

一种超精密非球面在位测量方法

陈逢军 尹韶辉 余剑武 王宇 朱勇建

(湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心, 湖南长沙 410082)

摘要 高面形精度非球面加工,离不开面形测量和误差补偿加工。离线测量容易导致工件装夹误差,并带来非加工时间增加。为解决这一问题,采用一种利用接触式的微小测头与激光干涉位移测量计相结合的在位形状测量装置,直接对磨削后的工件表面进行在位形状误差测量。介绍了该在位测量方法的原理及非球面测量过程,探讨了回转对称轴在半径方向的误差与测头倾角误差对测量误差的影响,并进行了补偿加工实验。对加工后的微小非球面进行了在位测量,并与超精密离线测量系统测量结果进行了比较。

关键词 光学测量;在位测量;接触式测量;非球面

中图分类号 TH74; TB92 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.071203

An Ultra-Precision on-Machine Measurement Method of Aspheric Surface

Chen Fengjun Yin Shaohui Yu Jianwu Wang Yu Zhu Yongjian

(National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract High quality ultra-precise machining of aspheric surface includes machining, test, and compensation machining. In order to remove repeating installation error and decrease on-machine time of the aspheric surface, a contact on-machine measurement method is proposed in combination with a laser interferometer. Shape error of the ground surface is measured directly on the machine. The on-machine measuring principle and aspheric measuring process are studied. The measurement errors caused by positional deviation and inclination angle error are corrected in ultra-precise contact on-machine measurement process. A small aspheric surface after grinding is measured by the on-machine contact measurement method and the off-line measurement system, and the measuring results are compared to confirm the validity of the proposed method.

Key words optical measurement; on-machine measurement; contact measurement; aspheric surface

OCIS codes 120.3180; 120.0120

1 引言

非球面广泛应用于航天、航空、天文、电子、激光以及光通讯等领域^[1]。高质量非球面的超精密加工,就是加工、检测、补偿加工的反复过程^[2]。非球面光学零件的面形检测技术是非球面加工技术的一个重要环节。面形检测分为加工过程中的在位测量和加工结束后的离线测量^[3]。作为超精密加工中重要的组成部分,包括非球面检测在内的形状检测技术的研究与发展尤为重要。国内外在非球面检测技术上投入了大量的资金进行研究,研发了三坐标测量法、剪切干涉法、全息法、激光扫描法等多种非球面的面形检测方法^[4~6]。本文采用一种结合了接触式微探头和激光干涉位移测量计的在位形状测量装置,对磨削后的微小非球面进行在位测量。该方法可解决离线测量中的非加工时间增加、安装误差加大等问题。

收稿日期: 2012-02-05; **收到修改稿日期**: 2012-03-08; **网络出版日期**: 2012-05-16

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0184)、中央高校基本科研业务费资助项目(531107040147)、高等学校博士学科点专项科研基金(200805321035)和湖南省自然科学基金(10JJ4030)资助课题。

作者简介: 陈逢军(1979—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事超精密测量与控制方面的研究。

E-mail: abcfcj@126.com

2 非球面形状在位测量原理

2.1 离线测量与在位测量

目前采用的高精度测量仪器基本上是属于离线测量,其通常的测量过程如图 1(a)所示,即将加工后的工件从机床上取下,然后安装在离线测量仪器上进行测量,完毕后如果需要重新加工,必须将工件重新安装到加工机床上进行再次磨削。这种方式使得工件的非加工时间增加,并导致工件的二次安装误差。为了有效地解决这些问题,并为后续的误差补偿加工提供便利,进而提高工件的加工精度,可采用在位测量方式,其过程如图 1(b)所示。工件加工完毕后直接在机床上进行测量,测量后,如果精度不合格,则继续进行补偿加工。在设计与安装在位测量系统时,必须考虑刀具与机床、工件的干涉问题。对于微小零件的超精度在位测量,测头的半径应足够小,以避免尺寸误差造成的测量误差。

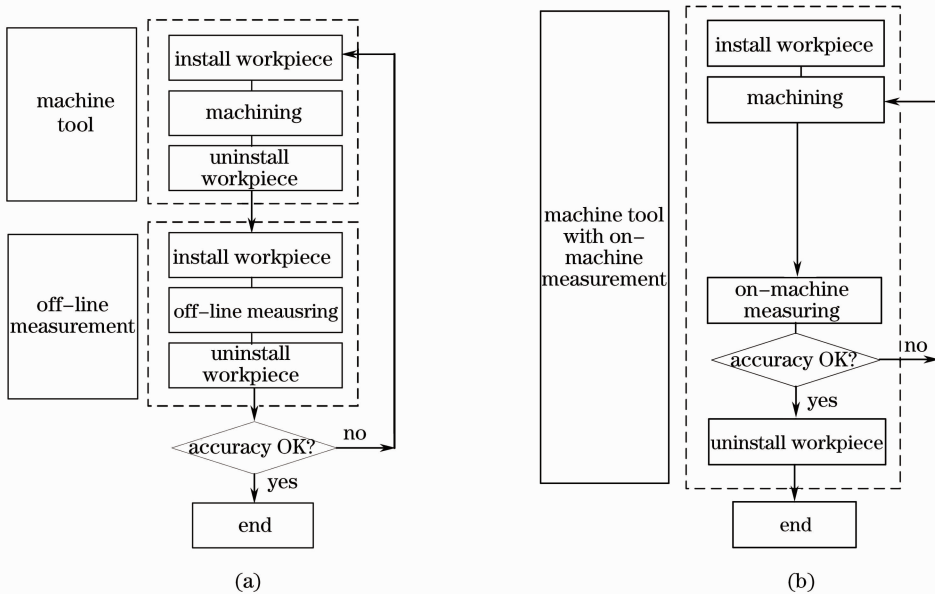


图 1 (a)离线测量与(b)在位测量比较

Fig. 1 Comparison of (a) off-line measurement and (b) on-machine measurement

2.2 在位测量装置

本文采用的在位形状测量装置如图 2 所示。该测量装置采用接触式测量方式,直接对磨削加工后的工件表面进行在位形状误差的测量。测量杆由气浮轴承支撑,其前端装有曲率半径为 0.25 mm 的微小红宝石,接触压力低,速度慢,精度高;测量杆的另一端装有反射式激光位移传感器。反射式激光位移传感器包括激光光源、激光光线感测头、检测器。激光光源发出的光经被测物反射后传回到检测器上。由于表面形状精度的误差,微小测头的偏移使安装在测量杆上的反射镜不断移动,从而使反射光与入射光形成光干涉效应。该系统利用光干涉原理可以计算出反射镜偏移量,即得到被测物体的位移量。该高精度在位测量装置的特点在于利用接触式的微小测头与激光干涉位移测量计相结合,其接触压力低。测量装置测头的规格为:测量分辨率 1 nm,测头的接触压力为 0.02~0.1 N,空气压力 274~412 kPa,轴承刚性 13.3 $\mu\text{m}/\text{N}$ 。

2.3 在位测量过程

在位测量系统首先根据工件的设计形状生成测量数控(NC)程序,测量时测头沿着轴对称形状的母线进行路径规划。在每个测量点,空气主轴上的红宝石测头与被测面接触,NC 轨迹与实际运动轨迹的偏差由激光干涉位移传感器获得,并将测量值传送给计算机。然后,生成的 NC 轨迹与获得的位移偏差进行叠加,从

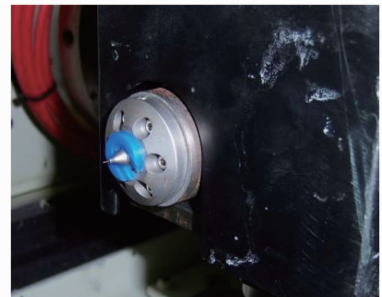


图 2 在位测量装置

Fig. 2 On-machine measuring equipment

而求出接触点的坐标。计算机将测得的数据进行去噪与滤波等处理后得到位移偏差值,并与 NC 轨迹位移进行叠加,利用一定的算法计算出工件形状的误差曲线函数,同时也对加工工件的表面质量给出评价。最后计算出补偿后的 NC 程序,传送到 NC 控制器以驱动各轴的运动,进行误差补偿加工。

3 测量数据的迭代计算

一般的轴对称非球面形状方程可表示为

$$Z(X) = \frac{C_v \cdot X^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1) \cdot C_v^2 \cdot X^2}} + \sum_{i=1}^m C_i \cdot X^i, \quad (1)$$

式中 $C_v, k, C_i (i = 1 \sim m)$ 为非球面系数。 X 轴为轴对称的被测物半径方向, $Z(X)$ 为旋转轴方向位置,该非球面形状只存在一条回转对称轴。

图 4 为测量非球面工件时可能会产生的回转对称轴的 X 方向误差 ΔX 与倾角误差 $\Delta \tau$,必须先求出误差值后再进行修正。经过坐标偏移与旋转变化后有

$$\begin{cases} X' = X_F \cdot \cos \Delta \tau - Z_F \cdot \sin \Delta \tau - \Delta X \\ X' = X_F \cdot \sin \Delta \tau + Z_F \cdot \cos \Delta \tau \end{cases} \quad (2)$$

算出最优值,利用 Z 的实测值与理论值的差的平方均值开方(最小二乘法)来评价,则评价函数为

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z'_i - Z(X'_i)]^2}{n}}, \quad (3)$$

式中 n 为测量次数, $Z(X'_i)$ 为当 $X = X'_i$ 时 Z 的理论值。图 5 为利用试位迭代算法得到的 ΔX 与 $\Delta \tau$ 的相应变化值。当评价函数 E_{rms} 最小时可以求得最佳的 ΔX 与 $\Delta \tau$,将该最佳值代入到经坐标变换后的(3)式中,通过计算目标形状的差值,就可以得到实际被测量工件的形状误差曲线图。

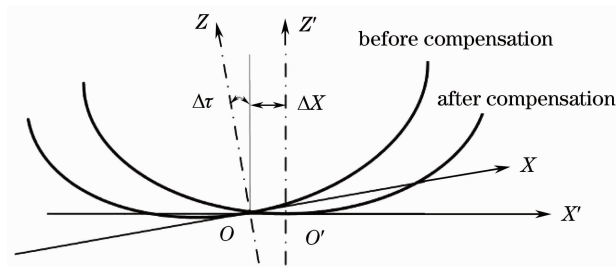


图 4 倾角误差与中心位置误差的修正

Fig. 4 Error correction of inclined angle and center position

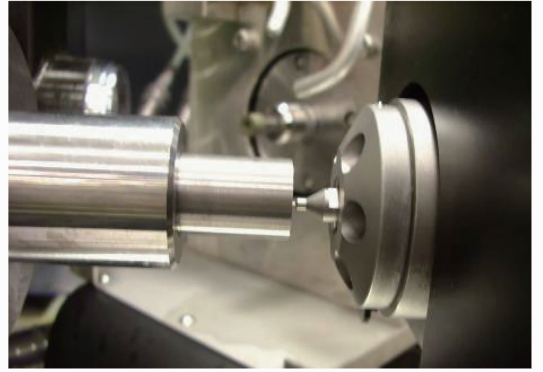


图 3 在位测量装置测量时的状态

Fig. 3 Measuring status of on-machine measuring equipment

图 5 迭代法计算倾角与中心位置误差

Fig. 5 Iterative calculation of inclined angle and position errors

4 在位测量结果与比较

为了验证超精密在位测量装置与数据处理结果,在一台具有在位测量装置的四轴(X, Y, Z, B)超精密加工磨床上采用直径为 6 mm 的圆柱砂轮对口径为 6 mm 的非球面碳化钨模具进行磨削并加以测量。该机床 X, Z 直线分辨率可达 1 nm, Y 轴的直线分辨率为 100 nm。对加工后的表面测量数据进行去噪、滤波、拟合等处理。为了评价在位测量的精度,磨削后的非球面模具的轮廓误差同样用英国泰勒公司的 Form Talysurf 离线测量仪进行测量。图 6 为在位测量系统测量的形状精度与离线测量系统的比较。图 6(a) 显示在位测量系统获得的峰谷(PV)值为 177 nm,图 6(b) 显示由 Form Talysurf 离线测量所得的 PV 值为 182 nm。在位测量装置上直接获得的轮廓形状、PV 值与离线测量装置上获得的形状与数据基本一致,这表明了在位测

量装置的高精度。

5 结 论

本文采用一种在位形状测量装置,以接触式测量方式直接对磨削加工后的工件表面进行在位形状误差的测量,避免离线测量带来的工件的非加工时间增加和二次安装误差。得到了接触式测量过程中测头曲率半径误差、轴对称工件的半径方向误差对超精密在位测量误差的影响,提出了对测量误差的修正方法,用稳健回归滤波方法对测量数据进行滤波。最后利用在位测量装置对加工后的微小非球面进行了在位测量,并与其他超精密离线测量系统进行了比较,从而验证了在位测量方法与装置的精确性。

参 考 文 献

- 1 H. Ohmori, K. Katahira, Y. Uehara *et al.*. ELID-grinding of microtool and applications to fabrication of microcomponents [J]. *International J. Materials and Product Technology*, 2003, **18**(4-6): 498~508
- 2 Yan Feng, Fan Di, Zhang Binzhi *et al.*. Manufacturing and testing of a SiC unrotational-symmetric aspherical optics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(3): 135~139
闫 锋, 范 镒, 张斌智 等. 一种 SiC 非回转对称非球面的加工与检测[J]. *光电工程*, 2009, **36**(3): 135~139
- 3 F. J. Chen, S. H. Yin, H. Huang *et al.*. Profile error compensation in ultra-precision grinding of aspheric surfaces with on-machine measurement [J]. *International J. Machine Tools and Manufacture*, 2010, **50**(5): 480~486
- 4 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313~1317
谢 意, 陈 强, 伍 凡 等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1313~1317
- 5 T. Kohno, D. Matsumoto, T. Yazawa *et al.*. Radial shearing interferometer for in-process measurement of diamond turning[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(10): 2696~2699
- 6 M. Dobosz, A. Wozniak. CMM touch trigger probes testing using a reference axis[J]. *Precision Engineering*, 2005, **29**(3): 281~289

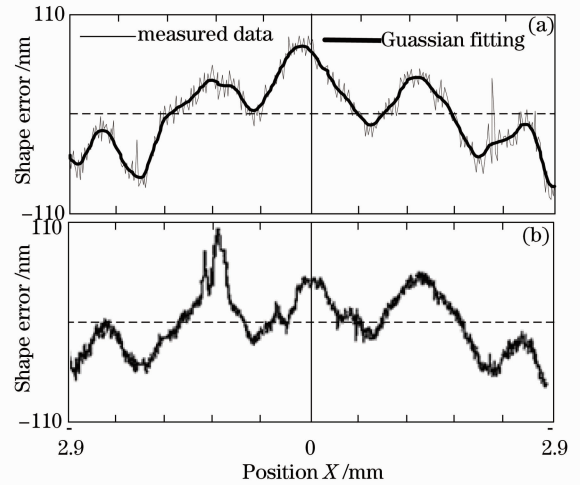


图 6 在位测量系统测量的形状精度与离线测量系统的比较。(a)在位测量;(b)离线测量

Fig. 6 Comparison of shape accuracy measurement results of (a) on-machine measurement and (b) off-line measurement