

## Study on Measuring Piston Error of Segmented Mirror Using Pyramid Sensor<sup>\*</sup>

ZHU Neng-hong<sup>\*</sup>, CHEN Xin-yang, ZHOU Dan, CAO Jiar-jun  
(Shanghai Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200030, China)

**Abstract**: It is necessary to measure the piston error of sub-elements accurately when developing segmented mirror of optical telescope. On the basis of analyzing the pyramid sensor (PS) principle, some piston measurements were carried with sub-elements stimulated by two reflective cubes. A certain relationship is confirmed between the sensing value and the relative piston value of sub-elements. At present, the measuring accuracy is about several tens of nanometers when the relative displacement between two elements is within one wavelength.

**Key words**: astronomical optical telescope; piston; pyramid sensor; segmented mirror  
EEACC: 7230C

## 利用四棱锥传感器检测光学拼接镜的法向光程差<sup>\*</sup>

朱能鸿<sup>\*</sup>, 陈欣扬, 周丹, 曹建军

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

**摘要**: 研制光学天文望远镜拼接主镜时, 需要精确检测各子镜单元之间的法向光程差。在对四棱锥波前检测原理分析的基础上, 通过反射立方体模拟拼接镜面, 开展四棱锥传感器的检测实验, 验证了四棱锥传感器检测信号和拼接镜子单元间的 piston 误差信号之间存在确定的函数关系。在一个波长的位移行程内, 目前可以达到数十纳米的测量精度。

**关键词**: 天文光学望远镜; 法向光程差; 四棱锥传感器; 拼接镜

**中图分类号**: TP212.14

**文献标识码**: A

**文章编号**: 1004-1699(2009)03-0433-05

追求对天体的更高分辨率观测永远是光学天文望远镜技术的发展动力。使镜面大口径化是实现这一目标的主要手段。目前世界上已建成的主镜为单镜面形式的光学天文望远镜口径已达到 8 米级, 如美国的 Gemini 望远镜和欧洲南方天文台的 VLT 望远镜等。但随着口径不断增大和重量急剧增加而给镜面加工、检测、安装、变形补偿等环节带来诸多技术难题以及由此产生昂贵的建造成本, 使得研制未来 30 m 以上级的巨型单镜面主镜越发困难。于是利用若干较小的子镜面(通常在 1 米直径左右)来拼接单个大镜面的光学技术逐渐发展起来, 如美国 10 m Keck 望远镜和我国刚刚建成的 4 m LAMOST 望远镜等。为了保证拼接镜面的共相精度或者实现拼接镜面的主动光学控制, 需要实时精确地测量各子镜之间的各种共相失调误差, 包括子镜单

元之间的法向光程差 (piston)、倾斜误差 (tip、tilt) 等。Piston 原义是大气湍流团沿光线传输方向的“活塞效应”, 现在也常用来表示拼接镜面波前的法向光程差。为了使望远镜接近衍射极限的成像质量, piston 误差的检测精度需在几十纳米以内。目前国内外出现的检测方法有衍射法、相位非连续检测法、干涉法等。衍射法是采集子镜两两拼接区域的衍射图像, 根据先验计算出的点扩展函数 (PSF) 峰值随 piston 变化特性, 确定子镜间的 piston 误差值<sup>[1]</sup>。相位非连续检测法是差分计算焦内、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 piston 误差值。干涉法是通过迈克尔逊干涉方法测量子镜单元拼接区域, 根据零级条纹出现的位置确定 piston 误差值<sup>[2]</sup>。这些测量方法彼此各有优劣之处。1996 年 Ragazzoni 提出利用四棱

**基金项目**: 国家自然科学基金重点资助项目 (10533040)

**收稿日期**: 2008-08-11 **修改日期**: 2008-12-22

锥镜(Pyramid)检测自适应光学中的波前相位误差的方法<sup>[3]</sup>。2001年 Esposito 等人通过仿真和实验研究,认为四棱锥波前传感器可以被用来检测拼接镜中的各阶共相失调误差<sup>[4]</sup>。2004年他们采用基于四棱锥传感器的闭环控制装置对威廉-赫歇尔望远镜自适应光学系统 NAOMI 的 76 单元拼接变形镜面进行 piston、tip、tilt 三个自由度的检测与控制,最终将面形共相精度控制在 10 nm 以下<sup>[5]</sup>。四棱锥传感器具有能够达到纳米级微位移测量精度的优点,但目前国内尚未开展这方面的研究。

## 1 检测原理

四棱锥传感器由四棱锥镜、中继透镜和 CCD 相机组成,见图 1。四棱锥镜是一个底面为正方形的金字塔型的折射棱镜,棱镜的顶点与望远镜光学系统的轴上焦点重合。棱镜后面依次放置中继透镜和 CCD 相机。中继透镜在对波前进行检测时,入射光波经过望远镜入瞳,会聚于四棱锥镜顶点,再通过棱镜四个棱面和中继透镜的折射后在 CCD 相机光敏面形成四个出瞳像,编号依次为 1、2、3、4。四棱锥传感器的波前检测原理详见引文<sup>[6]</sup>。如果是理想光波(没有任何波前误差),则出瞳像轮廓完善、能量分布均匀。如果光波存在畸变,出瞳像上的能量分布不再均匀。与入瞳面上同一点共轭的四个出瞳像点出现亮暗差异,从而反映出该入瞳点上的波前误差。

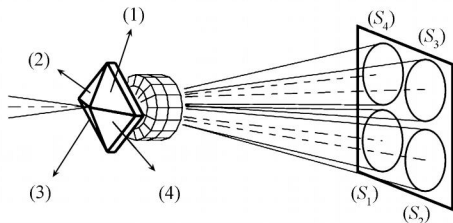


图 1 四棱锥传感器<sup>[7]</sup>

从四棱锥传感器输出的检测信号与出瞳像点能量(灰度)信号之间的关系为:

$$S_x(x, y) = \frac{I_1(x_p, y_p) + I_2(x_p, y_p) - I_3(x_p, y_p) - I_4(x_p, y_p)}{4} \quad (1)$$

$$I_i(x_p, y_p)$$

$$S_y(x, y) = \frac{I_1(x_p, y_p) + I_2(x_p, y_p) - I_3(x_p, y_p) - I_4(x_p, y_p)}{4} \quad (2)$$

$$I_i(x_p, y_p)$$

式中,  $I_i(x, y)$  代表四个共轭像点的灰度值,  $i = 1, 2, 3, 4$ 。P 点取与入瞳上任一个波前不连续点共轭的像点。

Esposito 提出检测信号和两个子镜单元之间的 piston 误差存在正弦函数关系的特性<sup>[8]</sup>,即:

$$S = \sin(2\pi \Delta / \lambda) \quad (3)$$

式中,  $\Delta$  代表两个子镜单元之间的相对位移,  $\lambda$  代表入射光波长。虽然给出实验结果证实以上结论,但并未说明实验的测量精度以及如何从相位缠绕的检测信号中求解 piston 误差量。因此在其研究基础上,我们进一步设计并开展实验:用反射立方体模拟拼接镜面,借助四棱锥传感器检测拼接单元之间的 piston 误差。

## 2 实验

实验原理图见图 2。我们利用两个表面镀反射膜的光学立方体模拟拼接镜面。使两个立方体光学接触。其中一个光学立方体固定,另一个光学立方体后面放置一个压电陶瓷微促动器,在微促动器的推动下可以向干涉仪光源方向作微小移动。固定立方体作为运动立方体运动的参照物,当给微位移促动器施加促动信号后,就可使运动立方体相对固定立方体产生一个相对位移运动,由此模拟出拼接过程产生的 piston 误差。

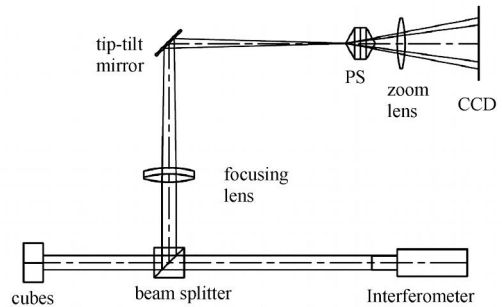


图 2 实验原理图

10 mm 的入射准直光由泰曼-格林干涉仪产生。该平行光束经过分光棱镜后入射到两个立方体拼接表面上。光线在这两个立方体拼接表面上照射面积各占 50%。再经立方体拼接面反射,其中一路光经由分光镜回到干涉仪。泰曼-格林干涉仪通过检测两个反射面形成的双孔径波面干涉图,可监视实际的 piston 误差。另一路光由分光镜反射 90° 经过成像透镜和 tip-tilt 倾斜镜传播到四棱锥波前传感器和中继透镜,最后到达 CCD 探测器焦面。四棱锥镜放置在前端成像系统的焦点处。通过这样布置光路,就可以利用泰曼-格林干涉仪和四棱锥传感器同时测量 piston 误差,然后将这两种测量结果进行比较。

与图 1 不同的是,实验中采用的四棱锥镜实际由两块底面正方形的金字塔形状的棱镜底面相贴胶

合而成。这是因为:为了保证经棱镜分出的四个子孔径光斑彼此不发生重叠,四棱锥镜的顶角须满足<sup>[7]</sup>:

$$(n - 1)(180 - \alpha) \geq \sqrt{2} F \quad (4)$$

式中,  $n$  为介质折射率,  $F$  为前端成像透镜的焦比。这样棱镜顶角非常平,接近  $180^\circ$ ,光学加工比较困难。采用双棱镜方式,式(4)变为:

$$(m_1 - 1)(180 - \alpha_1) - (m_2 - 1)(180 - \alpha_2) \geq \sqrt{2} F \quad (5)$$

式中,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为两个四棱锥镜的顶角,  $m_1$  和  $m_2$  为折射率。通过选择合适的玻璃材料,两个棱镜的顶角可以设计成  $150^\circ$  左右,加工比较容易。

实验时,设置促动器步长值(如  $1/20$ ),从某一初始位置,逐次对运动立方体施加单步运动。待每次运动稳定后,通过泰曼-格林干涉仪检测出促动前后的实际光程差变化量;CCD 同时采集经过四棱锥传感器输出的图像。多次单步后,完成一次测量过程。单次单步运动时采集到的图像见图 3,从图中可以清晰地看出有 4 个对称分布的出瞳像,每个子孔径边缘轮廓清晰,这是瑞利衍射效应所致。子孔径中央的分界线比较明显,或是明亮或是暗淡,表明这里的入瞳波前不连续(因为立方体在此处拼接),因而波前斜率最大。式(1)、式(2)中的 P 点就取自此分界线上的任一点。为了方便分析,结果分析均选择子孔径中心点。

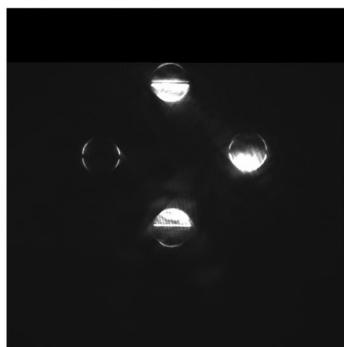


图 3 单步促动时 CCD 采集的图像

### 3 结果分析

运动立方体从某一初始位置开始连续单步运动(步长为  $1/20$ ),通过四棱锥传感器得到一系列检测数据,泰曼-格林干涉仪测量出相应参考数据,见图 4。图 4(a)是检测信号及其正弦拟合曲线,图 4(b)是 piston 误差估计值(由测量信号根据正弦模型反求出)与干涉仪参考测量值的对比。

假设将图像中分界线方向定义为 Y 向,则检测信号为与 Y 方向正交(定义为 X 向)的  $S_x$ 。测量点取子孔径中心点  $(x_0, y_0)$ 。

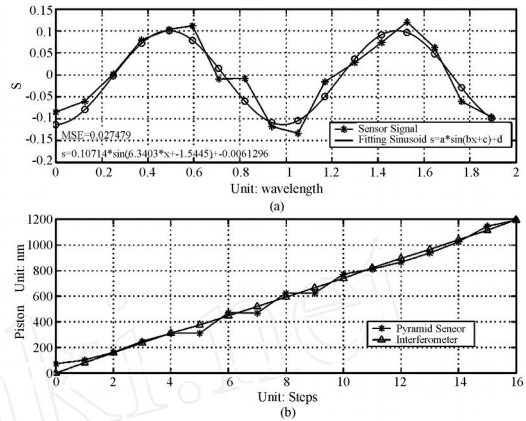


图 4 实验数据:传感器检测值,piston 误差估计值和干涉仪参考测量值

用于拟合的正弦函数可表示为:

$$S = A \cdot \sin(2\pi \cdot x / T + \phi) + S_0 \quad (6)$$

引入 RMSE(均方根误差)作为评价拟合优劣的指标:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_i)^2}{n - m}} \quad (7)$$

式中,  $S_i$  为信号测量值,  $\hat{S}_i$  为相应的拟合值,  $n$  为测量点数,  $m$  为拟合曲线的待定参数个数,对于正弦函数模型而言,  $m = 4$ 。正弦拟合函数的周期、幅值及均方根误差见表 1。可以看出,多次实验结果都比较平均,正弦拟合函数的周期基本在 1 个左右,正弦拟合曲线幅值(A)约为 0.1,拟合残差的均方根误差(RMSE)约为 0.03 ~ 0.04 左右。

表 1 检测信号的正弦拟合结果(有调制)

测量序号	周期 (T 单位:波长)	拟合曲线幅值(A)	RMSE
1	0.991 0	0.107 1	0.027 5
2	1.009 4	0.115 4	0.037 2
3	1.032 6	0.100 6	0.042 9
4	0.972 4	0.097 5	0.041 9
5	0.997 6	0.100 8	0.041 6
6	1.013 6	0.086 9	0.038 3
7	0.985 6	0.101 2	0.039 8
均值	1.000 3	0.101 4	0.038 5

计算出正弦拟合函数的参数后就可以根据式(3)通过反正弦函数去反求立方体间 piston 误差估计值。但由于正弦函数具有周期性以及  $\pi/2$  的相位模糊性,所以在计算估计值时还需要根据拟合函数的初相位以及一阶导数来判断每个测量点在正弦函数中对应的相位。

两个立方体之间 piston 误差变化从 0 ~ 0.8 (16 步)时,测量误差基本在  $\pm 50$  nm 范围左右。误差值的影响因素除了测量过程引起外,还有由反正

弦函数计算带来的截断误差(因为反正弦函数自变量在 $[-1, +1]$ 范围内取值,如果超出,统一取边界值)。以干涉仪测得的参考值为横坐标,以由四棱锥传感器检测进而计算出的估计值为纵坐标,对这样构造出的数据点进行线性拟合,见图5。拟合后的均方根误差为17.5 nm,表明由四棱锥传感器得到的 piston 误差检测结果和由干涉仪得到的检测结果能够较好地符合。

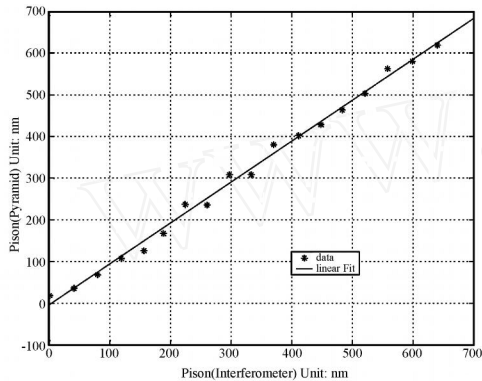


图5 数据点(X坐标:piston 误差估计值,Y坐标:piston 误差参考值)的显示及线性拟合

图2中 tip-tilt 倾斜镜的作用是产生周期性的二维方向上的快速旋转运动,从而对经过其反射后会聚到四棱锥传感器的光束进行动态调制,目的在于提高传感器对波前误差信号检测的动态范围。光路调制原理的详细解释见文献[7]和文献[9]。实验采用了环形的调制路径,即让 tip-tilt 镜面中心法线围绕四棱锥顶点作圆周运动。表1测量数据均是在有调制情况下得到的(调制频率取10 Hz)。实验还开展了无调制情况下的信号测量,见表2。piston 估计值与参考值线性拟合后的均方根误差为18.2 nm。与有调制情况相比,二者测量结果相似,说明有无调制对本实验 piston 误差测量没有明显的影响。其原因可能是用于 piston 误差计算的灰度信号采自波前变化最大处(子孔径中央的分界线),足够进行定量估计,其它波前误差(tip、tilt 或更高阶)测量需要整个子孔径的灰度信息,受动态范围影响大。

表2 检测信号的正弦拟合结果(无调制)

测量序号	周期 (T 单位:波长)	拟合曲线 幅值(A)	RMSE
1	0.986 8	0.141 5	0.040 1
2	0.950 3	0.115 2	0.030 9
3	1.009 4	0.115 4	0.037 2
均值	0.982 2	0.124 0	0.036 1

## 4 结论

本文开展了利用新型四棱锥传感器检测反射立方体相对位移量的实验,旨在研究应用四棱锥传感器检测光学拼接镜各子镜单元之间的法向光程差信号的可行性。实验时逐步促动其中一个反射立方体,利用四棱锥传感器和泰曼-格林干涉仪各自独立同时从反射光束中获得检测信号值。经过对实验结果分析,验证四棱锥传感器检测信号和拼接镜子单元间的法向光程差之间存在正弦函数关系的特性,以波长为周期。和泰曼-格林干涉仪测量结果比对,四棱锥传感器的测量误差在 $\pm 50$  nm 范围内。这样就可以通过正弦拟合建立传感器直接检测值和 piston 误差信号之间的特性曲线,实现 piston 误差的间接测量。

四棱锥传感器本身由棱镜、照相镜头和 CCD 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。此外,该传感器除了能够测量法向光程差外,还可以测量 tip、tilt 倾斜误差,在光学拼接镜共相失调误差检测、自适应光学波前检测等方面,应用前景很大。目前测量精度已达数十纳米,今后还有进一步提高的可能性。

四棱锥传感器目前也存在一些技术难点,例如正式测量前需要预先求解拟合模型、棱镜的棱边和锥顶角加工精度要求高以及如何检验等,这些问题有待进一步深入研究。

## 参考文献:

- [1] Chanan G, Troy M, Ohara C. Phasing the Primary Mirror Segments of the Keck Telescopes: A Comparison of Different Techniques [J]. Proc. SPIE, 2002, 4003: 188-202.
- [2] 宋贺伦, 鲜浩, 姜文汉等. 干涉系统在拼接主镜共相位检测上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 228-231.
- [3] Ragazzoni R. Pupil Plane Wavefront Sensing with an Oscillating Prism[J]. J. Modern Opt. 1996, (43): 289-293.
- [4] Esposito S, Devaney N. Segmented Telescopes Co-Phasing Using Pyramid Sensor [C]. ESO Conference and Workshop Proc., 2002, (58): 161-166.
- [5] Esposito S, Pinna E, et al. Pyramid Wavefront Sensor at the William Herschel Telescope: Towards Extremely Large Telescopes[J]. the ING Newsletter, 2005, (10): 26-27.
- [6] 陈欣扬. Fizeau 型天文光学综合孔径望远镜的若干关键技术研究[D]. 中国科学院研究生院, 2007, 55-59.
- [7] Riccardi A, Bindi N, et al. Laboratory Characterization of a "Foucault-like" Wavefront Sensor for Adaptive Optics [J]. Proc. SPIE, 1998, 3353: 941-951.

[8] Esposito S, Pinna E, et al. Co-Phasing of Segmented Mirrors Using Pyramid Sensor [J]. Proc. SPIE, 2003, 5169: 72-78.

[9] 陈欣扬, 朱能鸿. 基于四棱锥传感器的波前检测仿真设计[J]. 天文学进展, 2006, 24(4): 362-372.



朱能鸿(1939-),男,中国工程院院士,博士生导师,研究员,长期从事天文仪器的研究与研制。主持和参加了真空天顶筒、1.56米天体测量望远镜和低纬度子午环、激光测距仪等大型天文仪器的研制。曾获国家科技进步一等奖。目前主要研究领域为天文光学干涉技术, nhzhu@shao.ac.cn



陈欣扬(1975-),男,高级工程师,于中科院上海天文台获博士学位,主要研究方向为光学天文仪器的控制技术, xychen@shao.ac.cn

www.cnki.net