
GAO Yongwei, WEI Binbin, LIANG Dong. Research status of airfoil wind tunnel experimental technology [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(6): 85-100.
- [8] 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 Donglai, WANG Weikui, LI Wenbo, et al. Research status of shock wave overpressure sensor [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(5): 7-15.
- [9] ABIRI A, PARSAYAN A. The bullet shockwave-based

- real-time sniper sound source localization [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13): 7253-7264.
- [10] 周行健, 雷程, 梁庭, 等. 高频响 MEMS 压力传感器动态性能研究 [J]. 舰船电子工程, 2023, 43(4): 167-171.
- ZHOU Xingjian, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Dynamic performance research of high frequency response MEMS pressure sensor [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 167-171.
- [11] YAO Zhenjian, LI Yongsheng, DING Yifan, et al. Improved shock tube method for dynamic calibration of the sensitivity characteristic of piezoresistive pressure sensors [J]. Measurement, 2022, 196: 111271.
- [12] 赵立波, 赵玉龙, 李建波, 等. 倒杯式耐高温高频响压阻式压力传感器 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 50-54.
- ZHAO Libo, ZHAO Yulong, LI Jianbo, et al. Inverted-cup high-temperature and high-frequency piezoresistive pressure sensor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 50-54.
- [13] 杨秋菊, 王彤. 扩散硅压阻式压力传感器非线性误差纠正方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(3): 466-472.
- YANG Qiuju, WANG Tong. Nonlinear error correction method of diffused silicon piezoresistive pressure sensors [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(3): 466-472.
- [14] 王俊杰, 刘劲, 傅正义, 等. 超微型全石英光纤 Fizeau 腔水下激波压力传感器 [J]. 光学学报, 2019, 39(2): 214-222.
- WANG Junjie, LIU Jin, FU Zhengyi, et al. Miniature underwater shock wave pressure sensor based on all-silica optical fiber Fizeau cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 214-222.
- [15] LI Yingjun, YANG Zhikang, WANG Guicong, et al. Research on piezoelectric pressure sensor for shock wave load measurement [J]. ISA Transactions, 2020, 104: 382-392.
- [16] 冯斌, 马时亮. 激波压力传感器信号处理电路设计 [J]. 计量与测试技术, 2011, 38(11): 1-2.
- FENG Bin, MA Shiliang. Design of signal processing circuit for shock pressure sensor [J]. Metrology & Measurement Technique, 2011, 38(11): 1-2.
- [17] WANG Zhaoguang, GIGLMAIER M, HOPFES T, et al. Impact of sensor housing geometries on transient stagnation pressure measurements in impulse facilities [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 109: 109851.
- [18] KIM N I, CHANG Yuli, CHEN Jie, et al. Piezoelectric pressure sensor based on flexible gallium nitride thin film for harsh-environment and high-temperature applications [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2020, 305: 111940.
- [19] KRAUSE T, MEIER M, BRUNZENDORF J. Influence of thermal shock of piezoelectric pressure sensors on the measurement of explosion pressures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 71: 104523.
- [20] WANG Guicong, LI Yingjun, CUI Huanyong, et al. Acceleration self-compensation mechanism and experimental research on shock wave piezoelectric pressure sensor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150: 107303.
- [21] KENDA M, KLOBČAR D, BRAČUN D. Condition based maintenance of the two-beam laser welding in high volume manufacturing of piezoelectric pressure sensor [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 59: 117-126.
- [22] 姚贞建, 王中宇, 王辰辰, 等. 压力传感器动态特性参数不确定度评定 [J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1672-1681.
- YAO Zhenjian, WANG Zhongyu, WANG Chenchen, et al. Uncertainty evaluation for dynamic characteristic parameters of pressure sensors [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1672-1681.
- [23] 顾廷炜, 孔德仁. 基于 GA-BP 神经网络的落锤液压动标装置准静态校准模型 [J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(5): 581-586.
- GU Tingwei, KONG Deren. Quasi-static calibration model of drop hammer hydraulic dynamic pressure calibration device based on GA-BP neural network [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(5): 581-586.
- [24] GU Tingwei, SHANG Fei, KONG Deren, et al. Absolute quasi-static calibration method of piezoelectric high-pressure sensor based on force sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(5): 055111.
- [25] DIAO Kuan, YAO Zhenjian, WANG Zhongyu, et al. Investigation of vibration effect on dynamic calibration of pressure sensors based on shock tube system [J]. Measurement, 2020, 149: 107015.
- [26] MÄKINEN T, PERTILÄ P. Shooter localization and bullet trajectory, caliber, and speed estimation based on detected firing sounds [J]. Applied Acoustics, 2010, 71(10): 902-913.

- [27] 任孟虎. 基于激波与光测的弹丸飞行参数复合探测研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [28] 李雪伍, 高瑞, 黄艳斐, 等. 铌酸钾钠无铅压电陶瓷掺杂及制备技术现状 [J]. 中国表面工程, 2023, 36(2): 1-20.
- LI Xuewu, GAO Rui, HUANG Yanfei, et al. Research status of lead-free piezoelectric ceramic doping and preparation technology of potassium sodium niobate [J]. China Surface Engineering, 2023, 36(2): 1-20.
- [29] 李永生, 姚贞建, 丁义凡. 激波管反射阶跃压力上升时间高精度估计 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 10-18.
- LI Yongsheng, YAO Zhenjian, DING Yifan. High-accuracy estimation of the rise time of shock tube reflection step pressure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 10-18.

(编辑 陶晴)