

文章编号 1004-924X(2017)10-2636-09

基于扰动力矩观测器的大口径望远镜低速控制

邓永停*, 李洪文, 刘京, 王建立

(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: 为了增强大口径望远镜跟踪架伺服控制系统的抗扰动性能, 提高其低速跟踪精度, 提出了基于扰动力矩观测器的力矩补偿方法。该方法采用改进的加减速法控制转台的加减速时间, 使得望远镜转台微震; 通过测量电机的速度和电流响应曲线, 辨识获得望远镜转台的转动惯量。然后, 设计了望远镜转台的加速度估计器, 根据编码器位置反馈数据, 采用双积分和 PD 控制的方法, 估计出当前系统的加速度。最后, 基于转动惯量辨识和加速度估计, 设计了扰动力矩观测器, 根据电机的电流和转台的加速度, 计算出外部的扰动力矩, 并将扰动前馈补偿到电流控制器的输入端, 以修正电流输入参考值。在 2 m 望远镜控制系统中对扰动观测器的性能进行了实验验证, 结果表明, 加入扰动力矩观测器补偿后, 在跟踪斜率为 0.36 (″)/s 的位置斜坡时, 跟踪误差值(RMS)由 0.012 7″减小到 0.007 3″; 相比未加入扰动力矩观测器的补偿方法, 望远镜的低速跟踪抖动明显减小, 提高了伺服系统的低速跟踪精度, 实现了对目标的平滑、稳定跟踪。

关键词: 大口径望远镜; 低速跟踪; 转动惯量辨识; 加速度估计; 扰动力矩观测器

中图分类号: TH743; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2636

Low-speed control of large telescope based on disturbance torque observer

DENG Yong-ting*, LI Hong-wen, LIU Jing, WANG Jian-li

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

* Corresponding author, E-mail: dyt0612@163.com

Abstract: To improve the anti-disturbance performance and following tracking accuracy for the servo system in a large telescope, a torque compensation method based on a disturbance observer was proposed. With the method, the revised acceleration/deceleration control method was adopted to guide the telescope turntable oscillating in a little angle. Through measuring the velocity and current of a motor, the rotation inertia of the telescope turntable was identified. Then, an acceleration estimator was designed to estimate the low-acceleration based on encoder feedback data by using the double integration and PD control method. Finally, based on the inertia identification and acceleration estimation, a disturbance observer was designed to estimate the external torque according to the motor current and turntable acceleration. Furthermore, the estimated disturbance torque was used to compensate the current input to correct reference currents. Experiment results demonstrate that after the ob-

收稿日期: 2017-05-23; 修订日期: 2017-06-30.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 11603024)

server is added, the following error RMS is reduced from $0.0127''$ to $0.0073''$ at the sloop position of servo system to be $0.36 (')/s$. Compared with that without the disturbance torque observer, the following tracking jitter is reduced and the tracking accuracy is improved.

Key words: large telescope; low-speed tracking; inertia identification; acceleration estimation; disturbance torque observer

1 引 言

永磁同步力矩电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)以其功率密度高、动态响应快、转矩惯量比高等优点在工业伺服控制系统中得到了广泛的应用^[1-4]。但是,在望远镜这样惯量较大的控制系统中,PMSM 同其他电机驱动系统一样也存在低速跟踪抖动的问题。望远镜在跟踪目标过程中由于受轴系摩擦力、风载扰动以及电机齿槽力矩波动等扰动力矩的影响,会引起低速跟踪位置的抖动,并且随着跟踪时间的累计导致较大的跟踪误差^[5-6]。因此,如何解决外部扰动条件下 PMSM 驱动的大口径望远镜伺服控制系统的低速、高精度跟踪问题成为研究的重点。

目前,基于 PMSM 驱动的机械控制系统低速控制方法,可以分为直接补偿法和间接补偿法^[7-10]。直接补偿法是基于先进的控制策略或者扰动力矩模型,例如文献[7]采用基于跟踪误差的静态摩擦模型对两轴转台进行扰动补偿,提高了系统的动态响应和低速性能。文献[8]设计了基于模型参考自适应控制来估计机器人伺服系统中的随机摩擦,相比于传统的线性反馈控制方法,得到了满意的低速控制性能。文献[9]采用增强的微分观测器,通过编码器数据对低速进行精确估计的方法改善了系统的低速性能。间接补偿法基于扰动观测器的思想,通过观测器估计外部扰动,然后对参考输入进行修正补偿。文献[10]采用基于参数摄动的扰动观测器,在估计外部扰动的同时兼顾电机参数变化引起的控制性能下降问题,改善了伺服系统的定位精度。文献[11]、[12]均设计了基于扰动转矩观测器的永磁同步电机低速控制器,提高了电机的低速稳态精度和抗扰动能力。对于实时性较高、任务处理复杂的望远镜伺服系统来说,直接补偿法由于计算量大、设计复杂的缺点,难以得到实际应用。而文献[11]、[12]提出的扰动观测器具有设计简单、容易实现的特点,

可作为设计参考。不过,在设计观测器时需要估计系统的低速加速度,文献[11]尽管采用了伪微分操作,仍需要对位置编码器进行一阶微分,从而影响了观测器的估计精度。因此,需要设计低速情况下的加速度估计方法。

本文针对大口径望远镜的低速、高精度控制问题,首先采用改进的加减速法辨识出转台的转动惯量;然后设计加速度估计器,估计出低速情况下系统的加速度;在转动惯量辨识和加速度估计的基础上,设计扰动力矩观测器。最后,在 2 m 级望远镜控制系统中对扰动观测器的性能进行了实验验证。

2 望远镜伺服控制系统结构

2.1 望远镜伺服控制系统

由于望远镜的方位轴和俯仰轴伺服系统基本是相互独立的,本文以望远镜的方位轴为例进行设计。典型的望远镜伺服控制系统如图 1 所示,主要由位置环、速度环、电流环、逆变器、永磁同步电机以及望远镜组成。其中位置环为虚拟的光闭环,位置误差由图像跟踪器处理得到。由于大口径望远镜结构的一阶谐振频率较低,伺服系统的带宽设计受到限制。为了提高系统的带宽,增强系统的动态性能,需要在速度回路的输出端串入结构滤波器^[13]。结构滤波器的设计基于系统辨识获得的控制模型,控制模型中包含了系统的谐振频率点及其幅值,依据谐振的频率和幅值即确定结构滤波器^[14]。为了提高望远镜伺服系统对目标的跟踪精度,通常采用基于速度滞后补偿的方法来提取随动目标的速度信息,并将速度信息前馈补偿到位置环的输出端。实际系统中,如果能够获取目标或者转台的加速度信息,目标的跟踪精度会有较大的提高。因此,为了提取加速度信息,在系统中加入了基于扰动力矩补偿的观测器。

3 转动惯量辨识方法

对机械转动惯量进行辨识通常采用加减速法。加减速法是基于电机的机械运动方程(4),速

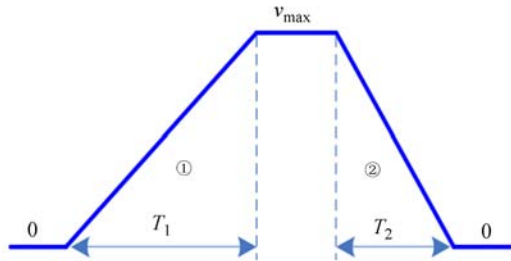


图 3 加减速法速度曲线示意图

Fig. 3 Speed curve of acceleration and deceleration

度曲线如图 3 所示,在速度上升①和下降阶段②,速度控制器输出均处于饱和阶段,加速阶段的时间稍长于减速阶段,这是因为摩擦力矩和风电阻等因素在速度上升时起阻力作用,速度下降时起辅助作用。在计算转动惯量时,可以对加速阶段和减速阶段的加速度取平均值,根据式(4)可得转台的转动惯量为:

$$J = \frac{K_T i_{qmax} (T_1 + T_2)}{2 v_{max}} \quad (5)$$

加减速法辨识转动惯量的方法简单清晰,但是存在如下缺点:(1)加减速法需要速度大范围阶跃,且在计算转动惯量时,只能取速度斜坡曲线的线性阶段;(2)加减速法要求系统速度快速、无超调,对于望远镜转台的调速性能要求比较苛刻。基于上述问题,在对望远镜的转台的转动惯量进行辨识时,为了减小机械振动对望远镜上光学负载的影响,提高转动惯量的辨识精度,采用基于改进的加减速法进行辨识,速度曲线如图 4 所示。该方法基于速度小范围摆动的思路,将速度回路参考值设定为固定周期的正负脉冲输出,通过缩短周期使得望远镜转台微震,在转台微震过程中加减速时间 T_1, T_2 保证速度回路的输出始终处于饱和状态,在速度响应峰峰值和周期确定的条件下,通过式(5)辨识获得转台的转动惯量。改进的加减速法优点如下:(1)速度响应过程中电流始终处于饱和状态,速度无超调;(2)速度曲线可以分为反向减速段①、正向加速段②、正向减速段

③、反向加速段④4个阶段,在反向减速段,摩擦力和风电阻等扰动因素起辅助作用;在正向加速段,摩擦力和风电阻等扰动因素起阻力作用;因此,在阶段①和阶段②,摩擦等非线性因素相互抵消,可以忽略其影响,在阶段③和④也是如此。

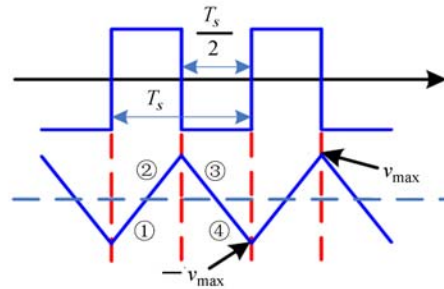


图 4 改进的加减速法速度曲线示意图

Fig. 4 Speed curve of improved acceleration and deceleration

4 加速度估计器设计

大口径望远镜对目标进行低速跟踪时,如果能够获得当前转台或者目标的加速度信息,则可以极大地提高望远镜的跟踪精度。目标加速度信息的提取方法通常对位置进行二次微分操作,但是微分操作具有放大编码器噪声的特点,会造成加速度估计不准确。本文设计了低速情况下的加速度估计方法,该方法基于以下两方面:(1)望远镜的位置信息需要准确;(2)数值积分相比于数值微分,具有更稳定和更准确的特点。图 5 所示为设计的加速度估计器,该估计器采用 PD 控制的形式,即有:

$$a_e = K_1 (\theta - \theta_e) - K_2 \frac{d\theta_e}{dt} \quad (6)$$

式中: a_e 为加速度估计值, θ 为编码器位置数据, θ_e 为位置估计值, K_1, K_2 为估计器参数。

对式(6)进行变换得到估计位置 θ_e 到编码器实际位置 θ 的传递函数:

$$\frac{\theta_e}{\theta} = \frac{K_1}{s^2 + K_2 s + K_1} = \frac{\omega_b^2}{s^2 + 2\zeta\omega_b s + \omega_b^2} \quad (7)$$

式中: ζ 为估计器的阻尼系数, ω_b 为估计器的带宽, PD 控制器的系数 K_1, K_2 决定了估计器的带宽和阻尼比。

由式(6)可知,式中不包括编码器位置数据 θ 的微分操作。由于实际的编码器数据不仅包含位

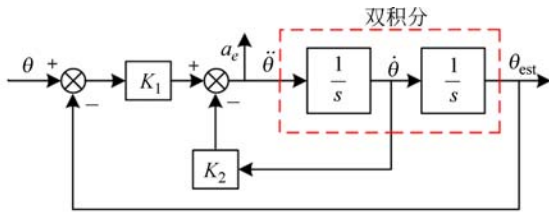


图 5 加速度估计器原理框图

Fig. 5 Block diagram of acceleration observer

置信息的低频成分,还包含高频成分,且控制系统采样获得的编码器反馈数据是编码器分辨率的整数倍,因此对 θ 进行微分操作会产生严重的噪声,导致加速度计算不准确。采用式(6)形式的加速度估计器,可以很好地避免微分操作的缺点,并且通过合理调整参数 K_1, K_2 ,可以比较准确地提取加速度信息。

在控制器中实现上述加速度估计器时,采用如下离散形式:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(k+1) \\ v_e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & T_s \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix} a_e, \quad (8)$$

式中: θ_e 为位置估计值, v_e 为速度估计值, T_s 为速度回路的采样周期。

PD 控制器的离散化形式如下:

$$a_e = K_{d1}[\theta(k) - \theta_e(k)] - K_{d2} v_e(k), \quad (9)$$

式中 K_{d1}, K_{d2} 为 PD 控制器离散化后的系数。

5 扰动力矩观测器设计

影响望远镜低速跟踪精度的主要因素有轴系的摩擦、风载和负载惯量的变化,这些扰动力矩恶化了系统的低速性能。常用的扰动力矩观测器补偿方法为扰动力矩观测器,其基本思想是通过设计观测器获得扰动力矩估计值,然后将估计值前馈补偿到电流环的输入端,以达到力矩补偿的目的。扰动力矩观测器原理如图 6 所示,由电机的动力学方程(4)可得扰动力矩观测器模型为:

$$\hat{T}_L(s) = K_T I_q(s) - J s^2 \theta(s), \quad (10)$$

式中 \hat{T}_L 为扰动力矩观测值。为了减小电流测量噪声对扰动力矩观测值的影响,通常在 \hat{T}_L 的输出端加入低通滤波器,其形式如下:

$$G_{LPF}(s) = \frac{\omega_1}{s + \omega_1}, \quad (11)$$

式中 ω_1 为低通滤波器的截止频率。

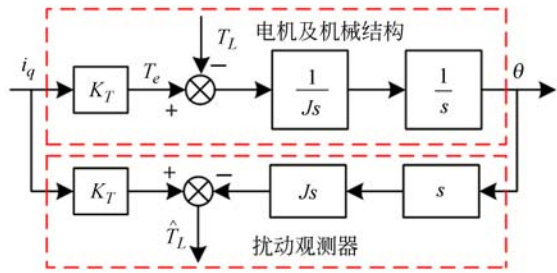


图 6 扰动力矩观测器原理图

Fig. 6 Principle diagram of disturbance torque observer

通过式(10)对扰动力矩进行观测,需要系统的机械转动惯量和转台加速度信息,因此,基于转动惯量辨识和加速度估计器的原理框图如图 7 所示。采用加速度估计器后,对力矩观测时不再需要对位置进行二次微分操作,提高了扰动力矩的观测精度,并且观测器设计方法较为简单。如图 2 所示,经过观测后的扰动力矩 \hat{T}_L 除以电机力矩系数 K_T 得到前馈补偿电流 i_{comp} , 从而对电流参考值 i_q^* 进行修正,以减小外部扰动力矩对望远镜低速跟踪性能的影响。

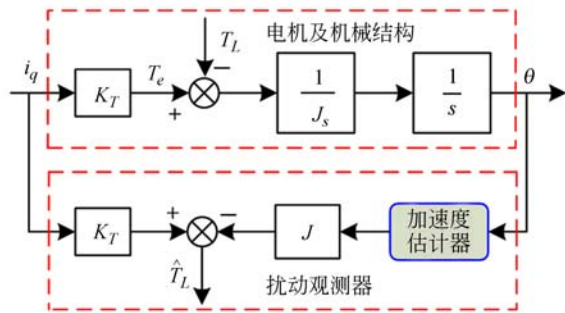


图 7 基于加速度估计的扰动力矩观测器原理图

Fig. 7 Principle diagram of disturbance torque observer based on acceleration estimation

6 实验结果分析

为了验证基于加速度设计的扰动力矩观测器对望远镜低速性能的有效性,在 2 m 级望远镜控制系统平台进行了实验验证。实验平台原理如图 8 所示,系统由望远镜转台、大功率 PMSM、电机驱动控制器和绝对式编码器等组成。其中,编码器为 32 位绝对式圆光栅编码器,分辨率为 $0.0003''$;大功率 PMSM 的参数为:力矩系数

$K_T=178 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$,相电阻 $R_s=3.2 \Omega$,同轴电感 $L=27 \text{ mH}$,额定电流 $I=25 \text{ A}$,最大驱动电压 $V=600 \text{ V}$,磁极对数 $p=69$ 。控制器采用基于高性能的 DSP 和 FPGA 的架构,其中 DSP 完成位置、速度和电流环的控制策略以及结构滤波器算法;电流环的采样频率为 15 kHz ,FPGA 并行硬件电

路完成电机电流和编码器数据的采集,以及 SVPWM 波形的产生,同时系统的故障保护功能也嵌入到 FPGA 中。驱动器采用智能功率模块 (Intelligent Power Module, IPM),该模块的最大驱动电压为 $1\ 200 \text{ V}$,最大驱动电流为 75 A ,望远镜方位轴转台实际运行时的电机驱动电压为 100 V 。

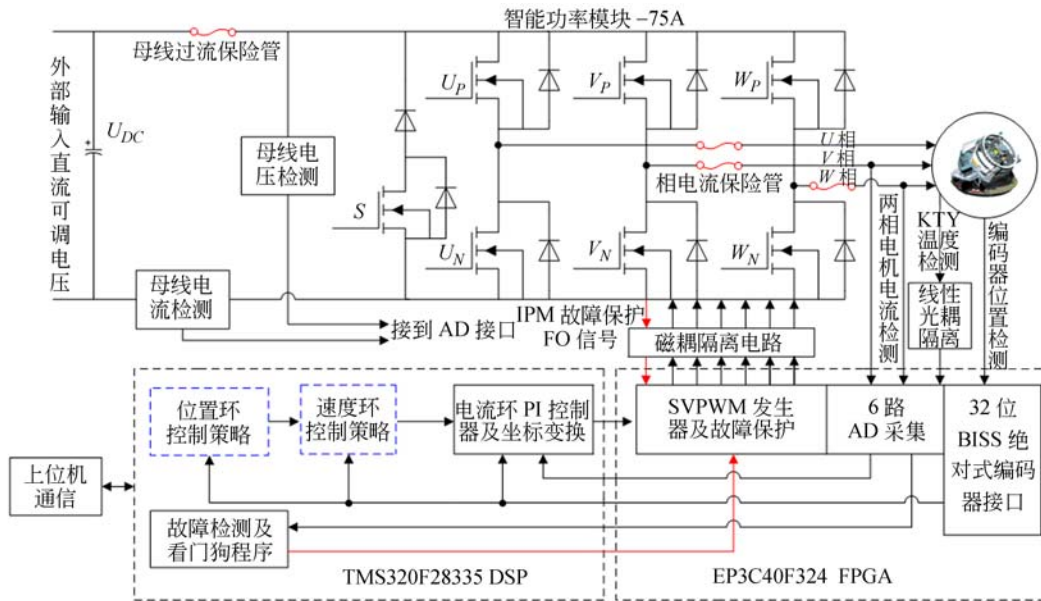


图 8 2 m 级望远镜控制系统实验平台原理框图

Fig. 8 Block diagram of experimental setup of control system for 2 m aperture telescope

首先,采用改进的加减速法对望远镜转台的方位轴转动惯量进行辨识,实验过程中设定速度参考值正负脉冲的幅值为 $\pm 5^\circ/\text{s}$,周期为 1.6 s ,电流限幅值为 $\pm 10 \text{ A}$ 。测得速度响应曲线及加速曲线如图 9 所示,由图可以看出,转动惯量辨识过程中转台微震且速度无超调,并且该过程中转台的加速度始终处于饱和状态。根据式(5)计算获得转动惯量为 $J=2 \times 178 \times 10 / (3.2 + 2.9) \times 57.3 = 33\ 440 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

在设计加速度估计器时,估计器的阻尼比系数 ζ 和带宽 ω_b 决定了它的估计精度。根据典型二阶控制系统的参数设计方法,当阻尼比 $\zeta=0.707$ 时,系统响应快速、无超调。估计器带宽 ω_b 的设计没有固定准则,需要根据实际情况设计,在该望远镜控制系统中取 $\omega_b=50 \text{ Hz}$ 。虽然加速度估计器的跟踪性能会随着估计器带宽的增加而提高,但是过大的估计器带宽反而会影响加速度的

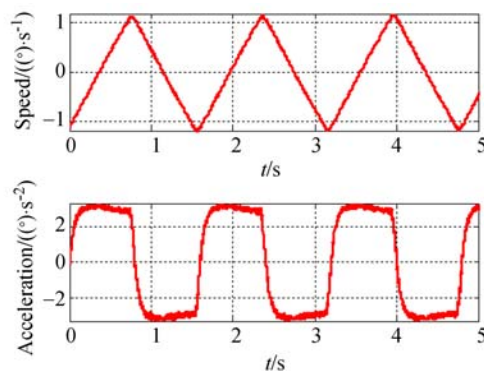


图 9 加减速法转动惯量辨识的实验波形

Fig. 9 Experimental data of inertia identification by acceleration and deceleration method

估计精度。因为实际跟踪过程中位置指令是以阶跃函数的形式给出的,较大的估计器带宽会导致估计跟踪位置指令中非连续的高频成分。因此,为了保证加速度估计器的估计精度,在加速度不大的情况下,估计器的带宽不必设置过大。

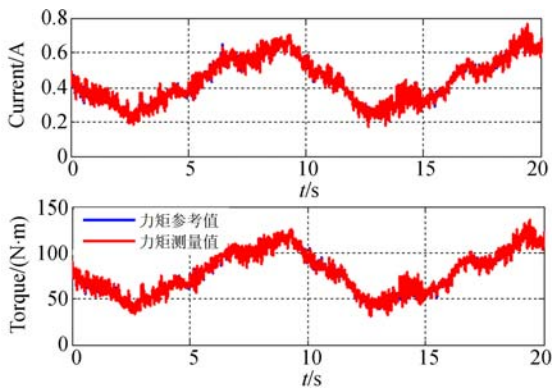


图 10 扰动力矩观测器输出的力矩曲线

Fig. 10 Torque output of disturbance torque observer

在转动惯量辨识和加速度估计的基础上,设计望远镜伺服系统的速度和位置控制器,速度控制器采用具有 Anti-Windup 策略的 PI 控制器,位置环采用超前-滞后补偿控制器。然后对扰动力矩观测器的输出进行了测量,望远镜转台在跟踪斜率为 $0.36(^{\circ})/s$ 的位置指令时,观测器的扰动力矩输出及补偿电流曲线如图 10 所示。实际调试过程中,扰动力矩输出低通滤波器的截止频率 ω_1 直接影响观测器的效果, ω_1 的选择应满足尽可能多地滤除转矩噪声的同时,减小低通滤波器造成的相位延迟,以保证系统的稳定性。

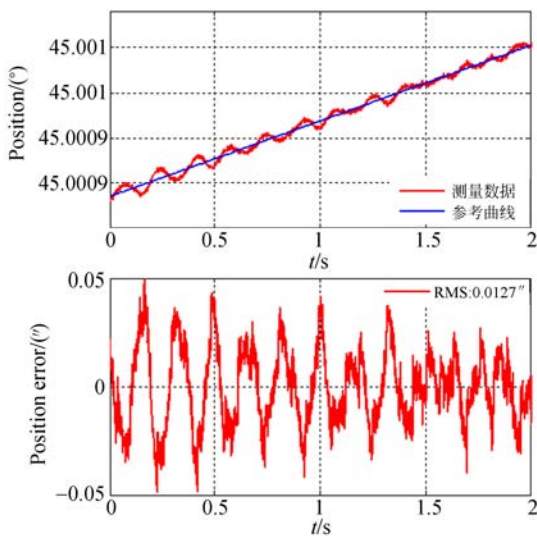


图 11 未加入扰动力矩补偿的低速跟踪曲线

Fig. 11 Position tracking curve under low-speed without disturbance torque observer

为了验证控制系统加入扰动力矩观测器后的低速控制效果,对望远镜转台跟踪斜率为 $0.36(^{\circ})/s$

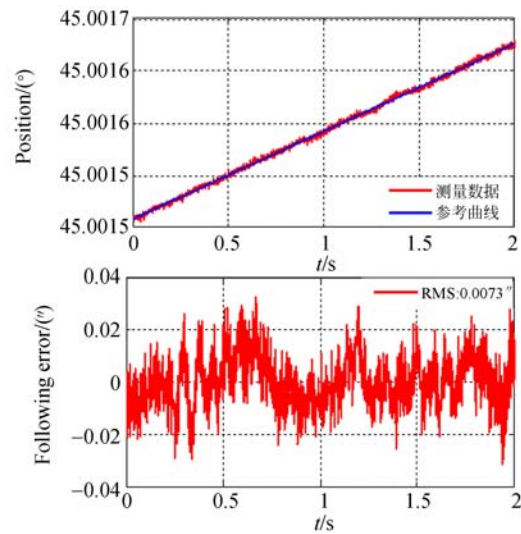


图 12 加入扰动力矩补偿的低速跟踪曲线

Fig. 12 Position tracking curve under low-speed with disturbance torque observer

的位置指令时的位置曲线进行了测试。未加入扰动力矩观测器的跟踪曲线如图 11 所示,加入扰动力矩观测补偿的跟踪曲线如图 12 所示。对比图 11 和图 12 可以看出:在未加入扰动观测器的情况下,望远镜转台低速运行时其位置出现明显的“Stick-Slip”现象,这是因为转台在动摩擦力与静摩擦力之间来回切换,系统出现非线性极限环,产生了较大的位置抖动误差;在加入扰动补偿观测器后,位置跟踪误差 RMS 值由 0.0127° 减小到 0.0073° ,位置跟踪曲线明显稳定、平滑,这是因为观测器能够实时计算出外部扰动力矩的变化,并前馈修正电流指令参考值,从而克服外部摩擦力矩和风阻力矩的变化。

7 结 论

本文在传统望远镜伺服控制系统结构的基础上,提出了基于扰动力矩观测器的低速跟踪补偿方法。扰动力矩观测器的设计需要转动惯量的辨识和系统加速度的估计,首先,采用改进的加减速法对望远镜转台的转动惯量进行了辨识;其次,采用基于双积分和 PD 控制的方法估计系统的加速度;最后,在 2 m 级望远镜控制系统中进行了控制效果验证。实验结果表明,加入扰动力矩观测

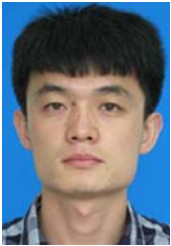
器补偿后,在跟踪 $0.36''/s$ 的位置斜坡时,位置跟踪误差 RMS 值由 $0.0127''$ 减小到 $0.0073''$,证

实了基于扰动观测器低速补偿方法的良好效果,并为大口径望远镜的低速控制提供了保障。

参考文献:

- [1] 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): 1598-1605.
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Speed control for PMSM based on predictive functional control and disturbance observer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1598-1605. (in Chinese)
- [2] 邓永停,李洪文,王建立,等. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2088-2095.
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Adaptive sliding mode control for AC servo system based on Kalman filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2088-2095. (in Chinese)
- [3] 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): 1105-1113.
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): 1105-1113. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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 2 m telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 163-171. (in Chinese)
- [6] 邓永停,李洪文,王建立,等. 基于自适应滑模控制的大型望远镜低速控制[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 713-720.
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Large telescope low speed control based on adaptive sliding mode control[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 713-720. (in Chinese)
- [7] XI X C, POO A N, HONG G S. Tracking error-based static friction compensation for a bi-axial CNC machine[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3): 480-488.
- [8] CHO H C, FADALI M S, LEE K S, *et al.*. Adaptive position and trajectory control of autonomous mobile robot systems with random friction[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2010, 4(12): 2733-2742.
- [9] SU Y X, ZHENG C H, MUELLER P C, *et al.*. A simple improved velocity estimation for low-speed regions based on position measurements only[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(5): 937-942.
- [10] CHOI S H, KO J S, KIM I D, *et al.*. Precise position control using a PMSM with a disturbance observer containing a system parameter compensator[J]. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2005, 152(6): 1573-1577.
- [11] 纪科辉,沈建新. 采用扰动转矩观测器的低速电机伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 100-106.
JI K H, SHEN J X. A low speed servo motor drive system with disturbance torque observers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(15): 100-106. (in Chinese)
- [12] HIRAIDE T, TAKAHASHI K, NANDAYAPAM, *et al.*. Acceleration control of AC servo motor considering cogging torque at low velocities for haptics[C]. *Proceedings of the 2012 IEEE Inter-*

- national Symposium on Industrial Electronics, IEEE*, 2012: 1668-1673.
- [13] SIROTA M J, THOMPSON P M, JEX H R. Azimuth and elevation servo performance of the W. M. Keck telescope[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 126-141.
- [14] 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. (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: li-hongwen1970@yahoo.com