



双轴电热机械 MEMS 微镜的驱动臂交叉耦合模型

杨亮亮^{1a}, 胡 斌^{1,2}, 李剑敏^{1b}

(1. 浙江理工大学, a. 浙江省现代纺织装备技术重点实验室; b. 机械与自动控制学院,
杭州 310018; 2. 无锡微奥科技有限公司, 江苏无锡 214000)

摘 要: 根据双轴电热机械 MEMS 微镜的热力学、机械振动、频率响应和光学动态扫描图形分析, 考虑驱动臂轴间交叉耦合情况, 建立了双轴电热机械 MEMS 微镜的驱动臂交叉耦合模型。通过 Matlab/Simulink 对微镜系统模型进行仿真, 并模拟了双轴电热机械 MEMS 微镜单个驱动臂和两个驱动臂的光学动态扫描模式。将仿真图形与双轴电热机械 MEMS 微镜动态扫描的实际情况进行对比, 结果表明该模型有效仿真出双轴电热机械 MEMS 微镜的光学动态扫描模式, 达到预测该微镜光学动态扫描图形的目的。

关键词: MEMS 微镜; 电热驱动; 交叉耦合; 电热机械建模

中图分类号: TP215

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 05-0349-07

Actuator cross-axis coupling model of two-axis electrothermalmechanical MEMS mirror

YANG Liangliang^{1a}, HU Bin^{1,2}, LI Jianmin^{1b}

(1a. Zhejiang Provincial Key Lab of Modern Textile Machinery & Technology; 1b. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. WiO Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: According to the thermodynamics, mechanical vibration, frequency response and optical dynamic scanning pattern analysis of the two-axis electrothermalmechanical MEMS (micro electro mechanical system) mirror, the actuator cross-axis coupling model of the two-axis electrothermalmechanical MEMS mirror is established, in view of the cross-axis coupling. The MEMS mirror system model is simulated by Matlab/Simulink, and the optical dynamic scanning mode of a single actuator and two actuators of the two-axis electrothermalmechanical MEMS mirror is simulated. The simulation results are compared with the actual situation of dynamic scanning of two-axis electrothermalmechanical MEMS mirror. The results show that the model effectively simulates the optical dynamic scanning mode of the two-axis electrothermalmechanical MEMS mirror, which reaches the purpose of predicting the optical dynamic scanning pattern of the MEMS mirror.

Key words: MEMS (micro electro mechanical system) mirror; electrothermal actuation; cross-axis coupling; electrothermomechanical modeling

收稿日期: 2019-09-05 网络出版日期: 2019-12-04

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1304000); 浙江省自然科学基金项目(LY18E050016)

作者简介: 杨亮亮(1978—), 男, 湖北荆门人, 副教授, 博士, 主要从事高速高精运动控制技术方面的研究。

通信作者: 李剑敏, E-mail: ljmrz@163.com

0 引言

微机电系统(Micro electro mechanical system, MEMS)泛指采用微机械加工技术制造的微型器件或微型系统^[1]。MEMS 微镜是将微型镜面和 MEMS 驱动器集成制造的 MEMS 器件,是光通信、显示器制造、医学成像和运动跟踪等领域中的关键部件^[2-5]。MEMS 微镜按驱动方案的不同可分为静电式、压电式、电磁式和电热式^[6]。静电式 MEMS 微镜和压电式 MEMS 微镜工作电压较高,并且扫描角度范围有限^[7-8];电磁式 MEMS 微镜在谐振状态下扫描角度范围大,但体积结构大,不利于产品小型化;电热式 MEMS 微镜工作电压低,驱动结构简单,扫描角度范围大,但响应速度较慢。在许多应用中需要双轴扫描的 MEMS 微镜,通常采用万向节来驱动两个独立的扫描轴^[9-11],而该类 MEMS 微镜的缺点是填充因子(镜面面积除以芯片面积)低。根据双轴电热机械 MEMS 微镜的驱动原理,已经设计出具有高填充因子结构的双轴电热机械 MEMS 微镜。

基于双层薄膜结构(Bimorph)驱动的双轴电热机械 MEMS 微镜,4 个驱动臂分别在镜面的四侧悬挂,采用无万向节设计结构,填充因子得以大大增加^[12],并且在低工作电压下能实现大扫描角度^[13],已经广泛应用于内窥镜光学成像部件^[14]和微光谱仪^[15]。但该类 MEMS 微镜结构上缺少了万向节,在工作时,由于 4 个驱动臂都连接到镜面,镜面沿一个驱动轴的旋转会影响另一个驱动轴的旋转,即两个驱动轴之间存在固有的耦合造成扫描图形失真^[16]。本文对双轴电热机械 MEMS 微镜在光学动态扫描时存在的失真问题,在热力学、机械振动、频率响应和光学动态扫描图形分析的基础上,考虑驱动臂轴间交叉耦合情况,建立了双轴电热机械 MEMS 微镜的驱动臂交叉耦合模型;结合实验按照模型拟合实验数据曲线,搭建了一个仿真微镜系统,采用 Matlab/Simulink 仿真了该 MEMS 微镜的光学动态扫描模式,并通过实验对模型的有效性进行了验证。

1 双轴电热机械 MEMS 微镜的结构

本文采用 Bimorph 驱动结构^[16]的双轴电热机械 MEMS 微镜。该微镜如图 1(a)中所示,主要由镜面、4 个电热式 Bimorph 驱动臂(Act-1、Act-2、Act-3 和 Act-4)和硅基底组成;镜面直径约为 1 mm,

镜面涂有 Al 膜以获得高反射率。双轴电热机械 MEMS 微镜驱动臂如图 1(b)所示,采用折叠的双 S 形 Bimorph 驱动结构,由不同热膨胀系数的两种材料组成,支撑并控制镜面转动。单个驱动臂由两个重叠段的反向串联式(Inverse series connection, ISC) Bimorph 组成,具有最小尖端倾斜和横向位移,在温度变化下可以产生垂直方向的大位移^[16]。驱动臂的材料由 Al 和 SiO₂ 组成,Al 层和 SiO₂ 层的厚度均约为 1.00 μm 。厚度为 0.25 μm 的 Ti 层嵌入在 Bimorph 中,在 MEMS 微镜工作时产生焦耳热,传导至 Al 层和 SiO₂ 层,由于 Al 的热膨胀系数大于 SiO₂ 的热膨胀系数,导致 Al 层产生的热变形大于 SiO₂ 层,使得每个 Bimorph 结构将产生弯曲形变,因而整个 ISC Bimorph 驱动臂产生垂直方向的位移。温度变化时 Bimorph 结构变化示意图如图 2 所示。

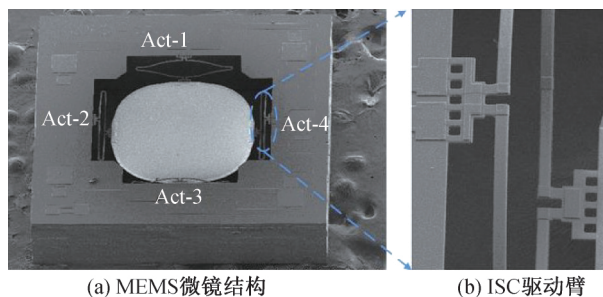


图 1 MEMS 微镜照片

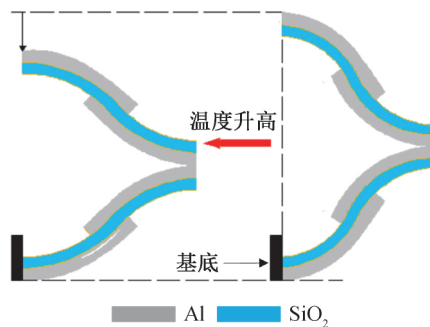


图 2 温度变化时 Bimorph 结构变化示意图

2 双轴电热机械 MEMS 微镜建模

2.1 电热机械模型

双轴电热机械 MEMS 微镜的驱动原理是基于电能、热能和机械能三者之间的能量转换。因此,双轴电热机械 MEMS 微镜的运动可以被认为是 Bimorph 驱动臂的电热响应与机械响应组合作用结果。

Bimorph 驱动臂的温度分布非常均匀,因为 Ti 电阻器沿驱动臂均匀分布,并且每个驱动臂的两端

都存在热隔离^[17]。因此,其电热响应可以简化为一阶系统。

在机械响应方面,双轴电热机械 MEMS 微镜的镜面厚度远大于 Bimorph 驱动臂的厚度,镜面可以被视为刚体,当仅激励一个驱动臂时,其机械响应可以简化为二阶质量-弹簧-阻尼系统。因此,结合 Bimorph 驱动臂的电热响应与机械响应,双轴电热机械 MEMS 微镜的全部响应可以简化为以下传递函数 H :

$$H(s) = H_T(s) \cdot H_M(s) = K_a \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

其中: $H_T(s)$ 为电热响应传递函数; $H_M(s)$ 为机械响应传递函数; K_a 为关于驱动臂的偏置电压的增益; τ 为热时间常数; s ; ω_n 为阻尼固有频率; ζ 为 MEMS 微镜系统中阻尼比。

测量倾角的实验装置如图 3 所示,其中: U 为施加在驱动臂的电压信号; θ 为镜面偏转的角弧度变化量; D 为镜面到测试屏之间的距离; d 为镜面反射光斑在测试屏上的位移量。激光器工作产生的激光束,经分光镜入射到镜面表面,同时向双轴电热机械 MEMS 微镜的一个驱动臂施加电压激励信号,若双轴电热机械 MEMS 微镜正常工作,测试屏上将出现激光线。镜面的偏转角度 2θ 可以通过测量激光线的长度计算得到。

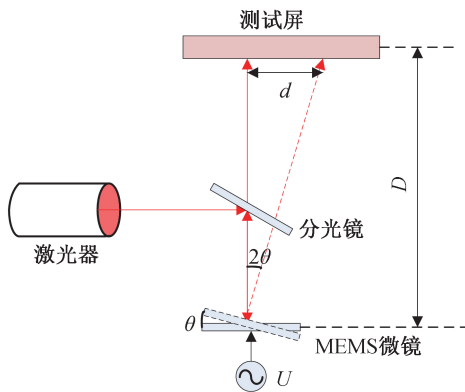


图3 测量倾角的实验装置

实验在室温和一个标准大气压下进行。信号发生器将带有 1.25 V 直流偏置和 1.25 V 幅度的频率扫描正弦信号施加在 Act-2 (x 轴驱动臂) 上。图 4 显示了该 MEMS 微镜从 1 Hz 到 1680 Hz 的频率响应曲线,在低频段处存在的衰减对应其一阶热响应,3 处尖峰对应其 3 个共振模式。因此,根据实验结果,需要通过引入 2 个共振模式以完善式(1)给出的模型。

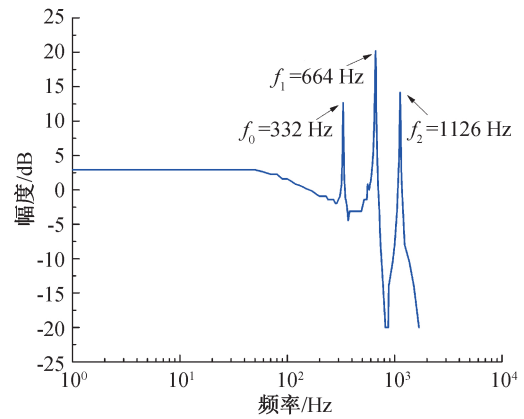


图4 双轴电热机械 MEMS 微镜的频率响应(Act-2 被驱动)

该 MEMS 微镜的运动示意图如图 5(a) 所示,一侧驱动臂被激励后,产生垂直方向的运动,带动镜面向另一侧偏转。驱动臂的机械运动可简化为弹簧刚体模型如图 5(b) 所示,其中 r 表示镜面半径, X 表示中心位移。镜面绕其中心旋转,4 根弹簧对应 MEMS 微镜的 4 个驱动臂。

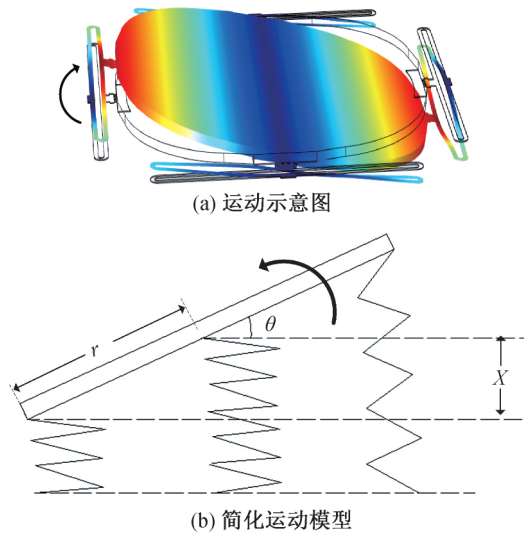


图5 双轴电热机械 MEMS 微镜的运动示意图及简化运动模型

由简化弹簧刚体模型建立动力学方程^[18],刚体具有对称中心,对称中心就是质心,其系统动能为:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{X}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

其中: T 为系统动能; m 为 MEMS 微镜镜面质量; g ; J 为转动惯量。

系统势能为:

$$V = 2 \times \frac{1}{2} k X^2 + \frac{1}{2} k (X + \theta r)^2 + \frac{1}{2} k (X - \theta r)^2 + 2 \times \frac{1}{2} k_\theta \theta^2 \quad (3)$$

其中: V 为系统势能; k 为弹簧刚度; k_θ 为扭转刚度。

根据式(2)–(3)可构建拉格朗日方程:

$$L = T - V = \frac{1}{2}m\dot{X}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 - 2kX^2 - (kr^2 + k_{\theta})\theta^2 \quad (4)$$

应用拉格朗日方程建立系统运动微分方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial X} = m\ddot{X} \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{X}} = -4kX \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = J\ddot{\theta} \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = -2(kr^2 + k_{\theta}) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)得系统固有频率 ω_1 、 ω_2 :

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{4k}{m}} \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{2(kr^2 + k_{\theta})}{J}} = \sqrt{\frac{1}{4}mr^2} \end{cases} \quad (6)$$

该 MEMS 微镜结构材料及机械相关参数见表 1, 利用表 1 中的材料参数可求解出式(6)中变量参数 k 、 m 和 k_{θ} [19]。表 1 中的 Si 是微镜面主要组成材料, Al 和 SiO_2 是驱动臂的主要组成材料, 求解出固有频率值: $\omega_1 = 4172 \text{ rad/s}$; $\omega_2 = 7072 \text{ rad/s}$ 。

表 1 MEMS 微镜结构材料及机械相关参数

材料	热膨胀系数/ ($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)	杨氏模量/ GPa	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^3$)	泊松比
Si	2.6	165	2.33	0.27
SiO_2	0.4	70	2.22	0.17
Al	23.6	70	2.7	0.33

双轴电热机械 MEMS 微镜的频率响应如图 4 所示, 在实验测试结果中, 测得该 MEMS 微镜固有频率 f_0 (332 Hz) 是 f_1 (664 Hz) 的一半, 这种半频共振起源于电热响应的非线性 [20]。该 MEMS 微镜固有频率理论值与实际值见表 2。从表 2 中可以发现微镜固有频率的理论值与实际值存在偏差, 主要原因是模型没有考虑实际存在的空气串扰对驱动臂的影响。表 2 将实验测得值与理论值进行比较, 3 组误差均在 6.7% 以内。微镜系统存在的多共振模式, 在式(7)中用单个传递函数进行描述。

表 2 MEMS 微镜固有频率理论值与实际值

固有频率类别	理论值/Hz	实验值/Hz	误差/%
f_0	310.9	332	6.3
f_1	621.8	664	6.3
f_2	1118.4	1126	6.7

建立的电热机械模型可以表示为:

$$H(s) = H_T(s) \cdot H_1(s) \cdot H_2(s) \cdot H_3(s) = K_a \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \cdot \frac{\omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_1\omega_1 s + \omega_1^2} \cdot \frac{\omega_2^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2 s + \omega_2^2} \cdot \frac{\omega_3^2}{s^2 + 2\zeta_3\omega_3 s + \omega_3^2} \quad (7)$$

其中: $H_1(s)$ 为第一个共振模式的传递函数; $H_2(s)$ 为第二个共振模式的传递函数; $H_3(s)$ 为第三个共振模式的传递函数; ω_1 为 MEMS 微镜的第一个固有频率; ω_2 为 MEMS 微镜的第二个固有频率; ω_3 为 MEMS 微镜的第三个固有频率。

2.2 考虑驱动臂轴间交叉耦合的双轴电热机械 MEMS 微镜模型

式(7)表明若激励该 MEMS 微镜的一个驱动臂, 在图 3 所示的测量倾角实验中, 扫描出的图形将是直线。在验证实验中, 将带有 1.25 V 直流偏置和 1.25 V 幅度的 332 Hz 正弦波电压信号施加到 MEMS 微镜的 Act-2 (332 Hz 是沿着 x 轴驱动臂的共振频率之一)。双轴电热机械 MEMS 微镜光学动态扫描图形如图 6 所示, 从图中可以看出, 该 MEMS 微镜的实际扫描图形不是 x 轴上的一条直线而是一个椭圆形, 这表明从驱动臂的 x 轴到 y 轴存在强烈的交叉轴耦合。因此, 有必要考虑轴间交叉耦合影响, 从而进一步完善模型。



图 6 MEMS 微镜扫描示例图形照片

虽然双轴电热机械 MEMS 微镜的 4 个驱动臂设计相同, 但由于制造工艺的变化, x 轴和 y 轴上实际的共振频率有轻微不同。当激励 x 轴驱动臂达到谐振时, 受交叉耦合影响, y 轴驱动臂在谐振频率附近也将被激励。因此, 在模型中引入二输入二输出系统, 则可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: θ_x 为 MEMS 微镜在 x 轴方向上的扫描偏转角; θ_y 为 y 轴方向上的扫描偏转角; U_x 为施加到 x 轴驱动臂的电压信号; U_y 为施加到 y 轴驱动臂的电压信号; H_{xx} 为当 x 轴驱动臂被驱动时, x 轴的传递函数; H_{yy} 为当 y 轴驱动臂被驱动时, y 轴的传递函数; H_{xy} 是 x 轴驱动臂被激活时与 y 轴耦合的传递函数; H_{yx}

是 x 轴驱动臂被激活时与 y 轴耦合的传递函数。

双轴电热机械 MEMS 微镜的 4 个驱动臂通过热隔离分开, 热耦合可以忽略不计。将式(7)应用在 H_{xx} 、 H_{yy} 、 H_{xy} 和 H_{yx} , H_{xy} 和 H_{yx} 公式中, 并简化 $\tau=0$ 。结合式(7)一式(8), 在 Matlab/Simulink 中搭建双轴电热机械 MEMS 微镜系统模型, 模型仿真示意图如图 7 所示。

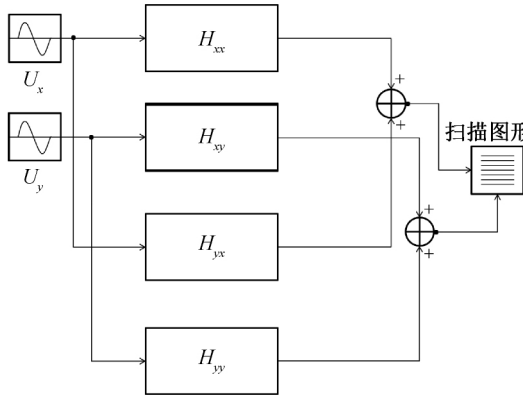


图 7 双轴电热机械 MEMS 微镜的仿真示意图

3 仿真实验及结果分析

仿真实验采用与图 3 相同的实验装置。实验首先测量仅单个驱动臂被驱动时的频率响应, 并结合实验按照模型拟合实验数据曲线, 得到双轴电热机械 MEMS 微镜系统中的模型参数; 然后分别对双轴电热机械 MEMS 微镜的单个驱动臂和两个驱动臂进行光学动态扫描, 同时采用 Matlab/Simulink 进行相应仿真; 最后将该 MEMS 微镜的光学动态扫描图形与仿真图形做比较分析。

3.1 单个驱动臂的频率响应分析

当 Act-2 被施加带有 1.25 V 直流偏置和 1.25 V 幅度的正弦电压, 频率从 1 Hz 扫描到 1680 Hz 时, 主轴(x 轴)的频率响应与 y 轴的交叉耦合影响如图 8(a)所示, 图中显示出在 3 个谐振频率附近存在 y 轴到 x 轴的强耦合, 3 个谐振频率分别是 f_0

(332 Hz)、 f_1 (664 Hz)和 f_2 (1126 Hz)。激励 y 轴驱动臂(Act-1)时该 MEMS 微镜的频率响应如图 8(b)所示, Act-1 被施加与 Act-2 相同的激励信号, 频率从 1 Hz 扫描到 1680 Hz。3 个谐振频率分别在 f_0 (333 Hz)、 f_1 (666 Hz)和 f_2 (1130 Hz), 耦合情况与图 8(a)类似。

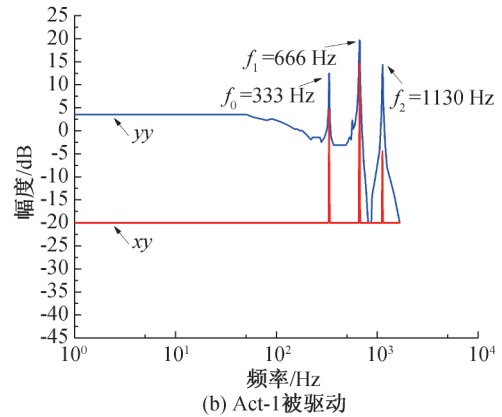
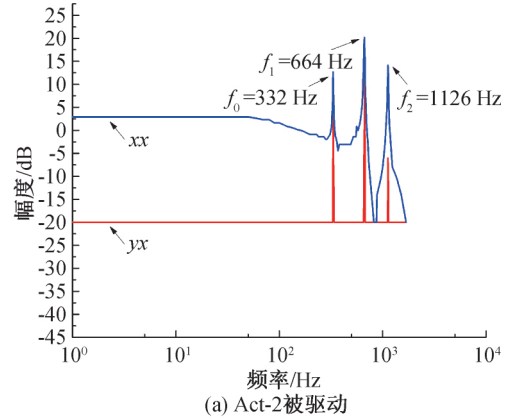


图 8 测量双轴电热机械 MEMS 微镜频率响应曲线

根据式(7), 在 Matlab 中仿真实验曲线结果如图 9 所示, 从图 9 可以看出, 仿真实验曲线与双轴电热机械 MEMS 微镜频率响应曲线在测量范围的频率内(1~1680 Hz)的大多数频率段基本吻合, 具有较高的一致性, 相应的模型参数如表 3 所示。

H_{xx} 、 H_{xy} 、 H_{yx} 和 H_{yy} 的数学表达式为:

$$H_{xx}(s) = \frac{5.421 \times 10^{21}}{0.001s^7 + 1.3s^6 + 7.2 \times 10^4 s^5 + 9 \times 10^7 s^4 + 1.18 \times 10^{12} s^3 + 1.36 \times 10^{15} s^2 + 3.98 \times 10^{18} s + 3.8 \times 10^{21}},$$

$$H_{xy}(s) = \frac{3.860 \times 10^{20}}{s^6 + 4.55s^5 + 7.205 \times 10^7 s^4 + 2.63 \times 10^8 s^3 + 1.178 \times 10^{15} s^2 + 2.57 \times 10^{15} s + 3.86 \times 10^{21}},$$

$$H_{yx}(s) = \frac{3.837 \times 10^{20}}{s^6 + 4.32s^5 + 7.194 \times 10^7 s^4 + 2.517 \times 10^8 s^3 + 1.17 \times 10^{15} s^2 + 2.46 \times 10^{15} s + 3.837 \times 10^{21}},$$

$$H_{yy}(s) = \frac{5.809 \times 10^{21}}{0.001s^7 + 1.32s^6 + 8 \times 10^4 s^5 + 9.22 \times 10^7 s^4 + 1.33 \times 10^{12} s^3 + 1.4 \times 10^{15} s^2 + 4.48 \times 10^{18} s + 3.9 \times 10^{21}}.$$

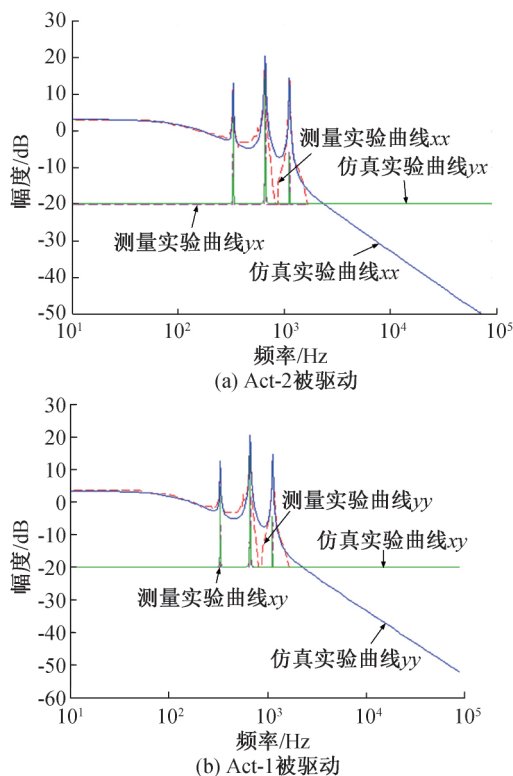


图9 双轴电热机械 MEMS 微镜频率响应的测量实验与仿真实验曲线

表3 模型参数表

参数	H_{xx}	H_{xy}	H_{yx}	H_{yy}
K_a	1.43	1	1	1.49
τ/s	0.001	0	0	0.001
f_0/Hz	332	333	332	333
f_1/Hz	664	666	664	666
f_2/Hz	1126	1130	1126	1130
ζ_1	4.8×10^{-2}	6.0×10^{-4}	5.8×10^{-4}	4.6×10^{-2}
ζ_2	1.0×10^{-2}	1.8×10^{-4}	1.7×10^{-4}	9.0×10^{-3}
ζ_3	1.0×10^{-3}	3.9×10^{-5}	3.3×10^{-5}	1.0×10^{-3}

3.2 单个和两个驱动臂扫描图形分析

信号发生器将带有 1.25 V 直流偏置和 1.25 V 幅度的 664 Hz 正弦波电压信号施加到 Act-2 (664 Hz 是沿着 x 轴驱动臂的共振频率之一)。图 10(a) 是该 MEMS 微镜在 f_1 (664 Hz) 处的光学动态扫描图形, 从图形呈现的椭圆形状可以发现在此频率处, x 轴受到交叉轴的强烈耦合; 基于图 7 所示的系统模型, 在 Matlab/Simulink 中仿真结果如图 10(b) 所示, 从图中可以看出仿真图形表现出与光学动态扫描图形一致的耦合情况。

实验进一步扩展至 MEMS 微镜两个驱动臂的扫描, 信号发生器将带有 1.25 V 直流偏置和 1.25 V 幅度的 30 Hz 正弦波电压信号施加到 Act-1, 同时, 将带有 1.25 V 直流偏置加 1.25 V 幅度的 390 Hz 正

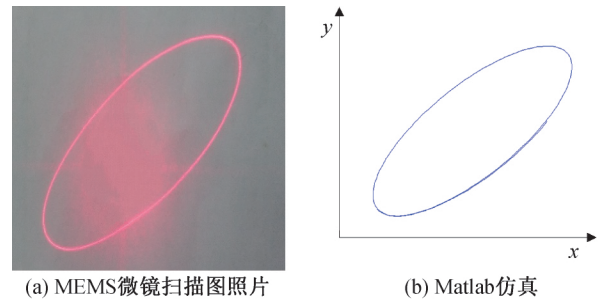


图10 单个驱动臂扫描图形

弦波电压信号施加到 Act-2, 光学动态扫描图形如图 11(a) 所示。在 Matlab/Simulink 仿真中, 加入相同的激励信号, 仿真结果如图 11(b) 所示, 从图中可以看出其主要特征点与光学动态扫描图形基本吻合, 并表现出了相似的耦合情况, 能够达到预测效果。

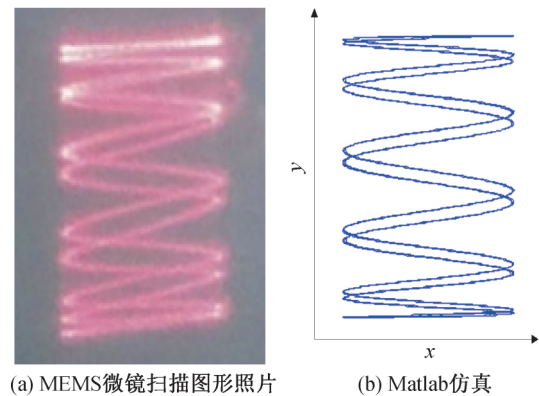


图11 两个驱动臂扫描图形

4 结论

本文提出了一种仿真双轴电热机械 MEMS 微镜的光学动态扫描模式方法, 该方法首先根据双轴电热机械 MEMS 微镜的热力学、机械振动建立电热机械模型; 再由频率响应和动态扫描图形分析, 考虑了驱动臂轴间交叉耦合影响, 建立了双轴电热机械 MEMS 微镜的驱动臂交叉耦合模型; 最后通过 Matlab/Simulink 搭建的系统模型进行仿真实验。仿真实验有效的仿真了双轴电热机械 MEMS 微镜的光学动态扫描模式, 使设计人员根据该模型可准确预测出该微镜光学动态扫描图形, 并为后续修正扫描图形失真阶段, 提供了模型基础。本文未对双轴电热机械 MEMS 微镜的热学特性进行详细分析, 有待深入。

参考文献:

- [1] 范伟政, 乔大勇. 微机电路系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011: 1-2.
- [2] Krishnamoorthy U, Li K, Yu K, et al. Dual-mode

- micromirrors for optical phased array applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 97/98: 21-26.
- [3] Wu L, Xie H. 124° rotation angle electrothermal micromirror with integrated platinum heater[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(2): 316-321.
- [4] Tanguy Q, Duan C, Wang W, et al. A 2-axis electrothermal MEMS micro-scanner with torsional beam [C]//2016 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN). Singapore: IEEE, 2016: 1-2.
- [5] Wang W, Chen J, Zivkovic A S, et al. A compact Fourier transform spectrometer on a silicon optical bench with an electrothermal MEMS mirror[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(2): 347-355.
- [6] Zhou G, Lee C. Optical MEMS: An introduction[M]//Optical MEMS, Nanophotonics, and Their Applications. Boca Raton: CRC Press, 2017: 33-38.
- [7] Jung I W, Krishnamoorthy U, Solgaard O. High fill-factor two-axis gimbaled tip-tilt-piston micromirror array actuated by self-aligned vertical electrostatic combdrives [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(3): 563-571.
- [8] Hofer H, Chen L, Yoon G Y, et al. Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye's aberrations[J]. Optics Express, 2001, 8(11): 631-643.
- [9] Yalcinkaya A D, Urey H, Holmstrom S. NiFe plated biaxial MEMS scanner for 2-D imaging [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(5): 330-332.
- [10] Urey H, Holmstrom S, Yalcinkaya A D. Electromagnetically actuated FR4 scanners[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(1): 30-32.
- [11] Koh K H, Lee C. A two-dimensional MEMS scanning mirror using hybrid actuation mechanisms with low operation voltage [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(5): 1124-1135.
- [12] Jia K M, Samuelson S R, Xie H K. High-fill-factor micromirror array with hidden bimorph actuators and tip-tilt-piston capability[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2011, 20(3): 573-582.
- [13] Wu L, Dooley S, Watson E A, et al. A tip-tilt-piston micromirror array for optical phased array applications [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(6): 1450-1461.
- [14] Struk P, Bargiel S, Froehly L, et al. Swept source optical coherence tomography endomicroscope based on vertically integrated Mirau micro interferometer: concept and technology [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(12): 7061-7070.
- [15] Wang D L, Liu H Q, Zhang J C, et al. Fourier transform infrared spectrometer based on an electrothermal MEMS mirror [J]. Applied Optics, 2018, 57(21): 5956-5961.
- [16] Jia K M, Pal S, Xie H K. An electrothermal tip-tilt-piston micromirror based on folded dual S-shaped bimorphs [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2009, 18(5): 1004-1015.
- [17] Pal S, Xie H. A parametric dynamic compact thermal model of an electrothermally actuated micromirror[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(6): 065007.
- [18] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 6 版. 北京:高等教育出版社, 2002: 290-295.
- [19] 邱棣华. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2004: 164-170, 390.
- [20] Todd S T, Xie H K. Steady-state 1D electrothermal modeling of an electrothermal transducer[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(12): 2264-2276.

(责任编辑:康 锋)