

# 用于大型结构应变测量的光纤传感器

查开德

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**提要** 描述了一种梳形光纤应变传感器,从理论上导得传感器传输光功率变化和应变之间的线性关系;得到了这种传感器应变灵敏度和梳形结构参数的函数关系。实验得到的结果和理论一致。实验显示出这种传感器没有滞回特性,具有好的单值性、重复性和温度稳定性。

**关键词** 光纤传感器,应变

## 1 引言

近年来,光纤传感器用于大型结构(大桥、大坝、大楼等)的安全性、可靠性的质量评估,引起了民用结构工程师和科学家的广泛兴趣<sup>[1]</sup>。在大型结构建设过程中,用光纤传感器对结构的关键部位和构件的物理性能(如应变)进行在线测量,评估建筑质量;在大型构件生产、养护过程中,光纤传感器对构件内部应变和温度的变化进行实时测量,将为工程师提供设计高质量构件所需的宝贵数据;光纤传感器还可以长期固定在结构上,监视结构运行状况,提供运行情况的数据,并及时发出结构异常征兆警报,确保运行安全。是传统的应变传感器所不能比拟的。

光纤应变传感器主要有强度调制型和相位调制型两种,相位型光纤传感器灵敏度很高,但结构复杂,易受干扰,要用特种光纤,检测和处理信号的设备也复杂。强度型光纤应变传感器目前大都是微变型,即利用光纤受力引起微弯局部泄漏光功率增加,达到检测应变的目的。在结构上需要一种应变引导装置。这种装置目前有两种,一种是周期性波纹结构或链式装置,结构较复杂,不易安装。另一种是用塑料预变型光纤,即将塑料光纤在软化温度下周期性弯曲变型,结构简单,但此光纤软化温度低,应用受到限制。一种新的损耗型梳状光纤应变传感器,不需要应变引导装置,结构简单,灵敏度高,安装方便,适合于大型构件的应变测量。本文将介绍这种光纤传感器的结构、原理和实验研究的结果。

## 2 光纤应变传感器的结构

损耗型梳状光纤应变传感是直接制作在普通多模光纤上的。应用光刻技术,将光纤的局部刻蚀成梳状结构,如图1,梳齿宽为 $L_1$ ,齿隙宽为 $L_2$ ,且 $L_1$ 一般不等于 $L_2$ 。一个传感器共有 $N$ 个周期, $N(L_1 + L_2) = L$ , $L$ 为传感器的长度。梳齿直径为 $b_1$ ,齿隙直径为 $b_2$ , $b_1, b_2$ 大于纤芯直径。

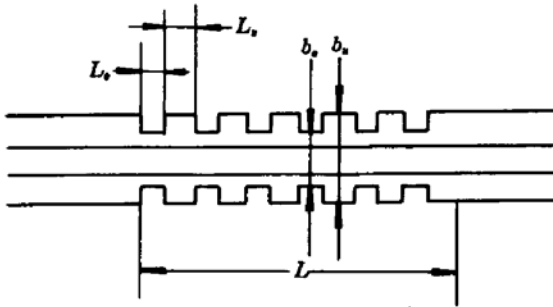


Fig. 1 Schematic diagram of a fiber-optic strain sensor

### 3 理论分析

在多模光纤中,应用介质波导理论得到光纤的传输特性,例如损耗可以用光纤的模体积(mode volume)表征。不同结构参数的光纤具有不同的模体积;参数变化,模体积变化。两根不同模体积的光纤连接时,连接损耗和模体积有关<sup>[2]</sup>。将光纤视作弹性圆柱体,当光纤受拉力时,结构参数发生变化:长度变化——应变效应;半径变化——泊松效应;折射率变化——光弹效应。这些

变化导致光纤模体积变化,损耗变化,因而传输的光功率变化。这样可以用光纤传输功率的变化来度量光纤的应变,可以导出应变和光功率变化之间的关系。

根据介质波导理论,多模光纤的模体积为

$$V = \frac{4\pi^2 a}{(\alpha + 2)\lambda^2} n_0^2 a^2 \quad (1)$$

式中  $\Delta = (n_0 - n_c)/n_0$ ,  $a$  为纤芯的半径,  $n_0$  为纤中心折射率,  $\alpha$  是折射率分布参数。当两根有不同  $a$ ,  $n_0$ ,  $\alpha$  的光纤连接时,连接损耗为

$$L_c = -10 \lg(V_{12}/V_2) \quad (2)$$

$V_2$  为发射光纤的模体积,  $V_{12}$  是光纤连接部分共有的模体积。设模体积为  $V$  的光纤传输光功率为  $P$ , 经过一段模体积为  $V + \delta V$  的光纤, 光功率变为

$$P + \delta P = P \cdot \frac{V + \delta V}{V} = P + P \frac{\delta V}{V} \quad (3)$$

$$\frac{\delta P}{P} = \frac{\delta V}{V}$$

当一根光纤受外力作用, 光纤的芯径和折射率变化时, 模体积变化为

$$\frac{\delta V}{V} = 2 \left( \frac{\delta n_0}{n_0} + \frac{\delta a}{a} \right) \quad (4)$$

在弹性范围内, 芯径变化与长度变化的关系为

$$\delta a = -\frac{1}{2} \frac{a \delta L}{L} \quad (5)$$

$\delta L/L$  即为纵向应变  $\varepsilon_{zz}$ 。由光弹理论可以得到折射率变化和应变的关系<sup>[3]</sup>

$$\frac{\delta n_0}{n_0} = -\frac{n_0^2}{2} [P_{11} - 2\sigma P_{12}] \varepsilon_{zz} \quad (6)$$

(5)和(6)代入(4), 并结合(3)得到

$$\frac{\delta P}{P} = -[n_0^2(P_{11} - 2\sigma P_{12}) + 1] \varepsilon_{zz} = -K \varepsilon_{zz} \quad (7)$$

$K = n_0^2(P_{11} - 2\sigma P_{12}) + 1$ 。两根连接的光纤受力, 应变分别为  $\varepsilon_{zz1}$  和  $\varepsilon_{zz2}$ , 则(7)变为

$$\frac{\delta P}{P} = -K \Delta \varepsilon_{zz}, \quad \Delta \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{zz1} - \varepsilon_{zz2} \quad (8)$$

从材料力学可知, 光纤受拉力将产生一个纵向应变  $\varepsilon'$  和一个横向应变  $\varepsilon''$ , 因此总的应变为  $\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''$ , 而且有  $\varepsilon''/\varepsilon' = \mu$ ,  $\mu$  称为横向变形系数。对石英,  $\mu = 0.18$ 。因此有

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' = (1 + \mu)\varepsilon' \tag{9}$$

当梳状光纤受拉力时,齿和隙部分的应变分别为

$$\begin{aligned} \varepsilon'_a &= F/(\pi b_a^2 y) \\ \varepsilon'_g &= F/(\pi b_g^2 y) \end{aligned} \tag{10}$$

式中  $y$  为杨氏模量。有  $N$  个齿和隙的传感器,总的长度变化为

$$\delta L = \delta L_1 + \delta L_2 = \frac{F}{\pi y} \left[ \frac{L - NL_g}{b_g^2} + \frac{NL_g}{b_a^2} \right] \tag{11}$$

消去  $F/\pi y$ ,可以得到

$$\begin{aligned} \varepsilon'_a &= \delta L b_a / [(L - NL_g)b_a^2 + NL_g b_a^2] \\ \varepsilon'_g &= \delta L b_g / [(L - NL_g)b_g^2 + NL_g b_g^2] \end{aligned} \tag{12}$$

齿和隙部分应变之差,计及(9)得到为

$$\Delta \varepsilon = (1 + \mu) \frac{L(b_a^2 - b_g^2)}{Lb_a^2 + NL_g(b_a^2 - b_g^2)} \cdot \frac{\delta L}{L} \tag{13}$$

定义  $Q = \frac{L(b_a^2 - b_g^2)}{Lb_a^2 + NL_g(b_a^2 - b_g^2)}$ ,  $Q$  的含义是梳状结构将应变放大。

考虑  $N$  个齿和隙的传感器,(13)代入(8)得到

$$\frac{\delta P}{P} = - (1 + \mu)NQK \frac{\delta L}{L} \tag{14}$$

(14)式表示了梳状光纤传感器传输光功率变化和应变之间的线性关系。定义  $G$  是传感器的应变系数

$$G = \left| \frac{\delta P}{P} / \frac{\delta L}{L} \right| = (1 + \mu)NQK \tag{15}$$

$G$  实际上是梳状光纤应变传感器的灵敏度,表征单位应变引起光功率变化的大小。 $G$  越大,传感器对应变越灵敏。 $G$  是结构参数的函数,结构参数一定, $G$  即唯一确定。对于石英基光纤,  $P_{11} = 0.121$ ,  $P_{12} = 0.270$ ,  $\sigma = 0.17$ ,  $n_0 = 1.458$ ,得  $K \approx 1.06$ ,  $K \cdot (1 + \mu) \approx 1.251$ 。

应变灵敏度  $G$  和传感器结构参数之间的关系讨论如下。设  $L_g/L_a = C$ ;  $L_g \neq 0$ ,  $L_a = L_g + L_c = (C + 1)L_c$ ,  $NL_g = L$ ,  $B = b_a/b_g$ ,  $1 < B < 2.5$ ;  $C > 0$ ,则  $G$  可写为

$$G = (1 + \mu) \cdot K \cdot N \frac{(C + 1)(B^2 - 1)}{(C + 1) + (B^2 - 1)} \tag{16}$$

$G$  和  $B, C$  之间的关系如图 2,  $G$  随  $C$  的增加而增加,随  $B$  的增加而增加。 $G$  随  $N$  的变化而变化。因此可以改变  $B, C, N$  而得到不同灵敏度。(16)式在实际制作传感器时有指导意义。

### 4 实验结果和讨论

应用光刻工艺制成的梳状光纤应变传感器的特性用图 3 的测试系统测量。光源是稳定化光源。用  $y$  型分路器将光分成两路,一路进入传感器,输出光或进光功率计,或进入检测器。另一路光作为参考光送入另一个检测器。双光路是为了消除其他干扰(光路和光源的)带来的测量

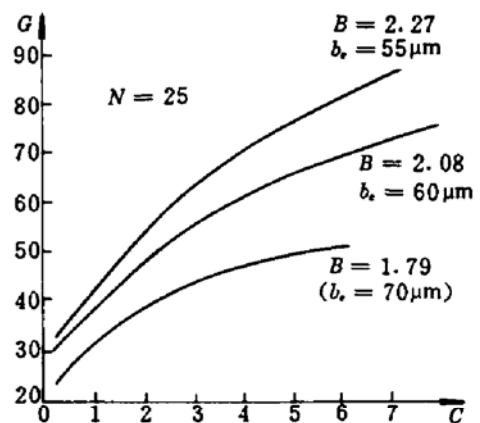


Fig. 2 Relation between strain sensitivity and structural parameter of the fiber-optic strain sensor

误差。传感器粘在  $140 \times 10 \times 3$  mm 的弹簧片下面。弹簧片用三角形支承支持。作为对比,传感器旁粘有电阻应变片,用应变仪监视。对弹簧片加压力产生应变,光纤传感器因应变而损耗增加,光功率减小。图 4 是测量得到的应变和光功率变化关系。增加应变,光功率线性地减少。这个测量结果和理论分析的结果是一致的。图中直线的斜率即为  $G$  值,对应的  $G = 41.6$ ,而理论值为 37.39。实验中测得的最大  $G$  值在 50 左右,最大应变达 4000。这主要受实际工艺限制。改进光刻工艺可望进一步提高  $G$  值和最大应变值。

在实验中做了匹配液实验,即在传感器周围涂上甘油。测得传感器涂甘油前的  $G = 31.37$ ,涂甘油后的  $G = 32.59$ ,两者相差不多。这个结果说明这种传感器的机理不是微弯形成的泄漏模而使光功率变化,而是由于模体积的变化。

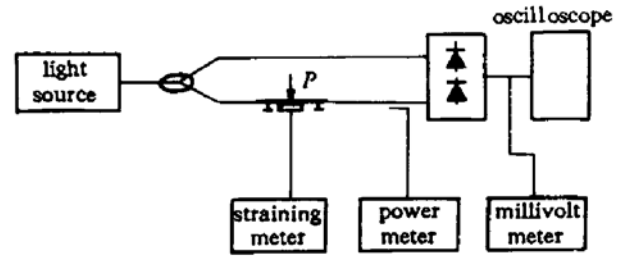


Fig. 3 Experimental system of the fiber-optic strain sensor

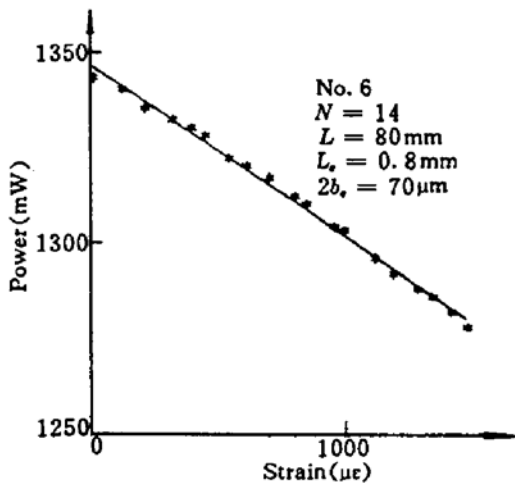


Fig. 4 Measured transmissive optical power of the fiber sensor vs strain

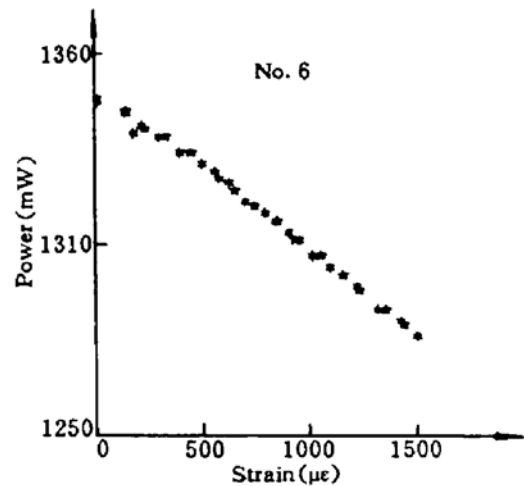


Fig. 5 Single-value behavior of the fiber-optic strain sensor

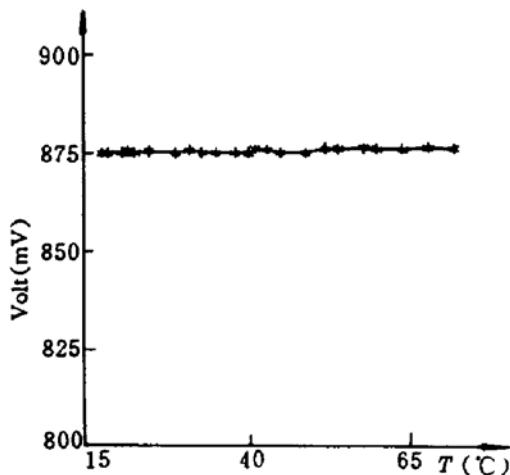


Fig. 6 Temperature behavior of the fiber sensor

传感器特性的单值性决定着这种器件能否实用的命运。为此我们对应变传感器进行加应变和减应变的实验,结果如图 5。图中 \* 为加应变,★为减应变。实验曲线清楚地显示出这种应变传感具有很好的单值性,没有任何滞回现象。

图 6 是梳状光纤应变传感器随温度变化的实验结果。实验中温度从 15 °C 增加到 70 °C 以上,用电压表监视传感器输出的变化。实验曲线显示,随着温度变化输出信号变化极小,说明这种传感器的温度稳定性是好的。

在实验中还进行了传感器特性的迭加性试验。若两个或多个传感器串联,检测的信号变化量是否为单独每一个传感器信号变化量之和,这便是迭加性问题。如图 7 三个传感器  $S_1, S_2, S_3$  串联。曲线 1 是  $\epsilon_2 = 0, \epsilon_3 = 0$  时,  $S_1$  的电压和应变的关系。曲线 2, 3, 4 分别是  $\epsilon_2 = 0, \epsilon_3 = \text{常数}, \epsilon_3 = 0, \epsilon_2 = \text{常数}$  和  $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$  都为常数时,

$S_1$  信号电压和应变的关系。图中曲线 1, 2, 3, 4 的斜率是一样的。曲线 2, 3, 4 是曲线 1 的平移, 是在  $S_1$  的信号电压上分别加上固定电压的结果。这说明了  $S_1, S_2, S_3$  之间没有串扰,  $S_1, S_2, S_3$  的特性是独立的, 可以迭加。这个结果说明可以用几个传感器组成一个复合传感器, 以满足测量的特殊要求。在这个实验中, 对  $S_1$  进行多次重复实验,  $S_1$  的  $G$  值没有变化, 说明这种传感器有很好的重复性, 可以重复应用。

在大型结构实际测量时, 传感器和参考光纤已装在一个很细的封装结构内, 并用胶粘贴在构件的待测点, 和构件形成一体; 用四芯光缆连接到光源和检测器。为消除外部、光源和光纤本身的干扰(例如振动引起的干扰), 采取了 (1) 双光路检测法: 在接收端用两只检测器同时接收信号光和参考光, 信号处理应用除法(相减)消除信号光路上和参考光路上同时出现的共模干扰; (2) 光桥检测技术: 和电桥类似, 对光路中光纤和光源的任何对称变化都将消除, 检测到的仅是传感器感受的信号, 具有很高的灵敏度, 模拟实验证明此技术消除干扰是有效的。大型结构光纤应变测量的实验结果将另文发表。

### 参 考 文 献

- 1 A. Mender, T. F. Morse. Overview of optical fiber sensors embeded in concrete. *SPIE*, 1978. Fiber optic smart structure and skin V. 205~216
- 2 F. L. Thiel, R. M. Howk. Optical waveguide cable connection. *Appl. Opt.*, 1976, 15: 2785~2791
- 3 Masoud Vaziri, Chin-Lin Chen. Etched Fibers as stain Gauges. *J. of Lightwave Technology*, 1992, 10(6): 836~841

## Optical Fiber Sensor for Use in Strain Measurement of Large Structures

Zha Kaide

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** In this paper, a new class of comb-shaped optical fiber sensor is described. The linear relation between transmission power and strain of the sensor is introduced. Experimental result of the sensor is in agreement with the theory. In the meantime, singularity, stability, and reproducibility of the sensor are studied.

**Key words** optical fiber sensor, strain, comb-shaped

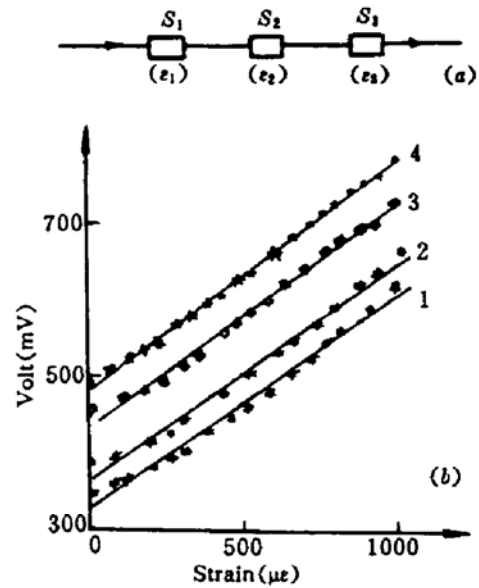


Fig. 7 Experimental result of the fiber-strain sensors in series  
(a) series sensors; (b) measured result