

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902617

基于 PLL 自适应滑模观测器的 PMSM 无传感器控制*

申永鹏¹ 郑竹凤¹ 王耀南² 孟步敏² 李会仙³

(1. 郑州轻工业大学 电气信息工程学院 郑州 450002; 2. 湖南大学 电气信息工程学院 长沙 410082;

3. 郑州宇通集团有限公司 郑州 451482)

摘要:针对传统滑模观测器无传感器控制方法反电动势基波中高频谐波含量高、抖振严重以及转子位置估计误差大等问题,提出了一种锁相环结构(PLL)自适应滑模观测器永磁同步电机无传感器控制方法。首先,在满足 Lyapunov 稳定性的前提下,推导并建立了反电动势的自适应律,通过构造自适应滑模观测器,使得反电动势观测误差迅速衰减;同时采用带有消除旋转影响环节的锁相环得到转子位置,消除了转速变化的影响,进一步提高了观测精度;最后,在一台 2.9 kW 表贴式永磁同步电机上进行了实验验证。实验结果表明,该方法有效地抑制了滑模抖振,降低了反电动势中的高频谐波,提高了转子位置的观测精度。

关键词: 永磁同步电机;自适应律;滑模观测器;锁相环

中图分类号: TM351;TN601 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Adaptive sliding mode observer based on PLL in sensorless control of PMSM

Shen Yongpeng¹ Zheng Zhufeng¹ Wang Yaonan² Meng Bumín² Li Huixian³

(1. College of Electrical Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Zhengzhou Yutong Bus Co. Ltd, Zhengzhou 451482, China)

Abstract: In the traditional sliding mode observer based sensorless field oriented control scheme for permanent magnet synchronous motor (PMSM), the fundamental wave of the observed back electromotive force (back-EMF) has high frequency harmonics and chattering problem, and the observed rotor position is not accurate enough. Focused on these problems, a PLL adaptive sliding mode observer based sensorless control method for PMSM is proposed. Firstly, under the premise of Lyapunov stability, adaptive rule of back EMF is established and deduced. It makes the error of the observed back-EMF decline rapidly by constructing the adaptive sliding mode observer. Meanwhile, the rotor position is obtained by introducing the rotated influence immune phase-locked loop, which eliminates the influence of rotation speed change and further improves the observation accuracy. Finally, the experimental results based on a 2.9 kW PMSM show that the proposed method can effectively suppress the chattering of the sliding mode, reduce the high frequency harmonics of the back-EMF, and improve the observation accuracy of the rotor position.

Keywords: PMSM; adaptive law; sliding mode observer; PLL

0 引言

永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有功率密度高、调速范围宽以及动态响应快等诸多优点广泛应用于伺服驱动、电动汽车等领域。

永磁同步电机矢量控制系统通常需要编码器或者旋转变压器等机械式传感器提供实时的转子位置信息,但是机械式传感器即增加了系统的成本,同时还存在易受干扰、可靠性差、安装维护困难等问题。电机无传感器控制技术利用电机中可测量的信号,例如定子电流、定子电压等,通过算法估计出转子的转速和位置信息,有效地克服

收稿日期: 2019-09-23 Received Date: 2019-09-23

* 基金项目: 国家自然科学基金青年项目(61803345)、河南省科技开放合作项目(182106000032)资助

了机械式传感器的不足,受到了学术界和工业界的广泛关注^[1]。

无传感器控制技术一般分为适用于低速阶段的高频信号注入法和适用于中高速阶段的反电动势及磁链估计法^[2-6]两大类。高频注入法利用永磁电机的凸极效应,通过注入脉动高频信号,得到电机在极低速运行状态下的转子位置信息,该方法不适用于中高速阶段^[7-9];中高速阶段通常采用的方法为通过建立电机的反电动势或磁链观测器,来获得电机转速和位置信息,包括扰动观测器、状态观测器、扩展卡尔曼滤波器、模型参考自适应以及滑模观测器等方法^[10-15]。滑模观测器具有计算简单、参数变化或外部扰动时鲁棒性强等优点,得到了广泛应用。

文献[16]提出一种抗扰动无传感器控制方法,能够在不通过状态变量的微分和滤波环节的情况下实现扰动量的精确估计。文献[17]提出一种基于滑模观测器的无传感器矢量控制方法,可较准确地跟踪转子位置和速度,并对转速和负载变化具有较好的自适应能力和鲁棒性。该方法所使用的传统滑模观测器控制存在抖振问题,且观测转子位置易受电机转速变化的影响,文献[18]采用 Sigmoid 函数代替符号函数,在一定程度上削弱了反电动势中的高频抖振。但是,所使用的开关函数同样会影响观测精度^[19-20]。

针对传统滑模观测器存在的上述问题,本文提出了一种锁相环结构 PLL 自适应滑模观测器无传感器控制方法,在满足 Lyapunov 稳定性的前提下,通过构造反电动势自适应滑模观测器,使得反电动势观测误差迅速衰减。同时采用带有消除旋转影响环节的锁相环得到转子位置,消除了转速变化的影响,进一步提高了观测精度。在一台 2.9 kW 的表贴式永磁同步电机上进行了实验验证,实验结果表明,该方法有效地抑制了滑模抖振,降低了反电动势中的高频谐波,提高了转子位置的观测精度。

1 PLL 自适应滑模观测器设计

1.1 滑模观测器设计

表贴式永磁同步电机结构及数学模型如图 1 所示。

根据 α 、 β 坐标系下的数学模型,可将电流方程写为:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + \mathbf{K}_E \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_s} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_E =$$

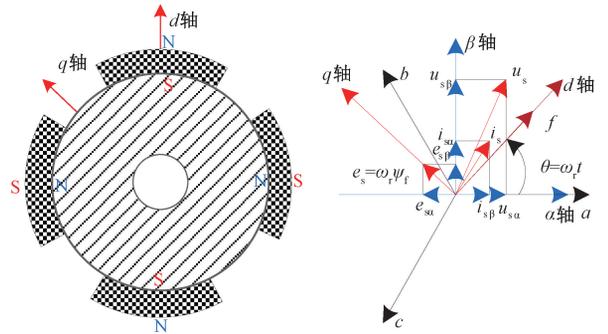


图 1 表贴式永磁同步电机的结构和数学模型
Fig. 1 Structure and mathematical model of PMSM

$\begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_s} \end{bmatrix}$ 。 R 为定子电阻, L_s 为定子电感, i_α 、 i_β 为定子电流, u_α 、 u_β 为定子电压, E_α 、 E_β 为电机反电动势。

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

式中: ψ_f 为定子磁链; ω_e 为转速; θ_e 为转子电角度。

可知,电机反电动势包含了转子的位置和转速信息。式(2)还满足式(3)。

$$\dot{\mathbf{E}}_s = \omega_e \begin{bmatrix} -E_\beta \\ E_\alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

定子电流的误差为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \hat{i}_α 、 \hat{i}_β 为定子电流观测值。

将 $\tilde{i}_\alpha = 0$ 、 $\tilde{i}_\beta = 0$ 定义为滑模面,则有:

$$s = [\tilde{i}_\alpha \quad \tilde{i}_\beta]^T = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

设计自适应滑模观测器为:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + \mathbf{K}_E \begin{bmatrix} \hat{E}_\alpha \\ \hat{E}_\beta \end{bmatrix} + K \text{sign} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: K 为滑模增益; \hat{E}_α 、 \hat{E}_β 为反电动势估计值。若使滑模观测器满足 Lyapunov 稳定性,滑模增益需满足式(7)。

$$K < \min \left[-\frac{R}{L_s} |\tilde{i}_\alpha| - \frac{1}{L_s} |\tilde{E}_\alpha|, -\frac{R}{L_s} |\tilde{i}_\beta| - \frac{1}{L_s} |\tilde{E}_\beta| \right] \quad (7)$$

1.2 自适应律设计

闭环状态观测器能够通过引入误差反馈,进一步提高观测精度。如果闭环状态观测器的系统稳定,只要设置合理的误差反馈增益,误差会逐渐的衰减。闭环状态观测器的原理如图 2 所示。

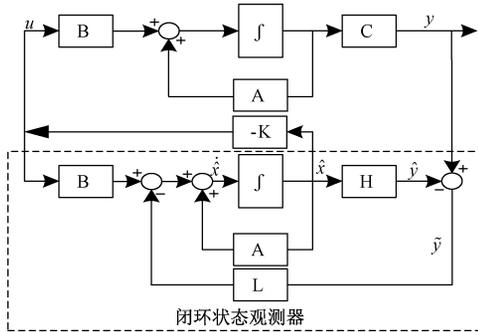


图 2 状态观测器

Fig. 2 State observer

观测器标准方程为:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(\hat{y} - y) \quad (8)$$

$$y = H\hat{x}$$

由式(3)可知:

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \hat{e}_\alpha \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\omega}_e \hat{e}_\beta - l(\hat{e}_\alpha - \hat{E}_\alpha) \\ \hat{\omega}_e \hat{e}_\alpha - l(\hat{e}_\beta - \hat{E}_\beta) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: l 为观测器误差增益; \hat{e}_α 、 \hat{e}_β 为观测器中反电动势观测值。

令 $\tilde{e}_s = \hat{e}_s - \hat{E}_s$, 构建 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{e}_\alpha^2 + \tilde{e}_\beta^2 + \tilde{\omega}_e^2) \quad (10)$$

对所定义的 Lyapunov 函数进行求导,得出:

$$\frac{dV}{dt} = \tilde{e}_\alpha \frac{d\tilde{e}_\alpha}{dt} + \tilde{e}_\beta \frac{d\tilde{e}_\beta}{dt} + \tilde{\omega}_e \frac{d\tilde{\omega}_e}{dt} \quad (11)$$

式(3)与(9)相减可得:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\tilde{e}_\alpha}{dt} \\ \frac{d\tilde{e}_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\omega}_e \tilde{e}_\beta + \omega_e \tilde{e}_\beta - l\tilde{e}_\alpha \\ \hat{\omega}_e \tilde{e}_\alpha - \omega_e \tilde{e}_\alpha - l\tilde{e}_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(9)和(12)代入式(11)中,有:

$$\frac{dV}{dt} = \tilde{\omega}_e \left[\frac{d\tilde{\omega}_e}{dt} - (\hat{e}_\beta \tilde{e}_\alpha - \hat{e}_\alpha \tilde{e}_\beta) \right] - l(\tilde{e}_\alpha^2 + \tilde{e}_\beta^2) \quad (13)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论, Lyapunov 函数的导数小于 0 则为负定,系统达到稳定。所以要使观测器达到稳定,式(13)必须满足式(14)。

$$\frac{dV}{dt} < 0 \quad (14)$$

若使式(13)满足 Lyapunov 稳定性则必有:

$$\frac{d\tilde{\omega}_e}{dt} - (\hat{e}_\alpha \tilde{e}_\beta - \hat{e}_\alpha \tilde{e}_\beta) = 0 \quad (15)$$

即:

$$\frac{d\tilde{\omega}_e}{dt} = \hat{e}_\alpha \tilde{e}_\beta - \hat{e}_\alpha \tilde{e}_\beta \quad (16)$$

由上述分析,反电动势的自适应律可设计为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{e}_\alpha = -\hat{\omega}_e \hat{e}_\beta - l\tilde{e}_\alpha \\ \frac{d}{dt} \hat{e}_\beta = -\hat{\omega}_e \hat{e}_\alpha - l\tilde{e}_\beta \\ \frac{d}{dt} \hat{\omega}_e = \tilde{E}_\alpha \hat{e}_\beta - \hat{e}_\alpha \tilde{E}_\beta \end{cases} \quad (17)$$

将式(3)作为参考模型,上述算法的基本框图如图 3 所示。

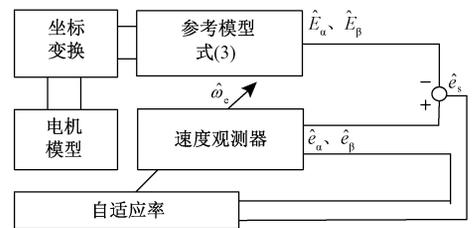


图 3 模型参考自适应算法框图

Fig. 3 Block diagram of model reference adaptive algorithm

1.3 PLL 转速及位置角估计

由式(2)可知,滑模观测器观测反电动势 E_α 和 E_β 中含有转速和转子的位置信息,通常利用反正切函数求取转子的位置信息。

$$\hat{\theta} = -\tan^{-1}(\hat{E}_\alpha / \hat{E}_\beta) \quad (18)$$

但是滑模变结构在工作时会发生抖振,从而导致反电动势存在高频抖振现象。如果利用反正切函数估算转子位置,在运算过程中会受高频抖振影响,转子估计的误差增大,故本文采用 PPL 来估算转子位置以及转速。利用自适应滑模观测器观测到的反电动势 \hat{e}_α 、 \hat{e}_β 可以得到转子位置误差信息:

$$\Delta E = -\hat{e}_\alpha \cos(\hat{\theta}_e) - \hat{e}_\beta \sin(\hat{\theta}_e) = \hat{\omega}_e \psi_f \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \approx k_e(\theta_e - \hat{\theta}_e) \quad (19)$$

式中: $k_e = \omega_e \psi_f$; 反电动势误差信号 ΔE 先经过 PI 控制器调节得到转子速度,再通过积分得到转子位置。

锁相环开环传递函数为:

$$G_{PLL} = \frac{\hat{\theta}_e}{\theta_e} = \frac{k_e k_p s + k_e k_i}{s^2 + k_e k_p s + k_e k_i} \quad (20)$$

式中： k_p 、 k_e 分别是 PI 调节器的比例系数和积分系数。由于转速信息包含在系数 k_e 中，速度的改变会对锁相环位置估算性能产生影响。为了消除转子转速的影响，在传统锁相环中加入消除旋转影响环节，进而提高观测精度。锁相环结构如图 4 所示。

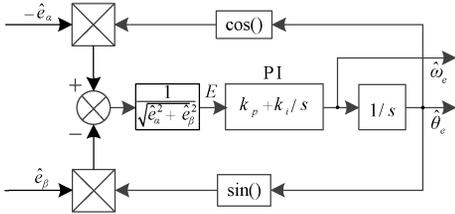


图 4 锁相环结构原理

Fig. 4 Principle of phase-locked loop structure

在加入消除旋转影响环节后，转子位置的误差信息可写为：

$$\Delta E = \hat{\omega}_e \psi_f \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) / \sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2} = \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \quad (21)$$

当转子位置误差 $\Delta\theta_e = \theta_e - \hat{\theta}_e$ 在 $0 \sim \pi/6$ 的范围内，有 $\Delta E \approx \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e)$ 。从而消除转子转速对转子位置观测精度的影响。

锁相环将得到的转速信息反馈至自适应律算法中，构成的 PLL 自适应滑模观测器如图 5 所示。

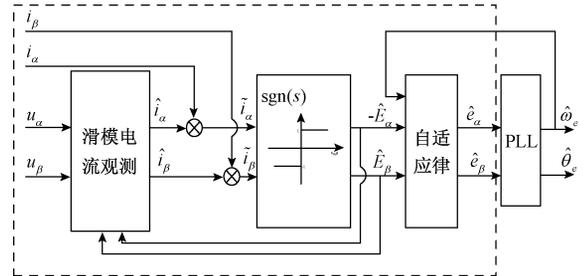


图 5 PLL 自适应滑模观测器

Fig. 5 PLL adaptive sliding mode observe

综上所述，本文所设计的 PLL 自适应滑模观测器无位置传感器控制系统如图 6 所示。

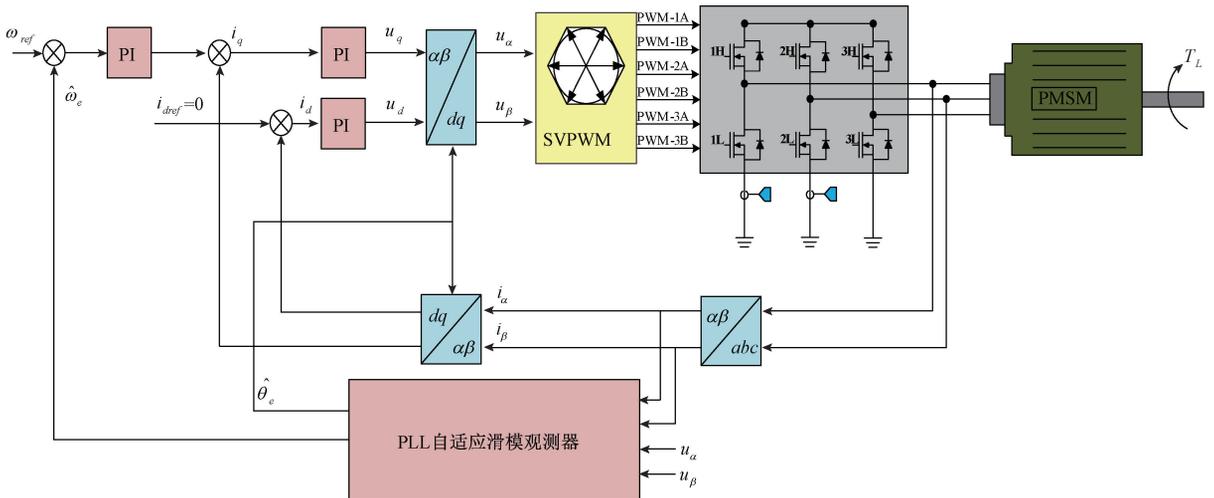


图 6 PLL 自适应滑模观测器无位置传感器控制系统

Fig. 6 PLL adaptive sliding mode observer sensorless control system of PMSM

2 实验结果与分析

为验证所提出的 PLL 自适应滑模观测器无位置传感器控制系统，根据图 6 搭建了实验平台。电机控制器采用 TMS320F28305 型 DSP，逆变器开关频率为 10 kHz。实验电机内置有 2 500 线增量式编码器，用来检测实际转子位置，与观测值进行比对。采用 MDA800 A 型电机驱动分析仪，对波形进行采集和分析。负载电机为一台型号为 1LE001-1AB42 的西门子三相感应电机，并使用汇川 MD500 型变频器在转矩控制模式下驱动负载电机，

为实验电机提供负载转矩。

实验所采用永磁同步电机的参数如表 1 所示。实验平台如图 7 所示。

为了验证 PLL 自适应滑模观测器在永磁同步电机无速度传感器控制中的实际效果和可靠性，实验中将电机转速分别设置为低速（600 r/min）和高速（1 500 r/min）两种不同的阶段。

图 8 所示为电机运行在 600 r/min 时传统滑模观测器和 PLL 自适应滑模观测器估计的反电动势波形；图 9 所示为电机运行在 1 500 r/min 时传统滑模观测器和 PLL 自适应滑模观测器估计的反电动势波形。

表 1 永磁同步电机参数
Table 1 Parameters of PMSM

参数	数值
相数 m	3
功率/kW	2.9
极对数 p	5
额定转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	1 500
相额定电流/A	11.9
额定电磁转矩/($N \cdot m$)	18.6
定子电阻 R_s/Ω	0.322
直轴电枢电感 L_d/mH	5.3
交轴电枢电感 L_q/mH	5.3
额定频率/Hz	125

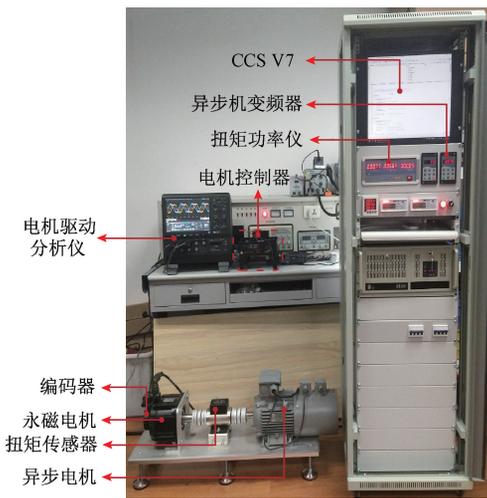
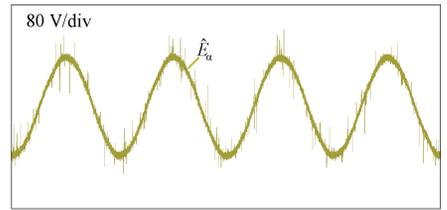
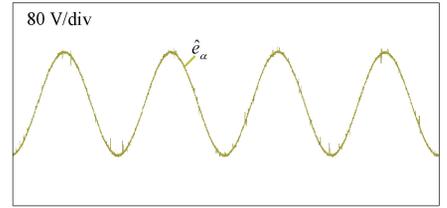


图 7 实验平台
Fig. 7 Experiment platform



(a) 传统滑模观测器估计反电动势
(a) Back EMF of traditional sliding mode observer



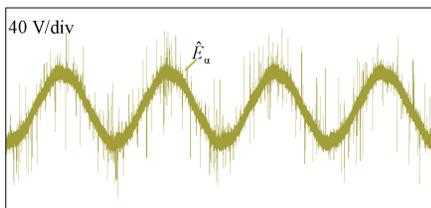
(b) PLL自适应滑模观测器估计反电动势
(b) Back EMF of PLL adaptive sliding mode observer

图 9 1 500 r/min 时反电动势波形

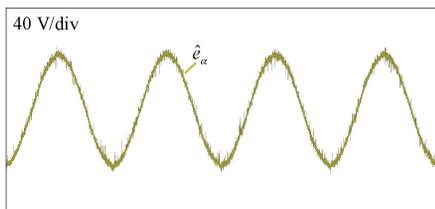
Fig. 9 Waveform of back EMF at 1 500 r/min

由图 8(a) 和 9(a) 可以明显地看出,传统滑模观测器观测的反电动势波形中含有大量的高频谐波且抖振现象严重;而在图 8(b) 和 9(b) 中,PLL 自适应滑模观测器观测的反电动势波形包含的高频谐波明显减少,抖振现象也有所减弱。

图 10 所示为电机运行在 600 r/min 时实际转子位置以及传统滑模观测器和 PLL 自适应滑模观测器估计的转子位置;图 11 所示为电机运行在 1 500 r/min 时实际转子位置以及传统滑模观测器和 PLL 自适应滑模观测器估计的转子位置。



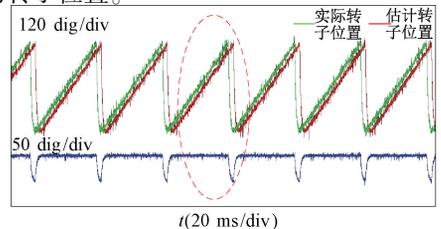
(a) 传统滑模观测器估计反电动势
(a) Back EMF of traditional sliding mode observer



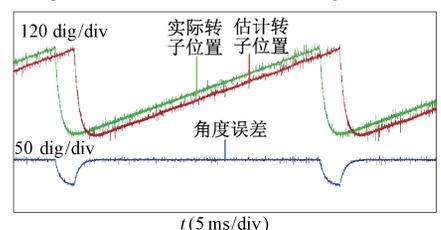
(b) PLL自适应滑模观测器估计反电动势
(b) Back EMF of PLL adaptive sliding mode observer

图 8 600 r/min 时反电动势波形

Fig. 8 Waveform of back EMF at 600 r/min



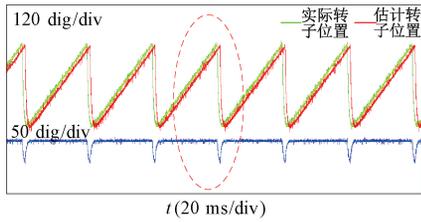
(a) 传统滑模观测器控制转子估计位置及误差
(a) Rotor position and error of traditional sliding mode observe



(b) 转子位置及误差细节图
(b) Detail of rotor position and error

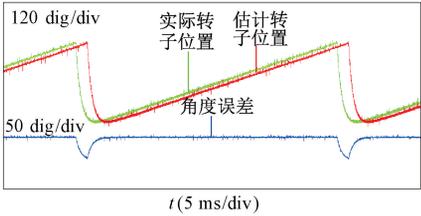
图 10 600 r/min 时传统滑模观测器估计转子位置

Fig. 10 Rotor position at 600 r/min of traditional sliding mode observer



(a) PLL 自适应滑模观测器转子位置及误差

(a) Rotor position and error of PLL adaptive sliding mode observer

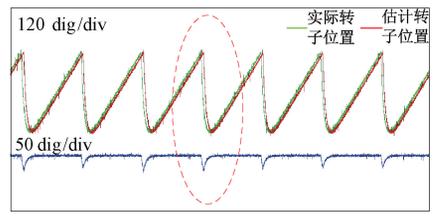


(b) 转子位置及误差细节图

(b) Detail of rotor position and error

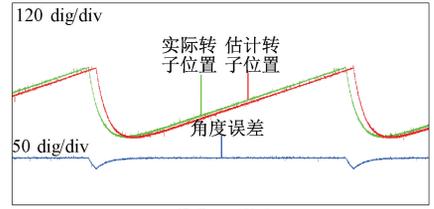
图 11 600 r/min 时 PLL 自适应滑模观测器估计转子位置

Fig. 11 Rotor position at 600 r/min of PLL adaptive sliding mode observer



(a) PLL 自适应滑模观测器转子位置及误差

(a) Rotor position and error of PLL adaptive sliding mode observer



(b) 转子位置及误差细节图

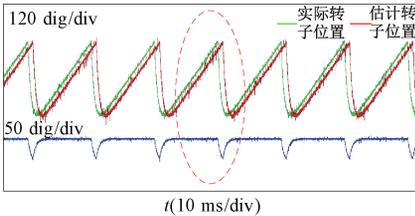
(b) Detail of rotor position and error

图 13 1 500 r/min 时 PLL 自适应滑模观测器估计转子位置

Fig. 13 Rotor position at 1 500 r/min of PLL adaptive sliding mode observer

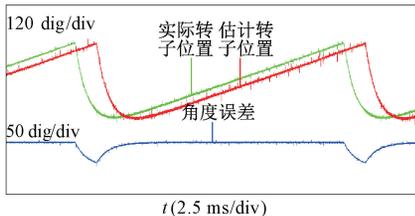
当电机转速为 600 r/min 时,由图 10 和 11 可知,传统滑模观测器估计的转子位置波形含有谐波并伴有明显的抖振。PLL 自适应滑模观测器估计的转子位置波形与传统方法相比含有的谐波减少,抖振现象有所抑制。

当电机转速为 1 500 r/min 时,由图 13 可以看出,在使用 PLL 自适应滑模观测器的情况下,转子的估计位置与实际位置之间的误差大大减小,位置估计更加准确。相较于传统的滑模观测器,其追踪性能明显提高,而且转子的位置波形几乎不含有谐波。



(a) 传统滑模观测器控制转子估计位置及误差

(a) Rotor position and error of traditional sliding mode observer



(b) 转子位置及误差细节图

(b) Detail of rotor position and error

图 12 1 500 r/min 时传统滑模观测器估计转子位置

Fig. 12 Rotor position at 1 500 r/min of traditional sliding mode observer

3 结 论

针对传统滑模观测器存在的观测精度低、抖振严重等问题,本文提出了一种 PLL 自适应滑模观测器无传感器控制方法,在满足 Lyapunov 稳定性的前提下,通过构造反电动势自适应滑模观测器,使得反电动势观测误差迅速衰减。同时采用带有消除旋转影响环节的锁相环得到转子位置,消除了转速变化的影响,进一步提高了观测精度。在一台 2.9 kW 永磁同步电机上的实验结果表明,本文方法的有益效果体现在所构造的 PLL 自适应滑模观测器,有效的降低了观测误差,观测精度明显提高;与传统滑模观测器相比,PLL 自适应滑模观测器得到的反电动势与转子位置曲线更加平滑,谐波含量更少;采用带有消除转速影响环节的锁相环估算转子位置,有效消除转速对观测精度的影响,进一步提高了位置观测精度。

参考文献

[1] 朱其新, 张正, 杨辉, 等. 基于无传感器的 PMSM 电流控制策略的研究 [J]. 控制工程, 2014, 21 (4): 547-553.
ZHU Q X, ZHANG ZH, YANG H, et al. Research on sensorless PMSM current control strategy [J]. Control

由于滑模观测器在电机高速阶段的性能较好,所以即使是传统的滑模观测器,相比于低速阶段,转子位置的追踪效果也有所改善。谐波分量虽然也有所减少,但是依然存在。

- Engineering, 2014, 21(4):547-553.
- [2] 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.
- LU W Q, HU Y W, DU X Y, et al. Sensorless vector control using a novel sliding mode observer for PMSM speed control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 78.
- [3] KIM H, SON J, LEE J A. High-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4069.
- [4] ABDELRAHEM M, HACKL C, KENNEL R. Finite position set-phase locked loop for sensorless control of direct-driven permanent-magnet synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017: 1-1.
- [5] ZHAO Y, QIAO W, WU L. An adaptive quasi-sliding-mode rotor position observer-based sensorless control for interior permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 28(12): 5618.
- [6] ZHANG G, WANG G, YUAN B, et al. Active disturbance rejection control strategy for signal injection-based sensorless IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 330.
- [7] 申永鹏, 刘安康, 崔光照, 等. 基于扩展滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制[J/OL]. 电机与控制学报: 1-8 [2019-07-03].
- SHEN Y P, LIU A K, CUI G ZH, et al. Sensorless field oriented control of permanent magnet synchronous motor based on extend sliding mode observer[J/OL]. Electric Machines and Control: 1-8 [2019-07-03].
- [8] QIAN W, ZHANG X, FANNING J, et. al. Using high-control-bandwidth FPGA and SIC inverters to enhance high-frequency injection sensorless control in interior permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Access, 2018, 6: 42454.
- [9] SZALAI T, BERGER G, PETZOLDT J. Stabilizing sensorless control down to zero speed by using the high-frequency current amplitude[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3646-3656.
- [10] SONG X, FANG J, HAN B, et al. A novel compensation method for high-speed surface PMSM sensorless drives of EMF-based position estimation error [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1438-1449.
- [11] ZHANG X, SUN L, ZHAO K, et al. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358-1365.
- [12] KIM W, SHIN D, CHUNG C C. Microstepping using a disturbance observer and a variable structure controller for permanent-magnet stepper motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2689-2699.
- [13] SHI T, WANG Z, XIA C. Speed measurement error suppression for PMSM control system using self-adaption kalman observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2753-2763.
- [14] 陈勇, 高玉文, 陈章勇. 一种自适应同步滤波器和正交锁相环相结合的滑模观测器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 265-274.
- CHEN Y, GAO Y W, CHEN ZH Y. A sliding mode observer based on combination of adaptive synchronization filter and quadrature phase locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 265-274.
- [15] 沈寅强, 金海, 戴豪宇, 等. 基于滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器矢量控制系统设计[J]. 电工技术, 2018(21): 41-43.
- SHENG Y Q, JING H, DAI H Y, et al. Design of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer[J]. Electric Engineering, 2018(21): 41-43.
- [16] 陆婉泉, 林鹤云, 韩俊林. 永磁同步电机的扰动观测器无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1387-1394.
- LU X Q, LIN H Y, HAN J L. Position sensorless control of permanent magnet synchronous machine using a disturbance observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1387-1394.
- [17] KIM H, SON J, LEE J. A High-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4069-4077.
- [18] 李冉, 赵光宙, 徐绍娟. 基于扩展滑模观测器的永磁同步电动机无传感器控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 79-85.
- LI R, ZHAO G ZH, XU SH J. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 79-85.
- [19] 张磊, 高春侠. 改进型永磁同步电机全速度范围无传感器控制策略[J]. 电机与控制学报, 2012,

- 16(7): 103.
ZHANG L, GAO CH X. An improved whole speed region sensorless control theme for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(7): 103.
- [20] 陈炜, 张志伟. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制 [J]. 电工电能新技术, 2016, 35(8): 8-14.
CHEN W, ZHANG ZH W. A position sensorless control strategy for PMSM based on adaptive sliding mode observer [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(8): 8-14.
- [21] 赵凯辉, 殷童欢, 张昌凡, 等. 永磁同步电机无模型滑模控制方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 172-180.
ZHAO K H, YIN T H, ZHANG CH F, et al. Research on model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(4): 172-180.
- [22] 王淑娴, 彭东林, 吴治峰, 等. 伺服电机位置检测技术综述 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 143-153.
WANG SH X, PENG D L, WU ZH Y, et al. Review of position estimation techniques for servo motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 143-153.
- [23] 宛野, 袁飞雄, 高跃. 基于模型参考自适应的电动车用内置式永磁同步电机电感参数辨识技术研究 [J]. 船电技术, 2018, 38(1): 19-25.
YUAN Y, YUAN F X, GAO Y. Research on online inductance parameter identification of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle based on model reference adaptive system [J]. Marine Electric

& Electronic Engineering, 2018, 38(1): 19-25.

- [24] 许中阳, 郭希铮, 邹方朔, 等. 永磁同步电机无速度传感器控制离散化方法研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1): 52-61.

XU ZH Y, GUO X ZH, ZOU F SH, et al. Research on digital discretization method of speed sensorless control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 52-61.

作者简介



申永鹏, 2010 年于郑州轻工业大学获得硕士学位, 2015 年于湖南大学获得博士学位, 现为郑州轻工业大学讲师, 主要研究方向为电动汽车动力系统驱动与控制、能量管理与优化研究。

E-mail: shenyongpeng@zzuli.edu.cn

Shen Yongpeng received M. Sc. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2010, Ph. D. degree from Hunan University in 2015. Now he is a lecturer at Zhengzhou University of Light Industry. His main research interests include drive and control of electric vehicle powertrain, management and optimization of energy.



郑竹风 (通信作者), 2018 年于郑州轻工业大学获得学士学位, 现为郑州轻工业大学硕士研究生, 主要研究方向为永磁同步电机控制。

E-mail: zhufeng_zzuli@163.com

Zheng Zhufeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhengzhou University of Light Industry in 2018. Now he is a M. Sc. candidate at Zhengzhou University of Light Industry. His main research interest includes control of permanent magnet synchronous motor.