

## 空间相机快速反射镜的两轴柔性支撑结构设计

汪奎<sup>1,2</sup>, 辛宏伟<sup>1</sup>, 曹乃亮<sup>1</sup>, 石震<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 快速反射镜是空间相机中常用的像移补偿装置, 而支撑结构的机械特性将直接影响快速反射镜系统的响应速度及闭环带宽。以某近地轨道空间相机中的音圈电机驱动型快速反射镜为研究对象, 设计了基于十字型柔性铰链的两轴柔性支撑结构, 该结构具有空间利用率高、中心漂移小等优点。根据悬臂梁的挠曲线近似微分方程, 建立了柔性支撑结构两轴转动刚度的数学模型, 针对快速反射镜机构的谐振频率要求, 选择了柔性铰链的主要结构参数, 并利用有限元软件 MSC.Patran 对机构进行了模态分析, 分析结果表明, 快速反射镜机构在两个工作方向上的谐振频率分别为 18.6 Hz 和 18.7 Hz, 而其他非工作方向上的谐振频率均在 292.2 Hz 以上, 证明了柔性铰链结构参数的选择具有合理性。为了检验理论模型的准确性, 加工了快速反射镜的样机并搭建实验平台, 对机构的转动刚度和谐振频率进行了检测, 检测结果与理论分析得到的结果在允许的误差范围内具有一致性。

**关键词:** 结构设计; 柔性支撑; 模态分析; 快速反射镜; 转动刚度

**中图分类号:** V443.5; TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.1214005

## Design of two-axis flexible support structure for fast steering mirror in space cameras

Wang Kui<sup>1,2</sup>, Xin Hongwei<sup>1</sup>, Cao Nailiang<sup>1</sup>, Shi Zhen<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The fast steering mirror is a commonly used image motion compensation device in space cameras. The mechanical properties of the support structure will directly affect the response speed and closed loop bandwidth of the fast steering mirror system. A fast steering mirror driven by voice coil motor in a low earth orbit space camera was taken as the research object, and a two-axis flexible support structure based on cross-shaped flexible hinges was designed, which had the advantages of compact structure and small center drift. According to the approximate differential equation of cantilever beam deflection, the mathematical model of the rotational stiffness of the two-axis flexible support was established. The main structural parameters of the flexible hinge were selected for the resonant frequency requirements of the fast steering mirror mechanism, and a modal analysis of the mechanism was performed by using the finite element software MSC.Patran. The analysis results show that the resonant

收稿日期: 2019-06-09; 修订日期: 2019-07-05

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20170204029GX)

作者简介: 汪奎(1994-), 男, 硕士生, 主要从事空间相机光机结构的优化设计方面的研究。Email: lightningwings@qq.com

导师简介: 辛宏伟(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事空间相机光机结构方面的研究。Email: xinhwciomp@sina.com

frequency of the fast steering mirror mechanism in the two working directions is 18.6 Hz and 18.7 Hz, while the resonant frequencies in other non-working directions are above 292.2 Hz, which proves that the choice of flexible hinge structural parameters is reasonable. In order to test the correctness of the theoretical model, a prototype of the fast steering mirror was processed and the experimental platform was built. The rotational stiffness and resonant frequency of the mechanism were tested. The results of the test and the theoretical analysis are consistent within the allowable error range.

**Key words:** structure design; flexible support; modal analysis; fast steering mirror; rotational stiffness

## 0 引言

空间相机成像期间,卫星平台的前向飞行、扫描镜的横向扫描等因素引起的像移会严重降低遥感图像的分辨率,必须配备相应的像移补偿系统<sup>[1]</sup>。快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)是一种能实时改变反射镜偏转角、调整光学系统中光束传播方向的精密光学仪器,可以实现跟踪、定位和光学稳像等功能,在空间相机像移补偿系统中具有广泛的应用<sup>[2]</sup>。

快速反射镜主要由反射镜、柔性支撑、驱动电机、位移传感器、底座以及控制电路等部分构成,各组件紧密结合,共同影响整机的性能。要稳定、有效地补偿空间相机工作时的高频像移,快速反射镜应有较高的响应速度、定位精度和闭环带宽,并且结构应具有紧凑性。近年来,国内外对快速反射镜展开了深入研究,主要研究方向集中于反射镜的轻量化设计、柔性支撑结构设计、控制算法研究等。其中,柔性支撑的结构特性会直接影响快速反射镜的响应速度和闭环带宽,因此,高性能柔性支撑结构的设计一直是相关领域的研究重点<sup>[3]</sup>。

文中以某近地轨道空间相机中的音圈电机驱动型快速反射镜为研究对象,对其两轴柔性支撑结构的设计理论展开研究。其中,反射镜的口径为 70 mm,快速反射镜系统的闭环带宽要求为 200 Hz 以上。

## 1 柔性支撑结构的工作要求

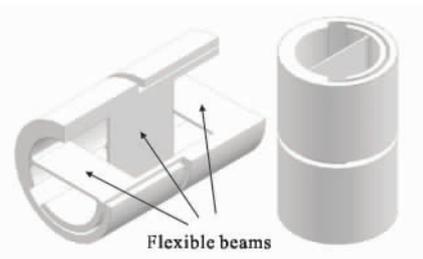
在快速反射镜中,柔性铰链的弹性变形为反射镜提供转动自由度,与传统铰链相比,柔性铰链避免了传动副之间的摩擦和运动时的空行程,灵敏度和线性度更高,被广泛应用于各种精密仪器和微位移

平台中。对于空间相机中的两轴反射镜,一般采用两组工作方向相互垂直的柔性快速铰链分别负责两个方向的转动,为了保证快速反射镜的响应速度和单轴回转精度,柔性铰链应具有以下几个特点<sup>[4]</sup>:

- (1) 在工作方向上的转动刚度较低;
- (2) 在非工作方向上的转动刚度较高;
- (3) 工作时的转动中心漂移较小;
- (4) 在热载荷作用下的尺寸变形较小;
- (5) 疲劳寿命较长。

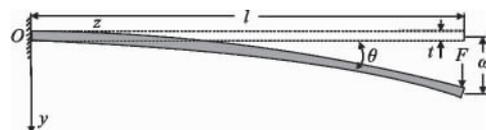
经过对比,此次设计选用了图 1(a)所示的十字型柔性铰链,十字型柔性铰链的柔性单元为垂直布置的三个柔性梁,在受到扭矩作用时可以输出特定转角,如图 1(b)所示。

为了补偿空间相机的高频像移,快速反射镜应



(a) 十字型柔性铰链的结构模型

(a) Structural model of cross-shaped flexible hinge



(b) 柔性梁的工作原理

(b) Working principles of the flexible beam

图 1 十字型柔性铰链及其柔性单元

Fig.1 Cross-shaped flexible hinge and its flexible unit

具有较高的闭环带宽。在设计柔性支撑结构时,一般要求柔性支撑的转动刚度较大,使结构的一阶谐振频率大于系统的控制带宽,避免结构在工作频率发生共振影响系统的稳定性。然而,较大的转动刚度意味着驱动电机需要有较大的峰值力驱动反射镜摆动,这无疑增加了快速反射镜机构的体积和设计成本,且不利于响应速度的提高。

因为快速反射镜工作方向上的谐振可以通过控制器引入速度反馈回路加以消除,而非工作方向上的谐振无法消去,所以,现在常采用的策略是允许结构在两个工作方向上的谐振频率小于闭环带宽,并通过控制算法对工作方向上的谐振进行抑制,而结构三阶以上的谐振频率应大于闭环带宽<sup>[5]</sup>。前两阶谐振频率 $f_1$ 和 $f_2$ 越小,用控制算法抑制结构谐振的难度越低,所需的电机驱动力越小;而三阶谐振频率越大,非工作方向上的结构谐振对控制系统的影响越小,一般要求:

$$f_{1,2} \leq \omega_b/4, f_3 \geq \sqrt{2} \omega_b \quad (1)$$

式中: $\omega_b$ 为快速反射镜系统的闭环控制带宽,此次设计的快速反射镜闭环带宽要求为 200 Hz。所以设计柔性支撑时,应保证快速反射镜机构满足谐振频率要求:

$$f_{1,2} \leq 50 \text{ Hz 且 } f_3 \geq 283 \text{ Hz} \quad (2)$$

## 2 柔性支撑结构的设计及分析

十字型柔性铰链的柔性环节为三个垂直布置的柔性梁,当受到扭矩作用时,柔性梁一端固定,另一端输出转角,在力学上可以简化为悬臂梁的挠曲模型<sup>[6-7]</sup>。如图 1(b)所示,柔性梁左端固定,右侧受集中力 $F$ 作用,柔性梁的主要结构参数为直梁厚度 $t$ 、宽度 $b$ 和长度 $l$ ,根据悬臂梁的挠曲线近似微分方程有:

$$\omega''(z) = \frac{M_x(z)}{EI} \quad (3)$$

式中: $E$ 为铰链材料的弹性模量; $I$ 为梁截面的惯性矩,对于矩形梁有 $I=bt^3/12$ ;  $M_x(z)$ 为柔性梁各截面受到的弯矩,  $M_x(z)$ 的大小为:

$$M_x(z) = F(1-z) \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(3)并进行二次积分得:

$$\omega = F/(6EI)(1-z)^2 + C_1z + C_2 \quad (5)$$

引入边界条件,由柔性梁左端固定有:

$$\omega|_{z=0} = 0, \omega'|_{z=0} = 0 \quad (6)$$

将上式代入公式(5)得到柔性梁的挠曲函数为:

$$\omega = \frac{F}{6EI} [(1-z)^3 + 3Fz - F] \quad (7)$$

因为柔性梁的输出转角 $\theta$ 的值非常小,有:

$$\theta = \frac{\omega|_{z=l}}{l} = \frac{Fl^2}{3EI} \quad (8)$$

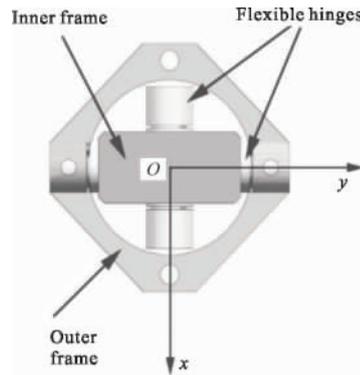
由此得到单个柔性梁的弯曲刚度为:

$$C = \frac{\theta}{M} = \frac{\theta}{Fl} = \frac{4}{Ebt^3} \quad (9)$$

每个十字型柔性铰链包含三个相互并联的柔性梁,则十字型柔性铰链工作方向上的转动刚度 $K_{\theta}$ 为三个柔性梁在工作方向上的弯曲刚度之和,即:

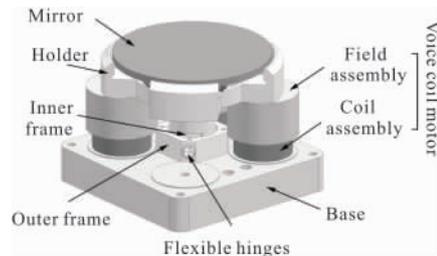
$$K_{\theta} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (10)$$

基于十字型柔性铰链,设计了快速反射镜的两轴柔性环节,如图 2(a)所示。两轴柔性环节由外框



(a) 两轴柔性环节

(a) Two-axis flexible link



(b) 柔性支撑结构模型

(b) Structural model of flexible support

图 2 快速反射镜的两轴柔性支撑结构

Fig.2 Two-axis flexible support structure of the fast steering mirror

架、内框架和四个十字型柔性铰链构成,具有绕  $x$  轴和  $y$  轴的两个转动自由度,每个转动自由度由两个并联的十字型柔性铰链提供,四个柔性铰链的结构参数完全相同。

图 2(b)为采用此柔性环节的快速反射镜两轴柔性支撑结构,反射镜通过环带胶接法固定在镜架上,镜架端部与柔性环节相连。镜架与内框架之间可以实现绕  $x$  轴的转动,内框架可以携带镜架一同绕  $y$  轴转动,外框架通过螺钉固定在快速反射镜的底座上。柔性支撑结构采用等相位布置的四个音圈电机(图中未全部画出)提供驱动力,外圈磁钢与镜架相连接,内圈固定在底座上。快速反射镜工作时,对角的两个音圈电机的输出力等大反向,一推一拉,共同驱动反射镜绕单轴的转动,四个电机同时工作实现反射镜的两轴偏摆。快速反射镜各部分结构的材料属性如表 1 所示。

表 1 快速反射镜主要结构的材料属性

Tab.1 Material properties of the main structures of the fast steering mirror

Structures	Materials	$\rho/g \cdot mm^{-3}$	$E/MPa$	$\mu$	Reference
Mirror	Fused quartz	$2.19 \times 10^{-3}$	$7.2 \times 10^4$	0.17	[8]
Holder	2A12	$2.78 \times 10^{-3}$	$7.5 \times 10^4$	0.28	[9]
Adhesive	RTV	$1.09 \times 10^{-3}$	2.2	0.49	[10]
Flexible link	Tc4	$4.43 \times 10^{-3}$	$1.09 \times 10^5$	0.34	[11]

此种柔性支撑结构的优点是两个转轴处在同一平面上,存在一个稳定的转动中心;结构紧凑,空间利用率较高;快速反射镜的两轴转动惯量很接近, $x$  向与  $y$  向之间仅相差一个极小的内框架的转动惯量,这使得笔者所在课题组在进行电机的选型以及控制系统的设计等相关工作时,可以根据结构对称性简化设计过程。

图 3 为快速反射镜在  $x$  轴方向上的简化动力学模型。其中  $K_{\theta_1}$  为单个柔性铰链在工作方向上的转动刚度, $K_{\theta_2}$  为单个柔性铰链在与工作方向垂直的方

向上的转动刚度, $J_x$  是反射镜、镜架、音圈电机外圈等摆动组件绕  $x$  轴的总转动惯量。表 2 列举了利用 SolidWorks 分析得到的快速反射镜摆动组件的质量属性。

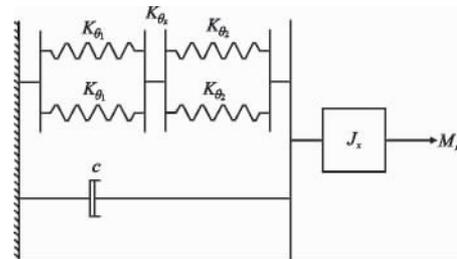


图 3 快速反射镜在  $x$  轴方向上的简化动力学模型

Fig.3 Simplified dynamic model of the fast steering mirror in the  $x$  axis direction

表 2 摆动组件的质量属性

Tab.2 Physical properties of the wobble assembly

Total mass/g	Moment of inertia around the $x$ axis $J_x/kg \cdot mm^2$	Moment of inertia around the $y$ axis $J_y/kg \cdot mm^2$
214.1	198.15	198.20

根据刚度合成规则,柔性支撑结构的两轴转动刚度为:

$$K_{\theta_x} = K_{\theta_y} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\theta_1} + K_{\theta_1}} + \frac{1}{K_{\theta_2} + K_{\theta_2}}} \quad (11)$$

由于柔性铰链非工作方向上的转动刚度远大于工作方向,即  $K_{\theta_1} \gg K_{\theta_2}$ ,故有:

$$K_{\theta_x} = K_{\theta_y} \approx 2K_{\theta_1} \quad (12)$$

由公式(12)可知,柔性支撑结构的两轴转动刚度约为柔性铰链工作方向上的转动刚度的两倍。根据图 3 中的简化动力学模型,因为快速反射镜机构采用了无传动摩擦的柔性铰链,转动时的阻尼比  $c$  的值非常小,结构的一阶谐振频率  $f_1$  约等于结构的固有频率,即:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\theta_x}}{J_x}} \\ f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\theta_y}}{J_y}} \approx f_1 \end{cases} \quad (13)$$

根据公式(2)中快速反射镜的谐振频率要求,试

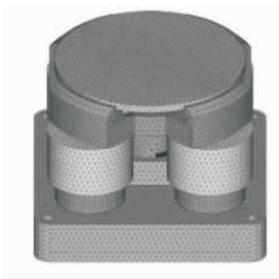
取十字型柔性铰链三个柔性梁的宽度分别为 3、4、3 mm,厚度  $t$  为 0.28 mm,铰链内径(即柔性梁长度)为 4.5 mm,外径为 6.35 mm,则由公式(9)~(10)及公式(12)求得快速反射镜机构的两轴转动刚度为:

$$K_{\theta} = K_{\theta_0} = 2658.6 \text{ N} \cdot \text{mm} \cdot \text{rad}^{-1} \quad (14)$$

快速反射镜机构前两阶谐振频率的值为:

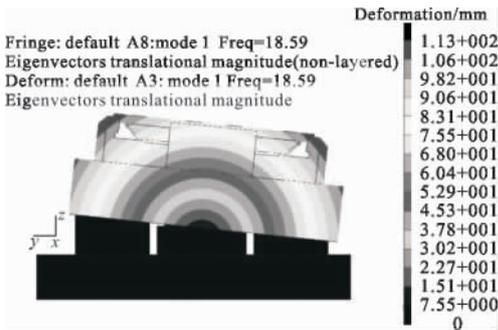
$$f_1 \approx f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2658.6 \times 10^{-3}}{198.2 \times 10^{-6}}} \approx 18.4 \text{ Hz} \quad (15)$$

为了检验十字型柔性铰链的参数选择是否合理,利用有限元软件 MSC.Patran 对快速反射镜机构进行了模态分析。机构的有限元模型如图 4(a)所示,



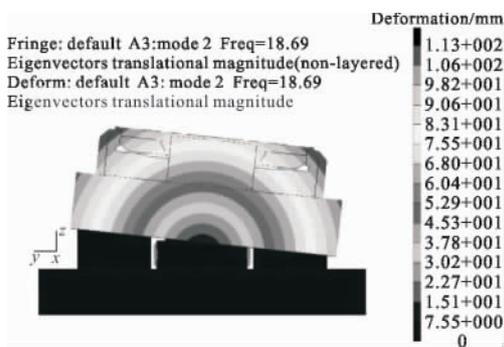
(a) 机构的有限元模型

(a) Finite element model of the mechanism



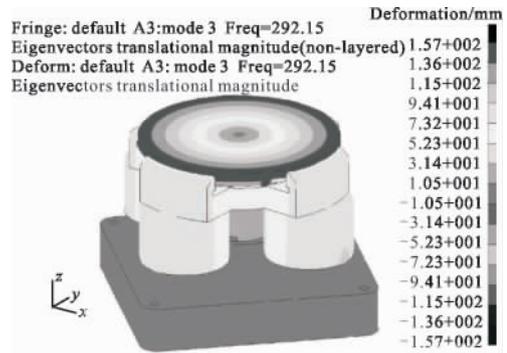
(b) 机构的一阶振型

(b) The first-order mode of the mechanism



(c) 机构的二阶振型

(c) The second-order mode of the mechanism



(d) 机构的三阶振型

(d) The third-order mode of the mechanism

图 4 快速反射镜机构的模态分析

Fig.4 Modal analysis of the fast steering mirror mechanism

赋予各部分结构的材料属性见表 1。底座的四个螺孔施加了固定约束,提交计算后得到图 4(b)~(d)所示的振型图。

将模态分析得到的快速反射镜机构的各阶谐振频率和振型汇总,整理出表 3。分析表 3 可以得出,快速反射镜机构除了在两个工作方向上的谐振频率较低以外,在其他各方向都具有较高的谐振频率。将表中的数据与公式(2)对比可知,柔性支撑的刚度可以满足快速反射镜机构的谐振频率要求,十字型柔性铰链尺寸参数的选择具有合理性。若采用不完全微分法等控制算法抑制快速反射镜机构在两个工作方向上的谐振,则系统的第一个谐振峰将会出现在 292.2 Hz 左右,不会对闭环控制系统在 200 Hz 带宽内的稳定性造成影响。

表 3 快速反射镜机构的模态分析结果

Tab.3 Modal analysis results of the fast steering mirror mechanism

Resonance order	Frequency/Hz	Vibration mode
First	18.6	Rotating around the y axis
Second	18.7	Rotating around the x axis
Third	292.2	Rotating around the z axis

### 3 实验检测

前面对快速反射镜的两轴柔性支撑结构进行了详细的设计与分析,为了测试快速反射镜机构的机械性能以及验证理论模型的准确性,加工了快速反射镜机构的实验样机,如图 5 所示。此节将对快速反射镜的转动刚度及谐振频率进行测试,并与理论计算得到的结果进行对比。

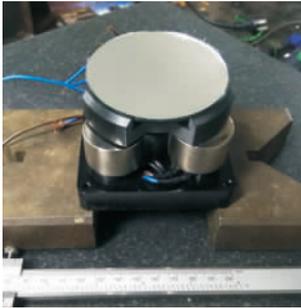


图 5 快速反射镜机构的实验样机

Fig.5 Experimental prototype of the fast steering mirror mechanism

图 6 为检测柔性支撑结构两轴转动刚度的实验平台,图中直角卡钳夹持快速反射镜的底座固定在花岗岩平台上,砝码通过尼龙线和定滑轮对镜架施加拉力,拉力的作用点到柔性铰链转动中心的距离  $a$  为 36 mm,调整高度尺的高度使拉力的方向水平,则可通过公式(16)计算柔性支撑结构受到的扭矩:

$$M=mg \cdot a \quad (16)$$

式中:  $m$  为砝码的质量;  $g$  为引力常量。

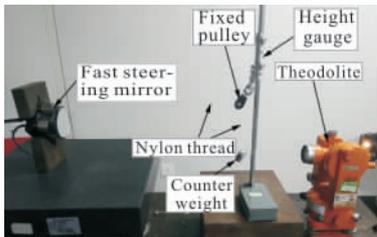


图 6 快速反射镜机构的转动刚度测试

Fig.6 Rotational stiffness test of the fast steering mirror mechanism

对镜架施加绕  $x$  轴方向的扭矩,用经纬仪测量反射镜在特定扭矩下的偏转角度。改变砝码的规格,重复测量多组数据并记录在表 4 中。测完  $x$  轴之后,改变快速反射镜的夹持方向,用同样的方法测反

射镜绕  $y$  轴的转动刚度,测量结果汇总如下。

表 4 机构两轴转动刚度的测试结果

Tab.4 Test results of the two-axis rotational stiffness of the mechanism

Counterweight of mass $m/g$	Deflection angle of $x$ direction	Counterweight of mass $m/g$	Deflection angle of $y$ direction
10	4'28"	10	4'37"
20	9'29"	20	9'34"
30	14'6"	30	14'40"
40	18'49"	40	19'21"
50	23'30"	50	24'1"
60	28'	60	27'40"
70	33'10"	70	33'19"
80	37'27"	80	38'18"
90	42'18"	90	43'5"
100	47'15"	100	47'57"

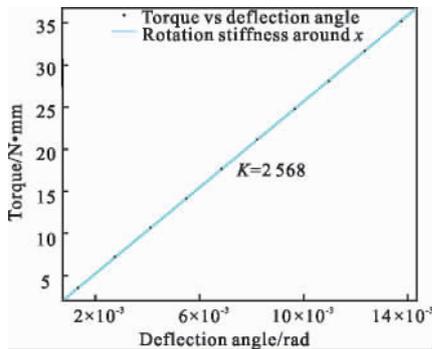
将表中的数据分别转换成扭矩和弧度,导入 MATLAB 中绘制出散点图,如图 7(a)、(b)所示。可以看到散点大致呈直线分布,用最小二乘法对散点进行线性拟合,拟合结果如图 7 所示。

整理得到快速反射镜机构的两轴转动刚度为:

$$\begin{cases} K_{\theta_x} = 2\ 568\ \text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{rad}^{-1} \\ K_{\theta_y} = 2\ 535\ \text{N} \cdot \text{mm} \cdot \text{rad}^{-1} \end{cases} \quad (17)$$

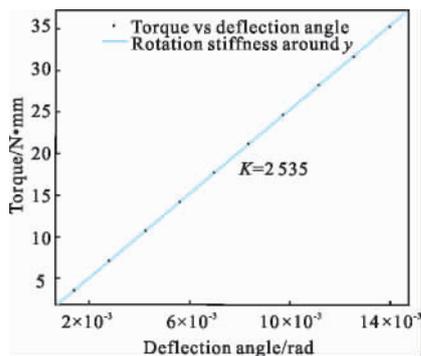
与理论计算得到的两轴转动刚度相比,实验测得的两轴转动刚度比理论值稍小,相对误差在 5% 以内。误差存在的原因是快速反射镜的简化动力学模型忽略了非工作方向柔性铰链的影响,使计算得到的转动刚度稍大。

为了检验模态分析结果的准确性,对快速反射镜机构采取了振动实验,如图 8 所示。快速反射镜的底座固定在垂直振动台上,加速度传感器与反射镜相连,在 0~200 Hz 内对机构进行 1.5  $g$  定加速度扫频,得到结构的一阶谐振频率为 19.2 Hz,与模态分析得到的结果相符合。



(a) x 方向转动刚度

(a) Rotational stiffness around x axis



(b) y 方向转动刚度

(b) Rotational stiffness around y axis

图 7 两轴转动刚度的线性拟合结果

Fig.7 Linear fitting results of two-axis rotational stiffness

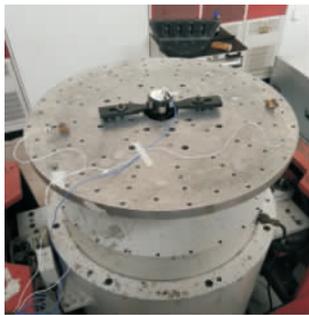


图 8 快速反射镜机构的振动实验

Fig.8 Vibration test of fast steering mirror mechanism

## 4 结论

文中以某近地轨道空间相机中的音圈电机驱动型快速反射镜为研究对象, 设计了基于十字型柔性铰链的两轴柔性支撑结构。根据空间相机快速反射镜的实际工作条件, 提出了快速反射镜机构的谐振频率要求, 为柔性支撑的参数设计提供了依据。基于悬臂梁的挠曲线近似微分方程, 推导了十字型柔

性铰链转动刚度与主要结构参数之间的函数关系, 并由此建立了快速反射镜的简化动力学模型和柔性支撑两轴转动刚度的数学模型, 利用 SolidWorks 分析了快速反射镜机构中摆动组件的转动惯量, 根据柔性支撑的谐振频率要求, 预选了十字型柔性铰链的结构参数。

为了快速反射镜机构的谐振频率是否满足设计要求, 利用有限元软件 MSC.Patran 对其进行了模态分析。分析结果表明, 机构在两个工作方向上的谐振频率分别为 18.6 Hz 和 18.7 Hz, 而其他非工作方向上的谐振频率均在 292.2 Hz 以上, 证明了柔性铰链结构参数的选择具有合理性。为了验证理论模型的准确性, 加工了快速反射镜的实验样机并搭建实验平台, 检测了机构的转动刚度和谐振频率, 实验结果与理论分析所得的结果在允许的误差范围内具有一致性。

## 参考文献:

- [1] Yao Chengkang, Li Qinghui, Hu Lin. Analysis of image motion of satellite remote sensing camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 901-904, 914. (in Chinese)  
姚呈康, 李庆辉, 胡琳. 星载遥感相机像移分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 901-904, 914.
- [2] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)  
周子云, 高云国, 邵帅, 等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1547-1554.
- [3] Xu Xinhang, Yang Hongbo, Wang Bin, et al. Research on key technology of fast-steering mirror [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1095-1103. (in Chinese)  
徐新行, 杨洪波, 王兵, 等. 快速反射镜关键技术研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1095-1103.
- [4] Lu Yafei, Fan Dapeng, Fan Shixun, et al. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2574-2582. (in Chinese)  
鲁亚飞, 范大鹏, 范世珣, 等. 快速反射镜两轴柔性支撑设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2574-2582.
- [5] Xu Ning. Research on fast steering mirror based on compliant mechanism [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)

- 徐宁. 基于柔性机构的快速反射镜研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [6] Yong Y K, Lu T F. Kinetostatic modeling of 3-RRR compliant micro-motion stages with flexure hinges [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2009, 44(6): 1156-1175.
- [7] Zhao Lei, Gong Yan, Hua Yangyang. Compliance matrix analysis of corner-filletted flexure hinge [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(18): 2462-2468. (in Chinese)  
赵磊, 巩岩, 华洋洋. 直梁圆角形柔性铰链的柔度矩阵分析 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2462-2468.
- [8] Qi Fanya. Materials of space optical [J]. *Materials Reports*, 1993 (4): 39-44. (in Chinese)  
齐亚范. 空间光学材料 [J]. 材料导报, 1993(4): 39-44.
- [9] Wang Rudong, Tian Wei, Wang Ping, et al. Effect of temperature change on the surface accuracy of bonded lens [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(8): 0808002. (in Chinese)  
王汝冬, 田伟, 王平, 等. 温度变化对胶粘结透镜面形精度的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0808002.
- [10] Guo Junli, An Yuan, Li Zongxuan, et al. Bonding technique of mirror components in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0304004. (in Chinese)  
郭骏立, 安源, 李宗轩, 等. 空间相机反射镜组件的胶结技术 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0304004.
- [11] Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 83-88. (in Chinese)  
徐宏, 关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 83-88.