

光纤测头在小型气体激光器微深孔检测中的应用

刘贱平 梁丽萍 黄 云 金世龙

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 小型气体激光器腔体增益孔的直径小于 1 mm, 深度大于 10 mm, 长径比大, 传统的方法很难对其进行测量。为了解决这种微深孔的测量问题, 介绍了一种接触测量与光学测量相结合的方法。将末端带有发光球的光纤伸入待测孔中, 在待测零件孔中做 x 、 y 方向移动, 当球与孔壁接触后, 会引起球心做相应的运动, 利用 CCD 捕获发光球的球心, 通过图像处理, 可得出接触点处测头球心的 xy 坐标, 拟合多点测量结果, 从而实现深孔的直径、圆柱度及直线度等参数的测量。还通过亚像素边缘检测技术提高了系统的测量精度, 最后采用 0 级标准环规对系统进行了验证, 其测量结果的重复不确定度优于 $0.4 \mu\text{m}$ 。并对深度为 15 mm、直径为 0.6 mm 的孔在三维测量显微镜上进行了测量, 实验证明此测量方法为大长径比的孔的检测提供了一种可行的方法。

关键词 测量; 光纤测头; 微深孔; 亚像素边缘检测技术

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0708002

Application of the Optical Fiber Prober in Measuring Micro Deep Hole of Small Laser

Liu Jianping Liang Liping Huang Yun Jin Shilong

(College of Optoelectronic Science and Engineer, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract For the role with a diameter of less than 1 mm, a depth more than 10 mm, and a larger ratio of length and diameter, it is difficult to measure these micro deep holes with traditional method. In order to solve this problem, a measurement that combines the contacting measurement and the optics measurement is introduced. By inserting and optical fiber probe with a lighting ball in its end into the role, the ball is pushed with the contraction between the ball and the hole during the xy movement of the piece. The xy coordinate of the ball can be gotten after processing the image of the lighting ball which is captured by the CCD camera. With a fitting of many measure points, the measurements of the diameter, the cylindricity and the straightness etc. of the hole are finally realized. The measurement precision is improved through using sub-pixel detection technology. At last the system is verified through zero degree standard circle, and the repeatability uncertainty of measurement result is less than $0.4 \mu\text{m}$. A hole with a depth of a hole with 15 mm and a diameter of about 0.6 mm is measured in a 3D measurement microscope, and the experiment provides a suitable method to measure the hole with big ratio of length and diameter.

Key words measurement; fiber optic probe; micro deep hole; sub-pixel edge detection technology

OCIS codes 120.4630; 060.2380; 140.1340

1 引 言

气体激光器由于具有高的频率稳定性而被广泛应用于精密测量和标定等领域。在某些场合由于体积和重量方面的原因需要使用小形气体激光器, 一般这种小型激光器腔体增益孔的直径小于 1 mm, 深度大于 10 mm, 为了保证零件质量, 在加工完后需对这些孔进行测量。对于孔的测量, 可以采用显微

镜或三坐标的方法, 但显微镜只能测量孔的表面直径。三坐标属于刚性接触测量, 目前 Carl Zeiss 和 Renishaw 的最小测头为 0.3 mm, 但为了保持其刚性, 这些测头都较短, 如 Renishaw 的测针其有效长度仅为 2 mm, 因此传统的三坐标测量法也很难对这种孔进行测量。

为了解决微深孔的测量问题, 各国学者展开了

收稿日期: 2011-02-15; 收到修改稿日期: 2011-03-28

作者简介: 刘贱平(1974—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: l_jianp@sina.com

深入的研究^[1,2],1993年日本的 Masuzawa 提出了振动扫描法,实现了直径为 0.2 mm、深度为 0.3 mm 微孔的测量,后来日本学者在此基础上进行改进,实现了直径 0.2 mm、深度为 1.0 mm 微孔的测量。1998年,德国联邦物理技术研究院和天津大学联合提出了光纤微力接触式测量方法,可以实现对直径为 0.2 mm、深度为 1.0 mm 孔的测量。2004年美国 B. Muralikrishnan 提出了光纤倾斜测孔法,实现了对直径为 0.129 mm、深度为 0.5 mm 微孔的测量。另外还有一些测量方法如微力接触式测量法^[3]、光束端面扫描法^[4]和电感位移传感器法^[5],这些方法在一定程度上实现了微孔的检测,但是长径比不大。为此本文介绍了一种光学测量与接触测量相结合的方法,通过将末端带有球形测头的光纤深入孔中,实现了大长径比微深孔的测量。

2 测量原理

随着光纤加工技术的提高,光纤除了在通信、传像和传光等领域得到广泛的应用外,还在测量领域也起到了越来越大的作用^[6,7]。如图 1 所示,系统主要由显微物镜、CCD 和光纤测头等组成。光纤测头由芯径较粗的光纤烧熔拉制加工而成^[8],带有球形测头的光纤与物镜固联在一起,光纤测头位于 CCD 物镜的物面上并与光轴基本重合,光纤另一端的灯通过透镜聚焦于光纤端面,球形测头镀有膜,当光线到达球头后经过多次反射和透射形成一个均匀的发光球。测量时,光纤测头伸入待测孔中,当光纤测头与孔壁接触并继续移动时,光纤测头的球心坐标会发生相应的变化,通过计算可得出接触点对应光纤测头的球心坐标 O_1 ,多点测量可得出 O_2, O_3, \dots, O_n 的坐标,将点 $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$ 拟合成一个圆,如图 2 所示。被测圆半径 R 等于拟合圆的半径 R_1 加上光纤测头的半径 R_p ,其圆心坐标与拟合的圆相同。

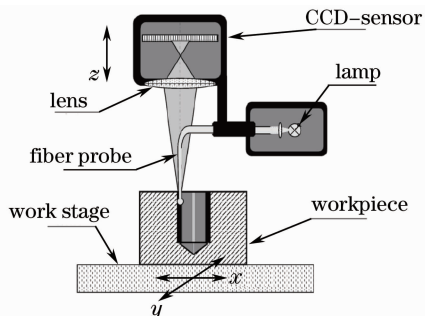


图 1 系统组成
Fig. 1 Structure of system

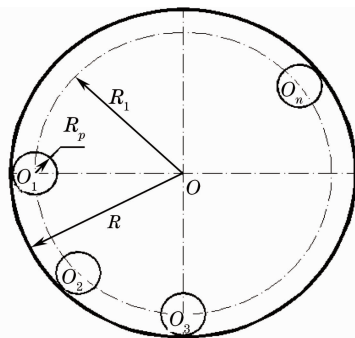


图 2 测量原理图
Fig. 2 Principle of measurement

3 光纤测头球心坐标的确定

由 2 节知,得出光纤测头在不同位置的球心坐标 $O_1(x_1, y_1, z_1), O_2(x_2, y_2, z_2), O_3(x_3, y_3, z_3), \dots, O_n(x_n, y_n, z_n)$, 是测量圆的相关参数的关键。如图 3 所示,测量时,光纤测头伸入待测孔中,工件沿某一方向移动,孔壁与测头接触,并继续沿该方向移动,孔壁推动测头一起移动至某一位置。在此过程中,不能准确得出两者刚接触时测头的球心坐标。在孔壁与球头接触前,当工件以某一速度移动时,测头球心在视场中保持静止,其坐标的变化速度与工件移动速度相同,当两者接触上后,测头与工件以同样的速度移动,因此,光纤测头的坐标变化速度为工件坐标变化的 2 倍。

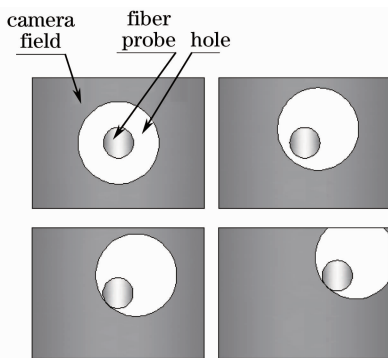


图 3 测量过程
Fig. 3 Process of measurement

在光纤测头安装时,测头与 CCD 物镜光轴可能不重合,该偏差值可以测量得出,而在计算时进行修正即可,为了方便,假定光纤测头球心与光轴重合。如图 4 所示,设测头与孔壁刚接触时测头的位置为 O_n ,其对应的坐标为 (x_n, y_n) ,当孔壁将测头推至 O'_n 时,其对应的坐标为 (x'_n, y'_n) ,此时光轴的坐标与测头并不相同,设其坐标为 (x_0, y_0) , x_0, y_0 可直接从测量机器读出,是已知的, x'_n, y'_n 可以测量得出。

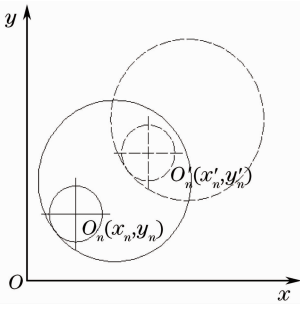


图4 坐标变化图

Fig. 4 Change of coordinates

为了计算简单,假定工件只沿 x 轴移动,则由 $2(x_0 - x_n) = x'_n - x_0$ 得

$$x_n = (3x_0 - x'_n)/2, \quad (1)$$

同样

$$y_n = (3y_0 - y'_n)/2. \quad (2)$$

多点测量可计算出 $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$ 各点的坐标值,再根据需要对圆进行拟合,如高斯圆(最小平方和)、最小外接圆法、最大内切圆法、最小区域圆法等,如图5所示。

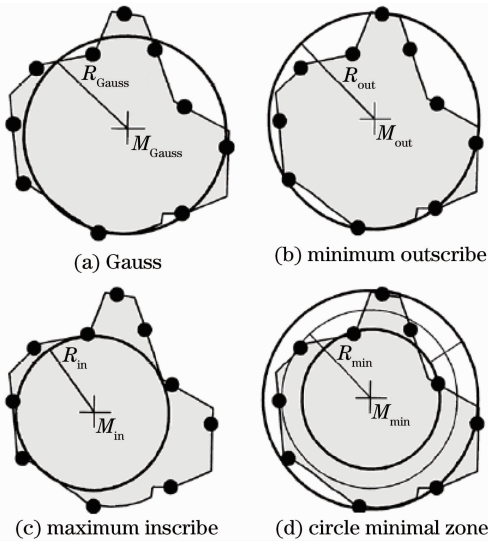


图5 拟合圆方法

Fig. 5 Method of fitting circle

4 光纤测头球心坐标的亚像素提取

光纤测头球心坐标 (x'_n, y'_n) 的精度直接影响系统的测量精度,其坐标值是通过处理测头图像的边缘而获得的,边缘提取的方法较多^[9],如常用的梯度算子、Lapacian 算子、Kissch 算子、门式算子及 Canny 算子等,这些算法的精度为 1 个像素精度,即能判断出边缘在哪个像素内,但不能判断出边缘在像素的哪个位置。显然这种像素级的精度已经不能满足实际测量的需要,因此需要更高精度的边缘提

取算法,即亚像素算法。

亚像素边缘检测技术是由 Huecke 于 20 世纪 70 年代最早提出的^[10-11],是在经典算法基础上发展起来的算法,这些算法先用经典算法找出边缘的像素级精度的位置,然后使用周围像素的灰度值作为判断的补充信息,使边缘定位于更加精确的位置。现已发展为拟合法、空间矩方法和数字相关法等多种亚像素提取方法。在众多的亚像素定位算法中,以拟合法和空间矩方法为主流发展方向,其中基于空间矩的方法以其精度高、计算过程相对简单、不受数据加性和乘性因素的影响等许多优点而在亚像素图像处理中得到了广泛的应用。

空间矩法是利用空间灰度矩来确定边缘的位置,适于任意尺寸的窗口,其基本思想是通过计算每个像素点的 4 个参数来判断该点是否为边缘点^[12]。像素点的 4 个参数分别是 k 为灰度阶跃高度, h 为背景灰度, l 为中心点到边缘的距离, ϕ 为中心点到边缘垂线与 x 轴的夹角,各参数物理意义如图 6 所示。离散图像中的一点 $f(x, y)$ 的空间矩表示为

$$M_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dy dx. \quad (3)$$

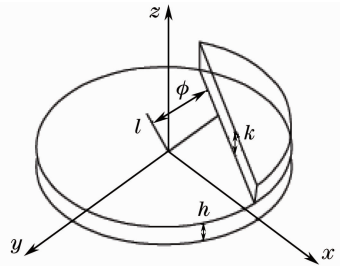


图6 平面亚像素边缘阶跃模型

Fig. 6 Two-dimensional sub-pixel edge model

为降低空间矩的维数,旋转 θ 角使函数 $f(x, y)$ 相对 x 轴对称,得到函数 $f'(x, y)$,求得图像从 0 阶到 2 阶的空间矩。根据图像上的同一点灰度值不变的原理,函数 $f'(x, y)$ 的空间矩和函数 $f(x, y)$ 的空间矩之间的对应关系为

$$\begin{cases} M'_{00} = M_{00} \\ M'_{10} = M_{10} \cos \theta + M_{11} \sin \theta \\ M'_{20} = M_{20} \cos^2 \theta + M_{11} 2 \cos \theta \sin \theta + M_{02} \sin^2 \theta \\ M'_{01} = -M_{10} \sin \theta + M_{01} \cos \theta \\ M'_{02} = M_{20} \sin^2 \theta - M_{11} 2 \cos \theta \sin \theta + M_{02} \cos^2 \theta \\ M'_{11} = (M_{02} - M_{20}) \sin \theta \cos \theta + M_{11} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \end{cases} \quad (4)$$

由于函数 $f'(x, y)$ 关于 x 轴对称, 因此 $M'_{01} = 0, \tan \theta = M_{01}/M_{10}$ 。利用函数 $f'(x, y)$ 的 2 阶空间矩可以求得

$$l = \frac{4M'_{20} - M'_{00}}{3M'_{10}}, \quad (5)$$

$$k = \frac{3M'_{10}}{2\sqrt{(1-l^2)^3}}, \quad (6)$$

$$h = \frac{2M'_{00} - k(\pi - 2\arcsin l - 2l\sqrt{1-l^2})}{2\pi}, \quad (7)$$

则亚像素边缘检测公式为

$$\begin{cases} x' = x + Nl \cos(\theta/2) \\ y' = y + Nl \sin(\theta/2) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 (x, y) 为像素点的图像坐标, (x', y') 为亚像素边缘检测结果, 单位圆所包含的区域为 $N \times N$ 的邻域。对所有被检测圆边缘点用空间矩法进行亚像素细分, 即可得到检测圆亚像素级的边缘位置。对于被检测圆亚像素级的边缘点, 再对其进行拟合就可得到光纤测头球心的精确坐标参数。

5 实 验

实验用的光纤长度为 140 mm, 球头直径为 0.299 mm, 测量显微镜的测量不确定度为: $E_1 = 1.1 + L/500, E_2 = 1.5 + L/400$ (L 为测量长度), 光纤测头及测量时测头与孔壁接触时的影像如图 7 所示。

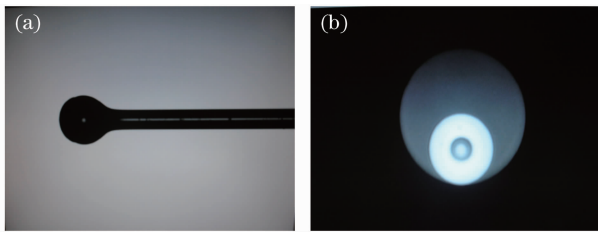


图 7 (a) 光纤测头及 (b) 测量照片

Fig. 7 (a) Photo of the probe and (b) measurement

为了检验系统的测量精度, 先用直径为 $\phi 10$ mm 的 0 级环规进行测量, 均匀测量 12 个点, 重复测量 5 次, 测量结果如表 1 所示。由表 1 可知, 单次测量的误差为 $2 \mu\text{m}$, 多次测量的误差为 $1 \mu\text{m}$, 测量不确定度 σ 为 $0.4 \mu\text{m}$, 因此该系统的测量数据正确可靠。

采用同样的方法对深度为 15 mm, 直径为 0.6 mm 的孔进行测量, 激光器腔体材料为玻璃, 用金刚石钻头加工而成, 测量 7 个截面圆, 每个圆测 8 个点, 在样品与测量点不变的情况下重复测量 5 次, 测量结果如表 2 所示。可以计算得到 $\bar{\phi} = 0.6118$ mm,

$\sigma_{\phi} = 0.00083$ mm, $\bar{C} = 3.68 \mu\text{m}, \sigma_C = 0.26$ mm, $\bar{L} = 3.0 \mu\text{m}, \sigma_L = 0.20$ mm。

表 1 校验结果

Table 1 Results of verifying

Number	Diameter ϕ /mm
1	10.0021
2	10.0008
3	10.0018
4	9.9996
5	10.0012

表 2 测量结果

Table 2 Results of test

Number	Diameter	Cylindricity	Straightness
	ϕ /mm	$C / \mu\text{m}$	$L / \mu\text{m}$
1	0.6142	3.5	3.0
2	0.6103	3.2	3.5
3	0.6095	3.0	2.8
4	0.6133	4.5	2.5
5	0.6112	4.2	3.2

从表 2 数据来看, 金刚石钻头在加工孔的过程中磨损较小, 孔的圆柱度主要是由于钻头较小导致孔的直线度变化引起的。

6 结 论

介绍了光纤测头测量小型气体激光器微深孔的原理和方法, 通过自发光光纤深入待测孔中实现了大孔径比孔的测量。还通过亚像素边缘检测技术提高了系统的检测精度, 最后采用标准环规验证了系统测量的准确性, 并对深度为 15 mm, 直径为 0.6 mm 的孔进行测量, 得出了孔的直径、圆柱度和直线度等参数, 实验表明该方法精度高, 可靠性好, 为大长径比微深孔的测量提供了一种切实可行的方法。

参 考 文 献

- 1 Cui Jiwen, Tan Jiubin, Liu Yang. Measurement of micro-hole with high aspect ratio based on double optical fiber coupling[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 106~109
- 2 崔继文, 谭久彬, 刘洋. 基于双光纤耦合的微深孔测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 106~109
- 3 Ye Shuliang, Tan Jiubin. High precision laser deep-hole diameter measurement based on dynamic Abbe's principle [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(8): 971~974
- 4 叶树亮, 谭久彬. 基于动态阿贝原则的高精度激光深孔直径测量[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(8): 971~974
- 5 G. X. Zhang, S. M. Yang. A 3D probe for measurement small blind hole[J]. *Annals of CIRP*, 1995, **44**(1): 461~464
- 6 Xu Limei, Zhang Jiayu. Micro-hole diameter measurement method[J]. *Journal of UEST of China*, 1998, **27**(3): 301~304
- 7 G. Y. Tian, Z. X. Zhao, R. W. Baines et al. The design of

- miniaturized displacement transducers for deep hole diameter measurement[J]. *Mechatronics*, 1999, **9**(4): 317~327
- 6 Xiong Yikun, Huang Xuguang. Optical fiber sensor for liquid refractive index based on fiber optic taper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1956~1960
熊贻坤, 黄旭光. 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1956~1960
- 7 Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1177~1182
马 宾, 徐 健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1177~1182
- 8 Zhu Xiaoping, Du Hua, Wang Weichen. The development and application of fiber probe for small hole diameter measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2009, **10**(5A): 115~119
朱小平, 杜 华, 王蔚晨. 微孔光纤测头的研制及应用[J]. *计量学报*, 2009, **10**(5A): 115~119
- 9 He Zhonghai, Wang Baoguang, Liao Yibai *et al.*. Subpixel algorithm using a curve fitting method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, **24**(2): 195~197
贺忠海, 王宝光, 廖怡白等. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(2): 195~197
- 10 Xu Shenghua, Liu Jiping, Wang Yong. Sub-pixel edge detection of color image based on principal axis analysis and EDISON-Zernike momen [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, **29**(11): 2272~2277
- 11 Wang Sheyang, Song Shenmin, Chen Xinglin. Improvement spatial moment subpixel edge detection method[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, **38**(6): 870~876
王社阳, 宋申民, 陈兴林. 改进的空间矩亚像素边缘检测算法 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, **38**(6): 870~876
- 12 Ouyang Gaofei, Kuang Yongcong, Xie Hongwei *et al.*. Accurate image capture for surface mounting component based on subpixel location[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(6): 16~22
欧阳高飞, 邝泳聪, 谢宏威等. 基于亚像素定位的贴装元件精确取像技术[J]. *光电工程*, 2010, **37**(6): 16~22