

基于混合补偿检测-离轴抛物面的方法

张宪忠 闫公敬

齐齐哈尔大学应用技术学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161000

摘要 为了解决大口径大偏离量非球面高精度检测问题,提出子孔径拼接与补偿器混合补偿检测模型。在被检测非球面镜面形精度未达到干涉仪测量动态范围要求,同时轮廓测量精度不能满足后续加工要求时,该模型可以实现对被检测镜的高分辨率检测,为后续加工提供指导。为了验证模型的可行性,结合工程实例,对口径为1450 mm的离轴抛物面镜进行了混合补偿检测,为了评价混合补偿检测精度,将混合补偿检测结果与子孔径检测结果进行了对比分析,其残差的峰谷值与均方根值分别为 0.030λ 与 0.003λ ,验证了该模型的精度与可行性。

关键词 光学设计;干涉测量;孔径拼接;补偿器;离轴抛物面

中图分类号 O439; O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.121203

Method of Hybrid Compensation Detection-off-Axis Parabolic Mirror

Zhang Xianzhong Yan Gongjing

Institution of Applied Technology, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161000, China

Abstract To accomplish the high-precision testing of aspherical mirror with large aperture and deviation, a hybrid compensation detection model combining subaperture stitching with compensator is proposed. The model can realize high resolution detection of the detected mirror and provide guidance for subsequent processing when the accuracy of the mirror is not high enough to be achieved by the dynamic range of the interferometer. At the same time, it's beyond the testing accuracy of the profile measurement. To evaluate the validity of the proposed model, a 1450 mm off-axis parabolic mirror with the hybrid compensation method is tested. To evaluate the testing accuracy, the testing result with the subaperture testing result is compared. The peak and valley value and root square value of the residual between them is 0.030λ and 0.003λ respectively, verifying the accuracy and validity of the model.

Key words optical design; interferometry; subaperture stitching; compensator; off-axis parabolic mirror

OCIS codes 220.1250; 220.1000; 220.4610

1 引言

大口径非球面是高分辨率空间对地观测、深空探测和天文观测系统的核心元件,其制造技术水平对国家的国防安全、国民经济建设、基础科研能力和防灾减灾具有重要意义,也是衡量国家高性能光学系统研制水平的重要标志。与传统的球面光学元件相比,非球面具有很高的加工、检测难度。

补偿器作为一种比较成熟的检测器件,广泛应用于非球面检测中^[1-4]。在干涉检验中一般采用 offner 双次通过型补偿器。在补偿检验时,光源可采用平行光或者会聚光,采用会聚光在检验时会给调整带来很大困难,使得干涉仪和补偿器位置对准困难,而使用平行光时,干涉仪和补偿器对准容易。当利用补偿器直接对离轴非球面镜进行检测时,若被检测非球面镜面形精度不高,并不能完全被干涉仪检测到,则检测结果与实际面形结果通常会存在较大偏差,尤其对于远离光轴的镜面位置,其检测畸变较大,CCD 中单个像素点对应镜面检测面积大于近轴区域像素点所对应检测面积,该区域检测结果的缺失会延缓后续加工收敛速度。

子孔径拼接检测技术作为一种通用的以小检大的检测方式,可以有效地提高检测分辨率,增大测量动态范

收稿日期: 2016-08-25; 收到修改稿日期: 2016-08-30; 网络出版日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)、国家高技术研究发展计划(O8663NJ090)

作者简介: 张宪忠(1962—),男,硕士,教授,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: zhang_xian_zhong@163.com

围。该方法于1982年由亚利桑那大学的Kim^[5]提出,国外QED公司对其进行了比较深入的研究,并于2003年研制出了子孔径拼接测量仪,能够实现对200 mm以内口径的平面、球面及适度偏离量的非球面的拼接检测^[6],同时可变光学补偿器(VON)技术与子孔径拼接技术相结合的方式对偏离量 1000λ 以内的凸非球面镜完成了非零位补偿拼接检测^[7-8],国内对拼接检测技术的研究主要还停留在拼接算法上,其中中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、国防科技大学、浙江大学、中国科学院光电技术研究所都对其进行了一定的研究^[7,9-12]。

为了解决在非球面光学反射镜面形精度不高,未达到干涉仪检测动态范围,检测精度不能达到后续加工精度需求时,需要对非球面反射镜进行高精度检测的问题,本文将补偿器补偿检测技术与子孔径拼接检测技术相结合,实现对被检测非球面镜的混合补偿检测。该方法有效地提高了检测分辨率,同时基于该混合补偿检测方式对口径为1450 mm的离轴抛物面镜进行了混合补偿检测,验证了该方法的精度与可行性。

2 混合补偿模型

子孔径拼接与补偿器结合的混合补偿模型流程图如图1所示。

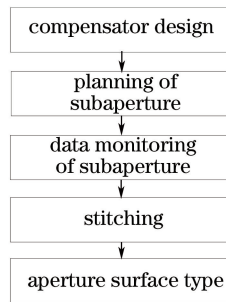


图1 混合补偿流程图

Fig. 1 Flow chart of hybrid compensation

基于非球面参数设计补偿器,在检测时对非球面进行检测子孔径规划,规划时需要各子孔径对被检测非球面镜完成全口径覆盖,同时各相邻子孔径间具有一定比例的重叠面积。通过对各子孔径进行干涉检测,从而得到各子孔径检测数据。

假设检测子孔径数目为 N ,以第 N 个子孔径检测坐标系为全局坐标系,则第 i 个子孔径检测结果在该坐标系内可以表示为^[13]

$$z'_i(x, y) = z_i(x, y) + \sum_{k=1}^L F_{ik} f_k(x, y), \quad (1)$$

式中 $z_i(x, y)$ 为第 i 个子孔径检测结果, $f_k(x, y)$ 为调整项, F_{ik} 为第 i 个子孔径各调整项系数。

对于补偿器与拼接结合的混合补偿检测,

$$\begin{cases} F_{i1} = x \\ F_{i2} = y \\ F_{i3} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

通过最小二乘拟合,得到最小值即可得到各子孔径相对于基准子孔径的调整系数,即

$$V_{\min} = \sum_{i=1, \dots, N} \sum_{j=1, \dots, N}^{j \cap i} \left\{ \left[z_i(x, y) + \sum_{k=1}^L F_{ik} f_k(x, y) \right] - \left[z_j(x, y) + \sum_{k=1}^L F_{jk} f_k(x, y) \right] \right\}^2. \quad (3)$$

(3)式可以写成矩阵形式为

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{R}, \quad (4)$$

式中对于第 i 个子孔径,其对应的拟合系数为 $L \times 1$ 阶向量,记其第 k 行元素为 F_{ik} ,则

$$\mathbf{R}_i[k] = F_{ik}. \quad (5)$$

同理,对于任意两个检测子孔径 i, j ,建立 $L \times 1$ 阶向量 \mathbf{P}_{ij} 及 $L \times L$ 阶方阵 \mathbf{Q}_{ij} ,

$$\mathbf{P}_{ij}[k] = \sum_{i \cap j} f_k(x, y) [Z_i(x, y) - Z_j(x, y)], \quad (6)$$

$$Q_{ij}(m, n) = \begin{cases} \sum_{i \cap j} f_m(x, y) f_n(x, y), & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (7)$$

这里借用 Matlab 中 Cell 矩阵的概念, 则对应(4)式的 \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 可以写为如下形式:

\mathbf{P} 为一个 $(N-1) \times 1$ 阶 Cell 矩阵,

$$\mathbf{P}\{i, 1\} = \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{ij}, \quad (8)$$

\mathbf{Q} 为一个 $(N-1) \times (N-1)$ 阶 Cell 矩阵,

$$Q\{i, j\} = -\delta_{ij} \sum_{k=1}^N Q_{ik} + Q_{ij}, \quad (9)$$

式中

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (10)$$

\mathbf{R} 是一个 $(N-1) \times 1$ 阶 Cell 矩阵,

$$\mathbf{R}\{i, 1\} = \mathbf{R}_i. \quad (11)$$

通过求解(4)式即可求得矩阵 \mathbf{R} , 而后将各子孔径相对全局坐标系的调整项去掉即可得到全口径检测面形。

3 实验验证

为了验证本文模型的可行性, 结合工程实例, 对口径为 1450 mm 的离轴抛物面进行了混合补偿检测, 实验装置图如图 2 所示。



图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

实验中, 共检测了三个子孔径(上、中、下), 其子孔径检测结果如图 3 所示。

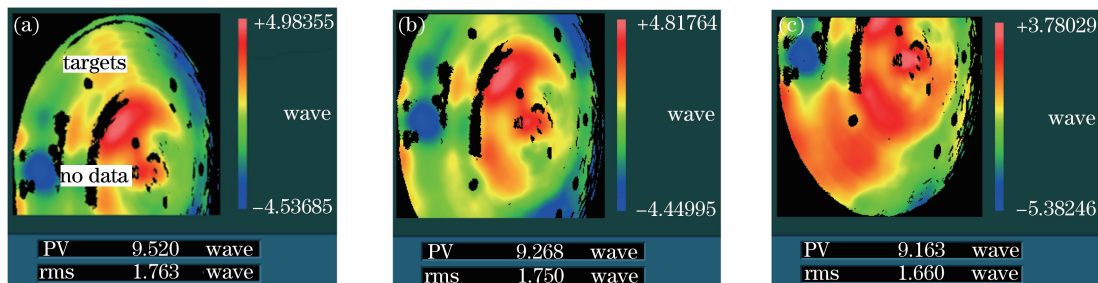


图 3 子孔径检测结果

Fig. 3 Testing maps of subaperture

检测结果中黑色圆形部分为靶标点检测结果[图 3(a)中所标注 targets 位置], 靶标处检测结果为 no data 数据类型, 即该处无检测结果; 检测结果中黑色长带部分[图 3(a)中所标注 no data 位置]为干涉仪未测出区域, 由于此时被检测镜面形结果并不好[子孔径峰谷(PV)值约为 9.5λ], 面形数据并不能完全被干涉仪

检测到,故在干涉仪检测数据中会出现黑色长带等检测结果。基于本文所述算法模型,拼接后得到的全口径面形结果如图 4 所示。

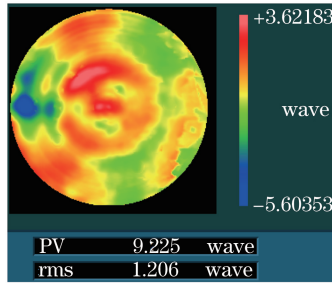


图 4 子孔径拼接结果

Fig. 4 Subaperture stitching result

利用本文模型获得检测结果,并对其进行了后续加工,分别给出一轮加工及两轮加工后该镜检测结果如图 5、图 6 所示。

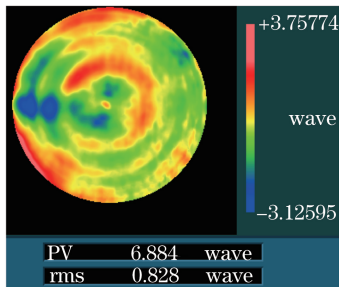


图 5 一轮加工后检测结果

Fig. 5 Testing map after once processing

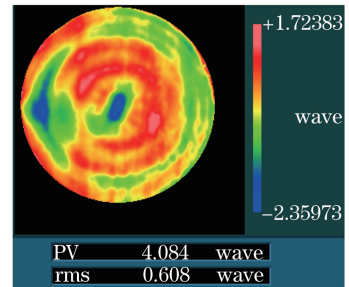


图 6 两轮加工后检测结果

Fig. 6 Testing map after twice processing

由图 5、图 6 的检测结果可以看出,该方法可以有效地使加工面形收敛,基于该模型可以对后续加工提供指导。为了进一步评价拼接检测精度,在检测中采取自检验评价法^[14]。自检验法即在检测中选取一个用于评价检测精度的自检验子孔径,如图 7 所示,将该子孔径检测结果与拼接结果进行对比,得到残差图如图 8 所示。

由图 8 可以看出,其残差的 PV 与均方根(RMS)值分别为 0.030λ 与 0.003λ ,验证了该模型的检测精度。

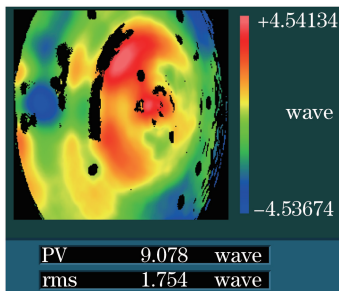


图 7 自检验子孔径检测结果

Fig. 7 Testing map of self-test subaperture

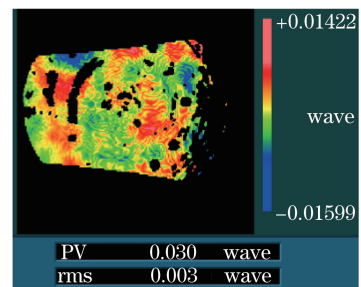


图 8 残差图

Fig. 8 Residual map

4 结 论

对补偿器与子孔径拼接相结合的混合补偿检测技术进行了研究,该方法可以在非球面面形精度不高的情况下有效地拓宽干涉仪测试的动态范围,为后续非球面镜的加工提供指导。为了验证该方法的精度及有效性,结合工程实例对一口径为 1450 mm 的离轴抛物面镜进行了混合补偿检测,基于该方法得到的镜面检测结果可以很好地指导镜面的后续加工,在经过两轮加工后,镜面的 PV 及 RMS 分别从 9.225λ 及 1.206λ

收敛到 4.084λ 及 0.608λ , 验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 Guo P, Yu J. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror[C]. SPIE, 2006, 6150: 61502N.
- 2 Sasian J M, Lerner S A, Burge J H, *et al.* Design, tolerancing and certification of a null corrector to test 8.4 meter mirrors[C]. SPIE, 1999: 3739: 444-448.
- 3 Morate A, Servin M, Malacara D. Axial tolerance in the position of aberration compensators placed in a converging beam [J]. Appl Opt, 1996, 35(10): 1590-1592.
- 4 Zhang Y, Wu Y, Fan B. Theoretical and experimental study of a catadioptric compensator for an aspheric surface[J]. Appl Opt, 2013, 52(27): 6834-6839.
- 5 Kim C J. Polynomial fit of interferograms[J]. Appl Opt, 1982, 21(24): 4521-4525.
- 6 Paul M, Jon F, Greg F. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres[C]. SPIE, 2006, 6293: 62930J.
- 7 Chen S, Li S, Dai Y, *et al.* Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. Opt Express, 2008, 16(7): 4760-4765.
- 8 Kulawiec A, Murphy P, DeMarco M. Measurement of high-departure aspheres using subaperture stitching with the variable optical null (VONTM)[C]. SPIE, 2010, 7655: 765512.
- 9 Wang X. Subaperture stitching testing of an aspherical surface[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s108002.
- 10 Supranowitz C, McFee C, Murphy P. Asphere metrology using variable optical null technology[C]. SPIE, 2012, 8416: 841604.
- 11 Tian C, Yang Y, Wei T, *et al.* Nonnull interferometer simulation for aspheric testing based on ray tracing[J]. Appl Opt, 2011, 50(20): 3559-3569.
- 12 Hou X, Wu F, Yang L, *et al.* Experimental study on measurement of aspheric surface shape with complementary annular subaperture interferometric method[J]. Opt Express, 2007, 15(20): 12890-12899.
- 13 Zhao Y, Burge J H. Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface[C]. SPIE, 2008, 7063: 706316.
- 14 Yan Lisong, Wang Xiaokun, Zheng Ligong, *et al.* Large-diameter reflector mirror stitching accuracy analysis based on self-test[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1920-1924.
闫力松, 王孝坤, 郑立功, 等. 大口径反射镜子孔径拼接自检验精度分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1920-1924.