

变形镜用高效率音圈驱动器的结构优化设计

曹朔, 张志高, 赵子云, 顾虎, 吴晶晶, 朱华新, 苏宙平, 张逸新, 胡立发

引用本文:

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 Shuo, ZHANG Zhi-gao, ZHAO Zhi-yun, 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于压电陶瓷直驱的前向像移补偿系统

Forward motion compensation system based on piezoelectric direct drive

液晶与显示. 2015(3): 519–524 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153003.0519>

降低聚合物稳定蓝相液晶显示器驱动电压的一种方法

A method to reduce the operating voltage of polymerstabilized blue-phase liquid crystal displays

液晶与显示. 2017, 32(3): 163–168 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173203.0163>

高性能钆铝锌氧薄膜晶体管的制备

Fabrication of high performance Gadolinium–aluminum–zinc–oxide thin film transistors

液晶与显示. 2017, 32(5): 339–343 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0339>

取向层厚度及介电常数对 TN-LCD 影响的研究

Effect of thickness and dielectric constant of alignment layer on the TN-LCD

液晶与显示. 2016, 31(11): 1017–1022 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163111.1017>

文章编号:1007-2780(2020)11-1110-10

变形镜用高效率音圈驱动器的结构优化设计

曹 朔^{1,2}, 张志高^{1,2}, 赵子云^{1,2}, 顾 虎^{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:音圈变形镜具有无磁滞、响应快、调制量大等优点,在大口径光学望远镜中已经替代了传统的压电变形镜。为提高音圈变形镜驱动器的效率,本文研究了影响驱动器电磁力和效率的因素,建立了音圈驱动器的三维模型,并利用有限元分析软件对其磁体充磁方向、磁体尺寸、线圈尺寸和驱动器结构等参数进行了有限元仿真分析和优化。结果表明,本文设计的动磁式音圈驱动器输出力可达 0.43 N,电机常数可达 0.9,输出力和输入电流有良好的线性关系,为音圈变形设计和应用提供了理论基础。

关键词:变形镜;音圈驱动器;有限元仿真;电磁力;电机常数

中图分类号:O436;TH744 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203511.1110

Optimized design of high efficient voice coil actuator in deformable mirror

CAO Shuo^{1,2}, ZHANG Zhi-gao^{1,2}, ZHAO Zhi-yun^{1,2}, GU Hu^{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: Voice coil actuator(VCA) has the merits of no hysteresis, fast response and large stroke. It has been used in the secondary mirror of large optical telescopes. To improve its efficiency, a high efficiency moving magnetic voice coil actuator was designed. And a three-dimensional model of VCA has been built and analyzed with finite element analysis software to simulate its magnet magnetizing direction, magnet size, coil size and structure contributed to a more accurate result of the electromagnetic force and efficiency. In order to generate large electromagnetic force and high efficiency, the above parameters are simulated and optimized respectively. The result shows that the output force of the small caliber moving magnetic VCA is up to 0.43 N and the actuator constant is up to 0.9. There is a good

收稿日期:2020-07-07;修订日期:2020-08-10.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No.61475152)

Supported by General Projects of National Natural Science Foundation of China(No.61475152)

* 通信联系人, E-mail: hulifa@jnnu.edu.cn

linear relationship between the output force and the input current, which provides a theoretical basis for the development of the VCA for next generation deformable mirror.

Key words: deformable mirror; voice coil actuator; finite element analysis; electromagnetic force; actuator constant

1 引 言

1953 年 Babcock 首次提出自适应光学的概念,即通过实时探测和校正光学系统的畸变,提高目标图像的分辨率^[1]。1961 年穆尔黑德提出了镀金属膜的聚酯薄膜变焦镜^[2]。经过多年的研究开发,人们研制出了不同类型的变形镜:PZT 变形镜^[3]、电致伸缩变形镜^[4]、薄膜变形镜^[5]、MEMS 变形镜^[6]、音圈变形镜^[7]等,并广泛应用于天文观测、显微成像、大功率激光、眼底成像等领域。其中,PZT 变形镜是目前最广泛使用的变形镜。但因其磁滞特性、调制量相对低的缺点,限制了其在大口径望远镜次镜方面的应用。近年来,液晶以其优异的光电性能^[8-10],也用于波前校正器,是自适应光学系统的核心器件之一。相较于 PZT 变形镜,音圈变形镜的调制量大、无磁滞,同时还具有结构简单、体积小、噪声低、比推力高、响应速度快、精度高、维护方便、可靠性高等优点^[11]。

1993 年,意大利阿切特里天文台的 Salinari 提出了基于音圈驱动器的非接触变形镜^[12],并于 1999 年研制了 30 单元和 36 单元音圈变形镜,误差衰减可达 100 Hz(0 分贝衰减水平)^[13]。2002 年,MMT 的 336 单元音圈变形镜研制成功,用作 MMT 望远镜的次镜,极大简化了自适应光学系统,提高了入射光的利用效率。其在 H 波段的斯特列尔比达到了 0.2,在 M 波段的斯特列尔比达到了 0.98^[14-15]。2010 年,有 672 个驱动器的音圈变形镜安装在 LBT 望远镜上,在 H 波段的斯特列尔比达到了 0.8^[16]。2012 年正式运行的 VLT 巡天望远镜的变形次镜有 1 170 个音圈驱动器,所有模式的拟合误差 RMS 为 62.5 nm^[17]。E-ELT M4 直径 2.4 m,分为 6 个部分,由 5 316 个驱动器控制,最多可承受 5%的驱动器故障,而不会破坏其性能^[18]。Vecchio 设计的永磁体径向磁化的音圈驱动器,功耗更低,结构更紧凑,但磁化过程复杂^[19]。日本的 Hashizume 团队设计的音

圈变形镜变形 2.8 μm 时,与理想抛物线的最大偏差小于 30 nm^[20]。国内多个研究组也开展了关于音圈变形镜的研究^[21]。中科院光电技术研究所设计了动磁式音圈电机,输出力可达 $\pm 0.5\text{ N}$ ^[22],阶跃响应时间为 50 ms,对离焦像差拟合 PV 值可达 50 μm ^[23]。长春光机所通过音圈驱动器校正 400 mm 反射镜面形,经过校正后的 RMS 可达 $\lambda/40$ ^[24]。

音圈变形镜基本原理是音圈驱动器通过产生电磁力来驱动薄镜面变形,因此,在音圈变形镜的设计中,电机常数 K 是一个关键的参数,其定义为输出力与功耗的平方根的比值,是衡量电机电磁与热设计水平的标准, K 值越大则驱动器效率越高^[25]。在同样的形变量下,效率低的音圈驱动器会产生过多的热,热的积累导致温度升高,严重时导致薄镜面局部变形,最终会使变形镜的补偿精度和工作稳定性下降。最先应用于 MMT 望远镜的音圈驱动器的电机常数为 0.6^[26],LBT 望远镜的变形次镜单元中的音圈驱动器电机常数为 0.74^[27],ELT 望远镜中用于支撑镜面的音圈驱动器的电机常数达到 1^[28]。国内张玉方设计的用于薄镜面的动磁式音圈驱动器的电机常数为 0.446^[22]。赵静设计的采用 Halbach 阵列磁体的音圈电机的电机常数达到 1.15,但是其径向排列的结构不适用于设计小口径的驱动器^[25]。

目前研究较多的是动圈结构,固定的磁体可提供较强的磁场,但是运动的线圈散热差,对于需要快速响应的变形镜是个大的隐患。动磁式音圈电机由于尺寸限制无法提供较强的磁场,因此产生的电磁力较小。高效率的动磁式音圈电机的研究对于其应用尤为重要,本文针对该问题进行了研究,对音圈变形镜的结构设计进行了优化和仿真。

2 理 论

2.1 驱动器的基本结构

音圈驱动器常用的结构有两种:一种是动磁

式,即磁体运动,线圈固定;另一种是动圈式,即磁体固定,线圈运动。基于动圈式的结构不利于工作过程中线圈的散热,因此,我们采用动磁式。基本结构如图 1 所示。

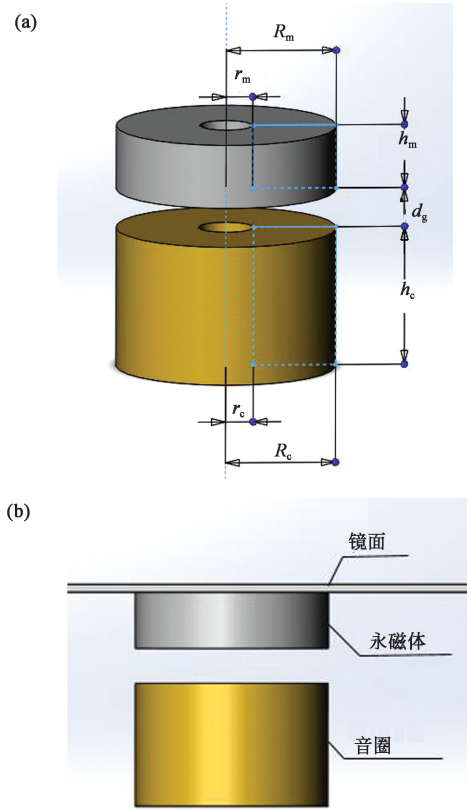


图 1 (a)音圈驱动器结构图;(b)音圈驱动器与镜面的位置关系。

Fig.1 (a) Structure diagram of voice coil actuator;
(b) Position of voice coil actuator and mirror.

该音圈电机由上部粘在镜面背面的钕铁硼永磁体和下部铜线圈构成,主要参数如下:永磁体内、外半径分别为 R_m 和 r_m ,厚度为 h_m ;线圈的内、外半径分别为 R_c 和 r_c ,厚度为 h_c ;永磁体和线圈之间的气隙为 d_g 。

2.2 电磁场分析

根据图 1 所示的基本结构,永磁体所产生的磁场是静磁场,其磁场分布可以按如下方法进行计算。首先,根据等效电流模型^[29],磁体内部存在的圆电流密度:

$$\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{M}$ 为磁化强度。在均匀磁化磁体内部圆电流抵消,而面电流密度为:

$$\mathbf{J}_{ms} = -\mathbf{e}_n \times \mathbf{M}, \quad (2)$$

根据安培定律可求得磁体周围的磁感应强度:

$$\mathbf{B}_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\iiint_V \frac{\mathbf{J}_m \times \mathbf{R}}{R^3} dV + \iint_S \frac{\mathbf{J}_{ms} \times \mathbf{R}}{R^3} dS \right), \quad (3)$$

其中: $\mathbf{R}$ 是源点到场点的矢径, R 是源点到场点的距离, V 是永磁体体积, S 是永磁体表面积。

通过虚位移法可以得到载流线圈在非均匀磁场中受到的合力为^[30]:

$$\mathbf{F}_i = I \nabla \Phi_m, \quad (4)$$

其中 Φ_m 为线圈磁通量。设第 i 匝线圈半径为 r_i ,距多层线圈上表面距离为 d_i ,其上任一点到磁体源点的距离:

$$R_i = \sqrt{r_i^2 + \left(d_i + d_g + \frac{h_m}{2}\right)^2}, \quad (5)$$

该点处的磁感应强度:

$$\mathbf{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\iiint_V \frac{\mathbf{J}_m \times \mathbf{R}_i}{R_i^3} dV + \iint_S \frac{\mathbf{J}_{ms} \times \mathbf{R}_i}{R_i^3} dS \right), \quad (6)$$

其中: $\mathbf{R}_i$ 为线圈上任一点到磁体源点的矢径。单匝圆线圈受到的安培力为:

$$\mathbf{F}_i = I \nabla \Phi_m = I \nabla \left(\int_S \mathbf{B}_i dS \right), \quad (7)$$

其中: $\mathbf{S}$ 是永磁体表面的面积矢量,方向为表面法线方向。多层线圈受到的合力为:

$$\mathbf{F} = \sum_i \mathbf{F}_i. \quad (8)$$

2.3 影响效率的因素

音圈驱动器的电机常数为:

$$K = \frac{|\mathbf{F}|}{\sqrt{P}}, \quad (9)$$

其中: P 是其功耗。

音圈驱动器的功耗为:

$$P = I^2 R_{all}, \quad (10)$$

其中: I 为电流, R_{all} 为线圈总电阻。将式(8)和(10)代入式(9),可以得到评价驱动器效率的电机常数 K 公式如下:

$$K = \frac{\sum_i \nabla \left(\int_S \mathbf{B}_i dS \right)}{\sqrt{R_{all}}}. \quad (11)$$

由公式(11)可见,影响效率的主要因素包括磁感应强度、线圈尺寸和线圈电阻。

需要说明的是,上述公式在近似条件下,计算中心轴线等特殊位置处的磁场时可以得到近似准

确的解,但实际情况下,磁体和线圈边缘的磁场分布复杂,我们需要借助有限元的方法进行求解。有限元分析已经广泛应用于各个领域,能够快速求解电磁、热、流体、结构等问题,节约研发成本,减少研发时间。有限元法是将待求解的整体分割成许多足够小的子区域,即“有限元”,然后根据求解边界问题的原理求解这些有限元,求得的所有结果合起来就是整体的解。Ansoft Maxwell 进行三维网格剖分时将求解区域剖分为许多四面体单元,如图 2 所示。

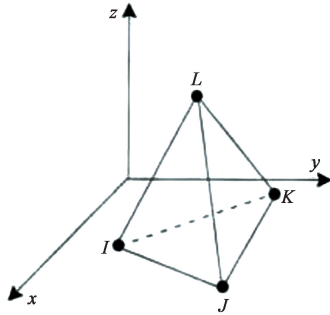


图 2 有限元计算基本单元

Fig.2 Basic element of finite element calculation

4 个顶点上的场量为:

$$\begin{cases} U_I = a + b \cdot x_I + c \cdot y_I + d \cdot z_I \\ U_J = a + b \cdot x_J + c \cdot y_J + d \cdot z_J \\ U_K = a + b \cdot x_K + c \cdot y_K + d \cdot z_K \\ U_L = a + b \cdot x_L + c \cdot y_L + d \cdot z_L \end{cases}, \quad (12)$$

求解该方程组需要 4 个顶点的坐标和定点上的场量。

三维静磁场采用棱边法计算,以单元边上的待求场量为自由度。磁场强度 H 为

$$H = H_p + \nabla\varphi + H_c, \quad (13)$$

其中: φ 为标量磁位, H_p 为四面体单元 6 条棱边上待求的磁场强度。四面体 4 个顶点上的标量磁位和 6 条边上的磁感应强度组成了待求解的 10 个自由度,最后采用二次插值逼近每个单元内的场量^[31]。Maxwell 软件进行有限元仿真的步骤为:建模,添加材料,添加边界条件和激励,划分网格,后处理。为了得到高精度的结果,要特别注意网格的质量以及边界条件和激励的合理性。

3 仿真结果与分析

由前述的解析公式可以看出,驱动器的输出

力跟以下因素有关:永磁体的充磁方向和磁体线圈间的气隙厚度、磁体和线圈的几何尺寸等关键参数。但上述解析公式只针对特殊位置有精确的解,为了进一步研究驱动器参数对音圈变形镜性能的影响,我们利用有限元算法进行了精确的模拟。本节分别对这些参数的影响进行了仿真模拟与讨论。

3.1 磁场方向的优化对比

设置线圈外径为 10 mm,内径为 1 mm,高度为 6 mm,导线直径为 0.33 mm;永磁体外径为 10 mm,内径 1 mm,高度为 3 mm,分别设置磁体的充磁方向为径向充磁和轴向充磁,永磁体轴向受力和电流关系如图 3 所示。图中横轴为输入电流 i ,纵轴为永磁体在轴向所受的电磁力,结果显示永磁体受力 F_z 与输入电流成正比,可用式(14)表示:

$$F_z = k \cdot i, \quad (14)$$

其中: k 是比例系数,对于径向充磁和轴向充磁的磁体 k 分别是 0.45 和 0.34。可见,径向充磁的永磁体所受电磁力更大。因此,接下来的实验中都选用径向充磁的永磁体。

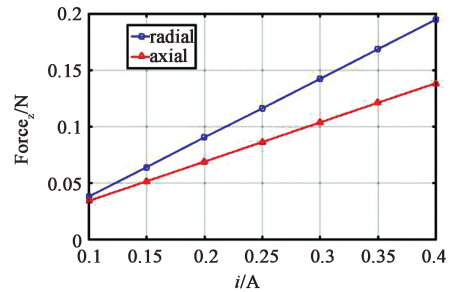


图 3 电磁力与磁体不同充磁方向的关系

Fig.3 Relationship between electromagnetic force and different magnetization directions of magnet

3.2 气隙厚度

磁体和线圈之间的气隙为变形镜的镜面局部形变提供空间,当间隙较大时,镜面相同的形变量需要更大的驱动力,而这需要更大的输入电流,增加了功耗和热;而当间隙较小时,这会限制镜面的局部形变,减少它的调制量。因此,需要对驱动器的形变进行优化设计。线圈尺寸为:外径 10 mm,内径 1 mm,高度 6 mm;导线直径 0.33 mm,通入电流 0.2~0.5 A,步长 0.1 A;磁体外径 10 mm,内径 1 mm,高度 3 mm,设置磁体与铜线圈

之间的间隙厚度 d_g 为 $0.1 \sim 1$ mm, 步长 0.1 mm, 仿真结果如图 4 所示。图 4 中横轴为永磁体与铜线圈之间的间隙厚度 d_g , 左纵轴为永磁体的轴向受力, 右纵轴为电机常数 K , 结果表明间隙的增大会导致电磁力和电机常数减小, 所以间隙应在满足驱动器最大行程条件下取最小值。MMT 望远镜的音圈驱动器的气隙为 0.1 mm, 满足运行时所需的行程空间^[13], 因此本文选择间隙厚度为 0.1 mm。

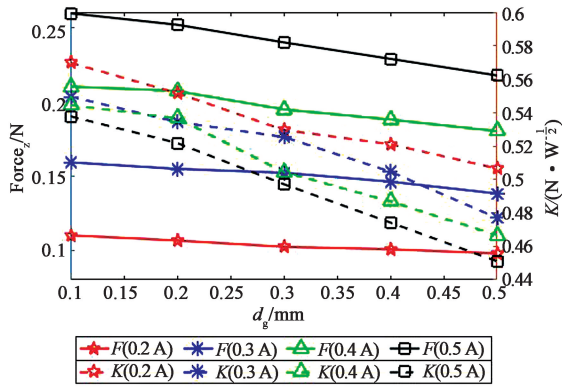


图 4 电磁力随气隙厚度的变化关系

Fig.4 Relationship between electromagnetic force and air gap thickness

3.3 磁体结构优化

3.3.1 磁体厚度的优化

驱动器的基本结构如图 1 所示, 为了优化线圈的尺寸, 线圈的外径增加时, 会影响其空间密度, 而外径太小时, 输出的电磁力较弱, 会导致调制量降低, 因此, 线圈外径采用 10 mm, 通过优化磁体高度, 来优化其性能。首先, 我们固定线圈外

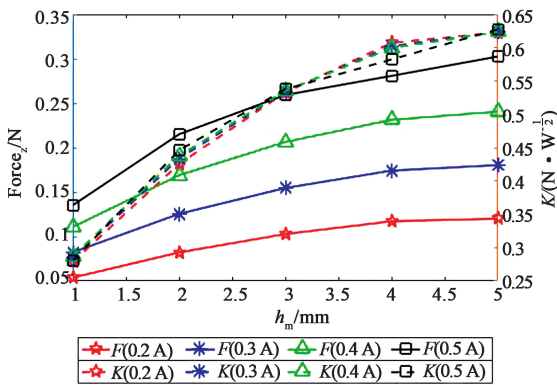


图 5 电磁力和电机常数随磁体高度变化的关系

Fig.5 Relationship between electromagnetic force, actuator constant and the height of magnet.

径 10 mm, 内径 1 mm, 高度 6 mm; 导线直径 0.33 mm, 通入电流 $0.2 \sim 0.5$ A, 步长 0.1 A; 磁体外径 10 mm, 内径 1 mm, 设置高度 h_m 取值 $1 \sim 10$ mm, 步长 1 mm, 仿真得到磁体高度与电磁力的关系如图 5 所示。图中横轴为永磁体的高度 h_m , 左侧纵轴为永磁体的轴向受力, 右侧纵轴为电机常数, 结果显示随着磁体高度的增加电磁力也变大, 但是电磁力与电机常数的增长幅度变小。考虑到磁体的成本, 选择磁体高度为 3 mm。

3.3.2 磁体外半径优化

固定线圈外径 10 mm, 内径 1 mm, 高度 6 mm; 导线直径 0.33 mm, 通入电流 $0.2 \sim 0.5$ A, 步长 0.1 A; 磁体内径 1 mm, 高度 3 mm, 设置磁体外半径 R_m 取值 $3 \sim 7$ mm, 步长 0.5 mm, 仿真结果如图 6 所示。图中横轴为永磁体外半径 R_m , 左纵轴为永磁体轴向受力, 右纵轴为电机常数。结果显示随着永磁体外半径变大电磁力和电机常数的增长幅度开始减小, 因此选择永磁体外径为 5 mm。

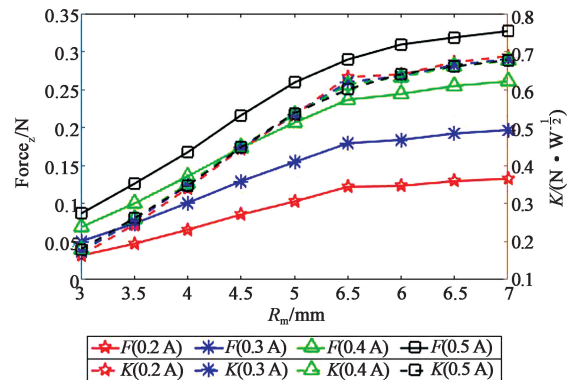


图 6 电磁力和电机常数随磁体外径变化的关系

Fig.6 Relationship between electromagnetic force, actuator constant and the outer diameter of magnet.

3.3.3 磁体内半径优化

固定线圈外径 10 mm, 内径 1 mm, 高度 6 mm; 导线直径 0.33 mm, 通入电流 $0.2 \sim 0.5$ A, 步长 0.1 A; 磁体外径 10 mm, 高度 3 mm, 设置磁体内半径 r_m 取值 $0.3 \sim 0.7$ mm, 步长 0.1 mm, 仿真结果如图 7 所示。图中横轴为永磁体内半径 r_m , 左纵轴为永磁体轴向受力, 右纵轴为电机常数, 结果显示磁体内径变化时电磁力没有明显变

化,但当磁体内半径从 0.1 mm 增至 0.5 mm 时,电机常数变大并达到极值,然后随着磁体内径的增大而减小,因此选择磁体内半径为 0.5 mm。

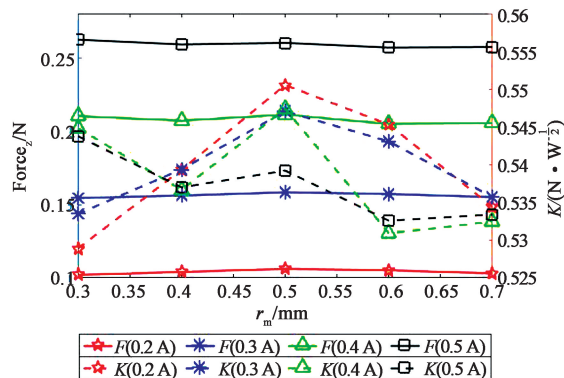


图 7 电磁力和电机常数随磁体内径变化的关系

Fig.7 Relationship between electromagnetic force, actuator constant and the inner diameter of magnet.

3.4 线圈结构优化

3.4.1 线圈高度

固定磁体外径 10 mm,内径 1 mm,高度 3 mm;导线直径 0.33 mm,通入电流 0.2~0.5 A,步长 0.1 A;线圈外径 10 mm,内径 1 mm,高度 h_c 为 4~8 mm,步长 1 mm,仿真结果如图 8 所示。图中横轴为线圈高度 h ,左侧纵轴为永磁体轴向受力,右侧纵轴为电机常数。随着线圈高度的增长磁体受力增长而电机常数减小,综合考虑电磁力和电机常数,选择线圈高度为 6 mm。

3.4.2 线圈外径

固定磁体外径 10 mm,内径 1 mm,高度 3

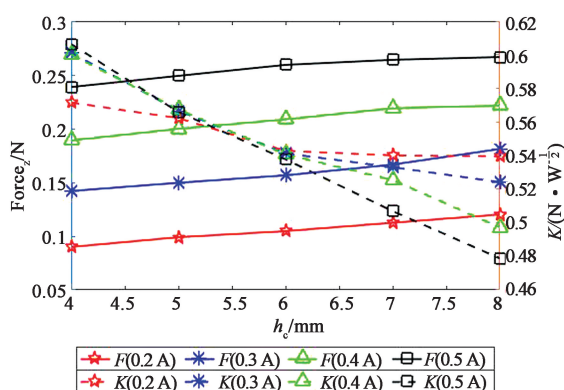


图 8 电磁力和电机常数随线圈高度变化的关系

Fig.8 Relationship between electromagnetic force, actuator constant and the height of coil.

mm;导线直径 0.33 mm,通入电流 0.2~0.5 A,步长 0.1 A;线圈内径 1 mm,高度 6 mm,外半径为 4~6 mm,步长 0.5 mm,仿真结果如图 9 所示。图中横轴为铜线圈外半径 R_c ,左纵轴为永磁体轴向受力,右纵轴为电机常数。结果显示随着线圈外径的增大,电磁力逐渐增大,而电机常数在 $R_c = 5$ mm 处达到极大值,因此选择线圈外半径为 5 mm。

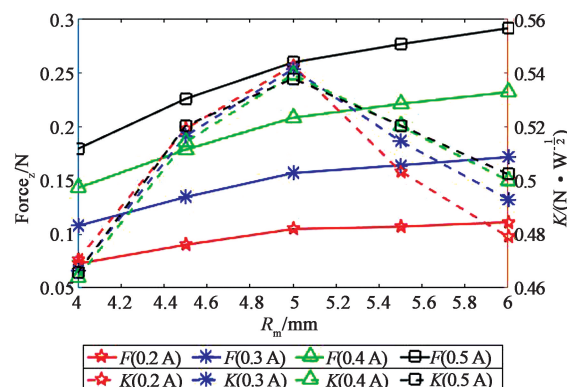


图 9 电磁力和电机常数随线圈外径变化的关系

Fig.9 Relationship between electromagnetic force, actuator constant and the outer diameter of coil.

3.4.3 线圈内径

固定磁体外径 10 mm,内径 1 mm,高度 3 mm;导线直径 0.33 mm,通入电流 0.2~0.5 A,步长 0.1 A;线圈外半径 5 mm,高度 6 mm,内半径为 0.25 mm,0.5 mm,0.75 mm,仿真结果如图 10 所示。图中横轴为线圈内半径 r_c ,左侧纵轴为永

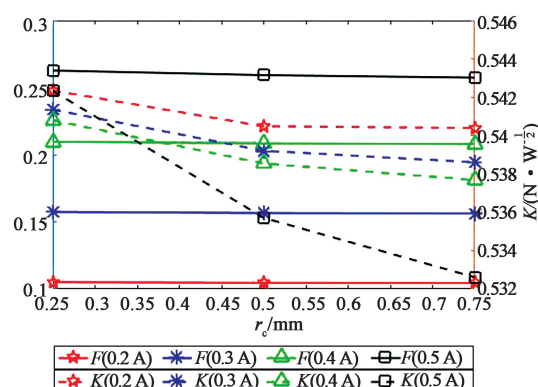


图 10 电磁力和电机常数随线圈内径变化的关系

Fig.10 Relationship between electromagnetic force, actuator constant and the inner diameter of coil.

磁体轴向受力,右侧纵轴为电机常数。结果显示随着线圈内径的变大,电磁力没有明显变化,而电机常数虽然减小但数值变化不大,考虑到电机的结构,因此选择线圈内半径为 0.5 mm。

3.5 输出力的线性

经过 Maxwell 的仿真优化,该音圈电机结构参数如下:永磁体外半径 5 mm,内半径 0.5 mm,高度 3 mm,磁体径向充磁;线圈外半径 5 mm,内半径 0.5 mm,高度 6 mm;通过仿真表明输入电流和电磁力有良好的线性关系,如图 11 所示。

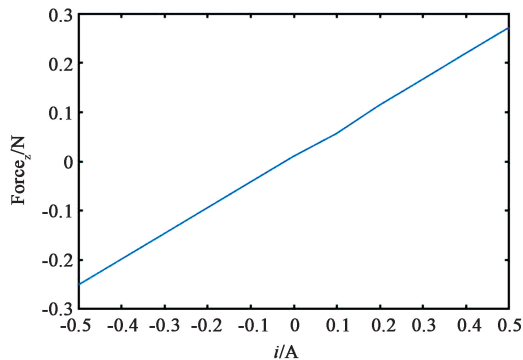
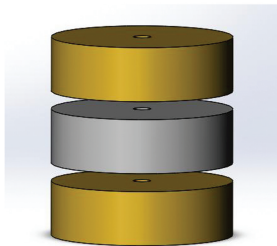


图 11 电磁力和电流的关系

Fig.11 Relationship between electromagnetic force and current

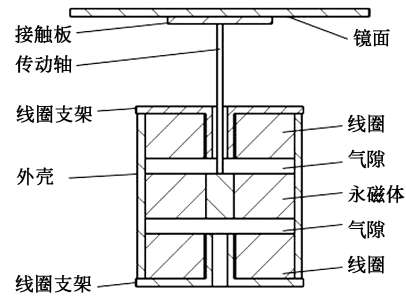
4 双线圈结构音圈电机

经过优化的音圈电机的电机常数约为 0.6,与 MMT 望远镜的音圈电机的效率相当。为了进一步提高效率,在此基础上设计了一种新的结构,如图 12。将 6 mm 厚的铜线圈分为两个厚度为 3 mm 的铜线圈,分布于磁体两侧,气隙厚度 0.1 mm,其余尺寸均与第三节相同。两个线圈分别位于永磁体两侧,提高了磁场的利用率,而且通过传动轴对镜面进行推拉减小了驱动器热量对镜面的影响。



(a) 双线圈音圈电机结构图

(a) Structure of voice coil actuator with double coils



(b) 双线圈音圈电机剖面图

(b) Section of voice coil actuator with double coils

图 12 双线圈音圈电机结构图

Fig.12 Structure diagram of voice coil actuator with double coils

4.1 磁场强度的仿真与对比

通电线圈激发的磁场越大永磁体受力越大,以两种结构的线圈在永磁体半高处产生的磁场强度为例,仿真结果如图 13 所示。横轴为直径上的点,纵轴为该点处的磁场强度,双线圈结构产生的磁场强度为 $H1$,单线圈产生的磁场强度为 $H2$ 。结果表明双线圈结构可以在永磁体处产生更大的磁场强度。

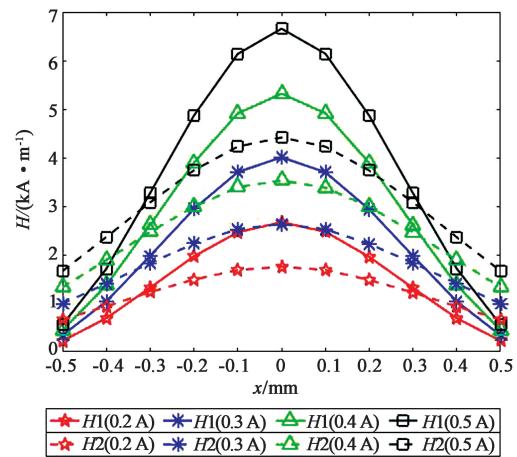


图 13 双线圈和单线圈产生的磁场强度对比

Fig.13 Comparison of magnetic field strength generated by double coils and single coil

4.2 电磁力的仿真与对比

图 14 展示了双线圈电机(CMC)和单线圈电机(MC)通入不同电流得到的电磁力和电机常数,图中横坐标为通入的电流 i ,左纵轴为永磁体轴向受力,右纵轴为电机常数,结果显示双线圈电机可以产生更大的推力和电机常数。

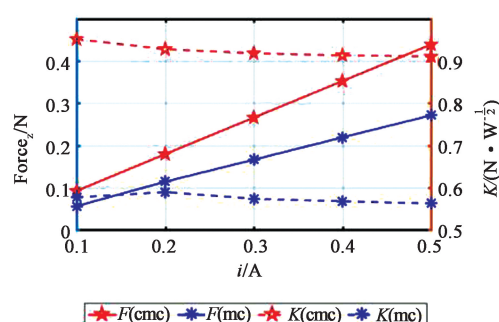


图 14 两种电机的电磁力和电机常数

Fig.14 Electromagnetic force and actuator constant of two actuators

5 结 论

本文设计了用于变形镜的动磁式高效率音圈驱动器。介绍了音圈驱动器的基本原理并且推导了计算音圈驱动器电磁力的公式。基于有限元的方法利用 Maxwell 软件对动磁式音圈电机进行了模拟仿真,结果表明采用径向充磁的永磁体提高了电机的效率,降低了发热。通过对磁体和线圈的尺寸进行优化将电机常数提高至 0.9,输出力达到 0.43 N。结果符合电机设计的基本要求,为音圈驱动器的研制提供了理论基础。

参 考 文 献:

- [1] HARDY J W. Active optics: A new technology for the control of light [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1978, 66 (6): 651-697.
- [2] MUIRHEAD J C. Variable focal length mirrors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1961, 32(2): 210-211.
- [3] LING N, RAO X J, WANG L, et al. Characteristic of a novel small PZT deformable mirror [C]//*Proceedings of the 2nd International Workshop on Adaptive Optics for Industry and Medicine*. Durham, England: University of Durham, 2000: 129-135.
- [4] EALEY M A, WELLMAN J A. Deformable mirrors: design fundamentals, key performance specifications, and parametric trades [C]//*Proceedings Volume 1543, Active and Adaptive Optical Components*. San Diego: SPIE, 1992: 346-362.
- [5] GROSSO R P, YELLIN M. The membrane mirror as an adaptive optical element [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(3): 399-406.
- [6] 饶伏波, 乔大勇, 苑伟政. 自适应光学系统 MEMS 微变形镜的研究 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, 2(4): 288-293.
RAO F B, QIAO D Y, YUAN W Z. Research of micro deformable mirror based MEMS technology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, 2(4): 288-293. (in Chinese)
- [7] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy [C]//*Proceedings Volume 8447, Adaptive Optics Systems III*. Amsterdam: SPIE, 2012: 844705.
- [8] 申文, 马文超, 胡栋挺, 等. 温度对液晶波前校正器响应速度及 LUT 的影响研究 [J]. *液晶与显示*, 2018, 33(11): 911-917.
SHEN W, MA W C, HU D T, et al. Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(11): 911-917. (in Chinese)
- [9] 王猛, 张彬, 韦德泉, 等. 不同光滑度立方体氧化铁对液晶电光性能的改善 [J]. *应用化学*, 2019, 36(6): 690-697.
WANG M, ZHANG B, WEI D Q, et al. Improvement of electro-optical properties of liquid crystal by cubic ferric oxide with different roughness [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2019, 36(6): 690-697. (in Chinese)
- [10] 关晓琳, 孟丽, 贾天明, 等. 液晶性直线型共轭芳炔衍生物的合成及电致发光性质 [J]. *应用化学*, 2018, 35(4): 426-435.
GUAN X L, MENG L, JIA T M, et al. Synthesis and electroluminescent properties of a liquid crystalline linear conjugated arylacetylene derivative [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2018, 35(4): 426-435. (in Chinese)
- [11] 兴连国, 周惠兴, 侯书林, 等. 音圈电机研究及应用综述 [J]. *微电机*, 2011, 44(8): 82-87.
XING L G, ZHOU H X, HOU S L, et al. Research and application of voice coil motor [J]. *Micromotors*, 2011,

- 44(8): 82-87. (in Chinese)
- [12] SALINARI P, DEL VECCHIO C, BILIOTTI V. A study of an adaptive secondary mirror [C]//*ESO Conference and Workshop Proceedings, Proceedings of the ICO-16 (International Commission for Optics) Satellite Conference on Active and Adaptive Optics*. Munich: European Southern Observatory, 1993.
- [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]//*Beyond Conventional Adaptive Optics*. Venice: European Southern Observatory, 2001.
- [14] WILD F P, BRUSA G, LLOYD-HART M, *et al.* First light of the 6.5-m MMT adaptive optics system [C]//*Proceedings Volume 5169, Astronomical Adaptive Optics Systems and Applications*. San Diego: SPIE, 2003.
- [15] BIASI R, GALLIENI D, SALINARI P, *et al.* Contactless thin adaptive mirror technology: past, present, and future [C]. *Proceedings Volume 7736, Adaptive Optics Systems II*. San Diego: SPIE, 2010: 77362B.
- [16] XOMPERO M, RICCARDI A, ZANOTTI D. Adaptive secondary mirror for LBT and its capacitive sensors: how can we calibrate them? [C]//*Proceedings Volume 7015, Adaptive Optics Systems*. Marseille: SPIE, 2008: 70153Q.
- [17] ARSENAULT R, BIASI R, GALLIENI D, *et al.* A deformable secondary mirror for the VLT [C]//*Proceedings Volume 6272, Advances in Adaptive Optics II*. Orlando: SPIE, 2006: 62720V.
- [18] BIASI R, MANETTI M, ANDRIGHETTONI M, *et al.* E-ELT M4 adaptive unit final design and construction: a progress report [C]//*Proceedings Volume 9909, Adaptive Optics Systems V*. Edinburgh: SPIE, 2016: 99097Y.
- [19] DEL VECCHIO C. Supporting a magnetically levitated, very thin meniscus for an adaptive secondary mirror: the optimization of the magnetic circuit [C]//*Proceedings Volume 3126, Adaptive Optics and Applications*. San Diego: SPIE, 1997.
- [20] HASHIZUME J, IDE T, KANAMARU M, *et al.* Non-contact deformable mirror actuator for spherical aberration compensation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(9S1): 09MA02.
- [21] 陈子豪, 顾永刚, 翟超. 基于音圈电机的主动光学力促动器研究[J]. *机械与电子*, 2012(6): 47-49.
CHEN Z H, GU Y G, ZHAI C. Researching of active optics force actuator based on the voice coil motor[J]. *Machinery & Electronics*, 2012(6): 47-49. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 孙晓林. 基于音圈电机变形镜的技术研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2015.
SUN X L. Research on voice-coil actuators deformable mirror [D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [24] 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: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China, 2019. (in Chinese)
- [25] 赵静. 高精度音圈电机的多场分析与驱动器硬件设计[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
ZHAO J. Multi-field analysis and driver hardware design of high precision voice coil actuator [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [26] DEL VECCHIO C, RICCARDI A, MARIGNETTI F, *et al.* Linear motors for astronomical mirrors [C]//2008 *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Edmonton: IEEE, 2008.
- [27] DEL VECCHIO C, GALLIENI G, MARTIN H M, *et al.* Design improvements of the LBT adaptive secondary [C]// *Beyond Conventional Adaptive Optics*. Venice: European Southern Observatory, 2001.
- [28] RICCARDI A, BIASI R, BRUSA G, *et al.* Giant segmented adaptive mirrors: progress report [C]//*Proceedings Volume 4840, Future Giant Telescopes*. Waikoloa: SPIE, 2003.
- [29] 汤双清, 陈习坤, 唐波. 永磁体空间磁场的分析计算及其在永磁磁力轴承中的应用[J]. *大学物理*, 2005, 24(3): 32-36.

- TANG S Q, CHEN X K, TANG B. Analysis and calculation on spatial magnetic field emanated from a permanent magnet and its application to permanent magnetic bearing [J]. *College Physics*, 2005, 24(3): 32-36. (in Chinese)
- [30] 任连.非均匀磁场对载流线圈的作用[J]. 佳木斯教育学院学报, 2000(4):38-39.
- REN L. Effect of non-uniform magnetic field on coil carrying current [J]. *Journal of Jiamusi Vocational Institute*, 2000(4): 38-39. (in Chinese)
- [31] 赵博,张洪亮.Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- ZHAO B, ZHANG H L. *Application of Ansoft 12 in Engineering Electromagnetic Field* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese)

作者简介:



曹 朔(1996—),男,江苏徐州人,硕士研究生,2018 年于淮阴师范学院获得学士学位,主要从事自适应光学变形镜的研究。E-mail: 6181203006 @ 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,主要从事液晶和自适应光学研究。E-mail: hulifa@jiangnan.edu.cn