

非零位拼接检测凸非球面金属反射镜

蔡志华^{1,2}, 王孝坤^{1,2}, 胡海翔^{1,2}, 曾雪锋^{1,2}, 王晶^{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: 随着单点金刚石车削技术和抛光技术的发展, 实现了金属反射镜的快速高效低成本制造。然而, 金属反射镜的检测手段存在明显不足, 尤其是没有一种快速、高效的检测手段用于检测凸非球面金属反射镜。为提高凸非球面金属反射镜的检测效率, 提出一种非零位拼接检测凸非球面金属反射镜的检测方法。结合工程实例, 对口径为 120 mm, 顶点曲率半径 R 为 1121.586 mm, 二次曲线常数 K 为 -2.38 的凸非球面金属反射镜进行了拼接检测实验, 拼接所得面形误差均方根值 (RMS) 为 0.016λ ($\lambda=632.8$ nm)。与 Lumphoscan 检测结果对比, 验证了非零位拼接检测方法的检测精度 RMS 为 0.007λ , 结果表明该方法能够实现凸非球面金属反射镜的快速、高效检测。

关键词: 拼接检测; 凸非球面; 非零位; 金属反射镜

中图分类号: O436.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210061

Non-null stitching test convex aspheric metal mirror

Cai Zhihua^{1,2}, Wang Xiaokun^{1,2}, Hu Haixiang^{1,2}, Zeng Xuefeng^{1,2}, Wang Jing^{1,2}

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

Abstract: With the development of single-point diamond turning technology (SPDT) and polishing technology, the rapid, efficient and low-cost manufacturing of metal mirrors has been realized. However, the test methods of metal mirrors have obvious shortcomings, especially there is no fast and efficient test method for testing convex aspheric metal mirrors. In order to improve the test efficiency of convex aspheric metal mirrors, a non-null stitching method to test convex aspheric metal mirrors was proposed. Combined with engineering examples, a stitching test experiment was carried out on a convex aspheric metal mirror with a diameter of 120 mm, a radius of curvature of the vertex R of 1121.586 mm, and a conic constant K of -2.38 . The residual surface shape obtained by stitching $\text{RMS}=0.016\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm). Compared with the Lumphoscan test results, it is verified that the test accuracy of the non-null stitching test method $\text{RMS}=0.007\lambda$, which shows this test method can achieve rapid and efficient test of convex aspheric metal mirrors.

Key words: subaperture stitching; convex aspheric surface; non-null test; metal mirror

收稿日期: 2021-01-14; 修订日期: 2021-03-15

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20200401065GX); 中国科学院青年创新促进会 (2019221); 国家自然科学基金 (61975201)

作者简介: 蔡志华, 男, 博士生, 主要从事光学设计与测试技术方面的研究。

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

0 引言

金属反射镜由于具有超高光洁度、高反射率和低吸收率的特性,被广泛应用于空间遥感和军事等领域^[1]。同时,当反射镜和支撑结构均采用同种金属材料时,光学系统能够实现最优的无热化效果和良好的力、热承载性能。通过将设计、制造、检测和装调进行全工艺链路的统筹优化,能够将光学和结构要素在光机零件中进行有效融合,实现真正的光机一体化制造,使结构更紧凑,研制生产周期更短,产品性价比和技术优势更高^[2]。随着单点金刚石车削技术 (SPDT) 的发展,实现了金属反射镜的快速低成本制造,金属反射镜被广泛应用于激光通信、激光制造与武器、光学遥感、导航与制导、侦查与预警等诸多军民应用领域^[3]。2010 年后,欧洲航天局也将金属反射镜应用在 500 mm 口径以下的光学遥感载荷上^[4]。然而相比于金属反射镜的加工手段,其检测手段略显不足,尤其是在凸非球面金属反射镜的检测上没有一种快速、高效的检测手段。

传统凸非球面检测方法主要有轮廓检测法^[5]、Hindle 球补偿法^[6]、Null-lens 补偿法^[7]、CGH 补偿法^[8-9]、子孔径拼接检测法^[10-11]。其中轮廓检测法检测精度较低,较适用于研磨阶段的检测;Hindle 球补偿检测法适用于检测二次曲面,但是需要制作超过被检镜口径数倍的补偿器;Null-lens 补偿检测法能够满足凸非球面反射镜的高精检测要求,然而在检测全口径面形时,Null-lens 补偿器的口径要大于被检镜口径,并且 Null-lens 补偿器的参考面为非球面,需要另外制作补偿器对 Null-lens 补偿器参考面进行检测,生产周期长,造价高;CGH 补偿法检测精度高,但是在检测凸非球面金属反射镜时,需要针对每一个反射镜单独设计 CGH,其 CGH 口径也要大于被检镜口径,而 CGH 制作成本较高,同时受限于现有光刻工艺,难以制作大口径的 CGH。

子孔径拼接检测法^[12-13]是将大口径凸非球面反射镜面形分成若干子孔径,分别检测,然后通过拼接的方式获得全口径面形信息,能够实现对大口径凸非球面反射镜检测,检测过程中无需添加任何补偿元件,检测方法简单,因此拼接检测法是解决凸非球面

金属反射镜高效率、高精度检测的有效手段。文中针对工程实例中的凸非球面金属反射镜面形的检测进行了设计分析和测试,验证了非零位拼接检测凸非球面金属反射镜的适用性和高效性。

1 方法介绍

首先给出图 1 所示的非零位拼接检测凸非球面金属镜的流程图,图 2 所示的是凸非球面金属镜检测的光路图。

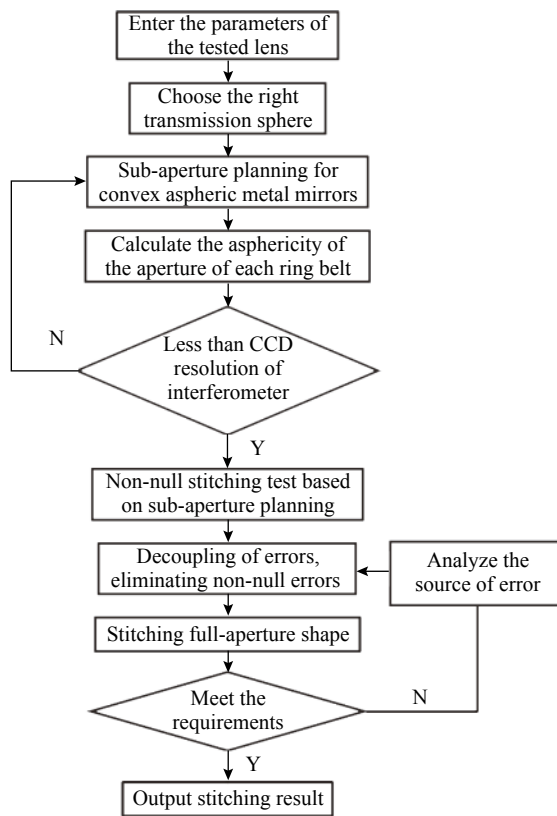


图 1 非零位拼接检测凸非球面金属镜流程图

Fig.1 Flow chart of non-null stitching test of convex aspheric metal mirror

从图 1 中可得,在检测凸非球面金属镜时首先需要根据被检镜参数选择标准镜,并根据被检镜参数和选择的标准镜参数,进行子孔径规划。

由图 2 可得,凸非球面金属镜检测时球面的标准镜选择原则:

(1) $F/\# \geq R/\#$ ($F/\# = f/D$, $R/\# = R/d$, 其中 $F/\#$ 为标准镜 F 数, $R/\#$ 为被检镜 R 数, f 为标准镜焦距, D 为标准镜口径, R 为被检镜顶点曲率半径, d 为被检镜口径)。

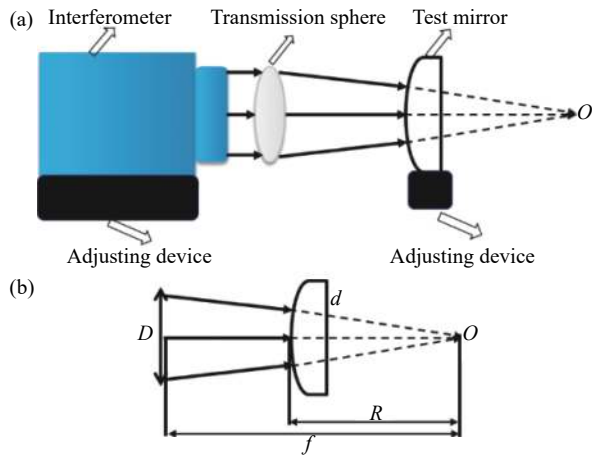


图 2 凸非球面金属反射镜检测原理示意图。(a) 非球面检测示意图；(b) 标准镜选择示意图

Fig.2 Schematic diagram of test principle of convex aspheric metal mirror. (a) Schematic diagram of aspheric surface test; (b) Schematic diagram of standard mirror selection

(2) $f > R$ 。

子孔径规划原则：

(1) 各子孔径干涉条纹数小于干涉仪最大分辨条纹数 (实验中使用干涉仪 CCD 相机分辨率为 45 对条纹, 并且要求干涉检测波前均方根值 (RMS) $< 4\lambda$)。

(2) 保证规划的子孔径能够对全口径面形实现覆盖。

(3) 各相邻子孔径检的重叠面积 $\geq 30\%$ ^[14]。

在进行拼接检测实验前, 首先需要计算被检镜的非球面度, 以判断是否能够采用非零位拼接检测方法检测。在分析完成后, 根据被检镜参数和选择的标准镜参数合理规划子孔径。为保证检测精度, 各子孔径重叠面积应超过 30%^[14]。文中针对表 1 所示参数的凸非球面金属反射镜进行了仿真分析和实验验证, 以验证非零拼接检测凸非球面金属反射镜的可行性。

首先根据表 1 所示参数, 分析被检镜非球面度, 结果如图 3(a) 所示, 被检镜非球面度峰值 (PV) 为

表 1 被检镜参数

Tab.1 Parameters of the tested mirror

Parameter	Value
Diameter/mm	120
Vertex radius of curvature/mm	1 121.586
Conic constant	-2.38
A_6	1.83×10^{-15}
A_8	7.91×10^{-19}
A_{10}	1.05×10^{-22}

0.667λ , 由图 3(b) 得, 若以最大非球面度检测被检镜全口径面形, 其干涉条纹数量为 22 根条纹。实验中使用的 Zygo 干涉仪最大分辨为 90 根条纹, 即可以采用非零位拼接检测的方法检测被检镜。

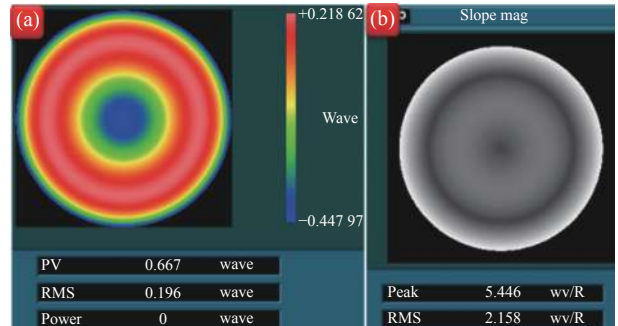


图 3 被检镜非球面度。(a) 被检镜非球面度计算结果; (b) 全口径 Slope 分析结果

Fig.3 Asphericity of the tested mirror. (a) Calculation result of the asphericity of the tested mirror; (b) Full-aperture Slope analysis result

根据表 1 所示被检参数, 选择为 6 in (1in=2.54 cm), $F/\# = 11$ 的球面标准镜, 子孔径规划如图 4 所示, 共需要 5 个子孔径, 即可实现对被检镜全口径面形的检测。

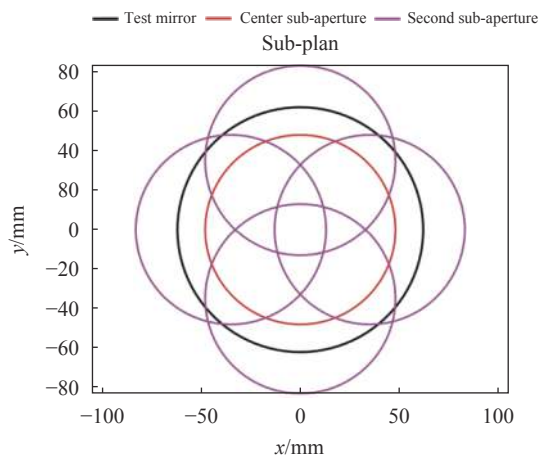


图 4 子孔径规划方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of sub-aperture plan

在子孔径规划完成后, 对内外两圈子孔径进行仿真分析, 中心和外围子孔径的波前图和干涉条纹图如图 5 所示。可得中心子孔径的设计残差 RMS 为 0.208λ , 外围子孔径的设计残差 RMS 为 0.867λ , 其设计残差即为非零位误差, 可以将设计残差结果作为系统误差, 在数据处理过程中予以剔除, 从而获得真实的检测面形误差。

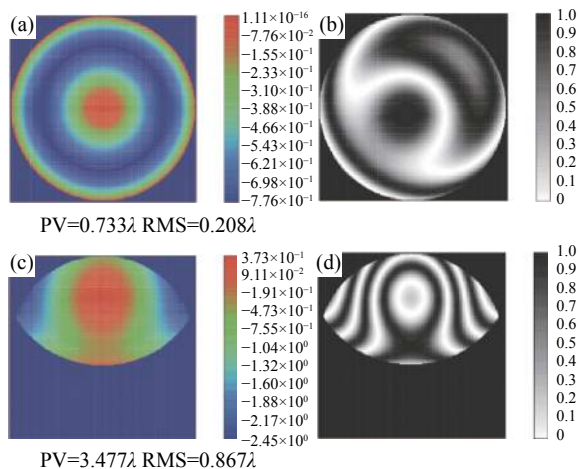


图 5 各子孔径面形和干涉条纹仿真结果。(a) 中心子孔径波前; (b) 中心子孔径干涉条纹; (c) 第二圈子孔径波前; (d) 第二圈子孔径干涉条纹

Fig.5 Surface shape of various sub-aperture and interference fringe simulation results. (a) Central sub-aperture wavefront; (b) Central sub-aperture interference fringe; (c) Second circle aperture wavefront; (d) Second circle aperture interference fringe

2 凸非球面金属反射镜检测实验

图 6 为凸非球面金属反射镜的拼接检测光路, 干

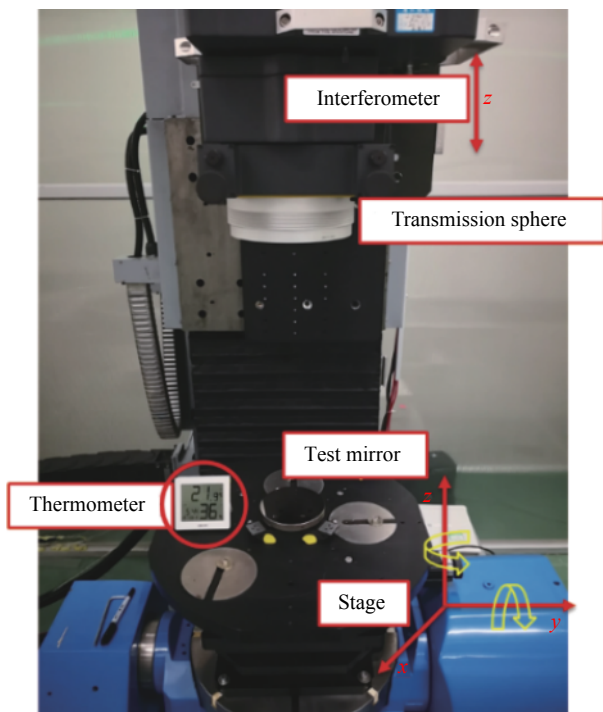


图 6 凸非球面金属反射镜检测光路

Fig.6 Test light path of convex aspheric metal mirror

涉仪和载物台共同组成了五维调节机构, 能够满足凸非球面金属反射镜拼接检测时需要的调整量。同时, 金属镜面形易受温度影响, 因此需要控制检测时的温度 (温度控制在 $(22 \pm 0.2)^\circ\text{C}$), 以保证检测面形的一致性。各子孔径检测结果如图 7(a)~(e) 所示。

对数据进行处理, 以图 3 子孔径规划的中心子孔径坐标系为基准坐标系^[15-16], 将各子孔径坐标统一到基准坐标系下, 如公式 (1) 所示:

$$\Phi'_i(x, y) = \Phi_i(x, y) + \sum_{k=1}^L a_{ik} f_k(x, y) \quad (1)$$

式中: $\Phi_i(x, y)$ 为第 i 个子孔径的检测结果; $\Phi'_i(x, y)$ 为第 i 个子孔径在基准坐标系下的坐标; a_{ik} 为拼接系数; k 为拼接系数所对应方程的序号, 由于检测面形为凸非球面元件所以 $L=9$, f_k 设置如公式 (2) 所示的九个表达式:

$$f_k = \begin{cases} f_1(x, y) = x \\ f_2(x, y) = y \\ f_3(x, y) = x^2 + y^2 \\ f_4(x, y) = xy \\ f_5(x, y) = x^2 - y^2 \\ f_6(x, y) = x(x^2 + y^2) \\ f_7(x, y) = y(x^2 + y^2) \\ f_8(x, y) = (x^2 + y^2)^2 \\ f_9 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\delta^2 = \sum_{i=1 \dots n} \sum_{j=1 \dots n, j \neq i} \left[\begin{matrix} \left(\Phi_i(x, y) + \sum_{k=1}^L a_{ik} f_k(x, y) \right) \\ - \left(\Phi_j(x, y) + \sum_{k=1}^L a_{jk} f_k(x, y) \right) \end{matrix} \right]^2 = \min \quad (3)$$

求解拼接系数, 使用最小二乘法对公式 (3) 求解, 可得各子孔径对应的的拼接系数 a_{ik} , 从而实现全口径面形的拼接获得以基准坐标系为参考的非球面表面误差分布。其拼接结果如图 6(f) 所示, 拼接后全口径面形 RMS 为 0.250λ 。

对拼接结果进行分析, 去除检测结果中的非零位误差。去除非零位误差后, 被检镜全口径面形误差如图 8(a) 所示, RMS 为 0.016λ 。为验证该方法的准确性, 利用纳米轮廓仪 Lumphoscan 对该金属凸非球面反射镜进行检测, 其面形检测结果如图 8(b) 所示。将两种检测结果对比, 其绝对偏差 (数值相减) 为 $PV=0.061\lambda$, $RMS=0.004\lambda$, 拼接检测结果相对于 Lumphoscan

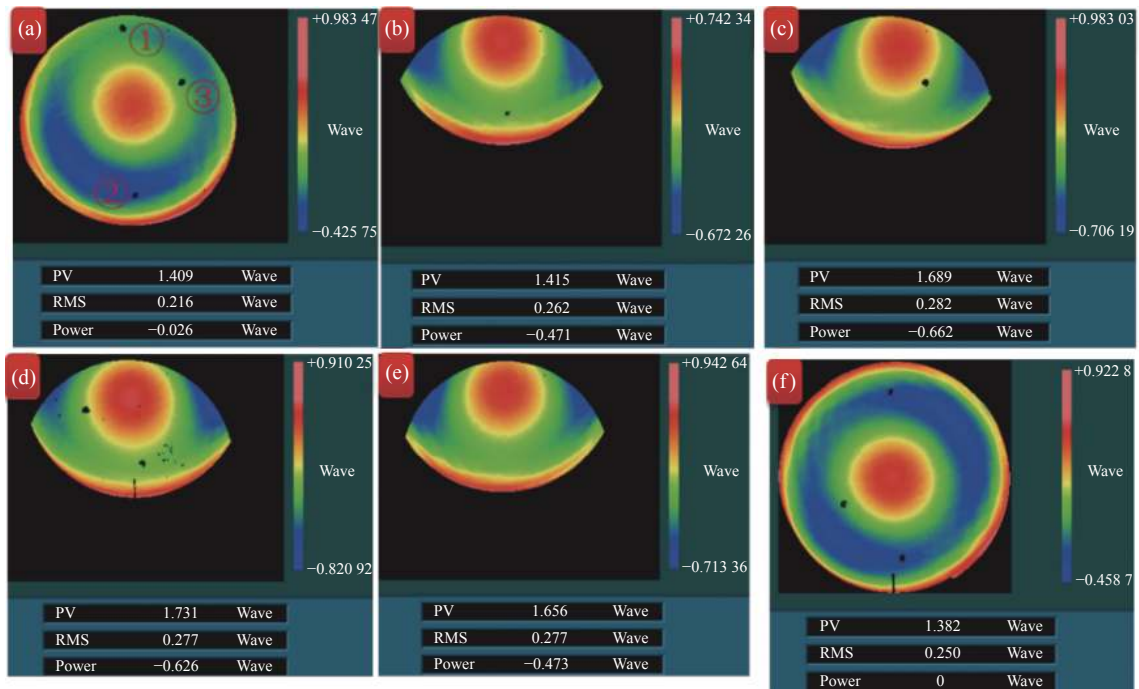


图 7 拼接检测结果。(a) 中心子孔径检测结果; (b)~(e) 外围子孔径检测结果; (f) 拼接后全口径面形

Fig.7 Stitching test results. (a) Center sub-aperture test results; (b)-(e) Peripheral sub-aperture test results; (f) Full-aperture surface shape after stitching

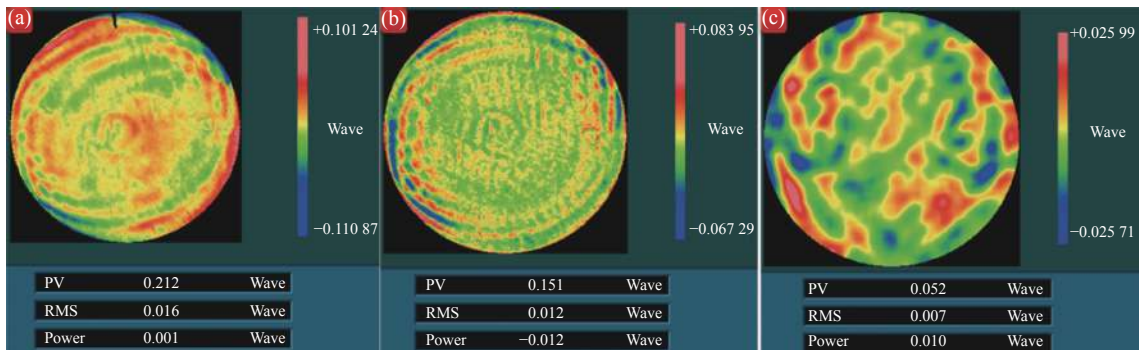


图 8 金属镜面形误差。(a) 拼接检测结果; (b)Lufoscan 检测结果; (c) 子孔径拼接检测结果与 Lufoscan 检测结果的残差

Fig.8 Metal mirror shape error. (a) Stitching test result; (b) Lufoscan test result; (c) Residual difference between sub-aperture stitching test result and Lufoscan test result

检测结果的残差(数据点对点相减)如图 8 所示, $PV=0.052\lambda$, $RMS=0.007\lambda$ 。实验结果表明非零位拼接检测能够满足凸非球面金属反射镜表面面形的高精度检测, 验证了非零位拼接检测法检测凸非球面金属反射镜的可行性。

3 结论

为了提高凸非球面金属反射镜的检测效率和检测精度, 文中提出了非零位拼接检测凸非球面金属反射镜的方法。并针对一口径为 120 mm, 顶点曲率半

径 $R=1121.586\text{ mm}$, 二次曲线常数 $K=-2.38$ 的凸非球面金属反射镜进行了非零位拼接检测的验证实验, 实验结果表明该检测方法在检测凸非球面金属反射镜时, 具有良好的可行性和适用性, 相比传统补偿检测方法具有更高的检测效率, 与 Lufoscan 检测结果对比, 得到非零位拼接检测凸非球面反射镜的检测精度能够达到 RMS 为 0.007λ , 满足了凸非球面金属反射镜面形检测的要求。非零位拼接检测法具有很高的灵活性, 不仅可以用于检测大口径凸非球面, 也可以应用于凹面非球面和自由曲面的检测, 并且若将该技

术与补偿技术结合,可将低补偿器的设计难度,实现对高陡度非球面反射镜的检测,从而为先进光学制造提供依据和保障。

参考文献:

- [1] Chen Daren, Li Zhanjie, Jin Gang, et al. Review on ultra-precision machining of metal reflector [J]. *Mechanical Research & Application*, 2018, 31(1): 159-163.
- [2] Zimmerman J. Strain free mounting technology for metal mirror [J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(2): 187-189.
- [3] Schaefer J P. Advanced metal mirror processing for tactical ISR systems[C]//Proceedings of SPIE, 2013: 8713.
- [4] Guregian J J, Pepi J W, Schwalm M, et al. Material trades for reflective optics from a systems engineering perspective[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5179: 85-96.
- [5] Anderson D S, Burge J H, Doherty V J, et al. Swing-arm profilometry of aspherics[C]//Proceedings of SPIE, 1995, 2536: 169-179.
- [6] Yan F, Fan B, Hou X, et al. Testing convex hyperbolic mirrors with two or more annular apertures by handle and stitching methods [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2014, 61: 52-56.
- [7] 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.
- [8] Zhang H D, Wang X K, Xue D L, et al. Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154. (in Chinese)
- [9] Li F Z, Luo X, Zhao J L, et al. Test of off-axis aspheric surfaces with CGH [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 709-716. (in Chinese)
- [10] Wang Xiaokun. Testing of a large rectangular mirror based on sub-aperture stitching method [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(13): S11201.
- [11] Yan G J, Zhang X Z. Research on non-null convex aspherical sub-aperture stitching detection technology [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 798-803. (in Chinese)
- [12] Wang X K, Xue D L, Zhang X J. Fabrication and testing of large aspheric system based on common reference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 743-748. (in Chinese)
- [13] Zhang L, Liu D, Shi T, et al. Optical free-form surfaces testing technologies [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299. (in Chinese)
- [14] Wang Xiaokun. Aspheric surface measurement based on sub-aperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013(14): S21201.
- [15] Wang Xiaokun. Test convex aspheres by subaperture stitching interferometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 716-722. (in Chinese)
- [16] Yan L S, Wang X K, Zheng L G, et al. Large-diameter reflector mirror stitching accuracy analysis based on self-test [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1920-1924. (in Chinese)