

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106522

基于小波及改进 Canny 算子的光纤涂覆层几何参数测量

赵仁燕¹ 李祥鹏¹ 涂建坤² 江斌² 郑刚¹

(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.上海电缆研究所 上海 200093)

摘要: 光纤涂覆层对光纤的性能有较大影响。在涂覆层几何参数的测量过程中,由于涂覆层的切割过程易产生较大形变,而且往往造成边缘模糊,因此直接对其进行边缘拟合求几何尺寸的方法会造成较大误差。使用小波阈值法去除图像高频信号中的噪声部分,保护边缘信息,使用自适应阈值的 Canny 算子提取有效边缘,利用可变的半径限制在形变较大的情况下区分边缘,最后通过函数拟合求取几何参数。以一次涂覆层直径为例,仪器测得直径为 185.298 μm ,重复测量精度为 0.112 μm ,当切割条件不好时,仪器测量值变为 184.516 μm ,测量精度变为 0.198 μm 。该方法前后测量值为 184.599、184.613 μm ,测量精度分别为 0.054、0.075 μm ,实验对比表明,该方法有效提高了光纤涂覆层几何参数测量的准确性与稳定性。

关键词: 光纤涂覆层;几何参数;小波阈值去噪;改进 Canny 算子

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 coating geometric parameters based on wavelet and improved Canny operator

Zhao Renyan¹ Li Xiangpeng¹ Tu Jiankun² Jiang Bin² Zheng Gang¹

(1. Shanghai Engineering Research Center of Interventional Medical Device, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Cable Research Institute, Shanghai 200093, China)

Abstract: Fiber coating is very important to the performance of fiber. In the process of measuring the geometric parameters of the coating layer, because the cutting process of the coating layer is easy to produce a large deformation, and often causes the edge fuzzy, so the method of direct edge fitting to obtain the geometric size of the coating layer will cause a large error. The wavelet threshold method is used to remove the noise part in the high-frequency signal of the image to protect the edge information. The effective edge is extracted by the Canny calculation of adaptive threshold. The variable radius is used to limit the edge in the case of large deformation, and the geometric parameters are obtained by function fitting. Taking the diameter of a coating layer as an example, the diameter measured by the standard instrument is 185.298 μm , and the repeat measurement accuracy is 0.112 μm . When the coating layer is not cut properly, the measurement value of the instrument becomes 184.516 μm and the measurement accuracy becomes 0.198 μm . The measured values before and after the method are 184.599 and 184.613 μm , and the measurement accuracy is 0.054 and 0.075 μm respectively. Experimental comparison shows that the method effectively improves the accuracy and stability of the measurement of the geometric parameters of the optical fiber coating.

Keywords: optical fiber coating;geometric parameters;wavelet threshold denoising;improved Canny operator

0 引言

光纤涂覆层对光纤的性能有很大影响。通常光纤的涂覆层有两层,其内涂层较软,弹性模量低(1.00 MPa),起到缓冲层的作用,用以改善光纤的抗弯曲性。外涂层较硬,弹

性模量高(600 MPa),耐磨损,作为保护层,用以增强光纤的机械性能^[1]。光纤涂层需满足剥离力要求,当外涂层截面积大于 1 800 μm^2 时,可满足剥离力要求。例如当光纤涂层直径为 245 $\pm$ 5 μm 时,内涂层直径应小于 190 μm ^[2],而缓冲层和保护层的厚度同样影响着光纤的使用性能^[3-4]。

收稿日期:2021-04-26

因此,为保证光纤的质量,对光纤涂覆层几何参数精确快速的测量是必需的。

现有国标中对光纤涂覆层几何尺寸的测量主要采用侧视光分布法和机械法^[5]。侧视光分布法从不同角度测出光纤包层,一次和二次涂层直径的最大值和最小值。由于光纤本身具有的聚焦能力会影响测量精度,侧视光分布法的测量精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右^[6]。机械法则是直接利用夹具测量最外层涂覆层的直径,测量参数少,不能满足现代光纤生产厂家的要求。沈奶连等^[7]利用近场光分布法研制出的FGM-5光纤几何参数测量仪测量参数多,测量速度快。但由于涂覆层的切割过程易产生较大形变,而且往往造成边缘模糊,在提取涂层边缘,特别是一次涂层的边缘时会有较多噪声影响边缘的提取,导致测量结果出现误差。

由于图像噪声大多存在于高频信息中,本文采用小波阈值法对图像高频部分进行滤波处理,同时可以很好地保护边缘信息。其次用Canny边缘检测算子将边缘提取出来,利用Otsu最大类间方差法自动选出高低阈值,抑制噪声,通过可变的半径限制将内外边缘分离,并同时进一步去除部分噪声。最后利用椭圆函数多次拟合计算出涂覆层的直径、不圆度、同心度误差等参数,通过对拟合后的边缘直接寻找其之间的最小距离作为涂覆层的厚度,确定其最大和最小厚度。

1 图像预处理

利用近场光分布法对光纤端面进行显微光学放大后通过CCD相机接收图像,并输入电脑^[8-9]。光纤涂覆层端面图像如图所示,图1为仅对光纤纤芯通光,涂覆层及包层不通光显示为黑色,用于二次涂覆层的测量。图2为在光纤涂覆层端面向后合适长度处剥离涂覆层后照入光源,光经各涂覆层传导将涂覆层端面照亮,根据各层不同的材料衰减系数及不同的光入射角区分各层次^[6],用于一次涂覆层的测量。经放大和CCD采集的数字图像通常存在较多噪声干扰,需要先对图像进行滤波去噪处理。下面以一次涂覆层为例,展开说明。

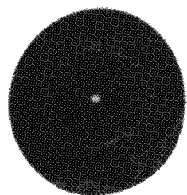


图1 二次涂覆测试图

在对图像进行有效滤波的同时,往往会使滤波后图像的熵增高,细节丢失。小波阈值法可以有效地去除高频信号中的噪声部分,很好地保护边缘信息,在图像滤波方面得到广泛应用。小波阈值法去噪的主要原理是:根据小波变换具有的能量集中特性,含噪信号经由小波变换后,使得

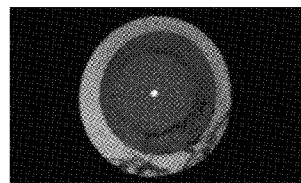


图2 一次涂覆测试图

噪声成分的能量分布在整个小波域但主要集中在高频部分,而信号的能量集中分布在少数几个幅值较大的小波系数上,其中噪声的小波系数幅值小于信号的小波系数幅值,因此只要合理的选取阈值,就能有效地实现信号和噪声的分离^[10]。

小波阈值法主要有分解、阈值处理和重构3个步骤^[11-12]。一般来说,硬阈值函数的不连续会导致重构出来的图像信号呈现震荡,软阈值函数存在的固定偏差会导致重构出来的信号过于平滑。本文采用一种改进的小波阈值函数^[13],在一定程度上解决了震荡和边界模糊的问题。本文采用的小波阈值函数如式(1)所示。

$$\tilde{W}_{j,k} = \begin{cases} [\text{sign}(W_{j,k})] \left(|W_{j,k}| - \frac{2(1-\rho)\lambda}{1 + e^{\frac{\rho}{\lambda}(|W_{j,k}|-\lambda)^n}} \right), & |W_{j,k}| \geq \lambda \\ \text{sign}(W_{j,k}) \rho \frac{|W_{j,k}|^2}{\lambda}, & |W_{j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ, λ, n 为可调参数。阈值设定:

$$\lambda = \frac{\sigma \sqrt{2 \ln(M \times N)}}{2j - 1} \quad (2)$$

式中: j 为分解尺度, σ 为噪声标准差,定义为:

$$\sigma = \frac{\text{median}(|W_{1,k}|)}{0.6745} \quad (3)$$

式中: $\text{median}(|W_{1,k}|)$ 为第1层小波分解系数绝对值的中值,0.6745为高斯噪声标准方差的调整系数。滤波后图片如图3所示。

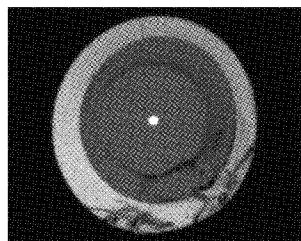


图3 小波阈值去噪

2 边缘提取

2.1 传统的Canny算子

Canny算子提取边缘主要分为4个步骤^[14-15]:

1) 高斯滤波器平滑图像。高斯函数类似于正态分布。对于一个位置 (m, n) 的像素点,其灰度值为 $f(m, n)$ 。那么经过高斯滤波后的灰度值将变为:

$$g_{\sigma}(m, n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{m^2+n^2}{2\sigma^2}} \cdot f(m, n) \quad (4)$$

2) 一阶差分偏导计算梯度值和方向。利用 x 和 y 的一阶微分算子 G_x 、 G_y 计算梯度幅值和方向:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

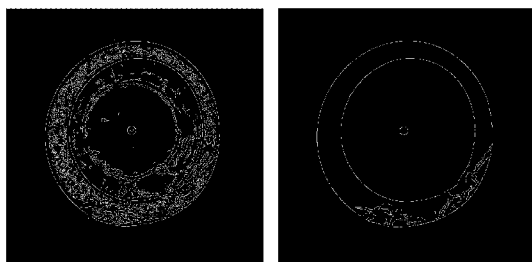
$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (6)$$

3) 对梯度值幅值进行非极大值抑制。将待判断的像素梯度值 $G(x, y)$ 与沿着梯度方向的 $G(x \pm 1, y \pm 1)$ 进行比较, 如果该像素点的梯度幅值没有沿梯度方向的两个相邻像素的梯度值大, 令 $G(x, y) = 0$, 说明该点不是边缘点。

4) 用双阈值算法检测和连接边缘。设置双阈值 t_1, t_2 且 $t_1 \leq t_2$, 对于大于 t_2 的点确定为边缘; 小于 t_1 的点判定为非边缘, 予以排除; 在 t_1, t_2 之间的点, 通过搜索其领域范围判断是否存在边缘点。

2.2 改进 Canny 算子提取边缘

使用 Canny 算子作边缘检测时需要人为的设置阈值, 或者默认自动给出阈值对提取出的边缘进行噪声抑制。通常, 不同的图像需要给出不同的阈值, 阈值过低会产生很多假性边缘, 即干扰边缘多, 阈值过高则边缘会被当成噪声去除, 如图 4(a) 所示。为了去除干扰, 本文采用自适应阈值的 Canny 边缘检测^[16]。利用 Otsu 最大类间方差法, 将一幅图像按照灰度划分为前景与背景两部分, 遍历图像灰度范围 $0 \sim (L-1)$ 内的像素灰度, 通过计算对应方差, 并不断比较, 获得前景与背景之间的最大类间方差, 得到最优阈值。获得的最优阈值作为双阈值的低阈值 Tl , 选择 $1.6 \times Tl$ 的阈值作为高阈值 Th 对噪声点予以剔除, 如图 4(b) 所示。



(a) 传统Canny算子提取边缘 (b) 改进Canny算子提取边缘

图 4 Canny 算子边缘检测

提取边缘后, 为了将一次涂层和二次涂层边缘分开, 同时去除边缘周围存在的部分噪声, 通常使用的是通过对半径进行限制将内边缘分离出来。但是对于形变较大的涂覆层, 用固定半径进行限制去除外边缘, 有其一定的局限性。若半径设置过小容易将偏离中心较大的边缘一起去掉, 得到的边缘不够完整, 过大则不能很好地去除提取边缘时附带的噪声, 造成后续测量的误差较大。本文先初步确定圆心, 以圆心到一次涂层边缘的最大距离为半径画圆, 将圆外的点去除, 并通过形态学进一步滤除噪声, 这样可以保留较为完整的一次涂层边缘, 如图 5 所示。

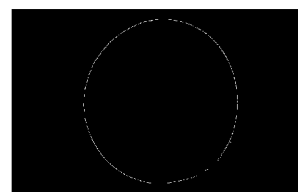


图 5 一次涂层边缘

3 曲线拟合计算几何参数

求解光纤涂覆层几何参数需要对边缘进行曲线拟合。光纤边缘可以近似看作为椭圆, 普遍使用的是用最小二乘法进行椭圆函数拟合。由于最小二乘法椭圆函数拟合对数据没有选择, 容易受到噪声点的影响。本文在进行椭圆拟合时设定双向阈值^[17-19], 对不在阈值范围内的数据剔除后再进行椭圆函数拟合, 从而有效提高测量准确性。如图 6 所示, 黑色粗实线部分为剔除误差数据后拟合得到的椭圆, 可以看出, 拟合出的边缘与原始数据的边缘达到最佳吻合。

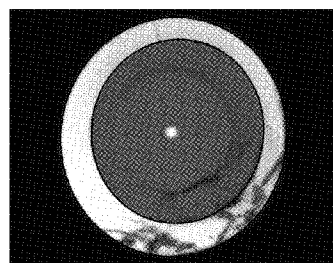


图 6 剔除误差数据后的拟合椭圆

获得光纤涂覆层边缘椭圆图形的长短径, 中心坐标及旋转角后, 可利用式(7)~(9)计算出涂覆层直径 d , 不圆度 ∂ 以及涂/包同心度误差 l 。

$$d = \frac{a+b}{2} \quad (7)$$

$$\partial = \frac{a-b}{d} \times 100\% \quad (8)$$

$$l = [(X_{pc} - X_{cl})^2 + (Y_{pc} - Y_{cl})^2]^{1/2} \quad (9)$$

式中: a, b 为涂覆层长短径; X_{pc} 和 Y_{pc} 为涂覆层中心坐标; X_{cl} 和 Y_{cl} 为包层中心坐标。

测量光纤涂覆层厚度时, 选取不同的中心会导致厚度有所差别。如图 7 所示, 分别选取一次涂层圆心 E 、二次涂层圆心 F 时, 得到不同的厚度 AB, AC 。本文提出一种不需要依赖选取中心点的计算方法, 直接求出点 A 到一次涂层边缘最近的距离。测量方法如下:

1) 选取二次涂层边缘上一点, 遍历一次涂层边缘所有点, 求与一次涂层边缘上与该点距离最近点的坐标, 算出两点之间的距离;

2) 按照步骤 1), 遍历二次涂层上所有点, 分别找到一次涂层上与二次涂层边缘点距离最近点的坐标, 算出距离;

3)找出所有距离中最大和最小距离,即为二次涂层的最大和最小厚度值。

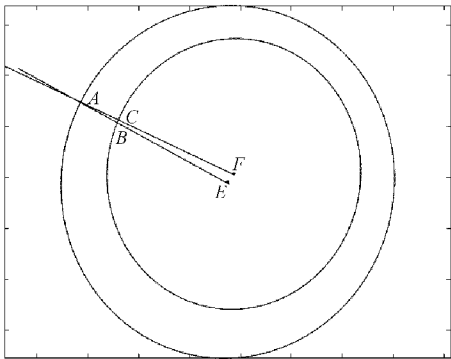


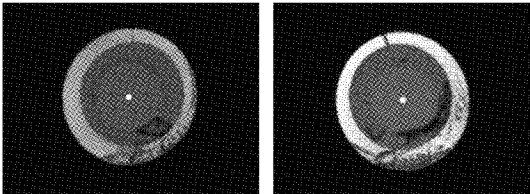
图 7 拟合后的内外边缘

4 测量数据与讨论

利用上海电缆研究所(原机械工业部所属)生产的 FGM-5 光纤几何参数测试仪测量单模光纤 G652 的涂覆层几何参数,包括一次涂覆层直径 d_1 、二次涂覆层直径 d_2 、一次涂覆层不圆度 ∂_1 、二次涂覆层不圆度 ∂_2 、一次涂覆层/包层同心度误差 l_1 、二次涂覆层/包层同心度误差 l_2 、一次涂覆层最小厚度 δ_{1_min} 、最大厚度 δ_{1_max} 、二次涂覆层最小厚度 δ_{2_min} 、最大厚度 δ_{2_max} 。该仪器对涂覆层的主要测量指

标^[6]为:涂覆层直径重复测量精度 $\leq 1.00\ \mu\text{m}$,涂覆层不圆度重复性测量精度 $\leq 0.4\%$,同心度误差重复测量精度 $\leq 1.00\ \mu\text{m}$ 。根据国标 GB/T 977.1-2008^[5]中要求,单模光纤的涂覆层直径为 $(245\pm 10)\ \mu\text{m}$,包层/涂覆层同心度误差 $\leq 12.5\ \mu\text{m}$ 。本文测量方法所用的硬件系统即为 FGM-5 光纤几何参数测试仪。

在切割过程中,当涂覆层产生较大形变,而且边缘区域模糊程度较大时,测量结果会有较大误差。本文选取两组数据作对比。当涂覆层形变较小,对应光纤涂覆层端面如图 8(a)所示,FGM-5 测试仪实测参数如表 1 所示,表 2 为本文方法得到的实测数据。当涂覆层形变较大,对应光纤涂覆层端面如图 8(b)所示,FGM-5 测试仪实测参数如表 3 所示,表 4 为本文方法得到的实测数据。其中标准偏差为 STDEVP 函数计算得到,代表 5 组实验数据相对其平均值的离散程度。



(a)形变较小时的涂覆层端面图 (b)形变较大时的涂覆层端面图

图 8 涂覆层测试图

表 1 FGM-5 光纤涂覆层几何参数测量数据

实验组数	$d_1/\mu\text{m}$	$\partial_1/\%$	$l_1/\mu\text{m}$	$\delta_{1_max}/\mu\text{m}$	$\delta_{1_min}/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	$\partial_2/\%$	$l_2/\mu\text{m}$	$\delta_{2_max}/\mu\text{m}$	$\delta_{2_min}/\mu\text{m}$
1	185.209	2.680	8.009	39.010	22.784	240.890	2.820	2.361	34.266	22.385
2	185.410	2.559	8.029	39.019	22.744	241.081	2.835	2.523	34.237	22.468
3	185.220	2.560	8.084	39.061	22.644	241.081	2.667	2.626	34.038	22.413
4	185.194	2.537	8.181	39.085	22.572	240.869	2.856	2.575	34.231	22.395
5	185.458	2.764	8.428	39.279	22.466	240.852	2.864	2.615	34.342	22.315
平均值	185.298	2.620	8.146	39.091	22.642	240.955	2.808	2.540	34.223	22.395
标准偏差	0.112	0.088	0.153	0.098	0.115	0.104	0.072	0.097	0.100	0.049

表 2 实测的涂覆层几何参数测量数据

实验组数	$d_1/\mu\text{m}$	$\partial_1/\%$	$l_1/\mu\text{m}$	$\delta_{1_max}/\mu\text{m}$	$\delta_{1_min}/\mu\text{m}$	$d_2/\mu\text{m}$	$\partial_2/\%$	$l_2/\mu\text{m}$	$\delta_{2_max}/\mu\text{m}$	$\delta_{2_min}/\mu\text{m}$
1	184.544	2.550	7.912	36.891	20.891	241.121	2.897	2.591	34.163	22.314
2	184.682	2.446	7.911	36.946	20.969	241.299	2.850	2.611	34.135	22.426
3	184.630	2.426	7.794	36.734	20.947	241.092	2.864	2.490	34.070	22.383
4	184.538	2.602	7.841	36.867	20.996	241.097	2.864	2.496	34.077	22.310
5	184.602	2.519	7.849	36.826	20.928	241.073	2.854	2.481	34.139	22.270
平均值	184.599	2.509	7.861	36.853	20.946	241.136	2.886	2.534	34.366	22.498
标准偏差	0.054	0.065	0.045	0.071	0.036	0.083	0.017	0.055	0.037	0.056

表 3 FGM-5 光纤涂覆层几何参数测量数据

实验组数	$d_1/$ μm	$\partial_1/$ %	$l_1/$ μm	$\delta_{1_max}/$ μm	$\delta_{1_min}/$ μm	$d_2/$ μm	$\partial_2/$ %	$l_2/$ μm	$\delta_{2_max}/$ μm	$\delta_{2_min}/$ μm
1	184.659	3.571	6.878	37.776	23.100	241.432	3.978	2.107	37.401	20.594
2	184.593	3.528	6.353	37.218	23.707	241.625	4.064	2.441	37.420	20.758
3	184.543	3.541	6.546	37.434	23.505	241.425	3.991	2.163	37.319	20.588
4	184.655	3.418	6.479	37.392	23.403	241.369	3.991	2.386	37.547	20.530
5	184.129	3.927	7.103	37.606	23.764	241.639	4.008	2.331	37.043	20.526
平均值	184.516	3.597	6.671	37.485	23.496	241.498	4.006	2.286	37.346	20.599
标准偏差	0.198	0.173	0.277	0.191	0.237	0.112	0.030	0.129	0.168	0.084

表 4 实测的涂覆层几何参数测量数据

实验组数	$d_1/$ μm	$\partial_1/$ %	$l_1/$ μm	$\delta_{1_max}/$ μm	$\delta_{1_min}/$ μm	$d_2/$ μm	$\partial_2/$ %	$l_2/$ μm	$\delta_{2_max}/$ μm	$\delta_{2_min}/$ μm
1	184.516	3.549	6.332	35.418	21.590	241.500	3.981	2.670	36.964	20.585
2	184.660	3.448	6.494	35.678	21.643	241.712	4.028	2.306	36.969	20.719
3	184.592	3.467	6.432	35.515	21.530	241.507	3.972	2.470	36.885	20.623
4	184.566	3.446	6.481	35.544	21.475	241.489	3.987	2.629	37.074	20.498
5	184.731	3.420	6.524	35.698	21.616	241.741	4.023	2.491	37.134	20.563
平均值	184.613	3.466	6.453	35.571	21.571	241.590	3.998	2.513	37.005	20.518
标准偏差	0.075	0.044	0.067	0.105	0.061	0.112	0.023	0.129	0.088	0.073

由表 1 和 2 可以看出,在测量装置的硬件系统一致的情况下,本文方法的测量数据与 FGM-5 测试仪的测量结果基本一致,符合国标要求,对涂覆层直径的重复测量精度可达 $0.054 \mu\text{m}$,一次涂层不圆度重复测量精度可达 0.065% ,二次涂层不圆度重复测试精度可达 0.017% 。对于一次涂层最大和最小厚度的测量重复测试精度可达 0.071 和 $0.036 \mu\text{m}$ 。大部分参数的重复测量精度略优于标准仪器的测量精度。

由表 3 和 4 可以看出,当涂覆层形变较大,边缘存在较多干扰噪声时,标准仪器测量各参数的重复测量精度受到了不同程度的干扰。而本文方法在边缘干扰噪声较多,形变较大时,仍能保持良好的测量结果一致性。特别对于一次涂层的直径和不圆度,重复测量精度分别为 $0.075 \mu\text{m}$ 和 0.044% ,和表 2 中一次涂层直径和不圆度的重复测量精度的差值为 $0.021 \mu\text{m}$ 和 0.021% ,标准仪器的两组测量数据中一次涂层直径和不圆度的重复测量精度差值为 $0.086 \mu\text{m}$ 和 0.085% 。实验表明,相较于标准仪器测量,本文方法的重复测量精度更高。

5 结 论

本文用小波阈值法对图像去噪和改进的 Canny 算子提取边缘。小波阈值法可以去除图像高频信号中的噪声部分,保护边缘信息。利用 Otsu 算法得到自适应的 Canny 算子的高低阈值,抑制噪声对边缘的干扰,可变的半径限制在涂覆层形变较大的情况下也能将内外边缘分离。直

接用函数拟合后外边缘上的点到内边缘的最短距离确定涂覆层的最大和最小厚度,避免中心点的选取对厚度测量的影响。实验结果表明,本文方法提高了涂覆层几何参数测量的准确性和稳定性,特别是在涂覆层边缘比较模糊、形变较大时,本文方法可以保持测量结果的一致性。

参考文献

- [1] 涂亚庆,刘长兴. 光纤智能结构[M]. 重庆:重庆出版社,2000:65-67.
- [2] 陈炳炎. 光纤光缆的设计和制造[M]. 浙江:浙江大学出版社,2020:300-303.
- [3] 宁四平,段琳琳,王彬. 涂覆尺寸对 $200 \mu\text{m}$ 光纤性能影响的研究[J]. 光通信技术,2019,43(10):11-15.
- [4] EKICI C, DINLEYICI M S. A practical approach for optical characterization of a film coated on the optical fiber[J]. Optical Fiber Technology,2017,36:382-386.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 15972.21-2008, 光纤试验方法规范 第 21 部分:尺寸参数的测量方法和试验程序—涂覆层几何参数[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [6] 沈奶连,涂建坤,王建财. 一种光纤涂覆层几何参数的检测方法:CN103115568A[P]. 2013-05-22.
- [7] 沈奶连,涂建坤,王建财,等. 光纤几何参数测试仪的研究与设计[J]. 现代传输,2008(6):51-54.
- [8] LI Y M, XIANG H Z, TU J K, et al. Measurement of optical fiber geometry parameters with bessell

- function fitting method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 28(2): 74-81.
- [9] 夏于生. 基于近场光分布法的光纤涂覆层几何参数测试[J]. 现代传输, 2019(6): 63-66.
- [10] 孙康泰, 羿旭明, 方壮. 基于 Canny 算子边缘检测的小波阈值去噪方法[J]. 数学杂志, 2015, 35(6): 1388-1392.
- [11] 张绘娟, 张达敏, 闫威, 等. 基于改进阈值函数的小波变换图像去噪算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(5): 1545-1548, 1552.
- [12] 吴红卫, 李铎, 顾思洪. 小波滤波在时间同步系统中应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 182-189.
- [13] 贾文良, 陈雨, 陈强. 基于改进的小波阈值图像去噪算法[J]. 微电子学与计算机, 2020, 37(10): 24-29.
- [14] 赵子润, 高保禄, 郭云云, 等. 基于改进 Canny 算法的噪声图像边缘检测[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(12): 202-206, 212.
- [15] 阙禄松, 王明泉, 张俊生, 等. 基于 Canny 算子和形态学滤波的焊缝图像背景去除技术[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 10-14.
- [16] 宋人杰, 刘超, 王保军. 一种自适应的 Canny 边缘检测算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 72-76.
- [17] 曹俊丽, 李居峰. 基于莱特准则的椭圆拟合优化算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(1): 273-277.
- [18] LIN S, JUSKO O, HARTIG F, et al. A least squares algorithm for fitting data points to a circular arc cam[J]. Measurement, 2017, 102: 170-178.
- [19] 李一鸣, 涂建坤, 项华中, 等. 光纤几何参数测量的椭圆函数多次拟合法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(23): 60-65.

作者简介

赵仁燕, 硕士研究生, 主要研究方向为光电测试和生物医学光子学。

E-mail: 2545633481@qq.com

郑刚(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电测试和生物医学光子学。

E-mail: gangzheng@usst.edu.cn