

文章编号 1004-924X(2010)08-1842-07

# 拉杆式压弯聚焦镜组件线性与接触非线性方法的比较

吕清涛<sup>1</sup>, 薛松<sup>1</sup>, 彭忠琦<sup>2</sup>, 祝万钱<sup>1</sup>, 傅远<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 中国科学院长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**在压弯聚焦镜的工程分析中,采用接触非线性分析方法分析某些关键部位可提高分析精度,比以往只用线性分析得出的结果更接近实际情况。针对用线性分析方法分析所研究的对象求解误差较大,本文分析了系统产生非线性的主要因素。对某压弯聚焦镜组件进行了有限元建模,采用接触非线性分析方法对拉杆被拉弯时聚焦镜的响应进行了分析。对比非线性分析和检测结果可知,当压弯的矢高相等时,检测结果和非线性分析的斜率和半径误差在  $0.4 \mu\text{rad}$  和  $5 \text{ km}$  范围内,基本满足要求。对比线性分析、非线性分析的结果和实验数据表明:采用非线性分析的结果更接近实际情况,完全可在误差允许的范围内模拟压弯机构的实际压弯情况。

**关键词:**压弯聚焦镜;接触非线性分析;线性分析

**中图分类号:**TH703;TB24 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1842

## Comparison on linear and contact nonlinear analysis methods of pull-rod bent focusing mirror assembly

LÜ Qing-tao<sup>1</sup>, XUE Song<sup>1</sup>, PENG Zhong-qi<sup>2</sup>, ZHU Wan-qian<sup>1</sup>, FU Yuan<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*; 2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** For analysis on pull-rod bent focusing mirror assemblies in engineering, the accurate results can be obtained by a contact nonlinear method rather than a linear analysis. As analysis of a nonlinear system by linear method shows a bigger error, this paper researches the causes of errors. A pull-rod bent focusing mirror assembly is simulated by the finite element method, then the contact nonlinear analysis method is introduced to analyze the response of focusing mirror when its pull-rod is bended. In comparison of the nonlinear analysis results with detection results, it is pointed out that the errors between them on scope and radius are  $4 \mu\text{rad}$  and  $5 \text{ km}$  when the bent vector height of focusing mirror is a constant, which can meet the requirements of engineering. Finally, the tested results of the bent focusing mirror from linear analysis, nonlinear analysis and detection are compared, which indicates that the nonlinear analysis is closer to a real system in engineering analysis and suits to simulate the real

收稿日期:2009-11-06;修订日期:2010-01-18.

基金项目:应用光学国家重点实验室开放基金资助项目

conditions at the scope of limited errors.

**Key words:** bent focusing mirror; contact nonlinear analysis; linear analysis

## 1 引言

上海同步辐射光源(Shanghai Synchrotron Radiation facility, SSRF)是一台高性能的中能第三代同步辐射光源,它是我国迄今为止最大的大科学装置和大科学平台,在科学界和工业界有着广泛的应用价值,每天能容纳数百名来自全国或全世界不同学科、不同领域的科学家和工程师在这里进行基础研究和技术开发,它的主要结构包括储存环,光束线和试验站。大多数光束线都需要准直聚焦系统对同步辐射光进行准直聚焦,压弯聚焦镜系统是在建的上海光源光束线中的关键设备,主要作用包括光束的偏转、准直、聚焦,由它决定的压弯面型精度对光束线质量有很大影响。光束线上的压弯镜按成形方法可分为磨制镜和压弯镜。与磨制镜相比,压弯镜有半径可以调节,表面精度高和易于制造等优点。国内外现有的压弯方式主要有三点压弯、四点滚轴压弯、双臂结构、单臂结构、无臂结构和柔性铰链等。本文采用的拉杆式压弯聚焦镜系统为双臂结构,通过两端施加不同的力矩来压弯成不同的曲率半径,从而实现在实验站各种不同要求下曲率半径的调节。

通常采用有限元方法来分析拉杆式压弯聚焦镜系统中的受力情况,且按线性规律分析整个系统的应力-应变特性。以往工程实践及大量试验发现,有些工程分析结果与实际试验结果之间存在着较大的误差,特别是针对此类高精度的光学器件。为提高分析精度,搞清误差产生的原因,本文引入了非线性分析方法,并针对具体拉杆式压弯聚焦镜组件中拉杆与套筒接触部位进行了非线性分析,使分析精度得到了提高。此分析方法具有普遍意义,对大多数同类压弯聚焦镜系统的压弯分析过程均适用。

## 2 压弯聚焦镜系统非线性问题的描述

压弯机构(图1)处于工作状态时,由于施加在拉杆中部的拉力作用,拉杆会发生弯曲,从而使镜子的曲率发生变化。但镜子的曲率变化与拉杆

所受拉力并不成正比,当拉杆所受拉力达到最大值的时候,开始减小拉力,在拉力缓慢减小的过程中,镜子的弯曲程度并没有随之减小,反而迅速增大;随着所施加拉力的继续缓慢减小,镜子弯曲增大到一定的程度后,才开始减小并最终接近于初始状态<sup>[1]</sup>。而目前所广泛采用的线性分析方法得到的结果多显示为镜子的弯曲程度一直随着拉力的增大而增大<sup>[2]</sup>,随着拉力的减小而减小,也就是说工程分析结果不能与试验结果准确吻合。实验认为这是由于在拉杆与套筒间(图2)存在接触非线性问题,造成了计算结果与实验结果偏离较大。

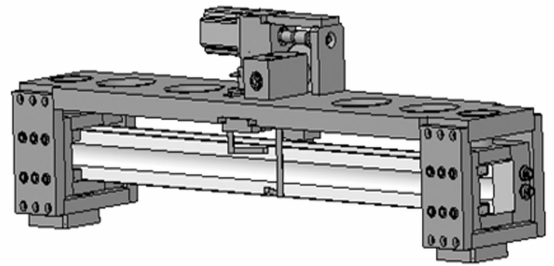


图1 压弯聚焦镜组件结构示意图

Fig. 1 Bent focusing mirror assembly

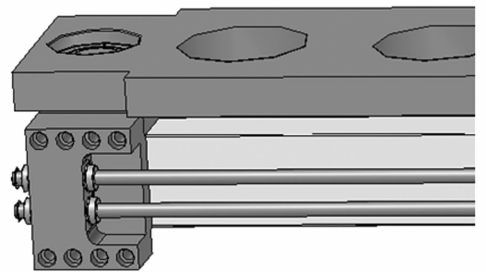


图2 拉杆与套筒结构示意图

Fig2 Structure of pull-rod and sleeve

非线性问题是指结构刚度随其变形而改变的问题。所有的物理结构都是非线性的,为了方便,线性分析只是一种近似,它对通常的设计是足够的,但对某些光学精密仪器的光机结构设计来说却远远不够。但在非线性工程分析中,由于刚度依赖于位移,所以不能够再用初始的柔度乘以外加载荷的方法来计算任意载荷下的结构变形,结构的刚度矩阵在整个分析过程中必须进行多次的

生成和求逆,这就使得分析求解的成本比线性分析高的多<sup>[3-6]</sup>。所以在实际的工程分析中应该采用以线性分析为主,以非线性分析为辅的分析策略。

## 2.1 结构非线性的来源

(1)材料的非线性:主要是指结构采用了非线性的材料,从而造成解的复杂性。

(2)边界条件的非线性:若边界条件在分析过程中发生变化,则会产生边界条件的非线性问题。在压弯聚焦镜的结构中,由于拉杆在拉弯时与套筒的接触问题就属于边界条件的非线性问题。

(3)几何非线性:主要发生在位移的大小影响到结构响应的情形<sup>[7-8]</sup>。

压弯聚焦镜系统是光束线中的重要部件,用于给镜子提供合适的压弯半径以满足光束线的聚焦、准直的需要,其压弯半径的调节精度会影响整个出射光束线的质量。压弯聚焦镜是一种高精度的光学仪器,对光学元件的要求很高,所以在此结构中,存在的主要问题是由于拉杆和套筒的接触所带来的边界条件的非线性问题。

## 2.2 接触理论基础

接触理论是研究物体之间通过接触而实现力的传递的一种分析方法。在有限元中接触条件是一类特殊的不连续约束,因此,分析方法必须能够判断什么时候两个表面是接触的,并且能应用相应的接触约束。与此类似,分析方法还必须能判断什么时候两个表面是分开的,并能解除其约束。

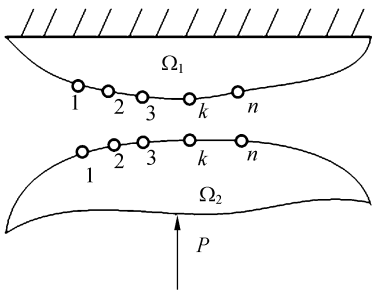


图 3 接触示意图

Fig. 3 Contact of two objects

图 3 所示为平面应变状态的两个物体  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  在单一方向外载荷  $P$  (法向表面载荷) 的作用下产生法向接触应力的情况。首先做如下假设:

- (1)两物体材料均为各向同性;
- (2)接触表面光滑,忽略切向摩擦;

(3)小变形,且在变形过程中接触点对始终一一对应;

(4)单调加载,即加载过程中无卸载情况。

在初始接触区及其周围将  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  离散成接触点对,如图 3 中的  $1, 2, \dots, n$ 。这样处理可以用离散的接触节点接触力来代替外载荷作用下的分布压力。接触区的任一点  $k$  在变形后必须满足弹塑性变形与初始距离之和大于或等于刚体位移量。其数学表达式为

$$\epsilon_k = \epsilon_{0k} + u_{1k} + u_{2k} - \alpha, \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_{0k}$  是  $k$  点对的初始间距,  $u_{1k}, u_{2k}$  分别是两物体  $k$  点的弹塑性位移量,  $\alpha$  是刚体位移量,  $\epsilon_k$  是物体刚体位移和弹塑性变形后点对的间距。

将可能接触的点对加载后的间距写成矩阵形式为,即

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_0\} + \{u_1\} + \{u_2\} - \alpha\{e\}, \quad (2)$$

式(2)中:  $\{e\}$  为单位列矢量。

由矩阵位移法原理可知  $\{u_1\} = [F_1]\{R_1\}$

$$\{u_2\} = [F_2]\{R_2\}, \quad (3)$$

式(3)中:  $[F_1], [F_2]$  为物体  $\Omega_1$  和  $\Omega_2$  对应于可能接触点的柔度矩阵,它是由材料的性质决定的,可以从表征材料应力水平的相对总刚度求逆得出;  $\{R_1\}, \{R_2\}$  为接触节点力,并有  $\{R_1\} = -\{R_2\}$ 。若以  $\Omega_1$  为基准,记  $\{R_1\} = \{R\}$ ,  $[F_1] + [F_2] = [F]$ , 则可得典型的接触问题的位移协调方程,即

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_0\} + \{R\} - \alpha\{e\}.$$

作用在各分散点上的力  $F_k$  的和必须等于法向外载荷  $P$ , 所以平衡条件可写作  $\sum_{k=1}^n F_k = P$ 。同时,对可能接触区各节点来说,只有接触时才存在接触力,即

$$\begin{cases} F_k \geq 0 & (\text{当 } \epsilon_k = 0 \text{ 时}) \\ F_k = 0 & (\text{当 } \epsilon_k > 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

式(4)称为接触准则。这样接触问题就是求一组解,使它满足上述条件<sup>[9-10]</sup>。可将此思想用于解决边界条件引起的非线性分析。

接触问题的特点在于接触体间的相互关系,此关系又可分为在接触前后的法向关系与切向关系。在法向必须实现两点:接触力的传递;两接触面间没有穿透。切向关系主要体现接触面在接触后的摩擦力。对于压弯聚焦镜结构,在分析拉杆与套筒的结构时,线性与非线性分析方式的处

理方法是截然不同的。常用的线性模拟多忽略接触面的作用,将拉杆与套筒间的接触面的节点合并为同一节点,这样算法在有限元模型的单元间除了相互连接的节点以外,其它的节点并没有搜寻与其相互作用的节点<sup>[11-12]</sup>,因而无从考虑接触应力问题,更无从考虑拉杆与套筒的接触问题。所以,压弯聚焦镜中对压弯精度影响较多的部位还应采用非线性接触分析来消除由于分析方法带来的求解误差<sup>[13-14]</sup>。

### 3 压弯聚焦镜组件工程分析

本文以压弯聚焦镜系统为研究对象,对其聚焦镜组件进行了接触非线性有限元分析,并将其分析结果与采用线性方法所得结果进行了比较。

#### 3.1 建立有限元模型

在CAD几何模型的基础上应用ANSYS建立了压弯聚焦镜组件的有限元模型(图4)。聚焦镜采用单晶硅材料,其两边采用全支撑,支撑材料为不锈钢(0Cr18Ni9),支撑结构与拉杆接触处有套筒,且套筒通过卡簧与支撑结构固结在一起,此处可以整体建立有限元模型。拉杆材料为高碳铬钢(GCr15),套在两侧的套筒内,且拉杆两端处有卡簧,防止拉杆滑出套筒,建立有限元时忽略此卡簧。由于拉杆在套筒内有接触滑移现象,所以在此处做非线性分析。

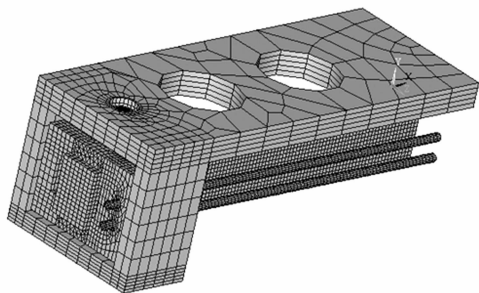


图4 压弯聚焦镜组件有限元模型

Fig. 4 FE model of bent focusing mirror

在划分有限元网格时遵循以下原则:

- (1)在镜子模拟承受弯曲结构时,厚度方向至少划分4层单元;
- (2)在进行接触分析时采用非协调单元,并将网格做细化处理,使网格扭曲减至最小;
- (3)尽可能采用六面体单元,在模型复杂部位

适当采用楔形单元,以增加过渡的连续性和协调性。

#### 3.2 接触非线性工程分析

##### 3.2.1 材料属性

具体属性参数如表1所示。

表1 材料属性

Tab. 1 Material attributes

|   | 材料名称     | 泊松比  | 杨氏模量               |
|---|----------|------|--------------------|
| 1 | Si       | 0.3  | $1.69 \times 10^5$ |
| 2 | 0Cr18Ni9 | 0.33 | $2.06 \times 10^5$ |
| 3 | GCr15    | 0.3  | $2.08 \times 10^5$ |

##### 3.2.2 选择单元类型

在本有限元模型中,选用结构实体单元Solid65。采用Free和Sweep两种划分方式来对实体进行网格划分。为了保证仿真结果的准确性,划分过程中,对不同位置的精度需求采用了不同密度的网格来划分。

##### 3.2.3 边界条件

非线性分析时,与线性分析的边界条件既有相同之处,也有其独特之处。具体边界条件是:

- (1)聚焦镜与支撑部位采用全约束;
- (2)由于结构具有对称性,为了节省计算资源,分析时只取了整个模型的一半作为分析对象;
- (3)在利用接触非线性分析时,对拉杆与套筒接触的部位进行接触面属性定义,拉杆相接触的部位定义为CONTA173接触面,套筒相接触的部位定义为TRRGE170目标面,由于通常接触件在外力作用下易产生弯曲、相对滑移或倾斜,因此采用罚函数的形式。同理,在镜子支架与外框的接触部位,因为实际情况是镜子和支架在拉力作用下受弯矩,支架和外框是轴和轴承的接触,所以在支架和外框接触处也设置为接触面。在接触面之间利用接触理论来搜索面与面的分离与接触;
- (4)接触刚度比例因子FKN取0.1,拉杆与套筒的接触部位摩擦系数取0.15,镜子支架与外框的接触部位摩擦系数取0.1。

##### 3.2.4 载荷工况

在拉杆中心位置施加位移载荷来模拟步进电机的作用,做非线性分析时将位移载荷分为10步,每步为1mm。

### 3.2.5 计算结果分析

聚焦镜在拉杆的拉力作用下发生弯曲,根据曲率的计算公式  $k = \left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \right|$ , 曲率半径  $R = 1/k$ , 且对于本压弯机构两端施加相等力矩时聚焦镜中间各点曲率半径相等,可推导出曲率半径为:

$$R = 1 / \left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} \right|$$

取其路径上一点的压弯半径来描述在压弯机构上施加不同的载荷过程中,镜子上同一点在这期间压弯半径的变化,把压弯半径转化为偏转角度,用偏转角度描述弯曲程度的大小,如表 2 所示。

表 2 拉杆作用下聚焦镜压弯偏转角度

Tab. 2 Bent focusing deflection angle in nonlinear analysis

| 步进电机位移<br>/mm | 施加载荷<br>/(°) | 释放载荷<br>/(°) |
|---------------|--------------|--------------|
| 1             | 1.2          | 4.3          |
| 2             | 3.1          | 9.8          |
| 3             | 6.7          | 17.1         |
| 4             | 9.6          | 22.3         |
| 5             | 12.2         | 26.0         |
| 6             | 16.1         | 33.6         |

分析表 2 结果可以看出:由于将拉杆与套筒定义为接触非线性,拉杆对聚焦镜支撑结构施加载荷和释放载荷的过程中,压弯偏转角度是不同的,这在工程实际中也是确实存在的,然而线性工程分析中拉杆与套筒采用的是刚性连接,不能真实模拟接触作用,因此不能分析出两种不同过程对压弯镜面的影响(表 3)。

表 3 线性与非线性分析结果对比

Tab. 3 Contrast of linear and nonlinear analysis

| 步进电机位移<br>/mm | 施加载荷/(°) |      | 释放载荷/(°) |      |
|---------------|----------|------|----------|------|
|               | 线性       | 非线性  | 线性       | 非线性  |
| 1             | 2.5      | 1.2  | 2.5      | 4.3  |
| 2             | 6.3      | 3.1  | 6.3      | 9.8  |
| 3             | 10.4     | 6.8  | 10.4     | 17.1 |
| 4             | 15.8     | 9.5  | 15.8     | 22.3 |
| 5             | 20.1     | 12.3 | 20.1     | 26.0 |
| 6             | 22.8     | 16.2 | 22.8     | 33.6 |

### 3.2.6 误差分析

分析表 3 结果可以看出:在拉杆对聚焦镜支

撑结构分别施加载荷和释放载荷过程中,非线性分析得到的压弯偏转角度不同,表现为施加载荷时比释放载荷时偏转角度小,分析其原因为接触非线性所导致。在压弯过程中,套筒和拉杆之间的接触部位存在比较大的摩擦力,摩擦力在步进电机施加给拉杆以向外拉的力与释放拉力使拉杆向回时对镜体的弯曲产生的作用不同:向外拉时,由于摩擦力的存在,阻碍了套筒与拉杆之间的相对运动;释放力向回时,摩擦力的方向与向外拉时相反,摩擦力的作用使套筒和拉杆之间不能运动,从而使镜体弯曲加大。但在线性分析中,这种变化是很难体现出来的。表 4 为非线性分析结果与实验结果的对比数据,两者基本吻合。

表 4 非线性与实验结果对比

Tab. 4 Contrast on nonlinear analysis and experiment result

|                     | 检测数据  |       | 非线性分析结果 |      |
|---------------------|-------|-------|---------|------|
| 矢高/ $\mu\text{m}$   | 1.60  | 1.50  | 1.60    | 1.50 |
| 斜率/ $\mu\text{rad}$ | 4.44  | 4.34  | 4.8     | 4.6  |
| 半径/km               | 46.75 | 48.38 | 42      | 44   |

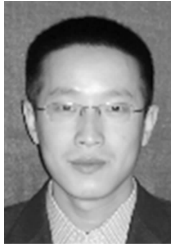
## 4 结 论

本文对某压弯聚焦镜组件进行了有限元建模,采用非线性分析方法对具体拉杆式压弯聚焦镜组件中拉杆与套筒接触部位进行了非线性分析,对比线性与非线性分析结果和实验结果可知,在压弯聚焦镜机构中的关键部位采用非线性接触算法进行分析,得到的结果更精确。不同的分析结果与实验结果的对比表明,当压弯的矢高相等时,检测结果和非线性分析的斜率和半径的误差在  $0.4 \mu\text{rad}$  和  $5 \text{ km}$  范围内,基本满足要求,表明将非线性分析方法引入工程分析中,可最大限度地模拟结构的真实状态,提高工程分析精度。

## 参考文献:

- [1] 周泗忠,杨晓许,时慧霞.压弯聚焦镜自重的平衡[J].核技术,2005,28(3):180-182.  
ZHOU S ZH, YANG X X, SHI H X. Study of gravity compensation of bent focusing mirror[J]. *Nuclear Techniques*, 2005, 28(3): 180 - 182. (in Chinese)
- [2] LV Q T, XUE S, ZHU W Q, *et al.*. Pull-rod bent focusing mirror subassembly engineering analysis based on contact nonlinear analysis method [J]. *SPIE*, 2009, 7385: 73850E\_1-73850E\_9.
- [3] 李建勋,冯宸.工程应用力学手册[M].西安:陕西人民教育出版社,1994.  
LI J X, FENG CH. *Manual of Engineering Applied Mechanics*[M]. Xi'an: Shanxi People's Education Publishing House, 1994. (in Chinese)
- [4] 曾攀.有限元分析及应用[M].北京:清华大学出版社,2006.  
ZENG P. *Finite element analysis and application* [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2006. (in Chinese)
- [5] 凌道盛,徐兴.非线性有限元及程序[M].浙江:浙江大学出版社,2004.  
LING D SH, XU X. *Nonlinear finite element analysis and program*[M]. Zhejiang: Zhejiang University Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [6] 郭乙木,陶伟明,庄茁.线性与非线性有限元及其应用[M].北京:机械工业出版社,2004.  
GUO Y M, TAO W M, ZHUANG ZH. *Linear and nonlinear finite element analysis and application* [M]. Beijing: China machine press, 2004. (in Chinese)
- [7] SCHWEICKHARDT T, ALLGÖWER F. Linear modeling error and steady-state behaviors of non-linear dynamical systems [J]. *IEEE*, 2005, 44: 8150-8155.
- [8] DUNCAN J M, CHANG C Y. Non-linear analysis of stress and strain in soils [J]. *Journal of the Soils Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [9] PADMORE H, HOWELLS M R, IRICK S, *et al.*. New schemes for producing high-accuracy elliptical mirrors by elastic bending [J]. *SPIE*, 1996, 2856: 145-156.
- [10] GARRARD W L. On linear modeling for non-linear systems. *Int. J. Contr.*, 1972, 15(6): 1165 - 1168.
- [11] 刘磊,李景林,吕清涛,等.大口径反射光学系统装调装置设计研究[J].光学精密工程,2005, S1: 134-137.  
LU L, LI J L, LV Q T, *et al.*. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (Supp.): 134-137. (in Chinese)
- [12] 卢启鹏,李勇军,彭忠琦,等.六杆并联机构运动学正解研究及其在同步辐射光束线中的应用[J].光学精密工程,2008,16(10):1874-1879.  
LU Q P, LI Y J, PENG ZH Q, *et al.*. Forward kinematics of six-bar parallel mechanism and its applications in synchrotron radiation beam-line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1874-1879. (in Chinese)
- [13] 张众,王占山,秦树基,等.宽角度x射线反射镜的设计[J].光子学报,2003,32(2):253-256.  
ZHANG ZH, WANG ZH SH, QIN SH J, *et al.*. The design of X-ray supermirror with broad angle range [J]. *ACTA Photonica sinica*, 2003, 32(2): 253-256. (in Chinese)
- [14] 曲艳峰,吕丽军.同步辐射仪器中柔性铰链压弯机的研究[J].光学精密工程,2002,10(2):220-225.  
QU Y F, LV L J. Research on the flexural hinge-based bender in a synchrotron radiation instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 220-225. (in Chinese)

## 作者简介:



吕清涛(1978—),男,吉林长春人,博士研究生,2002年于北京大学获工学学士学位,2007年于长春工业大学获工学硕士学位,主要研究方向为压弯聚焦镜系统的设计和分析。E-mail:lvqingtao@sinap.ac.cn



傅远(1979—),男,浙江江山人,助理研究员,博士,2006年于中国科学院上海应用物理研究所获博士学位,主要研究方向为光束线技术。E-mail:fuyuan@sinap.ac.cn



彭忠琦(1957—),男,吉林榆树人,高级工程师,主要从事精密机械设计方面的研究。pengzhongqi@126.com

## 导师简介:



薛松(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于东北大学获学士学位,主要从事同步辐射光学工程、精密机械和光谱仪器设计方面的研究。E-mail:xuesong@sinap.ac.cn



祝万钱(1979—),男,浙江三门人,助理研究员,博士研究生,主要从事同步辐射光束线关键部件结构设计方面的研究。E-mail:zhuwanqian@sinap.ac.cn

(本栏目编辑:李树军)

## ● 下期预告

## FY-3A 中分辨率光谱成像仪 热红外通道多探元辐射定标

胡秀清<sup>1,3</sup>,张里阳<sup>1</sup>,郑照军<sup>1</sup>,张勇<sup>1</sup>,孙凌<sup>1</sup>,丁雷<sup>2</sup>,黄小仙<sup>2</sup>

(1. 国家卫星气象中心,北京 100081;2. 中国科学院上海物理研究所,上海 200083;

3. 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101)

FY-3A 中分辨率光谱成像仪(MERSI)热红外窗区通道探测器为 40 元跨轨并行扫描,这种多元并扫观测模式获取图像既有探元辐射响应差异条纹,又有探元光谱响应差异形成的目标依赖条纹。本文针对这些特点介绍了 MERSI 红外通道的多探元辐射定标方法。首先基于星上黑体观测进行逐探元的辐射定标处理,消除探元辐射响应差异条纹。同时利用各探元与基准探元光谱响应对不同温度黑体光谱辐亮度建立比值关系,这一关系随着辐亮度呈非线性变化,基于它对逐探元定标后图像进行探元光谱差异的辐亮度归一化补偿,从辐射机理上最大限度消除图像条纹。为了验证 MERSI 红外通道辐射定标精度,文中还利用同时过星下点观测(SNO)交叉定标方法,将 MERSI 定标结果与 MODIS 进行对比,结果显示,MERSI 相对于后者红外通道亮温高 1 K 左右,这可能与两者的通道带宽不同有关。