

高分辨率空间视频相机热敏感性分析

李凯^{1,2} 安源¹ 李宗轩¹ 孔林¹ 郭骏立^{1,2}

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

摘要 随着光学遥感卫星在轨成像质量要求的提高,为了满足相机环境温度的要求,往往需要大量热控资源。由于微小卫星资源紧张,所以综合分析相机各组件的热敏感性,合理分配热控资源,改善成像质量,具有重要的实用意义。介绍了光机热集成分析的研究现状和方法。建立了空间视频相机的有限元模型,分析了各组件在各温度载荷下的热变形对光学系统成像质量的影响。最后对比分析不同工况下的分析结果,得到了各组件在各温度载荷下对光学系统成像质量影响的强弱关系。结果表明:对影响最大的6种工况的温度载荷进行严格控制可使成像质量达到要求,从而为该视频相机的热控设计提供了参考。

关键词 光学设计; 光机热集成分析; 光学传递函数; 热变形; 视频相机

中图分类号 TP391.9; TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.122203

Thermal Sensitivity Analysis of High Resolution Space Video Camera

Li Kai^{1,2} An Yuan¹ Li Zongxuan¹ Kong Lin¹ Guo Junli^{1,2}

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

Abstract With the improving requirements of satellite's imaging quality, it often requires plenty of thermal control resources to meet the requirements of the space camera's temperature. Because the resources of small satellite are rare, it is important to study the thermal sensitivity of the camera component, rational distribution of thermal control resource and how to improve the image quality. First, researching status and methods of thermal-structural-optical integrated analysis are introduced. Then, the finite element model of space video camera is established to analyze the influence of thermal deformation of the components under the temperature load on the optical system's imaging quality. Last, contrast analysis of the results under different operating conditions are finished and the influence of the components under the temperature load on the optical system's imaging quality is achieved. The results show that reducing temperature load of every operating condition whose influence to the modulation transfer function is on the top six can make the image quality meet the requirement. It provides a reference to the thermal control design of the video camera.

Key words optical design; thermal-structural-optical intergrated analysis; optical transfer function; thermal deformation; video camera

OCIS codes 220.4880; 200.4880; 220.1000; 110.2980

1 引言

视频卫星具有重量轻、成本低、敏捷性高、分辨率高的特点以及对目标进行持续观测的能力,成为近年来对地观测卫星发展的新方向。与传统的对地观测卫星相比,视频卫星的持续观测能力可以获得更多的动态信息,特别适于观测动态目标,分析其瞬时特性^[1-3]。为了满足成像质量的要求,对相机热控提出了严格的要求。但由于视频卫星重量、体积和功耗的限制,需要根据光机热(TSO)集成分析等分析结果,对相机结构和热控进

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-07-09; 网络出版日期: 2015-10-25

基金项目: 国家863计划(2012AA121502)

作者简介: 李凯(1991—),男,硕士研究生,主要从事空间相机结构设计及其稳定性方面的研究。

E-mail: likai_sichuan@163.com

导师简介: 安源(1980—),男,博士,研究员,主要从事航天遥感器结构与机构设计方面的研究。

E-mail: any@ciomp.ac.cn

行一体化设计^[4],在保证相机成像质量的前提下,充分考虑各限制因素的影响^[5],降低热控对能源的需求。

聂山钧等^[6]对不同辐照光束下反射镜的热变形和镜体厚度对热变形的影响进行分析,得到了热变形对光束质量的影响。徐钰蕾等^[7]利用光机集成分析方法分析了静力载荷对光学系统传递函数(MTF)的影响。何宴等^[8]分析了各温度载荷对反射镜面形的影响。周连生等^[9]对光刻机的光机结构进行分析,得到了激光源强度、结构换热能力、空气扰动和外部环境对系统像差的影响。国外 Cengiz K 等^[10]用光机热集成分析方法对 Wide-Field Camera 3 相机主光学安装座进行了系统分析和优化设计,John D J 等^[11]对 James Webb 空间望远镜进行了完整的光机热集成分析。

本文通过光机热集成分析的方法,分析了空间视频相机各个组件在不同温度载荷的影响下,各光学表面的变形对整个光学系统成像质量的影响,得到相机各组件对各种温度载荷的敏感性,为相机的结构和热控优化设计提供了参考。

2 光机热集成分析

光机热集成分析方法综合了传热学、结构力学和光学等诸多学科,通过对不同热载荷条件下光学系统的成像质量进行分析,获得对光机结构热稳定性的评价。分析时,去除镜面变形中的刚体位移,把镜面畸变转变成光学分析软件能够接受的数据文件,从而实现结构变形分析到光学性能分析的有效传递^[12],是光机热集成分析的关键。利用 Nastran 软件,进行不同温度载荷下的热力学分析,得到视频相机结构和光学表面的变形数据。再将变形数据导入 Sigfit 中,先去除刚体位移,再对镜面进行面形拟合,使拟合结果更加准确。最后用 Zemax 对刚体位移数据和镜面拟合数据描述的光学系统进行成像质量分析,得到各个组件在温度载荷的影响下对光学系统成像性能的影响。光机热集成分析的流程图如图 1 所示。

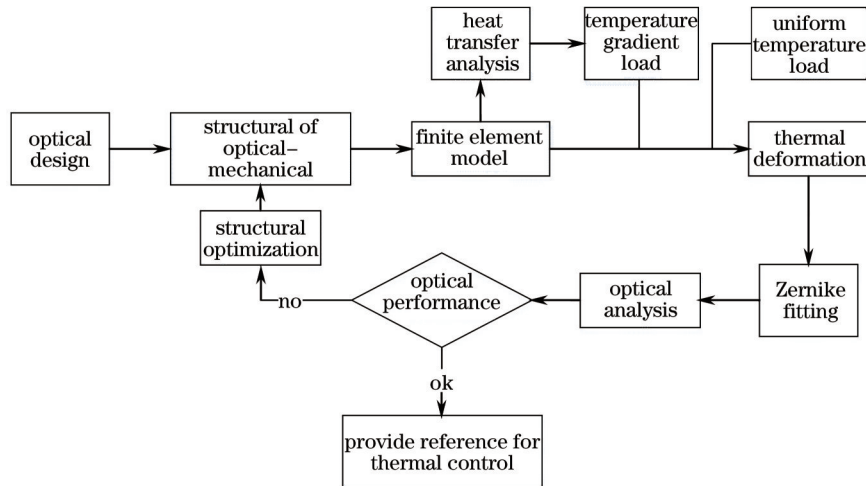


图 1 光机热集成分析流程图

Fig.1 Flow chart of TSO integrated analysis

镜面的刚体位移主要包括 3 个方向的平移和旋转,先用齐次坐标变换表示出变形数据中的刚体位移,再用最小二乘法求出刚体位移参数,即可相减去除镜面刚体位移。通过给镜面预设一个刚体位移,再用最小二乘法求解这个刚体位移量,与预设值对比可知,刚体位移的计算精度满足要求^[13]。光学元件在温度载荷和外部应力的影响下,镜面会产生复杂的微小变形,通过对镜面进行 Zernike 多项式拟合,即可得到变形后的精确面形。Zernike 多项式的每一项都对应着一种像差,为光学系统的优化提供了依据^[14]。Zernike 多项式的表达式为:

$$Z(r, \theta) = A_{00} + \sum_{n=2}^{\infty} A_{n0} R_n^0(r) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n R_n^m [A_{nm} \cos(m\theta) + B_{nm} \sin(m\theta)], \quad (1)$$

其中:

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} r^{(n-2s)}, \quad (2)$$

(1)式中的 A_{nm} 和 B_{nm} 是 Zernike 系数, (1)、(2)式中的 n 和 m 均为整数, 且 $n \geq m$ 。

光学表面面形用 Zernike 多项式拟合为

$$W(x, y) = a_1 Z_1(x, y) + a_2 Z_2(x, y) + \cdots + a_n Z_n(x, y), \quad (3)$$

其中 Z 为 n 项 Zernike 多项式。

在用 m 个节点表示的光学表面中, 通过热分析得到表面变形 $W_i(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, m)$, 令 $q_{ij} = Z_j(x_i, y_i) (j=1, 2, \dots, n)$, 代入(3)式得到方程组为

$$\begin{cases} q_{11}a_1 + q_{12}a_2 + \cdots + q_{1n}a_n = w_1 \\ q_{21}a_1 + q_{22}a_2 + \cdots + q_{2n}a_n = w_2 \\ \vdots \\ q_{m1}a_1 + q_{m2}a_2 + \cdots + q_{mn}a_n = w_m \end{cases}, \quad (4)$$

即

$$QA = W, \quad (5)$$

其中 $Q = (q_{ij})_{m \times n}$, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 。

一般 $W - QA \neq 0$, 所以采用最小二乘法来求解向量系数 $A^{[15]}$ 。将求得的 Zernike 系数输入光学分析软件中, 对光学系统进行成像质量的分析和评价, 通常最主要的评价标准为传递函数, 用不同视场角的传递函数值在奈奎斯特频率处的最小值来评价光学系统的成像质量。视频相机所采用的互补金属氧化物半导体 (COMS) 像元大小为 $5.5 \mu\text{m}$, 通过计算得到奈奎斯特频率为 91。

3 视频相机模型

视频相机采用的是卡塞格林式光学系统, 成像光线依次经主反射镜、次反射镜反射后, 通过 5 片球面矫正镜, 汇聚到焦平面上成像。主反射镜采用内凹的抛物面, 次反射镜为凸二次曲面, 为了减少温度变化产生的热变形, 两者均采用零膨胀微晶玻璃加工而成。通过 5 片矫正镜对反射式光学系统的轴外像差进行校正, 同时为了防止空间辐射对光学系统性能的影响, 校正镜的第一片透镜采用熔石英材料。光学系统的通光孔径为 320 mm , 视场角为 1.2° , 结构如图 2 所示。

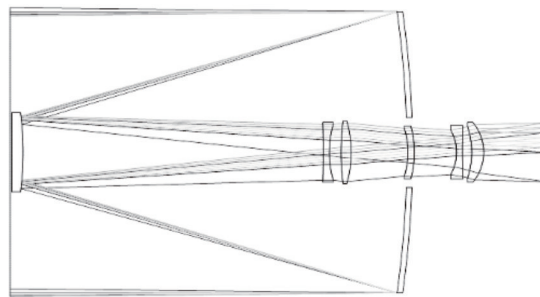


图2 视频相机光学模型

Fig.2 Optical model of video camera

视频相机结构系统由主镜组件、次镜组件、桁架杆、主背板、矫正镜组件等组成, 主镜芯轴与次镜座都是

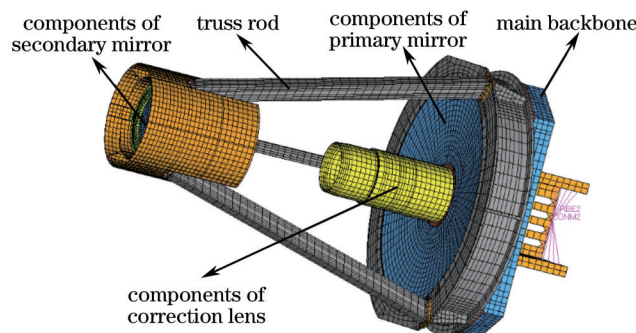


图3 视频相机有限元模型

Fig.3 Finite element model of video camera

采用与镜体的热膨胀系数一致的柔性殷钢材料,减少热变形对镜面的影响,次镜组件通过M40碳纤维桁架安装在钛合金主背板上,既保证了整个桁架结构的刚度,也降低了重量。视频相机有限元模型如图3所示。

4 光机热集成仿真分析

在没有加载温度载荷的情况下光学系统的传递函数如图4所示。在奈奎斯特频率处,各视场中传递函数数值最小为0.265654。

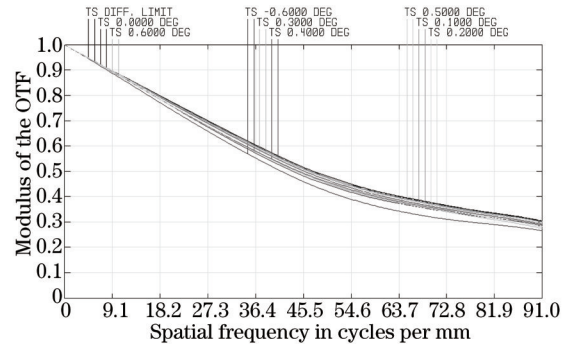


图4 光学系统传递函数

Fig.4 MTF of optical system

以一个组件加载一种温度载荷作为一个独立的工况进行分析,且加载的均匀温度载荷和温度梯度载荷均只有 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,便于对比分析各组件在各温度载荷下对成像质量的影响。首先,分别在主镜组件、次镜组件、校正镜组件、桁架杆和主背板上加载 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均匀温度载荷进行分析,共5个工况;其次,由于反射镜和透镜材料的导热系数都很低,不大于 $0.002\text{ [W/(mm}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C)]}$,在空间热环境和内置加热片的共同作用下,容易造成温度分布不均匀。所以需要对主镜、次镜以及校正镜组件在轴向、径向和周向 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度梯度载荷下进行分析,共9个工况。最后,连接次镜组件的三根桁架杆是独立的,容易造成三根杆的温度不同,所以需要对单根杆温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的周向温度梯度载荷进行分析,一共15个工况。

4.1 均匀温度载荷分析

分别对5个组件加载 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的均匀温度载荷,进行热变形分析,得到各组件加载温度载荷后的镜面变形。其中,次镜组件和主镜组件在均匀温度载荷下的反射镜镜面变形云图如图5所示。

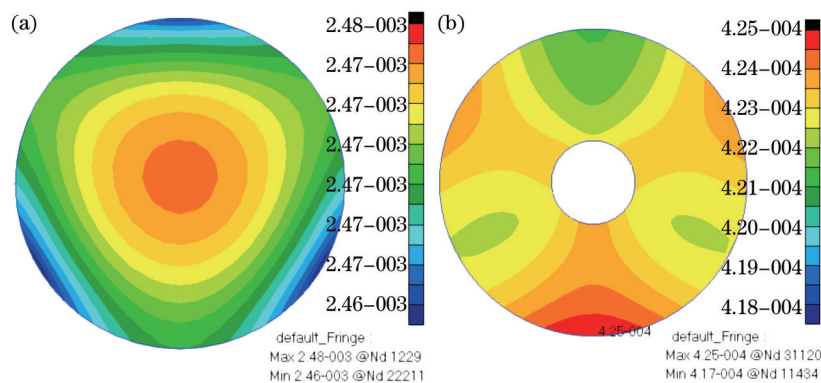


图5 镜面变形云图。(a) 次镜;(b) 主镜

Fig.5 Distortion nephogram surface. (a) Secondary mirror; (b) primary mirror

对5个工况下变形后的光学表面进行Zernike多项式拟合,得到拟合后的光学表面和光学系统。对图5中次镜和主镜的镜面变形进行拟合,结果如图6所示。

利用光学分析软件对拟合后的光学系统进行分析,获取5个工况下光学系统的传递函数。视频相机设计有调焦机构,通过调焦可以补偿离焦量,改善光学系统的成像质量。在分析时,通过软件对光学系统进行调焦,模拟调焦机构调焦,获取改善后各视场的传递函数在奈奎斯特频率处的值和各视场弥散斑中的最大均方根值(RMS)如表1所示。以仅在主镜组件上加载均匀温度载荷为例,在 0° 视场角的子午向和弧矢向的传递函数数值为0.30281、0.30283,后面依次是 $\pm 0.3^{\circ}$ 和 $\pm 0.6^{\circ}$ 视场角的传递函数数值,最后是传递函数在5个视场

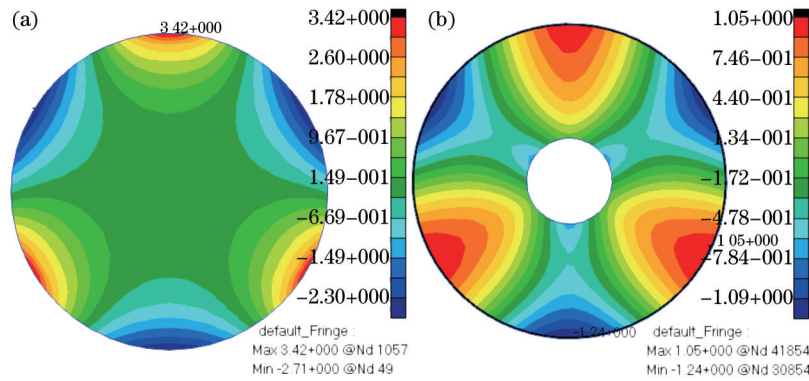


图6 拟合结果。(a) 次镜; (b) 主镜

Fig.6 Fitting results. (a) Secondary mirror; (b) primary mirror

角中的最小值 0.26385。根据传递函数最小值的对比可知,校正镜组件在均匀温度载荷下的传递函数在奈奎斯特频率处的最小值为 0.2606,在 5 个工况中最小,同时弥散斑的最大 RMS 值为 6.435,是 5 个工况中最大的。所以校正镜组件在均匀温度载荷下对传递函数影响最大。

表 1 均匀温度载荷状态下光学系统在奈奎斯特频率处的传递函数值

Table 1 MTF values of optical system at the Nquist frequency under uniform temperature load

Loading position		Components of primary mirror	Components of secondary mirror	Components of correction lens	Truss rod	Main backbone
0.000°	Meridian	0.30281	0.30301	0.30240	0.30281	0.30241
	Sagittal	0.30283	0.30302	0.30273	0.30288	0.30262
0.300°	Meridian	0.27572	0.27510	0.27437	0.27494	0.27465
	Sagittal	0.28926	0.29184	0.29404	0.29332	0.29475
-0.300°	Meridian	0.27536	0.27483	0.27542	0.27472	0.27645
	Sagittal	0.29199	0.28969	0.28529	0.28800	0.28594
0.600°	Meridian	0.26666	0.26397	0.26060	0.26250	0.26129
	Sagittal	0.28886	0.28711	0.28460	0.28582	0.28463
-0.600°	Meridian	0.26385	0.26590	0.26883	0.26721	0.27037
	Sagittal	0.28743	0.28895	0.28924	0.28988	0.28845
Minimum		0.26385	0.26397	0.26060	0.26250	0.26129
Spot diagram RMS radius		5.66	5.689	6.435	5.71	5.908

4.2 温度梯度载荷分析

在主镜的轴向上下表面、中心和外围以及两个扇形区域分别加载相差 1 °C 的均匀温度载荷,再利用

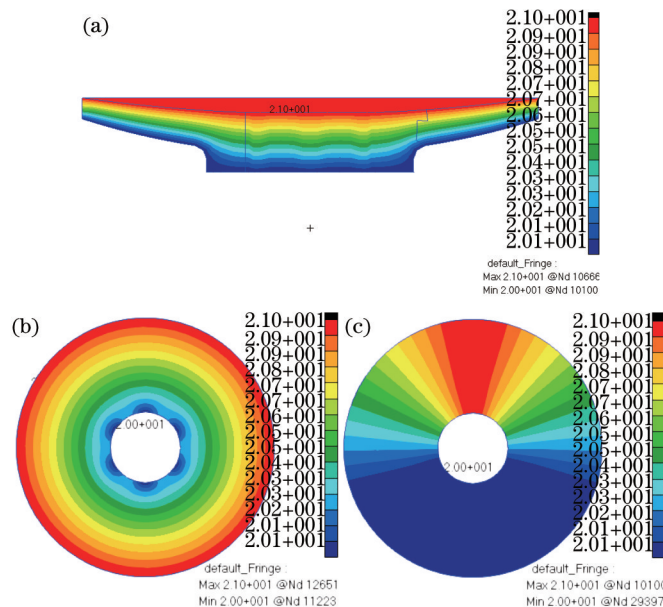


图7 主镜温度梯度。(a) 轴向; (b) 径向; (c) 周向

Fig.7 Temperature gradients of primary mirror. (a) Along axis; (b) along radial; (c) along circularity

Nastran软件进行热传导分析,可以得到主镜在不同加载状态下温度分布的情况,并借此作为主镜的温度梯度载荷,如图7所示,依次为1℃轴向温度梯度载荷、1℃径向温度梯度载荷和1℃周向温度梯度载荷。

采用同样的分析方法可以得到次镜和校正镜组件的1℃温度梯度载荷。根据得到的温度梯度载荷,利用光机热集成分析方法,分析光学系统在10个工况下的成像质量,通过光学软件调焦补偿后,各视场的传递函数在奈奎斯特频率处的值和各视场弥散斑中的最大RMS值如表2所示。根据传递函数最小值的对比可知,校正镜组件在周向温度载荷作用下传递函数的最小值最小,对传递函数影响最大。桁架杆在周向温度载荷的作用下,弥散斑的最大RMS值为6.352,在10个工况中最大。

表2 温度梯度载荷状态下奈奎斯特频率处的传递函数值

Table 2 MTF values at the Nquist frequency under temperature gradient load

Loading position		Axial of primary mirror	Radial of primary mirror	Circumferential of primary mirror	Axial of secondary mirror	Radial of secondary mirror
0.000°	Meridian	0.30338	0.30285	0.30299	0.30293	0.30295
	sagittal	0.30338	0.30285	0.30284	0.30293	0.30295
0.300°	Meridian	0.27525	0.27542	0.27511	0.27546	0.27551
	sagittal	0.29115	0.29086	0.29034	0.29075	0.29079
-0.300°	Meridian	0.27527	0.27547	0.27631	0.27545	0.27550
	sagittal	0.29118	0.29050	0.29137	0.29070	0.29080
0.600°	Meridian	0.26459	0.26516	0.26530	0.26525	0.26521
	sagittal	0.28659	0.28807	0.28791	0.28803	0.28793
-0.600°	Meridian	0.26457	0.26553	0.26439	0.26528	0.26519
	sagittal	0.28658	0.28825	0.28725	0.28808	0.28793
Minimum		0.26457	0.26516	0.26439	0.26525	0.26519
Spot diagram RMS radius		5.927	5.64	5.729	5.667	5.693

Loading position		Circumferential of secondary mirror	Axial of correction lens	Radial of correction lens	Circumferential of correction lens	Circumferential of truss rod
0.000°	Meridian	0.30292	0.30292	0.29936	0.30106	0.30242
	sagittal	0.30295	0.30293	0.29896	0.30276	0.30181
0.300°	Meridian	0.27507	0.27520	0.27144	0.27565	0.27130
	sagittal	0.29086	0.29035	0.28551	0.28695	0.28778
-0.300°	Meridian	0.27562	0.27520	0.27142	0.25893	0.28179
	sagittal	0.29043	0.29034	0.28551	0.29276	0.29485
0.600°	Meridian	0.26563	0.26428	0.26161	0.26244	0.26393
	sagittal	0.28799	0.28786	0.29053	0.28889	0.28666
-0.600°	Meridian	0.26508	0.26429	0.26157	0.26592	0.26052
	sagittal	0.28850	0.28786	0.29054	0.28293	0.28172
Minimum		0.26508	0.26428	0.26157	0.25893	0.26052
Spot diagram RMS radius		5.679	6.132	5.8	6.267	6.352

4.3 敏感性分析

根据表1和表2中光机热集成分析的结果,可以得到视频相机各组件分别在均匀温度载荷和温度梯度载荷下,经调焦补偿后,光学系统的传递函数在奈奎斯特频率点处的降低程度如图8所示。在某个工况下传递函数的减少量除以没有温度载荷时的传递函数值,即该工况中,特定组件在特定的温度载荷下对传递函数的影响强弱。主镜和次镜在温度梯度载荷下的数据分别归类到主镜组件和次镜组件中。校正镜组件在周向温度梯度载荷下,经过调焦后的剩余像差对传递函数的影响最大,降低2.53%。对于15种温度工况,传递函数的降低之和为14.2%,根据成像质量的要求,所有温度载荷对传递函数的影响之和不大于6%。传递函数改变最大的前6个温度工况,依次是校正镜组件加载周向温度梯度载荷、桁架杆加载周向温度梯度载荷、校正镜组件加载均匀温度载荷、主背板加载均匀温度载荷、校正镜组件加载径向温度梯度载荷和桁架杆加载均匀温度载荷,对传递函数影响之和达到10.73%,通过控制加热片的加热功率,对6个温度工况中的温度

载荷进行温度控制,使其对传递函数的影响下降80%,则所有工况对传递函数的影响之和下降了60.45%,减少到5.62%,即可满足成像质量的要求。当温度增加,使传递函数的降低量超过6%,温度载荷对传递函数的影响较大,不再满足成像要求。

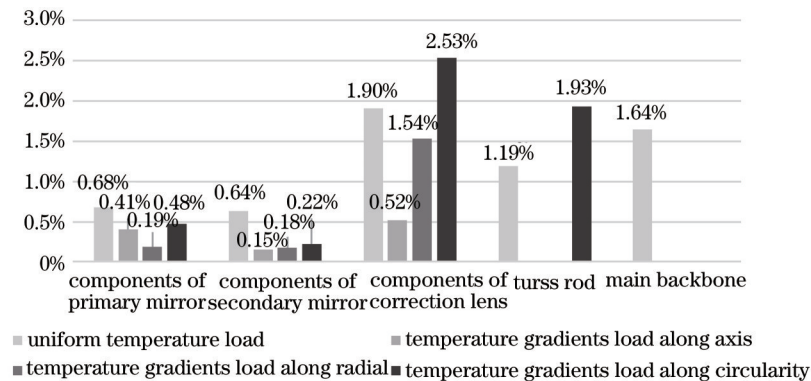


图8 各组件在不同温度载荷下对传递函数的影响

Fig.8 Impact on MTF of components under different temperature loads

5 结 论

通过热传导的分析方法,得到了光学组件的温度梯度分布,并用集成分析的方法,分析了各组件在不同温度载荷下,对光学系统成像质量的影响程度,并通过图表的形式进行了影响程度的对比。对影响最大的6种工况的温度载荷进行控制,使其对传递函数的影响下降80%,则所有工况对传递函数的影响之和下降到5.62%,即可满足成像质量的要求,为热控提供参考。根据分析结果可知,不同的组件在不同的温度载荷下对光学系统成像质量的影响不同;为了提高光学系统的成像质量,只需对影响最大的6种工况下的温度载荷进行控制即可,使热控资源得到合理分配,减少了热控目标,有利于灵巧视频卫星的轻量化、小型化和一体化设计。

参 考 文 献

- Liu Tao. Development and research of video satellite abroad[J]. Space International, 2014, 9: 50-56.
刘 韬. 国外视频卫星发展研究[J]. 国际太空, 2014, 9: 50-56.
- Zhu Luqing, Zhang Zhaocai. Review of foreign small satellite in 2013[J]. Space International, 2014, 2: 38-43.
朱鲁青, 张召才. 2013年国外微小卫星回顾[J]. 国际太空, 2014, 2: 38-43.
- Chen Entao, Jia Hong, Li Jindong, *et al.*. Study on the method of thermal/structural/optical integrated analysis of space remote sensor[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(1): 66-70.
陈恩涛, 贾 宏, 李劲东, 等. 空间光学传感器光-机-热集成分析方法研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(1): 66-70.
- Jia Yong, Gao Yunguo, Shao Shuai. Opto-mechanical optimization for laser expander system under thermal loads[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0116003.
贾 勇, 高云国, 邵 帅. 热载荷下激光扩束系统的光机优化设计[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116003.
- Hu Xinhang, Chen Ning, Wang Bing, *et al.*. Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0816002.
徐新行, 陈 宁, 王 兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0816002.
- Nie Shanjun, Guo Jin, Shao Junfeng. Thermal deformation of high absorption chrome plated mirror irradiated by laser [J]. Chinese Optics, 2015, 8(1): 84-90.
聂山钧, 郭 劲, 邵俊峰. 激光辐照下镀铬介质高吸收镜的热变形[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 84-90.
- Xu Yulei, Tian Haiying, Liu Jian. Intergratedopto-mechanical analysis of a long-focus airborne camera under overloads [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 082202.
徐钰蕾, 田海英, 刘 剑. 长焦距航空传感器过载荷下的光机集成分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 082202.
- He Yan, Wang Jihong, Peng Qi. Thermal property of large aperture light primary mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(6): 63-69.
何 宴, 王继红, 彭 起. 大口径轻质主镜热特性分析[J]. 光电工程, 2014, 41(6): 63-69.
- Zhou Liansheng, Yu Xinfeng, Wu Zhihui, *et al.*. Analysis of influence factors of thermal aberrations based on the small

- lens system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 092204.
周连生, 于新峰, 吴志会, 等. 基于小物镜系统的热像差影响因素分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 092204.
- 10 Cengiz K, Peter M. WFC3 optical bench structural thermal optical performance (STOP) analysis and optimization[C]. 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2003, 4.
- 11 John D J, Joseph M H, Gary E M, *et al.*. Integrated modeling activities for the james webb space telescope: structural-thermal-optical analysis[C]. *SPIE*, 2004, 10, 5487: 600-610.
- 12 Doyle K, Genberg V, Michels G. Integrated Optomechanical Analysis[M]. Washington: Publication of SPIE, 2002.
- 13 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): 2763-2767.
张颖, 丁振敏, 赵慧洁, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2763-2767.
- 14 Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of thermal_structural_optical integrated analysis of space remote sensor[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(6): 913-917.
杨恽, 陈时锦, 张伟. 空间光学遥感器光机热集成分析技术综述[J]. *光学技术*, 2005, 31(6): 913-917.
- 15 Fan Yue. Thermal/Structural/Optical Analysis and Thermal Control Technique of Aerial Camera[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
樊越. 航空相机光机热分析与热控技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.

栏目编辑: 韩峰