

光纤干涉式振动传感器中顺变柱体刚度系数的计算方法

高文智¹, 陈建冬¹, 葛兆斌², 孙 韦¹, 付群健¹, 郎金鹏¹, 常天英^{1,2*}, 崔洪亮¹

¹吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012;

²山东省科学院自动化研究所, 山东 济南 250014

摘要 从能量分配角度分析了光纤干涉式顺变柱体传感器的工作原理,给出了复合顺变柱体的等效刚度系数计算公式。采用有限元分析方法对复合顺变柱体进行固有频率的仿真,并得出光纤缠绕起始位置应该距离中间惯性振子 5 mm 的结论;实验采用固有频率测量的方法间接计算顺变柱体的等效刚度系数,对三个顺变柱体传感器进行的测量实验结果表明,该方法可作为顺变柱体复合刚度系数计算的依据。

关键词 传感器; 顺变柱体; 刚度系数; 迈克耳孙干涉; 能量分配; 振动传感器

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0310002

Calculation Method for Stiffness Coefficient of Compliant Cylinder in Fiber-Optic Interferometric Vibration Sensor

Gao Wenzhi¹, Chen Jiandong¹, Ge Zhaobin², Sun Wei¹, Fu Qunjian¹, Lang Jinpeng¹,
Chang Tianying^{1,2}, Cui Hongliang¹

¹College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

²Institute of Automation, Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China

Abstract In this paper, the principle of fiber-optic interferometric compliant cylinder sensor is analyzed from the perspective of energy distribution, and the compound compliant cylinder calculation formula of the equivalent stiffness coefficient is given. Finite element analysis method is used to simulate the natural frequency of the compound compliant cylinder, and the simulation results show that the distance from wrapped position of the fiber-optic to the intermediate inertia oscillator should be 5 mm. In the experiment, the natural frequency measurement method is used to indirectly calculate the equivalent compliant cylinder stiffness coefficient. The experimental results from the measurement of three different compliant cylinder sensors show that the proposed method can be used as the basis of the calculation of the compliant stiffness coefficient.

Key words sensors; compliant cylinder; stiffness coefficient; Michelson interference; energy distribution; vibration sensor

OCIS codes 280.4788; 060.2310; 120.3180; 060.2370

1 引 言

随着光纤技术的迅猛发展,光纤传感技术有了长足进步并日趋成熟^[1]。相比于传统传感技术,光纤传感

收稿日期: 2016-10-23; 收到修改稿日期: 2016-12-14

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(201405026-01)

作者简介: 高文智(1993—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术及其应用方面的研究。

E-mail: gaowenzhi_gwz@163.com

导师简介: 崔洪亮(1956—),男,博士,教授,主要从事光纤通信和传感、太赫兹科学与技术等方面的研究。

E-mail: hcui@jlu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: tchang@jlu.edu.cn

技术有着测量精度高、动态范围大、本征无源安全及抗电磁干扰等独特优点^[2]。光纤干涉式振动传感技术是光纤传感技术的重要分支,该技术将被测信号通过干涉方法转化为相应的光强变化,在测量分辨率和测量精度方面有明显的优势,并且广泛应用于地震监测、海啸预警、水听声呐等方面^[3-5]。

光纤干涉式振动传感技术中多采用顺变柱体作为光纤干涉式振动传感器的探头,其作为换能元件可以将振子的轴向振动转化为光纤长度的拉伸^[6]。但是由于材料属性和制作工艺的不同,顺变柱体的等效刚度系数没有一种确定的测试方法,目前的研究通常采用 Gardner 等^[7]提出的计算方式,将硅胶柱体弹性势能和缠绕光纤弹性势能按照 1:1 的比例进行能量分配,并得出相应等效刚度系数的计算方法。但缠绕光纤与硅胶柱体的杨氏模量相差约 3 个数量级,几何直径相差约 3 个数量级,采用该方法计算等效刚度系数的误差较大。此外丁桂兰等^[8]报道了一种顺变柱体型全光纤加速度检波器,推导了硅胶柱体刚度系数和缠绕光纤刚度系数之间的关系。本文侧重研究的顺变柱体等效刚度系数的计算方法,是相对于顺变柱体整体性质进行的研究,是在前人研究的基础上进行的理论推进。光纤干涉式振动传感器仍处于实验室研发阶段,因此深入了解光纤干涉式振动传感器的顺变柱体刚度系数的计算方法及其等效模型的建立,对光纤干涉式振动传感器的理论发展以及实际应用有着非常关键的作用。

本文深入研究了光纤干涉式顺变柱体传感器,详细介绍了顺变柱体的工作原理和结构特点,对顺变柱体进行了建模,并对顺变柱体的等效刚度系数的计算方法进行了讨论。通过对不同型号的光纤干涉式振动传感器进行的测试,验证了理论的正确性。

2 基本原理

光纤干涉式振动传感器用于海底振动监测,传感部分为全光纤设计,有效地克服了电磁式海洋地震传感器需要电供应、易受电磁干扰和体积庞大等缺点。光纤干涉式振动传感器可以将海底的振动信号通过干涉的方法转化为相应的光相位变化,进一步转化和解调光相位信号就可以得到振动信息,灵敏度高。光纤干涉式振动传感器在海啸地质灾害预警方面有着重要的作用,光纤干涉式振动传感技术作为第二代地震海啸观测预警的核心技术有着广阔的应用前景。

光纤干涉式振动传感器多采用迈克耳孙干涉式结构,系统的原理如图 1 所示。系统由迈克耳孙干涉仪组成,分布反馈式激光器(DFB-LD)输出的激光经过隔离器(ISO)输入到环形器 C1 中,环形器的 b 端口和 c 端口分别接 3 dB 耦合器和 PIN 光电探测器。环形器的 b 端口经 3 dB 耦合器将入射光分成相等光强的两束,分别进入迈克耳孙干涉仪的两路干涉臂之中。传感光纤的末端接有法拉第旋转镜,入射光在法拉第旋转镜上发生反射后按原光路返回,两束光在 3 dB 耦合器内发生干涉,将相应的光相位的变化转化为光强的变化,法拉第旋转镜的使用消除了干涉光路中偏振衰落的影响^[9-10]。干涉光经过环形器 c 端口输入到 PIN 光电探测器上,并将相应的光信号转化为电信号后输入到上位机进行解调,解调后得到相应光相位的变化,进一步分析就可以得到振动的相关信息^[11]。

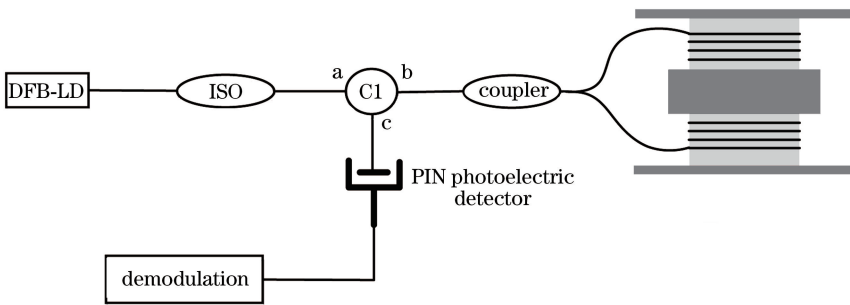


图 1 光纤干涉式振动传感器系统框图

Fig. 1 Block diagram of fiber-optic interferometric vibration sensor system

顺变柱体振动传感器由两个硅胶柱体和一个质量块组成,硅胶柱体采用稳定度高的硫化橡胶浇铸形成。每一个硅胶柱体上面紧密地缠绕着单模光纤,构成了迈克耳孙干涉仪的两臂,其模型为受迫振动弹簧阻尼质量系统,硅胶柱体和光纤复合后等效为刚度系数确定的弹簧,阻尼来自振动部件间的摩擦,质量来自硅胶柱

体等效质量以及金属惯性振子的质量。

顺变柱体振动传感器会封装在机壳内部,当有外界振动时传感器探头的机壳首先振动,之后内部惯性振子振动,产生对硅胶柱体的拉伸和压缩作用,构成推挽结构^[12];缠绕在硅胶圆柱表面的光纤长度随之改变,在光纤中传输的光的光程差也随之变化,该变化影响干涉信号的变化。此时,顺变柱体将质量块的轴向运动转化为光纤张力,即起到了换能元件的作用。

缠绕着光纤的顺变柱体分别作为迈克耳孙干涉仪的两臂,形成互补推挽输出,这样环境温度和压力引起的相位变化可以在两臂内相抵消^[13],可以有效避免环境温度和压力对系统的影响。迈克耳孙干涉仪结构提高了传感器的灵敏度水平,使得传感相位变化信号可以双倍输出^[14-15]。由于上下硅胶柱体的属性相同,只有在纵向振动上才可以引起光纤长度的变化,横向上的振动只能带来硅胶柱体微小的形变,因此顺变柱体有很高的横向抑制性。硅胶柱体和质量块之间有相互匹配的凹槽,能够使得硅胶柱体和质量块紧密连接,提高了质量块动能转化为顺变柱体弹性势能的效率,并且进一步增加了顺变柱体的横向抑制比。

3 理论计算

由于硅胶柱体径向上紧紧缠绕着光纤,当硅胶柱体轴向受到压力时,径向会向外膨胀,而光纤会对硅胶柱体产生向内紧收的作用,阻碍了硅胶柱体的形变,振子传递的能量就会在硅胶柱体和缠绕光纤上发生相应的能量分配。在实际应用中,当质量块产生振动时,其相应的动能转化为硅胶柱体和缠绕光纤的弹性势能以及摩擦产生的热损耗。由于缠绕光纤和硅胶柱体的力学作用不同,二者分配的势能也会不同,因此将缠绕光纤和硅胶柱体等效成为两个刚度系数不同的弹簧,二者对质量块起支持作用并参与能量的分配。下面对模型(图 2)的建立和参数进行分析。

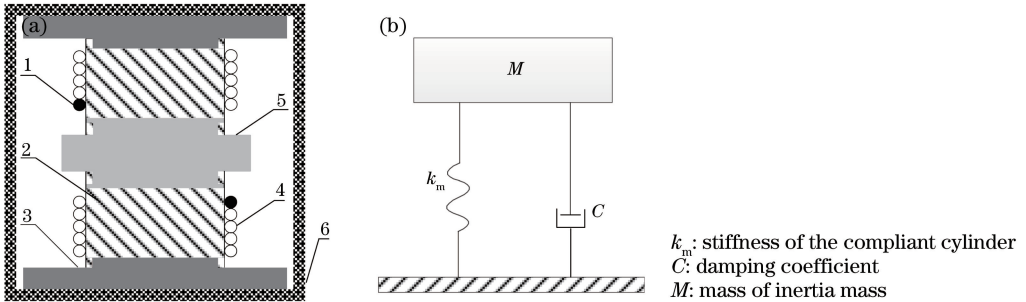


图 2 (a)顺变柱体剖面图;(b)顺变柱体等效模型

Fig. 2 (a) Compliant cylinder profile; (b) compliant cylinder equivalent model

如图 2 所示,硅胶柱体的直径为 D ,高度为 H ,光纤缠绕的圈数为 N ,光纤的直径为 d ,硅胶柱体上单圈光纤的长度 $l = \pi D$,光纤的横截面积为

$$A_f = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

光纤的杨氏模量为 Y_f ,硅胶柱体的杨氏模量为 Y_r ,则对于单圈光纤来说,光纤等效的刚度系数为

$$K_f = \frac{Y_f A_f}{l} = \frac{Y_f d^2}{4D}, \quad (2)$$

同理得到相应的硅胶柱体的等效刚度系数为

$$K_r = \frac{Y_r \cdot \pi [(D/2)]^2}{H} = \frac{Y_r \pi D^2}{4H}. \quad (3)$$

单圈光纤中所存有的弹性势能为

$$E_{f1} = \frac{1}{2} K_f (\Delta l)^2 = \frac{1}{2} K_f (\pi \Delta D)^2, \quad (4)$$

硅胶柱体上缠绕的 N 圈光纤具有的总势能为

$$E_f = N \cdot E_{f1} = \frac{1}{2} N K_f (\Delta l)^2 = \frac{1}{2} K_f N (\pi \Delta D)^2. \quad (5)$$

硅胶弹性柱体的刚度系数为 K_r ，由于顺变柱体为互补推挽结构，那么上下的硅胶柱体为并联弹簧关系，可得整体硅胶柱体的刚度系数为 $2K_r$ 。硅胶柱体的弹性势能为

$$E_r = \frac{1}{2} \cdot (2K_r) \cdot (\Delta H)^2 = K_r \cdot (\Delta H)^2, \quad (6)$$

径向形变不改变圆柱体的体积，由此可以得到：

$$-\frac{2\Delta D}{D} = \frac{\Delta H}{H}, \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式得到硅胶柱体所存有的弹性势能为

$$E_r = \frac{1}{2} 2K_r \left(-\frac{2H}{D} \Delta D \right)^2 = 4K_r \left(\frac{H}{D} \right)^2 (\Delta D)^2, \quad (8)$$

硅胶柱体分配的能量和缠绕光纤中分配的能量比值系数为

$$\frac{E_r}{E_f} = \frac{4K_r [(H/D)]^2 (\Delta D)^2}{\frac{1}{2} NK_f \pi^2 (\Delta D)^2} = \frac{8K_r}{NK_f \pi^2} \left(\frac{H}{D} \right)^2. \quad (9)$$

顺变柱体复合刚度系数为 K_m ，顺变柱体作为换能元件将质量块的动能转化为顺变柱体本身的势能（忽略机械摩擦），硅胶柱体上的弹性势能和缠绕光纤中的弹性势能之和即为势能的总和：

$$E_{\text{total}} = \frac{1}{2} K_m (\Delta H)^2 = E_f + E_r = \frac{1}{2} \frac{8K_r H^2 + NK_f \pi^2 D^2}{4H^2} (\Delta H)^2, \quad (10)$$

通过(10)式可以得出相应的顺变柱体的刚度系数为

$$K_m = \frac{8K_r H^2 + NK_f \pi^2 D^2}{4H^2}. \quad (11)$$

实际的顺变柱体的相关参数如表 1 所示。

表 1 硅胶柱体和光纤的机械参数

Table 1 Mechanical parameters of silica rubber cylinder and fiber

Parameter	Symbol	Value and unit
Optical fiber elastic modulus	Y_f	72 GPa
Optical fiber diameter	d	125 μm
Compliant cylinder diameter	D	50 mm
Compliant cylinder height	H	32 mm
Optical fiber turns	N	42
Mass of inertia mass	M	411 g

硅胶柱体的杨氏模量的数值范围为 0.2~0.8 MPa，由此可以计算得到相应的硅胶柱体的刚度系数 K_r 的范围为 $1.23 \times 10^4 \sim 4.909 \times 10^5$ N/m。由能量分配的比例关系可以得出 E_r/E_f 的范围为 0.0013~0.5268。

由此可知，在忽略摩擦阻尼损耗的情况下，势能主要存储在缠绕光纤上，而硅胶柱体起到了换能的作用。由能量总量不变可以得到顺变柱体的等效刚度系数的范围为 $1.448 \times 10^6 \sim 2.846 \times 10^6$ N/m。

对复合顺变柱体进行有限元分析，选取需要仿真的顺变柱体刚度系数参数值为 1.55×10^6 N/m。顺变柱体振动传感器的固有频率分析结果如图 3 所示，其前三个模态固有频率仿真结果分别为 184.35, 184.40, 245.02 Hz。

仿真中对上下基座进行固定约束，对顺变柱体进行振动激励，仿真结果显示的是相对于基座的位移，可以看出越接近中间惯性振子，硅胶柱体的颜色越深，表示相对位移变化越大，最大相对位移发生在与中间惯性振子相邻的 5 mm 范围内，此范围外顺变柱体产生的位移量仿真结果约为 0.6 mm。通过仿真分析结果可以指导实际顺变柱体的最佳光纤缠绕位置，即将光纤集中缠绕在距离中间惯性振子 5 mm 范围以外的硅胶柱体的圆周上。

4 实验与分析

由于顺变柱体被封装在传感探头机壳内，不方便对其复合刚度系数进行直接测量，因此采用测量固有频

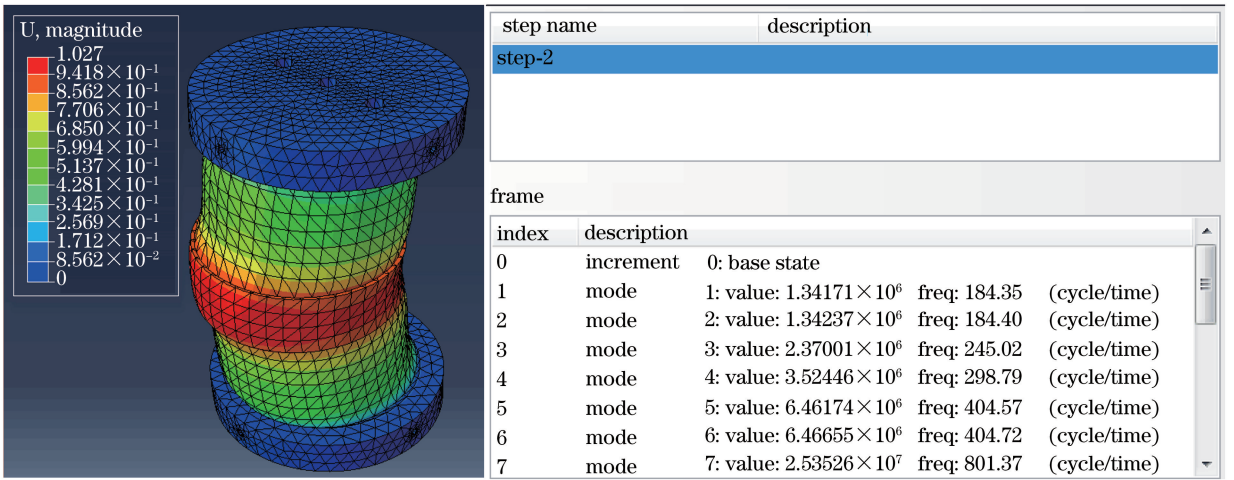


图 3 顺变柱体振动传感器有限元分析结果

Fig. 3 Finite element analysis results of compliant cylinder vibration sensor

率的方法,间接推导出相应的顺变柱体的刚度系数^[16]。由固有频率和振动幅度的关系可以看出,在固有频率附近顺变柱体的振动幅度最大,但实验中不能直接观察固有频率引起的振动幅度的变化。由于振幅越大光纤干涉式传感器的相位调制深度值越大,顺变柱体的输出灵敏度就越高,于是将固有频率的测量转化为顺变柱体灵敏度的测量。通过调节振动台的振动频率进行顺变柱体灵敏度测量,顺变柱体的输出灵敏度最大时对应的振动频率即为顺变柱体的固有频率测量值。对于弹簧质量系统[图 2(b)],固有频率和振子质量的关系如下所示:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad (12)$$

式中 K 为振子的刚度系数, M 为振子的质量。通过(12)式反推得到振子的刚度系数 K 的数值为

$$K = 4M\pi^2 f_n^2. \quad (13)$$

对于顺变柱体来说,与质量块连接的硅胶柱体分别对质量块有支撑和悬吊的作用,所以顺变柱体的刚度系数应为测量值的 2 倍。通过(13)式可得到顺变柱体刚度系数 K_m 的数值为

$$K_m = 8M\pi^2 f_n^2. \quad (14)$$

将传感器机壳固定在振动台上,机壳振动时会带动顺变柱体振动,调整振动台的振动频率,分别测量顺变柱体的灵敏度响应,就可以得出不同型号的传感器顺变柱体的固有频率测量曲线。本实验选取的光纤干涉式振动传感器为项目支持研发的第三代传感器产品,相比于前两代传感器其固有频率稳定性更好。分别标记为 JDIII-1 型、JDIII-2 型、JDIII-3 型,三种型号的顺变柱体固有频率测量曲线如图 4 所示。

由图 4 可以得出 JDIII-1 型、JDIII-2 型、JDIII-3 型顺变柱体的固有频率分别为 250, 220, 210 Hz。由此可以得出 JDIII-1 型、JDIII-2 型、JDIII-3 型顺变柱体的刚度系数分别为 2.196×10^6 , 1.701×10^6 , 1.550×10^6 N/m。

为验证实验的准确性,对 JDIII-1 型光纤干涉式振动传感器进行了重复性实验。在恒定室温和排除其他振动干扰源的情况下对 JDIII-1 型光纤干涉式振动传感器进行了三组重复性实验,结果如图 5 所示。在图中可以看出三组重复性实验测得的顺变柱体的固有频率均为 250 Hz,并且三组实验的灵敏度的变化趋势和数值差别不大,说明光纤干涉式振动传感器具有良好的可重复性。进一步得知对于 JDIII-1 型、JDIII-2 型、JDIII-3 型顺变柱体固有频率测量数值精密度高,测量准确性好。

通过实验数据可以发现,三种顺变柱体的刚度系数数值均在建立模型的理论范围之内。但测量数值靠近理论范围的下限阈值,这种不一致来自于机械效率、光纤与硅胶的耦合程度等因素,可通过采用机电式光纤自动缠绕机制作复合顺变柱体的方式加以改善,这将是下一步的研究工作。实验进行的测量环境是实验室内室温条件,光纤干涉式振动传感器所应用的海底环境是恒温的,温度的变化会使硅胶柱体的性质发生变化,进而影响到相应的刚度系数,具体的影响作用有待进一步的研究。实验结果说明,采用细致能量分配的

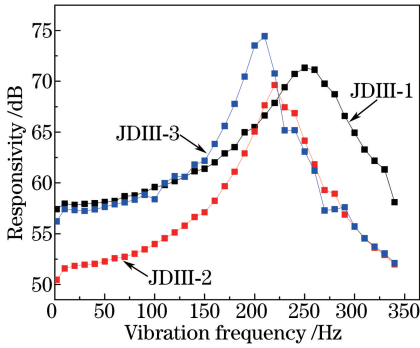


图 4 顺变柱体固有频率测量曲线

Fig. 4 Natural frequency measurement curves of the compliant cylinders

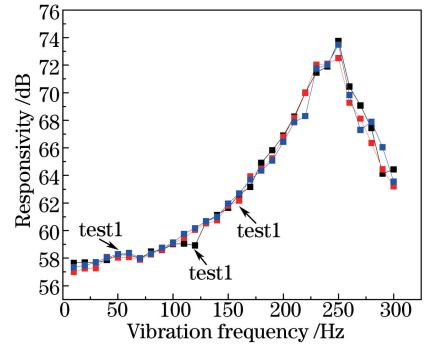


图 5 JDIII-1 型顺变柱体固有频率重复性实验测量结果

Fig. 5 Repetitive experimental measurement results of natural frequency for JDIII-1 compliant cylinder

计算方法对光纤干涉式振动传感器的顺变柱体刚度系数的计算是有效的。由于光纤干涉式振动传感器有多种形式,而盘片式光纤干涉式振动传感器与顺变柱体式光纤干涉式振动传感器的原理相似,可推断该计算方法也可适用于盘片式光纤干涉式振动传感器的等效刚度系数的计算。

5 结 论

依据能量分配原则给出光纤干涉式振动传感器中顺变柱体等效刚度系数的理论计算方法,建立了顺变柱体的能量分配的模型,从理论上得到顺变柱体的刚度系数的计算公式,并采用有限元方法分析了共振现象发生时,顺变柱体上位移的分布情况,得出光纤应当缠绕在距离中间惯性振子 5 mm 范围之外的位置。利用三款传感器进行灵敏度测量并获得固有频率,间接获得顺变柱体的等效刚度系数,从实验结果可知,该方法可以作为顺变柱体刚度系数的理论计算方法,对特定数值刚度系数的顺变柱体的设计具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Lee B H, Kim Y H, Park K S, *et al.* Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(3): 2467-2486.
- [2] Kirkendall C K, Dandridge A, *et al.* Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(18): R197-R216.
- [3] Teixeira J G V, Leite I T, Silva S, *et al.* Advanced fiber-optic acoustic sensors[J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(3): 198-208.
- [4] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: an overview[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2000, 82(1): 40-61.
- [5] Du Zhiqian, Ni Feng, Xiao Faxin, *et al.* Development and application of optical fiber sensing technology[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2014, 29(6): 7-12.
杜志泉, 倪 锋, 肖发新, 等. 光纤传感技术的发展与应用[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(6): 7-12.
- [6] Ni Yanru. Physical analysis on sensing principle of one fiber-optic accelerometer[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science)*, 2008, 22(12): 90-92.
倪艳茹. 一种光纤加速度计传感原理的物理学分析[J]. *重庆工学院学报(自然科学版)*, 2008, 22(12): 90-92.
- [7] Gardner D, Hofler T, Baker S, *et al.* A fiber-optic interferometric seismometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1987, 5(7): 953-960.
- [8] Ding Guilian, Liu Zhenfu, Cui Yuming, *et al.* An all-fiber optic accelerometer base on compliant cylinders[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 340-343.
丁桂兰, 刘振富, 崔宇明, 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器[J]. *光学学报*, 2002, 22(3): 340-343.
- [9] Lü Wenlei, Pang Meng, Wang Liwei, *et al.* Study on optic fiber gradient hydrophone based on composite structures of compliantly variable cylinder and diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 340-346.
吕文磊, 庞 盟, 王利威, 等. 基于顺变柱体和膜片复合结构的压差式光纤矢量水听器研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 340-346.
- [10] Jing Zhenguo, Yin Kai, Zhang Min, *et al.* Polarization induced fading elimination technique for interferometric optical

- fiber sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(8): 2024-2027.
- 荆振国, 殷 锴, 张 敏, 等. 干涉型光纤传感器的偏振衰落技术研究[J]. 光子学报, 2009, 38(8): 2024-2027.
- [11] Pei Yapeng, Yang Jun, Yuan Libo. Principle of fiber optic interferometric sensors and their phase demodulation techniques[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(3): 17-21.
- 裴雅鹏, 杨 军, 苑立波. 光纤干涉型传感器原理及其相位解调技术[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3): 17-21.
- [12] Wang Ting. Study on interferometric fiber optic accelerometer system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005: 19-21.
- 王 婷. 干涉型光纤加速度计系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005: 19-21.
- [13] Liu Zhenfu. Research on all-fiber optic acceleration seismic geophone based on compliant cylinders[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002: 19-20.
- 刘振富. 顺变柱体型全光纤加速度地震检波器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2002: 19-20.
- [14] Yan Zhigang, Ding Guilan, Chen Caihe, *et al.* Three-component all-fiber acceleration seismometer and digital processing system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1413-1417.
- 严志刚, 丁桂兰, 陈才和, 等. 三分量全光纤加速度检波器及数字处理系统[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1413-1417.
- [15] Yao Jianyong, Zhang Sen, Wang Zhen, *et al.* Theory and application analysis of optical fiber Michelson interferometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2007(5): 23-25.
- 姚建永, 张 森, 王 臻, 等. 光纤迈克尔逊干涉仪的理论与应用分析[J]. 仪表技术与传感器, 2007(5): 23-25.
- [16] Liu Yang, Chen Caihe, Ding Guilan, *et al.* Hollow-compliant-cylinder-type three-component all-fiber acceleration geophone[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2003, 14(11): 1138-1141.
- 刘 洋, 陈才和, 丁桂兰, 等. 空心顺变柱体型三分量全光纤加速度地震检波器[J]. 光电子•激光, 2003, 14(11): 1138-1141.