

做科研，非一朝一夕

—买器材，应速战速决

Newport数千种优质产品当日发货，
更多惊喜尽在PhotonSpeed™光速购！



超轻空间相机杂散光抑制结构的优化设计

邵梦旗^{1,2*}, 张雷^{1,3**}, 魏磊³, 贾学志³

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长光卫星技术有限公司光机结构一室, 吉林 长春 130031

摘要 为抑制杂散光对空间相机成像性能的影响, 满足其严苛的质量和稳定性的要求, 提出了一种主遮光罩的优化设计方法。基于图形法分析了遮光罩挡光环的位置分布, 以结构柔顺度和质量最小为目标, 以基频为约束, 建立了遮光罩的多目标优化模型, 并对遮光罩进行了尺寸优化设计。最终, 遮光罩质量为 0.24 kg, 轻量化率达到 38.6%。另外, 进行了遮光罩的振动实验和整机的杂散光分析。结果显示: 遮光罩的杂散光抑制性能良好, 有限元分析结果与实验数据相对误差低于 15%, 表明设计的遮光罩的性能参数满足要求, 验证了所采用优化方法的可行性。

关键词 光学设计; 光机结构; 优化设计; 轻量化; 遮光罩; 杂散光

中图分类号 V423.4+2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1122002

Optimal Design of Stray Light Suppression Structure for Ultra-Light Space Camera

Shao Mengqi^{1,2*}, Zhang Lei^{1,3**}, Wei Lei³, Jia Xuezhong³

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Optical-Mechanical Structure Research Laboratory, Chang Guang Satellite Technology Co., LTD, Changchun, Jilin 130031, China

Abstract This study proposes an optimization method to design the main baffle for suppressing the influence of stray light on the imaging performance of a space camera and satisfying the stringent requirements of small weight and high stability. Further, the position distribution of the vanes of the baffle is analyzed based on the graphical method. A multi-objective optimization model of the baffle is established with regard to minimum structural compliance and mass as well as the constraint of the fundamental frequency. The optimized dimension design of the baffle can be obtained. The mass of the baffle is 0.24 kg, and the lightweight rate is 38.6%. In addition, the dynamic vibration test of the baffle and stray light analysis of the system are conducted. The results denote that the relative error between the finite element analysis results and experimental data is lower than 15% and that the baffle exhibits good stray light suppression performance. This indicates that the performance parameters of the designed baffle satisfy the requirements; furthermore, the feasibility of the optimization method is verified.

Key words optical design; optomechanics; optimization design; lightweight; baffle; stray light

OCIS codes 220.4880; 290.5880; 350.4600; 350.6090

1 引 言

空间相机的杂散光会严重影响成像质量; 杂散光通常指的是到达光学系统像面的非成像光线, 其

产生的主要原因有三个: 光学系统视场外部辐射、光学系统内部辐射, 以及成像光线的散射。

光学系统的杂散光相当于光学系统的“噪声”。它对 CCD 相机星像点的影响非常明显, 可使

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-07-10; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500904)

* E-mail: 18300608158@163.com; ** E-mail: 18686344285@163.com

像面的对比度大大降低,清晰度变坏;杂散光辐射引起的噪声严重时甚至会盖过目标信号。因此,杂散光抑制设计是空间相机的关键技术之一。常采用的方法是为相机设计遮光罩以抑制杂散光的影响^[1]。

国内外学者对光学系统的杂散光抑制结构设计均有一定研究。国外:Terebizh^[2]基于光线追迹法分析出望远镜中光阑的准确位置,研究了杂散光系数和望远镜性能的关系;Kawano等^[3]提出一种新型星敏感器遮光罩结构,其长度是传统二级遮光罩的四分之三;Senthil Kumar等^[4]为遮挡卡塞格林望远镜的直射杂散光,采用迭代优化算法获得了遮光罩的最佳尺寸参数。国内:Song^[5]同时进行了同轴二反望远镜遮光罩的尺寸优化设计与光学设计,优化了望远镜的结构形式;Zhang等^[6]将有限元分析理论和优化技术相结合并应用于遮光罩,实现了大型同轴二反望远镜次镜遮光罩的轻量化设计;李洋等^[7]为星敏感器设计了不同结构形式的外遮光罩,分析了其对星敏感器杂散光的影响。

上述研究多为研究遮光罩结构对杂散光的抑制效果,而基于遮光罩结构机械性能参数的设计分析研究较少。本文针对某遮光罩严苛的质量和刚度要求,设计一种遮光筒结构阻挡视场外的杂散光进入光学系统,并对遮光罩的挡光环参数和结构的机械性能参数进行分析及优化。通过振动实验和杂散光

分析等手段对系统结构的稳定性、可靠性和功能进行了验证。结果表明,该遮光罩结构具有超轻、高刚度、良好尺寸稳定性的特点,并满足空间杂散光的抑制要求。

2 遮光罩的材料选取

要满足该空间相机的质量要求以及适应空间相机热环境的变化,所选材料需具有比刚度高、线胀系数小的特点。常用的空间结构材料有铝、钛合金、镁铝合金、殷钢、高体分 SiC/Al、碳纤维复合材料等,这些材料均具有良好的比刚度和热稳定性。

遮光罩的主要功能是抑制空间相机的杂散光,以减小杂散光对光学系统成像性能的影响。因此,需要其在能够保持形状的同时具有足够小的质量。利用碳纤维/环氧复合材料(CFRP)能够加工出超薄的结构,单层材料的厚度可达到 0.08 mm,并可以根据不同的铺层方式获得不同的性能。

CFRP 的密度和膨胀系数小,并且能在空间环境中正常使用。美国的 HiRISE 高分辨率相机的多个结构件^[8]、国内部分空间相机的反射镜^[9],以及主承力框架^[10]等结构中均有应用碳纤维复合材料的先例;为获得超薄遮光罩结构,最终选择 CFRP 作为遮光罩的加工材料。本文采用 $[60^\circ/0^\circ/60^\circ]$ 的三层铺层方式,故结构厚度尺寸参数须为 0.24 的整数倍,其性能参数如表 1 所示。

表 1 CFRP 性能参数

Table 1 Performance parameters of CFRP

Material	Longitudinal tensile elastic modulus /GPa	Lateral tensile elastic modulus /GPa	Longitudinal Poisson's ratio	Lateral Poisson's ratio	Shear modulus /GPa
CFRP	230.00	9.30	0.27	6.65	6.20

3 遮光罩的结构设计

3.1 遮光罩的设计要求

将空间相机的主镜遮光罩安装于光学系统的外侧,遮光罩由相机背板支撑,用于遮挡视场外杂散光进入主镜;将次反射镜遮光罩安装于次镜位置,用于遮挡光学系统内部反射和散射的杂散光;遮光罩除了要抑制杂散光对光学系统的影响,还要保证目标光路可以直接进入,因此遮光罩一般为圆筒状,其张角等于或略大于视场角,以获得其良好的遮光罩体积;主遮光罩为单层圆筒状。

通常,遮光罩的长度和直径不能随意设定;本文要求空间相机总质量不大于 5 kg,遮光罩的质量小

于 300 g;主反射镜直径为 266 mm,次反射镜直径为 84 mm,主、次反射镜相距 280 mm,视场角为 0.92° ;相机的轨道高度为 500 km,太阳规避角为 40° ,在规避角以外,光学系统的点源透射比值需要小于 10^{-5} 。由于光学系统的尺寸限制了主、次反射镜遮光罩的包络尺寸,因此优化任务主要包括:改变主反射镜遮光罩翻边厚度、筒厚、筋厚,以及挡光环的厚度等,优化遮光罩的机械性能;合理布置挡光环的位置,良好地抑制外杂散光对相机的影响。要求结构达到相机的强度和刚度要求,具有良好的稳定性以及合理的模态分布且满足杂散光的抑制要求。

3.2 挡光环设计

使主镜遮光罩的后面部分延伸至主镜的后表

面,朝向主镜支撑结构,获得遮光罩的长度为 L 。将遮光罩延伸到主镜顶点之外主要是为了安装遮光罩,同时限制其他邻近机械元件反射的光线,以及避免视场外主要的杂散光源(如太阳、地球、月亮等)直接照射到系统像面。为了控制主反射镜遮光罩内壁产生的杂散光,需设置挡光环的环形叶片。

挡光环的设计要保证遮光罩内壁反射的光线(即高阶杂散光)不能到达像面,并且不遮挡视场内(FOV)的成像光线;要求挡光环沿遮光罩长度方向放置在适当的位置。挡光环的设计过程是根据主反射镜遮光罩长度以及挡光环的内外直径来确定挡光环的位置。

本文的设计方法是从像面出发计算挡光环参数,即从主反射镜遮光罩靠近像面的一端开始,按照

图 1 所示的顺序向另一端依次计算挡光环参数。图 1 中, D_h 表示光学系统焦面宽度大小的一半, D_1 、 D_2 分别表示焦面沿宽度方向的上下两个端点, Z 表示遮光罩底部到焦面的距离, M_1 、 M_2 分别表示光学系统主反射镜内孔上下两个端点, R_1 、 R_2 分别为从焦面端点 D_1 引出的射线段, V_0 表示遮光罩底部到第一个挡光环的距离, V_h 表示挡光环的高度, d_{v1} 表示第一个挡光环到第二个挡光环的距离, d_{v1m} 、 d_{v2m} 分别表示第一个挡光环到射线段 R_1 与遮光罩交点的距离、第二个挡光环到射线段 R_2 与遮光罩交点的距离, 虚线 b 表示所有挡光环的等高线, T_{v1m} 表示射线段 R_2 经遮光罩内表面反射后与虚线 b 的交点, a 表示遮光罩筒壁, φ 表示遮光罩的内径。

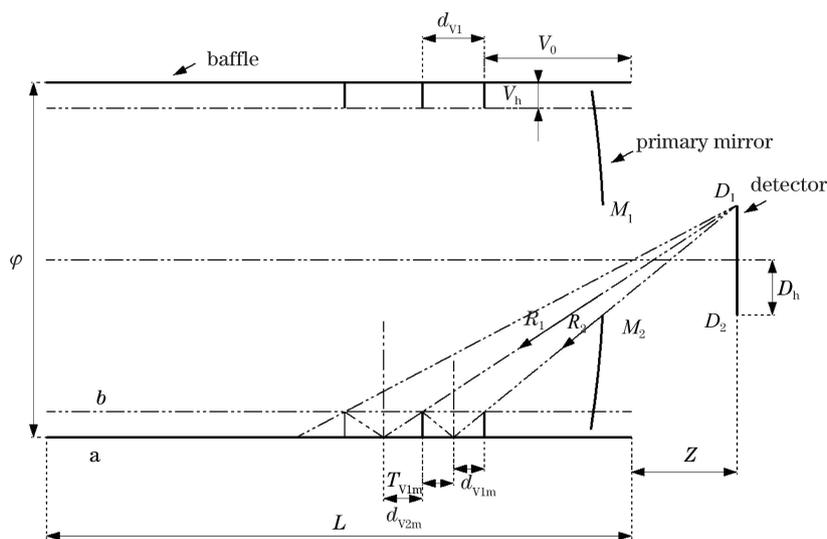


图 1 主遮光罩挡光环相关参数设计

Fig. 1 Parameters pertinent to design of vanes of the primary mirror baffle

通过以下顺序步骤迭代计算挡光环参数,可获得主反射镜遮光罩长度方向上的所有挡光环。

1) 由空间相机的尺寸约束确定遮光罩的外形尺寸 $L \times \varphi$; 选取 V_h 使挡光环略超过反射镜边缘, 得到虚线 b (这样做是为了减少经过挡光环边缘时产生的衍射光及散射光进入光学系统);

2) 从 D_1 到主反射镜内径边缘 M_2 绘制一个射线段 R_1 , 并与虚线 b 交于一点, 即射线段 R_1 在距离遮光罩后端 V_0 处获得挡光环 1 的位置。

3) 从遮光罩内壁反射后, 射线段 R_1 的反射线段在距离 T_{v1m} 处与虚线 b 交于一点, 即在距离挡光环 1 的 d_{v1} 处获得挡光环 2 的位置。

4) 从 D_1 到挡光环 2 的顶点绘制一个射线段 R_2 , 并在距离挡光环 2 的 d_{v2m} 处与遮光罩内壁交于一点。

5) 重复步骤 3) 和 4), 直到挡光环的位置达到

或超过遮光罩前端。

3.3 遮光罩尺寸优化设计

综合 3.1 节和 3.2 节的设计内容获得主遮光罩的初始结构。该结构为薄壁圆筒式, 筒内分布利于遮光。具有该结构的挡光环如图 2 所示。对初始结构进行模态分析, 得到其基频为 92 Hz, 质量接近 397 g, 质量和基频均不满足设计要求的(基频大于 100 Hz、质量小于 300 g), 需对其进行改进优化。本文以遮光罩各部分厚度参数为设计变量进行遮光罩优化设计, 如图 3 所示; 以结构柔顺度和质量最小为目标, 约束其固有频率, 建立多目标尺寸优化模型, 求解获得其最佳的性能响应。

3.3.1 主反射镜遮光罩尺寸优化模型

采用二阶壳单元建立初始结构的有限元模型, 如图 3 所示; 约束遮光罩结构中螺纹孔六个方向的



图 2 主镜遮光罩初始结构

Fig. 2 Initial structure of primary mirror baffle

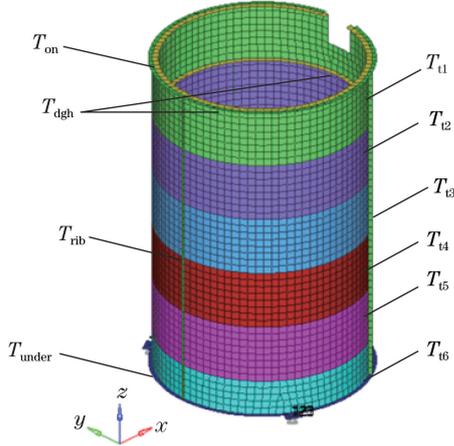


图 3 主反射镜遮光罩有限元模型及其结构参数

Fig. 3 Finite element model and structural parameters of primary mirror baffle

自由度,进行模态分析,得到一阶振型为 x 方向的平动,二阶振型为 y 方向的平动。为避免在受到运输和发射阶段的激励时结构表面发生共振现象,造成横向变形,影响遮光罩的性能,本研究建立以遮光罩结构的 x 向基频和 y 向基频为约束,以质量和结构柔顺度均最小为设计目标的尺寸优化模型。采用第二代非序列排序遗传算法(NSGA-II)进行优化,设遮光罩上下翻边的厚度为 T_{on} 、 T_{under} ,挡光环的厚度为 T_{dgh} ,筋的厚度为 T_{rib} ,筒的厚度分别为 T_{t1} 、 T_{t2} 、 T_{t3} 、 T_{t4} 、 T_{t5} 、 T_{t6} 。设计变量表示为

$$\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_e, \dots, t_n)^T, \quad (1)$$

式中: t_e 表示设定的第 e 个遮光罩尺寸参数,遮光罩共 n 个。

某空间相机要求相机结构基频不小于 100 Hz,约束主遮光罩 x 向基频大于 100 Hz, y 向基频大于 120 Hz。

将 x 、 y 、 z 重力三个工况下的柔顺度加权作为整个结构的总柔顺度响应,整个结构的总柔顺度响应为

$$C_w = \sum W_i C_i = \sum W_i \mathbf{F}_i^T \mathbf{U}_i, \quad (2)$$

式中: W_i 表示第 i 工况下结构柔顺度的权重; C_i 表示第 i 工况下的结构柔顺度; \mathbf{F}_i^T 表示第 i 工况下外载荷矩阵的转置; \mathbf{U}_i 表示第 i 工况下结构的位移矩阵。

遮光罩结构尺寸优化的数学模型如下。

1) 设计变量:

$$\mathbf{T} = (t_1, t_2, \dots, t_e, \dots, t_n)^T, \quad (3)$$

2) 目标:最小 (M, C_w),

3) 约束条件:

$$\begin{cases} f_1 \geq 100 \text{ Hz} \\ f_2 \geq 120 \text{ Hz} \\ 0.2 \leq t_e \leq 0.6 \\ 0.6 \leq T_{on} \leq 1 \\ 0.6 \leq T_{under} \leq 1 \end{cases}, \quad (4)$$

其中 M 表示遮光罩结构的质量, f_1 表示遮光罩结构的 x 向基频, f_2 表示遮光罩结构的 y 向基频, t_e 表示遮光罩结构的第 e 个尺寸参数。

3.3.2 灵敏度分析

考虑从一个由 N 个有限单元构成的结构中删除第 j 个单元,外载荷 \mathbf{F} 不变。结构刚度矩阵和位移矩阵的变化量分别为

$$\Delta \mathbf{K} = \mathbf{K} - \mathbf{K}_0 = -\mathbf{K}_j, \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{U} = \mathbf{U} - \mathbf{U}_0, \quad (6)$$

式中: \mathbf{K}_0 为初始结构的总刚度矩阵; \mathbf{K} 为删除第 j 个单元后结构的总刚度矩阵; \mathbf{K}_j 为第 j 个单元扩维后的刚度矩阵; \mathbf{U}_0 为初始结构的位移矩阵; \mathbf{U} 为删除第 j 个单元后结构的位移矩阵。

联立结构静态特性平衡方程 $\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}$, 得

$$\Delta \mathbf{U} = -\mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{K} \mathbf{U}_0, \quad (7)$$

结合结构柔顺度 $C = \mathbf{F}^T \mathbf{U}$, 可得

$$\Delta C^- = -\mathbf{F}^T \mathbf{K}^{-1} \Delta \mathbf{K} \mathbf{U}_0 = \mathbf{u}_j^T \mathbf{k}_j \mathbf{u}_j, \quad (8)$$

式中: \mathbf{u}_j 为第 j 个单元降维后的位移矩阵; \mathbf{k}_j 为第 j 个单元降维后的刚度矩阵; ΔC^- 表示删去第 j 个单元后结构柔顺度的变化量。

由(8)式可以看出删除第 j 个单元时,引起的结构柔顺度的变化量为第 j 个单元应变能 c_j 的两倍:

$$c_j = \frac{1}{2} \mathbf{u}_j^T \mathbf{k}_j \mathbf{u}_j. \quad (9)$$

同理,第 j 个单元的增加(由删除单元变为保留单元),引起的结构柔顺度的变化量为

$$\Delta C^+ = -\mathbf{u}_j^T \mathbf{k}_j \mathbf{u}_j. \quad (10)$$

在优化迭代过程中,需要保证质量最小的同时柔顺度亦最小。由上述分析可知,当删除一个单元时,结构柔顺度 C 增加,质量减小;增加一个

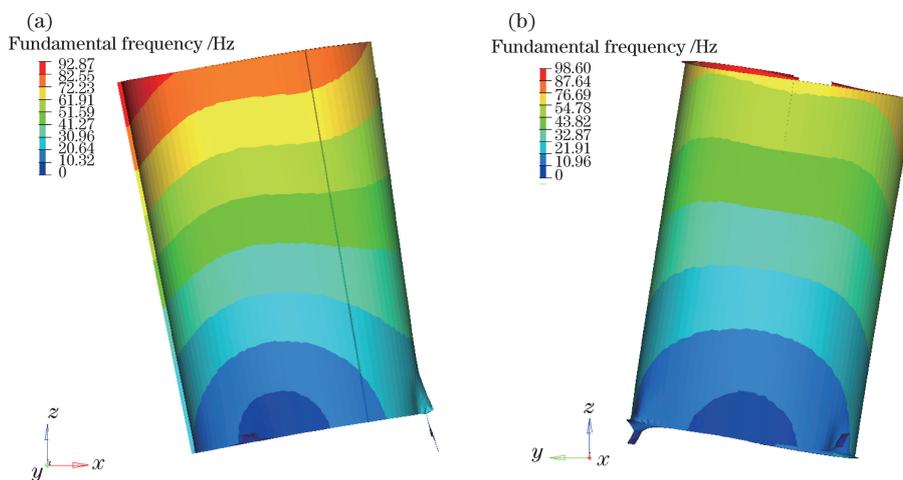


图 4 遮光罩结构 x 向基频与 y 向基频对应的振型云图。(a) x 向;(b) y 向

Fig. 4 Nephograms of x - and y -direction vibration modes of fundamental frequency of baffle. (a) x direction; (b) y direction

单元时,结构柔顺度 C 减小,质量增加。为了达到质量和柔顺度均最优,有效的方法是删除 c_j 值相对小的单元,保留 c_j 值相对大的单元,实现最优结构设计。

3.3.3 优化模型提取

该优化模型有两个目标函数,根据有限元分析

获得主遮光罩的质量以及总柔顺度响应;设计变量参数如图 3 和表 2 所示。NSGA-II 算法按照群体大小和进化代数决定迭代次数;设定 NSGA-II 的群体大小为 10,进化代数为 21,通过 240 次迭代建立一个目标函数的解集,迭代曲线如图 5 所示;并从解集中得到最优解,优化结果如表 2 所示。

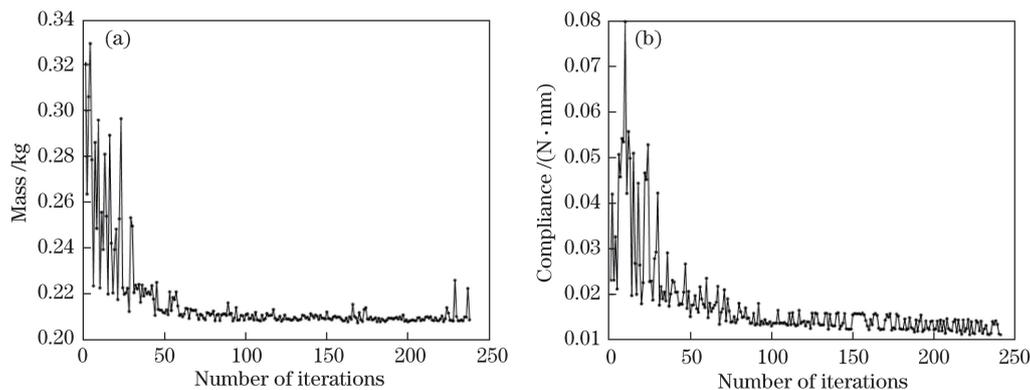


图 5 优化目标迭代过程。(a)质量迭代曲线;(b)结构柔顺度迭代曲线

Fig. 5 Iteration process of object optimization. (a) Iterative curve of mass; (b) iterative curve of structural compliance

表 2 设计变量与优化结果

Table 2 Designed variables and optimized results

Variable	Range /mm	Initial value /mm	Optimization result /mm	Amended result /mm
T_{t1}	[0.2,0.6]	0.5	0.59	0.48
T_{t2}	[0.2,0.6]	0.5	0.26	0.24
T_{t3}	[0.2,0.6]	0.5	0.22	0.24
T_{t4}	[0.2,0.6]	0.5	0.23	0.24
T_{t5}	[0.2,0.6]	0.5	0.24	0.24
T_{t6}	[0.2,0.6]	0.5	0.37	0.48
T_{on}	[0.6,1.0]	1.0	0.67	0.72
T_{under}	[0.6,1.0]	1.0	0.98	0.98
T_{rib}	[0.2,0.6]	0.5	0.23	0.24
T_{dgh}	[0.2,0.6]	0.5	0.34	0.24

表 3 对比了优化前后的结构性能,由表 3 可知尺寸参数优化后可得到最小筒厚仅为 0.22 mm,最小翻边厚度为 0.67 mm 的遮光罩结构。CFRP 按照 [60°/0°/60°]铺层方式获得,单层厚度为 0.08 mm;所以结构的厚度须为 0.24 mm 的整数倍。按照就近原则修正优化后的结构尺寸参数,得到最小厚度为 0.24 mm 的遮光罩结构,其质量为 243.8 g,仅占整机的 4.9%。并且遮光罩的结构柔顺度、 x 向基频和 y 向基频均有所改善,可满足整机对子结构的基频要求。

表 3 优化前后的结构性能对比

Table 3 Structural performance comparison before and after optimization

Performance	f_1 /Hz	f_1 /Hz	Compliance / (N·mm)	Mass /g
Initial value	95	117.9	0.03	397.5
Optimization result	125.2	146.7	0.01	243.8
Improvement /%	31.79	24.4	66.6	38.6

4 工程分析与实验验证

4.1 动力学实验验证

为验证本文中优化设计方法的可行性和有限元

分析计算方法的准确性,利用振动实验台对遮光罩进行振动实验。实验现场如图 6 所示,利用数据采集仪和加速度传感器获取目标位置的加速度响应。为了有助于有限元分析结果与振动实验结果的对比分析,遮光罩振动测试的测点布置选择在采样点相邻位置。图 7 所示为遮光罩实验测点 x 、 y 、 z 三个方向的随机振动响应曲线,纵坐标 M' 为实验测点随机振动加速度响应的幅值;表 4 给出 x 、 y 、 z 三个方向的随机振动输入条件;表 5 给出了随机振动响应实验结果与分析数据的对比。

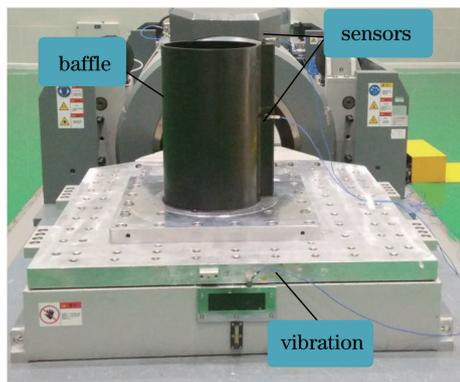
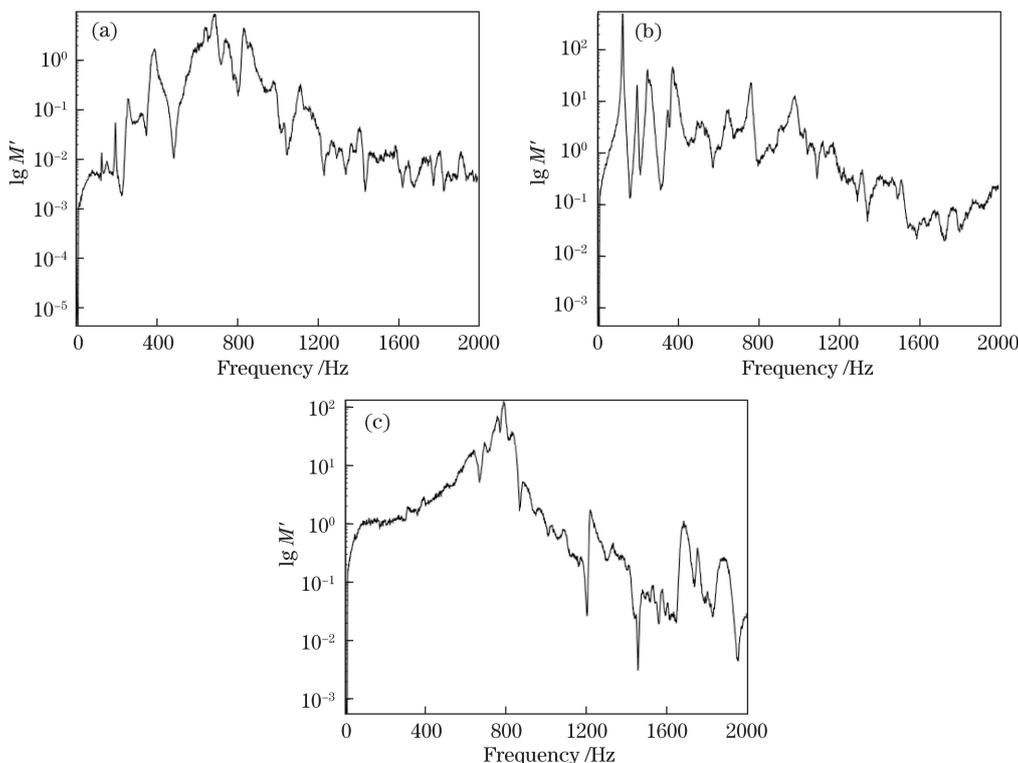


图 6 振动测试现场

Fig. 6 Scene of random vibration test



M' represents the amplitude of the acceleration response of random vibration.

图 7 采样点随机振动频率响应曲线。(a) x 向;(b) y 向;(c) z 向

Fig. 7 Frequency response curve of random vibration of sampling point. (a) x axis; (b) y axis; (c) z axis

表 4 随机振动实验条件

Table 4 Test conditions of random vibration

Frequency /Hz	Power spectral density /($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	Acceleration root mean square /g
10	0.0000	3.56
80	0.0100	
800	0.0100	
8000	0.0016	

表 5 实验结果与分析数据对比

Table 5 Comparison between test and analysis data

Direction	Comparison results of frequency scanning test with modal analysis			Comparison results of random vibration test with analysis		
	Analysis value of fundamental frequency /Hz	Test value of fundamental frequency /Hz	Relative error /%	Analysis value of acceleration response /g	Test value of acceleration response /g	Relative error /%
<i>x</i>	125.20	125.39	0.15	12.84	11.20	12.70
<i>y</i>	146.70	128.42	12.46	11.20	8.99	10.30
<i>z</i>	609.67	635.45	4.23	10.90	10.11	7.80

4.2 空间相机杂散光分析计算

遮光罩主要的功能是抑制空间相机的杂散光。为验证所设计遮光罩结构消杂散光的性能,需对整机进行杂散光分析^[11]。为光学元件表面定义反射属性,并设定光源,模拟空间相机在光源照射下的光线传递路径。

杂散辐射分析中,主要考虑表面的反射特性。本文选用 A_{Bg} 模型^[12],其表达式为

$$F_{BSDF} = \frac{A}{B + |\beta - \beta_0|^g}, \quad (11)$$

式中: F_{BSDF} 为能量辐射面元的双向反射分布系数; β_0 、 β 分别为单位能量光线入射方向与散射方向的方向正弦值; A 、 B 、 g 为修正系数。光学元件作为系统的关键面,其修正系数 $A = 0.0001$, $B = 0.015$, $g = 2$ 。在分析中为避免其余组件(包括遮光罩、挡光板和桁架杆等结构支撑元件)对光线造成反射或散射,将其表面均设置成黑漆属性: $A = 0.06366$, $B = 1$, $g = 0$ 。

该相机的成像谱段为全色(450~800 nm);该相机为反射式光学成像系统,不同波长的光对相机杂散光仿真分析的影响不大。因此取波长为常用的 632.8 nm。将光源设定为栅格光源,设置于主镜遮光罩出口处发出不同方向的平行光。对于光线追迹数量的选择,设定光线追迹的阈值为 10^{-8} ,保证追

根据表 5 可知,实验结果较有限元分析结果偏小,有限元模型简化了部分尺寸小的圆角;另外,网格密度是决定有限元模型准确性的关键因素之一,可通过修正网格密度来优化有限元分析的结果。经优化设计后的遮光罩采样点随机振动响应有限元分析数据与振动实验数据的误差在 15% 以内,该结果验证了模型的准确性和以结构柔顺度和质量最小为目标的多目标优化设计方法的可行性。

迹分解出光线强度高于 10^{-8} 的光线,光线追迹数量为 500 万条,光出射度为 1 W/m^2 。通过改变光源面出射光束的方向来模拟不同视场的通光情况,如图 8 所示。

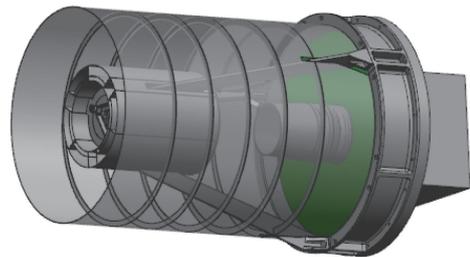


图 8 杂散光分析模型

Fig. 8 Model for stray light analysis

对视场外的杂散光在像面照度的分布进行了分析,分别将一个方向视场设置为 0° ,将另一方向视场范围设置为 $0 \sim 90^\circ$,间隔 2° 。根据像面照度分布计算得到的点源透射比(PST, R_{PST})曲线如图 9 所示。

可以看出,视场外的杂散光在像面上的照度随着视场的增加呈逐渐下降趋势;当入射角大于杂散光抑制角 40° 时,点源透射比 R_{PST} 为 10^{-6} 量级,杂散光抑制性能良好。

5 结 论

为抑制杂散光对相机成像质量的影响并保证结

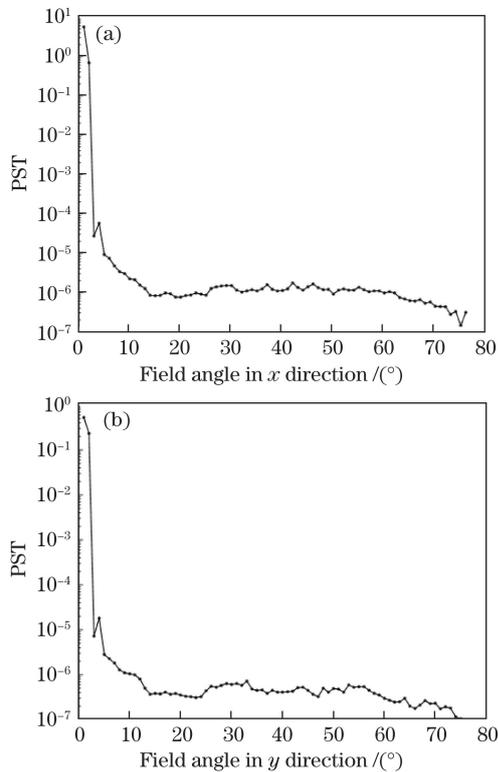


图9 光学系统 x 向以及 y 向的 PST 曲线。

(a) x 向的 PST 曲线; (b) y 向的 PST 曲线

Fig. 9 PST curves of optical system in x and y directions.

(a) PST curve in x direction; (b) PST curve in y direction

构具有足够的机械性能,设计了遮光罩的挡光环参数,提出了以结构柔顺度和质量最小为目标的尺寸优化设计方法。建立了结构柔顺度和质量的多目标尺寸优化模型,对模型进行了结构柔顺度灵敏度分析。优化后的结构柔顺度改善了 66%,质量为 0.244 kg,轻量化率达到 38.6%。同时进行了遮光罩的振动实验和整机的杂散光分析,结果表明:有限元分析结果与实验数据相对误差低于 15%,设计的遮光罩性能参数满足设计指标,验证了所采用优化方法的可行性。本文设计的遮光罩结构及采用的优化方法可以为空间相机其他类似结构的设计提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Ho C F, Chang S T. Baffle design for a Cassegrain telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7506: 75061S.
- [2] Terebizh V Y. Optimal baffle design in a Cassegrain telescope[J]. Experimental Astronomy, 2001, 11(1): 171-191.
- [3] Kawano H, Sato Y, Mitani K, *et al.* New light-shielding technique for shortening the baffle length of a star sensor[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4767: 62-69.
- [4] Senthil Kumar M, Narayanamurthy C S, Kiran Kumar A S. Design and analysis of optimum baffle for a Cassegrain telescope[J]. Journal of Optics, 2016, 45(2): 180-185.
- [5] Song N. Baffles design for an axial two-mirror telescope[J]. Optical Engineering, 2002, 41(9): 2353-2356.
- [6] Zhang L, Jia X Z, Xie P, *et al.* Study on ultra-light secondary baffle for coaxial two-mirror telescope[C] // 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 5-8, 2012, Chengdu, China. New York: IEEE, 2012: 909-913.
- [7] Li Y, Liao Z B, Mu S B, *et al.* Stray light suppressing technique and simulation for star sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2620-2624.
李洋, 廖志波, 穆生博, 等. 星敏感器杂散光抑制方法及仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2620-2624.
- [8] McEwen A S, Eliason E M, Bergstrom J W, *et al.* Mars reconnaissance orbiter's high resolution imaging science experiment (HiRISE) [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(E5): E05S02.
- [9] Wei L, Zhang L, Gong X X. Design and optimization of the CFRP mirror components[J]. Photonic Sensors, 2017, 7(3): 270-277.
- [10] Yang S, Sha W, Chen C Z, *et al.* Design and optimization of carbon fiber framework for space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 697-705.
杨帅, 沙巍, 陈长征, 等. 空间相机碳纤维框架的设计与优化[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 697-705.
- [11] Yang L, Li D, Cui T G, *et al.* Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1456-1463.
杨林, 李达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1456-1463.
- [12] Griner D B. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) measurements of stray light suppression coatings for the space telescope (ST)[J]. Proceedings of SPIE, 1979, 183: 98-104.