

文章编号 1004-924X(2005)03-0332-07

一种微位移促动器的设计和检测

李国平¹, 苗新利^{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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:设计制造了一套微位移促动器并进行了检测。比较了常用的实现高精度、大行程的微位移机构的工程方法,并结合大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)微位移调节机构的实现原理,采用步进电机驱动减速器、精密丝杆型式,及高精度的杠杆缩放结构,实现了高精度、大行程的微位移促动器。根据该传动机构的特点,对机构的误差进行了分析,通过计算机查表校正丝杆的传动误差。双频激光干涉仪的检测结果表明该微位移促动器在行程范围内灵敏度达到了 $201 \text{ nm} \pm 48 \text{ nm}$,步长为 $10 \text{ } \mu\text{m}$,单向精度达到了标准偏差 237 nm 。

关键词:微位移促动器;误差分析;校正;检测;传动机构

中图分类号:TH703.6;TH751 **文献标识码:**A

Design and test of a micro -displacement actuator

LI Guo-Ping¹, MIAO Xin-Li^{1,2}

(1. *Nanjing Institute of Astronomical Optics and
Technology, National Astronomical Observatory,*

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A set of micro-displacement actuator was developed and tested for the large area multi-object fiber spectroscopic telescope(LAMOST). Conventional techniques for micro-displacement mechanism with high accuracy and long travel in engineering applications are studied. In view of implementation principle of the active-motion mechanism in the LAMOST, integrated with precision lever, a scheme of stepper motor, harmonic reducer and ball screw, the goal of both high accuracy and long travel is realized. The origins of error are investigated, before a computer look-up table is designed to calibrate transmission error and to improve absolute accuracy of the actuator. Measured with laser interferometer in laboratory, the actuator confirms itself that it can be used as micro-displacement actuator of the LAMOST, thanks to its resolution of $201 \text{ nm} \pm 48 \text{ nm}$ and unidirectional accuracy of 237 nm (standard

收稿日期:2005-02-22;修订日期:2005-04-08.

基金项目:本研究题目属于“大天区多目标光纤光谱天文望远镜国家重大科学工程项目”

deviation) at a step of $10\ \mu\text{m}$.

Key words: mechanical micro-displacement actuator; error analysis; error correction; measurement; transmission mechanism

1 引言

在天文望远镜的设计制造过程中,为了降低成本和镜面制造、加工的难度,大型望远镜很多都采用拼接镜面主动光学技术,用小口径的子镜拼接成大口径的镜面,应用现代传感和控制技术,实现主动补偿以达到光学成像要求^[1]。微位移促动器在拼接镜面主动光学技术中起到精度补偿作用。

大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)是我国目前在建的重大科学工程项目,等效通光口径 $4\ \text{m}$,视场 5° 。由 Schmidt 改正板、焦面机构和球面主镜 3 部分组成。其中 Schmidt 改正板由 24 块对角线长为 $1.1\ \text{m}$ 的六角形平面子镜拼接组成,球面主镜由 37 块对角线长为 $1.1\ \text{m}$ 的六角形球面子镜拼接组成。每块子镜背面都安装 3 个微位移促动器,通过调节微位移促动器使 Schmidt 改正板和球面主镜维持共焦状态,同时通过加力改变每一块 Schmidt 改正板子镜面形以校正象差^[2]。要使这些镜面精确共焦,支撑并调节各子镜的微位移促动器必须能精确实现大负载条件下的高精度的精确定位。

2 设计原理和方案遴选

微位移促动器在拼接镜面主动光学技术中作为定位支撑和调节机构,必须同时具有大行程、高精度和大负载的性能。而在实际的工程应用中,大行程和高精度是难

以兼顾的,通常采用以下方式解决这一矛盾^[3]:

(1) 粗-精平台相结合(macro-micro)的方式。精位移平台放置在粗位移平台上面,进行精度补偿。驱动时采用分阶段交互控制的方法。该方案的优点在于可实现较大范围的运动而不受驱动器的限制,但结构臃肿复杂,且由于系统自由度的增加使成本大为提高。

(2) 移动式驱动系统。目前常见的移动式驱动结构主要是两大类:一类是基于“尺蠖(inchworm)原理”,另一类是基于“粘滑(stick-slip)效应”。理论上这两者都可实现无限大的工作行程,若采用压电马达,其运动分辨率均可达到纳米级^[4]。但是目前这类产品尚未商品化,很大程度上需要自己开发,价格偏高,控制系统也比较复杂。

(3) 在驱动器与执行器之间采用具有运动缩放功能的机构(可通称为运放机构)。这种缩放机构又分两种情况:一种是采用压电类驱动器+运动放大机构;另一种是采用普通电机+运动缩小机构。

相对于前两种方式,第三种方式成本最低,控制最为简单,工程上也最容易实现。压电元件+运动放大机构虽然具有结构紧凑、运动分辨率高(从理论上说可以达到无限小)、响应快、输出力大、无机械损耗、无磁场、无污染等优点,但输出位移范围小始终是它的致命弱点^[5]。因此本微位移机构采用普通电机+运动缩小机构来实现高精度、大负载、大行程的技术要求。尽管机械传动式微位移机构存在间隙、传动误差、摩擦损耗以及爬行现象等缺陷,导致

其运动灵敏度低^[6]。但是,机械式位移促动器可以兼顾大行程、大负载能力,通过对传动链的精度补偿,提高精度,仍然可以作为基于大行程微位移机构的驱动元件。就采用拼接镜面主动光学的望远镜来看,应用机械式微位移促动器机构加高精度缩放装置已有成功的范例,比如美国的 10 m Keck 望远镜^[7]采用了减速器丝杆型式的微位移促动器加一级精密液压缩放机构;美国 9 m HET 望远镜^[8]采用了减速器丝杆型式的微位移促动器加一级精密杠杆缩放机构。

3 微位移促动器的设计

基于 LAMOST 项目具体要求(工作范围 ± 1 mm,分辨率 20~30 nm,位移精度 $RMS \leq 50$ nm,承载能力 > 50 kg),设计了一套机械式微位移促动器,并进行了实验测试。因 LAMOST 最终要求子镜位移精度为 RMS 50 nm,考虑到位移调节机构引入高精度的杠杆机构(缩放比 10:1),故对微位移促动器的精度要求为 RMS 500 nm;分辨率要求为 200~300 nm^[9]。

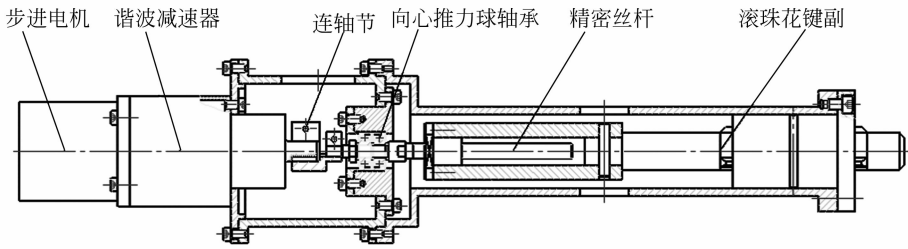


图 1 微位移促动器

Fig. 1 Structure of micro-displacement actuator

结构上微位移促动器包括微位移机构和驱动控制系统两大部分(如图 1 所示)。微位移机构由谐波齿轮减速器、精密滚珠丝杆、滚珠花键副等组成。步进电机通过联轴节驱动谐波齿轮减速器,带动精密丝杆转动,通过滚珠丝杠将旋转运动转换为螺母的直线运动。滚珠花键副的作用主要是防止螺母旋转。驱动控制系统(如图 2 所示)包括:步进电机、驱动器、步进电机控制卡和控制软件。微位移促动器机构采用开环控制,通过计算机查表校正滚珠丝杆的传动误差。为消除机械振动,步进电机采用细分驱动。

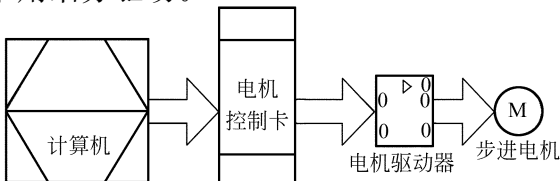


图 2 驱动控制系统

Fig. 2 Schematic of control system

4 机构的误差分析

机械式微位移促动器机构设计中选用的步进电机、滚珠丝杆、谐波齿轮减速器、滚珠花键副都存在着传动误差,需详细分析,并加以校正以提高输出精度。

4.1 步进电机的误差

机械式微位移促动器采用的步进电机的步距角为 1.8° ,折算到位移输出端的位移为 4.6 nm。在实际控制中,需整化运行步数,由此引入的是 $1/2$ 步距角的误差,折算到位移输出端的位移误差为 2.3 nm。步进电机不产生累积误差,假设步距角误差为 5%,则实际上由整化误差和步距角误差两项综合的误差 Δ_M 也不超过 3 nm。

4.2 滚珠丝杆的误差

滚珠丝杆的传动误差为 $8 \mu\text{m}$,这是影

响微位移促动器传动精度最主要的因素。实际上如果不能校正滚珠丝杆的传动误差,机械式微位移促动器对 LAMOST 项目是没有实用价值的。对于开环控制的精密传动,丝杆传动误差通常采用软件查表进行校正的方法,机械式微位移促动器也是采用了这种方法,实测中发现校正效果很好。

4.3 谐波齿轮减速器的误差

谐波齿轮减速器误差的传动误差为 $13'$,折算到输出端相当于输出误差 Δ_X 为 602 nm。谐波齿轮减速器传动误差中的高频误差几乎占了 50%,这对开环控制十分有利,这是因为一般机械结构普遍具有通低频、阻高频的特点。

4.4 滚珠花键副的误差

滚珠花键副对最终定位精度的影响主要是花键轴和轴套的圆周方向的跳动。考虑最极端的情况:圆周方向跳动的最大值为花键轴和轴套的间隙值 $3 \mu\text{m}$,折算到输出端的误差 Δ_S 为 155 nm。

综合以上的分析可知,采用光学工程常用的误差标准,该机械式微位移促动器机构的误差 Δ_e (RMS) 为:

$$\Delta_e = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta_M}{3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_X}{3}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_S}{3}\right)^2} = \pm 207 \text{ nm}$$

理论设计结果表明,该设计方案满足 LAMOST 项目中主动光学微位移调节机构的精度指标。需要指出的是尽管该微位移促动器设计分辨率是 4.6 nm,但是由于机构的传动误差、弹性变形、摩擦等因素的影响,实际分辨率几乎不可能达不到理论设计指标,需要实测来标定分辨率。

除传动误差外,各个构件还存在间隙误差。间隙误差分为两种:与载荷无关的纯间隙误差和与载荷有关的弹性变形引起的弹性回差。纯间隙误差,可以通过实验来标定,然后进行校正;至于弹性回差,由于载荷的单向、恒定,理论上不会对最终定

位精度产生影响。从上面传动误差分析得结果来看,微位移促动器的设计过程中已经给间隙误差留有一定的余量,这有利于保证最后精度指标的实现。

5 实 测

为了消除振动,将微位移促动器装夹在双频激光干涉仪减震平台上,并设计了加力装置以模拟负载(如图 3 所示)。根据微位移促动器的使用特点,试验测试微位移促动器的静态性能,具体方法是输入一组脉冲,双频激光干涉仪进行采样,计算机记录数据并绘制出运行曲线图。

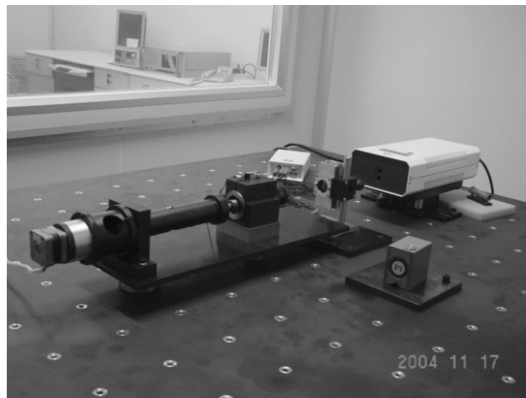


图 3 微位移促动器实测

Fig. 3 Test of micro-displacement actuator

5.1 分辨率的检测

分别按步长为 200 nm、250 nm、500 nm 的位移量进行测试,得到试验结果(如图 4~6 所示)。将理论值与实测值进行比较(如图 7~9 所示),求得各种步长的均值、标准偏差如表 1 所示:

表 1 200~500 nm 步长的均值和标准偏差

Tab. 1 Mean and standard deviation of test at a step of 200~500 nm

步长(nm)	平均值(nm)	标准偏差(nm)
200	201	48
250	254	34
500	496	21

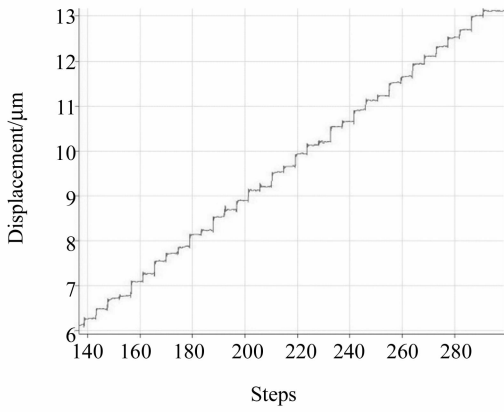


图 4 200 nm 步长曲线

Fig. 4 Curve of test at a step of 200 nm

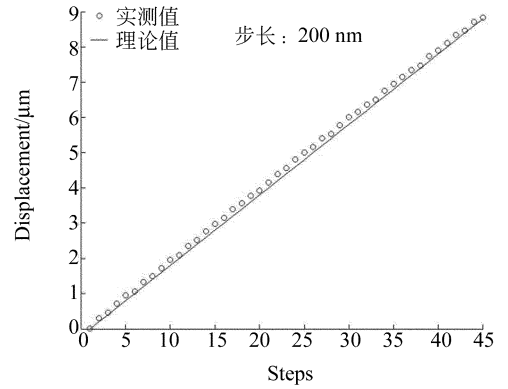


图 7 200 nm 步长理论与实测值比较

Fig. 7 Comparison of testing data and theoretical prediction at a step of 200 nm

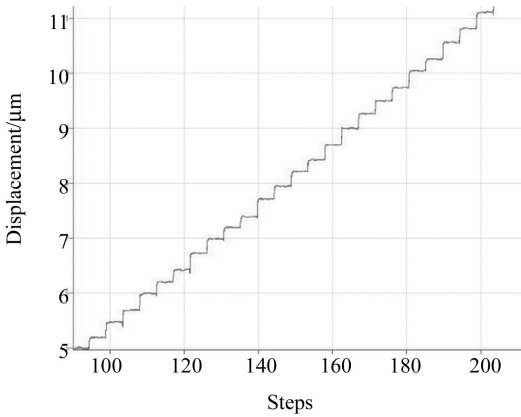


图 5 250 nm 步长曲线

Fig. 5 Curve of test at a step of 250 nm

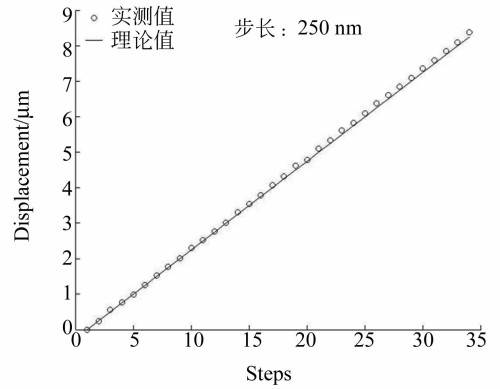


图 8 250 nm 步长理论与实测值比较

Fig. 8 Comparison of testing data and theoretical prediction at a step of 250 nm

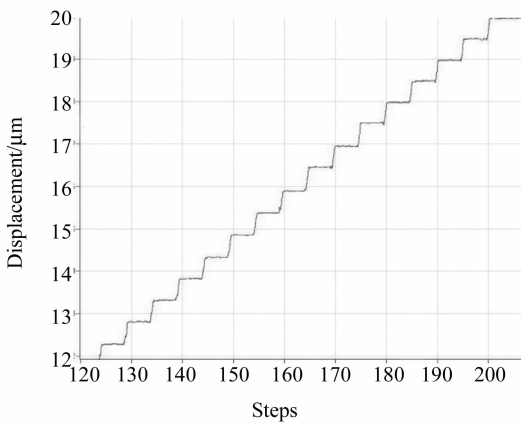


图 6 500 nm 步长曲线

Fig. 6 Curve of test at a step of 500 nm

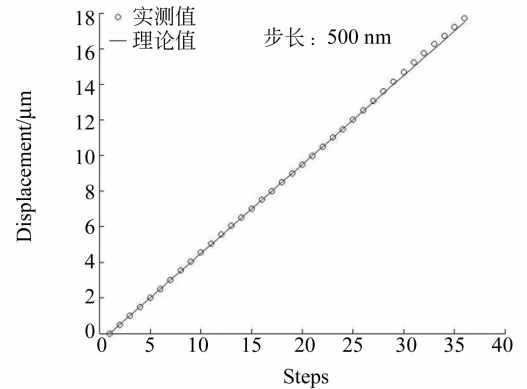


图 9 500 nm 步长理论与实测值比较

Fig. 9 Comparison of testing data and theoretical prediction at a step of 500 nm

测试结果表明该微位移促动器的实际分辨率为 $201 \text{ nm} \pm 48 \text{ nm}$,再结合 $10:1$ 的精密缩放机构,可以满足 LAMOST 对微位移促动器的分辨率要求。

5.2 精度的检测

LAMOST 微位移促动器对精度的要求为单次调节的相对精度。根据 LAMOST 拼接镜面主动光学技术要求的单次调节位移量(初步设计为亚微米级),考虑到需要结合 $10:1$ 的缩放机构,机械式微位移促动器的精度检测方法是在行程范围内输入 $10 \mu\text{m}$ 步长指令,进行实测,干涉仪实测曲线如图 10 所示。

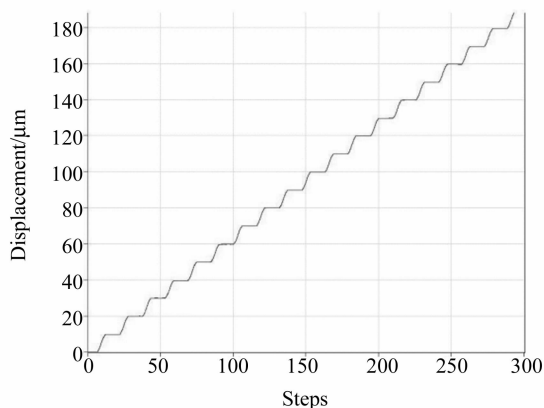


图 10 $10 \mu\text{m}$ 步长曲线

Fig. 10 Curve of test at a step of $10 \mu\text{m}$

实验得到 $10 \mu\text{m}$ 位移指令的标准偏差为 297 nm 。这与理论计算的结果有出入,实测误差大于理论误差,其原因是丝杆校正的残留误差。但是,这已经可以满足 LAMOST 微位移促动器的精度要求。

6 结 论

实测结果表明,微位移促动器机构开环校正后 200 nm 、 250 nm 、 500 nm 步长的平均值分别为: 201 nm 、 254 nm 、 496 nm ;标准偏差则达到了: 48 nm 、 34 nm 和 21 nm 。也就是说机械式微位移促动器的分辨率达到 $201 \text{ nm} \pm 48 \text{ nm}$ 。相对精度测试表明,单次调节 $10 \mu\text{m}$ 时,该微位移促动器单向精度达到了标准偏差 237 nm ,可以满足 LAMOST 拼接镜面主动光学的实用要求。作为传动链中最主要的误差来源的丝杆传动误差得到了有效的校正。该微位移促动器除可用于天文望远镜之中,也可用于其它需微位移调节机构的精密仪器之中。

参考文献:

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2003. 145-159.
CHENG J Q. *Principles of astronomical telescope design* [M]. Beijing: Press of science and technology of China, 2003. (in Chinese)
- [2] 马礼胜. LAMOST 微位移促动器及其研究[D]. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 2003.
MA L SH. *Study on micro-displacement actuator for LAMOST* [D]. Nanjing: National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [3] 于靖军, 毕树生, 宗光华. 全柔性微位移放大机构的设计技术研究[J]. 航空学报, 2004, 25(1): 74-77.
YU J J, BI SH SH, ZONG G H. Study on the design of fully motion amplification mechanisms in actuation system for micromanipulator [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, 25(1): 74-77. (in Chinese)

- [4] 段智勇,王庆康,曾令刚,等. 纳米精度压电马达的动力学模拟及试验[J]. 光学精密工程,2004,12(3):287-291.
DUAN ZH Y, WANG Q K, ZENG L G, *et al.* Dynamic simulation and testing of a novel piezoelectric nanomotor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004 12(3):287-291. (in Chinese)
- [5] 于靖军,宗光华,毕树生. 全柔性机构与 MEMS[J]. 光学精密工程,2001,9(1):1-5.
YU J J, ZONG G H, BI SH SH. Fully compliant mechanisms and MEMS[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(1):1-5. (in Chinese)
- [6] 阎绍泽,吴德隆,黄铁球,等. 航天压电陶瓷微位移促动器设计与试验研究[J]. 导弹与航天运载技术,1998,236(6):25-31.
YAN SH Z, WU D L, HUANG T Q, *et al.* Design and experiment for a piezo-ceramic micro-displacement actuator on spacecraft[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 1998, 236(6):25-31. (in Chinese)
- [7] NELSON J E, MAST T S, FABER S M. *The design of the Keck observatory and telescope (ten meter telescope)*[R]. Keck observatory report No. 90-1985.
- [8] KRABBENDAM V L. Development and performance of Hobby Eberly telescope 11 meter segmented mirror[J]. *SPIE*, 2002, 3352:647-658.
- [9] 杨德华. MA 子镜系统样机检测[R]. 南京:中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,2004.
YANG D H. *Test of MA segment prototype*[R]. Nanjing: National Astronomical Observatories/ Nanjing Institute of Astronomical Optics and Rechnology, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)

作者简介:李国平(1962—),男,安徽凤阳人,研究员,现在国家天文台南京天文光学技术所从事望远镜技术研究工作。Email: xlmiao@niaot.ac.cn