

基于重置算法的感应电机转速自适应观测器

潘月斗, 郭映维, 贺 靛

(北京科技大学 自动化学院, 北京 100083)

摘要: 常规并联双模型转速自适应观测器在电机启动、加速或突加负载时存在观测转速滞后性大、精度低的问题, 使得感应电机无速度传感器控制系统的调速性能变差. 针对上述问题, 提出一种重置自适应转速观测器对转子磁链进行观测, 同时通过自适应机构得到电机转速, 并利用 Lyapunov 稳定性定理证明了系统的稳定性. 仿真和实验结果表明, 所提出的重置自适应观测器的观测误差小、稳定性好, 改善了在电机启动、加速或突加负载时的转速观测性能.

关键词: 无传感器技术; 重置算法; 自适应观测器; 并联双模型

中图分类号: TP301

文献标志码: A

Rotor flux and speed adaptive observer for induction motor based on a reset law

PAN Yue-dou, GUO Ying-wei, HE Jing

(School of Automation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Correspondent: PAN Yue-dou, E-mail: ydpan@ustb.edu.cn)

Abstract: The conventional parallel dual model speed adaptive observer has the problem of large delay and low precision when the motor gets started or a sudden load applied. The problems produce a bad effect on the speed control performance of the speed sensorless control system of the induction motor. To deal with the above problems, a reset adaptive observer is proposed to observe the rotor flux, then the rotor speed is obtained from an adaptive mechanism at the same time. And the stability of the system is proved by using the Lyapunov stability theorem. The simulation and experiment results show that, the proposed observer has high precision and good stability, and improves the speed observation performance, especially when the motor gets started or a sudden load applied.

Keywords: sensorless technology; reset law; adaptive observer; parallel dual model

0 引言

在高性能的感应电动机控制系统中, 转速闭环反馈部分通常采用光电码盘等速度传感器来检测并反馈转速信号. 但是, 使用速度传感器存在一些不足: 传感器的使用维护成本都比较高; 传感器的安装精度会大大影响测量结果的精度; 传感器的工作环境(温度、灰尘等)也会对其检测精度产生影响; 传感器的安装会破坏感应电机固有的坚固性和简单性. 因此, 无传感器控制技术有着非常好的应用前景^[1].

无速度传感器技术的核心就是对转速进行准确估计, 并将估计值提供给转速控制器. 目前主要的方法有直接计算法、基于数学模型的开环估计法、模型参考自适应法(MRAS)、自适应观测器法及基于扩展卡尔曼滤波算法(EKF)等. 其中, 自适应观测器对参

数偏差、系统噪声有很好的稳定性, 对转速估计的鲁棒性较高^[2-6], 因此在矢量控制和直接转矩控制中得到广泛应用. 文献[2-4]分别提出了使用不同自适应律的全阶观测器, 达到了较高的观测精度, 但是由于系统阶数较高, DSP运算时间较长, 影响了观测器的实时性能; 文献[5]提出了将电压模型和电流模型结合起来的双模型观测器, 其结构较为简单, 且能同时观测电机的转速和磁链; 由于并联双模型观测器存在积分初始误差的问题, 文献[6]提出了一种电流模型在前, 逆电压模型在后的串联双模型观测器, 并取得了不错的效果. 本文在并联双模型观测器中加入重置算法, 以实现积分误差的快速消除及观测转速的迅速收敛.

重置的概念最先由Clegg^[7]于1958年提出, 重置

收稿日期: 2014-08-20; 修回日期: 2015-01-19.

基金项目: 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).

作者简介: 潘月斗(1966—), 男, 副教授, 博士后, 从事交流电动机智能控制及计算机数字控制系统设计等研究; 郭映维(1990—), 男, 硕士生, 从事交流感应电动机控制理论及数字化设计的研究.

单元由一个积分环节及其相应的重置算法组成. 自适应观测器在估计过程中不能同时减少调节时间和超调量, 因此近年来重置自适应观测器被提出, 并得到了迅速的发展和广泛的应用.

本文首先基于感应电机数学模型给出并联双模型转速自适应观测器的设计, 然后将重置算法应用于转子磁链观测的电流模型中, 得到感应电机转速重置自适应观测器 (ReO), 并利用 Lyapunov 定理证明了系统的稳定性. 仿真和实验结果表明, 所提出的系统能够有效减小转子磁链观测过程中因积分初始误差带来的超调过大的问题, 并使转子磁链的观测值快速收敛, 进而减小观测转速的滞后时间, 提高观测精度.

1 感应电机的数学模型^[8]

在两相静止坐标系 α - β 下, 忽略铁损影响, 三相感应电动机电压矩阵方程式为

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{sd} & 0 \\ 0 & R_s + L_{sd}p \\ L_{md}p & L_{md}\omega_r \\ -L_{md}\omega_r & L_{md}p \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} R_s + L_{sd} & 0 \\ 0 & L_{md}p \\ R_r + L_{rd}p & L_{rd}\omega_r \\ -L_{rd}\omega_r & R_r + L_{rd}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: $u_{s\alpha}$ 和 $u_{s\beta}$ 为定子电压, R_s 和 R_r 分别为定子电阻和转子电阻, ω_r 为转子速度, $i_{s\alpha}$ 和 $i_{s\beta}$ 为定子电流, $i_{r\alpha}$ 和 $i_{r\beta}$ 为转子电流, L_{sd} 和 L_{rd} 分别为定子和转子电感, L_{md} 为互感, p 表示微分算子 $\left(\frac{d}{dt}\right)$.

转子磁链在 α - β 轴上的分量为

$$\begin{aligned} \psi_{r\alpha} &= L_{rd}i_{r\alpha} + L_{md}i_{s\alpha}, \\ \psi_{r\beta} &= L_{rd}i_{r\beta} + L_{md}i_{s\beta}. \end{aligned}$$

由以上二式解出

$$\begin{cases} i_{r\alpha} = \frac{1}{L_{rd}}(\psi_{r\alpha} - L_{md}i_{s\alpha}), \\ i_{r\beta} = \frac{1}{L_{rd}}(\psi_{r\beta} - L_{md}i_{s\beta}). \end{cases} \quad (2)$$

2 并联双模型转速自适应观测器

2.1 基于电压模型的转子磁链推算

根据式(1)的前两行及式(2)可以消去 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$, 整理后可以得到转子磁链的状态方程

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{r\alpha}^* = \frac{L_{rd}}{L_{md}p} [u_{s\alpha} - (R_s + \sigma L_{sd}p)i_{s\alpha}], \\ \dot{\psi}_{r\beta}^* = \frac{L_{rd}}{L_{md}p} [u_{s\beta} - (R_s + \sigma L_{sd}p)i_{s\beta}]. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\sigma = 1 - L_{md}/L_{sd}L_{rd};$$

为了与后文的电流模型推算的转子磁链 $\hat{\psi}_{r\alpha}$ 、

$\hat{\psi}_{r\beta}$ 区分开, 这里用 $\psi_{r\alpha}^*$ 、 $\psi_{r\beta}^*$ 表示电压模型推算的转子磁链.

2.2 基于电流模型的转子磁链推算

由式(1)的后两行及式(2)可以得到带有转速参数的转子磁链状态方程

$$\begin{cases} \dot{\psi}_{r\alpha} = \frac{1}{T_r p + 1} (L_{md}i_{s\alpha} - \omega_r T_r \hat{\psi}_{r\beta}), \\ \dot{\psi}_{r\beta} = \frac{1}{T_r p + 1} (L_{md}i_{s\beta} + \omega_r T_r \hat{\psi}_{r\alpha}). \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$T_r = L_{rd}/R_r.$$

2.3 转速自适应观测器设计

对式(4)进行整理可得出如下基于电流模型的转子磁链状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\psi}}_{r\alpha} \\ \dot{\hat{\psi}}_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & -\hat{\omega}_r \\ \hat{\omega}_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\psi}_{r\alpha} \\ \hat{\psi}_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{L_{md}}{T_r} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

设电压模型输出的转子磁链为期望值, 电流模型输出的转子磁链为观测值, 则可取其误差为

$$e = \hat{\psi}_{r\alpha} \psi_{r\beta}^* - \hat{\psi}_{r\beta} \psi_{r\alpha}^*.$$

如果观测转速 $\hat{\omega}_r$ 收敛于实际转速 ω_r , 则有 $e = 0$, 此时观测器输出的转子磁链等于转子磁链期望值. 为了提高转速估计的动态性能, 采用 PI 控制器, 则转速估计自适应律为

$$\dot{\hat{\omega}} = \left(K_p + K_i \frac{1}{p} \right) e. \quad (6)$$

上述并联双模型转子转速观测器的构成如图 1 所示. 当期望值与观测值之间存在误差, 即 $e \neq 0$ 时, $\hat{\omega}_r$ 将在 PI 控制器作用下连续变化, 以自适应收敛于电机的真实转速 ω_r .

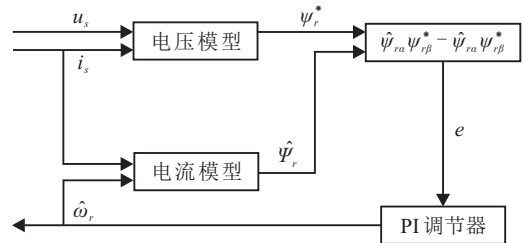


图 1 并联双模型转速自适应观测器构成图

从图 1 可以看出, 在电流模型对转子磁链进行观测时, 由于积分初始误差以及系统的惯性性质使得转子磁链观测值 $\hat{\psi}_r = [\hat{\psi}_{r\alpha} \ \hat{\psi}_{r\beta}]^T$ 往往会有较大的超调和振荡, 这样减缓了磁链的收敛速度, 并造成了观测转速滞后性大、精度不高的问题, 特别是在电机启动、加速或突加负载时, 这个问题尤为明显.

3 感应电机转速重置自适应观测器设计

为了解决并联双模型转速自适应观测器启动、加速时转速观测误差大的问题, 本文将重置算法应用于转子磁链观测的电流模型中, 得到感应电机转速重置自适应观测器. 下面给出重置自适应观测器的设计及其稳定性的理论证明.

3.1 感应电机转速重置自适应观测器设计

根据式(5), 基于电流模型的转子磁链状态方程可以记为

$$\begin{cases} \dot{\psi}_r = A\psi_r + Bi_s, \\ y = C\psi_r. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix},$$

$$B = \frac{L_{md}}{T_r} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

为了便于重置自适应观测器设计, 这里取 $C = [1 \ 0]$, 即系统输出为 $\psi_{r\alpha}$.

本文设计的转速重置自适应观测器模型为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\psi}}_r = A\hat{\psi}_r + Bi_s + K_i\varsigma + K_p\tilde{y}, \\ \tilde{y} = C\hat{\psi}_r. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\hat{\psi}_r$ 是观测器的转子磁链状态估计值; $\tilde{y} = C\hat{\psi}_r = C(\psi_r^* - \hat{\psi}_r)$ 是转子磁链输出误差估计值; ς 是积分重置项, 其取值需满足如下重置算法:

$$\begin{cases} \dot{\varsigma} = A_s\varsigma + B_s\tilde{y}, \tilde{y} \cdot \varsigma > 0; \\ \varsigma^+ = A_r\varsigma, \tilde{y} \cdot \varsigma \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

$A_s \in \mathbf{R}, B_s \in \mathbf{R}; A_r$ 是重置参数, 这里取为 0.

上述观测中重置单元 Reset 可以表示为

$$\text{Reset} = K_i\varsigma + K_p\tilde{y}. \quad (10)$$

重置自适应观测器可视为一个带渐变集 \mathcal{F} 和重置集 \mathcal{J} 的混合系统. 渐变集 \mathcal{F} 和重置集 \mathcal{J} 分别定义如下:

$$\mathcal{F} = \left\{ (\tilde{\psi}_r, \varsigma) : \begin{bmatrix} \tilde{\psi}_r \\ \varsigma \end{bmatrix}^T M \begin{bmatrix} \tilde{\psi}_r \\ \varsigma \end{bmatrix} > 0 \right\}, \quad (11)$$

$$\mathcal{J} = \left\{ (\tilde{\psi}_r, \varsigma) : \begin{bmatrix} \tilde{\psi}_r \\ \varsigma \end{bmatrix}^T M \begin{bmatrix} \tilde{\psi}_r \\ \varsigma \end{bmatrix} \leq 0 \right\}.$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} 0 & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix}.$$

从式中可以看出, 根据重置算法, 只要 $(\tilde{y}, \varsigma) \in \mathcal{F}$, 观测器就运行在比例积分状态; 而当 (\tilde{y}, ς) 满足重置条件, 即 $(\tilde{y}, \varsigma) \in \mathcal{J}$ 时, 观测器的积分环节将会被置零.

由重置自适应观测器的重置算法可知, 若 \tilde{y} 与 ς 同号, 即表明误差估计的正负与积分重置项的变化方向相同, 则此时观测器 PI 环节运行于渐变集 \mathcal{F} , 以保证观测器的响应速度; 若 \tilde{y} 和 ς 异号或有一者为零, 即表明误差估计的正负与积分重置项的变化方向相反, 则此时观测器运行于重置集 \mathcal{J} , 其积分项将被置零, 以减小观测器输出的超调和振荡.

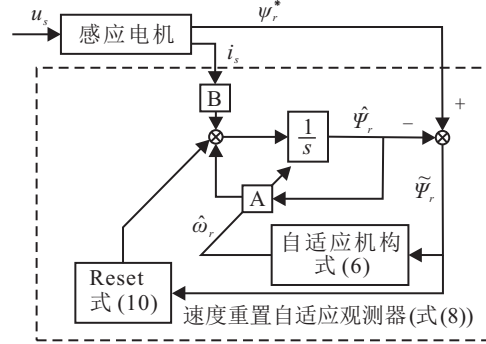


图2 基于重置算法的感应电机转速自适应观测器结构

图2展示了感应电机转速重置自适应观测器的结构, 图中的自适应机构已由式(6)给出, 其输出为 $\hat{\omega}_r$. 从图2可以看出, 通过将转子磁链输出误差 $\tilde{\psi}_r$ 反馈至观测器输入端, 经过重置单元利用重置算法对转子磁链进行调节, 以减小转子磁链观测值的超调和振荡. Reset 能够根据预先设置的算法对积分重置项进行重置, 及时对转子磁链观测值进行修正, 使其快速收敛.

3.2 转速重置自适应观测器稳定性证明

针对式(8)和(9)所描述的转速重置自适应观测器, 运用二阶 Lyapunov 函数给出其稳定性的充分条件.

用式(7)减去式(8)可以得到系统动态误差 $\tilde{\psi}_r = \psi_r - \hat{\psi}_r$, 可将其定义为

$$\dot{\tilde{\psi}}_r = (A - K_p C)\tilde{\psi}_r - K_i\varsigma, \quad (12)$$

根据式(12)和(9)可以得到如下动态方程:

$$\begin{cases} \dot{\eta} = A_\eta\eta, \eta \in \mathcal{F}; \\ \eta^+ = A_R\eta, \eta \in \mathcal{J}; \\ \dot{\xi} = C_\eta\eta. \end{cases} \quad (13)$$

其中

$$\eta = [\tilde{\psi}_r \ \varsigma]^T,$$

$$A_\eta = \begin{bmatrix} A - K_p C & -K_i \\ B_s C & A_s \end{bmatrix},$$

$$A_R = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & A_r \end{bmatrix},$$

$$C_\eta = [C \ 0].$$

假设式(8)和(9)中所描述的转速重置自适应观

测器服从如下两个条件:

1) $\eta \in \mathcal{J} \Rightarrow A_R \eta \in \mathcal{F}$. 这保证了在每次重置之后, 系统能进入渐变集 \mathcal{F} 继续运行.

2) 重置自适应观测器的重置时间为 t_i , 则 $t_{i+1} - t_i \geq \rho, \exists \rho > 0, \forall i \in \mathbf{N}$.

这是观测器使用时间正则化来避免芝诺解^[9], 它保证了连续两次重置的时间间隔不小于一个正常数 ρ , 这个正常数称为停延时间.

以上两个假设条件在当前重置系统构造的相关文献中被广泛采用^[10-12]. 在最后的仿真和实验中, 本文进行了相应的设置, 以使得观测器满足以上条件.

对式(13)中所描述的系统动态方程, 取二阶李亚普诺夫函数如下^[13-14]:

$$V(\eta) = \eta^T P \eta, \quad (14)$$

其中实对称阵 $P = P^T > 0$.

由 Lyapunov 稳定性定理, 为了使系统稳定须有

$$\begin{cases} \dot{V}(\eta) < 0, \eta \in \mathcal{F}; \\ V(\eta^+) \leq V(\eta), \eta \in \mathcal{J}. \end{cases} \quad (15)$$

因为 $\mathcal{F} = \{\eta : \eta^T M \eta > 0\}$, 所以式(15)中的第1项等价于如下命题:

$$\exists \tau_F \geq 0 \Rightarrow \dot{V}(\eta) < -\eta^T \tau_F M \eta. \quad (16)$$

对式(14)求导可得

$$\dot{V}(\eta) = -\dot{\eta}^T P \eta + \eta^T P \dot{\eta} = \eta^T (A_\eta^T P + P A_\eta) \eta. \quad (17)$$

联立式(16)和(17)得

$$\eta^T (A_\eta^T P + P A_\eta) \eta + \eta^T \tau_F M \eta < 0. \quad (18)$$

因为 A_η 和 M 是确定的, 式(17)可以视为一个以 $P > 0, \tau_F \geq 0$ 为变量的线性矩阵不等式

$$A_\eta^T P + P A_\eta + \tau_F M < 0. \quad (19)$$

这说明, 只要满足式(19), 式(15)中的第1项必然成立.

同样的, 因为 $\mathcal{J} = \{\eta : \eta^T M \eta \leq 0\}$, 所以式(15)中的第2项等价于如下命题:

$$\exists \tau_J \geq 0 \Rightarrow V(\eta^+) \leq V(\eta) + \eta^T \tau_J M \eta. \quad (20)$$

上式可以改写为

$$\eta^T A_R^T P A_R \eta - \eta^T P \eta - \eta^T \tau_J M \eta \leq 0. \quad (21)$$

式(20)等价于一个以 $P > 0, \tau_J \geq 0$ 为变量的线性矩阵不等式

$$A_R^T P A_R - P - \tau_J M \leq 0. \quad (22)$$

这说明, 只要满足式(22), 式(15)中的第2项必然成立.

至此, 可以得到如下结论:

若存在实对称阵 $P = P^T > 0$, 实数 $\tau_F \geq 0$ 及 τ_J

≥ 0 使得

$$\begin{cases} A_\eta^T P + P A_\eta + \tau_F M < 0, \\ A_R^T P A_R - P - \tau_J M \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

恒成立, 则式(13)中所描述的动态系统是 Lyapunov 意义下渐近稳定的.

为了证明本文所提出的重置自适应观测器的稳定性, 下面将验证其是否符合式(23)中的条件.

特别地, 令 $P = I, \tau_F = 0, \tau_J = 0$, 则式(23)可以写为

$$\begin{cases} A_\eta^T + A_\eta < 0, \\ A_R^T A_R - I \leq 0. \end{cases} \quad (24)$$

其中

$$A_\eta^T + A_\eta = \begin{bmatrix} A + A^T - K_p C - C^T K_p^T & B_c C^T - K_i \\ B_c C - K_i^T & 2A_c \end{bmatrix}.$$

可见, 式(24)的第1项是很容易满足的, 只需对控制器选取适当的参数即可. 而对于式(24)的第2项

$$A_R^T A_R - I = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & 0 & \\ & & -1 \end{bmatrix}$$

显然也是满足条件的.

综上所述, 本文所设计的转速 ReO 观测器是 Lyapunov 意义下渐近稳定的.

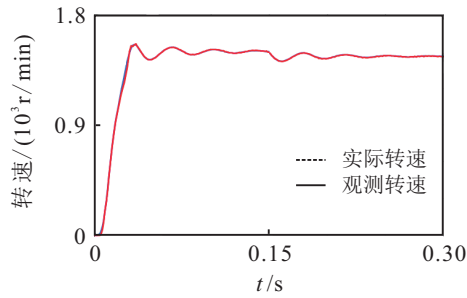
4 仿真与实验研究

设计采用 Matlab/Simulink 对所提出的感应电机转速重置自适应观测器进行仿真, 以验证其有效性和准确性. 感应电机主要参数为: 额定电压 $U_N = 380$ V, 额定频率 $f_N = 50$ Hz, 额定转速 $n_N = 1440$ r/min, 定子电阻 $R_s = 1.405$ Ω , 转子电阻 $R_r = 1.395$ Ω , 定子自感 $L_{sd} = 0.1780$ H, 转子自感 $L_{rd} = 0.1780$ H, 互感 $L_{md} = 0.1722$ H, 极对数 $n_p = 2$, 转动惯量 $J = 0.0131$ kg \cdot m².

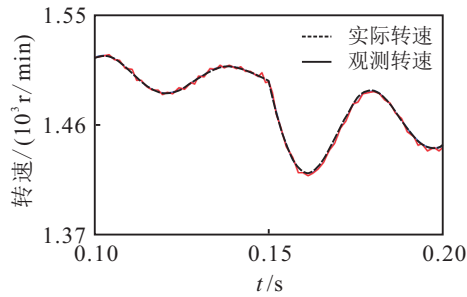
仿真时给电机加 $U_N = 380$ V 的三相交流电, 空载启动, 并在 $t = 0.15$ s 时给电机加 15 N \cdot m 的负载转矩. 重置自适应观测器的仿真结果如图3所示.

图3(a)为观测器输出转速与电机实际转速的对照图, 图3(b)为局部放大图. 从图3可以看出, 观测转速能够很好地跟随实际转速变化, 并以很小的误差在实际值上下波动. 即使在电机启动、加速或突加负载时也能保持良好的收敛性和准确性.

同时为了验证感应电机转速重置自适应观测器的实际可行性, 搭建了实验平台^[15], 主要包括感应电机及负载、主回路、PC、DSP (TMS320F2812) 控制板, 如图4所示. 电机参数与仿真参数相同.

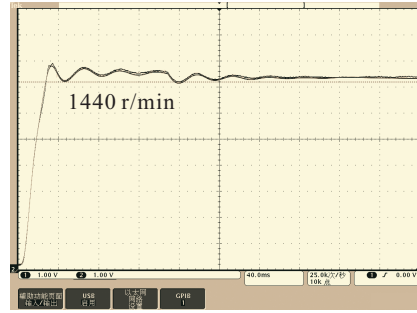


(a) Reo 观测器输出转速和实际转速

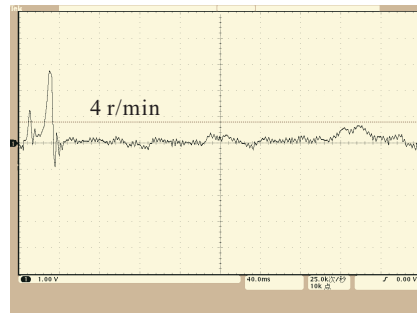


(b) 观测转速和实际转速局部放大

图3 ReO 观测器输出转速及0.1~0.2s的局部放大

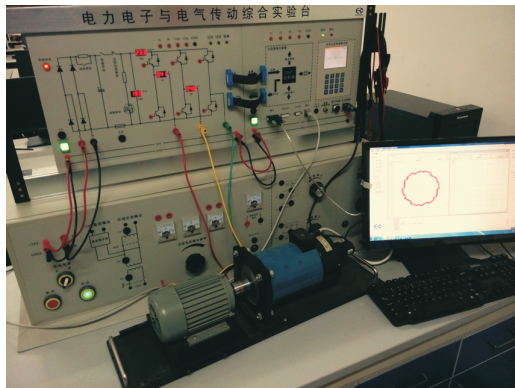


(a) 电机实际转速和观测转速
(单位: X轴 40 ms/格; Y轴 200 r·min⁻¹/格)

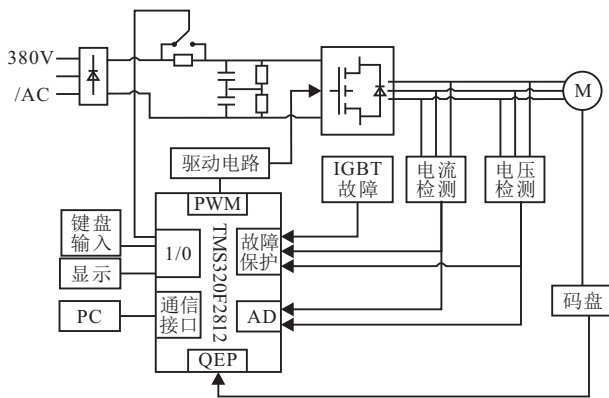


(b) 电机转速观测误差
(单位: X轴 40 ms/格; Y轴 5 r·min⁻¹/格)

图5 ReO 观测器输出转速及其误差波形(实验结果)



(a) 实验平台



(b) 实验平台构成

图4 实验平台及其构成

实物实验时,使电机在与仿真同样的条件下运行和添加负载. ReO 转速观测器通过 DSP 来实现,其观测值通过 I/O 接口输出到示波器,并与码盘所测得的电机转速做对比,实验结果如图 5 所示.

对比图 3(a) 和图 5(a) 可以看出,仿真结果和实验结果得到的曲线趋势一致.由 DSP 计算得出的观测转

速能实时地跟随实际转速;其观测误差能迅速收敛,并稳定在一个小范围内(4 r/min),如图 5(b) 所示.实验结果验证了感应电机转速重置自适应观测器的实际可行性.

5 结 论

本文提出了一种基于重置算法的感应电机转速自适应观测器,首次将重置自适应观测器应用于电机转子磁链和转速的观测.该方法解决了常规并联双模型转速观测器存在积分初始误差和积分环节惯性较大的问题,在电机启动、加速或突发负载时也能具有较高的观测精度.这些特点将有助于改善感应电机无速度传感器控制系统的调速性能.

仿真和实验结果验证了本文所提出的基于重置算法的感应电机转速自适应观测器的有效性和可行性,对电机转速的观测性能达到了预期效果.

参考文献(References)

[1] 苏健勇. 基于磁链观测器的永磁同步电动机无速度传感器控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 6-12.
(Su J Y. Research on PMSM sensorless control based on flux observer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 6-12.)

[2] 范蟠果, 杨耕. 感应电机无速度传感器控制自适应速度观测器[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(6): 621-628.
(Fan P G, Yang G. Adaptive speed observer for speed

- sensorless control of induction motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(6): 621-628.)
- [3] 黄志武, 桂卫华, 年晓红, 等. 基于自适应观测器的无速度传感器感应电机控制[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(6): 913-918.
(Huang Z W, Gui W H, Nian X H, et al. Adaptive observer based sensorless speed control of induction motors[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 913-918.)
- [4] 宋文祥, 曹大鹏, 陈国呈, 等. 基于状态观测器的异步电机定子磁链观测和速度辨识[J]. *上海大学学报: 自然科学版*, 2008, 14(4): 349-354.
(Song W X, Cao D P, Chen G C, et al. Stator Flux Linkage and Speed Estimation of Induction Motor Based on Full Order State Observer[J]. *J of Shanghai University: Natural Science*, 2008, 14(4): 349-354.)
- [5] Schauder C. Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers[J]. *IEEE Trans on Industry applications*, 1992, 28(5): 1054-1061.
- [6] 竺伟, 陈伯时. 一种新型的闭环串联双模型异步电机转速磁链观测器[J]. *电工技术学报*, 1997, 12(5): 17-20.
(Zhu W, Chen B S. A novel closed loop series dual model speed and flux observer for induction motor[J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 1997, 12(5): 17-20.)
- [7] Clegg J C. A nonlinear integrator for servo- mechanisms[J]. *Trans of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 1958, 77(1): 41-42.
- [8] 潘月斗. 电力拖动自动控制系统[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2014: 153-156.
(Pan Y D. *Automatic control system of electric motor drive*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014: 153-156.)
- [9] Lin H, Antsaklis P J. Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2009, 54(2): 308-322.
- [10] Nesic D, Zaccarian L, Teel A R. Stability properties of reset systems[J]. *Automatica*, 2008, 44(8): 2019-2026.
- [11] Banos A, Barreiro A. Delay-independent stability of reset systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2009, 54(2): 341-346.
- [12] Aangenent W, Witvoet G, Heemels W, et al. An LMI-based L_2 gain performance analysis for reset control systems[C]. *Proc of American Control Conf. Washington: IEEE*, 2008: 2248-2253.
- [13] Paesa D, Franco C, Llorente S, et al. Reset adaptive observers and stability properties[C]. *The 18th Mediterranean Conf on Control and Automation. Marrakech: IEEE*, 2010: 1435-1440.
- [14] Guo Y, Wang Y, Xie L, et al. Stability analysis and design of reset systems: Theory and an application[J]. *Automatica*, 2009, 45(2): 492-497
- [15] 潘月斗, 陈虎. 基于高增益观测技术的高精度感应电机磁链观测器研究[J]. *控制与决策*, 2014, 29(8): 1495-1500.
(Pan Y D, Chen H. Research on high gain technique based on-line fluxes estimation for IMs[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(8): 1495-1500.)

(责任编辑: 齐 霖)