

文章编号 1004-924X(2015)08-2258-07

## 大角度压电式快速控制反射镜

袁 刚<sup>1,2\*</sup>, 王代华<sup>1,2</sup>, 李世栋<sup>1</sup>

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆大学 光电工程学院, 精密与智能实验室, 重庆 400044)

**摘要:**针对现有的基于压电陶瓷叠堆执行器的快速控制反射镜偏转角度较小的问题,提出了一种大角度定轴偏转压电式快速控制反射镜。采用基于柔性铰链的桥式位移放大机构将压电陶瓷叠堆执行器的输出位移放大,并将其作用到反射镜面上实现大角度定轴偏转。在此基础上,建立了压电式快速控制反射镜的结构和偏转角度输出方程,并通过理论推导和仿真对其工作时的最大偏转角度、最大应力和自然频率特性进行了分析。最后,通过实验测试对建立的压电式快速控制反射镜的工作原理和特性分析结果进行了验证。结果表明,建立的偏转角度输出方程能够根据压电陶瓷叠堆执行器的输出位移准确估计压电式快速控制反射镜的机械偏转角度,从而大大提高设计的效率;建立的压电式快速控制反射镜可以实现大于 $3^\circ$ 的镜面机械偏转,其固有频率为 180 Hz,能够满足高速稳像系统的偏转角度大、响应速度快的要求。

**关键词:**快速控制反射镜;压电陶瓷叠堆执行器;倾斜镜;自适应光学;图像稳定

**中图分类号:** TN384; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2258

## Piezoelectric fast steering mirror with large excursion angle

YUAN Gang<sup>1,2\*</sup>, WANG Dai-hua<sup>1,2</sup>, LI Shi-dong<sup>1</sup>

- (1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Precision & Intelligence Laboratory, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

\* Corresponding author, E-mail: cqyuan@cqu.edu.cn

**Abstract:** To extend the excursion angle of the Piezoelectric Ceramic Stack Actuator (PCSA) based fast steering mirror (FSM), a piezoelectric FSM with a large excursion angle and a fixed rotation axis was proposed and explored. The output displacement of the PCSA was amplified by a bridge-type flexure hinge and applied to a mirror to generate a fixed axis deflection with the large excursion angle. On this basis, the configuration and the corresponding output equation of the piezoelectric FSM were established, and the characteristics of the FSM, including the maximum excursion angle, the maximum stress, and the natural frequency, were analyzed through theoretical derivation and finite element simulation. Finally, the principle and characteristics of the proposed piezoelectric FSM were validated through experiments and tests. The results show that the output equation of the piezoelectric

收稿日期: 2015-01-17; 修订日期: 2015-02-20.

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (No. CDJZR12120005)

FSM estimates exactly the mechanical deflection angles of the piezoelectric FSM based on the output displacement of the PCSA and improves the design efficiency. Moreover, the developed piezoelectric FSM provides a mechanical excursion angle larger than  $3^\circ$  with natural frequency of 180 Hz, which satisfies the requirements of the high-speed image stabilization system for the large excursion angle and rapid response.

**Key words:** Fast Steering Mirror (FSM); Piezoelectric Ceramic Stack Actuator (PCSA); tilt mirror; adaptive optics; image stabilization

## 1 引 言

快速控制反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM) 根据输入的控制信号驱动反射镜面偏转, 实现对光源和接收装置间光路进行快速准确调整<sup>[1]</sup>, 在自适应光学补偿、光束跟踪和指向<sup>[2-4]</sup>、图像稳定<sup>[5,6]</sup>、激光扫描<sup>[7]</sup>、跟踪、捕获、瞄准系统<sup>[8-10]</sup>、空间光通信<sup>[11]</sup>等方面具有广泛应用。

近 20 年来, 国内外学者针对不同的应用和精度要求提出并研究了各种类型的 FSM<sup>[1,3,4,7,12-15]</sup>。根据驱动装置不同, FSM 可分为基于音圈执行器的 FSM 和基于压电陶瓷叠堆执行器 (Piezoelectric Ceramic Stack Actuator, PCSA) 的 FSM 两种。黑沫等<sup>[3]</sup>利用 4 个音圈电机和二自由度柔性支撑设计了可实现偏转角度为  $0.6^\circ$  的两轴 FSM; 王恒坤等<sup>[4]</sup>采用 4 个音圈电机驱动刚性轴系设计了偏转角度为  $30'$  的 2 轴 FSM; 向思桦等<sup>[7]</sup>采用包含弹性外框的新型 PCSA 驱动结构实现了机械偏转角度为  $0.7^\circ$  的单轴 FSM; 邵兵等<sup>[8]</sup>通过 PCSA 驱动柔性铰链杠杆结构设计了精瞄偏转镜, 其最大机械偏转角度为  $0.24^\circ$ , 响应频率和偏转精度分别达到 1 kHz 和  $0.22''$ 。相比较而言, 基于 PCSA 的 FSM 利用 PCSA 所具有的体积小、响应快、精度高、动态性能好、无电磁辐射等优点, 在高精度的应用中具有明显的优势。但是由于 PCSA 输出位移较小 (通常为执行器长度的 0.1%), 现有的基于 PCSA 的 FSM 大多只能实现小于  $1^\circ$  的角度偏转。

在高速图像稳定系统的应用中, 随着视场的扩大, 对 FSM 的偏转角度的要求越来越高。为了提高基于 PCSA 的 FSM 的偏转角度, 可采用基于柔性铰链的桥式位移放大机构<sup>[16,17]</sup>将 PCSA 的输出位移放大, 但目前缺乏合理的结构形式和准确的数学模型, 不能满足大角度压电式 FSM

设计的需要。

本文采用基于柔性铰链的桥式位移放大机构提出了一种大角度定轴偏转的压电式 FSM, 建立并分析了其工作原理和偏转角度输出方程, 通过理论推导和有限元仿真分析了其工作时的最大偏转角度、最大应力和自然频率特性, 并建立了相应的估计方程。最后, 通过实验对建立的 FSM 的原理进行了验证, 并对其特性进行了测试。

## 2 原理与结构

大角度定轴偏转压电式 FSM 的结构如图 1 所示。压电式 FSM 由反射镜面、柔性铰链连杆及镜架、桥式位移放大机构、PCSA 和球头垫片等组成。其中柔性铰链连杆由相同的双边直圆柔性铰  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  (也用于表示各柔性铰的旋转中心) 及其连接部组成; 反射镜面固定在柔性铰  $M_1$  和  $M_2$  之间的镜架上, 柔性铰  $M_1$  的下端固定; 桥式位移放大机构由 8 个相同的柔性铰  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $\dots$ 、 $A_8$  (也用于表示各柔性铰的旋转中心) 及其连接的对称的 4 端和 4 臂构成, 其下端固定; PCSA 在

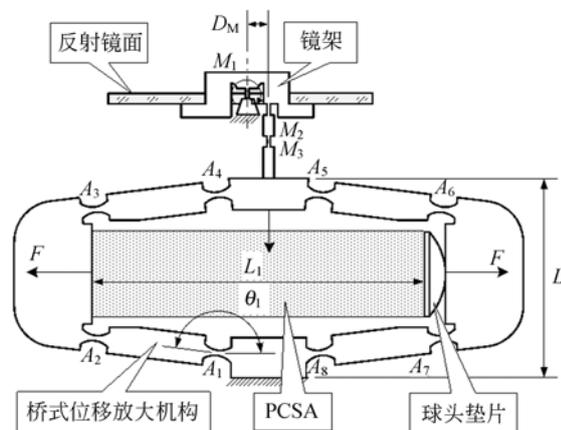


图 1 大角度定轴偏转压电式 FSM 的结构示意图  
Fig. 1 Configuration of piezoelectric FSM with large excursion angle and fixed rotation axis

预紧力作用下其两端分别直接和通过球头垫片与桥式位移放大机构两端面内侧紧密接触。

在驱动电压作用下,PCSA 沿水平方向产生位移  $\Delta L_1$  并通过桥式位移放大机构放大后引起连接部  $A_4 A_5$  垂直下移  $\Delta L$ 。考虑到  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  的刚度和偏转角度较小,可以忽略其对  $\Delta L$  的影响, $\Delta L$  可表示为:

$$\Delta L \approx \Delta L_1 / \tan \theta_{1N}, \quad (1)$$

式中: $\theta_{1N}$  为桥式位移放大机构上连线  $A_1 A_2$  与连线  $A_1 A_3$  夹角  $\theta_1$  的初始值; $1/\tan \theta_{1N}$  即为桥式位移放大机构的放大比。考虑 PCSA 产生的位移  $\Delta L_1$  较小,为了实现大角度的偏转需要较大的  $\Delta L$ ,因此要求桥式位移放大机构的放大比尽可能大,通常取  $\theta_{1N} > 170^\circ$ 。

连接部  $A_4 A_5$  下移拉动柔性铰链连杆,使得反射镜面绕柔性铰  $M_1$  的旋转轴线顺时针偏转。偏转角度可近似表示为

$$\Delta \alpha \approx \Delta L / D_M, \quad (2)$$

式中: $D_M$  为  $M_1$  到  $M_2 M_3$  的水平距离,定义为偏距。根据式(2)可知即便经过桥式位移放大机构放大后位移  $\Delta L$  仍然较小,为了实现较大的镜面偏转角度,偏距  $D_M$  不能取得过大,通常小于 3 mm。

根据式(1)和(2)有:

$$\Delta \alpha \approx \Delta L_1 / (D_M \tan \theta_{1N}). \quad (3)$$

反之,当驱动电压减小时,在各柔性铰的弹性力作用下,桥式位移放大机构上端的连接部  $A_4 A_5$  垂直上移,引起柔性铰链连杆向上运动,使得反射镜面绕柔性铰  $M_1$  的旋转轴线逆时针偏转。因此,通过调整 PCSA 的驱动电压变化,即可控制反射镜面绕  $M_1$  的旋转轴线往复偏转。

### 3 特性分析

#### 3.1 偏转角度

根据式(3),FSM 的偏转角度  $\Delta \alpha$  与  $\Delta L_1$ 、 $D_M$  和  $\theta_{1N}$  成反比。其中  $\Delta L_1$  不仅与 PCSA 的刚度、最大位移量和驱动电压有关,还与桥式位移放大机构的刚度有关<sup>[18]</sup>, $\Delta L_1$  可表示为:

$$\Delta L_1 = \Delta L_0 \frac{k_p}{k_p + k_s}, \quad (4)$$

式中: $k_p$  为 PCSA 的刚度; $\Delta L_0$  为 PCSA 空载时的位移; $k_s$  为桥式位移放大机构水平方向的刚度。

根据式(3)和(4),可建立压电式 FSM 的偏转角度输出方程为:

$$\Delta \alpha \approx \frac{\Delta L_0 k_p}{(k_p + k_s) D_M \tan \theta_{1N}}. \quad (5)$$

对具有不同  $D_M$  和  $\theta_{1N}$  的 FSM,在刚度  $k_p$  为  $50 \mu\text{m/N}$ 、空载位移  $\Delta L_0$  为  $16 \mu\text{m}$  的 PCSA 驱动下的偏转角度进行了有限元仿真。仿真时施加在桥式位移放大机构两端部内侧面的力等于  $k_p$  ( $\Delta L_0 - \Delta L_1$ ),其中  $\Delta L_1$  从仿真结果中测得。同时,可以根据桥式位移放大机构的结构参数计算其水平方向的刚度  $k_s$ ,并根据式(5)对偏转角度进行理论估计。仿真和理论估计的结果如表 1、表 2 所示。

根据表 1 和表 2,理论估计的结果与仿真结果接近且略偏大。当  $D_M$  大于 2 mm 且  $\theta_{1N}$  小于  $174^\circ$  时,理论估计的结果与仿真结果相对误差小于 15%。当  $D_M$  小于 1 mm 时,由于推动柔性铰  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  变形需要较大的推力,桥式位移放大机构不能等效为理想的位移执行器,根据式(5)估算反射镜面的偏转角度存在较大误差。当  $\theta_{1N}$  大于  $176^\circ$  时,桥式位移放大机构的 4 臂近似平行,其上端  $A_4 A_5$  的垂直位移将引起  $\theta_1$  和桥式位移放大机构实际位移放大比的较大变化,因此根据式(5)估算的反射镜面偏转角度的误差会随着角度增大而明显增加。

根据表 1,在相同的 PCSA 的驱动下,FSM 的偏转角度的幅值随着  $D_M$  的增加而减小。根据表 2,FSM 的偏转角度的幅值随着  $\theta_{1N}$  的增加而增大。

#### 3.2 应力分布

压电式 FSM 上各连接部可近似为刚体,工作时机构的主要变形发生在各柔性铰处。因此,应力主要分布在各柔性铰上,考虑到双边直圆柔性铰链具有应力集中的效果,故最大应力出现在柔性铰的旋转中心所在切面的外表面处,其大小可以根据各柔性铰弯曲的角度进行估计。

表 1 不同  $D_M$  的压电式 FSM 偏转角度仿真和估计结果  
Tab. 1 Simulated and estimated excursion angles of piezoelectric FSMs with different  $D_M$

$D_M/\text{mm}$	0.5	1	1.5	2	2.5
$\Delta \alpha$ 仿真值/ $^\circ$	-5.83	-4.08	-3.06	-2.47	-2.00
$\Delta \alpha$ 估计值/ $^\circ$	-11.43	-5.71	-3.81	-2.86	-2.29

表 2 不同  $\theta_N$  的压电式 FSM 偏转角度仿真和估计结果  
Tab. 2 Simulated and estimated excursion angles of piezoelectric FSMs with different  $\theta_N$  ( $^\circ$ )

$\theta_N$	170	172	174	176	178
$\Delta\alpha$ 仿真值	-2.00	-2.30	-2.64	-2.84	-2.22
$\Delta\alpha$ 估计值	-2.26	-2.64	-3.08	-3.38	-2.77

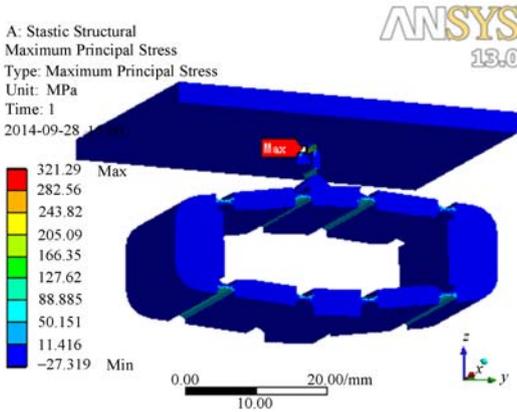


图 2 镜面偏转  $3.08^\circ$  时压电式 FSM 的应力分布仿真结果

Fig. 2 Simulation result of stress distribution of piezoelectric FSM with excursion angle of  $3.08^\circ$

由于  $\theta_N > 170^\circ$ , 连接部  $A_4 A_5$  的位移方向近似垂直于连线  $A_3 A_4$ , 则铰  $A_1 \sim A_8$  的偏转角度  $\Delta\theta_i$  可表示为:

$$\Delta\theta_i = \arcsin(\Delta L / 2l_2) \quad (6)$$

由于  $\Delta\theta_i$  较小, 式(6)可近似为

$$\Delta\theta_i \approx \Delta L / 2l_2 \quad (7)$$

由于  $2l_2 \gg D_M$ , 对比式(2)和(7), 柔性铰  $M_1$  处的转角远大于其余各柔性铰。因此压电式 FSM 的最大应力位于柔性铰  $M_1$  的旋转中心所在切面的外表面处, 其最大应力可写为:

$$\sigma = \frac{Mt}{2I} \quad (8)$$

式中:  $I$  为柔性铰  $M_1$  旋转中心所在截面的惯性矩,  $I = bt^3/12$ ;  $t$  为柔性铰的厚度;  $b$  为柔性铰的宽度;  $M$  为柔性铰  $M_1$  所受的扭矩,  $M = k_M \Delta\alpha$ ;  $k_M$  为柔性铰  $M_1$  的扭转刚度, 可表示为:<sup>[19]</sup>

$$k_M = \frac{2Eb t^2.5}{9\pi R^{0.5}} \quad (9)$$

式中:  $E$  为材料的弹性模量,  $R$  为柔性铰的切割半径。

根据式(8)和(9), 有:

$$\sigma = \frac{4\Delta\alpha E}{3\pi} \sqrt{\frac{t}{R}} \quad (10)$$

压电式 FSM 上的最大应力与材料弹性模量  $E$ 、镜面偏转角度和柔性铰  $M_1$  的厚度成正比, 与切割半径  $R$  成反比。为了减小应力可以采用低弹性模量的材料进行结构设计, 如超硬铝合金或铍铝合金; 同时要考虑尽可能减小柔性铰的厚度或增大其切割半径  $R$ 。

考虑  $t$  为 0.8 mm,  $R$  为 2 mm, 根据式(10)可得到压电式 FSM 镜面偏转  $3.08^\circ$  时的最大应力理论值为 323.97 MPa。同时, 在相同镜面偏转角度下, 压电式 FSM 应力分布的仿真结果如图 2 所示。最大应力位于柔性铰  $M_1$  上, 为 321.29 MPa, 与理论分析结果的相对误差小于 1%。验证了理论分析结果的准确性。

### 3.3 自然频率

压电式 FSM 的自然频率决定了其工作时的响应速度。由于 PCSA 的响应快、动态性能好, 而柔性铰链连杆部分的运动近似为刚体运动, 压电式 FSM 的自然频率主要由桥式位移放大机构、镜面惯性质量和理想旋转轴构成的转动系统的自然频率决定。考虑将桥式位移放大机构等效为垂直方向的弹簧, 压电式 FSM 可简化为图 3 所示的模型。根据图 3, 忽略镜面旋转铰的刚度, 运动时的自然频率可表示为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_A D_M^2}{I_M}} \quad (11)$$

式中:  $k_A$  为等效弹簧的刚度, 可以根据桥式位移放大机构的结构参数计算或仿真分析得到;  $I_M$  为镜面的转动惯量。

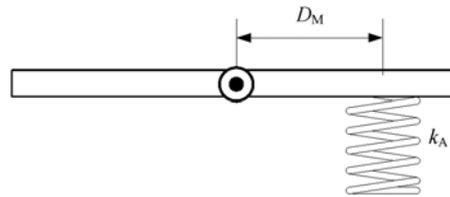


图 3 压电式 FSM 的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of proposed FSM

根据式(11), 可得到  $k_A$  为  $0.23 \text{ N}/\mu\text{m}$ 、 $D_M$  为 2 mm、 $I_M$  为  $4.377 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$  的压电式 FSM 的自然频率为 73.17 Hz。对相同参数的压电式 FSM 进行有限元仿真, 得到 1 阶模态分析结果如图 4 所示。根据图 4, 仿真得到的自然频率为

79.506 Hz, 与理论计算结果的相对误差小于 10%, 验证了分析结果的准确性。

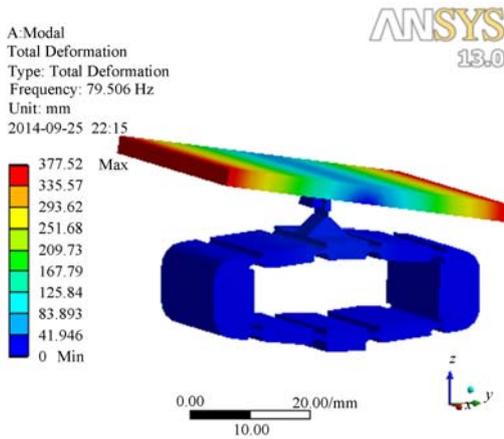


图 4 压电式 FSM 的一阶模态的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the first-order model of piezoelectric FSM

## 4 实验测试

为了对工作原理和特性分析结果进行验证, 根据前述偏转角度输出方程和自然频率方程设计了压电式 FSM 及其特性测试系统, 如图 5 所示。

测试系统由信号发生器、压电陶瓷执行器驱动器、压电式 FSM、激光多普勒测振仪(型号: Polytec OFV-505/5000)、示波器等组成。其中压电式 FSM 由外框架、反射镜面及桥式位移放大机构组件和 PCSA 等组成。通过在外框架上端切割加工得到柔性铰  $M_1$ , 将外框架分成底座和镜架两部分。镜架的上表面与反射镜面的下表面连接, 使得柔性铰  $M_1$  构成的反射镜面旋转中心与反射镜面共面。反射镜面的下端通过包含柔性铰  $M_2$  和  $M_3$  的柔性连杆与桥式位移放大机构的上端面连接, 桥式位移放大机构的下端通过螺钉固定在外框架的底座上。信号发生器产生的驱动信号经过压电陶瓷执行器驱动器放大后, 驱动压电式 FSM 中的 PCSA 伸长, 引起反射镜面的角度偏转。通过激光多普勒测振仪测量反射镜面上距离旋转轴线一定距离处沿垂直方向的位移, 可以解算得到反射镜面的实际偏转角度。测量结果由示波器显示和记录。

在 1 Hz、100 V 三角波信号的电压驱动下,

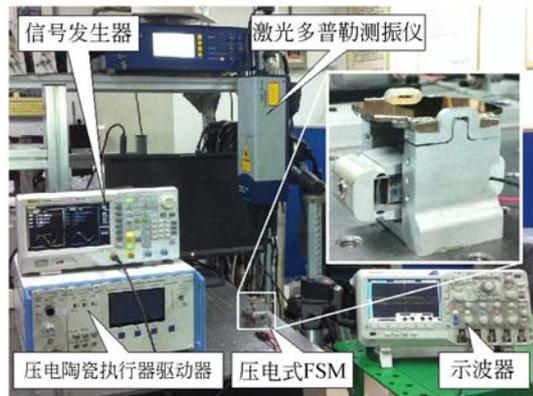
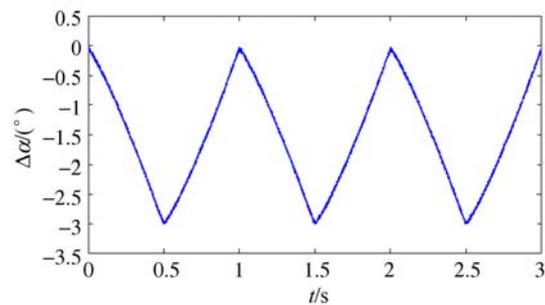


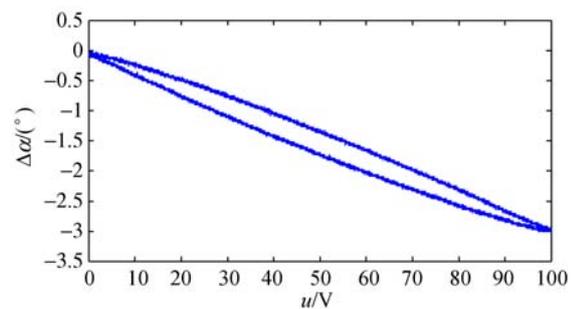
图 5 压电式 FSM 及其特性测试系统实物图

Fig. 5 Photograph of piezoelectric FSM and experimental set



(a) 偏转角度时间曲线

(a) Time histories of excursion angle



(b) 电压-偏转角度关系曲线

(b) Relationship between excursion angle and voltage

图 6 压电式 FSM 偏转角度的测试结果

Fig. 6 Experimental results of excursion angle of developed piezoelectric FSM

测得压电式 FSM 的偏转角度时间曲线和电压-偏转角度关系曲线如图 6 所示。根据图 6(a), 此时压电式 FSM 的最大机械偏转角度约为  $3^\circ$ , 通过提高驱动电压, 偏转角度还可以进一步增大。测得此时  $\Delta L_1$  的最大值为  $12.8 \mu\text{m}$ , 根据式(5)估

算得到最大机械偏转角度为 $2.986^\circ$ ,与实测结果一致。根据图6(b),由于PCSA存在迟滞特性,电压-偏转角度关系曲线中可以看到明显的迟滞环,即存在一定的非线性问题,构成了影响压电式FSM的执行精度的主要因素,可以通过线性化控制算法进行修正。

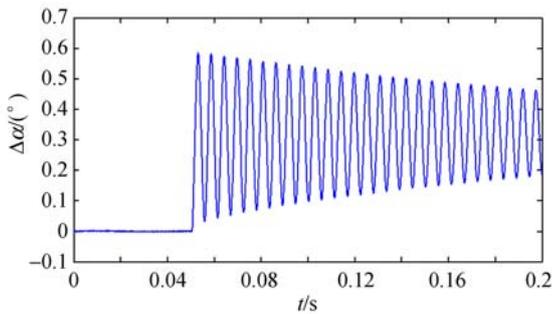


图7 压电式FSM在阶跃电压驱动下的偏转角度-时间曲线

Fig. 7 Time histories and excursion angle of developed piezoelectric FSM with step driven voltage

在阶跃电压驱动下,测得压电式FSM的偏转角度-时间关系曲线如图7所示。根据图7,压电式FSM的自然频率为 $180.421\text{ Hz}$ ,阻尼比为 $0.00179$ 。

## 参考文献:

- [1] HEDDING L R, LEWIS R A. Fast Steering Mirror design and performance for stabilization and single axis scanning [C]. *Proceedings of the SPIE in Acquisition, Tracking, and Pointing IV*, 1990: 14-24.
- [2] 邓耀初, 贾建援, 陈贵敏, 等. 振动环境下的快速反射镜精跟踪系统[J]. *激光与红外*, 2008, 38(1): 11-13.  
DENG Y CH, JIA J Y, CHEN G M, *et al.*. Precision tracking system with a Fast Steering Mirror in vibration environment [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(1):11-13. (in Chinese)
- [3] 黑沫, 鲁亚飞, 张智永, 等. 基于动力学模型的快速反射镜设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 53-61.  
HEI M, LU Y F, ZHANG ZH Y, *et al.*. Design

## 5 结论

本文提出了一种大角度定轴偏转的压电式FSM研究了其工作原理,建立了偏转角度输出方程,分析了其最大偏转角度、最大应力和自然频率特性,并推导了自然频率方程。通过实验对建立的FSM的原理进行了验证,结果表明:大角度定轴偏转的压电式FSM能够实现超过 $3^\circ$ 的大角度偏转,其自然频率为 $180.421\text{ Hz}$ 。压电式FSM的最大应力集中在镜面旋转柔性铰 $M_1$ 处。根据理论计算,当柔性铰厚度为 $0.08\text{ mm}$ 、切割半径为 $2\text{ mm}$ ,且反射镜面实现 $3.08^\circ$ 偏转时,压电式FSM上的最大应力为 $323.97\text{ MPa}$ 。可以通过调整位移放大机构对PCSA的预紧和初始高度,使得初始状态时反射镜面相对水平面逆时针偏转 $1.5^\circ$ 。在此情况下,反射镜面实现 $3.08^\circ$ 偏转时,镜面旋转柔性铰 $M_1$ 的最大偏转角度为 $1.58^\circ$ ,最大应力为 $166\text{ MPa}$ ,明显小于铝合金7075的屈服强度,能够保证其长期有效工作。本文建立的偏转角度输出方程能够根据PCSA的输出位移对压电式FSM的机械偏转角度进行准确估计,避免使用有限元分析存在的计算量大、更改参数进行仿真耗时较长的问题,能够大大提高设计的效率,并为进一步深入分析压电式FSM的动态特性和优化结构奠定基础。

- of Fast Steering Mirror based on dynamic model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 53-61. (in Chinese)
- [4] 王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(12): 336-341.  
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, *et al.*. High performance Fast-Steering Mirror for beam control of vehicular high energy laser system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 336-341. (in Chinese)
- [5] 洪华杰, 王学武, 翁千飞. 光电侦察装备中的反射镜稳定技术[J]. *应用光学*, 2011, 32(4): 591-597.  
HONG H J, WANG X W, WENG Y F. Mirror stabilization in electro-optical reconnaissance system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 591-597. (in Chinese)
- [6] CHEN N, POTSAID B, WEN J T, *et al.*. Model-

- ing and control of a Fast Steering Mirror in imaging applications [C]. *Proceedings of the 6th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Ontario*, 2010: 27-32
- [7] 向思桦, 陈四海, 吴鑫, 等. 基于新型压电驱动器的快速扫描反射镜[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 208-212.
- XIANG S H, CHEN S H, WU X, *et al.*. Research on novel piezoelectric Fast Steering Mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 208-212. (in Chinese)
- [8] 邵兵, 孙立宁, 曲东升, 等. 自由空间光通信 ATP 系统关键技术研究[J]. *压电与声光*, 2005, 27(4): 431-433.
- SHAO B, SUN L N, QU D SH, *et al.*. Research on the key technology of ATP system for free space optical communication [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optic*, 2005, 27(4): 431-433. (in Chinese)
- [9] 丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 1991-1998.
- DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of Fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 1991-1998. (in Chinese)
- [10] 元波, 陈洪斌, 任戈, 等. 100km 量子纠缠分发实验捕获跟踪技术[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6): 1628-1634.
- QI B, CHEN H B, REN G, *et al.*. ATP Technology for 100-kilometer quantum entanglement distribution experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1628-1634. (in Chinese)
- [11] TANG T. Acceleration feedback of a CCD-based tracking loop for Fast Steering Mirror [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(1): 1-6.
- [12] 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.
- ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, *et al.*. Design of Fast Steering Mirror using flexible hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)
- [13] 徐新行, 高云国, 杨洪波, 等. 车载大口径刚性支撑式快速反射镜[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 117-124.
- XU X X, GAO Y G, YANG H B, *et al.*. Large-diameter Fast Steering Mirror on rigid support technology for dynamic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 117-124. (in Chinese)
- [14] MARTH H, DONAT M, POHLHAMMER C F. Latest experience in design of piezoelectric-driven fine-steering mirrors [C]. *Proceedings of SPIE Active and Adaptive Optical Components, San Diego*, 1991: 248-261.
- [15] KLUK D J, BOULET M T, TRUMPER D L, A High-bandwidth, High-precision, Two-axis steering mirror with moving iron actuator [J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [16] MA H W, YAO S M, WANG L Q, *et al.*. Analysis of the displacement amplification ratio of bridge-type flexure hinge [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 132: 730-736.
- [17] YEOMA T, SIMONA T W, MARK T, *et al.*. High frequency, Large displacement, and Low power consumption piezoelectric translational actuator based on an oval loop shell [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 176: 99-109.
- [18] 刘荣, 侯力, 毛建, 等. 负载刚度对压电元件输出特性影响的研究[J]. *压电与声光*, 2008, 30(3): 279-281.
- LIU R, HOU L, MAO J, *et al.*. Research on the influence of stiffness on piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*. 2008, 30(3): 279-281.
- [19] YONG Y K, LU T F, HANDLEY D C. Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations [J]. *Precision Engineering*, 2008, 32: 63-70.

#### 作者简介:



袁刚(1982—),男,湖北麻城人,博士,讲师,2003年、2006年、2010年于重庆大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事智能结构与系统、传感器技术和振动能量收集等方面的研究。E-mail: cqyuan@cqu.edu.cn



王代华(1966—),男,湖北松滋人,博士,教授,博士生导师,1990年、1993年、1999年于重庆大学分别获得博士学位,主要从事智能结构与系统、传感器技术和光纤传感等方面的研究。E-mail: dhwang@cqu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)