

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107869

# 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<sup>\*</sup>

姜昌兴<sup>1,2</sup>, 宋超鑫<sup>1,2</sup>, 雷小华<sup>1,2</sup>, 刘显明<sup>1,2</sup>, 章 鹏<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学光电工程学院 重庆 400044; 2. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

**摘要:**航空发动机内流场多方向压力测量可为航空发动机压缩比计算提供重要的数据支撑。本文针对现有多孔探针结合电类压力测量法存在迟滞且测量精度低的问题;结合多孔探针和光纤传感技术优势,设计了一种适用于航空发动机内流多方向压力测试的一体化探针。分析了一体化探针的多方向压力传导与压力测量原理,采用FLUENT软件对多方向气流传导性能进行分析并优化多孔气流传导结构参数;研制了5孔一体化光纤探针并开展了压力测试实验。结果表明:在0.7~1.6 MPa压力范围内,一体化探针各方向压力传感器的平均灵敏度为-16.267  $\mu\text{m}/\text{MPa}$ ,重复性误差小于2.98%,各传感器压力测量最大误差小于1.72%。

**关键词:**一体化探针;光纤法-珀传感器;多方向压力;航空发动机内流

中图分类号: TH4 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.1040

## Study on the multi-direction pressure measurement technology of aero engine internal flow based on an integrated probe

Jiang Changxing<sup>1,2</sup>, Song Chaoxin<sup>1,2</sup>, Lei Xiaohua<sup>1,2</sup>, Liu Xianming<sup>1,2</sup>, Zhang Peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Multi-direction pressure measurement in aero-engine inner flow field can provide important data support for aero-engine compression ratio calculation. In this paper, aiming at the problem that the existing porous probe combining with electrical pressure measurement method has the disadvantages of hysteresis and low measurement accuracy. Combining with the advantages of porous probe and optical fiber sensing technology, an integrated optical fiber probe for multi-direction pressure measurement of aero-engine internal flow is designed. The principle of multi-direction pressure conduction and pressure measurement of integrated probe is analyzed. FLUENT software is used to analyze the multi-direction airflow conduction performance and optimize the structural parameters of porous airflow conduction. A 5-hole integrated optical fiber probe was developed and the pressure measurement experiment was carried out. The results show that the average sensitivity of the multi-direction pressure sensors of the integrated probe is -16.267  $\mu\text{m}/\text{MPa}$  and the repeatability error is less than 2.98% in the pressure range of 0.7~1.6 MPa. The maximum error of pressure measurement of various sensors is less than 1.72%.

**Keywords:** integrated probe; optical fiber Fabry-Perot sensor; multi-directional pressure; aero-engine inner flow

## 0 引言

风扇/压气机组成的压缩系统是航空发动机三大部件之一,其压缩性能直接决定了航空发动机整机性能。

效率是压缩系统设计研发和应用控制的最重要性能指标,而压比是计算效率的主要参数之一。当发动机处于过渡状态或者紧急状态时,主流参数和二次流参数很不稳定,空气系统内部会经历复杂瞬变流动过程。对压气机空气内流瞬变过程的压力进行高速动态准确测试,即

收稿日期:2021-04-30 Received Date: 2021-04-30

\*基金项目:国家自然科学基金(51675068,51975077)项目资助

进口气流多方向动态压力畸变,及其在后续各级压气机中的发展情况,是准确把握压缩系统在各种畸变条件下气动稳定性的基础,可为压缩系统设计提供直接试验数据支持和迭代优化设计依据,是先进航空发动机研制的关键技术<sup>[1-2]</sup>。

要在高温高速气流冲击环境下进行多方向动态压力测试,传感器需满足小体积、高强度、高响应(10~30 kHz)、耐高温(风扇/压气机250℃)、高精度(0.4%)、压力测量范围0.8~1.5 MPa等要求。目前主要采用传统电类压力传感器进行测试,由于不耐高温,且抗振性差,不得不采用多孔探针连接引压管,将压力远程引出再测试的方式进行<sup>[3]</sup>,这将导致压力损失及信息延时,难以保障实时性,对试验结果评估准确性造成不利影响,成为制约风扇/压气机空气系统流动特性测试的瓶颈问题之一。

对比现有的电学传感方法,光纤法珀传感器凭借体积小、不受电磁干扰、耐高温等优点,逐步被应用到航空等领域<sup>[4]</sup>。美国Luna公司、弗吉尼亚理工大学、英国Oxsensis公司等开展了深入研究与应用实验。其中,Luna公司于2002年报道了对光纤法珀压力传感器在航空发动机以及高速燃烧室中的相关应用,并将传感器放置在超声速风扇下进行测试,测试结果表明该传感器的量程为0~750 psi,响应频率大于150 kHz,常温下满量程的精度达到1%<sup>[5]</sup>。英国Oxsensis公司研发出了使用蓝宝石制作的高温光纤法珀压力传感器,该传感器可安装在燃气轮机中燃烧室,其他零部件通过蓝宝石管远离燃烧区,温度降低。该传感器的长期工作温度达到650℃,短期工作温度可达1 000℃<sup>[6]</sup>。国内,天津大学、北航、北理工、电子科技大学、武汉理工、中北大学、北京自动化控制研究所<sup>[7-12]</sup>等单位也开展了相关研究。其中,中北大学设计碳化硅光纤法珀压力传感器,其压力范围可达0~800 kPa,灵敏度为918 nm/MPa,传感器迟滞小于0.2%,非线性误差小于0.37%,耐受温度可达500℃<sup>[13]</sup>。国内外研究现状表明,光纤法珀压力传感器的耐温性、灵敏度等已经远优于电类压力传感器。但仅限于单方向压力测试,不能满足多方向压力的监测需求。

为此,本文结合多孔探针和光纤传感技术优势,将耐高温光纤法珀传感器阵列集成到多孔探针前端,设计一种一体化探针,分析一体化探针的多方向压力传导与压力测量原理,分析对多方向气流传导性能并优化多孔气流传导结构;进而开展实验对传感器性能进行验证。该探针方案可能成为航空发动机内流多方向压力测量在高温区段的有效补充方法。

## 1 一体化探针结构

根据多孔探针的导流特性,结合光纤传感技术体积小的特点,设计一体化探针<sup>[14]</sup>结构如图1。一体化探针由气流传导单元和压力传感单元组成。气流传导单元头部为锥形结构并开有多个气孔,用于气流传导。压力传感单元由开有多孔的基座和压力膜片构成。5个光纤端面与膜片共同构成光纤法珀传感器阵列,实现由气孔导入的气流压力探测。为方便静压测试安装,基座设计了螺纹和外六角。

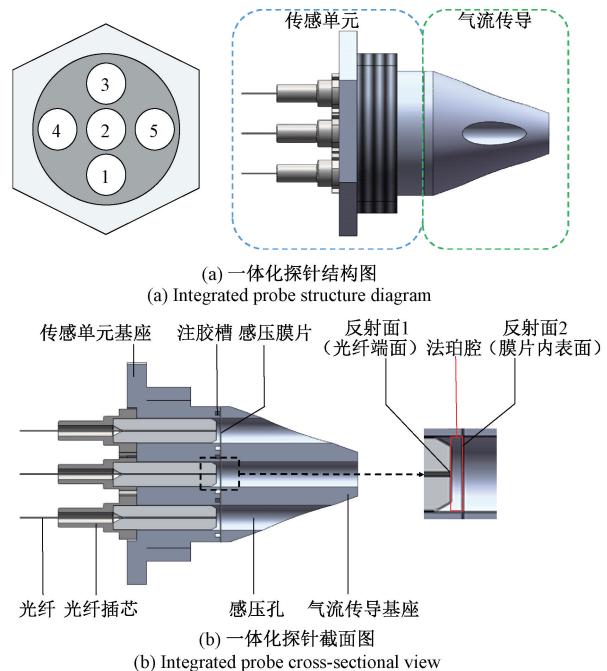


图1 一体化探针  
(a) Integrated probe structure diagram  
(b) Integrated probe cross-sectional view

图1 一体化探针

Fig. 1 Integrated probe

## 2 一体化探针的压力测量原理

一体化探针的压力测量主要由传感单元多个光纤法珀压力传感器组成的传感阵列实现。每一个法珀传感器对应一个感压气孔,负责一个方向的气流压力测量。如图2所示,当外界气压通过气流传导单元传输至膜片时,各个法珀腔对应膜片发生形变,导致光纤压力传感器中法珀腔长随之变化,通过干涉光谱解调腔长变化,即可得到压力信息。

取单个法珀传感器,分析其腔长变化与压力传感原理关系,如图3所示。在压力作用下,膜片感受压力,发生向下挠度形变 $y$ ,使得法珀腔的腔长发生改变,进而导致输出干涉光谱信号发生变化。通过解调光谱信号,便能解调出腔长变化量<sup>[15]</sup>。该腔长变化量与感压膜片的

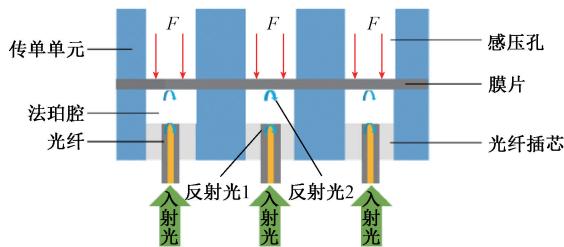


图2 光纤法珀压力传感阵列

Fig. 2 Fiber optical Fabry-Perot pressure sensor array

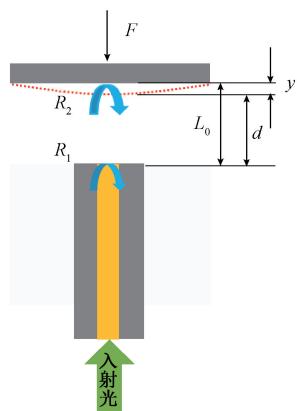


图3 光纤法珀压力传感器传感原理

Fig. 3 Sensing principle of fiber optical Fabry-Perot pressure sensor

挠度存在对应关系,从而可建立法珀腔变化量和压力的关系。

感压膜片的挠度形变与压力关系<sup>[16]</sup>为:

$$y = \frac{3(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3}F \quad (1)$$

式中:  $E$  为感压膜片的弹性模量;  $\mu$  为膜片泊松比;  $h$  为膜片厚度;  $r$  为膜片半径;  $F$  为外界压力。

光纤法珀传感器输出信号与膜片挠度关系为:

$$I_{out}(L(x,y), \lambda) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \cdot \frac{4\pi L(x,y)}{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{\lambda}{\lambda}} \cdot \frac{4\pi L(x,y)}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{\lambda}{\lambda}} \cdot I_0(\lambda) d\lambda dx dy \quad (2)$$

式中:  $L(x,y)$  表示法珀腔长变化,为初始腔长  $L_0$  与膜片挠度变量  $y$  之差。 $R_1$  和  $R_2$  分别为光纤端面和膜片内表面的反射率,  $\lambda$  为入射光波长。

### 3 一体化探针气流传导结构参数优化设计

光纤法珀压力传感器的压力测量取决于气流传导单元对发动机内流的准确传导。根据文献[17]可知,一体

化探针气流传导单元的头部锥度、气孔直径是影响多方向气流传导的重要参数。由于将光纤法珀压力传感器集成到探针头部,极大的缩短了气流传导长度,因此还需分析气流传导单元的长度对气流传导影响。

一体化探针的感压气孔终端为感压膜片,高速气流冲击气孔终端的压力即为膜片感受到的压力,因此在仿真时可将传导单元的气孔终端设置为壁面,据此对一体化探针进行简化,并采用 FLUENT 软件建立模型,如图 4 所示。其中,假设气流传导单元外径为 4 mm,感压气孔深度为  $h$ ,直径为  $d$ ,锥度为  $\delta$ 。其初始值分别为  $h=6$  mm,  $d=0.8$  mm,  $\delta=20^\circ$ 。

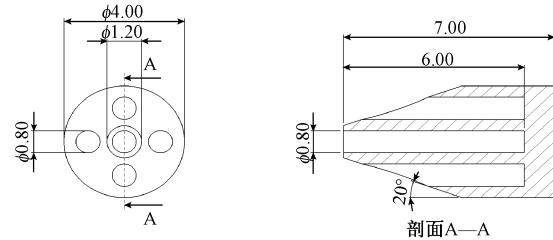


图4 气流传导单元的简化模型

Fig. 4 Simplified model of airflow conduction unit

假设流体马赫数为 0.6 Ma,迎角为 0°,气流传导单元在该环境下的压强分布如图 5 所示。当正对来流时,受到中心孔位置的阻滞,流速此时降为 0,中心孔位置形成驻点,而侧面仍然有高速气流划过,中心孔的静压高于侧面四个气孔,且四孔的压强值相当,可通过侧面四个孔平均压强来综合评价传导单元锥面所感受的压强。在探针头部锥面与圆柱面接触的地方,由于气流有大角度的偏折,速度很高,根据伯努利方程,速度越高,静压越低,因此头部锥面与圆柱面相交区域出现了一圈低压区。

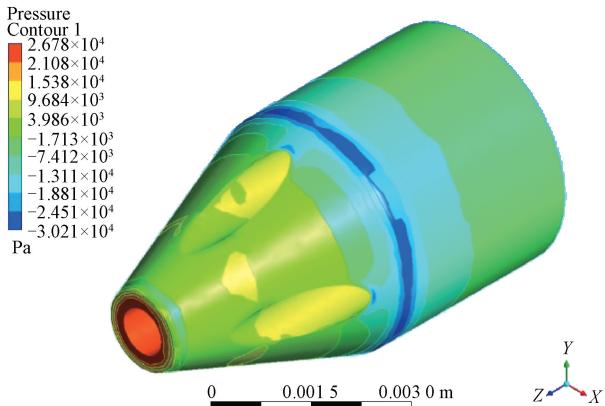


图5 锥形气流传导单元压力分布

Fig. 5 Pressure distribution of conical airflow conduction unit

如果中心孔与侧孔压强不存在明显差异,则很难通过各个孔间的差异求解外界流体气压。即当正对来流方

向时,中心孔与侧面孔之间压强差尽可能大,更有利于压力测量与解算。若一体化探针与来流方向存在一定迎角,此时中心孔压强不一定最大,侧面感压孔的压强也存在差异。如果各个感压气孔间的压强差越小,同样越难通过各个孔压强差求解外界流体气压。因此,应优化一体化探针传导单元参数,使各个感压气孔间的压强差尽可能大。

### 3.1 感压气孔内径对气流传导性能影响

当一体化探针正对来流方向时,仿真分析感压气孔内径从0.7 mm逐渐增加到1.1 mm过程中,各孔传导气压结果如图6所示。

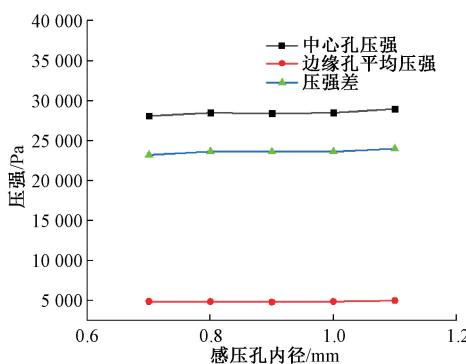


图6 感压气孔内径与压强之间的关系

Fig. 6 Relationship between inner diameter of pressure sensing air hole and pressure

随着感压气孔直径增加,中心孔压强与侧孔平均压强没有发生明显改变,中心孔压强始终大于边缘孔平均压强。相同压强下,随着气孔内径增大,结构对流场的扰流作用越大;但另一方面,随着气孔内径增大,处于气流传导单元尾部的感压膜片承受压力逐渐增大,膜片形变的灵敏度也随之增大。因此,在不扰流的情况下,应尽量增大气孔直径。

### 3.2 感压气孔深度对气流传导性能影响

当一体化探针正对来流方向时,仿真分析感压气孔深度从3 mm增加到9 mm过程中,各孔传导气压结果如图7所示。

随着感压孔深度增加,中心孔压强与侧孔平均压强在孔深3~4 mm处发生变化,而在4~9 mm时基本保持稳定,且随着感压孔深度增加,中心孔压强始终大于侧孔平均压强。

当一体化探针的感压孔到达一定的轴向长度,导管内的气体几乎不再流动,它们的作用只是传递压力,如图8所示,孔深为5 mm时,各孔气流已稳定。由于一体化探针头部存在锥度,侧孔深度小于中心孔深度,当感压孔深度为3 mm时,锥形头部占用了侧孔大部分深度,导致

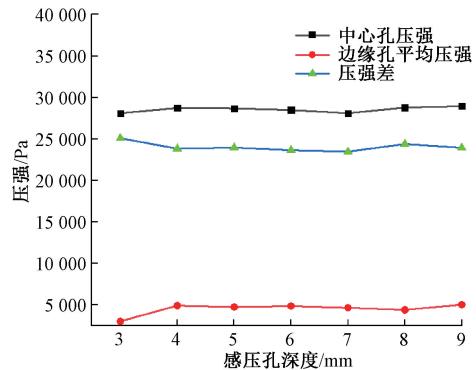


图7 一体化探针感压气孔深度与压强之间的关系

Fig. 7 Relationship between depth of pressure sensing air hole and pressure

侧孔的孔深较浅,气流在孔内部仍然处于高频且小幅度的运动状态,即并未形成稳态,如图9所示,此时侧孔测得的压力并不能真实反应发动机内流情况。

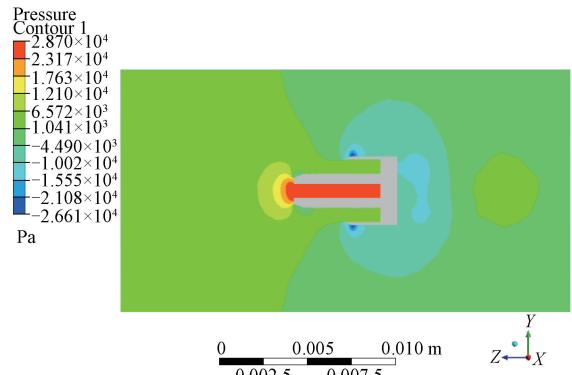


图8 一体化探针受压Y-Z截面图

Fig. 8 Y-Z cross section of the integrated probe under pressure

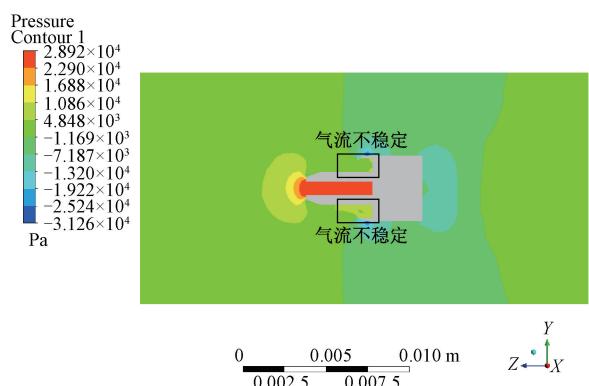


图9 一体化探针受压Y-Z截面图

Fig. 9 Y-Z cross section of the integrated probe under pressure

一体化探针的感压孔深度不能太小以免影响压力测量的准确性,在一定范围内,感压孔的深度不会对一体化探针的性能造成影响。

### 3.3 一体化探针头部锥度对对气流传导性能影响

当一体化探针正对来流方向时,仿真分析锥度从 $10^\circ \sim 70^\circ$ 变化过程中,各孔传导气压结果如图 10 所示。

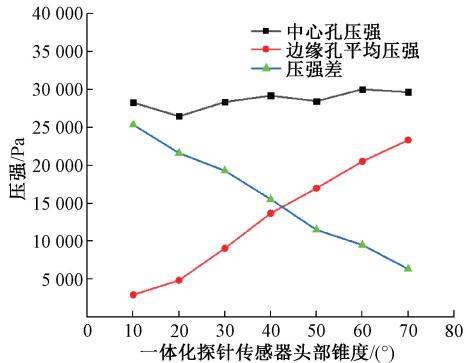


图 10 一体化探针头部锥度与压强之间的关系

Fig. 10 Relationship between head cone angle of the integrated probe and pressure

气流在中心孔附近依然会形成驻点,一体化探针锥度的增加并未改变中心孔气压。侧孔压强随着锥度增大而增大,但始终小于中心孔压强。中心孔与侧孔的压强差随着锥度的增加逐渐减小,对外界气流方向的判断能力也逐渐减弱。

当俯仰角大于 $0^\circ$ 时,3 孔为迎风孔,1 孔为背风孔。随着探针俯仰角从 $0^\circ$ 增加到 $70^\circ$ ,中心孔、背风孔以及中心孔压强变化情况如图 11 所示。

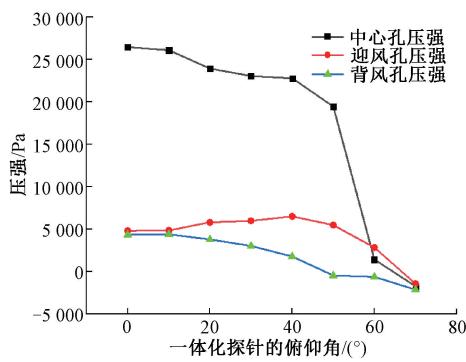


图 11 一体化探针俯仰角与压强之间的关系

Fig. 11 Relationship between pitch angle of the integrated probe and pressure

随着俯仰角逐渐增大,气流在一体化探针上的驻点逐渐上移,迎风孔的压强逐渐增大,中心孔和背风孔的压强逐渐减小;当俯仰角大于 $40^\circ$ 时,迎风孔压强开始减小;俯仰角持续增大至驻点上移到一体化探针 3 孔上方,此时一体化探针的各孔压强均为负压,探针失效。

因此,高速气流在锥形头部形成的驻点范围与其压力测量范围有直接关系。一体化探针俯仰角或偏转角一定时,其锥形头部的锥度越大,驻点位置越容易背离锥面从而使探针失效,即在一定范围内,一体化探针头部锥度越小,测量高速来流气体的角度范围越大,越有利于多方向高速气流的压力测量。同理,一体化探针头部锥度一定时,一体化探针随着与来流气体间角度的增大,其压力测量结果精度逐渐降低。综合考虑高速来流气体的测量角度范围和测量结果准确性,一体化探针头部锥度选取 $20^\circ$ 。

综上分析可知,在不扰流的情况下,一体化探针的感压孔直径应尽量大;在一定范围内,感压孔深度不会对一体化探针的性能造成影响;综合考虑高速来流气体的测量角度范围和压力测量准确性,一体化探针头部锥度取 $20^\circ$ 最优。

## 4 感压膜片优化设计

一体化探针的压力传感性能取决于膜片对压力的响应能力。由式(1)可知,膜片参数如半径、厚度和膜片材料弹性模量  $E$  等影响传感器的测量范围、灵敏度。因此应针对测量范围需求,确保较高灵敏度的情况下,对膜片参数进行优化。

### 4.1 灵敏度分析

在不同膜片直径情况下,对膜片厚度和灵敏度之间关系进行仿真,结果如图 12 所示。随着膜片厚度  $h$  的减小,灵敏度增大;随着膜片半径  $r$  的增大,膜片灵敏度增大。

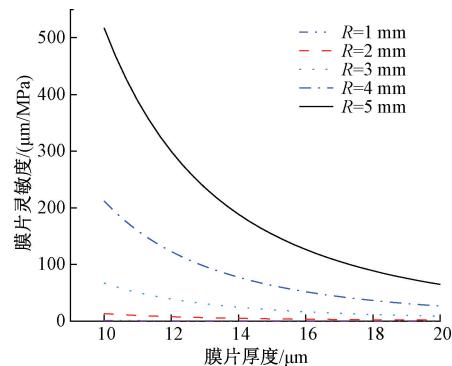


图 12 不同  $r$  值时传感器灵敏度与膜片厚度的关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between sensor sensitivity and diaphragm thickness at different  $r$  values

## 4.2 频响性分析

假设膜片为圆形平板,膜片在外界没有压力作用在上面时为自由振动,其振动方程为:

$$D \nabla^2 Y(r, \theta, t) + \rho h \frac{\partial^2 Y(r, \theta, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (4)$$

式中: $\rho$ 是膜片的质量密度; $D$ 是膜片的弯曲刚度; $\nabla^2$ 为拉普拉斯算符。对其进行变换分离变量,求解该方程,最终得到膜片的固有频率为:

$$f_{mn} = \frac{a_{mn}}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} = \frac{a_{mn}}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} \left( \frac{h}{a^2} \right) \quad (5)$$

式中: $a_{mn}$ 是与膜片振动模式相关的常数,膜片的固有频率与膜片厚度 $h$ 及膜片半径 $r$ 间关系的仿真结果如图13所示。

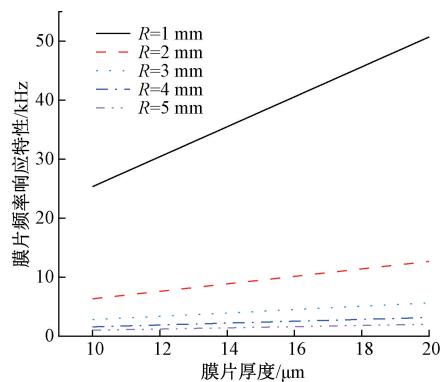


图13 不同 $r$ 值时频响特性与膜片厚度的关系曲线

Fig. 13 Relationship curve between frequency response and diaphragm thickness at different  $r$  values

压力传感器膜片的固有频率随着膜片厚度的增大而增大,随着膜片半径的增大而减小。

综上,膜片的半径越大、厚度越小,传感器的灵敏度越高,而频率响应特性就越差,所以选择膜片时要综合考虑灵敏度和频响性。

目前,铍青铜、锡青铜和316不锈钢等材料由于高强度、耐腐蚀等特性而被广泛应用在压力传感器中。当单孔压力传感器的膜片直径为2.5 mm,厚度为20  $\mu\text{m}$ 时,计算得到上述不同材料的固有频率如表1所示。

表1 不同材料的固有频率

Table 1 Natural frequencies of different materials

膜片材料	固有频率/kHz
铍青铜	25.6
锡青铜	21.6
316不锈钢	32.5

表1中3种材料的膜片固有频率均满足航空发动机内压力监测中频率响应要求10 kHz,本文选用频响性能最好、材料最易获得的316不锈钢作为传感器膜片材料。

由图1可知,压力传感器中单个感压孔直径与单孔膜片直径相等。根据气流传导分析可知,各个感压孔直径应尽量大,表明单孔直径应尽量大;但过大会导致塑性变形。由于光纤采用插芯作为支撑,因此取膜片单孔直径与插芯外径尺寸相同,为2.5 mm。

已知感压膜片材料为316不锈钢,压力范围为0.8~1.5 MPa,当压力传感器的膜片厚度从10  $\mu\text{m}$ 增加到50  $\mu\text{m}$ 时,膜片的形变量如图14所示。

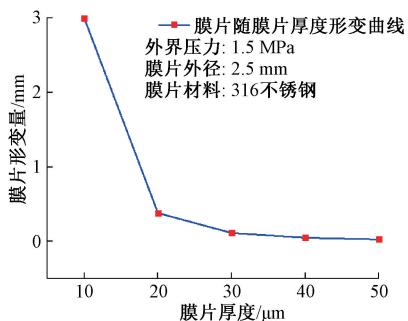


图14 1.5 MPa压力下膜片形变量与厚度的关系

Fig. 14 Relationship between diaphragm deformation and thickness under 1.5 MPa pressure

当膜片厚度为10  $\mu\text{m}$ ,膜片发生明显塑性形变,当膜片厚度为20  $\mu\text{m}$ 时,此时膜片未发生塑性形变且灵敏度较高,综合考虑膜片的灵敏度和屈服极限,选择膜片厚度为20  $\mu\text{m}$ 。

综上,膜片材料选用316不锈钢,厚度为20  $\mu\text{m}$ ,半径为7 mm(单个感压孔直径为2.5 mm)。

## 5 一体化探针的工艺制造

结合仿真分析结果与现有光纤插芯尺寸,设计了一体化探针,其结构参数为:头部锥度为20°,感压气孔直径2.5 mm,感压气孔深度为6 mm。

首先加工传导单元和传感单元基座如图15所示。

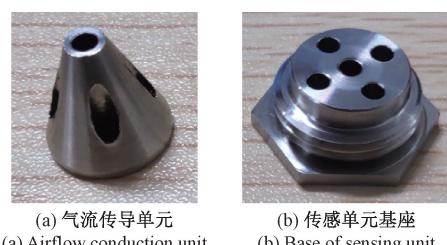


图15 气流传导单元和传感单元基座

Fig. 15 Airflow conduction unit and sensing unit base

采用 ZG-MF30 激光打标机将  $20 \mu\text{m}$  厚的 316 不锈钢膜片切割, 使其直径与探针外径一致。采用 UV 紫外固化胶先将膜片与基座固定, 再将膜片的另一面与气流传导单元的锥形头部固定。

最后, 将插入光纤的陶瓷插芯周围涂敷环氧胶后插入传感单元基座, 然后在其后端注入密封胶进行固定密封, 一体化探针制作工艺流程如图 16 所示。



图 16 一体化探针制作工艺流程

Fig. 16 Integrated probe manufacturing process flow chart

制作完成的一体化探针如图 17 所示。



图 17 一体化探针实物图

Fig. 17 A sample photo of the integrated probe

## 6 一体化探针的压力测试实验

### 6.1 压力测试系统的搭建

搭建压力测试实验系统如图 18 所示, 将一体化探针密封安装在压力发生器上, 压力发生器用于产生  $0\sim2 \text{ MPa}$  的压力, 一体化探针的尾端连接内置光源的光谱仪。宽带光源发出的光经过分束器后分别进入一体化探针的 5 路光纤法珀传感器, 从各路传感器反射的干涉信号分别经过环形器进入多通道光谱仪后, 再进入计算机进行数据处理。

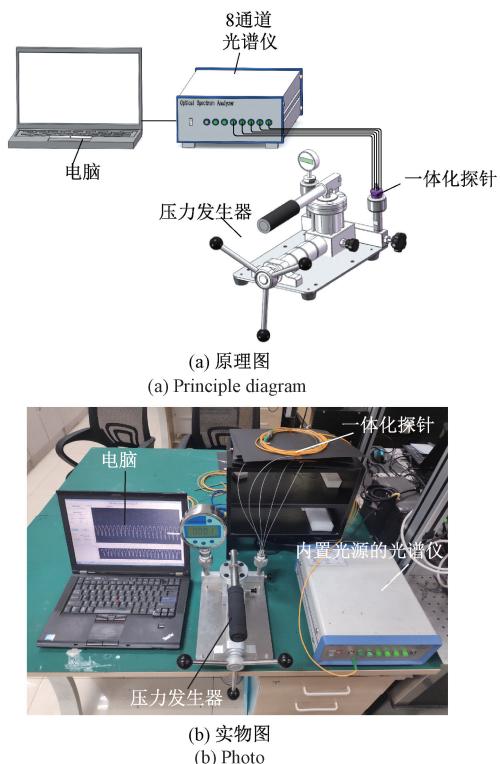


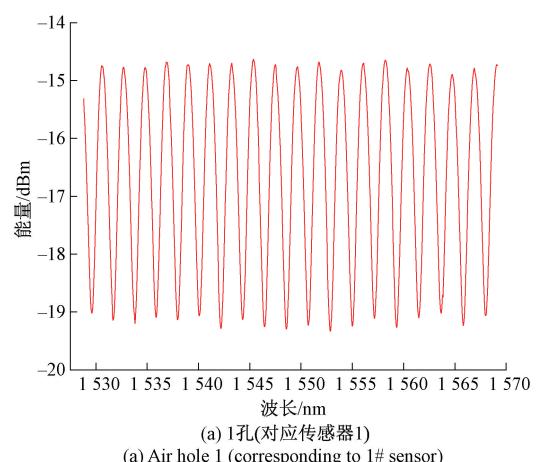
图 18 一体化探针的压力测试实验系统

Fig. 18 Pressure test experiment system of integrated probe

### 6.2 压力测试实验与分析

一体化探针包含 5 个光纤法珀压力传感器, 分别对每个法珀传感器进行压力测试, 各个传感器的原始信号如图 19 所示。

通过调节压力发生器对一体化探针进行升压和降压测试。压力发生器从 0 升压到  $1.7 \text{ MPa}$ , 再从  $1.7 \text{ MPa}$  降压到 0, 在每次压力稳定  $10 \text{ s}$  以后记录法珀压力传感器的数据, 完成一次实验。然后, 按照上述步骤进行 3 次重复实验。



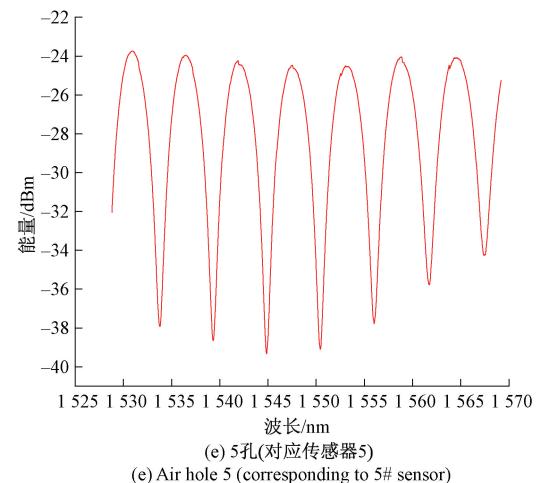
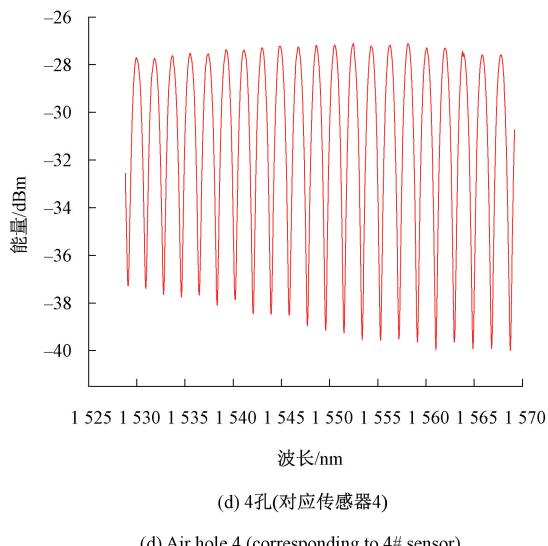
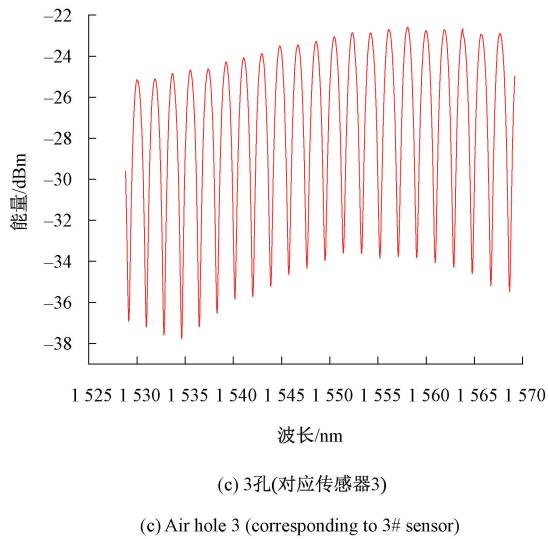
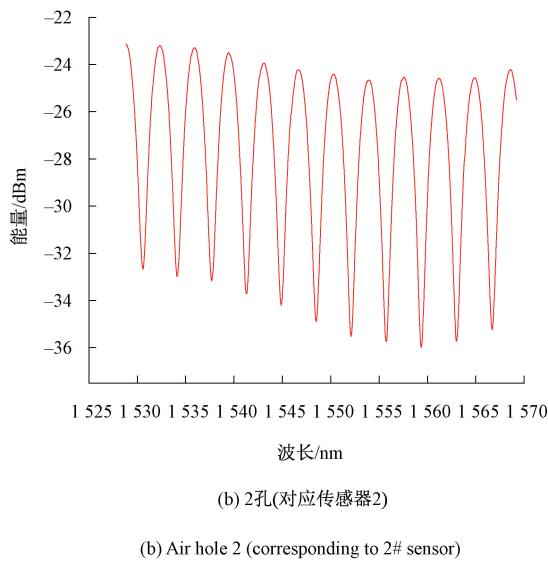
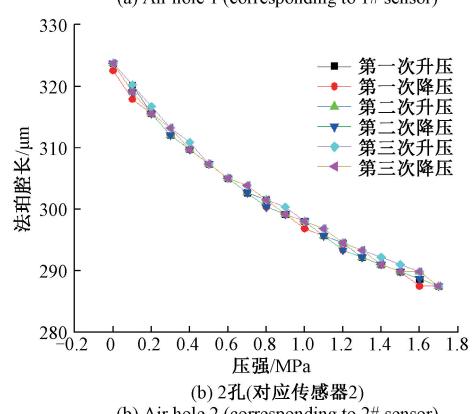
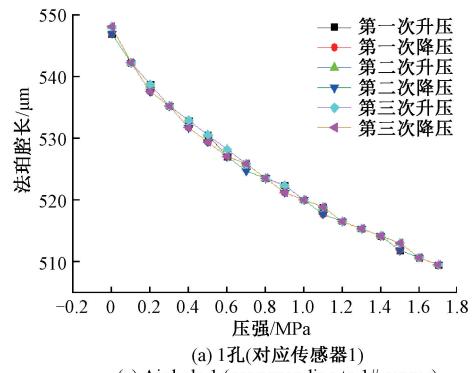


图 19 一体化探针原始信号

Fig. 19 Initial signal of the integrated probe

对 5 个传感器 3 次重复实验采集到的光谱数据进行解调<sup>[18]</sup>,结果如图 20 所示。一体化探针中每个法珀传感器在升压和降压时,变化趋势几乎保持一致:随着压强的增加,法珀腔长逐渐减小,且减小速度先快后慢。

一体化探针测试的目标压力为 0.8~1.5 MPa,为更好的分析一体化探针性能,对一体化探针 0.7~1.6 MPa 压力范围内数据进行线性拟合和误差计算,结果如图 21 所示。



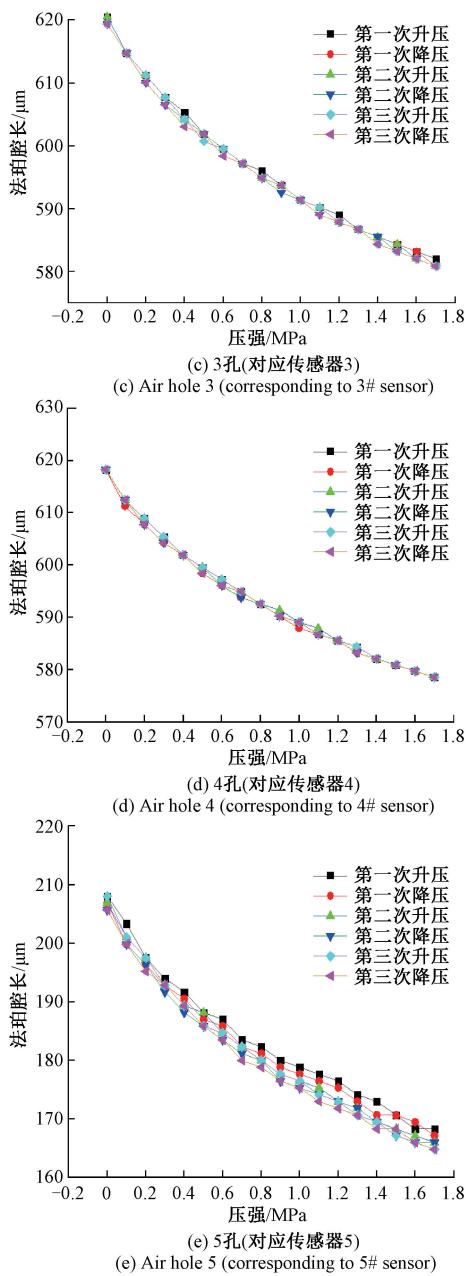


图20 一体化探针升降压测试结果

Fig. 20 Loading and unloading pressure test result of the integrated probe

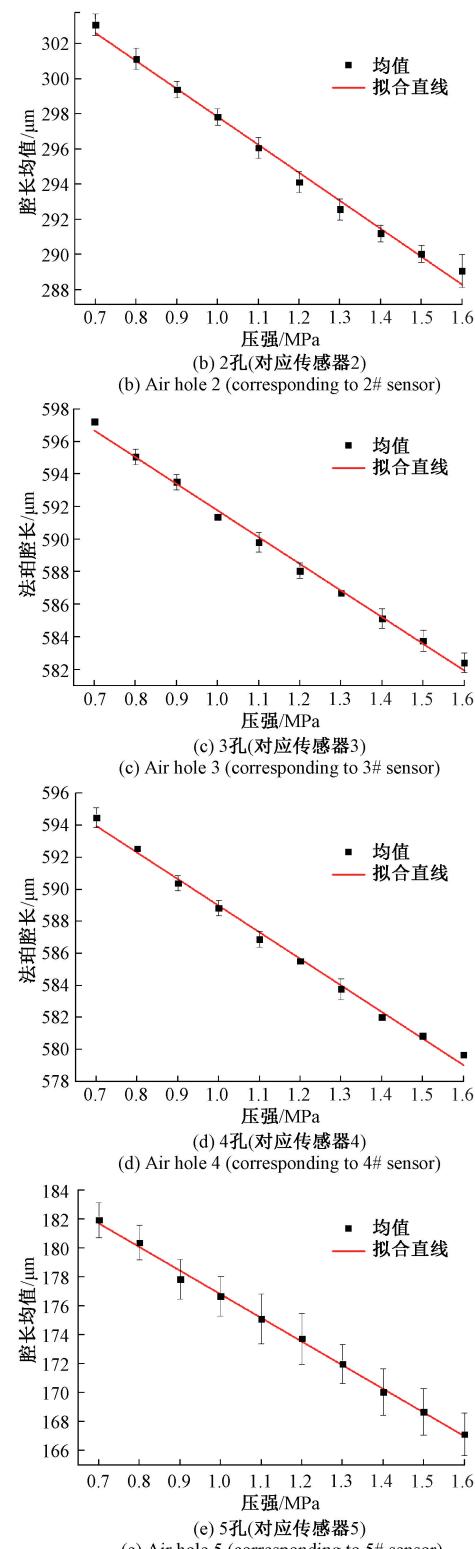
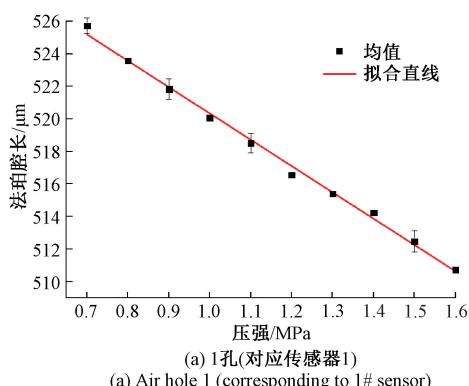


图21 一体化探针各孔对应压力传感器升降压实验拟合结果

Fig. 21 The fitting results of integrated probe loading and unloading pressure test for the pressure sensors corresponding to various holes of the integrated probe

进一步对各传感器数据的斜率、线性度、最大误差等进行计算,结果如表2所示。各个压力传感器的灵敏度即拟合直线斜率介于 $-15.9 \sim -16.7 \mu\text{m}/\text{MPa}$ 之间,平均

斜率为 $-16.267 \mu\text{m}/\text{MPa}$ 。各传感器的斜率波动小于2.98%,表明传感器传感的一致性较好。

表2 一体化探针各个传感器的性能参数对比

Table 2 Comparison of the performance parameters of various sensors of the integrated probe

传感器	孔1	孔2	孔3	孔4	孔5
平均斜率( $\mu\text{m}/\text{MPa}$ )	-16.161 1	-15.913 2	-16.361 8	-16.574 3	-16.326 4
平均 $R^2$	0.992 283	0.987 452	0.991 117	0.991 250	0.989 658
平均RSS	1.672 160	2.640 663	1.956 353	1.994 983	2.235 042
最大误差/%	0.15	0.33	0.17	0.17	1.72
重复性/%	2.28	2.98	2.42	2.38	1.91

传感器1~4压力测量最大误差小于0.33%,由于制作工艺原因导致传感器5误差相对较大,最大误差为1.72%。

## 7 结 论

本文结合多孔探针和光纤传感技术优势,设计了一种适用于航空发动机内流多方向压力测试的一体化探针。分析了一体化探针的多方向压力传导与压力测量原理,采用FLUENT软件对多方向气流传导性能进行分析并优化多孔气流传导结构参数。

研制了5孔一体化探针并开展了静压测试实验。结果表明:在0.7~1.6 MPa压力范围内,一体化探针各方向压力传感器的平均灵敏度为 $-16.267 \mu\text{m}/\text{MPa}$ ,重复性误差小于2.98%,传感器传感的一致性较好。传感器1~4压力测量最大误差小于0.33%,由于制作工艺原因导致传感器5误差相对较大,最大误差为1.72%。

一体化探针初步验证了将光纤法珀压力传感器与多孔探针集成用于发动机内流多方向压力测量的可行性。该探针方案可能成为航空发动机内流多方向压力测量在高温区段的有效补充方法。

## 参考文献

- [1] 陈凯云,叶佩青,俞学兰,等.航空压气机叶片型面激光测量系统研究[J].仪器仪表学报,2003,24(4):609-612.  
CHEN K Y, YE P Q, YU X L, et al. Research on laser measurement system of vane of aero engine compressor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 609-612.
- [2] 陈矛章.风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J].航空动力学报,2002(1):1-15.  
CHEN M ZH. Development of fan/compressor techniques and suggestions on further researches [J]. Journal of Aerospace Power, 2002(1): 1-15.
- [3] 陈琳琳,安征海,张昌杰,等.五孔探针技术在压缩机测试中的应用[J].机电技术,2011,34(5):79-80.  
CHEN L L, AN ZH H, ZHANG CH J, et al. Application of five hole probe technology in compressor test [J]. Mechanical & Electrical Technology, 2011, 34(5): 79-80.
- [4] 刘铁根,王双,江俊峰,等.航空航天光纤传感技术研究进展[J].仪器仪表学报,2014,35(8):1681-1692.  
LIU T G, WANG SH, JIANG J F, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681-1692.
- [5] PULLIAM W, RUSSLER P, MLCAK R, et al. Micromachined, SiC fiber optic pressure sensors for high-temperature aerospace applications [M]. Industrial Sensing Systems. Boston, Massachusetts, USA. 2000: 21-30.
- [6] HARPIN A, FASHAM S J, TYLER S G. Method of assembling an optical sensor: USPTO9989385[P]. 2018-06-05.
- [7] 陈鹏.耐高温光纤FP压力传感器的研制[D].武汉理工大学,2019.  
CHEN P. Research on high temperature resistant fiber optic FP pressure sensor[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [8] 刘彦超,申争光,时兆峰,等.基于微型光谱仪的光纤压力高速解调技术[J].导航定位与授时,2017,4(4):103-108.  
LIU Y CH, SHEN ZH G, SHI ZH F, et al. Study on fiber optic pressure high-speed demodulation based on micro-spectrometer [J]. Navigation Positioning and授时, 2017, 4(4): 103-108.

- Timing, 2017, 4(4):103-108.
- [9] YI J, LALLY E, WANG AN B, et al. Demonstration of an all-sapphire fabry-pérot cavity for pressure sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 23(1):9-11.
- [10] 陈勇. 多模光纤和蓝宝石光纤法珀传感器研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.
- CHEN Y. Research on fabry perot sensor based on multimode fiber and sapphire fiber [ D ]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [11] 张韬杰, 江毅, 马维一. 一种高精细度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 314-318.
- ZHANG T J, JIANG Y, MA W Y. A high optical fiber pressure sensor based on MEMS [ J ]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17):314-318.
- [12] JINDE Y, TIEGEN L, JUNFENG J, et al. Wavelength-division-multiplexing method of polarized low-coherence interferometry for fiber Fabry-Perot interferometric sensors[J]. Optics letters, 2013, 38(19): 3751-3753.
- [13] 李奇思. 碳化硅膜片式光纤高温压力传感器关键制备技术研究[D]. 太原:中北大学, 2019.
- LI Q S. Research on key preparation technology of silicon carbide membrane fiber optic high temperature pressure sensor [ D ]. Taiyuan: North University of China, 2019.
- [14] 雷小华, 宋超鑫, 刘显明, 等. 一种用于多方向高速动态压力测量的多孔阵列光纤探针及其测量系统: CN202010830718. 9[P]. 2020-11-27.
- LEI X H, SONG CH X, LIU X M, et al. A porous array fiber optic probe and its measurement system for multi direction high speed dynamic pressure measurement: CN202010830718[P]. 2020-11-27.
- [15] 陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 139-152.
- CHEN W M, LEI X H, ZHANG W, et al. Recent progress fo optical fiber Fabry-Perot sensor [ J ]. Acta Optica Sinica, 2018,38(3): 139-152.
- [16] YU Q X, WANG X N, SONG S D, et al. Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic fabry-perot interferometer for high temperature oil well measurement[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2007, 18(3): 299-302.
- [17] 杨敏官. 流体机械内部流动测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- YANG M G. Measurement technology of internal flow in fluid machinery [ M ]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.
- [18] 章鹏, 王军, 朱永, 等. 基于 DSP 的新型光纤法珀传感解调系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (3): 437-440.
- ZHANG P, WANG J, ZHU Y, et al. Novel modulation of optical fiber Fabry-Perot sensor based on DSP [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(3): 437-440.

### 作者简介



雷小华(通信作者),2002年于重庆大学获得学士学位,2008年于重庆大学获得博士学位,现为重庆大学光电学院副教授,博士生导师,主要研究方向为光纤传感和光电检测技术。

E-mail:xhlei@cqu.edu.cn

**Lei Xiaohua** ( Corresponding author ) received her B. Sc. degree in 2002 and Ph. D. degree in 2008 both from Chongqing University. Now, she is an associate professor and Ph. D. supervisor in College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University. Her main research interest includes fiber optic sensing and photoelectric detection technology.



姜昌兴,2019年于哈尔滨理工大学获得学士学位,现为重庆大学硕士研究生,主要研究方向为光纤传感。

E-mail:201908021007@cqu.edu.cn

**Jiang Changxing** received his B. Sc. degree in 2019 from Harbin University of Science and Technology. Now, he is a master student in Chongqing University. His main research interest is fiber optic sensing.