

# 一种空间相机调焦机构的设计研究

高飞<sup>1,2</sup>, 张葆<sup>1</sup>, 刘大禹<sup>3</sup>

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100039;  
3.长春奥普光电技术股份有限公司, 长春 130033)

**摘要:** 随着现代光学捕获技术的不断发展, 捕获目标的日趋复杂化, 对空间相机的要求也越来越高, 为了保证光学系统具有更强的适应性, 获得最佳图像, 设计了一种调焦机构。调焦机构由直线电机、直线导轨、光栅尺等组成, 针对航空光学系统对调焦机构的要求, 对该调焦机构的试验过程进行了设计, 针对控制精度、晃动和高低温进行了试验, 并分析了影响调焦机构精度的主要因素。试验证明该调焦机构可以满足使用要求。

**关键词:** 调焦; 直线电机; 直线导轨; 光栅尺

中图分类号: V216.8

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 (2008) 04 - 0074 - 03

## Design for a kind of space camera's focusing structure

GAO Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao<sup>1</sup>, LIU Dayu<sup>3</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;  
2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;  
3.Changchun UP Optotech Co., Ltd, Changchun 130033)

**Abstract:** With the rapid development of modern optic capture, complicating in target-capturing gradually, more and more higher requirement is needed for the space camera, a focusing mechanism is described in order to ensure more adaptability for optical system which to get prime image. The focusing mechanism is composed of liner motor, liner orbit and raster ruler; Designed some tests in allusion to fulfill the need of this mechanism, and carried through tests to verify the precision, shake and high and low temperature; then analyzed main factors which effected the precision of focusing mechanism. Experimentation has testified the focusing mechanism can meet with using requirement.

**Key words:** focus; liner motor; liner orbit; raster ruler

随着现代光学捕获技术的不断发展, 捕获目标的日趋复杂化, 对光学系统的要求也越来越高, 因此对各组件的精度也提出了更高的要求。为了保证光学系统具有更强的适应性, 需要有一组机构来调整像面的位置, 保证最佳的成像质量, 进而提高系统的识别能力。因此需要一套调焦机构来完成此项功能。

### 1 方案分析

目前在多种调焦机构的设计中, 其支承方式多

采用滑动导轨或直线轴承, 驱动方式多利用旋转电机通过齿轮带动自身带有曲线槽的凸轮进行旋转, 或由旋转电机驱动丝杆带动与镜架连接的丝母将旋转运动变为直线往复运动从而达到调焦的目的。两种直线位移量的采集需要通过安装在丝杠或凸轮<sup>[1]</sup>上的电位计或编码器通过角位移间接测量得出。因此必然难以克服以下的缺点及不足:

(1) 从支撑方式上看, 滑动导轨无论是摩擦系数还是定位精度都要低于滚动导轨, 且易磨损, 而采用直线轴承的支撑方式虽然低摩擦、高精度,

收稿日期: 2008-06-05

基金项目: 中国科学院院长奖获得者科研启动专项资金资助

作者简介: 高飞(1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事机械件的零、部件及总体检测的研究, E-mail: gaofeib108@126.com。

但由于直线轴承装配要求保证  $0 \sim 5\mu\text{m}$  的间隙，因此对调焦系统的精度必然有所影响。

(2) 由于凸轮曲线槽<sup>[2]</sup>的精度直接决定着调焦的精度，因此需要依赖高精度的机床进行加工，机械加工难度大、周期长，大大提高了设计成本与加工周期，而且曲线一旦确定无法调整。

(3) 在传动链中引入齿轮传动，不可避免的会产生空回现象，进而导致整个机构存在传动效率低、响应速度慢、位移精度差等问题。

## 2 调焦方案的设计

本文设计了一种行程 30mm，负载 10kg，可适用在环境温度为  $-40 \sim +55$  之间的航空光学调焦机构，系统原理如图 1 所示。

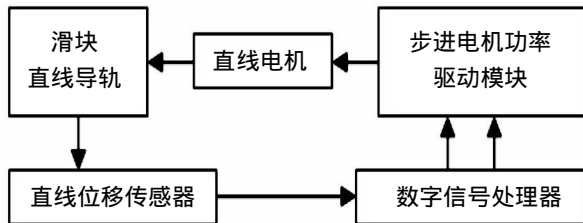


图 1 系统原理图

Fig.1 Chart of systematic theory

调焦机构主要由以下几部分组成：带有滑块的直线导轨、直线步进电机、直线位移传感器、数字信号处理器、步进电机功率驱动模块。将平面反射镜固连在滑块上，直线步进电机驱动滑块沿导轨作直线运动，直线位移传感器检测滑块的相对位移量并将此模拟信号传递给数字信号处理器，对其进行处理，转换为数字信号反馈给直线步进电机，确定滑块的相对位置，对其进行实时控制。

### 2.1 导轨的选取

根据设计需要，对比滚动直线导轨和滑动导轨。滚动直线导轨具有摩擦系数小、空载小、预压无间隙、维护保养简便的特点。而且滚动直线导轨的运动摩擦阻力较小，驱动功率小、定位精度及重复定位精度较高，因此本方案选用走行平行度为  $2\mu\text{m}$ ，摩擦系数为  $0.002 \sim 0.005$ ，重复定位精度为  $1\mu\text{m}$  的滚动直线导轨。如表 1 所示。

### 2.2 电机的选取

如表 2 所示。利用直线步进电机代替旋转电机的传统驱动方式，可将电机输出的运动直接施加在滑块上，且直线电机驱动还有动态响应快、定位精度高、无反向工作死区、直线移动速度快、起动推

表 1 几种形式导轨副的分析和比较

Tab.1 Analyse and contrast of a few deputy guide

性能	滚动式导轨	测动式导轨
摩擦力	摩擦系数在 0.01 以下，静态和动态摩擦差异小，速度引起的变化小	摩擦大，静态和动态摩擦差异大
定位精度	空载小，卡死滑行小；亚微米尺寸定位容易	空载大，低速时的卡死滑行大，亚微米尺寸定位困难
静态刚性	一般较高，因施加预压而无间隙，容易预测刚性	单项载荷刚性大，有间隙，刚性预测困难
速度	可以在高~低速很宽的速度范围内使用	不适宜超低速、高速
维护和可靠性	简单的维护可保证长寿命	导轨面劣化会严重降低精度

力大、行程长度不受限制、传动效率高等优点<sup>[3]</sup>，因此选用  $3\mu\text{m}/\text{步}$  的直线步进电机作为驱动。

表 2 传统驱动方式与直线电机驱动方式对比

Tab.2 Contrast of traditional-driving approach and liner motor-driving approach

性能	传统驱动方式	直线电机
驱动方式	间接驱动	直接把电能转换为直线运动
使用温度	$-40 \sim +50$	$-40 \sim +50$
功率	高	低
精度	有累积误差	无累积误差
结构	复杂	简单

### 2.3 传感器的选取

在传感器的选择方面使用的是光栅尺式位移传感器，它在测量系统中的占有率已超过 80%，而其长度测量系统的分辨率已覆盖到微米级、亚微米级和纳米级，可直接测量直线位移量，测量精度  $1\mu\text{m}$ ，测量速度  $60 \sim 480\text{m}/\text{min}$ ，而且采用光栅尺式测量系统进行直接测量，可有效避免中间传动装置和测量装置带来的误差，相比以前采用电位计进行测量的定位方式，精度有了很大的提高。而且它还具有精度高、稳定性高、重复性好、输出信号强、高分辨率等优点。如表 3 所示。

## 3 试验测试

空间相机调焦机构在满足高精度的要求同时，还必须适应大的工作温度范围。因此，对本调焦机构进行了精度及温度的测试。

### 3.1 控制精度试验

表3 传统测量方法与光栅尺式位移传感器的差异  
Tab.3 Difference of traditional measurement methods and displacement sensor of raster ruler

性能	传统测量方式	光栅尺式位移传感器
测量方式	有中间环节,属于间接测量	无中间环节,可直接测量
测量精度	受中间传动环节影响,测量精度 0.01mm	直接测量直线位移,测量精度 1μm
维修	复杂	整体更换

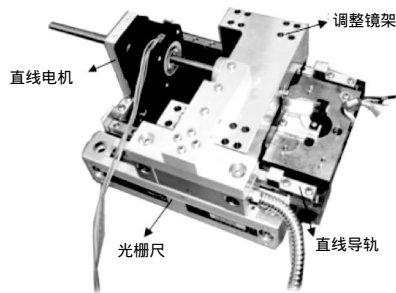


图2 调焦机构组成

Fig.2 Composition of focusing structure

现场测试环境如下:室温 20.5℃;湿度 55%,将镜座置于三坐标测量机的平台上,利用直线电机控制镜架做往返运动,用三坐标测量机测量各位置相对初始位置的位移量与电机的输入量进行比较。

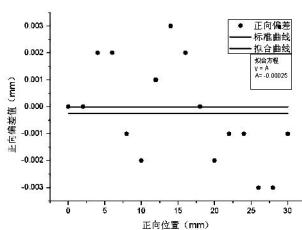


图3 正向控制精度图

Fig.3 Chart of forward controllable precision

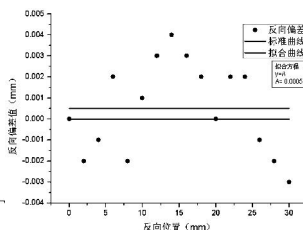


图4 反向控制精度图

Fig.4 Chart of backward controllable precision

由图3、图4可知,利用三坐标测量机与电机的输入量进行比较得出控制精度的最大绝对误差为0.003mm,满足设计要求。

### 3.2 晃动实验

将平面镜固定在镜架上,利用0.2自准值平行光管作为检测工具,通过调整平行光管找到平面镜所成的像,驱动镜座作直线运动,通过自准直平行光管读取光栅尺显示位置的晃动值。

由图6、图7可知,使用0.2自准值平行光管作为检测量具,通过平行光管读取平面镜在固定位置所成像的数据得到机构的晃动量在水平方向最大为2.5,垂直方向最大晃动量为5.8,无论水平

还是垂直方向均满足机械轴晃动小于15的要求。

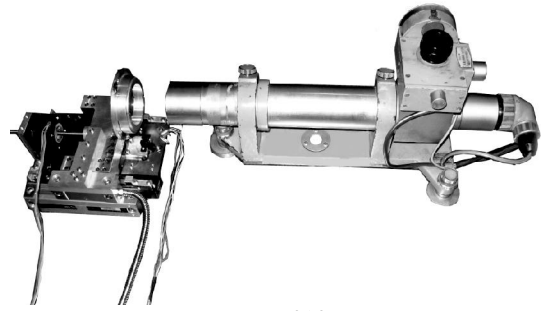


图5 晃动试验

Fig.5 Test of shake

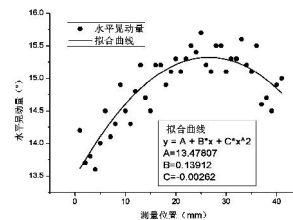


图6 水平晃动

Fig.6 Horizontal shake

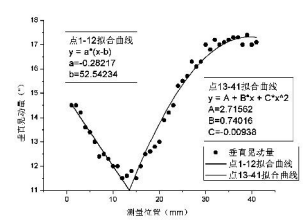


图7 垂直晃动

Fig.7 Vertical shake

### 3.3 高低温实验

利用高低温试验箱对调焦机构进行试验,其试验状态如表4所示。

表4 高低温试验

Tab.4 Test of high temperature or low temperature

配重	10.2kg
最低温度	-40
瞬时环境最低温度	-41.8
低温保温时间	1h
最高温度	55
瞬时环境最高温度	56.6
保温时间	1h

由表4可知,电机在上述工作环境及时间下均能正常工作,可见此机构可满足高低温试验的要求。

从试验结果来看,影响调焦机构精度的主要因素有:

(1) 滚动直线导轨的自身误差。如:两端V型槽中心线的不直线性、滑轨与滚珠接触部位的尺寸偏差、滚珠直径的偏差、安装直线导轨时的安装误差<sup>[4]</sup>。

(2) 直线步进电机自身的因素,由于直线电机在运动过程中会产生发热等问题,会对自身精度产生一定影响。

(3) 光栅尺式位移传感器的制造误差,受温度影响时的尺身变形及安装误差。

(下转第60页)

式中  $r$  地球半径;  $h_i$  目标飞行高度;  $l$  目标飞行距离; 发射点的距离;  $x_i, y_i, z_i$  目标位置坐标。

### 2.3.2 经纬仪观测量

应用式(13), 经纬仪对目标的观测量:  $R_i, A_i, E_i$ 。

$$\begin{aligned} R_i^2 &= (x_i - x_{oi})^2 + (y_i - y_{oi})^2 + (z_i - z_{oi})^2 \\ R_{xzi}^2 &= (x_i - x_{oi})^2 + (z_i - z_{oi})^2 \\ A_i &= \begin{cases} \arctan \frac{z_i - z_{oi}}{x_i - x_{oi}} & (x_i - x_{oi}) \geq 0 \\ \arctan \frac{z_i - z_{oi}}{x_i - x_{oi}} + \pi & (x_i - x_{oi}) < 0 \end{cases} \\ E_i &= \arctan \frac{y_i - y_{oi}}{R_{xzi}} \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $A_i, E_i$  为经纬仪观测量,  $R_i$  目标到经纬仪的距离,  $x_{oi}, y_{oi}, z_{oi}$  为经纬仪站址坐标。

### 2.3.3 定位误差解算

当不考虑站址误差时, 其协方差矩阵  $P_i$  为

$$P_i = \begin{bmatrix} \sigma_{x_i}^2 & \sigma_{x_i y_i} & \sigma_{x_i z_i} \\ \sigma_{y_i x_i} & \sigma_{y_i}^2 & \sigma_{y_i z_i} \\ \sigma_{z_i x_i} & \sigma_{z_i y_i} & \sigma_{z_i}^2 \end{bmatrix} = C_i \bar{P}_i C_i^T \quad (14)$$

式中

$$C_i = \begin{bmatrix} \cos A_i \cos E_i & -R_i \sin A_i \cos E_i & -R_i \cos A_i \sin E_i \\ \sin E_i & 0 & R_i \cos E_i \\ \sin A_i \cos E_i & R_i \cos A_i \cos E_i & -R_i \sin A_i \sin E_i \end{bmatrix}$$

$A_i, E_i$  为经纬仪的观测数据,  $R_i$  为目标到经纬仪的距离。

$$\bar{P}_i = \text{diag}[\sigma_{R_i}^2, \sigma_{A_i}^2, \sigma_{E_i}^2] \quad (15)$$

式中  $\sigma_{A_i}, \sigma_{E_i}$  为  $A_i, E_i$  的测量误差的方差,  $\sigma_{R_i}$  为雷达测距误差和将雷达测量的到目标距离转换到经纬仪的换算误差的总误差。

当  $\sigma_{A_i} = \sigma_{E_i} = 0.001 \text{ mrad}$ ,  $\sigma_{R_i} = 3 \text{ m}$ , 雷达与经纬仪距

离  $D = 10 \text{ m}$ , 经纬仪主测量轴回转中心高程  $h_0 = 65 \text{ m}$ , 目标到雷达站距离从  $0 \text{ km}$  到  $40 \text{ km}$  变化时, 目标高度  $h_i = 30 \text{ m}$ , 沿着  $x$  轴方向平飞, 经纬仪对目标的定位误差如图 2 所示。

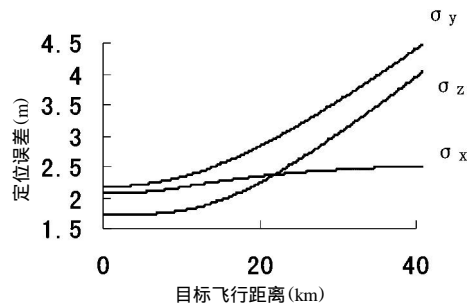


图 2 经纬仪对目标定位误差

Fig.2 Theodolite position measurement error to target

## 3 结论

从上面的分析可以看出, 将以测距为主的 2 坐标雷达与经纬仪配合使用, 可以实现经纬仪保精度单站定位。在规定的测量段落, 定位精度  $\sigma_{xi}, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}$  小于  $5 \text{ m}$ , 满足使用要求。同时雷达还可以对经纬仪提供方位引导, 提高了经纬仪捕获目标的速度。这些对提高经纬仪综合测量能力具有重要意义。

### 参考文献

- [1] GJB 1381.1-92.导弹、航天器外测设备的精度评定.光电经纬仪[S].科学技术工业委员会, 1992.
- [2] 刘利生, 张玉祥. 外弹道测量数据处理[M]. 国防工业出版社, 2002.
- [3] 何照才. 光电测量[M]. 国防工业出版社, 2002.

(上接第 76 页)

根据以上的实验数据可以看出无论是控制精度、晃动精度还是高低温实验, 此机构均可以满足设计要求。

## 4 结论

根据航空光学系统的要求, 设计了一种以直线电机、直线导轨和光栅尺式位移传感器相组合的航空光学调焦系统, 该机构具有响应快、定位精度高、传动效率高、无过多的中间环节的优点, 既降低了加工难度、又能满足使用要求。通过直线精度

试验和晃动试验表明该结构完全满足航空光学调焦系统的应用, 可直接应用于航空光学系统中。

### 参考文献

- [1] 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): 35-38.
- [2] 陈鑫, 付跃刚. 变焦系统凸轮曲线的优化设计[J]. 应用光学, 2008, 29(2): 45-47.
- [3] 林为才, 王晶. 一种新型调焦机构的设计[J]. 长春理工大学学报, 2007, 30(4): 46-48.
- [4] 毛英泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 147-151.