

基于扩张状态观测器的永磁同步电机无位置传感器控制



张帅¹, 田兵¹, 王涛²

1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016

2. 浙江大学, 浙江 杭州 310027

摘要: 永磁同步电机(PMSM)凭借高效率、动态性能好等优点而被广泛应用。为降低PMSM系统的成本,提高系统可靠性,无位置传感器控制应运而生。针对有转子位置传感器PMSM矢量控制系统可靠性降低和抗干扰能力下降等问题,本文提出一种改进的线性扩张状态观测器(ILESO)无位置控制方法。通过在未知扰动观测回路中加入基于转速观测误差反馈的比例环节来计算快速变化的反电动势,可提高对系统外部扰动的估计精度,增强鲁棒性。此外,为了在斜坡型扰动下转子位置误差快速收敛为零,设计了一种增强型锁相环(EPLL)。最后,采用永磁电动机与发动机对拖的方式进行试验,验证了该控制策略的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 无位置传感器控制; 线性扩张状态观测器; 增强型锁相环

中图分类号: TM351

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.03.004

永磁同步电机(PMSM)在航空电作动器和多电飞机电推进领域具有广阔的应用前景^[1]。作为PMSM高性能控制的基础,位置传感器是调速系统不可缺少的组成部件。然而,PMSM无位置传感器控制在提高可靠性和降低成本方面更具竞争力。为了满足这一需求,近年来,不使用位置传感器的永磁同步电机磁场定向控制得到了广泛的研究。一般来说,根据运行转速的不同,无位置传感器控制可分为中高速运行范围内的反电动势模型法,以及零速和低速运行范围内的高频注入法。

高频注入法需要向PMSM注入额外的高频电压。由于转子位置信息可以从高频电流中提取,且只与转子的凸极特性有关,因此高频注入法可以很好地估计出零速和低速时的转子位置^[2]。反电动势模型法仅通过电机基频模型即可估计出位置信息,由于该方法实现相对简单,在PMSM无位置传感器控制中得到了广泛的应用。反电动势模型法主要包括滑模观测器法(SMO)^[3]、模型参考自适应法(MRAS)^[4]、扩展卡尔曼滤波(EKF)^[5]和扩张状态观测器(ESO)等。其中,SMO得到的反电动势不可避免地存在“抖

振”,这将降低系统的稳态精度。电机参数不匹配将导致基于MRAS的无位置传感器控制性能下降。EKF在噪声环境下具有良好的估计性能。然而,由于算法的复杂性,它不容易在低成本的处理器的实现。

自抗扰控制(ADRC)更少依赖于精确的数学模型,具有较强的抗干扰能力^[6]。因此,将自抗扰控制器应用于PMSM位置无传感器控制系统具有广阔的前景^[7]。自抗扰控制器由跟踪微分器、ESO和非线性状态误差反馈控制器组成。ESO作为自抗扰的核心,对系统的抗扰性能有着决定性的影响^[8]。ESO不仅可以估计系统的已知状态变量,还可以估计系统的未知扰动。因此,ESO在不确定系统中被广泛应用。ESO可分为线性ESO和非线性ESO^[9]。非线性ESO估计精度高,响应速度快,但由于设定参数较多,稳定性分析复杂,阻碍了其在工程领域的应用。相比之下,线性扩张状态观测器(LESO)的参数设置方便,稳定性分析容易,因此常应用于工程实践。

ESO作为一种无位置传感器控制技术,近年来受到越来越多研究者的关注。曾香平等^[10]提出了一种LESO来估

收稿日期: 2024-09-11; 退修日期: 2024-11-21; 录用日期: 2025-01-17

基金项目: 航空科学基金(2022Z024052002); 中央高校基本科研业务费专项资金(NJ2023012, NJ2023014)

引用格式: Zhang Shuai, Tian Bing, Wang Tao. Linear extended state observer-based sensorless control for permanent magnet synchronous motors[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(03): 31-39. 张帅, 田兵, 王涛. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 航空科学技术, 2025, 36(03): 31-39.

计IPMSM的等效反电动势,并通过等效反电动势得到转子位置和转速。张明远等^[11]提出了一种LESO来估计感应电机的转速。曲立志等^[12]提出了一种由两个LESO组成的改进自抗扰控制器。两个LESO分别用于估计反电动势和内部扰动。然而,由于两个LESO之间的耦合,不可能完全独立地估计反电动势和扰动。康尔良等^[13]通过辨识转动惯量,提高了ESO对扰动的观测精度,减少了估计负担,但参数设计较为复杂。朱良红等^[14]提出了一种级联扩张观测器,利用级联的ESO估计系统所受的集总扰动,对其进行补偿。王淑旺等^[15]构造三阶LESO来实现对等效反电动势的观测,然后利用正切反函数计算转子位置。为了结合LESO和NESO的优点,陈志翔等^[16]提出了一种线性-非线性切换ESO来估计反电动势。

综上,ESO现有研究中针对反电动势的观测,多为ESO结构和参数整定上的研究,主要思路是以升阶和线性化为主要方法来提高观测精度,但没有足够的处理能力处理快速变化的反电动势和斜坡型负扰动。

为了准确地估计PMSM的反电动势,从而准确地估计转子的位置和转速,本文提出了一种改进的LESO无位置传感器控制方法。ILESO是在传统LESO基础之上,于干扰估计器中插入基于转速误差反馈的比例环节来估计快速变化的反电动势,提高了系统对扰动的观测速度。此外,为了使频率斜坡变化时转子位置误差收敛于零,给出了一种增强锁相环(EPLL)。最后,通过两个电机对拖的试验方式验证了该方法的有效性。

1 基于LESO的反电动势观测器

对于如下形式的一阶系统

$$\dot{x}_1 = f_0 + f_1 + b_0 u \quad (1)$$

式中, x_1 为状态变量; f_0 为系统已知扰动; f_1 为系统未知扰动; b_0 为输入放大系数; u 为控制输入。

将未知扰动 f_1 扩展为一个新的状态,则式(1)可以改写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_0 + f_1 + b_0 u \\ \dot{x}_2 = \dot{f}_1 \end{cases} \quad (2)$$

对此系统,可以设计如下形式的LESO

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 + f_0 + b_0 u - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (3)$$

式中, e 为估计误差; z_1 用来观测输出 x_1 ; z_2 用来观测系统未知扰动 f_1 ; β_1 和 β_2 为LESO的增益。

对于表贴式PMSM,基于 $\alpha-\beta$ 坐标系的PMSM数学模型可表示为

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_\alpha \\ \dot{u}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + PL_s & 0 \\ 0 & R + PL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, u_α 和 u_β 为定子电压; i_α 和 i_β 为定子电流; R 为定子电阻; L_s 为定子电感; P 为微分算子。 E_α 和 E_β 为反电动势,且满足

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \omega_e \psi_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, ψ_f 为永磁体磁链; ω_e 为电角速度; θ_e 为转子位置角。

根据LESO的基本思想,系统输出和未知扰动可以表示为

$$\begin{cases} b_0 u = u_{\alpha\beta}/L_s \\ f_0 = -Ri_{\alpha\beta}/L_s \\ f_1 = -E_{\alpha\beta}/L_s \end{cases} \quad (6)$$

由此, $\alpha-\beta$ 轴的反电动势估计如下

$$\begin{cases} e_{\alpha\beta} = z_1 - i_{\alpha\beta} \\ \dot{z}_1 = z_2 - Ri_{\alpha\beta}/L_s + u_{\alpha\beta}/L_s - \beta_1 e_{\alpha\beta} \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e_{\alpha\beta} \end{cases} \quad (7)$$

当系统进入稳态时,反电动势的估计值为 $\hat{E}_{\alpha\beta} = -L_s z_2$ 。

2 基于ILESO的反电动势观测器

2.1 LESO性能分析

由于式(7)具有对称性,以 α 轴为例分析LESO对反电动势的估计性能。由(7)可得到LESO中的相关传递函数

$$\begin{cases} z_1(s) = \frac{\beta_1 s + \beta_2 - Rs}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} i_\alpha(s) + \frac{s/L_s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} u_\alpha(s) \\ z_2(s) = \frac{\beta_2}{s^2 + (\beta_1 + R/L_s)s + \beta_2} f_{1\alpha}(s) \end{cases} \quad (8)$$

式中, z_1 是对电流 i_α 的观测值,但变化的电压 u_α 会影响观测值 z_1 对电流 i_α 的观测效果。观测值 z_2 是对系统未知扰动经二阶滤波后的结果。

传统LESO的原理框如图1所示。由图1可知,电流观测值 z_1 和扰动观测值 z_2 均利用了状态观测误差 e 。其中电流观测值 z_1 是对误差 e 比例反馈和积分,而扰动观测值 z_2 仅为误差 e 的积分,导致ESO对未知扰动 f_1 的跟踪速度较慢,观测性能受限。

2.2 引入速度观测误差比例反馈的ILESO设计

为了提高ESO对扰动的观测速度,在扰动观测通道中增加观测误差 e 的比例增益通道,以提高对观测误差信号 e 的利用率。因此本文构造如式(9)所示的LESO

$$\begin{cases} e_{\alpha\beta} = z_1 - i_{\alpha\beta} \\ \dot{z}_1 = z_2 - Ri_{\alpha\beta}/L_s + u_{\alpha\beta}/L_s - \beta_1 e_{\alpha\beta} \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e_{\alpha\beta} - \beta_3 \dot{e}_e \end{cases} \quad (9)$$

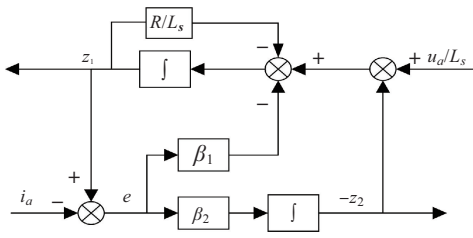


图1 LESO原理框图

Fig.1 The block diagram of LESO

式中, β_3 为观测误差 e 的微分增益系数。

由式(9)可得到观测量 z_2 的闭环传递函数

$$z_2(s) = \frac{\beta_2 + \beta_3 s}{s^2 + (\beta_1 + R/L_s + \beta_3)s + \beta_2} f_{1a}(s) \quad (10)$$

对比式(8)和式(10)发现,在扰动观测通道中增加的误差信号 e 的微分增益 $\beta_3 e$,其本质是对 z_1 反馈通道系数 $\beta_1 e$ 的分解。在没有影响传统 LESO 对转速跟随性能的前提下,将部分反馈增益 $\beta_3 e$ 引入扰动观测通道,提升了观测速度。引入反馈增益 β_3 后的 ILESO 的原理框图如图2所示。

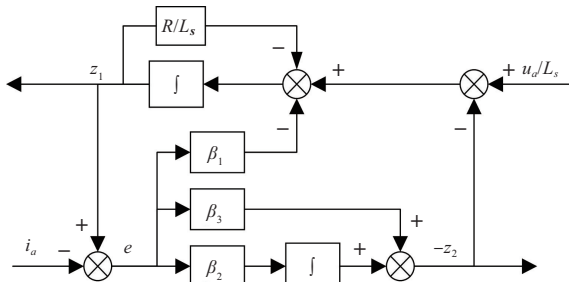


图2 ILESO原理框图

Fig.2 The block diagram of ILESO

相比于图1,可以看出增加的反馈增益 $\beta_3 e$ 实质相当于在扰动观测通道引入了误差信号 e 的比例反馈,提升了对误差信号 e 的利用率。通过配置系数 β_1 、 β_2 和 β_3 可以加快观测器对未知扰动 f_1 的辨识速度,从而提高系统的抗干扰能力。

3 增强型锁相环

传统归一化正交锁相环能够实现对斜坡信号输入实现无静差跟踪,但当输入信号为抛物线时(电机加减速阶段),会出现稳态误差,其表达式为

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s^2}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2} \cdot \frac{k_a}{s^3} = \frac{k_a}{\omega_n^2} \quad (11)$$

式中, k_a 为电机加速度系数,从式(11)中可以看出,带宽 ω_n 越大, e_{ss} 越小,而电机加速度越大, e_{ss} 越大。当锁相环的带

宽设置太小或电机的加速度太大时,该误差会使估算位置角超出最大稳定界限。为了改善电机的无位置控制动态性能,本文提出了一种增强型锁相环,可以减小电机在动态运行过程中出现的转速和位置角估算误差。增强型锁相环原理框图如图3所示。

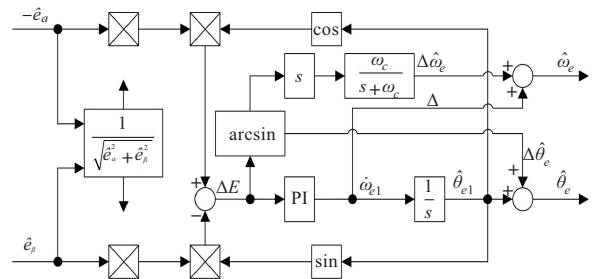


图3 EPLL原理框图

Fig.3 The block diagram of EPLL

基于EPLL的传递函数表示如下

$$G(s) = \frac{\Delta \theta_e}{\theta_e} = \frac{s^3}{s^3 + (\omega_n + k_p)s^2 + (\omega_n k_p + k_i)s + \omega_n k_i} \quad (12)$$

增强锁相环内部环路与传统锁相环没有差异,所以 k_p 、 k_i 的参数设计与传统锁相环的设计方法一样。

当系统输入为抛物线时,其表达式为

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{k_a s}{s^3 + (\omega_n + k_p)s^2 + (\omega_n k_p + k_i)s + \omega_n k_i} = 0 \quad (13)$$

由式(13)可知,当输入信号为抛物线时,转子位置误差可以通过EPLL收敛到零。因此与传统锁相环相比,EPLL有更好的位置和转速估计性能。

4 仿真分析

为验证改进的 ILESO 更具有优势,对传统 LESO 和本文所提出的改进方案的仿真结果进行对比。采用仿真模型,图4为基于 ILESO 控制的 PMSM 无位置传感器原理框图。表1为仿真和试验所用 PMSM 具体参数。

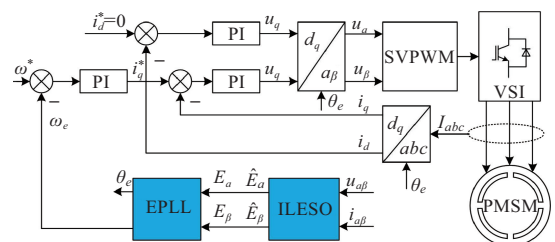


图4 基于 ILESO 的 PMSM 无位置传感器原理框图

Fig.4 The block diagram of ILESO-based PMSM sensorless control

表1 PMSM参数
Table 1 PMSM parameter

电机参数	数值
直流母线电压/V	120
额定功率/kW	0.8
额定相电流/A	7.5
额定转速/(r/min)	750
极对数	4
定子电感/mH	2.7
定子电阻/ Ω	0.65
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.01
磁链/Wb	0.16

首先对本文所改进的ILES0和传统LES0的观测性能进行分析。LES0与观测器带宽的关系为 $\beta_1=2\omega_0, \beta_2=\omega_0^2$ 。ILES0进行参数设计时,令 $\beta_1=\beta_3=\omega_0, \beta_2=\omega_0^2$ 。图5和图6分别给出了在额定负载 $2\text{N}\cdot\text{m}$ 情况下,参考转速 500r/min 转速误差和位置估计误差对比试验。ILES0和LES0的带

宽 ω_0 设置为 $\omega_0=500\text{rad/s}$,并统一使用EPLL。

从图5和图6可以看出,基于LES0的观测转速和位置都能跟随转子实际值,但存在一定的转速抖振,观测转速误差为 $\pm 8\text{r/min}$ 。而基于ILES0的观测转速误差仅为 $\pm 2\text{r/min}$,并且能更快地跟随转子实际位置。通过对比可知基于ILES0的具有更高的转速和位置观测精度。

图7和图8为在 500r/min 转速下,在 0.35s 突加负载至 $5\text{N}\cdot\text{m}$ 的试验结果。从图7可以看出,在阶跃负载扰动下,基于LES0的转子位置估计误差超过 70r/min ,而基于ILES0的转子位置估计误差小于 40r/min 。两图对比说明ILES0的无位置算法具有更强的抗扰能力。

5 试验验证

试验平台如图9所示。图中电机驱动控制器共4层PCB,最上层是以STM32F7为核心的控制板。中间两层是采集电流、位置等信息的采样板,底层是功率板。功率板整流后直流母线电压为 120V ,开关频率为 10kHz ,使用负载电

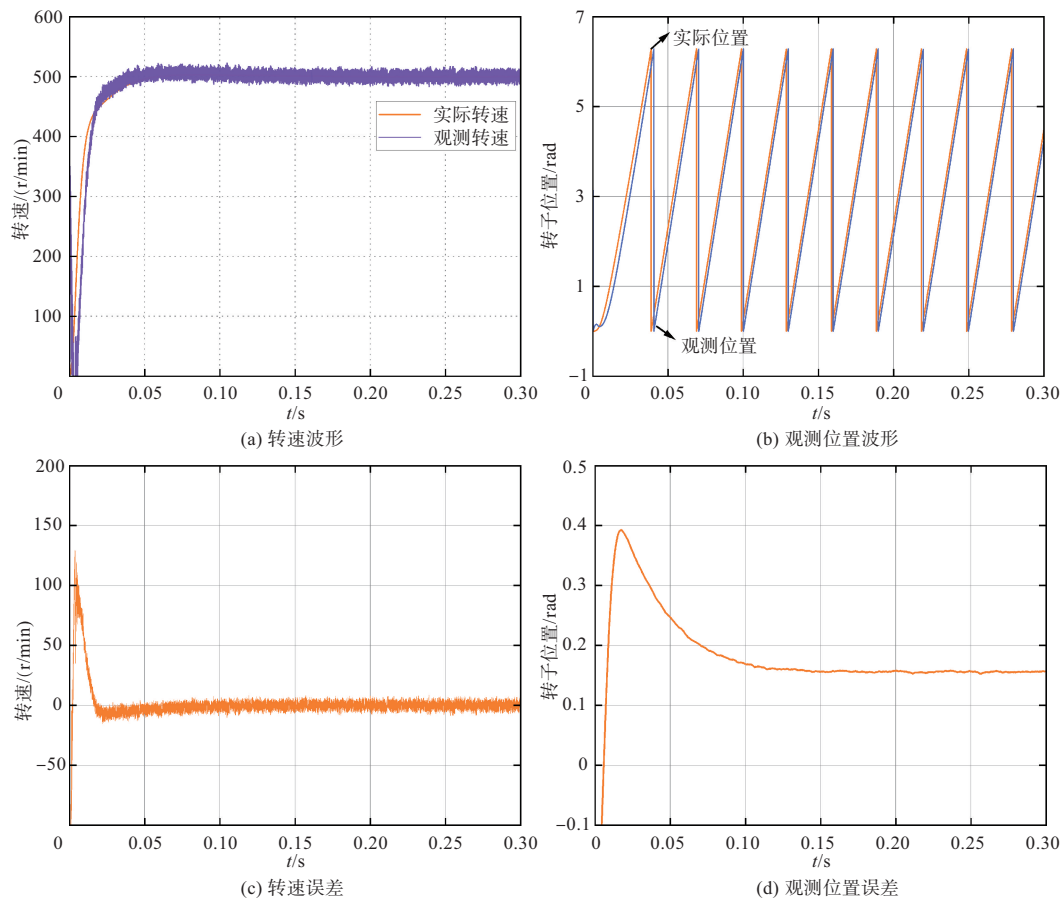


图5 LES0转速和位置仿真波形

Fig.5 LES0 based speed and position waveform

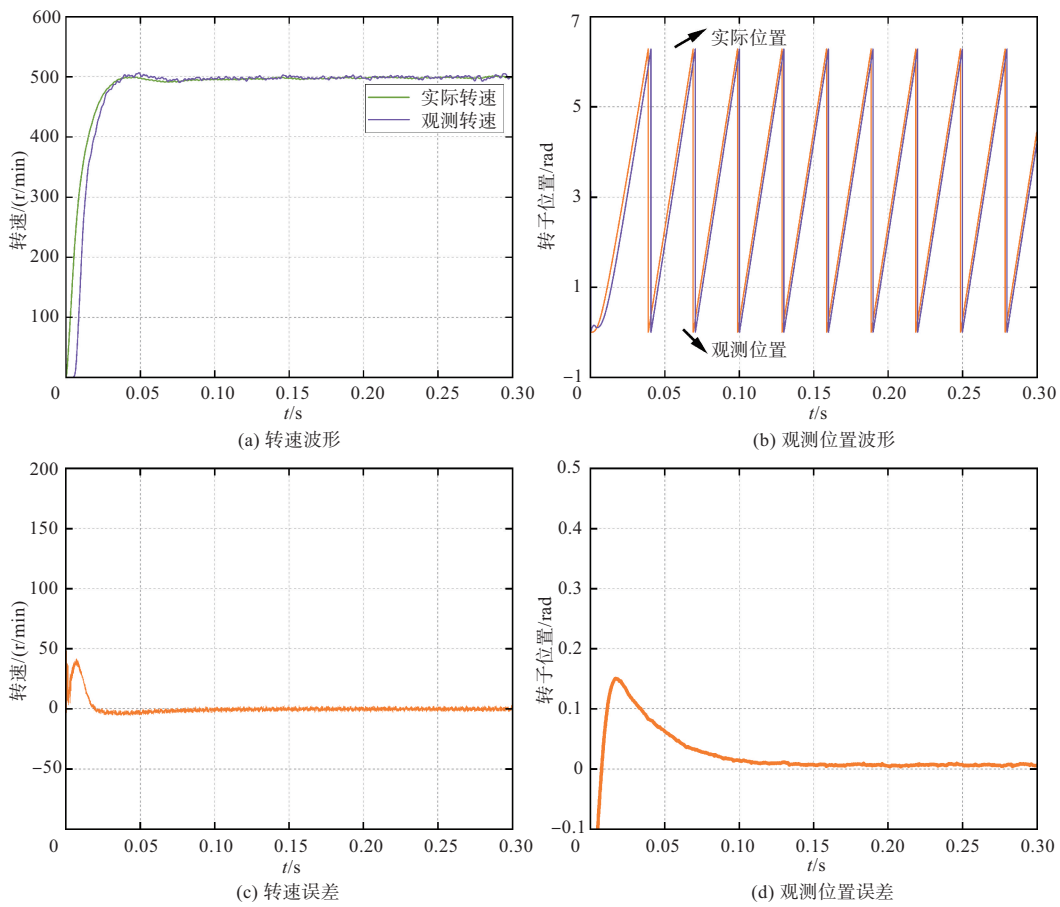


图6 ILESO转速和位置仿真波形

Fig.6 ILESO based speed and position waveform

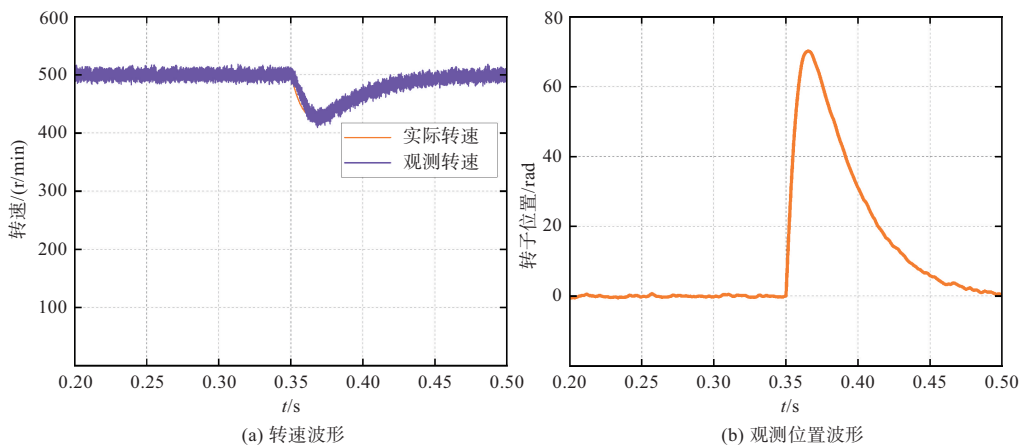


图7 额定负载下LESO转速和位置误差

Fig.7 LESO speed and position error under rated load

阻来模拟负载扰动试验。上位机与控制板通过RS485进行数据传输,三相PMSM参数与表1保持一致。

图10和图11分别对应电机工作于500r/min时LESO和ILES0的转速试验波形。从图中可以看出,ILES0观测的转速误差要小于LESO,且LESO观测转速存在抖振,

ILES0抖振被明显抑制。试验结果说明了ILES0在抑制抖振和观测精度上要优于传统LESO。

图12和图13为电机工作于500r/min时LESO和ILES0的位置试验波形。由图12和图13可知,LESO的角度观测误差较大,ILES0的角度观测误差较小,电机运行稳定。试

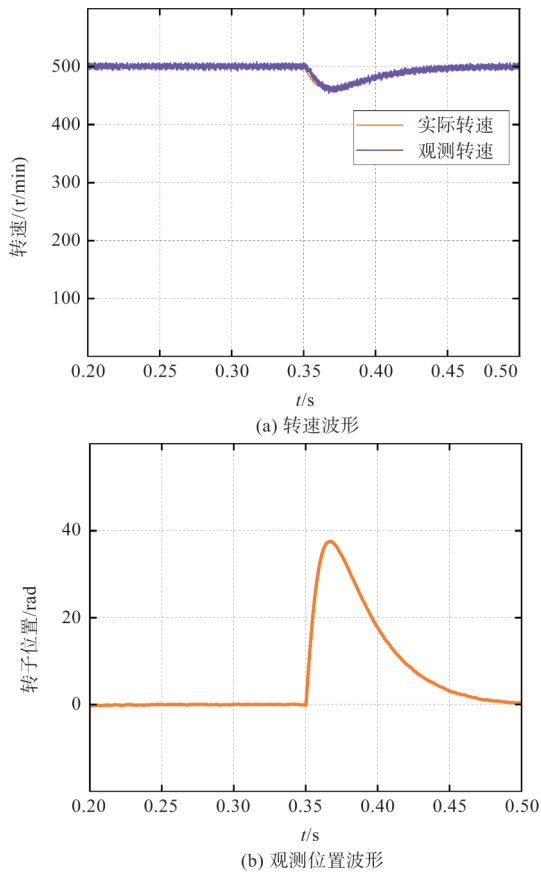


图8 额定负载下 ILESO 转速和位置误差
Fig.8 ILESO speed and position error under rated load

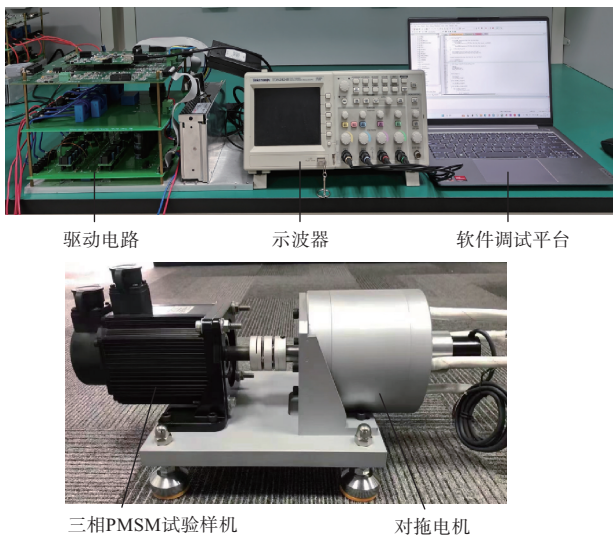


图9 PMSM 控制系统试验平台
Fig.9 PMSM control system experiment platform

验结果说明了 ILESO 在观测精度上要优于传统 LESO。

图 14 和图 15 分别为 LESO 和 ILESO 观测器下的加减

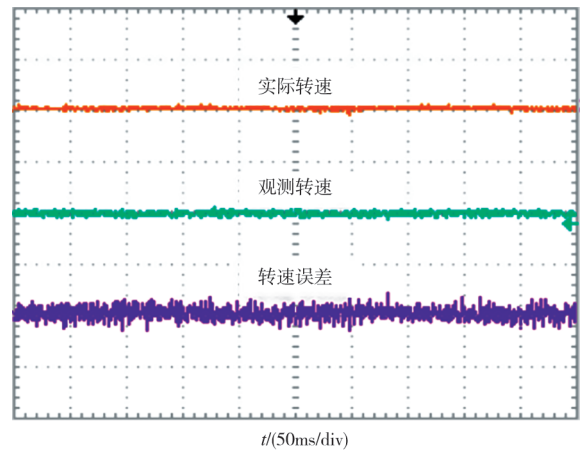


图10 LESO 估计转速波形
Fig.10 LESO estimated speed waveform

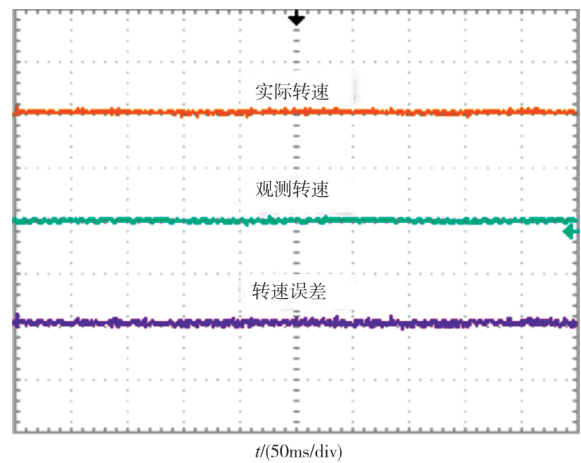


图11 ILESO 估计转速波形
Fig.11 ILESO estimated speed waveform

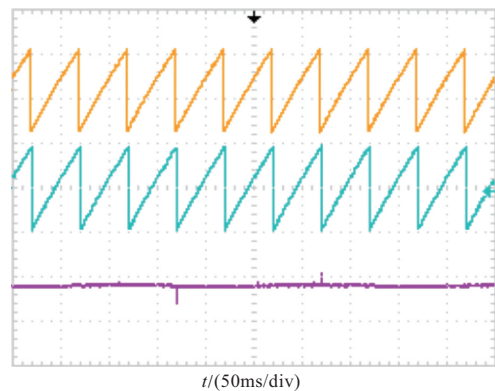


图12 LESO 估计与实际转子位置波形对比

Fig.12 LESO estimation compared with actual rotor position
载试验波形图。该试验参考转速设置为 500r/min, 在 0.5s 时刻附近突加至 5N·m, LESO 观测转速误差最大可达 $\pm 70\text{r}/\text{min}$ 。ILES0 观测转速误差明显减少, 观测转速误差

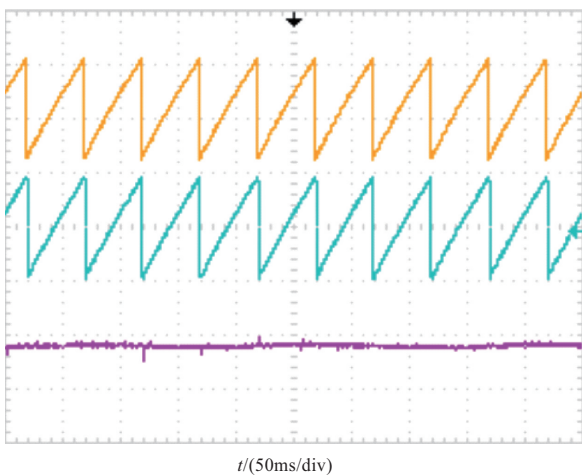


图13 ILESO估计与实际转子位置波形对比

Fig.13 ILESO estimation compared with actual rotor position

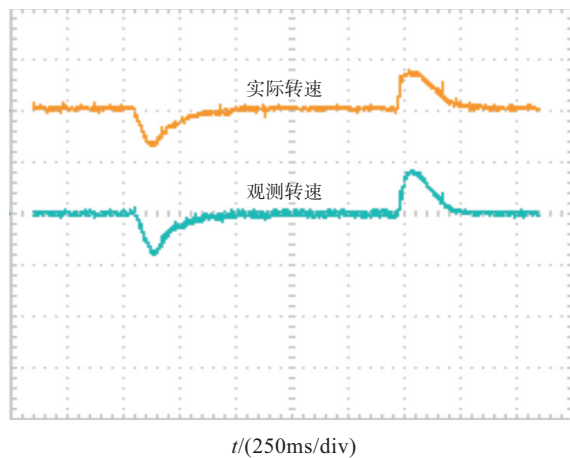


图14 LESO电机转速响应曲线

Fig.14 LESO motor speed response waveform

最大为 $\pm 35\text{r/min}$ 左右。在 2s 时刻附近进行卸载试验,LESO转速观测转速误差可达 75r/min 和 -70r/min ,ILES0观测转速误差为 38r/min 和 -35r/min 。该试验说明了ILES0具有更好的动态跟踪性能。

6 结论

本文提出了一种基于ILES0的PMSM无位置传感器控制方法,用于准确估计PMSM反电动势,从而估计转子的位置和速度。该算法由纯积分和基于速度误差反馈的比例环节组成,用于估计无位置传感器系统的总扰动。通过研究,得出以下结论:

(1) ILES0在抑制“抖振”和观测精度上要优于传统LESO。

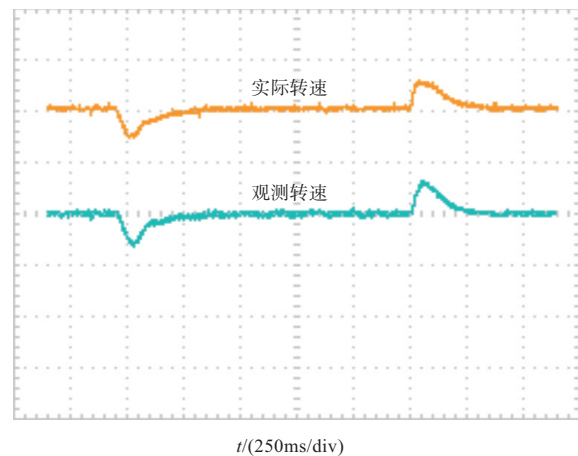


图15 ILES0电机转速响应曲线

Fig.15 ILES0 motor speed response waveform

(2) ILES0能准确估计等效反电动势。与LESO方法相比,负载扰动和在额定转速下转子位置估计误差明显减小,系统具有良好的稳态和动态性能。

AST

参考文献

- [1] 张峻涛. 高压直流电机驱动系统电磁兼容设计改进技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 59-67.
Zhang Juntao. Research on electromagnetic compatibility test rectification technology of high voltage DC motor driving system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3): 59-67. (in Chinese)
- [2] 孙佃升, 章跃进. 自抗扰控制和高频信号注入的嵌式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(4): 508-514.
Sun Diansheng, Zhang Yuejin. Sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection control and high frequency signal injection technique[J]. Control Theory and Applications, 2017, 34(4): 508-514. (in Chinese)
- [3] 王宏喆, 甘醇, 倪楷, 等. 基于SMO和RLS的航空电推进永磁电机驱动系统[J]. 航空科学技术, 2023, 34(1): 97-104.
Wang Hongzhe, Gan Chun, Ni Kai, et al. Research on sensorless control of SPMSM in aviation electric propulsion drive system based on SMO and RLS[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(1): 97-104. (in Chinese)
- [4] 吴新兵, 章玮, 谈方成. 基于MRAS永磁同步电机无速度传感器的改进控制策略[J]. 微特电机, 2023, 51(7): 34-39.

- Wu Xinbing, Zhang Wei, Tan Fangcheng. Improved speed sensorless control of PMSM based on model reference adaptive system[J]. *Small and Special Electrical Machines*, 2023, 51(7): 34-39. (in Chinese)
- [5] 王宽, 陈龙淼, 肖鑫, 等. 基于速度环扩展卡尔曼滤波的无位置传感器电机控制[J]. *微电机*, 2023, 56(1): 58-64.
- Wang Kuan, Chen Longmiao, Xiao Xin, et al. Sensorless motor control based on speed loop extended Kalman filter[J]. *Micromotor*, 2023, 56(1): 58-64. (in Chinese)
- [6] Du Chao, Yin Zhonggang, Zhang Yanping, et al. Research on active disturbance rejection control with parameter autotune mechanism for induction motors based on adaptive particle swarm optimization algorithm with dynamic inertia weight[J]. *IEEE Transaction on Power Electronnics*, 2019, 34(3): 2841-2855.
- [7] Wang Gaolin, Liu Ran, Zhao Nannan, et al. Enhanced linear ADRC strategy for HF pulse voltage signal injection-based sensorless IPMSM drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(1): 514-525.
- [8] 吴春, 傅子俊, 孙明轩, 等. 基于扩张状态观测器负载转矩补偿的永磁同步电机全速范围无位置传感器控制[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(S1): 172-181.
- Wu Chun, Fu Zijun, Sun Mingxuan, et al. Sensorless control of PMSM in all speed range based on extended state observer for load toque compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(S1): 172-181. (in Chinese)
- [9] 孙佃升. 基于改进型ESO的表贴式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. *电气传动*, 2021, 51(3): 3-8.
- Sun Diansheng. Sensorless control of surface mounted permanent magnet synchronous motor based on improved extended state observer[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(3): 3-8. (in Chinese)
- [10] 曾香平, 赵世伟, 尹华杰, 等. 基于线性扩张状态观测器的PMSM无位置传感器控制[J]. *微特电机*, 2022, 50(5): 52-56.
- Zeng Xiangping, Zhao Shiwei, Yi Huajie, et al. Sensorless speed control of PMSM based on linear extended state observer [J]. *Small and Special Electrical Machines*, 2022, 50(5): 52-56. (in Chinese)
- [11] 张明远, 史黎明, 范满义, 等. 长初级双边直线感应电动机分段推力协同控制和测速算法[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(3): 659-669.
- Zhang Mingyuan, Shi Liming, Fan Manyi, et al. Thrust cooperative control and speed measurement algorithm of segmented long primary double-sided linear induction motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38 (3): 659-669. (in Chinese)
- [12] Qu Lizhi, Qiao Wei, Qu Liyan. An enhanced linear active disturbance rejection rotor position sensorless control for permanent magnet synchronous motors[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(6): 6175-6184.
- [13] 康尔良, 吴炳道, 禹聪. 基于LADRC控制的永磁同步电机无位置传感器研究[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(2): 69-78.
- Kang Erliang, Wu Bingdao, Yu Cong. Research on sensorless of permanent magnet synchronous motor based on LADRC control[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(2): 69-78. (in Chinese)
- [14] 朱良红, 张国强, 李宇欣, 等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37 (18): 4614-4624.
- Zhu Lianghong, Zhang Guoqiang, Li Yuxin, et al. Active disturbance rejection control for position sensorless permanent magnet synchronous motor drives based on cascade extended state observer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18): 4614-4624. (in Chinese)
- [15] 王淑旺, 李晶晶, 王涛. 基于方波注入的PMSM无位置传感器控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022, 13(9): 55-58.
- Wang Shuwang, Li Jingjing, Wang Tao. Sensorless control of PMSM based on square wave injection[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2022, 13(9): 55-58. (in Chinese)
- [16] 陈志翔, 高钦和. 线性/非线性切换扩张状态观测器[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(6): 902-908.
- Chen Zhixiang, Gao Qinhe. Linear/nonlinear switching extended state observer[J]. *Control Theory and Applications*, 2019, 36(6): 902-908. (in Chinese)

Linear Extended State Observer-based Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Motors

Zhang Shuai¹, Tian Bing¹, Wang Tao²

1. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

2. *Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

Abstract: The permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive equipped with sensors may experience reduced reliability and diminished anti-disturbance capabilities. In light of this, this paper introduces an advanced linear extended state observer (ILESO) based sensorless control approach. To enhance the estimation accuracy of rapidly changing back-electromotive force and bolster robustness, a proportional action in connection with the speed estimation error is integrated into the uncertainty observer. Furthermore, an enhanced phase-locked loop (EPLL) is employed to expedite the convergence rate of rotor position estimation error, particularly under ramp-changed disturbances. Finally, the efficacy of this control strategy is experimentally validated on a PMSM-Generator set.

Key Words: PMSM; sensorless control; linear extended state observer; enhanced phase-locked loop

Received: 2024-09-11; **Revised:** 2024-11-21; **Accepted:** 2025-01-17

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2022Z024052002); Foudamental Research Funds for the Contral Universitives (NJ2023012, NJ2023014)