

doi:10.3788/gzxb20184704.0422004

# 一种空间相机热控调焦机构的设计与分析

李泽坤<sup>1,2</sup>, 吕群波<sup>1,2</sup>, 李伟艳<sup>1</sup>

(1 中国科学院光电研究院 计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**为满足空间相机成像质量的要求,设计了一种热控调焦机构来修正离焦量.首先,根据光学系统确定调焦方式,并通过驱动次镜沿光轴方向移动的方式设计了调焦机构,该结构占用空间小且质量较轻.然后,根据调焦需求,选取热膨胀系数较高的铝作为主要材料,采用在镜座背面贴加热片等措施保证次镜在恒温下工作,并通过有限元方法对调焦机构性能进行了建模分析.最后,对调焦机构工作状态进行分析验证,利用 Zernike 多项式对其工作时所产生温度变化引起的镜面变形进行拟合,把变形后的面形输入到 Zemax 软件中,以调制传递函数作为光学系统成像质量评价指标,分析了调焦机构在正常工作时次镜面形变化对相机成像质量的影响.结果表明,调焦机构符合设计指标,且工作时次镜面形的变化对光学系统成像质量的影响可以忽略,与传统调焦机构相比,具有质量轻、结构简单等优点.

**关键词:**空间相机;调焦结构;有限元;力-热耦合分析;Zernike 多项式

中图分类号:V445.8

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0422004-8

## Design and Analysis of a Thermally Driven Focusing Structure for Space Camera

LI Ze-kun<sup>1,2</sup>, LÜ Qun-bo<sup>1,2</sup>, LI Wei-yan<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Computation Optical Imaging Technology, Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve imaging quality of the space camera, a thermally driven focusing structure is designed to compensate the offset. Firstly, the focusing method is chosen according to the optical system, and the focusing structure is designed by driving the secondary mirror to move along the direction of the optical axis which occupies small space and is light in quality. Then, according to the demand of focusing, the aluminum with higher thermal expansion coefficient is selected as the main material. To ensure the secondary mirror works at constant temperature, some heating films are attached to the back of the mirror seat. And the performance of the focusing structure is simulated by the finite element method. Finally, the working state of the focusing structure is analyzed, and the deformation of the mirror caused by the temperature change is fitted by Zernike polynomial, and the fitting coefficients are input into the Zemax. As the measurement of imaging quality, the modulation transfer function is used to reflect the impact of the deformation of the sub-mirror on the optical performance of the space camera. The result shows that the focusing structure meets the design specifications and the impact of deformation belonging to the sub-mirror on the imaging quality of optical system can be neglected when the focusing structure is working. Compared with traditional focusing structures, the thermally driven focusing structure has the advantages of light weight and simple structure.

**Key words:** Space camera; Focusing structure; Finite element method; Stress-thermal coupled analysis; Zernike polynomial

基金项目:国家自然科学基金(No.61635002)和中国科学院国防科技创新基金(No.CXJJ-16S045)资助

第一作者:李泽坤(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光机结构设计.Email: lizekun@aoe.ac.cn

导师(通讯作者):吕群波(1979-),男,研究员,博士,主要研究方向为计算光学成像.Email: lvqunbo@aoe.ac.cn

收稿日期:2017-11-03;录用日期:2017-12-21

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着人类对近地行星表面信息获取需求的日益增加以及航天技术的飞速发展,空间相机成为获取地理空间信息的主要途径之一<sup>[1]</sup>,对适用于各个领域、性能更加完善、应用环境更加严格的空间相机的研发已成为世界各国的研究热点<sup>[2]</sup>.空间相机所处的运载和运行环境条件非常复杂,在运输过程中会受到冲击、振动、碰撞等干扰<sup>[3]</sup>,在运行过程中会受到压力、温度、重力等影响,这些因素都会造成离焦现象,从而影响成像质量<sup>[4]</sup>.为了满足光学成像要求,需要设计相应的调焦机构,以修正由外界因素引起的系统离焦问题<sup>[5]</sup>.

目前,空间相机主要使用机械调焦的方式对光学系统进行调焦,通常使用超精密滚珠丝杠驱动 CCD 面的移动<sup>[6]</sup>,或者使用凸轮结构作为驱动装置驱动焦面移动<sup>[7]</sup>,这类调焦机构调焦行程大且调焦精度较高.但其缺点在于结构质量大且装配难度高,在工作过程中其顺畅性和稳定性也较差,并且由于现在空间相机朝着轻小型化的方向发展<sup>[8]</sup>,以往常规的调焦机构很难满足现在空间相机的尺寸以及重量要求.相较于传统的机械调焦方式,热控调焦方式可以减少结构的复杂性,减轻相机重量和占用空间,从而可以改善整个系统的动力特性和可靠性,节约发射成本<sup>[9]</sup>.

本文设计了一种基于热控方式的新型调焦机构,通过有限元力-热耦合建模分析了调焦机构在工作时所引起系统的变化,验证其是否满足调焦需求,并通过 Zernike 多项式对由于调焦机构工作时所产生的温度变化引起的镜面变形进行拟合,利用调制传递函数(Modulation Transfer Function MTF)和波像差等指标来分析调焦机构在正常工作状态下,镜面的变化对系统成像质量的影响.

## 1 热控调焦方式的选用及参数确定

### 1.1 热控调焦方式的选用

调焦方式的选用主要由光学系统构型、调焦精度以及工作条件等因素决定,常见的调焦方式有镜组调焦、反射镜调焦和焦面调焦三种<sup>[10]</sup>.本文空间相机搭载的光学系统为卡塞格林光学系统,针对该类折反式光学系统的特点,采用镜组调焦这种方式,通过移动光学镜头的方式改变光学间隔,从而实现调焦.这种方法的优点是调焦精度高,且光学系统能保持良好的稳定性.

镜组调焦通过移动光学系统中的透镜,改变光学系统参数,从而实现调焦.在该类光学系统中次镜部分最为敏感,次镜沿光轴方向微小的位移对系统的焦面位置变化具有很大的影响,所以选择灵敏度高的次镜作为调焦部分.

卡塞格林光学系统是使用最广的两镜系统,在该光学系统中主镜和次镜都是二次曲面,其表达式为

$$y^2 = 2Rx - (1 - e^2)x^2 \quad (1)$$

式中, $e^2$  为面型参数,用于消像差, $R$  为镜面的曲率半径.

该系统中,主镜为抛物面,所以  $e_1^2 = 1$ ,通过消像差公式可得

$$e_2^2 = \frac{(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^2} \quad (2)$$

式中, $\beta$  为次镜的放大倍数, $e_2^2$  为次镜的面型参数.

系统焦距与主镜焦距的关系为

$$f = f_1' \beta \quad (3)$$

式中, $f$  为光学系统总焦距, $f_1'$  为主镜焦距.

主镜和次镜之间的距离为

$$d = f_1' (1 - \alpha) \quad (4)$$

式中, $d$  为两镜之间的距离, $\alpha$  为遮光比, $\alpha \approx R_2/R_1$  约为次镜半径与主镜半径的比值.

由式(3)和(4)可以推导出两镜之间的距离与系统焦距的关系为

$$f = \frac{d}{(1 - \alpha)} \beta \quad (5)$$

## 1.2 调焦机构参数确定

相机的光学系统通常都允许有一定的离焦量,在给定离焦范围内不会引起成像质量的下降,允许离焦量的最大值为相机的半焦深,其计算公式为

$$|\pm\delta| = 2F^2\lambda \quad (6)$$

式中, $\pm\delta$ 为光学系统半焦深, $F$ 为光学系统 $F$ 数, $\lambda$ 为相机工作中心波长。

由式(1)可知,离焦量主要由光学系统的 $F$ 数决定,本文调焦机构所搭载相机光学系统的工作波段为400~700 nm, $F$ 数为8,计算可得其半焦深为0.06 mm,根据传统设计经验,相机调焦机构精度应优于 $\delta/4$ ,即 $F^2\lambda/2$ ,因此焦面移动精度应优于0.015 mm。根据相机光学设计指标,通过式(5)可得出焦面移动距离是次镜移动距离的13倍,因此确定次镜移动精度应优于0.001 mm。综合考虑本相机所处环境的恶劣、整机的装调及非线性误差等因素的影响,为增加安全裕度<sup>[11]</sup>,最终确定调焦精度为0.8  $\mu\text{m}$ 。

空间相机的离焦通常是由运载发射中的振动及所处环境变化引起的,根据相机光学设计要求分析表明,焦面沿光轴移动距离至少达到 $\pm 0.08$  mm才可补偿离焦量,综合考虑结构设计和其他因素的影响,在结构设计时,在结构条件允许的范围内,尽可能提高调焦范围,使调焦量具有一定裕度,确保成像质量,因此最终确定焦面行程不小于 $\pm 0.1$  mm,转化为次镜行程为不小于 $\pm 0.007$  mm。

## 2 调焦机构结构设计及分析

### 2.1 调焦机构结构设计

空间相机工作环境的特殊性,要求其对空间微重力、空间温度的大幅变化以及运输和运载过程中的振动干扰具备良好的适应性。调焦机构应避免采用复杂的机械结构,尽可能减轻重量,节省空间,并具有足够的精度和稳定性等<sup>[12]</sup>。

本文采用镜组调焦的方式来设计调焦机构,并最终确定通过移动次镜来改变光学间隔。图1为设计的一种基于热控原理的新型调焦机构。

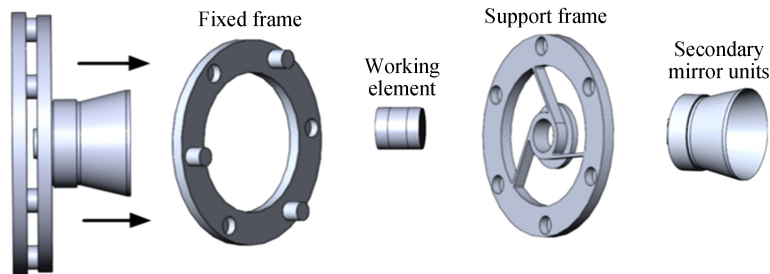


图1 调焦机构结构图  
Fig.1 Structure of focal system

基架作为整个机构的固定件固定于镜筒上,而次镜支架则通过调焦执行件及基架上的定位块固定于基架上,通过控制调焦执行件的温度,使其产生膨胀收缩,从而驱动次镜支架沿光轴移动,调焦执行件则与基架和次镜支架通过内六角螺钉进行紧固联接。对调焦执行件进行温控时需要使用加热片和热敏电阻,加热片贴在调焦执行件中间部分,避免贴在调焦执行件两端配合处,以防产生系统偏离光轴的误差,确保次镜部分在工作时可以均匀平稳地沿光轴方向移动。次镜组件部分包括次镜、遮光罩、隔热垫等,全部固定于次镜支架上。为了正常工作时次镜支架只与基架通过调焦执行件连接,不与镜筒接触以避免其他阻力,所以在满足光学系统和结构强度要求时,次镜支架的半径要小于基架。

### 2.2 调焦机构工作原理

通电后,调焦执行件会随着加热片的温度变化而膨胀收缩,通过控制加热片的温度来控制调焦执行件的膨胀量,从而驱动次镜组件的移动。调焦执行件长度随温度变化近似满足线性关系,即

$$L_2 = L_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)] \quad (7)$$

式中, $L_2$ 、 $L_1$ 分别为 $T_2$ 、 $T_1$ 温度下调焦执行件对应的长度,而 $\alpha$ 为调焦执行件材料的线膨胀系数,其物理意

义为温度变化 1 个单位时物体单位长度的变化量。一般情况下空间相机的正常工作温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ，因此根据式(7)计算可得调焦机构在基于正常工作温度  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  的范围内工作才能满足所设计的次镜行程要求，所以将工作温度范围设为  $5\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。

图 2 所示为调焦机构正常工作时各部件轴向间隔变化示意图，图中 + 号和 - 号反映各零件在温度升高时如何影响次镜的移动，单个零件的变化方向取决于其与相邻件的接触方式。基架被固定于镜筒上，所以其轴向长度改变量可近似不计，视其为无变量固定端，从与之接触的隔热垫算起。

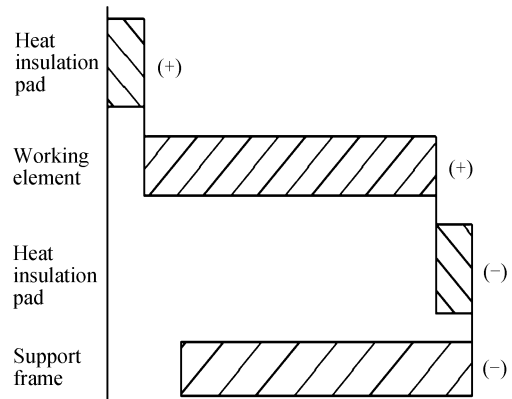


图 2 轴向间隔变化

Fig.2 Change of axial space

### 3 材料选取及热控措施

#### 3.1 材料选取

在满足系统的调焦要求时，零件材料的选取还要符合结构设计的强度和刚度要求，调焦机构所涉及到的材料见表 1。调焦执行件选用 LY12，因为其热膨胀系数高、密度低且机械性能良好。而作为固定件与承载件，基架与次镜支架需具有足够高的强度，所以选择力学性能良好的碳纤维作为其材料，碳纤维耐高温且热膨胀系数低，可以降低调焦执行件温度变化对基架和次镜支架的影响<sup>[13]</sup>。

表 1 材料属性

Table 1 Properties of material

Material	Density/ $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$	Elastic modulus/Gpa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion/ $^{\circ}\text{C}$	Application
LY12	2.7	73	0.33	$2.38 \cdot 10^{-5}$	Working element, lens hood
Zerdour	2.5	90	0.25	$0.3 \cdot 10^{-6}$	Secondary mirror
Carbon fibre	1.8	200	0.22	$0.7 \cdot 10^{-6}$	Fixed frame
Polyimide	1.4	5	0.34	$2 \cdot 10^{-5}$	Support frame, insulation pad, mirror seat
Invar	8.1	206	0.3	$1.2 \cdot 10^{-6}$	

#### 3.2 调焦机构热控措施

光学系统的设计和成像质量的评价都是在地面常温常压的环境中进行的，相机在空间中工作时，周围环境的改变会对其产生较大影响，而环境温度的变化是影响相机成像质量的主要因素之一<sup>[14]</sup>。因此要把温度对光学系统的作用降到最低，控制相机内外及内部的热交换过程，使其温度水平和温差处于温度指标的范围内，保证相机的成像质量。

对于调焦机构的热控分别采用了被动热控和主动热控的方法<sup>[15]</sup>。被动热控措施为在铝块连接两侧安装隔热垫，减少调焦执行件和次镜支架之间的传导换热；涂黑遮光罩外表面，使其热发射率最大，增加外表面和外界环境的辐射热交换，而内表面镀金使热发射率最小，减小内表面向外部的辐射热交换，保证相机内的正常工作温度。主动热控措施为在次镜座的周向及背面贴加热片，提高次镜组件的温度水平，减小径向温差，保证次镜在恒定的设计温度下正常工作。

### 4 调焦机构性能分析

有限元分析通过合理的建模及工况仿真模拟机构工作环境，解决在地面上难以实现相机空间工作环境的问题，可以对机构工作状态进行模拟分析。通过有限元仿真分析不仅能验证调焦机构是否满足结构设计的刚度和强度要求，而且可以计算在热耦合作用下引起的变形是否满足光学系统要求。

#### 4.1 调焦机构模态分析

模态分析可以为结构的振动特性分析、振动故障预报以及结构动力特性的优化设计提供依据。表 2 为对

调焦机构前 10 阶模态的提取.图 3 为前 6 阶模态振型提取图,根据工程经验,高阶模态不易被激发出来,通常低阶模态起主导作用,通过对前几阶模态的研究,发现次镜组件部分的振动幅度较大,可能会在实际工作中发生振动故障,所以后续的优化设计中应对其进行稳定加固.

表 2 前 10 阶固有频率

Table 2 Inherent frequency of first ten orders

Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frequency/Hz	332	529	533	1 286	1 287	1 350	2 486	2 567	2 574	2 588

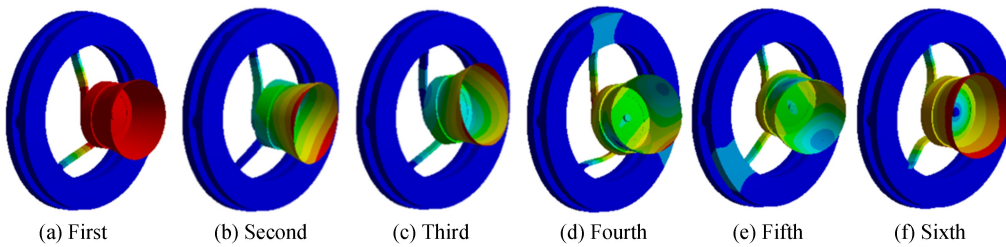


图 3 前 6 阶振型图

Fig.3 First six maps of model shape

#### 4.2 基于有限元的热-力耦合建模分析

对调焦机构建立基于有限元的热力耦合分析,输入材料参数,进行网格划分.将工作条件为 5~35℃ 的温度范围作用于调焦执行件,将 20℃ 的恒定温度作用到遮光罩及次镜座上.在对结构进行分析时进行了一定的简化,略去对温度分布影响较小的部件,如图 4 所示在划分网格时,细化了光学器件的网格,光学器件导热系数低,温度梯度大,因此网格划分精细的程度直接影响计算结果的精度.

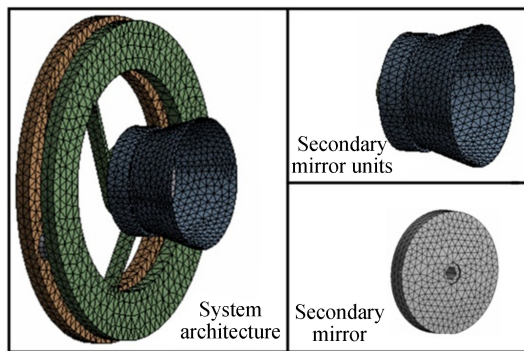


图 4 结构有限元模型

Fig.4 Finite element model of the structure

NODAL SOLUTION

STEP=1  
SUB=1  
TIME=1  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX=15.6537  
SMX=15.6537

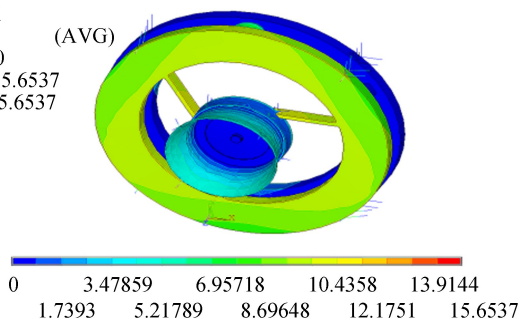


图 5 温度作用下的结构变形图

Fig.5 Structure deformation map caused by temperature effect

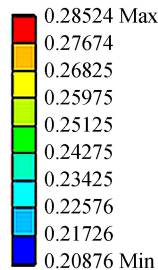


图 6 温度作用下的次镜面变形图

Fig.6 Secondary mirror deformation map caused by temperature effect

工作时施加温度载荷产生的影响主要表现在两方面:一是温度变化引起的各部件的膨胀;二是温度梯度产生的热应力引起的变形.图 5 为系统在正常工作时各部分的变形图,最小变形为  $0 \mu\text{m}$ ,为基架部分,最大变形量为  $16.297 \mu\text{m}$ ,为调焦执行件部分,变形量级为  $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ mm}$ .由于对机构采取了热控措施,所以在温度变化至更高时,不会使次镜面形变化增大,在后处理中,提取机构变形图数据,如图 6,可得次镜镜面形变范围约为  $0.21 \sim 0.29 \mu\text{m}$ ,边缘变形量大于中心变形量,出现“翘边”现象.

## 5 镜面形变对成像质量的影响

理想的光学镜面是平滑连续的,而从有限元软件中得到的数据是离散点的变形数据,所以在获得这些变形数据后,为了分析其对成像质量的影响,需利用离散点数据进行镜面拟合.镜面拟合有多种方法,最理想的为 Zernike 多项式拟合法<sup>[16]</sup>,相比其他方法,各项物理意义明了,是光学分析与结构分析的接口工具,且函数系的正交各多项式之间的系数相互独立,有效消除了偶然因素的干扰<sup>[17]</sup>.

通过后处理提取出有限元热力耦合作用后的次镜面形变形数据,利用 Matlab 编程对各节点坐标及轴向位移进行 Zernike 多项式拟合得出 37 项 Zernike 系数,且得出了镜面 PV 值为  $7.648 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,RMS 值为  $1.188 \times 10^{-5} \text{ mm}$ ,表 3 列出了前 10 项 Zernike 系数.

表 3 前 10 项 Zernike 系数  
Table 3 First ten Zernike coefficients

Coefficient	Value of surface
1	$-3.73 \times 10^{-8}$
2	$-2.57 \times 10^{-8}$
3	$6.95 \times 10^{-8}$
4	$-3.04 \times 10^{-10}$
5	$1.64 \times 10^{-10}$
6	$4.39 \times 10^{-10}$
7	$-2.59 \times 10^{-10}$
8	$3.73 \times 10^{-10}$
9	$-1.49 \times 10^{-10}$
10	$2.46 \times 10^{-10}$

将拟合后的 Zernike 系数代入原相机光学系统中,其中图 7(a)、(b)分别为次镜变形前后系统 MTF 曲线.表 4 详细列出了系统引入次镜变形前后 3 个视场子午和弧矢方向在  $91 \text{ lp/mm}$  频率处的 MTF 值及引入次镜变形后 MTF 值的改变量.

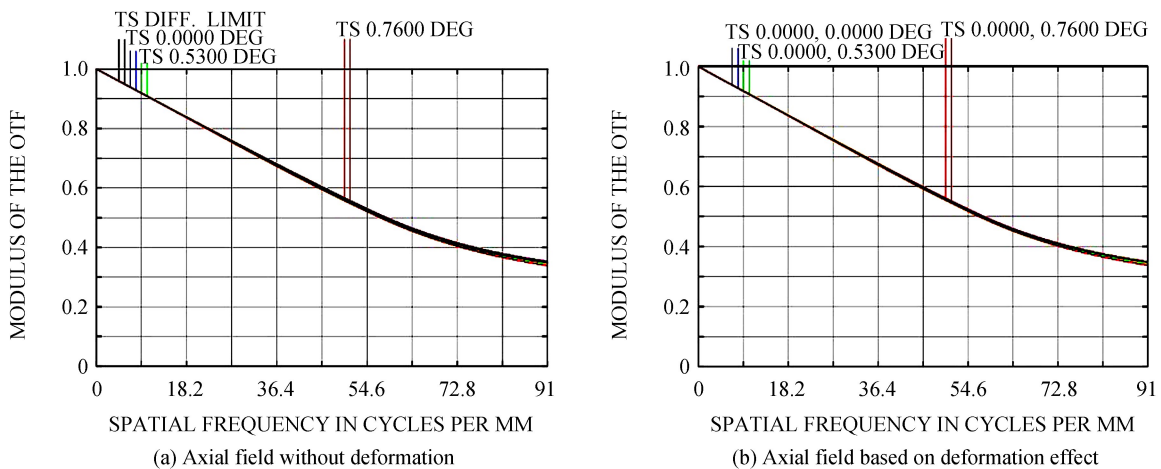


图 7 系统 MTF 曲线

Fig.7 MTF curves of optical system

表 4 三个视场奈奎斯特频率处 MTF 值及变化  
Table 4 Variation of the system MTF of three fields at Nyquist frequency

MTF at 91 lp/mm	Axial field of view		0.7 field of view		Full field of view	
	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal	Meridian	Sagittal
Original	0.365 030	0.365 030	0.368 559	0.366 512	0.358 744	0.370 272
After deformation	0.348 697	0.348 697	0.346 802	0.345 612	0.337 797	0.349 001
Change value	0.016 333	0.016 333	0.021 757	0.020 90	0.020 947	0.021 271

通过对图表数据的对比可以得出,光学系统在引入变形之后三个视场的 MTF 值分别有升高或降低,其中一些视场的像差得以补偿,同时也造成其他视场像差的提高,但总体变化幅度很小,可以忽略其对系统成像质量的影响<sup>[18]</sup>.故在调焦机构正常工作时,次镜面型变化不会引起光学系统成像质量的变化。

## 6 结论

调焦机构是空间相机的重要组成部分,本文结合实际光学系统设计了一种基于热控驱动原理的调焦机构,具有质量轻、结构简单等优点.通过有限元建模对其进行热力耦合分析,验证了调焦机构符合设计要求,结合分析结果利用 Zernike 多项式对镜面变形进行拟合,分析了在调焦机构正常工作条件下,次镜变形对光学系统成像质量的影响.结果表明,调焦机构符合设计要求,且由温度变化引起的次镜变形对系统成像质量的影响可以忽略,满足使用要求.

### 参考文献

- [1] GLEYZES M A, PERRET L, KUBIK P. Pleiades system architecture and main performances [J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B1: 537-542.
- [2] FAN Hong-jie, DONG Ji-hong, LI Wei, et al. Design and analysis of focusing mechanism for space camera[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2016, **39**(3):1-4.  
范洪杰,董吉洪,李威,等.一种空间相机调焦机构的设计与分析[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2016, **39**(3):1-4.
- [3] JIA Xue-zhi, ZHANG Lei, AN Yuan, et al. Design and experiment research on precision focusing mechanism of space remote sensor[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, **52**(13):25-30.  
贾学志,张雷,安源,等.空间光学传感器精密调焦机构设计与试验[J]. *机械工程学报*, 2016, **52**(13):25-30.
- [4] SU Dong-feng, JIA Ji-qiang, LIU Bo, et al. The trajectory of roller in offset cam focusing mechanism for aerial camera [J]. *Journal of Electronic Measurement And Instrumentation*, 2015, **29**(10):1472-1477.  
苏东风,贾继强,刘波,等.航空相机偏心凸轮调焦机构中的滚子运动轨迹[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, **29**(10):1472-1477.
- [5] XUE Le-tang, CHEN Tao, XU Tao, et al. A high precision and reliability focusing mechanism design[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2012, **35**(2):9-11.  
薛乐堂,陈涛,徐涛,等.一种高精度高可靠性调焦机构设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, **35**(2):9-11.
- [6] LÜ Shi-liang, LIU Jin-guo, JIA Ping, et al. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(8):2154-2160.  
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.
- [7] GU Song, WANG Shao-ju, JIN Guang. Design and test for fine image motion compensation mechanism in space camera [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2011, **34**(2):16-19.  
谷松,王绍举,金光.高精度空间相机像移补偿机构设计与试验[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, **34**(2):16-19.
- [8] ZHANG Hong-wei, XU Yu-lei, LI Quan-chao, et al. Design of focusing mechanism for lightweight dual-band aerial camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(8):252-258.  
张洪伟,徐钰蕾,李全超,等.轻型双波段航空相机调焦机构的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(8):252-258.
- [9] SELIMOGLU O, EKINCI M, KARCI O. Thermal refocusing method for spaceborne high-resolution optical imagers.[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(15):4109-4112.
- [10] YANG Yong-bin. Study on focusing technique for space optical camera[J]. *Spacecraft Engineering* 2011, **20**(2):20-24.  
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.
- [11] YANG Hui-sheng, ZHANG Yin-he, CHAI Fang-mao, et al. Design of focusing mechanism for off-axis TMA space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(4):948-954  
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.
- [12] AN Yuan, QI Ying-chun. Design of straight - line focusing mechanism for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **3**(3):609-614

- 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, **3**(3):609-614.
- [13] LEE M, KIM J, CHANG J S, *et al.* Development of in-orbit refocusing mechanism for SpaceEye-1 electro-optical payload[C] SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics and Photonics, 2016, **9972**:101-108.
- [14] FAN Yue, LIANG Wei, MA Wen-li. Thermal design of the optical system in an aerial camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(1):51-59.  
樊越, 梁伟, 马文礼. 航空相机光学系统热控设计[J]. 光电工程, 2013, **40**(01):51-59.
- [15] JIANG Li-feng, FU Wei-chun, CHEN Jian-xin. Precise thermal control design and test for the high-resolution three-linear array mapping cameras[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, **35**(4):467-473.  
江利锋, 傅伟纯, 陈建新. 高分辨率三线阵相机精密热控设计及试验[J]. 宇航学报, 2014, **35**(4):467-473.
- [16] FENG Jie, BAI Yu, XING Ting-wen. Fitting accuracy of wavefront using zernike polynomials [J]. *Electro-Optic Technology Application* 2011, **26**(2):31-34.  
冯婕, 白瑜, 邢廷文. Zernike 多项式波面拟合精度研究[J]. 光电技术应用, 2011, **26**(2):31-34.
- [17] YANG Jia-wen, HUANG Qiao-lin, HAN You-ming, Application and simulation in fitting optical surface with zernike polynomial[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, **31**(5):49-55.  
杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernike 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感, 2010, **31**(5):49-55.
- [18] FAN Da, MING Xing, LIU Xin-yue, *et al.* Thermal optical analysis and design of optical window in high-altitude and high-speed environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(8):202-208.  
范达, 明星, 刘昕悦, 等. 高空高速环境热光学分析及光学窗口设计[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(8):202-208.