

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2514731

# 光纤 Fizeau 腔超快爆炸冲击波压力传感器

贺 达, 王俊杰, 朱亚凯, 熊俊杰, 刘 腾

(光纤传感技术与网络国家工程研究中心 武汉 430070)

**摘要:**为解决传统机电式与压电阻式传感器在爆炸冲击波等极端电磁环境下易受干扰、响应滞后及上升沿难以捕捉的问题,提出并制备了基于法布里-珀罗(F-P)干涉原理的全石英 Fizeau 腔光纤微型动态压力传感器,该传感器兼具高灵敏度、高频响与高空间分辨率特性。其传感单元由直径 125  $\mu\text{m}$  的单模光纤、石英毛细玻璃管及无芯光纤熔接构成,通过限长研磨与 40% HF 化学腐蚀工艺,将无芯光纤压力敏感膜片厚度精确至 2~3  $\mu\text{m}$ ,实现近似理想双光束正弦干涉输出。为实现瞬态压力的高精度反演,采用三波长光源激励与任意确定性相位间隔的被动零差解调技术,实时提取冲击载荷下腔长变化引发的干涉相位偏移;结合三通道电压归一化与相位跳变补偿算法,有效抑制插入损耗差异与量化噪声对测量精度的影响。静态标定实验表明,传感器在量程范围内均处于弹性工作区,其中 0~60 MPa 量程线性度达 2.23% FS、重复性优于 2%、回程误差 < 0.1%。激波管动态测试结果显示,当高速光电探测器谐振频率设置为 20 MHz、响应时间为 8 ns 时,传感器系统动态响应时间 < 50 ns,可准确重构冲击波压力-时间波形。该传感器兼具微尺度探测与高频响特性,适用于爆炸冲击及强激光诱导近场等离子体冲击等极端工况下的瞬态压力测试,并可在强电磁与高冲击条件下保持稳定输出,具有一定工程应用价值。

**关键词:** 超快响应时间; 光纤压力传感器; 高频响动态响应; 超微型压力探针

**中图分类号:** TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Optical fiber Fizeau cavity ultrafast explosive shock wave pressure sensor

He Da, Wang Junjie, Zhu Yakai, Xiong Junjie, Liu Teng

(National Engineering Research Center for Optical Fiber Sensing Technology and Networks, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To address the problems that traditional electromechanical and piezoelectric/piezoresistive sensors are susceptible to interference in extreme electromagnetic environments such as explosive shock waves, exhibit response lag, and have difficulty capturing the rising edge, this paper proposes and fabricates an all-silica Fizeau-cavity optical fiber miniature dynamic pressure sensor based on the Fabry-Pérot (F-P) interference principle. The sensor integrates the characteristics of high sensitivity, high frequency response, and high spatial resolution. Its sensing unit is formed by fusion splicing a 125  $\mu\text{m}$  single-mode fiber, a silica capillary tube, and a coreless fiber. By length-limited grinding and 40% HF chemical etching, the thickness of the coreless-fiber pressure-sensitive diaphragm is precisely controlled to 2~3  $\mu\text{m}$ , achieving an approximately ideal two-beam sinusoidal interference output. To enable high-precision inversion of transient pressure, a three-wavelength light source excitation scheme and a passive homodyne demodulation technique with arbitrary deterministic phase spacing are adopted to extract, in real time, the interferometric phase shift induced by cavity length variations under shock loading. In combination with three-channel voltage normalization and a phase-jump compensation algorithm, the influence of insertion-loss differences and quantization noise on measurement accuracy is effectively suppressed. Static calibration experiments show that the sensor operates within the elastic regime over the entire measurement range; within 0~60 MPa, the full-scale nonlinearity reaches 2.23%, the repeatability is better than 2%, and the hysteresis error is less than 0.1%. Shock-tube dynamic test results indicate that when the resonance frequency of the high-speed photodetector is set to 20 MHz and the response time is 8 ns, the dynamic response time of the sensor system is less than 50 ns, which allows for the accurate reconstruction of the shock-wave pressure-time waveform. With the merits of microscale sensing and high-frequency response, the sensor is suitable for transient pressure measurements under extreme

conditions such as explosive impacts and intense laser-induced near-field plasma shocks, and it can maintain stable output under strong electromagnetic and high-shock conditions, thus exhibiting considerable engineering application value.

**Keywords:** ultrafast response time; optical fiber pressure sensor; high-frequency dynamic response; ultrafine pressure probe

## 0 引言

在爆炸冲击波的动力学压力测试领域,常用的测量手段包括压阻式、压电式和光纤式压力传感器<sup>[1-3]</sup>。周行健等<sup>[4]</sup>研制的微机电系统(micro electromechanical system, MEMS)压力传感器,其频率高达 222.8 kHz,上升时间约为 20 μs,具备较高的线性度和快速的响应特性。王桂从等<sup>[5]</sup>设计了一种高频动态压电式压力传感器结构,成功将上升时间缩短至 10.45 μs。然而,这些传感器存在两个共性问题:1)无法在等离子辐射环境和强电磁环境中稳定工作<sup>[6]</sup>;2)面对强激光与物质作用产生的近场等离子体冲击波,其上升时间<50 ns,难以满足实际工程应用中的测量需求。

光纤传感器通过光信号传输,受外界环境干扰较少,具备出色的抗电磁能力<sup>[7]</sup>。在测量声波<sup>[8]</sup>、磁场<sup>[9]</sup>、压力<sup>[10]</sup>、温度<sup>[11]</sup>、旋转角度等物理量时,其性能表现尤为优异,能够适应测量爆炸冲击波等特殊环境条件。Guo 等<sup>[12]</sup>设计了一种石英毛细管端面结合 300 nm 银膜形成空腔的光纤传感器,其静压灵敏度达 1.6 nm/kPa,谐振频率为 1.44 MHz。Chu 等<sup>[13]</sup>开发了一种基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)腔的光纤尖端微型冲击波压力传感器,通过静态与动态试验,该传感器在 1 MPa 压力范围内的线性度、重复性和迟滞率分别为 4.33%、1.9% 和 2.8%,谐振频率高达 8.97 MHz,具备良好的线性度和准确性,适用于爆炸冲击波压力测量。殷建雄等<sup>[14]</sup>介绍了一种基于 MEMS 技术的光纤 F-P 压力传感器,该传感器在 0~10 MPa 压力范围内呈现优异的线性响应,满量程非线性误差仅为 0.41%,迟滞为 0.37%,传感器上升时间为 8.5 μs,虽具备批量化制备能力,但上升响应时间仍有提升空间。刘明尧等<sup>[15]</sup>提出了采用双光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)聚合物封装结构,压力灵敏度最高可达 197.4 pm/MPa,内置温度补偿机制,线性相应良好,但传感器微型化程度不足,动态响应速度慢,难以满足高频动态压力的测量。

针对上述问题,本文提出并研制了一种基于 F-P 干涉原理的全石英光纤 Fizeau 腔超快动态压力传感器。通过在制作工艺、封装结构及解调算法方面的系统优化,结合有限元仿真、静压标定及激波管动态测试,对传感器性能进行了环境评估,以验证其在极端动态压力环境中的适用性。

## 1 理论分析

### 1.1 全石英光纤 Fizeau 腔基本原理

全石英光纤 Fizeau 腔的光反射与干涉原理如图 1 所示。该结构主要由单模光纤(single-mode fiber, SMF)、无芯光纤(coreless fiber, CLF)及石英玻璃毛细管(silica capillary tube, SCT)组成,其中无芯光纤充当压力敏感膜片用于感知外界压力。系统中存在 3 束主要反射光:来自 SMF 端面的反射光  $I_1$ 、膜片内表面的反射光  $I_2$  及膜片外表面的反射光  $I_3$ 。

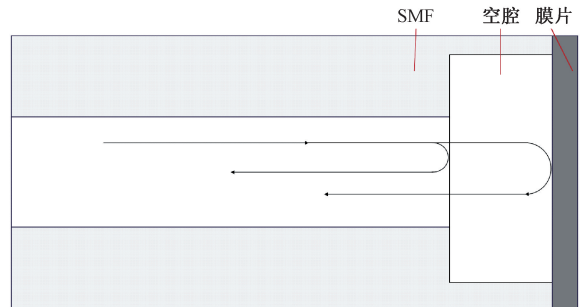


图1 全石英光纤 Fizeau 腔光反射原理

Fig. 1 Light reflection principle of all-quartz fiber Fizeau cavity

当外界压力变化引起腔长变化时,3束光之间的相位差随之变化,从而改变干涉条纹,利用这种相位变化关系,可实现外界压力的精确测量。其反向探测干涉输出  $I(\lambda)$  表示为:

$$I(\lambda) = A_1 + A_2 + A_3 - 2\sqrt{A_1A_2} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) - 2\sqrt{A_2A_3} \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda}\right) + 2\sqrt{A_1A_3} \cos\left[\frac{4\pi(L+nd)}{\lambda}\right] \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  是干涉激励光源中心波长;  $L$  是 Fizeau 腔;  $n$  是石英材料(二氧化硅)光学折射率;  $d$  是膜片厚度;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为反射光束  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  各自对应的光强反射率。

在理想条件下,3束反射光的光强均由端面反射率与入射光强的乘积决定。当在膜片内表面镀覆一层高反射率金属膜(如金或铝)时,膜片外表面的反射光  $I_3$  几乎被抑制,可忽略其影响。此时系统的干涉输出主要由  $I_1$  与  $I_2$  构成,形成简化的双光束干涉模型,其反向探测输出可近似表示为:

$$I(\lambda) = A_1 + A_2 - 2\sqrt{A_1A_2} \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) \quad (2)$$

当中心波长  $\lambda$  固定后,干涉信号主要由腔长  $L$  决定。

通过对输出光谱进行曲线拟合,即可反推出 Fizeau 腔的长度变化,实现对压力的定量反演。

## 1.2 Fizeau 腔作为压力传感器分析

### 1) 静态特性分析

静态特性是评估传感器性能的重要基础指标。本文所设计的光纤 Fizeau 腔传感器通过膜片受力产生的弹性形变,将外界压力信号转化为光学相位变化,从而实现压力的光学检测。为分析其静态特性,可将膜片视作弹性力学中的平面圆形薄板模型,根据小变形理论推导出腔长变化量与外加压力之间的定量关系,即:

$$\Delta P = \frac{16}{3} \times \frac{Ed^3}{(1-\mu^2)r^4} \Delta L \quad (3)$$

式中: $E$ 为膜片杨氏模量; $\mu$ 为膜片泊松比; $L$ 为空心腔腔长; $d$ 为膜片厚度; $r$ 为膜片有效振动半径。进一步可得到传感器灵敏度,即:

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta P} = \frac{16}{3} \times \frac{Ed^3}{(1-\mu^2)^2 r^4} \quad (4)$$

由推导可知,传感器的灵敏度与膜片有效振动半径  $r$  呈负相关,与厚度  $d$  呈正相关,即当  $r$  减小时、 $d$  增大时,传感器灵敏度提高,响应性能更佳。然而在实际测量中,膜片厚度与有效振动半径的测量存在不可避免的误差,这将导致理论计算的灵敏度与实际值存在偏差。

为提高灵敏度计算的准确性,本文结合传感器材料固有属性,提出了一个更为精确的灵敏度计算模型,设膜片弹性模量  $E_f$ , 泊松比  $\mu_f$ , 密度  $\rho_f$ , 则膜片柱面抗挠度<sup>[16-17]</sup>为:

$$K = \frac{E_f d^3}{12(1-\mu_f^2)^2} \quad (5)$$

对应地,传感器干涉相位灵敏度<sup>[16]</sup>和位移灵敏度分别表示如式(6)和(7)所示。

$$S_a = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot \frac{M}{kN_c(r)} \quad (6)$$

$$S_b = \frac{1}{16} \cdot \frac{M}{kN_c(r)} \quad (7)$$

结合研究上述物理量可以得到式(8)<sup>[18]</sup>,即:

$$\begin{cases} M = \frac{R^3}{3} \\ N_c(r) = \int_0^R \left\{ r[Y(r)]^2 + \frac{1}{r}[X(r)]^2 + 2\mu_f X(r)Y(r) \right\} dr \\ X(r) = \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \frac{r}{R^2} \\ Y(r) = \left[ 1 - 3 \left( \frac{r}{R} \right)^3 \right] \frac{r}{R^2} \end{cases} \quad (8)$$

综合分析可知,膜片的抗挠刚度与厚度  $d$  呈正相关。

干涉相位灵敏度与位移灵敏度均与结构参数  $K$  相关,并在中心波长  $\lambda$  固定时成反比关系,即膜片越厚,灵敏度越低,但结构稳定性越好。

除膜片厚度与材料等结构参数对传感器灵敏度具有显著影响外,温度变化也是重要外部因素,其主要影响包括:(1)温度波动导致传感器空腔内气体折射率变化,影响 F-P 腔的反射特性;(2)温度变化引起 F-P 腔结构热胀冷缩,影响光束反射传递;(3)持续高温环境会加速传输光纤的材料老化进程,极端低温条件易导致光纤基体应力变化,进而影响其机械结构稳定性。

实际应用中,前两项效应对传感性能影响最为显著,为此本文提出温度影响下的干涉相位灵敏度模型,即:

$$S_T = \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{4\pi L}{\lambda} \times (\xi + n_T) \quad (9)$$

$$n_T = \frac{1}{n_k} \cdot \frac{dn_k}{dT} \quad (10)$$

式中: $\delta$ 为材料热膨胀系数; $n_T$ 为空腔内气体折射率温度系数; $n_k$ 为气体折射率; $L$ 为腔长。

由式(9)和(10)可知,温度对光纤传感器的影响主要集中在腔长的变化,即热胀冷缩现象,且进一步的分析可知在温度较低情况下对传感器灵敏度影响较小,在高温情况下灵敏度有所降低但总体干扰率相比于传统压阻式更低,表现出更高的环境适应性。

### 2) 动态性能分析

光纤传感器的动态性能反映其对外界快速变化环境的响应能力,主要包括频率响应与时间响应等<sup>[19]</sup>关键参数。在爆炸冲击等极端条件下,传感器的动态特性直接决定系统的响应速度与实时测量能力。利用平面圆形薄板模型,可精确计算传感器膜片的谐振角频率<sup>[20]</sup>,从而分析其动态响应特征。

$$\omega_n = \sqrt{\frac{96\pi KN_c(r)}{6Z + 3m_e}} \quad (11)$$

其中, $Z$ 和  $m_e$  的公式表达如式(12)所示。

$$\begin{cases} Z = \pi\rho_a d \left( \frac{R^3}{10} \right) \\ m_e = 2\sqrt{a^3} \rho_k R^3 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\rho_a$ 为膜片密度, $\rho_k$ 为传感器工作环境下的密度; $m_e$ 为膜片等效共振质量, $\alpha$ 为常数  $1/3$ 。

为实现高频信号测量,一方面,应在保证结构强度的前提下尽可能减小腔体尺寸。另一方面,膜片厚度  $d$  增大时,其刚度提高,谐振角频率亦随之升高,从而拓宽传感器的有效测量带宽。

值得注意的是,传感器的谐振频率不仅由自身几何与材料参数决定,还受工作介质密度的影响。当传感器在水中工作时,由于水的密度远高于空气,其谐振频率将

明显降低;此外材料的弹性模量、密度及阻尼特性也会对谐振特性产生影响。因此,在传感器设计阶段,应综合考虑材料、介质及结构因素,以获得最优的动态响应性能。

对于典型二阶谐振系统,设阻尼系数为  $\xi_a$ , 则系统的上升时间可表示<sup>[21]</sup>为:

$$t_{r(10\% - 90\%)} = \frac{\pi - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \xi_a^2}}{\xi_a}}{\omega_n \sqrt{1 - \xi_a^2}} \quad (13)$$

由此可见,合理的阻尼设计能够在保证快速响应的同时抑制振荡,提高系统稳定性。通过优化膜片厚度、材料特性及腔体尺寸,可在响应速度与测量稳定性之间取得平衡。

### 1.3 三波长相位解调原理

当前 F-P 腔型光纤传感器的解调技术主要包括波长解调、强度解调与相位解调 3 种类型。综合分析三者特点及本文的实验需求,采用相位解调法最为合适。该方法通过检测干涉光信号的相位变化实现对腔长变化的反演,从而完成压力、位移等物理量的高精度测量。

相位解调技术可进一步分为移项解调法<sup>[22]</sup>、相位生成载波法(phase generated carrier, PGC)、路径匹配差分干涉法(phase modulation and demodulation interferometry, PMDI)及互相关法等。其中, Jia 等<sup>[23]</sup>于 2020 年提出的基于移项法的三波长无源解调技术,可实现任意腔长的非本征法布里-珀罗干涉(extrinsic Fabry-Perot interferometer, EFPI)传感器解调,具有高灵敏度、宽动态范围与高频率特性,为 F-P 传感解调研究提供了新的思路。然而该算法结构复杂,实时性有限,不适合超快瞬态压力测量场景。

针对上述不足,本文设计了一种基于“三波长激励与被动零差检测”的改进型相位解调技术。该方法利用 3 种不同波长的激光源进行激励,通过设置任意确定性相位间隔实现多通道相位调制,从而显著提升测量精度与系统稳定性。被动零差检测结构可有效提高共模噪声抑制能力与信号灵敏度,通过公式简化得到式(14)的结果,即:

$$I_\lambda = kI_s + V\cos\varphi \quad (14)$$

其中,  $k$  为端面平均反射率,  $I_s$  为输入光强,  $\varphi$  为 F-P 腔空腔相位,  $V$  为干涉条纹对比度。

当 3 束激励光源入射后,可以得到 3 束不同干涉输出,即:

$$\begin{cases} I_{\lambda_a} = kI_s + [1 + V\cos\varphi] \\ I_{\lambda_b} = kI_s + [1 + V\cos(\varphi + \Delta\varphi_1)] \\ I_{\lambda_c} = kI_s + [1 + V\cos(\varphi + \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)] \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $I_{\lambda_a}$ 、 $I_{\lambda_b}$ 、 $I_{\lambda_c}$  分别为 3 种不同光对应的中心波长;  $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$  分别为不同波长之间的相位差, 分别可表

示为:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = 4\pi L \left( \frac{1}{\lambda_a} - \frac{1}{\lambda_b} \right) \\ \Delta\varphi_2 = 4\pi L \left( \frac{1}{\lambda_b} - \frac{1}{\lambda_c} \right) \end{cases} \quad (16)$$

结合已知量与上述方程, 联立可求解出相位表达式(17), 即:

$$\Delta\varphi_n = \varphi_a[n] - \varphi \quad (17)$$

其中,  $Q_{-1}$  和端面平均反射率  $k$  可表示为:

$$Q_{-1} = 1 - Q \quad (18)$$

$$k = \frac{H(I_{\lambda_c} - UI_{\lambda_a}) + W(GI_{\lambda_a} - I_{\lambda_b})}{H(1 - U) + W(G - 1)} \quad (19)$$

其中, 相关参数分别为:

$$\begin{cases} G = \cos\Delta\varphi_1 \\ Q = \cos\Delta\varphi_2 \\ T = \sin\Delta\varphi_2 \\ H = \Delta\varphi_1 \\ U = \cos(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \\ W = \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \end{cases} \quad (20)$$

由理论分析可知, 为保证三波长相位解调与腔长调制的同步性, 3 束光的相位差应保持在  $0 \sim 2\pi$  范围且满足相互正交关系。计算结果表明, 当三波长之间的相位间隔设定为  $2/3\pi$  时, 可获得最优解调性能与最小相位误差。后续仿真表明, 传感器在腔长约  $24.97 \mu\text{m}$  时具备最佳干涉灵敏度, 因此实际制作中建议将 F-P 腔长控制在  $25 \mu\text{m}$  左右, 以平衡灵敏度与结构稳定性。

## 2 实验验证

### 2.1 F-P 腔膜片仿真

在传感器工作过程中, 膜片是直接感受外界压力的关键结构, 其受力形变量极微, 难以通过常规手段观测。为定量分析膜片的应力与应变分布, 本文采用 COMSOL Multiphysics 6.2 软件进行有限元仿真, 从而揭示膜片在不同厚度与载荷条件下的力学特性, 为后续厚度优化与封装结构设计提供理论依据。

模型设为直径  $125 \mu\text{m}$  的圆形薄膜结构, 并在膜片边缘施加固定约束以模拟实际封装状态。材料参数设定: 泊松比 0.17, 弹性模量  $79 \text{ GPa}$ , 密度  $2.3 \text{ g/cm}^3$ 。计算采用精细网格划分, 载荷条件为瞬态分布压力, 施加于膜片上表面以模拟冲击作用。

首先设置的是膜厚  $8 \mu\text{m}$ , 瞬态压力为  $60 \text{ MPa}$ , 从图 2 可知, 膜片的最大应力集中在边缘固定区域, 峰值约为  $4.44 \times 10^{12} \text{ MPa}$ 。应力分布呈现环形变化特征, 具有一定中心应力, 且沿径向向边缘逐渐增大。形变图呈现典

型的环形梯度变化特征,即边缘形变量较小,但至膜片中心形变量变大,虽对 F-P 腔长具有一定影响,但未超过材料最大变形限制,仍具有稳定性。

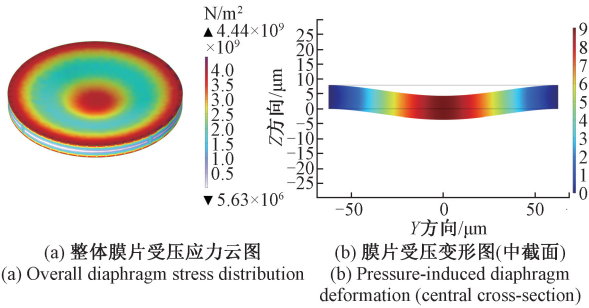


图 2 膜片受力应变云图

Fig. 2 Stress and strain contour map of diaphragm

为进一步探究规律,分别进行了不同情况下的仿真如图 3 所示。

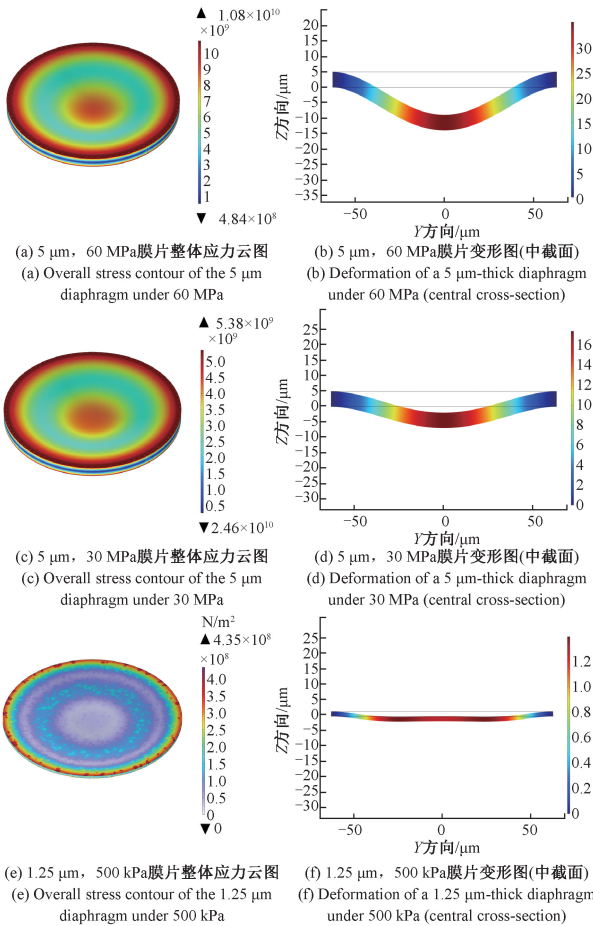


图 3 3 种不同情况膜片受力应变云图对比

Fig. 3 Comparison of stress-strain contour maps of the diaphragm under three different conditions

仿真结果显示,随着膜片厚度减小,结构的整体刚度

下降,应力水平略升高但形变量显著增大。这种形变增幅虽可提高灵敏度,却同时缩小了测量量程,不利于高压环境下的稳定测量。综合爆炸冲击波测量的实际应用场景与封装结构约束,适度减薄膜片厚度可实现更高的响应灵敏度。

当膜片厚度为 1.25  $\mu\text{m}$  时(见图 3(e)~(f)),形变量仍为膜厚的 1 倍左右,未发生塑性变形。动态仿真过程表明,该厚度下膜片对微小外界扰动极为敏感,可有效反映细微压力变化,显著提升了干涉信号的相位变化幅度与检测精度。仿真结果验证了薄膜设计在高灵敏度传感中的可行性,并为 F-P 腔及封装结构的后续优化提供了依据。

### 2.2 光纤 Fizeau 腔制作

本文研制的光纤 Fizeau 腔由 3 部分组成:直径为 125  $\mu\text{m}$  的 SMF、内径 75  $\mu\text{m}$ 、外径 125  $\mu\text{m}$  的 SCT 以及同直径的 CLF。其中 SMF 用作光信号传输端,SCT 构成传感腔主体,CLF 作为压力敏感反射膜,其厚度决定传感器的灵敏度与量程。所有部件均采用日本古机电公司生产的高精度光纤熔接机进行连接,其制作流程如图 4 所示。

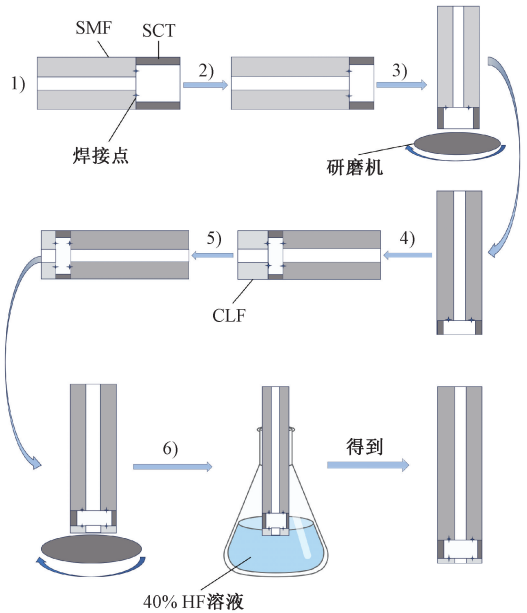


图 4 Fizeau 腔制作流程

Fig. 4 Fizeau cavity fabrication process

Fizeau 腔的制作流程为:

1) 选取约 1 m、表面完好的 SMF,去除两端涂覆层并切割平整。一端与空接跳线熔接以连接 AQ6370B 光谱仪,另一端与长度约 7 mm 的 SCT 进行高温熔接,确保光学对准良好。

2) 将熔接后的 SMF-SCT 组件在 JSZ6 体视显微镜辅助下进行机械切割,将 SCT 长度控制在约 30  $\mu\text{m}$ 。

3) 对切割后的组件进行研磨, 使用  $1\ \mu\text{m}$  研磨纸将 SCT 段减薄至约  $25\ \mu\text{m}$ , 随后经异丙醇超声清洗并干燥。

4) 将 SCT 与 CLF 熔接, 并在不破坏腔体结构的前提下切割 CLF 端面, 获得初步的 F-P 腔探头。

5) 进一步研磨 F-P 腔探头, 将 CLF 总长度控制在约  $10\ \mu\text{m}$ , 并保证端面平整。

6) 将探头置于 40% HF 溶液中腐蚀, 使 CLF 膜片厚度控制在  $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。

需要注意的是, 除显微镜测量外, 还需要利用光谱仪进行辅助验证。通过分析光谱平滑度评估端面质量, 并利用拟合干涉条纹确定腔长与 CLF 厚度, 确保尺寸精度。

当 CLF 长度减短到一定长度时, 利用研磨等物理方法就极易使腔体受到损坏, 于是便利用一定浓度 HF 溶液进行化学腐蚀来减小膜片厚度, 通过自制探测器与多种实验仪器组合制作膜片腐蚀光路系统进行监测, 具体布局如图 5 所示。

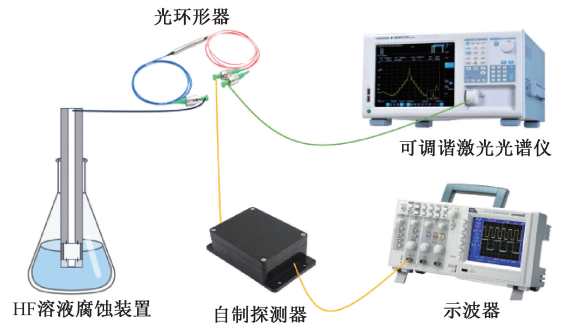


图 5 膜片腐蚀光路监测

Fig. 5 Monitoring of membrane corrosion optical path

通过光电探测器监测膜片腐蚀速率与厚度变化关系。示波器采样时间间隔设为  $10\ \text{s}$ , HF 溶液浓度 40%, 实验环境为  $25^\circ\text{C}$  室温、标准大气压及无振动条件下进行。

相关的监测数据如图 6 所示。

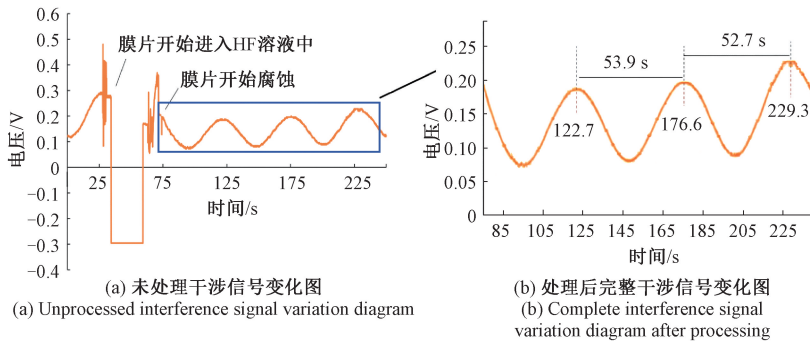


图 6 膜片腐蚀过程干涉信号变化

Fig. 6 Changes in interference signals during the membrane corrosion process

从图 6 中可以看出膜片的腐蚀效率基本呈现周期变化, 平均两个干涉峰间隔为  $53.3\ \text{s}$ , 一个干涉条纹对应的腐蚀效率可以表示为:

$$L = \frac{\lambda}{2n} \tag{21}$$

根据输入光源中心波长  $\lambda$  与 SCT 的材料折射率  $n$ , 可计算膜片的腐蚀速率约为  $1.5\ \mu\text{m}/\text{min}$ 。由此可预测所需总腐蚀时间, 并在预定时刻利用高倍显微镜进一步确认膜厚与膜面完整性。

针对爆炸环境需求, 设计了一种陶瓷-金属复合封装结构。该结构采用 LC 型单模陶瓷插芯(内径  $127\ \mu\text{m}$ 、外径  $1.25\ \text{mm}$ )作为光纤固定与传输界面, 并结合不锈钢基座、封装探针、保护松套管及金属波纹管, 实现整体密封与机械防护。陶瓷插芯与不锈钢基座通过 353ND 光纤胶粘接, 不锈钢基座与封装探针采用螺纹连接。最后封装的传感器实物图如图 7 所示。

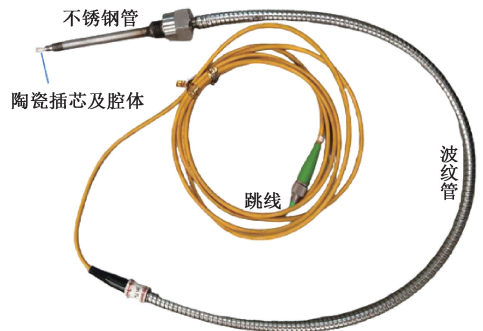


图 7 封装完成后的传感器实物图

Fig. 7 Photograph of the fully packaged sensor

### 2.3 传感器性能测试

为验证所研制光纤 Fizeau 腔传感器的综合性能, 封装完成后对其静态与动态特性进行了系统测试。静态实验用于评估灵敏度、线性度、重复性及测量量程等指标;

动态实验则重点考察响应时间、频率响应和抗冲击能力。通过两类实验的对比分析,可全面表征传感器在稳态和瞬态压力条件下的性能。

1) 静态测试标定

静态压力标定实验采用自制的三波长相位解调系统,并利用活塞式油压标定仪加载压力,传感器探测端固定于标定仪出油口处。为防止油体泄漏并提高重复性,设计并安装了一套专用密封装置,确保系统气密性与稳定性,其安装结构如图8所示。

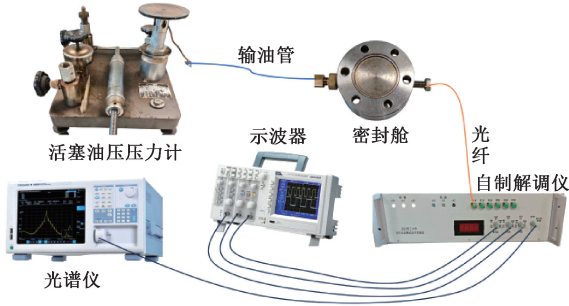


图8 传感器密封安装检测

Fig. 8 Sensor seal installation inspection

标定过程遵循JJG860-2015《压力传感器(静态)》国家计量检定规程<sup>[24]</sup>。每个传感器进行6次重复校准,对于精度优于0.05的样品,在量程范围内设置9个标定点(含零点)。为覆盖不同测量范围,实验采用两种标准设备:YU-60A型(0~6 MPa)与YS-600C型(0~60 MPa)活塞式压力计,分别测量低量程与高量程传感器。

共测试8类不同量程的传感器,覆盖0~60 MPa到0~0.5 MPa范围。随着量程减小,传感器的静态灵敏度逐步提高。由于光纤接口处存在插入损耗,且不同波长在光纤传输中的衰减差异较大,3种波长对应的光强峰值存在一定差别。以量程为0~24 MPa的传感器为例,其三通道光强差异如图9所示。

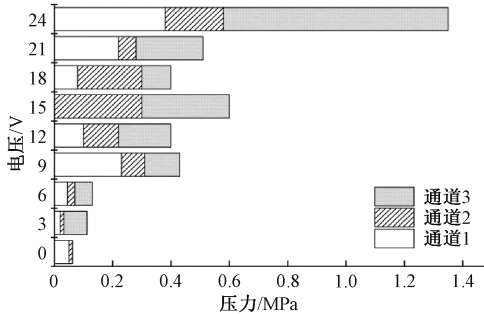


图9 正逆程平均电压值之差

Fig. 9 Difference in average voltage values between forward and reverse travel

在相同实验条件下,受砝码加载与卸载过程中等不确定因素的影响,同一传感器在同一次压力标定试验中,其正向与反向加载过程所对应的输出光强仍存在差异。上述条形图长度越大,表明正逆程光强偏差越显著,难以满足三波长相位解调的基本条件。因此,有必要对传感器3个通道的电压信号进行归一化处理,以保证解调结果的有效性与一致性。经过归一化处理后的三通道电压值如图10所示。

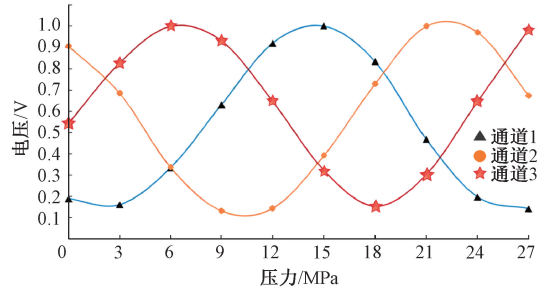


图10 三波长通道归一化后电压输出

Fig. 10 Normalized output voltages of the three wavelength channels

经归一化处理后的三通道峰值电压基本相同,在数据采集过程中,对3个通道信号进行同步获取,并将所采集的数据代入解调原理的基本公式进行计算,从而得到如标定结果,如图11所示。

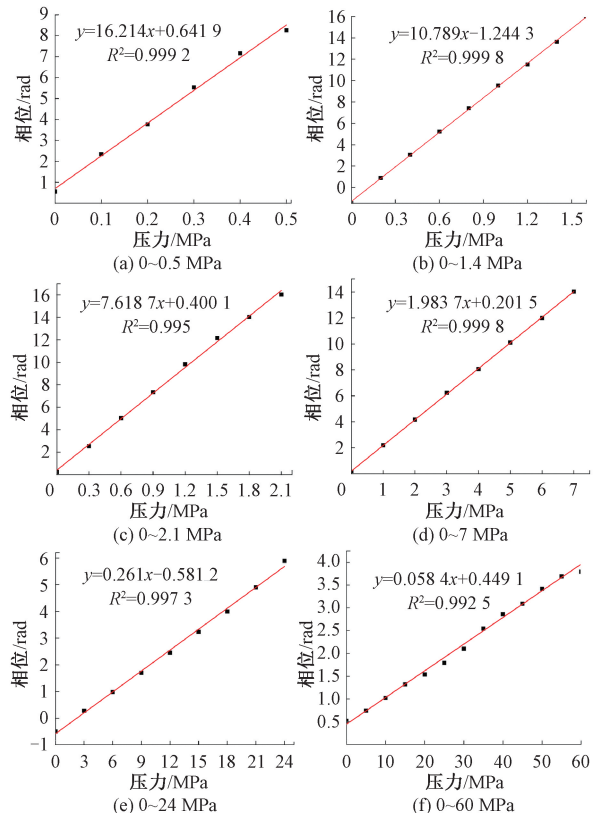


图11 各传感器静态压力标定结果

Fig. 11 Static pressure calibration results of each sensor

通过对数据的进一步处理,得到各个传感器静态标定数据如表 1 所示。

表 1 各传感器静态标定数据

Table 1 Static calibration data of each sensor

量程/MPa	迟滞性/%	重复性/%	线性度/%	灵敏度比
0~0.5	2.36	2.76	1.09	0.997
0~1.4	1.75	3.12	0.47	0.991
0~2.1	2.53	1.25	0.75	0.983
0~7.0	2.91	2.93	0.32	0.996
0~24.0	3.15	2.45	1.55	0.987
0~60.0	0.24	1.19	2.23	0.948

可以看出,不同量程的传感器均表现出良好的线性度与重复性。其非线性误差与理论计算结果基本一致,说明所制备传感器在量程范围内具备稳定的光学响应,干涉相位变化与外加压力呈近似线性关系。

## 2) 动态测试标定

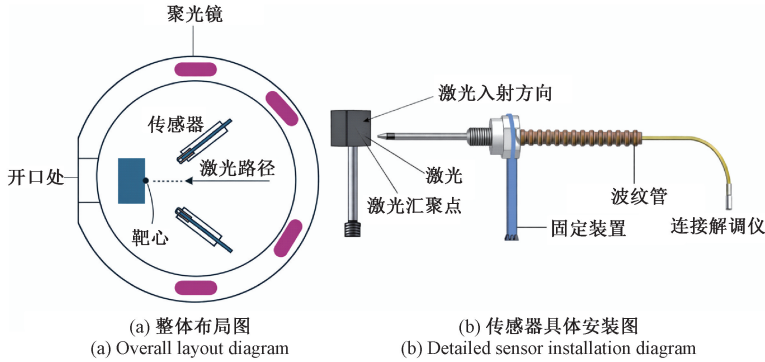


图 12 激光诱导爆炸冲击波压力探测装置布局

Fig. 12 Layout of laser-induced explosion shock wave pressure detection device

实验采样频率设为 20 MHz,两只光纤传感器对称安装形成对照。当冲击波传播至传感器端面时,传感器将压力信号转换为光学干涉信号并实时解调。采集系统同步记录电压变化并生成压力-时间曲线。通过调整传感器与靶面之间的距离,可对不同传播条件下测量性能的变化进行分析。

采集数据之后,利用 LabVIEW 2023 编写的程序进行数据分析,本文的光电探测器中三路光信号互相正交,基于正交的光信号相位提取方法如式(22)<sup>[27]</sup>所示。

$$\varphi = \arctan\left(\frac{S}{C}\right) + k\pi, \quad k \in Z \quad (22)$$

当真实相位跨越  $\pi/2$  时,原始解调值将会突变,跳变区域对量化噪声敏感度提升 3~5 倍,因此当相位值在边

界时,需要对解调相位进行补偿,即进行  $\pm\pi$  的相位调整,即:

在本文传感器动态实验标定中,主要性能指标是响应时间( $T_{90}$ ),即指在稳态电压的基础上,初始信号值上升到最终值的 90% 所需要的时间。 $T_{90}$  反映了传感器对输入信号的响应速度,在同一输入信号下, $T_{90}$  越小则表明探测器响应越快,对外界环境的变化感知更快,表明传感器系统性能更好。本文的光电传感采用了差分输出,可显著降低噪声水平并提高响应时间。

通过示波器监测得到光电探测器的稳定电压为 8 V,通道一达到稳定电压的 90% 时间为 22 ns,对其他两通道进行数据测量,上升时间也为 22 ns。通过计算可以得到传感器的响应时间基本在 40 ns 内,相对于目前主流传感器系统的响应时间提升了 20 倍左右,表明系统具有极快的瞬态响应能力。

本文采用北京航天计量测试技术研究所研制的激波管动态压力标准装置进行测试,该装置代表了国防领域的最高标准。依据《JJG 624-2005 动态压力传感器检定规程》<sup>[25]</sup>和《GB/T 15478-2015 压力传感器性能试验方法》<sup>[26]</sup>等相关标准进行测试。图 12 展示了激光诱导爆炸冲击波压力探测实验装置的布局。

补偿后,相位值均在反正切函数取值范围内,不会出现跳变现象。

$$\begin{cases} \varphi_r = \varphi_a + k\pi, & k \in Z \\ \Delta\varphi_n = \varphi_a[n] - \varphi_a[n-1] \end{cases} \quad (23)$$

实验时室内温度为 10℃,标准大气压,首先安装两个量程为 60 MPa 传感器,激光触发能量为 15 J,面对冲击波的压力探测反应时间实验结果如图 13 所示。

如图 13 所示,CH1、CH2、CH3 这 3 个通道的压力突变初始时间均约为 2  $\mu$ s,这表明光电探测器将光信号转换为电信号的起始时间约为 2  $\mu$ s。CH4 作为参考电压值,形成对照并未直接参与探测过程。整个数据

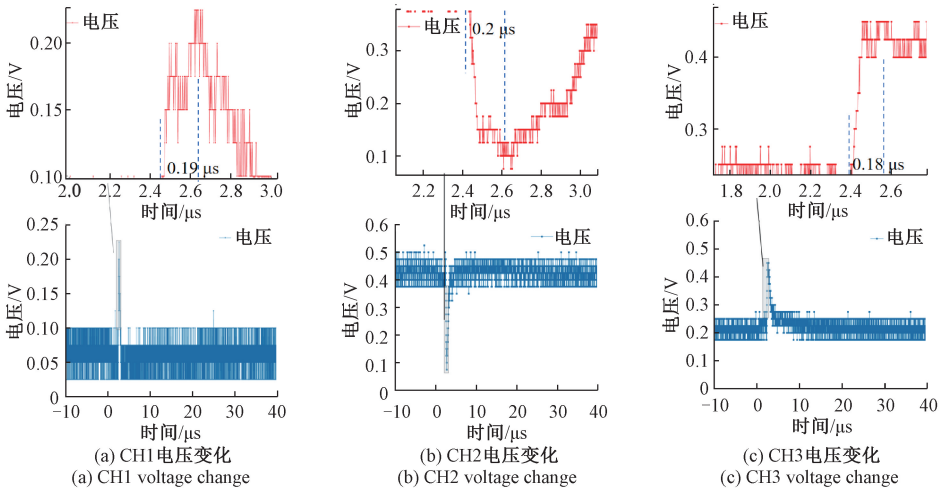


图 13 三通道压力探测反应时间

Fig. 13 Response time of the three-channel pressure sensor

采集系统具有高灵敏度,能够及时捕捉传感器的高频响应。

经过数据解调后,两侧的传感器探测结果见图 14,从图 14 中可以看出,两侧对压力的感知时间均在 2 μs 级别,大约在 2.1 μs 左右,这表明两个传感器具备较高的灵敏度和快速的响应能力。

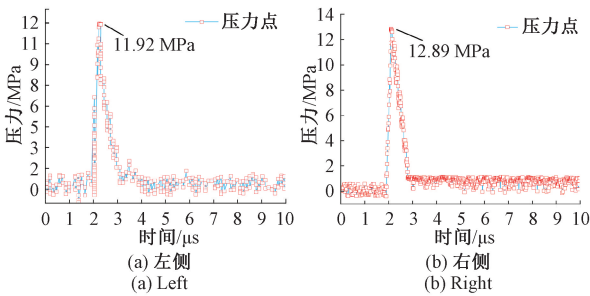


图 14 两侧传感器探测对比

Fig. 14 Comparison of detection by sensors on both sides

左侧传感器探测到的瞬态峰值压力为 11.92 MPa,而右侧为 12.89 MPa,两者测量结果相差 0.97 MPa。这种差异可能源于多种因素,包括固定传感器的夹具在短时间冲击下发生偏移、电离的金属块表面不平整以及安装过程中未能严格对称等。

在实验中还对 0~24 MPa 和 0~16 MPa 量程的传感器进行了测量定标如图 15 所示。

综合上述实验结果得到各个传感器动态实验数据如表 2 所示。

为进一步验证和比较传感器性能,将本文传感器与国内外典型 F-P 腔压力传感器进行了对比,结果如表 3 所示。

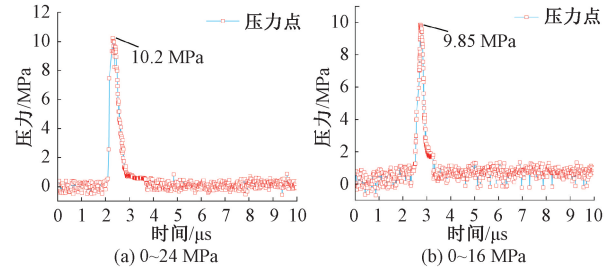


图 15 两传感器标定数据

Fig. 15 Calibration data of two sensors

表 2 传感器动态性能指标

Table 2 Sensor dynamic performance indicators

量程/MPa	灵敏度/(nm·MPa <sup>-1</sup> )	响应频率/MHz	膜片厚度/μm
0~0.5	2 005.57	3.89	1.26
0~7.0	245.65	7.79	2.56
0~24.0	33.29	15.49	4.79
0~60.0	7.835	24.35	8.25

表 3 性能及应用场景对比

Table 3 Comparison of performance and application scenarios

传感器	量程/MPa	灵敏度	膜厚/μm	场景应用
A	0~1.00	1.59 μm/MPa	145	大气压
B	0~0.20	2.91 nm/kPa	30	爆炸冲击
C	0~0.05	18.5 nm/kPa	4	医疗
D	0~0.04	154 nm/kPa	5~20	医疗
本文	0~60 不等	7.835~ 2 005.57 nm/kPa	1.257~8.25	爆炸冲击

其中,A 是一种基于 MEMS 技术的高精度压力传感器<sup>[28]</sup>,灵敏度高但量程较小,且测量的为稳态压力,无法适用于高速与瞬态情况;B 所设计的传感器灵敏度<sup>[29]</sup>进一步提升,但对于频率响应远低于本文所设计的传感器;C 中介绍了灵敏度较高的传感器<sup>[30]</sup>,但对于响应频率却未知。D 中介绍了微型传感器<sup>[31]</sup>,但其超弹性体膜及结构封装难度高。对比结果表明,本文传感器兼具高灵敏度、宽量程和高频响特性,结构紧凑、抗干扰性能优越。经静态与动态试验证实,其在强电磁及高冲击环境下均能稳定工作,具有良好的工程应用前景。

## 2.4 传感器场景应用效果

为进一步验证该类传感器在不同环境中的适用性,结合其静态和动态性能指标,对爆炸冲击、高能激光加载等典型应用场景进行工程分析,评估在实际测试条件下的表现和优势。

1) 军工或安全试验中爆炸冲击波测量:爆炸冲击试验主要用于获取爆炸威力及冲击波传播特性的高时间分辨率压力信息。所设计传感器动态响应时间 $<50$  ns,能够准确捕捉冲击波上升沿及峰值细节,为爆炸参数反演和防护性能评估提供可靠数据支持。同时,其宽频带特性和良好的一致性有助于提高波形重构精度;光纤传感方式具备优异的抗电磁干扰能力,可有效降低测试与信号处理复杂度。

2) 高功率激光或等离子体冲击试验:在高功率激光或等离子体加载条件下,材料表面会产生快速蒸发和膨胀,引发强瞬态压力波。该传感器具备的高频响应能力可真实表征压力的快速变化过程,避免因响应滞后造成峰值信息丢失;同时,光纤传输有效抑制电磁耦合干扰,显著提升系统稳定性与测试安全性,从而提高实验成功率和数据可靠性。

3) 结构抗爆或安全防护材料测试:在结构抗爆及防护材料性能评估中,需要获取完整且精细的压力—时间响应曲线。该传感器的超快响应特性可实现对冲击全过程的高保真记录,清晰区分不同阶段的压力演化规律;此外,其体积小、易布设,适合多点同步测量与空间分布分析,为结构响应机理研究提供有效支撑。

## 3 结 论

本研究详细阐述了一种光纤压力传感器的设计与制备流程。该传感器利用直径仅  $125\ \mu\text{m}$  的全石英光纤 Fizeau 腔,实现了近似理想正弦波形的双光束干涉输出。通过实施“三波长光源激励、任意确定性相位间隔、被动零差解调技术”实现了高频响动态压力测试。测试结果表明:

1) 得益于光纤端头 Fizeau 腔的特殊制作工艺,压力

敏感有效直径仅为  $61\ \mu\text{m}$ ,压力敏感薄板厚度在  $10\ \mu\text{m}$  范围内。该制作工艺的特殊性赋予了传感器微小的尺寸效应,从而具备极高的谐振频率,对极快的响应速度和极宽的响应带宽。

2) 静态标定表明,传感器在  $0\sim 60$  MPa 量程范围的线性度优于  $2.23\%$ ,重复性优于  $2\%$ ,回程误差 $<0.1\%$ 。动态实验中,当光电探测器响应时间为  $8\ \text{ns}$ 、谐振频率为  $20\ \text{MHz}$  时,传感器系统的动态响应时间 $<50\ \text{ns}$ ,具有优异的瞬态测量能力。

3) 良好的静动态性能数据可以适应于爆炸冲击、高频响应等高压恶劣环境,尤其是在部分军工测试领域具有良好效果。

当前制备工艺仍存在精度限制,难以保证两个传感器静态与动态特性完全一致。后续研究可通过在膜片表面沉积反射增强层或采用复合功能材料,进一步提高灵敏度与稳定性,实现“大量程—高灵敏度”兼顾的测量目标。

## 参考文献

- [1] 谢林,刘迎彬,范志强,等.基于复合压电效应的 PVDF 传感器测量性能调控[J].高压物理学报,2023,37(4):37-46.  
XIE L, LIU Y B, FAN ZH Q, et al. Measurement performance regulation of PVDF sensor based on composite piezoelectricity[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(4): 37-46.
- [2] HEGDE G, MONDAL S K, HEGDE G K, et al. Blast wave pressure measurement and analysis in air and granular media inside a shock tube using a fiber bragg grating sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(4): 045003.
- [3] 周会娟,余尚江,陈晋央,等.一种双面感压式光纤土压力传感器[J].兵工学报,2023,44(S1):132-137.  
ZHOU H J, YU SH J, CHEN J Y, et al. A double-sided pressure-sensitive optical fiber earth pressure sensor[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(S1): 132-137.
- [4] 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):167-171,185.  
ZHOU X J, LEI CH, LIANG T, et al. Study on dynamic performance of high-frequency-response MEMS pressure sensor[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 167-171,185.
- [5] 王桂从,孟令源,李映君,等.高频动态压电式压力传感器结构与实验研究[J].西安交通大学学报,2024,58(6):203-214.  
WANG G C, MENG L Y, LI Y J, et al. Structural

- design and experimental study of high-frequency dynamic piezoelectric pressure sensor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(6): 203-214.
- [ 6 ] ROSSI B, CUTOLO M A, GIAQUINTO M, et al. Curved Fabry-Pérot ultrasound detectors: Optical and mechanical analysis[J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 10-14.
- [ 7 ] 柯特, 李大鹏, 黄清, 等. 光纤传感技术在爆炸物检测中的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2025, 62(13): 248-263.
- KE T, LI D P, HUANG Q, et al. Research progress of optical fiber sensing technology in explosive detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2025, 62(13): 248-263.
- [ 8 ] SUN J Y, YAN L, JIANG C L, et al. Highly sensitive Fabry-Perot acoustic sensor based on optic fiber spherical end surface[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 80: 103440.
- [ 9 ] TANG M L, WU Y, WANG Y Q. Optical fiber magnetic field sensor based on Fabry-Perot interferometer and magnetostrictive effect [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(7): 1175.
- [ 10 ] 郑志霞, 黄元庆. 基于 F-P 腔干涉的膜片式光纤微机电系统压力传感器[J]. *光子学报*, 2012(12): 1488-1492.
- ZHENG ZH X, HUANG Y Q. Membrane-type fiber optic MEMS pressure sensor based on F-P cavity interference[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012(12): 1488-1492.
- [ 11 ] MHISSI M, TONG X L, ZHANG C, et al. Study on the vibration performances for a high temperature fiber F-P accelerometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62(24): 102471.
- [ 12 ] GUO F W, FINK T, HAN M, et al. High-sensitivity, high-frequency extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-tip sensor based on a thin silver diaphragm[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 1505-1507.
- [ 13 ] CHU CH L, WANG J J, QIU J Y. Miniature high-frequency response, high-pressure-range dynamic pressure sensor based on all-silica optical fiber Fabry-Perot cavity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(12): 13296-13304.
- [ 14 ] 殷建雄, 王军, 王昊星, 等. 用于冲击波测量的硅 MEMS 光纤法珀压力传感器[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(3): 452-459.
- YIN J X, WANG J, WANG H X, et al. Silicon MEMS fiber-optic Fabry-Pérot pressure sensor for shock wave measurement[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(3): 452-459.
- [ 15 ] 刘明尧, 卢一帆, 张志建, 等. 基于聚合物封装的光纤布拉格光栅压力传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(10): 2392-2398.
- LIU M Y, LU Y F, ZHANG ZH J, et al. FBG pressure sensor based on polymer packaging[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(10): 2392-2398.
- [ 16 ] LUO ZH H, DING SH, TAN CH, et al. Low-frequency fiber optic hydrophone based on ultra-weak fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(11): 11635-11641.
- [ 17 ] ZHANG Y N, YUAN L, LAN X W, et al. High temperature fiber-optic Fabry-Pérot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4609-4612.
- [ 18 ] 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): 222-230.
- WANG J J, LIU J, FU ZH Y, et al. Ultrafine all-quartz fiber fizeau cavity underwater shock wave pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 222-230.
- [ 19 ] 何祖源, 刘庆文. 光纤分布式声波传感器原理与应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 11-25.
- HE Z Y, LIU Q W. Principles and applications of fiber-optic distributed acoustic sensors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 11-25.
- [ 20 ] JENTZSCH M, LECHNER W, WOSZODLO R, et al. The dynamic response of a pressure transducer for measurements in water [J]. *Experiments in Fluids*, 2024, 65(8): 125.
- [ 21 ] RÎMBU G A, PÎSLARU-DĂNESCU L, ZĂRNESCU G C, et al. Electrochemical sensor for hydrogen leakage detection at room temperature [J]. *Sensors*, 2025, 25(1): 264.
- [ 22 ] 张树桓. 光纤激光干涉测量技术在 EFPI 传感器信号解调中的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 244-256.
- ZHANG SH H. Research progress of fiber optic laser interferometry technology in EFPI sensor signal demodulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 244-256.
- [ 23 ] JIA J SH, JIANG Y, CUI Y. Phase demodulator for the measurement of extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors with arbitrary initial cavity length [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(7): 3621-3626.
- [ 24 ] 国家计量检定规程. JJG 860-2015 压力传感器(静态)检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- National Metrological Verification Regulation. JJG 860-2015 verification regulation of pressure transducer

- (static) [S]. Beijing: China Quality and Inspection Press, 2015.
- [25] 国家计量检定规程. JJG 624-2005 动态压力传感器检定规程[S]. 北京:中国计量出版社, 2005.  
National Metrological Verification Regulation. JJG 624-2005 verification regulation of dynamic pressure transducer[S]. Beijing: China Metrology Press, 2005.
- [26] 中国机械工业联合会. GB/T 15478-2015 压力传感器性能试验方法[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会, 2015.  
China Machinery Industry Federation. GB/T 15478-2015 Test methods of the performances for pressure transducer/sensor[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2015.
- [27] ZHENG J J, LI W, LIU X Y. Fast and simple interrogation of extrinsic Fabry-Perot interferometer sensor based on dual wavelength intensity ratio [J]. Optics Communications, 2019, 439: 176-180.
- [28] MA W Y, JIANG Y, HU J, et al. Microelectromechanical system-based, high-finesse, optical fiber Fabry-Perot interferometric pressure sensors [J]. Sensors and Actuators A. Physical, 2020, 302: 111795.
- [29] 张慧君. 膜片式光纤动态压力传感器的研制[J]. 计测技术, 2022, 42(3):30-35.  
ZHANG H J. Development of a diaphragm-type fiber optic dynamic pressure sensor[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(3):30-35.
- [30] LI H, LUO X J, ZHANG H Y, et al. All-Silica diaphragm-based optical fiber fabry-perot pressure sensor fabricated by CO2 laser melting capillary end face[J]. Optik, 2023, 287: 170994.
- [31] 向柳静,姜昌兴,刘显明,等. 基于超弹性体材料的微型光纤法珀压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12):66-75.  
XIANG L J, JIANG CH X, LIU X M, et al. Miniature fiber optic Fabry-Perot pressure sensor based on superelastic material [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 66-75.

### 作者简介



贺达,2024年于湖北工业大学获得学士学位,现为武汉理工大学机电工程学院硕士研究生,主要研究方向为光纤传感器、光纤动态测试技术等。

E-mail:heda@whut.edu.cn

**He Da** received his B.Sc. degree from Hubei University of Technology in 2024. He is currently a master's student at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology. His main research interests include dynamic testing, fiber optic sensors, etc.



王俊杰(通信作者),2001年于北京理工大学获得机械电子工程博士学位,现为武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心教授,主要研究方向为光纤传感器、光机电一体化技术、光纤动态测试技术等。

E-mail:wangjj@whut.edu.cn

**Wang Junjie** (Corresponding author) received his Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2001. He is currently a professor in National Engineering Research Center for Optical Fiber Sensing and Network at Wuhan University of Technology. His main research interests include fiber optic sensors, opto mechatronics integration technology, fiber optic dynamic testing technology, etc.