

文章编号:1002-2082(2016)02-0262-05

光机热集成分析在高光谱成像仪 紫外镜头中的应用

武 耀,徐明明,陈素娟,江 宇,薛 辉,司福祺,陈结祥

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

摘 要:温度变化会影响紫外镜头各镜面面形和镜片间隔的变化,采用了光机热集成分析方法研究温度对紫外镜头成像质量的影响。论述光机热集成分析的基本流程和关键技术,采用 Zernike 多项式作为结构分析与光学分析之间的接口工具,在紫外镜头光学系统设计和机械结构设计的基础上,建立了紫外镜头的热-结构分析模型,得到各镜面面形和镜片间隔的变化结果,并将结果耦合到光学设计软件中进行像质分析。分析结果表明,在镜头的工作范围内,镜头的调制传递函数在 12 lp/mm 处均在 0.7 左右,能满足高光谱成像光谱仪的使用要求,同时也为光谱仪最后整机分析提供了参考。

关键词:高光谱成像仪紫外镜头;成像质量;光机热集成分析;Zernike 多项式;计算机仿真

中图分类号:TN216

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0205002

Application of thermal/structural/optical integrated analysis to ultraviolet lens of hyperspectral imaging spectrometer

Wu Yao, Xu Mingming, Chen Sujuan, Jiang Yu, Xue Hui, Si Fuqi, Chen Jiexiang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: The temperature change can affect the change of the shape and interval of the surfaces of the ultraviolet(UV) lens. In order to study the effect of the temperature on the imaging quality of the UV lens, the method of thermal/structural/optical(TSO) integrated analysis was used. The basic processes and key technologies of the TSO integrated analysis were discussed and the Zernike polynomials was used as the interface between structural analysis and optical analysis. Based on the design of the optical system and mechanical structure of the UV lens, the thermal-structural model of the lens was established and the changes of the surface shape and lens spacing were obtained. Finally, the results were coupled in the optical design software, then the image quality was further analyzed. The analysis results show that, in the working range of the lens, the design value of the modulation transfer function (MTF) at 12lp/mm is about 0.7, which can meet the use requirements of hyperspectral imaging spectrometer. At the same time, it also provides a reference for the analysis of the final machine of the spectrometer.

Key words: UV lens of hyperspectral imaging spectrometer; image quality; TSO integrated analysis; Zernike polynomials; computer simulation

收稿日期:2015-11-25; 修回日期:2015-12-20

基金项目:国家自然科学基金(41275037);安徽省自然科学基金(1408085MKL49)

作者简介:武耀(1985-),男,湖北孝昌人,硕士,主要从事光学工程技术及应用方面的研究。

E-mail:hwsywu@sohu.com

引言

高光谱分辨率紫外成像光谱仪主要由前置光学系统和后端成像光谱仪系统两部分组成,光学系统结构如图 1 所示。前置光学系统是像方远心结构的紫外望远物镜,将地表光聚焦到 Littrow-Offner 光谱仪入射狭缝处,入射狭缝主要控制光通量和实现空间滤波,其狭缝宽度由所选探测器像元的大小确定。为了抑制杂散光和提高系统的信噪比,入射狭缝处设置滤光片。后端成像光谱仪系统主要由凸面光栅和凹面反射镜组成,从入射狭缝入射的具有一定发散角的多色光入射到凹面镜,再由凹面镜反射到凸面光栅上,因为凸面光栅的光栅条纹密度足够高,使其衍射的光束返回到凹面反射镜,再经凹面镜反射到探测器上。最后,狭缝的光谱像被成像到入射狭缝下方的面阵 CCD 探测器上。

在设计过程中,首先对前端成像系统和后端光谱分光系统进行单独设计,分别得到各自的初始结构,然后进行整体优化,合理分配 2 个系统的像差,提高整体光学系统的成像质量。运用光机热集成分析方法,全面考虑外部热环境的影响,机械结构系统的热弹性作用和光学系统的相互关系,对前置紫外镜头进行计算机虚拟环境下的仿真,实现前置紫外镜头光学系统结构的最优设计并得到最佳的像质评价^[1-2]。由于光机热集成分析方法可以模拟真实物理环境下的成像,所以能使成像系统分析变得更加可靠。

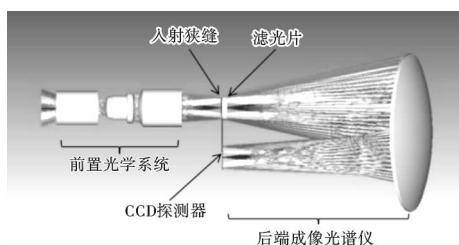


图 1 高光谱成像仪光学系统结构图

Fig. 1 Optical layout of hyperspectral imaging spectrometer

1 光机热集成分析介绍

光机热集成分析方法是光机系统热分析最常用和最成熟的一种分析方法,它综合考虑了系统热变形、机械结构优化设计与光学系统像质评价这三者之间的相互关系和影响。现代光学系统大多都是光机电算的跨学科综合系统,为解决不同

学科领域之间的协同设计问题,可以通过各自设计领域内软件间的相互配合(导入和导出),综合分析整个系统,得到系统的综合性能指标,并根据分析结果对系统进行设计修改,从而使设计的光学系统更能反映真实情况^[3-4]。

1.1 集成分析基本流程

集成分析运用多个不同学科技术手段,分析过程主要是^[5]:首先,利用机械设计软件(如 Solid-Works)对光学系统进行几何建模;其次,将模型导入有限元分析软件(如 ANSYS Workbench)中进行网格划分和热-结构耦合分析;再次,将分析得到的变化数据导出,利用编程软件(如 Matlab)对变化后的面形进行 Zernike 多项式拟合得到其多项式系数,并将其转化为可直接输入光学设计软件(如 Zemax)的文件格式(.DAT);最后,在光学设计软件(如 Zemax)中进行像质分析。图 2 是分析过程的一般技术路线图^[6]。

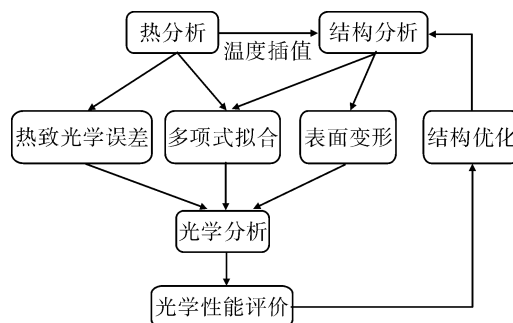


图 2 光机热集成分析流程

Fig. 2 Flow chart of TSO integrated analysis

1.2 集成分析关键技术

集成分析最关键的工作是如何将光学系统热变形数据导入到光学设计软件中,这主要涉及到数据接口转换问题。Zernike 多项式是理想的结构分析与光学分析程序之间的接口工具,这是因为:首先,Zernike 多项式在单位圆内是连续正交的,显然多项式的每一项之间也是线性无关的,这有利于消除偶然因素的干扰;其次,Zernike 多项式在光学系统求解的过程中一般都具有很好的收敛性,这对复杂系统的求解是重要的,尤其是对计算机数值求解;最后,Siedel 像差可以表示成 Zernike 多项式的线性组合,这为有选择性地校正光学系统(重点校正的像差)提供了理论依据,为优化系统性能提供了有效的途径^[7-9]。所以,可以编写专门的程序通过 Zernike 多项式这座桥梁实现结构和光学的通信。

2 紫外镜头光机系统和结构设计

2.1 光学系统设计

紫外镜头光学设计要求:工作波长为 276 nm ~380 nm,视场角为 40° , F 数为 3.5,有效焦距为 18 mm。由于视场较大、焦距较短且因探测器的安装需要较长的工作距离,结构形式采用反远距结构,由分离的负、正光组构成。靠近物空间的光组具有负光焦距,称为前组;靠近像平面的光组具有正光焦距,称为后组。入射光线经过前组发散后,再经过后组会聚于焦平面。由于像方主面位于正组的右侧靠近像平面的空间里,因此反远距的后工作距可以大于焦距。反远距物镜的光阑设在正组中间,轴外光束有较大的入射高度,产生了较大的初级轴外像差和高级轴外像差。前组采用单片负透镜,自身产生的轴外像差由本身解决,剩余的量可以由后组补偿。反远距物镜的后组承担了较大的孔径,其视场由于有前组的发散作用,已经有所减小。与一般物镜比较,后组是对近距离成像,可采用不对称的结构形式。该镜头工作在紫外波段,可供选择的材料少,色差难以控制。由消色差的基本原则可知,正透镜选用 V 值大的材料,负透镜选用 V 值小的材料。综合考虑材料的理化性能,负透镜比较适宜的材料为熔石英,正透镜可选用的材料为 CaF_2 。设计完成后的光学系统如图 3 所示。镜片 1 和 3 的材料为 JGS_1 ,镜片 2、4 和 5 的材料为 CaF_2 ,截止频率为 12 lp/mm 时系统传递函数如图 4 所示。

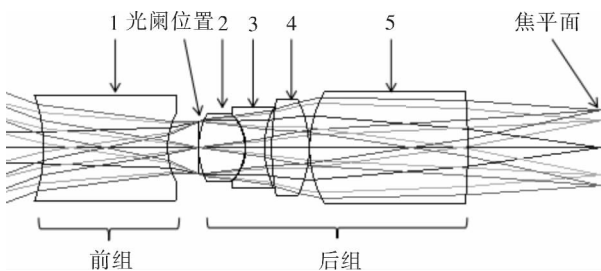


图 3 光学系统图

Fig. 3 Optical system layout

2.2 机械结构设计

如图 3 所示,由于镜头后组各镜片之间的间距都比较小,尤其是镜片 2 和 3 的最小距离只有 0.02 mm,所以通过机械结构精度来保证最终的成像质量就显得尤为重要。各镜片间的间距通过隔圈保证,由光学系统图不难看出,镜片 2 和 3、3 和 4 之间的隔圈将会做的很薄,无论从加工或变形的角度来看,都是不宜采用的。如图 5 所示,为了提

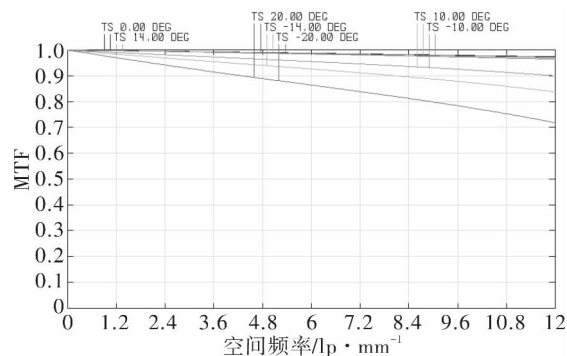


图 4 光学系统传递函数

Fig. 4 Optical system MTF

高隔圈的刚度,隔圈采用内嵌式结构。同时,由于存在上述小空气间隔,对镜头装配过程中的系统累积误差也比较敏感,装配时需反复测量研磨隔圈来保证设计要求。为了保证镜头在温度变化环境下的可靠性,分别沿镜筒的圆周方向在每个镜片的安装位置均匀布置 3 个灌胶孔,装配完成和通过测试满足成像要求后,用 RTV 胶密封,目的是各镜片和镜筒之间实现柔性连接,提高镜头在温度变化及冲击、振动环境下的稳定性。

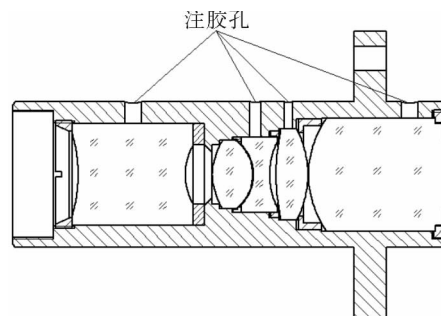


图 5 镜筒结构图

Fig. 5 Barrel of lens drawing

3 紫外镜头光机热集成分析

3.1 热-结构耦合分析

镜头的工作温度范围是 $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$,所用到的材料属性见表 1 所示。将 Solidworks 装配模型导入到 Workbench 中,需要用到稳态热分析和静态结构分析两个模块,分别对每个零件添加材料属性,采用六面体网格划分方法,得到的有限元网格模型如图 6 所示。单元总数为 27 453,节点总数为 53 223。分别对装配体添加载荷和边界条件,求解得到在 -10°C 环境下镜片的变形位移云图,如图 7 所示。由云图可看出,第 1 块和第 5 块镜片的镜面变形是主要的,这是因为第 1 块与环境温度直接接触,第 5 块受后继系统等效热源影响,分析结果和实

际相符。将变形后的面形节点坐标提取出来,经过处理后借助 Matlab 编程工具进行 Zernike 多项式拟合,得到每个镜面的前 37 项 Zernike 多项式系数。

限于篇幅限制,仅列出第 4 块镜片左表面的前 9 项系数和对应的物理意义,如表 2 所示,各环境温度下镜片间距的变化如表 3 所示。

表 1 装配体材料属性

Table 1 Material properties of assembly

材料	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比	热导率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	热胀系数/ $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
CaF ₂	3.18	75.8	0.26	9.71	18.85
JGS ₁	2.2	72	0.15	1.4	0.55
TC ₄	4.45	109	0.33	5.44	7.89

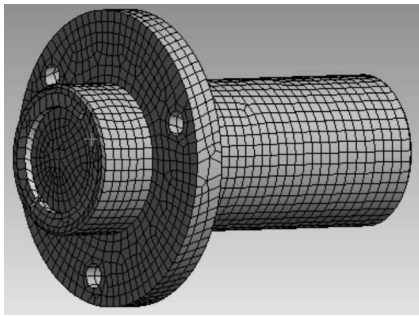


图 6 镜头有限元模型

Fig. 6 Finite element model of lens

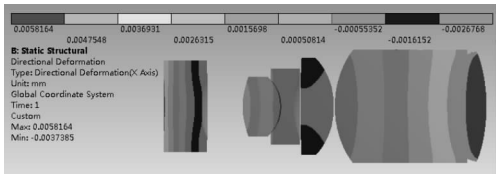


图 7 -10 °C 镜头的变形云图

Fig. 7 Displacement of lens at -10 °C

表 2 Zernike 系数及物理意义

Table 2 Zernike coefficients and their physical meanings

项	系数	初级像差
1	-1.328E-6	平移
2	7.263E-12	X 轴倾斜
3	5.158E-12	Y 轴倾斜
4	-1.826E-6	离焦
5	2.376E-10	0°像散 & 离焦
6	6.347E-10	45°像散 & 离焦
7	-1.361E-12	彗差和 X 轴倾斜
8	-2.639E-12	彗差和 Y 轴倾斜
9	2.308E-11	球差 & 离焦

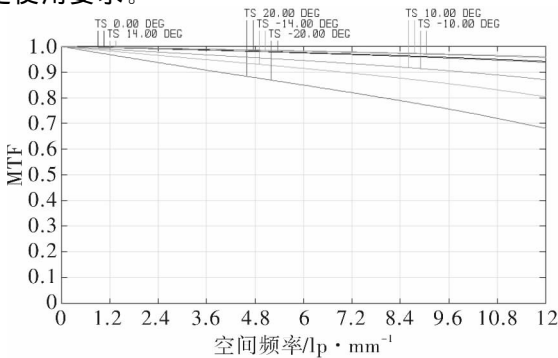
表 3 各环境温度下镜片间距的变化

Table 3 Variation of lens spacing at different ambient temperatures

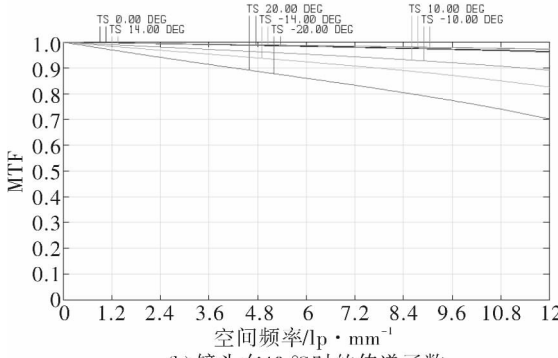
环境 温度/°C	1,2 间距 变化/ μm	2,3 间距 变化/ μm	3,4 间距 变化/ μm	4,5 间距 变化/ μm
-10	4.308	0.554	1.615	1.062
40	-1.769	-0.362	-1.074	-0.715

3.2 光学系统像质评价

对镜头进行像质评价前,需要将 Zernike 多项式系数转化为 Zemax 能够直接导入的“. DAT”格式。将各温度条件下的镜片间隔和 Zernike 系数导入 Zemax 像质分析软件中,最终得到的 MTF 如图 8 所示。边缘视场子午方向和弧矢方向的 MTF 虽然有所差异,但由于前置镜头只要求在光谱仪的光谱维方向有较高的分辨率,对空间维方向的镜头分辨率要求并不高,所以只要分析 MTF 在子午方向的像质。通过对比图 4 和图 8 可以看出,-10 °C 和 40 °C 时镜头的 MTF 在 12 lp/mm 处尽管较设计值均有所下降,但仍然都在 0.6~0.7 之间,说明该镜头具有良好的温度适应性,满足使用要求。



(a) 镜头在-10 °C时的传递函数



(b) 镜头在40 °C时的传递函数

图 8 镜头在不同温度下的传递函数

Fig. 8 MTF of lens at different temperatures

4 结论

温度始终是影响光学系统成像质量的主要因素,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内,分析结果表明,紫外镜头的MTF较设计值均略有下降,边缘视场在 $12\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处的MTF值在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 大致分别为0.68和0.7,完全满足后端成像光谱仪对像质的要求。运用光机热集成分析方法很好地分析了温度对紫外镜头成像质量的影响,尤其是在大温度场、大温度梯度的光机设计中,其优越性更加明显,同时也为下一步高光谱分辨率紫外成像光谱仪温度场整机分析提供了参考。

参考文献:

- [1] Liu Xiaobo, Yang Hongbo, Sun Qiang. Applications of integrated analysis of optical-structure-thermal in IR optical system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(6): 973-979.
刘小波,杨洪波,孙强. 光机热集成分析法在红外光学系统中的应用[J]. 半导体光电, 2008, 29(6): 973-979.
- [2] Li Fu, Ruan Ping, Xu Guangzhou, et al. Integrated opto-mechanical-thermal analysis of infrared lens [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 385-388.
李福,阮萍,徐广州,等. 红外镜头的光机热集成分析研究[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 385-388.
- [3] Zhou Xiaohong, Ren Xiaoming, Li Zhu, et al. Thermal-structural-optical integrated analysis method of laser optical system [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(11): 2851-2855.
周小红,任晓明,李柱,等. 激光器光学系统光机热集成分析方法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2851-2855.
- [4] Liu Ju, Xue Jun, Ren Jianyue, et al. Review of re-

search on integration design of structural, thermal and optical analysis with key technique of space camera [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 422-427.

刘巨,薛军,任建岳. 空间相机光机热集成设计分析及关键技术研究综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 422-427.

- [5] Li Qikai. Zernike polynomials fitting in cryogenic optical thermal integration analysis [J]. Spacecraft Recovery&Remote Sensing, 2010, 31(4): 45-50.
李其楷. Zernike 多项式拟合用于低温光学镜头热集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(4): 45-50.
- [6] Yang Yi, Zhang Wei, Chen Shijin. Thermal/structural/optical concurrent design based on integrated analysis technique [J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 394-397.
杨怿,张伟,陈时锦. 基于集成分析法的光机热一体化设计[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 394-397.
- [7] Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(3): 318-323.
单宝忠,王淑岩,牛憨笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程, 2002, 10(3): 318-323.
- [8] Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with Zernike polynomial [J]. Spacecraft Recovery&Remote Sensing, 2010, 31(5): 49-55.
杨佳文,黄巧林,韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5): 49-55.
- [9] Li Fu, Ruan Ping, Ma Xiaolong, et al. Methods of opto-mechanical analysis with Zernike polynomials [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 38-42.
李福,阮萍,马小龙,等. 用 Zernike 多项式实现光机分析的技术方法[J]. 应用光学, 2007, 28(1): 38-42.