



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116625269 A

(43) 申请公布日 2023.08.22

(21) 申请号 202310433323.9

(22) 申请日 2023.04.21

(71) 申请人 成都太科光电技术有限责任公司
地址 610000 四川省成都市温江区金马镇
双堰路1919号联东U谷10号楼

(72) 发明人 赵智亮 赵子嘉 刘乾 张志华
黄丹 王雪竹

(74) 专利代理机构 成都天嘉专利事务所(普通
合伙) 51211
专利代理师 彭思雨

(51) Int. Cl.
G01B 11/24 (2006.01)
G01B 9/02001 (2022.01)

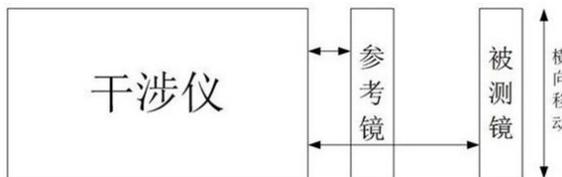
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法

(57) 摘要

本申请涉及光学元件平面面形检测技术领域,公开了一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法,本申请的检测方法只需两块平晶,互检四次以后,经过数据处理就可以计算得到被测镜的面形分布,整个检测过程不需要旋转平晶,测量方法简单易于操作,是一种有效的平面绝对检测方法,并且同时还能够将光学元件的中频面形信息单独提取出来,从而指导标准镜的超光滑表面加工。



1. 一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法,其特征在于,所述方法采用两个平面镜互检的方式,实现被测镜的面形检测,包括以下步骤:

步骤S1.沿相移干涉仪输出光束方向依次设置参考镜和被测镜,定义光轴方向为z轴,垂直于光轴的平面为xy平面,分别记录此时参考镜和被测镜在x轴和y轴方向上的位置信息,此时被测镜所处的位置为其初始位置;

步骤S2.在初始位置处,相移干涉仪发出的光束依次照射到参考镜和被测镜上,被测镜的第二平面反射的光和参考镜的第一平面反射的光沿原路返回进入相移干涉仪,并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像,计算机对上述干涉测试条纹图像进行数据处理,得到初始位置时第一平面和第二平面的相对测量结果 h^0 ;

$$h^0(x,y) = h_{\text{test}}(x,y) - h_{\text{ref}}(x,y) \quad \text{式(1)};$$

其中,(x,y)表示像素坐标; $h_{\text{test}}(x,y)$ 表示被测镜在初始位置的形貌; $h_{\text{ref}}(x,y)$ 表示参考镜在初始位置的形貌;

步骤S3.将被测镜从步骤S1的初始位置沿x轴方向平移,相移干涉仪发出的光束依次照射到参考镜和被测镜上,被测镜的第二平面反射的光和参考镜的第一平面反射的光沿原路返回进入相移干涉仪,并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像,计算机对上述干涉测试条纹图像进行数据处理,得到沿x轴方向平移后,第一平面和第二平面的相对测量结果 $h^{\Delta x}$;

$$h^{\Delta x}(x,y) = h_{\text{test}}(x+\Delta x,y) - h_{\text{ref}}(x,y) \quad \text{式(2)};$$

其中, Δx 为被测镜在x轴方向的平移量; $h_{\text{test}}(x+\Delta x,y)$ 为被测镜沿x轴方向平移后的形貌;

步骤S4.将被测镜从步骤S1的初始位置沿y轴方向平移,相移干涉仪发出的光束依次照射到参考镜和被测镜上,被测镜的第二平面反射的光和参考镜的第一平面反射的光沿原路返回进入相移干涉仪,并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像,计算机对上述干涉测试条纹图像进行数据处理,得到沿y轴方向平移后,第一平面和第二平面的相对测量结果 $h^{\Delta y}$;

$$h^{\Delta y}(x,y) = h_{\text{test}}(x,y+\Delta y) - h_{\text{ref}}(x,y) \quad \text{式(3)};$$

其中, Δy 为被测镜在y轴方向的平移量; $h_{\text{test}}(x,y+\Delta y)$ 表示被测镜沿y轴方向平移后的形貌;

步骤S5.将沿x轴方向和y轴方向平移后的相对测量结果与初始位置时的相对测量结果作差,得到如下方程组

$$\begin{cases} \Delta h^x(x,y) = h_{\text{test}}(x+\Delta x,y) - h_{\text{test}}(x,y) \\ \Delta h^y(x,y) = h_{\text{test}}(x,y+\Delta y) - h_{\text{test}}(x,y) \end{cases} \quad \text{式(4)};$$

其中, Δh^x 为 $h^{\Delta x} - h^0$; Δh^y 为 $h^{\Delta y} - h^0$;

进一步地,所述式(4)可用如下线性方程组表示:

$$g = Qh + n \quad \text{式(5)};$$

其中,g为 Δh^x 、 Δh^y 构成的差分向量,为已知量;Q为稀疏矩阵;h为被测镜表面各点的高度向量;n为误差项;

设被测镜表面高度h有最小二乘解,得到如下表达式:

$h = (Q^T Q)^{-1} Q^T g$ 式(6)；

设图像的分辨率为 $M \times N$ ，则图像中第 j 列在 x 方向的差分向量为

$$g_{x,j} = [\Delta h^x(1,j), \Delta h^x(2,j), \dots, \Delta h^x(M - \Delta x, j)], j=1, 2, \dots, N \text{ 式(7)；}$$

进一步地，图像中第 i 行在 y 方向的差分向量为

$$g_{y,i} = [\Delta h^y(i,1), \Delta h^y(i,2), \dots, \Delta h^y(i, N - \Delta y)], i=1, 2, \dots, M \text{ 式(8)；}$$

将式(7)和式(8)合并得到如下表达式

$$g = [g_x, g_y]^T \text{ 式(9)；}$$

$$\text{其中, } g_x = [g_{x,1}, g_{x,2}, \dots, g_{x,N}], g_y = [g_{y,1}, g_{y,2}, \dots, g_{y,M}];$$

那么矩阵 Q 可对应写出，其行数为 $(M - \Delta x)N + (N - \Delta y)M$ ，列数为 MN ，其非零元素所在位置及取值为

$$\begin{aligned} Q[i + (j-1)(M - \Delta x), i + (j-1)M] &= -1 \\ Q[i + (j-1)(M - \Delta x), i + (j-1)M + \Delta x] &= 1 \\ Q[(M - \Delta x)N + r, r] &= -1 \\ Q[(M - \Delta x)N + r, r + M\Delta y] &= 1 \end{aligned} \quad \text{式(10)}$$

其中， $i=1, \dots, M - \Delta x; j=1, \dots, N; r=1, \dots, (N - \Delta y)M$ ；

求解上述方程组式(10)，最后将式(9)以及方程组(10)代入公式(5)中，得到被测镜的绝对测量结果；

步骤S6. 将公式(4)方程组的两边做傅里叶变换，得到如下表达式，对该表达式求解，得到被测镜中频绝对面形的频谱分布

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(\Delta h^x) &= \text{Re} \left[\Delta \tilde{\Phi} \left(h_{\text{test}}(x + \Delta x, y) - h_{\text{test}}(x, y) \right) \right] / \left(2 \sin(\pi \Delta h^x \Delta L) \right) \\ \tilde{\varphi}(\Delta h^y) &= \text{Re} \left[\Delta \tilde{\Phi} \left(h_{\text{test}}(x, y + \Delta y) - h_{\text{test}}(x, y) \right) \right] / \left(2 \sin(\pi \Delta h^y \Delta L) \right) \end{aligned} \quad \text{式(11)；}$$

其中， ΔL 表示每个像素对应的物方空间分辨率； Re 表示取实部运算。

2. 根据权利要求1所述的一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法，其特征在于，被测镜在 x 轴方向和 y 轴方向平移的移动量为一个像素对应的物面宽度距离的整数倍。

3. 根据权利要求1所述的一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法，其特征在于，在步骤S6中，设定相移干涉仪的CCD工业相机分辨率为 $P \times P$ ，被测镜的口径为 φ ，那么：

$$\Delta L = \varphi / P \quad \text{式(12)。$$

一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法

技术领域

[0001] 本申请涉及光学元件平面面形检测技术领域,具体涉及一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法。

背景技术

[0002] 随着现代光学技术的发展,整个光学系统发展迅猛。在光刻机、空间望远镜等为代表的大口径光学系统,对光学元件面形加工质量的要求越来越高,从而使得对光学元件面形检测精度要求不断提高。干涉测量利用测量光与参考光之间的光程差形成干涉条纹,从中解算表面高度,因此,测量结果中包含了参考镜的形貌信息,属于一种“相对测量”。当被测镜精度要求较低、或参考镜精度较高(至少高出被测镜一个数量级)时,可以认为相对测量结果就是被测镜的真实形貌;而当二者精度相当时,必须将参考镜的形貌从中剔除,得到被测镜形貌,这种测量方式为“绝对测量”。绝对测量可实现纳米精度的面形测量,逐渐成为光学检测的关键技术。

[0003] 目前常用的绝对干涉检测方法是三板互检法,它要求三块平板以不同的相对位置两两组合,分别作为透射平板及反射平板,互检四次后,经过数据处理,即可以得到三块平板各自的面形误差。但是,三板互检法测量过程复杂,不易操作,并且由于测量过程需要旋转标准反射平晶,因此还存在测量稳定性较低的问题;并且由于现代光学对超高精度平面镜要求对低频面形精度,同时对中频面形信息也需要进行一定考虑,而目前的检测方法并不能够得到光学元件的中频面形信息。

发明内容

[0004] 针对上述现有技术中存在的问题和缺陷,本申请提供了一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法,与三面互检法相比,本申请的检测方法只需两块平晶就可以计算得到被测镜的面形分布,测量方法简单,易于操作,是一种有效的平面绝对检测方法,并且同时还能够将光学元件的中频面形信息单独提取出来,从而指导标准镜的超光滑表面加工。

[0005] 为了实现上述发明目的,本申请的技术方案如下:

[0006] 一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法,所述方法采用两个平面镜互检的方式,实现平面镜的面形绝对检测,具体步骤如下:

[0007] 步骤S1.沿相移干涉仪输出光束方向依次设置参考镜和被测镜,定义光轴方向为z轴,垂直于光轴的平面为xy平面,分别记录此时参考镜和被测镜在x轴和y轴方向上的位置信息,此时被测镜所处的位置为其初始位置;

[0008] 步骤S2.在初始位置处,相移干涉仪发出的光束依次照射到参考镜和被测镜上,被测镜的第二平面反射的光和参考镜的第一平面反射的光沿原路返回进入相移干涉仪,并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像,计算机对上述干涉测试条纹图像进行数据处理,得到初始位置时第一平面和第二平面的相对测量结果 h^0 ;

[0009] $h^0(x,y) = h_{\text{test}}(x,y) - h_{\text{ref}}(x,y)$ 式(1);

[0010] 其中, (x, y) 表示像素坐标; $h_{\text{test}}(x, y)$ 表示被测镜在初始位置的形貌; $h_{\text{ref}}(x, y)$ 表示参考镜在初始位置的形貌;

[0011] 步骤S3. 将被测镜从步骤S1的初始位置沿x轴方向平移, 相移干涉仪发出的光束依次照射到参考镜和被测镜上, 被测镜的第二平面反射的光和参考镜的第一平面反射的光沿原路返回进入相移干涉仪, 并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像, 计算机对上述干涉测试条纹图像进行数据处理, 得到沿x轴方向平移后, 第一平面和第二平面的相对测量结果 $h^{\Delta x}$;

$$[0012] \quad h^{\Delta x}(x, y) = h_{\text{test}}(x + \Delta x, y) - h_{\text{ref}}(x, y) \quad \text{式(2)};$$

[0013] 其中, Δx 为被测镜在x轴方向的平移量; $h_{\text{test}}(x + \Delta x, y)$ 为被测镜沿x轴方向平移后的形貌;

[0014] 步骤S4. 将被测镜从步骤S1的初始位置沿y轴方向平移, 相移干涉仪发出的光束依次照射到参考镜和被测镜上, 被测镜的第二平面反射的光和参考镜的第一平面反射的光沿原路返回进入相移干涉仪, 并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像, 计算机对上述干涉测试条纹图像进行数据处理, 得到沿y轴方向平移后, 第一平面和第二平面的相对测量结果 $h^{\Delta y}$;

$$[0015] \quad h^{\Delta y}(x, y) = h_{\text{test}}(x, y + \Delta y) - h_{\text{ref}}(x, y) \quad \text{式(3)};$$

[0016] 其中, Δy 为被测镜在y轴方向的平移量; $h_{\text{test}}(x, y + \Delta y)$ 表示被测镜沿y轴方向平移后的形貌;

[0017] 步骤S5. 将沿x轴方向和y轴方向平移后的相对测量结果与初始位置时的相对测量结果作差, 得到如下方程组

$$[0018] \quad \begin{cases} \Delta h^x(x, y) = h_{\text{test}}(x + \Delta x, y) - h_{\text{test}}(x, y) \\ \Delta h^y(x, y) = h_{\text{test}}(x, y + \Delta y) - h_{\text{test}}(x, y) \end{cases} \quad \text{式(4)};$$

[0019] 其中, Δh^x 为 $h^{\Delta x} - h^0$; Δh^y 为 $h^{\Delta y} - h^0$;

[0020] 进一步地, 所述式(4)可用如下线性方程组表示:

$$[0021] \quad g = Qh + n \quad \text{式(5)};$$

[0022] 其中, g 为 Δh^x 、 Δh^y 构成的差分向量, 为已知量; Q 为稀疏矩阵; h 为被测镜表面各点的高度向量; n 为误差项;

[0023] 设被测镜表面高度 h 有最小二乘解, 得到如下表达式:

$$[0024] \quad h = (Q^T Q)^{-1} Q^T g \quad \text{式(6)};$$

[0025] 设图像的分辨率为 $M \times N$, 则图像中第 j 列在 x 方向的差分向量为

$$[0026] \quad g_{x,j} = [\Delta h^x(1, j), \Delta h^x(2, j), \dots, \Delta h^x(M - \Delta x, j)], j = 1, 2, \dots, N \quad \text{式(7)};$$

[0027] 进一步地, 图像中第 i 行在 y 方向的差分向量为

$$[0028] \quad g_{y,i} = [\Delta h^y(i, 1), \Delta h^y(i, 2), \dots, \Delta h^y(i, N - \Delta y)], i = 1, 2, \dots, M \quad \text{式(8)};$$

[0029] 将式(7)和式(8)合并得到如下表达式

$$[0030] \quad g = [g_x, g_y]^T \quad \text{式(9)};$$

[0031] 其中, $g_x = [g_{x,1}, g_{x,2}, \dots, g_{x,N}]$, $g_y = [g_{y,1}, g_{y,2}, \dots, g_{y,M}]$;

[0032] 那么矩阵 Q 可对应写出, 其行数为 $(M - \Delta x)N + (N - \Delta y)M$, 列数为 MN , 其非零元素所在位置及取值为

$$\begin{aligned}
 & Q[i+(j-1)(M-\Delta x), i+(j-1)M] = -1 \\
 [0033] \quad & Q[i+(j-1)(M-\Delta x), i+(j-1)M+\Delta x] = 1 \\
 & Q[(M-\Delta x)N+r, r] = -1 \\
 & Q[(M-\Delta x)N+r, r+M\Delta y] = 1
 \end{aligned} \quad \text{式 (10)}$$

[0034] 其中, $i=1, \dots, M-\Delta x$; $j=1, \dots, N$; $r=1, \dots, (N-\Delta y)M$;

[0035] 求解上述方程组式(10), 最后将式(9)以及方程组(10)代入公式(5)中, 得到被测镜的绝对测量结果;

[0036] 步骤S6. 将公式(4)方程组的两边做傅里叶变换, 得到如下表达式, 对该表达式求解, 得到被测镜中频绝对面形的频谱分布

$$\begin{aligned}
 [0037] \quad \tilde{\varphi}(\Delta h^x) &= \text{Re} \left[\Delta \tilde{\Phi} \left(h_{\text{test}}(x+\Delta x, y) - h_{\text{test}}(x, y) \right) \right] / \left(2 \sin(\pi \Delta h^x \Delta L) \right) \\
 \tilde{\varphi}(\Delta h^y) &= \text{Re} \left[\Delta \tilde{\Phi} \left(h_{\text{test}}(x, y+\Delta y) - h_{\text{test}}(x, y) \right) \right] / \left(2 \sin(\pi \Delta h^y \Delta L) \right)
 \end{aligned} \quad \text{式 (11);}$$

[0038] 其中, ΔL 表示每个像素对应的物方空间分辨率; Re 表示取实部运算。

[0039] 作为优选地, 所述被测镜在x轴方向和y轴方向平移的移动量为一个像素对应的物面宽度距离的整数倍。

[0040] 作为优选地, 在步骤S6中, 设定相移干涉仪的CCD工业相机分辨率为 $P_k \times P_k$, 被测镜的口径为 φ , 那么:

$$[0041] \quad \Delta L = \varphi / P \quad \text{式 (12)}。$$

[0042] 本申请的有益效果:

[0043] (1) 本申请与三板互检法相比, 提出的两板伪剪切法只需两块平晶就可以计算得到被测镜的面形分布, 测量方法简单易操作, 是一种有效的平面绝对检测方法。

[0044] (2) 本申请与现有的大口径光学元件绝对面形检测方法相比, 本方法无需移动置换干涉仪自身的标准透射平晶, 并且也无需旋转标准反射平晶。因此, 极大地提高了测量的稳定性, 并且也降低了拆卸大口径干涉仪标准平晶的风险。

[0045] (3) 本申请的检测方法能够将光学元件的中频面形误差信息单独提取出来, 实现了光学元件中频误差功率谱密度的绝对测量, 进而能够指导标准镜的超光滑表面加工。

附图说明

[0046] 本申请的前述和下文具体描述在结合以下附图阅读时变得更清楚, 附图中:

[0047] 图1为本申请干涉检测示意图;

[0048] 图2为被测镜在初始位置干涉测试示意图;

[0049] 图3为被测镜沿x轴方向平移后干涉测试示意图;

[0050] 图4为被测镜沿y轴方向平移后干涉测试示意图。

具体实施方式

[0051] 下面通过几个具体的实施例来进一步说明实现本申请发明目的的技术方案, 需要说明的是, 本申请要求保护的技术方案包括但不限于以下实施例。

[0052] 干涉测量利用测量光与参考光之间的光程差形成干涉条纹,从中解算表面高度,因此,测量结果中包含了参考镜的形貌信息,属于一种“相对测量”。当被测镜精度要求较低、或参考镜精度较高(至少高出被测镜一个数量级)时,可以认为相对测量结果就是被测镜的真实形貌;而当二者精度相当时,必须将参考镜的形貌从中剔除,得到被测镜形貌,这种测量方式为“绝对测量”。绝对测量可实现纳米精度的面形测量,逐渐成为光学检测的关键技术。

[0053] 目前常用的绝对干涉检测方法是三板互检法,它要求三块平板以不同的相对位置两两组合,分别作为透射平板及反射平板,互检四次后,经过数据处理,即可以得到三块平板各自的面形误差。三板互检法测量过程复杂,并且由于检测过程存在平晶的旋转,因此整个检测过程不易操作,测量稳定性也较差。

[0054] 基于此,本申请的实施例提供了一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法,本申请只需要两块平晶互检四次以后,通过数据处理就可以计算得到平晶的面形分布,并且整个检测过程不需要旋转平晶,因此本申请的测量方法简单易于操作,是一种有效的平面绝对检测方法。

[0055] 首先,需要说明的是,本申请所指的大口径光学元件,是指口径达到600mm及以上的光学元件。

[0056] 本实施例公开了一种大口径光学元件平面面形绝对检测方法,首先参照说明书附图1,本方法是基于附图1所示的干涉检测系统实现的,包括一个干涉测试仪,以及沿检测光路方向依次设置的参考镜和测试镜,所述干涉测试仪用于对参考镜和测试镜的光学面形进行检测,干涉仪的输出光束方向即为测试光路,参考镜和被测镜均为平面镜,设参考镜的待测平面为第一平面,测试镜的待测平面为第二平面,第一平面和第二平面分别记为正面。具体的,通过以下步骤实现第一平面或第二平面的面形绝对检测、测量。

[0057] 步骤S1.首先沿干涉仪输出光束方向依次设置参考镜和被测镜,定义光轴方向为z轴,垂直于光轴的平面为xy平面,分别记录此时参考镜和被测镜在x轴和y轴方向上的位置信息,定义此时被测镜所处的位置为其初始位置。

[0058] 步骤S2.参照说明书附图2,在初始位置处时,干涉仪发出的激光光束首先照射至参考镜的第一平面上,然后穿过参考镜透射至被测镜的第二平面上,被测镜第二平面反射的光和参考镜第一平面反射的光沿原光路返回进入干涉仪中,第一平面反射的光和第二平面反射的光发生干涉并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像,计算机接受上述干涉测试条纹图像后,对图像进行数据处理,得到初始位置时第一平面和第二平面的相对测量结果为 h^0

[0059] $h^0(x,y) = h_{\text{test}}(x,y) - h_{\text{ref}}(x,y)$ 式(1);

[0060] 其中,(x,y)表示像素坐标; $h_{\text{test}}(x,y)$ 表示被测镜在初始位置的面形信息; $h_{\text{ref}}(x,y)$ 表示参考镜在初始位置的面形信息。

[0061] 在本实施例中,需要说明的是,相对测量结果也表示第一平面和第二平面的光程差信息。

[0062] 步骤S3.参照说明书附图3,将被测镜从初始位置沿x轴方向进行平移,参照步骤S2的操作,干涉仪发出的激光光束首先照射至参考镜的第一平面上,然后穿过参考镜透射至被测镜的第二平面上,第二平面反射的光和第一平面反射的光沿原路返回进入干涉仪,第

一平面反射的光和第二平面反射的光发生干涉并在干涉仪中再次形成相应的干涉测试条纹图像,计算机对该图像进行数据处理,得到沿x轴方向平移后,第一平面和第二平面的相对测量结果为 $h^{\Delta x}$:

$$[0063] \quad h^{\Delta x}(x, y) = h_{\text{test}}(x + \Delta x, y) - h_{\text{ref}}(x, y) \quad \text{式(2)};$$

[0064] 其中, Δx 为被测镜在x轴方向的平移量; $h_{\text{test}}(x + \Delta x, y)$ 为被测镜沿x轴方向平移后的面形信息。

[0065] 在本实施例中,需要说明的是, Δx 也表示沿图像x方向的剪切量。

[0066] 在本实施例中,还需要进一步说的是,被测镜沿x轴方向进行平移的平移量 Δx 为一个像素对应的物面宽度距离的整数倍。

[0067] 步骤S4.参照说明书附图4,将被测镜从步骤S1的初始位置沿y轴方向平移,参照步骤S2的操作,干涉仪发出的激光光束首先照射至参考镜的第一平面上,然后穿过参考镜透射至被测镜的第二平面上,第二平面反射的光和第一平面反射的光沿原路返回进入干涉仪,第一平面反射的光和第二平面反射的光发生干涉并在干涉仪中形成相应的干涉测试条纹图像,计算机对该图像进行数据处理,得到沿y轴方向平移后,第一平面和第二平面的相对测量结果为 $h^{\Delta y}$

$$[0068] \quad h^{\Delta y}(x, y) = h_{\text{test}}(x, y + \Delta y) - h_{\text{ref}}(x, y) \quad \text{式(3)};$$

[0069] 其中, Δy 为被测镜在y轴方向的平移量; $h_{\text{test}}(x, y + \Delta y)$ 表示被测镜沿y轴方向平移后的形貌。

[0070] 在本实施例中,需要说明的是, Δy 也表示沿图像y方向的剪切量。

[0071] 在本实施例中,还需要进一步说的是,被测镜沿y轴方向进行平移的平移量 Δy 为一个像素对应的物面宽度距离的整数倍。

[0072] 步骤S5.将沿x轴方向和y轴方向平移后的相对测量结果与初始位置时的相对测量结果作差,去除参考镜这一公共量的影响,得到如下关于被测镜面形信息的方程组

$$[0073] \quad \begin{cases} \Delta h^x(x, y) = h_{\text{test}}(x + \Delta x, y) - h_{\text{test}}(x, y) \\ \Delta h^y(x, y) = h_{\text{test}}(x, y + \Delta y) - h_{\text{test}}(x, y) \end{cases} \quad \text{式(4)};$$

[0074] 其中, $\Delta h^x(x, y)$ 为 $h^{\Delta x}(x, y) - h^0(x, y)$; $\Delta h^y(x, y)$ 为 $h^{\Delta y}(x, y) - h^0(x, y)$;

[0075] 进一步地,所述式(4)可用如下线性方程组表示:

$$[0076] \quad g = Qh + n \quad \text{式(5)};$$

[0077] 其中, g 为 $\Delta h^x(x, y)$ 、 $\Delta h^y(x, y)$ 构成的差分向量,为一个已知量; Q 为稀疏矩阵; h 为被测镜表面各点的高度向量; n 为误差项;

[0078] 设被测镜表面高度 h 有最小二乘解,则得到如下表达式:

$$[0079] \quad h = (Q^T Q)^{-1} Q^T g \quad \text{式(6)};$$

[0080] 设图像的分辨率为 $M \times N$,则图像中第j列在x方向的差分向量为

$$[0081] \quad g_{x,j} = [\Delta h^x(1, j), \Delta h^x(2, j), \dots, \Delta h^x(M - \Delta x, j)], j = 1, 2, \dots, N \quad \text{式(7)};$$

[0082] 进一步地,图像中第i行在y方向的差分向量为

$$[0083] \quad g_{y,i} = [\Delta h^y(i, 1), \Delta h^y(i, 2), \dots, \Delta h^y(i, N - \Delta y)], i = 1, 2, \dots, M \quad \text{式(8)};$$

[0084] 将式(7)和式(8)合并得到如下表达式

$$[0085] \quad g = [g_x, g_y]^T \quad \text{式(9)};$$

[0086] 其中, $g_x = [g_{x,1}, g_{x,2}, \dots, g_{x,N}]$, $g_y = [g_{y,1}, g_{y,2}, \dots, g_{y,M}]$;

[0087] 那么矩阵Q可对应写出,其行数为 $(M - \Delta x)N + (N - \Delta y)M$,列数为 MN ,其非零元素所在位置及取值为

$$\begin{aligned}
 & Q[i+(j-1)(M-\Delta x), i+(j-1)M] = -1 \\
 [0088] \quad & Q[i+(j-1)(M-\Delta x), i+(j-1)M+\Delta x] = 1 \\
 & Q[(M-\Delta x)N+r, r] = -1 \\
 & Q[(M-\Delta x)N+r, r+M\Delta y] = 1
 \end{aligned} \quad \text{式(10);}$$

[0089] 其中, $i=1, \dots, M-\Delta x; j=1, \dots, N; r=1, \dots, (N-\Delta y)M$;

[0090] 求解上述方程组,由于稀疏矩阵Q的秩为 $r(Q) = MN - \Delta x \Delta y$,小于其列数,故方程组(10)可按照广义逆运算求解;最后将式(9)以及方程组(10)代入公式(5)中,即可得到被测镜的绝对测量结果。

[0091] 在本实施例中,从梯度分布重构绝对面形过程中,由于梯度分布中可能存在局部误差,而常规的重构方法(如积分方法)容易导致误差扩散。因此,本实施例进一步对前述的剪切绝对检测重构面形,进行Zernike多项式拟合分析,建立适合波前梯度特性的正交矢量多项式,利用多项式重新拟合面形可以得到被测镜的低频面形误差的绝对检测。在本实施例中,Zernike多项式拟合分析为本领域常规的技术手段,在此不再赘述。

[0092] 步骤S6.中频面形误差的绝对检测

[0093] 由于现代光学对超高精度平面镜要求对低频面形精度,同时对中频面形信息也需要进行一定考虑,而上述检测测量结果并不能将被测镜的中频面形信息提取出来,因此本实施例进一步对被测镜的面形进行分析解算,将被测镜的中频面形信息提取出来,实现中频面形误差的绝对检测,具体如下:

[0094] 将公式(4)方程组的两边做傅里叶变换,得到如下表达式,对该表达式进行求解,即可得到被测镜中频绝对面形的频谱分布

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\varphi}(\Delta h^x) = \text{Re} \left[\Delta \tilde{\Phi} \left(h_{\text{test}}(x+\Delta x, y) - h_{\text{test}}(x, y) \right) \right] / \left(2 \sin(\pi \Delta h^x \Delta L) \right) \\
 [0095] \quad & \tilde{\varphi}(\Delta h^y) = \text{Re} \left[\Delta \tilde{\Phi} \left(h_{\text{test}}(x, y+\Delta y) - h_{\text{test}}(x, y) \right) \right] / \left(2 \sin(\pi \Delta h^y \Delta L) \right)
 \end{aligned} \quad \text{式(11);}$$

[0096] 其中, ΔL 表示每个像素对应的物方空间分辨率;Re表示取实部运算。因此,通过控制 ΔL ,利用方程组式(11)就可以得到被测镜中频绝对面形的频谱分布,进而获得被测镜的中频面形误差,实现中频面形误差的绝对检测。

[0097] 在本实施例中,为了实现光学元件中频误差的检测,要求 ΔL 尽量小,一般小于0.625mm。对于本申请采用的大口径干涉设备而言,设定其CCD工业相机的分辨率为 $P \times P$,被测镜测试面的口径为 φ ,那么 $\Delta L = \varphi / P$ 。借助于大口径干涉设备及其功率谱密度计算软件,实现光学元件中频误差功率谱密度的测量分析,进而指导光学元件制造过程的中、低频精度同时实现。

[0098] 在本实施例中,参考镜和被测镜的面形形貌都是未知的,参考镜的面形计算方式可以参照被测镜的算法进行求解。

[0099] 在本实施例中,实现上述面形检测的装置为相移干涉仪,所述相移干涉仪包括由激光光源、分光棱镜、准直光学组件等光学元件组成的干涉测试光路模块,以及由CCD工业

相机、成像镜头和计算机组成的干涉测试分析模块,计算机分别与激光光源以及CCD工业相机连接,用于控制上述两个部件工作。

[0100] 所述激光光源,用于为面形检测提供不同波长的辐射光;

[0101] 所述分光棱镜,用于将激光光源输出的光一部分反射至成像镜头和CCD工业相机所在的光路,一部分投射至参考镜和被测镜所在的光路;

[0102] 所述准直光学组件,用于将分光棱镜透射的光生成准直光,光束依次入射至参考镜和被测镜;

[0103] 所述成像镜头,用于捕捉第一平面和第二平面产生干涉测试条纹,并将干涉测试条纹投射到CCD工业相机中;

[0104] 所述CCD工业相机,用于收集第一平面和第二平面产生的干涉测试条纹图像,并将图像传输给计算机;

[0105] 所述计算机,用于根据CCD工业相机传输的干涉图像进行数据分析,解算得到第一平面和第二平面的面形信息,最终实现光学元件面形的绝对检测。

[0106] 所述计算机解算第一平面和第二平面面形信息的具体方法和步骤参照本实施例记载的方法。

[0107] 在本实施例中,需要说明的是,干涉测试仪的结构除了上述文字记载的内容以外,还包括其它元器件,本实施例只是对其基本结构做出了简单的说明和介绍,并非对其结构进行限定。并且,本申请所采用的相移干涉仪采用目前已有的干涉仪即可,干涉仪本身并非是本申请的发明创新,所以在此不再赘述。

[0108] 以上所述,仅是本申请的较佳实施例,并非对本申请做任何形式上的限制,凡是依据本申请的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化,均落入本申请的保护范围之内。

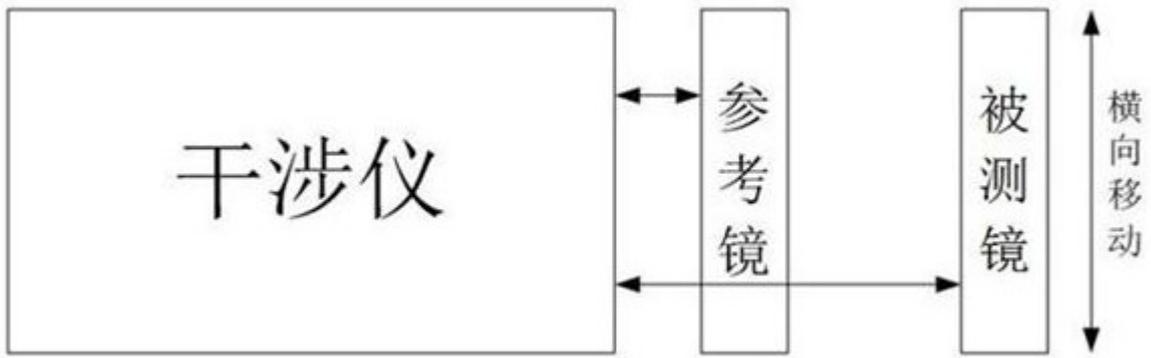


图1

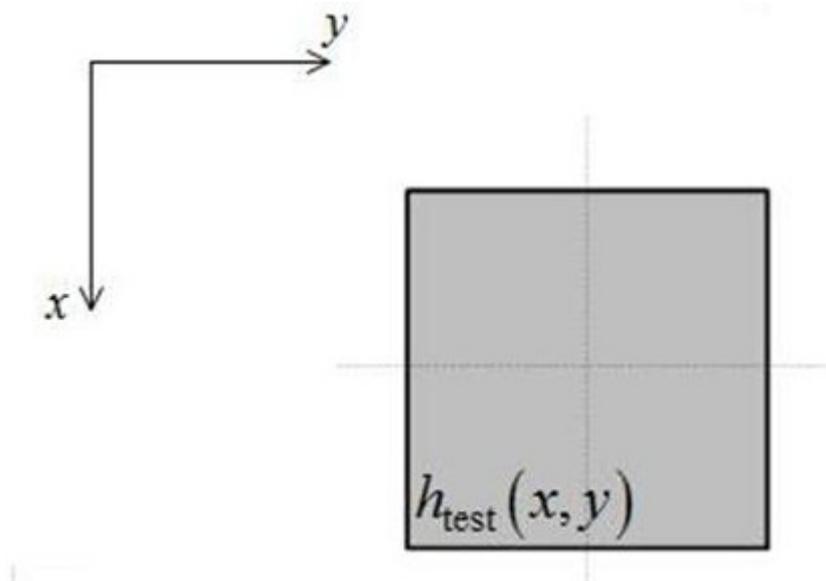


图2

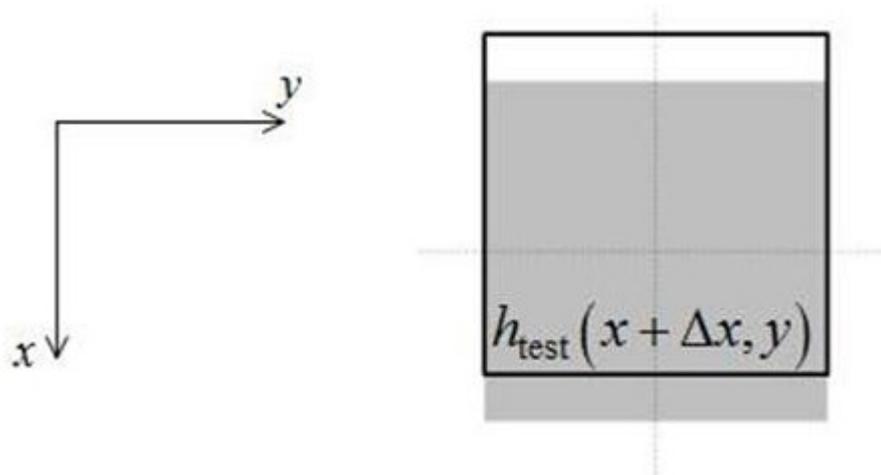


图3

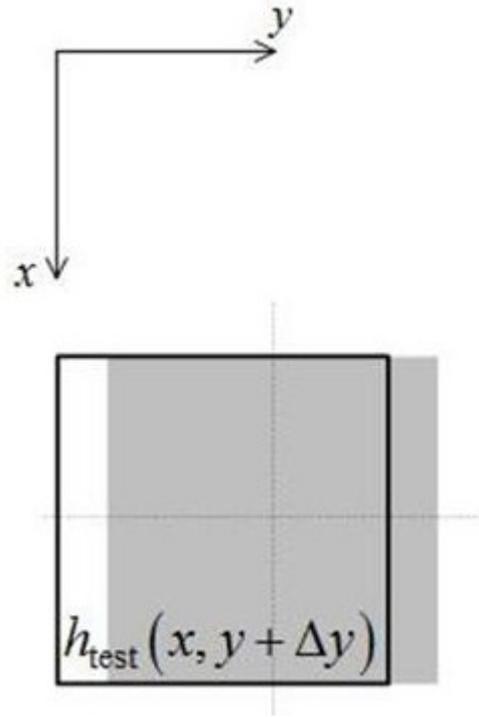


图4