

文章编号 1004-924X(2009)09-2076-08

400 mm 薄镜面主动光学实验系统

李宏壮¹, 林旭东^{1,2}, 刘欣悦¹, 王富国^{1,2}, 杨 飞¹, 明 名¹, 王建立¹, 韩昌元¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:采用 400 mm 口径, 12 mm 厚的球面反射镜进行了主动光学实验。实验镜支撑结构由背部 12 个主动支撑点和 3 个固定支撑点组成。主动支撑点用压电陶瓷促动器和压力传感器组成功力促动器, 用于控制实验镜面形; 固定支撑点用于控制实验镜的定位。实验中通过干涉仪测试镜面面形。分别测量出反射镜在单独一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得到该促动器的响应函数, 由各促动器的响应函数组成刚度矩阵, 然后用阻尼最小二乘法计算各支撑点的校正力。最后, 通过 PID 算法闭环控制各促动器施加力的过程。经过 3 次校正, 将初始状态的 1.22λRMS 的面形误差校正到 0.12λRMS, 接近了镜面加工的 0.1λRMS 面形精度, 说明所采用的主动校正算法和过程正确可行。

关键词:望远镜; 反射镜; 主动光学; 主动支撑; 促动器; 阻尼最小二乘法

中图分类号:TH703; TH743 **文献标识码:**A

Experiment system of 400 mm thin-mirror active optics

LI Hong-zhuang¹, Lin Xu-dong^{1,2}, LIU Xin-yue¹, WANG Fu-guo^{1,2},

YANG Fei¹, MING Ming¹, WANG Jian-li¹, HAN Chang-yuan¹

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

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

Abstract: An active optical experiment was carried out by a mirror with a diameter of 400 mm and a thickness of 12 mm. The support construction of the mirror included 12 active supports and 3 fixed supports, in which the active support was implemented by force actuators consisting of piezoelectric ceramic actuators and loadcells. The active supports were used for controlling the surface of the mirror, and the fixed points were used for positioning the mirror. In the experiment, the mirror surface was tested by a Zygo interferometer. The surface error of the mirror was tested before and after an actuator exerted a unit force on it lonely, then the difference between the two surface errors was calculated to be as the response function of the actuator, and the response functions of all the actuators made up a stiffness matrix. Afterwards, the damp least square method is used to determine the active corrective force and the process of exerting force of the actuator was controlled by a PID arithmetic. The

收稿日期: 2008-10-16; 修订日期: 2008-11-05.

基金项目: 中科院三期创新工程资助项目

experimental results show that the surface error is corrected from $1.22\lambda\text{RMS}$ to $0.12\lambda\text{RMS}$, which is close to 0.1λ that is the surface quality after polishing. The experiment shows the active correct arithmetic and procedure is correct and feasible.

Key words: telescope; mirror; active optics; active support; actuator; damp least square method

1 引言

主动光学是大口径望远镜中的关键技术,主动光学系统是闭环控制的校正波前误差的系统,由波前传感器、计算机控制系统、校正元件和校正促动器组成。

主动光学校正的误差源主要来自光学和机械加工、装校等产生的系统误差及望远镜由于重力和温度梯度变化而产生的变形,因此,校正频率较低,最高频率约为 10^{-2} Hz,但如果还要校正一部分低频的圆顶内和主镜上的大气扰动以及风载引起的误差,则校正频率要高达 10 Hz。

薄镜面主动光学利用薄的反射镜(一般是主镜)的微小弹性变形来补偿望远镜的主镜和次镜由于重力、温度变形等引起的系统波前误差。目前国际上已经应用的薄镜面主动光学望远镜有 NTT 3.5 m、SORT 3.5 m、AEOS 3.67 m、DCT 4.2 m、SOAR 4.2 m、MMT 6.5 m、VLT 8 m、Subaru 8 m、GEMINI 8.1 m、LBT 8.4 m 等。

最早的主动光学实验装置是欧洲南方天文台为 NTT(New Technology Telescope)望远镜研制的 1 m 实验装置,该装置采用口径为 1 050 mm,厚 18.9 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。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,轴向采用 9 个主动支撑点。我国南京天文仪器厂为 Lamost 望远镜研制了口径为 500 mm 的主动光学实验装置,该实验镜厚 6 mm,背部采用 58 个主动支撑点,校正后面形精度为 $0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$ 。另外,北京理工大学也采用 230 mm 口径,18 mm 厚的实验镜的进行了主动光学实验^[1-5]。

本实验采用 400 mm 口径,12 mm 厚的弯月形球面反射镜构建实验系统,并用背部 12 个主动

支撑点和 3 个固定支撑点组成支撑结构。主动支撑点由压电陶瓷促动器和压力传感器组力促动器,用于控制实验镜面形;固定支撑点用于控制实验镜的定位。实验中通过干涉仪测试镜面面形,然后用阻尼最小二乘法计算各支撑点的校正力,通过 PID 算法闭环控制各促动器施加力的过程。通过校正,将初始状态的 $1.22\lambda\text{RMS}$ 的面形误差校正到 $0.12\lambda\text{RMS}$,接近镜面加工的 $0.1\lambda\text{RMS}$ 面形精度。

2 主动光学的基本原理

主动光学是建立在以下 3 个物理定律的基础上的^[2-3]:

2.1 线性理论(Hooke 定律)

玻璃材料在破裂之前都严格符合 Hooke 线性定律,线性定律在主动光学中有两方面的重要应用,第一,镜面变形符合力的线性叠加;第二,相同的力变化将始终产生相同的弹性变形,而与镜面的初始形状无关,即镜面任意点的位移量与促动器的力成线性关系。

2.2 收敛定律

这个定律解释了随着空间频率的增加,弹性模式幅值的收敛特性,即对于相同的幅值,要产生的模式空间频率越高,所需的力越大。对于一定径厚比的镜面,当超过一定的空间频率,则该模式既不能通过外力来产生,也不能由该系统自然产生。

2.3 正交定律

若采用波面拟和的多项式相互正交,相互独立,则可分别加以控制而不产生相互之间的影响。

3 实验系统构成

整个系统的结构如图 1 所示,400 mm 实验主镜水平安装在轴向支撑上,通过 M_1 、 M_2 两块平面反射镜将光路折叠,在主镜曲率中心处,用波前测量仪器测量波前,由于 M_1 、 M_2 的面形精度

优于 $1/30\lambda\text{RMS}$, 所以它们对测量结果的影响可忽略。

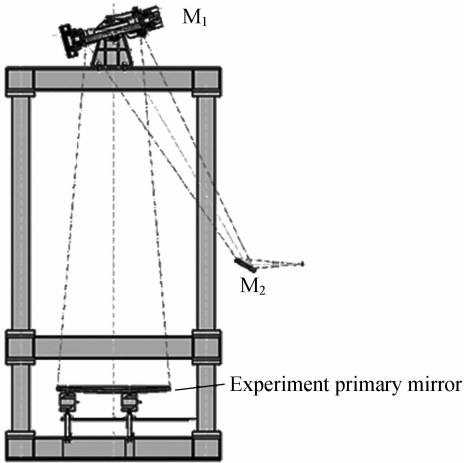
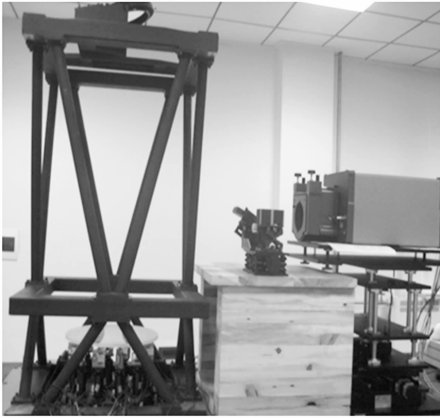


图 1 实验系统的结构

Fig. 1 Configurations of experiment system

实验主反射镜参数为: 口径 $D=400\text{ mm}$, 厚 $d=12\text{ mm}$, 半弯月形, 凹球面, 曲率半径 $R=2\ 400\text{ mm}$, 材料为 K9, 质量为 3.7 kg , 加工后面形精度为 $0.1\lambda\text{RMS}(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。

实验镜的支撑结构由轴向的 12 个主动支撑

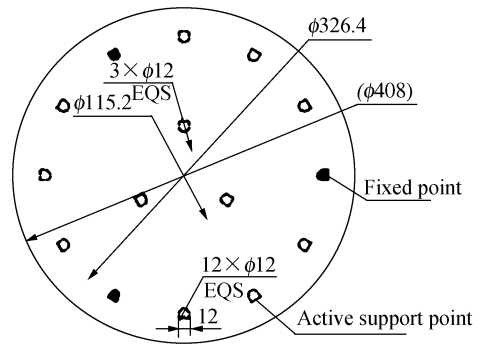
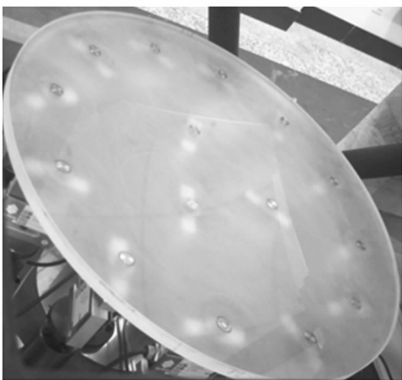


图 2 实验主反射镜支撑点分布

Fig. 2 Primary mirror and supports

点和 3 个固定支撑点组成, 支撑点的分布如图 2 所示。

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, 移动行程为 $60\ \mu\text{m}$, 如图 3 所示。力传感器采用 STC S-5 kg 型传感器, 测量范围为 5 kg , 如图 4 所示。3 个固定点也安装有力传感器。



图 3 压电陶瓷促动器

Fig. 3 Piezoelectrical actuator

经测量, 力促动器(包括位移促动器和传感器)的整体刚度较大, 平均为 $1.83 \times 10^5\text{ N/m}$, 而实验镜较薄, 刚度不大, 因此当一个促动器施加力时, 会引起邻近促动器位置力的改变, 即存在相互耦合, 这种耦合将使各促动器很难精确达到所需的力。为解决这个问题, 采用 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, 最终主动支撑点力促动器的输出精度达到 $\pm 0.05\text{ N}$ 。力促动器

的控制采用 Labview 软件完成。



图4 力传感器

Fig. 4 Load cell

4 镜面面形误差的校正方法

主动光学技术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。在本实验中,面形检测采用 Zygo 干涉仪,并拟合成 Zernike 多项式形式;校正力的施加采用 PID 闭环控制。下面主要介绍校正力的计算方法^[4-6]。

4.1 响应函数的确定

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,即:

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

式中 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, n 为促动器个数。

镜面面形用 Zernike 多项式拟合^[7-9]。

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计算法。

本实验采用直接测量法,利用干涉仪分别测量出反射镜在该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。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,总的变形则是各个促动器作用力的综合作用结果,各促动器引起的

镜面总变形是单个促动器作用引起镜面变形的线性迭加。

即如果用 $W_i(x, y)$ 表示第 i 个促动器所引起的镜面变形,则总的镜面变形量 $W(x, y)$ 可表示为:

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i(x, y), \quad (2)$$

式中 n 为促动器的个数; i 为促动器的序号。

4.2 促动器校正力的计算

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

$$Cf = -W, \quad (3)$$

式中 C 为刚度矩阵。由于面形误差 W 用 Zernike 多项式表示, 写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial a_1}{\partial f_1}, \frac{\partial a_1}{\partial f_2}, \dots, \frac{\partial a_1}{\partial f_n} \\ \frac{\partial a_2}{\partial f_1}, \frac{\partial a_2}{\partial f_2}, \dots, \frac{\partial a_2}{\partial f_n} \\ \vdots \\ \frac{\partial a_m}{\partial f_1}, \frac{\partial a_m}{\partial f_2}, \dots, \frac{\partial a_m}{\partial f_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 n 为促动器个数, $a_i (i=1 \dots m)$ 为校正的第 i 项 Zernike 系数, 共校正 m 项像差。

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 $0^\circ, 45^\circ$ astig (A_2^2, B_2^2), x, y 方向 coma (A_3^1, B_3^1), spherical (A_4^0), $0^\circ, 45^\circ$ triangular 像差 (A_3^3, B_3^3), 各模式对应的面形如图 5 所示。

用最小二乘法求式(4)的解为:

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

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:

$$f = -(C^T C + P I)^{-1} C^T w, \quad (6)$$

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

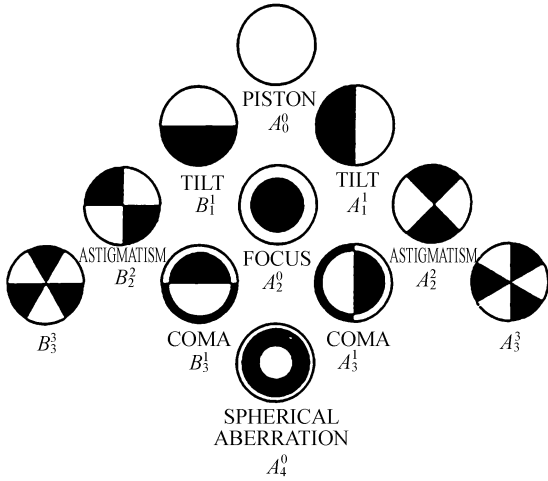


图 5 Zernike 多项式模式

Fig. 5 Patterns of Zernike modes

5 实验过程及结果

主动光学校正过程如图 6 所示,对于特定的实验镜及支撑结构,刚度矩阵的测量只需进行一次即可。初始状态时,将各轴向支撑点,包括 12 主动点和 3 个固定点的力设置成相等的值,由于反射镜质量为 3.7 kg,所以每个支撑点受力约为 2.41 N。此时的镜面面形轮廓如图 7,面形 PV = 5.2λ, RMS = 1.22λ, 各项像差如表 1。

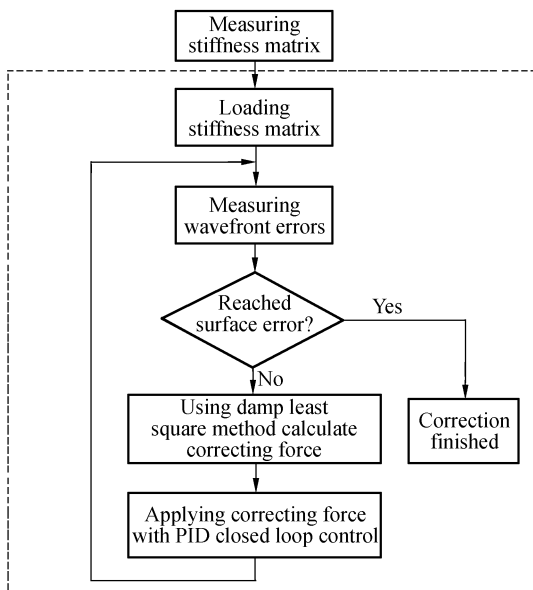


图 6 主动光学校正过程

Fig. 6 Procedure of active optics correction

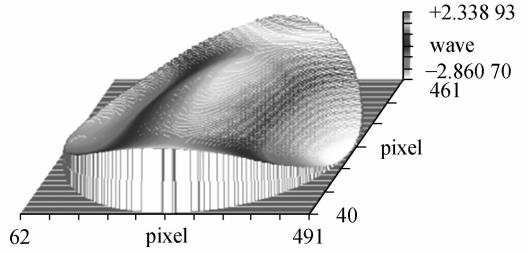


图 7 初始状态镜面面形轮廓图

Fig. 7 Initial mirror surface figure

表 1 初始状态各项像差系数

Tab. 1 Initial aberration coefficients

像差模式	(λ)
0°astig	-2.558
45°astig	0.728
x coma	-0.056
y coma	-0.118
Spherical	0.685
x-triangular	-0.519
y-triangular	0.022

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,如式(4)中的 C,这里促动器个数 n = 12,像差项数 m = 7。

然后对初始状态的面形进行校正,经过第一次校正后, PV = 1.223λ, RMS = 0.237λ, 结果如图 8 和表 2 所示。

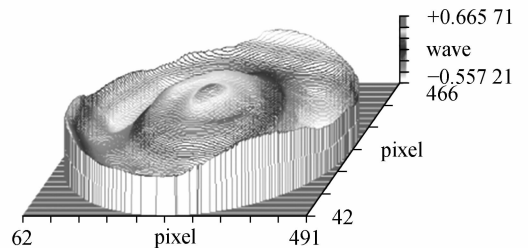


图 8 第一次校正后镜面面形轮廓图

Fig. 8 Surface figure after 1st correction

表 2 第一次校正后各项像差系数

Tab.2 Aberration coefficients after 1st correction

像差模式	(λ)
0°astig	0.136
45°astig	0.020
x coma	0.062
y coma	-0.124
Spherical	0.455
x-triangular	-0.172
y-triangular	-0.170

表 4 第三次校正后各项像差系数

Tab.4 Aberration coefficients after 3rd correction

像差模式	(λ)
0°astig	-0.082
45°astig	0.030
x coma	0.037
y coma	0
Spherical	0.101
x-triangular	-0.047
y-triangular	0

第二次校正后, $PV=0.849\lambda$, $RMS=0.164\lambda$, 结果如图 9 和表 3 所示。

第四次校正后, $PV=0.697$, $RMS=0.121$, 结果如图 11 和表 5 所示。

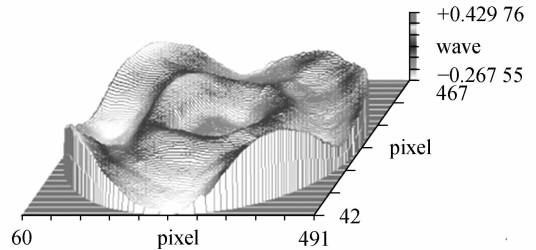
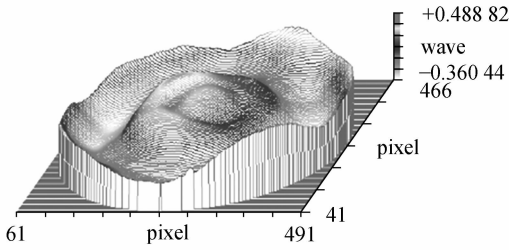


图 9 第二次校正后镜面面形轮廓图
Fig.9 Surface figure after 2nd correction

图 11 第四次校正后镜面面形轮廓图
Fig.11 Surface figure after 4th correction

表 3 第二次校正后各项像差系数

Tab.3 Aberration coefficients after 2nd correction

像差模式	(λ)
0°astig	-0.083
45°astig	0.014
x coma	0.108
y coma	-0.023
Spherical	0.312
x-triangular	-0.055
y-triangular	-0.077

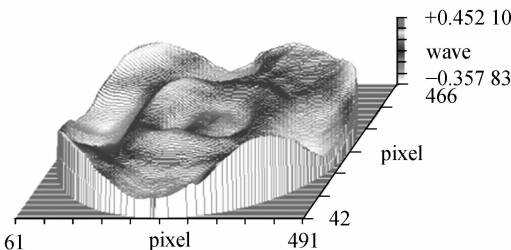
表 5 第四次校正后各项像差系数

Tab.5 Aberration coefficients after 4th correction

像差模式	(λ)
0°astig	-0.016
45°astig	-0.021
x coma	0.041
y coma	0.001
Spherical	0.074
x-triangular	0.006
y-triangular	-0.055

第三次校正后, $PV=0.81\lambda$, $RMS=0.124\lambda$, 结果如图 10 和表 4 所示。

第四次校正没有使面形明显改善, 因此不再做校正。从 Zernike 像差系数可见, 校正的 7 项低频误差都已达到了很小的值, 校正后面形精度达到 $0.12\lambda RMS$, 接近了镜面加工的 $0.1\lambda RMS$, 残余误差主要是高频项, 这将需要更多的主动支撑点才能校正。



实验发现, 对于像散的校正比较容易, 所需的校正力也不大, 但对于彗差的校正较难, 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

图 10 第三次校正后镜面面形轮廓图
Fig.10 Surface figure after 3rd correction

主动支撑点来校正,而彗差、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。

6 结 论

本文采用 400 mm 薄实验镜进行了主动光

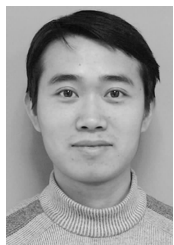
学实验,从初始状态下的 1.22λ RMS 面形精度经过三次校正后面形精度达到 0.12λ RMS,接近了镜面加工的 0.1λ RMS;主要的残余误差是高频像差,在目前仅有 12 个主动支撑点的情况下还很难校正。实验证明了提出的校正算法及校正过程是正确可行的,本文的工作为研制主动光学望远镜奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] 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 D Q, CUI X Q. Active optics—key technology of the new generation telescopes[J]. *Astronomy Evolvement*, 1999,17(1):1-14. (in Chinese)
- [2] 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*,1987,34(4):485-509.
- [3] 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*, 1988,35(9):1427-1457.
- [4] IYE M, NOGUCHI T, TORII Y, *et al.*. Active optics experiments with a 62 cm thin mirror[J]. *SPIE*,1990,1236:929-939.
- [5] SU D Q, JIANG S T, ZOU W Y, *et al.*. Experiment system of thin-mirror active optics[J]. *SPIE*, 1982,2199:609-621.
- [6] NOETHE L,FRANZA F, WILSON R N, *et al.*.

- Active optics:from the test set up to the NTT in the observatory[J]. *SPIE*,1989,1114:314-319.
- [7] 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 B,XIAO ZH H,YU J CH. Analyzing thermal deformation of ultra-thin mirror using Zernike polynomials[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):173-179. (in Chinese)
- [8] 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 ZH L, LIAO W H, SHEN J X. A new algorithm for human eye's wave-front aberration fitting with Zernike polynomial[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):308-314. (in Chinese)
- [9] 郭培基,余景池. 用校正法提高补偿器检测法的精度[J]. 光学 精密工程,2006,14(2):202-206.
GUO P J, YU J CH. Improving precision of null lens method with correction technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):202-206. (in Chinese)

作者简介:



李宏壮(1980—),男,黑龙江巴彦人,博士,助理研究员,主要从事光学设计、光学检测和主动光学的研究。E-mail: jilinbayan@163.com



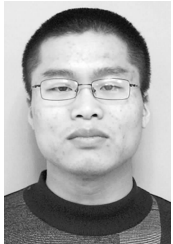
林旭东(1982—),男,福建莆田人,博士研究生,主要从事主动光学技术的研究。E-mail:linxudong_82@126.com



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,主要从事图像处理的研究。E-mail: sirliuxy@sina.com



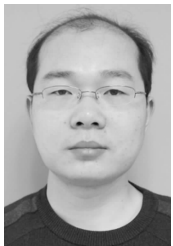
明名(1983—),男,湖南临澧人,硕士,研究实习员,主要从事光学设计、光学检测测量、大口径光学系统等方面的研究。E-mail: mingm1118@yahoo.com.cn



王富国(1979—),男,山东单县人,博士研究生,主要从事光机系统设计及仿真的研究。E-mail: wfg109@163.com



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的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



杨飞(1982—),男,湖北天门人,研究实习员,主要从事光学仪器机构设计方面的研究。E-mail: yangflying@163.com



韩昌元(1940—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、检测及航天光学遥感器的研制工作。E-mail: hanchangyuan@ciomp.ac.cn

●下期预告

提高紫外告警系统探测距离的新方法

陈兆兵^{1,2},郭劲¹,姜伟伟^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为解决紫外告警的近探测距离和红外告警的高虚警率矛盾,提出一种将紫外告警与红外跟踪相复合的应用于地面设备的新型告警/跟踪一体化模式。重点分析了紫外告警系统的探测机理、捕获条件及作用距离影响因素。将基于 Lowtran 软件包的紫外告警系统探测距离估算模型用于精确估算紫外告警系统对近程固体推进剂导弹的探测距离。针对 UVCCD 图像信号处理对探测距离的重要影响,采用了基于 Gabor 特征的图像匹配方案。通过系统仿真实验分析,表明该模型在系统硬件不变以及虚警率保持 1 次/10 h 的条件下能将探测距离估算的误差控制在 5% 以内,可将目前紫外告警系统的探测距离由 5 km 提高到最远 8 km,大大提高了告警系统的探测质量。本方案模型可用于其他光电探测设备。