

基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究

张 勇^{1,2} 张 靓^{1,2,3*} 刘根荣^{1,2} 王跃飞^{1,2} 张亚俊^{1,2} 曾裔中^{1,2} 李烨平^{1,2}

(¹ 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042
² 中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 研制极大望远镜的拼接主镜时, 为使得望远镜系统成像质量达到衍射极限, 子镜的定位精度需要满足共相位要求, 那么必须对子镜之间的平移误差进行实时精确检测和校正。在对色散条纹检测和色散哈特曼检测原理分析的基础上, 建造了一台色散条纹传感器, 并在室内拼接镜面主动光学实验系统上开展检测实验, 验证了检测信号和平移误差之间存在确定的函数关系, 可实现对平移误差的间接测量。针对实验结果分析了误差产生的原因, 总结了影响检测精度的主要因素有: 条纹对比度、光谱曲线定标、非线性最小二乘法, 并提出了解决方案, 以完善数据处理的方法。在 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的测量范围内, 可达到 20 nm 的检测精度。

关键词 主动光学; 平移误差; 色散条纹传感器; 拼接镜面; 子镜共相

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0212004

Experimental Study of Segmented Mirrors Co-Phase Using Dispersed Fringe Sensor

Zhang Yong^{1,2} Zhang Liang^{1,2,3} Liu Genrong^{1,2} Wang Yuefei^{1,2}
Zhang Yajun^{1,2} Zeng Yizhong^{1,2} Li Yeping^{1,2}

¹ National Astronomical Observatories, Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China
² Key Laboratory of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For segmented primary mirror of extremely large telescope, in order to make the image quality of telescope system reach the diffraction limit, sub-mirrors positioning accuracy requires to meet the requirements of co-phase. So the piston errors between sub-mirrors need accurate measurements and corrections in real time. On the basis of analyzing dispersed fringe sensing (DFS) and disperse Hartmann sensing (DHS) principles, a dispersed fringe sensor was built and some detection experiments on an indoor segmented mirror active optics experimental system were carried out. A certain relation is confirmed between the sensing result and relative piston error value of sub-mirrors. So piston errors can be detected indirectly. And experimental results were analyzed for error factors, which affect the measurement accuracy greatly. They are fringe visibility, spectral curve calibration, nonlinear least squares and so on. During the real test experiments, solutions are also proposed to improve the data processing. The results indicate that the present measurement accuracy is up to 20 nm in the range of $\pm 15 \mu\text{m}$.

Key words active optics; piston error; dispersed fringe sensor; segmented mirrors; segment phasing

OCIS codes 120.0120; 120.2650; 120.4640

收稿日期: 2010-07-07; 收到修改稿日期: 2010-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(10703008, 11073035)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX-YW-T17)资助课题。

作者简介: 张 勇(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事主动光学和自适应光学等方面的研究。

E-mail: yzh@niaot.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: liangzhang@niaot.ac.cn

1 引 言

自 1993 年,由 36 块对角线 1.8 m 正六边形子镜拼接 10 m 口径的美国 Keck I 望远镜交付使用,拼接镜面主动光学技术已经发展成熟,成为制造极大望远镜的关键技术^[1]。为了掌握这些技术,在苏定强院士主持下,于 1998 年在南京天文光学技术研究所建成了我国第一个拼接镜面主动光学实验系统。在此实验基础上,于 2009 年 6 月成功完成了国家重大科学工程项目大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)^[2]。而由拼接式主镜面所形成的望远镜光学系统,与单块整镜主镜相比,其所面临的主要问题就是拼接子镜的位置失调。望远镜在进行天体成像时,为使得望远镜系统达到或接近衍射极限的成像质量,各子镜的定位精度需要达到共相位,即拼接子镜间的平移误差 P 的均方根(RMS)值需要小于 $\lambda/20$ ^[3]。所以要实现可见光波段共相,子镜间的平移误差需要进行纳米量级的高精度检测。

目前国内外发展了多种在瞳孔面上或像面上检测平移误差的方法,例如:衍射法,主要是采集子镜两两拼接区域的衍射图样,根据先验计算出的点扩散函数(PSF)峰值随平移误差变化特性,确定子镜间的平移误差值^[4];曲率传感法,通过测量子镜间边缘的相位不连续性来重构子镜间的平移误差值^[5];相位多样性法,是差分计算焦内,焦外图像数据,测量出子镜拼接边缘的不连续相位,最后迭代计算出平移误差值^[6];四棱锥波前检测法,是检测四个出瞳像点能量信号的差异,计算出平移误差值^[7]。本文研究的色散条纹检测法是美国在研制詹姆斯韦伯太空望远镜(JWST)期间,提出的一种非常有效、可实现高度自动化的检测方法,美国国家航空航天局(NASA)和喷气推进实验室(JPL)的研究人员通过模拟研究和实验测试验证了色散条纹传感器能准确

测量微米级的平移误差,并成功将该技术应用于 Keck 望远镜和 JWST 的共相位调节。该技术是从相邻子镜拼接区域子孔径的衍射图样中采集能量信号,拟合光强分布曲线,获得平移误差值。与其他检测技术相比,色散条纹检测法具有量程大、抗干扰能力强和检测快捷等优点,特别适合空间望远镜在轨检测使用^[8~11]。

2 检测原理

色散条纹检测法以双半圆孔衍射测量方法的原理为基础,系统采用白光光源,当双半圆孔之间有一定透射光程差时,对于不同波长的光,光程差产生的相位差不同,圆孔衍射光斑的能量极大值所在位置的坐标偏移量不同^[12],经过棱栅的色散,不同波长的光的双半圆孔衍射像沿色散方向排列开,光强非相干叠加,最后在像面上形成明暗条纹,条纹中包含了待测光程差的信息,可以对条纹进行分析处理,计算出双半圆孔之间的光程差。

色散条纹传感器(DFS)主要由 Hartmann 小透镜阵列、棱栅和 CCD 照相机构成。图 1 是 DFS 检测系统示意图,色散条纹传感器被安放在出瞳位置处,Hartmann 小透镜阵列的子孔径横跨在拼缝上,白光被拼接主镜反射后,通过准直透镜,形成平行光束,光束被棱栅色散开,由小透镜阵列抽样,发生衍射,不同波长的衍射斑非相干叠加,最后在 CCD 相机上形成相邻子镜拼接区域子孔径的衍射色散条纹^[11]。

因为该衍射系统的点扩展函数受平移误差的调制,反映为光强的变化。如果入射光束为高斯光束,且 $\lambda/d \ll \delta/\lambda$,根据傅里叶光学的夫琅禾费衍射理论可以推导出像面上的光强分布满足公式^[11]

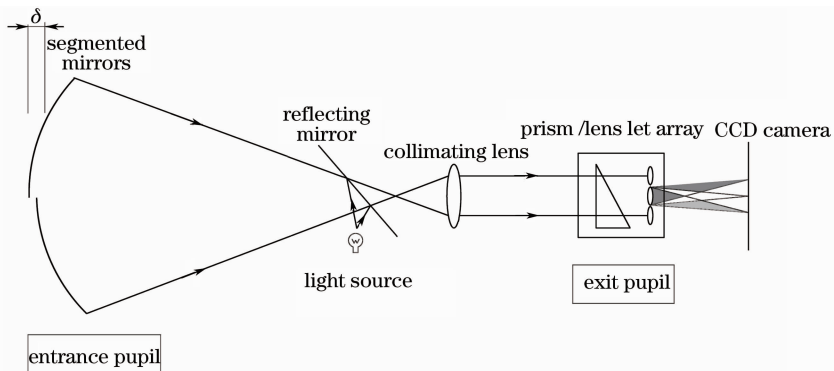


图 1 DFS 检测系统示意图

Fig. 1 Schematic drawing of DFS detecting system

$$I(x, y) = I_0 \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda(x)} \delta + \varphi(y) \right] \right\}, \quad (1)$$

$$\gamma \approx \exp \left[-(\sqrt{2} \pi C \delta / \lambda_0 d)^2 \right], \quad (2)$$

式中 I_0 是平均光强, γ 是条纹对比度, δ 是拼接子镜两束反射光之间的光程差, 平移误差 $P_e = \delta/2$, d 是子透镜的直径, $\lambda(x) = \lambda_0 + Cx$, λ_0 是中心波长, x 方向为色散方向, C 是棱栅的线色散率, $\varphi(y)$ 是初相位[由采集信号的位置决定, $\varphi(0) = 0$], 那么 $I(x, y)$ 与 δ 有对应关系。所以从 CCD 图像中提取能量信号, 用最小二乘法拟合光强分布曲线, 就能获得平移误差值^[13,14]。

3 系统实现和检测结果

检测实验是在室内拼接镜面主动光学实验平台上进行的, 图 2 是实验室检测系统的照片。该系统的主镜是由三块球面六角形子镜拼接组成, 其中一块子镜为参考镜, 其余两块子镜为可调镜, 在它们下面安装有高精度位移促动器, 可控制子镜的姿态。卤素灯作为系统光源, 小透镜阵由 21 个正六角型小透镜组成, 黑白 CCD 照相机放在像面上收集光强信号^[15]。图 3 是检测拼接主镜其中一条拼缝时, 获得的第一条 DFS 条纹。这里平移误差约等于十几

微米, 图像上的条纹很密, 亮线向上倾斜。随后利用位移促动器调节子镜的高度对平移误差进行补偿, 条纹逐渐减少, 直到像面上呈现一条均匀亮线, 这时平移误差接近或等于零。若促动器补偿过量, 平移误差值为负数, 图像上又会出现条纹, 但亮线向下倾斜。这与参考文献[16]中的仿真研究的结论相同, 可以根据条纹的倾斜方向判断平移的符号和条纹的空间频率粗略估计平移误差值。

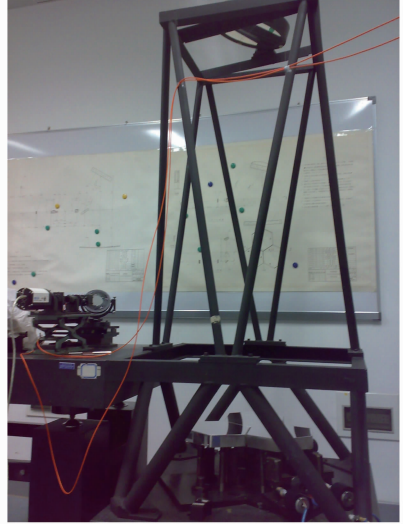


图 2 DFS 检测实验系统

Fig. 2 DFS detecting experimental system



图 3 实验中获得的第一条 DFS 条纹

Fig. 3 First DFS fringe in the experiment

为了精确计算平移误差值, 编写了 DFS 条纹分析软件。该分析软件沿着色散方向在条纹中心位置单路采集信号, 因为此处信噪比最高。图 4(a), (b) 是原信号和光源光谱特性曲线, 容易看出原信号中

含有光源光谱特性, 所以要得到 DFS 信号必须把光源光谱特性从原信号中滤掉, 方法是用原信号去除光源光谱特性曲线。图 4(c) 是处理后的 DFS 信号及其拟合曲线, 可以看出(1)式把 DFS 信号拟合得

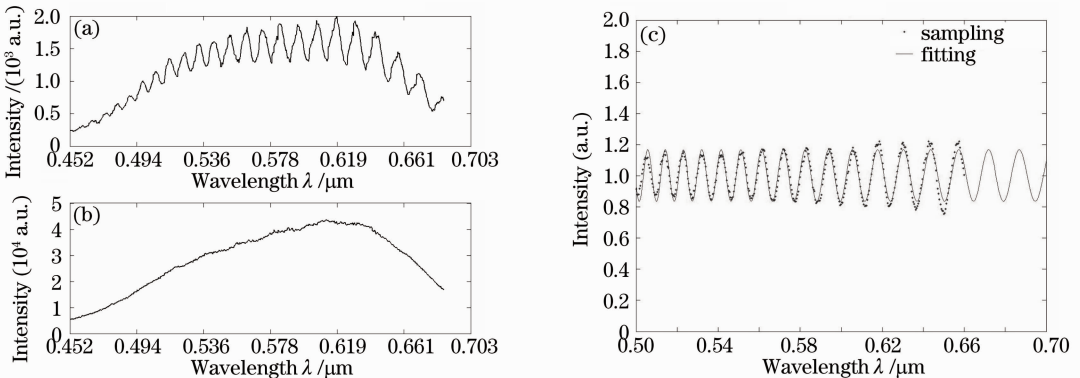


图 4 DFS 信号处理

Fig. 4 DFS signal processing

非常好。为此,验证了信号确实满足正弦变化规律,与理论研究的结论相符,计算出 $P_e = 15.290 \pm 0.019 \mu\text{m}$ 。

另外,根据(1)式拟合计算出来的数值仅仅是平移误差的绝对值,还需要判断它的符号^[16]。图5是 $P_e \approx 1.5 \mu\text{m}$ 的 DFS 条纹。图6中的 signal #1, signal #2, signal #3 分别是自上而下从图5中的条



图5 平移误差 $P_e \approx 1.5 \mu\text{m}$ 的 DFS 条纹

Fig. 5 DFS fringe of piston error $P_e \approx 1.5 \mu\text{m}$

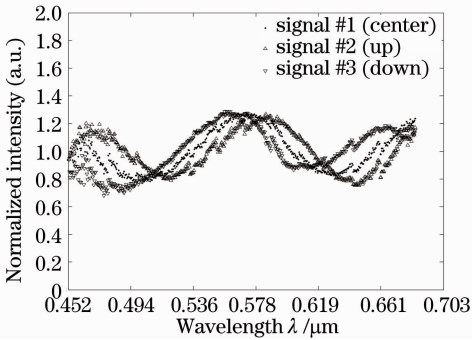


图6 多路采集的3组 DFS 信号

Fig. 6 Three DFS signals from multi-trace sampling

研制色散条纹传感器的目的是精确检测拼接镜面的共相位误差,检测精度需要优于 $\lambda/20$ 。由于 DFS 算法的限制,当 $|P_e| < \lambda/2$ 时,有效信号小于一

纹上采集的3组 DFS 信号。实验中发现,平移误差符号不同,3组信号在一个信号调制周期内,波峰或波谷出现的顺序刚好相反,所以可以根据这个规律来判断平移误差的符号,计算机处理起来也方便,可实现程序的自动化^[15]。而且将3组信号分别进行处理的平均结果作为最终的检测值,可减少波长标定误差对单组信号拟合精度的影响。

个周期,调制不完善,不能准确计算出平移误差值,为此需要借助其他的检测手段。目前,国外一般会另外建立一套检测系统,如美国 Keck 望远镜用衍射法, JWST 用散焦图像对比法。这样会增加整个检测系统的复杂程度,使自动化程度降低。

在仔细研究了衍射法的理论基础上提出一种色散哈特曼检测技术(DHS)^[17,18],该技术使用 DFS 的检测系统,通过测量衍射斑能量峰值所在位置的偏移量来计算平移误差,它们两者之间的关系为

$$d_y = A(\delta f)/D, \quad (3)$$

式中 $A \approx 3.655$, f 是子透镜的焦距, D 是子透镜的直径。由于存在 2π 的模糊性,其检测范围为 $\pm \lambda/2$ 。所以 DHS 与 DFS 两种技术的检测范围互补,把它们集成在一套系统上,可完成大量程,高精度测量。

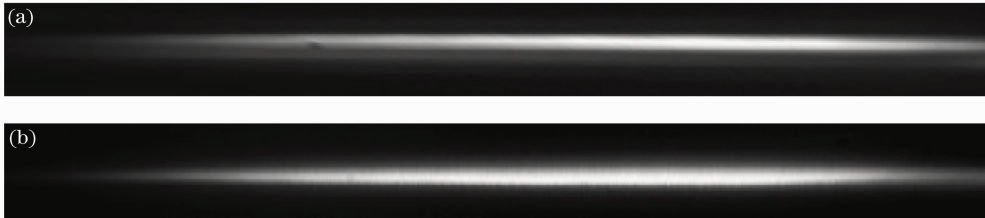


图7 平移误差(a)接近0和(b)等于0的 DFS 图像

Fig. 7 DFS image of piston error which is (a) close to 0 and (b) equal to 0

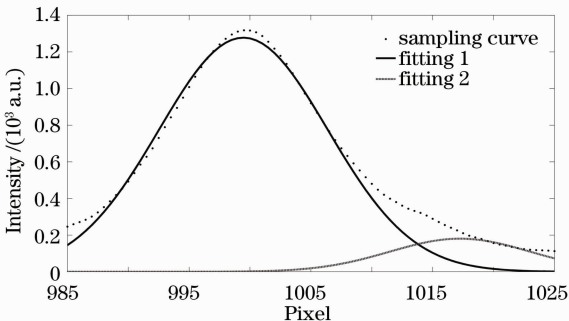


图8 DHS 信号的拟合曲线

Fig. 8 DHS signal fitting curve

比较图7(a),(b)两幅图像的差异容易发现,(a)图中的亮线下面出现了一条暗线,这正是由于存在平移误差,衍射斑主级大的能量向次级大上转移后的效果,而平移误差很小,所以暗线能量较弱。在波长为 $0.6523 \mu\text{m}$ 的位置,沿着垂直色散方向的方向,从条纹上提取光强分布信息,拟合能量分布曲线,如图8所示,检测出峰值坐标偏移量 $d_y = -10.1 \mu\text{m}$,根据(3)式可算得 $P_e \approx -19 \text{ nm}$ 。该值作为反馈值驱动促动器做校正,结果暗线消失,最终的图像与 $P_e = 0$ 时的一样,说明计算结果准确,验证了 DHS 算法的正确性。

4 误差分析

通过模拟研究和检测实验发现,影响 DFS 检测精度的因素主要有:条纹对比度、光谱曲线定标、非线性最小二乘法。例如,色散方向与拼缝不平行,将造成条纹对比度下降^[13]。图 9 是仿真研究得到的检测误差与条纹对比度的关系曲线,从曲线上可以看出误差随着对比度的下降而增大,特别当对比度小于 0.3 时,误差急剧增加。分析知,要在可见光范围内,保证 $\lambda/20$ 的共相检测精度,条纹对比度需要大于 0.15,而实验中得到的 DFS 条纹的对比度一般都大于 0.2,所以能够满足共相精度要求。

在信号处理方面,原信号中含有光源光谱信息,必须滤掉。在检测实验中,发现光源光谱特性曲线重复性并不好,所以每次检测都需要重新标定波长获得条纹上的光谱特性曲线。为了减小波长标定误差对检测结果的影响,将采用多路采集的信号采集方式。表 1 是对图 5 所示条纹曝光 0.75 s 和 1.5 s

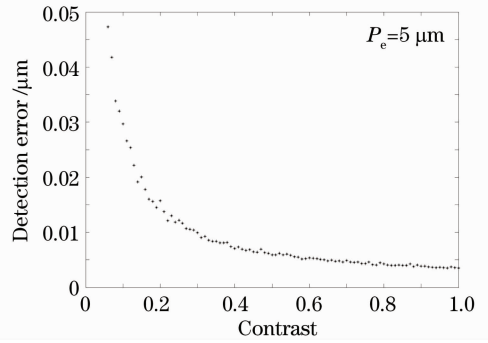


图 9 检测误差与条纹对比度的关系曲线

Fig. 9 Curve of detection errors versus fringe contrast

后,分别采用单路和多路条纹处理方式得到的检测值。曝光时间为 1.5 s 时,条纹清晰,对比度高,检测精度高。在噪声的干扰下,减少曝光时间,条纹变暗,信噪比降低。检测结果表明,多路采集的检测结果的标准差比单路采集的小,说明多路采集算法的稳健性更好。还可以推断多路采集算法抵抗其他不确定因素干扰的能力更强。

表 1 不同曝光时间下的检测结果

Table 1 DFS measured result on different exposure times

Times of measurement	Measurements / μm			
	Exposure time is 1.5 s		Exposure time is 0.75 s	
	Single-trace	Multi-trace	Single-trace	Multi-trace
1	1.462	1.463	1.419	1.423
2	1.465	1.467	1.426	1.427
3	1.464	1.464	1.428	1.429
4	1.454	1.459	1.421	1.423
5	1.455	1.460	1.422	1.424
6	1.453	1.457	1.426	1.427
7	1.464	1.468	1.420	1.423
8	1.452	1.455	1.410	1.414
Mean	1.459	1.462	1.422	1.424
STD	0.0056	0.0047	0.0057	0.0046

DFS 检测软件应用非线性最小二乘法进行数据处理,检测范围和精度有限。图 10 是仿真研究得到的检测不同平移值的误差曲线。从整体上看,曲线以原点为中心呈对称分布,除 0 点附近的点外,检测误差随着平移绝对值的增大而增大。当 $|P_c| > 15 \mu\text{m}$,检测误差急剧增加的原因是:当平移的绝对值很大的时候,像面上的条纹太密了,CCD 采样不充分,信号拟合误差增大。而 0 点附近的平移检测误差发生突跳的原因是,当平移的绝对值很小的时候,DFS 调制信号不足一个周期,DFS 算法失效。这时应换成 DHS 检测法进行测量,第 3 节中已经通过实验验证了 DHS 能准确计算十几纳米的平移值。所以这台结合了色散条纹检测技术和色散哈特曼检测技术的传感

器在 $\pm 15 \mu\text{m}$ 的检测范围内,检测精度能达到 20 nm。

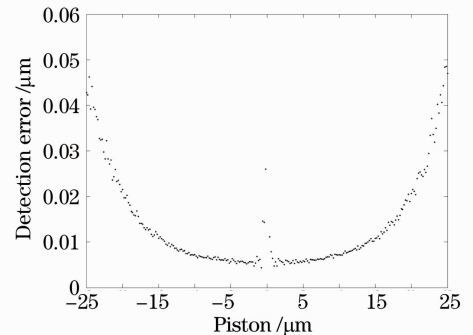


图 10 DFS 检测不同平移的误差曲线

Fig. 10 Curve of DFS detection errors of different pistons

5 结 论

在室内拼接镜面主动光学实验平台和色散条纹传感器基础上,提出了一整套检测方法,开展了色散条纹传感器的检测实验,建成了一整套相关的软件系统,验证了检测信号与拼接子镜之间的高低差存在正弦关系的特性,符合理论研究的结果,实现了平移误差的间接测量。此外,分析了误差产生的原因,总结了影响检测精度的主要因素,并提出了解决方案,完善了数据处理的算法。最终该传感器可完成对平移误差的大量程、高精度和无盲区检测,充分满足了拼接镜面的共相位检测要求。

色散条纹传感器由棱栅、小透镜阵和 CCD 照相机组成,实现起来成本低且相对容易。检测数据直接来自采集图像的灰度信息,因而手段快捷,可实现高度自动化。此外色散条纹检测法具有抗干扰能力强,与镜面非接触,可以替代传统的定标较为复杂的位移传感器。该技术的研究成果可以应用于我国的天文望远镜的建造和改造升级,比如在国家重大科学工程项目 LAMOST、南极大口径拼接望远镜、极大口径光学/红外望远镜以及国防军事和空间的大口径拼接光学系统,对我国的天文学和国家安全有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Su Dingqiang, Cui Xiangqun. Active optics-key technology of the new generation telescope [J]. *Progress in Astronomy*, 1999, **17**(1): 1~14
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
- 2 Zhang Qiaoling. Major state science projects LAMOST through the acceptance[N]. *Science Times of China*, 2009-06-05(A1)
张巧玲. 国家重大科学工程 LAMOST 项目通过验收[N]. *科学时报*, 2009-06-05(A1)
- 3 Su Dingqiang, Zou Weiyao, Zhang Zhenchao *et al.*. Experiment system of segmented-mirror active optics [C]. *SPIE*, 2000, **4003**: 417~425
- 4 G. Chanan, M. Troy, C. Ohara. Phasing the primary mirror segments of the Keck telescopes: a comparison of different techniques [C]. *SPIE*, 2002, **4003**: 188~202
- 5 R. G. Paxman, J. R. Fienup. Optical misalignment sensing and image reconstruction using phase diversity [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1988, **5**(6): 914~923

- 6 G. Chanan, M. Tory, E. Sirko. Phasing the Keck telescopes with out-of-focus images in the infrared[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 632~642
- 7 Zhu Nenghong, Chen Xinyang, Zhou Dan *et al.*. Study on measuring piston error of segmented mirror using pyramid sensor [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2009, **22**(3): 433~437
朱能鸿, 陈欣扬, 周丹等. 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差[J]. *传感技术学报*, 2009, **22**(3): 433~437
- 8 Wang Shanshan, Zhu Qiudong, Cao Genrui. Cophasing methods of segmented space telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2435~2440
王珊珊, 朱秋东, 曹根瑞. 空间拼接主镜望远镜共相位检测方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2435~2440
- 9 Dong Bing, Yu Xin. On-orbit piston error correction of segmented primary mirror of high-resolution space telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 55~59
董冰, 俞信. 高分辨率空间望远镜分块主镜位置误差的在轨校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 55~59
- 10 Zhang Xiaofang, Dong Bing, Huang Yifan *et al.*. Simulation research on wavefront sensing and correction algorithms for segmented space telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 7~11
张晓芳, 董冰, 黄一帆等. 分块式空间望远镜波前传感及控制方法的仿真研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 7~11
- 11 F. Shi, G. Chanan, C. Ohara *et al.*. Experimental verification of dispersed fringe sensing as a segment phasing technique using the Keck telescope [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(23): 4474~4481
- 12 Li Yan, Yuan Xiangyan, Cui Xiangqun. A study of a method of the coplanar splicing of segments into a large-aperture mirror based on the Keck method [J]. *Chinese J. Astronomic Research & Technology*, 2009, **6**(2): 147~153
李艳, 袁祥岩, 崔向群. 基于 Keck 方法的大型拼接镜面共面方法的研究[J]. *天文研究与技术*, 2009, **6**(2): 147~153
- 13 F. Shi, D. Redding, J. J. Green *et al.*. Performance of segmented mirror coarse phasing with a dispersed fringe sensor: modeling and simulations [C]. *SPIE*, 2004, **5487**: 897~908
- 14 F. Shi, D. Redding, C. Bowers *et al.*. DCATT dispersed fringe sensor: modeling and experimenting with the transmissive phase plates [C]. *SPIE*, 2000, **4013**: 757~762
- 15 Zhang Yong, Cui Xiangqun, Liu Genrong *et al.*. An indoor three-mirror phasing experiment system based on a dispersed Hartmann type sensor [C]. *SPIE*, 2010, **7733**: 733352
- 16 Zhang Yong, Zhang Liang. Simulation study on measuring piston error of segmented mirror using dispersed fringe sensing technology [J]. *J. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, **4**(27): 39~47
张勇, 张靓. 色散条纹传感技术用于拼接镜面位移探测的仿真研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, **4**(27): 39~47
- 17 Allan Wirth. Cophasing methods for segmented mirrors [C]. *SPIE*, 2000, **4003**: 250~261
- 18 Zhang Yong, Liu Genrong, Wang Yuefei *et al.*. Preliminary study of a dispersed fringe type sensing system [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2009, **9**(8): 945~952