

文章编号 1004-924X(2013)04-0948-07

离轴三反空间相机调焦机构设计

杨会生¹, 张银鹤¹, 柴方茂¹, 徐 宏¹, 李志来¹, 关英俊^{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. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:空间相机受所处复杂运载环境(冲击、振动、过载)和空间运行环境(压力、温度、微重力)的影响易产生焦平面偏移。为提高成像质量,本文设计了一种利用丝杠螺母变向、直线导轨导向、倾斜导轨驱动且适用于反射式光学系统的新型高精度调焦机构来修正离焦量。该设计采用防冷焊措施、预压消间隙措施和双重防卡死设计,有效地提高了结构强度、刚度和可靠性,从而保证了调焦精度。介绍了其结构和工作原理,描述了相应的可靠性设计措施,最后通过精度检测试验对调焦机构进行了综合性能测试。试验结果表明:该调焦机构具备良好的自锁特性,其直线运动精度优于 $\pm 2 \mu\text{m}$,重复定位精度优于 $\pm 1 \mu\text{m}$;调焦行程范围内调焦反射镜摆角精度绕 X 轴和 Y 轴方向均优于 $\pm 3.5''$,满足用户提出的精度要求。

关键词:斜面驱动;调焦机构;离轴三反系统;空间相机

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132104.0948

Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera

YANG Hui-sheng¹, ZHANG Yin-he¹, CHAI Fang-mao¹,
XU Hong¹, LI Zhi-lai¹, GUAN Ying-jun^{2*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)*

* *Corresponding author, E-mail: gyj5460@sohu.com*

Abstract: Space cameras are extremely vulnerable to the offset from its optimal position to the focal plane because of its complicated launch environments including shock, vibration and overload, and space operating environments, such as high vacuum, low temperature and micro-gravity. To improve the imaging quality, a new high-precision focusing mechanism for effectively compensating this offset was proposed to improve the adaptability of a camera by steering screw pairs, guiding parallel guide tracks and driving inclined-guides. In the design, schemes of anti-cold welding, gap relieving by pre-load and double anti-seize were adopted to improve the structural strength, rigidity and reliability and to guarantee the focusing precision. The structure and working principle of the mechanism were introduced and the design scheme for system reliability was described, then a synthetic test was performed. The test results show that the accuracy of linear movement and repeatability of the mechanism are less

收稿日期:2012-11-08;修订日期:2013-01-03.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA7020107)

than $\pm 2 \mu\text{m}$ and $\pm 1 \mu\text{m}$ respectively, and the swing of the focusing mirror around X and Y axes in the total focusing range are both less than $\pm 3.5''$, which meets the requirements of the users.

Key words: inclined plane driving; focusing mechanism; off-axis Three Mirror Anastigmat (TMA) system; space camera

1 引言

三反光学系统即三反射镜消像散光学系统(TMA),包括同轴TMA系统和离轴TMA系统两种^[1]。TMA系统的特点是不存在色差和二级光谱,成像谱段范围宽,设计灵活。离轴TMA系统无中心遮拦,焦面照度水平高,理论调制传递函数(MTF)较高,可在较大视场获得接近理想的成像效果,是空间相机光学系统的发展方向。离轴TMA系统包含多项关键技术,其中精密调焦技术是星载长焦距、高分辨率离轴三反空间相机必不可少的关键技术之一,由于空间相机在发射过程中受运载条件(如冲击、振动、过载等)的影响和在轨运行时环境条件(如压力、温度、微重力等)改变的影响都将导致不同程度的离焦,导致成像质量下降。为了保证成像质量,需要对空间相机的离焦量进行修正,因此设计一套可补偿像面偏移的高精度、高稳定性的调焦机构是十分必要的^[2-4]。本文以保证相机成像质量为出发点,提出了一种基于斜面驱动原理并适用于反射式光学系统的新型高精度调焦机构,详细介绍了其结构和工作原理,并采取了相应的可靠性设计措施,提高了调焦机构的可靠性,最后通过精度检测试验对调焦机构进行了综合性能测试。

2 调焦方式的选用原则及调焦参数确定

相机的光学系统不尽相同,调焦方式也存在较大差异,空间相机常用的调焦方式有镜头调焦、反射镜调焦和焦面调焦3种方式^[5]。镜头调焦即通过移动光学镜头的方式改变光学间隔,实现调焦,反射式光学系统中主镜、次镜对相机成像质量影响较大,特别是主镜对成像质量起决定作用,一般不用作调焦元件,故常采用移动三镜式调焦;反射镜调焦即通过移动在光学系统中起折转光路作

用的反射镜实现调焦,常用于后截距较长、调焦精度较高的光学系统中;像面调焦即通过移动成像介质(焦面或CCD)感光面进行调焦,常应用于焦面组件结构简单、体积较小的光学系统中。结合本离轴三反空间相机光学系统高分辨率、长后截距和焦面组件复杂的特点,本文采用反射镜调焦方式。

设计调焦机构时应首先确定其设计输入,即调焦参数,决定调焦机构结构的主要参数有行程、灵敏度、检测精度和调焦精度等。

光学系统都允许有一定的离焦量,当离焦量小于允许值时,对成像质量影响较小,当超过允许值时,成像质量下降严重。最大允许离焦量等于相机半焦深,半焦深计算公式为:

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

式中: $\pm \delta$ 为光学系统半焦深; F 为光学系统 F 数; λ 为光学系统工作中心波长。

所针对的离轴三反空间相机光学系统的允许离焦量为0.107 mm,依据传统经验,空间相机调焦精度应优于 $\delta/4$ 即 $F^2\lambda/2$,即焦面移动精度应优于0.026 mm。由于采用移动反射镜的方式进行调焦,根据如图1所示调焦光路图可得反射镜位移 s 与焦面位移 δ_1 的关系:

$$\delta_1 = \frac{s \sin \theta (\sin \gamma + \sin \beta)}{\sin \beta \cos(\alpha/2)}, \quad (2)$$

式中: δ_1 为焦面位移; s 为调焦反射镜位移; θ 为反射镜镜面与移动方向夹角; α 为入射光线与反射光线夹角; β 为反射光线与焦面夹角; γ 为入射光线与焦面夹角。

将光学系统参数代入可得 $\delta_1 = 1.6 s$,所以反射镜移动精度应优于 $0.026/1.6 = 0.016 \text{ mm}$ 。考虑到本空间相机分辨率高、焦距长及所处空间环境条件恶劣等因素,增加安全裕度,最终确定调焦精度为0.004 mm。

根据传统的检测理论,量仪的精度应比被测物高1个量级,即调焦机构的检测精度应比调焦精度高1个量级为 $0.5 \mu\text{m}$ 。灵敏度的确定比较灵活,一般也可以按照比调焦精度高 $0.5 \sim 1$ 个量

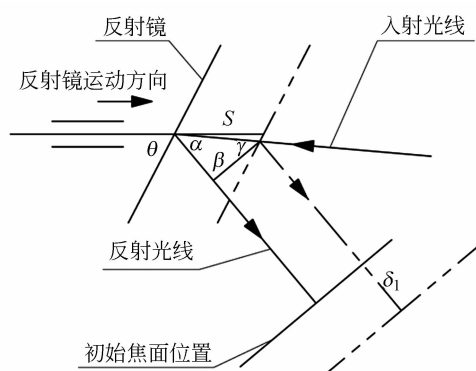


图 1 反射镜调焦光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflective focusing

级来确定,在兼顾调焦精度和避免爬行现象的要求下,确定调焦机构灵敏度为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

空间相机离焦主要是由运载条件和运行环境改变引起的,通过分析计算表明,焦面调焦行程至少达到 $\pm 0.8 \text{ mm}$ 才能满足使用要求,综合考虑地检环节的需求和其它未知因素影响,相机实际离焦量可能会超过分析结果,需在结构允许的情况下尽量提高调焦范围,增加调焦裕度,确保成像质量,所以最终确定焦面行程不小于 $\pm 2.5 \text{ mm}$,转化为调焦机构(反射镜)行程为不小于 $\pm 1.56 \text{ mm}$ 。

3 调焦机构设计

3.1 调焦机构的设计原则

鉴于本机构特殊的使用环境,要求其对于重力、温度条件的变化,运输和运载过程的影响具备良好的适应性。一般调焦机构应具有足够高的精度、灵敏度、检测精度,足够大的调焦范围,足够的刚度、强度和稳定性,较好的自锁特性^[5-6]。

3.2 调焦机构结构设计

按传动方式的不同,常用调焦机构有凸轮调焦机构、丝杠螺母调焦(螺纹调焦)机构和连杆调焦机构^[6-12]3类。凸轮调焦机构是利用空间凸轮机构将电机的旋转运动转化为调焦部件直线运动的机构,多应用于同轴光学系统。其结构简单,机构运动关系线性、运动部件表面经过特殊处理无冷焊卡滞现象,但是凸轮空间曲线加工难度大,同时凸轮副为高副,强度低易磨损且整体刚度不易提高;丝杠螺母调焦机构是利用螺纹副将电机的旋转运动转化为调焦部件直线运动的机构,其结

构简单,加工方便,能够自锁,但在两端极限位置易产生卡滞现象;连杆调焦机构是新兴的一种调焦机构,它利用连杆机构将电机的旋转运动转化为调焦部件的直线运动,因其结构较复杂,运动关系非线性,精度不易提高等应用较少。

由于相机总体结构对调焦机构的重量和结构刚度限制严格,为了在降低机构重量的同时获得尽可能高的结构刚度,提出了一种基于斜面驱动原理的新型调焦机构,其结构如图 2 所示,由调焦电机组件、编码器组件、丝杠螺母组件、楔角滑块组件和反射镜组件组成。

反射镜组件借助于支撑结构安装在楔角滑块组件上,楔角滑块组件两侧的高精度直线导轨与主框架连接,楔角滑块组件可沿调焦方向做高精度直线运动,其它自由度均被约束;楔角滑块组件通过与水平方向有一定安装角度的高精度直线导轨与丝杠螺母组件连接,同时为了增强整体支撑刚度,提高调焦精度,丝杠螺母组件也通过一对高精度直线导轨与主框架连接,丝杠螺母组件可以做沿轴方向的直线运动,其它自由度被约束;驱动部件(调焦电机组件)和检测部件(编码器组件)左右对称与主框架固连,并通过弹性联轴器分别与丝杠螺母组件连接。

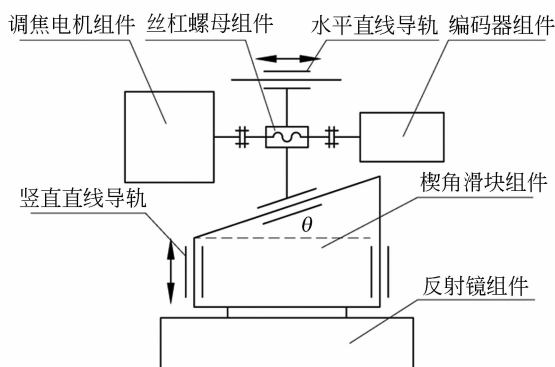


图 2 调焦机构结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of focusing mechanism

3.3 调焦机构工作原理

通电后,调焦电机组件转动通过弹性联轴器传递到丝杠螺母组件,转化为沿丝杠螺母组件轴向的直线运动,沿轴直线运动通过倾斜放置的高精度直线导轨转化为楔角滑块组件沿导轨直线运动,带动反射镜进行调焦。其驱动公式为:

$$s = nP \tan \theta / N, \quad (3)$$

式中: s 为调焦反射镜位移, n 为步进电机运动总步数, P 为丝杠螺母导程, θ 为直线导轨倾斜角度, N 为步进电机转 1 圈运动总步数。

调焦机构中步进电机采用 4 向 8 拍的工作方式, 转动 1 圈电机运动 400 步, 丝杆导程为 2 mm, 直线导轨的倾斜角度为 7.5° , 由此可得调焦机构灵敏度为 $0.66 \mu\text{m}$, 即电机运动 1 步焦面移动 $1.05 \mu\text{m}$ 。作为检测元件的编码器选用检测精度为 $5'$ 的航天级 16 位多圈编码器, 其理论分辨率可达 $0.06 \mu\text{m}$ 。

4 调焦机构可靠性设计

为补偿空间相机离焦, 保证成像质量, 调焦机构除具有高的调焦精度外, 还应稳定、可靠, 以适应运输、运载和运行环境的影响。

4.1 强度、刚度和结构稳定性设计

要使调焦机构稳定、可靠, 就应具备足够的强度、刚度和结构稳定性。考虑到运动副对强度、刚度和结构稳定性具有严重的负面影响, 特别是高副因接触面积小, 易磨损, 振动易发生塑性变形。本调焦机构运动副均采用低副(螺纹副和滑动副), 滑动副采用冗余设计思想; 同时通过配对筛选直线滚珠导轨循环钢珠直径, 使循环钢珠存在约 $5 \mu\text{m}$ 的弹性变形, 产生预压内力, 同时作用于导轨和滑块上, 实现了预压消间隙, 有效提高了机构强度、刚度和结构稳定性, 同时有效的消除机构运动空回, 增强反射镜运动平稳性, 减小了调焦运动过程中焦面晃动, 提高了调焦精度。

4.2 防冷焊设计

机构运动部件长期暴露在真空环境中, 金属表面失去吸附润滑介质, 接触表面上大量微观突起的金属触点发生冷焊, 导致运动阻力增大, 严重时会导致机构无法工作。为提高机构的可靠性, 延长机构使用寿命, 调焦机构中的运动部件采用固体自润滑处理技术, 在上述部件的接触表面形成一层固体润滑薄膜, 达到防冷焊目的。

4.3 机构自锁性设计

自锁是驱动力合力的作用线位于摩擦角之内, 此时平衡只依赖于摩擦角, 而与驱动力大小无关。调焦机构自锁具有很大优势, 主要体现在研

制、运输和运载阶段能保持焦面位置稳定, 减少调焦次数, 降低调焦风险, 提高可靠性; 其次, 减少电子学负担, 因为在机构不自锁的情况下, 会采用一些其它的方式(如步进电机单相通电锁紧)来保持焦面位置。本文调焦机构自锁性设计主要体现在丝杠螺母组件的参数选择上, 根据螺旋升角和自锁角公式:

$$\lambda = \arctan(S/\pi d_2), \quad (4)$$

$$\rho' = \arctan[f/\cos(\alpha/2)], \quad (5)$$

式中: λ 为螺旋升角; S 为丝杆导程; d_2 为丝杠螺旋中径; ρ' 为当量摩擦角; f 为丝杠螺母材料摩擦系数; α 为牙型角。

采用梯形丝杠, 配副摩擦系数约为 0.08, 将丝杠参数带入公式可得螺旋升角 $\lambda = 2.43^\circ$, 配副当量摩擦角 $\rho' = 4.73^\circ$, 丝杠螺旋升角小于配副当量摩擦角并有较大余量, 机构能够可靠自锁。

4.4 防卡死设计

调焦机构在意外情况下, 调焦电子学无法控制调焦机构正常停止于行程范围内, 丝杠螺母组件与两端结构件因机械限位强行停止。因为丝杠螺母组件运动过程中动量较大, 机械接触(撞击)过程作用时间很短, 从而产生较大摩擦阻力矩, 当摩擦阻力矩超过电机驱动力矩时, 会导致调焦机构卡死。丝杠螺母机械限位卡死会导致空间相机调焦机构无法正常工作甚至报废。为避免卡死现象发生, 调焦机构中设计软、硬两套限位措施, 软限位是指在调焦机构实际使用行程范围两端安装光电行程开关, 调焦机构运动到两侧就会触发行程开关(这时还不会出现机械接触), 调焦控制软件只要检测到马上进行中断响应处理, 使调焦机构停止运动; 硬限位其原理与软限位类似, 是在调焦机构设计行程范围(稍小于两端机械范围)两端安装机械式行程开关, 当调焦机构运动至此触发行程开关, 调焦机构掉电, 强行使调焦机构停止运动。

5 调焦机构精度测试

调焦机构精度测试试验是工程实施中的关键环节, 是验证设计精度是否能满足使用要求的重要依据, 调焦机构环境试验前后精度变化是检验其结构稳定性的主要指标。本文的调焦机构精度

检测包含自锁性检测、调焦过程反射镜摆角精度和直线运动精度 3 方面内容。利用调焦机构上的角位置传感器作为检测元件,可以得到环境试验前后焦面位置,对比试验前后角位置传感器数值可以得到调焦机构的自锁特性;利用经纬仪安装在检测楔角滑块组件上的平面反射镜可以得到调焦机构的摆角精度;利用检测精度为 $1\ \mu\text{m}$ 的数显千分表采用接触式测量方式可以得到调焦机构的直线运动精度。

5.1 自锁性检测

通过监视调焦机构检测元件在环境模拟试验前后的变化量可以检测调焦机构的自锁特性。本文所述调焦机构环境模拟试验前后焦面位置如表 1 所示,调焦组件环境模拟试验前后角位置传感器变化 $49''$,角位置传感器的测量精度为 $200''$,说明调焦机构自锁性能良好。

表 1 调焦机构环境模拟试验前后自锁特性检测

Tab. 1 Self-lock testing before and after orbit simulation operation tests

检测状态	角位置传感器数值			
环境试验前	8 圈	340°	$16'$	$20''$
环境试验后	8 圈	340°	$17'$	$9''$

5.2 调焦过程反射镜摆角精度检测

调焦过程中要求焦面平动,确保整个焦面都位于焦深范围内,为防止焦面摆动导致焦面部分离焦,确保成像质量,要求调焦过程中反射镜摆角尽量小。利用经纬仪检测安装在楔角滑块组件上的检测平面镜,可以得到平面镜俯仰方向和扭摆方向的读数,调焦机构全行程往复运动中,经纬仪两方向读数的最大变化量即为调焦机构的摆角精度,测试装置如图 3 所示。

表 2 环境模拟试验前摆角精度测试

Tab. 2 Accuracy test of swing angle before orbit simulation operation testing

极值	正向运动				逆向运动			
	X 轴 (")	Y 轴 (°)	Y 轴 (')	X 轴 (")	X 轴 (")	Y 轴 (°)	Y 轴 (')	X 轴 (")
Max	3.8	89	35	9.5	3.7	89	35	9
Min	-1.7	89	35	2.5	-1.5	89	35	2.8

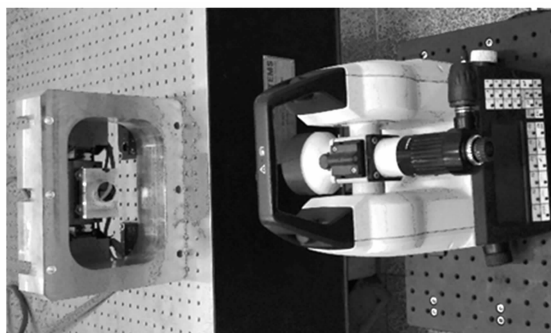


图 3 摆角精度测试

Fig. 3 Accuracy measuring of tilt angle

调焦机构环境模拟试验前后反射镜摆角精度如表 2、表 3 所示,调焦组件环境模拟试验前绕 X 轴方向摆角精度为 $\pm 2.75''$,绕 Y 轴方向摆角精度为 $\pm 3.5''$,试验后绕 X 轴方向摆角精度为 $\pm 2.75''$,绕 Y 轴方向摆角精度为 $\pm 1.8''$ 。试验结果表明调焦机构调焦过程反射镜摆角精度优于 $\pm 3.5''$,满足设计要求,且试验前后摆角精度变化量小于 $2''$,说明调焦机构稳定、可靠,运输、运载和运行环境对其影响很小。

表 3 环境模拟试验后摆角精度测试

Tab. 3 Accuracy test of swing angle after orbit simulation operation testing

极值	正向运动				逆向运动			
	X 轴 (")	Y 轴 (°)	Y 轴 (')	X 轴 (")	X 轴 (")	Y 轴 (°)	Y 轴 (')	X 轴 (")
Max	2	89	59	18.7	2	89	59	18.6
Min	-3.5	89	59	15.1	-2.9	89	59	16.5

5.3 直线运动精度检测

调焦机构到达预期位置的能力为直线运动精度,直线运动精度是判断调焦机构调焦能力的一项重要指标。为了减小测量误差,降低测量平面粗糙度对测量结果的影响,将千分表测头放在检测平面镜镜面上,通过地检软件输入目标位置,利用千分表检测实际位置,期望位置与实际位置的最大差值即为调焦机构的直线运动精度。为了使测试结果具有覆盖性,采用等间隔循环往复采点测量的检测方式,检测装置如图 4 所示。

调焦机构环境模拟试验前后直线运动精度如表 4、5 所示,调焦组件环境模拟试验前后直线运动精度均优于 $\pm 2\ \mu\text{m}$,重复定位精度均优于 \pm

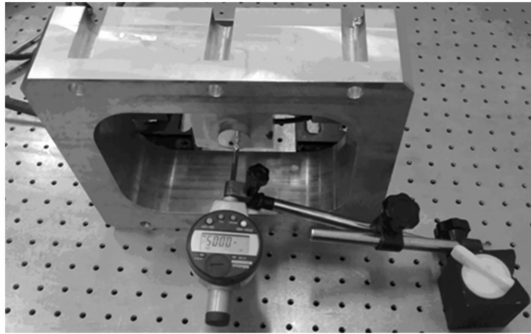


图4 直线运动精度测试

Fig. 4 Accuracy measuring of linear movement

1 μm , 满足设计要求, 且试验前后直线运动精度和重复定位精度均没有变化, 说明调焦机构稳定、

表4 环境模拟试验前直线运动精度测试

Tab. 4 Accuracy measurement of linear movement before orbit simulation operation testing (mm)

期望位置	第一次		第二次	
	正向	反向	正向	反向
0.068	0.066	0.07	0.067	0.07
0.566	0.564	0.567	0.565	0.568
1.062	1.062	1.065	1.063	1.065
1.685	1.683	1.686	1.684	1.686
2.181	2.18	2.183	2.181	2.183
2.677	2.677	2.68	2.678	2.681
3.175	3.174	3.177	3.175	3.178

参考文献:

- [1] 任建伟. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7):1491-1497.
REN J W. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1491-1497. (in Chinese)
- [2] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [3] 张新洁, 颜昌翔, 谢涛. 星载光学遥感器调焦机构的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2757-2761.
ZHANG X J, YAN CH X, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Opt.*

可靠, 运输、运载和运行环境对其影响很小。

表5 环境模拟试验后直线运动精度测试

Tab. 5 Accuracy measurement of linear movement after orbit simulation operation testing (mm)

期望位置	第一次		第二次	
	正向	反向	正向	反向
0.068	0.068	0.071	0.068	0.071
0.566	0.564	0.568	0.565	0.568
1.062	1.061	1.065	1.062	1.065
1.685	1.682	1.686	1.682	1.686
2.181	2.179	2.182	2.18	2.182
2.677	2.676	2.679	2.676	2.679
3.175	3.173	3.175	3.173	3.176

6 结论

设计了一种基于斜面驱动原理的调焦机构以满足高精度、高灵敏度、高刚度、高强度和高稳定性的要求, 试验结果证明: 该调焦机构具备良好的自锁特性; 直线运动精度优于 $\pm 2 \mu\text{m}$, 重复定位精度优于 $\pm 1 \mu\text{m}$; 行程范围内反射镜摆角精度优于 $3.5''$; 环境模拟试验条件下机构运动灵活, 无冷焊、卡滞、丢步现象, 试验前后调焦精度没有变化, 满足用户提出的使用要求。

Precision Eng., 2009, 17(11): 2757-2761. (in Chinese)

- [4] 丁亚林, 田海英, 王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 36-38.
DING Y L, TIAN H Y, WANG J Q. Design on the focusing mechanism of space remote-sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 36-38. (in Chinese)
- [5] 杨永彬. 空间光学相机调焦技术研究[J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 20-24.
YANG Y B. Study on focusing technique for space optical camera [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(2): 20-24. (in Chinese)
- [6] 安源, 齐迎春. 空间相机直线调焦机构的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 609-614.
AN Y, QI Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 609-614. (in Chinese)

- [7] 柴方茂,樊延超. 一种新型调焦机构设计[J]. 光机电信息, 2010, 27(6): 16-19.
CHAI F M, FAN Y CH. Design of a new kind of focusing structure [J]. *OME Information*, 2010, 27(6):16-19. (in Chinese)
- [8] 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.
HUANG H P, XIA Y H, AN CH B, *et al.*. Design on the focusing mechanism of long focus IR system [J]. *Laser and Infrared*, 2005, 35 (10): 745-747. (in Chinese)
- [9] 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): 1052-1056.
WANG ZH, ZHANG L P, LI ZH H, *et al.*. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1052-1056. (in Chinese)
- [10] 岳建如,关富玲,杨玉龙. 空间望远镜成像镜调焦机构改进设计与分析[J]. 空间科学学报, 2003, 23 (2):155-159.
YUE J R, GUAN F L, YANG Y L. Modified design and structural analysis for adjustment mechanism of the imaging Lens's focal length of a space solar telescope [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2003, 23(2):155-159. (in Chinese)
- [11] 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.
WANG SH X, LI J L, LIU L, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism in space camera with long focal-plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2239-2243. (in Chinese)
- [12] 张青青,张立平,王智. 航天立体测绘相机调焦机构的设计与试验研究[J]. 机械设计与制造, 2009, 4:57-59.
ZHANG Q Q, ZHANG L P, WANG ZH. Design and experimental research on focusing mechanism of aerial stereo mapping camera [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009, 4:57-59. (in Chinese)

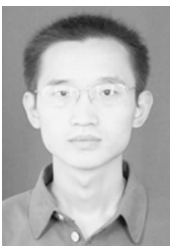
作者简介:



杨会生(1982—),男,河北献县人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构及精密机械等方面的研究。E-mail: yanghuisheng@126.com



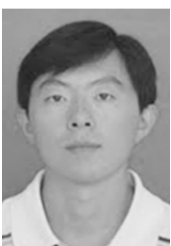
徐宏(1961—),女,吉林长春人,高级工程师,1983年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术方面的研究。E-mail: xuhongciomp@sohu.com



张银鹤(1986—),男,江苏铜山人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间光机结构方面的研究。E-mail: crickzhang1@163.com



李志来(1965—),男,吉林镇赉人,研究员,1986年于吉林工学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构技术及精密机械方面的研究。E-mail: lizl2004@sohu.com



柴方茂(1982—),男,吉林通化人,硕士,助理研究员,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间光机结构方面的研究。E-mail: fmao1982@163.com



关英俊(1978—),男,吉林永吉人,副教授,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器 CAD/CAE 及结构优化设计方面的研究。E-mail: gjy5460@sohu.com