文章编号 1004-924X(2016)06-1424-08

大口径长条形反射镜组件自重变形的仿真与试验

董得义*,李志来,薛栋林,张学军,樊延超,庞新源
(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:研究了空间光学遥感器的大口径长条形反射镜组件在自重载荷作用下的面形变化,实验验证和定量分析了 Zernike 多项式拟合法以及球面方程拟合法得到的仿真分析结果的精度。介绍了 Zernike 多项式拟合法以及球面方程拟合法的基本原理,分别用这两种算法对大口径长条形反射镜组件在自重载荷作用下的面形变化进行了仿真分析。根据误差合成原理,提出了依据翻转前后两个状态的面形检测结果计算镜面面形变化的方法;针对离轴反射镜在面形检测过程中存在离轴量与镜面像散互相补偿的现象,求解了离轴量变化量与镜面像散的关系。试验结果显示:Zernike 多项式拟合法的计算精度为 74.2%,而球面方程拟合法的计算精度为 12.6%;对仿真分析结果的误差评价表明,采用有限元法得到的仿真分析结果的理论精度值为 10%左右,与球面方程拟合方法的计算精度 12.6%基本吻合。研究表明,由于 Zernike 多项式拟合法自身的局限性,不适合对长条形反射镜面形变化进行拟合,而球面方程拟合法的计算精度能够满足工程要求。

关 键 词:空间光学遥感器;大口径反射镜;长条形反射镜;自重变形;仿真分析;Zernike 多项式拟合;球面方程拟合;
中图分类号:TP73;TP391.9 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20162406.1424

Analysis and experiment of gravity deformation for large aperture rectangular mirror set

DONG De-yi*, LI Zhi-lai, Xue Dong-lin, ZHANG Xue-jun, FAN Yan-chao, PANG Xin-yuan

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: s200201029@163.com*

Abstract: The surface figure deformation of a large aperture rectangular mirror set in a space optical remote sensor under the gravity was explored and the accuracy of simulation analysis results by Zernike polynomial fitting and spherical equation fitting methods were verified and analyzed quantitatively. The basic principles of Zernike polynomial fitting and spherical equation fitting were introduced, and the gravity deformation of the large aperture rectangular mirror set under the gravity was simulated and analyzed by the two fitting methods mentioned above. On the basis of error composition principle, a calculation method of the mirror surface figure change was proposed according to the two test results in the grounded turn-over experiment. For the compensation phenomenon between the off-axis magnitude and the surface astigmatism of an off-axis mirror in the process of the mirror surface test, a

收稿日期:2015-11-12;**修订日期**:2015-12-20.
基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

method was proposed to determine the relationship between the amount of off-axis magnitude and the surface astigmatism. Experimental results show that the fitting accuracy of Zernike polynomial method is 74.2%, and that of spherical equation fitting method is 12.6%, which is in good agreement with the error evaluation of simulation results 10%. It suggests that the polynomial fitting method is not suitable for the rectangle mirror due to its limitation, however the accuracy of the spherical equation fitting method can meet the engineering requirements.

Key words: space optical remote sensor; large aperture mirror; rectangular mirror; gravity deformation; simulation analysis; Zernike polynomial fitting; spherical equation fitting

1　引　言

在光学参数相同的条件下，折返式或全反射式的光学系统与折射式系统相比，体积和质量都会小得多，所以当前空间光学系统多采用全反射式或折反射式结构。在这类光学系统中，反射镜是必不可少的关键部件之一，其在轨工作状态下的面形精度直接决定了空间光学遥感器的成像质量[1-4]。

相机入轨后，自重释放是影响反射镜面形精度的关键因素。在反射镜组件设计初期，对设计方案进行自重变形的仿真分析，已经成为衡量设计方案是否合理，图纸能否下图加工的重要评价手段[5-8]，为了保证设计方案不出现颠覆性的失误，要求仿真分析结果的精度必须满足一定的指标要求。

随着有限元分析技术的发展以及仿真分析软件的不断完善，采用仿真分析的方法计算反射镜组件在自重载荷作用下的面形变化已比较成熟，在国内外都有广泛的应用。吴清文[9]等人在1997年就对反射镜组件在自重载荷作用下的面形变化的方法进行了研究，并以仿真分析结果为依据提出了镜头优化的设计方向；李福[10]等人对平面镜在装配前以及装配后在重力载荷作用下的面形变化进行了研究；文献[11-12]表明，国外的光学研究人员在反射镜支撑方案的设计中也都是采用仿真分析的手段来确定自重对反射镜面形的影响。但对面形仿真分析结果计算精度进行定量研究相对较少。

本文以某空间光学遥感器的大口径长条形反射镜组件为例，对反射镜组件在自重载荷作用下面形变化，采用不同拟合算法得到的仿真分析结果的计算精度进行了定量的研究。

2　反射镜面形变化分析方法

反射镜面形变化计算的处理方法主要包括Zernike多项式拟合法[13-14]、球面/平面方程拟合法[15-16]、光学追迹法、齐次坐标变换法等，目前最为常用的为Zernike多项式拟合法以及球面/平面方程拟合法。

2.1　Zernike多项式拟合法

被测反射镜的表面光滑且连续，波面拟合就是选择一个线性无关的基底函数系（本文选择的Zernike多项式系）的组合来拟合离散波差函数（在光学检测中，离散波差函数为镜面上每个点对应的测量值；在仿真分析中，离散波差函数为每个镜面离散节点对应的分析结果），由连续的函数表征被测系统的波像差函数或面形，假设镜面离散数据点数为1 000个，要拟合前37项的Zernike多项式的系数，相当于用1 000个方程组求解37个未知数，这是一个典型的需要用最小二乘法解决的问题。

设被测波面$\delta(x,y)$用n项Zernike多项式可以表示为：

$$\delta(x,y)=\sum c_i\phi_i=c_1\phi_1(x,y)+c_2\phi_2(x,y)+c_3\phi_3(x,y)+\cdots\cdots+c_n\phi_n(x,y), \quad (1)$$

式中：ϕ_{ji}为Zernike多项式；c_j为Zernike多项式的系数。

假设有m个离散点（为测量数据点或仿真分析结果）$\delta_i(x_i,y_i)$，$i=1,2,\cdots\cdots,m$

令$\phi_j=\phi_j(x_i,y_i)$，$i=1,2,\cdots,m$；$j=1,2,\cdots,n$，是位置坐标的函数，代入式(1)中，可得矛盾方

程组 $m \geqslant n$：

$$\left.\begin{aligned}&\phi_{11}c_1+\phi_{12}c_2+\phi_{13}c_3+\cdots+\phi_{1n}c_n=\delta_1\\&\phi_{21}c_1+\phi_{22}c_2+\phi_{23}c_3+\cdots+\phi_{2n}c_n=\delta_2\\&\cdots\cdots\\&\phi_{m1}c_1+\phi_{m2}c_2+\phi_{m3}c_3+\cdots+\phi_{mn}c_n=\delta_m\end{aligned}\right\},\quad(2)$$

简记作：$\boldsymbol{\Phi}_c=\boldsymbol{\Delta}$，其中：$\boldsymbol{\Phi}=(\boldsymbol{\phi}_{ij})$ 为 $m\times n$ 阶矩阵，$\boldsymbol{c}=(c_1,c_2,\cdots,c_n)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{\Delta}=(\delta_1,\delta_2,\cdots,\delta_m)^{\mathrm{T}}$。矛盾方程组一般不存在通常意义下的解，即对任何 n 维向量 c，一般 $\boldsymbol{\Delta}-\boldsymbol{\Phi}_c\neq 0$，此时可采用最小二乘法求解。最小二乘法的误差函数为：

$$\boldsymbol{E}=\sum\boldsymbol{W}_i(\boldsymbol{\delta}_i-\sum\boldsymbol{c}_j\boldsymbol{\phi}_{ji})^2,\quad(3)$$

式中：W_i 为权函数；令 E 关于 c_j 的导数为 0，即：

$$\frac{\partial\boldsymbol{E}}{\partial\boldsymbol{c}_j}=2\sum\boldsymbol{W}_i(\delta_i-\sum\boldsymbol{c}_j\boldsymbol{\phi}_{ji})\boldsymbol{\phi}_{ji}=0,\quad(4)$$

可以得到最优的 Zernike 多项式系数。系数向量$\{c\}$可以使用高斯消去法求解：

$$[\boldsymbol{H}]\{\boldsymbol{c}\}=\{\boldsymbol{p}\},\quad(5)$$

式中：

$$\boldsymbol{p}_j=\sum\boldsymbol{W}_i\boldsymbol{\delta}_i\boldsymbol{\phi}_{ji},\quad(6)$$

$$\boldsymbol{H}_{jk}=\sum\boldsymbol{W}_i\boldsymbol{\phi}_{ji}\boldsymbol{\phi}_{ki},\quad(7)$$

求得$\{c\}$，带入式(8)中，即可就得镜面的均方根值：

$$RMS=\sqrt{\sigma^2}=\sqrt{\sum_{j=0}^{n}\sum_{i=0}^{m}\frac{\varepsilon_{ji}}{2(m+1)}c_{ij}^2},\quad(8)$$

式中：$\varepsilon_{ji}=\begin{cases}1 & 2i\neq j\\ 2 & 2i=j\end{cases}$

2.2 球面方程拟合法

对于空间光学遥感器，其反射镜镜面通常有球面、非球面和平面镜，在仿真分析中，由于是对节点变化量的处理，因此非球面也可以采用球面来描述，因此在仿真分析中，只有球面与平面两种类型，本文只讨论球面方程拟合法。球面方程拟合法的基本原理为：反射镜组件的有限元模型可以提供镜面节点坐标的原始位置，通过仿真分析，可以求出每个镜面节点在外部载荷作用变化量，通过原始位置和变化量可以得到每个节点变形后的位置，将变形后的节点采用最小二乘法拟合出一个具有新的半径和新的球心位置的球面，变形后节点到新的球面法向量的峰谷值就为镜面变形的 PV 值，法向量变化量的均方根值就为镜面变形的 RMS 值。球面方程拟合法的基本过程描述如下：

1)读入镜面节点的原始坐标位置；

2)读入镜面节点在外载作用下的变化量；

3)将节点坐标值与变形量相加，得到新的球面位置坐标；

4)根据 3)中的值，采用最小二乘法拟和得到新的球面；

5)根据式(9)计算出 3)中得到的每个镜面节点相对于 4)中新拟合得到的球面沿球面法向的变形量：

$$d_{sn}=\mathrm{d}z\sqrt{1-\rho^2(x^2+y^2)}-\rho(x\mathrm{d}x+y\mathrm{d}y).\quad(9)$$

7)采用式(10)将 5)中计算得到的最大值与最小值的求差即为镜面变形量的 PV 值：

$$PV=\max(\mathrm{d}s_i)-\min(\mathrm{d}s_i)\quad i=1,2,3,\cdots,n.\quad(10)$$

8)采用式(11)对 5)中计算得到的变形量取均方根值即为镜面变形的均方根值：

$$RMS=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{d}s_i)^2}{n-1}}\quad i=1,2,3,\cdots,n.\quad(11)$$

2.3 两种方法的比较

Zernike 多项式拟合法的计算精度取决于其各项之间的正交性，正交性越高，其计算精度越高，反之就越低；由于 Zernike 多项式是在单位圆且连续的空间域上是正交的，因此，对长条形反射镜镜面节点的离散数据进行 Zernike 拟合，其计算精度较低。

与 Zernike 多项式拟合法相比，球面方程拟合法适用于任何形状的反射镜，且不存在由于数据离散会导致求解精度下降的问题，是一种比较简单且精度较高的计算镜面面形误差的方法。

3 仿真分析

3.1 研究对象

某空间光学遥感器的大口径长条形反射镜组件的外形如图 1 所示，主要由反射镜、柔性支撑以及支撑板等组成。

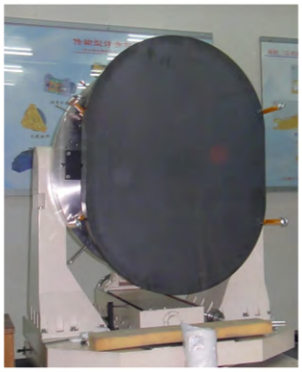


图 1　反射镜组件的结构形式

Fig. 1　Reflective mirror set

3.2　有限元模型

在大口径反射镜组件的建模过程中主要考虑以下几点：

(1)有限元模型按照设计人员提供的三维模型构造，以保证有限元模型与设计结构一致；

(2)在关键的力的传递路径上(比如：柔性支撑结构)：网格划分较密；非关键部位网格划分可适当稀疏一些。

根据以上原则以及零件结构的特点，主要采用 8 节点六面体单元对各零件进行网格划分，个别拐角的地方采用五面体楔形单元过渡。反射镜组件的有限元模型中共划分了 124，150 个单元，180，020 个节点，组件的有限元模型如图 2 所示。

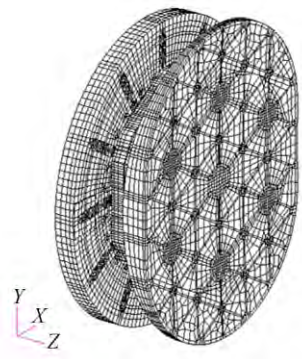


图 2　反射镜组件有限元模型

Fig. 2　Finite element model of reflective mirror set

3.3　材料属性

反射镜镜体采用 SiC 材料，柔性支撑材料为钛合金(TC4)，支撑板材料为高体份硅铝合金，三种材料的参数如表 1 所示，每种材料的参数全部由各自的生产厂商提供，材料参数的误差为随机误差，正态分布。

表 1　材料参数属性表

Tab. 1　Material parameters for the mirror set

材料	密度 (g/cm^3)	弹性模量 (GPa)	泊松比	构件
碳化硅	3.06±0.15	420±12	0.17	反射镜
钛合金	4.4±0.2	114±3	0.34	柔性支撑
高体份硅铝合金	2.9±0.1	213±6	0.23	支撑板

由于反射镜在地面检测中受到－Y 向(坐标系方向定义如图 2 中所示，下同)重力，因此在仿真分析中，主要对反射镜组件在－Y 向进行自重载荷作用下的分析，分析结果如表 2 所示。

表 2　反射镜在自重载荷分作用下面形变化析结果

Tab. 2　Analysis results of mirror surface figure by the gravity load deformation　(nm)

分析方法	镜面 PV	镜面 RMS
Zernike 多项式	224.6	52.0
球面方程拟合	62.8	11.9

两种拟合方法分析结果表明：球面方程拟合法要比 Zernike 多项式拟合法小得多。

4　测试结果与分析

4.1　测试方法

在地面很难模拟重力释放的环境，通常根据反射镜组件在翻转 180° 前后面形检测结果的变化量来评价重力对反射镜组件面形的影响。

(1)首先，测量反射镜组件在 0°状态下的面形数据 RMS_{0° 以及离轴量；在 0°状态下反射镜面形检测结果主要由检测误差 $\delta_{0^\circ检测}$ 及面形加工残差 $\delta_{加工}$ 组成，由误差的合成原理可知：

$$RMS_{0^\circ}=\sqrt{\delta_{加工}^2+\delta_{0^\circ检测}^2}\ . \tag{12}$$

(2)其次，测量反射镜组件在 180°状态下的面形数据 RMS_{180° 以及离轴量；在 180°状态下反射镜面形检测结果主要有检测误差 $\delta_{180^\circ检测}$、面形

加工残差 $\delta_{加工}$ 以及自重载荷导致的面形变化 $\delta_{自重变形}$ 组成，由误差合成原理可知：

$$RMS_{180^\circ}=\sqrt{\delta^2_{加工}+\delta^2_{180^\circ检测}+\delta^2_{自重变形}}\ . \quad (13)$$

(3)由 180°状态下检测结果的平方减去 0°状态下检测结果的平方，得到：

$$\delta_{自重变形}=\sqrt{RMS^2_{180^\circ}-RMS^2_{0^\circ}-(\delta^2_{180^\circ检测}-\delta^2_{0^\circ检测})}. \quad (14)$$

由镜面检测的原理可知：在镜面面形检测过程中通常是将镜面残差调至最小，因此在面形精度加工到一定精度后(面形精度高于 $\lambda/10$)由于检测环节引入的误差(采用干涉仪进行面形检测的，检测误差为 $\lambda/1\ 000$)可以忽略不计，因此有：

$$\delta_{自重变形}=\sqrt{RMS^2_{180^\circ}-RMS^2_{0^\circ}}. \quad (15)$$

(4)对于离轴非球面反射镜，通常采用零位补偿原理进行检测，如图 3 所示。在检测过程中，离轴量与像散之间会互相补偿[17]，因此，在翻转前

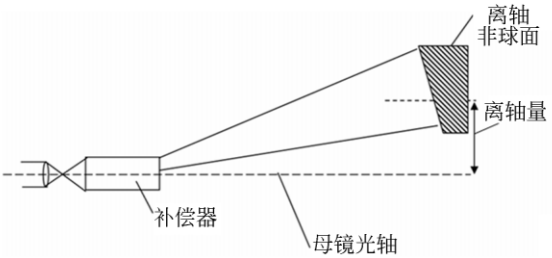


图 3　离轴非球面零位补偿检测原理示意图

Fig. 3　Test sketch of null test theory for the off-axial asphere

后要对反射镜的离轴量进行测量。若翻转前后离轴量发生了变化，说明镜面在最小残差之外还有一定的像散，设离轴量变化量对应的镜面像散为 $AST_{\Delta离轴量}$，则自重载荷导致反射镜的面形变化为：

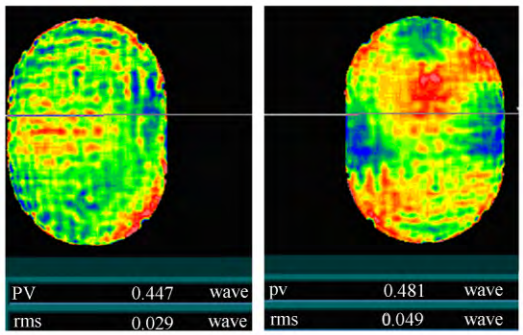
$$\delta_{自重变形}=\sqrt{RMS^2\ 180^\circ-RMS^2_{0^\circ}+AST^2_{\Delta离轴量}}. \quad (16)$$

(5)通过试验确定离轴量变化量与镜面像散的关系。对于不同的反射镜，相同的离轴量的变化量对应的镜面像散也不一定相同，因此，对每个反射镜，通常通过试验获得离轴量变化量与镜面像散的关系，过程为：在反射镜组件处于 0°状态下，首先找到面形最佳位置；然后，通过调整补偿器的位置，让补偿器在测量面形的时候，人为的构造一定大小的离轴量，然后查看镜面面形产生的像散，这个像散就是由离轴量的变化量导致的镜面象散变化量。在反射镜组件处于 0°状态下，分别对 1 mm 离轴量、2 mm 离轴量，以及 −1 mm 离轴量、−2 mm 离轴量的引入的镜面象散进行了测试(离轴量变化量正负的定义：远离主镜光轴的变化为正，靠近主镜光轴的变化为负)。根据实验测得的离轴量变化量与镜面像散的关系，可以通过线性插值的方法获得两个状态的离轴量的变化量对应的镜面像散的大小。

(6)由于两个状态中，反射镜组件受到的重力大小相等，方向相反，因此通过该试验得到的是 2 倍自重载荷对反射镜面形的影响，也就是说通过式(16)计算得到的 $\delta_{自重变形}$ 的 1/2 即为反射镜在自重释放后的面形变化。

4.2　测试结果

反射镜组件装配完毕后，在镜面面形加工到 $\lambda/30$(λ=632.8 nm，下同)时，进行了翻转 180°的面形检测，面形检测结果如图 4 所示。检测结果对比如表 3 所示。



(a)0°面形　　(b)180°面形

图 4　翻转试验面形检测结果

Fig. 4　Test results of turn-over experiment

表 3　翻转试验两个状态面形检测结果对比

Tab. 3　Contrast between the two status in the turn-over experiment

检测状态/(°)	RMS(λ)	离轴量/mm
0	0.029	487.2
180	0.049	485.9

离轴量变化量与镜面像散关系的测试结果如表 4 所示。

表 4　离轴量变化量与镜面象散的关系

Tab. 4　Relationship between the off-axial quantity and the surface astigmatism

离轴量变化量(mm)	镜面象散(λ)
−2	0.030
−1	0.012
+1	0.009
+2	0.03

反射镜在 0°与 180°状态下离轴量变化量为 −1.3 mm，根据线性对推导 −1.3 mm 离轴量变化量对应镜面像散大小为 0.016；

将镜面在 0°与 180°状态下的面形检测结果以及离轴量变化量对应的镜面像散带入式(16)，可以得到在翻转 180°前后镜面面形变化量为 0.042λ(26.9 nm)，因此 1g 自重变形对应镜面面形变化量为 13.4 nm。

4.3　对比分析

两种面形拟合方法对应的分析结果与测试结果对比分析如表 5 所示。

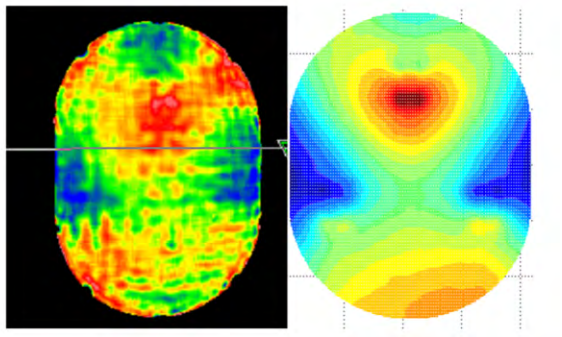
表 5　分析结果与测试结果对比

Tab. 5　Contrast between analysis results and test results

分析方法	测试结果 /nm	分析结果 /nm	绝对误差 /nm	相对误差 /%
Zernike 多项式拟合	13.4	52.0	38.6	74.2
球面方程拟合	13.4	11.9	1.5	12.6

采用 Zernike 多项式拟合法得到的分析结果精度很低。这主要是由于反射镜的形状为在长条形区域，其次，有限元分析中镜面节点是稀疏离散的，导致了 Zernike 多项式的不正交，从而导致计算精度大大降低；而采用球面方程拟合法得到的分析结果与测试结果吻合的很好。

去除刚体位移镜面变形云图与测试结果对比如图 5 所示。



(a)检测结果　　(b)分析结果

(a)Test result　　(b)Analysis result

图 5　去除刚体位移面形分布云图对比

Fig. 5　Comparison between test and analysis contour by remove rigid displacements

5　仿真分析结果的误差评价

在反射镜组件自重变形面形分析中，主要误差源有三类[18-20]：算法误差、材料参数误差以及结构参数误差。

1)算法误差。算法误差主要包括：面形分析的算法误差以及 Nastran 计算软件的误差。自重变形对反射镜而言属于小变形，球面方程拟合法在处理数据前都对变形结果数据进行了双精度处理，计算误差可以忽略不计；Nastran 采用迭代算法求解矩阵，算法误差小于 1%。

2)材料参数误差：采用摄动法得到了 3 种材料 6 个参数的误差传递因子，与 6 个参数的误差相乘得到了每个参数误差在主镜组件自重变形面形分析中引入的误差，如表 6 所示。

表 6　材料参数误差引入的计算误差

Tab. 6　Errors deduced by material parameters errors

		原始误差/%	传递因子	引入误差/%
碳化硅	密度	5.0	0.97	4.85
	模量	3.1	0.85	2.64
钛合金	密度	5.0	0.022	0.11
	模量	3.0	0.0	0.00
高体份硅铝合金	密度	4.5	0.008	0.04
	模量	3.0	0.16	0.48

材料参数误差为随机误差，总的误差为各误差的方和根，为 7.53%。

3)结构参数误差：由于反射镜镜体尺寸大，刚度低，在加工背部轻量化孔的过程中，会出现“塌腰”的现象[21]，导致主镜镜体存在较大的加工误差。通过对比镜体加工后的尺寸与设计尺寸，发现其存在 5%左右的误差，镜体 5%的尺寸误差导致镜体质量存在 5%的误差，其引入计算结果的

误差与碳化硅材料密度引入的误差是基本等效的，为4.85%；

4)误差合成：算法引入的误差为常差，材料参数以及结构参数引入的误差为随机误差，根据误差合成原理，总的计算误差约为10%，与试验结果12.6%基本吻合。

6 结　论

本文分别采用Zernike多项式拟合法以及球面方程拟合法对某长条形大口径反射镜组件在装调方向自重载荷作用下的面形进行了仿真分析；然后，在反射镜组装完毕后，对其在自重载荷下的面形变化进行了试验测试，根据误差合成的原理提出了对测试结果的处理方法，并针对离轴反射镜提出了确定离轴量变化量与镜面像散的关系的方法。

测试结果与分析结果的对比表明：由于Zernike多项式拟合法在长条形区域及离散数据上的正交性较差，导致其分析结果的精度较低，为74.2%，验证了该方法不适用于长条形反射镜的面形拟合；而球面方程拟合法由于在算法上不受镜面形状的限制，具有较高的计算精度，其计算精度为12.6%，与仿真分析结果误差的理论值10%基本吻合，从而验证了采用球面方程拟合法得到的仿真分析结果的有效性。

参考文献：

[1] 国绍文，张广玉，王武义，等. 空间相机指向反射镜面形误差仿真分析[J]. 光学仪器，2005，27(6)：29-32.
GUO SH W，ZHANG G Y，WANG W Y，*et al*.. Surface contour deflection analysis of directional mirror for space camera[J]. *Optical Instruments*，2005，27(6)：29-32. (in Chinese)

[2] 陈长征，赵贵军，张星祥，等. 空间光学镜头可适应边界温度的CAE计算方法[J]. 光学 精密工程，2007，15(5)：668-673.
CHEN CH ZH，ZHAO G J，ZHANG X X，*et al*.. A calculating method for temperature tolerance of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*，2007，15(5)：668-673. (in Chinese)

[3] 董得义，李志来，李锐刚，等. 胶层固化对反射镜面形影响的仿真与试验[J]. 光学 精密工程，2014，22(10)：2698-2707.
DONG D Y，LI ZH L，LI R G，*et al*.. Simulation and experiment of influence of adhesive curing on reflective mirror surface [J]. *Opt. Precision Eng.*，2014，22(10)：2698-2707. (in Chinese)

[4] 庞志海，樊学武，陈钦芳，等. 大口径发射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报，2013，33(4)：0422002.
PANG ZH H，FAN X W，CHEN Q F，*et al*.. Influence of Surface-Profile Error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system [J]. *Acta Optica Sinica*，2013，33(4)：0422002. (in Chinese)

[5] 李志来，徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计[J]. 光学 精密工程，2011，19(5)：1039-1047.
LI ZH L，HE H. Design of rectanglar space mirror and its support structure [J]. *Opt. Precision Eng.*，2011，19(5)：1039-1047. (in Chinese)

[6] 郭疆，何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J]. 光学 精密工程，2008，16(9)：1642-1647.
GUO J，HE X. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*，2008，16(9)：1642-1647. (in Chinese)

[7] 关英俊，辛宏伟. 长条形空间反射镜轻量化及其支撑结构设计[J]. 激光与红外，2010，40(11)：1245-1249.
GUAN Y J，XIN H W. Lightweight and support design for rectangular space mirror [J]. *Laser & Infrared*，2010，40(11)：1245-1249. (in Chinese)

[8] 李宗轩，陈雪，张雷，等. 大口径空间反射镜Cartwheel型柔性支撑设计[J]. 光学学报，2014，34(6)：0622003.
LI Z X，CHEN X，ZHANG L，*et al*.. Design of cartwheel flexural support for a large aperature space mirror [J]. *Acta Optica Sinica*，2014，34(6)：0622003. (in Chinese)

[9] 吴清文，卢锷，王家骐，等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学 精密工程，1996，4(4)：63-68.
WU Q W，LU E，WANG J Q，*et al*.. Study on the surface figure changes of primary mirror centerally supported under gravity load[J]. *Opt. Precision Eng.*，1996，4(4)：63-68. (in Chinese)

[10] 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.
LI F，RUAN P，ZHAO B CH. Study on the sur-

face deformation of flat reflector under gravity load [J]. *Acta photonica sinica*, 2005, 34(2): 272-275. (in Chinese)

[11] STEPHEN E. Kendrick, Timothy Reed, Scott Streetman, *et al*.. Design and test of semi-rigid beryllium mirrors for lightweighted space applications; SBMD cryogenic performance update and AMSD design approach [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4198: 221-229.

[12] TAPIO K, PERTTU K, MIKKO P, *et al*.. Polishing and testing of the 3.5 m SiC M1 mirror of the Herschel space observatory of ESA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7102: 710218_1-7.

[13] **单宝忠，王淑岩，牛憨笨，等**. Zernike **多项式拟合方法及应用**[J]. **光学 精密工程**, 2002, 10(3): 318-323.
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, *et al*.. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 318-323. (in Chinese)

[14] **杨怿，张伟，陈时锦. 光机热集成分析中数据转换接口的研究**[J]. **宇航学报**, 2005, 26(2): 201-206.
YANG Y, ZHANG W, CHEN SH J. Study on data transmission tool for thermal/structural/optical integrated analysis [J]. *Joural of Astronautics*, 2005, 26(2): 201-206. (in Chinese)

[15] **吴清文. 镜面面型误差的曲面方程处理方法**[J]. **光学 精密工程**, 1998, 6(6): 56-60.
WU Q W. Treating with surface figure error of mirror/lens by means of surface equation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(6): 56-60. (in Chinese)

[16] **辛宏伟，关英俊，李景林，等. 大口径长条形反射镜支撑结构的设计**[J]. **光学 精密工程**, 2011, 19(7): 1560-1568.
XIN H W, GUAN Y J, LI J L, *et al*.. Design of support for large aperture rectangle mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1560-1568. (in Chinese)

[17] DIETRICH K, HUNTSVILLE, ALABAMA. *Reflective Optics* [M]. USA: Academic Press, 1991: 98-100, 212-216.

[18] **廖瑛，邓方林，梁加红，等. 系统建模与仿真的校核、验证与确认**[M]. **长沙：国防科技大学出版社**, 2006: 15.
LIAO Y, DENG F L, LIANG J H, *et al*.. *The verification, validation and accreditation technologies on system modeling and simulation* [M]. ChangSha: National University of Defense Technology Press, 2006: 15.

[19] **卢锷，吴清文，牛晓明. 用有限单元法**(FEA)**进行工程分析误差评价与控制**[J]. **光学 精密工程**, 1995, 3(6): 34-39.
LU E, WU Q W, NIU X M. Engineering analysis, error veluation and control with FEM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(6): 34-39. (in Chinese)

[20] **董得义，张学军. 反射镜组件模态分析的误差评价**[J]. **光学 精密工程**, 2011, 19(8): 1883-1895.
DONG D Y, ZHANG X J. Error valuation for mode analysis of reflective mirror set [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1883-1895. (in Chinese)

[21] **胡海飞，罗霄，辛宏伟，等. 超大口径光学制造均力支撑布局优化**[J]. **光学学报**, 2014, 34(4): 0422003.
HU H F, LUO X, XIN H W, *et al*.. Layout optimization of equal-force supports for ultra-large optical fabrication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0422003. (in Chinese)

作者简介：



董得义(1979－)，**男，天津人，博士，副研究员**，2002 **年、**2005 **年于北京工业大学获学士、硕士学位**，2012 **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，主要从事空间光学遥感器有限元分析、结构优化设计、力学试验等方面的研究工作**。E-mail: s200201029@163.com



李志来(1965－)，**男，汉族，吉林镇赉人，研究员**，1986 **年于吉林工学院获得学士学位，主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究**。E-mail: lizl2004@sohu.com

（本栏目编辑：马　健）

（版权所有　未经许可　不得转载）