DOI：10. 13382/j.jemi.B1902528

自适应高阶滑模永磁同步电机永磁磁链观测*

目云奎　李祥飞　陈　玄
（湖南工业大学　电气与信息工程学院　株洲　412007）

摘　要：针对永磁同步电机（PMSM）用传统方法难以准确观测永磁体的失磁问题，讨论基于自适应非奇异终端滑模变结构的永磁磁链观测策略。依据永磁体失磁工况建立永磁同步电机数学模型，根据永磁同步电机失磁故障检测，构建自适应和非奇异终端滑模观测器，给出定子电阻自适应估计值，借助 Lyapunov 稳定性理论对观测器的稳定性加以证明，依据滑模变结构等值控制原理构造出永磁磁链算式。仿真实验验证了在改变定子电阻参数后，自适应高阶滑模永磁磁链观测器能准确地检测磁链参数。

关键词：永磁同步电机；失磁；非奇异终端滑模观测器；自适应；永磁磁链
中图分类号：TM351；TN082　　**文献标识码**：A　　**国家标准学科分类代码**：510.80

Permanent magnet flux linkage observation for PMSM based on adaptive high-order sliding mode

Mu Yunkui　Li Xiangfei　Chen Xuan
（College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China）

Abstract：With regard to the problem that the traditional methods are difficult to precisely detect the demagnetization of permanent magnet synchronous motor（PMSM）, an adaptive nonsingular terminal-sliding-mode control algorithm is discussed for PMSM. Firstly, the mathematical model of PMSM is established according to permanent magnet demagnetization condition. Then, adaptive observer and nonsingular terminal-sliding-mode observer（NTSMO）is constructed for permanent magnet demagnetization detection and the adaptive estimation of stator resistance is given. The stability of the sliding mode observer is proved by the Lyapunov stability theory. Based on the equivalent control principle of sliding mode variable structure, equation for permanent magnet flux linkage is constructed. Finally, it is verified by simulation experiments that after changing the stator resistance parameter, the adaptive high-order sliding mode permanent flux observer can detect the flux parameters accurately.

Keywords：permanent-magnet synchronous motor（PMSM）; demagnetization; nonsingular terminal-sliding-mode observer（NTSMO）; adaptive; permanent magnet flux linkage

0　引　言

交流永磁同步电机具有结构简单，体积小、效率高、功率因数高等优异性能，在现代交流传动领域中占有相当重要的地位。但永磁同步电机（PMSM）在运行期间，永磁材料存在失磁，将导致电机控制性能降低，严重时电机可能报废[1]。

牵引电机在牵引系统中运行区间跨度大，运行工况变化无常，导致其电阻参数在运行过程中会发生改变，使得电机的动态性能降低。因此需要对电机的电阻进行在线实时检测，保证牵引系统能够可靠运行。目前电机电阻在线检测的方法有很多种，且取得不少满意的成果[2-3]。文献[4]通过构造改进型滑模观测器检测电机转速，运用 Lyapunov 函数对电阻进行实时检测；文献[5]对定子电阻辨识采用的是模型参考自适应系统与模糊逻辑相结合的方法；文献[6]采用关联自适应观测器来辨识定子电阻等参数。上述方法仅对定子电阻在线检测。

针对 PMSM 失磁问题，许多学者开展了大量研究。文献[7]利用定子磁链降阶观测器观测出定子磁链；文

收稿日期：2019-08-30　　Received Date：2019-08-30
＊基金项目：国家自然科学基金（61473117）、湖南省自然科学联合基金（2018JJ4066）、湖南省教育厅科学研究重点项目（18A267）资助

献[8]根据传统方法辨识磁链的误差,给出一种改进型磁链计算方法;文献[9]基于模型预测原理对定子磁链进行预测;文献[10-11]基于滑模变结构原理对永磁同步电机磁链进行在线观测;文献[12-14]对永磁同步电机磁链等参数进行观测;文献[15]利用自适应滑模观测器构造出永磁体磁链。以上方法均未考虑电阻参数变化对磁链观测的影响。

针对传统方法难以在电阻参数发生改变时,保证磁链观测精确度。本文利用自适应非奇异终端滑模变结构与失磁工况的 PMSM 状态方程相结合方法,构造自适应永磁磁链观测器,给出电阻自适应估计值,借助 Lyapunov 稳定性理论对观测器的稳定性进行证明。依据滑模变结构等值控制原理构造出永磁磁链算式,并通过仿真实验对该观测方法的可行性进行验证。

1 PMSM 失磁模型

当 PMSM 发生失磁时,永磁体磁链矢量幅值发生的变化如图 1 所示[11]。PMSM 永磁体磁链矢量初始值由 ψ_f 变化到 ψ'_f, 永磁体磁链幅值变化为 $\boldsymbol{\psi}_f = \Delta\psi + \boldsymbol{\psi}'_f$。

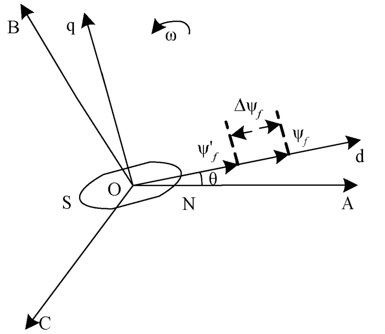


图 1 永磁同步电机永磁磁链的变化

Fig.1 Change of permanent magnet flux linkage of permanent magnet synchronous motor

PMSM 失磁电压方程为[16]:

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_q + R i_d + \dfrac{\mathrm{d}L_d i_d}{\mathrm{d}t} \\ u_q = \omega L_d i_d + R i_q + \dfrac{dL_q i_q}{dt} + \omega\psi_f \end{cases} \tag{1}$$

式中: u_d、u_q 为 d、q 电压; i_d、i_q 为 d、q 轴电流; L_d、L_q 为 d、q 轴电感; R 为定子电阻; ω 为转子电角速度; ψ_f 为转子永磁磁链。

为便于滑模观测器设计,由式(1)可得失磁方程:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}L_\mathrm{d} i_\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} = \omega L_q i_\mathrm{q} - R i_\mathrm{d} + u_d \\ \dfrac{\mathrm{d}L_\mathrm{q} i_\mathrm{q}}{\mathrm{d}t} = -\omega L_d i_\mathrm{d} - R i_\mathrm{q} + u_q - \omega\psi_f \end{cases} \tag{2}$$

令 $L_\mathrm{d} i_\mathrm{d} = x_1, L_q i_q = x_2$, 则式(2)可改写成:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}x_1}{\mathrm{d}t} = \omega x_2 - R i_d + u_d \\ \dfrac{\mathrm{d}x_2}{\mathrm{d}t} = -\omega x_1 - R i_q + u_q - \omega\psi_f \end{cases} \tag{3}$$

将定子电流和电感乘积作为选定的状态矢量,由式(3)构建失磁工况 PMSM 在 d-q 坐标系的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{D}\boldsymbol{y} + \boldsymbol{A}\boldsymbol{f} \\ \boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x} \end{cases} \tag{4}$$

式中:状态变量 $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$,系统输入 $\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$,系统输出 $\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$,定子磁链 $\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix}$。

系数矩阵如下:

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{L_q} \end{bmatrix}, \boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} -R & 0 \\ 0 & -R \end{bmatrix}。$$

2 滑模变结构观测器

2.1 自适应电阻观测器

为了得到准确的实时电阻检测值,设计如下自适应滑模观测器:

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u} + \hat{\boldsymbol{D}}\hat{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{f}} + \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}) + \boldsymbol{k}\mathrm{sgn}(\boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}}) \tag{5}$$

式中: $\hat{\boldsymbol{D}} = \begin{bmatrix} -\hat{R} & 0 \\ 0 & -\hat{R} \end{bmatrix}$。

取状态误差 $\boldsymbol{e} = \boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$,令:

$$m = R \tag{6}$$

参数偏差定义为 $\tilde{m} = m - \hat{m}$。其中 m 代表参数的真实值。

系数矩阵 $\boldsymbol{D}$ 可以改写成:

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix}$$

且:

$$\boldsymbol{\Delta D} = \boldsymbol{D} - \hat{\boldsymbol{D}} = \begin{bmatrix} -m + \hat{m} & 0 \\ 0 & -m + \hat{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{m} & 0 \\ 0 & -\tilde{m} \end{bmatrix}$$

结合式(4)与(5),得到观测器误差方程:

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{x}} - \dot{\hat{\boldsymbol{x}}} =$$
$$\boldsymbol{Ae} + \boldsymbol{Ae}_f + \boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{\Delta D}\hat{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{He} - \boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) =$$
$$(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{H})\boldsymbol{e} + \boldsymbol{Ae}_f + \boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{\Delta D}\hat{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{e}_y = \boldsymbol{y} - \hat{\boldsymbol{y}} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d - \hat{i}_d \\ i_q + \hat{i}_q \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{e}_f = \boldsymbol{f} - \hat{\boldsymbol{f}}$

以式(8)函数作为 Lyapunov 函数。

$$\boldsymbol{V} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{e} + \partial_1 \tilde{m}^2) \tag{8}$$

式中：∂_1 作为待设计的正常数。

根据式(7)并对式(8)求导得：

$$\dot{V} = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{e}} - \partial_1 \tilde{m}\dot{\hat{m}} =$$
$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}((\boldsymbol{Ae} + \boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{\Delta D}\hat{\boldsymbol{y}} - \boldsymbol{He} - \boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) + \boldsymbol{Ae}_f) - \partial_1 \tilde{m}\dot{\hat{m}} =$$
$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{H})\boldsymbol{e} + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) +$$
$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Delta D}\hat{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - \partial_1 \tilde{m}\dot{\hat{m}} \tag{9}$$

令：

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \tag{10}$$
$$\dot{V}_1 = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{H})\boldsymbol{e} + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{Ae}_f - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e})$$
$$\dot{V}_2 = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{D}\hat{\boldsymbol{y}} - \partial_1 \tilde{m}\dot{\hat{m}} \tag{11}$$

1) 对 $\dot{V}_1$

$$\dot{V}_1 = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{H})\boldsymbol{e} + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) \tag{12}$$

设计矩阵 $\boldsymbol{H}$ 为对角矩阵，即 $\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 0 & H_1 \\ H_2 & 0 \end{bmatrix}$，$H_1 = \omega$，$H_2 = -\omega$。

则

$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{H})\boldsymbol{e} = 0 \tag{13}$$

进而考虑 $\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e})$

$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - \boldsymbol{k}\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}} sgn(\boldsymbol{e}) = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - k\|\boldsymbol{e}\| \leqslant$$
$$\|\boldsymbol{e}\|\,\|\boldsymbol{D}\|\,\|\boldsymbol{e}_y\| + \|\boldsymbol{e}\|\,\|\boldsymbol{A}\|\,\|\boldsymbol{e}_f\| - k\|\boldsymbol{e}\| =$$
$$\|\boldsymbol{e}\|(\|\boldsymbol{D}\|\,\|\boldsymbol{e}_y\| + \|\boldsymbol{A}\|\,\|\boldsymbol{e}_f\| - k) \tag{14}$$

式中：$\|\boldsymbol{D}\|$、$\|\boldsymbol{e}_y\|$、$\|\boldsymbol{A}\|$、$\|\boldsymbol{e}_f\|$ 工程有界[1]。要使得滑模观测器收敛，必须保证 k 值足够大。其中 $k = \min\{k_1, k_2\}$，设计 $k = (\|\boldsymbol{D}\|\,\|\boldsymbol{e}_y\| + \|\boldsymbol{A}\|\,\|\boldsymbol{e}_f\|)_{\max} + \eta$，其中 $\eta > 0$，则由式(14)可知：

$$\boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{De}_y + \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Ae}_f - \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{k}\text{sgn}(\boldsymbol{e}) \leqslant -\eta\|\boldsymbol{e}\| \tag{15}$$

由式(12)、(13)和(15)可知：

$$\dot{V}_1 \leqslant -\eta\|\boldsymbol{e}\| \tag{16}$$

2) 对 $\dot{V}_2$

$$\dot{V}_2 = \boldsymbol{e}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{D}\hat{\boldsymbol{y}} - \partial_1 \tilde{m}\dot{\hat{m}} =$$
$$-\tilde{m}[e_1\hat{i}_d + e_2\hat{i}_q + \partial_1\dot{\hat{m}}] \tag{17}$$

令 $e_1\hat{i}_d + e_2\hat{i}_q + \partial_1\dot{\hat{m}} = 0$ 得到 $\hat{m}$ 的自适应律：

$$\hat{m} = -\frac{1}{\partial_1}\int(e_1\hat{i}_d + e_2\hat{i}_q) + m(0) \tag{18}$$

式中：$m(0)$ 是参数 $\hat{m}$ 的初始估计值。

由式(10)、(16)～(18)可得：

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \leqslant -\eta\|\boldsymbol{e}\| \tag{19}$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知所设计的观测器渐近稳定[16-17]。当系统状态抵达滑模切面后，由滑模等值控制原理知 $\boldsymbol{e} = \dot{\boldsymbol{e}} = 0$[18]，再由设计的自适应律可得电阻参数。

2.2 非奇异终端滑模观测器

为了得到 PMSM 的永磁磁链实时观测值，并保证控制系统稳定性，根据式(4)失磁电机模型，构造式(20)非奇异终端滑模观测器[17]：

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{Bu} + \hat{\boldsymbol{D}}\hat{\boldsymbol{y}} + \boldsymbol{v} \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}$ 为观测器控制输入量，上标^表示观测值。

取状态误差：

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{x} - \hat{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - \hat{x}_1 \\ x_2 - \hat{x}_2 \end{bmatrix} \tag{21}$$

观测器误差方程由式(4)与(20)得出：

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{x}} - \dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{Ae} + \boldsymbol{e}_{eq} + \boldsymbol{Af} - \boldsymbol{v} \tag{22}$$

式中：$\boldsymbol{e}_{eq} = [\boldsymbol{Dy} - \hat{\boldsymbol{D}}\hat{\boldsymbol{y}}]$。

式(23)为选取的非奇异终端滑模面[10]。

$$\boldsymbol{l} = \boldsymbol{s} + \boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q} \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{l} \in R^2$，$\boldsymbol{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \boldsymbol{e}$，$\beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2)$，$\beta_1 > 0$，$\beta_2 > 0$ 为常数，p 和 q 为奇数，且 $1 < p/q < 2$，$\dot{s}^{p/q} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1^{\,p/q} \\ \dot{s}_2^{\,p/q} \end{bmatrix}$。

设计式(24)～(26)所示的控制律，则系统在有限时间内收敛至 0。

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_{eq} + \boldsymbol{v}_n \tag{24}$$

式中：等效控制分量。

$$\boldsymbol{v}_{eq} = \boldsymbol{Ae} + \boldsymbol{e}_{eq} \tag{25}$$

$$\boldsymbol{v}_n = \int_0^t \left[\frac{\dot{\boldsymbol{s}}}{(p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}} + (k+\eta)\text{sgn}(\boldsymbol{l}) + \mu\boldsymbol{l}\right]\mathrm{d}\tau \tag{26}$$

式中：$k > 0$，$\eta > 0$，$\mu > 0$，$k > max(\|\boldsymbol{A}\|\,\|\dot{\boldsymbol{f}}\|)$，$\text{sgn}(\boldsymbol{l}) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(l_1) \\ \text{sgn}(l_2) \end{bmatrix}$。

为了证明观测器的稳定性，选取式(27)正定函数作为 Lyapunov 函数。

$$V(t) = \frac{1}{2}\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{l} \tag{27}$$

对(27)求导得:

$$\dot{V}(t) = \boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}(\dot{\boldsymbol{s}} + (p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}\ddot{\boldsymbol{s}}) =$$

$$\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}(p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}\left[\ddot{\boldsymbol{s}} + \frac{\dot{\boldsymbol{s}}}{(p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}}\right] \tag{28}$$

由式(22)~(24)得:

$$\dot{\boldsymbol{e}} = \dot{\boldsymbol{x}} - \dot{\hat{\boldsymbol{x}}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{e} + \boldsymbol{e}_{eq} + \boldsymbol{A}\boldsymbol{f} - \boldsymbol{v}_{eq} - \boldsymbol{v}_n = \boldsymbol{A}\boldsymbol{f} - \boldsymbol{v}_n \tag{29}$$

把式(29)代入式(28)得

$$\dot{V}(t) = \boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{l}} = \boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}(\dot{\boldsymbol{s}} + (p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}\ddot{\boldsymbol{s}}) =$$

$$\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}(p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}[\boldsymbol{A}\dot{\boldsymbol{f}} - (k+\eta)\mathrm{sgn}(\boldsymbol{l}) - \mu\boldsymbol{l}] \leqslant$$

$$-\boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}(p/q)\boldsymbol{\beta}\dot{\boldsymbol{s}}^{p/q-1}[\eta\mathrm{sgn}(\boldsymbol{l}) + \mu\boldsymbol{l}] \leqslant$$

$$-(p/q)\min_{i=1,2}(\boldsymbol{\beta}_i\dot{s}_i^{p/q-1})[\eta\|\boldsymbol{l}\| + \mu\|\boldsymbol{l}\|^2] \leqslant 0 \tag{30}$$

由式(30)可以看出,滑模观测器就具有收敛性。且可通过调节 p、q、β 等参数调节收敛速度。

当 $\boldsymbol{l} = 0$ 时[17],滑模等值原理[19]表明,系统抵达滑模面后,$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{e}_{eq} = \dot{\boldsymbol{e}} = 0$。由式(22)可得:

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{f} = \boldsymbol{v} \tag{31}$$

对式(31)展开,代入相应参数,可得永磁体磁链算式:

$$\psi_f = -v_q/\omega \tag{32}$$

3 仿真实验

3.1 MATLAB 仿真

基于自适应非奇异终端滑模变结构的永磁同步牵引电机磁链参数观测控制系统结构如图 2 所示,主要包括电流调节器模块、失磁重构模块、自适应模块以及状态观测器模块等。

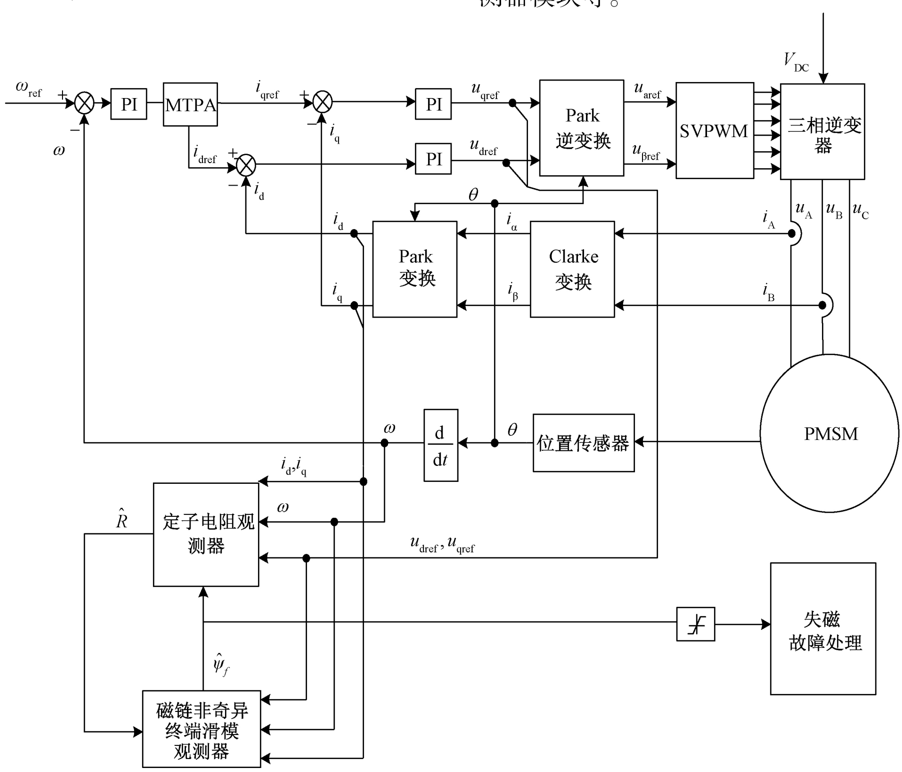


图 2 控制系统框图

Fig.2 Control system block diagram

为了验证方法的有效性,以 MATLAB 仿真软件中 Simulink 的 SimPowerSystems 工具箱 PMSM 模型为对象,保留原库文件,在其基础上进行改进。改进后的电机模型能通过外接模块实时动态修改电机参数值,然后将其加载到元件库 Library 中,便于调用。首先构造自适应非奇异终端滑模观测器,给出自适应电阻估计值,然后运用滑模等值原理构造失磁工况磁链观测状态方程。仿真中 PMSM 参数如表 1 所示。本文采用最大转矩电流比(MTPA)矢量控制策略。

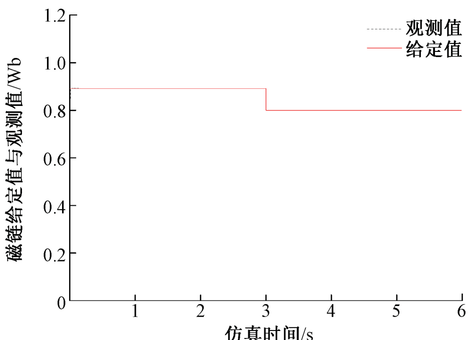
表 1 电机参数值

Table 1 Motor parameter values

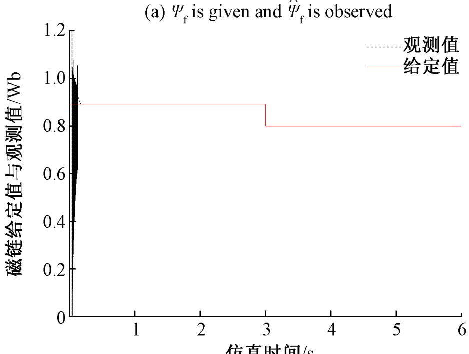
参数	单位	数值
定子绕组相电阻 R	Ω	0.02
极对数 p		4
定子绕组 q 轴电感 L_q	H	0.001
定子绕组 d 轴电感 L_d	H	0.003 572
转子磁链 ψ_f	Wb	0.892

电机磁链观测分为两种情况下运行。第 1 种是电阻参数未发生改变。第 2 种是电阻参数在 2 s 时增加至 0.04 Ω。假设电机失磁发生在 3 s，d 轴磁链变为 0.8 Wb。为了更好验证观测器的鲁棒性，电机转矩在 4 s 时，由 300 N·m 变为600 N·m。

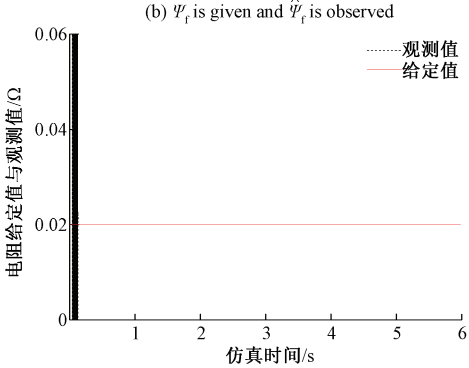
图 3(a)所示为第 1 种情况下未采用自适应观测器情况下磁链参数观测值。图 3(b)、(c)所示为采用自适应观测器下磁链参数与电阻参数观测值。由图 3 可知，当电阻参数没发生变化时，未采用自适应观测器与采用自适应观测器对磁链的观测结果几乎一致。所设计的观测器能快速而精确地跟踪目标参数的给定值。



(a) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值
(a) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(b) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值
(b) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed

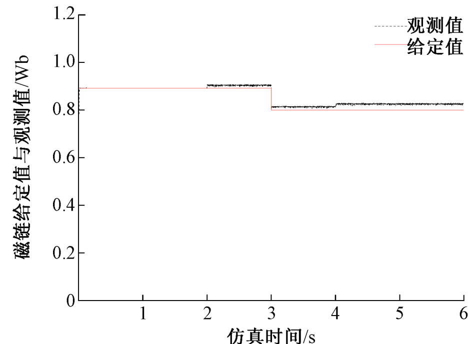


(c) R 给定值和 $\hat{R}$ 观测值
(c) R is given and $\hat{R}$ is observed

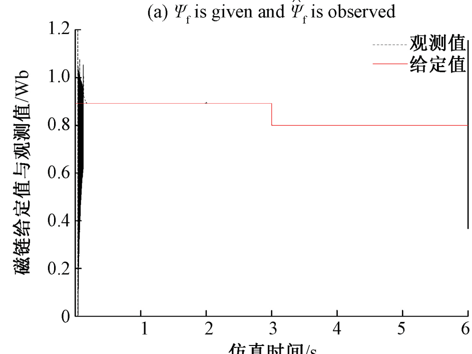
图 3　定子电阻不变时，各个参数给定值与观测值

Fig.3　The given and observed values of each parameter when the stator resistance is constant

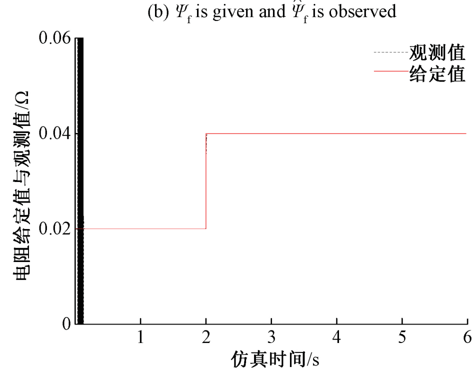
图 4(a)所示为第 2 种情况下，未采用自适应观测器情况下磁链参数观测值，由图 4 可知，当定子电阻在 2 s 发生变化时，磁链参数观测值在较长时间内未能跟踪给定值，且在第 4 s 转矩发生变化时，磁链跟踪值再次偏离实际值。图 4(b)、(c)所示为采用自适应观测器下电阻参数与磁链参数观测值，磁链参数很快跟踪上给定值。由图 4 可知，采用自适应观测器方法后，磁链参数能更快跟踪目标参数。



(a) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值
(a) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(b) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值
(b) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(c) R 给定值和 $\hat{R}$ 观测值
(c) R is given and $\hat{R}$ is observed

图 4　定子电阻改变时，各个参数给定值与观测值

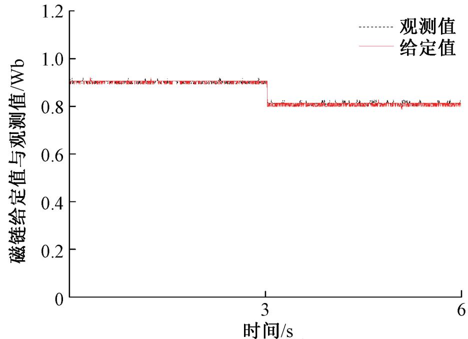
Fig.4　The given and observed values of each parameter when the stator resistance changes

3.2　RT-LAB 实验

RT-LAB 可应用于实时仿真、复杂系统控制等各个领

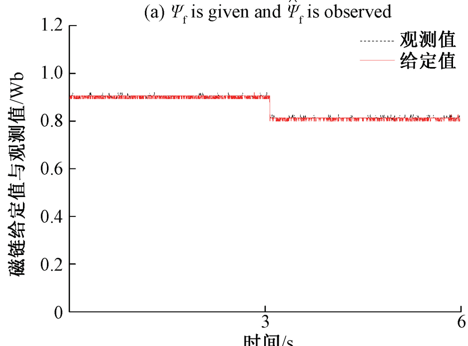
域。PMSM 以及逆变器等其他部分由 OP5600 进行模拟[11]，通过 RT-LAB 可实现 PMSM 的硬件在环仿真。

图 5、6 所示为对仿真结果的实验验证，实验结果表明了仿真分析的正确性。



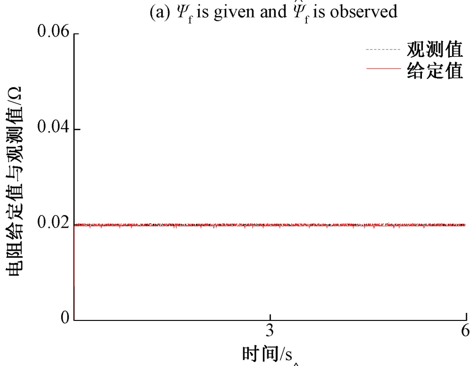
(a) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值

(a) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(a) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值

(a) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(c) R 给定值和 $\hat{R}$ 观测值

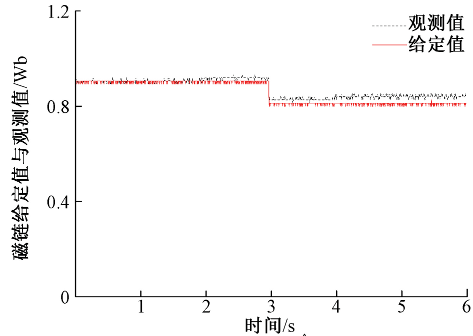
(c) R is given and $\hat{R}$ is observed

图 5 定子电阻不变时，各个参数给定值与观测值实验波形

Fig.5 The experimental waveforms of the given and observed values of each parameter when the stator resistance is constant

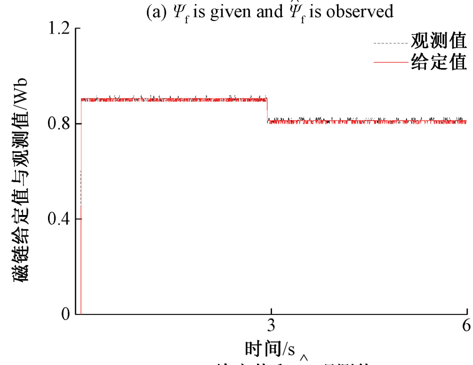
4 结 论

本文采用永磁同步电机失磁工况的状态方程模型与自适应非奇异终端滑模变结构相结合方式，对定子电阻和永磁体磁链地观测进行了仿真和实验，得到以下结论。



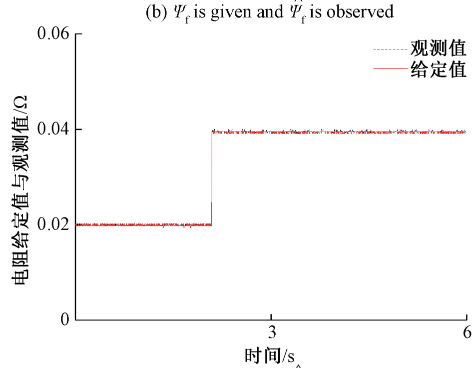
(a) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值

(a) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(b) Ψ_f 给定值和 $\hat{\Psi}_f$ 观测值

(b) Ψ_f is given and $\hat{\Psi}_f$ is observed



(c) R 给定值和 $\hat{R}$ 观测值

(c) R is given and $\hat{R}$ is observed

图 6 定子电阻改变时，各个参数给定值与观测值实验波形

Fig.6 The experimental waveforms of the given and observed values of each parameter when the stator resistance changes

1）当电阻参数未发生改变时，传统磁链检测方法和自适应高阶滑模磁链检测方法得到几乎一样的观测效果。

2）当电阻参数发生改变时，传统磁链观测方法不能满足磁链的精确检测，而自适应高阶滑模观测器可很好的检测出磁链参数变化情况。

3）仿真实验对本文方法的可行性进行了验证。

参考文献

[1] 张昌凡，张淼滢，张发明，等. 一种检测永磁同步电机失磁的级联观测器[J]. 电机与控制学报，2017，

21(2):45-54.
ZHANG CH F, ZHANG M Y, ZHANG F M, et al. A cascade observer to detect demagnetization faults for PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(2): 45-54.

[2] HUIMIN W, GE X, LIU Y C. Second-order sliding-mode mras observer based sensorless vector control of linear induction motor drives for medium-low speed maglev applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9938-9952.

[3] DU R H, WU Y F, CHEN W, et al. adaptive fuzzy speed control for permanent magnet synchronous motor servo systems [J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(8):798-807.

[4] 张勇军,汪伟,张晓庆,等. 带电阻在线辨识的改进型永磁同步电机滑模观测方法[J].电机与控制学报, 2017,21 (6):10-25.
ZHANG Y J, WANG W, ZHANG X Q, et al. Study on improved sliding-mode control with resistance estimation of PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(6): 10-25.

[5] REZA C M F S, ISLAM D, MEKHILEF S. Stator resistance estimation scheme using fuzzy logic system for direct torque controlled induction motor drive[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2014, 27(4):5-48.

[6] HAMIDA M A, GLUMINEAUl A, DE LEON J, et al. Robust adaptive high order sliding-mode optimum controller for sensorless interior permanent magnet synchronous motors[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2014, 105:79-104.

[7] 王斌,王跃,郭伟,等. 基于定子磁链降阶状态观测的永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3):160-195.
WANG B, WANG Y, GUO W, et al. Deadbeat direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on reduced order stator flux observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3):160-195.

[8] 李彪,李黎川. 基于高性能磁链算法的永磁同步电动机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 59-67.
LI B,LI L CH. Position sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on high performance flux estimation algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(11):59-67.

[9] 张永昌,杨海涛. 异步电机无速度传感器模型预测控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(15):2422-2429.
ZHANG Y CH,YANG H T. Model predictive control for speed sensorless induction motor drive[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(15):2422-2429.

[10] 赵凯辉,陈特放,张昌凡,等. IPMSM 非奇异快速终端滑模无速度传感器转矩控制[J].仪器仪表学报, 2015,36(2): 294-303.
ZHAO K H,CHEN T F, ZHANG CH F, et al. Sensorless and torque control of IPMSM applying NFTSMO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 294-303.

[11] 张昌凡,吴公平,何静,等. 一种永磁同步电机失磁故障容错预测控制算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15):100-110.
ZHANG CH F, WU G P, HE J, et al. Fault-tolerant predictive control for demagnetization faults in permanent magnet synchronous machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(15):100-110.

[12] 林国汉,章兢,刘朝华,等. 改进综合学习粒子群算法的 PMSM 参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(1):51-57.
LIN G H, ZHANG J, LIU ZH H, et al. Parameter identification of PMSM using improved comprehensive learning particle swarm optimization [J]. Electric Machines and Control, 2015,19(1):51-57.

[13] 肖曦,许青松,王雅婷,等.基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法[J].电工技术学报,2014, 29(3):21-26.
XIAO X, XU Q S, WANG Y T, et al. Parameter identification of interior permanent magnet synchronous motors based on genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(3):21-26.

[14] 石建飞,戈宝军,吕艳玲,等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J]. 电机与控制学报,2018,22(3): 17-24.
SHI J F, GE B J, LV Y L, et al. Research of parameter identification of permanent magnet synchronous motor on line[J]. Electric Machines and Control, 2018,22(3): 17-24.

[15] 张昌凡,彭钊,何静,等. 基于自适应观测器的鲁棒失磁故障检测方法[J].电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 508-518.
ZHANG CH F, PENG ZH, LI X F, et al. Robust demagnetization failure detection method based on adaptive observer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 508-518. .

[16] 曹艳玲,文彦东. 永磁同步电机直交轴电感参数离线测量方法[J].微电机,2016,49(2):41-64.
CAO Y L,WEN Y D. Offline measurement method of dq-axis inductances for permanent magnet synchronous motor[J]. Micromotors,2016,49(2):41-64.

[17] 赵凯辉,陈特放,张昌凡,等.永磁同步牵引电机有效磁链观测及转矩控制[J].铁道科学与工程学报,2014,11(5): 146-153.
ZHAO K H, CHEN T F, ZHANG CH F, et al. Effective flux observation and torque control for permanent magnet synchronous motor of railway vehicles[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2014,11(5):146-153.

[18] 赵凯辉,陈 跃,张昌凡,等. PMSM 失磁故障的有限集模型预测容错控制 [J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(7): 79-87.
ZHAO K H, CHEN Y, ZHANG CH F, et al. Finite-set model predictive fault control for demagnetization faults of permanent magnet synchronous motor drives [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(7):79-87.

[19] 邱忠才,郭冀岭,王斌,等. 基于卡尔曼滤波滑模变结构转子位置观测器的 PMSM 无差拍控制[J]. 电机与控制学报,2014,18(4):60-71.
QIU ZH C, GUO J L, WANG B, et al. Deadbeat predictive current control based on a sliding mode observer with Kalman filter for PMSM speed and rotor position[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(4):60-71.

作者简介

目云奎, 2015 年于沈阳化工大学获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为电力传动技术及其故障诊断。

E-mail:m1428735855@163.com

Mu Yunkui received his B. Sc. From Shenyang University of Chemical Technology in 2015. Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include electric drive technology and its fault diagnosis.

李祥飞(通信作者),1999 于郑州大学获得硕士学位,2003 年于中南大学获得博士学位,现为湖南工业大学教授,主要研究方向为电气传动及控制。

E-mail: lixiangfei2002@sina.com

Li Xiangfei (Corresponding author) received M.Sc.from Zhengzhou University in 1999 and Ph.D. from Central South University in 2003, respectively. Now he is a professor at Hunan University of Technology. His main research interests include electrical transmission and control.

陈玄,2016 年于武汉大学珞珈学院获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为电力传动技术及其故障诊断。

E-mail:15102784972@163.com

Chen Xuan received his B. Sc. From Luojia College Wuhan University in 2016. Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interests include electric drive technology and its fault diagnosis.