光纤非本征法布里-玻罗传感器兰姆波检测灵敏度分析

张海燕，孙修立，石志东，陈 娜，肖悦娱
(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网省部共建重点实验室，上海 200072)

摘要：基于兰姆波的结构工况检测技术在评估复合材料和金属结构的安全性和耐久性方面发挥着重要的作用。作为对传统的压电换能器(PZT)的一种很好的替代，光纤传感器在传感方面的应用正被广泛地挖掘出来，包括兰姆波检测。本文从理论上建立了超声兰姆波作用下光纤非本征法布里-玻罗(EFPI)传感器参数与其输出性能之间的关系。数值结果显示了传感器的性能与其相对于声源的方向角以及传感器的计量长度与超声波长的比值相关。所得出的结论对于EFPI 传感器精确地探测兰姆波提供了理论依据。

关键词：兰姆波；光纤传感器；非本征法布里-玻罗干涉仪；灵敏度分析
中图分类号：O426.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-04-0485-03
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.04.010

Sensitivity analysis of extrinsic Fabry-Perot interferometer optical fiber sensor for Lamb wave detection

ZHANG Hai-yan, SUN Xiu-li, SHI Zhi-dong, CHEN Na, XIAO Yue-yu
(*School of Communication and Information Engineering, Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, Shanghai University, Shanghai* 200072, *China*)

Abstract: Structural health monitoring technology using Lamb waves for composite and metallic structures plays an important role in assessing the safety and the durability of the structures. As a good alternative to conventional piezoelectric transducers (PZT), fiber optic sensors are being widely exploited for their sensing applications, including Lamb wave detection. In this paper, a theoretical analysis of optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) sensor performance is made to establish a relationship between the parameters of an EFPI sensor and its output characteristics due to ultrasonic Lamb wave field. Numerical results reveal that the performance of EFPI sensor is mainly related to the directional angle of the sensor relative to the acoustic source and to the ratio of the gage length of the sensor to the Lamb wave wavelength. The obtained conclusions are useful for the precise measurement of Lamb waves using EFPI sensor.

Key words: Lamb waves; fiber optic sensor; extrinsic Fabry-Perot interferometer; sensitivity analysis

1 引 言

兰姆波检测中最广泛应用的是压电传感器(PZT)[1,2]。采用压电探头的常规兰姆波检测，是一种物理接触式方法，检测时探头与试件通过耦合剂完成能量交换。尽管这种技术较成熟、操作较简易且成本较低，但在某些特殊场合已不能满足工程要求。例如在恶劣环境下(如高温、高压、放射性材料等)的测量、物质微结构的研究、超薄材料的测量等方面，其有效性大大降低甚至不能使用。因此，采用先进的信息传感器提供可靠的结构特征信息已逐渐成为必然。光纤传感器具有体积小、质量轻、抗电磁干扰等优点而越来越受到关注，近年来已经在工业测量、大型建筑结构健康监测、智能材料等领域得到广泛应用。虽然基于各种原理的光纤传感器已经被演示验证成功[3,4]，但光纤非本征法布里-珀罗(EFPI)传感器被认为是目前最有前途的传感器之一[5-8]。EFPI 传感器主要是基于白光多光束干涉的原理制成的，传感信号为波长式调制。这一传感机理的好处在于：测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗和解调器老化等因素的影响，避免了一般干涉型传感器中相应测量对固有参考点的需要。

采用传统的 PZT 传感器进行兰姆波检测时，激发频率以及输入波形的选择是其主要考虑的因素。

收稿日期: 2008-07-10; **修回日期**: 2008-11-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(10874110,10504020)，上海市重点学科和科委重点实验室项目资助(S30108, 08DZ2231100)
作者简介: 张海燕(1970-)，女，山东人，博士，副教授，研究方向为超声检测，声信号处理。
通讯作者: 张海燕, E-mail: hyzh@shu.edu.cn

而光纤 EFPI 传感器检测兰姆波时，除上述因素外，传感器的计量长度、激发兰姆波的波长以及传感器相对于发射器角度等参数也都是影响传感器灵敏度的主要因素，当传感器的灵敏度最大时可以更精确的进行缺陷检测。鉴于此，本文建立了光纤 EFPI 传感器兰姆波检测的理论模型，并对传感器的灵敏度的影响因素从理论上进行了分析。

2 EFPI 传感原理

EFPI 传感器的典型结构如图 1 所示。将两根抛光端面的光纤(分别称为导入光纤和导出光纤)置入一根内径与光纤包层直径相匹配的准直毛细管，两个光纤端面和二者之间的空气隙构成了一个非本征型的 FP 腔，其腔长为 d。实际制作过程中，采用环氧树脂胶粘或激光热熔的方式将导入光纤和导出光纤与准直毛细管固定在一起，两固定点之间的距离为 L，称为计量长度。导入光纤与激光器相连，激光器激发的光沿导入光纤传输，遇到第一个端面时，一部分光直接地反射回来(R_1)，另一部分光从第一个端面透射到第二个端面，再有一部分反射回来(R_2)，这两部分反射光相互干涉。由温度、应力等可引起干涉光相位的变化，从而检测出相应的物理量。

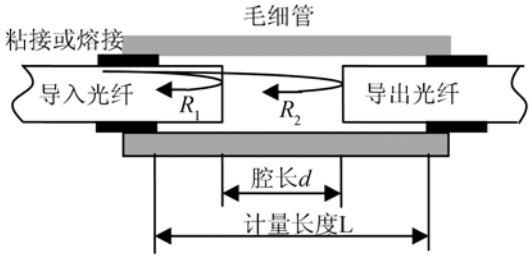

图 1 EFPI 传感原理图

Fig.1 Schematic diagram of optical fiber EFPI sensor

3 理论建模

3.1 EFPI 兰姆波检测系统

图 2 为 EFPI 作为传感器的兰姆波无损检测系统。该系统采用标准的兰姆波激发方式，包括函数发生器、幅值放大器以及 PZT 换能器。由函数发生器激发的输入信号经幅值放大器放大后送入 PZT 发射器，PZT 激发的兰姆波信号在薄板中传播一段距离后由 EFPI 传感器接收。兰姆波对 EFPI 的作用相当于一个随时间变化的应变场，该应变场导致 EFPI 传感器光相位的变化，通过光谱仪可实时地监测该相位变化。稳定控制系统包含两部分功能：一是补偿相位漂移，接光谱仪；二是光信号解调，接数字示波器，将光信号转化为电信号，显示在数字示波器上。含缺陷信号与无缺陷信号的波形在示波器上的表现不同，以此判断板中是否含有缺陷。

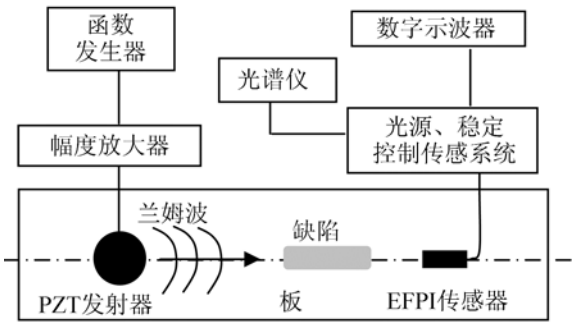

图 2 EFPI 兰姆波检测系统

Fig.2 Lamb wave detection system using EFPI as sensor

3.2 EFPI 灵敏度影响分析

假定薄板上有一个点源，兰姆波由该点源激发，则由点源激发的兰姆波在板内产生一个位移场。假设该位移场仅仅是由点源引起的，则由位移场的变化所产生的应变场可用式(1)表示：

$$\varepsilon_r(r)=\frac{A_0}{\sqrt{r}}\sin\left(2\pi\left(ft-\frac{r}{\lambda}\right)\right) \tag{1}$$

其中 A_0 是初始幅度，r 是距点源的距离，f 和 λ 分别是兰姆波的频率和波长。

假设光纤传感器粘贴在薄板上，且应变场的定义如式(1)，则光纤传感器的输出可以用式(2)表示：

$$I_{out}=\mathrm{A}(1+\cos\delta\phi) \tag{2}$$

其中 A 是个比例常数，$\delta\phi$ 代表光信号中相位的变化。

对干涉式传感器的情况，当输出信号的初始相位位于正交点上的时候，相位变化与输出信号差不多是成比例的[8]。而且，如果相位变化不超过线性极限 π 的话，位移的变化将会落在线性范围内。这里，假定相位变化并没有超过线性极限，沿光纤传感器的纵向方向对应变积分，可以导出相位变化 $\delta\phi$：

$$\delta\phi=\frac{2\pi}{\lambda_0}\int_{-L/2}^{L/2}\varepsilon_x(r)\mathrm{d}x=\frac{2\pi}{\lambda_0}\int_{-L/2}^{L/2}\frac{\varepsilon(r)}{2}(1+\cos(2\alpha))\mathrm{d}x \tag{3}$$

其中 L 是光纤传感器的计量长度，λ_0 是所用的激光波长，α 是光纤传感器的轴向与声源中心和传感器位置连线的夹角，图 3 为 EFPI 传感器检测兰姆波时灵敏度分析理论模型图。

把式(3)代入式(1)并且归一化，可得到式(4)：

$$\overline{\delta\phi}=\int_{-L/2}^{L/2}\frac{1}{\sqrt{r}}\sin(2\pi(ft-\frac{r}{\lambda}))(1+\cos(2\alpha))\mathrm{d}x \tag{4}$$

其中：

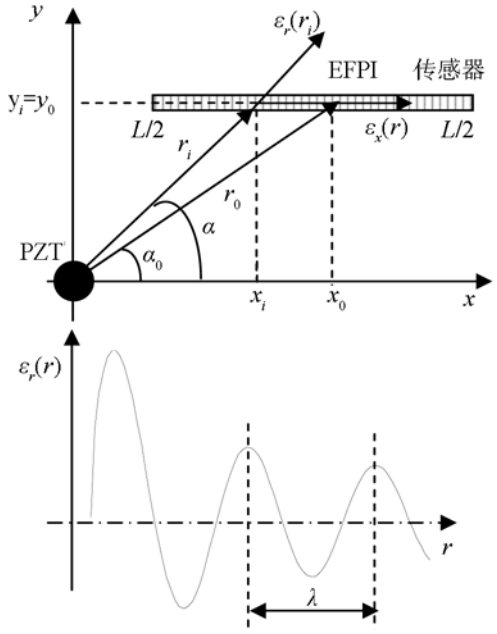

图 3　EFPI 传感器兰姆波检测时灵敏度分析理论模型

Fig.3　Theoretical model for measuring the sensitivity of EFPI fiber optic sensor while detect Lamb waves

$$r=\sqrt{(r_0\cos(\alpha_0)+x)^2+(r_0\sin(\alpha_0))^2} \tag{5}$$

$$\alpha=arctg\left(\frac{r_0\sin(\alpha_0)}{r_0\cos(\alpha_0)+x}\right) \tag{6}$$

方程(4)很难求出解析解，可利用 Matlab 数值求解。图 4 给出了 EFPI 传感器的灵敏度随 L/λ 和 α_0 的变化。由图 4(a)知，当 L/λ 从 0.1 变化到 0.6 时，光纤传感器的灵敏度在 0° 时最大，随着角度的增大，灵敏度在减小。由图 4(b)知，当为 L/λ 为 0.5 左右时光纤传感器的灵敏度达到最大。综合图 4(a)和 4(b)，可以清楚地看出，当 L/λ 为 0.5 左右，且光纤传感器相对声源的放置角度 α_0 为 0° 时，光纤传感器的灵敏度最大。

4　结 论

EFPI 光纤传感器的应变灵敏度较高，因而被广泛地应用到各种信号的检测中。本文建立了 EFPI 光纤传感器兰姆波检测的理论模型，数值仿真表明：光纤 EFPI 传感器兰姆波检测时，其灵敏度主要受光纤传感器相对声源的放置角度 α_0、光纤传感器的计量长度与超声波长的比值 L/λ的影响。文中给出了传感器灵敏度最大时这两个参数的合理取值。所得出的结论对于 EFPI 传感器精确地探测兰姆波提供了理论依据。

下一步将是选择合适的兰姆波模式及其激发频率，设计合理的 EFPI 计量长度，合理布置 EFPI 传感器相对声源的位置，利用文中所建立的兰姆波检测系统进一步实验研究。

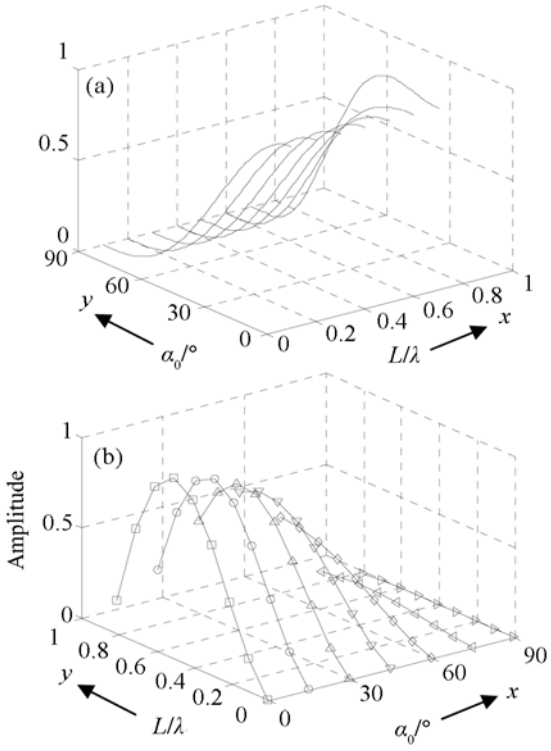

图 4　EFPI 传感器兰姆波检测时灵敏度随 L/λ以及 α_0 的变化: x-L/λ, y-α_0; (b) x-α_0, y-L/λ

Fig.4　Sensitivity variation of EFPI sensor with L/λ and α_0 while detecting Lamb waves: (a) x-L/λ, y-α_0; (b) x-α_0,y-L/λ

参　考　文　献

[1] 张海燕, 周全, 吕东辉, 刘镇清. 各向同性薄板中横穿孔缺陷的超声兰姆波层析成象[J]. 声学学报, 2007, **32**(1): 83-90.
ZHANG Haiyan, ZHOU Quan, LÜ Donghui, LIU Zhenqing. Ultrasonic Lamb wave tomography of through hole flaws in isotropic thim plates[J]. Acta Acustica, 2007, **33**(1): 83-90.

[2] 樊仕轩, 张海燕, 吕东辉. 基于 HHT 的多模式 Lamb 波走时提取[J]. 声学技术, 2007, **26**(4): 628-631.
FAN Shixuan, ZHANG Haiyan, LÜ Donghui. Travel time extraction of multi-mode Lamb wave with HHT[J]. Tehcnical Acoustics, 2007, **33**(1): 83-90.

[3] Takeda N, Okabe Y, Kuwahara J, Kojima S, Ogisu T. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing[J]. Comp. Sci. Technol., 2005, **65**: 2575-2587.

[4] Betz D C, Thursby G, B, Culshaw B, Staszewski W J. Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings[J]. Smart Mater. Struct., 2003, **12**: 122-128.

[5] Kim D H, Koo B Y, Kim C G, Hong C S. Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system[J]. Smart Mater. Struct., 2004, **13**: 593-598.

[6] Leng J S, Aundi A. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors[J]. Sensors and Actuators, 2003, **103**: 330-340

[7] Kim D H, Kim Y H, Kim C G. Directivity evaluation of fiber optic sensor for detecting Lamb waves[J]. Smart Mater. Struct., 2005, **14**: 1037-1046.
Kim D H, Kang H K, Park J W. Hong C S, Kim C G. Measuring dynamic strain of structures using a gold-deposited EFPI[J]. Smart mater. Struct., 2003, **12**: 1-5.