

文章编号: 0253-2239(2010)09-2508-05

# 基于强度型光纤传感器的声波隔体探测关键技术研究

许秉时 肖文

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要** 利用反射式强度调制型光纤传感器进行间隔固体介质的声波隔体探测, 研制了光纤传感声探测装置, 重点从光强调制、振动提取和拾振耦合三个方面研究了在声波隔体探测过程中的振动传递机理, 对振动传递过程进行了分析研究, 从理论上建立了固体介质、探测拾振装置和光纤敏感单元三者的振动传递数学模型。在此基础上设计实现了光纤声传感系统, 并给出了声波隔体探测的实验方法。其结果表明, 在 5 cm 厚木板、5 cm 厚水泥预制板、12 cm 厚砖墙、10 cm 厚水泥预制板的测试条件下, 此系统对频率为 1 kHz, 声级(SPL)为 94 dB 的标准声信号的探测失真度均小于 8%。

**关键词** 探测器; 强度调制型光纤传感器; 数学模型; 声波探测

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2508

## Research of Acoustic Sounding Sensors over Obstructs Based on Reflective Intensity Modulated Fiber-Optic Sensor

Xu Bingshi Xiao Wen

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** Reflective intensity modulated fiber-optic sensors (RIM-FOS) have received increasing attention in the fields of civil engineering for their superior ability of explosion proof, immunity to electromagnetic and high accuracy, especially fitting for measurement applications in harsh environment. A novel functioning prototype of an integrated sensor based on RIM-FOS which is used for acoustic sounding over obstruct is introduced. It aims at the integration of optical fibers based sensors into functional probe for extending the capabilities of the portable solutions for the acoustic detection over solid obstructs. According to the laws of wave propagation, the mechanism of acoustic wave transmission between solid medium and acoustic sounding probe is studied and the calculating formula reflecting the wave transfer process was presented. Some details and overview regarding our ongoing efforts are provided. The experimental results show that the developed sensor's response distortions towards 1 kHz 94 dB sound pressure level (SPL) signal are all lower than 8% in 4 experimental terms including 5 cm wood board, 5 cm concrete prefabricated board, 12 cm brick well and 10 cm concrete prefabricated board.

**Key words** detectors; intensity modulated fiber-optic sensors; mathematical model; acoustic sounding

## 1 引言

反射式强度调制型光纤传感器是一种基础的光纤传感器类型, 在光纤传感领域有着十分重要的地位。它通过反射面的位置改变来调制光纤接收的光强度, 从而实现位移、转角、应变、压力、振动、温度、表面粗糙度等多种物理量的测量<sup>[1]</sup>。截止目前, 关于反射式强度调制型光纤传感器的研究和应用非常

广泛, 国内外均有其实际应用成果的相关报道<sup>[2~5]</sup>, 其中以位移测量等传统应用为主。

声波探测, 特别是间隔固体介质进行声波探测, 在勘探、建筑、医疗、精密机械及灾害预防等许多领域, 具有重要的应用价值。现有的声波探测传感器大多采用电学式, 由振动引起电荷、电压或电流的变化实现测量, 这类传感器不适合易燃易爆、强电磁干

收稿日期: 2009-09-29; 收到修改稿日期: 2009-11-18

基金项目: 国家 863 计划(2007AA12Z131)资助课题。

作者简介: 许秉时(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: xubingshi616@yahoo.com.cn

导师简介: 肖文(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤陀螺和光电传感等方面的研究。E-mail: xiaow@buaa.edu.cn

扰等测量环境严苛的领域。光纤声波探测传感器<sup>[6~7]</sup>具有抗电磁干扰、耐腐蚀和灵敏度高许多优势,能够满足恶劣条件下的测量要求。

反射式强度型光纤传感器应用于声波探测,具有结构紧凑、设计灵活、成本较低以及环境适应性强的独特优点,因此引起人们的重视。目前,此类传感器在空气介质中的声波探测领域,已有相关的实验研究及应用,其中一种典型实例为光纤麦克风<sup>[8]</sup>,已达到成品应用水平。但反射式强度型光纤传感器用于间隔固体介质进行声波探测,因其振动作用形式和探测机理不同,且振动传递过程更为复杂<sup>[9~13]</sup>,而亟待深入研究和探索原理。本文设计了一种基于反射式强度调制型光纤传感原理的声探测传感器,针对间隔固体介质的另一侧声振动探测的关键技术进行了深入研究,设计了振动拾取装置,并给出系统传递函数,实现了声波的隔体探测。

## 2 系统原理及数学模型

如图 1 所示为光纤振动传感器用于隔体声音探测的原理图。固体介质一侧的声波将引起介质的微小振动<sup>[14]</sup>,振动波透过介质传播到另一侧,并引起介质表面的振动,振动拾取单元通过与光纤传感单元的有效配合,将振动反映为光纤单元敏感反射面的位置变化,进而调制接收光纤中的光强度,最终由光电转换及信号处理电路复原声音,实现了声音的隔体探测。

如图 1 所示,传感器系统主要包括电路部分、传输光纤与传感探头部分,其中传感探头部分是系统完成隔体声波探测的设计重点,它分为光纤传感单元和振动拾取单元,并需要二者有效结合。

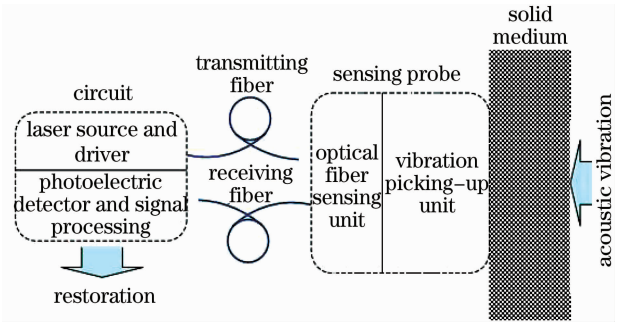


图 1 光纤振动传感器隔体声波探测原理框图  
Fig. 1 Acoustic sounding over obstructs by fiber-optic vibration sensor

光纤传感单元基于反射式强度调制型光纤振动传感器原理,此类传感器主要由光源、发射光纤、反射面、接收光纤及光电转换电路五部分组成,如图 2(a)所示。光源发出功率为  $P_0$  的光经发射光纤投射在敏感振动的反射面上,反射光进入接收光纤输出到光电探测器。当反射面相对光纤端面的距离  $d$  发生微小改变时,反射回接收光纤的光强相应发生变化,在其他参数不变的情况下,探测器接收到的光功率  $P_r$  取决于距离  $d$ ,即  $P_r$  受  $d$  的调制, $P_r = M_0(d)$ 。  $M_0$  为光纤传感器的光强调制函数,根据参考文献<sup>[15]</sup>对反射式光纤传感器模型的分析及推导,可知:

$$P_r = P_0 \frac{\omega^2(z)\alpha_1(z) + r^2\alpha_2(z) - p\omega(z)\sin\alpha_1(z)}{\pi\omega^2(z)}$$

其中

$$p = 2h \sin \alpha - 2rcos^2 \alpha,$$

$$\alpha_1(z) = \arccos \{ [p^2 + \omega^2(z) - r^2] / 2p\omega(z) \},$$

$$\alpha_2(z) = \arccos \{ [p^2 + r^2 - \omega^2(z)] / 2rp \},$$

$\omega(z) = r + \tan \theta (r \sin 2\alpha + 2d \cos \alpha)$ 。其中  $r$  为光纤纤芯半径, $\theta$  为数值孔径角, $\alpha$  为发射光纤与接收光纤夹角的平分角。

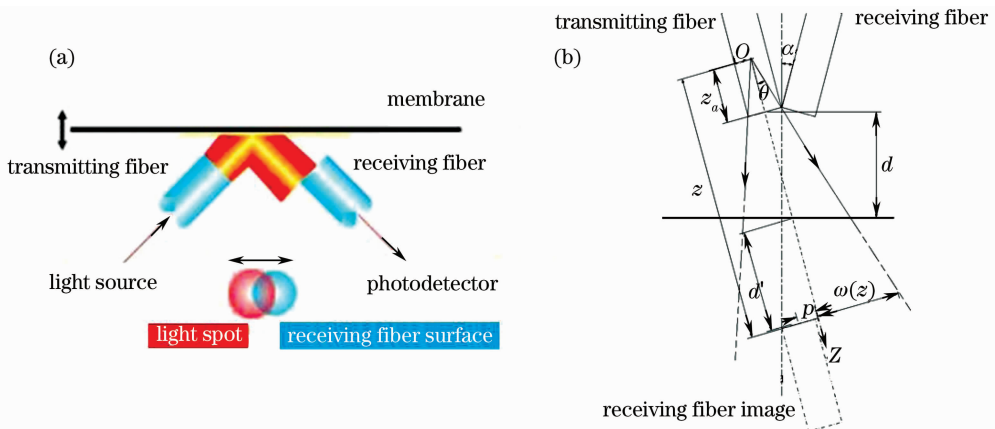
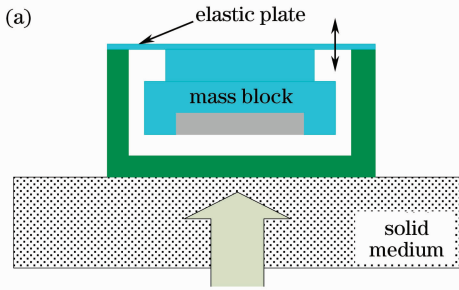


图 2 反射式光纤传感器。(a)原理示意图,(b)几何模型

Fig. 2 Reflective intensity modulated fiber-optic sensor. (a) Schematic of principle, (b)geometric model

在隔体声音探测系统中,与光纤传感单元相结合,使其适用于隔体声音探测的振动拾取单元结构如图 3(a)所示,其动力学等效模型如图 3(b)所示。拾振单元外壳拾取振动信号后,传导到与其壳体相



连接的弹性薄板结构,将弹性结构等效为弹簧,下端附加一质量块  $M$ ,用于调节系统频响及增大振动幅度, $R$  为周围空气对质量块的阻尼。

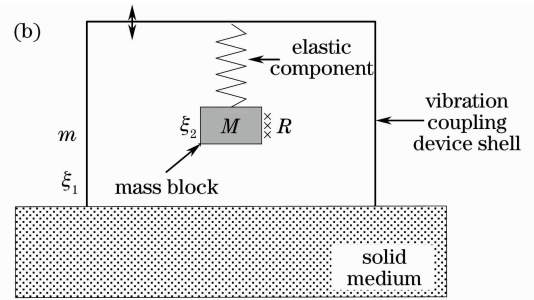


图 3 振动拾取单元。(a)结构示意图,(b)动力学等效模型

Fig. 3 Vibration picking-up unit. (a) Schematic of structure, (b) dynamic equivalent model

设探测介质表面垂直方向振动为  $\xi_1 = \xi_{10} \exp(j\omega t)$ <sup>[16]</sup>,则当传感探头与固体介质平行且紧密接触时,壳体的位移量  $\xi_1 = a\xi_{10} \exp(j\omega t)$ , $a$  为常数。记  $\xi_2$  为质量块的位移,对于微振动敏感单元而言,质量块对壳体的相对位移  $\xi = \xi_1 - \xi_2$  即为拾取到的振动信号。

上述模型的振动学方程为

$$M(d^2\xi/dt^2) + R(d\xi/dt) + K\xi = -M(d^2\xi_1/dt^2),$$

求解后即可得到拾取到的振动信号的表达式:

$$\xi = \xi_\alpha \exp[j(\omega t - \theta_0 - \pi/2)]$$

其中振动信号的振幅为  $\xi_\alpha = M\omega\alpha\xi_{10}/|Z|$ , $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$  为系统的力阻抗模值, $\theta_0 = \arctan(X/R)$  为其幅角, $X = \omega M - (K/\omega)$  为力抗。

由上面的分析可知,拾取到的振动信号  $\xi$  与待测声音信号  $\xi_1$  具有相同的频率,但存在  $\theta_0 + \pi/2$  的相位差,对于本文所研究声音探测系统,暂不讨论相位差的影响。于是在探测环境(介质参数)一定的情况下, $\xi = M_v(\xi_{10})$ , $M_v$  称为此系统中拾振单元的振动传递函数。

振动拾取单元通过其空气腔 I 与光纤敏感单元空气腔 II 连通结合,如图 4 所示。根据气体方程,得到敏感反射面振动  $\xi_r = M_g(\xi)$ , $M_g$  为连接导通过程

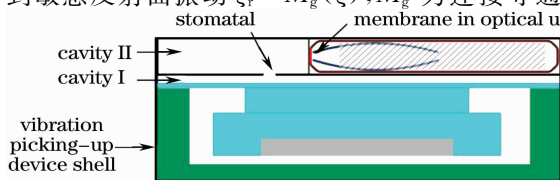


图 4 振动拾取单元与光纤敏感单元连接示意图

Fig. 4 Conjunction of vibration picking-up unit and optical-fiber sensing unit

的振动传递函数,完成了振动的传递、放大。反射面振动  $\xi_r$  等价于反射面相对光纤端面的距离  $d$  ( $d - d_0 = |\xi_r|$ )。

综上所述,光电探测器检测到的光功率,通过调制传递函数  $M_0, M_g, M_v$ ,最终反映了声音振动信号。

### 3 实验研究及结果

该系统采用带尾纤的 850 nm 半导体 LED 光源,输出功率 200 mW。发射与接收光纤均为大芯径多模光纤,光纤出射端与轴线夹角为  $60^\circ$ ,反射面为高反射率金属薄膜。探头拾振结构材质为 ABS 工程塑料合金(密度  $1.13 \text{ g/cm}^3$ ),外观尺寸直径  $\phi 5 \text{ cm}$ ,外壳壁厚 4 mm,质量块尺寸  $\phi 3.4 \text{ cm} \times 9 \text{ mm}$ ,弹性薄板厚 0.75 mm。

在非探测面对声源的隔声量远大于探测面的条件下,进行了系统的隔体声音探测实验,实验装置如图 5 所示。实验中采用 AWA6122 电声测试仪的仿真嘴作为待测的标准声源,其激励信号由电声测试仪主机给出。仿真嘴放置在固体介质一侧,固体介质将传感探头与声源隔音分离,以尽量减小声音信号的泄露干扰。实验时,标定声源发声到达固体介质表面时声压级(SPL)为 94 dB。探测系统的传感探头固定在固体介质板的另一侧,并且与电路相连接,最终输出的信号进入电声测试仪和失真度测试仪,以检测探测失真度指标。

实验用固体介质隔板平面尺寸均为  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ,固体介质分别为 5 cm 厚木板(密度  $0.69 \text{ g/cm}^3$ )、5 cm 厚水泥预制板(平均密度  $2.45 \text{ g/cm}^3$ )、12 cm 厚砖墙(平均密度  $2 \text{ g/cm}^3$ )、10 cm 厚水泥预制板的系统失真度实验结果如图 6 所示。

在声波探测中,传感器的频率特性同样是非常重要的性能指标,图 7 给出的在 94 dB SPL 标准声信号扫频输入情况下系统光纤敏感探头频率响应曲线

线,由图可知该声波隔体探测器对频率集中在300~3000 Hz 的声音振动信号有较为平坦的系统响应。

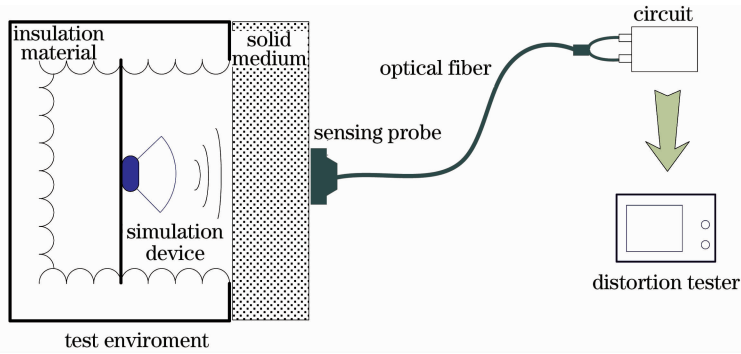


图 5 实验测试装置图

Fig. 5 Devices of experimental test

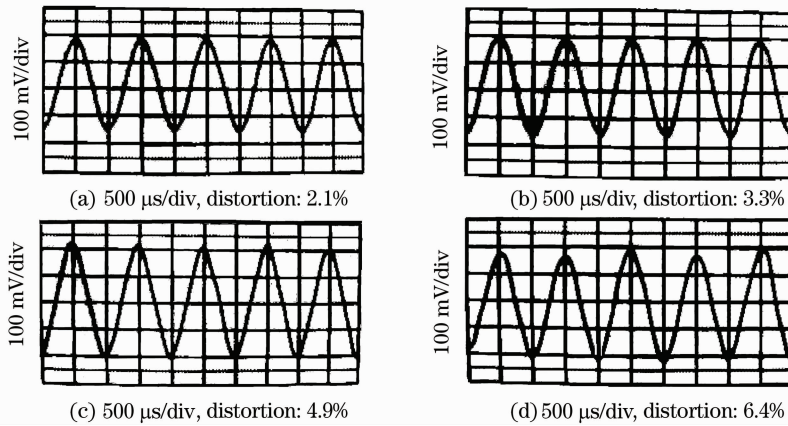


图 6 系统失真度实验结果。(a)5 cm 厚木板,(b)5 cm 厚水泥板,(c)12 cm 厚砖墙,(d)10 cm 厚水泥板

Fig. 6 Response distortions in 4 experimental terms. (a)5 cm -thick wood board, (b)5 cm -thick concrete prefabricated board, (c)12 cm -thick brick wall; (d)10 cm -thick concrete prefabricated board

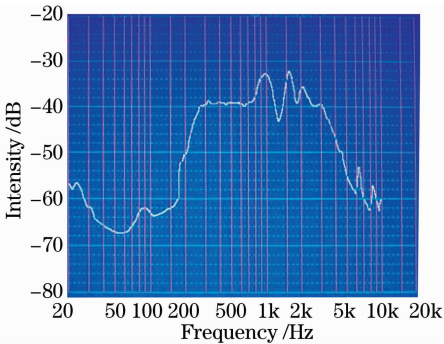


图 7 系统频率响应实验结果

Fig. 7 Frequency response under 94 dB SPL signal

### 4 结 论

基于反射式强度调制型光纤振动传感器进行隔体声波探测,设计实现了声波探测样机,从光强调制、振动拾取等方面分析了此隔体探测系统的声波探测原理,从理论上建立了待测声波通过传感系统

的振动传递数学模型,为声波的隔体探测提供了理论依据,同时阐述了该系统用于声波探测的方法。实验结果表明,在 5 cm 厚木板、5 cm 厚水泥预制板、12 cm 厚砖墙、10 cm 厚水泥预制板的测试条件下,此系统对频率为 1 kHz,声级(SPL)为 94 dB 的标准声信号的探测失真度均小于 8%,由此得出此基于反射式强度调制型光纤振动传感器的声波隔体探测系统所测得的声波信号可以在工程实际中使用。

### 参 考 文 献

- 1 P. B. Buchade, A. D. Shaligram. Simulation and experimental studies of inclined two fiber displacement sensor[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **128**(2): 312~316
- 2 Jose Brandao Faria. A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor[J]. *Trans. Instrum. Meas.*, 1998, **47**(3): 742~747
- 3 Fang Lanlan, Ma Junshan. A method for improving the sensitivity of the reflective fiber optic displacement sensor[J].

- Applied Laser*, 2007, **27**(2): 129~131  
方兰兰, 马军山. 一种提高反射式光纤位移传感器灵敏度的方法[J]. *应用激光*, 2007, **27**(2): 129~131
- 4 P. B. Buchade, A. D. Shaligram. Influence of fiber geometry on the performance of two-fiber displacement sensor[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **136**(1): 199~204
- 5 Ma Huiping, Liu Lihua, Yang Leming *et al.*. Fiber optic displacement sensors based on principle of collimated beam reflective intensity modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 176~181  
马惠萍, 刘丽华, 杨乐民等. 平行光束反射光强调制型光纤位移传感器研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 176~181
- 6 Wu Juntao, Deng KungLi. Fiber-Optic Photo-acoustic spectroscopy sensor for harsh environment gas detection[C]. *SPIE*, 2007, **6698**(66980E): 1~7
- 7 Miao Changzong, Xu Haiying, Lin Changsheng *et al.*. Experimental research on characteristics of fiber-optic acoustic sensor[J]. *Chinese J. Sensors Actuators*, 2006, **19**(3): 818~819  
缪长宗, 徐海英, 林长圣等. 光纤声传感器特性的实验研究[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(3): 818~819
- 8 Murat Okandan, Neal Hall. Optical microphone structures fabricated for broad bandwidth and low noise[C]. *IEEE Sensors 2007 Conference*, 2007: 1472~1475
- 9 Christine Prella, Frederic Lamarque, Philippe Revel. Reflective optical sensor for long-range and high-resolution displacements [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **127**(1): 139~146
- 10 Weimin Chen, Yuanyuan Xie, Peng Zhang *et al.*. Localization theory of distributed fiber vibration sensor[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 186~187
- 11 He Yan, Shang Jianhua, Liu Dan *et al.*. Heterodyne laser Doppler vibrometer for underwater acousto-optic communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 189~192  
贺岩, 尚建华, 刘丹等. 用于水下声光通信的外差式激光多普勒振动计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 189~192
- 12 Graham Wild, Steven Hinckley. Fiber Bragg grating sensors for acoustic emission and transmission detection applied to robotic NDE in structural health monitoring [C]. *IEEE Sensors Applications Symposium*, 2007, 1-4244-0678-1/07: 1~6
- 13 B. R. Tittmann, R. Lerch, H. Landes *et al.*. Wave propagation in long compound acoustic transmission line; numerical simulation and measurement [C]. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1997: 401~404
- 14 Sylvain Gauthier, Walid Chamma. Surveillance through concrete walls[C]. *SPIE*, 2004, 5403: 597~608
- 15 Xu Bingshi, Xiao Wen, Yao Dong. A theoretical analysis on parameters of fiber optic displacement sensor[C]. *SPIE*, 2008, **7129**(71290P): 1~4
- 16 L. M. Brekhovskikh, Wave in Multi-Layer Media[M]. Yang Xunren Transl. Beijing: Science Press, 1960. 303~306  
布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波[M]. 杨训仁译. 北京: 科学出版社, 1960. 303~306