

基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器

刘晨炜¹, 李 想^{2*}, 孙兴法², 许 金², 郑欣良²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 海军工程大学 电磁能技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430033)

Improved ESO Trajectory Observer Based on Adaptive Acceleration Compensation

LIU Chenwei¹, LI Xiang^{2*}, SUN Xingfa², XU Jin², ZHENG Xinliang²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of slow response speed, low observation accuracy, and poor anti-disturbance capability in trajectory observation for permanent magnet synchronous motor (PMSM) position and speed estimation using traditional extended state observers (ESO), an improved ESO trajectory observer based on adaptive acceleration compensation is proposed. [Methods] Adaptive acceleration feedforward compensation was introduced into the traditional ESO, enabling online adaptive adjustment of the feedforward acceleration based on position observation errors. This enhancement improved the dynamic accuracy and response speed of trajectory observation under strong disturbance and transient operating conditions. [Results] Simulation results showed that the proposed improved ESO trajectory observer reduced the position observation error by 61.53% and the angular velocity observation error by 58.6% compared to the traditional ESO-based observation method under strong disturbance and transient conditions. [Conclusion] The proposed improved ESO trajectory observer effectively enhances response speed, dynamic accuracy, and anti-disturbance capability in trajectory observation. With excellent observation performance, it offers significant engineering application value.

Key words: trajectory observation; extended state observer; adaptive acceleration compensation; observation performance

摘 要: 【目的】针对基于传统扩张状态观测器(ESO)的轨迹观测器在永磁同步电机(PMSM)位置和速度观测中所存在的响应速度慢、观测精度低和抗干扰能力差的问题,提出一种基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器。【方法】在传统扩张状态观测器中引入自适应加速度前馈补偿,可直接根据位置观测误差在线自适应调节

前馈加速度,进而提高强扰动、强暂态运行条件下轨迹观测的动态精度及响应速度。【结果】仿真结果表明,该改进型 ESO 轨迹观测器在设定的强扰动、强暂态工况下,与采用传统 ESO 的观测方案相比,位置观测误差减小了 61.53%,角速度观测误差减小了 58.6%。【结论】本文所提改进 ESO 轨迹观测器有效提高了轨迹观测的响应速度、动态精度和抗干扰性,观测性能好,具备较高的工程应用价值。

关键词: 轨迹观测; 扩张状态观测器; 自适应加速度补偿; 观测性能

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)依靠永磁体励磁,具有结构简单、机械特性好、加载水平高、转速控制平稳、调速范围宽及转矩高等优势^[1]。随着矢量控制原理的提出和微型计算机技术的发展,PMSM 在工业伺服应用中能够实现精准的位置和速度控制,因而得到普遍认可,广泛应用于要求功率密度高、调速范围广的场景^[2]。PMSM 的矢量驱动控制中,需要取得转子的速度和位置信息,一般传统做法是在电机上安装位置传感器,即编码器来获得这些参数^[3-4]。编码器的特点是其输出量化成编码器分辨率的倍数,因此其输出的位置量不够平滑,将其直接作为反馈用于位置控制会带来诸多问题^[5-9],而使用扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)获得平滑的位置信息和速度信息以实现位置反馈控制是一种实用而有效的控制思想^[10]。

传统 ESO 将加速度视为扰动量,通过位置观测误差进行反馈补偿,响应速度慢、观测精度低、抗干扰能力差,抗扰性能随着扰动和输入频率的提高而迅速下滑^[11],其性能已无法满足实际工程应用的需求。因此,有必要在传统 ESO 的基础上,研究具有更快响应速度、更高观测精度和更强抗扰性能的改进型 ESO。

自 ESO 被提出以来,研究者就不断尝试采用各种方法对 ESO 进行改进。其中,线性 ESO (Linear ESO, LESO) 结构最为简单,但响应速度慢,观测精度低。虽然如此,LESO 因其算法简单,能大大减轻控制单元数据处理的压力而仍获得广泛应用。文献[12]给出了非线性 ESO (Nonlinear ESO, NLESO) 的设计方法,但参数设定较为复杂。文献[13]通过将 NLESO 变换为 LESO,确定了使系统收敛的各参数选择范围。文献[14]提出了采用反正切函数的 NLESO 改进方案。文献[15]采用带宽分析的方法对 ESO 进行分析,提出了一种参数设置方法。文献[16]证明了采用双曲正切函数的 NLESO 的误差系统的收敛性,并设计了时变参数 ESO 来削减初期的微分峰值现象。文献[17]分析了现有 fal 函数和传统 NLESO 中存在的 6 类问题,提出了一种新型的 fal 函数和 3 种新型 NLESO,在跟踪速度和观测误差方面相比于传统 NLESO 获得了明显的改善。文献[18]利用滑模控制鲁棒性强和响应快速的优点,针对 PMSM 驱动系统设计了一种基于滑模控制的改进 ESO,提升了系统在扰动下的响应速度和跟踪精度。但在设计过程中仅采用了传统的线性滑模面和指数趋近律,响应速度提升不大。文献[19]针对传统指数趋近律存在的抖振和全局收敛慢的问题,提出一种新型复合滑模趋近律,实现无抖振下的快速收敛。文献[20-21]分析了 ESO 的性能,得出了随着频率的上升,ESO 性能下降的结论。文献[22]证明了高阶 LESO 的收敛性,通过仿真得出提高带宽能提高观测精度的结论。上述文献从改进非线性函数及如何更合理地设置参数等方面对 ESO 进行改进,为如何提升 ESO 的观测性能提供了有益参考。

本文从分析传统 ESO 的观测原理入手,提出了基于自适应加速度补偿的改进型 ESO,通过变更传统 ESO 的结构来提升 ESO 的响应速度、观测

精度和抗扰性能。最后,通过仿真分析验证了该改进方案的有效性。

1 传统 ESO 轨迹观测

状态观测器的基本原理如图 1 所示。其主要思想是根据系统已知或经验模型构造一个相同结构的动态观测模型,通过观测模型输出与实际系统输出的偏差对观测状态进行在线反馈修正。在忽略系统模型误差的情况下,当观测系统的输出量无限逼近于实际系统的输出量时,即可认为观测状态也无限逼近于系统的实际状态。

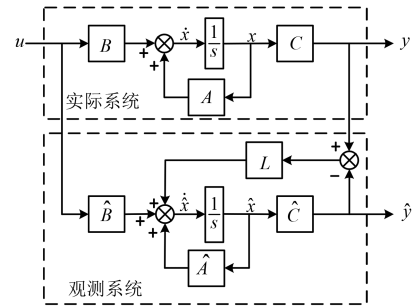


图 1 状态观测器基本原理

Fig. 1 Basic principle of the state observer

从编码器的输出得到实际动子位置和速度是状态观测过程,对系统来说,位置和速度是状态量,电磁力与集总扰动之和是输入,编码位置是输出。这是一个可观测系统,实际上可以构造观测器,观测出动子位置和速度^[23-25]。

永磁同步电机转子载荷的运动方程为

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{F_e + F_l}{m} \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 为转子位置; ω 为转子角速度; F_e 为 PMSM 的输出电磁力; F_l 为集总扰动; m 为负载质量。

引入角加速度 α 作为扩张状态,可构造 ESO,如式(2)所示:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{\text{obs}}}{dt} = \omega_{\text{obs}} + l_1(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\omega_{\text{obs}}}{dt} = \alpha + l_2(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\alpha}{dt} = l_3(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_{obs} 为转子观测位置; ω_{obs} 为转子观测角速

度; θ_m 为转子测量位置; l_1 、 l_2 和 l_3 为 ESO 的位置观测误差反馈增益。

将式(2)改写成式(3)所示的矩阵形式:

$$\begin{cases} s \begin{bmatrix} \theta_{\text{obs}} \\ \omega_{\text{obs}} \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{\text{obs}} \\ \omega_{\text{obs}} \\ \alpha \end{bmatrix} + \mathbf{L}(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \mathbf{L} = [l_1 \quad l_2 \quad l_3]^T \end{cases} \quad (3)$$

观测器的特征方程如式(4)所示:

$$f(\lambda) = \lambda^3 + l_1\lambda^2 + l_2\lambda + l_3 \quad (4)$$

由此可得基于传统 ESO 轨迹观测器误差反馈增益系数设计如式(5)所示。此时观测器的 3 个极点均分布在左半平面半径为 $\omega_{n,\text{obs}}$ 的圆上, $\omega_{n,\text{obs}}$ 为轨迹观测器的截止频率, ζ 为观测器阻尼比。

$$\begin{cases} l_1 = \omega_{n,\text{obs}}(1 + 2\zeta) \\ l_2 = \omega_{n,\text{obs}}^2(1 + 2\zeta) \\ l_3 = \omega_{n,\text{obs}}^3 \end{cases} \quad (5)$$

基于传统 ESO 的轨迹观测器的控制框图如图 2 所示。

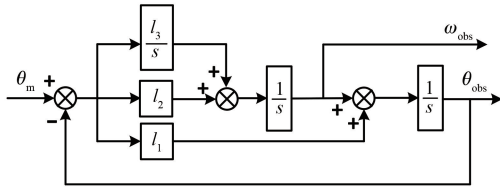


图 2 基于传统 ESO 的轨迹观测器

Fig. 2 Trajectory observer based on traditional ESO

基于传统 ESO 的轨迹观测器将加速度视为扰动量,通过位置测量误差进行反馈补偿,存在响应速度慢、观测误差大及抗干扰能力差的问题,一般只用于负载扰动较弱、加速度变化相对缓慢的平稳运动场合。

2 基于设定加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测

在扰动特性复杂、扰动强度显著的运行条件下,为提高 PMSM 轨迹观测的精度及响应速度,引入加速度前馈补偿,通过扩张状态 α_d 来观测由模型误差、机械摩擦及流体阻力等因素导致的加速度扰动,对应的改进扩张状态观测器形式如式(6)所示:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{\text{obs}}}{dt} = \omega_{\text{obs}} + l_1(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\omega_{\text{obs}}}{dt} = \alpha_d + \alpha + l_2(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\alpha_d}{dt} = l_3(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \end{cases} \quad (6)$$

由于实际电磁力和集总扰动不可获取,采用设定加速度 α 作为观测前馈补偿,式(6)的矩阵形式为

$$s \begin{bmatrix} \theta_{\text{obs}} \\ \omega_{\text{obs}} \\ \alpha_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{\text{obs}} \\ \omega_{\text{obs}} \\ \alpha_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{L}(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \quad (7)$$

基于设定加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器的控制框图如图 3 所示。

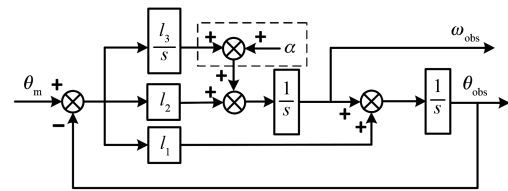


图 3 基于设定加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器

Fig. 3 Improved ESO trajectory observer based on preset acceleration compensation

图 3 所示的改进 ESO 轨迹观测器通过引入设定加速度补偿,可在一定程度上提高轨迹观测的动态精度和响应速度。但在扰动强度大或暂态运行特性显著(加速度急剧变化)的情况下,受限于轨迹闭环跟踪精度,电机的实际运动加速度与设定加速度之间存在较大差异,轨迹观测的动态性能会严重下降。

3 基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测

3.1 观测器的设计

针对基于设定加速度前馈补偿的轨迹观测器在强暂态运行或未知强扰动作用条件下观测性能恶化的问题,本节进一步提出一种基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器,不依赖于具体的扰动模型,可直接根据位置观测误差在线自适应调节前馈加速度,进而提高强扰动、强暂态运行条件下轨迹观测的动态精度及响应速度。

基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测扩展状态方程如式(8)所示:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{\text{obs}}}{dt} = \omega_{\text{obs}} + l_1(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\omega_{\text{obs}}}{dt} = \alpha_d + \alpha_s + l_2(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\alpha_d}{dt} = l_3(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: α_s 为自适应加速度,作为观测前馈补偿,如式(9)所示:

$$\alpha_s = \alpha \left[1 + \left(K_{\text{pa}} + \frac{K_{\text{ia}}}{s} \right) (\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \text{sign}(\alpha) \right] \quad (9)$$

式中: K_{pa} 、 K_{ia} 分别为前馈加速度自适应调节的比例参数、积分参数; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

前馈加速度自适应原理如下:

1) 由式(9)可以看出,在观测位置 θ_{obs} 无限逼近于实际测量位置 θ_m 的情况下,前馈加速度 α_s 趋于稳定,此时轨迹观测基本处于稳态。需要注意的是,观测稳态不等于跟踪稳态,此时前馈加速度 α_s 不一定与设定加速度 α 完全一致,而是与负载的实际运动加速度接近。

2) 在扰动剧烈或运动状态突变导致观测稳态失衡的情况下,由式(9)分加速和制动两种情况讨论:加速阶段,设定加速度 $\alpha > 0$, $\text{sign}(\alpha) = 1$, 若观测位置 θ_{obs} 显著小于(大于)实际测量位置 θ_m , $(\theta_m - \theta_{\text{obs}})$ 的幅值显著增大,在比例积分环节 $(K_{\text{pa}} - K_{\text{ia}}/s)$ 的作用下,前馈加速度 α_s 的幅值迅速提高(下降);制动阶段,设定加速度 $\alpha < 0$, $\text{sign}(\alpha) = -1$, 若观测位置 θ_{obs} 显著小于(大于)实际测量位置 θ_m , $(\theta_m - \theta_{\text{obs}})$ 的幅值显著增大,在比例积分环节 $(K_{\text{pa}} - K_{\text{ia}}/s)$ 的作用下,前馈加速度 α_s 的幅值迅速下降(提高),从而加快轨迹观测的动态响应速度,提高动态观测精度。

式(8)的矩阵形式为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \theta_{\text{obs}} \\ \omega_{\text{obs}} \\ \alpha_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{\text{obs}} \\ \omega_{\text{obs}} \\ \alpha_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_s \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{L}(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \alpha_s = \alpha \left[1 + \left(K_{\text{pa}} + \frac{K_{\text{ia}}}{s} \right) (\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \text{sign}(\alpha) \right] \end{cases} \quad (10)$$

基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器的控制框图如图 4 所示。

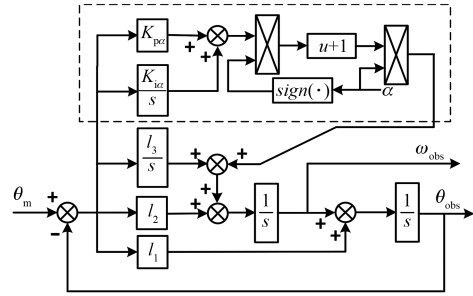


图 4 基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器

Fig. 4 Improved ESO trajectory observer based on adaptive acceleration compensation

3.2 稳定性分析

通过比较实际系统和观测系统状态量之差是否发散,可以分析位置观测的稳定性。将编码器测得的转子位置测量值 θ_m 代入式(1)可以得到:

$$\begin{cases} \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{F_e + F_l}{m} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω_m 为测量位置经过差分和均值滤波处理后得到的角速度。

式(11)与式(8)相减得到:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) = \omega_m - \omega_{\text{obs}} - l_1(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d}{dt}(\omega_m - \omega_{\text{obs}}) = \frac{F_e + F_l}{m} - \alpha_d - \alpha_s - l_2(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \\ \frac{d\alpha_d}{dt} = l_3(\theta_m - \theta_{\text{obs}}) \end{cases} \quad (12)$$

令 $e_\theta = \theta_m - \theta_{\text{obs}}$, $e_\omega = \omega_m - \omega_{\text{obs}}$, 再结合式(9), 则式(12)可以表示为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}e_\theta = -l_1e_\theta + e_\omega \\ \frac{d}{dt}e_\omega = k_1e_\theta + k_2\alpha_d + \frac{F_e + F_l}{m} - \alpha \\ \frac{d\alpha_d}{dt} = l_3e_\theta \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$\begin{cases} k_1 = -l_2 - \alpha K_{\text{pa}} \text{sign}(\alpha) \\ k_2 = -1 - \frac{\alpha K_{\text{ia}} \text{sign}(\alpha)}{l_3} \end{cases} \quad (14)$$

式 (13) 可以进一步表示成线性系统标准形式:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{E} = \mathbf{A} \mathbf{E} + \mathbf{B} u \tag{15}$$

式中:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = [e_\theta \quad e_\omega \quad \alpha_d]^T \\ \mathbf{B} = [0 \quad 1 \quad 0]^T \\ u = \frac{F_e + F_1}{m} - \alpha \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 & 0 \\ k_1 & 0 & k_2 \\ l_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{16}$$

由线性系统理论可知,如果矩阵 $\mathbf{A}$ 的所有特征值实部均为负,那么式 (10) 描述的系统收敛,即 $(\theta_m - \theta_{obs})$ 和 $(\omega_m - \omega_{obs})$ 会最终趋近于零,观测器状态逐渐逼近实际对象状态。用方程 $\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A} = 0$ 来求矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值 (其中 $\mathbf{I}$ 是单位矩阵),得到特征方程:

$$\lambda^3 + l_1 \lambda^2 - k_1 \lambda - l_3 k_2 = 0 \tag{17}$$

根据劳斯判决可以分析出,观测器稳定的充要条件是:系数 l_1 、 $-k_1$ 、 $-l_3 k_2$ 全为正,且 $(-l_3 k_2) < (-k_1 l_1)$ 。

4 轨迹观测性能仿真分析

为了验证改进方案的可行性和有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建如图 5 所示的仿真模型,分别采用传统 ESO 轨迹观测、基于设定加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测和基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测三种观测方案进行仿真。

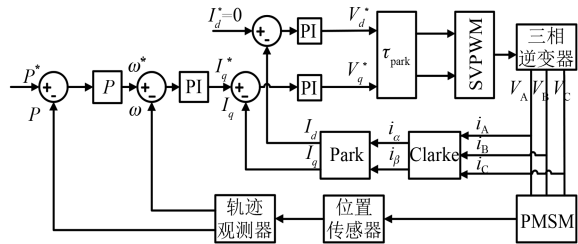


图 5 电机控制系统框图

Fig. 5 Motor control system block diagram

仿真中的电机参数以实际项目中所采用的张紧驱动电机参数作为参考,如表 1 所示。

轨迹观测参数设定如表 2 所示,三种轨迹观测方案采用相同的观测参数。在实际应用中,受

表 1 PMSM 参数

Tab. 1 Parameters of the PMSM

参数名称	参数值
定子电感 L_s/mH	5.8
定子电阻 R/Ω	0.432
极对数 P	5
磁链 ψ_f/Wb	0.291 4
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.021 616
阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	0.000 1

表 2 轨迹观测参数设定

Tab. 2 Parameter setting for trajectory observation

参数名称	参数值
截止频率 $\omega_{n,obs}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	120
阻尼比 ζ	0.707
l_1	289.68
l_2	34 762
l_3	1 728 000
K_{pa}	200
K_{ia}	5 000

运行噪声、测量噪声的影响,轨迹观测器的截止频率 $\omega_{n,obs}$ 不能整定过高^[26],通过调高截止频率来提高观测精度存在一定的限度。

给电机下达一段持续 0.5 s 的运动指令 (0.1 s 匀加速, 0.1 s 匀速, 0.1 s 匀减速, 0.1 s 低速匀速, 0.1 s 静止), 驱动电机从静止开始运动。匀加速段和匀减速段的角加速度大小为 $1\ 080\ \text{rad/s}^2$, 低速匀速段的角速度为 $9.8\ \text{rad/s}$ 。对电机转子的位置和角速度进行观测, 对比不同观测方案的观测性能, 仿真结果如图 6 所示。图中, θ_{obs1} 、 θ_{obs2} 、 θ_{obs3} 以及 ω_{obs1} 、 ω_{obs2} 、 ω_{obs3} 分别为三种观测方案的转子观测位置和观测角速度; 观测误差 θ_{obs1_error} 、 θ_{obs2_error} 、 θ_{obs3_error} 和 ω_{obs1_error} 、 ω_{obs2_error} 、 ω_{obs3_error} 分别由测量值减去观测值得到。

由图 6 可知, 在转子角加速度发生变化, 即外部扰动增大时, 观测误差会突增。方案 1 的位置观测误差最大达到 $0.019\ 47\ \text{rad}$, 即 $1.115\ 5^\circ$, 角速度观测误差最大达到 $5.829\ \text{rad/s}$; 方案 2 的位置观测误差最大达到 $0.010\ 01\ \text{rad}$, 即 $0.573\ 5^\circ$, 角速度观测误差最大达到 $3.331\ \text{rad/s}$; 而方案 3 的位置观测误差最大为 $0.007\ 489\ \text{rad}$, 即 $0.429\ 1^\circ$, 较之于方案 1 减小 61.53% , 较之于方案 2 减小 25% , 角速度观测误差最大为 $2.413\ \text{rad/s}$, 较之于方案 1 减小 58.6% , 较之于方案 2 减小 27.56% 。

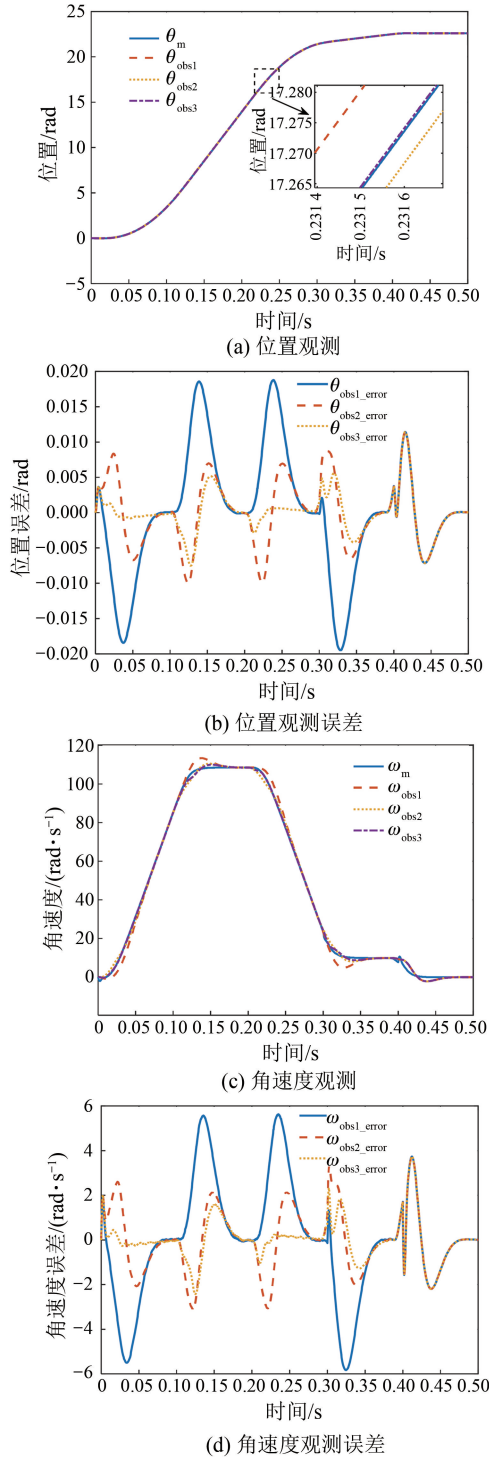


图6 三种方案轨迹观测性能对比

Fig. 6 Comparison of trajectory observation performance of three methods

在强扰动、强暂态运行条件下,方案3的响应速度快,观测精度高,抗干扰性能好。当转子角加速度趋于稳定,即集总扰动强度弱时,三种观测方案的观测性能基本一致。

5 结语

本文提出了一种基于自适应加速度补偿的改进 ESO 轨迹观测器,对传统 ESO 进行结构上的改进,引入自适应加速度前馈补偿。仿真结果表明,在设定的强扰动、强暂态工况下,该观测方案与采用传统 ESO 的观测方案相比,位置观测误差减小了 61.53%,角速度观测误差减小了 58.6%,有效提高了观测器的响应速度、观测精度和抗干扰性能。

参考文献

- [1] LI H M, WANG Z, XU Z X, et al. Feedback linearization based direct torque control for IPMSMs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 3135-3148.
- [2] 林巨广, 鲍子威, 陈桐. 永磁同步电机全速度段无位置传感器控制策略研究[J]. 微电机, 2018, 51(1): 34-38.
- LIN J G, BAO Z W, CHEN T. Research on sensorless control strategy of PMSM at full speed range [J]. Micromotors, 2018, 51(1): 34-38.
- [3] 王要强, 马小勇, 曹冲, 等. 永磁同步电机复合编码器参考信号自适应标定方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2383-2391.
- WANG Y Q, MA X Y, CAO C, et al. Adaptive calibration of reference signal for permanent magnet synchronous motor hybrid encoder [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10): 2383-2391.
- [4] 莫化成, 闵琳. 现代高性能永磁交流伺服系统综述——传感装置与技术篇[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 10-21.
- MO H C, MIN L. Summary of modern high performance permanent magnet AC servo system-sensor device and technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 10-21.
- [5] 杨明, 刘铠源, 陈扬洋, 等. 基于 PI-Lead 控制的永磁同步电机双环位置伺服系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(8): 2060-2072.
- YANG M, LIU K Y, CHEN Y Y, et al. Permanent magnet synchronous motor dual-loop position servo system based on PI-Lead control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2060-

- 2072.
- [6] 邹文斌, 潘松峰, 李先弘, 等. 基于复合控制的永磁同步电机伺服系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 209-212.
- ZOU W B, PAN S F, LI X H, et al. Design of permanent magnet synchronous motor servo system based on compound control [J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(2): 209-212.
- [7] 张国伟. 基于单片机的 PMSM 调速系统设计[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(12): 158-160+162.
- ZHANG G W. Design of PMSM speed control system based on microcontroller [J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(12): 158-160+162.
- [8] 姜少华, 桑志民, 王俊, 等. 永磁同步电机转子相位检测与编码器校正方法[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(5): 134-136.
- JIANG S H, SANG Z M, WANG J, et al. Detection of rotor phase and correction method of encoder for PMSM driving [J]. Industrial Control Computer, 2023, 36(5): 134-136.
- [9] BOLOGNANI S, CALLIGARO S, PETRELLA R, et al. Sensorless control of IPM motors in the low-speed range and at standstill by HF injection and DFT processing [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 96-104.
- [10] 高钦和, 董家臣. 扩张状态观测器的观测误差前馈补偿设计[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 93-102.
- GAO Q H, DONG J C. Feedforward compensation design for observation error of extended state observer [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(5): 93-102.
- [11] 顾健, 艾勇, 单欣, 等. 线性扩张状态观测器的改进及在空间光通信粗跟踪的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 263-270.
- GU J, AI Y, SHAN X, et al. Improvement of linear ESO and its application in space optical communication coarse tracking [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 263-270.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- HAN J Q. Active Disturbance Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [13] 康忠健, 陈学允. 非线性扩张状态观测器的一种设计方法[J]. 电机与控制学报, 2001, (3): 199-203.
- KANG Z J, CHEN X Y. A design method of nonlinear extension state observer [J]. Electric Machines and Control, 2001, (3): 199-203.
- [14] 周林阳, 王生捷. 基于反正切非线性函数的自抗扰控制[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(7): 1043-1048+1054.
- ZHOU L Y, WANG S J. An improved ADRC based on nonlinear arctangent function [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(7): 1043-1048+1054.
- [15] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // Proceedings of the 2023 American Control Conference, Denver, CO, 2003.
- [16] 于洪国, 康忠健, 陈瑶. 基于双曲正切函数的二阶时变参数扩张状态观测器[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(4): 530-534.
- YU H G, KANG Z J, CHEN Y. Time-varying parameter second-order extended state observer based on hyperbolic tangent function [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(4): 530-534.
- [17] 蒲明, 刘鹏, 熊皓. Fal 函数的改进及 3 种新型非线性扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1655-1662.
- PU M, LIU P, XIONG A. Advanced Fal function and three novel nonlinear extended state observers [J]. Control and Decision, 2021, 36(7): 1655-1662.
- [18] XU W, JUNEJO A K, LIU Y, et al. An efficient antidisturbance sliding-mode speed control method for PMSM drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6879-6891.
- [19] 雷城, 蓝益鹏, 徐泽来, 等. 一种新型复合滑模趋近律设计与分析[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 435-440.
- LEI C, LAN Y P, XU Z L, et al. Design and analysis of a new compound sliding mode reaching law [J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 435-440.
- [20] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574-580.
- CHEN Z Q, SUN M W, YANG R G. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 574-580.
- [21] 李承霖, 孙洪飞. 二阶系统自抗扰控制的扩张状

- 态观测器的改进[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(4): 746-754.
- LI C L, SUN H F. Improvement of extended state observer for active disturbance rejection control of second-order systems [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(4): 746-754.
- [22] 邵星灵, 王宏伦. 线性扩张状态观测器及其高阶形式的性能分析[J]. 控制与决策. 2015, 30(5): 815-822.
- SHAO X L, WANG H L. Performance analysis on linear extended state observer and its extension case with higher extended order [J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 815-822.
- [23] 黄科元, 金其军, 黄守道. 一种永磁同步电机转子位置混合辨识方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 1938-1945.
- HUANG K Y, JIN Q J, HUANG S D. A hybrid rotor position identification method for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 1938-1945.
- [24] 钱弼违, 鞠金涛. 基于混合终端滑模观测器的永磁同步电机位置和速度估计方法[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 21-26.
- QIAN B W, JU J T. Position and speed estimation for permanent magnet synchronous motor based on hybrid terminal sliding mode observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(3): 21-26.
- [25] 张琳元, 张清艺, 张志锋. 基于非线性观测器的永磁同步电机位置估计算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 79-85.
- ZHANG L Y, ZHANG Q Y, ZHANG Z F. Research on position estimation algorithm of permanent magnet synchronous motor based on nonlinear observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 79-85.
- [26] 张皎, 杨旭, 刘源翔, 等. 高阶线性自抗扰控制器的性能评估[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1162-1170.
- ZHANG J, YANG X, LIU Y X, et al. Performance evaluation for active disturbance rejection with high-order line extended state observer [J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1162-1170.

收稿日期:2024-07-08

收到修改稿日期:2024-09-06

作者简介:

刘晨炜(1997-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制,626598702@qq.com;

* 通信作者:李想(1986-),男,博士,副研究员,研究方向为流体传动与控制技术,lixiang2023@nue.edu.cn。

Improved ESO Trajectory Observer Based on Adaptive Acceleration Compensation

LIU Chenwei¹, LI Xiang^{2*}, SUN Xingfa², XU Jin², ZHENG Xinliang²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Energy, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Key words: trajectory observation; extended state observer; adaptive acceleration compensation; observation performance

Permanent magnet synchronous motor (PMSM), driven by permanent magnets, possess several advantages such as simple structure, excellent mechanical characteristics, high load capacity, stable speed regulation, wide speed adjustment range, and high torque. In industrial applications, PMSM drive systems that detect motion states using position sensors typically employ extended state observer (ESO) to smooth position information and obtain velocity information. To address the issues of slow response speed, low observation accuracy, and poor anti-disturbance capability in traditional ESO trajectory observers, this paper proposes an improved ESO trajectory observer based on adaptive acceleration compensation.

First, the structure and working principles of traditional ESO were analyzed theoretically. The trajectory observer based on the traditional ESO treats acceleration as a disturbance and compensates for it using feedback from position observation errors. This approach inherently suffers from slow response speed and poor anti-disturbance capability.

Next, an improved ESO trajectory observer based on preset acceleration compensation was proposed. By introducing preset acceleration feedforward compensation, the extended state α_d observes acceleration disturbances caused by model errors, mechanical friction, and fluid resistance.

This method improved the dynamic accuracy and response speed of trajectory observation to some extent. However, under conditions of strong disturbances or significant transient operating characteristics, the actual motion acceleration of the motor may deviate significantly from the preset acceleration due to the limitations of closed-loop trajectory tracking accuracy, leading to a severe decline in the dynamic performance of the trajectory observer.

To overcome this limitation, an improved ESO trajectory observer based on adaptive acceleration compensation was further proposed. By introducing adaptive acceleration feedforward compensation, the feedforward acceleration can be adjusted online based on position observation errors, enhancing the dynamic accuracy and response speed of trajectory observation under conditions of strong disturbances and significant transient operations.

Finally, to verify the feasibility and effectiveness of the proposed improved observation scheme, a simulation model was built in Matlab/Simulink for testing. The proposed improved observation scheme was compared with the traditional observation scheme. The results show that the proposed scheme effectively improves the response speed, dynamic accuracy and anti-interference performance of trajectory observation.