

# 四连杆柔性铰链机构在晶体单色器中的应用

邓小国<sup>1</sup> 周泗忠<sup>1</sup> 郭治理<sup>1</sup> 杨晓许<sup>1</sup> 江波<sup>1</sup> 夏绍建<sup>2</sup>

1 (中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119)

2 (中国科学院上海应用物理研究所, 国家同步辐射中心 上海 201800)

**摘要** 将单轴直圆柔性铰链的理论应用于铰链机构的研究, 建立起了四连杆铰链机构模型, 应用到弧矢聚焦晶体单色器的压弯机构中。通过控制输入量输出小角位移, 实现了同步辐射光束在弧矢方向的聚焦, 分析了机构变形时需要输入的驱动力, 在线测试聚焦光斑数据证实了模型的正确性。

**关键词** 小角位移, 单轴直圆铰链, 连杆机构

**中图分类号** TG156

自 20 世纪 60 年代中期以来, 具有无机械磨擦、无间隙、稳定性和运动灵敏度高等特点的柔性铰链, 在航空和航天等领域得到迅速发展, 实现了精密仪器仪表所需的小角位移, 其尺寸和体积也趋于微型化, 获得了高精度和稳定性<sup>[1,2]</sup>。

但是, 随着科技的不断发展, 单轴和双轴柔性铰链已满足不了实际需要。我们根据同步辐射光束线工程中光学自动聚焦系统的需求, 在单轴直圆铰链的基础上, 建立了一种新型小角位移四连杆柔性铰链机构模型。机构模型在输入直线位移时输出小角位移, 分析机构的性能, 在基于铰链机构的压弯模型<sup>[3]</sup>基础上, 实现了束线工程中光学元件的压弯聚焦, 最终给出了通过四连杆柔性铰链机构对光学元件压弯后的聚焦光斑。

角。摆臂  $L_a$  在  $L_2$  中点下侧处与  $L_2$  固定联结, 且始终垂直于  $L_2$ 。  $F$  是驱动器作用于摆臂  $L_a$  上的作用力, 作用力臂为旋转点  $O$  到驱动器作用点之间的距离, 长为  $l$ 。

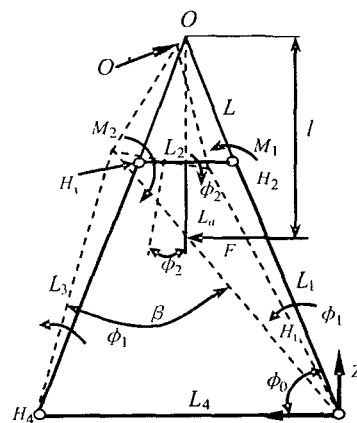


图 1 四连杆铰链机构示意图  
Fig.1 Schematics of hinge with four links.

## 1 模型的建立

### 1.1 模型的建立

在四连杆机构的四个铰接点上采用相同的单轴直圆铰链构成四连杆柔性铰链机构, 简化结构如图 1 所示。  $H_1$ 、  $H_2$ 、  $H_3$  和  $H_4$  是参数相同的四个单轴直圆铰链,  $t$ 、  $R$  和  $b$  分别为铰链的厚度、半径和长度, 其中铰链  $H_1$  在坐标原点。四根连杆  $L_i(i=1-4)$  通过四个铰链连接,  $L_1=L_3$ ,  $L_4$  固定不动。  $O$  点是以四连杆机构的顶杆  $L_2$  为底边、  $L_1$  和  $L_3$  所在直线为腰的等腰三角形  $\Delta OH_2H_3$  顶点,  $\Delta OH_2H_3$  其余两个边  $OH_2$ 、  $OH_3$  长度为  $L$ , 在连杆结构中三角形的三条边是刚性连接, 点  $O$ 、  $H_2$  和  $H_3$  之间的位置不发生相对变化。  $\phi_0$  是侧杆  $L_1$  与底杆  $L_4$  ( $X$  轴) 的初始夹

角。作用于摆臂  $L_a$  下端的驱动力, 在连杆机构的顶杆  $L_2$  上产生如图所示弯矩  $M_1$  和  $M_2$  后,  $L_2$  随  $\Delta OH_2H_3$  转动的角位移为  $\phi_2$ ,  $\Delta OH_2H_3$  绕旋转点  $O$  的角位移  $\phi_2$  定义为机构的输出角位移; 连杆  $L_1$  绕铰链  $H_1$  和  $H_2$  转动,  $L_3$  绕铰链  $H_3$  和  $H_4$  转动, 则定义  $L_1$  转动的角位移为输入角位移; 铰链机构的四个单轴直圆铰链均发生绕  $XZ$  平面法线的偏转, 如图中虚线所示为四连杆机构发生转动后的位置, 其中铰链  $H_1$  和  $H_4$  的偏转角大小为  $\phi_1$ , 根据几何关系我们推知: 铰链  $H_2$  和  $H_3$  发生的偏转角大小均为  $\phi_1$  与  $\phi_2$  之和, 且  $\phi_1$  与  $\phi_2$  之间有以下函数关系:

$$\varphi_2 = \pi - \varphi_1 - \arccos\left[\frac{L_2^2 + L_4^2 - 2L_1L_4 \cos(\varphi_0 + \varphi_1)}{2L_2\sqrt{L_1^2 + L_4^2 - 2L_1L_4 \cos(\varphi_0 + \varphi_1)}}\right] - \beta - \varphi_0 \quad (1)$$

其中

$$\beta = \arcsin\left[\frac{L_4 \sin(\varphi_0 + \varphi_1)}{\sqrt{L_1^2 + L_4^2 - 2L_1L_4 \cos(\varphi_0 + \varphi_1)}}\right]$$

## 1.2 机构旋转点偏差的计算

由图 1 的几何关系推知: 旋转点  $O$  在转动后产生的机构偏差为:

$$\begin{cases} \Delta O_x = L_1 \cos(\varphi_0 + \varphi_1) + L \cos(\varphi_0 - \varphi_2) - (L_1 + L) \cos \varphi_0 \\ \Delta O_z = L_1 \sin(\varphi_0 + \varphi_1) + L \sin(\varphi_0 - \varphi_2) - (L_1 + L) \sin \varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知: 在偏移角较小,  $\varphi_0$ 、 $L_1$  和  $L$  固定不变时, 机构偏差  $\Delta Fx$  与  $\varphi_1$  成单调非线性递减函数、与  $\varphi_2$  成非线性单调递增函数;  $\Delta Fz$  与  $\varphi_1$  成单调非线性递增函数、与  $\varphi_2$  成非线性单调递减函数关系。

## 1.3 机构的推力计算

由图 1, 驱动器输入的动力全部转化为弹性势能储存在铰链机构里。而机构输入的总能量为:

$$E = \int F ds \quad (3)$$

其中,  $s$  是驱动器推动摆臂  $L_a$  转动角位移  $\varphi_2$  对应的位移。由能量法可获得机构的势能:

$$E_d = \sum_{i=1}^4 \frac{1}{2} C \varphi_i^2 \quad (4)$$

其中,  $C=2Ebt^{2.5}/(9\pi R^{1/2})$  是铰链的转角刚度, 由于四个铰链结构参数相同, 铰链的转角刚度也相等;  $\varphi_i$  是第  $i$  个铰链的偏转角。根据能量守恒定律:

$$Fl\varphi_2 = E_d + M = \frac{EI}{R_s} + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^4 \varphi_i^2 \quad (5)$$

其中,  $M$  是施加在晶体上的弯矩,  $R_s$  是晶体弯曲半径,  $E$  是晶体的弹性模量,  $I$  是晶体截面对中性层的惯性矩。由式(4)、(5)可知: 晶体截面参数不变时, 晶体弯曲半径变小, 机构所需输入的驱动力与半径成反比关系变大; 在驱动力臂长度一定时, 驱动力与铰链结构参数  $t^2/R$  和四个铰链的偏转角  $\varphi_i$  成正比关系, 铰链厚度越薄、圆弧半径越大, 需要的驱动

力就越小; 四个单轴直圆铰链的偏转角越小, 驱动力也越小。

## 2 机构的应用

根据具体的四连杆柔性铰链机构应用环境, 确定旋转点与底座之间的距离, 选择合适的连杆参数  $\varphi_0$ 、 $L_1$  和  $L$ , 同时还需要结合铰链机构的角位移  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的范围, 保证机构的旋转点偏差最小。而铰链机构的角位移  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  的范围与铰链的材料属性有密切关系, 最大偏转角  $\varphi$  必须在材料的强度极限  $\sigma_b$  许可的范围之内。

图 2 是应用在弧矢聚焦晶体单色器中的四连杆柔性铰链机构实物结构, 结构参数:  $L_1=L_3=35$  mm,  $L_2=12.05$  mm,  $L_4=30.163$  mm,  $\varphi_0=75^\circ$ 。当驱动器的驱动力作用于铰链机构中间的摆杆上, 通过铰链机构和安装在铰链机构上底面的光学元件底座输出小角位移, 并转化传递上来的弯矩使光学元件发生弯曲变形, 实现光学元件对 X 光束的聚焦<sup>[3]</sup>。



图 2 铰链机构示意图  
Fig.2 Flexible hinge.

当  $L_1=35$  mm、 $L=23.27$  mm 时, 由 CAE 软件计算得到的  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  函数关系图, 及旋转点偏差与  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  之间的函数关系如图 3、4 所示。从图中可以看出, 机构输出的角位移增大, 机构连杆  $L_1$  和  $L_3$  的角位移也增大, 旋转点的机构偏差随  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  近似线性增大, 需要的驱动力也同时增大。所以, 要调整铰链机构的参数确保输出一定范围的角位移, 同时保证旋转点偏差和驱动力最小。

取铰链参数  $t=0.12$  mm、 $R=2.5$  mm、 $b=60$  mm、 $\varphi_2=0.05$  rad 时铍青铜材料的 FEA 应力云图如图 5 所示。应力最大点发生在机构的上端铰链厚度最小处, 最大等效应力为 1.1 GPa, 小于铍青铜的强度极限 1.15 GPa, 说明选择的机构参数合理, 机构安全可靠。

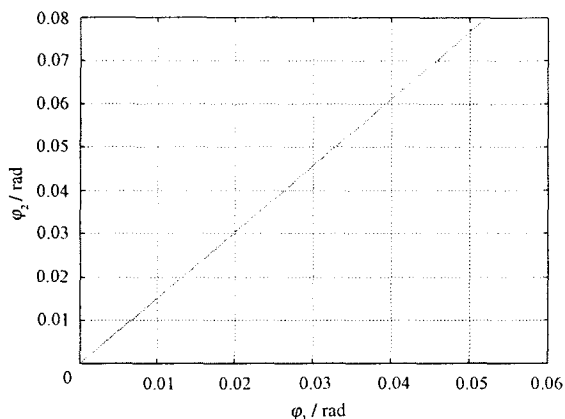


图 3  $\phi_1$  与  $\phi_2$  的函数曲线关系  
Fig.3 Curve between  $\phi_1$  and  $\phi_2$ .

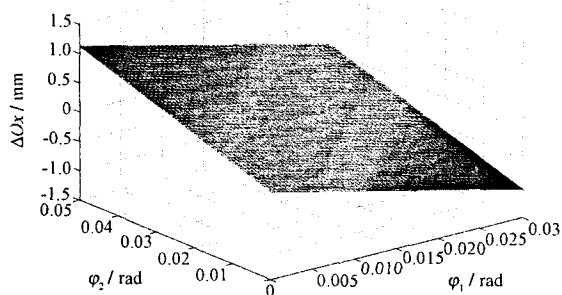


图 4 偏差  $\Delta O_x$  与  $\phi_1$  和  $\phi_2$  之间的函数关系  
Fig.4 Function  $\Delta O_x$  between  $\phi_1$  and  $\phi_2$ .

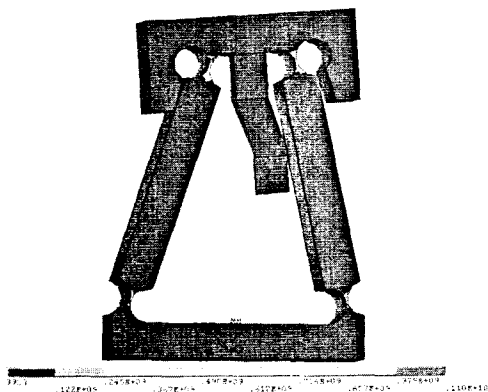


图 5  $\phi_2 = 0.05$  rad 时的 FEA 应力云图  
Fig.5 FEA stress nephogram at  $\phi_2 = 0.05$  rad.

### 3 结论

小角位移四连杆柔性铰链机构的研究提供了一种新型输入直线位移输出小角位移的途径，既可以应用在精密科学仪器中实现力矩的传递，亦可以应

用到国防等其他领域中对部件的姿态调整。从图 3 和图 4 可知：四连杆柔性铰链机构的侧杆和初始底角确定后，再根据与机构关联部件的空间尺寸确定旋转点与上底杆之间的距离，从而输出的小角位移和旋转点偏差也就确定。最后须根据图 4 在铰链机构材料强度极限范围内优化机构的参数，选择合理的输入输出角位移，使旋转点偏差最小。由机构的推力计算公式(5)可知：驱动力一般不超过 10 N，微位移器和压电陶瓷等驱动器都可作为动力源。

在束线工程中，已经成功将四连杆铰链机构应用到同步辐射科学仪器中，实现了单色器光学元件的聚焦。弧矢聚焦光斑尺寸测试在上海光源 X 射线衍射线站 BL14B1 上进行。单色器的人射光束尺寸为 48 mm (H)×3 mm (V)，经过单色器和后置聚焦镜聚焦后的光斑尺寸为 0.54 mm (H)×0.47 mm (V)，由 CCD 测量出口处光斑如图 6 所示。单色 X 光经过水平方向聚焦后，光斑尺寸压缩约 88 倍，与 SHADOW 追迹计算 10 keV 时样品处的理论光斑尺寸 0.5 mm×0.3 mm 相比，弧矢方向获得了较好的聚焦效果。

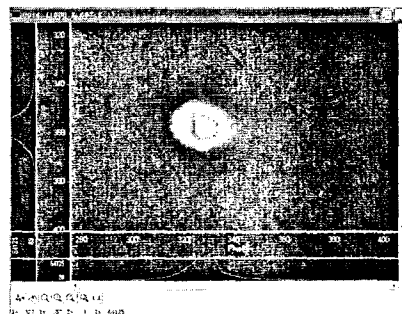


图 6 在线测试聚焦光斑  
Fig.6 Focusing facula measured on the beamline.

### 参考文献

- 1 李庆祥. 现代精密仪器设计. 北京: 清华大学出版社, 2004  
LI Qingxiang. Design of modern precision instruments. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
- 2 Paros J M, Weisbord L. Mach Des, 1965, 37(12): 151-159
- 3 邓小国, 周泗忠, 熊仁生. 核技术, 2007, 30(5): 411-413  
DENG Xiaoguo, ZHOU Sizhong, XIONG Rensheng. Nucl Tech, 2007, 30(5): 411-413

## A new limited angular motion single-axis flexure hinge four-connecting-rod mechanism

DENG Xiaoguo<sup>1</sup> ZHOU Sizhong<sup>1</sup> GUO Zhili<sup>1</sup> YANG Xiaoxu<sup>1</sup> JIANG Bo<sup>1</sup> XIA Shaojian<sup>2</sup>

*1 (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)*

*2 (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)*

**Abstract** The theory of single-axis flexure hinge is applied to a four connecting rods hinge mechanism, which has been used on the sagittally focusing double-crystal monochromator at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). It outputs limit angular motion with an inputting force. Mechanism system errors were analyzed by elastic deformation of mechanism, and inputting force was analyzed, too. Correctness of the mechanism has been validated in online tests of the focused beam.

**Key words** Limited angular motion, Single-axis flexure hinge, Connecting rod mechanism

**CLC** TG156