

doi:10.3788/gzxb20174603.0322002

离轴非球面在细磨与粗抛阶段的波面再现技术

武中华^{1,2,3}, 袁吕军^{1,2}, 朱永田^{1,2}, 何丽^{1,2}, 康燕^{1,2}, 苏志德^{1,2}, 孔维斌^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台 南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于付科法的离轴非球面波面再现检测技术, 通过对付科检测过程的数学分析, 建立了离轴非球面波面再现的数学模型, 提出了波面整合算法, 通过对两幅阴影图灰度值积分、去倾斜及波面整合等数据处理再现出被检离轴非球面的波面误差。在被检离轴非球面两个方向的弥散斑分别为 0.152 mm 和 0.284 mm 时, 干涉检测得到其面形误差峰谷值为 1.110 μm 、均方根值为 0.194 μm , 且两种检测方法的波面轮廓相一致。实验结果验证了基于付科法的离轴非球面再现技术的正确性, 可以应用于指导离轴非球面在细磨粗抛阶段的加工并且实现与精抛光阶段干涉检测的有效衔接。

关键词: 测量; 离轴非球面; 付科法; 光学检测; 波面再现

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0322002-7

Technology of Wavefront Retrieval for Off-axis Aspheric Surface in the Stage of Fine-grinding and Rough-polishing

WU Zhong-hua^{1,2,3}, YUAN Lv-jun^{1,2}, ZHU Yong-tian^{1,2}, HE Li^{1,2},
KANG Yan^{1,2}, SU Zhi-de^{1,2}, KONG Wei-bin^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,
Chinese Academy of Science, Nanjing 210042, China)

(2 Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the disadvantages of traditional Foucault test, the wavefront retrieval technology of off-axis aspheric surfaces is proposed. According to the mathematical analysis of Foucault test, a mathematical model is established and the wavefront integrating algorithm is proposed to reconstruct wavefront of the off-axis aspherical surface through integrating gray values of two Foucault pattern, removing tilt of wavefront map, and wavefront integration etc. When the circles of confusion in two directions reach to 0.152 mm and 0.284 mm, the surface error tested by interferometer is that PV value is 1.110 μm and RMS value is 0.194 μm , and the wavefront patterns are consistent. Experiment proves that the technology of wavefront retrieval is correct and can be used to guide the manufacture of off-axis aspherical surface until to be coherent with interferometer test of the fine grinding stage.

Key words: Testing; Off-axis aspheric surface; Foucault test; Optical testing; Wavefront retrieval

OCIS Codes: 220.4840; 220.1250; 200.4560

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11203049)资助

第一作者: 武中华(1985—), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为非球面加工与检测等. Email: zhwu@niaot.ac.cn

通讯作者: 朱永田(1964—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为天文光谱和高分辨成像技术、太阳系外行星探测技术. Email: ytzhu@niaot.ac.cn

导 师: 袁吕军(1961—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为天文光学系统的装调和天文大镜面的光学工艺与检测. Email: ljyuan@niaot.ac.cn

收稿日期: 2016-09-26; 录用日期: 2016-12-30

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

高次离轴非球面可以增加光学设计中像差校正的自由度、降低系统复杂性,具有无中心遮拦、增大视场范围等优点.现代光学系统尤其在空间光学、天文光学领域,离轴非球面已经成为核心部件^[1-4].

根据检测方法的不同,可以将离轴非球面的加工过程分为三个阶段:铣磨成型阶段、细磨粗抛阶段及精抛光阶段.离轴非球面铣磨成型后面形误差较大,达到微米的量级.精抛光阶段的材料去除量很小,为使面形误差均方根值(Root Mean Square, RMS)达到 $\lambda/30 \sim \lambda/80$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)的高准确度最终面形,必须经过非球面面形快速修正的细磨与粗抛光过程,而该阶段的面形检测技术是影响面形误差收敛速度的关键所在.通常离轴非球面收敛速度慢、收敛过程中反复多,而造成其研制效率低下的主要原因是在离轴非球面磨制过程中细磨粗抛阶段缺少能够准确判断的定量检测方法^[5].

目前离轴非球面在细磨与粗抛光阶段的主要检测方法有三坐标测量机、激光跟踪仪、红外干涉仪及付科法等.亚利桑那大学光学中心利用激光跟踪仪测量了巨型麦哲伦望远镜离轴非球面主镜在细磨阶段的面形误差,并作为辅助测量手段与红外干涉仪和五棱镜扫描法检测结果作对比^[6].成都光电所李杰等对激光跟踪仪检测离轴非球面的面形误差等进行了研究^[7].付科法检测装置结构简单,检测准确度较高且易于准确判断局部误差,可以应用于大口径离轴非球面的检测,相较于其他检测方法仍然有较大优势.但是传统付科法也有其局限性:1)只能定性,不能定量,不满足现代数控加工技术的要求.2)需要相当丰富的经验来判读刀口检验的局部误差和整体误差的准确分布,这也是国内很多单位不使用或不会用付科法检测的重要原因.

袁吕军较早地开展了刀口定量检测技术的研究,实现了对球面镜的定量检验^[8].张钧、王小鹏等均通过对一系列阴影图的处理实现了对同轴反射镜的定量检验,但是多幅阴影图的采集与数据处理过程复杂不适用于加工现场的检验,且均没有应用到离轴非球面的检验^[9-11].针对传统付科法应用上的缺陷,本文开展了基于付科法的离轴非球面在细磨及粗抛阶段的波面再现技术研究.该技术通过对相互垂直方向上采集的两幅阴影图积分、求取亮暗边界、去倾斜处理及波面整合等数据处理,再现出离轴非球面的波面形状并根据弥散斑大小初步评判其面形误差的量值大小,为细磨粗抛阶段离轴非球面的高效研制提供技术指导,并与精抛光阶段的干涉仪检测得到有效衔接.

1 数学模型

如图1所示,刀口在被加工镜面的焦面上切割弥散斑.当刀口切过波面的斜率极值对应的弥散斑处时,阴影图就开始以虚线为中心向内向外变暗,亮暗环带开始出现.刀口继续向上切割弥散斑,当达到焦点处,环形阴影图开始达到最大,此时反映的波面信息最为丰富.

假设在加工过程中,镜面的波面函数曲线总是光滑的,即波面函数 W 的一阶导数连续.如图1所示, $DBOB'D'$ 为实际波面函数, W' 为理想波面函数.现在重点分析实际波面函数的中间低带 BAO

段.在 BAO 段,波面函数的法线斜率在 A 点取得极大值.刀口自下而上切割时,最先从 A 点开始切割,阴影图从 A 点对应的虚线处向内向外开始变黑,此处对应为灰度极小值.如果此时被测镜面为圆光瞳的轴对称镜面,则其波面函数对称,所以其法线斜率关于 X 轴对称, A' 点的法线最后被切割,在 A' 点灰度取极大值.同理可分析波面函数其余环带对应阴影图上的灰度值变化.

假设在实际波面上 DC 、 CB 等每一段波面函数对应的灰度值线性变化,如图2所示.由此,从刀口切割弥散斑得到的阴影图中抽象出了灰度变化分段函数的理想数学模型.图2中, $g(x) = g_0$,即 X 轴为阴影图的亮暗边界,边界值以上的为亮带,边界值以下的为暗带,且灰度值关于原点 g_0 中心对称.

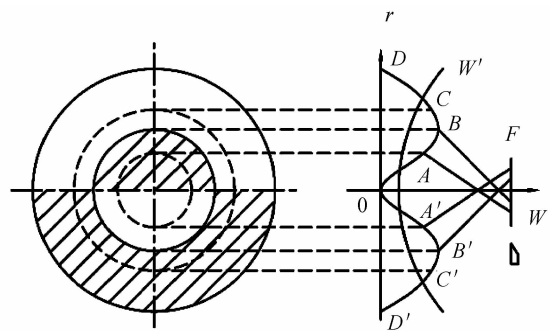


图1 付科检验分析

Fig. 1 Analysis of Foucault test

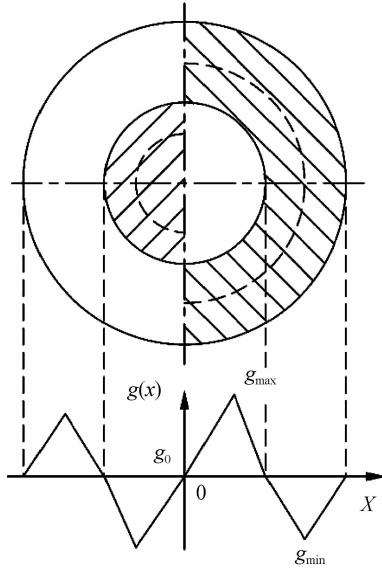


图2 灰度变化模型

Fig. 2 Model of gray-level value variation

2.2 对灰度变化函数积分

以被加工镜面的焦面为检测平面,使用 CCD 在此平面上拍摄的阴影图记录实际波面相对于理想波面不同区域的光线偏差.光线偏差被刀口切割后以亮暗环带的阴影图形式表现出来.对阴影图的灰度值进行积分求出各取样点处的波面偏差,从而可以再现被加工镜面的波前.

$$W_i(x) = \int_0^x g_i(x) dx \quad (3)$$

式中, W_i 为被测离轴非球面在刀口切割弥散斑方向上阴影图第 i 行代表的波面误差, $g_i(x)$ 为相应行的灰度变化函数.

对于表征灰度变化函数的离散数据,设 δx 为步长相等的离散点,采用组合梯形法积分,如果波面误差以波长表达,积分表达式(3)可以表示为

$$W_i = \frac{A}{\lambda} \left(\frac{1}{2} g_1 + \sum_{i=2}^N g_i + \frac{1}{2} g_N \right) \quad (4)$$

若 CCD 采集到的阴影图灰度数据为 $M \times N$ 的矩阵,在刀口切割弥散斑的方向上逐行进行数据处理得到整个被测离轴非球面的面形误差信息,即

$$W_0 = \begin{bmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_i \\ \dots \\ W_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 波面倾斜的处理

在 CCD 实际采集得到的灰度数据中,阴影图的亮暗边界 g_0 并不会理想地如式(1)所示,总会存在一定的误差 Δg_0 ,使得积分得到的面形误差呈线性变化,即波面存在倾斜项.需要对式(5)得到的面形误差数据逐行运用最小二乘法进行去倾斜处理.

波面函数中,亮暗边界误差引起的倾斜项表示为

$$W(x) = ax + b \quad (6)$$

该倾斜项 $\Delta W(x, y)$ 可以通过最小二乘法求出,如式(7)~式(12)所示.

$$x_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (7)$$

对理想数学模型中的灰度函数运用梯形法则积分可以得到被测离轴非球面的波面函数 W .

2 数据处理

根据数学模型,通过求边界值、对灰度变化函数积分、整合水平与竖直两个方向切割弥散斑得到的波面误差等一系列数据处理再现被测离轴非球面的波面误差分布.

2.1 求取阴影图的亮暗边界

根据建立的灰度变化数学模型,对于付科检测得到的阴影图,首先确定亮暗边界,然后从总的灰度变化中去得到灰度变化函数.设亮暗边界灰度值为

$$g_0 = \frac{g_{\text{max}} + g_{\text{min}}}{2} \quad (1)$$

则灰度变化函数为

$$g(x) = G(x) - g_0 \quad (2)$$

$$\omega_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_1^N W_k \quad (8)$$

$$S_{x^2} = \frac{1}{N} \sum_1^N (x_k - x_{\text{mean}})^2 \quad (9)$$

$$S_{xw} = \frac{1}{N} \sum_1^N (x_k - x_{\text{mean}}) (W_k - \omega_{\text{mean}}) \quad (10)$$

$$b = S_{xw} / S_{x^2} \quad (11)$$

$$a = \omega_{\text{mean}} - b \cdot x_{\text{mean}} \quad (12)$$

$$W(x) = W_0(x) - W(x) \quad (13)$$

最后将倾斜项通过式(13)去除,得到真实的刀口切割弥散斑方向上被测离轴非球面反射镜的面形误差信息.

2.4 波面整合算法

在使用一维刀口自右向左切割过程中,检测到的是镜面左右方向的波面误差,在与刀口切割方向垂直的上下方向上灵敏度为零;在刀口自下向上切割过程则反之.因此在付科法检测离轴非球面过程中必须采用相互垂直的刀口上下切与左右切相结合的方式来判断整个镜面的面形误差分布.设定刀口切割弥散斑的左右和上下两个方向分别为 x 和 y 两个方向,通过处理 x 和 y 两个方向切割弥散斑采集的阴影图通过 z 得到两个波面误差,需要将两个波面误差信息数据通过一算法整合为一个代表被检离轴非球面面形误差的波面误差定的分布数据.

任意曲面均可以由一组完备的正交基函数拟合得到.设波面误差函数为 $W(x, y)$,其可以通过一组定义在单位圆内的 Zernike 多项式拟合表示为

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^n a_i Z_i(x, y) \quad (14)$$

波面法线与焦面的交点如图 3 所示.对波面误差函数 $W(x, y)$ 分别在 x 和 y 方向求导得到

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x} \quad (15)$$

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f} = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \quad (16)$$

通过对 x 和 y 方向的两幅阴影图进行处理得到两个波面误差数据,并运用 Zernike 多项式拟合后得到波面函数 $W'(x, y)$ 和 $W''(x, y)$,对其在 x 和 y 方向求导,得到

$$\frac{\partial W'(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f} = b'(x, y) \quad (17)$$

$$\frac{\partial W''(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f} = b''(x, y) \quad (18)$$

分别将式(17)、式(18)带入式(15)、式(16)得到

$$b'(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x} \quad (19)$$

$$b''(x, y) = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} \quad (20)$$

令 $\frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial x} = c'(x, y)$, $\frac{\partial Z_i(x, y)}{\partial y} = c''(x, y)$,式(19)与式(20)组成超静定方程,矩阵形式表述为

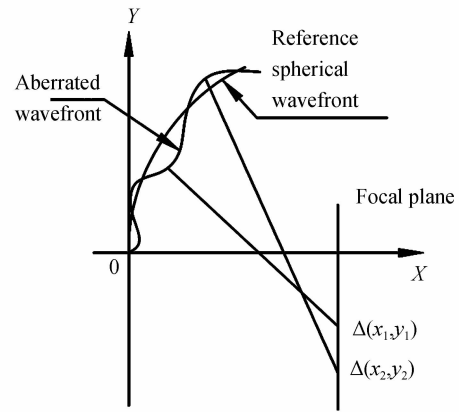


图 3 波面法线与焦面的交点

Fig. 3 Intersection of normal of Wave front and focal plane

$$\begin{bmatrix} b'(x_1, y_1) \\ \dots \\ b'(x_n, y_n) \\ b''(x_1, y_1) \\ \dots \\ b''(x_n, y_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c'_1(x_1, y_1) & c'_2(x_1, y_1) & \dots & c'_i(x_1, y_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c'_1(x_m, y_m) & c'_2(x_m, y_m) & \dots & c'_i(x_m, y_m) \\ c''_1(x_1, y_1) & c''_2(x_1, y_1) & \dots & c''_i(x_1, y_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c''_1(x_m, y_m) & c''_2(x_m, y_m) & \dots & c''_i(x_m, y_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\text{令} \begin{bmatrix} b'(x_1, y_1) \\ \dots \\ b'(x_n, y_n) \\ b''(x_1, y_1) \\ \dots \\ b''(x_n, y_n) \end{bmatrix} = B, \begin{bmatrix} c'_1(x_1, y_1) & c'_2(x_1, y_1) & \dots & c'_i(x_1, y_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c'_1(x_m, y_m) & c'_2(x_m, y_m) & \dots & c'_i(x_m, y_m) \\ c''_1(x_1, y_1) & c''_2(x_1, y_1) & \dots & c''_i(x_1, y_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c''_1(x_m, y_m) & c''_2(x_m, y_m) & c''_2(x_m, y_m) & c''_i(x_m, y_m) \end{bmatrix} = \varphi, \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_i \end{bmatrix} = A, \text{则有}$$

$$\begin{cases} B = \varphi A \\ A = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T B \end{cases} \quad (22)$$

式中, φ^T 为 φ 的转置, $(\varphi^T \varphi)^{-1}$ 为 $(\varphi^T \varphi)$ 的逆. A 即为通过波面整合算法得到的多项式系数矩阵, 从而得到整合后被检离轴非球面的波面误差.

3 实验验证

实验装置包含离轴非球面反射镜、离轴非球面的镜面顶点指示装置、补偿镜、激光器、计算机、刀口仪、CCD 摄像机、电动位移台、控制器、激光器等, 如图 4 所示. 在实验装置中, 刀口仪采用 L 形刀口在水平和竖直两个方向切割弥散斑, 且由于起初面形误差较大, 根据被检镜面的焦比及能采集到的亮度采用了 0.2 mm 直径的小孔光源, 既可以保证一定的采集准确度和检测灵敏度, 又具有较大的检测动态范围; 采用德国 AVT 公司高分辨率 CCD 摄像机, 分辨率 1024×1024 , 像元尺寸 $5.5 \mu\text{m}$; 电动位移台采用步进电机进行控制, 分辨率 0.001 mm.

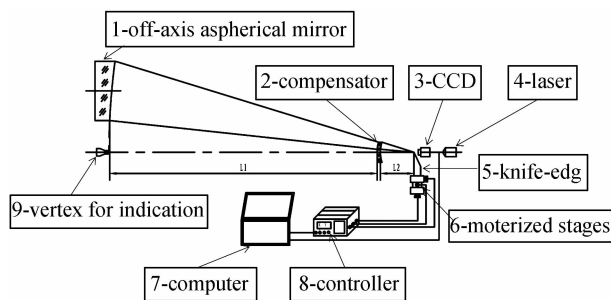


图 4 波面再现技术检测实验装置示意图
Fig. 4 Experimental equipment for test of wavefront retrieval technology

首先, 调整离轴非球面检验光路. 调整 9 顶点指示标志, 使其处于离轴非球面母镜的顶点; 利用点光源找到被检离轴非球面 0.7 带的球心并重合, 在点光源处放置小孔备用, 母镜的顶点与 0.7 带球心连线即是被检离轴非球面反射镜的光轴; 利用激光发出的指示光线, 使指示光线通过备用的小孔和指示圆心; 在激光器和备用小孔之间的准确放置非球面补偿器, 并使补偿器的光轴和激光指示光线重合, 以确保被检离轴非球面的离轴量; 利用专用高准确度石英玻璃测杆控制补偿器前后距离 L_1 和 L_2 , 保证被检验离轴非球面的顶点曲率半径和二非球面系数与设计吻合.

其次, 调整刀口与阴影图采集系统. 将刀口和电动位移台固定在一起, 并安装在稳固的三角架上; 调整刀口位置, 使刀口切于被检球面镜的焦面上; 安装调试 CCD 摄像机, 使 CCD 摄像头处于刀口后合适的位置; 调整 CCD 的曝光时间等参量, 使其处于非饱和状态并且拍摄的阴影图亮度适中.

被测镜面为圆角矩形高次离轴扁椭球面镜, 口径 490×187 , 离轴量 183. 反射面为四次非球面, 顶点曲率半径 $R = -2049.3$, $K = 0.2791$, $A = 3.1 \times 10^{-12}$, 非球面方程为 $x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + Ay^4$. 检验时使用补偿器将非球面波前补偿为球面波前, 将刀口放置于焦点处切割弥散斑, 如图 4 所示.

根据经验, 一般采用 0.2 mm 小孔光源的刀口检验离轴非球面时, 当弥散斑直径在 0.2~0.3 mm 左右即可以用干涉仪进行检验, 离轴非球面的加工可以转入精抛光阶段. 实验过程中, 利用刀口在 x (水平) 和 y

(竖直)两个方向切割弥散斑,电动位移台测得弥散斑大小分别为 0.152 mm 和 0.284 mm,得到的阴影图如图 5 所示.

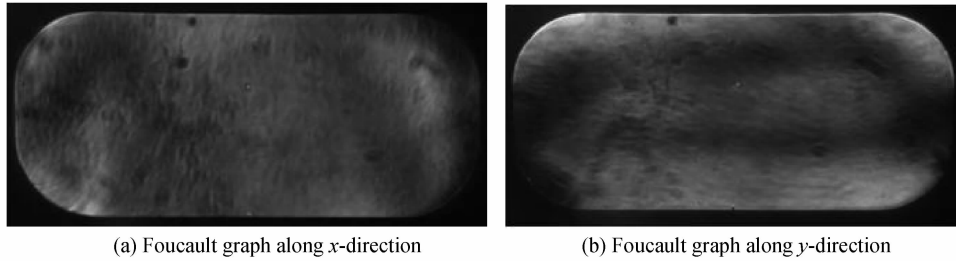


图 5 被测离轴非球面的阴影图
Fig. 5 Foucault graphs of the off-axis aspheric mirror being tested

读取图 5(a)所示阴影图得到其灰度值矩阵,利用式(4)对灰度值矩阵在刀口切割弥散斑方向逐行进行积分,并利用式(7)~(12)去倾斜处理后得到代表离轴非球面在刀口切割弥散斑方向的波面误差,如图 6(a)所示.同理对阴影图 5(b)进行数据处理后得到代表离轴非球面在刀口切割弥散斑方向的波面误差,如图 6(b)所示.

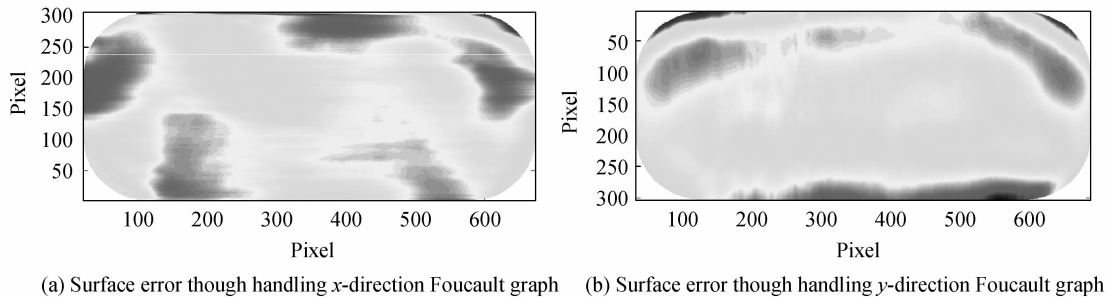


图 6 处理两个方向的阴影图得到的面形轮廓

Fig. 6 Surface error through handling Foucault graphs of 2 directions

通过波面整合算法整合左右与上下切割弥散斑得到的面形轮廓数据得到被检验高次离轴非球面的面形误差,面形轮廓如图 7 所示.

为验证基于付科检验的离轴非球面波面再现技术的正确性,在镜面误差值的弥散斑小到干涉仪能检测其面形时,通过 4D 干涉仪检测得到的面形误差轮廓图如图 8 所示.干涉检测得到的面形误差峰谷值(Peak to Valley, PV)值为 $1.110 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.194 \mu\text{m}$.

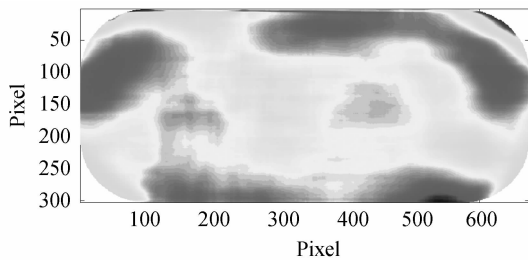


图 7 粗抛光结束时离轴椭球面的面形误差
Fig. 7 Surface error of the off-axis after rough-polished

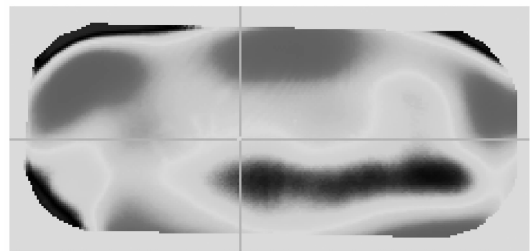


图 8 粗抛光结束时离轴椭球面的干涉检测结果
Fig. 8 Result by the 4D interferometer after rough-polished

该技术的重点在于及时检测出被检面形误差的准确分布,有效准确地提高误差的收敛速度,使面形误差的弥散斑迅速的减小.分析基于付科法的离轴非球面波面再现技术与干涉仪面形轮廓,两种检测方法的误差分布趋于一致,可以实现离轴非球面加工过程中两个阶段检测方法的有效衔接.

该技术主要应用于离轴非球面在细磨与粗抛光阶段的检验,被检离轴非球面的面形误差较大且表面粗糙度较差均导致弥散斑亮度不佳的情况.因此在检验过程中,刀口仪必须配备较大尺寸的光源.实验中光源尺寸为 $\phi 0.2 \text{ mm}$,是影响检测准确度的主要因素.并且出于焦距测量的方便性,检验过程中没有采用刀口仪光源与刀口共光轴检测的方法,一定程度上也影响了检测准确度.

4 结论

基于付科法的波面再现技术在离轴非球面粗抛光阶段的检测实验,获得了离轴非球面的面形检测结果,和4D干涉仪的检测结果相对比,两者的面形误差分布结果趋于一致,验证了基于付科法的波面再现技术检测细磨和粗抛阶段离轴非球面的准确性和可行性,可以应用于指导离轴非球面在此阶段的加工,并实现与精抛光阶段更准确、操作更方便的干涉仪检验的有效衔接,有助于提高离轴非球面的加工效率与面形平滑程度。

参考文献

- [1] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 科学出版社, 1994. 145-152.
- [2] ZHENG Li-gong, WANG Xiao-kun, XUE Dong-lin, *et al.* Fabricating and testing of the large off-axis convex aspheric surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(7): 0722001.
郑立功, 王孝坤, 薛栋林, 等. 大口径离轴凸非球面的加工和检测[J]. 光子学报, 2016, **45**(7): 0722001.
- [3] LI Jie, WU Fan, WU Shi-bin, *et al.* Using a laser tracker to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112002.
李杰, 伍凡, 吴时斌, 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112002.
- [4] YIN Long-hai, WANG Xiao-kun, LI Long-xiang, *et al.* Fast grinding of large off-axis aspheric surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(9): 2497-2505.
殷龙海, 王孝坤, 李龙响, 等. 大口径SiC离轴非球面的高效磨削加工[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(9): 2497-2505.
- [5] LIN Chang-qing, JING Hong-wei, KUANG Long, *et al.* Measuring technique for off-axis aspherical mirror in fine grinding process[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(11): 2665-2668.
林长青, 景洪伟, 匡龙, 等. 离轴非球面镜精磨阶段的三坐标检测技术[J]. 强激光与离子束, 2012, **24**(11): 2665-2668.
- [6] BURGE J H, KOT L B, MARTIN H M, *et al.* Alternate surface measurements for GMT primary mirror segments [C]. SPIE, 2006, **6273**: 6273.
- [7] LI Jie, WU Fan, WU Shi-bin, *et al.* Using a laser tracter to measure the surface of off-axis aspheric mirror during grinding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0112002.
李杰, 伍凡, 吴时彬, 等. 使用激光跟踪仪测量研磨阶段离轴非球面面形[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0112002.
- [8] YUAN Lv-jun. Study of technology for knife-edge quantitative test[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 845-851.
袁吕军. 刀口定量检验技术的研究[J]. 光学学报, 1999, **19**(6): 845-851.
- [9] ZHANG Jun. Digital knife-edge testing technology on spherical mirror of large aperture [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005:5-22.
张钧. 大口径球面数字刀口检测技术的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005: 5-22.
- [10] WANG Xiao-peng, ZHU Ri-hong, WANG Lei, *et al.* Digitized foucault tester for quantitative evaluation the surface of aspheric optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **38**(1): 0112008.
王小鹏, 朱日宏, 王雷, 等. 数字刀口仪定量检验非球面光学元件面形[J]. 光学学报, 2011, **38**(1): 0112008.
- [11] TANG Wa, DENG Wei-jie, LI Rui-gang, *et al.* Correction of removal function of ion beam figuring highly steep off-axis asphere[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(6): 1572-1579.
唐瓦, 邓伟杰, 李锐钢, 等. 离子束抛光高陡度离轴非球面的去除函数修正[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(6): 1572-1579.