

轻型双波段航空相机调焦机构的设计

张洪伟 徐钰蕾 李全超 谭淞年 王中石

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 轻型双波段航空相机工作时所处的环境条件比较复杂, 由于环境的变化, 航空相机的焦平面会发生不同程度的偏移, 为了保证其成像质量, 需要对变化的焦平面加以校正, 因此设计了一套调焦机构。该调焦机构选用的是蜗轮蜗杆副以及调焦偏心凸轮的传动方式, 调焦偏心凸轮转动带动调焦镜片沿光轴方向平动, 从而解决了航空相机的离焦问题。该调焦机构优化后的外形尺寸为 96 mm×65 mm×62 mm。对该调焦机构在其有效的工作区内进行了精度分析, 并且对其进行了传动精度实验和晃动精度实验。实验结果表明该调焦机构的传动精度为 3.5 μm, 最大晃动误差在±3"以内, 满足结构空间尺寸和调焦精度的设计要求。

关键词 光学器件; 航空相机; 调焦机构; 蜗轮蜗杆; 偏心凸轮; 调焦精度

中图分类号 TN214

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.082301

Design of Focusing Mechanism for Lightweight Dual-Band Aerial Camera

Zhang Hongwei Xu Yulei Li Quanchao Tan Songnian Wang Zhongshi

Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The working environment of the lightweight dual-band aerial camera is very complicated. Due to the changes in the environment, the focal plane of the camera will produce different degrees of deviation. In order to ensure the imaging quality of the camera in the complex environment, it is necessary to correct the focal plane of the camera, so a focusing mechanism is designed. The transmission mode of the focusing mechanism is a worm-gear and an eccentric cam. The rotation of the eccentric cam drives the focusing lens moving along optical axis direction to solve the problem of aerial camera defocus. The optimized focusing mechanism has a shape size of 96 mm×65 mm×62 mm. The precision analysis of the focusing mechanism is carried out in the effective working range. The transmission precision experiment and the sway precision experiment are also carried out. The experimental results show that the transmission precision of the focusing mechanism is 3.5 μm, and the maximum sway error is below ±3". The focusing mechanism meets the requirements of the structure space size and focusing precision.

Key words optical devices; aerial camera; focusing mechanism; worm-gear; eccentric cam; focusing precision

OCIS codes 230.2090; 120.4640; 350.4800

1 引言

可见/红外双波段航空相机可实现对地面信息全天时的检测, 并且可以获得高清、可靠的图像信息, 在军事侦察、监测、测绘制图等方面具有非常广泛的应用^[1]。而航空相机在工作过程中受到复杂恶劣的工作环境(如振动、冲击、温度、压力等)的影响, 会导致航空相机焦平面产生少量的离焦, 造成光学系统成像模糊。为保证其在恶劣环境下的成像质量, 需要校正相机变化的像面^[2-5]。然而关于航空相机调焦机构的文献较少, 并且现在航空相机朝着小型化、轻量化的方向发展, 以往的调焦机构很难满足空间尺寸、调焦精度的要求, 因

收稿日期: 2016-01-29; 收到修改稿日期: 2016-04-05; 网络出版日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61405192)、中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-15S158)

作者简介: 张洪伟(1987—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事光机结构设计与分析方面的研究。

E-mail: xjtuzhw@foxmail.com

此根据项目需求,设计了一套紧凑型调焦机构。

根据调节部件的不同,调焦方式可以分为调焦镜组平移式、焦平面反射镜平移式以及像面平移式。其中调焦镜组平移又可分为调焦镜组的整组平移、前组平移、中组平移(包括后组平移)^[6-9]。综合考虑调焦机构的精度、调焦量以及整个机构组件所占空间等因素,最终选用镜头移动式的调焦方式。

2 调焦机构的设计

2.1 调焦机构的参数要求

在设计调焦机构之前,要明确调焦机构的参数,其中包括调焦量、传动精度以及晃动精度等。光学系统容许航空相机有少量的离焦量,当焦平面在容许的离焦范围内时,成像质量几乎不受影响,超过这个范围成像质量便急剧下降。光学系统容许的最大离焦量为航空相机的半焦深,计算公式如下^[10-12]:

$$|\pm \delta| = 2F^2\lambda, \quad (1)$$

式中 $|\pm \delta|$ 为航空相机的半焦深, F 为航空相机的 F 数, λ 为航空相机工作的中心波长。

根据光学系统计算可得航空相机的半焦深为 ± 0.05 mm。由于本文的调焦机构选用偏心凸轮作为执行机构,因此调焦镜组沿光轴方向以正弦形式进行平动,为方便调焦机构的控制,选择偏心凸轮 $\pm 8^\circ$ 近似线性段作为调焦机构的有效工作区间。综合分析,将偏心凸轮的偏心率设为 1 mm,则调焦机构的有效工作区间为 ± 0.139 mm,满足系统要求。此外,光学系统要求调焦机构的晃动精度小于等于 $\pm 10''$ 。

为了提高调焦精度,结合项目需求,选用蜗轮蜗杆副以及偏心凸轮的传动方式,将偏心凸轮的转动转换为调焦镜组的平动。调焦机构由调焦电机组件、偏心凸轮、精密直线导轨、拉簧、光电编码器、调焦镜组支撑框架等组成,具体结构如图 1 所示。

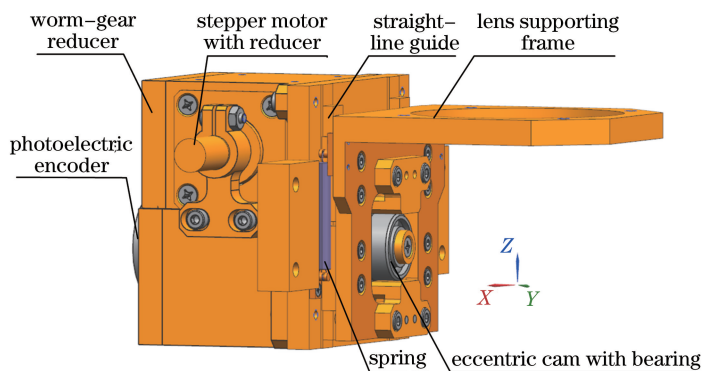


图 1 调焦机构图

Fig. 1 Configuration of the focusing mechanism

2.2 调焦电机组件的设计

调焦电机组件主要由蜗轮蜗杆变速箱、配有精密减速箱的步进电机等组成。调焦镜组沿光轴方向的上下平动是由调焦电机组件驱动实现的。根据调焦镜组的受力情况并结合实际结构尺寸,对调焦机构进行受力分析。在冲击、加速度等极限条件下,驱动调焦镜组需要电机力矩为 $120 \text{ mN} \cdot \text{m}$,在蜗轮、蜗杆减速比为 $15:1$,电机减速箱速比为 $120:1$ 的情况下,综合考虑航空相机的环境条件及安全可靠性,选用最大驱动力矩为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 的步进电机作为驱动电机。

2.3 调焦凸轮机构的设计

调焦凸轮机构是保证调焦机构精度,决定调焦范围的末端执行器,综合考虑调焦机构的精度、调焦范围以及凸轮的加工工艺性等要求,最终选用高精度的偏心凸轮作为调焦凸轮机构。

将偏心凸轮与蜗轮轴设计为一体,即在蜗轮轴端部加工成偏心凸轮,将精密轴承与凸轮联结在一起,轴承沿着光轴方向与支撑架的两个平面相切接触,支撑架与调焦镜组连接。当步进电机工作时,带动蜗轮蜗杆副转动,进而带动偏心凸轮运动。由于偏心凸轮的旋转运动可正交分解为调焦镜组垂直于光轴方向的直线运动和沿光轴方向的直线运动,然而垂直于光轴方向的运动被导向机构限位,因此偏心凸轮的旋转运动转换

成沿光轴方向的直线运动。当步进电机工作时,借助偏心凸轮以及精密直线导向机构实现了调焦镜组沿光轴方向的平动,从而实现了调焦。考虑到蜗轮蜗杆副间的间隙对调焦机构的精度影响较大,因此采用在调焦机构基板与镜筒安装支架之间对称安装一对相同拉簧的方式来消除蜗轮蜗杆副的间隙,进而提高了调焦机构的精度^[13]。调焦机构的内部结构图如图 2 所示。

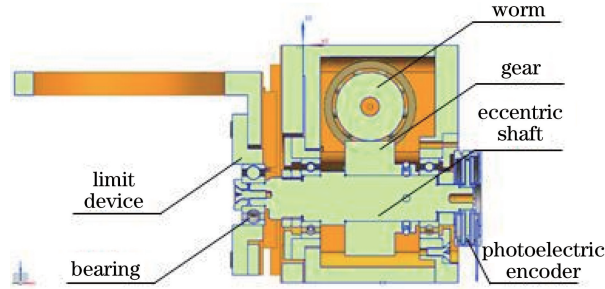


图 2 调焦机构内部结构图

Fig. 2 Internal structure of the focusing mechanism

3 调焦机构的精度分析

误差是评定精密仪器的主要性能和质量指标的参数之一,所以误差分析是保证精密仪器性能与质量的一项十分重要的工作。对于调焦机构来说,通过误差分析可以预估调焦机构的精度是否满足航空相机的成像质量要求。调焦机构的误差主要由调焦机构的传动误差和控制误差组成,其中调焦机构的控制误差主要包括绝对式光电编码器误差和控制策略误差。

3.1 调焦机构的传动误差

轻型双波段航空相机要求调焦机构具有很高的灵敏度,本文的调焦机构中选用 AM0820 型步进电机,其步进角为 18° ,因此需要选用减速装置使步进电机单步移动距离微小化。调焦机构的减速比为 $1800:1$,其中包括精密直齿减速箱和一级蜗轮蜗杆减速箱。由于调焦机构采用了闭环控制方式,以调焦镜组的实时位置作为反馈量,因此减速装置以及精密滚珠丝杠副整个链路对调焦机构的精度几乎没有影响。但是对于作为末端执行机构的偏心凸轮来说在加工过程中会引入加工误差,根据实际加工条件,将该误差定为 $\pm 3 \mu\text{m}$,因此综合分析调焦机构的传动误差为 $\Delta_1 = \pm 3 \text{ mm}$ 。

3.2 调焦机构的控制误差

调焦机构选用 17 位的光电编码器作为测角传感器,由产品手册可得编码器的分辨率为 $\delta_\theta = \frac{360^\circ}{2^{17}} = 9.89''$,即一个码值对应的角度为 $9.89''$,静态误差为 $\delta_{\theta_1} = \pm 45''$ 。由于光电编码器直接与偏心凸轮轴连接,并且调焦机构在有效量程 ($\pm 0.13 \text{ mm}$,即 $\pm 8^\circ$) 内近似为线性关系,因此满足以下线性比例关系:

$$\frac{\delta_{\theta_1}}{\delta_{l_1}} = \pm \frac{\theta}{l}, \quad (2)$$

式中 δ_{θ_1} 为光电编码器的静态误差, δ_{l_1} 为由光电编码器静态误差引起的调焦镜组沿光轴方向的位移误差, $\pm l$ 为调焦机构的有效量程, $\pm \theta$ 为调焦机构的有效量程对应的偏心凸轮的角度。

代入各参数数值得:

$$\delta_{l_1} = \pm \frac{l \times \delta_{\theta_1}}{\theta} = \pm \frac{0.139 \text{ mm}}{8^\circ} \times 45'' = \pm 0.217 \mu\text{m}, \quad (3)$$

即由光电编码器引起的误差为 $\pm 0.217 \mu\text{m}$ 。

当调焦机构处于闭环调焦时,由于惯性等原因,调焦镜组到达指定的位置后不能立刻停止,可能会超过指定的位置。经过调焦系统的控制,调焦镜组会沿着光轴的方向往回平移,此过程不断重复直至到达指定位置,因此在对调焦机构进行控制的时候引入一个阈值,使得调焦镜组在阈值范围内即可停止运动,从而产生了调焦机构的控制策略误差。编写控制程序时,将控制阈值设为 ± 10 个码值,设控制阈值为 δ_{θ_2} ,则由控制

阈值引起的误差 δ_{i_2} 为

$$\delta_{i_2} = \pm \frac{l \times \delta_{\theta_2}}{\theta} = \pm \frac{0.139 \text{ mm}}{8^\circ} \times 9.89'' \times 10 = \pm 0.477 \text{ } \mu\text{m}。 \quad (4)$$

因此,调焦机构的控制误差 $\Delta_2 = \pm \sqrt{\delta_{i_1}^2 + \delta_{i_2}^2} = \pm 0.524 \text{ } \mu\text{m}$ 。

3.3 调焦机构的合成误差

由误差合成理论可知,调焦机构的误差可由调焦机构的传动误差和控制误差合成得到^[14-17]:

$$\Delta = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = \pm 3.045 \text{ } \mu\text{m}, \quad (5)$$

误差数值满足光学系统提出的 $\pm 6 \text{ } \mu\text{m}$ 的精度要求。

4 调焦机构实验

由于轻型双波段航空相机的调焦机构选用调焦镜组平移的调焦方案,除了传动误差会影响成像质量外,调焦镜组的晃动对航空相机的成像质量也有一定的影响,因此必须对其进行传动精度实验和晃动精度实验。

4.1 传动精度实验

在传动精度实验过程中,将调焦机构放置在三坐标测量机的隔振平台上。由于事先无法得知调焦机构的零点位置,因此必须对调焦机构的整个行程($\pm 1 \text{ mm}$,即 $\pm 180^\circ$)进行打点测量,然后绘制出曲线寻找零点位置。确定零点位置后,再对调焦机构的有效行程($\pm 0.139 \text{ mm}$,即 $\pm 8^\circ$)进行打点测量,如图 3 所示。



图 3 调焦机构的传动精度实验

Fig. 3 Transmission precision experiment of the focusing mechanism

实验的具体实施方法为:控制步进电机使偏心凸轮每转过 4° 时暂停,使用三坐标测量机对调焦机构的支撑架表面进行打点测量,数据经 Matlab 处理后得到的曲线如图 4 所示。

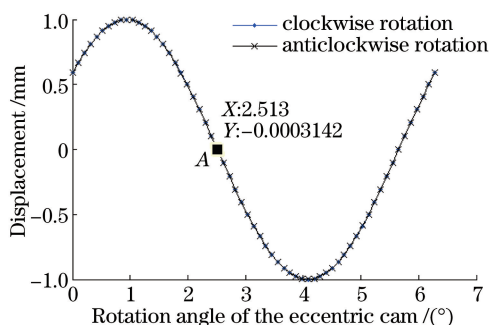


图 4 调焦机构的整个工作区间位移曲线

Fig. 4 Whole working range displacement curves of the focusing mechanism

从图 4 可知,A 点即为调焦机构的零点位置,将 A 点对应的编码器的读数 $\alpha (2.513^\circ)$ 作为偏心凸轮的零点位置,即可得出调焦机构的有效工作区间为 $\alpha \pm 8^\circ$ 。接着控制步进电机使偏心凸轮在 $\alpha - 8^\circ \sim \alpha + 8^\circ$ 区间内每转过 0.5° 时暂停,使用三坐标测量机对调焦机构的支撑架表面进行打点测量,控制步进电机反转重复打点测量,得到的数据经过 Matlab 处理得到的曲线如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可知,步进电机在正转和反转两种工作模式下,调焦机构在有效行程内的直线度很高,并且从图

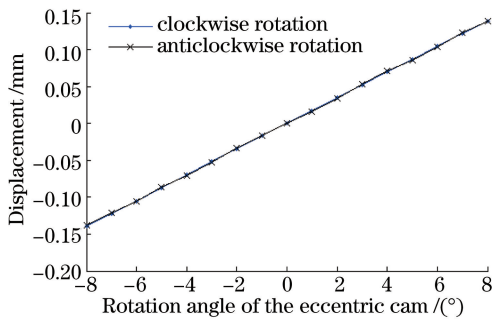


图 5 调焦机构的有效工作区间位移曲线

Fig. 5 Effective working range displacement curves of the focusing mechanism

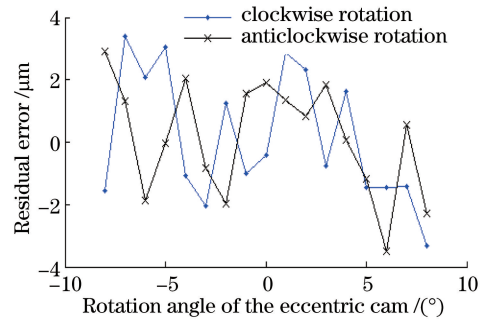


图 6 调焦机构的残差曲线

Fig. 6 Residual error curves of the focusing mechanism

6 可以看出调焦机构的最大绝对误差为 $3.5 \mu\text{m}$, 满足设计要求。

4.2 晃动精度实验

在晃动精度实验过程中, 将平面反射镜胶粘在调焦机构的支撑架上, 并将调焦机构放置在隔振平台上, 采用自准直仪作为检测工具, 通过调整自准直仪找到反射镜所成的像。驱动调焦机构的步进电机, 使胶粘在支撑架上的平面反射镜沿光轴方向直线平移, 通过自准直仪读取光栅尺显示位置的摆角, 实验如图 7 所示。

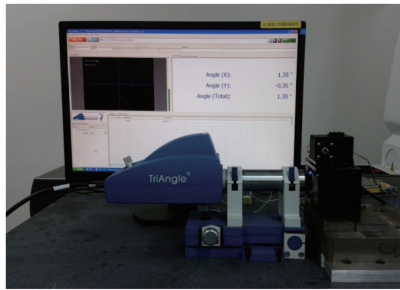


图 7 调焦机构的晃动精度实验

Fig. 7 Sway precision experiment of the focusing mechanism

在摆角精度实验过程中, 通过编程驱动步进电机正转从而带动偏心凸轮顺时针转动, 偏心凸轮每转过 1° 自准直仪便计数一次, 并且将工作过程中调焦机构在水平和竖直两个方向的晃动误差进行采集与记录; 驱动电机反转, 重复上述实验步骤。将采集到的实验数据经 Matlab 处理后得到的曲线如图 8 所示。

从图 8 可知, 步进电机在正转和反转两种工作模式下, 调焦机构在水平和竖直两个方向的晃动误差均在 $\pm 3''$ 以内, 可见调焦机构具有很高的精度, 能够满足光学系统提出的 $\pm 10''$ 的精度要求。

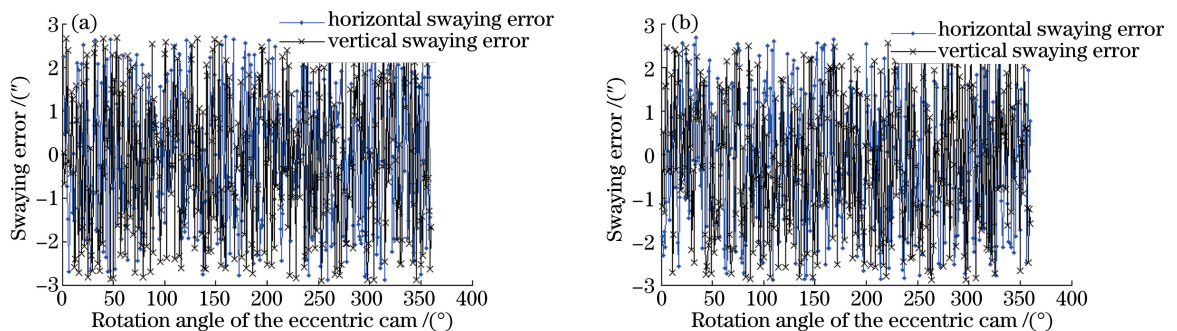


图 8 步进电机 (a) 正转和 (b) 反转时调焦机构的晃动精度实验结果

Fig. 8 Sway precision experimental results of the focusing mechanism while the stepper motor rotates

(a) clockwise and (b) anticlockwise

5 结 论

为满足轻型双波段航空相机总体提出的外形尺寸、调焦精度等要求,选择蜗轮蜗杆副和偏心凸轮传动方式的调焦方案,实现了偏心凸轮转动与调焦镜组沿光轴方向平稳运动的转化,解决了航空相机的离焦问题。通过对调焦机构进行传动精度实验和晃动精度实验可知,该调焦机构的传动精度为 $3.5 \mu\text{m}$,最大晃动误差在 $\pm 3''$ 以内。经过试飞实验,双波段航空相机调焦机构无故障,工作稳定可靠,并获得了稳定清晰的航拍图像。实验结果表明,该调焦机构具有传动比大、结构紧凑、调焦精度高等特点,可以满足双波段航空相机的使用要求,为航空相机朝着小型化、轻型化的方向发展打下了坚实的基础。

参 考 文 献

- Nie Pin, Tian Haiying, Xu Yongsen, *et al.*. Design of focusing mechanism for a dual-band aerial camera[J]. *Infrared*, 2010, 31(9): 6-8.
聂 品, 田海英, 徐永森, 等. 双波段航空相机红外调焦机构的设计[J]. *红外*, 2010, 31(9): 6-8.
- Zhang Jichao, Ding Yalin, Zhang Hongwen. Design for a kind of aerial frame camera's focusing structure[J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(2): 50-54.
张继超, 丁亚林, 张洪文. 一种航空画幅遥感相机调焦机构的设计[J]. *光学仪器*, 2007, 29(2): 50-54.
- Meng Fanhao, Ding Yalin, Wang Dejiang, *et al.*. Analysis influence of signal to noise ratio on auto-focusing precision of aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(9): 0911001.
孟繁浩, 丁亚林, 王德江, 等. 信噪比对航空相机调焦精度的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(9): 0911001.
- Cao Qipeng, Ye Zhao, DongXiaoqing, *et al.*. A method of focusing of foreign space camera based on image evaluation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011102.
曹启鹏, 叶 钊, 董小静, 等. 基于图像评价的国外空间相机调焦方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011102.
- Huang Heping, Xia YinHui, An Chengbin, *et al.*. Design on the focusing mechanism of long focus IR system[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(10): 745-747.
黄和平, 夏寅辉, 安成斌, 等. 大口径、长焦距红外系统调焦机构设计[J]. *激光与红外*, 2005, 35(10): 745-747.
- Meng Fanhao, Ding Yalin, Wang Dejiang, *et al.*. Analysis of influence of image motion on auto-focus precision for high resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0611001.
孟繁浩, 丁亚林, 王德江, 等. 像移对长焦距高分辨率航空相机调焦精度影响的分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0611001.
- Li Chuncai, Gong Yan, Li Jing, *et al.*. Optical design of an inducible human eye accommodation fundus camera[J], *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0422001.
李春才, 巩 岩, 李 晶, 等. 可诱导人眼自动调焦的眼底相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0422001.
- Wang Shuxin, Li Jinglin, Liu Lei, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long-focal-plane [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2239-2243.
王书新, 李景林, 刘 磊, 等. 大尺寸焦平面空间相机调焦机构的精度分析[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2239-2243.
- Zhang Hongwen. Research on the auto-focusing technology for space camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
张洪文. 空间相机调焦技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
- Wang Zhi, Zhang Liping, Li Zhaohui, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1051-1056.
王 智, 张立平, 李朝辉, 等. 传输型立体测绘相机的调焦机构设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1051-1056.
- San Bing, Li Jinglin. Focusing device design of the large aperture optics system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013 (S2): 329-332.
伞 兵, 李景林. 大口径反射光学系统调焦机构设计[J]. *红外与激光工程*, 2013(S2): 329-332.
- Guo Quanfeng, Dong Jihong, Li Wei, *et al.*. Focusing mechanism design for long focal length space camera[J]. *OME Information*, 2010, 27(11): 105-109.

- 郭权锋, 董吉洪, 李 威, 等. 长焦距空间相机调焦机构设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(11): 105-109.
- 13 Hui Shouwen. Study of automatic focusing technique for long focus oblique real-time aerial camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003: 23-26.
惠守文. 长焦距斜视实时航空相机自动调焦技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003: 23-26.
- 14 Zhang Xinjie, Wang Shuqing, Yan Changxiang. Design and analysis for focusing mechanism of space camera[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(5): 462-466.
张新洁, 王树清, 颜昌翔. 空间相机调焦机构的设计与分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 462-466.
- 15 Jia Xuezhi, Wang Dong, Zhang Lei, *et al.*. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1824-1831.
贾学志, 王 栋, 张 雷, 等. 轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度实验[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1824-1831.
- 16 Lv Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping. Accuracy analysis of the focusing precision for multispectral CCD space camera[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 392-397.
吕世良, 刘金国, 贾 平. 空间多光谱 CCD 相机调焦精度分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 392-397.
- 17 Chen Wei. SiC scanning mirror assembly design and research [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
陈 伟. 大尺寸碳化硅扫描反射镜组件结构设计与研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.