



任文佳, 夏于生, 依晓春. 光纤涂覆层几何性能测试系统的研究与设计[J]. 电线电缆, 2025, 68(7): 60-65.
REN W J, XIA Y S, YI X C. Research and design of geometric performance testing system for optical fiber coating layer[J]. Wire & Cable, 2025, 68(7): 60-65.
DOI: 10.16105/j.dxdl.1672-6901.20250136

光纤涂覆层几何性能测试系统的研究与设计

任文佳¹, 夏于生¹, 依晓春²

(1. 上海电缆研究所有限公司, 上海 200093; 2. 上海赛克力光电技术有限责任公司, 上海 200093)

摘要: 依据 IEC 60793-1-21: 2001、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》所提供的涂覆层几何参数测量方法, 开展光纤涂覆层几何性能测试系统的设计工作。借助数字图像处理技术, 对被测光纤在不同旋转角度下的成像进行深入分析, 通过有限点拟合光纤端面, 对光纤的几何参数, 如包层、一次涂覆层、二次涂覆层等展开测量, 并进行分析及对比验证。结果显示, 该测试系统的测量结果与国外同类测量设备基本相符, 具备较高的准确性。

关键词: 侧视光分布法; 光纤涂覆层; 几何参数; 图像处理

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2025)07-0060-06

0 引言

在现代通信等众多前沿领域, 光纤凭借其卓越的传输性能和稳定的物理特性, 成为不可或缺的关键基础材料^[1]。光纤涂覆层作为光纤结构的重要组成部分, 其几何参数对光纤的综合性能起着决定性作用, 是光纤从设计研发到实际应用过程中无法忽视的核心要素^[2]。因此, 精确测量光纤涂覆层的几何尺寸对于光纤制造商来说至关重要, 它直接关系到光纤产品的质量把控、性能优化和市场竞争能力。

目前, 测量光纤涂覆层几何参数的标准方法主要有侧视光分布法和机械法。侧视光分布法是在光纤的侧面进行光纤涂覆层几何尺寸测量; 机械法则是将光纤支撑在两个平砧板之间, 依靠弹簧张力夹住光纤, 通过电子测微计读数。机械法采用接触式测量, 测量精度低, 测量参数少, 只能测量光纤最外层涂覆, 无法满足光纤生产厂家的要求。侧视光分布法可实现多种参数测量, 同时具有测量精度高的优点。基于侧视光分布法测量的实际应用中, 以美国 Photon Kinetics 公司的 PK2302 模块最为典型。

本文基于侧视光分布法, 开展对光纤涂覆层几何参数测试系统的深入研究, 包括侧视光分布法原理的剖析、光纤涂覆层几何性能测试系统的软硬件设计、二值化法等图像处理方法的介

绍^[3], 详细阐述对不同旋转角度下光纤截面进行图像处理并计算光纤涂覆层几何参数的过程^[4-6], 并对拟合结果进行对比分析。

1 光纤涂覆层几何参数系统设计

1.1 测试原理

参照 IEC 60793-1-21: 2001、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》, 对光纤涂覆层几何参数进行测量。测试系统试验装置示意图见图 1。其中, 旋转台带动被测光纤和光纤夹具一同旋转, 旋转范围为 360°。

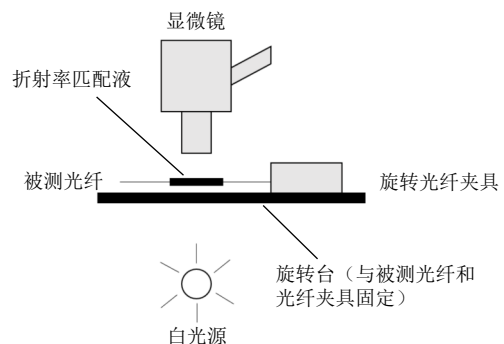


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

测量步骤如下。①截取一段光纤, 固定在旋转光纤夹具上, 浸在折射率匹配液中, 使其置于显微镜焦平面上, 光纤轴与显微镜光轴垂直。

②采用发光二极管(light emitting diode, LED)作为光源,当光线传播至光纤边界时,由于不同涂覆层之间存在折射率差异,光线遵循折射定律改变传播方向后进入光学系统,在相机成像中形成相应线条,对应不同折射率涂覆层的界面。

为得到光纤涂覆层的几何性能,需测量光纤在不同旋转角度下的包层直径、涂覆层厚度和涂覆层直径。将光纤旋转不同角度,对采集的光纤侧视图像进行分析,并对数据点进行椭圆拟合,确定椭圆的长轴、短轴,计算涂覆层直径的最大值和最小值。该测试系统能够测量涂覆层直径在 80~600 μm 的光纤,可根据不同直径的光纤更换相应尺寸的夹具,满足大尺寸光纤的测量需求。

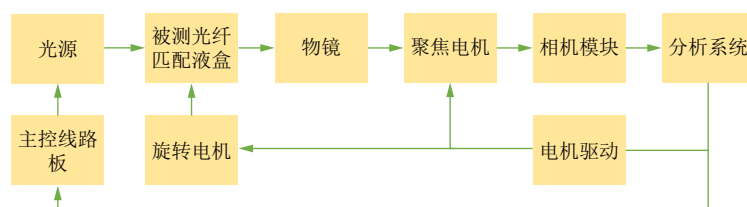


图2 测试系统总体设计框图

Fig.2 Overall design block diagram of test system

1.3 软件设计方案

该测试系统基于 Visual C# 开发环境进行编写,软件功能模块包含设备通信接口模块、系统配置模块、数据管理模块、数据显示模块,以及实现各项具体功能的子模块等。这些模块协同工作,实现测试系统对光纤几何参数的测量、图像采集、数据读取与计算、光纤截面绘制、测量数据下载等功能。设备通信接口模块主要负责上位机与各个功能模块硬件之间的通信工作,通

1.2 硬件设计方案

测试系统总体设计框图见图2,主要由系统光路、主控线路板、电机驱动模块、相机模块和分析系统组成。系统光路由光源、物镜、匹配液盒,以及用于固定光纤的夹具等支撑结构构成。主控线路板承担控制光源的重要任务,使电荷耦合器件接收到的光信号处于便于收集的状态。根据反馈控制原理,当测试系统检测到光功率水平低于预设阈值时,会自动提升照明强度。电机驱动模块包括旋转电机与聚焦电机,能够精准调节光学系统沿光轴方向的位置,从而满足不同测试场景下的聚焦需求,确保成像清晰。相机模块实现图像的数字化采集,将光学图像转换为电信号。分析系统则是对图像进行处理。

过运用多种通信协议,实现通用串行总线(universal serial bus, USB)通信和 RS232 串口通信。系统配置模块可对亮场光强、暗场光强、测试点数、角度步进、测试报告等参数进行相关设置。数据管理模块具备图像采集、几何参数计算,以及数据存储等功能,并提供多种数据保存方式。数据显示模块则用于展示测量结果。

测试流程见图3。首先检查通信接口连接状态,然后在电脑端查看光纤质量,检查视野内是

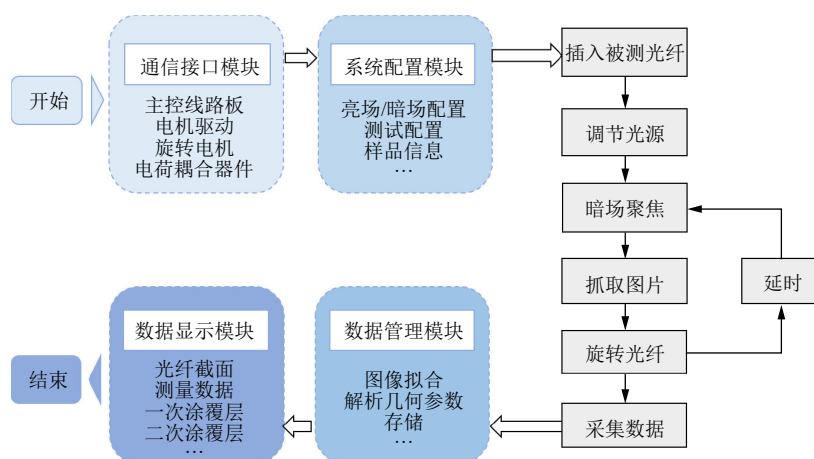


图3 测试流程图

Fig.3 Flow chart of the test

否存在气泡,确保光纤表面干净无杂质,配置好相关参数后进行测量,采用暗场光源对光纤进行精细聚焦,使图像达到清晰状态。待所有旋转角度测量完成后,测量结果以拟合后的光纤截面图和几何参数数据的形式进行保存并显示。

2 光纤图像处理

光纤图像处理是获取光纤涂覆层几何参数的核心环节,其处理效果直接影响测量结果的准确性与可靠性。本文采用图像二值化法进行图像处理,二值化法是将图像上像素点的灰度设定为0或255,使图像呈现明显黑白效果的关键技术,能够大幅减少图像数据量,突出目标轮廓,便于后续的特征提取与分析。该测试系统利用开源计算机视觉库中的函数来执行图像二值化操作,通过调用大津算法(Otsu's method, OTSU)函数来实现。OTSU函数的基本原理是通过计算图像的灰度直方图,以类间方差最大化为准则来确定图像的分割阈值,相较于手动设定阈值的方法,具有更高的准确性和适应性。常见的图像二值化算子见表1。分割阈值过程实现如下。

设图像有 L 个灰度级(0, 1, ..., $L-1$),灰度级 i

出现的概率为 $p_i(i=0, 1, \dots, L-1)$,且 $\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1$,计算前 t 个灰度级的概率之和为

$$\omega_0(t) = \sum_{i=0}^t p_i \quad (1)$$

式中: $\omega_0(t)$ 为前 t 个灰度级的概率之和。

计算后 $L-1-t$ 个灰度级的概率之和为

$$\omega_1(t) = 1 - \omega_0(t) \quad (2)$$

式中: $\omega_1(t)$ 为局部灰度级的概率之和。

计算前 t 个灰度级的平均灰度。若 $\omega_0(t)$ 不为0,则

$$\mu_0(t) = \frac{1}{\omega_0(t)} \sum_{i=0}^t i \cdot p_i \quad (3)$$

式中: $\mu_0(t)$ 为前 t 个平均灰度。

计算后 $L-1-t$ 个灰度级的平均灰度。若 $\omega_1(t)$ 不为0,则

$$\mu_1(t) = \frac{1}{\omega_1(t)} \sum_{i=t+1}^{L-1} i \cdot p_i \quad (4)$$

式中: $\mu_1(t)$ 为局部平均灰度。因此,类间方差为

$$40\sigma^2(t) = \omega_0(t)\omega_1(t)[\mu_0(t) - \mu_1(t)]^2 \quad (5)$$

式中: σ^2 为类间方差。

遍历 $t(t=0, 1, \dots, L-1)$,使得 $\sigma^2(t)$ 取得最大值,则此时的 t 即为分割阈值。

表1 常见的图像二值化算子

Tab.1 Common image binarization operators

名称	含义
THRESH_BINARY	高于阈值的像素点灰度改为255, 低于阈值的改为0
THRESH_BINARY_INV	高于阈值的像素点灰度改为0, 低于阈值的改为255
THRESH_TRUNC	截断操作, 高于阈值的像素点灰度改为阈值, 最大值失效
THRESH_TOZERO	高于阈值的像素点灰度保持不变, 低于阈值的改为0
THRESH_TOZERO_INV	高于阈值的像素点灰度改为0, 低于阈值的保持不变

2.1 图像处理过程

图像处理流程见图4。由图4可知,在图像预处理阶段,由于光纤纤芯与包层的灰度存在显著差异,利用OTSU函数能够精确计算出分割阈值。借助该阈值,可将灰度图像顺利转化为二值图像,从而高效地提取出纤芯、包层、涂覆层区域。在光纤旋转过程中,测试系统持续采集不同旋转角度下的光纤侧视图像,在完成多组图像采集后,对采集的数据进行拟合处理。

图像处理过程见图5。图5(a)为未经处理的原始图像;图5(b)为经过特定旋转角度二值化处理后的光纤轮廓图像,其光纤各层轮廓被精确划分,且层次分明;图5(c)为对光纤轮廓图进行区

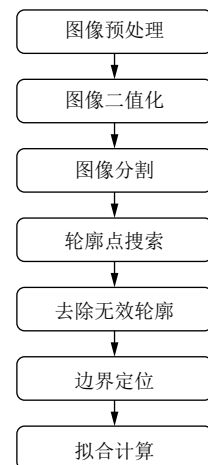


图4 图像处理流程

Fig.4 Image processing procedure

域分割后的效果, 所有不相连的区域均被成功分离为独立个体; 图 5(d) 为经过轮廓点搜索和筛选算法处理后的有效区域轮廓, 与图 5(c) 相比明显可见质量欠佳的区域已被有效剔除; 图 5(e) 为对有效轮廓进行拟合后的结果, 其中条带区域代表最终提取的光纤直线轮廓; 图 5(f) 为最终的直线拟合及距离测量结果, 成功实现了对光纤轮廓的精准分析和处理。

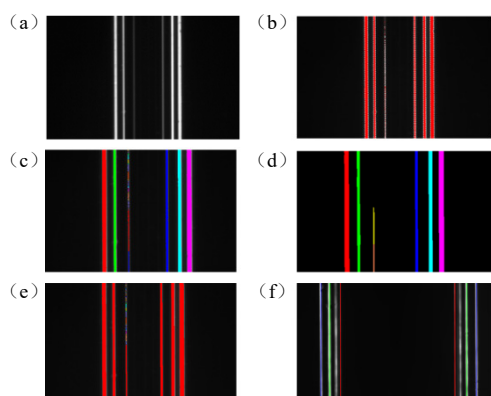


图 5 图像处理过程示意图: (a) 原图像; (b) 二值化的图像; (c) 分割后的图像; (d) 去除无效轮廓的图像; (e) 有效轮廓图; (f) 拟合后图像

Fig.5 Schematic diagram of image processing process: (a) Original image; (b) Binary image; (c) Segmented image; (d) Removing images with invalid contours; (e) Effective contour map; (f) Fitted image

2.2 拟合结果

经过多次旋转后, 对每个旋转角度下的图片进行处理, 能够获取光纤在当前旋转角度下包

层、一次涂覆层、二次涂覆层点的坐标。为便于统一分析与计算, 以包层中心作为原点, 对其余坐标进行平移变换, 这种坐标变换方式消除了因光纤放置位置不同带来的误差。最后, 对平移坐标进行拟合椭圆计算, 从而得出光纤涂覆层的几何参数, 见图 6。其中, 经算法拟合后的数据所生成的图片为光纤截面; 虚线标示光纤截面各层壁厚的测量参数; 最大壁厚与最小壁厚分别通过两条独立的虚线段精确表征, 直观呈现各层壁厚的实际分布状态。

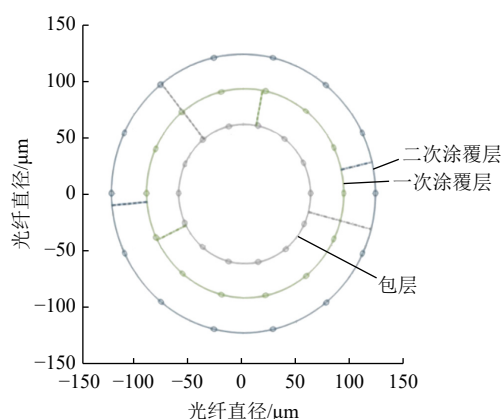


图 6 拟合后的光纤截面图

Fig.6 Fitted cross-sectional diagram of the optical fiber

为验证测试系统测量结果的稳定性, 选取长度为 2 m 的光纤样品, 对其两端进行切割处理后进行 10 次重复测量, 光纤涂覆层几何参数测量数据见表 2。由表 2 可知, 各项参数的标准偏差

表 2 光纤涂覆层几何参数测量数据

Tab.2 Test data of coating layer geometric parameters

测量序号	包层直径/ μm	一次涂覆层			二次涂覆层		
		直径/ μm	不圆度/%	同心度误差/ μm	直径/ μm	不圆度/%	同心度误差/ μm
1	125.095	207.383	0.169	3.242	246.587	0.418	4.165
2	125.109	207.351	0.149	3.233	246.598	0.409	4.175
3	125.116	207.303	0.116	3.250	246.592	0.411	4.165
4	125.122	207.378	0.249	3.244	246.597	0.411	4.183
5	125.141	207.274	0.042	3.238	246.630	0.389	4.194
6	125.153	207.319	0.157	3.234	246.587	0.390	4.193
7	125.140	207.422	0.143	3.239	246.586	0.427	4.162
8	125.138	207.346	0.178	3.241	246.581	0.413	4.169
9	125.157	207.252	0.227	3.242	246.618	0.408	4.147
10	125.146	207.283	0.250	3.246	246.563	0.428	4.169
标准偏差	0.020	0.054	0.064	0.005	0.019	0.013	0.015
重复性要求	≤ 0.05	≤ 0.40	≤ 1.00	≤ 0.80	≤ 0.20	≤ 0.40	≤ 0.80

均较小,满足重复性指标要求,充分证明了该测试系统测量结果的可靠性。

2.3 对比验证

为进一步验证该测试系统的准确性与可靠性,选取不同的样品光纤开展测试,并与其他设备的测量结果进行对比。其中,设备1为本文研制的光纤涂覆层几何性能测试系统,设备2为PK2302模块。考虑到同一盘样品光纤不同段之间可能存在自身性能差异、不同设备之间的性能差异,采用3盘样品光纤进行测量,结果见表3。

表3 不同设备测量数据对比

Tab.3 Comparison of measurement data from different devices

样品光纤	测量参数	测量结果	
		设备1	设备2
G652—NO.1	包层/ μm	124.71	125.08
	一次涂覆层/ μm	194.21	194.01
	二次涂覆层/ μm	243.99	244.01
G652—NO.2	包层/ μm	125.24	125.02
	一次涂覆层/ μm	183.91	183.29
	二次涂覆层/ μm	246.21	246.37
M625	包层/ μm	124.98	124.98
	一次涂覆层/ μm	193.14	193.05
	二次涂覆层/ μm	245.21	245.29

由表3可知,本文设计的测试系统的测量结果与国外同类方法的设备基本一致,在包层、一次涂覆层、二次涂覆层等参数的测量上,具有较高的准确性,能够满足实际生产与检测的需求。

3 结 语

本文基于侧视光分布法原理设计出光纤涂覆层几何性能测试系统,借助数字图像处理技术,对光纤成像进行精准分析,拟合出高精度的光纤截面。

从测量结果来看,光纤包层、一次涂覆层、二次涂覆层等几何参数的测量具有较好的稳定性与重复性,测量数据具有较好的可靠性;与国外同类设备的对比测量结果表明,该测试系统具有较高的一致性和准确性。

目前,该测试系统已实现国产化替代,打破了国外产品在这一领域的长期垄断,不仅为国内光纤光缆产业提供了自主可控、完整高效的一体化测试解决方案,还满足了多样化的测试场景

需求,增强了国内光纤产业在国际市场的竞争力。

参考文献 References

- [1] 王正,赵晓静.浅析光纤通信传输的应用及发展方向[J].中国新通信,2020,22(23):29-30.
WANG Z, ZHAO X J. Analysis of the application and development direction of fiber optic communication transmission[J]. China New Telecommunications, 2020, 22(23): 29-30.
- [2] GONZALEZ R C, WOODS R E. 阮秋琦,阮宇智,译.数字图像处理(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2003.
GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing (second edition)[M]. Translated by RUAN Q Q, RUAN Y Z. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [3] 夏于生,依晓春,龚江疆.基于近场光分布法特种光纤几何参数测试[J].现代传输,2022(5):27-31.
XIA Y S, YI X C, GONG J J. Measurement of geometric parameters of special optical fibers based on near-field light distribution method[J]. Modern Transmission, 2022(5): 27-31.
- [4] 王晓鹏,罗进文.基于形态学梯度重建的分水岭分割[J].光电子·激光,2005,16(1):98-101.
WANG X P, LUO J W. Watershed segmentation based on morphological gradient reconstruction[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2005, 16(1): 98-101.
- [5] 卢官明.一种计算图象形态梯度的多尺度算法[J].中国图象图形学报,2001,6(3):214-218.
LU G M. A multiscale algorithm for computing morphological gradient images[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(3): 214-218.
- [6] 孙卫芳,段志勇,朱忠杰.结合JSEG与分水岭方法的彩色图像分割[J].计算机工程与应用,2010,46(21):185-187.
SUN W F, DUAN Z Y, ZHU Z J. Color image segmentation based on jseg and watershed methods.computer engineering and applications[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21): 185-187.

收稿日期:2025-06-25

修回日期:2025-06-30

作者简介:任文佳 REN Wenjia

1995—,女,助理工程师
主要从事电子设计、质量检验工作

E-mail: renwenjia@secri.com

依晓春 YI Xiaochun (通信作者)

1977—,女,高级工程师

主要从事光电测试技术研究和装备研制、光器件的研发设计及产业化工作

E-mail: yixiaochun@secri.com

Research and Design of Geometric Performance Testing System for Optical Fiber Coating Layer

REN Wenjia¹, XIA Yusheng¹, YI Xiaochun²

(1. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China; 2. Shanghai SECRI Optics and Electronics Technology Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Design and development of a geometric performance testing system for optical fiber coating layer was conducted, based on geometric parameter measurement methods for coating layer stipulated in IEC 60793-1-21: 2001 and *Specification for Optical Fibre Test Methods—Part 21: Measurement Methods and Test Procedures for Dimensions—Coating Geometry* (GB/T 15972.21—2008). Digital image processing technology was employed to conduct in-depth analyses of the tested optical fiber images at various rotation angles. Through finite point fitting of the optical fiber end face, geometric parameters of the optical fiber were measured, including cladding, primary coating layer, and secondary coating layer. Test results were then analyzed and verified through comparison. The findings indicated that test results of the system were largely consistent with those of similar foreign measuring equipment, thereby demonstrating high accuracy.

Key words: side-view optical distribution method; optical fiber coating layer; geometric parameters; image processing