

文章编号 1004-924X(2016)04-0796-08

空间相机均力输出式调焦机构

杨会生¹,李志来¹,樊延超¹,宁永慧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:为了补偿空间相机因所处复杂运载环境和空间运行环境导致的焦平面偏移,研制了一套利用均力输出组件驱动,正反双曲柄滑块机构传动,直动组件导向的新型高精度调焦机构。介绍了其结构组成和运动原理,并对其误差来源及影响因素进行了深入分析。该调焦机构采用两点支撑方式,两支撑点均力输出且无同步性误差,机构内应力小,运行平稳,调焦精度高;运动副采用预压消间隙措施,有效消除配合间隙,无空回,重复精度高。在模拟空间环境条件下,对其各项参数进行了测试。试验结果表明,该调焦机构可在 ± 1.77 mm间调焦,直线定位精度大于 ± 8 μm ,重复性优于 ± 2 μm ;同步性误差小于 ± 4 μm ,重复性优于 ± 3 μm ;调焦行程范围内调焦反射镜转角精度优于 $\pm 5''$,重复性优于 $\pm 1.5''$ 。得到的结果能够满足空间相机在复杂空间环境下的成像需求。

关键词:空间相机;调焦机构;均力输出;焦平面偏移;离轴系统

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162404.0796

Focusing mechanism with equal output forces for space camera

YANG Hui-sheng¹, LI Zhi-lai¹, FAN Yan-chao¹, NING Yong-hui¹, GUAN Ying-jun²

(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: To compensate the offset from optimal focal plane position of a space camera due to its complicated launch environment and space operating environment, a new high-precision focusing mechanism was proposed. The mechanism is driven by equal output components, transmitted by a positive and negative slider-crank mechanisms and its guiding is completed by a direct-acting component. The structural composition and motion mechanism were introduced and its error sources and influence factors were analyzed. The focusing mechanism was supported by the direct-acting component with two points and the output force of each point was equivalence, so that it has no synchronization motion error, and characterized by low internal stress in the organization and high swing angle precision. Furthermore, the gap relieving by preload was used in all kinematics pairs to eliminate the error of backlash in the focusing mechanism to improve focusing accuracy. The test parameter was tested in a sim-

收稿日期:2015-07-20;修订日期:2015-08-27.

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

ulated space environment, and the analysis and experiment results show that the focusing range of the focusing mechanism is ± 1.77 mm, the linear position precision and repeatability are better than ± 8 μm and ± 2 μm respectively, the synchronization motion error is less than ± 4 μm , and the repeatability better than $\pm 1''$. In focusing travel ranges, the tilt angle accuracy of the focusing mirror and its repeatability are better than $\pm 5''$ and $\pm 1.5''$, respectively. These results meet the needs of complex spatial imaging environments.

Key words: space camera; focusing mechanism; equal output; focal plane distortion; off-axis system

1 引言

航天遥感相机是获取地面信息的重要光学仪器,使用空间相机对地观测,具有速度快、精度高、覆盖广等优点,被广泛应用于科学探测、军事侦查、应急抢险和灾难救援等领域。在空间相机领域,离轴反射式光学系统具有高分辨率、大视场、无色差、平像场等优点^[1]。但由于离轴反射式光学系统为非轴对称系统,设计和装调难度大,存在多项关键技术,其中精密检调焦是确保空间相机高质量成像的关键技术之一^[2-4]。

空间相机地面集成受重力影响会产生自重变形,尤其是大体量离轴反射式光学系统,因采用光轴水平集成方式,受重力影响更为显著,为使自重变形满足使用要求,大体量且结构非对称的调焦元件需采用多点支撑方式,但该方式结构复杂,各支撑点运动同步性不易保证,导致同步性误差,不仅影响机构运动精度,导致调焦过程中出现焦面摆动,还会引入内应力,影响机构稳定性,严重时会出现卡死,导致调焦失败。为简化结构,提高可靠性,现有多点支撑式调焦机构多使用两点支撑,采用过约束方式驱动两支撑点运动,此方式结构刚度大,但是无法完全消除同步性误差,只能通过无限提高机械加工精度控制运动同步性,减小同步性误差,保证调焦精度和结构稳定性,因此,其加工成本高,研制周期长,废品率高。

本文基于驱动力控制的角度,提出了具有均力输出特性的两点驱动式调焦机构,讨论了设计输入确定方式,详细介绍了结构组成和运动原理,并对其误差来源及影响因素进行了深入分析,最后在模拟空间环境条件下,对各项参数进行了测试,为后续系统集成提供了有效依据。

2 确定设计输入

调焦机构的设计输入主要有调焦精度和检焦精度^[5]。光学系统允许最大离焦量 δ 由其 F 数和中心工作波长 λ 决定,且有 $|\pm\delta| = 2F^2\lambda^{[6-7]}$,根据工程经验,调焦精度优于半焦深 δ 的 $1/4$ 时,空间相机可以稳定成像,将其等作用分解为直线精度 Δ_1 和转角精度 δ_1 ,有:

$$\Delta_1 \leq \sqrt{2}\delta/8, \quad (1)$$

$$\delta_1 \leq \text{atan}[\sqrt{2}\delta/(8d)], \quad (2)$$

式中: d 为焦平面感光面最大包络圆直径。

采用移动反射镜方式调焦,焦平面直线位移 S 与反射镜直线位移 s 的转化关系,可参考文献^[5]中式(2);转角位移为 2 倍关系。代入结构参数,确定直线运动精度 Δ 为 ± 0.015 mm;转角精度 δ 为 $\pm 11.4''$,等作用分解到两正交轴上,绕 X 轴(R_x)=绕 Y 轴(R_y)= $\pm 8.1''$ 。位移检焦精度依据“高 1 个数量级”的误差理论,定为 0.001 mm;转角精度因不需实时检测,故不做设计要求。

此外,为满足地面检测和装调、集成需求,调焦机构需具备大调焦范围,高静态刚度,以克服自重变形对系统集成影响。根据系统设计需求,焦面可调范围大于 ± 3 mm,即调焦反射镜行程大于 ± 1.52 mm;光学装调状态下,调焦反射镜自重转角变形应小于 $6''$ 。

3 调焦机构设计

3.1 结构设计

因为调焦反射镜体量大(大于 600 mm),长宽比高,采用传统的两点支撑式调焦机构无法满足同步精度公差要求,基于驱动力控制思想,提出了具有均力输出特性的调焦机构,其结构图如图

1 所示。调焦机构由轻量化主支撑组件、均力输出组件、正曲柄滑块机构、反曲柄滑块机构、直动组件和反射镜组件组成。

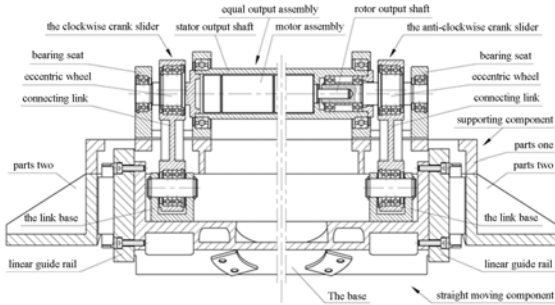


图 1 调焦机构结构图

Fig. 1 Structure of focusing mechanism

轻量化主支撑组件由一系列相互固连的轻量化零件 1~2 (parts one 和 parts two) 组成, 提供坚固、稳定的一体式主体支撑框架, 用于安装其它机构和组件; 均力输出组件由调焦电机组件、定子输出轴和转子输出轴组成, 调焦电机组件内部集成角位置传感器和失电制动器, 分别用于检焦和焦面位置保持, 调焦电机组件外壳与定子输出轴连接, 输出轴与转子输出轴连接; 正、反曲柄滑块机构结构相同, 由轴承基座、偏心轮、牵拉杆和连杆基座等组成, 两机构偏心轮轴安装相位沿纸面对称; 定子输出轴与左侧偏心轮连接, 驱动正曲柄滑块机构, 转子输出轴与右侧偏心轮连接, 驱动反曲柄滑块机构; 反射镜组件由调焦反射镜、镶嵌件和转接柔节组成, 主要用于反射镜的连接及力、热匹配; 基座通过左右对称安装的直线导轨与主支撑组件连接, 组成直动组件, 反射镜组件通过基座安装到直动组件上。此外, 为适应空间冷黑环境, 机构运动部件采用固体自润滑防冷焊处理技术, 以提高系统可靠性; 装置中运动副也采用预压消间隙技术, 以消除空回, 提高精度。

3.2 工作原理

调焦机构工作速度较低 (小于 3.14 rad/s), 并在启停段进行加速度控制, 使其角加速度绝对值小于 5 rad/s^2 , 所以忽略动力学影响, 将其简化为单纯的运动学和静力学问题。其原理如图 2 所示, 均力输出组件通电后, 定子输出轴和转子输出轴出现相对转动, 两输出轴的输出力矩是一对作用力与反作用力, 其大小相等, 方向相反; 定子输出轴驱动正曲柄滑块机构运动, 使其绕轴顺时针

转动 θ_z , 驱动左支撑点移动 S_z , 转子输出轴驱动反曲柄滑块机构运动, 使其绕轴逆时针转动 θ_F , 带动右支撑点移动 S_F ; 忽略误差影响, 左右两支撑点旋转轴线重合, 左右两支撑点移动距离 S_z 与 S_F 相等 (设为 S), 由于正反曲柄滑块机构结构完全相同, 则左右两侧偏心轮轴的转动角度 θ_z 与 θ_F 也相同 (设为 θ), 因为两偏心轮轴输入力矩大小相同, 则两支撑点的输入力也相等。即有, 当均力输出组件输出量为 2θ 时, 反射镜组件移动 S , 同时两支撑点的输出大小相等的作用力。

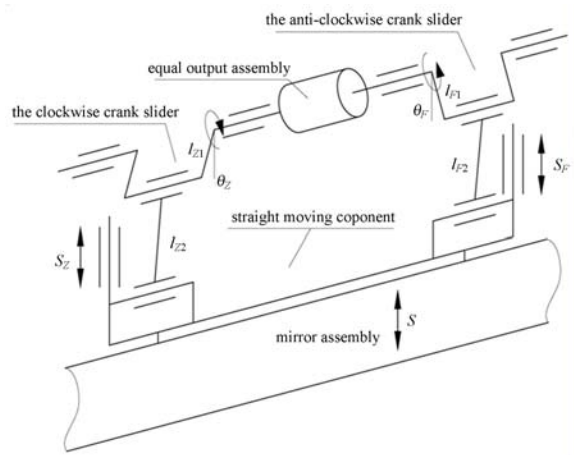


图 2 调焦机构原理图

Fig. 2 Schematic of focusing mechanism

3.3 结构参数确定

理想条件下, 忽略误差因素, 调焦机构理论运动模型如图 3 所示, 正反曲柄滑块组件偏心轮轴和牵拉杆基座同轴安装, 即图 3 所示两机构的 O 点和 O' 点分别重合, 则调焦机构理论运动公式为:

$$S = l_1 \cos \theta + \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \theta}, \quad (3)$$

式中: S 为反射镜组件位移; $l_1 = l_{z1} = l_{F1}$ 为左右偏心轮的理论偏心距; $l_2 = l_{z2} = l_{F2}$ 为左右牵拉杆的理论长度; $\theta = \theta_z = \theta_F$ 为均力输出组件的运动半角。

采用步进电机作为调焦电机, 则均力输出组件运动半角为:

$$2\theta = n / (iN), \quad (4)$$

式中: i 为调焦减速器减速比; n 为步进电机运动总步数; N 为步进电机 1 周运动总步数。

步进电机采用 4 相 8 拍工作方式, 电机转 1 圈运动 400 步, 偏心轮初始相位角 45° , 终止相位角 135° , l_1 取 2.5 mm , l_2 取 52 mm , 则调焦行程

为±1.77 mm;调焦机构运动规律非线性,偏心轮在相位角为 87.25°时,调焦机构灵敏度最低,当使用减速比为 50 的减速器时,其最低灵敏度可达 0.79 μm,转化为焦平面的移动量为 1.56 μm,即调焦机构的最低灵敏度为 1.56 μm。调焦检焦元件选用精度为 5' 的航天级 16 位多圈编码器,转化为焦平面移动量,调焦机构理论分辨率为 0.24 μm。

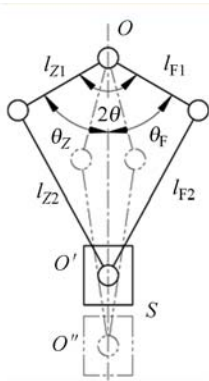


图 3 调焦机构理论运动简图

Fig. 3 Theory motion diagram of focusing mechanism

4 调焦机构精度分析

4.1 误差来源

影响机构精度的误差类型主要有系统误差和随机误差,其对机构精度的影响按极限误差合成可表示为:

$$\Delta = \sum_{i=1}^r \alpha_i \Delta_i \pm t \sqrt{\sum_{i=1}^j \left(\frac{\alpha_i e_i}{t_i} \right)^2 + \sum_{i=1}^q \left(\frac{\alpha_i \delta_i}{t_i} \right)^2} + R, \quad (5)$$

式中:Δ 为机构极限误差;α_i 为误差传递系数;Δ_i 为已定系统误差;e_i 为未定系统误差;δ_i 为随机误差;R 为各误差间协方差之和;t_i 为各误差置信系数。

调焦机构在组件集成前,需对重要零部件的关键尺寸和形位公差进行精密实测,确定加工误差;组件集成完毕后,进行组件级精度测试,求解装调误差;以确定全部已定系统误差。未定系统误差可以看做是由检测精度引入的检测误差,由于所采用的检测仪器和所使用的检测方法所引入的误差远小于上述误差,其误差可忽略。随机误差其影响方式非常复杂,针对本文所述调焦机构,主要为运动副、轴承和电机随机误差的影响,使用

过盈配合将轴承内圈和外圈分别与运动件连接,轴承滚珠采用预压处理可以均化并减小随机误差,通过选用高精度调焦电机可以控制随机误差,使用上述方式可以将随机误差控制到远小于(1/10)系统误差的程度,同样可以忽略其影响,则式(5)可简化为:

$$\Delta = \sum_{i=1}^r \alpha_i \Delta_i. \quad (6)$$

对于因已定系统误差引起的运动误差,可以通过误差补偿进行修正,则正反曲柄滑块机构的同步性误差是影响机构精度的主要因素^[8-10]。

4.2 同步性误差分析

调焦机构为两点支撑,且每个支撑点都通过一套独立的曲柄滑块机构进行驱动,由于存在上述加工、装调误差,两支撑点运动不同步,存在偏差,即同步性误差。其误差来源主要有零部件尺寸、形状、位置(装配)误差以及各运动副之间的配合间隙。具体包括两偏心轮轴的不同轴误差、两偏心轮偏心距误差、两牵拉杆尺寸误差、轴孔的不同轴误差、两连杆基座轴孔对安装面的尺寸偏差和形位误差以及运动副间的配合间隙等。

调焦机构左右两支撑点(驱动点)运动学公式为:

$$S_Z = S_Z(\theta, l_{Z1}, l_{Z2}), S_F = S_F(\theta, l_{F1}, l_{F2}), \quad (7)$$

式中:S_Z、S_F 分别为左右两侧支点位移;l_{Z1}、l_{Z2} 为左右偏心轮的理论偏心距;l_{F2}、l_{F2} 为左右牵拉杆的理论长度;θ 为均力输出组件的运动半角。

加工及装配误差对精度影响如图 3 所示。

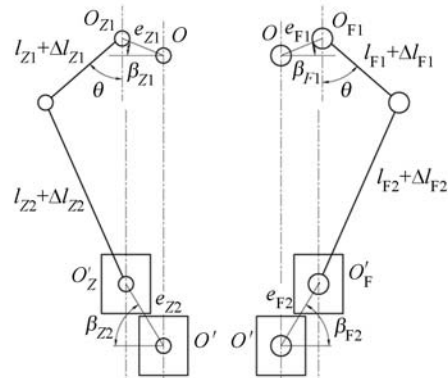


图 3 调焦机构误差影响示意图

Fig. 3 Affections schematic of focusing mechanism errors

设正曲柄滑块机构运动误差 ΔS_Z,反曲柄滑块机构运动误差 ΔS_F,则有:

$$\Delta S_Z = \frac{\partial S_Z}{\partial l_{Z1}} \Delta l_{Z1} + \frac{\partial S_Z}{\partial l_{Z2}} \Delta l_{Z2} - e_{Z1} \sin \beta_{Z1} - e_{Z2} \sin \beta_{Z2} + \sum_{i=1}^n r_i, \quad (8)$$

$$\Delta S_F = \frac{\partial S_F}{\partial l_{F1}} \Delta l_{F1} + \frac{\partial S_F}{\partial l_{F2}} \Delta l_{F2} - e_{F1} \sin \beta_{F1} - e_{F2} \sin \beta_{F2} + \sum_{j=1}^n r_j, \quad (9)$$

则由两支点的同步性误差 ΔS 为:

$$\Delta S = |\Delta S_Z - \Delta S_F|, \quad (10)$$

式中: e_{Z1} 、 e_{F1} 为左右两侧偏心轮轴安装偏心误差; β_{Z1} 、 β_{F1} 为左右两侧偏心轮轴安装偏心误差相位; e_{Z2} 、 e_{F2} 为左右两侧连杆基座安装偏心误差; β_{Z2} 、 β_{F2} 为左右两侧连杆基座安装偏心误差相位; Δl_{Z1} 、 Δl_{F1} 为左右两侧偏心轮偏心误差; Δl_{Z2} 、 Δl_{F2} 为左右两侧牵拉杆长度误差; r_i 、 r_j 为正反曲柄滑块机构运动副配合间隙, 调焦机构运动副采用预压消间隙措施, 无配合间隙, r_i 、 r_j 为零。

4.3 同步性误差影响

同步性误差主要影响转角精度, 其对调焦机构转角精度影响如图 4 所示:

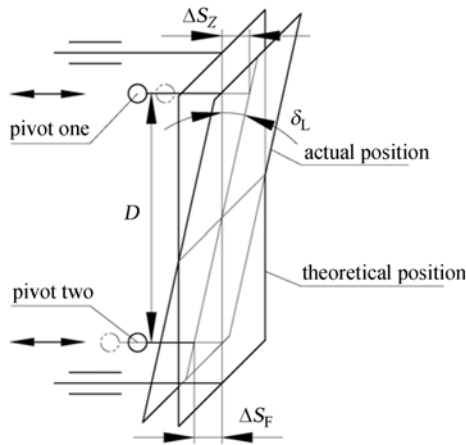


图 4 同步性误差影响示意图

Fig. 4 Affections of synchronization motion error

同步性误差主要影响调焦反射镜 R_X 的摆角精度 δ_L , 具体关系为:

$$\delta_L = \text{atan}(|\Delta S_Z - \Delta S_F| / D), \quad (11)$$

式中: D 为两支点间距, 同步性误差不仅影响调焦反射镜调焦过程中的镜面晃动, 还会引入较大转动力矩, 产生内应力, 导致调焦机构出现弹性变形, 影响机构稳定性, 严重时会出现机构卡死, 导致调焦失败。

4.4 同步性误差修正

鉴于同步性误差的影响, 需对其进行控制和修正, 由此分别对正反曲柄滑块机构输入引入修正量 $\Delta \theta_Z$ 和 $\Delta \theta_F$, 使其满足:

$$\Delta S_Z + \frac{\partial S_Z}{\partial \theta} \Delta \theta_Z = \Delta S_F + \frac{\partial S_F}{\partial \theta} \Delta \theta_F = 0. \quad (12)$$

然后, 将均力输出组件输出量 2θ 变为 $2\theta + \Delta \theta_Z + \Delta \theta_F$, 即可消除同步误差, 而上述修正过程是机构本身自动完成的。

5 精度测试

为验证调焦机构是否满足系统需求, 对装配后的调焦机构进行了精度测试, 具体包括自重转角变形测试, 同步性精度测试, 直线定位精度测试, 转角精度测试和重复性(稳定性)测试。

5.1 自重转角变形测试

自重转角变形测试是为了验证调焦机构在装调状态下, 调焦反射镜抵抗重力变形的能力。将调焦机构装调状态设定为 0° 状态, 将调焦机构绕调焦反射镜法线旋转 180° 设定为 180° 状态, 调焦反射镜在上述两种状态下的镜面转角变化量, 即为调焦机构在 2 倍重力作用下的自重转角变形, 其检测结果如表 1 所示, 由表 1 可知调焦机构振前在 2 倍重力下自重转角变形, $R_x = 6.7''$, $R_y = 9.6''$, 振后 $R_x = 5.1''$, $R_y = 8.3''$, 振动前后变形优于 $2''$, 满足系统需求。

表 1 自重转角变形测试数据

Tab. 1 Data of rotation angle by weight

statuses	before vibration		after vibration					
	R_x (")	R_y (°)	R_x (")	R_y (")	R_x (°)	R_y (')	R_y (")	
0°	0	90	0	0.6	0	90	0	1.5
180°	-6.7	89	59	51	-5.1	89	59	53.2

5.2 同步性、直线定位精度测试

同步性、直线定位精度测试检测方法相同, 主要检测同步性误差对调焦机构定位精度的影响。在调焦范围内等间隔的规划 37 个期望位置, 使用两台检测精度为 $1 \mu\text{m}$ 的数显千分表分别检测两支撑点在期望位置的定位误差可以求得调焦机构的直线定位精度, 两支撑点定位误差之差即为同步性误差。调焦机构同步性、直线定位精度测试

结果如图 5、6 所示。测试结果表明,调焦机构力学振动试验前后同步性均优于 $\pm 4 \mu\text{m}$, 直线运动精度均优于 $\pm 8 \mu\text{m}$, 满足设计输入需求。

5.3 转角精度测试

为确保相机稳定成像,在进行离焦补偿(调焦)时,理想情况下焦平面只允许平动,其晃动不能超差。因此,转角精度测试就是检测在调焦过程中调焦反射镜面晃动量是否满足系统需求的检测环节。将调焦机构 0° 状态放置,使用检测精度为 $0.5''$ 的莱卡经纬仪检测调焦反射镜转角,在全行程范围内,调焦反射镜最大转角变化量就是转角精度的极限偏差,调焦机构力学振动试验前后转角精度测试结果如表 2、3 所示,由测试数据可知,调焦机构力学振动试验前 R_x 转角精度为 $\pm 4.3''$, R_y 转角精度为 $\pm 3.7''$, 试验后 R_x 转角精度为 $\pm 4.4''$, R_y 转角精度为 $\pm 4.8''$, 满足设计输入要求。

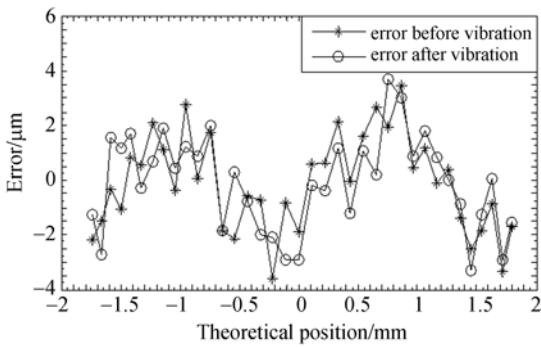


图 5 同步性误差曲线

Fig. 5 Curve of synchronous motion error

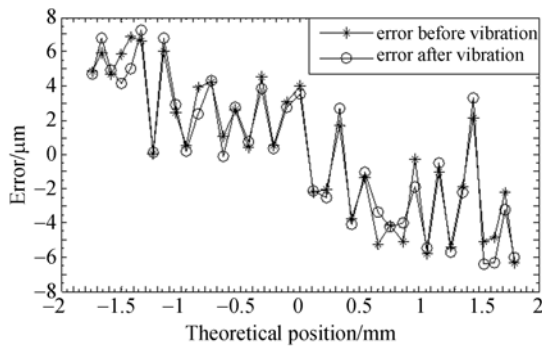


图 6 直线运动误差曲线

Fig. 6 Curve of linear motion error

5.4 重复性(稳定性)测试

重复性测试是为了验证机构稳定性的测试环

节,以验证调焦机构抵抗运输、运载过程中所出现的振动、冲击和过载等力学条件的能力,要求调焦机构在经历上述过程后不能出现破坏、变形和精度损失。重复性测试主要通过调焦机构力学试验前后精度改变来进行定量描述,由表 1~3 所述检测数据可知,调焦机构力学试验前后,1 倍自重转角变化量优于 $1''$, 转角精度重复性优于 $1.5''$, 由图 5、6 所示测试结果可求得直线运动重复性和同步性运动重复性,其结果如图 7 所示,调焦机构力学振动试验前后直线运动重复定位精度优于 $\pm 2 \mu\text{m}$, 同步性运动重复性优于 $\pm 3 \mu\text{m}$, 可以确定调焦机构稳定性良好,没有出现精度损失,满足使用要求。

表 2 振前转角精度测试数据

Tab. 2 Data of accuracy measurement of swing angle before vibration testing

extremum	forward motion		backward motion					
	R_x	R_y	R_x	R_y	R_x	R_y		
	($''$)	($^\circ$)	($'$)	($''$)	($''$)	($^\circ$)	($'$)	($''$)
Max	3.7	89	47	37.1	4.7	89	47	35.9
Min	-4.9	89	47	29.5	-4.0	89	47	28.7

表 3 振后转角精度测试数据

Tab. 3 Data of accuracy measurement of swing angle after vibration testing

extremum	Forward motion		Backward motion					
	R_x	R_y	R_x	R_y	R_x	R_y		
	($''$)	($^\circ$)	($'$)	($''$)	($''$)	($^\circ$)	($'$)	($''$)
Max	5.1	89	55	36.2	4.3	89	55	36.9
Min	-3.8	89	55	26.5	-4.4	89	55	27.3

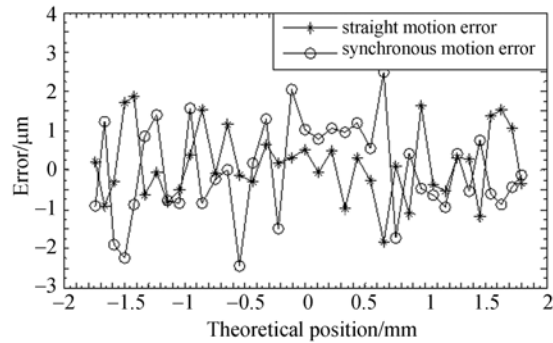


图 7 重复性误差曲线

Fig. 7 Curve of repeatability motion error

6 结 论

本文针对某型空间相机调焦元件大体量,高长宽比的结构特点,提出采用两支撑点驱动调焦反射镜的均力输出型调焦机构。该机构支撑下的调焦反射镜自重变形小,能够满足空间相机地面装调,空间应用的特殊需求;配置了均力输出组件,使两驱动点等力输出,同步性误差小;机构不

存在过约束,内应力小,稳定性高。试验测试结果表明:调焦反射镜在装调状态放置,在 1g 重力作用下, R_x 、 R_y 转角均小于 $5''$;调焦机构振动前后的同步性误差均优于 $\pm 4 \mu\text{m}$,直线运动精度均优于 $\pm 8 \mu\text{m}$,振动前后 R_x 和 R_y 的转角精度均优于 $\pm 5''$;振动前后转角重复精度优于 $1.5''$,重复定位精度优于 $\pm 2 \mu\text{m}$,同步性运动重复性优于 $\pm 3 \mu\text{m}$,均满足系统需求。

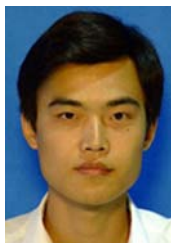
参考文献:

- [1] 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)
- [2] 刘磊, 曹国华. 大视场长焦面光学遥感器双凸轮式焦面调焦机构[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1939-1944.
LIU L, CAO G H. Double cam focusing mechanism of space camera with wide field and long-focal-plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1939-1944. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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.
XU ZH T, LIU J G, LONG K H, *et al.*. Accuracy analysis of focusing mechanism of high resolution space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0728001. (in Chinese)
- [5] 杨会生, 张银鹤, 柴方茂, 等. 离轴三反空间相机调焦机构设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 948-954.
YANG H SH, ZHANG Y H, CHAI F M, *et al.*. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 948-954. (in Chinese)
- [6] 吕世良, 刘金国, 贾平, 等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2154-2160.
LU SH L, LIU J G, JIA P, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2154-2160. (in Chinese)
- [7] 邵明东, 郭疆, 孙继明. 离轴三反测绘相机调焦机构的设计[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 373-379.
SHAO M D, GUO J, SUN J M. Design of focusing mechanism for off-axis TMA mapping cameras [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 373-379. (in Chinese)
- [8] 刘炳强, 张帆, 李景林, 等. 空间相机调焦机构运动同步性误差分析[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 946-951.
LIU B Q, ZHANG F, LI J L, *et al.*. Analysis of synchronous motion error for focusing mechanism of space camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 946-951. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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.

CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al.*. Error analysis for focusing mechanism of space camera

[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (5): 1349-1356. (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



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。Email: li-zl2004@sohu.com