

高效率可变磁阻音圈驱动器的设计及性能研究

张志高, 胡启立, 马文超, 姜律, 顾虎, 吴晶晶, 胡立发

引用本文:

张志高, 胡启立, 马文超, 等. 高效率可变磁阻音圈驱动器的设计及性能研究[J]. 液晶与显示, 2022, 37(1): 21–28.

ZHANG Zhi-gao, HU Qi-li, MA Wen-chao, et al. Design and performance research of high efficiency variable reluctance voice coil actuator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 21–28.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0272>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

变形镜用高效率音圈驱动器的结构优化设计

Optimized design of high efficient voice coil actuator in deformable mirror

液晶与显示. 2020, 35(11): 1110–1119 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1110>

音圈变形镜的设计及其力学特性分析

Design of voice-coil deformable mirror and its mechanical characteristics

液晶与显示. 2020, 35(8): 801–807 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203508.0801>

自适应光学系统误差分析与参数优化研究

Error budget and parameters optimization of adaptive optics system

液晶与显示. 2021, 36(5): 663–672 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0356>

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>

应用于AMOLED源极驱动的具有DAC功能的输出缓冲器设计

Design for AMOLED source driver output buffer with DAC function

液晶与显示. 2020, 35(9): 938–945 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203509.0938>

文章编号:1007-2780(2022)01-0021-08

高效率可变磁阻音圈驱动器的设计及性能研究

张志高^{1,2}, 胡启立³, 马文超⁴, 姜 律^{1,2}, 顾 虎^{1,2}, 吴晶晶^{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;

3. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003;

4. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘要:变形镜是自适应光学(AO)系统的核心单元之一,本文提出了一种基于磁阻最小原理的新型音圈驱动器结构,在传统音圈结构设计上引入软磁材料-坡莫合金以减少磁漏,从而提高输出力与效率。使用 ANSYS Maxwell 建立模型进行仿真并优化了各组件的结构尺寸,结果表明该驱动器结构的力为 3.4 N,效率可达 $9.05 \text{ N} \times \text{W}^{-1/2}$,响应时间为 0.03 ms。同时,研究发现相邻驱动器间工作影响很小,以此确立了驱动器间距 15 mm 时,音圈变形镜交连值为 11.7%,满足应用要求。本工作为研制大行变量、快速响应、低功耗和高驱动器密度的变形镜打下了坚实的基础,具有很好的应用前景。

关键词:自适应光学; 变形镜; 音圈驱动器; 交连值

中图分类号: O436; TH744 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2021-0272

Design and performance research of high efficiency variable reluctance voice coil actuator

ZHANG Zhi-gao^{1,2}, HU Qi-li³, MA Wen-chao⁴, JIANG Lv^{1,2},GU Hu^{1,2}, WU Jing-jing^{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;

3. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test and Evaluation Technology, Luoyang 471003, China;

4. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: The deformable mirror is one of the core units of the Adaptive Optics (AO) System. This article proposes a new voice coil actuator structure based on the principle of minimum magnetoresistance. The soft magnetic material-Permalloy is added to the traditional voice coil structure design to

收稿日期:2021-10-28; 修订日期:2021-11-15.

基金项目:国家自然科学基金(No.61475152); 光电对抗测试评估技术重点实验室开放课题(No.GKCP2021001)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61475152); Fund for Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology (No.GKCP2021001)

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

reduce magnetic leakage and thus improve output force and efficiency. The model is established by ANSYS Maxwell for simulation and the structural dimensions of each component are optimized. The results show that the actuator structure can generate a force of 3.4 N, an efficiency of $9.05\text{N} \times \text{W}^{-1/2}$, and a response time of 0.03 ms. At the same time, it is found that the working influence between adjacent actuators is very small, so it is established that the coupling of deformable mirror is 11.7% when the actuator spacing is 15 mm, which meets the system requirements. This work lays a solid foundation for the development of deformable mirrors with large travel, fast response, low power consumption and high actuator density, which have good application prospects.

Key words: adaptive optics; deformable mirror; voice coil actuator; coupling

1 引言

在使用地基望远镜进行天文观测时,由于大气湍流的干扰,光学系统的成像质量会变差,人们引入自适应光学技术(Adaptive Optics, AO)来解决这一问题^[1-3]。波前校正器作为整个 AO 系统中关键的部分之一,根据校正原理分为液晶空间光调制器^[4-5]和变形镜,其中 PZT 变形镜技术较为成熟应用广泛^[6],但它有迟滞和调制量低的缺点,而基于音圈电磁驱动器的变形次镜因其行程大、无迟滞、精度高、响应快等特点被多个大型望远镜系统采用。

1993 年,意大利切特里天文台的 Piero Salinari 首次提出用音圈驱动器控制光学望远镜的可变形次镜^[7]。音圈驱动器没有磁滞、速度快、功耗低,被用在一系列的大口径望远镜,如多镜面望远镜(Multiple Mirror Telescope, MMT)、大双筒望远镜(Large Binocular Telescope, LBT)、甚大望远镜(Very Large Telescope, VLT)、巨型麦哲伦望远镜(Giant Magellan Telescope, GMT)和欧洲极大望远镜(European Extremely Large Telescope, E-ELT)上^[8-9]。近年来,国内也有开展对音圈变形镜的研究^[10-12]。传统的音圈驱动器采用线圈作定子而永磁体(PM)作动子的结构,由于线圈发热、漏磁等的影响,其电机效率为 0.3~0.8^[13-15],本组在优化结构参数的基础上,将电机效率提高到了 0.9^[16]。

为克服音圈变形镜功耗大、效率低、输出力小的问题,本文提出一种新型无磁体结构的音圈电磁驱动器,线圈绕在软磁材料上作定子,动子则用软磁材料替代永磁体,使用 ANSYS 进行音圈驱动器结构的设计和优化,并对驱动器的响应时间和变形镜的交连值等参数进行了分析,研究相邻

驱动器间的合理间距。

2 音圈驱动器结构和工作原理

2.1 基本结构

不同于传统的有磁结构音圈驱动器,该驱动器由线圈绕组和软磁材料坡莫合金组成,其中铜线圈嵌入坡莫合金中作定子,动子也采用软磁材料,定子上下各两个并置于动子两端,其结构示意图如图 1 所示,包括薄镜面、传动轴、线圈绕组、动子、定子等。

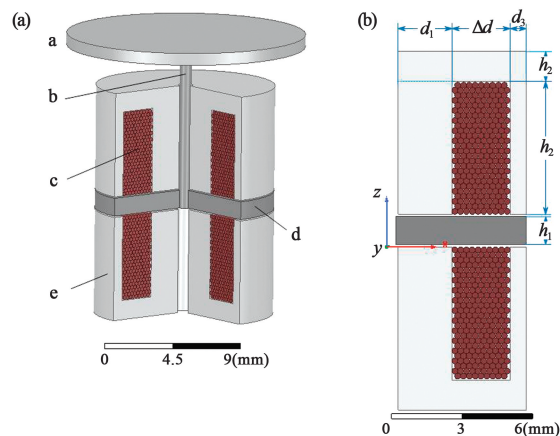


图 1 (a)驱动器结构示意图。a:薄镜面;b:传动轴;c:线圈绕组;d:动子;e:定子;(b)驱动器沿轴线某一剖面图。

Fig.1 (a) Schematic view of the actuator structure. a: Thin mirror; b: Transmission shaft; c: Coil winding; d: Mover; e: Stator; (b) Sectional view of the actuator along the axis.

2.2 工作原理

当线圈绕组通以电流时,会在周围激发磁场,由于线圈周围存在软磁材料,于是磁感线将集中

在软磁材料中,并产生比原磁场大很多的磁感强度^[17]。得益于软磁材料的特性,可以将电流激发的磁场放大,这时软磁材料中磁感强度远大于空间中其他位置的磁感强度,磁力线穿过动子、软铁定子以及动子与定子间气隙构成闭合回路,由于软磁材料的导磁性能比空气好,根据磁阻最小原理,磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合,整个磁路力图缩短磁通路径以减小磁阻^[18],从而使动子和定子产生相向的磁拉力。也正是产生的只有拉力,因此需要两个定子对称放置在动子两侧使其可以上下运动。

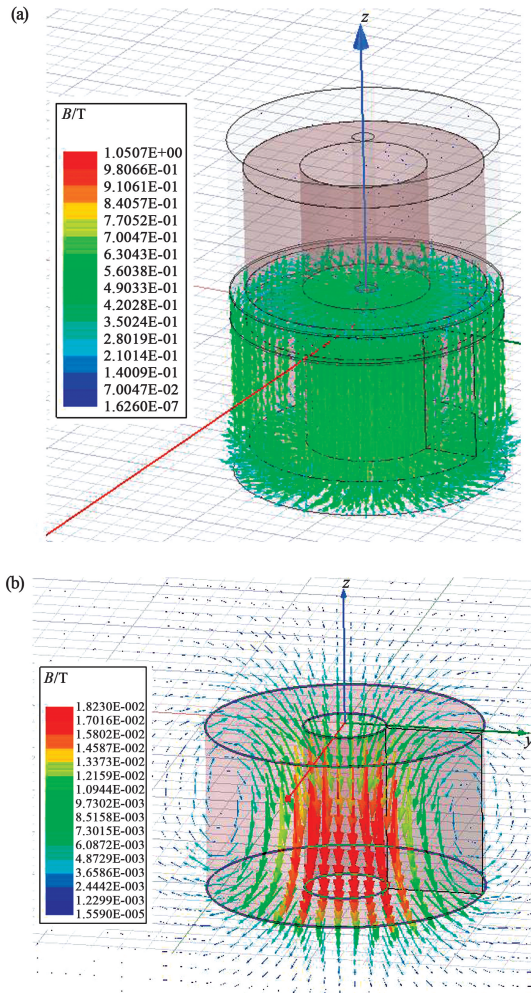


图 2 (a)驱动器结构磁感线分布图;(b)无软磁结构时线圈绕组周围磁感线分布图。

Fig.2 (a) Flux lines distribution of actuator structure; (b) Distribution diagram of flux lines around coil winding without soft magnetic structure.

当驱动器的上半部分线圈不通电,而下半部分的线圈通以电流时,其磁感线的三维分布如图 2(a)所示,图 2(b)为无软磁结构时相同通电线圈绕组周围的磁感线分布图,其磁场在空间不同位置处的强度和方向都不相同,因此,一部分磁场并没有对轴向的输出力产生贡献,这会导致输出力低、效率低。从图 2 中的对比可见,具有软磁的结构极大地减少了漏磁现象,电流所产生的磁场主要集中在闭合的磁路中,这使得驱动器的输出力和效率都会得到提高。

用于变形镜时,单个驱动器的直径还受到限制,不能太大,否则会降低单位面积上驱动器的数量,导致校正效果差。同时,驱动器的分布不能太密,否则相邻驱动器工作时会互相影响,降低校正效果。因此,需要对音圈驱动器的结构和分布进行优化研究。

2.3 音圈驱动器的基本理论

在设计音圈驱动器时,驱动器所产生的轴向力 F_z 和效率 ϵ 是衡量结构优劣的重要参数,其中效率 ϵ 定义为输出力与线圈功率平方根的比值,即 $\epsilon = F_z / \sqrt{P}$,输出力跟软磁材料的结构大小、电流以及线圈绕组的尺寸有关。效率 $\epsilon = \sqrt{1/\rho} \cdot \bar{B} \cdot \sqrt{V}$, ρ 为线圈导体的电阻率, $\bar{B}$ 为磁感应强度,线圈绕组的体积为 V ,影响效率的因素主要有磁感强度、线圈的尺寸,因此优化驱动器各结构参数使其在有限空间内的力和效率最大化。

采用如图 1(a)所示的驱动器简化模型,基于上述讨论本文借助有限元分析软件 ANSYS Maxwell 对驱动器模型进行电磁仿真,对于线圈绕组采用线径 0.335 mm 铜漆包线,则选取该漆包线最大的通过电流为 0.441 A。由于软磁材料中坡莫合金的相对磁导率很大且磁滞特性不显著^[19],因此结构中选择镍含量 76% 的坡莫合金 Mu_metal。

在模拟电流时为了简化模型,使用圆环柱体代替线圈绕组,并设置电流均匀流过导体截面,线圈匝数用 N 表示,此时整个绕组的截面电流(单位 A)为:

$$I_{all} = 0.441 \times N \quad (1)$$

线圈的匝数 N 主要由绕组的横截面积决定,此外还与导线的缠绕方式有关,由于导线之间存在间隙,整个绕组的横截面积要大于实际导线的截面积之和,这里引入填充因子 K ,一般取 1.1~1.2。

绕组截面面积可表示为:

$$S = K \cdot N \cdot A = (r_2 - r_1) \cdot h_2 \quad (2)$$

其中 A 表示为铜导线的横截面积, r_1, r_2 分别为绕组线圈的内半径和外半径, 高度为 h_2 , 由于导线填满整个绕组线圈的空间, 绕组的整个体积 V 也可采用该方法表示, 将铜线圈的总长度设为 L , 体积可表示为:

$$V = K \cdot A \cdot L = \pi(r_2^2 - r_1^2)h_2 \quad (3)$$

线圈绕组的总电阻设为 R , 由电阻定义:

$$R = \rho \cdot L / A \quad (4)$$

其中 ρ 为铜的电阻率, 查得 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 线圈绕组的功率 P_{all} :

$$P_{\text{all}} = I^2 R \quad (5)$$

由式(1)、(2)可得:

$$I_{\text{all}} = 0.441 \times \frac{(r_2 - r_1)h_2}{K \cdot A} \quad (6)$$

由式(3)、(4)、(5)得:

$$P_{\text{all}} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot I^2}{K \cdot A^2} (r_2^2 - r_1^2)h_2 \quad (7)$$

根据大口径地基望远镜的变形次镜的规格和性能要求, 驱动器尺寸不能过大, 尤其是驱动器的直径, 本文约束驱动器整体直径 12 mm, 单侧的定子结构总高 7 mm, 因为要放置传动轴将动子输出力传递到镜面, 设置软磁材料的开孔内径 0.5 mm, 在此空间基础上优化软磁材料和线圈绕组的尺寸以寻求性能的最优化。本文在对驱动器模型进行仿真时, 尽可能地简化模型突出其主要特征, 可以优化的对象包括定子结构中软磁材料的内壁厚度 d_1 , 底部厚度 d_2 , 外壁厚度 d_3 以及动子的高度 h_1 , 如图 1(b)所示。当设置好软磁材料的尺寸后, 线圈绕组的尺寸也将随之确定, 接下来将分别对其进行优化。

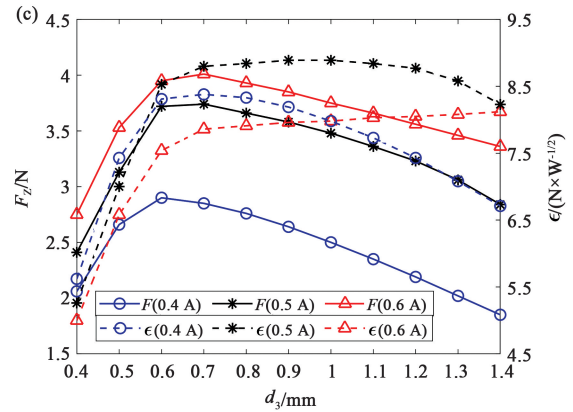
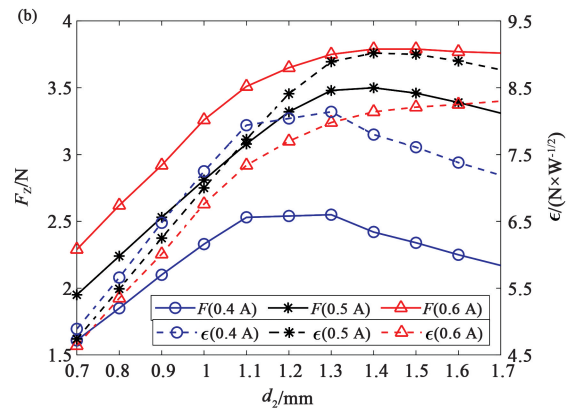
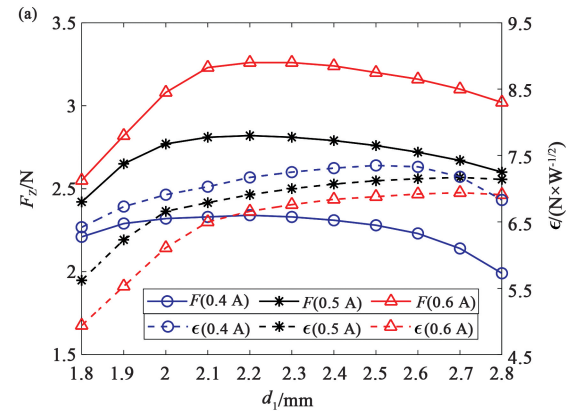
3 仿真结果与分析

3.1 驱动器结构参数优化

基于上述讨论, 在软件中建立模型, 这里采用一个初始的结构尺寸, 动子与定子间的气隙设置 0.1 mm。动子的高度 h_1 设置 1 mm, 内半径 0.5 mm, 外半径 6 mm。软铁定子的内半径和外半径与动子相同, 分别为 0.5 mm 和 6 mm, 高度 7 mm, 两个定子对称并置于动子的上下两侧, 软铁定子的内壁厚度 d_1 为 2 mm, 底部厚度 d_2 为

1 mm, 外壁厚度 d_3 为 1 mm。此时线圈绕组的内半径和外半径分别为 2.5 mm 和 5 mm, 高度 h_2 为 6 mm。在对驱动器结构某一尺寸进行优化时, 需要确定其他的尺寸不变。

首先, 对软磁材料内壁厚度 d_1 进行优化, 即固定软铁定子的内外半径和高度不变, 外壁厚度 d_3 不变, 底部厚度 d_2 也不变, 气隙 0.1 mm。设置软铁定子的内壁厚度 d_1 为 1.8~2.8 mm, 则线圈绕组的截面宽度 Δd 随之发生相应变化。在导线中通入 0.4~0.6 A 的电流, 仿真得到轴向力和效率与内壁厚度 d_1 的关系如图 3(a), 其中左纵轴和右纵轴分别为轴向力和驱动器效率, 从图中可



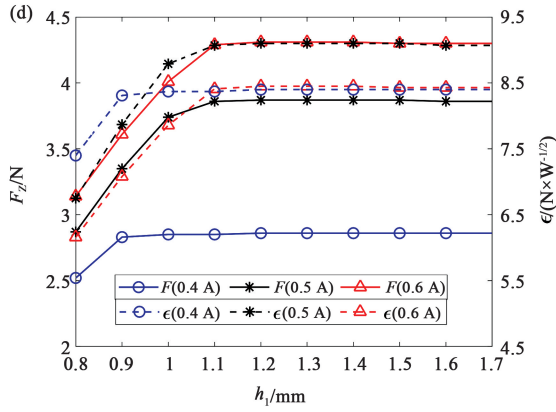


图 3 对音圈驱动器结构参数的优化曲线。(a)软铁内壁厚度优化;(b)软铁底部厚度优化;(c)软铁外壁厚度优化;(d)动子高度优化。

Fig.3 Optimization curves of structural parameters of voice coil actuator. (a) Optimization of inner wall thickness of soft iron; (b) Optimization of soft iron bottom thickness; (c) Optimization of outer wall thickness of soft iron; (d) Optimization of the mover height.

以看出,随着内壁厚度 d_1 增大,磁路发生一些改变,电磁力先增大后减小,效率随之增大后基本保持不变,这是由于软磁材料中磁通密度达到饱和和后线圈体积减小引起力和功率的降低,因此效率保持不变,考虑到驱动器对输出力和效率的要求,这里选取软铁定子内壁厚度 d_1 最佳的尺寸为 2.3 mm。

对软磁材料底部厚度 d_2 的优化,结果如图 3 (b)所示,从图中可以看出,当 d_2 大于 1.3 mm 时,力和效率开始减小,且效率减小幅度较缓,综合对力与效率的考量,选取软磁材料底部厚度 d_2 为 1.3 mm,此时线圈绕组的高度 h_2 为 5.7 mm。对软磁材料外壁厚度 d_3 进行了优化,结果如图 3 (c)所示,随着外壁厚度 d_3 增大,轴向力和效率先急剧增大后减小,综合对驱动器力与效率的考量,选择软磁材料外壁厚度 d_3 为 0.7 mm,此时线圈绕组的截面宽度为 2.5 mm。对动子高度 h_1 进行了优化,结果如图 3(d)所示,从图中可以看出,随着动子高度的增大,力和效率先增大,当高度超过 1.2 mm,其保持不变,此时磁通密度在动子中达到最大,考虑驱动器结构要求对动子质量尽可能的低,因此动子的高度选取 1.2 mm。

3.2 驱动器结构优化前后对比

通过对驱动器动子与定子结构尺寸的逐一优

化,得到了音圈驱动器最优的尺寸,以此确定驱动器的软磁材料内壁厚度 d_1 为 2.3 mm,底部厚度 d_2 为 1.3 mm,外壁厚度 d_3 为 0.7 mm,动子高度 h_1 为 1.2 mm,此时线圈绕组的内径为 2.8 mm,外径 5.3 mm,截面宽度 2.5 mm,高度 h_2 为 5.7 mm。图 4 给出了驱动器结构优化前后的对比结果,从图中可以看出,优化后的输出力和效率得到很大提高,当取铜导线的安全载流量 5 A/mm² 时,允许导线通过的最大电流为 0.441 A,在此基础上仿真得到该驱动器的最大输出力为 3.4 N,效率 9.05 N×W^{-1/2},这也是目前文献报道的最大值。

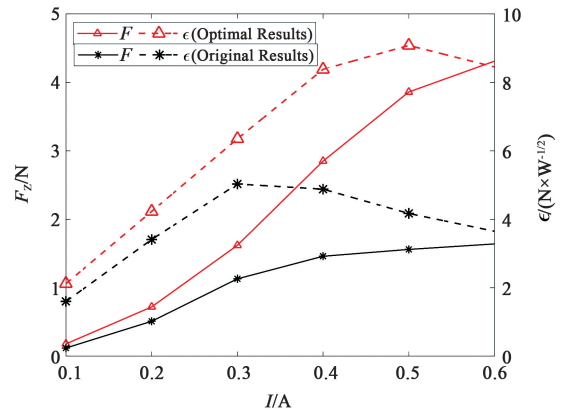


图 4 驱动器结构优化前后数据对比

Fig.4 Comparison of data before and after actuator structure optimization

4 音圈驱动器的响应时间

大型天文望远镜在工作时往往需要变形镜反应的足够快,这就要求变形镜用驱动器具备极短的响应时间,音圈驱动器在这方面的性能优异。由于音圈驱动器是一种靠电磁力驱动的力驱动器,其动子的运动遵循以下的运动方程:

$$F_{em} + F_{load} = ma + \lambda v \quad (8)$$

其中 F_{em} 是所计算出的电磁力, F_{load} 为动子所连接的外部载荷力,用于大气波前修正和薄镜面重力载荷的力大约需要 0.2 N。 m 为动子的质量, a 为加速度, λv 为阻尼项,其中 v 是速度, λ 为系统阻尼。

由式(8)可以计算驱动器的运动状态及响应时间,选取驱动器动子初始位置 z_0 为坐标原点即 $z_0 = 0$,当动子行程 δ 分别为 1、2、5 μm 时,其响应时间的关系如图 5 所示。

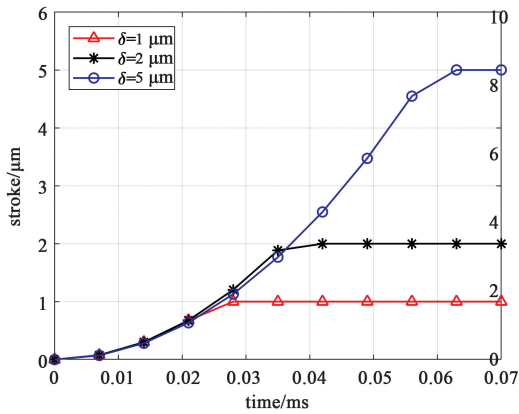


图 5 在 $z_0 = 0$ 处, 动子行程 δ 与响应时间关系曲线。

Fig.5 Relation curves between mover stroke δ and response time at $z_0 = 0$

从图 5 中可以看出, 动子行程在 $5 \mu\text{m}$ 内响应时间小于 0.07 ms , 高于系统的带宽。

5 音圈驱动器间距与交连值的选择

一般的典型音圈变形镜驱动器间距为 $25 \sim 30 \text{ mm}$, 例如在 LBT, VLT 以及 E-ELT 望远镜项目中, 驱动器间距为 30 mm ^[20]。长间距会导致变形镜的驱动器密度降低, 从而影响变形镜的校正精度, 因此如何有效降低驱动器间距对于音圈变形镜的研究意义重大。本文提出的基于无磁体结构音圈变形镜, 在该方面效果显著, 使用 ANSYS Maxwell 软件分析相邻两个驱动器的相互影响。

变形镜的另一主要性能指标为交连值 c (coupling), 即中心驱动器单独施加电压时相邻驱动器的位移 δ_1 与中心驱动器位移 δ_0 的比值:

$$c = \delta_1 / \delta_0, \quad (9)$$

交连值过大过小都不好, 理想的交连值在 $5\% \sim 12\%$ 之间^[21-22]。影响交连值的因素有很多, 镜面材料、镜面厚度、驱动器刚度以及驱动器间距都对其产生影响。研究交连值与驱动器间距关系时需约束好其他的条件, 其中镜面材料与厚度可以沿用常规选择。对于压电陶瓷驱动的变形镜, 驱动器的刚度普遍很大 (约 $10^6 \sim 10^7 \text{ N/m}$), 而音圈驱动器采用非接触模式, 属于力驱动器, 除了悬架的刚度外, 执行机构没有机械刚度, 此时变形镜的冷却结构和控制系统不会对镜面造成干扰, 在 ASM (自适应次镜) 中, 往往通过局部位置反馈和一个

复杂的控制系统增加额外的轴向刚度, 使其刚度约为 10^3 N/m 。

本文采用上述音圈驱动器结构来研究变形镜的交连值与驱动器间距的关系, 选取 7 单元音圈变形镜, 其中薄镜面直径 100 mm , 厚度 1.6 mm , 材料参数如表 1, 驱动器传动轴与镜面的粘结面直径为 2 mm , 采取三角形排布方式, 将驱动器作为一个整体并设置刚度值为 6300 N/m 。在中心驱动器线圈中通以 0.441 A 电流, 相邻驱动器间距设置不同值时, 分析结果如图 6 所示。

表 1 变形镜材料参数

Tab.1 Material parameters of deformable mirror

Materials	Young's modules/GPa	Poisson' ratio	Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
K4 glass	71	0.21	2 500

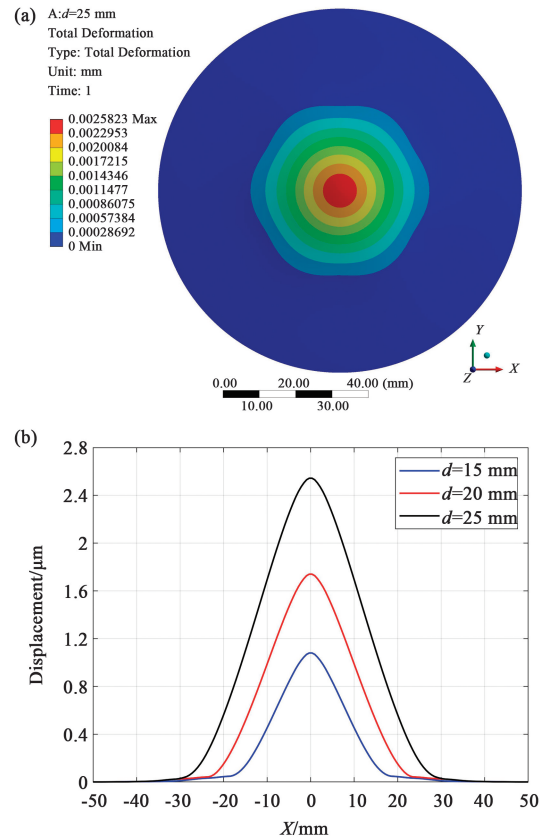


图 6 (a) 相邻驱动器间距 $d = 25 \text{ mm}$ 时, 镜面受力产生的形变云图; (b) 中心驱动器典型影响函数。

Fig.6 (a) Deformation nephogram generated by mirror force when the distance between adjacent actuators is $d = 25 \text{ mm}$; (b) Typical influence function of the central actuator.

图6(a)显示了相邻驱动器间距为25 mm时镜面受力产生的形变云图,此时,中心驱动器处镜面位移 $2.582\ 3\ \mu\text{m}$,相临驱动器处镜面位移 $0.162\ 4\ \mu\text{m}$ 。由式(9)可计算出此时变形镜交连值为6.3%。图6(b)显示了相邻驱动器在不同间距下中心驱动器的典型影响函数,由式(9)可得当间距为20 mm和15 mm时,对应变形镜的交连值分别为8.1%和11.7%。

根据以上分析结果,变形镜交连值随驱动器间距的减小而增大,并且驱动器间距的变化并不影响各自的工作性能,但其间距不能无限缩小,否则交连值过大会造成各个控制回路之间的机械耦合,影响系统工作,综合上述讨论,为适当增大变形镜驱动器密度,可以选择驱动器的最小间距为15 mm,此时交连值为11.7%,满足系统要求。

6 结 论

本文针对大口径天文望远镜系统对变形次镜的要求,提出一种新型变形镜用无磁体结构音圈驱动器,介绍了音圈驱动器工作原理并建立结构模型,利用有限元软件优化了其内部的结构尺寸,结果表明该结构可提供最大输出力3.4 N,驱动器效率为 $9.05\ \text{N} \times \text{W}^{-1/2}$ 。从文献报道来看,我们所设计的音圈驱动器,其效率远高于MMT、LBT等望远镜次镜上所用的音圈驱动器的结果。同时,研究了音圈驱动器的响应时间以及相邻驱动器间距与交连值的影响,该结构可以在0.03 ms内提供 $1\ \mu\text{m}$ 的行程,选择驱动器最小间距15 mm时,镜面交连值为11.7%,满足了高性能音圈变形镜的设计要求。本文的分析和优化结果对音圈驱动器的研制及其应用提供了理论基础。

参 考 文 献:

- [1] 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)
- [2] 姜文汉.自适应光学发展综述[J].光电工程,2018,45(3):170489.
JIANG W H. Overview of adaptive optics development [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170489. (in Chinese)
- [3] 胡立发,刘超,申文,等.自适应光学技术在天文观测中的研究进展[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(8):084202.
HU L F, LIU C, SHEN W, *et al.* Advancement of adaptive optics in astronomical observation [J]. *Scientia Sinica Physics, Mechanics & Astronomica*, 2017, 47(8): 084202. (in Chinese)
- [4] 王猛,王岩,韦德泉,等.松果状纳米氧化铁对液晶电光性能的影响[J].应用化学,2019,36(5):578-584.
WANG M, WANG Y, WEI D Q, *et al.* Influence of pinecone-like ferric oxide on the electro-optical properties of Nematic liquid crystals [J]. *Applied Chemistry*, 2019, 36(5): 578-584. (in Chinese)
- [5] 王萌,杨槐.碳纳米管掺杂聚合物稳定蓝相液晶的电场响应性能[J].应用化学,2018,35(8):969-971.
WANG M, YANG H. Electrically responsive properties of carbon nanotube-doped polymer-stabilized blue phase [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2018, 35(8): 969-971. (in Chinese)
- [6] 官春林,张小军,邓建明,等.中国科学院光电技术研究所的变形反射镜研究进展[J].光电工程,2020,47(10):200337.
GUAN C L, ZHANG X J, DENG J M, *et al.* Deformable mirror technologies at institute of optics and electronics, Chinese academy of sciences [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200337. (in Chinese)
- [7] SALINARI P, DEL VECCHIO C, BILIOTTI V. A study of an adaptive secondary mirror [C]//*ESO Conference and Workshop Proceedings*. European Southern Observatory, 1994: 247.
- [8] CAYREL M. E-ELT optomechanics: overview [C]//*Proceedings of SPIE 8444, Ground-Based and Airborne Telescopes IV*. Amsterdam, Netherlands: SPIE, 2012: 84441X.
- [9] BIASI R, GALLIENI D, SALINARI P, *et al.* Contactless thin adaptive mirror technology: past, present, and fu-

- ture [C]//*Proceedings of SPIE 7736, Adaptive Optics Systems II*. San Diego: SPIE, 2010: 77362B.
- [10] 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 X Y, CAO S, HU D T, *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. (in Chinese)
- [11] 张玉方, 李国平. 用于薄镜面主动光学的音圈力促动器设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(11): 2836-2843.
ZHANG Y F, LI G P. Design of voice coil force actuator in thin mirror active optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2836-2843. (in Chinese)
- [12] 王昕彤. 基于音圈促动器的镜面面形校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
WANG X T. Research on mirror shape correction technology based on voice coil actuator [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [13] RICCARDI A, BRUSA G, DEL VECCHIO C, *et al.* The adaptive secondary mirror for the 6.5 conversion of the Multiple Mirror Telescope [C]//*European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*. 2002: 55.
- [14] MARTIN H M, ZAPPELLINI G B, CUERDEN B, *et al.* Deformable secondary mirrors for the LBT adaptive optics system [C]//*Proceedings of SPIE 6272, Advances in Adaptive Optics II*. Orlando, USA: SPIE, 2006: 62720U.
- [15] 郭世成. 用于大口径自适应变形镜的音圈电机研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
GUO S C. Research on voice coil motor for large aperture adaptive deformable mirror [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [16] 曹朔, 张志高, 赵子云, 等. 变形镜用高效率音圈驱动器的结构优化设计[J]. 液晶与显示, 2020, 35(11): 1110-1119.
CAO S, ZHANG Z G, ZHAO Z Y, *et al.* Optimized design of high efficient voice coil actuator in deformable mirror [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(11): 1110-1119. (in Chinese)
- [17] SANKARA SUBRAMANIAN A T, MEENALOGHINI P, SATHIYA S S B, *et al.* A review on selection of soft magnetic materials for industrial drives [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 1591-1596.
- [18] VAHEDI P, GANJI B. A simple magnetic equivalent circuit model for switched reluctance machine [J]. *Electrical Engineering*, 2021, 103(2): 1307-1320.
- [19] LI B, FU W Q, XU H S, *et al.* Additively manufactured Ni-15Fe-5Mo Permalloy via selective laser melting and subsequent annealing for magnetic-shielding structures; process, micro-structural and soft-magnetic characteristics [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 494: 165754.
- [20] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy [C]//*Proceedings of SPIE 8447, Adaptive Optics Systems III*. Amsterdam, Netherlands: SPIE, 2012: 844705.
- [21] SHANNON R, WYANT J M. *Applied Optics and Optical Engineering* [M]. New York: Academic Press, 1979: 295.
- [22] 凌宁, 官春林. 变形反射镜的发展[J]. 光电工程, 1995, 22(1): 14-22.
LING N, GUAN C L. The development of deformable mirrors [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(1): 14-22. (in Chinese)

作者简介:



张志高(1996—),男,河南焦作人,硕士研究生,2018年于洛阳理工学院获得学士学位,主要从事自适应光学变形镜的研究。E-mail: 6191203022 @ stu.jiangnan.edu.cn



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,主要从事液晶自适应光学研究。E-mail: hulifa@jiangnan.edu.cn