

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.09.043

电动拖拉机永磁电机模糊滑模无传感器控制研究

张 凯¹ 全 力¹ 晋世博²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 许昌学院电气与机械工程学院, 许昌 461000)

摘要: 永磁电机闭环控制需要准确的转子位置信息,而传统的机械传感器在农业生产等恶劣工况下的可靠性难以保证。为了提高系统可靠性,对无传感器控制方法进行了研究。在传统基于滑模观测器的无传感器控制中,系统抖振和稳定性差的问题严重影响了无传感器运行的控制效果。为此,本文提出了一种基于模糊滑模观测器和模糊锁相环的无传感器控制方法,有效地解决了这一问题。首先,利用模糊控制器对滑模观测器和锁相环的控制参数进行处理,并根据电机的实际工况实时调整这些参数,提高了系统鲁棒性。其次,采用递归最小二乘自适应线性谐波提取器对反电动势的高谐波分量进行有效滤波,避免了高频分量对观测结果的影响。实验结果表明,所提出的控制方法提高了对转速和转子位置的估计精度。

关键词: 电动拖拉机; 内置式永磁同步电机; 模糊控制; 滑模观测器; 锁相环; 无传感器控制

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)09-0431-08

OSID:



Sensorless Control of Permanent Magnet Motor for Electric Tractor Based on Fuzzy Sliding Mode Observer

ZHANG Kai¹ QUAN Li¹ JIN Shibo²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: Developing electricized and intelligent modern agricultural equipment system and improving the modernization level of agricultural equipment is one of the important measures to vigorously promote the comprehensive revitalization of rural areas and quickly realize the “modernization of agriculture and rural areas”. Because of its potential advantages of green, intelligent and efficient, electric tractors have become one of the effective means to support the green and sustainable development of agriculture and ensure the safety of food production. Among them, as the core and key of electrification technology of tractor, driving motor is the power source of electric tractor, which directly determines the operation efficiency and tillage quality of the whole machine. The closed-loop control system of permanent magnet motor needs accurate rotor position information, while the reliability of traditional mechanical sensors is difficult to guarantee under bad working conditions. In order to improve the system reliability, the sensorless control method was studied. In the traditional sensorless control based on sliding mode observer, the problem of poor parameter robustness and stability seriously affected the control effect of sensorless operation. Therefore, a sensorless control method based on fuzzy sliding mode observer and fuzzy phase-locked loop was proposed to effectively solve this problem. Firstly, fuzzy controller was used to process the control parameters of the sliding mode observer and phase-locked loop, and these parameters were adjusted in real time according to the actual working conditions of the motor. Secondly, the recursive least squares adaptive linear harmonic extractor was used to effectively filter the high harmonic component of the back electromotive force, which avoided the influence of the high frequency component on the observed results. The experimental results showed that the proposed control method can improve the accuracy of speed and position estimation.

Key words: electric tractor; interior permanent magnet synchronous motor; fuzzy control; sliding mode observer; phase-locked loop; sensorless control

收稿日期: 2023-03-09 修回日期: 2023-05-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51777089)

作者简介: 张凯(1989—),男,博士生,主要从事现代农业装备电驱动及其无人驾驶技术研究,E-mail: 164045348@qq.com

通信作者: 全力(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事高效能永磁电机及驱动控制技术研究,E-mail: quanli@ujs.edu.cn

0 引言

电动拖拉机作为一种新型农用动力机械设备,采用电机作为动力源,具有清洁环保、节能高效、控制灵活等优点,有利于提升我国农业机械电气化发展水平,提高农业生产资源的利用率^[1-5]。内置式永磁同步电机(Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)作为电动拖拉机的驱动电机,具有质量轻、效率高、功率密度高等优点,得到了广泛研究^[6-10]。在 IPMSM 控制系统中,转子位置信息对于磁场定向闭环控制至关重要。这种机械信息可以通过光电编码器或旋转变压器来获取,但会增加系统成本。此外,由于电动拖拉机运行工况复杂且恶劣,位置传感器在此类工况下十分容易损坏,导致控制系统失灵。因此,开发一种稳定可靠的无传感器控制方法就显得尤为重要。

无传感器控制是一种旨在消除位置传感器的信号处理技术。它只利用测量到的电气量,如电机电流和电压,实现对其他难以直接测量的量的估计。由于它是一种在处理器中设置的估计算法,因此也能有效地降低系统成本^[11-17]。在中高速无传感器控制中,滑模观测器(Sliding mode observer, SMO)被广泛应用于反电势的观测。SMO 中存在高频抖振,这是由其自身结构原理决定的。传统的方法是在 SMO 中使用低通滤波器来抑制抖振^[18-20]。但是,低通滤波器的使用会带来增益衰减和相位滞后的问题。因此,需要在系统中增加相位补偿模块。相位补偿模块需要使用 arctan 函数,这将进一步增加转子位置和转速的估计误差。文献[21]使用 sigmoid 函数来代替符号函数,对降低反电势信号的高频抖振有一定的作用。文献[22]引入一种基于新的趋近律的 SMO 方法,以减少控制器输入的抖振,保持控制器的高跟踪性能。文献[23]提出了一种新的离散时间系统的 SMO 切换趋近律,在不增加临界信号大小的情况下,保证了控制系统的快速收敛和良好的鲁棒性。然而,控制器设计的复杂性给其在动态系统中的应用带来了挑战。此外,高阶 SMO 是一种既能消除抖振又不影响鲁棒性的方法。文献[24-25]提出了一种基于超螺旋的二阶滑模算法,将超螺旋算法与 SMO 算法相结合,降低了系统抖振。文献[26]进一步采用三阶超螺旋算法来提升系统的动态响应速度,然而高阶算法会显著增加系统的复杂性。这些方法具有较好的使用价值和实施效果,在实际应用中,虽然 SMO 具有较强的鲁棒性,但电机本身参数变化以及其他非线性因素仍对控制性能有一定影响。

由于模糊控制算法实现较为简单,可以简化 SMO 参数的设计,因此本文将模糊控制算法与 SMO 和锁相环(Phase-locked loop, PLL)相结合,形成模糊 SMO(Fuzzy SMO, FSMO)和模糊 PLL(Fuzzy PLL, FPLL)结构。采用递归最小二乘自适应线性(Recursive least squares adaptive linear, RLS-Adaline)谐波提取器对反电势中的谐波进行滤波,以期进一步提高无传感器控制算法的性能。

1 传统无传感器控制方法

1.1 滑模观测器数学模型

根据 IPMSM 在两相静止坐标系下的电压方程,将其改写为电流的状态方程形式,即

$$p\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & -\omega_e \frac{L_d - L_q}{L_d} \\ \omega_e \frac{L_d - L_q}{L_d} & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = [(L_d - L_q) (\omega_e i_d - p i_q) + \omega_e \lambda_f] \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 R ——定子电阻, Ω λ_f ——永磁磁链, Wb
 L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感, mH
 ω_e ——转子电角速度, rad/s
 i_α 、 i_β —— α 、 β 轴定子电流, A
 v_α 、 v_β —— α 、 β 轴定子电压, V
 E_α 、 E_β —— α 、 β 轴扩展反电势, V
 θ_e ——转子电角度, rad

由于 IPMSM 的 L_d 和 L_q 不相等,因此由式(2)可知,扩展反电势不仅与电机转速有关,还与定子电流 i_d 和微分项 pi_q 有关,而 i_d 和 pi_q 又与负载有关,这意味着电机负载状态也会影响扩展反电势。当电动拖拉机低速重载运行时,电动势会发生较大的畸变。根据式(2),IPMSM 的反电势包含所有的转速和角度信息。因此,只需准确地获取反电势,就能准确地估计出转子位置和速度。SMO 在算法的便捷性和控制的鲁棒性方面有较好的效果,因此利用 SMO 来获取扩展反电势的估计值。传统的 SMO 设计方法为

$$p\begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & -\omega_e \frac{L_d - L_q}{L_d} \\ \omega_e \frac{L_d - L_q}{L_d} & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} z_\alpha \\ z_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ —— α, β 轴电流观测值, A
 z_α, z_β —— α, β 轴的滑模控制函数

用式(3)减去式(1)后,可以得到

$$P \begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_\alpha \\ \dot{\hat{i}}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & -\omega_e \frac{L_d - L_q}{L_d} \\ \omega_e \frac{L_d - L_q}{L_d} & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha - z_\alpha \\ E_\beta - z_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $\dot{\hat{i}}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$ $\dot{\hat{i}}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$

式中 $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ ——电流观测误差, A

SMO 控制率设计为

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_\alpha \\ \dot{z}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$k > \max \{ -R|\dot{\hat{i}}_\alpha| + E_\alpha \operatorname{sgn}(\dot{\hat{i}}_\alpha), -R|\dot{\hat{i}}_\beta| + E_\beta \operatorname{sgn}(\dot{\hat{i}}_\beta) \}$$

当观测器的状态变量到达滑模面后,即电流误差趋近 0 时,可得

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ k \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

随后,可以使用反正切函数或者 PLL 算法来获取转子位置与速度。

1.2 转子速度和位置信号提取

基于得到的扩展反电势,可以使用一个相对简单的函数 $\arctan(\cdot)$ 来获得转子位置和转速等信息。但由于 SMO 本身存在高频抖振问题,利用 $\arctan(\cdot)$ 获取转子位置和转速信息,会将 SMO 中的抖振现象引入除法运算中,从而放大这种不利影响,造成角度估计误差过大。因此,采用 PLL 算法来获得转子位置和转速。由于简化的 PLL 框图可以等效为角度闭环控制,因此可以更好地实现位置估计。根据前面得到的扩展反电势,可以通过图 1 所示的结构获得转子位置信息。

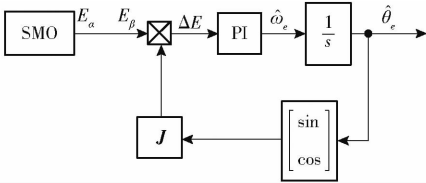


图 1 基于滑模观测器和锁相环的无传感器控制结构图

Fig.1 Sensorless control structure based on sliding mode observer and phase-locked loop

图中, $J = \begin{bmatrix} 0 & 1; -1 & 0 \end{bmatrix}$ 。根据图 1 和式(2)可得

$$\Delta E = -E_\alpha \cos \hat{\theta}_e - E_\beta \sin \hat{\theta}_e = k_0 \sin \theta_e \cos \hat{\theta}_e - k_0 \cos \theta_e \sin \hat{\theta}_e = k_0 \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \quad (7)$$

式中 $\hat{\theta}_e$ ——转子位置观测值

k_0 ——滑模增益系数

当 $|\theta_e - \hat{\theta}_e| < \pi/6$ 时,式(7)可以简化为

$$k_0 \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \approx k_0(\theta_e - \hat{\theta}_e) \quad (8)$$

因此,可以将图 1 的控制框图简化为图 2。根据图 2,其传递函数可以写成

$$\frac{\hat{\theta}_e}{\theta_e} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

其中 $\xi = \sqrt{k_0 K_i}$ $\omega_n = 0.5 K_p \sqrt{k_0 / K_i}$

式中 K_i ——PI 控制器积分系数

K_p ——PI 控制器比例系数

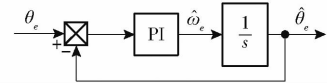


图 2 简化后的控制结构图

Fig.2 Simplified control structure

因此,可以通过设置不同的阻尼系数和带宽系数确定不同的 PI 控制器参数。

2 改进的无传感器控制方法

2.1 模糊滑模观测器

在实际控制过程中,由于 SMO 的增益系数 k 和 PLL 的 PI 参数需要根据实际工况进行调整,而被控对象参数往往复杂多变,传统的无传感器控制方法难以准确估计转子速度和位置,因此本文引入模糊控制来解决这一问题。

采用模糊控制方法,将输入参数按特定规则模糊化,并根据评价指标和初始参数的信息,将输入参数作为信息保存的控制单元,经过简单的算术运算,即可根据控制系统的性能调整相应的控制参数。本文提出的 FSMO 以及 FPLL 的控制结构如图 3 所示。

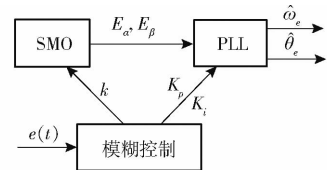


图 3 模糊滑模观测器及模糊锁相环控制结构图

Fig.3 Control structure of fuzzy sliding mode observer and fuzzy phase-locked loop

2.2 隶属度函数与模糊逻辑建立

模糊化处理是将精确的输入量和控制输出量模糊化。此处,将电机转速的误差 $e(t)$ 和误差变化量 $e_c(t)$ 作为模糊控制器的输入变量,将输入变量求取绝对值并归一化,其量化等级为 $\{1, 2, 3\}$,论域为 $[0, 1]$ 。以 SMO 的增益系数 k 和 PLL 的 PI 参数 K_p 和 K_i 为输出参数,其量化等级为 $\{1, 2, 3\}$,论域为

[0.5, 1]。并乘以 PI 参数对应的量化系数,可得实际的控制参数。输入与输出的隶属度函数均选择计算便捷的三角形隶属度函数,输入与输出的模糊子集均为{S, M, L}。输入与输出的隶属度函数图如图 4 和图 5 所示。隶属度函数是依据专家经验建立的,依据专家经验建立的隶属度函数能使系统在各个工作点上具有较优的性能,在绝大多数工况下,该隶属度函数的效果优异。

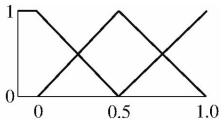


图 4 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 以及增益系数 k 的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of $e(t)$, $e_c(t)$ and k

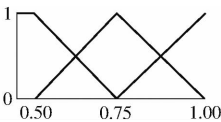


图 5 PI 参数隶属度函数

Fig. 5 PI parameter membership function diagram

2.3 模糊控制规则建立

SMO 的增益系数 k 和 PLL 的 PI 参数与转速误差及误差变化量相关,因此,可以根据 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 来实时调整所需的参数,从而提高无传感器控制的估计精度。在转速误差较大,且误差变化量较大时,为了提高低速时观测器的控制带宽,使滑模收敛速度更快,SMO 的增益系数 k 取值较大。反之,增益系数 k 取值较小。而 PLL 的 PI 参数在转速误差及其变化量较大时,需取较小的值,而在 $e(t)$ 和 $e_c(t)$ 较小时,需增大 PI 参数。不仅能增加抗干扰能力,还可以提高收敛精度。因此,可以根据以上规则建立输入与输出的模糊规则表。SMO 增益系数 k 的模糊规则如表 1 所示。PLL 的 PI 参数模糊规则如表 2、3 所示。

表 1 增益系数 k 的模糊规则

Tab.1 Fuzzy rule of gain coefficient k

$e_c(t)$	$e(t)$		
	S	M	L
S	S	M	M
M	S	M	L
L	M	M	L

表 2 K_p 的模糊规则

Tab.2 Fuzzy rule of gain coefficient K_p

$e_c(t)$	$e(t)$		
	S	M	L
S	L	M	M
M	L	M	S
L	M	M	S

表 3 K_i 的模糊规则

Tab.3 Fuzzy rule of gain coefficient K_i

$e_c(t)$	$e(t)$		
	S	M	L
S	L	M	M
M	L	M	S
L	M	M	S

2.4 模糊量反模糊化

模糊控制中,常用的 3 种反模糊化方法为最大隶属度法、重心法和加权平均法。其中,重心法将隶属度函数曲线与横坐标所围成区域的重心作为模糊推理的输出值,该方法具有平滑输出的特性,并能对微小输入做出相应变化。本文采用重心法对模糊值进行反模糊化,其表达式为

$$V_o = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)}$$

(10)

式中 $\mu_v(v_k)$ ——模糊推理后的值
 v_k ——论域中所对应的值

2.5 谐波提取器

由于死区效应及逆变器非线性因素的影响,电机反电势中会存在高次谐波分量。反电势中基波以及谐波分量可以表示为

$$\begin{cases} E_\alpha = -E_f \sin(\omega_e t + \theta_{ei}) - \\ \quad E_{6k \pm 1} \sin((6k \pm 1)\omega_e t + \theta_{6k \pm 1}) + n_1(t) \\ E_\beta = E_f \cos(\omega_e t + \theta_{ei}) + \\ \quad E_{6k \pm 1} \cos((6k \pm 1)\omega_e t + \theta_{6k \pm 1}) + n_2(t) \end{cases}$$

(11)

式中 E_f ——基波反电势幅值,V
 $E_{6k \pm 1}$ ——谐波反电势幅值,V
 $\theta_{6k \pm 1}$ ——谐波初始相位,rad
 $n_1(t)$ 、 $n_2(t)$ ——总噪声分量

从式(11)可以看出,反电势中存在 5 次及 7 次等谐波电压分量。为了能准确地获取转子位置和速度等信息,需要将反电势中的谐波分量尽可能滤除。因此,可使用简单且高效的 RLS-Adaline 方法来提取反电势中的谐波分量。同时,在 Adaline 的迭代更新过程中,使用 RLS 方法对权值进行更新,具有更快的收敛速度。RLS-Adaline 谐波提取器控制框图如图 6 所示。

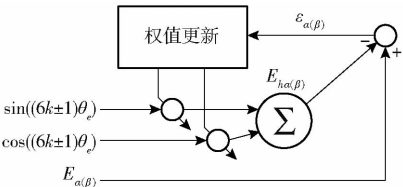


图 6 RLS-Adaline 谐波提取器控制框图

Fig. 6 RLS-Adaline harmonic extractor control block

区时间设为 $2\ \mu\text{s}$ 。实验样机参数如表 4 所示。

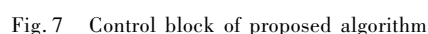
$$E_{h\alpha(\beta)} = A(t) (\sin(\omega_h t) \cos\theta_h + \cos(\omega_h t) \sin\theta_h) =$$

$$\begin{bmatrix} \sin(\omega_h t) & \cos(\omega_h t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(t) \cos\theta_h \\ A(t) \sin\theta_h \end{bmatrix} = \mathbf{X}^T(n) \boldsymbol{\omega}(n) \quad (13)$$

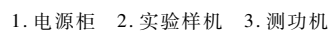
$\omega(n)$ ——所需更新的权值

式中 α ——遗忘因子,取(0,1)

所提出的基于模糊算法的无传感器控制方法的总控制框图如图 7 所示。采用静止坐标系下的电压和电流作为 FSMO 的输入变量,经过运算后得到反电势。由于反电势中存在诸多谐波分量,因此使用 RLS-Adaline 算法滤除反电势中的谐波分量,得到分量 ε_α 和 ε_β ,并将该分量作为 FPLL 的输入,经 FPLL 运算后得到所需的转子位置和转速等信息。最后将估计的转子信息送至矢量控制中,实现电动拖拉机驱动系统的闭环控制。

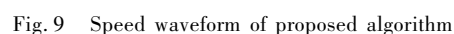


为了验证所提出的无传感器控制方法的有效性,在图 8 所示的实验平台上进行了算法实际测试。主控单元为 TMS320F28335。开关频率为 10 kHz。死

**Tab.4** Prototype parameters

参数	数值
极对数	4
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500
额定转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	88
直流母线电流/A	400
直流母线电压/V	72
额定功率/kW	18.4
永磁磁链/Wb	0.034 85
定子电阻/ Ω	1.79
d 轴电感/mH	18.99
q 轴电感/mH	77.91

图9为有模糊控制器且有RLS-Adaline算法的转速波形图,即本文所提出的方法。此时电机稳定运行在额定转速附近。其中,转速误差的振动幅



值约为 50.1 r/min。

图 10 为无模糊控制器时的转速波形。此时,电机转速同样能够稳定在额定转速附近,但是转速误差的振动幅值约为 68.8 r/min,比所提出的方法增加 37.3%。

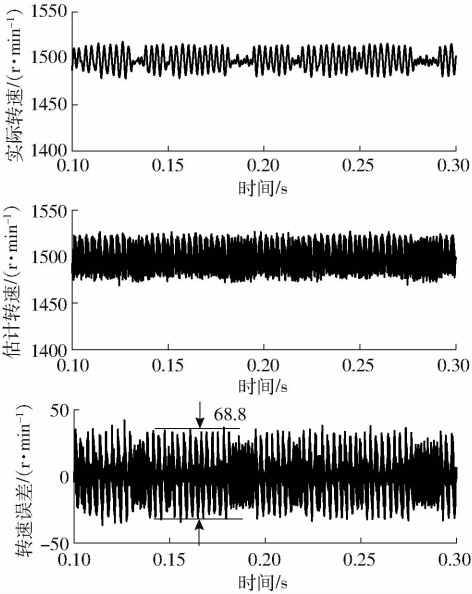


图 10 无模糊控制器的转速波形

Fig. 10 Speed waveform without fuzzy controller

图 11 为无 RLS - Adaline 算法的转速波形。此时,电机的转速出现较大的抖动,并且无法达到额定转速运行,出现较大的静差。同时,估计转速与实际转速之间也存在 97.5 r/min 的误差,振动幅值比所提出的方法增加 94.6%。

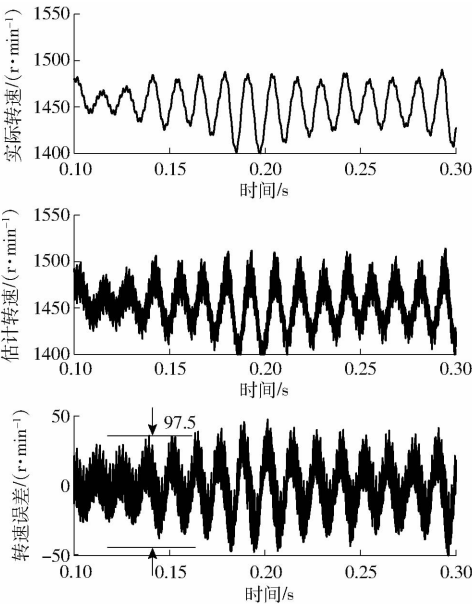


图 11 无 RLS - Adaline 算法的转速波形

Fig. 11 Speed waveform without RLS - Adaline algorithm

图 12 为有模糊控制器且有 RLS - Adaline 算法的转子位置波形,即本文所提出的方法。从图 12 可以看出,转子位置存在的偏差小于 5.00 rad,且振动

幅值小于 0.30 rad。

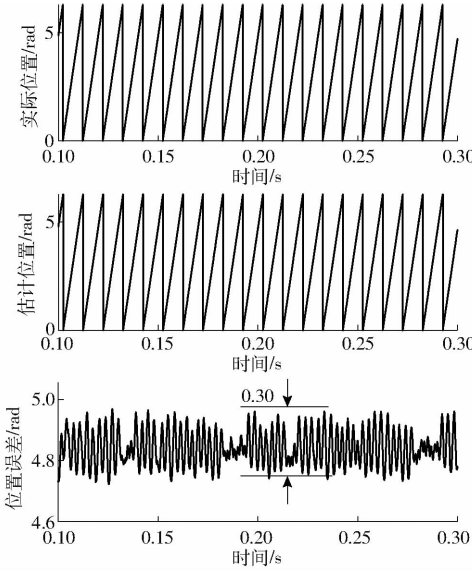


图 12 所提算法的转子位置

Fig. 12 Rotor position of proposed algorithm

图 13 为无模糊控制器的转子位置。此时,电机转子位置存在的偏差小于 5.10 rad,且振动幅值小于 0.41 rad,振动幅值比所提方法增加 36.7%。

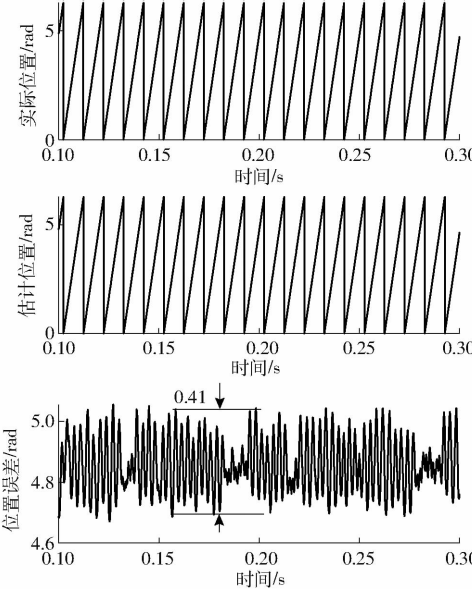


图 13 无模糊控制器的转子位置

Fig. 13 Rotor position without fuzzy controller

图 14 为无 RLS - Adaline 算法的转子位置波形。此时,电机转子位置存在的偏差小于 6.00 rad,且振动幅值小于 3.10 rad,此时转子位置的振动幅值和转子偏差都明显较大。

5 结论

(1)在分析 IPMSM 的无传感器控制方法的基础上,探究了现有控制方法的不足之处,提出了 FSMO、FPLL 以及 RLS - Adaline 谐波提取器相结合的无传感器控制方法,该方法显著提高了转子

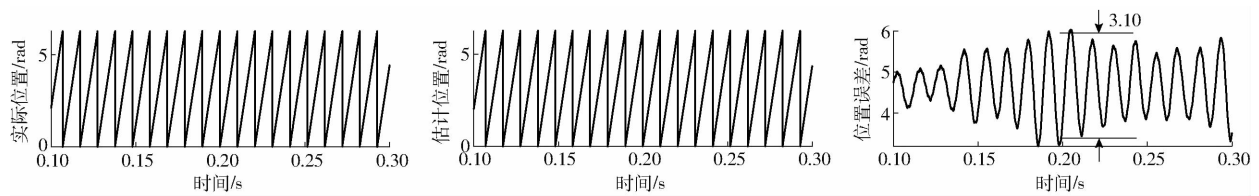


图 14 无 RLS-Adaline 算法的转子位置

Fig. 14 Rotor position without RLS-Adaline algorithm

位置和速度的估计精度,提升了无传感器控制效果。

(2)在实验平台上验证了所提方法的有效性。所提方法的转速误差的振动幅值约为 50.1 r/min,比无模糊控制器时的转速误差振幅减少 27.2%,比

无 RLS-Adaline 算法的转速误差振幅减少 48.6%。所提方法的转子位置的振动幅值小于 0.30 rad,比无模糊控制器时的转子位置振幅减少 26.8%,比无 RLS-Adaline 算法的转子位置振幅减少幅度超过 90.3%。

参 考 文 献

- [1] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):412-420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2):412-420. (in Chinese)
- [2] 刘孟楠,李书苑,徐立友,等. 拖拉机双向耦合电驱动系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报,2022,53(4):423-431.
LIU Mengnan, LI Shuyuan, XU Liyou, et al. Design and performance analysis of tractor bidirectional coupling electric drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4):423-431. (in Chinese)
- [3] 李贤哲,刘孟楠,徐立友,等. 拖拉机串联式液力机械复合传动系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):406-413.
LI Xianzhe, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Design and test of tractor serial hydraulic and mechanical hybrid transmission system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):406-413. (in Chinese)
- [4] 汪珍珍,周俊,王旭. 增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型研究[J]. 农业机械学报,2023,54(4):428-438.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, WANG Xu. Research on energy management model for extended-range electric rotary-tilling tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4):428-438. (in Chinese)
- [5] 李银平,刘立,靳添絮,等. 基于动态规划的电动拖拉机动力电源能量控制策略研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4):403-410.
LI Yinping, LIU Li, JIN Tianxu, et al. Energy control strategy of electric tractor power supply based on dynamic programming [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):403-410. (in Chinese)
- [6] DENG T, SU Z, LI J, et al. Advanced angle field weakening control strategy of permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3424-3435.
- [7] 韩清振,何仁. 车用永磁同步电机稳定性分析[J]. 农业机械学报,2016,47(11):363-368.
HAN Qingzhen, HE Ren. Stability analysis of permanent magnet synchronous motor in vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):363-368. (in Chinese)
- [8] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):348-364.
LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Sup. 1):348-364. (in Chinese)
- [9] XIAO D, NALAKATH S, FILHO S R, et al. Universal full-speed sensorless control scheme for interior permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4):4723-4737.
- [10] WANG K, WU Z. Simplified current control strategy for permanent-magnet synchronous motors with rotor flux distortion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4):3407-3417.
- [11] XIAO D, FILHO S R, FANG G, et al. Position-sensorless control of switched reluctance motor drives: a review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1):1209-1227.
- [12] 张国强,项润华,王高林,等. 基于静止轴系脉冲信号注入的永磁同步电机无传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12):4297-4306.
ZHANG Guoqiang, XIANG Runhua, WANG Gaolin, et al. Pulse signal injection in stationary reference frame for sensorless PMSM drives[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2021, 41(12):4297-4306. (in Chinese)
- [13] WANG G, VALLA M, SOLSONA J. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives—a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7):5830-5842.
- [14] LASCU C, ANDREESCU G D. PLL position and speed observer with integrated current observer for sensorless PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7):5990-5999.
- [15] 刘计龙,肖飞,麦志勤,等. IF 控制结合滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器复合控制策略[J]. 电工技术学报,

- 2018,33(4):919-929.
- LIU Jilong, XIAO Fei, MAI Zhiqin, et al. Hybrid position-sensorless control scheme for PMSM based on combination of IF control and sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(4):919-929. (in Chinese)
- [16] 黄皓,涂群章,蒋成明,等. 基于扰动观测器的农用驱动电机变速滑模控制[J]. 农业机械学报,2022,53(7):447-458.
- HUANG Hao, TU Qunzhang, JIANG Chengming, et al. Variable speed sliding mode control of agricultural drive motor based on disturbance observer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):447-458. (in Chinese)
- [17] 邓国发,王辉,吴轩,等. 一种可抑制逆变器非线性影响的永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7381-7390,7464.
- DENG Guofa, WANG Hui, WU Xuan, et al. A sensorless control strategy of permanent magnet synchronous motor for suppressing nonlinear effects of inverter[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2018,38(24):7381-7390,7464. (in Chinese)
- [18] XU W, JUNEJO A K, LIU Y, et al. An efficient anti-disturbance sliding-mode speed control method for PMSM drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(6):6879-6891.
- [19] KE D, WANG F, HE L, et al. Predictive current control for PMSM systems using extended sliding mode observer with Hurwitz-based power reaching law[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(6):7223-7232.
- [20] WU X, HUANG S, LIU K, et al. Enhanced position sensorless control using bilinear recursive least squares adaptive filter for interior permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(1):681-698.
- [21] SHENG L, LI W, WANG Y, et al. Sensorless control of a shearer short-range cutting interior permanent magnet synchronous motor based on a new sliding mode observer[J]. IEEE Access, 2017,5:18439-18450.
- [22] BARTOSZEWICZ A, LESNIEWSKI P. New switching and nonswitching type reaching laws for SMC of discrete time systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016,24(2):670-677.
- [23] FALLAHA C J, SAAD M, KANAAN H Y, et al. Sliding-mode robot control with exponential reaching law[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,58(2):600-610.
- [24] XIONG X, KIKUWE R, KAMAL S, et al. Implicit-Euler implementation of super-twisting observer and twisting controller for second-order systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020,67(11):2607-2611.
- [25] LIANG D, LI J, QU R, 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.
- [26] ZHANG T, XU Z, LI J, et al. A third-order super-twisting extended state observer for dynamic performance enhancement of sensorless IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020,67(7):5948-5958.

~~~~~

(上接第 406 页)

- [35] 刘梅先,杨劲松,李晓明,等. 膜下滴灌条件下滴水量和滴水频率对棉田土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3203-3210.
- LIU Meixian, YANG Jinsong, LI Xiaoming, et al. Effects of irrigation amount and frequency on soil water distribution and water use efficiency in a cotton field under mulched drip irrigation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3203-3210. (in Chinese)
- [36] 王允喜,李明思,蓝明菊. 膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 31-38.
- WANG Yunxi, LI Mingsi, LAN Mingju. Effect of soil wetting pattern on cotton-root distribution and plant growth under plastic mulched drip irrigation in field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 31-38. (in Chinese)
- [37] 王秀康,李援农,邢英英,等. 滴头流量对夏玉米根系的影响[J]. 中国农村水利水电, 2010(11): 66-68.
- WANG Xiukang, LI Yuannong, XING Yingying, et al. Effect of dripper discharge on summer maize-root distribution[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(11): 66-68. (in Chinese)
- [38] 康跃虎,王凤新,刘士平,等. 滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 66-72.
- KANG Yuehu, WANG Fengxin, LIU Shiping, et al. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 66-72. (in Chinese)
- [39] WANG X K, LI Z B, XING Y Y. Effects of dripper discharge and irrigation frequency on growth and yield of maize in Loess Plateau of Northwest China[J]. Pakistan Journal of Botany, 2014, 46(3): 1019-1025.
- [40] 李菊,张富仓,王艳丽,等. 灌水量和滴灌频率对甘肃省河西地区春玉米生长和水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 8-20.
- LI Ju, ZHANG Fucang, WANG Yanli, et al. Effects of irrigation amount and drip irrigation frequency on spring maize growth and water use in Hexi area of Gansu Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(10): 8-20. (in Chinese)