

文章编号 1004-924X(2009)01-0098-06

# 拼接镜的主动光学面形控制

林旭东<sup>1,2</sup>, 陈 涛<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 王富国<sup>1,2</sup>

(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:** 为了实现对拼接式望远镜各子镜的主动控制, 建立了正六边形子镜拼接的面形控制方程, 并研究了传感器的安装位置对面形控制的影响。根据子镜之间相对位置的测量要求确定了主动控制所采取的方式, 建立了由3个正六边形子镜组成的拼接镜的面形控制方程, 并分析了传感器的安装位置对面形控制的影响。提出了传感器沿垂直镜缝方向错位安装的方法, 分析了该方法对于拼接子镜扩展的适用性。分析表明, 对于边长0.9 m, 对角线长1.8 m的子镜, 传感器错开0.02 m安装即能够准确检测子镜之间的位置变化; 给出了正确的促动器调整信息, 满足了拼接镜主动面形实时、高精度控制等要求。

**关键词:** 望远镜; 拼接镜; 主动控制; 传感器; 面形控制

**中图分类号:** TH75 **文献标识码:** A

## Active optics figure control of segmented mirror

LIN Xu-dong<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, WANG Fu-guo<sup>1,2</sup>

(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:** To realize the active control of each segment of a segmented telescope, the figure control equation of hexagonal mirrors was built up, and the impact of sensor location on figure control system was studied. A working manner of the active control system based on the measurement requirements of relative segment locations was confirmed. Then, a figure control system consisting of 3 segments was built up, and the influence of the sensor location on figure control was analyzed. And also, a sensor setting scheme in which sensor is perpendicularly away in centimeters was put forward. Finally, the applicability of this scheme to the extent of segmented mirrors was testified. The analysis results indicate that the change of location between the mirrors can be exactly measured in fixed two sensors with 0.02 m stagger along the same gap when the segment mirror has side length of 0.9 m and diagonal length of 1.8 m, also the control system can give out the correct adjusted information of actuators. These conclusions reported here show that proposed scheme can satisfy the requirements of real time and high precise control of the active figure of the segmented mirror.

**Key words:** telescope; segmented mirror; active control; sensor; figure control

## 1 引言

对于大型望远镜,主镜的重力变形和热变形将严重影响其成像质量和观测能力,必须采用主动光学技术加以校正。从主镜的建造、磨制、运输和成本等方面来看,单块主镜望远镜的口径极限为 8 m;用超过 8 m 的整块镜面,无论从哪个方面来说都是及其困难的。如果采用拼接镜技术,主镜由多块子镜拼成,只要子镜有足够的刚度,主镜的厚度和重量可大为减小,大尺寸的磨镜机、镀膜机也不需要了,并且为应用高反射膜和复制技术创造了条件。拼接镜面使建造特大口径的望远镜成为可能,也成为了新一代大型望远镜采用的较为普遍的一个方式。

使用拼接式主镜的中心问题是安装这些小尺寸的镜子,并维持它们的位置和方向使其形成一个单一的大的光学镜。使用一个控制系统来监视主镜的面形(该面形一旦建立)并持续保持该面形以抑制由风、重力载荷和温度变化所导致的面形改变。本文采用的控制方案是使用电容式传感器来测量子镜之间的相对位置和方向,使用微位移促动器来移动、校正子镜的方向,并使用一个算法把传感器信息转换成所需要的促动器运动量。本文建立了由 3 个正六边形镜组成的拼接镜的面形控制方程,并对传感器的安装位置与面形方程的关系进行了分析,得出了一种能够用于多镜面拼接控制的传感器和促动器安装形式。需要强调的是该系统是一个面形维持系统,建立正确的初始面形的相关问题和技术将在另外的文章中讨论。

## 2 控制方式及面形方程的建立

拼接镜可以看作刚性体。控制系统感应子镜的位置和方向,并移动子镜以维持正确的面形。设计中为尽量保持镜子的上表面无遮拦,把传感和促动器件放在子镜的背面,这样就可以保证有较大的聚光面积且避免其他方法中所需要的附加光源。传感器与促动器的位置关系如图 1 所示,其中 3 号子镜固定不动,等同于实际望远镜中用于确定望远镜指向的那块子镜,在每相邻六边形子镜的边上安装两个传感器,镜子后面的 3 个

促动器安放在六角形子镜的 3 个对称的几何重心位置,根据传感器的读数调整 1、2 号子镜的位置使 3 块子镜等效为一个单一的大镜子。

每个镜子有六个自由度:piston(沿镜子法线运动),tip(绕  $y$  轴旋转),tilt(绕  $x$  轴旋转),沿镜子法线的旋转,在主镜表面内的子镜中心的径向和方位运动。本文假设只有前 3 个运动需要主动控制,其他 3 个运动由支撑结构的刚度被动限制住,文献[1]指出这样做并不降低图像质量。

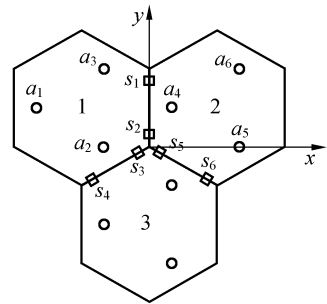


图 1 子镜背面的传感器和促动器分布

Fig. 1 Distributions of sensors and actuators at the back of segmented mirrors

对于如图 1 所示的情况,由立体解析几何,按逆时针方向的任意 3 点  $(x_1, y_1, z_1)$   $(x_2, y_2, z_2)$   $(x_3, y_3, z_3)$ ,则过这 3 点的平面方程为:

$$\begin{vmatrix} x-x_1 & y-y_1 & z-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

两个六角形子镜交界处的传感器的读数就是这两个子镜平面在该点的高度差,设传感器所在的点位于两个子镜的交界线上,假如子镜的 3 个促动器原先的读数都为 0,发生抖动之后变为  $z_1, z_2, z_3$ ,设子镜在传感器所在点处的高度为  $z$ ,则由上面的平面方程可得:

$$z = \frac{1}{S_0} (S_1 z_1 + S_2 z_2 + S_3 z_3), \quad (2)$$

其中  $S_1, S_2, S_3$  分别为三角形  $s_1 a_2 a_3, s_1 a_3 a_1, s_1 a_1 a_2$  的面积,  $S_0$  为三角形  $a_1 a_2 a_3$  的面积,以三角形各顶点为方向,面积逆时针为正,顺时针为负。由上式可见传感器的位置读数只取决于它与促动器之间的位置关系。

不失一般性,拼接镜中的传感器和促动器的相对位置一般为如图 1 中的 1、2 号子镜所显示的

两种情况。假设子镜边长为  $a$ , 促动器之间的距离为  $c$ , 两个传感器之间的距离为  $d$ 。定义传感器的读数为相邻子镜面之间的高度差, 则传感器的读数  $s$  可表示为相邻两子镜的 6 个促动器读数  $p_i$  的线性组合:

$$s_1 = c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3 + c_4 p_4 + c_5 p_5 + c_6 p_6, \quad (3)$$

由式(2)可得:

$$c_1 = S_{\Delta s_1 a_2 a_3} / S_0 = 1/3 - a/c, \quad (4)$$

$$c_2 = S_{\Delta s_1 a_3 a_1} / S_0 = 1/3 + (a-d)/2c, \quad (5)$$

$$c_3 = S_{\Delta s_1 a_1 a_2} / S_0 = 1/3 + (a+d)/2c, \quad (6)$$

$$c_4 = S_{\Delta s_1 a_5 a_6} / S_0 = 1/3 + a/c, \quad (7)$$

$$c_5 = S_{\Delta s_1 a_6 a_4} / S_0 = 1/3 - (a+d)/2c, \quad (8)$$

$$c_6 = S_{\Delta s_1 a_4 a_5} / S_0 = 1/3 - (a-d)/2c, \quad (9)$$

同样可得:

$$s_2 = c_1 p_1 + c_3 p_2 + c_2 p_3 + c_4 p_4 + c_6 p_5 + c_5 p_6, \quad (10)$$

对于图 1 所示的传感器、促动器分布情况, 可以得到如下的面形控制方程:

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \\ c_1 & c_3 & c_2 & c_4 & c_6 & c_5 \\ -c_5 & -c_4 & -c_6 & 0 & 0 & 0 \\ -c_6 & -c_4 & -c_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 & c_2 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

可表示为:

$$\mathbf{AP} = \mathbf{S}, \quad (12)$$

对  $\mathbf{A}$  进行初等变换可知其秩为 5, 故对于待求的  $\mathbf{P}$  方程(12)不能给出准确解。文献[2]提出了 3 种方法, 方法一是借助于调焦设备, 得到 4 个调焦方程, 再结合方程(12)由最小二乘法就可解出  $\mathbf{P}$ ; 方法二是采用阻尼最小二乘法, 通过选择一定的阻尼因子, 可以把解  $\mathbf{P}$  限制在一定的范围之内; 方法三是再固定一个促动器从而使构造的  $\mathbf{AP} = \mathbf{S}$  中的  $\mathbf{A}$  满秩, 但这种方法难以得到准确解。

### 3 传感器位置的调整及分析

针对  $\mathbf{A}$  的不满秩情况, 本文对传感器的位置重新排放, 如图 2 所示, 传感器位置表示为黑色的为感应面, 即传感器错开子镜缝正下方一定距离, 且一条缝上面的两个传感器错开的方向相反。

假设传感器垂直镜缝方向错开的距离为  $e$ , 则与前面的分析方法相同, 可以得到方程(3), 这

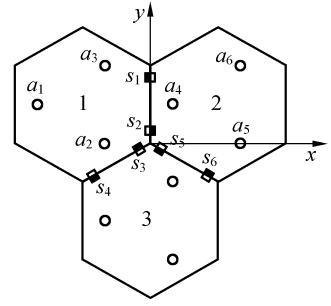


图 2 重新分布传感器的位置

Fig. 2 Redistribution of sensor location

时的系数为:

$$c_1 = 1/3 - a/c + 2\sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (13)$$

$$c_2 = 1/3 + (a-d)/2c - \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (14)$$

$$c_3 = 1/3 + (a+d)/2c - \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (15)$$

$$c_4 = 1/3 + a/c + 2\sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (16)$$

$$c_5 = 1/3 - (a+d)/2c - \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (17)$$

$$c_6 = 1/3 - (a-d)/2c - \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (18)$$

这时传感器  $s_2$  与 6 个促动器的关系为:

$$s_2 = c_7 p_1 + c_8 p_2 + c_9 p_3 + c_{10} p_4 + c_{11} p_5 + c_{12} p_6, \quad (19)$$

由传感器和促动器的位置关系可定出方程的系数为:

$$c_7 = 1/3 - a/c - 2\sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (20)$$

$$c_8 = 1/3 + (a+d)/2c + \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (21)$$

$$c_9 = 1/3 + (a-d)/2c + \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (22)$$

$$c_{10} = 1/3 + a/c - 2\sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (23)$$

$$c_{11} = 1/3 - (a-d)/2c + \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (24)$$

$$c_{12} = 1/3 - (a+d)/2c + \sqrt{3}/3 \times e/c, \quad (25)$$

对于图 2 情况, 仍然假设 3 号子镜不动, 调整 1、2 号子镜的促动器, 可以得到面形控制方程  $\mathbf{AP} = \mathbf{S}$  为:

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ -c_{12} & -c_{10} & -c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ -c_6 & -c_4 & -c_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_8 & c_9 & c_7 \\ 0 & 0 & 0 & c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

同样对矩阵  $\mathbf{A}$  进行初等变换可知这时  $\mathbf{A}$  满

秩,所以对于由扰动引起的拼接镜面形改变,可以通过读取传感器的变化量并解方程(26)所示的面形方程得到 6 个促动器的位移量  $-p_i$ ,从而抵消扰动的影响。

可以用促动器输出来模拟扰动的影响,取系统的参数类似于 Keck 望远镜的参数<sup>[3]</sup>为:子镜边长  $a=0.9\text{ m}$ ,  $c=0.9\text{ m}$ ,  $d=0.772\text{ m}$ ,这里假设  $e=0.02\text{ m}$ 。假定  $\mathbf{P}_i=1.0\times 10^{-6}\times [0.1\ 0.14\ 0.21\ 0.08\ 0.31\ 0.64]^T\text{ m}$ ,由  $\mathbf{AP}=\mathbf{S}$  得到传感器输出为  $\mathbf{S}=1.0\times 10^{-6}\times [0.173\ 0.380\ 0.183\ 0.087\ -0.212\ 0.008]^T\text{ m}$ ,再由  $\mathbf{P}=\mathbf{A}^{-1}\mathbf{S}$  反求的  $\mathbf{P}$  与假定的扰动输入  $\mathbf{P}_i$  完全相同,从而抵消了扰动的影响。

### 4 子镜扩展分析

为了验证上述方法对子镜再扩展的适应性,本文对子镜的单圈内扩展和圈外扩展建立了面形

控制方程,并进行了分析。

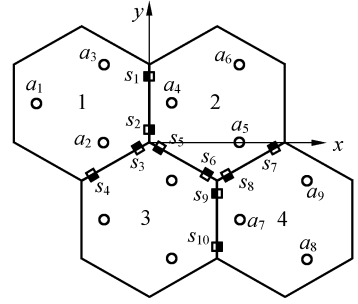


图 3 单圈内的子镜扩展

Fig. 3 Segment extension in the same ring

#### 4.1 单圈内子镜扩展

对于单圈内的扩展如图 3 所示,可以把作为参考镜的 3 号镜看作拼接镜的中心镜,那么扩展的 4 号镜就与 1、2 号镜构成内侧第一圈的三块子镜,可以建立出对应的面形控制方程  $\mathbf{AP}=\mathbf{S}$  为:

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & 0 & 0 & 0 \\ c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{12} & -c_{10} & -c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_6 & -c_4 & -c_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_8 & c_9 & c_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_2 & c_3 & c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_{12} & -c_{10} & -c_{11} & -c_9 & -c_7 & -c_8 \\ 0 & 0 & 0 & -c_6 & -c_4 & -c_5 & -c_3 & -c_1 & -c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_4 & -c_5 & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_{10} & -c_{11} & -c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \\ s_{10} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

可分析得矩阵  $\mathbf{A}$  的秩为 9,对于由扰动产生的传感器读数向量  $\mathbf{S}$ ,可以用最小二乘法:

$$\mathbf{P}=(\mathbf{A}^T\times\mathbf{A})^{-1}\times\mathbf{A}^T\times\mathbf{S}, \quad (28)$$

来算得各促动器应移动的改正量  $-\mathbf{P}$ 。类似上面的分析,假定扰动输入为  $\mathbf{P}_i=1.0\times 10^{-6}\times [1.7\ 3.2\ -0.6\ 5.3\ -2.8\ 2.4\ 6.3\ 1.8\ -0.5]^T$ ,这时的扰动输出为  $\mathbf{S}=1.0\times 10^{-4}\times [-0.101\ -0.021\ 0.030\ 0.051\ 0.041\ -0.030\ -0.068\ -0.105\ 0.073\ 0.090]^T$ ,再由最小二乘法(方程(28))可以算得改正量为  $-\mathbf{P}=1.0\times 10^{-6}\times [1.699\ 3.199\ -0.600\ 5.299\ -2.799\ 2.400\ 6.300\ 1.800$

$-0.499]^T$ ,可见算法误差很小。对多组的模拟扰动输入计算表明,本文所用的传感器分布方式对于图 3 所示子镜的扩展是完全适用的。

#### 4.2 子镜圈外扩展

对于大型的拼接镜,可能需要多圈子镜实现,如 Keck 望远镜由三圈子镜拼成。所以需要验证上述方法对于子镜圈外扩展的适应性,如图 4 所示。仍然把 3 号子镜作为中心镜,1、2 号镜为第一圈,沿径向方向加一块子镜 4,处于第二圈位置。用前面类似方法可以建立对应的面形控制方程  $\mathbf{AP}=\mathbf{S}$  为:

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & 0 & 0 & 0 \\ c_7 & c_8 & c_9 & c_{10} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{12} & -c_{10} & -c_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_6 & -c_4 & -c_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_8 & c_9 & c_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_2 & c_3 & c_1 & 0 & 0 & 0 \\ -c_{11} & -c_{12} & -c_{10} & 0 & 0 & 0 & -c_8 & -c_9 & -c_7 \\ -c_5 & -c_6 & -c_4 & 0 & 0 & 0 & -c_2 & -c_3 & -c_1 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 & c_1 & c_2 & c_6 & c_4 & c_5 \\ 0 & 0 & 0 & c_9 & c_7 & c_8 & c_{12} & c_{10} & c_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \\ s_{10} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

同样可分析得矩阵  $\mathbf{A}$  的秩为 9, 用与方程(28)相同的最小二乘法可以算出用于校正扰动所需的促动器移动量。假定扰动输入为  $\mathbf{P}_i = 1.0 \times 10^{-6} \times [-0.71 \ -3.21 \ 1.67 \ 2.39 \ -0.82 \ 5.44 \ -6.37 \ 0.86 \ -5.53]^T$ , 对应的扰动输出为  $\mathbf{S} = 1.0 \times 10^{-6} \times [-3.817 \ -2.632 \ -3.323 \ -5.556 \ -1.061 \ -3.576 \ 7.793 \ -0.222 \ 2.698 \ 5.186]^T$ , 由方程(28)可以算出促动器校正量为  $-\mathbf{P} = 1.0 \times$

$10^{-6} \times [-0.719 \ 9 \ -3.209 \ 9 \ 1.6700 \ 2.390 \ 0 \ -0.819 \ 9 \ 5.440 \ 0 \ 6.370 \ 0 \ -6.369 \ 9 \ 0.860 \ 0 \ -5.529 \ 9]^T$ 。与 4.1 分析方法相同, 对多组模拟扰动输入的计算可以发现算法的误差很小, 可忽略不计。可见, 本文所述的方法对于图 4 所示的子镜扩展也是合适的。

## 5 结 论

本文建立了拼接镜面的面形控制方程, 讨论了传感器的安装位置对面形控制的影响, 给出了一种传感器放置方案。针对 Keck 子镜的尺寸, 边长 0.9 m, 对角线长 1.8 m, 传感器沿镜缝方向距离 0.772 m, 且沿垂直镜缝方向各自错开 0.02 m 的方案能够使面形控制系统正确地将由热、风载荷和重力变形引起的传感器读数改变量转换为子镜下方的促动器的校正量, 实现拼接镜主动光学的实时校正。

同时通过分析可知该方案适用于多子镜多圈拼接的形式, 这对于指导大型拼接望远镜的传感器安装有一定的指导意义。

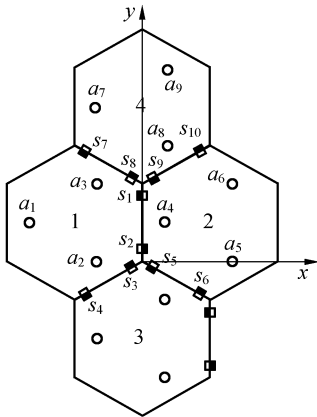


图 4 圈外子镜扩展

Fig. 4 Segment extension in the outer ring

## 参考文献:

- [1] MAST T S, NELSON J E. Figure control for a fully segmented telescope mirror [J]. *Appl. Opt.*, 1982, 21(14): 2631 - 2641.
- [2] 苏定强, 崔向群. 主动光学——新一代大型望远镜的关键技术[J]. *天文学进展*, 1999, 17(1): 1-14.  
SU D Q, CUI X Q. Active optics—the key technology for new generation big aperture telescopes [J]. *Progress in Astronomy*, 1999, 17(1): 1-14. (in Chinese)
- [3] MINOR R H, ARTHUR A A, GABOR G, et al.. Displacement sensors for the primary mirror of the W. M. Keck telescope [A]. *SPIE*, 1990, 1236, *Advanced Technology Optical Telescopes IV*: 1009-1017.
- [4] 邹维曜. 大型拼接镜面望远镜的面形控制[D]. 南京: 天文光学技术研究所, 1996.  
ZOU W Y. *Figure control of big segmented mirror telescope* [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, 1996. (in Chinese)

- [5] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.  
CHENG J Q. *Principle and Design of Astronomical Telescope* [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003.
- [6] 杨德华, 戚永军, 朱振东, 等. 光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 191-197.  
YANG D H, QI Y J, ZHU ZH D, et al.. Design and test of the active micro-motion mechanism for

optical mirror segment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 191-197. (in Chinese)

- [7] 刘建芳, 杨树臣, 杨志刚, 等. 新型压电精密步进旋转驱动器研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 594-601.  
LIU J F, YANG SH CH, YANG ZH G, et al.. Study on precision PZT rotary step actuator with inner anchor/loosen [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 594-601. (in Chinese)

#### 作者简介:



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



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与仿真的研究。E-mail: wfg109@163.com

#### 导师简介:



陈涛(1965—), 男, 内蒙古赤峰人, 工学博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。E-mail: chent@ciomp.ac.cn



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和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

#### ●下期预告

## 石墨纤维增强铝基复合材料在空间遥感器结构中的应用

孙德伟<sup>1</sup>, 张广玉<sup>1</sup>, 张其馨<sup>1</sup>, 武高辉<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

为了设计和制造出性能更加优越的空间遥感器, 对一种新型航天材料—石墨纤维增强铝基复合材料(Gr/Al composite)进行了研究。首先, 突破了石墨纤维与铝合金的界面反应控制、纤维铺层和缠绕设计等关键技术, 成功制备了石墨纤维增强铝基复合材料, 材料的密度为  $2.12 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量为 129 GPa, 线膨胀系数为  $5.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。然后, 针对这种复合材料, 摸索出一套完整的加工和后处理工艺, 并首次把这种复合材料应用在空间红外遥感器镜筒结构设计中, 设计的镜筒较之钛合金镜筒减重 31.8%。最后, 完成了镜筒组件的加工装配、透镜的装校和随机振动试验。试验结果表明, 镜筒组件的一阶谐振频率为 284 Hz, 大于 100 Hz 的设计要求, 振动试验后光机系统没有发生变化。上述工作表明石墨纤维增强铝基复合材料在航天遥感领域具有较高的应用价值。