

文章编号 1004-924X(2005)02-0191-07

光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测

杨德华, 戚永军, 朱振东, 姜方华, 陈昆新, 张 如

(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)

摘要:设计和制造了一套微位移主动调节机构和支撑系统,用以实现拼接镜面天文光学望远镜的每块平面子镜精密地调节倾斜和轴向平移,并在典型的仰角工况下对该机构进行了实测。设计技术要求子镜主动调节行程须达 ± 1 mm,同时分辨率须达 50 nm 以下。选用了工作行程为 6 mm 和分辨率为 50 nm 的位移促动器,并引入杠杆机构提高位移分辨率和抑制误差;采用平衡配重和预拉弹簧机构使工作中位移促动器上保持恒定负载,以保护位移促动器和保证其输出位移精度。依据拼接镜面的工作原理,建立了子镜微位移调节系统性能测试的数学模型,并在实验室内采用分辨率为 5 nm 的位移传感器进行了实测。结果表明其位移分辨率可达 12 nm,线性良好,与理论值相对误差为 5.6%,验证了该机构设计的合理性和在不同工作位置良好的灵敏度。

关键词:微位移;分辨率;位移测量;杠杆;位移传感器

中图分类号:TH751 文献标识码:A

Design and test of the active micro-motion mechanism for optical mirror segment

YANG De-hua, QI Yong-jun, ZHU Zhen-dong,
JIANG Fang-hua, CHEN Kun-xin, ZHANG Ru

(National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and
Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: Active micro-motion mechanism is fundamental for astronomical telescope using segmented mirror to form and maintain required figure by active tip-tilt and/or piston. Mechanical design and laboratory test of such an active mechanism for a mirror segment prototype are described. Technical requirement specifies that active motion range covers up to 2 mm with resolution down to 50 nm. Three displacement actuators with 6 mm working travel and 50 nm motion resolution are adopted with three sets of lever mechanism introduced to increase the resolution of displacement and to abate error in the system. Also, three sets of lever-weight-balance mechanism together with three pairs of tensional spring are integrated to ensure, despite of variable elevation angles of the telescope in operation, con-

收稿日期:2005-02-14;修订日期:2005-03-25.

基金项目:国家九五重大科学工程 LAMOST 项目。

stant load on the displacement actuators, whereby the actuators are safely protected with stabler output displacement accuracy, which is undesirably load-dependent. Based on working philosophy of segmented mirrors, mathematical model and experimental method were established for the active micro-motion system to be tested in laboratory, for which displacement sensors of 5 nm output resolution are used. Measurement results have confirmed the feasible design of the active micro-motion mechanism with output displacement resolution as fine as 12 nm and transmission ratio error no greater than 5.6%, besides its excellent linearity and sensitivity.

Key words: micro displacement; resolution; displacement measurement; lever; displacement sensor

1 引言

为降低造价和获得良好像质,大型天文望远镜多采用拼接镜面主动光学技术,应用现代传感和控制技术,由较小尺度的子镜拼接成大口径的镜面^[1-2]。为实现主动补偿和达到光学成像要求,调节工作行程须达亚毫米级,分辨率达 50 nm。目前国际上大型拼接镜面望远镜多采用大行程精密位移促动器,并采用精密位移传感器进行实时检测和闭环控制^[3-4]。在自适应光学系统中,有时也采用单元镜片拼接构成变形镜^[5],由于其工作频率要高得多(100 Hz 以上),一般采用压电陶瓷技术实现子镜位移的高速调节,但压电陶瓷机构工作行程微小(微米量级),不适用于需要大行程的主动光学校正系统。

由若干块对角直径为 1.1 m 六边形子镜拼接而成的天文望远镜平面反射镜面,要求在回转观测范围内位移主动校正行程不小于 ±1 mm,分辨率不大于 50 nm^[1]。这是典型的大行程高分辨率微位移机构。选用了位移促动器并引入杠杆和平衡机构设计制造了该微位移调节系统,并根据拼接镜面的工作原理,对之进行了实测,检测结果表明该位移调节机构的位移分辨率可达 12 nm,且调节和传递性能稳定,线性良好,相对误差约 5.6%,与理论值符合得很好。

2 拼接镜面工作原理

拼接镜面工作中,为了保持或实现某种光学面形,每块单元子镜通过 3 组适当的微位移调节机构主动调节或补偿子镜的倾斜和轴向平移(离焦),并在相邻子镜间安装位移传感器来检测相邻子镜边缘的高度差,从而获得各子镜位移主动补偿调节量^[3]。参见图 1,则各位移传感器 S 的值仅与相邻的 2 块子镜的位置姿态有关,即仅与相邻两块子镜的位移调节机构 P (各有 3 组)的值有关,为

$$S = a_1 P_1 + a_2 P_2 + a_3 P_3 + a_4 P_4 + a_5 P_5 + a_6 P_6, \quad (1)$$

式中 a_i 是和 S 及 P_i 几何位置相关的常系数。所有位移传感器的读数都有类似式(1)的方程,从而构成线性方程组:

$$\begin{cases} S_1 = A_1 P_A + B_1 P_B + C_1 P_C \\ S_2 = A_2 P_A + B_2 P_B + C_2 P_C \\ \vdots \\ S_6 = A_6 P_A + B_6 P_B + C_6 P_C \end{cases} \quad (2)$$

写成矩阵形式

$$\{S\} = [A]\{P\}, \quad (3)$$

即

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \\ A_5 & B_5 & C_5 \\ A_6 & B_6 & C_6 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_A \\ P_B \\ P_C \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

式中系数矩阵 $[A]$ 由图中几何位置及尺寸确定。控制系统计算机获得该线性方程组的解,取反,并驱动微位移调节机构 P_i 进行主动补偿调节。

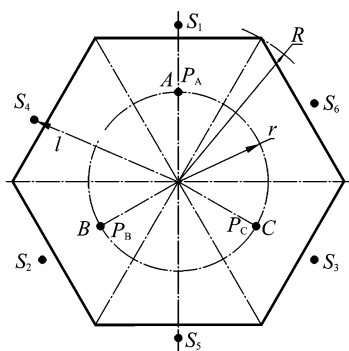


图 1 位移促动器及位移传感器编号

Fig. 1 Numbering of displacement actuators and displacement sensors

3 微位移主动调节机构的设计^[6-8]

文献[4]采用位移促动器和杠杆机构设计了子镜微位移调节系统,但该望远镜无俯仰回转运动,故实际上子镜无工作姿态的变化,故位移促动器负载是恒定的。我们的设计技术要求子镜位移调节量 ± 1 mm,分辨率不大于 50 nm,且拼接镜面工作中将回转达到不同仰角,范围为 $32.3^\circ \sim 82.3^\circ$ ^[9]。

如图 2,子镜的位置及姿态(倾斜和离焦)则由位于下层的位移调节机构来主动调节子镜基板的位置及姿态完成的。根据当前选用的位移促动器(美国 Diamond Motion 公司出品),其承载能力最大为 100 磅(约 45 kg),工作行程为约 6 mm,分辨率为 50 nm^[10]。直接应用该位移促动器,则行程有余,但承载能力不足,分辨率也未必达到技术要求;况且拼接镜面工作中将回转达到不同仰角,使得直接应用的位移促动器不在一个恒定负载的情况下工作,影

响位移促动器的位移输出精度^[10]。为此,设计中考虑一套对应于 3 个位移促动器的 3 组杠杆平衡配重机构,首先平衡卸荷被调节部分的自重,然后采用弹簧产生固定数值的弹簧拉力,使位移促动器在一个与镜面俯仰角无关的恒定压力负载下工作。同时,为放大位移促动器的负载能力、提高其分辨率和缩小误差,在每组杠杆平衡配重机构的另一端又设计一个缩比 4 : 1 的杠杆机构,二者共用支点,如图 2-4,从而每一个支撑接触点最大负载可达 180 kg 而行程为 1.5 mm,满足设计技术要求。杠杆的设计中保证了位移输入点、输出点为点接触,且与杠杆支点共线。这样,3 组位移促动器同时或独立的推进或后退可实现子镜面的姿态的主动调节控制,且位移促动器工作负载恒定,子镜输出位移分辨率提高 4 倍,机构误差则减少 4 倍,从而大大提高整个位移调节机构系统的性能。

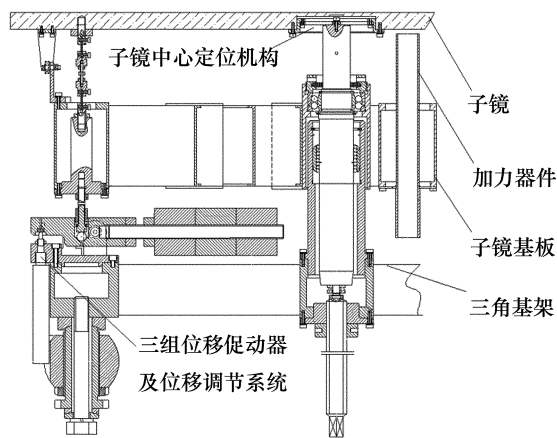


图 2 单元子镜系统

Fig. 2 Mirror segment system

4 实 测

4.1 检测原理^[10-11]

模拟 2 中所述拼接镜面工作原理,建立子镜微位移调节系统性能测试的数学模型,只是对于单块子镜的情况,安装位移传

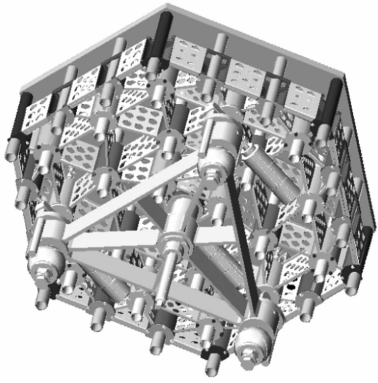


图 3 单元子镜系统 CAD 模型

Fig. 3 CAD model of mirror segment

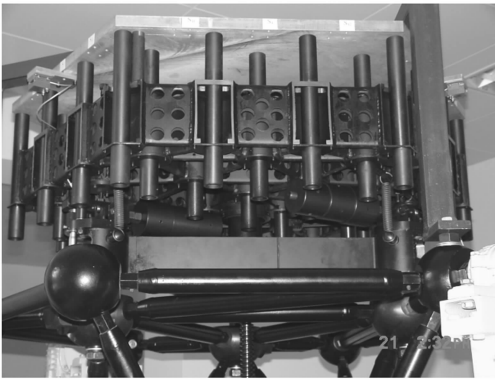


图 4 待测中实物

Fig. 4 Mirror segment to be tested

传感器的相邻子镜的对边由固定的支撑来代替。检测中,位移促动器和位移传感器编号如图 1 所示, P_A, P_B, P_C 为位移编号, S_i 位移传感器编号。

因引入了 4 : 1 的杠杆缩小机构,所以位移传感器读数 S 和位移促动器输入位移 P 关系为:

$$\{S\} = 1/4 \times [A]\{P\}, \quad (5)$$

按图 4 所示几何尺寸,位移调节系统最终缩比为

$$S_D = 4 \times \frac{3r}{2l+r}, \quad (6)$$

检测的目的即是考察在一系列位移促动器输入位移条件下,位移调节系统的位移传递线性度如何,位移缩比 S_D 数值是否平稳,与理论值的误差如何。

4.2 检测系统配置

3 组微位移调节系统为设计原理完全相同且工作过程完全独立的机构,因此,基于单个位移促动器对其中 1 组的检测可以作为代表来评定位移调节机构的性能。参见图 1 中编号和图 5 实验系统配置,测试中位移促动器安装在 P_B 处, P_A 和 P_C 处无位移促动器;4 套 CDJ 差分电容式传感器(分辨率 5 nm)中的 3 套分别安装在 S_1, S_2 和 S_3 的位置,第 4 套放在实验系统一起用来监测和消除环境影响误差;3 套 JDC-IV 型电容传感器(分辨率 4.2 nm)用来检测位移促动器的输入位移和用来交叉比对 CDJ 差分电容式传感器的位移测量值,减少测量误差^[14]。



图 5 实测系统配置

Fig. 5 Configuration of test system

图 1 中几何位置尺寸 $r = 370.5 \text{ mm}$, 对应于 S_2 处的 JDC-IV 电容式传感器安装尺寸 $l_{\text{JDC}} = 544.3 \text{ mm}$,按式(6),该位移调节系统最终理论缩比为

$$S_D^{\text{JDC}} = 4 \times \frac{3r}{2l_{\text{JDC}} + r} = 3.047, \quad (7)$$

在实验室中,为了便于检测,减少干扰,将整个系统安放在光学隔振平台上进行检测。

5 实测结果

环境因素对测试影响显著,实测中采

取了适当的外插校正方法^[11-13]。图 6 给出了同在 S_2 处的 JDC-III 和 CDJ-22 个位移传感器的实测曲线和校正后的曲线。可以看出经校正和归算(CDJ 型位移传感器归算为 JCD 的读数),两曲线较为接近,误差约 2~3 个单位,即 8.4~12.6 nm,校正效果良好。

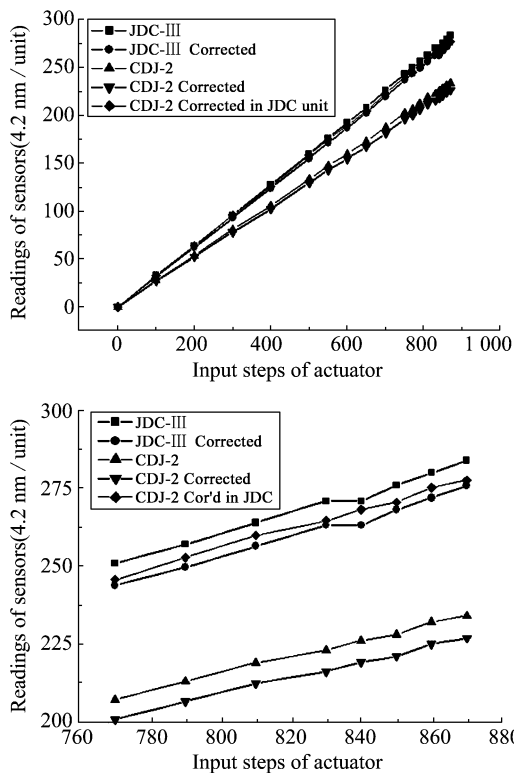


图 6 JDC-III 和 CDJ-2 测试及校正曲线(下图为末段局部放大)

Fig. 6 Test and corrected curves of JDC-III and CDJ-2 (Lower: details of end part)

取子镜仰角高度为 30° 时进行测试,位移促动器输入一系列位移进行测试。

实测曲线见图 7,可以看出,位移输入和输出的线性关系良好,且位移调节机构灵敏度高,在位移促动器输入减少到每步长为 10 步,即约 45 nm 时(JDC-II 读数),输出位移步长约 12 nm,仍然保持线性,即子镜位移分辨率可达 12 nm,可以保证满足设计技术要求。位移调节传递缩比逐渐减

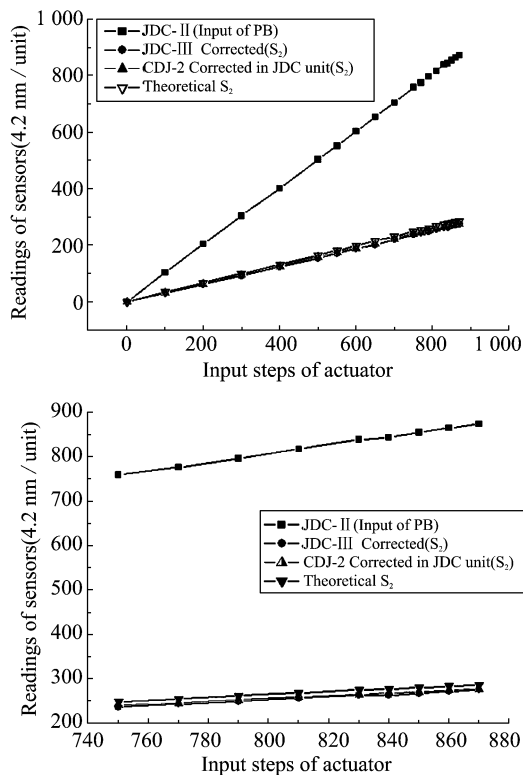


图 7 微位移测试曲线(下图为末段局部放大)

Fig. 7 Displacement test curves (Lower: details of end part)

小并微小波动,见图 8,均值为 3.216,接近实际机构理论值,相对误差为 5.6%,实测经验表明,误差主要由于读数偶然误差和测试环境特别是温度变化的因素造成的。

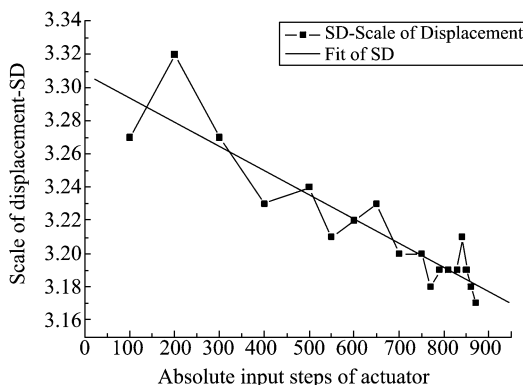


图 8 位移缩比曲线

Fig. 8 Curve of displacement transmission scale

6 结 论

通过对该拼接镜面之单元子镜的微位移调节机构等部件的设计和实测过程,了解了该机构设计的工作性能满足设计技术要求,从而该微位移调节机构基本设计原理获得了验证和肯定。同时应该注意到,这一实测过程是针对一个位移促动器作用

一组位移调节机构工作的条件下完成的,未来应进行 2 个和 3 个位移促动器同时作用的验证检测。通过以上工作还可以了解到,可以通过合理的机构设计实现大行程高分辨率的微纳米量级机构的动作和控制,并且可以通过适当的测试和校正方法在一般的实验室环境内对之进行成功检测。

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.
CHENG J Q. *Principles of astronomical telescope design*[M]. Beijing: Press of Science and Technology of China, 2003.
- [2] BELY P Y. *The design and construction of large optical telescopes*[M]. Springer-Verlag, 2003.
- [3] NELSON J E, MAST T S, FABER S M. *Keck observatory report No. 90-the design of the Keck observatory and telescope(ten meter telescope)*[R]. 1985.
- [4] KRABBENDAM V L. Development and performance of Hobby Eberly Telescope 11 meter segmented mirror[J]. *SPIE*, 2002, 3352:647-658.
- [5] MYERS R M, LONGMORE A J, *et al.* The NAOMI adaptive optics system for the 4.2 m william herschel telescope[J]. *SPIE*, 2002, 4839:647-658.
- [6] VUKOBRATOVICH D. *Introduction to opto-mechanical design*[M]. McGraw-Hill, 1993.
- [7] 杨德华. M_A 子镜系统样机及相关支撑系统的设计[R]. 南京:中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 2003.
YANG D H. *Design of M_A unit prototype and its support system*[R]. Nanjing: National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [8] 孙立宁, 荣伟彬, 曲东升, 等. 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(6):514-518.
SUN L N, RONG W B, QU D S, *et al.* Research on a large travel and high resolution rotary micro-driver based on micro-manipulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6):514-518. (in Chinese)
- [9] CUI X Q, LI Y P, NI X Y, *et al.* The active support system of LAMOST reflecting schmidt plate[J]. *SPIE*, 2002, 4837:628-636.
- [10] Diamond Motion, Inc., Product Catalog-Diamond Motion Actuator Line Specifications[Z]. 2005.
- [11] 杨德华. M_A 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 M_A segment prototype*[R]. Nanjing: National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [12] 石照耀, 费业泰. 基于均值平移的动态测量重复性的评定方法研究[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(4):363-367.
SHI Z Y, FEI Y T. Assessing the repeatability of dynamic measurement based on mean line[J].

Optics and Precision Engineering 2003,11(4):363-367. (in Chinese)

- [13] Citterio O. Support system for the 1 m ESO active optics experiment[C]. *Proceedings of the IAU Colloquium*, 1984: 41-56.
- [14] 天津大学. 纳米级 CDJ-差动电容式位移传感器操作使用说明[M]. 天津大学,2004.
Tianjin university. *Nanometer differential capacitive displacement sensor-model CDJ - user guide*[M]. Tianjin University,2004. (in Chinese)

作者简介:杨德华(1973—),男,安徽当涂人,1995年毕业于西北工业大学机械电子工程专业,现为中国科学院南京天文光学技术研究所,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为天文望远镜结构设计和分析。

中国仪器仪表学会 2005 年第五届精密工程学术研讨会 征文通知(第一轮)

由中国仪器仪表学会精密机械分会主办,深圳职业技术学院、深圳仪器仪表学会承办,深圳深飞激光光学系统有限公司协办的 2005 第五届精密工程学术研讨会定于 2005 年 11 月中旬在深圳职业技术学院召开,现将会议征文的有关事宜通知如下:

一、征文范围:

1. 精密工程发展现状及展望
2. 光机电一体化技术及系统
3. 精密机械与系统
4. 精密测试仪器及其技术与控制
5. 精密制造与材料
6. 微系统、微机电系统(MEMS)、微光机电系统(MOEMS)
7. 微型机器人及微机械
8. 纳米材料和器件
9. 微纳米制造与测试技术
10. 传感器及测控单元技术
11. 嵌入式技术、网络技术及其应用
12. 精密工程数字和仿真技术
13. 精密工程环境技术
14. 精密工程其它新理论、新方法、新技术

二、征文时间:

1. 论文摘要接受截止日期:2005 年 7 月 10 日
2. 论文录用及第二轮会议通知日期:2005 年 7 月 15 日

三、征文要求:

1. 论文摘要:中文 250~500 字,同时也请包括关键字 3~5 个,论文作者通讯方式(含联系电话和电子邮件地址),请用 A4 纸打印。
2. 论文全文:中文 5000 字左右(最好不超过 4 页 A4 纸),包括论文标题(2 号宋体)、署名(5 号宋体)、中文摘要 100~250 字(小 5 号宋体)、关键词 3 个(小 5 号宋体)、英文标题(2 号宋体)、英文署名(5 号宋体)、参考文献,以上请参见《光学精密工程》杂志的版面要求,请用 A4 纸打印,同时将电子版发送到编辑部。
3. 请在论文摘要右上方注明《2005 年第五届精密工程学术研讨会》论文。

四、论文发表及出版:

1. 论文作者根据录用通知及修改意见进行修改。
2. 经专家评审后,符合出版要求的优秀论文将在《光学精密工程》杂志上以特刊形式公开发表。

注:《光学精密工程》是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国仪器仪表学会共同主办的国家自然科学核心期刊、EI 核心刊(compendex)的刊源。

五、投稿地址及联系人:

联系人:吴秀丽 辛培裕 **电话:**0431-6176855
地 址:长春市东南湖大路 16 号《光学精密工程》编辑部
邮 编:130033 **传真:**0431-5682346
电子邮件:gxjmgc@ciomp.ac.cn;gxjmgc@sina.com