

文章编号: 1001-2486 (2002) 01-0105-04

# 几种带补偿功能的三光纤传感器的分析\*

杨华勇, 吕海宝, 徐涛, 王军

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 在单光纤对光耦合模型的基础上, 研究了三种带补偿功能的三光纤反射式位移传感器, 建立了通用的光耦合的数学模型。仿真研究了它们的位移特性, 并比较了它们的优缺点。研究结果表明, 采用三光纤的光纤位移传感器不但线性范围、位移灵敏度和线性度等特性得到较好改善, 而且可以有效地消除光源功率波动和反射面的反射率变化等因素对位移测量的影响。

关键词: 光纤传感器; 数学模型; 位移特性; 强度补偿; 反射率补偿

中图分类号: TN25; TH703.2

文献标识码: A

## Analysis of the Tri-Fiber Optic Sensors with Intensity Compensation

YANG Hua-yong, LU Hai-bao, XU Tao, WANG Jun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In the field of reflective fiber-optic displacement sensor, in order to improve the displacement measuring accuracy, two receiving fibers are often used for intensity and reflectivity compensation. Based on the mathematic model of light coupling between the fiber pair, three types of tri-fiber optic sensors are studied. The general mathematic model of the tri-fiber sensors is proposed. Simulation about them is finished. Research shows that these kinds of tri-fiber sensors can not only improve the linear range, linearity and displacement measuring sensitivity, but also eliminate the influence caused by power fluctuation of the light source and variety of surface reflectivity.

**Key words:** fiber optic sensor; mathematic model; displacement; property; intensity compensation; reflectivity compensation

光纤传感器的灵敏度高、动态范围宽、环境适应性强等独特优点使得它在工程测量中的应用越来越广泛。而作为光纤传感器家族中重要的一类——反射式强度型光纤传感器 (RIM-FOS: Reflective Intensity Modulated Fiber Optic Sensor) 以其原理简单、设计灵活、价格低廉等特点引人注目, 并且已在许多物理量的测量中获得成功应用<sup>[1~4]</sup>。

最简单的 RIM-FOS 由光源、发送光纤、接收光纤和反射面组成<sup>[1~7]</sup>。光源发出的光经发送光纤至被测反射面, 反射回来的光由接收光纤接收, 最后将接收到的光信号转换为电信号。当光源功率保持不变时, 接收光纤接收到的光强与光纤探头和反射面之间的距离有关。然而, 由于这种光纤传感器采用光强作为测量信息的载体, 因此它必然要受到光源功率波动影响。另外, 反射面反射率的不同, 及光纤传输损耗的改变, 都会对位移的精确测量造成一定误差<sup>[3,4,6]</sup>。为克服上述问题, Hull-Allen 曾提出并研究了间距不等的三光纤探头<sup>[3]</sup>; Jianli Zheng<sup>[4]</sup>也提出了一种三光纤结构, 并用纯几何法从理论上分析其强度补偿机理, 进行了相关实验; 文献[6]提出了一种等间距排列的三光纤, 并采用一种近似高斯的纤端光场分布假设分析了其补偿机理。

## 1 三光纤传感器的通用数学模型

三光纤探头的结构示意图如图 1(a)~(d) 所示。三光纤传感器的数学模型建立在单光纤对模型的

\* 收稿日期: 2001-08-29  
基金项目: 湖南省科委工业科技计划项目 (99GKY2009)  
作者简介: 杨华勇 (1974—), 男, 博士生。

基础之上, 分别将接收光纤 1、2 与发送光纤构成两对光纤对, 计算两对光纤对的光耦合量, 再相除即得到三光纤的光强调制系数。作者曾经基于光辐射学的原理, 建立了单光纤对光强调制特性的数学模型, 给出了详细的表达式<sup>[7]</sup>。本文不再做详细推导, 仅引用单光纤对的光强调制系数  $M_s$  的计算公式如下

$$M_s = \begin{cases} 0 & d < (p - r_1 - r_2) / (2 \cdot \text{tg} \theta_V) \\ \rho \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \frac{S_r \cos^4 \theta_V}{\pi (2d \cdot NA)^2} & \frac{p - r_1 - r_2}{2 \cdot \text{tg} \theta_V} < d \leq \frac{p - r_1 + r_2}{2 \cdot \text{tg} \theta_V} \\ \rho \cdot \eta_2 \cdot \frac{S_r \cos^4 \theta}{\pi (2d \cdot NA)^2} & d > \frac{p - r_1 + r_2}{2 \cdot \text{tg} \theta_V} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $d$  为反射面与光纤对端面间的距离;  $p$  为光纤对轴间距;  $r_1$  和  $r_2$  分别为发送光纤与接收光纤的半径;  $NA$  为光纤数值孔径,  $\theta_V$  为孔径角;  $\eta_1 = S'_r / S_r$ ,  $\eta_2 = S'_r / S_l$  为光耦合面积的比例系数;  $S_l = \pi r_1^2$  和  $S_r = \pi r_2^2$  分别为发送光纤和接收光纤端面的面积;  $S'_r$  为接收光纤端面的有效接收面积, 其计算方法参考文献[5];  $\rho$  表示反射面的反射率;  $\cos \theta = 1 / \sqrt{1 + (p/2d)^2}$ 。

为方便起见, 单光纤对的光强调制系数计算公式 (即 (1) 式) 可用下面的函数关系来表示

$$M_s = \rho \cdot F(r_1, r_2, NA, p, d) \quad (2)$$

对于图 1 (a) ~ (d) 所示的三光纤探头而言, 为了将特殊的结构参数全面地反映出来, 在 (2) 式的基础上可建立一个通用的公式。接收光纤 1 与发送光纤组成的光纤对以及接收光纤 2 与发送光纤组成的光纤对的光强调制系数的表达式分别为

$$M_s^1 = \rho \cdot F(r_1, r_2, NA, p_1, d, b_1) \quad (3)$$

$$M_s^2 = \rho \cdot F(r_1, r_3, NA, p_2, d, b_2) \quad (4)$$

式中  $p_1$  和  $p_2$  分别为两组光纤对的轴间距,  $r_1$ 、 $r_2$  和  $r_3$  分别为发送光纤和接收光纤 1、2 的半径,  $b_1$  和  $b_2$  分别为两接收光纤与发送光纤端面之间的错位量 (图 1 (b) 所示  $b_1$  为正,  $b_2$  为负)。因此, 三光纤探头调制函数的表达式为

$$M = \frac{M_s^2}{M_s^1} = \frac{F(r_1, r_3, NA, p_2, d, b_2)}{F(r_1, r_2, NA, p_1, d, b_1)} \quad (5)$$

图 1 (a) ~ (d) 均给出了两种不同的补偿方式。一种是采用比值法输出, 另一种是采用差动法输出。两种补偿方式理论上都可以有效地补偿光源功率波动、物体表面反射率的变化等因素对测量精度的影响。

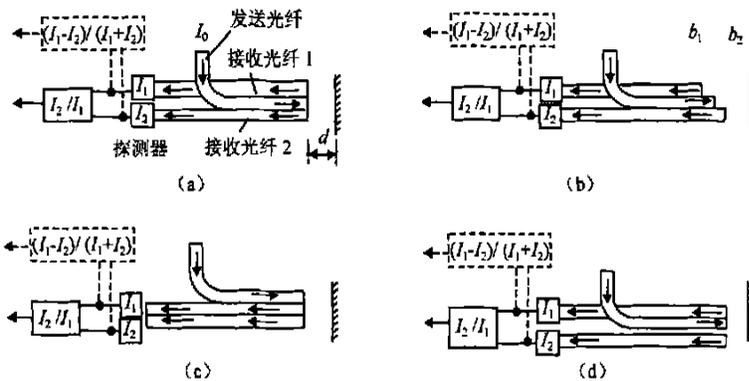


图 1 几种不同形式的三光纤示意图

Fig 1 Schematic figures of several types of tri-fiber sensors

## 2 几种三光纤探头的仿真

根据光纤排列方式以及光纤芯径的不同, 三光纤探头有以下几种形式: 芯径不等式 (图 1 (a))、等芯错位式 (图 1 (b)) 以及等芯不等间距式 (图 1 (c) 和 (d))。下面分别对这三种探头进行仿真。

### 2.1 芯径不等式三光纤探头

如图 1 (a) 所示。设发送光纤与接收光纤 1 相同，芯径为  $r_1$ ，包层厚度为  $t_1$ ；接收光纤 2 的芯径为  $r_2$ ，包层厚度为  $t_2$ ；包层之间无间隙。由通用公式 (5) 可得这种形式的三光纤的调制函数为

$$M_1 = \frac{M_s^2}{M_s^1} = \frac{F(r_1, r_2, NA, r_1 + r_2 + t_1 + t_2, d, 0)}{F(r_1, r_1, NA, 2r_1 + 2t_1, d, 0)} \quad (6)$$

根据 (6) 式可以对这种结构的三光纤探头的位移特性进行仿真。仿真时所选的参数为：发送光纤与接收光纤 1 的参数相同，半径  $r_1 = 100\mu\text{m}$ ，包层厚度  $t_1 = 20\mu\text{m}$ ；接收光纤 2 的半径  $r_2 = 80\mu\text{m}$ ，包层厚度  $t_2 = 80\mu\text{m}$ ；三根光纤的 NA 均为 0.5。图 2 是仿真得到的位移特性曲线。曲线 1 和 2 分别是发送光纤与接收光纤 1、2 构成的光纤对的位移特性曲线，图中已经对曲线进行了归一化处理 (图 3、4 同此)。从图中可以看出，采用芯径不等的三光纤探头，补偿后的输出曲线 3 不但与光源的功率波动、反射面反射率的变化无关，而且线性范围、线性度等特性均得到较大改善。

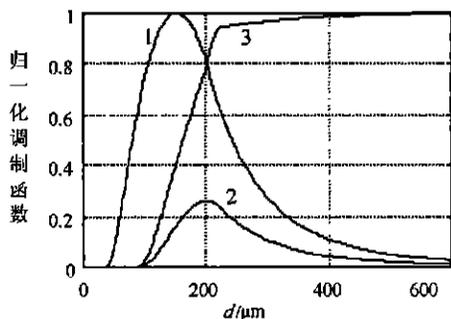


图 2 芯径不等式三光纤探头的仿真结果  
Fig. 2 Simulation result of the fiber probe with different radius

### 2.2 等芯错位式三光纤探头

如图 1 (b) 所示。设发送光纤与接收光纤 1、2 均相同，芯径为  $r_1$ ，包层厚度为  $t_1$ ，且包层之间无间隙；光纤端面间的错位量分别为  $b_1$  和  $b_2$ 。由通用公式 (5) 可得这种形式的三光纤的调制函数为

$$M_2 = \frac{M_s^2}{M_s^1} = \frac{M(r_1, r_1, NA, 2r_1 + 2t_1, d, b_2)}{M(r_1, r_1, NA, 2r_1 + 2t_1, d, b_1)} \quad (7)$$

根据 (7) 式可以对这种结构的三光纤探头的位移特性进行仿真。仿真时所选的参数为：发送光纤与接收光纤 1、2 的参数相同，半径  $r_1 = 100\mu\text{m}$ ，包层厚度  $t_1 = 50\mu\text{m}$ ；三根光纤的 NA 均为 0.5。接收光纤 1 的错位量 (在发送光纤端面的后面为正)  $b_1 = 150$ ；接收光纤 2 的错位量 (在发送光纤端面的前面为负)  $b_2 = -150$ 。图 3 是仿真得到的位移特性曲线。从图中可以看出，采用等芯错位式的三光纤探头，补偿后的输出曲线与光源的功率波动、反射面反射率的变化无关，但是线性范围、线性度等特性没有得到明显改善。

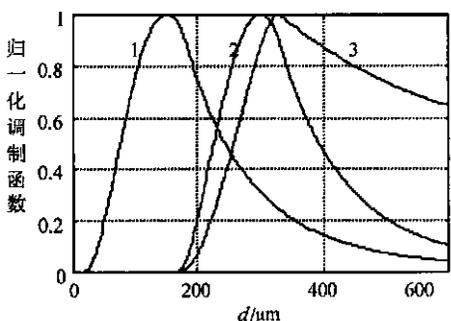


图 3 等芯错位式三光纤探头的仿真结果  
Fig. 3 Simulation result of the fiber probe with equal radius while different position of fiber end

### 2.3 等芯不等间距式三光纤探头

如图 1 (c) 所示。设发送光纤与接收光纤 1、2 均相同，芯径为  $r_1$ ，包层厚度为  $t_1$ ，包层之间无间隙。由通用公式 (5) 可得调制函数为

$$M_3 = \frac{M_s^2}{M_s^1} = \frac{M(r_1, r_1, NA, 4r_1 + 4t_1, d, 0)}{M(r_1, r_1, NA, 2r_1 + 2t_1, d, 0)} \quad (8)$$

另一种形式的等芯不等间距式如图 1 (d) 所示，设光纤参数与图 1 (c) 相同。发送光纤与接收光纤 1 的包层之间无间隙，而与接收光纤 2 的包层之间存在间隙  $p_0$ 。由通用公式 (5) 可得调制函数为

$$M'_3 = \frac{M_s^2}{M_s^1} = \frac{M(r_1, r_1, NA, 2r_1 + 2t_1 + p_0, d, 0)}{M(r_1, r_1, NA, 2r_1 + 2t_1, d, 0)} \quad (9)$$

这两种等芯不等间距式的三光纤结构在本质上没有区别，但是图 1 (c) 所示的结构由于光纤之间是紧密排列的，因而光纤间距容易确定，仅由光纤芯径和包层决定；而图 1 (d) 所示的结构由于光纤包层之间存在间隙，因此光纤的间距不容易准确给定，需要标定，容易引入测量系统误差。所

以, 实际应用中前者易于实现, 而后者一般不大采用。

根据 (8) 式可以对图 1 (c) 所示的三光纤探头的位移特性进行仿真。仿真时所选的参数为: 发送光纤与接收光纤 1、2 的参数相同, 半径  $r_1 = 100\mu\text{m}$ , 包层厚度  $t_1 = 50\mu\text{m}$ ; 三根光纤的 NA 均为 0.5。图 4 是仿真得到的位移特性曲线。从图中可以看出, 采用等芯不等间距式的三光纤探头, 补偿后的输出曲线不但同样可以消除光源的功率波动、反射面反射率的变化对测量结果的影响, 而且也可以改善线性度, 扩大线性范围。

### 3 结 论

本文研究的几种带补偿功能的三光纤位移传感器各有优缺点。表 1 比较了这几种结构的三光纤传感器的优缺点, 表中的结论是在每种结构采用五组参数仿真的情况下得到的, 由于篇幅的关系本文并没有给出  $4 \times 5$  组仿真曲线。表中所述的“扩大”和“提高”均是相对于两光纤传感器而言的。

表 1 几种三光纤位移传感器的比较

Tab 1 Comparison of the different types of tri-fiber sensors

	芯径不等式 (a)	等芯错位式 (b)	等芯不等间距式 (c)	等芯不等间距式 (d)
光强补偿	这几种结构形式的三光纤位移传感器均可以消除光源功率波动对测量精度的影响			
反射率补偿	均可以消除反射面反射率变化对测量精度的影响			
线性范围	扩大	变化不太明显	扩大	扩大
线性度	提高	变化不太明显	提高	提高
简易程度	易实现	错位量不易确定	易实现	包层间隙不易确定
实用性	好	不好	好	不好

以上建模仿真的研究结果表明, 采用适当形式的三光纤位移传感器不但线性范围和线性度等特性可得到较好改善, 而且会有效地消除光功率波动和反射面反射率的变化等因素对位移测量的影响。首选宜采用等芯不等间距式结构 (图 1 (c) 所示)。

### 参考文献:

- [1] Kissinger C D. Fiber Optic Proximity Probe [P]. US Patent 3327584, 1967.
- [2] Cook R O, et al. Fiber optic lever displacement transducer [J]. Applied Optics, 1979, 18 (19): 3230-3241.
- [3] Hull-Allen G. Reflectivity compensation and linearization of fiber optic proximity probe response [J]. SPIE, 1984, 518: 81-90.
- [4] Jianli Z., et al. Self-referenced reflective intensity modulated fiber optic displacement sensor [J]. Optical Engineering, 1999, 38 (2): 227-232.
- [5] 吕海宝等. 反射式光纤传感器光纤对输出特性的数学模型[J]. 光电工程, 1998, 25 (5): 16-23.
- [6] 徐涛等. 一种强度补偿反射式光纤传感器的研究[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22 (6): 109-112.
- [7] 杨华勇等. 反射面倾斜度对 RIM-FOS 光强调制函数的影响[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23 (3): 107-110.

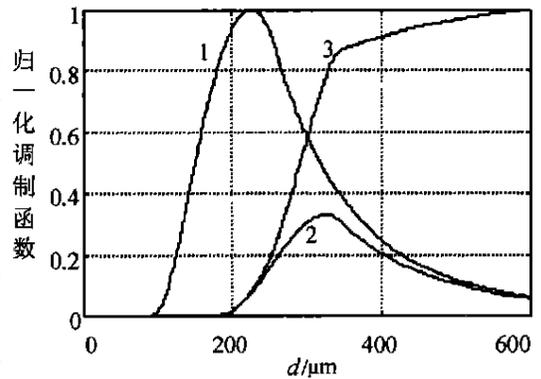


图 4 等芯不等间距式三光纤探头的仿真结果

Fig. 4 Simulation result of the fiber probe with equal radius while different fiber space