

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108381

# 分段多项式拟合法测量光纤几何参数

赵仁燕<sup>1</sup> 郑泽希<sup>2</sup> 项华中<sup>1</sup> 李一鸣<sup>1</sup>

(1.上海理工大学上海市介入医疗器械工程研究中心 上海 200093; 2.上海理工大学机械工程研究所 上海 200093)

**摘要:** 光纤几何参数是影响光纤性能的一个重要指标。灰度法为光纤几何参数测量的一种常用方法,测量时需要光纤通光照明以区分纤芯和包层。由于光并不完全集中于纤芯传播(部分光在包层中传播),导致纤芯与包层的界面难以区分。为了准确找出纤芯边缘,本文利用两段多项式分别拟合纤芯和包层区域的光强灰度分布,求得两段多项式的交点对应的灰度值作为纤芯和包层的分界点,从而得到纤芯的边缘数据。利用分段三次 Hermite 插值对测量数据进行矫正,降低误差点对拟合的影响。通过对两组成像质量不同的光纤端面图像进行测量,用标准仪器先后测得纤芯的直径和不圆度为 10.068  $\mu\text{m}$ 、0.616% 和 10.397  $\mu\text{m}$ 、0.766%,本文方法的测量值为 9.999  $\mu\text{m}$ 、0.716% 和 10.020  $\mu\text{m}$ 、0.857%。实验表明,本文方法对光纤几何参数的测量具有较好的准确性和稳定性,而且从理论上讲,本文方法较之常用的灰度法更具有物理意义和测量原理上的合理性。

**关键词:** 光纤几何参数;分段多项式拟合;分段三次 Hermite 插值

**中图分类号:** TN818;TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Measurement of optical fiber geometry parameters with piecewise polynomial fitting

Zhao Renyan<sup>1</sup> Zheng Zexi<sup>2</sup> Xiang Huazhong<sup>1</sup> Li Yiming<sup>1</sup>

(1. Shanghai Engineering Research Center of Interventional Medical Device, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Institute of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Optical fiber geometric parameters are an important index that affects optical fiber performance. The gray-scale method is a common method for measuring the geometric parameters of optical fibers. When measuring, it is necessary to illuminate the optical fiber to distinguish the core and the cladding. Since the light is not completely concentrated in the core propagation (part of the light propagates in the cladding), it is difficult to distinguish the interface between the core and the cladding. In order to accurately find the edge of the fiber core, this paper uses two polynomials to fit the light intensity gray distribution of the core and cladding area respectively, and obtains the gray value corresponding to the intersection of the two polynomials as the boundary point between the core and the cladding. So as to get the edge data of the core. The segmented cubic Hermite interpolation is used to correct the measured data, reducing the influence of error points on the fitting. By measuring two sets of fiber end-face images with different imaging qualities, the diameter and out-of-roundness of the fiber core were measured with a standard instrument to be 10.068  $\mu\text{m}$ , 0.616%, and 10.397  $\mu\text{m}$ , 0.766%. The measured value of the method in this paper is 9.999  $\mu\text{m}$ , 0.716% and 10.020  $\mu\text{m}$ , 0.857%. Experiments show that the method in this paper has better accuracy and stability for the measurement of optical fiber geometric parameters, and theoretically, the method in this paper has more physical meaning and rationality in the measurement principle than the commonly used gray-scale method.

**Keywords:** optical fiber geometry parameters; piecewise polynomial fitting; piecewise cubic Hermite interpolation

## 0 引言

光纤不仅在通信中,而且在医学上的应用也十分广泛,

如内窥镜光纤诊断系统,激光手术及治疗仪器等<sup>[1-3]</sup>。光纤的几何参数是表征光纤质量的重要指标,此参数标准既是光纤制造的依据,又是光纤质量控制的标准。国标 GB

15972.20-2021 中对光纤几何参数的定义主要包括光纤包层的直径与不圆度,光纤纤芯的直径与不圆度以及纤芯与包层的同心度误差<sup>[4]</sup>。

常用的测量光纤几何参数的方法有折射近场法<sup>[5]</sup>和近场光分布法<sup>[6]</sup>。其中折射近场法是通过直接测量折射率分布曲线来确定几何尺寸参数的。近场光分布法分为扫描法和灰度法。现有的光纤端面几何参数测量装置大都使用灰度成像法<sup>[7]</sup>。将照明光源发出的光耦合注入被测光纤的一端,在光纤的另一端使用显微系统对光纤端面进行放大,使用照像机检测放大的近场图像输出,然后进行数据处理计算几何参数。由于单模光纤是光学弱波导介质,通过其传输的光能量有相当一部分是存在包层中,而不是全部集中在光纤的纤芯中传播<sup>[8-9]</sup>。对纤芯透光后,纤芯在灰度图像中是一个边缘模糊的光斑,因而难以提取出准确的纤芯边缘。

与传统的灰度法直接提取边缘不同,为了准确提取纤芯的边缘,需确定纤芯和包层的分界点。本文根据包层和纤芯光强灰度分布的不同特点,分别对包层和纤芯的二维光强分布进行不同阶次的多项式拟合,求得两段多项式的交点,交点对应的灰度值作为纤芯和包层的分界点。为了避免因光照和切割带来的误差点影响拟合的准确性,利用分段三次 Hermite 插值对待拟合的数据点进行矫正,降低误差点对测量结果的影响。通过对两组成像质量不同的光纤端面图像进行测量验证本文方法的有效性,为光纤几何参数测量提供更多的思路。相较传统的灰度法,本文方法更具有物理意义和测量原理上的合理性。

## 1 测量原理

光纤端面图像如图 1 所示。对纤芯透光以区分包层与纤芯的边界,包层显示为黑色区域,外围亮场为照明区域。光纤的光强数据以灰度值表示,通过归一化后得到光纤端面光强分布的三维示意图,如图 2 所示。若直接对归一化光强进行多项式曲面拟合,则运算复杂,效率不高,检测速度慢。为了简化运算,常将三维光强分布转化为二维光强分布,如图 3 所示。通过对二维光强分布的拟合得到纤芯和包层的分界点,可大大降低运算的复杂度,有效提高运算效率。

### 1.1 分段三次 Hermite 插值

单模光纤基模的横向电场强度分布接近于高斯分布<sup>[10]</sup>。若光纤端面切割不平整或照明光源有波动出现较差的成像效果,导致归一化后的光强分布会有部分异常值,出现平顶现象,如图 4 所示。为了避免部分异常数据点对拟合结果的影响,利用 Hermite 插值对测量数据进行矫正。

直接使用 Hermite 插值得到的多项式次数较高,也存在着龙格现象<sup>[11-12]</sup>。在实际应用中,可使用分段三次 Hermite 插值来提高模拟数据的准确性。对于一系列给定的节点  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ , 对应的函数值和导数

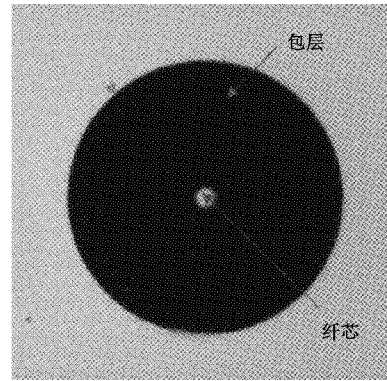


图 1 光纤端面

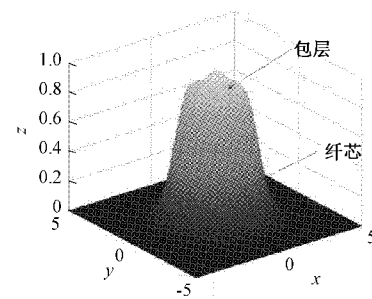


图 2 三维光强分布

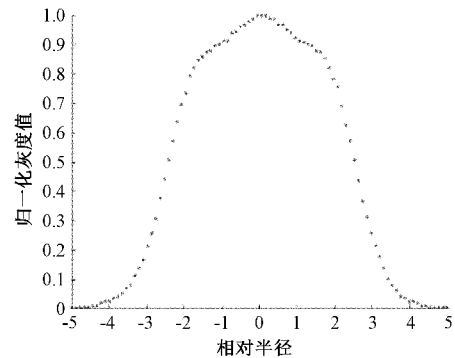


图 3 二维光强分布

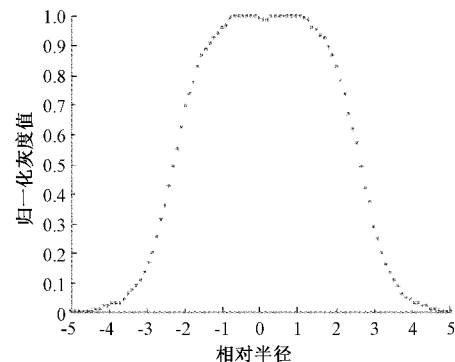


图 4 有异常值的光强分布

值为  $y_j = f(x_j), m_j = f'(x_j), j = 0, 1, 2, \dots, n$ 。在整个区间上构造一组分段三次 Hermite 插值函数  $I_n(x)$ , 使

$I_h(x)$  满足: 1)  $I_h(x) \in C[a, b]$ ; 2)  $I_h(x_j) = y_j$ ,  $I'_h(x_j) = m_j$ ; 3) 在每个小区间  $[x_k, x_{k+1}]$  上  $I_h(x)$  是三次多项式。用插值基函数表示为<sup>[13-14]</sup>:

$$I_h(x) = \sum_{j=0}^n [f_j \alpha_j(x) + g_j \beta_j(x)] \quad (1)$$

插值基函数  $\alpha_j(x)$  和  $\beta_j(x)$  的形式分别为:

$$\alpha_j(x) = \begin{cases} \left(1 + 2 \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i}\right) \left(\frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)^2, & x \in [x_{i-1}, x_i] \\ \left(1 + 2 \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i}\right) \left(\frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}\right)^2, & x \in [x_i, x_{i+1}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\beta_j(x) = \begin{cases} (x - x_i) \left(\frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right)^2, & x \in [x_{i-1}, x_i] \\ (x - x_i) \left(\frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}\right)^2, & x \in [x_i, x_{i+1}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

插值后的二维光强分布如图 5 所示。可以看出, 分段三次 Hermite 插值可以有效地平滑曲线, 平顶现象基本消失, 光强分布更接近于高斯分布。

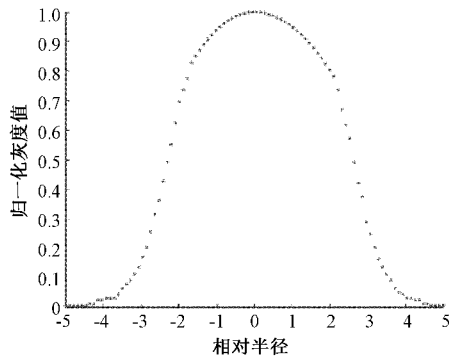


图 5 修正后的光强分布

### 1.2 分段多项式拟合

为了描述光纤端面的光强分布和光纤直径的关系, 得到包层和纤芯的边界点, 一种可行的方案是对数据点进行拟合。其中基于最小二乘法的多项式曲线拟合是一种较常用的数据拟合方法<sup>[15]</sup>。设有一组试验观测数据  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, N$ , 令拟合函数为一个  $n (n < N)$  次多项式, 即:

$$S(x) = \sum_{j=0}^n \omega_j x^j \quad (4)$$

由式(4)可知,  $S(x_i)$  与  $y_i$  在  $N+1$  个点上的偏差的平方和为:

$$\phi = \sum_{i=0}^N [S(x_i) - y_i]^2 \quad (5)$$

由式(4)和(5)可知,  $\phi$  是关于  $\omega_i$  的函数, 要使  $\phi$  存在极小值, 则  $\phi$  对  $\omega_i$  的偏导数为 0, 即:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \omega_i} = 2 \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot x_i^j - y_i \right] \cdot x_i^k = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot x_i^j \cdot x_i^k - 2 \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i^k = 0 \quad (6)$$

可简化为:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot x_i^j \cdot x_i^k = \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i^k, k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式(7)为关于  $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_n$  的线性方程组, 求解该线性方程组即可得到拟合函数的系数  $\omega_i$ , 从而得到多项式拟合函数。

由光强分布图可以看出, 包层区域随着直径的增大, 光强逐渐平缓, 接近于 0, 适合次数较低的多项式函数拟合; 而光强分布主要集中在纤芯区域, 在纤芯中心达到最大值, 适合高次项函数拟合。在不同区域内, 光强灰度分布的拟合应当分段单独进行, 从而减小最终拟合曲线与实际光强灰度曲线之间的拟合误差。

在获取分界点的分段拟合中, 首先可以从原始测量数据点中选取一个最接近曲线变化趋势的转折点作为初始分界点, (不一定是真正意义上包层与纤芯的分界点,) 然后利用分段多项式自然相交的方法, 找到真正的分界点。

为了确定包层和纤芯区域拟合多项式的最佳阶数, 分别对包层和纤芯区域的灰度数据进行不同阶次的多项式拟合, 利用拟合优度 ( $R^2$ )<sup>[16-17]</sup> 来评估拟合模型。选取 5 张不同的图片, 包层区不同阶次的多项式拟合优度如图 6 所示, 可以看出, 在包层区, 拟合阶数达到 4 次时均可得到较好的拟合效果。纤芯区不同阶次的多项式拟合优度如图 7 所示, 由图可知, 纤芯区拟合阶数达到 6 次均可得到较好的拟合效果。根据实际应用中的需求, 保证精度的前提下, 尽可能减少计算量, 选取 4 次和 6 次多项式分别拟合包层和纤芯的灰度数据。

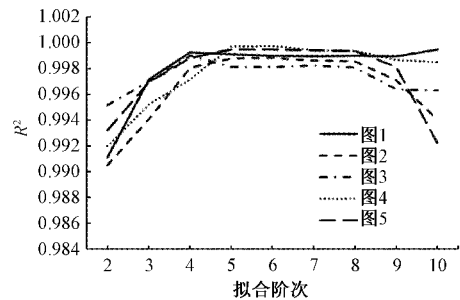


图 6 包层区多项式拟合评价结果

拟合方法的具体步骤可以分为如下 2 步:

1) 以型号为 G. 652 的单模光纤为例, 其纤芯直径为  $8 \sim 10 \mu\text{m}$  之间<sup>[18]</sup>, 结合光强分布曲线变化趋势, 大致选定分段点为  $8 \mu\text{m}$  处对应的灰度值  $Y'$ , 设为初始分界点, 对应的坐标点为  $[-X', Y']$  和  $[X', Y']$  (光强分布呈左右对称)。以左半边为例, 把测量数据分为  $x \in [x_0, -X']$  和

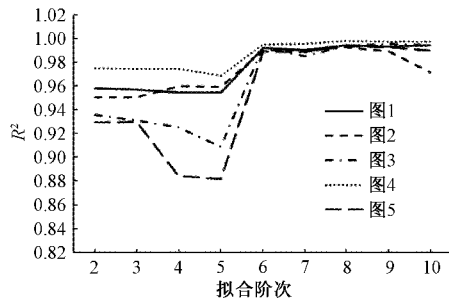


图7 纤芯区多项式拟合评价结果

$x \in [-X', X']$  两段, 其中  $x_0$  为横坐标起始值。通过对灰度数据进行不同阶次的拟合之后, 得出不同区域的最佳拟合式如下:

$$I(x) = \begin{cases} a_1x^6 + b_1x^5 + c_1x^4 + d_1x^3 + e_1x^2 - fx + g, & x \in [-X', X'] \\ a_2x^4 + b_2x^3 + c_2x^2 + d_2x + e_2, & x \in [x_0, -X'] \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $a, b, c, d, e, f, g$  为多项式系数,  $I$  为光强灰度值。在包层区用 4 次多项式, 纤芯区用 6 次多项式。

2) 联立式(8)中的两个表达式, 求出交点  $(X, Y)$ ,  $Y$  为纤芯与包层真正分界点所对应灰度值。根据灰度值  $Y$  反推得到纤芯的边缘数据点。以此类推, 其他型号的光纤也可以用此方法测量。

### 1.3 计算光纤几何参数

利用得到的分界点灰度值反推得到该灰度值对应的纤芯边缘数据点。由于包层与背景的边缘较为清晰, 直接利用边缘提取算子就可精确提取出包层边缘点。通过对包层和纤芯边缘数据点进行椭圆拟合得到最佳估计的实际边界, 获取边缘图形的中心坐标, 长短径及旋转角, 根据式(9)~(11)求取光纤包层或纤芯的直径  $R$ 、不圆度  $\delta$  以及纤芯与包层的同心度误差  $\gamma$ 。

$$R = \sqrt{R_{\max} \cdot R_{\min}} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R} \times 100\% \quad (10)$$

$$\gamma = \sqrt{(x_{\text{core}} - x_{\text{clad}})^2 + (y_{\text{core}} - y_{\text{clad}})^2} \quad (11)$$

式中:  $R_{\max}, R_{\min}$  为拟合椭圆的长短径;  $x_{\text{core}}, y_{\text{core}}$  为纤芯的中心坐标;  $x_{\text{clad}}, y_{\text{clad}}$  为包层的中心坐标。

## 2 实验数据处理及分析

本文采用原机械工业部上海电缆研究所生产的 FGM-5 光纤几何参数测量仪测量光纤几何参数, 该仪器采用先进的机器视觉技术, 200 万像素的 CCD 工业相机, 合理的成像光学系统, 对光纤端面进行精密的自动测量, 已在国内外光纤生产大厂得到广泛使用。其主要技术指标为: 测试时间  $< 50 \text{ sec}$ , 纤芯和包层直径重复测量精度  $\leq 0.05 \mu\text{m}$ , 包层不圆度重复测量精度  $\leq 0.01\%$ , 芯-包同心度的重复测量精度  $\leq 0.04 \mu\text{m}$ , 完全满足国标对光纤几何尺寸测量的要求。

为了验证本文方法测量光纤几何参数的准确性和稳定性, 以单模光纤 G. 652 为例, 选取两组实验对比, 一组为光纤端面成像质量较好时测出的实验数据, 一组为光纤端面成像质量较差时测出的实验数据, 利用标准仪器和本文方法分别对两组图片进行测量。

### 2.1 光纤端面成像质量较好时的测量数据

图 1 为光照条件良好的状态下得到的光纤端面图。利用 FGM-5 光纤几何参数测量仪的测量结果如表 1 所示, 其中标准偏差为 STDEVP 函数计算得到, 代表 5 次实验数据相对其平均值的离散程度。由表 1 可以看出, 仪器测量的纤芯和包层直径重复性误差  $\leq 0.03 \mu\text{m}$ , 包层不圆度的重复性误差  $\leq 0.003\%$ , 芯-包同心度重复性误差  $\leq 0.006 \mu\text{m}$ , 满足国标对光纤几何参数测量的要求。

表 1 FGM-5 几何参数测试仪的测量结果

实验次数	纤芯直径/ $\mu\text{m}$	纤芯不圆度/ $\%$	包层直径/ $\mu\text{m}$	包层不圆度/ $\%$	芯/包同心度/ $\mu\text{m}$
1	10.048	0.830	125.103	0.158	0.032
2	10.073	0.295	125.145	0.153	0.025
3	10.076	0.394	125.121	0.161	0.035
4	10.093	0.428	125.155	0.157	0.017
5	10.051	1.135	125.104	0.162	0.032
平均值	10.068	0.616	125.126	0.158	0.028
标准差	0.017	0.317	0.021	0.003	0.006

表 2 所示为本文方法测得的数据, 由表 2 中可以看出, 本文方法与 FGM-5 光纤几何参数测量仪的测量数据基本一致, 符合国标的测量要求。对比纤芯部分和芯/包同心度, 本文方法测量结果的标准差更小一点, 表明本文方法具有更好的重复测量稳定性。

### 2.2 光纤端面成像质量较差时的测量数据

当光照条件或切割条件不好时, 光纤端面图像如图 8 所示, 中间纤芯部分较为模糊, 在提取二维光强分布时会出现图 4 所示的平顶现象, 导致测量出现波动或偏离真值, 对测量结果造成较大误差。为了验证本文方法在成像

表 2 分段多项式拟合法的测量数据

实验次数	纤芯直径/ $\mu\text{m}$	纤芯不圆度/%	包层直径/ $\mu\text{m}$	包层不圆度/%	芯/包同心度/ $\mu\text{m}$
1	10.029	0.440	125.072	0.158	0.027
2	9.990	0.724	125.117	0.151	0.019
3	9.997	0.673	125.088	0.155	0.026
4	9.981	0.494	125.130	0.154	0.016
5	9.999	1.250	125.077	0.158	0.027
平均值	9.999	0.716	125.097	0.155	0.023
标准差	0.016	0.287	0.023	0.003	0.005

质量较差的情况下的测量精度和准确性,使用 FGM-5 仪器对该光纤端面进行 5 次测量,测量的结果如表 3 所示,使用本文方法对该光纤端面的测量结果如表 4 所示。

通过表 3 和 4 可以看出,在成像质量不好的情况下,相比于仪器的重复性测量精度,本文方法对大部分参数的重复测量精度有所提高,特别是纤芯部分,直径和不圆度的重复测量精度分别为  $0.017 \mu\text{m}$  和  $0.030\%$ ,略优于仪器的重复性测量精度。通过对比表 1、3 和表 2、4 可以发现,在成像质量不好的情况下,FGM-5 仪器测量数据的均值较成像质量好时的均值偏离较大,重复测量精度也有所下降,特别是纤芯直径,其准确性和稳定性都受到了影响。而本文方法在两组对比实验中保持有良好的测量精度和测量

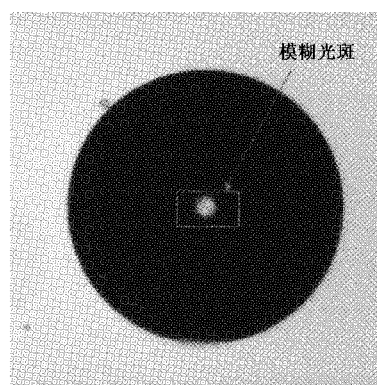


图 8 光照不均时光纤端面图像

表 3 成像质量较差时 FGM-5 仪器的测量结果

实验次数	纤芯直径/ $\mu\text{m}$	纤芯不圆度/%	包层直径/ $\mu\text{m}$	包层不圆度/%	芯/包同心度/ $\mu\text{m}$
1	10.320	0.684	125.083	0.169	0.038
2	10.393	0.950	125.143	0.158	0.030
3	10.433	0.581	125.152	0.151	0.029
4	10.398	0.801	125.137	0.159	0.032
5	10.349	0.814	125.112	0.167	0.034
平均值	10.379	0.766	125.125	0.161	0.033
标准差	0.040	0.125	0.025	0.007	0.003

表 4 成像质量较差时本文方法的测量数据

实验次数	纤芯直径/ $\mu\text{m}$	纤芯不圆度/%	包层直径/ $\mu\text{m}$	包层不圆度/%	芯/包同心度/ $\mu\text{m}$
1	10.001	0.849	125.055	0.163	0.029
2	10.052	0.808	125.119	0.150	0.020
3	10.020	0.879	125.122	0.148	0.026
4	10.007	0.853	125.113	0.152	0.024
5	10.022	0.895	125.086	0.159	0.028
平均值	10.020	0.857	125.099	0.154	0.025
标准差	0.017	0.030	0.025	0.006	0.003

一致性,尤其是在纤芯部分,并没有因成像质量降低影响测量数据的准确性和稳定性,说明本方法具有一定的可靠性。

### 3 结 论

本文提出一种利用分段多项式拟合法测量光纤几何

参数的方法。通过两段不同阶次的多项式分别拟合纤芯和包层区域的光强灰度分布,将两段多项式函数的交点作为纤芯和包层的分界点对应的灰度值,从而确定并提取出纤芯的边缘数据。实验表明,本文方法在测量条件良好的情况下具有与标准仪器相当的测量准确性,当测量条件较差时,本文方法仍可以保持测量结果的一致性,有效提高了测量的稳定性。此外,本方法在测量原理上更合理,物理意义更明确,更符合实际测量条件。本文未对其他型号的光纤进行试验验证,只停留在理论部分,对于解决实际生活中的应用问题还需要继续探究。

### 参考文献

- [1] BUENCONSEJO A L, HOBERT G, MANNING M, et al. Submillimeter diameter rotary-pullback fiber-optic endoscope for narrowband red-green-blue reflectance, optical coherence tomography, and autofluorescence in vivo imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2019, 25(3):1-7.
- [2] ARNOULD L, DE L A, SEYDOU A, et al. Diagnostic ability of spectral-domain optical coherence tomography peripapillary retinal nerve fiber layer thickness to discriminate glaucoma patients from controls in an elderly population(the MONTRACHET study)[J]. *Acta Ophthalmologica*, 2020, 98(8):e1009-e1016.
- [3] HERRERA R A P. Latest technologies in optical fiber lasers for sensing applications-Rosa Ana Perez Herrera-Universidad Publica de Navarra[J]. *Journal of Lasers, Optics & Photonics*, 2021, 8(5):4.
- [4] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光纤试验方法规范 第 20 部分: 尺寸参数的测量方法和试验程序 光纤几何参数: GB/T 15972.20-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [5] 陈磊, 陈进榜, 陆润华. 光纤几何参数的自动检测仪[J]. *光学学报*, 2001, 21(10): 1245-1248.
- [6] 高迎春. 基于折射近场法测量光纤折射率分布的仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [7] 赵耀, 高业胜, 郑光金, 等. 基于环形 LED 照明的光纤端面几何参数测量装置及方法: CN110672303B[P]. 2021-01-22.
- [8] 及少勇, 龚江疆, 朱丰. 单模光纤模场直径和有效面积的计算[J]. *现代传输*, 2020, 4(6):34-37.
- [9] 李春生, 李琳莹, 杨世信, 等. 单模光纤模场直径标准研究[J]. *现代传输*, 2013, (2):72-76.
- [10] 郭福源, 李连焯, 王明华. 介质平面光波导 TE<sub>0</sub> 模模场分布的高斯近似[J]. *中国激光*, 2008(2):235-239.
- [11] 闫丽梅, 付春耕, 徐建军. 基于改进插值 HHT 算法的输电线路行波故障测距[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(9):1-6.
- [12] 于媛媛, 王兆仲. 一种改进的放大图像边缘修复算法[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(15): 167-170, 233.
- [13] WANG A, LI L, MEI S, et al. Hermite interpolation based interval shannon-cosine wavelet and its application in sparse representation of curve [J]. *Mathematics*, 2020, 9(1):1.
- [14] WANG Y, ZHOU L F, FENG D. An improved numerical manifold method model for groundwater flow problems [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2021, 125: 218-232.
- [15] 彭丹, 杨磊, 杨家强. 热膜式气流量传感器指数过渡分段拟合方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(10):1990-1998.
- [16] 高嵩, 何卓峻, 刘子岳, 等. 基于机器学习的差异融合分析在空气质量预测中的应用[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(18):85-92.
- [17] 黄静, 廉小亲, 陈彦铭, 等. 基于 OLS 法及改进 LM 法的 ICP-AES 非线性标准曲线拟合方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(8):99-106.
- [18] 祖鹏. 光纤近场测量研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

### 作者简介

赵仁燕, 硕士研究生, 主要从事光电测试和生物医学光子学方面的研究。

E-mail: 2545633481@qq.com

郑泽希(通信作者), 博士, 博士后研究人员, 主要从事超精密加工与测试和微纳机械方面的研究。

E-mail: zexizheng@outlook.com