

# 天线型光纤传感器的建模与仿真<sup>\*</sup>

黎琼炜 吕海宝

(国防科技大学机电工程与仪器系 长沙 410073)

**摘 要** 反射式强度调制光纤位移传感器(天线型 FOS)由发射光纤和接收光纤按一定的排列方式组合而成,是一定数量的单光纤对的特定组合。本文基于已有的单光纤对的调制函数的数学模型,通过分析 FOS 中光纤的排列方式,在忽略光纤包层和粘结剂厚度的情况下,利用几何和概率统计的理论做了适当的假设,建立了同轴型、半圆型、随机型光纤传感器调制函数的通用数学模型,并对所建模型进行了仿真。利用专门研制的测试系统对建模和仿真结果进行了验证。

**关键词** 光纤传感器、强度调制、调制函数、建模、仿真

**分类号** TH 744, TP 391.91

## The Model and Simulation of Antenna-Shaped Optical Fiber Sensor

Li Qiongwei Lu Haibao

(Department of Mechatronic Engineering and Instrument, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** The reflective intensity-modulated optical fiber sensor for measuring displacement, the antenna-shaped optical fiber sensor is usually composed of a fiber bundle with the emitting and receiving fibers in a specific arrangement at the probe tip. The three elementary types of fiber arrangement are concentric distribution, semicircular distribution and random distribution. In comparison with the size of the optical fiber sensor, the thickness of clad and binding element of the fibers is so small that it can be ignored. The mathematical models of the modulation function for the single fiber couple composed of both an emitting fiber and a receiving one are presented. After analyzing the distribution of the fibers inside the optical fiber sensor by using the geometric and statistical theories, the general mathematical models of modulation function for the three types of the sensors mentioned above are proposed. And all the models are simulated with computer and all the simulating results are briefly analyzed.

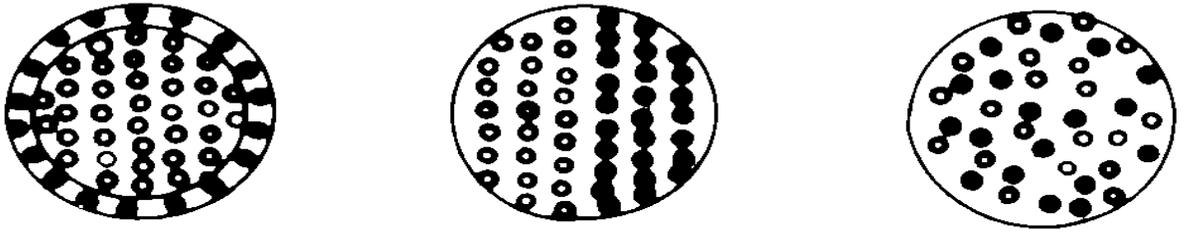
**Key words** optical fiber sensor; intensity modulating; modulation function; model; simulation

反射式强度调制光纤位移传感器(天线型 FOS)由发射光纤和接收光纤按一定的排列方式组合而成,是一定数量的单光纤对的特定组合。通常,我们可依据两种光纤的排列方式将此类传感器分为同轴型、半圆型和随机型。天线型 FOS 的端面结构如图 1 所示。

光从发射光纤出射,形成一个照度场,被反射面反射后形成一个反射场。实际上,只有在接收光纤视场和反射场交叠区域内的光才能被接收光纤所接收。随着传感器端面与反射面的距离增加,交叠区域将发生变化,探测器所接收的光信号也随之发生变化。

我们令光源耦合到单根发射光纤的光通量为  $\phi_e$ ,显然  $\phi_e$  是发射光纤的半径  $r_1$  和数值孔径  $NA_1$  的函数,故可写成  $\phi_e(r_1, NA_1)$ ,发射光纤在 FOS 端面出射的光通量为  $\phi'_e$ 。

<sup>\*</sup> 1997年 6月 20日修订  
第一作者:黎琼炜,女,1972年生,博士生



同轴型 (CTI)      半圆型 (H)      随机型 (R)

图 1 天线型 FOS 端面结构

$$\phi'_e = T_1 l \phi_e(r_1, NA_1) \quad (1)$$

式中  $T_1$  是发射光纤的每米透过率,  $l$  是发射光纤的长度。反射场中的光通量为

$$\phi_f = f_1 R \phi'_e \quad (2)$$

式中  $f_1$  是由反射面加工方法和形状不同而引入的反射系数,  $R$  是由反射面材质不同而引入的反射系数。单根接收光纤所接收的光通量为

$$\phi'_r = f_2 \phi_f \quad (3)$$

式中  $f_2$  是距离  $d$ 、接收光纤半径  $r_2$ 、数值孔径  $NA_2$ 、两光纤中心间距  $p$  的函数。探测器所接收的光通量为

$$\phi_r = T_2 l \phi'_r \quad (4)$$

式中  $T_2$  是接收光纤的每米透过率,  $l$  是接收光纤的长度。由此可得单对光纤的调制函数为

$$M'_s = \frac{\phi_r}{\phi_e} = T_2 l f_2 f_1 R T_1 l \quad (5)$$

为了简便起见, 令

$$T_1 l T_2 l R = 1 \quad (6)$$

则

$$M'_s = f_1 f_2 \quad (7)$$

从上述分析中, 我们可以得到如下结论:

(1) 在单光纤对的情况下, 当入射光与反射面的性质一定时, 单根发射光纤所出射的光仅与光纤芯径和数值孔径有关;

(2) 在单光纤对的情况下, 当入射光与反射面的性质一定时, 对于一定距离  $d$ , 单根接收光纤所接收的光与发射光纤的芯径  $r_1$ 、数值孔径  $NA_1$ 、接收光纤的芯径  $r_2$ 、数值孔径  $NA_2$ 、以及两根光纤的中心距离  $p$  有关;

天线型 FOS 是由  $N$  根芯径为  $r_1$ 、数值孔径为  $NA_1$  的发射光纤与  $M$  根芯径为  $r_2$ 、数值孔径为  $NA_2$  的接收光纤按一定方式排列组合而成。在 FOS 中, 每一根发射光纤与所有的接收光纤都有耦合作用, 故 FOS 中实际上共有  $M \times N$  个单光纤对。

天线型 FOS 的发射光纤束出射的总的光通量为:

$$F_e = N \phi_e \quad (8)$$

而接收光纤束接收的总光通量为:

$$F_r = \sum_{q=1}^{MN} \phi_{r,q} \quad (9)$$

式中  $\phi_{r,q}$  为单根接收光纤接收的由单根发射光纤耦合的光通量。故天线型 FOS 调制函数为

$$M_s = F_r / F_e = \sum_{q=1}^{MN} \phi_{r,q} / (N \phi_e) \quad (10)$$

多年来, 各国专家对单光纤对的调制函数做了大量的研究工作, 建立了一些数学模型<sup>[1-4]</sup>。这里, 我们在这些模型的基础上, 通过分析 FOS 的结构, 推导出天线型 FOS 调制函数的通用数学模型, 并对所建模型进行了计算机仿真。同时, 在专用的测试系统上测试了各类 FOS, 验证了模型的正确性。

## 1 同轴型、半圆型 FOS 调制函数的数学模型

为了方便地求出同轴型、半圆型 FOS 中各光纤对的间距  $p_q$ , 我们在此忽略光纤的包层及粘接剂的厚度, 即认为多根光纤的纤芯是两两相切地紧密排列的。在单根光纤的芯径远小于 FOS 的端面直径时, 我们可以认为光纤是紧密地排列在以 FOS 端面中心为圆心的许多同心圆环上的。采用极坐标时, FOS 发射光纤的中心位置为  $(d_i, \theta_{ij})$ , 接收光纤的中心位置为  $(d_n, \theta_{mn})$ 。

对于同轴型 FOS, 在某一圆环上的发射光纤中心的矢径为

$$d_i = 2r_1 i \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (11)$$

式中  $k = \lfloor (R_1 - r_1) / (2r_1) \rfloor$ ,  $R_1$  为同轴型 FOS 的内径。该圆环上各个发射光纤中心的极角为

$$\theta_{ij} = j\Delta\theta_i \quad (j = 0, 1, \dots, N_i) \quad (12)$$

式中  $N_i = \lfloor (2^c \Delta\theta_i) \rfloor$ ,  $\Delta\theta_i = \arccos\{[d_i^2 + d_i^2 - (2r_1)^2] / (2d_i^2)\}$ 。在某一圆环上的接收光纤中心的矢径为

$$d_n = R_1 + r_2 + 2r_2 m \quad (m = 0, 1, \dots, Q) \quad (13)$$

式中  $Q = \lfloor (R_2 - R_1) / (2r_2) \rfloor$ ,  $R_2$  为同轴型 FOS 的外径。该圆环上的接收光纤中心的极角为

$$\theta_{mn} = n \cdot \Delta\theta_m \quad (n = 0, 1, \dots, M_m) \quad (14)$$

式中  $M_m = \lfloor (2^c \Delta\theta_m) \rfloor$ ,  $\Delta\theta_m = \arccos\{[d_m^2 + d_m^2 - (2r_2)^2] / (2d_m^2)\}$ 。

半圆型 FOS 中, 接收光纤与发射光纤排列于端面轴线的两侧。一般来说, 半圆型 FOS 中接收光纤与发射光纤的结构参数和数目都是相同的, 即  $r_1 = r_2$ ,  $NA_1 = NA_2$ ,  $M = N$ 。因此, 我们可认为两种光纤的中心是以极轴为对称分布的。采用与同轴型 FOS 相同的分析方法, 便可求出半圆型 FOS 中每根光纤中心的极坐标值。

无论是同轴型 FOS, 还是半圆型 FOS, 在求出各个光纤的中心位置后, 便可利用下式求得每个光纤对的中心间距

$$p_{q(ijmn)} = \sqrt{d_i^2 + d_n^2 - 2d_i d_n \cos(\theta_{ij} - \theta_{mn})} \quad (q = 1, 2, \dots, MN) \quad (15)$$

进而可得同轴型或半圆型 FOS 的接收的总光通量, 并最终获得这两种 FOS 调制函数的数学模型。

## 2 随机型 FOS 调制函数的数学模型

一般来说, 随机型 FOS 中, 发射光纤与接收光纤的结构参数及数目均相同, 即  $r_1 = r_2$ ,  $NA_1 = NA_2$ ,  $M = N$ 。随机型 FOS 中发射光纤与接收光纤是随机放置的, 故发射光纤的中心位置  $(d_i, \theta_{ij})$  和接收光纤的中心位置  $(d_n, \theta_{mn})$  都是二维的离散随机变量, 且  $(d_i, \theta_{ij})$  与  $(d_n, \theta_{mn})$  的分布不是独立的。那么, 光纤对中心间距  $p_q$  及单光纤对中接收光纤接收的光通量  $\phi_r$  是同分布的离散随机变量, 它们的概率分布是  $(d_i, \theta_{ij})$  和  $(d_n, \theta_{mn})$  的联合分布。由于随机型 FOS 加工过程中存在着大量的人为因素, 故很难确定  $(d_i, \theta_{ij})$ 、 $(d_n, \theta_{mn})$  的分布函数和它们之间的相关函数, 故精确地求出  $F_r$  是不可能的。

这里, 我们将考虑如下的简化模型:

- (1) 忽略光纤的包层和光纤间粘接剂的厚度;
- (2) 发射光纤的中心位置  $(d_i, \theta_{ij})$  和接收光纤的中心位置  $(d_n, \theta_{mn})$  是独立同分布的随机变量;
- (3) 在同一个圆环上两种光纤的中心位置都是均分分布的。

其实, 当单光纤半径远小于 FOS 的端面半径时, 这些假设与实际是相符的。

根据概率统计的理论, 我们可很容易地写出两种光纤中心位置的概率分布。根据式 (15) 求出单根接收光纤与单根发射光纤的中心距离  $p_q$ , 而后便可得该单光纤对中接收光纤所接收到的光通量  $\phi_{r,q}$ , 再根据两种光纤中心位置的概率分布, 求得随机型 FOS 中单光纤对的  $\phi_{r,q}$  的均值  $\langle \phi_{r,q} \rangle$ 。至此可得, 随机型 FOS 中接收光纤接收的总光通量为

$$F_r = C_M^1 C_N^1 \langle \phi_{rq} \rangle = MN \langle \phi_{rq} \rangle \tag{16}$$

而发射光纤发射的总光通量为

$$F_e = N\phi_e \tag{17}$$

那么，随机型 FOS的调制函数为

$$M_s = F_r / F_e = (M \langle \phi_{rq} \rangle) \phi_e \tag{18}$$

### 3 各种天线型 FOS的仿真结果及分析

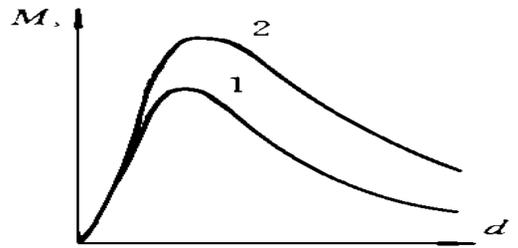
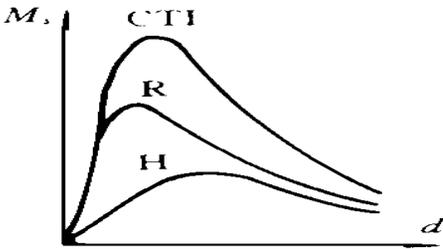


图 2 三种 FOS 调制函数的仿真曲线 (外径及光纤结构参数均相同)

图 3 两种随机型 FOS 调制函数的仿真曲线 (光纤结构参数相同, 但曲线 2 的 FOS 外径较大)

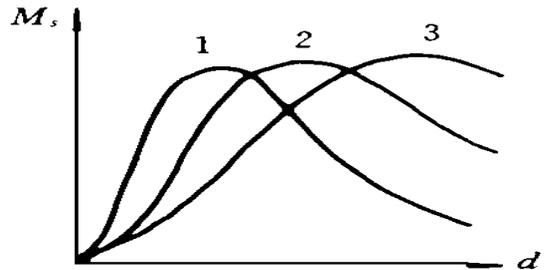
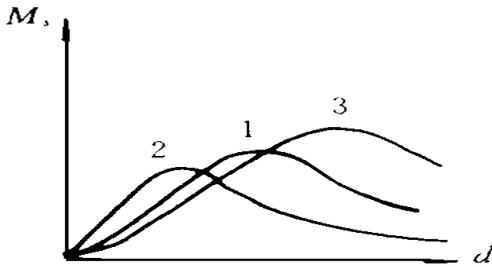


图 4 三种半圆型 FOS 调制函数的仿真曲线 (光纤结构参数均相同, FOS 外径  $R_2 < R_1 < R_3$ )

图 5 三种同轴型 FOS 调制函数的仿真曲线 ( $NA_3 < NA_2 < NA_1$ , 其余各种结构参数均相同) 但曲线 2 的 FOS 外径较大)

图 2~ 图 5 是各向同性光入射, 反射面为完全镜面时的各种天线型 FOS 的仿真结果

从图 2 中可清楚地看到, 当单根光纤的结构参数相同、FOS 端面的外径也相同时, FOS 的调制函数因光纤的排列方式不同而有很大的差别。同轴型 FOS 的前坡的线性范围最大, 灵敏度适中; 随机型 FOS 的后坡线性最好, 且范围最大。由这张图, 我们可以推断出, 随机型 FOS 的后坡适用于大位移量的测量。

在图 3 中, 曲线 1 和曲线 2 仅仅是 FOS 端面的外径不同。由此可看出, 当随机型 FOS 端面外径增大, 前坡曲线不敏感, 而后坡线性范围和灵敏度明显增大。究其原因, 主要是位移很小时 (前坡), 随机型 FOS 中只有相邻的接收光纤和发射光纤有耦合作用, 故与光纤总数无关 (即与端面外径无关), 而在后坡每一根发射光纤对所有的接收光纤都有耦合作用, 故端面外径增大时, 后坡变化很明显。

从图 4 中可以看出, 半圆型 FOS 的前坡与 FOS 端面外径有关, 这是因为此结构的 FOS 的发射光纤束和接收光纤束可分别看成一个大的独立的单光纤。这也是这种 FOS 到达峰值输出时位移量最大的

原因

在图 5 中绘出了三条  $NA$  值不同的同轴型 FOS 的调制函数曲线, 当光纤  $NA$  减小时的调制函数的位移曲线峰值点后移, 且平顶增大。根据这一特点, 我们可选择  $NA$  较小的同轴型 FOS 测量表面粗糙度。

## 4 各种天线型 FOS 的测试

为了测试各种天线型 FOS 的位移输出特性, 以检验理论模型的正确性, 我们研制了一个较高精度的天线型 FOS 位移特性测试系统, 并且定制了一系列天线型 FOS, 在测试系统上进行反复测试。

该测试系统使用半导体激光光源, 采用反射面不动, 而 FOS 探头放在平移台的拖板上, 用一个步进电机驱动拖板的工作方式。系统配有 486DLC 微机, 用于完成对系统的控制以及数据处理。系统硬件分为三个部分:

- (1) 光路及光电转换部分: 该部分包括激光电源及激光器、耦合透镜、带孔光电池和光电池、天线型 FOS 等。
- (2) 信号处理部分: 该部分主要完成对  $I/V$  转换后的电信号进行滤波整形处理, 滤去各种噪声, 得到一个“干净”的测量信号后进行模数转换, 以便利用计算机对测量信号进行处理。
- (3) 控制部分: 该部分由计算机、计算机接口电路和步进电机驱动电路组成, 计算机通过接口电路来控制整个系统的正常运行。步进电机驱动电路用于接收计算机所发的循环码, 驱动步进电机, 以提供测试所需位移量。

限于篇幅, 这里我们只列出三个天线型 FOS 的测试结果。这三个天线型 FOS 的参数分别如下表所示。测试结果如图 6 所示。

表 1

	单丝直径	芯料	NA	透过率	光纤长度	探头尺寸 (mm)
CTI	30 <sub>m</sub>	光学玻璃	0.56	50% <sub>lm</sub>	100cm	外径: 4 内径: 3
H	47 <sub>m</sub>	光学玻璃	0.626	48% <sub>lm</sub>	75cm	外径: 4
R	47 <sub>m</sub>	光学玻璃	0.626	48% <sub>lm</sub>	75cm	外径: 4

图 6 中横坐标可看成 FOS 端面与反射面之间的距离, 而由于光电池输出与接收光纤接收的光通量成正比, 纵坐标可看作接收光纤接收到的光通量。实测曲线的起始点不在坐标原点的原因是测试时采用的反射面是圆柱面, 且圆柱面的曲率半径并不远大于 FOS 的外径, 当 FOS 探头与圆柱面接触时, FOS 端面上所有的点与圆柱面的距离并不都为“0”, 部分接收光纤仍能接收到反射光。

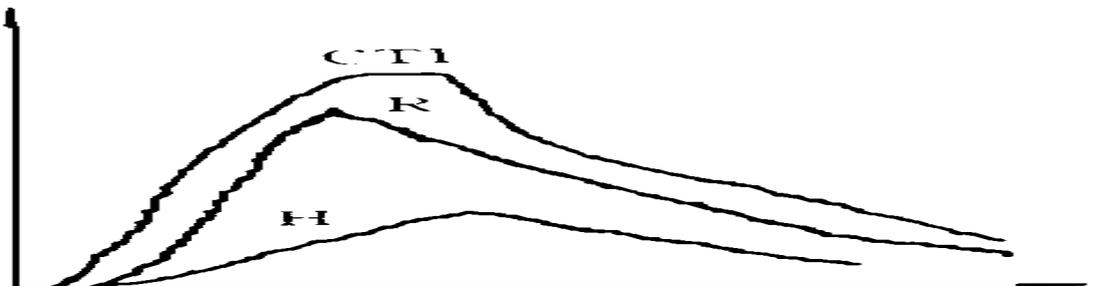


图 6 实际测试的三种天线型 FOS 的位移输出曲线  
(横坐标为位移, 纵坐标为光电池的输出)

## 5 结论

比较图 2 与图 6 可以看出, 三种 FOS 仿真曲线与实测曲线基本相同。这充分表明, 我们所建的模

型是正确的。我们对多个天线型 FOS 进行了分组测试, 测试结果均与仿真结果相吻合。

天线型 FOS 可用于位移、粗糙度、低频振动等的测量, 且结构简单, 使用方便。但目前在生产和使用天线型 FOS 中, 人们往往只能凭经验来确定各种结构参数, 这样使生产成本大大增加, 在 FOS 的选用上也存在着困难。我们所建的模型将为此类 FOS 结构参数的选择提供理论依据, 有助于降低天线型 FOS 的生产成本, 也为天线型 FOS 的大量使用开辟了道路。

## 参 考 文 献

- 1 斋藤胜政, 三好隆志. ファイバブイクス光尺计つ原理. 精密机械, 1974 40 (2): 13~ 18
- 2 三好隆志, 斋藤胜政. 同心圆型光ファイバ束つ解析. 精密机械, 1981 47 (3): 74~ 79
- 3 Cook R. O, Ham m C. W, Fibre optic lever displacem ent transducer. Applied optics 18 (19): 3230~ 3241
- 4 Zhao Zhiqiang, Lau W. S, Albert C. K, Choi Shan Y. Y. Modulation functions of the reflective optical fiber sensor for specular and diffuse reflection. Optical Engineering Vol 33 (9): 2986~ 2991
- 5 Kissinger C. Fibre optic lever displacem ent sensors and autom ated reflectance compensation improvements FOC/LAN 83 the Seventh International Fiber Optical & Communication Exposition. 1983 300~ 304
- 6 Leo Hoogenboom, Gregory Hull-Allen, Wang Steven. Theoretical and experim ental analysis of a optic fiber proximity probe. SPIC, Fibre Optic and Lasers Sensors II, 1984 478 46~ 87