

doi:10.3969/j.issn.2097-3853.2025.01.008

基于互补滑模观测器的永磁同步电机无感速度控制

潘嘉鑫^{1,2,3}, 何栋炜^{1,3,4}, 蒋学程², 王佩^{1,3,4}, 刘丽桑^{1,3,4}, 陈健¹

(1. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

2. 闽江学院 物理与电子信息工程学院, 福建 福州 350108;

3. 福建省工业集成自动化行业技术开发基地, 福建 福州 350118;

4. 电子信息与电气技术国家级实验教学示范中心, 福建 福州 350118)

摘要: 传统永磁同步电机无传感器控制方法中, 常用的滑模观测器因存在抖振问题会导致转子位置及转速观测准确度下降, 针对该问题提出一种基于互补滑模的改进观测器。基于永磁同步电机的数学模型设计了互补滑模观测器, 基于 Lyapunov 理论证明所设计观测器的稳定性。并引入卡尔曼滤波器消除传统反电动势滤波所产生的相位误差, 以进一步提升转子位置及转速的观测性能。通过仿真实验对不同的运行工况进行了验证, 结果表明所提方法能够有效消除抖振问题, 提高观测精度。

关键词: 永磁同步电机; 无传感器控制; 互补滑模; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)01-0080-06

Sensorless speed control of permanent magnet synchronous motor based on complementary sliding mode observer

PAN Jiaxin^{1, 2, 3}, HE Dongwei^{1, 3, 4}, JIANG Xuecheng², WANG Pei^{1, 3, 4}, LIU Lisang^{1, 3, 4}, CHEN Jian¹

(1. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Physics & Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

3. Technical Development Base of Industrial Integration Automation of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

4. National Demonstration Center for Experimental Electronic Information and Electrical Technology Education, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In traditional sensorless control methods for permanent magnet synchronous motors, the chattering problem associated with commonly used sliding mode observers can lead to a decrease in the accuracy of rotor position and speed observation. To address this issue, an improved observer based on complementary sliding mode is proposed. A complementary sliding mode observer is designed based on the mathematical model of the permanent magnet synchronous motor, and its stability is proven using Lyapunov theory. Additionally, a Kalman filter is introduced to eliminate the phase error generated during the back electromotive force filtering process, further enhancing the observation performance of rotor position and speed. Simulation experiments validate that the proposed method effectively mitigates chattering and improves system observation accuracy under various operating conditions.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sensorless control; complementary sliding mode; Kalman filter

近年来, 永磁同步电机(PMSM)由于其转动惯量小、功率密度高、结构简单以及控制性能好等特点, 在工业领域应用广泛。而永磁同步电机的

收稿日期: 2024-05-15

基金项目: 福建省自然科学基金(2023J011397); 福建省高校产学研合作科技计划项目(2022N5020); 福建省中青年教师教育科研项目(JAT210286)

第一作者简介: 潘嘉鑫(1999—), 男, 福建莆田人, 硕士研究生, 研究方向: 电机控制。

通信作者: 何栋炜(1985—), 男, 福建福州人, 副教授, 博士, 研究方向: 运动控制及电机控制。

控制策略通常需要有转子位置信号和转速信号作为反馈。传统获取转子位置信号和转速信号的途径是在电机上加装位置传感器, 但这些传感器价

格昂贵、安装不便、在恶劣工况下工作不可靠,增加了系统的成本和复杂性。因此无传感器控制逐步成为永磁同步电机研究的热点^[1]。

目前,永磁同步电机的无传感器控制策略根据转速区间分为适用于低速域的控制策略和适用于中高速域的控制策略。低速域主要以脉振和旋转高频电压注入法为主,而中高速域则通过模型参考自适应算法和滑模观测器法等算法实现^[2]。其中,滑模观测器法因其响应快和鲁棒性受到关注,但由于其使用大切换控制增益和开关函数,导致系统存在高频抖振的问题。为改进传统滑模中的开关函数,文献[3-5]引入分段指数型函数、饱和函数以及边界层可变的S函数,使得系统滑模面的趋近过程更加平滑,从而抑制了观测器中的抖振问题。此外,调整合适的滑模增益、优化滑模趋近率以及设计新型滤波器等措施也能有效抑制系统抖振^[6]。文献[7]设计了一种变增益超螺旋滑模观测器,其滑模增益值随转速的不同而实时变化,可以改善滑模的抖振问题,提高观测器对转速和转子位置的观测精度。文献[8]提出一种改进型超螺旋观测器算法,通过设计自适应参数策略改善抖振问题提升系统动态性能,并设计了新型同步参考系滤波器用于滤除估计反电动势信号的高次谐波,进一步提高转速及转子位置观测精度。文献[9]设计了状态观测器观测反馈信号,以避免低通滤波器引起的相位误差问题,实现了较宽的调速范围。文献[10]引入了频率自适应复数滤波器用于滑模观测器的反电动势滤波,通过设计频率自适应律可以保证滤波器的滤波过程始终处于中心频率处,并且信号无衰减,从而实现零相移,提高观测精度。但文献[9-10]两种方法设计过程与参数设置过程较复杂。文献[11]通过实时估计转速和低通滤波器截止频率来计算位置误差,并进行误差补偿;文献[12]将估计转速作为低通滤波器的参数之一,设计了截止频率随转速调整的变截止频低通滤波器。然而,文献[11-12]两种方法在对观测器进行位置误差补偿时都未考虑到估计误差对最终结果的影响。

上述文献提出的改进滑模观测器策略在不同程度上缓解了抖振问题,提高了观测精度,但仍存在参数设置复杂、低通滤波器引入的相位误差问题等局限性。为进一步提升观测器的观测精度和鲁棒性,针对传统滑模观测器中的抖振造成转子

位置及转速观测准确度下降的问题,本研究将文献[13]中的互补滑模控制思想引入观测器的设计中,提出一种基于互补滑模观测器无传感器控制方法,结合互补滑模观测器与卡尔曼滤波器,改善传统滑模观测器的抖振问题,提升对反电动势的滤波性能。

1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机在 α - β 两相静止坐标系下,数学模型如式(1)所示。

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

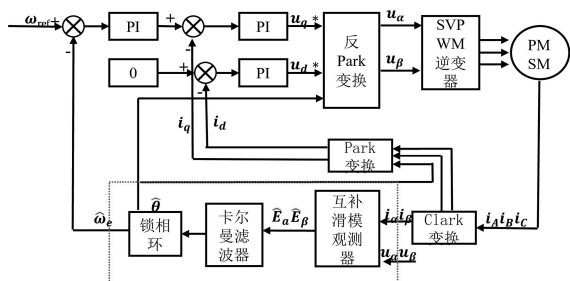
式中, i_α 、 i_β 为定子电流在 α - β 轴上的分量; u_α 、 u_β 为定子电压在 α - β 轴上的分量; L_s 、 R_s 为电机的定子电感和定子电阻; t 为时间; E_α 、 E_β 为反电动势, 其定义如式(2)所示。

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

式中, φ_f 为永磁体磁链, ω_e 为电角速度, θ_e 为转子位置。

2 基于互补滑模观测器的无传感器算法

本研究设计的基于互补滑模观测器的无传感器算法由互补滑模观测器、卡尔曼滤波器、锁相环等构成。算法整体系统结构如图 1 所示。其中,互补滑模观测器在传统滑模面的基础上增加互补滑模面,旨在提高系统的观测性能和响应速度。卡尔曼滤波器可以滤除反电动势谐波,在提升算法滤波性能的同时能够减少相位误差。



基于互补滑模观测器的无传感器算法

图 1 系统结构框图

Fig.1 System structure diagram

2.1 互补滑模观测器

为了更好地获得反电动势的估计值,由式(1)、式(2)建立永磁同步电机的电流估计方程,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L_s}u_\alpha - \frac{1}{L_s}\hat{E}_\alpha; \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L_s}u_\beta - \frac{1}{L_s}\hat{E}_\beta; \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\hat{i}_\alpha$ 、 $\hat{i}_\beta$ 为电流估计值, $\hat{E}_\alpha$ 、 $\hat{E}_\beta$ 为反电动势估计值。理想状态下,式(3)可写为:

$$\frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = A_i\hat{i}_\alpha + B_i\hat{E}_\alpha + C_i \quad (4)$$

式中, $A_i = -\frac{R_s}{L_s}$, $B_i = -\frac{1}{L_s}$, $C_i = \frac{1}{L_s}u_\alpha$, i 对应不同工况。考虑不确定性因素的影响,永磁同步电机的电流估计方程可写为:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} &= (A_0 + \Delta A)\hat{i}_\alpha + (B_0 + \Delta B)\hat{E}_\alpha + (C_0 + \Delta C) = \\ &A_0\hat{i}_\alpha + B_0\hat{E}_\alpha + H(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, A_0 、 B_0 为不考虑不确定因素时的参数。含“ Δ ”的项表示各项中由于不确定因素引起的变化量,对这些不确定项集中表述为:

$$H(t) = \Delta A\hat{i}_\alpha + \Delta B\hat{E}_\alpha + C_0 + \Delta C \quad (6)$$

$H(t)$ 为不确定项之和,假设 $H(t)$ 有界,即:

$$|H| \leq D \quad (7)$$

式中, $|H|$ 为 $H(t)$ 的模值, D 为其上界。

2.1.1 互补滑模面设计

受文献[13]启发,为提高算法的观测性能,在滑模观测器中引入广义滑模面及其互补滑模面。首先定义观测误差,如式(8)所示。

$$e = i_\alpha - \hat{i}_\alpha \quad (8)$$

式中, e 为电流实际值与观测值的误差。设计广义滑模面,如式(9)所示。

$$S_g = \left(\frac{d}{dt} + k \right)^n \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (9)$$

式中, S_g 为广义滑模面, k 为常数, n 为系统的阶数。在式(9)中,误差积分项 $k \int_0^t e d\tau$ 的存在可以使系统的观测值更接近实际值,能够显著降低系统的稳态误差,但由于积分需要时间,增益值不适配容易影响收敛速度。因此需要设计与式(9)互补的滑模面^[13],如式(10)所示。

$$S_c = \left(\frac{d}{dt} + k \right)^{n-1} \left(\frac{d}{dt} - k \right) \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

式中, S_c 为互补滑模面,由于永磁同步电机的无传感器控制系统为一阶系统,所以 $n=1$ 代入式(9)(10),则所设计广义滑模面及互补滑模面如式(11)所示。

$$\begin{cases} S_g = e + k \int_0^t e d\tau \\ S_c = e - k \int_0^t e d\tau \end{cases} \quad (11)$$

广义滑模面及互补滑模面的导数为:

$$\begin{cases} \dot{S}_g = \dot{e} + ke \\ \dot{S}_c = \dot{e} - ke \end{cases} \quad (12)$$

S 为广义滑模面与其互补滑模面之和,形如式(13)。

$$S = S_g + S_c \quad (13)$$

2.1.2 互补滑模控制律设计

为保证观测器的收敛性,需要设计相应的反馈律。本研究基于等效控制法,设计了一种互补滑模反馈律。以静止坐标系下 α 轴的估计反电动势 $\hat{E}_\alpha$ 为例,具体如(14)所示。

$$\hat{E}_\alpha = \hat{E}_{eq} + \hat{E}_c \quad (14)$$

式中, $\hat{E}_{eq}$ 和 $\hat{E}_c$ 的定义如式(15)所示。

$$\begin{cases} \hat{E}_{eq} = \frac{1}{B_i} \left[\frac{di_\alpha}{dt} - A_i \hat{i}_\alpha + ke + kS_g \right] \\ \hat{E}_c = \frac{1}{B_i} \left[\rho \cdot \text{sat} \left(\frac{S_g + S_c}{\varphi} \right) \right] \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\hat{E}_{eq}$ 表示等效控制部分,针对理想状态下的系统控制; $\hat{E}_c$ 表示切换控制部分,用于克服系统外部扰动; ρ 为切换增益,且 $\rho > D$,即取值大于式(7)中不确定项 $H(t)$ 的上界, $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数,具体表示为:

$$\text{sat} \left(\frac{S_g + S_c}{\varphi} \right) = \begin{cases} 1, & S_g + S_c \geq \varphi \\ \frac{S_g + S_c}{\varphi}, & -\varphi < S_g + S_c < \varphi \\ -1, & S_g + S_c \leq -\varphi \end{cases} \quad (16)$$

为验证所设计的互补滑模观测器的稳定性及收敛性,定义 Lyapunov 函数 V 如式(17)所示。

$$V = \frac{1}{2} (S_g^2 + S_c^2) \quad (17)$$

将式(17)对时间求导可得:

$$\dot{V} = S_g \dot{S}_g + S_c \dot{S}_c \quad (18)$$

将式(12)代入式(18)可得:

$$\dot{V} = (S_g + S_c) \cdot (S_g - k \cdot S_c) =$$
$$(S_g + S_c) \left(\frac{di_a}{dt} - A_0 \hat{i}_\alpha - B_0 \hat{E}_a + H + ke - kS_c \right) \quad (19)$$

将式(15)代入式(19)可得:

$$\dot{V} = -k (S_g + S_c)^2 + (S_g + S_c) (-B_i \hat{E}_c) + (S_g + S_c) \cdot$$
$$(-H) \leq -k (S_g + S_c)^2 + (S_g + S_c) (-B_i \hat{E}_c) +$$
$$|S_g + S_c| |H| \leq -k (S_g + S_c)^2 + |S_g + S_c| (|H| -$$
$$\rho) = -k (S_g + S_c)^2 - \mu |S_g + S_c| \leq 0 \quad (20)$$

式中, μ 为一正值。式(20)整体为负半定,所设计的广义滑模面 S_g 和互补滑模面 S_c 符合 Lyapunov 定理,可以保证所设计的互补滑模观测器的收敛。且由式(20)可知,当两滑模面之和 $|S_g + S_c|$ 趋近于 0,在互补滑模控制律的作用下,位于边界层外的初始观测误差 e 能够在有限时间内沿广义滑模面 S_g 和互补滑模面 S_c 的交集收敛到稳态。

2.2 卡尔曼滤波器及锁相环

为滤除所设计观测器获得的反电动势中的高频谐波,本研究引入卡尔曼滤波器对反电动势进行滤波,卡尔曼滤波器的状态方程可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{E}_\alpha}{dt} = -\hat{\omega}_e \hat{E}_\beta + \omega_e E_\beta - l\tilde{E}_\alpha \\ \frac{d\tilde{E}_\beta}{dt} = \hat{\omega}_e \hat{E}_\alpha - \omega_e E_\alpha - l\tilde{E}_\beta \\ \frac{d\tilde{\omega}_e}{dt} = \tilde{E}_\alpha \hat{E}_\beta - \hat{E}_\alpha \tilde{E}_\beta \end{cases} \quad (21)$$

式中, $\hat{E}_\alpha$ 、 $\hat{E}_\beta$ 为滤波前反电动势, $\tilde{E}_\alpha$ 、 $\tilde{E}_\beta$ 为滤波后反电动势, l 为卡尔曼滤波增益,具体参考文献[14]。估计的反电动势通过卡尔曼滤波处理后输入到锁相环(phase-locked loop, PLL)中,利用锁相环计算得到转子的位置和转速。锁相环的结构如图 2 所示。

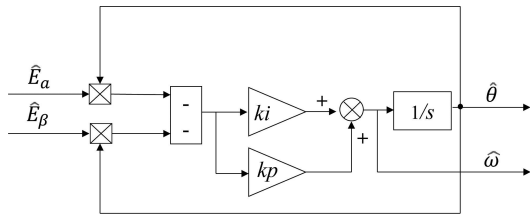
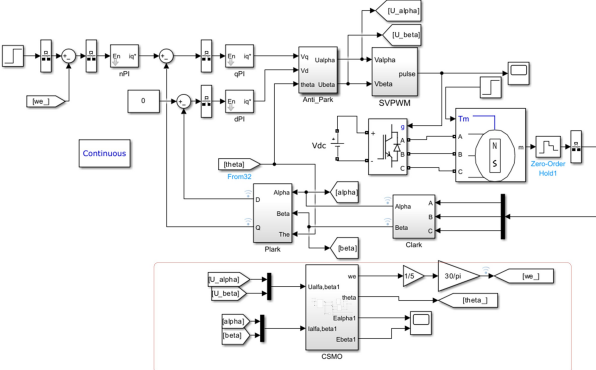


图 2 锁相环构框图

Fig.2 Phase-locked loop block diagram

3 仿真结果与分析

为了验证所设计的基于互补滑模观测器的无传感器算法的有效性,在 MATLAB/simulink 中进行仿真与测试,仿真模型如图 3 所示。同时将所设计方法与文献[15]中的超螺旋滑模观测器方法进行对比。



互补滑模观测器+卡尔曼滤波器+锁相环

图 3 基于互补滑模观测器的无传感器控制算法仿真
Fig.3 Sensorless control algorithm simulation based on complementary sliding mode observer

具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数
Tab.1 Parameters of PMSM

参数	数值
额定电压/V	48
额定功率/W	200
额定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	3 000
极对数	5
电感/mH	1.7
电阻/ Ω	1.36

同时搭建文献[15]中的超螺旋滑模观测器系统的仿真模型将其与本研究进行对比,采用锁相环计算转速和转子位置,文献[15]中超螺旋算法表示如式(22)。

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = k_1 |\bar{i}_\alpha|^{1/2} \text{sign}(\bar{i}_\alpha) + \int k_2 \text{sign}(\bar{i}_\alpha) \\ \hat{e}_\beta = k_1 |\bar{i}_\beta|^{1/2} \text{sign}(\bar{i}_\beta) + \int k_2 \text{sign}(\bar{i}_\beta) \end{cases} \quad (22)$$

式中, k_1 、 k_2 为超螺旋滑模增益, $\hat{e}_\alpha$ 、 $\hat{e}_\beta$ 为超螺旋滑模的估计反电动势。根据文献[15]中的约束条件对超螺旋算法取参数 $k_1 = 300$, $k_2 = 1\,500$ 。而对于本研究所设计的互补滑模观测器算法在式(19)中取参数 $k = 10$, $\rho = 0.125$ 。

仿真工况中,启动时给定转速 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,负载为额定负载 $0.64\text{ N}\cdot\text{m}$,在 0.25 s 时负载加载至 $1\text{ N}\cdot\text{m}$,在 1 s 时转速由 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 突变为 $900\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。仿真结果如图 4、图 5 所示。

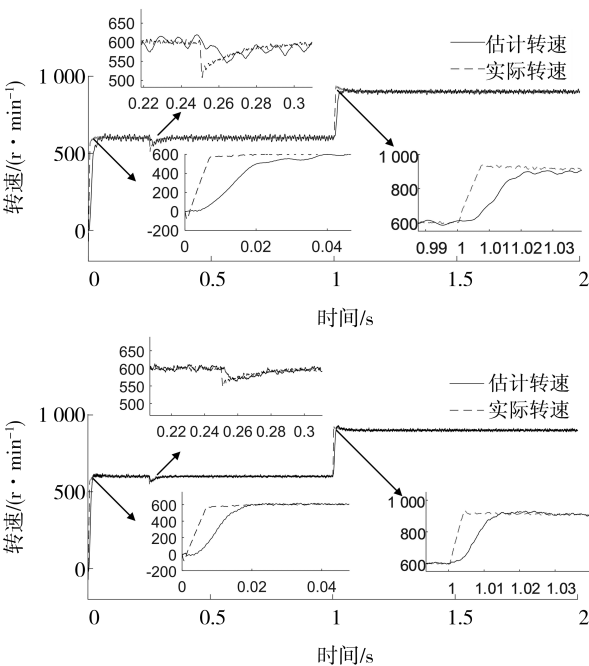


图 4 估计转速与实际转速对比
Fig.4 Comparison of estimated speed and actual speed

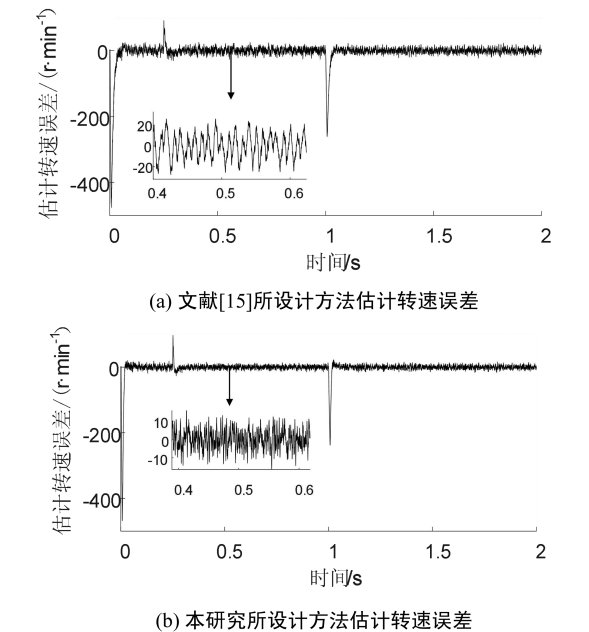


图 5 估计转速误差
Fig.5 Error between estimated speed and actual speed

由图 4 可知,文献[15]的方法在电机启动阶段估计转速误差较大,收敛速度较慢,经过 0.04 s

后达到稳态,在 0.25 s 负载突变时,文献[15]的方法动态性能较差。而本研究所设计方法在电机启动阶段转速波形抖动较小,在经过 0.02 s 后达到稳定,在 0.25 s 负载突变时能够及时跟踪转速变化,且调整速度较快,动态性能更优。由图 5 可知,文献[15]的方法稳定时转速误差为 $\pm 20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,稳态时仍存在较大的抖振,在 1 s 转速突变时,估计转速在经过 0.04 s 后达到稳定;而本研究所设计方法稳定时误差为 $\pm 10\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,在 1 s 转速突变时,经过 0.018 s 调整后达到稳定。综上可知,本研究所设计方法的响应速度更快,估计转速的误差更小,观测精度更高,能够有效抑制系统的抖振,且在负载突变以及转速突变时,调节时间更短,响应更迅速,鲁棒性更强。

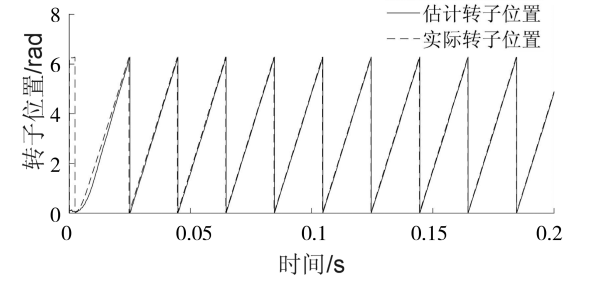
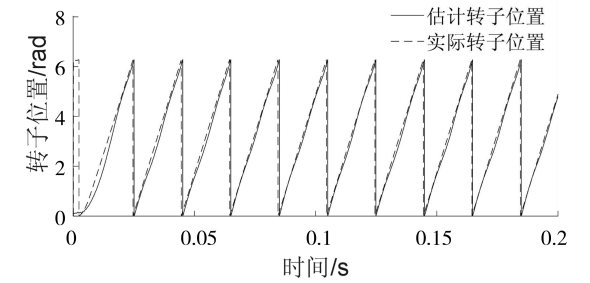


图 6 估计转子位置与实际转子位置对比
Fig.6 Comparison of estimated rotor position and actual rotor position

从图 6(a)、图 7(a)可见,低速时文献[15]的转子位置估计误差较大,随着转速增加,误差有所减少,但仍存在一定的相位差和抖振问题。而图 6(b)和图 7(b)表明,本研究所设计方法的估计值更接近实际值,且两者间相位差得到了改善。从稳定后的误差角度看,文献[15]所设计方法的估计转子位置稳态误差为 -0.10 rad ,最大误差为 -0.60 rad ,而本研究所设计方法的估计转子位置稳态误差为 -0.05 rad ,最大误差为 -0.30 rad ,误差相对更小,位置估计精度得到提高。

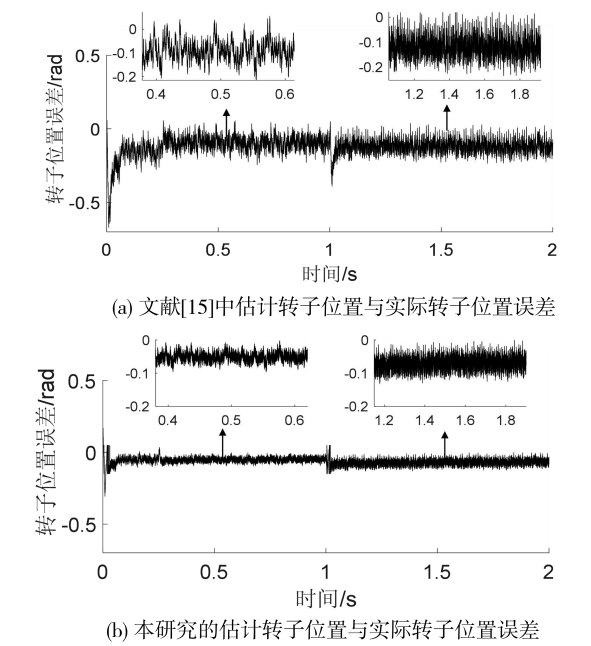


图 7 估计转子位置与实际转子位置误差

Fig.7 Error between estimated rotor position and actual rotor position

为进一步验证卡尔曼滤波器的滤波性能,将低通滤波器滤波后的反电动势和卡尔曼滤波器滤波后的反电动势进行对比。设置低通滤波器的截止频率为 $\omega_c=1\ 000\ \text{Hz}$,卡尔曼滤波器的增益 $l=1\ 000$,滤波前的反电动势如图 8 所示,用低通滤波器和卡尔曼滤波器滤波后的反电动势的 MATLAB 仿真图形图 9 所示。

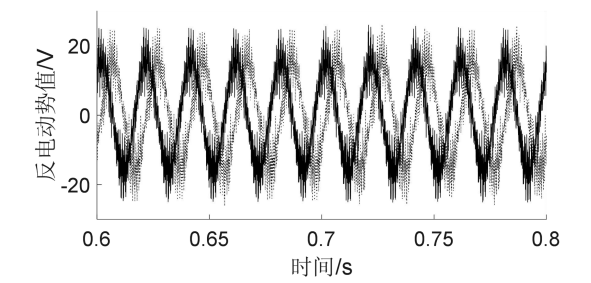


图 8 滤波前反电动势值

Fig.8 Back EMF value before filtering

从图 9 可知,在相同参数条件下,相比于低通

滤波器,卡尔曼滤波器对反电动势的滤波效果更优,仿真波形更加接近正弦波。同时结合图 7 本研究所设计方法估算的转子误差和超螺旋滑模观测器的转子误差对比可知,卡尔曼滤波器能够在保证滤波性能的前提下,有效改善低通滤波器带来的相位滞后问题。

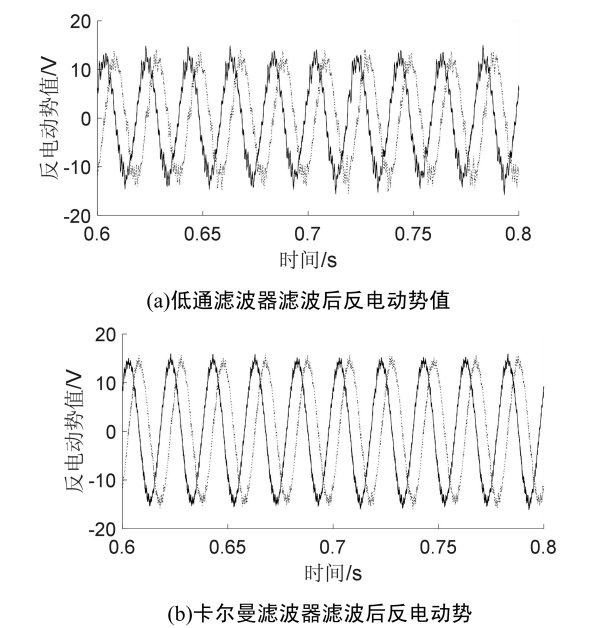


图 9 滤波后反电动势对比

Fig.9 Comparison of back EMF after filtering

4 结论

本研究提出了一种基于互补滑模观测器的无传感器算法,首先设计了互补滑模观测器,其次设计了卡尔曼滤波器对反电动势进行滤波,最后从理论上分析证明观测器的可行性并进行仿真验证。通过仿真与实验结果得出结论:在同样条件下,相比于超螺旋滑模观测器算法,所设计的基于互补滑模观测器的无传感器算法对反电动势有更好的滤波性能,对转子位置及转速的观测精度更高,收敛速度更快,在面对负载及转速突变有更好的动态性能,鲁棒性更优。

参考文献:

[1] 禹聪,康尔良. 永磁同步电机模糊滑模无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2024,28(1):87-94.

[2] 刘计龙,肖飞,沈洋,等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2017,32(16):76-88.

[3] 王兵,陈瀚,何孝祖,等. 基于可变边界层的永磁同步电机滑模观测器[J]. 微电机,2019,52(10):79-85.

参考文献:

- [1] LIU C, WANG Y J, CHEN Z H. Degradation model and cycle life prediction for lithium-ion battery used in hybrid energy storage system[J]. Energy, 2019,166:796–806.
- [2] 陈琳,陈静,王惠民,等. 基于小波包能量熵的电池剩余寿命预测[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1827–1835.
- [3] 郑永飞,文怀兴,韩昉,等. 基于电池外特征的粒子群神经网络电池健康状态预测[J]. 科学技术与工程,2019,19(36):184–189.
- [4] 郭邦军,李家琦,马小乐,等. 基于深度学习的动力锂离子电池容量估计[J]. 电池,2022,52(5):517–521.
- [5] 张浩,胡昌华,杜党波,等. 多状态影响下基于 Bi-LSTM 网络的锂电池剩余寿命预测方法[J]. 电子学报,2022,50(3):619–624.
- [6] 郝可青,吕志刚,邸若海,等. 基于鲸鱼算法优化长短时记忆神经网络的锂电池剩余寿命预测[J]. 科学技术与工程,2022,22(29):12900–12908.
- [7] 方斯顿,刘龙真,孔赖强,等. 基于双向长短期记忆网络含间接健康指标的锂电池 SOH 估计[J]. 电力系统自动化,2024,48(04):160–168.
- [8] 李峥,张泽恒,杨斌,等. 混合钳位式感应电能传输系统抗偏移恒流–恒压充电研究[J/OL]. 中国电机工程学报,1–10 [2024-05-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231898>.
- [9] PRADHAN S K, CHAKRABORTY B. Battery management strategies: an essential review for battery state of health monitoring techniques[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104427.
- [10] TRITHAM C, LEKAWAT L, ARRAYANGKOOL A, et al. A comparison between correlation and grey relational for big data and analytics [C]//2018 International Electrical Engineering Congress. Krabi: IEEE, 2018, pp. 1–4.

(责任编辑:方素华)

(上接第 85 页)

- [4] 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.
- [5] 鲁文其,胡育文,杜栩杨,等. 永磁同步电机新型滑模观测器无传感器矢量控制调速系统[J]. 中国电机工程学报,2010,30(33):78–83.
- [6] 孙庆国,朱晓磊,牛峰,等. 基于改进型积分滑模观测器的 PMSM 无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报,2024,44(8):3269–3278.
- [7] LIANG D L, LI J, QU R H, et al. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10):8994–9004.
- [8] 王孝洪,连维钊,翟名扬. 基于改进型滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 控制理论与应用,2023,40(7):1243–1251.
- [9] FAN Y, ZHANG L, CHENG M, et al. Sensorless SVPWM–FADTC of a new flux-modulated permanent-magnet wheel motor based on a wide-speed sliding mode observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5):3143–3151.
- [10] AN Q T, ZHANG J Q, AN Q, et al. Frequency-adaptive complex-coefficient filter-based enhanced sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1):335–343.
- [11] JIANG T, NI R, GU S, et al. A study on position estimation error in sensorless control of PMSM based on back EMF observation method[C]//24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Gyeongju: IEEE, 2021: 1999–2003.
- [12] 李宁,郝成,姚征,等. 改进滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(3):82–85,90.
- [13] 赵希梅,孙洪潇,金鸿雁. 永磁直线伺服系统终端互补滑模位置控制[J]. 电机与控制学报,2023,27(6):182–190.
- [14] 李长明,王传奎,魏利胜,等. 基于卡尔曼滤波的永磁同步电机转子位置估算方法研究[J]. 绥化学院学报,2019,39(9):143–147.
- [15] 康尔良,陈健. 永磁同步电机改进滑模无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2022,26(10):88–97.

(责任编辑:方素华)