

# 反射面形状对反射式光纤位移传感器理论特性的影响

杨华勇, 吕海宝

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研究了反射式强度调制型光纤传感器中反射面的形状对光强调制特性的影响, 推导得出了含反射面形状因子的光强调制函数。计算机仿真结果表明, 若凸反射面曲率半径变大, 则特性曲线的死区将变小, 前坡无显著变化, 后坡线性范围增大而灵敏度降低; 若凹反射面曲率半径变大, 则特性曲线的死区变小, 前坡及后坡的线性范围减小而灵敏度增大。

关键词: 光纤传感器; 强度调制; 反射面; 形状  
中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引言

由于反射式强度调制型光纤传感器(RIM-FOS: reflective intensity-modulated fiber optic sensor)有许多独特的优点, 如结构简单、设计灵活、成本低、环境适应性强<sup>[1]</sup>等, 所以到目前为止, RIM-FOS已在许多物理量的测量中得到了广泛的应用, 如位移、振动、压力、温度等。虽然研究RIM-FOS的文献非常多, 但是绝大多数研究的是采用平面反射面, 对于凸凹反射面的情况在研究中考虑的并不多。但是事实上在实际的机械测量的场合, 反射面为凸面和凹面的情况非常普遍。三好隆志和斋腾腾政<sup>[2]</sup>在研究同轴型光纤束的理论解析式的同时, 引入一个等效距离参数, 探讨了反射面为凸面和凹面的情况, 但是理论上的解析表达式并不明确。文献[4]研究发现改变反射面的形状可以改变传感器的位移特性, 并且采用不同的曲率半径的凹凸反射面进行了实验, 但是该文没有在理论上进行详细的数学推证。本文在几何光学的基础上, 从理论上对反射面的形状进行细致分析, 并通过数值计算研究不同曲率的反射面对RIM-FOS光强调制特性的影响。

## 2 反射面形状因子的理论分析

对于反射面为平面的情况, 作者在文献[3]和

[4]中分别进行了分析, 本文对于凹凸反射面的理论分析是在此基础上引入了反射面形状因子参数, 也即反射面的曲率半径 $R_c$ 。当 $R_c = \infty$ 时, 反射面为平面;  $R_c > 0$ 时, 反射面为凸面;  $R_c < 0$ 时, 反射面为凹面。必须注意在分析反射面为凹凸面的时候, 由于反射面的形状因子而使得从发送光纤TF(Transmitting Fiber)经反射面反射后, 应排除反射光线与光纤轴线的夹角大于光纤数值孔径角 $\theta_N$ 的情况, 否则这种反射光即使在接收光纤RF(Receiving Fiber)的接收范围内也不能被RF传输到探测器。

设TF和RF的半径均为 $r$ , 二者之间的轴间距为 $P$ , TF的轴线通过反射面的中心, 且到反射面的顶点之间的距离为 $d$ 。由

$$\begin{cases} (d + d') \tan \theta_N + r = BN \\ BN = R_c \sin \alpha \\ d' = R_c - R_c \cos \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

可得到

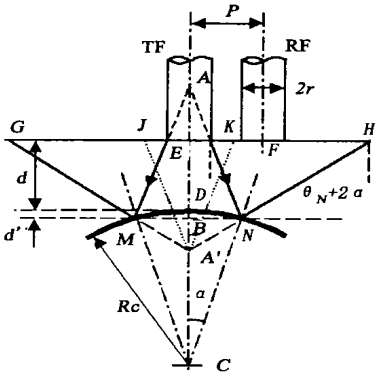
$$\alpha = \sin^{-1} \frac{d \sin \theta_N + r \cos \theta_N + R_c \sin \theta_N}{R_c} - \theta_N, \quad (2)$$

其实 $\alpha$ 也是一个有正负量。由(1)和(2)可知当反射面为凸面时,  $R_c > 0$ , 则 $\alpha > 0$ ; 当反射面为凹面时,  $R_c < 0$ , 则 $\alpha < 0$ ; 而当反射面为平面时,  $R_c$ 趋于 $\infty$ ,  $\alpha$ 则趋于0。

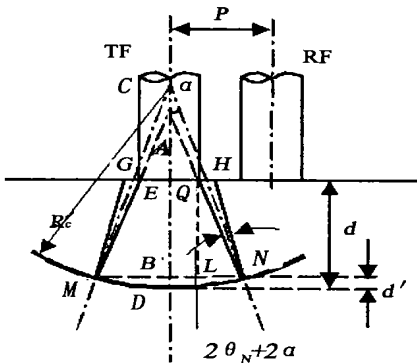
当光束经过凸反射面反射后, 相当于从  $A'$  发出的光形成的发散型光锥  $\Delta A'HG$ 。在这种情况下, 由角度为  $\theta_N$  的光线经过反射面后的反射光线  $NH$  必然不能被 RF 接收, 因为  $\theta_N + 2\alpha > \theta_N$ 。所以只能考虑有效光锥  $\Delta A'JK$  (光锥角为  $2\theta_N$ ) 内的光被 RF 接收的情况。从图 1(a) 所示的几何关系可以得到

$$\begin{cases} A'C = \frac{R_c \sin(\theta_N + \alpha)}{\sin(\theta_N + 2\alpha)} \\ A'E = d + A'D = d + R_c - A'C \\ A'E \tan \theta_N = EK = q \\ EH = A'E \tan(\theta_N + 2\alpha), \end{cases} \quad (3)$$

$q$  为有效反射光锥  $\Delta A'JK$  在光纤端面上光斑的半径。



(a) Convex reflector



(b) Concave reflector

图 1 RIB-FOS 中反射面为凸凹面的情况

Fig. 1 Convex and concave reflectors in RIM-FOS.

当光束经过凹反射面反射后, 会形成一个收缩光锥  $MNHG$ 。由于在这种情况下  $\alpha < 0$  使得  $\theta_N$

+  $2\alpha < \theta_N$ , 所以只要反射光锥中的光能照射到接收光纤且满足  $|\alpha| \leq \theta_N$ , 就均可被 RF 接收并传输。因此从图 1(b) 所示的几何关系可以得到:

$$\begin{cases} QL = d + d' = d + (R_c - R_c \cos \alpha) \\ EH = BN + QL \cdot \tan(\theta_N + 2\alpha) = q, \end{cases} \quad (4)$$

在假设反射面完全光滑且反射光锥内的光强均匀分布的前提下, 光纤对的光强调制系数等于 RF 端面 and 有效光锥 (半径为  $q$ ) 在光纤端面上光斑的交叠面积  $S_r$  与反射光锥 (半径为  $EH$ ) 在光纤端面的面积之比<sup>[4]</sup>。即

$$M = \frac{S_r}{\pi EH^2}, \quad (5)$$

下面分别考虑因为距离  $d$  的变化而引起的光斑半径  $q$  变化的几种情况。

(1) 当  $q \leq p - r$  时 RF 接收不到光, 此时光强调制系数

$$M = 0, \quad (6)$$

(2) 当  $p - r < q \leq \sqrt{p^2 + r^2}$  时, RF 和有效光锥在光纤端面上光斑的交叠面积为<sup>[4]</sup>

$$S_r = \varphi q^2 + \sin^{-1} \frac{q \sin \varphi}{r} \cdot r^2 - pq \sin \varphi, \quad (7)$$

$$\text{其中 } \varphi = \cos^{-1} \frac{p^2 + q^2 - r^2}{2pq}.$$

(3) 当  $\sqrt{p^2 + r^2} < q \leq p + r$  时, RF 和有效光锥在光纤端面上光斑的交叠面积为<sup>[4]</sup>

$$S_r = \varphi q^2 + (\pi - \sin^{-1} \frac{q \sin \varphi}{r}) \cdot r^2 - pq \sin \varphi, \quad (8)$$

(4) 当  $q > p + r$  时, 由于 RF 完全处于有效光锥  $\Delta A'JK$  在光纤端面上的光斑中, 因此

$$S_r = \pi r^2, \quad (9)$$

以上是反射面的形状因子  $R_c$  对 RIM-FOS 光强调制特性影响的数学分析过程。下面采用数值计算的方法来研究反射面形状因子对特性的影响规律。

### 3 仿真计算

根据式(1)~(9)可分别计算并绘制出反射面形状因子  $R_c$  不同的光强调制特性曲线。其中设定  $NA = 0.56$ , 光纤半径  $r_1 = r_2 = 100 \mu\text{m}$ , 光纤对的轴间距  $p$  设定为  $300 \mu\text{m}$ 。图 2 和图 3 中的特性曲线纵坐标均进行了归一化处理。

图 2 是反射面为不同曲率半径的凸面时的仿真曲线。图中共有五条特性曲线, 分别对应不同的凸面。细实线对应曲率半径  $R_{c_1} = 3.0\text{mm}$ , 虚线对应  $R_{c_2} = 6.0\text{mm}$ , 点划线对应  $R_{c_3} = 9.0\text{mm}$ , 而曲率半径  $R_{c_4} = 150.0\text{mm}$  所对应的特性曲线与粗实线几乎重合。粗实线是根据文献[4]给出的反射面为平面的公式计算出的特性曲线。同样, 图 3 是反射面为不同曲率半径的凹面时的仿真曲线。五条特性曲线分别对应不同的凹面。细实线对应曲率半径  $R_{c_5} = -3.0\text{mm}$ , 虚线对应  $R_{c_6} = -6.0\text{mm}$ , 点划线对应  $R_{c_7} = -9.0\text{mm}$ , 曲率半径  $R_{c_8} = -150.0\text{mm}$  所对应的特性曲线与粗实线几乎重合。粗实线也是根据文献[4]给出的反射面为平面的公式计算出的特性曲线。

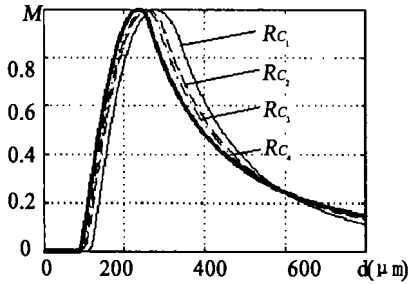


图 2 不同  $R_c$  的凸反射面的仿真曲线  
Fig. 2 Simulating curves of convex reflectors.

从图 2 中可以看出, 随着凸反射面形状因子的变化, RIM-FOS 的光强调制特性会发生较大的变化。凸反射面的曲率半径变大, 则特性曲线的死区变小, 前坡没有显著地变化, 后坡的线性范围增大而灵敏度降低。当曲率半径增加到一定的时候, 凸反射面相对于直径为  $200\mu\text{m}$  的光纤来说已经趋近于平面, 因此此时的特性曲线与平反射面所得到的特性曲线几乎重合。对于图 3 的反射面为凹面的情况, 随着反射面形状因子的变化, RIM-FOS 的光强调制特性也发生较大的变化。

凹面的曲率半径变大, 则特性曲线的死区变小, 前坡线性范围减小而灵敏度增加, 后坡的线性范围减小但斜率增大。当曲率半径增加到一定的时候, 凹面也将趋近于平面, 因此此时的特性曲线也与平反射面所得到的特性曲线重合。

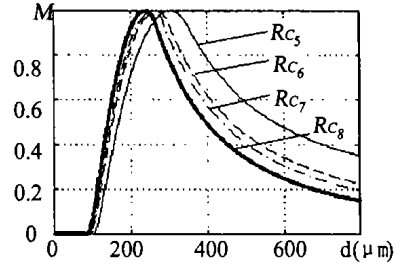


图 3 不同  $R_c$  的凹反射面的仿真曲线  
Fig. 3 Simulating curves of concave reflectors.

#### 4 结论

本文对于 RIM-FOS 中反射面的形状因子的理论分析及数值计算得研究结果表明, 反射面的形状因子对光强调制特性的影响较大。随着凸反射面形状曲率半径变大, 特性曲线的死区将变小, 前坡没有显著变化, 后坡的线性范围增大而灵敏度降低; 随着凹反射面曲率半径变大, 特性曲线的死区变小, 前坡线性范围减小而灵敏度增大, 后坡线性范围也减小且灵敏度增大。

本文的研究结论与文献[5]由实验得到的结果基本一致。其中, 对于反射面形状对传感器特性曲线的死区、前坡特性的影响, 二者的研究结论是一致的; 而对于后坡线性范围的影响, 两者的研究结论相背, 这可能主要是由于当工作在特性曲线的后坡时, 反射面与光纤端面间的距离比较大, 实验时由于反射面的表面粗糙而使得光的散射相对较严重, 导致实际反射进入 RF 的光强与理论情况下不考虑光散射得到的光强存在相对较大的差异。

#### 参考文献:

[1] 杨华勇, 吕海宝, 徐涛. 反射式强度型光纤传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2001, 14(4): 349- 355.  
 [2] 三好隆志, 斋藤政. 同心圆型光ファイバ束の解析[J]. 精密机械, 1981, 74(3): 74- 79.  
 [3] Yang H Y, Lu H B. Research on the effect on intensity modulation caused by perpendicularity between the axes of fiber pair

and reflector[J]. *SPIE*, 2000, 4222: 318– 322.

[4] 杨华勇, 吕海宝, 徐涛. 反射式光纤传感器光纤参数对调制系数的影响[J]. *光子学报*, 2002, 31(1): 74– 77.

[5] 陶宝琪. M 光导纤维组合探头及应用[C]. *中国航空科技文献*, 1989. 1– 12.

## Influence on the intensity modulation of a reflective fiber optic displacement sensor induced by reflector shape

YANG Hua\_yong, LU Hai\_bao

(*College of Mechatronic Engineering and automation,  
National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China*)

**Abstract:** In a reflective fiber optic displacement sensor, the influence on intensity modulation property caused by the reflector shape was studied theoretically with the mathematic model found. The computer simulation was performed. Results show that with the radius of the convex reflector increasing, the starting distance of the sensor property curve will decrease, the front slope will change unobviously, while the linear range of the back slope enlarges, and its sensitivity decreases. When the radius of the concave reflector increases, the starting distance of the sensor property curve will decrease, the linear ranges of the front and back slopes become smaller while their sensitivities enhance.

**Key words:** fiber optic sensor; intensity modulation; reflector; shape

作者简介: 杨华勇(1974–), 男, 江西安义人, 博士, 主要从事激光检测、光纤传感的研究。