红外与激光工程
INFRARED AND LASER ENGINEERING
EI, SCOPUS, CSCD等收录期刊

子孔径拼接和计算全息混合补偿检测大口径凸非球面(特邀)

苏航　王孝坤　程强　李凌众　王晶　李雯研　吴琼　唐瓦　罗霄　张学军

Sub-aperture stiching and CGH mixed compensation for the testing of large convex asphere (*invited*)

Su Hang, Wang Xiaokun, Cheng Qiang, Li Lingzhong, Wang Jing, Li Wenyan, Wu Qiong, Tang Wa, Luo Xiao, Zhang Xuejun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/IRLA20220576

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光学偏折子孔径拼接面形检测技术

Sub-aperture stitching deflectometric testing technology for optical surfaces

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210105　https://doi.org/10.3788/IRLA20210105

平面镜子孔径加权拼接检测算法(特邀)

Subaperture stitching testing to flat mirror based on weighting algorithm (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20210520　https://doi.org/10.3788/IRLA20210520

非零位拼接检测凸非球面金属反射镜

Non-null stitching test convex aspheric metal mirror

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210061　https://doi.org/10.3788/IRLA20210061

夏克哈特曼扫描拼接检测平面镜(特邀)

Shack-Hartmann scanning and stiching detection plane mirror (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20210527　https://doi.org/10.3788/IRLA20210527

基于dOTF的大口径透射光学元件检测技术

Large aperture transmission optical element detection method based on dOTF

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20200358　https://doi.org/10.3788/IRLA20200358

大口径凹椭球面反射镜光轴偏心测量方法

Measurement of optical axis eccentricity of a large-aperture concave ellipsoid mirror

红外与激光工程. 2021, 50(12): 20210196　https://doi.org/10.3788/IRLA20210196

子孔径拼接和计算全息混合补偿检测大口径凸非球面 (特邀)

苏 航[1,2], 王孝坤[1,2*], 程 强[1,2], 李凌众[1,2], 王 晶[1,2],
李雯研[1,2], 吴 琼[1,2], 唐 瓦[1,2], 罗 霄[1,2], 张学军[1,2]

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘 要：为了实现大口径凸非球面的高精度检测,提出了将子孔径拼接检测法和计算全息补偿检测法相结合的检测方法。由于其中心的非球面度较小,采用球面波直接检测;而外圈的非球面度较大,采用子孔径拼接和计算全息混合补偿的方法进行测量,再通过拼接算法将中心检测数据和外圈检测数据进行拼接从而得到全口径面形。结合实例对一块口径为 540 mm 的大口径凸非球面进行测量,并将检测结果与 Luphoscan 检测结果进行对比,两种方法检测面形残差的 RMS 值为 0.019λ,自检验子孔径与拼接结果点对点相减后的 RMS 值为 0.017λ。结果表明该方法能够实现大口径凸非球面的高精度检测。

关键词：光学检测； 大口径凸非球面； 混合补偿； 子孔径拼接检测； 计算全息
中图分类号：O436.1 **文献标志码**：A **DOI**：10.3788/IRLA20220576

Sub-aperture stiching and CGH mixed compensation for the testing of large convex asphere (*invited*)

Su Hang[1,2], Wang Xiaokun[1,2*], Cheng Qiang[1,2], Li Lingzhong[1,2], Wang Jing[1,2],
Li Wenyan[1,2], Wu Qiong[1,2], Tang Wa[1,2], Luo Xiao[1,2], Zhang Xuejun[1,2]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Univesity of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to achieve high-precision testing of large convex asphere, a testing method combining sub-aperture stitching and computer generated hologram compensation is proposed. Because the asphericity of the center is small, the direct testing method of spherical wave is used; while the asphericity of the outer ring is large, the method of sub-aperture stitching and computer generated hologram (CGH) mixed compensation is used for measurement. Then, the center testing data and the outer ring testing data are stitched by the stitching algorithm to obtain the full-aperture surface shape. Combined with an example, a large convex asphere with a diameter of 540 mm is measured. The test results were compared with the Luphoscan testing results. The residual error of the two methods to test the RMS value of the surface is 0.019λ, and RMS value after subtracting the self-test aperture and stitching result point-to-point is 0.017λ. The results show that the method can achieve high-precision testing of large convex asphere.

Key words: optical testing; large convex asphere; mixed compensation; sub-aperture stitching testing; computer generated hologram

收稿日期:2022-08-16; **修订日期**:2022-09-01

基金项目:吉林省重点研发计划 (20200401065GX); 国家自然科学基金 (62127901); 中国科学院大学生创新实践训练计划项目 (Y91838S)

作者简介:苏航, 女, 硕士生, 主要从事光学检测技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介:王孝坤, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学制造与测试技术方面的研究。

0 引 言

在光学系统中,非球面光学元件拥有更多的设计自由度,因此可以满足更复杂的设计要求。引入非球面元件能够扩大视场角度和提高分辨率,从而改善成像质量,且在针对相同的性能指标条件下,非球面的使用能够减少元件的数量从而降低系统的复杂程度。因此,非球面反射镜被越来越多地应用于空间光学、天文光学、军事国防以及高科技民用等领域[1]。例如,早在 20 世纪 80 年代,美国陆军的光学设备所采用的非球面元件就已经多达 23.46 万件[2]。在空间对地观察以及天文观测领域,对光学成像系统的分辨率提出了更高的要求,因此光学元件的口径也随之增大。例如,已发射的詹姆斯-韦伯空间望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST) 的次镜采用的是凸非球面,口径达到了 738 mm[3−4]。现如今,大口径凸非球面镜越来越多的应用于空间光学技术,其面形精度要求越来越高,因此对高精度面形检测技术也提出了更高的要求[5]。

传统的凸非球面检测方法包括轮廓测量法、无像差点测量法、补偿测量法以及子孔径拼接检测法等。轮廓检测法[6] 分为接触式和非接触式,接触式检测口径有限,检测时间长,检测精度受限,一般适用于研磨阶段;非接触式检测口径受限,测量时间长,运动误差累积;无像差法[7] 利用二次曲面的一对共轭的无像差点,完成对抛物面、双曲面及椭球面的测量,但其只适用于二次曲面,在检测大口径非球面时往往需要更大口径的 Hindle 球或者辅助平面镜,并且在测量过程中会存在中心遮挡问题;单独使用补偿元件进行全口径面形检测[8],需制作比待测镜口径大且含有与其匹配的非球面补偿透镜,高陡度偏离量大的大口径非球面需要高刻画密度的计算全息元件 (Computer generated hologram, CGH),无论是补偿透镜或者是 CGH,制作难度和成本都很高,装调和检测难度大;对于中小口径的凸非球面,子孔径拼接法[9−10] 简单方便且精度较高,例如 2003 年美国 QED 公司研发的子孔径拼接干涉仪[11],可对平面、球面以及 200 mm 以下的非球面实现检测,然而在应对大口径凸非球面的面形检测中,单独使用拼接检测会使得子孔径的数目繁多,增加了数据处理的难度和检测的时间,更重要的是加剧了误差的传递,使得拼接检测的精度受限[12]。因此可以看出,传统的凸非球面检测方法在测量大口径凸非球面镜时存在一定的局限性。

文中提出了将子孔径拼接法和 CGH 补偿法相结合对大口径凸非球面镜进行检测的方法。其中由于大口径凸非球面中心的非球面度较小,可直接用干涉仪进行检测;而外圈非球面较大,需采用 CGH 补偿的方法进行测量,最后将中心和外圈的检测数据利用子孔径拼接算法拼接得到全口径面形。该方法通过 CGH 补偿法扩大测量的口径范围,从而增大规划的子孔径大小,达到减少子孔径个数的目的;同时能够使用较小尺寸的 CGH 进行测量。因此,该方法不仅能够减少误差的传递,提高检测的效率,而且还降低了检测成本。

1 CGH 结合子孔径拼接检测原理

检测大口径凸非球面中心时,由于中心非球面度较小,采用非零位检测的方法,用干涉仪直接进行测量,通过标准镜将干涉仪出射的平面波转化为球面波,近似沿法线方向入射到被检面上,光线近似原路返回;检测其边缘时,由于其偏离量较大,采用零位检测的方法,利用 CGH 补偿元件,将干涉仪出射的波前转换为与被检非球面的理论形状一致的非球面波,光线沿法线入射并原路返回,与参考波面形成干涉条纹。最后,利用综合优化的子孔径拼接算法进行 全口径拼接计算,即可获得大口径凸球面全口径的面形误差分布。检测流程如图 1 所示。

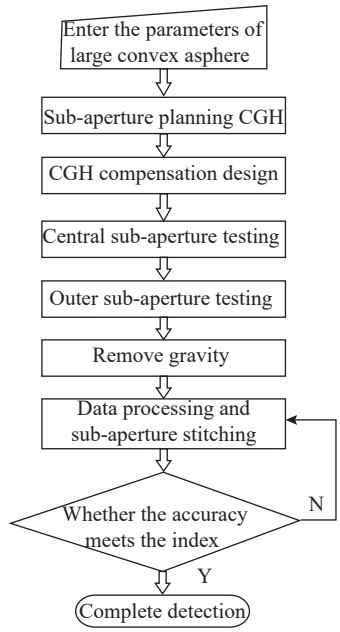


图 1 混合补偿法检测大口径凸非球面流程

Fig.1 Mixed compensation method for the testing of large convex asphere processes

1.1 子孔径规划

在规划子孔径大小的过程中，要保证规划的子孔径能够对全面形口径实现覆盖，各相邻子孔径的重叠区域面积一般大于子孔径面积的 1/4[13−14]。

在中心子孔径的测量过程中应选取适当的标准镜用干涉仪直接检测。选取标准镜时，应满足 $F^{\#}\geqslant R^{\#}$，$f>R$ ($F^{\#}=f/D$, $R^{\#}=R/d$)，其中 $F^{\#}$为标准镜的 F 数，$R^{\#}$为中心子孔径的 R 数，f 为标准镜焦距，D 为标准镜口径，R 为中心子孔径顶点的曲率半径，d 为中心子孔径口径。根据光斑大小确定中心子孔径的大小。

而外圈子孔径的大小取决于 CGH 的设计，根据 CGH 主区域的大小以及其与被检镜之间的距离，通过光线追迹的方式得到被检镜上的光斑大小，从而确定外圈子孔径的大小；再根据子孔径规划的原理确定外圈子孔径的个数。

1.2 中心子孔径测量

干涉仪直接测量大口径凸非球面中心的示意图如图 2 所示，它由干涉仪、标准球面镜、待测大口径凸非球面以及调整机构组成。干涉仪对准被检镜中心，直接测量获得中心子孔径的面形相位。

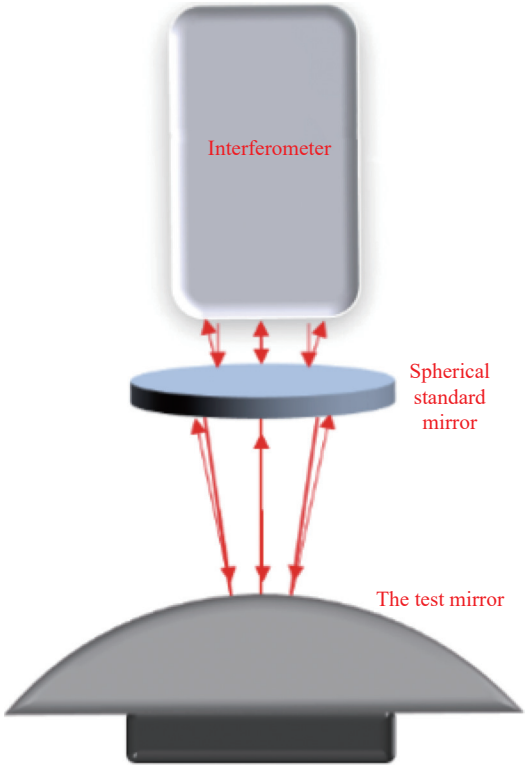


图 2 干涉仪检测中心子孔径示意图

Fig.2 Schematic diagram of the interferometer testing of the center sub-aperture

1.3 CGH 设计原理

根据待测大口径凸非球面的参数设计外圈子孔径所需的 CGH。CGH 一般分为三个区域[15−16]：主区域即检测区域，用于检测被检镜的面形；对准区域用于干涉仪和 CGH 之间的对准；基准区域用于 CGH 和被检镜之间的对准。设计主区域时，应使检测光路沿原路返回，直到波像差最小，其衍射图样条纹密度应满足现有的 CGH 加工工艺制作条件。

1.4 外圈子孔径测量

用 CGH 补偿法检测外圈的示意图如图 3 所示，由干涉仪、CGH、待检镜及调整装置组成。固定 CGH 的位置，通过旋转调整装置来实现对待检镜外圈不同子孔径的检测。

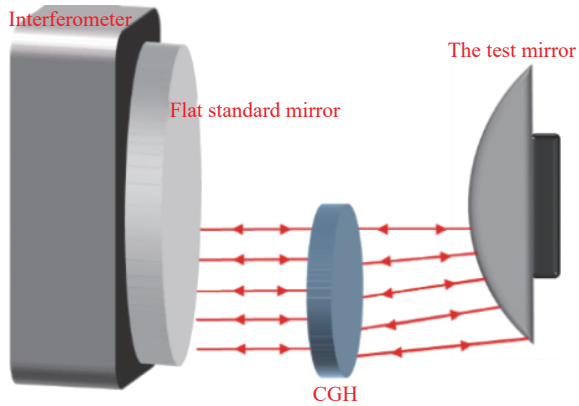


图 3 CGH 检测外圈子孔径示意图

Fig.3 Schematic diagram of CGH testing of the outer sub-aperture

1.5 子孔径拼接算法

测量中心子孔径时，由于是球面标准镜直接检测非球面，因此入射光线并不是沿法线入射到被检非球面，这时会引入相应的非共路误差。这部分误差是由非球面与最接近球面之间的偏差引起的，由二者法向相减后得到，并在拼接算法中去除。

在拼接外圈子孔径的过程中，各子孔径之间有存在着一定的重叠区域，通过其相位数据求解相邻子孔径之间的相对误差。由于外圈子孔径采用的是零位检测的方式，因此子孔径之间的相对失调量会引起平移、倾斜和离焦。在多个子孔径进行拼接的过程中，为了便于定位和测量，选定其中一个子孔径作为基准，该子孔径即为基准子孔径。假设基准子孔径的相位分布为w_0，则其他子孔径相位分布与其关系为：

$$w_0 = w_1 + p_1 + a_1x_1 + b_1y_1 + c_1(x_1^2 + y_1^2) = w_2 + p_2 + a_2x_2 + b_2y_2 + c_2(x_2^2 + y_2^2)\cdots = w_{M-1} + p_{M-1} + a_{M-1}x_{M-1} + b_{M-1}y_{M-1} + c_{M-1}(x_{M-1}^2 + y_{M-1}^2) \tag{1}$$

式中：a_i、b_i、c_i和p_i分别为轴外子孔径相对基准子孔径沿 x、y 方向的倾斜系数、离焦系数和平移系数。再利用最小二乘拟合，使重叠区域相位差的平方和值最小[17]。可得：

$$S = \sum_{i=1}^{n}[w_1 + a_1x + b_1y + c_1(x^2 + y^2) + p_1 - w_0]^2 + \sum_{j=1}^{M-2}\sum_{i=1}^{n}\{[w_{j+1} + a_{j+1}x + b_{j+1}y + c_{j+1}(x^2 + y^2) + p_{j+1}] - [w_j + a_jx + b_jy + c_j(x^2 + y^2) + p_j]\}^2 = \min \tag{2}$$

利用最小二乘法对各个系数分别求偏导并令其值为零，可得：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial a_j} = 0 \\ \dfrac{\partial S}{\partial b_j} = 0 \\ \dfrac{\partial S}{\partial c_j} = 0 \\ \dfrac{\partial S}{\partial p_j} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

得到各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接因子，从而消除调整误差，完成拼接[15]。

2 基于计算全息的拼接检测实验设计分析

为了证明 CGH 补偿法和拼接检测法相结合的检测方法的可行性，结合具体实例设计了仿真实验。待检镜的参数为：直径 D=538 mm，顶点曲率半径 r=1 371.905 mm，二次曲线常数 k=−1.588 687。

2.1 大口径凸非球面反射镜非球面度计算

根据待检镜的参数计算大口径凸非球面镜的非球面度[1]，结果如图 4 和图 5 所示，其最接近球面曲率半径为 1 387.570 mm，非球面度为 66 μm。

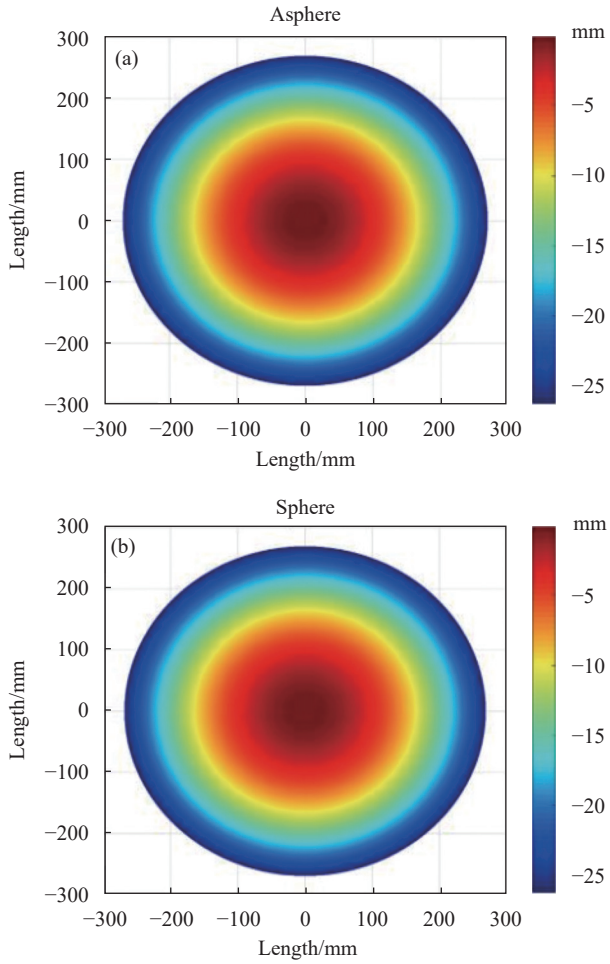


图 4 (a) 理想大口径凸非球面矢高分布示意图；(b) 最接近球面矢高分布示意图

Fig.4 (a) Schematic diagram of the high distribution of ideal large convex asphere; (b) Schematic diagram of the height distribution of the best fitting sphere

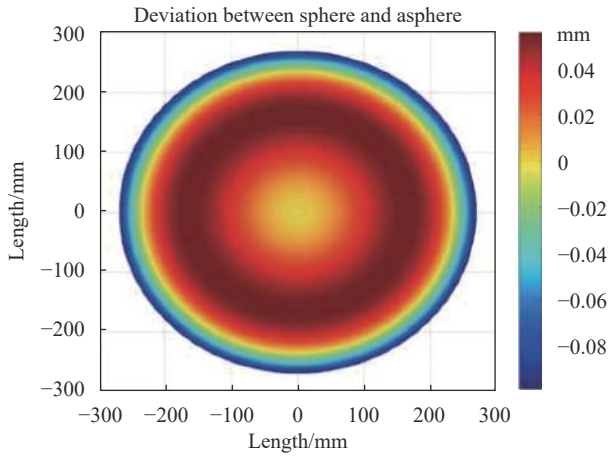


图 5 理想非球面与最接近球面的偏差

Fig.5 Deviation between the ideal asphere and the best fitting sphere

2.2 子孔径规划方案

根据前文的子孔径规划原理，设计出如图 6 所示的规划方案。中心子孔径大小为 $r/F^{\#}$，计算得 124.7 mm，外圈子孔径的大小为 245 mm；外圈子孔径的中心与待检镜中心的距离为 168 mm。

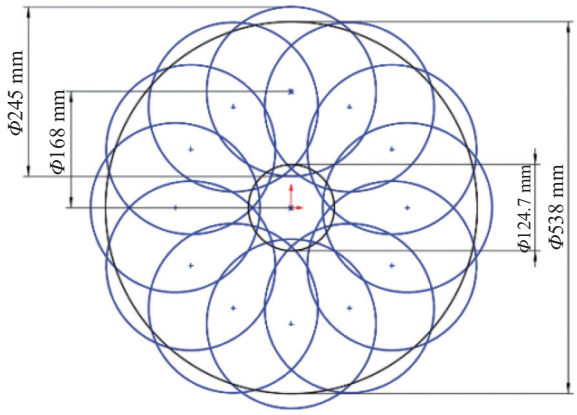
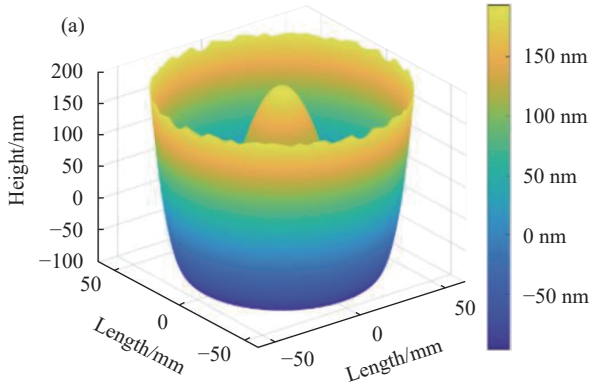


图 6 子孔径规划示意图

Fig.6 Schematic diagram of sub-aperture planning

2.3 中心及外圈子孔径非球面度计算

根据子孔径规划分别计算中心及外圈子孔径的最接近球面曲率半径和非球面度。如图 7 所示，中心子孔径的最接近球面曲率半径为 1 373 mm，非球面度为 193.721 9 nm；外圈子孔径的最接近球面曲率半径为 1 403 mm，非球面度为 $6.621\,2\times10^4$ nm。根据计算结果可知，中心子孔径的非球面度较小，可直接进行检测，不需要补偿。外圈子孔径非球面度较大，因此其干涉条纹密度较大从而超过干涉仪 CCD 相机分辨率的极限，需要通过补偿法降低条纹密度实现检测。



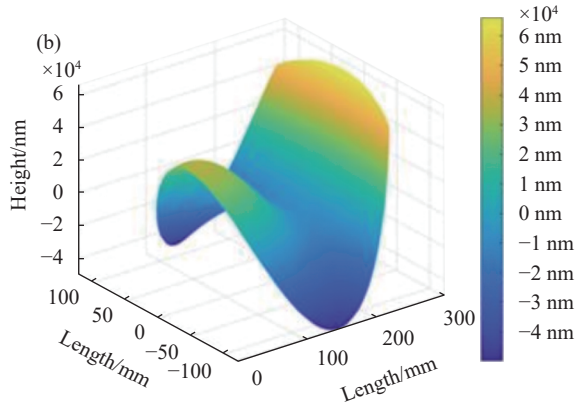


图 7 (a) 中心子孔径偏离量；(b) 外圈子孔径偏离量

Fig.7 (a) Central sub-aperture deviation; (b) Outer sub-aperture deviation

2.4 子孔径零位补偿检测 CGH 设计分析

CGH 主区域光路如图 8 所示，将 CGH 靠近待检镜的面设置成为 Zernike Fringe Phase，主区域的主衍射级次设为+1 级，为减少 CGH 基板对检测条纹产生的影响，在视场中的 y 方向加入 5 mm 的载频；将 Zernike 前 37 项中的前三项设为 0，其他项设为变量对 CGH 衍射图样进行优化，使得反射光线沿原路返回，波前像差的值达到最小，此时的 Zernike 系数则为 CGH 的设计参数。

优化后所得的波前图如图 9 所示，其 PV=0.000 1λ，

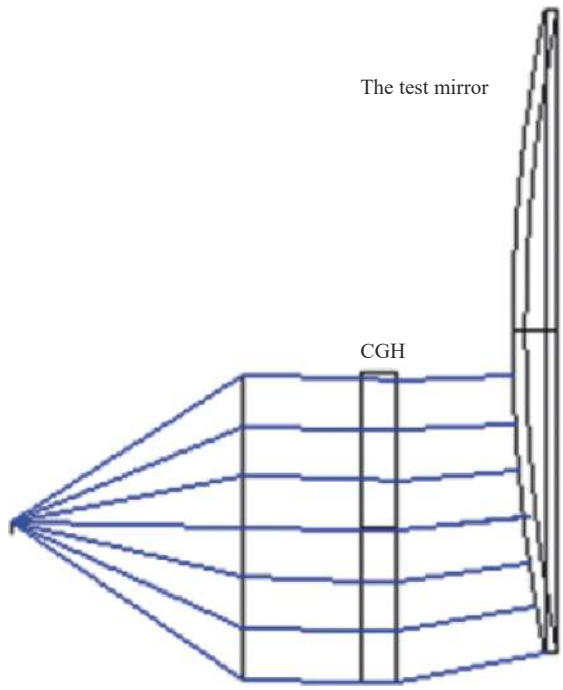


图 8 CGH 主区域设计光路图

Fig.8 Designed light path diagram of CGH main area

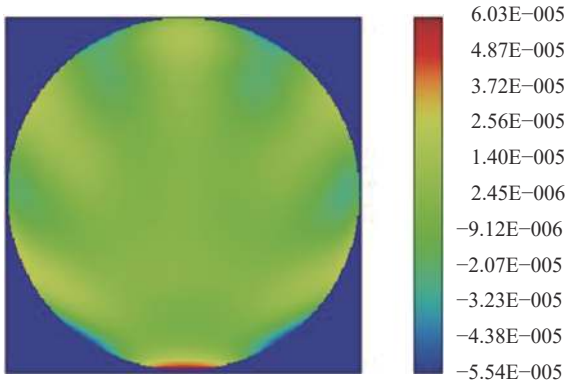


图 9 CGH 主区域检测波前

Fig.9 CGH main area testing wavefront

RMS=0.000 0λ, 可以看出设计残差非常小, 可以忽略。

3 检测实验

3.1 中心子孔径检测

按照干涉仪检测中心子孔径示意图搭建光路, 安装 $F^{\#}$11 标准镜, 调整标准镜与干涉仪之间的位姿, 使反射光沿原路返回。检测光路如图 10 所示。

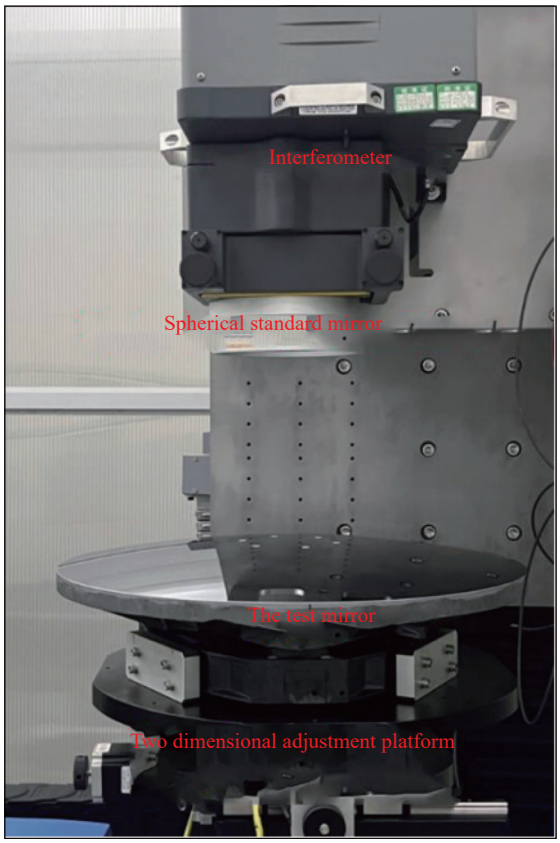


图 10 中心子孔径检测光路

Fig.10 Central sub-aperture testing optical path

在待检镜安装完毕后, 通过调整干涉仪的三位精密调整架来实现 x、y、z 方向的平动以及待检镜所在的二维精密转台的俯仰和扭摆来调节标准镜和被检镜中心子孔径之间的位置, 直至干涉条纹最少。将中心子孔径非球面与其最接近球面法线相减得到非共路误差, 再用干涉仪检测得到的结果减去非共路误差, 从而得到中心子孔径的面形结果。

如图 11 所示, 中心子孔径检测到的最终面形结果为 *PV*=0.515λ, *RMS*=0.047λ。

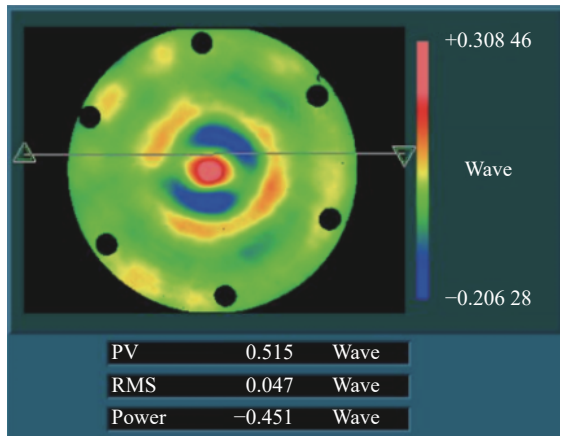


图 11 中心子孔径检测结果

Fig.11 Central sub-aperture testing result

3.2 外圈子孔径检测

检测外圈时由于非球面度较大, 需要通过 CGH 补偿法进行检测。检测光路如图 12 所示。

图 12 外圈子孔径检测光路

Fig.12 Outer sub-aperture testing optical path

首先调整 CGH 与干涉仪间的位姿, 利用 CGH 的基准区域将其与干涉仪对准, 使得基准区域的条纹数

最少。再通过调整架上 x、y、z 轴的平移、俯仰和扭摆来调整待检镜，利用 CGH 的对准区域调整 CGH 与待检镜之间的位姿至检测条纹最少。外圈子孔径检测结果如图 13 所示。

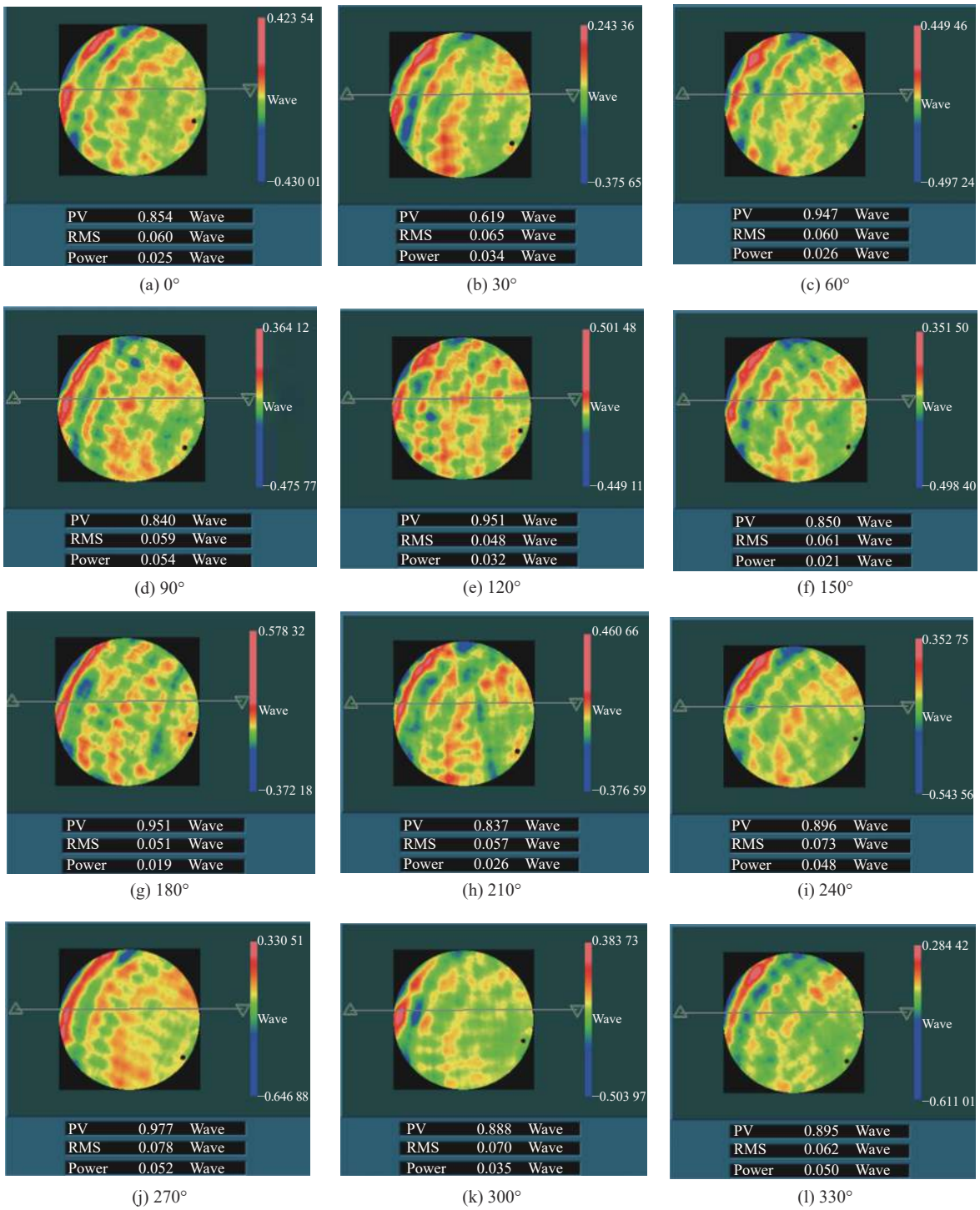


图 13 外圈子孔径检测结果

Fig.13 Outer sub-aperture testing result

3.3 全口径拼接

利用拼接算法得到的全口径面形如图 14 所示，其 PV=0.954λ, RMS=0.070λ。

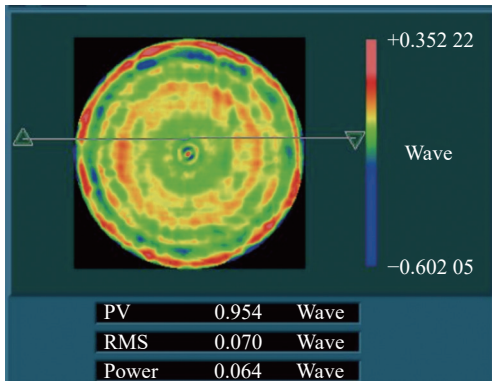


图 14 子孔径拼接结果

Fig.14 Sub-aperture stitching result

3.4 自检验精度分析

为了检验拼接结果的精度，额外对被检镜的一个子孔径进行测量。该子孔径为自检验子孔径，将拼接结果与自检验子孔径的检测结果进行点对点相减，获得相应残差图。其中自检验子孔径的结果如图 15 所示。

点对点相减得到的残差图如图 16 所示。

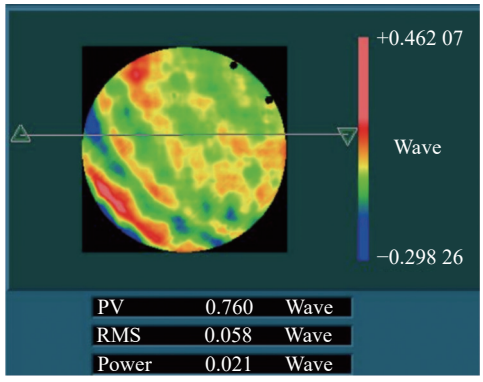


图 15 自检验子孔径检测结果

Fig.15 Self-testing aperture result

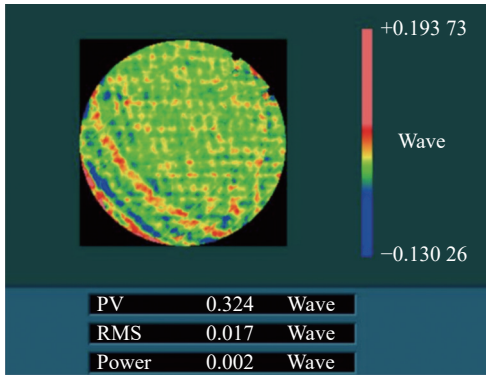


图 16 子孔径与拼接结果残差图

Fig.16 Residual map between self-testing aperture result and stitching result

由图 16 可以看出，残差图的 PV=0.324λ, RMS=0.017λ，验证了拼接方法的可行性。

3.5 全口径面形检测

为验证该检测方法的准确性，利用纳米轮廓仪 Luphoscan 对待检镜进行全口径面形检测，结果如图 17 所示，其 PV=0.724λ, RMS=0.074λ。

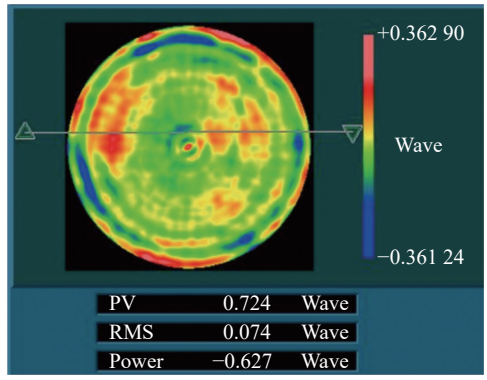


图 17 Luphoscan 检测结果

Fig.17 Luphoscan testing result

将两种检测结果进行对比，其绝对偏差值为 PV=0.230λ, RMS=0.004λ，拼接得到的结果相对于 Luphoscan 检测结果的残差 (点对点相减) 如图 18 所示，PV=0.291λ, RMS=0.019λ。从而验证了该检测方法能够实现对大口径凸非球面的高精度检测。

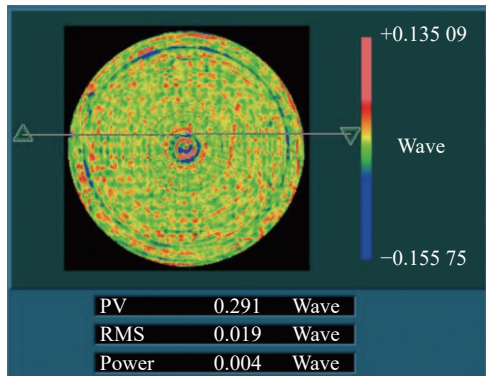


图 18 拼接结果与 Luphoscan 检测结果残差图

Fig.18 Residual map between stitching result and Luphoscan testing result

4 结 论

文中采用零位检测和非零位检测方法结合的手段，利用子孔径拼接获得全口径面形，从而实现对大口径凸非球面的高精度检测。分别对中心子孔径和

外圈子孔径采用干涉仪直接检测法和 CGH 补偿法进行测量，并结合实例对一口径为 540 mm 的大口径凸非球面进行检测。该方法与 Luphoscan 检测结果对比，其点对点相减的残差 RMS 值为 0.019λ，满足了大口径凸非球面检测的要求。该方法具备减小补偿元件尺寸、减少子孔径拼接个数等优点，为大口径凸非球面的高精度检测提供了一种可行的方法。

参考文献：

[1] Liu Fengwei, Wu Yongqian, Chen Qiang, et al. Overview of advanced manufacturing technology of large-aperture aspheric mirror [J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2020, 47(10): 200203. (in Chinese)

[2] Xin Q M. Manufacturing Technology of Plastic Aspheric Lens[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)

[3] Gardner J P. The james webb space telescope [C]//Proceedings of Science, 2007, 2(14): 522-523.

[4] Marini E, Dell'Agli F, Groenewegen M A T, et al. Understanding the evolution and dust formation of carbon stars in the large magellanic cloud via the JWST [J]. ***Astronomy & Astrophysics***, 2021, 647: A69.

[5] Wang Xiaokun, Qi Erhui, Hu Haixiang, et al. Optical testing of the super-large plane mirror (*Invited*) [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2022, 51(1): 20210953. (in Chinese)

[6] Wei T. Research of asphere testing using annular sub-aperture stitching method and a high-precision way to locate asphere[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)

[7] Abdulkadyrov M A, Belousov S P, Pridnya V V, et al. Optimizing the shaping technology and test methods for convex aspheric surfaces of large optical items [J]. ***Journal of Optical Technology***, 2013, 80(4): 219-225.

[8] Xue S, Chen S, Tie G. Near-null interferometry using an aspheric null lens generating a broad range of variable spherical aberration for flexible test of aspheres [J]. ***Optics Express***, 2018, 26(24): 31172-31189.

[9] Cai Zhihua, Wang Xiaokun, Hu Haixiang, et al. Non-null stitching test convex aspheric metal mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2021, 50(11): 20210061. (in Chinese)

[10] Chen W, Chen S, Tie G, et al. Null test of large convex aspheres by subaperture stitching with replaceable holograms [J]. ***Optics Communications***, 2020, 466: 125665.

[11] Murphy P, Forbes G, Fleig J, et al. Stitching interferometry: A flexible solution for surface metrology [J]. ***Optics and Photonics News***, 2003, 14(5): 38-43.

[12] Yan Gongjing, Zhang Xianzhong. Technology of sub-aperture stitching testing optical convex spherical mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(5): 0517002. (in Chinese)

[13] Yan F, Fan B, Hou X, et al. Testing convex hyperbolic mirrors with two or more annuluses by Hindle and stitching methods [J]. ***Optics and Lasers in Engineering***, 2014, 61: 52-56.

[14] Chen S, Xue S, Dai Y, et al. Subaperture stitching test of convex aspheres by using the reconfigurable optical null [J]. ***Optics & Laser Technology***, 2017, 91: 175-184.

[15] Yoshikawa N, Itoh M, Yatagai T. Binary computer-generated holograms for security applications from a synthetic double-exposure method by electron-beam lithography [J]. ***Optics Letters***, 1998, 23(18): 1483-1485.

[16] 谢念. 基于计算全息光学元件的非球面检测技术应用研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2015.

[17] Wang Xiaokun, Wang Lihui, Zheng Ligong, et al. Application of subaperture stitching technology to test of large and steep aspherical surface [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2007, 19(7): 1144-1148. (in Chinese)