

耦合型高频光纤振动传感器实验研究

马 宾^{1,2} 徐 健³ 隋青美²

(¹山东政法学院信息科学技术系, 山东 济南 250014; ²山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

³山东财政学院计算机信息工程学院, 山东 济南 250013

摘要 提出了一种耦合型高频光纤振动传感器,并设计了相应的解调电路和信号处理系统。对高频振动信号的响应波形和频率进行了测量,研究了光纤传感器对不同的振动强度和不同方向的振动信号的响应,分析了不同结构和不同材质的传输介质对光纤传感器测量结果的影响。实验证明所设计的耦合型高频光纤振动传感器截止频率达到 8 kHz,振幅测量灵敏度为 325 mV/mm,频率和幅值响应误差小于 1%。

关键词 光纤光学; 振动传感器; 振动测量; 耦合器; 高频振动

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092905.1177

Experimental Study on Coupling High-Frequency Fiber-Optic Vibration Sensor

Ma Bin^{1,2} Xu Jian³ Sui Qingmei²

¹Department of Information Science and Technology, Shandong University of Political Science and Law, Jinan, Shandong 250014, China

²School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China

³School of Computer and Information Engineering, Shandong Finance Institute, Jinan, Shandong 250013, China

Abstract A new kind of coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor and its corresponding demodulation circuit and signal process system were presented. The waveform and frequency of high-frequency vibration signals were tested, and the responses of fiber-optic sensor to different drive voltages and different directions were discussed. The influences of transmission medium shape and quality on the results were investigated. The experimental results show that the cutoff frequency of the coupling fiber-optic vibration sensor is 8 kHz; its amplitude measuring sensitivity is 325 mV/mm; and its frequency and amplitude response error is less than 1%.

Key words fiber optics; vibration sensor; vibration measurement; coupler; high-frequency vibration

1 引 言

随着材料科学和智能结构的迅速发展,融入新材料的智能结构体的力学性能测试与评估成为实际应用的重要环节,在这些环节中经常需要检测高频的应变或振动。另外,在冲击机械,水听器等系统中也经常需要检测高频的应力波。因此,对于高频振动信号的检测逐渐成为了研究的热点^[1,2]。传统的压电振动传感器由于存在电磁干扰和响应平坦性问

题而不能满足传感技术向更高层次发展的要求,特别是在较恶劣环境下使用时更显不足^[3,4]。

光纤传感器由于对应变有良好的敏感性,且具有抗电磁干扰、抗腐蚀、响应频带宽、易于构成光纤网络等特点,非常适合在高频信号测量中使用。耦合型光纤传感器还具有体积小、质量轻、结构简单,易于制作,测量频带宽,成本低廉等优点^[5,6]。因而设计一种具有良好的高频响应的耦合型光纤振动传

收稿日期: 2008-08-03; 收到修改稿日期: 2008-10-08

基金项目: 山东省自然科学基金(Z2006G06)资助。

作者简介: 马 宾(1973—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术及嵌入式系统研究。E-mail: jnxlmb@126.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术,检测理论与信号处理研究。

E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

感器具有重要的意义。

2 工作原理

耦合型高频光纤振动传感器的核心是一个单模熔融拉锥型光纤耦合器,熔融拉锥光纤耦合器是用熔融拉锥法将两根除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢。在高温下加热熔融,并同时沿轴线向两侧拉伸,最终在加热区形成双锥形式的特殊波导结构(如图1所示)。

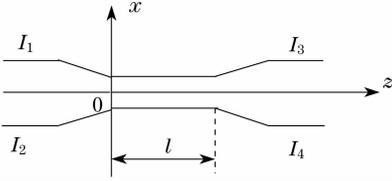


图1 光纤耦合器结构模型

Fig.1 Structure model of fiber-optic coupler

在耦合器的一端输入光信号,输入的光信号的导模功率在拉锥区随着纤径的变细而逐渐转变为辐射模或包层模,所泄漏的功率被输出端的两根光纤俘获,并随着光纤变粗而逐渐转化为导模功率。对熔锥区采用平行波导代替,并假定在耦合起始点 $z=0$ 处,主光纤中光功率 $I_1=1$,副光纤中光功率 $I_2=0$,经平行段耦合长度 l 后,其输出光功率可以表示为^[7,8]:

$$\begin{cases} I_3 = \cos^2 \left\{ \int_0^l C(z) dz \right\}, \\ I_4 = \sin^2 \left\{ \int_0^l C(z) dz \right\}, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $C(z)$ 为耦合系数, l 为耦合区长度。

$$C(z) = \frac{\omega}{4} \int E_1^*(x, y) \epsilon(x, y) E_2(x, y) dx dy, \quad (2)$$

其中 ω 是角频率, E_1 和 E_2 分别是两个基模的振幅。

当振动信号在耦合型高频振动传感器中传播时,会引起耦合区折射率发生周期性变化,这种变化的折射率对分布在耦合区的模式产生扰动,扰动会对耦合区光纤的介电常数进行调制,最后导致传感器的耦合输出随振动信号的变化而变化。调制后介电常数可以表示为^[9,10]:

$$\begin{aligned} \epsilon(x, y, z, t) &= \epsilon_0(x, y) + \Delta\epsilon_a(x, y, z, t) = \\ &= \epsilon_0(x, y) + \Delta\epsilon_a(x, y) \cos\left(\frac{2\pi fz}{v} - 2\pi ft\right). \end{aligned} \quad (3)$$

f 为高频振动频率, v 为振动在介质中的传播速率。 $\epsilon_0(x, y)$ 为无扰动时的介电常数, $\Delta\epsilon_a(x, y, z, t)$ 是扰动产生的介电常数变化量。

$$C(z) = C_0 + C_a(z, t), \quad (4)$$

其中

$$C_a(z, t) = \left[\frac{\omega}{4} \int E_1^*(x, y) \epsilon_0(x, y) E_2(x, y) dx dy \right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi fz}{v} - 2\pi ft\right), \quad (5)$$

令:

$$M = \frac{\omega}{4} \int E_1^*(x, y) \epsilon_0(x, y) E_2(x, y) dx dy, \quad (6)$$

C_0 是无扰动时的耦合常数, $C_a(z, t)$ 是扰动造成的耦合常数变化量, M 是扰动造成的耦合常数变化的幅值。

由(4)~(6)式可以看出, M, C_0 在局部区域内是与 z 无关的量,对应一定的耦合结构和场分布应为常量,设耦合器的长度为 l ,利用局部耦合模式理论可以求出耦合器的输出为^[11,12]:

$$\begin{cases} I_3(l) = \cos^2 \left\{ \int_0^l C_0 dz + \int_0^l M \cos\left(\frac{2\pi fz}{v} - 2\pi ft\right) dz \right\}, \\ I_4(l) = \sin^2 \left\{ \int_0^l C_0 dz + \int_0^l M \cos\left(\frac{2\pi fz}{v} - 2\pi ft\right) dz \right\}. \end{cases} \quad (7)$$

实际应用中,考虑到灵敏度和信号检测等多种因素,选用 3 dB 耦合器,使器件在扰动时两输出端口的光强及振幅相等。也就是当 $M=0$ 时, $I_3(l) = I_4(l) = 1/2$ 。

$$\begin{cases} I_3(l) = \cos^2 \int_0^l C_0 dz = \frac{1}{2}, \\ I_4(l) = \sin^2 \int_0^l C_0 dz = \frac{1}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

当有扰动时:

$$\begin{cases} I_3(l) = \frac{1}{2} - \frac{M\Lambda}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi fl}{v} - 2\pi ft\right) \sin\left(\frac{\pi fl}{v}\right), \\ I_4(l) = \frac{1}{2} + \frac{M\Lambda}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi fl}{v} - 2\pi ft\right) \sin\left(\frac{\pi fl}{v}\right), \end{cases} \quad (9)$$

两输出端的光强差可以表示为:

$$\begin{aligned} \Delta I = I_4 - I_3 &= \frac{2M\Lambda}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi fl}{v} - 2\pi ft\right) \cdot \\ &\sin\left(\frac{\pi fl}{v}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式可以看出,耦合输出是耦合长度以及频率的函数。表达式中 $\cos\left(\frac{2\pi fl}{v} - 2\pi ft\right)$ 包含了振动信号的频率信息, $\frac{2M\Lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi fl}{v}\right)$ 表示振动引起的耦合器输出变化的幅值。 Λ 为高频振动波长。

从(10)式可知,振动频率一定时,耦合输出随耦合长度周期性变化,其变化周期对应不同的振动频

率。而且振动频率越小,耦合输出的幅值越大,如果保持耦合长度不变,耦合输出会随振动的频率成 sinc 函数变化。因此,根据实际应用的需要对耦合区的长度或形状进行调制,可以制成不同的响应带宽和响应灵敏度的传感器。

3 光纤振动检测系统设计

3.1 光纤振动传感器设计

实验中采用纤芯材料掺锗石英玻璃,包层材料为纯石英玻璃的阶跃型单模光纤作为耦合型传感器的材料。采用间接加热的方法进行后加强处理,制作过程中达到要求的耦合比后,继续用低温火焰烧灼耦合区,改进耦合区光纤的力学性能,使耦合器具有更好的韧性,测量过程中不易被拉断。耦合区的包层材料采用硅弹性树脂,其温度特性与光纤相匹配,从而不会对耦合区产生显著的应力,影响测量的精度。

根据耦合器的传感原理,设计了如图 2 所示的光纤传感检测系统。系统由光源,传感器,光电转换,接收放大电路,滤波器和信号处理单元几部分组成。 V_1 和 V_2 分别为耦合器两个端口的解调输出电压,激光光源发出的光进入耦合型光纤振动传感器,传感器的两个输出臂发出的光通过光电二极管接收。对光电转换后的信号进行比较放大,目的是为了抵消光源输出功率的波动和外界噪声信号对测量结果的影响。然后对放大后的电信号进行滤波和 A/D 转换,通过计算机进行信号的显示及分析处理。

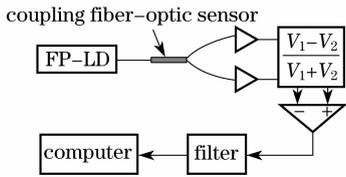


图 2 实验装置框图

Fig. 2 Diagram of experimental apparatus

系统光源采用法布里-珀罗半导体激光器 (FP-LD) 光源,工作波长为 1310 nm,输出光功率为 3 dBm。放大电路前端采用 AP0917TP 光电二极管,响应时间为 0.3 ns,最大额定电流为 5 mA,保证测量转换电路的快速相应。由于光电转换后信号的电压非常低,并且电源的输出功率波动也会对输出电压产生影响,所以在接收端采用比较放大电路,可以有效地抑制光源功率波动对输出结果的影响,然后通过高通滤波器消除信号中的噪音信号。A/D 转换模块采用研祥公司生产的 AD_LINK 2205 型

A/D 转换卡,采样速率为 500 kHz,分辨率为 12 位。信号输出端采用 LABVIEW 编写显示和处理软件,对耦合型光纤应变称重仪的数据进行实时的监控。

4 实 验

如图 3 所示,采用铝合金板作为振动传输介质,尺寸为 400 mm×20 mm×2 mm;用环氧树脂胶将耦合型高频光纤振动传感器和一个作为参考的压电振动传感器固定在铝合金板一端。采用 P-51 型 PZT 压电陶瓷作为振动信号源,把它放在铝合金板的另一端。由信号发生器驱动 PZT 压电陶瓷产生振动,振动就会通过铝合金板传输到光纤振动传感器,使得传感器两输出端的光强随振动信号发生变化。通过光电转换和差动放大以及滤波电路将振动信号传到计算机,从而实现对振动的测量。实验中选用 YJ9A 型标准压电传感器进行比较测量,其频率测量范围是 1~10 kHz,最大测量加速度为 2000 m/s²。

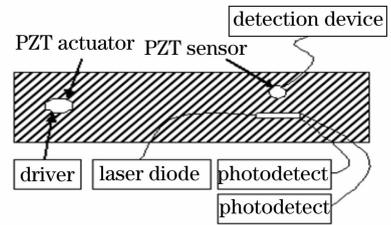


图 3 传感器放置图

Fig. 3 Placement of sensor on the substrate

4.1 光纤传感器的频率响应

分别用 1 kHz~8.5 kHz 的正弦信号驱动 PZT 压电陶瓷,使之产生高频振动信号。耦合型高频光纤传感器和压电传感器的响应如图 4 所示,在 1 kHz~8 kHz 的范围内,光纤传感器和压电传感器的测量结果基本一致,都能准确地测量出介质的振动频率,光纤传感器的频率误差率小于 1%,可以实现高频信号的准确测量。8 kHz 以上时,光纤传感器测量误差较大。

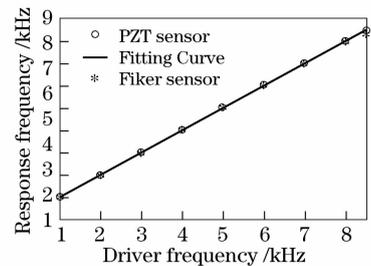


图 4 传感器频率响应

Fig. 4 Frequency response of the sensor

调节压电陶瓷的驱动频率,测得传感器随频率的响应如图 5 所示。

由图 5 中传感器的响应曲线可知,光纤传感器

在 4.3 kHz 时输出响应达到最大值,而在其他点输出响应明显减小。这是因为压电陶瓷被电压驱动产生振动,振动在铝合金板中传播,与材料谐振频率相

表 1 传感器频率响应

Table 1 Frequency response of the sensor

Frequency /kHz	1	2	3	4	5	6	7	8	8.5
PZT sensor /kHz	1.000	2.000	2.999	4.001	4.998	5.996	7.003	7.987	8.509
Fiber sensor /kHz	1.000	2.000	3.001	4.001	5.003	6.002	7.003	7.986	8.297

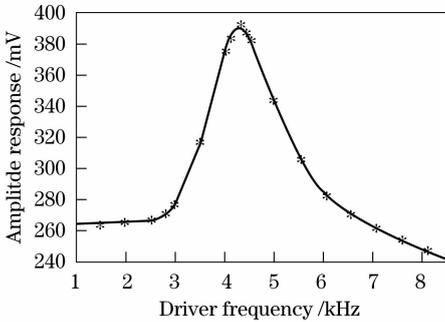


图 5 耦合型光纤传感器的幅值响应

Fig. 5 Amplitude response of coupling fiber-optic sensor
 同的振动信号才会无衰减地向外传播,其他频率的信号则会有较大的衰减。这与理论分析是一致的。由于只有在谐振频率点,传感器才会有较大的输出值,这为复合材料的性能分析提供了较为方便的途径。当振动频率大于 8 kHz 时,传感器测得的振幅误差大于 5%,传感器的截止频率为 8 kHz。

4.2 光纤传感器的响应灵敏度

调节压电陶瓷的驱动电压,保持驱动频率一定,调节高频振动信号的幅值不断变化,测得传感器对不同幅度的振动信号的响应如图 6 所示。

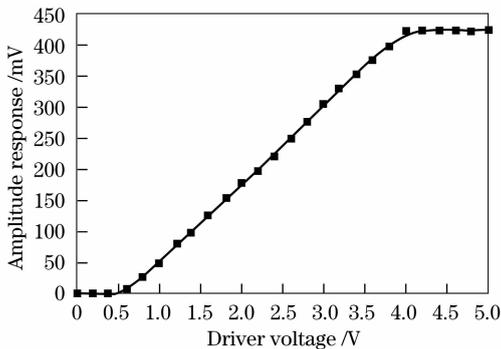


图 6 光纤传感器响应振幅与驱动电压关系曲线

Fig. 6 Relation curve of fiber-optic sensor between amplitude and drive voltage

当驱动电压小到一定程度时,也就是振动信号幅度小到一定值时,传感器探测不到信号。传感器的耦合输出随高频振动信号的强度线性单调变化。当驱动电压大于 0.7 V 时,光纤传感器开始产生响

应,这就是传感器的最小可探测的振动信号幅值。当驱动电压大于 4.1 V 时,光纤传感器的输出几乎保持不变,是传感器的最大可探测的振动信号幅值。因此,可根据耦合输出的幅度变化测量高频振动振幅的大小。已知激振器的极限振幅为 2 mm(峰峰值),可以求出耦合型光纤传感器的幅值量程为 0.3~1.6 mm,振动幅值的响应灵敏度为 325 mV/mm,幅值测量误差小于 1%。可知耦合型光纤传感器具有较高的灵敏度和检测能力。

4.3 不同结构和材质的介质时光纤传感器的响应

为了进一步验证耦合型光纤传感器的性能,改变振动传输介质的几何结构和尺寸大小进行测量。分别将铝合金板的长度缩短 1/2,宽度减少 1/2,厚度减少 1/2。三种情况下所测得的振动响应曲线分别如图 7 中(a, b, c)所示。介质的长度缩短后,谐振频率点增大,幅值减小,灵敏度降低;厚度变薄后其谐振频率点变小,幅值增加,灵敏度提高;宽度减少后,谐振频率点和响应幅值变化很小,灵敏度变化同样很小。采用人工大理石板作为传输介质,所测得的结果如图 8 所示。所测得的介质的谐振频率点变小,并且振幅响应变大,灵敏度增加。这是因为人工大理石的弹性模量要小于铝合金板,因而相同形状的人工大理石板刚度较低,而且质量较重,从而其固有频率也就较低,实验结果与理论分析是一致的。

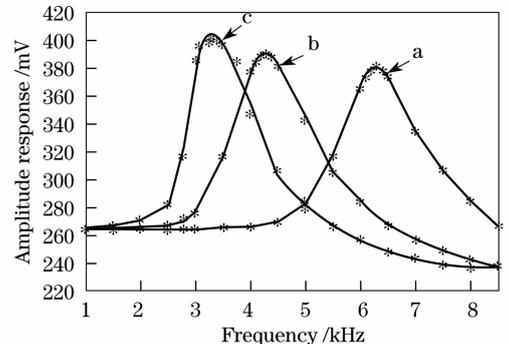


图 7 介质结构形状不同时光纤传感器的响应

Fig. 7 Response of fiber-optic sensor to different structure profiles

实验中采用环氧树脂胶作为粘合剂,是因为粘结强度高,收缩率低,操作简单等优点,采用不同特性的粘胶,因不同的机械特性,收缩率和粘结强度也会对耦合输出产生不同的影响。

4.4 传感器对不同方位的信号响应

改变压电陶瓷激励源在铝合金板上相对于光纤传感器的放置位置,可以测得传感器对不同方位振动的响应如表 2 所示。

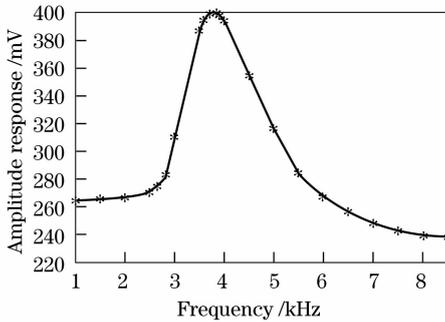


图 8 人工大理石板做介质时光纤传感器的响应

Fig. 8 Response of fiber-optic sensor to artificial stone

表 2 光纤传感器对不同方向的信号响应

Table 2 Response of fiber-optic sensor to different directions

Anglur /($^{\circ}$)	0	45	90	135	180	225	270	315
Reacting amplitudo /mV	138	137	128	135	126	132	135	138

从表 2 中可看出耦合型高频光纤振动传感器对不同方向的振动信号几乎有相同的响应。因此振动信号的方向可以认为不会引起耦合输出的变化。表 2 中各个方向的响应的波动是由于压电陶瓷的底面和铝合金板的接触面积的差异而引起的。利用这一特性,可以把多个传感器组成分布式传感网路,实现对高频振动信号的方位,振幅和频率的测量。

5 分析与讨论

为了提高系统的响应分辨率,在动态测量实验中采用了差动/比例放大解调电路。通过检测耦合器两输出端的输出功率之差,实现对振动的测量。能够有效地避免振动检测系统光源的波动和电路的噪音对测量结果的影响。通过 $V_1 - V_2$ 来放大系统振动所产生的电压的变化量, $V_1 + V_2$ 来补偿光源输出功率波动对输出结果所产生的影响。如果不采用这样的补偿办法而直接取 $V_1 + V_2 = 3 \text{ V}$,当光源的功率发生波动 50% 时,通过实验测得没有进行电压补偿的系统的灵敏度降低到 50% 以下,而进行了电压补偿的系统的灵敏度仍然维持在 92% 以上。测

量系统相应灵敏度的变化如图 9 所示。

耦合型高频光纤振动传感器除具有耐腐蚀,抗电磁干扰,本质安全等特性外,还具有质量轻,体积小等优点,所以在被测物体质量较轻时测量所产生的附加误差会比较小。尤其在一些复合材料需要埋入材料内部测量材料的共振响应频率时,耦合型光纤振动传感器体积比压电传感器要小得多,能够更容易地埋入复合材料内部而不影响材料自身的结构性能。

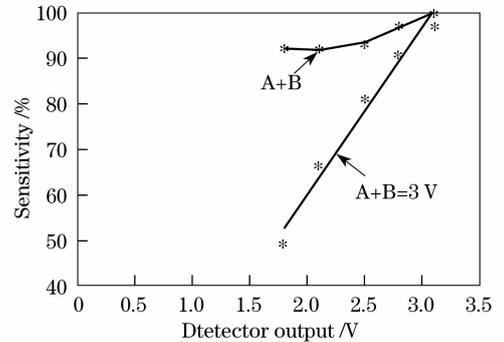


图 9 光源波动补偿对比曲线

Fig. 9 Contrast curve of laser source fluctuation compensation

6 结 论

根据耦合器的分光原理设计了一种耦合型光纤振动传感器,并设计了相应的检测解调电路。将光纤传感器和压电传感器进行了对比研究,分析了传感器对振动响应的频率特性,然后调节振动信号的强度,测量光纤传感器的响应灵敏度。讨论了不同结构和不同材质的传输介质对光纤传感器测量结果的影响。同时,对光纤传感器的响应方向特性进行了研究。实验证明耦合型光纤振动传感器可以用于高频信号的测量,在高频环境下实现对材料力学性能的测试是完全适用的。通过对耦合型光纤传感器的封装技术、粘敷技术(包括选择合适的粘结剂)、解调系统噪声抑制技术(包括光路部分的封装和信号整形电路的改进)等的不断改进,耦合型高频光纤振动传感器在新型复合材料性能测试等高频应用领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- Zhang Weigang. *Principle and application of fiber optics* [M]. Tianjin: Nankai university publishing company, 2008: 118~127
- 张伟刚. 光纤光学原理及应用 [M]. 天津: 南开大学出版社, 2008. 118~127
- Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers [J]. *Chinese J.*

- Lasers*, 2007, **34**(11):1472~1475
- 高欣, 薄报学, 张晶等. 多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1472~1475
- 3 Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xueqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):726~728
- 葛强, 徐长春, 吴许强等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):726~728
- 4 Wang Kexin, Pang Fufei, Wang Tingyun. Evanescent wave coupled semiconductor quantum dots fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):398~401
- 王克新, 庞拂飞, 王廷云. 消逝波耦合半导体量子点光纤放大器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):398~401
- 5 Liu Renqiang, Liu Pinkuan, Fu Zhuang. Operation principle of a bend enhanced curvature optical fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):807~812
- 刘仁强, 刘品宽, 付庄. 弯曲增敏型光纤曲率传感器机理的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5):807~812
- 6 Qian Jingren, Wang Xuxu. Coupled-mode theory for spun multi-lobe stress region fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):550~554
- 钱景仁, 王许旭. 多叶应力区扭转光纤的耦合模理论[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):550~554
- 7 Yuan Libo, Zhou Limin, Jin Wei. Detection of acoustic emission in structure using Sagnac-like fiber-loop interferometer [J]. *Sensors and Actuators A*, 2005, **118**(1):6~13
- 8 Ian Read, Peter Foote, Stuart Murray. Optical fibre acoustic emission sensor for damage detection in carbon fibre composite structures[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13**(1):5~9
- 9 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):123~127
- 杭利军, 何存富, 吴斌等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1):123~127
- 10 Maria Q F, Kim D H. Novel fiber optic accelerometer system using geometric moire fringe[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **128**(1):37~42
- 11 Wu Yulie, Zheng Yu, Li Shengyi *et al.*. Propagation properties analysis of fused taper PANDA fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1111~1115
- 吴宇列, 郑煜, 李圣怡等. 熔锥型熊猫光纤耦合器的传输特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1111~1115
- 12 Zhao Chujun, Fan Dianyuang, Zhou Ping *et al.*. Power distribution characteristics of tapered fibers [J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(3):422~425
- 赵楚军, 范滇元, 周萍等. 锥形光纤的功率分布特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3):422~425