

压电陶瓷驱动 FSM 三自由度柔性支撑设计

方 楚^{1,2,3}, 郭 劲^{1,2}, 徐新行^{1,3}, 王挺峰^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了有效吸收反射镜偏转造成驱动点的横向位置偏差, 保护压电陶瓷驱动器, 抑制反射镜在非工作方向上的自由度, 提高系统谐振频率, 设计了基于压电陶瓷驱动的快速反射镜三自由度柔性支撑。首先根据压电陶瓷驱动的快速反射镜对柔性支撑的设计要求确定了由支撑杆与支撑片组成的三自由度四周式柔性支撑方案, 再利用压杆稳定性理论与变形能法对支撑杆与支撑片进行参数设计, 最后利用 workbench 对设计结果进行分析。有限元分析结果表明, 直径 1 mm、长度 8 mm 的柔性支撑杆的应用可以使压电陶瓷的剪切位移减少 86.7%, 柔性支撑片的应用使反射镜一阶模态为轴向平移振动, 谐振频率为 360 Hz, 二三阶模态为反射镜两轴偏摆振动, 谐振频率为 420 Hz, 而高阶模态在 1 000 Hz 以上。三自由度柔性支撑可以有效防止压电陶瓷受到剪切破坏, 提高快速反射镜结构谐振频率, 有利于提高系统闭环带宽。

关键词: 快速反射镜; 四周式柔性支撑; 支撑杆; 支撑片; 压电陶瓷

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-2987-08

Design of three DOFs flexure support for FSM driven by piezoelectric ceramics

Fang Chu^{1,2,3}, Guo Jin^{1,2}, Xu Xinhang^{1,3}, Wang Tingfeng^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun 130033, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Three DOFs elastic support for fast steering mirror driven by piezoelectric is designed in order to effectively absorb the lateral deviation of driving point caused by tilting of mirror, protect the piezoelectric drivers, restrain the DOF in non-working direction and enhance the frequency resonance of system. Firstly the scheme of all-around elastic support which consists of flexure ring and flexure staff was determined according to requirements of fast steering mirror driven by piezoelectric design. Secondly flexure ring and flexure staff was designed separately based on the buckling theory and energy theory. Finally the design was analyzed with FEA software workbench. The FEA analysis shows that the shear displacement of piezoelectric decreases 86.7% with the application of 8 mm length and 1mm diameter flexure staff. In addition, the application of flexure ring turns the axial translation vibration into the first-

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 长春市科技计划(2013270)

作者简介: 方楚(1990-), 男, 博士生, 主要从事光学精密仪器方面的研究。Email: cfang1990@hotmail.com

导师简介: 郭劲(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用技术方面的研究。Email: guojin1964@126.com

order mode with resonance frequency of 340 Hz, turns the swing vibration into the second and the third order mode with resonance frequency of 420 Hz and the higher-order resonance frequency is more than 1 000 Hz. The three DOFs elastic support can prevent piezoelectric from shearing damage and help to enhance the resonance frequency of fast steering mirror system, which does help to enhancing the close-loop bandwidth of the system.

Key words: fast steering mirror; all-around flexure support; flexure staff; flexure ring; piezoelectric ceramics

0 引言

快速反射镜^[1-4](Fast Steering Mirror, FSM)是快速精确控制光束的装置,由于其具有响应速度快、工作带宽高、控制精度高等优点,被广泛应用于自由空间光通信^[5]、激光雷达系统^[6]、激光加工系统^[7]、光电经纬仪^[8]等领域,近年来成为国内外研究的热点。

快速反射镜主要由基座、反射镜、支撑元件、驱动元件、测量元件等部分组成。在关于快速反射镜的文献报道中,反射镜负载大小根据项目需求而定,驱动元件与测量元件大都选用成熟的产品,而支撑元件在设计上的差异是造成各种快速反射镜之间性能差异的重要原因,因此,分析和设计支撑元件是进行快速反射镜系统研究的关键^[9]。

与刚性支撑结构相比,柔性支撑结构是利用结构自身变形来提供或抑制反射镜的自由度,因此具有精度高、无摩擦、无间隙、结构紧凑等优点,在精密机械领域,柔性支撑结构得到更多推广应用。在国内的研究中大多针对音圈电机驱动的快速反射镜进行柔性支撑设计^[6,9-10],由于压电陶瓷与音圈电机存在控制上的差异,对支撑结构的要求不尽相同。因此本文将针对压电陶瓷驱动的快速反射镜设计具有三自由度的柔性支撑结构。

1 FSM 柔性支撑结构的方案设计

1.1 柔性支撑结构的设计思路

为了降低对偏转力矩的要求,支撑结构在反射镜的偏摆方向上应该具有较低的刚度,这意味着在这个方向上的振动模态会成为低阶模态,一般通过在控制系统中设计陷波器抑制低阶谐振频率的办法来提高系统带宽。支撑结构应该在反射镜的径向以及扭转方向上具有较高的刚度,使得在这些方向上

的振动模态具有较高的机械谐振频率。系统带宽一般设计在低阶谐振频率与高阶谐振频率之间,因此高阶谐振频率越高,越有利于提高系统的闭环带宽。基于以上设计思想,快速反射镜的支撑结构应该满足在反射镜的偏摆方向上给予自由度,在反射镜的径向以及扭转方向上抑制自由度。

1.2 柔性支撑结构的传统方案

为了实现对反射镜在不同方向上不同程度的自由度抑制效果,一般采用两种办法来设计支撑结构:一种是利用特殊的各向异性材料来提供柔性支撑,这种材料在某一方向上具有较高的弹性模量,可以在这个方向上对机构的自由度进行抑制,而在其他方向上的模量则较低,因而对这些方向上的自由度抑制作用较低。利用不同方向上性能的差异可以在特定方向提供自由度,从而避免了复杂的结构设计。美国麻省理工大学林肯实验室研制出一款快速反射镜^[5],其柔性支撑包括两部分:一是通过柔性支撑杆限制了反射镜轴向平移自由度;二是通过一种特殊橡胶材料来限制反射镜扭转自由度和径向的平移自由度。

另外一种方法采用常规材料,但是通过巧妙地结构形式来实现功能上的“各向异性”。复杂的支撑结构一般由基础柔性单元组合而成,基础的柔性单元包括各种类型的柔性铰链、柔性板、柔性轴等。国防科技大学研制的快速反射镜利用柔性铰链的组合设计了两轴柔性支撑^[9]。柔性铰链^[11-12]是一种特殊的传动机构,应用于转动角有限,而要求没有摩擦和空程的场合。单轴柔性铰链只具有单一的偏摆自由度,而多个柔性铰链通过串并联组合在一起,就可以实现更多功能。鲁亚飞等把4个单轴柔性铰链两两分成一组,采用先并联再串联的方法设计了快速反射镜的两轴柔性支撑结构,使柔性支撑只提供快速反射镜两个方向的偏摆自由度,保证了较高的机械谐振频率。

1.3 压电陶瓷驱动 FSM 柔性支撑设计要求

上一节介绍的两种柔性支撑结构有一个共同点,就是他们支撑的快速反射镜都是以音圈电机作为驱动元件。然而压电陶瓷与音圈电机除了在性能上的不同之外,在使用的过程中也有差别,这就使得以它们作为驱动元件的快速反射镜对柔性支撑结构也有不同的要求。

音圈电机在工作的过程中可以加正电压也可以加负电压,因此当音圈电机处于断电状态时快速反射镜的负载处于中间位置,也就是说反射镜的几何中心就是其回转中心所在位置,快速反射镜由断电状态转为工作状态时回转中心位置不会改变。但是当压电陶瓷作为驱动元件,情况就有些不同:如图 1 所示,压电陶瓷只能加正电压,当它处于断电状态时,压电陶瓷处于最短的状态,这时给压电陶瓷通电,由于所有压电陶瓷都要伸长,反射镜负载不能原地偏摆,而是在偏摆前要升高一段距离,理论上为了能让反射镜偏摆最大,升高的这段距离应该等于驱动元件的半行程。如果支撑结构限制了反射镜轴向平移自由度,当快速反射镜处于通电状态负载升高时,负载轴向将承受非常大的应力,对反射镜产生严重的变形影响。

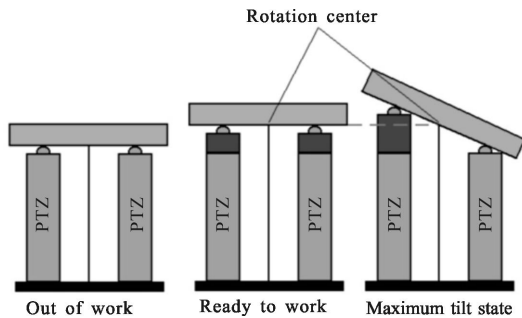


图 1 压电陶瓷驱动 FSM 的回转中心

Fig.1 Rotation center of FSM driven by piezoelectric ceramics

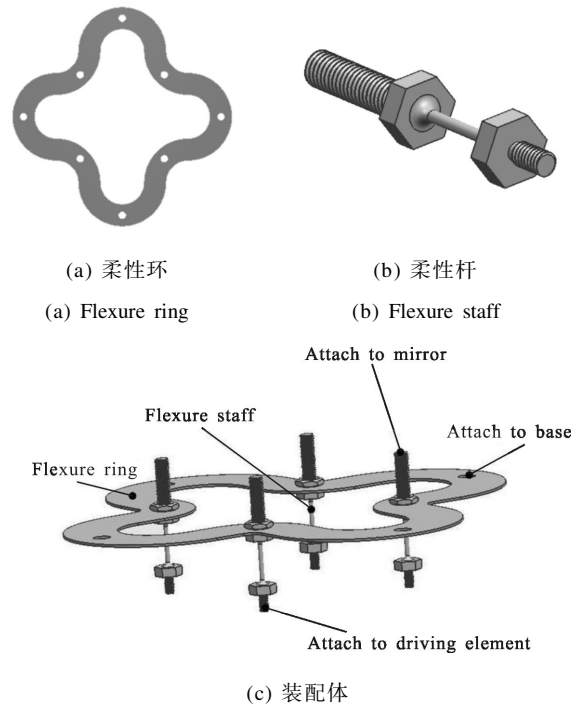
中心支撑结构^[13]能够提供稳定的回转中心,同时限制了反射镜的轴向平移自由度,如果压电陶瓷驱动的快速反射镜采用这种结构,那将对中心支撑轴的加工精度和预紧力的设置提出很高的要求:当压电陶瓷由断电状态转为通电状态时,中心支撑轴会随压电陶瓷的伸长也产生轴向变形,如果支撑轴的横截面较大,就会有很大应力产生,从而对镜架造成比较大的影响,如果支撑轴的横截面太小,那么对

反射镜的轴向约束就不彻底,回转中心也难以稳定。因此对于压电陶瓷驱动的快速反射镜,四周式支撑结构是可行的方案。

此外反射镜在偏转的过程中反射镜与驱动器的连接点会有横向位移,尽管横向位移很小,但是由于压电陶瓷抗剪切能力很差,如果压电陶瓷直接与反射镜连接,接触点的横向位移会使压电陶瓷承受剪切力而损坏。因此对于压电陶瓷驱动的快速反射镜,设计合理的柔性结构吸收反射镜偏转带来的驱动点位置偏差是十分必要的。

1.4 三自由度柔性支撑结构方案的设计

如图 2 所示,文中设计的柔性支撑结构由柔性片与柔性杆两部分组成。反射镜具有轴向平移和二维偏转 3 个自由度。



(c) 装配体

(c) Assembled flexure support

图 2 柔性支撑结构

Fig.2 Flexure support

设计柔性支撑杆的目的是为了在有效传递驱动力的同时,吸收反射镜偏转造成的驱动器与反射镜接触点的位置变化,从而保护压电陶瓷避免承受剪切破坏。如图 3 所示,柔性杆在轴向承受拉压变形,变形刚度比较大,因此变形小,可以有效传递驱动力;而柔性杆的弯曲刚度比较小,在吸收径向形变的情况下,可以传递很小的剪切力,从而保护了压电陶瓷。

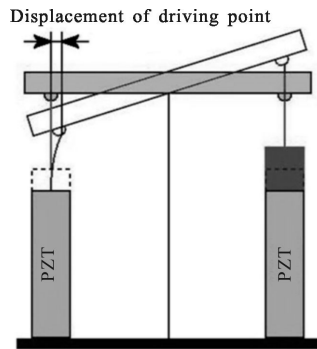


图 3 反射镜偏转时驱动点位置变化

Fig.3 Displacement of driving point when mirror tilts

柔性杆支撑结构不能抑制反射镜在扭转自由度与径向平移自由度，因此这个问题需要柔性片结构来解决。

图 4 中，为了抑制反射镜的径向平移自由度，可以把 4 根杆件摆成十字结构。

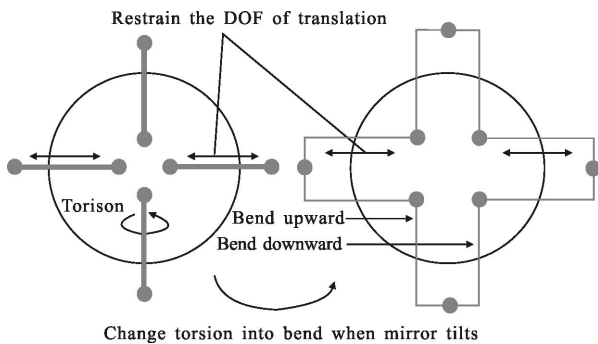


图 4 柔性片设计思路

Fig.4 Thought of flexure ring design

由于杆件的拉压刚度较大，不易变形，因此反射镜中心在径向的平移自由度就受到限制。然而在反射镜偏摆时，这些杆件会发生扭转变形，由于扭转变形刚度相对弯曲变形刚度较高，因此反射镜在偏摆方向上的自由度受到影响，为了减小对反射镜在偏摆方向上自由度的影响，将每根杆件一分为二，这样反射镜在偏摆时，所有杆件的变形都为弯曲变形，很大程度上减小了反射镜在偏摆方向上的刚度。反射镜的扭转自由度可以通过调整截面尺寸得到抑制。梁的惯性矩是影响梁弯曲刚度最重要的因素，如果在反射镜法向上柔性片中每个梁的惯性矩较小，那么反射镜在偏摆方向上的刚度就会很小，自由度不会受到抑制；如果在反射镜径向上柔性片中每个梁

的惯性矩较大，那么反射镜在扭转方向的刚度就会很大，自由度受到抑制。经过倒圆角后，支撑结构成为花瓣形柔性片。

2 柔性支撑结构的参数设计

2.1 柔性杆参数设计

设计柔性支撑杆最重要的是考虑压杆稳定性以及杆内应力是否低于许用应力。柔性杆的几何参数设计应该在保证不失稳和满足许用应力要求的前提下提供最大的柔度。为了加工方便，支撑杆截面选用圆形。根据欧拉公式，圆杆的失稳条件^[4]是：

$$F_{cr} = \frac{\pi^3 ED^4}{64l^2} \quad (1)$$

式中： F_{cr} 为临界力； E 为材料的弹性模量； D 和 l 分别为圆杆的直径和长度。从使用寿命考虑，选用具有较高疲劳极限的弹簧钢作为支撑杆材料。当驱动元件的最大输出力确定后，就可以确定圆杆的直径与长度比。考虑到加工时支撑杆直径的误差会对结果产生比较明显的影响，应该在临界力前乘以一定的安全系数。

$$n_1 F_{cr} \leq \frac{\pi^3 ED^4}{64l^2} \quad (2)$$

另一方面，柔性杆在传递驱动力的过程中必须保证内部应力小于许用应力：

$$\frac{4n_2 F}{\pi D^2} \leq [\sigma] \quad (3)$$

式中： F 为驱动力，因为在估算驱动力时会有一定误差，所以增加安全系数 n_2 。由公式(2)、(3)可以看出，选定柔性杆材料后决定柔性杆尺寸的因素是驱动力，因此在参数设计前需要先估算出在工作带宽下驱动快速反射镜所需要的最大驱动力。设快速反射镜采用四点驱动，4 个驱动器均布在半径为 r 的节圆上，驱动力为 F ，则转动动力矩为：

$$M_m = 2F \cdot r \quad (4)$$

而阻力矩为：

$$M_r = k \cdot \theta + \xi \cdot \omega + J \cdot \alpha \quad (5)$$

式中： θ 、 ω 和 α 分别是反射镜偏转角度、角速度和角加速度； k 、 ξ 和 J 分别是反射镜偏转刚度、阻尼和转动惯量。

为了不约束反射镜偏转自由度， k 值必须较小，而压电陶瓷行程有限，快速反射镜的偏转行程一般为分级，因此公式(5)中第一项可以忽略。 ξ 虽然无法

估算,但是一般而言,最大阻力矩发生在反射镜处于最大偏转状态下,此时 ω 值为 0,因此第二项也不必考虑,只需通过第三项估算最大阻力矩。

最大阻力矩为反射镜负载的转动惯量与最大角加速度的乘积:

$$M_r \approx J \cdot \alpha \tag{6}$$

$$\alpha = \theta \cdot \omega^2 \tag{7}$$

$$\omega = 2\pi f \tag{8}$$

式中: J 为反射镜负载的惯量; α 为反射镜最大角加速度; θ 为反射镜的偏转范围; f 为反射镜的工作频率, J 一般由反射镜的口径和材料决定,而反射镜的口径与偏转范围、工作频率都是快速反射镜的应用需求,可以直接获得。根据平衡条件,动力矩等于阻力矩:

$$M_m = M_r \tag{9}$$

由公式(4)~(9)可以计算出柔性杆所需传递的最大驱动力为:

$$F = 2\pi^2 \frac{J\theta f^2}{r} \tag{10}$$

由公式(2)、(10)得到:

$$\frac{D^4}{l^2} \geq \frac{128n_1 J\theta f^2}{\pi r E} \tag{11}$$

由公式(3)、(10)得到:

$$D^2 \geq \frac{8n_2 \pi J\theta f^2}{[\sigma]r} \tag{12}$$

驱动力和材料确定后即可获得柔性杆直径和长度的设计要求。在满足稳定性和寿命的要求下,长度直径比越大,则柔性杆的柔性越好,对压电陶瓷的保护作用越强。

2.2 柔性片参数设计

由于对称性,花瓣形柔性片实际上由 8 条相同的弯梁组合而成,为了研究柔性片的性能,必须先对每一条梁的性能进行分析。

为了分析方便,设每一“花瓣”圆弧半径为 R ,过渡圆弧的半径也为 R ,截面长宽分别为 a 、 b ,自由端所受作用力 F 。悬臂梁上任意一点的弯矩:

$$M(x,y) = F \sqrt{\left(R\left(2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) - x\right)^2 + \left(R\left(1 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right) - y\right)^2} \tag{13}$$

悬臂梁方程:

$$y = \begin{cases} R - \sqrt{R^2 - x^2}, & x \in [0, R] \\ R + \sqrt{4Rx - x^2 - 3R^2}, & x \in \left[R, R\left(2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)\right] \end{cases} \tag{14}$$

根据卡式定理^[14],自由端变形量:

$$\delta = \int_s \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial F} ds \tag{15}$$

$$\delta \approx 3.962 \frac{FR^3}{EI} \tag{16}$$

悬臂梁与柔性片平面垂直方向的弯曲刚度为:

$$k_{\alpha} = \frac{F}{\delta} \tag{17}$$

8 个悬臂梁与柔性片平面垂直方向的弯曲刚度并联起来决定反射镜偏转刚度,即反射镜的偏转刚度:

$$k_r = 8k_{\alpha} = 2.0192 \frac{EI_z}{R^3} \tag{18}$$

同样利用卡式定理推导悬臂梁在与柔性环平面平行方向的两个互相垂直的弯曲刚度。

$$k_{\phi} = 1.1618 \frac{EI_y}{R^3} \tag{19}$$

$$k_{\alpha} = 0.3219 \frac{EI_x}{R^3} \tag{20}$$

当反射镜平移时,会带动四条悬臂梁末端 x 方向位移与 4 条悬臂梁末端 y 方向位移,当反射镜扭转运动时,会带动 4 条悬臂梁末端在对角线方向上运动,据此,可以得出反射镜平移和扭转的刚度:

$$k_m = 4(k_{\phi} + k_{\alpha}) = \frac{E}{R^3} (4.6472 I_y + 1.2876 I_x) \tag{21}$$

$$k_r = 2\sqrt{2} R^2 (k_{\phi} + k_{\alpha}) = \frac{E}{R} (3.2861 I_y + 0.9105 I_x) \tag{22}$$

一般来说, R 由系统空间尺寸限定,不能有太多变化,因此主要通过控制截面的惯性矩的方法让系统结构呈现各向异性。由于选用矩形截面,通过控制长宽让不同方向的惯性矩有差别。

$$I_z = \frac{ab^3}{12} \tag{23}$$

$$I_x = I_y = \frac{a^3 b}{12} \tag{24}$$

则 3 个方向的刚度表达式改写为:

$$k_r = 0.1683 \frac{Eab^3}{R^3} \tag{25}$$

$$k_m = 0.4946 \frac{Ea^3 b}{R^3} \tag{26}$$

$$k_r = 0.3497 \frac{Ea^3 b}{R} \tag{27}$$

通过增加截面长度 a 、减小截面宽度 b 可以降低偏转刚度、增加径向平移刚度和扭转刚度,使得柔性支撑达到在反射镜工作方向提供必要自由度,在非工作方向限制反射镜自由度的目的。

3 柔性支撑的仿真分析

3.1 FSM 系统驱动元件介绍

在对 FSM 系统进行有限元分析之前,有必要了解系统的驱动元件。压电陶瓷行程有限,通常需与位移放大机构一起使用。如图 5 所示,实验室研制的快速反射镜以这种菱形微位移放大机构与压电陶瓷配合作为驱动元件。

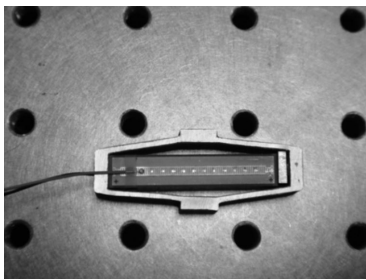
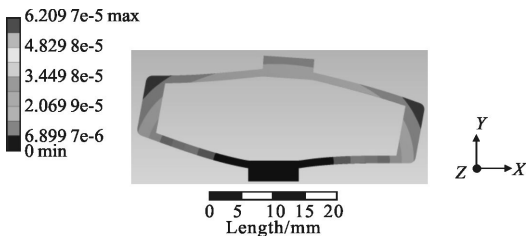


图 5 菱形位移放大机构

Fig.5 Rhomboid displacement magnifying mechanism

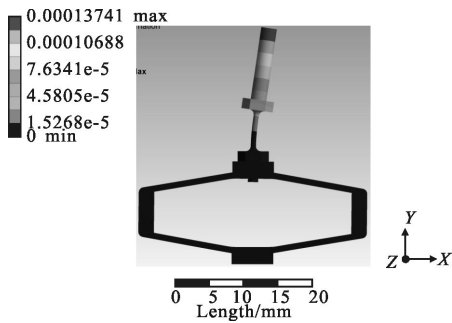
3.2 柔性杆的仿真分析

如图 6 所示,当压电陶瓷的放大机构顶端直接与反射镜相连,假设反射镜的横向偏移量为 $0.050\ \mu\text{m}$,通过 workbench 进行仿真分析可以发现压电陶瓷两



(a) 没有柔性杆

(a) No flexure staff



(b) 有柔性杆

(b) With flexure staff

图 6 有限元分析

Fig.6 Finite element analysis

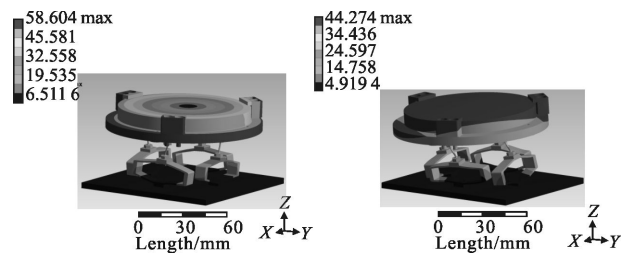
端的剪切位移为 $0.075\ \mu\text{m}$ 。仿真结果表明:放大机构放大压电陶瓷行程的同时,把剪切位移微量也进行了放大,由于压电陶瓷抗剪切能力很差,当这种机构处于振动环境下,压电陶瓷很容易因为承受剪切力而损坏。

设计柔性杆的尺寸参数为:长度 $l=8\ \text{mm}$,直径 $D=1\ \text{mm}$,两端倒圆角,半径为 $1\ \text{mm}$ 。通过 workbench 进行仿真分析可以发现:当放大机构通过柔性杆与反射镜相连,则压电陶瓷两端的剪切位移为 $0.010\ \mu\text{m}$,与不用柔性杆时相比减少了 86.7% 。

由此可见,增加了柔性杆结构,减少了压电陶瓷两端由于反射镜偏转带来的剪切位移,提高了放大机构的稳定性,尤其是振动环境下可以使压电陶瓷避免因承受剪切而损坏。

3.3 柔性片的仿真分析

如图 7 所示,当没有柔性片时,快速反射镜系统的低阶模态分别是扭转振型、径向平移振型,四阶与五阶模态才是所需要的偏转振型,机械谐振频率大约为 $250\ \text{Hz}$,这样不利于提高系统闭环带宽。如图 8 所示,增加柔性片后,一阶振型是沿反射镜垂直方向的平移振型,谐振频率为 $360\ \text{Hz}$ 。二阶振型与三阶振型为快速反射镜两轴偏摆振型,谐振频率大约为 $420\ \text{Hz}$,而反射镜的扭转振型和与镜面径向的平移振型都得到抑制,谐振频率在 $1\ 000\ \text{Hz}$ 以上,不会对系统的闭环带宽产生影响。

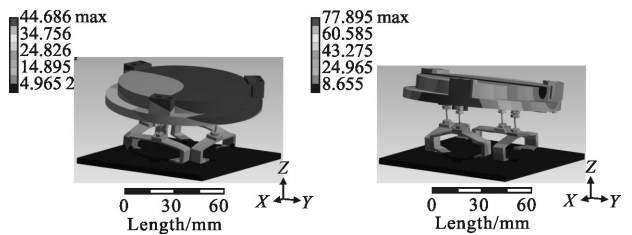


(a) 一阶模态-扭转

(a) 1st mode-torsion

(b) 二阶模态-径向平移

(b) 2nd mode-translation



(c) 三阶模态-径向平移

(c) 3rd mode-translation

(d) 四阶模态-偏转

(d) 4th mode-tilt

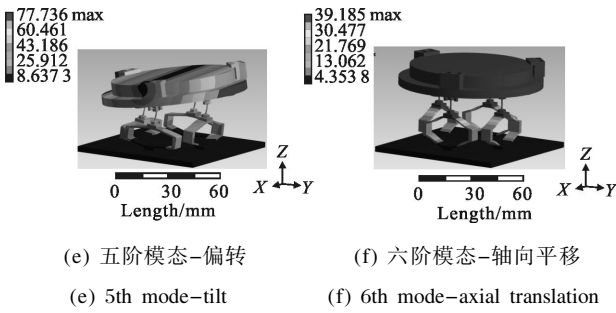


图 7 没有柔性片 FSM 模态分析

Fig.7 FSM mode analysis when no flexure ring

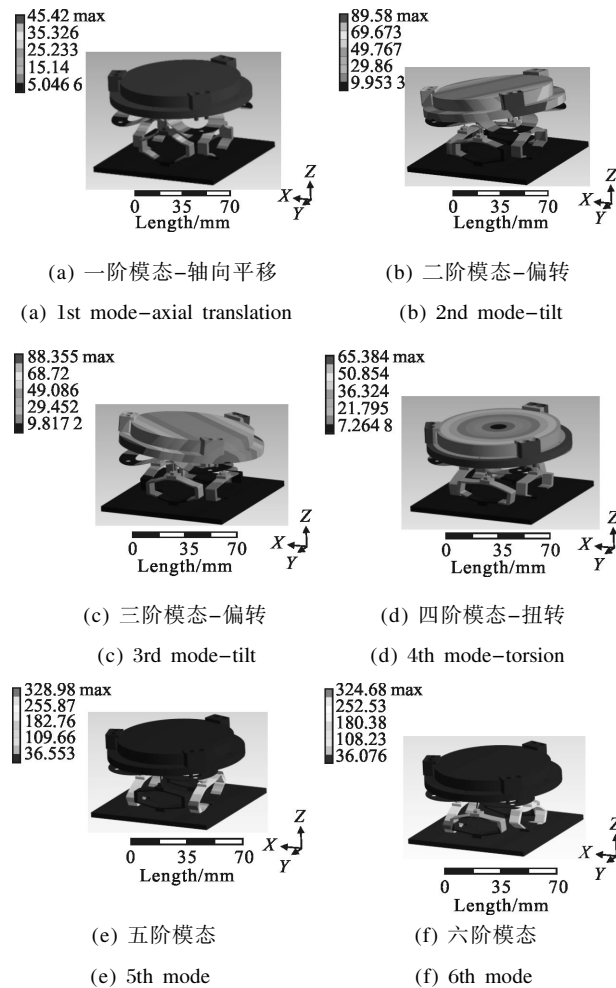


图 8 存在柔性片时 FSM 模态分析

Fig.8 FSM mode analysis when flexure ring helps

仿真证明, 柔性片的设计可以抑制不需要的振型, 提高系统的机械谐振频率。

4 结 论

文中针对压电陶瓷驱动的快速反射镜设计了具有三自由度的柔性支撑结构, 柔性支撑由柔性杆与

柔性片两部分组成。其中柔性杆可以在有效传递驱动力的同时吸收由反射镜偏转所造成的驱动点位置偏差, 保护了压电陶瓷。通过有限元分析表明, 使用柔性杆后压电陶瓷剪切位移减少了 86.7%。而柔性片可以抑制快速反射镜非工作方向上的自由度, 保证了较高的机械谐振频率。有限元分析表明, 增加柔性片后, 快速反射镜的低阶机械谐振频率在 400 Hz 左右, 高阶机械谐振频率在 1 000 Hz 以上。有利于提高快速反射镜系统的控制带宽。

参考文献:

- [1] Xin Wu S C, Chen Wei, Yang Minghui, et al. Large angle and high linearity two dimensional laser scanner based on voice coil actuators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(105103): 1-7.
- [2] Xu Xinhang, Gao Yunguo, Yang Hongbo, et al. Large diameter fast steering mirror on rigid support technology for dynamic platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1):117-124. (in Chinese)
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.
- [3] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)
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.
- [4] Yang Shouwang, Wan Qihua, Sun Ying, et al. Image scanning system of aerial camera base on VCM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1540-1544. (in Chinese)
杨守旺, 万秋华, 孙莹, 等. 音圈电机驱动的航空相机相面扫描系统[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1540-1544.
- [5] Kluk D J. A advanced fast steering mirror for optical communication [D]. US: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [6] Wu Xin. Research on high-performance fast steering mirror [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
吴鑫. 高性能快速控制反射镜研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [7] Nanhu Chen B P, Wen J T, Scott Barry, et al. Modeling and control of a fast steering mirror in imaging applications [C]//6th Annual IEEE Conference on Antomation Science and Engineering, 2010.

- [8] Loney G C. Design of a small-aperture steering mirror for high-bandwidth acquisition and tracking [R]. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [9] Lu Yafei, Fan Dapeng, Fan Shixun, et al. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2574–2582. (in Chinese)
鲁亚飞, 范大鹏, 范世珣, 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.
- [10] Wang Yonghui. Research on structure design of fast steering mirror and its dynamic characteristics [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
王永辉. 快速控制反射镜及其动态特性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- [11] Yao Jiantao, Li Lijian, Yang Wei, et al. Analytical calculation of compliance matrix for right-circular flexure spherical hinge [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1857–1863. (in Chinese)
姚建涛, 李立建, 杨维, 等. 直圆柔性球铰柔度矩阵的解析计算[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(7): 1857–1863.
- [12] Wu Yingfei, Zhou Zhaoying. Deduction of design equation of flexure hinge [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(1): 125–128. (in Chinese)
吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链转动刚度计算公式的推导[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(1): 125–128.
- [13] Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, et al. Light weight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 535–540. (in Chinese)
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 535–540.
- [14] Jin Zhongmou. *Mechanics of Materials* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
金忠谋. *材料力学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.