

文章编号 1004-924X(2016)07-1711-08

射电望远镜主动反射面系统的控制

李爱华^{1,2,3*}, 周国华^{1,2}, 李国平^{1,2}, 张 勇^{1,2}, 张振超^{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:针对新疆奇台 110 m 射电望远镜主动反射面控制技术的要求,设计和研制了一种新型的位移促动器和位移控制系统,并采用双频激光干涉仪对多个位移促动器及其控制系统进行了全面检测。位移促动器采用了基于涡轮蜗杆加滚珠丝杆的高精度结构设计方案,控制器系统采用了 ARM 微处理器。最后选择 S 曲线加速控制方法,设计了主动反射面控制系统硬件平台和软件算法。基于双频激光干涉仪和光学隔振平台在恒温超洁净条件下进行了系列测试。结果表明:系统实现了行程范围为 30 mm,控制精度为 5 μm RMS 的快速精密控制;在额定负载 300 kg,步长 2 mm,行程 30 mm 范围内,实测结果平均值与理论值偏差为 0.04%,标准偏差为 3.67 μm 。最后,采用测量精度为 0.25 μm 的激光传感器对 4 块四点支撑的四边形子面板进行了验证检测。结果显示:经多次迭代后主动反射面控制闭环系统的控制精度小于 5 μm RMS,远远优于 3 mm 波段射电望远镜主动反射面控制的技术要求。

关键词:射电望远镜;主动反射面;S 曲线加速控制算法;位移促动器;位移控制系统

中图分类号:TH751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162407.1711

Control of active reflector system for radio telescope

LI Ai-hua^{1,2,3*}, ZHOU Guo-hua^{1,2}, LI Guo-ping^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, ZHANG Zhen-chao^{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: ahl@niaot.ac.cn*

Abstract: According to the control requirements of the active reflector surface in the 110 m radio telescope at QiTai (QTT) Xinjiang, a new displacement actuator and a new displacement control system were designed and manufactured and then their characteristics were tested by a dual-frequency laser interferometer in the micro-displacement laboratory. The displacement actuator was designed by a scheme of high precision worm and roller screw structures, and the displacement control system was based on a ARM micro-processor. Finally, the S curve acceleration control methods were used to

收稿日期:2016-01-10;修订日期:2016-02-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1331204);国家重点基础研究发展计划(No. 2015CB857100)

design the hardware platform and software algorithm for the active reflection surface of the control system. The test experiments were performed based on the laser metrology system on an active reflector close-loop antenna prototype for large radio telescope. Experimental results indicate that it achieves a 30 mm working stroke and 5 μm RMS motion resolution. The accuracy (standard deviation) is 3.67 μm , and the error between the determined and theoretical values is 0.04% when the rated load is 300 kg, the step is 2 mm and the stroke is 30mm. Furthermore, the active reflector integrated system was tested by the laser sensors with the accuracy of 0.25 μm RMS on 4-panel radio telescope prototype, the measurement results show that the integrated precision of the active reflector closed-loop control system is less than 5 μm RMS, and well satisfies the technical requirements of active reflector control system of the QTT radio telescope in 3 mm wavelength.

Key words: radio telescope; active reflector; S curve acceleration control algorithm; displacement actuator; displacement control system

1 引言

射电天文学对天体物理研究的多个领域作出了巨大贡献,引起越来越多天文学家的重视,世界各国都在努力突破毫米波射电望远镜的技术困难,以建造更大的高精度的天线和实现对较短波段的观测。为了获得高灵敏度和高角分辨率,射电望远镜的口径越来越大,为实现对较短波段的观测而广泛采用主动反射面技术,即在望远镜的某个反射面上实施主动变形技术以补偿因加工、装调、重力、风载、温度等因素造成的面形误差,或主动调整为某种要求的面形。已建成的美国 100 m GBT 望远镜,工作波段覆盖 0.1~116 GHz,由 2 209 个促动器采用主动反射面技术控制 2 004 块面板保证 4 GHz 以上的工作效率^[1-2];美墨合作的 50 m LMT 望远镜借鉴光学拼接镜面原理,由 720 个促动器通过精密控制 180 块面板保证其在 1~3 mm 波段高效运行^[3];上海 65 m 天马射电望远镜^[4-8]工作频段 1.3~46 GHz,由 1 104 个促动器对 1 008 块面板实时调整,校正反射面对重力和温度引起的变形;贵州 500 m fast 望远镜观测波段 70 M~3 GHz,采用主动反射面技术实时控制天线面形为 300 m 抛物面;在研的有美国 25 m CCAT 亚毫米波望远镜^[5-6]和我国新疆乌鲁木齐 110 m 射电望远镜^[7]。

中国未来要发展大口径亚毫米波/毫米波射电望远镜,主动反射面控制是实现射电望远镜面板拼接的一项关键技术,在亚毫米波段、毫米波段

的应用尚需极大努力和技术突破。面向新疆奇台 110 m 射电望远镜 3 mm 波段观测的主动反射面要求,设计、研制精密位移促动器和高精度位移控制系统。位移促动器采用基于精密涡轮蜗杆加滚珠丝杆的高精度结构设计方案;控制系统采用 ARM 微处理器,基于 S 曲线加速控制算法,设计主动反射面控制系统硬件平台和软件算法,并在双频激光干涉仪/毫米波射电望远镜样机系统分别进行测试,满足控制精度优于 50 μm 的毫米波射电望远镜主动反射面控制设计要求。

2 主动反射面系统构成及其工作原理

主动反射面技术中一般 4 块相邻的面板的 4 个角点由位移促动器实现位移调整,如 GBT 望远镜和上海天文台 65 m 天马望远镜,均是过约束支撑,因此要求位移促动器负载较大,以支撑大面板重量、大桁架变形和促动器大行程等各种导致结构变形的轴向和横向应力;同时射电面板本身也具有一定的可变形调节性能,不会因射电望远镜野外恶劣环境下重力变形和热变形等产生各种应力集中导致结构件破坏,而且四点支撑的促动器分布调整方案能够通过闭环准确控制子面板的面形和拼接,不会因为四点过约束而使得主动反射面性能受到影响。3 mm 波段根据衍射条件面形精度要求为 1/20 波长均方根值,即面形精度 150 μm ,考虑到控制系统的精度要求及未来实现亚毫米波主动反射面需求,控制精度要求满足 50 μm 。针对新疆奇台 110 m 射电望远镜(QiTai

Radio Telescope, QTT)的毫米波工作频段,满足其 3 mm 波段观测要求的主动反射面控制基本技术指标为:行程 30 mm,额定负载 300 kg,破坏负载 700 kg,控制速度 0.5 mm/s,位移精度 50 μm ,位移分辨率 1 μm 。基于此技术指标,设计一种毫米波射电望远镜主动反射面系统,主要包括位移促动器、位移控制器和驱动器。

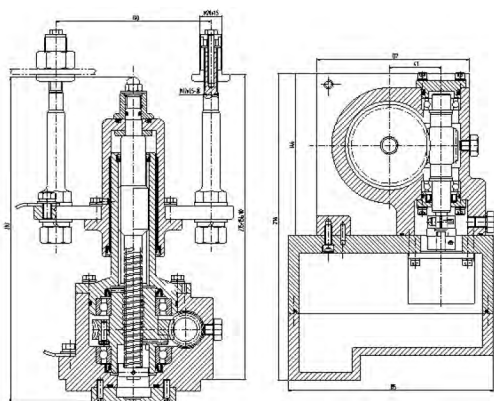


图1 位移促动器机械结构

Fig.1 Structure of displacement actuator

2.1 位移促动器设计

位移促动器是射电望远镜主动反射面的执行元件,其重要的参数为负载能力、精度和行程,对位移促动器的要求具有行程长、精度高及负载大的特点。实际工程设计中,这些要求难以兼顾,基于 QTT 望远镜毫米波主动反射面的控制指标,位移促动器机械原理如图 1 所示,由精密蜗轮蜗杆、精密滚珠丝杆、步进电机等组成,步进电机连接精密蜗杆,蜗杆带动固定于滚珠丝杠螺母上的精密蜗轮转动,通过滚珠丝杆将旋转运动转换为位移促动器直线运行,滚珠丝杠底部连接滑动花键,滚珠丝杠顶部与连接反射面板的螺杆组件联结。位移促动器采用基于涡轮蜗杆加滚珠丝杆的减速机构,提高输出转矩,满足额定负载 300 kg 的设计要求。

对位移促动器在极限破坏载荷工况下,建立有限元模型,进行负载分析。促动器处在上极限位置时,根部位置承受的力矩最大,根据侧向极限破坏负载要求,位移促动器受力 700 kg(6 860 N),由 4 根立柱共同承受。将力加载在 4 根立柱顶部的节点上,初步设计方案的仿真分析结果如图 2 所示,

位移促动器缸体部分受力比较均匀,总体应力在 100 MPa 以下,缸体根部圆角处的最大应力为 102 MPa,缸体部分的应力满足使用要求;但对于立柱,越到根部受到的应力越大,在根部圆角处达到最大值 980 MPa,不能达到使用要求。为此,后续进一步仿真的有限元参数优化调整后,通过加大根部直径和放大根部圆角,采用调质后的合金钢材料 40 Cr,最终的优化计算分析结果表明,可使其根部最大破坏应力小于 600 MPa,这样的结构和材料选择就能满足使用要求。

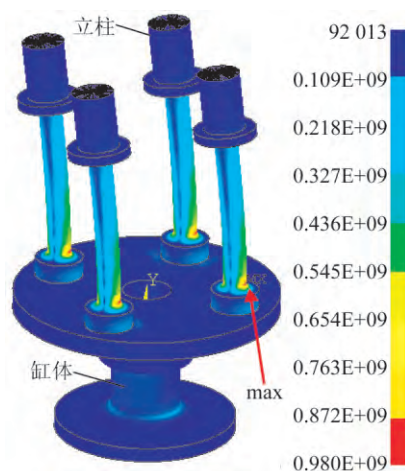


图2 仿真优化前位移促动器总体应力分布

Fig.2 Displacement actuator total stress

2.2 位移控制器设计

控制精度是毫米波射电望远镜主动反射面调整的一个重要参数,位移控制器性能的优劣会直接影响整个位移控制系统的精度。一个好的控制系统有助于精密位置控制。针对新疆奇台提出的未来 110 m 射电望远镜 QTT,主动反射面控制系统对控制器提出如下基本技术要求:实时通讯、位移控制、实时反馈、限位报警等功能;电控设计在满足基本功能的前提下,还要综合考虑电磁兼容、可靠性、稳定性及功耗等各方面因素。

位移控制器选用 ARM 处理器。ARM 具有功耗低、成本低和可靠性高等优点,其操作系统在稳定性、安全性和多任务等方面具有显著优点^[9];其丰富的资源可以使控制器同时控制多个促动器。主动反射面控制系统原理如图 3 所示。脉冲和方向等控制信号首先经译码芯片识别地址,数据总线输出的数据经数据锁存、总线驱动后,进行

光耦隔离,输出连接到驱动器控制端;限位输入信号首先经光耦隔离、总线驱动后,数据传输到数据总线,经地址识别后读入控制器;控制系统软件采用多线程控制方式,通过控制驱动器信号输入端的脉冲数量、频率和方向实现位移促动器的位置、速度和方向控制。

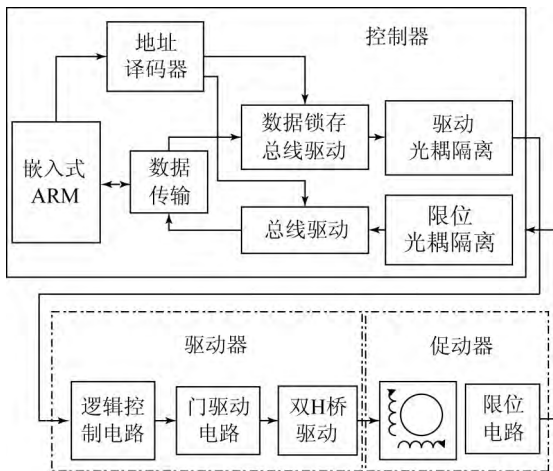


图 3 主动反射面控制系统原理图

Fig. 3 Block diagram of active reflector control system

2.3 位移驱动器设计

位移控制器产生速度、脉冲及方向控制信号;位移驱动器将电脉冲信号转化为角位移,每接收到一个脉冲信号,即驱动步进电机按设定的方向转动一个步距角,通过控制脉冲数量来控制角位移量,通过控制方向电信号来控制运动方向;驱动器为电压型功率放大电路,脉冲、方向、细分信号输入到逻辑控制电路产生 H 桥驱动信号,经门驱动电路放大整形后控制 H 桥输出。驱动器额定电压为 5 V,最大电流为 1 A,可采用整步、2 倍、4 倍、8 倍细分,细分电路可以提高分辨率,但是难以提高控制精度。在精密位置控制中,不适合采用高倍细分,本控制系统采用 2 倍细分;位移促动器步进电机为 200 对极两相混合式步进电机,步距角为 1.8°,电阻为 1 Ω,额定电流为 2.5 A,静转矩为 1.1 Nm。

2.4 主动反射面控制加速度算法

新疆 QTT 望远镜 3 mm 波段主动反射面控制对速度的要求为 0.5 mm/s,位移促动器的执行元件为两相混合式步进电机,虽然具有控制简单,体积小,控制精确,位置自锁等优点,但具有启动速度慢、高速失步和低速振动的缺点。位移促动

器因为安装位置有限,对尺寸要求严格,采用编码器,进行闭环控制,同时减速箱的设计提高输出转矩的同时,极大的降低了速度,因此,此位移促动器应用于精确位置控制中,需要选择合适的加速度控制算法保证精度和速度技术指标。

常用的步进电机加速度控制算法有梯形曲线、指数曲线和 S 曲线^[10-11],通过控制加速度来控制位移促动器的运动速度。相比较于前两者,S 曲线控制算法加速度没有突变,加速度曲线和速度曲线连续,过渡平缓,保证在运动过程中无突变,启动和停止时冲击比较小,速度平稳,保证位移促动器在启动、停止和平稳性上具有更好的性能,非常适合应用于望远镜中位移促动器的精确控制。位移促动器 S 曲线控制算法采用七段论,前三段为加速过程,第四段为匀速运动阶段,后三段为减速过程。

$$j(t) = \begin{cases} j_{\max} & 0 \sim t_1 \\ 0 & t_1 \sim t_2 \\ -j_{\max} & t_2 \sim t_3 \\ 0 & t_3 \sim t_4 \\ -j_{\max} & t_4 \sim t_5 \\ 0 & t_5 \sim t_6 \\ j_{\max} & t_6 \sim t_7 \end{cases}$$

$$a(t) = \begin{cases} j_{\max} t & 0 \sim t_1 \\ a_{\max} & t_1 \sim t_2 \\ a_{\max} - j_{\max} t & t_2 \sim t_3 \\ 0 & t_3 \sim t_4 \\ -j_{\max} t & t_4 \sim t_5 \\ -a_{\max} & t_5 \sim t_6 \\ -a_{\max} + j_{\max} t & t_6 \sim t_7 \end{cases} \quad (1)$$

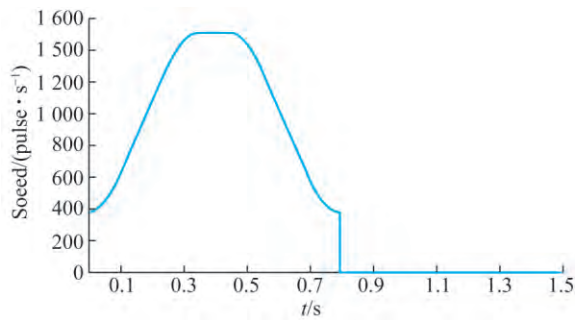
$$v(t) = \begin{cases} v_1, & v_0 + \frac{1}{2} j_{\max} t^2 & 0 \sim t_1 \\ v_2, & v_1 + a_{\max} t & t_1 \sim t_2 \\ v_3, & v_2 + a_{\max} t - \frac{1}{2} j_{\max} t^2 & t_2 \sim t_3 \\ v_4, & & t_3 \sim t_4 \\ v_5, & v_4 - \frac{1}{2} j_{\max} t^2 & t_4 \sim t_5 \\ v_6, & v_5 - a_{\max} t & t_5 \sim t_6 \\ v_7, & v_6 - a_{\max} t + \frac{1}{2} j_{\max} t^2 & t_6 \sim t_7 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $j(t)$ 为加速度的导数, j_{\max} 为位移促动器允

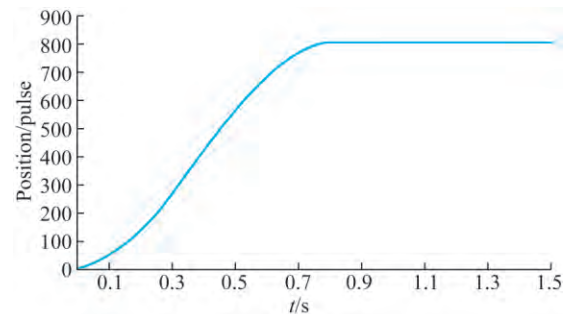
许最大加加速度, $a(t)$ 为加速度的函数, a_{\max} 为位移促动器允许最大加速度:

$$p(t) = \begin{cases} p_1, & v_0 t + \frac{1}{6} j_{\max} t^3 & 0 \sim t_1 \\ p_2, & v_1 t + \frac{1}{2} a_{\max} t^2 & t_1 \sim t_2 \\ p_3, & v_2 t + \frac{1}{2} a_{\max} t^2 - \frac{1}{6} j_{\max} t^3 & t_2 \sim t_3 \\ p_4, & v_4 t & t_3 \sim t_4, \\ p_5, & v_4 t - \frac{1}{6} j_{\max} t^3 & t_4 \sim t_5 \\ p_6, & v_5 t - \frac{1}{2} a_{\max} t^2 & t_5 \sim t_6 \\ p_7, & v_6 t - \frac{1}{2} a_{\max} t^2 + \frac{1}{6} j_{\max} t^3 & t_6 \sim t_7 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v(t)$ 为位移促动器速度函数, v_0 为位移促动器启动速度, v_4 为位移促动器允许最大速度,也是匀速运动过程的速度, $p(t)$ 为位移促动器位置函数。



(a)速度曲线
(a) Curve of speed



(b)位置曲线
(b) Course of displacement

图 4 位移促动器加速控制曲线

Fig. 4 Course of displacement actuator control

位移促动器采用两相混合式步进电机,其输出力矩随着脉冲频率的上升而下降,如果启动频

率太高,则负载能力下降,可能出现严重失步甚至无法启动的现象。根据实际测量结果,选择启动速度 $v_0 = 375 \text{ step/s}$, $v_4 = v_{\max} = 1\,500 \text{ step/s}$, $a_{\max} = 4\,500 \text{ step/s}^2$,加速过程 $t_3 = 0.35 \text{ s}$ 。采用 VC 编程仿真,位移促动器 S 曲线控制速度曲线、位置曲线如图 4 所示。

将式(2)、(3)位移促动器速度和位置函数离散化为:

$$\begin{cases} v(k) = v(k-1) + a(k) \Delta t \\ p(k) = p(k-1) + v(k) \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

根据启动速度 v_0 和式(4),选择 $\Delta t = 0.035 \text{ s}$,将加速过程分成 10 个频率段进行离散化, $a(k)$ 根据给定条件和式(1)计算,根据式(4)建立位置(脉冲)与速度(频率)的表格,加速控制表如表 1 所示,在第 k 段时间内,将以 $v(k)$ 的速度运行到 $p(k)$ 的位置,控制系统对脉冲进行计数,与 $p(k)$ 比较,如果 $\geq p(k)$,则进入第 $k+1$ 段,查表调整脉冲频率,加速过程在第 10 段完成,速度达到 v_{\max} ,然后进入匀速运行过程,在位移促动器即将到位时,减速控制,控制方法与加速控制类似。整个位移控制系统通过对促动器的开环控制即可实现高精度精确控制,其软件流程如图 5 所示。

位移促动器存在机械空回,当控制器发出反向运行命令时,因为机械间隙的存在,会出现反向运行不到位,且误差较大的情况。针对此问题,对位移促动器采用事先检测标定的措施,即基于位移测试平台,按实际应用要求,对位移促动器施加负载 300 kg,多次反复测试,经数字滤波后取平均值,计算空回数据,位移促动器每次反向进行误差补偿以提高控制精度。

表 1 加速控制表
Tab. 1 S curve control

| k | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 时间/s | 0 | 0.035 | 0.07 | 0.105 | 0.14 |
| 速度 v/k | 375 | 429 | 540 | 696 | 855 |
| 脉冲 p/k | 12 | 27 | 45 | 69 | 99 |
| k | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 时间/s | 0.175 | 0.21 | 0.245 | 0.28 | 0.315 |
| 速度 v/k | 1011 | 1170 | 1326 | 1440 | 1500 |
| 脉冲 p/k | 135 | 118 | 150 | 273 | 324 |

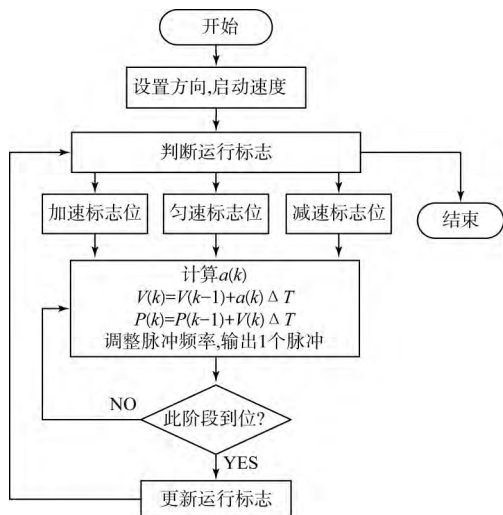


图 5 主动反射面控制软件流程图

Fig. 5 Program flowchart of active reflector control

3 实验研究

3.1 主动反射面控制系统实验

基于图 3 主动反射面控制系统原理研制的实验硬件测试平台如图 6 所示,采用 S 曲线加速度算法,在光学隔振平台上,利用高精度双频激光干涉仪 ZLM800(位移测量分辨率为 1.25 nm),在恒温 20 °C、湿度 50%±20%的超洁净实验室内,对位移促动器和控制系统进行了测试。

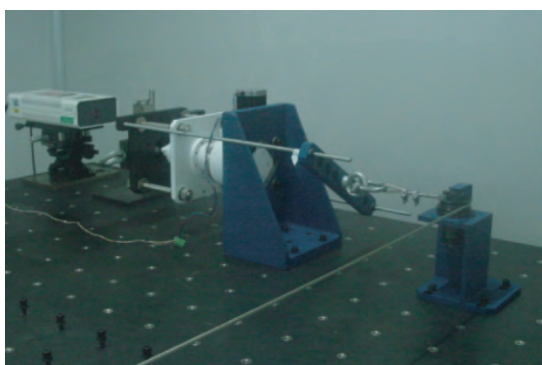


图 6 位移测试平台

Fig. 6 Test platform of displacement

图 7 所示为位移促动器加速曲线启动过程,控制系统在 0.3 s 左右完成加速,达到速度 0.544 mm/s,与图 4 仿真曲线一致。图 8 所示为位移控制系统小步长测试曲线,周期 5 s,运行指令 3 步,运行次数 10 次,平均步长为 1.086 9 μm,标准偏差为 0.051 μm,分辨率为 0.363 μm。

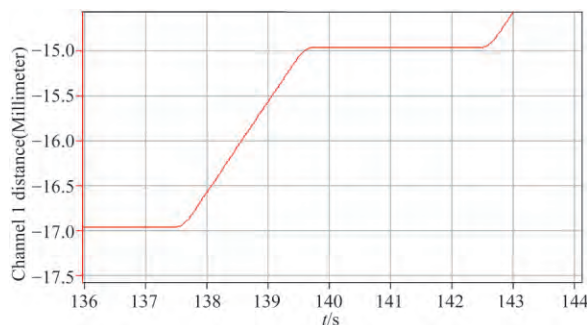


图 7 控制系统加速曲线

Fig. 7 Motion curve of displacement control

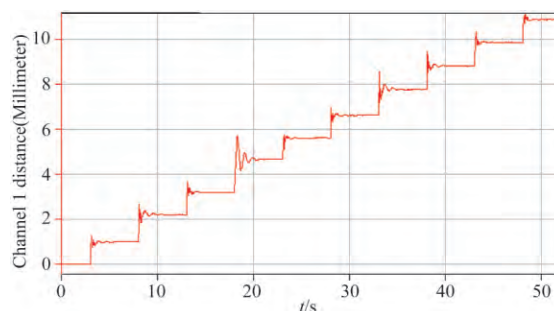


图 8 小步长测试

Fig. 8 Test curve at 3 steps

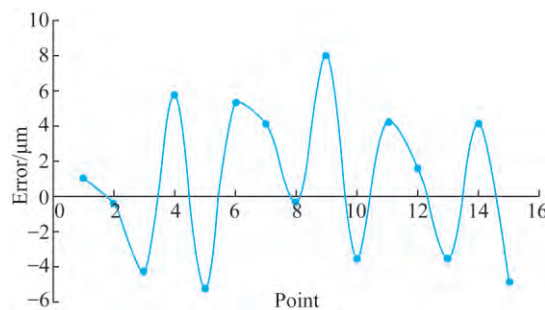
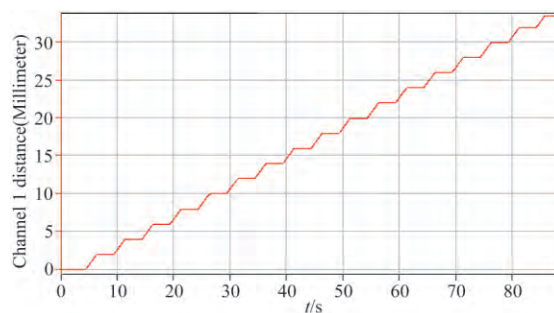


图 9 2 mm 位移促动器精度曲线及误差分析

Fig. 9 Test curve at a step of 2 mm and the error analysis

分别按照步长 2 mm 的位移量进行测试,测试曲线及误差分析如图 9 所示,周期为 5 s,运行 15 次,行程为 30 mm,求得步长平均值为

2.000 8 mm,与理论值偏差为 0.04%,标准偏差为 3.67 μm。

位移控制系统需要有高精度的定位重复性^[13],因为反馈系统采用编码器,无法直接测量位移促动器输出位置,只能保证电机运行不丢步,在电机反向运行的时候,因为机械空回的存在,必需进行位移补偿,在实验室内,测出正向反向空回(P-N)、反向转正向空回(N-P),如图 10 所示,周期 5 s,步长 1 mm,每 5 次正向运行后,反向运行 5 次,空回测试曲线及误差分析如图 10 所示,P-N 空回平均值为 17.868 μm,标准偏差为 0.563 μm;N-P 空回平均值为 15.164 μm,标准偏差为 0.159 μm。

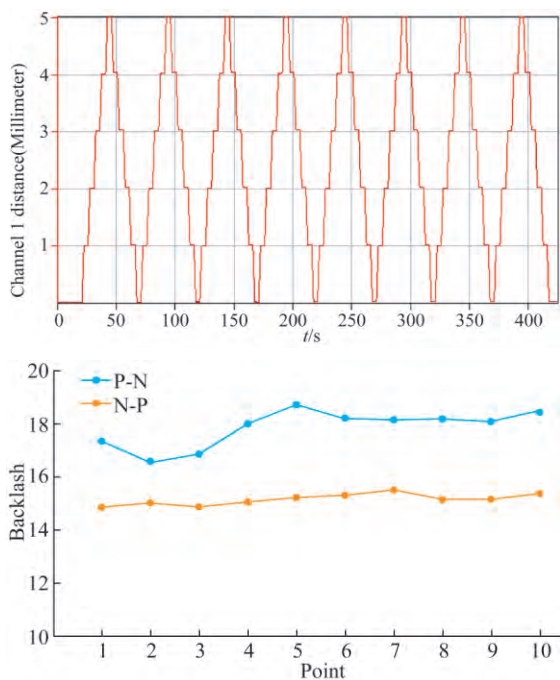


图 10 空回实验位移曲线及实验结果

Fig. 10 Test curve ofbacklash and experiment result

3.2 射电望远镜实验室位移控制系统实验验证

基于上述研制的位移促动器和位移控制系统,采用激光位移法^[14],在南京天文光学技术研究所毫米波射电望远镜样机系统的 4 块子面板上进行主动面测试,如图 11 所示,利用测量精度 0.25 μm 的激光传感器和五套位移促动器,控制四块面板进行了验证检测,结果如图 12 所示,表明主动反射面控制闭环系统 3 次迭代后控制精度即可达到 5 μm RMS,满足 3 mm 波段射电望远镜主动反射面控制的技术要求。

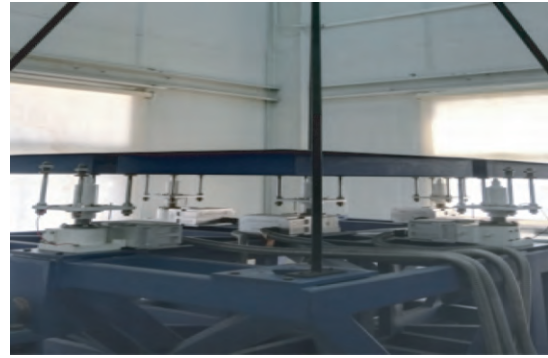


图 11 望远镜样机实测

Fig. 11 Test system

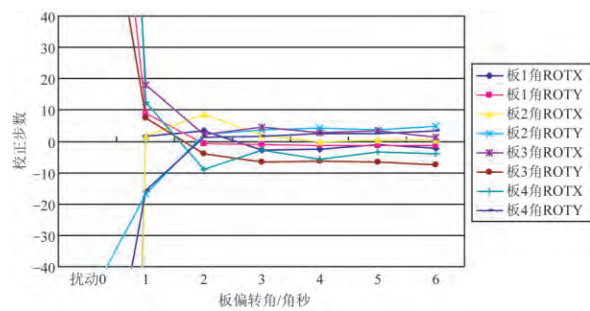


图 12 板校正测量偏转角

Fig. 12 Normal angle deflection of each panel

4 总 结

本文根据毫米波射电望远镜主动反射面控制的技术要求,设计了位移促动器和位移控制系统。位移促动器采用基于涡轮蜗杆加滚珠丝杆的高精度结构设计方案;控制器采用 ARM 微处理器和 S 曲线软件算法,基于双频激光干涉仪,在恒温超洁净和光学隔振平台的条件下,进行了系列测试,加速过程在 0.3 s 左右完成,速度达到 0.544 mm/s,与仿真结果一致;实现了行程为 30 mm,控制精度优于 5 μm RMS 的高精度、高速精确控制;采用位移补偿的控制方式,在额定负载 300 kg,给定步长 1.095 μm(3 步)、2 mm 的测试结果平均值为:1.086 9 μm 和 2.000 8 mm,标准偏差为:0.051 μm 和 3.67 μm。并在毫米波射电望远镜样机系统采用激光位移传感器进行了实验验证,基于四块子面板进行了闭环检测和实时校正,结果表明主动反射面控制闭环系统多次迭代后控制精度优于 5 μm RMS,达到 QTT 射电望远镜 3 mm 波段主动反射面控制的应用要求,也同时远远地优于亚毫米波射电望远镜的技术要求。

参考文献:

- [1] JEWELL P R. The green bank telescope [C]. *Proc. of SPIE*, 2000,4015:136-147.
- [2] TODD R H, FREDERIC R S, STEVEN D W, *et al.*. Holographic measurement and improvement of the green bank telescope surface [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2011, 123(907):1087-1099.
- [3] SOUCCAR K, WALLACE G, GROSSLEIN R, *et al.*. The architecture of the active surface control system of the Large Millimeter Telescope [C]. *Proc. of SPIE*, 2014,9151:91512J. 1-91512J. 6.
- [4] 沈志强. 上海 65 米射电望远镜[J]. *科学*, 2013, 65(3):15-20.
SHEN ZH Q. Shanghai 65m radio telescope [J]. *Science*, 2013, 65(3):15-20. (in Chinese)
- [5] ANDREW T S, FRANK W K. Finite element analyses of CCAT preliminary design [C]. *Proc. of SPIE*, 2014,9145: 914521. 1-914521. 17.
- [6] GERMÁN C M. Active surface segmentation analysis of CCAT [C]. *Proc. of SPIE*. 2006, 6267: 62672X. 1-62672X. 11.
- [7] 王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜[J]. *中国科学*, 2014, 8(44): 783-794.
WANG N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope[J]. *Science china*, 2014, 8(44): 783-794. (in Chinese)
- [8] 钱宏亮, 柳叶, 范峰, 等. 上海 65 m 射电望远镜非均匀温度场及其效应[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(4):970-977.
QIAN H L, LIU Y, FAN F, *et al.*. Non-uniform temperature field and effects of Shanghai 65 m Radio telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):970-977. (in Chinese)
- [9] 弓雷. ARM 嵌入式 Linux 系统开发详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
GONG L. *ARM embedded Linux system development* [M]. Beijing: Tsinghua university press, 2014. (in Chinese)
- [10] 黄兆斌, 黄云龙, 余世明. 几种步进电机加减速方法的对比研究及其应用[J]. *机电工程*, 2011, 28(8):951-953.
HUANG ZH B, HUANG Y L, YU SH M. Comparative study between several acceleration and deceleration methods on stepper motor and application [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(8):951-953. (in Chinese)
- [11] 曾康玲, 杨向宇, 赵世伟, 等. 步进电机指数型加速曲线优化与实现[J]. *微电机*, 2014, 6:36-40.
ZENG K L, YANG X Y, ZHAO SH W, *et al.*. Optimization of exponential acceleration curve of stepper motor and realization on PIC [J]. *Micro-motors*, 2014, 6:36-40. (in Chinese)
- [12] YANG D H, ZHANG Y, ZHOU G H, *et al.* An active surface upgrade for the Delingha 13.7-m Radio Telescope [C]. *Proc. of SPIE*, 2012, 8444: 84444B. 1-84444B. 10.
- [13] 许素安, 谢敏, 孙坚, 等. 基于压电陶瓷光电相移驱动的大行程纳米定位系统[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(10):2773-2778.
XU S A, XIE M, SUN J, *et al.*. Long range nanopositioning system based on optoelectronic phase-shift for piezoelectric actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10):2773-2778. (in Chinese)
- [14] ZHANG Y, ZHANG J, YANG D H, *et al.*. An active reflector antenna using a laser angle metrology system [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12(6):713-722.

作者简介:



李爱华(1979—),女,山东夏津人,博士研究生,高级工程师,2002年南京航空航天大学获得学士学位,2005年南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事望远镜控制技术方面的研究,E-mail:ahl@niaot.ac.cn



周国华(1965—),男,浙江新昌人,高级工程师,1989年哈尔滨工业大学获学士学位,主要从事望远镜机械设计方面的研究,E-mail:ghzhou@niaot.ac.cn