

## 康普顿光源精密调节镜架机构的设计与分析

刘今越<sup>1</sup>,任东城<sup>1</sup>,张 靛<sup>1</sup>,贾晓辉<sup>1</sup>,崔月盟<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 机械工程学院,天津 300130; 2. 天津津航技术物理研究所,天津 300308)

**摘要:**为弥补国内航天探测中用于探测器标定的  $\gamma$  源单色性差、能量覆盖范围小等缺陷,设计了一种康普顿光源精密调节镜架。该镜架由压电陶瓷电机驱动,通过柔性铰链的柔性变形传递运动,对激光入射角进行精密调节,实现激光束与高能电子束精确对撞,从而获得峰值能量连续变化的  $\gamma$  粒子。利用伪刚体模型理论对该镜架进行建模,分别得到了该机构沿纬度方向和经度方向的刚度模型和位移模型,结合有限元仿真,对位移理论模型和镜架中应力分布规律进行了分析,其结果验证了机构参数选择的合理性。最终得到了经度、纬度方向调节范围均为  $1.12^\circ$ 、定位精度不小于  $6 \times 10^{-4}$  的精密调节镜架。

**关键词:** 柔性镜架; 康普顿光源; 精密调节; 伪刚体模型; 有限元分析

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0218002

## Design and analysis of the precision adjustment mirror bracket for Compton optical source

Liu Jinyue<sup>1</sup>, Ren Dongcheng<sup>1</sup>, Zhang Liang<sup>1</sup>, Jia Xiaohui<sup>1</sup>, Cui Yuemeng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** To make up for the poor monochromaticity and the narrow energy range of  $\gamma$  particle source which is applied at the demarcation of domestic detector in aerospace probe, a precision control mirror bracket driven by the piezoelectric ceramic motor for Compton optical source was designed. In order to impinge accurately with high energy electron beam and obtain the continuous changed peak energy of the  $\gamma$  particle, the input angle of the laser beam was adjusted exactly with the elastic deformation of the flexure hinges. The mathematic model of stiffness and displacement in both latitude and longitude directions were developed by the principle of the pseudo-rigid-body model. Then, the displacement in both directions and the distributing rule of the stress were discussed through the finite element analysis, and the simulation results indicate that the structural parameters are fully satisfied. Finally, it was confirmed experimentally that the adjustable angles of the precision control mirror bracket both are  $1.12^\circ$  in latitudinal and longitude directions, and the positioning accuracy is not less than  $6 \times 10^{-4}$ .

**Key words:** flexible mirror bracket; Compton optical source; precision adjustment; pseudo-rigid-body model; finite element analysis

收稿日期:2016-06-05; 修订日期:2016-07-03

基金项目:国家自然科学基金(51175145)

作者简介:刘今越(1977-),男,副教授,博士,主要从事精密测量与机器视觉方面的研究。Email:lgy@hebut.edu.cn

通讯作者:贾晓辉(1977-),女,副教授,博士,主要从事精密测量与机器视觉方面的研究。Email:jia\_dragon@163.com

## 0 引言

作为航天探测的一类有效载荷,  $\gamma$  探测器在许多应用中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。目前,  $\gamma$  探测器的定标实验多是通过单能放射性源或同步辐射源来完成, 其精确度往往无法达到要求, 这也是航天探测发展的瓶颈问题, 所以迫切需要一种单色性好、能量覆盖范围广 (keV~GeV) 且峰值能量可调的理想光源来实现航天探测中  $\gamma$  探测器的精确定标<sup>[2]</sup>。

$\gamma$  光源的获取可利用康普顿效应, 即入射光子与电子发生弹性散射, 以获得准单色、高通量和高能量的散射光子<sup>[3]</sup>, 散射得到的  $\gamma$  光子能量与激光入射角度有关, 通过连续改变激光的入射角度, 可以得到能量连续可调的  $\gamma$  光<sup>[4]</sup>。

目前国际上有关康普顿光源的研究已经取得一定进展, 如美国 Lyncean Technologies Inc. 公司已研发出一种商业化的小型康普顿光源, 在相关部门中用于相衬成像和蛋白质结构的测定, 但根据已有调研, 可覆盖 keV~GeV 能区的康普顿光源极少。而国内在康普顿光源的实验研究方面起步较晚, 而且其实验条件要求较高, 还没有任何实验室完全掌握通过改变激光入射角实现能量连续可调的  $\gamma$  光源这一技术<sup>[5]</sup>。

文中设计了一套精密调节系统, 使激光束与高能电子束精确对撞发生康普顿散射, 从而获得反向散射的  $\gamma$  射线。对撞发生在一个真空度为  $10^{-7}$  Pa 的真空室中, 电子束的入射方向不变, 利用激光反射系统调整激光束的入射方向, 使激光束与电子束精确碰撞, 再通过真空回转台的回转获得峰值能量连续变化的  $\gamma$  粒子。激光束与高能电子束的束腰半径均为  $20 \mu\text{m}$ , 为了获得单色性好的  $\gamma$  光, 要求激光束和电子束在碰撞位置的中心重合度达到  $2 \mu\text{m}$ , 因此激光反射系统对激光束入射方向的调节将成为实验成功与否的关键因素。激光反射系统由多组光学镜架组成, 其最后一组反射镜架需具备角度定位精度不小于  $6 \times 10^{-4}^\circ$ , 经度、纬度两个方向的旋转范围均需不小于  $0.6^\circ$  的调节能力, 才能实现激光束与电子束的精确碰撞。文中将对该组调节镜架的结构进行详细设计与分析。

## 1 总体功能设计

由于激光束与电子束均不可见, 故在其碰撞处

放置一个  $20 \text{mm} \times 20 \text{mm}$  的 YAG 荧光靶, 靶面带有刻度。激光束与电子束打在 YAG 荧光靶上产生荧光并出现一个光斑, 从而可获得光斑在荧光靶上的位置信息。

图 1 是调节系统总体调节方案示意图, 电子束在荧光靶形成光斑后, 真空靶室外部的相机透过玻璃观察窗对光斑进行拍摄, 并记录此时光斑在荧光靶上的位置坐标; 然后关掉电子加速器以后, 使激光通过一系列激光反射镜的反射, 最终也打在荧光靶上产生一个光斑, 调节反射镜系统改变激光光路使激光光斑与电子束光斑重合, 从而实现激光与电子束的碰撞。该过程中光斑位置的检测通过机器视觉实现。

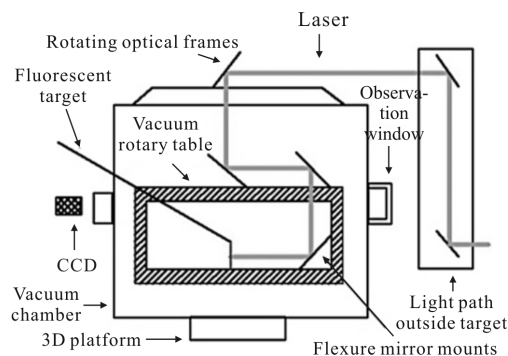


图 1 调节方案示意图

Fig.1 Sketch map of adjustment scheme

图中三维平台用来移动靶室, 令电子束打到荧光靶的中心, 其定位精度可以达到  $2 \mu\text{m}$ 。一部分激光反射镜安装在真空回转台上, 通过回转台的旋转和柔性镜架的共同作用实现激光与电子注不同角度的精确碰撞, 以获得能量峰值可调的  $\gamma$  射线。在调节过程中高速高清 CCD 相机实时记录荧光靶上光斑的位置坐标, 为柔性镜架提供视觉反馈。靶室外的光路调节系统用来粗调激光光路, 使激光在荧光靶上的落点进入柔性镜架精密调节范围之内。

## 2 结构设计

图 2 为柔性镜架整体结构示意图, 为保证运动精度, 经度与纬度方向都使用压电陶瓷电机驱动、柔性铰链传动。柔性镜架主要由激光反射镜、压电陶瓷电机, 柔性架体和底座组成。

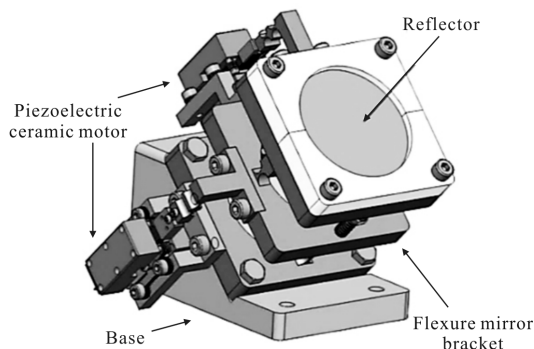


图 2 柔性镜架系统结构图

Fig.2 Structure of flexure mirror mounts

### 2.1 柔性铰链的参数确定

柔性铰链是利用材料的变形产生位移的一种特殊运动副,用于提供绕轴作复杂运动的有限角位移,在力的作用下能产生微小可逆的弹性变形,并利用该变形来实现运动的传递,其工作稳定、分辨率高、无机械摩擦、无空程、无爬行,体积小且可一体化加工,在结构设计中多用于精密定位、传动和导向<sup>[6-7]</sup>。

文中选择单自由度圆形凹槽弹性铰链,其几何结构如图 3 所示。主要几何参数有切割半径  $R$ 、最小厚度  $t$ 、宽度  $b$  和高度  $h$ ,在直圆型柔性铰链中有  $h=t+2R$ 。其在  $z$  方向弯矩作用下会产生一个可逆的弹性变形用于传动。

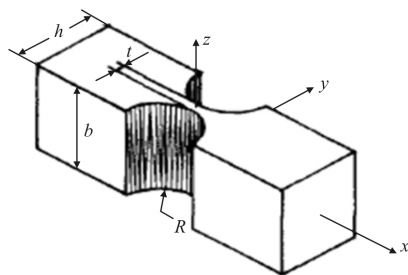


图 3 单自由度圆形凹槽柔性铰链几何结构图

Fig.3 Circular groove flexure hinge with single degree of freedom

根据 Paros-Weisbord 公式<sup>[8-9]</sup>,此类柔性铰链的转动刚度为:

$$C_z = \frac{\varphi_z}{M_z} = \frac{3}{2EbR^2} \left[ \frac{1}{2\beta + \beta^2} \right] \times \left\{ \left[ \frac{1 + \beta}{\gamma^2} + \frac{3 + 2\beta + \beta^2}{\gamma(2\beta + \beta^2)} \right] \sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2} + \frac{6(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \cdot \left[ \arctan \left( \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \times \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma)^2}} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

式中:  $\beta = t/2R$ ,  $\gamma = h/2R$ ;  $E$  为弹性模量;  $\varphi_z$  为弹性铰链绕  $z$  轴转角;  $M_z$  为施加在弹性铰链上的弯矩。考虑到绝大多数柔性铰链的最小厚度  $t$  远远小于铰链的高度  $h$  和铰链半径  $R$ , 即  $\beta = t/2R \ll 1$ ,  $\beta = t/2R \ll \gamma = h/2R$ , 所以公式(1)可以简化为:

$$K_z = \frac{M_z}{\varphi_z} \approx \frac{2EbR^2(2\beta)^{5/2}}{9\pi} = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (2)$$

由公式(2)可见,单轴柔性铰链转动刚度与切割半径  $R$ 、宽度  $b$ 、最小厚度  $t$  和弹性模量  $E$  相关,其中与最小厚度  $t$  成正比,与切割半径  $R$  成反比。

### 2.2 最大角位移和所能承受的最大力矩

柔性铰链的最大角位移以及它所能承受的最大力矩是两个重要参数,其直接反映了铰链的行程范围和负载承受能力。柔性铰链最大应力发生在其凹槽中心截面最薄处,主要由作用于其上的弯矩产生。所以柔性铰链最大允许转角为:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_p I_{\min} / K_z t \quad (3)$$

式中:  $I_{\min} = bt^3/12$  为弹性铰链最小截面绕转动轴的惯性矩;  $\sigma_p$  为材料的许用强度。

由上式可见,最大角位移  $\sigma_{\max}$  随着  $t$  的增大而减小,随着  $R$  的增大而增大<sup>[10]</sup>。因此设计过程中,应在保证柔性铰链最大角位移的前提下,尽可能增大最小厚度  $t$ 、减小其切割半径  $R$ 。

由以上分析可知,在柔性铰链设计中,为了使微动工作台具有良好的动态特性和抗干扰能力,应尽可能增大柔性铰链的最小厚度  $t$ ,并减小其圆弧半径  $R$ 。而为了实现机械传动的高灵敏度和高分辨率,在保证传动机构强度要求的前提下,则应适当增大柔性铰链的圆弧半径  $R$ ,并减小铰链的最小厚度  $t$ 。

考虑到柔性调节镜架的使用位置,其整体尺寸不宜过大,选取铰链宽度  $b=5$  mm,针对铰链切割半径与最小厚度的设计,进行了多组驱动力为  $\pm 10$  N 下的变形仿真分析,部分仿真数据见表 1。

表 1 不同  $R$ 、 $t$  参数下的仿真结果

Tab.1 Simulation results of different parameter

R and t			
No.	R/mm	t/mm	Maximum displacement/mm
1	3	0.8	0.645
2	3	0.4	2.085
3	2	0.8	0.876
4	2	0.4	1.665

由表 1 数据可知,几组数据均满足镜架调节需求,为尽可能减小柔性镜架的整体尺寸,选取 $R=2\text{ mm}$ ,为适当提高镜架刚度及抗干扰能力,选取 $t=0.8\text{ mm}$ ,最终确定最小厚度 $t=0.8\text{ mm}$ ,宽度 $b=5\text{ mm}$ ,切割半径 $R=2\text{ mm}$ 。进而通过公式(2)可以计算出单个柔性铰链绕 $z$ 轴的转动刚度 $K_z=30.08\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。

### 3 基于伪刚体模型的柔性镜架建模

伪刚体模型是对柔顺机构刚性化的一种描述,是将柔顺杆和柔顺铰链等效简化为刚性杆和真实运动铰链,然后应用刚体理论对机构进行分析和综合的一种方法<sup>[11]</sup>,由于涉及到柔性铰链的运动副形式只有一种,故假设机构中只有柔性铰链产生弹性变形,其变形在材料的弹性极限之内,且相比较而言,柔性尺寸远小于杆件总尺寸,可忽略不计,故可将机构做如下简化处理:将柔性铰链等效为转动副和理想线性扭簧,并将柔性铰链转动中心定义为伪刚体模型中转动副所对应的等效位置。

图 4 为柔性镜架的伪刚体模型图。为保证角位移调整有足够余量,柔性铰链的组合采取先串联后并联的形式。根据伪刚体模型理论,将每个柔性铰

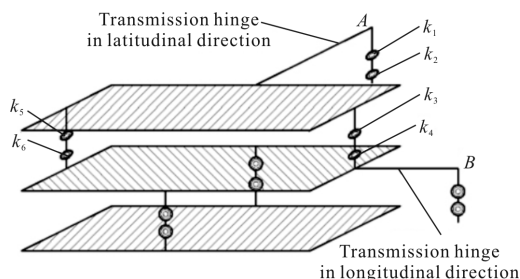


图 4 柔性镜架伪刚体模型

Fig.4 Pseudo-rigid -body model of flexure mirror bracket

链等效为线性扭簧,扭簧的劲度系数即为铰链绕 $z$ 轴的转动刚度,由于经度、纬度两个方向传动及驱动铰链的构成形式完全相同,因此选取上层纬度方向的铰链组合进行分析,假设纬度方向扭簧的劲度系数分别为 $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 和 $k_6$ ,其中 $k_1$ 和 $k_2$ 串联, $k_3$ 和 $k_4$ 串联, $k_5$ 和 $k_6$ 串联,三组串联铰链相互并联。根据弹簧串并联劲度系数的计算公式有:

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} + \frac{k_3 k_4}{k_3 + k_4} + \frac{k_5 k_6}{k_5 + k_6} \quad (4)$$

由于六个柔性铰链的参数完全相同,故可得:

$$k = 45.12\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad} \quad (5)$$

由图 5 可见,在经度和纬度方向传动铰链的最远端 A 点和 B 点距离转动中心的距离均为 $50\text{ mm}$ ,当驱动力为 $\pm 10\text{ N}$ 时,根据扭簧转角计算公式:

$$\theta = \frac{F \times 0.05}{k} \quad (6)$$

可计算得到柔性镜架经度、纬度两个方向调节范围可达 $1.27^\circ$ ,在理论分析方面,柔性铰链参数选择合理,满足设计要求。

在铰链转动的过程中,弧 $AA_1(BB_1)$ 与转角 $\theta$ 之间的关系如图 5 所示,图中 $x$ 表示线段 $AA_1$ 的长度,考虑柔性铰链转动角度微小,可近似认为弧 $AA_1(BB_1)$ 的长度与线段长度 $x$ 相等,可得:

$$x = \frac{\theta \times \pi \times 50\text{ mm}}{180^\circ} \quad (7)$$

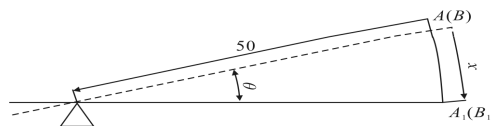


图 5 弧长与转动角度的关系示意图

Fig.5 Relationship between arc length and rotation angle

由于要求反射镜转动角度范围 $\theta=0.6^\circ$ ,故可得出 $x=0.523\text{ mm}$ 。即压电陶瓷电机使图 4 中的 A 点和 B 点移动 $0.523\text{ mm}$ 即可达到转动角度要求。

### 4 工作空间及应力分析

对机构进行有限元分析,步骤如下:

(1) 定义材料

选择柔性架体材料为 65Mn,基座材料为铝。

(2) 设置力和约束

图 6 为力示意图。在底座和传动铰链上分别施

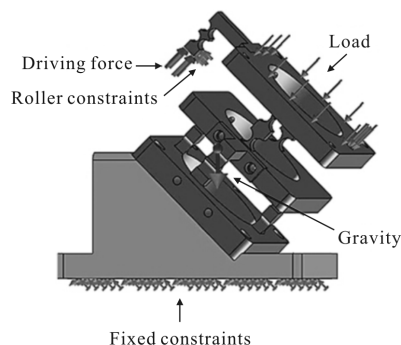


图 6 力与约束加载示意图

Fig.6 Sketch of forces and constraints

加固定约束和滚柱约束,固定整体结构,并保证传动铰链的与压电电机连接处只在约束平面内滑动。分别在经度、纬度方向传动铰链端部施加 10 N 驱动力,在激光反射镜固定板上施加 1 N 负载力,另外设置重力加速度为  $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

(3) 划分网格

图 7 为柔性架体的网格模型。在进行网格划分时,考虑到铰链最小截面尺寸与整体尺寸存在较大差异,且为机构中主要变形位置,为保证其精度,将柔性铰链最小截面处进一步细化。

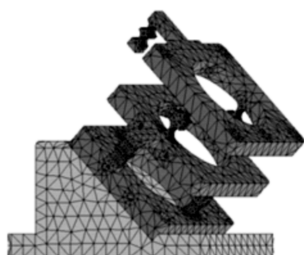


图 7 柔性架体的网格模型

Fig.7 Mesh model of flexure body

图 8 为纬度方向位移分析及应力分析结果。由图中可知施加  $\pm 10 \text{ N}$  的驱动力时,A 点的位移分别为  $0.497 \text{ mm}$  和  $-0.479 \text{ mm}$  (以施加推力时位移方向为正),总位移为  $0.976 \text{ mm}$ 。由公式(6)可知转动角度,变形过程中最大应力发生在柔性铰链最薄位置,最大应力值为  $241.8 \text{ MPa}$ ,在材料许用应力极限之内,故纬度方向满足使用要求。

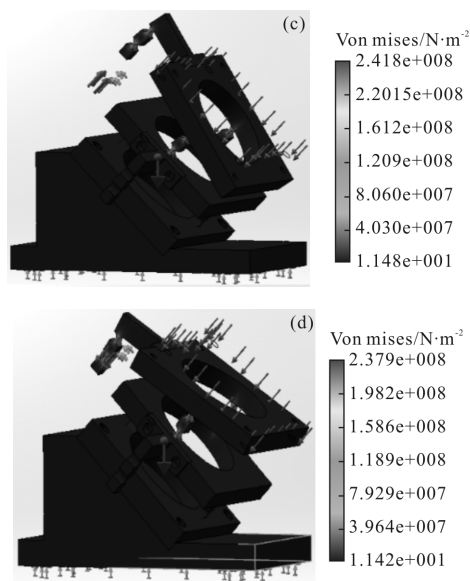
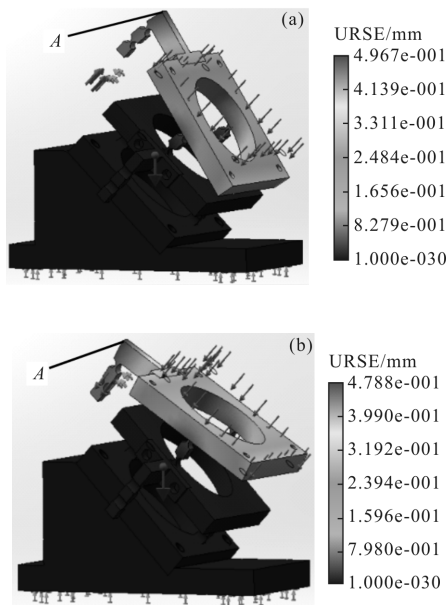
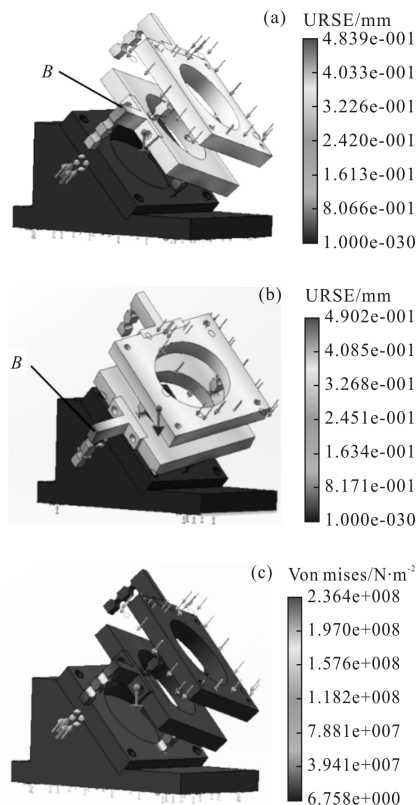


图 8 纬度方向位移与应力分析

Fig.8 Displacement and stress analysis in latitudinal direction

图 9 为经度方向位移分析及应力分析的结果,由图可知 B 点的位移分别为  $0.484 \text{ mm}$  和  $-0.490 \text{ mm}$ ,总位移为  $0.974 \text{ mm}$ 。由公式(6)可以得出此时反射镜转动角度  $\theta=1.12^\circ$ 。变形过程中最大应力值为  $237.8 \text{ MPa}$ ,低于材料许用应力,故在经度方向满足使用要求。



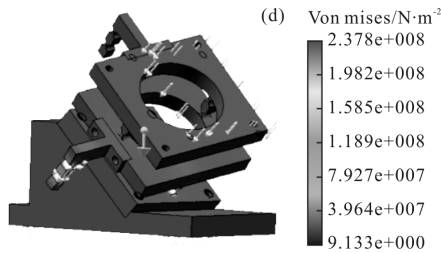


图 9 经度方向位移与应力分析

Fig.9 Displacement and stress analysis in longitudinal direction

仿真结果与理论分析结果存在一定差异，最大误差为 13.4%，这是由于理论分析建立在一定假设条件的基础上，其分析过程中认为除柔性铰链变形外其他部分均为刚形体，而仿真分析更贴近实际情况，镜架其他部分的变形会造成二者之间一定的差异，但误差值相对较小，仿真结果可以验证理论分析的准确性。

## 5 结论

设计了一种康普顿光源精密调节机械机构，该机构通过压电陶瓷电机驱动和柔性铰链传动，其可对激光束入射角度精密调节，使得激光束与高能电子束精确对撞产生康普顿散射，从而获得能量可调的反向  $\gamma$  射线。构建了该精密调节机构的仿真模型，利用伪刚体模型法对该机构进行建模，构建了该机构在经度和纬度方向的刚度模型和位移模型。通过有限元分析，对机构的理论位移与应力进行了校核，其结果验证了各项参数设计的合理性以及理论分析的准确性。该机构在  $\gamma$  探测器的精确定标应用中有一定的推广价值。

## 参考文献:

[1] Fast J E, Aalseth C E, Asner D M, et al. The multi-sensor airborne radiation survey (MARS) instrument [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 698: 152-167.

[2] Sun Kexu, Yi Rongqing, Jiang Shaoen, et al. Calibration of soft X-ray detection with synchrotron radiation [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, 28: 202-207. (in Chinese)

孙可煦, 易荣清, 江少恩, 等. 同步辐射应用于软 X 射线探测器的标定[J]. *高能物理与核物理*, 2004, 28: 202-207.

[3] Henry Seligman. Airborne gamma ray spectrometer surveying, technical reports series no.323: International atomic energy agency [J]. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation*, 1991, 43(3): 469-470.

[4] Ge Yuchen. Physical properties of laser-electron compton scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3094-3103. (in Chinese)

葛榆成. 激光-电子康普顿散射物理特性研究 [J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3094-3103.

[5] Xu Wang, Luo Wen, Huang Bosong, et al. Adjustable LCS source SINAP-III [J]. *Nuclear Physics Review*, 2012, 9(3): 253-258. (in Chinese)

徐望, 罗文, 黄勃松, 等. 能量连续可调 LCS 光源 SINAP-III[J]. *原子核物理评论*, 2012, 9(3): 253-258.

[6] Tian Ming, Feng Jinliang, Bai Suping, et al. Design of Precision Machinery [M]. Beijing: Peking University Press, 2010. (in Chinese)

田明, 冯进良, 白素平, 等. 精密机械设计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.

[7] Zhang Mingyue, Yang Hongbo. Design and research of moving mirror supporting mechanism based on large displacement flexible structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2595-2601. (in Chinese)

张明月, 杨洪波. 基于大位移柔性结构的动镜支撑机构设计及研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8): 2595-2601.

[8] Paros J M, Weisbord L. How to design flexure hinges[J]. *Machine Design*, 1965, 37(27): 151-157.

[9] Fu Jinjiang, Yan Changxiang, Liu Wei, et al. Stiffness optimization of two-axis flexible supporting platform for fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3378-3386. (in Chinese)

付锦江, 颜昌翔, 刘伟, 等. 快速控制反射镜两轴柔性支撑平台刚度优化设计 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3378-3386.

[10] Chen Guimin, Jia Jianyuan, Liu Xiaoyuan, et al. Study on the accuracy of flexure hinges [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 107-109. (in Chinese)

陈贵敏, 贾建援, 刘小院, 等. 柔性铰链精度特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 107-109.

[11] Zhao Lei, Liang Chao, Zhang Defu, et al. Forward kinematics of 3-RRR flexure parallel mechanism used in lens micro-adjustment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1373-1381. (in Chinese)

赵磊, 梁超, 张德福, 等. 基于 3-RRR 结构的光学元件柔顺微动调整机构的位姿正解[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1373-1381.