光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260530001

基于有限元分析的光纤不规则宏弯损耗计算方法与夹角优化

赵丽娟[1,2]，侯海舰[1]，杨曜齐[1]，徐志钮[1*]，姬睿杰[1]，袁　豪[1]，
陈锦山[3]，王新澜[4]，吴诗雨[4]

（1. 华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003；2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室，河北 保定 071003；3. 国网福建省电力有限公司，福州 350001；4. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院，福州 350007）

摘　要： 针对光纤网络非侵入式光功率测量中不规则弯曲损耗难以定量计算的问题，提出了一种基于有限元分析的光纤不规则宏弯损耗计算方法。为验证该方法的有效性，基于COMSOL中的波束包络法模块构建了某典型夹具约束下光纤的不规则弯曲模型，引入S参数实现了宏弯损耗的量化计算，采用3D打印技术制作该典型夹具并搭建实验系统进行了验证。结果表明，该典型夹具的有限元计算损耗为1.15 dB，实验测得的平均损耗为1.44 dB，二者基本吻合。在此基础上，对典型夹具夹角在70°～120°范围内变化时夹角对弯曲损耗的影响进行了研究，结果表明，光纤宏弯损耗随夹具夹角的增大呈现出先增大后减小的趋势，当夹具夹角在85°～95°的范围内变化时，产生的泄漏光功率既能满足光电探测器的响应需求，又能使主干光纤链路的损耗处于1～3 dB的安全允许阈值范围内。该研究为不规则弯曲场景下泄漏光功率的计算提供了一种可靠方法，并为典型夹具下泄漏比例和最佳夹角范围的确定提供参考。

关键词： 非侵入式光功率测量；光纤不规则弯曲；宏弯损耗；波束包络法；光纤夹具

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0945－08

Finite Element Calculation of Irregular Macrobending Loss in Optical Fibers and Optimization of the Fixture Angle

ZHAO Lijuan[1,2], HOU Haijian[1], YANG Yaoqi[1], XU Zhiniu[1], JI Ruijie[1], YUAN Hao[1], CHEN Jinshan[3], WANG Xinlan[4], WU Shiyu[4]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 3. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350001, CHN; 4. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Fuzhou 350007, CHN)

Abstract: Irregular macrobending loss is difficult to quantify in non-intrusive optical power measurements of optical fiber networks. To address this problem, a finite element method for calculating irregular macrobending loss is proposed. To validate the proposed method, an irregularly bent fiber model constrained by a representative fixture was developed using the electromagnetic waves, the beam envelopes interface in COMSOL Multiphysics. S-parameters were used to quantify the macrobending loss. The fixture was then fabricated by 3D printing, and an experimental setup

收稿日期：2026－08－24.

基金项目：国家自然科学基金项目(62171185, 62273146)；河北省省级科技计划资助项目(SZX2020034).

* 通信作者：徐志钮

was established to validate the proposed method. The results show that the loss calculated by the finite element analysis for the representative fixture is 1.15 dB. This value is in reasonable agreement with the experimentally measured average loss of 1.44 dB. On this basis, the effect of the fixture angle on bending loss was investigated over an angular range of 70° to 120°. The macrobending loss first increased and then decreased as the fixture angle increased. When the fixture angle was between 85° and 95°, the leaked optical power was sufficient to meet the response requirements of the photodetector, while the loss of the backbone fiber link remained within the allowable safety range of 1～3 dB. This study provides a reliable method for calculating macrobending loss under irregular fiber-bending conditions. Moreover, it provides a useful reference for determining the leakage ratio and the optimal fixture angle range in non-intrusive optical power measurements.

Key words: non-intrusive optical power measurement; irregular fiber bending; macrobending loss; beam envelope method; optical fiber fixture

0 引言

随着光纤通信技术的快速发展,5G移动通信、云数据中心等新型业务场景的大规模落地,对光纤传输网络的稳定性和可靠性提出了更高的要求[1]。作为各类业务传输的物理载体,光纤网络的在线监测已成为光网络管理的核心环节。在光纤链路的日常巡检与故障定位排查中,光功率测量是常用的检测手段之一[2]。传统的光功率测量多采用分光器或光功率计,这种侵入式的测量方法需要中断主干光路的信号传输,且易引入额外的损耗和端面污染等问题[3]。为解决上述问题,基于光纤宏弯损耗原理[4]的非侵入式光功率测量技术,凭借不中断业务、不破坏链路结构的优势,成为近年来研究的热点。其核心机理是利用机械装置使光纤产生宏弯,破坏光在光纤中传输的全反射条件,使得纤芯内的部分能量转化为辐射模,向包层外泄漏,产生泄漏光[4]。在非侵入式光功率测量的研究中,光纤宏弯损耗产生的泄漏光既要保证信号可被光电探测器有效响应,又要满足引入的损耗在安全阈值范围内。在非侵入式光功率测量与光纤识别中,通常利用夹具使光纤产生局部宏弯,并通过检测弯曲区域生成的泄漏光获取光信号状态。已有研究采用带V形槽的夹持结构使光纤产生弯曲,并利用泄漏光信号进行监测[5];在市场化光纤识别仪中,普遍采用V型或近似V型夹持结构。与理论分析中常采用的恒定曲率规则圆弧不同,光纤在该V型夹具约束下形成了不能由单一弯曲半径完整描述的非恒定曲率路径。因此,有必要提出一种基于不规则弯曲路径的宏弯损耗计算方法。

近年来,国内外学者围绕光纤弯曲损耗的计算与分析开展了大量研究。文献[6]搭建了1 550 nm波段的实验系统,测量了单模光纤弯曲损耗随弯曲半径和波长变化的振荡规律,该研究虽考虑了包层模式与基模耦合引发的损耗振荡现象,但测试对象基于恒定曲率的圆柱弯曲。文献[7]以经典单模光纤弯曲理论为基础,引入了光纤弯曲后应力导致的折射率变化,对原有理论模型进行了修正,但其解析推导仍建立在均匀纯圆弧弯曲的假设之上。文献[8]基于标量衍射理论推导了光纤模式的弯曲损耗表达式,拓展了弯曲损耗的理论分析视角,不过该推导过程同样受限于恒定曲率的规则弯曲场景。文献[9]则采用有限元分析方法,构建了不同弯曲半径下光纤宏弯传输仿真模型,完成了弯曲损耗的数值求解,但该研究的有限元建模与实验验证均针对规则圆弧弯曲展开。综上,现有研究尚未建立适用于光纤不规则形状的宏弯损耗计算方法。

为解决传统光纤夹具设计依赖经验、规则圆弧解析公式难以处理不规则弯曲损耗的问题,本文提出了一种基于波束包络法和S参数的光纤不规则宏弯损耗有限元计算方法。针对典型V型夹具开展了有限元建模与实验验证,进一步分析了70°～120°范围内夹具夹角对宏弯损耗的影响,并确定了最佳夹角范围。研究结果为不规则弯曲路径下宏弯损耗的计算提供了一种可靠方法,对非侵入式光功率测量具有参考价值。

1 光纤弯曲损耗理论与计算方法

光纤弯曲引发的能量泄漏[10]是实现非侵入式光功率测量的核心物理基础。为解决不规则弯曲

损耗难以定量计算的难题，基于光纤宏弯理论，提出一种光纤不规则宏弯损耗计算方法，即基于波束包络法构建典型夹具约束下光纤不规则弯曲的有限元分析模型[11]和基于S参数的宏弯损耗计算。

1.1　光纤宏弯泄漏机制与典型夹具

光纤受外力作用发生形变所引入的附加损耗，主要分为微弯损耗与宏弯损耗两类。前者主要由光纤轴线产生微米级的随机曲率变化引起[12]；后者则是指光纤发生宏观尺度的弯曲形变。在非侵入式光功率测量技术中，通过机械装置让光纤产生宏弯来提取泄漏光信号，其能量泄漏机理见图1。

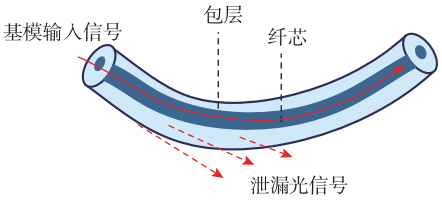


图1　光纤宏弯损耗能量泄漏机理示意图

理想状态下，单模光纤内的光信号依赖纤芯与包层界面的全反射效应沿轴向稳定传输。从波动光学视角分析，当光纤受外部作用发生宏观弯曲时，包层外侧光场的相位传播速度为保证等相面连续性会随之升高[13]。由于介质材料中光速存在上限，当弯曲半径小于临界值时，包层外侧的倏逝波相速度会超过介质中的光速，原本满足的全反射条件被打破。这一物理过程促使纤芯中的基模能量部分转化为辐射模，向包层外辐射逸散，最终产生图1所示的泄漏光信号。

结合泄漏光检测的研究现状，本文设计了一种具有代表性的V型夹具，其结构如图2所示。该装置由夹具底座、夹具固定压片和光电探测器三部分组成。其中，夹具底座采用V型结构设计，左右两斜边分别与水平面呈45°夹角，整体构成90°的典型夹具夹角。夹具底座两斜边长17 mm，底部水平边长10 mm，高度6 mm，上端两侧水平边长为3 mm，两侧斜边用半径为2 mm的圆弧平滑过渡，避免光纤产生尖锐弯折。夹具固定压片的高度同样为6 mm，顶部水平边长为30 mm，斜边长度16 mm，两条斜边之间也采用半径为2 mm的圆弧结构，与底座的几何轮廓匹配。实验测试时，将待测光纤放入夹具预设的几何导槽内，通过螺钉驱动固定压片闭合，并采用螺母锁紧定位。夹具锁紧后，光纤受夹具底座导槽与固定压片轮廓的共同约束，形成与最终闭合状态相对应的不规则宏弯路径。各次测试均采用相同的装夹、闭合与锁紧操作，以提高最终闭合状态的一致性。布置在夹具外侧的光电探测器即可捕获泄漏光信号，完成非侵入式泄漏光信号的提取。

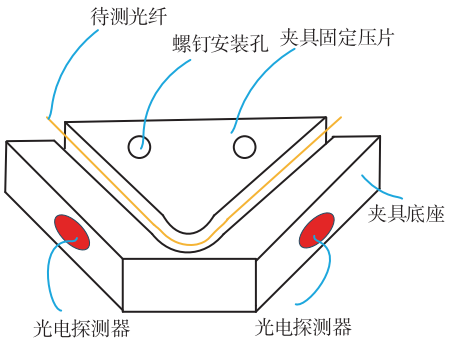


图2　非侵入式光功率测量典型夹具结构示意图

1.2　基于波束包络法的光纤电磁场有限元建模

本文采用COMSOL Multiphysics有限元分析软件，构建三维光纤弯曲电磁场模型。由于夹具引发的光纤形变尺寸为毫米级，而单模光纤的纤芯半径仅为微米级，若直接采用常规全电磁波求解器进行网格划分，会产生难以承受的自由度规模与计算资源开销。针对这一问题，本模型选用“电磁波，波束包络”物理接口开展仿真计算[14]。该方法从数学上分离了电磁波的高频振荡相位项与慢变包络幅值项，允许沿波传播方向采用尺寸大于波长的较粗网格，在保证模型求解精度的同时，降低了计算耗时[15]。

在几何构建阶段，本文并非通过在模型中施加机械压力来确定光纤形状，而是直接提取实物夹具约束后最终闭合状态的几何形状，基于该形状进行建模。具体而言，根据夹具锁紧后的几何形状及导槽约束轮廓构建光纤弯曲中心路径，并以该路径作为扫掠路径生成三维光纤模型。所建立的光纤弯曲中心路径随夹具夹角变化，能够描述光纤在夹具约束下形成的非恒定曲率弯曲路径。进一步引入曲线坐标场，使局部波矢方向始终与光纤弯曲中心路径的切向方向保持一致。三维空间中波矢 $\boldsymbol{k}$ 的三个标量分量（k_x，k_y，k_z）定义为：

$$k_x=k_0\times n_{\mathrm{eff}}\times\frac{v_x}{\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}} \tag{1}$$

$$k_y=k_0\times n_{\mathrm{eff}}\times\frac{v_y}{\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}} \tag{2}$$

$$k_z=k_0\times n_{\mathrm{eff}}\times\frac{v_z}{\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}} \tag{3}$$

式中，$k_0=2\pi/\lambda$，为电磁波在真空中的波数，其中λ为入射光波长；n_{eff}为边界模式分析得到的有效模式折射率；v_x，v_y和v_z是由曲线坐标物理场生成的、沿着光纤弯曲中心路径的局部切向矢量v在笛卡尔坐标系下的三个分量。

针对三维弯曲模型，将光纤的光信号输入端和输出端设置为“数值”端口[16]，通过数值端口完成边界模式分析，求解出光纤的基模场分布，实现入射光激励信号的注入和透射光信号的接收。在光纤的包层最外侧设置散射边界条件，吸收光纤弯曲激发的辐射模电磁波，避免界面反射对纤芯光场产生数值干扰。

1.3 基于S参数的宏弯损耗计算方法

获取频域电磁场分布后，为量化典型夹具导致的不规则弯曲所引入的光纤宏弯损耗，参考文献[17]，本文采用微波网络分析中的散射参数，即S参数来构建宏弯损耗计算方法。将测试的弯曲光纤段等效为无源两端口网络，定义信号注入端为端口1，透射端为端口2，则系统的能量反射率R和透射率T可以分别表示为：

$$R=|S_{11}|^2 \tag{4}$$

$$T=|S_{21}|^2 \tag{5}$$

式中，S_{11}为端口1的输入反射系数，S_{21}为正向传输系数，||表示取复数的模长。两者共同构成系统能量分配的衡量基础。

由于外围设置的散射边界条件减弱了边界对辐射场的反射，基于S参数计算得到的光纤宏弯损耗L_{th}可通过正向传输系数S_{21}推导得出[18-19]，其单位为dB：

$$L_{\mathrm{th}}=-10\times\log_{10}(|S_{21}|^2) \tag{6}$$

式(6)建立的损耗计算方法，实现了不规则弯曲下的光纤宏弯损耗的数值量化，为后续验证此计算方法的可行性以及最佳夹角范围的确定提供了理论依据。

2 基于典型夹具的计算方法验证

为验证所提出的基于波束包络法的有限元模型与基于S参数的宏弯损耗计算方法的准确性，本节选取前文设计的夹角为90°的典型夹具结构作为研究对象。在COMSOL中完成该约束状态下的三维弯曲模型仿真建模以获取有限元计算值，同时采用3D打印技术加工实体夹具，如图3所示，并搭建实验系统进行实验验证。通过仿真与实验的对比，论证了该计算方法的有效性。

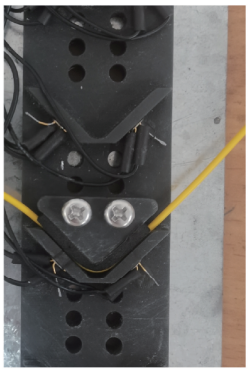


图3 3D打印的实体夹具

2.1 有限元模型验证及典型夹具分析

利用COMSOL中的“电磁波，波束包络”物理接口构建了典型夹具约束下的三维光纤弯曲电磁场模型。为确保仿真数据对后续实验具有直接的指导意义，模型中设置的单模光纤参数与实验室所用的实物光纤一致。具体的参数详见表1。

表1 单模光纤的基本参数

参数	数值
工作波长λ/nm	1 550
纤芯半径a/μm	4.5
包层半径b/μm	62.5
纤芯折射率n_1	1.468
包层折射率n_2	1.463

为验证所建立的基于波束包络法的有限元模型和基于S参数的宏弯损耗计算方法，首先建立了圆心角为90°的恒定曲率规则圆弧模型，并将有限元分析结果与Marcuse经典解析公式进行了对比。规则圆弧模型与后续不规则弯曲模型采用相同的光纤截面参数、材料参数、端口设置、边界条件及有限元求解方法，区别仅在于将光纤扫掠中心路径设置为恒定曲率的规则圆弧。Marcuse解析公式适用于曲率半径恒定且弯曲半径相对于纤芯尺度足够大的规则圆弧弯曲条件，其单位长度的功率弯曲损耗系数为[20]：

$$2\alpha=\frac{\sqrt{\pi}\times\mathcal{K}^2\times\exp\left[-\frac{2}{3}\times\left(\frac{\gamma^3}{\beta_{\mathrm{g}}^2}\right)\times R\right]}{2\times\gamma^{\frac{3}{2}}\times V^2\times\sqrt{R}\times[K_1(\gamma\times a)]^2} \tag{7}$$

$$\mathcal{K}=\sqrt{n_1^2\times k_0^2-\beta_{\mathrm{g}}^2} \tag{8}$$

$$\gamma=\sqrt{\beta_{\mathrm{g}}^2-n_2^2\times k_0^2} \tag{9}$$

$$V^2=k_0^2\times a^2\times(n_1^2-n_2^2) \tag{10}$$

式中，2α 为基模的单位长度功率弯曲损耗系数，单位为 m^{-1}；$K_1(\cdot)$ 为一阶第二类修正贝塞尔函数；R 为规则圆弧弯曲半径；a 为纤芯半径；k_0 为电磁波在真空中的波数；β_g 为直光纤基模的传播常数，本文取 $\beta_g=k_0\times n_{eff}$，其中 n_{eff} 为有效模式折射率；n_1 和 n_2 分别为纤芯折射率和包层折射率；$\mathcal{K}$ 为纤芯中的横向传播常数；γ 为包层中的倏逝场衰减常数；V^2 为归一化频率的平方。

对于圆心角为 90°的规则圆弧，弯曲段弧长为 $l=\pi\times R/2$，相应的 Marcuse 解析损耗为：

$$L_M=4.343\times(2\alpha)\times l \tag{11}$$

式中，L_M 的单位为 dB。

分别设置规则圆弧弯曲半径 R 为 5，7.5，10，12.5 和 15 mm，利用式(7)～(11)计算 Marcuse 解析损耗，同时利用式(6)计算对应圆弧模型的有限元损耗。两种方法的计算结果如图 4 所示。

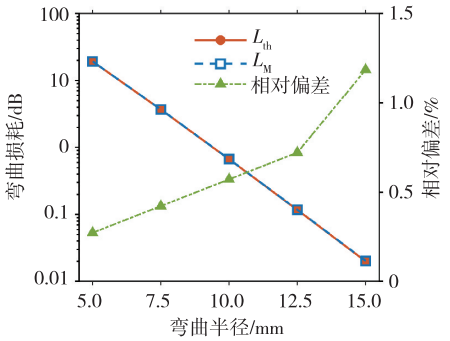


图 4　90°规则圆弧的弯曲损耗及相对偏差对比

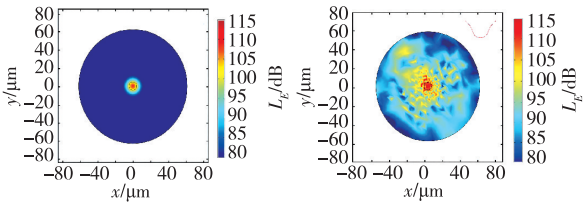
由图 4 可知，随着弯曲半径的增大，有限元计算损耗 L_{th} 与 Marcuse 解析损耗 L_M 均快速减小，两组曲线在对数坐标下基本重合。以 Marcuse 解析结果为基准，平均相对偏差约为 0.63%，最小的相对偏差约为 0.27%，最大的相对偏差约为 1.19%。结果表明，该有限元方法在规则圆弧条件下具有较好的计算准确性；由于其直接基于完整弯曲路径建模，不依赖恒定曲率假设，可进一步用于不规则弯曲损耗计算，并由后续 90°实体夹具实验验证其有效性。

完成表 1 所示的参数设置后，依次执行边界模式分析与频域求解。为分析光纤宏弯状态下电场的分布，提取光纤弯曲横截面的电场。由于弯曲引发的包层泄漏光能量与纤芯内束缚的基模能量存在数量级差异，常规线性坐标难以同时表征两者的空间场分布细节。因此，对电场幅值进行对数变换，所有子图均使用统一色标范围。定义电场幅值的对数表示为：

$$L_E=20\times\log10\left(\frac{|E|}{E_0}\right) \tag{12}$$

式中，$|E|$ 表示电场幅值，$E_0=1$ V/m 为参考电场幅值，L_E 的单位为 dB。

为直观对比典型夹具约束对光波传输特性的影响，提取了理想直光纤与弯曲光纤的横截面电场分布，对比结果如图 5 所示。图 5(b)右上角插图为 90°典型夹具对应的光纤弯曲中心路径。



(a) 理想直光纤状态　　(b) 典型夹具约束下弯曲状态

图 5　不同状态下光纤横截面电场幅值对数分布

由图 5(a)可知，在 1 550 nm 的工作波长下，理想直光纤状态下的电场幅值呈中心对称分布。绝大多数基模能量被束缚在纤芯几何中心及其邻近的包层区域，包层外围区域的电场强度极低，未见明显的能量向外辐射。作为对比，由图 5(b)可知，在受到典型夹具约束后，光纤外侧区域原本对称的倏逝波尾迹出现明显的形变。因此可以得出结论：在光纤受夹具弯曲时绝大部分基模能量仍受到纤芯的有效束缚，但包层区域出现较明显的辐射场分量，导致电磁能量突破原有的全反射界面，呈现出沿半径向外侧空间辐射状发散。直光纤与弯曲光纤场分布对比表明，该有限元模型能够表征光纤弯曲后包层辐射场分量的变化，直观展示了泄漏光的产生过程。为量化这一损耗，提取了模型中的有效模式折射率、反射率和透射率的大小，结果见表 2。

表 2　三维弯曲光纤仿真结果

参数	数值
n_{eff}	1.465 4
T	0.766 7
R	$6.263\,5\times10^{-4}$

在表 2 的数据中，基模的有效模式折射率为 1.465 4，该数值严格介于纤芯与包层折射率之间，符合基模有效折射率的基本取值范围。同时，计算得到的输入端反射率低至 10^{-4} 数量级，表明输入端背向反射较小，端口与弯曲模型之间具有较好的模式匹配。根据透射率的值，代入式(6)计算得出，在该典型夹具的不规则弯曲约束下，此计算方法得到

的仿真损耗为1.15 dB。

2.2 实验系统搭建与计算方法有效性验证

为验证所提出计算方法在实际物理环境中的准确性，搭建了如图6所示的实验测试系统，系统的主要仪器清单如表3所示。系统由分布反馈式激光器（Distributed Feedback Laser，DFB）发出1 550 nm波段的连续波（Continuous Wave，CW）作为探测光源，经过单模光纤（Single Mode Fiber，SMF）传输至可调衰减器（Variable Optical Attenuator，VOA）调节入射光功率。随后，光信号进入宏弯传感区，在90°典型夹具（90° Macrobending Fixture）下，通过螺钉驱动固定压片闭合和螺母锁紧。锁紧后，光纤受夹具共同约束，形成与有限元模型最终几何约束相对应的不规则宏弯路径，从而形成泄漏光。泄漏光被布置于夹具外侧的光电探测器（Photodetector，PD）实时捕获并转化为电信号，以实现非侵入式泄漏光信号的提取；而绝大多数的主干光信号则继续沿光纤向前传输，最终由末端的光功率计（Optical Power Meter，OPM）接收，用于监测光功率变化并量化引入的宏弯损耗。

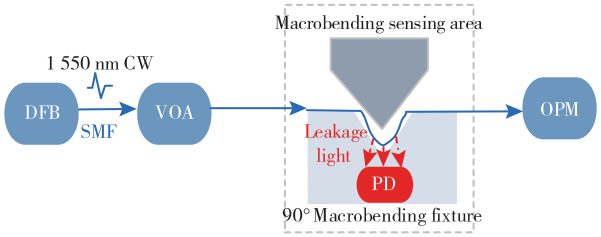


图6 宏弯损耗的实验测试原理图

表3 实验测试系统主要仪器清单

仪器名称	生产厂家	设备型号
分布反馈式激光器	康冠光电	KG-DFB-15-10-M-SM-FA
光功率计	嘉慧光电	JW3208C

该典型夹具引入的实验宏弯损耗L_{exp}定义为：

$$L_{exp}=P_0-P_1 \tag{13}$$

式中，P_0和P_1分别为未加载和加载典型夹具下光功率计在接收端测得的数值，二者之差L_{exp}的单位为dB。

为评价相同装夹、闭合与锁紧操作时夹具最终闭合状态的重复性，对系统进行10次“加载-释放”循环测试，代入式（13）算得的实验损耗与仿真算得损耗的对比如图7所示。由图7可知，在10次重复测试中，实验算得光纤宏弯损耗的平均值为1.44 dB，标准差为0.14 dB，表明夹具最终闭合状态对应的损耗响应具有良好的重复性。

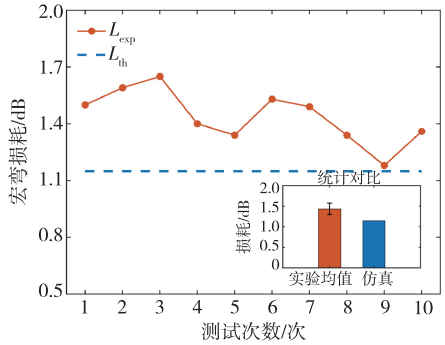


图7 典型夹具下光纤宏弯损耗的实验与仿真对比

将实验测试结果与仿真结果进行对比可知，实验算得平均损耗1.44 dB与仿真算得损耗1.15 dB二者基本吻合，二者绝对偏差为0.29 dB。该偏差可能与实际光纤涂覆层、夹具加工与装配误差，以及实际弯曲路径与理想模型之间的差异有关。整体对比结果表明，本文提出并构建的基于波束包络法与S参数的宏弯损耗计算方法，能够可靠地定量计算不规则弯曲引起的光功率泄漏，满足非侵入式光功率测量的理论分析需求。

3 典型夹具夹角的影响分析与最佳范围的确定

在前文验证了基于波束包络法与S参数的光纤宏弯损耗计算方法可靠性的基础上，本节将利用此方法针对夹具夹角对弯曲损耗的影响进行研究，从而为非侵入式测量确定最佳的夹角取值范围。

3.1 夹具夹角对光纤传输特性的影响

利用本文建立的计算模型，对夹具夹角进行参数化扫描，参数化扫描中仅改变V型夹具的夹角，其余几何尺寸、圆弧半径、光纤截面参数、材料参数、端口条件和边界条件均保持不变，并根据各夹角下的最终闭合几何状态重新构建光纤弯曲中心路径。其中，以5°为扫描步长，在70°～120°范围内对夹具夹角进行参数化扫描，计算获得了光纤内部的电磁场。限于篇幅，图8仅给出部分典型夹角下的电场分布。对电场数值进行了对数变换处理，与前文原因一致，此处不再赘述。图中右上角插图给出了对应夹角下的光纤弯曲中心路径，用于直观反映夹角变化引起的弯曲路径差异。

由图8（a）和8（b）可知，随着夹具夹角向90°逼近，右上角所示光纤弯曲中心路径随之变化，局部弯曲程度逐渐增强，包层区域的辐射场分量随之增大；由图8（c）可知，当夹具夹角到达90°时，包层区

域的辐射场分量较为明显，且对应的透射率在整个扫描区间内最低；由图 8(d)、8(e)和 8(f)可知，当夹具夹角超过 90°后，光纤弯曲中心路径逐渐舒展，局部弯曲程度减弱，包层内部的辐射光斑有所消退，包层外围逐步出现深蓝色的低场强颜色。

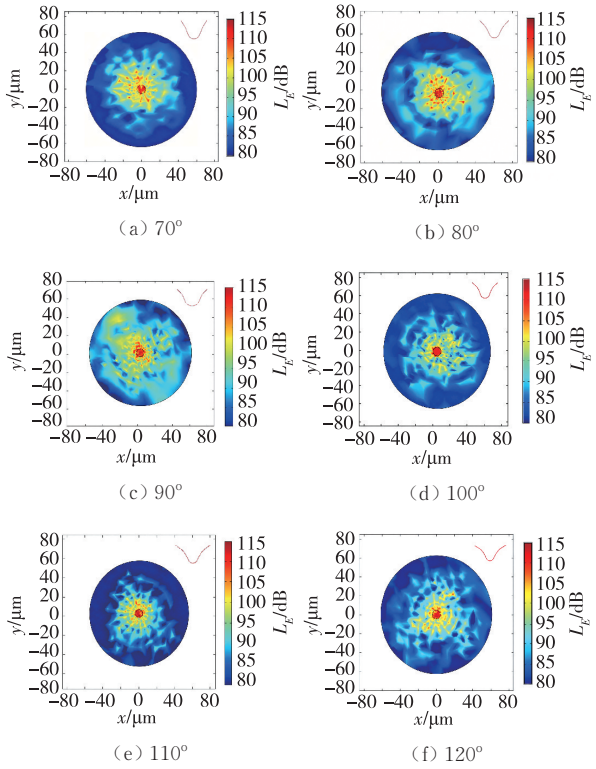


图 8　不同夹具夹角的弯曲路径及电场幅值分布

利用本文建立的计算模型，算得各个角度下的反射率、透射率与仿真损耗。所得传输特性曲线如图 9 所示。

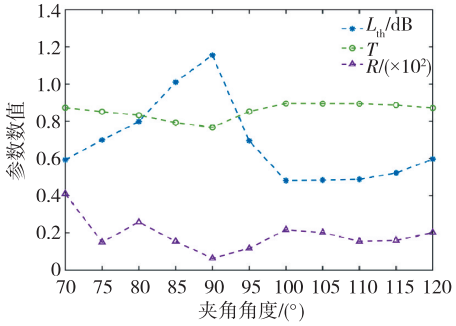


图 9　不同夹具夹角下的光纤传输特性及宏弯损耗

分析图 9 的参数化扫描仿真结果可知，光纤宏弯损耗随夹具夹角的增大呈现出先增大后减小的单峰变化。当夹角从 70°逐渐增大至 90°时，光纤弯曲中心路径的局部弯曲程度逐渐增强，辐射模的泄漏量增加，宏弯损耗增大；并在 90°夹角处达到 1.15 dB 的峰值，同时反射率处于较低水平。随后，当夹具夹角从 90°继续增加至 120°时，弯曲中心路径逐渐舒展，光纤弯曲程度降低，辐射模的泄漏量随之减少，宏弯损耗逐渐回落。

3.2　最佳夹角范围的确定

非侵入式光功率测量中典型夹具的设计核心原则是，在提取泄漏光信号时，同时满足“主干链路低损耗”与“泄漏信号可检测”两个约束条件。结合图 9 中传输特性随夹角的变化，本文确定 85°～95°为该典型夹具的最佳夹角范围，其合理性主要体现在两方面：一是反射率较低。由图 9 可知，当夹具夹角位于 85°～95°范围内时，系统反射率处于参数扫描区间的较低水平，表明输入端背向反射较小。二是实现了泄漏光强度与链路安全的平衡。当夹具夹角偏离 85°～95°范围时，光纤宏弯损耗大多低于 0.60 dB，此时产生的泄漏光微弱，无法被常规的光电探测器有效响应。而在 85°～95°的最佳夹角范围内，仿真损耗保持在 0.75～1.15 dB 的较高区间，既能产生足够强度的泄漏光信号以保证检测精度，又符合光纤通信的安全规范。光纤链路外部引入的插入损耗应进行严格控制，本文确定的夹角范围，能够确保主干光纤链路的整体损耗稳定在 1～3 dB 的安全允许阈值范围[21]内。

综上，本文提出的基于波束包络法的有限元计算方法，不仅揭示了不规则弯曲下的宏弯损耗变化，还确定了 85°～95°这一兼顾背向散射抑制与有效信号提取的最佳夹角范围，为非侵入式光功率测量夹具的设计提供参考依据。

4　结论

本文提出了一种基于波束包络法和 S 参数的光纤不规则宏弯损耗有限元计算方法。结果表明，由该方法算得的仿真损耗 1.15 dB 和实验平均损耗 1.44 dB 基本吻合，验证了所述方法能够分析光纤不规则弯曲产生的微弱能量泄漏。基于该方法，分析了 70°～120°范围内夹具夹角对宏弯损耗的影响，明确了光纤宏弯损耗随夹具夹角增大呈现先增大后减小的变化；建议夹具夹角取 85°～95°的范围。综上，本文提出的有限元计算方法及其验证过程，不仅为不规则弯曲时宏弯损耗的定量分析提供了一种可靠的理论工具，也为非侵入式测量中泄漏比例和最佳夹角范围的确定提供理论支撑，具有良好的工程应用价值与研究前景。

参考文献：

[1] 杨 桃，王 雪，李开宣，等. 基于PAM4数字光标签的WDM光网络监测[J]. 中国激光，2024，51(2)：126-137.
Yang Tao，Wang Xue，Li Kaixuan，et al. WDM optical network monitoring technology based on PAM4 digital optical label[J]. Chinese Journal of Lasers，2024，51(2)：126-137.

[2] 王健健，汤 锐，尚秋峰. 少模光纤弯曲特性分析[J]. 半导体光电，2025，46(2)：299-306.
Wang Jianjian，Tang Rui，Shang Qiufeng. Bending characteristics of a few-mode fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46(2)：299-306.

[3] Zheng X，Ge H，Xuan X，et al. BendSense-RFID：fiber-pairing managing and on-port power detecting in large-scale optical networks[J]. IEEE Internet of Things Journal，2025，12(23)：51533-51541.

[4] 彭星玲，茶映鹏，张 华，等. 单模光纤宏弯损耗的温度响应特性[J]. 光子学报，2018，47(11)：45-52.
Peng Xingling，Cha Yingpeng，Zhang Hua，et al. Temperature response properties of macrobending loss of single-mode fiber[J]. Acta Photonica Sinica，2018，47(11)：45-52.

[5] Uematsu T，Hirota H，Kawano T，et al. Design of a temporary optical coupler using fiber bending for traffic monitoring[J]. IEEE Photonics Journal，2017，9(6)：7106013.

[6] 游善红，郝素君，殷宗敏，等. 单模光纤中弯曲损耗的测试与分析[J]. 光子学报，2003，32(4)：409-412.
You Shanhong，Hao Sujun，Yin Zongmin，et al. Analysis and test of bend loss in single-mode fiber [J]. Acta Photonica Sinica，2003，32(4)：409-412.

[7] 王雪珍，卞保民，纪运景，等. 单模光纤弯曲损耗理论模型的修正[J]. 光子学报，2006，35(6)：819-823.
Wang Xuezhen，Bian Baomin，Ji Yunjing，et al. Theoretical model modify of bending loss of mono-mode fiber [J]. Acta Photonica Sinica，2006，35(6)：819-823.

[8] Marcuse D. Bend loss of slab and fiber modes computed with diffraction theory [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics，1993，29(12)：2957-2961.

[9] Qu X，Ma F，Zhao S，et al. Analysis of the influence of macro-bending loss in single-mode optical fibers on OFDR signal quality[J]. Sensors，2025，25(22)：6983.

[10] 李香芹. 基于微弯曲光纤和光时域反射技术的实时车辆入侵检测系统[J]. 光通信技术，2025，49(6)：85-88.
Li Xiangqin. Real-time vehicle intrusion detection system based on micro-bend optical fiber and optical time domain reflectometry technology [J]. Optical Communication Technology，2025，49(6)：85-88.

[11] 童晓玲，刘晨宇，梁 磊，等. 单模传输约束下HCF低耦合损耗结构优化方法[J/OL]. 光通信技术，2026，https://link.cnki.net/urlid/45.1160.TN.20260210.1829.002.
Tong Xiaoling，Liu Chenyu，Liang Lei，et al. Single-mode-constrained optimisation of low-coupling-loss HCF structures [J/OL]. Optical Communication Technology，2026，https://link.cnki.net/urlid/45.1160.TN.20260210.1829.002.

[12] 薛梦驰，左琼华. 光纤微弯损耗的新测试方法仿真算法及验证[J]. 光学学报，2021，41(18)：28-34.
Xue Mengchi，Zuo Qionghua. Simulation algorithms and verification for new test methods of microbending loss in optical fibers[J]. Acta Optica Sinica，2021，41(18)：28-34.

[13] 纪运景，王雪珍，卞保民，等. 单模光纤弯曲损耗的测量与分析[J]. 光学与光电技术，2003，1(5)：59-61.
Ji Yunjing，Wang Xuezhen，Bian Baomin，et al. Bend loss measurement and analysis of coated single-mode fibers [J]. Optics & Optoelectronic Technology，2003，1(5)：59-61.

[14] 程 柏，毛晓博，史建猛，等. 水导激光电场分布理论分析及试验研究[J]. 制造技术与机床，2023(12)：73-78.
Cheng Bai，Mao Xiaobo，Shi Jianmeng，et al. Theoretical and experimental research on electric field distribution of laser water jet [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool，2023(12)：73-78.

[15] 高湛翔，肖海峰，朱海红. 激光在电解液射流中的传输特性研究(特邀)[J]. 中国激光，2025，52(14)：178-192.
Gao Zhanxiang，Xiao Haifeng，Zhu Haihong. Laser transmission characteristics in electrolyte jet (invited) [J]. Chinese Journal of Lasers，2025，52(14)：178-192.

[16] Liu G，Wang F，Gao Y，et al. Topology optimization of low-loss Z-bend 2D photonic crystal waveguide [J]. Photonics，2023，10(2)：202.

[17] Peng J，Wang X，Wang L，et al. RF interconnection design of bump bonding with a dislocation package structure towards electro-optic modulation applications [J]. Photonics，2023，10(12)：1348.

[18] Shen L，Wu H，Zhao C，et al. Distributed curvature sensing based on a bending loss-resistant ring-core fiber [J]. Photonics Research，2020，8(2)：165-174.

[19] Shang Y，Wang C，Zhang Y，et al. Non-intrusive pipeline flow detection based on distributed fiber turbulent vibration sensing[J]. Sensors，2022，22(11)：4044.

[20] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America，1976，66(3)：216-220.

[21] James S M. Non-intrusive optical fibre identification using a high-efficiency macrobending ‘clip-on’ optical component [J]. Electronics Letters，1988，24(19)：1221-1222.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，教授，主要从事光纤传感与光纤通信方面的研究；

徐志钮(1979—)，男，博士，教授，主要从事分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断应用方面的研究。