

BCF-92 POF 端面不圆度测量及应用

庞云龙¹, 刘佳^{2*}, 王林¹

(1. 内蒙古工业大学 电力学院, 呼和浩特 010080; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 塑料光纤(POF)在高能物理宇宙线探测中应用广泛, 光纤的端面质量在很大程度上决定了探测器的性能, 从而影响宇宙线能谱和成分测量的精度。以高海拔宇宙线项目中电磁粒子探测器采用的 BCF-92 POF 作为研究对象, 通过 Matlab 图像处理的方式对光纤端面图像进行了预处理, 应用迭代最小二乘椭圆拟合法确定了纤芯和包层的端面几何参数并计算了端面不圆度。实验结果表明: 95.4% 的样本光纤为合格光纤, 端面不圆度平均在 0.75% 左右, 该方法能满足高海拔宇宙线项目的探测需求。

关键词: BCF-92 塑料光纤; 图像处理; 迭代最小二乘法; 椭圆拟合; 包层不圆度

中图分类号: TN929.11; TN206 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)07-0059-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

BCF-92 POF end face
out-of-roundness measurement and applicationPANG Yunlong¹, LIU Jia^{2*}, WANG Lin¹

(1. College of electric power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Plastic optical fiber (POF) is widely used in the detection of high-energy physical cosmic rays. The quality of the optical fiber end face determines the performance of the detector largely, thus affecting the accuracy of cosmic ray spectrum and composition measurement. In this paper, the BCF-92 POF used in the electromagnetic particle detector of the high altitude cosmic ray project is taken as the research object. The image of the optical fiber end face is preprocessed by the way of Matlab image processing. The geometric parameters of the end face of the core cladding are determined by the iterative least square ellipse fitting method, and the end face out of roundness is calculated. The experimental results show that 95.4% of the sample optical fiber is qualified, and the average non circularity of the end face is about 0.75%. This method can meet the detection requirements of high altitude cosmic ray project.

Key words: BCF-92 plastic optical fiber; image processing; iterative least squares method; ellipse fitting; cladding out-of-roundness

0 引言

与石英光纤相比, 塑料光纤(POF)作为一种优良的大容量信息传输介质在短距离传输上(100 m 左右)具有绝对的优势^[1]。在高海拔宇宙射线探测器

收稿日期: 2020-01-12。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11605208)资助。

作者简介: 庞云龙(1993—), 男, 硕士研究生, 现就读于内蒙古工业大学电力学院控制科学与工程专业, 参与国家重大项目高海拔宇宙射线项目建设, 从事电磁粒子探测器性能测试、调试以及 BCF-92 塑料光纤的衰减长度测试工作等。

* 通信作者: 刘佳(E-mail: jialiu@ihep.ac.cn)。



(LHAASO)项目中, 大气中簇射产生的电磁粒子, 穿过探测器中的塑料闪烁体, 激发闪烁体内的发光介质产生光子, 光子通过 POF 收集到一端, 被光电倍增管接收并转换为电荷量。在此过程中, 若 POF 端面因机械抛光造成端面倾斜或本身质量缺陷, 使得端面不圆度增大, 便会引起除光纤本征特性以外的传输损耗, 致使电磁粒子探测器整体性能降低。因此, 为了避免端面不圆度较大的光纤装入探测器中, 计算抛光后 POF 端面的不圆度及相关几何参数尤为重要。在前人关于光纤端面不圆度及相关几何参数测量中, 祖鹏用 LabVIEW 开发了一套基于图像处理技术的近场法测量光

纤几何参数软件,但文中仅对边界轮廓进行了单次拟合,实际拟合曲线与边界像素点之间存在误差,计算的不圆度及相关几何参数也具有一定的误差^[2]。肖韶荣等人通过光学棱镜将光纤端面出射的光斑投影到显示屏上,通过电荷耦合器件(CCD)摄像机获取光纤端面的光斑图像,并对其进行处理。此方法对于多模光纤计算端面不圆度及相关几何参数精度较高,光纤的纤芯和包层边界清晰,效果良好,但对于单模光纤,得到的纤芯和包层图像界限模糊,因此该方法计算得到的不圆度及相关几何参数值也存在一定的误差^[3-5]。本文提出一种基于图像处理计算端面不圆度及相关几何参数的方法。

1 光纤参数测量原理

光纤几何参数是指仅与光纤横截面的物理结构特性相关的参数,在一定程度上反映了光纤传输性能的好坏。本文首先对纤芯和包层边界轮廓像素点做最小二乘椭圆曲线粗拟合,然后根据阈值筛选边界轮廓像素点,对满足条件的像素点进行迭代椭圆拟合,通过最终椭圆拟合曲线计算纤芯和包层不圆度的几何参数并得到不圆度数值。这种测量方法装置简单,测量快速,测量结果有效。下面给出关于光纤横截面几何参数的定义以及最小二乘法椭圆拟合的表示方法。

1.1 光纤几何参数定义

目前,国内外比较常用的几种检测光纤横截面几何参数的方法主要有:显微镜读取法、图像处理法、折射近场法、后向散射法和近场法^[6]。在光纤与接收器对接时,几何参数不仅关系到转换效率也关系到传输损耗的大小。光纤横截面几何参数具体如下:

$$\text{纤芯半径: } R_o = (R_{o\max} + R_{o\min}) / 2 \quad (1)$$

$$\text{纤芯不圆度: } \delta_o = 100\% \times (R_{o\max} - R_{o\min}) / R_o \quad (2)$$

$$\text{包层半径: } R_l = (R_{l\max} + R_{l\min}) / 2 \quad (3)$$

$$\text{包层不圆度: } \delta_l = 100\% \times (R_{l\max} - R_{l\min}) / R_l \quad (4)$$

其中, $R_{o\max}$ 、 $R_{o\min}$ 为纤芯的最大半径和最小半径, $R_{l\max}$ 、 $R_{l\min}$ 为包层的最大半径和最小半径。实际计算中,可以将纤芯、包层轮廓分别拟合成椭圆,用纤芯边界像素点拟合的椭圆曲线的长轴表征纤芯的最大半径 $R_{o\max}$,短轴表征纤芯的最小半径 $R_{o\min}$; 包层边界像素点拟合的椭圆曲线的长轴表征包层的最大半径 $R_{l\max}$,短轴表征包层的最小半径 $R_{l\min}$ 。

1.2 最小二乘法椭圆拟合表示方法

椭圆拟合是图像处理、机器视觉和模式识别中数据处理经常应用的方法。目前,经典的椭圆拟合方法

主要有最小二乘法^[7]、不变矩法^[8]和 Kalman 滤波椭圆拟合法^[9]。本文采用最小二乘法拟合椭圆,主要因为计算不圆度过程中会涉及到计算纤芯与包层的最大半径和最小半径等几何参数,在实际计算中可应用椭圆参数来表征与不圆度相关的几何参数。而在椭圆拟合方法中,当随机误差呈正态分布时,最小二乘法由最大似然估计得出最优结果,使得拟合误差的平方和最小,因此最小二乘法椭圆拟合也被认为是误差最小、可信度较高的方法之一。故采用最小二乘法拟合椭圆,根据求取的椭圆参数表征与光纤端面不圆度相关的几何参数。

二维平面坐标系中,椭圆曲线可由二元二次隐函数表达,即:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (5)$$

为使式(5)规范化,本文对椭圆方程进行了限定,即令 $F=1$ 。设拟合目标函数为:

$$f(A, B, C, D, E, F) = \sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2 \quad (6)$$

若使求得的目标函数 f 最小,需令:

$$\frac{\partial f}{\partial A} = \frac{\partial f}{\partial B} = \frac{\partial f}{\partial C} = \frac{\partial f}{\partial D} = \frac{\partial f}{\partial E} = \frac{\partial f}{\partial F} = 0 \quad (7)$$

求解式(7)的线性方程组,便可求得方程系数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 和 F 的值,从而确定椭圆方程。

2 测量系统

2.1 图像采集系统

POF 端面图像采集系统如图 1 所示。所使用的光纤型号为 BCF-92 POF, 折射率为 1.60, 纤芯直径为 1.38 mm, 包层直径为 1.50 mm。在采集端面图像前需要使用抛光设备对光纤端面进行抛光处理,将光纤垂直固定在载物台上,对准物镜放置在光纤端面下方,调整物镜倍数及焦距,直至端面图片清晰地呈现在物镜的视野中央。显微镜物镜上方的电荷耦合器件(CCD)相机会将采集的端面图像上传至电脑。本次采集光纤端面图像使用的设备为万濠精密仪器有限公司出产的 VMS-1510F 影像仪,其分辨率为 0.5 μm ,变

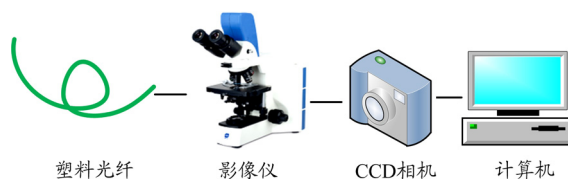


图 1 POF 端面图像采集系统

倍镜头倍率为0.7~4.5 X,物方视场为 11.1 mm~1.7 m。在采集图片过程中需要事先将光纤端面擦拭干净,防止抛光过程中光纤端面残留的抛光碎屑以及尘埃颗粒影响端面图像效果,若有尘埃颗粒难以去除,可以在擦拭布上浸入少许低浓度酒精擦拭光纤端面。另外,在拍摄过程中还需要对光纤端面进行补光处理,以使纤芯、包层轮廓分明,为后续的图像预处理、边界轮廓分离和像素点转化等方面减少信息处理量,提高拟合精度。

2.2 图像处理

采集的光纤端面图像如图 2 所示。本文通过 Matlab 软件对获取的光纤端面图像进行预处理,将 RGB 图像转换为灰度图像,对图像做单通道操作后,再通过高斯滤波去除在采集图像时产生的噪声干扰,最后使用 Canny 算子检测纤芯、包层的边界轮廓,生成的图像为二值图像,如图 3 所示。



图 2 光纤端面

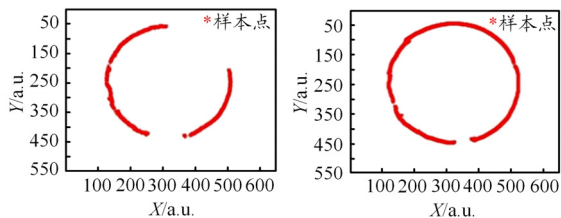


图 3 边界轮廓检测

图像处理的主要过程如下:

①求取边界轮廓像素点的坐标。遍历 Canny 算子轮廓检测图像中所有像素点,找出所有像素值为 1 的坐标点,将对应像素点坐标值存入堆栈中。

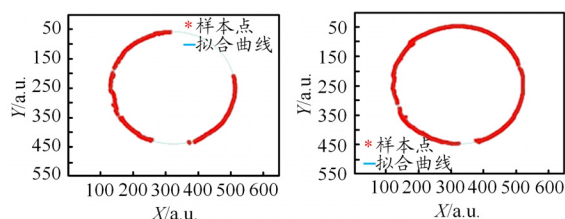
②分离纤芯、包层的边界轮廓。将获取的纤芯包层边界轮廓坐标点写入到二维直角坐标系中。对坐标系中的离散点做圆拟合,求出拟合圆的圆心坐标点及圆半径 R ;以半径 R 作为相对阈值,大于 R 的离散点为包层轮廓离散点,小于半径 R 的离散点为纤芯轮廓离散点,也可根据分离效果调整半径 R 大小,使得分离效果达到最佳。纤芯和包层的边界点分离结果如图



(a) 纤芯边界点

(b) 包层边界点

图 4 纤芯和包层的边界点分离情况



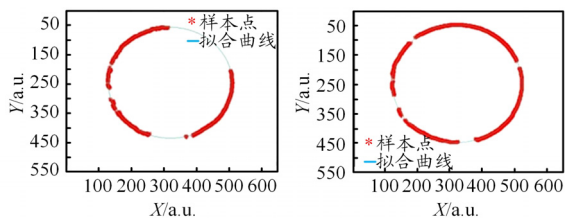
(a) 纤芯边界轮廓点

(b) 包层边界轮廓点

图 5 对分离的纤芯、包层边界轮廓点进行最小二乘椭圆曲线粗拟合

4 所示。对分离的纤芯、包层边界轮廓点分别进行最小二乘椭圆曲线粗拟合,拟合结果如图 5 所示。

③迭代最小二乘椭圆曲线精确拟合。最小二乘拟合椭圆法默认样本点是零均值的,且有共同的协方差矩阵^[9],实际拟合中存在误差较大的样本点,导致拟合参数的有偏估计,故需要去除这些杂质点,改善拟合精度。本文采用点到椭圆曲线最短距离法,首先遍历纤芯或包层的全部离散点,然后计算某一离散点到椭圆粗拟合曲线的所有距离(取最小距离值为这一离散点到椭圆曲线的最短距离),依次计算出全部离散点到曲线上的最短距离。如果距离值小于某一阈值(根据情况自己定义,一般可选为 3),则认为这些离散点为有效点,利用有效像素点再次进行最小二乘椭圆拟合;如果有效像素点个数大于当前拟合椭圆周长的一半,则认为拟合结果满足条件,否则重新筛选像素点进行拟合,直到椭圆拟合结果满足条件。精度改善中选取的椭圆方程为椭圆参数方程,其中自变量 t 的取值范围为 $[0, 2\pi]$, t 的取值越多,求得的点到椭圆曲线的最短距离越精确,精确椭圆曲线拟合如图 6 所示。



(a) 纤芯边界轮廓点

(b) 包层边界轮廓点

图 6 对分离的纤芯、包层边界轮廓点进行迭代最小二乘椭圆曲线精确拟合

④计算纤芯包层的不圆度。通过最终椭圆拟合曲线求取椭圆参数,计算纤芯的最大半 $R_{\max}$ 、最小半径 $R_{\min}$ 、包层的最大半径 $R_{\max}$ 、最小半径 $R_{\min}$ 以及中心坐标 (X_0, Y_0) 和 (X_1, Y_1) ,根据不圆度计算公式求出纤芯和包层的不圆度数值。

3 结果分析

经过以上图像处理过程,便可得到 POF 端面的不圆度。BCF-92 POF 的纤芯材料为聚苯乙烯,包层材料为丙烯酸。在制作过程中采用共挤法拉制工艺制作,因此在计算 POF 的纤芯和包层的不圆度时,应将二者区分开来计算。表 1 和表 2 分别给出了 5 根样本 POF 的纤芯和包层几何参数的计算结果。在实际工作中,本文共测取了 504 根光纤,95.4%的样本光纤为合格光纤,纤芯和包层的不圆度均小于国标中规定的 2.00%,且样本光纤端面的不圆度相差无几,平均在 0.75%左右。4.6%的样本光纤为不合格光纤,在这些光纤中,98%的光纤包层不圆度虽然小于 2.00%,但其纤

芯不圆度大于 2.00%,剩余 2%的光纤不满足包层不圆度指标。

4 结束语

本文以 BCF-92 POF 作为研究对象,通过 Matlab 图像处理的方法对光纤端面图像进行边缘检测,将纤芯和包层的边界轮廓分别应用最小二乘法拟合椭圆曲线。根据首次拟合的椭圆曲线筛选了边界误差较大的像素点,利用误差较小的有效像素点进行了迭代曲线拟合,得到了精度较高的光纤端面几何参数,计算了纤芯和包层的不圆度。实验结果表明:光纤端面不圆度的测量精度较高,满足性能要求且操作简单,易于实现,对环境测量要求不高,可用于批量测量光纤端面不圆度。

参考文献:

- [1] 苏君红,张玉龙. 光纤材料技术 [M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2009.
- [2] 祖鹏. 光纤近场测量研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [3] 肖韶荣,胡短,冒晓莉,等. 光电图像处理技术在光纤不圆度测量实验中的应用[J]. 电气电子教学学报,2008,30(3):49-55.
- [4] 胡短. 基于图像处理技术的单模光纤不圆度测量方法[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.
- [5] 冒晓莉,肖韶荣,张仙玲. 基于位图的光纤不圆度测量[J]. 光通信技术,2007,31(3):51-52.
- [6] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [7] 陈若珠,孙岳. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2017(2):35-38,46.
- [8] 邹益民,汪渤. 一种基于最小二乘的不完整椭圆拟合算法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(7):808-812.
- [9] 华瑞娟,蔡利栋. 一种多椭圆曲线拟合的新算法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2010,33(2):133-136.
- [10] 闫蓓,王斌,李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(3):295-298.

表 1 POF 纤芯的几何参数

样本光纤	最大半径 $R_{\max}$	最小半径 $R_{\min}$	不圆度 δ_0	评价
1	429.447	425.938	0.82%	合格
2	381.805	378.956	0.75%	合格
3	382.004	379.097	0.76%	合格
4	382.225	379.069	0.83%	合格
5	401.453	392.135	3.05%	不合格

表 2 POF 包层的几何参数

样本光纤	最大半径 $R_{\max}$	最小半径 $R_{\min}$	不圆度 δ_1	评价
1	451.266	447.359	0.86%	合格
2	403.690	400.668	0.75%	合格
3	404.076	400.311	0.94%	合格
4	403.887	400.332	0.88%	合格
5	440.565	437.778	1.38%	不合格

新书推荐

《高速可见光通信芯片与应用系统》是“十三五”国家重点出版物出版规划项目国之重器出版工程系列专著之一。作者朱义君是该领域的知名专家,设计并实现 50 Gb/s 超高速可见光通信系统,研制了全球首款可见光通信专用芯片组,为可见光通信的规模应用奠定了基础;新华社对相关研究成果播发通稿,国内外媒体广泛报道。

本书围绕高速可见光通信专用芯片组的设计和研制工作展开,系统地介绍了可见光通信专用芯片组、标准模块与相关应用系统,填补了国际国内还未有高速可见光通信芯片书籍这一空白。

本书的主体内容为本团队最新的科研成果,也借鉴和吸纳了国际国内其他科研工作者的学术成果。本书可供信息与通信工程、光学工程、光电材料等领域的科研人员、工程技术人员以及普通高等院校的教师、研究生阅读参考。

