

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.016

# 基于自适应降阶观测器的感应电机无速度 传感器矢量控制研究\*

陈凌宇<sup>1,2</sup>, 康龙云<sup>1,2\*</sup>, 冯元彬<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;  
2. 华南理工大学 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对稳定的感应电机无速度传感器转子磁链观测器和转速自适应律难以设计的问题, 研究了基于转子反电动势矢量误差、位于观测转子磁链矢量定向的同步坐标系上的自适应降阶观测器。对降阶观测器和转速自适应律的结构进行了分析, 通过合理设置二者的收敛速度, 实现了转子磁链观测与转速估计的解耦, 简化了转速自适应律的形式和降阶观测器的稳定性分析; 同时结合小信号分析, 提出了降阶观测器的稳定增益整定方法; 在基于 DSP 的数字控制平台上搭建了感应电机无速度传感器矢量控制系统并进行了实验。研究表明: 自适应降阶观测器可以在较大的速度范围内稳定运行, 且具有良好的动态、稳态和抗扰性能。

**关键词:** 感应电机; 自适应降阶观测器; 稳定性分析

中图分类号: TH39; TM3

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1168-06

## Speed-sensorless vector control of induction machines based on adaptive reduced-order observer

CHEN Ling-yu<sup>1,2</sup>, KANG Long-yun<sup>1,2</sup>, FENG Yuan-bin<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aimed at reducing the difficulty of designing stable rotor flux observer and speed adaption law for speed-sensorless induction machine drive, adaptive reduced-order observer which was implemented in estimated rotor-flux-oriented synchronous coordinates and based on error of rotor back-electromotive force vector was studied. The structures of the reduced-order observer and the speed adaption law were analyzed, and the rates of convergence of them were set reasonably, which made rotor flux observation independent of estimated speed. The implementation of speed adaption law and the stability analysis of the reduced-order observer were also simplified. Small signal analysis was utilized to provide a method for tuning stable gains of the reduced-order observer. A speed-sensorless IM vector control system was established on the digital control platform with a DSP and experiments were carried out. The results indicate that the reduced-order observer is stable in a wide range of speed, and has good steady-state, dynamic and anti-disturbance performance.

**Key words:** induction machine (IM); adaptive reduced-order observer; stability analysis

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 广东省重大科技资助项目 (2014B010125002); 东莞市引进创新科研团队计划资助项目 (2014607119)

作者简介: 陈凌宇 (1992-), 男, 甘肃临泽人, 硕士研究生, 主要从事交流电机无位置传感器控制及其参数辨识方面的研究。E-mail: hunterzero104@163.com

通信联系人: 康龙云, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: lykang@scut.edu.cn

## 0 引言

感应电机高性能矢量控制调速系统在工业中应用广泛,而去除速度传感器有助于进一步提高调速系统的硬件成本和可靠性。基于感应电机基波动态数学模型的无速度传感器矢量控制通用性强、易于实现,一直是学者和工程师们的研究热点。感应电机无速度传感器矢量控制的核心是转速自适应观测器<sup>[1]</sup>,其中,观测定子电流矢量与转子磁链矢量的观测器称为全阶观测器,而仅观测转子磁链矢量的观测器称为降阶观测器<sup>[2]</sup>。

文献[3]最早提出自适应全阶观测器,其尝试用李雅普诺夫稳定性定理证明观测器全局稳定性,但仅通过试错法对转速 PI 自适应律进行参数整定;文献[4]指出自适应全阶观测器在低速发电状态下存在不稳定区域;文献[5]对几种典型转速自适应磁链观测器的全局稳定性进行了分析,并指出所有自适应磁链观测器在同步角速度为 0 时仅能实现临界稳定;文献[6]指出全阶观测器和降阶观测器在实现转速估计时是等效的;文献[7]提出了一种具有稳定观测器增益的降阶观测器,并同时实现了在线定子电阻辨识。

本文将主要研究基于转子反电动势矢量误差的转速自适应降阶观测器。

## 1 降阶观测器数学模型

感应电机转子反电动势矢量定义为:

$$\mathbf{e}^k = \frac{d\boldsymbol{\psi}_r^k}{dt} + j\omega_k \boldsymbol{\psi}_r^k \quad (1)$$

用转子反电动势矢量表示的电压模型和电流模型分别为:

$$\mathbf{e}_v^k = \frac{L_r}{L_m} \left( \mathbf{u}_s^k - r_s \mathbf{i}_s^k - \sigma L_s \frac{d\mathbf{i}_s^k}{dt} - j\omega_k \sigma L_s \mathbf{i}_s^k \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_c^k = \frac{L_m}{t_r} \mathbf{i}_s^k - \frac{1}{t_r} \boldsymbol{\psi}_r^k + j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r^k \quad (3)$$

式中:上标“k”一矢量位于以角速度 $\omega_k$ 旋转的直角坐标系上; $\mathbf{u}_s^k$ ,  $\mathbf{i}_s^k$ ,  $\boldsymbol{\psi}_r^k$ 一定子电压、定子电流和转子磁链矢量; $r_s$ ,  $t_r$ ,  $L_m$ ,  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $\sigma$ 一定子电阻、转子时间常数、互感、定子自感、转子自感和总漏磁系数; $\omega_r$ 一转子电角速度。

静止坐标系下的电压模型与 $\omega_r$ 和 $\omega_k$ 无关,直观上适用于无速度传感器转子磁链观测。但由于缺少反馈项,静止坐标系下的电压模型对直流偏移没有抑制作用,因此实际中无法应用。

基于转子反电动势矢量观测误差的降阶磁链观测器利用误差矢量为电压模型加入反馈,由下式表示:

$$\hat{\mathbf{e}}^k = \mathbf{e}_v^k + \mathbf{k}_\psi (\hat{\mathbf{e}}_c^k - \mathbf{e}_v^k) = \mathbf{e}_v^k - \mathbf{k}_\psi \delta \mathbf{e}^k \quad (4)$$

式中: $\mathbf{k}_\psi$ —降阶磁链观测器复增益,  $\mathbf{k}_\psi = k_d + jk_q$ 。

复增益的好处在于可以提供二自由度。同时,对应无速度传感器场合:

$$\hat{\mathbf{e}}_c^k = \frac{L_m}{t_r} \mathbf{i}_s^k - \frac{1}{t_r} \hat{\boldsymbol{\psi}}_r^k + j\hat{\omega}_r \hat{\boldsymbol{\psi}}_r^k \quad (5)$$

式中:顶标“^”一观测值。

容易发现,当 $\mathbf{k}_\psi = 1$ 时,观测器与电流模型等效;

当 $\mathbf{k}_\psi = 0$ 时,观测器与电压模型等效。

降阶磁链观测器适合在观测转子磁链矢量定向的同步坐标系(后文简称观测同步坐标系)上实现,原因有 3 点。首先,在观测同步坐标系下用电流模型计算转子反电动势时,分量为:

$$\hat{e}_{cd} = \frac{L_m}{t_r} i_{sd} - \frac{1}{t_r} \hat{\psi}_{rd} \quad (6)$$

$$\hat{e}_{cq} = \frac{L_m}{t_r} i_{sq} + \hat{\omega}_r \hat{\psi}_{rd} \quad (7)$$

$d$ 轴分量中不含转速估计量;其次,静止坐标系下,当同步角频率不为 0 时,定子电压、电流和转子磁链分量稳态时均为正弦量,而在观测同步坐标系下这些分量稳态时均为直流量,无论是稳定性分析还是参数整定,后者均更为方便;最后,多出的观测同步角速度 $\omega_s$ 这一变量为降阶磁链观测器提供了额外的自由度。

因此,降阶磁链观测器的分量为:

$$\frac{d\hat{\psi}_{rd}}{dt} = e_{vd} + k_d (\hat{e}_{cd} - e_{vd}) - k_q (\hat{e}_{cq} - e_{vq}) \quad (8)$$

$$\omega_s \hat{\psi}_{rd} = e_{vq} + k_d (\hat{e}_{cq} - e_{vq}) + k_q (\hat{e}_{cd} - e_{vd}) \quad (9)$$

由于 $\hat{e}_{cq}$ 与转速估计值有关,转速估计值也需要取代转速测量值用于闭环反馈,因此需要设计转速自适应律。矢量的点积与叉积模运算与参考坐标系的选取无关,常被用于为感应电机参数估计提供信息<sup>[8-9]</sup>,因此以如下转速自适应律为基础进行分析:

$$\frac{d\hat{\omega}_r}{dt} = k_{od} (\hat{\boldsymbol{\psi}}_r \cdot \delta \mathbf{e}) + k_{oq} \hat{\psi}_{rd} (e_{vq} - \hat{e}_{cq}) \quad (10)$$

式中: $k_{od}$ ,  $k_{oq}$ —转速自适应律增益。

转速自适应律自身必须是稳定的。为了满足稳定条件,本研究将式(10)的右侧展开并以观测转速为自变量求偏导数,得:

$$\frac{\partial}{\partial \hat{\omega}_r} \left\{ k_{od} \hat{\psi}_{rd} (e_{vd} - \hat{e}_{cd}) + k_{oq} \hat{\psi}_{rd} (e_{vq} - \hat{e}_{cq}) \right\} =$$

$$k_{\omega d} \frac{\partial \hat{\psi}_{rd}}{\partial \hat{\omega}_r} (e_{vd} - \hat{e}_{cd}) + k_{\omega q} \left\{ \frac{\partial \hat{\psi}_{rd}}{\partial \hat{\omega}_r} (e_{vq} - \hat{e}_{cq}) + \frac{\partial (e_{vq} - \hat{e}_{cq})}{\partial \hat{\omega}_r} \hat{\psi}_{rd} \right\} \quad (11)$$

为了使估计转速在降阶磁链观测器中能被视为参数,  $\hat{\omega}_r$  的收敛速度需要远大于  $\hat{\psi}_{rd}$  的收敛速度。若该假设满足, 则可认为:

$$\frac{\partial \hat{\psi}_{rd}}{\partial \hat{\omega}_r} = 0 \quad (12)$$

式 (11) 因此变为:

$$\frac{\partial}{\partial \hat{\omega}_r} \left\{ k_{\omega q} \hat{\psi}_{rd} (e_{vq} - \hat{e}_{cq}) \right\} = -k_{\omega q} \hat{\psi}_{rd} \frac{\partial \hat{e}_{cq}}{\partial \hat{\omega}_r} = -k_{\omega q} \hat{\psi}_{rd}^2 \quad (13)$$

因此转速自适应律可写为:

$$\frac{d\hat{\omega}_r}{dt} + k_{\omega q} \hat{\psi}_{rd}^2 \hat{\omega}_r = r, \quad \frac{\partial r}{\partial \hat{\omega}_r} = 0 \quad (14)$$

只要  $k_{\omega q} > 0$ , 转速自适应律的极点就在复平面左半平面, 因而稳定。而为了满足上述收敛速度的条件,  $k_{\omega q}$  需要尽量大, 以使极点远离虚轴。

当转速自适应律满足上述条件后, 在分析降阶磁链观测器的动态响应时, 就可以认为  $\hat{\omega}_r$  始终收敛, 即:

$$\frac{d\hat{\omega}_r}{dt} = 0 \quad (15)$$

式 (10) 此时变为:

$$k_{\omega d} (e_{vd} - \hat{e}_{cd}) + k_{\omega q} (e_{vq} - \hat{e}_{cq}) = 0 \quad (16)$$

这样一来, 降阶磁链观测器中的  $q$  轴转子反电动势可被消去, 因此实现了与  $\hat{\omega}_r$  的解耦。这大大简化了观测器的稳定性分析和增益整定。

## 2 降阶观测器稳定性分析

降阶磁链观测器在各运行点的局部稳定性可以通过对误差函数局部线性化进行小信号分析。关于全局稳定性, 感应电机无速度传感器转速自适应磁链观测器无法证明全局渐进稳定, 其在  $\omega_s = 0$  时仅能实现临界稳定。

与  $\hat{\omega}_r$  解耦的磁链观测方程为:

$$\frac{d\hat{\psi}_{rd}}{dt} = e_{vd} + (k_d - bk_q)(\hat{e}_{cd} - e_{vd}) \quad (17)$$

$$\omega_s \hat{\psi}_{rd} = e_{vq} + (k_q + bk_d)(\hat{e}_{cd} - e_{vd}) \quad (18)$$

式中:  $b = -k_{\omega d} / k_{\omega q}$ 。

将式 (3), 即实际电流模型转换至观测同步坐标系下, 可得分量方程:

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_s \psi_{rq} = \frac{L_m}{t_r} i_{sd} - \frac{1}{t_r} \psi_{rd} - \omega_r \psi_{rq} = e_{cd} \quad (19)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_s \psi_{rd} = \frac{L_m}{t_r} i_{sq} - \frac{1}{t_r} \psi_{rq} + \omega_r \psi_{rd} = e_{cq} \quad (20)$$

考虑稳态运行点上  $\psi_r = \hat{\psi}_r$ ,  $\omega_r = \hat{\omega}_r$  和实际转子反电动势等效关系  $e_v = e_c$ , 以式 (19) 和式 (20) 分别减去式 (17) 和式 (18), 并构造局部线性化小信号误差状态方程:

$$\frac{d(\psi_{rd} - \hat{\psi}_{rd})}{dt} = \frac{d\delta\psi_{rd}}{dt} = \omega_s \delta\psi_{rq} - (k_d - bk_q) \left( \frac{1}{t_r} \delta\psi_{rd} + \omega_r \delta\psi_{rq} \right) \quad (21)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = \frac{d\delta\psi_{rq}}{dt} = -\omega_s \delta\psi_{rd} - (k_q + bk_d) \left( \frac{1}{t_r} \delta\psi_{rd} + \omega_r \delta\psi_{rq} \right) \quad (22)$$

其中, 状态向量为  $[\delta\psi_{rd} \ \delta\psi_{rq}]^T$ , 则状态矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_d - bk_q}{t_r} & \omega_s - (k_d - bk_q)\omega_r \\ -\frac{k_q + bk_d}{t_r} - \omega_s & -(k_q + bk_d)\omega_r \end{bmatrix} \quad (23)$$

对应特征方程为:

$$|sI - A| = s^2 + \left( \frac{k_{d1}}{t_r} + k_{q1}\omega_r \right) s + \omega_s \left( -k_{d1}\omega_r + \frac{k_{q1}}{t_r} + \omega_s \right) = 0 \quad (24)$$

其中,  $k_{d1} = k_d - bk_q$ ,  $k_{q1} = k_q + bk_d$ 。根据劳斯判据, 系统稳定需要:

$$a_1 = \frac{k_{d1}}{t_r} + k_{q1}\omega_r > 0$$

$$a_0 = \omega_s \left( -k_{d1}\omega_r + \frac{k_{q1}}{t_r} + \omega_s \right) > 0 \quad (25)$$

然而在  $\omega_s = 0$  时,  $a_0$  显然等于 0, 这与前述关于全局稳定性的结论相符, 即此时系统为临界稳定。考虑  $\omega_s \neq 0$  时使式 (25) 恒成立的条件。由于:

$$k_{d1} = a_1 t_r - k_{q1} \omega_r t_r \quad (26)$$

将式 (26) 代入  $a_0$  表达式, 得:

$$a_0 = \omega_s \left\{ -\left( a_1 t_r - k_{q1} \omega_r t_r \right) \omega_r + \frac{k_{q1}}{t_r} + \omega_s \right\} \quad (27)$$

为了使  $\omega_s \neq 0$  时  $a_0 > 0$  恒成立, 令:

$$-\left( a_1 t_r - k_{q1} \omega_r t_r \right) \omega_r + \frac{k_{q1}}{t_r} + \omega_s = a_2 \omega_s \quad (28)$$

联立式 (26) 与式 (28), 解得:

$$k_{d1} = \frac{a_1 t_r - (a_2 - 1) \omega_s \omega_r t_r^2}{1 + (\omega_r t_r)^2}, k_{q1} = \frac{(a_2 - 1) \omega_s t_r + a_1 t_r^2 \omega_r}{1 + (\omega_r t_r)^2} \quad (29)$$

因此, 在确定的运行点上, 每一组  $a_1$  和  $a_2$  都唯一对应一组  $k_{d1}$  和  $k_{q1}$ 。需要注意的是,  $k_{d1}$  和  $k_{q1}$  因此可能

是  $\omega_r$  和  $\omega_s$  的函数, 而由于  $\omega_r$  不可测量, 需要用  $\hat{\omega}_r$  代替。鉴于局部线性化的稳态假设, 这样的处理并不会改变线性化状态方程的形式。

### 3 降阶观测器的实现

由于本文降阶磁链观测器在观测同步坐标系上实现, 因此定子电流分量需要进行坐标变换(定子电压不进行测量, 而是利用输入空间矢量调制(SVM)模块的参考电压), 变换角:

$$\hat{\theta} = \int_0^t \omega_s d\tau \quad (30)$$

是  $\omega_s$  的函数;

式(18)中,  $e_{vq}$  和  $e_{vd}$  显式地与  $\omega_s$  相关, 增益  $k_{q1}$  由式(29)可知也可能与  $\omega_s$  相关。观测  $\omega_s$  的式(18)因此形成了代数环, 显式解出  $\omega_s$  的表达式十分困难。若  $b=0$ , 则式(16)变为:

$$e_{vq} = \hat{e}_{cq} = \frac{L_m}{t_r} i_{sq} + \hat{\omega}_r \hat{\psi}_{rd} \quad (31)$$

可解得估计转速为:

$$\hat{\omega}_r = \frac{e_{vq}}{\hat{\psi}_{rd}} - \frac{L_m i_{sq}}{t_r \hat{\psi}_{rd}}, \quad \hat{\omega}_{sl} = \frac{L_m i_{sq}}{\hat{\psi}_{rd} t_r} \quad (32)$$

式中:  $\hat{\omega}_{sl}$ —观测转差角速度。

由于  $e_{vq}/\hat{\psi}_{rd}$  为式(18)在收敛后  $\omega_s$  的稳态值, 式(32)说明, 在观测同步坐标系下, 转速自适应律若满足  $\hat{\omega}_r$  的收敛速度远大于  $\hat{\psi}_{rd}$  的条件, 则与转差方程:

$$\omega_s = \hat{\omega}_r + \hat{\omega}_{sl} \quad (33)$$

等效。综合上述分析, 实际转速自适应律为:

$$\frac{d\hat{\omega}_r}{dt} = \omega_{b1} \left\{ \frac{e_{vq} + k_{q1}(\hat{e}_{cd} - e_{vd})}{\hat{\psi}_{rd}} - \hat{\omega}_r - \hat{\omega}_{sl} \right\} \quad (34)$$

式(34)是将式(18)和式(33)嵌入低通滤波器中得到的, 低通滤波器解决了前述代数环问题, 同时间接对  $\omega_s$  的观测式进行了滤波。 $\omega_{b1}$  为转速自适应律带宽, 由于带宽可认为近似与收敛速度成正比<sup>[10]</sup>, 因此要求:

$$\omega_{b2} \ll \omega_{b1} < \omega_{b3} \quad (35)$$

式中:  $\omega_{b2}$ ,  $\omega_{b3}$ —降阶磁链观测器和定子电流控制器的带宽。

由于实际转子磁链的收敛速度由转子时间常数  $t_r$  决定, 对应带宽为  $1/t_r$ , 而由式(17)易得:

$$\omega_{b2} = \frac{k_{d1}}{t_r} \quad (36)$$

本文选择:

$$a_1 = m \frac{1 + (\hat{\omega}_r t_r)^2}{t_r}, \quad a_2 = 1 \quad (37)$$

则:

$$k_{d1} = m, \quad k_{q1} = m t_r \hat{\omega}_r \quad (38)$$

对降阶观测器增益的整定最终简化为了对正参数  $m$  的整定。

### 4 实验研究

为了验证所述方法的正确性, 搭建了感应电机无速度传感器间接磁链定向矢量控制系统, 原理图如图1所示。

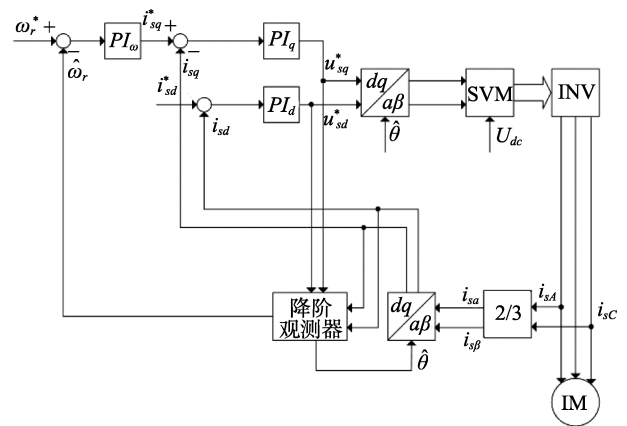


图1 感应电机无速度传感器矢量控制系统原理图

其中, SVM 表示空间矢量调制, INV 表示逆变器, IM 表示感应电机。感应电机参数如表1所示。

表1 实验用感应电机参数

| 参数                                          | 数值    |
|---------------------------------------------|-------|
| 额定功率 $P/\text{kW}$                          | 1.5   |
| 额定转速 $n_N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 1 440 |
| 定子电阻 $r_s/\Omega$                           | 3.60  |
| 转子时间常数 $t_r/\text{s}$                       | 0.120 |
| 互感 $L_m/\text{H}$                           | 0.273 |
| 转子自感 $L_r/\text{H}$                         | 0.300 |
| 极对数 $p$                                     | 2     |

逆变器主电路拓扑为三相半桥结构; 控制系统基于 TI 公司的浮点型数字信号处理器 TMS320C6713, 采样频率和开关频率均设置为 10 kHz。

实验结果如图(2~3)所示。

图中时间以  $t$  表示, 以  $\text{r/min}$  为单位的实际转速以  $n$  表示, 估计转速以  $n_e$  表示。图2考察了电机在中高速下的性能。电机首先带 5 Nm 负载以 200  $\text{r/min}$  运行, 然后依次卸去负载、加速至 800  $\text{r/min}$  并减速至 200  $\text{r/min}$ 。图3考察了电机的低速性能, 电机首先以 50  $\text{r/min}$  带 5 Nm 负载运行, 然后卸去负载。两组实验中, 无论是

参考转速变化还是负载扰动,估计转速均能快速准确地跟踪实际转速,观测转子磁链幅值波动较小, $q$ 轴定子电流响应迅速。稳态时转速、转子磁链幅值和 $q$ 轴定子

电流的轻微纹波由相电流采样直流偏移<sup>[11]</sup>和逆变器非线性<sup>[12]</sup>引起;带载运行稳态时估计转速与实际转速之间的轻微静差则是由转子时间常数不准确造成。

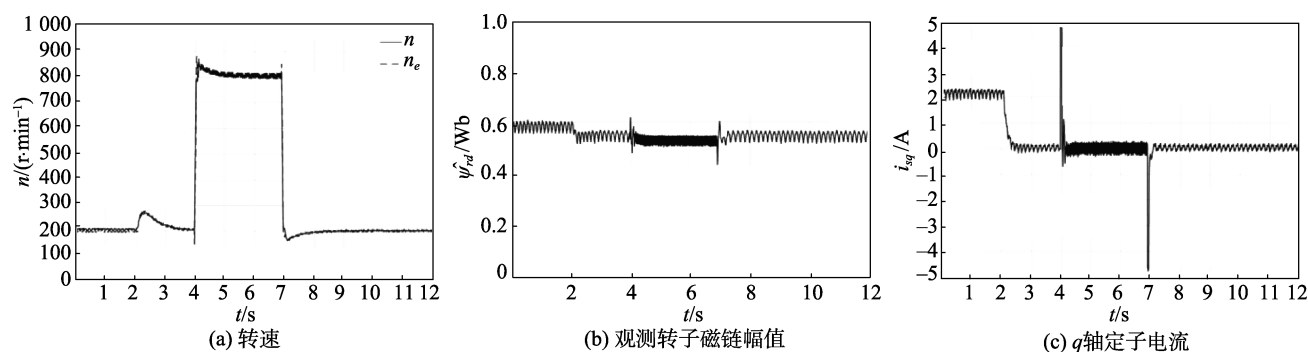


图 2 中高速实验结果

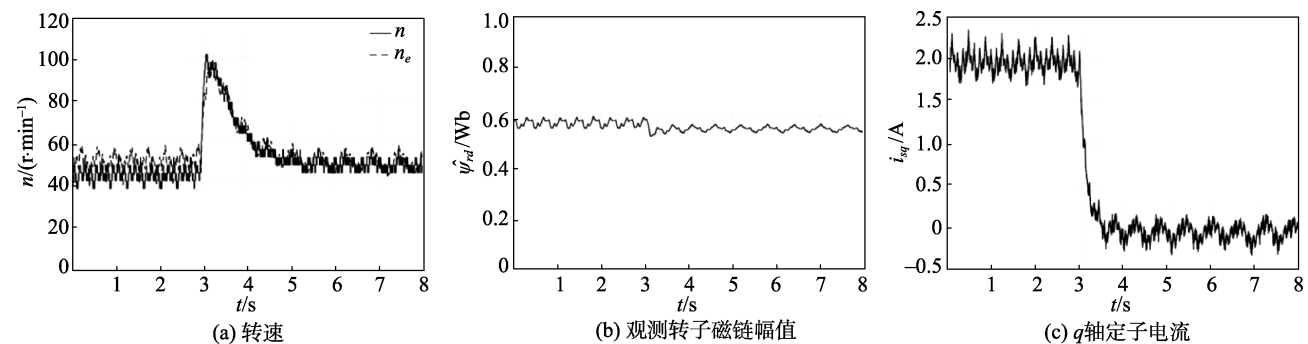


图 3 低速实验结果

## 5 结束语

本文研究了一种转子磁链观测与转速估计解耦、稳定性分析简单且可在所有运行点下保持局部稳定的感应电机自适应降阶观测器。其中利用复增益和观测同步角速度提供多自由度的方法以及观测器增益整定方法对其他类型的感应电机自适应观测器也有一定价值。实验结果验证了采用本文提出的自适应降阶观测器的感应电机无速度传感器矢量控制系统在较大速度范围内的稳定性以及良好的动态、稳态和抗扰性能。

需要注意的是,本文的所有分析均建立在感应电机参数准确的理想情况下,然而实际上参数是不可能完全准确的,部分实验结果也体现出了参数不准确对系统性能的影响。因此,从理论上考虑参数不准确对降阶观测器的影响,降低降阶观测器对参数的敏感性是下一步的研究方向。

## 参考文献(References):

- [1] HARNEFORS L, HINKKANEN M. Stabilization methods for sensorless induction motor drives—a survey[J]. **IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics**, 2014, 2(2): 132-142.
- [2] VERGHESE G C, SANDERS S R. Observers for flux estimation in induction machines[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1988, 35(1): 85-94.
- [3] KUBOTA H, MATSUSE K, NAKANO T. DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1993, 29(2): 344-348.
- [4] KUBOTA H, SATO I, TAMURA Y, et al. Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications Ia**, 2002, 54(8): 679-683.

(下转第 1185 页)

### 本文引用格式:

陈凌宇, 康龙云, 冯元彬. 基于自适应降阶观测器的感应电机无速度传感器矢量控制研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1168-1172, 1185.  
CHEN Ling-yu, KANG Long-yun, FENG Yuan-bin. Speed-sensorless vector control of induction machines based on adaptive reduced-order observer[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(10): 1168-1172, 1185.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>