

音圈变形镜的设计及其力学特性分析

刘新宇, 曹朔, 胡栋挺, 马文超, 赵子云, 吴晶晶, 朱华新, 苏宙平, 张逸新, 胡立发

引用本文:

刘新宇, 曹朔, 胡栋挺, 等. 音圈变形镜的设计及其力学特性分析[J]. 液晶与显示, 2020, 35(8): 801–807.

LIU Xin-yu, CAO Shuo, HU Dong-ting, et al. Design of voice-coil deformable mirror and its mechanical characteristics[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(8): 801–807.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203508.0801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多GPU的液晶自适应光学波前处理器

Liquid crystal adaptive optics wavefront processor based on multi-GPU

液晶与显示. 2016, 31(5): 491–496 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163105.0491>

纯位相液晶调制器的响应特性计算

Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator

液晶与显示. 2017, 32(3): 182–189 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0182>

液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望

Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application

液晶与显示. 2015, 30(1): 1–9 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153001.0001>

温度对液晶波前校正器响应速度及LUT的影响研究

Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector

液晶与显示. 2018, 33(11): 911–917 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183311.0911>

基于有限元的Mini-LED灭灯分析

Analysis of Mini-LED light-off phenomenon based on FEM simulation

液晶与显示. 2020, 35(1): 53–61 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203501.0053>

文章编号:1007-2780(2020)08-0801-07

音圈变形镜的设计及其力学特性分析

刘新宇^{1,2}, 曹 朔^{1,2}, 胡栋挺^{1,2}, 马文超^{1,2}, 赵子云^{1,2}, 吴晶晶^{1,2},
朱华新^{1,2}, 苏宙平^{1,2}, 张逸新^{1,2}, 胡立发^{1,2*}

(1. 江南大学 理学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要:针对 7 单元音圈变形镜的结构进行了设计, 对镜面进行了力学分析, 并基于有限元 ANSYS 软件对镜面不同材料及物理参数对最大变形量及镜面应力的影响关系进行了仿真。实验结果表明, 所设计的音圈变形镜在镜面具有优良力学特性的条件下, 基本满足了变形镜对校正量、影响函数等主要性能指标的要求。仿真结果可以为更多驱动单元数的音圈变形镜提供参考。

关键词:变形镜; 音圈驱动器; 光学玻璃; 自适应光学; 有限元分析

中图分类号: O753⁺.2 **文献标识码:** A **doi:**10.37188/YJYXS20203508.0801

Design of voice-coil deformable mirror and its mechanical characteristics

LIU Xin-yu^{1,2}, CAO Shuo^{1,2}, HU Dong-ting^{1,2}, MA Wen-chao^{1,2}, ZHAO Zi-yun^{1,2},
WU Jing-jing^{1,2}, ZHU Hua-xin^{1,2}, SU Zhou-ping^{1,2}, ZHANG Yi-xin^{1,2}, HU Li-fa^{1,2*}

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Provincial Research Center of Light Industry Opto-electronic Engineering and Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: The structure of 7 actuators VDM is designed, and the mechanical characteristics of its mirror are analyzed based on the finite element method with ANSYS software. The maximum deformation and stress of the VDM under different material and physical parameters are simulated and discussed. The results show that the designed VDM has an outstanding comprehensive performance, and basically meets the requirements of applications. Our simulation results can provide a reasonable reference for the application of VDM.

Key words: deformable mirror; voice-coil actuator; optical glass; adaptive optics; finite element analysis

收稿日期:2020-03-03; 修订日期:2020-03-25.

基金项目:国家自然科学基金面上项目 (No.61475152)

Supported by National Natural Science Foundation(No.61475152)

* 通信联系人, E-mail: hulifa@jiangnan.edu.cn

1 引言

用地基光学望远镜进行天文观测时,光波在大气中的传输过程会受大气湍流的影响,导致波前相位会发生畸变,从而使系统的光学成像质量降低。为解决这一问题,人们引入了自适应光学技术。它能实时探测波前畸变,并通过波前校正器实时补偿波前像差,使光学成像质量可以恢复到接近衍射极限分辨力。其中,变形镜是自适应光学系统中使用最广泛的波前校正器^[1-2]。

目前,应用于自适应光学系统中的各类变形镜技术主要有薄膜变形镜、压电变形镜、磁致伸缩变形镜、电致伸缩变形镜、双压电变形镜、微机电系统(MEMS)变形镜、音圈变形镜、声光空间调制器、光寻址变形镜、液晶光调制器等^[3-9]。其中,音圈变形镜具有大调制量(100 μm 级)、校正精度高、线性响应(无磁滞)且响应速度快等优点^[9]。1993 年,Salinari 等人首次对音圈变形镜次镜进行了研究,此后人们对音圈变形镜的结构设计和应用进行了大量的研究工作,在音圈驱动器布局 and 热影响方面、音圈驱动器的控制、电容式位置传感器等方面取得了很大进步^[9-11]。并将它作为次镜应用在 MMT (Multiple Mirror Telescope)、LBT (Large Binocular Telescope)、MT (Magellan Telescope)、VLT (Very Large Telescope)、GMT (Giant Magellan Telescope)、E-ELT (European Extremely Large Telescope) 等大口径望远镜上。国内中科院长春光机所、中科院成都光电所、国家天文台南京天光所等大学和研究单位在音圈驱动器^[12]的开发和应用方面也有报道,包括航空相机用的快反镜、自适应光学用的音圈变形镜等。

在音圈变形镜的研究中,尚无关于变形镜结构及物理参数设计的详细力学特性研究,设计多依靠经验判断,针对此问题本文通过对音圈变形镜的结构和镜面等关键单元进行建模和设计,并利用有限元软件对 7 单元音圈变形镜原理样机模型进行优化设计和强度校核,为制作高性能的音圈变形镜设计提供了参考。

2 音圈变形镜的结构设计

音圈变形镜的基本原理为电流通过线圈产生

磁场,该磁场与永磁体的磁场相互作用,使驱动器产生推力或拉力,该力作用在镜面上使其发生变形。音圈变形镜的设计需要全面考虑自适应光学系统参数要求和限制因素、材料特性和加工、镜子的组装和精加工等问题,重要的系统参数包括变形镜尺寸、调制量要求、控制带宽、驱动器间隔、所需通道数和反射镜共振特性等。因此,我们需要对音圈驱动器的结构、镜面特性进行重点考虑,这些参数对于音圈变形镜的响应速度、调制量、调制精度等性能有重要的影响,因此,本节重点研究音圈变形镜的基本结构,并以 7 单元的变形镜为例进行了初步设计。另外,7 单元音圈变形镜可以作为原理样机,更多驱动单元的变形镜可以在此基础上扩展。

音圈变形镜主要包括音圈驱动器、镜面及附属的支撑结构。7 驱动单元的音圈变形镜基本结构如图 1(a)所示,镜面“悬浮”在由 7 个音圈驱动器组成的驱动器阵列上方,与每个驱动器对应的薄镜背面处粘接有小磁体,线圈产生的磁场与永磁体的磁场相互排斥或吸引,来推拉镜面变形。为有效解决变形镜在加工、装配后存在像散像差的问题,镜面为环形支撑且驱动器环形排布。如图 1(b)所示,6 个单元的音圈驱动器环形分布在中心驱动器周围,这种排布方式的另一好处是,空间采样与其他形状排列方式相比更均匀,有利于提高面形拟合能力。

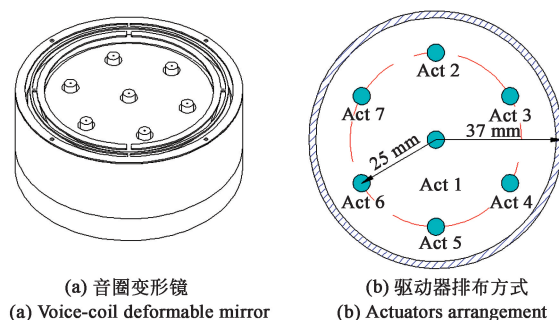


图 1 7 单元音圈变形镜原理图

Fig.1 Schematic diagram of voice coil deformable mirror with 7 actuators

音圈驱动器工作过程中会产生热量,考虑到温度有可能会对音圈变形镜的镜面变形,因此,一方面,考虑散热问题是非常有必要的;另一方面,还需要选择合适的镜面玻璃材料。为解决该变形镜在工作过程中的散热问题,我们采用了定音圈式驱动器的方案,即将永磁体的一面胶粘在

变形镜背面,永磁体另一面正对线圈相隔一段气隙,通过控制线圈通入电流大小与方向来实现对镜面的推拉作用。由于音圈电机驱动的变形镜具有非接触的驱动方式,音圈和永磁体之间选择合理距离的气隙,理论上变形镜可以具有较大的校正范围。且镜面与参考板间的空隙会产生挤压薄膜空气阻尼,这也会有效避免镜面在谐振频率下损坏。线圈骨架固定在铜制冷却杆上,其作用不仅可以为线圈产生的热量传递出去,同时还可以将音圈的控制线路从变形镜后方引出外接电源,冷却杆的躯干位置上布有音圈电机的控制线路板。该驱动方案可有效解决音圈变形镜工作时的散热问题,最大程度减少电机做功散热对变形镜镜面成像质量的影响。

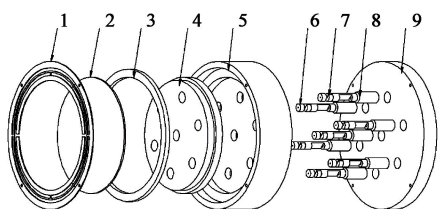


图2 7单元音圈变形镜爆炸图。(1)柔性结构;(2)镜面;(3)O形环;(4)参考板;(5)镜架;(6)磁体;(7)线圈;(8)冷却杆;(9)冷却板。

Fig.2 7-unit voice-coil deformable mirror exploded view.
(1)Flex structure; (2) Mirror; (3) O-ring; (4) Refer-ence plate; (5) Frame; (6) Magnet; (7) Coil; (8) Cold finger; (9) Cooling plate.

图2给出了7单元音圈变形镜的爆炸图,镜面(2)通过柔性结构(1)固定在镜架的一端,镜面的背面粘有7个环形排布的永磁体(6),永磁体直径5 mm,厚度为3.22 mm,材料为钕铁硼磁铁。镜面正后方为一块厚度10 mm的石英玻璃参考板(4),为薄镜面提供位置参考基准。驱动器尾部有一块外径94 mm,厚度10 mm的铜冷却板(9),为音圈驱动器提供冷却和支撑作用。驱动器的冷却杆(8)为铜制材料,便于散热,尾部连接电源及控制线路。由磁体、线圈(7)及冷却杆组成的音圈驱动器单元先后穿过冷却板及参考板上的孔到达薄镜背面。

3 镜面的力学理论分析

镜面设计时要考虑其具有足够的强度及刚性

的同时,尽可能产生较大的变形量,且便于加工。利用理论公式计算对薄镜的最大变形量以及最大应力进行估计,并以此为依据进行优化设计。

3.1 镜面最大应力计算

由于薄镜面直径厚度比较大(>30),故可采用弹性力学中的薄板理论进行分析。如图3所示,当7单元变形镜镜面仅受中心驱动力作用产生变形时,外圈6个驱动器处镜面的变形量小于中心驱动器处的变形量,此时与PZT的变形镜不同,驱动器和镜面之间没有直接物理连接,薄镜边缘可近似当作薄镜面的固定支撑。

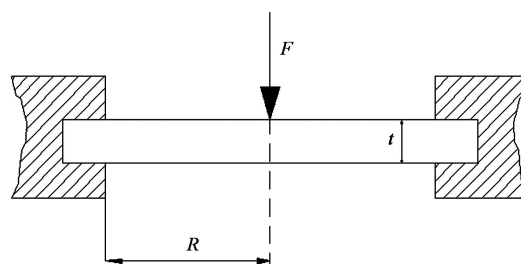


图3 边缘固定的圆薄板受中心驱动力作用

Fig.3 Edge locked round sheet suffered with concentrating center force

圆薄板所受力 F 和圆薄板的最大应力 $\sigma_{\max}$ 可近似表示为^[13]:

$$F = \frac{\delta E t^3}{0.218 R^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = F \cdot \frac{0.63 \ln(R/t) + 0.68}{t^2} = \frac{[0.63 \ln(R/t) + 0.68] \delta E t}{0.218 R^2}, \quad (2)$$

式中; δ 为薄镜面的最大变形量, E 是材料的弹性模量, R 为圆薄板半径, t 为圆薄板厚度。由公式可知,薄镜面最大应力出现在其发生最大变形时,且薄镜面距离中心驱动力作用点越近应力值越大。

3.2 力学特性评价方法

设计薄镜面时必须考虑复杂应力状态下的强度条件,而利用强度理论,可由简单应力状态下的实验结果建立复杂应力状态下的强度条件。根据强度理论,材料的强度失效形式主要有两种,即脆性断裂和塑性屈服。薄镜面受外力作用形变,以某种形式失效时主要与危险点处的应力和应变或应变能密度等因素有关。两种失效产生原因不

同,相对应的强度理论也不同,分别采用解释断裂失效的第一强度理论和解释屈服失效的第四强度理论来对薄镜面的工作状态进行判定。

第一强度理论认为最大拉应力是引起材料脆性断裂破坏的主要因素。无论构件处于任何应力状态,只要最大拉应力 σ_1 达到强度极限 σ_b ,材料就将发生断裂破坏。即强度条件为:

$$\sigma_1 \leq [\sigma] = \sigma_b / b, \quad (3)$$

其中: $[\sigma]$ 为材料的许用应力, b 为材料安全系数。

第四强度理论认为畸变能密度是引起屈服破坏的主要因素。无论构件处于任何应力状态,只要畸变能密度达到某一极限值,材料就发生屈服破坏,此时屈服应力为 σ_s 。强度条件为:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{1}{2} [\sigma_1 - \sigma_2]^2 + [\sigma_2 - \sigma_3]^2 + [\sigma_3 - \sigma_1]^2} \leq [\sigma]. \quad (4)$$

接下来应用应力强度条件(3)和(4)来判定和分析薄镜面的应力状况。选择了3种常用于变形镜镜面的光学玻璃材料用作分析,包括K4玻璃、K9玻璃、微晶玻璃^[14]。通过查阅规范和手册,并考虑材料不同形式破坏下的安全系数,K4玻璃许用应力取为 $[\sigma]_1 = 20$ MPa, K9玻璃许用应力取为 $[\sigma]_2 = 25$ MPa。微晶玻璃材料的强度通常没有固定值,安全起见许用应力取为 $[\sigma]_3 = 40$ MPa。

4 镜面力学特性的有限元法仿真分析

本文主要使用了 ANSYS 有限元分析软件,在 SolidWorks 软件建立的三维模型基础上,利用线性静力学模块分析镜面物理参数与应力以及最大变形量的关系。利用 ANSYS 对变形镜镜面的有限元静力学分析主要分为以下几个步骤:

①建模:利用 SolidWorks 建立镜面+磁体的三维模型,将模型导入 ANSYS Geometry 模块中:建立 11 个模型,镜面厚度分别为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 mm;

②材料数据:选取了微晶玻璃、K4 玻璃和 K9 玻璃,它们的参数值如表 1 所示;

③网格划分:为准确构建薄镜面的计算模型,采用了计算精度较高的三角形模型,每单元网格边长仅为 0.2 mm。在镜面厚度为 1.0 mm 时,共划分了 766 858 个节点和 480 638 个单元;

④约束条件:薄镜面背面最外缘开始宽 2 mm 的环形区域固定约束;中心驱动器的推力为施加的唯一载荷。中心驱动力的变化范围为 0.4~10.0 N,共设置 18 个对照组;

⑤求解:需要求解的有镜面变形量;第一强度理论的应力结果;以及第四强度理论应力结果。

表 1 有限元模型材料参数

Tab.1 Material parameter of finite element model

Component	Material	Young's modules/(10^7 Pa)	Poisson's ratio	Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Mirror	Zerodur	9 100	0.240	2.53
	K4	7 144	0.211	2.50
	K9	8 132	0.209	2.53
Magnet	Neodymium	1 600	0.240	7.45

首先对 3 种材料的薄镜面在不同厚度情况下,随中心驱动力数值的变化时对最大应力的影响情况做出了仿真计算,计算结果如图 4 所示。图 4 中左和右列图镜面分别在第一和第四强度理论条件下的受力-应力曲线。从仿真结果中可以看出,最大应力随中心驱动力的增加而增大,这与理论一致。图 4 中的水平红线为对应材料和条件下的安全阈值,在红线以下使用时镜面玻璃不会损坏,超过红线时,镜面玻璃会破裂而无法使用。厚度不同

承受力的安全范围也不同:0.6 mm 厚度时,微晶玻璃镜面是 0~7 N,而 K4 玻璃是 0~3 N, K9 镜面是 0~5 N。厚度增加到 1 mm 时,微晶玻璃和 K9 的镜面在 0~10 N 范围内都是安全的,而 K4 玻璃是 0~8 N。由图 4 对比可见 K4 玻璃的镜面应力受中心驱动力的影响最为显著。在强度方面, K4 和 K9 玻璃材料的镜面在 0.4~0.8 mm 内可能会出现塑性屈服或脆性断裂的破坏。而微晶玻璃镜面的破坏范围只出现在厚度 0.6 mm 以下。相同状况下

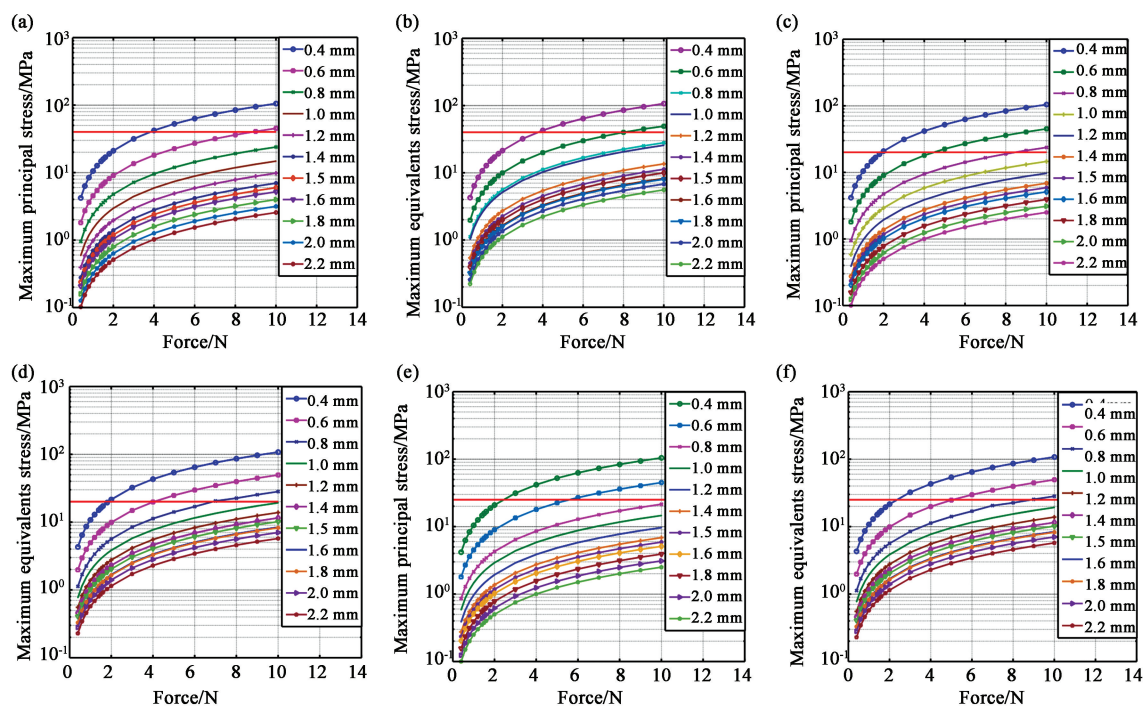


图 4 镜面受力-最大应力曲线。(a)微晶玻璃第一强度理论应力;(b)微晶玻璃第四强度理论应力;(c)K4 玻璃第一强度理论应力;(d)K4 玻璃第四强度理论应力;(e)K9 玻璃第一强度理论应力;(f)K9 玻璃第四强度理论应力。

Fig.4 Mirrorforce-maximum stress curve. (a) Material zerodur, maximum principal stress; (b) Material zerodur, maximum equivalent stress; (c) Material K4 glass, maximum principal stress; (d) Material K4 glass, maximum equivalent stress; (e) Material K9 glass, maximum principal stress; (f) Material K9 glass, maximum equivalent stress.

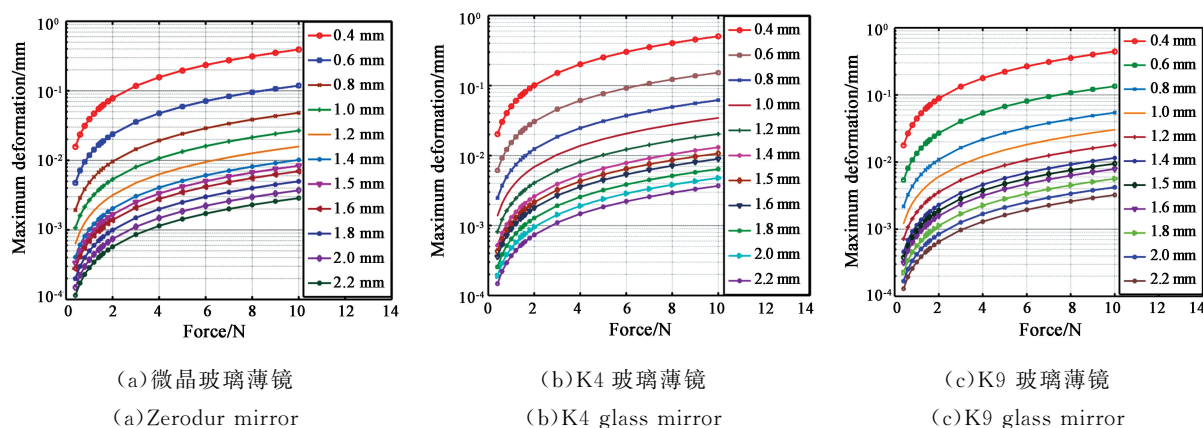


图 5 镜面受力-最大变形量曲线

Fig.5 Mirrorforce-maximum deformation curves

微晶玻璃镜面的强度特性最好。

在不同镜面厚度情况下,随着中心驱动力数值的增加,最大变形量的变化情况如图 5 所示。

由图 5 可以看到,随中心驱动力的增大,变形

量成线性增大。随着厚度的增加,变形量逐渐减小。相同条件下,K4 玻璃镜面的变形量最大,K9 玻璃镜面比微晶玻璃的略大,但三者差异量级相对于变形量非常小。且 K4 玻璃镜面在 0.6 mm

厚时 6 N 力下变形量约 $100\ \mu\text{m}$, 在 1 mm 厚时 6 N 力下变形量约 $20\ \mu\text{m}$, 满足一般自适应光学应用中对变形镜调制量的要求。另外, 需要指出的是, 当驱动器和周围驱动器联合动作时, 可以控制不同驱动器力在镜面上的分布来进一步扩大波前调制范围。因此, 当变形镜用于温度起伏不大的实验室环境时, 镜面可以采用 K4 玻璃材料; 而当用于天文台观测时, 环境温度相对较低且起伏较大, 因此, 考虑到微晶玻璃更好的温度特性, 需要采用微晶玻璃作为镜面材料。

综合静力学及和热稳定性的角度考虑, 微晶

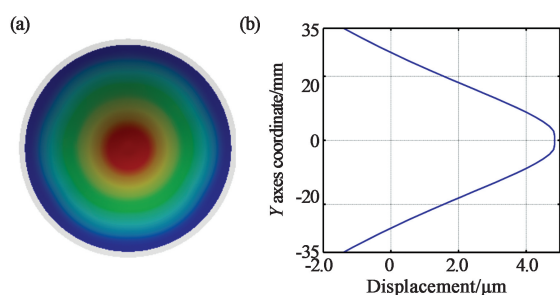


图 6 变形镜影响函数

Fig.6 Deformable mirror effect function

玻璃具有强度高、热膨胀系数极低的优点, 7 单元变形镜口径 $D=74\ \text{mm}$, 镜面厚度 $t=1\ \text{mm}$, 采用微晶玻璃。利用此 7 单元音圈变形镜模拟的离焦面形如图 6(a) 所示, 图 (b) 为其横截线, 在中心驱动器推力 1.5 N, 周围 6 个驱动器产生 0.25 N 拉力的情况下, 变形镜镜面的变形量的峰谷值达 $6.34\ \mu\text{m}$ 。

5 结 论

音圈变形镜具有无磁滞、响应速度快和调制量大的特点, 逐渐引起了人们的重视。本文以 7 单元的音圈变形镜为原理样机进行讨论, 提出了合理的结构设计; 并详细分析了镜面材料、结构参数与强度的关系。结果表明, 镜面最大应力出现在变形量最大处; 驱动力相同时, 镜面变形量随着厚度的增加而减小; K4 玻璃具有最大的变形量, 而微晶玻璃的强度最高。同时, 我们还利用参数优化设计后的 7 单元音圈变形镜产生了离焦的面形, 并实现了 $6.34\ \mu\text{m}$ 的调制量。我们的结果对于更多音圈驱动器的设计及音圈变形镜的应用有较好的参考价值。

参 考 文 献:

- [1] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(3): 207-211.
- [2] WIZINOWICH P. Adaptive optics in astronomy [J]. *Contemporary Physics*, 2015, 56(4): 432-450.
- [3] OPPENHEIMER B R, PALMER D L, DEKANY R G, *et al.* Investigating a Xinetics Inc. deformable mirror [C]// *Proceedings of Adaptive Optics and Applications*. San Diego, CA, United States: SPIE, 1997: 569-579.
- [4] ROOMS F, CHARTON J. Recent developments and future challenges for MEMS adaptive optics [C]// *Proceedings of SPIE MEMS Adaptive Optics V*. San Francisco, California, United States: SPIE, 2011: 793109.
- [5] 宣丽, 李大禹, 刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望 [J]. *液晶与显示*, 2015, 30(1): 1-9.
XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9. (in Chinese)
- [6] 曹召良, 李小平, 宣丽, 穆全全, 等. 液晶自适应光学研究进展 [J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 12-19.
CAO Z L, LI X P, XUAN L, *et al.* Recent progress in liquid crystal adaptive optical techniques [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 12-19. (in Chinese)
- [7] CAO Z L, MU Q Q, HU L F, *et al.* Preliminary use of nematic liquid crystal adaptive optics with a 2.16-meter reflecting telescope [J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2530-2537.
- [8] 胡立发, 彭增辉, 王启东, 等. 纯位相液晶调制器的响应特性计算 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(3): 182-189.
HU L F, PENG Z H, WANG Q D, *et al.* Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 182-189. (in Chinese)
- [9] BIASI R, GALLIENI D, SALINARI P, *et al.* Contactless thin adaptive mirror technology: past, present, and future [C]// *Proceedings of Adaptive Optics Systems II*. San Diego, California, United States: SPIE, 2010: 77362B.

- [10] SALINARI P, DEL V C, BILIOTTI V. A study of an adaptive secondary mirror [C]//*Proceedings of ESO Conference, ICO-16 Satellite Conference, Active and Adaptive Optics*. Garching near Munich: European Southern Observatory, 1993: 247-253.
- [11] BRUSA G, DEL VECCHIO C. Design of an adaptive secondary mirror: a global approach [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(21): 4656-4662.
- [12] 吴琼雁,王强,彭起,等.音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J].*光电工程*,2004,31(8):15-18.
WU Q Y, WANG Q, PENG Q, *et al.* Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(8): 15-18. (in Chinese)
- [13] EALEY M A, WELLMAN J. Fundamentals of deformable mirror design and analysis [C]//*Proceedings of Precision Engineering and Optomechanics*. San Diego, United States:SPIE, 1989: 66-84.
- [14] HARTMANN P, NATTERMANN K, DÖHRING T, *et al.* ZERODUR® glass ceramics for high stress applications [C]//*Proceedings of SPIE Optical Materials and Structures Technologies IV*. San Diego, California, United States: SPIE, 2009: 74250M.

作者简介:



刘新宇(1995—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,2017年于江南大学获得学士学位,主要从事自适应光学变形镜的研究。E-mail:sullivanlx@outlook.com



胡立发(1974—),男,湖北武汉人,博士,研究员,2003年于东北大学获得博士学位,主要从事液晶和自适应光学研究。E-mail:hulifa@jiangnan.edu.cn