

文章编号 1004-924X(2013)11-2836-08

用于薄镜面主动光学的音圈力促动器设计

张玉方^{1,2,3*}, 李国平^{1,2}

- (1. 中国科学院 国家天文台 南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;
2. 中国科学院 南京天文光学技术研究所 天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:根据薄镜面主动光学存在的实际问题,提出了通过音圈电机对主镜镜面变形进行非接触面型校正的方法。讨论了音圈电机工作原理,基于音圈电机设计了一种非接触、高线性、体积小且控制方便的力促动器,并对其进行了仿真分析和实验验证。对常见类型力促动器结构进行对比,根据应用特点和音圈电机原理设计了该力促动器的总体结构,建立了物理模型与数学模型,根据应用要求提出了参数指标。最后,进行了实验验证。实验结果表明,该音圈力促动器是一个非接触式高线性系统,输出力可达 ± 0.5 N,在此范围内,线性度小于 0.09% 。

关键词:光学望远镜;主动光学;薄镜面;力促动器;音圈电机;磁场分析

中图分类号:P111.21;TH751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132111.2836

Design of voice coil force actuator in thin mirror active optical system

ZHANG Yu-fang^{1,2,3*}, LI Guo-ping^{1,2}

- (1. *National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
 2. *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;*
 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*
- *Corresponding author, E-mail: adamyuanfang@163.com*

Abstract: A contactless surface correction method for the surface deformation of a primary mirror was designed based a voice coil motor to improve the performance of a thin mirror active optical system. The working principle of the voicecoil motor was discussed, the contactless voice coil force actuator with high linearity and a small size was designed, then the performance of the force actuator was simulated and verified. After comparing the structures of traditional actuators, the overall structure of the voice coil force actuator was designed according to the requirements of application in the thin primary mirror experiment system, the physical model and mathematical model were also established and the parameters of voice coil force actuator were proposed. The experimental results show that the voice coil force actuator is a contactless linear system, and its output force is up to ± 0.5 N. Whin this

收稿日期:2013-07-07;修订日期:2013-09-10.

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(No. KG CX2-YW-T17);30~100 m 极大口径光学/红外望远镜预研项目

range, the linearity is less than 0.09%.

Key words: optical telescope; active optics; thin mirror; force actuator; voice coil motor; magnetic field analysis

1 引言

随着现代天文观测、气象预报、资源考察、太空探索、军事侦察、预警、强激光及光电跟踪的要求越来越高,大型光学系统,特别是关键部件——主反射镜的口径也越来越大。传统的主镜由于其质量、加工、造价以及支撑难度等急剧增加已经不能满足要求,因此薄镜面主动光学技术迅速发展并逐渐成熟^[1]。对于大型光学望远镜,主动光学是指在观测过程中不断检测镜面因重力、风力、温度等外部载荷因素而发生的变形,然后通过安装在主镜背后的力促动器系统实时校正镜面变形,以保证较好的成像质量而采用的一种波面校正技术^[2]。

1989年ESO的3.5m NTT望远镜首次采用了主动光学技术,目前世界上在建和已经建成的8m级单镜面主镜的大型望远镜中,大多数采用了薄镜面主镜^[3]。

国外薄镜面主动光学的应用项目有ESO的VLT 8.2m望远镜,日本的SUBARU望远镜,美国的3.67m AEOS, 3.5m SORT, 8m GEMIN^[4], 亚利桑那大学分别于1997年与2001年为NGST研制了口径分别为0.53m和2m,厚度只有2mm的实验系统。在国内,南京天文仪器厂最先于1994年实现了口径0.5m,厚6mm的薄镜面主动光学系统,中科院光电所,北京理工大学,长春光机所,苏州大学等也先后展开了薄镜面主动光学的研究。

用于光学望远镜的促动器分为力促动器和位移促动器,位移促动器主要应用在拼接镜面中,用于调整各个子镜的相对位置与姿态;力促动器主要用在薄镜面与自适应镜中,用于调整主镜的形状。

用于主动光学的力促动器要求能够实现高精度的微小输出量改变,当外界条件变化时输出量应该保持恒定,不受外界条件的影响;尺寸应足够小,保证在镜面后安装,拆装、维修方便;还应具有运动平滑、线性度好、重复性高和响应速度快等

特点。

目前常见的力促动器主要有5种类型:(1)电动机械式,如SOAR;(2)液压式;(3)气动式,如MMT^[5], LBT;(4)压电式,如GMT, E-ELT^[6];(5)音圈式(目前主要用于自适应次镜),如MMT^[7], VLT, LBT^[8]。我国在建造完成LAMOST之后,正在紧密地预研大口径的光学望远镜CFGT,这需要大量高精度的力促动器,因此对力促动器的研究具有重要的应用意义。

本文将音圈电磁力应用于薄镜面主动光学上。首先对常见类型力促动器结构进行比较,然后根据项目需求对力促动器进行设计分析,并对设计的力促动器进行了实验验证。

2 方案设计

对目前常见的力促动器类型进行对比,结果如表1所示^[9]:

表1 力促动器类型对比
Tab.1 Contrast of force actuator type

驱动方式	优点	缺点	应用实例
音圈式	非接触无内在刚度,分辨率高,体积小,控制方便。	产热高,无断电保持。	MMT, LBT, VLT
压电式	刚度、精度、频率、分辨率高,结构紧凑	产热高,非线性、驱动电压高,易老化,行程短,存在爬行、迟滞、漂移。	
气动式	结构简单,频率高	控制复杂,精度和频率难提高,噪声	MMT, LBT, LSST
液压式	输出力大,减速比高	控制复杂,频率难提高,泄漏污染。	
电动机机械式	技术成熟,易于控制	惯量大,工作频率低。	SOAR

音圈力促动器具有非接触无内在刚度,分辨率高,无滞后,高响应,体积小,力特性好,控制方便等特点。1993年,意大利阿切特里天体物理观测台的 P. Salinari 第一次提出了采用音圈电磁力控制自适应副镜的设想,目前由 ADS 与 Microgate 公司开发的音圈力促动器已经成功应用于 MMT, LBT, VLT 等望远镜的自适应副镜上,并将用于正在建造的 GMT, E-ELT 望远镜的副镜上。

音圈力促动器系统结构包括永磁体、音圈、音圈骨架、力(或位移)传感器和控制电路等。支撑永磁体胶粘在镜面上,通过偏置永磁体平衡初始重力影响及断电保护;音圈与支撑永磁体相对位移通过位移传感器,经信号调理电路传给控制器,驱动信号通过驱动器激励音圈,并控制循环散热系统调节音圈及音圈骨架温度。

音圈力促动器系统如图 1 所示。

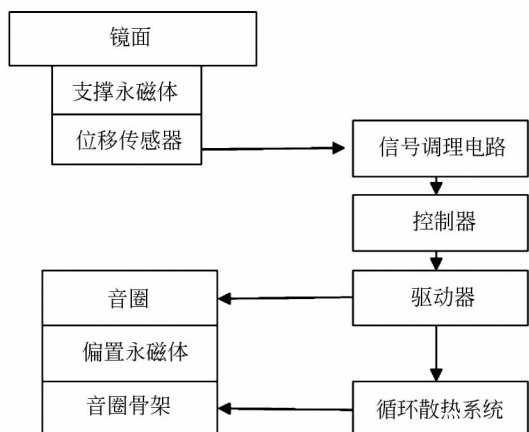


图 1 促动器系统示意图

Fig. 1 Diagram of force actuator system

3 音圈力促动器原理及数学模型

3.1 音圈电机的基本原理

音圈电机是基于安培力原理的一种新型直驱电机,图 2 为常用音圈电机的原理图,它由永磁铁、磁轭、气隙、线圈和线圈支撑等部分组成^[10]。

当线圈通电后,位于磁场中的载流线圈受到磁场力的作用而与永磁体产生相对运动,改变线圈电流的强度和极性能够控制出力的大小和方向。力 F 的大小取决于磁场强度 B ,工作电流 i 以及磁场内的线圈长度 l ,即:

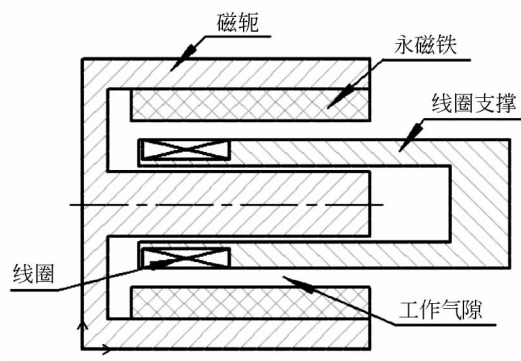


图 2 音圈电机原理图

Fig. 2 Principle diagram of voice coil motor

$$F = Bli. \quad (1)$$

3.2 音圈力促动器系统结构与数学模型

音圈电机分为定音圈式和动音圈式,对比如表 2 所示:

表 2 定音圈式与动音圈式对比

Tab. 2 Contrast of fixing and moving voice coils

	优点	缺点
动音圈结构	磁铁系统可以比较大,可得到较强的磁场。	音圈处于运动状态,易断路,动音圈散热条件恶劣,音圈允许最大电流较小。
定音圈结构	线圈散热好,允许最大电流较大。	较小的磁铁,因此磁场较弱。

由于镜面对温度比较敏感,因此选用定音圈结构,音圈力促动器总体结构方案如图 3 所示。

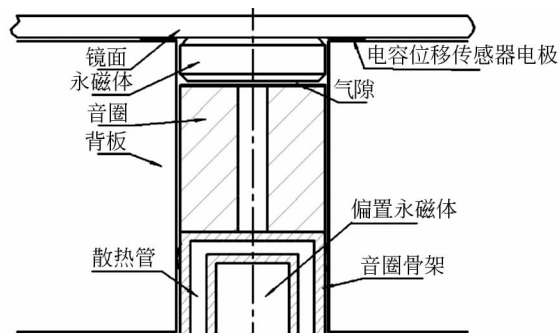


图 3 音圈力促动器结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of voice coil force actuator

促动器通过音圈支架固定在背板上,支撑永

磁体胶粘在主镜背面,永磁体下方正对音圈,通过控制音圈通入电流方向与大小即可实现对镜面的推拉作用,音圈支架内有一偏置永磁体,与胶粘在主镜背面的磁体形成偏置推力,可平衡镜面重力

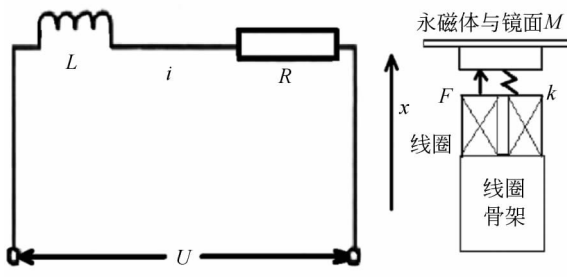


图 4 音圈力促动器物理模型及音圈电路
Fig. 4 Physical model and circuit of the actuator

及断电保护。音圈支架内另有一循环散热管,将音圈热量传递出去。在支撑永磁体和音圈周围还有一电容位移传感器,是促动器控制形成闭环。其物理模型及音圈电路如图 4 所示。

对系统力学分析及音圈电路分析可得^[11]:
电压平衡方程:

$$u = Blv + iR + L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

式中: v 为永磁体相对线圈的运动速度。

动力平衡方程:

$$F = M\ddot{x} + kx, \quad (3)$$

式中: x 为磁体相对线圈的位移, \ddot{x} 为加速度, k 为镜面的弹性系数。

联立系统的动态电压平衡方程,运动平衡方程,电磁力方程得:

$$\begin{cases} u = Blv + iR + L \frac{di}{dt} \\ F = Bli \\ F = M\ddot{x} + kx \end{cases} \quad (4)$$

忽略电感 L 影响,进行拉氏变换并化简得音圈电机直线位移 x 与控制电压 u 的传递函数为:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{Bl}{MRs^2 + B^2l^2s + Rk}, \quad (5)$$

这是一个典型的二阶系统传递函数:

$$G(s) = A \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (6)$$

因此,音圈力促动器的运动灵敏度为 $A =$

$$\frac{Bl}{Rk}, \text{ 固有频率为 } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}, \text{ 阻尼比为 } \zeta$$

$$= \frac{B^2 l^2}{2R \sqrt{Mk}}.$$

4 音圈力促动器设计与分析

基于以上系统结构设计思路,以解决超薄镜面主动光学实际应用问题为目标,设计制作了一个音圈力促动器实验平台进行试验验证,如图 5 所示。

4.1 力促动器参数设置

用于实验的主镜口径 $D=576.6$ mm,中孔直径 $d=50$ mm,厚 $t=3$ mm,工作凹球面半径 $R=1\ 600$ mm。质量为 2 kg。材料微晶玻璃,密度 $\rho=2.46 \times 10^3$ kg/m³,弹性模量 $E=90.2$ GPa,泊松比 $\mu=0.28$,屈服极限 $\sigma_b=35.8$ MPa,最大许用应力 $[\sigma]=3$ MPa。在重力及温度载荷作用下的面形误差要求是: $PV \leq (1/5)\lambda=127$ nm, $RMS \leq (1/20)\lambda=32$ nm,工作范围高度角为 $15 \sim 90^\circ$; 轴向支撑由 3 点固定支撑,51 个主动支撑组成,由内而外支撑点数分别为:6,12,18,18。在镜面光轴垂直水平面时,每个支撑点所受力为 $f=2 \times 9.8/54=0.363$ N;另外还有侧支撑。综合选取促动器设计指标如表 3 所示:

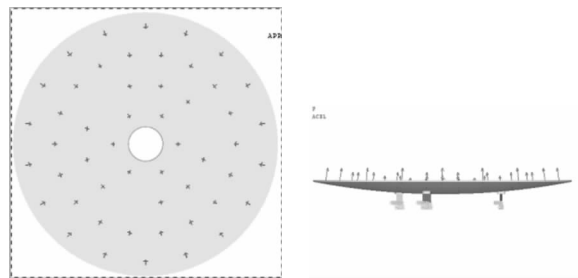


图 5 实验主镜支撑方案

Fig. 5 Test primary mirror and support program

表 3 音圈力促动器设计参数

Tab. 3 Design parameters of voice coil force actuator

项目	要求
驱动力输出/N	± 0.5
驱动力精度/N	0.001
驱动位移输出/mm	0.05
驱动电源电压/V	20

音圈力促动器实验平台二维及三维结构如图 6 所示。

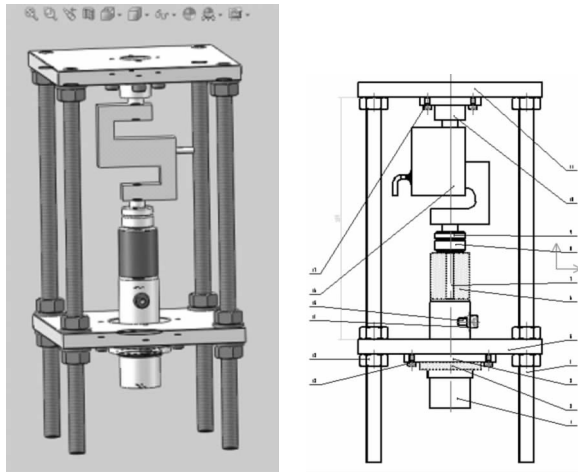


图 6 实验平台三维模型与总图

Fig. 6 3D model and general drawing of test platform

4.2 永磁体设计

理论上,支撑面积 S 越小越好,但考虑到镜子重量由 54 个力促动器来承担,支撑面越小,单位面积上镜子承受的应力越大。由 $f/S \leq [\sigma]$ 得 $S \geq f/[\sigma] = 0.363/3 \text{ mm}^2 = 0.121 \text{ mm}^2$ 。

综合考虑安全系数、磁场强度,输出力等因素,设计支撑永磁体半径为 10 mm,厚为 5 mm。材料 NdFeB N48 矫顽力 $H_c = 8.76 \times 10^5 \text{ A/m}$ 剩磁 $B_r = 1.4 \text{ T}$,实测表面磁场强度为 0.246 T,密度为 7.5 g/cm^3 。

因镜面曲率半径为 1.6 m,永磁体与镜体的连接面非常近似于平面,永磁体与镜体的连接面为平面。

偏置永磁体直径选取 10 mm,对偏置距离和磁体高度组合进行仿真,得偏置力仿真结果如表 4 所示。

表 4 偏置力仿真结果

Tab. 4 Results of bias force simulation (N)

偏置距离 /mm	磁体高度	
	10 mm	15 mm
30	0.281	0.320
35	0.188	0.222

综合考虑选取偏置距离为 35 mm,磁体高度为 15 mm。

4.3 音圈及音圈骨架设计

选取线径 0.33 mm 铜漆包线绕制音圈,查表得其最大载流量为 0.257 A,考虑磁场强度随距离增大衰减及安全系数,取音圈与支撑永磁体气隙为 1.3 mm 时,平均磁场强度为 0.05 T,工作电流为 0.1 A,由式(1) $F = Bli$ 得漆包线长约 100 m,得出电阻约 20 Ω ,综合设计取音圈内径 $d_1 = 5 \text{ mm}$,外径 $d_2 = 25 \text{ mm}$,圈数取 2 200,高 $l = 25 \text{ mm}$,基于同样思路,另选取线径 0.55 mm 漆包线,圈数取 800,制做 2 个音圈模块做实验测试对比,音圈参数如表 5 所示。

表 5 音圈参数

Tab. 5 Parameters of voice coil

线圈编号	线径/mm	圈数
1	0.33	2 200
2	0.55	800

基于 ANSYS 有限元软件,对 1/4 支撑永磁体与音圈建模仿真结果如图 7 所示,轴向力约为 0.122 N,即永磁体与音圈轴向力约为 0.488 N,与理论设计值比较符合。

Component	Force-X	Force-Y	Force-Z
arm	0.29282E+01	0.29157E+01	-0.12181E+00

SUMMARY OF FORCES BY MAXWELL STRESS TENSOR

Units of Force: < N >

Component	Force-X	Force-Y	Force-Z
arm	0.13265E+01	0.12819E+01	-0.87772E-01

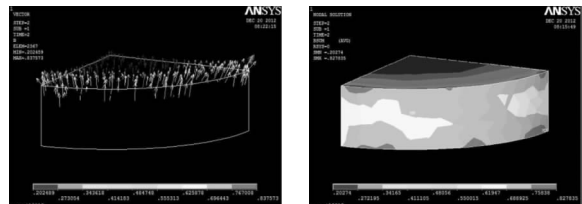


图 7 仿真结果:磁通量密度矢量图和等值线分布图

Fig. 7 Simulation results, vector and contour maps of magnetic flux density

基于音圈结构设计音圈骨架,并通过细牙螺纹连接骨架与平台,可以微调音圈与支撑永磁体气隙并可通过锁紧环锁紧;骨架内部设计一个 U 型腔,利用液冷将音圈工作时产生热量带走,减少温度对镜面面形精度影响。

4.4 其他部分设计

平台支座由上下支撑板,四根螺杆及 12 个螺母和垫圈组成,支撑整个平台;液冷循环由水箱,潜水泵,软管,软管接头,骨架内腔形成循环回路。采用 HJ-311 型潜水泵,功率为 2 W,流量为 200 L/h。

5 控制方案与实验结果

通过理论分析,结构设计及仿真模拟,最终确定实验验证平台方案。

反馈采用 JLBS-5N 拉压力传感器,量程为 5 N,重复精度为 0.0005FS。测试平台基于 NI Labview 软硬件实验平台实现。

测试平台控制如图 8~10 所示。

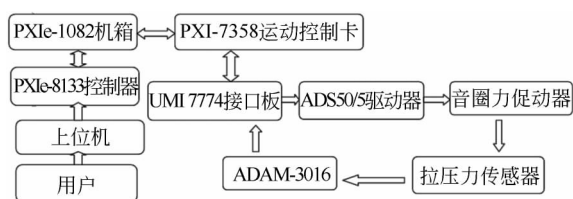


图 8 测试平台控制框图

Fig. 8 Control block diagram of test platform



图 9 音圈促动器、液冷循环系统和控制柜

Fig. 9 Actuator, liquid cooling system and control cabinet



图 10 NI UMI-7774 和 NI PCI-7350

Fig. 10 NI UMI-7774 and NI PCI-7350

选用 2 块支撑永磁体做对比试验,并利用高斯计分别测量磁场强度,5 次取平均值,结果如表

6 所示。

表 6 永磁体磁场强度测试

Tab. 6 Test of permanent magnet field strength (T)

编号	1	2	3	4	5	平均值
1	0.245	0.247	0.249	0.242	0.248	0.246
2	0.453	0.455	0.452	0.462	0.457	0.456

表 7 永磁体参数

Tab. 7 Parameters of permanent magnet

编号	直径/mm	高度/mm	表面中心磁场强度/T
1	20	5	0.246
2	20	15	0.456

连续调整输入电压进行了全量程(-0.5N, +0.5N)测试,测试拉压力传感器输出力的变化,以此来分析系统输出的线性。测试结果如表 8 所示,音圈力促动器输出力与软件仿真非常接近。

表 8 测试结果

Tab. 8 Test results

编号	线径/mm	圈数	电流/A	电阻/ Ω	电压/V	最大出发热功率/W
1	0.33	2 200	0.257	21.2	5.45 \pm 0.334	1.40
2	0.55	800	0.713	2.77	1.97 \pm 0.529	1.41

力促动器的输出力线性度指的是输入输出特性曲线偏离理论评定直线的程度,一般用输入输出特性曲线与理论评定直线间的最大偏差(ΔY_{max})与满输出(Y)的百分比。即:

$$\delta = \frac{\Delta Y_{max}}{Y} \times 100\% \quad (7)$$

最合理和最常用的理论评定直线拟合方法是最小二乘法。

用 Matlab 软件进行回归分析,绘制输入电压与输出力关系散点图,并用最小二乘法线性拟合。以输出力 f 为纵轴,以输入电压 U 为横轴作图;用最小二乘法计算(U, f)间的线性相关系数 r ,即为输出力对输入的线性度。用 polyfit($y, x, 1$)函数拟合,并用 corrcoef(x, y)函数计算线性度。

对线圈 1 与永磁体 1 实验结果拟合,当气隙分别为 0.3,0.7 和 1 mm 时,线性度和输出力如图 11 所示。

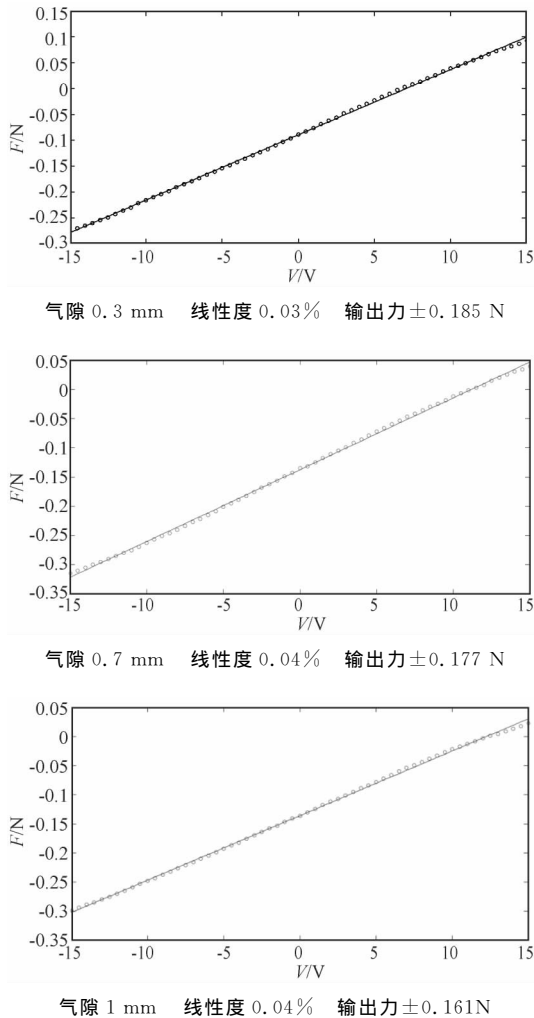


图 11 线性拟合结果

Fig. 11 Linear fitting results

参考文献:

- [1] 苏定强,崔向群. 主动光学-新一代大望远镜的关键技术[J]. 天文学进展,1999,17(1):1-14.
SU D Q,CUI X Q. Active optics-key technology of the new generation telescopes[J]. *Progress in Astronomy*,1999,17(1):1-14. (in Chinese)
- [2] 张丽敏,张斌,杨飞,等. 主动光学系统力促动器的设计和测试[J]. 光学精密工程,2012,20(1):38-44.

对线圈 1 与永磁体 2 和线圈 2 与永磁体 2 组合实验结果线性拟合的情况类似,实验结果如表 9 所示。

表 9 综合实验结果

Tab. 9 Comprehensive test results

组合	间隙 0.3 mm		间隙 0.7 mm		间隙 1 mm	
	线性度 /%	输出力 /N	线性度 /%	输出力 /N	线性度 /%	输出力 /N
线圈 1 永磁体 1	0.03	± 0.185	0.04	± 0.177	0.04	± 0.161
线圈 1 永磁体 2	0.01	± 0.334	0.06	± 0.321	0.009	± 0.297
线圈 2 永磁体 2	0.09	± 0.529	0.03	± 0.493	0.02	± 0.435

实验结果与理论设计值、仿真结果比较符合,而且在测试范围内线性度非常好,小于 0.09%。

6 结 论

根据薄镜面主动光学实际问题的要求,提出了通过音圈对主镜镜面变形进行校正的方法,介绍了音圈电机工作原理。通过总体设计,建立模型、结构设计、仿真分析,设计了用于薄镜面主动光学的音圈力促动器装置,最后进行了试验验证。实验结果证明音圈力促动器是一个非接触式高线性系统,输出力可达到 ± 0.5 N,并且在此范围内时,线性度可小于 0.09%。本结果为主镜镜面的工程应用提供了理论基础。

ZHANG L M,ZHANG B,YANG F, *et al.*. Design and test of force actuator in active optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(1):38-44. (in Chinese)

- [3] 余正洋,李国平. 用于主动光学的气体力促动器设计[J]. 液压与气动,2011,9:80-85.
YU Z Y,LI G P. Pneumatic force actuator design for active optics [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*,2011,9:80-85. (in Chinese)
- [4] BRUNS D G, SANDLER D G. Design and prototype tests of an adaptive secondary mirror for the

- new 6.5-m single-mirror MMT [J]. *SPIE*, 1995, 2534:130-133.
- [5] RICCARDI A, BRUSAA G, BILIOTTIA V, *et al.*. The adaptive secondary mirror for the 6.5m conversion of the Multiple Mirror Telescope: latest laboratory test results of the P36 prototype[J]. *SPIE*, 2000, 4007:524-531.
- [6] ROBERTO B, DANIELE G, PIERO S, *et al.*. Contactless thin adaptive mirror technology: past, present and future [J]. *SPIE*, 2010, 7736 (77362B):1-14.
- [7] BRUNS D G, BARRETT T K, BRINKLEY T J, *et al.*. Final prototype design for the adaptive secondary mirror of the 6.5-m MMT [J]. *SPIE*, 1997, 3126:164-172.
- [8] GALLIENI D, ANACLERIO E, LAZZARINI P G, *et al.*. LBT adaptive secondary units final design and construction [J]. *SPIE*, 2003, 4839: 765-771.
- [9] 李国平,苗新利.一种微位移促动器的设计和检测[J].*光学精密工程*,2005,13(3):332-338.
LI G P, MIAO X L. Design and test of a micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3):332-338. (in Chinese)
- [10] 徐新行,王兵,韩旭东,等.音圈电机驱动的球面副支撑式快速控制反射镜设计[J].*光学精密工程*, 2011,19(6):1320-1326.
XU X X, WANG B, HAN X D, *et al.*. Design of fast-steering mirror with spherical pair supporting structure driven by voice coil actuators [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1320-1326. (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 SH L, *et al.*. Research and application of voice coil motor [J]. *Micro motors*, 2011, 44(8):82-87. (in Chinese)

作者简介:



张玉方(1984—),男,山东日照人,硕士研究生,2007年于青岛大学获学士学位,主要从事精密仪器与机械方面的研究。E-mail: adamyuanfang@163.com

导师简介:



李国平(1962—),男,安徽凤阳人,研究员,博士生导师,1984年毕业于中国科学技术大学,主要从事精密仪器与机械方面的研究。E-mail: gpli@niaot.ac.cn