

阶跃折射率塑料光纤的弯曲损耗分析

孔祥泽, 李蔚

(北京邮电大学电信工程学院, 北京 100876)

摘要: 本文利用几何光学的方法分析了阶跃折射率塑料光纤的弯曲损耗。阶跃折射率光纤中的辐射损耗发生在光线反射点, 可以由隧道光和折射光的功率透射系数 T 推导出弯曲损耗表达式。数值仿真显示阶跃折射率塑料光纤在弯曲半径小于 20 mm 时有较大的损耗。最后由弯曲损耗曲线得出阶跃折射率塑料光纤测量中所用扰模器的最佳尺寸。

关键词: 光学; 塑料光纤弯曲损耗; 阶跃折射率; 隧道光线; 功率透射系数; 扰模器

中图分类号: 043 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)08-0838-6

Analysis of step-index plastic optical fiber bending loss

KONG Xiangze, LI Wei

(School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract: This paper analyses the bending loss of step-index plastic optical fiber (POF) using geometric approach. The radiation loss only occurs at reflection points, and can be described by the power-transmission coefficient T which is different for tunnelling and refracting rays. A numerical simulation shows that the bending loss of step-index POF becomes larger as the curve radius is less than 20 mm. This result is helpful to design a mode scrambler which is used in step-index POF measurements.

Key words: optical; plastic optical fiber bending loss; step-index; tunnelling ray; power-transmission coefficient; mode scrambler

0 引言

塑料光纤 (POF) 又称聚合物光纤, 具有纤芯直径大、重量轻、在可见光区有低损耗窗口等优点, 是一种有较好应用前景的短距离传输媒质。相对于纤芯的尺寸来说, 塑料光纤可弯曲的程度较大, 容易产生较大的辐射损耗。因此研究塑料光纤的弯曲损耗对塑料光纤的实际应用具有重大意义, 同时对塑料光纤扰模器^[1]的制作也具有指导作用。

光沿光纤的传输可以严格地用麦克斯韦方程来描述。然而, 如果在某些区域内, 折射率处于与光波长可比拟范围只有很小变化的情况下, 则可用经典几何光学的方法来近似描述^[2]。用于通信的多模光纤, 尤其是大纤芯半径的塑料光纤都符合这个条件, 因而采用光线追迹的方法研究多模塑料光纤内的一些物理现象是简便可行的。但如果忽略了波动效应, 在研究光纤弯曲引起的辐射损耗 (这种效应随光的行进距离呈指数积累) 等效应时, 便会遇到困难。于是在经典几何光学中纳入一种波动效应来研究多模光纤的弯曲损耗。基本思路是: 保留几何光学的光线轨迹, 采用功率衰减系数来描述光线轨迹的功率衰减。

本文先分析得出直阶跃折射率光纤的隧道光线透射系数, 然后将直光纤的两个不变量与弯曲平板波导相对应, 推出弯曲阶跃折射率平板波导的隧道光线透射系数, 进而推导出阶跃折射率光纤的弯曲损耗表达式。根据表达式数值仿真了不同半径下的弯曲损耗曲线, 最后由弯曲损耗曲线得出阶跃塑料

作者简介: 孔祥泽 (1980—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 塑料光纤通信

通信联系人: 李蔚, 教授, 主要研究方向: 塑料光纤接入网, E-mail: kongzeze@bupt.cn

光纤扰模器的最佳尺寸。

1 相关参量及波导中三种光线的划分

1.1 归一化频率及传导模数

阶跃折射率光纤的纤芯和包层的折射率都是常数，分别设为 n_1 和 n_2 。定义归一化频率为^[3]

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1)$$

其中， a 为纤芯半径； λ 为光波波长。

光纤中的传导模数 M 由归一化频率决定，计算公式为 $M \approx V^2/2$ 。

取阶跃折射率塑料光纤的一般参数 $n_1=1.491$, $n_2=1.405$, 半径 a 为 0.5 mm, 光波长为 650 nm, 可计算出 $V=2\ 417$, M 约为 292 万, 传导模数量比玻璃光纤大很多。

1.2 三种光线划分

如图 1 所示，入射光线在纤芯边界的 P 点处反射，光线与光纤轴向间的夹角为 θ_z ，OP 与 PM 在纤芯的横截面上，入射光线和反射光线与法线 PO 间的夹角为 α ，反射光线在光纤横截面上的投影线 PM 与横截面在反射点的切线 PT 间的夹角为 θ_ϕ ， θ_ϕ 表示光纤偏斜的程度， $\theta_\phi = \pi/2$ 时为子午光线。三个方向角之间的关系为： $\cos\alpha = \sin\theta_z \sin\theta_\phi$ 。一特定光线路径上各处的 θ_z 和 θ_ϕ 都是常数。

光波导中的光可分为束缚光和泄露光，若不考虑吸收损耗，束缚光可在波导中无损耗传输，而泄露光在传输过程中不断向外辐射能量。在平板光波导中，泄露光只有折射光，通过折射损耗能量，满足费涅尔 (Fresnel) 定理。对于圆光纤波导，泄露光可分为折射光和隧道光，其中隧道光是由纤芯界面弯曲所产生的^[2]。阶跃折射率光纤的光线类型可按角度 θ_z 、 θ_ϕ 和 α 的值划分，如图 2 所示。

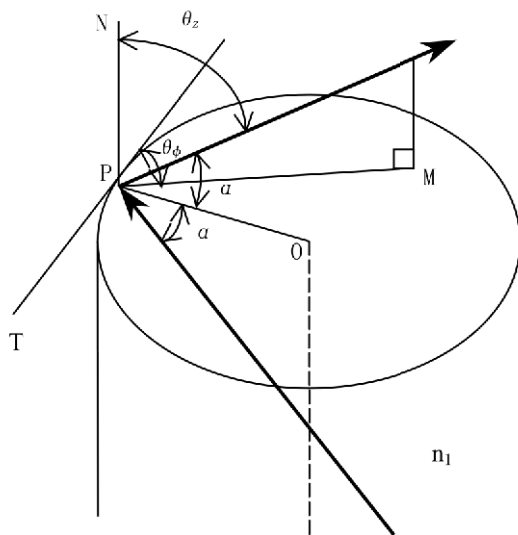


图 1 光线在直阶跃折射率光纤中的轨迹

Fig.1 The track of ray in direct step-index optical fiber

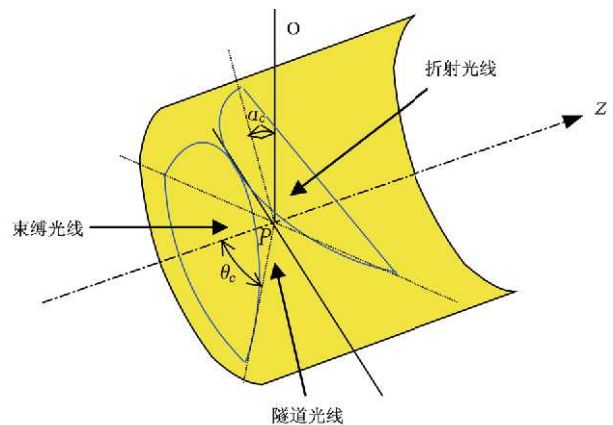


图 2 按照界面处的入射角对光线分类

Fig.2 Classification of rays by the angles at the interface

束缚光线： $0 \leq \theta_z < \theta_c$ ；折射光线： $0 \leq \alpha < \alpha_c$ ；隧道光线：同时满足 $\theta_c \leq \theta_z \leq \pi/2$ 和 $\alpha_c \leq \alpha \leq \pi/2$ 。其中， α_c 和 θ_c 是费涅尔定理所定义的临界角，满足

$$\sin\alpha_c = n_2/n_1 = \cos\theta_c \quad (2)$$

定义两个不变量

$$\beta = n_1 \cos\theta_z \quad (3)$$

$$l = n_1 \sin\theta_z \cos\theta_\phi \quad (4)$$

三种光线又可按如下不等式分类:

束缚光线: $n_2 < \beta \leq n_1$; 折射光线: $0 \leq \beta^2 + l^2 < n_2^2$; 隧道光线: $n_2^2 - l^2 \leq \beta^2 \leq n_2^2$ 。

当光纤受光源照射时, 束缚光和泄露光都将被激励, 一般来说折射光线的所有功率在光纤很短的距离上很快地损失掉, 在光纤较长的距离上能对总功率产生重要影响的光线是隧道光线, 尤其是当光纤归一化频率参量 V 足够大时, 隧道光线可以有任意低的衰减。

2 阶跃折射率塑料光纤弯曲损耗分析

2.1 直阶跃光纤中隧道光线的辐射损耗分析

引入功率衰减系数 γ , 光传输距离 z 后的功率 $P(z)$ 与初始功率 $P(0)$ 的关系为

$$P(z) = P(0) \exp(-\gamma z) \quad (5)$$

并且有^[4]

$$\gamma = T/z_p \quad (6)$$

其中, T 为透射系数, $T = 1 - \text{反射光功率}/\text{入射光功率}$; z_p 为相邻反射点间光线半周期, $z_p = 2a/\tan\theta_z$ 。

阶跃折射率光纤的透射系数表示式为^[5]

$$T = |T_f| \exp\left\{-2k \int_a^{r_{rad}} \left(\beta^2 + l^2 \frac{a^2}{x^2} - n_2^2\right)^{1/2} dx\right\} \quad (7)$$

其中, r_{rad} 为辐射散焦面半径; T_f 为经典费涅尔透射系数的解析延拓, 表达式分别如下

$$r_{rad} = al/(n_2^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$|T_f| = \frac{4}{n_1^2 - n_2^2} (n_1^2 - \beta^2 - l^2)^{1/2} (\beta^2 + l^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (9)$$

对式 (3) 进行积分后透射系数可表示为

$$T = |T_f| \exp\left\{-2kal[\ln\{p + (p^2 - 1)^{1/2}\} - (p^2 - 1)^{1/2}/p]\right\} \quad (10)$$

其中, $p = r_{rad}/a$ 。 (11)

对于辐射散焦面非常接近界面的光线, 也就是接近临界角余角 θ_c 的光线来说, 式 (10) 的计算结果不够精确。

2.2 弯曲阶跃平板波导的弯曲损耗分析

如图 3 所示, 假设波导的折射率不受弯曲的影响, 光线路径应为锯齿形或多边形。可以把弯曲波导沿平行于纸面切下的横截面与直光纤的横向横截面相对应看作一个空心的“粗光纤”, 内半径和外半径分别为 $R-a$ 和 $R+a$ 。对于每一光线来说, 此时的纵向不变量 β 为 0, 类似于式 (4), 并将 $\theta_z = \pi/2$ 代入, 可得表示光线偏斜程度的不变量表达式

$$l_b = [r/(R+a)]n_1 \cos\theta_\phi(r) \quad (12)$$

其中, r 是以弯曲波导的曲率中心为中心的圆柱半径; $\theta_\phi(r)$ 为光线与弯曲圆周向间的夹角。

将 $\beta=0$, $l=l_b$, 半径为 $R+a$ 代入式 (8) 可得辐射散焦面半径表达式为

$$r_{rad} = (R+a)l_b/n_2 \quad (13)$$

这里可把 l_b 与直光纤的不变量 β 相对应，可得进入弯曲波导的束缚光线必须满足

$$n_2 < n_1 \cos\theta_\phi(r) \leq n_1$$

由于 r 必须在 $R-a$ 和 $R+a$ 之间，于是 l_b 的范围应为满足 $n_2(R-a)/(R+a) \leq l_b \leq n_1$ 的有限值，所以 r_{rad} 也一定为有限值。由以上分析可知弯曲波导中每一条光线都是泄露光线（束缚光线为 $r_{rad} \rightarrow \infty$ 的极限情况）。隧道光线的 $r_{rad} > R+a$ ，而折射光线的 $r_{rad} = R+a$ ，在轻微弯曲波导内，光线几乎都为隧道光线。

计算弯曲波导内的隧道效应衰减时采用直光纤中的计算方法，不过要用角位移 ϕ 代替 z ，用 $P(\phi)$ 表示角度 ϕ 处的功率， γ 表示衰减系数，则有公式

$$P(\phi) = P(0)\exp(-\gamma\phi) \quad (14)$$

其中， $P(0)$ 是弯曲之前直波导中的束缚光功率。

定义 ϕ_p 为相邻反射点之间的角度，如图 3 所示。则有每一光线的衰减系数为

$$\gamma = T/\phi_p \quad (15)$$

弯曲段中角度 ϕ 处的光线总功率 $P_t(\phi)$ 可由如下公式求得

$$P_t(\phi) = P(0) \int_{R-a}^{R+a} dr \int_{-\theta_c}^{\theta_c} \exp(-\gamma\phi) d\theta_z \quad (16)$$

其中， θ_c 为临界角，由式 (2) 确定。

弯曲阶跃折射率平板波导中的光线分为两类，如图 3 所示，路径 I 交替地在内界面和外界面反射，而路径 II 只在外界面反射，不管哪一类光线，不变量 l_b 都可简化为

$$l_b = n_1 \cos\theta_\phi = [(R-a)/(R+a)]n_1 \cos\theta'_\phi \quad (17)$$

其中， θ_ϕ 和 θ'_ϕ 分别为光线路径与外界面切线和内界面切线之间的夹角。

光线正好与内界面相切时为临界情况，此时 $\theta'_\phi = 0$ ，则 $\cos\theta_\phi = (R-a)/(R+a)$ ，因此路径 II 的光线应满足 $\cos\theta_\phi > (R-a)/(R+a)$ ，实际上当 R/a 较大时，只有少量 θ_ϕ 接近 0 的光线满足这一条件。

隧道光线可认为只在外界面损耗功率，内界面由于是凸面不损耗功率。为描述隧道损耗，将 $\beta=0$ 和 $l=l_b=n_1 \cos\theta_\phi$ 代入式 (10) 求得功率透射系数为

$$T = |T_f| \exp\{-2kan_1 \cos\theta_\phi [\ln\{p + (p^2 - 1)^{1/2}\} - (p^2 - 1)^{1/2}/p]\} \quad (18)$$

其中， $|T_f| = \frac{4}{n_1^2 - n_2^2} (n_1^2 - n_2^2 \cos^2\theta_\phi)^{1/2} (n_1^2 \cos^2\theta_\phi - n_2^2)^{1/2}$ ， $p = r_{rad}/(R+a)$ ， $r_{rad} = (R+a)(n_1/n_2) \cos\theta_\phi$ 。

由图 3 中的几何关系可知路径 I 和路径 II 的 ϕ_p 分别为：I： $\phi_p = 2(\theta_\phi - \theta'_\phi)$ ；II： $\phi_p = 2\theta_\phi$ 。

在 $R \gg a$ 条件下，有 $\theta_\phi - \theta'_\phi \approx 2a/R\theta_\phi$ ，可得 I： $\phi_p \approx 4a/P\theta_\phi$ 。由路径 I 过渡到路径 II 发生在

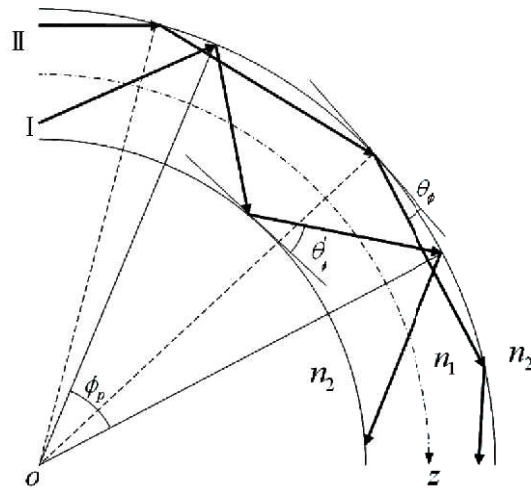


图 3 弯曲平板波导中的两种光线轨迹
Fig. 3 The tracks of two kinds of ray in bending planar waveguide

$\theta_p \approx \sqrt{2a/R}$ 处。在 $R \gg a$ 条件下，可认为 $\theta_p \approx \theta_c$ 。

2.3 阶跃折射率塑料光纤弯曲损耗计算

弯曲光纤的损耗计算较为复杂，这里采用前面所得的隧道光线透射系数并结合经典费涅尔透射系数^[6]作为参数来计算光纤中的弯曲损耗，并定性分析阶跃折射率塑料光纤的弯曲损耗情况。

弯曲光线中当 $\theta_p \leq \theta_c$ 时，损耗为隧道损耗，透射系数用式 (18) 表示。当 $\theta_p > \theta_c$ 时，损耗为折射损耗，透射系数为

$$T' = \frac{4\sin\theta_p(\sin^2\theta_p - \sin^2\theta_c)^{1/2}}{\{\sin\theta_p + (\sin^2\theta_p - \sin^2\theta_c)^{1/2}\}^2}$$

假设光纤弯曲开始处的各角度光线功率为均匀分布，即 $P(0)$ 为常数，则弯曲损耗的计算表达式为

$$\frac{P(\phi)}{P(0)} = \frac{\int_0^{\sqrt{2a/R}} \exp(-T\phi/2\theta_p) d\theta_p + \int_{\sqrt{2a/R}}^{\theta_c} \exp(-TR\theta_p\phi/4a) d\theta_p + \int_{\theta_c}^{\pi/2} \exp(-T'R\phi/4a) d\theta_p}{\pi/2} \quad (19)$$

根据阶跃折射率塑料光纤的一般参数对上式数值仿真可做出图 4，从 $z/R=10$ 处开始绘制曲线。如图 4 所示，光纤弯曲部分的初始阶段由于折射光线的迅速衰减而使曲线下降很快，随后趋于平缓。弯曲损耗随弯曲半径的增大而减小，半径为 10 mm 时衰减很快，半径为 20 mm 及以上时衰减较小。

3 阶跃折射率塑料光纤扰模器制作

在进行多模光纤损耗、带宽等的测量时，为满足注入条件，达到测试标准的要求，需要使用扰模器。扰模器一般由将光纤缠绕其上的若干统一直径的圆柱体构成，圆柱体的直径对扰模器的性能有决定性影响。

根据前面情况分析，并由图 4 中的曲线

可以得出，纤芯半径为 0.5 mm，数值孔径约为 0.5 mm 的阶跃折射率塑料光纤的扰模器半径尺寸为 20 mm 左右，既能很快滤除瞬态高阶模，又不至于插入损耗太大而影响测量注入功率，这与 JIS 6863 和 IEC 60794-1-1 Annex A 两个标准中所描述的圆柱直径为 42 mm 的阶跃折射率塑料光纤扰模器相吻合。同时还可看出当 $z/R > 60$ 即光纤绕圆柱缠绕 10 圈以上时可较好滤除瞬态模。

4 结论

弯曲光纤中的所有光都为泄露光，泄露光可根据角度不同分为折射光和隧道光，折射光能量损失很快，而隧道光可传输较长的距离。弯曲部分在初始阶段由于折射光的迅速衰减而使总的光功率损耗很快，折射光滤除后便剩下损耗较慢的隧道光。光纤弯曲半径较小时折射光所占的比重较大，因而弯曲损耗较大，在实际的短距离通信应用中应避免塑料光纤产生较小半径的弯曲。

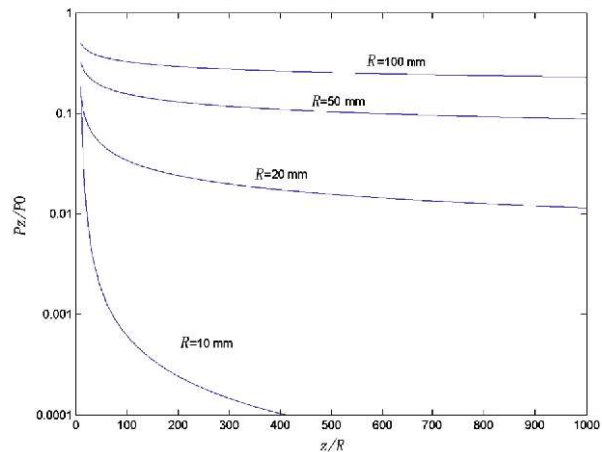


图 4 不同弯曲半径的弯曲损耗曲线
 $n_1=1.491, n_2=1.405$, 纤芯半径 a 为 0.5 mm
Fig. 4 The bending loss curves for different bending radiuses
 $n_1=1.491, n_2=1.405$, the radius a of core is 0.5 mm

[参考文献] (References)

- [1] ARRUE J, ALDABALDETRERU G, DURANA G, et al. Design of mode scramblers for step-index and graded-index plastic optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(3): 1253~1260.
- [2] SNYDER A W. Leaky-ray theory of optical waveguides of circular cross-section[J]. *Applied Physics A*, 1974, 4(4): 273~298.
- [3] 顾畹仪, 李国瑞. 光纤通信系统[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.
GU W Y, LI G R. Optical communication system[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1999. (in Chinese)
- [4] SNYDER A W, MITCHELL D J. Generalized Fresnel's laws for determining radiation loss from optical waveguides and curved dielectric structures[J]. *Optik*, 1974, 40(4): 438~459.
- [5] LOVE J D, WINKLER C. Attenuation and tunnelling coefficients for leaky rays in multilayered optical waveguide [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(12): 1627~1633.
- [6] LOVE J D, WINKLER C. Refracting leaky rays in graded-index fibers[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(14): 2205~2208.