

文章编号 1004-924X(2015)04-0975-07

利用相位差异法检测镜面面形

马鑫雪*, 王建立

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了验证相位差异波前检测器演示系统利用自带光源独立完成波前检测任务的能力, 搭建了基于相位差异法检测镜面面形的实验平台。测试时在焦面和离焦面上同时采集短曝光图像, 在已知离焦量的前提下解算出波前相位分布并恢复出目标, 从而实现对大镜面像差的估计。为了进一步验证相位差异测量方法的准确性, 对相位差异法与高精度的 ZYGO 干涉仪得到的测量结果进行了比较分析。实验结果表明: 两种方法获得的面形误差分布及误差的峰谷值(PV)和均方根值(RMS)一致性很好, 而波前 RMS 的测量精度达到了 $2.83/1\ 000\lambda$ 。得到的结果表明提出的相位差异法能有效地检测出镜面的像差, 且准确性很好。

关键词: 镜面面形; 面形检测; 相位差异法; 泽尔尼克多项式; 像差

中图分类号: TQ171.65; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0975

Surface testing with phase diversity method

MA Xin-xue*, WANG Jian-li

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xinxuema@hotmail.com

Abstract: To verify the demonstration system of a phase difference wavefront detector by using its own light source to complete the wavefront detection independently, an experiment platform to detect the mirror surface shape with the phase diversity method is set up. The phase diversity method collects shorter exposure images in the focal plane and away from the focal plane at the same time, then it calculates the distribution of wavefront solutions and recovers the target based on known defocus, so as to realize the estimation of large mirror aberration. In order to further validate the phase diversity method, the measurement results from phase diversity method are compared with that from a high accuracy ZYGO interferometer. Experimental results demonstrate that the error distribution, PV values and RMS values of the two methods are well in agreement, and their wavefront RMS accuracy is $2.83/1\ 000\lambda$. These results mean that the phase diversity method effectively detects the mirror aberration and has good feasibility and accuracy.

Key words: mirror surface; surface test; phase diversity method; Zernike polynomial; aberration

收稿日期: 2013-05-28; 修订日期: 2013-07-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA8082035)

1 引言

自适应光学、主动光学等新型光学系统常在后端将光路分成两束,一路进入波前传感设备用于探测系统波前相位,以校正波面;另一路进入终端成像相机。为了使波面校正效果与相机成像效果完全对应,应尽量减少这两束光路之间的波面相位差别,但由于光路调整、元件加工等因素,两束光之间通常会存在非共光路像差,从而影响校正效果。如果能精确地测量非共光路像差,并将其加到变形镜上作为初始面形,就会显著提高校正效果,从而提高系统的成像质量。但这种非共光路像差的测量在不改变系统光路的前提下进行,因此无法应用传统的检测设备进行测量。

1979 年, Gonsalves 首次提出相位差异 (Phase Diversity, PD) 技术,其核心思想是在成像系统的焦面和离焦面上同时采集两幅图像,在已知离焦量的前提下解算出波前相位分布并恢复出目标^[1-2]。Paxman 等进一步完善了 PD 理论^[3-5],通过建立多帧 PD 在高斯噪声和泊松噪声情况下的数学模型,大大提高了 PD 在噪声情况下的估计精度。Vogel 等利用反演问题提出了快速数值解法^[6-7]。Löfdahl 等将相位差异散斑 (Phase-Diversity Speckle, PDS) 理论成功地应用于太阳观测领域,获得了高分辨率的太阳表面组织图像^[8-9]。Bolcar 把 PD 理论引入到合成孔径及拼接镜的检测中^[10]。Löfdahl 等人将相位差异复原 (Phase-Diversity Phase Retrieval, PDPR) 用于 Keck 望远镜的自适应光学 (Adaptive Optics, AO) 系统的非共光路的像差标定^[11-13]。

通常,地基望远镜得到的图像会受大气扰动和望远镜像差影响而质量降低。其中,望远镜像差主要受光学元件的加工误差、光学设备的装调误差、望远镜内部温度不均匀和重力变形等因素的影响。在现有观测条件下,测试和控制大型望远镜的室内装调存在困难,即使在山上等室外环境下完成装调检测也不容易。为控制望远镜的成像质量,本文在 PD 理论研究和实验验证的基础上,搭建了相位差异法检测镜面面形的实验平台,用以验证相位差异波前检测器演示系统利用自带光源独立完成波前检测任务的能力。

2 基本原理

图 1 是具有焦面和离焦面两个采集通道的 PD 系统的光路示意图。PD 图像恢复问题可以看作已知受扰动图像求原信号相位的反演问题。本文使用多通道来改善反演问题的病态性。

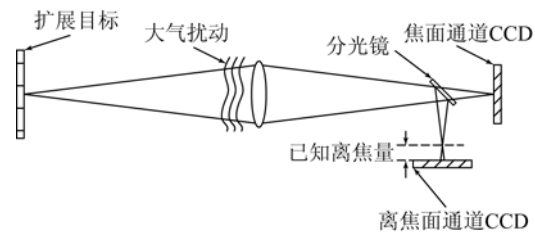


图 1 相位差异法图像采集示意图

Fig. 1 Scheme for image data-collection by PD method

2.1 系统模型

大气和望远镜可近似看成线性空间不变系统。非相干光照明下,高斯噪声模型的成像公式为^[1]:

$$d(x) = f(x) * s(x) + n(x), \quad (1)$$

式中: d 为 CCD 上采集到的目标图像, f 为目标的理想图像, s 为点扩散函数, n 为高斯噪声。其中,点扩散函数为^[1]:

$$s(x) = |F^{-1} \{ P(v) e^{i\varphi(v)} \}|^2, \quad (2)$$

其中: F^{-1} 为傅里叶逆变换, P 为光瞳函数, v 为光瞳面坐标, φ 为波前相位。 φ 可用 Zernike 多项式的和表示:

$$\varphi(v) = \theta(v) + \sum_{m=1}^M \alpha_m Z_m(v), \quad (3)$$

其中: α_m 为第 m 项多项式系数, Z_m 为第 m 项 Zernike 多项式基底, θ 为已知的固定离焦相位。

2.2 评价函数

在高斯噪声模型下,目标与多通道图像的均方差可看做似然函数^[16-18],本文的多通道相位差异法的评价函数可表示为:

$$L(f, \alpha) = \frac{1}{2N} \sum_u \left(\sum_{c=1}^C \sigma_c^2 \left| \frac{D_c(u) - F(u)}{FS_c(u)} \right|^2 + \gamma |F(u)|^2 \right), \quad (4)$$

式中: u 为频域坐标, T 和 C 分别为使用的帧数及通道数; N 为单幅图像的像素总数; $\{\alpha\}_t$ 为需要求解的 t 帧 Zernike 系数, $\gamma |F(u)|^2$ 是 Tik-

honov 正则项^[6-7],可提高算法的稳定性和收敛速度,γ表示非负的正则项系数,σ_c⁻²为通道 c 的噪声读出方差的倒数。

对式(4)求关于 F 的导数,并令导数为 0,求得式(4)关于 F 的稳定点,这个稳定点为:

$$F = \frac{\sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_c S_c^*}{\gamma + \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_c|^2} \quad (5)$$

将式(5)带入式(4)得到:

$$L(a) = \frac{1}{2N} \sum_u \left[\sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |D_c|^2 - \frac{\left| \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} D_c S_c^* \right|^2}{\gamma + \sum_{c=1}^C \sigma_c^{-2} |S_c|^2} \right] \quad (6)$$

由此将目标估计作为独立中间过程与相位估计分离,得到与目标无关的评价函数^[5]。式(6)是多通道之间读出噪声不一致时的评价函数。本文所述的多通道实际上是成像相机在若干时刻及调焦电机的带动下,在若干已知离焦量的离焦面上采集来的图像。由此可知,各个通道的 σ_c⁻² 是相等的,为一常数。确定评价函数后,图像恢复过程就可描述为数学最优化问题,本文采用了适合大规模变量寻优的简单约束有限内存拟牛顿法(L-BFGS-B)^[19-20]进行搜索。

3 实 验

3.1 实验原理及结构

PD 波前传感器测量的光路结构如图 2 所示。从激光器发出的高斯光束经针孔后变成球面波,通过透镜 2 变成平行光。经过孔径光阑出射到棱镜上的光被分成两部分:一部分发出的光不需要考虑;另一部分的平行光经透镜 1 后汇聚到被测镜面上后反射。反射的光束带有相位信息(即像差),再次由分光棱镜分为两路:其中一路原路返回;另一路经过会聚透镜 3 会聚在 CCD 相机上,用于实现基于 PD 的波前测量。相机被安置在一个可移动平台上,沿光轴方向移动相机并进行角度姿态微调,使相机接收到焦点前后离焦量不同的图像,用 PD 算法进行处理,得到被测镜面面形的像差。

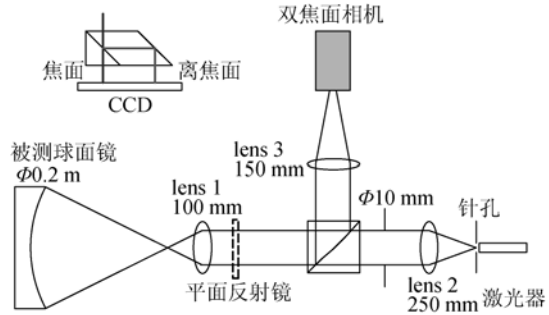


图 2 相位差异测量的原理图
Fig. 2 Scheme of PD method

被测镜为口径 0.2 m、焦距 1 m 的球面镜,系统波长 λ=635 nm,透镜 3 的焦距为 150 mm,中心出瞳口径为 10 mm,焦深约为 0.286 mm。实验中选取的离焦量为 0, ±1, ±1.5, ±2 mm。相机像元尺寸为 6.45 μm,每一个离焦位置分别截取以目标为中心的 128×128 像素的区域,曝光时间为 20 ms,移动平台的准确度为 ±5 μm。PD 检测实验装置如图 3 所示。

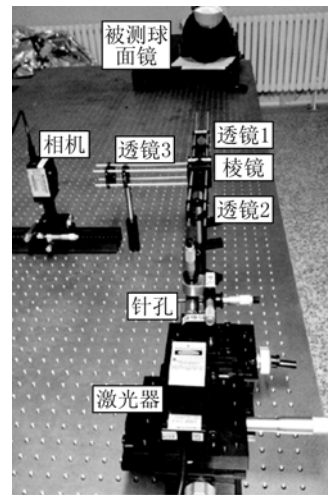


图 3 相位差异检测的实验图

Fig. 3 Experimental system of PD measurement

3.2 实验步骤

第一步,搭建实验系统。首先,固定好 0.2 m 望远镜,如图 4 所示;其次,确定激光器和针孔的位置,保证激光器射出的光与望远镜的镜面中心共轴。然后将显微物镜及针孔置于激光器前,调节显微物镜及针孔,使针孔出射的光是较理想的球面波。接着再次确认激光器、针孔、望远镜镜面共轴。

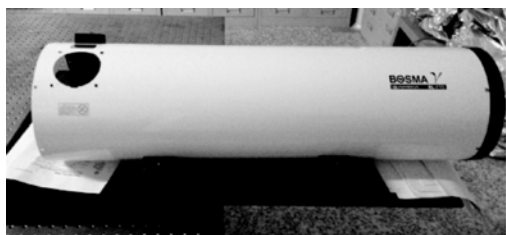


图 4 被测望远镜

Fig. 4 Tested telescope

第二步,加入透镜 1,调整位置使透镜与激光器及针孔共轴。从针孔出射的球面波经过透镜 1 后变为平行光。

第三步,在光路中加入分光棱镜、光阑、透镜 2,使它们与被测镜及针孔共轴,并根据分光镜返回光的平行程度来调整透镜 2 的位置。

第四步,固定透镜 3 和 phaseview 相机,使得从被测镜面反射的光束经棱镜后进入 phaseview 相机内。

第五步,调整平移台使相机上的成像点最小,记录该位置,并将它作为离焦距为 0 的位置。

第六步,在离焦距分别为 $\pm 1, \pm 1.5, \pm 2$ mm 处用相机采集图像。

第七步,在透镜 1 和棱镜间加平面反射镜,重复以上步骤并用相机采集图像。

第八步,用 PD 算法处理图像,得到被测镜面面形的像差。

3.3 实验结果及分析

图 5 为 PD 检测被测镜面面形的结果,图 6 为用 PD 恢复后的图像。

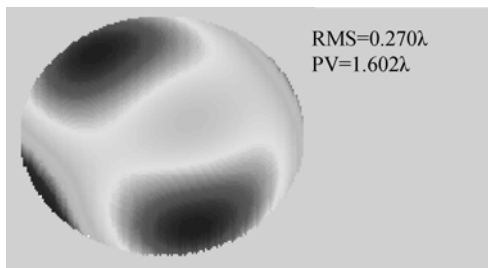


图 5 PD 检测结果

Fig. 5 Result of PD measurement

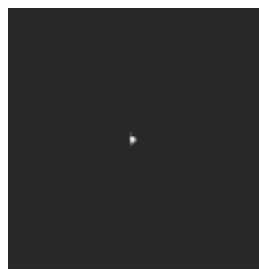


图 6 恢复的图像

Fig. 6 Retrieved image



图 7 干涉仪检测实验系统

Fig. 7 Experimental system of ZYGO interferometric measurement

为了验证 PD 的准确性,本文用干涉仪对同一个被测镜进行了检测,从 ZYGO 干涉仪出射的平行光射到被测镜面上后反射,反射的光束带有指定的相位信息(即像差),原路返回 ZYGO 干涉仪^[21-26],与干涉仪的参考光发生干涉,形成干涉条纹。通过分析干涉条纹计算出待测波前。干涉仪检测实验系统如图 7 所示。

干涉仪的检测结果如图 8 所示。对比图 5 和图 8 可知:两种方法的测量结果(面形误差分布及误差的峰谷值(PV)和均方根值(RMS))相一致,从而说明了 PD 测量方法的可行性和准确性。

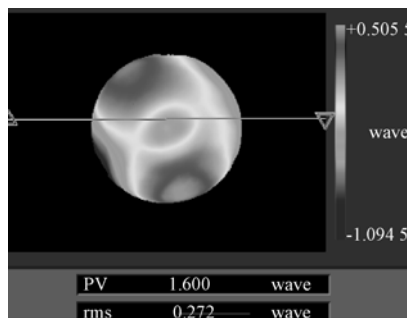


图 8 干涉仪检测结果

Fig. 8 Result of ZYGO interferometer

为了更好地说明 PD 算法的可重复性和可行性,将望远镜旋转不同的角度再进行检测。PD 检测得到的结果如图 9 所示,ZYGO 干涉仪得到的结果如图 10 所示。

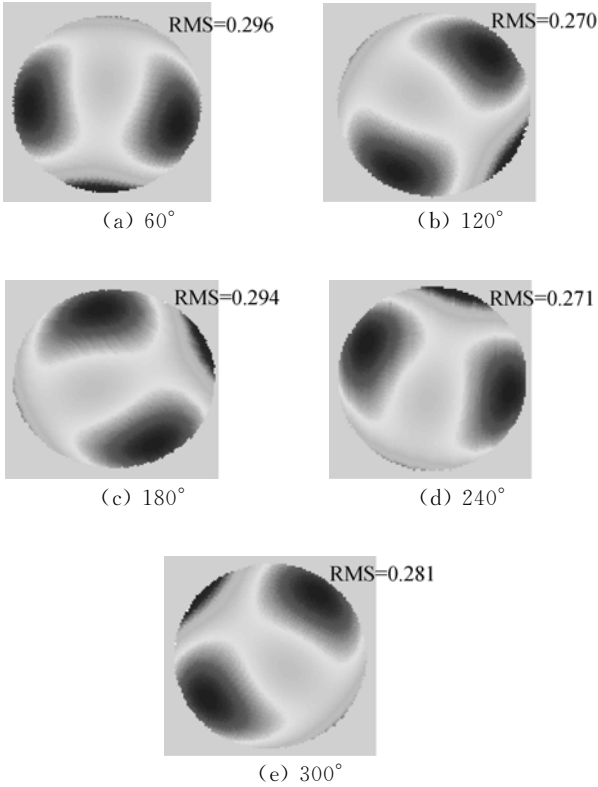


图 9 望远镜旋转不同角度时 PD 的检测结果
Fig. 9 Results of PD for mirror surface of telescope at different rotation angles

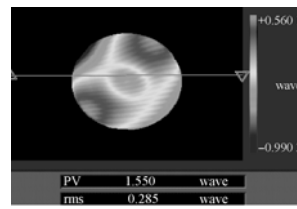


图 10 望远镜旋转不同角度时 ZYGO 测量的结果
Fig. 10 Results of ZYGO interferometer for mirror surface of telescope at different rotation angles

表 1 PDWS 与 ZYGO 的 RMS 对比

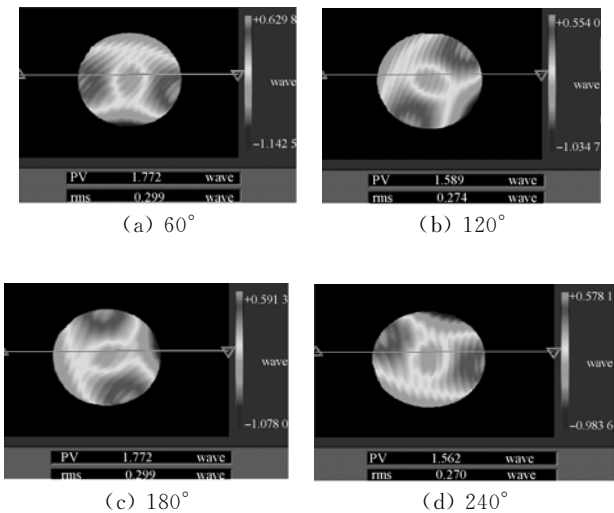
Tab. 1 Contrast of RMS between PDWS and ZYGO

角度/(°)	PD	ZYGO
初始	0.270λ	0.272λ
60	0.296λ	0.299λ
120	0.270λ	0.274λ
180	0.294λ	0.297λ
240	0.271λ	0.270λ
300	0.281λ	0.285λ

从表 1、图 9 和图 10 可以看出:PD 的面形检测结果与 ZYGO 干涉仪的测量结果一致,PD 波前 RMS 的测量精度可达 2.83/1 000λ,且重复性良好。

4 结 论

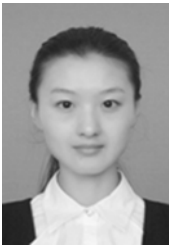
本文搭建了 PD 检测球面镜面面形的实验平台,在该实验平台上对 PD 检测法进行了验证,并与高精度的 ZYGO 干涉仪的测量结果进行了比较分析。对比结果表明,两种方法得到的面形误差分布及误差的峰谷值(PV)和均方根值(RMS)一致性较好,PD 对波前 RMS 的测量精度为 2.83/1 000λ,说明了用 PD 检测镜面面形的可行性和准确性,为地基大口径望远镜镜面面形的 PD 检测应用提供了支持。



参考文献:

- [1] ROGGEMANN M C, WELSH B M. *Imaging Through Turbulence* [M]. Washington: CRC Press, 1996.
- [2] 吴元昊, 王斌, 赵金宇, 等. 利用相位差异技术恢复宽带白光图像[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1849-1854.
WU Y H, WANG B, ZHAO J Y, *et al.*. Restoration of broadband white light image using phase diversity technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1849-1854. (in Chinese)
- [3] PAXMAN R G, SCHULZ T J, FIENUP J R. Joint estimation of object and aberrations by using phase diversity [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1992, A9: 1072-1085.
- [4] PAXMAN R G, SELDIN J H, LÖFDAHL M G, *et al.*. Evaluation of phase-diversity techniques for solar-image restoration[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, 466: 1087-1099.
- [5] THELEN B J, PAXMAN R G, CARRARA D A, *et al.*. Maximum a posteriori estimation of fixed aberrations, dynamic aberrations, and the object from phase-diverse speckle data[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1999, A16: 1759-1768.
- [6] VOGEL C R. *Computational Methods for Inverse Problems* [M]. Philadelphia: SIAM Press, 2002.
- [7] VOGEL C R, CHAN T, PLEMMONS R. Fast algorithms for phase diversity-based blind deconvolution[J]. *SPIE*, 1998, 3353: 994-1005.
- [8] LÖFDAHL M G, BERGER T E, SHINE R S, *et al.*. Preparation of a dual wavelength sequence of high-resolution solar photospheric images using phase diversity [J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 495: 965-972.
- [9] LÖFDAHL M G, SCHARMER G B. Wave-front sensing and image restoration from focused and defocused solar images [J]. *Astron. Astrophys.*, 1994, 107: 243-264.
- [10] BOLCAR M R. *Phase Diversity for Segmented and Multi-Aperture Systems* [D]. University of Rochester, 2008.
- [11] Measure piston misalignment on the segmented primary mirror of the keck II telescope[J]. *SPIE*, 1998, 3356: 1190-1201.
- [12] BLANC A, FUSCO T, HARTUNG M, *et al.*. Calibration of NAOS and CONICA static aberrations application of the phase diversity technique [J]. *Astron. Astrophys.*, 2003, 399: 373-383.
- [13] BLANC A, MUGNIER L M, IDIER J. Marginal estimation of aberrations and image restoration by use of phase diversity [J]. *Opt. Soc. Am.*, 2003, 20(6):1035-1046.
- [14] SELDIN J H, PAXMAN R G. Phase-diverse speckle reconstruction of solar data[J]. *SPIE*, 1994, 2302: 268-280.
- [15] 王建立, 汪宗阳, 王斌, 等. 相位差异散斑法图像复原技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1165-1170.
WANG J L, WANG Z Y, WANG B, *et al.*. Image restoration by phase-diversity speckle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1165-1170. (in Chinese)
- [16] 王斌, 汪宗洋, 王建立, 等. 双相机相位差异散斑成像技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1384-1390.
WANG B, WANG Z Y, WANG J L, *et al.*. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6): 1384-1390. (in Chinese)
- [17] 赵金宇, 陈占芳, 王斌, 等. 相位差异法目标函数并行化改造[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 431-438.
ZHAO J Y, CHEN ZH F, WANG B, *et al.*. Improvement of phase diversity object function's parallelity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 431-438. (in Chinese)
- [18] RICHARD A, CARRERAS, SERGIO R, *et al.*. Phase diversity experimental results: deconvolution of ν Scorpii [J]. *Optics Communications*, 1996, 130:13-19.
- [19] BYRD R H, LU P, NOCEDAL J, *et al.*. A limited memory algorithm for bound constrained optimization[J]. *SIAM. J. Sci. Comput.*, 1995, 5: 1190-1208.
- [20] ZHU C, BYRD R H, LU P, *et al.*. LBFGS-B: Fortran subroutines for large-scale bound constrained optimization[R]. *Report NAM-11, EECS Department, Northwestern University*, 1994.
- [21] MILLERD J E, WYANT J C. Simultaneous phase-shifting Fizeau interferometer [P]. *US Patent*, 2005: 20050046864.
- [22] LESLIE DECK. Vibration-resistant phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 1996, 35

- (34):6655-6662.
- [23] BURGE J H, WYANT J C. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics [J]. *SPIE*, 1995, 2576:258-269
- [24] REICHELT S, PRUSS C, TIZIANI H J. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(22):4468-4479.
- [25] SOMMARGREN G E, PHILLION D W, CAMPBELL E W. Sub-nanometer interferometry for aspheric mirror fabrication[C]. *The 9th International Conference on Production Engineering, Osaka, Japan*, 1999.
- [26] REICHELT S, TIZIANI H J. Twin-CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry [J]. *Optics Communications*, 2003, 220:23-32.

作者简介:

马鑫雪(1987—),女,黑龙江伊春人,博士研究生,主要从事 PR 算法、最优化算法以及波前探测等方面的研究。E-mail: xinxuema@hotmail.com

导师简介:

王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)