

DOI: DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804315

具有两个双轴柔性铰链的快速反射镜设计*

徐新行¹, 张贵明², 李冠楠¹, 刘星洋^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033;
2. 许昌职业技术学院 许昌 461000; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了改善快速反射镜(FSM)对车载运动平台振动、冲击环境的适应性,设计了一款具有中心和四周两个双轴柔性铰链支撑结构的FSM。在明确车载跟瞄发射系统应用需求的基础上,分别对FSM的平面反射镜、驱动元件、测角元件和柔性铰链进行了详细设计和选择。采用两两差分的方法对四通道电涡流传感器的测量噪声进行抑制,有效保证了FSM的测量精度。采用有限元分析的方法对中心和四周柔性铰链的模式和刚度进行分析与优化设计,有利保证了FSM控制带宽的提高。完成FSM的精密加工、装调后,对系统的指向精度、控制带宽和阶跃响应时间进行了实验测试分析。结果表明,所设计FSM的指向精度优于1",闭环控制带宽大于200 Hz,阶跃响应时间约为10 ms,满足车载平台系统的应用需求。

关键词: 快速反射镜; 柔性铰链; 指向精度; 控制带宽; 阶跃响应时间

中图分类号: TH122 TG502.33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 416.20

Design of fast steering mirror with two double-axis flexure hinges

Xu Xinhang¹, Zhang Guiming², Li Guannan¹, Liu Xingyang^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Xuchang College of Vocational Technology, Xuchang 461000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To improve the adaptability to vibrancy and impact condition on the vehicle platform, a fast steering mirror (FSM) with the center and outer double-axis flexure hinges is designed. Based on the basis of application requirements of the vehicle track-launch system, the lightweight mirror, actuators, sensors for angle and flexure hinges of FSM are designed and selected, respectively. The eddy current sensors with four channels, which measurement noise is suppressed by using difference data of two channels, are used to improve measurement accuracy of FSM. Mode and stiffness of the combined hinges with center and outer flexure hinges are analyzed by the finite element method and two flexure hinges are designed optimally, which are beneficial to improve the control bandwidth of FSM system. Finally, the pointing precision, control bandwidth and step response time of FSM are tested respectively after fine manufacturing and assembling. Experimental results show that the pointing error of the FSM is less than 1", the control bandwidth is more than 200 Hz, and the step response time is about 10 ms. Hence, the designed FSM with two double-axis flexure hinges can meet the application requirements of vehicle track-launch system.

Keywords: fast steering mirror (FSM); flexure hinge; pointing precision; control bandwidth; step response time

0 引言

光电跟瞄发射系统与普通的测量系统不同,它不仅要求系统能在红外告警或雷达设备的引导下,快速地实现空中可疑目标的捕获与跟踪,而且要求系统必须达到

足够的跟瞄精度,才能实现发射激光对跟踪目标的精确打击或干扰^[1-4]。一般要求系统的跟瞄精度小于光束发散角的1/5~1/6,即要求系统的跟瞄精度达到角秒级。由于大型光电跟踪转台存在惯量大、频带窄、响应慢等缺陷,无法直接达到如此高的跟瞄精度。最常用的解决方法是在主跟踪转台粗跟踪的基础上,引入一套快速反射

收稿日期: 2018-10-13 Received Date: 2018-10-13

* 基金项目: 吉林省科技发展计划(20180520185JH)项目资助

镜(fast steering fast, FSM)来实现光电跟瞄发射系统对空中运动目标的精确跟瞄与打击^[5-8]。

FSM 是通过控制平面反射镜的位置,进而精确控制光束传播方向的精密光学装置,具有转动惯量小、响应速度快、指向精度和角度分辨力高等突出优点,目前已被广泛应用于自适应光学、远程激光通信、复合轴精密跟瞄和高精度激光合束等领域^[9-13]。现阶段国内外针对 FSM 的研究主要集中于单一柔性铰链支撑结构^[14-18]。这类 FSM 具有结构简单、无摩擦、响应速度快等优点,但也存在包括反射镜在内的所有运动载荷全部由单一柔性铰链支撑、系统承载能力相对有限等不足。多年来,为了提高柔性 FSM 的承载能力,国内外学者针对柔性铰链的结构开展了大量的研究工作,并设计出各种各样的柔性铰链。Cho 等^[9]为 GMT 大型望远镜系统的快速响应次镜设计了类似“风车”形状的柔性弹片; Ni 等^[2]为激光通信系统的 FSM 设计了双曲线直圆混合型柔性铰链; Aigouy 等^[21]为光学指向系统的磁性 FSM 设计了类似“旋涡”形状的柔性片铰链; Zhu 等^[22]为激光跟踪系统的两维 FSM 设计了四周分布柔度的柔性环铰链。尽管在一定程度上改善了 FSM 的承载能力,但是当面对机动平台高振动、大冲击等恶劣的工作环境时,这种具有单一柔性铰链的 FSM 的工作精度与稳定性仍会大幅度下降。因此,在目前 FSM 被越来越多地应用于车载、机载等机动平台的大背景下,开展高承载、高环境适应性、双柔性铰链结构 FSM 的研究,具有十分重要的科学意义和实用价值。

本文采用中心与四周两个双轴柔性铰链来实现 FSM 支撑基座对运动部分的柔性支撑,不仅保留了柔性 FSM 无摩擦、无空回、高精度、高频响的优点,而且有利于提高 FSM 的承载能力及其在机动平台上使用时的稳定性。这种具有两个双轴柔性铰链 FSM 的成功研制,也将为其他大口径、高带宽 FSM 的设计提供一种新思路。

1 FSM 的工作原理与设计要求

图 1 所示为具有两个双轴柔性铰链 FSM 的结构原理。新型 FSM 主要由平面反射镜、支撑基座、中心柔性铰链、四周柔性铰链、音圈电机和测量传感器等组成。为了最大程度地减小 FSM 运动部分的转动惯量,本设计一方面省略了反射镜支撑板,采用音圈电机直接驱动平面反射镜的结构形式;另一方面,选择音圈电机的线圈与平面反射镜相连组成 FSM 的运动部分,选择音圈电机的磁座与支撑基座相连组成 FSM 的不动部分(音圈电机线圈的质量约是磁座的 1/4)。此外,该型 FSM 的另一大技术特点就是运动部分与不动部分之间通过中心与四周两个

双轴柔性铰链实现柔性连接,大幅度提高了 FSM 的承载能力与工作稳定性。平面反射镜在音圈电机的推、拉作用下,依靠两个双轴柔性铰链的弹性变形实现两维小角度偏转。测量传感器通过实时监测平面反射镜的位置,实现对其偏转角度的间接测量,进而完成对 FSM 的闭环控制。

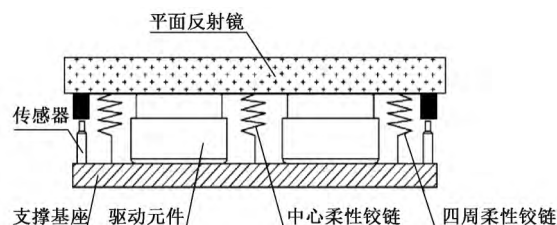


图 1 具有两个双轴柔性铰链 FSM 的结构原理

Fig.1 Principle diagram of FSM with two flexure hinges

根据车载光电跟瞄发射系统的功能需求及其所传输激光的光斑尺寸与发散角,确定 FSM 的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 FSM 的主要性能指标

Table 1 Performing requirements of the FSM

序号	项目	指标
1	通光口径/mm	$\geq \Phi 85$
2	行程/mrad	$\pm 2(X, Y \text{ 轴})$
3	角分辨力/ μmrad	优于 5
4	控制带宽/Hz	≥ 200
5	阶跃响应时间/ms	≤ 10

2 FSM 的设计与实现

为了实现表 1 所示 FSM 的主要技术指标,本文重点对 FSM 的平面反射镜、驱动元件、测角元件、柔性铰链控制系统进行详细设计与选择。

2.1 平面反射镜的设计

平面反射镜作为影响 FSM 导光质量与响应速度的重要工作元件,必须具有足够高的面形精度和尽量小的转动惯量。结合 FSM 无反射镜支撑板,平面反射镜直接与柔性铰链、驱动电机相连接的技术特点,本文采用导热性能好、机械加工性能优异的超硬铝 LC9 为基底材料制作平面反射镜,并采用背部开槽的方式对反射镜进行减重设计。图 2 所示为完成轻量化设计后平面反射镜的结构外形。本设计对平面反射镜有效工作面以外的部分进行倒角处理,以尽量减轻反射镜的重量。平面反射镜的加强筋围绕柔性铰链和驱动电机的连接孔进行均匀布

置,以减小各连接孔对反射镜结构刚度的不利影响。表2所示为平面反射镜的主要结构参数。

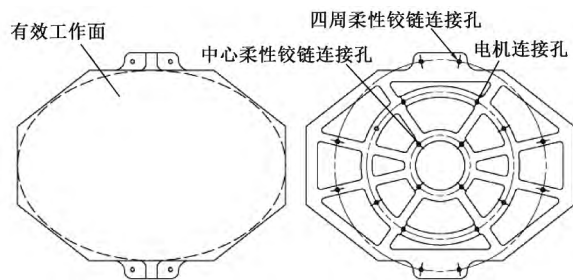


图2 平面反射镜的结构外形

Fig.2 The outline structure of the mirror

表2 平面反射镜的主要结构参数

Table 2 Structure parameters of the mirror

序号	项目	参数
1	外形尺寸/mm	120×107×12
2	加强筋宽/mm	5
3	加强筋高/mm	7
4	重量/g	196
5	轻量化率/%	35.1

为了保证平面反射镜足够的面形精度,在完成反射镜的机械外形加工后,在镜坯表面均匀镀覆镍过渡层;然后,再对工作表面的镍层进行精密抛光;待抛光精度达标后,在反射镜的工作表面镀覆高反射率、抗强激光损伤的反射膜系。

2.2 驱动元件的选择

在FSM常用的驱动元件中,压电陶瓷的抗剪切性能较差,而且存在驱动电压高、伸缩行程小、迟滞现象明显等缺陷,因此,在实验室场合应用较多。音圈电机不仅驱动电压低、运动行程大、响应速度快,而且环境适应性强,因此,被越来越多地应用于FSM的制作中,尤其适合存在冲击、振动的场合。根据车载机动平台恶劣的工作环境,本研究选择直线式音圈电机作为驱动元件。

由FSM的结构原理可知,FSM具有固定的回转中心,因此要实现其二维偏转,每个轴线上至少需要1个驱动元件。本研究选用4个相同型号的音圈电机以“单轴双驱动”的方式为FSM提供直线动力,不仅保证了FSM大的驱动力矩,而且对系统的运动平稳性也十分有利。4个音圈电机在适应反射镜面尺寸的前提下,布置在尽可能大的节圆上,进一步保证了FSM大的驱动力矩,如图3所示。

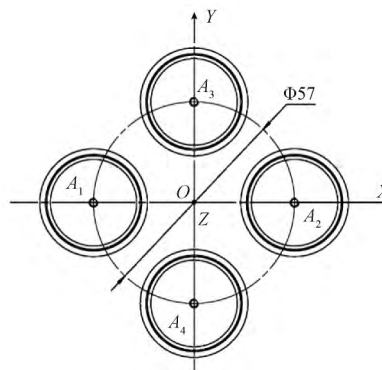


图3 直线式音圈电机的位置排布

Fig.3 Position of the linear voice coil actuators

在音圈电机的选型方面,除了考虑外形尺寸适合狭小的安装空间外,峰值驱动力是另外一项重要的选择标准。音圈电机不仅要驱动柔性铰链变形产生需求的位移,还要克服FSM运动部分的惯性阻力,最终实现FSM在一定角度范围内的高频、快速偏转。音圈电机所需要的峰值驱动力可由式(1)求出。

$$F_{\max} \geq \frac{K_1 \cdot \theta_{\max} + K_2 \cdot \theta_{\max} + J \cdot (2\pi f_c)^2 \theta_{\max}}{2R} \quad (1)$$

式中: $F_{\max}$ 为音圈电机的峰值驱动力; K_1 为中心柔性铰链工作方向的刚度; K_2 为四周柔性铰链工作方向的刚度; $\theta_{\max}$ 为FSM的最大转角; J 为FSM运动部分的转动惯量; f_c 为FSM系统的工作带宽; R 为音圈电机到Z轴的距离。

根据经验要求两个柔性铰链在工作方向的刚度不超过 $50 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, FSM运动部分的转动惯量不超过 $500 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ 。代入式(1)可得: $F_{\max} \geq 29.5 \text{ N}$, 据此选择音圈电机的性能参数如表3所示。

表3 所选音圈电机的主要性能参数

Table 3 Performances of linear voice coil motor

序号	项目	参数
1	外形尺寸/mm	Φ30×40
2	行程/mm	6
3	工作间隙/mm	0.5
4	峰值推力/N	40.5
5	线圈重量/g	32
6	磁座重量/g	128

2.3 测角元件的选择

在FSM系统中,由于反射镜绕稳定的回转中心回转,因此常采用线位移传感器来实现FSM偏转角度的间接测量。目前,用于FSM角度监测的微位移传感器主要有直线光栅尺、电容传感器和电涡流传感器。其中,用于FSM的直线光栅尺一般为接触式测量,它不仅会给FSM

的运动增加额外阻尼,进而限制系统响应速度的提高,而且体积偏大,不利于FSM的小型化。电容传感器和电涡流传感器二者的技术原理类似,都可用于微小位移的非接触式精密测量。但电容传感器不仅存在严重的温度漂移现象,而且对环境的洁净程度要求较高,因此不适合在环境条件较为恶劣的车载平台上使用。电涡流传感器不仅响应速度快、测量分辨率高,而且环境适应性强,在 $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,仍然保持着稳定的测量精度。此外,现阶段国产电涡流传感器已日趋成熟,相对于高精度电容传感器仍依赖进口的现状而言,成本更低,因此被越来越多的应用于国内FSM的制作中。本研究选用四通道差分式电涡流传感器来实现FSM位置的实时监测,通过两两差分的方式对传感器的测量噪声进行抑制,可获得更高的测量精度。所选用电涡流传感器的主要性能参数如表4所示。

表4 电涡流传感器的主要性能参数

Table 4 Performances of the eddy current sensor

序号	项目	参数
1	探头尺寸/mm	M5×30
2	行程/mm	± 0.5
3	响应频率/kHz	0~20
5	分辨率/ μm	0.1
6	灵敏度/ $(\text{mV}\cdot\mu\text{m}^{-1})$	40

如图4所示,4个电涡流传感器探头布置在X、Y轴线的角平分线上,不仅可以最大程度地压缩FSM的体积,而且FSM在每一维方向的偏转角度均由4个电涡流传感器的测量结果经过两次差分处理获得,有效提高了FSM的测量精度。FSM在每一维方向上偏转角度的具体计算过程如下:

$$M = \frac{C_1 + C_3}{2} \quad (2)$$

$$N = \frac{C_2 + C_4}{2} \quad (3)$$

$$C_X = \frac{M + N}{2} \quad (4)$$

$$C_Y = \frac{M - N}{2} \quad (5)$$

$$\theta_X = \frac{C_X}{r} = \frac{M + N}{2r} \quad (6)$$

$$\theta_Y = \frac{C_Y}{r} = \frac{M - N}{2r} \quad (7)$$

式中: C_1 为第1路电涡流传感器(S_1)的测量值; C_2 为第2路电涡流传感器(S_2)的测量值; C_3 为第3路电涡流传感器(S_3)的测量值; C_4 为第4路电涡流传感器(S_4)的测

量值; M 为第1组传感器(S_1 、 S_3)的差分结果; N 为第2组传感器(S_2 、 S_4)的差分结果; C_X 为FSM绕X轴偏转时传感器处的位移; C_Y 为FSM绕Y轴偏转时传感器处的位移; r 为电涡流传感器到(X或Y)轴线的距离; θ_X 为FSM绕X轴的偏转角度; θ_Y 为FSM绕Y轴的偏转角度。

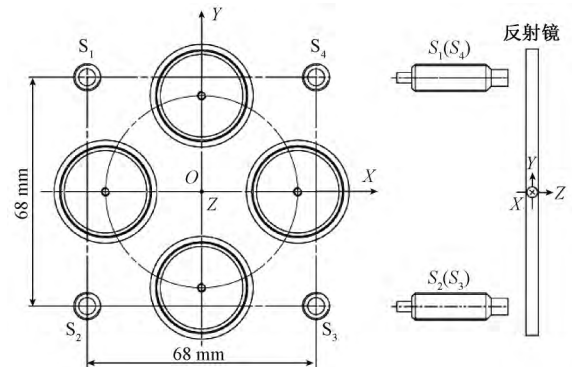


图4 电涡流传感器的位置排布

Fig.4 Position of the eddy current sensors

由式(6)、(7)可知,在电涡流传感器分辨力一定的情况下,FSM的分辨力与传感器到轴线的距离 r 成正比。因此,在FSM外形尺寸许可的前提下,应尽量增大传感器到轴线的距离。

2.4 柔性铰链的设计

为了实现FSM足够高的控制带宽,一般要求系统的谐振频率远大于工作带宽。但电机的驱动力矩有限,而且在FSM的工作方向上存在控制系统的作用,因此常用的设计思路是保证FSM在非工作方向的谐振频率远高于系统的工作带宽,且越高越好;保证FSM在工作方向的谐振频率远低于系统的工作带宽,且越低越好。即保证FSM的1阶、2阶谐振频率尽可能低,3阶及以上的谐振频率尽可能高。这对于单一的柔性铰链实现起来较为困难,因此,本研究采用中心柔性铰链与四周柔性铰链两个双轴柔性铰链实现FSM运动部分与不动部分的柔性连接。

1) 中心柔性铰链的设计

中心柔性铰链采用直圆形柔性铰链的结构形式,如图5(a)所示。该种柔性铰链主要由固定环、过渡环和运动环3个部分组成,其中,固定环与支撑基座相连接,运动环与平面反射镜相连接。当FSM需要绕X轴回转时,柔性铰链的固定环和过渡环静止不动,运动环依靠材料的弹性变形绕铰链的第一回转轴线进行小角度偏转;当FSM需要绕Y轴回转时,柔性铰链的固定环静止不动,过渡环和运动环依靠材料的弹性变形绕铰链的第二回转轴线进行小角度偏转。

2) 四周柔性铰链的设计

四周柔性铰链采用薄片式的结构,主要用于限制

FSM 绕 Z 轴的回转运动,以提高 FSM 在非工作方向的谐振频率。图 5(b) 所示为四周柔性铰链的结构外形图,该柔性铰链主要由 4 个半圆环组成,每个半圆环的对称线上各有 1 个动支孔,用于与 FSM 的运动部分相连接;在半圆环与半圆环的连接处有 4 个为静支孔,用于与 FSM 的支撑基座相连接。当 FSM 工作时,四周柔性铰链的 4 个动支孔即依靠材料的弹性变形在驱动电机的作用下进行小范围的往复运动。

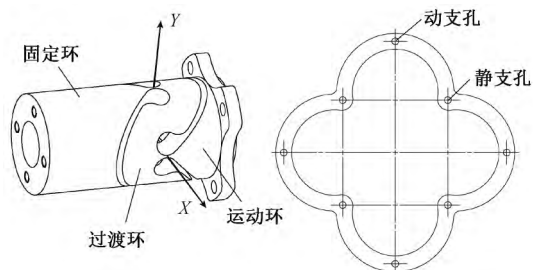


图 5 柔性铰链的结构外形

Fig.5 Structure of the flexure hinge

3) 双柔性铰链的组合设计

中心柔性铰链与四周柔性铰链均是利用材料的弹性变形进行工作,为了防止二者运动相互干涉,不仅要确保每个双轴柔性铰链的两回转轴线相互正交,而且必须确保两个双轴柔性铰链的回转轴两两重合,如图 6 所示,以确保平面反射镜具有稳定且唯一的回转中心。

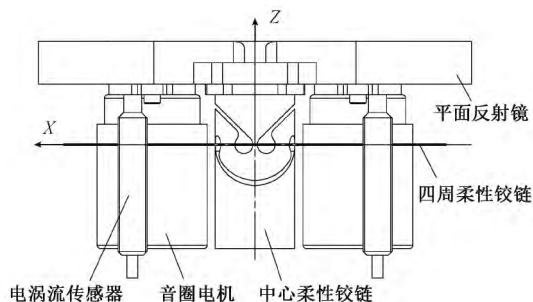


图 6 中心和四周柔性铰链的位置排布

Fig.6 Position of center and around flexure hinge

在完成双柔性铰链的组合设计后,对其谐振频率和刚度进行了仿真分析与计算。图 7 所示为 FSM 系统 1~4 阶振型及模态的分析结果,可知,FSM 的 1 阶、2 阶振型为工作方向,对应的模态分别为 $M_1 = 45.6 \text{ Hz}$, $M_2 = 49.7 \text{ Hz}$,满足 $f_c > (2 \sim 4) M_1$, $f_c > (2 \sim 4) M_2$ 的设计要求; FSM 的 3 阶、4 阶振型为非工作方向,对应的模态分别为 $M_3 = 823 \text{ Hz}$, $M_4 = 1265 \text{ Hz}$,满足 $M_3 > (2 \sim 4) f_c$, $M_4 > (2 \sim 4) f_c$ 的设计要求。

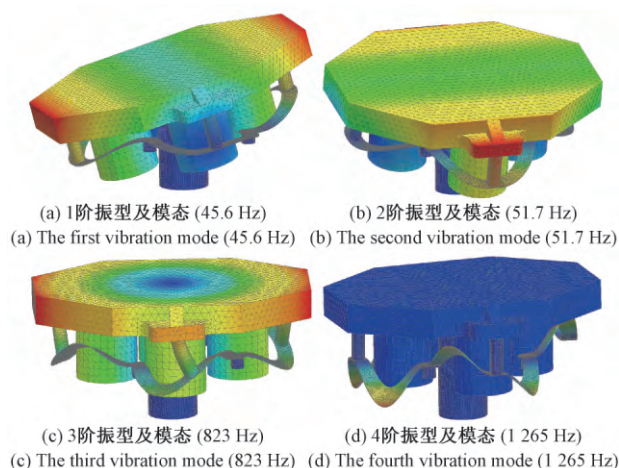


图 7 FSM 的振型及模态分析结果

Fig.7 Vibration mode analysis results of FSM

图 8 所示为 FSM 在工作方向的刚度分析结果。在对反射镜的两个工作方向分别施加 $2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的作用力矩时,FSM 绕 X 轴、Y 轴的最大位移量分别为 2.827 、 3.229 mm 。计算可得双柔性铰链的组合刚度分别为 $K_x = 37.8 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, $K_y = 37.2 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$,满足 K_x (或 K_y) $< 50 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ 的设计要求。

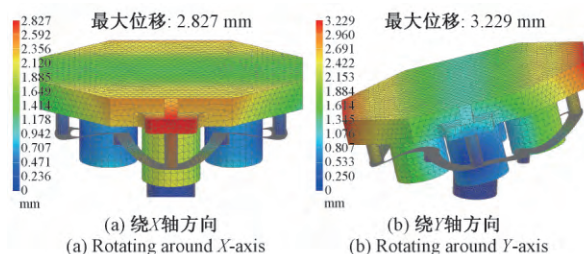


图 8 FSM 的刚度分析结果

Fig.8 Stiffness analysis results of FSM

3 FSM 的实验测试

在完成 FSM 的精密加工装调后,获得 FSM 的有效通光口径为 $\Phi 85 \text{ mm}$;由所选用电涡流传感器的分辨率计算获得 FSM 的分辨率为 $2.94 \mu\text{rad}$,满足指标需求。在完成 FSM 控制系统的组建与调试后,重点对 FSM 的指向精度、控制带宽和阶跃响应时间进行了实验检测。

3.1 指向精度的测试

室温条件下,采用 $0.1''$ 自准直仪对 FSM 的指向精度进行实验检测,检测装置如图 9 所示。该装置主要由光学测试平台、FSM 装置、FSM 控制系统(包括主控板、功率级、供电电源等)、主控计算机、仿真器和自准直仪等组成。其中,FSM 控制系统用于控制 FSM 正常工作;主控

制计算机和仿真器用于设定 FSM 的位置指向; 自准直仪用于监测 FSM 的实际位置指向。具体的实验方法如下: 首先, 将 FSM 装置固定在光学测试平台上, 并通过主控计算机将其控制在 $(0'', 0'')$ 位置; 然后, 调节自准直仪实现其与 FSM 的准直, 清零后记录自准直仪的一系列读数 (取 100 个); 再然后, 分别将 FSM 控制在不同的指向位置 (见表 5), 并记录自准直仪在各设定位置处的读数; 最后, 分别对各设定位置处的 100 个测量值取均方根, 即获得 FSM 在该位置处的实际位置指向, 对比其与设定位置之间的差值, 获得 FSM 的指向精度。

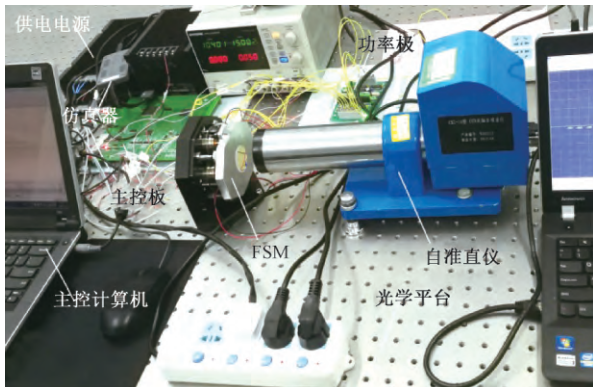


图 9 FSM 指向精度的测试

Fig.9 Experiment for testing pointing precision of FSM

表 5 所示为 FSM 指向精度的检测数据。结果显示 FSM 在方位方向的指向误差不超过 $0.7''$, 在俯仰方向的指向误差不超过 $0.8''$, 均低于设计指标 $1.0''$, 满足车载平台的应用需求。

表 5 FSM 指向精度的测试结果

Table 5 Testing results of FSM pointing precision (")

序号	设定位置	实际位置	指向误差
1	$(-400, 400)$	$(-400.7, 399.2)$	$(-0.7, -0.8)$
2	$(-300, 300)$	$(-300.7, 300.7)$	$(-0.7, +0.7)$
3	$(-200, 200)$	$(-199.6, 200.7)$	$(+0.6, +0.7)$
4	$(-100, 100)$	$(-100.6, 99.3)$	$(-0.6, -0.7)$
5	$(0, 0)$	$(0.5, -0.6)$	$(+0.5, -0.6)$
6	$(100, -100)$	$(100.5, -100.6)$	$(+0.5, -0.6)$
7	$(200, -200)$	$(200.6, -199.3)$	$(+0.6, +0.7)$
8	$(300, -300)$	$(299.4, -300.7)$	$(-0.6, -0.7)$
9	$(400, -400)$	$(400.7, -400.7)$	$(+0.7, -0.7)$

3.2 控制带宽的测试

为了获得 FSM 的控制带宽, 以正弦信号 $\theta(t) = A \sin(2\pi f_c t)$ 为输入信号, 监测输出信号 $\theta(t) = A' \sin(2\pi f_c t)$ 的变化情况。当 $f_c = 200 \text{ Hz}$ 时, 输入、输出

信号的波形如图 10 所示。由于图 10 中输出信号的幅值 A' 仍然略大于 $0.707 A$, 因此 FSM 的控制带宽约为 $200 \text{ Hz}(-3 \text{ dB})$, 满足系统对 FSM 控制带宽的应用需求。此外, 由图 10 还可以看出, 输出信号较输入信号滞后约 0.4 ms , 占信号周期的 8% , 因此该 FSM 具有较高的快速响应性能。

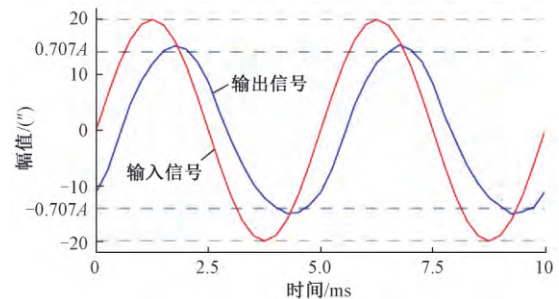


图 10 闭环控制带宽测试信号的波形

Fig.10 Oscillogram of testing signal for closed-loop control bandwidth

3.3 阶跃响应时间的测试

为了进一步检测 FSM 的快速响应能力, 对系统的阶跃响应时间进行了实验测试。检测方法如下: 首先将 FSM 的指向位置设定为 $(400'', 0'')$; 然后, 开启 FSM 的控制系统, 并采集 FSM 从初始点到达设定位置过程的传感器值; 最后, 通过数据处理获得 FSM 的阶跃响应时间, 如图 11 所示。

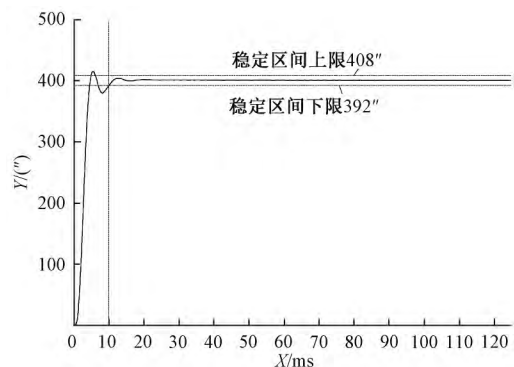


图 11 阶跃响应时间测试结果

Fig.11 Step response time of FSM system

由图 11 可知, 该 FSM 的阶跃响应时间约为 10 ms , 其中, FSM 方位指向的稳定区间为 $\pm 2\%$ 。再次证明该 FSM 具有较高的快速响应性能。

4 结 论

本文针对单一柔性铰链的 FSM 难以满足在车载运动平台行进中可靠工作的应用需求, 设计了一款具有中

心柔性铰链与四周柔性铰链两个双轴柔性铰链的 FSM, 从结构原理上改善了 FSM 的承载能力和抗振动、冲击性能。实验检测结果表明, 所设计 FSM 还具有指向精度和控制带宽高、响应速度快等突出优点, 完全满足车载跟瞄发射系统的应用需求。该型 FSM 的成功研制, 不仅证明了双柔性铰链结构的 FSM 方案的可行性, 而且表明了本文所采用设计方法的正确性。同时也为柔性 FSM 用于车载、机载等动态平台提供了一种新选择。

参考文献

- [1] TIAN J L, WANG Z Y, LI L, et al. Tracking human poses with head orientation estimation [J]. Instrumentation, 2017, 4(3): 40-46.
- [2] 王槐, 代霜, 范磊, 等. 可见光粗跟踪成像镜头光机结构设计 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1190-1197.
WANG H, DAI SH, FAN L, et al. Opto-mechanical structure design of visible light rough tracking and imaging lens [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1190-1197.
- [3] 程龙, 陈娟, 陈茂胜, 等. 光电跟踪系统快速捕获时间最优滑模控制技术 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 148-154.
CHENG L, CHEN J, CHEN M SH, et al. Fast acquisition of time optimal sliding model control technology for photoelectric tracking system [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 148-154.
- [4] 陈健, 王伟国, 刘廷霞, 等. 美军新型机载光电瞄准系统工作原理分析 [J]. 中国光学, 2017, 10(6): 777-782.
CHEN J, WANG W G, LIU T X, et al. The operational principle analysis of new airborne electro-optical targeting system(EOTS) of US army [J]. Chinese Optics, 2017, 10(6): 777-782.
- [5] XIONG Z J, LI Q, LIU L, et al. Fast steering mirror and michelson interferometer based laser beam pointing and steering [C]. IEEE 8th International Conference on CIS & RAM, 2017: 815-819.
- [6] 李贤涛, 张晓沛, 毛大鹏, 等. 高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2428-2436.
LI X T, ZHANG X P, MAO D P, et al. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(9): 2428-2436.
- [7] LIN M, ZHANG X M, SERGEJ F. Design and analysis of a multi-notched flexure hinge for compliant mechanisms [J]. Precision Engineering, 2017(48): 292-304.
- [8] 王帅, 吴庆林, 张斌, 等. 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计 [J]. 电子测量技术, 2015, 46(7): 6-10.
WANG S, WU Q L, ZHANG B, et al. Design of the PZT driver system for fast steering mirror [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 46(7): 6-10.
- [9] NAM B U, GIMM H K, KANG D W, et al. Design and analysis of a tip-tilt guide mechanism for the fast steering of a large-scale mirror [J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 106120.
- [10] 高铎瑞, 李天伦, 孙悦, 等. 空间激光通信最新进展与发展趋势 [J]. 中国光学, 2018, 11(6): 901-913.
GAO D R, LI T L, SUN Y, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. Editorial Committee of Chinese Optics, 2018, 11(6): 901-913.
- [11] 徐新行, 王恒坤, 韩旭东, 等. 机载小型化快速反射镜用微位移测量传感器设计 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1937-1944.
XU X H, WANG H K, HAN X D, et al. Design of displacement sensor for fast steering mirror with small volume on airborne platform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1937-1944.
- [12] 陈炜, 孔建寿, 刘宗凯. 反射镜片高度对快反镜测量误差的影响及补偿 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(12): 24-27.
CHEN W, KONG J SH, LIU Z K. Effect and compensation of the reflector lens height on the measurement error of fast steering mirror [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 36(12): 24-27.
- [13] 王帅, 曹玉岩. 音圈电机型快速反射镜的驱动控制系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7): 1115-1121.
WANG SH, CAO Y Y. Design of control system for fast steering mirror driven by voice coil actuator [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(7): 1115-1121.
- [14] 刘凉, 赵新华, 王收军, 等. 空间刚柔耦合并联机构的逆动力学建模与控制 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(1): 95-104.
LIU L, ZHAO X H, WANG SH J, et al. Inverse dynamic modeling and control of spatial rigid-flexible parallel manipulator [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 95-104.
- [15] LONG Y J, WEI X H, WANG C L, et al. Modeling and design of a normal stress electromagnetic actuator with linear characteristics for fast steering mirror [J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 054102.
- [16] 钟相强, 黄卫清, 张轩, 等. 二级杠杆柔性铰链复合

- 结构的双足压电直线电机 [J]. 光学 精密工程, 2018, 26(1): 86-94.
- ZHONG X Q, HUANG W Q, ZHANG X, et al. Double-foot piezoelectric linear motor with secondary lever and flexure hinge composite structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1): 86-94.
- [17] 董世则, 郭抗, 李显凌, 等. 光学元件狭缝柔性调节机构的设计与分析 [J]. 中国光学, 2017, 10(6): 790-797.
- DONG SH Z, GUO K, LI X L, et al. Design and analysis of adjustment mechanism with slit diaphragm flexures for optical elements [J]. Chinese Optics, 2017, 10(6): 790-797.
- [18] 李耀, 吴洪涛, 杨小龙, 等. 圆弧柔性铰链的优化设计 [J]. 光学 精密工程, 2018, 26(6): 1370-1379.
- LI Y, WU H T, YANG X L, et al. Optimization design of circular flexure hinges [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(6): 1370-1379.
- [19] CHO M, JUN Y, DRIBUSCH C, et al. Design of the fast steering secondary mirror assembly for the giant magellan telescope [C]. Proceedings Of SPIE, 2018: 1070607.
- [20] NI Y X, WU J B, SAN X G, et al. Deflection angle detecting system for the large-angle and high-linearity fast steering mirror using quadrant detector [J]. Optical Engineering, 2018, 57(2): 024110.
- [21] AIGOUY G, BENOIT K, BETSCH E, et al. Development of magnetic fast steering mirror prototype for optical pointing applications [C]. 16th International Conference on New Actuators, 2018: 559-562.
- [22] ZHU W, BIAN L X, AN Y, et al. Modeling and control of a two-axis faststeering mirror with piezoelectric stackactuators for laser beam tracking [J]. Smart Materials and Structures, 2015(24): 075014.

作者简介



徐新行(通信作者), 2015 年于中国科学院长春光机所获得博士学位, 现为中科院长春光机所副研究员, 主要研究方向为光电跟瞄设备及快速反射镜的设计。

E-mail: xxh123321xxh@163.com

Xu Xinhang (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics in 2015. He is currently an associate research fellow at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research interests include design of electro-optical tracking & pointing equipment and fast steering mirror.