

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

张 猛, 肖 曦, 李永东

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Speed and Flux Linkage Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on EKF

ZHANG Meng, XIAO Xi, LI Yong-dong

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: To eliminate the mechanical sensors of permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive and get the stator flux linkage used in direct torque control (DTC), an extended Kalman filter (EKF) is established. The stator flux linkage on the fixed $\alpha\text{-}\beta$ coordinate, rotor speed and position are chosen as state variables. The input and output of the EKF are stator voltages and currents. The stator flux linkage and rotor speed are observed by EKF. DTC using space vector modulation (SVM) is applied to the system in order to reduce the torque ripples and keep constant switching frequency. The experimental test is carried out to verify the efficiency and robustness of the proposed sensor-less DTC system with speed and flux linkage observer.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor; extended Kalman filter; direct torque control; sensor-less; space vector modulation

摘要: 为了取消永磁同步电机控制中的机械传感器, 获得直接转矩控制中需要的电机磁链信息, 设计了一种基于扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速和磁链估算方法。选取定子固定坐标系下定子磁链、电机转速和转子位置为状态变量, 电压和电流作为输入、输出量, 建立估算定子磁链、电机转速和转子位置的 EKF 滤波器系统。采用空间矢量调制的直接转矩控制策略, 有效减小了直接转矩控制方法的转矩脉动, 并保持了功率器件恒定的开关频率。实验结果表明 EKF 准确地观测了电机转速和磁链, 所构建的无速度传感器 DTC 控制系统具有良好的转速和转矩控制性能。

关键词: 永磁同步电机; 扩展卡尔曼滤波器; 直接转矩控制; 无速度传感器; 空间矢量调制

0 引言

永磁同步电机直接转矩控制具有快速的转矩响应和良好的动态性能, 吸引了很多学者进行相关研究, 并取得了一定的研究成果^[1-5]。在直接转矩控制当中, 需要机械传感器提供电机的转速信息, 机械传感器使系统复杂性增加, 鲁棒性降低。磁链观测的准确性直接影响到转矩的控制性能。在无机电传感器的情况下, 如何获得准确的速度和磁链信息是永磁同步电机直接转矩控制研究方面的热点问题。

传统的永磁同步电机直接转矩控制中磁链观测大多采用纯积分方法。初值的敏感性和直流漂移是纯积分方法的主要缺点。三种改进型积分器已经应用到异步电机磁链估算中^[6], 其中的第二种方法被用于永磁同步电机磁链的估算^[7], 但是在全速范围内只能获得准确的相位信息。全阶观测器^[8]和非线性反馈正交磁链补偿观测器^[9]也被应用到永磁同步电机磁链观测中, 但是此两种方法需要利用传感器或其他算法获得电机转速。

电机的转速可以通过对定子磁链位置变化或通过采用定子磁链和转矩角获得转子位置变化计算得到^[10-11], 但是需要在输出加一个低通滤波器以获得平滑的估算速度, 滤波器的延时容易造成系统的不稳定。

基于扩展卡尔曼滤波器对非线性系统优异的状态估算能力, 本文提出一种能同时观测速度和磁链的方法, 实现了永磁同步电机的无速度传感器直接

基金项目: 国家自然科学基金项目(50607010)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50607010).

转矩控制。文献[12-14]已将扩展卡尔曼滤波器用于永磁同步电机无速度传感器矢量控制中,但其中以定子电流为状态变量的扩展卡尔曼滤波器可能会导致启动过程中估算结果收敛到错误解^[14],另外,这种方法不能直接提供磁链信息,因此不适用于直接转矩控制。本文设计了一种以定子磁链、电机转速和转子位置为状态变量的扩展卡尔曼滤波器观测器,避免了状态方程多解问题,同时提供了DTC无速度传感器运行所必需的电机转速和磁链信息。为了减小转矩脉动,获得恒定的开关频率,得到更好的稳态速度控制性能,文中采用了空间矢量调制(SVM)的直接转矩控制策略^[15]。实验结果表明本文提出的基于扩展卡尔曼滤波器的转速和磁链观测器能准确估算电机定子磁链和电机转速,所构成的永磁同步电机无速度传感器DTC-SVM控制系统具有良好的转矩和转速控制性能。

1 永磁同步电机数学模型

直接转矩控制是基于静止坐标系对磁链和转矩进行控制,因此本文给出静止坐标系上的永磁同步电机数学模型。

在静止的 α - β 坐标系下,隐极式永磁同步电机方程表示为

$$u_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + L \frac{di_{\alpha}}{dt} - \psi_r \omega \sin \theta \quad (1)$$

$$u_{\beta} = R_s i_{\beta} + L \frac{di_{\beta}}{dt} + \psi_r \omega \cos \theta \quad (2)$$

式中: u_{α} 、 u_{β} 、 i_{α} 、 i_{β} 分别为 α - β 坐标系下定子电压和电流; R_s 、 L 、 ψ_r 为定子电阻、定子电感和转子永磁体磁链; ω 、 θ 为电机角速度和转子位置。为了获得直接转矩控制所需要的定子磁链信息,选取定子磁链作为状态变量,式(1)、(2)整理为

$$u_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + \frac{d(Li_{\alpha} + \psi_r \cos \theta)}{dt} \quad (3)$$

$$u_{\beta} = R_s i_{\beta} + \frac{d(Li_{\beta} + \psi_r \sin \theta)}{dt} \quad (4)$$

定义

$$\psi_{\alpha} = Li_{\alpha} + \psi_r \cos \theta \quad (5)$$

$$\psi_{\beta} = Li_{\beta} + \psi_r \sin \theta \quad (6)$$

考虑到机械转速变化过程的时间常数一般远大于电磁过程时间常数,本方法中将电机转速的导数设为零,避免了观测器中出现系统机械参数,而在实际系统中,机械参数通常有较大的变化范围,因

此该方法将具有良好的适应性。选取 α - β 坐标系上定子磁链、电机转速和转子位置作为状态变量,定子电压作为输入量,定子电流作为输出量,永磁同步电机模型可以表示为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t)] + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{y}(t_k) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(t_k)] \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{x} = [\psi_{\alpha} \quad \psi_{\beta} \quad \omega \quad \theta]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{u} = [u_{\alpha} \quad u_{\beta}]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{y} = [i_{\alpha} \quad i_{\beta}]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -R_s \frac{1}{L} (\psi_{\alpha} - \psi_r \cos \theta) \\ -R_s \frac{1}{L} (\psi_{\beta} - \psi_r \sin \theta) \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} (\psi_{\alpha} - \psi_r \cos \theta) \\ \frac{1}{L} (\psi_{\beta} - \psi_r \sin \theta) \end{bmatrix} \quad (14)$$

从式(7)可以看出,永磁同步电机系统为一个4阶非线性系统,通过选取定子磁链、电机转速和位置作为状态变量, α - β 坐标系下的电压输入作为系统输入,电流作为输出,整个系统相对于输入是线性的,而相对于输出是非线性的。

观察定子固定坐标系下的永磁同步电机电压方程式(1)、(2),如果按照文献[12-14]中选取定子固定坐标系下的电流为状态变量,发现有两组解 (ω, θ) 、 $(-\omega, \theta + \pi)$ 都满足方程。这会造成电机启动时扩展卡尔曼滤波器可能收敛到错误的状态 $(-\omega, \theta + \pi)$ ^[14],按照本文的方法,选取定子磁链为状态变量,整个系统不存在多解问题,避免了系统收敛到错误的运行状态。

2 扩展卡尔曼滤波器算法

非线性系统模型和它的离散非线性测量方程如下:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}[\mathbf{x}(t)] + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\sigma}(t) \quad (15)$$

$$\mathbf{y}(t_k) = \mathbf{h}[\mathbf{x}(t_k)] + \boldsymbol{\mu}(t_k) \quad (16)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}(t)$ 、 $\boldsymbol{\mu}(t_k)$ 分别为系统噪声和测量噪声,

其均值为零；方差矩阵分别为 $\mathbf{Q}(t)$ 和 \mathbf{R} ，并且和系统状态 \mathbf{x} 及采样时间 t_k 不相关； $\mathbf{u}(t)$ 为确定性输入向量；初始状态向量 $\mathbf{x}(t_0)$ 表述为一具有均值 \mathbf{x}_0 、方差 \mathbf{P}_0 的高斯随机向量。

对上述系统，扩展卡尔曼滤波器算法如表 1 所示。其中，

$$\mathbf{F}_{k-1} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{k-1|k-1}} \quad (17)$$

$$\mathbf{H}_k = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{k|k-1}} \quad (18)$$

式中： \mathbf{Q}_d 、 \mathbf{R} 分别为系统噪声协方差矩阵和量测噪声协方差矩阵，为恒值矩阵； T_s 为控制周期。

表 1 扩展卡尔曼滤波算法
Tab. 1 EKF algorithm

阶段	算法
预测阶段	$\mathbf{x}_{k k-1} = \mathbf{x}_{k-1 k-1} + [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1 k-1}) + \mathbf{B}(\mathbf{u}_{k-1})]T_s$ $\mathbf{P}_{k k-1} = \mathbf{P}_{k-1 k-1} + (\mathbf{F}_{k-1}\mathbf{P}_{k-1 k-1} + \mathbf{P}_{k-1 k-1}\mathbf{F}_{k-1}^T)T_s + \mathbf{Q}_d$
修正阶段	$\mathbf{x}_{k k} = \mathbf{x}_{k k-1} + \mathbf{K}_k[\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\mathbf{x}_{k k-1})]$ $\mathbf{P}_{k k} = \mathbf{P}_{k k-1} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k k-1}$
卡尔曼增益	$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k k-1}\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R})^{-1}$

3 PMSM DTC-SVM 实现

图 1 为无速度传感器 PMSM DTC-SVM 控制框图。其中，EKF 观测器获得电机转速和定子磁链观测值，用作控制中的反馈量。参考转速 ω^* 和反馈转速 ω_t 的误差通过 PI 控制器得到转矩参考值 T^* 。参考转矩 T^* 和电磁转矩 T_e 的误差通过 PI 控制器获得转矩角增量 $\Delta\delta$ 。利用参考磁链 ψ_s^* 、反馈磁链 ψ_s 、反馈磁链位置 r_s 、转矩角增量 $\Delta\delta$ 和定子电流 $i_{\alpha,\beta}$ 计算得到定子电压参考值 U_α 、 U_β 。计算过程如下：

$$\begin{cases} U_\alpha = \frac{\psi_s^* \cos(r_s + \Delta\delta) - |\psi_s| \cos r_s}{T_s} + R_s i_\alpha \\ U_\beta = \frac{\psi_s^* \sin(r_s + \Delta\delta) - |\psi_s| \sin r_s}{T_s} + R_s i_\beta \end{cases} \quad (19)$$

电磁转矩反馈根据式(20)计算：

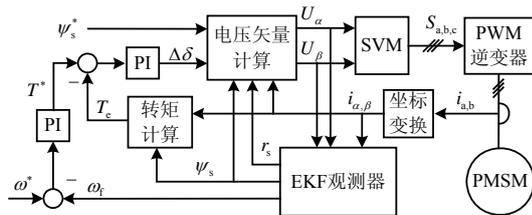


图 1 控制系统框图

Fig. 1 Control block diagram

$$T_e = P_n(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (20)$$

式中 P_n 为电机极对数。

4 实验结果

为了验证基于 EKF 观测器的无速度传感器 PMSM DTC-SVM 控制系统的性能，在基于 TMS320F2812 的永磁同步电机实验平台上进行了实验验证。实验采用一台隐极式永磁同步电机，电机参数如表 2 所示，与电机同轴连接的测功机向系统提供负载转矩。系统控制周期为 100 μs 。EKF 输入的电压为电压参考值，逆变器死区时间、器件非线性和管压降等因素会造成电压参考值与机端实际电压的不同。尤其在极低速情况下，逆变器的非线性和器件的管压降等因素造成电压参考值与机端实际电压值差距显著增大，如果需要极低速运行，需要仔细考虑这些问题，本文中只针对低速和中速进行了相关实验，对死区时间进行了补偿，极低速运行有待进一步研究。实验中使用的 \mathbf{Q}_d 、 \mathbf{R} 和 \mathbf{P}_0 参数如下：

$$\mathbf{Q}_d = \text{diag}(0.001, 0.001, 5000, 0.2) \quad (21)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}(0.08, 0.08) \quad (22)$$

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag}(0.1, 0.1, 300, 0.5) \quad (23)$$

表 2 电机参数

Tab. 2 Motor parameters

电机参数	数值
R_s/Ω	1.125
P_n	4
L/H	0.00477
ψ_f/Wb	0.1292
$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.0048

图 2~4 为电机运行在参考转速 375 r/min 的实验波形。其中，图 2 为空载启动转速波形，在动态阶段，估算转速落后于实际转速，落后数值的大小由 \mathbf{Q}_d 矩阵中对应的 $\mathbf{Q}_d(3,3)$ 决定， $\mathbf{Q}_d(3,3)$ 越大，落后的数值越小，但太大的 $\mathbf{Q}_d(3,3)$ 会使 EKF 系统不稳定，实验中综合考虑系统稳定性和稳态性能，确定 $\mathbf{Q}_d(3,3)=5000$ 。图 3 为突加负载时电机响应波形，负载转矩从约 0.9 N·m 增加到约 1.6 N·m，其中图 3 (a) 为观测转速和实际转速波形，图 3 (b) 为突加负载过程实际转速与观测转速之间的误差波形，图 3 (c) 为突加负载过程中电机输出的电磁转矩波形。图 4 为在负载转矩约为 1.6 N·m 情况下，观测得到的定子 α - β 轴磁链波形。

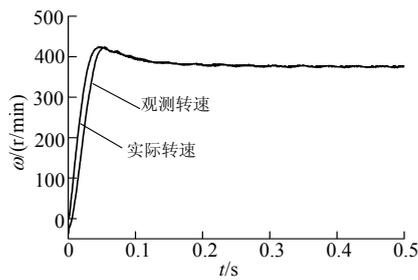
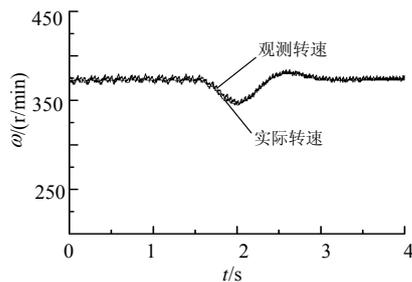
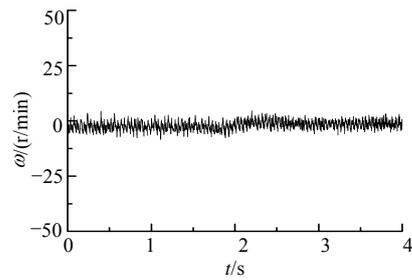


图 2 启动转速

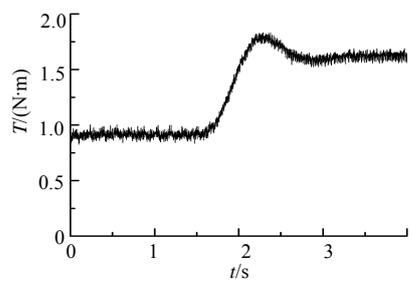
Fig. 2 Speed waveform during starting process



(a)转速波形



(b)实际转速和估算转速误差波形



(c)电磁转矩波形

图 3 突加负载过程电机响应波形

Fig. 3 Waveform with load torque change

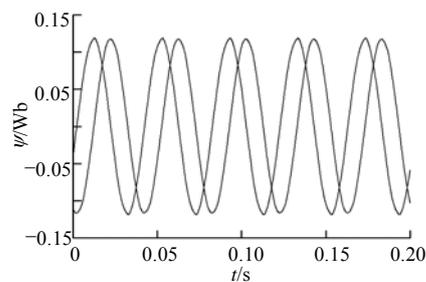


图 4 观测定子磁链

Fig. 4 Observed stator flux linkage

图 5 为电机在低速 150 r/min 运行时的空载转速及带载转速波形,图 6 为 150 r/min 运行时观测磁链波形,所加负载约为 1.6 N·m,从图中可以看出,在低速情况下,电机能够带载稳定运行。

上述实验曲线表明本文所提出的基于 EKF 的 PMSM 转速和磁链观测器能够准确观测电机转速和磁链,所构成的无速度传感器 PMSM DTC-SVM 控制系统具有很好的动静态性能。

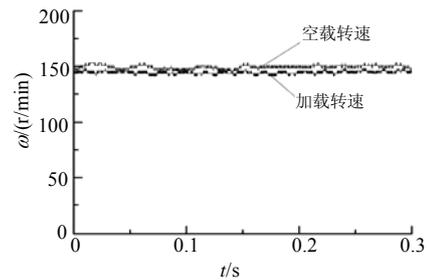


图 5 低速运行转速波形

Fig. 5 Speed waveform in low speed range

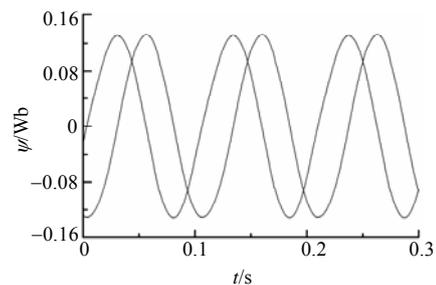


图 6 低速运行定子磁链波形

Fig. 6 Stator flux linkage in low speed range

5 结论

提出了一种基于 EKF 的 PMSM 转速和磁链观测器,并利用转速和磁链观测器实现了 PMSM 无速度传感器 DTC-SVM 运行。通过选取定子固定 $\alpha\text{-}\beta$ 坐标系下的定子磁链、电机转速和转子位置作为状态变量,选取定子电压和电流为输入、输出向量,构建了 EKF 观测器,克服了以定子电流为状态变量的多解问题。利用 EKF 观测器观测得到的定子磁链和电机转速,实现了永磁同步电机无速度传感器直接转矩控制。磁链观测克服了直接转矩控制中纯积分方法的缺陷;速度估算动态跟随性好,并且无需系统机械参数,增强了系统的鲁棒性。采用空间矢量调制的直接转矩控制方法,减小转矩脉动,获得较高转矩和转速控制性能。实验结果表明本文提出的方法的准确性和鲁棒性。

参考文献

- [1] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1997, 13(5): 528-536.
- [2] 史渗微, 邱建琪, 金孟加, 等. 永磁同步电动机直接转矩控制方法的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 141-146.
Shi Cenwei, Qiu Jianqi, Jin Mengjia, et al. Study on performance of different direct torque control methods for permanent magnet synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 141-146(in Chinese).
- [3] 金孟加, 邱建琪, 史渗微, 等. 基于新型定子磁链观测器的直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 139-143.
Jin Mengjia, Qiu Jianqi, Shi Cenwei, et al. A novel stator flux estimator for direct torque controlled magnet synchronous motor drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 139-143(in Chinese).
- [4] 刘军, 刘丁, 吴浦升, 等. 基于模糊控制调节电压矢量作用时间策略的永磁同步电机直接转矩控制仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 148-152.
Liu Jun, Liu Ding, Wu Pusheng, et al. The simulation analysis of permanent magnet synchronous motor based on the strategy of modulating the time of voltage vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 148-152(in Chinese).
- [5] 孙丹, 贺益康. 基于恒定开关频率空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 112-116.
Sun Dan, He Yikang. Space vector modulated based constant switching frequency direct torque control for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 112-116(in Chinese).
- [6] Jun Hu, Bin Wu. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 13(5): 969-977.
- [7] 许俊峰, 徐英雷, 冯江华, 等. 基于改进型积分器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 77-80.
Xu Junfeng, Xu Yinglei, Feng Jianghua, et al. Direct torque control of permanent magnet synchronous machines based on modified integrator[J]. Transactions of china electrotechnical society, 2004, 19(7): 77-80(in Chinese).
- [8] Xu Junfeng, Wang Fengyan, Xie Shaofeng, et al. A new control method for permanent magnet synchronous machines with observer [C]. Power Electronics Specialists Conference, 35th Annual IEEE, Aachen Germany, 2004.
- [9] 贾洪平, 贺益康. 一种适合DTC应用的非线性正交反馈补偿磁链观测器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 101-105.
Jia Hongping, He Yikang. A new nonlinear perpendicular flux observer with compensation feed back suitable for DTC application [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 101-105(in Chinese).
- [10] Rahman M F, Zhong L, Haque Md E, et al. A direct torque-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drive without a speed sensor[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2003, 18(1): 17-22.
- [11] Hu Yuwen, Tian Cun, You Zhiqing, et al. Direct torque control system and sensorless technique of permanent magnet synchronous motor[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(2): 97-102.
- [12] Bolognani S, Oboe R, Zigliotto M. Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999, 46(1): 969-977.
- [13] Bolognani S, Tubiana L, Zigliotto M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2003, 39(6): 1741-1747.
- [14] Bolognani S, Zigliotto M, Zordan M. Extended-range PMSM sensorless speed drive based on stochastic filtering [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2001, 16(1): 110-117.
- [15] Swierczynski D, Kazmierkowski M P. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) using space vector modulation (DTC-SVM)-simulation and experimental results [C]. The 28th IEEE Conference of the Industrial Electronics Society, Seville Spain, 2002.

收稿日期: 2007-05-24。

作者简介:

张 猛(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为永磁同步电机控制及其应用, zhangm98@mails.tsinghua.edu.cn;

肖 曦(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子与高性能电机控制方面的研究;

李永东(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能、大容量、全数字化交流电机控制系统的理论和应用研究。

(编辑 王剑乔)