

光电经纬仪主镜面形变化的有限元分析

谭凡教 乔彦峰 李耀彬 高慧斌 刘旨春

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 为了从整体上了解装配支撑系统后主镜面形变化情况,采用有限元分析方法对某光电经纬仪主镜系统结构进行了分析。在不同倾角下分析镜面及其支撑系统的自重变形,得出镜面及其支撑系统在各个俯仰高度上的变形位移。分析结果表明,在各个倾角状态下,主镜在 Z 方向上位移较大,最大达 $1.4 \mu\text{m}$,造成镜面反射面平移,对反射面焦距有影响; X 方向为旋转轴方向,变形较小,为 $0.01''$; Y 方向为镜面倾斜方向,变形在 $0.5''$ 左右,造成镜面弯曲。

关键词 光学设计; 光电经纬仪; 主镜面形; 有限元分析

中图分类号 V556.5 文献标识码 A

Finite Element Analysis for Surface Shape Deformation of Photo-Electronic Theodolite Primary Mirror

Tan Fanjiao Qiao Yanfeng Li Yaobin Gao Huibin Liu Zhichun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract In order to get reflection surface deformation after assembly of support system, the finite element method (FEM) is used to analyze the primary reflection mirror structure. Surface shape and self-weight deformation of a corbeling system at different tilted angles are analyzed, and deformation displacement on every pitching height of mirror surface and its corbeling system are obtained. The analytical results show at different tilted angles, displacement in Z direction is more than that in X and Y direction, and its maximal displacement is $1.4 \mu\text{m}$ that translates the reflection surface and changes the focal distance. The deformation of X (slewing axis) direction is $0.01''$. And the Y direction is the mirror tilting direction, and its deformation is about $0.5''$ and bends the mirror surface.

Key words optical design; photo-electronic theodolite; primary mirror surface shape; finite element analysis

1 引言

大型光电经纬仪是大型的光学测量系统,其中主反射镜是系统中非常关键的部件,在使用过程中其面形的变化是经纬仪研究设计的主要因素。有限元分析方法(FEM)是光电经纬仪主镜系统分析设计的关键方法,对大型镜面系统进行分析计算,是现代经纬仪设计不可或缺的环节。不论是传统的串行式设计过程中,还是在现代的并行工程中,镜面系统结构的工程分析都占有重要的地位^[1]。在国外,如欧洲、美国、日本等国的大型经纬仪望远镜,围绕主镜面形分析、数值模拟和设计占据整个研制周期的2/3以上,同温层红外天文台(SOFIA)机载望远镜2.7 m口径主镜,轴向18点浮动支撑,径向6点支撑,采用有限元方法分析了镜面变形情况;欧洲南方

天文台(ESO)的甚大望远镜的辅助望无数镜1.87 m主镜,轴向54点支撑,径向16点支撑,采用Ansys软件分析镜面面形情况^[2,3]。在国内,大型经纬仪望远镜研制院校研究所也进行了独立镜面面形力学分析和实验研究^[4,5]。

当今随着经纬仪通光口径的增加,主镜重量的增加,主镜的支撑复杂程度不断增加,造成镜面面形变化更复杂,要对复杂的经纬仪主镜面形精确结果,需要详细的计算分析。本文采用有限元分析方法,分析某光电经纬仪主镜面形变化,从整体上了解主镜装配其支撑系统后的面形变化情况^[6],为以后更大口径经纬仪主镜系统采用的新型组合自适应光学^[7]或主动光学设计及镜面反射面面形三维测量^[8]和确定镜面装配性能指标提供参考。

收稿日期: 2007-07-06; 收到修改稿日期: 2007-11-14

基金项目: 国家863计划资助课题。

作者简介: 谭凡教(1979—),男,壮族,广西河池人,博士,主要从事光电精密机械结构设计与分析等方面的研究。

E-mail: tanfj003@sohu.com

2 理论分析

模型单元采用实体六面体单元,每个单元有 8 个节点,每个节点有三个自由度(u, v, w),单元总共有 24 个自由度,如图 1 所示。

对模型空间中任意点(x, y, z),其自由度位移函数为

$$\begin{cases} u(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7zx + a_8xyz, \\ v(x, y, z) = a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z + a_{13}xy + a_{14}yz + a_{15}zx + a_{16}xyz, \\ w(x, y, z) = a_{17} + a_{18}x + a_{19}y + a_{20}z + a_{21}xy + a_{22}yz + a_{23}zx + a_{24}xyz, \end{cases} \quad (1)$$

引入单元局部坐标系(ζ_i, η_i, ξ_i),局部坐标系原点在单元体形心,各轴分别与整体坐标系 xoy 各轴平行,设单元中心点坐标为(x_0, y_0, z_0)

$$\begin{aligned} x_{i0} &= \frac{x_{i1} + x_{i4}}{2} = \frac{x_{i2} + x_{i3}}{2} = \frac{x_{i5} + x_{i8}}{2} = \frac{x_{i6} + x_{i7}}{2}, \\ y_{i0} &= \frac{y_{i1} + y_{i2}}{2} = \frac{y_{i3} + y_{i4}}{2} = \frac{y_{i5} + y_{i6}}{2} = \frac{y_{i7} + y_{i8}}{2}, \\ z_{i0} &= \frac{z_{i1} + z_{i5}}{2} = \frac{z_{i2} + z_{i6}}{2} = \frac{z_{i3} + z_{i7}}{2} = \frac{z_{i4} + z_{i8}}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}), \dots , (x_{i8}, y_{i8}, z_{i8}) 分别为 8 个节点的空间坐标。整体坐标和局部坐标的转换关系

$$\zeta_i = \frac{x - x_{i0}}{a}, \quad \eta_i = \frac{y - y_{i0}}{b}, \quad \xi_i = \frac{z - z_{i0}}{c}, \quad -1 \leq \zeta_i, \eta_i, \xi_i \leq 1 \quad (3)$$

式中 a, b, c 分别为单元的长、宽、高。在局部坐标系下单元 8 个节点坐标分别为 $i1(1, -1, -1), i2(1, 1, -1), i3(-1, 1, -1), i4(-1, -1, -1), i5(1, -1, 1), i6(1, 1, 1), i7(-1, 1, 1), i8(-1, -1, 1)$ 。节点位移矩阵 δ 为

$$\delta^T = \begin{bmatrix} u_{i1} & v_{i1} & w_{i1} \\ u_{i2} & v_{i2} & w_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{i8} & v_{i8} & w_{i8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \zeta_{i1} & \eta_{i1} & \xi_{i1} & \zeta_{i1}\eta_{i1} & \eta_{i1}\xi_{i1} & \xi_{i1}\zeta_{i1} & \zeta_{i1}\eta_{i1}\xi_{i1} \\ 1 & \zeta_{i2} & \eta_{i2} & \xi_{i2} & \zeta_{i2}\eta_{i2} & \eta_{i2}\xi_{i2} & \xi_{i2}\zeta_{i2} & \zeta_{i2}\eta_{i2}\xi_{i2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \zeta_{i8} & \eta_{i8} & \xi_{i8} & \zeta_{i8}\eta_{i8} & \eta_{i8}\xi_{i8} & \xi_{i8}\zeta_{i8} & \zeta_{i8}\eta_{i8}\xi_{i8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_9 & a_{17} \\ a_2 & a_{10} & a_{18} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_8 & a_{16} & a_{24} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

将(2)式、(3)式及各节点局部坐标 $ik(\zeta_{ik}, \eta_{ik}, \xi_{ik}) (k = 1, 2, \dots, 8)$ 代入(1)式、(4)式,求解得位移表达式

$$\mathbf{U} = \sum_{k=1}^8 \mathbf{N}_{ik} u_{ik}, \quad \mathbf{V} = \sum_{k=1}^8 \mathbf{N}_{ik} v_{ik}, \quad \mathbf{W} = \sum_{k=1}^8 \mathbf{N}_{ik} w_{ik}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{N}_{ik} 为单元形状函数矩阵,只与单元形状、大小、方向有关:

$$\mathbf{N}_{ik} = \frac{1}{8} (1 + \zeta_{ik}\zeta)(1 + \eta_{ik}\eta)(1 + \xi_{ik}\xi). \quad (6)$$

根据弹性力学得单元应变为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_x = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_y = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad \boldsymbol{\varepsilon}_z = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial z}, \quad (7)$$

将(4)式~(6)式代入(7)式,整理得

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\boldsymbol{\varepsilon}_x \quad \boldsymbol{\varepsilon}_y \quad \boldsymbol{\varepsilon}_z]^T = [B_{i1}, \dots, B_{ik}, \dots, B_{i8}] \boldsymbol{\delta} = \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}, \quad (8)$$

$$\mathbf{B}_{ik} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a} \frac{\zeta_{ik}}{8} (1 + \eta_{ik}\eta)(1 + \xi_{ik}\xi) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b} \frac{\eta_{ik}}{8} (1 + \zeta_{ik}\zeta)(1 + \xi_{ik}\xi) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \frac{\xi_{ik}}{8} (1 + \zeta_{ik}\zeta)(1 + \eta_{ik}\eta) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

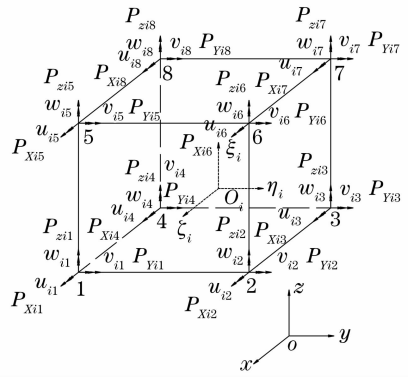


图 1 单元 i 的节点位移和作用力

Fig. 1 Displacement and force on No. i element

式中 \mathbf{B} 为应变矩阵或几何矩阵。

在弹性范围内,由胡克定律得应力与应变的关系

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu \\ \mu & 1-\mu & \mu \\ \mu & \mu & 1-\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 E 为材料弹性模量, μ 为泊松比。令 \mathbf{D} 为单元弹性系数矩阵

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu \\ \mu & 1-\mu & \mu \\ \mu & \mu & 1-\mu \end{bmatrix}, \quad (11)$$

将(8)式、(9)式代入(10)式整理得

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}\mathbf{B}\boldsymbol{\delta} = [\cdots, \mathbf{D}\mathbf{B}_{ik}, \cdots]\boldsymbol{\delta}, \quad (12)$$

由(9)式、(11)式、(12)式得

$$\mathbf{D}\mathbf{B}_{ik} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \times \begin{bmatrix} (1-\mu) \frac{1}{a} \frac{\xi_{ik}}{8} (1+\eta_{ik}\eta) (1+\xi_{ik}\xi) & \mu \frac{1}{b} \frac{\eta_{ik}}{8} (1+\zeta_{ik}\zeta) (1+\xi_{ik}\xi) & \mu \frac{1}{c} \frac{\xi_{ik}}{8} (1+\zeta_{ik}\zeta) (1+\eta_{ik}\eta) \\ \mu \frac{1}{a} \frac{\xi_{ik}}{8} (1+\eta_{ik}\eta) (1+\xi_{ik}\xi) & (1-\mu) \frac{1}{b} \frac{\eta_{ik}}{8} (1+\zeta_{ik}\zeta) (1+\xi_{ik}\xi) & \mu \frac{1}{c} \frac{\xi_{ik}}{8} (1+\zeta_{ik}\zeta) (1+\eta_{ik}\eta) \\ \mu \frac{1}{a} \frac{\xi_{ik}}{8} (1+\eta_{ik}\eta) (1+\xi_{ik}\xi) & \mu \frac{1}{b} \frac{\eta_{ik}}{8} (1+\zeta_{ik}\zeta) (1+\xi_{ik}\xi) & (1-\mu) \frac{1}{c} \frac{\xi_{ik}}{8} (1+\zeta_{ik}\zeta) (1+\eta_{ik}\eta) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

根据结构力学,单元由虚位移产生的虚应变能为 $\Delta U = \iiint_{V_e} \Delta^T \boldsymbol{\sigma} dV_e$ 。

假设单元受到外载荷 \mathbf{q} 作用,外载荷可以是重力载荷、温度载荷、压力、集中力、电磁力等,将载荷等效到各个节点,得单元节点载荷

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{x1} & \cdots & p_{xik} & \cdots & p_{x18} \\ p_{y1} & \cdots & p_{yik} & \cdots & p_{y18} \\ p_{z1} & \cdots & p_{zik} & \cdots & p_{z18} \end{bmatrix} = \iiint_{V_e} [N_{i1} \quad N_{i2} \quad \cdots \quad N_{i8}] \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{bmatrix} dV_e = \iiint_{V_e} [N] \mathbf{q} dV_e, \quad (14)$$

外力在虚位移做的功为

$$\Delta \mathbf{P} = \begin{bmatrix} u_{i1} & \cdots & u_{i8} \\ v_{i1} & \cdots & v_{i8} \\ w_{i1} & \cdots & w_{i8} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{x1} & \cdots & p_{xik} & \cdots & p_{x18} \\ p_{y1} & \cdots & p_{yik} & \cdots & p_{y18} \\ p_{z1} & \cdots & p_{zik} & \cdots & p_{z18} \end{bmatrix}^T = \boldsymbol{\delta}^T \mathbf{P}, \quad (15)$$

根据结构力学的虚功原理得外力在虚位移上做的虚功等于内力产生的虚应变能,有 $\Delta \mathbf{P} = \Delta U$, 于是

$$\boldsymbol{\delta}^T \mathbf{P} = \boldsymbol{\delta}^T abc \iiint_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\zeta d\eta d\xi, \quad (16)$$

由于对模型中任何单元,则有

$$\mathbf{P} = abc \iiint_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\zeta d\eta d\xi = \mathbf{K} \boldsymbol{\delta}, \quad (17)$$

式中 \mathbf{K} 为单元刚度矩阵,消元后求出其逆阵,就可以求出单元位移 $\boldsymbol{\delta}$,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} [k_{i11}] & \cdots & [k_{i18}] \\ \vdots & [k_{iik}] & \vdots \\ [k_{i81}] & \cdots & [k_{i88}] \end{bmatrix}. \quad (18)$$

由

$$\mathbf{B}_{ik}^T \mathbf{D} \mathbf{B}_{ik} = \frac{E}{64(1+\mu)(1-2\mu)} \times \begin{bmatrix} (1-\mu) \frac{1}{a^2} \zeta_{ik}^2 (1+\eta_{ik}\eta)^2 (1+\xi_{ik}\xi)^2 & \mu \frac{1}{ab} \zeta_{ik} \eta_{ik} (1+\zeta_{ik}\zeta)(1+\eta_{ik}\eta)(1+\xi_{ik}\xi)^2 & \mu \frac{1}{ac} \zeta_{ik} \xi_{ik} (1+\zeta_{ik}\zeta)(1+\eta_{ik}\eta)^2 (1+\xi_{ik}\xi) \\ \mu \frac{1}{ab} \zeta_{ik} \xi_{ik} (1+\zeta_{ik}\zeta)(1+\eta_{ik}\eta)^2 (1+\xi_{ik}\xi) & (1-\mu) \frac{1}{b^2} \eta_{ik}^2 (1+\zeta_{ik}\zeta)^2 (1+\xi_{ik}\xi)^2 & \mu \frac{1}{bc} \eta_{ik} \xi_{ik} (1+\zeta_{ik}\zeta)^2 (1+\xi_{ik}\xi)(1+\eta_{ik}\eta) \\ \mu \frac{1}{ac} \zeta_{ik} \xi_{ik} (1+\zeta_{ik}\zeta)(1+\eta_{ik}\eta)^2 (1+\xi_{ik}\xi) & \mu \frac{1}{bc} \eta_{ik} \xi_{ik} (1+\zeta_{ik}\zeta)^2 (1+\xi_{ik}\xi)(1+\eta_{ik}\eta) & (1-\mu) \frac{1}{c^2} \xi_{ik}^2 (1+\zeta_{ik}\zeta)^2 (1+\eta_{ik}\eta)^2 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

积分后求得

$$\mathbf{K}_{ik} = \frac{E}{64(1+\mu)(1-2\mu)} \times \begin{bmatrix} (1-\mu) \frac{2}{9a^2} \frac{\zeta_{ik}^2}{\eta_{ik}\xi_{ik}} (1+3\eta_{ik}^2)(1+3\xi_{ik}^2) & \mu \frac{8}{9ab} \frac{\zeta_{ik}\eta_{ik}}{\xi_{ik}} (1+3\xi_{ik}^2) & \mu \frac{2}{9ac} \frac{\zeta_{ik}\xi_{ik}}{\eta_{ik}} (1+3\eta_{ik}^2) \\ \mu \frac{8}{9ab} \frac{\zeta_{ik}\eta_{ik}}{\xi_{ik}} (1+3\xi_{ik}^2) & (1-\mu) \frac{2}{9b^2} \frac{\eta_{ik}^2}{\zeta_{ik}\xi_{ik}} (1+3\zeta_{ik}^2)(1+3\xi_{ik}^2) & \mu \frac{2}{9bc} \frac{\eta_{ik}\xi_{ik}}{\zeta_{ik}} (1+3\xi_{ik}^2) \\ \mu \frac{8}{9ac} \frac{\zeta_{ik}\xi_{ik}}{\eta_{ik}} (1+3\eta_{ik}^2) & \mu \frac{8}{9bc} \frac{\eta_{ik}\xi_{ik}}{\zeta_{ik}} (1+3\xi_{ik}^2) & (1-\mu) \frac{1}{9c^2} \frac{\xi_{ik}^2}{\zeta_{ik}\eta_{ik}} (1+3\zeta_{ik}^2)(1+3\eta_{ik}^2) \end{bmatrix}, \quad (20)$$

将各个单元位移矩阵 δ 、单元刚度矩阵 \mathbf{K} 、外载荷矩阵 \mathbf{P} 集合组成了整个镜面平衡方程

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}\delta, \quad (21)$$

将单元节点坐标 $(\zeta_{ik}, \eta_{ik}, \xi_{ik})$ 代入(21)式,采用高斯消元法或下山法进行刚度矩阵子阵的分解,并根据位移边界条件,确定轴向支撑固定支座、侧向支撑固定支座、中心定位的零约束节点和自由节点位移,消除总体刚度矩阵的奇异性,即可唯一求解出节点位移矩阵,即镜面及其支撑系统的位移变形量,然后求出镜面及其支撑系统结构的相应应变、应力、节点反力等。

3 分析前处理

分析的镜面全口径为 $\phi 630$ mm,边缘厚度为 100 mm,轴向 9 点浮动支撑、侧向 2 点浮动支撑和中心支撑,前支撑作用力恒为 30 N。镜面面形设计精度要求均方根(RMS)值不大于 $\lambda/20$, $\lambda = 632.8$ nm。模型中采用的材料^[1]为:主镜为熔石英,与镜体接触为高弹性橡胶,中心轴套为镍合金,其他为合金。

根据理论建立模型,划分网格,定义约束边界,施加重量载荷,建立计算模型。由于结构模型比较复杂,采用 8 节点实体单元,接触部分定义接触单元。经网格划分后,共生成 939605 个单元。由于主镜中心孔和轴套之间是粘胶,所以之间定义位移耦合。连接螺栓定义为节点耦合。轴向支撑中心杆连接、侧支撑杠杆支座、中心支撑定位支撑都采用螺钉固定在底

板上,所以支座上螺钉孔上的节点固定约束。分析模型见图 2。

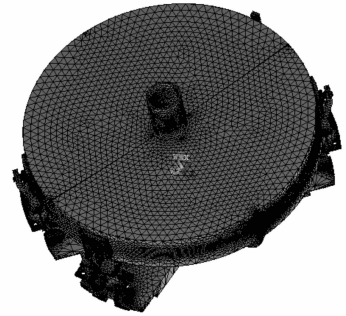


图 2 主镜及其支撑系统分析模型图
Fig. 2 Analysis model scheme of primary mirror and its supporting system

4 结果分析

4.1 镜面变形的变化

镜面节点在 X, Y, Z 方向变形的峰值(PV)、均方根值的比较如表 1 和表 2 所示,其中 X 轴为镜面旋转轴, Y 轴为镜面中心线轴线方向,即镜面俯仰轴, Z 轴为镜面光轴。

主镜光轴从 90° 旋倾斜到 -90° 过程中镜面节点位移的变化如图 3 所示。可见节点最大位移位于主镜下方,且镜面发生了倾斜。图 4 为主镜光轴从 90° 旋倾斜到 -90° 过程中镜面节点变形位移的峰值变化曲线,图 5 为镜面变形均方根变化曲线。

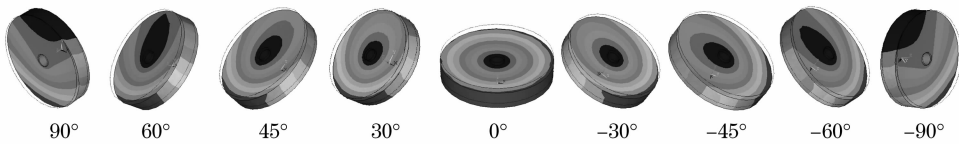


图 3 镜面节点位移变形图

Fig. 3 Deformation of node displacement on reflection surface

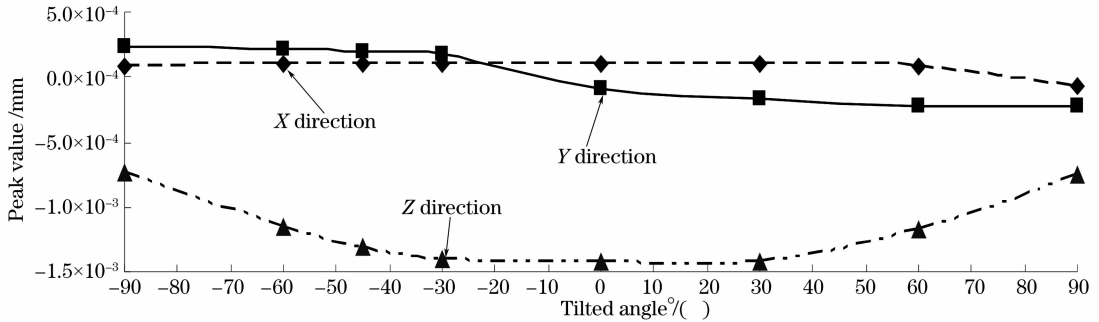


图 4 镜面面形变形的峰值随倾斜角的变化曲线

Fig. 4 Relationship between deformation peak value of mirror surface with tilted angle

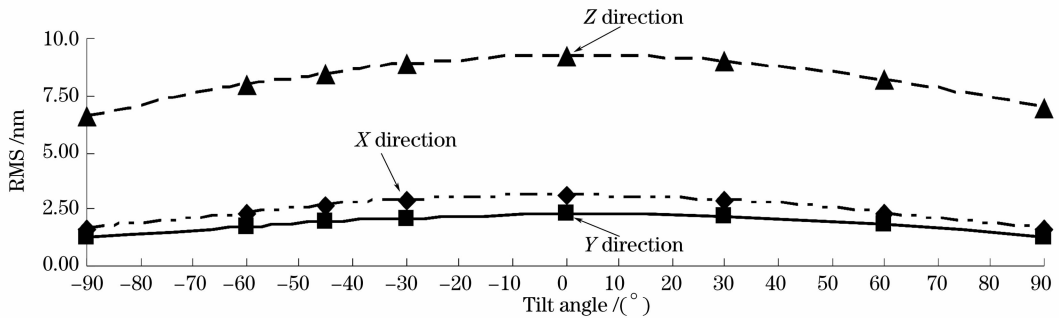


图 5 镜面面形位移的均方根值随倾斜角的变化曲线

Fig. 5 Relationship between displacement RMS of mirror surface with tilted angle

表 1 镜面节点在 X、Y、Z 方向变形的峰值(PV)

Table 1 Peak value of nodes on mirror reflection surface in X, Y, Z direction

Tilt angle / (°)	X /mm	Y /mm	Z /mm	Note
-90	7.32×10^{-5}	2.24×10^{-4}	-7.29×10^{-4}	In vertical state
-60	9.13×10^{-5}	2.23×10^{-4}	-1.17×10^{-3}	
-45	9.59×10^{-5}	2.02×10^{-4}	-1.31×10^{-3}	
-30	9.71×10^{-5}	1.71×10^{-4}	-1.40×10^{-3}	
0	1.02×10^{-4}	-8.94×10^{-5}	-1.43×10^{-3}	In horizontal state
30	9.82×10^{-5}	-1.76×10^{-4}	-1.42×10^{-3}	
60	8.38×10^{-5}	-2.27×10^{-4}	-1.18×10^{-3}	
90	-6.95×10^{-5}	-2.29×10^{-4}	-7.48×10^{-4}	

从表 1 和图 4 看出,随光轴倾角变大,也就是主镜光轴逐渐偏离天顶方向的过程中,正倒两个俯仰方向镜面位移不一致。如果正向俯仰,X 方向位移不大,在 $0.007 \sim 0.01 \mu\text{m}$ 之间,Y,Z 方向变化较大,其中 Y 方向位移逐渐增加到 $0.02 \mu\text{m}$,但倾斜过 45° 后变化不大,最大为 $0.0314 \mu\text{m}$,Z 方向逐渐降低,最低到 $0.07 \mu\text{m}$,最大降低 $0.0697 \mu\text{m}$;如果是负方向俯仰,X 方向逐渐降低,但降低幅度不大,最

大为 $0.00323 \mu\text{m}$,Y 方向位移逐渐增加,最大为 $0.0140 \mu\text{m}$,但倾斜过 60° 后变化不大,Z 方向变化较大些,高度角在 30° 之内,Z 方向平移为最大,达 $1.4 \mu\text{m}$,约为波长的 2.25 倍,其他状态下,最低降低到 $0.7 \mu\text{m}$,可见在俯仰过程中镜面平移位移较大,这虽然和模型采用的计算材料有关,不过也反映了 Z 方向平移较大给调焦系统工作压力较大。表 2 和图 5 可见,X,Y 方向在水平状态时均方根值较

小,有 2~3 nm;而 Z 方向的变化较大,有 6~ nm,对镜面焦距有影响。

表 2 镜面节点在 X、Y、Z 方向变形的均方根(RMS)值

Table 2 Root-mean-square value of nodes on mirror reflection surface in X, Y, Z direction

Tilted angle / (°)	X /nm	Y /nm	Z /nm
-90	1.56	1.25	6.50
-60	2.31	1.73	7.90
-45	2.62	1.94	8.43
-30	2.86	2.10	8.83
0	3.06	2.25	9.21
30	2.85	2.14	9.00
60	2.30	1.79	8.20
90	1.56	1.30	6.84

4.2 镜面中心线变化

从图 6 可见,无论是正方向俯仰还是反方向俯

仰,总变形位移量相当,同位置相差 0.0013~0.0152 μm,最大弯曲 0.012"。从变形分量看来,由于 X 方向为俯仰轴方向,所以在俯仰过程中没有很大变化;Y 方向变化较大,而且其正方向和负方向不一样,正方向位移较小,上半部分位移比下半部分大,为 0.7~1.329 μm,而负方向时,下半部分位移大,平均为 0.7~1.314 μm,同点相差最大为 0.00398 μm,最大 0.00294";Z 方向为镜面平移,无论是哪个俯仰方向,其位移都一样,都在 1~1.5 μm,沿径向逐渐增大,同点相差最大为 0.0148 μm,位移量比 X、Y 方向都较大,Z 方向影响到镜面焦距,造成离焦影响,引起成像模糊。X、Y 方向造成镜面弯曲,引起彗差。

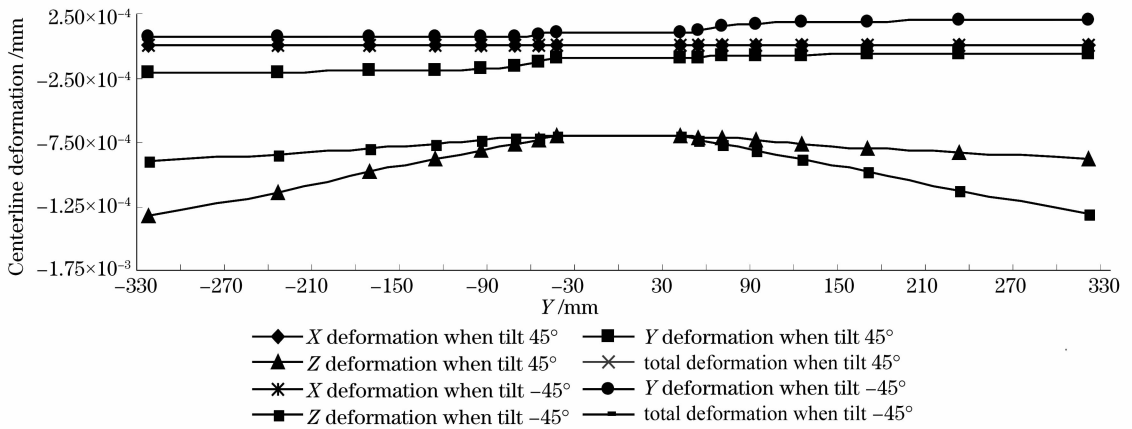


图 6 镜面倾斜正倒 45°时中心线节点位移曲线对比图

Fig. 6 Displacement comparison of nodes centerline when the mirror is tilted in 45° and -45°

4.3 镜面同位置点的位移变化

镜面节点 830(位于镜面上平分线中间点)位移随倾角变化的位移如表 3,变化曲线如图 7 所示,可见节点位移以 X 方向为最小,因为其为旋转轴,在 2~7 nm之间弯曲变化角度 0.005"~0.02";Y 方向

沿径向呈逐渐增大趋势,在 0.06~0.3 μm 之间且同样倾斜角度,顺时针和逆时针不一样,相差 0.05 μm 左右,即镜面弯曲角度变动近 1"。在 Z 方向变形较大,在水平状态下最大,达 1 μm,其他倾斜过程,逐步降低到垂直状态最低,为 0.02~0.04 μm,但是顺

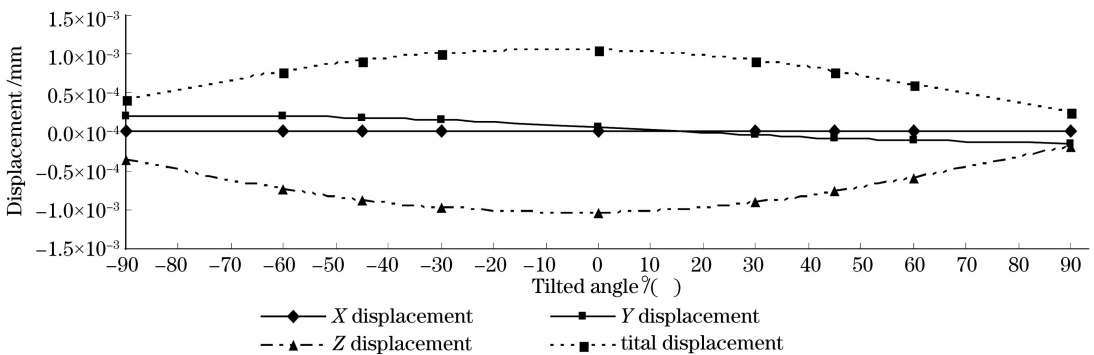


图 7 节点 870 位移随倾角变化的曲线

Fig. 7 Displacement of No. 870 node changing with tilted angle

时针和逆时针方向不一样,相差 $0.17 \mu\text{m}$ 。

表3 节点 870 位移随倾角变化表

Table 3 Displacement of No. 870 node changing with tilted angle

X		Y		Z	Total
Displacement /mm	Angle /($''$)	Displacement /mm	Angle /($''$)	Displacement /mm	displacement /mm
2.641×10^{-6}	0.0066	2.036×10^{-4}	0.506	-3.698×10^{-4}	4.222×10^{-4}
5.300×10^{-6}	0.0132	2.003×10^{-4}	0.498	-7.364×10^{-4}	7.632×10^{-6}
6.376×10^{-6}	0.0158	1.805×10^{-4}	0.449	-8.796×10^{-4}	8.980×10^{-4}
7.180×10^{-6}	0.0178	1.500×10^{-4}	0.373	-9.824×10^{-4}	9.938×10^{-4}
7.779×10^{-6}	0.0193	6.624×10^{-5}	0.165	-1.042×10^{-3}	1.044×10^{-3}
6.936×10^{-6}	0.0172	-2.861×10^{-5}	-0.071	-8.989×10^{-4}	8.994×10^{-4}
6.030×10^{-6}	0.0150	-7.216×10^{-5}	-0.179	-7.615×10^{-4}	7.649×10^{-4}
4.876×10^{-6}	0.0121	-1.091×10^{-4}	-0.271	-5.918×10^{-4}	6.018×10^{-4}
2.152×10^{-6}	0.0053	-1.537×10^{-4}	-0.382	-2.028×10^{-4}	2.545×10^{-4}

综合分析结果, X 方向位移变化比较小, 造成镜面面形横向的弯曲比较小; 而 Y 方向在俯仰过程中变化比较大, 造成镜面纵向弯曲比较大, 由于在俯仰状态, 镜面 Y 向的下方处于侧支撑、轴向支撑和中心支撑的全自由度组合超静定稳定支撑, 镜面面形比较稳定, 而对于上方, 虽然受到中心支撑和轴向支撑的作用, 但侧向没有对镜面进行张拉的牵引作用, 使得镜面纵向自由下坠, 而且是由于镜面中心部分比较薄, 纵向位移造成的镜面弯曲更大。Z 向是镜面光轴方向, 从计算结果看, 位移也比较大, 但对系统光学成像影响不大, 因为是整体的平移, 通过调焦可以补偿。但要注意, 调焦只能补偿整体平移部分, 因此轴向支撑要采用镜面接触同一材料, 对称支撑或等压支撑, 使得镜面轴向位移一致, 提高调焦的可行性, 才能补偿轴向位移对成像的影响。

5 对比验证

采用加密单元试算法验证分析结果。模型网格密疏程度将直接影响计算结果的收敛误差。收敛误差是以相邻单元最大主应力在二次网格划分所得的计算结果差与其前次网格划分计算结果的百分比, 即

$$\delta_i = \left| \frac{\psi(u)_i - \psi(u)_{i-1}}{\psi(u)_{i-1}} \right| \times 100\%, \quad (22)$$

$$i = 2, 3, \dots, n$$

式中 δ_i 是第 i 次网格划分的收敛误差, $\psi(u)_i, \psi(u)_{i-1}$ 分别是第 i 次、 $i-1$ 次网格划分的解。

一般情况下, 增加网格划分密度, 通过对比试算, 当收敛误差小于 5% 时, 即可满足工程精度要求, 结果准确。再过密的网格划分也将导致计算时间明显增加, 结果占有空间加大, 而对于提高计算结果精度却没有太大作用。主镜系统网格数量和计算收敛误差见表 4, 可见随网格划分数量增加, 收敛误

差逐渐减小, 当小于 5% 后, 单元数量增加, 而误差减小不大, 达到了需要的计算精度, 计算结果准确可靠。

表4 主镜系统网格数量和计算的收敛误差

Table 4 Meshing amount of primary mirror system and computational convergence error

Amount	Convergence error /%
616412	
768301	6.1
939605	3.6
972438	3.4

6 结 论

经过采用有限元方法, 对某光电经纬仪的主镜及其支撑系统处于不同俯仰角度时, 进行镜面及其支撑系统的自重变形分析, 得出镜面及其支撑系统在各个俯仰高度上的变形位移。从分析结果得出, 在各个倾角状态下, 主镜在 Z 方向上位移较大, 最大达 $1.4 \mu\text{m}$, 该方向变形位移造成镜面反射面平移, 对反射面焦距有影响; X 方向为旋转轴方向, 变形较小; Y 方向为镜面倾斜弯曲方向, 其变形在 $0.5''$ 左右, 造成镜面弯曲, 对成像有一定影响, 在设计经纬仪中需注意。

参 考 文 献

- Cheng Jingquan. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2002
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, 2002
- John W. Zinn, George W. Jones. Kepler primary mirror assembly: FEA surface figure analyses and comparison to metrology[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6671**: 667105-1~10
- Qitai Huang, Qiang Gao, Jingchi Yu. FEM analysis of ultra thin mirror supporting structure effect on surface deformation in gravity field[C]. *Proc. SPIE*, 2006, **6148**: 61480W~4W
- Li Fu, Ruan Ping, Zhao Baochang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 272~275

李 福,阮 萍,赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 272~275

5 Xiao Keqi, Li Dongbo, Gong Zhibin. The effect of bottom support on deformation of the small reflector surface[J]. *Design and Research*, 2005, **32**(7): 21~23

肖克齐,李东波,贡智兵. 底支承对小口径反射镜镜面变形的影响[J]. 设计与研究, 2005, **32**(7): 21~23

6 Liu Zhigang, Zhu Jianqiang. Integrated optomechanical analysis of large octagonal Nd:glass support system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(3): 307~312

刘志刚,朱健强. 大口径八边形钕玻璃片支撑系统的光机集成分

析[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 307~312

7 Yang Huafeng, Liu Guilin, Rao Changhui *et al.*. Combinational-deformable-mirror adaptive optics system for compensation of high-order modes of wavefront[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 435~437

8 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1636~1640

刘元坤,苏显渝,吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1636~1640

光学前沿——2008'激光技术论坛 暨“2007 中国光学重要成果”发布会在上海召开

2008年3月18日下午,由中科院上海光学精密机械研究所和德国慕尼黑国际博览集团联合主办,光学期刊联合编辑部承办的光学前沿——2008'激光技术论坛暨“2007 中国光学重要成果”发布会在上海隆重召开。国家科技部副部长、中国光学学会副理事长、《光学学报》杂志主编曹健林,中国光学学会理事长、《中国激光》杂志主编周炳琨院士,《激光与光电子学进展》主编范滇元院士,中科院上海光学精密机械研究所所长朱健强,德国慕尼黑国际展览有限公司副总裁张树青等出席了此次论坛。

朱健强所长在欢迎词中指出,随着激光技术的不断发展,激光应用已经渗透到科研、产业的各个方面,在新能源、汽车制造、环境监测、通信、国防安全等领域都起着重要的作用。光学前沿——2008'激光技术论坛对推动和发展激光技术将具有积极的意义。

《激光与光电子学进展》杂志主编范滇元院士在发言中指出,近年来,中国光学领域科研人员在国际著名期刊,发表的具有重要学术、应用价值的论文越来越多,得到了国内外同行的肯定和好评。为了让更多的读者及时了解这些最新研究成果,扩大这些成果在国内的影响,《激光与光电子学进展》杂志从2005年起开设“年度中国光学重要成果”栏目,介绍当年中国光学领域研究人员在国际著名期刊发表研究成果。这个栏目得到了国内众多光学专家的认可与支持,该栏目内容丰富多彩,是国内光学期刊中少见的高含金量栏目。

范滇元院士在论坛上宣布了获奖名单。本次2007年度“中国光学重要成果”包括全国光学领域29个课题组在2007年发表在国外知名期刊上的研究成果。今年借2008'激光技术论坛之际举办2007年度“中国光学重要成果”发布会,获奖的研究工作代表了我我国在相关领域的最高研究水平,非常值得向从事光学研究的人员推荐。曹健林副部长、周炳琨院士、范滇元院士等激光专家以及相干(北京)商业有限公司、恩耐(上海)激光技术有限公司等光电企业的代表为华中科技大学周治平研究组等13个获奖课题组代表颁发了获奖证书和奖杯。



图1 颁奖嘉宾和获奖代表合影。前面左起:邵建达,齐豪,朱健强,曹健林,周炳琨,范滇元,管小康;后排:张树青(左一),黄哲(左三),陈寅飞(左五),马向阳(左八),楼祺洪(左九),周常河(右三),龚尚庆(右二),付玲(右一)



图2 科技部副部长曹健林为获奖代表颁奖



图3 中国光学学会理事长周炳琨院士为获奖代表周常河研究员颁奖

此次激光技术论坛邀请了国内从事前沿激光技术研究的许祖彦院士、王骥研究员、张小民研究员、魏志义研究员、陈卫标研究员等就深紫外激光技术、高功率激光、空间激光等开展了广泛探讨。