文章编号 1004-924X(2018)03-0654-08

2 m 级望远镜跟踪架控制系统动态性能分析

邓永停*，李洪文，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：为了增强望远镜的抗风载扰动能力，提高望远镜跟踪架的跟踪精度，本文对 2 m 望远镜跟踪架伺服控制系统的动态性能进行了测试和分析。首先，采用正弦扫描信号对望远镜跟踪架的结构和伺服系统进行了频率特性测试；其次，采用基于观测器/卡尔曼滤波器的辨识算法，对跟踪架控制系统的频率特性进行了模型辨识；最后，依据辨识获得的控制模型设计了位置和速度控制器，然后对 2 m 望远镜跟踪架伺服控制系统进行了目标观测实验，实验结果表明：当跟踪最大速度为 3.5 (°)/s，最大加速度为 1 (°)/s² 的目标时，方位轴和俯仰轴的最大跟踪误差均小于 4.5″，跟踪误差的 RMS 值分别为 0.378 6″和 0.151 6″，实验验证了跟踪架控制系统的良好性能。

关 键 词：望远镜；频率响应；模型辨识；伺服系统
中图分类号： **文献标识码**：A **doi**：10.3788/OPE.20182603.0654

Dynamic analysis of two meters telescope mount control system

DENG Yong-ting*, LI Hong-wen, CHEN Tao

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: dyt*0612@163.*com*

Abstract: In order to enhance the ability of disturbance rejection for the telescope, and improve the tracking accuracy of the telescope mount control system, this paper analysis the dynamic of mount control system for the two meters telescope. Firstly, the frequency response of telescope mount control system is test using swept sine. Secondly, the Observer/Klaman filter algorithm is employed to identify the model for the mount control system. Finally, the position controller and speed controller are designed based on the mount control model. The experimental results of target observation show that max tracking errors of the azimuth and elevation axis are less than 4.5″, and the tracking error RMS are 0.378 6″ and 0.151 6″, when the target moving with the max speed 3.5 (°)/s and the max acceleration 1 (°)/s². The experiments verify the good dynamic of telescope mount control system.

Key words: telescope; frequency response; model identification; servo system

收稿日期：2017-06-08；**修订日期**：2017-08-16.
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 11603024)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引　言

地基大口径光电望远镜在实现对空间目标精密跟踪时，需要重点考虑跟踪架伺服控制系统的定点和跟踪误差[1]。望远镜在低风速条件下，经过重力变形、热变形及其他系统误差校正后，跟踪误差通常被要求小于 5 角秒[2]。对于高速风扰，受望远镜伺服系统带宽和动态性能的限制，望远镜观测无法满足这种条件下的精密跟踪误差要求，进而限制了望远镜的可观测时间[3]。如果风载在望远镜中引入的不确定动态能够被抑制，则望远镜的可观测时间将有大幅提高。因此，在设计望远镜跟踪架伺服控制系统时，需要设计具有高鲁棒性、高伺服带宽的闭环控制器来抑制由风载引起的跟踪抖动[4]。伺服控制器的设计首先需要辨识系统的控制模型，常用的控制模型辨识方法有基于白噪声激励的特征矩阵辨识法和基于正弦扫描的观测器/卡尔曼滤波器辨识法[5-6]。文献[7]采用基于白噪声激励的特征矩阵辨识法对望远镜转台的控制模型进行了辨识，但是基于白噪声的激励方法需要经特殊的过滤波处理，否则辨识结果将存在较大的噪声，甚至造成高频动态特性丢失。而基于正弦扫描的观测器/卡尔曼滤波器具有辨识精度高的特点，可以根据控制系统设计需要选择主要的高频动态特性，进而辨识出表征系统主要动态性能的控制模型[8]。在辨识获得控制模型后，对基于模型的望远镜跟踪架伺服控制器进行仿真和实验，进而评价控制器的性能。

本文将采用基于正弦信号扫描的方法对望远镜跟踪架伺服系统进行频率特性测试；然后在频率特性辨识分析的基础上，采用基于正弦扫描的观测器/卡尔曼滤波器辨识法对频率特性曲线进行拟合，进而获得系统的控制模型；最后，依据辨识获得的控制模型设计望远镜跟踪架控制系统的位置和速度回路控制器，并在 2 m 级望远镜跟踪架控制系统中进行了动态性能分析和实际目标的观测实验。

2 望远镜跟踪架伺服系统频率特性测试方法

2.1 望远镜跟踪架伺服系统组成

2 m 级望远镜跟踪架伺服控制系统的方位轴和俯仰轴驱动电机均采用永磁力矩电机，控制结构由典型的位置、速度和电流环三环组成。伺服系统频率特性测试的回路配置原理图如图 1 所示，位置回路保持开环状态，速度回路根据测试需要保持闭环或者开环状态。在进行开环频率特性测试时，保持速度开环，在电流闭环参考输入端注入正弦扫描信号，通过计算机同步记录转台的编码器响应数据。该方法辨识的控制模型包括电流闭环控制器、驱动放大部分、电机部分和机械结构部分。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。

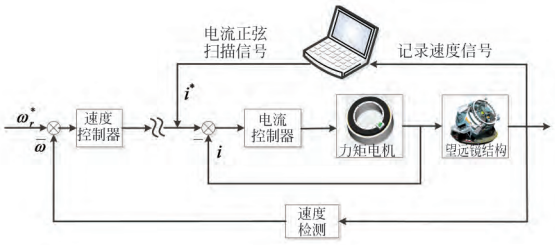

图 1　辨识实验中伺服回路配置原理图

Fig. 1　Block diagram of servo loop setup for identification experiment

输入的正弦扫描信号阶次为三阶，频率扫描范围为 0.1～100 Hz，正弦信号的连续时间序列为：

$$u(t) = A(t)\sin[2\pi\omega(t)]\,, \tag{1}$$

其中：

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

正弦扫描信号的频率范围为 $[f_0, f_T]$，扫描时间为 T_s，$A(t)$ 是变化的幅值，但是在本文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三阶，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，将输入的电流正弦扫描信号乘以速度控制器的增益。

2.2 实验数据处理方法

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：

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

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中：$\varphi(\omega)$ 的数值介于 0～1 之间，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等。2 m 级望远镜方位轴和俯仰轴的输入激励信号和速度响应信号如图 2 和图 4 所示，经过离散傅里叶变换处理后的速度开环频率特性曲线如图 3 和图 5 所示，由图可以看出：方位轴的一阶锁定转子频率为 16.13 Hz，一、二、三阶谐振频率分别为 34.08 Hz，41.8 Hz，57.18 Hz；俯仰轴的一阶锁定转子频率为 8.75 Hz，一、二阶谐振频率分别为 9.2 Hz 和 41.13 Hz。伺服控制系统的带宽受限于结构的一阶锁定转子频率，在谐振频率峰值合理抑制的同时，速度回路的闭环带宽可以达到一阶锁定转子频率的一半，位置回路的闭环带宽可以达到一阶锁定转子频率的五分之一[9]。

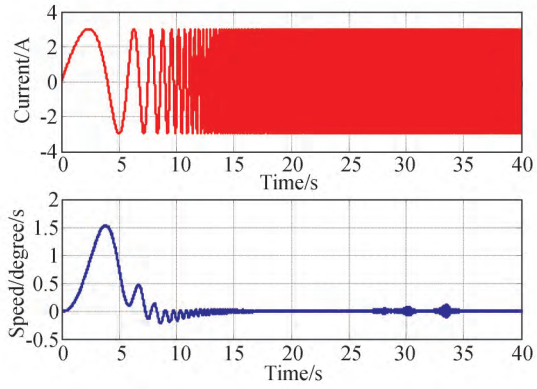

图 2　方位轴速度开环输入激励和输出响应曲线

Fig. 2　Signal input and response output of speed open-loop for the azimuth axis

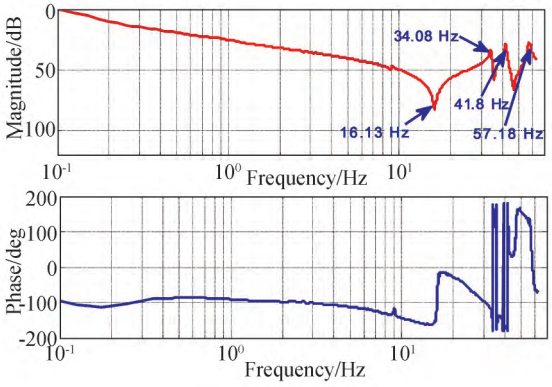

图 3　方位轴速度开环频率特性曲线

Fig. 3　Frequency response of speed open-loop for the azimuth axis

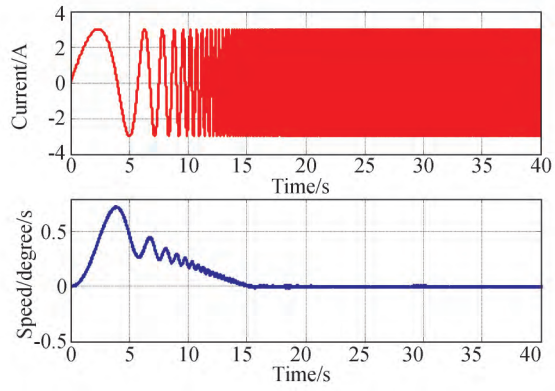

图 4　俯仰轴速度开环输入激励和输出响应曲线

Fig. 4　Signal input and response output of speed open-loop for the elevation axis

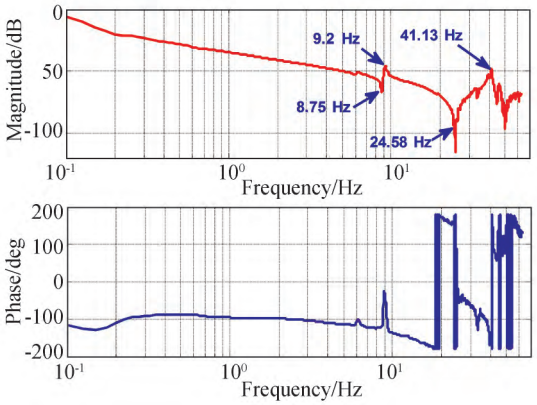

图 5　俯仰轴速度开环频率特性曲线

Fig. 5　Frequency response of speed open-loop for the elevation axis

3　望远镜跟踪架伺服系统模型辨识算法

通过对实验数据分析处理获得伺服系统的开环频率特性后，需要据此辨识系统的控制模型，从而进行闭环控制器的设计。无论基于经典控制理论还是现代控制理论的控制器设计，均可基于式(3)所示的离散状态空间模型进行设计。

$$\begin{cases} x(k+1) = \boldsymbol{A}x(k) + \boldsymbol{B}u(k) \\ y(k) = \boldsymbol{C}x(k) + \boldsymbol{D}u(k) \end{cases}. \tag{3}$$

对式(1)所示的离散状态空间模型，采用文献[10-11]所述的观测器/卡尔曼辨识（Observer/Kalman identification，OKID）算法进行辨识，OKID 算法首先需要辨识带有观测增益的系统观测器的马尔可夫参数，然后采用观测器的马尔可

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

夫参数辨识表达式(3)所示的模型参数，系统观测器的表达式为：

$$\begin{cases}\hat{x}(k+1)=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{GC})\hat{x}(k)+(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{GD})u(k)-\boldsymbol{G}y(k)\\ \hat{y}(k)=\boldsymbol{C}\hat{x}(k)+\boldsymbol{D}u(k)\end{cases}. \tag{4}$$

观测器的马尔可夫参数表达式为：

$$\bar{\boldsymbol{Y}}=[\boldsymbol{D}\quad \boldsymbol{C}\bar{\boldsymbol{B}}\quad \boldsymbol{C}\bar{\boldsymbol{A}}\bar{\boldsymbol{B}}\quad \cdots\quad \boldsymbol{C}\bar{\boldsymbol{A}}^{p-1}\bar{\boldsymbol{B}}], \tag{5}$$

其中：$\bar{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{A}+\boldsymbol{GC}$，$\bar{\boldsymbol{B}}=[\boldsymbol{B}+\boldsymbol{GD},\ -\boldsymbol{G}]$，这些参数均可通过输入输出数据直接计算得到。观测器的马尔可夫参数用来求解离散状态控制模型(3)的马尔可夫参数：

$$\boldsymbol{Y}=[\boldsymbol{D}\quad \boldsymbol{CB}\quad \boldsymbol{CAB}\quad \boldsymbol{CA}^2\boldsymbol{B}\quad \cdots]. \tag{6}$$

采用系统的马尔可夫参数构建如下 Hankel 矩阵：

$$\boldsymbol{H}(k)=\begin{bmatrix}Y_{k+1} & Y_{k+2} & \cdots & Y_{k+\xi}\\ Y_{k+2} & Y_{k+3} & \cdots & Y_{k+\xi+1}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ Y_{k+\zeta} & Y_{k+\zeta+1} & \cdots & Y_{k+\zeta+\xi-1}\end{bmatrix}, \tag{7}$$

其中：Y_k 为系统的 k 阶马尔可夫参数，ζ、ξ 依赖于系统的输入、输出信号数量以及系统辨识的阶次。为了辨识 n 阶系统的控制模型，采用前 n 阶奇异值和左右奇异向量表示 $\boldsymbol{H}(0)=\boldsymbol{R}_n\Sigma_m\boldsymbol{S}_n$。对于具有 r 阶输入和 m 阶输出的系统来说，其 k 阶辨识矩阵表示为 $\boldsymbol{I}_k$，$\boldsymbol{O}_k$ 为 $k\times k$ 阶零矩阵，令 $\boldsymbol{E}_r=[\boldsymbol{I}_r\quad \boldsymbol{O}_r\quad \cdots\quad \boldsymbol{O}_r]$，$\boldsymbol{E}_m^{\mathrm{T}}=[\boldsymbol{I}_m\quad \boldsymbol{O}_m\quad \cdots\quad \boldsymbol{O}_m]$。

系统辨识矩阵表示如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}=\sum_n^{-1/2}\boldsymbol{R}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}(1)\boldsymbol{S}_n\sum_n^{-1/2},\boldsymbol{B}=\sum_n^{1/2}\boldsymbol{S}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_r\\ \boldsymbol{C}=\boldsymbol{E}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_n\sum_n^{1/2},\boldsymbol{D}=\boldsymbol{Y}_0\end{cases}. \tag{8}$$

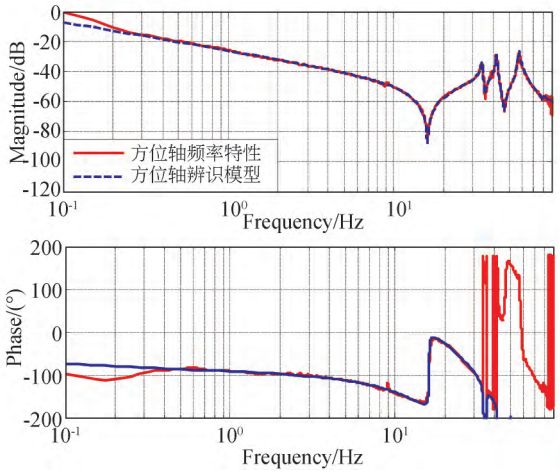

图 6　方位轴的控制模型辨识曲线

Fig. 6　Identified model for azimuth axis

在对 2 m 级望远镜方位轴和俯仰轴进行模型辨识时，选择前 60 个马尔可夫参数，模型选择 40 阶次即可描述两轴的动态特性。方位轴和俯仰轴的模型辨识曲线如图 6 和图 7 所示(彩图见期刊电子版)，图中红色曲线为开环频率特性曲线，蓝色曲线为辨识的模型曲线，由图可以看出：辨识的模型曲线能够较好地拟合实际系统的频率特性曲线，代表控制系统的主要动态特性，控制器的仿真设计完全可以依据辨识的控制模型。

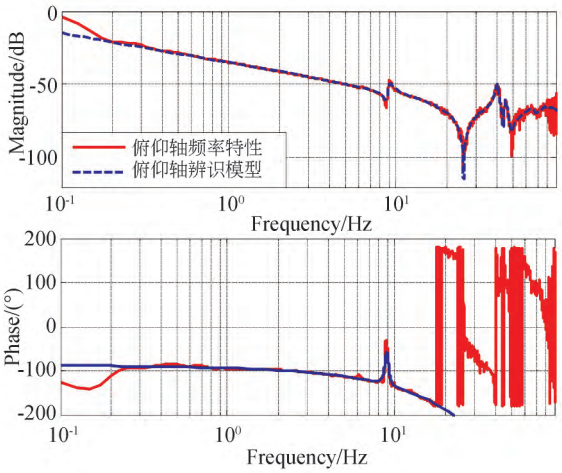

图 7　俯仰轴的控制模型辨识曲线

Fig. 7　Identified model for elevation axis

4　跟踪架伺服系统闭环性能测试

在完成方位轴和俯仰轴伺服系统的控制模型辨识后，依据此模型进行速度环和位置环控制器设计[12]。为了保证速度的快速、无超调响应，速度回路采用具有 Anti-Windup 策略的 PI 控制器[13]，控制器的形式如下。

电流限幅环节表示为：

$$i_{\mathrm{q}}^{*}=\begin{cases}i_{\mathrm{q}}, & if(i_{\mathrm{q}}\leqslant I_{\mathrm{m}})\\ I_{\mathrm{m}}sgn(i_{\mathrm{q}}), & if(i_{\mathrm{q}}>I_{\mathrm{m}})\end{cases}, \tag{9}$$

式中：I_{m} 为限幅环节的幅值，$sgn(\cdot)$ 为符号函数。

PI 控制器的输出 i_{q} 为：

$$i_{\mathrm{q}}=k_{\mathrm{p}}\Delta\omega+q, \tag{10}$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中：q 表示 PI 控制器的积分输出，$\Delta\omega=\omega_r^*-\omega$。

控制器输出工作在线性区时，速度环采用 PI 控制器形式，当速度阶跃信号较大时，PI 控制器输出会达到饱和，基于反馈计算的积分输出值将以一定的速率复位为零，此时，控制器为纯比例控制，积分输出 q 的表达式为：

$$q=k_p\Delta\omega+\frac{k_i}{s}(\Delta\omega-k_a\Delta i_q)\ , \tag{11}$$

式中：$\Delta i_q=i_q-i_q^*$，k_p，k_i 分别为 PI 控制器的比例时间常数和积分时间常数，k_a 为 PI 控制器反馈计算系数。

由图 3 和图 5 可以看出，伯德图的幅值曲线在谐振频率处有较大的峰值，如果控制信号的响应频率接近谐振频率时，系统的动态响应将会不稳定，引起机械系统的振荡[14-15]。为了减小谐振频率处的振荡，通常采用结构滤波器来滤除谐振频率处的控制信号，从而保持系统动态性能的稳定性。

结构滤波器的应用目的是抑制在谐振频率处的驱动力矩成分，提高控制系统的增益，进而提高系统的带宽和动态性能。结构滤波器的表达式为：

$$W_{SF}(s)=\frac{s^2+2\zeta_Z\omega_{NF}s+\omega_{NF}^2}{s^2+2\zeta_P\omega_{NF}s+\omega_{NF}^2}\ , \tag{12}$$

式中：ω_{NF} 为系统的谐振频率，称为陷波频率；ζ_Z、ζ_P 分别为结构滤波器的零点和极点阻尼系数。

串入结构滤波器后的基于 Anti-Windup 策略的望远镜速度闭环控制系统如图 8 所示，对于基于永磁同步力矩电机的望远镜控制系统，电流环采用基于 PI 控制器的空间矢量控制方法，从而减小电机力矩波动，提高低速跟踪精度。

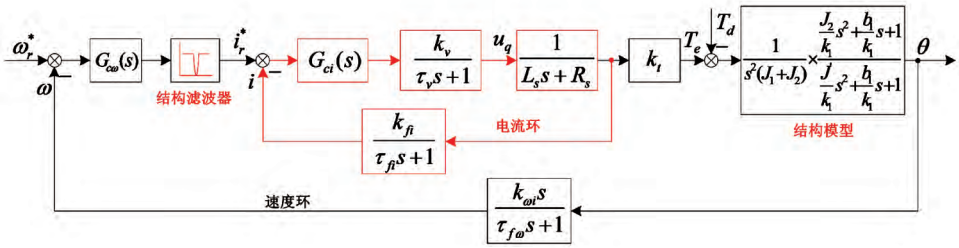

图 8　望远镜速度闭环控制系统

Fig. 8　Speed closed-loop of telescope control system

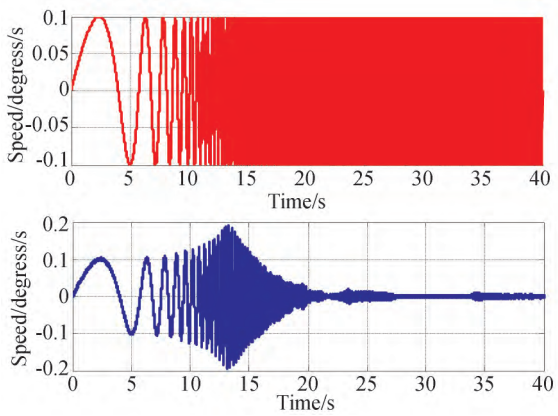

图 9　方位轴闭环测试输入和输出信号曲线

Fig. 9　Signal input and response output of speed closed-loop for the azimuth axis

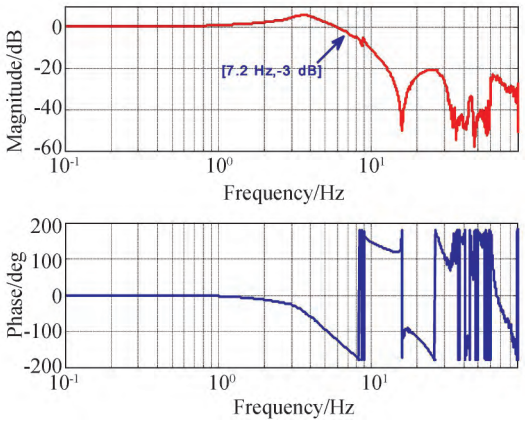

图 10　方位轴速度闭环频率特性曲线

Fig. 10　Frequency response of speed closed-loop for the azimuth axis

在完成速度控制器设计后，对速度闭环响应进行了测试，结构滤波器的零点和极点阻尼系数分别取 0.01 和 0.1。如图 1 所示，保持速度回路闭环，在速度回路参考端输入频率如表达式(1)所示，幅值为 0.1 (°)/s 的正弦扫描信号。方位轴和俯仰轴的时域信号响应曲线分别如图 9、图 11 所

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

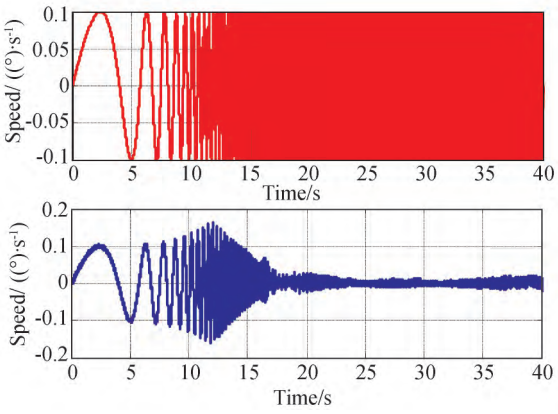

图 11　俯仰轴闭环测试输入和输出信号曲线

Fig. 11　Signal input and response output of speed closed-loop for elevation axis

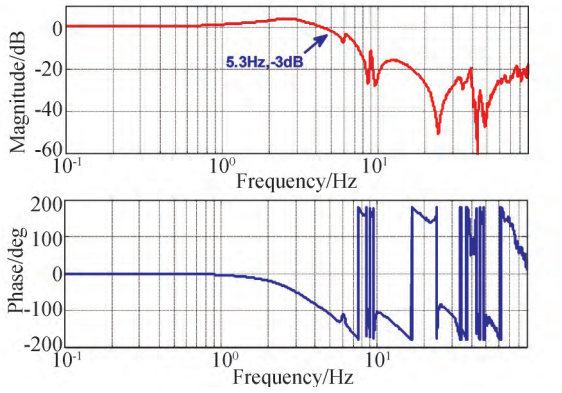

图 12　俯仰轴速度闭环频率特性曲线

Fig. 12　Frequency response of speed closed-loop for elevation axis

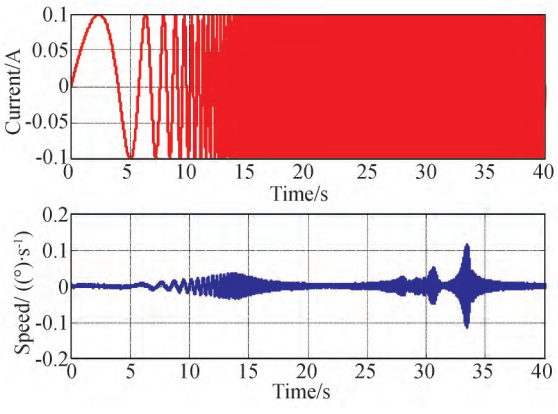

图 13　方位轴扰动频率测试输入输出信号曲线

Fig. 13　Disturbance signal input and response output of speed closed-loop for the azimuth axis

示，由图 10 和图 12 的所示的方位轴和俯仰轴的频域响应曲线可以看出：在加入结构滤波器后，方位轴和俯仰轴的速度闭环带宽达到 7.2 Hz、5.3 Hz；相比于图 3 和图 5，方位轴和俯仰轴的前 3 阶谐振峰值得到了明显抑制，控制系统的闭环带宽和稳定性有了较大提高。

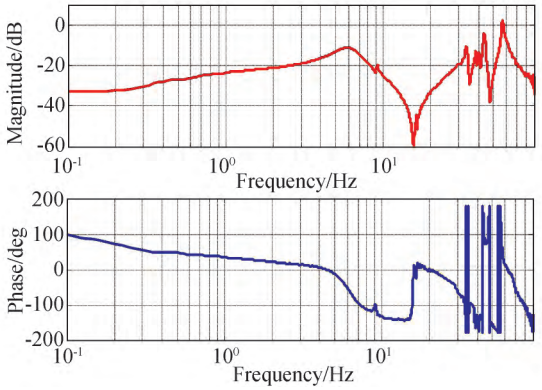

图 14　方位轴扰动频率特性曲线

Fig. 14　Disturbance frequency response of speed closed-loop for the azimuth axis

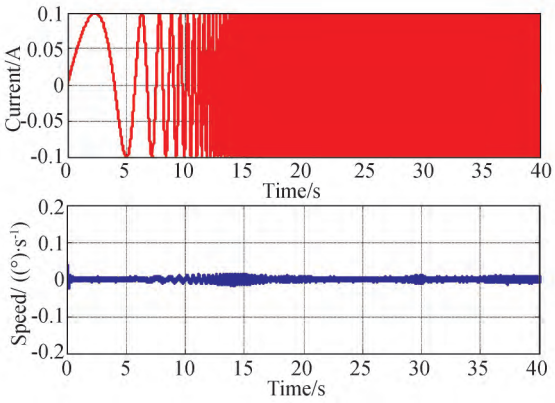

图 15　俯仰轴扰动频率测试输入输出信号曲线

Fig. 15　Disturbance signal input and response output of speed closed-loop for the elevation axis

实际望远镜在跟踪过程中受到风载等非线性扰动影响，对风载进行频谱分析，风扰主要集中在 1 Hz 以下[16]。为了分析控制系统的抗扰动性能，对扰动到速度输出的频率响应进行测试，扰动输入信号如表达式(1)，方位轴和俯仰轴的时域测试信号分别如图 13 和图 15 所示，频率特性曲线如图 14 和图 16 所示。由图可以看出：方位轴对 1 Hz 以下的扰动信号的抑制小于－20 dB，俯仰轴对 1 Hz 以下的扰动信号的抑制在－30 dB 左右，速度回路能够有效的抑制扰动输入对速度输出的影响，具有较强的抗扰动能力。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

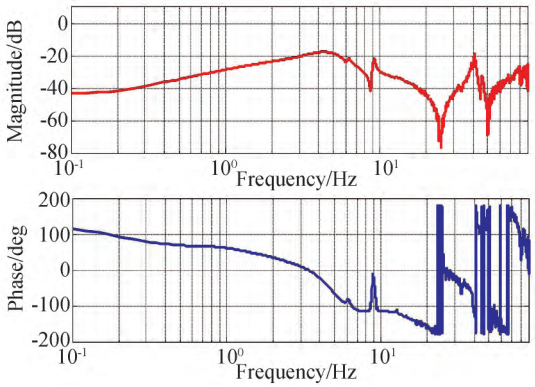

图 16　俯仰轴扰动频率特性曲线

Fig. 16　Disturbance frequency response of speed closed-loop for the elevation axis

5　跟踪架伺服系统闭环跟踪实验

2 m 级望远镜跟踪架控制系统框图如图 17 所示，俯仰轴有两台永磁相同的力矩电机驱动，方位轴由一台大功率永磁力矩电机驱动。两轴的位置反馈元件均采用绝对式圆光栅编码器，分辨率为 32 位，需要注意的是在该系统中编码器的安装位置直接反映数据的可靠性，同时影响控制系统的动态响应特性，因此 2 m 级望远镜方位轴和俯仰轴的编码器码盘安装在电机与轴承的链接处。方位轴和俯仰轴电机的电流环控制在各自的机上驱动器中实现，两轴的速度环和位置环控制器，以及结构滤波器算法在机下主控制器中实现。机下主控制器通过光纤数据通信将方位轴和俯仰轴的电流驱动指令发送到机上电机驱动器，从而实现跟踪架控制系统的远程控制。本文中跟踪架伺服系统的动态性能测试，是通过机下主控制器进行的。

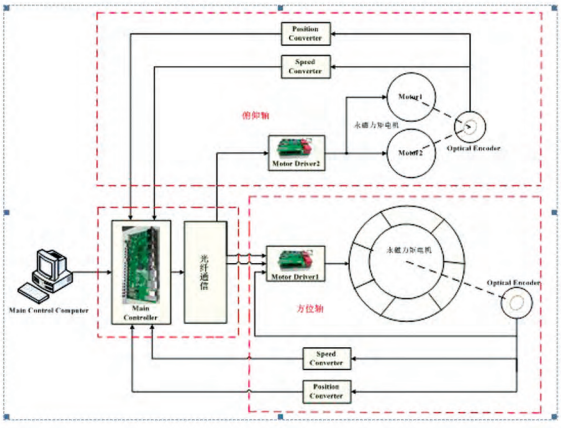

图 17　2 m 级望远镜跟踪架控制系统框图

Fig. 17　Block diagram of two meters telescope mount control system

在完成望远镜跟踪架的控制模型辨识和动态性能分析后，采用文献[14]所述的望远镜伺服系统位置环设计方法，设计位置回路校正器。最后，对 2 m 级望远镜进行了实际目标的观测实验，选取的目标运动速度随角度变化曲线如图 18 所示，由图可以看出：目标运动速度随着俯仰角度增大而增大，最大速度为 3.5 (°)/s，最大加速度为 1(°)/s^2。方位轴和俯仰轴的目标跟踪误差曲线如图 19 所示，方位轴和俯仰轴的最大跟踪误差均小于 4.5"，踪误差的 RMS 值分别为 0.378 6" 和 0.151 6"，满足望远镜跟踪架伺服控制系统跟踪性能要求。

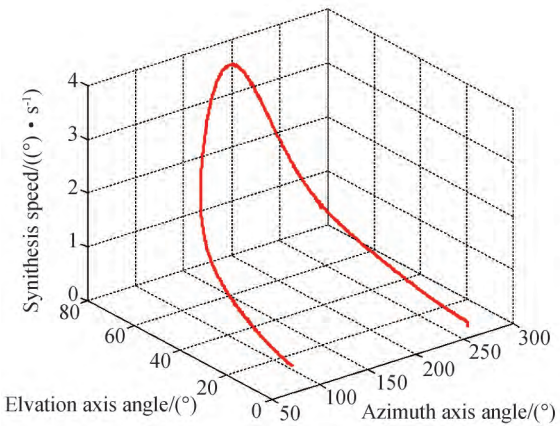

图 18　目标运动速度随方位和俯仰角度变化曲线

Fig. 18　Speed variation with azimuth and elevation angle change

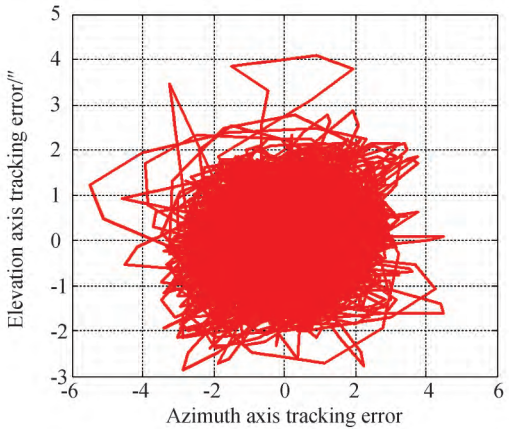

图 19　望远镜两轴跟踪目标误差曲线

Fig. 19　Azimuth and elevation tracking errors

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

6 结　论

本文根据 2 m 级望远镜跟踪架精密跟踪性能要求，对望远镜的方位轴和俯仰轴伺服控制系统进行了频率特性测试；在频率特性的基础上，采用观测器/卡尔曼滤波器算法辨识出了两轴的控制模型；基于控制模型设计了伺服系统的位置和速度控制器，分析了系统的闭环带宽和抗扰动性能；最后对望远镜跟踪架控制系统进行了实际目标观测实验，实验结果表明：当跟踪最大速度为 3.5 (°)/s，最大加速度为 1 (°)/s^2 的目标时，方位轴和俯仰轴的最大跟踪误差均小于 4.5"，跟踪误差的 RMS 值分别为 0.378 6"和 0.151 6"，满足望远镜跟踪指标要求。

参考文献：

[1] 邓永停，李洪文，王建立. 大型望远镜交流伺服控制系统综述[J]. 中国光学，2015，8(6)：895-908.
DENG Y T，LI H W，WANG J L. Overview of AC servo control system for the large telescope[J]. *Chinese Optics*，2015，8(6)：895-908.

[2] RANKA T M，GARCIA-SANZ M，SYMMES A，*et al*.. Dynamic analysis of the Green Bank Telescope structure and servo system[J]. *Journal of Astronomical Telescopes，Instruments，and Systems*，2016，2(1)：014001.

[3] RANKA T，GARCIA-SANZ M，WEADON T L，*et al*.. System identification and interval analysis of the Green Bank Telescope structure and servo system[J]. *Proceedings of SPIE*，2014，9145：914554.

[4] GAWRONSKI W. Control and pointing challenges of large antennas and telescopes[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*，2007，15(2)：276-289.

[5] RACHO C S，GAWRONSKI W K. Experimental modification and identification of the DSS-13 antenna control system model[J]. *The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report*，1993，42(115)：42-53.

[6] JUANG J N，PAPPA R S. Effect of Noise on Modal Parameters Identified by the Eigensystem Realization Algorithm[J]. *Journal of Guidance，Control，and Dynamics*，1986，9(3)：294-303.

[7] Gawronski W. *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*[M]. Springer Science & Business Media，2004.

[8] JUANG J N. *Applied System Identification*[M]. Englewood Cliffs，NJ：Prentice Hall，1994.

[9] 邓永停，李洪文，王建立，等. 2 m 望远镜主轴交流伺服控制系统设计[J]. 光学 精密工程，2017，25(1)：163-171.
DENG Y T，LI H W，WANG J L，*et al*.. Main axes AC servo control system for 2m telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*，2017，25(1)：163-171.

[10] LEW J S，KEEL L H，JUANG J N. Quantification of parametric uncertainty via an interval model[J]. *Journal of Guidance，Control，and Dynamics*，1994，17(6)：1212-1218.

[11] JUANG J -N，PAPPA R S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction[J]. *Journal of Guidance，Control，and Dynamics*，1985，8(5)：620-627.

[12] GAWRONSKI G. Design and performance of the H-infinity controller for the beam-waveguide antennas[J]. *The Interplanetary Network Progress Report*，2011，42：1-22.

[13] 李洪文，邓永停，王建立. 永磁同步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)

[14] SUáREZ M，ROSICH J，ORTEGA J，*et al*.. The GTC main axes servos and control system[J]. *Proceedings of SPIE*2008，7019：70190J.

[15] ANDERSEN T，ENMARK A. *Integrated Modeling of Telescopes*[M]. New York：Springer，2011.

[16] 邓永停，李洪文，王建立，等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用[J]. 光学 精密工程，2017，25(4)：900-909.
DENG Y T，LI H W，WANG J L，*et al*.. Application of structural filter to principal axis system of telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*，2017，25(4)：900-909.

作者简介：

邓永停(1987—)，男，山东潍坊人，助理研究员，博士，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

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net