

文章编号 1674-2915(2009)06-0513-06

# 微粒子观测相机调焦机构设计

昌 剑,李志来,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:**为满足微粒子观测相机对光学系统的要求,提出了一种基于滚珠丝杆驱动的传动式调焦机构,介绍了其独特的直线运动结构形式。针对调焦机构承受的静载荷工况和温度工况,用有限元模拟法仿真分析了它的应力和变形情况,得到的最大静力变形为0.001 mm,最大热变形为0.002 mm。通过分析该结构各个传动件误差及装配误差,给出了结构总的理论相对误差值为2.2%。在样机的装调检测中实现了步进分辨率为0.005 mm,平均空回误差步距角为0.2°,完全可以满足整机对调焦机构的要求。

**关键词:**调焦机构;微粒子;滚珠丝杆传动;粒子观测相机

**中图分类号:**TL506; TB853 **文献标识码:**A

## Design of focusing mechanism for microcosmic particle observing camera

CHANG Jian, LI Zhi-lai, JIN Guang

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

**Abstract:** In order to meet the demands of a microcosmic particle observing camera for its optical system, a unique focusing mechanism driven by a ball screw in the linear movement was presented and the stress and strain of the focusing mechanism were analyzed by the Finite Element method (FEM) in accordance with its temperature and the static loads. Results show that the biggest strain is 0.001 mm under the static load, and 0.002 4 mm under the temperature load. The accessory error and the assembly error were analyzed, it is shown that the total comparative error is 2.2%. In the specimen experiment, the resolving power of 0.005 mm at each step and the average backlash error of 0.001 mm are obtained, respectively, which meets the need of the system.

**Key words:** focusing mechanism; microcosmic particle; ball screw driving; particle observing camera

# 1 引言

在直线式加速器中,质子、电子等带电粒子通过交变电场后可以加速到接近光速,这些高速粒子撞击原子后,可以得到各种微观粒子。微粒子观测相机则用于观测这些粒子在云雾室中的轨迹,从而对实验结果进行定量和定性的分析。由于观测相机加工制造环境( $-30 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )与工作环境( $-10 \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ )存在一定的温差,工作环境温度本身亦有四季温差,加之工作台的振动,这些因素都可能使观测相机的焦平面产生微小偏移,给光学系统带来离焦,因此,调焦是这套观测相机运行中非常重要的一个环节。本文分析了各种调焦方式和结构形式的优劣,考虑整机精度和角度要求,设计了一套滚珠丝杆传动式调焦机构,调节焦平面到光学系统焦深范围内<sup>[4]</sup>。本文还详细阐述了该套机构的运动转化原理,分析其误差来源,并对加工后的样本进行了实验测试,验证和分析了设计的合理性。

## 2 调焦方式选择与结构设计

### 2.1 调焦方式选择

在调焦机构中,可以采用的调焦方式有很多。

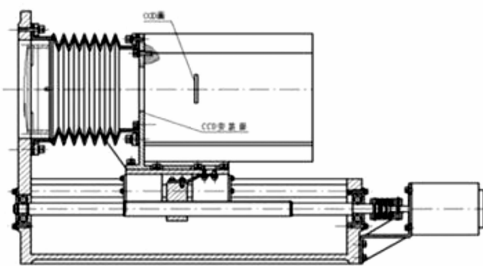
按移动部件的不同有镜头移动、调焦反射镜移动和像面移动3种方式;按传动方式不同有螺纹传动的调焦方式,蜗轮、蜗杆传动的调焦方式,丝杠、螺母传动的调焦方式,以及凸轮传动的调焦方式<sup>[1~3]</sup>。由于凸轮加工工艺复杂,凸轮齿轮表面需要特殊工艺处理,一般在航天相机调焦中使用较多。考虑到精度要求和观测相机所处的工作环境,本文选用高精度滚珠丝杆作为传动部件,同时选用 CCD 相面作为移动部件。

观测相机光学系统主要特点是成像范围广,其物距变化为  $1.5 \sim 4.0\text{ m}$ ,焦平面调节范围大,整个调焦行程为  $133\text{ mm}$ ;根据光学系统焦深的要求,系统最小调焦步距为  $0.005\text{ mm}$ 。

### 2.2 结构组成与工作原理

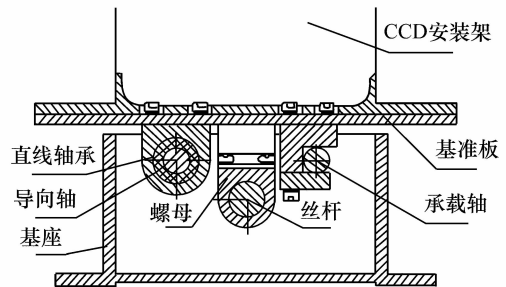
#### 2.2.1 调焦结构组成

调焦结构原理图如图1所示,结构组成包括:3个轴系(丝杠螺母传动轴、直线轴承导向轴和承载轴系)、步进电机组件、CCD相机组件和基座等主要部件。为保证得到平稳和精度较高的传动,3轴系平行度有较高要求。基座上轴系安装孔加工方式为数控镗床加工,机床刀具转动  $180^{\circ}$  时的误差为  $1' \sim 2'$ ,轴系安装孔平行度误差可以达到  $5'$ ,这样的轴系安装精度完全可以到达要求。轴系在基座上的安装方式采用一端固定,一端支撑的方式,以防止轴系由于热应变产生应力。



(a) 调焦结构简图

(a) Scheme of focusing mechanism



(b) 光轴方向剖视图

(b) Section view of mechanism in axis direction

图1 调焦结构示意图

Fig. 1 Illustration of focusing mechanism

#### 2.2.2 导向结构设计

该调焦结构中,可供选用的直线导向结构有直线导轨滑块副和直线轴承光轴副。光学系统的成像物距为  $1.4 \sim 4.5\text{ m}$ ,调焦行程要求  $133\text{ mm}$ ,

当轴系之间平行度较差时,容易过约束产生卡死或者大扭矩载荷。调焦结构对环境稳定要求严格,一旦工作环境变化,观测相机受到温差或者震动冲击后,本来已经调整平行的轴系位置会发生

偏移,影响调焦功能的实现。

为让结构有更好的适应性,降低装配难度要求,需要对常用的双直线导轨,或双直线轴承光轴的结构进行优化,优化后的结构如图 1(b)所示。该调焦结构选用导向方式为由一个光轴导轨和两个直线轴承配合作为导向轴系,限制了运动组件(CCD 相机组件)的 4 个自由度,即  $X$ 、 $Y$  方向的移动和转动;由一个光轴导轨与摩擦块配合作为承载部件,限制了运动部件(CCD 相机组件)的一个自由度,即  $Z$  轴(光轴方向)的转动。因此整个运动部件(CCD 相机组件)可以实现在  $Z$  轴(光轴方向)的直线运动。优化后的设计避免了过约束情况的出现,降低了机构功能对两轴系平行度的要求,进而使系统在震动、温差引起两轴系不平行时也能很好地完成调焦功能,具有较好的环境适应。

### 2.2.3 传动结构设计

凸轮调焦方式精度高,凸轮、齿轮等运动部件表面经特殊处理后无冷焊、无卡滞,能够适应真空和低温的环境,但凸轮曲线加工要求较高,一般用于空间相机中的调焦;滚珠丝杆副模块化程度高,专业生产滚珠丝杆精度很高,丝杆和螺母之间的间隙和空回很小,装配要求不高。根据调焦机构的负载工况和精度要求,本文选择了台湾生产的 PMI 型滚珠丝杆。为避免滚珠丝杆轴系和其它两个轴系不平行导致卡死现象,滚珠丝杆轴系与运动部件(CCD 相机组件)之间采用软连接<sup>[6]</sup>,如图 1(a)所示,设计一个 Z 字型的弹性连接片作为软连接部件,以避免过约束的出现。

## 3 结构受力和热分析

### 3.1 静力分析

基座和轴系在 CCD 组件重力作用下的形变对调焦功能的实现有很大影响,因此对基座和轴系的受力分析是非常必要的。简化基座和轴系模型,忽略螺纹小孔等非线性因素,并细化轴系,轴系和基座结合处的网格。把 CCD 组件载荷简化为均布载荷,利用 PATRAN 有限元分析功能,分析组件在近观测点、焦点、远观测点 3 个位置的轴系基座应变和应力,应力应变云图如图 2 ~ 图 7 所示。

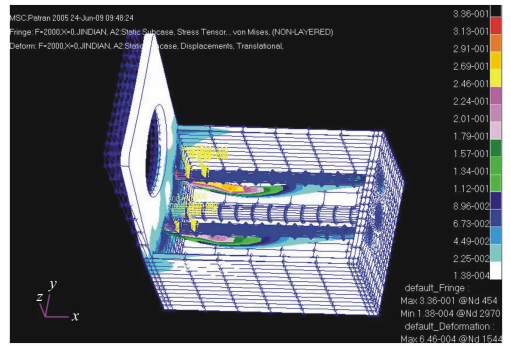


图 2 近观测点应变

Fig. 2 Strain at near observation point (color online)

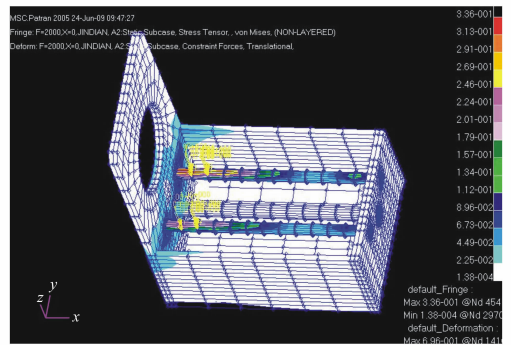


图 3 近观测点应力

Fig. 3 Stress at near observation point

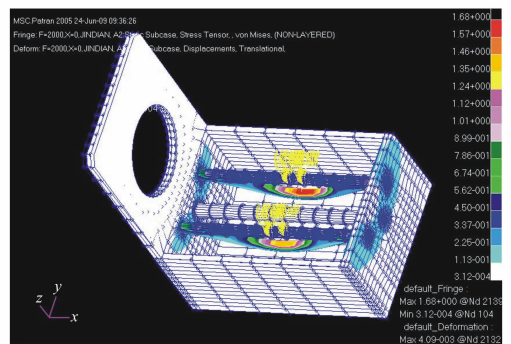


图 4 焦点观测点应变

Fig. 4 Strain at focus plane

上面分析加载的工况为 200 N 均布力(CCD 组件质量 12.5 kg)。根据分析结果可以得到,结构最大变形如图 9 所示,近点观测时变形量为  $5.11 \times 10^{-4}$  mm,焦点处观测时变形量为  $1.68 \times 10^{-3}$  mm,远点观测时变形量为  $3.68 \times 10^{-4}$  mm,

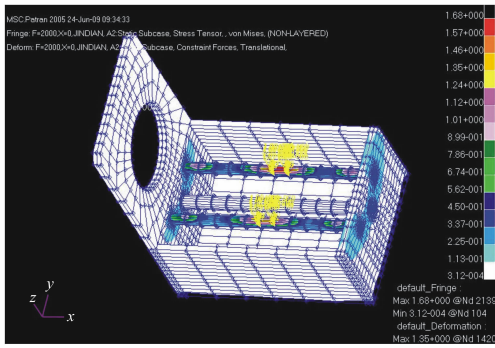


图5 焦点观测点应力  
Fig. 5 Stress at focus plane

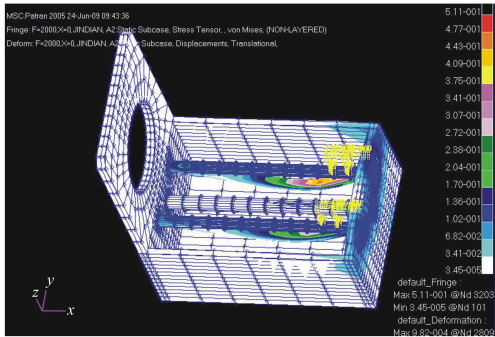


图6 远观测点应变  
Fig. 6 Strain at far observation point

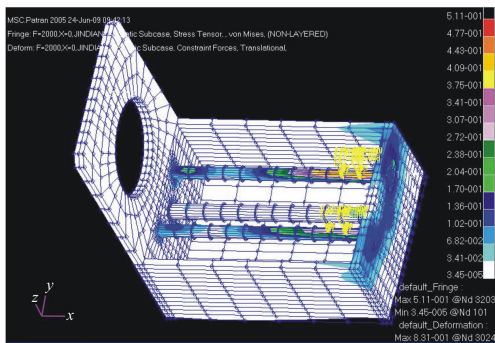


图7 远观测点应力  
Fig. 7 Stress at far observation point

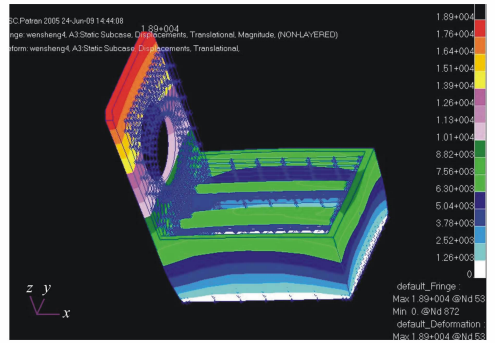


图8 温升4 °C 结构变形云图  
Fig. 8 Strain at 4 °C

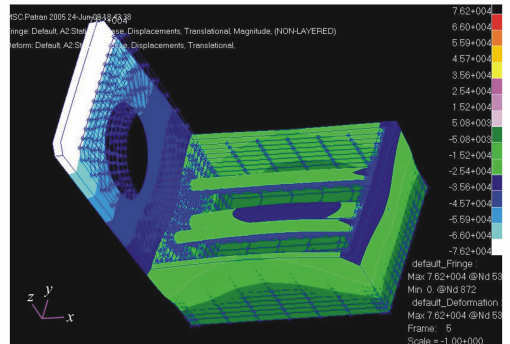


图9 温升4 °C 结构应力云图  
Fig. 9 Stress at 4 °C

温度产生的变形对结构精度影响很大,因此需要对结构热变形进行分析,图8和图9是参考环境温度20 °C,温度均匀变化±4 °C时的结构变形情况。

由分析结果可以看出,温度产生的最大变形为  $1.93 \times 10^{-2}$  (因为单位换算,为图中最大形变乘以  $2.5 \times 10^{-7}$ ),轴系产生的最大形变为  $0.24 \times 10^{-2}$  (因为单位换算,为图中最大形变乘以  $2.5 \times 10^{-7}$ ),对传动精度影响较大的轴系产生的热变形为  $0.0024 \text{ mm}$ ,相对于制造误差仍在允许范围内。

载荷产生的变形与结构件的加工误差相差两个数量级。因此,载荷产生的变形在允许范围内。

### 3.2 热分析

观测仪在室外靶场工作,温度环境较为恶劣,

## 4 误差分析

### 4.1 步进距原理误差分析

调焦机构主要指标最小直线位移由光学系统

焦深确定,当焦平面的漂移量在该焦深范围内时,光学系统仍然能够正常清晰地成像,焦深由光学系统数值孔径决定,其计算公式如下式。

$$\delta = 2\lambda / (NA)^2, \quad (1)$$

$\delta$  为光学系统焦深,  $\lambda$  为入射光波长,  $NA$  为光学系统数值孔径。

由光学系统数值孔径和针对设计的波段波长可以得到  $\delta = 10 \mu\text{m}$ , 考虑热形变震动等影响, 调焦最小步进距离应为  $5 \mu\text{m}$ 。

调焦机构主要技术指标为 CCD 相机组件在光轴方向的最小步进距离, 步进距离计算公式为:

$$\delta = p \times \varphi / 360^\circ, \quad (2)$$

其中  $\delta$  为最小步进距离,  $p$  为传动丝杆螺距,  $\varphi$  为步进电机最小步距角。

由误差传递理论<sup>[5]</sup>有

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\varphi}{\varphi}\right)^2}, \quad (3)$$

其中  $\frac{\Delta\delta}{\delta}$  为最小步进距相对误差,  $\frac{\Delta p}{p}$  为滚珠丝杆螺距相对误差,  $\frac{\Delta\varphi}{\varphi}$  步进电机步距角相对误差。

#### 4.1.1 滚珠丝杆导程误差

滚珠丝杆导程在加工制作过程中存在误差, 其误差在产品出厂时有严格技术说明, 选用 PMI 型滚珠丝杆, 其精度等级与一个导程的累积误差如表 1 所示。选用的为 C4 级滚珠丝杆, 在 1 mm 导程内, 累积误差为  $8 \mu\text{m}$ , 导程制造相对误差为 0.8%。

表 1 某型滚珠丝杆精度等级与累积误差对应表

Tab. 1 Cumulation errors of ball screws

GRADE	C0	C1	C2	C3	C4	C5
JIS( $\mu\text{m}$ )	3	4		6		8
PMI( $\mu\text{m}$ )	3	4	4	6	8	8

#### 4.1.2 步进电机步距角误差

根据电机启动力矩和最小步距角要求, 本文选用的步进电机是深圳众兴数控的某型电机, 其最小步距角的相对误差在 2% 以内。滚珠丝杆和电机步距角相对误差相对独立, 总的相对误差为:

$$\frac{\Delta\delta}{\delta} = \sqrt{0.81^2 + 2^2\%} = 2.2\% \quad (4)$$

#### 4.2 空回误差

空回误差由滚珠丝杆和螺母之间的间隙, 以及滚珠丝杆副和运动部件之间的装配间隙引起, 可能导致焦平面的步进精度跳动和错误的反馈, 影响调焦功能。空回误差无法在理论上定量给出, 而采用预压紧滚珠丝杆可以在很大程度上减小空回。本文将在试验中测量空回误差, 并给出其定量数据。

#### 5 焦平面步进精度测量与实验数据

调焦结构主要精度是轴向步进分辨力, 根据整机光学系统要求, 最小调焦步距分辨力可以达到  $5 \mu\text{m}$ 。因为该分辨率数量级在微米级, 本文采用的检测仪器为电感测微仪, 分辨力达  $1 \mu\text{m}$ , 可以满足检测要求。移动相面的调焦方式检测原理

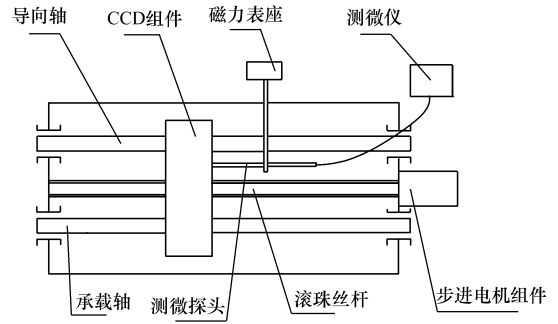


图 10 调焦检测原理示意图

Fig. 10 Illustration of measuring design

表 2 相面步进精度实验数据

Table 2 Experimental data of step accuracy

测量点	1	2	3	4
平均值( $\mu\text{m}$ )	2.78	2.66	2.23	2.58
均方根( $\mu\text{m}$ )	0.17	0.14	0.18	0.17
空回次数	0	1	0	1
测量点	5	6	7	8
平均值( $\mu\text{m}$ )	2.69	2.66	2.58	2.59
均方根( $\mu\text{m}$ )	0.16	0.11	0.20	0.26
空回次数	0	0	0	0
测量点	9	10		
平均值( $\mu\text{m}$ )	2.68	2.41		
均方根( $\mu\text{m}$ )	0.19	0.13		
空回次数	0	1		

如图 10 所示,用电子测微仪直接检测相面的轴向步进位移,即检测 CCD 相机的安装面的步进位移。检测过程中,选择丝杆上 10 个位置进行检测,每个位置步进电机均正转 15 步,反转 15 步,电机每走一个步距,检测一次 CCD 相面的轴向位移,每个位置测量 30 个调焦步距的数据<sup>[7]</sup>,并记录每次电机反转时的空回,统计后检测的数据如表 2 所示。

调焦结构根据光学系统焦深的要求,步进电机控制一个步距角时,焦平面轴向位移应  $< 5 \mu\text{m}$ ,对步进电机进行细分处理后,可以达到每次步进时焦平面轴向步进分辨力为  $2.5 \mu\text{m}$ 。由表 2 轴向步距实验数据可知,焦平面的轴向步进距离均在  $4 \mu\text{m}$  以下,达到了较高的步进分辨力。在每次测量过程中,电机反转时电机空回次数为一个步距,因此,滚珠丝杆的基准紧滚珠丝杆

和螺母在减少间隙和减少空回中起到了很好的作用。

## 6 结 论

本文根据微粒子观测相机整体要求,设计了一套调焦机构。通过检测焦平面步进精度和空回误差,验证了这套滚珠丝杆传动的调焦结构可以在 133 mm 的行程内实现  $4 \mu\text{m}$  的步进分辨力,空回误差平均值为 0.2 个步距,其精度完全可以满足微粒子观测相机整机对调焦部分的要求。分析了结构在相机重力载荷和温度变化载荷作用下关键传动部件的变形情况,验证了结构设计的合理性。该套调焦机构已经几次应用于可见波段的微粒子观测相机中,也将用在其它波段的观测仪器中。

### 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):35-37.  
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):35-37. (in Chinese)
- [2] 黄江,吴开成,关富玲.空间太阳望远镜成像镜调焦机构设计与分析[J].工程设计学报,2003,10(6):341-344.  
HUANG J, WU K CH, GUAN F L. Design and structural analysis for adjustment mechanism of imaging lens' focal length of space solar telescope[J]. *J. Eng. Design*, 2003, 10(6):341-344. (in Chinese)
- [3] 吴林涛,蔡盛,乔彦峰.经纬仪分离透镜法自动调焦模型建立与分析[J].激光与红外,2008,38(12):1241-1244.  
WU L T, CAI SH, QIAO Y F. Modeling and analysis of dialyte-lens auto-focusing technology for theodolite[J]. *Laser Infrared*, 2008, 38(12):1241-1244. (in Chinese)
- [4] 王一凡,薛育.一种大口径高精度凸轮变焦机构的设计[J].光学精密工程,2007,15(11):1756-1759.  
WANG Y F, XUE Y. Design of heavy calibre and high precision cam-varifocal mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1756-1759. (in Chinese)
- [5] 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. *Theory of Error and Analysis of Accuracy*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [6] 郑学文,王全波.精密仪器设计[M].北京:兵器工业出版社,1992.  
ZHENG X W, WANG Q B. *Design of Instrumental Accuracy*[M]. Beijing: Military Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [7] 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,2008,17(3):609-614.  
AN Y, QING Y CH. Design of straight-line focusing mechanism for space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 17(3):609-614. (in Chinese)

作者简介:昌 剑(1984—)男,湖南益阳人,硕士研究生,主要从事光学仪器结构设计方面的研究。

E-mail:ajchang@mail.ustc.edu.cn

金 光(1958—)男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机总体研究。

E-mail:jing@ciomp.ac.cn