材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240721001

少模光纤弯曲特性分析

王健健[1,2,3]，汤　锐[1*]，尚秋峰[1,2,3]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 少模光纤作为实现模式分复用的关键技术，已成为提升光纤通信传输容量的研究热点。文章通过有限元建模方法，分析研究了普通阶跃少模光纤、环芯少模光纤以及椭圆型环芯少模光纤的弯曲半径、纤芯半径对其弯曲特性的影响。通过对比分析有效折射率、弯曲损耗以及有效模场面积三个性能指标，得出结论：弯曲对于三种少模光纤各阶模式的有效折射率影响较小；随着弯曲半径的增大，少模光纤的弯曲损耗呈下降趋势，而有效模场面积呈增加趋势；环芯少模光纤由于其特殊的纤芯结构，表现出更高的折射率差，椭圆型环芯少模光纤各模式间的重叠最小。本研究不仅为对少模光纤的结构设计及优化提供参考，还为进一步探究少模光纤在高质量的信号传输中的应用奠定理论基础。

关键词： 模分复用；少模光纤；有效折射率；弯曲损耗；模场面积

中图分类号： TN929　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0299－08

Bending Characteristics of A Few-Mode Fiber

WANG Jianjian[1,2,3], TANG Rui[1], SHANG Qiufeng[1,2,3]

(1. Department of Electronic and Communications Engineering; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology; 3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: To improve the transmission capacity of optical fiber communication, few-mode fibers that can realize mode division multiplexing have become a popular research topic, where the analysis of their bending characteristics is particularly significant. In this paper, the effects of bending radius and core radius on the bending characteristics of ordinary step few-mode fibers, ring-core few-mode fibers, and elliptical ring-core few-mode fibers are analyzed using finite element modeling. Through the comparative analysis of the three performance indexes (effective refractive index, bending loss, and effective mode field area), bending loss was determined to have less influence on the effective refractive index of the three types of few-mode fibers in each order mode. With the increase in bending radius, the bending loss of the few-mode fiber tended to decrease, while the effective mode field area tended to increase. The ring-core few-mode fiber had a higher refractive index difference owing to the special core structure, and the overlap between modes of elliptical ring-core few-mode fiber was minimal. This research provides a useful reference for the structural design and optimization of few-mode fibers as well as a theoretical basis for further research on the use of few-mode fibers to achieve high-quality signal transmission.

收稿日期：2024－07－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(62205105,62071181)；河北省省级科技计划项目(SZX2020034).

*通信作者：汤　锐

Key words: mode division multiplexing; few-mode fibers; effective refractive index; bending loss; mode field area

0 引言

从20世纪80年代起，光纤通信领域对光纤传输容量的需求日益剧增，而传统单模通信光纤的容量正逐渐逼近其理论极限[1-3]。尽管多模光纤因其支持更多的传输模式而在理论上传输容量具有较大优势，但随着光纤中传输模式数量增多，光纤中的模式间色散及各种非线性效应亦会随之加剧[4-5]。相比之下，少模光纤支持的传输模式数量在单模光纤和多模光纤之间，同时各阶模式之间相互正交且干扰较小，因此能够实现模分复用技术的少模光纤成为增加系统传输容量的更优选择。然而，在实际工程应用的铺设安装过程中，少模光纤不可避免地会发生弯曲，而其中各阶模式的弯曲特性不尽相同。因此，研究少模光纤各阶模式的弯曲特性对提高光纤通信质量具有重要意义。

1976年，Marcuse[6]首次提出单模光纤的弯曲损耗计算方法，对弯曲阶跃折射率光纤的弯曲损耗进行了理论评估；2005年，Sculze等[7]从理论和实验两方面研究了标准单模光纤的宏弯损耗，所提出的方法适用于普通阶跃少模光纤弯曲损耗，但不适用于当前复杂结构的少模光纤；2017年，Zhao等[8]利用中央圆形气孔和环形椭圆环芯设计出一种支持偏振保持的少模光纤，该结构能够有效控制光纤的弯曲损耗，但仅验证了该结构双折射特性及保偏性能，并未涉及光纤各阶模式弯曲损耗的特点；2018年，Zhang等[9]提出一种纤芯具有高折射率环的M型光纤，该光纤支持五个LP模式的稳定传输，通过在包层中引入沟槽的方法降低了弯曲损耗。2022年，薛宇勃等[10]提出一种空气孔辅助型偏振保持少模光纤，在少模光纤中引入椭圆型空气孔，该结构使得所有相邻模式之间的有效折射率差都高于1×10^{-4}，实现了模式的偏振保持传输。2023年，刘亚男等[11]提出一种具有同心圆形应力区的熊猫型保偏少模光纤结构，通过引入低折射率应力区，显著提高了高阶模式之间有效折射率差。

本文对三种具有代表性的少模光纤——普通阶跃少模光纤、环芯少模光纤以及椭圆型环芯少模光纤的弯曲特性进行研究。利用有限元分析软件，研究不同类型少模光纤的弯曲半径、纤芯半径（或纤芯间隔、椭圆率）对其弯曲特性的影响。本研究为少模光纤的结构设计及优化提供有益的参考，并为其在高质量信号传输中的应用奠定了理论基础。

1 少模光纤的模式特性

1.1 有限元分析法

利用COMSOL Multiphysics软件进行光纤结构仿真和模式求解，其求解过程如图1所示。

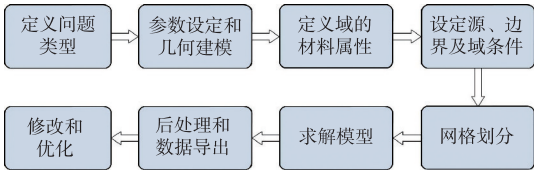


图1 COMSOL软件模式求解过程

在有限元分析方法中，由标量波动方程来分析传输模式的性质。该波动方程为：

$$\nabla^2\Phi+k_0^2[n^2(x,y)-n_{\mathrm{eff}}^2]\Phi=0 \tag{1}$$

式中，$k_0=\dfrac{2\pi a}{\lambda}$是真空中的波数，$a$是纤芯半径，$\lambda$是波长，$n_{\mathrm{eff}}$是有效折射率，$n(x,y)$是光纤截面的折射率分布。给定光纤结构和折射率分布参数，根据公式(1)就能唯一确定$n(x,y)$，从而计算出n_{eff}。采用有限元方法分析研究少模光纤各阶模式的电场分布，建立有效折射率、弯曲损耗及有效模场面积与弯曲半径和纤芯半径的关系，进而研究少模光纤各阶模式的弯曲特性。

1.2 弯曲损耗

光纤中的弯曲损耗通常分为微弯损耗和宏弯损耗，本研究的重点是宏弯损耗。当光纤沿y轴正方向弯曲时，借助等效折射率变换，将弯曲光纤等效为折射率随弯曲半径变化的直光纤进行分析，则弯曲光纤横截面的折射率等效为[12]：

$$n_1(x,y)=n_0(x,y)\exp(y/R)\approx n_0(x,y)(1+y/R) \tag{2}$$

式中，$n_0(x,y)$为直光纤的折射率分布，$n_1(x,y)$为弯曲光纤的等效折射率分布，R为弯曲半径。光纤的弯曲损耗α_{b}与光纤模式有效折射率虚部之间的关系为[13-14]：

$$L=\frac{20}{\ln 10}\frac{2\pi}{\lambda}\mathrm{Im}(n_{\mathrm{eff}}) \tag{3}$$

式中，Im(n_{eff})为有效模式折射率的虚部。

1.3　有效模场面积

除弯曲损耗外，模式有效模场面积也是衡量少模光纤特性的指标之一，其含义是在光纤中传输的光信号的模场分布所占的实际面积大小，较大的有效模场面积有利于减弱光纤的非线性效应，同时也能减小热效应引发的不利影响。有效模场面积A_{eff}的表达式为[15]：

$$A_{\mathrm{eff}}=\frac{\left(\iint_{-\infty}^{+\infty}|E|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right)^2}{\iint_{-\infty}^{+\infty}|E|^4\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{4}$$

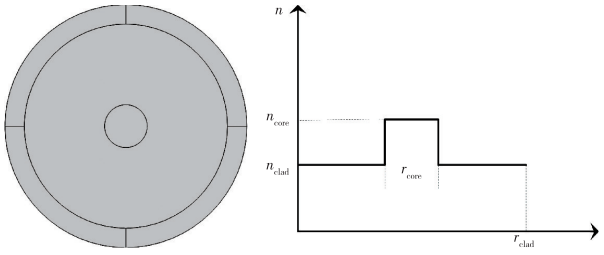
式中，E为模式的横向电场分布。由公式(4)可知，当光纤中传播的模式离截止条件较远时，纤芯区域几乎被模式的光场完全填满。在这种情况下，模式的有效面积与纤芯区域成正比。

2　有限元仿真及分析

本研究建立了三种少模光纤的数值模型，采用有限元法仿真分析了三种少模光纤不同模式的声光特性，以及有效模式折射率、有效模场面积和弯曲损耗等参数。

2.1　普通阶跃少模光纤

阶跃少模光纤结构如图 2 所示。



（a）横截面　　（b）折射率分布

图 2　阶跃少模光纤结构示意图

普通阶跃折射率少模光纤的结构包括中心纤芯和包层，其包层的折射率n_{clad}略低于中心纤芯的折射率n_{core}，这种差异使得光纤在光传输过程中能够展现出独特的光学特性。

仿真中，设置包层半径r_{clad}=62.5 μm，纤芯折射率n_{core}=1.461，包层折射率n_{clad}=1.456 5，在包层中添加了 10 μm 的完美匹配层来吸收向外辐射的光功率谱，并在边界设置了散射边界条件。以阶跃少模光纤的纤芯半径作为自变量进行仿真分析，其传输模式的有效折射率n_{eff}与纤芯半径a的关系如图 3 所示。

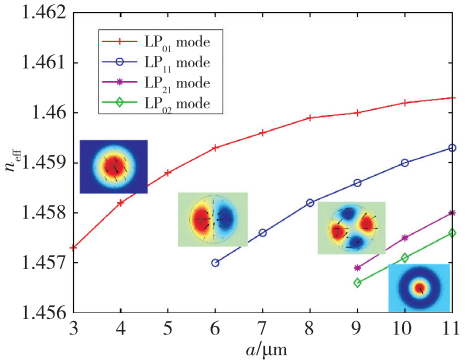
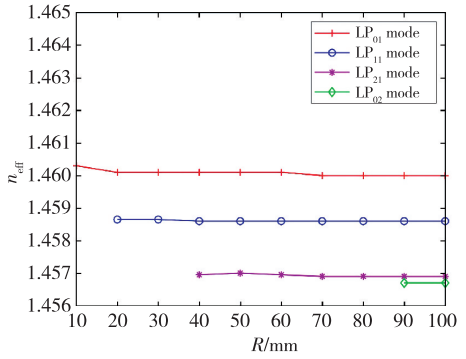
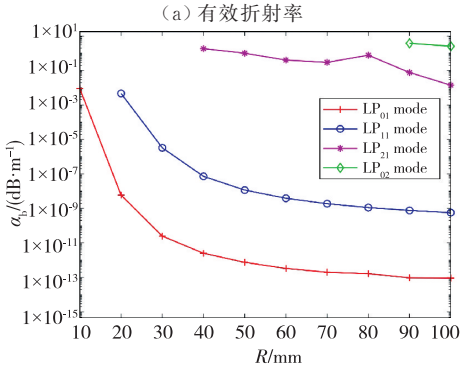


图 3　阶跃少模光纤传输模式的有效折射率与纤芯半径的关系

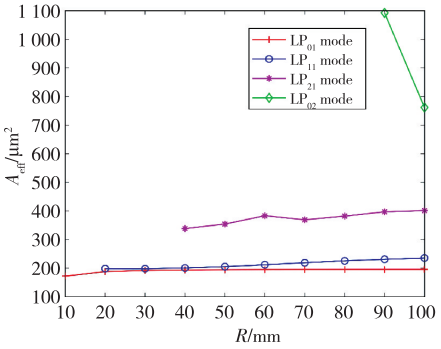
从图 3 所示的曲线关系可以看出，当纤芯半径为 3～9 μm 时，只能传输 LP_{01} 和 LP_{11} 两种模式。由少模光纤归一化截止频率 $V=\frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_{\mathrm{core}}^2-n_{\mathrm{clad}}^2}$ 可知，当纤芯和包层的折射率未发生变化时，归一化截止频率随着纤芯半径的增大而增大，因此少模光纤传输的模式数量在逐渐增加。当纤芯半径增大至 9 μm 时，少模光纤能够传输四种模式。本研究主要探讨少模光纤在弯曲情况下传输模式及其弯曲性能，故取纤芯半径为 9 μm，再分析弯曲半径R对阶跃少模光纤特性的影响，其结果如图 4 所示。



（a）有效折射率



（b）弯曲损耗

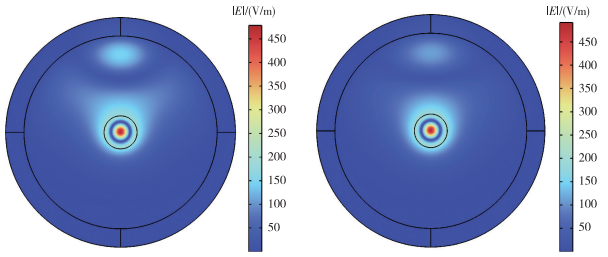


（c）有效模场面积

图4 弯曲半径对阶跃少模光纤特性的影响

由图4可知，当纤芯半径为9 μm且少模光纤为直光纤时，普通阶跃少模光纤能够传输4种模式，但是仿真结果表明只有当弯曲半径大于90 mm时，少模光纤才能够传输4种模式。这是因为光纤处于弯曲时，会对光的传播产生额外的影响，将会导致原本可以在非弯曲情况下能够传输的模式在弯曲区域变得无法传播。且弯曲引起的模式截止主要受弯曲半径及模式阶数的影响，当弯曲半径越小时，对光传播的影响也越大，更有可能发生模式截止；此外，由于高阶模式的能量分布更分散，在纤芯边缘部分的能量较多，更容易因弯曲而发生模式泄漏。由图4(a)可知，弯曲对各阶模式的有效折射率并无显著影响，在10～100 mm的范围内，各阶模式的有效折射率差均能保持在10^{-4}量级以上，其中LP_{21}和LP_{02}模式的有效折射率差最小，当弯曲半径为90 mm时，有效折射率差为2×10^{-4}；由图4(b)可知，当弯曲半径小于50 mm时，纤芯中LP_{01}模式较其余模式弯曲损耗增加更为明显，当弯曲半径为10 mm时弯曲损耗的最大值为0.088 dB/m，随着弯曲半径的增大，弯曲损耗逐渐趋于平稳；由图4(c)可知，随着弯曲半径的增大，有效模场面积也呈现出增大的趋势，其主要原因是弯曲半径的增大影响了光纤内部的折射率分布，导致光信号的分布范围扩大，从而增大了有效模场面积。而LP_{02}模式有效模场面积反而呈现出明显下降趋势的主要原因是当弯曲半径为90～100 mm时，LP_{02}模式有部分能量泄漏到纤芯外部，即包层存在LP_{02}模式的能量。LP_{02}模式在不同弯曲半径下的电场模如图5所示。

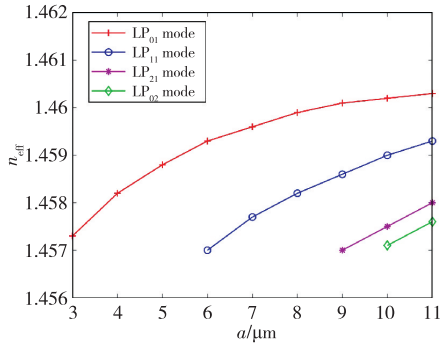
从图5可知LP_{02}模式的大部分能量被限制在纤芯内进行传播，仅有小部分能量泄漏至包层，因此仍属于导模，其有效模场面积大于其他模式，且随着弯曲半径的增大，泄漏能量变少，呈现出有效模场面积下降的趋势。



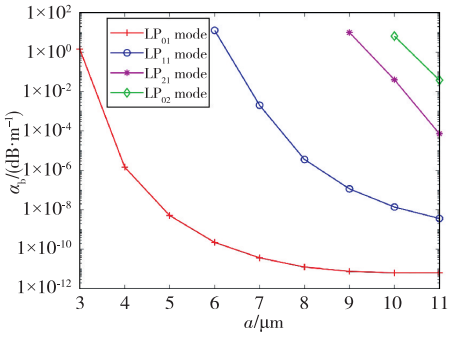
（a）弯曲半径为90 mm （b）弯曲半径为100 mm

图5 LP_{02}模式在不同弯曲半径下的电场模

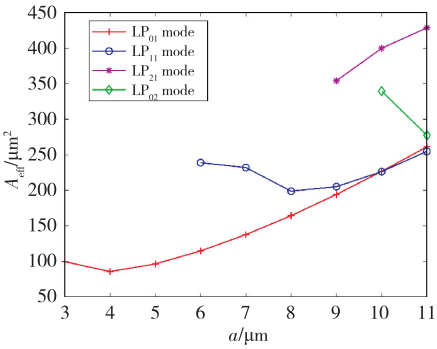
此外，当少模光纤处在弯曲状态下，不同的纤芯半径对光纤传输性能也会产生影响。当弯曲半径为50 mm时，不同纤芯半径a对阶跃少模光纤特性的影响如图6所示。



（a）有效折射率



（b）弯曲损耗



（c）有效模场面积

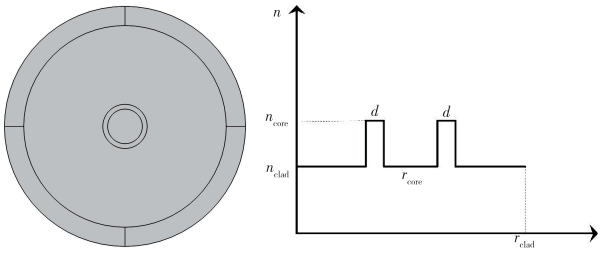
图6 纤芯半径对阶跃少模光纤特性的影响

对比图6(a)和图3可得，弯曲光纤与直光纤各

阶模式有效折射率未发生显著变化，证明了弯曲对各阶模式有效折射率不产生影响。纤芯半径为 9 μm 时，直光纤可传输 LP_{02} 模式；而对于弯曲半径为 50 mm 的弯曲光纤，纤芯半径为 10 μm 时才可以传输 LP_{02} 模式，再次证明弯曲引起的弯曲损耗使得 LP_{02} 高阶模式无法稳定传输。由图 6(b)和图 6(c)可知，随着纤芯半径的不断增大，各阶模式的弯曲损耗呈现明显的下降趋势，有效模场面积呈现增大趋势。此外，LP_{01} 模式的有效模场面积小于其他高阶模式，这表明光信号在传输过程中更容易集中在较小的区域内，从而减少了光信号在光纤中的散射，所以其弯曲损耗更低。

2.2　环芯少模光纤

环芯少模光纤结构如图 7 所示。



(a) 横截面　　(b) 折射率分布

图 7　环芯少模光纤结构示意图

仿真设置包层半径 r_{clad}=62.5 μm，中间纤芯半径 r_{core}=3.8 μm，纤芯折射率 n_{core}=1.459，包层折射率 n_{clad}=1.444，在包层中添加了 10 μm 的完美匹配层来吸收向外辐射的光功率谱，并在边界设置了散射边界条件。

以环芯少模光纤的纤芯间隔 d 作为自变量进行仿真分析，其传输模式的有效折射率与纤芯间隔的关系如图 8 所示。

由图 8 可知，随着纤芯间隔的增大，各阶模式的有效折射率也随之增大。当纤芯间隔 d=2.5 μm 时，环芯少模光纤能够传输 4 种模式，故设置纤芯间隔为 2.5 μm，研究弯曲半径 R 对环芯少模光纤特性的影响，其结果如图 9 所示。

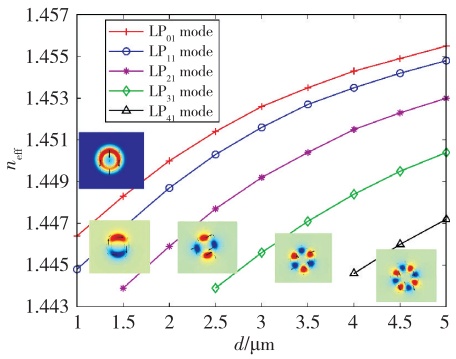
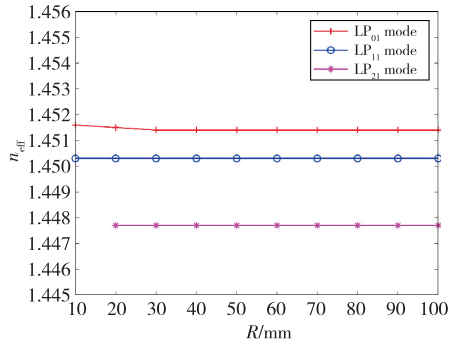
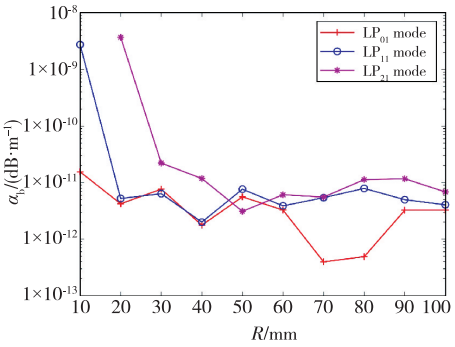


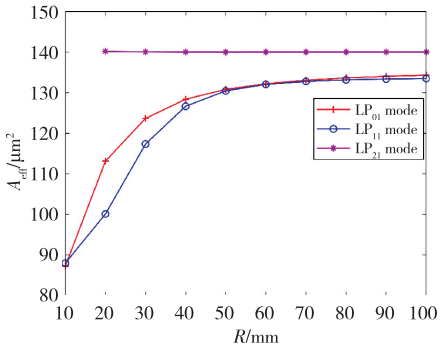
图 8　环芯少模光纤传输模式的有效折射率与纤芯间隔的关系



(a) 有效折射率



(b) 弯曲损耗



(c) 有效模场面积

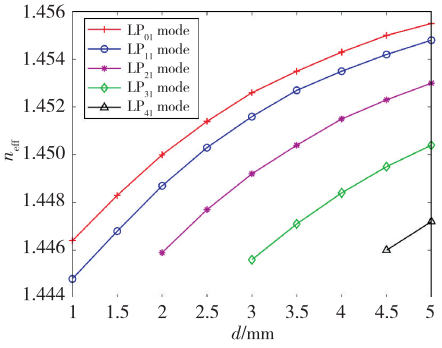
图 9　弯曲半径对环芯少模光纤特性的影响

由图 9(a)可知，当弯曲半径为 10～20 mm 时能有效传输 LP_{01} 和 LP_{11} 两种模式；当弯曲半径为 20～100 mm 时能够传输 LP_{01}，LP_{11} 和 LP_{21} 共 3 种模式。由图 9(b)可知，当弯曲半径从 100 mm 减小到 10 mm 时，LP_{01} 模式的弯曲损耗变化波动较小，维持在 1×10^{-11} dB/m 以下；高阶模式 LP_{11} 的弯曲损耗在弯曲半径为 20 mm 时急剧增加，高阶模式 LP_{21} 的弯曲损坏在弯曲半径为 30 mm 时急剧增加，之后均维持在 1×10^{-11} dB/m 左右。这表明高阶模式在传输过程中更容易受到弯曲的影响，在较大的弯曲半

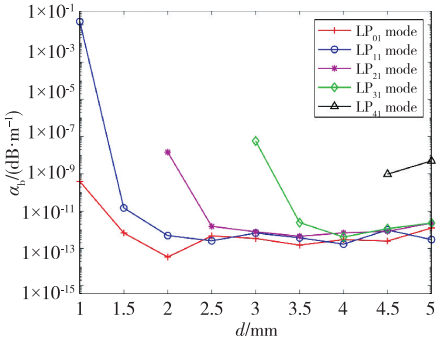
径下，光纤的损耗主要受限于材料的固有特性，包括光纤的吸收损耗和散射损耗等[16]。由图9(c)可知，随着弯曲半径的增大，各阶模式的有效模场面积也呈增大趋势并最终趋于平稳。相比于普通阶跃少模光纤，环芯少模光纤采用低折射率的纤芯和高折射率的环形相结合的结构，使其各阶模式具有较高的折射率差。当环芯少模光纤处于较小的弯曲半径时，任意两个模式的有效折射率差仍然能够保持足够大，使其弯曲损耗更小，有利于实现模式的稳定传输。

通过以上分析可知，纤芯间隔的不同表明环芯少模光纤能够传输光信号的结构发生改变。仿真设置弯曲半径为50 mm，分析不同纤芯间隔d对环芯少模光纤特性的影响，其结果如图10所示。

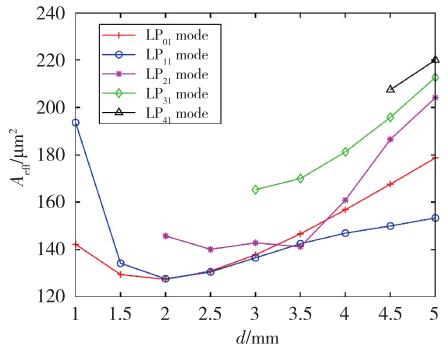
从图8和图10(a)的对比可知，无论光纤是否发生弯曲各阶模式的有效折射率变化趋势与3.1节的阶跃少模光纤相同，即光纤弯曲并不会对各阶模式的有效折射率产生显著影响。当纤芯间隔为3 μm、弯曲半径为50 mm时，环芯少模光纤中能够传输4种模式。由图10(b)和图10(c)可知，随着纤芯间隔的增加，各阶模式的弯曲损耗呈现下降趋势，并且维持在1×10^{-11} dB/m左右，而各阶模式的有效模场面积呈现增大趋势。



(a) 有效折射率



(b) 弯曲损耗

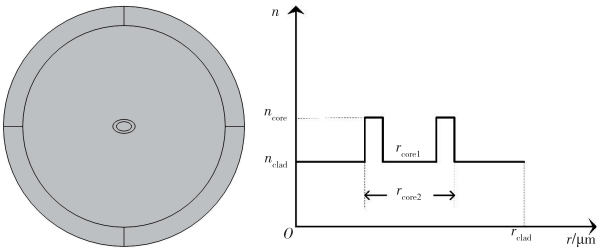


(c) 有效模场面积

图10 纤芯间隔对环芯少模光纤特性的影响

2.3 椭圆型环芯少模光纤

椭圆型环芯少模光纤的结构示意图如图11所示。仿真设置包层半径r_{clad}=62.5 μm，中间纤芯半径r_{core1}=2.42 μm，r_{core2}=3.61 μm，纤芯折射率n_{core}=1.474，包层折射率n_{clad}=1.444，在包层中添加了10 μm的完美匹配层来吸收向外辐射的光功率谱，并在边界设置了散射边界条件。



(a) 横截面 (b) 折射率分布

图11 椭圆型环芯少模光纤结构示意图

以椭圆型环芯少模光纤的椭圆率ρ为自变量进行仿真分析，其传输模式的有效折射率与椭圆率的关系如图12所示。

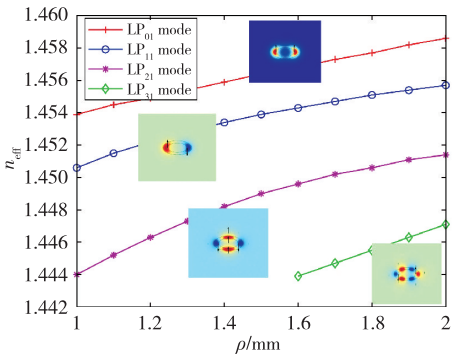
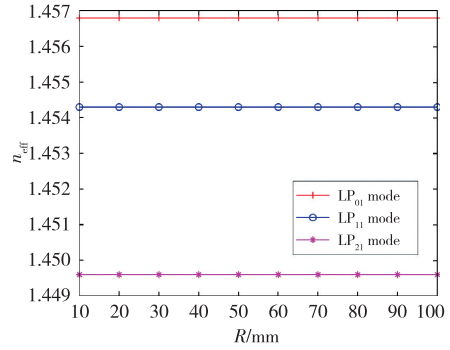


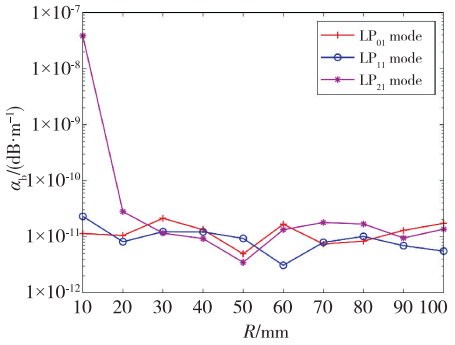
图12 椭圆型环芯少模光纤传输模式的有效折射率与椭圆率的关系

由图12可知，随着椭圆率的增大，各阶模式的有效折射率也随之增大。当椭圆率ρ=1.6时，环芯

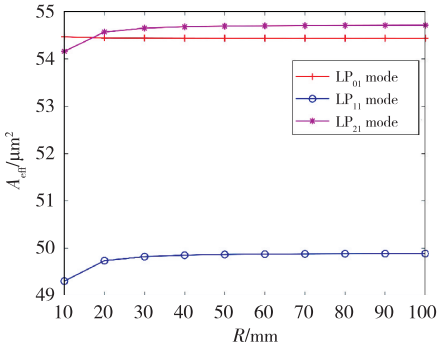
少模光纤能够传输 4 种模式。因此，仿真设置椭圆率为 1.6，研究不同弯曲半径 R 对椭圆型环芯少模光纤特性的影响，其结果如图 13 所示。



（a）有效折射率



（b）弯曲损耗



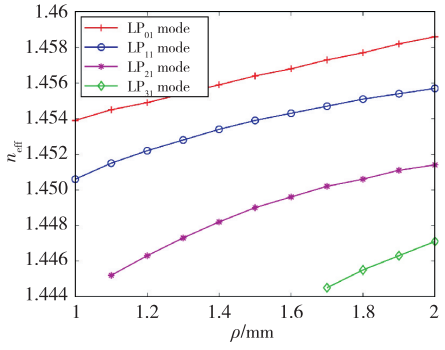
（c）有效模场面积

图 13　弯曲半径对椭圆型环芯少模光纤特性的影响

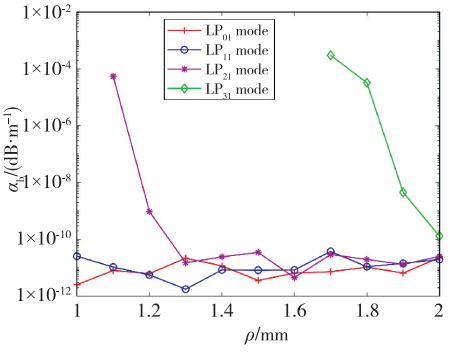
由图 13(a)可知，当弯曲半径为 10～100 mm 时，光纤能传输 3 种模式，且各阶模式有效折射率未发生改变。由图 13(b)可知，当弯曲半径从 100 mm 减小到 10 mm 时，LP_{01} 和 LP_{11} 模式的弯曲损耗变化不是特别明显，维持在 1×10^{-11} dB/m 以下，而 LP_{21} 模式的弯曲损耗在弯曲半径为 20 mm 时急剧增加，之后均维持在 1×10^{-11} dB/m 左右。由图 13(c)可知，随着弯曲半径的增大，各阶模式的有效模场面积也呈现增大趋势并最终趋于平稳。图 13 所得结论与图 9 所得结论基本一致。对比环芯少模光纤与椭圆型环芯少模光纤，后者各阶模式之间的有效折射率差更大，这会减少各阶模式之间的耦合，更容易实现单模式的稳定传输。

仿真设置弯曲半径为 50 mm，分析不同椭圆率 ρ 对椭圆型环芯少模光纤传输性能的影响，其结果如图 14 所示。

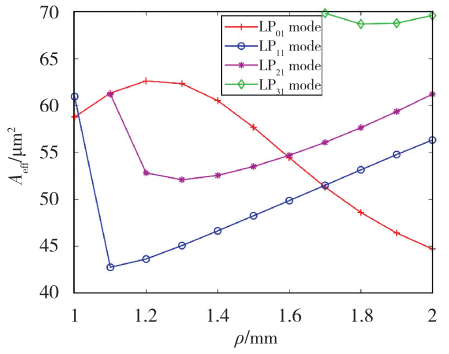
由图 12 和图 14(a)可知，光纤的弯曲对光纤的模式折射率并不会产生显著影响。当椭圆型的椭圆率为 1.7、弯曲半径为 50 mm 时，能够传输 4 种模式。由图 14(b)和图 14(c)可知，随着椭圆率的增大，各阶模式的弯曲损耗呈下降趋势，并且维持在 1×10^{-11} dB/m 左右，各阶模式的有效模场面积则呈增大趋势。



（a）有效折射率



（b）弯曲损耗



（c）有效模场面积

图 14　椭圆率对椭圆型环芯少模光纤特性的影响

3 结论

本文利用有限元分析软件成功构建普通阶跃少模光纤、环芯少模光纤和椭圆型环芯少模光纤三种光纤模型。对比分析在不同弯曲状态下,光纤内部各阶模式的声光特性,进而分析光纤的弯曲特性。结果表明,三种少模光纤各阶模式的有效折射率受弯曲影响较小。普通阶跃少模光纤结构简单,其模场面积和弯曲损耗会随着弯曲半径发生较大变化;环芯少模光纤采用低折射率纤芯和高折射率环形的结构,使其各阶模式具有较高的折射率差,能够降低光纤的损耗并提高光信号的传输效率;椭圆型环芯少模光纤则保留了环芯少模光纤的优点,并且椭圆型结构有助于减少不同模式之间的重叠,能够降低模式间的串扰。该研究为少模光纤结构设计和优化提供了有益的参考,为进一步研究利用少模光纤实现高质量的信号传输提供了理论基础。

参考文献:

[1] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 662-701.

[2] Li G, Bai N, Zhao N, et al. Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication[J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4): 413-487.

[3] 李 仑, 刘赛阳, 龚绎天, 等. 大带宽光信号探测技术研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(13): 9-25.
Li Lun, Liu Saiyang, Gong Yitian, et al. Research progress of ultra-large bandwidth optical signal measurement technology [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(13): 9-25.

[4] 介瑞敏, 肖 春, 刘 旭, 等. 拉曼分布式光纤温度传感:技术发展与应用综述[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 222-247.
Jie Ruimin, Xiao Chun, Liu Xu, et al. Raman distributed optical fiber temperature sensing: Review of technology and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 222-247.

[5] 郑兴娟, 任国斌, 黄 琳, 等. 少模光纤的弯曲损耗研究[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 166-173.
Zheng Xingjuan, Ren Guobin, Huang Lin, et al. Study on bending losses of few-mode optical fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(6): 166-173.

[6] Marcuse D. Field deformation and loss caused by curvature of optical fibers[J]. JOSA, 1976, 66(4): 311-320.

[7] Schulze C, Lorenz A, Flamm D, et al. Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3170-3181.

[8] Zhao J, Tang M, Oh K, et al. Polarization-maintaining few mode fiber composed of a central circular-hole and an elliptical-ring core[J]. Photonics Research, 2017, 5(3): 261-266.

[9] Zhang Y, Ren F, Fan X, et al. Design of weakly-coupled trench-assisted five-mode M-type fiber for short-haul communication in O band [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50: 1-16.

[10] 薛宇勃, 李海粟, 刘亚静, 等. 支持10个模式的空气孔辅助型偏振保持少模光纤[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 89-100.
Xue Yubo, Li Haisu, Liu Yajing, et al. Air hole-assisted polarization-maintaining few-mode fiber supporting 10 modes [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 89-100.

[11] 刘亚男, 颜 鑫, 袁学光, 等. 同心圆形应力区辅助的熊猫型保偏少模光纤[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 47-54.
Liu Yanan, Yan Xin, Yuan Xueguang, et al. Concentric-circular stress-applying region-assisted panda polarization-maintaining few-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(20): 47-54.

[12] 刘诗男, 宁提纲, 马绍朔, 等. 一种大模场沟槽辅助型扇形瓣状光纤的研究[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 203-210.
Liu Shinan, Ning Tigang, Ma Shaoshuo, et al. Trench-assisted fan-segmented cladding fiber with large mode area [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 203-210.

[13] Schermer R T, Cole J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 43 (10): 899-909.

[14] Cai M, Shi W, Lou Y, et al. Design and theoretical analysis of broadband bend-resistant low-loss hollow-core anti-resonant fiber [J]. Applied Optics, 2024, 63 (21): 5692-5698.

[15] 王 震, 汪静丽. 一种支持130个轨道角动量模式稳定传输的反谐振光纤[J]. 光学学报, 2023, 43(23): 80-89.
Wang Zhen, Wang Jingli. An anti-resonance fiber supporting stable transmission of 130 orbital angular momentum modes [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(23): 80-89.

[16] 曹珊珊, 郭朝阳, 王 震, 等. 用于极寒温度的特种光纤的结构与弯曲损耗研究[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 195-201.
Cao Shanshan, Guo Chaoyang, Wang Zhen, et al. Structure design and bending loss of a novel fiber for low temperature environment [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48 (11): 195-201.

作者简介:

王健健(1983—),女,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向为光通信与光传感;

汤 锐(2001—),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信与光传感。