

文章编号 1004-924X(2012)06-1243-07

## 大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标

吴小霞\*, 王鸣浩, 明 名, 王富国

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了准确地预算出大口径 SiC 轻量化主镜镜面的温度变形, 研究了不同热模式下 SiC 轻量化主镜镜面面形的定标和计算方法。将 SiC 轻量化主镜上的温度传感器在轴向厚度方向上进行分层处理, 对每层上的温度分布采用准 Zernike 多项式进行拟合。以 4 m SiC 轻量化主镜为例, 采用有限元法分别对准 Zernike 前 9 项温度模式(18 种温度场)下的镜面变形进行定标计算, 得出各种单位载荷作用下轻量化主镜镜面的最大变形以及面形误差 PV 值和 RMS 值。计算结果表明: 准 Zernike 第一项模式、单位载荷作用下镜面变形最大, 其面形误差 RMS 为 278.3 nm。采用最小二乘法对各种温差场下的镜面误差进行准 Zernike 多项式拟合, 获得了准 Zernike 像差项的系数。采用最小二乘法拟合计算出镜面变形误差产生的准 Zernike 像差项的系数, 结果表明, 18 种温度场下产生的像差形式主要有: 平移、倾斜、离焦、彗差和像散。

**关键词:** 大口径主镜; SiC 轻量化主镜; 热变形; 定标; 准 Zernike 多项式

**中图分类号:** TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122006.1243

## Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror

Wu Xiao-xia\*, WANG Ming-hao, MING Ming, WANG Fu-guo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com

**Abstract:** To estimate the thermal distortion of a large aperture SiC lightweight primary mirror exactly, the calibration and calculation methods for the SiC lightweight mirror were researched in different thermal modes. Temperature sensors stuck on the lightweight mirror were divided into three levels along an optic axial direction, and the temperatures at each level were fitted by quasi-Zernike polynomials, respectively. By taking a 4 m SiC lightweight mirror for an example, the Finite Element Method (FEM) built by MSC. Patran was used to calibrate and calculate the thermal distortion in eighteen kind temperature fields of the first ninth quasi-Zernike polynomials and the Max deformation, surface error PV and RMS values due to the lightweight mirror thermal distortion were obtained for different temperature patterns. Calculation results show that the deformation of lightweight mirror is max under the first quasi-Zernike polynomial temperature pattern, and the surface error RMS value is 278.3 nm. Using a least-square method, the aberration coefficients of surface errors are calculated by quasi-

收稿日期: 2012-02-06; 修订日期: 2012-03-28.

基金项目: 中科院三期创新工程专项基金资助项目(No. O65X32C060); 科技部国际合作项目(No. 2011DFA50590)

Zernike polynomial wavefront fitting program for each temperature field, and the main aberration caused by the thermal distortion is piston, tilt, defocus, coma and astigmatism.

**Key words:** large aperture mirror; SiC lightweight mirror; thermal distortion; calibration; quasi-zernike polynomial

## 1 引言

SiC 材料具有比刚度高,热稳定性好等优点,是理想的空间轻量化主镜镜坯材料,随着国内制造和加工工艺的发展, SiC 材料有望应用于地基望远镜中大口径轻量化主镜的制备<sup>[1-2]</sup>。与主镜常用的零膨胀玻璃材料 Zerodur 不同, SiC 材料具有较大的热膨胀系数(约为  $2.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ),这就使得大口径 SiC 轻量化主镜的镜面面形对温度变化较为敏感。因此,准确地预算出环境温度变化引起的轻量化主镜镜面变形,可以为望远镜系统调节的参数设定和热控参数的确定提供一定的理论参考。

利用有限元法可以分析出各种不同温度载荷下的主镜变形,分析时主要考虑的稳态温度场有:轴向温度梯度、径向温度梯度和整体温度变化 3 种工况<sup>[3-6]</sup>。实际应用中,反射镜上的温度分布是非常复杂的,1987 年 E. Pearson 提出了采用 Zernike 多项式表示轻量化主镜的温度场分布的方法<sup>[7]</sup>,文献[8]则采用 Zernike 多项式拟合了超薄镜的镜面温度场。本文将地基望远镜中的大口径 SiC 轻量化主镜在轴向厚度方向上进行分层处理,对每层的温度分布采用准 Zernike 多项式进行拟合,采用有限元法对不同温度模式下轻量化主镜的镜面变形进行定标,并将镜面变形分解成准 Zernike 像差。

## 2 温度分布的准 Zernike 多项式拟合

采用有限元法准确预算实际工作状态下轻量化主镜热变形的前提条件是在主镜有限元模型上施加准确逼真的温度载荷。因为实际测量轻量化主镜的温度分布时,温度传感器的个数是有限的,而有限元模型的节点和单元的数量远远超出了实际分布在主镜上的温度传感器的个数。所以,直接测得有限元模型上大量的节点和单元的温度十分困难。

为了能够准确地获得主镜的温度载荷分布情况,设计中将测量镜体温度的传感器分成 3 层:主镜前面板背面的 A 层、主镜中间面筋板上的 B 层和主镜后面板上的 C 层,如图 1 所示。

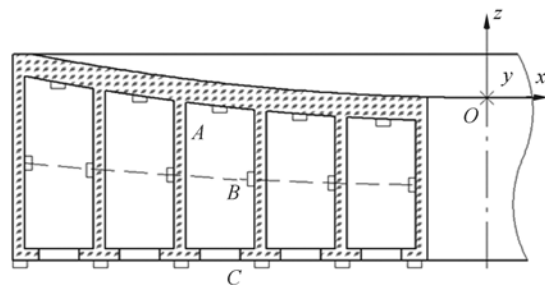


图 1 轻量化主镜上温度传感器的分布

Fig.1 Temperature sensor distribution of lightweight mirror

以主镜镜面顶点为原点  $o$ ,主镜光轴方向为  $z$  向,主镜半径方向为  $x$  和  $y$  向建立直角坐标系。对每个层面上的温度分别采用 9 项准 Zernike 多项式进行拟合:

$$T_i(x, y) = K_{i1} + K_{i2}(x) + K_{i3}(y) + K_{i4}(2x^2 + 2y^2 - 1) + K_{i5}(x^2 - y^2) + K_{i6}(2xy) + K_{i7}(3x^3 + 3xy^2 - 2x) + K_{i8}(3x^2y + 3y^3 - 2y) + K_{i9}(6x^4 + 12x^2y^2 + 6y^4 - 6x^2 - 6y^2 + 1), \quad (1)$$

式中,  $i$  分别为 A、B、C。利用离散分布的温度传感器的实测数据,采用最小二乘法即可获得每个层面上各个准 Zernike 项的 9 个系数  $K_{i1} \sim K_{i9}$ ,从而可以预算出镜体上其它位置的节点温度。

## 3 轻量化主镜模型的建立

借助有限元分析软件建立大口径轻量化主镜模型时,一般会采用平板单元,这样模型上节点和单元温度代表的是镜体中性面上的温度,并且模型节点之间的温度采用了线性插值方法。影响这种模型准确度的因素主要有:(1)对模型节点施加温度载荷时,采用镜体表面的测量值代表了中性

面的温度;(2)每个层面上测量点(温度传感器的个数)相对稀疏, SiC 材料相对较高的热传导率 [185 mW/(mm K)]则能够保证轻量化主镜测点位置表面与中性面的温度差很小,这就使得镜体表面测量值和有限元预算值之间仍具有较好的一致性。

以口径为  $2r_0=4\text{ m}$  的 SiC 轻量化主镜为分析对象,其抛物镜面的曲率半径为  $R=12\text{ m}$ ,镜体边缘厚度为  $Z_0=350\text{ mm}$ ,主镜所采用 RB-SiC 材料的相关参数如下:密度  $\rho$  为  $3.05\times 10^{-9}\text{ tone/mm}^3$ ;弹性模量  $E$  为  $392\ 000\text{ MPa}$ ;泊松比  $\mu$  为  $0.25$ ;线胀系数  $\alpha$  为  $2.5\times 10^{-6}/\text{K}$ ;热传导率  $\lambda$  为  $185\text{ mW}/(\text{mm K})$ 。

轻量化主镜有限元模型的坐标系与上述坐标系重合,为保证热变形分析时轻量化主镜在半径和光轴方向上可以自由膨胀,模型中采用的约束方式为:镜体背面支撑点位置约束光轴方向  $z$  向自由度,背面中心孔  $x$  轴上两节点进行  $y$  方向的对称约束, $y$  轴上的两节点进行  $x$  方向的对称约束。

#### 4 不同温度场下轻量化主镜热变形的定标

基于准 Zernike 多项式的正交性以及不同温度场产生的主镜变形可采用线性叠加的原理,本文在预先定标出各种准 Zernike 温度模式的单位载荷作用下的主镜热变形后,组合计算出了通过准 Zernike 多项式表达出来的各种热载荷引起的镜面变形。

分析研究中发现,将准 Zernike 温度模式施加在中间层  $B$  上与施加在前后表面上所产生的镜面面形误差区别很小。因此,文中主要叙述了以下 18 种温度场下镜面变形的定标计算:(1)主镜背板温度为  $20^\circ\text{C}$ (参考温度),镜面在参考温度的基准上分别施加前 9 项准 Zernike 多项式的单位载荷( $K_{Aj}=1^\circ\text{C}, j=1,2,\dots,9$ );(2)主镜镜面温度为  $20^\circ\text{C}$ ,背面在参考温度的基准上分别施加前 9 项准 Zernike 多项式的单位载荷( $K_{Cj}=1^\circ\text{C}, j=1,2,\dots,9$ )。

在 MSC. Nastran 有限元软件的热分析模块中通过 PCL 函数建立各种情况下镜体背面和镜

面节点温度场时,式(1)中的  $x$  和  $y$  值分别为:

$$x=x_m/r_0, y=y_m/r_0, \quad (2)$$

其中  $x_m, y_m$  分别为节点  $m(x_m, y_m, z_m)$  的坐标值。

给定模型中镜面和背面的节点温度后,通过稳态分析计算获得镜体其它节点的温度值,并将热分析结果中所有节点的温度值作为结构变形分析中的热载荷施加到主镜模型上。18 种温度场单位载荷作用下 SiC 轻量化主镜的镜面最大变形量 Max、镜面误差 PV 值和 RMS 值分析结果见表 1 和表 2。图 2 中仅列出了背面节点温度为  $20^\circ\text{C}$ ,镜面节点温度分别为不同的准 Zernike 温度模式时镜面温度的等高线图和镜面光轴方向的变形云图。

表 1 背面为  $20^\circ\text{C}$ , 镜面为不同准 Zernike 温度模式时主镜镜面变形的定标结果

Tab. 1 Optical surface errors caused by different quasi-Zernike patterns on faceplate in rear plate temperature of  $20^\circ\text{C}$

准 Zernike 第 $j$ 项	Max/ $\mu\text{m}$	PV/nm	RMS/nm
1	4.00	1 029.0	278.3
2	2.30	1 596.8	185.1
3	2.31	1 597.1	185.1
4	0.63	596.8	113.6
5	1.54	692.6	163.5
6	1.54	687.9	163.3
7	1.27	537.2	136.9
8	1.27	549.6	136.9
9	0.49	676.4	219.6

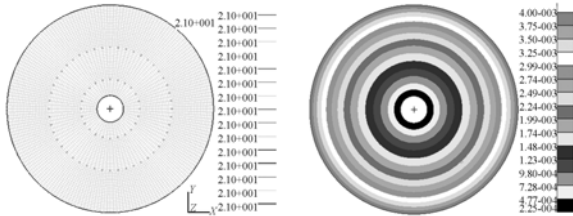
表 2 镜面为  $20^\circ\text{C}$ , 背面为不同准 Zernike 温度模式时主镜镜面变形的定标结果

Tab. 2 Optical surface errors caused by different quasi-Zernike patterns on rear plate in faceplate temperature of  $20^\circ\text{C}$

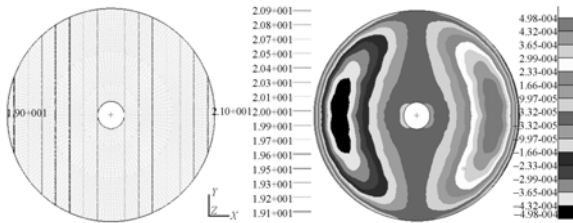
准 Zernike 第 $j$ 项	Max/ $\mu\text{m}$	PV/nm	RMS/nm
1	1.80	1 209.0	278.3
2	1.18	1 577.7	183.4
3	1.18	1 578.0	183.4
4	0.80	495.0	115.8
5	0.92	1 775.1	189.3
6	0.91	1 762.1	189.6
7	0.89	687.7	85.1
8	0.89	686.8	85.1
9	0.30	322.7	52.5

由有限元分析计算可见,18 种工况中准 Zernike 多项式第 1 项的两种热模式引起的镜面变形量最大,单位载荷下镜面变形 RMS 值高达 278.3 nm。

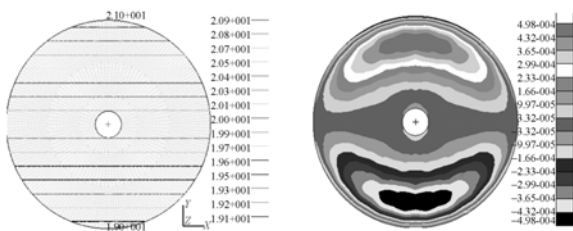
为检验结果的准确性,可以采用理论解析求解主镜的热变形。抛物镜面的主镜上的温度



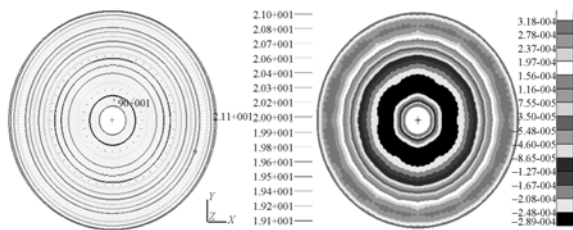
(a)  $t=21\text{ }^{\circ}\text{C}$



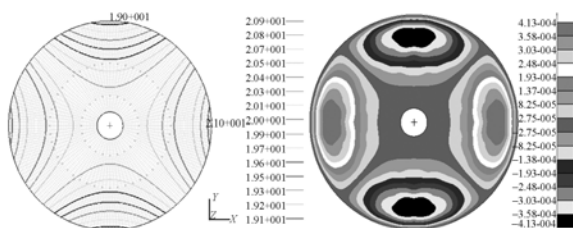
(b)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(x)$



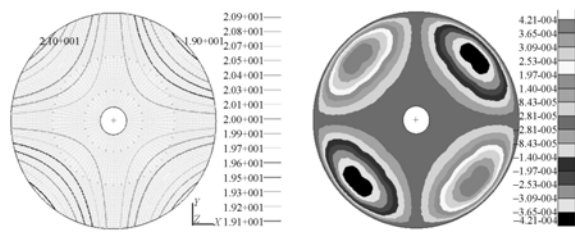
(c)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(y)$



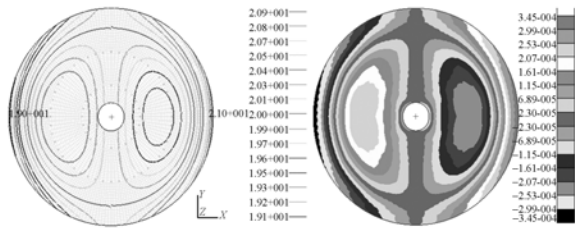
(d)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(2x^2+2y^2-1)$



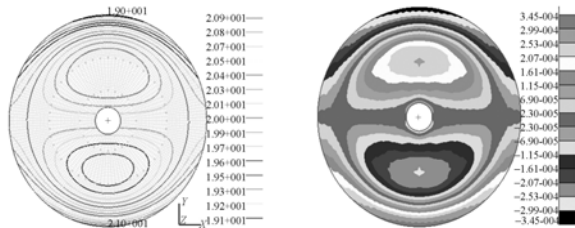
(e)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(x^2-y^2)$



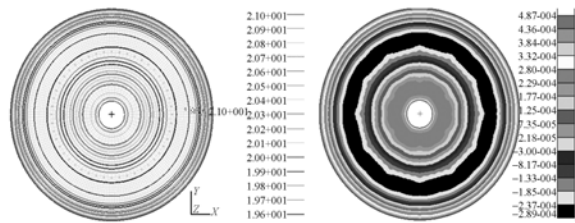
(f)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(2xy)$



(g)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(3x^2+3xy^2-2x)$



(h)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(3x^2+3y^3-2y)$



(i)  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}+1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(6x^4+12x^2y^2+6y^4-6x^2-6y^2+1)$

图 2 背面温度为 20 °C, 镜面温度(t)不同时主镜镜面的温度等高线和镜面变形云图

Fig. 2 Temperature contour and deformation patterns of optical surface at different quasi-Zernike patterns on faceplate in rear plate temperature of 20 °C

分布方程为:

$$t(x, y, z) = C_0 + C_1(x) + C_2(y) + C_3(z), \quad (3)$$

其中  $C_0, C_1, C_2, C_3$  为温差常数。则镜面产生的热变形可以表示成:

$$W(r, \theta) = (\alpha C_3 / 8R^2) r^4 + (\alpha C_1 / 2R) r^3 \cos(\theta) + (\alpha C_2 / 2R) r^3 \sin(\theta) + (\alpha C_3 Z_0 / 2R - \alpha C_3 / 2 + \alpha C_0 / 2R) r^2 + (\alpha C_1 Z_0) r \cos(\theta) + (\alpha C_2 Z_0) r \sin(\theta) + (\alpha C_3 Z_0^2 / 2 + \alpha C_0 Z_0), \quad (4)$$

其中,  $W$  为镜面热变形;  $r$  为镜面的半径位置 ( $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ );  $\theta$  为镜面的角度位置 [ $\theta = \arctan(y/x)$ ];  $Z_0$  为主镜的轴向厚度。由上式可见镜面变形会产生的像差有球差、彗差、离焦、倾斜和平移。

### 5 镜面变形的准 Zernike 多项式拟合

由有限元分析软件中可以获得主镜镜面节点的原始坐标值 ( $x_m, y_m, z_m$ ) 和节点变形量 ( $\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m$ ) 信息, 借助于波面拟合程序采用最小二乘法对镜面误差进行准 Zernike 多项式拟合, 从而获得准 Zernike 像差项的系数。表 3 和表 4 中列出 18 种温度场下镜面热变形的准 Zernike 多项式系数拟合结果, 表中仅给出了前 9 项像差的拟合系数。

表 3 背面为 20 °C, 镜面为不同的准 Zernike 温度模式时主镜镜面误差的拟合系数

Tab. 3 Quasi-Zernike polynomial parameters of surface errors caused by different quasi-Zernike patterns on faceplate in rear plate temperature of 20 °C

热模式 $A_j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Piston	$3.3 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-9}$	$5.3 \times 10^{-9}$	$4.6 \times 10^{-5}$	$4.9 \times 10^{-9}$	$5.1 \times 10^{-9}$	$4.9 \times 10^{-9}$	$4.9 \times 10^{-9}$	$-1.6 \times 10^{-5}$
Tilt-X	$-2.0 \times 10^{-11}$	$-8.0 \times 10^{-13}$	$-1.8 \times 10^{-4}$	$-2.0 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-11}$	$-5.5 \times 10^{-11}$	$-6.0 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$-2.1 \times 10^{-12}$
Tilt-Y	$1.3 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$-1.6 \times 10^{-11}$	$1.4 \times 10^{-10}$	$4.1 \times 10^{-11}$	$4.7 \times 10^{-11}$	$1.1 \times 10^{-5}$	$9.0 \times 10^{-11}$	$-1.4 \times 10^{-10}$
Defocus	$-7.9 \times 10^{-5}$	$7.6 \times 10^{-10}$	$9.4 \times 10^{-10}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$-1.0 \times 10^{-10}$	$1.3 \times 10^{-10}$	$6.9 \times 10^{-10}$	$7.0 \times 10^{-10}$	$3.6 \times 10^{-5}$
Pri Astig.-X	$4.0 \times 10^{-13}$	$-5.6 \times 10^{-11}$	$-3.2 \times 10^{-11}$	$-1.6 \times 10^{-10}$	$-2.5 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$8.4 \times 10^{-11}$	$-9.2 \times 10^{-11}$	$6.0 \times 10^{-11}$
Pri Astig.-Y	$-7.4 \times 10^{-11}$	$-1.1 \times 10^{-9}$	$9.6 \times 10^{-10}$	$-4.0 \times 10^{-6}$	$-1.6 \times 10^{-4}$	$2.4 \times 10^{-10}$	$-8.3 \times 10^{-10}$	$8.1 \times 10^{-10}$	$1.9 \times 10^{-10}$
Pri Coma-X	$1.7 \times 10^{-10}$	$-9.1 \times 10^{-5}$	$-5.2 \times 10^{-11}$	$-2.9 \times 10^{-11}$	$2.9 \times 10^{-11}$	$-6.1 \times 10^{-11}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$-1.4 \times 10^{-11}$	$-8.5 \times 10^{-11}$
Pri Coma-Y	$2.0 \times 10^{-12}$	$-5.7 \times 10^{-11}$	$9.1 \times 10^{-5}$	$2.1 \times 10^{-11}$	$-2.3 \times 10^{-12}$	$1.9 \times 10^{-11}$	$-3.5 \times 10^{-11}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$-5.2 \times 10^{-12}$
Pri Spherical	$-8.5 \times 10^{-11}$	$6.0 \times 10^{-10}$	$-2.2 \times 10^{-10}$	$-7.6 \times 10^{-11}$	$-3.4 \times 10^{-11}$	$-4.1 \times 10^{-11}$	$5.1 \times 10^{-10}$	$1.5 \times 10^{-10}$	$8.1 \times 10^{-11}$
主要像差	Piston Defocus	Tilt Coma	Tilt Coma	Piston Defocus	Astig.	Astig.	Tilt Coma	Tilt Coma	Piston Defocus

表 4 镜面为 20 °C, 背面为不同的准 Zernike 温度模式时主镜镜面误差的拟合系数

Tab. 4 Quasi-Zernike polynomial parameters of surface errors caused by different quasi-Zernike patterns on rear plate in faceplate temperature of 20 °C

热模式 $C_j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Piston	$3.4 \times 10^{-4}$	$3.8 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$4.3 \times 10^{-5}$	$4.0 \times 10^{-9}$	$4.0 \times 10^{-9}$	$4.1 \times 10^{-9}$	$3.9 \times 10^{-9}$	$9.2 \times 10^{-6}$
Tilt-X	$3.0 \times 10^{-11}$	$-1.2 \times 10^{-10}$	$-1.9 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-12}$	$8.2 \times 10^{-13}$	$-6.3 \times 10^{-12}$	$-2.6 \times 10^{-11}$	$2.3 \times 10^{-5}$	$6.2 \times 10^{-12}$
Tilt-Y	$-1.3 \times 10^{-10}$	$1.9 \times 10^{-4}$	$-1.3 \times 10^{-10}$	$-1.2 \times 10^{-10}$	$-9.7 \times 10^{-11}$	$1.0 \times 10^{-11}$	$2.3 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-12}$
Defocus	$2.0 \times 10^{-4}$	$9.7 \times 10^{-10}$	$6.8 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$1.2 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-9}$	$1.5 \times 10^{-5}$
Pri Astig.-X	$1.9 \times 10^{-11}$	$1.7 \times 10^{-10}$	$0.13 \times 10^{-10}$	$-9.0 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-11}$	$-8.8 \times 10^{-11}$	$-1.1 \times 10^{-11}$
Pri Astig.-Y	$7.5 \times 10^{-11}$	$6.5 \times 10^{-10}$	$-5.4 \times 10^{-10}$	$-4.1 \times 10^{-6}$	$-1.6 \times 10^{-4}$	$-1.7 \times 10^{-10}$	$-1.0 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-10}$	$8.7 \times 10^{-12}$
Pri Coma-X	$-1.9 \times 10^{-10}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$-6.0 \times 10^{-11}$	$-7.9 \times 10^{-11}$	$-9.3 \times 10^{-11}$	$-7.1 \times 10^{-12}$	$7.3 \times 10^{-5}$	$-5.4 \times 10^{-12}$	$-1.8 \times 10^{-11}$
Pri Coma-Y	$-6.5 \times 10^{-12}$	$-3.4 \times 10^{-11}$	$-1.4 \times 10^{-4}$	$5.5 \times 10^{-12}$	$-3.6 \times 10^{-14}$	$-1.4 \times 10^{-11}$	$1.6 \times 10^{-11}$	$7.3 \times 10^{-5}$	$-7.8 \times 10^{-12}$
Pri Spherical	$9.7 \times 10^{-11}$	$-4.0 \times 10^{-10}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$3.4 \times 10^{-11}$	$6.6 \times 10^{-11}$	$1.5 \times 10^{-12}$	$2.0 \times 10^{-10}$	$6.5 \times 10^{-11}$	$6.5 \times 10^{-12}$
主要像差	Piston Defocus	Tilt Coma	Tilt Coma	Piston Defocus	Astig.	Astig.	Tilt Coma	Tilt Coma	Piston Defocus

从拟合结果可以看出各种热模式引起的主要像差,例如第 1 项准 Zernike 项的两种热模式引起的像差主要包括轴向平移和离焦,这些像差可以通过次镜的轴向平移进行补偿。表 3 和表 4 中的拟合系数与镜面变形有限元分析和理论解析结果一致,可以作为光机系统调节量和热控参数确定的理论依据。

## 6 结 论

对不同热模式下 SiC 轻量化主镜的镜面变形进行定标计算时,没有考虑重力载荷的影响,而任何热模式和重力影响的共同作用结果都可以通过

在先前计算的重力载荷工况上叠加单独的温度载荷工况获得。

本文对轻量化主镜不同层面上的温度分布分别采用准 Zernike 多项式进行拟合,既能表示出主镜各层面上温度梯度,又考虑了主镜的轴向温度梯度。通过对单位载荷作用下,不同温度场模式时轻量化主镜镜面变形的定标计算,准确预算出了主镜在任何组合温度场下的变形。通过对镜面变形误差的准 Zernike 多项式拟合,为望远镜光机系统调节和热控参数的确定提供了理论参考。所介绍的方法适用于口径不同,材料不同的轻量化主镜。

### 参考文献:

- [1] IWONA A. P, ISAAC, G. Developing SiC for optical system applications[J]. *SPIE*, 2004,5524:14-20.
- [2] 王富国, 杨洪波, 赵文兴, 等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2009,17(1): 85-91.  
WANG F G, YANG H B, ZHAO W X, *et al.*. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):85-91. (in Chinese)
- [3] 冯树龙, 张新, 翁志成, 等. 温度对大口径主镜面形变形的影响分析[J]. *光学技术*, 2005,31(1): 41-43.  
FENG SH L, ZHANG X, WENG ZH CH, *et al.*. Study on deformation of surface figure of large-aperture mirror in temperature field[J]. *Optical Technique*, 2005,31(1):41-43. (in Chinese)
- [4] 王红, 田铁印. 轴向温差对空间遥感器光学系统成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 2007,15(10): 1489-1494.  
WANG H, TIAN T Y. Effect of axial temperature difference on imaging quality of space remote sensor optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(10):1489-1494. (in Chinese)
- [5] 杨烽, 张伟, 陈时锦. 空间望远镜主镜的热光学特性分析[J]. *光学技术*, 2006,32(1):144-147.  
YANG Y, ZHANG W, CHEN SH J. Study on the thermal optics property of primary mirror applied on a space telescope[J]. *Optical Technique*, 2006,32(1):144-147. (in Chinese)
- [6] 吴清文, 卢镔, 王家骥, 等. 主镜稳定温度场特性分析[J]. *光学精密工程*, 1996,4(6):47-53.  
WU Q W, L E, WANG J Q, *et al.*. A study on static thermal properties of primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996,4(6):47-53. (in Chinese)
- [7] PEARSON E, STEPP L. Response of large optical mirrors to thermal distributions[J]. *SPIE*, 1987, 0748:164-177.
- [8] 解滨, 肖志宏, 余景池. 利用准 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)

## 作者简介:



吴小霞(1981—),女,江苏盐城人,博士,副研究员,2003年于吉林大学获得学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大口径薄镜面主动支撑系统设计和仿真分析方面的研究。E-mail: wu-xiaoxia@sohu.com



王鸣浩(1981—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,2004年于长春理工大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标探测技术的研究。E-mail: wangminghao\_cc@163.com



明名(1983—),男,湖南临澧人,硕士,助理研究员,2004年、2007年于大连理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学系统设计检测与装调方面的研究。E-mail: mingm118@yahoo.com.cn



王富国(1979—),男,山东单县人,博士,助理研究员,2003年于山东科技大学获得学士学位,2009年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光机系统设计及仿真方面的研究。E-mail: wfg109@163.com

## ●下期预告

## 用于侧出式 LED 背光的全局动态调光算法

冯奇斌<sup>1</sup>,何会杰<sup>2</sup>,张伟伟<sup>2</sup>,方勇<sup>1</sup>,吕国强<sup>1</sup>

- (1. 合肥工业大学 特种显示技术教育部重点实验室 特种显示技术国家工程实验室 现代显示技术省部共建国家重点实验室 光电技术研究院,安徽 合肥,230009)
2. 安徽大学 仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥,230009)

针对液晶显示器能耗高、对比度低的问题,结合背光源发展趋势,提出了适用于侧出式 LED 背光的全局动态调光算法。首先,根据显示图片平均灰度值、最大灰度值和平均值的差值确定背光调光亮度。接着,基于 S 曲线对液晶像素亮度值进行补偿。亮度大于 S 曲线拐点的像素调整因子大于 1,小于拐点的像素调整因子小于 1,以此有效提高静态对比度,并且不会引入溢出失真。对算法进行了仿真分析并开发了原理样机进行实际验证。结果表明:采用动态调光算法的液晶显示器的功耗严重依赖于显示内容;显示 40 幅不同类型的图片时,平均整机节能为 9.39%;静态对比度提高 124.7%。采用本文提出的全局动态调光算法的侧出式背光具有成本低、体积轻薄、节能、对比度高的优点。