

# 一种对称式光纤束差压传感器结构及性能

胡 浩<sup>1</sup> 钟丽琼<sup>1,2</sup>

1. 贵州大学机械工程学院, 贵阳, 550025      2. 贵阳学院机械工程学院, 贵阳, 550003

**摘要:**对一种对称式光纤束差压传感器的结构及性能进行了研究。提出了一种两相同结构检测探头与桥式光路组成的对称式光纤束差压传感器, 传感器探头采用机械式封装; 对传感器进行理论研究, 建立了强度调制数学模型, 并对其进行仿真计算与分析; 最后试制出实验样机, 进行实验研究, 实验结果表明: 探头与膜片在不同设计尺寸下, 传感器具有不同的量程、输出灵敏度、检测分辨率、线性度与重复性精度。研究表明, 光纤束差压传感器具有较好的检测性能, 能满足不同检测场合的需要。

**关键词:** 光纤光学; 差压传感器; 几何光学; 性能检测

**中图分类号:** O436

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2017.03.009

## Structures and Properties of a Symmetrical Optical Fiber Bundle Differential Pressure Sensor

HU Hao<sup>1</sup> ZHONG Liqiong<sup>1,2</sup>

1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025

2. College of Mechanical Engineering, Guiyang College, Guiyang, 550003

**Abstract:** The structures and properties of a symmetrical optical fiber bundle differential pressure sensor were studied herein. First, a kind of structures of symmetrical optical fiber bundle differential pressure sensor was put forward, which consisted of two identical structure detection probes and bridge optical paths, the detection probes adopted mechanical capsulation. Second, by theoretical studies on the sensor, a intensity modulation mathematical model was established, simulation calculations and analyses were carried out. Finally, an experimental prototype was pilot produced, and experimental researches were carried out. The experimental results of show that: under different design sizes of probes and the diaphragm, sensor has different measurement ranges, output sensitivities, detection resolutions, linearity and repeatability precisions. The results show that this symmetrical optical fiber bundle differential pressure sensor has a good detection performances, which may be able to meet needs of different detections.

**Key words:** fiber optics; differential pressure sensor; geometric optics; performances detection

## 0 引言

随着现代工业技术的发展与进步, 差压传感器在许多高精度检测场合得到了越来越多的应用。从微流量测量、泄漏测试、洁净间监测、环境密封性检测到压力场分布的测量、风量的测量、人工呼吸器呼吸量的测量、房间之间的超微压差测量等领域, 无一不需要稳定可靠的差压传感器。并且, 随着现代检测技术的发展, 差压传感器的应用空间会进一步拓展, 对差压传感器的技术要求也会越来越高, 正因如此, 现今许多学者都致力于对差压传感结构的改进与性能的提高, 以期能使其更好地服务于现代工业检测领域<sup>[1-5]</sup>。现今差压传感器主要为压阻式与电容式两种。压阻式差压传感器的灵敏度与频率响应之间存在着比较突出的矛盾, 且温度对这种传感器的性能影响较大;

电容式差压传感器的缺点是寄生电容和分布电容对灵敏度和测量精度有影响, 以及与传感器连接的电路比较复杂等。正是由于传统差压传感器的诸多不足, 国内外学者开始对一些新型的差压传感器进行研究。

光纤传感器技术因具有诸多传统传感器无法比拟的优点, 在现代传感器研究中吸引了越来越多的关注<sup>[6-11]</sup>。近年来, 不断有学者致力于光纤差压传感器的研究, SHENG 等<sup>[12]</sup>、ARIAS 等<sup>[13]</sup>分别提出了一种基于布拉格光栅的光纤差压传感器结构; KINUGASA<sup>[14]</sup>提出了一种反射式光纤差压传感器; 佟成国等<sup>[15]</sup>设计了一种基于弹簧管结构的光纤差压传感器。但目前人们对传感器的实现、探头结构的合理性、反射面的工作状态、误差的补偿等许多关键因素未做深入研究。在此背景下, 本文在对传统差压传感器工作原理、性能及优缺点进行分析的基础上, 结合光纤传感技术, 提出了一种对称式光纤束差压传感器, 并对其结构及工作性能进行研究, 以期使差压传感器的研发

收稿日期: 2016-03-09

基金项目: 贵州省科技厅、贵阳市科技局、贵阳学院联合基金资助项目(LKG[2013]39); 贵州大学引进人才项目([2014]43); 贵州省科学合作计划资助项目(黔科合 LH 字[2015]7660)

得到进一步的拓展。

### 1 传感器结构

本文中的传感器采用压力检测探头与桥式光路组成的对称式结构,如图 1 所示,图中  $D_1$ 、 $D_2$  表示光电探测器, $D_1$  左侧方框与  $D_2$  右侧方框表示信号处理模块,传感器系统两光源  $S_1$ 、 $S_2$  交替发光,每次发光时间相等,光源  $S_1$  经 Y 型耦合器分为两路,一路传送到  $D_2$ ,另一路传送到检测探头 1,经反射后再传送到  $D_1$ ;光源  $S_2$  经 Y 型耦合器分为两路,一路传送到  $D_2$ ,另一路传送到检测探头 2,经反射后再传送到  $D_1$ , $D_1$ 、 $D_2$  把接收的光强信号转变为电信号输出。该传感器结构能消除因光源功率不稳定、入射光纤传输损耗等带来的误差,很好地实现对光的强度补偿。同时,该对称式双探头结构具有以下优点:可自由选择需要检测的位置进行检测;探头可直接固定于检测位置,而不用进行引流;能根据检测需要来使用几何尺寸与检测范围不同的探头,用以满足一些特殊需求等。

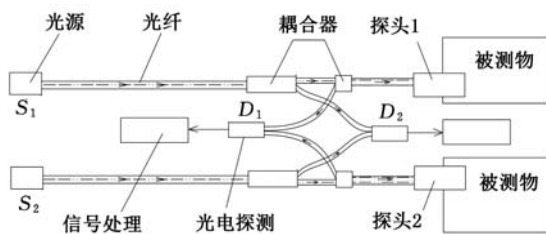


图 1 传感器系统  
Fig.1 Sensor system

对传感器探头采用机械式封装方法进行封装。如图 2 所示,该结构在检测腔内安装了具有杯状空腔的玻璃体,以减少流体的扰动。端盖与壳体采用螺纹连接,通过端盖与挡圈固定弹性膜片,光纤束固定在端盖中孔的螺纹套内,螺纹套与端盖亦采用螺纹连接,螺纹套表面标注尺寸刻度,通过螺纹套与端盖的旋进来调整光纤束与弹性膜

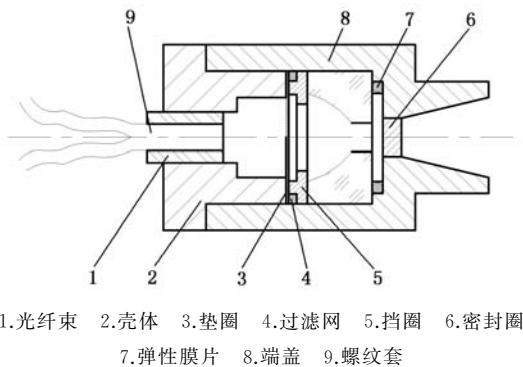


图 2 探头的机械封装结构  
Fig.2 Mechanical encapsulating structure of probe

片的距离。加工时保证传感器壳体、端盖、螺纹套等的圆度与同轴度。该机械式封装结构形成的暗腔还能避免背景光带来的噪声。

### 2 传感器理论模型

#### 2.1 数学模型

本文在传感器光纤束探头设计中,采用同轴式光纤束分布形式,这种分布形式紧凑、规则、易于加工实现。本文利用解析法原理,建立了传感器探头的强度调制模型,假设光纤出射光场强度为均匀分布。图 3 为输出光纤与反射面同轴分布的结构简图,图中  $l_{AC}$ 、 $l_{BD}$  为边界出射光线长度, $l_{CE}$ 、 $l_{DF}$  分别为其发生曲面反射后的光线长度,而反射光光锥端面  $EF$  与接收光纤端面之间的位置关系如图 4 所示,其中,TF 表示输出光纤,RF 表示接收光纤。

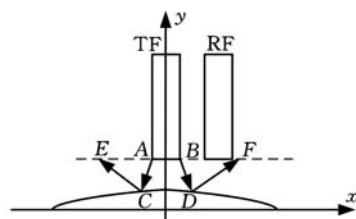
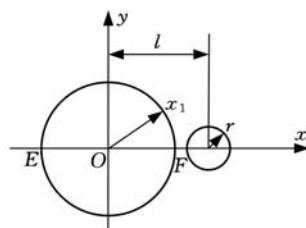
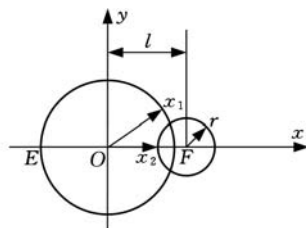


图 3 同轴分布结构简图

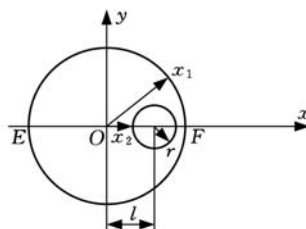
Fig.3 Coaxial distribution structure diagram



(a) 两圆相离



(b) 两圆相交



(c) 两圆相容

图 4 反射光锥与接收光纤位置

Fig.4 Position of the reflected light cone and RF

对上述分布结构进行解析法建模,可得到以下数学模型( $M$  为光强调制函数,即接收光纤接

收的光通量与入射光纤发送的光通量之比):

$$M = \begin{cases} 0 & x_1 \leq l - r \\ \frac{\mu_0 \mu_1}{\pi x_1^2} \left[ r^2 \arcsin \frac{x_2 - l}{r} + (x_2 - l) \sqrt{r^2 - (x_2 - l)^2} + \frac{\pi}{2} (r^2 + x_1^2) - x_1^2 \arcsin \frac{x_2}{x_1} - x_2 \sqrt{x_1^2 - x_2^2} \right] & l - r < x_1 < l + r \\ \mu_0 \mu_1 r^2 / x_1^2 & x_1 \geq l + r \end{cases} \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{d - n}{k_3} + m \quad x_2 = \frac{x_1^2 - r^2 + l^2}{2l}$$

$$k_3 = \frac{k_1 k_2^2 + 2k_2 - k_1}{2k_1 k_2 - k_2^2 + 1} \quad k_1 = -\cot \theta$$

$$\theta = \arcsin D_{NA} \quad k_2 = -4Am$$

$$m = \frac{\cot \theta - \sqrt{\cot^2 \theta - 8A(r \cot \theta + d - Ar_B^2)}}{4A}$$

$$n = -m \cot \theta + r \cot \theta + d$$

$$A = \frac{r_B^2 p}{64D} \quad D = \frac{Et^3}{12(1 - \mu^2)}$$

式中,  $r$  为光纤半径(这里认为两光纤半径相等,即  $r_R = r_T = r$ );  $l$  为两光纤端面中心距;  $D_{NA}$  为光纤数值孔径;  $d$  为光纤与膜片的初始距离;  $r_B$  为膜片半径;  $\mu_0$  为入射光的光功率损耗系数;  $\mu_1$  为接收光纤的损耗系数;  $x_1, x_2$  为图 4 中标示之距离;  $A$  为弹性膜片的形变系数;  $p$  为检测压力;  $E$  为弹性膜片弹性模量;  $t$  为弹性膜片厚度;  $\mu$  为泊松比。

对该数学模型进行计算,即可得到输出光纤与反射面同轴分布时的  $p - M$  曲线,分析出此时接收光强度随外界压力不同而发生变化的趋势。

### 2.2 仿真分析

由式(1)可知,传感器探头接收光强大小受到  $d, l, r, D_{NA}, r_B, A$  等参数变化的影响,下面分别对各参数进行分析,得出各参数变化时对应的  $p - M$  曲线。

图 5 所示为  $l = 140 \mu\text{m}, r = 50 \mu\text{m}, D_{NA} = 0.5, A = 0.04 \times 10^{-7}, r_B = 5 \text{ mm}$  时的  $p - M$  曲线,  $d$  越大检测范围越大;图 6 所示为  $d = 250 \mu\text{m}, r = 50 \mu\text{m}, D_{NA} = 0.5, A = 0.04 \times 10^{-7}, r_B = 5 \text{ mm}$  时的  $p - M$  曲线,  $l$  越小峰值越大;图 7 所示为  $d = 250 \mu\text{m}, l = 140 \mu\text{m}, D_{NA} = 0.5, A = 0.04 \times 10^{-7}, r_B = 5 \text{ mm}$  时的  $p - M$  曲线,  $r$  越大峰值越大;图 8 所示为  $d = 250 \mu\text{m}, l = 140 \mu\text{m}, r = 50 \mu\text{m}, A = 0.04 \times 10^{-7}, r_B = 5 \text{ mm}$  时的  $p - M$  曲线,  $D_{NA}$  越大检测范围越大;图 9 所示为  $d = 250 \mu\text{m}, l = 140 \mu\text{m}, r = 50 \mu\text{m}, D_{NA} = 0.5, A = 0.04 \times 10^{-7}$  时的  $p - M$  曲线,  $r_B$  越大检测范围越小;图 10 所示为  $d = 250 \mu\text{m}, l = 140 \mu\text{m}, r = 50 \mu\text{m}, D_{NA} = 0.5, r_B = 5 \text{ mm}$  时的  $p - M$  曲线,  $A$  越大检测范围越小。由仿真结果不难看出,各曲线变化趋势相似,均为先上升后下降,  $d, l, r,$

$D_{NA}, r_B, A$  等参数的变化会对传感器的测量范围与检测灵敏度产生影响。为了使传感器具有更好的线性度与灵敏度,设计时先以  $p - M$  特性曲线的后坡曲线作为传感器的检测区域,此时  $d, D_{NA}, r_B, A$  等参数主要影响传感器的测量范围,而  $l, r$  等参数主要影响传感器的灵敏度;再根据不同检测对象的需要,确定出各参数的具体数值,以指导传感器的结构设计。

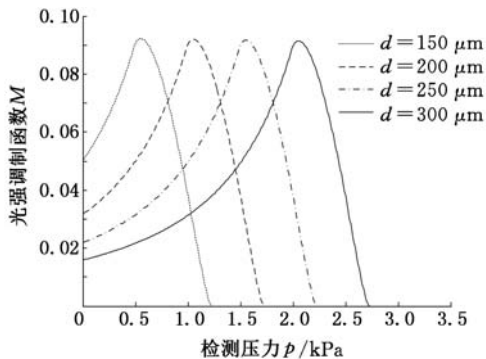


图 5  $p - M$  曲线(参数  $d$  变化)

Fig.5  $p - M$  curve(Parameter  $d$  changes)

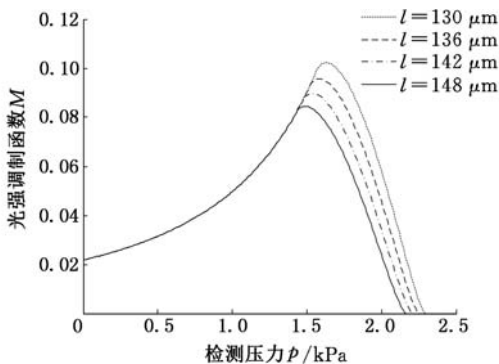


图 6  $p - M$  曲线(参数  $l$  变化)

Fig.6  $p - M$  curve(Parameter  $l$  changes)

### 3 实验结果与分析

依据上述设计及理论分析,试制出光纤束差压传感器实验样机。实验样机由以下关键元件组成:稳压电源,可编程时间继电器,峰值波长为  $650 \text{ nm}$  的红光二极管光源,1 条入射光纤与 26 条接收光纤集成同轴型光纤束,入射光纤与接收光纤均为多模光纤(数值孔径  $D_{NA}$  为  $0.2$ ,芯径为  $50 \mu\text{m}$ ),机械式封装传感器探头,光敏电阻等。

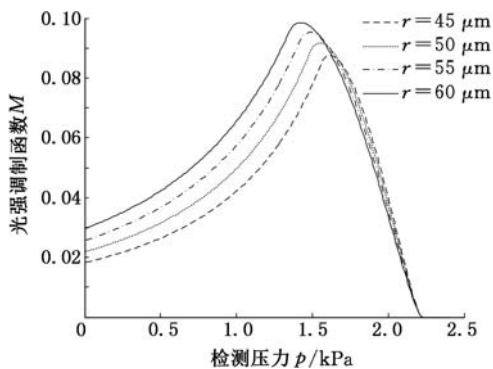


图 7  $p - M$  曲线(参数  $r$  变化)

Fig.7  $p - M$  curve(Parameter  $r$  changes)

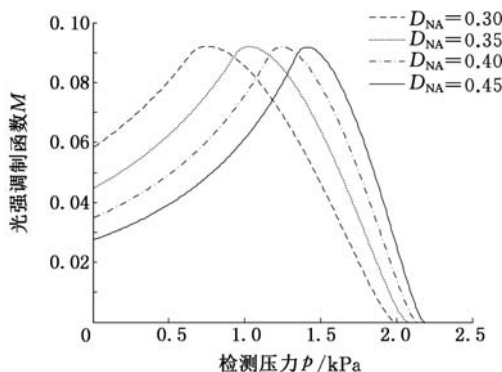


图 8  $p - M$  曲线(参数  $D_{NA}$  变化)

Fig.8  $p - M$  curve(Parameter  $D_{NA}$  changes)

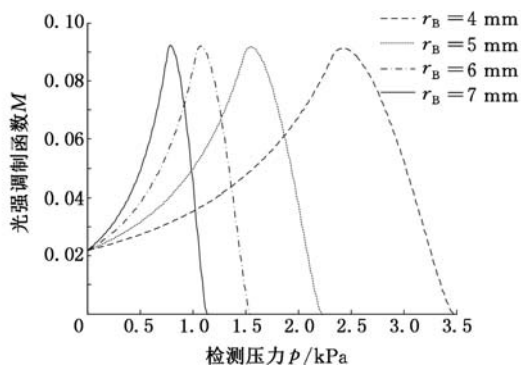


图 9  $p - M$  曲线(参数  $r_B$  变化)

Fig.9  $p - M$  curve(Parameter  $r_B$  changes)

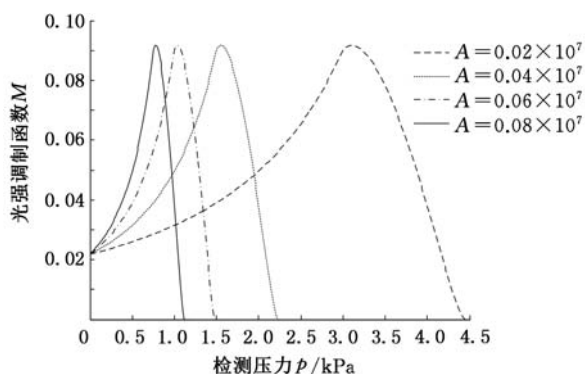


图 10  $p - M$  曲线(参数  $A$  变化)

Fig.10  $p - M$  curve(Parameter  $A$  changes)

光敏电阻接入光强度信号检测模块,先与 A/D 转换模块相连,进行光电信号的前处理,再输入计算机进行后期数据的计算。传感器探头及弹性膜片的设计加工尺寸见表 1。

表 1 探头及膜片尺寸

Tab.1 Probes and diaphragm sizes mm

探头	探头尺寸		膜片尺寸		
	内径	外径	加工半径	有效半径	厚度
$A_1, A_2$	19	21	18	16	0.1
$B_1, B_2$	21	23	20	18	0.2
$C_1, C_2$	13	15	12	10	0.2

通过对测试探头施加不同大小的压力,使得两探头之间存在一定的压力差值,来测试差压传感器在压差检测中的性能。分别对传感器探头  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$  完成以下实验:

(1)传感器探头  $A_2$  的作用压力为 0,改变传感器探头  $A_1$  的作用压力,使两检测位置实现 0、0.2 kPa、0.4 kPa、0.6 kPa、0.8 kPa、1.0 kPa 的正压差;

(2)传感器探头  $A_1$  的作用压力为 0,改变传感器探头  $A_2$  的作用压力,使两检测位置实现 0、-0.2 kPa、-0.4 kPa、-0.6 kPa、-0.8 kPa、-1.0 kPa 的负压差;

(3)传感器探头  $B_2$  的作用压力为 0,改变传感器探头  $B_1$  的作用压力,使两检测位置实现 0、2 kPa、4 kPa、6 kPa、8 kPa、10 kPa 的正压差;

(4)传感器探头  $B_1$  的作用压力为 0,改变传感器探头  $B_2$  的作用压力,使两检测位置实现 0、-2 kPa、-4 kPa、-6 kPa、-8 kPa、-10 kPa 的负压差;

(5)传感器探头  $C_2$  的作用压力为 0,改变传感器探头  $C_1$  的作用压力,使两检测位置实现 0、20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa 的正压差;

(6)传感器探头  $C_1$  的作用压力为 0,改变传感器探头  $C_2$  的作用压力,使两检测位置实现 0、-20 kPa、-40 kPa、-60 kPa、-80 kPa、-100 kPa 的负压差。

图 11~图 13 为传感器在不同的压差作用下最终的检测输出值曲线,其中,虚线为对实验数据进行最小二乘法的线性回归直线;传感器的最终输出值  $R$  为光源 1、2 发光时光电探测器  $D_1$  与  $D_2$  输出电压之比的差值。三组实验的检测量程分别为 0~1 kPa、0~10 kPa、0~100 kPa。对实验结果分析可知:传感器的输出灵敏度  $K$  分别为 0.011/(10<sup>-1</sup> kPa)、0.024/kPa、0.023/(10 kPa);检测分辨率分别为 0.5 Pa、0.003 kPa、0.01 kPa 左右;

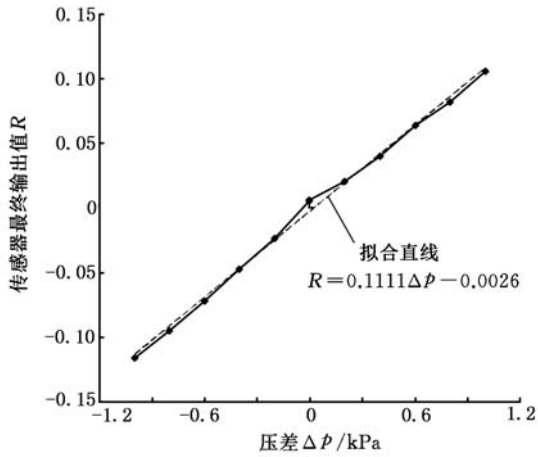


图 11 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> 压差检测曲线

Fig.11 A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub> differential pressure detection curve

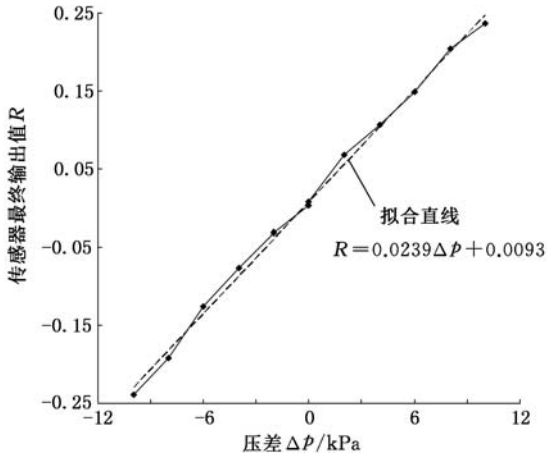


图 12 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 压差检测曲线

Fig.12 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> differential pressure detection curve

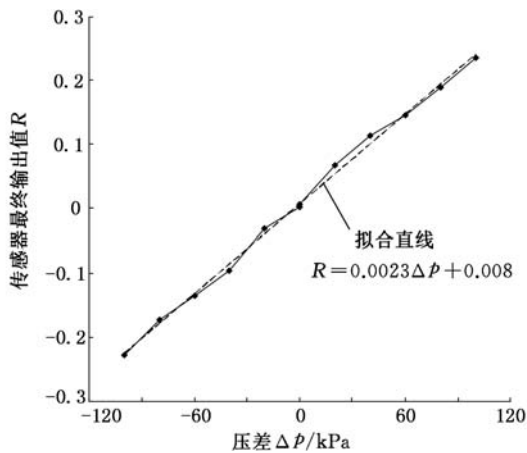


图 13 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 压差检测曲线

Fig.13 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> differential pressure detection curve

线性度分别为 3.56%、2.37%、2.8%；重复性精度分别为 0.46%、0.37%、0.4%。后期再对其进行压力标定，能很好地实现差压检测与读取。

#### 4 结论

(1) 本文设计了一种对称式的光纤束差压传感器，传感器系统由两个结构相同的压力检测探

头与桥式光路组成，对传感器探头进行机械式封装。

(2) 对传感器的理论模型进行了研究，建立了传感器的强度调制数学模型，并采用仿真软件对该数学模型进行计算与分析，得到传感器的特征  $p-M$  曲线，分析了  $d$ 、 $l$ 、 $r$ 、 $D_{NA}$ 、 $r_B$ 、 $A$  等参数的变化对传感器性能的影响。

(3) 试制出光纤束差压传感器实验样机，通过对两个测试探头施加不同大小的压力，来测试差压传感器在压差检测中的性能，根据实验结果对传感器检测性能进行分析。实验结果表明，光纤束差压传感器具有较好的检测性能，较之传统差压传感器，光纤束差压传感器的综合性能得到了提高。

#### 参考文献：

- [1] SHANMUGAVALLI M, UMA G, UMAPATHY M. Uncertainty Analysis of Micro Differential Pressure Sensor Using Interval Analysis[J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2009, 2(3): 463-476.
- [2] CHIOU J A, CHEN S. Thermal Hysteresis and Voltage Shift Analysis for Differential Pressure Sensors[J]. Sensors and Actuators, 2007, 135(1): 107-112.
- [3] MEENATCHISUNDARAM S, SIMHA A, MENON M K, et al. Lumped Parameter Modeling of Absolute and Differential Micro Pressure Sensors [J]. Sensors and Transducers, 2012, 144(9): 76-91.
- [4] HIDETOSHI T, DUNG N M, MATSUMOTO K, et al. Differential Pressure Sensor Using a Piezoresistive Cantilever[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(5): 991-1108.
- [5] PAVLIK M, HAZE J, VRBA R, et al. Smart Differential Pressure Sensor[C]//International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Angers, 2007: 244-248.
- [6] 朱佳利, 王鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 264-267.  
ZHU Jiali, WANG Ming, CAI Dongyan, et al. A Fiber Fabry-Perot Micro Pressure Sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 264-267.
- [7] 栾楠楠, 王然, 郝丛静, 等. 基于亚波长悬浮芯光纤的高灵敏度气体传感器[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 239-243.  
LUAN Nannan, WANG Ran, HAO Congjing, et al. High-sensitivity Gas Sensor Based on Suspended Core Subwavelength Fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 239-243.

(下转第 315 页)

疏表示的图像压缩感知[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(6): 193-198.

ZHAI Xuehan, ZHU Weiping, KANG Bin, et al. Compressed Sensing of Images Combining KSVD and Classified Sparse Representation[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(6): 193-198.

[13] AHARON M, ELAD M, BRUCKSTEIN A, et al. K-SVD: An Algorithm for Designing over Complete Dictionaries for Sparse Representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311 - 4322.

[14] 李玉胜. 交替方向法及其应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.

LI Yusheng. Alternating Direction Method and Its Application[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.

[15] 钟轶君. 范数最优化问题的交替方向乘子算法[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

ZHONG Yijun. Norm Optimization via Alternation Direction Method of Multipliers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[16] BOYD S, PARIKH N, CHU E, et al. Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2011, 3(1): 1-122.

[17] 李佩杰, 陆镛, 白晓清, 等. 基于交替方向乘子法的动态经济调度分散式优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2428-2435.

LI Peijie, LU Yong, BAI Xiaoqing, et al. Decentralized Optimization for Dynamic Economic Dispatch Based on Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(10): 2428-2435.

[18] ERSEGHE T. Distributed Optimal Power Flow Using ADMM[J]. IEEE Transactions on Power Systems: a Publication of the Power Engineering Society, 2014, 29(5): 2370-2380.

[19] Case Western Reserve University Bearing Data Center [EB/OL]. Cleveland: Case Western Reserve University [2013-05-01] <http://csegroups.case.edu/bearing-datacenter/pages/download-data-file>, 2013.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 孙占龙, 男, 1991年生。北京交通大学电气工程学院硕士研究生。主要研究方向为故障诊断、损伤评估及寿命预测技术。佟庆彬(通信作者), 男, 1979年生。北京交通大学电气工程

学院副教授。E-mail: tqbin818@126.com.

(上接第 309 页)

[8] KHAN M M, PANWAR N, DHAWAN R. Modified Cantilever Beam Shaped FBG Based Accelerometer with Self Temperature Compensation[J]. Sensors & Actuators A. Physical, 2014, 205(205): 79-85.

[9] TAGHIPOUR A, ROSTAMI A, BAHRAMI M, et al. Comparative Study between LPFG-and FBG-based Bending Sensors [J]. Optics Communications, 2014, 312(4): 99-105.

[10] 魏莉, 周祖德, 黄俊, 等. 一种光纤光栅非接触机械振动传感器的研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(14): 1873-1876.

WEI Li, ZHOU Zude, HUANG Jun, et al. Study on Non-contact Mechanical Vibration Sensor with FBG[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(14): 1873-1876.

[11] 丁国平, 周祖德, 胡业发. 基于光纤光栅的磁力轴承磁力在线测量系统[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1331-1334.

DING Guoping, ZHOU Zude, HU Yefa. Fibre Bragg Grating Based Magnetic Force Online Measurement System for Magnetic Bearings [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11): 1331-1334.

[12] SHENG H J, LIU W F, LIN K R, et al. High-sensitivity Temperature-independent Differential Pressure Sensor Using Fiber Bragg Gratings [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 16013-16018.

[13] ARIAS V J L, SILVA M F D, FREITAS R M, et al. Fiber Optics Differential Pressure Transducer: US, 7266261 [P]. 2006-09-04.

[14] KINUGASA S. Differential Pressure Sensor Using Common Optical Fiber Path [C]//IEEE Conference on Sensors, Daegu, 2006: 1039-1042.

[15] 佟成国, 杨军, 刘志海, 等. 双弹簧管光纤差压传感器[J]. 光子学报, 2004, 33(10): 1172-1175.

TONG Chengguo, YANG Jun, LIU Zhihai, et al. Fiber Optic Difereftial Pressure Sensor with Twin Borden Tubes [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(10): 1172-1175.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 胡 浩, 男, 1980年生。贵州大学机械工程学院讲师、博士。主要研究方向为传感器技术。E-mail: haohu0105@126.com。钟丽琼(通信作者), 女, 1981年生。贵阳学院机械工程学院副教授, 贵州大学机械工程学院博士研究生。