适用于 FSM 系统的菱形微位移放大机构设计

方 楚[1,2,3],郭 劲[1,2],徐新行[1,3],姜振华[1,2],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:为了增加压电陶瓷驱动快速反射镜的偏摆范围,对菱形微位移放大机构进行了研究设计。首先介绍了菱形结构的放大原理并利用变形能法分析了影响菱形结构性能的关键参数,然后建立了快速反射镜系统要求与菱形结构设计要求之间的联系,并根据自行设计的快速反射镜系统选择了菱形结构的关键参数,最后通过有限元仿真对菱形结构和快速反射镜系统进行了模态分析并对快速反射镜的偏摆范围进行了实验测试。仿真与实验结果表明,快速反射镜的偏摆范围大于 6′,低阶谐振频率约为 400 Hz,满足了快速反射镜的系统要求。文中研究得出,菱形结构的位移放大倍率与最大驱动力是此消彼长的两个性能,可以通过合理调整菱形长轴与菱形边夹角以及菱形边宽度使两个性能同时满足系统设计要求。

关键词:快速反射镜; 压电陶瓷; 位移放大机构; 菱形结构
中图分类号:TH741 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1018004

Design of rhomboid micro stroke amplifier for FSM system

Fang Chu[1,2,3], Guo Jin[1,2], Xu Xinhang[1,3], Jiang Zhenhua[1,2], 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: Rhomboid micro stroke amplifier was designed in order to raise the tilting range of fast steering mirror driven by piezoelectric. Firstly, the theory of stroke amplifier was expounded and the key factors were analyzed with the help of energy method. Secondly, the connection between the performance requirement of fast steering mirror system and key factors of rhomboid mechanism was built. Then, key factors were resolved for self-designed fast steering mirror system. Finally, mode finite element analysis was made for both rhomboid mechanism and fast steering mirror and the experiment was carried out for testing the tilting range of fast steering mirror. The analysis and experiment shows that the tilting range is more than 6′ and the frequency of first mode is about 400 Hz which satisfied the need of fast steering

收稿日期:2016-02-20; **修订日期**:2016-02-13
基金项目:长春市科技计划项目(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

mirror system. The conclusion is that the multiple and the maximum driving force of rhomboid mechanism conflict with each other which can be coordinated by resolving the key factors of rhomboid micro stroke amplifier in order to meet the need of the whole system.

Key words: fast steering mirror; piezoelectric; stroke amplifier; rhomboid mechanism

0 引 言

快速反射镜[1-4](Fast Steering Mirror,FSM)作为精确控制光束指向的装置,由于具有响应速度快、工作带宽大、指向精度高等突出优点,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]和光电经纬仪[8]等领域,近年来一直是国内外研究的热点。

压电陶瓷是快速反射镜系统重要的驱动元件之一[9],其优点体现在结构紧凑、控制精度高、驱动力大和机械谐振频率高等方面,随着精密光学技术对FSM控制带宽要求的不断提高,压电陶瓷得到越来越广泛地应用。工作行程小是限制压电陶瓷应用的重要因素,为了增加压电陶瓷行程,国内外诸多学者对位移放大机构进行研究,包括复合杠杆放大机构[10]、菱形放大机构、椭圆形放大机构[11]等。

菱形放大机构、椭圆形放大机构等这些包围式结构可以与压电陶瓷通过预紧力装配起来成为独立的驱动元件。这种方法可以方便地将压电陶瓷安装在微机电系统中,且无需再整体调整压电陶瓷的预紧力。因此被广泛应用于压电叠堆泵[11]、精密位移调节[12]、压电扫描器[6]等领域。

在很多文章报道中,位移放大机构与压电陶瓷组合作为驱动元件工作在无负载的状态下,因此这些研究只强调了其位移放大能力及线性度等性能。而且这些文献中只是总结了菱形结构在长轴与菱形边夹角的变化下呈现出的规律,并没有指出其它结构参数对其性能的影响以及针对不同微机电系统具体的设计方法,因此在实际设计的过程中,研究人员要通过不断调整参数进行仿真分析,浪费了时间与精力。在快速反射镜系统中,反射镜负载在高频状态下产生很大的附加负载,不仅要求位移放大机构有足够的行程放大能力,而且要保证足够的驱动力及较高的谐振频率。文中将对菱形微位移放大机构进行详细的研究,并针对一种自行设计的压电陶瓷驱动的快速反射镜系统提出具体的设计方法。

1 菱形微位移放大机构

1.1 位移放大原理

如图 1 所示,菱形微位移放大机构与压电陶瓷通过预紧力装配在一起,当压电陶瓷的长度发生变化时,菱形结构也随之发生形变。而通过数学分析可知,菱形结构短轴方向上的形变大于长轴方向上的形变,因此当把压电陶瓷放在菱形结构的长轴方向上时,短轴方向上位移输出就要大于压电陶瓷的位移输出,实现了位移的放大。图 1 中 X 为压电陶瓷的输出位移,Y 为菱形结构的输出位移,线框为压电陶瓷长度变化前菱形结构的形状,灰色部分为压电陶瓷长度变化后菱形结构的形状。

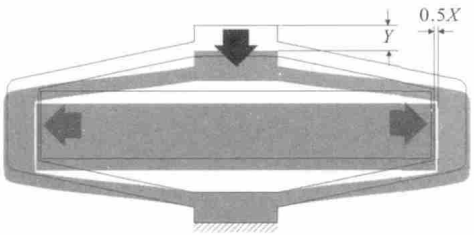


图 1 菱形结构位移放大原理示意图

Fig.1 Sketch of stroke amplifying theory of rhomboid mechanism

1.2 关键参数

在菱形结构中,最重要的参数就是长轴与菱形边的夹角 α。对于 4 根首尾铰接的刚性棍棒组合而成的菱形结构而言,其位移放大倍率可以通过 $\cot\alpha$ 准确描述,此时菱形结构在其位移输出方向上没有刚度,因此驱动能力为 0。然而实际的菱形结构是弹性的部件,在发生形变的过程中不仅菱形边的“铰接点”发生形变,在其他位置上也发生了形变,这些形变使菱形结构的位移放大倍率小于 $\cot\alpha$,因此为了更准确地计算其放大倍率及驱动能力,使其更好地适应于实际工

程,需要对菱形结构进行详细的结构分析。

文中通过变形能法[13]对菱形结构进行分析。根据菱形结构的对称性，可以取四分之一结构进行研究,受力分析如图 2 所示。四分之一菱形结构由三段梁固结而成,编号为 1、2、3,其中 F_1、F_2 与 M_1、M_2 分别为约束力与约束力矩,F_z 为负载的反力,F_x 为压电陶瓷的驱动力；菱形结构与其它部件的连接部分长度为 u,与压电陶瓷的连接部分长度为 w,菱形边长度为 l,整个菱形结构厚度为 h,菱形边的宽度为 m。对每一段梁进行受力分析时，需要在梁上建立局部坐标系,设 t 为局部坐标系中梁长度方向上的坐标。

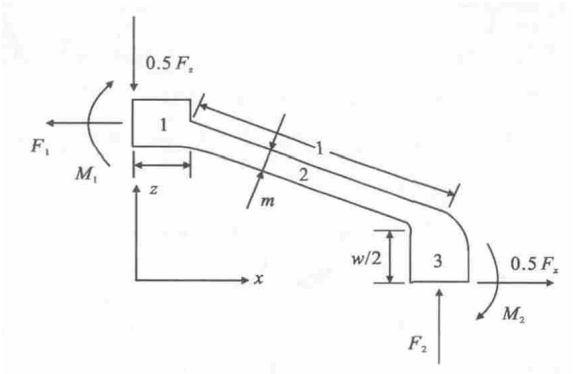


图 2 菱形结构受力分析

Fig.2 Force analysis of rhomboid mechanism

根据力的平衡条件可得：

$$F_1=\frac{F_x}{2} \tag{1}$$

$$F_2=\frac{F_z}{2} \tag{2}$$

$$M_1=F_2\left(\frac{u}{2}+l\cos\alpha\right)+\frac{1}{2}F_x\left(\frac{w}{2}+l\sin\alpha\right)-M_2 \tag{3}$$

对每一根梁进行内力分析,F_{Ni} 表示各梁的轴向内力,M_{xi} 表示各梁的弯矩。

$$F_{N1}=\frac{F_x}{2} \tag{4}$$

$$M_{x1}=M_1-\frac{F_z}{2}t,t\in\left(0,\frac{u}{2}\right) \tag{5}$$

$$F_{N2}=\frac{F_x}{2}\cos\alpha-\frac{F_z}{2}\sin\alpha \tag{6}$$

$$M_{x2}=M_1-\frac{F_z u}{4}-\left(\frac{F_x}{2}\sin\alpha+\frac{F_z}{2}\cos\alpha\right)t,t\in(0,1) \tag{7}$$

$$F_{N3}=\frac{F_z}{2} \tag{8}$$

$$M_{x3}=M_1-\frac{F_z u}{4}-\left(\frac{F_x}{2}\sin\alpha+\frac{F_z}{2}\cos\alpha\right)l-\frac{F_x}{2}t,t\in\left(0,\frac{w}{2}\right) \tag{9}$$

在不考虑剪切和扭转变形的影响下，各个梁的变形能：

$$U_i=\int_{l_i}\frac{F_{Ni}^2}{2EA_i}\mathrm{d}t+\int_{l_i}\frac{M_{xi}^2}{2EI_i}\mathrm{d}t,(i=1,2,3) \tag{10}$$

式中：l_i 为各梁的长度；A_i 为各梁的截面积；I_i 为各梁的主惯性矩；E 为材料的弹性模量。

总变形能为：

$$U=\sum_{i=1}^{3}U_i \tag{11}$$

由于对称性，梁 1 的边界不会有转角的变化与水平方向的位移变化，梁 3 的边界不会有竖直方向的位移变化,因此：

$$\frac{\partial U}{\partial M_1}=0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial U}{\partial F_1}=0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial U}{\partial F_2}=0 \tag{14}$$

令 Δx、Δz 分别为位移放大机构在外力作用下在菱形长轴方向上和短轴方向上的微位移：

$$\Delta x=\frac{\partial U}{\partial F_x} \tag{15}$$

$$\Delta z=\frac{\partial U}{\partial F_z} \tag{16}$$

位移放大机构在菱形长轴方向上的刚度：

$$k_x=\frac{F_x}{\Delta x|_{F_z=0}} \tag{17}$$

在菱形短轴方向上刚度：

$$k_z=\frac{F_z}{\Delta z|_{F_x=0}} \tag{18}$$

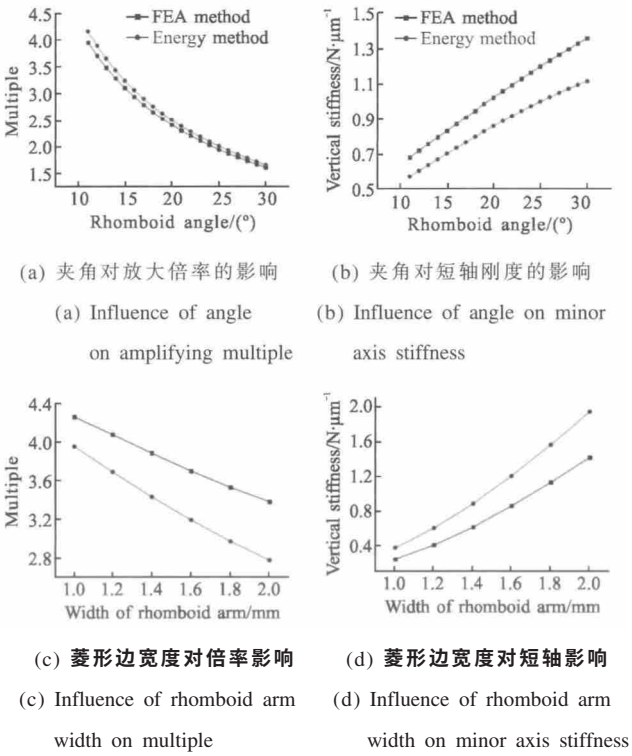
位移放大机构的空载放大倍率：

$$A_x=\frac{\Delta z|_{F_z=0}}{\Delta x|_{F_z=0}} \tag{19}$$

由公式(1)~(19)联立求解的结果非常复杂,无法通过推导出来的算式直接观察出位移放大机构的刚度、放大倍率与各参数之间的关系。因此通过 MATLAB 编程控制单一参数变化来观察该参数对放大倍率与刚度的影响。结果表明,(1) 长轴与菱形边的夹角是最主要的参数,随着夹角的增加,菱形结构放大倍率减小,短轴方向刚度增加,最大驱动力增加；(2) 菱形边的宽度是影响菱形结构性能的第二主要参数,随着宽度的增加,菱形的刚度增加,最大驱动力变大，而放大倍率减小；(3) 在菱形结构微小变形的情况下，压电陶瓷驱动力与负载反作用力对放

大倍率与刚度没有影响,也就是说,当菱形结构的形状参数确定后,输出的放大位移随压电陶瓷的位移呈线性关系,不会因为驱动力或者负载的变化使位移传递不成比例;(4) 菱形结构的放大倍率与驱动能力是两个此消彼长的性能,只有合理配置结构参数才可以让两者都满足系统要求;(5) 菱形长轴长度与菱形整体厚度对其菱形结构的刚度有很大的影响,菱形长轴越长,短轴方向刚度越差,驱动能力越差;整体厚度越大,菱形刚度越强,驱动能力越强,但位移放大能力越弱,然而这两者一般受系统空间所限,往往不能有很大的取值空间,因此不会对菱形结构性能产生明显影响,在文中不予以详细讨论。

长轴与菱形边的夹角、菱形边宽度对菱形结构性能的影响如图 3 所示,其中圆形标记的曲线是理论分析曲线,方形标记的曲线是有限元法分析的曲线,二者趋势吻合,误差在 10%以内。



(a) 夹角对放大倍率的影响 (b) 夹角对短轴刚度的影响

(a) Influence of angle on amplifying multiple (b) Influence of angle on minor axis stiffness

(c) 菱形边宽度对倍率影响 (d) 菱形边宽度对短轴影响

(c) Influence of rhomboid arm width on multiple (d) Influence of rhomboid arm width on minor axis stiffness

图 3 关键参数对菱形结构性能的影响

Fig.3 Influence of key parameters on rhomboid mechanism performance

2 菱形结构的参数设计

2.1 快速反射镜对驱动元件的要求

为了使菱形微位移放大机构能够满足快速反射镜系统的要求,首先要建立快速反射镜的性能指标与菱形结构关键参数之间的联系。快速反射镜的偏转范围与谐振频率两项指标与驱动元件息息相关,设偏转范围要求为 W(rad),谐振频率不低于 f_n(Hz),驱动元件提供的驱动力不低于 F_n(N)。

设压电陶瓷在空载时最大行程为 u_T,那么与菱形结构装配后,其最大行程[6]为:

$$u=u_T\frac{k_T}{k_T+k_x} \tag{20}$$

式中:k_T 为压电陶瓷的刚度;k_x 为菱形结构长轴方向刚度。

菱形结构为了提供一定驱动力,则必然在短轴方向上发生形变,记为 Δu,为了可以提供足够的驱动力,则必须满足:

$$k_z\Delta u\geqslant F_n \tag{21}$$

式中:k_z 为菱形结构短轴方向上的刚度。

为了提供足够的行程,驱动元件的空载行程减去菱形结构因为提供必要驱动力而引起的变形量要大于快速反射镜对驱动元件的最小行程要求,则:

$$Au_T\frac{k_T}{k_T+k_x}-\Delta u\geqslant W\times R \tag{22}$$

式中:R 为驱动元件之间的距离。自行设计的两维快速反射镜为四点驱动,因此公式(22)右边表示在一个维度上反射镜最大程度偏摆时驱动元件提供的行程。

设负载等效总惯量为 J,则系统的谐振频率:

$$f_n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_z}{J}} \tag{23}$$

根据功能互等定理[13]:

$$F_x\Delta x|_{F_x=0}=F_z\Delta z|_{F_z=0} \tag{24}$$

式中:F_x、F_z 分别为作用在菱形结构上的长轴方向和短轴方向上的作用力,$\Delta x|_{F_x=0}$ 为仅在负载反作用力下长轴方向的变形量,$\Delta z|_{F_z=0}$ 为仅在压电陶瓷驱动力下短轴方向的变形量。

结合公式(17)~(19)与公式(24)得到:

$$k_x=A_xA_zk_z \tag{25}$$

式中:A_x 与 A_z 分别是在压电陶瓷驱动力与负载反作用力作为主动力时菱形结构的放大倍率,放大倍率是短轴方向微位移与长轴方向微位移之比,由于材料的变形总会阻碍主动力方向的放大效果,因此 A_z 要略大于 A_x,记为:

$$A_z=\delta A_x \tag{26}$$

仿真结果表明 $\delta\approx1.2$,因此上式转化为:

$$k_x=\delta A_x^2 k_z \tag{27}$$

综合上述算式推出:

$$\frac{F_n\delta A_x^2}{k_x}-A_x u_T\frac{k_T}{k_T+k_x}+WR\leqslant 0 \tag{28}$$

$$A_x\leqslant\frac{1}{\pi f_n}\sqrt{\frac{k_x}{\delta J}} \tag{29}$$

根据这两个算式可以将对系统的设计要求 W、F_n、f_n 转化为对放大机构的设计要求 k_x、A_x。

2.2 参数设计

图 4 可以为选择菱形结构关键参数提供参考。纵轴是菱形结构的放大倍率，横轴是其长轴方向刚度。实线是由公式(28)做出的曲线,反映了驱动元件的行程要求与 A_x 和 k_x 的关系,实线上方是满足行程要求的设计区域;点划线是由公式(29)做出的曲线,反映了快速反射镜系统谐振频率要求与 A_x 和 k_x 的关系，点划线下方是满足要求的设计区域。通过 MATLAB 将不同的夹角与菱形边宽度值代入公式(1)~(19)计算出这些设计参数对应的菱形机构的 A_x 和 k_x,把这些设计点标在图 4 上,分布在点划线之下实线之上的点就是符合设计要求的菱形结构。

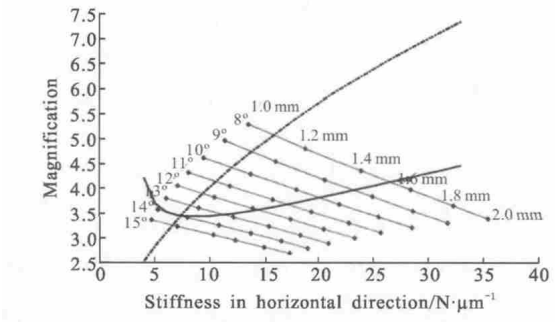


图 4 FSM 系统要求下菱形结构参数设计

Fig.4 Design of rhomboid mechanism parameters for FSM system

为了避免计算误差对实际设计造成影响，参数选择要为误差留有余量，因此选择的设计点应该与实线和点划线保持一定距离。此外,在符合设计要求的前提下菱形边宽度要尽可能大，以减小加工误差对菱形结构性能的影响。

文中的目标是实现镜面口径为 90 mm、偏摆范围大于 5′、闭环带宽高于 100 Hz 的快速反射镜设计。其中所使用的压电陶瓷为 P-882.91(PI,德国),其主要参数如表 1 所示。该设计采用以铝为基底的反射镜,以及铝合金镜架结构,对于未经过轻量化的反射镜及镜架的转动惯量 J 估算为 $2.048\,9\times10^{-4}$ kgm^2。反射镜的最大角加速度:

$$a_{max}=A\times w^2=A\times4\pi^2\times f^2 \tag{30}$$

式中:A 为快速反射镜的偏摆范围约为 3 mrad;f 取 100 Hz,则 $a_{max}=1\,184.352\,5$ rad/s^2。

所需要的驱动力为:

$$F=M/2R=J\times a/2R \tag{31}$$

式中:M 为反射镜的驱动力矩;R 为驱动元件的分布半径为 27 mm,则 $F=4.493\,7$ N。

表 1 压电陶瓷 P-882.91 主要参数

Tab.1 Main parameters of piezoceramics P-882.91

Length	Stroke	Stiffness	Maximum driving force
36 mm	32 μm	50 N/μm	1 800 N

将以上各参数代入公式(28)和(29),做出图 4 所示曲线,从中选择满足要求的设计点。文中选择菱形长轴与菱形边的夹角为 10°,菱形边宽度为 1.2 mm。其 A_x 约为 4.2,k_x 约为14 N/um。

3 仿真与实验

3.1 有限元模态分析

利用 WORKBENCH 对菱形结构及自行设计的快速反射镜系统进行模态分析。

菱形结构前三阶模态分析如图 5 所示，其中第三阶模态是所需要的振型，谐振频率约为 2 300 Hz，而前两阶不需要的模态会通过自行设计的柔性支撑结构[14]进行抑制。

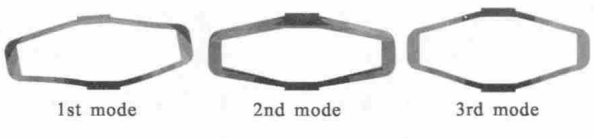


图 5 菱形结构有限元模态分析

Fig.5 Mode finite element analysis of rhomboid mechanism

在设计中，位移放大机构采用弹簧钢材料(60Si2Mn),其密度设定为 7 830 kg/m^3,通过 UG 软件计算其质量为 0.011 462 kg,在运动中可以把它看做弹簧,则其等效质量为其实际质量的 1/3。在短轴方向刚度可由公式(22)进行计算。则理论推导的位移放大机构的谐振频率为:

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_z}{m_d}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_x}{2A_x^2 m_d}} \tag{32}$$

理论计算的谐振频率为 2 093.99 Hz，与有限元仿真分析结果相符合。

快速反射镜系统的模态分析如图 6 所示，各阶模态的谐振频率如表 2 所示。前三阶振型可以通过设计陷波器将谐振抑制，使系统闭环带宽可以突破低阶谐振频率，达到 200 Hz 以上。

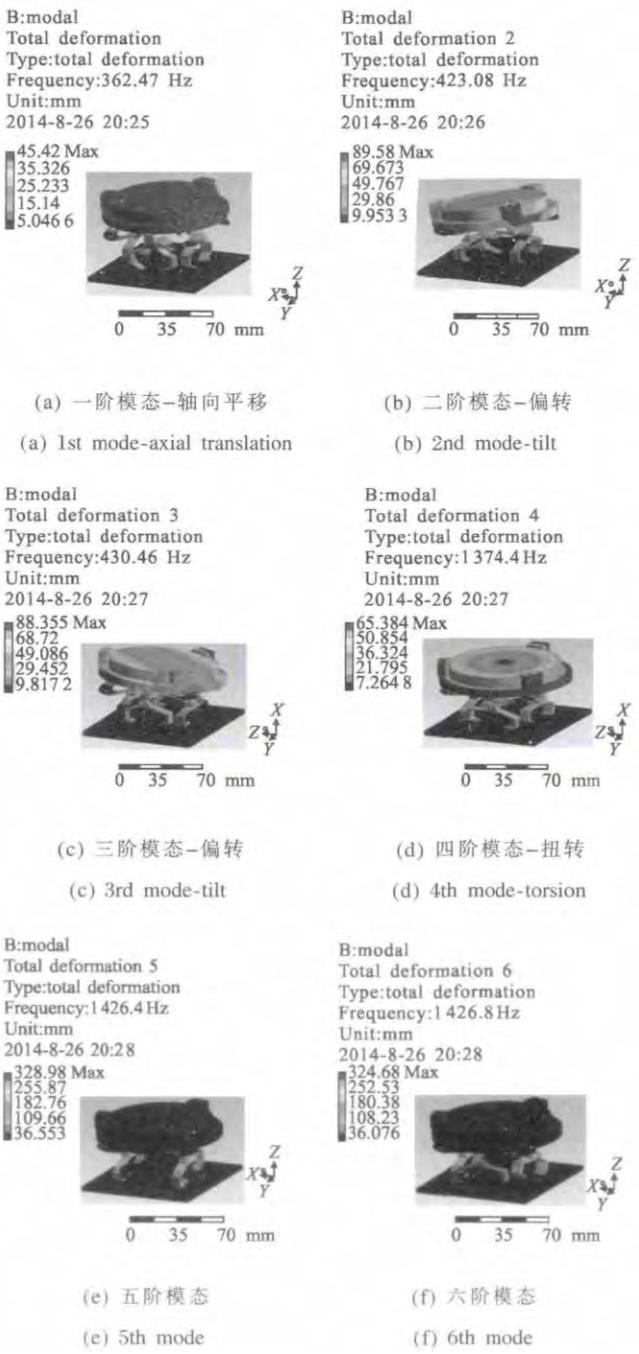


图 6 FSM 系统模态有限元分析

Fig.6 Finite element mode analysis of FSM system

表 2 快速反射镜模态分析结果

Tab.2 Result of mode analysis for FSM

Mode order	Frequency/Hz	Description
1st mode	392.46	Displacement
2nd mode	420.32	Tip/tilt
3rd mode	426.95	Tip/tilt
4th mode	1 634.4	High mode
5th mode	1 643.2	High mode
6th mode	1 647.7	High mode

3.2 偏转范围性能测试

利用如图 7 所示的实验设备对快速反射镜系统机械偏摆范围进行测试。通过计算机控制 PI E-500 控制箱向压电陶瓷输入 0~100 V 以及 100~0 V 的离散电压值，然后利用准直仪测量快速反射镜的偏摆角度。

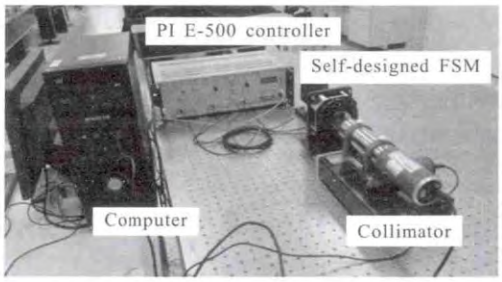


图 7 快速反射镜偏摆范围测试实验设备

Fig.7 Experimental devices for testing the tilting range of fast steering mirror

测得结果如图8 所示，横轴为压电陶瓷的端电压，纵轴为反射镜偏摆角度。反射镜开环偏摆范围超过 6′，满足快速反射镜系统的设计要求。

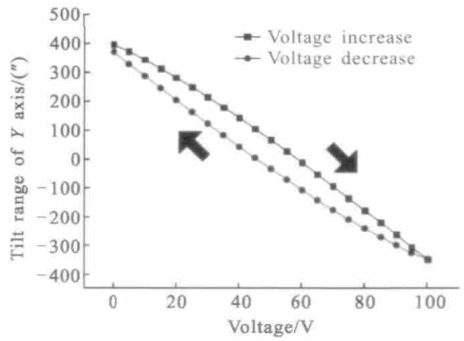


图 8 快速反射镜偏摆范围测试结果

Fig.8 Experimental result of testing tilting range of FSM

4 结 论

菱形微位移放大机构可以与压电陶瓷组合作为快速反射镜系统的驱动元件。通过对菱形结构的详细研究设计，得到以下结论：(1) 菱形长轴与菱形边的夹角以及菱形边的宽度是影响菱形结构的最主要两个因素，随着夹角的增加，菱形结构放大倍率减小，驱动能力增加；随着菱形边宽度的增加，放大倍率减小，驱动能力增加。(2) 菱形微位移放大机构的放大倍率与驱动能力是此消彼长的两个性能，只有通过合理配置关键参数，才可以让两者同时满足系统设计要求。(3) 作为快速反射镜系统的驱动元件，菱形结构可以在不限制系统工作带宽的前提下增加压电陶瓷的行程，扩大了偏摆镜的偏摆范围。

参考文献：

[1] Xin Wu, Sihai Chen, Wei Chen, 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 Qiuhua, 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. An advanced fast steering mirror for optical communication [D]. Boston: 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] Yuan Gang, Wang Daihua, Li Shidong. Single piezoelectric ceramic stack actuator based fast steering mirror with fixed rotation axis and large excursion angle [J]. ***Sensors and Actuators A: Physics***, 2015, 235: 292.

[8] Liao Hongbo, Fan Shixun, Hei Mo, et al. Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2015, 23 (2): 477-485. (in Chinese)
廖洪波, 范世珣, 黑墨, 等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 477-485.

[9] Zhu Wei, Bian Leixiang, An Yi, et al. Modeling and control of a two-axis fast steering mirror with piezoelectric stack actuators for laser beam tracking [J]. ***Smart Materials and Structures***, 2015, 24: 075014.

[10] Wang Geng, Rao Changhui. Adaptive control of piezoelectric fast steering mirror for high precision tracking application[J]. ***Smart Materials and Structures***, 2015, 24: 035019.

[11] Yang Zhigang, Liu Dengyun, Wu Liping, et al. Micro-displacement magnifying mechanism used in piezo-stack pump [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2007, 15(6): 884-888. (in Chinese)
杨志刚, 刘登云, 吴丽萍, 等. 应用于压电堆叠泵的微位移放大机构[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(6): 884-888.

[12] Yeom Taiho, Simon Terrence W, Zhang Min, et al. High frequency, large displacement and low power consumption piezoelectric translation actuator based on an oval loop shell [J]. ***Sensors and Actuators A: Physics***, 2012, 176: 99-109.

[13] Jin Zhongmou. Machnics 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.

[14] Fang Chu, Guo Jin, Xu Xinhang, et al. Design of three DOFs flexure support for FSM driven by piezoelectric ceramics[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(10): 2987-2995. (in Chinese)
方楚, 郭劲, 徐新行, 等. 压电陶瓷驱动 FSM 三自由度柔性支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2987-2995.