

子孔径拼接检测光学系统波前机械定位误差补偿算法

汪利华 吴时彬 任 戈 谭 毅 杨 伟

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 为了实现大口径光学系统波前子孔径拼接干涉测量, 保证子孔径采样数据准确定位, 提出了子孔径拼接定位补偿算法。介绍了该算法原理, 分析了该算法子孔径定位误差补偿能力。首先根据被检光学系统和子孔径口径大小规划出采样子孔径布局, 在子孔径采样装置机械精度误差范围内对子孔径进行拼接, 根据所求子孔径定位误差补偿系数和调整误差系数, 得到被检全口径波前, 完成大口径光学系统波前的拼接检测。通过仿真验证了该算法的可行性, 在机械平移定位精度为 1 mm 和转动角定位精度为 0.5° 时, 用该算法实验检测口径为 200 mm 的光学系统平面波前。检测结果表明该算法稳定可靠, 能有效补偿机械精度引起的子孔径定位误差, 从而可放宽对机械定位精度的要求。

关键词 子孔径拼接; 定位补偿; 光学波前; 光学测量

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0112003

Location Error Compensation Algorithm for Measuring Optical System Wave Front by Sub-Aperture Stitching

Wang Lihua Wu Shibin Ren Ge Tan Yi Yang Wei

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*)

Abstract In order to realize sub-aperture stitching measurement of large optical wavefront, sub-aperture location compensation algorithm is introduced and the ability to compensate the mechanical location error is analyzed. Based on the aperture of the tested optical system and the sub-aperture, the layout of the sub-aperture is calculated. In the range of the mechanical location error, stitching the sub-aperture to get the location compensation coefficients and the adjusting error coefficients, the full aperture of the tested wavefront is got and the large optical wavefront is tested. The feasibility of the algorithm is tested by the simulation, and the wavefront of the optical system with aperture of 200 mm is tested when the mechanical translation precision is 1 mm and rotation precision is 0.5° . The result indicates the stability of the algorithm and can effectively compensate the sub-aperture location error caused by the mechanical, which can reduce the high requirement of the mechanical platform.

Key words sub-aperture stitching; location compensation; optical wave front; optical measurement

OCIS codes 120.6650; 120.4640; 120.4610

1 引 言

子孔径拼接检测方法是一种检测大口径光学元件和系统波前的有效方法, 该方法的思想是“以小拼大”, 将大口径光学波前划分成若干子孔径, 通过干涉仪或哈特曼等波前传感器, 对子孔径波前测量、数据采集, 再通过适当算法将子孔径波前数据拼接, 从而得到全口径波前信息。子孔径拼接方法在 20 世纪 80 年代由 C. J. Kim^[1] 提出以来, 便得到广泛的研究和应用。1999 年, M. Bray^[2] 制造出实用化子孔

径拼接干涉仪主要用于检测大口径平面光学元件波前。2003 年美国 QED 公司 J. Fleig 等^[3,4] 成功研制出 SSI 自动拼接干涉仪, 能够检测口径 200 mm 以内平面、球面和适当偏离度的非球面。2007 年, Julius Yellowhair^[5] 用子孔径拼接方法检测了 1.6 m 的平面波前。在国内, 国防科学技术大学、中国科学院光电技术研究所和四川大学等单位的科研人员也对子孔径拼接检测方法进行了一定的研究^[6-9]。子孔径拼接检测方法经过 20 多年的发展,

收稿日期: 2011-06-22; 收到修改稿日期: 2011-07-21

基金项目: 中国科学院光束控制重点实验室基金(20090813AOP-08)资助课题。

作者简介: 汪利华(1983—), 男, 助理工程师, 主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: lhwangky@163.com

逐渐趋于成熟,该技术多应用于检测光学元件表面面形,而用该技术检测光学系统波前的报道较少,2009年本课题组验证了采用该技术检测光学系统波前像质^[10]。

子孔径拼接方法是一种高精度检测方法,影响拼接精度的因素有拼接算法误差、环境变化引起的噪声误差和机械运动引起的误差等。子孔径拼接方法实用工程化过程中,要求最高的是机械定位精度。子孔径拼接方法是将各个子孔径精确定位,根据相邻两子孔径间重叠区域子孔径波前相位信息,求出子孔径间相对调整系数,从而将子孔径进行拼接。当两子孔径定位存在误差时,重叠区域没有对准,由此计算出子孔径间相对调整系数存在误差,从而影响拼接精度。目前子孔径拼接精确定位主要依靠高精度的精密机械运动平台来实现,增加检测成本,同时也是不现实的。张鹏飞等^[11]采用立体视觉实现子孔径拼接测量的工件定位,该方法需要在夹具上加工若干标志点,被检元件与夹具一起运动,可以很好地实现对子孔径定位。王月珠等^[12]提出采用标记点对子孔径进行定位。陈善勇等^[13]提出了子孔径迭代拼接算法,该拼接算法,以牺牲拼接算法效率为代价放宽了对机械定位精度的要求。以上拼接算法均针对光学元件面形检测时对子孔径进行定位,但当被检对象为大口径复杂光学系统,不能随夹具旋转,也不能粘贴标记点时,这些方法的实施存在一定局限。为了用子孔径拼接方法检测光学系统波前,减小该方法对机械运动定位精度的要求,本文提出了子孔径拼接定位补偿算法,通过拼接算法对子孔径定位误差进行补偿,求出子孔径间误差调整系数,完成对光学系统波前检测。

2 子孔径拼接定位补偿算法原理

子孔径拼接检测前根据被检光学系统口径和子孔径口径进行规划,将大口径光学系统波前按照一定路径布局划分若干子孔径,对子孔径进行编号,并记下每个子孔径中心规划坐标值。对子孔径采样完成后,将子孔径局部坐标按照规划转换到全口径全局坐标下拼接,从而得到全口径波前相位信息。

如图1所示两相邻子孔径在没有任何误差理想情况下,测量得到每个子孔径波前应与其真实波前一致,重叠区域波前相位也应相等,但由于子孔径采样过程中,机械运动误差、调整误差影响会对子孔径波前相位引入平移(piston)和倾斜(tilt)等误差,因此相邻两子孔径重叠区域波前相位并不一致。子孔径

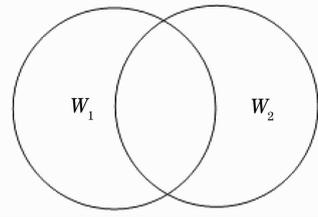


图1 相邻有重叠区域子孔径

Fig. 1 Overlapped sub-apertures

拼接算法的功能是求出子孔径间调整误差,将子孔径间波前差异统一来完成拼接,光学系统波前为平面波前,只需对子孔径间平移和倾斜误差进行调整如(1)式所示, $W_1(x,y)$ 和 $W_2(x,y)$ 分别为两相邻子孔径波前,两子孔径波前相位关系可表示为

$$W_1(x,y) = P + T_x x + T_y y + W_2(x,y), \quad (1)$$

式中 P 为相位平移系数, T_x 和 T_y 分别为 x 和 y 方向子孔径倾斜系数,通过(1)式求出子孔径间调整误差将子孔径拼接。但由于机械定位精度误差的存在,实际检测波前与规划波前位置有偏差,直接用(1)式求得的倾斜与平移系数也存在误差从而影响拼接精度,因此需要对子孔径定位误差进行补偿。设子孔径 $W_2(x,y)$ 波前相位中心与检测前规划中心的偏差为 (h,v) ,则(1)式可写为

$$W_1(x,y) = P + T_x x + T_y y + W_2(x+h,y+v), \quad (2)$$

则:

$$W_1(x,y) = P + T_x x + T_y y + h \frac{\partial W_2(x,y)}{\partial x} + v \frac{\partial W_2(x,y)}{\partial y} + W_2(x,y), \quad (3)$$

式中 $W_1(x,y)$ 和 $W_2(x,y)$ 为检测得到子孔径波前为已知量,(3)式为非线性方程,有5个未知数,直接用最小二乘法求解,会存在很大误差。 (h,v) 与机械定位精度有关,因此不会无限大,依据机械定位精度对 (h,v) 范围进行限定。设机械定位精度误差在 x 方向为 $(-h_0,h_0)$, y 方向为 $(-v_0,v_0)$,限定 (h,v) 的范围分别为 $(-2h_0,2h_0)$ 和 $(-2v_0,2v_0)$,在该范围内对方程求解。

令

$$d_{ik} = W_1(x_{ik},y_{ik}) - W_2(x_{ik},y_{ik}) - h_i \frac{\partial W_2(x_{ik},y_{ik})}{\partial x} - v_i \frac{\partial W_2(x_{ik},y_{ik})}{\partial y}, \quad (4)$$

其中 ik 为第 i 个重叠区域第 k 个采样点,

$$\sigma_i^2 = \sum_{k=1}^{N_i} (d_{ik} - P_i - T_{x_i} x_{ik} - T_{y_i} y_{ik})^2, \quad (5)$$

式中 N_i 为第 i 个重叠区域总采样点数,令 (h_i,v_i) 初

始值为 $(-2h_0, -2v_0)$,在 (h, v) 范围内依次求解(5)式,求出所有调整系数后,将 $(P_i, T_{x_i}, T_{y_i}, h_i, v_i)$ 代入(5)式,对应 σ_i^2 最小的调整误差系数和坐标偏离补偿系数即为所求。

子孔径定位补偿算法流程为:

1) 依据被检光学系统波前口径和子孔径口径大小,对子孔径布局规划,并记下规划子孔径圆心坐标;

2) 根据机械运动定位精度 $(-h_0, h_0)$ 和 $(-v_0, v_0)$,设定子孔径定位误差方程搜索求解范围为 $(-2h_0, 2h_0)$ 和 $(-2v_0, 2v_0)$;

3) (h_i, v_i) 初始值为 $(-2h_0, -2v_0)$,代入(5)式,求调整误差系数 (P_i, T_{x_i}, T_{y_i}) ;

4) $h_{i+1} = h_i + 1, v_{i+1} = v_i + 1$,代入(5)式,求调整误差系数;

5) 重复步骤4),至 (h_i, v_i) 到 $(2h_0, 2v_0)$ 止;

6) 将 $(P_i, T_{x_i}, T_{y_i}, h_i, v_i)$,代入(5)式,对应 σ_i^2 最小的调整误差系数和坐标偏离补偿系数即为所求;

7) 对所有子孔径重复步骤3)~6),即可完成对全口径拼接。

3 算法验证

为了验证算法可行性,用 Zygo 干涉仪 MetroPro 软件,仿真口径为 150 mm 的光学波前,子孔径口径设为 100 mm。干涉仪 CCD 最大分辨率 1000 pixel \times 1000 pixel,同时还有3种分辨率(1/2,1/3和1/4)可

以选,CCD 分辨率过高,子孔径波前采样数据多,影响数据处理速度。分辨率过低,子孔径部分信息丢失影响拼接精度。通常设置 CCD 像素 500 pixel \times 500 pixel可满足要求。子孔径口径为 500 pixel,则 1 pixel对应0.2 mm,全口径波前口径为 750 pixel。设机械运动定位精度为 1 mm,子孔径 x 和 y 方向定位误差范围可设为 $(-5 \text{ pixel}, 5 \text{ pixel})$ 。

全口径为 150 mm 用 100 mm 子孔径拼接检测子孔径规划如图 2 所示。规划子孔径圆心与设置圆心定位误差(以像素为单位)如表 1 所示。对子孔径加入平移和倾斜调整误差系数如表 2 所示。采样得到有定位误差和加入倾斜后 7 个子孔径波前如图 3 所示。对采样到的 7 个子孔径波前采用定位补偿算法拼接,求得的调整误差系数和定位补偿系数如表 3 所示。

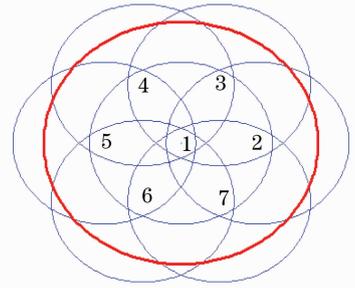


图 2 150 mm 全口径用 100 mm 子孔径检测子孔径规划图

Fig. 2 Layout of sub-aperture test of 150 mm full aperture by 100 mm sub-aperture

表 1 子孔径规划圆心坐标和定位误差

Table 1 Center coordinate and location errors of sub-aperture

Sub-aperture	1	2	3	4	5	6	7
Center coordinate	(375,375)	(586,375)	(80, 557)	(270,557)	(164,375)	(270,193)	(480,193)
Center locaiton error	(0,0)	(5,3)	(-3,1)	(-2,-2)	(3,-2)	(4,1)	(-2,5)

表 2 初始子孔径调整误差系数

Table 2 Adjusting error coefficients of initial sub-aperture

Sub-aperture	1	2	3	4	5	6	7
P	0	0.032	0.054	0.015	0.069	0.037	0.086
T_x	0	-0.083	0.056	0.037	0.072	-0.054	0.044
T_y	0	0.089	0.019	-0.029	0.066	0.028	0.046

表 3 定位补偿算法求得调整误差系数和定位补偿系数

Table 3 Tilting error and location compensation coefficients solved by location compensation algorithm

Sub-aperture	1	2	3	4	5	6	7
P	0	0.032	0.055	0.015	0.069	0.0351	0.087
T_x	0	-0.083	0.056	0.037	0.072	-0.054	0.044
T_y	0	0.089	0.019	-0.029	0.066	0.028	0.046
Location compensation coefficients	0,0	5,3	-3,1	-2,-2	3,-2	4,1	-2,5

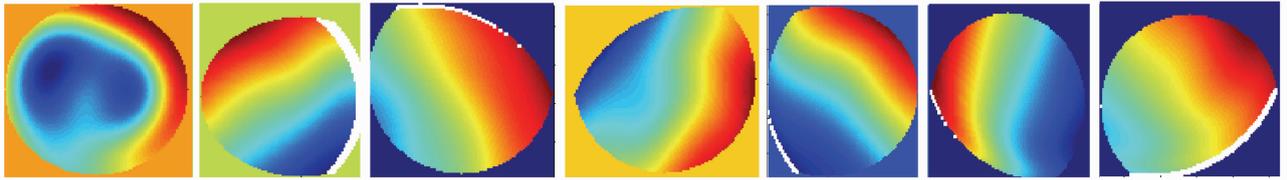


图 3 1-7 子孔径波前

Fig. 3 1-7 sub-aperture wavefront

用没有定位补偿直接求得调整误差系数如表 4 所示。由定位补偿算法拼接得到波前如图 4 所示, PV 值为 0.231λ , RMS 值为 0.048λ 。没有定位补偿

直接拼接的波前如图 5 所示, PV 值为 0.392λ , RMS 值为 0.057λ 。理论真实全口径波前如图 6 所示, PV 值为 0.229λ , RMS 值为 0.049λ 。

表 4 直接拼接求调整误差系数

Table 4 Tilt error coefficients found by direct stitching

Sub-aperture	1	2	3	4	5	6	7
P	0	0.027	0.047	0.013	0.063	0.034	0.079
T_x	0	-0.070	0.058	0.033	0.057	-0.055	0.049
T_y	0	0.082	0.037	-0.027	0.061	0.021	0.029

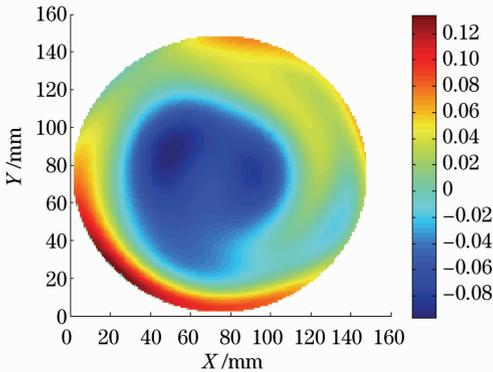


图 4 定位补偿算法拼接得到全口径波前

Fig. 4 Full-aperture wavefront stitched by location compensation algorithm

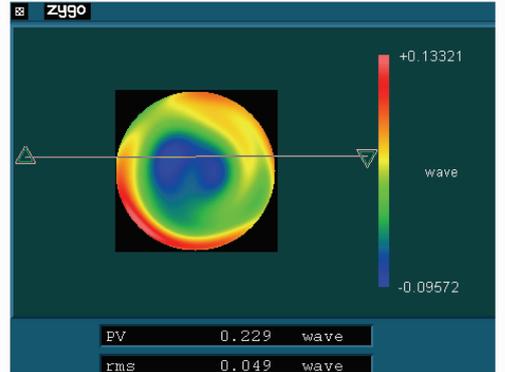


图 6 理论全口径波前

Fig. 6 Theoretic full-aperture wavefront

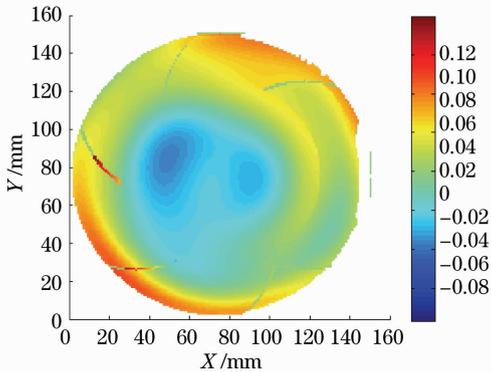


图 5 直接拼接得到全口径波前

Fig. 5 Directly stitched full-aperture wavefront

由表 4 与表 2 对比可知,直接对有定位误差的子孔径拼接时,所求的调整误差系数与设置误差调整系数差别较大,调整误差没有完全去除,同时将子孔径局部坐标映射到全口径全局坐标时存在对准误

差,在两子孔径重叠区域边缘存在突变和毛刺,拼接所得到的面形(图 6)、PV 和 RMS 值均与原始真实波前有较大差别,不能满足精度要求。用子孔径定位补偿算法求得调整误差系数和定位补偿系数与规划设定基本一致, PV 和 RMS 与原始波前相对误差分别为 0.87% 和 2.04%。检测结果和对比表明,机械运动定位误差为 1 mm 时,该算法能够很好补偿定位误差,求出调整误差系数,得到理想的结果。验证了该算法的正确性和可行性。采用 AMD Phenom8450(2.11 GHz)处理器,2 GB 内存,计算所需时间为 3.4 min。

4 实验和结果

图 7 为实验示意图,图 8 为实验实物图,通过双五棱镜对被检波前按照规划路径扫描,干涉仪检测子孔径波前并通过子孔径定位补偿算法拼接,从而得全口径被检波前信息。双五棱镜分别安装在转台

和导轨上,并随导轨和转台平移、旋转运动。因此导轨和转台的定位精度决定子孔径采样定位精度。实验中导轨平移定位精度为 $5\ \mu\text{m}$,转台角定位精度为 $10'$,定位精度较高,为了验证算法在机械精度较低情况下拼接效果,人为设置误差使导轨平移精度为 $1\ \text{mm}$,转台定位精度为 0.5° 。子孔径口径为五棱镜口径大小 $60\ \text{mm}$,被检光学系统波前的口径为 $200\ \text{mm}$ 。子孔径路径规划如图 9 所示。

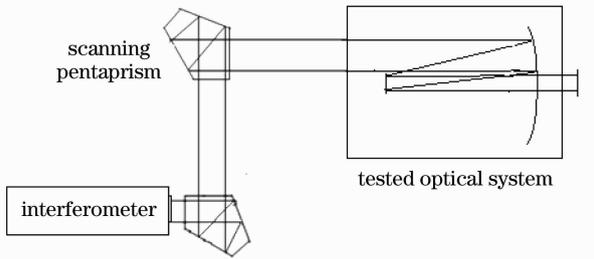


图 7 实验装置示意图

Fig. 7 Schematic of experimental setup

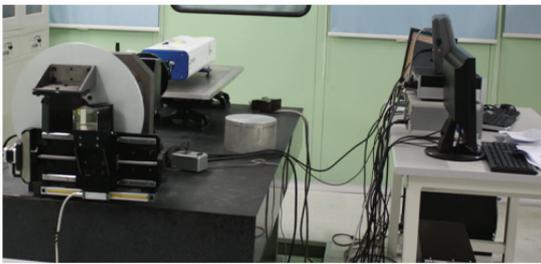


图 8 实验装置实物图

Fig. 8 Photograph of experimental setup

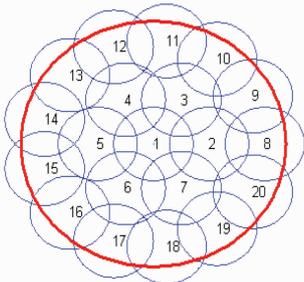


图 9 子孔径布局规划

Fig. 9 Distribution of sub-apertures

对采样子孔径用定位补偿拼接算法拼接全口径波前如图 10 所示, PV 值为 0.171λ , RMS 值为 0.0265λ , 计算所需时间为 $4.6\ \text{min}$ 。

对该光学系统用大口径 Zygo 干涉仪直接检测得到波前如图 11 所示, PV 值为 0.175λ , RMS 值为 0.027λ 。采用子孔径定位补偿拼接算法与全口径直接测量波前残差如图 12 所示, PV 值残差、RMS 值残差分别为 0.0125λ 和 0.00127λ 。表明了该算法能补偿机械运动引起的子孔径定位误差, 对子孔径

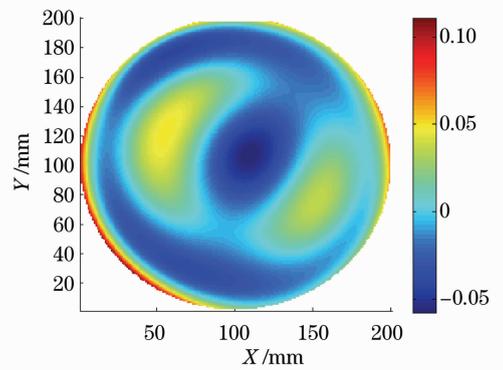


图 10 拼接子孔径波前

Fig. 10 Wavefront of stitched sub-aperture

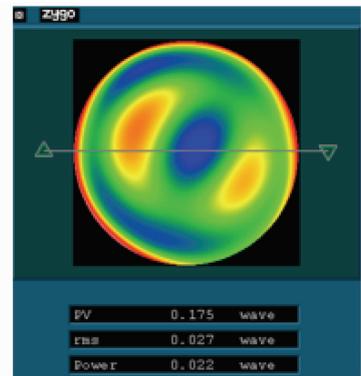
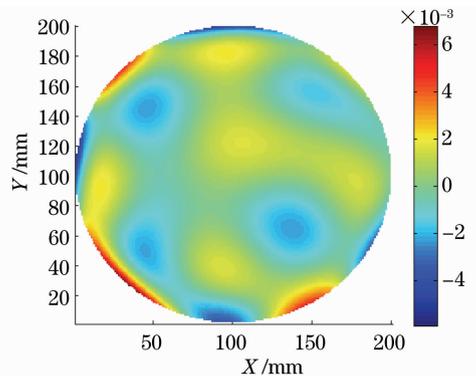
图 11 Zygo 干涉仪直接测量得到的全口径波前
Fig. 11 Full-aperture wavefront directly tested by Zygo interferometer

图 12 拼接波前与直接测量残差图

Fig. 12 Residual wavefront between directed tested and stitched wavefront

能很好地完成拼接。

5 结 论

针对子孔径拼接检测大口径光学系统波前像质,需要子孔径位置精确定位的特点,提出了子孔径定位补偿拼接算法,介绍了该算法原理和 workflows。并对该算法分别进行了仿真和实验验证,实验结果

表明,该方法简单易行,能补偿机械平移定位精度达到 1 mm,转角定位精度为 0.5°。降低了子孔径拼接检测技术对机械精度的要求,该技术为工程实用化提供了一种可行的方法。

参 考 文 献

- 1 C. J. Kim. Polynomial fit of interferograms [J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(24): 4521~4525
- 2 M. Bray. Stitching interferometry: how and why it works[C]. *SPIE*, 1999, **3739**: 259~268
- 3 J. Fleig, P. dumas, *et al.*. An automated subaperture stitching workstation for spherical and aspherical surface [C]. *SPIE*, 2003, **5188**: 296~307
- 4 Donald Golini, Greg Forbes, Paul Murphy. Method for self-calibrated subaperture stitching for surface figure measurement [P]. US Patent: 6956657B 2005
- 5 Julius Yellowhair, Peng Su, Matt Novak *et al.*. Fabrication and testing of large flats [C]. *SPIE*, 2007, **6671**: 667107
- 6 Ding Lingyan, Dai Yifan, Chen Shanyong. Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(6): 978~985
丁凌艳, 戴一帆, 陈善勇. 平面子孔径拼接测量研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(6): 978~985
- 7 Wang Lihua, Yang Wei, Li Lei *et al.*. Sub-aperture stitching with scanning pentaprism testing optical wavefront[C]. *SPIE*, 2010, **7654**: 76540Y
- 8 Zhang Rongzhu, Shi Qikai, Cai Bangwei *et al.*. Study on the experiments of the stitching interferometer [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 173~175
张蓉竹, 石琪凯, 蔡邦维 等. 子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2): 173~175
- 9 Xu Hongyan, Xian Hao, Zhang Yudong. Algorithm for reconstructing the whole-aperture wavefront from annular subaperture Hartmann gradient data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112005
徐洪艳, 鲜浩, 张雨东. 利用环形子孔径哈特曼-夏克斜率数据复原全孔径波前相位算法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112005
- 10 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
- 11 Zhang Pengfei, Zhao Hong, Zhou Xiang *et al.*. Work-piece localization in subaperture stitching test based on stereo vision [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(2): 503~511
张鹏飞, 赵宏, 周翔 等. 采用立体视角实现子孔径拼接测量的工件定位[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(2): 503~511
- 12 Wang Yuezhu, Tian Yi, Li Hongyu *et al.*. Modeling and experiment of testing sphere by annular subaperture stitching interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3082~3087
王月珠, 田义, 李洪玉 等. 环形子孔径拼接检测非球面的建模与实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3082~3087
- 13 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 883~888
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉 等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 883~888

栏目编辑: 谢 婧