

文章编号: 1003-501X(2009)06-0120-06

# 薄反射镜主动光学实验系统

李宏壮<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 林旭东<sup>1,2</sup>, 刘欣悦<sup>1</sup>, 陈宝刚<sup>1</sup>, 韩昌元<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 用口径 400 mm、厚 12 mm 的薄反射镜作为实验镜进行了主动光学实验。支撑系统由背部 12 个主动支撑点和 3 个固定支撑点组成, 主动支撑点采用由压电陶瓷促动器和压力传感器组成的力促动器, 用于控制实验镜面形, 固定支撑点用于控制实验镜的定位。通过 Shack-Hartmann 波前传感器测量镜面面形并拟合出 Zernike 像差, 用阻尼最小二乘法计算出校正力, 通过 PID 算法闭环控制各促动器施加力的过程。通过主动校正, 将初始支撑状态下的  $1.16\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm) RMS 面形精度校正到  $0.07\lambda$  RMS, 优于镜面抛光后的  $0.1\lambda$  RMS。

**关键词:** 主动光学; Shack-Hartmann 波前传感器; 力促动器; 阻尼最小二乘法

中图分类号: O439; TH751

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.06.024

## Active Optics Experiment System with Thin-mirror

LI Hong-zhuang<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, LIN Xu-dong<sup>1,2</sup>,LIU Xin-yue<sup>1</sup>, CHEN Bao-gang<sup>1</sup>, HAN Chang-yuan<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Active optics experiment was carried out with a 400 mm diameter, 12 mm thickness mirror. The support system of the mirror includes 12 active support points and 3 fixed support points. The active support was implemented by force actuator, which was composed of piezoelectric ceramics actuator and loadcell. The active support points were used for controlling the surface of the test mirror, and the fixed points were used for positioning the mirror. The mirror surface was tested by Shack-Hartmann wavefront sensor, the active corrective force was calculated through damp least square method, and the process of exerting force of the actuator was controlled by PID algorithm. The initial surface error is  $1.16\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm) RMS. After active correction, the surface error is  $0.07\lambda$  RMS, which is better than  $0.1\lambda$  of surface quality after polishing.

**Key word:** active optics; Shack-Hartmann wavefront sensor; force actuator; damp least square method

## 0 引言

主动光学是现代大型望远镜研制中的关键技术, 其原理是通过分布在反射镜背面的促动器阵列向反射镜施加轴向作用力进行镜面面形控制, 达到校正波面误差的目的。

本实验是针对 4 m 轻量化薄镜面形式望远镜研制而进行的缩比试验, 主要验证主动控制算法, 实现对主镜面进行有效的检测与主动控制, 保证主镜面形精度, 以改善光学系统的像质。

欧洲南方天文台为研制 NTT(New Technology Telescope)望远镜进行了口径 1 m 的主动光学实验, 该装置采用厚 18.9 mm, 口径为 1050 mm 的球面反射镜, 轴向安装了 75 个主动支撑点, 校正低频像差后, 面

收稿日期: 2008-12-09; 收到修改稿日期: 2009-03-06

基金项目: 中科院三期创新项目

作者简介: 李宏壮(1980-), 男(汉族), 黑龙江巴彦人。助理研究员, 博士, 主要研究主动光学、光学设计、光学测试等。

E-mail: bayanjilin@yahoo.com.cn。

形精度达到 68 nm *RMS*, 对高频像差(5 阶像散)校正后面形达到 5 nm *RMS*<sup>[1-5]</sup>。日本为 7.5 m 主动望远镜 JNLT(Japanese National Large Telescope)也研制了一个 62 cm 的主动光学试验系统, 实验镜厚 2.1 cm, 轴向 9 个主动支撑点<sup>[6]</sup>。我国南京天文仪器厂为 Lamost 望远镜研制了口径为 500 mm 主动光学实验装置, 该实验镜厚 6 mm, 背部采用 58 个主动支撑点, 校正后波前误差为 0.02~0.04  $\mu\text{m RMS}$ <sup>[7]</sup>。另外, 北京理工大学采用 230 mm 口径, 18 mm 厚的实验镜的进行了主动光学实验<sup>[8]</sup>。

本实验采用 400 mm 口径, 12 mm 厚的半弯月型球面反射镜构建实验系统, 采用 Hartmann 波前传感器测量面形误差, 通过背部 12 个主动支撑点, 将初始状态的 1.16 $\lambda$  *RMS* 的面形误差校正到 0.07 $\lambda$  *RMS*, 证明了校正算法及校正过程是正确可行的。

1 实验系统组成

实验系统主要由镜面面形检测、面形误差拟合、促动器所需校正力的计算以及校正力的施加等环节组成, 下面分别介绍。

1.1 实验主镜

实验主反射镜镜参数为: 口径  $D=400$  mm, 厚  $d=12$  mm, 半弯月形, 凹球面, 曲率半径  $R=2400$  mm, K9 材料, 重 3.7 kg, 加工后面形精度为 0.1 $\lambda$  *RMS*( $\lambda=632.8$  nm)。

实验镜的支撑结构由 12 个主动支撑点和 3 个固定支撑点组成, 支撑点的分布如图 1 所示。

1.2 镜面面形检测

采用从莫斯科国立大学自适应光学实验室购买的 ShaH\_1220 型 Shack-Hartmann 波前传感器作为面形检测设备, 如图 2 所示。其参数如表 1。

该 Hartmann 测量球面反射镜的光路结构如图 3 所示。为方便使用, 将各个元件(包括光源、空间滤波

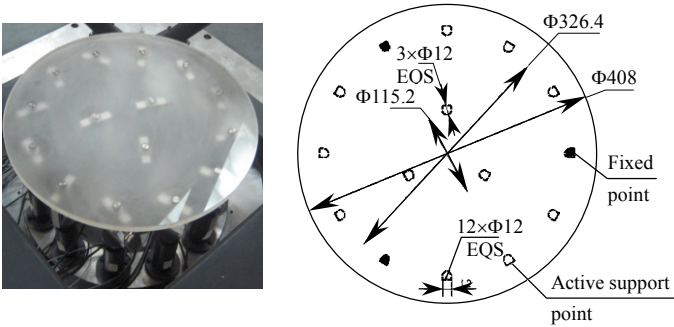


图 1 实验主反射镜支撑点分布

Fig.1 Primary mirror and supports



图 2 Shack-Hartmann 波前传感器

Fig.2 Shack-Hartmann wavefront sensor

表 1 Shack-Hartmann 波前传感器技术指标  
Table 1 Specifications of Shack-Hartmann wavefront sensor

|                               |                                    |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Aperture dimension (diameter) | 12.5 mm                            |
| Lenslet number                | 32×32                              |
| Spatial resolution            | 480 $\mu\text{m}$                  |
| Number of points for analysis | 650                                |
| Processing frequency          | 68 Hz                              |
| Working wavelength            | 300~1 000 nm                       |
| Absolute accuracy <i>RMS</i>  | $\lambda/20$ ( $\lambda=632.8$ nm) |
| Relative accuracy <i>RMS</i>  | $\lambda/60$ ( $\lambda=632.8$ nm) |

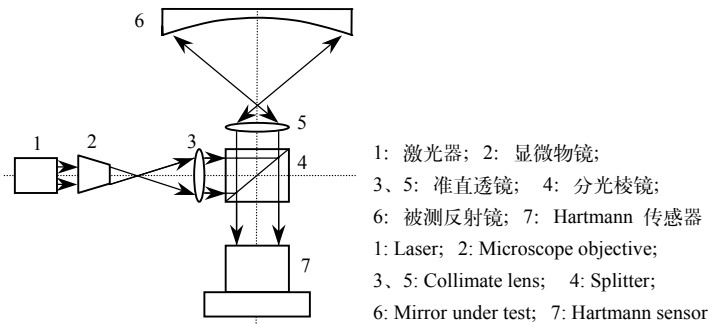


图 3 用 Hartmann 传感器测量球面反射镜的光路结构

Fig.3 Light path of testing spherical mirror using Hartmann sensor



图 4 装调后的 Hartmann 传感器

Fig.4 Hartmann sensor after alignment

器、准直透镜、分束棱镜)之间的相对位置通过一个基板固定后,作为一个整体仪器使用,装调后如图4。

通过标准球面反射镜作标定,将仪器本身的误差去除,相对测试精度可达  $0.01\lambda \text{ RMS} (\lambda=632.8 \text{ nm})$ 。

测试薄镜面面形时, Hartmann 的测试有效点为 150 个,如图 5 所示。对于本实验 400 mm 口径的实验镜测试及 12 个主动支撑点校正 7 项低频像差的应用, 150 个采样点是够用的, 由于主动支撑点个数的限制, 采样点数增多检测出的镜面面形高阶像差也无法校正。

### 1.3 校正力的计算

#### 1.3.1 响应函数的确定

主动反射镜上每个促动器的作用力都会引起一定的镜面变形, 总的变形是各个促动器作用力的综合结果, 即各个促动器单独作用引起镜面变形的线性迭加。对单个促动器而言, 镜面变形量与作用力的大小满足线性关系。

如果用  $w_i(x, y)$  表示第  $i$  个促动器在单位作用力下引起的镜面变形, 则总的镜面变形量  $W(x, y)$  为

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n F_i w_i(x, y) \quad (1)$$

式中:  $n$  为促动器的个数,  $i$  为促动器的序号,  $F$  为该促动器施加的作用力,  $w_i(x, y)$  为第  $i$  个促动器施加单位作用力时所引起的镜面变形, 称为该促动器的响应函数。

确定促动器响应函数的方法有 3 种: 解析计算法、直接测量法和有限元分析法。

本实验采用直接测量法, 利用 Hartmann 传感器分别测量出反射镜在单个促动器施加单位作用力前后的镜面面形, 求出这两个面形之差即为该促动器的响应函数。由各个促动器的响应函数组成的矩阵为该镜面的刚度矩阵。

镜面面形用 Zernike 多项式拟合。

#### 1.3.2 阻尼最小二乘法计算校正力

为了校正面形误差  $W$ , 校正力  $f$  应产生  $-W$  的面形, 即  $f$  应满足:

$$Cf = -W \quad (2)$$

式中  $C$  为刚度矩阵。由于面形误差  $W$  用 Zernike 多项式表示<sup>[10-11]</sup>, 写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial a_1}{\partial f_1}, \frac{\partial a_1}{\partial f_2}, \dots, \frac{\partial a_1}{\partial f_n} \\ \frac{\partial a_2}{\partial f_1}, \frac{\partial a_2}{\partial f_2}, \dots, \frac{\partial a_2}{\partial f_n} \\ \vdots \\ \frac{\partial a_m}{\partial f_1}, \frac{\partial a_m}{\partial f_2}, \dots, \frac{\partial a_m}{\partial f_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $n$  为促动器个数,  $a_i (i=1, \dots, m)$  为待校正面形的第  $i$  项 Zernike 系数, 共校正  $m$  项。

由于促动器个数有限, 很难对高频误差校正, 因此实验中只对低频的 7 项像差进行校正, 包括  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  ast3( $A_2^2$ 、 $B_2^2$ ),  $x$ 、 $y$  方向 com3( $A_3^1$ 、 $B_3^1$ ), sph3( $A_4^0$ ),  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  Triangular 像差( $A_3^3$ 、 $B_3^3$ )。

用最小二乘法求式(3)的解为

$$f = -(C^T C)^{-1} C^T W \quad (4)$$

采用最小二乘法求主动反射镜在校正时往往会出现很大的校正力, 甚至超出反射镜能够承受的范围, 采用阻尼最小二乘法, 通过适当的阻尼因子对较大的解进行衰减可以解决这个问题:

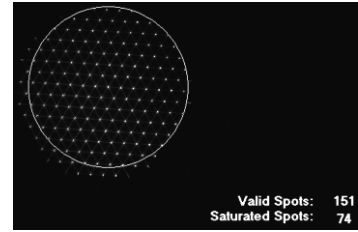


图5 Hartmann 在被测镜上的有效测试点

Fig.5 Valid spots of Hartmann sensor on the tested mirror

$$f = -(C^T C + PI)^{-1} C^T W \quad (5)$$

$P$  是阻尼因子(正值),  $I$  是单位矩阵, 取适当的  $P$  值, 使求得的校正力在可接受的范围内。 $P$  值的选取范围较宽, 在 0.01~1 范围内均可,  $P$  值越大, 对解衰减得越大。实验中取  $P=0.1$ 。

### 1.3.3 校正力的施加

主动支撑的力促动器由位移促动器与力传感器组成, 位移促动器采用 PI 公司的 P-843.40 型压电陶瓷促动器, 位移行程为 60  $\mu\text{m}$ , 如图 6 所示。力传感器采用美国 Celtron 系列称重传感器 STC S-5 kg 型, 测量范围为  $\pm 5 \text{ kg}$ , 如图 7。实验镜固定在支撑结构上, 如图 8 所示。

通过 PID 算法闭环控制各促动器施加力的过程, 使各促动器的输出力都在一个较小的误差范围内稳定。PID 控制采用 Labview 软件完成, 最终力促动器精度达到  $\pm 0.05 \text{ N}$ 。



图 6 压电陶瓷促动器

Fig.6 Piezoelectricity actuator

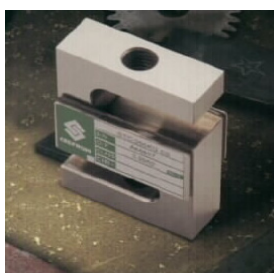


图 7 力传感器

Fig.7 Load cell



图 8 实验镜及其支撑结构

Fig.8 Primary mirror and structure

## 2 实验过程及结果分析

整个系统的结构如图 9 所示, 400 mm 实验主镜水平安装在轴向支撑上, 通过两块平面反射镜将光路折叠, 在主镜曲率中心处, 用 Hartmann 传感器测量波前, 由于两块反射镜的面形精度接近  $\lambda/30 \text{ RMS}$ , 所以它们对测量结果的影响可忽略。

初始状态: 此时各主动支撑点的支撑力如下(单位 N):

$$f = [2.66 \quad 2.24 \quad 2.48 \quad 2.66 \quad 2.23 \quad 1.91 \quad 2.66 \quad 3.01 \quad 2.53 \quad 2.73 \quad 2.63 \quad 2.23]$$

初始时面形误差  $RMS=1.16\lambda$ , 干涉图和面形轮廓如图 10 所示。

首先测试刚度矩阵。使单独一个促动器增加 1 N 的支撑力, 测试面形, 将其像差系数与初始面形的像差系数相减, 得到该促动器的响应函数, 即 7 个像差系数变化量。依次得到 12 个促动器的响应函数, 组成刚度矩阵。刚度矩阵测试完成后, 即可进行面形的主动校正。

校正第 11 次后的面形的干涉图、面形轮廓及结果如图 11 所示。由于第 12 次校正后面形没有改善, 因此不再做校正, 通过 11 次校正后面形精度达到  $RMS=0.07\lambda$ ,  $PV=0.34\lambda$ 。



图 9 实验系统的结构

Fig.9 Configuration of experiment system

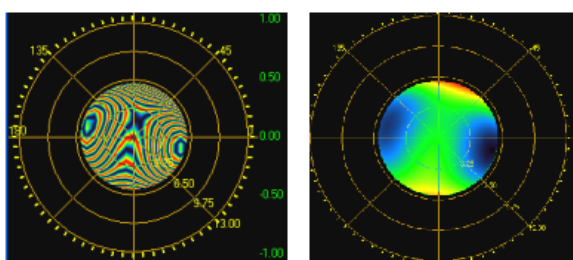


图 10 初始时的干涉图和面形轮廓

Fig.10 Initial mirror surface figure

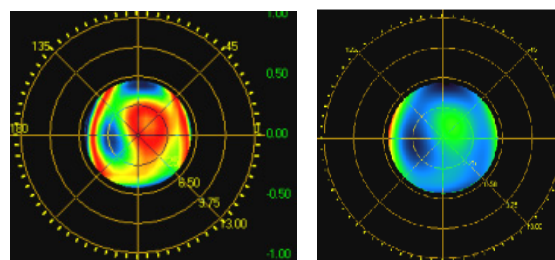


图 11 经过 11 次校正后的面形轮廓( $RMS=0.07\lambda$ )

Fig.11 Surface contour after 11 times of correction( $RMS=0.07\lambda$ )

各项像差系数在校正过程中的变化如图 12 所示, 图中横轴为校正次数, 纵轴为各像差值, 单位 $\lambda$ ( $\lambda=6320.8\text{ nm}$ )。

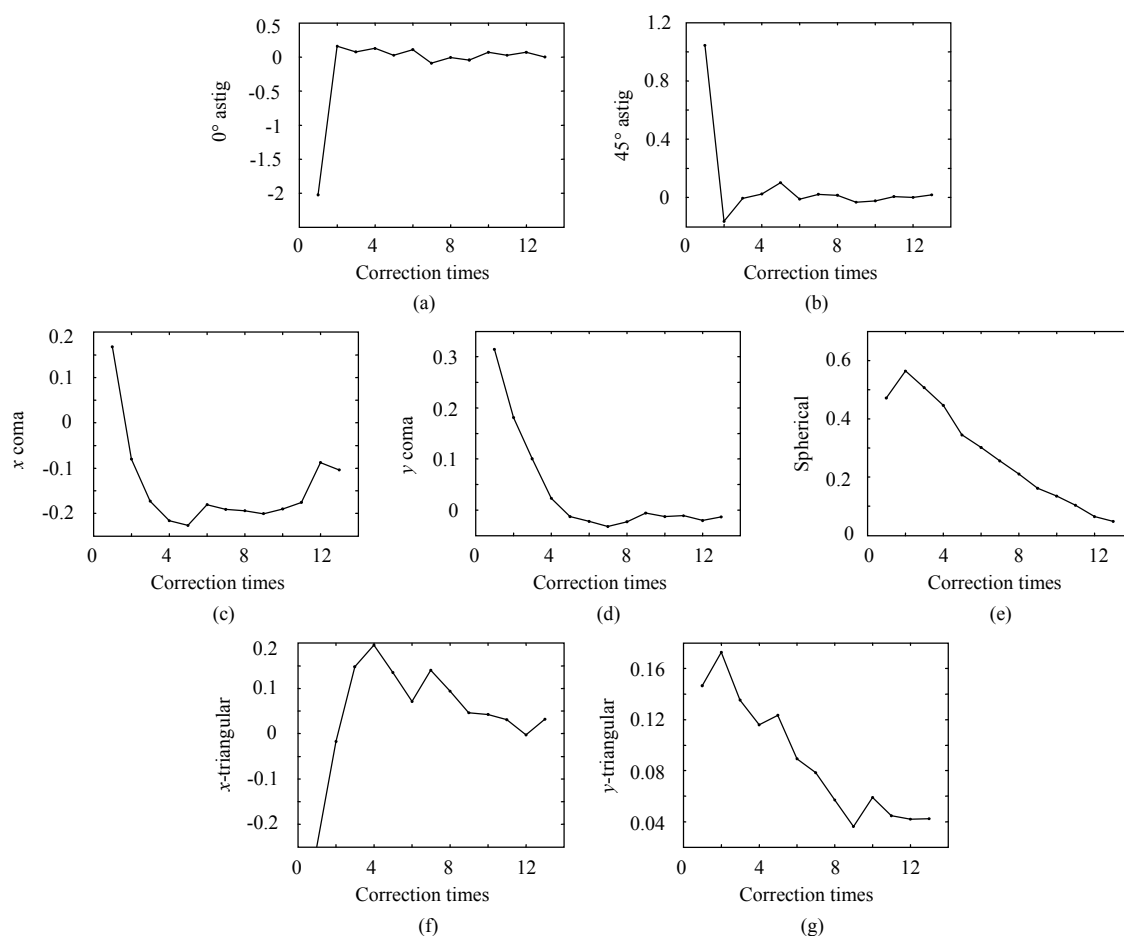


图 12 各项像差系数在校正过程中的变化

Fig.12 Aberration coefficients change in the active correction processing

校正过程中面形误差  $RMS$  的变化如图 13 所示。

实验中我们发现, 对于像散的校正比较容易, 所需的校正力也不大, 但对于慧差的校正较难, 而球差最难校正, 所需的校正力也最大。原因是像散的面形轮廓高低区域都在镜子的口径边缘, 适宜用主动支撑点来校正, 而慧差、球差的轮廓高低部分都在镜子的口径中间部分, 校正时所需的力将较大。

实验中校正次数较多, 共进行了 11 次, 这是因为阻尼因子的对校正力解的衰减作用引起的。但由于主动光学的校正周期较长, 例如 NTT 望远镜每小时校正一次, 每次校正需 1 分钟, 因此对于校正次数的要求并不高。

校正使各项像差系数整体趋势都是趋近于 0 的, 说明了校正算法及过程是正确可行的。

### 3 结 论

本文采用 400 mm 薄反射镜作为实验镜进行了主动光学实验, 用 Harman 传感器测量面形, 通过阻尼最小二乘法计算校正力。将初始状态下的  $1.16\lambda$   $RMS$  面形精度校正到  $0.07\lambda$   $RMS$ , 优于镜面加工的  $0.1\lambda$   $RMS$ , 通过实验证明了校正算法及校正过程是正确可行的, 为下一步研制主动光学望远镜做了一定的基础。

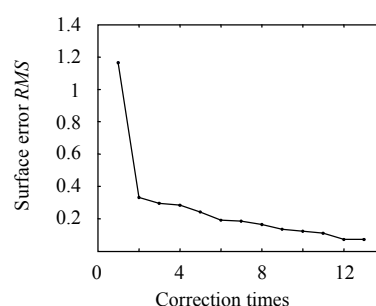


图 13 面形误差  $RMS$  在校正过程中的变化

Fig.13 Surface error  $RMS$  change in the active correction processing

## 参考文献:

- [1] WILSON R N, FRANZA F, NOETHE L. Active optics 1: A system for optimizing the optical quality and reducing the costs of large telescopes [J]. **Journal of Modern Optics**(S0950-0340), 1987, **34**(4): 485-509.
- [2] NOETHE L, FRANZA F, GIORDANO P, *et al.* Active optics 2: Results of an experiment with a thin 1m test mirror [J]. **Journal of Modern Optics**(S0950-0340), 1988, **35**(9): 1427-1457.
- [3] WILSON R N, FRANZA F, GIORDANO P, *et al.* Active optics 3: Final results with the 1m test mirror and NTT 3.58 m primary in workshop [J]. **Journal of Modern Optics**(S0950-0340), 1989, **36**(11): 1415-1425.
- [4] WILSON R N, FRANZA F and NOETHE L. Active optics 4: Set-up and performance of the optics of the ESO New Technology Telescope (NTT) in the observatory [J]. **Journal of Modern Optics**(S0950-0340), 1991, **38**(2): 219-243.
- [5] NOETHE L, FRANZA F, WILSON R N, *et al.* Active Optics: From the test set up to the NTT in the observatory [J]. **Proceedings of the SPIE**(S0277-786X), 1989, **1114**: 314-319.
- [6] IYE M, NOGUCHI T, TORII Y, *et al.* Active optics experiments with a 62cm thin mirror [J]. **Proceedings of SPIE** (S0277-786X), 1990, **1236**: 929-939.
- [7] SU D Q, JIANG S T, ZOU W Y, *et al.* Experiment system of thin-mirror active optics [J]. **Proceedings of SPIE**(S0277-786X), 1982, **2199**: 609-621.
- [8] 于洋, 曹根瑞. 主动光学反射镜面型的校正能力及其优化设计[J]. 北京理工大学学报, 2003, **23**(2): 229-233.  
YU Yang, CAO Gen-rui. A study on the corrective capability and optimization of active mirrors [J]. **Transactions of Beijing Institute of Technology**, 2003, **23**(2): 229-233.
- [9] 解滨, 肖志宏, 余景池. 利用 Zernike 多项式分析超薄镜热变形[J]. 光学 精密工程, 2007, **15**(2): 173-179.  
XIE Bin, XIAO Zhi-hong, YU Jing-chi. Analyzing thermal deformation of ultra-thin mirror using Zernike polynomials[J]. **Optics and Precision Engineering**, 2007, **15**(2): 173-179.
- [10] 曹正林, 廖文和, 沈建新. Zernike 多项式拟合人眼波前像差的一种新算法[J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(2): 308-314.  
CAO Zheng-lin, LIAO Wen-he, SHEN Jian-xin. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2006, **14**(2): 308-314.
- [11] 苏定强, 崔向群. 主动光学 - 新一代大望远镜的关键技术[J]. 天文学进展, 1999, **17**(1): 1-14.  
SU Ding-qiang, CUI Xiang-qun. Active Optics- Key Technology of the New Generation Telescopes [J]. **Astronomy Evolvment**, 1999, **17**(1): 1-14.
- [12] 倪颖, 黄启泰, 余景池. 超轻超薄反射镜主动支撑方案优化设计[J]. 光电工程, 2008, **35**(9): 22-26.  
NI Ying, HUANG Qi-tai, YU Jing-chi. Optimized Design of Active Support of Ultra Thin Mirror [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2008, **35**(9): 22-26.