

文章编号 1004-924X(2017)06-1557-10

## 接口前处理在光机系统动力学分析和 面形优化中的应用

兰 斌<sup>1,2\*</sup>, 杨洪波<sup>3</sup>, 吴小霞<sup>1</sup>, 张景旭<sup>1</sup>, 刘祥意<sup>1</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. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

**摘要:**为了解决光机系统动力学分析与面形优化过程中由于光机接口程序后处理方式所引起的计算数据量大或接口处理失效的问题, 提出将光机接口处理过程移到有限元前处理中, 并进行了光机系统的集成分析与优化。首先, 为了解决标准 Zernike 多项式在环形离散点域内的非正交性, 引入了节点面积加权因子和环域 Zernike 多项式。提出了通过对镜面施加均匀压强求节点支反力的方式求取节点面积加权因子的计算方法。然后采用最小二乘法推导出镜面刚体位移和拟合镜面变形的 Zernike 多项式系数与镜面各节点变形量之间的线性关系式。最后, 编写接口程序将这些线性表达式以多点约束(MPC)的方式导入到有限元模型中, 在前处理过程中完成系统的光机接口处理过程。通过对非稳态风载引起的某 1.2m 地基望远镜视轴抖动和液压 whiffletree 支撑下的主镜镜面高阶变形量进行结构动力学随机响应分析, 验证了光机前处理方法对解决光机系统动力学问题的有效性。此外, 还以镜面面形为优化目标对 1.2 m 轻量化主镜的镜体结构和尺寸进行敏感度分析, 证明了光机前处理方法可以有效地简化镜面面形的优化分析过程。

**关键词:**光机接口前处理; 光机系统动力学; 面形优化; 节点面积加权因子; 环域 zernike 多项式

中图分类号: TH751 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20172506.1557

## Application of interface preprocessing in opto-mechanical system dynamics analysis and surface shape optimization

LAN Bin<sup>1,2\*</sup>, YANG Hong-bo<sup>3</sup>, WU Xiao-xia<sup>1</sup>, ZHANG Jing-xu<sup>1</sup>, LIU Xiang-yi<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China)

\* Corresponding author, E-mail: lanbin169320@126.com

**Abstract:** In order to solve the problems of large calculation data volume and failure caused by the post processing mode of interface program in the process of optical machine system dynamics analysis and surface shape optimization, the pre-processor was introduced into the opto-mechanical interface pro-

收稿日期: 2016-07-18; 修订日期: 2016-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金(11403023)

cessing for integrated analysis and optimization of opto-mechanical system. First, the node area weighting factor and annular Zernike polynomial were introduced to settle non-orthogonality of standard Zernike polynomial within annular discrete field. And a calculation method was proposed to solve node area weighting factor by imposing uniform pressure on mirror surface to solve the bearing reaction force of the node. Then, the least square method was used to deduce the linear relation expression between rigid body deformation of mirror surface, Zernike polynomial coefficients of fitting mirror deformation and deformation of each node on mirror surface. Finally, the interface program was wrote and these linear expressions were channeled to finite element model by the way of Multiple Point Constraint (MPC); what's more, the systematic interface pre processing of the optical machine was completed. Through making structural dynamics random response analysis on vibration of the bore-sight on 1.2m certain ground-based telescope caused by unsteady state wind load and high-order deformation of the main mirror surface supported by hydraulic whiffletree, the effectiveness of optical machine preprocessing method to the problem of optical machine system dynamics was verified; through taking the shape of the mirror as the optimization objective, the sensitivity analysis was made on the structure size of 1.2m lightweight lens body of primary mirror to verify the optimization analysis process of the mirror shape which was subject to be effectively simplified by the optical preprocessing method.

**Key words:** Preprocessing of optical machine interface; optical machine system dynamics; surface shape optimization; node area weighting factors; annular Zernike polynomial

## 1 引 言

高精度光学成像系统在使用过程中难免会受到各种各样动力扰动的影响,例如空间光学遥感器会受到反作用飞轮的微振动的干扰,而地基望远镜会受到风载地震等的动态扰动。光机系统在受到动力扰动后,各光学元件自身会发生变形,同时各光学元件之间的相对距离也将发生变化。由动力扰动引起的光学成像系统视轴抖动是造成系统成像质量下降的主要因素之一<sup>[1]</sup>。因此,在进行光机系统静力学集成分析时都要着重分析动力扰动的影响,通常采用的方式是对结构变形文件进行后处理,分离出镜面的刚体位移和具有物理意义的 Zernike 多项式系数,然后通过格式转换导入到光学分析软件中分析力学和温度载荷对光学系统的影响<sup>[2]</sup>。然而利用这种光机接口程序后处理方式去处理光机系统动力学分析,如瞬时分析时,需要在每个步长计算完成后导出镜面节点的变形量,然后进行光机接口处理,导致数据量明显增大;另一方面,在进行光机系统的随机响应分析时,由于随机响应分析过程是在有限元分析软件内部进行的,后处理程序无法介入,导致光机接口处理失效。因此常规的光机接口后处理方式无

法有效满足光机系统动力学分析的要求。另外,由于后处理方式中光机接口处理过程发生在有限元求解之后,而镜面面形优化过程无法在有限元分析软件中独立完成,需要如 Matlab 或者 Isight 等其他软件提供集成优化环境<sup>[3]</sup>,从而增大了镜面面形优化设计的复杂度。

望远镜通常采用卡塞格林光学系统,由于次镜的中心遮拦,通常将主镜设计为圆环形,而标准的 Zernike 多项式只在连续的单位圆域内正交,在环形离散采样点域内失去正交性。针对这个问题,长春光机所的王孝坤等对标准 Zernike 多项式做出了修正,使其在环域上正交,修正后的多项式与标准 Zernike 多项式具有相同的物理意义,其把拟合得到的前 4 项 Zernike 多项式值当作调整误差予以消除,从而得到确切的加工残差分布<sup>[4]</sup>。之后,长春光机所孟轩等环域将 Zernike 多项式作为基底函数拟合某光电经纬仪主反射镜镜面,得到变形量对光学系统像差造成的影响<sup>[5]</sup>。

为了解决后处理方式在光机系统动力学分析与面形优化中存在的问题,本文提出了光机接口程序前处理的方式。该方法中,引入有限元节点面积加权因子和环域 Zernike 多项式作为拟合基底函数,采用最小二乘法拟合得到镜面刚体位移和镜面变形 Zernike 多项式系数与镜面所有节点

位移之间的线性关系式,并以多点约束(MPC)的方式导入到有限元模型中,实现光机接口程序前处理。通过有限元软件 Nastran 对结构有限元模型分别进行动力学分析和静力学优化分析,以各个镜面的刚体位移和 Zernike 多项式拟合系数的动力学结果值与面形值作为设计目标,得到最佳设计变量值。

## 2 镜面刚体位移和 Zernike 多项式的拟合处理

复杂光机系统中机械结构和光学系统耦合在一起,必须采用光机集成分析的方法才能准确评价动力扰动对系统光学性能指标的影响。集成分析的过程是将光机系统的结构变形分解成镜面的刚体位移和 Zernike 变形系数,然后转化成光学分析软件可以识辨的格式,最后导入到光学分析软件中进行动态分析。实际分析过程中为了简化变形拟合量导入光学分析软件动态数据传输过程,通常将系统的光学模型作线性化处理,推导出描述光学系统性能参数与各镜面变形拟合量间线性关系的光学敏感度矩阵<sup>[6]</sup>。光学系统性能参数与各镜面变形拟合量关系的表达式为:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial p_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial p_1}{\partial \alpha_1} & \dots \\ \frac{\partial p_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial \alpha_1} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial p_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial p_m}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial p_m}{\partial \alpha_1} & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \theta_{r_1} \\ \vdots \\ \alpha_1^1 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (1)$$

其缩写为  $\mathbf{P}=\mathbf{S} \cdot \mathbf{Z}$ ,其中  $\mathbf{P}$  为光学系统性能参数向量, $\mathbf{Z}$  为光学系统中各光学元件刚体位移量与 Zernike 多项式系数, $\mathbf{S}$  为光学系统的光学敏感度矩阵,可以利用光学设计软件进行公差分析或者光线追迹的方式求出<sup>[7]</sup>。

### 2.1 刚体位移拟合处理

光学元件受到外载荷作用产生的刚体位移可以通过镜面上节点位移量的最小二乘法拟合得到。假设镜面顶点  $P$  坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,镜面上坐标为  $(X_i, Y_i, Z_i)$  任意节点  $i$  由于刚体位移  $\boldsymbol{\alpha}=\left\{T_x, T_y, T_z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z\right\}^T$  所产生的随动位移

量  $\left\{x_i', y_i', z_i'\right\}$  为:

$$\begin{pmatrix} x_i' \\ y_i' \\ z_i' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Z_i - Z_0 & Y_i - Y_0 \\ Z_0 - Z_i & 0 & X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 & X_0 - X_i & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

拟合误差  $E$  为镜面内所有节点的实际位移量  $x_i, y_i, z_i$  与随动位移量  $x_i', y_i', z_i'$  之差的平方加权和:

$$E = \sum_i \omega_i \left[ (x_i - x_i')^2 + (y_i - y_i')^2 + (z_i - z_i')^2 \right] \quad (3)$$

式中  $\omega_i$  为镜面节点  $i$  的面积加权因子,表征由于镜面有限元网格不均匀引起的每个节点计算得到的变化量的平方对于拟合误差的贡献量。对镜面施加总压力为 1N 的沿光轴方向的均匀压强,并约束所有节点的平移自由度,反求出镜面上每个节点沿光轴方向的支反力即为这个点的  $\omega_i$ 。图 1 (彩图见期刊电子版)所示是中心孔为 400 mm 的直径为 1 200 mm 反射镜镜面有限元模型与镜面节点对应的面积加权因子云图。

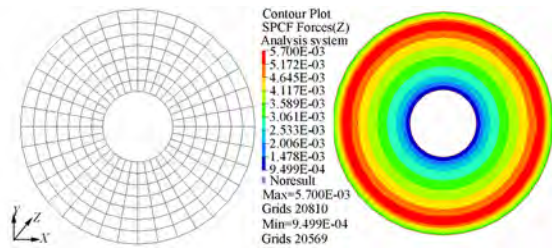


图 1 镜面有限元模型及镜面节点面积加权因子云图  
Fig. 1 Mirror FEM model and cloud map of node area weighted factor

拟合误差  $E$  在最佳拟合刚体位移处取得极小值,此时对刚体位移  $\boldsymbol{\alpha}=\left\{T_x, T_y, T_z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y, \Delta \theta_z\right\}^T$  6 个分量的偏微分均为零,将得到的方程组整理成矩阵形式为:

$$[\mathbf{H}]_{6 \times 6} \boldsymbol{\alpha} = [\mathbf{R}]_{6 \times 3n} \{d\mathbf{u}\}_{3n \times 1} \quad (4)$$

反解刚体位移为:

$$\boldsymbol{\alpha} = [\mathbf{H}]_{6 \times 6}^{-1} [\mathbf{R}]_{6 \times 3n} \{d\mathbf{u}\}_{3n \times 1} = [\mathbf{A}]_{6 \times 3n} \{d\mathbf{u}\}_{3n \times 1} \quad (5)$$

方程可写成  $\sum_j A_j u_j = 0$ ,将其以 MPC 的形式导入到 MSC. Patran 中的有限元模型中<sup>[8]</sup>,镜面的刚体位移由一个新建节点的 6 个自由度来表示。

2.2 镜面变形 Zernike 系数拟合处理

由于标准 Zernike 多项式在单位圆内彼此正交,而且每一项多项式与特定的像差相对应,故被广泛用于反射镜镜面节点变形数据的拟合<sup>[9]</sup>。鉴于标准的 Zernike 多项式在环形离散采样点域内

会失去正交性,学者 V. N. Mahajan 引入环形因子多项式对其进行修正<sup>[10]</sup>,表 1 列出了前 11 项标准圆域内的 Zernike 多项式和环域内多项式,其中环形因子  $\epsilon$  为中心孔半径与镜面半径的比值。

表 1 前 11 项标准圆域 Zernike 多项式和环域 Zernike 多项式

Tab.1 The first 11 terms of standard Zernike polynomials and annular Zernike Polynomials

| 项数 | N | M | 圆域 Zernike 多项式                    | 环域 Zernike 多项式   | 像差      |
|----|---|---|-----------------------------------|--|---------|
| 1  | 0 | 0 | 1                                 | 1  | 平移      |
| 2  | 1 | 1 | $2r \cos \theta$                  | $2r \cos \theta / (1 + \epsilon^2)^{1/2}$  | 倾斜 -A   |
| 3  | 1 | 1 | $2r \sin \theta$                  | $2r \sin \theta / (1 + \epsilon^2)^{1/2}$  | 倾斜 -B   |
| 4  | 2 | 2 | $\sqrt{6} r^2 \cos 2\theta$       | $\sqrt{6} r^2 \cos 2\theta / (1 + \epsilon^2 + \epsilon^4)^{1/2}$  | 初级像散 -A |
| 5  | 2 | 0 | $\sqrt{3}(2r^2 - 1)$              | $\sqrt{3}(2r^2 - 1 - \epsilon^2) / (1 - \epsilon^2)$   | 离焦      |
| 6  | 2 | 2 | $\sqrt{6} r^2 \sin 2\theta$       | $\sqrt{6} r^2 \sin 2\theta / (1 + \epsilon^2 + \epsilon^4)^{1/2}$  | 初级像散 -B |
| 7  | 3 | 3 | $\sqrt{8} r^3 \cos 3\theta$       | $\sqrt{8} r^3 \cos 3\theta / (1 + \epsilon^2 + \epsilon^4 + \epsilon^6)^{1/2}$   | 三叶像差 -A |
| 8  | 3 | 1 | $\sqrt{8}(3r^3 - 2r) \cos \theta$ | $\frac{\sqrt{8} \cos \theta [3r^3(1 + \epsilon^2) - 2r(1 + \epsilon^2 + \epsilon^4)]}{(1 - \epsilon^2)[(1 + \epsilon^2)(1 + 4\epsilon^2 + \epsilon^4)]^{1/2}}$ | 初级彗差 -A |
| 9  | 3 | 1 | $\sqrt{8}(3r^3 - 2r) \sin \theta$ | $\frac{\sqrt{8} \sin \theta [3r^3(1 + \epsilon^2) - 2r(1 + \epsilon^2 + \epsilon^4)]}{(1 - \epsilon^2)[(1 + \epsilon^2)(1 + 4\epsilon^2 + \epsilon^4)]^{1/2}}$ | 初级彗差 -B |
| 10 | 3 | 3 | $\sqrt{8} r^3 \sin 3\theta$       | $\sqrt{8} r^3 \sin 3\theta / (1 + \epsilon^2 + \epsilon^4 + \epsilon^6)^{1/2}$   | 三叶像差 -B |
| 11 | 4 | 0 | $\sqrt{5}(6r^4 - 6r^2 + 1)$       | $\sqrt{5}[6r^4 - 6(1 + \epsilon^2)r^2 + (1 + 4\epsilon^2 + \epsilon^4)] / (1 - \epsilon^2)^2$  | 球差      |

同理针对离散域内尤其是镜面有限元网格不均匀引起的基底函数的非正交性,引入节点面积加权因子进行修正。

定义拟合基底矩阵  $\mathbf{H}$  中矩阵元素,  $h_{kj} = \sum_i \omega_i \Phi_j^i \Phi_k^i$  ( $k, j = 1 \sim m$ ), 其中  $N$  为镜面上节点总数,  $m$  为拟合选取的基底系数的总项数,  $\Phi_k^i$  和

$\Phi_j^i$  代表节点  $i$  处第  $k$  和  $j$  阶 Zernike 多项式值,  $\omega_i$  为节点面积加权因子。以图 1 反射镜为例,将前 11 阶未加权圆域 Zernike 基底矩阵、未加权环域 Zernike 基底矩阵和加权环域 Zernike 基底矩阵中所有元素值分别绘制成柱状图列于图 2 (彩图见期刊电子版),其中,柱状图的横纵坐标为基底矩阵的行列数,高度为对应元素的数值。

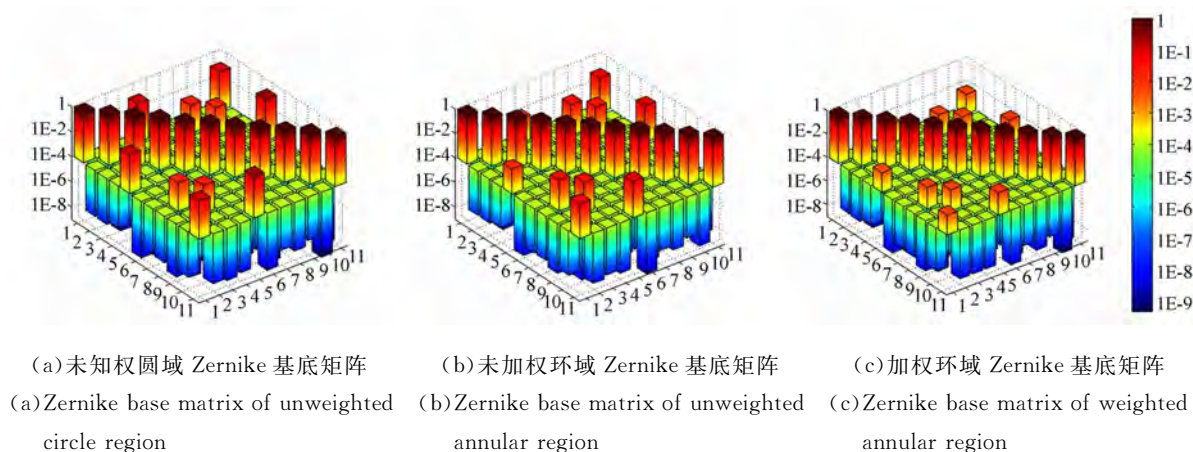


图 2 3 种基底矩阵所有元素值柱状图

Fig. 2 Histograms of all elements in three kinds of base matrixs

由图 2 可知,未加权圆域 Zernike 构成的基底矩阵中非对角线上的最大数值为  $10^{-1}$  数量级,未加权环域 Zernike 构成的基底矩阵中非对角线上的最大数值为  $10^{-2}$  数量级,而加权环域 Zernike 构成的基底矩阵中非对角线上的最大数值为  $10^{-3}$  数量级,可知引入环域 Zernike 多项式和节点面积加权因子后,基底函数的正交性显著提高,拟合系数的鲁棒性增强。

观察图 2 中非对角线上的非零元素可知,基底矩阵中具有相同对称结构的 Zernike 多项式的相互耦合程度高,例如旋转对称的第 1 项、第 5 项与第 11 项、关于轴系  $x$  轴对称的第 2 项与第 8 项和关于  $y$  轴对称的第 3 项与第 9 项。因此,为了提高拟合精度,应选取尽可能多的与所关注的系数对称性一致的 Zernike 多项式作为拟合基底函数组。

镜面的节点受到径向力或者热载荷时会发生径向移动,如图 3 所示,实线为镜面变形前的截面线,虚线为镜面变形后的截面线, $P$  点为变形前的节点, $P'$  为变形后的节点。

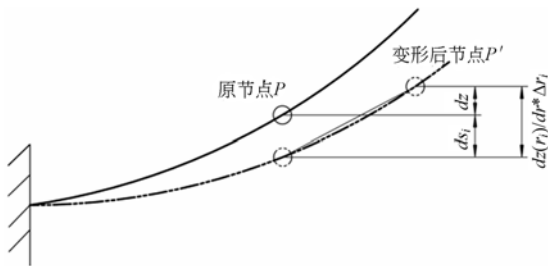


图 3 镜面节点变形量与拟合量关系图

Fig. 3 Relationship diagram of deformation amount and fitting amount for mirror node

基于小位移线性化处理可得镜面节点对应的拟合量  $ds_i$  为

$$ds_i = \frac{\partial z(r_i)}{\partial r} dr_i - dz_i, \quad (6)$$

拟合误差矩阵  $E$  可定义为镜面所有节点的实际位移  $ds_i$  与 Zernike 多项式拟合量  $z_i$  的平方加权和:

$$E = \sum_i \omega_i (ds_i - z_i)^2, \quad (7)$$

其中节点  $i$  处 Zernike 系数拟合量  $z_i = \sum_{j=1}^M c_j \Phi_j^i$ 。

拟合误差  $E$  在最佳拟合 Zernike 多项式系数处取得极小值,即最佳拟合系数处拟合误差  $E$  对

每个 Zernike 分量的偏微分均为 0,由此可得到方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial c_k} &= \sum_{i=1}^N 2\omega_i \Phi_k^i (ds_i - \sum_{j=1}^M c_j \Phi_j^i) \quad (k = 1 \sim m) \\ &= \sum_{i=1}^N 2\omega_i \Phi_k^i ds_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M 2\omega_i c_j \Phi_j^i \Phi_k^i = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

共  $m$  个方程,从而将问题转化为求解  $m$  元一次方程组的问题:

$$[G]\{ds\} - [H]\{c\} = 0, \quad (9)$$

其中  $G_{ki} = \omega_i \Phi_k^i$ ,  $H_{kj} = \sum_i \omega_i \Phi_j^i \Phi_k^i$ ; 反解 Zernike 系数可得:

$$\{c\} = [H]^{-1} [G] \left\{ \frac{\partial z(r_i)}{\partial r} dr_i - dz_i \right\}. \quad (10)$$

将方程  $\sum_j A_j u_j = 0$  以 MPC 形式导入到 MSC. Nastran 中,因此镜面变形的 Zernike 多项式系数可由与拟合基底项数相等的新建标量点的自由度来表示。

### 3 镜面面形 RMS 和 PV 值的拟合处理

光学元件在外载荷作用下需要满足一定的面形精度要求,通常以 RMS 作为评价指标。为了简化面形优化过程,将光机接口处理过程在有限元前完成,充分利用 MSC. Nastran 自带的优化模块,直接以 RMS 为设计目标进行设计参数的敏感度分析。

单个光学元件的镜面平移、倾斜和离轴可以通过系统装调或者实时调整调焦机构来消除它们对光学系统的影响<sup>[11]</sup>。镜面上每个节点去掉平移、倾斜和离轴后的残余位移值为:

$$\begin{aligned} E_i &= ds_i - \sum_{j=1}^4 c_j \Phi_j^i = \\ &= \frac{\partial z(r_i)}{\partial r} dr_i - dz_i - c_1 \Phi_1^i - c_2 \Phi_2^i - c_3 \Phi_3^i - c_4 \Phi_4^i. \end{aligned} \quad (11)$$

在有限元模型中新建表征镜面节点  $i$  的残余位移量为  $E_i$  的标量点,将式(11)表示的镜面节点  $i$  的位移量、Zernike 多项式前四阶拟合系数  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  和  $c_4$  标量点自由度与新建标量点位移量的线性关系式以前处理方式,通过 MPC 形式导入

有限元模型中。镜面面形均方根值 RMS 与峰谷值 PV 可表示为：

$$\begin{cases} \text{RMS} = \sqrt{\sum_i w_i E_i^2} \\ \text{PV} = \max(E_i) - \min(E_i) \end{cases}, \quad (12)$$

式(12)建立了 RMS 和 PV 与镜面所有节点残余像差位移值的非线性关系式,可以通过 MSC. Nastran 中的 DERSP2 中的 DEQATN 卡片进行设置<sup>[6]</sup>。

### 4 Matlab 软件的实现

将本文介绍的光机接口前处理过程在 Matlab 环境下编制求解,图 4 为编程中数据传递流程图。首先提取镜面有限元模型数据,沿光轴方向施加总压力为 1N 的均匀压强,并约束所有节点的平移自由度,通过有限元分析软件 Nastran 反求出镜面上每个节点沿光轴方向的支反力,即为这个点的节点面积加权因子;然后,通过 Matlab 提取镜面节点编号、节点面积加权因子和坐标值信息,采用最小二乘法拟合得到镜面刚体位移和 Zernike 多项式系数与镜面上所有节点位置值的线性关系式,并将得到的线性关系式以 MPC 的

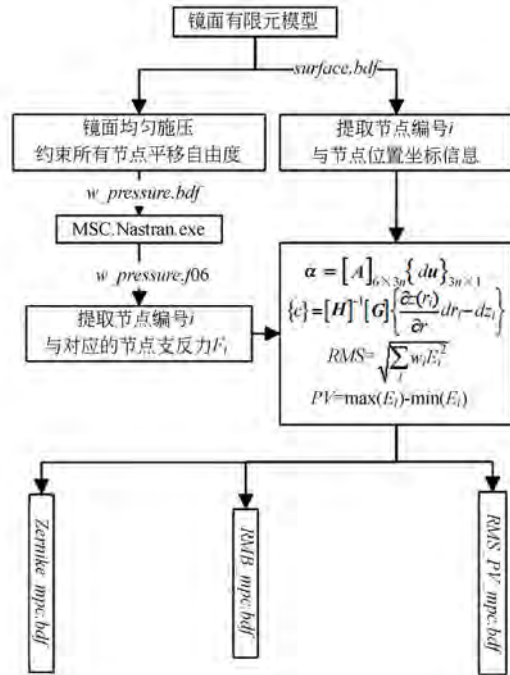


图 4 光机接口前处理流程图

Fig. 4 Flow chart of pre-processor for opto-mechanical interfaces

方式转化为有限元分析前处理文件;最后将前处理文件导入到镜面有限元模型中,进行镜面面形优化和光机系统动力学分析。

图 5 为按照图 4 流程编写的 Matlab 界面软件,首先输入 MSC. Nastran 求解得到的包含节点面积加权因子的 .f06 文件和包含镜面节点坐标信息的 .bdf 文件,然后设置镜面顶点坐标值、工作波长值、起始节点编号和拟合所采用的环 Zernike 拟合项数,最后将导出前处理文件复制到原有限元模型中,进行集成分析与优化。

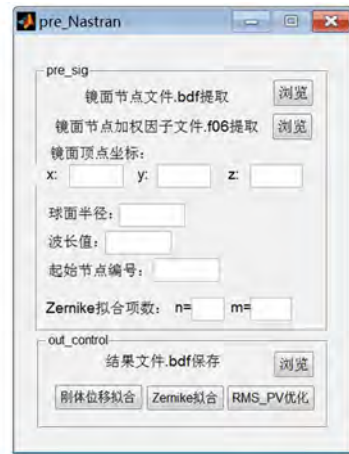


图 5 光机接口前处理 Matlab 程序界面

Fig. 5 Matlab GUI of pre-processor for opto-mechanical interfaces

### 5 实例

#### 5.1 非稳态风载引起的望远镜视轴抖动

风载作为地基光电望远镜正常工作时最主要的外力扰动,会导致光学元件之间的相对位置反生变化或者引起光学元件自身的变形,这些都会导致光学系统发生视轴抖动,严重地影响系统的成像质量。对于小口径的望远镜,其镜体刚度足够大,外界的扰动力不足以引起镜体自身的变形,只会使光学元件发生刚体位移<sup>[12]</sup>。

某 1.23 m 地基望远镜安装在市郊 10 m 高的楼顶,方位轴以下的基座处于圆柱形凹槽中。图 6 为光学系统以及各光学元件的刚体自由度示意图,在 Hpermesh 中建立系统的有限元模型,将公式(5)表示的光学敏感度矩阵和公式(1)表示的镜体刚体位移拟合的线性关系式以 MPC 的方式导入到有限元模型中,如图 7 所示。

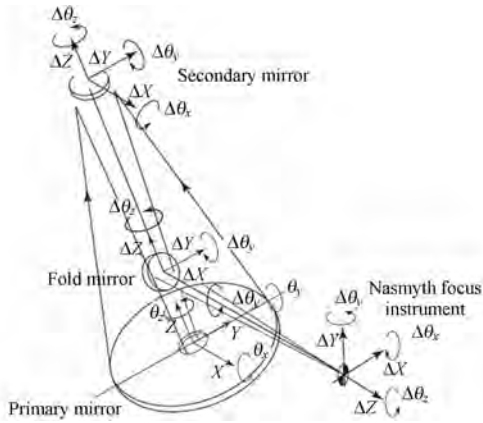


图 6 1.23 m 地基望远镜光学系统元件刚体自由度示意图  
Fig. 6 Freedom degree diagram of rigid body for optical system elements in 1.23 m telescope

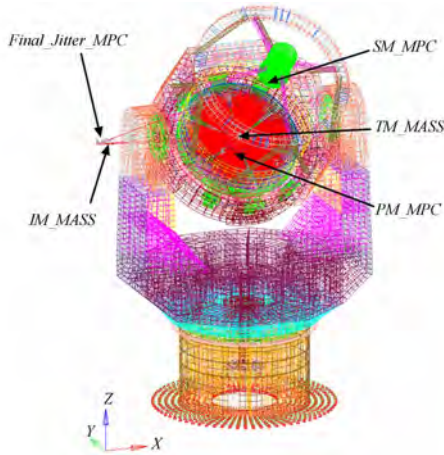


图 7 1.23 m 地基望远镜的有限元模型  
Fig. 7 Finite element model for 1.23 m telescope

望远镜俯仰角为  $45^\circ$ , 8 级风速下迎风面处加载如图 8 所示的功率谱密度描述的非稳态随机风

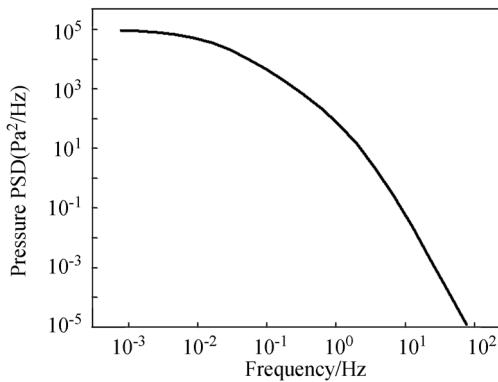


图 8 非稳态随机风压功率谱密度图  
Fig. 8 Power spectral density map caused by unsteady random wind pressure

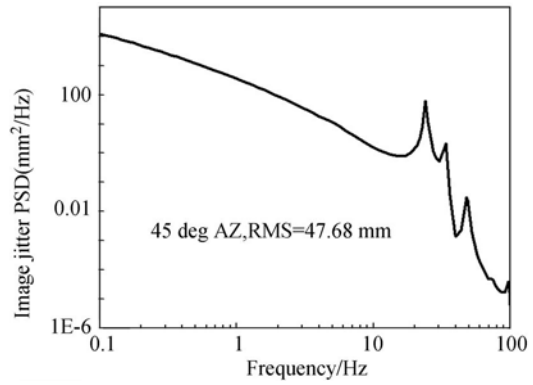


图 9 像点位移随机响应曲线  
Fig. 9 Image displacement PSD curve

压。通过 MSC. Nastran 对望远镜结构模型进行随机响应分析,得到像点位移的随机响应曲线,如图 9 所示。

### 5.2 非稳态风载引起的镜面像差

某 1.23 m 主镜系统采用 18 点液压 Whiffle-tree 被动支撑<sup>[13]</sup>,采用自编软件进行光机接口前处理并导入有限元模型中,图 10 为主镜系统的有限元模型。在镜面上均匀施加图 8 所示功率谱密度的非稳态风载,通过 MSC. Nastran 对主镜系统进行随机响应分析,输出代表前 11 项 Zernike 多项式系数标量点位移的功率谱密度曲线,得到 8 等级非稳态风载引起的主镜各阶像差的 RMS 值,如图 11 所示。由图可知,非稳态风载主要引

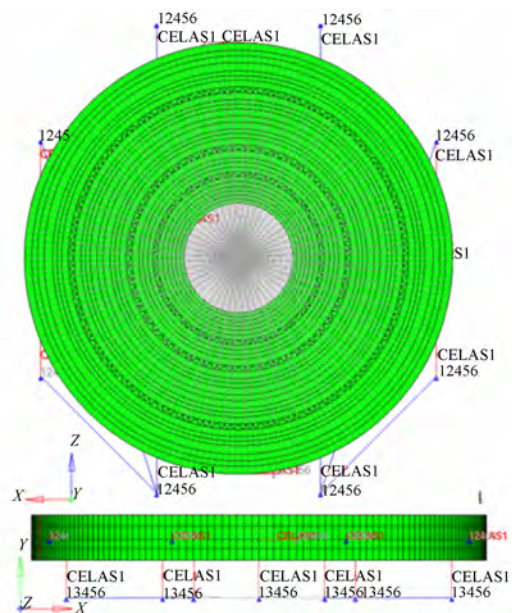


图 10 1.23 m 主镜系统有限元模型  
Fig. 10 Finite element model of 1.23 m PM system

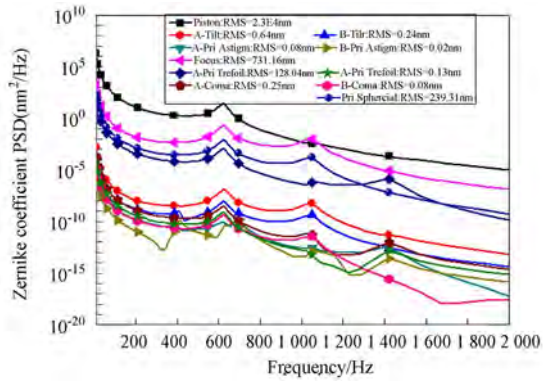


图 11 1.23 m 主镜镜面前 11 项 Zernike 多项式系数功率谱密度曲线

Fig.11 The first 11 Zernike polynomial coefficients PSD curves of 1.23m PM

起主镜的平移,离焦、A 型初阶三叶像差和球差。

### 5.3 轻量化镜体厚度的敏感度分析

如果设计变量出现了微小变化量  $\Delta t$ ,则设计目标也会随之产生微小的变化量  $\Delta rms^{[14]}$ ,即

$$\Delta rms = \frac{\delta rms}{\delta t} \Delta t, \quad (13)$$

其中  $\delta rms / \delta t$  就是设计目标对设计变量的灵敏度值。

某 1.23 m 主镜系统镜体采取三明治夹心式轻量化结构形式,选用扇形轻量化孔,镜体背部半封闭。图 12 为镜体壳单元的有限元模型<sup>[15]</sup>;图 13 为镜体前面板厚度  $t_f$ 、加强筋厚度  $t_r$  和后面板厚度  $t_b$  尺寸示意图。采用自编软件生成面形优化前处理文件导入到有限元模型中。

镜体在轴向重力作用下去除刚体位移和离焦项后的残余变形主要为初级三叶像差项和初级球差项<sup>[16]</sup>。将  $t_f$ 、 $t_r$  和  $t_b$  作为设计变量,以镜体质量与去除刚体位移后残余的初级三叶像差、球差和面形 rms 值为设计目标,进行尺寸灵敏度分析,表 2 为 MSC. Nastran 计算的敏感度值。

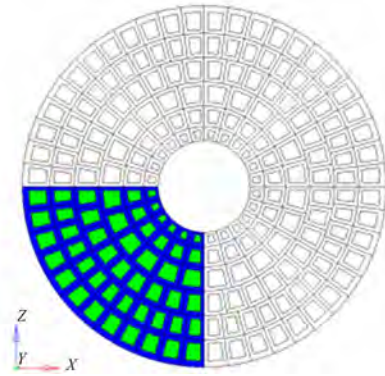


图 12 1.23 m 主镜镜体壳单元有限元模型

Fig.12 Finite element model of 1.23 m PM shell

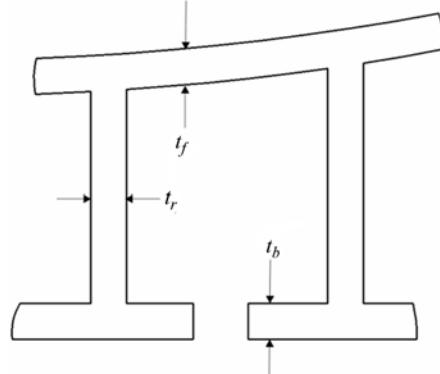


图 13 1.23 m 主镜轻量化镜体设计尺寸

Fig.13 Design sizes of 1.23 m lightweight PM body

表 2 轻量化镜体尺寸敏感度值

Tab.2 Sensitivity values of lightweight PM body size

|           | 前面板          | 加强筋          | 后面板          |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 镜体质量/kg   | 3.360 3      | 9.451 1      | 1.991 5      |
| 初级三叶像差/nm | -1.943 4E-02 | 2.610 6E+00  | -5.851 0E-01 |
| 初级球差/nm   | 5.878 0E-03  | -3.036 8E-02 | -1.566 4E-02 |
| RMS/nm    | 4.805 1E-02  | 2.131 7E+00  | -5.651 4E-01 |

镜体的比刚度定义为镜体刚度除以镜体质量,将镜面面形值 RMS 的倒数作为镜体刚度大小的标准。由表 2 可知:加强筋的厚度对镜体的比刚度产生负贡献;后面板的厚度对镜体的比刚度产生正贡献;前面板的厚度对镜体的比刚度产

生正贡献,但与后面板相比,贡献因子较小。因此在设计轻量化反射镜镜体时,在满足镜体加工工艺和材料屈服极限的条件下,应尽可能减小加强筋的厚度,增大后面板的厚度<sup>[17]</sup>。

## 6 结 论

本文提出一种光机接口过程前处理方法,用于解决光机系统动力学集成分析与镜面面形优化问题。针对标准 Zernike 多项式在离散环域内非正交的问题,引入有限元节点面积加权因子和作为拟合基底函数的环域 Zernike 多项式进行修正,提高了光机拟合处理精度。

### 参考文献:

- [1] PIERRE Y, BELY. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. New York: Springer-Verlag New York, Inc, 2003:219-223.
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4):327-336.  
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4):327-336. (in Chinese)
- [3] 苏燕芹, 张景旭, 王富国, 等. 基于谱分析的 30m 望远镜三镜支撑结构地震分析[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4):996-1003.  
SU Y Q, ZHANG J X, WANG F G, *et al.*. Seismic analysis of TMT M3 cell assembly based on spectral response[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):996-1003. (in Chinese)
- [4] 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(7):91-97.  
MENG X, QIAO Y F, HE F Y, *et al.*. Analyzing primary mirror deformation of photo-electronic theodolite using Zernike annular polynomials [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 91-97. (in Chinese)
- [5] 王孝坤, 郑立功. 中心遮拦光学元件检测中调整误差的精确去除[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(9):69-72.  
WANG X K, ZHENG L G. Accurate removal of misalignment errors from testing central obscured optics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9):69-72. (in Chinese)
- [6] 吴清文. 空间相机主镜的力学、温度场热性及轻量化研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 1997.  
WU Q W. *Research on the mechanical, thermal and light weight of the primary mirror of space camera* [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 1997. (in Chinese)
- [7] 胡海飞, 辛宏伟, 戚二辉, 等. 超大口径光学制造均匀力支撑布局优化[J]. 光学学报, 2014, 34(4):0422003.  
HU H F, XIN H W, QI E H, *et al.*. The layout optimization of uniform force support for super large diameter optical manufacturing[J]. *ACTA OPTICA SINICA*, 2014, 34(4):0422003. (in Chinese)
- [8] 葛东明, 邹元杰, 张志娟, 等. 基于全柔性卫星模型的控制闭环微振动建模与仿真[J]. 航天器工程, 2002, 21(5):58-63.  
GE D M, ZOU Y J, ZHANG ZH J, *et al.*. Modeling and simulation of closed loop micro vibration based on full flexible satellite model [J]. *Spacecraft Engineering*, 2002, 21(5): 58-63. (in Chinese)
- [9] ANGELI G Z, GREGORY B. Linear optical model for a large ground based telescope [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 726-736.
- [10] 李增刚. Nastran 快速入门与实例[M]. 北京:国防工业出版社 2007:77-79.  
LI Z G. *Nastran Quick Start and Examples* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 77-79. (in Chinese)
- [11] 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):312-323.  
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, *et al.*. Zernike polynomial fitting method and application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 312-323. (in Chinese)
- [12] MAHAJAN V N. Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils[J]. *J. Opt.*

- Soc. Am., 1981, 71(1):75.
- [13] 吴清文. 镜面面形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. Surface treatment method for surface equation of mirror surface error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6 (6): 56-60. (in Chinese)
- [14] 周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构性能分析[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 138-145.  
ZHOU CH, YANG H B, WU X X, *et al.*. Analysis of the structure and performance of large aperture ground-based telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (1): 138-145. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 范磊, 张景旭, 邵亮, 等. 基于液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8):2126-2131.  
FAN L, ZHANG J X, SHAO L, *et al.*. Axial support for large aperture primary mirror based on hydraulic Whiffle-tree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8):2126-2131. (in Chinese)
- [17] 张永昌. MSC. Nastran 有限元分析理论基础与应用[M]. 北京: 科学出版社.  
ZHANG Y CH. *MSC. Nastran Finite Element Analysis Theory Foundation and Application* [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

## 作者简介:



兰 斌(1987—),男,山西朔州人,博士研究生,2012年于山东大学获得学士学位,主要研究方向为光机系统集成分析与优化、地基望远镜动力学集成建模技术以及主动光学模式定标理论。E-mail:lanbin169320@126.com

## 导师简介:



杨洪波(1963—),男,黑龙江嫩江人,博士生导师,研究员,主要研究方向为光机电集成计算机辅助工程技术。Email: yanghb@sibet.ac.cn