

## Isight 环境下基于视轴抖动误差的镜头结构优化

杨丰福<sup>1,2</sup>, 田海英<sup>1</sup>, 颜昌翔<sup>1</sup>, 吴从均<sup>1</sup>, 母德强<sup>3</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 100049; 3. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 为了在机载振动环境下获得满足光学性能指标要求的偏振成像光谱仪镜头的最佳结构性能, 建立了基于视轴抖动误差的优化模型, 并在 Isight 集成优化环境下对该模型进行了求解。首先, 阐述了视轴抖动误差影响光学系统性能的原理并根据光学系统模型和指标需求设计了镜头的初始结构; 其次, 推导了视轴抖动误差的计算方法并建立了基于视轴抖动误差的优化模型; 最后, 在 Isight 环境下, 使用多岛遗传算法对优化模型进行了求解。结果表明: 在满足镜头视轴抖动误差的要求下, 镜筒质量降低了 17.4%, 镜头光学系统传函为 0.4(77 lp/mm), 满足设计指标要求。提出的优化方法引入镜头视轴抖动误差作为优化约束, 拓展了光机结构优化的内涵, 为同类结构的优化提供了新的思路。

**关键词:** 视轴抖动误差; 光机结构优化; 光学系统传递函数; 集成优化

**中图分类号:** TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0118005

## Optimization of the lens structure based on the line of sight jitter error in Isight environment

Yang Fengfu<sup>1,2</sup>, Tian Haiying<sup>1</sup>, Yan Changxiang<sup>1</sup>, Wu Congjun<sup>1</sup>, Mu Deqiang<sup>3</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 100049, China;  
3. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** To achieve the best structure performance of the airborne polarization imaging spectrometer lens which meets the optical performance, the optimization model based on the line of sight jitter error was established and calculated in Isight environment. Firstly, the principle that the line of sight jitter error affected the performance of the optical system was elaborated and the initial structure layout was designed according to the optical model and performance. Secondly, the calculation method of the line of sight jitter error was deduced, based on which the optimization model was established. Finally, the optimization model was calculated by applying the Multi-island Genetic Algorithm in Isight environment. The computational result of the integrated optimization model shows that the mass of the lens barrel is reduced by 17.4%, which satisfying the constraint of the optimization model and the value of the optical transfer function is 0.4 (77 lp/mm), which meeting the requirement. The line of

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-22

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0103603)

作者简介: 杨丰福(1989-), 男, 博士生, 主要从事光机结构优化设计方面的研究。Email: yangfengfu@126.com

导师简介: 田海英(1975-), 女, 研究员, 博士, 主要从事光机结构设计方面的研究。Email: tianhy@ciomp.ac.cn

母德强(1958-), 男, 研究员, 博士, 主要从事机械系统动力学分析方面的研究。Email: mudq@ccut.edu.cn

sight jitter error is applied during the procedure of the structure optimization presented, which expanded the connotation of optomechanic structure optimization and provided a new optimization idea for the same kind of structure.

Key words: line of sight jitter error; optomechanic structure optimization; optical transfer function; integrated optimization

## 0 引言

随着成像技术的不断发展,人们对镜头结构的要求越来越高,在满足成像技术所需结构功能的基础上,设计高刚度、低质量的镜头结构逐渐成为未来的发展趋势。偏振成像技术因其能够将常规成像技术观测所得的数据模型从三维扩展至七维,大大丰富了观测对象的数据信息,在军事和民用领域应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。早期的偏振成像多采用旋转偏振片和波片方式实现,而偏振光谱强度调制技术是通过在常规成像光谱仪镜头结构的基础上加装偏振光谱强度调制模块来实现的,具有集成度高、使用方便等优点,具有广阔的应用前景。为了方便调试及安装,设计的偏振成像光谱仪的偏振光谱强度调制模块安装在镜头前端。然而,这种布局设计造成了镜头重心前移,在机载振动环境下镜头视轴抖动误差(Line of Sight jitter error, LOS jitter error)增大,导致光谱仪镜头的光学系统传函(Modulation Transfer Function, MTF)超出了使用要求范围。为了使偏振成像光谱仪镜头的 MTF 在机载振动环境下满足光谱成像使用要求,在保持镜头结构足够刚度的同时应尽量轻量化,因此,需要对镜头结构进行优化设计。

关于光机结构的优化设计,已有很多学者进行了研究。其中,梁彪等<sup>[2]</sup>研究了二氧化碳探测仪镜筒的拓扑优化和参数优化问题,其优化模型分别是以刚度及结构频率最大为优化目标的多目标优化和以质量最小为优化目标、以重力变形及热载荷作用下变形为约束的单目标优化,优化后结构质量减少了 33%;王平等<sup>[3]</sup>对机载光电平台外框架结构进行了优化设计,优化模型的约束为结构的一阶固有频率,优化目标为框架质量,优化后结构质量减少了 1.4 kg,固有频率提高了 40 Hz;M.Riva 等<sup>[4]</sup>研究了重力载荷作用下空间光学仪器支撑结构的优化问题,优化过程选取镜面面型 RMS 为优化约束,取得了较好

的优化效果;Hagyong Kihm 等<sup>[5]</sup>研究了空间望远镜主镜组件柔性支撑的多目标优化问题,选取优化目标为面型 RMS 和质量 M,达到了预期的设计目标。但上述光机结构优化问题仅涉及单个光学元件本身的光学性能指标,未针对动载荷作用下考虑系统级光学性能指标视轴抖动误差的结构优化问题进行研究。目前针对视轴抖动误差对光学系统性能影响的研究主要有:谭碧涛等<sup>[6]</sup>建立了含视轴抖动的光电成像系统的全系统 MTF 模型,给出了特定成像分辨率下,成像系统对视轴抖动误差的需求;王婉婷等<sup>[7]</sup>分析了视轴抖动对成像质量的影响,并通过实验验证了仿真方法的正确性。

文中针对机载振动环境下偏振成像光谱仪镜头的光学系统视轴抖动误差增大的问题,提出了一种基于视轴抖动误差的优化方法。建立了以镜筒壁厚为设计变量、以镜头光学系统视轴抖动误差为优化约束、以镜头质量最小为优化目标的优化模型,并在 Isight 集成环境下进行了求解,得到了满足设计指标同时质量最轻的镜头结构。

## 1 机载偏振成像光谱仪镜头结构设计

### 1.1 视轴抖动误差引起的等效 MTF

在机载振动环境下,镜头结构的变形会引起光学元件产生刚体位移,造成离轴、离焦和倾斜运动等问题,这几种效应会使得光学系统的实际指向和理想指向存在角度误差,这种误差称为视轴误差,随时间变化的视轴误差称为视轴抖动误差。视轴误差可以在像空间或者物空间内表示,在物空间内可以表示为无限远处物体相对于光轴的角度误差  $\theta_{obj}$ ,在像空间内可以用图像在像平面上的位移  $\Delta_{image}$  来表示,如图 1 所示,两者之间的关系为<sup>[8]</sup>:

$$\theta_{obj} = \frac{\Delta_{image}}{f_{eff}} \quad (1)$$

式中: $f_{eff}$  为光学系统焦距。

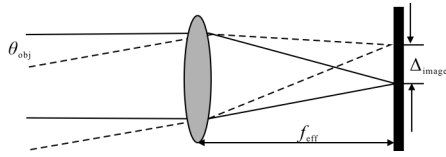


图 1 视轴抖动误差表示方法  
Fig.1 Expression of LOS jitter error

在机载振动环境下，镜头光学系统的视轴抖动表现为图像在像平面上的往复运动，使得图像的亮度变得模糊，从而增加了点扩散函数的尺寸，导致光学分辨率下降。根据点扩散函数可以计算出相应的 MTF，即考虑视轴抖动影响后的传递函数的计算公式为：

$$MTF_{system}(f_s) = MTF_{nominal} \times MTF_{jitter} \quad (2)$$

式中： $MTF_{system}(f_s)$ 为考虑视轴抖动误差的光学系统传函； $MTF_{nominal}$ 为光学系统设计传函； $MTF_{jitter}$ 为视轴抖动引起的系统传函。

根据视轴抖动的频率分布方式，将图像运动分为正弦图像运动和随机图像运动，引起的 MTF 的计算公式分别为<sup>[6]</sup>：

$$MTF(\xi) = J_0(2\pi\Delta_r) \quad (3)$$

$$MTF(\xi) = e^{-2\pi^2\Delta^2\xi} \quad (4)$$

其中： $J_0$ 为零阶贝塞尔函数； $\xi$ 为空间频率； $\Delta_r$ 为图像正弦运动的幅值； $\Delta$ 为视轴抖动引起的像移量相对于空间频率的归一化标准差。

### 1.2 光学系统设计及指标需求

偏振成像光谱仪主要指标需求如表 1 所示。根据指标需求，系统望远单元采用透射结构。由于该系统需求的视场角较小，在偏振光谱强度调制过程中能够保证光束在偏振光谱强度调制模块上的入射角小于  $5^\circ$ ，同时为了降低结构设计难度及加工成本，方便使用及维护，采用将偏振强度调制模块置于镜头前端的布局设计方案，如图 2 所示，相应的光学系统传函曲线如图 3 所示。

表 1 偏振成像光谱仪核心指标需求

Tab.1 Core index requirment of polarization imaging spectrometer

Index	Value
Wavelength range/ $\mu\text{m}$	0.4-1.0
Field of view/ $^\circ$	$\pm 3.75$
F number	$\leq 3.5$
MTF	$\geq 0.4@77 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$

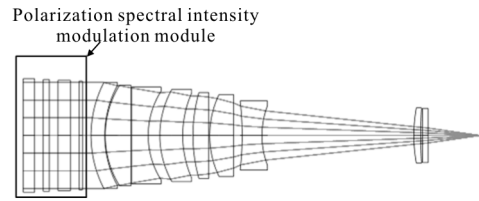


图 2 偏振成像光谱仪望远单元光学系统  
Fig.2 Polarization imaging spectrometer telescope optical system

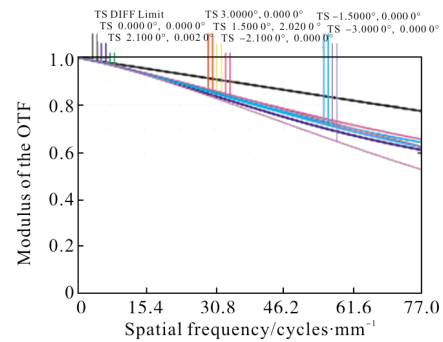


图 3 光学系统传函设计值

Fig.3 MTF value of optical system

### 1.3 镜头结构方案设计

为保证系统的宽温度使用范围及结构刚度需求，镜头结构选用与玻璃热膨胀系数接近的钛合金材料。为了减轻镜筒质量、降低镜筒结构加工工艺复杂程度和加工成本，将镜片根据半径大小划分为三组，相应的镜筒结构设计为不同半径的三段式外表不加筋的结构布局，如图 4 所示。

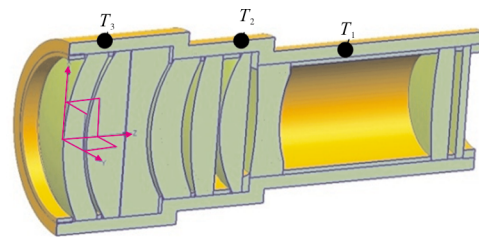


图 4 镜筒光机结构

Fig.4 Lens optomechanical structure

随机振动条件是结构设计的典型条件，因此文中主要研究随机振动条件下的镜头结构优化问题，确定镜筒不同部分、不同厚度  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的数值大小对镜头光轴抖动误差的影响。研究的偏振光谱仪为小型无人机机载设备，并且安装在减振平台上，其随机振动功率谱(Power Spectral Density, PSD)曲线

如图 5 所示。

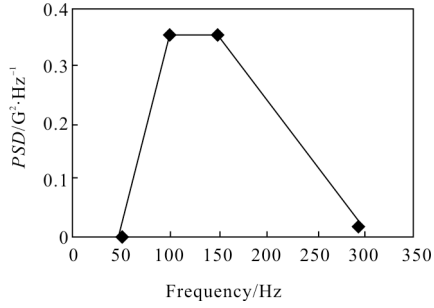


图 5 随机振动载荷功率谱

Fig.5 Random vibration loads PSD

## 2 基于视轴抖动误差的优化模型

### 2.1 视轴抖动误差计算

设 $(x_i, y_i, z_i)$ 和 $(x'_i, y'_i, z'_i)$ 分别为光学元件表面变形前和变形后节点的坐标,  $(T_x, T_y, T_z)$ 为光学元件表面畸变后的最佳拟合面沿各轴的平移距离,  $(R_x, R_y, R_z)$ 为光学元件表面畸变后的最佳拟合面绕各轴旋转角度,  $(dx_i, dy_i, dz_i)$ 为光学元件畸变表面上的节点相对原始节点的位移,  $(\tilde{d}x_i, \tilde{d}y_i, \tilde{d}z_i)$ 为光学元件表面畸变后的最佳拟合面上的节点相对于原始节点的位移, 与原始节点坐标及最佳拟合面的位移的关系式为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (x'_i - x_i) \\ \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i) \\ \sum_{i=1}^n (z'_i - z_i) \\ \sum_{i=1}^n y_i (x'_i - x_i) - x_i (y'_i - y_i) \\ \sum_{i=1}^n x_i (z'_i - z_i) - z_i (x'_i - x_i) \\ \sum_{i=1}^n z_i (y'_i - y_i) - y_i (z'_i - z_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n & 0 & 0 & 0 & \sum_{i=1}^n z_i & -\sum_{i=1}^n y_i \\ 0 & n & 0 & -\sum_{i=1}^n z_i & 0 & \sum_{i=1}^n x_i \\ 0 & 0 & n & \sum_{i=1}^n y_i & -\sum_{i=1}^n x_i & 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i & -\sum_{i=1}^n x_i & 0 & \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & -\sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \\ -\sum_{i=1}^n z_i & 0 & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i & -\sum_{i=1}^n (x_i^2 + z_i^2) & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ 0 & \sum_{i=1}^n z_i & -\sum_{i=1}^n y_i & -\sum_{i=1}^n (y_i^2 + z_i^2) & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

设光学系统中光学元件刚体位移矩阵为  $\mathbf{X}=[X_1, X_2 \cdots X_n]$ , 其中第  $i$  个光学元件表面的刚体位移为  $X_i=[T_x \ T_y \ T_z \ R_x \ R_y \ R_z]$ . 视轴误差导致的像移可以表示为光学元件刚体位移的函数  $f_x(\mathbf{X})$ 、 $f_y(\mathbf{Y})$ . 根据泰勒定理, 将该函数一阶展开并表示为矩阵形式<sup>[10]</sup>:

$$\Delta_{\text{image}} = \begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x(X_0)}{\partial X_1} & \frac{\partial f_x(X_0)}{\partial X_2} & \cdots & \frac{\partial f_x(X_0)}{\partial X_n} \\ \frac{\partial f_y(X_0)}{\partial X_1} & \frac{\partial f_y(X_0)}{\partial X_2} & \cdots & \frac{\partial f_y(X_0)}{\partial X_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \tilde{d}x_i = T_x + z_i R_y - y_i R_z \\ \tilde{d}y_i = T_y + x_i R_z - z_i R_x \\ \tilde{d}z_i = T_z + y_i R_x - x_i R_y \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} dx_i = x'_i - x_i \\ dy_i = y'_i - y_i \\ dz_i = z'_i - z_i \end{cases} \quad (6)$$

设光学元件表面节点共有  $n$  个, 对光学元件畸变表面上的节点相对原始节点的位移 $(dx_i, dy_i, dz_i)$ 和光学元件表面畸变后的最佳拟合面上的节点相对于原始节点的位移 $(\tilde{d}x_i, \tilde{d}y_i, \tilde{d}z_i)$ 求平方差  $E$ :

$$E = \sum_{i=1}^n \left[ (dx_i - \tilde{d}x_i)^2 + (dy_i - \tilde{d}y_i)^2 + (dz_i - \tilde{d}z_i)^2 \right] \quad (7)$$

求解光学元件表面畸变后的最佳拟合面的位移相当于求一组  $(T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z)$ , 使得平方差  $E$  的取极小值。根据极值条件有:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial T_x} = 0, & \frac{\partial E}{\partial T_y} = 0, & \frac{\partial E}{\partial T_z} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial R_x} = 0, & \frac{\partial E}{\partial R_y} = 0, & \frac{\partial E}{\partial R_z} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将公式(5)~(7)代入公式(8)即可求得光学元件表面畸变后的最佳拟合面的位移 (即光学元件刚体位移)的表达式, 其矩阵形式如公式(9):

式中： $\Delta_x, \Delta_y$  为像移在 X 方向和 Y 方向的分量； $X_0$  为光学元件表面设计时的初始位置。由于  $f_x(X), f_y(Y)$  很难获得解析表达式，通常用差商代替微商，并且在光学元件表面刚体位移  $X$  很小的情况下， $\frac{\partial f_x(X_0)}{\partial X_i}$  为常数。由这些常数构成的矩阵为光学系统灵敏度矩阵，通常在光学设计时由光学设计软件给出。

随机载荷作用下的光学系统视轴抖动误差为每个激励频率光学系统视轴误差的标准差，根据标准差计算公式可得：

$$\Delta_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{image\_fi}^2}{n}} \quad (11)$$

式中： $\Delta_{image\_fi}$  为每个频率点处光学系统视轴误差； $n$  为采样频率点个数。

## 2.2 优化建模

选取镜筒厚度为优化变量  $T_1, T_2, T_3$ ，以视轴抖动误差  $\Delta_{rms}$  为约束，以镜筒质量  $M$  最小为优化目标，建立优化模型：

$$\text{Min: } M = f(T_1, T_2, T_3) \quad (12)$$

边界条件：

$$0 \text{ mm} \leq \Delta_{rms} \leq 0.001 \text{ 625 mm}$$

$$4 \text{ mm} \leq T_1 \leq 8 \text{ mm}$$

$$2.5 \text{ mm} \leq T_2 \leq 4.5 \text{ mm}$$

$$1.5 \text{ mm} \leq T_3 \leq 3.5 \text{ mm}$$

## 3 Isight 环境下基于视轴抖动误差的集成优化

### 3.1 优化技术方案

根据上一部分建立的优化模型(公式(12))，将集成优化技术方案设计在软件 Isight 优化环境中来实现，主要包括三个部分：有限元计算、视轴抖动误差计算以及计算结果分析。其中，有限元计算采用通用有限元软件 Patran/Nastran 来实现，主要进行光学元件和机械结构有限元建模以及结构动力学计算；视轴抖动误差计算采用光机分析软件 Sigfit 来实现，主要负责光学和力学坐标系转换、光学元件表面刚体位移拟合以及视轴抖动误差计算等；Isight 主要负责计算结果分析部分：根据已有的数据判断当前计算结果是否为最优，若不是最优，则给出下一次计算所需的数据并启动新一轮迭代，整个技术方案如

图6 所示。

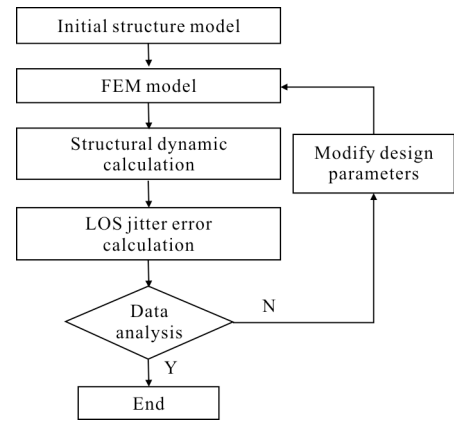


图 6 基于视轴抖动误差的集成优化技术路线

Fig.6 Integrated optimization technology roadmap based on LOS jitter

在整个过程中，为了减少计算时间同时提高结果精度，需要对光学元件有限元模型以及优化算法给予特别关注。

### 3.2 有限元建模

光学元件的有限元模型主要有单点模型(图7)和实体镜片模型(图8)，其主要特性如表2所示。

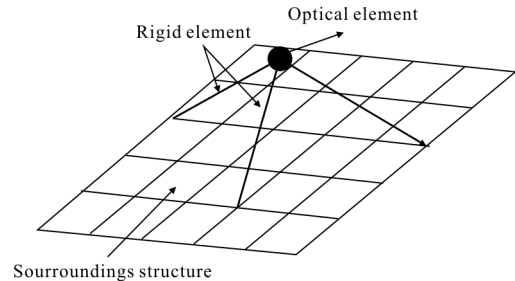
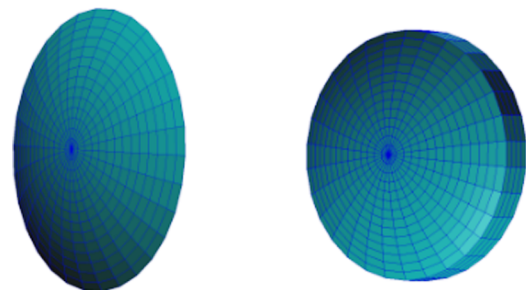


图 7 单点模型

Fig.7 Single-point model



(a) 二维单元模型

(b) 三维单元模型

(a) 2D-element model

(b) 3D-element model

图 8 镜片实体单元模型

Fig.8 Solid element model of the mirror

表 2 光学元件有限元建模类型优缺点分析

Tab.2 Analysis of the advantages and disadvantages of the finite element modeling of optical parts

FEM model	Advantages	Disadvantages
single-point model	Simplest modeling, least cost of resource and fastest calculation	Unable to simulate the elastic deformation and rotation of the mirror
2D model	Rough simulation of the mirror elastic deformation, less cost of resource and faster calculation	Poor precision of the simulated mirror elastic deformation
3D model	Can accurately simulate the elastic deformation of the optical element surface	More cost of computing resources and longer calculation time

为了减少计算时间并准确预测镜片表面变形,光学元件的有限元模型采用三维有限元模型和二维有限元模型相结合的建模方案,即:在光学元件的三维有限元模型表面建立一层结构厚度任意小的“虚拟”板单元,如图 9 所示。由于“虚拟”板单元的节点与光学元件三维有限元模型表面节点是重合的,因此“虚拟”板单元的节点位移信息完全包括光学元件的弹性变形信息。在视轴抖动误差计算过程只需使用“虚拟”板单元的节点位移信息即可,大大减少了计算时间同时计算精度不变。

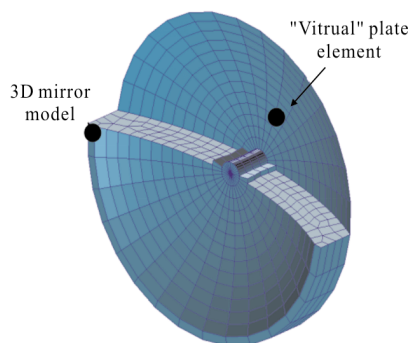


图 9 三维镜片模型与“虚拟”板单元

Fig.9 3D mirror model and "virtual" plate element

在进行镜头结构优化过程中,需要根据计算结果来修改镜筒厚度参数。修改厚度的主要方式主要有:(1)修改几何模型并自动生成有限元模型<sup>[11]</sup>;(2)移动有限元模型单元节点<sup>[12]</sup>;(3)修改有限元模型单元属性。综合考虑有限元建模复杂程度和消耗的计算资源、时间,选定第三种方式作为优化过程中使用

的技术方案。图 10 所示为镜筒的有限元二维简化模型。

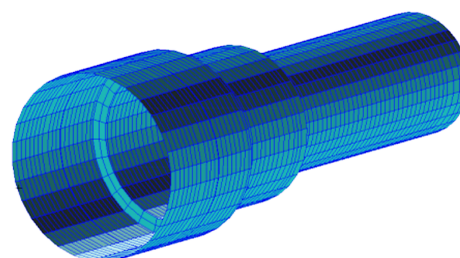


图 10 镜筒有限元二维简化模型

Fig.10 2D finite element simplified model of barrel

由于偏振光谱强度调制模块的弹性变形不是文中关注的重点,因此简化为质量点,与镜筒之间使用 rbe2 单元进行连接,镜筒光机结构系统的有限元模型如图 11 所示。

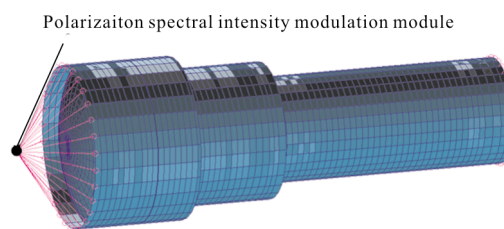


图 11 光机系统有限元模型

Fig.11 Optomechanical system finite element model

### 3.3 优化过程的数据分析

采用多岛遗传算法 (Multi-island Genetic Algorithm, MIGA)对计算过程中的数据进行分析判断。该算法只评价设计点,不计算函数梯度有较强的适应性,并且能求解全局最优解,避免了局部区域的搜索,特别适合较为复杂的优化问题的求解<sup>[13]</sup>。

镜筒结构参数集成优化的具体实施方案如图 12 所示,主要包括:数据预处理、有限元模型数据处理、视轴抖动误差数据处理、数据转化部分以及数据分析部分。其中,数据预处理部分主要负责将优化算法

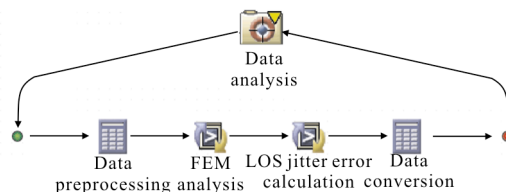


图 12 基于 Isight 集成优化的数据传递流程

Fig.12 Data transfer flowsheet based on the integrated optimization tool Isight



选出的镜筒厚度值进行圆整, 适合实际加工工艺要求; 有限元模型数据处理及视轴抖动误差部分分别负责模型结构动力学计算和视轴抖动误差计算; 数据转化部分主要是为了研究设计变量和优化约束及优化目标之间的关系而对数据进行转化。

### 3.4 优化结果及光学系统传函分析

优化前后, 镜头的结构参数如表 3 所示。图中数据显示镜筒结构厚度参数从根部到顶端依次增大, 呈现阶梯状分布, 契合了高刚度悬臂梁结构布局特征, 初步说明了优化结果的合理性。相比初始结构设计, 镜筒质量减少了 17.24%, 说明了优化的有效性。

表 3 优化结果(单位:mm)

Tab.3 Optimization results(Unit:mm)

Variable	Initial value	Optimal value
$T_1$	6	6.3
$T_2$	4.2	3.0
$T_3$	3.3	1.9
$\Delta_{rms}$	0.001 234	0.001 625
Mass/kg	0.29	0.24

优化过程中, 优化模型的设计变量与优化约束及优化目标的相关系数如图 13 所示。图中数值范围为[-1,1], 数值绝对值大小代表相关性, 绝对值越大, 相关性越强, 其中(0,1]为正相关, [-1,0)为负相关, 0 为不相关。由图中数据可知, 设计变量镜筒厚度  $T_1$  与视轴抖动误差量  $\Delta_{rms}$  为负相关, 且绝对值最大, 说明增大  $T_1$  能够有效降低视轴抖动误差, 从而满足优化约束; 设计变量镜筒厚度  $T_2$  与优化目标镜筒质量  $M$  为正相关, 且绝对值最大, 说明减小  $T_2$  能够有效降低镜筒质量, 从而达到质量最小; 设计变量镜筒厚度  $T_3$  与视轴抖动误差  $\Delta_{rms}$  正相关, 说明减小  $T_3$  能够降低视轴抖动误差, 与优化趋势相符。

优化过程、视轴抖动误差与镜筒质量之间呈负相关且中间没有局部极值, 如图 14 所示, 与优化结果中优化约束刚好为边界值的情况相吻合。为了研究镜筒结构布局特征与视轴抖动误差之间的关系, 选取镜筒中间段壁厚与镜筒根部壁厚之间的比值  $a_1(a_1=T_2/T_1)$  和镜筒顶端壁厚与镜筒中间段壁厚之

间的比值  $a_2(a_2=T_3/T_2)$  为自变量, 选取镜筒视轴抖动误差  $\Delta_{rms}$  为因变量进行绘图, 如图 15 所示。由图可知: 视轴抖动误差与  $a_1$  和  $a_2$  总体趋势为正相关, 即视轴抖动误差越小, 距离镜筒固定点远处的壁厚越小。

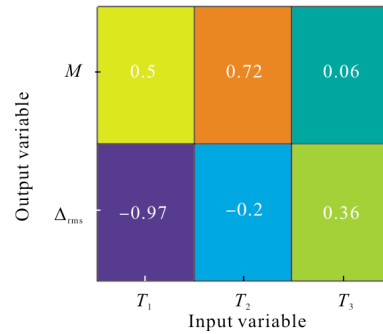


图 13 设计变量与输出变量的相关性

Fig.13 Correlation between design variables and output variables

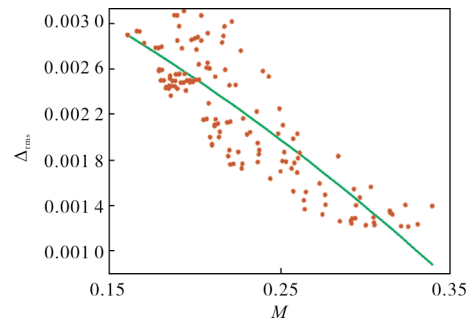


图 14 视轴抖动误差  $\Delta_{rms}$  与镜筒质量  $M$  之间的关系

Fig.14 Relationship between LOS jitter error  $\Delta_{rms}$  and barrel mass  $M$

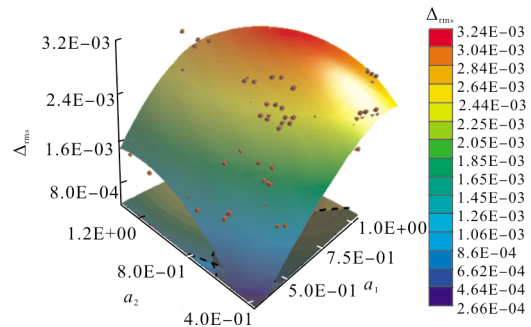


图 15 视轴抖动误差  $\Delta_{rms}$  与  $a_1$  和  $a_2$  之间的关系

Fig.15 Relationship between LOS error  $\Delta_{rms}$  and  $a_1, a_2$

对优化后的镜头进行了光学性能分析, 如图 16 所示, 在考虑视轴抖动误差影响的情况下, 系统传函为 0.4(77 lp/mm), 达到了设计需求指标。

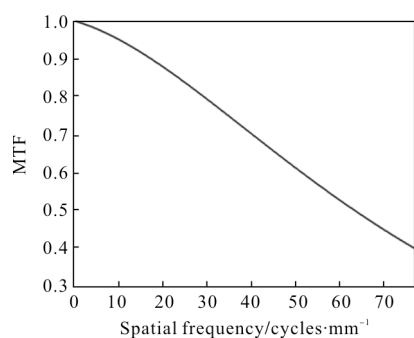


图 16 考虑视轴抖动误差的光学系统传递函数曲线

Fig.16 MTF of optical system considering LOS jitter error

## 4 结论

为了使机载偏振光谱仪镜头在满足光学性能指标的同时获得最佳的结构性能,文中提出了一种基于视轴抖动误差的集成优化方法,建立了以视轴抖动误差为优化约束的优化模型,系统阐述了 Isight 环境下基于视轴抖动误差的优化模型求解方法并进行了计算。计算结果表明:镜头质量减少了 17.4%,随机振动载荷作用下镜头光学系统传函为 0.4(77 lp/mm),达到了设计指标要求,说明了基于视轴抖动误差集成优化方法的可行性以及以视轴抖动误差为优化约束的优化模型的正确性。提出的集成优化方法具有较强的适应性,对于其他光学系统结构的优化具有普遍的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Zhao Jinsong. Developments of polarization imaging technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35 (12): 743-772. (in Chinese)
- [2] Liang Biao, Liu Wei, Chen Cheng. Multi-objective optimization design of lens barrel for the carbon dioxide detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1858-1866.
- [3] Wang Ping, Liu Jiayan, Li Yonggang, et al. Optimization design of outer frame structure for airborne electro-optical platform [J]. *Journal of Electronic Measurement And Instrumentation*, 2015, 29(1): 84-91. (in Chinese)
- [4] Riva M, Moschetti M. Intergrated optomechanical structural optimization through coupliing of sensitivity matrixes[C]// SPIE, 2016, 10012: 100120D.
- [5] Hagyong Kihm. Design optimization of a 1 -m lightweight mirror for a space telescope [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091806.
- [6] Tan Bitao, Chen Hongbin, Wang Qunshu. Jitter of the electro-optical system based on image-resolution [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 00411001. (in Chinese)
- [7] Wang Wanting, Guo Jin, Jiang Zhenhua, et al. Study of image quality degraded by los jitter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4): 0409001. (in Chinese)
- [8] Keith B Doyle, Victor L Genberg, Gregory J Michels. *Integrated Optomechanical Analysis* [M]. USA: SPIE Press, 2002.
- [9] Zhang Ying, Ding Zhenmin, Zhao Huijie, et al. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural-thermal integrated analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (10): 2764 -2767. (in Chinese)
- [10] Gu Zhiyuan, Yan Changxiang, Li Xiaobing, et al. Application of modified sensitivity matrix method in alignment of off-axis telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23 (9): 2595 -2604. (in Chinese)
- [11] Yuan Jian, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Integrated optimization design of truss-supporting structure for space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3661-3666. (in Chinese)
- [12] Bao Qihong, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Ultra-lightweight design of  $\phi 600$  mm circular primary mirror supported in centre[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45 (9): 0912007. (in Chinese)
- [13] 姜欣,方立桥,李明,等. Isight 参数优化理论与实例详解 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2012.