

偏振式光纤传感器稳定性的探讨*

梁大开 陶宝祺

(南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京 210016)

提要 从光纤的模式耦合特性出发对偏振式光纤传感器的稳定性进行了探讨。

关键词 稳定性, 偏振, 光纤传感器

1 引言

光纤传感器具有轻、软、细、可挠曲、电绝缘、无电磁感应等优点, 很适合于制作可用于智能复合材料的埋入式传感器阵列。而偏振式光纤传感器更具有结构简单、灵敏度较高, 并能够提供传感器敏感区域传感量的积分信息等特点, 受到了广泛的注意, 已有许多文章从各个方面对它的特性进行了研究, 本文仅从光纤的模式耦合特性出发对偏振式光纤传感器的稳定性进行了讨论。

2 光纤的模式耦合系数

在单模光纤中可以传输两个相互正交的线偏振模 HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y 模。当光纤受到扰动时, 这两个模之间将产生耦合, 从而改变在光纤中传输的光的偏振特性^[1]。由光波导理论, 我们可得到在光纤中传输的 HE_{11}^x 模及 HE_{11}^y 模的电场矢量为^[2]:

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 [\cos\theta \cos(\delta\beta \cdot z/2) - i \cos(\theta - \eta) \sin(\delta\beta \cdot z/2)] \exp[-i(N_{11} + N_{22})z/2] \\ E_y &= E_0 [\sin\theta \cos(\delta\beta \cdot z/2) + i \sin(\theta - \eta) \sin(\delta\beta \cdot z/2)] \exp[-i(N_{11} + N_{22})z/2] \end{aligned} \quad (1)$$

这里

$$\delta\beta = [(N_{11} - N_{22})^2 + |2N_{12}|^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\eta = \arctg \frac{2N_{12}}{N_{11} - N_{22}} \quad (3)$$

z 为光纤受扰部分的长度, θ 为入射光偏振方向和光纤主轴间的夹角。 N_{ij} ($i, j = 1, 2$) 由下式决定:

$$\begin{aligned} N_{ii} &= \beta_i + \omega\epsilon_0 \int \bar{e}_i^* [\delta\bar{e}] \bar{e}_i ds \quad (i = 1, 2) \\ N_{ij} &= N_{ji}^* = \omega\epsilon_0 \int \bar{e}_i^* [\delta\bar{e}] \bar{e}_j ds \quad (i \neq j, i, j = 1, 2) \end{aligned} \quad (4)$$

* 国家自然科学基金、航空科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年11月2日; 收到修改稿日期: 1996年1月15日

式中 β_i 为在不受扰动系统中的传播常数, 积分面为整个光纤截面, ω 为光波的角频率, ϵ_0 为真空中的介电常数, $[\delta\epsilon]$ 为由扰动产生的光纤介电张量的变化。设 HE_{11} 和 HE_{11} 模所携带的功率分别为 P_x, P_y , 并令两模态之间的能量耦合系数为 h^2 , 则有:

$$h^2 = \frac{P_y}{P_x + P_y} = \frac{E_x \cdot E_x^*}{E_x \cdot E_x^* + E_y \cdot E_y^*} = \sin^2\theta \cos^2 \frac{\delta\beta}{2} z + \sin^2(\theta - \eta) \sin^2 \frac{\delta\beta}{2} z \quad (5)$$

将式(2), (3)代入上式, 可得:

$$h^2 = \sin^2\theta \cos^2 \frac{\delta\beta}{2} z + \frac{1}{(\delta\beta)^2} \sin^2 \frac{\delta\beta}{2} z [\sin\theta(N_{11} - N_{22}) - 2N_{12}\cos\theta]^2 \quad (6)$$

当 $\theta = 0$ 时, 可得:

$$h^2 = \frac{1}{(\delta\beta)^2} \sin^2 \frac{\delta\beta}{2} z (2N_{12})^2 \quad (7)$$

由上式可知, 即使入射光沿 x 方向, 只激励 HE_x 模时, h 一般也不为零。即 $P_y \neq 0$, 这就是模态耦合所产生的作用。

由(6), (7) 两式可以看出, 耦合功率系数在光纤受扰区域沿光纤传输方向 z 周期变化。

3 由弯曲扰动引起的模式耦合

由上节的(6), (7) 及(2)式可知, 只要求得 $N_{11} - N_{22}$ 及 $2N_{12}$ 就可以得到模态的能量耦合系数 h , 对于理想单模光纤, 在弱导条件下, 可以得到:

$$\begin{cases} N_{11} - N_{22} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} B + \omega C (\sigma_2 - \sigma_1) \cos 2\phi \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \\ N_{12} = \frac{1}{2} C \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\phi \end{cases} \quad (8)$$

这里, $C = \frac{2n^3}{E} [P_{12} - P_{11}(1 + 2\mu)]$, P_{12}, P_{11} 为光纤的弹光系数, n 为纤芯的折射率, B 为光纤的双折射率, μ_0, ϵ_0 为真空中的磁导率和介电系数, σ_1 和 σ_2 为扰动在光纤中引起的主应力, ϕ 为光纤应力主轴和入射光偏振方向的夹角, E, μ 为纤芯的弹性模量和泊松比。

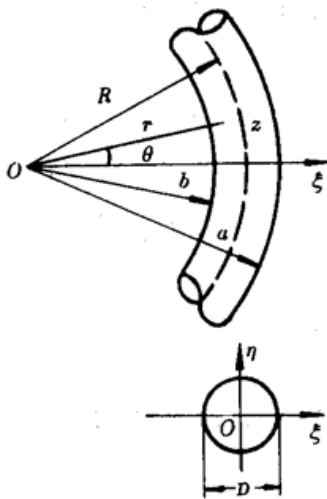


Fig. 1 Bending deformation of an optic fiber

当光纤受到如图 1 所示的弯曲扰动时, 由弹性力学并略去 $(b - a)/R$ 和 ξ/R 的三次方以上项。可以得到此时的应力分布^[3]

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{E}{2R^2} \left[\xi^2 - \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right], & \sigma_y = 0, \tau_{yz} = 0 \\ \sigma_x = \frac{E\xi}{R} - \frac{E}{R^2} \left[\xi^2 - \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{D}{2} \right)^2 \right] \end{cases}$$

(9)

由上式可知此时有 $\sigma_1 = \sigma_z, \sigma_2 = 0$ 为弯曲在光纤中引起的主应力。由于光纤芯很细, 我们用纤芯附近区域的应力近似代替实际应力分布, 即认为 $\sigma_1 = (E/2R^2) \cdot (D/2)^2$ 。经(8)式代入(7)式并令图 2 光纤弯曲半径 R 与 h 关系 $B = 0$, 可得到单模光纤在受弯曲扰动情况下的功率耦合系数为:

$$h^2 = \left[\omega \frac{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} F}{R^2 \delta \beta} \right]^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \left(\frac{\delta \beta}{2} R \theta' \right) \quad (10)$$

其中系数 $F = n^3(D/2)^2[P_{12} - P_{11}(1 + 2\mu)]$ 。由上式可知,当 $\phi = 45^\circ$ 时弯曲扰动产生最大的模式耦合。

对于光纤的典型参数: $n = 1.46$, $D = 125 \mu\text{m}$, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.27$, $\mu = 0.164$ 及半导体激光管波长 670 nm 代入上式,并取扰动范围 $\theta' = \pi$,得到单模光纤在弯曲扰动下 h 随弯曲半径 R 的变化,如图 2 所示。

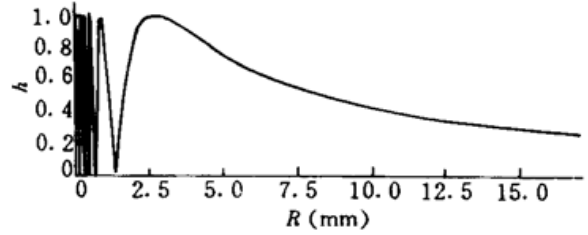


Fig. 2 Relationship between R and h when the single mode optic fiber is bended

对于高双折射光纤,由于它本身具有两个主轴,而在激光器和光纤的耦合过程中,又不能保证输入偏振光和某——主轴重合,所以不能认为 $\theta = 0$,由式(6),(8),(9)可得:

$$h^2 = \sin^2 \theta \cos^2 \frac{\delta \beta}{2} z + \frac{k_0^2}{(\delta \beta)^2} \cdot \sin^2 \frac{\delta \beta}{2} z \left[\sin \theta \left(B - \frac{F}{R^2} \cos 2\phi \right) - \frac{F}{R^2} \cos \theta \sin 2\phi \right]^2 \quad (11)$$

其中 $k_0 = \omega(\mu_0 \varepsilon_0)^{1/2}$ 。将光纤的基本参数代入,并令 $\phi = 45^\circ$,扰动范围为 π ,我们得到 θ 分别为 0 和 45° 时 h 和 R 之间的关系如图 3 所示。

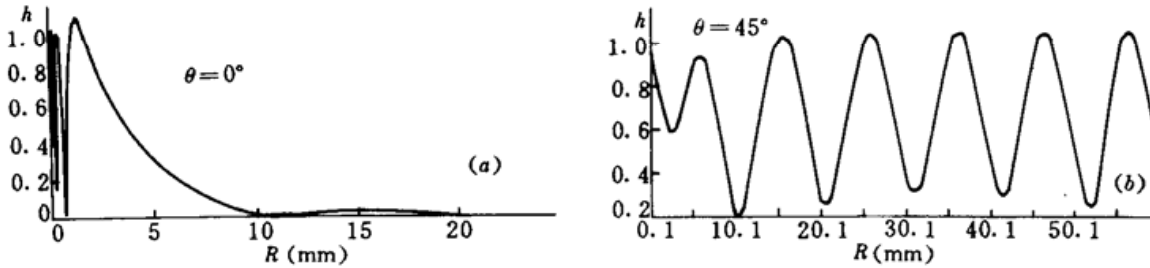


Fig. 3 Relationship between R and h when the Hi-Bi optic fiber is bended

4 偏振式光纤传感器稳定性分析及试验结果

对于光纤传感器来说,敏感部分都固定于被测结构之中,而光纤的传光部分一般都安置在外面,它将容易受到各种干扰。其中最主要的是弯曲扰动的作用。但是,弯曲的半径一般较大并且变化不大,这样如果传感器采用的是单模光纤,则由图 2 可知弯曲扰动对 h 的影响不大。但如传感器采用的是高双折射光纤则只有在 $\theta = 0$ 时才是这样,而当 $\theta \neq 0$ 时,由图 3 可知,弯曲扰动将使 h 产生较大的变化从而使传感器的输出信号发生变化,使传感器的稳定性下降。我们采用了法国生产的单模光纤及北京玻璃研究所生产的高双折射光纤进行了偏振式光纤传感器的试验,试验装置如图 4 所示。半导体激光管 LD 发出的光分为两路,一路经起偏镜 P_1 及二分之一波片 P 进入光纤,从光纤出射的光经检偏镜 P_2 被 PIN₂ 管接收,然后由数据采集系统进行处理。另一路由 PIN₁ 管接收后经功率监控电路控制电源以保证光源的稳定性。这样,调整 P 即可改变 θ 角。由于只改变光纤弯曲半径而不影响其它因素的试验条件难以实现,所以我们首先进行了系统静置的稳定性试验。通电 20 min 后开始记录数据,每隔 2 min 记录一次。每次试验进行 6 h。PIN₂ 输出电压的相对最大波动 $S_r = (V_{\max} - V_{\min})/V_{\text{mean}}$,当敏感光纤为单模光纤时为 5%。如敏感光纤为高双折射光纤,当 $\theta = 0$ 时为 8%,当 $\theta = 45^\circ$ 时为 18%。这说明了 θ 角确实对传感器的稳定性有很大的影响。其次,我们把光纤埋入 $780 \times 780 \times 5 \text{ mm}^3$ 的复合材料板

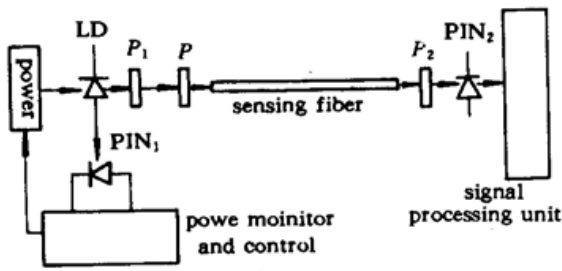


Fig. 4 Experimental schematic configuration of a sensor system

稳定性较差。

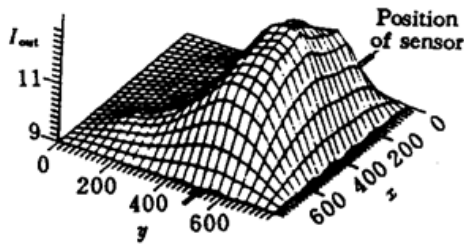


Fig. 5 Output of a single mode optic fiber sensor when a load acts on different points of the plate

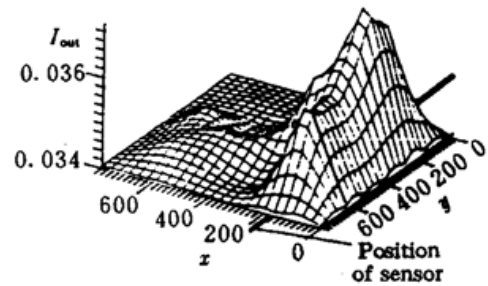


Fig. 6 Output of a Hi-Bi optic fiber sensor when a load acts on different points of the plate

5 结 论

稳定性是传感器的主要指标之一,所以当我们采用高双折射光纤制作偏振式传感器时必须注意光源和光纤耦合的方向,尽量使 $\theta = 0$ 并注意防止传光光纤受到弯曲扰动的作用以提高传感器的稳定性。另外,从图4和图5可以看出,从偏振式传感器的输出可以得到板上所加载荷的作用点到传感器的距离。所以用它组成的传感器网络可以在智能复合材料中应用。

参 考 文 献

- 1 J. I. Saka, S. Machida, T. Kimura. Degree of Polarization in Anisotropic Single-Mode Optical Fibers; Theory. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(4): 488~495
- 2 K. Okamoto, Y. Sasaki, N. Shibata. Mode Coupling Effects in Stress-Applied Single Polarization Fibers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(11): 1890~1899
- 3 徐芝纶 著. 弹性力学. 北京: 北京人民教育出版社, 1979. 85

Study on Stability of Embedded Polarized Optic Fiber Sensors

Liang Dakai Tao Baoqi

(Smart Material and Structure Research Institute, NUAA, Nanjing 210016)

Abstract The polarized optic fiber sensor, which possesses the characteristics of simple structure and high sensitivity and can be embedded into composite materials conveniently, is very fit to be used in arrays of smart sensors. In this paper, the stability of polarized optic fiber sensors is studied through the mode coupling characteristics of optic fibers.

Key word stability, polarization, optic fiber sensor

中进行了试验,光纤在靠近板上表面处的 $500 \times 500 \text{ mm}^2$ 处埋置,得到如图5和图6所示的结果。从图中可以看出,在板的不同点加载可以明显影响传感器的输出,但单模光纤传感器的输出为一平滑曲面,曲面形状和通过力学分析得到的结果相似,且重复性较好。而高双折射光纤传感器的输出则有明显的起伏,联系稳定性试验结果可知,当敏感光纤采用高双折射光纤时传感器的