

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.03.05

# 膜片式光纤动态压力传感器的研制

张慧君

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 为了更好地满足动态压力的测量需求, 研究了一种基于法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉原理的膜片式光纤动态压力传感器。从理论上分析了多个反射面对 F-P 腔光谱的影响, 提出了得到单一 F-P 腔的方法。进而采用机械研磨的方式对传感器膜片外表面进行粗化加工, 有效解决了由多个反射面带来的光谱复杂问题。对传感器进行静态压力和动态压力标定试验, 结果表明: 传感器性能良好, 在 0~200 kPa (表压) 范围内的静态压力测量误差小于等于 0.5 %FS; 在 20~2500 Hz 范围内, 传感器的幅值灵敏度相对误差优于  $\pm 10\%$ 。

**关键词:** 光纤传感器; F-P 腔; 动态压力

**中图分类号:** TB935; TP212      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5795(2022)03-0030-06

## Development of diaphragm-type optical fiber dynamic pressure sensors

ZHANG Huijun

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** In order to meet the demodulation requirements of dynamic pressure better, a diaphragm-type optical fiber dynamic pressure sensor based on Fabry-Perot (F-P) interference principle is studied. The influence of multiple reflective surfaces on the spectrum of the F-P cavity is theoretically analyzed, and a method is proposed to obtain a single F-P cavity. The outer surface of the sensor diaphragm is roughened by mechanical grinding, which effectively solves the complex spectrum problem caused by multiple reflective surfaces. Static pressure and dynamic pressure calibration tests are carried out on the sensor, and the results show that the sensor performs well. The static pressure measurement error of the sensor in the range of 0~200 kPa (gauge pressure) is not more than 0.5 %FS, and the amplitude sensitivity relative error of the sensor does not exceed  $\pm 10\%$  within the range of 20~2500 Hz.

**Key words:** fiber optic sensors; F-P cavity; dynamic pressure

## 0 引言

基于法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 干涉原理的光纤压力传感器是目前应用较为广泛的一类光纤传感器<sup>[1-3]</sup>, 其抗电磁干扰能力强、动态响应高、耐温性能好, 能够满足多种场合的动态压力测试需求, 国内外机构已开展相关研究。如, 国内工程兵科研三所研制的 F-P 光纤爆炸压力传感器, 性能

好, 响应快, 成功应用于爆炸冲击波压力测量<sup>[4-5]</sup>; 美国弗吉尼亚理工大学<sup>[6]</sup>、Luna Innovations 公司<sup>[7]</sup>和英国的 Oxsensis 公司<sup>[8-9]</sup>分别研制了 F-P 高温光纤压力传感器, 最高工作温度可达 1000°C, 并在发动机动态压力测量中取得了良好的效果。

对于一般的 F-P 腔光纤压力传感器而言, F-P 干涉腔可由两个或多个反射面构成。但当存在多个反射面时, 传感器的输出为复合 F-P 腔干涉光

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-06-07

基金项目: 工信部民用飞机专项科研项目 (MJ-2015-J-99)

引用格式: 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.

**Citation:** ZHANG H J. Development of diaphragm-type optical fiber dynamic pressure sensors [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (3): 30-35.



谱<sup>[10-12]</sup>，信号解调的速度及精度均会受到影响，在一定程度上限制了其在动态测试领域的应用。

本文研究了一种膜片式光纤动态压力传感器，通过机械研磨的方式消除了膜片外表面产生的反射光影响，操作简单、方便、有效，解决了由多个反射面带来的光谱复杂问题。研磨后的传感器灵敏度一致性可控、性能良好，满足动态压力的测量需求。

### 1 F-P腔干涉原理

如图1所示，光纤压力传感器主要包括膜片、基底和光纤三部分，膜片和基底由MEMS技术批量制作而成，膜片材料为硅，基底材料为玻璃。光纤由基底底部的通孔穿入，光纤端面与膜片表面构成F-P干涉腔。当外界压力作用在膜片时，膜片产生形变，F-P腔的腔长随之发生变化，进而引起干涉信号变化。通过探测干涉信号的变化，可得到外界压力的大小。

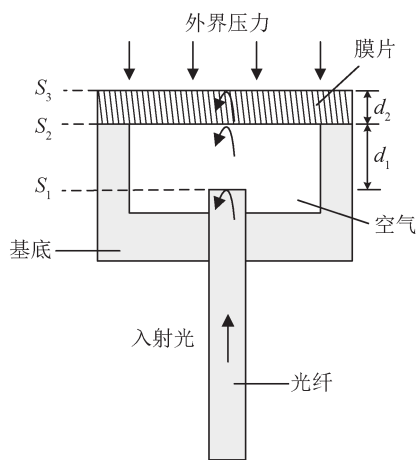


图1 膜片式光纤压力传感器示意图

Fig.1 Schematic diagram of diaphragm-type optical fiber dynamic pressure sensor

通常MEMS加工技术得到的膜片内外表面均为镜面。因此，入射光会在光纤端面 $S_1$ 、膜片内表面 $S_2$ 、膜片外表面 $S_3$ 三个界面上分别发生反射，反射光之间彼此发生干涉，最后返回到光纤的是复合F-P腔的干涉信号。复合F-P腔的反射率 $R$ 表示为<sup>[13]</sup>

$$R(\lambda) = \frac{A}{B} \quad (1)$$

其中，

$$B = 1 + r_1^2 r_2^2 + r_2^2 r_3^2 + r_1^2 r_3^2 + 2r_1 r_2 (1 + r_3^2) \cos(\varphi_1) + 2r_2 r_3 (1 + r_1^2) \cos(\varphi_2) + 2r_1 r_3 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + 2r_1 r_2^2 r_3 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2)$$

$$A = B - (t_1 t_2 t_3)^2 \quad (3)$$

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d_1 \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d_2 \quad (5)$$

式中： $r_1, r_2, r_3$ 分别为 $S_1, S_2, S_3$ 界面的反射系数； $t_1, t_2, t_3$ 分别为 $S_1, S_2, S_3$ 界面的透射系数； $\varphi_1, \varphi_2$ 分别为光经过空气腔、硅腔的相位差； $d_1, d_2$ 分别为空气腔、硅腔的腔长， $\mu\text{m}$ ； $n_1, n_2$ 分别为空气、硅的折射率； $\lambda$ 为入射光的波长， $\text{nm}$ 。

当膜片外表面 $S_3$ 为磨砂面时，入射光不会在 $S_3$ 面发生反射，由光纤端面 $S_1$ 与膜片内表面 $S_2$ 形成单一的F-P腔。根据F-P干涉仪的基本理论，其反射率 $R$ 表示为

$$R(\lambda) = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(\varphi_1)}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(\varphi_1)} \quad (6)$$

由式(6)可知，F-P腔的反射率与各反射面的反射系数、透射系数、F-P腔腔长及光源波长均有关。假设 $d_1=100\mu\text{m}$ ， $d_2=30\mu\text{m}$ ，根据式(1)和式(6)，可以分别得到复合F-P腔和单一F-P腔的理论光谱，如图2所示。

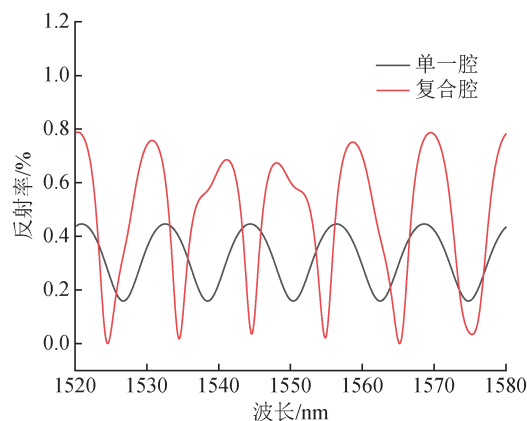


图2 复合F-P腔和单一F-P腔的理论光谱

Fig.2 Theoretical spectra of composite F-P cavity and single F-P cavity

由图2可以看出，与单一F-P腔相比，复合F-P腔的输出光谱更为复杂，由此可知，复合F-P腔

传感器的动态解调难度更大。因此，在传感器的制作过程中，将对膜片的外表面进行粗化处理，以消除膜片外表面反射光的影响。

## 2 传感器参数设计

根据弹性力学原理，传感器的压力灵敏度  $Y$  为

$$Y = \frac{\Delta d}{\Delta P} = \frac{3(1 - \mu^2)r^4}{16Eh^3} \quad (7)$$

式中： $\Delta d$ 为膜片的形变量，nm； $\Delta P$ 为压力的变化量，kPa； $h$ 为膜片的厚度，nm； $E$ 为硅材料的杨氏模量， $1.3 \times 10^8$  kPa； $r$ 为膜片的有效半径，nm； $\mu$ 为硅材料的泊松比，0.28。

通常膜片的最大形变量不能超过膜片厚度的30% [14]，即  $\Delta d_{\max} < 0.3h$ 。因此，由式(7)可得最大压力变化量  $\Delta P_{\max}$ ，从而确定传感器的量程。图3为不同有效半径下膜片厚度与最大压力变化量之间的关系。可以看出，同一有效半径下，膜片的最大耐受压力随着膜片厚度的增加而不断增大。

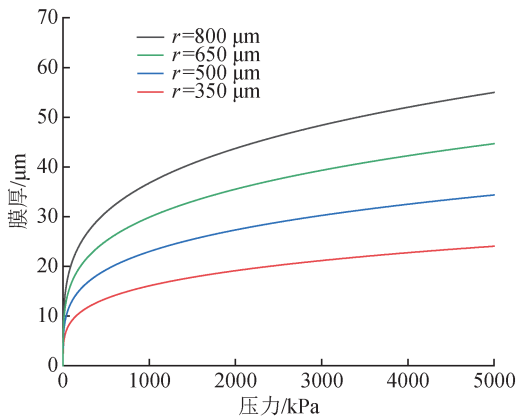


图3 膜片厚度与最大压力变化量的关系

Fig.3 Relationship between diaphragm thickness and maximum pressure variation

此外，传感器的动态特性由膜片的固有频率决定，膜片的固有频率  $f_{mn}$  为

$$f_{mn} = \frac{\alpha_{mn}}{4\pi} \sqrt{\frac{E}{3\omega(1 - \mu^2)}} \left( \frac{h}{r^2} \right) \quad (8)$$

式中： $\alpha_{mn}$ 为膜片振动模式的一个常数； $w$ 为膜片材料的质量密度， $\text{kg/m}^3$ 。

根据式(8)得到不同有效半径下膜片的一阶固有频率与膜厚的关系，如图4所示。由图4可以

看出，同一有效半径下，膜片越厚，膜片的一阶固有频率越高。实际应用时，应结合压力测量范围及动态性能要求进行传感器参数的设计，传感器的最大使用频率一般不超过其一阶固有频率的1/5。

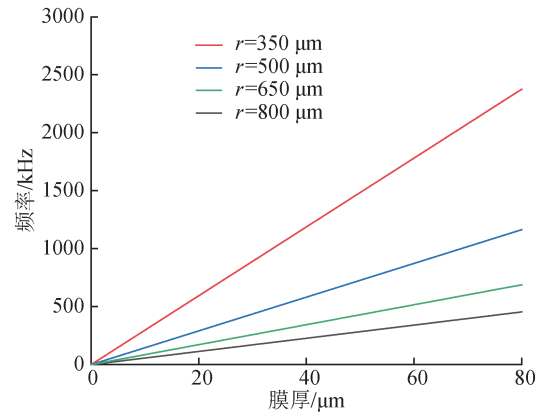


图4 膜片的一阶固有频率与膜厚的关系 ( $m=n=0$ )

Fig.4 Relationship between first-order natural frequency and thickness of the diaphragm ( $m=n=0$ )

## 3 传感器制作

### 3.1 传感器焊接

采用  $\text{CO}_2$  激光加工的方式完成传感器的焊接。激光焊接系统主要包括  $\text{CO}_2$  激光器、微位移平台、CCD 显微摄像机、光纤解调仪等部分组成，如图5所示。首先，夹持并固定传感器各组件，利用微位移平台调节其相对位置；然后，将处理好的光纤穿入基底的中心孔中，根据光纤解调仪显示的实时监测信号，调整传感器腔长值；最后，设置激光器参数，发射一定功率的激光，完成传感器的焊接。

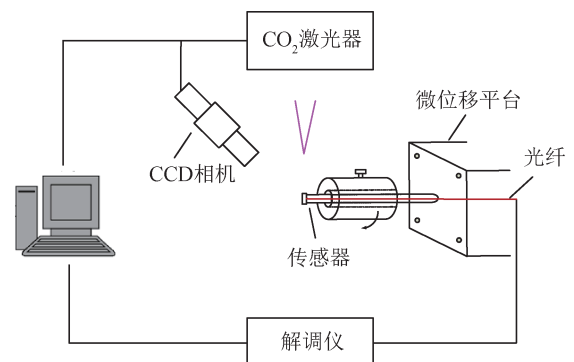


图5 激光焊接系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of laser welding system

### 3.2 膜片表面粗化

为得到单一的F-P腔,采用研磨方式对膜片外表面进行粗化加工。首先,将传感器装夹在光纤研磨机的专用夹具上,传输光纤与光纤解调仪相连;然后,设置研磨参数,对膜片进行研磨,直至传感器输出光谱满足要求;最后,对膜片外表面进行清洗,完成研磨。光纤研磨机常用的研磨纸粗糙度分别为30, 9, 1  $\mu\text{m}$ 三种,研磨纸的粗糙度直接影响膜片的粗化效果。由于膜片本身厚度较小,使用30  $\mu\text{m}$ 的研磨纸时,膜片易破损;而使用1  $\mu\text{m}$ 的研磨纸时,研磨效率较低;因此,选取9  $\mu\text{m}$ 的研磨纸对膜片外表面进行研磨,并在研磨过程中对传感器光谱进行实时监测,从而更好地控制研磨质量。

若研磨不充分,膜片外表面依然存有部分反射率,峰值强度大小不一,传感器光谱如图6(a)所示;当研磨充分时,传感器光谱如图6(b)所示,干涉条纹近似于标准余弦形式输出曲线,各个峰值强度比较一致,此时膜片外表面反射的影响已基本消除。

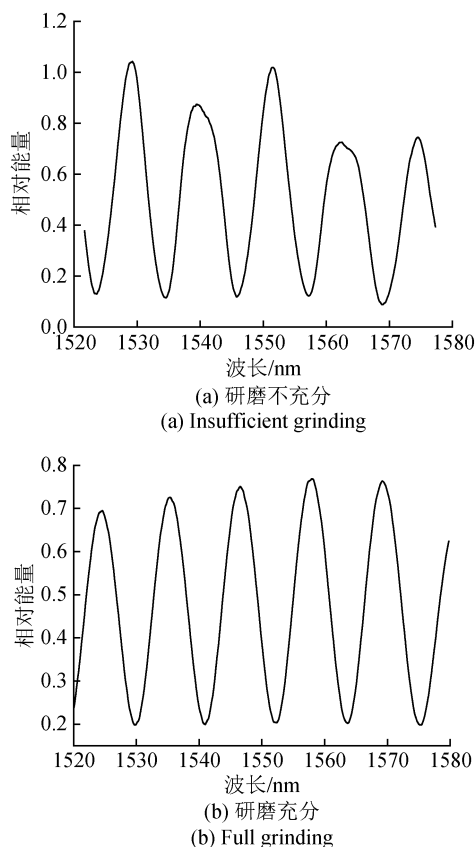


图6 膜片表面处理后的传感器光谱图

Fig.6 Sensor spectrum after surface treatment of diaphragm

为了提高研磨工艺的一致性,对研磨转速和研磨时间等关键参数进行研究,得到了最佳研磨参数:研磨转速约为50 r/min,研磨时间不超过20 s。在最佳研磨工艺下,膜片研磨质量得到了有效保证。对研磨前后的膜片外表面进行显微观测,如图7所示。研磨前,膜片的外表面为光滑镜面,粗糙度约为40 nm。研磨后,膜片外表面粗糙度增大,由镜面变为磨砂面,但均匀性仍较好,无破损现象。

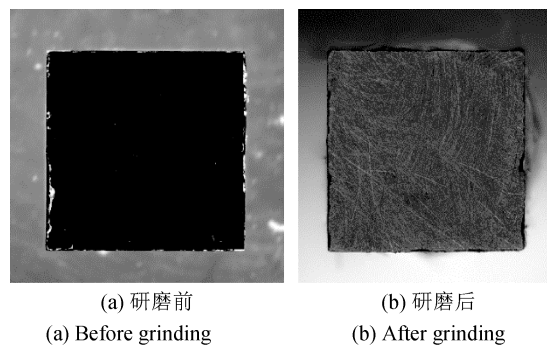


图7 膜片外表面显微图

Fig.7 Micrograph of outer surface of diaphragm

### 3.3 传感器封装

光纤压力传感器的主要组件为玻璃基材料,为提高传感器的环境适应性,可根据不同的测试需求,对传感器进行金属化封装。圆柱式封装结构如图8所示。传感器的压力敏感结构位于封装结构的内部,膜片位于最前端,感知外界压力。传感器后端利用软管对光纤进行保护,并用少量胶粘剂进行固定,减小光纤弯折对传感器信号质量的影响。



图8 传感器金属化封装

Fig.8 Metallization package of the sensor

## 4 传感器标定

### 4.1 静态压力标定

对传感器进行实验室环境下的静态压力标定<sup>[15]</sup>。将传感器放置于密封的压力容器中,压力容器通过管路与标准压力发生器相连,传感器的传输光纤从压力容器出口引出并连接至光纤解调

仪。调节标准压力发生器，从常压开始，以40 kPa为一级，升压至200 kPa（表压），依次记录各压力点下的正行程输出值；之后，再以40 kPa为一级，降低压力至常压，倒序记录各压力点下的反行程输出值。正行程和反行程标定往返一次为1个循环，重复3个循环。图9是传感器正反行程的腔长-压力变化曲线，可以看出，传感器的正反行程曲线基本重合，数据重复性好。对该曲线进行线性拟合， $R^2 \approx 0.9999$ 。

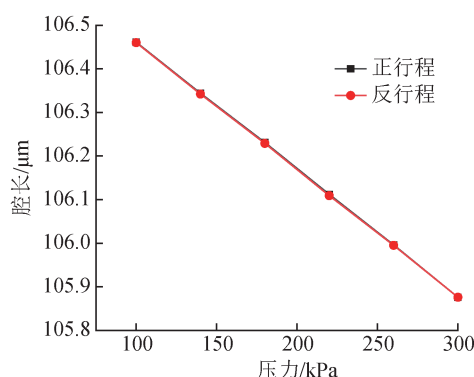


图9 传感器腔长-压力变化曲线

Fig.9 Cavity length-pressure curve of the sensor

此外，对使用最佳研磨参数加工的一批传感器进行压力标定，以评价研磨工艺的一致性，结果如表1所示。传感器的压力灵敏度均为2.91 nm/kPa左右，且腔长-压力变化曲线的线性较好，测量误差小于等于0.5 %FS。由此表明，研磨工艺一致性可控，可批量进行膜片粗化处理。

表1 传感器测试结果

Tab.1 Test results of sensors

编号	压力灵敏度/(nm·kPa <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	测量误差/%FS
#01	2.92		0.4
#02	2.90		0.5
#03	2.92	0.9999	0.4
#04	2.90		0.5
#05	2.92		0.4

#### 4.2 动态压力标定

利用正弦压力校准装置对传感器进行动态压力标定<sup>[16]</sup>。正弦压力校准装置产生按正弦规律变化的压力，标准压力传感器和被测压力传感器对称安装在正弦压力发生器主机压力室的两侧，两

者同时测量正弦变化的压力，通过比较标准压力传感器与被测压力传感器的输出，可得到被测压力传感器的频率响应特性。

膜片式动态压力传感器所设计的固有频率约为300 kHz，通常对60 kHz以下的压力信号有较好的响应，但受到光纤解调仪采样频率20 kHz的限制，故在20~2500 Hz频率范围内进行传感器的动态标定试验。选择20，500，1000，1500，2000，2500 Hz作为标定频率点，记录各频率点下传感器的输出值。结果表明：在20~2500 Hz内，传感器的幅值灵敏度相对误差优于±10%，能够满足动态压力的测量需求。表2为传感器在不同频率下的幅值灵敏度相对误差。

表2 传感器的幅值灵敏度相对误差

Tab.2 Amplitude sensitivity relative errors of sensor

频率/Hz	幅值灵敏度相对误差/%
20	2.4
500	3.9
1000	2.1
1500	-3.5
2000	-5.8
2500	-4.3

#### 5 结论

研制了一种膜片式光纤动态压力传感器，通过机械研磨膜片外表面的方法得到了单一的F-P干涉腔，满足了动态压力测量对传感器光谱信号的要求。该方法操作简单，一致性好，可以用于批量传感器的粗化处理。对传感器进行了0~200 kPa（表压）的静态压力标定和20~2500 Hz的动态压力标定，试验结果表明，传感器性能良好，其静态测量误差小于等于0.5 %FS，幅值灵敏度相对误差优于±10%，能够进行动态压力的测量。在后续工作中，可开展动态压力测试的实际应用研究，从而进一步验证传感器性能。

#### 参考文献

[1] 韩冰, 高超. 光纤F-P腔压力传感器的研究进展[J]. 计测技术, 2012, 32(2): 5-10.  
HAN B, GAO C. Research progress of optical fiber type Fabry-Perot pressure sensor[J]. Metrology and measure-

- ment technology, 2012, 32(2): 5-10. (in Chinese)
- [ 2 ] 高红春, 唐才杰, 蓝天, 等. 高温光纤法珀压力传感器研究进展[J]. 仪表技术与传感器, 2020, 12: 26-31.  
GAO H C, TANG C J, LAN T, et al. Review of high-temperature fiber-optic Fabry-Perot pressure sensors [J]. Instrument technique and sensor, 2020, 12: 26-31. (in Chinese)
- [ 3 ] 童杏林, 陈士猛. 基于Fabry-Perot干涉的高温温度、压力、应变、振动传感器研究进展[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(1): 1-13.  
TONG X L, CHEN S M. Research progress of temperature, pressure, strain and vibration sensors based on Fabry-Perot interference at high temperature[J]. Optics and optoelectronic technology, 2022, 20(1): 1-13. (in Chinese)
- [ 4 ] 陈显, 余尚江, 周会娟, 等. 一种F-P光纤爆炸压力传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(2): 99-101, 105.  
CHEN X, YU S J, ZHOU H J, et al. Design of a F-P optical fiber explosion pressure sensor[J]. Transducer and microsystem technologies, 2018, 37(2): 99-101, 105. (in Chinese)
- [ 5 ] 周会娟, 余尚江, 杨吉祥, 等. 光纤法布里—珀罗腔式冲击波压力传感器及其应用研究[J]. 兵工学报, 2014, 35: 328-332.  
ZHOU H J, YU S J, YANG J X, et al. Research on fiber-optic Fabry-Perot shock-wave pressure sensor and its applications[J]. Acta armamentarii, 2014, 35: 328-332. (in Chinese)
- [ 6 ] XU J C, GARY PICKRELL, YU B, et al. Epoxy-free high temperature fiber optic pressure sensors for gas turbine engine applications [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5590: 1-10.
- [ 7 ] PULLIAM W J, RUSSLER P M, FIELDER R S. High-temperature, high bandwidth, fiber-optic, mems pressure sensor technology for turbine engine component testing[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4578: 229-238.
- [ 8 ] LEACH F C P, DAVY M H, SISKIN D, et al. An optical method for measuring exhaust gas pressure from an internal combustion engine at high speed[J]. Review of scientific instruments, 2017: 1-7.
- [ 9 ] PECHSTEDT R D. Fibre optic pressure and temperature sensor for applications in harsh environments [J]. Fifth european workshop on optical fibre sensors, 2013: 1-4.
- [10] 王雪. 基于MEMS复合法珀微腔的光纤大气物理参量传感方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- WANG X. Research on fiber-optic air physical parameters sensing method based on MEMS cascade Fabry-Perot micro-cavity [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020. (in Chinese)
- [11] 唐瑛. 光纤压力传感器的光谱解调技术[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.  
TANG Y. Spectral demodulation of optical fiber pressure sensors [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)
- [12] GAO H, JIANG Y, CUI Y, et al. Dual-cavity fabry-perot interferometric sensors for the simultaneous measurement of high temperature and high pressure [J]. IEEE sensors journal, 2018, 18(24): 10028-10033.
- [13] 姜丽娟. 基于光谱的光纤法珀压力传感解调方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.  
JIANG L J. The study on the demodulation methods of optical fiber fabry-perot pressure sensor based on spectrum demodulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [14] XU J C, GARY PICKRELL, WAN X W, et al. A novel temperature-insensitive optical fiber pressure sensor for harsh environments [J]. IEEE photonics technology letters, 2005, 17(4): 870-872.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 压力传感器(静态): JIG 860-2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.  
State Administration for Market Regulation. Pressure transducer (static): JIG 860-2015 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2015. (in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 动态压力传感器: JIG 624-2005[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.  
State Administration for Market Regulation. Dynamic pressure transducers: JIG 624-2005 [S]. Beijing: China Metrology Press, 2005. (in Chinese)

(本文编辑:朱俊真)



第一作者:张慧君(1988—),女,高级工程师,硕士,主要研究方向为光纤压力传感器。