

文章编号 1004-924X(2006)05-0835-05

# 基于柱面坐标系的新型光学坐标测量机的研制

贾立德, 郑子文, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**研制了一种基于柱面坐标系的新型专用非球面坐标测量机,通过测量非球面多条子午截线实现对非球面形的全口径检测。在结构设计方面,采用了龙门框架加回转运动的形式,利用高精度气浮导轨实现水平运动,利用端齿盘实现对工件的精确分度,通过点位测量的方式实现对非球面形的高精度检测。在软件方面,建立了系统的数学模型和柱面坐标系下回转对称非球面形全口径检测算法,并在 VC++6.0 和 Matlab 平台上编制了测控软件 and 数据处理软件。系统最大测量口径为 600 mm,测量高度为 25 mm,最小测量步长为 1 mm,经过系统误差补偿后,系统精度优于  $1\ \mu\text{m}$ ,满足了精磨、粗抛阶段非球面形检测要求。试验表明:系统运行良好,精度满足要求,同时具有良好的通用性,可用于非球面精磨、粗抛阶段的检测。

**关键词:**光学非球面;接触式测量;全口径检测;坐标测量机;Zernike 多项式

**中图分类号:**TH703;TH72 **文献标识码:**A

## Development of a new optical coordinate measuring machine in cylinder coordinates

JIA Li-de, ZHENG Zi-wen, LI Sheng-yi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A new special-purpose optical coordinate measuring machine (OCMM) was developed with the cylinder coordinates to realize full aperture testing of the optical aspherics in the stage of grinding and pre-polishing. The full-aperture of optical aspherics can be measured with testing several meridians point by point. In the aspect of hardware, the system was composed mainly by an ultra-precise air-rail for the linear motion, and a graduator for the rotary motion. In the aspect of software, for analyzing the mathematical model of a system, a new algorithm for the full-aperture testing of rotational-symmetric aspherics was established. The testing software and data-processing software were written on the VC++6.0 and Matlab platform respectively. The system is shown the better performance in the maximum measurement range of 600 mm, the maximum sag of 25 mm and the minimum sampling step of 1 mm. After the compensation of the systematic error the accuracy is higher than  $1\ \mu\text{m}$  in full scale. The experimental results conclude that the optical coordinate measuring machine has a good universal and can satisfy requirement in the grinding and pre-polishing process for asphere testing.

收稿日期:2005-12-14;修订日期:2006-07-14.

基金项目:国家安全重大基础研究 973 资助

**Key words:** optical aspherics; contact-measurement; full-aperture test; Coordinate Measuring Machine (CMM); Zernike polynomial

## 1 引言

光学非球面精磨粗抛阶段的检测是影响非球面加工精度和加工效率的关键因素。此时面形误差尚未达到光波长( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ )量级,且表面粗糙度不佳,通常的干涉检测方法存在一定的困难。尽管  $\text{CO}_2$  红外干涉仪( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ )从理论上讲是非球面形精磨粗抛阶段的最理想检测方法,但是红外干涉仪价格十分昂贵,而且研制周期长,材料难寻,光不可见<sup>[3]</sup>。接触式检测方法的精度通常在微米亚微米量级上,满足了精磨粗抛阶段对检测精度的要求,而且相对简单,成本较低,成为当前非球面精磨粗抛阶段的主要检测手段。为此国内外诸多单位都进行了深入的研究,例如 Arizona 大学光学加工中心的非球面形测量专用轮廓仪,精度高达  $50 \text{ nm}$ <sup>[5-6]</sup>。以英国 Taylor Hobson 公司和德国 LOH 光学机械公司为代表的国外企业也已经将接触式非球面形检测方法的精度发展到  $10 \text{ nm}$  量级<sup>[2]</sup>,并形成了商用化的产品。国内多家单位也进行了相应的技术研究<sup>[3-4]</sup>,取得了阶段性的成果,但与国外相比尚有一定的差距。

本文介绍了开发的新型光学非球面坐标测量机的设计思路、软硬件结构和检测结果,它成功地解决了非球面精磨、粗抛阶段的全口径检测问题,能够同时对非球面、球面和平面光学元件进行检测。

## 2 系统测量原理

在笛卡儿坐标系或柱面坐标系下,直接测量非球面形的三维高度值( $x, y, z$ )或( $\rho, \theta, z$ )进而拟合面形,得到面形误差数据是三坐标测量法的基本原理。三坐标测量法能够在得到非球面形误差的同时得到顶点曲率半径等参数误差,同时接触式测量本身的特点决定了它通常是将三维面形的检测转化为二维截线的测量,通过测量多条母线(子午截线)来实现非球面形的全口径检测,测量原理如图 1 所示。

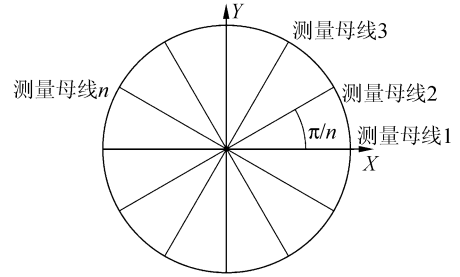


图 1 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of measuring principle

在柱面坐标系( $\rho, \theta, z$ )下,二次非球面方程可以表达为<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2\rho^2}} \\ \rho^2 = x^2 + y^2 \end{cases}, \quad (1)$$

其中  $c$  为近轴曲率,且  $c = \frac{1}{R}$ ,  $R$  为曲面近轴曲率半径,  $k = -e^2$ ,  $e^2$  为曲面的偏心率平方。

假设测量母线数为  $n$ ,对应于一条测量母线的测量数据为

$$\begin{cases} \rho_j = [\rho_{1j}, \rho_{2j}, \rho_{3j}, \dots, \rho_{mj}]^T \\ z_j = [z_{1j}, z_{2j}, z_{3j}, \dots, z_{mj}]^T \end{cases}, \quad j = 1 \dots n \quad (2)$$

其中  $m$  为测量点数目,  $\rho$  是测量横坐标值。

如图 2 所示,由于测量得到的是测头中心点  $A$  的坐标,而实际接触点为  $B$ ,因此需要对测头的半径进行补偿。

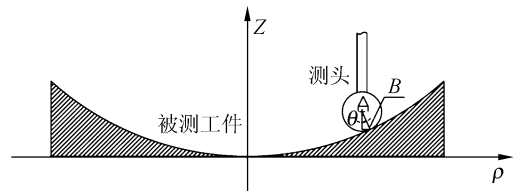


图 2 测头半径补偿示意图

Fig. 2 Compensation of probe radius

假设测头半径为  $r$ ,非球面测量点  $\rho_{ij}$  处的切线斜率角度为  $\theta_{ij}$  则  $\tan \theta_{ij} = \frac{z_{(i+1)j} - z_{ij}}{\rho_{(i+1)j} - \rho_{ij}}$ ,补偿后的数据为

$$\begin{cases} \rho_{ij}^c = \rho_{ij} + r \times \sin \theta_{ij} \\ z_{ij}^c = z_{ij} - r \times \cos \theta_{ij} \\ i=1 \cdots m, j=1 \cdots n \end{cases}, \quad (3)$$

将补偿后的数据插值细化,组合成三维面形数据  $[X, Y, Z^M]$ ,则有

$$\begin{cases} X = \rho \times [1, \cos(\frac{\pi}{n}), \cos(\frac{2\pi}{n}), \dots, \cos(\frac{(n-1)\pi}{n})] \\ Y = \rho \times [0, \sin(\frac{\pi}{n}), \sin(\frac{2\pi}{n}), \dots, \sin(\frac{(n-1)\pi}{n})], \\ Z^M = (z_{ij})_{m \times n} \\ \rho = [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_m]^T \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $\rho$  是经过插值处理并统一后的测量点坐标值。由式(1)得理想面形三维数据为  $[X, Y, Z^N]$ , 则利用非线性最小二乘方法使得:

$$\begin{aligned} F(R, k) &= \frac{1}{2} \left\| Z^M - Z^N(R, k) \right\|_2^2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{(x, y) \in D} (Z^M(x, y) - Z^N(x, y, R, k))^2 \\ &= \min_{(x, y) \in D} F, \end{aligned} \quad (5)$$

得到的  $R, k$  即为被测非球面的实际顶点曲率半径与二次项系数值,其中  $D$  为测量区域。

将三维测量数据与理想值相比较,并利用 Zernike 多项式拟合得到被测非球面的面形误差:

$$W(x, y) = Z^M(x, y) - Z^N(x, y) = \sum_{K=1}^{36} a_K Z_K(x, y)$$

$$= K_x x + K_y y + K_d(x^2 + y^2) + W_0(x, y), \quad (6)$$

$Z_K(x, y)$  为直角坐标系下前 36 项 Zernike 多项式基,  $a_K$  为相应的系数;  $K_x, K_y$  和  $K_d$  分别为  $X, Y$  方向上的倾斜系数和离焦系数;  $W_0(x, y)$  即为消掉倾斜、离焦后的被测非球面形的误差数据。

### 3 系统软硬件结构的设计

#### 3.1 系统硬件结构设计

系统整体结构采用了气浮导轨加端齿盘的结构形式,如图 3 所示。其中传动方式为精密低速直流力矩电机加同步带的形式,通过 Renishaw 光栅尺实现闭环运动,横向分辨率  $1 \mu\text{m}$ ,气浮导

轨直线度在全量程范围内优于  $1 \mu\text{m}$ 。测量传感器为标普 LG-25 型长度计,分辨率  $10 \text{ nm}$ 。端齿盘最小分度  $1^\circ$ 。系统整体采用了全大理石结构,减小了温度对测量精度的影响。

测量运动流程:测量时首先调整测头与端齿盘中心的对中,工件与端齿盘中心的对中,通过千分杠杆表测量工件侧面并使工件与端齿盘一起转动可以将工件与端齿盘之间的偏心误差调整到几十微米量级。之后将端齿盘锁死,设定测量步长进行单条母线的测量,在测量过程中,传感器运动到期望的测量位置后,通过步进电机和软线将传感器测头缓慢放下,之后采集数据并将传感器测头抬起并运动到下一个测量点位置,如此循环完成单条母线的点位式测量。之后将端齿盘打开,转动一定角度,重新开始下一条母线的测量,最终实现非球面形的全口径检测。

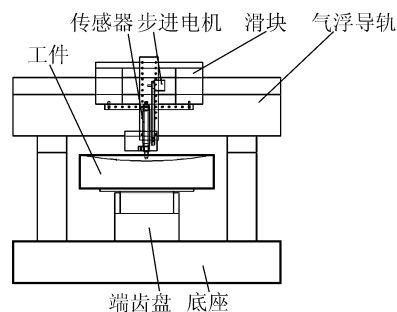


图 3 测量系统结构图

Fig. 3 Schematic of measuring setup

#### 3.2 系统软件的设计

分别在 VC6.0 和 MATLAB 平台上开发了测控软件 and 数据处理软件,算法流程如图 4 所示。

针对不同的测量需要,可以分别对单条测量截线进行数据处理并获取二维误差曲线图,或者进行面形的全口径测量并获取被测面形更多的局部信息。在一些研抛试验以及对测量要求不高的条件下,为了节省时间,通常采用第一种方法;全口径检测主要用于 CCOS 数控抛光,尤其是需要对非球面形局部误差进行修正时,经过数据处理后可以获得被测表面的顶点曲率半径误差,面形误差, Zernike 多项式系数等参数。

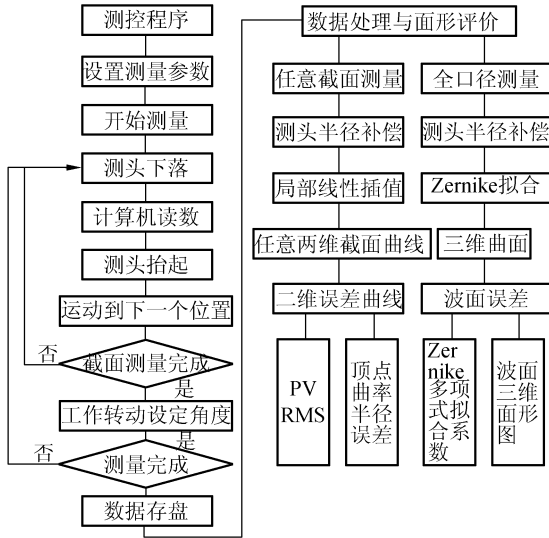
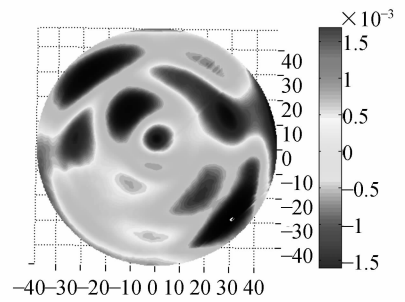


图 4 数据处理流程图

Fig. 4 Schematic of data-processing

## 4 测量试验与分析

为了验证测量系统的精度与测量算法的正确性,同时为了能够用于干涉仪校准仪器,试验中采用了精抛后的小尺寸工件。对一直径 100 mm,  $p=1\ 000$  mm 的凹形抛物面镜进行了测量,并与干涉检测结果进行了比对。其中测量步长 5 mm,每隔  $15^\circ$  测量一条母线,共 12 条。测量结果如图 5 所示,其中干涉检测结果为面形误差 PV  $3.46\ \mu\text{m}$ , RMS  $0.55\ \mu\text{m}$ ,接触测量结果为面形误差 PV  $3.92\ \mu\text{m}$ , RMS  $0.67\ \mu\text{m}$ ,顶点曲率半径  $992.62\ \text{mm}$ 。图 6 是直径 200 mm,  $p=1400$  mm 的凹形抛物面镜铣磨后的检测结果,其中测量步长 10 mm,每隔  $15^\circ$  测量一条母线,共 12 条,测量结果为面形 PV  $2.83\ \mu\text{m}$ , RMS  $0.64\ \mu\text{m}$ ,顶点曲率半径  $1\ 402.52\ \text{mm}$ 。图 7 是测量系统实物。



(b)干涉测量

(b) Interferometric measurement

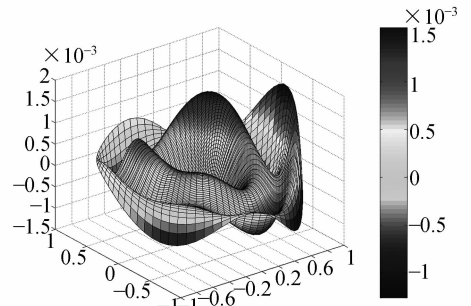
图 5  $\phi 100$  mm 抛物面镜测量结果Fig. 5 Measuring results of  $\phi 100$  mm paraboloid mirror

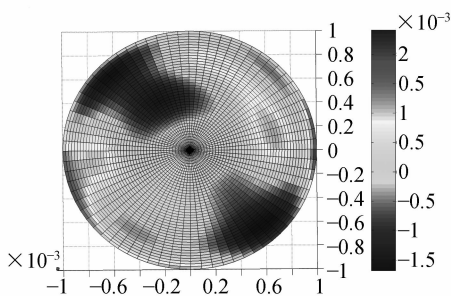
图 6 200 mm 抛物面镜铣磨后测量结果

Fig. 6 Measuring result of 200 mm paraboloid mirror after grinding



图 7 测量系统实物图

Fig. 7 Photograph of measuring setup



(a)接触式测量

(a) Contact-measurement

## 5 结论

接触式测量存在着许多的缺点,例如精度局限于微米亚微米量级,易于划伤工件表面等。但是在非球面形的精磨粗抛这一特定阶段却是首选的检测方法。为此研制了上述非球面形专用测量

系统,能够对常见的非球面,球面和平面元件进行微米和亚微米级精度的检测。在实际的测量系统设计中,采用了点位式测量这种准静态的测量方式,与扫描测量方式相比,其缺点是测量时间比较长,效率不高,但是它却避免了扫描测量中常见的划伤问题,同时由于是准静态的测量,相比于扫描测量而言,动态误差影响小,更容易获得较高的测量精度。经过实际测量试验证明,该测量系统经

济、简单、可靠、实用,能够满足当前的精度要求。但是该系统也远未是一个成熟的测量系统,仍然存在许多问题需要进一步解决,例如如何通过算法消除测头与端齿盘中心,工件与端齿盘中心的中误差以及工件的位姿误差对测量结果的影响;测量高陡度非球面时,对中误差和侧向力对测量精度的影响等都是需要进一步深入思考和研究的内容。

### 参考文献:

- [1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社,2001.  
YANG L. *Advanced manufacturing technology of optics*[M]. Beijing: Science Press,2001. (in Chinese)
- [2] 辛企明. 光学塑料非球面制造技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.  
XIN Q M. *Manufacturing technology of plastic aspheric lens*[M]. Beijing: National Defense Industry Press,2005. (in Chinese)
- [3] 唐健冠,伍凡,吴时彬. 大口径非球面精磨表面形状检测技术研究[J]. 光学技术,2001,27(6):509-511.  
TANG J G, WU F, WU SH B. Research on testing techniques for large aperture aspherical surface in the fine grinding stage[J]. *Optical Technique*, 2001,27(6):509-511. (in Chinese)
- [4] 余景池,张学军,孙侠菲,等. 计算机控制非球面加工精磨阶段的检测技术[J]. 光学技术,1998,3:38-40.  
YU J CH, ZHANG X J, SUN X F, et al. Testing technology at fine grinding stage of computer-controlled aspheric surfacing[J]. *Optical Technology*, 1998,3:38-40. (in Chinese)
- [5] *Design study report-the primary and secondary mirrors for the proposed Euro50 telescope*[R]. Zeeko ltd., 2001: 70-78.
- [6] ANDERSON D S, BURGE J H. Swing-arm profilometry of aspherics[J]. *SPIE*, 1995, 2536:169-179.
- [7] STROUP J, DOIRON T. The accuracy and versatility of the NIST M48 coordinate measuring machine[J]. *SPIE*, 2001, 4401:136-146.
- [8] STAHL H P. Aspheric surface testing techniques[J]. *SPIE*, 1990, 1332:66-76.

作者简介:贾立德(1981—),男,博士研究生,主要研究方向为光学非球面的接触式测量技术。E-mail:jiazhonghua135@yahoo.com.cn