

折射率温敏式光纤温度传感器的理论模型

沈为民 张 艺

(中国计量学院光电子研究所, 杭州 310034)

摘 要 提出了折射率温敏式光纤温度传感器的理论模型, 包括子午光线和偏射光线的影响。讨论了多模光纤的弯曲损耗。理论的分析结果与实验相当一致。

关键词 光纤温度传感器, 多模光纤, 光线理论。

1 引 言

折射率温敏式光纤温度传感器, 是将一小段光纤的包层剥去, 换以折射率温度灵敏材料, 制作光纤温度传感头。国内外已有多项研究, 取得了很好的结果^[1-3]。但对其中的光传输过程仍缺少深入的研究。文献[1]和文献[2]根据介质波导的模式理论, 曾作过理论探讨, 但由于涉及的是多模光纤, 分析中引入大量简化使理论分析与实验结果存在很大的偏差。而且, 为了便于实际测量, 温敏探头通常(不是直通型的)做成弯曲的更合适^[3]。此时, 由于探头内光纤是弯曲的, 很难用文献中提出的理论模型来讨论。本文从光纤的光线理论出发, 结合光的电磁理论中的菲涅耳公式, 同时考虑子午光线和偏射光线的影响, 建立的光传输模型与实验结果相当一致。模型中涉及光源与光纤的耦合, 温敏探头中温度对光功率的调制, 探头光纤弯曲对光纤温度传感器特性的影响等。这种分析方法也可应用于多模光纤的光功率传输、弯曲损耗等过程的研究。

2 光功率的角向分布

在阶跃光纤中, 要确定光线的传播方向, 需要两个参量: 轴向角 θ 与偏射角 ϵ 。轴向角是光线与光纤轴线方向夹角; 偏射角 ϵ 是光线在光纤横截面上的投影线与反射点处半径方向的夹角。不同角度的光线, 温度的调制效应是不一样的, 因而需要讨论光功率对 θ 、 ϵ 是如何分布的。

设光由光纤端面直接耦合。某一光线以轴向角为 θ , 方位角为 ϕ 投射到离圆心距离为 r 的 A 点处如图 1 所示, 光纤纤芯半径为 a , 则

$$\frac{\sin \phi}{a} = \frac{\sin \epsilon}{r} \quad (1)$$

严格讨论光源与光纤的耦合很复杂。但因为实际进入光纤并沿

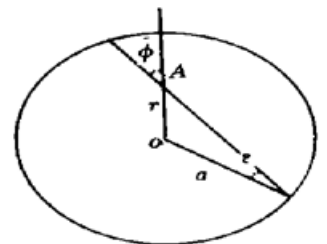


Fig. 1 Projective angles of a ray on fiber section

光纤传播的光线其 θ 角较小。在小范围内可以看作是均匀分布的, 即与 θ 角无关。另外, 假设光功率分布是轴对称的, 即与 ϕ 角无关。则

$$dP \propto d\theta d\phi \quad (2)$$

对于不同的入射点 (r 不同), 可取适当 ϕ 值使偏射角 ϵ 相同。由 (1) 式可得

$$d\phi \propto \frac{a}{r} \frac{\cos \epsilon d\epsilon}{\sqrt{1 - (a/r)^2 \sin^2 \epsilon}} \quad (3)$$

由 (1) 式知, 对于给定 ϵ , r 有一最小值, 即 $r_{\min} = a \sin \epsilon$ 。如果要考虑光功率按 ϵ 的分布问题, 则应考虑端面上全部的入射光线的贡献。

$$dP \propto d\theta d\phi = a \cos \epsilon d\theta d\epsilon \int_{a \sin \epsilon}^a \frac{2\pi r dr}{\sqrt{1 - (a/r)^2 \sin^2 \epsilon}} = 2\pi a^2 \cos^2 \epsilon d\theta d\epsilon$$

或

$$dP = A \cos^2 \epsilon d\theta d\epsilon \quad (4)$$

A 为比例系数。 $\cos^2 \epsilon$ 因子表明, 只有较小的 ϵ 角才会有较大的贡献。

3 探头温度对光强的调制

对于光纤中轴向角为 θ 、偏射角为 ϵ 的光线, 它在纤芯与包层界面的入射角 ψ 满足

$$\cos \psi = \sin \theta \cos \epsilon \quad (5)$$

全反射临界角

$$\psi_m = \arcsin (n_2/n_1) \quad (6)$$

令

$$\theta_M = \pi/2 - \psi_m \quad (7)$$

- 则
- 1) $\theta < \theta_M$ 为传导光线
 - 2) $\psi < \psi_m$ 为折射光线
 - 3) $\psi > \psi_m$ 且 $\theta > \theta_M$ 为隧道光线

从光源到探头部分的光纤较长, 折射光线、隧道光线的能量将损耗殆尽, 故探头输入端光功率为

$$P_0 = A \int_0^{\theta_M} d\theta \int_0^{\pi/2} \cos^2 \epsilon d\epsilon = \frac{\pi}{4} A \theta_M \quad (8)$$

光进入探头后, 传导光线有一部分转化为隧道光线和折射光线, 由于探头可能很短, 不能简单地认为这一部分能量全部损耗掉。对于多模光纤, 纤芯直径较大, 可认为求反射系数的菲涅耳公式仍适用, 因此探头输出光功率为

$$P = A \int_0^{\theta_{M_t}} d\theta \int_0^{\pi/2} \cos^2 \epsilon d\epsilon + A \int_{\theta_{M_t}}^{\theta_M} d\theta \int_{\epsilon_t}^{\pi/2} \cos^2 \epsilon d\epsilon + A \int_{\theta_{M_t}}^{\theta_M} d\theta \int_0^{\epsilon_t} R_{\psi}^N \cos^2 \epsilon d\epsilon \quad (9)$$

上式三项分别对应探头中传导光线、隧道光线和折射光线的贡献。其中

$$\theta_{M_t} = (\pi/2) - \arcsin (n_{2t}/n_1) \quad (10)$$

$$\epsilon_t = \arccos (\sin \theta_{M_t} / \sin \theta) \quad (11)$$

式中 n_{2t} 为温敏介质在温度 t 时的折射率, 由实验确定。 R_{ψ} 为反射率, 如果光源是非偏振的, 则

$$R_{\psi} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\psi'' - \psi)}{\sin^2(\psi'' + \psi)} + \frac{\tan^2(\psi - \psi'')}{\tan^2(\psi + \psi'')} \right] \quad (12)$$

$$\Psi'' \text{ 为折射角} \quad \Psi'' = \arcsin (n_1 \sin \Psi / n_{2t}) \quad (13)$$

$$N \text{ 为反射次数} \quad N = L / \Delta L = L / 2a \cos \epsilon \cot \theta \quad (14)$$

L 为探头长度, a 为纤芯半径, ΔL 为两次反射之间的光纤长度。

4 探头弯曲对光强的影响

图 2 为光纤温度探头结构示意图。图 2(a) 为直通型, 图 2(b) 为弯曲型。温敏介质折射率 n_{2t} 介于纤芯折射率 n_1 和包层折射率 n_2 之间, 并随温度而变。温度改变 n_{2t} 的数值, 使光纤有效数值孔径发生变化, 引起输出光功率变化。即不同温度对应不同的光功率。

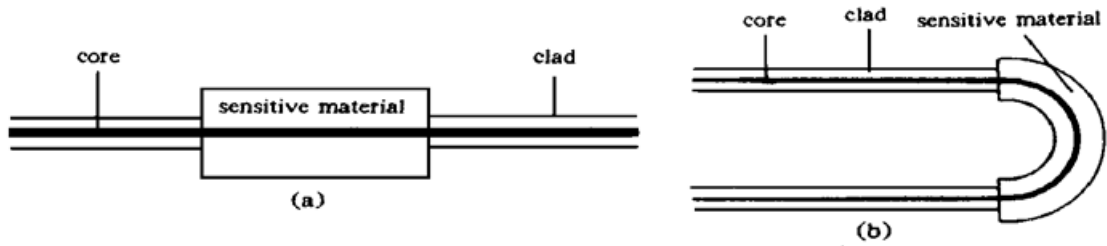


Fig. 2 The structure of optical fiber temperature sensor. (a) Linear structure, (b) Bent structure

严格地说, 上面讨论仅适用于探头光纤为平直时的情况(如直通式探头或反射式探头)。

在平直光纤中 θ, ϵ 为不变量, 即对同一支光线的 θ, ϵ 取值在传播中不会改变。当光纤弯曲时, 光纤轴线的方向各点是不同的, 定义 θ 为反射点处光线与光纤轴线切向的夹角。因此光线在各反射点的角度取值是不同的, 其值大小与光线相对光纤弯曲平面的取向有关, 所以用 θ, ϵ, ϕ 三个角度来描写某一光线。如图 3 所示, 设 yz 为光纤弯曲平面, 图 3(a) 为某反射点 A 处光纤横截面, AB 为反射后光线在此截面的投影线。

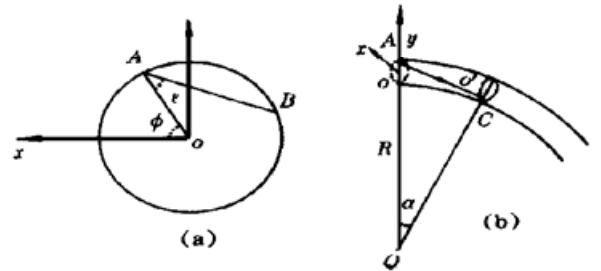


Fig. 3 Typical geometry of a bent fiber

在 A 点反射后的光线方向可表为

$$e_k = \cos \theta e_z + \sin \theta [-\cos (\phi - \epsilon) e_x - \sin (\phi - \epsilon) e_y] \quad (15)$$

此处反射面的法线沿 A 点与圆心 o 的连线方向, 故

$$n = -\cos \phi e_x - \sin \phi e_y \quad (16)$$

所以光线在 A 点的入射角(等于反射角) ψ 满足

$$\cos \psi = n \cdot e_k = \sin \theta [\cos \phi \cos (\phi - \epsilon) + \sin \phi \sin (\phi - \epsilon)] = \sin \theta \cos \epsilon \quad (17)$$

要求出下一反射点 C 处的入射角, 需先确定 C 点的位置。由于光纤表面为圆柱面, C 点即光线与弯曲圆柱面的交点。 A 点坐标为 $(a \cos \phi, a \sin \phi, 0)$, 光线方向由(15)式确定, 可写出光线对应的直线方程为

$$\frac{x - a \cos \phi}{-\sin \theta \cos (\phi - \epsilon)} = \frac{y - a \sin \phi}{-\sin \theta \sin (\phi - \epsilon)} = \frac{z}{\cos \theta} \quad (18)$$

设光纤在 C 点的截面的圆心为 o' , o' 的坐标为

$$x_{o'} = 0, \quad y_{o'} = -(R - R \cos \alpha), \quad z_{o'} = R \sin \alpha \quad (19)$$

式中 R 为光纤弯曲半径。弯曲圆柱面的方程为

$$x^2 + [y + (R - R \cos \alpha)]^2 + (z - R \sin \alpha)^2 = a^2 \quad (20)$$

而 $\sin \alpha = z / \sqrt{(y + R)^2 + z^2}$, $\cos \alpha = (y + R) / \sqrt{(y + R)^2 + z^2}$ (21)
 消去 α 可得

$$x^2 + [\sqrt{(y + R)^2 + z^2} - R]^2 = a^2 \tag{22}$$

(18) 和(22) 两式联立可解出 C 点的坐标。当 $R \gg a$ 时, 可求得近似值

$$\begin{aligned} x_c &= a \cos(\pi + \phi - 2\epsilon) + (2a^2/R) \cot^2 \theta \cos \epsilon \cos(\phi - \epsilon) \sin(2\epsilon - \phi) \\ y_c &= a \sin(\pi + \phi - 2\epsilon) + (2a^2/R) \cot^2 \theta \cos \epsilon \sin(\phi - \epsilon) \sin(2\epsilon - \phi) \\ z_c &= 2a \cot \theta \cos \epsilon [1 - (a/R) \cot^2 \theta \sin(2\epsilon - \phi)] \end{aligned} \tag{23}$$

经过复杂运算, 可求出光线在 C 点反射后的三个角度值:

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta' &= \sin \theta \sin(\phi - \epsilon) \sin \alpha + \cos \theta \cos \alpha \approx \cos \theta + (2a/R) \cos \theta \cos \epsilon \sin(\phi - \epsilon) \\ \cos \phi' &\approx \cos(\pi + \phi - 2\epsilon) + (2a/R) \cot^2 \theta \cos \epsilon \cos(\phi - \epsilon) \sin(2\epsilon - \phi) \\ \epsilon' &\approx \epsilon \end{aligned} \right\} \tag{24}$$

以及在 C 点的入射角 ψ' ,

$$\cos \psi' = \cos \epsilon \sin \theta [1 - (2a/R) \cot^2 \theta \cos \epsilon \sin(\phi - \epsilon)] \tag{25}$$

据此可求出反射率。

5 结果及讨论

根据上述模型, 计算了平直探头和弯曲探头的输出光功率(相对值)对温度的关系曲线, 如图 4 所示。所取参数为: 纤芯折射率 $n_1 = 1.470$, 包层折射率 $n_2 = 1.450$, 温敏介质折射率 $n_{2t} = 1.4600 - 0.0004(t - 30)$ 。图 4 中 P_1 、 P_2 两曲线对应平直探头, 探头长度分别为 8 mm 和 16 mm。在温度很低时, $n_{2t} > n_1$, 反射率很小, 输出光很弱。温度升高, n_{2t} 下降, 当 $n_{2t} = n_1$ 时, 输出光最弱, 此时只有掠射光线有贡献。温度继续升高, 则输出光迅速增强, 此后两曲线几乎重合。当 $n_{2t} = n_2$ 时, 输出光达到饱和。这与文献[1] 的实验结果相一致。图 4 中 P_3 、 P_4 两曲线对应弯曲探头, 弯曲半径为 20 mm, 探头长度分别为 8 mm 和 16 mm。与平直探头相比, 低温处输出光功率随温度变化缓慢, 当温度增加到使 $n_{2t} = n_2$ 时, 输出功率并未达到饱和, 而是随温度继续增加。

理论模型正确与否, 须由实验检验。图 5 为实验装置示意图, 所用光源为发光二极管。为了消除光源不稳定的影响, 采用双通道。也就是调制光波同时耦合到两路光纤, 信号通道经温敏探头携带温度信息进入 PIN 光电管, 而参考通道直接进入另一个 PIN 光电管。电子开关控制两路信号相继进行放大。实际测量的是两路信号的比值。

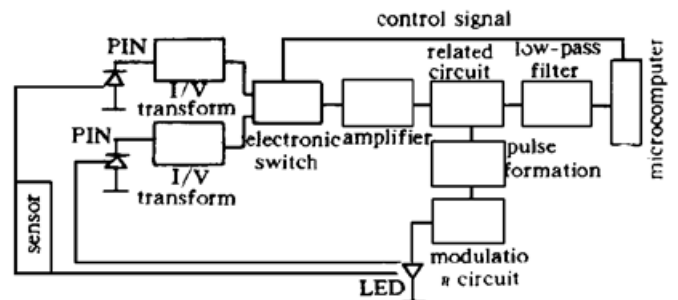
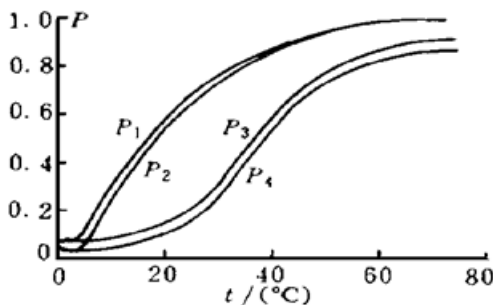


Fig. 4 Relationship between output optical power and temperature

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental system

为了验证理论的正确性, 实验用参数已知的光纤和折射率可准确测量的温敏介质制作温度传感头。所用光纤的参数为: 纤芯折射率 $n_1 = 1.490$, 包层折射率 $n_2 = 1.450$, 纤芯直径为 $100 \mu\text{m}$ 。图 6 为 1 号探头的光功率对温度的曲线。1 号探头的参数为: $L = 30 \text{ mm}$, $R = 10 \text{ mm}$, $n_{2t} = 1.4730 - 0.00045(t - 27)$ 。

图 7 为 2 号探头的光功率对温度的曲线。2 号探头的参数为 $L = 10 \text{ mm}$, $R = 8 \text{ mm}$, $n_{2t} = 1.4680 - 0.00035(t - 20)$ 。

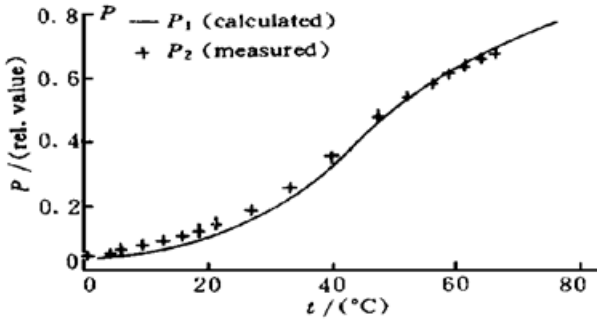


Fig. 6 Optical power as a function of temperature for No. 1 sensor

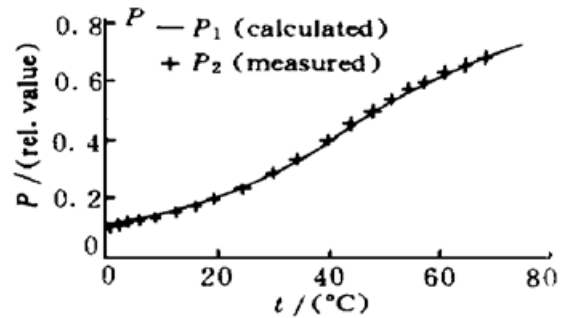


Fig. 7 Optical power as a function of temperature for No. 2 sensor

由图 6 和图 7 可见, 理论计算与实验符合得很好。需要说明的是, 图 6、图 7 中的光功率是相对值, 即认为某一温度下, 理论值与实验值相等, 此点为参考点。参考点的选择以使理论曲线与实验结果整体偏差最小为原则。

参 考 文 献

- [1] 潘应天等, 折射率温度敏感式医用光纤温度传感器的研究. 红外研究, 1990, 9(1): 73~ 79
- [2] Edmundo A. Soares *et al.*, Simple theory for a temperature sensor. *Proc. SPIE*, 1992, 1795: 236~ 239
- [3] 沈为民等, 油罐测温用光纤温度传感器系统的研究. 光电子·激光, 1997, 8(4): 254~ 256

Theoretical Model for Optical Fiber Temperature Sensor with Refractive Index Sensitive to Temperature

Shen Weimin Zhang Yi

(*Institute of Opto-Electron Technology, China Institute of Metrology, Hangzhou 310034*)

(Received 20 February 1998; revised 26 August 1998)

Abstract We propose a simple theory for the optical fiber temperature sensor with an index of refraction highly sensitive to temperature, including influences of both meridional rays and skew rays and discuss bending loss of multimode fibers. The results obtained agree very well with the experimental ones.

Key words optical fiber temperature sensor, multimode fibers, ray theory.