

大口径凸非球面反射镜子孔径拼接检测

王孝坤

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术
重点实验室,吉林 长春 130033)

摘要: 为了获得大口径凸非球面反射镜全口径的面形,提出了利用子孔径拼接检测大口径凸非球面的新方法。利用干涉仪标准球面波前依次干涉测定大口径镜面上各个区域的相位分布,通过子孔径拼接算法即可求解得到镜面全口径面形信息。对该方法的基本原理和实现步骤进行了分析和研究,建立了大口径拼接检测算法的数学模型,设计并研制了大口径反射镜拼接检验装置。结合实例对一口径为 260 mm 的碳化硅凸非球面反射镜进行了 9 个子孔径的拼接干涉测量,并将拼接检测结果与全口径面形测量结果进行对比,两种方法测量面形 PV 值和 RMS 值的偏差分别为 0.043λ 和 0.021λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。

关键词: 光学检测; 大口径反射镜; 子孔径拼接干涉; 凸非球面; 非零位测试

中图分类号: O439;O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0716-07

Test on large convex aspherical mirror by subaperture stitching interferometry

Wang Xiaokun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to obtain the figure error of the whole large convex aspherical mirror, a new method for testing large convex asphere by subaperture stitching and interferometry so called SSI was proposed. A perfect sphere mirror was used as the reference surface, the phase distribution of each subaperture could be measured by the digital wavefront interferometer, and the full surface map could be calculated by stitching several subapertures. The basic principle and theory of SSI were studied, the stitching process and prototype for test of large aspheres were devised and developed, and the setup of SSI for measuring of large aspherical surface was designed and manufactured. A convex SiC asphere mirror with the aperture of 260 mm was tested by SSI with 9 subapertures. For the validation, the aspheric mirror was also measured by null compensation, the difference of PV and RMS error was 0.043λ and 0.021λ , respectively (λ is 632.8 nm). It provides an another accurate testing method for aspherical surface especially for large convex aspherical mirror.

Key words: optical measurement; large aperture mirror; SSI; convex asphere; non-null test

收稿日期:2012-07-10; 修订日期:2012-08-20

基金项目:863 计划(O8663NJ090);国家自然科学基金(61036015)

作者简介:王孝坤(1980-),男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事光学超精加工和检测技术方面的研究。

Email:jimwzk@sohu.com

0 引 言

当今全球范围内的高科技竞争主要体现为信息技术的竞争,随着信息技术的不断发展,空间遥感技术得到了前所未有的飞速发展,它直接关系到甚至决定着与国家安全、国防建设息息相关的各个领域^[1]。作为空间遥感的核心,空间相机在资源探测、国防军事和科学探索等方面正发挥越来越重的作用^[2-3]。

由于三反系统具有组件少、消像散、无色差、结构紧凑等优点,已经成为空间相机的主要结构形式^[4]。但是无论是同轴三反系统还是离轴三反系统,其光学系统的次镜一般为凸非球面次镜。

相对凹非球面面形的检测,凸非球面的测量存在很多的难点^[5]。对于口径很小的凸非球面,可以设计补偿透镜或者计算全息等补偿元件对其进行零位补偿干涉检测^[6-7]。但是对于大口径的凸非球面,如果采用零位补偿测量,由于需要参考波面为汇聚光束,因此需要定制大口径的补偿透镜或者计算全息版。凸非球面的补偿透镜中还含有非球面透镜,同时其口径很大,对材料折射率和均匀性有很高的要求,因此在设计、加工制作和装校中存在很多的困难^[8-10]。此外,由于受刻划工艺的限制,目前大口径计算全息版的制作也无法实现。利用 Hindle 球也可以实现对大口径凸非球面的零位测量,但是需要超大口径的辅助球,且存在中心遮拦。而子孔径拼接测量是一种通用的凸非球面面形检测方法,它能摆脱补偿元件的束缚,无需零位补偿就能高精度地实现对大口径凸非球面反射镜的测量^[11-12]。

文中建立了大口径凸非球面子孔径拼接测量的数学模型,规划了拼接测试流程,并结合工程实践对一加工过程中的大口径凸非球面进行了拼接测量。

1 基本原理

子孔径拼接检测凸非球面反射镜的设备示意图如图 1 所示,它由干涉仪、待测非球面反射镜、计算机以及调整机构等组成。待测镜面安置在六维精密调整架上,可以精确调整待测镜体的俯仰、扭摆和旋转以及沿 X 方向、Y 方向和沿 Z 方向(光轴方向)的平动,坐标系定义如图 1 中所示。

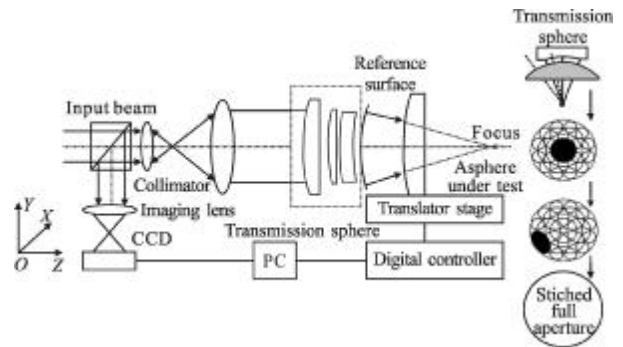


图 1 子孔径拼接检测凸球面的装置示意图
Fig.1 Sketch of setup for testing convex asphere by SSI

拼接检测流程如图 2 所示。

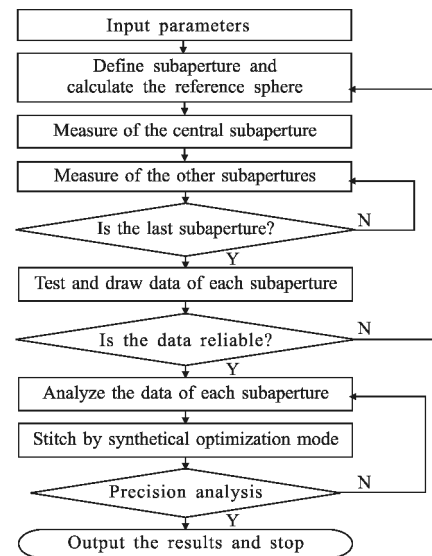


图 2 子孔径拼接算法流程图
Fig.2 Flow chart of SSI algorithm

(1) 选取标准镜和规划子孔径

标准镜选择要求 $f > r$ (其中 f 为干涉仪标准镜的焦距, r 为待测非球面的最接近球面半径)。子孔径大小约为 $r/F\#$, 且相邻各子孔径有一定的重叠区域, 为了确保拼接精度, 重叠区域面积一般不小于子孔径面积的 $1/4$ 。

(2) 中心基准子孔径测量

调整干涉仪, 使干涉仪出射的参考球面波前的曲率半径与待测非球面中心区域子孔径的最接近球面半径吻合, 利用干涉法测定该区域的相位分布。

(3) 其他区域子孔径测量

通过精确控制待测凸非球面, 使其沿 X 方向平

移一定距离,并调整待测凸非球面的倾斜及离焦,使干涉仪出射波前的曲率与轴外子孔径区域曲率匹配,从而可以测定该区域的相位分布。然后,通过旋转待测凸非球面,依次可以测量获得其他子孔径的相位信息。

(4) 全口径数据拼接

最后利用综合优化的子孔径拼接算法,求解各子孔径相对中心基准子孔径的拼接系数,进行全口径拼接计算即可获得大口径凸非球面全口径的面形误差分布。

2 拼接算法和数学模型

图 3 是子孔径拼接检测示意图,对于回转对称的非球面,仅有 5 个方向的失调会引入调整误差,分别是沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的平动 D_x, D_y, D_z 以及绕 X 轴和 Y 轴的转动 θ_x, θ_y 。

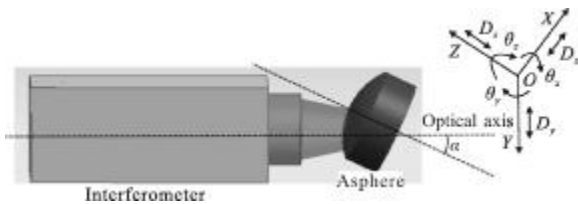


图 3 子孔径拼接检测示意图

Fig.3 Sketch of SSI

设镜面上任意点坐标为 $P(x, y, z)$, P 的矢量为: $\vec{p} = (x \ y \ z \ 1)^T$, 引入调整量偏离理想位置后的坐标为 $P'(x', y', z')$, P' 的矢量为: $\vec{p}' = (x' \ y' \ z' \ 1)^T$ 。

由刚体运动定理可得:

$$\vec{p}' = \begin{pmatrix} \cos(\theta_y)x - \sin(\theta_y)z + D_x \\ \sin(\theta_x)\sin(\theta_y)x + \cos(\theta_x)y + \sin(\theta_x)\cos(\theta_y)z + D_y \\ \cos(\theta_x)\sin(\theta_y)x - \sin(\theta_x)y + \cos(\theta_x)\cos(\theta_y)z + D_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

当 θ_x, θ_y 足够小时,有: $\sin(\theta_x) \approx \theta_x, \cos(\theta_x) \approx 1$; $\sin(\theta_y) \approx \theta_y, \cos(\theta_y) \approx 1$

因此,

$$\vec{p}' = \begin{pmatrix} x - \theta_y z + D_x \\ y + \theta_x z + D_y \\ z + \theta_y x - \theta_x y + D_z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

令:

$$\vec{\delta d} = \begin{pmatrix} -\theta_y z + D_x \\ \theta_x z + D_y \\ \theta_y x - \theta_x y + D_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

则 δd 可以表示镜面上任意点由调整量误差 $D_x, D_y, D_z, \theta_x, \theta_y$ 引起的位移矢量。拼接检测时,光线近似沿被检区域的法线方向入射,所以调整误差为该点的位移矢量在其法线方向上的投影,由于是反射面,则引入的波像差为:

$$W_A(x, y) = -2(\vec{\delta d} \cdot \vec{n}) \quad (4)$$

式中: \vec{n} 为非球面的单位法向量。

$$\vec{n} = \left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left\{ -\frac{\partial f}{\partial x}, -\frac{\partial f}{\partial y}, 1 \right\} \quad (5)$$

非球面方程的标准形式为:

$$f(p) = \frac{cp^2}{1 + [1 - (k+1)c^2p^2]^{1/2}} + A_1p^4 + A_2p^6 + \dots \quad (6)$$

式中: $p^2 = x^2 + y^2$; k 为二次曲面常数; $c = 1/r_0, r_0$ 为非球面顶点曲率半径。对于二次曲面,工程中常使用其级数展开式:

$$z = f(x, y) = \frac{cp^2}{2} + \frac{(k+1)c^3p^4}{2^2 \cdot 2!} + \frac{(k+1)c^5p^6}{2^3 \cdot 3!} + \frac{(k+1)c^7p^8}{2^4 \cdot 4!} + \dots \quad (7)$$

将 $\left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$ 使用其级数展开为:

$$\left[1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = 1 - \frac{c^2p^2}{2} - \frac{k+1}{8}c^4p^4 + \dots \quad (8)$$

则推导可得出同轴二次曲面干涉检验中调整量误差引起的像差 W_A 的表达式:

$$W_A = -2 D_z^{\text{Piston}} + 2x(c D_x^{\text{X-tilt}} + \theta_y) + 2y(c D_y^{\text{Y-tilt}} - \theta_x) + p c D_z^{\text{Defocus}} + x p^2 (k c D_x^{\text{X-coma}}) + y p^2 (k c D_y) + p^4 \frac{(1+4k)c^4}{8} D_z \quad (9)$$

由公式(9)可知,对于同轴非球面,拼接测量时由调整量引起的像差主要是倾斜、离焦、彗差和球差。但对于离轴非球面,由于干涉像面的坐标系与离轴镜的几何坐标系 $(x'y'z')$ (以离轴非球面的几何中心为原点建立的坐标系)相对应,因此,需要对公式(9)进行坐标变换。设 x 方向离轴量为 x_c, y 方向离轴量为 y_c , 离轴镜面上任一点 $P(x, y)$ 在几何坐标系 $x'y'z'$ 下的坐标为 $p'(x_s, y_s)$, 由于 $x = x_c + x_s, y = y_c + y_s$ 令 $s^2 = x_c^2 + y_c^2, p_s^2 = x_s^2 + y_s^2$, 则经坐标变换推导得到离轴非

球面检测中调整误差所引起的像差为公式(10):

$$\begin{aligned}
 W_A = (x, y) = & -2D_z + 2c x_c \overset{\text{Piston}}{D_x} + 2c y_c D_y - 2y_c \theta_x + 2x_c \theta_y + \\
 & \underset{\text{Focus}}{(2c D_x + 2\theta_y) x_s + (2c D_y - 2\theta_x) y_s} + \\
 & \underset{\text{Astigmatism}}{p_s^2 c^2 D_z + x_c p_s^2 c^3 k D_x + y_c p_s^2 c^3 k D_y + s^2 p_s^2 c^4 \frac{4k+1}{8} D_z +} \\
 & 2x_c x_s^2 c^3 k D_x + 2y_c y_s^2 c^3 k D_x + 2x_c x_s y_s c^3 k D_y + 2y_c y_s^2 c^3 k D_y + \\
 & x_c^2 x_s^2 c^4 \frac{4k+1}{2} D_z + y_c^2 y_s^2 c^4 \frac{4k+1}{2} D_z + x_c x_s y_s c^4 (4k+1) D_z + \\
 & x_s p_s^2 c^3 k D_x + y_s p_s^2 c^3 k D_y + x_c x_s p_s^2 c^4 \frac{4k+1}{2} D_z + \\
 & y_c y_s p_s^2 c^4 \frac{4k+1}{2} D_z + p_s^4 c^4 \frac{4k+1}{8} D_z \quad (10)
 \end{aligned}$$

由公式(10)可得,对离轴非球面进行子孔径拼接检测时,若以待测非球面的几何中心为原点建立参考坐标系,则相邻两个子孔径间的相对调整误差引起的除了倾斜、离焦、彗差和球差外,还包含像散。

假使基准子孔径的相位分布为 w_0 , 则其他子孔径相位分布与基准子孔径相位分布的关系为:

$$\begin{aligned}
 W_0 = & w_i + a_{1i} x_i + a_{2i} y_i + a_{3i} (x_i^2 + y_i^2) + a_{4i} x_i y_i + a_{5i} (x_i^2 - y_i^2) + \\
 & a_{6i} x_i (x_i^2 + y_i^2) + a_{7i} y_i (x_i^2 + y_i^2) + a_{8i} (x_i^2 + y_i^2)^2 + a_{9i} \quad (11)
 \end{aligned}$$

式中: w_i 为其他子孔径的相位分布; a_{1i}, a_{2i}, a_{3i} 分别为其他子孔径相对基准子孔径沿 x 方向的倾斜系数、沿 y 方向的倾斜系数、相对离焦系数; a_{4i}, a_{5i} 为相对像散系数; a_{6i}, a_{7i} 为相对彗差系数; a_{8i} 为相对球差系数; a_{9i} 为相对平移系数。

利用最小二乘拟合可以求解相邻两个子孔径间的拼接系数,从而实现两个子孔径拼接,通过两两拼接可以获得全口径面形误差分布,但是这往往会带来误差传递和累积。为此,采用了综合优化的拼接模式^[13],利用最小二乘法,使得所有重叠区域相位差的平方和值为最小,可得公式(12):

$$\begin{aligned}
 S = \sum_{i \in W_{i1}, W_{i2}}^N \sum_{j \in W_{i1}, W_{i2}}^n \{ & [W_{i1}(x_{i1}, y_{i1}) + a_{1i1} x_{i1} + a_{2i1} y_{i1} + a_{3i1} (x_{i1}^2 + y_{i1}^2) + \\
 & a_{4i1} x_{i1} y_{i1} + a_{5i1} (x_{i1}^2 - y_{i1}^2) + a_{6i1} x_{i1} (x_{i1}^2 + y_{i1}^2) + a_{7i1} y_{i1} (x_{i1}^2 + y_{i1}^2) + \\
 & a_{8i1} (x_{i1}^2 - y_{i1}^2)^2 + a_{9i1}] - [W_{i2}(x_{i2}, y_{i2}) + a_{1i2} x_{i2} + a_{2i2} y_{i2} + \\
 & a_{3i2} (x_{i2}^2 + y_{i2}^2) + a_{4i2} x_{i2} y_{i2} + a_{5i2} (x_{i2}^2 - y_{i2}^2) + a_{6i2} x_{i2} (x_{i2}^2 + y_{i2}^2) + \\
 & a_{7i2} y_{i2} (x_{i2}^2 + y_{i2}^2) + a_{8i2} (x_{i2}^2 - y_{i2}^2)^2 + a_{9i2}] \}^2 = \min \quad (12)
 \end{aligned}$$

式中: N 为相邻子孔径的重叠区域数; n 为重叠区域

内的采样点数,其中所有相位分布均剔除了标准球面波与非球面的理论偏差(非共路误差),若 W_{i1} 或 W_{i2} 为基准子孔径,则不包含相应的拼接项。

对于中心子孔径,其最接近球面半径可由下式求出:

$$r_0 = D^2 / (8h) + h / 2 \quad (13)$$

式中: D 为中心子孔径的直径(大小为 $r_c / F\#$, r_c 为待测非球面的顶点曲率半径, $F\#$ 为标准镜 F 数); h 为中心子孔径边缘矢高,由非球面方程可以求出。其他区域子孔径通过求解算出子孔径子午方向及弧矢方向的矢高极值,通过三点法可以求解相应区域的最接近球面半径。

对于非球面度比较小的非球面拼接,可以采用理论位置时各子孔径的非球面方程与参考球面方程的理论偏差求解非共路误差,但其与法向像差存在一定的偏差,对于高陡度、离轴子孔径,更明显。因此对于偏离量较大的子孔径其非共路误差值应为各点非球面方程与参考球面方程的理论偏差与各点法向角余弦的乘积。此外,可以根据实际调整参数,利用 Zemax 软件模拟子孔径干涉实际测量光路来精确求解非共路误差。

对公式(12)进行分析和求解,可得最终的最小二乘等式为:

$$[(\sum_k^{M-1} G_{ik})_i] = [(Q_{ij} - \delta_{ij} \sum_k^{M-1} Q_{ik})_{ij}] (R_i) \quad (14)$$

其中,子矩阵 G, Q, R 的表达式如下:

$$\begin{aligned}
 G_{ij} = & \left[\begin{array}{l} \sum_{i \in j} x \Delta w \\ \sum_{i \in j} y \Delta w \\ \sum_{i \in j} (x^2 + y^2) \Delta w \\ \sum_{i \in j} xy \Delta w \\ \sum_{i \in j} (x^2 - y^2) \Delta w \\ \sum_{i \in j} x(x^2 + y^2) \Delta w \\ \sum_{i \in j} y(x^2 + y^2) \Delta w \\ \sum_{i \in j} (x^2 + y^2)^2 \Delta w \\ \sum_{i \in j} \Delta w \end{array} \right] \quad (15) \\
 R_i = & \left[\begin{array}{l} a_{1i} \\ a_{2i} \\ a_{3i} \\ a_{4i} \\ a_{5i} \\ a_{6i} \\ a_{7i} \\ a_{8i} \\ a_{9i} \end{array} \right] \quad (16) \\
 \delta_{ij} = & \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$Q_{ij} = \begin{pmatrix} \sum_{i_{nj}} x^2 & \sum_{i_{nj}} xy & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} x^2y & \sum_{i_{nj}} x(x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} x^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} x \\ \sum_{i_{nj}} xy & \sum_{i_{nj}} y^2 & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy^2 & \sum_{i_{nj}} y(x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} y \\ \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} (x^4-y^4) & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2)^3 & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2) \\ \sum_{i_{nj}} x^2y & \sum_{i_{nj}} xy^2 & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} x^2y^2 & \sum_{i_{nj}} xy(x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} x^2y(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} xy \\ \sum_{i_{nj}} x(x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} y(x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} (x^4-y^4) & \sum_{i_{nj}} xy(x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} (x^2-y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} x(x^4-y^4) & \sum_{i_{nj}} y(x^4-y^4) & \sum_{i_{nj}} (x^4-y^4)(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} (x^2-y^2) \\ \sum_{i_{nj}} x^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} x^2y(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} x^2(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2)^3 & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2) \\ \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} xy^2(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y(x^4-y^4) & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} y^2(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2)^3 & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2) \\ \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2)^3 & \sum_{i_{nj}} xy(x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} (x^4-y^4)(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2)^3 & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2)^3 & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2)^4 & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2)^2 \\ \sum_{i_{nj}} x & \sum_{i_{nj}} y & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} xy & \sum_{i_{nj}} (x^2-y^2) & \sum_{i_{nj}} x(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} y(x^2+y^2) & \sum_{i_{nj}} (x^2+y^2)^2 & \sum_{i_{nj}} n_{ij} \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中： n_{ij} 为各重叠区域的采样点数；假如任意两子孔径间没有重叠，则子矩阵 G_{ij} 、 Q_{ij} 为零矩阵。

利用方程(14)~(18)求得子矩阵 R_i ，就可以得到各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接系数，从而实现全口径数据综合优化拼接，完成对大口径非球面的拼接测量。

3 拼接检测实验

为了验证拼接算法和数学模型的准确性，笔者对一大口径碳化硅凸非球面反射镜进行了拼接测量，前期通过轮廓测量和 Hartman 检测完成了该凸非球面的研磨和粗抛光，目前正转入精抛光阶段，将利用子孔径拼接测量获得的全口径面形误差信息指导后续加工。子孔径规划如图 4 所示。

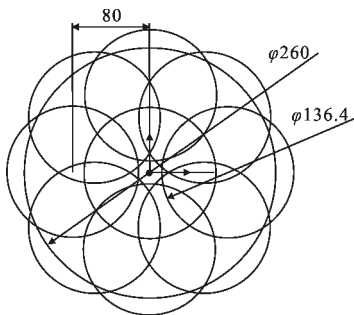


图 4 子孔径分布图

Fig.4 Distribution of subapertures

待测凸非球面的口径为 260 mm，顶点曲率半径为 4 088 mm，二次曲面常数为 -3.6，因此专门设计定制了 F# 为 30 的标准球面参考镜，子孔径大小为 136.4 mm，利用 9 个子孔径拼接即可完成对其测量。

所设计开发的拼接检测实验装置如图 5 所示，干涉仪安置在调整架上，可以精确调整其升降，待测非球面安装在五维精密调整机构上，可以精确控制其在 X 轴方向和 Z 轴(光轴方向)上的平动以及俯



图 5 子孔径拼接检测设备图

Fig.5 Setup of the SSI

仰、扭摆和绕 Z 轴的旋转。首先，调整好干涉仪与待测非球面之间的相对位置关系，使得干涉仪出射光束对准待测凸非球面的中心区域，并使干涉仪参考球面半径与中心子孔径最接近球面半径吻合，测量获得该区域的相位分布(如图 6 中子孔径 0 所示)。其次，调整待测凸非球面，使其沿 X 轴方向平移 80 mm，并调

整使其绕 Y 轴旋转 1.121°, 然后沿轴向调整其离焦, 使得参考球面波前曲率与该区域的最接近球面曲率一致, 从而测定该区域的相位信息(如图 6 中子孔径 1 所示)。再次, 通过绕光轴依次旋转 45°, 可以测定其他 7 个子孔径的相位分布(如图 6 中子孔径 2~8 所示)。最后通过综合优化拼接算法求得全口径面形误差分布如图 7 所示, 其 PV 值和 RMS 值分别为 0.349 λ 和 0.059 λ 。

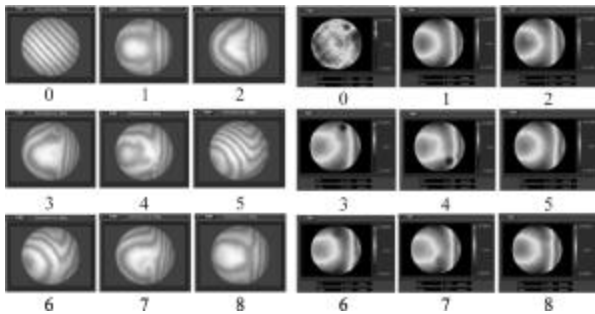


图 6 9 个子孔径相位分布图和干涉图

Fig.6 Phase map and interferogram of nine subapertures

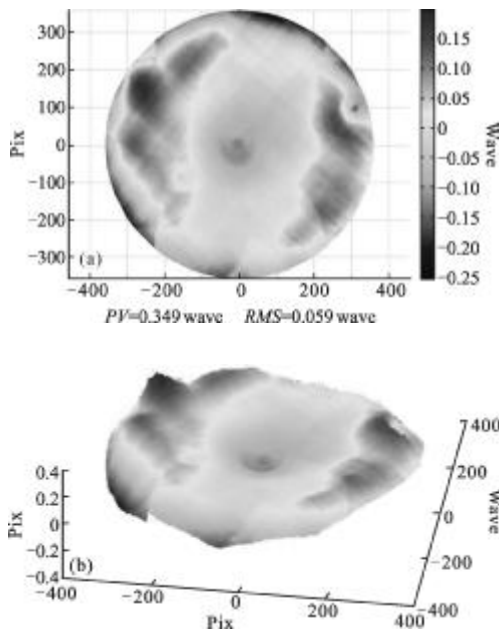


图 7 拼接后全口径面形分布图

Fig.7 Normalized surface map of the whole aperture after stitching

为了分析和对比, 设计了零位补偿检测装置, 利用口径为 600 mm 的干涉仪对该凸非球面进行了全口径面形测量, 检测装置如图 8 所示, 全口径检测结果如图 9 所示, 其 PV 值和 RMS 值分别为 0.391 λ 和 0.045 λ , 两种测试方法面形残差分布如图 10 所示,

残差分布中无低阶像差, 其 PV 值和 RMS 值分别为 0.23 λ 和 0.018 λ 。



图 8 全口径面形检测装置图

Fig.8 Setup of testing full aperture

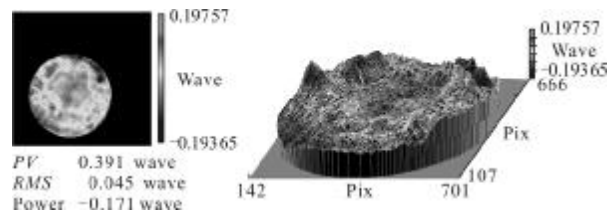


图 9 全口径测量面形分布图

Fig.9 Phase map of full aperture testing

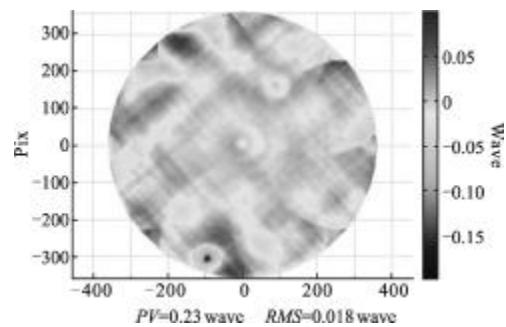


图 10 两种测试方法面形残差分布图

Fig.10 Residual error with two test methods

4 结论

针对大口径凸非球面反射镜面形测量的困难, 提出了利用子孔径拼接检测获得全口径面形误差的新方法。对其基本原理进行了分析和研究, 推导了子孔径拼接检测同轴非球面和离轴非球面由于失测量引起的具体像差表征形式, 并建立了综合优化的拼接数学模型, 初步设计开发了子孔径拼接检测装置。结合工程实例对一口径为 260 mm 的大口径凸非球面进行了拼接测量, 并与全口径面形测量进行了对比, 其面形分布是一致的, 两种测量方法面形残差的 PV 值和 RMS 值分别优于 $\lambda/4$ 和 $\lambda/50$ 。该方法不仅

适合大口径凸非球面的拼接测量,也适用大口径的凹非球面、离轴非球面以及自由曲面。

参考文献:

- [1] Zobrist Tom L, Burge James H, Martin Hubert M. Laser tracker surface measurements of the 8.4 m GMT primary mirror segment[C]//SPIE, 2009, 7426: 742613-1-742613-12.
- [2] Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jiaguang. Optical design of off-axis three-mirror anastigmatic system for imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 167-172. (in Chinese)
王美钦, 王忠厚, 白加光. 成像光谱仪的离轴反射式光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 167-172.
- [3] Ming Ming, Yang Fei, Zhao Jinyu, et al. Catadioptric optical system with large aperture, wide field of view and broad waveband[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 149-154. (in Chinese)
明明, 杨飞, 赵金宇, 等. 折反式大口径、大视场、宽光谱光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 149-154.
- [4] Connelly Joseph A, Bosa Brent J, Davila Pamela S, et al. Optical metrology and alignment of the James Webb space telescope integrated science instrument module [C]//SPIE, 2008, 7068: 70680F-1-70680F-10.
- [5] Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of Aspherical Optical Surface [M]. Beijing: Science Press, 1994: 150-160. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 150-160.
- [6] Qi Yuejing, Wang Ping, Xie Jinghui. A novel method of measuring convex aspheric lens using hologram optical elements[C]//SPIE, 2005, 6024: 60241F-1-60241F-7.
- [7] Guo Peiji, Yu Jingchi. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror [C]//SPIE, 2006, 6150: 259-263.
- [8] Ma Jie, Zhu Zheng. Testing convex aspherical surfaces with optimized modified Hindle arrangement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 277-281. (in Chinese)
马杰, 朱政. 改进的Hindle方法检测凸非球面的研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 277-281.
- [9] Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong, et al. Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 764-767. (in Chinese).
付联效, 吴永刚, 李兴隆, 等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验 [J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 764-767.
- [10] Walker D D, Beaucamp A T H, Bingham R G. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [C]//SPIE, 2003, 4842: 73-84.
- [11] Marc T, Paul D, Greg F. Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology[C]//SPIE, 2005, 5638: 284-299.
- [12] Wang X K, Zheng L G, Zhang B Z, et al. Subaperture stitching interferometry for testing of a large hyperboloid[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 88-93. (in Chinese)
- [13] Wang X K, Wang L H. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 11(5): 645-647.