

文章编号 2097-1842(2025)01-0105-09

## 基于双观测器的拼接弧线电机改进积分滑模控制策略

曹兆锦<sup>1,2,3</sup>, 宋晓莉<sup>1,2\*</sup>, 范壬秋<sup>1,2,3</sup>, 张超<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

2. 中国科学院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:** 拼接弧线电机凭借其高转矩比和低速稳定运行等优点, 为大口径天文望远镜观测提供了高性能驱动技术支持。电机运行过程中存在的如参数畸变、谐波等其他内外部干扰, 都对提高电机性能提出了挑战。因此, 本文提出一种基于新型趋近律的积分滑模控制器, 同时结合扩张状态观测器与负载观测器的混合控制策略, 旨在优化传统滑模控制并增强系统的抗干扰能力。传统趋近律参数较为繁杂且不能很好地抑制抖振, 新型的趋近律简化了参数, 有效克服了系统抖振。其次, 采用扩张状态观测器对反馈转速进行估计, 然后结合 q 轴电流信息和估计出的转速数据作为负载转矩观测器输入, 进一步提高了负载观测性能, 并将负载观测值转换为电流进行前馈补偿, 用以提高电机的抗干扰性能。仿真和实验结果表明: 所提出的双观测器方法能够有效观测电机的转速和负载值, 显著增强了电机的抗负载扰动能力; 同时, 采用新型滑模速度控制器降低了电机转速超调量, 并在一定程度上抑制了滑模抖振, 为弧线电机在大口径天文望远镜的高精度观测应用提供了理论和实验支持。

**关键词:** 大型天文望远镜; 拼接弧线永磁同步电机; 双观测器; 改进滑模控制

中图分类号: TH751 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0085 CSTR: 32171.14.CO.2024-0085

## Improved integral sliding mode control strategy for the segmented arc permanent magnet synchronous motor based on dual observer

CAO Zhao-jin<sup>1,2,3</sup>, SONG Xiao-li<sup>1,2\*</sup>, FAN Ren-Qiu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Chao<sup>1,2,3</sup>

(1. *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences,*

*Nanjing 210042, China;*

2. *CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: xlsong@niaot.ac.cn*

**Abstract:** With its high torque ratio and stable low-speed operation, the segmented arc permanent magnet synchronous motor (SAPMSM) provides high-performance drive technology support for large-aperture astronomical telescope observations. Improving the motor's performance is challenging due to various internal

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-06-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 12373096, No. 11673045)

Supported by The National Natural Science Foundation of China (No. 12373096, No. 11673045)

and external interferences during its operation, such as parameter distortion, harmonics, etc. To this end, this paper proposes an integral sliding mode controller based on a new reaching law and a hybrid control strategy that combines an expanded state observer and a load observer, aiming to optimize the traditional sliding mode control and enhance the system's anti-interference ability. The traditional reaching law has complicated parameters and cannot suppress chattering well. The new reaching law simplifies the parameters and effectively overcomes the system chattering. Second, an expanded state observer is used to estimate the feedback speed. Then, the q-axis current information and the estimated speed data are combined as the input of the load torque observer. This further improves the load observation performance and converts the load observation value into current for pre-processing. Feedback compensation is used to improve the motor's anti-interference performance. Simulation and experimental results show that the proposed dual observer method can effectively observe the motor's speed and load, significantly enhancing the motor's ability to resist load disturbances. At the same time, the new sliding mode speed controller reduces the motor speed overshoot and suppresses the buffeting of the sliding mode to a certain extent, providing theoretical and experimental support for arc motors in high-precision observation applications of large-aperture astronomical telescopes.

**Key words:** large-aperture astronomical telescope; segmented arc permanent magnet synchronous motor (SAPMSM); dual observer; improved sliding mode control

## 1 引言

在过去很长的时间内,大型天文望远镜常采用摩擦驱动、齿轮传动等方式驱动望远镜机架。拼接电机凭借其转动惯量大、功率密度高、转矩比高等特点,在天文望远镜的高精密定位和方位轴直接驱动中显示出独特优势。直接驱动控制技术是高精度望远镜超低速运转的核心技术之一,其直接影响望远镜的观测精度及运行稳定性。南京天文光学技术研究所通过研究国外大型望远镜中拼接电机的特点,提出一种拼接弧线永磁同步电机(segmented arc permanent magnet synchronous motor, SAPMSM)。这是一种复杂的强耦合系统,因此选择合适的控制策略对提高弧线电机的控制性能至关重要<sup>[1-2]</sup>。

传统的比例-积分(proportional integral, PI)控制策略虽然实现简单,但其参数调节依赖经验且缺乏自适应机制,故不能很好地应对复杂情况下的电机控制。鉴于传统控制策略的一些固有缺陷,许多先进的现代控制理论已被成功应用于普通的永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的控制实验中<sup>[3]</sup>。滑模变结构控制是一种实现简单、响应速度快、抗干扰能力

强且鲁棒性非常优越的控制策略,在现阶段,针对滑模控制的抖振抑制是控制领域的研究热点。文献[4]提出了一种自适应超螺旋非奇异快速终端滑模控制策略,通过自适应律来实时调整开关增益,削弱了滑模控制器的抖振并提升了直线电机的抗干扰性。文献[5]在磁悬浮直线电机线性化模型的基础上,采用基于变速趋近律设计的滑模控制器,显著提高了电机的动静态特性。文献[6]为克服直流电机的参数变化和未知干扰,构造了新型的积分型三阶滑模控制器,并采用含自适应增益系数的趋近律,从而使跟踪误差在有限时间内收敛为零。但是从现有研究来看,上述滑模趋近律具有参数、理论证明及硬件实现均较复杂的缺点。这使得将滑模理论实际应用到电机控制系统中具有一定的挑战,考虑到实际工程中效果和实现方法需要两者兼顾,故需在确保其抗干扰优势的前提下,对滑模控制进行简化设计并减少可调参数。

考虑到电机实际运行时遇到的扰动以负载扰动为主,故可采用扭矩传感器直接观测负载,但是其精度易受外界干扰。为提高伺服系统性能,通常采用的方式是设计负载观测器对负载值进行估计,然后将观测值进行前馈补偿。常见的负载观测器有滑模观测器<sup>[7]</sup>、Kalman 滤波负载观测器<sup>[8]</sup>、

全阶及降阶龙贝格观测器<sup>[9]</sup>等。文献[10-11]针对低速大转矩电机伺服控制系统存在的超调量大等问题,采用负载观测器对系统进行前馈补偿,用以抑制大范围的负载变化对系统性能的影响。文献[12]针对系统精度低、稳定性差等问题,提出了一种Kalman滤波负载观测器,并结合模型预测算法来提高控制系统的精度。然而,部分观测器算法需要进行大量调参,不利于工程实验,且实际系统的输出不一定能达到期望目标,故需要对系统不断地进行优化调整。一些观测器,如位置观测器、扭矩观测器等,能够直接对系统内部进行观测,故可以有效减少硬件成本、提高观测精度。

针对传统滑模控制SAPMSM时超调量大、抗干扰能力不佳的问题,本文对传统滑模趋近律做出改进,并结合负载观测器进行补偿,通过设计的混合控制算法,有效提高了电机的鲁棒性。由于实际转速的输出精度直接影响负载观测器的观测值,故采用扩张状态观测器(extend state observer, ESO)预测电机转速,然后将得到的转速值给予负载观测器,从而提高观测器的精度。最后通过仿真和实验,结果证明本文所提控制方案能够有效降低转速超调量,并提高了伺服系统的抗干扰能力。

## 2 SAPMSM 数学模型

假设SAPMSM在理想状态下,基于磁场定向控制理论,得到在旋转坐标系下的电压方程<sup>[13-14]</sup>:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - L_q i_q \omega_e + L_q \frac{di_q}{dt} \\ u_q = R_s i_q + (L_d i_d + \psi_f) \omega_e + L_d \frac{di_d}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

SAPMSM的电磁转矩方程和机械运动方程<sup>[15]</sup>为:

$$\begin{cases} T_e = 1.5p(\psi_f + (L_d - L_q)i_d)i_q \\ \dot{\omega}_m = \frac{1}{J}(T_e - T_L - B\omega_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$ 和 $i_d$ 、 $i_q$ 分别为d-q轴的电压和电流,  $R_s$ 为定子电阻,  $L_d$ 、 $L_q$ 为d-q轴电感且值相等,  $\psi_f$ 为磁链,  $\omega_e = p\omega_m$ 为电角速度,  $p$ 为极对数,  $\omega_m$ 为机械角速度,  $T_L$ 为负载转矩,  $T_e$ 为电磁转矩,  $J$ 为转动惯量,  $B$ 为摩擦阻尼系数。

## 3 双观测器设计

### 3.1 速度环扩展状态观测器

ESO的应用广泛,常被用于自抗扰控制器的设计。ESO设计方法简单,可以对系统内部状态进行估计。然而由于电机的输出波动较大,为更精确地优化系统,本文将其用于电机转速的估计。根据式(2)所描述的电机运动方程,考虑到电机运行时系统参数变化等因素,将式(2)改写为:

$$\dot{\omega}_m = \left( \frac{1.5p\psi_f}{J} + \frac{1.5p\Delta\psi_f}{\Delta J} \right) i_q - \left( \frac{1}{J} + \frac{1}{\Delta J} \right) T_L - \left( \frac{B}{J} + \frac{\Delta B}{J} \right) \omega_m \quad (3)$$

式中:  $\Delta\psi_f$ 为磁链参数变化干扰量,  $\Delta J$ 为电机转动惯量的变化量,  $\Delta B$ 为摩擦阻尼系数的变化量。

进一步地,将式(3)简写为:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = \alpha i_q + W \\ \alpha = \frac{1.5p\psi_f}{J} \\ W = \frac{1.5p\Delta\psi_f}{\Delta J} i_q - \left( \frac{1}{J} + \frac{1}{\Delta J} \right) T_L - \left( \frac{B}{J} + \frac{\Delta B}{J} \right) \omega_m \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$ 为电流增益,  $W$ 为系统的未知扰动。

从式(4)中选取状态变量 $i_q$ 和 $W$ ,建立二阶扩张观测器的状态方程<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} e = z_1 - \omega_m \\ \dot{z}_1 = z_2 + \alpha i_q - \varepsilon_1 e \\ \dot{z}_2 = -\varepsilon_2 e \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $e$ 为速度跟踪误差,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 为增益系数,  $z_1$ 为机械角速度的估计值,  $z_2$ 即未知扰动 $W$ 的估计值。

对式(5)进行离散化,得到方程为:

$$\begin{cases} e(k) = \hat{\omega}(k) - \omega(k) \\ \hat{\omega}(k+1) = \hat{\omega}(k) + T_s [\hat{W}(k) + \alpha i_q(k) - \varepsilon_1 e(k)] \\ \hat{W}(k+1) = \hat{W}(k) - T_s \varepsilon_2 e(k) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_s$ 为离散化采样时间,  $\hat{\omega}(k)$ 为估计的机械角速度值。

### 3.2 负载观测器

对于电机控制系统中的负载观测,需要从包含多种干扰的实际测量结果中估计出真实的负载

转矩<sup>[16]</sup>。主要考虑几个参数的变化,包括转动惯量、摩擦阻尼系数及磁链等对电机运行过程的影响,将式(3)重新写为:

$$(J + \Delta J) \frac{d\omega_m}{dt} = (\alpha + \Delta\alpha) i_q - T_L - (B + \Delta B) \omega_m \quad (7)$$

式中:  $\Delta\alpha$  为电流增益变化的扰动。

由于电机运行常受上述式(7)中扰动的影 响,将其视为一个整体,并等效为负载转矩的形式,如式(8)所示。式子左侧为负载扭矩的等效值,式子右侧则为干扰合集:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} - \alpha i_q = -\Delta J \frac{d\omega_m}{dt} + \Delta\alpha i_q - (T_L + \Delta T_L) - (B + \Delta B) \omega_m \quad (8)$$

通过对等效负载进行 Laplace 变换,并加入低通滤波器  $H(s)$  滤除高频信号的干扰,即可得到更为准确、稳定的负载转矩观测值:

$$\hat{T}_L(s) = \frac{1}{T_0 s + 1} \left( \alpha i_q + \frac{J}{T_0} \omega_m(s) - \frac{J}{T_0} (T_0 s + 1) \omega_m(s) \right) = \frac{1}{T_0 s + 1} \left( \alpha i_q + \frac{J}{T_0} \omega_m(s) \right) - \frac{J}{T_0} \omega_m(s) \quad (9)$$

式中:  $T_0$  为时间常数。

### 3.3 双观测器

从式(9)可以看出,负载转矩观测器的输入量为机械角速度  $\omega_m$  和 q 轴电流,而提高输入量稳定性在一定程度上可提高负载转矩观测值的稳定性,此处的机械角速度  $\omega_m$  采用上节中估计出的角速度值  $\hat{\omega}(k)$ 。结合速度环扩展状态观测器和负载转矩观测器的双观测器结构如图 1 所示。

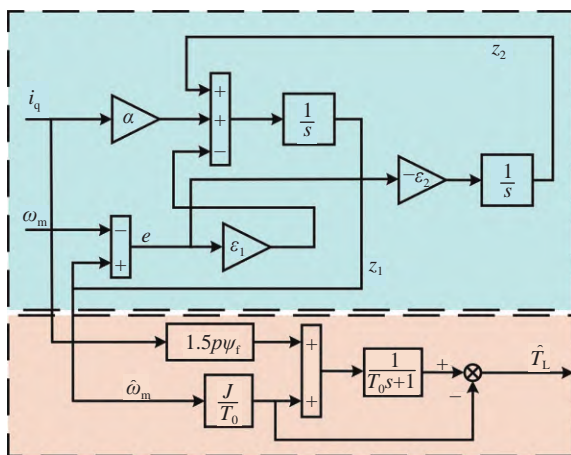


图 1 双观测器结构

Fig. 1 Dual observer structure

## 4 改进滑模速度控制器设计

### 4.1 滑模面和趋近律

为进一步提高 SAPMSM 伺服控制系统的稳定性和抗干扰能力,根据滑模变结构控制理论设计了一种基于积分滑模面和新型滑模趋近律的速度控制器,并可结合上节观测到的精确负载进行前馈补偿,进一步提高电机的鲁棒性。选择合适的趋近律对控制器的设计至关重要,趋近律的主要作用为:提高系统的趋近速度,使得在状态变量远离滑模面时,提高系统的动态响应能力<sup>[17-18]</sup>。

传统的趋近律参数较多、设计复杂,为兼顾趋近速度和抗抖振能力,设计的新型趋近律为:

$$\frac{ds}{dt} = -\kappa \cdot \frac{s^4 + 1}{4e^{-|s|} + 1} \text{sgn}(s) - \zeta s, \kappa > 0, \zeta > 0 \quad (10)$$

式中:  $s$  为滑模面,  $\kappa$ 、 $\zeta$  为可调参数。

分析式(10)发现,当状态变量逐渐逼近滑模面时,比例项  $\zeta s$  逐渐逼近 0,此部分能够保证滑模面  $s$  在较大值时能够快速收敛。然而,仅有比例项是不够的,由于状态变量越接近滑模面,速度越慢,因此引入了新的趋近项,从而确保状态变量在有限时间内快速收敛。当状态变量远离滑模面时,新趋近项的值大于  $\kappa$ ,此时,趋近速度相对单独的  $\kappa \text{sgn}(s)$  更快。综合来看,此趋近律满足滑模控制的期望。

为设计控制器,首先定义状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\omega_{\text{ref}}$  为参考机械角速度。

然后,选择积分滑模面并求导:

$$\begin{cases} s = x_1 + c \int_{-\infty}^t x_2 d\tau \\ \frac{ds}{dt} = \dot{x}_1 + c x_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $c$  为可调参数。

结合式(2),将摩擦阻尼系数  $B$  和负载转矩  $T_L$  视为扰动,采用传统的幂次趋近律<sup>[19]</sup>,可得到 q 轴参考电流为:

$$i_q^* = \frac{3p\psi_f}{2J} [\lambda |s|^\sigma \text{sgn}(s) + c x_1] \quad (13)$$

式中:  $\lambda$ 、 $\sigma$  为传统趋近律的可调参数。

采用本文的新型趋近律, 可得到 q 轴参考电流为:

$$i_q^* = \frac{3p\psi_f}{2J} \left[ \kappa \cdot \frac{s^4 + 1}{4e^{-|s|} + 1} \text{sgn}(s) + \zeta s + cx_1 \right] \quad (14)$$

根据式 (14) 可得控制器的具体结构如图 2 所示。从图 2 可以看出, 控制器需要调整的参数较少, 且实现方法简单。

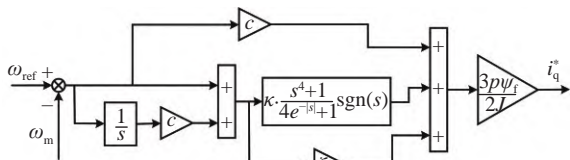


图 2 滑模速度控制器结构图

Fig. 2 Structural diagram of sliding mode speed controller

### 4.2 稳定性证明

为判断所设计趋近律的稳定性, 选取 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (15)$$

对此函数进行求导, 并代入式 (10) 可得到:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \left( -\kappa \cdot \frac{s^4 + 1}{4e^{-|s|} + 1} \text{sgn}(s) - \zeta s \right) \quad (16)$$

由于式 (10) 中有  $\kappa > 0, \zeta > 0$  条件, 且:

$$\begin{cases} -\kappa(s^4 + 1)\text{sgn}(s) < 0 \\ 4e^{-|s|} + 1 > 0 \end{cases}, \quad (17)$$

故结合式 (10) 和式 (17) 可知, 式 (16) 中  $\dot{V} \leq 0$ , 可知满足 Lyapunov 稳定性条件。

## 5 仿真与实验分析

为验证 SAPMSM 在改进滑模速度控制器+双观测器算法控制下的系统性能, 在 Matlab/Simulink 环境下进行电机控制的模拟仿真, 将所提算法的输出速度、负载变化等与传统滑模控制进行对比, 并进行量化分析, SAPMSM 的具体仿真参数见表 1。所对比的两种策略的设计参数分别如下, 传统滑模控制:  $\lambda = 8, \sigma = 1.25, c = 40$ ; 新型滑模控制:  $\kappa = 15, \zeta = 0.35, c = 40$ ; 双观测器的具体参数:  $\varepsilon_1 = 2\,000, \varepsilon_2 = 4\,000\,000, T_0 = 0.001$ 。

表 1 拼接弧线电机参数

Tab. 1 Parameters of the SAPMSM

参数	数值
极对数 $p$	200
定子电阻 $R_s/\Omega$	20
d轴电感 $L_d/H$	1.2
q轴电感 $L_q/H$	1.2
转动惯量 $J/(Kg \cdot m^2)$	18000
永磁体磁链 $\psi_f/Wb$	3.5
母线电压 $U_{dc}/V$	300

### 5.1 仿真结果

工况一: 给定电机的参考转速为  $360^\circ/s (0.1^\circ/s)$ , 当电机运行到 5 s 时, 施加  $280\text{ N}\cdot\text{m}$  的力矩, 图 3 ~ 5(彩图见期刊电子版) 展示了此工况下电机速度、交直流电流的仿真结果对比。

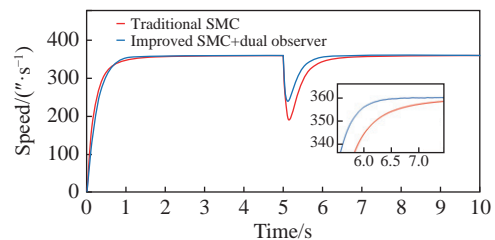


图 3 工况一条件下两种控制策略转速输出仿真结果对比  
Fig. 3 Comparison of simulation results of speed output of two control schemes under working condition 1

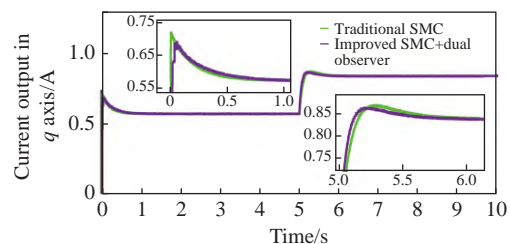


图 4 工况一条件下 q 轴电流输出仿真结果  
Fig. 4 Simulation results of q-axis current output under working condition 1

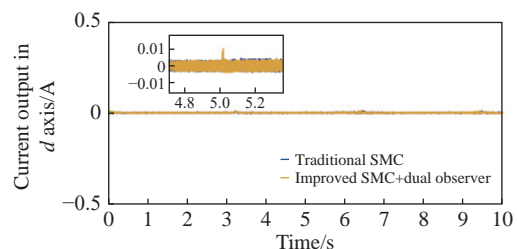


图 5 工况一条件下 d 轴电流输出仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of d-axis current output under working condition 1

由图 3 可知:电机刚启动时,两种控制策略下转速输出都没有超调,采用传统滑模控制在 3 s 时达到期望转速,遇到负载变化时,速度突降至 191"/s,然后在 8.5 s 时又达到稳定状态;而本文所提策略下仅用 1.6 s 转速即达到稳定状态,360"/s,遇到负载变化时速度突降至 239"/s,波动相对较小,然后在 6.7 s 时恢复稳定,与传统控制策略相比,速度波动降低了 25.1%。

由图 4 和图 5 可以看出:在本文所提策略控制下,q 轴电流在电机启动时峰值为 0.68 A,比传统控制低 0.4 A,在 1 s 时快速恢复稳定;当遇到负载变化时,传统滑模控制下电机的 q 轴电流峰值达到了 0.87 A,比新策略控制下的峰值电流高出约 0.01 A,两种控制策略下 d 轴电流基本上都保持稳定。对比之下,明显可以看出,d-q 轴电流在新策略下波动较少,电流的输出波形得到改善。

工况二:给定电机初始转速为 360"/s,在 5 s 的时候使电机转速升高至 720"/s(0.2°/s),图 6~8(彩图见期刊电子版)展示了工况二下的电机速度、交直电流的仿真结果对比。

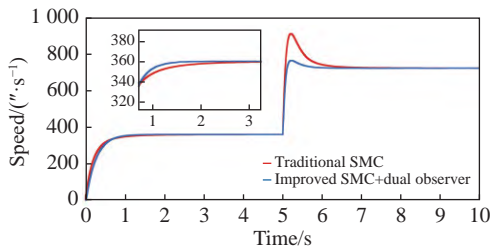


图 6 工况二条件下两种控制策略的转速输出仿真结果对比  
Fig. 6 Comparison of simulation results of speed output of two control schemes under working condition 2

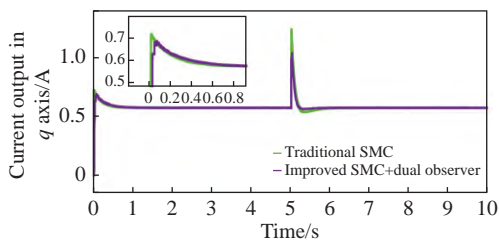


图 7 工况二条件下 q 轴电流输出仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of q-axis current output under working condition 2

从图 6 可知:电机转速突变时,传统控制下的转速超调量较大,峰值转速达到了 907"/s,在 8.5 s 时到达稳定;而改进滑模+双观测器控制策略下的

峰值转速仅为 762"/s,在 6.4 s 时到达稳定转速,两者效果对比来看,本文所提策略在速度变化状态下到达期望转速用时更少。

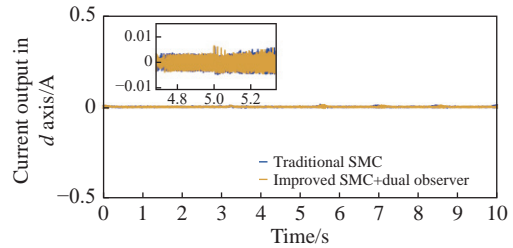


图 8 工况二条件下 d 轴电流输出仿真结果  
Fig. 8 Simulation results of d-axis current output under working condition 2

从图 7 和图 8 可以看出:无论电机在启动时还是转速突变时,在本文所提策略控制下,d-q 轴电流相较传统控制均得到了一定的优化,q 轴电流在速度突变时峰值为 1 A,较传统控制低 0.3 A 左右,两种控制方案下 q 轴电流分别在 5.1 s 和 5.4 s 时达到稳定,传统方案比新方案慢 0.3 s;两种方案下 d 轴电流都稳定保持在 0 A 左右。

上述仿真结果表明,在本文所提的改进滑模控制器+双观测器控制下,电机具有良好的抗干扰能力、转速更稳定,且鲁棒性较好。

### 5.2 实验结果

为验证本文所提出的新型控制策略的实际效果,在大型天文望远镜电控实验平台上进行实验。实验平台如图 9 所示,采用光电式钢带编码器作为位置信号反馈装置,并利用电机控制器分别对两种控制算法进行实验对比。

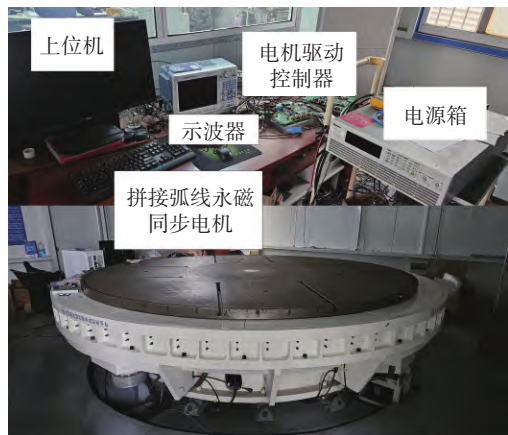


图 9 大型天文望远镜电控实验平台  
Fig. 9 Electronic control experimental platform of large-aperture astronomical telescope

图 10 为本文所提策略下单负载转矩观测的实验波形。从图中可以看出, 负载转矩基本上保持在  $400 \sim 800 \text{ N}\cdot\text{m}$  上下波动。图 11(彩图见期刊电子版) 为本文所提策略下的双负载观测器的实验波形, 从图中可知, 双负载观测器的效果得到了一定的改善, 观测范围大致在  $420 \sim 620 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 观测到的负载转矩值精度更高, 基本上满足了大转矩电机的负载观测需求, 能够通过补偿在一定程度上对负载扰动进行抑制。

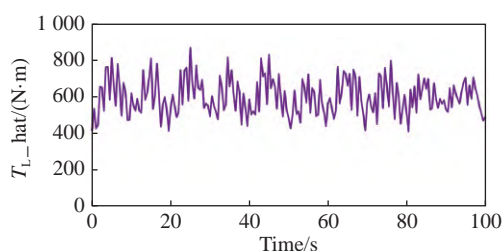


图 10 单负载观测实验结果

Fig. 10 Single load observation experiment results

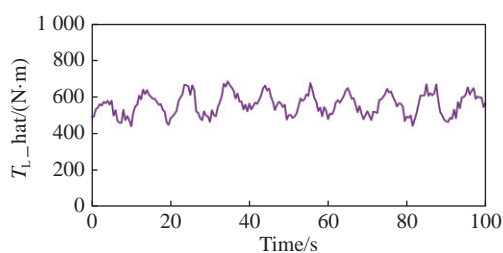


图 11 双负载观测实验结果

Fig. 11 Dual load observation experiment results

为测试电机运行状态变化时的系统性能, 将电机的初始转速由  $360 \text{ r/s}$  突增为  $720 \text{ r/s}$ , 图 12 和图 13(彩图见期刊电子版) 展示了电机在不同算法控制下的实际转速和估计转速。

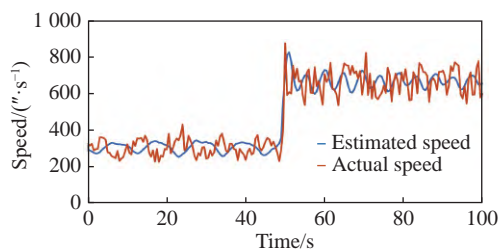
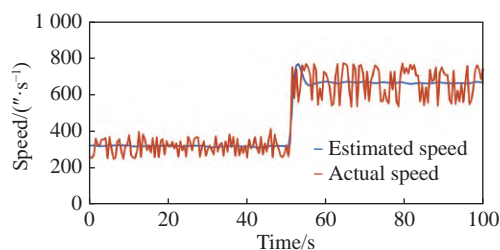


图 12 传统滑模控制下的实际转速和估计转速

Fig. 12 Actual speed and estimated speed under traditional sliding mode control

从图 12 可以看出, 前  $50 \text{ s}$  内, 电机在传统滑模控制下的转速输出波动很大, 实际转速最低降到  $227 \text{ r/s}$  左右, 然后在转速突变后, 最低降落到

$537 \text{ r/s}$ 。虽然估计出的转速值得到一定的改善, 估计的速度曲线相对平稳光滑, 但是滑模抖振很明显, 估计出的转速基本上与实际速度波形保持一致。从图 13 可以看出, 在改进滑模+双观测器的控制下, 估计转速都较为平稳, 在  $50 \text{ s}$  转速变化时, 估计转速有一定的超调, 基本符合电机的稳定运行需求, 但是实际转速抖振相对估计转速较大, 参考转速为  $360 \text{ r/s}$  时实际转速波动范围为  $[227 \text{ r/s}, 431 \text{ r/s}]$ , 当参考转速为  $720 \text{ r/s}$  时波动范围则为  $[558 \text{ r/s}, 775 \text{ r/s}]$ , 对比实际的转速波形, 估计的转速曲线更加稳定, 精度更高。由图 12 和图 13 对比结果可知, 相较传统滑模控制的速度波形, 本文所提策略的估计和实际转速的输出都有一定的优化, 能够证明本文方法具有一定的优化效果。

图 13 改进滑模+双观测器控制下的实际转速和估计转速  
Fig. 13 Actual speed and estimated speed under improved sliding mode control combined with dual observer control

## 6 结 论

由于大型望远镜用拼接弧线电机的转动惯量大且存在负载干扰, 无法准确对期望目标进行高精度观测, 本文设计了一种基于改进滑模速度控制器+双观测器的混合控制策略。该方法不仅能提高电机的运行稳定性, 还能精确观测负载, 并对电机进行前馈补偿, 达到抑制电机负载扰动、提高控制系统鲁棒性的目的。首先, 利用 ESO 观测电机的精确转速, 然后将观测到的转速和  $q$  轴电流作为负载观测器的输入, 从而实现负载转矩的精确观测。其次, 通过积分滑模面和改进的趋近律设计了新型速度控制器, 并选取 Lyapunov 函数判断控制器的稳定性。最终, 将负载观测值转换为电流补偿到  $q$  轴参考电流中。仿真和实验结果都表明: 在本文所设计的控制策略下, 电机速度波

形的稳定性较传统控制得到了有效提升。本文研究证明了结合双观测器的控制效果,有助于将高性能滑模控制算法应用于大型天文望远镜的驱动控制中。

#### 参考文献:

- [1] 霍银龙, 杨飞, 王富国. 大口径光学望远镜拼接镜面关键技术综述[J]. 中国光学(中英文), 2022, 15(5): 973-982.  
HUO Y L, YANG F, WANG F G. Overview of key technologies for segmented mirrors of large-aperture optical telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 973-982. (in Chinese).
- [2] SONG X L, CAO ZH J. Research on control strategy of hamiltonian theory for large telescope based on SAPMSM[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 31960-31967.
- [3] 朱泳廷, 张泽. 基于音圈电机的柔性杆自抗扰 LQR 抑振控制算法研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 283-292.  
ZHU Y T, ZHANG Z. Algorithm for the LQR active disturbance rejection control of a flexible beam for vibration suppression based on voice coil motors[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(22): 283-292. (in Chinese).
- [4] ZHAO X M, GONG Y W, JIN H Y, *et al.*. Adaptive super-twisting-based nonsingular fast terminal sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2023, 45(16): 3057-3066.
- [5] SUN Y P, LAN Y P, SHI X L, *et al.*. Variable speed sliding mode control of magnetic suspension linear synchronous motor based on feedback linearization[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, 37(11): 5843-5853.
- [6] ZHOU N, DENG W X, YANG X W, *et al.*. Continuous adaptive integral recursive terminal sliding mode control for DC motors[J]. *International Journal of Control*, 2023, 96(9): 2190-2200.
- [7] MOGHANNI-BAVIL-OLYAEI M R, KEIGHOBADI J, GHANBARI A, *et al.*. Passivity-based hierarchical sliding mode control/observer of underactuated mechanical systems[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2023, 29(13-14): 3096-3111.
- [8] WU Y Q, YU J B, ZHANG ZH C. Output feedback regulation control for a class of cascade nonlinear systems by time-varying Kalman observer[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2019, 29(7): 2149-2170.
- [9] YUE B Y, CHENG Q M, CHENG Y M. Robustness improvement model predictive control strategy based on Luenberger observer for Y-type modular multilevel converter[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2023, 51(12): 5672-5690.
- [10] LU E, LI W, YANG X F, *et al.*. Anti-disturbance speed control of low-speed high-torque PMSM based on second-order non-singular terminal sliding mode load observer[J]. *ISA Transactions*, 2019, 88: 142-152.
- [11] LI ZH, FENG SH D, WANG J S, *et al.*. Design of model-free position controller for PMSLM based on hyperlocal model[J]. *Electrical Engineering*, 2023, 105(4): 2361-2372.
- [12] SHU H Y, GUO CH, SONG Y T, *et al.*. Design of model predictive controllers for PMSM drive system based on the extended Kalman filter observer[J]. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, 2019, 11(4): 378-394.
- [13] SUN ZH Y, TAN C, LI B, *et al.*. Dual model predictive control strategy of direct-drive PMSM based on sliding mode disturbance observer[J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2024, 19(4): 527-534.
- [14] LIU H X, MEI K Q, LIU L, *et al.*. Fixed-time non-singular terminal sliding mode control for PMSM drive systems[J]. *Journal of Power Electronics*, 2024, 24(2): 258-268.
- [15] LIU L, LIU Y X, ZHOU L L, *et al.*. Cascade ADRC with neural network-based ESO for hypersonic vehicle[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2023, 360(12): 9115-9138.
- [16] 张海洋, 许海平, 方程, 等. 基于负载转矩观测器的直驱式永磁同步电机新型速度控制器设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2923-2934.  
ZHANG H Y, XU H P, FANG CH, *et al.*. Design of a novel speed controller for direct-drive permanent magnet synchronous motor based on load torque observer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(13): 2923-2934. (in Chinese).
- [17] 王东辉, 孔国利, 陈书立. 采用滑模观测器的机载激光通信视轴精度控制[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210460.  
WANG D H, KONG G L, CHEN SH L. Precision control of airborne laser communication optical axis using sliding mode observer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210460. (in Chinese).

- [18] ZHANG ZH C, LI L, WU Y Q. Disturbance-observer-based antiswing control of underactuated crane systems via terminal sliding mode[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2018, 12(18): 2588-2594.
- [19] MA H F, LI Y M, XIONG ZH H. Discrete-time sliding-mode control with enhanced power reaching law[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4629-4638.

作者简介:



宋晓莉(1978—),女,河南驻马店人,博士,副研究员,2012年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事大型望远镜机架精密驱动控制方面的研究。E-mail: xlsong@niaot.ac.cn