

文章编号 1004-924X(2013)01-0053-09

基于动力学模型的快速反射镜设计

黑沫^{1*}, 鲁亚飞¹, 张智永¹, 范大鹏¹, 夏年中²

- (1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410072;
2. 湖南兵器资江机器有限公司, 湖南 益阳 413000)

摘要:为了实现快速反射镜系统(FSM)的性能预测和快速设计,建立了两轴 FSM 的动力学模型,并提出了基于该动力学模型的 FSM 设计方法。介绍了 FSM 的结构与工作原理,推导了 FSM 的理想动力学模型,分析了 FSM 的高阶谐振和轴间耦合,建立了二自由度 FSM 整体模型。基于该模型,设计了某型 FSM 的主要参数,并进行了性能仿真。根据所设计的参数制作了 FSM 试验样机,测试了样机性能。试验结果表明:模型性能仿真结果与试验样机测试结果基本一致,系统带宽达到 250 Hz 以上,调节时间小于 15 ms,超调量小于 8%,定位精度优于 20 μ rad。结果表明,设计的 FSM 样机性能满足指标要求,验证了该设计方法的有效性和正确性。

关键词:快速反射镜;快速设计;激光束控制;动力学建模

中图分类号:TH703;TN243 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0053

Design of fast steering mirror based on dynamic model

HEI Mo^{1*}, LU Ya-fei¹, ZHANG Zhi-yong¹, FAN Da-peng¹, XIA Nian-zhong²

- (1. College of Mechatronic Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China;
 2. Hunan Enginery Zijang Machinery Limited Company, Yiyang 413000, China)
- * Corresponding author, E-mail: heimo_pla@163.com

Abstract: To design a Fast Steering Mirror (FSM) system rapidly and to predict its performance, a FSM dynamic model with two Degree of Freedom (DOF) was established, and a design method for the “dynamic model-based design of FSM” was investigated. The structure and operating principle of the FSM was described, and an ideal dynamic model of FSM was derived. Then, the high-order resonance and the coupling between the axes were analyzed and a two DOF integrated model of FSM is established. Based on the FSM model, main parameters for the FSM were determined. According to the design parameters, a FSM prototype was produced and its performance was tested. The results indicate that the simulation performance obtained by the FSM model is coincident with the experimental performance of the FSM prototype well. Moreover, the FSM shows its bandwidth more than 250 Hz, adjusting time less than 15 ms, overshoot less than 8%, and position accuracy better than 20 μ rad. These results demonstrate that the FSM prototype can satisfy the design requirements. It verifies the validity and correctness of the design method.

Key words: fast steering mirror; rapid design; laser beam control; dynamic modeling

收稿日期:2012-07-17;修订日期:2012-09-04.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 51135009);国家自然科学基金资助项目(No. 50805144)

1 引言

现代激光技术对激光光束瞄准精度的要求越来越高,已达到了微弧度和亚微弧度量级。如何实现空间激光的高精度、高带宽精确调整和指向,已然成为该领域的研究热点^[1]。快速反射镜系统(Fast Steering Mirror system, FSM)是在激光光源与接收端之间进行光束调整的装置,它广泛应用于激光光束稳定与控制系统中,具有体积小、质量轻、结构紧凑、速度快、精度高、带宽高等优点^[2-3]。目前,由于 FSM 的工作行程普遍较小,所以 FSM 通常与大行程框架机构一起构成粗精两级光束稳定与控制系统。这种系统可实现大行程角、高精度、快速响应的指向和稳定功能,广泛应用于空间光通信、像移补偿、精确跟踪瞄准等领域^[4]。

按照传统的机电系统设计方法设计 FSM,一般首先设计其机械部分,然后再设计其控制系统^[5-6]。该方法只有在机械和控制系统设计完成后才能对 FSM 性能进行评估,一旦其性能不能达到指标要求,则需对设计方案进行修改,由此不仅降低了产品生产效率,还增大了设计成本^[7]。为改善这一状况,实现 FSM 的性能预测与快速设计,本文依照基于模型设计(Model-Based Design, MBD)的思想^[8],提出了一种基于动力学模型的 FSM 设计方法。该方法首先建立 FSM 动力学模型,之后基于该模型对 FSM 进行参数设计,并进行性能仿真分析,以保证 FSM 在总体设计阶段设计的各参数均满足系统的性能要求。最后对利用该方法设计的 FSM 试验样机进行了性能测试,测试结果与模型仿真结果基本一致。该方法优化了 FSM 设计流程,提高了 FSM 设计效率。

2 FSM 结构与运动原理

FSM 两轴四驱动结构较之于两轴两驱动和两轴三驱动结构,具有稳定性强,高频运动耦合低,两轴运动控制无需座标变换等优点,因而本文设计的 FSM 选择两轴四驱动结构^[9],如图 1 所示。FSM 的基座上轴向对称安装有 4 个相同型号的音圈电机,音圈电机通过螺钉与反射镜固连;反射镜通过止口与二自由度柔性支承固连;二自

由度柔性支承通过另一端的止口与基座固连。

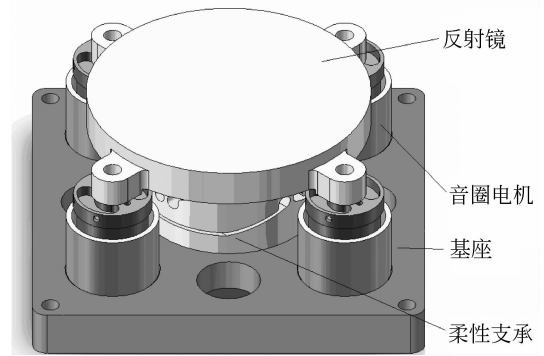


图 1 二自由度 FSM 结构

Fig. 1 Structure of two DOF FSM

柔性支承结构如图 2 所示,柔性支撑的下环固定在底座上,柔性铰链 1 和 3 与下环连接并通过中环与柔性铰链 2 和 4 连接,柔性铰链 2 和 4 通过上环与反射镜连接。柔性支承实现二自由度运动的原理为:4 个柔性铰链具有相同的结构尺寸和刚度,在 Z 方向共同支承反射镜,铰链 1 和 3 在音圈电机驱动力的作用下可绕 X 轴柔顺转动,铰链 2 和 4 在音圈电机驱动力的作用下可绕 Y 轴方向柔顺转动,其他方向的自由度则被结构所限制,从而实现了反射镜绕 X、Y 轴转动的自由度。

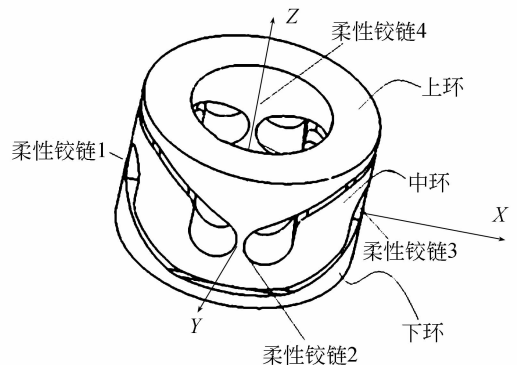


图 2 柔性支撑结构

Fig. 2 Structure of flexible support

3 FSM 建模

3.1 FSM 系统理想模型

在两轴四驱动结构中,假设其 X、Y 轴的特性相同,且不考虑轴间耦合,则 FSM 可简化为两个相同的单轴理想模型,如图 3 所示。以绕 X 轴转

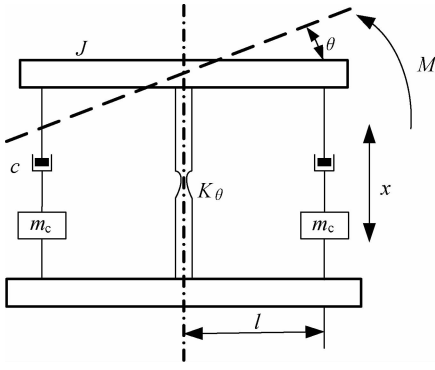


图 3 FSM 单轴理想模型

Fig. 3 Ideal model of FSM in single axis x

动为例,设 M 为 X 轴方向施加的力矩, J 为反射镜和柔性支承转动部分的转动惯量, θ 为反射镜的偏转角, K_θ 为柔性支承 X 轴扭转刚度, c 为柔性支承与音圈电机的等效阻尼系数, m_c 为音圈电机动子质量, l 为音圈电机力作用点到反射镜转轴的距离, x 为音圈电机的轴向位移,则 FSM 单轴模型的力矩平衡方程可表示为:

$$M = (J + 2m_c l^2) \ddot{\theta} + 2cl^2 \dot{\theta} + K_\theta \theta. \quad (1)$$

$$G_1(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{2lK_f}{(R + Ls) \left(s^2 + \frac{2c'l^2}{J + 2m_c l^2} s + \frac{K_\theta}{J + 2m_c l^2} \right) + K_f K_e l^2 s}. \quad (4)$$

利用该模型即可在 FSM 机械系统制作完成后,通过试验对 $G_1(s)$ 中的未知参数进行辨识,然后利用 SISO 系统控制器设计工具完成 FSM 控制器的设计。

3.2 带有高阶谐振的 FSM 模型

实际的 FSM 较理想模型复杂得多,通常存在着多个谐振频率^[2,10],如图 4 所示。为了准确描述 FSM 的幅频特性,需对 FSM 的高阶谐振进一步建模。

对于本文所述的 FSM 结构,由于其自由度方向刚度远低于非自由度方向刚度,因而其低阶谐振主要由自由度方向刚度决定;另外,由于存在加工装配误差、寄生效应等因素,FSM 高阶谐振主要由非自由度方向对自由度方向的运动耦合造成。综上所述可知,系统低阶谐振的成因较为简单,谐振频率可由式(4)计算得出,振型为绕 X 、 Y 轴的转动。对于系统高阶谐振,由 FSM 的有限元模型可知,限制 FSM 带宽提高的高阶谐振振型主要为绕 Z 轴的转动和沿 Z 轴的拉伸^[4,11]。由于 FSM 非自由度

进一步对两个音圈电机进行建模。令 u 为音圈电机的工作电压, i 为音圈电机的工作电流, L 为电机线圈的电感; R 为电机线圈的内阻, K_f 为电机力矩系数, K_e 为电机反电动势系数, c' 为除电机反电动势外的其它等效阻尼, $F_k = kx$ 为音圈电机所受的弹性力,则音圈电机的力平衡方程可表示为:

$$\begin{cases} \left(\frac{J}{2l^2} + m_c \right) \ddot{x} + \left(c' + \frac{K_f K_e}{R} \right) \dot{x} + kx = k_f i \\ u = L \frac{di}{dt} + Ri + K_e x \end{cases}. \quad (2)$$

在 FSM 中,偏转角 θ 一般较小,可近似认为 $\tan \theta \approx \theta$,由图 3 所示结构可知:

$$\begin{cases} x = l\theta \\ K_\theta = 2kl^2 \\ M = 2K_f il \\ cl^2 \dot{\theta} = \left(c' + \frac{K_f K_e}{R} \right) l \dot{x} \end{cases}. \quad (3)$$

联立式(1)~(3),可得系统的传递函数 $G_1(s)$ 为:

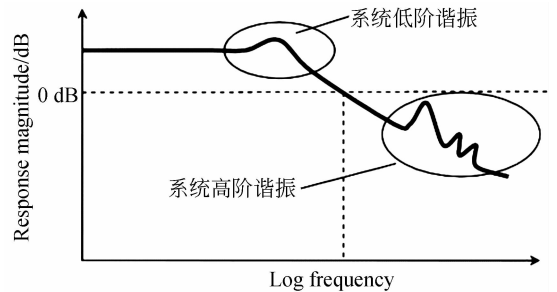


图 4 FSM 频域特性示意图

Fig. 4 Frequency response of FSM

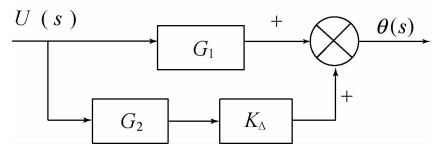


图 5 加入高阶谐振的 FSM 模型

Fig. 5 High-order resonance model of FSM

方向对自由度方向的耦合运动受较多非线性及不确定因素的影响,使得高阶谐振成因较为复杂,难

于准确建立其定量理论模型。因为 FSM 运动范围较小,为简化分析,将该耦合简化为一线性增益系数 K_{Δ} 。参照 3.1 节中方法,令 $K_{\theta z}$ 为柔性支承 Z 轴的扭转刚度, K_z 为柔性支承 Z 轴的拉伸刚度,

$$G_2(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{2K_f l}{(R + Ls) \left(s^2 + \frac{2c'l^2}{J_z + 2m_c l^2} s + \frac{K_{\theta z}}{J_z + 2m_c l^2} \right) + K_f K_e l^2 s} + \frac{2K_f}{(R + Ls) \left(s^2 + \frac{2c'}{m_z + 2m_c} s + \frac{K_z}{m_z + 2m_c} \right) + K_f K_e s}, \quad (5)$$

为满足系统带宽的要求,如将 FSM 的低阶谐振频率设计为带宽的 2~3 倍,势必将增大 K_{θ} 值,由式(1)可知 M 值也会随之增大,从而增大驱动电机的尺寸和功率,增加结构设计的难度和成本。由于 FSM 低阶谐振成因明确,谐振频率变化范围小,谐振增益不高,如果在满足强度、疲劳、转角范围和结构尺寸要求的前提下,降低柔顺支撑自由度方向上的刚度,同时提高非自由度方向上的刚度,使系统低阶谐振频率降低,高阶谐振频率增大;之后利用图 5 所示模型设计适宜的超前滞后控制器、陷波器和低通滤波器以抑制低阶谐振,减小高阶谐振及噪声等对系统的影响,即可令 FSM 具有较高闭环带宽的同时,有较低的自由度方向刚度,从而减小系统的结构设计难度,降低功耗和成本。

3.3 带有轴间耦合的 FSM 模型

对于轴间耦合问题,可将本文设计的 FSM 视为一个双输入双输出系统,如图 6 所示。其中, $U_x(s)$, $U_y(s)$ 分别为 X , Y 轴的输入电压, $\theta_x(s)$, $\theta_y(s)$ 分别为 X , Y 轴的输出转角,则可知:

$$\begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{yx} \\ G_{xy} & G_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix}, \quad (6)$$

令 $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{yx} \\ G_{xy} & G_{yy} \end{bmatrix}$, 为 FSM 的传递函数矩阵。

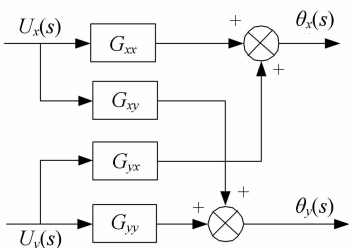


图 6 FSM 耦合模型

Fig. 6 Coupling model of FSM

K_{Δ} 为 Z 轴扭转和拉伸在自由度方向上的耦合增益系数,则可得到系统加入高阶谐振的模型如图 5 所示。其中, $G_1(s)$ 如式(4)所示, $G_2(s)$ 如式(5)所示, K_{Δ} 根据测试经验暂取 0.1(-20 dB)。

两轴 FSM 产生轴间耦合的原因主要有:(1)制造误差引起的柔性支承结构两旋转轴线不垂直;(2)每对音圈电机安装位置连线与柔性支承旋转轴线不垂直;(3)传感器角度测量轴线与柔性支承旋转轴线不共线。对于以上原因产生的 X , Y 轴间耦合进行线性近似,并通过给定 FSM 的装配公差指标计算出相应的耦合增益系数 K_{xx} , K_{xy} , K_{yx} , K_{yy} 。进而 FSM 的传递函数矩阵 \mathbf{G} 可表示为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} K_{xx}G_x & K_{yx}G_y \\ K_{xy}G_x & K_{yy}G_y \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由式(4)和式(5),按照图 5 所示模型,求得 $G_x(s)$, $G_y(s)$ 分别为:

$$\begin{cases} G_x(s) = G_1(s) + K_{\Delta x}G_2(s) \\ G_y(s) = G_1(s) + K_{\Delta y}G_2(s) \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $K_{\Delta x}$, $K_{\Delta y}$ 为 X , Y 轴非自由度方向的位移到自由度方向的线性近似耦合增益系数。

由于系统的加工与装配误差不可避免,轴间耦合必然存在,故实际系统均为 MIMO 系统。但为简化控制系统设计,一般希望系统可视为 SISO 系统。对于式(7)所示的传递函数矩阵,若 K_{xx} 和 K_{yy} 远大于 K_{xy} 和 K_{yx} (一般取两个数量级),则可视 $K_{xy} \approx 0$, $K_{yx} \approx 0$, \mathbf{G} 近似为 \mathbf{G}' 的形式,如式(9)所示,进而将实际系统近似为 SISO 系统。

$$\mathbf{G}' = \begin{bmatrix} K_{xx}G_x & 0 \\ 0 & K_{yy}G_y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

这就要求在总体设计阶段,设计人员需依照系统的运动范围和定位精度等指标,给定图 6 所示模型中 K_{xx} , K_{yy} 与 K_{xy} , K_{yx} 间的比例关系;并对各加工装配公差量进行控制,以保证 FSM 在满足运动范围和定位精度等指标的情况下可近似为 SISO 系统。

3.4 二自由度 FSM 整体模型

根据上述分析结果,进一步对 FSM 控制器、

驱动电路、角位置传感器等进行建模,可得到含有高阶谐振的二自由度 FSM 整体模型,如图 7 所示。其中, $C(s)$ 为位置环控制器模型, $G_d(s)$ 为驱动电路模型, $G_{sen}(s)$ 为角位置传感器模型。

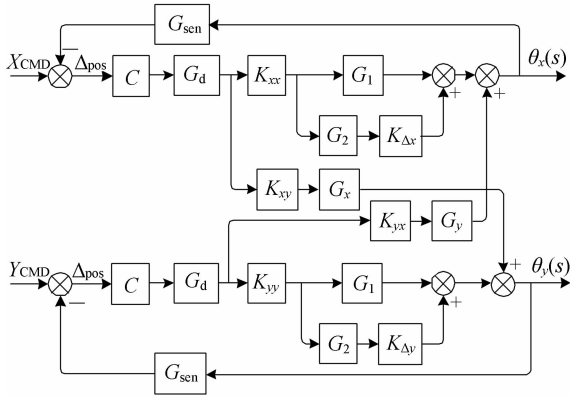


图 7 二自由度 FSM 模型

Fig. 7 Model of two DOF FSM

在系统的总体设计阶段,可利用该模型对各主要参数进行快速设计,并对设计结果进行性能仿真。这样就可以在进行细节设计前预测系统性能,及早发现问题并修改设计参数,确保参数满足系统的性能要求,从而提高设计效率。

4 基于模型的 FSM 设计实例

根据上述分析结果,以表 1 中的某两轴 FSM 指标要求为例,进行 FSM 的主要参数设计和性能仿真,以描述基于动力学模型的 FSM 设计的具体方法。

表 1 某二自由度 FSM 性能指标

Tab. 1 Performances of two DOF FSM

指标	参数
反射镜尺寸	$\Phi 75 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$
反射镜材料	微晶玻璃
转角范围	$\pm 10 \text{ mrad}$
定位精度	$\leq 20 \mu\text{rad}$
带宽	$\geq 250 \text{ Hz}$
调节时间(5%)	$\leq 15 \text{ ms}$
总功耗	$\leq 500 \text{ W}$

伺服带宽是 FSM 关键的性能指标,直接关系到本文所述的柔性支撑各向刚度的设计和电机的选型。由于 FSM 的带宽要求在 250 Hz 以上,因此根据“高阶谐振频率为伺服带宽的 2~3 倍”这一

设计原则,在保证系统高阶谐振频率大于 500 Hz 的前提下,综合电机最大出力、材料强度和疲劳以及 FSM 其它的性能指标等,基于图 7 所示的 FSM 模型,依照图 8 所示的流程对各关键参数进行反复迭代设计^[11],最终得到系统的设计参数如表 2 所示。

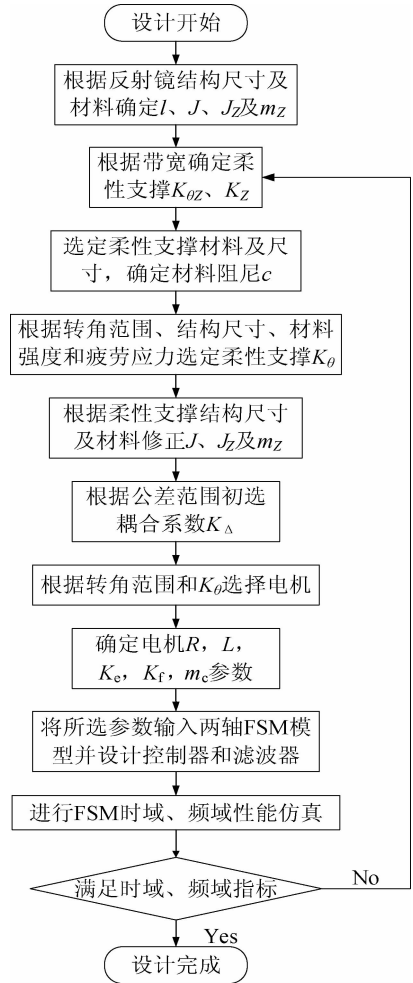


图 8 基于模型的 FSM 参数设计流程图

Fig. 8 Flowchart of parameter design of model based FSM

表 2 某 FSM 设计参数

Tab. 2 Design parameters of FSM

参数	数值	参数	数值
l	47 mm	K_θ	75 Nm/rad
J	$2.85 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	K_Δ	0.01
J_z	$4.31 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	R	4.30 Ω
m_z	0.33 kg	L	1.40 mH
K_{oz}	$1.09 \times 10^4 \text{ Nm/rad}$	K_e	5.90 V/(m · sec ⁻¹)
K_z	$8.40 \times 10^6 \text{ N/m}$	K_f	5.90 N/A
c	5.96×10^{-2}	m_c	0.025 kg

利用二自由度 FSM 模型对表 2 中所列参数进行时域和频域性能仿真,得到 X,Y 轴开环 Bode 图如图 9,10 所示。进一步利用 SISO 工具对系统控制器进行设计,可得 FSM 模型 X,Y 轴闭环 Bode 图和闭环阶跃响应如图 11~14 所示。综上所述,依照表 2 中所列参数进行 FSM 的设计,其性能参数如表 3 所示,满足系统的指标要求,故可依据表 2 中参数对系统进行详细设计。

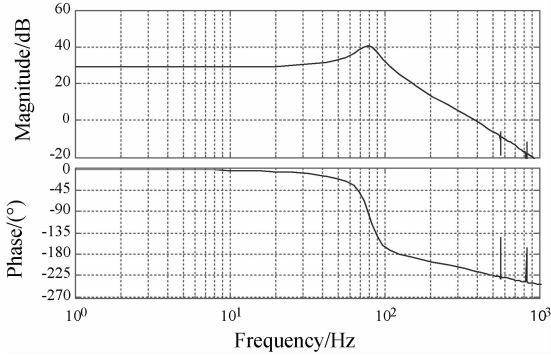


图 9 FSM 模型 X 轴开环 Bode 图

Fig. 9 X-axis open-loop Bode diagram of FSM model

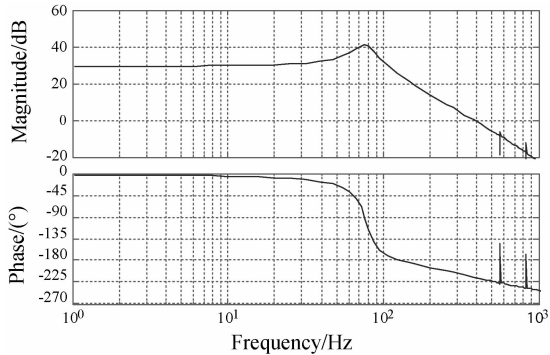


图 10 FSM 模型 Y 轴开环 Bode 图

Fig. 10 Y-axis open-loop Bode diagram of FSM model

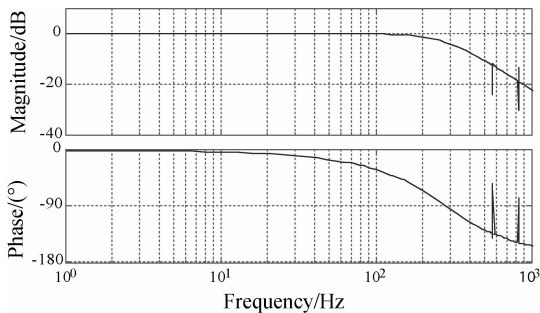


图 11 FSM 模型 X 轴闭环 Bode 图

Fig. 11 X-axis close-loop Bode diagram of FSM model

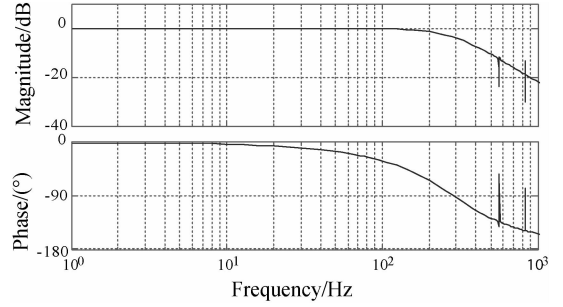


图 12 FSM 模型 Y 轴闭环 Bode 图

Fig. 12 Y-axis close-loop Bode diagram of FSM model

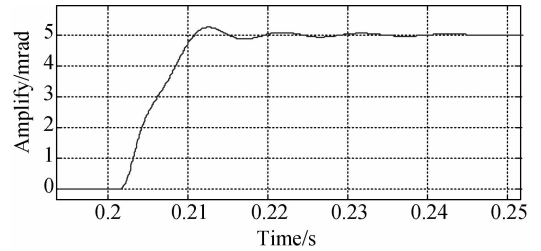


图 13 FSM 模型 X 轴闭环阶跃响应

Fig. 13 X-axis close-loop step response of FSM model

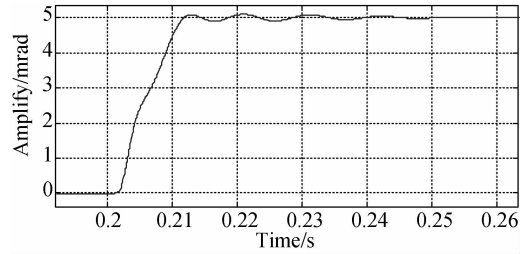


图 14 FSM 模型 Y 轴闭环阶跃响应

Fig. 14 Y-axis close-loop step response of FSM model

表 3 时域、频域仿真结果

Tab. 3 Simulation results of time domain & frequency domain

性能	X 轴	Y 轴
一阶谐振频率/Hz	79	77
二阶谐振频率/Hz	565	564
三阶谐振频率/Hz	828	828
闭环带宽/Hz	265	263
调节时间/ms	12	13
超调量/%	8	6
定位精度/ μ rad	≤ 20	≤ 20

5 FSM 试验样机性能测试

依据表 2 所列参数对 FSM 进行详细设计^[4], 制作了 FSM 试验样机。FSM 试验样机的柔性支撑内部安装有两组差动式电感传感器以检测反射镜的偏转角度^[4], 该传感器对反射镜偏转角度的测量精度优于 $5 \mu\text{rad}$, 保证了 FSM 能够满足定位精度指标。

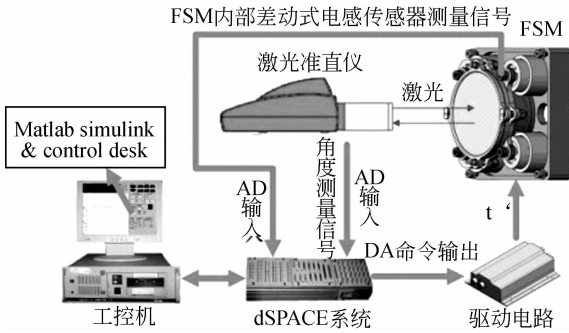


图 15 FSM 性能测试系统组成

Fig. 15 Components of FSM performance testing system

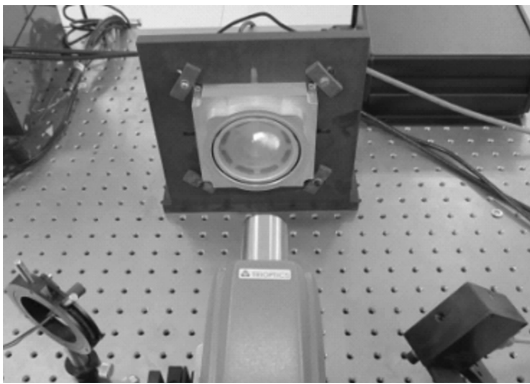


图 16 FSM 性能测试系统实物图

Fig. 16 Physical picture of FSM performance testing system

利用 dSPACE 半实物仿真系统构建该样机的性能测试系统, 如图 15, 图 16 所示。用该系统对 FSM 进行时域和频域性能测试, 可得系统的开环 Bode 图、闭环 Bode 图和闭环阶跃响应如图 17~22 所示, 其性能参数如表 4 所示。

由图 9~14、图 17~22、表 3, 4 中数据, 将试验样机的测试结果与模型仿真结果进行对比, 可知二自由度 FSM 模型的仿真结果与 FSM 试验样机的测试结果基本一致, FSM 试验样机的性能能达到

指标要求, 基于二自由度 FSM 模型的设计方法正确。

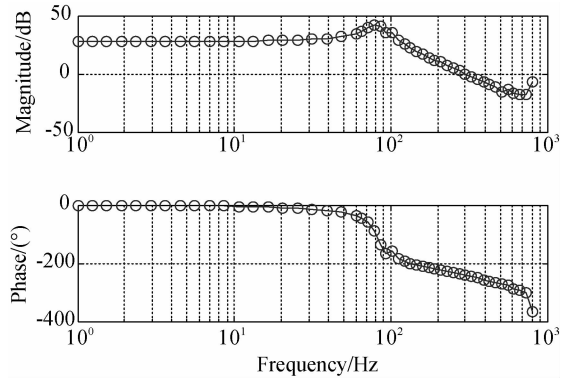


图 17 FSM 样机 X 轴开环 Bode 图

Fig. 17 X-axis open-loop Bode diagram of FSM prototype

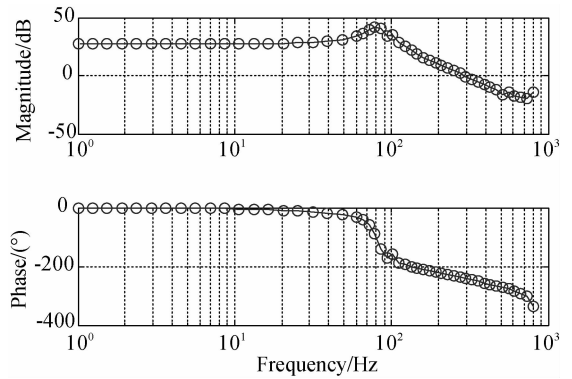


图 18 FSM 模型 Y 轴开环 Bode 图

Fig. 18 Y-axis open-loop Bode diagram of FSM prototype

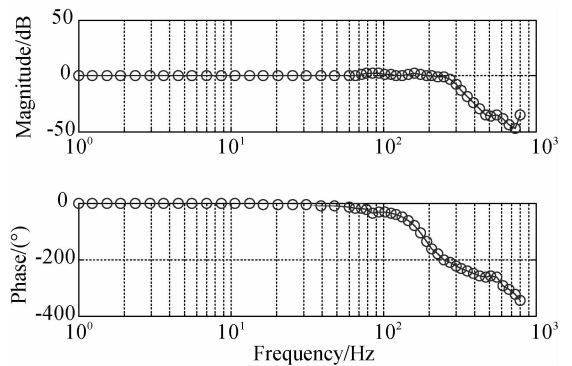


图 19 FSM 模型 X 轴闭环 Bode 图

Fig. 19 X-axis close-loop Bode diagram of FSM prototype

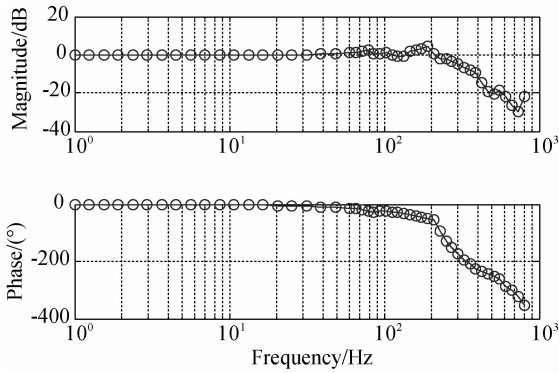


图 20 FSM 模型 Y 轴闭环 Bode 图

Fig. 20 Y-axis close-loop Bode diagram of FSM prototype

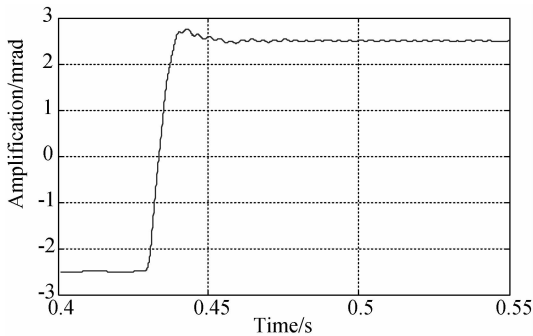


图 21 FSM 模型 X 轴闭环阶跃响应

Fig. 21 X-axis close-loop step response of FSM prototype

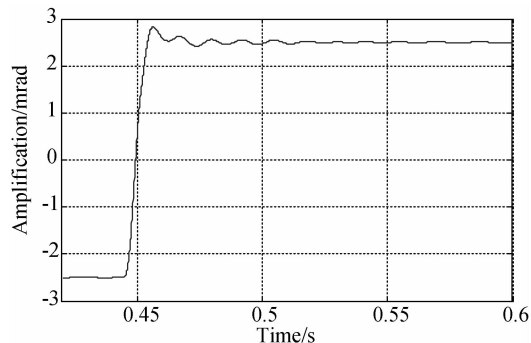


图 22 FSM 模型 Y 轴闭环阶跃响应

Fig. 22 Y-axis close-loop step response of FSM prototype

表 4 FSM 样机时域、频域性能

Tab. 4 Time domain & frequency domain properties of FSM prototype

性能	X 轴	Y 轴
一阶谐振频率/Hz	80	79
二阶谐振频率/Hz	550	540
三阶谐振频率/Hz	820	800
闭环带宽/Hz	255	250
调节时间/ms	14	15
超调量/%	7	8
定位精度/ μrad	≤ 20	≤ 20

6 结 论

本文以激光光束控制系统为应用背景,针对 FSM 快速设计问题,提出了一种基于动力学模型的 FSM 设计方法。首先介绍了 FSM 的结构与工作原理,然后建立了 FSM 动力学模型,最后设计了 FSM 的主要参数并进行了性能仿真。试验样机的性能测试结果表明:

(1)建立的 FSM 动力学模型各参数具有明确的物理意义,基于该模型设计的 FSM,其仿真结果与样机试验结果基本一致;

(2)基于该模型对 FSM 进行设计,在 FSM 低阶谐振频率较低的情况下,通过合理设计超前滞后控制器、陷波器和低通滤波器抑制低阶谐振,可使系统带宽达到 250 Hz 以上,调节时间小于 15 ms,超调量小于 8%,定位精度优于 20 μrad ;

(3)该设计方法可在总体设计阶段对 FSM 进行参数设计与性能预测,优化了 FSM 设计流程,提高了 FSM 设计效率,所设计的 FSM 可满足激光光束控制系统的精确控制要求。

参考文献:

[1] ULANDER K. *Two-axis beam steering mirror control system for precision pointing and tracking a p-*

plications [D]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2006.

[2] KLUK D J, BOULET M T, TRUMPER D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator [J]. *Mechatron-*

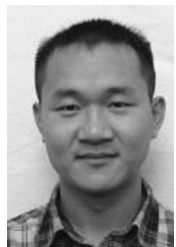
ics, 2012, 22: 257-270.

- [3] 张丽敏,郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13: 142-147.
ZHANG L M, GUO J. Simulative research on dual X-Y axis control of fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13: 142-147. (in Chinese)
- [4] 鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2009.
LU Y F. *Research on fast/fine steering mirror system* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [5] TANG T, MA J G, REN G. PID-I controller of charge coupled device-based tracking loop for fast-steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(4): 043002.
- [6] XIA Y X, BAO Q L, WU Q Y. Internal model control of a fast steering mirror for electro optical fine tracking [J]. *High-Power Lasers and Applications V, SPIE*, 2010, 7843: 78430L.
- [7] 石斌. 高速高精度机电系统的结构/控制一体化设计模型的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
SHI B. *Integrated modeling research on structure and control of high-speed and high-accuracy electro-mechanical system* [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [8] TOUMI K Y. Modeling, design, and control integration: a necessary step in mechatronics [J]. *IEEE Transactions on Mechatronics*, 1996, 1(1): 29-38.
- [9] 王永辉. 快速控制反射镜结构及其动态特性研究[D]. 长春:中国科学院长春光机所, 2004.
WANG Y H. *Research on Structure and Dynamic Performance of Fast Steering Mirror* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [10] KLUK D J. *An advanced fast steering mirror for optical communication* [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [11] 鲁亚飞,范大鹏,范世均,等. 快速反射镜两轴柔性支承设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2574-2582.
LU Y F, FAN D P, FAN SH X, *et al.*. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2574-2582. (in Chinese)

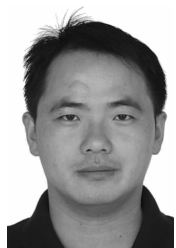
作者简介:



黑沫(1986—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,2008年,2010年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电伺服系统机电一体化设计方面的研究。E-mail:heimo_pla@163.com



鲁亚飞(1985—),男,河南汝州人,博士研究生,2007年于华中科技大学获得学士学位,2009年于国防科技大学获硕士学位,主要从事精密机械、结构动力学优化方面的研究。E-mail:luyafei-china@163.com



张智永(1979—),男,安徽明光人,讲师,1999年,2002年,2006年于国防科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事柔顺机构、嵌入式系统以及精密光电跟踪平台测控技术的研究。E-mail:zzynihao@126.com



夏年中(1965—),男,湖南益阳人,高级工程师,2005于南京理工大学武器系统与发射工程专业获得学士学位,主要研究方向为轻武器光电火控系统结构设计及其控制技术。E-mail:9656chnxnz@sina.com

导师简介:



范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数控技术,嵌入式系统以及精密光电跟踪平台测控技术的研究。E-mail:fdp@nudt.edu.cn