©2015《中国激光》杂志社

多组元透镜的安装和定位研究

张丽敏 吕天宇

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 针对在温度范围大的环境中使用的多组元透镜组由于透镜和镜座的材料热膨胀系数不匹配而在透镜内部产生应力,影响系统光学性能的问题,对透镜组的固定支撑结构进行设计以最小化此应力。对常用的几种表面接触方式进行分析比较,计算温度对轴向和径向的影响,并合理设计透镜组安装和定位结构,采用MSC.Patran软件对消热结构进行验证。结果表明,消热间隙和消热垫的设计使温度对透镜的影响明显减小,而且整体结构刚度高,便于装调,对于共轴光学系统的支撑结构是一种普遍适用的设计方法。

关键词 光学设计;多元透镜组;消热;共轴光学系统

中图分类号 TH752 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.042202

Research for Fixing and Orientation Structure of Lens

Zhang Limin Lü Tianyu

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

Abstract As the mismatch of thermal expansion coefficients between the lens and the frames, stress on the lens is brought under the large temperature range, which can affect the properties of optical system. So a special support structure is designed to minimize the stress. Firstly, several existing form of surface contacted are analyzed and compared, then the axial and radial effect caused by temperature is calculated, and the fixing and orientation structure is designed prettily. Lastly, the impact of reducing the thermal stress is simulated by the MSC.Patran software. The result indicates that the space and pad for reducing the thermal stress make the stress and deformation of lens caused by temperature decrease clearly, and the rigidity of the assembly system is fine, assembly method simple, as a broad applicable design method can solve the support structure of coaxial optical system.

Key words optical design; lens; reducing the thermal effect; coaxial optical system

OCIS codes 120.4880; 120.6810; 220.4840; 220.4880

1 引 言

透镜是组成各种光学仪器的基本光学元件。通过将不同形式的透镜合理组合可以构成功能各异的光学系统,如经典的光学仪器望远镜、显微系统和照相机,也可以应用于新型的高功率激光装置。随着成像要求的不断提高,对光机系统的精度和稳定性要求也越来越苛刻。

光机系统的设计质量和装配精度是影响设备整体精度的直接因素。然而,在现代的光学设计中,Zemax和CodeV等光学设计分析软件已得到广泛应用。相比于传统的设计方法,利用这些光学软件不仅可以大大缩短设计周期,而且其本身集成的公差分析功能,使光学系统的设计质量得到极大的提升,可以充分满足功能要求。因此,透镜组的安装和定位精度成为影响设备精度的关键因素之一[1-5]。在实际使用过程中,透镜组常在运动过程中完成对目标的成像,而且使用环境的温度变化范围也比较大,因此对透镜组的固定结构不仅要满足静态力学和动力学设计要求,而且要具有温度适应性。此外,依靠反复修磨机械件的传统装调方法,效率低,成本高,因此需要在设计时考虑新的装调测试方法,既简捷,而且精度高,从而满足系统的要求。

收稿日期: 2014-09-17; **收到修改稿日期**: 2014-11-17; **网络出版日期**: 2015-02-10

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20130102018JC)

作者简介: 张丽敏(1981—),女,博士,副研究员,主要从事精密光机结构设计方向的研究。E-mail: zhangtqx@163.com

透镜的轴向和径向支承主要考虑在支承过程中保持透镜的加工面形精度不变,固定足够牢固、稳定,而且结构又便于研磨、装配和调试,达到空气间隔和中心厚的公差要求。常见的透镜的固定支撑组件形式一般有三种,见文献[6]。本文在此基础上进行了改进,既降低结构和装配的难度,同时定心精度较高[7-9]。

2 透镜装夹结构形式与选择

2.1 透镜表面为凸球面

2.1.1 尖角界面

镜座、压圈或隔圈与光学表面相交,从而形成尖角界面,如图1所示。镜座与透镜之间留有一定间隙(小于1 mm),对于满足一定条件的透镜,使用尖角界面结构可以实现自动定心功能:

$$\left[\frac{y_c}{2R_1}\right]-\left[\frac{y_c}{2R_2}\right]\geqslant 0.07, \tag{1}$$

式中 R_1 为与环形凸台接触的透镜表面曲率半径, R_2 为与压圈接触的透镜表面曲率半径, y_c 为压圈与透镜的接触点与镜座几何轴的距离。

由于透镜和镜座的材料都是弹性材料,所以在光学表面较靠外的边缘部分与金属构件之间会形成一条较窄的环状形变接触区,轴向压力沿环状形变区的中心线将产生一个峰值接触应力:

$$S_c=0.798(K_1\times P/K_2)^{1/2}, \tag{2}$$

式中 $K_1=10$(半径大于5 mm的光学表面),单位为mm。 $K_2=K_G+K_M=(1-\upsilon_G^2)/E_G+(1-\upsilon_M^2)/E_M$,单位为 Pa^{-1}。 P 是单位接触长度上承受的预载,单位为N/mm。

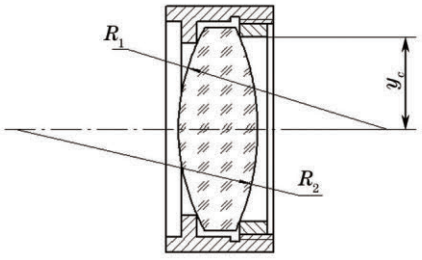

图1 尖角界面

Fig.1 Sharp-angled contact

2.1.2 相切界面

当凸球面与圆锥形机械表面相接触时形成相切界面,如图2所示。半锥角 θ 可描述为

$$\theta=90^\circ-\arcsin(y_c/R), \tag{3}$$

式中 y_c 为接触高度, R 为接触半径。根据(2)式可知,在一定预载下切向界面的产生的压力比尖角界面对应的挤压力明显减少。

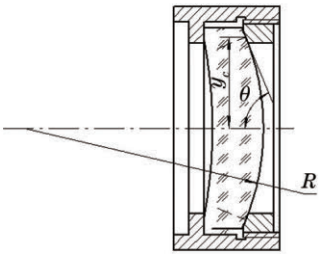

图2 相切界面

Fig.2 Tangent contact

2.2 透镜表面为凹球面和平面

尖角界面同样适用于表面为凹球面的透镜表面。但是由于通常加工时在超过通光区域留有平面,所以可以看作接触面为平面。透镜表面为平面时,与之相接触的机械表面为精密的平面,便可以对透镜进行轴向定位。

3 镜头设计

以某跟踪望远镜为例,通过分析设计其安装和定位结构。该结构具有普遍适用性,可用于同类的共轴多组元透镜组。本透镜组由3组胶合透镜和3块单透镜组成,光路如图3所示,透镜参量见表1。

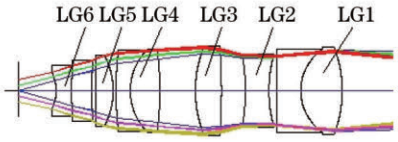

图3 透镜组光路

Fig.3 Optics layout of lens

表1 光学参数

Table 1 Optical parameters

No.	Aperture /mm	Distance to the next /mm
LG1	76,75,67	8.50 (d=35,20)
LG2	66,68	17.51 (d=15)
LG3	77,80	34.12 (d=22)
LG4	74,72,67	1.33 (d=25,12)
LG5	61,55	3 (d=15)
LG6	53,46,33	32 (d=15,13)
Image plane	19.0	

对光学系统质量产生影响的因素有重力、温度和应力。由于本透镜组通光口径较小,重力对透镜组的影响可以忽略。

3.1 温度分析

当环境温度发生变化时,光学元件材料的折射率、表面的曲率半径、光学元件的中心厚和空气间隔都会发生变化,从而引起系统像差,如离焦。所以设计时需要进行消热处理[10-13]。

在透镜与镜座之间留有间隙,应遵循的温度间隙公式:

$$\Delta X=(D/2)(\alpha_2-\alpha_1)\Delta T, \tag{4}$$

式中 ΔX 为温度变化产生的间隙, D 为光学透镜直径, α_1 为光学透镜的线胀系数, α_2 为支撑件的线胀系数, ΔT 为温度变化值。

本透镜组中,最大的直径为 ϕ85 mm,选择的镜座材料为45钢,温度变化30 ℃时, $\Delta X=(85/2)\times(11.6-7.6)\times 30=5.1$ μm。

由于光学材料和镜座材料的热膨胀系数不一致,所以温度变化会造成轴向预载的变化,量化关系式为

$$\Delta P=K_3\Delta T, \tag{5}$$

式中 K_3 为设计的温度灵敏度因子。

由于 K_3 计算比较复杂,而且存在一定误差。可以通过有限元分析来确定轴向预载的大小。

透镜和镜座之间留有间隙,往往会在此间隙中局部注入粘接剂,如室温硫化橡胶(RTV)。由于胶粘剂的热膨胀系数一般要比镜筒和透镜大得多,所以温度变化时胶层产生的热应力会对透镜造成一定的影响。因此,注胶时要多点均布注入。而且设计时在径向尽量进行消热处理,使得在温度变化时由于透镜、镜座和胶层不同的膨胀系数在透镜内产生的热应力最小。消热间隙:

$$t=(D/2)(\alpha_M-\alpha_G)/(\alpha_e-\alpha_M), \tag{6}$$

式中 α_M 、α_G 、α_e 分别为镜座、透镜和胶层的热膨胀系数。

本透镜组中 $t_{max}=(85/2)\times(11.6-8)/(236-11.6)=0.68$ mm, $t_{min}=(66/2)\times(11.6-8)/(236-11.6)=0.53$ mm。

3.2 结构和装配设计

为提高各元件对心装调精度和装配效率,采取分组装调,再进行总体安装固定的方法。本光路系统包括6组透镜组件,根据元件外径尺寸和位置关系,分为三个子组件装配,最后安装于同一个镜筒中。设计对

各镜座和镜筒的配合圆柱面表面粗糙度、圆柱度均有较高的要求，同时同轴度控制在ϕ0.01 mm范围内，接触端面对回转中轴的垂直度小于0.01 mm。依次使用隔圈保证它们之间正确的空间位置，最后使用压圈将所有零件夹持到位。为了避免振动条件下松动，除了在压圈与镜筒周围注入RTV弹性硅橡胶外，透镜与机械元件尽量采用平面接触，即将凸球面光学元件加工为平面，图4为LG4.2光学加工图。

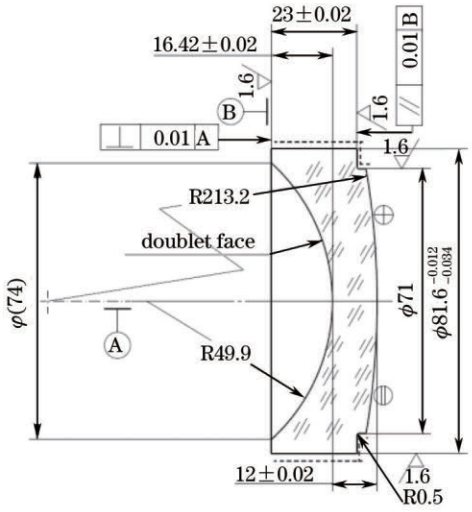

图4 LG4.2光学加工图

Fig.4 Machining drawing of LG4.2

在进行系统组装之前，需要对单个光学元件的表面面型通过干涉仪进行定量检测，然后通过紧定螺钉调整透镜位置，采用定心仪回转的方法进行系统的装调检测，以严格控制光学元间的间隔、平移以及倾斜在公差要求的范围内。最后在透镜和镜座之间注入室温硫化橡胶以保证装调位置关系不发生变化。此外，为了保证光路清洁，装调达到要求后，对初始和最后透镜边缘注室温硫化橡胶。

在系统组装完成以后，通过干涉仪再次对光学系统通过自反射的方法进行检测。透镜组件的结构设计如图5所示。

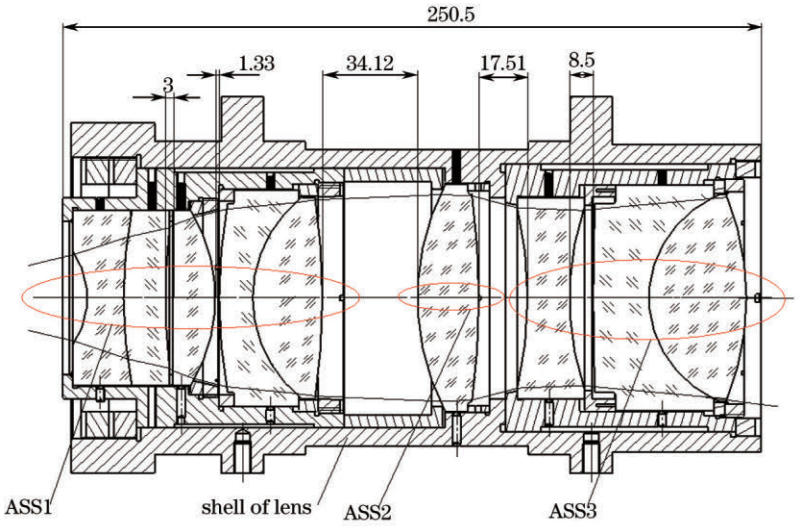

图5 透镜组件结构设计图(单位:毫米)

Fig.5 Structure design drawing of lens (unit: mm)

4 仿真分析

以组件3为例，利用MSC.Patran软件分析轴向载荷对透镜面形的影响，分析时理想温度为20°C。材料属性见表2。

表2 材料属性

Table 2 Property of materials

Name	E /Mpa	ρ /(t/mm^3)	μ	α /10^{-6}
H-LAF1	101380	3.85	0.29	7.6
H-LAK6A	107700	3.59	0.28	6
H-ZLAF76	105350	3.98	0.26	7.1
45	200100	7.81	0.26	11.6

假设压圈对透镜施加轴向均布载荷,初始值为1.295 MPa(相当于轴向载荷1000 N)。此时,胶合透镜组的凸球面变形均方根(RMS)为1.6 nm,第二片透镜凹球面变形RMS为1.6 nm,变形云图如图6所示。从图6上可以看出,此时透镜组的轴向位移分别为1.54×10^{-4} mm和3.96×10^{-5} mm。透镜组的使用环境温度为-40° C~50° C,在-40° C时镜座轴向收缩量:$\Delta_1=59\times11.6\times60\times10^{-6}=0.041$ mm;透镜轴向收缩量:$\Delta_2=(35\times6+24\times7.1)\times60\times10^{-6}=0.023$ mm。$\Delta_2-\Delta_1=0.018$ mm。

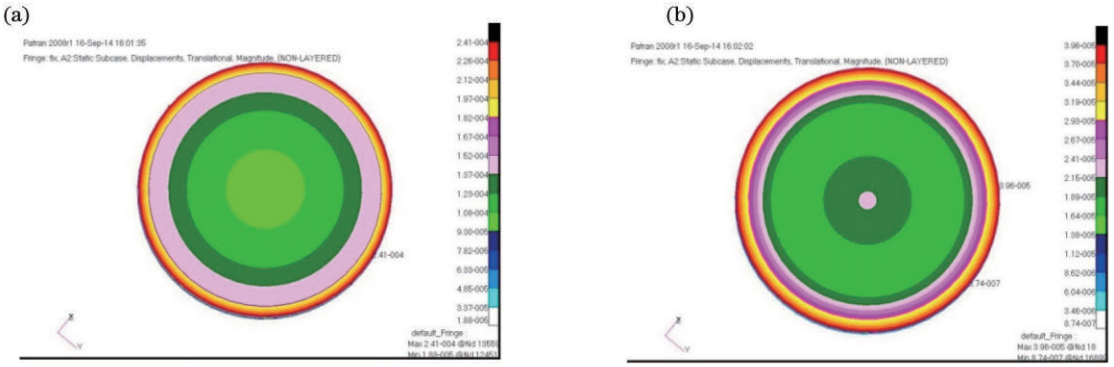

图6 轴向载荷变形图。(a)凸球面变形云图; (b)凹球面变形云图

Fig.6 Deformation by axial loading. (a) Deformation of convex sphere; (b) deformation of concave sphere

根据以上分析,如此大的变形量将导致透镜面形产生很大的变化,因此设计时需在压圈处增加消热垫以减小温度对面形的影响。

5 结 论

多元透镜组的结构设计在考虑了强度、刚度等具体的结构性能之后,还需要重点考虑温度对系统的影响。合理的设计透镜和装夹结构,可以充分保证光学镜片的各项性能指标。低应力、低收缩率的粘接胶和消热垫的使用,为保证整个光学系统达到指标要求起着重要作用。此外,基于可测性设计的指导思想,透镜分组装配,既可以保证透镜组的装配质量,同时缩短装配周期。

参 考 文 献

1 Han Xu, Wu Qingwen, Dong Deyi, *et al*.. Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 118-125.
韩 旭, 吴清文, 董得义, 等. 室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 118-125.

2 Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tinging, *et al*.. Error analysis for focusing mechanism of space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1349-1356.
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间相机调焦机构误差分析[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1349-1356.

3 Xu Zhitao, Liu Jinguo, Long Kehui, *et al*.. Accuracy and analysis of focusing mechanism of hign resolution space camera [J]. Acta Opptics Sinica, 2013, 33(7): 0728001.
许志涛, 刘金国, 龙科慧, 等. 高分辨率空间相机调焦机构精度分析[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0728001.

4 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al*.. Influence of mounting sress on wavefront distortion of litoraphic object lens [J]. Chinese Optics, 2013, 6(11): 57-63.
王 平, 田 伟, 王汝冬, 等. 支撑应力对光刻透镜透射波前畸变的影响[J]. 中国光学, 2013, 6(11): 57-63.

5 Li Yan, Zhang Baohong, Yong Feng. Design of large zoom ration middle wavelength infrared zoom optical system [J].

Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422005.

李 岩, 张葆洪, 永 丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422005.

6 Jia Qinglian. Dynamic analysis and design for supporting structure of large aperture mirrors [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 3(3): 1-3.

贾庆莲. 大口径多组元透镜的固定结构设计及动力学分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 3(3): 1-3.

7 Zhou Haixian, Chen Yunfang. Opto- Mechanical Systems Design (3rd Edtion of Original Book) [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 21-27.

周海宪, 程云芳. 光机系统设计(原书第3版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 21-27.

8 Tu Dehua. Structure design for lens frame of coaxial optical system[J]. Optical Instruments, 2007, 29(1): 52-56.

涂德华. 共轴光学系统镜框结构设计[J]. 光学仪器, 2007, 29(1): 52-56.

9 Guo Kang, Gong Yang. Effect of adjusting force on surface figure of optical element in axial adjustment mechanism [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123001.

郭 抗, 巩 岩. 轴向调节机构中调节力对光学元件面形的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1123001.

10 Fan Zhigang, Chang Hong, Chen Shouqian. Design of bonding layer in lens athermal mount [J]. Optsics and Precision Enginering, 2011, 19(11): 2576-2581.

范志刚, 常 虹, 陈守谦. 透镜无热装配中粘结层的设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11): 2576-2581.

11 Li Yanwei, Yuan Guoqin, Yang Hongbo, *et al*.. Thermal control design and proof test of altitude transmissive optical sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1123001.

李延伟, 远国勤, 杨洪波, 等. 高空透射式光学遥感器热控设计及试验验证[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928001.

12 Wang Zhi, Zhang Liping, Yao Hui. Design on optical lens of three- linear tridimensional mapping camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 227-232.

王 智, 张立平, 姚 惠. 三线阵立体测绘相机光学镜头的设计 [J]. 光子学报, 2010, 39(2): 227-232.

13 Yu Xinfeng, Gong Yan, Ni Mingyang, *et al*.. Optical surface figure of lens under Kinematic mount apparatus and its reproducibility [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(8): 2000-2007.

于新峰, 巩 岩, 倪明阳, 等. 基于运动学支撑的透镜光学表面面形及其复现性[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(8): 2000-2007.

栏目编辑: 韩 峰