DOI: 10.7641/CTA.2015.40595

感应电机二阶滑模次优算法定子磁链观测器设计

潘月斗†, 陈泽平, 郭映维

(北京科技大学自动化学院,北京100083;北京科技大学钢铁流程先进控制教育部重点实验室,北京100083)

摘要:提出了基于二阶滑模次优算法的感应电机定子磁链观测方法,设计了定子磁链观测器,并应用到感应电机 直接转矩控制中.本文设计的磁链观测器,通过准确的跟踪电流及其变化率,从而实现对转子磁链的准确估算,然后 利用转子磁链与定子磁链的关系,估算出定子磁链.由于本文设计的定子磁链观测器是一个多输入多输出(MIMO) 系统,稳定性分析非常复杂,为此将磁链估算误差的微分看作扰动处理,从而将MIMO的观测器模型分解成两个独 立的单输入单输出(SISO)系统,简化了稳定性分析.将该观测器用于感应电机直接转矩控制中,达到了很好的控制 效果.仿真和实验验证了该方法的有效性.

关键词:感应电机;二阶滑模;次优算法;电流观测;磁链观测;直接转矩控制

中图分类号: TM343 文献标识码: A

Design of second order sliding-mode sub-optimal algorithm stator flux observer for induction motor

PAN Yue-dou[†], CHEN Ze-ping, GUO Ying-wei

(School of Automation & Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process (Ministry of Education),

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper proposes a stator flux estimation method for induction motor based on the second order slidingmode sub-optimal algorithm. A stator flux observer is designed and applied to the direct torque control (DTC) of an induction motor. The flux observer tracks stator current and the differential of stator current accurately to realize accurate estimation of the rotor flux, and then estimate the stator flux using the relationship between the stator flux and the rotor flux. Because the stator flux observer is a multi-input multi-output (MIMO) system and is complicated in stability analysis, we treat the differential of estimated flux error as disturbance and divide the multi-input multi-output observer model into two separate single input single output (SISO) systems, which simplifies the stability analysis. The observer is applied to the direct torque control of an induction motor and achieves a very good control results. Simulation experiment results validate the proposed method.

Key words: induction motors; second order sliding-mode; sub-optimal algorithm; current observe; flux observe; direct torque control

1 引言(Introduction)

感应电机被广泛应用于工农业生产、国防、科技 及社会生活等各个方面,随着直接转矩控制和矢量控 制技术的出现,使其逐渐进入了伺服控制领域^[1].相 对于矢量控制,直接转矩控制方法直接把转矩作为被 控量,并由电流和定子磁链估算,无需进行磁场定向 和矢量变换,更为简单和实用,具有快速的动态响应 能力^[2].直接转矩控制中,定子磁链观测值的精确度 直接影响控制效果^[3].定子磁链观测的基本方法有电 压模型法和电流模型法. 电压模型法结构简单,观测时仅需确定定子电阻. 但是电压模型法在运算过程中需开环积分(纯积分), 微小的直流偏移误差和初始值误差都将导致积分饱 和^[4].电流模型法可解决电压模型积分漂移和无法建 立初始磁链的问题,但观测精度与转速相关,易受电 动机转速变化的影响^[5].为了更好的观测磁链,已提 出了很多方法,如滑模变结构方法^[6-7]、自适应方 法^[8]、卡尔曼滤波器方法^[9-10]、神经网络方法^[11]等. 相比其他方法,滑模变结构方法对系统的不确定性因 素具有较强的鲁棒性和抗干扰性,同时控制设计简单,

收稿日期: 2014-06-24; 录用日期: 2015-02-02.

[†]通信作者. E-mail: pyd88165@163.com; Tel.: +86 13401018329.

中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-AS-09-006B),北京市重点学科共建项目(XK100080537)资助.

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-AS-09-006B) and Key Discipline Construction Project of Beijing (XK100080537).

物理上易于实现,因此得到广泛应用.

但是在实际应用中,滑模变结构控制也存在一些 问题,其中最主要的是抖振现象[12].近些年提出的高 阶滑模控制理论[13],是对传统滑模控制理论的进一步 推广.相比传统滑模,高阶滑模不仅保持了传统滑模 的优点,同时抑制了系统的抖振,除去了相对阶的限 制,并且提高了控制精度,二阶滑模控制是目前应用 最广泛的高阶滑模控制方法,因为它的控制器结构简 单且所需要的信息不多. 二阶滑模控制中常见的4种 算法有: twisting(螺旋)算法、sub-optimal(次优)算法、 prescribed convergence law(给定收敛律)算法和Super-Twisting(超螺旋)算法.本文设计了一种基于二阶滑模 次优算法的感应电机定子磁链观测器. 将磁链估算误 差的微分看作扰动处理,从而将MIMO的观测器模型 分解成两个独立的SISO系统,简化了稳定性分析.将 该观测器用于感应电机直接转矩控制中,达到了很好 的控制效果. 仿真及实验结果验证了该方法的有效性.

2 感应电机的数学模型(Model of induction motor)

设感应电机的磁路是线性的,忽略铁损的影响,在 静止坐标系(α-β)下,感应电机的数学模型的状态方 程为^[14]

$$\begin{cases} \dot{i}_{\mathrm{s}\alpha} = -\delta i_{\mathrm{s}\alpha} + \lambda \theta \psi_{\mathrm{r}\alpha} + n_{\mathrm{p}} \lambda \omega_{\mathrm{r}} \psi_{\mathrm{r}\beta} + \eta u_{\mathrm{s}\alpha}, \\ \dot{i}_{\mathrm{s}\beta} = -\delta i_{\mathrm{s}\beta} - n_{\mathrm{p}} \lambda \omega_{\mathrm{r}} \psi_{\mathrm{r}\alpha} + \lambda \theta \psi_{\mathrm{r}\beta} + \eta u_{\mathrm{s}\beta}, \\ \dot{\psi}_{\mathrm{r}\alpha} = \theta L_{\mathrm{m}} i_{\mathrm{s}\alpha} - \theta \psi_{\mathrm{r}\alpha} - n_{\mathrm{p}} \omega_{\mathrm{r}} \psi_{\mathrm{r}\beta}, \\ \dot{\psi}_{\mathrm{r}\beta} = \theta L_{\mathrm{m}} i_{\mathrm{s}\beta} + n_{\mathrm{p}} \omega_{\mathrm{r}} \psi_{\mathrm{r}\alpha} - \theta \psi_{\mathrm{r}\beta}, \end{cases}$$
(1)

其中: $\theta = \frac{R_{\rm r}}{L_{\rm r}}, \sigma = 1 - \frac{L_{\rm m}^2}{L_{\rm s}L_{\rm r}}, \eta = \frac{1}{\sigma L_{\rm s}}, \lambda = \frac{L_{\rm m}}{\sigma L_{\rm s}L_{\rm r}},$ $\delta = \eta R_{\rm s} + L_{\rm m} \lambda \theta; i_{\rm s\alpha}, i_{\rm s\beta}, u_{\rm s\alpha}, u_{\rm s\beta}, \psi_{\rm r\alpha}, \psi_{\rm r\beta} \beta$ 别为 α 轴和 β 轴的定子电流、定子电压和转子磁链; $\omega_{\rm r}$ 为转 子电角速度; $L_{\rm s}, L_{\rm r}, L_{\rm m}$ 分别为定子电感、转子电感和

定转子间互感; $R_{\rm s}$, $R_{\rm r}$ 分别为定子电阻和转子电阻.

定子磁链和转子磁链存在如下关系^[15]:

$$\begin{cases} \psi_{\mathrm{s}\alpha} = \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}}\psi_{\mathrm{r}\alpha} + \sigma L_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{s}\alpha}, \\ \psi_{\mathrm{s}\beta} = \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}}\psi_{\mathrm{r}\beta} + \sigma L_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{s}\beta}. \end{cases}$$

3 二阶滑模次优算法磁链观测器设计 (Design of flux observer based on second order sliding mode sub-optimal algorithm) 设计如下感应电机转子磁链观测器:

$$\begin{cases} \hat{i}_{s\alpha} = -\delta \hat{i}_{s\alpha} + \lambda \theta \hat{\psi}_{r\alpha} + n_{p} \lambda \omega_{r} \hat{\psi}_{r\beta} + \eta u_{s\alpha}, \\ \hat{i}_{s\beta} = -\delta \hat{i}_{s\beta} - n_{p} \lambda \omega_{r} \hat{\psi}_{r\alpha} + \lambda \theta \hat{\psi}_{r\beta} + \eta u_{s\beta}, \\ \hat{\psi}_{r\alpha} = \theta L_{m} \hat{i}_{s\alpha} - \theta \hat{\psi}_{r\alpha} - n_{p} \omega_{r} \hat{\psi}_{r\beta} + v_{\alpha}, \\ \hat{\psi}_{r\beta} = \theta L_{m} \hat{i}_{s\beta} + n_{p} \omega_{r} \hat{\psi}_{r\alpha} - \theta \hat{\psi}_{r\beta} + v_{\beta}, \end{cases}$$
(2)

其中: $\hat{i}_{s\alpha}$, $\hat{i}_{s\beta}$, $\hat{\psi}_{r\alpha}$, $\hat{\psi}_{r\beta}$ 分别为定子电流和转子磁链的状态估计变量, v_{α} 和 v_{β} 为控制信号, $\bar{i}_{s\alpha} = i_{s\alpha}$ –

 $\hat{i}_{s\alpha}, \bar{i}_{s\beta} = i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}$ 分别为 α 轴和 β 轴的定子电流观测 误差. 定子电压和定子电流 $u_{s\alpha}, u_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 都是可以 检测到的, 定子电压是原实际系统(感应电机)的输入 量, 定子电流可作为原实际系统的输出量; 针对此观 测器而言, 定子电流检测量 $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 作为给定输入量(也 作为干扰输入的一部分), 定子电压检测量 $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 以 及转子电角速度看作干扰输入的一部分; $\hat{i}_{s\alpha}, \hat{i}_{s\beta}$ 作为 观测器的反馈量.

式(1)减式(2),可以得到定子电流和转子磁链观测 误差方程

$$\begin{cases} \bar{i}_{s\alpha} = -\delta \bar{i}_{s\alpha} + \lambda \theta \bar{\psi}_{r\alpha} + n_{p} \lambda \omega_{r} \bar{\psi}_{r\beta}, \\ \bar{i}_{s\beta} = -\delta \bar{i}_{s\beta} - n_{p} \lambda \omega_{r} \bar{\psi}_{r\alpha} + \lambda \theta \bar{\psi}_{r\beta}, \\ \bar{\psi}_{r\alpha} = \theta L_{m} \bar{i}_{s\alpha} - \theta \bar{\psi}_{r\alpha} - n_{p} \omega_{r} \bar{\psi}_{r\beta} - v_{\alpha}, \\ \bar{\psi}_{r\beta} = \theta L_{m} \bar{i}_{s\beta} + n_{p} \omega_{r} \bar{\psi}_{r\alpha} - \theta \bar{\psi}_{r\beta} - v_{\beta}, \end{cases}$$
(3)

 $\bar{\psi}_{r\alpha} = \psi_{r\alpha} - \hat{\psi}_{r\alpha}, \bar{\psi}_{r\beta} = \psi_{r\beta} - \hat{\psi}_{r\beta}$ 分别为 α 轴和 β 轴的转子磁链观测误差.

电流观测误差方程写成如下形式:

$$\dot{\bar{i}}_{\rm s} = -\delta\bar{i}_{\rm s} + A\bar{\psi}_{\rm r},\tag{4}$$

其中:

$$\bar{i}_{\rm s} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{\rm s\alpha} \\ \bar{i}_{\rm s\beta} \end{bmatrix}, \ \bar{\psi}_{\rm r} = \begin{bmatrix} \bar{\psi}_{\rm r\alpha} \\ \bar{\psi}_{\rm r\beta} \end{bmatrix}, \ A = \begin{bmatrix} \lambda \theta & n_{\rm p} \lambda \omega_{\rm r} \\ -n_{\rm p} \lambda \omega_{\rm r} & \lambda \theta \end{bmatrix}.$$

由于A的行列式 $|A| = \lambda^2 \theta^2 + n_p^2 \lambda^2 \omega_r^2 > 0$,所以 只要 $\bar{i}_s = \dot{\bar{i}}_s = 0$ (或者 $\dot{\bar{i}}_s + \delta \bar{i}_s = 0$),则必有 $\bar{\psi}_r = 0$.由 式(3)可得电流误差方程的另一种形式:

$$\dot{\bar{i}}_{\rm s} = (\lambda \theta L_{\rm m} - \delta) \bar{i}_{\rm s} - \lambda \dot{\bar{\psi}}_{\rm r} - \lambda v, \qquad (5)$$

其中 $v = [v_{\alpha} \ v_{\beta}]^{\mathrm{T}}$ 为控制信号.

由式(5)可知, 电流误差方程系统相对于控制信号 v是1阶系统, 因此可以采用二阶滑模控制, 设计控制 信号v, 使得滑模变量s趋于零, 并保持二阶滑动模态, 即 $s = \dot{s} = 0$. 如果选取 $s = \bar{i}_s$, 采用二阶滑模控制, 即 可使得 $\bar{\psi}_r = 0$.

二阶滑模次优算法(sub-optimal)形式如下:

$$\begin{cases} u = -k_1 \operatorname{sgn}(s - \frac{s^*}{2}) + k_2 \operatorname{sgn} s^*, \ k_1, k_2 > 0, \\ s = s(t, x). \end{cases}$$

其中: s^* 是最近的时间内, $\dot{s} = 0$ 时s的值; k_1 , k_2 为控 制参数, $\Rightarrow s(t, x) = 0$ 为所定义的滑模面, 控制目标是 使系统的状态在有限时间内收敛到滑模流形 $s = \dot{s} = 0$.

选取滑模面
$$s = \bar{i}_{s}$$
,设计如下控制律:
 $v = \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\lambda}(v_{eq\alpha} + v_{n\alpha}) \\ -\frac{1}{\lambda}(v_{eq\beta} + v_{n\beta}) \end{bmatrix},$ (6)

其中:

第5期

$$\begin{aligned} v_{\rm eq} &= \begin{bmatrix} v_{\rm eq\alpha} \\ v_{\rm eq\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda\theta L_{\rm m} - \delta)\bar{i}_{\rm s\alpha} \\ -(\lambda\theta L_{\rm m} - \delta)\bar{i}_{\rm s\beta} \end{bmatrix}, \\ v_n &= \begin{bmatrix} v_{\rm n\alpha} \\ v_{\rm n\beta} \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -k_{\alpha 1}{\rm sgn}(\bar{i}_{\rm s\alpha} - \frac{\bar{i}_{\rm s\alpha}^*}{2}) + k_{\alpha 2}{\rm sgn}\,\bar{i}_{\rm s\alpha}^* \\ -k_{\beta 1}{\rm sgn}(\bar{i}_{\rm s\beta} - \frac{\bar{i}_{\rm s\beta}^*}{2}) + k_{\beta 2}{\rm sgn}\,\bar{i}_{\rm s\beta}^* \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

4 观测器稳定性分析(Analysis of the observer's stability)

对于式(5), 将 $\bar{\psi}_r$ 看作扰动处理, 可将其分成 α 轴和 β 轴方向两个独立的SISO(单入单出)系统, 如下:

$$\dot{\bar{i}}_{s\alpha} = (\lambda \theta L_{\rm m} - \delta) \bar{i}_{s\alpha} - \lambda \dot{\bar{\psi}}_{r\alpha} - \lambda v_{\alpha}, \qquad (7)$$

$$i_{\rm s\beta} = (\lambda \theta L_{\rm m} - \delta) i_{\rm s\beta} - \lambda \psi_{\rm r\beta} - \lambda v_{\beta}. \tag{8}$$

文献[16]给出了次优算法有限时间收敛的充分条件:

$$\begin{cases} 2[(k_1 + k_2)K_{\rm m} - C] > (k_1 - k_2)K_{\rm M} + C, \\ (k_1 - k_2)K_{\rm m} > C. \end{cases}$$

其中K_m, K_M, C满足如下条件:

$$\begin{cases} 0 < K_{\rm m} \leqslant \frac{\partial}{\partial u} \ddot{s} \leqslant K_{\rm M}, \\ C \geqslant |\ddot{s}|_{u=0}. \end{cases}$$

对于本文设计的观测器系统, α 轴方向分析如下: 将 $v_{\alpha} = -\frac{1}{\lambda}(v_{eq\alpha} + v_{n\alpha})$ 代入式(7), 可得

$$\dot{\bar{i}}_{\mathrm{s}\alpha} = -\lambda \dot{\bar{\psi}}_{\mathrm{r}\alpha} + v_{\mathrm{n}\alpha}.$$

上式对时间求导,可得

$$\ddot{\bar{i}}_{\mathrm{s}\alpha} = -\lambda \ddot{\bar{\psi}}_{\mathrm{r}\alpha} + v_{\mathrm{n}\alpha}.$$

系统有限时间收敛的充分条件[16]如下:

$$\begin{cases} 2[(k_{\alpha 1} + k_{\alpha 2})K_{m\alpha} - C_{\alpha}] > \\ (k_{\alpha 1} - k_{\alpha 2})K_{M\alpha} + C_{\alpha}, \\ (k_{\alpha 1} - k_{\alpha 2})K_{m\alpha} > C_{\alpha}. \end{cases}$$
(9)

如果参数 $k_{\alpha 1}, k_{\alpha 2}$ 满足式(9),则系统必能在有限 时间内到达滑模面 $i_s = i_s = 0$,其中 $K_{m\alpha}, K_{M\alpha}, C_{\alpha}$ 满足如下条件:

$$\begin{cases} 0 < K_{\mathrm{m}\alpha} \leqslant \frac{\partial}{\partial v_{\mathrm{n}\alpha}} \ddot{\bar{i}}_{\mathrm{s}\alpha} = 1 \leqslant K_{\mathrm{M}\alpha}, \\ C_{\alpha} \geqslant |\ddot{\bar{i}}_{\mathrm{s}\alpha}|_{v_{\mathrm{n}\alpha}=0} = \lambda |\ddot{\psi}_{\mathrm{r}\alpha}|. \end{cases}$$

β轴方向的稳定性分析同上.

5 定子磁链估算(Estimating stator flux)

利用转子磁链观测器估算得到的转子磁链和定子 电流,可估算定子磁链

$$\begin{cases} \hat{\psi}_{\mathbf{s}\alpha} = \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}} \hat{\psi}_{\mathbf{r}\alpha} + \sigma L_{\mathrm{s}} \hat{i}_{\mathbf{s}\alpha}, \\ \hat{\psi}_{\mathbf{s}\beta} = \frac{L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}} \hat{\psi}_{\mathbf{r}\beta} + \sigma L_{\mathrm{s}} \hat{i}_{\mathbf{s}\beta}. \end{cases}$$
(10)

基于二阶滑模次优算法的感应电机定子磁链观测器 系统框图如图1所示.



图 1 观测器系统框图 Fig. 1 Diagram of the observer system

6 仿真与实验(Simulation and experiment)

为了检验所设计的基于二阶滑模次优算法的感应 电机定子磁链观测器的有效性,进行了MATLAB仿真 与实验.电机参数为: 额定电压 $U_{\rm N} = 220$ V, 定子电阻 $R_{\rm s} = 94 \Omega$, 转子 电 阻 $R_{\rm r} = 83.9 \Omega$, 定子 自 感 $L_{\rm s} =$ 5.387 H, 转子 自 感 $L_{\rm r} = 5.387$ H, 互 感 $L_{\rm m} = 5.082$ H, 转动惯量J = 0.105 kg·m². 观测器控制参数为: $k_{\alpha 1}$ = $k_{\beta 1} = 10$, $k_{\alpha 2} = k_{\beta 2} = 5$.

电机施加220 V,15 Hz的三相交流电,在开环下空载运转,4 s时,施加3 N·m负载转矩.仿真时间7 s,仿真结果如图2-5所示.

从图3和图4可以看出,观测电流误差及其微分(由于实际对磁链观测误差有影响的是*i*_s/δ,所以图4实际 是*i*_s/δ的值),在一定时间内渐近趋于0,从而说明了给 二阶滑模次优算法控制的有效性.从图5可以看出,观 测磁链在一定时间内达到稳定.





图 3 α轴定子电流观测误差











Fig. 5 Estimated α axis flux

为了验证基于二阶滑模次优算法的感应电机定子 磁链观测器的有效性,将其应用到感应电机直接转矩 控制中.电机参数与开环时一样,定子磁链给定值 $\psi = 1$ Wb,给定转速600 r/min.转速调节器采用PID 控制,其中比例系数 $K_{\rm P} = 10$,积分系数 $K_{\rm I} =$ 0.001,微分系数 $K_{\rm D} = 0.5$.仿真时间20 s,仿真结果 如图6所示.



图 6 基于二阶滑模次优算法的定子磁链观测器应用到 感应电机直接转矩控制中(仿真结果)

Fig. 6 Stator flux observer based on sub-optimal algorithm for direct torque control of induction motor (simulation results)

为了验证二阶滑模次优算法定子磁链观测器的实际可行性,利用"电力电子与电气传动综合实验台"进行实验.实验台组成包括:功率挂箱、主控挂箱、加载控制箱、电动机、上位机,如图7所示.实验电机为鼠笼式三相异步电动机,参数与仿真时所用电机参数相同.转速给定值600r/min,实验结果如图8所示.



图 7 电力电子与电气传动综合实验台





- 图 8 基于二阶滑模次优算法的定子磁链观测器应用到 感应电机直接转矩控制中(实验结果)
- Fig. 8 Stator flux observer based on sub-optimal algorithm for direct torque control of induction motor (experimental results)

从仿真和实验结果可以看出,二阶滑模次算法定 子磁链观测器能够很好的观测定子磁链,电机转速也 最终稳定在了给定值600 r/min,从而证明了本文所 提出的基于二阶滑模次算法的感应电机定子磁链观 测器的实际可行性.

7 结语(Conclusions)

本文提出的二阶滑模次优算法定子磁链观测器, 首次将二阶滑模次优算法应用到感应电机定子磁链 观测器设计中,并将此观测器应用到直接转矩控制中. 从仿真和实验结果可以看出,该观测器能够准确的估 算定子磁链,将其用于感应电机直接转矩控制中,也 达到了很好的控制效果.仿真实验验证了该方法的有 效性.

参考文献(References):

- PELLEGRINO G, GUGLIELMI P, ARMANDO E, et al. Selfcommissioning algorithm for inverter nonlinearity compensation in sensorless induction motor drives [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46(4): 1416 – 1424.
- [2] 张细政, 王耀南, 袁小芳, 等. 基于滑模与自适应观测器的感应电机 非线性控制新策略 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(6): 753 – 760. (ZHANG Xizheng, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang, et al. New nonlinear controller for induction motor based on sliding-mode control and adaptive observer [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(6): 753 – 760.)
- [3] 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.)
- [4] 李红, 罗裕, 韩邦成, 等. 带通滤波器法电压积分型定子磁链观测器 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(9): 8 16.
 (LI Hong, LUO Yu, HAN Bangcheng, et al. Voltage integral model for stator flux estimator based on band-pass filter [J]. *Electric Machines and Control*, 2013, 17(9): 8 16.)
- [5] SPICHARTZ M, STEIMEL A, Stator-flux-oriented control with high torque dynamics in the whole speed range for electric vehicles [C] //Emobility-Electrical Power Train. New York: IEEE, 2010: 1 – 6.
- [6] LI J C, XU L Y, ZHANG Z. An adaptive sliding-mode observer for induction motor sensorless speed control [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(4): 1039 – 1046.
- [7] REHMAN H. Elimination of the stator resistance sensitivity and voltage sensor requirement problems for DFO control of an induction machine [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, 2005, 52(1): 263 – 269.

- [8] 刘艳红, 霍海娟, 楚冰, 等. 感应电机转矩跟踪无源控制及自适应观测器设计 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(8): 1021 1026.
 (LIU Yanhong, HUO Haijuan, CHU Bing, et al. Passivity-based torque tracking control and adaptive observer design of induction motors [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(8): 1021 1026.)
- [9] BARUT M, BOGOSYAN S, GOKASAN M. Speed-sensorless estimation for induction motors using extended Kalman filters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(1): 272 – 280.
- [10] HAQUE M E, ZHONG L, RAHMAN M F. A sensorless initial rotor position estimation scheme for a direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(6): 1376 – 1383.
- [11] SIMOES M G, BOSE B K. Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive [J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1995, 31(3): 620 – 629.
- [12] YOUNG K D, UTKIN V I, OZGUNER U. A control engineer's guide to sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1999, 7(3): 328 – 342.
- [13] FRIDMAN L, LEVANT A. Higher order sliding modes as a natural phenomenon in control theory [J]. *Robust Control via Variable Structure and Lyapunov Techniques*. Heidelberg, Berlin: Springer, 1996: 107 – 133.
- [14] LI J, XU L, ZHANG Z. An adaptive sliding-mode observer for induction motor sensorless speed control [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, 41(4): 1039 – 1046.
- [15] MITRONIKAS E D, SAFACAS A N. An improved sensorless vectorcontrol method for an induction motor drive [J]. *IEEE Transactions* on *Industrial Electronics*, 2005, 52(6): 1660 – 1668.
- [16] LEVANT A. Principles of 2-sliding mode design [J]. Automatica, 2007, 43(4): 576 – 586.

作者简介:

潘月斗 (1966-), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为交流电动机 智能控制理论研究及高速高精交流电动机驱动系统的计算机数字控制 系统设计, E-mail: pyd88165@163.com;

陈泽平 (1989–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电气传动及自动化, E-mail: chenzeping1016@126.com;

郭映维 (1990-), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为异步电机控制 理论及数字化设计, E-mail: gyw265113@163.com.