

米级口径经纬仪保护窗口镜面变形分析

赵晓东^{1,2}, 王晶^{1*}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了精确分析外载荷作用下米级口径经纬仪保护窗口镜面变形, 本文基于接触有限元理论建立了米级口径经纬仪保护窗口带摩擦接触的有限元分析模型, 对比了线性刚性连接和非线性摩擦接触方法的差异。采用齐次坐标变换法去除刚体位移, 得到米级口径经纬仪保护窗口镜面畸变数据, 使用 Zernike 多项式作为光机集成分析的接口工具, 并将 Zernike 多项式系数导入 ZEMAX 中, 以波前像差 RMS 值衡量镜面变形对成像质量的影响, 并与干涉仪检测结果进行比较。考虑摩擦接触条件得到的保护窗口镜面波前像差 RMS 值为 38.095 nm、PV 为 205.027 nm, 使用干涉仪检测得到的保护窗口镜面波前像差 RMS 值为 40.626 nm、PV 值为 235.654 nm。实验结果表明, 考虑摩擦接触条件的仿真实验与干涉仪检测实验的镜面波前像差 RMS 值偏差为 6.23%, 能更准确地反映米级口径保护窗口镜面变形。

关键词: 经纬仪; 有限元理论; 齐次坐标变换; Zernike 多项式

中图分类号: TH74 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20181104.0654

Analysis of the mirror deformation of one-meter theodolite protective window

ZHAO Xiao-dong^{1,2}, WANG Jing^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author E-mail: wangjing@ciomp.ac.cn*

Abstract: In order to accurately analyze the mirror deformation of the one-meter theodolite protective window under exterior loads, the model of one-meter theodolite protective window is built on the base of frictional contact finite element theory, the differences between linear rigid joint and nonlinear frictional contact simulation methods are compared. Homogeneous coordinate transformation method is used to remove the rigid body displacement, and the mirror distortion data of the protection window of the meter-caliber theodolite is obtained. The Zernike polynomial is used as an interface tool for the integrated optomechanical analysis, and Zernike polynomial coefficients are introduced into ZEMAX. The effect of mirror distortion on image quality is measured by the RMS value of wavefront aberration, and is compared with the results of the interferometer test. The RMS value of the mirror wavefront aberration is 38.095 nm and the PV is 205.027 nm. The RMS value of the

收稿日期: 2017-12-26; 修订日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11403064)

Supported by National Nature Science Foundation of China(No. 11403064)

wavefront aberration is 40.626 nm and the PV is 235.654 nm. The experimental results show that the deviation of the RMS value of the specular wavefront aberration between the simulation experiment and the interferometer detection experiment considering the frictional contact condition is 6.23%, thus more accurately reflect the mirror deformation of the meter-level aperture protection window.

Key words: theodolite; finite element theory; homogeneous coordinate transformation; Zernike polynomial

1 引言

在常规武器靶场任务实验中,现代光电经纬仪系统的主要作用是观察目标的全过程,为指挥中心提供高清晰、直观的目标实况图像^[1]。对特定观测波长而言,望远镜口径越大,理论分辨率越高,作用距离越远^[2-3]。米级口径经纬仪主系统前加装保护窗口的主要目的是防盐雾侵蚀及防湿热防潮、防霉。然而,另一方面,保护窗口镜面变形会直接影响系统的成像质量。以往600 mm口径光电经纬仪的窗口设计基本能够保证成像质量要求,但当口径达到米级水平时,情况发生很大改变,窗口的质量、面积、厚度都有所增加,这就意味着窗口的变形更加难以预测。为了保证米级口径经纬仪最终的成像质量,必须对保护窗口的镜面变形进行分析。

光学元件工程分析面临的主要问题是接触所带来的边界条件的非线性问题^[4]。工程分析在很多情况下采用线性分析方法,对诸如螺钉联结、零部件接触等非线性环节通常进行线性简化建模^[5-6],这会造成结构内部应力得不到有效释放,通常用于接触条件要求不高的仿真中。对于经纬仪这种镜面微小变形就会引起成像质量很大变化的精密仪器,简化模型存在的连接自由度或连接件刚度与实际情况不一致的问题将会突显,导致镜面变形分析的精确性降低。

为了精确描述米级口径经纬仪保护窗口部件之间的接触关系,本文采用接触有限元理论,针对模型中螺栓联结部位进行了接触非线性分析,提高了分析精度。在进行面形拟合前,应用齐次坐标变换法去除结构刚体位移,分离出镜面畸变数据。将Zernike多项式作为本文的面形拟合和光机集成分析的接口工具,并结合ZEMAX光学设

计软件,从波前图获得镜面波前像差RMS值,以波前像差RMS衡量镜面变形对成像质量的影响。最后,通过与线性刚性连接仿真方法和干涉仪检测结果进行对比,判断保护窗口设计是否合理。

2 接触有限元理论

本文使用惩罚法^[7]求解有限元模型中的接触非线性问题。线弹性材料接触问题的求解可归结为接触体总能量最小的问题,即

$$\sum_{\gamma=1}^2 \left\{ \int_{B^\gamma} W^\gamma(C) dV - \int_{B^\gamma} \bar{f} \cdot \varphi^\gamma dV - \int_{\Gamma_c^\gamma} \bar{t} \cdot \varphi^\gamma dA \right\} + \Pi_c^p \Rightarrow \text{MIN}, \quad (1)$$

式中, $W^\gamma(C)$ 是与体 B^γ 相关的应变能, φ^γ 是两接触体的变形量, Π_c^p 是总势能。对于考虑摩擦的接触,其切向库伦摩擦力为

$$t_T = -\mu |p_N| \frac{\dot{g}_T}{\|\dot{g}_T\|}, \quad (2)$$

式中, μ 为滑动摩擦系数, p_N 为法向正压力, \dot{g}_T 为切向间隙函数一阶导数。式(1)中与约束条件相关的惩罚项为 Π_c^p ,即

$$\Pi_c^p = \frac{1}{2} \int_{\Gamma_c} [\varepsilon_N (g_N^-)^2 + t_T g_T] dA, \quad \varepsilon_N > 0, \quad (3)$$

式中, ε_N 为法向惩罚因子,决定法向刚度系数的取值, g_N^- 为接触面法向侵入方程, g_T^+ 为接触面切向间隙函数。

在实际计算中,保护窗口有限元模型计算时,需设置接触表面间的滑动摩擦系数、法向惩罚刚度系数和侵入量容差的大小。法向惩罚因子过大会造成收敛困难;法向惩罚因子过小会造成计算不精确。一般法向惩罚刚度系数取0.01~10,侵

入量容差取 0.1。

3 保护窗口的有限元分析

3.1 保护窗口的结构

保护窗口主要是由平板玻璃、橡胶垫、压环、框体组成。窗口平板玻璃直径为 1 035 mm,厚度为 85 mm。平板玻璃置于框体中,压环和框体通过 16 个螺栓联结,使用薄橡胶垫将三者隔开。保护窗口结构如图 1 所示。

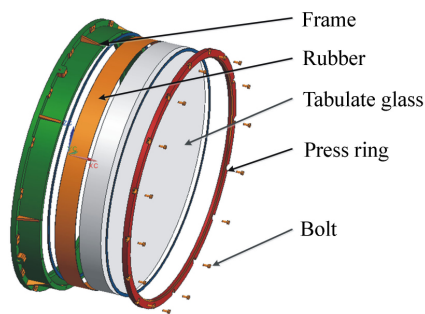


图 1 保护窗口结构

Fig. 1 Protective window structure

3.2 螺栓预紧力

重力和螺栓预紧力是导致保护窗口镜面变形的主要载荷。为了保证压环和框体的可靠联结,施加适当的螺栓预紧力是必要的。工程实际中,经常使用力矩扳手来控制施加于螺栓的拧紧力矩的大小,从而控制螺栓预紧力的大小。拧紧力矩与螺栓预紧力的关系为^[8]:

$$T = K \cdot d \cdot F_f, \quad (4)$$

式中, T 为拧紧力矩, K 为转矩系数, d 为螺栓名义直径, F_f 为螺栓预紧力。根据工程经验,无润滑条件下, K 值可取 0.2。保护窗口压环与框体间的螺栓拧紧扭矩为 3 N·m,螺栓名义直径为 8 mm,据式(4)可计算出螺栓预紧力为 1 875 N。

3.3 保护窗口的有限元模型

将在 UG 中建立的保护窗口模型导入 ANSYS 有限元分析软件进行网格划分。其中,平板玻璃采用扫掠网格划分方法,网格单元为六面体单元;压环和框体采用自由网格划分方法,网格单元为四面体单元,并对压环和框体中的螺栓孔进行网

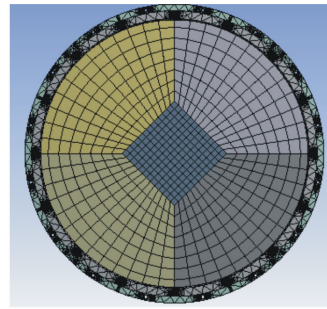


图 2 保护窗口有限元模型

Fig. 2 Finite element model of protective window

格细化;螺钉同样采用扫掠网格划分,网格单元为六面体单元。最终划分单元总数为 148 838。保护窗口有限元模型如图 2 所示。

3.4 接触和约束条件

为了更加真实地反映重力和螺栓预紧力对保护窗口镜面变形的影响,采用接触非线性有限元分析结构变形,需要设置的接触有:螺栓与压环的接触、压环与框体的接触,都设置为带摩擦的接触。为了降低分析复杂度,将不是研究重点的其余部分设置为绑定接触。在 ANSYS 有限元仿真中,为了阻止接触表面相互侵入,接触表面间需要建立一个互不侵入的约束关系,即接触协调条件,所有的 ANSYS 接触单元都采用惩罚刚度系数来保证接触协调性。保护窗口是固定于经纬仪上的,故在框体底面施加限制框体自由度的固定约束。

3.5 材料属性

保护窗口中,压环材料为 45 钢,框体材料为 HT250,平板玻璃材料为熔石英,垫圈是橡胶。材料属性参数如表 1 所示。

表 1 材料属性参数

Tab. 1 Material property parameters

Material	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Young's Modulus/Gpa	Poisson's Ratio
45	7 890	209	0.27
HT250	7 280	138	0.156
Fused silica	2 205	73	0.17
Rubber	1 150	0.006 1	0.49

4 保护窗口镜面面形拟合

光学元件表面总是趋于光滑和连续的,所以镜面的面形变化可以表示成一个完备的基底函数的线性组合或线性无关的基底函数系的组合^[9]。Zernike 多项式在单位圆内正交且各项系数与赛德尔像差相对应,目前已广泛应用于面形表征、光学设计和检测等领域^[11]。由于篇幅原因,这里列出了 Zernike 前五项多项式及意义,如表 2 所示。

表 2 Zernike 前五项表达式及意义
Tab.2 The first five polynomials of Zernike and their meanings

NO	Polynomial	Meaning
1	1	piston
2	2x	x tilt
3	2y	y tilt
4	$\sqrt{3}(2x^2 + 2y^2 - 1)$	defocus
5	$2\sqrt{6}xy$	astigmatism

4.1 保护窗口去除刚体位移算法

光学表面变形通常包含离焦、偏心、倾斜、畸变 4 种形式。其中,前 3 种变形是由支撑结构的变形造成的,称为刚体位移;表面畸变是由光学元件内应力造成的,用来拟合镜面面形^[13]。本文的分析对象为平板玻璃,球心位于无穷远处,故不存在偏心,只需对离焦、倾斜、畸变进行分析。有限元软件分析结果给出的节点坐标位移数据既有刚体位移又有表面畸变,要进行面形拟合就必须先去节点坐标位移数据中的刚体位移。

本文采用齐次坐标变换法^[14]去除刚体位移。假设用于计算刚体位移的参考坐标系定义在光学元件镜面顶点上,z 轴与光轴重合。分别用 d_x 、 d_y 、 d_z 表示刚体沿 x 轴、y 轴、z 轴的平移,分别用 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 表示刚体绕 x 轴、y 轴、z 轴的旋转角度,通过齐次坐标变换可得刚体位移前后各相应节点间的齐次转换矩阵。一般情况下,齐次坐标变换的顺序不同,所用的齐次转换矩阵也不同,而由于旋转角度一般是微小变量,所以可以做 $\cos\theta_x \approx 1$ 、 $\cos\theta_y \approx 1$ 、 $\cos\theta_z \approx 1$ 、 $\sin\theta_x \approx \theta_x$ 、 $\sin\theta_y \approx \theta_y$ 、 $\sin\theta_z \approx \theta_z$ 近似处理,高阶小量又可以忽略。通过近似处理

后,刚体位移前后各相应节点间的齐次转换矩阵与齐次坐标变换顺序无关,其坐标变换表达式可统一表示为:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_z & \theta_y & d_x \\ \theta_z & 1 & -\theta_x & d_y \\ -\theta_y & \theta_x & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $[x_i, y_i, z_i]$ 为第 i 个节点原始坐标, $[x'_i, y'_i, z'_i]$ 为第 i 个节点变形后坐标。 $[\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i]$ 为第 i 个节点镜面表面畸变。

式(5)可改写为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_i - x_i \\ y'_i - y_i \\ z'_i - z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据式(6),对包含有 m 个节点的保护窗口镜面有

$$Y - AX = \Sigma \quad (7)$$

式中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & z_1 & -y_1 & 1 & 0 & 0 \\ -z_1 & 0 & x_1 & 0 & 1 & 0 \\ y_1 & -x_1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & z_m & -y_m & 1 & 0 & 0 \\ -z_m & 0 & x_m & 0 & 1 & 0 \\ y_m & -z_m & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \\ d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x'_1 - x_1 \\ y'_1 - y_1 \\ z'_1 - z_1 \\ \vdots \\ x'_m - x_m \\ y'_m - y_m \\ z'_m - z_m \end{bmatrix}, \Sigma = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta z_1 \\ \vdots \\ \Delta x_m \\ \Delta y_m \\ \Delta z_m \end{bmatrix}$$

对式(7)应用最小二乘法求解刚体位移参数

X , 即

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y, \quad (8)$$

将刚体位移参数带入式(7), 即可求得保护窗口的镜面畸变 Σ 。在经纬仪俯仰角为零度时, 求得保护窗口刚体位移为: 绕 x 轴偏转 $-0.413 \mu\text{rad}$ 绕 y 轴偏转 $-0.0528 \mu\text{rad}$ 绕 z 轴偏转 $0.0636 \mu\text{rad}$ 沿 x 轴平移 $-0.0203 \mu\text{m}$ 沿 y 轴平移 $-0.793 \mu\text{m}$ 沿 z 轴平移 $-0.00403 \mu\text{m}$ 。

4.2 Zernike 多项式镜面拟合算法

在光机集成分析时, 需要用结构分析得到的镜面节点的变形数据拟合光学元件面形, 再用光学设计软件对光学元件的成像质量进行分析。 n 项 Zernike 多项式可表示为:

$$W(x, y) = a_1 Z_1(x, y) + a_2 Z_2(x, y) + \dots + a_n Z_n(x, y) = ZA, \quad (9)$$

式中 $A = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]^T$ 为 Zernike 多项式系数, $Z = [Z_1(x, y) \ Z_2(x, y) \ \dots \ Z_n(x, y)]$ 为 n 项 Zernike 多项式基底函数, 现有 m 个节点, $W_i(x_i, y_i)$ 表示变形后镜面第 i 个节点 z 方向上的畸变数值, 令

$$q_{ij} = Z_j(x_i, y_i), \quad (i = 1 \ 2 \ \dots \ m \ j = 1 \ 2 \ \dots \ n \ m > n)$$

代入式(9), 得到矛盾方程组:

$$\begin{cases} q_{11}a_1 + q_{12}a_2 + \dots + q_{1n}a_n = W_1 \\ q_{21}a_1 + q_{22}a_2 + \dots + q_{2n}a_n = W_2 \\ \dots \\ q_{m1}a_1 + q_{m2}a_2 + \dots + q_{mn}a_n = W_m \end{cases} \quad (10)$$

对该矛盾方程组使用 QR 正交分解^[15]求得 n 项 Zernike 多项式系数。本文使用 36 项 Zernike 多项式进行保护窗口镜面拟合。

5 结果分析

5.1 保护窗口有限元仿真方法对比

在保护窗口面形有限元仿真分析中, 螺栓联结的模拟是重点和难点。以往研究中采用直接刚性连接来模拟, 但是这种简化模型会引入误差。本文采用带摩擦接触的有限元模型。在螺栓和框体、框体和压环之间设置带摩擦的接触, 摩擦接触对间的法向惩罚刚度系数取为 0.6, 使得有限元模型自由度、刚度接近保护窗口真实状态。此外, 还对比了刚性连接的仿真分析方法, 使用 ANSYS 在 24°C 环境温度下获得两种方法的面形及应力分布云图, 图 3 为刚性连接面形及应力图, 图 4 为

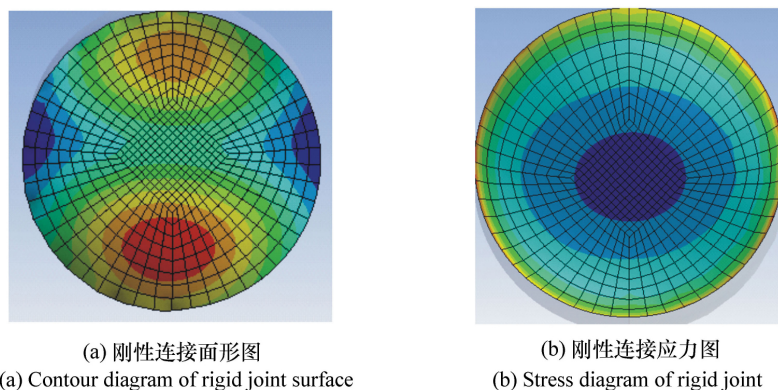


图 3 刚性连接面形及应力图

Fig. 3 Contour and stress diagram of rigid joint surface

摩擦接触面形及应力图。可见, 刚性连接使得结构应力不能有效释放, 镜面局部变形过大, 不能反映镜面变形的真实状态, 容易引入计算误差; 而摩擦接触的有限元模型没有明显的应力集中, 面形更加均匀, 接近于镜面实际变形状态, 计算结果更

精确。

5.2 干涉仪检测保护窗口镜面变形实验

为了检验、对比线性刚性连接和考虑摩擦接触仿真实验的准确性, 本文采用 ESDI-VB 干涉仪在 24°C 环境温度下检测保护窗口俯仰角为零度

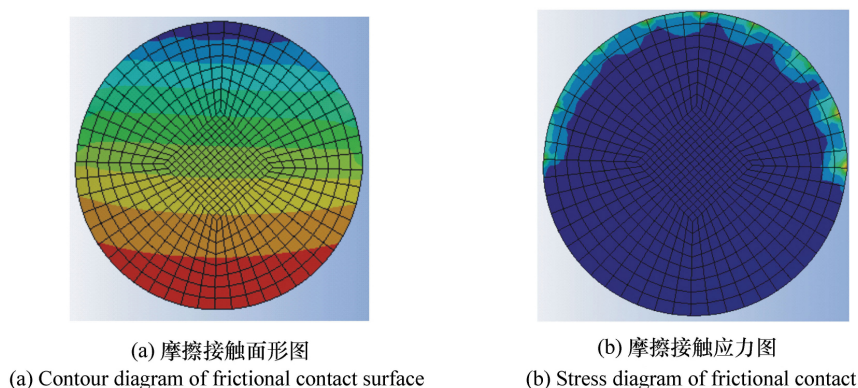


图4 摩擦接触面形及应力图

Fig. 4 Contour and stress diagrams of frictional contact surface

时镜面变形对透射波前像差的影响。在重力及螺栓预紧力作用下,镜面透射波前像差 RMS 值为 40.626 nm, PV 值 235.654 nm。干涉仪检测保护窗口面形如图 5 所示。

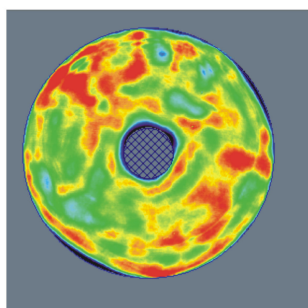


图5 保护窗口面形的干涉仪检测结果

Fig. 5 Interferometer test results of contour diagram of protective window surface

5.3 基于 ZEMAX 评价镜面变形

保护窗口俯仰角为零度时,将面形拟合算出的 36 项 Zernike 系数导入 ZEMAX 软件,得到波前像差 RMS、PV 值。图 6 为刚性连接镜面波前图,其波前像差 RMS 为 71.312 nm、PV 为 387.768 nm,波前像差 RMS 与干涉仪检测结果偏差为 75.53%,波前像差 PV 与干涉仪检测结果偏差为 64.55%。图 7 为考虑摩擦接触镜面波前图,其波前像差 RMS 为 38.095 nm、PV 为 205.027 nm,波前像差 RMS 与干涉仪检测结果偏差为 6.23%,波前像差 PV 与干涉仪检测结果偏差为 13%。实验结果说明,与线性刚性连接仿真结果相比,考虑摩擦接触的仿真结果更加接近干

涉仪检测结果,准确反映了保护窗口镜面变形的真实状态。



图6 刚性连接镜面波前图

Fig. 6 Wave front map of rigid joint mirror

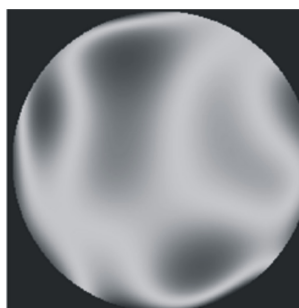


图7 摩擦接触镜面波前图

Fig. 7 Wavefront map of frictional contact mirror

为了满足系统整体成像质量要求,经纬仪保护窗口波前像差 RMS 要小于 $\lambda/15$ (λ 为 632.8 nm)。可见,干涉仪检测和考虑摩擦接触仿真方法得到的结果都能满足系统成像质量的要求,说明该米级口径保护窗口设计合理,该摩擦接

触仿真方法可用于米级口径保护窗口镜面变形分析。而刚性连接仿真方法得到的结果不能满足系统成像质量的要求,说明该方法不适用于米级口径保护窗口镜面变形分析。

6 结 论

在重力和螺栓预紧力作用下,本文采用摩擦接触的仿真方法分析米级口径保护窗口镜面变

形。与线性刚性连接仿真分析相比,面形图没有显著的局部凸起和凹陷,同时应力图分布较均匀。考虑摩擦接触的仿真方法结果与干涉仪检测结果的 RMS 值偏差为 6.23%,刚性连接仿真方法结果与干涉仪检测结果偏差为 75.53%。实验结果表明,与线性分析相比,考虑摩擦接触边界条件的仿真方法能更准确地反映米级口径保护窗口镜面变形,可用于米级口径保护窗口镜面变形分析。

参考文献:

- [1] 尤锐,王晶,王文革,等.大口径测量系统主反射镜装调及精度分析[J].长春理工大学学报(自然科学版) 2008, 31(3): 20-23.
YOU R, WANG J, WANG W G *et al.*. Adjustment and error analysis of the large mirror of test system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)* 2008, 31(3): 20-23. (in Chinese)
- [2] 刘莹奇,王志,刘欣悦,等.米级车载高分辨率光电成像系统光学设计[J].红外与激光工程 2011, 40(8): 1512-1516.
LIU Y Q, WANG ZH, LIU X Y *et al.*. Optical design of vehicle-based high resolution E-O imaging system using meter class telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2011, 40(8): 1512-1516. (in Chinese)
- [3] 范李立,张景旭,杨飞,等.极轴式望远镜主镜支撑结构对镜面变形的影响[J].红外与激光工程 2012, 41(1): 173-177.
FAN L L, ZHANG J X, YANG F *et al.*. Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. *Infrared and Laser Engineering* 2012, 41(1): 173-177. (in Chinese)
- [4] 辛雪军,陈长征,张星祥,等.平行光管主反射镜组件的非线性有限元分析[J].中国光学与应用光学 2010, 3(2): 170-176.
XIN X J, CHEN CH ZH, ZHANG X X *et al.*. Nonlinear analysis of primary mirror subassembly for collimator based on finite element method [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics* 2010, 3(2): 170-176. (in Chinese)
- [5] 徐广州,阮萍,李婷.基于接触有限元方法的镜面面形仿真技术研究[J].光学技术 2012, 38(3): 305-309.
XU G ZH, RUAN P, LI T. Surface simulation based on contact finite element method [J]. *Optical Technique* 2012, 38(3): 305-309. (in Chinese)
- [6] 陈长征,辛宏伟,吕清涛,等.某反射镜组件的线性与非线性工程分析[J].计算机仿真 2008, 25(3): 323-326.
CHEN CH ZH, XIN H W, LV Q T *et al.*. Reflector subassembly engineering analysis based on combined nonlinear and linear method [J]. *Computer Simulation* 2008, 25(3): 323-326. (in Chinese)
- [7] WINGGERS P. *Computational Contact Mechanics* [M]. 2nd ed. America: John Wiley and Sons Ltd 2002.
- [8] 关英俊,辛宏伟,刘巨,等.基于接触非线性分析方法的反射镜组件工程分析[J].光学技术 2006, 32(6): 859-862.
GUAN Y J, XIN H W, LIU J *et al.*. Reflector subassembly engineering analysis based on contact nonlinear analysis method [J]. *Optical Technique* 2006, 32(6): 859-862. (in Chinese)
- [9] 赵星,郑义,张赞,等.基于面形斜率的光学自由曲面表征[J].光学精密工程 2015, 23(7): 1957-1964.
ZHAO X, ZHENG Y, ZHANG Z *et al.*. Characterization of freedom optical surfaces based on surface slope [J]. *Opt. Precision Eng.* 2015, 23(7): 1957-1964. (in Chinese)
- [10] 田秀云,吴时彬,伍凡,等.环形大口径平面镜圆 Zernike 多项式拟合精度分析[J].光学技术 2008, 34: 21-23.
TIAN X Y, WU SH B, WU F *et al.*. Analysis for circle Zernike polynomial fitting precision of annual large flat [J]. *Optical Technique* 2008, 34: 21-23. (in Chinese)
- [11] 孟轩,乔彦峰,何锋赞,等. Zernike 环多项式分析光电经纬仪主镜变形[J].激光与光电子学进展 2013, 50,

072201.

MENG X ,QIAO Y F ,HE F Y *et al.* . Analyzing primary mirror deformation of photoelectric theodolite using Zernike annular polynomial[J]. *Laser and Optoelectronics Progress* 2013 50:072201. (in Chinese)

- [12] 杨佳文,黄巧林,韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. *航天返回与遥感* 2010 31(5): 49-55.

YANG J W ,HUANG Q L ,HAN Y M. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing* 2010 31(5): 49-55. (in Chinese)

- [13] 张颖,丁振敏,赵慧洁,等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. *红外与激光工程* 2012 41(10): 2763-2767.

ZHANG Y ,DING ZH M ,ZHAO H J *et al.* . Rigid - body displacement separation of optics in optical-structural thermal integrated analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering* 2012 41(10): 2763-2767. (in Chinese)

- [14] 田富湘,何欣. 空间光学传感器光学镜面有限元分析结果的后处理[J]. *红外* 2014 35(9): 19-22.

TIAN F X ,HE X. Post - processing of FEA results of optical mirrors for space remote sensor[J]. *Infrared* 2014 35(9): 19-22. (in Chinese)

- [15] 颜庆津. 数值分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.

YAN Q J. *Numerical Analysis* [M]. Beijing: Beihang Press 2006. (in Chinese)

作者简介:



赵晓东(1991—)男,山东滕州人,硕士研究生,主要从事光电测量设备结构设计方面的研究。E-mail: zxdstu@163.com



王晶(1966—)女,吉林九台人,研究员,博士生导师,主要从事光学技术与测量技术方面的研究。E-mail: wangjing@ciomp.an.cn