

doi:10.3788/gzxb20184702.0206002

基于光纤多普勒效应的超声传感方法

李岩,周次明,田涛,欧艺文,范典,王洪海

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室,武汉 430070)

摘 要:通过光纤频移干涉技术测量了超声在光纤中产生的多普勒频移,提出一种光纤超声传感方法.将缠绕在压电陶瓷上的光纤环接入到频移干涉萨格拉克干涉仪中,以压电陶瓷作为超声波信号源,调节声光调制器使得干涉信号偏置在零点,达到系统灵敏度最高,通过干涉信号的频率和幅值测量到了超声引起光纤环中发生的多普勒频移,进而获得了作用在光纤环上的超声波信号.实验结果表明,用该方法测量超声频率的相对误差为 0.001%,频响在所测量的 20~200 kHz 范围内具有良好的线性.该方法在管道健康监测、固体内部裂缝监测、大型机械装备结构损伤监测等方面具有应用前景.

关键词:光纤传感器;超声测量;频移干涉;多普勒效应;多普勒频移

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0206002-6

Ultrasonic Sensing Method Based on Optical Fiber Doppler Effect

LI Yan, ZHOU Ci-ming, TIAN Tao, OU Yi-wen, FAN Dian, WANG Hong-hai

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Doppler frequency shift in optical fiber is measured by fiber frequency shift interferometry, and a method of optical fiber ultrasonic sensing is obtained. The optical fiber loop wound on the piezoelectric ceramic is inserted into the frequency-shift interference Sagnac interferometer, where the piezoelectric ceramic is taken as the ultrasonic signal source, the acousto-optic modulator is adjusted so that the interference signal is biased at the zero point to reach the highest sensitivity of the system. Through the frequency and amplitude of the interference signal, the Doppler frequency shift in the fiber loop caused by ultrasound is measured, and the ultrasonic signal acting on the fiber loop is obtained. The experimental results show that, the relative error of the sensing method is 0.001% for the ultrasonic frequency measurement, and the frequency response has a good linearity in the measured range of 20 kHz to 200 kHz. There are some application prospects of the proposed method in the aspects of pipeline health monitoring, solid internal crack monitoring and structural damage monitoring of large machinery and equipment.

Key words: Fiber optic sensors; Ultrasonic measurement; Frequency shift interferometry; Doppler effect; Doppler shift

OCIS Codes: 060.2370; 280.4788; 280.3340

0 引言

超声波作为一种穿透力极强的波已经被广泛用到各个领域的监测和检测之中,如海底探潜、结构健康监测、地震物理模型成像等^[1].最常用的超声波传感器核心元件是压电换能器,其主要原理是利用机械共振的

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61377091, 61505152),预研领域基金项目(No.6140243010116QT69001),湖北省科技厅支撑计划(No.2015BAA214)资助

第一作者:李岩(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术.Email:419375900@qq.com

导师(通讯作者):周次明(1973-),男,博导,博士,主要研究方向为光纤传感.Email:zcm@whut.edu.cn

收稿日期:2017-08-09;**录用日期:**2017-11-17

<http://www.photon.ac.cn>

方式接受超声波信号,并转化为电信号传输至解调装置.它的工作方式决定了其带宽极窄,且对于不同的波形需要设计出不同的探针结构,复用性差^[2],并且环境的电磁干扰对压电换能器的稳定工作有极大的影响.近年来发展起来的光纤超声传感器具有灵活性、高强度、耐热性、抗电磁干扰、耐用性和耐腐蚀性能等独特的优势^[3],因此研究光纤超声传感器具有重要的意义和实用价值.

光纤超声传感器主要通过检测光的强度、相位、波长等基本参数达到测量超声波的目的.根据传感结构,光纤超声传感器可以分为强度调制型光纤超声传感器、光纤光栅超声传感器、干涉型光纤超声传感器^[3].强度调制型光纤超声传感器的主要原理是待测信号作用在传感器上,通过解调系统获取传感器上光纤中的光强变化实现传感.此类传感器具有宽频带的响应和较好的灵敏度,但是测得信号的信噪比不高,容易受光源和传感系统的结构影响^[4-5].光纤光栅超声传感器核心元件是光纤布喇格光栅,通过检测中心波长的漂移解调出待测信号,具有优良的复用性,可以在一根光纤上串联多个光纤光栅,在系统稳定性、大规模网络化方面具有明显的优势^[6-7].但是它只对光纤轴向应变具有很好的灵敏度,对光纤径向产生的应变则无法检测出来,限制了这种传感器在一定场合下的运用.干涉型光纤超声传感器是由两束或者多束光之间进行干涉,利用光波相位易受光纤应变影响这一特点来测量超声波信号的幅频特性.干涉型超声传感器的优点在于它拥有极高的灵敏度和较强的稳定性,但是缺点也是由于太过敏感导致易受外界条件影响,需要在解调过程中对信号进行放大、滤波、除噪等处理^[8-9].

多普勒效应早在 1842 年就已经被发现,经过 150 年的发展时间,基于多普勒效应制作的光纤传感器十分普遍.1964 年 Goldstein 等研制出世界上第一台激光多普勒测速仪,用来测量湍流的流速^[10].1983 年南安普顿大学的光振研究所研制出用于测量物体振动的激光多普勒测振仪^[11].1997 年 Larry.Fabiny 等研制的光纤速度干涉仪,通过测量运动物体上反射光的多普勒效应实现了 1~1000m/s 速度测量范围^[12].近年来 Ohsawa, K.Kageyama 等研制出一种光纤多普勒效应的传感器用于探测复合材料的裂缝的产生^[13].本文提出了一种基于光纤多普勒效应的超声传感器,并采用频移干涉(Frequency-Shifted Interferometry, FSI)解调方法^[14-15]测量了超声在光纤中产生的多普勒频移.结果表明,本文方法测量超声频率的相对误差为 0.001%,频响在所测量的 20~200 kHz 范围内具有良好的线性.

1 频移干涉原理和光纤多普勒效应

图 1 为频移干涉光路中 Sagnac 环的示意图.图中, L_1 表示耦合器 C_1 到传感器之间光纤的长度, L_2 表示传感器上光纤的长度, L_3 表示传感器到声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)之间光纤的长度, L_4 表示 AOM 到耦合器 C_1 之间光纤的长度.光经过超声信号作用后产生的频移为 f_D ,称为多普勒频移.AOM 产生的频移为 f_0 ,单模光纤有效折射率为 n ,光速为 c ,光源的频率为 ν_0 ,若干涉光的光强为 I_{ac} ,则^[10]

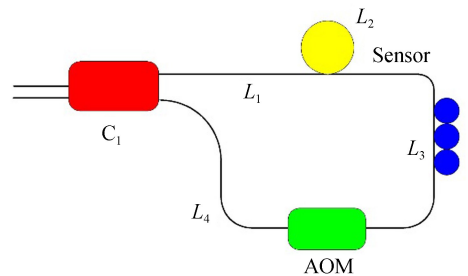


图 1 Sagnac 环示意图
Fig.1 Sagnac ring diagram

$$I_{ac}(\varphi) = I_0 \cos \left\{ \frac{2\pi n}{c} [f_D(L_4 + L_3 - L_1) + f_0(L_4 - L_1 - L_2 - L_3)] \right\} \quad (1)$$

式中, I_0 为余弦函数的振幅,正比于光强.在没有多普勒频移时,即 $f_D = 0$ 的时候,调节 AOM 频移 f_0 使干涉信号恰好偏置于余弦函数零点,即

$$\frac{2\pi n}{c} f_0 (L_4 - L_1 - L_2 - L_3) = m\pi \pm \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

则此时在零点附近,相位变化最为敏感,若加入多普勒频移 f_D ,引起的变化最大.当 φ 远小于 $\pi/2$ 时,光强的变化与多普勒频移呈线性关系,此时光强变化为

$$I_{ac}(\varphi) = I_0 \frac{2\pi n}{c} f_D (L_4 + L_3 - L_1) \quad (3)$$

通过测量干涉信号 $I_{ac}(\varphi)$,即可得出振动的频率和振幅信息.

假设光波在折射率为 n 的光纤中传播,光纤的长度为 L ,光波的频率为 f_0 ,光在真空中的波长为 λ_0 。当振动使光纤的长度发生改变,在极短的时间 dt 内,光纤由长度 L 变为 $L+dL$ 时,产生的多普勒效应使光的频率由 f_0 变为 f_0+f_D 。若将光纤绕成圆环,多普勒频移量 f_D 与光纤长度应变率之间的关系为^[1]

$$f_D = -\frac{\pi R N n}{\lambda_0} (\epsilon_x + \epsilon_y) \quad (4)$$

式中, R 表示光纤圆环的半径, N 表示光纤圆环的圈数, ϵ_x 表示在 x 轴方向的应变率, ϵ_y 表示在 y 轴方向的应变率。

实验时超声信号作用在光纤环上,使光纤环在 x 轴方向和 y 轴方向发生应变,产生的多普勒频移量 f_D 经过频移干涉技术转变为干涉信号的变化,并由示波器采集得到。

2 实验结果与讨论

图 2 为频移干涉系统结构示意图,系统主要包括:可调谐半导体激光器(Santec, TSL-510)、环形器、 2×2 的 3 dB 耦合器、平衡探测器(New Focus 2117, 10MHz bandwidth)、声光调制器、偏振控制器、函数信号发生器、压电陶瓷、示波器。实验所用的传感器是将单模光纤紧密缠绕在圆筒形压电陶瓷上,总共缠绕了 42 圈,长度为 5 m。压电陶瓷是 Newport 公司生产的圆筒形压电陶瓷,直径约为 35 mm,极化方向是半径方向。

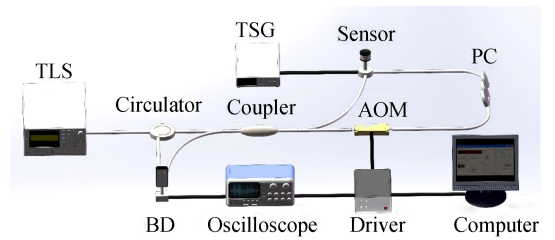


图 2 频移干涉系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the frequency-shifted interferometry

实验时可调谐半导体激光器的输出功率保持在 2 mW,输出波长为 1 560 nm,调节 AOM 在 90~110 MHz 范围内扫描,并保证 AOM 扫描与示波器采集同步。未加入多普勒频移 f_D 时,示波器上显示的干涉信号为一断开的正弦信号,每段代表 AOM 扫描的一个周期,如图 3。其中每段信号的左端点为 90 MHz,信号的右端点为 110 MHz,通过计算当 $f_0 = 95.5$ MHz 时式(2)成立,调节 AOM 使 $f_0 = 95.5$ MHz 干涉信号偏置在零点,此时示波器上由断开的正弦信号变为显示在 0 点处的一条连续直线。

用信号发生器给压电陶瓷施加一个正弦的输入电信号,即引入了多普勒频移 f_D ,通过式(3)可知此时光强也应呈现正弦变化,实测示波器上的信号也由一条直线信号变为连续的正弦信号如图 4。

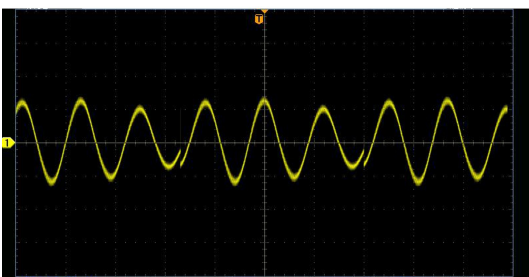


图 3 未引入 f_D 示波器上的 I_{ac}

Fig.3 I_{ac} on the oscilloscope before adding f_D

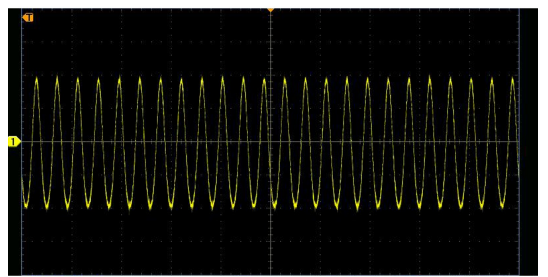


图 4 引入 f_D 时示波器上的 I_{ac}

Fig.4 I_{ac} on the oscilloscope after adding f_D

实验在保持输入信号电压不变的情况下,调节输入信号频率在 20~200 kHz 之间变化,对传感器进行频率测量试验。图 5 给出 30 kHz 和 200 kHz 输入情况下示波器检测到的输入信号与干涉信号波形图。

图 5(a)和图 5(c)中的实线表示的是通过信号发生器施加在压电陶瓷上的输入电压信号,虚线表示的是通过示波器测量得到的干涉信号 I_{ac} 。图 5(b)和图 5(d)分别表示 30 kHz 和 200 kHz 多普勒频移信号对应的 Fourier 频谱图。

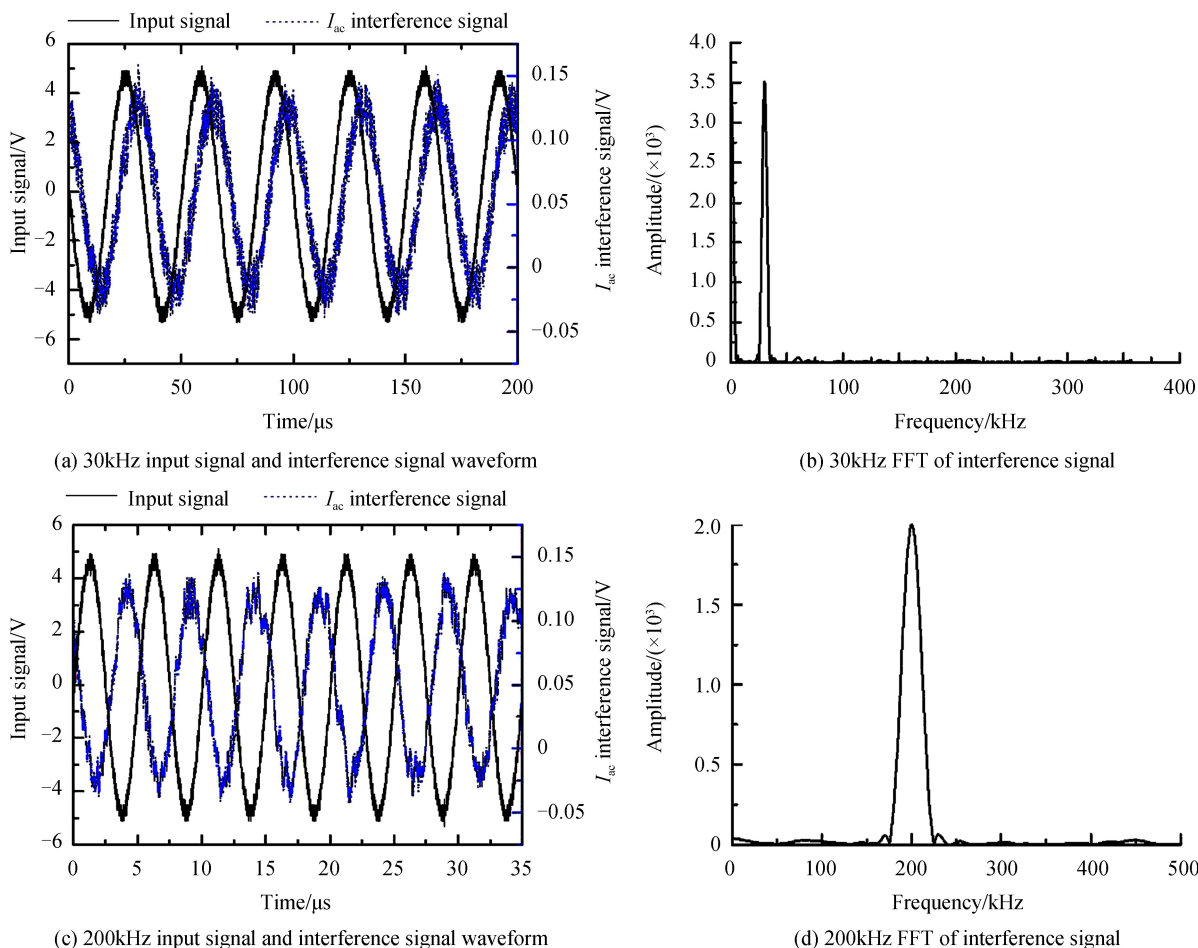


图5 实验检测到的输入信号与干涉信号波形

Fig.5 Input signal and interference signal waveform detected by experiment

在图 5(a) 和图 5(c) 中, 当输入电压信号为 30 kHz 时, 从图 5(b) 中得到的 I_{ac} 干涉信号的频率为 29.99 kHz. 当输入电压信号为 200 kHz 时, 从图 5(d) 中得到的 I_{ac} 干涉信号的频率为 200.27 kHz. 根据这种方法, 实验测量了输入信号频率范围在 20~200 kHz 时的干涉信号 I_{ac} 对应的频率, 其关系曲线如图 6.

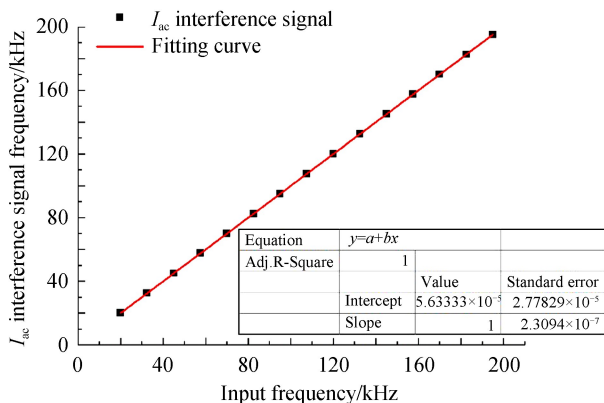


图6 输入频率与 I_{ac} 干涉信号频率的关系曲线

Fig.6 Relation curve between input frequency and I_{ac} interference signal frequency

图 6 表示的是实验获得的超声测量光纤环传感器的频率响应曲线. 对测得 I_{ac} 干涉信号频率做线性拟合得到了 1 的拟合度. 用 I_{ac} 干涉信号频率减去输入信号频率的绝对值, 除以输入信号频率得到的相对误差在 0.001% 以内, 表明了传感器对超声频率的测量有着很高的准确性. 根据实验数据及理论分析得知, 光的偏振态变化会对干涉信号的幅值产生影响, 但是与干涉信号的频率无关, 即光的偏振态的变化不会影响传感器对于超声信号频率识别的精度. 此外, 本文中采用的实验数据是同一次实验同一个光的偏振态下所测量得到的,

排除了光的偏振态不同对干涉信号幅值的影响,数据之间的对比遵循了单一变量的原则,具有可比性。

为了研究不同强度的超声信号对传感器的影响,保持输入信号频率不变,改变输入信号的幅值进行实验研究.在 20~200 kHz 总共测量了 27 个不同的频率点,电压幅值都是从 1 V 开始增加到 10 V,步进为 1 V.图 7 给出了其中 20kHz、35 kHz、40 kHz、45 kHz、190 kHz,5 个点的输入电压和 I_{ac} 干涉信号的关系曲线.这 5 条曲线所对应的拟合度均达到 0.99 以上。

从图 7 中可知在不同的频率点,相同的输入电压下测量得到的干涉信号 I_{ac} 幅值不同.主要原因是压电陶瓷在施加的电信号幅值不变的情况下,振动幅度会随着频率发生变化,从式(3)、(4)可以得知压电陶瓷振动幅度与 I_{ac} 干涉信号幅值具有正比关系,因此, I_{ac} 干涉信号幅值在不同的频率点不同,符合理论预期.为了进一步研究其对应关系,实验对多个信号幅度下 20~200 kHz 干涉信号 I_{ac} 幅频响应曲线进行了测量,图 8 为频率、输入和输出信号幅值之间的关系曲线.输入电压幅值由 1 V 依次递增到 10 V,从图中可以看出,所使用的传感器在 25 kHz 和 40 kHz 处分别有一级和二级共振峰,这就是图 7 中这两个频率处的信号幅度高于相同输入电压下其他频率处的信号的原因.从图中还可以看出,受限于该传感器结构,在 60~180 kHz 之间其多普勒频移产生的干涉信号幅值不高,信噪比有所降低,但结合图 7 的测试数据,目前这一套测量系统仍然能准确获得被测信号的频率,达到了超声频率测量目的.通过进一步设计传感器机械结构,改变其谐振特性曲线,能获得在所测试频段信噪比基本相当的多普勒频移超声传感器。

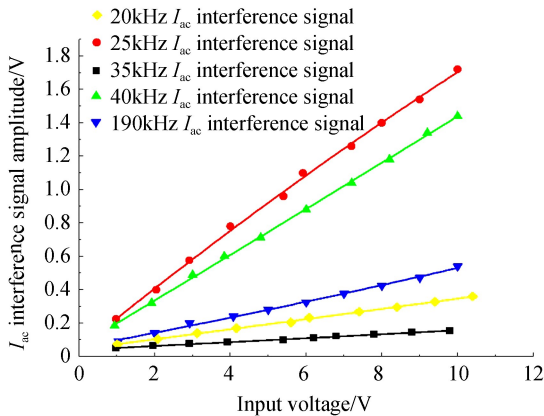


图 7 输入电压幅值与干涉信号幅值关系曲线

Fig.7 Relation curve between input voltage amplitude and interference signal amplitude

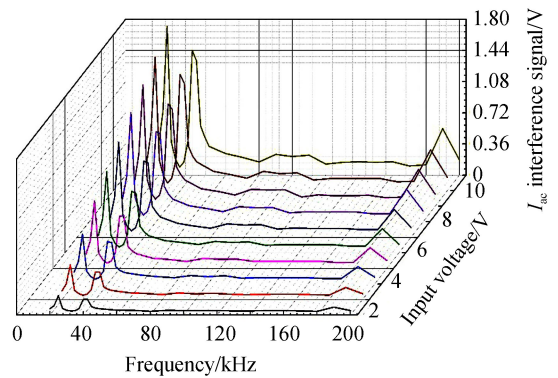


图 8 输入频率与干涉信号幅值关系曲线

Fig.8 Relation curve between input frequency and interference signal amplitude

3 结论

本文研究了一种光纤多普勒效应的超声传感方法,对传感器在不同频率的超声信号和不同强度的超声信号两种情况进行了实验测试.实验结果显示传感器在 20~200 kHz 对超声信号频率的识别具有很高的精度,误差在 0.001% 以内,同时,在所测频率范围内干涉信号与超声信号呈现出良好的线性关系.证明了此方法在实际运用中测量超声的可行性.由于压电陶瓷和函数信号发生器的限制,实验中传感器测量的超声信号频率在 20~200 kHz 以内.但是从结构和原理上看传感器可以达到更宽的频率响应范围和测量精度,这些可以通过更换超声信号源和更精密的实验仪器实现.此外,因为要对传感器精度、灵敏度等方面进行讨论而没有以实际超声波作为信号源,但此传感方法在实际运用中直接用来测量超声波也是可行的.因此,传感器在管道健康监测、固体内部裂缝监测、大型机械装备结构损伤监测等方面具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] LI F, MURAYAMA H, KAGEYAMA K, *et al.* Doppler effect-based fiber-optic sensor and its application in ultrasonic detection[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(3): 296-303.
- [2] WU Dong-fang, JIA Bo. A vibration measuring sensor of All-fiberinterferometer[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(6): 65-66.
吴东方, 贾波. 一种用于振动测量的全光纤传感器[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(6): 65-66.
- [3] QIAO Xue-guang, SHAO Zhi-hua, BAO Wei-jia, *et al.* Fiber-optic ultrasonic sensor and applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, **66**(7): 074205.

- 乔学光, 邵志华, 包维佳, 等. 光纤超声传感器及应用研究进展[J]. 物理学报, 2017, **66**(7): 074205.
- [4] YANG Xue-shan. Engineering vibration measurement instrument and testing technology[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2009.
杨华山. 工程振动测量仪器和测试技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [5] SUN An, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an. The study of fiber bragg grating pressure sensor with high pressure-resistance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 823-825.
孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 耐高压光纤 Bragg 光栅压力传感技术研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(7): 823-825.
- [6] KAZURO K, HIDEAKI M, KIYOSHI U, *et al.* Doppler effect in flexible and expandable light waveguide and development of new fiber-optic vibration/acoustic sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(4): 1768-1775.
- [7] SUN Hua, LIU Bo, ZHOU Hai-bin, *et al.* Doppler effect in flexible and expandable light waveguide and development of new fiber-optic vibration/acoustic sensor[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2009, **22**(9): 1270-1275.
孙华, 刘波, 周海滨, 等. 一种基于等强度梁的光纤光栅高频振动传感器[J]. 传感技术学报, 2009, **22**(9): 1270-1275.
- [8] SHAN Ning. Design and research of an optical fiber F-P ultrasound sensor with high directivity sensitivity[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2015, **28**(4): 487-491.
单宁. 一种高方向灵敏度光纤 F-P 超声传感系统设计研究[J]. 传感技术学报, 2015, **28**(4): 487-491.
- [9] LIANG Yi-jun, DENG Hu, XU Yan-de. Detection of acoustic emission based on a fiber optic Fizeau interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 681-685.
梁艺军, 邓虎, 徐彦德. 光纤 Fizeau 干涉仪的声发射检测研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(4): 681-685.
- [10] WANG Shi-kang, SHEN Xiong. Laser doppler technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985.
王仕康, 沈熊. 激光多普勒技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.
- [11] LU Hong-shi, LIU Bin. Latest development of laser doppler technique in vibration measurement[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 176-179.
吕宏诗, 刘彬. 激光多普勒测振技术的最新进展[J]. 激光技术, 2005, **29**(2): 176-179.
- [12] LARRY F, ALAN K. Interferometric fiber-optic doppler velocimetry with high-dynamic range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(1): 79-81.
- [13] OHSAWA I, KAGEYAMA K, MURAYAMA H, *et al.* Development of a novel vibration sensor using optical fiber and its application to composite materials[C]. American Institute of Physics, 2004: 883-890.
- [14] ZHOU C, TIAN T, QIAN L, *et al.* Doppler effect-based optical fiber vibration sensor using frequency-shifted interferometry demodulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(16): 3483-3488.
- [15] TIAN H, ZHOU C, FAN D, *et al.* Continuous-wave frequency-shifted interferometry cavity ring-down gas sensing with differential optical absorption[J]. *Photonics Journal IEEE*, 2015, **7**(3): 1-10.