

文章编号: 0253-2239(2005)03-341-5

## 光纤连接器端面几何参量自动测量仪\*

路元刚<sup>1,2</sup> 王向朝<sup>1</sup> 钟向红<sup>1</sup> 何国田<sup>1,2</sup> 郑德锋<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 报道了一种高精度测量光纤连接器端面几何参量的自动测量仪。叙述了光纤连接器的端面几何参量的测量原理。由光纤连接器端面形貌和纤芯中心坐标,可以高精度得到曲率半径、顶点偏移量、端面倾斜角和光纤高度等影响连接器性能的关键端面几何参量。该仪器体积小,自动化程度高,用户界面友好,使用方便,可测量物理接触、角度式物理接触等类型的光纤连接器端面几何参量。实际测量证明,该测量仪有很好的重复测量精度。该测量仪与美国 Dorc 公司 ZX-1 mini PMS 测量仪和 Norland 公司 NC3000 测量仪相比,测量精度水平相当。该仪器样机已通过华东国家计量测试中心的测试。

**关键词:** 光学测量; 干涉仪; 数字图像处理; 几何参量; 光纤连接器

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

## Interferometer for Endface Geometry Parameter Measurement of Optical Fiber Connector

Lu Yuangang<sup>1,2</sup> Wang Xiangzhao<sup>1</sup> Zhong Xianghong<sup>1</sup>

He Guotian<sup>1,2</sup> Zheng Defeng<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** An interferometer for measuring endface geometry parameters of optical fiber connector with high accuracy is reported. The endface topography of the optical fiber connector and the coordinates of the center of the fiber core are obtained. The endface geometry parameters, which have a great effect on the performance of optical fiber connector, are calculated. The interferometer is compact and easy to use. It can be used to measure the endface geometry parameters of physical contact, angle physical contact and other kinds of optical fiber connector. Actual measurements show that the interferometer has a good repeatability. The measurement accuracy of the interferometer is at the same level as that of the Dorc's ZX-1 mini PMS interferometer and the Norland's NC3000 interferometer. The interferometer has passed the test performed by the National Center of Measurement and Test for East China.

**Key words:** optical measurement; interferometer; digital image processing; geometry parameter; optical fiber connector

### 1 引 言

光纤连接器是使用量最多的光无源器件之一,在光纤通信系统中不可或缺。插入损耗和回波损耗是评价光纤连接器性能的主要指标,而连接器的端

面几何参量对其有较大影响。因此,为了保证光纤连接器的工作性能,提高光纤连接器的互换性,在光纤连接器研磨生产、成品检测和装配使用过程中,对其端面几何参量的检测非常必要。

\* 上海市科技发展基金(011461060)资助课题。

作者简介: 路元刚(1977~),男,安徽阜阳人,博士生,主要从事光学干涉测量和数字图像处理的研究工作。

E-mail: lu\_yuang@siom.ac.cn.

收稿日期: 2004-03-23; 收到修改稿日期: 2004-07-16

一般采用光学干涉显微术测量光纤连接器的端面几何参量。其方法是利用移相干涉术获得光纤连接器端面形貌,通过分析形貌数据得到光纤连接器的端面几何参量。文献[1,2]中报道的光纤连接器端面几何参量测量系统,仅从端面的三维形貌数据难以区分出光纤与插针体的相对位置,就难以精确确定光纤中心的位置,无法保证端面几何参量的高测量精度。同时其通过人工读取牛顿环条纹级数的方法求解端面的曲率半径,精度不高,且需人工干预。文献[3]中所述的测量系统,必须在待测光纤连接器中光纤有光输入的条件下才能确定光纤中心,需外加光源,测量过程繁琐。本文采用计算机图像采集系统,采集干涉图像和连接器端面像,使用数字图像处理技术,高精度地获得连接器端面形貌和光纤中心位置,然后采用最小二乘球面拟合算法,求解光纤连接器的端面几何参量。根据本文所述技术研制的测量仪,不需要人工干预和外加光源使光纤导光,测量精度高,操作简便,实现了光纤连接器端面几何参量的自动测量。

## 2 光纤连接器端面几何参量

影响光纤连接器插入损耗和回波损耗的端面几何参量<sup>[4]</sup>主要有曲率半径(Radius of curvature)、顶点偏移(Apex offset)、端面倾角(Angle)和光纤高度

度(Fiber height)。如果光纤高度为正值,则此高度值称为光纤突出(Fiber protrusion),反之则称为光纤凹陷(Fiber undercut)。光纤连接器端面的几何参量如图 1 所示。

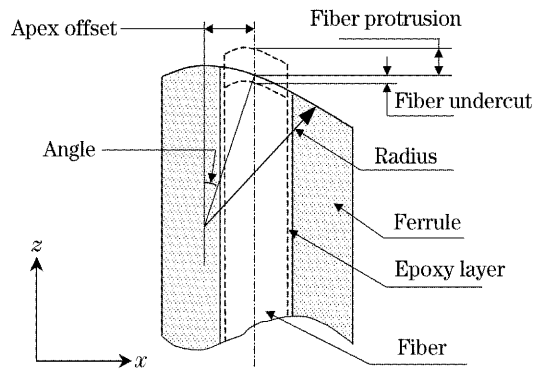


图 1 光纤连接器的端面几何参量

Fig. 1 Endface geometry parameters of an optical fiber connector

## 3 自动测量装置

本文采用泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪和移相干涉术获得光纤连接器端面形貌,利用光学成像系统和霍夫(Hough)变换圆检测方法得到光纤连接器纤芯中心坐标。由光纤连接器端面形貌和纤芯中心坐标,根据最小二乘拟合算法,高精度地得到光纤连接器的端面几何参量。装置的原理图如图 2 所示。

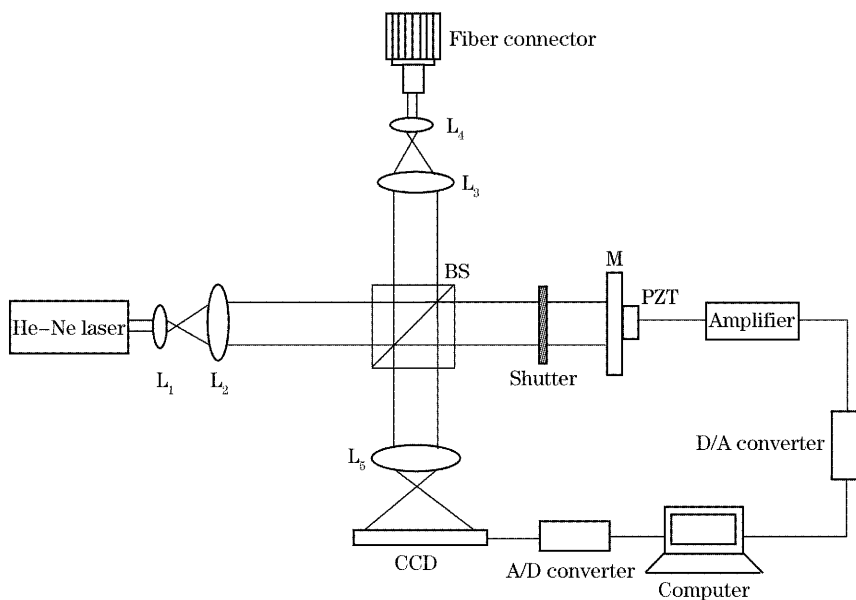


图 2 测量光纤连接器端面几何参量的干涉仪原理图

Fig. 2 Scheme of interferometer for endface geometry parameter measurement of optical fiber connector

光源是波长为632.8 nm的He-Ne激光器,激光器发出的光经透镜 L<sub>1</sub> 与 L<sub>2</sub> 准直扩束后,被分束器 BS

分为两束平行光。当电动遮光板处于不挡光位置时,平行光的一束由压电驱动器驱动的反射镜 M 反射作

为参考光,另一束由被测光纤连接器端面反射作为物光,CCD光敏面上接收的是两束光的干涉图像;当电动遮光板处于挡光位置时,参考光被阻断,CCD光敏面上接收的是光纤连接器端面像。面阵 CCD 尺寸为 1/3 英寸,像素数为  $752 \times 582$ 。CCD 摄像头获得的模拟视频图像经过模/数转换后送入计算机处理。计算机产生的数字电压经数/模转换后变为模拟电压,经电压放大器放大后驱动压电驱动器(PZT)使参考平面镜 M 沿光轴平移。被测光纤连接器夹持在多维精密调整工作台上,便于调试。工作台转动角度精密可调,不仅能测量物理接触型光纤连接器端面,而且能测量角度式物理接触型等端面类型的光纤连接器端面。测量仪结构紧凑,长 47 cm,宽 33 cm,高 15 cm,其实物图如图 3 所示。

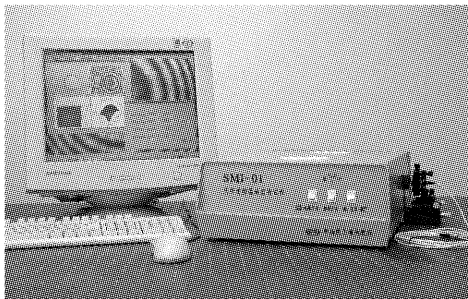


图 3 光纤连接器端面几何参量自动测量仪实物图

Fig. 3 The interferometer for endface geometry parameter measurement of optical fiber connector

仪器提供给用户的是窗口式的菜单操作环境。图像采集、图像处理过程以及测量结果均在计算机屏幕上显示,供操作者监控和观察。同时测量仪能够以二维及三维纳米分辨率显示光纤连接器端面的形貌。测量中所使用的图像处理、分析计算及形貌显示软件均采用 C++ 语言编写。软件操作界面友

好,使用方便。

## 4 测量和计算原理

### 4.1 光纤连接器端面形貌的测量

为了获得光纤连接器端面的形貌,本文采用步进移相干涉技术解算出被测光纤连接器端面对应的主值相位,然后通过相位展开技术得到被测光纤连接器端面的形貌。

#### 4.1.1 步进移相算法

泰曼-格林干涉仪中,被测光纤连接器端面上点  $(x, y)$  对应的干涉信号可表示为

$$I[x, y, \phi(t)] = I_0(x, y) \{1 + \gamma \cos[\phi(x, y) + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

式中  $I_0(x, y)$  为干涉场中相应位置处干涉光强的直流分量,  $\gamma$  为干涉条纹的调制度,  $\phi(x, y)$  为被测光纤连接器端面上点  $(x, y)$  对应的相位,  $\phi(t)$  为可控制的相位调制量。通过压电驱动器驱动参考平面镜沿光轴平移,使可控相位  $\phi(t)$  等间距地变化,通过探测不同  $\phi(t)$  对应的干涉光强来求解被测相位  $\phi(x, y)$ 。

本文采用的步进移相算法为卡尔(Carré)算法<sup>[5]</sup>,该算法只需要压电驱动器在 4 步相移中有相等的相移量,而无需知道每步相移的精确值,这样就不需要对压电驱动器严格标定。由(1)式可知,在基于卡雷算法的步进移相干涉术中,光电探测器 CCD 探测到的干涉图可表示为

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \left\{ 1 + \gamma \cos \left[ \phi(x, y) + \left( i - \frac{5}{2} \right) \alpha \right] \right\}, \quad (2)$$

式中  $i = 1, 2, 3, 4$ ,  $\alpha$  为每一步的相移量。由 4 幅干涉图可计算得到相位图,如图 4(a)所示。被测光纤连接器端面上点  $(x, y)$  对应的相位可以表示为

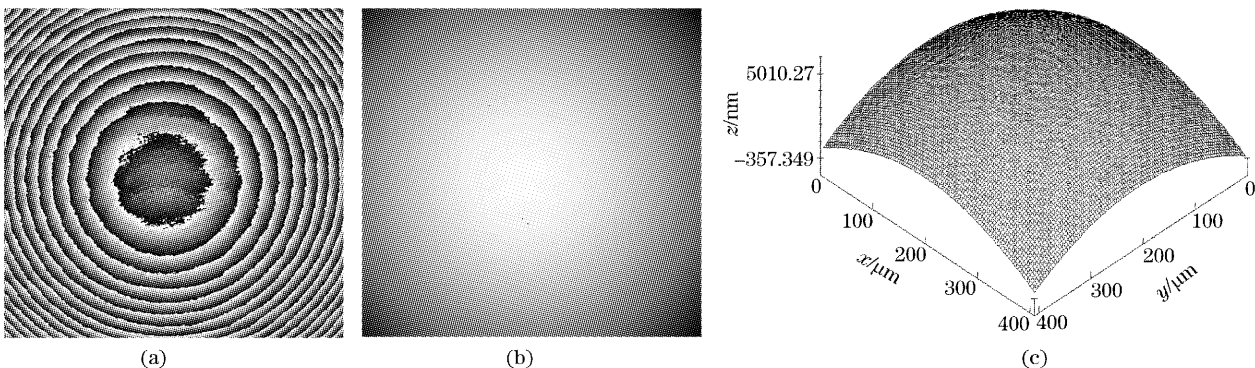


图 4 (a)被测端面的主值相位图, (b) 新算法的相位展开结果, (c) 光纤连接器端面的 3 维形貌

Fig. 4 (a) Wrapped phase map of the measured optical fiber connector endface, (b) unwrapped result by use of the proposed new algorithm, (c) 3-D representation of the optical fiber connector endface

$$\phi = \arctan \left[ \frac{\sqrt{[3(I_2 - I_3) - (I_1 - I_4)][(I_2 - I_3) + (I_1 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right], \quad (3)$$

#### 4.1.2 相位展开算法

由于反正切函数得到的相位是被测光纤连接器端面对应的实际相位在  $2\pi$  主值区间内的主值相位, 必须通过相位展开算法重建被测光纤连接器端面对应的真实相位。现有的相位展开算法很多<sup>[6~8]</sup>, 本文采用的是一种基于调制度分析的掩模阻断相位展开新方法。它以干涉条纹的调制度数据作为主值相位图的条纹质量图, 从残差点开始在质量较低的区域生长掩模区, 通过在低质量区域平衡残差点来控制掩模区的生长, 平衡所有残差点后掩模停止生长, 然后细化掩模区域, 使其仅包含连接残差点的分支, 最后在细化后的掩模区域外展开主值相位, 所得的结果与积分路径无关。这种相位展开方法鲁棒性好, 在高噪声条件下仍能高精度地展开主值相位图。

图 4(b) 为相位展开后得到的真实相位图  $\phi(x, y)$ 。由真实相位图根据(4)式得到的光纤连接器端面形貌  $H(x, y)$  如图 4(c) 所示。

$$H(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y). \quad (4)$$

#### 4.2 光纤中心的确定

在干涉仪参考光路中设置一自动遮光板, 当遮光板阻断参考光时, 面阵 CCD 上获得的是光纤连接器端面像。由于插针体与光纤的反射率不同, 端面像中光纤边缘轮廓清晰, 可利用计算机视觉算法中的霍夫变换圆检测算法精确求得光纤的圆周和中心。

霍夫变换<sup>[9]</sup>是寻找一种从区域边界(空间域)到参量空间的变换, 用大多数边界点满足的对应的参

量来描述这个区域的边界。本文在霍夫变换圆检测算法中, 圆半径参量  $r$  的递增步长为 0.2 像元宽度, 所得到的圆心坐标可精确定位在 0.2 像元宽度的位置上, 能实现对光纤中心的精确求解。

#### 4.3 光纤连接器端面几何参量的求解

获得光纤连接器端面形貌数据后, 在插针球面上选取若干点, 采用最小二乘拟合算法来计算插针体的球心坐标和曲率半径  $R$ 。本文在插针球面上选取 3600 点的坐标数据参与最小二乘拟合计算, 可保证有较高的精度。在光纤纤芯中心位置和插针球心位置均已知的情况下可得到顶点偏移  $\Delta$ 。由图 1 易知, 端面倾角

$$\alpha = \arcsin(\Delta/R), \quad (5)$$

再由纤芯中心位置处的纤芯端点  $z$  坐标值和此处对应的最小二乘拟合球面上点的  $z$  坐标值, 获得光纤高度值  $H$ 。

整个求解过程均由计算机自动完成, 并显示光纤连接器端面几何参量的测量结果。

## 5 测量结果与分析

在温度为 21 °C, 湿度为 50%RH 的实验室环境下, 华东国家计量测试中心的检验人员在该测量仪上对物理接触型端面和角度式物理接触型端面的多个光纤连接器样品进行了测试。其中物理接触型端面的光纤连接器 PC01 的测量结果如表 1 所示。

表 1 光纤连接器 PC01 的测量结果

Table 1 Measurement results of optical fiber connector PC01

Test order	Radius /mm	Apex offset / $\mu\text{m}$	Angle /( $^\circ$ )	Fiber height /nm
1	12.865	30.31	0.135	-66.4
2	12.847	30.26	0.135	-64.1
3	12.835	30.17	0.135	-60.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
18	12.849	30.23	0.135	-67.1
19	12.853	30.26	0.135	-70.5
20	12.859	30.19	0.135	-65.6
Mean	12.847	30.20	0.135	-67.2
RMS	0.007	0.05	0.0004	5.5

由表 1 可知, 光纤连接器 PC01 的端面几何参量为: 曲率半径为 12.847 mm, 顶点偏移量为 30.20  $\mu\text{m}$ , 端面倾斜角为 0.135°, 光纤高度为

-67.2 nm。使用美国 Dorc 公司 ZX-1 mini PMS 测量仪测量同一样品得到的数据为: 曲率半径为 12.83 mm, 顶点偏移量为 29.05  $\mu\text{m}$ , 端面倾斜角为

0.130°, 光纤高度为-64.4 nm。两组数据相对比, 曲率半径相差 0.13%, 球面偏芯量相差 3.96%, 端面倾斜角相差 3.85%, 光纤高度相差 4.35%。可知本文所述的测量仪在测量准确度上与 ZX-1 mini PMS 测量仪的水平相当。

经华东国家计量测试中心的检验人员检定, 本

表 2 三种测量仪的性能指标比较

Table 2 Comparison of the performance of three different instruments

		ZX-1 mini PMS	NC-3000	SMI-01
Radius	Range	3 mm~∞	—	3 mm~∞
	Repeatability	0.10%	±0.25 mm	0.05%
Apex offset	Range	0~500 μm	—	0~150 μm
	Repeatability	0.5 μm	±3.0 μm	0.06 μm
Angle	Range	—	0°~13°	0°~12°
	Repeatability	—	±0.01°	0.0004°
Fiber height	Range	>6 μm	—	-300~300 nm
	Repeatability	1.0 nm	±0.004 μm	5.5 nm

## 6 结 论

基于本文技术研制的光纤连接器端面几何参量测量仪, 能够实现物理接触和角度式物理接触等端面类型的光纤连接器端面几何参量的高精度测量。仪器测量速度快, 体积小, 自动化程度高, 用户界面友好, 使用方便, 测量准确度和测量重复性与国外同类产品水平相当。

**致谢** 检测所用的光纤连接器样品和使用美国 Dorc 公司 ZX-1 mini PMS 测量仪测量样品 PC01 的测量报告均由上海建宝光纤技术有限公司提供, 在此表示谢意。

### 参 考 文 献

- 1 Lin Min, Huang Jianjun, Li Jingzhen. An interference testing system for optical fiber connector surface[J]. *Laser J.*, 2000, **21**(1): 33~34 (in Chinese)  
林 敏, 黄建军, 李景镇. 光纤连接器端面干涉测试系统[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(1): 33~34
- 2 Zhang Pin, Wang Ling, Feng Huajun *et al.*. A testing technology for optical fiber connector end surface[J]. *Optical Instruments*, 2002, **24**(3): 3~7 (in Chinese)

文所述 SMI-01 测量仪的指标如表 2 中“SMI-01”一栏所示。美国 Dorc 公司 ZX-1 mini PMS 测量仪和美国 Norland 公司 NC-3000 测量仪与本文所述 SMI-01 测量仪属同类测量仪器, 三者主要技术指标的如表 2 所示。由表 2 可知, 本文所述 SMI-01 测量仪的测量重复性与国外同类产品水平相当。

张 平, 王 凌, 冯华君 等. 光纤连接器端面检测技术[J]. *光学仪器*, 2002, **24**(3): 3~7

- 3 Song Jinsheng. Automatic system for assembling and inspecting connectors on single-core optical fiber[J]. *Electronic Components & Materials*, 2000, **19**(5): 37~39 (in Chinese)  
宋金声. 单芯光缆连接器的自动装配和检验系统[J]. *电子元件与材料*, 2000, **19**(5): 37~39
- 4 Samuel I-En Lin. Effect of polishing conditions on terminating optical connectors with spherical convex polished ends[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(1): 88~95
- 5 K. Creath. Phase-measurement interferometry techniques [J]. *Prog. Opt.*, 1988, (26): 349~393
- 6 D. C. Ghiglia, M. Pritt. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software* [M]. New York: Wiley, 1998
- 7 Peng Zhenjun, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on simulated annealing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 845~849 (in Chinese)  
彭震君, 钱 锋, 王学锋 等. 基于模拟退火的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 845~849
- 8 Peng Zhenjun, Qian Feng, Zhong Xianghong *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on segmenting regions containing phase jumps[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 910~915 (in Chinese)  
彭震君, 钱 锋, 钟向红 等. 基于相位跳变区划分的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(8): 910~915
- 9 W. C. Y. Lam, S. Y. Yuen. Efficient technique for circle detection using hypothesis filtering and Hough transform[C]. *IEE Proc. -Vis. Image Signal Process*, 1996, **143**(5): 292~300