

## 基于新型切换函数的改进型超螺旋滑模观测器

冯海喜, 郭家虎

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

**摘要:**目的 为实现永磁同步电机高效率的矢量控制, 获得准确的电机转子角度和速度信息是两个非常重要的参数, 但是由于传感器安装不便, 需要通过无位置算法实现电机转子角度和速度的估算。方法 滑模观测器对电机参数变化不敏感, 鲁棒性强, 采用一种改进型滑模观测器实现角度和速度估算。改进型滑模观测器在超螺旋滑模观测器的基础上, 采用  $\sin(\arctan(nx))$  函数代替开关函数作为切换函数, 并使用李雅普诺夫稳定性证明系统的稳定性。结果 最后对提出的改进型滑模观测器进行仿真, 结果表明: 当期望速度为 1 200 rad/min 时, 改进型滑模观测器在稳定时速度抖动范围为 1 199.7~1 200.2 rad/min。结论 改进型超螺旋滑模观测器响应速度更快、抑制抖振效果更明显、角度估计更准确, 为永磁同步电机的无传感器控制策略提供了一种新思路。

**关键词:** 永磁同步电机; 超螺旋滑模观测器; 切换函数; 矢量控制

**中图分类号:** TM341; TP271+.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2026.0004.010

### An Improved Super-Twisting Sliding Mode Observer Based on a Novel Switching Function

FENG Haixi, GUO Jiahu

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China

**Abstract: Objective** To achieve high-efficiency vector control of permanent magnet synchronous motors (PMSMs), obtaining accurate rotor angle and speed information is essential, as these two parameters are critically important. However, sensor installation is often impractical, necessitating the use of sensorless algorithms to estimate these parameters. **Methods** A sliding mode observer (SMO), known for its robustness and insensitivity to motor parameter variations, was employed for angle and speed estimation. An improved SMO, building upon the super-twisting sliding mode observer (ST-SMO), was proposed. This improved version employed a novel switching function,  $\sin(\arctan(nx))$ , to replace the conventional switching function. The stability of the system was proven using the Lyapunov stability criterion. **Results** The proposed improved SMO was simulated and evaluated. Results indicate that when the desired speed is set to 1,200 rad/min, the steady-state speed oscillation range of the improved observer is confined between 1,199.7 rad/min and 1,200.2 rad/min. **Conclusion** The improved super-twisting sliding mode observer demonstrates faster response, more effective chattering suppression, and more accurate angle estimation. It offers a promising new approach for sensorless control strategies in PMSMs.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; super-twisting sliding mode observer; switching function; vector control

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Machine, PMSM) 具有体积小、功率密度高、效率高、结构简单、噪音低及动态响应快速等优点<sup>[1-3]</sup>。矢量控制

是目前控制 PMSM 的主要方法之一, 而准确地获得转子位置是实现 PMSM 高性能矢量控制的重要前提<sup>[4]</sup>。但是, 由于机械位置传感器的安装会导致电机体积增

收稿日期: 2024-05-16 修回日期: 2024-09-21 文章编号: 1672-058X(2026)04-0075-07

基金项目: 国网安徽电力公司科技项目 (B6120922000J) 资助。

作者简介: 冯海喜 (2000—), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化研究。

通信作者: 郭家虎 (1974—), 男, 安徽淮南人, 教授, 硕士生导师, 从事电力传动研究。Email: hn\_gjh@163.com。

引用格式: 冯海喜, 郭家虎. 基于新型切换函数的改进型超螺旋滑模观测器[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(4): 75-81.

Feng Haixi, Guo Jiahu. An improved super-twisting sliding mode observer based on a novel switching function[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(4): 75-81.

投稿地址 <http://journal.ctbu.edu.cn/zr/ch/index.aspx>

大,导致成本增加;且一般电机工作环境恶劣,不适合机械位置传感器的安装。因此,为了减小电机整体体积,降低成本,无位置传感器控制方式成为 PMSM 控制技术发展的主流趋势。

目前,无位置传感器控制方法主要分为两类:一类是通过利用电机的凸极性或者饱和性凸极的凸极跟踪法,高频信号注入法就是通过该方法实现转子位置估计,使用在电机反电动势不明显的零低速阶段<sup>[4-8]</sup>。高频信号注入法具有较高的精度,且无需精确的电机参数,但是该方法对信号检测的精度要求较高,且需要用到带通、低通滤波器,滤波器相移导致估计角度落后于真实角度。另一类是基于反电动势或磁链估计的基波模型法,该方法一般使用在反电动势明显的中高速阶段<sup>[9-17]</sup>。文献[9-10]采用模型参考自适应控制方法,通过观察电机状态和性能参数,以此辨别电机模型,具有较高的精度,且鲁棒性较好,但是在电机中发生变化的参数过多时,会导致辨识效果变差,降低转子位置估计精度,影响电机控制效果。文献[11-12]采用拓展卡尔曼滤波器的控制方法,考虑了系统的模型误差和测量噪声的统计特性,具有较好的抗负载转矩扰动能力,且精度较高,但是该方法需要构建精确的电机模型,并且计算量大,对处理器计算能力要求高。文献[13-14]采用磁链估计法,该方法计算量小、简单且容易实现,但是该方法对电机参数依赖性大,电机实际运行过程中产生电机参数扰动会导致该方法对电机转子位置估算精度降低。文献[15]通过把传统滑模观测器的开关函数改为分段指数型函数,有效地削弱了电机抖振问题,但是使用等速趋近律,系统响应速度较慢、收敛时间长。文献[16]使用超螺旋滑模观测器估算电机转子位置,系统响应速度快,收敛时间短,使用开关函数作为切换函数,会导致电机产生较大的抖振。文献[17]使用传统滑模观测器,采用自适应同步滤波器代替传统的低通滤波器,但是使系统更复杂,同时依然不能完全消除滤波器相移导致的误差。

文献[9-12]的方法具有较高精度,文献[13-14]的方法计算量小、易实现,但这几种方法均对电机参数敏感,电机运行过程中的参数扰动会导致角度估算精度降低。文献[15-17]的方法对电机参数不敏感,且鲁棒性强,但是由于切换函数高频抖动和趋近律响应速度慢的原因,导致系统存在较大抖动。文献[15]提出的切换函数有效降低了系统抖振,但是增大了计算量;

文献[16]改进了趋近律,但是开关函数导致的系统抖动依然存在;文献[17]提出的方法使滑模观测器输出的反电动势更连续,同时也使系统更复杂。

本文提出了一种基于新型切换函数的超螺旋滑模观测器,该观测器在传统超螺旋滑模观测器的基础上,采用  $\sin(\arctan(nx))$  函数代替传统滑模观测器中的开关函数,相较于传统滑模观测器,系统响应速度快,收敛时间短,并且有效抑制了抖振;同时加入角度补偿,减小使用低通滤波器相移导致的角度误差;并使用李雅普诺夫稳定性证明系统的稳定性。最后通过仿真分析,证明了改进型超螺旋滑模观测器在响应速度、抑制抖振、角度跟随方面具有一定的优势。

## 1 传统滑模观测器

一般传统滑模观测器是基于  $\alpha$ - $\beta$  坐标系下的电机模型构建的,在不考虑定子铁心磁饱和,忽略涡流损失和磁滞损失,并且电机参数一定的情况下,建立  $\alpha$ - $\beta$  坐标系下的 PMSM 模型:

$$\begin{cases} \frac{di_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L_s}i_{\alpha} + \frac{1}{L_s}u_{\alpha} - \frac{1}{L_s}e_{\alpha} \\ \frac{di_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L_s}i_{\beta} + \frac{1}{L_s}u_{\beta} - \frac{1}{L_s}e_{\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,下标  $\alpha$ 、 $\beta$  表示该变量分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的分量,  $i$  是定子电流,  $u$  是定子电压,  $R$  是定子电阻,  $L_s$  为定子电感。  $e$  为拓展反电动势,并且  $e_{\alpha}$ 、 $e_{\beta}$  可以表示为

$$\begin{cases} e_{\alpha} = -\psi_f \omega_e \sin \theta_e \\ e_{\beta} = \psi_f \omega_e \cos \theta_e \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,  $\psi_f$ 、 $\omega_e$ 、 $\theta_e$  分别为电机转子磁链、电机转子电角速度和转子电角度。

为了获得反电动势的估计值,需要根据电机模型建立滑模观测器,如下式:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_{\alpha} + \frac{1}{L_s}u_{\alpha} - \frac{1}{L_s}k\text{sign}(\hat{i}_{\alpha} - i_{\alpha}) \\ \frac{d\hat{i}_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_{\beta} + \frac{1}{L_s}u_{\beta} - \frac{1}{L_s}k\text{sign}(\hat{i}_{\beta} - i_{\beta}) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $\hat{i}_{\alpha}$ 、 $\hat{i}_{\beta}$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  轴上的电流估计值,  $u_{\alpha}$  和  $u_{\beta}$  是观测器的输入量,  $k$  为滑模观测器的增益系数,  $\text{sign}$  为开关函数。式(3)减去式(1)可得:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_{\alpha}}{dt} = -\frac{R}{L_s}\bar{i}_{\alpha} + \frac{1}{L_s}(e_{\alpha} - k\text{sign}(\hat{i}_{\alpha} - i_{\alpha})) \\ \frac{d\bar{i}_{\beta}}{dt} = -\frac{R}{L_s}\bar{i}_{\beta} + \frac{1}{L_s}(e_{\beta} - k\text{sign}(\hat{i}_{\beta} - i_{\beta})) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $\bar{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$ ,  $\bar{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$  为电流误差值,并且应满足的要求为

$$k > \max \left\{ \begin{array}{l} -R |\bar{i}_\alpha| + e_\alpha \text{sign}(\bar{i}_\alpha) \\ -R |\bar{i}_\beta| + e_\beta \text{sign}(\bar{i}_\beta) \end{array} \right\} \quad (5)$$

当滑模量满足  $\bar{i}_\alpha = \bar{i}_\beta = 0$  后,滑模量将一直保持在滑模面上。此时反电动势估计值可以表示为

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = k \text{sign}(\bar{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \hat{e}_\beta = k \text{sign}(\bar{i}_\beta - i_\beta) \end{cases} \quad (6)$$

由于开关函数的存在,导致实际控制量因高频切换而不连续,需要使用低通滤波器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{e}_\alpha}{dt} = \frac{(-\hat{e}_\alpha + k \text{sign}(\bar{i}_\alpha))}{\tau} \\ \frac{d\hat{e}_\beta}{dt} = \frac{(-\hat{e}_\beta + k \text{sign}(\bar{i}_\beta))}{\tau} \end{cases} \quad (7)$$

得到反电动势的估计值就可以通过反正切法计算转子估计电角度,估计电角度求导可以得到估计电角速度。

$$\hat{\theta}_0 = -\tan^{-1}(\hat{e}_\alpha / \hat{e}_\beta) \quad (8)$$

$$\hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}_0}{dt} \quad (9)$$

综上所述,传统滑模观测器的实现原理如图1所示。

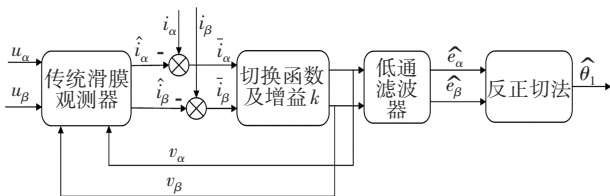


图1 传统滑模观测器实现原理框图

Fig. 1 Block diagram of the traditional sliding mode observer

## 2 改进型滑模观测器

### 2.1 超螺旋算法

上一节介绍的滑模观测器采用等速趋近律,导致系统响应速度慢、收敛时间长,超螺旋滑模观测器采用超螺旋算法,具有较快的响应速度、收敛时间短,因此,本文采用超螺旋滑模观测器。

超螺旋算法的基本形式如下:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -a_1 |\bar{x}_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{x}_1) + x_2 + \varepsilon_1(x_1, t) \\ \frac{dx_2}{dt} = -a_2 \text{sign}(|\bar{x}_1|) + \varepsilon_2(x_2, t) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中,  $x_n$  代表状态变量,下标  $n$  表示为第  $n$  个状态

变量;  $a_n$  为系统滑模增益系数,下标  $n$  表示为第  $n$  个状态变量的滑模增益系数;  $\bar{x}_n$  为状态变量误差值;  $\bar{x}_n = \hat{x}_n - x_n$ , 下标  $n$  表示为第  $n$  个状态变量误差值,  $\varepsilon_n(x_n, t)$  为状态变量的扰动项;下标  $n$  表示为第  $n$  个状态变量的扰动项,sign 为开关函数,并且式(10)中  $a_1$ 、 $a_2$  应满足:

$$\begin{cases} a_1 > 2\mu \\ a_2 > a_1 \frac{5\mu a_1 + 4\mu^2}{2(a_1 - 2\mu)} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中,  $\mu$  可以是任意正常数,同时式(11)中的扰动项也应满足:

$$\begin{cases} |\varepsilon_1| \leq \mu |\bar{x}_1|^{\frac{1}{2}} \\ \varepsilon_2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

当上述条件均满足时,系统最终会稳定在原点。

### 2.2 超螺旋滑模观测器

根据式(3)、式(10)可得超螺旋滑模观测器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} u_\alpha + \frac{1}{L_s} \left( a_1 |\bar{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{i}_\alpha) + \int a_2 \text{sign}(\bar{i}_\alpha) dt \right) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta + \frac{1}{L_s} \left( a_1 |\bar{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{i}_\beta) + \int a_2 \text{sign}(\bar{i}_\beta) dt \right) \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,  $a_1$ 、 $a_2$  为正数。并且对比式(10)和式(13),可以发现式(10)中的  $\varepsilon_1(x_1, t)$  被式(13)中的  $-\frac{R}{L_s} \hat{i}_\alpha +$

$\frac{1}{L_s} u_\alpha$  和  $-\frac{R}{L_s} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s} u_\beta$  替代,式(13)减式(1)可得:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s} \bar{i}_\alpha + \frac{1}{L_s} \left( e_\alpha + \left( a_1 |\bar{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{i}_\alpha) + \int a_2 \text{sign}(\bar{i}_\alpha) dt \right) \right) \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s} \bar{i}_\beta + \frac{1}{L_s} \left( e_\beta + \left( a_1 |\bar{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{i}_\beta) + \int a_2 \text{sign}(\bar{i}_\beta) dt \right) \right) \end{cases} \quad (14)$$

与传统滑模观测器一样,当滑模量达到  $\bar{i}_\alpha = \bar{i}_\beta = 0$  之后,滑模量将一直保持在滑模面上。得到估计反电动势后,角度与转速的计算如式(8)、式(9)。估计反电动势可以表示为下式:

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = - \left( a_1 |\bar{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{i}_\alpha) + \int a_2 \text{sign}(\bar{i}_\alpha) dt \right) \\ \hat{e}_\beta = - \left( a_1 |\bar{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\bar{i}_\beta) + \int a_2 \text{sign}(\bar{i}_\beta) dt \right) \end{cases} \quad (15)$$

### 2.3 改进型超螺旋滑模观测器

上文介绍的超螺旋滑模观测器的切换函数采用开关函数,开关函数设计简单、容易实现,但是由于开关函数在原点处的不连续性,会导致滑模观测器产生较大的抖振。对此,本文设计一种具有光滑连续特性的函数来替代开关函数,其表达式为

$$f(x) = \sin(\tan^{-1} nx) \quad (16)$$

式(16)中, $n$ 为正常数。该函数在原点处具有连续性,可以有效抑制抖振,并且在原点附近斜率较大,使系统具有较快的响应速度;当自变量足够大时,函数值趋近于1,因此该函数边界层厚度足够大,抖振抑制效果明显。该函数曲线特性如图2所示。

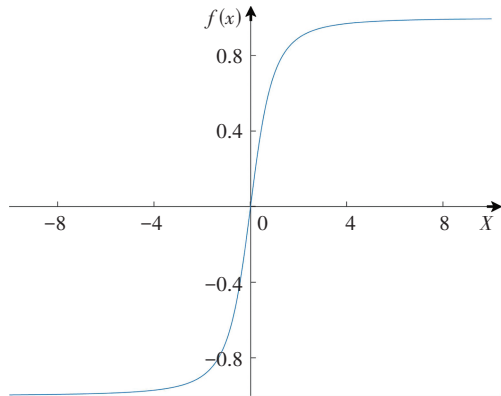


图2  $\sin(\tan^{-1}x)$  函数

Fig. 2 The  $\sin(\tan^{-1}x)$  function

根据式(1)、式(13)、式(16)可以推出改进型超螺旋滑模观测器的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha + \frac{1}{L_s}\left(a_1 |\bar{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} f(\bar{i}_\alpha) + \int a_2 f(\bar{i}_\alpha) dt\right) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta + \frac{1}{L_s}\left(a_1 |\bar{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} f(\bar{i}_\beta) + \int a_2 f(\bar{i}_\beta) dt\right) \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知,式(10)中的扰动项分别被分别由  $-\frac{R}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha$  和  $-\frac{R}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta$  替代,式(17)减式(1)可得改进型超螺旋滑模观测器的动态方程:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L_s}\bar{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}\left(e_\alpha + \left(a_1 |\bar{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} f(\bar{i}_\alpha) + \int a_2 f(\bar{i}_\alpha) dt\right)\right) \\ \frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L_s}\bar{i}_\beta + \frac{1}{L_s}\left(e_\beta + \left(a_1 |\bar{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} f(\bar{i}_\beta) + \int a_2 f(\bar{i}_\beta) dt\right)\right) \end{cases} \quad (18)$$

当滑模量达到  $\bar{i}_\alpha = \bar{i}_\beta = 0$  之后,滑模量将一直保持在滑模面上,反电动势估计值可以表示为

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = - \left( a_1 |\bar{i}_\alpha|^{\frac{1}{2}} f(\bar{i}_\alpha) + \int a_2 f(\bar{i}_\alpha) dt \right) \\ \hat{e}_\beta = - \left( a_1 |\bar{i}_\beta|^{\frac{1}{2}} f(\bar{i}_\beta) + \int a_2 f(\bar{i}_\beta) dt \right) \end{cases} \quad (19)$$

经滤波器后得到估算的反电动势  $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 。由于滤波器导致转子角度估计值存在相位误差,通过使用正交锁相环可以有效地解决这个问题,本文改用正交锁相环计算得出转子的电角度和电角速度。正交锁相环结构如图3所示。

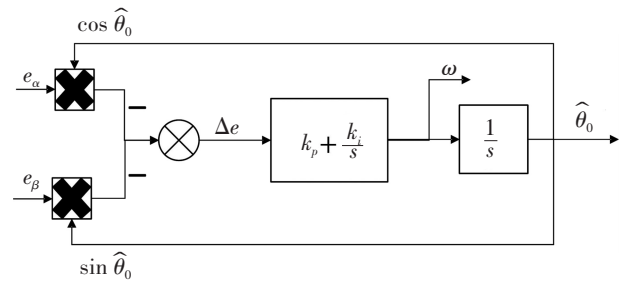


图3 正交锁相环结构框图

Fig. 3 Block diagram of the quadrature phase-locked loop

当图3中  $\Delta e$  足够小时,可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta e &= -e_\alpha \cos \hat{\theta}_0 - e_\beta \sin \hat{\theta}_0 = \\ &= k(\cos \hat{\theta}_0 \sin \theta_0 - \sin \hat{\theta}_0 \cos \theta_0) = \\ &= k \sin(\theta_0 - \hat{\theta}_0) = k \sin(\bar{\theta}_0) \approx k \bar{\theta}_0 \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)中, $k = \psi \omega_e$ ,  $\bar{\theta}_0$  为转子电角度差值,  $\bar{\theta}_0 = \theta_0 - \hat{\theta}_0$ 。

正交锁相环的闭环传递函数为

$$G(s) = \frac{\hat{\theta}_0}{\theta_0} = \frac{kk_p s + kk_i}{s^2 + kk_p s + kk_i} \quad (21)$$

由于低通滤波器的使用,滤波器相移会导致较大的信号延迟,因此在三种滑模观测器中均加入一个角度补偿,可以表示为

$$\hat{\theta}_e = \hat{\theta}_0 + \tan^{-1}(\omega/\omega_e) \quad (22)$$



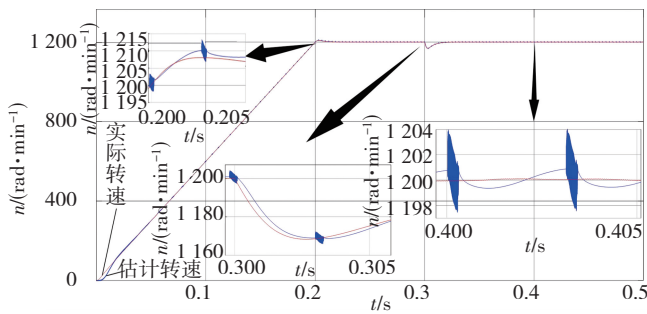


图 6 传统超螺旋滑模观测器速度跟随图

Fig. 6 Speed tracking performance of the conventional super-twisting sliding mode observer

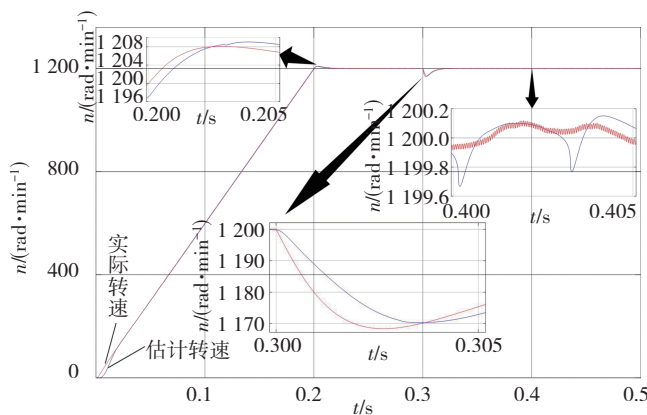


图 7 改进型超螺旋滑模观测器速度跟随图

Fig. 7 Speed tracking performance of the improved super-twisting sliding mode observer

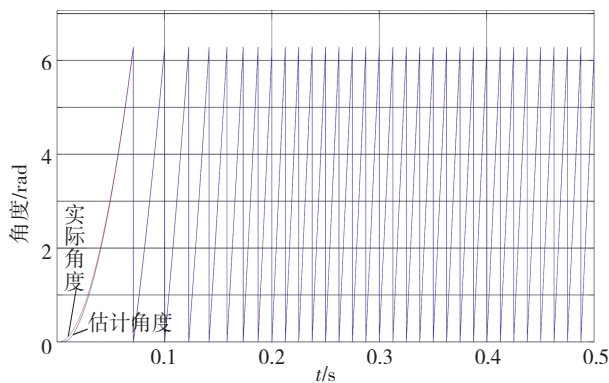


图 8 改进型超螺旋滑模观测器角度跟随图

Fig. 8 Angle tracking performance of the improved super-twisting sliding mode observer

对比图 5、图 6、图 7, 电机加速至  $1\,200\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$  时, 基于传统滑模观测器的电机估计转速最大超调量为  $70\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 基于传统超螺旋滑模观测器的电机估计转速最大超调量为  $13\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 基于改进型超螺旋滑模观测器的电机估计转速最大超调量为  $9\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ 。改进型超螺旋滑模观测器相较于传统滑模观测器和传统超螺旋滑模观测器, 超调量分别减小了  $61\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$  和

$4\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ 。在  $t=0.3\text{ s}$  时, 电机突加  $2.5\text{ N} \cdot \text{m}$  的负载, 传统滑模观测器的电机估计转速波动为  $75\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 传统超螺旋滑模观测器的电机估计转速波动为  $34\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 改进型超螺旋滑模观测器的电机估计转速波动为  $31\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 改进型超螺旋滑模观测器相较于传统滑模观测器和传统超螺旋滑模观测器, 波动分别减小了  $44\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$  和  $3\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ 。电机稳定时, 基于传统滑模观测器的估计转速波动范围为  $1\,140 \sim 1\,260\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 基于传统超螺旋滑模观测器的估计转速波动范围为  $1\,197 \sim 1\,204\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ , 基于改进型超螺旋滑模观测器的估计转速波动范围为  $1\,199.7 \sim 1\,200.2\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$ 。

通过以上仿真数据可知, 改进型超螺旋滑模观测器可以有效地抑制电机转子转速抖动, 使系统具有更好的动态特性, 同时通过图 7 和图 8, 可以看出改进型超螺旋滑模观测器组成的 SPMSM 控制系统在电机转子转速大于  $100\text{ (rad} \cdot \text{min}^{-1})$  时, 系统具有较好的角度跟随性, 极大程度地提高了系统的控制品质。

## 4 结 论

本文在传统超螺旋滑模观测器的基础上, 通过使用  $\sin(\arctan(nx))$  替换开关函数作为切换函数, 提出了一种改进型滑模观测器控制策略, 并使用李雅普诺夫稳定性判据证明了系统的稳定性。最后通过仿真与传统滑模观测器和传统超螺旋滑模观测器比较, 仿真结果表明: 相对于传统滑膜观测器和传统超螺旋滑模观测器, 新型超螺旋滑模观测器可以有效地抑制电机转子转速抖动, 使系统具有更好的动态特性, 具有较好的角度跟随性, 同时, 系统响应速度更快, 并且新型切换函数可以通过查表法实现, 降低实际应用过程中单片机的计算量。

## 参考文献 (References):

- [1] 龚事引, 李丹, 刘摺侵, 等. 永磁同步电机改进无模型超螺旋滑模控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(2): 175-181.  
Gong Shiyin, Li Dan, Liu Junqin, et al. Improved model-free sliding mode control of super-twisting for PMSM[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(2): 175-181.
- [2] 王力新, 王晓远, 高鹏, 等. 电动汽车用内置式永磁同步电机转矩脉动分析及抑制[J/OL]. 电工技术学报: 1-11[2024-02-27].  
Wang Lixin, Wang Xiaoyuan, Gao Peng, et al. Torque ripple reduction analysis of interior permanent magnet synchronous

- motor for electric vehicle [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-11[2024-02-27].
- [3] 孟冶金, 刘宇阳, 陈俐. 基于迭代式粒子群优化的永磁同步电机热网络模型参数辨识研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 1-11.
- Meng Zhijin, Liu Yuyang, Chen Li. Iterative particle swarm optimization based parameter identification of lumped-parameter thermal network for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(1): 1-11.
- [4] 毕广东, 张国强, 王高林, 等. 高频信号注入永磁电机系统转子位置估计偏差在线补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7205-7213.
- Bi Guangdong, Zhang Guoqiang, Wang Gaolin, et al. Online compensation method of estimated rotor position offset error for high-frequency signal injection based PMSM drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7205-7213.
- [5] 刘旭, 牛大强, 曹阳, 等. 基于励磁绕组高频信号注入的混合励磁开关磁链永磁电机位置估计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4297-4307.
- Liu Xu, Niu Daqiang, Cao Yang, et al. Position estimation for hybrid excited switched flux PM machine by injecting high-frequency pulse into the field winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20): 4297-4307.
- [6] 郭磊, 杨中平, 林飞. 带误差补偿的高频信号注入永磁同步电机无传感器控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21): 4458-4466.
- Guo Lei, Yang Zhongping, Lin Fei. A sensorless control strategy for high frequency signal injection permanent magnet synchronous motor with error compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21): 4458-4466.
- [7] Lu Q, Wang Y, Mo L H, et al. Pulsating high frequency voltage injection strategy for sensorless permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-4.
- [8] Wang Y, Wang P, Wang Z. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor with double frequency square wave voltage injection[C]//Proceedings of the IEEE 4th International Electrical and Energy Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [9] 刘永猛. 无位置传感器永磁同步电机全速范围起动运行控制策略研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- Liu Yongmeng. Research on Control Strategy for Full Speed Range Start and Operation of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023.
- [10] 尚诚诚, 赵云, 曹颖强, 等. 基于改进 MRAS 算法的转动惯量辨识策略[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(1): 106-108, 113.
- Shang Chengcheng, Zhao Yun, Cao Yingqiang, et al. Identification strategy of inertia based on improved MRAS algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(1): 106-108, 113.
- [11] 郑键. 基于复合观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- Zheng Jian. Research on Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Compound Observer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [12] Park Y S, Sul S K. Sensorless control method for PMSM based on frequency-adaptive disturbance observer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(2): 143-151.
- [13] 黄敏. 基于磁链观测器的永磁同步电机无感矢量控制策略研究与实现[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- Huang Min. Research and implementation of non-inductive vector control strategy of permanent magnet synchronous motor based on flux observer[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.
- [14] Ortega R, Praly L. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 601-614.
- [15] 张立伟, 李行, 宋佩佩, 等. 基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 70-78.
- Zhang Liwei, Li Hang, Song Peipei, et al. Sensorless vector control using a new sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor speed control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 70-78.
- [16] 高进. 基于超扭曲滑模观测器的永磁同步直线电机无传感器控制[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- Gao Jin. Sensorless Control of PMLSM Based on Super-twisting Sliding Mode Observer[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [17] 陈学永, 李朝江, 杜静娟, 等. 高速电机的转子损耗分析与无位置传感器矢量控制方法的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(5): 144-150.
- Chen Xueyong, Li Chaojiang, Du Jingjuan, et al. Rotor loss analysis of high-speed motor and research on its sensorless vector control method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(5): 144-150.

责任编辑:代小红