

文章编号 1004-924X(2009)08-1825-07

环形腔全光纤 F-P 干涉仪的声发射检测

梁艺军, 刘俊锋, 张巧萍, 樊晨光, 吴雷
(哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了实现固体材料内部声发射信号的检测, 提出了一种新型结构的全光纤 F-P 干涉仪。将 2×2 光纤耦合器的一个入射端与一个出射端焊接相连, 以其代替传统的反射腔面, 构成光纤环形传输腔, 腔体贴附或埋入待测固体中检测声发射信号。通过理论推导和计算机仿真, 确定了此结构光纤传感器的检测特性。实验以大理石板作为待测介质, 对利用信号发生器驱动压电陶瓷(PZT)作已知声发射源在大理石板中产生的连续型声发射信号, 及冲击波作用下大理石板中产生的突发型声发射信号进行了检测, 并利用 Fourier 变换得到了声发射信号的特征频率。实验结果表明, 此种结构传感器能够检测材料结构中使光纤轴向伸缩长度达 10^{-8} m 量级的声发射信号并识别其特征频率。该结构光纤传感器无需光程的匹配, 适用于大尺度构件的监测, 是材料结构健康检测与监控的一种新方法。

关键词: 声发射检测; 光纤传感; F-P 干涉仪; 特征频率

中图分类号: TB523; TH744.3 **文献标识码:** A

Ring cavity all fiber F-P interferometer used in detection of acoustic emission

LIANG Yi-jun, LIU Jun-feng, ZHANG Qiao-ping, FAN Chen-guang, WU Lei

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to detect the Acoustic Emission(AE) signals in solid materials, a novel ring cavity all fiber F-P interferometer is proposed. By welding the incidence and the exit of a 2×2 optical fiber coupler directly, an optical fiber ring cavity is constructed, which can be attached or embedded in the measured solid to detect the AE signals. The detection property of the optical fiber sensor is determined through the theoretical derivation and the computer simulation. Otherwise, a piezoelectric ceramic(PZT) is powered by signal generator to generate a continuous known AE signal, and a blast wave is adopted to simulate the burst AE signal in marble slabs. Then, they are detected by the optical fiber sensor, and the characteristic frequencies of AE signals are obtained by the Fourier technique. Experimental results indicate that the system can detect AE signals that cause the optical fiber stretching to 10^{-8} m in an axial direction and can identify the characteristic frequency of AEs. For it can work without the match of optical path and is suitable for monitoring the large scale component, the sensor provides a new method for the health examination and the monitoring of material structures.

Key words: acoustic emission detection; optical fiber sensor; F-P interferometer; characteristic frequency

收稿日期: 2008-09-10; 修订日期: 2008-10-23.

基金项目: 哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(No. HEUF04017)

1 引言

声发射(AE)是由于材料变形或者破坏时积蓄起来的应变能所释放的声波传播现象,又称为应力波发射^[1]。随着激光与光纤传感技术的发展^[2-4],利用光纤传感器检测固体声发射已经成为一种新型的无损检测手段。干涉型光纤传感器以其灵敏度高,动态范围大,抗电磁干扰能力强等优点而广泛应用于检测结构材料中声发射的实验中。实验发现现有的各种光纤干涉仪都存在问题,如光纤 Michelson 干涉仪对光纤端面反射率要求较高,干涉信号反衬度小;光纤 M-Z 干涉仪由于两个臂所处环境差异,造成干涉信号相位漂移严重;光纤 Sagnac 干涉仪的共光路结构导致其初位相无法调节;而传统的光纤 F-P 干涉仪,无论是本征结构还是非本征结构,对于腔体反射面要求较高,制作难度大,严重限制了其应用的范围^[5-7]。

本文基于多光束干涉仪原理,在传统的光纤 F-P 干涉仪的基础上,将 2×2 光纤耦合器的一个入射端与一个出射端焊接相连,以耦合器代替反射腔面,构成一种新型结构的光纤 F-P 干涉仪,用于检测结构材料中由声发射导致的表面振动。采用激光作为光源,使传感器无需光程匹配,即可实现多光束干涉。理论分析和实验验证表明,此结构的干涉仪可用于探测固体结构中伴随着微裂纹发生或其它压力等原因所产生的声发射信号,可用于大尺寸构件的监测。由于共光路结构,解决了因环境造成的相位漂移等问题,并可埋入大型建筑进行结构健康监测。

2 基本原理

将 2×2 光纤耦合器的一个入射端与一个出射端焊接相连,用耦合器代替反射端面,形成环形传输腔,具体结构如图 1 所示。设耦合器直通臂分光比为 α ,耦合臂分光比为 $1-\alpha$,入射光强为 I_0 ,当光从入射端口入射后,经过耦合器被分成两束。一束光经直通臂直接出射,光强为 αI_0 形成第一条出射光;另一束光强为 $(1-\alpha)I_0$ 经耦合臂进入环形传输腔,再次进入光纤耦合器,被分成了两束光,其中一束光强为 $(1-\alpha)I_0$ 的光从出射光

纤射出形成第二束出射光束;另外的一束光强为 $\alpha(1-\alpha)I_0$ 的光经过环形传输腔再次进入耦合器中,又有 $\alpha(1-\alpha)^2 I_0$ 的光从出射光纤射出形成第三条出射光;如此循环,直到环形腔内的光衰减为零,各出射光之间满足多光束干涉原理,在出射光纤端产生多光束干涉现象。

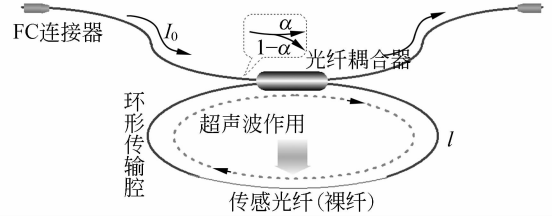


图 1 环形腔全光纤 F-P 传感器结构

Fig. 1 Structure of ring cavity all fiber F-P sensor

设光源输出光的振幅为 E_0 ,则 $I_0 = E_0^2$,不考虑损耗时,第一束出射光的振幅为 $\sqrt{\alpha}E_0$;第二束出射光的振幅为 $(1-\alpha)E_0$;第三束出射光的振幅为 $\sqrt{\alpha}(1-\alpha)E_0$;以此类推可以得到各出射光束的振幅。为了计算出射光的强度,必须分析各光束间的光程差 d 和位相差 δ 。在未接收声发射信号时,出射光中任何相邻的两束光线之间的光程差是相等的,可表示为:

$$d = nl, \quad (1)$$

式中, n 为光纤纤芯的折射率, l 为环形腔的长度。

每条光线的相位比前一条光线落后为:

$$\varphi = (2\pi/\lambda)d = knl. \quad (2)$$

根据各光束的振幅和相位差,设光波的初相位为 0 时,得到各出射光的复振幅:

$$\begin{cases} \tilde{U}_1 = \sqrt{\alpha}E_0 \\ \tilde{U}_2 = (1-\alpha)E_0 e^{j\varphi} \\ \tilde{U}_3 = \sqrt{\alpha}(1-\alpha)E_0 e^{j2\varphi} \\ \tilde{U}_4 = \alpha(1-\alpha)E_0 e^{j3\varphi} \\ \dots \end{cases} \quad (3)$$

为了方便对式(3)求和,可取合适的 α 使其构成等比数列,则有 $\sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\alpha} = 1-\alpha$,求得 $\alpha = 0.5$,即选用分光比为 1:1 的 3 dB 单模光纤耦合器,可方便地算出输出光强。代入上式后,出射光的总振幅化简为:

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^{\infty} \tilde{U}_i = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2} e^{j\varphi} + \frac{1}{2} e^{j2\varphi} + \frac{\sqrt{2}}{4} e^{j3\varphi} + \dots \right). \quad (4)$$

化简后得:

$$\tilde{U} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{E_0}{1 - \sqrt{2}e^{i\varphi}/2} = \frac{E_0}{\sqrt{2} - e^{i\varphi}} \quad (5)$$

因此,出射光的光强为:

$$I = \tilde{U}\tilde{U}^* = \frac{E_0^2}{(\sqrt{2} - e^{i\varphi})(\sqrt{2} - e^{-i\varphi})} = \frac{I_0}{2 - 2\sqrt{2}\cos\varphi + 1} = \frac{I_0}{3 - 2\sqrt{2}\cos\varphi} \quad (6)$$

式中, φ 为任意两相邻光束之间的位相差。

当加载声信号时,实际的光纤 F-P 声发射传感器的谐振腔长度 l 由两部分组成:

$$l = l_0 + \Delta l \quad (7)$$

式中, l_0 为静态腔长, Δl 为由 AE 波产生的整体的动态腔长。

实验中声发射源由正弦信号驱动压电陶瓷晶体 PZT 产生,信号可表示为 $S = S_0 \cos \Omega t$ (S_0 为声波的振幅, Ω 为声波的频率)。该声波作用于光纤上,其振幅的变化以及振动引起的光纤折射率的变化都会导致光程发生变化,则有:

$$n\Delta l = (a+b)S = (a+b)S_0 \cos \Omega t = l_s \cos \Omega t \quad (8)$$

式中, a 为振幅耦合系数, b 为折射率耦合系数。两相邻光束之间的位相差可写为:

$$\varphi = nk(\Delta l + l_0) = kl_s \cos \Omega t + nk l_0 = kl_s \cos \Omega t + \Delta\varphi \quad (9)$$

式中, $\Delta\varphi = nk l_0$ 为传感光纤原始长度的固定位相。所以输出的干涉光强为:

$$I = \frac{I_0}{3 - 2\sqrt{2}\cos(kl_s \cos \Omega t + \Delta\varphi)} \quad (10)$$

3 计算机仿真

为了获取光纤干涉仪的输出光强特性和与之相适应的实验条件,利用 MATLAB 软件在计算机上对式(10)进行了仿真^[8]。采用频率 $\omega/2\pi = 40$ kHz 的正弦波作为输入信号,仿真光纤传感器被该信号调制后的输出光强经光电转换后的电信号波形及其频谱。由 PZT 振动产生的超声波在固体中传播所能够检测到的幅值比较小,所以根据式(10),当 $\Delta\varphi$ 为 0, kl_s 分别取 1, 0.5, 0.3, 0.1, 对式(10)进行了仿真,其波形如图 2 中 a, b, c, d 所示,其对应的频谱如 3 图所示。

从图中可以看出,当 $kl_s = 1, 0.5, 0.3$ 时,检

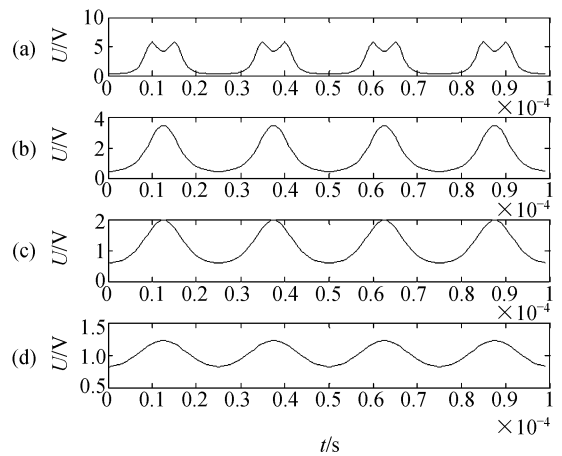


图 2 $\Delta\varphi$ 为 0, kl_s 为 1, 0.5, 0.3, 0.1 时的输出波形
Fig. 2 Output waveforms when $\Delta\varphi$ is 0, kl_s is 1, 0.5, 0.3, 0.1 respectively

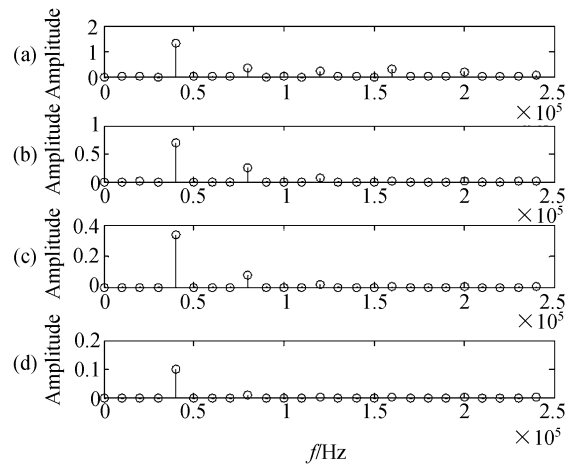


图 3 图 2 中各信号对应的频谱
Fig. 3 Spectra of signals in Fig. 2

测信号的频谱会出现明显的倍频现象,而当 $kl_s = 0.1$ 时,检测信号频率与输入信号的频率完全一致,并且无倍频现象,检测频率就是声源信号的频率。

以上仿真结果是当 $\Delta\varphi$ 为 0 时得到的,为了验证检测结果与传感器初位相的关系,取 $kl_s = 0.1$,分别对 $\Delta\varphi$ 为 $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ 时的检测信号进行了仿真,波形如图 4 所示,其对应的频谱如图 5 所示,可以看出,此时检测信号频率与输入信号频率完全一致,不受初位相影响。

通过以上仿真可以看出,当 kl_s 取 0.1 时,对应光纤轴向伸缩长度的量级为 10^{-8} m,当信号强度促使光纤轴向伸缩长度的量级 $> 10^{-8}$ m 时,检

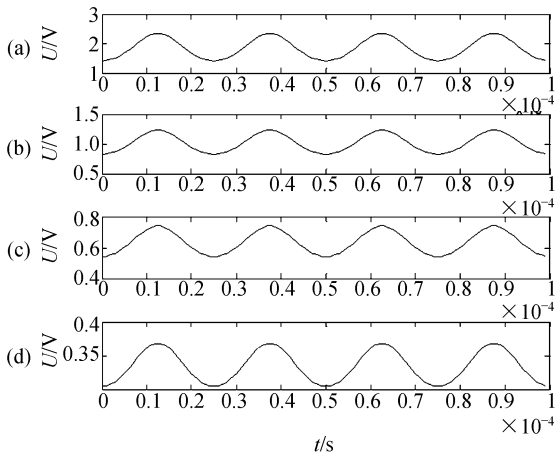


图 4 $kl_s=0.1, \Delta\varphi$ 为 $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ 时的检测波形
 Fig. 4 Output waveforms when kl_s is 0.1, $\Delta\varphi$ is $\pi/6, \pi/4, \pi/3, \pi/2$ respectively

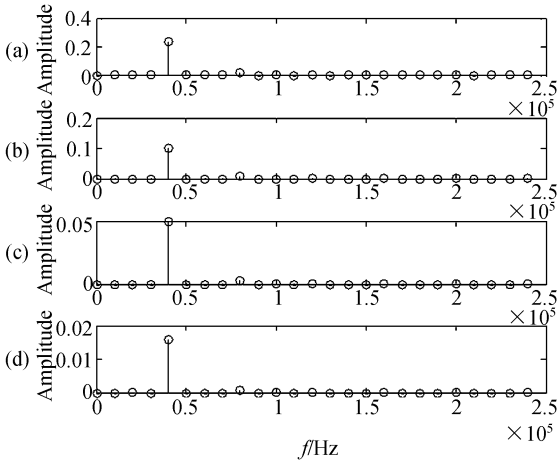


图 5 图 5 中各信号对应的频谱
 Fig. 5 Spectra of signals in Fig. 4

测结果中含有明显的倍频,信号失真明显;当信号强度促使光纤轴向伸缩长度的量级 $< 10^{-8}$ m 而大于光纤涂覆层缓冲阈值时,检测结果与输入信号频率相一致,且与传感器的初位相无关,能够检测到理想的声发射信号。实际测量范围与固体本身的属性及固体与光纤的耦合效率有关。

4 实验装置与实验结果

环形腔全光纤 F-P 干涉型声发射检测实验装置如图 6 所示,主要包括:LD 激光器、FC 连接器、3 dB 单模光纤耦合器、偏振控制器、光电探测器与放大器、高速数据采集卡(DSO-2904)、计算

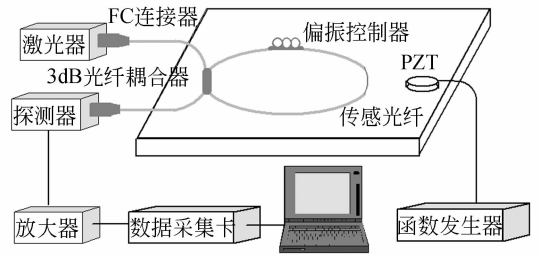


图 6 光纤 F-P 干涉声发射检测实验装置
 Fig. 6 Experimental device of optical fiber F-P interferometer for AE detection

机、PZT 压电换能器与函数信号发生器。

本实验采用一块 600 mm×600 mm×25 mm 的大理石板作为传输介质,PZT 固定在大理石板的表面,通过函数信号发生器驱动 PZT 模拟声发射源,驱动频率为 40 kHz,使之在大理石板内产生连续的声发射信号。传感光纤贴附于大理石板的表面进行检测,激光器出射光经过传感光纤后,被声发射信号调制,输出的干涉信号通过光电探测器转换为电信号,电信号经放大器后进入数据采集卡,通过电脑显示检测结果。当函数信号发生器的驱动电压为 20.5 V 时,系统检测的信号波形与频谱如图 7 和图 8 所示,函数信号发生器的驱动电压为 10 V 时,系统检测的信号波形与频谱如图 9 和图 10 所示。

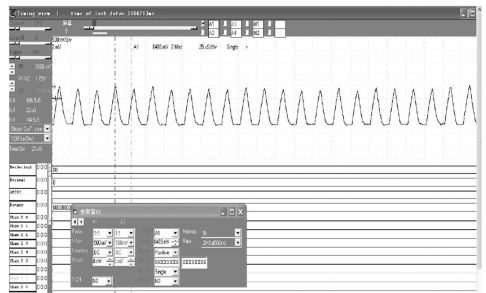


图 7 驱动电压为 20.5 V 时输出信号的波形
 Fig. 7 Signal waveform when driving voltage is 20.5 V

关闭函数信号发生器后,在大理石板表面利用自制的声发射模拟源,以弹簧挤压冲击杆,使杆的尖端对大理石板产生一个冲击作用,该冲击信号等效于突发型声发射信号。采集到的冲击信号波形如图 11 所示,此冲击信号的频率特征如图 12 所示。

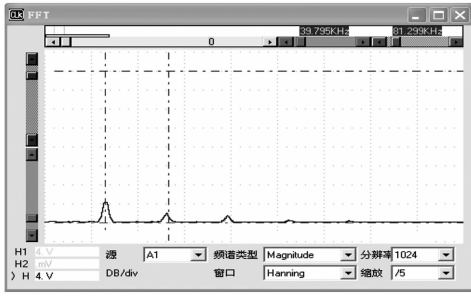


图 8 图 7 中输出信号的频谱
Fig. 8 Spectrum of signal in Fig. 7

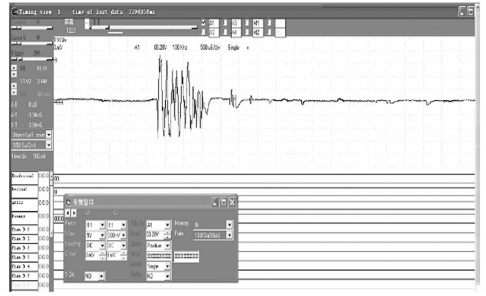


图 11 冲击波作用时的检测波形
Fig. 11 Signal waveform with shock wave action

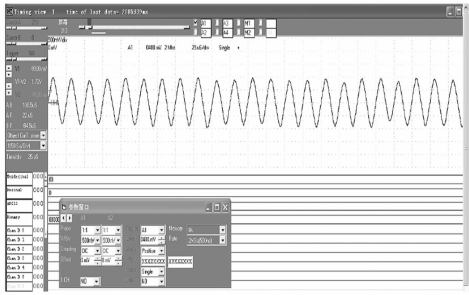


图 9 驱动电压为 10 V 时输出信号的波形
Fig. 9 Signal waveform when driving voltage is 10 V

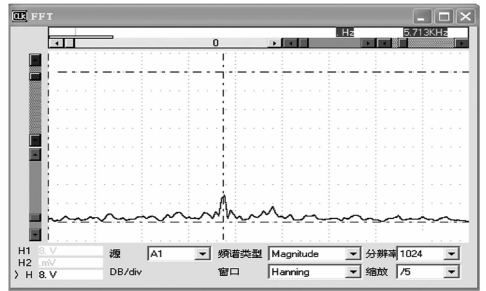


图 12 冲击波作用时检测波形的频谱
Fig. 12 Spectrum of signal with shock wave action

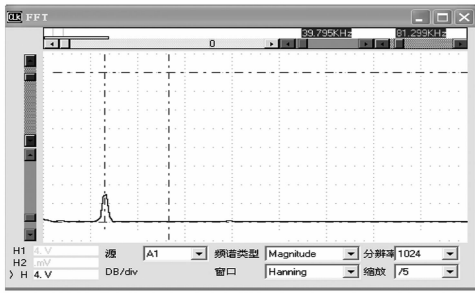


图 10 图 9 中输出信号的频谱
Fig. 10 Spectrum of signal in Fig. 9

种模拟,从图中可以看到检测信号的特征频率为 5.713 kHz,实现了其特征频率的识别。实际工程中的声发射信号强度要远小于此模拟冲击波信号,可以保证检测信号的准确性。综上所述,该传感器完全适用于声发射信号的检测。

5 结 论

本文提出了一种新型结构的光纤 F-P 干涉仪,用于结构材料中的声发射检测。根据理论推导,对光纤传感器经声信号调制后的输出光强进行了计算及仿真,通过实验实现了对 PZT 产生的 40 kHz 的连续型模拟声信号以及自制模拟声源产生的主频为 5.713 kHz 的突发型声发射信号的检测,通过 Fourier 变换,得到了信号的特征频率。实验结果表明,当光纤轴向伸缩长度的量级 $>10^{-8}$ m 时,适用于窄带声发射信号的检测,而当光纤轴向伸缩长度的量级 $<10^{-8}$ m,可以实现任意频率的声发射检测。此结构的光纤传感器完全能够检测材料结构中声发射信号并识别其频率

以上实验结果表明,当函数发生器输出的驱动电压较大时,对应 $kl_s > 0.1$,检测信号失真明显,但基频信号明显,出现多阶次倍频现象,此时为避免信号频率的重叠,可适用于窄带声发射信号的检测;而当减小函数发生器输出的驱动电压,对应光纤轴向伸缩长度的量级 $<10^{-8}$ m,只存在基频信号,可达到检测信号与输入信号相同的状态,适用于任何带宽的声发射信号检测,与理论推导结果相吻合,验证了上述理论的正确性。对于冲击波信号的检测,是对突发型声发射信号的一

特征。由于采用激光作为光源,无需进行光程匹配;而由光纤几何尺寸小,具有柔韧性等特点,使其便于贴附或埋入大尺寸结构材料内,实现对结构健康的无损检测及长期监控。以上仅就此结构

的光纤传感器的声发射信号检测的可行性进行了理论分析、计算机仿真及相关实验研究,接下来的工作将针对实际的声发射信号,实现混凝土材料内部声发射的检测。

参考文献:

- [1] 藤山邦久编著,冯夏庭译.声发射(AE)技术的应用[M].北京:冶金工业出版社,1996.
KUNIHISA F Authoring, FENG X T Translating. *Application of Acoustic Emission Technology*[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,1996. (in Chinese)
- [2] LIU K, FERGUSON S M, MEASURES R M. Damage detection in composites with embedded fiber optic interferometer sensors[J]. *SPIE*, 1990, 1107:205-210.
- [3] 金远强,刘丽华,马惠萍,等.用于高速转轴径向振动检测的光纤传感技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):95-99.
JIN Y Q, LIU L H, MA H P, *et al.*. Fiber sensor used in detecting radial vibration of high rotating speed shaft[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 95-99. (in Chinese)
- [4] 李醒飞,王驰,向红标,等.光学外差干涉法检测微弱超声振动[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1158-1162.
LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.*. Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1158-1162. (in Chinese)
- [5] YUAN L B, ZHOU L M, JIN W. Long-gauge length embedded fiber optic ultrasonic sensor for large-scale concrete structures[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(1): 11-17.
- [6] ZHAO J H, SHI Y K, SHAN N, *et al.*. Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(6): 874-880.
- [7] 赵洪,李敏,张影,等.非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(6): 1018-1024.
ZHAO H, LI M, ZHANG Y, *et al.*. Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot acoustic sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):1018-1024. (in Chinese)
- [8] 梁艺军,徐彦德,刘志海,等.环形光纤声发射传感器的相位调制特性研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(9): 1337-1340.
LIANG Y J, XU Y D, LIU ZH H, *et al.*. Frequency response of coiled-fiber optic sensor for detection of the acoustic emission[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(9):1337-1340. (in Chinese)

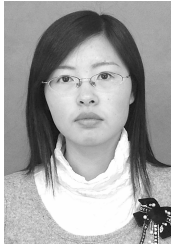
作者简介:



梁艺军(1961—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,现任教于哈尔滨工程大学理学院,主要从事光纤智能结构与光纤声发射检测技术的研究。E-mail: liang_yijun @126.com



刘俊锋(1984—),男,辽宁锦州人,硕士研究生,主要从事光学检测与光学信息处理的研究。E-mail: liujunfeng10159 @163.com



张巧萍(1986—),女,浙江东阳人,硕士研究生,主要从事光学检测与光学信息处理的研究。E-mail: zhangqiaoping0127@163.com



吴雷(1983—),男,黑龙江鹤岗人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: wulei412@163.com



樊晨光(1985—),男,湖北钟祥人,硕士研究生,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: hanyan440@163.com

● 下期预告

机载光电平台球罩的视轴指向误差

韩松伟,项阳,刘洵,孟中,毛大鹏,吴志勇,王国华,丁金伟,李永刚
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林长春 130033)

机载光电平台光学镜头前的通光窗口,多选用内外球心重合的等厚球形玻璃球罩。球罩在加工过程中,由于加工误差会产生内外表面球心不重合,给视轴指向精度带来附加误差。本文根据光路图推导出了产生这种误差的数学表达式,分析了内外球心偏离对视轴指向精度的影响,做了大量的相关实验并对实验数据进行处理。实验结果表明,实测数据与数学理论推导结果吻合得很好。当某型号机载光电平台球罩的内外表面球心沿视场中心线的偏离达到 0.26 mm 时,45°视场处的视轴指向误差实测值达到 0.075°,超出了 0.029°(0.5 mrad)的允许值。为了将球罩加工误差带来的视轴指向偏差减小到较理想值 0.017°(0.3 mrad)以内,内外球心偏离必须控制在 0.10 mm 以内。实际工作中将球罩内外球心偏离控制在 0.1 mm 以内,视轴误差均满足要求。