

文章编号 1004-924X(2019)02-0393-09

快速反射镜驱动形式对伺服带宽的影响

赵磊, 纪明*, 王明歆, 刘小强, 柳秋兴

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了提高大行程快速反射镜系统的伺服带宽, 提出一种直线驱动形式的快速反射镜。该快速反射镜以音圈电机作为驱动器, 利用滚珠花键约束驱动器工作方向, 将传统的弧线驱动转变为直线驱动。首先, 对直线驱动快速反射镜进行了结构设计, 重点分析了直线驱动单元的组成形式与特点; 接着, 从约束条件分析驱动形式对系统伺服带宽的影响因素, 并推导两种驱动形式下, 快速反射镜在大行程运动时的动力学方程; 最后, 利用有限元分析得出快速反射镜的机械谐振频率, 并通过实验测试对两种驱动形式下快速反射镜的伺服带宽进行了验证。结果表明, 在相同的实验条件下, 相较于传统弧线驱动形式, 直线驱动形式快速反射镜的机械谐振频率由 121.8 Hz 提高至 229.9 Hz, 伺服带宽由 40.3 Hz 提高至 75.1 Hz, 分别提高了 88.8%、86.4%, 满足快速反射镜在大行程工作状态下的宽带宽设计要求。

关键词: 快速反射镜; 直线驱动; 滚珠花键; 伺服带宽; 机械谐振频率

中图分类号: TH703; TN29 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192702.0393

Influence of driving forms on servo bandwidth in fast steering mirror

ZHAO Lei, JI Ming*, WANG Ming-xin, LIU Xiao-qiang, LIU Qiu-xing

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: jiming205@163.com

Abstract: To improve the servo bandwidth of fast steering mirrors with large stroke, a fast steering mirror with linear driving mode was proposed. Voice coil actuators were used to drive the fast steering mirror, and ball splines were used to constrain the direction of the drive, which transforms the traditional arc drive into a linear drive. First, the structure of a fast steering mirror driven by linearity was designed. Subsequently, the composition and characteristics of linear driving were analyzed. Subsequently, after the influence of the factors of the driving forms on the servo bandwidth was analyzed considering the constraint condition, the dynamic equations of the fast steering mirror with large stroke in the two driving modes were obtained. Finally, the mechanical resonance frequencies of the fast steering mirror were obtained through finite element analysis, and its servo bandwidths were verified through experimental tests. The experimental results indicate that, under the same experimental conditions, compared with the traditional arc drive, the resonant frequency of the fast steering mirror increases from 121.8 Hz to 229.9 Hz, and the servo bandwidth increases from 40.3 Hz to 75.1 Hz, indicating an increase of 88.8% and 86.4%, respectively. These results satisfy

收稿日期: 2018-06-28; 修订日期: 2018-09-14.

基金项目: 国防预研基金资助项目

the design requirement of high servo bandwidth for fast steering mirrors in large stroke state.

Key words: fast steering mirror; linear driving; ball spline; servo bandwidth; mechanical resonance frequency

1 引言

快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)作为光束指向精密控制的核心器件,因其结构紧凑、稳定精度高、控制带宽高、响应速度快等特点^[1],被广泛应用于光学系统的粗精复合轴稳定跟踪^[2-3]、光束指向控制^[4]、空间光通信^[5]及高清成像校正等领域^[6]。尤其在粗精复合轴光电跟踪系统中,为提高系统稳定精度,精级跟踪瞄准快速反射镜需要具备足够的运动范围以及伺服带宽,用以隔离粗级跟踪瞄准单元的残余误差^[7]。

国内外众多研究机构进行了相关技术探索与产品研制,美国 Ball Aerospace & Technologies 公司研制的大转角音圈电机(Voice Coil Actuator, VCA)驱动快速反射镜,应用于回扫补偿扫描像移和稳定视轴,能够满足大行程、高带宽的实际需求,其机械行程可达 $\pm 8^\circ$,闭环带宽可达 250 Hz。美国雷声公司研制的 Responder 快速反射镜用于空间和机载光学系统视轴稳定,该快速反射镜采用两组对称分布的音圈电机作为驱动器,行程可达到 $\pm 5^\circ$ 以上,闭环控制带宽优于 3.3 kHz^[8]。国内方面,长春光机所为提高复合轴航空光电稳定平台精度设计的快速反射镜,采用 4 个音圈电机同时驱动,通过自适应鲁棒控制方法测试表明,反射镜最大行程为 $\pm 1.5^\circ$,闭环带宽可达到 200 Hz 以上^[9]。华中科技大学为实现光学系统高帧频高分辨率成像,研制了音圈电机驱动的二维快速反射镜,反射镜最大行程为 $\pm 5^\circ$,扫描带宽为 330 Hz^[10]。

综合分析,音圈电机以其高频响、高加速度、大行程和无接触摩擦等特点,成为了快速反射镜驱动的首选器件^[11]。其驱动线圈在永磁体与磁轭产生的磁场中,绕反射镜回转轴心做高速往复运动,进而控制光路的指向^[12-13]。当反射镜运动范围较小时,根据几何学原理,驱动线圈绕轴心的圆弧运动近似的看作直线运动,所受电磁力可简化

成轴向电磁力,此时径向电磁力可忽略不计^[14-15]。然而随着反射镜行程增大,这种小角度直线与弧线之间的距离等价关系被逐渐打破,同时对快速反射镜性能带来了负面影响。第一,径向无用电磁力削弱了音圈电机的驱动能力,在相同驱动电压下机械行程有所减小;第二,轴向电磁力随着反射镜角度的增大逐渐呈现出几何非线性特性,加大了控制难度;第三,驱动线圈缺少轴向约束,降低了系统机械带宽与伺服带宽。

为保证快速反射镜在大角度偏摆过程中,具有较高的伺服带宽,本文提出一种音圈电机直线驱动形式的快速反射镜。该快速反射镜通过滚珠花键限定了音圈电机驱动线圈的直线运动,利用柔性铰链将驱动力传导至反射镜体。与传统弧线驱动快速反射镜对比,分析约束条件、运动行程对伺服带宽的影响,推导了两种驱动形式快速反射镜的动力学方程。最后,通过有限元分析与试验测试验证了相同实验条件下,两种驱动形式快速反射镜系统伺服带宽的优劣。

2 直线驱动设计

2.1 结构形式

如图 1 所示直线驱动快速反射镜结构原理图,主要由基座、直线驱动单元、位置传感器、万向轴承及反射镜等组成。基座作为承载平台,为各个功能单元提供稳定的刚性连接工作环境;4 个直线驱动单元垂直对称分布于两个自由度上,为反射镜提供有限行程内高速的旋转驱动;2 个位置传感器对称分布于 45° 位置,通过位置解算获取反射镜的实时偏转角度,为伺服控制单元提供前馈解算量;万向轴承作为各功能单元与反射镜的唯一支撑机构,不仅从结构形式上保证了反射镜的零位重复性,而且为反射镜旋转运动提供稳定的回转中心;反射镜在上述功能单元的协同下,完成对光路的快速精确指向控制。

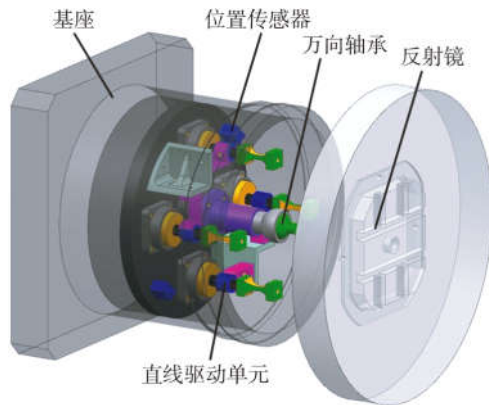


图 1 直线驱动快速反射镜结构原理图

Fig. 1 Structural diagram of FSM driven by linearity

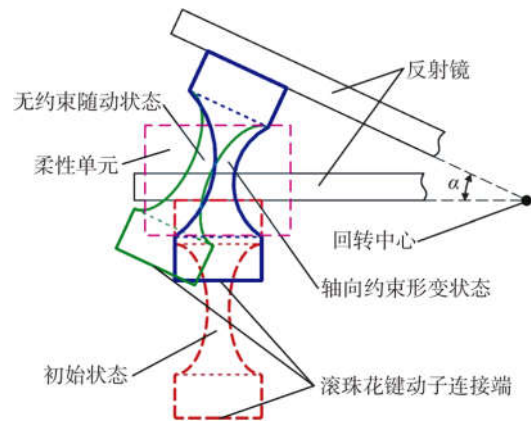


图 3 柔性铰链运动状态分析

Fig. 3 Motion analysis of flexible hinge

2.2 驱动单元

本设计特点是音圈电机的驱动线圈始终保持直线往复运动,替代了传统音圈电机驱动线圈随反射镜弧线运动的工作状态。两种驱动单元如图 2 所示。

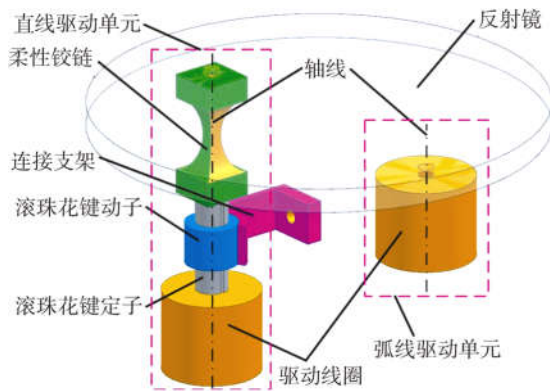


图 2 驱动单元示意图

Fig. 2 Schematic of driving units

传统的弧线驱动单元中,驱动线圈与反射镜刚性胶合连接,直接驱动反射镜,并随反射镜绕其回转中心运动。

本设计直线驱动单元中,连接支架固定在快速反射镜基座上,滚珠花键定子连接在连接支架的约束下保持相对静止,滚珠花键动子与音圈电机的驱动线圈刚性连接,实现了驱动线圈在其轴线上的直线往复运动。

滚珠花键动子与反射镜之间通过柔性铰链连接,柔性铰链在其中起到运动状态转换作用,将滚珠花键的直线运动转换为反射镜的弧线运动,柔性铰链运动状态分析如图 3 所示。

3 驱动形式分析

3.1 约束条件影响

快速反射镜约束条件如图 4 所示,其中 ST_1 为反射镜绕回转中心在两个自由度上的旋转运动约束, ST_2 为驱动线圈在其轴向的竖直运动约束。从驱动形式分析,快速反射镜的弧线驱动形式等价于 ST_1 单独约束,直线驱动形式等价于 ST_1 与 ST_2 同时约束。可以看出,与弧线驱动形式相比,直线驱动形式在其运动过程中具有更多的约束条件。

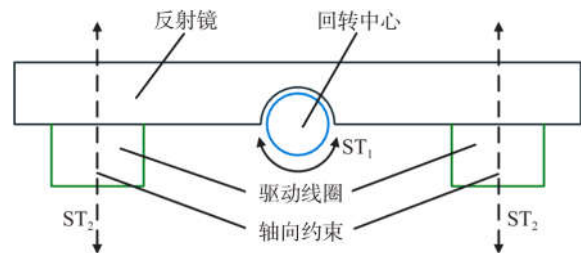


图 4 约束条件示意图

Fig. 4 Schematic of constraint conditions

从机械振动原理分析,快速反射镜在多自由度约束下受迫运动,约束条件越多,机械带宽以及伺服带宽越大^[16]。因此,当反射镜只受到 ST_1 约束时,反射镜绕回转中心做二维旋转运动。由于没有其它维度约束,在外部信号源激励下,反射镜振荡需依靠 ST_1 约束以及自身固有机特性达到稳定状态。当反射镜受到 ST_1 和 ST_2 同时约束时,在外部信号激励下,反射镜能够以更快的速度在驱动线圈竖直轴向达到稳定状态。

对比以上两种约束条件,在外界条件相同情况下,快速反射镜直线驱动形式具有更短的反应时间以及更大的带宽。

3.2 运动行程影响

音圈电机是一种基于安培力原理的直线电机,主要由永磁体、驱动线圈以及磁轭构成。工作时,通电驱动线圈在永磁体与磁轭微小间隙形成的磁场中受力运动,力的方向与大小随外加电压极性与数值变化。

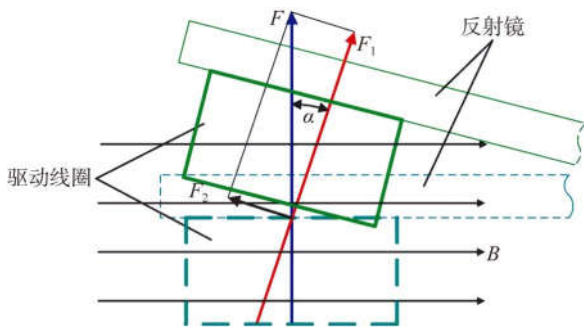


图 5 驱动线圈受力分析示意图

Fig. 5 Force analysis of actuator coil

音圈电机驱动线圈在 ST_1 单独约束下绕回转中心运动,其受力分析如图 5 所示,其中,磁场强度为 B ,驱动线圈所受电磁力为 F ,线圈总长度为 L ,通电电流为 I ,驱动线圈随反射镜运动,任一状态下与磁场之间的夹角为 α 。根据安培力原理,驱动线圈所受电磁力为:

$$F(t) = BLI(t)\cos\alpha \quad (1)$$

在直线驱动快速反射镜中,由于驱动线圈始终延磁力线垂直方向运动,因此 α 始终为 0,驱动线圈所受电磁力 $F_1(t)$ 为:

$$F_1(t) = BLI(t) \quad (2)$$

在弧线驱动快速反射镜中,当反射镜偏转角度较小时,根据几何学原理, $\cos\alpha \approx 1$, 此时:

$$F(t) \approx BLI(t) \quad (3)$$

可以认为此时驱动线圈作用力完全用于反射镜的偏摆,几乎没有损耗。

然而当 α 增大,这种等价关系逐渐被打破。 $F(t)$ 分解为轴向作用力 $F_2(t)$, 以及径向作用力 $F_3(t)$, $F_2(t)$ 是反射镜绕其回转中心高速运动的唯一驱动力; $F_3(t)$ 是驱动线圈的离轴反作用力,是快速反射镜的运动阻力。 $F_2(t)$ 与 $F_3(t)$ 分别表示为:

$$F_2(t) = BLI(t)\cos\alpha\cos\alpha = BLI(t)\cos^2\alpha, \quad (4)$$

$$F_3(t) = BLI(t)\cos\alpha\sin\alpha = \frac{1}{2}BLI(t)\sin 2\alpha \quad (5)$$

两种驱动形式对反射镜的作用力各不相同。弧线驱动形式快速反射镜工作过程中无摩擦力作用,但缺少了运动方向的轴向约束,因此在大角度工作状态下受反射镜偏转角度影响较大。直线驱动形式快速反射镜利用滚珠花键增加了轴向约束,提高了系统带宽。虽然受到非线性摩擦力的影响,但在工程实践中,能够通过合理地滤波校正设计进行优化,具有较好的工程可实现性。

3.3 动力学模型

快速反射镜等效动力学模型如图 6 所示,可以将其看作一个黏性阻尼弹簧-滚动摩擦-质量系统。 m 是支承结构、驱动线圈与反射镜的等效质量, k 是柔性铰链在其工作方向上的柔度, c 是支承机构与音圈电机的阻尼系数, μ 是滚珠花键的动摩擦系数。音圈电机驱动线圈在电磁力 $F_1(t)$ 作用下的位移为 x , 系统运动微分方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_\mu = F_1(t) \quad (6)$$

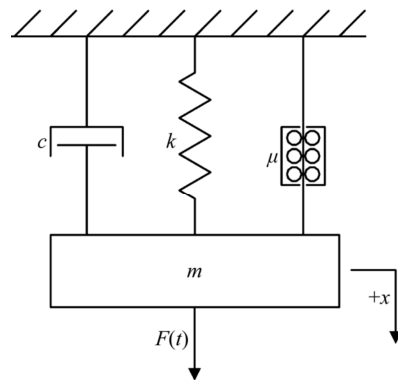


图 6 快速反射镜等效动力学模型

Fig. 6 Equivalent dynamic model of FSM

对于弧线驱动形式,没有滚珠花键的约束,驱动线圈电磁力 $F_2(t)$ 随反射镜的偏转而改变,偏转角为 α 。其运动微分方程表示为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = BLI(t)\cos^2\alpha \quad (7)$$

对于直线驱动形式, F_μ 是滚珠花键在系统工作时的动摩擦阻力,在其行程范围内仅与负载负荷有关,可表示为动摩擦系数 μ 与负载重力之积。对于轻负载、高速度的运动形式,润滑剂和密封性

是影响滚珠花键物理特性的主要因素。本设计中选用 Alvania EP 高性能润滑剂,并对动静接合部位进行动密封处理。一方面,保证滚珠花键具有极高的定位精度;另一方面,有效地减小滚珠花键的静摩擦系数与动摩擦系数。静摩擦系数 μ_0 、动摩擦系数 μ 设计结果为:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 2.6 \times 10^{-3}, \\ \mu &= 1.5 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

快速反射镜负载主要由反射镜、滚珠花键和驱动线圈组成,其等效质量 $m=0.2 \text{ kg}$,带入上述参数,静摩擦力 F_{f_0} 取值为:

$$F_{f_0} = \mu_0 mg = 5.2 \times 10^{-3} \text{ N}. \quad (8)$$

由于音圈电机推力设计值为 1.2 N ,远大于滚珠花键的静摩擦力,能够在极短时间内克服静摩擦力驱动反射镜。因此在推算系统动力学微分方程时,滚珠花键的静摩擦力可忽略不计。

F_μ 在其线性运动区域取值为:

$$F_\mu = \mu mg = 3 \times 10^{-3} \text{ N}. \quad (9)$$

阻尼系数经过实测,取值为 $c=0.65$ 。

下面对柔性铰链柔度 k 进行推导,柔性铰链能够将滚珠花键的直线运动转换为反射镜的旋转运动。其受力分析如图 7 所示,在 X、Y、Z 方向上分别受到 3 个作用力 F_x 、 F_y 和 F_z ,以及 3 个弯矩 M_x 、 M_y 、 M_z 的作用。由于 XY 平面与 XZ 平面为同参数设计平面,因此只对 XY 方向进行分析设计。设 F_y 为快速反射镜工作方向上的作用力,对应弯矩为 M_z ,切割椭圆长半轴为 a ,短半轴为 b ,最小切割边长为 t 。

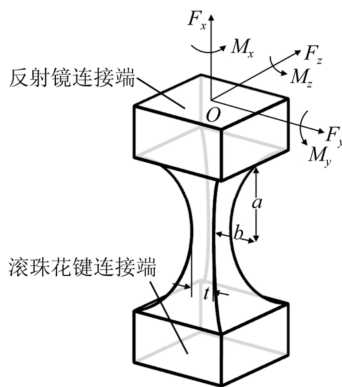


图 7 柔性铰链受力分析示意图

Fig. 7 Force analysis of flexible hinge

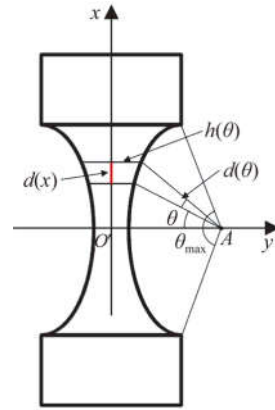


图 8 剖切面微元划分示意图

Fig. 8 Microelement division of section

柔性铰链的剖切面如图 8 所示, O' 为柔性铰链剖切面中心, A 为切割椭圆长半轴圆心,离心角为 $\theta \in [-\theta_{\max}/2, \theta_{\max}/2]$,因此, Y 向截面距离 $h(\theta)$ 为:

$$h(\theta) = 2b - 2b \cos \theta + t. \quad (10)$$

X 向长度为 $x = a \sin \theta$, 因此:

$$dx = a \cos \theta d\theta. \quad (11)$$

E 为柔性铰链的弹性模量, $I_z(\theta)$ 为 dx 在截面上 Z 向的惯性矩:

$$I_z(\theta) = \frac{h^4(\theta)}{12}. \quad (12)$$

柔性铰链在 F_y 作用下弯曲时,弯曲力臂 $L_y = a - a \sin \theta$, 因此力矩 M_z 表示为:

$$M_z = a F_y (1 - \sin \theta). \quad (13)$$

中性面 X 方向上 dx 的曲率半径为:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{M_z}{EI_z(x)} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (14)$$

对于柔性铰链微小型变处,挠曲线比较平滑,式(13)的分母可简化为 1。因此,柔性铰链在 F_y 作用下绕 z 轴转角 α 为:

$$\alpha = \frac{dy}{dx} = \int_{-\frac{\theta_{\max}}{2}}^{\frac{\theta_{\max}}{2}} \frac{d^2 y}{dx^2} dx + C. \quad (15)$$

切割椭圆相对 y 轴中心对称,因此 $C=0$ 。柔性铰链的柔度 k 可表示为转角 α 与作用力 F_y 的比值:

$$k = \frac{\alpha}{F_y}. \quad (16)$$

将式(11)~式(15)带入式(16),可得:

$$k = \frac{12a^2}{E} \int_{-\frac{\theta_{\max}}{2}}^{\frac{\theta_{\max}}{2}} \frac{(1 - \sin \theta) \times \cos \theta}{(2b - 2b \cos \theta + t)^4} d\theta. \quad (18)$$

综上,直线驱动快速反射镜微分方程可表示为:

$$0.2\ddot{x} + 0.65\dot{x} + \left[\frac{12\alpha^2}{E} \int_{\frac{\theta_{\min}}{2}}^{\frac{\theta_{\max}}{2}} \frac{(1 - \sin \theta) \times \cos \theta}{(2b - 2b\cos \theta + t)^4} d\theta \right] x + 3 \times 10^{-3} = BLI(t), \quad (19)$$

4 仿真与实验

为验证两种驱动形式对快速反射镜伺服带宽的影响,分别对直线驱动形式与弧线驱动形式的快速反射镜进行有限元仿真与实验验证。直线驱动快速反射镜结构组成已由图 1 给出,弧线驱动快速反射镜如图 9 所示。

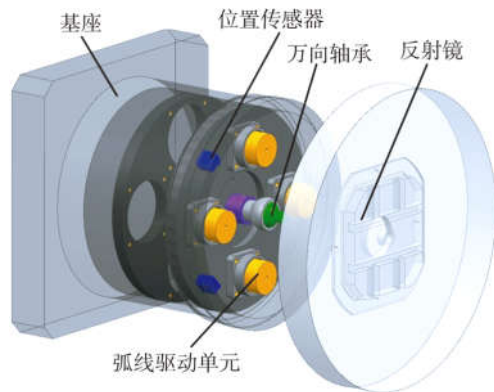


图 9 弧线驱动快速反射镜结构原理图

Fig. 9 Structural diagram of FSM driven by arc

在设计过程中,为保证实验数据合理有效,两种驱动形式快速反射镜的实验环境、安装方式、控制单元、负载特性等输入条件均无差异。

4.1 有限元分析

弧线驱动快速反射镜中,驱动线圈直接作用于反射镜底部,驱动单元约束条件为绕万向轴承的弧线运动。直线驱动快速反射镜中,柔性铰链与滚珠花键连接端约束条件为竖直方向往复运动,反射镜绕万向轴承做旋转运动。上述快速反射镜材料参数如表 1 所示。

表 1 快速反射镜材料参数

Tab. 1 Material parameters of FSM

名称	材料	密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
反射镜	铝合金	2.7	68	0.33
柔性铰链	钛合金	4.5	110	0.34
驱动线圈	铜	8.9	106	0.32
万向轴承	钢	7.9	205	0.30

对两种驱动形式的快速反射镜进行有限元仿真,弧线驱动快速反射镜一阶模态分析结果如图 10 所示,直线驱动快速反射镜一阶模态分析结果如图 11 所示。

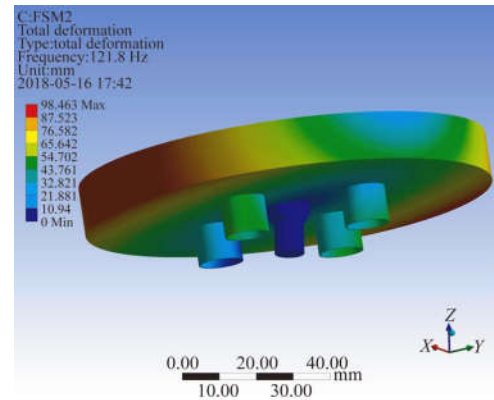


图 10 弧线驱动快速反射镜一阶模态仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the first-order model of FSM driven by arc

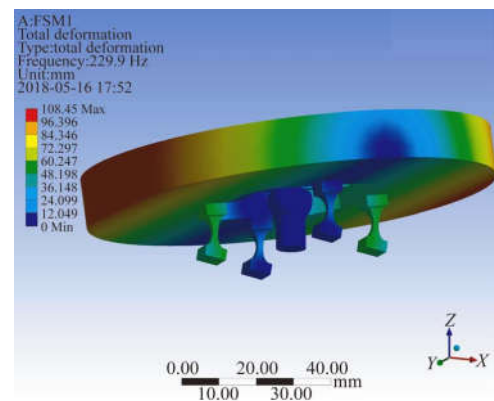


图 11 直线驱动快速反射镜一阶模态仿真结果

Fig. 11 Simulation results of the first-order model of FSM driven by linearity

根据图 10、图 11 的仿真结果,弧线驱动快速反射镜机械谐振频率为 121.8 Hz,直线驱动快速反射镜机械谐振频率为 229.9 Hz。

4.2 实验测试

搭建实验平台,分别对两种驱动形式快速反射镜的伺服带宽进行测试。测试系统由快速反射镜、扫频仪、驱动控制单元、测试计算机、示波器等组成,如图 12 所示。

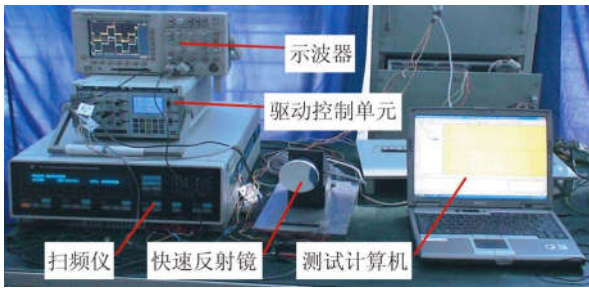


图 12 闭环带宽测试系统实物图

Fig. 12 Photograph of closed loop bandwidth test system

两种快速反射镜负载相同,安装于水平台面上。扫频仪产生一个正弦波激励信号,通过驱动控制单元控制器放大处理,加入相应的校正环节,驱动快速反射镜在其工作范围内做正弦振荡运动。扫频仪与驱动控制单元连接,将其设定为在 1~500 Hz 范围内进行正弦波频率扫描。并与快速反射镜正弦振荡运动进行幅值和相位对比,获取两种驱动形式快速反射镜的闭环频响曲线。示波器能够实时显示曲线状态,最终通过测试计算机记录并保存测试结果,如图 13 和图 14 所示,测试结果对比如表 2 所示。

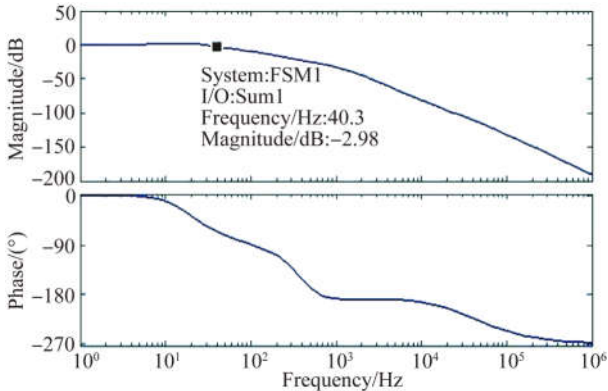


图 13 弧线驱动快速反射镜闭环频响曲线

Fig. 13 Closed loop response curve of FSM driven by arc

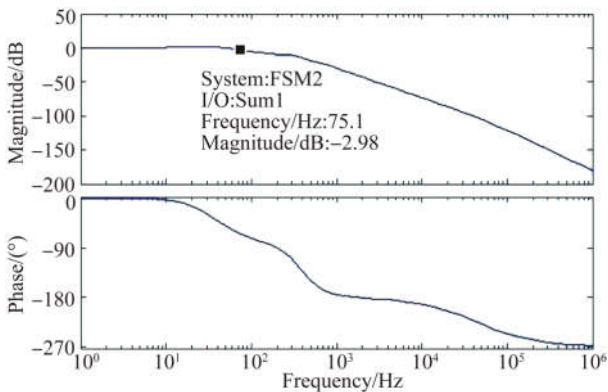


图 14 直线驱动快速反射镜闭环频响曲线

Fig. 14 Closed loop response curve of FSM driven by linearity

表 2 测试结果比较

Tab. 2 Comparison of test results

驱动形式	谐振峰	带宽 B/Hz	剪切频率 f_c /Hz	相位裕度 $\gamma/(\circ)$
弧线驱动	无	40.3	29.7	73.5
直线驱动	无	75.1	31.2	71.3

根据上述测试结果,在相同伺服控制器作用下,弧线驱动快速反射镜的-3 dB 闭环带宽约为 40.3 Hz,直线驱动快速反射镜的-3 dB 闭环带宽约为 75.1 Hz^[17]。

4.3 结果分析

对于高精度快速反射镜而言,为保证其快速性以及准确性,要求其伺服带宽尽可能高,并且在在其工作范围能不能出现机械谐振现象。因此在设计过程中,通常结构谐振频率是闭环带宽的 3 倍。

对比分析仿真及实验结果,弧线驱动快速反射镜的结构谐振频率约是闭环带宽的 3.02 倍,直线驱动快速反射镜的结构谐振频率约是闭环带宽的 3.06 倍。两种驱动形式的设计结果均与设计理念相符合,验证了分析结果的准确性。

在此基础上,分析两种驱动形式对系统控制带宽的影响。可以得出,将弧线驱动形式改为直线驱动形式,快速反射镜的机械谐振频率提高了 88.8%,伺服带宽提高了 86.4%。

5 结 论

本文针对如何提高大行程快速反射镜伺服带宽的设计要求,提出一种直线驱动形式的快速反射镜。通过与传统弧线驱动形式对比,研究两种驱动形式运动约束条件以及运动行程对快速反射镜伺服带宽的影响因素,并推导快速反射镜的系统动力学方程。最终,通过实验验证了两种驱动形式下,快速反射镜伺服带宽的优劣。试验结果表明,在相同外部输入条件下,与弧线驱动形式相比较,直线驱动快速反射镜的伺服带宽从 40.3 Hz 提高到 75.1 Hz,提高幅度约为 86.4%。也就是说,在大行程工作状态下,直线驱动快速反射镜具有更高的伺服带宽。结果满足设计要求,为大行程快速反射镜伺服带宽的提高提供了一种合理有效的解决方法。

参考文献:

- [1] 王鹤洪, 王伟国, 徐新行, 等. 机动车载快速反射镜激光指向修正量的解算 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(6): 1399-1406.
WANG H Q, WANG W G, XU X H, *et al.*. Solution of correcting values on laser beam directing of fast steering mirror for mobile vehicle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1399-1406. (in Chinese)
- [2] 纪明, 许培忠, 徐飞飞. 武装直升机光电系统发展与对策 [J]. 应用光学, 2010, 31(1): 1-7.
JI M, XU P ZH, XU F F. Development of optoelectronic systems for armed helicopters [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 1-7. (in Chinese)
- [3] DENG CH, REN W, MAO Y, *et al.* Plug-in module acceleration feedback control for fast steering mirror-based beam stabilization systems [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(8): 084105.
- [4] 方楚, 郭劲, 徐新行, 等. 适用于 FSM 系统的菱形微位移放大机构设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018004.
FANG CH, GUO J, XU X H, *et al.*. Design of rhomboid micro stroke amplifier for FSM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018004. (in Chinese)
- [5] NAM B U, GIMM H K, KANG D W. Design and analysis of a tip-tilt guide mechanism for the fast steering of a large-scale mirror [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(10): 084105.
- [6] 吕世良, 刘金国, 周怀得, 等. 星载红外探测器快速反射镜控制系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 0904005.
LÜ SH L, LIU J G, ZHOU H D, *et al.*. Design of control system for fast steering mirror of infrared detector based on satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0904005. (in Chinese)
- [7] 胥青青, 纪明, 雷霖霖, 等. 光电稳瞄二级稳定系统性能分析及测试 [J]. 应用光学, 2014, 35(1): 17-21.
XU Q Q, JI M, LEI F L, *et al.*. Performance analysis and test of opto-electronic two-level stabilization system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 17-21. (in Chinese)
- [8] 孙崇尚. 基于快速反射镜的高精度、宽频带扫描像移补偿技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
SUN CH SH. *Research on the sCanning Image Motion Compensation Technology Based on Fast Steering Mirrors with High Precision and Wide Frequency Range* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [9] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2428-2436. (in Chinese)
- [10] WU X, CHEN S H, SHI B Y, *et al.* High-powered voice coil actuator for fast steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(2): 023002.
- [11] 刘宗凯, 薄煜明, 王军, 等. 电磁力滤波与快速反射镜光学补偿在潜航器光轴稳定控制中的应用 [J]. 物理学报, 2017, 66(8): 084704.
LIU Z K, BO Y M, WANG J, *et al.*. Lorentz force filtering and fast steering mirror optical compensation in optical axis stability control for photoelectric mast [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2017, 66(8): 084704. (in Chinese)
- [12] 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, 2017, 31(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*, 2017, 31(7): 1115-1121. (in Chinese)
- [13] YUAN G, WANG D H, LI SH D. Single piezoelectric ceramic stack actuator based fast steering mirror with fixed rotation axis and large excursion angle [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2015, 235(1): 292-299.
- [14] 彭树萍, 陈涛, 刘廷霞, 等. 激光发射系统快速反射镜的光线反射过程 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 378-386.
PENG SH P, CHEN T, LIU Y X, *et al.*. Reflection process of fast-steering mirror of laser launching system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 378-386. (in Chinese)
- [15] TIAN J, YANG W SH, PENG ZH M, *et al.* Inertial sensor-based multiloop control of fast steering mirror for line of sight stabilization [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 111602.

[16] 闻邦椿,刘树英,张纯宇. 机械振动学[M]. 第2版. 北京:冶金工业出版社,2011.

WEN B CH, LIU SH Y, ZHANG CH Y. *Mechanical Vibrations*[M]. Second Edition. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011. (in Chinese)

[17] 王帅,邓永停,朱娟. 地基大口径望远镜伺服系统的

抗扰动设计[J]. 光学精密工程,2017,25(10): 2628-2635.

WANG SH, DENG Y T, ZHU J. Disturbance rejection control for large ground-based telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2628-2635. (in Chinese)

作者简介:



赵磊(1984—),男,陕西西安人,博士研究生,高级工程师,2007年、2010年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电系统总体设计方面的研究。E-mail:chrisjoto@163.com

导师简介:



纪明(1958—),男,山东威海人,研究员,博士生导师,兵器首席科学家,1982年于南京航空学院获得学士学位,1989年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事光电系统总体设计和瞄准线稳定技术设计等方面的研究。E-mail:jiming205@163.com