

文章编号 1004-924X(2012)04-0727-06

接触式大型非球面镜面形测量中测量点分布的确定

李杰^{1,2*}, 伍凡¹, 吴时彬¹, 匡龙¹, 林常青¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为准确有效地检测大型非球面光学元件的面形,研究了接触式测量光学元件的测量点分布方式。使用不同密度的径向分布及均匀分布的测量点分别对以不同 Zernike 多项式表示的面形偏差进行采样,然后计算采样所得面形相对给定面形 PV 值及 RMS 值的最大相对误差,并对计算结果进行了分析。对 1.8 m 抛物面镜面形实测结果表明:在镜面加工的成型及粗磨阶段,由于面形偏差主要呈旋转对称分布,低密度径向分布测量点即可满足继续加工的检测需求;在精磨及初抛阶段,面形偏差主要为像散或其它非对称面形偏差,测量点均匀分布是提升测量精度的有效手段。此分析方法可以指导测量点的排布方式,从而确保由测量点分布引入的测量误差小于镜面本身面形误差的 1/5,提高检测效率。

关键词:光学面形检测;非球面;接触式测量;测量误差;Zernike 多项式

中图分类号:TQ171.65 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0727

Determination of measurement point distribution for contact measurement of large aspheric mirror surface

LI Jie^{1,2*}, WU Fan¹, WU Shi-bin¹, KUANG Long¹, LIN Chang-qing¹

(1. Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: newuser9919@sohu.com.cn

Abstract: Measurement point distribution in contact measuring large aspheric optical surface was researched. By the radial and uniform measurement points with different density distributions, various surface deviations represented by different Zernike polynomials were sampled respectively. Then, the maximum PV and RMS errors were calculated and analyzed. Measurement results of a 1.8 m parabolic mirror were taken as examples, and it indicates that the low density radial measurement point distribution can meet the measurement needs at the forming and coarse grinding stages because the surface deviations show large rotate-symmetrical forms. Moreover, the uniform distribution of measurement points is an effective way to improve measurement accuracy at fine grinding and initial polishing stages, for the main surface deviations are astigmatism or other asymmetrical aberrations. This method can guide the measurement point distribution, control the measurement error caused by distribution to be less than 1/5 of surface error, and can improve measurement accuracy efficiently.

Key words: optical surface testing; aspheric surface; contact measurement; measurement error; Zernike polynomial

收稿日期:2011-09-14;修订日期:2011-12-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60838002)

1 引言

光学镜面的面形检测技术是光学领域发展的一个重要方向。在镜子成型、研磨及初抛光阶段,机械接触式测量是测量镜面面形偏差的主要手段,其主要代表有三坐标测量机法、激光跟踪仪法、轮廓仪法等^[1-3]。接触式测量依靠测量头拾取若干镜面点坐标,通过与理想面形轮廓进行比对得到面形偏差,与光学测量^[4-7]相比,接触式测量具有测量动态范围大、定量测量、不受镜面几何形状限制等优点。在实际测量中,为了使镜面面形达到各工艺流程所需的精度,在保证检测仪器精度的前提下,测量点的分布显得尤为重要,主要体现在以下两点:(1)合理分布测量点可以确保获取足够全面的镜面面形信息,避免因漏检而产生的测量误差。(2)合理分布测量点可以指导测量点数,减小因盲目增加测量点而造成的测量时间及由测量环境引起的误差,平衡检测精度及效率^[8]。

由于采样测量点分布带来的测量误差与被测镜面面形的实际状况紧密相关,本文采用数值分析的方法,计算并分析了简单通用的两种测量点分布对以 Zernike 多项式表征的各种面形偏差的采集能力,并以 1.8 m 抛物面镜加工中的检测结果为例,指出了不同测量点分布的适用阶段。

2 基本方法

2.1 Zernike 多项式

Zernike 多项式是光学检测中常用的表达面形偏差的一种方法,具有以下性质^[9-11]:

(1) Zernike 多项式在连续的单位圆上加权正交。

(2) Zernike 多项式自身特有的旋转对称性,使之对光学问题的求解过程具有良好的收敛性。

(3) Zernike 多项式的各项与初级像差有着一定的对应关系。

对于大部分光学镜面,其表面形状为圆形,因此其面形偏差总可以用一系列 Zernike 圆多项式线性组合表示(未考虑镜面面形不连续):

$$f(\rho, \theta) = \sum a_k Z_k(\rho, \theta), \quad (1)$$

其中, Z_k 为 Zernike 多项式第 k 项; a_k 为第 k 项系数因子; ρ, θ 分别表示极径和方位角。

由于 Zernike 多项式具有正交性,其各项之间不相关,因此对镜面面形的测量可看作对 Zernike 多项式所表示面形的测量,其测量误差为:

$$e_f = \sqrt{a_1^2 e_{z_1}^2 + a_2^2 e_{z_2}^2 + \dots + a_n^2 e_{z_n}^2}, \quad (2)$$

其中, e_{z_n} 为对应每一项 Zernike 像差的测量误差。由此可知,各单项 Zernike 多项式所代表的面形偏差的测量精度是保证总体面形测量精度的充分条件,从而将问题转换为研究不同的测量点分布对每一项 Zernike 多项式所表示面形偏差的测量能力。考虑在接触式测量时期,低阶面形偏差为镜面误差的主要成分,因此使用前 16 项 Zernike 条纹多项式进行计算。

2.2 面形偏差的表示方法

在光学检测中,镜面的面形偏差常用 PV 值及 RMS 值表示^[12]。PV 值为峰-谷值,反映了面形偏差总体的高低情况,可有效指导加工材料去除量,同时,其大小也是取决镜面能否进入光学检验的关键指标。RMS 值为镜面偏差的均方根值,是平均误差的表征,能全面反映镜面加工面形质量。因此,在数值计算中,以 PV 值及 RMS 值的相对误差来衡量不同测量点分布对镜面面形测量的能力。

3 计算及分析

对前 16 项 Zernike 条纹多项式表征的各面形偏差分别使用不同密度的径向分布测量点及均匀分布测量点进行采样。对于呈旋转对称的面形偏差,如 Zernike 多项式第 4, 9, 16 项表示的离焦、球差型面形偏差,给定测量点分布引起的测量误差是一定的。而对于非旋转对称的面形偏差,考虑采样点方向对计算结果的影响,进行 180 次不同角度下的采样(角度平均分布),计算采样结果的 PV、RMS 值与 Zernike 多项式表示的面形偏差 PV 及 RMS 值的最大相对误差(不考虑拟合算法及仪器测量精度带来的影响)。

3.1 径向分布

径向分布即测量点沿直线方向且经过圆心分

布。分别以 1,2,3,4,8,16 条直径分布进行计算,测量点间隔长度为半径的 2.5%。计算结果如图 1,2 所示。

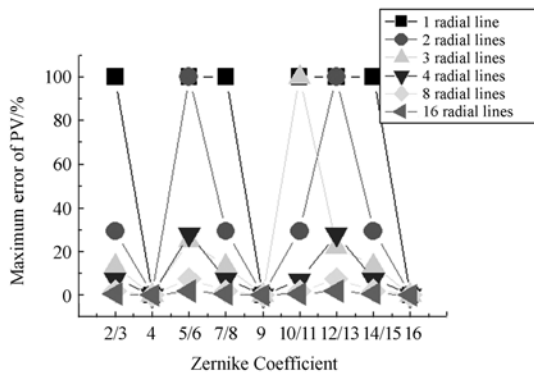


图 1 径向分布 PV 值最大误差

Fig. 1 Maximum PV error under radial distribution

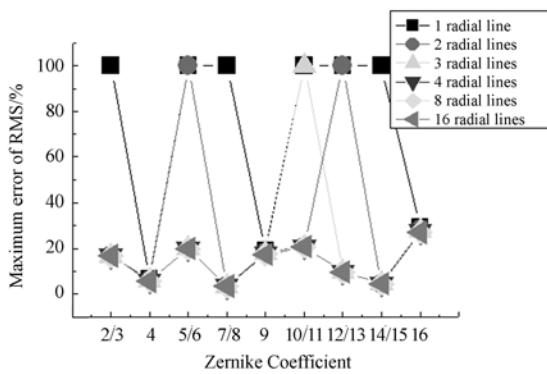


图 2 径向分布 RMS 值最大误差

Fig. 2 Maximum RMS error under radial distribution

从计算结果可以得出:

(1)测量点径向分布可以准确测量出旋转对称型像差项(第 4,9,16 项)的 PV 值,反映径向轮廓曲线。然而对于一些非旋转对称像差项,低密度的径向分布可能造成 100% 的测量误差,导致测量失败。

(2)旋转对称项 RMS 值的最大相对误差随径向分布密度改变,且收敛于固定数值,这是由于对于给定面形偏差,真实的 RMS 值反映了整个面偏差的平均特性;而径向分布测量所得 RMS 值仅反映了线平均特性,这也说明了径向分布对形貌细节采集能力较差,用测量点径向分布方法评价镜面 RMS 值存在一定误差。

(3)非旋转对称项 PV、RMS 值最大相对误差

不仅与径向分布密度有关,而且与像差特征有关。如使用 1 条直径分布和 3 条直径分布测量第 10,11 项 Zernike 多项式表示的面形偏差,其 PV 及 RMS 值最大相对误差均为 100%,这是因为 10,11 项像差呈 120° 旋转对称。

3.2 均匀分布

均匀分布即采样点呈正方形网格状分布。对应于以上径向分布的采样点数,分别取间隔比(间隔长度与被测件半径)0.2,0.14,0.12,0.1,0.07,0.05 进行计算,结果如图 3,4 所示。

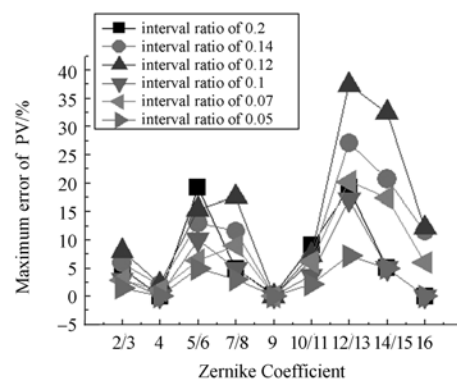


图 3 均匀分布 PV 值的最大误差

Fig. 3 Maximum PV error under uniform distribution

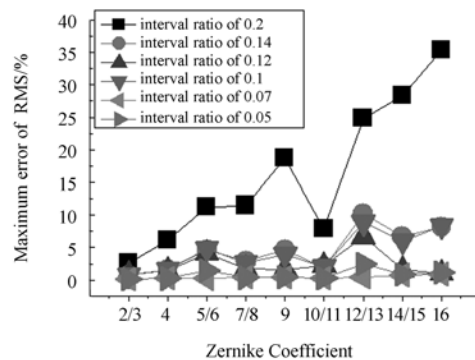


图 4 均匀分布 RMS 值的最大误差

Fig. 4 Maximum RMS error under uniform distribution

从计算结果可以得出:

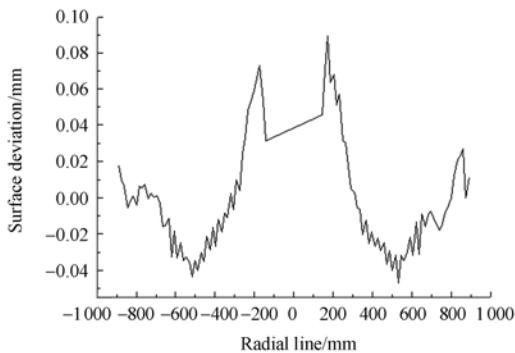
(1)随着 Zernike 系数项数的增加,面形偏差频率增大,测量点均匀分布时,相对于低阶项,高阶项 PV 值及 RMS 值相对误差偏大。

(2)测量点均匀分布时,测量值的相对 PV、RMS 误差随测量密度增加呈减小趋势,但不单调减小。

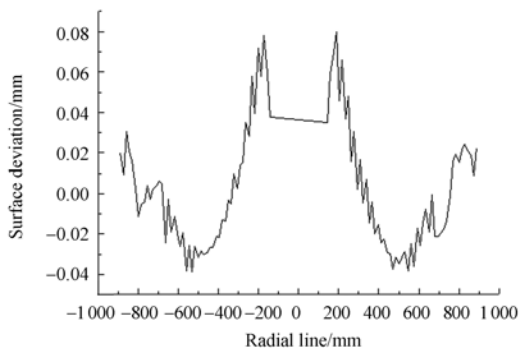
4 实验

对于一般的旋转对称光学镜面,接触式测量位于镜面成型、研磨及初抛光阶段。在非球面铣磨成型时,大部分的面形偏差由铣床垂直轴定位误差及磨头磨损造成,铣磨阶段的面形检测主要为数控加工中心提供进刀量的合理修正值,从而控制非球面面形 PV 值进入合理范围,减少后期的研磨时间。由于铣磨时采用自内而外旋转磨削的加工方式,面形偏差往往呈旋转对称规律分布,可由 Zernike 多项式第 4,9,16 项线性表示,因此,由上述计算分析可知:应用简单十字线或米字线的测量点径向分布即可准确检测镜面面形 PV 值。

图 5 为 1.8 m 抛物面镜在成型结束后,三坐标测量机采用十字线采样的面形检测情况。



(a) Deviation of 1 st radial line, PV: 0.137 mm, RMS: 0.03 mm



(b) Deviation of 2 nd radial line, PV: 0.119 mm, RMS: 0.030 mm

图 5 成型后测量点径向分布检测结果

Fig. 5 Measurement results under radial distribution after forming

从图 5 可以看出两条测量线反映出的轮廓大致相同,仅存在细节上的微小差异,可认为此阶段米字线测量点分布已经满足后期加工所需的精度。

在非球面精磨后期及初抛光阶段,需要精确地测量出整个镜面面形误差,配合磨修从而改进镜面面形,使之进入干涉仪的检测范围之内。图 6 为 1.8 m 抛物面镜抛光初期干涉仪检测面形,可以看出,在研磨后期及初抛光阶段,由于采用了数控应力盘技术及小工具磨盘精磨技术,大的旋转对称型面形偏差已被消除,由加工机床及加工工具产生的非对称型偏差是面形偏差的主要组成部分。

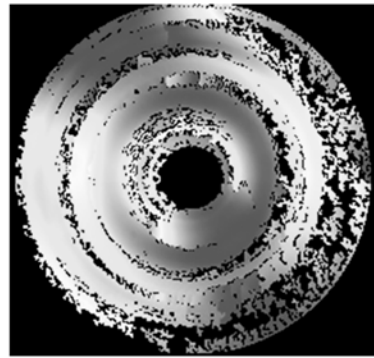


图 6 初抛光阶段干涉检验图

Fig. 6 Measurement result of interferometer at initial polishing

表 1 Zernike 系数

Tab. 1 Zernike coefficients

| 项数 | 值 | 项数 | 值 |
|----|-------|----|-------|
| 1 | 7.86 | 9 | 0.01 |
| 2 | 4.12 | 10 | -0.30 |
| 3 | -5.21 | 11 | 0.12 |
| 4 | 0.26 | 12 | -0.55 |
| 5 | 0.61 | 13 | 0.23 |
| 6 | 1.06 | 14 | -0.49 |
| 7 | 0.4 | 15 | 0.31 |
| 8 | 0.09 | 16 | -0.08 |

表 1 为上图面形所对应的 16 项条纹 Zernike 系数,使用数值计算中测量点的分布方式对此面形偏差进行采集(去除中心开孔内的测量点),以干涉仪测量面形结果为标准(忽略干涉仪测量的

平移、倾斜项),则不同测量点分布 PV、RMS 的最大相对误差如表 2 所示。

表 2 不同测量点分布下 PV、RMS 值最大相对误差

Tab.1 Maximum relative errors of PV&RMS under different distributions

| 均匀分布 /间隔比 | PV | RMS | 径向分布 /直径数 | PV | RMS |
|--------------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| 0.2 | 17.92 | 10.94 | 1 | 74.59 | 61.38 |
| 0.14 | 18.37 | 5.33 | 2 | 58.88 | 33.74 |
| 0.115 | 18.17 | 4.72 | 3 | 25.39 | 8.26 |
| 0.1 | 12.24 | 5.29 | 4 | 22.25 | 6.92 |
| 0.07 | 11.29 | 1.43 | 8 | 5.98 | 7.00 |
| 0.05 | 5.10 | 2.28 | 16 | 0.89 | 7.05 |

从计算结果可以看出:对于该检测任务,欲使测量点分布引起 PV 值的最大相对误差控制在面形偏差的 20%之内,若采用径向分布,其测量直径数应大于 4 条;而对于采样间隔比小于 0.2 的

均匀分布,由测量点分布引起的 PV、RMS 值相对误差均可满足测量要求且具有良好的收敛性,相比径向分布测量效率更高。同时,均匀分布测量 RMS 值相对误差明显小于径向分布,有助于更好地掌握镜面的全貌,指导镜面后期加工。

5 结 论

在面形测量中,采样点分布的选择对测量精度影响很大。本文通过使用不同测量点分布对以不同形式像差表征的面形偏差进行计算,掌握了由测量点分布引起的测量误差特性。在测量时,可以根据工件加工实际存在的面形偏差特性判断并选择合理的测量点分布,使由采样点分布引入的误差小于镜面面形误差的 1/5,使检测精度及效率达到平衡。本文的计算及分析结果对光学件面形测量的采样策略确定有一定指导意义。

参考文献:

- [1] WOLFGANG O, AXEL M, HEINZ S. Measuring large aspherics using a commercially available 3D-coordinate measuring machine [J]. SPIE, 2000, 4003:91-97.
- [2] TOM L Z, JAMES H B, WARREN B D, et al.. Measurements of large optical surfaces with a laser tracker [J]. SPIE, 2008, 7018:70183U-1-70183U-12.
- [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 larger aperture aspherical surface in the fine grinding stage [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6):509-511. (in Chinese)
- [4] 贺俊,陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):69-74. HE J, CHEN L. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):69-74. (in Chinese)
- [5] 王孝坤,王丽辉,邓伟杰,等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3):520-528. WANG X K, WANG L H, DENG W J, et al.. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):520-528. (in Chinese)
- [6] 黎发志,罗霄,赵晶丽,等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4):709-716. LI F ZH, LUO X, ZHAO J L, et al.. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4):709-716. (in Chinese)
- [7] 何煦,马军. 共光路径向剪切干涉仪的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9):2029-2035. HE X, MA J. Design of common path radial shearing interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2029-2035. (in Chinese)
- [8] MARCIN S, WLADYSLAW J. Optimization of measuring strategies in coordinate measuring technique[J]. *Measurement Science Review*, 2001, 1(1):191-194.
- [9] VIRENDRA N M. Zernike polynomials and aberration balancing[J]. SPIE, 2003, 5173:1-17.
- [10] 单宝忠,王淑岩,牛慧笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3):318-323. SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, et al.. Fitting method and apply of Zernike polynomials [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):318-323. (in Chinese)

- [11] 亓波,陈洪斌,刘顺发,等. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3):396-400.

QI B, CHEN H B, LIU SH F. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):396-400.

(in Chinese)

- [12] 徐德衍,王青,高志山,等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

XU D Y, WANG Q, GAO ZH SH, *et al.*. *Current Optics Testing and International Standards* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



李杰(1984—),男,安徽淮南人,博士研究生,主要从事光学精密检测技术的研究。E-mail: newuser9919@sohu.com.cn



林常青(1983—),男,辽宁本溪人,工程师,2008年于四川大学获得硕士学位,主要从事精密几何量检测技术的研究。E-mail: skyqing08@163.com.cn



吴时彬(1963—),男,四川成都人,研究员,主要从事光学精密检测及系统检测技术的研究。E-mail: zkb@ioe.ac.cn

导师简介:



伍凡(1957—),男,四川广安人,博士生导师,研究员,主要从事先进光学制造及测试技术方面的研究。E-mail: wufan@ioe.ac.cn



匡龙(1971—),男,四川武胜人,高级工程师,主要从事精密测试计量技术方面的研究。E-mail: klong@ioe.ac.cn