

文章编号 1004-924X(2011)08-1824-08

# 轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验

贾学志\*, 王 栋, 张 雷, 安 源, 姚劲松, 金 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 根据轻型空间相机光学系统的特点以及相机的焦深, 优化设计了一种适用于该类相机的调焦机构。为了满足相机总体要求, 综合考虑重量、外型尺寸、刚度、误差等各方面的因素, 选择丝杠和连杆配合使用的双滑块机构, 将丝杠的转动通过连杆机构转换成调焦镜沿光轴方向的直线运动, 实现了通过调整像面移动来解决离焦的问题。对该调焦机构在调焦范围内的调焦精度进行了分析, 介绍了该调焦机构的误差来源和计算方法。最后, 对该调焦机构进行了振动试验和精度试验。优化设计后的调焦机构总重量为 2.5 kg, 外型尺寸为 186 mm×144 mm×60 mm。振动试验和精度试验的结果表明, 该调焦机构的基频为 505 Hz, 单向定位精度为 0.008 mm, 重复定位精度为 0.002 5 mm, 满足相机总体提出的刚度和精度要求。该调焦机构具有刚度高、结构紧凑、定位精度高等特点, 能够满足空间调焦的设计要求。

**关键词:** 空间相机; 非线性调焦机构; 精度试验

**中图分类号:** V475.2    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1824

## Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera

JIA Xue-zhi\*, WANG Dong, ZHANG Lei, AN Yuan, YAO Jin-song, JIN Guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: xuezhi0817@163.com

**Abstract:** On the basis of the characteristics of optical systems in a space camera, a focusing mechanism suitable for the camera was designed optimally. Firstly, to meet the overall design requirements of the camera for the lower mass and smaller size, a double-slider mechanism combined a screw and a link was chosen to transform the screw's running into the line movement of the focusing mirror along the optical axis direction and to overcome the defocusing of the system by adjusting the image movement. Then, the focusing accuracy of the focusing mechanism was analyzed and the error source and error calculation were discussed. Finally, the vibration and accuracy tests were performed on the mechanism. It shows that the optimized focusing mechanism has a weight of only 2.5 kg and a shape size of 186 mm×144 mm×60 mm. Furthermore, the vibration and accuracy tests indicate that the focusing mechanism can offer the first frequency of 505 Hz, positioning accuracy of 0.008 mm, and the repeatability positioning accuracy of 0.002 5 mm, respectively. These results satisfy the requirement of the optical system very well and show that the mechanism is characterized by the compact struc-

收稿日期: 2010-06-23; 修订日期: 2010-07-23.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z113)

ture, high stiffness and good accuracy.

**Key words:** Space Camera; nonlinear focusing mechanism; accuracy test;

## 1 引言

空间相机是获取地面信息的重要手段之一,其工作任务是获取和提供清晰完整的地面图像,而要想获得高清晰度的图像,在相机对准目标区域进行拍摄时,目标区域必须准确地成像在 CCD 的感光面上。由于轻型空间相机光学系统焦距较长,卫星发射过程中的振动、冲击以及复杂多变的在轨温度、压力等环境引起的空气折射率的变化,光学系统中反射镜的曲率半径、厚度,透镜材料内的应力变化,金属材料的伸缩等,都会导致相机的 CCD 靶面偏离焦平面从而降低成像分辨率,直接影响成像的质量。为了提高相机光学系统的适应性,得到高质量的图像,课题组针对轻型相机的光学系统设计了一套补偿相机 CCD 靶面偏移的调焦机构<sup>[1-3]</sup>。本文以保证相机的成像质量为出发点,介绍了非线性调焦机构的组成及工作原理,并对该调焦机构进行了精度分析,详细阐述了误差的来源,最后通过的精度试验验证了调焦机构的精度。

## 2 调焦机构的原理

### 2.1 调焦机构的设计原则

鉴于空间相机特殊的使用环境,其调焦机构必须对重力、温度等变化具备良好的适应性,一般应具有较高精度,足够的调焦范围,足够的稳定性和较高的检测精度等。

### 2.2 调焦量的确定

空间相机都有一定的允许离焦量,当离焦量小于允许值时,不会造成图像质量的下降。允许离焦量的最大值等于相机的半倍焦深,半倍焦深计算公式如下:

$$|\pm\sigma| = 2F^2\lambda^{[3]}, \quad (1)$$

式中: $\pm\sigma$ 为半倍焦深, $F$ 为光学系统的 $F$ 数, $\lambda$ 为相机工作的中心波长。

由上式可知离焦量由光学系统的 $F$ 数决定,

本文中调焦机构设计所针对的轻型空间相机光学系统的 $F$ 数为13.3,所以其允许的离焦量为0.212 mm。综合考虑影响离焦量的温度等其它因素,相机调焦机构的精度应优于 $\sigma/4$ 即 $F^2\lambda/2$ ,所以像面移动的精度应优于0.05 mm。由于采用调焦镜调焦,所以当调焦镜移动距离为 $\Delta l$ 时,像面移动距离为 $2\Delta l$ 。综合考虑以上因素及零位误差、热控误差、非线性误差等因素的影响,调焦机构的设计精度应优于0.01 mm<sup>[3-5]</sup>。

轻型空间相机的离焦主要是由环境条件变化引起的,分析计算表明,需沿光轴方向调整 CCD 靶面至少 $\pm 2$  mm 才可以实现补偿,因此在结构设计时,应在结构允许的空间范围内尽量增加调焦范围,使调焦量具有一定裕度。调焦量的大小由连杆曲线决定,在结构允许的空间内并满足要求的强度、刚度条件下,设计调焦量为 $\pm 5$  mm。

### 2.3 调焦方案的确定

相机的调焦方式因光学系统的不同而不同,应用于航天相机的调焦机构主要有两种:一种是丝杠螺母的直线调焦;另一种是凸轮机构的非线性调焦。这两种调焦方式各有优缺点,丝杠螺母调焦方式结构简单,成本低,但在相机在轨工作环境中(真空、低温等)容易产生卡滞现象,抗振动冲击能力差;而凸轮调焦方式精度高,结构也比较简单,其运动件(齿轮、凸轮、蜗轮、蜗杆)经过防冷焊处理后不会产生冷焊、卡滞现象,但对凸轮曲线的加工要求较高,导致生产成本较高。由于相机总体结构对调焦机构的重量和外形尺寸进行了严格约束,要求其质量不超过3 kg,最大外型尺寸不超过200 mm×200 mm×80 mm。为了降低质量、缩短传动链长度,调焦机构最终选用了丝杠和连杆配合使用的方案,这种机构组合机构相对于传统的丝杠螺母机构和凸轮机构不仅重量较低,且节约空间<sup>[6]</sup>。

相机的调焦机构的结构简图如图1所示,调焦机构采用丝杠传动,本文根据自锁要求,兼顾传动效率及精度,对丝杠、连杆长度等参数进行了优化设计。调焦镜借助支承结构固定在调焦镜座

上,滑动导轨与基座固连,调焦镜座可沿导轨在光轴方向自由移动,而其它自由度都被约束。驱动部件(步进电机)安装在固定座上,通过传动机构将圆周运动转化为沿调焦镜法线方向的移动,调焦镜的位置(即调焦量)由编码器反馈。最终调焦机构总重量为 2.5 kg(含电机和编码器),最大外型尺寸为 186 mm×144 mm×60 mm,满足了相机总体提出的质量和外形要求。

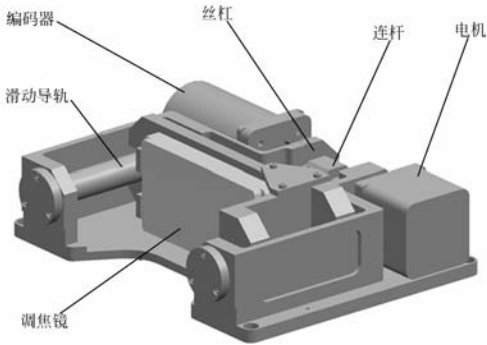


图 1 调焦机构结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of focusing mechanism structure

## 2.4 调焦机构的原理

调焦机构的运动简图如图 2 所示,以丝杠方向为坐标系的  $x$  轴,光轴方向为坐标系的  $y$  轴,螺母、调焦镜座和连杆构成了典型的双滑块机构。

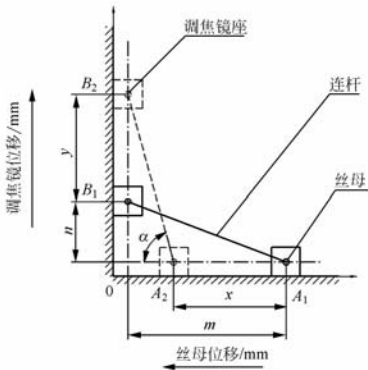


图 2 调焦机构原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram for focusing mechanism principle

设初始位置调焦结构的连杆位于  $A_1(0, m)$ ,  $B_1(n, 0)$  位置,经过调焦后曲柄位于  $A_2, B_2$  位置,由勾股定理可得:

$$m^2 + n^2 = (m - x)^2 + (n + y)^2 = l^2, \quad (2)$$

式中: $x$  为丝母位移, $y$  为调焦镜位移, $l$  为连杆长度, $m$  为丝母初始位置坐标, $n$  为调焦镜初始位置坐标。

而丝母位移  $x$  与编码器码值  $M$  的关系为:

$$M = \frac{2^{16}}{t} x. \quad (3)$$

式中: $t$  为丝杠螺距,为 1.5 mm。

由(1)式和(2)式可推出编码器码值  $M$  与调焦镜位移  $y$  的函数关系为:

$$M = \frac{2^{16}}{t} (m - \sqrt{l^2 - (y + n)^2}). \quad (4)$$

## 3 调焦精度分析

调焦机构主要由调焦镜组件、调焦电机组件、编码器组件、滑动导轨组件、螺旋传动机构及限位器等组成,其中,影响调焦机构精度的主要有螺旋传动机构及滑动导轨组件的传动误差与空回。

螺旋传动的误差是指螺母相对螺杆的实际位移与其理论值之间的最大差值。影响螺旋传动的主要因素有单个螺距误差  $\Delta l_1$ ,螺距累积误差  $\Delta l_2$ 、中径圆柱度和圆度误差  $\Delta l_3$ 、螺杆的轴向窜动和径向跳动引起的误差  $\Delta l_4$  以及由于外界环境变化引起的误差  $\Delta l_5$ 。其中由于螺杆在制造过程中是一次装卡加工出来的,故牙形半角误差在螺纹全长上变化不大,因而对传动精度的影响很小,可以不予考虑。传动误差组成情况如表 1 所示。

表 1 主要传动误差分析

Tab. 1 Analysis of main errors

主要误差项	误差大小/mm
单个螺距误差( $\Delta l_1$ )	$\pm 0.002$
螺距累积误差( $\Delta l_2$ )	$\pm 0.002$
中径圆柱度和圆度误差( $\Delta l_3$ )	$\pm 0.0002$
螺杆的轴向窜动和径向跳动引起的误差( $\Delta l_4$ )	$\pm 0.001$
由于外界环境变化造成的误差( $\Delta l_5$ )	$\pm 0.0015$
综合传动误差( $\Delta l$ )	0.0034

本调焦机构为丝杠连杆组成的非线性机构,调焦误差随滑块位置变化而变化,在极限位置  $B_2$  附近误差达到最大。由图 2 可知,在极限位置  $B_2$  时,连杆与  $x$  轴夹角  $\alpha$  达到最大值,为  $32.7^\circ$ 。此时的误差  $\Delta l_{mc}$  可由下式计算:

$$\Delta l_{mc} = l \sin 32.7^\circ - \sqrt{l^2 - (l \cos 32.7^\circ + \Delta l)^2}. \quad (5)$$

经计算得传动误差引起的极限调焦精度误差为:

$$\Delta l_{mc} = 5.3 \mu\text{m}. \quad (6)$$

调焦机构的空回主要是由螺纹传动产生的空回和连杆机构的连杆传动引起的空回两部分组成。螺纹传动产生的空回是由于螺纹结合处存在间隙造成的。为保证螺纹传动良好配合,本调焦机构加工过程中对螺母和丝杠进行配研,且由于调焦机构运动次数较少,即磨损较小,因此,螺旋传动空回对调焦机构的影响可以忽略。

连杆机构中铰链转轴存在间隙是产生空回另一原因。为减小空回,加工过程中对各元件进行了严格的质量控制,并在装配中进行试配调整。考虑极限加工能力,取定空回误差为:

$$\Delta l_6 = \pm 6 \mu\text{m}, \quad (7)$$

按照上述误差计算公式, $\Delta l_6$ 引起的调焦精度误差为:

$$\Delta l_{mk} = \Delta l_6 \sin 32.7^\circ = 3.24 \mu\text{m}. \quad (8)$$

由上述分析可知:调焦镜与编码器之间的总传动误差为 $\Delta l_{mc} = 5.3 \mu\text{m}$ ,调焦镜到编码器之间的空回误差为 $\Delta l_{mk} = 3.24 \mu\text{m}$ 。由于传动误差和空回误差相互独立,机构的综合误差取极限值<sup>[7]</sup>,即:

$$\Delta l_{m\max} = \sqrt{\Delta l_{mc}^2 + \Delta l_{mk}^2} = 6.2 \mu\text{m}. \quad (9)$$

由于设体总体要求调焦机构的精度为 $10 \mu\text{m}$ ,因此所设计的调焦机构精度满足总体设计要求。

## 4 调焦机构试验

### 4.1 调焦机构振动试验

调焦机构模态的要求是对调焦机构结构设计的基本要求。由于模态取决于结构的刚度,因此对调焦机构模态的要求有时也称为对该机构的刚度要求。调焦机构的模态分析是结构分析的重要内容之一,在调焦机构的研制过程中具有重要作用。通过模态分析,可以对该机构的结构设计进行有效验证,同时利用模态分析结果,可以合理分配刚度和质量,避免固有频率相近引起的动力耦合。

对设计出的调焦机构进行 $0.5g$ 扫频试验,如图3所示,试验得出的调焦机构频率响应曲线如图4所示。

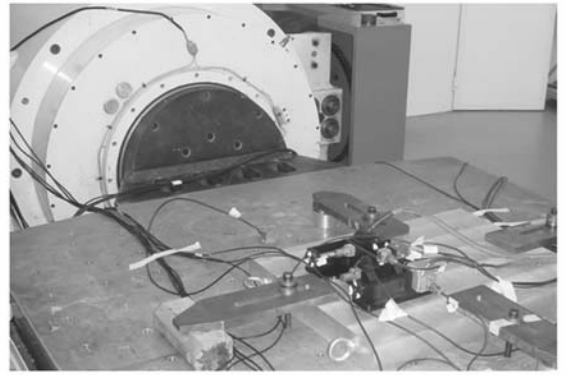


图3 调焦机构 $0.5g$ 扫频振动试验

Fig. 3  $0.5g$  vibration test of focusing mechanism

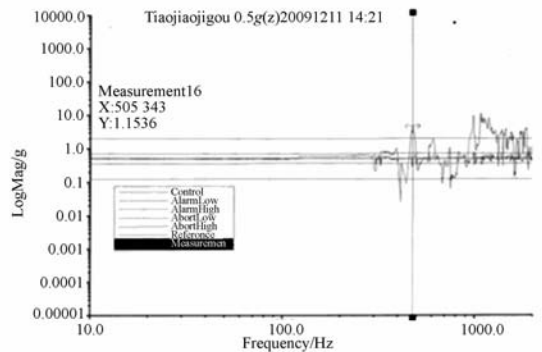


图4  $0.5g$ 扫频振动试验主承力基板响应曲线

Fig. 4 Response curve of the  $0.5g$  vibration test

由图4可知,调焦机构的一阶自然频率(基频)为 $505 \text{ Hz}$ 。 $0.5g$ 扫频振动试验结果表明,该调焦机构刚度分布合理,具有足够高的刚度,满足相机总体提出的刚度要求。

### 4.2 调焦机构精度试验

#### 4.2.1 调焦机构精度试验原理

调焦机构的精度主要包括晃动精度、定位精度和重复定位精度。定位精度,是表明所测量的调焦机构各运动部位在相机下位机的控制下运动所能达到的精度。根据实测的定位精度数值,可以判断出调焦镜在运动过程中能达到的最好的位置。重复定位精度,是指在调焦机构上反复运行同一程序代码所得到的位置精度的一致程度。

调焦机构的精度试验原理如图5所示,通过编码器输入调焦所需要的调焦量,通过数显千分表检测调焦镜的实际位移,并与输入的调焦量进行比较,计算调焦机构的控制精度。

具体检测方法如下:编写程序控制调焦镜沿光轴方向匀速移动到各目标位置,读取数显千分

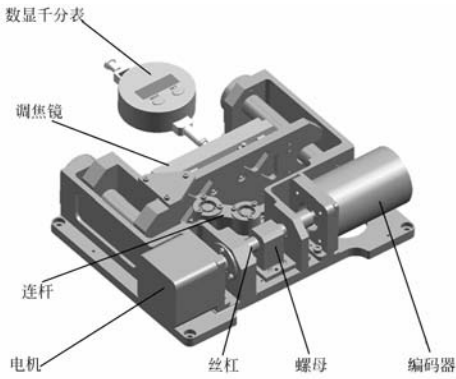


图 5 调焦机构精度试验原理示意图

Fig. 5 Principle of error test of focusing mechanism

表数值。在本次试验中,选择了 10 个目标位置,每个目标位置测量 5 次,如图 6 所示。

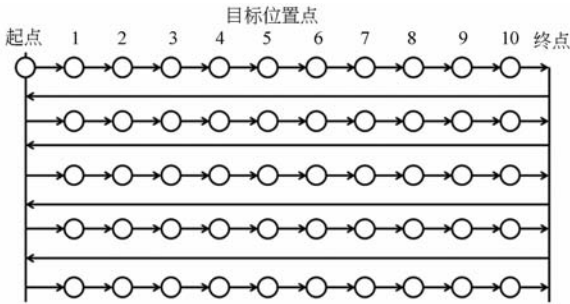


图 6 调焦机构精度检测方法示意图

Fig. 6 Error test method of focusing mechanism

为了便于程序的输入,建立了编码器码值和调焦镜位移的函数关系式。将理论曲线输入程序,通过数显千分表记录调焦镜的位移,通过对比输入调焦镜位移与数显千分表显示的调焦镜位移发现二者之间存在较大误差。分析其原因,除了存在系统误差外的一个主要原因就是理论公式的连杆曲线初始零点与测量所得曲线的初始零点之间存在偏差,由于机构为非线性机构,所以初始零点位置不同时在相同的步距驱动下得到的位移不相等。为了解决这个初始零点的偏差问题,采用通过逐次逼近的拟合方法来修正理论方程。控制系统对编码器的控制误差要求为±160 码值,即拟合曲线的误差在±160 内即可满足控制系统的要求。

经过若干次多项式拟合得到编码器码值与调焦镜位移的函数关系如下:

$$M = 0.317y^7 - 11.45y^6 + 171.9y^5 - 1385y^4 + 6380y^3 - 14850y^2 + 49030y + 166600, \quad (10)$$

从图 7 可知,编码器的码值误差在±150 码值,满足编码器码值误差±160 个码值的使用要求,因此,可将该拟合曲线作为调焦机构的控制曲线。

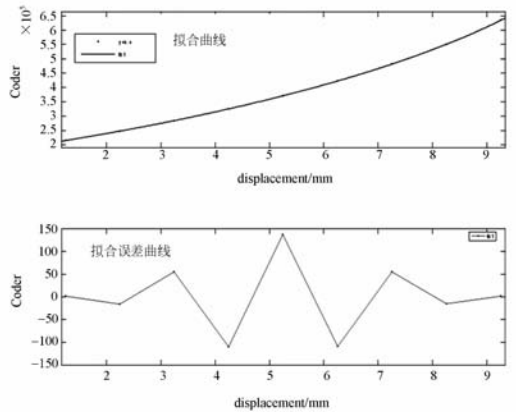


图 7 MATLAB 拟合出的实际控制曲线

Fig. 7 Actual control curves fitted by MATLAB

4.2.2 精度试验数据处理

为评定调焦机构精度而进行定位测量时,在沿光轴方向每一个目标点  $P_i$  位置运动时,将产生一定数量的不同实际定位点  $P_{ij}$ ,用实际定位点  $P_{ij}$  减去目标位置  $P_i$  即为该次运动的位置偏差量  $X_{ij}$ ,根据  $n$  次测量的偏差值就可确定该点的平均位置偏差值  $\bar{X}_i$  和不确定度的估算值  $S_i$ 。

将最终拟合到的函数关系式输入控制程序,记录数显千分表的读数,采集的数据如表 2:

表 2 调焦机构精度试验数据采集

Tab. 3 Data of error experiment of focusing mechanism

目标位置	实测偏差/ $\mu\text{m}$				
	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$
1	-4	-3	-3	-3	-3
2	3	2	3	3	2
3	3	2	2	3	2
4	3	2	3	3	3
5	0	1	1	0	1
6	-3	-3	-2	-3	-2
7	-2	-3	-2	-2	-2
8	2	3	2	2	3
9	-3	-2	-2	-2	-3
10	3	3	2	3	2

通过表 2 数据计算平均位置偏差值  $\bar{X}_i$  为:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{ij} - P_i), \quad (11)$$

标准偏差  $S_i$  为:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}. \quad (12)$$

用式(12)计算得到的标准偏差是具有不确定度的,其相对标准不确定度可表示为:

$$\frac{u(S_i)}{S_i} = \frac{1}{\sqrt{2(n-1)}}, \quad (13)$$

式中  $u(S_i)$  为不确定度  $S_i$  的标准不确定度。

测量次数越多,标准偏差  $S_i$  的不确定度  $u(S_i)$  越小,试验数据越可靠<sup>[7]</sup>。按式(12),(13)计算所得结果如表 3 所示。

表 3 调焦机构精度试验数据处理结果

Tab. 3 Results of error experiment of focusing mechanism

目标位置	标准偏差	标准偏差的不确定度
	$S_i/\mu\text{m}$	$u(S_i)/\mu\text{m}$
1	0.4	0.14
2	0.6	0.20
3	0.6	0.20
4	0.4	0.14
5	0.6	0.20
6	0.6	0.20
7	0.4	0.14
8	0.6	0.20
9	0.6	0.20
10	0.6	0.20

由表 3 可知,标准偏差  $S_i$  的不确定度  $u(S_i)$  均不超过 0.000 2 mm,试验标准差比较可靠。

标准将  $\pm 2$  倍(即 4 倍)单向定位标准不确定度(标准偏差)的估算值称为该点的单向重复定位精度  $R$ 。轴线单向定位精度  $A$  就是由单向定位系统偏差和单向定位标准不确定度估算值的 2 倍组合来确定的范围,即:

$$A = \max(\bar{X}_i + 2S_i) - \min(\bar{X}_i - 2S_i), \quad (13)$$

因此,曲线最高点和最低点的整个变化范围,即  $A$ ,就是 Is0 230-2(1997)所定义的定位精度,而重复定位精度是在沿轴线或绕轴线任一位置

$P_i$  点的重复定位精度的最大值<sup>[8-10]</sup>。将计算结果绘制成定位精度和重复定位精度曲线,如图 8 所示。

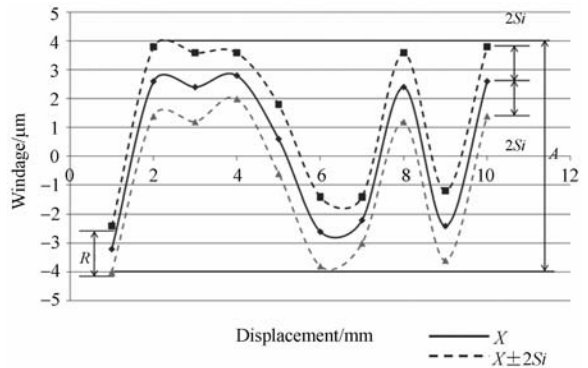


图 8 调焦机构单向定位精度和重复定位精度曲线  
Fig. 8 Positioning accuracy and repeatability positioning accuracy curves of focusing mechanism

由图 8 可知:调焦机构的单向重复定位精度  $R=0.002\ 5\ \text{mm}$ ,单向定位精度  $A=0.008\ \text{mm}$ ,满足系统的精度设计指标。

## 5 结 论

为满足相机总体提出的质量和外型尺寸的要求,选择丝杠和连杆机构配合使用的方案,将丝杠的转动通过连杆机构转化成调焦镜沿光轴方向的直线运动,实现了通过调整像面移动来解决离焦的问题。最终设计的调焦机构总质量为 2.5 kg,最大外形尺寸为 186 mm×144 mm×60 mm。通过对机构的 0.5 g 扫频试验和精度试验可知,该调焦机构的一阶自然频率为 505 Hz,单向定位精度为 0.008 mm,重复定位精度为 0.002 5 mm,满足系统的设计要求。试验结果表明,该机构具有刚度高、结构紧凑、运行平稳、质量轻、位移精度高等特点,能够很好地满足轻型空间相机的使用要求,为空间相机向轻型化和小型化方向发展奠定了研究基础。

## 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] 丁亚林, 田海英, 王家琪. 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)
- [3] 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)
- [4] 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): 51-53.  
ZHANG J C, DING Y L, ZHANG H W. Design for a kind of aerial frame camera s focusing structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 29(2): 51-53. (in Chinese)
- [5] 王智, 张立平, 李朝辉. 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.  
WANG Z, ZHANG L P, LI C H. Design of focusing mechanism of space tridimensional mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1051-1056. (in Chinese)
- [6] 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 C X, XIE T. Design of focusing mechanism of space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2757-2761. (in Chinese)
- [7] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.  
MAO Y T. *Error Theory and Precision Analysis* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [8] 刘慧玲, 曾韬, 刘建湘. 数控机床定位精度的测量和评定[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(6): 38-39.  
LIU H L, ZENG T, LIU J X. Measurement and Assessment of the error of the numerical control machine tool [J]. *Mechanical Research & Application*, 2005, 18(6): 38-39. (in Chinese)
- [9] GB/T17421. 2-2000, 机床检验通则第二部分: 数控轴线的定位精度和重复定位精度的确定
- [10] 冷涵涛. 数控机床定位精度和重复定位精度的检验[J]. 机床与液压, 2008, 36(8): 191-159.  
LENG X T. Testing of positioning accuracy and repeated positioning accuracy of CNC machine tool [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(8): 191-159. (in Chinese)

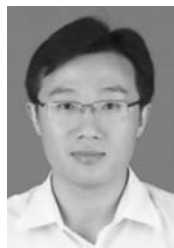
## 作者简介:



贾学志(1980—), 男, 河北唐山人, 博士, 2006年于东北大学获学士学位, 2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事空间遥感器结构设计与分析的研究。E-mail: xuezhi0817@163.com



王栋(1982—), 男, 山东聊城人, 副研究员, 2003年于吉林大学获学士学位, 2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位, 主要从事空间相机光机结构设计与分析及相机热控制技术的研究。E-mail: simest@163.com



张雷(1982—),男,山东菏泽人,博士,副研究员,2003年于东北大学获学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,研究方向为光学仪器设计与分析。E-mail: zhangleisong@tom.com



安源(1980—),男,黑龙江安达人,博士,副研究员,2002年于吉林大学获学士学位,2007年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事空间遥感器结构设计方面的研究。E-mail: any@ciomp.ac.cn



姚劲松(1962—),男,吉林洮南人,高级工程师,主要从事空间光学仪器机械与机构方面的研究。E-mail: yaoniuyjs@yahoo.com.cn

#### 导师简介



金光(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,1982年于长春光学精密机械学院获学士学位,1991年、2001年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士、博士学位,主要从事空间遥感器总体设计方面的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn

#### ●下期预告

## 大型管件模压式精确缩径矫圆

殷 璟,赵 军,孙红磊,展培培

(燕山大学 机械工程学院,河北 秦皇岛 066004)

提出以模压式缩径矫圆的方式代替机械扩径以减小管件椭圆度,提高其承压强度。模压式缩径矫圆是采用闭合后模腔为一整圆的上、下模具对椭圆管坯进行矫圆,为减小矫圆后管坯的回弹,必须使整个管坯内外壁均进入压缩塑性变形,即有足够的压缩率。本文采用小曲率曲梁平面压弯的分析方法对模压式缩径矫圆工艺进行了理论分析,推导出缩径矫圆弹复方程,该方程表示了管坯截面壁厚中心线上任意一点弹复后的曲率半径与管坯初始几何参数、材料性能、缩径率间的关系。工程中管线钢管的椭圆度一般要求为 $0.5\% \sim 1\%$ ,缩径矫圆后管坯椭圆度 $< 0.12\%$ ,完全满足技术要求。理论分析与实验结果的椭圆度相对偏差 $< 0.09\%$ ,几何尺寸相对偏差 $< 0.19\%$ 。理论分析和实验结果均表明模压式缩径矫圆在工程实际中具有重要的应用价值。