

面向永磁同步电机无传感器控制的 二阶改进扩展状态观测器

刘思源, 刘凌

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统扩展状态观测器(extended states observer, ESO)为保证收敛性和提升系统动态性能而增大校正项增益,进而加剧对于高频噪声敏感性的问题,提出了一种面向永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)无位置传感器控制的改进扩展状态观测器(improved ESO, IESO)。结合PMSM扩展反电动势全阶模型,将扩展反电动势作为ESO扩展的状态;通过将低阶动态方程的输出作为高阶动态方程的输入的方法设计IESO,从而有效降低校正项增益,进而减小系统对高频噪声的敏感性;在校正项中引入饱和函数以限制高增益观测器可能引入的峰值效应,并进行了收敛性分析。数值仿真结果表明:相较于传统线性ESO,采用IESO后,PMSM无传感器控制系统在电机启动、调速及突加负载时动态性能均有提升,误差最大值减小,同时收敛速度加快约25%;在测量电流加入0.5 A随机高频噪声后,传统方法收敛时间增加了约25%,转速误差最大值增大了约40%,而IESO并没有显著增加,同时相较于传统方法,IESO的角度误差高频噪声减小了约60%,因而IESO能够显著抑制系统高频噪声。

关键词: 永磁同步电机;无位置传感器控制;二阶状态观测器;高增益观测器;高频噪声抑制

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202408001 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0001-08

A Second-Order Improved Extended States Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor Sensorless Control

LIU Siyuan, LIU Ling

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the problem that the conventional extended states observer (ESO) increases the gain of the correction term in order to ensure convergence and improve the dynamic performance of the system, and thus aggravates the sensitivity to high-frequency noise, an improved ESO (IESO) for sensorless control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) is proposed in this paper. First, combined with PMSM extended back electromotive force model, extended back electromotive force is regarded as the extended state of ESO. Then, IESO is designed by using the output of the low-order dynamic equation as the input of the high-order dynamic function to effectively reduce the gain of the correction term, and thus reduce the sensitivity of the system to high-frequency noise. Then, the saturation function is introduced into the correction term to limit the peaking phenomenon that may be introduced by the high gain

收稿日期: 2023-12-25。 作者简介: 刘思源(1999—),男,博士生;刘凌(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977173)。

网络出版时间: 2024-02-23

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240223.1245.004>

observer, and the convergence analysis is carried out. The numerical simulation results reveal that, compared with the conventional linear ESO, through the IESO proposed in this paper, the dynamic performance of the PMSM sensorless control system is improved when the motor is started, the speed is adjusted and the load is suddenly applied. The maximum value of error is reduced and the convergence speed is accelerated by about 25%. Besides, when 0.5 A random high-frequency noise is added to the measured current, the convergence time of the traditional method increases by about 25%, and the maximum speed error increases by about 40%, while those of IESO do not increase significantly. Compared with traditional methods, IESO's angle error high-frequency noise is reduced by about 60%, so IESO can significantly suppress system high-frequency noise.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; sensorless control; second-order states observer; high gain observer; high frequency noise suppression

近年来,永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由于高效率、高功率密度、宽调速范围等特性,在机器人、电动汽车、全电飞机等对电机性能具有较高要求的领域得到了广泛应用。PMSM是典型的非线性多变量耦合系统。目前,常用的PMSM控制策略之一是矢量控制,其具有优异的动态性能^[1-2]。电机转子位置信息是矢量控制所不可缺失的。

在获取电机转子位置信息时,传统的方式是通过编码器、旋转变压器等机械式传感器对电机转子角度进行测量,而这不可避免地造成控制系统对传感器精度及可靠性的依赖。为此,PMSM无传感器控制吸引了众多研究人员的目光^[1-9]。无传感器控制旨在通过稳定性高的电压、电流传感器对电机相应信号进行采样,进而计算出电机转子位置信息。该方法摒弃了传统的机械式位置传感器,因而很好地降低了系统成本、安装难度并提升了控制系统可靠性。

PMSM无传感器控制技术可以分为基于凸极性的方法和基于模型的方法,分别多用于低速和高速。对于基于电机模型的方法而言,传统的方法多采用降阶模型,将待观测状态(如扩展反电动势或有效磁链)视为扰动项^[6-11]。这会不可避免地导致系统可靠性和观测精度的下降。PMSM全阶模型是对传统模型的扩展,将反电动势动态方程引入电机电压方程,构建二阶模型。在此基础上,将扩展状态观测器(extended states observer, ESO)引入状态观测是一种常用的做法^[12-19]。文献[12]首次提出了ESO,并将校正项设计为线性。传统的线性ESO在校正项直接采用线性反馈,该方法能有效消除稳态误差,在观测精度方面具有优势。然而,由于其是

典型的高增益观测器,为保证系统收敛性以及提升观测器动态性能,校正项增益需要随着阶数的增加显著增大。这会导致系统对于高频噪声的敏感性显著提升,同时带来不期望的峰值效应^[20]。

为解决该问题,一个有效的做法是将符号函数引入观测器校正项,进而系统改写为高阶滑模观测器的形式,从而在不需过大增益的情况下提升系统动态性能^[20-24]。然而,由于符号函数天然的不连续特性,会不可避免地带来系统中不期望的抖振,同时由于滑模观测器自身的限制,仅能保证系统渐进收敛,因而还存在收敛时间的问题。

为解决上述问题,本文对ESO误差项进行了重构,提出了一种改进ESO(improved ESO, IESO)用于观测PMSM扩展反电动势。该方法基于PMSM全阶模型,将扩展反电动势作为IESO扩展的状态^[25-26]。不同于传统ESO校正项采用相同的误差项,IESO以一种级联的形式将低阶动态方程的输出作为高阶动态方程的输入,可以视为将两个一阶ESO级联在一起,因而可以有效地减小校正项增益,从而在不影响系统收敛性的情况下提升观测器动态性能,并减小观测器对于高频噪声的敏感性。

本文基于PMSM扩展反电动势全阶模型,提出了一种改进的扩展状态观测器用于PMSM无位置传感器控制,并进行了稳定性分析。通过仿真结果证明了所提出观测器的有效性和优越性。

1 PMSM 数学模型

为简化分析,假定磁路不饱和,不计磁滞与涡流损耗,则永磁同步电机在两相静止坐标系($\alpha\beta$)下的PMSM定子电压方程为

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

式中: u_α 、 u_β 分别为电机 α 、 β 轴定子电压; i_α 、 i_β 为 α 、 β 轴定子电流; e_α 、 e_β 为扩展反电动势; L_q 为 q 轴电感; R 为定子电阻。

将式(1)改写并扩展为 PMSM 全阶模型^[25-26]

$$\begin{cases} L_q \frac{d}{dt} i_\alpha = u_\alpha - R i_\alpha - e_\alpha \\ L_q \frac{d}{dt} i_\beta = u_\beta - R i_\beta - e_\beta \\ \frac{d}{dt} e_\alpha = -\omega_e e_\beta \\ \frac{d}{dt} e_\beta = \omega_e e_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_e 为电角速度。

PMSM 电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5 n_{pp} [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (3)$$

式中: T_e 为电机电磁转矩; n_{pp} 为电机极对数; ψ_f 为转子磁链; L_d 为 d 轴电感; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴电流。电机运动方程为

$$\begin{aligned} \frac{J_s}{n_{pp}} \frac{d}{dt} \omega_e &= T_e - T_L = \\ 1.5 n_{pp} [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q - T_L \end{aligned} \quad (4)$$

式中: J_s 为转动惯量; T_L 为电机负载转矩。

2 改进扩展状态观测器

2.1 改进扩展状态观测器的设计

根据 PMSM 全阶模型(式(2)),将扩展反电动势 e_α 、 e_β 作为 ESO 扩展的状态,则可构建传统扩展状态观测器

$$\begin{cases} L_q \frac{d}{dt} \hat{i}_\alpha = u_\alpha - R \hat{i}_\alpha - \hat{e}_\alpha - k_p f_1(\bar{i}_\alpha) \\ L_q \frac{d}{dt} \hat{i}_\beta = u_\beta - R \hat{i}_\beta - \hat{e}_\beta - k_p f_1(\bar{i}_\beta) \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\alpha = -\hat{\omega}_e \hat{e}_\beta - k_i f_2(\bar{i}_\alpha) \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\beta = \hat{\omega}_e \hat{e}_\alpha - k_i f_2(\bar{i}_\beta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\hat{\cdot}$ 表示对实际值的估计; $\bar{\cdot}$ 表示误差,如 $\bar{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$; k_p 、 k_i 是增益; f_1 、 f_2 是矫正函数,通常是线性的,也可以设计为符号函数来构成高阶滑模观测器以提升观测器动态性能。

式(5)的简单形式即线性扩展状态观测器,设计 $f_i(x) = x$, $i = 1, 2$ 。由于线性扩展状态观测器结构符合高增益观测器的典型结构^[20],因而增益 k_p 、 k_i ,特别是高阶项 k_i ,需要设计得较大来保证系统的

稳定性和快速收敛性,而较大的增益会导致系统对于高频噪声的敏感性增加,同时会引起不期望的峰值效应。通常的解决办法是将 $f_i(x)$, $i = 1, 2$ 设计为符号函数来构成高阶滑模观测器来提升其动态性能。然而,引入符号函数又会引起抖振及收敛性问题。为解决上述问题,本文设计了一种改进的扩展状态观测器,采用级联形式修改系统的误差项,进而降低矫正项增益,来降低观测器对于高频噪声的敏感性。

IESO 可以设计为

$$\begin{cases} L_q \frac{d}{dt} \hat{i}_\alpha = u_\alpha - R \hat{i}_\alpha - \frac{g_1(\bar{i}_\alpha)}{\tau_1} \\ L_q \frac{d}{dt} \hat{i}_\beta = u_\beta - R \hat{i}_\beta - \frac{g_1(\bar{i}_\beta)}{\tau_1} \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\alpha = -\hat{\omega}_e \hat{e}_\beta + \frac{g_2(\bar{e}_\alpha)}{\tau_2} \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\beta = \hat{\omega}_e \hat{e}_\alpha + \frac{g_2(\bar{e}_\beta)}{\tau_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i = 1, 2$; $\tau_i < 1$ 是足够小的常数; $g_i(x)$ 是连续奇函数;误差 $\bar{e}_\alpha$ 、 $\bar{e}_\beta$ 满足

$$\begin{cases} \bar{e}_\alpha = \frac{g_1(\bar{i}_\alpha)}{\tau_1} - \hat{e}_\alpha \\ \bar{e}_\beta = \frac{g_1(\bar{i}_\beta)}{\tau_1} - \hat{e}_\beta \end{cases} \quad (7)$$

值得注意的是,不同于传统 ESO, IESO 的误差项采用了级联形式。

进一步地,为了抑制高增益观测器所固有的峰值效应,引入饱和函数限制误差 $\bar{e}_\alpha$ 、 $\bar{e}_\beta$

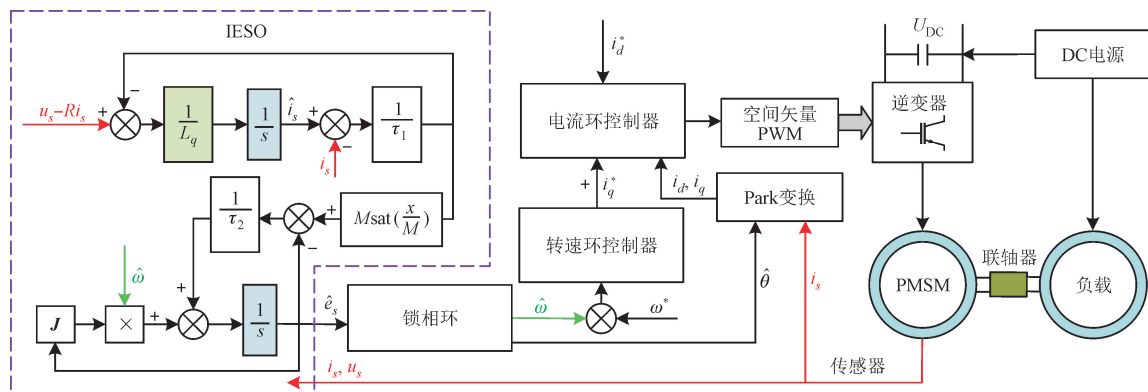
$$\begin{cases} \bar{e}_\alpha = \text{Msat}\left(\frac{g_1(\bar{i}_\alpha)}{M\tau_1}\right) - \hat{e}_\alpha \\ \bar{e}_\beta = \text{Msat}\left(\frac{g_1(\bar{i}_\beta)}{M\tau_1}\right) - \hat{e}_\beta \end{cases} \quad (8)$$

式中: M 是饱和边界,满足 $M > \sup\left(\frac{g_1(\bar{i}_s)}{\tau_1}\right)$, $s = \alpha, \beta$, $\sup$ 为上确界求取函数; $\text{sat}(x)$ 是标准饱和函数,满足

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x, & |x| \leq 1 \\ \text{sgn } x, & |x| > 1 \end{cases} \quad (9)$$

对设计的 IESO 式(6)进行进一步分析:与传统 ESO 式(5)进行对比, IESO 低阶动态的输出作为高阶动态的输入,因而可以看作两个一阶 ESO 的级联,从而大大减小了高阶动态的增益,进而解决了高增益观测器动态性能与高频噪声敏感性间的矛盾。根据上述分析可知,本文设计的 IESO 选择线性函数 $g_i(x) = x$, $i = 1, 2$ 。

根据本文设计的 IESO 构建 PMSM 矢量控制系统框图,如图 1 所示。



注: 上标*表示给定值; 上-代表估计值; 下标s代表 α, β 。

图 1 基于 IESO 的 PMSM 矢量控制系统框图

Fig. 1 PMSM vector control block diagram based on IESO

2.2 稳定性分析

考虑提出的 IESO 式(6), 误差式(8)中引入的饱和函数仅用于限制高增益观测器可能存在的峰值效应, 故不会影响系统收敛性。为简化证明过程, 分析式(6)~(7)的稳定性。

引理^[27] 考虑摄动时变系统

$$\frac{d}{dt}\varphi(t) = \frac{1}{\varepsilon}\mathcal{F}(t)\varphi(t) + \delta(t), t > t_0, t_0 \in \mathbf{R}^+ \quad (10)$$

存在方程 $\mathcal{F}(t) \in C(\mathbf{R}^{n \times n}), t \geq t_0, \delta(t)$ 表示扰动项, 初始状态 $\varphi(t_0)$ 是 $\mathbf{R}^n$ 紧子集的元素。假设线性时变系统 $\frac{d}{dt}\varphi(t) = \mathcal{F}(t)\varphi(t)$ 是指数一致稳定的, 并且对于一些独立于 ε 的正实数 $\tilde{\delta}$ 和正整数 m , 有 $\|\delta(t)\| \leq \tilde{\delta}\varepsilon^m$, 则对于任意 $\zeta > 0$ 和 $T > 0$, 存在 $\varepsilon_0 > 0$ 使得任意 $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0)$ 和 $t \in [t_0 + T, \infty]$, 式(10)的解满足 $\|\varphi(t)\| \leq \zeta\varepsilon^m$ 。

构建误差状态

$$\begin{cases} \gamma_s = \tau_1(e_s - \sigma_s) \\ \sigma_s = \text{Msat}\left(\frac{g_1(\hat{i}_s)}{M\tau_1}\right) \\ s = \alpha, \beta \end{cases} \quad (11)$$

则动态方程建立为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\gamma_\alpha = \tau_1\left(\frac{d}{dt}e_\alpha - \frac{d}{dt}\sigma_\alpha\right) = \tau_1(-\omega_e e_\beta) - \frac{d}{dt}\hat{i}_\alpha = \\ \tau_1(-\omega_e e_\beta) - \frac{d}{dt}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) = -\frac{1}{\tau_1 L_q}\gamma_\alpha + \tau_1(-\omega_e e_\beta) \\ \frac{d}{dt}\gamma_\beta = \tau_1\left(\frac{d}{dt}e_\beta - \frac{d}{dt}\sigma_\beta\right) = \tau_1(\omega_e e_\alpha) - \frac{d}{dt}\hat{i}_\beta = \\ \tau_1(\omega_e e_\alpha) - \frac{d}{dt}(\hat{i}_\beta - i_\beta) = -\frac{1}{\tau_1 L_q}\gamma_\beta + \tau_1(\omega_e e_\alpha) \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{令 } \gamma_s = [\gamma_\alpha, \gamma_\beta]^T, e_s = [e_\alpha, e_\beta]^T, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

则式(12)表示为

$$\frac{d}{dt}\gamma_s = -\frac{1}{\tau_1 L_q}\gamma_s + \tau_1 \omega_e \mathbf{J} e_s \quad (13)$$

式(13)满足引理中式(12)的形式, 因而合理选择 τ_1 即可使得误差状态 γ_s , 对于任意 $\zeta > 0$ 和 $T > 0$ 都满足

$$\|\gamma_s\| \leq \zeta; \quad \forall t \geq T \quad (14)$$

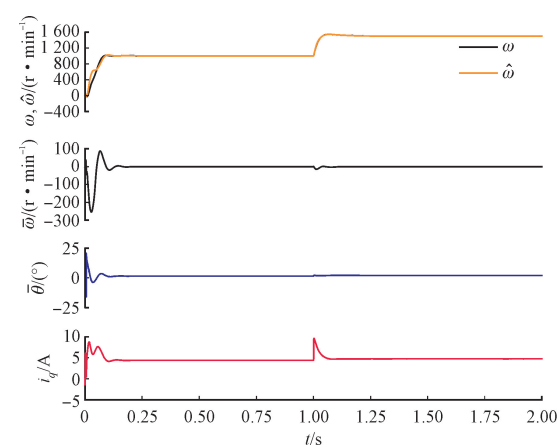
而这意味着估计状态 $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 能够收敛至真实值 e_α, e_β 。

3 数值仿真分析

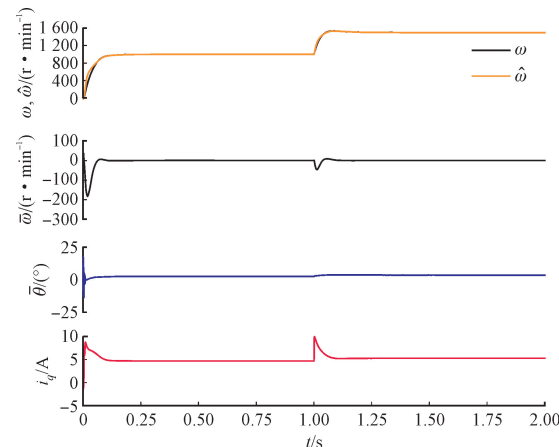
为验证有效性, 本节对上节所提出的 IESO 进行数值仿真分析。将 IESO 与传统的线性 ESO(式(5))进行了无传感器启动及调速、反转、抗扰对比测试。两种 ESO 获取估计扩展反电势 $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 后, 经参数相同的锁相环计算转速及角度。仿真所用 PMSM 标称值如下: 额定功率为 750 W, 额定转速为 1 500 r/min, 定子电阻为 2.29 Ω , d 轴电感为 0.008 26 H, q 轴电感为 0.011 54 H, 永磁体磁链为 0.07 Wb, 极对数为 5, 转动惯量为 0.001 15 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

对 IPMSM 矢量控制系统(图 1)进行仿真, 结果如图 2~4 所示。图中, 分别展示了实际转速 ω 、估计转速 $\hat{\omega}$ 、转速误差 $\bar{\omega}$ 、角度误差 $\bar{\theta}$ 、q 轴电流 i_q 的波形。

图 2 展示了传统线性 ESO 与本文 IESO 在无传感器状态下启动和调速性能的对比。电机由转速为 0 直接阶跃启动, 给定转速 1 000 r/min; 在第 1 s 时, 给定转速阶跃增加至 1 500 r/min。可以看出, 相较于传统线性 ESO, 采用 IESO 可以大大减小启动时的转速误差及角度误差, q 轴电流也更加平稳, 这意味这电磁转矩也更加平稳, 并且能够更快到达稳态, 动态性能更好。



(a)传统线性 ESO

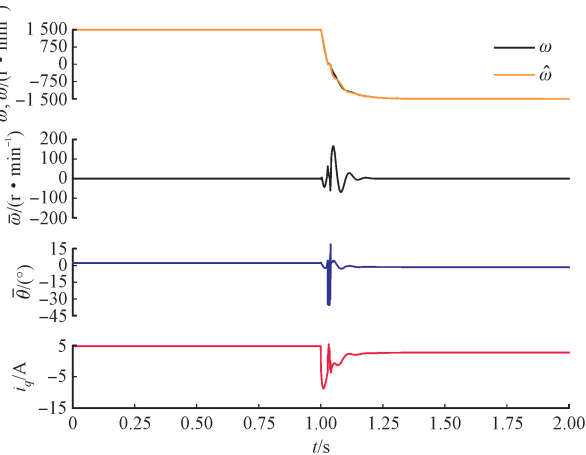


(b)本文 IESO

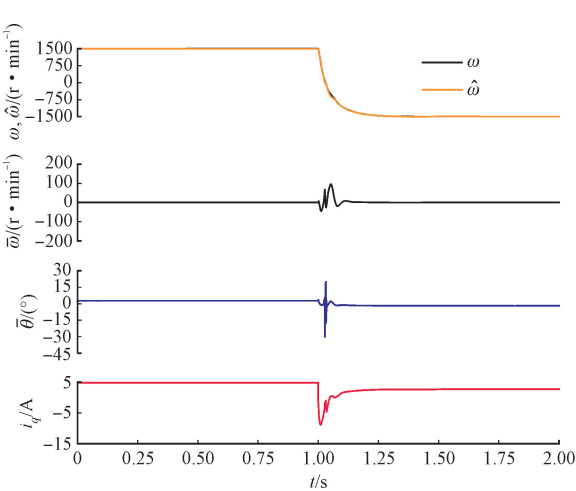
图 2 无传感器启动、调速仿真结果对比

Fig. 2 Comparison of simulation results of sensorless startup and speed regulation test

图 3 展示了传统线性 ESO 与本文 IESO 在无传感器运行下快速反转性能的对比。电机在分别在两种观测器闭环的情况下,在第 1 s 进行±1 500 r/min (1.0~−1.0 标么值)阶跃反转测试。可以看出,采用 IESO 后,电机反转时转速误差减小约 50%;角度误差也相应减小;同时,电磁转矩也更加平稳,收敛时间更小,动态性能得到提升。



(a)传统线性 ESO

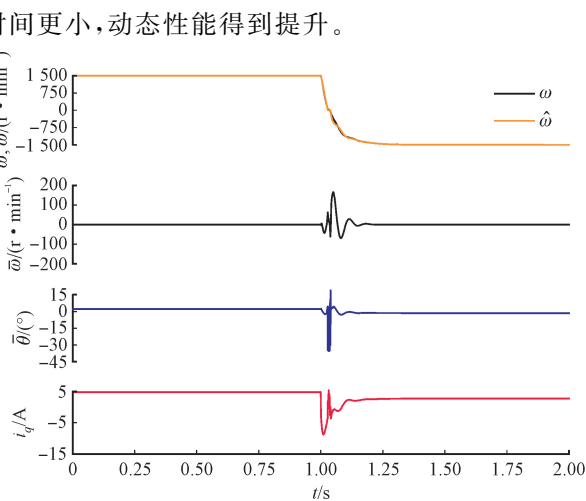


(b)本文 IESO

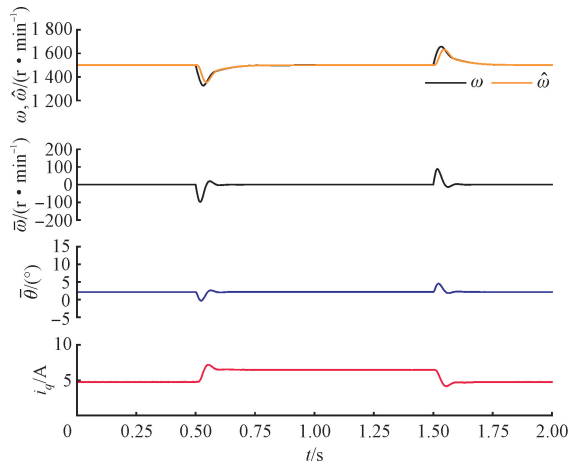
图 3 无传感器快速反转仿真结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation results of fast reversal test

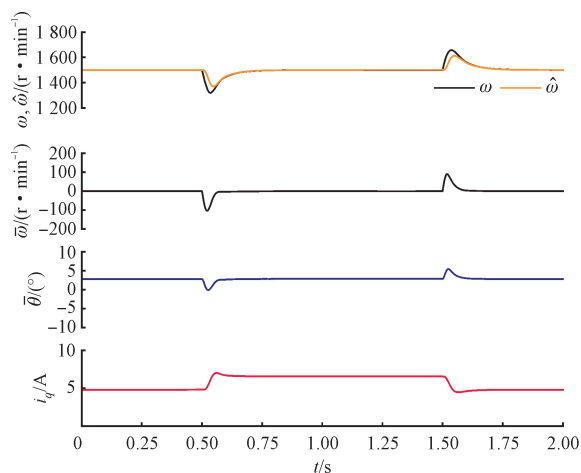
图 4 展示了传统线性 ESO 与本文 IESO 在无传感器运行下抗扰性能对比。图 4(a)、(b)比较了两种方法在突加负载时的性能。电机以 1 500 r/min 无传感器运行,在第 0.5 s 时突加 1 N·m 的负载,并在第 1.5 s 时卸载。可以看出:突加负载和突然卸载时,IESO 均展示出更好的动态性能,转速、角度误差波动更小,并且动态过程更短;同时,q 轴电流波动更小,说明输出的电磁转矩更为平稳。为进一步比较所提出的 IESO 对于系统高频噪声敏感性的抑制,图 4(c)、(d)进一步比较了在外加 0.5 A 随机高频电流噪声情况下两种 ESO 的性能。可以看出,传统方法收敛时间增加了约 25%,转速误差最大值增大了约 40%,而 IESO 并没有显著增加;相较于传统方法,IESO 的角度误差高频噪声减小了约 60%。



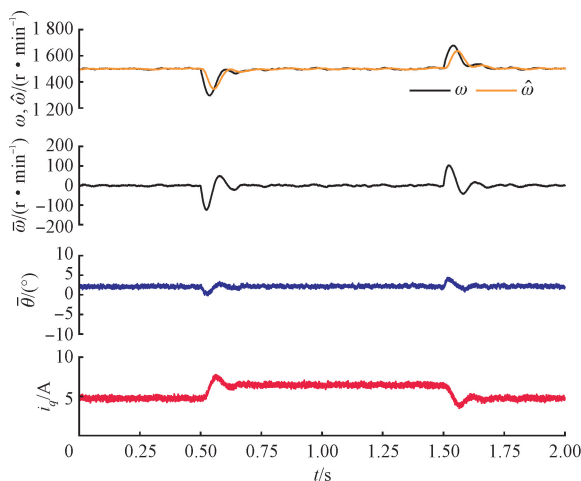
(a)传统线性 ESO



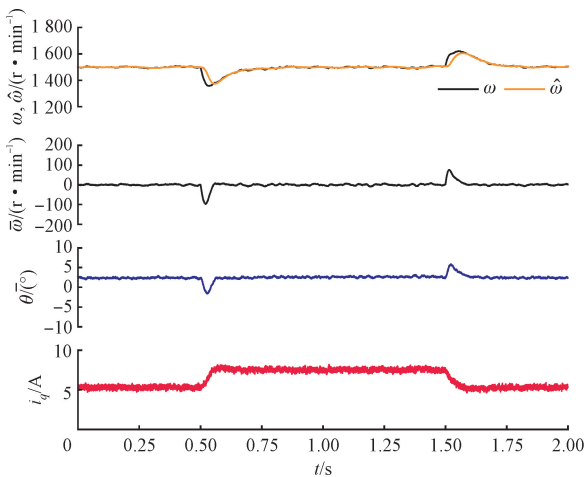
(a)传统线性 ESO,未加高频噪声



(b) 本文提出的 IESO, 未加高频噪声



(c) 传统线性 ESO, 电流加入高频噪声



(d) 本文 IESO, 电流加入高频噪声

图4 无传感器抗扰性能对比

Fig. 4 Comparison of anti-disturbance test

由图2~4知,采用IESO相比传统线性ESO能够提升系统动态性能,同时由于采用新型级联结构减小了校正项增益,系统对于高频噪声的敏感性得到了抑制。

4 结论

本文针对传统线性ESO存在动态性能和高频噪声敏感性间的矛盾,而加入符号函数改进为高阶滑模观测器又会引入抖振和收敛性的问题,设计了一种IESO用于PMSM扩展反电动势观测。在设计IESO时,采用了PMSM全阶扩展反电动势模型,并将扩展反电动势视为扩展出的状态变量。相较于传统ESO,IESO具有一种级联特性:将低阶动态方程的输出作为高阶动态方程的输入。因此,有效减小了校正项增益,从而提升了系统动态性能并降低了高频噪声敏感性。

通过数值仿真,将本文提出的IESO与传统线性ESO进行了对比分析。结果表明,采用IESO后,电机启动、调速及抗扰动态性能均有提升,同时当加入高频电流噪声时,系统对高频噪声敏感性显著下降。

参考文献:

- [1] 范佩樟, 刘凌, 靳东松, 等. 永磁同步电机的无差拍电流预测控制优化算法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 29-38.
FAN Peizhang, LIU Ling, JIN Dongsong, et al. Optimization algorithm of deadbeat current predictive control for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 29-38.
- [2] 靳东松, 刘凌. 永磁同步电机的改进无差拍预测抗扰前馈控制[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 38-46.
JIN Dongsong, LIU Ling. Improved control strategy combining deadbeat predictive current control with disturbance rejection feedforward compensation for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 38-46.
- [3] WANG Bo, SHAO Yanzhen, YU Yong, et al. High-order terminal sliding-mode observer for chattering suppression and finite-time convergence in sensorless SPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11910-11920.
- [4] ZUO Ying, LAI Chunyan, IYER K L V. A review of sliding mode observer based sensorless control methods for PMSM drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 11352-11367.
- [5] 李旭春, 王倩, 马少康. 带离线参数辨识的降阶观测器PMSM无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,

- 2017, 21(1): 1-7.
- LI Xuchun, WANG Qian, MA Shaokang. Reduced order observer based PMSM sensorless control algorithm with parameters identification at standstill [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(1): 1-7.
- [6] 吴轩钦, 谭国俊, 何凤有, 等. 基于有效磁链的电励磁同步电机无速度传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 81-90.
- WU Xuanqin, TAN Guojun, HE Fengyou, et al. Speed sensor-less control of electronically excited synchronous motor based on active-flux [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 81-90.
- [7] 刘计龙, 肖飞, 沈洋, 等. 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 76-88.
- LIU Jilong, XIAO Fei, SHEN Yang, et al. Position-sensorless control technology of permanent-magnet synchronous motor: a review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 76-88.
- [8] 吴春, 齐蓉, 李兵强, 等. 考虑饱和效应的永磁同步电机全程无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 171-179.
- WU Chun, QI Rong, LI Bingqiang, et al. Whole speed range sensorless control of permanent magnet synchronous motor considering saturation effect [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 171-179.
- [9] YE Shuaichen, YAO Xiaoxian. An enhanced SMO-based permanent-magnet synchronous machine sensorless drive scheme with current measurement error compensation [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4407-4419.
- [10] 王悍泉, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 104-109.
- WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. A sensorless permanent magnet synchronous motor control strategy for improved sliding mode observers with stator parameters identification [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 104-109.
- [11] 赵峰, 罗雯, 高峰阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 28-35.
- ZHAO Feng, LUO Wen, GAO Fengyang, et al. An improved sliding mode control for PMSM considering sliding mode chattering and disturbance compensation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 28-35.
- [12] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器 [J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
- HAN Jingqing. The "extended state observer" of a class of uncertain systems [J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85-88.
- [13] 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 torque compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 172-181.
- [14] 刘思源, 刘凌, 靳东松. 永磁同步电机新型有效磁链固定时滑模扰动辨识策略 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(9): 144-151.
- LIU Siyuan, LIU Ling, JIN Dongsong. A novel active flux fixed-time sliding mode disturbance identification method for permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(9): 144-151.
- [15] 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.
- [16] 夏长亮, 刘均华, 俞卫, 等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 139-143.
- XIA Changliang, LIU Junhua, YU Wei, et al. Variable structure control of BLDCM based on extended state observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 139-143.
- [17] 毛海杰, 李炜, 蒋栋年, 等. 基于线性扩张状态观测器的永磁同步电机状态估计与性能分析 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2155-2165.
- MAO Haijie, LI Wei, JIANG Dongnian, et al. State estimation and performance analysis based on linear extended state observer for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2155-2165.
- [18] 聂卓赞, 郭东生, 刘瑞娟, 等. 基于扩张状态观测器

- 的可调系统参数辨识与实验 [J]. 控制与决策, 2017, 32(10): 1905-1909.
- NIE Zhuoyun, GUO Dongsheng, LIU Ruijuan, et al. Parameter identification for adjustable systems based on extended state observer and experimental study [J]. Control and Decision, 2017, 32(10): 1905-1909.
- [19] 魏海峰, 韦汉培, 张懿. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机 PWM 电流预测控制 [J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 351-355.
- WEI Haifeng, WEI Hanpei, ZHANG Yi. PWM predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer [J]. Control and Decision, 2018, 33(2): 351-355.
- [20] KHALIL H K. High-gain observers in nonlinear feedback control [C]//2008 International Conference on Control, Automation and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: xlvii-lvii.
- [21] LIN Qilian, LIU Ling, LIANG Deliang. Hybrid active flux observer to suppress position estimation error for sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 872-886.
- [22] LIN Qilian, LIU Ling, LIANG Deliang, et al. A dual-level adaptive law design for super-twisting algorithm in sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(5): 5945-5956.
- [23] XU Zhuang, ZHANG Tianru, BAO Yuli, et al. A nonlinear extended state observer for rotor position and speed estimation for sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 733-743.
- [24] ZHANG Tianru, XU Zhuang, GERADA C. A nonlinear extended state observer for sensorless IPMSM drives with optimized gains [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1485-1494.
- [25] 张国强. 基于全阶滑模观测器的 IPMSM 无位置传感器控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [26] ZHANG Guoqiang, WANG Gaolin, XU Dianguo, et al. Discrete-time low-frequency-ratio synchronous-frame full-order observer for position sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(2): 870-879.
- [27] RAN Maopeng, LI Junchen, XIE Lihua. A new extended state observer for uncertain nonlinear systems [J]. Automatica, 2021, 131: 109772.

(编辑 陶晴)