

文章编号 2095-1531(2016)06-0713-08

# 基于自适应滑模控制的大型望远镜低速控制

邓永停\*, 李洪文, 王建立, 刘京

(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:** 为了提高永磁同步电机驱动的大型望远镜转台的低速跟踪性能, 设计了自适应滑模控制器以实时抑制系统的参数不确定性和外部扰动对系统的影响。为了优化控制器参数和缩短控制系统的调试周期, 辨识出了转台控制系统的控制模型, 同时建立了系统内部的非线性因素模型, 综合上述模型对系统进行了集成仿真。仿真和实验结果证明了所设计的自适应滑模控制器对系统参数不确定性、外部扰动和噪声具有较好的鲁棒性, 对望远镜转台的低速控制效果良好。

**关键词:** 大型望远镜; 永磁同步电机; 自适应滑模控制; 集成建模与仿真

**中图分类号:** TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20160906.0713

## Large telescope low speed control based on adaptive sliding mode control

DENG Yong-ting\*, LI Hong-wen, WANG Jian-li, LIU Jing  
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

**Abstract:** In order to improve the low speed performance of large telescope driven by permanent magnet synchronous motor (PMSM), an adaptive sliding mode controller (ASMC) is designed to suppress the uncertainty of system parameters and external disturbance. In order to optimize the parameters of the ASMC and shorten the system test period, an integrated model is built, which is based on the identified plant model and system inner nonlinear factor models. System simulation and experimental results show that the ASMC has the advantages of better robustness to the uncertainty of system parameters, external disturbance and noise, and has better performance for low speed control of large telescope.

**Key words:** large telescope; PMSM; ASMC; integrated modeling and simulation

收稿日期: 2016-06-24; 修订日期: 2016-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 11603024); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新项目 (No. 065X32CN60)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11603024); Third Phase of Innovation Project of CIOMP (No. 065X32CN60)

## 1 引言

大型望远镜是集光、机、电为一体的综合观测系统,为了实现望远镜对深空目标的精密跟踪,要求望远镜伺服系统达到角秒级的跟踪精度<sup>[1]</sup>。大型望远镜传统的驱动方式通常采用蜗轮蜗杆传动、齿轮传动和摩擦轮传动,随着望远镜口径的增大和分辨率的提高,传统的驱动方式由于存在传动刚度差、传动环节非线性和安装精度低等缺点,已经不能满足新一代大型望远镜的精度要求<sup>[2-3]</sup>。为了提高跟踪精度,目前国际上的大型望远镜采用了基于永磁同步电机的直接驱动方式,如西班牙 10.4 m 的 GTC<sup>[4]</sup>、欧南台 8.2 m 的 VLT<sup>[5]</sup>、日本 8.2 m 的 SABARU<sup>[6]</sup> 等,以及正在研制的 TMT<sup>[7]</sup> 和 JELT<sup>[8]</sup>。现在国内也有科研单位开始研究基于永磁同步电机的大型望远镜直驱方式,如中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所<sup>[9]</sup>、光电技术研究所<sup>[10]</sup>、长春光学精密机械与物理研究所<sup>[11]</sup> 等。

影响望远镜伺服控制系统低速跟踪性能的非线性因素主要有轴系摩擦、电机力矩波动、编码器量化误差以及风载等。望远镜永磁同步电机伺服控制系统通常采用 PID 控制器,但是该控制器的参数相对固定,对系统非线性扰动因素的鲁棒性较差,当望远镜控制系统对象发生变化时,系统的跟踪性能也随之下降<sup>[12]</sup>。近年来,滑模控制在永磁同步电机中的应用成为研究的热点,文献<sup>[13]</sup> 采用全局滑模控制,很好地解决了实际中给定位置不确定、切换面太多、电流冲击较大的问题。文献<sup>[14]</sup> 采用位置、速度一体化设计方案,解决了永磁同步电机中速度控制问题。文献<sup>[15]</sup> 在设计滑模控制律时采用新型趋近率,不仅提高了响应速度,而且有效降低了抖振。虽然上述方法能够减小扰动对系统的影响,增强系统的鲁棒性,但是并未考虑系统参数不确定性对系统性能的影响。

本文采用文献<sup>[16]</sup> 的设计思想,将滑模控制与自适应控制相结合,形成自适应滑模控制策略,该控制策略较好地解决了参数不确定性以及抖振

问题,具有快速的动态性能。针对实际望远镜控制系统的自适应滑模控制器的参数设计,建立了望远镜控制系统的集成仿真模型,通过仿真优化了控制器参数。仿真和实验结果表明了该控制器在望远镜控制系统中的良好动态性能和稳态性能。

## 2 永磁同步电机数学模型

为了简化分析,作如下假设:(1)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;(2)忽略定子铁心饱和,认为磁路线性,电感参数不变;(3)不计铁心涡流和磁滞损耗;(4)转子上无阻尼绕组。采用  $i_d = 0$  的矢量控制方式,PMSM 控制系统框图如图 1 所示,PMSM 在  $d,q$  轴坐标系下的数学模型:

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

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

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

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

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad (5)$$

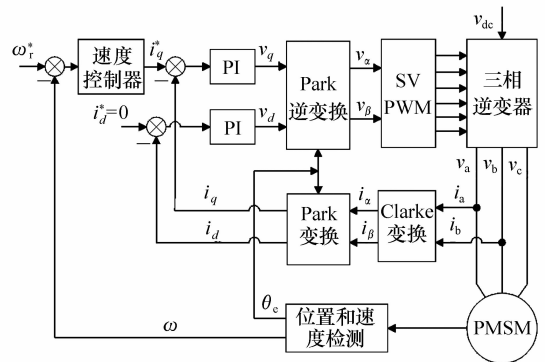


图 1 PMSM 控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of PMSM control system

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; $\theta$ 为转子机械角位置; $\omega$ 为转子机械角速度; $J$ 为转动惯量; $T_e$ 为电磁转矩; $T_1$ 为折算到电机轴上的总负载转矩; $K_t$ 为转矩系数; $\psi_a$ 为永磁体励磁磁链。

### 3 自适应滑模控制器设计

#### 3.1 标准系统的自适应滑模控制器设计

电机的机械运动方程(4)可以改写为:

$$\dot{\omega} = Ai_q - B, \quad (6)$$

式中: $A = \frac{K_t}{J}$ ;  $B = \frac{T_1}{J}$ 。

定义转速误差项为:

$$e = \omega^* - \omega, \quad (7)$$

式中, $\omega^*$ 为转子角速度参考值。

为了保证转速跟踪的精度,设计含有积分的滑模面:

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int e dt = 0, \quad (8)$$

式中, $n$ 为系统的阶次,方程(6)的阶次为1阶,因此,滑模面为:

$$S = e + \lambda \int e dt = 0. \quad (9)$$

假设系统的动态特性和模型参数已知,并且系统没有未知的外部扰动。考虑单入单出系统,采用Lyapunov直接法进行控制律的设计,定义如下Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2. \quad (10)$$

为了确保系统的稳定性,应该满足以下关系:

$$\dot{V} = s\dot{s} \leq 0. \quad (11)$$

如果假设 $\dot{V}$ 为负数:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -sKs, \quad (12)$$

式中, $K$ 为正常数,则不等式(11)满足:

$$s\dot{s} = -sKs \Rightarrow s(\dot{s} + Ks) \leq 0. \quad (13)$$

方程(9)改写为:

$$\dot{s} = \dot{e} + \lambda e = \dot{\omega}^* - \dot{\omega} + \lambda e, \quad (14)$$

将 $\dot{\omega}$ 用方程(6)代替,并代入 $\dot{s} + Ks$ 得:

$$\dot{\omega}^* - (Ai_q - B) + \lambda e + Ks = 0, \quad (15)$$

因此,控制律定义如下:

$$i_q = A^{-1}(\dot{\omega}^* + B + \lambda e + Ks), \quad (16)$$

标准的滑模控制律为:

$$i_q = A^{-1}[\dot{\omega}^* + B + \lambda e + K\text{sgn}(s)]. \quad (17)$$

由于符号函数的引入,会引起滑模控制的抖振问题。为了消除抖振,采用边界层的方法设计如下控制律:

$$i_q = A^{-1}[\dot{\omega}^* + B + \lambda e + K\text{sat}(s/\varepsilon)]. \quad (18)$$

#### 3.2 考虑扰动时的自适应滑模控制器设计

上述控制律适用于模型参数固定并且没有外部扰动的情况下,当存在模型参数不确定性和外部扰动 $d(t)$ 时,参数 $A$ 和 $B$ 可改写为:

$$A = \hat{A} + \Delta A, B = \hat{B} + \Delta B, \quad (19)$$

方程(6)可改写为:

$$\dot{\omega} = (\hat{A} + \Delta A)i_q - (\hat{B} + \Delta B) + d(t). \quad (20)$$

所有的扰动项可合并为

$$\tilde{f} = \Delta Ai_q - \Delta B + d(t). \quad (21)$$

方程(20)表达为:

$$\dot{\omega} = \hat{A}i_q - \hat{B} + \tilde{f}. \quad (22)$$

控制律(18)改写为:

$$i_q = \hat{A}^{-1}(\dot{\omega}^* + \hat{B} + \lambda e + Ks - \tilde{f}). \quad (23)$$

通常情况下 $\tilde{f}$ 未知,采用扰动在线估计值 $\tilde{f}_{\text{est}}$ 代替 $\tilde{f}$ ,控制律式(23)改写为:

$$i_q = \hat{A}^{-1}(\dot{\omega}^* + \hat{B} + \lambda e + Ks - \tilde{f}_{\text{est}}). \quad (24)$$

#### 3.3 系统的稳定性和鲁棒性分析

为了证明控制律式(24)的稳定性,推导出未知扰动 $\tilde{f}$ 的估计值,构造如下的Lyapunov函数:

$$V = \frac{1}{2}(s^2 + E^2/\Gamma), \quad (25)$$

式中:  $\Gamma$  为正常数;  $E = \tilde{f}_{\text{est}} - \tilde{f}$  为扰动估计误差值。

对方程(25)求导可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} + EE/\Gamma. \quad (26)$$

根据方程(14)、(22)和(24)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & s(-Ks - E) + \Gamma^{-1}EE\dot{=} \\ & -sKs - sE + \Gamma^{-1} \times E(\dot{\tilde{f}}_{\text{est}} - \dot{\tilde{f}}). \end{aligned} \quad (27)$$

选择如下控制律:

$$\dot{\tilde{f}}_{\text{est}} = \Gamma s. \quad (28)$$

将式(28)代入式(27)可得:

$$\dot{V} = -sKs - \Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}}. \quad (29)$$

因为  $\Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}}$  为未知项, 当  $\Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}} \geq 0$  时,  $\dot{V} \leq 0$ ; 当  $\Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}} < 0$  时, 方程(29)可改写为:

$$\dot{V} = -sKs - \Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}} \leq -sKs + |\Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}}|. \quad (30)$$

$$\dot{V} = -sKs - \Gamma^{-1}E\dot{\tilde{f}} \leq -K|s|^2 + |E\dot{\tilde{f}}|/\Gamma. \quad (31)$$

$$\dot{V} \leq -K|s|^2 + |E\dot{\tilde{f}}|/\Gamma. \quad (32)$$

对于方程(31), 如果  $\dot{V} < 0$ , 假设:

$$K|s|^2 > |E\dot{\tilde{f}}|/\Gamma. \quad (33)$$

等效于:

$$|s| > \left(\frac{|E\dot{\tilde{f}}|}{K\Gamma}\right)^{1/2} = \delta, \quad (34)$$

式中,  $\delta$  为一个非常小的正数。方程(34)说明对于所有的  $|s| > \delta \Rightarrow \dot{V} < 0$  意味着  $V$  是有界的, 此时滑模轨迹将会接近以  $\delta$  为边界层的滑模面  $S(t) = 0$  滑动; 通过合理的选择控制器参数  $K$  和  $\Gamma$  可以使系统进入滑模邻域内。考虑参数不确定性和外部扰动的自适应滑模控制律为:

$$\begin{cases} \dot{i}_q = \hat{A}^{-1}(\dot{\omega}^* + \hat{B} + \lambda e + Ks - \tilde{f}_{\text{est}}) \\ \dot{\tilde{f}}_{\text{est}} = \Gamma s \end{cases}. \quad (35)$$

在望远镜低速控制时, 控制器增益  $K$  在保证

系统具有较大带宽和鲁棒性的同时, 还应确保系统的稳定性; 自适应参数  $\Gamma$  应在  $\delta$  边界层范围内尽可能减小系统的抖振, 提高低速跟踪精度。

## 4 大型望远镜转台控制系统的仿真研究

### 4.1 大型望远镜转台的控制模型

上述自适应滑模控制器设计是建立在纯刚体模型的基础上的, 为了更好地反映控制系统的动态性能, 需要对系统的控制模型进行辨识。由于在频率响应的低频段, 纯刚体模型可以很好的逼近实际系统的频率特性, 因此, 设计的自适应控制律参数也适用于实际辨识的系统控制模型。文献[17]采用正弦扫描法进行系统控制模型的辨识, 该方法在采样点数足够多的情况下可以取得较高的辨识精度。但是, 该方法辨识周期较长, 并且辨识过程中大幅度、高频振动可能对望远镜的光学系统造成破坏。本文采用文献[18]提出的特征实现算法(ERA)对控制系统进行辨识, 在分析系统频率响应函数(FRF)的基础上获得系统的控制模型。采用 ERA 算法辨识得到的望远镜转台频率特性曲线如图2所示。

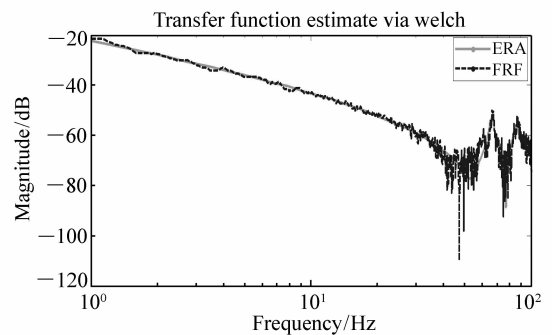


图2 采用 ERA 辨识的望远镜转台传递函数幅值曲线

Fig.2 Magnitude curves of the telescope transfer function identified through ERA

经辨识得到控制模型的一阶谐振频率为 43.8 Hz, 系统的状态矩阵  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为:

$$A = \begin{bmatrix} 0.996\ 8 & -0.060\ 1 & 0.000\ 6 & -0.004\ 8 & 0.004\ 3 & 0.004\ 8 \\ 0.066\ 1 & 0.576\ 4 & 0.205\ 2 & -0.081\ 9 & 0.270\ 3 & 0.075\ 9 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.002\ 5 & 0.230\ 5 & -0.604\ 8 & -0.719\ 5 & 0.189\ 3 & 0.064\ 3 \\ -0.000\ 4 & 0.075\ 8 & 0.557\ 3 & -0.559\ 6 & -0.595\ 0 & 0.141\ 3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.011\ 8 & 0.125\ 3 & -0.453\ 9 & 0.279\ 8 & -0.633\ 9 & 0.552\ 9 \\ 0.055\ 1 & -0.135\ 1 & -0.211\ 1 & -0.114\ 1 & -0.342\ 5 & -0.764\ 6 \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$B = [0.000\ 1 \quad -0.001\ 9 \quad 0.000\ 4 \quad 0.000\ 1 \quad -0.000\ 4 \quad -0.000\ 6]^T, \quad (37)$$

$$C = [5.705\ 5 \quad 0.184\ 0 \quad -0.076\ 7 \quad 0.086\ 1 \quad -0.145\ 5 \quad -0.060\ 5], \quad (38)$$

$$D = [0]. \quad (39)$$

在辨识得到系统矩阵和一阶谐振频率后,以此为理论依据进行系统的控制算法仿真。在进行控制系统设计时,系统的带宽设计通常以一阶谐振频率为依据,速度环的带宽最大不超过一阶谐振频率的60%,位置环的带宽为一阶谐振频率的20%~30%。

### 4.2 大型望远镜转台非线性因素建模

影响大型望远镜低速转动的非线性因素主要有轴系摩擦力矩、电机的力矩波动和编码器的量化误差。望远镜轴系的摩擦力矩模型采用静摩擦+库伦摩擦模型[19],模型表达式为:

$$F = \begin{cases} -F_c \text{sig}(v), & \text{if } |v| > v_t \\ -\min(|F_d|, F_s) \text{sig}(F_d), & \text{if } |v| \leq v_t \end{cases}, \quad (40)$$

式中: $F_c$ 为库伦摩擦力矩; $F_s$ 为最大静摩擦力矩; $F_d$ 为外部应用力矩; $v_t$ 为速度阈值。

永磁同步电机的力矩波动严重影响望远镜转台的低速跟踪性能,电机的力矩波动主要表现为齿槽力矩波动,采用文献[20]提出的虚位移法求得齿槽力矩:

$$T_c = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^{2\pi} F(\alpha, \theta) dG(\alpha), \quad (41)$$

式中: $F(\alpha, \theta)$ 为永磁体磁动势; $\theta$ 为磁极中心线的角位置; $G(\alpha)$ 为气隙磁导。

在永磁同步电机理想的情况下,可以认为齿槽力矩为转子位置角的余弦函数,表达式为:

$$T_c = T_{cmax} \cos(k\theta), \quad (42)$$

式中: $T_{cmax}$ 为力矩波动的最大幅值, $k$ 与电机的磁极对数和槽数相关。

编码器的量化误差及噪声也会对望远镜的低速性能产生影响,建立编码器数学模型:

$$R_{en} = h_{enc}(s)R + n_{enc}, \quad (43)$$

式中: $R_{en}$ 为实际的角位置; $h_{enc}(s) = e^{-sT_{enc}} \approx \frac{1}{\tau_{enc}s + 1}$ , $\tau_{enc}$ 为编码器采样周期;高斯白噪声 $n_{enc} = q_{enc}^2/12$ , $q_{enc}$ 为编码器的最小分辨率。

### 4.3 大型望远镜转台控制系统仿真结果

建立基于控制模型的系统仿真框图,如图3所示,其中控制模型部分包含了转台的非线性因素模型。通过仿真程序对控制器算法进行设计和优化,从而缩短望远镜控制系统的设计和调试周期。

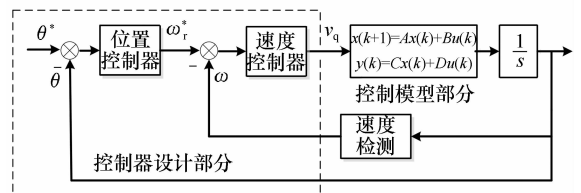


图3 望远镜控制系统仿真模型框图

Fig. 3 Simulation model block diagram of the control system of telescope

永磁同步电机的参数和非线性因素模型的参数如表1所示。

表1 控制系统仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of control system

| 参数名称   | 参数值   |
|--|-------|
| 库伦摩擦力矩 $F_c/(N \cdot m)$                       | 34    |
| 最大静摩擦力矩 $F_s/(N \cdot m)$                      | 40    |
| 速度阈值 $v_r/(\text{arcsec} \cdot \text{s}^{-1})$ | 5     |
| 力矩波动最大幅值 $(N \cdot m)$                         | 7.5   |
| 系数 $k$   | 65    |
| 编码器采样周期 $t_{\text{enc}}/\text{Hz}$             | 1 000 |
| 编码器分辨率 $q_{\text{enc}}/\text{marcsec}$         | 0.3   |



图5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

仿真中通过对比 PI 速度控制器来说明自适应滑模控制对望远镜转台的低速控制效果,速度为  $10 \text{ arcsec/s}$  时的阶跃响应曲线如图 4 所示。由仿真结果可以看出,采用自适应滑模控制相比于传统的 PI 控制能够使系统更快地达到给定转速,并且系统的稳态误差较小。

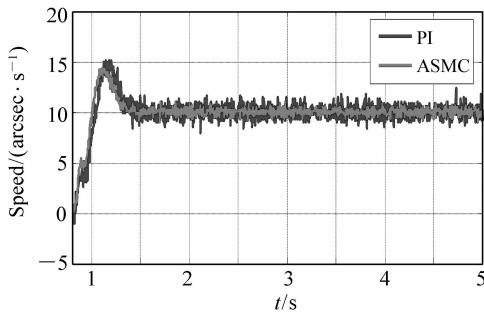


图4 10 arcsec/s 时的速度阶跃响应曲线

Fig. 4 Speed step response curves at 10 arcsec/s

## 5 大型望远镜转台控制系统的实验研究

为了验证所设计控制器的有效性,搭建了如图 5 所示的实验系统平台,伺服控制器主控芯片为 DSP28335,设置电流环的采样频率为  $15 \text{ kHz}$ ,速度环采样频率为  $1 \text{ kHz}$ ,位置传感器采用 RENISHAW 公司 32 位圆光栅绝对式电编码器(分辨率为  $0.3 \text{ marcsec}$ )。永磁同步电机的具体参数为:  $L_d = L_q = 36.5 \text{ mH}$ ,  $R = 2.44 \text{ } \Omega$ ,  $K_t = 142.2 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ ,  $p = 65$ ; 负载转动惯量:  $J = 1 \text{ 600 kg} \cdot \text{m}^2$ 。

实际控制中由于受电机电流和逆变器驱动电

压的限制,当速度阶跃给定较大时,控制器会出现积分饱和而导致 windup 现象。为了解决 windup 现象导致的系统超调量大和调节时间长的问题,达到较好的 PI 控制效果,速度控制采用基于具有 Anti-windup 策略的速度 PI 控制器,位置控制均采用基于 LQR 优化理论的 PI 控制器,以提高系统的控制效果。

在实验过程中,保持位置控制器不变,只进行速度环控制器的性能比较,传统 PI 控制器的速度

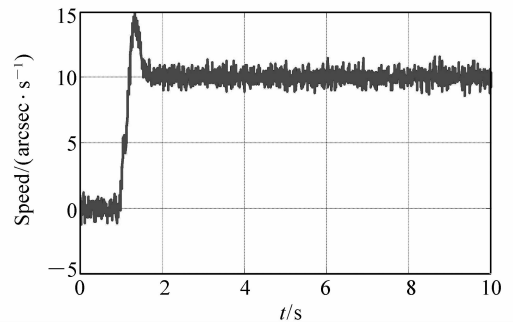


图6 采用 PI 控制器时的速度阶跃曲线

Fig. 6 Speed step response curve under PI controller

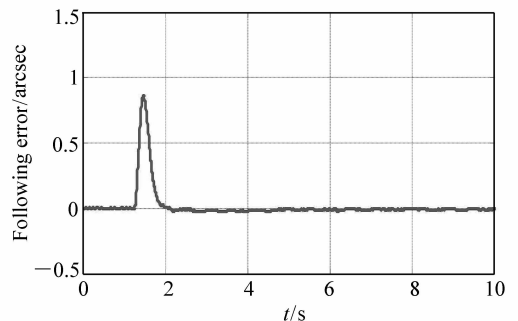


图7 采用 PI 控制器时的位置跟踪误差

Fig. 7 Position following error under PI controller

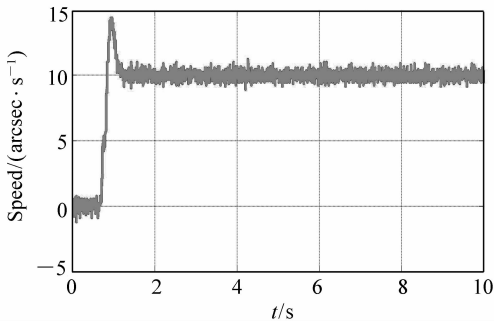


图8 采用自适应滑模控制器时的速度阶跃曲线

Fig. 8 Speed step response curve under ASMC

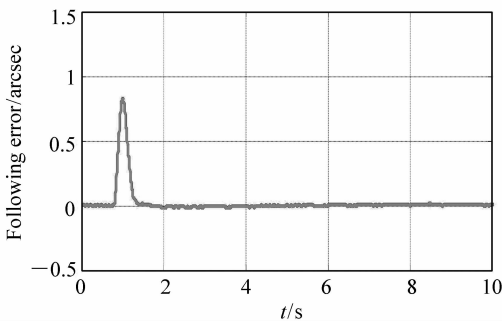


图9 采用自适应滑模控制器时的位置跟踪误差

Fig. 9 Position following error under ASMC

控制效果如图6所示;为了更好地评价速度的跟踪效果,同时记录编码器位置数据,计算得到的位置跟踪误差如图7所示。采用PI速度控制器时,速度调节时间为0.7s,稳态速度的RMS值为0.4452 arcsec/s,稳态位置跟踪误差的RMS值为

0.0789 arcsec。自适应滑模控制器的速度控制效果如图8所示,位置跟踪误差如图9所示;采用自适应滑模控制时,速度调节时间为0.5s,稳态速度的RMS值为0.3293 arcsec/s,稳态位置跟踪误差的RMS值为0.072 arcsec。

通过实验结果可以看出,与传统PI控制器相比较,本文所设计的自适应滑模控制器能够获得较快的响应给定转速,较低的稳态误差,可有效地抑制参数不确定性和外部扰动等非线性扰动因素对系统的影响,提高望远镜控制系统的鲁棒性和低速跟踪精度。

## 6 结 论

为了实现基于永磁同步电机的大型望远镜的低速高精度控制,本文以大型望远镜转台为控制对象,搭建了一个完整的闭环控制系统。

(1)在永磁同步电机数学模型的基础上,设计了自适应滑模控制器,实时抑制系统参数的不确定性和系统的外部扰动。

(2)采用特征实现算法辨识出了系统的控制模型,同时建立了系统中存在的非线性因素模型,为实际控制系统的集成仿真提供了准确模型。

(3)通过实验表明,所设计的自适应滑模控制器具有良好低速控制效果,验证了文中所提出的控制算法和集成仿真的正确性和有效性。

## 参考文献:

- [1] 胡伟,王莉,张振超,等.基于DSP的大口径天文望远镜伺服控制的设计与实现[J].微电机,2010,43(8):38-40.  
HU W, WANG L, ZHANG ZH CH. Design and implementation of servo control system of the large aperture telescope based on DSP[J]. *Micro-Motor*, 2010, 43(8):38-40. (in Chinese)
- [2] 常九健.基于弧形电机拼接的大型望远镜驱动技术研究[D].成都: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, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [3] 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,2007,25(4):364-374.  
WANG G M. Review of drive style for astronomical optical telescope[J]. *Progress Astronomy*, 2007, 25(4):364-374. (in Chinese)
- [4] SVAREZ M. The GTC main axes servos and control system[C]. New York:Springer,2008:1-12.
- [5] ERM T, GVTIERREZ P. Integration and tuning of the VLT drive systems[C]. New York:Springer,2003:490-499.
- [6] TAKESHI N, WATARA T, TOSHIYUKI S, et al.. Telescope Control Systems III. Hilton L, ed. Bellingham[J]. *SPIE*, 1998:361-366.
- [7] GILARDI G, SZETO K, HUARD S, et al.. Finite element analysis of the cogging force in the linear synchronous motor array

- for the Thirty Meter Telescope[J]. *Mechatronics*,2011,21(3):116-124.
- [8] MASANOR I,JELT W. Ground-based Telescopes, Oschmann J M Jr, ed. Bellingham[J]. *SPIE*,2004:417-428.
- [9] REN CH ZH,CHAO ZH ZH. One arc PMSM for telescope tracking system[J]. *SPIE*,2008,7012:701230-8.
- [10] CHANG J J,MA W L,HUANG J L. Design and optimization of arc permanent magnet synchronous motor used on large telescope[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,2012,48(5):1943-1947.
- [11] 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)
- [12] THOMPSON P M,MACMYNOWSKI D G,SIROTA M J. Analysis of the TMT mount control system[J]. *SPIE*,2008,7012:701260-7.
- [13] 胡强晖,胡勤丰. 全局滑模控制在永磁同步电机位置伺服中的应用[J]. *中国电机工程学报*,2011,31(18):61-66.  
HU Q H,HU Q F. Global sliding mode control for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. *Proceedings of the CSEE*,2011,31(18):61-66. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 张晓光,孙力,赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. *中国电机工程学报*,2012,32(3):111-116.  
ZHANG X G,SUN L,ZHAO K. Sliding mode control of PMSM based on a novel load torque sliding mode observer[J]. *Proceedings of the CSEE*,2012,32(3):111-116. (in Chinese)
- [16] 侯立民,张化光,刘秀翀. 带 ESO 的自适应滑模调节的 SPMSM 自抗扰-无源控制[J]. *控制与决策*,2010,25(11):1652-1656.  
HOU L M,ZHANG H G,LIU Z CH. Adaptive sliding mode controller based on extended state observer of SPMSM with active disturbance rejection-passivity-based controller[J]. *Control and Decision*,2010,25(11):1652-1656. (in Chinese)
- [17] 王帅,陈涛,李洪文,等. 光电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):79-83.  
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)
- [18] JUANG J N,PHAN M,HORTA L G,*et al.*. Identification of observer/kalman filter markov parameters:theory and experiments[J]. *J. Guidance,Control and Dynamics*,1993,16(2):320-329.
- [19] 刘丽兰,刘宏昭,吴子英,等. 机械系统中摩擦模型的研究进展[J]. *力学进展*,2008,38(2):201-212.  
LIU L L,LIU H ZH,WU Z Y,*et al.*. An overview of friction models in mechanical systems[J]. *Advances in Mechanics*,2008,38(2):201-212. (in Chinese)
- [20] 刘承军,张辉,邹继斌. 永磁同步电机齿槽定位力矩补偿[J]. *电工技术学报*,2007,22(7):131-135.  
LIU CH J,ZHANG H,ZOU J B. Compensation for the cogging torque of permanent magnet synchronous motors[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2007,22(7):131-135. (in Chinese)

#### 作者简介:



邓永停(1987—),男,山东潍坊人,博士,助理研究员,主要从事大型望远镜的精密跟踪控制方面的研究。E-mail:dyt0612@163.com