

大口径反射镜组件面形检测系统及方法研究

陈海平 熊 召 曹庭分 叶海仙 刘长春* 袁晓东 周 海

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 大口径反射镜组件检测存在的设备昂贵、环境要求苛刻等问题。基于S-H波前传感器的子孔径拼接检测技术, 对其拼接算法进行改进, 提出混联拼接算法, 有效减小拼接导致的面形检测误差。该方法结合自准直波前检测系统和高精密二维扫描系统形成大口径反射镜反射面形拼接检测系统。对比实验表明, 该系统测量误差为 0.072λ , 满足高功率固体激光器对大口径反射镜组件装校过程面形控制的要求。

关键词 测量; 大口径反射镜; 面形测量; S-H波前传感器; 子孔径拼接; 混联拼接

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0212002

Research on Surface Measure Device for Process of Large Aperture Mirror Assembly

Chen Haiping Xiong Zhao Cao Tingfen Ye Haixian Liu Changchu Yuan Xiaodong
Zhou Hai

Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Surface shape measure of large aperture mirror components existing problems of high cost and strict environmental requirements. In this paper, based on the sub aperture stitching detection technology of S-H wave-front sensor, the stitching algorithm is improved, and the mixed stitching algorithm is proposed, which can effectively reduce the error caused by the sub-aperture stitching. With auto-collimation wave-front detection system and high precision two-dimensional scanning system, the reflective surface shape of large aperture reflector is detected by surface stitching. The experimental results show that the measurement error of the device is approximately 0.072λ , which meets the requirements of the process of the large aperture mirror assembly from the high power solid laser.

Key words measurement; large aperture mirror; topography measurement; S-H wave-front sensor; sub-aperture stitching; mixed stitching

OCIS codes 120.6650;350.2660;230.4040;350.4600

1 引 言

大口径反射镜组件是高功率固体激光器光传输过程中波前控制的关键组件之一。国内外关于高功率固体激光器的研究表明, 传输光束波前畸变会严重影响焦斑能量分布, 甚至影响激光装置可靠运行, 为此国内外大型高功率固体激光器都设法控制大口径反射镜组件反射面形。大口径反射镜组件反射面形受反射镜加工、反射镜夹持以及重力倾斜等因素影响。以美国国家点火装置(NIF)为例, 为实现装置波前控制要求, 其反射镜组件反射面形控制要求为 $\lambda/3$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 其中在大口径反射镜加工方面控制元件加工面形峰谷(PV)值不大于 $\lambda/6$ 。在反射镜安装夹持方面, NIF装置采用背支撑技术, 夹持造成的附加面形畸变小于 $\lambda/4$ 。同时NIF还通过优化夹持支撑点的位置, 减小重力引起的面形畸变。国内神光-III主机装置对大口径反射镜组件反射面形控制要求为 $\lambda/2$ 。鉴于国内已有工艺, 大口径反射镜夹持采用四周固支方式。该方式将大口径

收稿日期: 2015-09-09; 收到修改稿日期: 2015-09-20

作者简介: 陈海平(1988—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事测试计量技术方面的研究。E-mail: chping5705@163.com

*通信联系人。E-mail: njdachun1234@163.com

反射镜放入镜框内,通过镜框四周分布的螺钉将反射镜夹持在镜框内。但该方式需通过控制螺钉的夹持力以实现大口径反射镜夹持稳定性和夹持附加面形控制的平衡。为确认大口径反射镜组件夹持满足面形控制要求,需在大口径反射镜组件安装完毕后对反射镜组件面形进行检测,判断大口径反射镜组件夹持是否满足面形控制要求。

目前光学元件面形检测方法主要有光圈识别法、傅科法、干涉法、偏折术法等。光圈识别法和傅科法常用于光学元件加工过程检验,具有设备简单、检验效率高等优点,但都只能定性分析,且结果对测量人员依赖性强,具有经验性与主观性^[1]。干涉法包括移相干涉、锁相干涉、外差干涉等。干涉法具有测量精度高、测量效率高等优点,但需要口径不小于待测元件的标准镜,且对检测环境要求高,且设备加工周期长、成本高^[2]。偏折术法具有动态范围大、对环境不敏感等优点。但其测量精度不高,常用于非球面镜、自由曲面反射表面检测^[3]。

针对大口径反射镜而言,其面形高精度检测方法主要是干涉法。以现有高功率固体激光器为例,为实现口径为610 mm×440 mm的反射镜面形测量,需要口径800 mm的口径的干涉仪。这类干涉仪不仅价格昂贵,其加工制造难度极高,而且使用时对环境要求也极为苛刻,在测试环境存在扰动的环境下甚至会无法完成测量。

为解决大口径光学元件面形检测,于1982年提出了子孔径拼接检测技术,经过三十几年的发展,已广泛应用于天文望远镜等系统的大口径光学元件面形检测。但这些方法仍然基于干涉检测,对环境和设备要求较高。且大量文献表明,现有子孔径拼接技术中子孔径数较少,一般不超过9个^[4-6]。近几年也有学者研究基于夏克-哈特曼(S-H)波前传感器的子孔径拼接检测技术^[7-9],这些研究仍处于实验研究阶段,未形成检测设备。

针对大口径光机组件安装现场环境扰动较大的问题,本文采用基于S-H波前传感器的子孔径拼接检测技术,并与高精度二维扫描系统结合形成检测设备。同时由于大口径光机组件通光口径较大,需要25个子孔径才能满足全口径检测要求,对现有算法进行改进,提出混联拼接算法,有效减小拼接导致的面形检测误差,满足大口径光机组件安装面形控制的需求。

2 测量原理

S-H波前传感器的原理是通过微透镜阵列将入射光束分割成若干子束,并将每一子束分别会聚在CCD靶面上,如图1所示。

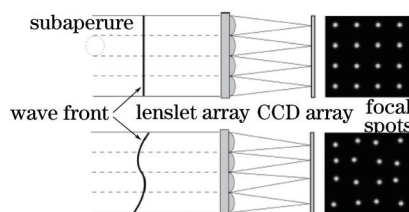


图1 S-H波前传感器原理图

Fig.1 Schematic diagram of S-H wave-front sensor

当入射光束为理想平面波时,这些光斑点阵排布规则,此时每个光斑的位置为其绝对参考位置。当入射光束波前存在畸变时,光斑位置就会发生偏离。根据微透镜阵列对入射光波的傅里叶变换原理可知,偏离的距离正比于该子束波前的平均斜率^[7]。

基于S-H哈特曼传感器,结合自准直光路的原理,设计了本系统的光学系统,实现各区域采样点的法矢测量,其原理示意图如图2所示。

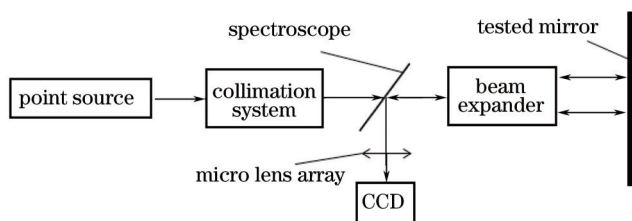


图2 光学系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of optical system

点光源经准直、扩束后形成较大口径准直光,经被测镜反射后返回扩束系统,再经分光镜反射,最后由微透镜阵列将返回光进行波阵面分割,聚焦在 CCD 靶面上形成光斑点阵。通过分析 CCD 上的各光斑与理想位置偏移,可获取局部区域各采样点的法矢。

然后通过二维扫描和子孔径拼接实现全口径采样点法矢测量与拼接,最终通过面形重构得到大口径反射镜面形,实现大口径反射镜组件反射面形检测。

该系统由二维扫描系统、光学系统以及计算控制三部分组成,如图 3 所示。

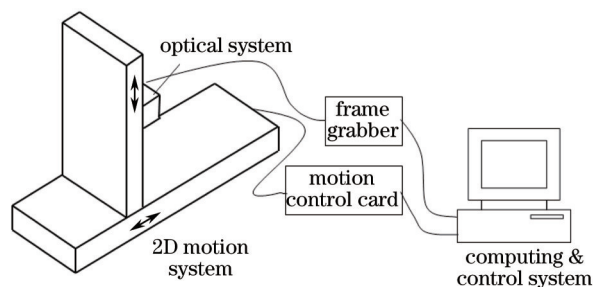


图 3 系统组成示意图

Fig.3 Schematic diagram of system component

计算控制系统通过运动控制卡和图像采集卡分别与二维扫描系统和光学系统连接,实现对扫描系统的控制以及光学系统图像采集与处理。通过二维扫描系统实现对各区域的扫描测量,然后通过子孔径拼接算法将各区域的法矢矩阵拼接,形成全口径法矢矩阵,最终通过模式法^[10-11]对面形进行恢复,实现对待测区域面形的检测。

3 拼接式面形检测方法

由于大口径反射镜中心区域为通光区域,因此要求测量方法优先考虑中心区域的测量精度。针对该要求,提出了混联拼接方法,其基本原理为子孔径拼接原理,如图 4 所示。

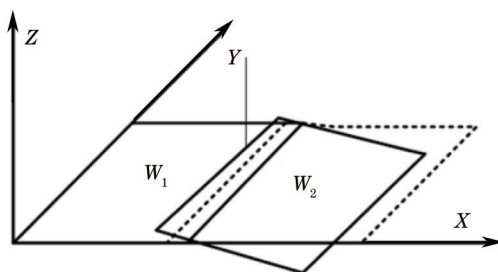


图 4 子孔径拼接示意图

Fig.4 Schematic diagram of sub-aperture stitching

研究表明,相邻两子孔径间重叠区域的平移、倾斜、离焦和彗差会存在较大的差异,拼接时需对这些差异进行修正^[12]。通常情况下离焦和彗差的影响相对较小,在不追求极高精度的情况下可以忽略。

仅考虑重叠区域平移和倾斜差异时,重叠区域的高度(面形)满足:

$$\mathbf{W}_2 - \mathbf{W}_1 = \mathbf{P} + T_x \mathbf{x} + T_y \mathbf{y}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{W}_1 、 \mathbf{W}_2 分别表示相邻两子孔径在重叠区域内的高度矩阵, \mathbf{P} 表示两子孔径之间的相对平移量, T_x 、 T_y 分别表示两相邻子孔径在 X、Y 方向上的斜率差。

对 x, y 求偏导得

$$G_{2x} - G_{1x} = T_x, \quad G_{2y} - G_{1y} = T_y, \quad (2)$$

式中 G_{1x} 、 G_{2x} 分别为 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 在 X 方向上的导数, G_{1y} 、 G_{2y} 为 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 在 Y 方向上的导数。

假设重叠区域共有 n 个点,以矩阵的形式表示 X、Y 方向导数方程分别为

$$\begin{bmatrix} G_{2x}(x_1, y_1) - G_{1x}(x_1, y_1) \\ G_{2x}(x_2, y_2) - G_{1x}(x_2, y_2) \\ \vdots \\ G_{2x}(x_n, y_n) - G_{1x}(x_n, y_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} [T_x] \begin{bmatrix} G_{2y}(x_1, y_1) - G_{1y}(x_1, y_1) \\ G_{2y}(x_2, y_2) - G_{1y}(x_2, y_2) \\ \vdots \\ G_{2y}(x_n, y_n) - G_{1y}(x_n, y_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} [T_y]. \quad (3)$$

通过最小二乘数据处理方法,就可分别求出X、Y方向上的倾斜系数 T_x , T_y , 将它们从 G_{2x} 和 G_{2y} 中去掉, 就可实现相邻两区域上的数据拼接。

常用的拼接算法包括顺序拼接算法和全局优化算法两种。顺序拼接算法由于拼接次数较多,引入较大拼接误差^[3,11-13]。全局优化算法虽能一次将所有子孔径拼法矢矩阵拼接形成全局法矢矩阵,有效控制拼接误差,但其算法复杂。而且在实际测量过程中,靠近待测件边缘的子孔径测量容易存在粗大误差,全局优化算法容易受该误差影响,导致待测反射镜的面形测量存在较大误差。为满足测试精度要求,优先确保待测反射镜中心区域测量精度,提出混联拼接算法,该算法拼接路径如图5所示。

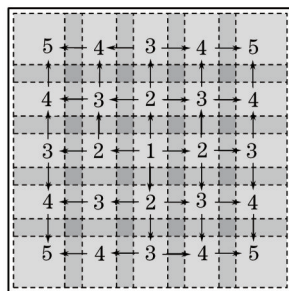


图5 混联拼接路径示意图

Fig.5 Sketch map of the mixed stitching

该拼接算法与顺序拼接算法相比,算法实现难度上与顺序算法相当,且能有效减少拼接次数,减小拼接的累积误差。通过对干涉仪测量得到的面形数据(PV值为0.412 λ)进行降采样与微分处理,得到每一个采样点的理想斜率。在确保混联和顺序拼接每块子孔径上初始斜率相同,每一采样点的随机噪声也相同的情况下,分析混联拼接与顺序拼接最后的累积误差。仿真分析结果如表1所示。

表1 拼接算法累积误差仿真分析

Table 1 Simulation result of error of stitching

	Mixed stitching mode		Serial stitching mode	
	Wave-front estimation PV/ λ	Wave-front residual PV/ λ	Wave-front estimation PV/ λ	Wave-front residual PV/ λ
First	0.464	0.0603	0.388	0.161
Second	0.469	0.0818	0.429	0.159
Third	0.433	0.0908	0.481	0.117

分析表1可得,混联拼接得到的残差面形优于顺序拼接得到的残差面形,混联拼接可以有效减小拼接的累积误差。

4 测量系统实现及实验验证

基于原理及系统设计,该检测装置如图6所示。装置主要包括高精度气浮扫描导轨、光学测量头、计算控制系统。

基于已有研究^[4],综合考虑子孔径测量误差控制和子孔径拼接误差的影响,该光学测量头子孔径测量区域尺寸100 mm×100 mm,子孔径区域内共10×10个采样点。通过将420 mm×420 mm测试区域分成5×5个子区域测量,重叠区域采样点数为2×10(或10×2)。根据分析,光学测量头中的波前传感器采用Thorlabs公司型号为WFS300-14AR的波前传感器,其测量精度为 $\lambda/50$ 。该传感器微透镜阵列数为13×13阵列,微透镜焦距为14 mm,微透镜间距为300 μm , CCD靶面大小为5.95 mm×4.76 mm,像素数为1280×1024。

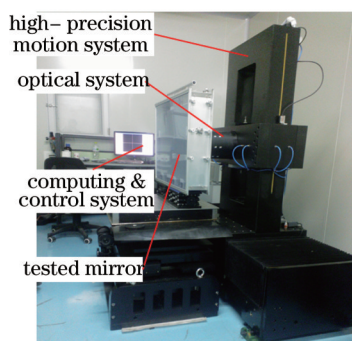


图6 装置实物图

Fig.6 Hardware configuration of the device

为控制子孔径测量误差,减小拼接过程中标准平面测量误差引入的系统误差^[15],在提高准直扩束系统的装配精度的同时用直径为 220 mm、面形 PV 值为 0.048 λ 的标准镜对系统进行标定。该光学测量头对 PV 值为 0.093 λ 的反射镜测量,测量结果如表 2 所示。

表2 子孔径测量结果

Table 2 Measurement results of sub-aperture

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PV/λ	0.11	0.17	0.09	0.13	0.11	0.13	0.07	0.12	0.14	0.11

测量结果显示,子孔径测量对 PV 值为 0.093 λ 的反射镜测量得到的 PV 均值为 0.118 λ,其测量误差为 0.025 λ。同时,多次测量结果之间存在一定的差异,该测量误差主要来源于气流扰动、振动等环境因素。

拼接误差主要是由于光学系统检测精度、扫描系统误差、环境扰动、拼接算法等因素导致相邻两个子孔径区域拼接时拼接系数计算误差而引起的面形测量误差。由于扫描系统直线度误差会导致相邻两子孔径区域的测量时存在较大的倾斜差异,引入高阶像差,拼接时难以消除,因此还需要减小扫描系统的直线度误差,以减小拼接误差。

在拼接误差控制方面,为控制扫描系统直线度引入的高阶像差,系统采用二维高精度气浮扫描平台作为该系统的扫描系统。根据图 7(a)中 X 轴在 Y、Z 方向的直线度测量结果可以计算得到该扫描系统 X 轴直线度误差为 $\sqrt{0.725^2 + 4.314^2} = 4.37 \mu\text{m}$,根据图 7(b)中 Z 轴在 X、Y 方向的直线度测量结果同理得到得 Z 轴直线度误差为 2.15 μm。

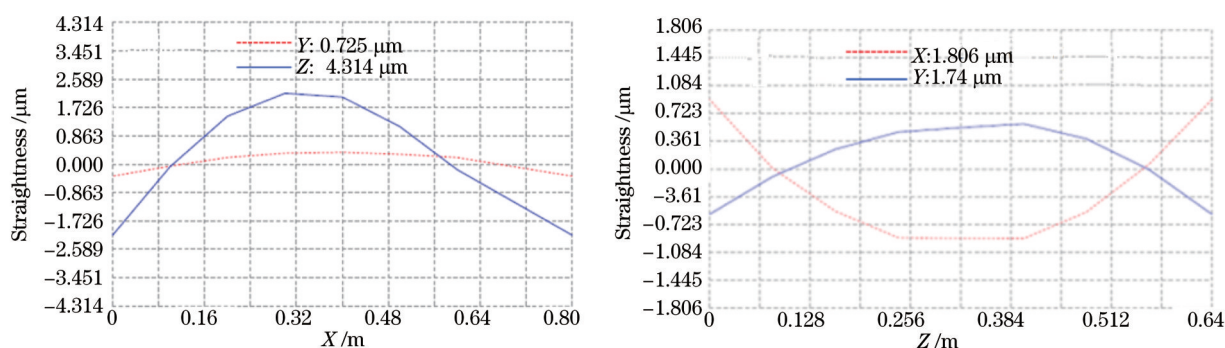


图7 二维扫描系统直线度。(a) X轴直线度;(b) Z轴直线度

Fig.7 Straightness of 2D scanning system. (a) Straightness of X axis; (b) straightness of Z axis

用大口径干涉仪和面形拼接测量装置分别用对尺寸为 610 mm×440 mm 反射镜中心为 420 mm×420 mm 区域进行多次测量,分析面形拼接测量装置测量精度。大口径干涉仪和面形拼接测量装置对该区域面形测量趋势结果如图 8 所示。

对比大口径干涉仪和面形拼接测量装置对该区域的测量趋势分布,面形拼接测量装置面形分布细节上与干涉仪测量结果有一定差异,但面形趋势相似。大口径干涉仪测量得到该区域面形 PV 值为 0.373 λ,面形拼接测量装置测量结果如表 3 所示。

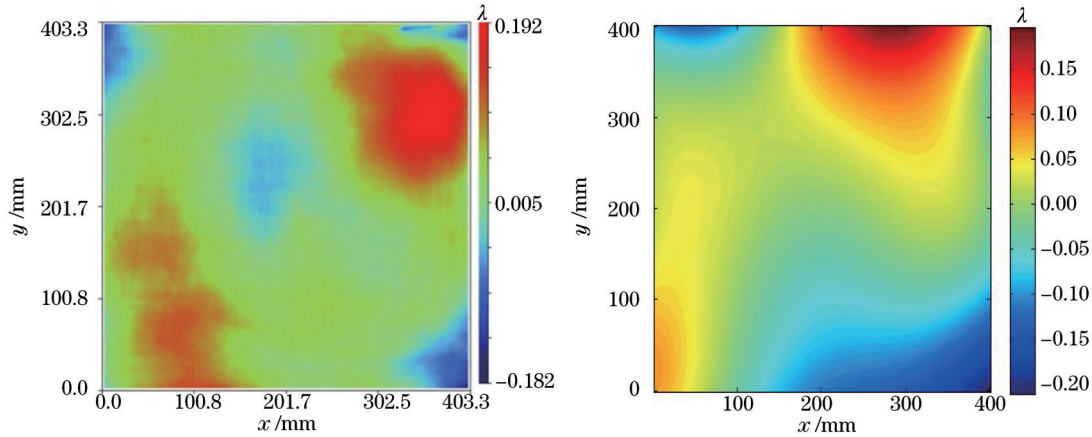


图8 面形测量分布对比图。(a)干涉仪测量面形分布图;(b)该装置测量面形分布图

Fig.8 Constastchart of distribution of surface shape measurement. (a) Distribution of measurement of interferometer; (b) distribution of measurement of the device

表3 面形拼接测量装置测量结果

Table 3 Measurement results of the surface stitching measuring device

Serial number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PV/ λ	0.52	0.46	0.40	0.53	0.38	0.53	0.33	0.55	0.52	0.33

分析表2,面形拼接测量装置对该区域测量PV均值为0.445 λ ,其误差为0.072 λ ,且存在一定的随机误差。其随机误差主要来源于气流扰动、振动等随机因素引起的子孔径测量误差。由于重叠区域采样点数较少,拼接时由于重叠区域的随机误差难以消除,会进一步导致面形测量误差。可通过增加重叠区域采样密度减小随机误差的影响。实验表明该系统通过提高光学系统装调精度、改善拼接算法、控制测量环境等手段,可以有效控制面形测量误差,满足大口径反射镜装校面形控制对面形测量的需求。

5 结 论

本文针对大口径反射镜组件安装工艺的面形控制需求,提出了一种拼接式面形测量方法。通过提高导轨直线度、优化面形拼接路径等措施,可以很好地控制面形测量误差。对比试验表明,面形拼接测量装置测量误差为0.072 λ ,满足大口径反射镜组件装校对面形控制的要求。但由于环境扰动、采样点较少,该装置面形测量结果存在一定的误差,且分布细节与干涉仪有一定的差异,可通过选用微透镜直径更小、微透镜阵列数较多的传感器,提高采样密度,提高装置测量精度,改善装置面形分布细节。

参 考 文 献

- Zhang Jun. Digital knife-edge testing technology on spherical mirror of large apterture[M]. Chengdu: Sichuan University, 2005: 5-20.
张 均. 大口径球面数字刀口检测技术的研究[M]. 成都: 四川大学, 2005: 5-20.
- Zheng Ligong, Yan Lisong, Wang Xiaokun, *et al.*. Research on sub-aperture stitching testing technology based on iterative gradient algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011202.
郑立功, 闫立松, 王孝坤, 等. 基于迭代梯度算法的子孔径拼接检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011202.
- Liang Libin, Su Xianyu, Liu Yuankun. Phase-measuring deflectometry based on binocular vision[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2009, 42(2): 387-391.
梁礼斌, 苏显渝, 刘元坤. 基于双目视觉的位相测量偏折术[M]. 四川大学学报(自然科学版), 2009, 42(2): 387-391.
- Otsubo Masashi, Okada Katsuyuki, Tsujiuchi Jumpei. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms[J]. Opt Eng, 1994, 33(2): 608-613.
- H S Tang. Stitching: high spatial resolution micro surface measurements over large areas[C]. SPIE, 1998, 3479: 43-49.
- Zhang Lei, Tian Chao, Liu Dong, *et al.*. Non-null annular sub-aperture stitching interferometry for aspheric test[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812003.
张 磊, 田 超, 刘 东, 等. 非球面非零位环形子孔径拼接干涉检测技术[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0812003.

- 7 Wu Jing. Wave-Front Test by Sub-Aperture Stitching Technique Based on Shack-Hartmann Wave-Front Sensor[M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 24-25.
吴 晶. 基于 Shack-Hartmann 的子孔径拼接波前检测技术研究[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 24-25.
- 8 Zheng Hanqing, Rao Changhui, Rao Xuejun, *et al.*. Wavefront stitching detection method based on Hartmann Shack wavefront sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3385-3390.
郑翰清, 饶长辉, 饶学军, 等. 基于哈特曼-夏克波前传感器的波面拼接检测方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3385-3390.
- 9 Wu Jing, Wang Jianli, Lin Xudong. Wave-front test by sub-aperture stitching technique based on Shack-Hartmann wave-front sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(1): 39-43.
吴 晶, 王建立, 林旭东. 基于 Shack-Hartmann 的子孔径拼接波前检验技术[J]. *光电工程*, 2011, 38(1): 39-43.
- 10 Liu Zesheng, Li Dahai. Comparative study of Hartmann wavefront reconstruction algorithm in square zone[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(1): 39-40.
刘泽晟, 李大海. 方形区域上哈特曼波前重构算法比较研究[J]. *激光杂志*, 2008, 29(1): 39-40.
- 11 Li Mengyang, Li Dahai, Wang Qionghua, *et al.*. Wavefront reconstruction with orthonormal polynomials in a square area[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108011.
李萌阳, 李大海, 王琼华, 等. 用方形区域内的标准正交多项式重构波前[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108011.
- 12 Su Yun, Li Bo. Optimizing the object function in subaperture stitching[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(1): 55-58.
苏 云, 李 博. 子孔径拼接检测方法的目标函数优化[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(1): 55-58.
- 13 Wang Lihua, Wu Shibin, Hou Xi, *et al.*. Measurement of flat wavefront by sub-aperture stitching interferometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 126-130.
汪利华, 吴时彬, 侯 溪, 等. 子孔径拼接干涉检测大口径平面波前[J]. *光电工程*, 2009, 36(6): 126-130.
- 14 Chen Haiping, Li Jiabin, Liu Changchun, *et al.*. Research on angle measure error based on method of angle difference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1012003.
陈海平, 李佳斌, 刘长春, 等. 基于角差法面形测量装置的测角误差研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1012003.
- 15 Zhou You, Wang Qing, Liu Shijie. A method to modify systematic errors in the stitching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 051202.
周 游, 王 青, 刘世杰. 一种修正子孔径拼接中系统误差的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 051202.

栏目编辑: 何卓铭