

文章编号 1004-924X(2017)01-0163-09

## 2 m 望远镜主轴交流伺服控制系统设计

邓永停, 李洪文\*, 王建立, 陈 涛

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了满足 2 m 口径望远镜低速跟踪精度的要求, 本文主要介绍了基于永磁同步力矩电机的望远镜交流伺服控制系统设计方法, 首先, 辨识出了系统结构的频率特性曲线; 其次, 根据系统的频率特性曲线设计了结构滤波器, 以减小结构模态引起的谐振幅值; 然后, 根据系统的控制性能指标要求, 设计了位置回路控制器和前馈控制器, 以提高系统的位置跟踪性能; 最后, 在设计的硬件平台上进行了望远镜转台的低速控制实验。实验结果显示, 当望远镜跟踪斜率为  $0.36''/s$  的位置斜坡曲线时, 速度平稳性较好, 位置跟踪误差 RMS 为  $0.006''$ , 实现了极低速度跟踪的效果; 在速度为  $5^\circ/s$ , 加速度为  $2^\circ/s^2$  条件下的正弦引导最大误差值为  $0.3''$ , 稳态误差 RMS 值为  $0.066''$ 。实验结果表明, 2 m 口径望远镜交流伺服系统的设计满足了系统跟踪精度的要求, 为大型望远镜交流伺服控制系统的设计提供了一定的参考。

**关键词:** 2 m 望远镜; 交流伺服系统; 频率响应; 结构滤波器; 前馈控制

**中图分类号:** TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0163

## Main axes AC servo control system for 2 m telescope

DENG Yong-ting, LI Hong-wen\*, WANG Jian-li, CHEN Tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: lihongwen1970@yahoo.com

**Abstract:** A design method for telescope AC servo control system, based on high-power permanent magnet synchronous motor, was proposed to meet the requirement of low-speed tracking accuracy for 2 m telescope. Firstly, frequency characteristic curve of system structure was identified; secondly, a structure filter was designed according to frequency characteristic curve of the system so as to reduce the resonant amplitudes caused by structural mode; then, according to the requirements of the system control performance index, the position controller and feed forward controller were designed to improve the system position tracking performance; lastly, a low-speed control experiment on the telescope turntable was conducted based on the designed hardware platform. The experiment result shows that the telescope is in better stableness and its tracking error RMS is  $0.006''$  when it tracks a slope  $0.36''/s$  position curve, which achieves an extremely low-speed tracking effect; the maximum error value guided by the sine curve is  $0.3''$  and the tracking error RMS is  $0.066''$  on the condition of speed  $5^\circ/s$  and acceleration  $2^\circ/s^2$ . The experiment result indicates that the design of AC servo control system for 2 m telescope meets the requirements of system tracking accuracy and provides a reference for the design of AC servo control system for large-scale telescope to an extent.

**Key words:** AC servo control system; 2 m telescope; frequency response; structure filter; feed forward

收稿日期: 2016-04-20; 修订日期: 2016-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11603024)

## 1 引言

大口径望远镜是集光学、机械和电子学为一体的综合观测设备,为了补偿地球自转对深空目标进行精密跟踪,要求望远镜伺服控制系统具有亚角秒级的跟踪精度<sup>[1]</sup>。大口径望远镜的驱动方式有直接驱动、齿轮传动和摩擦传动等,其中直接驱动方式以传动刚度高、非线性因素少的优点在望远镜跟踪架设计上应用较多<sup>[2]</sup>。随着望远镜口径和负载的增加,直流伺服控制系统在功率、体积和低速跟踪性能等方面已经无法满足直驱伺服系统跟踪精度要求<sup>[3]</sup>。目前,国外的大型直驱望远镜都已采用了基于永磁同步力矩电机的交流伺服控制系统,以提高伺服系统的低速跟踪性能,如 10.4 m 的 GTC<sup>[4]</sup>、8.2 m 的 VLT<sup>[5]</sup>、8.2 m 的 Subaru<sup>[6]</sup>和射电望远镜 ALMA<sup>[7]</sup>等。近年来,国内相关科研院所也开展了大功率交流伺服力矩电机在望远镜控制系统中的相关研究,如中科院南京天光所<sup>[8]</sup>、中科院成都光电所<sup>[9]</sup>、中科院长春光机所<sup>[10]</sup>等。但是,国内关于大口径望远镜交流伺服控制系统设计的文献较少,大口径望远镜机电控制系统设计技术还不是很成熟,因此,研究大口径望远镜主轴交流伺服控制系统具有重要意义。

望远镜频率特性辨识是获得控制模型的方法,常用辨识方法有白噪声测试法<sup>[11]</sup>和正弦信号扫描法<sup>[12]</sup>等,白噪声测试法相比于正弦信号扫描法具有辨识信号带宽覆盖范围大的优点,但是辨识的结果噪声相对较大。由于大口径望远镜结构的 3 阶谐振频率通常小于 100 Hz,为了辨识得到比较平滑的频率特性曲线,本文将采用正弦信号扫描法。望远镜结构组件之间的柔性连接,使得望远镜频率特性存在多阶结构模态,其中 1 阶谐振频率对伺服控制系统的设计具有重要的参考。为了减小结构谐振对系统的影响,文献<sup>[13]</sup>设计了结构滤波器以减小谐振幅值,增加伺服系统的带宽,通过设计结构滤波器可以将系统带宽增加到 1 阶锁定转子频率的 60%<sup>[14]</sup>。根据望远镜的数引工作模式需要,文献<sup>[15]</sup>设计了前馈控制器以满足不同形式的跟踪指令,从而提高伺服系统的跟踪精度。

由于望远镜的方位轴和俯仰轴伺服控制系统基本是相互独立的,且设计方法相同,因此,本文

将以 2 m 望远镜方位轴转台为研究对象,该转台采用直驱的传动方式,支撑轴承为大推力角接触球轴承,该类轴承能够承受重载,具有较小的摩擦力矩,有利于减小电机力矩波动、提高望远镜的低速跟踪性能。伺服系统采用大功率永磁同步力矩电机,在此基础上重点从系统频率特性的辨识、结构滤波器、位置控制器和前馈控制器等方面进行伺服控制系统的设计,给出了详细的设计方法和实验结果。

## 2 望远镜交流伺服控制系统结构

### 2.1 永磁同步力矩电机矢量控制

为了减小电机力矩波动对望远镜低速跟踪性能的影响,永磁同步力矩电机选择空间矢量控制方式<sup>[16]</sup>,为了简化分析,作如下假设:转子永磁磁场在气隙空间成正弦分布,定子电枢绕组中的感应电动势也为正弦分布;忽略定子铁心饱和,认为磁路线性,电感参数不变;不计铁心涡流和磁滞损耗;转子上无阻尼绕组。采用  $i_d = 0$  的矢量控制方式,永磁同步电机在  $dq$  坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} u_d = R i_d - \omega L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = R i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_a + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases}, \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_a i_q, \quad (2)$$

$$K_t = \frac{3}{2} p \psi_a, \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_l, \quad (4)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电压;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电流;对于表面式 PMSM 的电感满足  $L_d = L_q = L$ ,  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电感;  $R$  为定子电阻;  $p$  为极对数;  $\omega$  为转子机械角速度;  $J$  为转动惯量;  $T_e$  为电磁转矩;  $T_l$  为负载转矩;  $B$  为摩擦系数;  $K_t$  为转矩系数;  $\psi_a$  为永磁体励磁磁链。

### 2.2 望远镜交流伺服控制系统设计

在永磁同步力矩电机采用矢量控制方式后,望远镜交流伺服控制系统结构如图 1 所示,从构成部件的角度,系统由机械转台、同步力矩电机、电流控制器、结构滤波器、速度控制器、位置控制器、反馈滤波器、前馈控制器和编码器组成;从控制回路的角度,系统由电流环、速度环和位置环组

成,其中速度环和电流环均采用具有 Anti-windup 策略的 PI 控制器<sup>[17]</sup>,电流环的带宽大于 100 Hz,在控制系统设计时认为  $G_{ci}(s) \approx 1$ ,以简

化外环控制器的设计<sup>[18]</sup>。速度反馈信号不是来源于模拟的测速电机,而是直接由位置编码器经过差分得到。

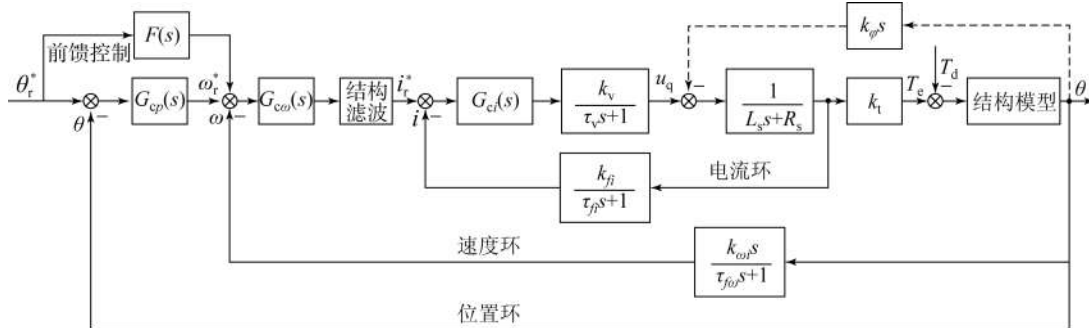


图 1 望远镜交流伺服控制系统结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of telescope AC servo control system

### 3 系统频率特性辨识

永磁同步力矩电机在采用  $i_d = 0$  的矢量控制方式后,使得永磁同步电机的控制类似于他励直流电机的控制。对电机施加一定的  $q$  轴电压  $u_q$ ,  $d$  轴仍然采用电流闭环控制,则电机将以一定的速度开环运行。2 m 望远镜转台的开环测试系统配置如图 2 所示,可以采用两种方法对系统进行开环测试。(1)断开  $q$  轴电流控制器,在  $q$  轴电流控制器输出端对系统施加电压正弦扫描信号  $u_q$ ,

通过计算机同步记录转台的编码器响应数据;(2)断开速度控制器,在  $q$  轴电流控制器的指令输入端对系统施加电流正弦扫描信号  $i_q$ ,通过计算机同步记录转台的编码器响应数据。方法 1 辨识的控制模型包括驱动放大部分、电机部分和机械耦合部分;方法 2 辨识的控制模型包括电流闭环控制器、驱动放大部分、电机部分和机械耦合部分。由于电流控制器的带宽通常在 100 Hz 以上,因此,电流环的引入对控制模型的辨识影响较小。将采用方法 2 对系统进行控制模型的辨识。

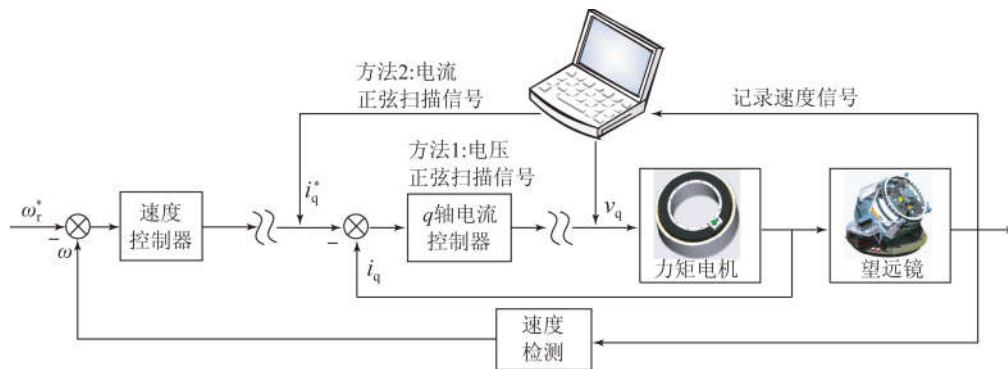


图 2 系统开环频率特性测试系统配置

Fig. 2 System setup for open-loop frequency response identifying

输入的正弦扫描信号阶次为 3 阶,频率扫描为 0.1~60 Hz,正弦信号的连续时间序列为:

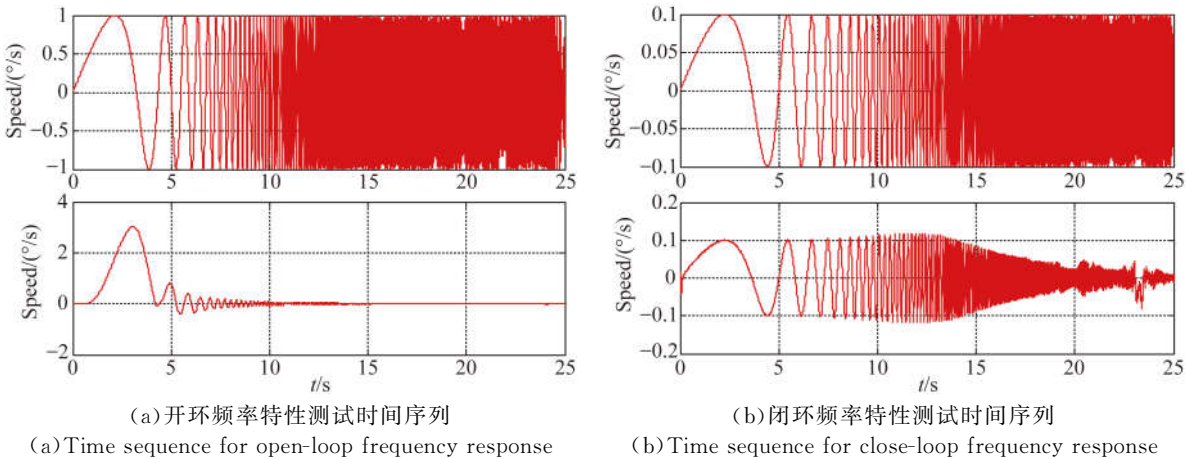
$$u(t) = A(t) \sin[2\pi\omega(t)], \quad (5)$$

其中:  $\omega(t) = f_0(1 + ct^n)t$ ,  $c = \frac{f_T/f_0 - 1}{(n+1)T^n}$ 。

正弦扫描信号的频率范围为  $[f_0, f_T]$ ,扫描时间为  $T_s$ ,  $A(t)$  为变化的幅值,但是在测试中扫描信号的幅值固定,  $n$  为多项式的阶次。为了使正弦信号在低频段具有较长的扫描时间,选择多项式的阶次为 3,扫描时间为 25 s。在进行系统的开环频率特性测试时,为了使系统的输入和输

出序列具有相同的量纲,把输入的电流正弦扫描信号乘以速度控制器的增益。系统开环频率特性测试的时间序列如图 3(a)所示,激励信号的正弦幅值为  $1^\circ/\text{s}$ ;系统闭环频率特性测试的时间序

列如图 3(b)所示,激励信号的正弦幅值为  $0.1^\circ/\text{s}$ ,系统闭环频率特性测试时正弦扫描信号幅值选择较小的数值,是为了防止速度控制器的输出进入限幅非线性区。



(a)开环频率特性测试时间序列 (b)闭环频率特性测试时间序列  
(a)Time sequence for open-loop frequency response (b)Time sequence for close-loop frequency response  
图 3 系统频率特性测试时间序列

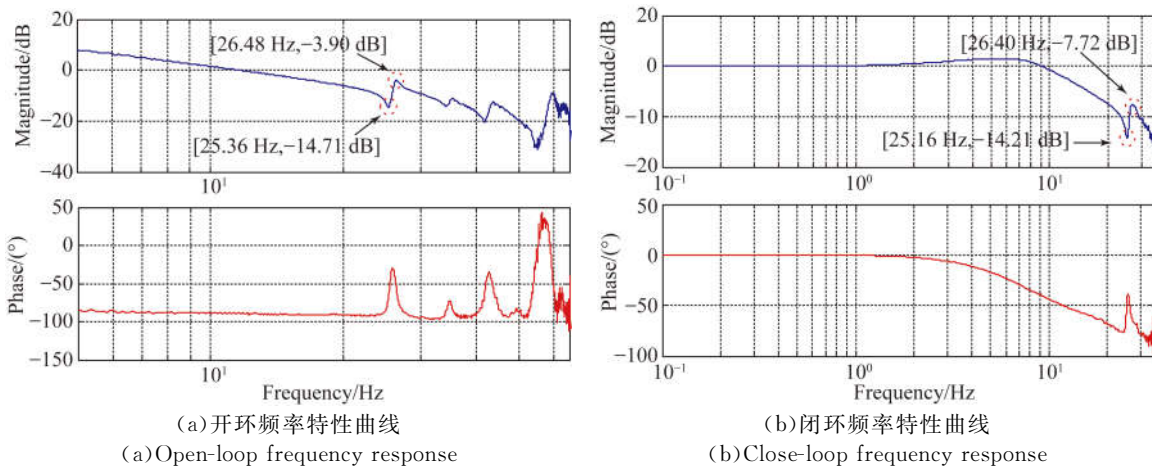
Fig. 3 Time sequence for testing system frequency response

对输入和输出信号进行离散傅里叶变换,得到输入、输出信号的功率谱密度函数:  $P_{uu}(\omega)$ 、 $P_{yy}(\omega)$  和  $P_{uy}(\omega)$ ,系统的开环传递函数和相干函数定义如下:

$$\hat{G}(\omega) = \frac{P_{uy}(\omega)}{P_{uu}(\omega)}, \quad \varphi(\omega) = \frac{|P_{uy}(\omega)|^2}{P_{uu}(\omega)P_{yy}(\omega)} \quad (6)$$

$\varphi(\omega)$ 的数值介于  $0 \sim 1$ ,单位值 1 表示输入输出序列的良好线性关系和记录的数据中没有扰动;较低的相干函数值是由于望远镜转动时的各种扰动引起的,同时也说明望远镜转台控制系统中存在较多的非线性因素,例如风载和轴系摩擦。

采用上述离散傅里叶变换,对输入和输出信号进行分析得到望远镜方位轴转台的开环频率特性曲线如图 4(a)所示,系统的锁定转子频率(LRF)为  $25.36 \text{ Hz}$ ,谐振频率为  $26.48 \text{ Hz}$ ,锁定转子频率与谐振频率相差较小,说明系统的刚度较大。方位轴转台的闭环频率特性曲线如图 4(b)所示,闭环频率测试得到的谐振频率与开环测试结果基本一致,系统的速度闭环带宽为  $10 \text{ Hz}$ 。在获得系统的频率特性曲线后,可以采用文献[19]中的特征多项式算法对系统的控制模型进行辨识。



(a)开环频率特性曲线 (b)闭环频率特性曲线  
(a)Open-loop frequency response (b)Close-loop frequency response

图 4 系统频率特性测试曲线

Fig 4 Frequency response of control system

### 4 结构滤波器设计

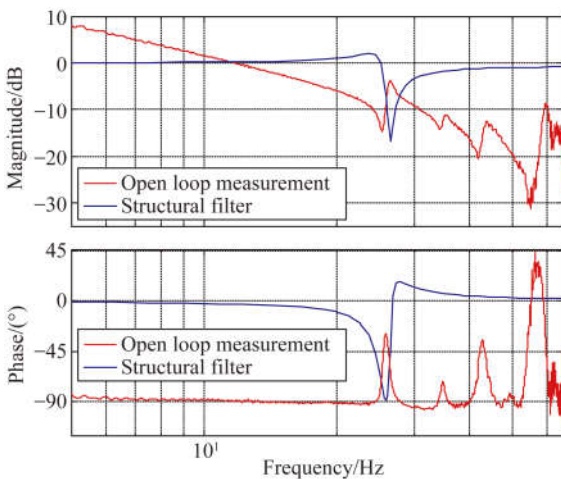
由于电机与负载之间的刚度有限,无法做到绝对的刚性连接,因此在控制系统中会存在多阶结构模态,为了减小结构模态引起的伺服系统震荡,设计结构滤波器以减小系统震荡对望远镜负载的损坏,结构滤波器的表达式为:

$$f_s = \frac{(s/\omega_h)^2 + 2\zeta_n(s/\omega_h) + 1}{(s/\omega_l)^2 + 2\zeta_d(s/\omega_l) + 1} \quad (7)$$

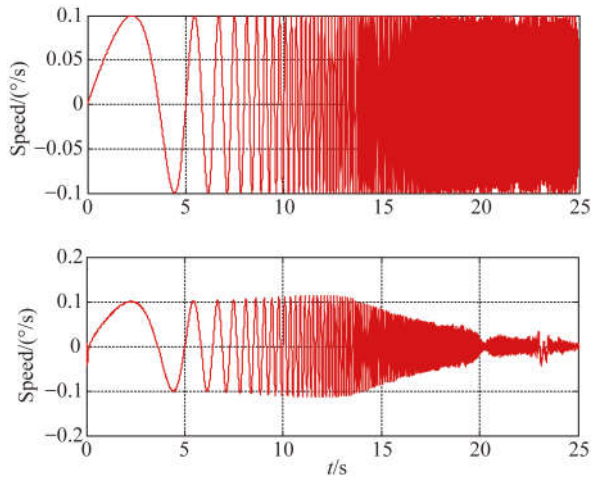
将极点频率  $\omega_l$  设置在锁定转子频率附近,将零点频率  $\omega_h$  设置在谐振频率附近,这种错开的陷波滤波器设计会显著的减小相应频率处的幅值增益。由图 4(a)可以看出:系统的锁定转子频率和谐振频率分别为 25.36 和 26.48 Hz,设计结构滤波器的目的是将谐振峰幅值降低到 -10 dB 以

下。经过设计的结构滤波器参数为:  $\zeta_n = 0.01$ ,  $\zeta_d = 0.05$ ,  $\omega_l = 159.34 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_h = 166.38 \text{ rad/s}$ 。

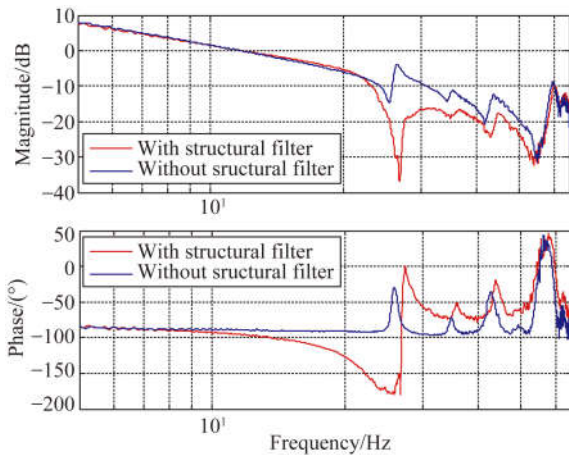
在控制系统中加入结构滤波器后的系统频率特性如图 5 所示,图 5(a)中两曲线相位和幅值相叠加得到的曲线与实际频率特性曲线测试曲线图 5(c)相吻合,说明了结构滤波器设计的正确性;图 5(b)所示为加入结构滤波器后系统的闭环频率特性测试曲线,可以看出系统的输出响应时间序列在某一频率处的幅值明显减小。对图 5(b)中的时间序列进行频谱分析得到如图 5(d)所示的频率特性曲线,可以看出:系统在谐振频率处的幅值明显减小,系统振荡得到抑制,但是也造成了在该频率处相位的滞后;在加入结构滤波器后系统的速度闭环带宽为 13 Hz,相比加入结构滤波器之前提高了 1.3 倍,增强了电机的速度动态响应能力。



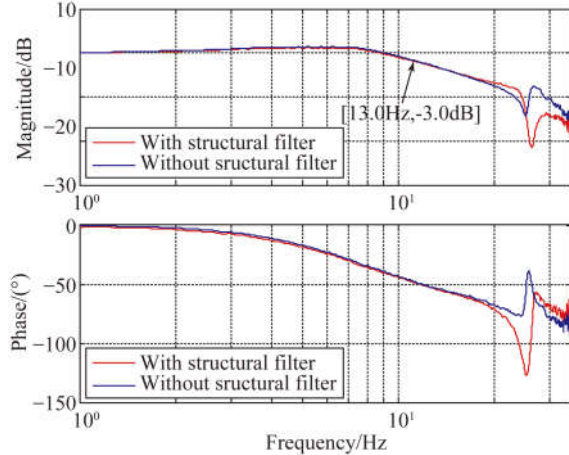
(a) Structural filter and open-loop frequency response



(b) Frequency response after structural filter added



(c) Open-loop frequency compare when structural filter added



(d) Close-loop frequency compare when structural filter added

图 5 加入结构滤波器后的系统频率测试曲线

Fig 5 Frequency response after structural filter added

## 5 位置控制回路设计

### 5.1 位置控制器设计

位置控制器传递函数:

$$G_{cp}(s) = k_r \left( k_p + \frac{k_i}{s} + s \right). \quad (8)$$

PID 控制器的参数由系统控制性能指标决定,对于采用直接驱动方式的望远镜,其频率特性在低频段接近纯刚体模型的特性,因此,位置控制器的参数设计为:

$$\begin{cases} k_i = -\beta \omega_c^2 / (\lg m \times \sqrt{1 + \beta^2}) \\ k_p = \beta(k_i - \omega_c^2) / \omega_c \\ k_r = \lg m \times J \times k_i / k_p \end{cases}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} \beta = \tan(90 + PM) \\ \lg m = 10^{LGM/20} \\ \omega_c = 2\pi f_c \end{cases}, \quad (10)$$

其中:  $f_c$  为开环剪切频率,  $PM$  为相角裕度,  $LGM$  为幅值裕度。

相角裕度是指对于稳定的系统,如果系统的开环频率特性再滞后  $PM$  度,则系统将处于临界稳定状态;幅值裕度是指对于稳定的系统,如果系统的开环频率特性的幅值再降低  $LGM$  分贝,则系统将处于临界稳定状态;由式(10)可以看出,比例系数  $k_r$  由系统的转动惯量  $J$  决定,因此,控制器的比例系数较大。为了提高系统的抗扰动能力,可以增大开环频率特性的剪切频率  $f_c$ ,同时降低系统的相位裕度  $PM$  和幅值裕度  $LGM$ 。位置控制器的带宽设计目标是使  $f_c$  尽量靠近锁定转子频率,通常为锁定转子频率的 30%~40%。

### 5.2 前馈控制器设计

根据前馈控制理论,前馈控制器为速度闭环回路传递函数的倒数,表达式为  $F(s) = s$ 。实际控制过程中,速度回路有相位滞后,因此,需要在前馈控制器中加入超前环节,采用二阶滤波器形式的前馈控制器为  $F(s) = s(as^2 + bs + 1)$ 。前馈控制器参数可以通过测量速度闭环回路的复增益进行估计,速度闭环传递函数可以采用二阶滤波器进行拟合:  $g(s) = 1/(as^2 + bs + 1)$ ,在速度回路的带宽范围内  $s = j\omega$  处,测量传递函数的  $g(s)$  的复增益,通过以下线性方程求解系数  $a$  和  $b$ :

$$\begin{bmatrix} \operatorname{Re}[g(s^2)] & \operatorname{Re}[g(s)] \\ \operatorname{Im}[g(s^2)] & \operatorname{Im}[g(s)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(1-g) \\ \operatorname{Im}(1-g) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由图 6 可以看出,在 5 Hz 处  $g(s)$  的相位与闭环传递函数很好的拟合,采用二阶滤波器进行拟合,相位的吻合比幅值的吻合更为重要。因此,得到前馈控制器的系数:  $a = 1.83 \times 10^{-4}$ ,  $b = 7.95 \times 10^{-3}$ 。

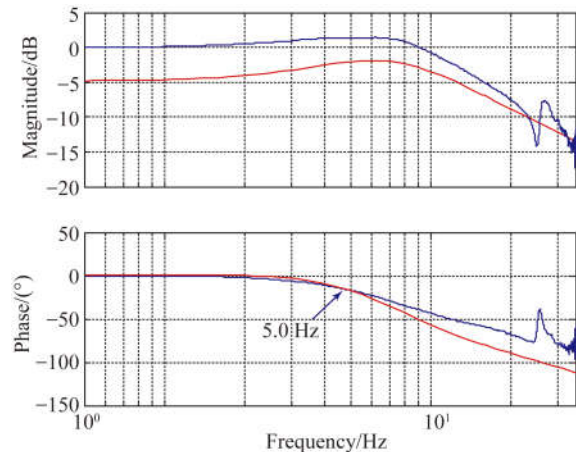


图 6 系统的速度闭环拟合曲线

Fig. 6 Fit curve of close loop velocity

## 6 实验结果分析

2 m 望远镜方位轴控制系统如图 7 所示,系统由望远镜转台、大功率永磁同步力矩电机、圆光栅编码器和驱动控制器组成。测量得到望远镜转台的转动惯量  $J = 1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,圆光栅编码器为 32 位绝对式编码器,分辨率为  $0.0003''$ ;大功率永磁同步力矩电机的参数为:力矩系数  $K_t = 142 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ ,相电阻  $R_s = 2.4 \Omega$ ,同轴电感  $L_q = L_d = 36.5 \text{ mH}$ ,额定电流  $I = 23 \text{ A}$ ,最大驱动电压  $V = 360 \text{ V}$ ,磁极对数  $P = 65$ 。控制器采用基于高性能的 DSP 和 FPGA 的架构,DSP 完成位置和速度回路的控制策略以及结构滤波器算法;电流环的采样频率为  $15 \text{ kHz}$ ,由 FPGA 并行硬件电路完成,同时系统的故障保护功能也嵌入在 FPGA 中。驱动器采用智能功率模块(IPM),该模块的最大驱动电压为  $1200 \text{ V}$ ,最大驱动电流为  $75 \text{ A}$ ,2 m 望远镜方位轴转台实际运行时的电机驱动电压为  $100 \text{ V}$ 。



图 7 2 m 望远镜方位轴控制系统

Fig. 7 Control system for 2 m telescope azimuth axis

基于上述系统频率特性的辨识、结构滤波器的设计、位置控制器以及前馈控制器的设计,在硬件平台上进行了望远镜交流伺服控制系统性能测试实验。望远镜转台的启动电流如图 8 所示,电流阶跃响应时间为 0.05 s,电流稳态误差为  $\pm 0.02$  A,转台启动力矩为 28 N·m;电机电力矩阶跃响应曲线说明电流环具有较高的带宽,驱动器具有很高的采样精度,提高了控制系统抗扰动能力。望远镜方位轴转台在 0.5°/s 时的速度阶跃响应曲线如图 9 所示,速度阶跃响应调节时间  $t_s < 0.2$  s,稳态速度波动百分比为 0.54%,转台的速度阶跃响应曲线说明系统的速度环具有较好的动态响应能力和较高的稳态精度。

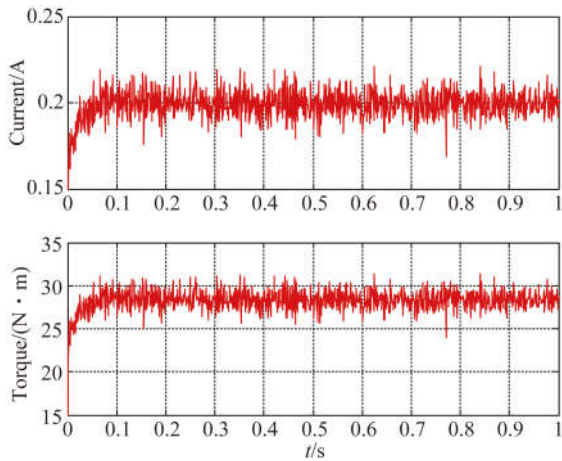


图 8 方位轴转台电机启动电流曲线  
Fig. 8 Start current of azimuth motor

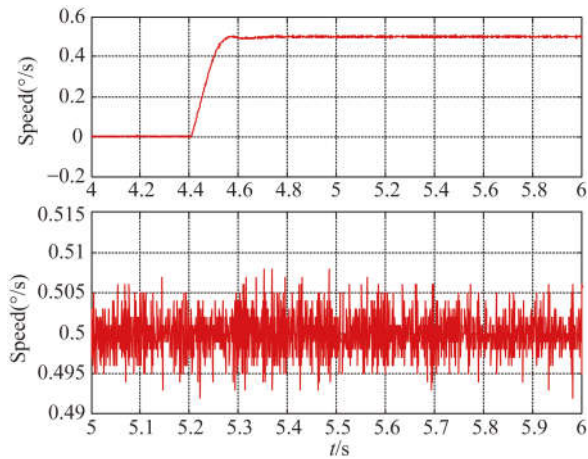


图 9 望远镜方位轴转台速度阶跃曲线  
Fig. 9 Speed response of telescope azimuth axis

望远镜转台的位置阶跃曲线如图 10 所示,由数据曲线可以看出,位置阶跃具有较快的动态响应能力,位置稳态误差为  $\pm 0.02''$  (20 毫角秒),满足望远镜转台精确定位的要求。转台在跟踪位置斜率为  $1.0 \times 10^{-4}$  /s 时的曲线如图 11 所示,由图可以看出,跟踪过程中速度波动 RMS 值为  $0.002^\circ/\text{s}$ ,但是位置跟踪误差为  $0.006 1''$ ,具有很高的位置跟踪精度。转台所用的永磁同步力矩电机磁极数为 65,据此计算单个磁极对应的角度为  $5.53^\circ$ ,电机在经过磁极对进行换向时,电机的齿槽力矩波动可能会影响转台的跟踪性能。为了验

证齿槽波动力矩对跟踪性能是否有影响,对位置斜率为  $0.5^\circ/\text{s}$  时的跟踪性能进行了实验,如图 12 所示,对数据进行分析可知,在电机经过磁极时跟踪误差没有明显波动,位置跟踪误差 RMS 值为  $0.019 43''$ ,具有良好的低速跟踪平稳性。为了验证望远镜转台的动态跟踪性能,在速度为  $5^\circ/\text{s}$ ,加速度为  $2^\circ/\text{s}^2$  条件下作等效正弦引导,引导曲线如图 13 所示,正弦跟踪过程中最大误差为  $0.3''$ ,跟踪误差的 RMS 值为  $0.066''$ ,实验数据表明,转台在跟踪动态目标时具有较高的动态响应能力和较小的跟踪误差。

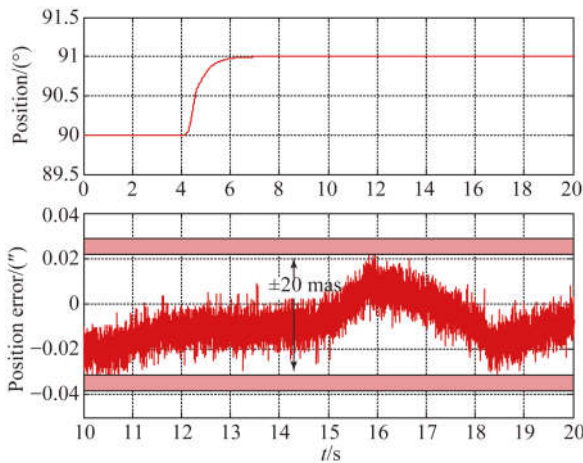


图 10 望远镜方位轴转台位置阶跃曲线  
Fig. 10 Position response of telescope azimuth axis

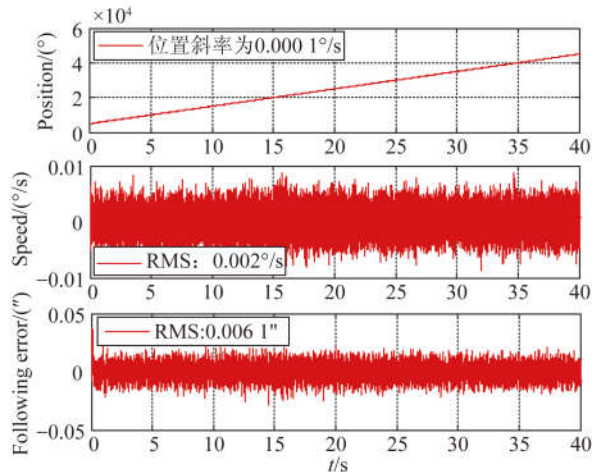


图 11 转台位置斜坡跟踪曲线(斜率 0.000 1°/s)  
Fig. 11 Position response for the slope command(slope 0.000 1°/s)

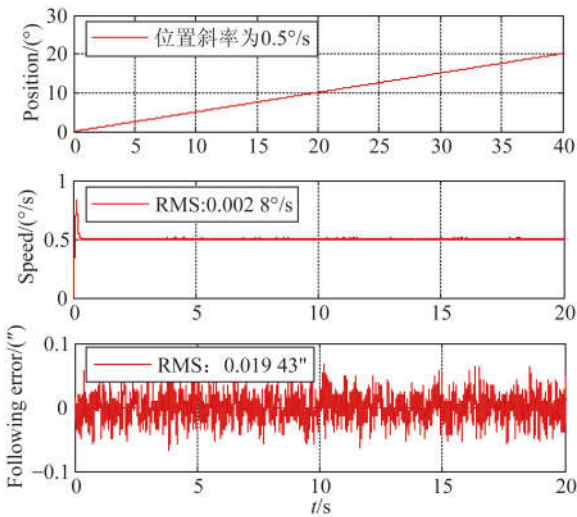


图 12 转台位置斜坡跟踪曲线(斜率 0.5°/s)  
Fig. 12 Position response for the slope command(slope-0.5°/s)

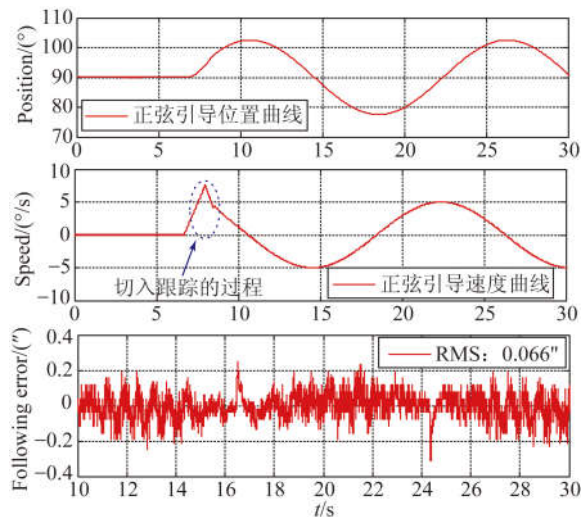


图 13 望远镜转台位置正弦引导曲线  
Fig. 13 Position response for the sine command

### 7 结 论

本文在 2 m 望远镜交流伺服控制系统结构的基础上,根据望远镜跟踪性能要求,辨识出了望远镜转台的频率特性曲线;为了减小结构模态引起的谐振,给出了结构滤波器的设计方法;为了提高望远镜的位置跟踪精度,设计了位置控制器和前馈控制器。最后,在搭建的 2 m 望远镜方位轴

转台控制系统上进行了实验研究,实验结果表明,当望远镜跟踪斜率为 0.36"/s 的位置斜坡曲线时,速度平稳性较好,位置跟踪误差 RMS 为 0.006 1",实现了极低速度跟踪的效果;在速度为 5°/s,加速度为 2°/s<sup>2</sup> 条件下的正弦引导最大误差值为 0.3",稳态误差 RMS 值为 0.066"。上述结果完全满足 2 m 口径望远镜交流伺服系统的设计要求,为大型望远镜交流伺服控制系统的设计提供了一定的依据。

### 参考文献:

[1] ANDERSEN T, ENMARK A. *Integrated Modeling of Telescopes* [M]. Springer Science & Business Media, 2011.  
[2] 王国民. 天文光学望远镜轴系驱动方式发展概述

[J]. 天文学进展, 2008, 25(4):364-374.  
WANG G M. Review of drive style for astronomical optical telescope [J]. *Progress in Astronomy*, 2007, 25(4):364-374. (in Chinese)  
[3] 常九健. 基于弧形电机拼接的大型望远镜驱动技术研究[D]. 中国科学院光电技术研究所, 2013.

- CHANG J J. *New Direct Drive Method for Large Telescope Base on Arc PMLSM* [D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [4] FILGUEIRA J M, RODRIGUEZ D. GTC control system: an overview [C]. *SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 1998:2-12.
- [5] GUTIERREZ P. Standardization of direct drive servos in telescope applications [C]. *SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2003:325-335.
- [6] NEGISHI S, KANZAWA T, TOMONO D, *et al.*. Subaru Telescope improved pointing accuracy in open-loop and Az rail flatness [C]. *SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2006:62673K-62673K-10.
- [7] GIACOMEL L, MANFRIN C, MARCHIORI G. The European ALMA Production Antennas: new drive applications for better performances and low cost management [C]. *SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2008:701236-701236-11.
- [8] LI X, WANG D, SONG X, *et al.*. Research on large aperture telescope drive control technology [C]. *SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation. International Society for Optics and Photonics*, 2012:84505B-84505B-7.
- [9] JIAN C J, LI M W, LONG H J. Design and optimization of arc permanent magnet synchronous motor used on large telescope [J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2012, 48(5):1943-1947.
- [10] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于 DSP 和 FPGA 的望远镜伺服控制系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3):908-914.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Design of telescope servo system based on DSP and FPGA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3):908-914. (in Chinese)
- [11] JUANG J N, PHAN M Q. *Identification and Control of Mechanical Systems* [M]. Cambridge University Press, 2001.
- [12] 王帅, 陈涛, 李洪文, 等. 光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):78-83.
- WANG SH, CHEN T, LI H W, *et al.*. Frequency characteristic test and model identification for O-E tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):79-83. (in Chinese)
- [13] SIROTA M J, THOMPSON P M, JEX H R. Azimuth/elevation servo performance of the W. M. Keck telescope [C]. *SPIE Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation, Kona*, 1994:13-18.
- [14] PIERRE Y B. *The Design and Construction of Large Optical Telescope* [M]. Verlag New York, Springer, 2003.
- [15] GAWRONSKI W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(2):276-289.
- [16] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6):1599-1605.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Speed control for PMSM based on predictive control and disturbance observer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1599-1605. (in Chinese)
- [17] 李洪文, 邓永停, 王建立. 永磁同步力矩电机速度控制器的全数字化集成[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4):1106-1113.
- LI H W, DENG Y T, WANG J L. Digital integration of PMSM speed controller based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1106-1113. (in Chinese)
- [18] 方斯琛, 周波. 滑模控制的永磁同步电机伺服系统一体化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(3):96-101.
- FANG S CH, ZHOU B. Integrated design for permanent magnet synchronous motor servo systems based on sliding mode control [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(3):96-101. (in Chinese)
- [19] 邓永停. 4 m 级望远镜主轴交流伺服控制系统研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
- DENG Y T. *Research on Ac Control System for the 4 m Scale Telescope Main Axis* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)

#### 作者简介:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,助理研究员,主要从事望远镜精密跟踪控制技术的研究及电子学设计。E-mail:dyt0612@163.com



李洪文(1970—),男,四川乐至人,研究员,博士生导师,主要从事地基高分辨率成像光电望远镜电控系统总体设计及电机控制方面的研究。E-mail:lihongwen1970@yahoo.com