

挠性压圈在被动式热分析中的应用研究

许 尧 黄一帆 常 军

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 为了实现红外光学系统的被动式无热化,设计了挠性压圈,建立了有限元分析模型,对透镜表面的接触应力和挠性压圈结构参数的灵敏度进行了研究。首先,根据光机结构的无热化要求介绍了挠性压圈,对两种常用的挠性压圈进行了热变形分析;然后,在分析挠性压圈的灵敏度系数的基础之上,对单透镜组件设计了相应的挠性结构,说明了挠性构件在被动式无热化中能够减小透镜表面的接触应力以及增加对镜座材料的选择;最后,将挠性压圈应用在三片式透镜的光学系统当中。通过分析计算,当调制传递函数(MTF)的空间频率为10 lp/mm时,挠性压圈作用下的三片式光学系统的MTF能够达到0.5以上;普通压圈在60℃和-20℃的像面离焦量分别为4.765 mm和-6.312 mm,而相同温度下挠性压圈的像面离焦量分别为1.261 mm和-1.563 mm。基本满足了红外光学系统的被动式无热化要求。

关键词 光学设计; 光机结构; 被动式无热化; 挠性压圈; 接触应力

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0116001

Investigation of Flexible Element in Passive Athermalisation

Xu Yao Huang Yifan Chang Jun

School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to realize the athermalisation of infrared optical system, an finite element analysis (FEA) model is established to analyze the contact stress of the lens and sensitivity of the structure. First, based on the athermal requirements of the optical system, the concept of the flexible pressure ring is introduced. Then, thermal deformation analysis is made on the flexible elements. After that, we design the flexible elements based on the sensitivity analysis, which gets that the flexible elements can reduce the contact stress of the lens and makes the choice of the lens seat materials more easily. Finally, the flexible elements is introduced to the triplet system. The simulation results indicate that the modulation transfer function (MTF) of the triplet system is above 0.5 under the use of flexible elements when the spacial frequency of MTF is 10 lp/mm. The defocus of the ordinary pressure ring under 60℃ and -20℃ are 4.765 mm and -6.312 mm respectively while the flexible are 1.261 mm and -1.563 mm respectively. The use of the flexible elements can meet the athermal requirements of the infrared system.

Key words optical design; opto-mechanical structure; passive athermalization; flexible element; contact stress

OCIS codes 120.4570; 120.4880; 120.6810; 220.4610; 220.4880

1 引 言

红外导引头光学系统的典型工作温度范围是-40℃~60℃,而光学系统是在20℃的环境下进行设计的,因此,为了确保红外光学系统的成像质量,需要进行无热化设计。光学被动无热化技术利用光学材料热特性的差异,通过不同材料的组合来消除温度的影响,并辅以结构可靠性好等优点,成为红外光学系统无热化设计的

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(61178041)

作者简介: 许尧(1989—),男,硕士研究生,主要从事红外光学系统的无热化方面的研究。E-mail: xuyao020305@163.com

导师简介: 黄一帆(1973—),女,副教授,主要从事光学系统设计及照明光学等方面的研究。E-mail: huangyifan@bit.edu.cn

主要途径。在合理选择光学材料组合的基础之上使用简单的机械辅助结构来补偿剩余的热漂移^[1]。常用的机械辅助结构材料有铝和钛,两种材料各有优缺点,钛的热膨胀系数较小,铝的价格便宜。材料的合理选择能够有效降低热效应影响,但是要满足设计要求,需要对镜筒、镜座、压圈等结构件进行简单的结构设计。

常用的透镜固定安装方式有滚边镜座安装、卡环安装、螺纹压圈安装、粘结安装以及挠性安装。不同的性能要求采用不同的透镜固定安装方式,挠性安装多应用于透镜的各项性能要求比较高的情况,在外载荷和温度变化时,支撑结构产生一定的刚体运动,发生相应的变形而不会使光学元件发生变形。其中,典型的挠性技术有多层弯曲技术、O型圈技术、接触凹表面的挠曲压圈和接触凸表面的挠曲压圈。它能保证透镜的共轴精度和面形精度,并能承受冲击和振动,在环境载荷消失之后,透镜能够回到原来的位置,从而确保光学系统的稳定性^[2]。因此,挠性安装具有重要的应用价值,在红外光学系统和空间光学系统中发挥了重要作用。

随着1964年Chin^[3]把挠性技术应用于太空望远镜中,挠性结构开始广泛应用于红外光学系统和空间光学系统^[4-10]。本文将挠性压圈应用于红外光学系统的被动式无热化设计中,在建立有限元分析模型的基础之上对透镜表面的接触应力和挠性压圈结构参数的灵敏度进行研究,并进行了相应的结构优化设计^[11-17]。分析证明挠性压圈的应用很好地减小了温度对光学系统的影响,通过对应用挠性压圈后不同镜座材料的分析,提出了对于单透镜组件。在合理设计挠性压圈的结构参数的情况下,镜座材料的影响显著降低,从而增加了对镜座材料的选择。在保证成像质量的同时,光学系统能有效地减小接触应力、降低环境因素的影响^[18]。

2 挠性压圈实现无热化的理论分析

光学系统无热化的基本原理是选择合适的材料,使不同材料的热差和色差均得到相互补偿。为了使光学系统满足光焦度、消热差和消色差要求,无热化系统至少由三片透镜组成,并满足如下的关系式^[19]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i = \phi \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \phi_i / \phi = C = 0 \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \phi_i / \phi = T = \alpha_m L \end{cases} \quad (1)$$

式中 ϕ_i 、 T_i 、 C_i 分别为透镜的光焦度、热差系数和色差系数; h_i 为轴上近轴光线在透镜上的高度; $\alpha_m L$ 为光学零件引起的热差,其数值随具体结构形式而变化。

温度变化时,光学系统几何尺寸的变化如下式:

$$\Delta x = \alpha \Delta L \Delta T, \quad (2)$$

式中 α 为材料的热膨胀系数, ΔL 为温度变化方向的长度, ΔT 为温度变化范围, Δx 为形状变化量。热膨胀系数的不同使得在温度变化时,透镜与镜座产生不同的位移。当温度升高时,透镜与光学零件之间产生间隙,这个间隙可以在任一界面或者分配给各元件之间,而设计者不能控制这种分配,导致在加速度下发生移动;当温度降低时,镜座长度的变化比透镜和隔圈长度的变化大,这种情况下,透镜和隔圈受到挤压,镜座壁受到拉伸。因此,需要设计合理的光机结构减小甚至消除温度的影响。

随着温度升高,透镜与压圈之间会有间隙产生,玻璃和金属的接触表面就会产生磨损,从而影响光学系统的成像质量,因此,在设计光机系统的时候,需要在最高温的时候预留足够的剩余预载,保证透镜时刻与机械界面相接触。装配预载等于最小预载加上最高温度所造成的预载下降量。分析光机结构并施加合适的预载对光机无热化具有重要意义。对于温度变化造成轴向总预载的变化,Yoder^[2]给出如下公式:

$$\Delta P = K_3 \Delta T, \quad (3)$$

式中 K_3 为设计预载随温度变化的速率,称为温度灵敏度因子, ΔP 为总预载的变化, ΔT 为温度的变化。

知道 K_3 对于光机设计是非常有利的,计算出相应的装配预载后,根据不同的温度可以评估出实际预载。对于单透镜组件,仅考虑整体玻璃受压及镜座壁的拉长时,由于挠性压圈随着差分膨胀会产生一定的挠性变形,按照典型的 K_3 表达式进行计算,预测出的预载随温度的变化比实际情况大;对于玻璃和金属表面变形的影响,由于挠性压圈的形变,透镜表面所产生的形变要小于普通压圈所产生的形变。挠性压圈的形

变会随着预载的减小而减小,而且透镜与压圈的接触应力会相应的减小,从而提高了压圈在使用时的可靠性。当使用挠性压圈后,在一定的温度范围内,透镜与压圈之间就不会产生过大的接触应力或者较大的间隙,从而增大的材料的选择范围。因此,设计合理的挠性压圈结构需要对压圈进行灵敏度分析。

有限元分析的方法发展了许多年,是设计、分析机械结构的常用工具,特别适用于光机结构的动态、静态和热传导分析。典型的有限元分析方法中,光机结构被建成二维或者三维小单元连续分布所组成的模型。

有限元分析软件 Ansys 中优化设计的基本原理是通过构建优化模型,运用各种优化方法,通过在满足设计要求的条件下迭代计算,求得目标函数的极值,得到最优优化设计方案。优化问题的数学模型表示如下^[20]:

$$\begin{cases} \min[F(\mathbf{X})]=F(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_i(\mathbf{X})=g_i(x_1, x_2, \dots, x_n), i=1, 2, \dots, M, \\ \mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T \end{cases} \quad (4)$$

式中 $F(\mathbf{X})$ 为设计变量的目标函数, \mathbf{X} 为设计变量, $g_i(\mathbf{X})$ 为状态变量。设计变量为自变量,优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的,对于每一个设计变量都有上下限,用户必须规定 \mathbf{X} 中的每一个元素的最大值和最小值,它定义了设计变量的变化范围;状态变量是约束设计的数值,是设计变量的函数,状态变量可能会有上下限,也可能只有单方面的限制,即只有上限或只有下限;目标函数是要尽量小的数值,它必须是设计变量的函数。

Ansys 的优化设计包括拓扑优化设计和形状优化设计。形状优化设计的基本原理是:以参数化方式建立计算机辅助分析(CAE)模型,在满足设定的设计要求的条件下,运用各种优化算法进行迭代,求得目标函数的极值,从而得到最优设计方案。在一般的形状优化设计方案中,目标函数通常包括诸如质量、最大应力、最小寿命、最大形变等结构相应参数,而设计变量则通常包括诸如几何尺寸、材料性能参数等,约束函数通常包括诸如最大应力、最大形变限制等。

3 挠性压圈在单透镜组件中的应用

光学系统是由多个单透镜组成的,因此,研究单片透镜对于多透镜光学系统具有重要的作用。对于单个组件的压圈,随着温度的变化,挠性压圈会产生相应的形变,导致接触表面的接触应力产生变化,优化压圈的几何尺寸并施加合适的装配预载对于光机结构设计具有重要意义。

3.1 单透镜组件的结构

选择铝合金和钛合金为镜座材料,Ge为透镜材料,压圈材料与镜座材料相同。单透镜光机结构的剖面图如图1所示。

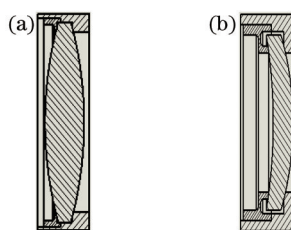


图1 (a)凸透镜光机结构剖面图;(b)凹透镜光机结构剖面图

Fig.1 (a) Profile of a convex lens structure; (b) profile of a concave lens structure

3.2 挠性压圈的灵敏度分析

凸透镜组件的有限元模型如图2所示,单元由四节点单元和八节点单元组成,单元数为3281,节点数为19462。Ansys中的优化设计模型是与有限元模型相对应的设计变量以及状态变量、目标函数。选取挠性压圈截面的厚度P1、压圈最外侧的半径P2和最内侧的半径P3作为设计变量,横坐标是最大变形和接触应力,其初始参数值及上下限值列于表1中。

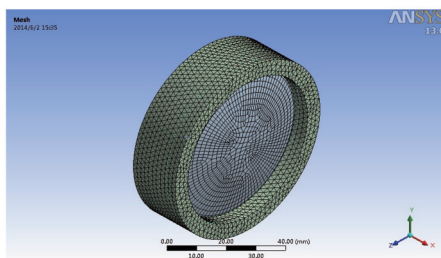


图2 凸透镜组件的有限元模型
Fig.2 FEA model of a convex lens system

表1 挠性压圈的结构优化值
Table 1 Optimization of the flexible element structure

	Initial value	Maximum	Minimum	Optimum
Thickness of the interface /mm	1	1.5	0.5	0.91
Outer radius /mm	25	27.5	22.5	25.48
Inner radius /mm	24	26	22	23.65

灵敏度分析的目标函数是最大接触应力。由于透镜的孔径、镜座的壁厚以及总尺寸已知,得到设计变量对接触应力和挠性压圈变形的灵敏度系数如图3所示。

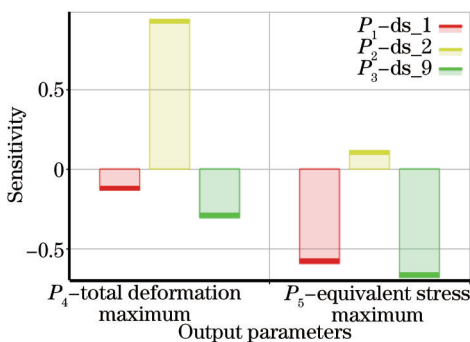


图3 设计变量对接触应力的灵敏度系数
Fig.3 Sensitivity coefficient of design variable to contact stress

从图3中可以看到,压圈最外侧的半径P2对变形的灵敏度最高,修改压圈最外侧的半径,可以有效地改变变形值。表1中列出了优化后的设计变量值。根据设计变量的优化值重新设定挠性结构的相应尺寸,修改有限元模型并应用在三片式透镜中。其中,普通压圈对使用铝镜座和钛镜座的接触应力如图4所示。从图4可以看出,对于普通压圈,选择热膨胀系数接近透镜材料的镜座和压圈材料,能够减小接触应力,有效降低温度对光学系统的影响。

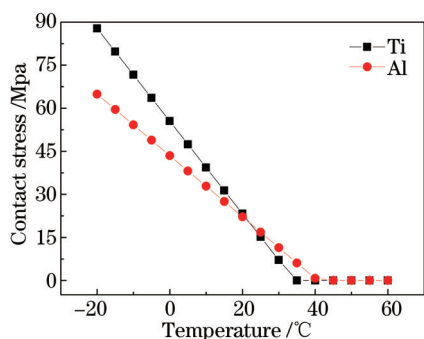


图4 普通压圈对不同材料镜座的接触应力
Fig.4 Contact stress of clamping ring to different mirror seats

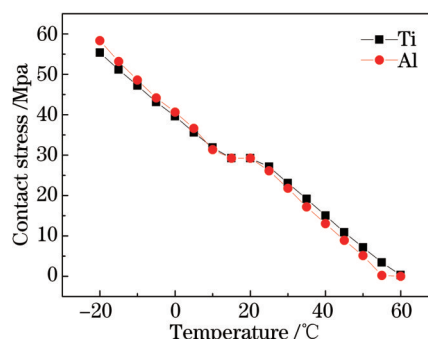


图5 挠性压圈对不同材料镜座的接触应力
Fig.5 Contact stress of flexible element to different mirror seats

对于挠性压圈,由于存在挠性形变,不能简单通过(1)式来对单透镜组件进行分析。合理地优化设计挠性压圈的结构参数能够补偿光学系统的轴向间隙,从而使挠性压圈始终接触又不至于使得接触应力过大而导致光学元件的失效。不同镜座材料的情况下,使用挠性压圈所产生的接触应力如图5所示。

从图5可以看出,应用铝合金镜座与钛合金镜座的差别不大,而铝合金镜座价格便宜,性价比高。在(1)式中, $\alpha_m L$ 为光学零件引起的热差,其数值随具体结构形式而变化,对于挠性压圈,设计合理的挠性结构就可以忽略光学零件引起的热差,设计的灵活性、可选择性增加。(1)式可改写为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i = \phi \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 C_i \phi_i / \phi = C = 0 \\ \sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \phi_i / \phi = T \end{cases} \quad (5)$$

因此,在精度要求不高的光学系统当中使用挠性结构,铝合金镜座具有较大优势。

4 挠性压圈应用在三片式透镜中

将挠性构件引入到典型的三片式透镜当中,结合红外光学系统的工作环境,建立挠性结构的有限元模型,比较普通压圈和挠性压圈对光学系统成像质量的影响,从而验证挠性压圈的稳定性。

4.1 三片式光学系统设计

通过选择合适的材料,使得系统中镜筒、镜座、隔圈、压圈与透镜的热差系数相互补偿,进而实现系统的无热化设计。当光学系统中的镜座材料不影响所施加的轴向预载时,热差系数的相互补偿就变得不重要,因此大大降低了光机设计的复杂性。

根据长波红外波段透镜材料的热差特性,三片式透镜分别选择 Ge, ZnS 和 AMTIR-1 三种材料,零件材料的机械特性如表2所示。光学系统的参数如表3所示。

表2 零件材料的机械特性

Table 2 Mechanical properties of part materials

Materials	$\alpha / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_M / (10 \text{ GPa})$	$SY/10^3$	ν_M	$\rho / (\text{g}/\text{mm}^3)$	$k / [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})]$
6061-T6	23.6	6.82	5.5~27.6	0.332	2.68	167
6Al4V	8.8	11.4	82.7~106	0.34	4.43	7.3
AMTIR-1	12	2.2	-	0.266	4.4	0.3
ZnS	4.6	7.45	-	0.29	4.08	18
Ge	6.0	10.37	-	0.278	5.323	59

表3 光学系统的性能指标要求

Table 3 Performance requirements of the optical system

Parameters	Value
Range of wavelength	8~12 μm
F	2
Focus	80 mm
Field	4 $^\circ$
Range of temperature	-20 $^\circ\text{C}$ ~60 $^\circ\text{C}$
Material of mirror seat	Al-6061

优化之后光学系统的结构如图6所示。经过优化之后的调制传递函数(MTF)如图7所示。

4.2 光机结构的有限元分析

通过施加载荷和约束,得到挠性压圈作用下第一片透镜两个表面的镜面形变,把形变数据整理后进行 Zernike 多项式拟合,然后把拟合得到的 Zernike 多项式系数传递给 Zemax 软件。采用 Zernike 拟合可以方便地去除偏移、倾斜等刚体位移。光学元件的刚体位移可以通过装调来消除,因此在传递数据时,简单地通过

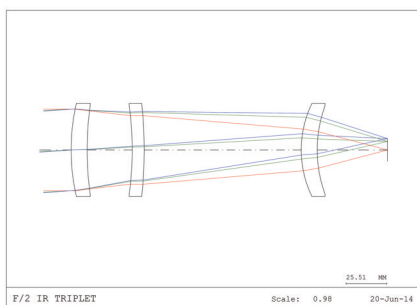


图6 光学系统的结构图

Fig.6 Structure of the optical system

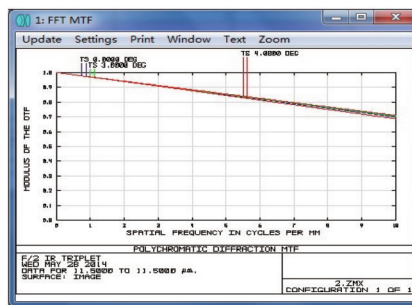


图7 优化之后的 MTF

Fig.7 MTF after optimization

把拟合得到的 Zernike 多项式系数对应的项置 0, 输入 Zemax 软件之后, 得到普通压圈分别在 60 °C 和 -20 °C 下光学系统的 MTF, 如图 8 所示。图 9 所示为挠性压圈别在 60 °C 和 -20 °C 下光学系统的 MTF。

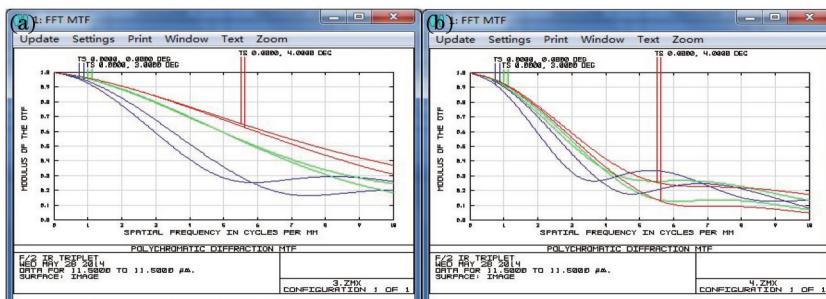


图8 普通压圈不同温度下的 MTF。(a) 60 °C; (b) -20 °C

Fig.8 MTF of the clamping ring at different temperatures. (a) 60°C; (b)-20°C

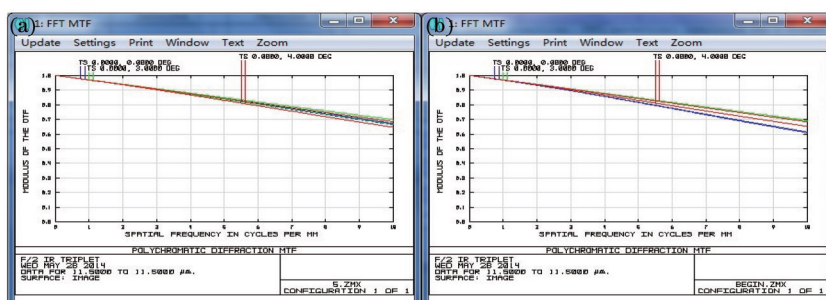


图9 挠性压圈不同温度下的 MTF。(a) 60 °C; (b) -20 °C

Fig.9 MTF of the flexible element at different temperatures. (a) 60 °C; (b) -20 °C

从图 9 可以看出, 挠性压圈相对于普通压圈具有明显的优势, 在进行光学系统的无热化分析时具有非常重要的作用, MTF 有了明显的提高。在进行光机设计的时候, 要充分权衡使用要求与经济性的问题。

离焦量如图 10 所示, 普通压圈在 60 °C 和 -20 °C 的像面离焦量分别为 4.765 mm 和 -6.312 mm, 而挠性压圈

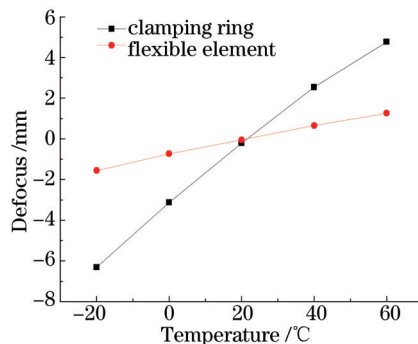


图10 挠性压圈与普通压圈在不同温度下的离焦量

Fig.10 Defocus of flexible element and clamping ring at different temperatures

相同温度下的像面离焦量分别为 1.261 mm 和 -1.563 mm。

5 结 论

根据红外光学系统提高对环境适应性的要求,提出了挠性压圈作用下镜座材料的可变性,并设计了挠性压圈,建立了有限元分析模型,对透镜表面的接触应力和挠性压圈结构参数的灵敏度进行了研究。然后对两种常用的挠性压圈进行了热变形分析,在分析设计变量对挠性变形的灵敏度系数基础上,对单透镜组件设计了相应的挠性结构,说明了挠性构件在被动式无热化中能够减小透镜表面的接触应力以及放松对镜座材料的选择。最后,将挠性压圈应用在三片式透镜的光学系统当中。通过分析计算,挠性压圈作用下的光学系统的 MTF 能够达到 0.5 以上;普通压圈在 60 °C 和 -20 °C 的像面离焦量分别为 4.765 mm 和 -6.312 mm,而挠性压圈相同温度下的像面离焦量分别为 1.261 mm 和 -1.563 mm,基本满足了红外光学系统的被动式无热化要求。

挠性压圈能够增加镜座材料的可选择性,降低温度变化对光学系统成像质量的影响。但是,如何选择合适的压圈材料以及设计合适的挠性结构来确保挠性压圈的可靠性需要更加深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Wu Xiaojing, Meng Junhe. Athermalizing infrared optical systems by using simple mechanical framework[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 391-393.
吴晓靖, 孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(4): 391-393.
- 2 Yoder Jr P R. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. Boca Raton: CRC press, 2005. 725-741.
- 3 Chin D. Optical mirror-mount design and philosophy[J]. *Appl Opt*, 1964, 3(7): 895-901.
- 4 Young P, Schreiber M. Alignment design for a cryogenic telescope[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1980. 171-178.
- 5 Iraninejad B, Vukobratovich D, Richard R M, *et al.*. A mirror mount for cryogenic environments[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1984. 34-39.
- 6 Bacich J J. Precision lens mounting: U.S. Patent 4,733,945[P]. 1988-3-29.
- 7 Vukobratovich D, Richard R M. Flexure mounts for high-resolution optical elements[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1988. 18-36.
- 8 Ahmad A, Huse R L. Mounting for high resolution projection lenses: U.S. Patent 4,929,054[P]. 1990-5-29.
- 9 Steele J M, Vallimont J F, Rice B S, *et al.*. A compliant optical mount design[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1992. 387-398.
- 10 Bruning J H, DeWitt F A, Hanford K E. Decoupled mount for optical element and stacked annuli assembly: U.S. Patent 5,428,482 [P]. 1995-6-27.
- 11 Niu Xiaoming. Application of CAE in the design of optical and mechanical structure for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(6): 23-29.
牛晓明. CAE 技术在空间相机光机结构设计中的应用[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(6): 23-29.
- 12 Shan Baozhong, Wu Keyong, Lu E. Optimum design of space cameras based on finite element method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 116-120.
单宝忠, 武克用, 卢 镔. 结合有限元法的空间相机优化设计[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1): 116-120.
- 13 Yang H S, Kihm H, Moon I K, *et al.*. Three-shell-based lens barrel for the effective athermalization of an IR optical system[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(33): 6206-6213.
- 14 Liu Jianguo, Li Ling. Study on the data transfer interface in the thermal/structural/optical integrated analysis[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(5): 427-431.
刘家国, 李 林. 光机热集成分析中数据转换接口研究[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(5): 427-431.
- 15 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang. Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422002.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0422002.
- 16 Zhou Chao. Opto-mechanical design for a cryogenic IR system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2092-2096.

- 周 超. 低温红外系统光机结构设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2092-2096.
- 17 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.
- 18 Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie. Investigation of controllable axial conformity for opto-mechanical structure[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0116001.
- 孙向阳, 张国玉, 段 洁. 光机结构的轴向一致性可控方法研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0116001.
- 19 Li Jie, Zhang Zhiming, Feng Shengrong. Passive athermalisation technique of infrared optical system loading in missile[J]. Infrared Technology, 2005, 27(3): 196-201.
- 李 婕, 张志明, 冯生荣. 弹载红外光学系统被动消热技术[J]. 红外技术, 2005, 27(3): 196-201.
- 20 Li Bing, He Zhengjia, Chen Xuefeng. Design, Simulation and Optimization of ANSYS Workbench[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 158-171.
- 李 兵, 何正嘉, 陈雪峰. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 158-171.

栏目编辑: 韩 峰