

回转内圆柱面的非拼接干涉测量方法

孙昊¹, 韩森^{2,3}, 唐寿鸿³, 王芳²

- (1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
3. 苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123)

摘要: 介绍了一个特殊结构的干涉测试方法和系统, 基于 Fizeau(菲索)干涉原理, 通过一高精度直角圆锥镜来实现圆柱坐标系与直角坐标的转换。该系统可以用来测量 360° 回转圆柱的表面形貌, 并且无需图像拼接, 可一次性获取整周的面形数据。通过对系统主成分误差的计算分析, 及 Matlab 软件数值仿真, 建立了圆柱坐标系下的误差校正矩阵。并针对一环形样品进行实际测量, 测试结果经过主成分误差校正后, 与 Taylor Hobson 接触式圆柱度仪的测量结果一致, 通过最小二乘圆(LSC)的圆度评定方法计算得到的圆度误差值十分接近。实验结果表明: 该测量方法可有效地实现圆柱体整周表面形貌的测量, 解决了目前回转光学元件的测量难度大、测试效率低等问题。

关键词: Fizeau 干涉仪; 回转圆柱面; 角锥反射镜; 误差校正

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0717001

Method of no stitching interferometric measurement for rotatory cylindrical surface

Sun Hao¹, Han Sen^{2,3}, Tang Shouhong³, Wang Fang²

- (1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. College of Opto-Electronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Suzhou H&L Instruments LLC, Suzhou 215123, China)

Abstract: A new method and a Fizeau type interference system were introduced in this paper, cylindrical coordinates and cartesian coordinates can be mutual transformation, through a high precision 90° conical reflector. This system was suitable for the test of 360° rotatory cylindrical surface, and the whole surface information can be achieved with one measurement without stitching. The error correction matrix was established in cylindrical coordinates, after analyzing the main component system errors, and simulating their effect with Matlab. A metal ring was tested to prove the feasibility and validity of this method and system. The principal error correction result was consistent with the measurement result by Taylor Hobson, and it was very close to the roundness value, which was calculated through the least square circle (LSC) assessment method. The experimental results show that: this method and system can realized

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

基金项目: 国家科技重大专项(2013YQ150829); 上海市科研计划项目(14140502500)

作者简介: 孙昊(1987-), 男, 博士生, 主要从事光学干涉计量方面的研究。Email: claudia_ss@163.com

导师简介: 韩森(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事精密光学检测技术及仪器等方面的研究。Email: senhanemail@126.com

the 360° cylindrical surface measurement, and the problems of rotary elements testing, low efficiency will be solved.

Key words: Fizeau interferometry; rotatory cylinder surface; axicon mirror; errors calibration

0 引言

柱面是特殊的非球面,其子午线始终沿圆柱轴线方向。高精度的柱面元件由于其自身的优越特性,广泛应用在测试计量、航空航天、工业加工等领域中^[1-3]。尤其随着空气轴承与精密惯性技术的不断发展,精密轴类零件的优越性和重要性日益突出。特别在航天器设计和制造领域中,作为主要支承部件的空气静压止推轴承,其承载性能的提高对于空气轴承的应用和推广有着非常重要的意义,同时也对轴承表面平整度、粗糙度、圆柱度、稳定性等的各项精度指标提出更高的要求。其中应用较广的铝合金空气静压轴承,对其表面质量要求 $\leq 0.5 \mu\text{m}$ 。对于此类零件的检测方法目前主要可以分为非干涉法和干涉法两种。

非干涉检测方法中主要有:(1)接触式测量方法。通过机械探针接触被测工件表面,并按设定路径进行逐行逐点扫描,通过传感器获得位置信息,并由计算机进行处理得到最终的面形。目前主要的接触式测量仪器有两种:一种是扫描探针轮廓仪;另一种是三坐标测量机(CMM)^[4]。接触式测量法的检测面形自由度较高,能广泛适用于各类非球面的检测,是目前检测精度较高的一种方法。但是该方法只能完成单一方向的轮廓线测量,被测件容易造成表面损伤,甚至引起探针变形和磨损。(2)样板比对法。该方法需要提供一个与待测半径相同的球面或者平面样板,通过直接接触柱面零件,进行比较,这种方法对标准件样板加工要求较高,检测区域很小,且具有一定的局限性,一般只适用于凹圆柱面,且测量精度较低,也可能对面形造成损伤。(3)条纹投影法^[5]。将标准条纹投射至面形表面,对受到面形调制而产生的形变相位光栅进行相位分析即可获取面形信息,虽然这种方法的检测面形自由度较高,但精度相对较低。

干涉检测法主要有:(1)掠入射零位干涉测量。运用两个衍射光学元件(DOE)实现测量^[6]。其中一个

DOE用来分离光束和光束整形,令一个DOE将被测表面反射的变形波前转换成近似平面波前,并与理想参考光束形成干涉。该测量方法的优点是通过将有效波长增大 $1/\cos\theta$ 倍,从而降低了被测表面粗糙度的敏感性,其中 θ 为入射角。同时也会引起像面的严重变形,导致沿圆柱轴线方向采样密度的大幅下降。(2)计算机全息法(CGH)。利用CGH产生柱面波与待测柱面进行零位干涉从而获得待测柱面的面形信息。与以上方法相比,计算全息法具有较高的精度、灵敏度及重复性^[7]。但是作为零位补偿器的CGH元件需根据被测件进行一对一的设计制造,设计加工难度大,成本高,并且其自身的误差很难标定。

针对闭合的360°圆柱面面形的检测,目前上海大学于瀛洁等人,通过基于CGH的干涉拼接方法对该类元件的测量进行了研究^[8]。通过带侧面面形的运动,从而获得一系列圆形区域内的面形偏差数据,最后利用拼接算法获得整个区域的面形结果。为获得整周的面形信息,需要多次测量,拼接测量计算量大,且效率较低,并对旋转机械装置精度要求较高。

针对特殊的回转圆柱面的测量,文中提出了一种干涉的方法,可在无拼接的情况下一一次性获取圆柱整周的形貌信息。对于某一组特定的圆锥反射镜和参考镜,被测对象的曲率半径只要大于圆锥反射镜的半径,就能满足测试要求。该方法不需要补偿元件和图像拼接技术,效率更高,通用性更强。

1 原理

基于Fizeau干涉仪的回转柱面测试系统原理,如图1所示。干涉系统出射的准直光沿光轴 z 方向照射到一高精度的直角圆锥反射镜后,光束沿圆锥径向折转 90° ,入射到被测圆柱面上。携带被测面形信息的圆柱形波前再经角锥镜反射后回到系统,与由平面参考镜反射回的平面波前发生干涉,形成干涉条纹图。

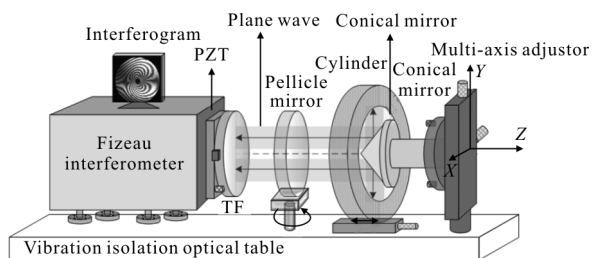


图 1 回转柱面测试系统原理图

Fig.1 System layout of rotatory cylindrical surface test system

直角圆锥镜的特殊结构可以实现圆柱坐标系与直角坐标系的相互转换, 即当空心元件轴线与 z 轴完全重合, 并且系统为远心光学系统^[9], 一个理想的直角圆锥可以将柱面完美地转换成平面。这样回转柱面的形貌偏差即可视为平面圆环相对于参考平面的偏差, 如图 2 所示。

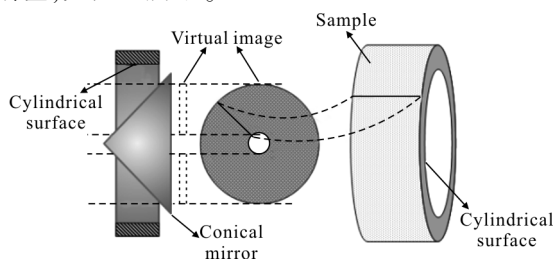


图 2 圆锥镜的光学转换

Fig.2 Optical conversion by conical mirror

探测器上的光强分布公式为:

$$I(x, y) = I_t + I_r + 2\sqrt{I_t I_r} \cos[\phi(x, y) + \phi] \quad (1)$$

式中: I_t 和 I_r 分别是测试光和参考光的各点光强值, 此处省略 (x, y) 。被测表面上各点的相位差分布用 $\phi(x, y)$ 表示, 为了能够计算得到 $\phi(x, y)$ 值, 在测试过程中通过 PZT (Piezoelectric Transducer) 推动参考镜 (TF) 移动, 由此引入 ϕ_t 的相位变化。借助于相移干涉技术 (PSI), 通过 4 次的等步长的相位移动, $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$, 相位差 $\phi(x, y)$ 的计算公式为:

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_3 - I_1}{I_4 - I_2} \right] \quad (2)$$

由图 1 可以看出, 被测空心元件内表面的可测深度是由圆锥的半径所决定, 即最大可测深度应小于等于圆锥的半径值。但圆锥顶点处的干涉条纹会因为压缩而发生形变, 导致图像的横向分辨率不均, 所以圆柱的实际可测深度约为圆锥半径大小的 $5/6$ ^[10]。

测量时, 先经过粗调使圆锥镜与被测件同轴, 然

后增加光强, 通过多维度的装卡机构进行校准, 调整被角锥反射镜, 使显示器上的空心圆环被完全照亮, 如图 3 所示。降低光强, 开始相移测量。

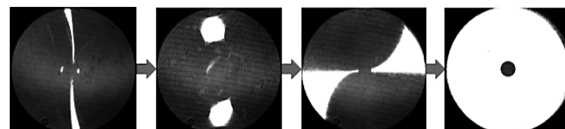


图 3 圆锥的校准流程

Fig.3 Alignment sequence of the cone

2 主成分误差校正

在实际测量中, 由于该系统中空调整的特殊结构, 很难通过机械装调机构来实现圆锥和圆柱的完美校准。不同的调整状态下, 会给测量结果引入不同效果的误差。在纳米级的检测中, 此类调整误差及相关系统误差的量级远大于被测表面的形貌误差, 所以为了得到被测侧面的真实形貌信息, 需要排除测试中的主要成分误差。下面对该测试中三种主成分误差进行圆柱坐标系下的模型推导, 并根据计算结果进行相应误差剔除。

2.1 平移误差

当圆锥轴线与圆柱轴线平行, 圆锥顶角为理想直角, 此时圆锥相对于被测圆柱的偏移量将对测量结果引入系统的光程差变化。假设圆锥沿着 x 轴方向平移至 O' 位置, 进行几何光路追迹。定义一垂直于 z 轴并通过 P 点的平面 I_p , 如图 4 所示^[11]。圆柱轴线与平面 I_p 相交于 O 点, 理想位置时圆锥轴心与 O 点重合, 圆锥相对坐标原点 O 产生 Δt 的偏移后, 圆锥轴心沿 x 轴移动到 O' 点。被测柱面的曲率半径为 R , 圆锥半径为 r_m , 圆柱深度为 h 。圆 O' 的半径为 $r(z_0)$, 随着 P 点的 z 坐标上升, $r(z_0)$ 逐渐缩小, 当 $r(z_0)$ 为最大值

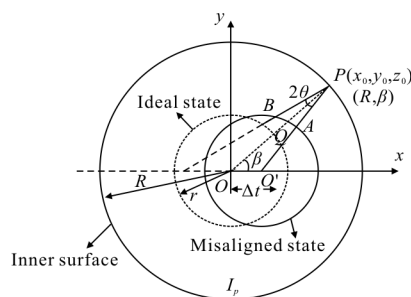


图 4 平移误差几何图

Fig.4 Geometry for translation error

时即为圆锥底面半径 r_m , 这里 $r(z_0)=h-z_0$ 。

图 4 中, 圆点虚线圆 O 表示圆锥的理想位置, 被测件内表面上任意一点 P 的空间坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 圆柱坐标为 (R, β, z_0) , $0 \leq \beta \leq 2\pi$, 故点 P 在平面 I_p 上的极坐标为 (R, β) 。

经公式推导, 当圆锥轴线与被测件轴线相互平行并存在相对偏移时, 所产生的光程差 (OPD_r) 表达式为:

$$OPD_r = 2\Delta t \cos\beta \quad (3)$$

径向平移量 Δt 为极小值, 计算中利用一阶泰勒级数的展开。

根据公式(3)的平移误差模型, 通过 Matlab 软件模拟出不同大小的平移误差干涉图, 如图 5 所示。

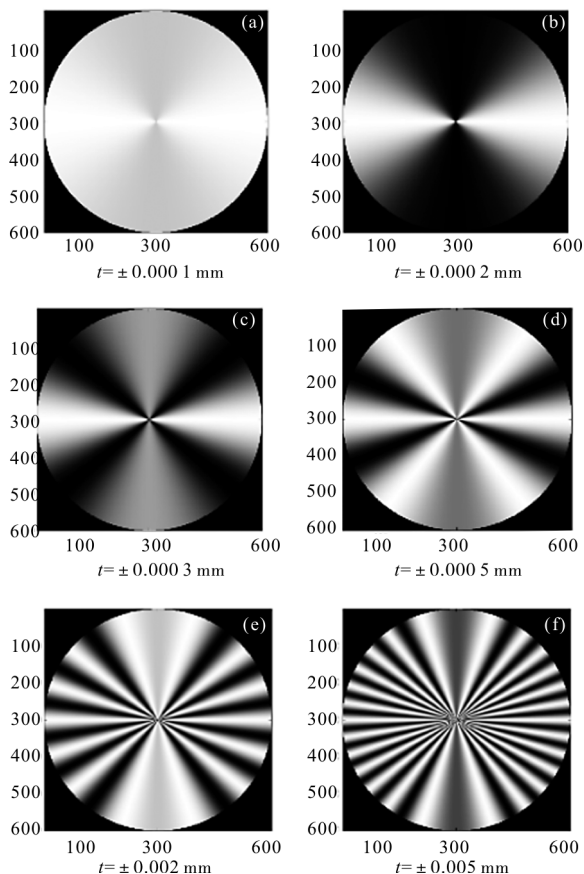


图 5 不同平移误差的模拟干涉图

Fig.5 Simulation interferogram of different translation errors

2.2 旋转误差

为便于计算分析, 假设圆柱与光学系统共轴, 圆锥绕其顶点, 在 YOZ 面内旋转 α 角度, 此时的几何光路如图 6 所示^[1]。

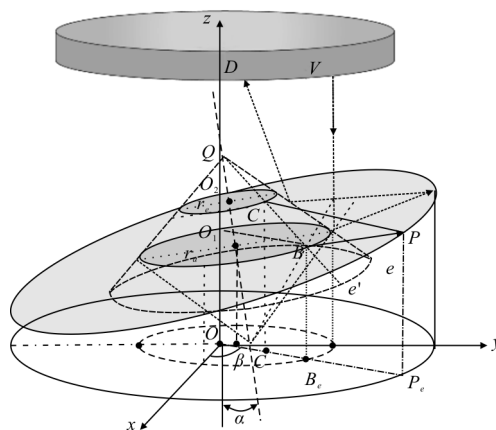


图 6 旋转误差分析的几何光路图

Fig.6 Optical geometry path for rotation error analysis

圆锥轴线与母线 l' 所在截面 I_r ; O_1, O_2 分别为入射点 B 与出射点 C 到光轴的垂线交点。图中 α' 随着 P 点极角的变化而变化, $\varphi = \pi/4 - \alpha'$, $\alpha' = \alpha \cdot \cos\beta$, $0 \leq \beta \leq 2\pi$ 。经推导, 系统的旋转误差计算模型为:

$$OPD_r = 4\alpha' (z_0 - r_m) \quad (4)$$

式中: $\alpha' = \alpha \cdot \cos\beta$ 。

根据公式(4)的旋转误差模型, 不同旋转角度下的误差模拟干涉图, 如图 7 所示。

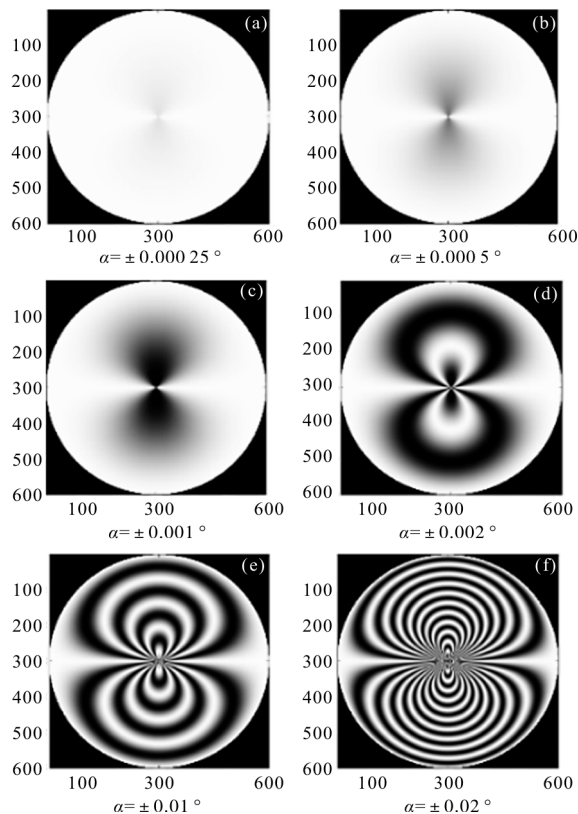


图 7 不同旋转角度的模拟干涉图

Fig.7 Simulation interferogram with different rotation angles

2.3 角度误差

假设圆锥与被测件都位于理想位置,圆锥顶角的实际大小为 $(90^\circ+2\gamma)$ 。定义一平面 I_2 ,使其通过圆锥的轴线并且过点 P ,如图 8 所示,图中圆点虚线表示顶角为理想 90° 的圆锥。

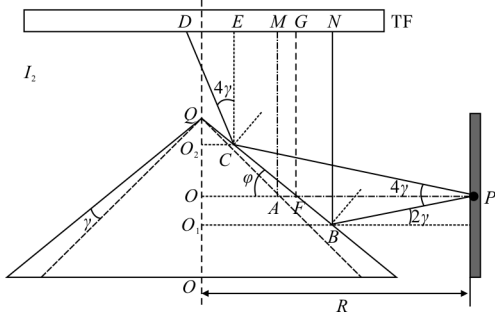


图 8 角度误差分析几何光路图

Fig.8 Optical geometry path for angular error analysis

经推导,圆锥顶角误差的数学模型为:

$$OPD_a=4\gamma(z_0-r_m) \quad (5)$$

根据角度误差模型(见公式(5))的模拟干涉条纹图,如图 9 所示。

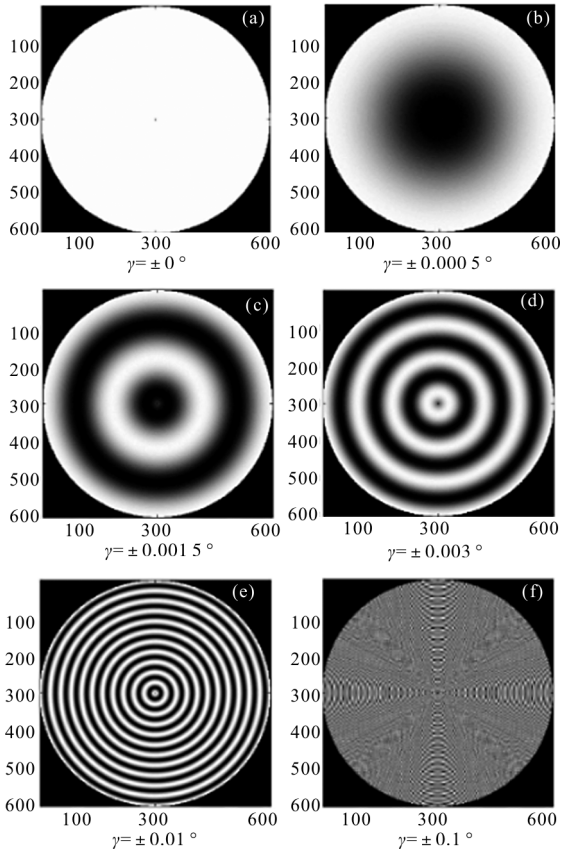


图 9 角度误差模拟干涉图

Fig.9 Simulation interferogram of angle error

以上误差干涉图的模拟分析,可对实际调校过程进行技术指导,有助于降低装调难度,提升测试效率。

2.4 误差分离模型

干涉检测前经过初步校准,所以调整误差量通常很小,再根据上述主成分误差计算模型,通过多参数的最小二乘拟合得出三种主成分误差量值,再利用以下误差分离模型,将其从测量结果中剔除。被测圆柱面在任意调整状态下所产生的误差总和为:

$$\Delta\phi=OPD_i+OPD_a+OPD_r=-2\Delta t\cos\beta+4\gamma(z_0-r_m)+4\alpha\cos\beta(z_0-r_m) \quad (6)$$

式中: Δt 、 γ 、 α 分别为平移量,顶角偏差量及旋转角度大小。

设实验得到的实际相位值为 ϕ_{near} ,从 ϕ_{near} 中减去由拟合公式得到的误差相位 $\Delta\phi$,即可获得被测表面的真实形貌^[12-13]:

$$V=\sum_{i=1}^M[\phi_{near}-\Delta\phi]^2 \quad (7)$$

式中: M 为像素点的个数, $M\geq 3$ 。

根据最小二乘法,为了使公式(7)有最小值,需要分别对 Δt 、 γ 、 α 求偏导,并令其偏导数等于零,这样可构建三个参数的方程组,用于计算被测柱面的调整误差量。

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta t}=0, \frac{\partial V}{\partial \gamma}=0, \frac{\partial V}{\partial \alpha}=0 \quad (8)$$

$$\{X\}=[A]^{-1}\{B\} \quad (9)$$

上式中:

$A=$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M 8\cos^2\beta_i & \sum_{i=1}^M -16\cos\beta(z_0-r_m) & \sum_{i=1}^M -16\cos^2\beta(z_0-r_m) \\ \sum_{i=1}^M -16\cos\beta(z_0-r_m) & \sum_{i=1}^M 32(z_0-r_m)^2 & \sum_{i=1}^M 32\cos\beta(z_0-r_m)^2 \\ \sum_{i=1}^M -16\cos^2\beta(z_0-r_m) & \sum_{i=1}^M 32\cos\beta(z_0-r_m)^2 & \sum_{i=1}^M 32\cos^2\beta(z_0-r_m)^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B=\left[\sum_{i=1}^M -4\cos\beta_i\phi_i, \sum_{i=1}^M 8(z_0-r_m)\phi_i, \sum_{i=1}^M 8\cos\beta(z_0-r_m)\phi_i \right]^T \quad (11)$$

式中:矩阵 A 为复合调整误差敏感矩阵的广义逆矩阵;矩阵 B 即为调整误差的系数矩阵。

经以上推导可得出主成分误差的量值大小为:

$$\{X\}=[\Delta t, \gamma, \alpha]^T \quad (12)$$

最后可获得被测回转柱面的真实面形分布为：

$$\psi=\phi_{\text{near}}-\Delta\phi \quad (13)$$

3 实验验证

为验证以上理论分析的正确性,需要利用图 10 中测试系统,对一圆柱样品进行实际测量验证。光源波长 $\lambda=633 \text{ nm}$, 参考平面镜口径 $3/4''(19.05 \text{ mm})$, 面形精度 $\lambda/20$ 。整个实验装置固定于隔振平台上,以降低外界振动对测量的影响。圆锥镜半径 10 mm , 被测圆环内径 30 mm , 深度 10 mm 。

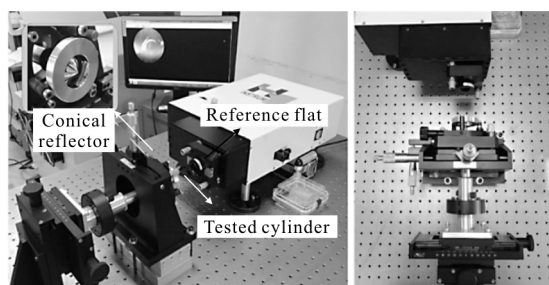


图 10 实验装置

Fig.10 Experimental setup

主成分误差剔除前的原始测量结果如图 11 所示。图 11(a)为光强图,图 11(b)为实测波前图,图 11(c)为误差校正后波前图。全表面 $RMS=1.49\lambda, PV=6.12\lambda$ ($PV=Peak \text{ to Valley}$, 最高与最低值之差; $RMS=Root \text{ Mean Square}$, 均方根值)。

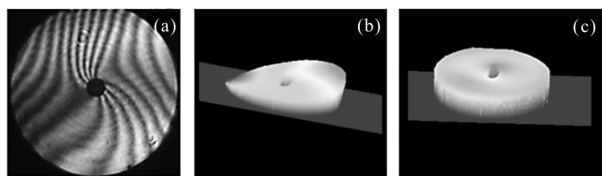


图 11 初步结果

Fig.11 Original result

由原始测试波前三维形貌(图 11(b))可以看出,测量结果中包含明显的调整误差,导致波前图严重倾斜和轻微扭转。为获得被测面真实形状,利用上述误差分离矩阵,去除测试结果中由于三种主成分误差后(图 11(c)),全表面 $RMS=0.18\lambda, PV=4.69\lambda$ 。处理前后的对比结果如图 12 所示。

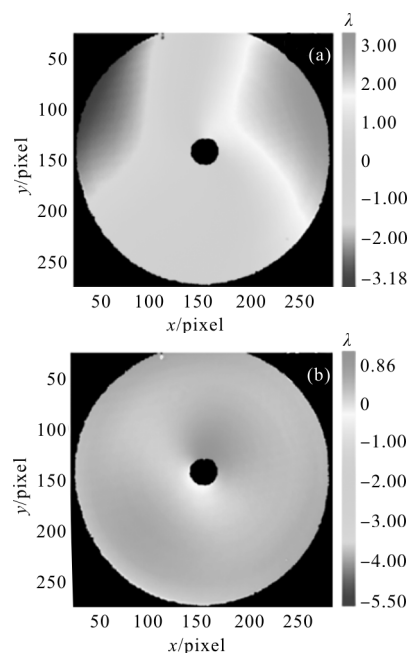
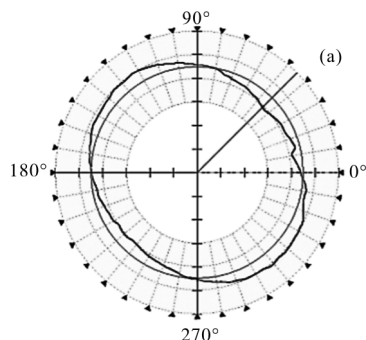


图 12 对比结果

Fig.12 Comparison results

为了验证该回转圆柱测试系统的有效性,以及文中推导模型的准确性,使用 Taylor Hobson 公司的高精度圆柱度仪(Talyrond565LT),其径向误差 $\pm(0.015 \mu\text{m}+0.0003 \mu\text{m}/\text{mm})$,轴向误差 $\pm(0.02 \mu\text{m}+0.0003 \mu\text{m}/\text{mm})$,示值最大允许误差为 $\pm 2\%$ (圆度),对同一样品进行测量。由于接触式的测量方法只能获得某一截面上的数据,无法取得全表面信息,为了更直观地呈现,需从上述全表面测试结果中截取相同位置的数据进行对比,如图 13 所示。

图 13(a)为圆柱度仪在样品中心高度截面上的测量结果,其中灰色圆为测量数据的最小二乘参考圆,黑色线为实际采样数据, $Conc$ (圆度值) $=0.71 \mu\text{m}$ 。其中,极坐标径向每一格为 $0.2 \mu\text{m}$ 等分,采样点数 4096 ,滤波形式为高斯滤波,测量速度为 $5 \text{ mm}/\text{s}$,圆度评定方法为最小二乘圆(LSC)。图 13(b)为该测试



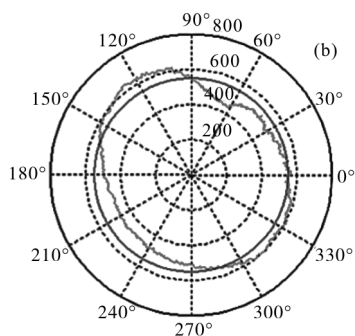


图 13 比对结果

Fig.13 Comparison results

系统在相同截面上的测量数据结果，测得 $Conc = 0.69 \mu\text{m}$ 。从图 13 和实际测量数据可以明显看出两种方法测量结果吻合。

4 结论

文中提出了一种能够测量圆环形柱面的干涉测量方法,该方法不需要图像拼接,即可一次性获得圆柱面整周的形貌信息。同时,搭建了基于 Fizeau 干涉系统和 90° 角锥镜的回转圆柱面测试系统,并在圆柱坐标系下建立了主成分误差的数学模型及误差剔除模型。针对一内环直径 $\Phi 30 \text{ mm}$ 的空心圆柱进行了实际测量,经过主成分误差校正后,被测圆环内表面真实形貌的 $RMS = 0.1803 \lambda$, $PV = 4.6951 \lambda$, 并且其校正后的结果与圆柱度仪的测量结果相一致,圆度误差分别为 $0.69 \mu\text{m}$ 和 $0.71 \mu\text{m}$ 。表明该测试方法可有效地实现回转圆柱表面形貌的测量,并且非接触、高效率。

参考文献:

[1] Shun Xiafei, Yu Jingchi, Ding Zhezao, et al. Fabrication and testing of the super-smooth silicon cylindrical mirror [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 497-498. (in Chinese)
 [2] Shang Guan, Wang Pin. Study on the system of beam

shaping for high-power laser diode array [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese).
 [3] Long Wei. Study on loading characteristics of orifice compensated aerostatic thrust bearing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
 [4] Xie Hongbo, Lv Eryang, Zhu Xiaochen, et al. Shaping and collimation of LD beam with astigmatism [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 551-555. (in Chinese)
 [5] Lin Junyi, Jiang Kaiyong, Gu Yonghua, et al. Accuracy analysis and application of the profilometry with projecting grating [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(5): 80-84. (in Chinese)
 [6] Schwider J, Lindlein N, Schreiner R, et al. Grazing-incidence test for cylindrical microlenses with high numerical aperture [J]. *Journal of Optics A*, 2002, 4(4): S10-16.
 [7] Tam P W, Gross K P, Bogan J R. Interferometric testing of cylinder optics using computer generated hologram (CGH) [C]//SPIE, 1997, 3134: 162-166.
 [8] Yu Yingjie, Xu Haifeng, Peng Junzheng. The interferometric method for the cylindrical surface [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(5): 460-463. (in Chinese)
 [9] Hai Yunfei. Research of the reflection model of the edge of objects and a method of measurement [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
 [10] Viotti M R, Albertazzi A, Pont A D, et al. A novel algorithm to stitch adjacent cloud of points of long cylindrical surfaces [C]//SPIE, 2007, 6616: 6616E.
 [11] Sun Hao, Han Sen, Tang Shouhong, et al. Misalignment analysis of cylindrical inner surfaces in interferometric measurement [J]. *Acta Optical Sinica*, 2017, 37 (1): 0112005.
 [12] Wyant J C, Creath K. Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology [M]. New York: Academic Press, 1992.
 [13] Mahajan V N. Zernike Polynomials and Wavefront Fitting [M]. New Jersey: John Wiley&Sons Inc., 2007.