

文章编号 1004-924X(2018)11-2675-09

## 机载摆扫式光谱仪高转速三面摆镜设计与优化

李 颀<sup>1,2</sup>, 刘 伟<sup>1\*</sup>, 谭亚雄<sup>3,4</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>, 颜昌翔<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 100049;

3. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854;

4. 宇航智能控制技术国防科技重点实验室, 北京 100854)

**摘要:**为满足机载摆扫式光谱仪在 25 Hz 扫描频率下工作的要求, 设计了具有三面反射镜的摆镜结构。首先, 计算镜面反射区域面积与旋转轴偏离量的关系, 通过比较摆镜布置不同数目反射镜时的性能, 设计了围绕旋转轴布置三面反射镜的摆镜结构形式, 通过 600 r/min 的转速即可完成每分钟 1 800 次的高频摆扫; 同时采用匀速摆扫的运动方式, 降低了摆镜的控制难度, 提高了系统的稳定性。然后, 采用拓扑优化、集成优化等方法对摆镜结构进行了优化, 摆镜最终质量为 5.28 kg, 轻量化率达到 58%。最后, 通过有限元仿真计算得到: 摆镜在机载平台 600 r/min 转速离心力与 1 g 重力的作用下, 面型精度 RMS 值优于  $\lambda/20$ , 基频达到 1 199 Hz, 具有较高的力学稳定性, 满足机载摆扫式光谱仪的高扫描频率要求。

**关键词:**机载摆扫式光谱仪; 高转速; 匀速摆扫; 三面反射镜

中图分类号: TH703; TH744.1 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182611.2675

## Design and optimization of high-speed swing mirror with three reflectors on airborne whiskbroom scanning spectrometer

LI Yi<sup>1,2</sup>, LIU Wei<sup>1\*</sup>, TAN Ya-xiong<sup>3,4</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>1</sup>, YAN Chang-xiang<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 100049, China;

3. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China;

4. National Key Laboratory on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100854, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuwei@ciomp.ac.cn

**Abstract:** Aiming at fulfilling the requirement of 25 Hz high scanning frequency of the airborne whiskbroom scanning spectrometer, a swing mirror with three reflectors is designed. Firstly, by revealing the relationship between the reflection area and the deviation of the rotation axis and comparing performance of several swing mirrors with the different numbers of reflectors. The arrangement of three reflectors around the rotation axis of swing mirror was adopted. Thus rotating at a speed of 600 r/min the mirror was able to achieve 1 800 scans within a single minute. At the same

收稿日期: 2018-02-09; 修订日期: 2018-04-16.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2016YFF0103603)

time, the swing mirror used uniform rotation to reduce the difficulty in controlling and improve the stability of the sweep-scanning system. Through topology optimization and integrated optimization, the weight of the swing mirror was reduced to 5.28 kg and the lightweight ratio was 58%. Finally, calculated by the finite element simulation, the RMS of the reflector was better than  $\lambda/20$  in 1 g gravity and centrifugal force at 600 r/min rotate speed environment and the fundamental frequency is 1 199 Hz. This verifies that the swing mirror is of high mechanical stability. It can satisfy the higher scanning frequency requirement of airborne whiskbroom scanning spectrometer.

**Key words:** airborne whiskbroom scanning spectrometer; high rotational speed; uniform speed sweep; swing mirror with three reflectors

## 1 引言

高光谱遥感作为当前遥感的前沿技术是 20 世纪 80 年代遥感技术发展的主要成就之一, 机载光谱仪相比于空间光谱仪, 具有成本低、使用方便、机动性能好等优点, 可广泛用于地质勘查、海洋研究、农业生产等诸多领域<sup>[1-3]</sup>。目前, 国外的机载光谱仪已经得到成熟应用, 如美国的 AVIRIS, 澳大利亚的 HyMap, 加拿大的 CASI、SASI、TABI 等<sup>[4]</sup>, 国内的上海技术物理研究所、长春光机所等都进行了相关领域的研究<sup>[5-6]</sup>。

光谱仪的扫描方式主要有推扫式和摆扫式两种。推扫式成像结构简单, 但视场受其像面大小限制, 而且对相机的飞行速度、高度要求严格, 常用于空间平台; 摆扫式成像的突出优点是其成像视场不受像面大小限制, 随摆镜的摆扫完成成像, 可以大幅降低成本。常用的摆扫模式主要分为转折镜摆扫、望远镜系统摆扫和整机摆扫<sup>[7]</sup>。其中, 望远镜系统摆扫和整机摆扫因运动部件体积大、质量大等因素, 难以实现高速摆扫运动。转折镜摆扫质量轻、结构简单, 适合用于高转速摆扫运动。但是, 转折镜摆扫中摆镜结构相对于旋转轴不对称, 对高转速下扫描机构的动平衡校正有较高的要求<sup>[8-9]</sup>; 另外, 常用的摆镜运动方式分为单程往复摆扫和双程往复摆扫, 这两种摆扫运动在扫描周期内需要进行频繁的变速运动, 在高速扫描时需达到极高的角加速度, 提高了对控制系统的要求, 并容易对结构造成冲击。

为满足某机载摆扫式光谱仪对高扫描频率的要求, 摆扫机构采用转折镜摆扫模式, 并针对单面镜相对于旋转轴不对称的问题, 设计了围绕旋转轴对称布置三面反射镜的结构形式。该结构形式

采用匀速转动的运动形式完成扫描, 通过布置多面反射镜的方式提高了匀速转动过程中角度的利用率, 同时降低了高转速下的控制难度; 使用拓扑优化、集成优化等技术, 大大减轻了摆镜质量, 提高了系统稳定性。最后, 对摆扫机构进行静动力学仿真, 验证了摆镜在高转速和重力工况下的各项性能均能满足工作要求。

## 2 摆镜初始结构设计

机载摆扫式光谱仪通过摆镜垂直飞行方向扫描与飞行推扫相结合获得二维图像, 为满足光谱仪对地面的扫描略有重叠又不可遗漏, 摆镜的扫描次数必须达到每分钟 1 500 次以上, 且其质量需小于 6 kg, 面型 RMS 值在高速旋转的离心力和重力作用下需优于  $\lambda/20$ 。现有的摆镜结构和摆扫方式只适用于较低频率的扫描, 需要设计能够适应高转速和重力环境的摆镜初始结构, 以满足光谱仪对摆镜高扫描频率的要求。

### 2.1 材料选择

本机载摆扫式光谱仪使用环境温度变化较大 ( $-30\sim 50^{\circ}\text{C}$ ), 光学件需选取与结构件相同的材料以避免热应力影响光学系统性能。典型结构件的材料性能对比如表 1 所示。综合考虑光学元件的面形精度、比刚度、热导率以及作为结构件的机械性能, 机载光谱仪的光学系统与结构件均考虑选用 7075 铝合金材料。

将铝合金材料作为反射镜的主要材料, 可以利用现有的机械加工工艺, 如车、铣、磨等, 对反射镜的基体进行快速加工, 使得铝合金材料易于成型的优点得到充分地发挥; 再采用精密金刚石切削工艺, 对反射镜的镜面进行加工, 获得满足宽波段光学系统成像要求的光滑平面<sup>[10]</sup>。选用

7075 铝合金材料能极大提高光机系统的力热环境适应能力,特别适用于温度变化范围较大的环

境,能在没有任何保护措施的条件下适应各种恶劣的自然条件。

表 1 反射镜材料属性

Tab.1 Properties of reflector materials

材料名称	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	弹性模量 E/GPa	比刚度 $(E/\rho) / (10^9 N \cdot mm/g)$	热导率 K $/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C)$	线膨胀系数 $\alpha / (10^{-6} \cdot ^\circ C^{-1})$
超硬铝合金(7075)	2.8	71	2.54	142	23.6
钢(4J32)	8.1	141	1.74	13.9	0.3~1.0
钢(45)	7.81	200	2.56	48.1	11.59
钛合金(TC4)	4.44	109	2.45	7.4	9.1

2.2 摆镜方案与镜面支撑方式确定

根据光学设计结果,并考虑到每分钟扫描次数大于 1 500 次的要求,摆镜采用旋转轴水平、反射面与旋转轴成 30° 夹角的方式布置于望远镜出瞳位置处。目前,已有的转折镜摆扫模式中,摆镜的旋转轴通常放置于望远镜出射平行光光瞳的正中心处,此时的反射镜面积最小,摆镜镜体较小,结构简单易于加工;但是摆镜关于旋转轴结构不对称,在高转速的工况下对摆镜静动平衡校正要求极高,且采用变速往复式摆扫过程中,大范围的速度变化对控制系统要求极高。针对上述问题,摆镜结构采用围绕旋转轴布置多面反射镜的形式,通过匀速转动即可完成扫描,匀速旋转运动波形如图 1 所示。

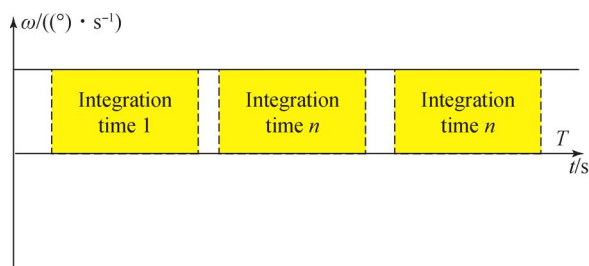


图 1 匀速旋转典型扫描运动速度波形

Fig.1 Waveform of uniform rotation scanning speed

一般情况下,镜面在加工过程中光轴垂直,而在装调过程中光轴水平,由于轻量化设计的要求,镜体结构刚度较弱,面型精度受重力变化的影响较大,因此需设计镜面支撑结构以补偿重力变化对于面型的影响<sup>[11]</sup>。高转速摆镜受到重力与高转速离心力共同作用,镜面上各个位置所受力的大小和方向并不相同,需通过后续的拓扑优化寻

求设计空间内的最佳结构形式和传力路径,以拓扑结构为依据结合切削加工的方式,对镜面的支撑结构进行设计。

2.3 反射面数量确定

当摆镜旋转轴位于望远镜出瞳位置的中心时,摆镜的尺寸只由望远镜出瞳的大小决定<sup>[12]</sup>,但围绕旋转轴布置多面反射镜时,旋转轴与出瞳位置的设计偏离较大,反射区域会随旋转轴与出瞳位置偏离量的变大而增大。为确定反射区域尺寸与偏离量  $d$  的关系,通过光线追迹解析计算反射区域大小。

如图 2 所示,在摆镜反射面的初始位置建立镜面坐标系  $O-X_0Y_0Z_0$ ,  $Y_0$  轴沿镜面方向向下,  $Z_0$  轴指向镜面;由摆镜出射的光线轮廓面可以看作是一柱面,在柱面上建立柱面坐标系  $O-X_1Y_1Z_1$ ,  $Y_1$  轴沿柱面向下,  $Z_1$  轴为出射光反向,其中光瞳直径为  $D$ ,旋转轴与出射平行光光瞳中心的距离为  $d$ ,反射面、光线柱面与旋转轴的夹角分别为  $\alpha, \beta$ 。

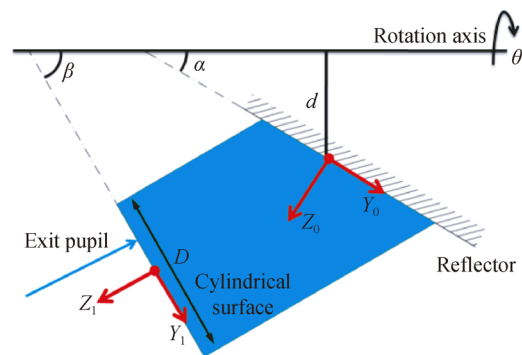


图 2 坐标系转换示意图

Fig.2 Schematic of coordinate transformation

首先确定初始状态下柱面方程在绝对坐标系  $O-X_0Y_0Z_0$  下的数学描述。在柱面坐标系  $O-X_1Y_1Z_1$  下,柱面方程为:

$$x_1^2 + y_1^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2. \quad (1)$$

该柱面在绝对坐标系中的曲面方程,可以认为是由坐标系旋转  $-(\beta-\alpha)$  得到,即有:

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{R}_x[-(\beta-\alpha)]\mathbf{P}_1, \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{P}_1$  为坐标系  $O-X_1Y_1Z_1$  下曲线上一点的坐标  $[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ ,  $\mathbf{P}_0$  为该点在坐标系  $O-X_0Y_0Z_0$  下的坐标  $[x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ ,  $\mathbf{R}_x[-(\beta-\alpha)]$  为绕  $x$  轴旋转  $(\alpha-\beta)$  的旋转矩阵:

$$\mathbf{R}_x[-(\beta-\alpha)] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta-\alpha) & -\sin(\beta-\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\beta-\alpha) & \cos(\beta-\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(2)得:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \\ y_1 = z_0 \sin(\beta-\alpha) + y_0 \cos(\beta-\alpha) \\ z_1 = z_0 \cos(\beta-\alpha) - y_0 \sin(\beta-\alpha) \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)得到绝对坐标系下的曲线

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{2d \sin \theta + 2x \cos \theta + y \sin \theta}{2 \cos^2 \theta + 2 \sin^2 \theta} \right]^2 - \frac{d^2}{4} + [(2\sqrt{3}x \sin \theta - \sqrt{3}y \cos \theta + 2\sqrt{3}d \cos^2 \theta + \\ & 2\sqrt{3}d \sin^2 \theta + \sqrt{3}y \cos^2 \theta + \sqrt{3}y \sin^2 \theta - 2\sqrt{3}d \cos \theta) - \sqrt{3}(3y \cos^2 \theta - 2d \sin^2 \theta + 3y \sin^2 \theta + 2d \cos \theta + \\ & y \cos \theta - 2x \sin \theta - 2d \cos^2 \theta)]^2 / (8 \cos^2 \theta + 8 \sin^2 \theta)^2 - \left[ \frac{133}{2} \right]^2 = 0 \quad (-20^\circ \leq \theta \leq 20^\circ). \end{aligned} \quad (8)$$

公式(8)为反射区域与旋转轴偏离量  $d$  的关系。由公式(8)可知,在扫描过程中旋转轴与出射平行光瞳中心的距离  $d$  越大,反射区域面积就越大,摆镜体积、质量也随反射区域面积的增大而增大。因为摆镜旋转轴上需要提供安装位置,当布置两面与三面反射镜时,偏离量变化不大;而当布置四面反射镜时,偏离量大幅增加,反射区域面积随之扩大,三面镜与四面镜的反射区域轮廓如图 3 所示,三面镜与四面镜的结构布局如图 4 所示。

在扫描次数一定的情况下,反射镜数量越多,所需的转速就越低,因此当面数增加至四面时,摆镜的质量与体积会大幅度上升。考虑到摆镜质量、所占空间等限制因素,反射面数量确定为 3,设计转速为 600 r/min,扫描速率为 1 800 次/分钟。

方程:

$$x_0^2 + [z_0 \sin(\beta-\alpha) + y_0 \cos(\beta-\alpha)]^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2. \quad (5)$$

为简化问题,将摆镜视为固定,入射光线绕旋转轴旋转  $\theta$  角得到:

$$\mathbf{P}'_0 = \mathbf{R}_p(\theta)(\mathbf{P}_0 - \mathbf{p}) + \mathbf{p}, \quad (6)$$

$$\mathbf{R}_p(\theta) =$$

$$\begin{bmatrix} u^2 t + \cos \theta & uv t - w \sin \theta & uw t + v \sin \theta & 0 \\ uv t + u \sin \theta & v^2 t + \cos \theta & vw t - u \sin \theta & 0 \\ uw t - v \sin \theta & vw t + u \sin \theta & w^2 t + \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{P}_0$  为绕轴旋转前的坐标矩阵  $[x_0 \ y_0 \ z_0 \ 1]^T$ ,  $\mathbf{P}'_0$  为旋转后的坐标矩阵  $[x'_0 \ y'_0 \ z'_0 \ 1]^T$ ,  $\mathbf{R}_p(\theta)$  为曲线绕旋转轴旋转  $\theta$  角的旋转矩阵;  $\mathbf{p}$  为旋转轴上一点,坐标为  $[0 \ -d \sin \alpha \ -d \cos \alpha \ 1]^T$ ,  $t = (1 - \cos \theta)$ ;  $[u \ v \ w \ 1]^T$  为旋转轴的归一化方向向量,其中  $u=0$ ,  $v=-\sin \alpha$ ,  $w=\cos \alpha$ 。

将已知条件:  $D=133 \text{ mm}$ ,  $\alpha=30^\circ$ ,  $\beta=60^\circ$ ,  $z=0$ ,代入式(5)中可得在成像范围内的转角下,反射面轮廓曲线为:

使用实体填满镜面内部除安装面上的所有空间作为初始结构,其性能参数如表 2 所示。

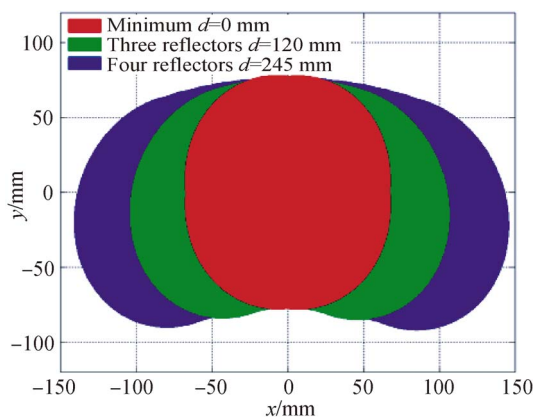


图 3 旋转轴不同偏离量下的反射区域示意图

Fig. 3 Reflection area in different deviations of rotation axis

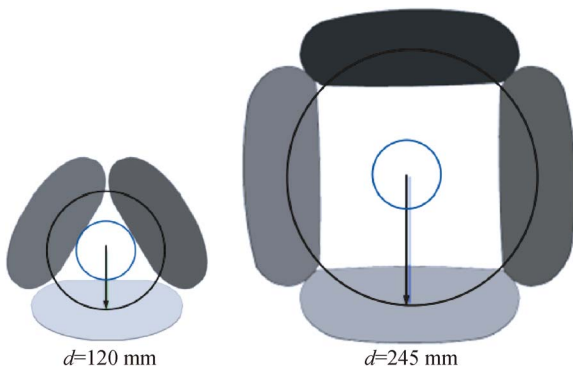


图 4 摆镜结构布局示意图

Fig. 4 Structural layout of swing mirrors

当摆镜为三面镜时,其所需的转速相比于两面镜可下降三分之一,扫描角度利用率也随之提高 1.5 倍,系统更为稳定,相比于四面镜体积减少近 3/4。由表 2 可知,初始结构在重力与高转速工况下的面型 RMS 值为 2.15 nm,远高于要求的  $\lambda/20$ ,而初始结构质量为 12.50 kg,尚未满足要求的 6 kg,有较大的质量冗余,需要对摆镜结构进行轻量化设计。

表 2 摆镜初始结构性能参数

Tab. 2 Initial structural parameters of swing mirror

	m/kg	RMS/nm
要求	6	31.64
主镜	12.50	2.146

### 3 摆镜结构优化设计

由于摆镜在高转速工况下工作,而摆镜与转台装配时有一定的装配误差而造成摆镜质心偏离旋转中心。当误差一定的情况下,质量越低,系统稳定性越高。所以在保证面型与结构刚度的同时,尽量降低摆镜质量,才能提高机载光谱仪的性能。

#### 3.1 摆镜主体结构拓扑优化

拓扑优化的作用是在设计空间内寻求结构刚度的最佳分布形式或结构的最佳传力路径,以优化结构的某些性能或减轻结构的质量。在初始设计阶段,拓扑优化能显著改善结构的性能和减轻结构的质量。首先建立三面镜初始结构的有限元模型,将安装部分与镜面部分定义为非设计区域,其余部分为设计区域,采用变密度法进行优化设计。

对于边缘支撑的圆形反射镜,Roberts 等人研究了其径厚比与自重变形的关系<sup>[13]</sup>,并通过经验公式定量给出镜体厚度与材料的比刚度、支撑及轻量化形式等因素的关系。而文中镜面形状为椭圆形,引起面型变化的原因除自重变形外,还有 600 r/min 转速下的离心力,该公式并不适用于计算椭圆镜不同工况下的镜体厚度。依据本反射镜的尺寸特点和受力大小初步确定反射镜厚度为 15 mm,待反射镜轻量化结构形式确定后再利用有限元分析方法对镜体厚度进行优化。

图 5(a)为摆扫镜拓扑优化模型,黑色区域为镜面与被支撑部分,属于非设计区域,灰色部分为设计区域。整个优化过程在 1 g 垂直旋转轴方向的重力与 600 r/min 转速离心力的工况下,以质量最小化为目标,镜面上各节点位移小于  $0.3 \mu\text{m}$  为约束条件,优化变量为设计区域各单元的密度,经过 52 次迭代,拓扑优化结果如图 5(b)所示。

对于单个镜面而言,反射镜的支撑主要有背部多点支撑、周边支撑、侧面支撑和中心支撑 4 种形式<sup>[12]</sup>。由拓扑优化结果可知,在重力与离心力环境下,镜面支撑结构采用背部多点支撑的方式较为合理。相比于其他支撑形式,背部多点支撑容易获得更高的面形精度,但设计难度较大,因为一方面支撑结构复杂,另一方面为解决反射镜过定位安装、热环境适应性问题通常需要引入复杂的柔性铰链系统。不过,文中摆镜采用了与结构件相同并易于加工的铝合金材料,并且支撑结构与镜面为一体,无需考虑过定位与热应力等问题,极大程度上降低了设计上的难度。

以拓扑优化结果为参考,考虑到 7075 铝合金材料结构致密等优势以及后续采用切削加工的方式,将摆镜支撑位置由支撑点改为加强筋,摆镜的轻量化设计结果如图 5(c)所示。对拓扑优化后的摆镜结构进行分析:在 1 g 侧向重力与 600 r/min 转速离心力工况下的面型拟合 RMS 值为 28.68 nm,优于设计要求,但质量为 6.28 kg,未满足设计要求。

因为在上述拓扑优化过程中采用了变密度法,设计区域单元密度分布在  $[0, 1]$  内,与实际结构有所差异,镜面厚度以及筋的尺寸、位置等关键尺寸选择并不严谨,仍留有一定的优化空间,因此需要进一步优化摆镜的轻量化模型以降低摆镜的质量。

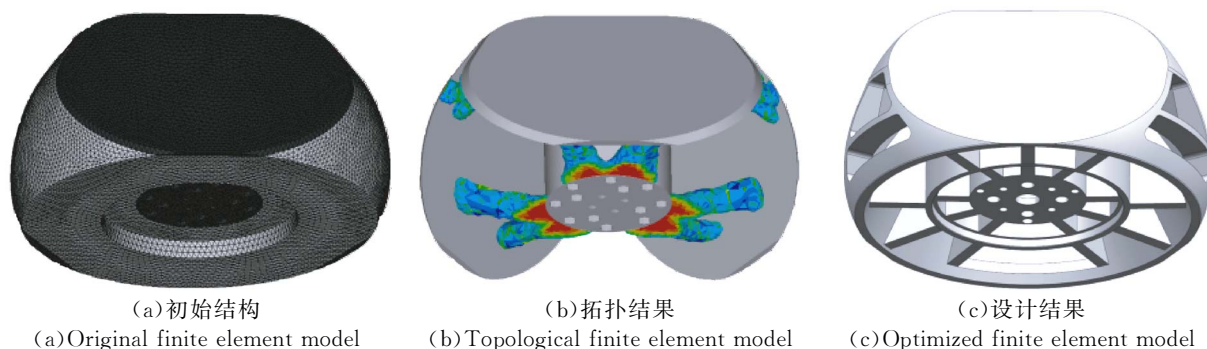


图 5 摆镜结构的拓扑优化过程示意图

Fig. 5 Schematic of topology optimization process of swing mirror

### 3.2 摆镜关键位置集成优化

以摆镜在工况下满足面型要求为前提进一步降低质量,对镜面厚度与支撑部分的关键尺寸进行了优化。在集成优化的过程中,直接将镜面厚度、加强筋的位置与厚度作为优化变量,使摆镜结构在满足设计要求的情况下获得最好的支撑效果。

由于摆镜的优化变量较多,优化约束为镜面的面型精度,采用 Isight 软件中的 Optimization 模块将有限元软件与面型拟合软件相结合,选用多岛遗传算法(Multi-island Genetic Algorithm, MIGA)完成优化<sup>[14]</sup>。

将离心力与侧向重力工况下的质量最小化作为优化目标,以工况下的面形 RMS 值作为约束条件。优化时为便于更改模型,建模时将镜面部分与加强筋简化为 2D 壳单元,去除距筋较近的孔以避免影响网格质量。集成优化示意图如图 6 所示,因为摆镜关于旋转轴  $120^\circ$  对称,将三面镜面的厚度均设为  $t_m$ ,筋分为如图 6 所示的 2 组,厚度分别设为  $t_1, t_2$ ,两筋夹角设为  $\theta$ 。优化问题的数学描述为:

$$\begin{cases} \min \text{mass} = f(t_m, t_1, t_2, \theta) \\ \text{s. t. RMS} \leq 31.64 \\ 4 \leq t_1 \leq 12, 4 \leq t_2 \leq 12 \\ 0 \leq t_m \leq 20, 10 \leq \theta \leq 35 \end{cases}, \quad (9)$$

其中 RMS 表示反射镜在离心力与侧向重力工况下的面形 RMS 值。优化结果见表 3,由表 3 可知,镜面厚度以及两组筋的厚度均有较大幅度降低,质量下降超过 1 kg,在满足面型要求的同时

降低了质量,达到了轻量化设计的目的。由此可知:在结构轻量化设计的过程中,对关键承力结构的尺寸与位置优化是十分必要的。

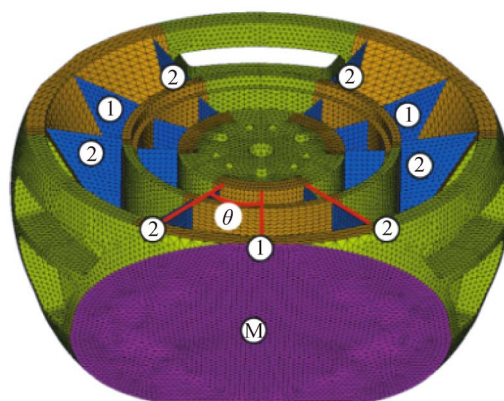


图 6 集成优化变量示意图

Fig. 6 Schematic of integrated design variables

表 3 设计变量和优化结果

Tab. 3 Design variables and optimization results

Variable	Domain	Original	Optimized
$t_m/\text{mm}$	$[5, 20]$	10	7
$t_1/\text{mm}$	$[4, 12]$	8	4
$t_2/\text{mm}$	$[4, 12]$	8	5
$\theta/^\circ$	$[20, 35]$	30	32
$m/\text{kg}$	—	6.28	5.24
RMS/nm	—	28.679	30.104

## 4 摆镜组件分析

### 4.1 摆镜支撑结构

摆镜右端为安装面,螺接于转台之上,旋转轴水平放置,由于摆镜质心与转台安装面的距离较大,镜子在垂直旋转轴方向的重力作用下产生力矩,会对转台产生不良影响,降低了系统的稳定性,

因此在摆镜左端设计了柔性结构进行辅助支撑,既避免了因过定位产生的装配应力,又降低了力矩对转台的影响。整个摆扫机构的结构如图 7 所示。

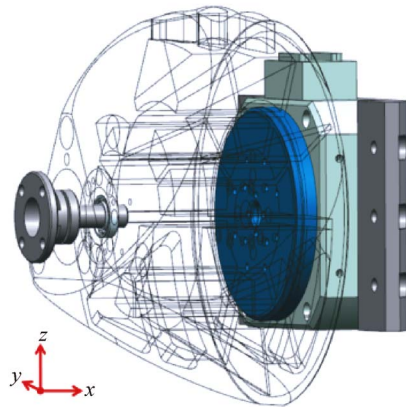


图 7 柔性支撑结构

Fig. 7 Structure of flexible support

### 4.2 静力学分析

静力学分析意在检验摆镜镜面处于工作位置时是否具有足够高的刚度,以保证摆镜在重力与离心力载荷作用下的位置与面型精度满足使用要求。分别计算摆镜在沿  $z$  轴负方向成  $\pm 20^\circ$  夹角区间内的重力与 600 r/min 转速离心力的合力工况下以及  $40^\circ\text{C}$  均匀温升状态下的位置变化和镜面面型。在分析  $40^\circ\text{C}$  温升状态时,由于铝合金材料各向同性<sup>[15]</sup>,因此可根据热膨胀公式  $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$  ( $l_0$  为安装孔与坐标原点的距离,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $\Delta T$  为温度变化量,  $\Delta l$  为热变形量) 计算各个安装位置热变形后的偏移量并在有限元模型

中进行设置,以等效于实际工作状态下,摆镜组件安装于热膨胀系数相同的结构件上。仿真结果见表 4,可以看到摆镜在工况下满足设计要求,且面型精度几乎不受温度影响,实现了良好的无热化结构。

表 4 镜面坐标系下反射镜面形精度分析结果

Tab. 4 Analysis results of mirror surface precision in mirror coordinate system

工况	PV/nm	RMS/nm	$\Delta/\mu\text{m}$		$\theta/(\text{''})$	
			x	y	x	y
要求	105	31.64	$\pm 50$	$\pm 50$	$\pm 20$	$\pm 20$
$g_{-20}$	99.0	30.4	-0.0	-0.1	0.6	-0.1
$g_0$	100.1	30.1	-0.1	0.1	0.5	-0.1
$g_{20}$	101.2	30.4	-0.1	0	0.5	-0.1
$t_{40^\circ\text{C}}$	0.16	0.02	-29.7	0.11	-0.02	0.01

### 4.3 动力学分析

光谱仪在工作过程中,摆镜会受到来自机载平台的动力载荷,在结构设计阶段进行模态分析是考核摆镜动态刚度能否满足设计要求的有效方法。图 8 为摆镜前三阶模态的振型图,组件的前三阶频率分别为 1 199, 1 259 和 1 296 Hz,远高于整机频率与机载平台的频率,说明摆镜的动态刚度较好,在工作过程中不发生共振,满足设计要求。

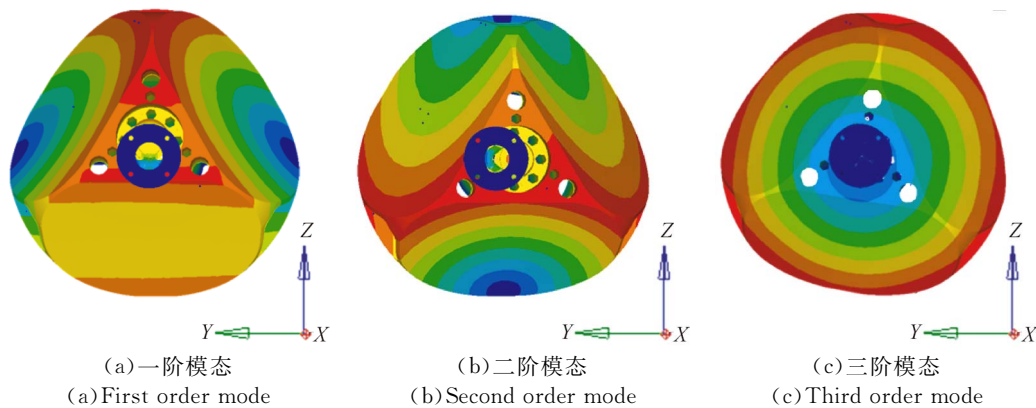


图 8 摆镜前三阶振型图

Fig. 8 First three order mode shapes of swing mirror

## 5 结 论

由于机载摆扫式光谱仪当前常用的几种摆扫模式和运动方式难以达到 25 Hz 的高扫描频率, 本文设计了一种新型摆镜结构。首先, 通过计算反射区域与旋转轴偏离量的关系, 设计了一种围绕旋转轴布置三面反射镜的摆镜结构形式。该结构形式为对称结构, 降低了高转速下摆镜动平衡校正的难度; 通过布置三面反射镜的方式提高了

扫描周期内的角度利用率, 同时, 采用匀速摆扫运动的方式, 降低控制难度, 并能够在 600 r/min 的转速下完成每分钟 1 800 次的摆扫。然后, 通过拓扑优化、集成优化等对摆镜进行了轻量化设计, 摆镜最终质量为 5.28 kg, 轻量化率达到 58%。最后, 通过有限元仿真手段计算得到摆镜在 600 r/min 的高转速下, 面型 RMS 值优于  $\lambda/20$ , 摆扫机构基频达到 1 199 Hz, 具有较高的力学稳定性, 满足机载摆扫式光谱仪对于高扫描频率的要求。

### 参考文献:

- [1] 曹佃生, 石振华, 林冠宇. 机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制 [J]. 光学 精密工程, 2017, 25 (6): 1403-1409.  
CAO D SH, SHI ZH H, LIN G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (6): 1403-1409. (in Chinese)
- [2] 周阳, 杨宏海, 刘勇, 等. 高光谱成像技术的应用与发展 [J]. 宇航计测技术, 2017, 37(4): 25-29.  
ZHOU Y, YANG H H, LIU Y, et al.. Application and development of hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2017, 37(4): 25-29. (in Chinese)
- [3] 于丰华. 基于无人机高光谱遥感的东北梗稻生长信息反演建模研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.  
YU F H. *Retrieving nutrient information of japonica rice based on unmanned aerial vehicle hyperspectral remote sensing* [D]. Shenyang: Information and Electrical Engineering, 2017. (in Chinese)
- [4] GREEN R O, EASTWOOD M L, SARTURE C M, et al.. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65 (3): 227-248.
- [5] 姜博. 大惯量高精度扫描控制及同步像移补偿技术的研究[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2014.  
JIANG B. *The research of large inertia and high precision scanning control and synchronal image motion compensation technology* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2014. (in Chinese)
- [6] 陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪 [J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 15-21.  
CHEN W, ZHENG Y Q, XUE Q SH. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 15-21. (in Chinese)
- [7] 周世椿. 高级红外光电工程导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-363.  
ZHOU SH CH. *Introduction to Advanced Infrared Optoelectronic Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-363. (in Chinese)
- [8] 王建宇. 成像光谱技术导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-293.  
WANG J Y. *Introduction to Imaging Spectral Technique* [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-293. (in Chinese)
- [9] 王义坤. 面阵摆扫宽幅成像技术研究[D]. 上海: 上海技术物理研究所, 2015.  
WANG Y K. *Research of wide swath imaging technology based on area-array detector adopting whisk-broom scanning mode* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, 2015. (in Chinese)
- [10] 张东阁, 傅雨田. 铝合金反射镜的发展与应用 [J]. 红外技术, 2015, 37(10): 814-823.  
ZHANG D G, FU Y T. Development and application of aluminum mirrors in optical system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 814-823. (in Chinese)
- [11] 曹永强, 傅丹鹰, 孙纪文, 等. 空间传感器大口径反射镜支撑结构型式综述 [J]. 航空返回与遥感, 2006, 27(2): 18-27.  
CAO Y Q, FU D Y, SUN J W, et al.. Summary of support structure patterns of large mirror for space remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(2): 18-27. (in Chinese)
- [12] 于洋, 王世勇, 蹇毅, 等. 面阵探测器连续扫描成像光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 122-126.  
YU Y, WANG SH Y, JIAN Y, et al.. Realization

- of an optical system based on continuous-scan focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016,45(1): 122-126. (in Chinese)
- [13] 约德. 光机系统设计 [M]. 周海宪,程云芳,译. 北京:机械工业出版社,2008.  
YODER JR P R. *Optic-mechanical System Design* [M]. ZHOU H X, CHENG Y F, Transl.. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 中心支撑  $\Phi 610$  mm 圆形主镜的超轻量化设计 [J]. 光子学报, 2016, 45(9): 128-134.
- BAO Q H, SHA W, CHENG CH ZH, *et al.*. Ultra-lightweight design of  $\Phi 610$  mm circular primary mirror supported in centre [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016,45(9): 128-134. (in Chinese)
- [15] 孙挺, 张霞. 无机化学 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2011:1-409.
- SUN T, ZHANG X. *Inorganic Chemistry* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 1-409. (in Chinese)

## 作者简介:



李 颀(1992—),男,内蒙古锡林郭勒人,博士研究生,2014 年于浙江大学获得学士学位,主要从事遥感仪器结构设计及优化等方面的研究。E-mail: liyi\_zju@163.com

## 导师简介:



刘 伟(1967—),男,吉林长春人,博士,研究员,2005 年于长春光机所获得博士学位,主要从事空间遥感仪器结构设计、优化及测试等方面的研究。E-mail: liuwei@ciomp.ac.cn