

基于四阶混合滑模观测器的 永磁同步电机无位置传感器控制

苏健勇, 李铁才, 杨贵杰

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

PMSM Sensorless Control Based on Four-order Hybrid Sliding Mode Observer

SU Jian-yong, LI Tie-cai, YANG Gui-jie

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: A four-order hybrid sliding mode observer of SPMSM (surface permanent magnet synchronous motor) was presented, of which the state variables were current and flux. The error between real and observed current was selected as sliding hyperplane, and the equal control signal multiplied by feedback matrix was inputted to flux observation equation. The flux transient response in time domain was established when the sliding mode occurs, and the flux observation error converged to zero. The influence of speed estimation error to flux observation was analyzed including amplitude and phase, and feedback matrix was calculated based on the analysis. The position and speed were calculated through tracking method with the observed flux. Simulation and experimental results show that the flux can be observed accurately, and the charting phenomenon is suppressed effectively. The estimation method of position and speed has good dynamic and static performances.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor; hybrid sliding mode observer; phase-locked loop; sensorless; vector control

摘要: 提出一种以电流和磁链为观测对象的表贴式永磁同步电机(surface permanent magnet synchronous motor, SPMSM)的四阶混合滑模观测器。以实际电流与观测电流之差构成滑模面,并将等效信号与反馈矩阵相乘后输入到磁链观测方程,当滑模运动发生后磁链观测误差渐进收敛到零。给出磁链观测值的暂态响应,着重分析速度估计误差对磁链观测结果幅值和相位的影响,并以此为基础进行反馈矩阵的计算。根据磁链观测结果采用跟踪型算法进行位置和速度的计算。仿真和实验结果表明,该观测器可准确地观测磁链,并有效消除滑模观测器抖振的影响,位置和速度算法稳态精度高,跟踪速度快。

关键词: 永磁同步电机; 混合滑模观测器; 锁相环; 无位置传感器; 矢量控制

0 引言

永磁同步电机控制系统中一般需要机械传感器来测量转子的速度和角度,但机械传感器会增加系统成本、尺寸和重量,并对使用环境有比较严格的要求。无机械/速度传感器已成为交流传动系统的重要研究方向。

目前,已有多种方法来估算PMSM高速运算转下转子的位置和速度。文献[1-2]采用磁链积分法,计算简单动态响应快,但该方法存在直流偏移问题,且没有误差校正环节。文献[3-4]采用假想坐标系法,根据电压方程中的 d 轴电压是否为零来判断角度误差,缺点是角度误差不具有全局收敛性^[5-6]。文献[7-15]采用了卡尔曼滤波器、神经网络和常规观测器法,该方法结构设计和参数调整比较复杂且计算量大。文献[16]采用基于电压方程和机械方程的状态观测器法,需要使用非线性理论进行分析,算法复杂,实现时计算量大,且机械方程参数难以准确获得。文献[17-20]采用滑模观测器法,以电流为变量建立状态方程,认为反电势为扰动量,对其进行观测,由于抖振现象的存在,需要对等效控制信号进行滤波,但同时观测信号也将产生相位滞后。文献[21]是以电流和反电势为变量的扩展电压方程建立观测器。在误差方程中反电势误差相互耦合,且耦合项与速度估计值相关,必须使用特定速度自适应率保证误差收敛,但该自适应率响应较慢,调节反馈系数并不能够有效提高速度响应且容易出现振荡,同时反馈系数最佳值随转速变化而变化。

本文提出一种四阶混合滑模观测器，以电流和磁链为状态变量建立状态方程。电流等效控制信号乘以反馈矩阵输入到磁链观测方程中，通过正确选择反馈矩阵可使磁链误差方程不存在相互耦合，同时该结构对抖振信号具有一阶低通滤波效果而不影响磁链观测结果。文中给出了磁链观测值的暂态响应及速度估计误差对观测结果的影响。根据磁链观测结果采用跟踪型算法进行位置和速度计算。最后通过仿真和实验验证了设计的正确性和有效性。

1 混合滑模观测器的建立

1.1 观测器的建立

表贴式永磁同步电机在静止 α - β 坐标系下的数学模型为

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_s = -\frac{R_s}{L_s} \mathbf{i}_s + \frac{1}{L_s} \mathbf{u}_s - \frac{1}{L_s} \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_f \quad (1)$$

式中： $\mathbf{u}_s=[u_\alpha u_\beta]^T$ 为定子电压； $\mathbf{i}_s=[i_\alpha i_\beta]^T$ 为定子电流； $\boldsymbol{\psi}_f=[\psi_\alpha \psi_\beta]^T=\psi_m[\cos\theta_r \sin\theta_r]^T$ 为永磁体产生的磁链； ψ_m 为磁链幅值； R_s 为定子电阻； L_s 为定子电感； θ_r 为转子角度； $\omega_r=d\theta_r/dt$ 为转子电角速度。

在电机运行过程中可以认为 $\dot{\psi}_m \approx 0$ ，当电气时间常数小于机械时间常数很多时，在若干电周期内可认为 $\dot{\omega}_r \approx 0$ 。根据上述假设，有 $\dot{\boldsymbol{\psi}}_f = \omega_r \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_f$ ，建立 SPMSM 扩展电压方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \boldsymbol{\psi}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \boldsymbol{\psi}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u}_s \quad (2)$$

式中： $\mathbf{A}_{11} = -(R_s/L_s)\mathbf{I} = a_{11}\mathbf{I}$ ； $\mathbf{A}_{12} = -(\omega_r/L_s)\mathbf{J} = a_{12}\mathbf{J}$ ； $\mathbf{A}_{22} = \omega_r\mathbf{J} = a_{22}\mathbf{J}$ ； $\mathbf{B}_1 = (1/L_s)\mathbf{I} = b_1\mathbf{I}$ ； $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ；

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

根据式(2)，建立混合滑模观测器为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \tilde{\mathbf{A}}_{12} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u}_s + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{G}\mathbf{L}_1 \end{bmatrix} \text{sgn}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) \quad (3)$$

式中：上标“ $\hat{\cdot}$ ”为状态变量观测值；上标“ $\tilde{\cdot}$ ”为与转速相关的参数估计值； $\mathbf{L}_1=l_1\mathbf{I}$ 为开关增益矩阵； \mathbf{G} 为反馈矩阵。考虑速度估计误差时，式(13)可重写为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{u}_s + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{G}\mathbf{L}_1 \end{bmatrix} \text{sgn}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) + \mathbf{H} \quad (4)$$

式中 \mathbf{H} 为由速度估计误差引起的扰动输入，有

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{A}_{12} \\ \Delta\mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \quad (5)$$

式中： $\Delta\mathbf{A}_{12} = \tilde{\mathbf{A}}_{12} - \mathbf{A}_{12} = (-1/L_s)\Delta\omega_r\mathbf{J}$ ； $\Delta\mathbf{A}_{22} = \tilde{\mathbf{A}}_{22} -$

$\mathbf{A}_{22} = \Delta\omega_r\mathbf{J}$ ； $\Delta\omega_r = \hat{\omega}_r - \omega_r$ 为速度估计误差； $\hat{\omega}_r$ 为速度估计值。

1.2 开关增益矩阵的选择

由式(2)和(3)可得电流和磁链观测误差方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{e}_1 = \mathbf{A}_{11}\mathbf{e}_1 + \mathbf{A}_{12}\mathbf{e}_2 + \mathbf{L}_1 \text{sgn}(\mathbf{e}_1) + \mathbf{H}_1 \\ \frac{d}{dt} \mathbf{e}_2 = \mathbf{A}_{22}\mathbf{e}_2 + \mathbf{G} \cdot \mathbf{L}_1 \text{sgn}(\mathbf{e}_1) + \mathbf{H}_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{e}_1=[e_{1\alpha} e_{1\beta}]^T = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s$ 为电流观测误差； $\mathbf{e}_2=[e_{2\alpha} e_{2\beta}]^T = \hat{\boldsymbol{\psi}}_f - \boldsymbol{\psi}_f$ 为磁链估计误差。

定义滑模平面 $s(x) = \mathbf{e}_1 = \mathbf{0}$ ，当观测器进入滑动模态时，电流观测误差 \mathbf{e}_1 满足 $\mathbf{e}_1 = \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{0}$ ，此时定义等效控制：

$$\mathbf{z} = [z_\alpha z_\beta]^T = -\mathbf{L}_1 \text{sgn}(\mathbf{e}_1) \quad (7)$$

根据式(6)的电流误差方程及式(8)，得

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}_{12}\mathbf{e}_2 + \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} -a_{12}e_{2\beta} + H_{1\alpha} \\ a_{12}e_{2\alpha} + H_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

广义滑模可达条件为 $\mathbf{s}^T \cdot \dot{\mathbf{s}} \leq 0$ ，开关增益矩阵 \mathbf{L}_1 可由此求出。

$$\begin{aligned} \mathbf{s}^T \cdot \dot{\mathbf{s}} &= \mathbf{e}_1^T \cdot \dot{\mathbf{e}}_1 = e_{1\alpha}[a_{11}e_{1\alpha} - a_{12}e_{2\beta} + \\ & l_1 \text{sgn}(e_{1\alpha}) + H_{1\alpha}] + e_{1\beta}[a_{11}e_{1\beta} + a_{12}e_{2\alpha} + \\ & l_1 \text{sgn}(e_{1\beta}) + H_{1\beta}] < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

进一步可得

$$l_1 < \min\{-|a_{11}e_{1\alpha}| - |-a_{12}e_{2\beta} + H_{1\alpha}|, \\ -|a_{11}e_{1\beta}| - |a_{12}e_{2\alpha} + H_{1\beta}|\} \quad (10)$$

由式(6)和(8)可得 l_1 自适应率如式(11)所示，其中 $n \geq 1$ 。

$$l_1 < n \cdot \min\{-|a_{11}e_{1\alpha}| - |z_\alpha|, -|a_{11}e_{1\beta}| - |z_\beta|\} \quad (11)$$

2 速度估计误差对观测结果影响及反馈矩阵的选择

当存在速度估计误差时，扰动输入 \mathbf{H} 为

$$\begin{cases} \mathbf{H}_1 = -\frac{\Delta\omega_{re}}{L_s} \mathbf{J} \cdot \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \\ \mathbf{H}_2 = \Delta\omega_{re} \mathbf{J} \cdot \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \end{cases} \quad (12)$$

当观测器进入滑动模态时， $\mathbf{e}_1 = \dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{0}$ ，将式(8)代入式(6)的磁链观测误差方程中，得

$$\frac{d}{dt} \mathbf{e}_2 = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{G}\mathbf{A}_{12})\mathbf{e}_2 + (\mathbf{H}_2 - \mathbf{G}\mathbf{H}_1) \quad (13)$$

将式(12)代入(13)，得

$$\frac{d}{dt} \mathbf{e}_2 = \omega_r \left(\mathbf{J} + \frac{1}{L_s} \mathbf{G}\mathbf{J} \right) \mathbf{e}_2 + \Delta\omega_r \left(\mathbf{J} + \frac{1}{L_s} \mathbf{G}\mathbf{J} \right) \hat{\boldsymbol{\psi}}_f \quad (14)$$

G 的选择应使 $e_{2\alpha}$ 和 $e_{2\beta}$ 相互解耦, 应满足条件:

$$J + \frac{1}{L_s}GJ = aI \quad (15)$$

式中 I 为单位矩, 且 $a < 0$ 。令

$$G = g_1 L_s I + g_2 L_s J \quad (16)$$

代入式(15)得

$$J + \frac{1}{L_s}GJ = -g_2 I + (g_1 + 1)J \quad (17)$$

根据解耦条件得 $g_1 = -1$, $g_2 = l_2 \cdot \text{sgn}(\omega_r)$, 其中 $l_2 > 0$ 。此时, 根据 $e_2 = \hat{\psi}_f - \psi_f$, 式(14)可展开为

$$\frac{d}{dt}\hat{\psi}_f + l_2|\hat{\omega}_r|\hat{\psi}_f = \frac{d}{dt}\psi_f + l_2|\omega_r|\psi_f \quad (18)$$

将 $\psi_\alpha = \psi_m \cos \omega_r t$ 和 $\psi_\beta = \psi_m \sin \omega_r t$ 代入式(18),

可求得 $\hat{\psi}_\alpha$ 和 $\hat{\psi}_\beta$ 的响应为

$$\begin{cases} \hat{\psi}_\alpha(t) = A_\alpha \psi_m e^{-l_2|\hat{\omega}_r|t} + B_\alpha \psi_m \cos(\omega_r t - \varphi_\alpha) \\ \hat{\psi}_\beta(t) = A_\beta \psi_m e^{-l_2|\hat{\omega}_r|t} + B_\beta \psi_m \sin(\omega_r t - \varphi_\beta) \end{cases} \quad (19)$$

式中: 第1项为暂态分量; 第2项为稳态分量。

$$\begin{cases} A_\alpha = -\frac{(l_2^2 + k_1)k_1}{l_2^2 + k_1^2} \\ A_\beta = \frac{l_2 k_1 (k_1 - 1)}{l_2^2 + k_1^2} \\ B_\alpha = B_\beta = \sqrt{\frac{l_2^2 + 1}{(l_2/k_1)^2 + 1}} \\ \varphi_\alpha = \varphi_\beta = \arctan\left(\frac{l_2(k_1 - 1)}{l_2^2 + k_1}\right) \end{cases} \quad (20)$$

式中 $k_1 = \omega_r / \hat{\omega}_r$ 。

由式(20)可看出, 当速度估计误差为零, 即 $k_1 = 1$ 时, $\hat{\psi}_\alpha$ 和 $\hat{\psi}_\beta$ 稳态时的幅值和相位发生变化相同, 且与 l_2 和 k_1 有关。图1、2分别为稳态时幅值变化 B_α 和相位变化 φ_α 与 k_1 和 l_2 的关系。

由图中可以看出, 当 $\hat{\omega}_r < \omega_r$ ($k_1 > 1$)时, 磁链观测值幅值变大, 角度发生滞后($\varphi_\alpha > 0$); 当 $\hat{\omega}_r > \omega_r$ ($k_1 < 1$)

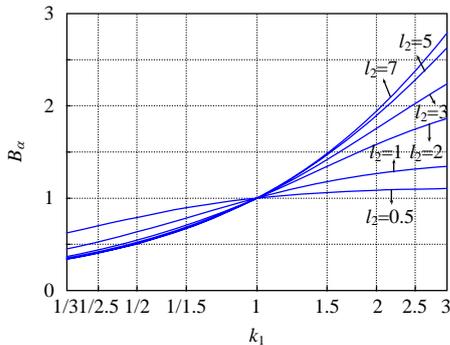


图1 B_α 与 k_1 和 l_2 关系图

Fig. 1 Relationship between B_α and k_1 plus l_2

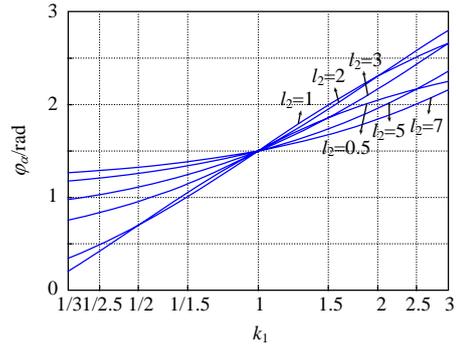


图2 φ_α 与 k_1 和 l_2 关系图

Fig. 2 Relationship between φ_α and k_1 plus l_2

时, 幅值变小, 角度发生超前($\varphi_\alpha < 0$)。对于相同的 k_1 , 当 l_2 增大时, 磁链暂态响应加快, 幅值变化将增大; 当 l_2 减小时, 磁链暂态响应减慢, 幅值变化将减小。在 $k_1 = 1$ 附近, 当 $l_2 > 1$ 时, 增大 l_2 可减小角度滞后。本文取 $l_2 = 3$, 反馈矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} -L_s & -3L_s \text{sgn}(\omega_r) \\ 3L_s \text{sgn}(\omega_r) & -L_s \end{bmatrix} \quad (21)$$

3 抖振现象抑制分析

当只考虑抖振对磁链观测影响时, 假设参数误差为零, 即 $H_1 = H_2 = 0$, 式(7)重定义为

$$z = -L_1 \text{sgn}(e_1) = A_{l_2} e_2 - z' \quad (22)$$

式中 z' 为抖振信号。

将式(22)代入式(6)的磁链观测误差方程得

$$\frac{d}{dt}e_2 + l_2|\omega_r|e_2 = Gz' \quad (23)$$

其意义如图3所示。

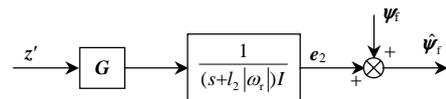


图3 观测器抖振抑制结构图

Fig. 3 Chattering suppression structure

抖振信号经过一阶低通滤波后与实际磁链相加作为磁链观测值, 观测结果可直接计算转子位置, 不需要再次滤波, 避免了相位滞后。

4 位置和速度估计

在得到磁链观测值 $\hat{\psi}_\alpha$ 和 $\hat{\psi}_\beta$ 后, 需要从中解调出位置和速度信号。本文采用的跟踪型算法如图4所示。

当 $|\theta_r - \hat{\theta}_r| < \pi/6$ 时, 认为

$$\sin(\theta_r - \hat{\theta}_r) \approx \theta_r - \hat{\theta}_r \quad (24)$$

此时图4的结构等效为锁相环, 如图5所示。

由 $\hat{\theta}_r$ 到 θ_r 的传递函数为

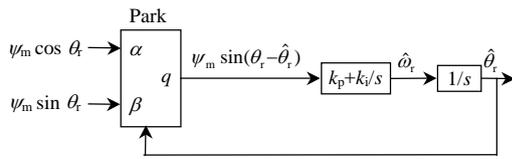


图 4 跟踪型速度和位置估算算法
Fig. 4 Algorithm of position and speed based on tracking method

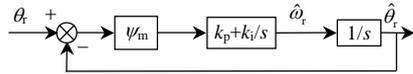


图 5 等效结构
Fig. 5 Equivalent structure

$$H(s) = \frac{\hat{\theta}_r}{\theta_r} = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (25)$$

式中： $\omega_n = \sqrt{\psi_m k_i}$ ； $\xi = k_p \sqrt{\psi_m} / 2\sqrt{k_i}$ 。

本文取 $\xi = 0.8$ ， $\omega_n = 280$ ，此时该锁相环带宽约为 100 Hz，基本满足大多数应用。

5 数字仿真和实验结果及分析

本文所提的上述观测器实现结构如图 6 所示。

本文实验电机参数如表 1 所示。实验中电机控制器核心控制芯片为 Infineon 公司 XC164，逆变器开关频率为 10 kHz。数字仿真是将观测器离散化后，利用 Matlab 实现。

图 7 为当速度给定定为 2 000 r/min 时，磁链观测值与实际值的仿真波形，仿真中电机控制采用转子角度和速度的实际值。图 7(a) 是 $\hat{\omega}_r = \omega_r$ 时的仿真波形，图 7(b) 是 $\hat{\omega}_r = \omega_r / 2$ 和 $\hat{\omega}_r = 2\omega_r$ 时的仿真波形。图 8 为由图 7(b) 中磁链观测值经过锁相环计算后得

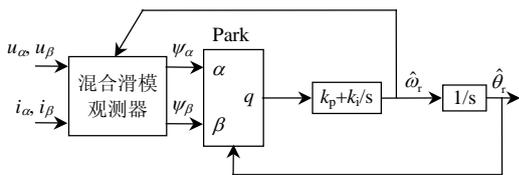
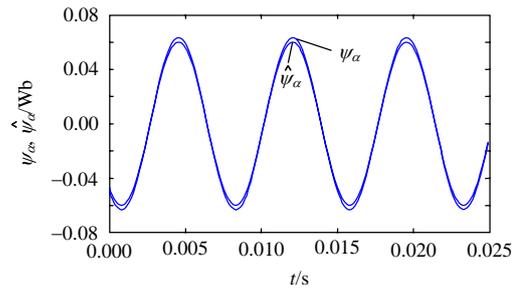


图 6 观测器实现结构
Fig. 6 Implementation structure of the observer

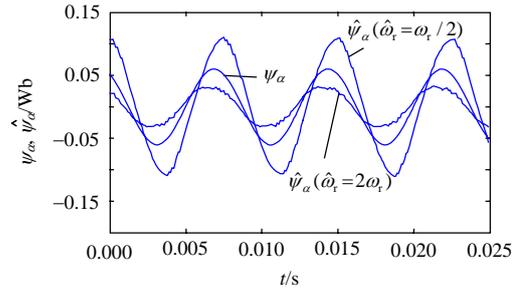
表 1 实验电机参数

Tab. 1 Motor parameters in experiments

| 参数 | 数值 |
|-------------------|-------|
| 额定功率/W | 400 |
| 额定电流/A | 2.7 |
| 额定转矩/(N·m) | 1.27 |
| 额定转速/(r/min) | 3 000 |
| 定子电阻 R_s /Ω | 1.54 |
| 定子电感 L_s /mH | 21 |
| 磁链幅值 ψ_m /Wb | 0.06 |
| 极对数 p | 4 |
| 直流母线电压/V | 300 |



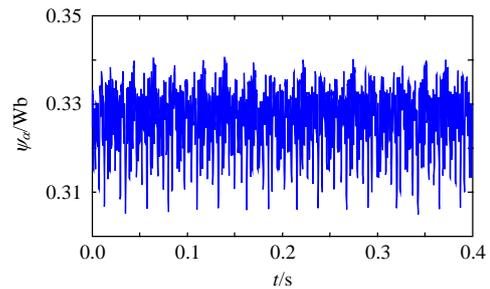
(a) $\hat{\omega}_r = \omega_r$



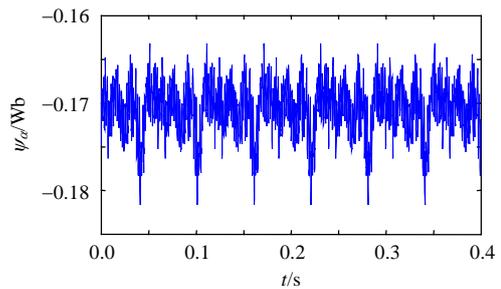
(b) $\hat{\omega}_r = 2\omega_r$ 和 $\hat{\omega}_r = \omega_r / 2$

图 7 不同转速误差时磁链观测值和实际值

Fig. 7 Real and observed flux with different speed error



(a) $\hat{\omega}_r = \omega_r / 2$



(b) $\hat{\omega}_r = 2\omega_r$

图 8 转速误差不为零时转子角度估计误差

Fig. 8 Motor angle error when speed error exist

到角度与实际角度之差。

由图 7 可知：当 $\hat{\omega}_r = \omega_r$ 时，磁链观测值与实际值基本重合；当 $\hat{\omega}_r < \omega_r$ 时，磁链观测值与实际值相比幅值变大，发生滞后；当 $\hat{\omega}_r > \omega_r$ 时，磁链观测值幅值变小，发生超前。磁链观测值的幅值变化规律与式(20)中的 B_α 符合，由图 8 得到的相位变化规律与式(20)中的 φ_α 符合。

实验中，电机控制使用由观测器和跟踪型算法

所计算出的转子电角度和速度估计值, 转子实际角度由旋转变压器进行测量以进行比较, 电机采用开环起动。滑模增益式(11)中 $n=2$, 式中 z_{α} 和 z_{β} 进行低通滤波, 滤波器带宽为1000 Hz。

图9为给定转速为2000 r/min时, 磁链的观测值与实际值, 其中实际值由转子角度和磁链幅值计算得到。图10为角度的实际值和估计值及估计误差。图11为给定转速由1000 r/min变化到2000 r/min后, 转子速度的估计值与实际值。图12为开环起动时速度的实际值、估算值及磁链观测值波形, 阶段I完成转子定位功能; 阶段II是开环起动加速阶段, 同时起动观测器和跟踪型算法; 当开环转速达到200 r/min时, 阶段III开始, 角度和速度的估计值

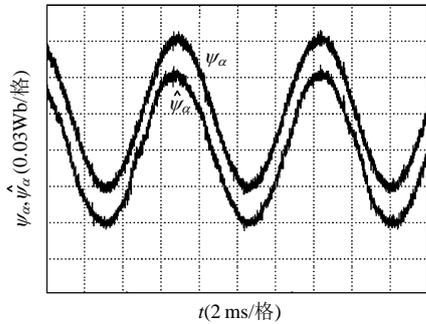


图9 磁链实际值与观测值
Fig. 9 Real and observed flux

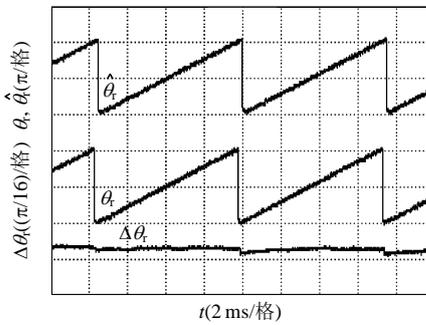


图10 由磁链观测值计算转子角度和实际角度及误差
Fig. 10 Rotor real angle and estimated angle from observed flux plus the error

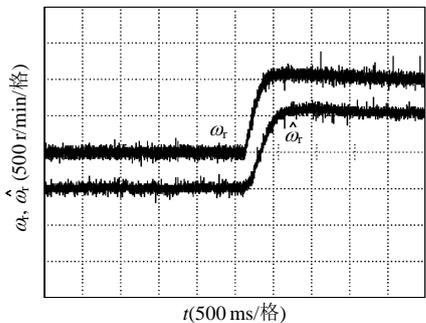


图11 速度给定变化时速度实际值和估计值
Fig. 11 Real and estimated speed when speed reference varies

参与电机闭环控制。

由图9~11可以看出, 观测器可准确地观测出磁链, 跟踪型算法可正确地计算出转子位置和速度。由图12可以看出, 阶段II开始时由于不满足式(24), $\hat{\omega}_r$ 将会出现振荡, 但该值并不参加闭环计算; 阶段II完成前, 振荡结束 $\hat{\omega}_r$ 可以准确跟踪 ω_r , 从而顺利进入到阶段III(闭环控制阶段)。

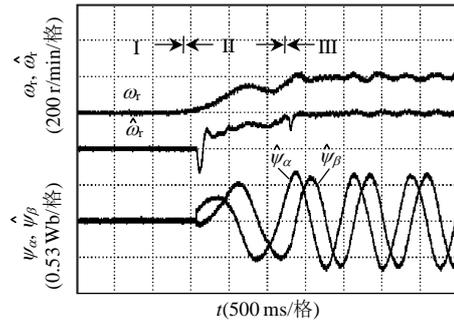


图12 开环起动转子速度实际值和估计值及磁链观测值
Fig. 12 Real and estimated speed plus observed flux in openloop mode

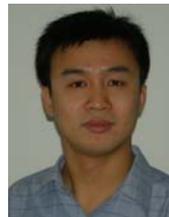
6 结论

本文以电流和磁链为观测对象, 提出一种永磁同步电机四阶混合滑模观测器。电流观测采用滑模观测器, 以实际电流与观测电流之差构成滑模面。当滑模运动发生时, 电流观测误差为零, 系统误差方程由4阶降为2阶, 将等效信号与反馈矩阵相乘后输入到磁链观测方程后, 磁链观测误差渐近收敛到零, 同时抖振信号得到有效滤除。着重分析了速度估计误差对磁链观测结果幅值和角度的影响, 并以此为基础进行反馈矩阵计算。同时, 根据磁链观测值采用跟踪型算法进行位置和速度计算。仿真和实验结果表明, 该观测器可以准确地观测磁链, 位置和速度算法稳态精度高, 跟踪速度快。

参考文献

- [1] Yousfi D, Azisi M, Saad A. Sensorless position and speed detection for permanent magnet synchronous motor[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, Beijing, China, 2000.
- [2] Chris F, Paul A. Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 1996, 32(5): 1089-1097.
- [3] 张剑, 温旭辉. 一种基于DSP的PMSM转子位置及速度估计新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 144-148.
Zhang Jian, Wen Xuhui. A novel sensorless control technique for permanent magnet synchronous motor using digital signal processor [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 144-148(in Chinese).
- [4] Morimoto S, Sanada M, Takeda Y. Mechanical sensorless drives of IPMSM with online parameter identification[C]. IEEE Industry

- Application Conference, HongKong, China, 2005.
- [5] Babak N M, Farid M T, Sargos F M. Mechanical sensorless control of PMSM with online estimation of stator resistance[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2004, 40(2): 457-471.
- [6] Babak N M, Farid M T, Sargos F M. Back EMF estimation-based sensorless control of PMAM: robustness with respect to measurement errors and inverter irregularities[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2007, 43(2): 485-494.
- [7] Bolognani S, Tubiana L, Zigliotto M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drivers[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2003, 39(6): 1741-1747.
- [8] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.
Li Hongru, Gu Shusheng. Neural-network-based adaptive observer of position and speed of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 32-35(in Chinese).
- [9] 张猛, 肖曦, 李永东. 基于扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速和磁链观测器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 36-40.
Zhang Meng, Xiao Xi, Li Yongdong. Speed and flux linkage observer for permanent magnet synchronous motor based on EKF [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 36-40(in Chinese).
- [10] Lian K Y, Chiang C H, Tu H W. LMI-based sensorless control of permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2769-2778.
- [11] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 基于变结构模型参考自适应系统的永磁同步电机转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 71-75.
Wang Qinglong, Zhang Chongwei, Zhang Xing. Variable-structure MRAS speed identification for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 71-75(in Chinese).
- [12] 秦峰, 贺益康, 贾洪平. 基于转子位置自检测符合方法的永磁同步电机无传感器运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 12-13.
Qin Feng, He Yikang, Jia Hongping. Investigation of the sensorless control for PMSM based on a hybrid rotor position self sensing approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 12-13(in Chinese).
- [13] Mohamed R, Peter F A, Paul A. Sensorless indirect rotor field orientation speed control of a permanent magnet synchronous motor with stator-resistance estimation[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1664-1675.
- [14] 孙凯, 许镇琳, 邹积勇. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机无位置传感器矢量控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 18-22.
Sun Kai, Xu Zhenlin, Zou Jiyong. A novel approach to position sensorless vector control of PMSM based on active disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 18-22(in Chinese).
- [15] 李君, 李毓洲. 无速度传感器永磁同步电机的 SVM-DTC 控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 28-34.
Li Jun, Li Yuzhou. Speed sensorless SVM-DTC for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 28-34(in Chinese).
- [16] Zhu Guchuan, Kaddouri A, Dessaint L A, et al. A nonlinear state observer for the sensorless control of a permanent-magnet AC machine[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2001, 48(6): 1098-1108.
- [17] 尚喆, 赵荣祥, 窦汝振. 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研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 23-27.
Shang Zhe, Zhao Rongxinag, Dou Ruzhen. Research on sensorless control method of PMSM based on an adaptive sliding mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 23-27(in Chinese).
- [18] Furuhashi T, Sangwongwanich S, Okuma S, et al. A position-and-velocity sensorless control for brushless DC motors using an adaptive sliding mode observer[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1992, 39(2): 89-95.
- [19] Parasiliti F, Petvella R, Tursini M. Sensorless speed control of a PM synchronous motor based on sliding mode observer and extended kalman filter[C]. IEEE Industry Application Conference, Chicago, USA, 2001.
- [20] Chi S, Zhang Z, Xu L. A novel sliding mode observer with adaptive feedback gain for PMSM sensorless vector control[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlande, USA, 2007.
- [21] 王成元, 夏加宽, 杨俊友. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 72-278.



苏健勇

收稿日期: 2008-10-13。

作者简介:

苏健勇(1979—), 男, 博士研究生, 从事电机伺服控制技术、无位置传感器方面研究, sujianyong@hit.edu.cn;

李铁才(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电机驱动控制、控制器 IP 核、AI 控制理论等方面研究;

杨贵杰(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事一体化电机系统驱动与控制等方面研究。

(责任编辑 张玉荣)