

文章编号 1004-924X(2014)10-2611-06

流速/温度共采的光纤布拉格光栅涡轮流速传感器

蒋善超, 隋青美*, 王 静, 王正方, 叶青霖
(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:为实现敏感元件仅为单一光纤光栅流速传感器的多参数同时测量,提出了一种流速/温度共采的光纤布拉格光栅(FBG)涡轮流速传感器。该传感器通过涡轮实现流体冲击力对光纤光栅中心波长的频率调制,解决光纤光栅温度应变的交叉敏感,理论计算得到其流速检测灵敏度为 $2.91 \cdot 10^{-2} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 。为测试传感器的性能,搭建了传感器测试系统,并选取光纤动态解调仪解调的光纤光栅中心波长动态信号作为试验原始数据。应用快速傅里叶变换(FFT)法分析试验数据,得到传感器流速的检测下限为 0.5417 m/s ,检测灵敏度为 $2.57 \cdot 10^{-2} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$,检测精度为 25 mm/s ,略小于理论计算值,其主要原因在于圆管内流体的流速并非均匀分布的匀速运动,管道内壁对流体具有一定的黏滞力。应用经验模式分解分析原始数据获取其趋势项信号,得到该传感器的温度灵敏度为 $10.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,检测精度为 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

关键词: 光纤传感; 涡轮流速传感器; 光纤光栅; 流速温度共采; 光纤动态解调; 经验模式分解

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2611

FBG turbine flow rate sensor for acquiring flow rate and temperature simultaneously

JIANG Shan-chao, SUI Qing-mei*, WANG Jing, WANG Zheng-fang, YE Qing-lin

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

* Corresponding author, E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

Abstract: To measure multi-parameters at the same time by a flow sensor with only one Fiber Bragg Grating(FBG) as the sensitive element, a novel FBG turbine flow rate sensor was proposed. This sensor uses a power element turbine to achieve a fluid impact force to modulate the frequency of FBG center wavelength and to overcome the cross-talking of temperature and strain effectively. The theoretical calculation of flow rate detection sensitivity is $2.91 \cdot 10^{-2} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$. To measure the properties of this sensor, a sensor measurement system was established, meanwhile the FBG center wavelength dynamic signal demodulated by a fiber dynamic demodulator was chosen to be the experiment origin data. A Fast Fourier Transform(FFT) was used to analyze the experiment data of the sensor. The result shows that the flower limit of flow rate is 0.5417 m/s and the flow rate detection sensitivity is $2.57 \cdot 10^{-2} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ with the detection accuracy of 25 mm/s , which are lower than the calculated values. It suggests that the main reason of these phenomena is that the flow rate of fluid in the

收稿日期:2013-12-11;修订日期:2014-02-03.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 61174018);国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 41202206);山东省自然科学基金面上项目(No. ZR2010FM001);山东大学自主创新基金资助项目(No. yzc12081)

transmission pipeline is not an even distributed uniform motion and the pipeline inner wall has some viscous forces on the fluid. Empirical mode decomposition was used to analyze the original signal. The experiment data indicate that the temperature detection sensitivity of this sensor is $10.6 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ and detection accuracy is $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Key words: optical fiber sensing; turbine flow rate sensor; fiber grating; flow rate/temperature common acquisition; optical dynamic demodulation; empirical mode decomposition

1 引言

流速/流量的精确测量在工业生产过程控制、能源计量、环境保护等方面起着相当重要的作用。现今,使用最广泛的是机械转子式流速测量仪,但它受限于机械结构,测量精度较低;随后兴起的电磁流量计、超声波流量计和声学多普勒流量计的测量精度较高,但在敏感测量时其电子元器件易受电磁辐射的影响。当前,光纤光栅^[1]因其测量精度高、不受电磁干扰而被广泛用作光栅流量传感器的敏感基元。

目前,国内外学者针对以光纤布拉格光栅(FBG)作为敏感元件的流速传感器做了大量的研究。李红民等基于涡街结构提出的 FBG 流量传感器^[2]实现了流速的测量,但其悬臂梁振动受涡街发生体的影响,信号检测较为困难。陈建军通过增设温补光栅提出了基于汾丘里管结构的 FBG 流量传感器^[3],实现了 $51.0 \sim 148.2 \text{ mm/s}$ 流速的测量,且测量精度很高,能检测到 0.3 mm/s 流速的变化。Yong Zhao^[4]等设计了靶式结构的 FBG 流量传感器,而王正方^[5]提出了改进的靶式结构的 FBG 流量传感器并通过模型试验验证了其实用性。虽然上述 FBG 流量传感器实现了流量的测量,但还存在诸如信号提取较为困难及结构中还需设置不受任何外力影响的温补光栅以提高流量测量精度的约束,以及一定的资源浪费等问题,这些极大地限制了以单一光纤光栅作为敏感元件的 FBG 流量传感器在多参数同时测量方面的应用。随着光学检测手段的发展^[6-7],如何在流速测量的同时解决温度与应变的交叉敏感并实现一个传感器测量多参量成为现今学者们比较关注的热点问题^[8]。

本文提出了一种 FBG 涡轮流量/温度传感器。该传感器利用涡轮进行流体冲击力对光纤光

栅中心波长的频率调制,实现了温度与应变在频率域上的区分,有效地解决了光纤光栅温度应力的交叉敏感对测量结果的影响。将光纤动态解调仪解调的光纤光栅中心波长的动态波长作为原始数据,分析反演得到流体的流量/流速;同时基于经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的数据分析法分析并提取了 FBG 中心波长振动信号的趋势项,实现了流量与温度的同时测量。

2 传感器结构及其测量原理

2.1 传感器基本结构

本文所设计的 FBG 涡轮流速/温度传感器主要包括敏感测量元件 FBG、核心动力元件涡轮及转换元件等强度悬臂梁。将带有一定预应力的 FBG 粘贴于等强度悬臂梁作为传感器的敏感元件。涡轮将流体的冲击力转换为 FBG 中心波长的振动频率,实现了流体冲击力对 FBG 中心波长的频率调制。涡轮风叶选用垂直风叶,目的在于增加相同流速下流体对涡轮的作用力矩。转换元件选取碳纤维材料的等强度悬臂梁,目的在于避免因传感器悬臂梁受外力表面应变不均而导致的 FBG 反射光谱啁啾或展宽并回避悬臂梁的固有频率。传感器剖视图如图 1 所示。

2.2 流量/流速测量原理

假定涡轮转盘半径为 r ,涡轮垂直风叶长度为 R ,传感器涡轮风叶与等强度梁的交错长度为 x 。当涡轮转过角度为 θ 时,等强度梁与涡轮风叶错开,此时悬臂梁的挠度为:

$$y = (R + r) \sin \theta, \quad (1)$$

式中: y, θ 分别为等强度梁与涡轮风叶错开时等强度梁发生的挠度及涡轮转过的弧度。其中 θ 为:

$$\theta = \arccos \left(\frac{R + r - x}{R + r} \right). \quad (2)$$

由材料力学原理得到等强度悬臂梁挠度与其

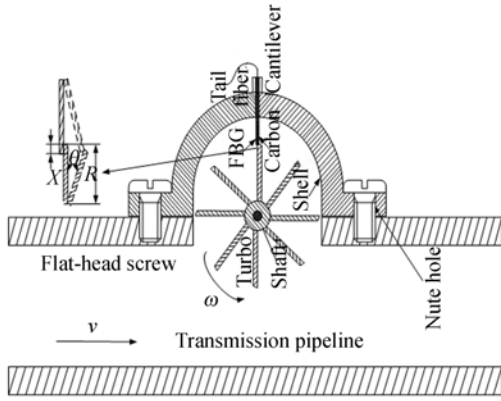


图 1 FBG 涡轮流速/温度传感器剖视图

Fig. 1 Cutaway view of FBG turbine flow rate/temperature sensor

自由端所受外力 F 的关系为^[9]:

$$y = \frac{6FL^3}{Eh^3W}, \quad (3)$$

式中: L, h, W 分别为等强度梁的长度、厚度和固定端宽度, E 为材料的弹性模量。

等强度梁固有频率的理论计算公式为^[10]:

$$\omega = 5.319 \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}, \quad (4)$$

式中: ρ 为等强度梁的材料密度, I 为悬臂梁根部的截面惯性矩, A 为悬臂梁根部的截面面积。

由式(1)~式(3)得到, 等强度梁与涡轮风叶错开所需的外界作用力为:

$$F = \frac{Eh^3W(R+r)}{6L^3} \sin(\arccos(\frac{R+r-x}{R+r})) = \frac{Eh^3W}{6L^3} \sqrt{2x(R+r) - x^2}. \quad (5)$$

假设传输管道内的流体密度为 ρ , 管道横截面积为 S , 涡轮盘质量为 m_1 , 垂直涡轮风叶质量为 m_2 , 横截面积为 s 。该传感器共有 8 个垂直风叶, 其总质量 $M=8m_2$, 进而得涡轮转动惯量^[11]为:

$$J = \frac{1}{2} m_1 r^2 + \frac{1}{2} M(R+r)^2. \quad (6)$$

当涡轮因受流动介质冲击力转动时, 涡轮与流动介质的有效接触面积为:

$$S_{\text{eff}} = s + s \cdot \cos(\frac{2\pi}{8}) \approx 1.71s. \quad (7)$$

假设流体流速为 v , 涡轮转动角速度为 ω , 流体经过涡轮后的流速为 v' 且 $v' = (R+r)\omega$, 涡轮盘转轴的摩擦力为 f_{fric} , 由转动惯量守恒定理得:

$$\rho S_{\text{eff}}(v-v')^2(R+r) - F(R+r) - f_{\text{fric}} \cdot 0 = J \cdot \omega. \quad (8)$$

将式(6)、式(7)代入式(8)整理得:

$$v = \sqrt{\frac{m_1 r^2 \omega + M(R+r)^2 \omega + 2F(R+r)}{3.42\rho s(R+r)}} + (R+r)\omega, \quad (9)$$

式中: $\omega = \pi f/4$, 其中 f 为快速傅里叶变换(FFT)^[12]分析动态解调仪所得的 FBG 中心波长的振动频率。

由式(7)可得该传感器可测流速的理论下限值为:

$$v_{\text{min}} = \sqrt{\frac{F}{1.71\rho s}}. \quad (10)$$

分析式(5)、式(10)可知, 在已知传感器选材及结构尺寸的情况下, 改变传感器涡轮风叶与等强度梁的交错长度可有效地调整传感器可测流速的下限。

2.3 温度测量原理

经验模式分解(EMD)因具有自适应分解性而广泛应用于机械故障检测^[13]、地震信号分析^[14]、海洋信号分析^[15]等领域。应用 EMD^[16]分析光纤动态解调仪解调所得的 FBG 中心波长的动态信号, 得到:

$$\lambda(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} + \lambda_{tr}, \quad (11)$$

式中: $\lambda(t)$ 为原始信号, λ_{tr} 为趋势项, $a_j(t)$, $\omega_j(t)$ 分别为时变幅值及时变频率。流体流速通过涡轮及等强度梁转换来改变原始信号中的时变信号; 而流体温度属于慢变信号, 它将导致原始信号中趋势项 λ_{tr} 的改变。根据光纤光栅传感原理, 由外界温度变化 ΔT 及应变 ϵ 引起的 FBG 中心波长的偏移量为:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + (\xi + \alpha) \Delta T, \quad (12)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为布拉格波长变化量, K_ϵ 为光栅应变的灵敏度, ξ 为 FBG 的热光系数, α 为光纤的热膨胀系数。

应用式(11)分解光纤光栅动态解调仪解调所得的原始信号 $\lambda(t)$, 筛选出原始信号的趋势项 λ_{tr} , 再通过式(12)反演得到管道内的流体温度。

3 传感器测试系统

3.1 传感器材料选型

传感器材料及其具体尺寸如下: 涡轮盘半径 r 为 5 mm, 质量 m_1 为 10 g; 垂直风叶半径 R 为

40 mm, 宽度为 5 mm, 质量 m_2 为 5 g; 等强度悬臂梁长度 L 为 20 mm, 厚度 h 为 0.1 mm, 固定端宽度为 5 mm, 弹性模量 E 为 125 GPa; 垂直风叶与等强度悬臂梁的交错长度 x 为 0.1 mm, 流体密度 ρ 的测量值为 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

由式(4)得该确定尺寸及材料下等强度悬臂梁的固有频率为 4.205 kHz。

将上述传感器结构参数带入式(9)可得流体流速 v 与 FFT 分析光纤动态解调仪解调所得的中心波长的变化频率 f 之间的对应关系为:

$$v = 0.338 + 2.91 \cdot 10^{-2} f. \quad (13)$$

由式(13)可知, 该传感器的可测流速下限为 0.338 m/s。当垂直风叶与等强度悬臂梁的交错长度 x 极限接近于 0 时, 可得该传感器的可测流速下限 v_{\min} 同样无限接近于 0。

3.2 实验装置及测试系统

传感器测试系统如图 2 所示。系统通过 ASE 宽带光源经隔离器、耦合器为传感器提供光源, 传感器 FBG 反射的光谱经耦合器后由光纤动态解调仪 (Sense 20/20) 解调得到 FBG 中心波长的动态信号, 计算机通过 RS232 读取中心波长的动态信号并进行信号处理, 最终前端界面可显示流体流速及其温度。

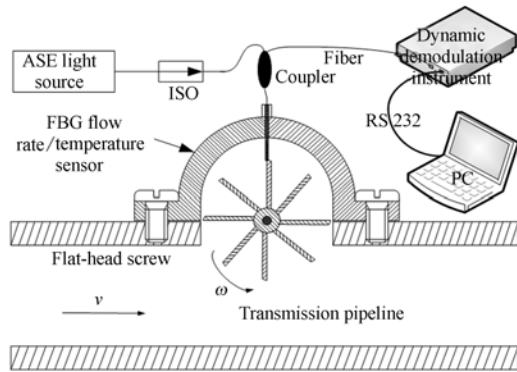


图 2 传感器测试系统框架图

Fig. 2 Frame diagram of sensor measurement system

4 试验结果分析

4.1 流量/流速检测特性分析

控制管道内由左向右流动的流体温度为 25 °C, 历史回放稳定流速为 2 m/s 时, 传感器 FBG 中心波长的实时信号及其相应的 FFT 频谱如图

3 所示。分析图 3 可得: 当流体流速较低时, 涡轮转速低, FBG 中心波长的振动频率远小于等强度悬臂梁的固有频率, 因此 FBG 中心波长有一定的振荡衰减。

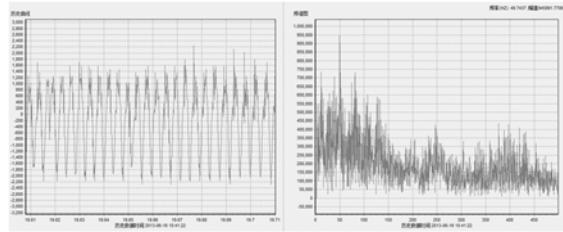


图 3 FBG 中心波长在流速 2 m/s 时的时域及频域信号
Fig. 3 Time and frequency domain signals of FBG center wavelength under a flow velocity of 2 m/s

图 4 为水流温度为 25 °C 时, FBG 中心波长频率 f 与流体流速 v 之间的拟合曲线图。由图 4 可知, f 与 v 的关系为: $v = 2.57 \cdot 10^{-2} f + 0.5417$, $R^2 = 0.9964$ 。由于光纤动态解调仪的频率检测精度为 1 Hz, 该传感器的检测灵敏度约为 25 mm/s。传感器流速检测的拟合系数为 $2.57 \times 10^{-2} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$, 小于理论系数 $3.6 \times 10^{-2} \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$, 其主要原因在于圆管内的流体流速并非匀速运动, 而是符合:

$$v = v_{\max} \left[\frac{R_p - r_c}{R_p} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (14)$$

其中: v_{\max} 为管道中心的最大流速。管道内壁对流体具有一定的黏滞力, 流体流动力与涡轮直叶风叶的力传递效率并非理想状态的 100%, 而是存在一定的消耗。图 4 中纵轴的截距不为零, 这

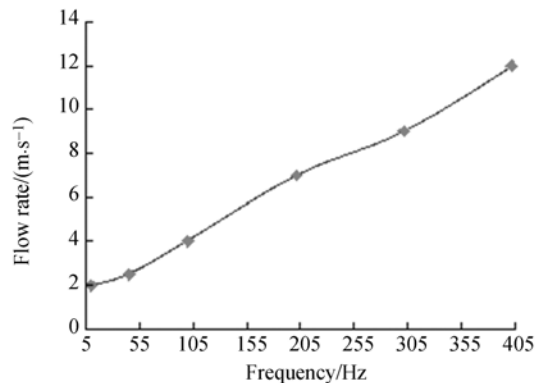


图 4 FBG 中心波长变化频率与流体流速的拟合曲线
Fig. 4 Relationship between frequency of FBG center wavelength and flow velocity

是由于涡轮开始转动的起始条件为外界流体的动力距大于错开等强度梁与涡轮风叶所需的阻力距及涡轮轮盘转轴存的摩擦力矩,即该传感器存在着一定的检测下限。调整等强度悬臂梁与涡轮风叶的交错长度及减小涡轮盘转轴的摩擦力可有效降低传感器的检测下限。

4.2 温度检测特性分析

在传感器温度测试实验中将流体流速恒定为 2 m/s 并通过恒温箱加热改变管道内的流体温度。在流体温度为 25 °C,流速为 2 m/s 时,对电脑采集的动态解调仪解调的 FBG 中心波长动态信号进行 EMD 数据分析,图 5 给出了传感器 FBG 中心波长动态信号的原始数据,部分内在模式函数 IMF1、IMF2 及其趋势项信号。

分析图 5 可得,代表温度信息的趋势项信号不是理想的直线而是有一定的波动。光纤动态解调仪解调的 FBG 中心波长的精度为 1 pm,但是其波长解调的重复性精度为 ± 2 pm,因此解调结果存在着一定的波动性。控制恒温箱温度改变流体温度,表 1 为流体温度与 FBG 中心波长动态信号经 EMD 处理后的趋势项之间的对应数据。由表 1 可得,流体温度 t 与 FBG 中心波长动态信号趋势项 λ_{tr} 之间的对应关系为: $\lambda_{tr} = 0.010 6t + 1557.9$, $R^2 = 0.995 5$; 进而可得该传感器的温度

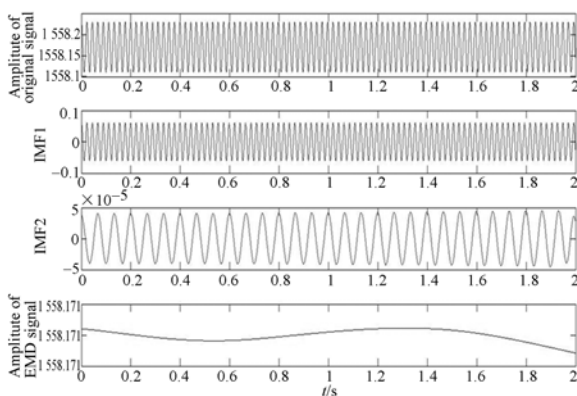


图 5 经 EMD 处理的 FBG 中心波长动态信号

Fig. 5 Dynamic signal of FBG center wavelength after EMD treatment

参考文献:

- [1] 吴入军,郑百林,贺鹏飞,等.埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J].光学精密工程,2014,1(22):24-30.
WU R J, ZHENG B L, HE P F, et al.. Influence of

敏感系数为 10.6 pm/°C,接近裸光栅的 10 pm/°C,即该传感器没有过度地影响 FBG 的温度敏感系数。因 FBG 中心波长动态解调的重复性精度为 ± 2 pm,则该传感器的测温精度为 0.5 °C。

表 1 流体温度与 FBG 中心波长动态信号趋势项的对应关系

Tab.1 Relationship between flow temperature and trend term of dynamic signal of FBG center wavelength

Temperature/°C	FBG center wavelength/nm
25	1 558.171 0
35	1 558.234 7
45	1 558.346 1
55	1 558.447 6
65	1 558.569 4
75	1 558.682 8
85	1 558.789 4

5 结 论

由于 FBG 的交叉敏感特性限制了流速传感器的多参数测量及光纤多参数测量的发展,本文提出了一种以涡轮实现流体冲击力对 FBG 中心波长频率调制的流速/温度共采的 FBG 流速/温度传感器。首先,搭建了传感器测试系统,并选取经光纤动态解调仪解调所得的传感器 FBG 中心波长的动态信号作为原始信号,验证了该流速传感器的性能。由性能试验数据可知,FBG 流速/温度传感器的流速检测精度为 25 mm/s,流速检测的下限为 0.541 7 m/s,这是因为传感器涡轮垂直风叶与等强度悬臂梁的错开需要一定的外界作用力。最后应用 EMD 分析 FBG 中心波长的动态信号,提取其趋势项并建立信号趋势 λ_{tr} 与流体温度 t 之间的关系: $\lambda_{tr} = 0.010 6t + 1 557.9$,温度检测精度为 0.5 °C。实验结果表明,该传感器可以较为理想地实现流速/温度的同时测量且检测精度较高,具有一定的实用价值。

encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,1(22):24-30. (in Chinese)

- [2] 李红民,高宏伟,刘波,等.一种新型的光纤光栅涡街流量传感器[J].传感技术学报,2006,19(4):1195-1197.

- LI H M, GAO H W, LIU B, *et al.*. A novel fiber Bragg grating flow meter [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuator*, 2006, 19(4): 1195-1197. (in Chinese)
- [3] 陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. *光学学报*, 2006, 8(26): 1136-1139.
- CHEN J J, ZHANG W G, TU Q CH, *et al.*. High sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 8(26): 1136-1139. (in Chinese)
- [4] ZHAO Y, CHEN K, YANG J. Novel target type flow meter based on a differential fiber Bragg grating sensor [J]. *Measurement*, 2005, 38(3): 230-235.
- [5] 王正方, 王静, 隋青美, 等. 靶式 FBG 流速传感器在裂隙水模型试验中的应用[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2012, 6(42): 1569-1575.
- WANG ZH F, WANG J, SUI Q M, *et al.*. Application of target-type FBG flow velocity sensor in fracture water model test [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2012, 6(42): 1569-1575. (in Chinese)
- [6] WANG Y P, HUANG X Q, WANG M. Temperature- and strain- independent torsion sensor utilizing polarization-dependent loss of Hi-Bi FBGs [J]. *Electronics Letters*, 2013, 13(49): 840-841.
- [7] ZHANG Q, ZHU T, ZHANG J D, *et al.*. Micro-fiber-based FBG sensor for simultaneous measurement of vibration and temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(18): 1751-1753.
- [8] Y. M · R. M. G. Multi-functional measurement using a single FBG sensor [J]. *Experimental Mechanics*, 2011(51): 1489-1498.
- [9] 丁腾蛟. 基于悬臂梁结构的大量程光纤 Bragg 光栅位移传感器[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012, 6.
- DING T J. *Large Range Fiber Bragg Grating Displacement Sensor Based on Cantilever Structure* [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012, 6. (in Chinese)
- [10] 胡海岩. *机械振动基础* [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004: 131-132.
- HU H Y. *Foundation of Mechanical Vibration* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2004: 131-132. (in Chinese)
- [11] 张三慧. *大学基础物理学* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007, 3.
- ZHANG S H. *University Fundamental Physics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007, 3. (in Chinese)
- [12] 朱勇, 王振种. 基于快速傅里叶变换直流分量的土壤电阻率测量 [J]. *光学精密工程*, 2013, 1(21): 115-123.
- ZHU Y, WANG ZH C. Measurement of soil resistivity based on FFT DC component [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 1(21): 115-123. (in Chinese)
- [13] 郝研, 王太勇, 万剑, 等. 基于经验模式分解和广义维数的机械故障诊断 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2012(2): 392-396.
- HAO Y, WANG T Y, WAN J, *et al.*. Mechanical fault diagnosis based on empirical mode decomposition and generalized dimension [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2012(2): 392-396. (in Chinese)
- [14] LOH C H, WU T C, HUANG N E. Application of the empirical mode decomposition-Hilbert spectrum method to identify near-fault ground-motion characteristics and structural response [J]. *Bulletin of the Seismological Society of American*, 2001, 91(5): 1339-1352.
- [15] MARCUS D, TORSTEN S. Performance and limitations of the Hilbert-Huang transformation (HHT) with an application to irregular water waves [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(14-15): 1783-1834.
- [16] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.*. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1998, 454: 903-995.
- [17] 孔珑. *工程流体力学* [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 106-107.
- KONG L. *Engineering Fluid Mechanics* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 106-107. (in Chinese)

作者简介:



蒋善超(1988—), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 2011 年于山东大学获得学士学位, 主要从事新型光纤传感器的研制与应用。E-mail: jiangshanchao88624@126.com

导师简介:



隋青美(1963—), 女, 山东东营人, 博士, 教授, 博士生导师, 1983 年、1986 年于山东工业大学分别获得学士、硕士学位, 2001 年于天津大学获得博士学位, 主要从事检测理论与应用, 光纤传感技术等方面的研究。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn