

文章编号: 1672-8785(2014)12-0023-06

空间相机用摆镜的轻量化优化设计 及其对像质的影响分析

陈长征

(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: 提出了一种空间相机用摆镜轻量化优化设计方法, 并对尺寸为 360 mm×560 mm 的空间相机用摆镜进行了轻量化优化设计。以镜体厚度、切角大小、镜面厚度和轻量化筋的厚度为设计变量, 以最小重量为设计目标, 以面形峰值 (Peak Value, PV) 和均方根值 (Root-Mean-Square, RMS) 不大于 55 nm 和 11 nm 为边界条件进行了优化, 并将整体反射镜重量从初始模型的 4 kg 减到了 1.72 kg (其面密度为 8.0 kg/m²)。然后以微重力变形条件下的最小面形为目标, 对轻量化处理后的反射镜进行了侧边支撑点位置优化, 其面形 PV 为 54 nm。采用有限元分析方法对反射镜在微重力、旋转惯性和温度载荷条件下的变形及反射镜模态进行了计算和校核, 其结果均满足空间使用要求。最后采用光机热集成仿真方法对空间环境条件综合作用下产生的变形对像质的影响进行了分析。结果表明, 由于该空间相机用摆镜产生变形, 摆扫式光学遥感器系统的传递函数下降, 在 70 lp/mm 处由设计值 0.735 降至 0.703, 相对降幅约为 4.4%, 满足设计要求。

关键词: 空间摆镜; 优化设计; 轻量化; 光机热集成仿真

中图分类号: V414 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.12.005

Optimization of Pointing Mirror for Space Camera and Analysis of Its Effect on Image Quality Degradation

CHEN Chang-zheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: An optimization method for designing a light-weight point mirror for a space camera is proposed. The light-weight design of a point mirror with a size of 360 mm×560 mm for a space camera is carried out. It is optimized by taking the mirror thickness, tip angle, face-sheet thickness, and rib-sheet thickness as design variables, by taking the minimum weight as the design objective, by using the figure peak value less than 55 nm and the root-mean-square value less than 11 nm as restraint conditions and by reducing the weight of the whole mirror from 4 kg to 1.72 kg (its face density is 8.0 kg/m²). Then, taking the minimum figure under the condition of microgravity as the objective, the supporting points of the designed light-weight mirror are optimized. The resulting figure peak value is 54 nm. The deformation and modality of the mirror under the condition of microgravity, rotation inertia and temperature change are calculated and verified by using a finite-element analysis method. All of the results meet the require-

收稿日期: 2014-10-23

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (863-2-5-1-13B)

作者简介: 陈长征 (1976-), 男, 山东德州人, 副研究员, 主要研究方向为光机热集成仿真。

E-mail: may328@163.com

ments for space application. Finally, the effect of the deformation due to the synthetic action of the space environment on the image quality of the optical system is analyzed by using an opto-mechanical-thermal integrated simulation method. The result shows that because of the deformation of the pointing mirror, the modulated transfer function of the optical remote sensing system is reduced from 0.735 to 0.703 with a reduction ratio of 4.4%, which meets the design requirement.

Key words: space pointing mirror; design optimization; lightweight; optical-mechanical-thermal integration analysis

0 引言

在光学系统前设置摆镜的目的是通过摆镜运动扩展空间遥感器的成像范围,提高绘图效率,缩短重访时间。由于摆镜置于光学入口前,通过往复摆动,可以将地物目标反射到光学系统上,然后再成像到光电器件上^[1-3]。

空间传感器摆镜的应用环境具有以下几方面的特点:第一,在空间应用中,摆镜需要承受空间微重力载荷的作用;第二,摆镜置于光学传感器前端的镜筒之外,而且不能进行热控包覆^[4],因此难以实施有效热控,且需承受较大的温度载荷;第三,为实现宽覆盖和连续成像,摆镜的运动频率必须满足卫星飞行的成像要求,在成像过程中它必须按照一定的周期连续运动,并周期性地承受旋转运动的惯性载荷作用。

由于摆镜在工作过程中需要往复摆动,为保证具有足够大的摆动频率和运行精度,需要一定的惯量,这就会直接影响驱动电机的功率选择以及转动机构的支撑刚度设计,甚至还会影响整体卫星姿控能力的配置。因此,摆镜的轻量化设计显得非常重要。

采用图1所示的集成优化设计方法,通过选择材料和确定结构形式,并根据使用要求制定相应的设计变量、设计目标和边界约束条件;然后进行多学科、多变量优化设计,并对设计结果进行校核验证;最后通过光机集成仿真方法对摆镜的设计结果进行评估,并验证其对空间光学传感器成像质量的影响情况以及轻量化设计结果是否满足空间使用要求^[5]。

1 反射镜的轻量化设计

1.1 反射镜的技术要求

根据某型空间遥感器的成像要求,摆镜的

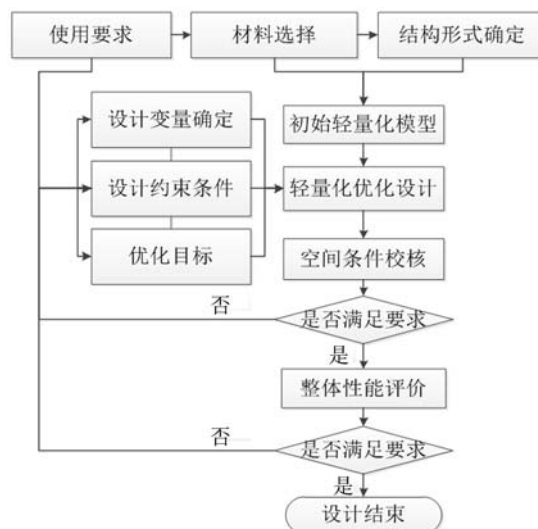


图1 摆镜的轻量化设计流程

技术指标如下:

- (1) 有效通光口径 ≥ 350 mm。
- (2) 面形误差: $PV \leq 60$ nm; $RMS \leq 12$ nm。
- (3) 摆扫镜范围 $\leq \pm 5^\circ$ 。
- (4) 摆扫周期 ≤ 1 s。
- (5) 扫描方式: 单向扫描。
- (6) 倾斜误差 $\leq 10''$ 。

根据以上要求,以 45° 为中心摆动 $\pm 5^\circ$ 成像,则反射镜的尺寸至少为 350 mm $\times$ 545 mm。考虑到加工装配误差,将反射镜的尺寸设计为 360 mm $\times$ 560 mm。

1.2 材料选择

表1列出了当前空间用反射镜材料的主要属性参数。可以看出,SiC材料具有较高的比刚度和热稳定性,因此摆镜选择采用SiC材料。

1.3 摆扫反射镜及其支撑结构形式

轻量化SiC反射镜具有背部开放型和背部封闭型两种结构形式。其中,背部封闭型SiC材料只能采用反应烧结工艺制备。与背部开放型结构相比,该材料的结构刚度较大,但是其制作

表 1 典型反射镜材料的属性参数

属性参数	单位	FS	Zerodur	K9	Be	SiC
密度 ρ	g/cm^3	2.19	2.53	2.53	1.85	3.05
弹性模量 E	Gpa	72	91	81	287	455
线膨胀系数 α	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	0.56	0.02	7.5	11.4	2.5
泊松比 μ	—	0.17	0.24	0.2	0.25	0.14
热传导率 λ	$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	1.4	1.64	1.2	216	155
比热容 C	$\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	787	795	858	1925	821
E/ρ	$\text{kN}\cdot\text{m}/\text{g}$	32.9	35.9	32	155	149
热梯度 λ/α	MW/m	2.5	82	0.16	18.9	62
$\lambda/\rho C$	$\text{W}/10^{-3}\text{J}$	0.81	0.81	0.55	70.4	61.8
$\lambda/\alpha E$	$\text{MW}\cdot\text{m}/\text{N}$	34.7	901	1.9	65.9	136
抛光性能	nm	0.2	0.3	0.7	2	0.7

工艺及刚度性能较差;同时,其内部结构的尺寸精度与设计模型偏差稍大。常用的轻量化孔包括三角形孔、四边形孔和六边形孔。这三种轻量化方式在实际的结构形式中均有应用。其中,四边形结构比较简单,加工工艺容易得到保证,轻量化程度比三角形结构高;而且由于摆镜属于侧边支撑,四边形筋的走向与其受力方向相同,有利于得到较高的面形精度。因此,本文也采用四边形轻量化孔的结构形式。根据光学口径的要求,尽量降低反射镜的重量;摆扫反射镜采用长方形、四角倒圆结构。摆镜背部采用方格形轻量化结构,同时通过两遍切角进行等刚度设计(其结构形式见图 2)。

朱波、宋春涛、刘学业和王伟成等人研究了 SiC 摆镜的轻量化筋厚度对摆镜位移与应力的影

响^[1-3,6]以及对空间微重力条件下反射镜面形的影响。根据以往空间反射镜的设计经验,并考虑空间微重力条件下的面形影响,我们分别将轻量化筋厚度和镜体厚度的初始值设为 4 mm 和 60 mm,并以此结构作为优化设计的初始模型(见图 3)。

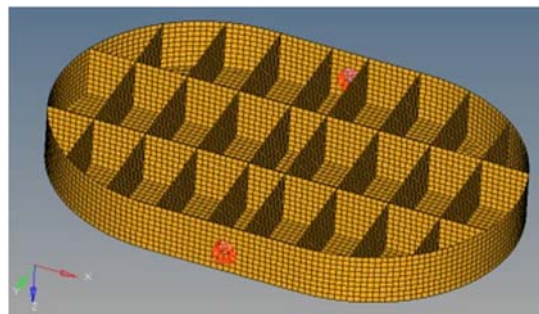


图 3 摆镜轻量化优化设计的初始模型

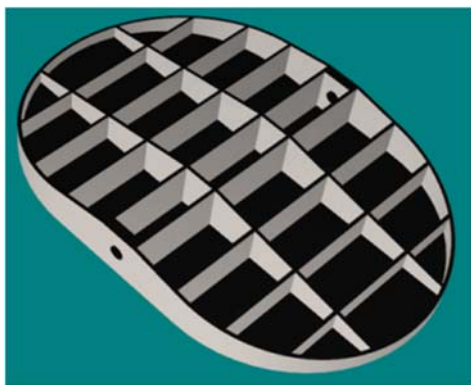


图 2 摆镜的轻量化结构形式

1.4 反射镜组件的轻量化优化设计

如图 4 所示,在轻量化网格确定后,摆镜重量主要受镜体厚度 d 、切角角度 α 、已知镜面厚度 D_1 和加强筋厚度 D_2 等因素的影响。以此作为优化设计变量,以微重力条件下反射镜的面形精度 ($\text{PV} < 55 \text{ nm}$, $\text{RMS} < 11 \text{ nm}$) 为边界条件,并以最小摆镜重量为目标进行反射镜的轻量化优化设计^[7-10]。由于支撑点位置 h 的变化会影响到面形精度,所以在优化过程中,我们将 h 也作为设计变量。

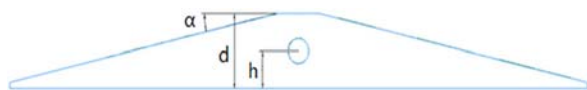


图 4 摆镜轻量化优化设计的初始模型

在以上变量条件下，可以直接看出，镜体厚度与重量成正相关，与面形成反相关；而切角大小在一定范围内与面形及重量均成正相关，镜面及筋的厚度与重量及面形之间成非线性关系。整个优化设计属于非线性多变量优化过程。它是将模拟退火方法和多岛遗传方法结合起来使用的^[11-12]。

我们总共通过 83 个循环进行求解。图 5 所示为整个优化流程的趋势曲线。表 2 主要列出了具有下降趋势的计算结果。可以看出，经过优化后，反射镜的厚度为 26 mm，切角角度为 5.06°，摆镜镜面与轻量化筋的厚度均为 2 mm，镜体重量由 4.39 kg 变为 1.72 kg。图 6 所示为优化后的摆镜模型。

由于支撑点的位置不会影响镜体重量，而只会影响面形精度，本文以轻量化优化结果作为初始模型，以支撑点位置 h 为设计变量，以实现最小的面形 PV 值作为优化目标，寻找最佳的

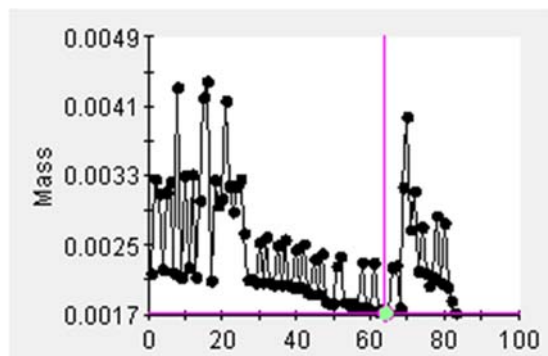


图 5 摆镜轻量化优化过程

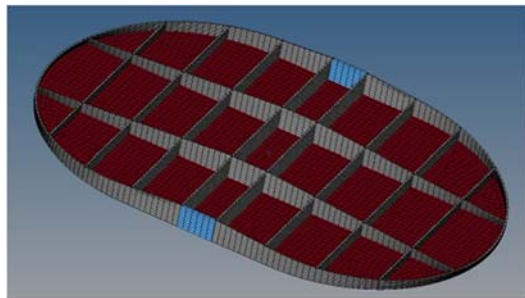


图 6 优化后的摆镜模型

支撑点位置 (计算历程见图 7，结果见表 3)。当支撑点位于镜面 7 mm 处时，镜面面形的 PV 值最小 (52.095 nm)，满足 62 nm 的设计指标要求。

2 空间环境应用中的摆镜校核

在完成摆镜的轻量化设计之后，本文针对空

表 2 摆镜轻量化优化设计的历程结果

NO.	d	α	D_1	D_2	PV	RMS	MASS
1	49	9.18	4	4	37.16	7.11	4.39
2	39	7.23	4	4	43.26	8.20	3.99
3	49	9.18	2	4	49.55	8.70	3.30
4	49	10.03	4	2	25.28	5.19	3.26
5	45	9.18	2	4	45.57	8.46	3.04
6	32	6.15	3	3	46.70	8.31	2.76
7	43	8.75	3	2	31.27	6.23	2.60
8	39	7.23	2	3	49.61	9.24	2.46
9	50	10.03	2	2	33.17	6.01	2.20
10	45	9.18	2	2	33.75	6.55	2.09
11	39	7.23	2	2	42.91	8.07	2.02
12	36	6.58	2	2	45.50	8.63	1.96
13	31	5.49	2	2	52.47	9.81	1.86
14	31	5.71	2	2	50.09	9.54	1.85
15	30	5.71	2	2	49.79	9.53	1.81
16	29	5.71	2	2	49.48	9.52	1.78
17	28	5.49	2	2	50.94	9.79	1.76
18	27	5.27	2	2	52.48	10.09	1.74
19	26	5.06	2	2	54.10	10.40	1.72

表 3 摆镜侧边支撑点位置的优化历程结果

序号	Z	PV_GY	rms_GY
1	24	62.329	8.183
2	18	58.862	8.119
3	14	56.469	8.23
4	10	54.204	8.414
5	7	52.095	8.922
6	6	52.413	9.331
7	4	53.921	9.954
8	2	54.41	10.332
9	0	54.103	10.396

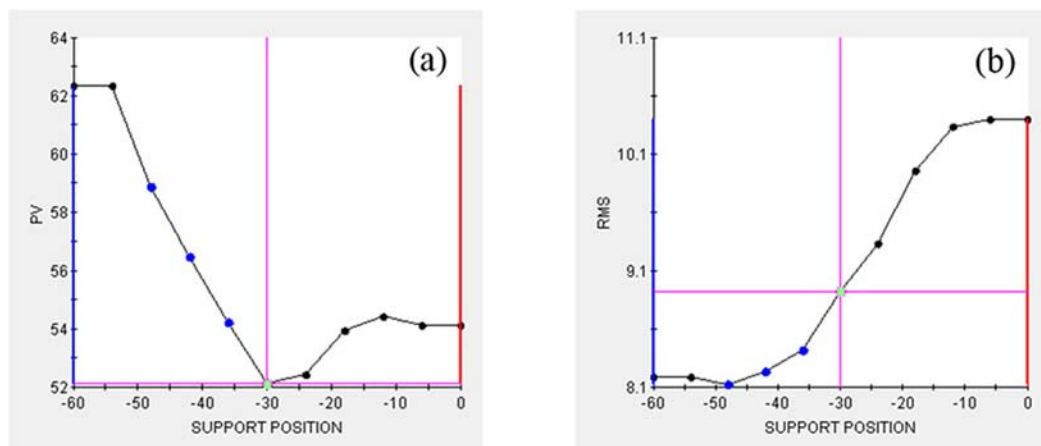


图 7 摆镜侧边支撑点位置的优化历程结果: (a) PV-No. ; (b) RMS-No.

间应用环境, 对设计结果进行了校核和考察。我们分析了空间微重力环境、温度环境以及摆动等载荷条件下的面形变化, 计算了摆镜的自然频率, 并对其动态性能进行了评估。

2.1 模态分析

模态是一个衡量结构动态性能的重要指标。通过模态分析可以计算摆镜的基频和振型, 并可评估摆镜在经历运输颠簸和发射振动载荷过程中的适应能力。

在运输或发射过程中, 摆镜的转动轴将会处于锁死状态。因此, 在模态分析中, 对摆镜两侧边的支撑点位置进行锁死约束。表 4 列出了摆镜的模态分析结果。其中, 一阶基频为 291 Hz, 远高于国内一般火箭发射过程中的主要谐振频率 100 Hz, 满足空间使用要求。

2.2 静力载荷变形分析

分别对摆镜在轨应用中所受的各种载荷进行分析, 并验证摆镜在优化后对空间应用的适应能力。根据摆镜的空间应用状态, 对摆镜两侧边分别施加固定约束和轴承约束, 然后分别施加微重力、 -50° 温度和 4.7 rad/s 旋转惯性载荷, 并计算摆镜面形。计算结果见表 5, 变形云图见图 8。

3 成像性能影响分析

为了评估空间环境中摆镜的变形对光学遥感器成像质量的影响, 我们对摆镜施加空间环

表 4 摆镜的前 5 阶约束频率

模态	频率 (Hz)	振型图
1	291	
2	465	
3	676	
4	807	
5	1020	

表 5 各空间载荷工况下的摆镜面形结果

序号	工况	载荷	PV	RMS
1	微重力	1 g	54.1	10.4
2	温度	-50°C	34.8	6.8
3	旋转惯性	4.7 rad/s	37.9	8.7

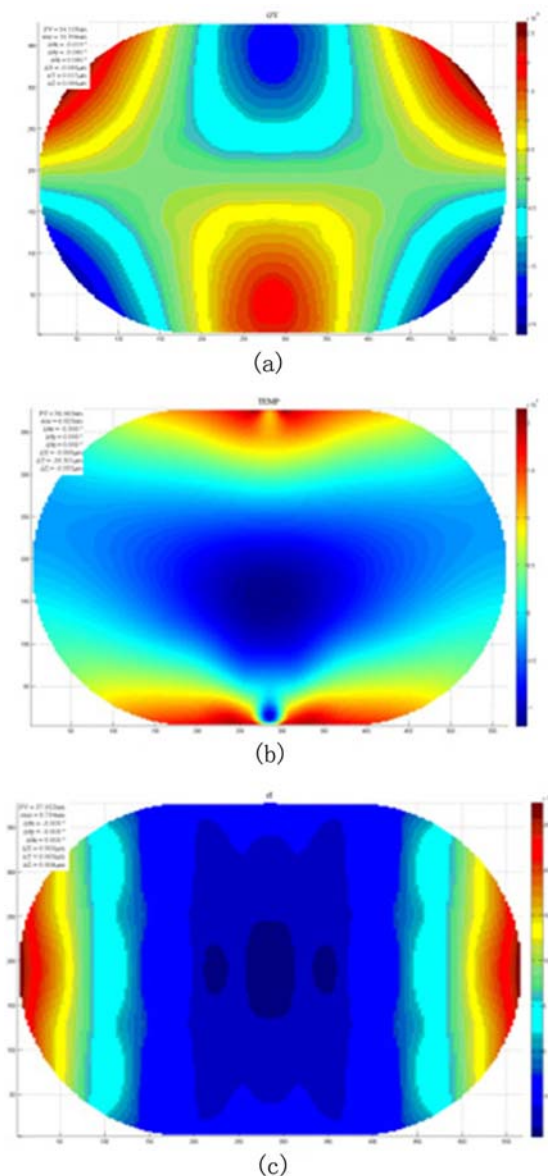


图 8 各空间载荷作用下的摆镜面形: (a) 微重力变形云图; (b) 温度载荷变形云图; (c) 旋转惯性载荷作用云图

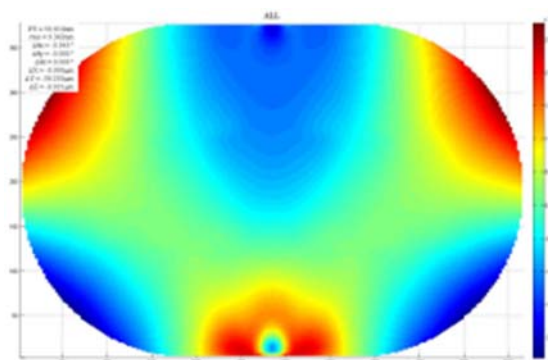


图 9 空间载荷综合作用下的摆镜面形

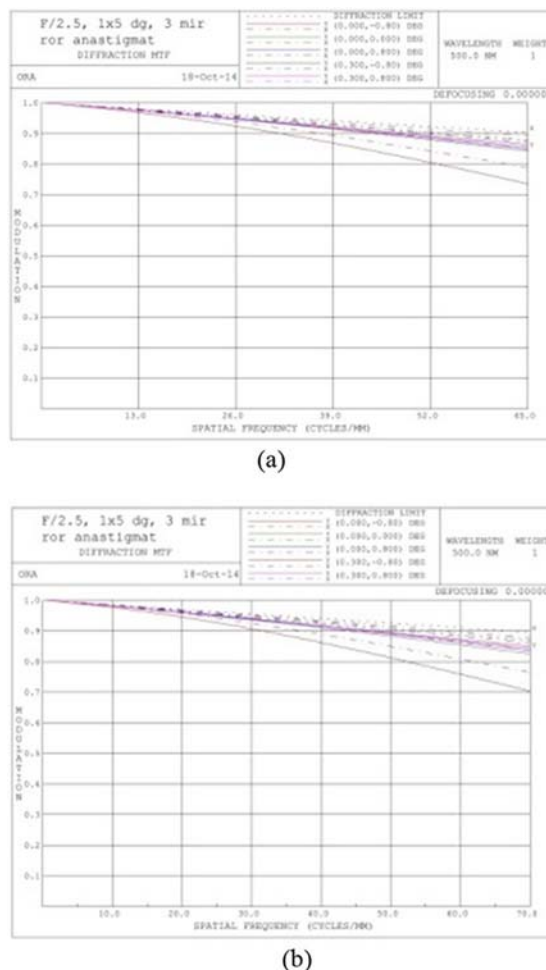


图 10 摆镜变形前后的光学传递函数对比: (a) 原光学系统设计的传递函数; (b) 引入摆镜面形变形后的光学传递函数

境载荷, 计算其变形所引起的面形变化; 然后计算波前差值, 并采用光机集成分析方法进行计算; 接着对面形进行拟合, 将数据写成 CODE V 软件可接收的接口文件格式 (*.INT), 并将其代入 CODE V 软件, 最后计算出遥感器的光学传递函数变化情况。

摆镜在空间环境中工作时, 需要经受以上载荷的共同作用, 而不仅仅是单个载荷。为了考核其实际工作状态对成像质量的影响, 我们同时施加静力、温度和惯性载荷, 计算其镜面变形, 并通过集成分析方法计算其变形对整个系统成像质量的影响。在以上载荷的共同作用下, 摆镜会产生变形, 其面形云图见图 9。此时, $PV=50.8$ nm, $RMS=9.4$ nm。对面形进行拟合, 并将数据

(下转第 34 页)