



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102620683 A

(43) 申请公布日 2012. 08. 01

(21) 申请号 201210101164. 4

(22) 申请日 2012. 03. 31

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路  
3888 号

(72) 发明人 王孝坤

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 张伟

(51) Int. Cl.

G01B 11/24 (2006. 01)

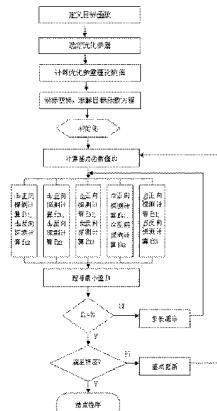
权利要求书 1 页 说明书 4 页 附图 2 页

(54) 发明名称

子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法

(57) 摘要

子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法涉及光学检测领域，该方法包括如下步骤：设定干涉仪，使其参考球波前的曲率半径与待测非球面中心区域的最接近球面半径吻合；调整干涉仪与待测非球面的相对位置关系，使干涉仪标准球面波前对准非球面待测区域；通过模式搜索误差补偿方法，消除标准球面检测偏离量较大的待测非球面时产生的调整误差；通过子孔径拼接检测技术，实现全口径拼接检测，得到精确的面型结果。本发明利用模式搜索误差补偿方法可以很好的将由于拼接测量位置没有对准带来的调整误差从测量的子孔径相位数据中消除，从而很好地实现多个子孔径的拼接，精确的完成非球面全口径面形拼接检测。



1. 子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

步骤一:设定干涉仪,使其参考球波前的曲率半径与待测非球面中心区域的最接近球面半径吻合;

步骤二:调整干涉仪与待测非球面的相对位置关系,使干涉仪标准球面波前对准非球面待测区域;

步骤三:通过模式搜索误差补偿方法,消除标准球面检测偏离量较大的待测非球面时产生的调整误差;

步骤四:通过子孔径拼接检测技术,实现全口径拼接检测,得到精确的面型结果。

## 子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光学检测领域,具体涉及一种子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法。

### 背景技术

[0002] 在光学系统和光学仪器中利用非球面元件能矫正像差,改善像质,而且可以减小光学系统的尺寸和重量,因此非球面元件正越来越多地被用于天文、空间光学、军事国防、高科技民用等领域,而非球面元件的检测也逐渐受到了关注。

[0003] 子孔径拼接是利用干涉仪小口径的标准球面参考波前对大口径非球面上各区域的相位进行逐次测量,通过子孔径拼接算法可以获得非球面全口径的面形信息。子孔径拼接技术拓宽了干涉仪测量非球面的横向和纵向动态范围,使干涉仪测量非球面的口径和相对孔径都有了很大的增加。此外,由于对小块子孔径区域测量所利用的干涉仪 CCD 象元面积与全口径干涉测量所利用的干涉仪 CCD 象元面积是相同的,所以子孔径测量能够获得非球面面形的中高频段的信息。

[0004] 由于子孔径拼接法是利用标准球面波去检测非球面,对于单个子孔径相位数据的测量,需要干涉仪出射波前的曲率半径与待测子孔径区域的最接近球面半径吻合,因此对拼接调整机构的定位精度和重复精度有很高的要求。但是在拼接测量过程中,干涉仪与待测非球面实际的相对位置关系与理论的相对位置关系肯定会存在偏差。

### 发明内容

[0005] 为了解决现有技术中存在的问题,本发明提供了一种子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法,该方法能很好的消除和补偿子孔径拼接测量过程中由于调整机构没有对准所带来的误差,从而很好地完成对非球面的子孔径拼接检测。

[0006] 本发明解决技术问题所采用的技术方案如下:

[0007] 子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法,该方法包括如下步骤:

[0008] 步骤一:设定干涉仪,使其参考球波前的曲率半径与待测非球面中心区域的最接近球面半径吻合;

[0009] 步骤二:调整干涉仪与待测非球面的相对位置关系,使干涉仪标准球面波前对准非球面待测区域;

[0010] 步骤三:通过模式搜索误差补偿方法,消除标准球面检测偏离量较大的待测非球面时产生的调整误差;

[0011] 步骤四:通过子孔径拼接检测技术,实现全口径拼接检测,得到精确的面型结果。

[0012] 本发明的有益效果是:本发明利用模式搜索误差补偿方法可以很好的将由于拼接测量位置没有对准带来的调整误差从测量的子孔径相位数据中消除,从而很好地实现多个子孔径的拼接,精确的完成非球面全口径面形拼接检测。

## 附图说明

- [0013] 图 1 本发明子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法子孔径划分图。
- [0014] 图 2 本发明子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法的流程图。
- [0015] 图 3 本发明子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法坐标系定义图。
- [0016] 图 4 本未对调整误差进行寻优补偿面形误差分布图。
- [0017] 图 5 本发明子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法拼接后的面形分布。

## 具体实施方式

- [0018] 下面结合附图和实施例对本发明做进一步详细说明。
- [0019] 子孔径拼接检测非球面调整误差补偿方法，该方法包括如下步骤：
  - [0020] 步骤一：设定干涉仪，使其参考球波前的曲率半径与待测非球面中心区域的最接近球面半径吻合，即测定中心基准子孔径的相位分布；
  - [0021] 步骤二：调整干涉仪与待测非球面的相对位置关系，使干涉仪标准球面波前对准非球面待测区域，即测定其他子孔径的相位分布；
  - [0022] 步骤三：通过模式搜索误差补偿方法，消除标准球面检测偏离量较大的待测非球面时产生的调整误差；
  - [0023] 步骤四：通过子孔径拼接检测技术，实现全口径拼接检测，得到精确的面型结果。
- [0024] 为了验证调整误差补偿方法数学模型的可行性，我们对一偏离量为  $64.1 \mu m$  的离轴非球面进行了拼接检测实验。该非球面的通光口径为  $230mm \times 141mm$ ，顶点曲率半径为  $-1358.8mm$ ，二次曲面系数为  $-1.59$ ，离轴量为  $-88.44mm$ 。
- [0025] 待测非球面安置在四维调整机构上，可以精确调整非球面在 X 轴、Z 轴方向上的平动以及沿 X 轴和 Y 轴方向的倾斜，干涉仪安装在精密升降机构上，可以调节其在 X 方向上的平动，所有测试装备都安放在气浮防震平台上，子孔径划分如图 1 所示。
- [0026] 首先，调节好干涉仪，使其参考球面波前的曲率半径与待测非球面中心区域（中心基准子孔径 0）的最接近球面半径吻合。
- [0027] 调整待测非球面与干涉仪之间的相对位置，使干涉仪出射波前分别对准待测非球面上区域（子孔径 1）和下区域（子孔径 2），并分别使子孔径 1 和子孔径 2 与基准子孔径 0 有一定重叠区域。
- [0028] 接下来进行调整误差补偿方法，如图 2 所示，算法中定义子孔径相位数据除去非共路误差后的相位的 RMS 值为目标函数 f。一般待测非球面都是回转对称的，无需绕 Z 轴的转动，因此对于单个子孔径的位置调整，仅需考虑 5 个方向的调整，分别是沿 X 轴、Y 轴和 Z 轴的平动以及绕 X 轴和 Y 轴的转动，调整误差补偿模型中共有 5 个优化参数，分别  $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ： $d_x$  表示沿 X 轴方向的平移； $d_y$  表示沿 Y 轴方向的平移； $d_z$  表示沿 Z 轴方向的平移； $\alpha$  表示绕 X 轴的转动； $\beta$  表示绕 Y 轴的转动。根据子孔径测量规划，求解测量某一子孔径时，待测非球面与干涉仪之间的相对位置理论调整量  $d_{x0}$ 、 $d_{y0}$ 、 $d_{z0}$ 、 $\alpha_0$  和  $\beta_0$ 。
- [0029] 建立待测非球面的母镜坐标系  $(x, y, z)$  以及以某个子孔径几何中心为坐标原点的直角坐标系  $(x', y', z')$ ，如图 3 所示，Z 为光轴方向，o 为待测非球面的母镜坐标系原点， $o'$  为某个测量子孔径的几何中心。坐标系  $(x', y', z')$  相对坐标系  $(x, y, z)$  的平移和旋转分别为  $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ 。

[0030] 设镜面上任意点 A 在坐标系  $(x, y, z)$  下的坐标为  $A(x, y, z)$ , A 的矢量为  $\vec{A} = (x \ y \ z \ 1)^T$ , 调整后 A 在坐标  $(x', y', z')$  下的坐标为  $A'(x', y', z')$ , A' 的矢量为  $\vec{A}' = (x' \ y' \ z' \ 1)^T$ 。由刚体运动定理可得两个矢量之间的坐标变换矩阵为 :

$$[0031] T = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta & -\sin \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix}$$

[0032] 二次非球面的母镜在坐标系  $(x, y, z)$  下, 表示为 :

$$[0033] x^2 + y^2 = 2R_0 z - (1+k)z^2$$

[0034] 利用空间坐标变换矩阵求解在以子孔径区域中心为坐标原点的新坐标系下非球面方程表达式为 :

$$[0035] Az'^2 + Bz' + C = 0$$

[0036] 其中 :

$$[0037] A = \sin^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta + (1+k) \cos^2 \alpha \cos^2 \beta$$

$$[0038] B = -kx' \sin(2\beta) \cos^2 \alpha + 2d_x \sin \beta - 2d_y \sin \alpha \cos \beta + ky' \sin(2\alpha) \cos \beta + 2(d_z + kd_z - R_0) \cos \alpha \cos \beta$$

$$[0039] C = x'^2 \cos^2 \beta + d_x^2 + 2x' d_x \cos \beta + x'^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta + y'^2 \cos^2 \alpha + d_y^2 + x' y' \sin(2\alpha) \sin \beta + 2x' \sin \alpha \sin \beta d_y + 2y' d_y \cos \alpha + (1+k) [x'^2 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha + y'^2 \sin^2 \alpha + d_z^2]$$

$$[0040] -x' y' \sin \beta \sin(2\alpha) - 2x' d_z \sin \beta \cos \alpha + 2y' d_z \sin \alpha] - 2R_0 (-x' \sin \beta \cos \alpha + y \sin \alpha + d_z)$$

$$[0041] \text{已知: } d_z = \frac{d_x^2 + d_y^2}{R_0 + \sqrt{R_0^2 - (k+1)(d_x^2 + d_y^2)}}$$

$$[0042] \text{则子孔径的矢高方程为: } F = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$[0043] \text{参考球面波前的矢高方程为式: } S = r_0 - \sqrt{r_0^2 - x^2 - y^2} \quad (1)$$

[0044] 子孔径的矢高 F 与参考球面波前的矢高 S 的差值为 P :

$$[0045] P = F(x', y') - S(x', y') \quad (2)$$

[0046] 由于各子孔径的相位数据值可以通过干涉仪测量直接获得, 设定某个子孔径测量所得的相位分布为 W, 定义相位数据中消去非共路误差后的相位分布为 U, 则 :

$$[0047] U = W - P$$

$$[0048] \text{目标函数 f 为式: } f = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U - \bar{U})^2 \right]^{1/2} \text{ 其中 N 为子孔径数据中采样点的个数。}$$

[0049] 初始化程序, 将理论位置调整初值代入目标函数  $f(d_{x0}, d_{y0}, d_{z0}, \alpha_0, \beta_0)$ 。给  $d_{x0}$ ,  $d_{y0}$ ,  $d_{z0}$ ,  $\alpha_0$  和  $\beta_0$  五个未知量约束按照一定的取值范围并分别设定各自的步长, 正反方向同时搜索, 以使优化结果符合实际要求;

[0050] 模式搜索算法的基本思想是在某点附近按一定的步长搜索函数值更小的点, 且步

长随搜索过程的进行而减小,通过该算法可以搜索出最大最小正基模式。它可以处理边界约束、线性代数、线性不等式、并且不需要函数连续或可微,而大多数传统优化方法通过使用梯度或者高阶导数的方法来搜寻优化点,它一般要求函数连续可微。

[0051] 当搜寻计算值大于基点函数值,即为这一轮的搜索失败时,则步长减半重新进行搜索迭代。

[0052] 在设定的阈值范围内,当相邻两次搜寻计算目标函数值的偏差小于  $10^{-5}\text{nm}$ ,则停止搜寻,程序结束。

[0053] 此时的搜寻结果值为可以认定为实际位置的调整量,新基点,将最终的搜寻结果带入方程(1)和(2),即可很好的补偿调整误差,精确的将非共路误差从子孔径数据中分离,从而很好地实现全口径拼接检测。

[0054] 利用理论位置调整参数值消除非共路误差后进行全口径拼接后的面形误差分布如图4所示,其PV值和RMS值分别为 $4.763\lambda$ 和 $0.682\lambda$ ( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ),可以看出,由于未对调整误差进行寻优补偿,此时面形分布有很大的“拼痕”。利用模式搜索算法求解各子孔径的最优位置参数如表1所示。

[0055]

	$d_x/\text{mm}$		$d_y/\text{mm}$		$d_z/\text{mm}$	
	理论位置	最佳位置	理论位置	最佳位置	理论位置	最佳位置
子孔径 0	88.44	88.61460	0	0.00001	2.87632	2.87341
子孔径 1	88.44	88.74017	53.5	53.55469	4.15526	4.15658
子孔径 2	88.44	88.60467	-53.5	-53.45312	4.15526	4.05313
	$\alpha /^\circ$		$\beta /^\circ$			
	理论位置	最佳位置	理论位置	最佳位置		
子孔径 0	0	0	-3.71927	-3.71930		
子孔径 1	2.25087	2.24852	-3.71757	-3.71653		
子孔径 2	-2.25087	-2.24773	-3.71757	-3.71831		

[0056] 表1 理论位置参数和搜索最优化参数

[0057] 三个子孔径经过70次左右迭代就能够收敛到最优解。从各子孔径中消去最优位置的非共路误差,并利用Zygo干涉仪的Metropro软件中的Fiducial标定功能模块Fuducial标定投影畸变将各子孔径的CCD像素坐标统一到镜面坐标上,对重叠区域的数据进行分析和求解,求得各子孔径相对中心基准子孔径的调整误差,通过综合优化拼接算法求得拼接后的面形分布如图5所示,面形误差分布没有明显的“拼痕”,其PV值和RMS值分别为 $4.087\lambda$ 和 $0.525\lambda$ 。

[0058] 为了验证和对比子孔径拼接检验的准确性,我们设计了补偿透镜,利用零位补偿干涉法对该离轴非球面进行了全口径面形测量,其面形误差分布的PV值和RMS值分别为 $4.064\lambda$ 和 $0.511\lambda$ 。比较可得:两种测试方法所得的面形误差分布是一致的,其PV值和RMS值的偏差分别为 $0.023\lambda$ 和 $0.014\lambda$ ,PV值和RMS值的相对偏差分别仅为0.57%和2.74%。

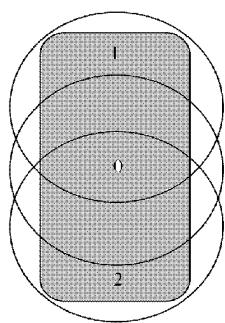


图 1

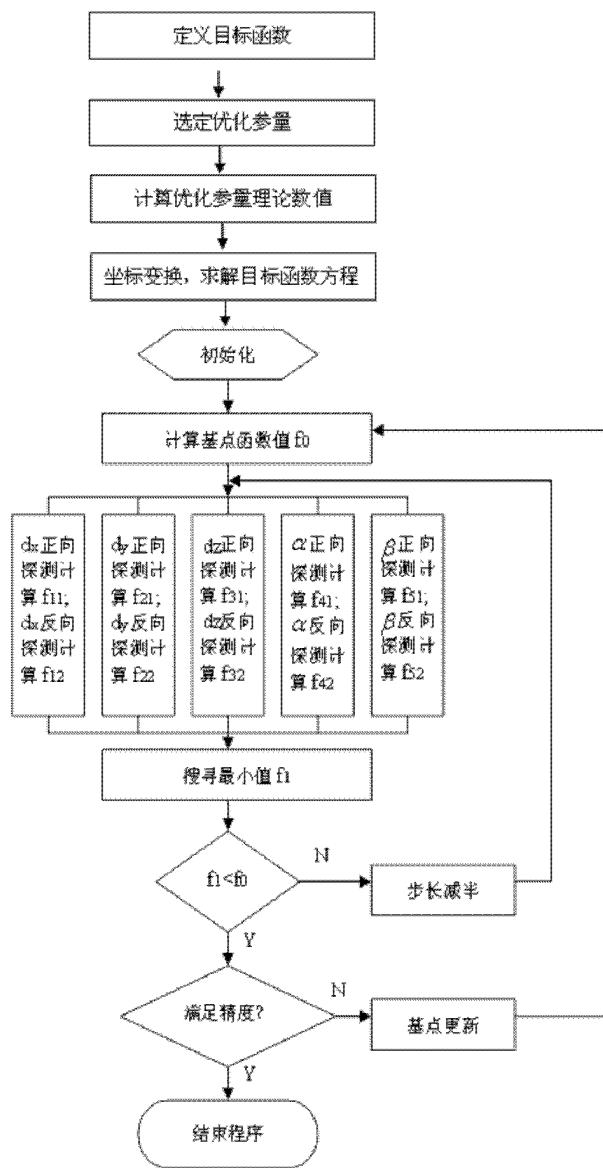


图 2

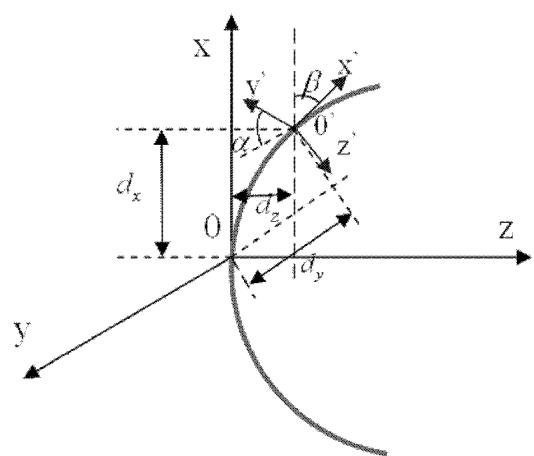


图 3

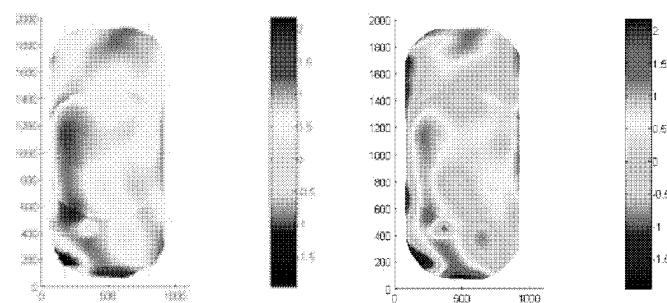


图 4

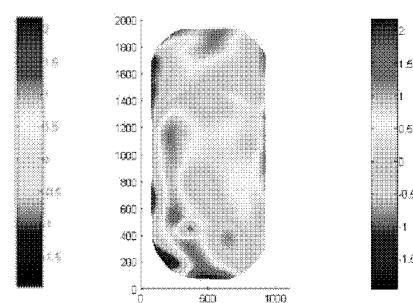


图 5