

基于卡尔曼滤波和低频信号注入法的永磁同步电机转子位置自检测

周晓敏 王长松 钟黎萍

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

摘要 永磁同步电机的运动控制是一个强耦合的非线性动态控制系统, 而且在控制过程中测量数据带有噪声, 采用传统的线性控制理论很难达到系统要求. 提出一种非线性系统的随机观测器——卡尔曼位置观测器, 它用于低频信号注入法下的转子位置检测. 利用脉动高频信号注入法进行永磁同步电机转子位置自检测, 将产生的高频载波电流解调后, 送入设计的卡尔曼位置观测器, 可有效去除干扰噪声, 准确观测出转子位置. 仿真实验结果表明, 在有系统噪声和测量噪声的情况下, 基于卡尔曼位置观测器的脉动高频信号注入法能够精确地跟踪转子位置.

关键词 永磁同步电机; 无位置传感器; 低频信号注入法; 卡尔曼滤波器; 转子位置自检测

分类号 TM 351

Rotor position self-sensing of a sensorless permanent synchronous motor based on fluctuating high-frequency voltage signal injection and Kalman filter

ZHOU Xiaomin, WANG Changsong, ZHONG Liping

School of Mechanical and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT The traditional linear control theory can not meet the system requirement of a permanent synchronous motor (PMSM) for its motion control is a coupling and nonlinear control system and measurement noise also exists in the control system. A method to estimate the rotor position of PMSM was presented based on fluctuating high-frequency voltage signal injection and Kalman rotor-position-estimator. When a fluctuating high-frequency voltage signal was injected into stator winding, the corresponding current signal containing the information of rotor position was demodulated and delivered into the Kalman rotor-position-estimator. Then the rotor position would be detected accurately. Simulation results verified the method can track the rotor position accurately, even though system noise and measurement noise exist in the control system.

KEY WORDS permanent synchronous motor (PMSM); position sensorless; high-frequency signal injection; Kalman filter; rotor position self-sensing

基于高频信号注入法的无位置传感器永磁同步电机转子位置自检测技术, 利用电动机的凸极效应跟踪转子的位置, 可以实现电机在低速以及零速情况下转子位置的检测, 且对电机参数的变化不敏感、鲁棒性好, 是目前应用非常广泛的一种无位置传感器永磁同步电机转子位置自检测技术^[1-2]. 高频信号注入法从注入信号的性质来分, 可以分为旋转高频信号注入法和脉动高频信号注入法. 脉动高频信号注入法只在转子旋转同步坐标系的 d 轴注入高

频电压信号, 在静止坐标系下表现为脉动电压信号, 此方法对 q 轴产生的转矩电流影响小, 产生的电磁转矩脉动小, 而且系统结构相对简单, 还可应用于面贴式永磁同步电机的位置检测^[3-4].

永磁同步电机 (permanent synchronous motor, PMSM) 的运动控制是一个强耦合的非线性动态控制系统, 在控制过程中测量数据带有噪声, 采用传统的线性控制理论很难达到系统要求. 卡尔曼滤波是一种对非线性系统的随机观测器, 当系统存在系统

收稿日期: 2007-06-24 修回日期: 2007-10-08

作者简介: 周晓敏(1975—), 女, 博士研究生; 王长松(1947—), 男, 教授, 博士, E-mail: cswang@me.ustb.edu.cn

噪声和测量噪声时,仍能对系统状态进行准确估计^[5-6].因此本文在进行脉动高频电压注入法的理论分析^[7]基础上,设计基于卡尔曼滤波理论的位置观测器,消除系统噪声和测量噪声的影响,以准确观测出转子位置.

1 脉动高频电压信号注入法

脉动高频电压信号注入法的基本原理是在转子旋转同步坐标系的 d 轴注入高频小幅值电压信号,在电机定子绕组端表现为高频小幅值的脉动电压信号,在产生的高频载波电流中包含有转子位置信息,将高频载波电流解调后,送入位置观测器,可观测出转子位置,实现永磁同步电机的无传感器闭环控制^[8-9].

1.1 高频脉动电压注入法基本原理

根据永磁同步电机转子同步旋转坐标系下的数学模型,定子电压方程为:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_r L_q i_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + w_r (L_d i_d + \psi_f) \quad (2)$$

式中, u_d 、 u_q 为直轴和交轴电压, i_d 、 i_q 为直轴和交轴电流, R_s 为定子绕组电阻, L_d 、 L_q 为直轴和交轴电感, w_r 为转子电角速度, ψ_f 为转子永磁体产生的磁链.

如果注入的电压信号频率相对于电机的旋转角频率足够高(一般 10 倍以上),可以把永磁同步电机看作为一个简单的 $R-L$ 负载,由于高频电阻相对于高频感抗来说很小,可忽略不计,故 $d-q$ 轴的高频电压方程可简化为:

$$u_{d-i} = L_{di} \frac{di_{d-i}}{dt} \quad (3)$$

$$u_{q-i} = L_{qi} \frac{di_{q-i}}{dt} \quad (4)$$

假设估计的转子同步坐标系 d^r-q^r 和电机静止坐标系 $\alpha-\beta$ 的夹角(估计的转子位置)为 θ^r ,实际转子同步坐标系 $d-q$ 和电机静止坐标系的夹角(即转子实际位置)为 θ ,则转子位置估计误差角为 $\Delta\theta = \theta^r - \theta$.各坐标系的关系如图 1 所示.

当在估计的转子同步坐标系的 d 轴注入高频电压信号为:

$$\begin{bmatrix} u_{d-i}^r \\ u_{q-i}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{si} \sin w_i t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, U_{si} 为注入的电压信号幅值, w_i 为注入的电压

信号频率.则此时可推导在估计的转子同步坐标系下高频电流响应为:

$$\begin{bmatrix} i_{d-i}^r \\ i_{q-i}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_{si} \cos w_i t (L - \Delta L \cos 2\Delta\theta)}{w_i (L^2 - \Delta L^2)} \\ \frac{U_{si} \cos w_i t (\Delta L \sin 2\Delta\theta)}{w_i (L^2 - \Delta L^2)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $L = \frac{L_d + L_q}{2}$ 为平均电感, $\Delta L = \frac{L_d - L_q}{2}$ 为半差电感.

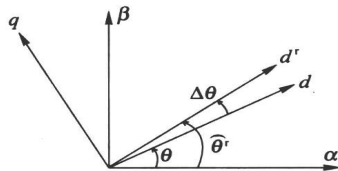


图 1 实际转子同步坐标系和估计转子同步坐标系

Fig. 1 Actual and estimation rotor synchronous coordinate systems

从式(6)可以看出,对于具有凸极效应的电机来说, $\Delta L \neq 0$, d^r 轴和 q^r 轴上的高频电流分量都与估计的转子位置误差有关. d^r 轴上的高频电流分量在估计转子位置误差为零时也不为零,然而当估计的转子位置误差为零时, q^r 轴上的高频电流分量应为零,因此可对 q^r 轴上的高频电流分量进行处理作为位置观测器的输入信号来观测转子位置信息.

1.2 信号提取

从定子端检测到的电流含有基波电流,如果采用逆变器供电,还含有高频载波电流.因此,为了提取 q^r 轴上高频电流信号中包含的转子位置误差信息 $\Delta\theta$,采用带通滤波器 BPF 滤掉基频电流分量和逆变器开关频率谐波分量,利用 $\cos w_i t$ 信号进行解调,解调后的信号包含直流分量和二次谐波分量,再进行低通滤波即可以提取所需的转子位置误差信息如式(7)所示.此误差信息可作为位置观测器的输入.信号提取过程如图 2 所示,图中 BPF 为带通滤波器,LPF 为低通滤波器.

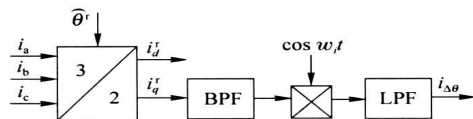


图 2 转子位置信号提取过程

Fig. 2 Procedure of rotor position signal processing

$$i_{\Delta\theta} = \frac{U_{si} (\Delta L \sin 2\Delta\theta)}{2 w_i (L^2 - \Delta L^2)} \quad (7)$$

如果转子位置估计误差足够小,可对观测器的输入信号进行线性化处理,即:

$$i_{\Delta\theta} = K_e \Delta\theta \quad (8)$$

式中, K_e 定义为转子位置误差系数。

1.3 位置观测器设计

可以看出, 永磁同步电机的运动是一个强耦合的非线性动态控制系统, 在高频信号注入下的模型经过简化处理, 存在建模误差, 而且在测量电流过程中存在测量误差, 采用传统的线性控制理论对永磁同步电机进行控制很难达到精度要求。卡尔曼滤波器是一种对非线性系统的随机观测器, 当系统存在系统噪声和测量噪声时, 可将噪声信号考虑为干扰信号, 卡尔曼滤波仍能对系统状态进行准确估计。系统噪声来源于数学模型的不准确性, 可考虑为状态噪声; 测量噪声来源于对定子电流的测量过程, 由传感器和 A/D 转换引起, 可考虑为测量噪声^[10-11]。

随机离散时间序列可用动态方程描述:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{C}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (k \geq 0) \quad (9)$$

式中, $\mathbf{x}_k = [\theta_r, \omega_r, \alpha_r]^T$ 为状态向量, 分别为转子位置、转子速度和加速度; $\mathbf{y}_k = \theta_r$ 为系统的“观测量”; \mathbf{w}_k 为系统噪声, \mathbf{v}_k 为测量噪声, 其协方差矩阵为 $\mathbf{Q} = \text{var}(\mathbf{w}_k)$, $\mathbf{R} = \text{var}(\mathbf{v}_k)$; \mathbf{A} 为系统矩阵, \mathbf{C} 为系统观测矩阵, 矩阵表达如下所示:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0] \quad (10)$$

式中, T 为采样周期。

应用卡尔曼滤波的递推步骤为:

(1) 状态一步预测, $\mathbf{x}_{k/k-1} = \mathbf{A}_{k, k-1} \mathbf{x}_{k-1}$;

(2) 状态估计, $\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{A}_{i, k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}_{k, k-1}^T + \mathbf{Q}_{k-1}$;

(3) 滤波增益, $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{C}_k^T (\mathbf{C}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{C}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$;

(4) 一步预测均方差, $\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})$;

(5) 均方误差, $\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}$ 。

只要给定初值 \mathbf{x}_0 和 \mathbf{P}_0 , 根据 k 时刻的测量值 \mathbf{y}_k 就可以通过递推计算得到 k 时刻的状态估计 \mathbf{x}_k 。式中 \mathbf{y}_k 实际是不可测量的, 但是步骤(4)中的 $(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})$ 恰好对应脉动高频信号注入法所得高频电流解调后提取的转子位置误差信号 $\Delta\theta$, 因此可通过上述所设计的卡尔曼位置观测器准确估计系统状态向量, 包括转子位置信息 θ 。

2 算法仿真及分析

为了验证基于卡尔曼位置观测器的脉动高频电

压信号注入法检测转子位置的可行性和准确性, 对一台内插式永磁同步电机进行无位置传感器位置检测仿真研究, 采用脉动高频电压信号注入法和卡尔曼位置观测器的无位置传感器位置检测及矢量控制结构如图 3 所示, 图中 PWM VSI 为电压源型逆变器模块。电机关键参数由表 1 给出。

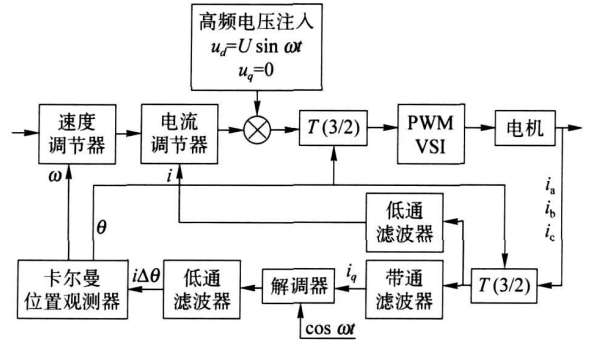


图 3 基于卡尔曼位置观测器的高频脉动电压信号注入无传感器 PMSM 控制系统

Fig. 3 Block diagram of a sensorless PMSM control system based on fluctuating high-frequency voltage signal injection and Kalman filter

表 1 永磁同步电机参数表

Table 1 Parameters of PMSM

参数	额定频率/Hz	额定电压/V	额定电流/A	极对数	d 轴电感/H	q 轴电感/H	注入电压/Hz	注入电压幅值/V
数值	50	110	5	2	0.008	0.014	1000	10

为了验证系统对噪声的抗干扰性, 系统误差和测量误差均以白噪声表示, 分别对转子速度 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的位置检测模型进行仿真, 得到转子位置估计值的输出波形以及对应的转子位置估计误差波形。转子速度为 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的仿真结果如图 4~图 7 所示。从仿真结果可以看出, 系统存在较强的噪声干扰时, 在转子速度 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时经过 0.1 s 即能将信号误差控制在 2° 。

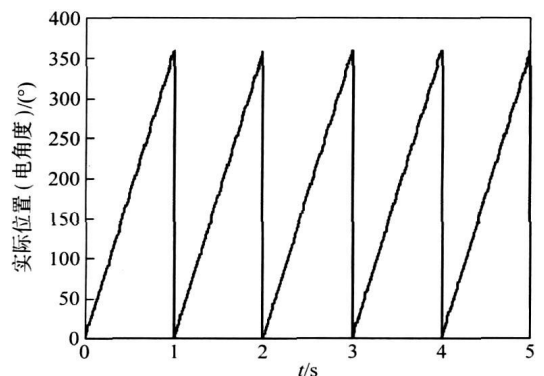


图 4 转子速度 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的实际转子位置

Fig. 4 Actual rotor position at the $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ rotor speed

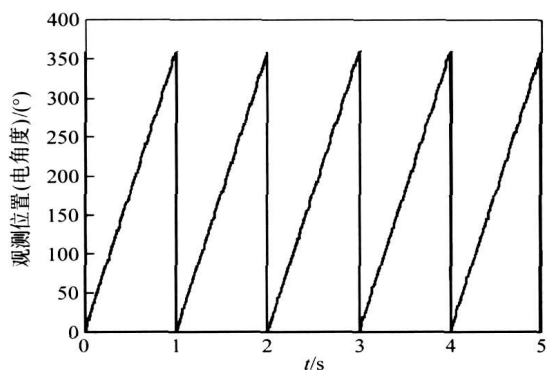


图 5 转子速度 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时卡尔曼观测器估计位置

Fig.5 Estimated rotor position at the $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ rotor speed by the Kalman estimator

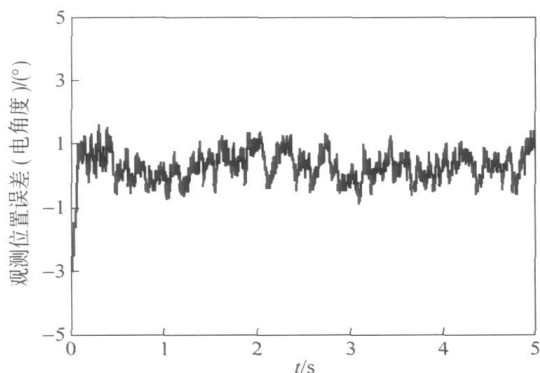


图 6 转子速度 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时卡尔曼估计位置误差

Fig.6 Estimation rotor position error of the Kalman estimator at the $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ rotor speed

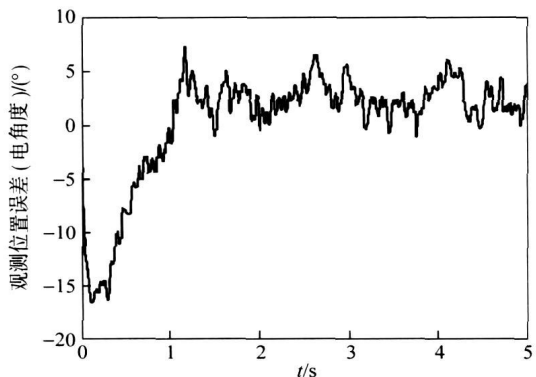


图 7 转子速度 $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时 PID 估计位置误差

Fig.7 Estimation rotor position error of the PID estimator at the $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ rotor speed

(电角度)以内,而传统的 PID 观测器的位置估计误差超过了 5° (电角度). 在转子速度 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的仿真结果如图 8~图 11 所示. 由仿真结果可以看出,系统存在较强的噪声干扰时,在转子速度 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时经过 0.05 s 即能将信号误差控制在

2° (电角度)以内,而传统的 PID 观测器的位置估计误差基本在 5° (电角度)左右. 这说明基于卡尔曼位置观测器的脉动高频信号注入法检测转子位置可以在系统有干扰噪声和测量误差时能够有效去除干扰噪声的影响,准确跟踪转子位置,优于传统的 PID 位置观测器.

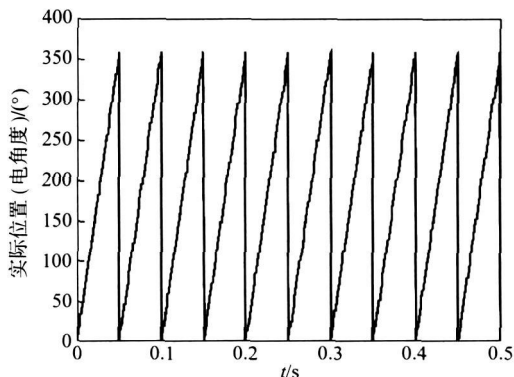


图 8 转子速度 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的实际转子位置

Fig.8 Actual rotor position at the $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ rotor speed

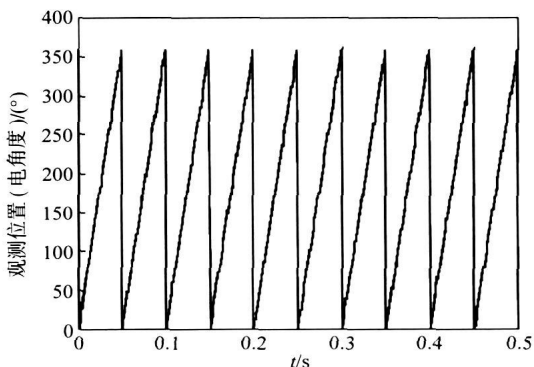


图 9 转子速度 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时卡尔曼观测器估计位置

Fig.9 Estimated rotor position at the $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ rotor speed by the Kalman estimator

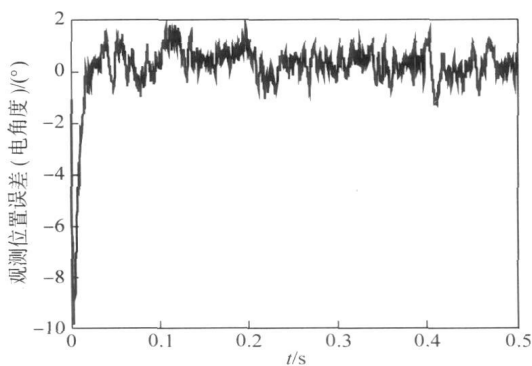


图 10 转子速度 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时卡尔曼估计位置误差

Fig.10 Estimation rotor position error of the Kalman estimator at the $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ rotor speed

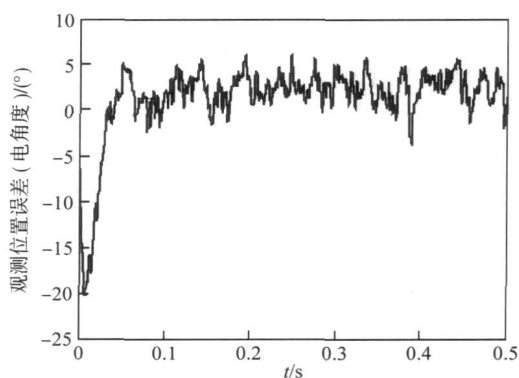


图11 转子速度 $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时 PID 估计位置误差

Fig.11 Estimation rotor position error of the PID estimator at the $600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ rotor speed

3 结论

利用脉动高频信号注入法进行永磁同步电机转子位置自检测,指出永磁同步电机的运动是一个强耦合的非线性动态控制系统. 在高频信号注入下的模型经过简化,存在建模误差,而且在测量定子电流过程中存在测量误差,采用传统的线性控制理论对永磁同步电机进行控制很难达到精度要求. 本文设计了一种非线性系统的随机观测器——卡尔曼位置观测器,对脉动高频信号注入法所得的高频载波电流进行解调后,送入卡尔曼位置观测器进行转子位置估测. 仿真实验结果表明,当系统存在系统噪声和测量噪声时,卡尔曼位置观测器能够有效去除干扰噪声,对转子位置进行准确估计. 本文的研究结果对无位置传感器永磁同步电机的位置检测,尤其是在低速和零速下的位置检测具有一定的借鉴作用.

参 考 文 献

[1] Corley M J, Lorenz R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds. *IEEE Trans Ind Appl*, 1998, 34(4):

784

- [2] Zou J B, Xu Y X, Yu C L. A novel detecting method of the rotor position of PMSM. *Proc CSEE*, 2002, 22(12): 47
(邹继斌, 徐永向, 于成龙. 正弦波无刷直流电机的新型转子位置检测方法. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 47)
- [3] Jansen P L, Lorenz R D. Transducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines. *IEEE Trans Ind Appl*, 1995, 31(2): 240
- [4] Qin F, He Y K, Liu Y, et al. Comparative investigation of sensorless control with two high-frequency signal injection schemes. *Proc CSEE*, 2005, 25(3): 116
(秦峰, 贺益康, 刘毅, 等. 两种高频信号注入法的无传感器运行研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 116)
- [5] Terzic B, Jadric M. Design and implementation of the extended Kalman filter for the speed and rotor position estimation of brushless DC motor. *IEEE Trans Ind Electron*, 2001, 48(6): 1065
- [6] Sato I, Kubota H, Matsuse K, et al. Zero frequency operation for sensorless controlled induction machines using extended Kalman filter // *Proceedings of the 1999 Japan Industry Applications Society Conference*, 1999: 51
- [7] Zhong L P, Zhou X M, Wang C S, et al. Voltage inputting for the rotor position estimation of a permanent magnet motor based on high-frequency signal injection. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2007, 29(12): 1259
(钟黎萍, 周晓敏, 王长松, 等. 基于高频信号注入的永磁电机转子位置估计方法中的电压输入. 北京科技大学学报, 2007, 29(12): 1259)
- [8] Wang L M, Lorenz R D. Rotor position estimation for permanent magnet synchronous motor using saliency-tracking self-sensing method // *Proceedings of IEEE 35th IAS Annual Meeting*, 2000: 445
- [9] Alfio C I, Giuseppe S. Industry application of zero-speed sensorless control techniques for PMSM. *IEEE Trans Ind Appl*, 2001, 37(2): 513
- [10] Francesco P, Roberto P. Sensorless speed control of salient rotor PM synchronous motor drives based on high frequency signal injection and Kalman filter. *Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2002: 623
- [11] Barut M, Bogosyan S, Gokasan M. Speed sensorless estimation for induction motors using extended Kalman filters. *IEEE Trans Ind Electron*, 2007, 54(1): 272