

基于抗差扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速估计策略

尹忠刚, 张瑞峰, 钟彦儒, 曹 钰

(西安理工大学 自动化学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过分析粗差对扩展卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF)状态估计的影响, 对无速度传感器矢量控制的永磁同步电机的转速, 提出了一种基于抗差扩展卡尔曼滤波器(robust extended Kalman filter, REKF)的估计方法. 建立了永磁同步电机的REKF模型, 探讨了永磁同步电机在粗差干扰下引入REKF能否获得优于EKF的估计性能这一问题, 比较了REKF与EKF在遇到外部粗差干扰或内部估算粗差干扰时转速和磁链的变化. 仿真和实验结果表明REKF较EKF而言具有更好的抗粗差性能, 使系统遇到干扰时能更快收敛.

关键词: 抗差扩展卡尔曼滤波; 永磁同步电机; 粗差; 无传感器控制

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A

Speed estimation for permanent magnet synchronous motor based on robust extended Kalman filter

YIN Zhong-gang, ZHANG Rui-feng, ZHONG Yan-ru, CAO Yu

(Automation College, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: By analyzing the impact of gross error on the estimation accuracy of extended Kalman filter (EKF), we propose a novel speed estimation method for the permanent magnet synchronous motor (PMSM) in sensorless vector control based on Robust extended Kalman filter (REKF). The model of permanent magnet synchronous motor based on REKF is developed. We investigate whether REKF can give better estimation performance than EKF when PMSM is disturbed by gross errors. The speed estimation error of REKF caused by external gross error and internal estimation gross error is compared with that of EKF. Simulation and experimental results show that REKF provides better performance and exhibit faster convergence than EKF under disturbances.

Key words: robust extended Kalman filter; permanent magnet synchronous motor; gross error; sensorless control

1 引言(Introduction)

永磁同步电机由于具有低惯性、快响应、高功率密度、高效率等优点, 成为高精度、微进给伺服系统的最佳执行机构之一. 无速度传感器控制由于减少了系统成本、增强了可靠性、简化了维护要求等优点, 成为现代交流传动控制技术研究的一个重要方向. 随着高性能数字信号处理器的飞速发展, 各种转速估计方法不断涌现, 如模型参考自适应法^[1-2]、非线性观测器^[3]、高频信号注入法^[4-6]、滑模控制法^[7-9]、扩展卡尔曼滤波器^[10-12]等.

扩展卡尔曼滤波器被广泛应用于导航、自动控制等领域^[13-14], 并已应用于交流电机无速度传感器控制转速估计. EKF的转速估计方法具有较强的抗噪能力并有较高的调速范围, 使其非常适合应用于交流电机的调速. 研究表明, 虽然扩展卡尔曼滤波器具有较强的抗干扰能力和精确的估算能力, 但在

遇到粗差时系统仍会出现较大的抖动, 从而影响系统的稳定性. 然而, 虽然抗差扩展卡尔曼滤波在导航、监控等领域有一些研究, 但针对永磁同步电机的EKF抗粗差问题, 国内外尚未见到相关的研究.

本文分析了粗差对于扩展卡尔曼滤波器的影响, 在扩展卡尔曼滤波器的基础上提出了一种基于抗差扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速估计方法, 用来减小粗差对估计状态的影响, 仿真和实验结果表明基于抗差扩展卡尔曼滤波的方法可以有效的削弱粗差的影响, 准确地估计转速.

2 扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter)^[11]

扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)是线性系统状态估计在非线性系统的扩展应用. EKF是一种随机观测器, 当系统出现噪声时, 仍能对系统状态进行估计. EKF方程的一般形式可表示为

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A(\hat{x})\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = C\hat{x}. \end{cases} \quad (1)$$

在交流电机的模型下,通常将定子电流和定子电压作为测量矢量,即 $y = i_s$, $u = u_s$. 测量矢量中还含有噪声统计,包括系统噪声矢量 V 和测量噪声矢量 W . 通过对系统离散化及推导计算,扩展卡尔曼滤波算法步骤如表1所示.

表1 扩展卡尔曼滤波算法
Table 1 EKF algorithm

| 阶段 | 算法 |
|-------|--|
| 预测阶段 | $\tilde{x}_{k+1} = A'\hat{x}_k + B'u_k,$ $\tilde{P}_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k$ |
| 修正阶段 | $\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k(y_k - H_k \tilde{x}_k),$ $\hat{P}_{k+1} = \tilde{P}_k - K_k H_k \tilde{P}_k$ |
| 卡尔曼增益 | $K_k = \tilde{P}_k H_k^T (H_k \tilde{P}_k H_k^T + R_k)^{-1}$ |

表1中: A' , B' , H 分别为 A , B , C 的离散化矩阵, Q 和 R 分别为 V 和 W 的协方差矩阵, “~”为预测值, “^”为校验值.

扩展卡尔曼滤波通过一系列近似计算,给出了较优的状态估计. 目前扩展卡尔曼滤波已广泛应用于电机转速估计,取得了良好的效果.

3 基于抗差EKF的永磁同步电机转速估计策略(Speed estimation of permanent magnet synchronous motor based on robust extended Kalman filter)

3.1 粗差对扩展卡尔曼滤波状态估计的影响(Affect on the extended Kalman filter by gross error)

当系统出现粗差时,将影响到系统的状态估计,很可能导致系统不稳定,观测向量中存在粗差时的观测方程可表示为

$$\hat{y}_k = C'\hat{x}_k + G_k \Delta_k + W_k, \quad (2)$$

其中: Δ_k 为粗差向量, G_k 为粗差干扰矩阵. 含有粗差影响的预测残差可表示为

$$\hat{V}_k = \hat{y}(k) - C'\hat{x}_k \approx W_k + G_k \Delta_k. \quad (3)$$

因为观测值的粗差影响了预测残差,新的滤波估计模型为

$$\hat{x}_{k+1} = A'x_k + B'u + K_{k+1}(W_k + G_k \Delta_k). \quad (4)$$

显然,粗差影响到系统的稳定,由式(4)可以看出,通过调节增益矩阵 K_{k+1} 可以减小粗差对状态向量的影响.

3.2 抗差扩展卡尔曼滤波器模型(The model of robust extended Kalman filter)

永磁同步电机的EKF方程经离散化后可表示为

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}) + v_k, \\ y_k = H_k x_k + w_k. \end{cases} \quad (5)$$

其中: 非线性函数 $f(\cdot)$ 为连续的可微分函数, y_k , x_k 表示在 k 时刻的测量向量和变量, H_k 为测量矩阵, v_k 和 w_k 为不相关且均值为0的白噪声. 在此基础上, REKF算法可分为如下2个阶段:

a) 抗差扩展卡尔曼滤波器的预测阶段.

x_k 的预测值 \tilde{x}_k 及其误差协方差阵为

$$\tilde{x}_k = f(\hat{x}_{k-1}), \quad (6)$$

$$\tilde{P}_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k, \quad (7)$$

$$\hat{P}_k = (\tilde{P}_k^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t)^{-1}, \quad (8)$$

其中: $F_k = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)|_{x=\hat{x}_{k-1}}$, L_t 是单位矩阵, γ 为不等于0且要保证 $\hat{P}_k > 0$ 的数, Q_k 为 v_k 的协方差阵.

b) 抗差扩展卡尔曼滤波器的修正阶段.

变量 \hat{x}_k 的估计值及估计误差协方差矩阵 P_k 为

$$K_k = \hat{P}_k H_k^T (H_k \hat{P}_k H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (9)$$

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k(y_k - H_k \tilde{x}_k), \quad (10)$$

$$P_{k+1} = \hat{P}_k - K_k H_k \hat{P}_k. \quad (11)$$

EKF与REKF的推导类似,如果 $\gamma = \infty$, REKF就相当于EKF. 抗差扩展卡尔曼滤波器要保证转移函数的范数在外部干扰与误差下低于规定的衰减水平 γ .

对于抗差扩展卡尔曼滤波, \hat{P}_k 可以通过减小 γ 来增大,但在 $L_t = I$ 时,要选择一个合适的 γ 值,使 \hat{P}_k 足够大是不可能的. 为了保证估计误差的有界性,提出了一种 L_t 的设计方法,如式(12)所示:

$$L_t = \gamma(\tilde{P}_t - \varepsilon_{\max}^{-2} I)^{1/2}. \quad (12)$$

经推导可知, $\varepsilon_{\max}^{-2} I$ 为 \tilde{P}_t 的上界,即 $\tilde{P}_t < \varepsilon_{\max}^{-2} I$. 这个界限在应用中应根据实际系统中的因素取值. 通过这个方法,可以避免调整 γ 的困难,只需通过调节 ε_{\max} 即可获得较好的抗差性能.

然而,使用上界 $\varepsilon_{\max}^{-2} I$ 会使转速估算过多的重点放在适应最差情况上,而最差情况并不会频繁出现,从而系统损失了准确性和最优性. 为了改善系统的稳定性且不影响系统的精确性,提出了一种改变 \hat{P}_k 的自适应方案,如式(13):

$$\hat{P}_k = \begin{cases} \tilde{P}_k, & D_k < \beta, \\ (\tilde{P}_k^{-1} - \gamma^{-2} L_t^T L_t)^{-1}, & \text{其他}, \end{cases} \quad (13)$$

其中: $D_k = \|y_k - C'\hat{x}_k\|$, 参数 $\beta > 0$. 由式(13)可知, REKF和EKF在算法的结构上基本相同,只是REKF

算法在计算预测误差协方差阵比EKF有所改进, 当系统出现较大的干扰时, \hat{P}_k 为 $(\hat{P}_k^{-1} - \gamma^{-2}L_t^T L_t)^{-1}$, 来保持系统的稳定; 另一方面, 当干扰较小的时候, \hat{P}_k 等于 \tilde{P}_k , 从而保持较好的估计精度。

3.3 基于抗差EKF的永磁同步电机转速估计策略(Speed estimation of permanent magnet synchronous motor based on robust extended Kalman filter)

本文基于永磁同步电机的 $\alpha\beta$ 轴(两相静止坐标系)设计REKF估计器, 建立以转子磁链 ψ_α, ψ_β , 转速 ω_r 和转子位置角 θ_r 为状态变量, 定子电压为输入变量的电机状态方程和测量方程. 永磁同步电机数学模型离散化后可以表示为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x) + Bu + v, \\ y = Cx + w, \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$x = \begin{pmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \\ \omega_r \\ \theta_r \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$Cx = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s}(\psi_\alpha - \psi_f \cos \theta_r) \\ \frac{1}{L_s}(\psi_\beta - \psi_f \sin \theta_r) \end{pmatrix},$$

$$f(x) = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_s}\psi_\alpha + \frac{R_s}{L_s}\psi_f \cos \theta_r \\ -\frac{R_s}{L_s}\psi_\beta + \frac{R_s}{L_s}\psi_f \sin \theta_r \\ 0 \\ \omega_r \end{pmatrix},$$

其中: x 为状态变量, u 为测量变量, $f(x)$ 为 Ax 化简后的值, v 为系统噪声, w 为测量噪声, u_α, u_β 分别为定子电压在 α - β 轴的分量, L_s 为定子电感, R_s 为定子电阻, ψ_f 为永磁体磁链。

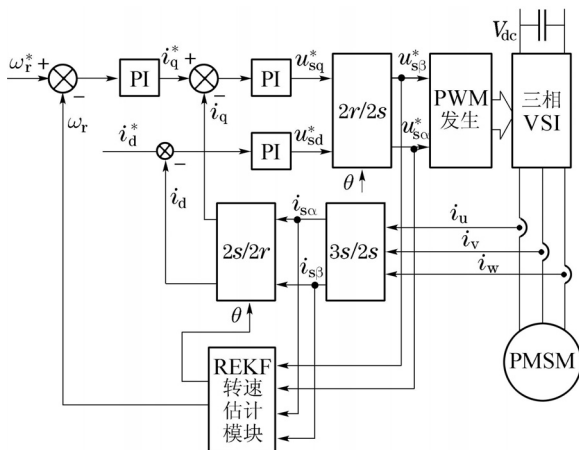


图 1 基于REKF的永磁同步电机矢量控制结构图
Fig. 1 Structure of PMSM vector control based on REKF

图1为基于REKF的PMSM矢量控制系统框图. 其中REKF观测器获得的电机转速和转子位置信息作为控制的反馈量, 参考转速 ω_r^* 和反馈转速 ω_r 的差值通过PI控制器得到参考电流 i_d^* . i_d^* 和反馈电流 i_d 的差经PI控制器获得参考电压 u_{sq}^* . 参考电流 i_d^* 和反馈电流 i_d 的差值通过PI控制器得到 u_{sd}^* . 通过得到的 u_{sq}^* 和 u_{sd}^* 就可以发出PWM波, 控制逆变器工作, 从而驱动电机运作。

4 仿真分析(Simulation analysis)

为了验证基于抗差扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速估计方法的有效性, 文章采用仿真软件MATLAB/Simulink进行系统仿真. 永磁同步电机的仿真参数为: 额定功率 $P_N = 1.5 \text{ kW}$, 额定线电压 $U_N = 380 \text{ V}$, 额定频率 $f_N = 50 \text{ Hz}$, 定子电阻 $R_s = 4.96 \Omega$, d 轴电感 $L_d = 8.5 \text{ mH}$, q 轴电感 $L_q = 8.5 \text{ mH}$, 极对数 $P = 2$, 额定转速 $n_N = 1500 \text{ r/min}$.

a) 空载转速性能验证.

图2是电机空载时电机的实际转速和REKF模块估计出的转速波形, 其中: n 为实际转速, \hat{n} 为估计转速。

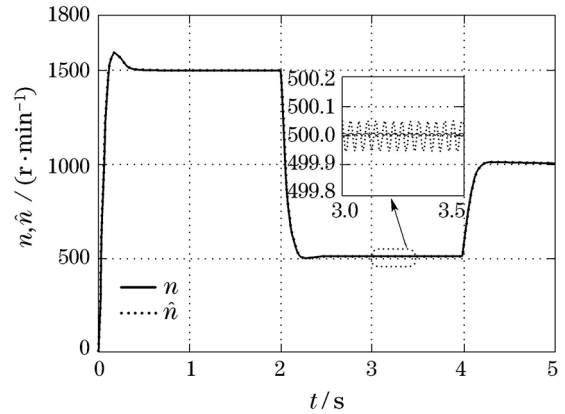


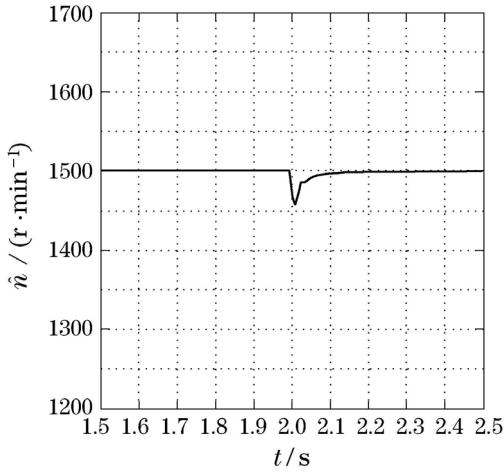
图 2 基于REKF的转速估计

Fig. 2 Speed estimation based on REKF

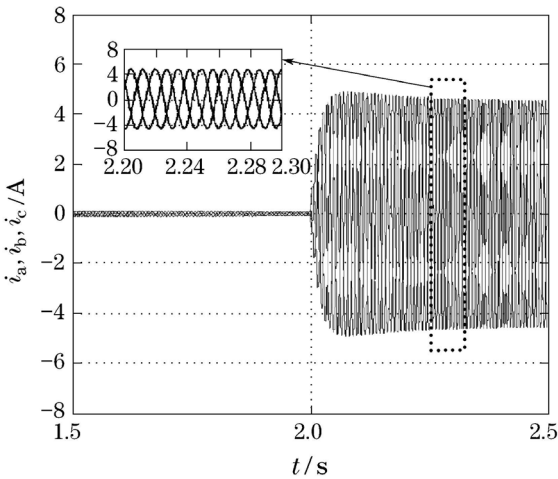
初始给定转速为1500 r/min, 在2 s时阶跃降至500 r/min, 在4 s阶跃增至1000 r/min. 从图2中可以看出估计转速可以很好地跟踪实测转速, 抗差扩展卡尔曼滤波器在整个转速范围表现出良好的动、静态性能. 由图2可知, 估计转速与实际转速的误差小于0.05 r/min, 估计转速可以很好地跟踪实际转速。

b) 加载转速性能验证.

电机启动时空载运行, 初始给定转速为1500 r/min. 在2 s时突加5 N·m的负载, 其电机转速波形 \hat{n} 和三相输出电流 i_a, i_b, i_c 的波形分别如图3(a)和图3(b)所示. 从仿真结果中可以看出, 加载后转速跌落了约45 r/min, 并在100 ms内迅速恢复至设定值1500 r/min, 可见系统加载时具有良好的动静态性能。



(a) 加载时转速波形



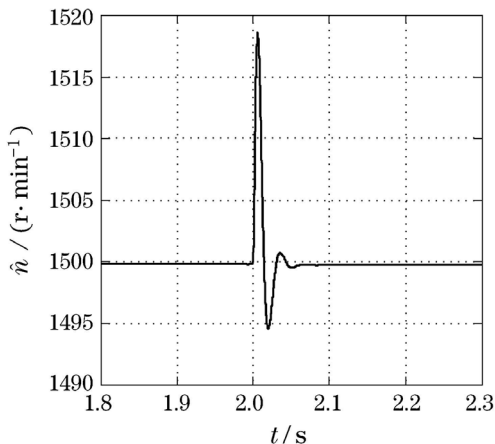
(b) 加载时电流波形

图3 突加负载时电机响应波形

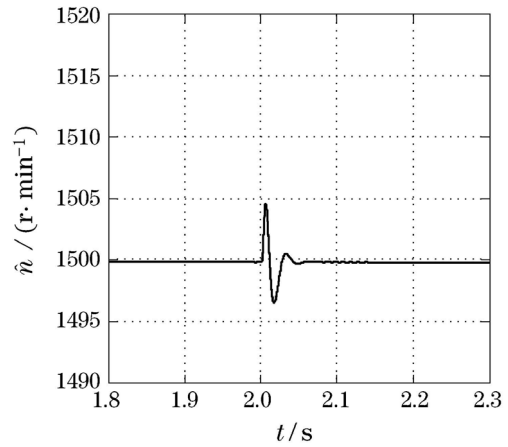
Fig. 3 Response waveforms with sudden load

c) 抗外部输入干扰性能验证.

为了检测REKF和EKF的抗差能力, 在第2s时给 i_a 加一个幅值为1A的脉冲干扰信号, 两者的估计转速 \hat{n} 的波形如图4所示.



(a) EKF转速波型

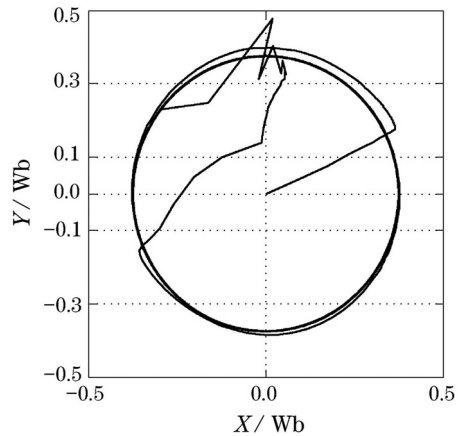


(b) REKF转速波形

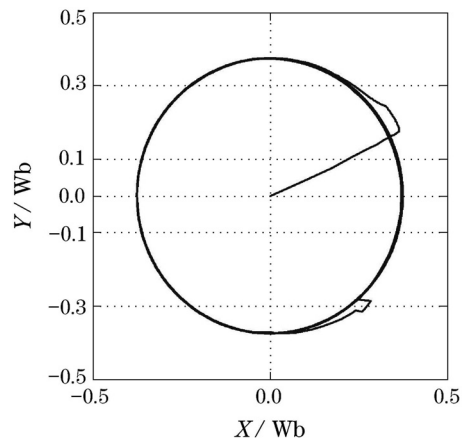
图4 加外部粗差干扰时转速波形

Fig. 4 Speed waves with external disturbance gross

在第2s时 REKF与EKF都会有一些波动, 但是EKF受到干扰的影响较大, 转速波动幅度约为18 r/min; 而在抗差扩展卡尔曼滤波器下的转速波动幅度有了明显的减少, 约为4.5 r/min. 图5为EKF与REKF在此干扰下的定子磁链比较, 从图5中可以看出REKF的抗粗差能力较EKF来说有了明显的提高.



(a) EKF估计的磁链环



(b) REKF估计的磁链环

图5 转速估计的磁链环比较

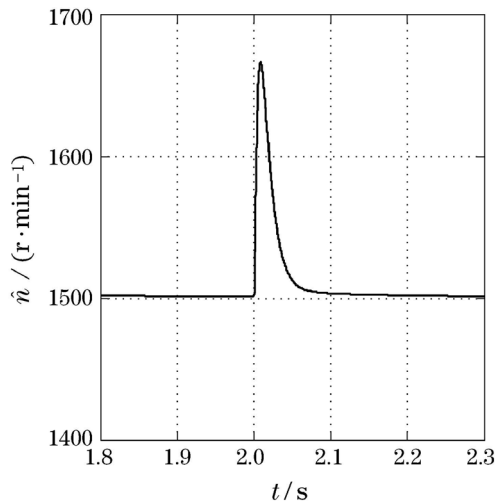
Fig. 5 Comparison of estimated flux linkage

d) 抗内部估算误差性能验证.

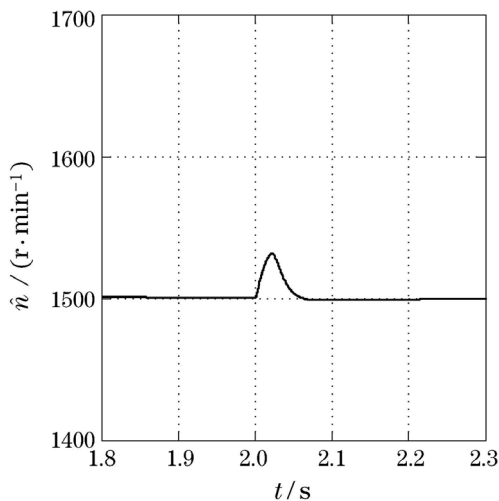
在第2s时向估算值中加入一个大小为

$$\Delta x = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

的估算误差向量, 用于检测其抗内部估算误差的性能, 该估算误差对转速的影响如图6所示. 从图6中可以看出, 在第2s时加入估算误差时REKF与EKF的转速波形都会有一些波动, 但是EKF波动较大, 转速波动振幅瞬时达到了160 r/min, 而抗差扩展卡尔曼滤波器波动较小, 约为30 r/min, 较EKF有了明显的减小. 图6中 \hat{n} 为估计转速.



(a) EKF转速波形



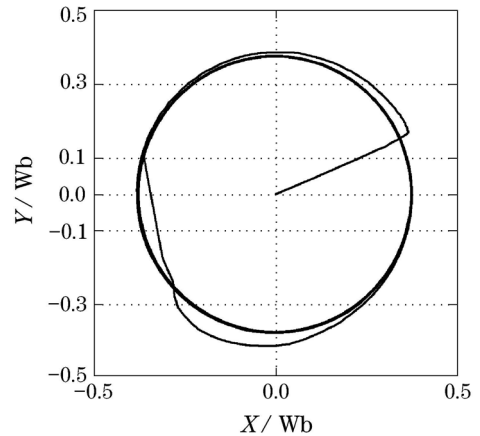
(b) REKF转速波形

图6 加入估算粗差时转速波形

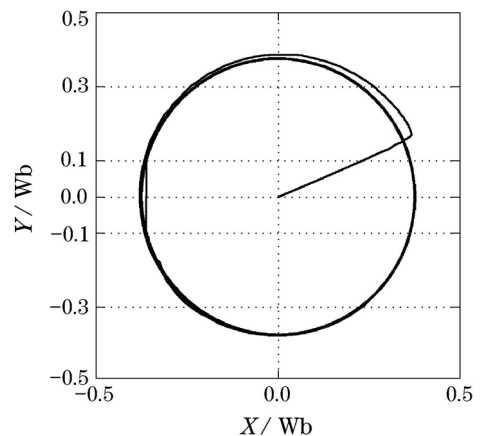
Fig. 6 Speed waves with estimated gross error

图7为加入内部估算误差后EKF算法和REKF算法的磁链波形. 从图7可知, EKF转速估计在遇到估算误差干扰后, 磁链圆发散严重, 而REKF估算的磁链圆遇干扰后发散明显变小, 且很快到达稳态, 因此

在加入估算误差向量时REKF具有更好的抗估算误差性能.



(a) EKF估计的磁链环



(b) REKF估计的磁链环

图7 转速估计的磁链环比较

Fig. 7 Comparison of estimated flux linkage

5 实验结果(Experimental results)

本节在电机试验平台上对基于抗差EKF的永磁同步电机转速估计策略进行了实验验证. 图8为本文使用的PMSM实验平台. 电机由电压源逆变器驱动, 定子电流、定子电压和转速分别由传感器和光电编码器测得. 这些信号经信号调理板进入高速数据采集卡, 经过A/D转换后将数据文件存入PC中, 以供实验使用.

a) 抗外部输入干扰性能实验验证.

为了验证算法在抗外部输入干扰时的性能, 在第8s时给 i_α 施加一个幅值为1A的脉冲干扰信号. 加外部粗差干扰时的转速波形如图9所示, 可以看出在第8s时EKF的波动幅度达到了40 r/min, 而REKF的波动幅度小于20 r/min. 从图9中可以看出REKF的抗外部粗差的性能较EKF来说有了一定的提高. 图9中 \hat{n} 为估计转速.

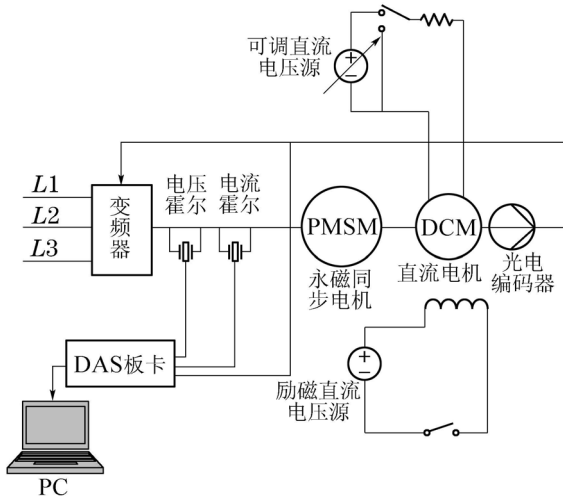
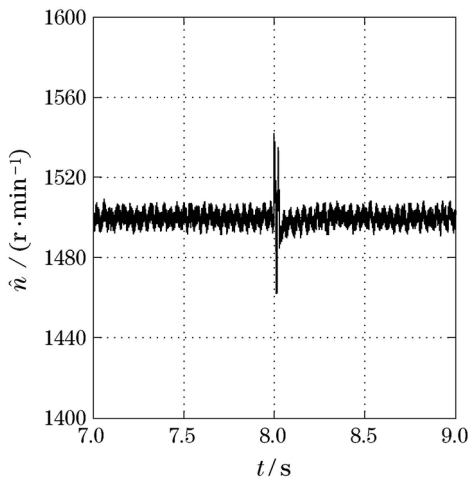
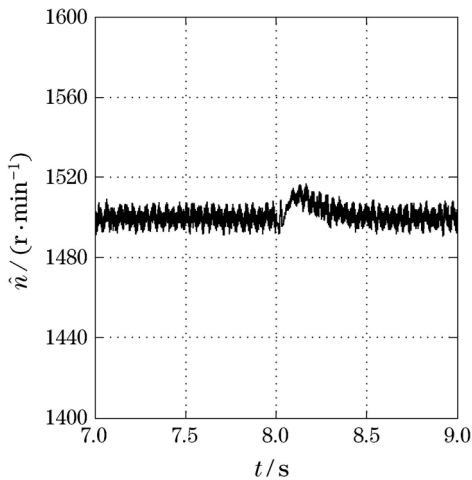


图8 实验系统结构图

Fig. 8 Structure of experiment system



(a) EKF转速波形



(b) REKF转速波形

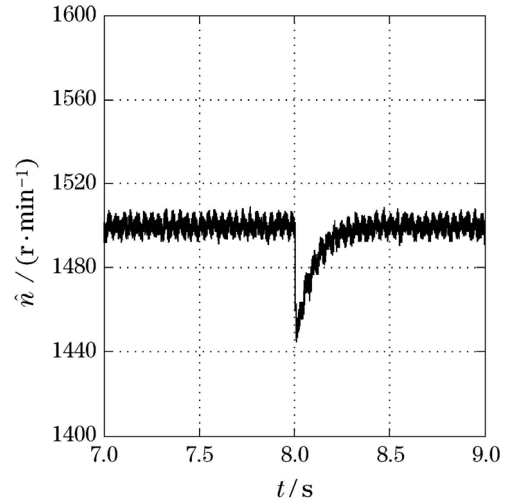
图9 加外部粗差干扰时转速波形

Fig. 9 Speed waves with external disturbance gross error

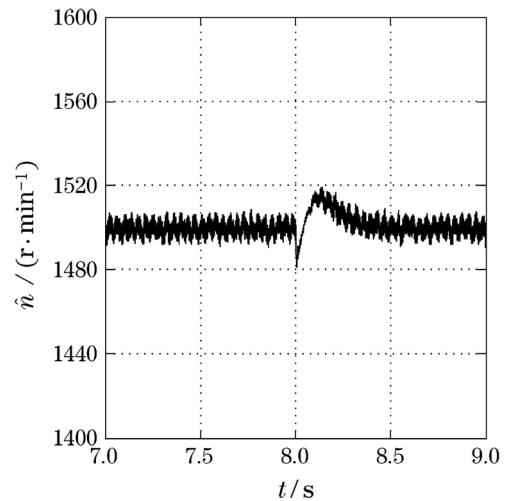
b) 抗内部估算误差性能实验验证。

为了验证算法在抗内部估算误差时的性能, 在第8s时向估算值中加入一个大小为 $\Delta x = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$

估算误差向量, 实验波形如图10所示. EKF在估算误差的干扰下转速波动约为50 r/min, 而REKF在此干扰下的转速波动小于20 r/min. 实验结果表明, 虽然两种算法都有一定的转速波动, 但REKF的波动更小, REKF较EKF有更好的抗差性能. 图10中 \hat{n} 为估计转速.



(a) EKF转速波形



(b) REKF转速波形

图10 加入估算粗差时转速波形

Fig. 10 Speed waves with estimated gross error

6 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于抗差EKF的永磁同步电机转速估计策略, 并且通过对EKF与REKF转速估计的永磁同步电机无速度传感器矢量控制系统的仿真和实验, 来比较这两种方法的性能. 仿真和实验结果表明, 尽管EKF与REKF都具有一定的抗干扰能力, 但是REKF在遇到较大的外部干扰或估算误差时能够更好的抵抗粗差干扰. 然而REKF计算量较大, 因此算法的简化和降阶对于REKF的实际应用有着重要的意义.

参考文献(References):

- [1] JIN H Z, LEE JANGMYUNG. An RMRAC current regulator for permanent-magnet synchronous motor based on statistical model interpretation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(1): 169 – 177.
- [2] 孙笑辉, 韩曾晋, 张曾科. 感应电动机直接转矩控制系统的模型参考自适应辨识 [J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(6): 907 – 910. (SUN Xiaohui, HAN Zengjin, ZHANG Zengke. Model reference adaptive control of induction motor based on direct torque control [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(6): 907 – 910.)
- [3] LEE JUNGGI, HONG JINSEOK, NAM KWANGHEE, et al. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(2): 290 – 297.
- [4] BOLOGNANI S, CALLIGARO S, PETRELLA R. Sensorless control of IPM motors in the low-speed range and at standstill by HF injection and DFT processing [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, 47(1): 96 – 104.
- [5] LU K, VETUSCHI M, RASMUSSEN P O. Determination of high-frequency d- and q-axis inductances for surface-mounted permanent-magnet synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(9): 2376 – 2382.
- [6] SHINNAKA S. A new speed-varying ellipse voltage injection method for sensorless drive of permanent-magnet synchronous motors with pole saliency-new pll method using high-frequency current component multiplied signal [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(3): 777 – 788.
- [7] CHI S, ZHANG Z, XU L Y. Sliding-mode sensorless control of direct-drive PM synchronous motors for washing machine applications [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, 45(2): 582 – 590.
- [8] 鲁文其, 黄文新, 胡育文. 永磁同步电动机新型滑模观测器无传感器控制 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(4): 429 – 432. (LU Wenqi, HUANG Wenxin, HU Yuwen. A novel sliding-mode observer for the sensorless control of permanent-magnet synchronous machines [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(4): 429 – 432.)
- [9] 郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(6): 697 – 700. (ZHENG Jianfei, FENG Yong, LU Qiliang. High-order terminal sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(6): 697 – 700.)
- [10] 陈振, 刘向东, 靳永强. 采用扩展卡尔曼滤波磁链观测器的永磁同步电机直接转矩控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(33): 75 – 81. (CHEN Zhen, LIU Xiangdong, JIN Yongqiang. Direct torque control of permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter observer of flux linkage [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2008, 28(33): 75 – 81.)
- [11] 刘英培, 万健如, 沈虹. 永基于EKFPMSM定子磁链和转速观测直接转矩控制 [J]. *电工技术学报*, 2009, 24(12): 57 – 62. (LIU Yingpei, WAN Jianru, SHEN Hong. Stator flux linkage and rotor speed observation for PMSM DTC based on EKF [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(12): 57 – 62.)
- [12] XIONG K, ZHANG H, LIU L. Adaptive robust extended Kalman filter for nonlinear stochastic systems [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(3): 239 – 250.
- [13] GAO Z Y, NIU X J, GUO M F. Quaternion-Based Kalman filter for micro-machined strapdown attitude heading reference system [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2002, 15(3): 171 – 175.
- [14] 张文明, 周一宇, 姜文利. 基于扩展卡尔曼滤波的多径抑制技术 [J]. *宇航学报*, 2003, 24(1): 53 – 56. (ZHANG Wenming, ZHOU Yiyu, JIANG Wenli. GPS multipath rejection through EKF [J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(1): 53 – 56.)

作者简介:

尹忠刚 (1982–), 男, 讲师, 博士, 从事高性能交流调速系统与电力电子变换器数字化控制的研究, E-mail: zhgyin@xaut.edu.cn;

张瑞峰 (1989–), 男, 硕士研究生, 从事高性能变频调速系统控制策略的研究, E-mail: chnzrfeng@foxmail.com;

钟彦儒 (1950–), 男, 教授, 博士生导师, 从事交流传动与新型电力电子装置的研究, E-mail: zhongyr@xaut.edu.cn;

曹钰 (1984–), 男, 硕士研究生, 从事高性能变频调速系统控制策略的研究, E-mail: zephyr.112@163.com.