

基于哈特曼-夏克波前传感器的波面拼接检测方法

郑翰清^{1,2} 饶长辉¹ 饶学军¹ 姜文汉¹ 杨金生^{1,2}

(¹ 中国科学院光电技术研究所自适应光学实验室, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 提出了一种利用小口径哈特曼-夏克(H-S)波前传感器检测大口径光学系统或元件的波面拼接检测方法。其基本原理是将待测大口径波面划分为多个小口径波面,通过最小二乘法得到各个子波面斜率图相对于基准子波面斜率图的拼接参数,恢复出全口径波面斜率图,再利用模式法复原出待测波面。建立了全局优化拼接方式的数学模型,并进行实验验证。实验采用一有效口径 $\phi 37.5$ mm 的哈特曼-夏克波前传感器对一平面反射镜面 $\phi 60$ mm 的区域进行测试,将拼接波面与利用干涉仪直接测量的全口径波面对比,其波面残差(RMS)值为 0.04λ ,拼接算法精度达到 $\lambda/40$ 。结果表明,全局优化拼接检测方案能够用于大口径光学表面的检测。

关键词 波面拼接检测;哈特曼-夏克波前传感器;全局优化;最小二乘拟合

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092912.3385

Wavefront Stitching Detection Method Based on Hartmann-Shack Wavefront Sensor

Zheng Hanqing^{1,2} Rao Changhui¹ Rao Xuejun¹ Jiang Wenhan¹ Yang Jinsheng^{1,2}

¹Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610029, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A method for wavefront stitching detection, in which small-aperture Hartmann-Shack wavefront sensor is used to test large-aperture optical system or component, is proposed. The basic principle is to divide large wavefront into certain small ones; then, the slope data in the overlap regions are used in a linear least squares fitting routine to obtain stitching parameters between each sub-frame and the benchmark frame. These parameters are then used to construct the whole gradient map, which is later used to reconstruct the whole wavefront by modal algorithm. The mathematical model of comprehensively optimized stitching mode is established and verified in our experiment. A H-S wavefront sensor with valid aperture $\phi 37.5$ mm is adopted to test a plane reflector's $\phi 60$ mm area and the stitching result is compared with the whole-aperture wavefront that directly acquired by an interferometer. The RMS value of the error wavefront is 0.04λ and the algorithm accuracy reaches up to $\lambda/40$. It proves that the comprehensively optimized stitching mode could be used in large optical surface measurement.

Key words wavefront stitching detection; Hartmann-Shack wavefront sensor; comprehensively optimized; linear least squares fitting

1 引言

大口径光学元件正越来越多的应用于天文观测、空间光学、遥感观测、激光核聚变系统等领域^[1~3],其加工和检测技术是当今国内外研究的难

点和热点。在采用常规的测量方式时,随着口径的增大,在考虑成本的前提下提高测量精度是非常困难的。而采用小口径仪器去测量大口径光学元件能更好的解决提高测量精度与降低设备成本之间的矛

收稿日期: 2009-01-07; 收到修改稿日期: 2009-03-20

作者简介: 郑翰清(1985—),女,硕士研究生,主要从事自适应光学技术的波前检测方面的研究。

E-mail: zhq.2468@gmail.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术与系统等方面的研究。

E-mail: chrao@ioe.ac.cn

盾,为光学元件的检测提供一种新方法。

目前的拼接检测方面的文章很多^[1-5],然而都有很大的局限性。王孝坤等^[2,4]实现了干涉仪拼接检测,但仅仅是三帧拼接,很难说明应用在多帧拼接大口径平面检测中的精度情况。T. D. Raymond等^[6]使用的非干涉拼接检测方案是方形口径的哈特曼-夏克(H-S)传感器,在以使用圆形口径哈特曼-夏克为主的国内外市场缺乏普适性。张蓉竹等^[4,5]提出的方案中的相邻两帧重叠区域面积大于80%,拼接检测的速度和效率低。本文基于哈特曼-夏克波前传感器的波面拼接检测方法,建立了全局优化拼接的数学模型并利用圆型口径H-S波前传感器实现了九帧拼接检测,克服了传统的两两拼接模型中误差累积和误差传递的问题,在相邻两帧重叠区域面积不到25%的情况下,实现了大口径光学表面的高精度拼接检测。

2 哈特曼-夏克波前传感器的基本原理

哈特曼-夏克波前传感器由于其结构简单、原理直白而在现代光学中有着非常广泛的用途。它是由微透镜和光电传感器组成,是一种基于斜率测量的波前测量仪器。

H-S波前传感器的原理图如图1所示,被检测波面被分成若干个采样单元,这些采样单元分别被高质量透镜组会聚在分离的焦点上,然后用CCD等光电探测器接收。子孔径范围内的波前倾斜将造成光斑的横向移动,每个分离焦点与中心点在 x 和 y 方向上的偏离程度反映了对应采样单元波面在两个方向上的平均倾斜,可以表示为

$$\Delta x = f \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \Delta y = f \frac{\partial W}{\partial y}, \quad (1)$$

式中 f 为微透镜的焦距; $\partial W/\partial x$ 和 $\partial W/\partial y$ 是子孔径波前斜率。

测得的波前斜率可以利用泽尼克多项式复原成

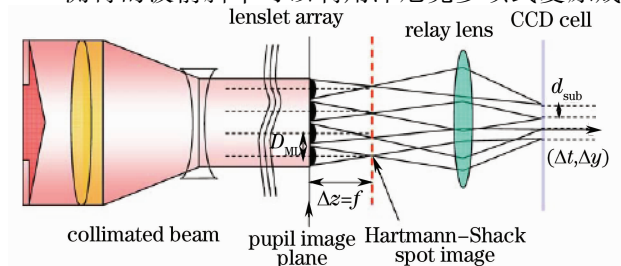


图1 哈特曼-夏克波前传感器示意图

Fig. 1 Schematic of Hartmann-Shack wavefront sensor

各阶模式系数,用数学关系式表示为

$$\mathbf{A} = \mathbf{D}^+ \mathbf{G}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ 为前 n 阶泽尼克模式系数向量, \mathbf{G} 为哈特曼-夏克波前传感器的子孔径斜率向量,矩阵 \mathbf{D}^+ 为复原矩阵 \mathbf{D} 的广义逆矩阵^[7,8]。模式法重构得到的波前为

$$\phi(x, y) = \sum_{j=1}^n a_j Z_j(x, y). \quad (3)$$

3 基于H-S波前传感器的最小二乘法波面拼接原理

拼接检测示意图如图2所示,图中W1, W2分别表示小口径H-S波前传感器在大口径非球面上进行的两次检测区域,它们之间有一定面积的重叠(图中阴影部分),每一个区域对应的相位分布分别用 $\phi(x, y)$ 和 $\phi'(x - x_0, y - y_0)$ 表示, (x_0, y_0) 为两个测量区域坐标系的相对移动量。理论上两次测量在重叠区域内的数据信息应该是相同的,然而在实际检测过程中,由于H-S波前传感器(或待测镜面)的移动误差必然使得前后两次测量到的相位分布不在同一个面上,这就导致重叠区域两侧检测结果不一致。但是,只要对重叠区域的斜率测量数据进行最小二乘拟合,就可以得到两个子波面的拼接参数,从而把两个子波面斜率图统一到一个坐标系里。

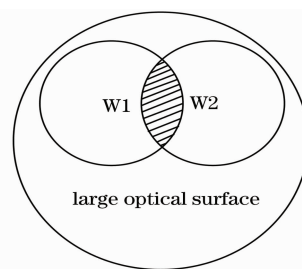


图2 拼接检测相邻两帧示意图

Fig. 2 Schematic of two adjacent frames in stitching detection

如果以W1区域的相位分布 $\phi(x, y)$ 为基准,则无论使用干涉仪测量还是H-S波前传感器均有

$$\phi(x, y) = \phi'(x - x_0, y - y_0) + ax + by + c(x^2 + y^2) + d, \quad (4)$$

式中 a, b, c 和 d 分别为两个子波面测量过程中的 x 轴和 y 轴的相对倾斜、离焦和平移误差系数。但在实际工程中,考虑到短距离的光传输,菲涅耳数定义为

$$N_F = \frac{w^2}{\lambda Z} = \frac{(60/2 \times 10^{-3})^2}{(0.635 \times 10^{-6})Z},$$

式中 ω 为衍射孔径的半径, λ 为光波波长, Z 为传播距离。可见: 当 $Z < 1.4173$ m 时, $N_F > 1000$, 此时因衍射而产生的波前变化的误差将在 1% 以下, 即波前畸变可以忽略不计^[9], 而实际测量中二维电动平移台的平移误差是毫米量级的, 因此可以忽略离焦项, (4) 式可简化为

$$\phi(x, y) = \phi'(x - x_0, y - y_0) + ax + by + d, \quad (5)$$

这些值都可以通过最小二乘法求出。(5) 式分别对 x, y 求得

$$\begin{cases} Gx(x, y) = Gx'(x - x_0, y - y_0) + a, \\ Gy(x, y) = Gy'(x - x_0, y - y_0) + b, \end{cases} \quad (6)$$

可见相对于干涉仪拼接检测, H-S 波前传感器检测消除了平移误差系数 d 的影响, 仅仅考虑相对倾斜系数 a, b , 从而降低了拼接参数求解复杂度, 以 x 方向斜率为例, 即有

$$\delta_x = \sum \{Gx(x_i, y_i) - [Gx'(x_i - x_0, y_i - y_0) + a]\}^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

式中对 a 求导并令其值为零 (y 方向的斜率图类似), 我们可以求得拼接参数 (a, b)。

4 广义的全局优化拼接模型

当拼接区域大于两个时 (假设一共 M 个), 先选定其中任意的某个子波面作为基准, 一般选择中心区域的子波面 m 作为参考标准。假设拼接参数分别为 (a_i, b_i) ($0 \leq i \leq M-1, i \neq m$), 则各子波面斜率图与基准子波面斜率图的关系为 (以 x 方向斜率)

$$G_m(x, y) = G_i(x - x_0, y - y_0) + a_i, \quad (0 \leq i \leq M-1, i \neq m) \quad (8)$$

利用最小二乘法

$$S = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{M-1} \{G(x, y) - [G_i(x - x_0, y - y_0) + a_i]\}^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

令

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = 0, \quad (0 \leq i \leq M-1, i \neq m) \quad (10)$$

可得

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{M-1} [G(x, y) - G_i(x - x_0, y - y_0)] = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^{M-1} a_i, \quad (11)$$

令

$$P_{ij} = \sum_{i \cap j} \Delta(x, y), \quad Q_{ij} = n_{ij}, \quad R_i = a_i, \quad (12)$$

式中 $\Delta(x, y) = G_i(x - x_i, y - y_i) - G_j(x - x_j, y - y_j)$

为第 i, j 帧子波面重叠区域内各个采样点处测量值之差, n_{ij} 为采样点个数。则 (11) 式可表示为

$$\left[\left(\sum_k^{M-1} P_{ik} \right)_i \right] = \left[\left(Q_{ij} - \delta_{ij} \sum_k^{M-1} Q_{ik} \right)_{ij} \right] \left[(R_i)_i \right], \quad (13)$$

式中 $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases}$ 。利用 (13) 式可得到各个子

波面相对于基准子波面的拼接参数。

相对传统的干涉仪拼接干涉检测装置, H-S 波前传感器的拼接检测方法可以克服沿垂直待测面方向的平移误差的影响 [(5) 式中的参数 d 在求导过程中已消除], 从而提高拼接精度且降低了拼接参数求解计算复杂度; 同时, 采用最小二乘拟合方法大大降低了每帧之间的倾斜误差的影响 [(6) 式中的参数 a, b]; 同时, 该装置不需要苛刻实验环境 (温度, 振动, 噪声等) 和每次移动后复杂的重定位过程, 具有检测速度快、效率高的特点。

全局优化拼接模式在计算拼接参数时将任意存在重叠区域的两个子波面都考虑在内, 增加了采样点个数; 同时, 不同于传统的两两拼接模式每次计算的是相邻两帧的相对拼接参数, 它计算的是各个子波面相对于基准子波面的绝对拼接参数, 各个子波面的拼接参数是相互关联的, 减弱了误差累积和误差传递的不良影响, 有利于拼接精度的提高^[10~12]。

5 实验方案及其结果

5.1 实验系统介绍

如图 3 所示布置实验系统, 采用口径 $\phi 60$ mm 的 H-S 波前传感器 (内置光源, 微透镜焦距 $f = 4$ mm, 入射波长 $\lambda = 0.635 \mu\text{m}$, 将入射光缩束为 $\phi 4.16$ mm, 子孔径个数为 32×32 , 直径为 0.13 mm, 每个子孔径对应的像素点数为 16×16) 的 $\phi 37.5$ mm 的有效口径进行检测, 精密电控平移台面尺寸 90 mm, 行程 100 mm, 重复定位精度小于 0.003 mm。先用标准平面反射镜对 H-S 波前传感器进行现场定标, 然后如图 4 虚线所示顺序进行九帧扫描, 每次待测面移动距离为 24.375 mm (经缩束系统后相当于移动了 13 个子孔径大小)。在各帧处, 点光源发出的光束经待测面反射回传感器, 经过缩束系统后在 CCD 上形成光斑点阵, 光斑质心偏移量即为该帧子波面的斜率值。依次采集九帧子波面数据然后利用全局优化拼接模式拼接斜率图并复原出待测波面。

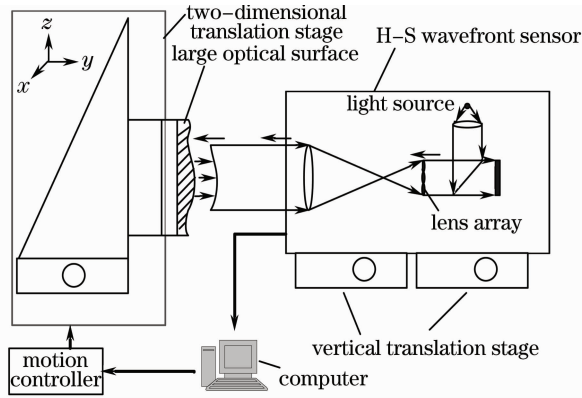


图 3 实验系统结构图

Fig. 3 Schematic configuration of system design

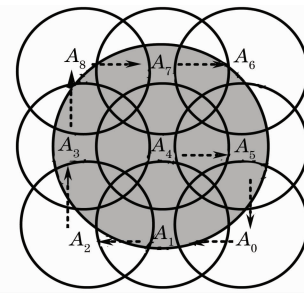


图 4 拼接检测扫描方式示意图

Fig. 4 Scanning pattern of stitching detection

5.2 实验中的具体数学模型

当按照图 4 所示顺序进行九帧扫描时,以中心 A_4 为基准,则(13)式可写为

$$\begin{pmatrix} \sum_k P_{0k} \\ \sum_k P_{1k} \\ \sum_k P_{2k} \\ \sum_k P_{3k} \\ \sum_k P_{5k} \\ \sum_k P_{6k} \\ \sum_k P_{7k} \\ \sum_k P_{8k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_k Q_{0k} & Q_{01} & 0 & 0 & Q_{05} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{10} & -\sum_k Q_{1k} & Q_{12} & Q_{13} & Q_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{21} & -\sum_k Q_{2k} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{31} & Q_{32} & -\sum_k Q_{3k} & 0 & 0 & Q_{37} & Q_{38} \\ Q_{50} & Q_{51} & 0 & 0 & -\sum_k Q_{5k} & Q_{56} & Q_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{65} & -\sum_k Q_{6k} & Q_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{73} & Q_{75} & Q_{76} & -\sum_k Q_{7k} & Q_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{83} & 0 & Q_{87} & -\sum_k Q_{8k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_0 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \\ R_8 \end{pmatrix} \quad (14)$$

5.3 实验结果

如图 5 所示,三幅子图从左到右依次为:拼接波面、干涉仪测量波面以及二者残差波面,比较分析可知,拼接后的全孔径面型与直接测量结果比较吻合。干涉仪测量结果的 RMS 值记为 σ_{veco} ,残差波面(拼

接结果与干涉仪测量结果相减)的 RMS 值记为 σ_{error} ,二者比值记为 σ_R 。将 σ_{error} 作为波前拼接的绝对精度指标,将 σ_R 作为波前拼接的相对精度指标, σ_{error} 与 σ_R 越小则拼接波面精度越高。

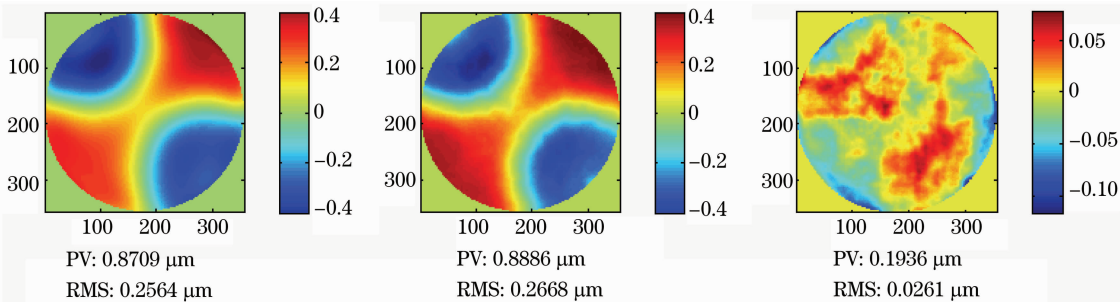


图 5 拼接结果与干涉仪检测结果对比图

Fig. 5 Comparison of the data acquired by H-S wavefront sensor and interferometer respectively

$$\sigma_{\text{error}} = 0.0261 \mu\text{m} = 0.0412\lambda, \quad (\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$$

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{\sigma_{\text{error}}}{\sigma_{\text{vecco}}} = \frac{0.0261 \mu\text{m}}{0.2668 \mu\text{m}} = 9.78\%. \quad (15)$$

进行了多次实验,且某几次改变了扫描顺序(如扫描顺序改成 $A_4-A_3-A_8-A_7-A_6-A_5-A_0-A_1-A_2$), σ_{error} 的值稳定为 0.04λ , 实验的稳定性和可重复性高。

5.4 实验中影响误差和精度的因素

5.4.1 H-S 的检测精度

本实验检测精度主要取决于标定用的平面反射镜, CCD 的采样率, 随机噪声, 复原阶数等因素。实验中的 H-S 波前传感器中装配的是模拟 CCD, 抗噪能力有限; 另一方面, 考虑到实际的光学元件检测工作中, 其面形误差的表现与大气扰动所产生的扰动误差有所不同, 主要集中在泽尼克多项式系数的低阶部分, 采用模式法复原时选取前 65 阶泽尼克多项式。对中心区域 A_i 进行 10 次检测, 每次采样 30 帧数据, 将测量值与干涉仪测量值比较, 如图 6 所示各次残差波面的 RMS 值记为 σ_i , 取均值作为 H-S 波前传感器检测的精度, 记为 σ_{HS} :

$$\sigma_{\text{HS}} = \sum_{i=1}^{10} \sigma_i / 10 = 0.0206 \mu\text{m} = 0.0325\lambda. \quad (16)$$

($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$)

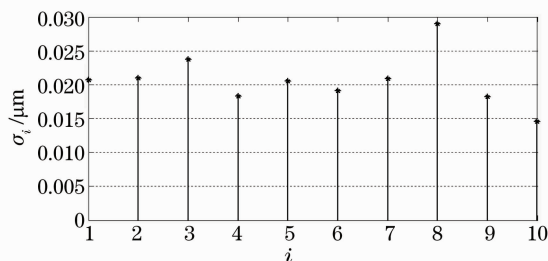


图 6 H-S 检测精度柱状图

Fig. 6 Stem map of H-S wavefront sensor test accuracy

5.4.2 拼接精度

拼接精度主要取决于 H-S 波前传感器的检测精度, 系统装调精度、二维平移台定位精度, 拼接算法精度等因素。在实验开始前, 通过两个升降台调整传感器的俯仰, 并手动微调其倾斜使其光轴与待测面垂直, 同时采用定位精度达微米级的二维电控平移台, 因此前两项因素造成的误差很小。由于拼接波面精度为 0.04λ , 假设算法误差与传感器检测误差相互独立, 则全局优化拼接算法的精度 σ_{COSM} 为

$$\sigma_{\text{COSM}} = \sqrt{\sigma_{\text{error}}^2 - \sigma_{\text{HS}}^2} = \sqrt{(0.4\lambda)^2 - (0.0325\lambda)^2} = 0.0233\lambda. \quad (\lambda = 0.6328 \mu\text{m}) \quad (17)$$

6 结 论

研究了一种波面非干涉拼接检测方法, 建立了全局优化拼接方式的数学模型, 并利用小口径圆形 H-S 波前传感器实现了九帧子波面拼接检测。通过与干涉仪直接测量的结果进行比较, 发现这种方法的拼接精度可达 0.04λ , 且具有很高的稳定性和可重复性, 能够用于大口径光学表面的检测。同时, 相比干涉仪拼接检测方法, 该方法是在波前斜率测量的基础上实现的, 拼接参数中仅有子波面的相对倾斜, 不受各拼接子波面平移误差的影响, 且不需要苛刻实验环境(温度, 振动, 噪声等)和每次移动后复杂的重定位过程, 具有成本低, 调试方便, 检测速度快且精度高的特点, 有广泛的应用前景。下一步将减小重叠区域的大小, 分析全局拼接方式对其敏感程度; 并对其它面型的光学元件表面进行检测。

参 考 文 献

- Zhang Rongzhu, Yang Chunlin, Xu Qiao *et al.*. Anti-tilting technology of the sub-aperture stitching interferograms[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7): 879~882
张蓉竹, 杨春林, 许乔等. 子孔径拼接干涉检测中去倾斜处理技术[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(7): 879~882
- 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
王孝坤, 王丽辉, 郑立功等. 子孔径拼接技术在大口径高陡度非球面检测中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(7): 1144~1148
- Masashi Otsubo, Katsuyuki Okada, Jumpei Tsujiuchi. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms[J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(2): 608~613
- Zhang Rongzhu, Shi Kaiqi, Xu Qiao *et al.*. Study on the experiments of the stitching interferometer [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2): 173~175
张蓉竹, 石琪凯, 许乔等. 子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2): 173~175
- Li Xinnan, Zhang Mingyi. Study on the sub-aperture stitching interferometry for large plano-optics [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(4): 514~517
李新南, 张明意. 大口径光学平面的子孔径拼接检验研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(4): 514~517
- T. D. Raymond, D. R. Neal, D. M. Topa *et al.*. High-speed, non-interferometric nanotopographic characterization of Si wafer surfaces[C]. *SPIE*, 2002, **4809**: 208~216
- Jiang Wenhan, Li Huagui. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[C]. *SPIE*, 1990, **1271**: 82~93
- Li Xinyang, Jiang Wenhan. Zernike modal wavefront reconstruction error of Hartmann sensor on measuring the atmosphere disturbed wavefront [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(2): 243~249
李新阳, 姜文汉. 哈特曼传感器对湍流畸变波前的泽尼克模式复原误差[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(2): 243~249

- 9 Yang Huafeng, Rao Changhui, Zhang Yudong *et al.*. Analysis of the conjugation request between the wavefront sensors and the deformable mirrors in adaptive optics systems [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 27~34
杨华峰, 饶长辉, 张雨东等. 自适应光学系统中变形镜和波前传感器共轭位置要求的分析[J]. *光电工程*, 2009, **36**(4): 27~34
- 10 Liang Chun, Liao Wenhe, Shen Jianxin *et al.*. An adaptive detecting centroid method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 430~434
梁春, 廖文和, 沈建新等. Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 430~434
- 11 Ma Xiaoyu, Fan Zihua, Rao Changhui *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in optical readout system of uncooled infrared imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 490~495
马晓燠, 樊志华, 饶长辉等. 基于哈特曼波前传感器的非制冷红外成像光学读出系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 490~495
- 12 Deng Zewei, Ma Xiuhua, Shi Xiangchun. Wavefront sensing technology of high repetition rate heat capacity master oscillator power amplifier system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1055~1058
邓泽微, 马秀华, 施翔春. 用于高重复频率热容主振荡功率放大器激光系统的波前检测技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1055~1058