

基于白光扫描干涉术的非球面光学元件 大范围评价方法

马 龙¹ 张鸿燕¹ 牛一凡¹ 郭 彤²

¹中国民航大学中欧航空工程师学院, 天津 300300

²天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 通过白光扫描干涉术研究了用于非球面元件的大范围测量方法并利用纳米测量机(NMM)构建了测量系统。对系统的运行环境进行分析,定量给出了评定结果。在系统环境得以保证的前提下,重点研究了无重叠拼接方法,并将结果进行了对比;针对周期性非球面光学表面,提出通过白光倾斜扫描干涉法进行测量。扫描过程中,测试样品倾斜通过干涉区,消除了物镜视场的影响,使毫米量级表面一次扫描即可完成测量。针对扫描过程,分析了扫描过程中干涉条纹移出视场现象及双角度不一致对测量结果的影响。

关键词 测量;大范围评价;无重叠拼接;白光倾斜扫描干涉术;非球面光学元件

中图分类号 TN247 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.061207

Large Range Evaluation Method Based on White Light Scanning Interferometry for Aspheric Optical Elements

Ma Long¹ Zhang Hongyan¹ Niu Yifan¹ Guo Tong¹

¹Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China

²State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin, 300072, China

Abstract White light interferometry is employed to research on the measurement technology for large scale evaluation and a dedicated system is developed on the platform of nano-measuring machine (NMM). Firstly, this work calibrates the environment effects and the results are given quantitatively. Secondly, under the condition of the precise environment control, the non-overlapping stitching method is investigated, and the comparison of the results is also made; For non-periodic array aspheric optical surface, white light tilted scanning interferometry is employed to perform the large range measurement. During the scan, the specimen moves through the coherence area along a sloping direction, and the objective field of view limitation is removed. Hence, within one round of scan, the surface in millimetre scale can be successfully evaluated. For the scanning process, this article analyzes the interferogram slipping out and the impact due to the difference of the two angles appeared in this technology. Finally, the comparison between the above two methods is given.

Key words measurement; large range evaluation; non-overlapping stitching; white light tilted scanning interferometry; aspheric optical elements

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.4640

1 引言

非球面光学元件对现代信息科学具有极为重要的意义^[1-3]。随着加工技术不断发展,非球面光学元件的加工精度不断提高^[4],其形状精度需要达到与光波长相同或更高量级,表面粗糙度 R_a 值小于光波长的1/10,也就是处于亚微米或纳米水平。另一方面,由于非球面光学元件的面型参数往往处于宏观尺度,这要求测试系统在测量中能够同时实现大范围和高精度。

收稿日期: 2014-01-14; 收到修改稿日期: 2014-02-13; 网络出版日期: 2014-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(51205397)、中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122014H004)

作者简介: 马 龙(1983—),男,博士,讲师,主要从事精密测试方面的研究。E-mail: malong9904@aliyun.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

从目前的测量方法看,非球面测量仍以光学方法为主^[5-6]。随着以白光扫描干涉术(WLI)为代表的一系列光学技术及装置的迅速发展^[7-12],越来越多的商业化白光干涉仪被应用到这类测量中^[13]。一些针对大范围测量的研究更揭示了白光扫描干涉术应用于这一领域的巨大潜力^[14-16]。然而在目前的商业化设备上,当测量范围大于干涉物镜视场时,都是通过拼接技术进行解决。值得注意的是,相邻测量区域间的部分重叠是拼接技术所不可避免的^[17]。由于测量区域较大,大量的重叠测量不但降低了测量效率,拼接算法本身也可能成为新的误差源^[18]。

本文针对以上问题,通过白光扫描干涉术研究了非球面的大范围测量。提出了以无重叠方法实现二维非球面大范围水平测量;以白光倾斜扫描干涉术实现一维大范围水平测量,并重点探讨了扫描中的具体问题——干涉条纹移出视场现象和双角度不一致对测量结果的影响。实验表明,本方法及系统为非球面光学元件测量提供了一种新思路。

2 实验系统

2.1 系统硬件结构

系统以德国 SIOS 公司生产的高精度纳米测量机(NMM)为运动及定位平台,可实现 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的大范围运动。NMM 载物台在运动过程中由激光干涉仪对其位置进行实时测量,运动分辨力为 0.1 nm ^[19]。在 NMM 的工作台上配置一个小型倾斜台作为样品台。当系统进行无重叠拼接测试时,测试样品直接放置于 NMM 载物台上;当进行白光倾斜扫描干涉术测量时,测试样品放置于倾斜工作台上。系统总体结构如图 1 所示。

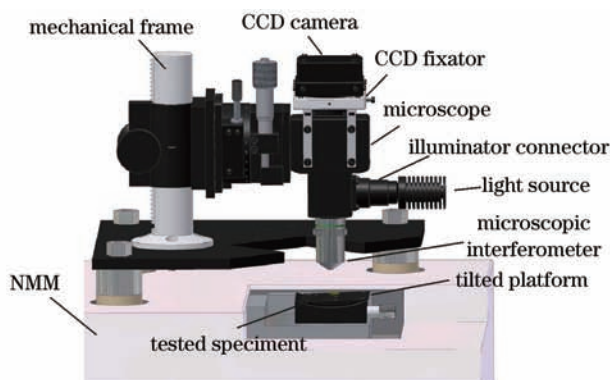


图 1 系统总体结构

Fig.1 System construction

2.2 系统环境测试

对无重叠拼接而言,拼接误差直接受环境影响,因此评价实验环境的重要性显而易见。由于激光干涉仪的频率响应和灵敏度都很高,任何环境扰动带来的定位或运动误差都会被激光干涉仪所感知。因此,激光干涉仪输出的距离值就用作环境评价的依据。

对系统分别进行动态和静态测试。动态测试中,令 NMM 以一定的步长运动,并随时读取激光干涉仪的输出值,结果如图 2 所示,其中扫描步长为 1 nm 。所用的滤波方法为一维滑动滤波,滤波器长度为 100。从结果可以看出,相比于 y 轴和 z 轴, x 轴的台阶型运动轨迹并不明显,这是由三个运动轴的位置关系造成的。当进一步增大扫描步长后,描述三轴运动过程的台阶轨迹将变得更为明显。事实上,环境测试过程中所用的运动步长均远小于实现无重叠拼接时的 CCD 等效像素尺寸。

3 无重叠拼接测量

由于 NMM 的位移分辨力远远小于通常显微物镜的等效像素间距,这为无重叠拼接的实现提供了可能,其操作原理如图 3 所示。可以看出,这种方式完全不涉及重复测量,拼接精度直接由 NMM 位移分辨力以及良好的环境控制予以保证。

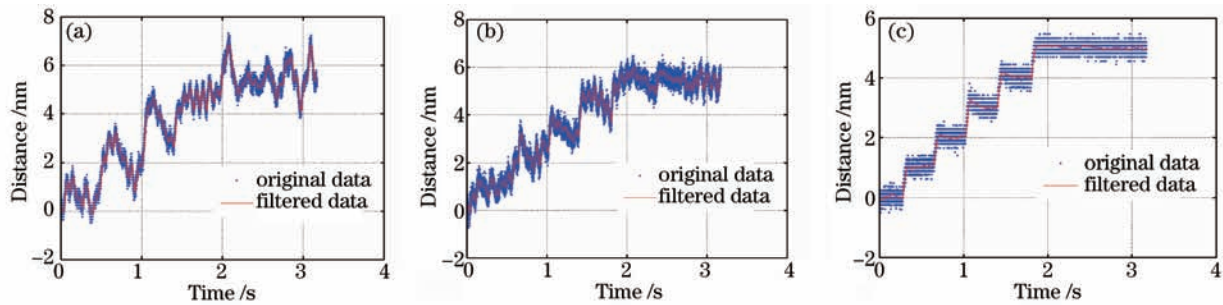


图2 NMM在1 nm扫描步长下工作台的位置变化曲线。(a) x 轴的位置变化曲线;(b) y 轴的位置变化曲线;
(c) z 轴的位置变化曲线

Fig.2 Plots of the NMM platform position change in 1 nm scan step length. (a) Plots of the position change in x axis;
(b) plots of the position change in y axis; (c) plots of the position change in z axis

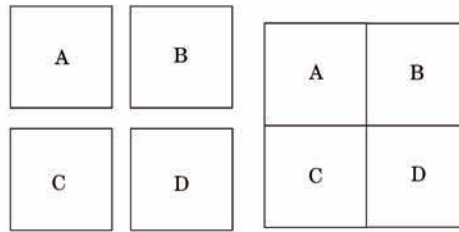


图3 基于NMM的无重叠拼接原理

Fig.3 Principle of non-overlapping stitching based on NMM

在上述实验环境下,对一个由金刚石单点车削加工的光学非球面反射镜进行了测量。设计方程可表示为

$$\frac{z^2}{31.8198^2} - \frac{x^2}{31.8198^2} = 1, \quad (1)$$

式中 z 和 x 是以毫米为单位的坐标值。为了对拼接结果进行合理的评价,测量中首先对顶部大小为800 pixel×800 pixel的较为平坦的区域进行测试,结果如图4(a)所示。然后,将CCD视场划分为400 pixel×400 pixel的四个相等区域,通过移动NMM工作台分别进行测量,NMM运动速度设定为1 mm/s,测量结果如图4(b)所示。图4(c)对两次结果进行了对比,可以看出拼接所得结果中,轮廓接合处过渡平缓,效果良好。但是,与直接测量所得结果相比,仍存在微小偏差。这种偏差来源于NMM工作台运动过程中直线电机之间的相

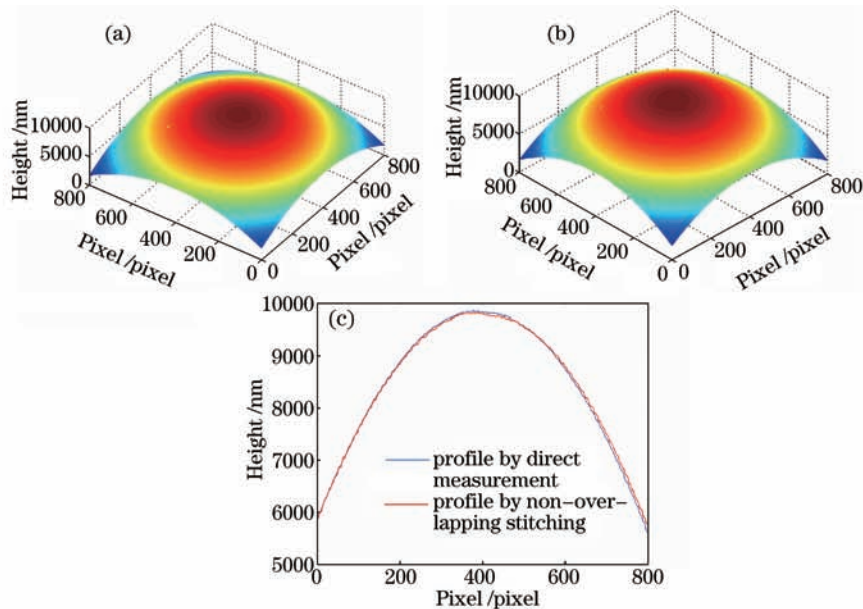


图4 直接测量与无重叠拼接测量结果对比。(a) 直接测量结果;(b) 无重叠拼接结果;(c) 测量轮廓对比

Fig.4 Comparison of the result between the direct measurement and the non-overlapping stitching. (a) Result of the direct measurement; (b) result of the non-overlapping stitching; (c) comparison of the retrieved profile

互影响和环境振动。直接测量结果与无重叠拼接测量结果的拟合方程分别为

$$\frac{z^2}{31.8192^2} - \frac{x^2}{31.8192^2} = 1, \quad (2)$$

$$\frac{z^2}{31.8194^2} - \frac{x^2}{31.8194^2} = 1. \quad (3)$$

显然,通过无重叠拼接方法对非球面进行测量是完全可行的。

4 白光倾斜扫描干涉测量

4.1 扫描原理

对某些阵列型非球面光学表面而言,测量信息除单个单元的面型精度外,单元周期性也是重要的考虑因素。该情况下,白光倾斜扫描干涉术则成为了这类测量的一种可行方法。

该方法保持干涉物镜垂直,测试样品以倾斜运动方式通过干涉物镜的相干平面完成扫描,彻底排除了物镜视场对扫描范围的限制。在系统中,倾斜运动由NMM在水平方向和垂直方向的共同运动合成,并使用一倾斜工作作为样品的载物台。这样的系统配置方式及相应的数据处理方法可以简化倾斜扫描的调整过程并且能够方便地解决测量过程中条纹移出 CCD 视场的问题,无需角度标定过程。白光倾斜扫描的基本原理如图 5 所示。

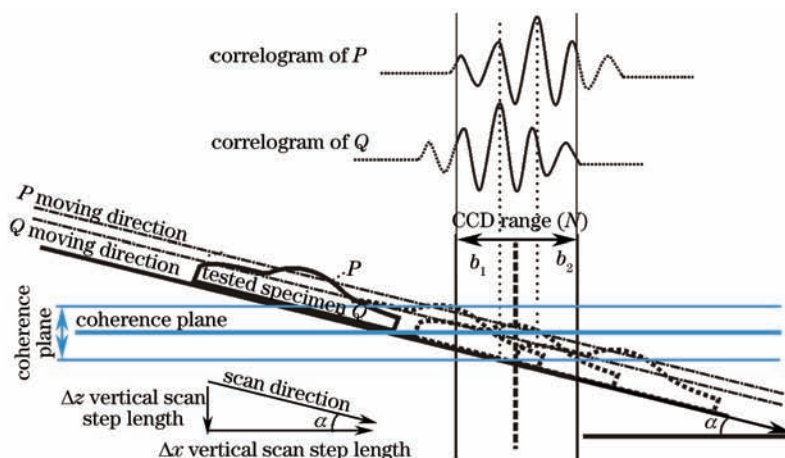


图 5 白光倾斜扫描原理

Fig.5 Principle of the white light tilted scanning interferometry

以样品上的 P 点和 Q 点为例,设 NMM 的扫描角度为 α 。扫描开始后,在 t_1 和 t_2 时刻 Q 点和 P 点开始进入干涉区,并在 t_3 和 t_4 时刻与干涉物镜的相干平面相交达到最佳干涉,干涉信号中的最大值位置在 CCD 像面上被分别标记为 b_1 和 b_2 。在 t_5 和 t_6 时刻 Q 点和 P 点各自退出干涉区。根据样品运动过程中记录的白光干涉信号就可以对相应的表面信息进行提取与分析。

4.2 高度信息提取

系统中使用一个倾斜台作为测试样品的载物台。这样使测量中出现了两个角度,分别是倾斜台的倾斜角度 β 和 NMM 的扫描角度 α ,如图 6 所示。值得注意的是,由于测试样品和倾斜台不理想的接触条件以及倾斜台的调整精度, β 并不能真正代表样品的姿态,这里它只用作名义值。在下文的讨论中,如不加特殊说明,将暂时忽略这一误差。因此在理想的情况下,这两个角度是相等的。实际扫描中,角 β 仅被用来作为角 α 的参考,扫描按照角 α 的方向进行。 α 的取值应尽可能表示真实的样品姿态,因此应保证 $\beta \approx \alpha$ 。

图 6 说明了倾斜扫描中的高度信息提取方法,此处仍假设 Q 点和 P 点的峰值位置为 b_1 和 b_2 , h_1 和 h_2 代表了结构的表面高度。由于大多数情况下扫描方向 α 的值很小,可以假设 $h_1 \approx z_1$, $h_2 \approx z_2$ 。 z_1 、 z_2 可以表示为

$$z_1 = \frac{b_1}{\Delta y} \times \Delta z, \quad (4)$$

$$z_2 = \frac{b_2}{\Delta y} \times \Delta z, \quad (5)$$

式中 Δy 和 Δz 分别为水平扫描步长和垂直扫描步长。扫描角度 α 可以表示为

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta z}{\Delta y}\right), \quad (6)$$

由于NMM极高的运动分辨力,测量中可以很精确地确定 α 值,从而完全避免了角度标定。

CCD范围 N 通过下式计算

$$N = L \times M, \quad (7)$$

式中 L 为 CCD 像素的等效尺寸, M 为 CCD 以像素为单位的视场宽度。

高度测量上限 h_{\max} 表示为

$$h_{\max} = N \times \sin \alpha. \quad (8)$$

根据(8)式,当 CCD 视场设定为 640 pixel(水平)×480 pixel(垂直)时,白光倾斜扫描干涉法的高度测量上限如表 1 所示。

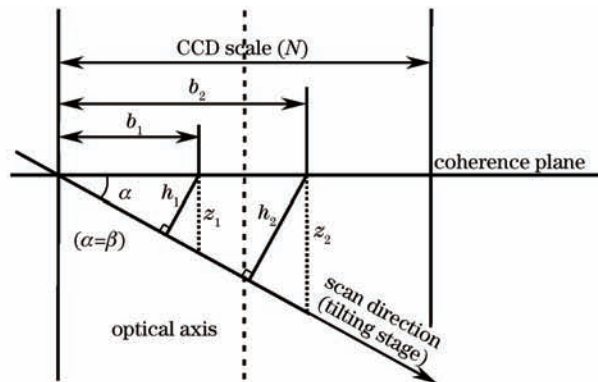


图 6 高度信息提取方法

Fig.6 Method of height information extraction

表 1 不同条件下的高度测量上限

Table 1 Height measurement upper limit in different conditions

Magnification	Height measurement upper limit	
	when $\alpha = 0.5^\circ / \mu\text{m}$	when $\alpha = 1^\circ / \mu\text{m}$
5×	6.981	13.962
10×	3.491	6.981
20×	1.804	3.608
50×	0.743	1.486
100×	0.374	0.748

4.3 正弦反射镜阵列测量

实验开始前,为标定所述方法及系统的有效性,对一个 $1.8 \mu\text{m}$ 标准台阶(标定值: $1.801 \mu\text{m} \pm 0.011 \mu\text{m}$, VLSI公司)进行了测量,测量结果为 $1.809 \mu\text{m}$ 。实验中使用一个由金刚石单点车削加工的正弦反射镜阵列作为测试样品。在 5 倍干涉物镜下,一次扫描成功重建了尺寸为 $5.375 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ($4300 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$) 的大范围表面,如图 7 所示。

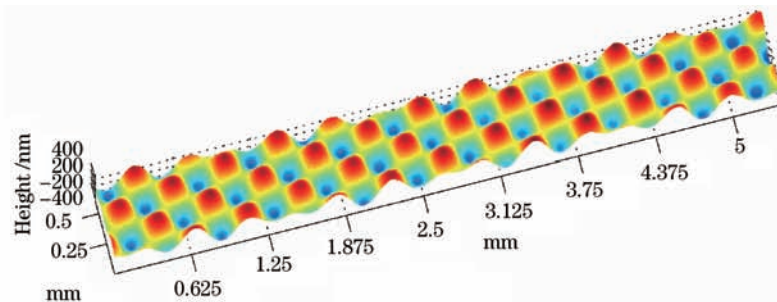


图 7 正弦反射镜阵列的测量结果

Fig.7 Result of the sinusoidal mirror array measurement

图8为测得的正弦反射镜阵列轮廓图,及经过一个高斯滤波器后得到的滤波后的表面轮廓和表面粗糙度信息。经评价,轮廓算术平均偏差为5.1 nm。同时,基于器件的加工特征,对其滤波后的表面轮廓进行了正弦曲线拟合,拟合轮廓 P 可以表示为

$$P = 250.457 \times \sin(13.6x - 3.099), \quad (9)$$

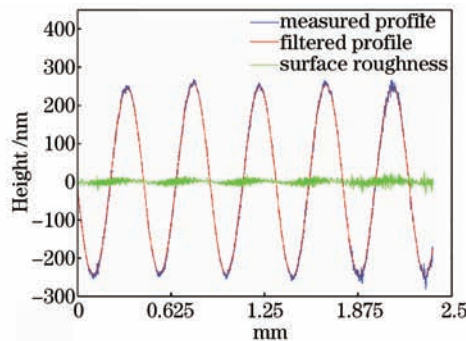


图8 正弦反射镜阵列轮廓

Fig.8 Profile of the sinusoidal mirror array

x 以毫米为单位。在进一步的数据分析中,基于本测量结果辅以不同的滤波器参数,可以很方便地提取到不同频率的表面信息,如粗糙度,波纹度等^[20]。

4.4 条纹移出视场现象的讨论

一次较为理想的白光倾斜扫描干涉扫描过程如图9所示,图中标明了系统的可测范围。在 $\beta \approx \alpha$ 的情况下,测试样品表面全部处于系统可测范围内。

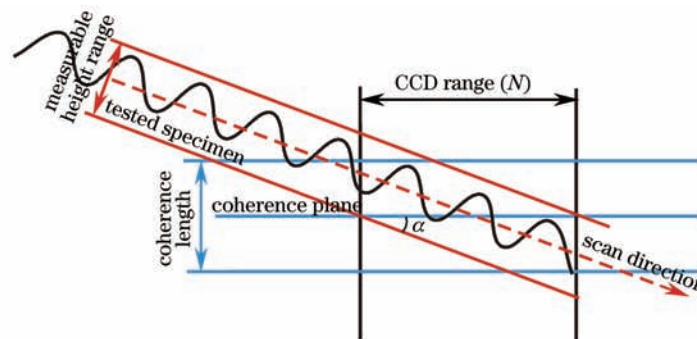


图9 理想情况的扫描过程

Fig.9 Scan process in the ideal case

然而,当样品的某些区域处于系统可测范围以外时,扫描过程中将会出现干涉条纹移出视场现象。当条纹移出视场后,测量就必须终止,水平方向的测量范围也因此受到很大限制,条纹移出视场现象如图10所示。条纹移出视场现象的形成原因可用图11和图12进行解释。

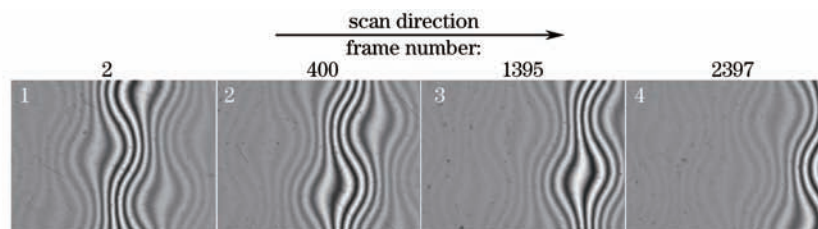


图10 正弦反射镜阵列测量中出现的条纹移出视场现象

Fig.10 Interferogram slipping out during the scan of the sinusoidal mirror array

图11中由于倾斜台的倾斜角设定 β 偏小,使系统的可测范围不能涵盖测试样品的全部表面。当扫描方向沿倾斜台方向进行时,会导致干涉条纹逐渐移出视场。

图12说明了条纹移出视场现象的另一种原因。由于倾斜台倾角 β 与扫描方向 α 差别过大,使样品远端处于系统可测范围外,同样会导致条纹移出视场现象的发生。

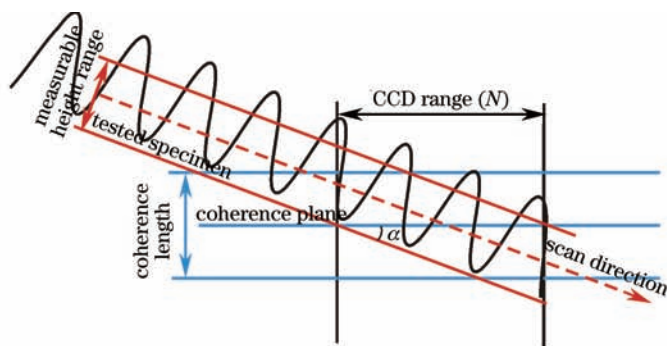


图 11 可测范围过小导致的条纹移出视场现象

Fig.11 Interferogram slipping out due to the too small measurable range

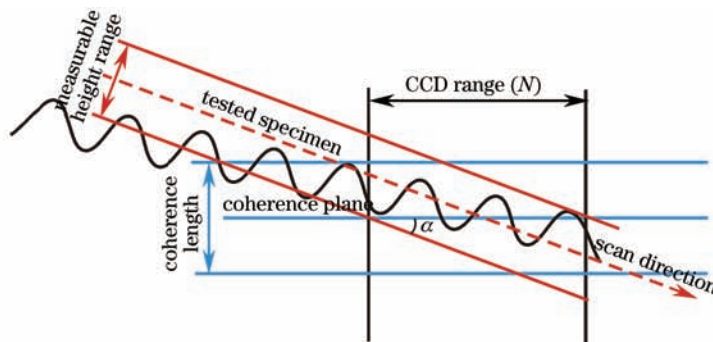


图 12 双角度差别过大导致的条纹移出视场现象

Fig.12 Interferogram slipping out due to the too large difference between the two angles

增大系统可测范围能够有效解决条纹移出视场问题。这意味着在测量高度较大的样品时,应同时增大倾斜台倾角 β 并保持 $\beta \approx \alpha$, 相应的扫描过程如图 13 所示。

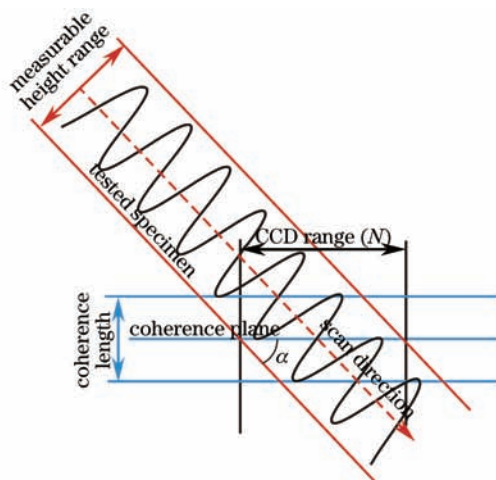


图 13 高度较大结构的扫描过程

Fig.13 Scan process for large height structures

基于本系统的双角度配置可以有效地对可测范围进行调整。由于测试样品放置在倾斜工作台上,而扫描方向仅由 NMM 进行控制,这使样品姿态与扫描角度在小范围内可以分别进行设定。系统可测范围调整的过程为:首先基于一个基本合适的扫描角度设定倾斜台以及 NMM 扫描参数,然后运行系统并观察条纹的移动方向。当条纹向视场前方运动时,增大垂直扫描步长;当条纹向视场后方运动时,减小垂直扫描步长。通常,仅需要几个纳米的变化便可以将干涉条纹基本定位于视场中心。

综上所述,系统的可测范围主要由 β 决定,而 α 仅用作精细调整。基于本系统,该调整可以以极高的分辨力完成。注意该方法中两个角度间的差别不能过大,否则不但会导致器件远端更快地移出可测范围,也会在调平过程中引入更多误差。

4.5 关于双角度不一致的讨论

在实际测量中 β 和 α 难以做到完全一致,并且在有些情况下,双角度的不一致是必须的。因此,有必要评价双角度差异对测量的影响。

在双角度配置下,从测试表面上的任一点 A 出发对测量结果进行讨论。 A 点的运动过程如图 14 所示。

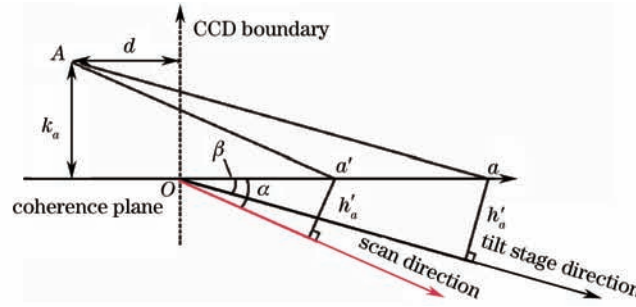


图 14 测试表面上一点 A 的运动过程

Fig.14 Motion of certain point A on the specimen surface

图中 A 点位于 CCD 视场以外,距 CCD 视场的距离为 d ,距干涉物镜相干平面的距离为 k_a 。 a 和 a' 为 A 点沿 β 和 α 方向扫描时所得到的最佳干涉位置, h_a 和 h'_a 为对应的高度信息。以干涉物镜的相干平面和 CCD 视场开始位置建立坐标系, O 为坐标原点, A 点的坐标可以表示为 $(k_a, -d)$ 。以下,按照沿 β 和沿 α 方向对扫描过程分别进行讨论。

1) 扫描沿 β 方向

此时, NMM 的水平扫描步长和垂直扫描步长为 Δy 和 Δz 。设 A 点运动到 a 点需经历 s_a 帧(frame),有以下关系存在

$$k_a - s_a \Delta z = 0, \quad (10)$$

可以计算出 s_a 为

$$s_a = \frac{k_a}{\Delta z}, \quad (11)$$

于是能够得到 a 点的横坐标值为

$$x_a = s_a \times \Delta x - d = \frac{k_a \Delta x}{\Delta z} - d, \quad (12)$$

计算 A 点此时的高度值 h_a 为

$$h_a = x_a \times \sin \beta = \frac{k_a \Delta x \sin \beta}{\Delta z} - d \sin \beta, \quad (13)$$

由于白光扫描干涉术给出的结果是表面形貌的相对高度信息,此处另取与 A 点处于同一数条上同一像素列的 B 点。 A 点与 B 点仅有高度信息不同,则 B 点的坐标为 $(k_b, -d)$ 。由(13)式可以得到 B 点的高度值 h_b 为

$$h_b = \frac{k_b \Delta x \sin \beta}{\Delta z} - d \sin \beta, \quad (14)$$

A 点和 B 点之间的相对高度 Δh_{ab} 为

$$\Delta h_{ab} = h_a - h_b = \frac{\Delta x \sin \beta}{\Delta z} (k_a - k_b). \quad (15)$$

2) 扫描沿 α 方向

改变扫描方向实际上改变了垂直扫描步长,设新的垂直扫描步长为 $\Delta z'$,其与原垂直扫描步长的关系为

$$\Delta z' = t_z \times \Delta z, \quad (16)$$

式中 t_z 为比例系数。同理,由(13)式可以得到此时 A 点和 B 点的表面高度 h'_a 和 h'_b 分别为

$$h'_a = \frac{k_a \Delta x \sin \alpha}{\Delta z'} - d \sin \alpha, \quad (17)$$

$$h'_b = \frac{k_b \Delta x \sin \alpha}{\Delta z'} - d \sin \alpha, \quad (18)$$

相对表面高度 $\Delta h'_{ab}$ 为

$$\Delta h'_{ab} = h_a - h_b = \frac{\Delta x \sin \alpha}{\Delta z'} (k_a - k_b), \quad (19)$$

将(15)式和(19)式对比可以得到

$$\frac{\Delta h_{ab}}{\Delta h'_{ab}} = \frac{\frac{\Delta x \sin \beta}{\Delta z} (k_a - k_b)}{\frac{\Delta x \sin \alpha}{\Delta z'} (k_a - k_b)} = \frac{\frac{\sin \beta}{\Delta z}}{\frac{\sin \alpha}{\Delta z \times t_z}} = \frac{t_z \sin \beta}{\sin \alpha}, \quad (20)$$

为了得到扫描角度之间的关系,将(16)式中的垂直扫描步长转化为水平扫描步长,并考虑到扫描角度很小,可以得到以下关系

$$\Delta x \sin \alpha = \Delta x \sin \beta \times t_z, \quad (21)$$

将(21)式代入(20)式中,得

$$\frac{\Delta h_{ab}}{\Delta h'_{ab}} = \frac{t_z \sin \beta}{\sin \alpha} = 1, \quad (22)$$

(22)式说明,扫描角度的变化并不影响测量结果中每一个横截面的轮廓。

另一方面,如果用(13)式和(17)式相减,将会发现

$$h_a - h'_a = \left(\frac{k_a \Delta x \sin \beta}{\Delta z} - d \sin \beta \right) - \left(\frac{k_a \Delta x \sin \alpha}{\Delta z'} - d \sin \alpha \right) = d(\sin \alpha - \sin \beta), \quad (23)$$

(23)式说明了不同扫描角度下测量结果姿态的变化。随着 α 和 β 间差值的增大,同一个数据点所计算出的高度值将会发生变化,相对于沿 β 方向计算出的结果会更加倾斜。

所以,扫描过程中应始终保持两个角度基本一致。通常情况下,调整的原则为:在小范围内精确控制扫描方向 α 不断趋近倾斜台倾角 β 的精确值。在解决测量过程中局部条纹移除视场现象时,双角度也应在相差很小的范围内调整。

5 测量方法讨论

通过以上分析可以看出,对于非阵列结构的非球面光学元件,当特征尺寸大于干涉物镜视场时,非重叠拼接是一种可行的方案。同时,在测量过程中要保证合理的环境控制,因为测试系统的高精度运动及定位是该方法得以实现的根本前提。另一方面,当测试结构为周期性光学元件时,若需同时测量单个单元的特征尺寸和元件的周期特征,白光倾斜扫描干涉术成为一种可行的测量方法。实际测试过程时需按光学元件的具体特点或所关心的特征尺寸合理选择测量方法。

6 结 论

针对非球面光学元件特点,研究了非接触测量方法。通过控制NMM载物台做小步长运动,评价了环境振动的影响。在环境振动所造成的影响远小于CCD等效像素尺寸时,系统成功实现了无重叠拼接,并分析了直接测量与无重叠拼接测量的误差。针对阵列型非球面光学元件,提出通过白光倾斜扫描干涉术进行测量,并进行了实验验证。着重讨论了扫描过程中所遇到的重要问题——干涉条纹移出视场现象及双角度差异对测量的影响。实验表明,本文所涉及的方法能够有效应用于大范围非球面光学元件的质量评价。

参 考 文 献

- 1 Zhang Bin, Wang Ming, Ma Li. Optical testing technique for aspherical surface[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2003, 25(2): 51-54.
张 斌,王 鸣,马 力. 非球面的光学测试技术[J]. 南昌大学学报(工学版), 2003, 25(2): 51-54.
- 2 Zhang Peng, Zhao Chunzhu, Cui Qingfeng. Design method of an aerial conformal optical window[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622006.
张 鹏,赵春竹,崔庆丰. 航空共形光学窗口的设计方法[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622006.
- 3 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0822001.
巩 盾,田铁印,王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822001.

- 4 Luo Songbao, Zhang Jianming. Ultraprecision machining equipment and technology of aspheric optics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 75–78.
罗松保, 张建明. 非球面曲面光学零件超精密加工装备与技术[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1): 75–78.
- 5 P E Murphy, T G Brown, D T Moore. Interference imaging for aspheric surface testing[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(13): 2122–2129.
- 6 H P Stahl. Aspheric surface testing techniques[C]. *SPIE*, 1990, 1332: 66–76.
- 7 L C Chen, A M Tapilouw. Theoretical simulation and experimental confirmation of duty cycle effect on stroboscopic white light interferometry of M(O)EMS dynamic characterization[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(11): 115008.
- 8 D W Kim, S H Kim, S H Lee, *et al.*. A new method of measuring localized chromatic dispersion of structured nanowaveguide devices using white-light interferometry[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(1): 43–48.
- 9 I Shavrin, L Lipiainen, K Kokkonen, *et al.*. Stroboscopic white-light interferometry of vibrating microstructures[J]. *Opt Express*, 2013, 21(14): 16901–16907.
- 10 A Pacholik, M Mueller, W Fengler, *et al.*. GPU vs FPGA: example application on white light interferometry[C]. 2011 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAS, 2011. 481–486.
- 11 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612003.
- 12 Li Jianxin, Zhu Ronggang, Cui Yanjun, *et al.*. Aspheric surface measurement based on fringe reflection and analysis of system's structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(s1): s112003.
李建欣, 朱荣刚, 崔艳军, 等. 基于条纹反射的非球面测量及系统结构分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(s1): s112003.
- 13 Long Funian, Guo Xiumei, Liu Jianfeng. Technical study for testing of aspheres by using ZYGO interferometer[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(2): 231–233.
龙夫年, 郭秀梅, 刘剑峰. 利用ZYGO干涉仪进行非球面检测技术研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(2): 231–233.
- 14 A Olszak. Lateral scanning white-light interferometry[J]. *Appl Opt*, 2000, 39(22): 3906–3913.
- 15 H Fan, I Reading, Z P Fang. Research on tilted coherent plane white light interferometry for wafer bump 3D inspection [J]. *SIM Tech Tech Rep*, 2006, 7(1): 59–63.
- 16 F Munteanu. Self-calibrating lateral scanning white-light interferometry[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(12): 2371–2375.
- 17 Zhang Huajun, Li Guihua, Liu Cheng, *et al.*. Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1112005.
张华俊, 李桂华, 刘程, 等. 基于SURF特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1112005.
- 18 K Choi, H Choi, S Y Lee, *et al.*. Fingerprint image mosaicking by recursive ridge mapping[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 2007, 37(5): 1191–1203.
- 19 T Hausotte, B Percle, G Jaeger. Advanced three-dimensional scan methods in the nanopositioning and nanomeasuring machine[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(18): 084004.
- 20 Y B Yuan, T V Vorburger, J F Song, *et al.*. A simplified realization for the Gaussian filter in surface metrology[C]. *International Colloquium on Surface*, 2000. 133–144.