

利用相位恢复波前传感技术检测球面镜面形

马鑫雪,王建立,王 斌

(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: 为了验证相位恢复波前传感器系统波前检测的能力,搭建了基于相位恢复测量方法的波前传感器检测球面镜面形的实验平台。该平台结构简单,抗震动,可以在对光路不进行任何改变的前提下,利用成像系统上已有的相机对整个光学系统进行在位检测。为了验证相位恢复波前传感器测量方法的准确性,将相位恢复波前传感器测量结果与 ZYGO 干涉仪测量结果进行比较,实验结果表明在面形误差分布及误差的峰谷值(PV)和方均根值(RMS)上,两者具有极大的相似性,所以利用相位恢复波前传感器技术能有效地检测出球面镜的面形误差。

关键词: 相位恢复; 波前传感器; 球面镜面形; 泽尼克多项式; 像差

中图分类号: TP391.4; TH703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3428-06

Spherical mirror estimation using phase retrieval wavefront sensor technology

Ma Xinxue, Wang Jianli, Wang Bin

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

Abstract: In order to verify the estimated wavefront ability of the phase retrieval wavefront sensor (PRWS) system, a measured spherical mirror of experiment platform with the method of PRWS was set up, whose structure was simple and there was little affection of the platform and even can be ignored, even use the camera of the imaging system to estimate the whole optical system without changing anything. In order to validate the veracity of PRWS, PRWS measurement results were compared with ZYGO interferometer measurement results, experimental results demonstrate that good agreement is obtained among the errors distribution, PV value and RMS value of ZYGO interferometer, so using PRWS technology can effectively estimate the aberration of spherical mirror.

Key words: phase retrieval; wavefront sensor; spherical mirror; Zernike polynomial; aberration

收稿日期:2014-02-11; 修订日期:2014-03-13

基金项目:国家 863 计划(2011AA8082035)

作者简介:马鑫雪(1987-),女,助理研究员,博士,主要从事 PR 算法、最优化算法以及波前探测等方面的研究。

Email:maxinxue@gmail.com

0 引言

传统光学检测设备很难完成大型光学镜面面形加工过程中的在位实时检测^[1-3]。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。地基望远镜得到的图像质量受大气扰动影响而降低,测试和控制大型望远镜的装调存在困难。为提高望远镜的光学质量,需要一种简单且高精度的方法。相位恢复波前传感技术^[4-8](Phase Retrieval Wavefront Sensor, PRWS)是一种基于焦面图像信息波前解算的焦平面波前探测技术,其原理是通过采集多幅给定离焦量的图像^[9-14],通过傅里叶光学方法解算得到光学系统的波前相位信息。系统硬件构成简单,可对光学元件及系统进行动态检测^[7,15],在光学加工、系统装调、主动光学、自适应光学等领域具有很好的应用前景。

在 PR 理论研究和试验验证的基础上,为了验证 PRWS 系统波前检测的能力,搭建了 PRWS 检测镜面面形的实验平台。并将 PRWS 测量结果与高精度的 ZYGO 干涉仪^[16-21]测量结果进行比较分析,结果表明在面形误差分布及误差的峰谷值(PV)和方均根值(RMS)上,两者具有极大的相似性,说明了利用 PRWS 技术能有效地检测出镜面的面形误差。

1 相位恢复波前传感器基本原理

相位恢复(PR)系统通过在指定离焦面上采集的图像、其对应的离焦量以及光瞳函数这三个已知条件来反向解算光学系统像差^[22]。如图 1 所示的简单光路可以描述 PR 系统的基本原理。

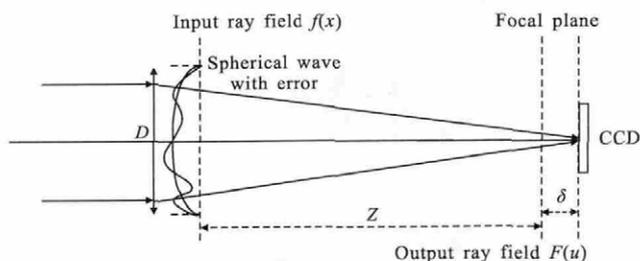


图 1 相位恢复光路原理图

Fig.1 Schematic of optical path of PR

假设一个被测光学系统的通光孔径为 D , 焦距

为 Z , 激光光源的中心波长为 λ , 它的光瞳约束函数为 $|f(x)|$, 其中 x 为一个二维向量, 它的波前畸变为 θ , 则对于焦平面, 它的广义光瞳函数是:

$$f(x)=|f(x)|\exp[i\theta(x)] \quad (1)$$

式中: θ 可用泽尼克多项式拟合, $\theta(x)=\sum_n \alpha_n Z_n(x)$ 。其中实数 α_n 表示第 n 项多项式系数, Z_n 表示第 n 项泽尼克多项式基底。

对于线性光学系统来说, 广义光瞳 $f(x)$ 在离焦量为 δ 的平面上的脉冲响应函数 $F(u)$ 为:

$$F(u)=|F(u)|\exp[i\psi(u)]=\text{FI}\{f(x)\exp[\varepsilon(x, \delta)]\} \quad (2)$$

式中: x 是光瞳域坐标; u 是像域坐标; x 和 u 都是二维向量; ψ 为脉冲响应的相位部分; FI 为二维傅里叶变换, FI^{-1} 为二维反傅里叶变换; $\varepsilon(x, \delta)$ 表示在位置 x 由离焦量 δ 所造成的波前畸变。

对于一个 PR 系统, 公式(1)中的 $|f(x)|$ 是已知的被测光学系统的先验条件, 对应于光瞳的大小与形状; $|F(u)|^2$ 是通过 CCD 采集来的图像; CCD 所在位置的离焦量为 δ 。用 PR 进行波前探测的目的就是通过以上的已知量来计算得到 α_n 。所以笔者把 PR 问题形式化描述为: 已知 $|f(x)|$, $\delta_1, |F_1(u)|^2, \delta_2, |F_2(u)|^2, \dots, \delta_M, |F_M(u)|^2$, 求光瞳的波前畸变 θ 所对应的各项 Zernike 系数 α_n , 其中 $|f(x)|$ 是光瞳约束函数, 距离焦面 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_M$ 处采集的图像分别为 $|F_1(u)|^2, |F_2(u)|^2, \dots, |F_M(u)|^2$ 。PR 的目标函数和目标函数关于 α_n 的偏导数分别为公式(3)和公式(4)。

$$B_k=E_{\text{FK}}^2=N^{-2} \sum_{m=1}^M \sum_u [|G_{m,k}(u)|-|F(u)|]^2 \quad (3)$$

$$\partial_{\alpha_n} B_k=-2 \sum_m \sum_x |f(x)| |g_{m,k}'(x)| \sin[\theta_{m,k}'(x)-\theta_{m,k}(x)] Z_n(x) \quad (4)$$

有了目标函数及其对各项 Zernike 系数的导数, 便可以用数学最优化的办法求解波前的各项 Zernike 系数值, 在这里使用之前相位差异(PD)^[23-26]实验中已经应用的 L-BFGS^[29](The limited memory variation of the Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)算法。求解步骤如下。

(1) 选定初始点 $\alpha^0 \in R^n$ 和初始对称正定矩阵 $H_0 \in R^{n \times n}$ 。设定搜索精度 $\varepsilon > 0$ 和有限记忆次数 m 。计算梯度 $\partial_{\alpha} B(\alpha^0)$, 并令 $k=0$ 。

(2) 若 $\|\partial_{\alpha} B(\alpha^k)\| \leq \varepsilon$, 则算法终止, 得到最优解 α^k , 即为所求的波前的各项 Zernike 系数值。否则, 令

$$d^k = -H_k \partial_\alpha B(\alpha^k).$$

(3) 采用非精确线性搜索策略,根据公式(3)及(4)确定步长 c_k ,更新 $\alpha^{k+1} = \alpha^k + c_k d^k$,并根据公式(4)计算梯度值 $\partial_\alpha B(\alpha^{k+1})$ 。

(4) 利用初始值 H_0 或者中间信息构造 $H_k^{(0)}$,反复利用公式(5)进行 $m+1$ 次修正得到 H_{k+1} :

$$H_{k+1} = \left(I - \frac{S_k Y_k^T}{S_k Y_k} \right) H_k^{(0)} \left(I - \frac{Y_k S_k^T}{S_k Y_k} \right) + \frac{S_k S_k^T}{S_k Y_k} \quad (5)$$

式中: $s_k = \alpha^{k+1} - \alpha^k, y_k = \partial_\alpha B(\alpha^{k+1}) - \partial_\alpha B(\alpha^k)$ 。

(5) 令 $k=k+1$,转步骤(2)。其中, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]$, α^k 表示第 k 次迭代所得到的 α 的值。在 L-BFGS 算法中,只需要存储 $m+1$ 个向量组 $\{s_i, y_i\}_{i=k-m}^k$ 就能够计算出下次迭代的 Hessian 矩阵的逆近似。在实际计算中,通常要根据问题规模大小及机器性能选择合适的 m 值来控制存储量。一般 m 取值为 3~20,在文中 m 取 5。

2 实验设计

2.1 实验原理及结构

相位恢复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,

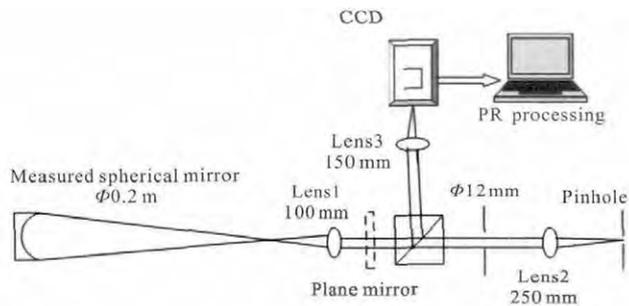


图 2 相位恢复波前传感器测量的原理图

Fig.2 Schematic diagram of PRWS

通过透镜 2 变成平行光,经过孔径光阑打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,另一部分经过会聚透镜 3 会聚在 CCD 相机上,用于实现基于相位恢复的波前测量。相机被安置在一个可移动平台上,通过使相机沿光轴方向移动和角度姿态微调,得到焦点前后接收不同离焦量的图像,用 PR 算法进行处

理,得到被测镜面面形的面形误差。

被测镜为口径 0.2 m、焦距 1 m 的球面镜,系统波长为 $\lambda=635 \text{ nm}$,透镜 3 的焦距为 150 mm,中心出瞳口径为 12 mm,焦深约为 0.286 mm。实验中选取离焦量分别为 0 mm, $\pm 1 \text{ mm}$, $\pm 1.5 \text{ mm}$, $\pm 2 \text{ mm}$ 。相机像元尺寸为 $6.45 \mu\text{m}$,每一个离焦位置分别截取以目标为中心的 128×128 像素大小区域,曝光时间为 20 ms,移动平台的准确度为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。PRWS 实验系统如图 3 所示。图 4 是用干涉仪检测的实物图。

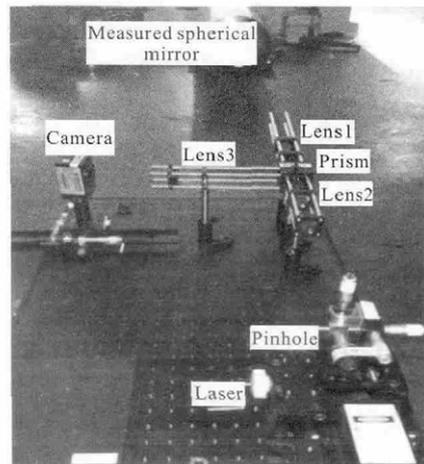


图 3 PRWS 实验光路图

Fig.3 Experimental system of PRWS



图 4 干涉仪检测的实验图

Fig.4 Experimental system of ZYGO interferometer measurement

2.2 实验结果及分析

用 PR 算法对采集到的七副图像进行处理,得到被测球面镜面形的结果如图 5 所示。用干涉仪检测的结果如图 6 所示。

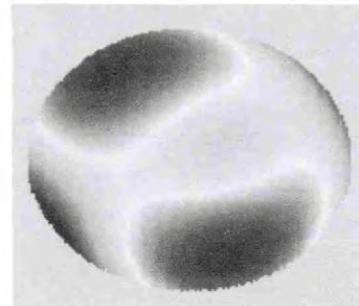


图 5 PRWS 检测结果(RMS=0.272λ, PV=1.608λ)

Fig.5 Result of PRWS measurement(RMS=0.272λ, PV=1.608λ)

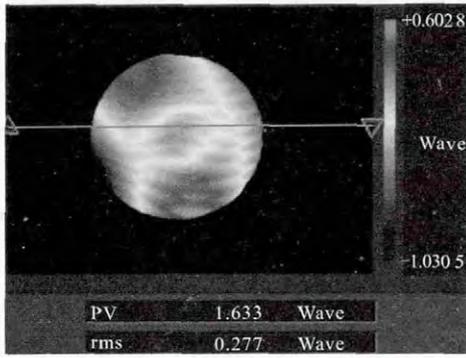


图 6 ZYGO 检测的结果(RMS=0.277λ, PV=1.633λ)

Fig.6 Result of ZYGO interferometer measurement(RMS=0.277λ, PV=1.633λ)

为了有力证明 PRWS 的准确性,对图5 和图 6 这一组的 Zernike 项前 19 项的系数进行比较,得到的结果如表 1 所示。由于 Zernike 前四项对结果的影响不大,所以将前四项忽略不计。

表 1 Zernike 项系数的比较

Tab.1 Comparison of Zernike coefficients

Items	Zernike	ZYGO	PRWS
1	Piston	0	0
2	X tilt	0	0
3	Y tilt	0	0
4	Defocus	0	0
5	Ast x	-0.380	-0.372
6	Ast y	-0.552	-0.543
7	Coma x	0.018	-0.017
8	Coma y	0.044	0.043
9	Primary spherical	-0.217	-0.213
10	Trefoil x	-0.013	-0.012
11	Trefoil y	0.240	0.235
12	Secondary ast x	0.045	0.044
13	Secondary ast y	0.028	0.027
14	Secondary coma x	-0.065	-0.063
15	Secondary coma y	-0.007	-0.006
16	Secondary spherical	0.100	0.099
17	Tetrafoil x	0.030	0.029
18	Tetrafoil y	0.014	0.013
19	Secondary trefoil x	-0.020	-0.019

由表 1 可以看出:ZYGO 和 PRWS 前 19 项系数

整体呈线性关系,如图 7 所示。

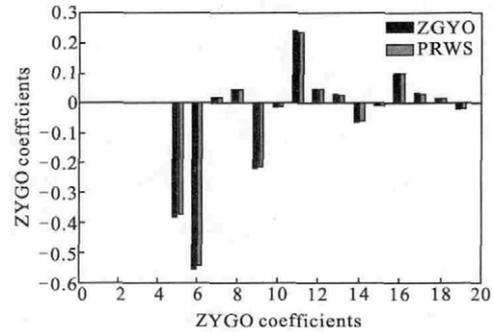


图 7 ZYGO 和 PRWS 前 19 项系数的柱状图

Fig.7 Histogram of the 19th coefficients of ZYGO and PRWS

为了说明 PRWS 测量方法的重复性和有效性,将被测镜旋转不同角度,用 PRWS 分别测量不同角度的面形,得到如图 8(a)~(d)所示的结果。

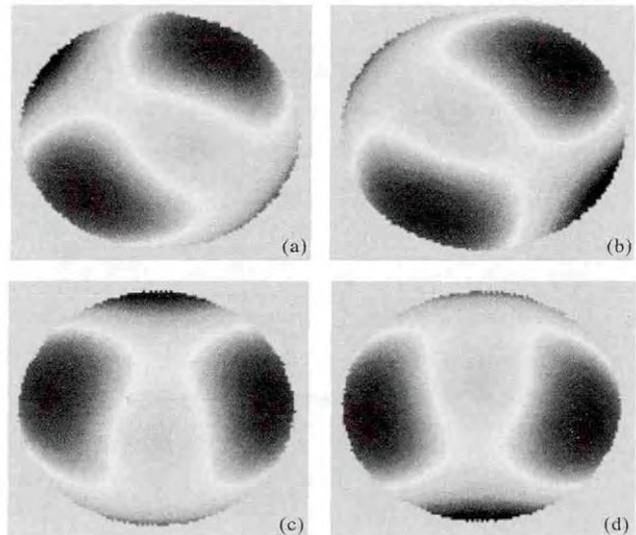


图 8 PRWS 检测球面镜不同角度的面形

Fig.8 Estimated spherical mirror with PRWS in different angles

由表 1 和图 7 的结果可以看出,旋转后与旋转前波前检测结果的趋势是一致的;如图 8 所示,在不同角度用 PRWS 检测球面镜的面形结果的趋势也是一致的,进而验证了 PRWS 测量方法的重复性和有效性。从图 5 与图 6 可以看出:对于同一块被测镜,在所测结果的面形误差分布及误差的峰谷值(PV)和方均根值(RMS)上,两种测量方法具有相似性,这说明了 PRWS 测量方法的可行性和准确性。

3 结论

文中搭建了基于相位恢复测量方法的波前传感

器检测球面镜面形的实验平台,经旋转前后的检测结果和不同角度检测结果的对比,说明了该方法的重复性和有效性。为了进一步验证 PRWS 测量方法的准确性,将 PRWS 测量结果与高精度的 ZYGO 干涉仪测量结果进行比较分析,实验结果表明在面形误差分布、误差的峰谷值(PV)和方均根值(RMS)上,两者具有相似性,所以利用 PRWS 技术能有效地检测出球面镜的面形误差,这也说明 PRWS 测量方法的可行性和准确性。为后续要进行的大镜面在位检测研究的可行性提供了实验支持。

参考文献:

- [1] Brady Gregory R, Fienup J R. Improved optical metrology using phase retrieval [C]//Optical Fabrication & Testing, 2004, 10: 1-3.
- [2] Yang Huizhen, Gong Chenglong. Phase retrieval for a kind of wavefront sensor based on pupil phase diversity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1112002. (in Chinese)
杨慧珍, 龚成龙. 一种基于瞳面相位差的波前传感器相位恢复[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1112002.
- [3] Osten W. Some answers to new challenges in optical metrology[C]//SPIE, 2008, 7155: 715503-1-715503-16.
- [4] Ohara C M, Faust J A, Lowman A E, et al. Phase retrieval camera optical testing of the advanced mirror system demonstrator [C]//SPIE, 2004, 5487: 1744-1756.
- [5] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction phase pictures [J]. *Optic*, 1972, 35(2): 237-246.
- [6] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: A comparison [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [7] Fienup J R, Marron J C, Schulz T J, et al. Hubble space telescope characterized by using phase-retrieval algorithms[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(10): 1747-1767.
- [8] Dean Bruce H, Aronstein David L, Smith J Scott, et al. Phase retrieval algorithm for JWST flight and testbed telescope[C]//SPIE, 2006, 6265: 1-17.
- [9] Li Fei, Rao Changhui. Study on phase diversity wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0804001. (in Chinese)
李斐, 饶长辉. 高精度相位波前探测器的数值仿真和实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0804001.
- [10] Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin. A new phase diversity wave-front error sensing method based on genetic algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1015-1019. (in Chinese)
梁士通, 杨建峰, 薛彬. 基于遗传算法的改进相位差法波前误差传感技术研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1015-1019.
- [11] Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Zou Yongchao, et al. Study of aberration correction in light path of adaptive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1214002.
蒋鹏志, 马浩统, 邹永超, 等. 自适应光学系统内光路的像差校正研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1214002.
- [12] Devaney A J, Childlaw R. On the uniqueness question in the problem of phase retrieval from intensity measurement [J]. *JOSA A*, 1978, 68(10): 1352-1354.
- [13] Han Bing, Xiao Wen, Pan Feng, et al. Optimization of space sampling distance of phase retrieval algorithm for in-line digital holography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49: 120903. (in Chinese)
韩冰, 肖文, 潘锋, 等. 同轴数字全息相位恢复算法采样距离优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49: 120903.
- [14] Fu Fuxing, Zhang Bin. Recovery of high frequency phase of laser beam with wavefront distortion [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0402009. (in Chinese)
付福兴, 张彬. 激光束畸变波前高频相位的恢复 [J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402009.
- [15] Brady Gregory R, Fienup J R. Phase retrieval as an optical metrology tool [C]//Optical Fabrication & Testing. Topical Meeting of the Optical Society of America, SPIE Technical Digest, 2005, TD03: 139-141.
- [16] Millerd J E, Wyant J C. Simultaneous phase-shifting Fizeau interferometer, US: 20050046864[P]. 2005.
- [17] Leslie Deck. Vibration-resistant phase-shifting interferometry [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6655-6662.
- [18] Burge J H, Wyant J C. Applications of computer-generated holograms for interferometric measurement of large aspheric optics[C]//SPIE, 1995, 2576: 258-269.
- [19] 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.
- [20] Sommargren G E, Phillion D W, Campbell E W. Sub-nanometer interferometry for aspheric mirror fabrication[C]//The 9th International Conference on Production Engineering, 1999.
- [21] Reichelt S, Tiziani H J. Twin-CGHs for absolute calibration in wavefront testing interferometry [J]. *Optics Communications*, 2003, 220: 23-32.
- [22] Ma Xinxue, Wang Jianli, Wang Bin. Study on phase retrieval

- algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(2): 217–221. (in Chinese)
- 马鑫雪, 王建立, 王斌. 相位恢复技术算法的探究[J]. *激光与红外*, 2012, 42(2): 217–221.
- [23] Wang Bin, Wang Zongyang, Wu Yuanhao, et al. Calibration of no-common path aberration in AO system using multi-channel phase-diversity wave-front sensing[J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(7): 1683–1692. (in Chinese)
- 王斌, 汪宗洋, 吴元昊, 等. 利用多通道相位差异波前探测法检测自适应光学系统非共光路像差[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1683–1692.
- [24] Wang Jianli, Wang Zongyang, Wang Bin, et al. Image restoration by phase-diverse speckle [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(5): 1165–1170. (in Chinese)
- 王建立, 汪宗洋, 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.
- [25] Zhao Jinyu, Chen Zhanfang, Wang Bin, et al. Parallelity improvement of object function for phase diversity [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(2): 431–438. (in Chinese)
- 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.
- [26] Wang Bin, Wang Zongyang, Wang Jianli, et al. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(6): 1384–1390. (in Chinese)
- 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.
- [27] Wang Zongyang, Wang Bin, Wu Yuanhao, et al. Calibration of non-common path static aberrations by using phase diversity technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701007. (in Chinese)
- 汪宗洋, 王斌, 吴元昊, 等. 利用相位差异技术校准非共光路静态像差[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0701007.
- [28] Zhao Jinyu, Wu Yuanhao, Ma Xinxue, et al. Image restoration based on real time wave-front information [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(6): 1350–1356. (in Chinese)
- 赵金宇, 吴元昊, 马鑫雪, 等. 基于实时波前信息的图像复原[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1350–1356.
- [29] Byrd R H, Lu P, Nocedal J. A limited-memory algorithm for bound-constrained optimization [J]. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1995, 16(5): 1190–1208.