

永磁同步电机的交流伺服控制系统仿真

刘丽伟 张小杰 丁圆圆 樊冰剑

(长春工业大学计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 在交流伺服电机控制系统中, 系统调节器的参数决定系统的动态性能, 并且负载变动、对象参数变动对系统各环节都有很大影响, 使实际电机控制中参数的调节比较困难。针对此问题, 通过对永磁同步电机(PMSM) 数学模型的分析, 根据实际程序搭建了基于 Matlab/Simulink 仿真软件的控制系统仿真模型。实验结果表明, 上述模型在负载变动和对象参数变动时, 具有较好的鲁棒性和准确性, 为实际 PWSM 控制系统的参数调节提供了很大的方便。

关键词: 永磁同步电机; 参数调节; 电流环; 伺服控制

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** B

Electric – Flow Modeling for PMSM and Servo Control System Simulation

LIU Li – wei ZHANG Xiao – jie DING Yuan – yuan FAN Bing – jian

(College of Computer Science and Engineering , Changchun University of Technology , Changchun Jilin 130012 , China)

ABSTRACT: In the AC servo motor control system , dynamic properties are affected by the parameter of the system regulator , and the changes of load and parameter have great influence on all aspects of system , so , it is difficult to adjust the parameters in actual motor control. To solve this problem , the permanent magnet synchronous motor (PMSM) mathematical model is analyzed , and a control system simulation model is built based on the actual program with Matlab/Simulink simulation software. Simulation results show that the model changes when the load and object parameter change , and it has good robustness and accuracy.

KEYWORDS: Permanent magnet synchronous motor; Parameter adjustment; Current loop; Servo control

1 引言

现代交流伺服系统是一种复杂的非线性时变系统。应用现代科学工具对交流伺服系统进行研究的重要手段之一就是交流伺服系统的建模与仿真。系统建模可以超越理想去模拟复杂的现实物理系统; 而系统仿真则可以对照比较各种控制策略和方案, 优化系统的控制结构和系统参数。如果能建立一种在控制算法、逆变器、电机模型和实验装置一样的仿真, 就可以在仿真上进行参数调节和分析。

目前, 对于永磁同步电机的仿真和建模都是在封装好的 Matlab/Simulink 库中直接调用的, 跟实际的程序和算法有很大差异, 因此仿真调节器的参数和实际调节器参数没有任何的联系。这样的仿真对实际参数的调节意义不大。

因此, 本文通过对永磁同步电机数学模型的分析, 基于

TMS320F28335 的控制程序, 对交流伺服系统进行建模和仿真, 并将控制系统电流环模型和实验系统作一个对比, 以验证仿真的正确性和证明该仿真对调节实际参数有很大帮助。

2 永磁同步电机的数学模型

永磁同步电机电子定子三相对称绕组 U、V、W, 定子和转子之间通过气隙磁场耦合。定转子与转子之间各个量的电磁耦合关系复杂, 给永磁同步电机的分析与控制带来不便之处。为了简化分析, 假设忽略磁路饱和、磁滞和涡流的影响, 各绕组轴线在空间上互差 120 度电角度, 永磁体没有阻尼作用, 电机电势正弦, 在定、转子参考坐标系下, PWSM 的模型如图 1。

通过对永磁同步电机的数学模型坐标变换, 可以得到在 dq 坐标系的磁链、电压方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

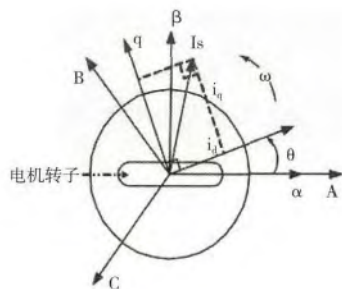


图1 永磁同步电机的物理模型

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q + R_s i_d \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d + R_s i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感; ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴磁链; ψ_f 为永磁磁链; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴电流; u_d 、 u_q 为 d 、 q 轴电压; R 为定子绕组电阻。联立式 (1) 和式 (2) 得

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \psi_f \end{cases} \quad (3)$$

在 $d-q$ 坐标系下 PMSM 的转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

机械运动方程为:

$$T_e = T_L + B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; p_n 为电机极对数; J 为转动惯量; ω_m 为机械角速度; B 为粘滞系数。

3 基于 Matlab 交流伺服系统仿真模型的建立

3.1 永磁同步电机的控制策略

本文主要以 $I_d = 0$ 矢量控制策略和空间电压矢量调制技术为主。

$I_d = 0$ 是最常用的一种磁场定向控制策略,称为转子磁场定向控制。如图 2 所示,它的原理是电机的电枢反应主要是由于定子电流的 q 轴分量引起的,定子电流 d 轴分量相当于励磁电流。在额定转速和恒定转矩调速方式下能够输出最大的转矩,因此使定子电流与 d 轴正交是最佳的控制方式,也就是保持 $I_d = 0$ 。此外,根据负载和频率的情况,矢量控制方式可以使变频器实时的改变输出电压和频率,因此其动态性能比较完善。

SVPWM 是当今发展的一种比较新颖的控制方法,是由三相功率逆变器的六个功率开关元件组成的特定开关模式产生的脉宽调制波,能够使输出电流波形尽可能接近于理想的正弦波形,空间电压矢量 PWM 与传统的正弦 PWM 不同,

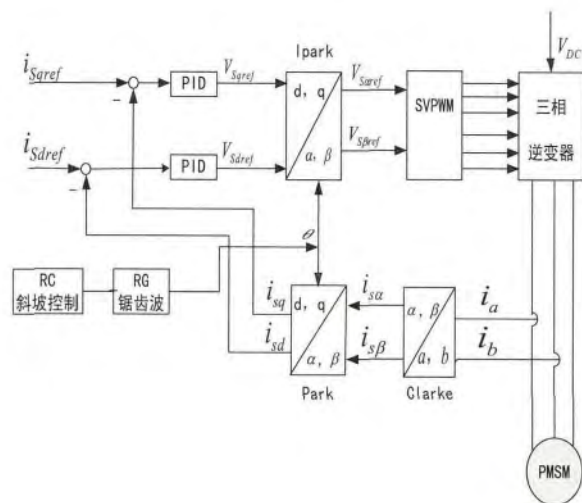


图2 永磁同步电机的转子磁链定向控制

它是从三相输出电压的整体效果出发,着眼于如何使电机获得理想圆形磁链轨迹。SVPWM 技术与 SPWM 相比较,绕组电流波形的谐波成分小,使得电机转矩脉动降低,旋转磁场更逼近圆形,而且使直流母线电压的利用率有了很大提高,且更易于实现数字化。

交流伺服系统一般具有电流环、速度环和位置环三闭环结构,电流环的作用是提高系统的快速性,抑制电流环内部干扰,限制最大电流,电流调节器输出控制信号送入脉冲形成、分配和驱动环节,控制开关管通断时间,调节 PWM 变换器控制的电动机输出。因此电流环是改变伺服系统性能的关键。所以限于篇幅,仅对电流环进行建模和仿真。并将仿真结果和实际测试结果进行对比。

3.2 系统模型的建立

在 Matlab 中应用 Simulink 建立永磁同步电机控制系统仿真模型,如图 3 所示。

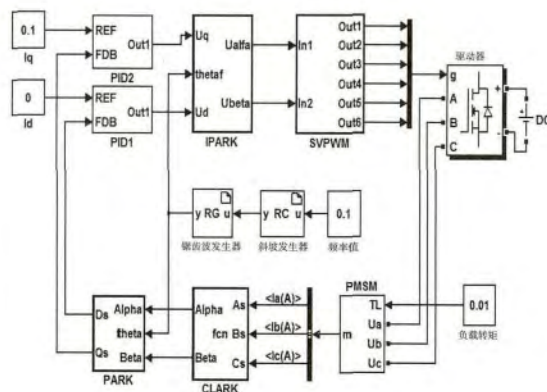


图3 交流伺服控制系统仿真

将三相电流的采样数值进行坐标变换,通过 Clarke 变换

将三相($a\ b\ c$)坐标系下 $i_a\ i_b\ i_c$ 转换到两相静止坐标系($\alpha\ \beta$)下 $i_\alpha\ i_\beta$ 为两相正交的正弦波。为便于系统控制将 $i_\alpha\ i_\beta$ 通过 Park 变换转换到两相旋转的($D\ Q$)坐标系下 $i_d\ i_q$ 为两条直线。通过磁场定向给定 $i_d^* = 0\ i_q^*$ 参考值为实际给定值。参考与反馈值进行差值运算后通过 PI 控制器进行调节,输出数值经 PARK 逆变换后提供给 SVPWM 算法模块产生 PWM 脉冲波形控制逆变器驱动电机。在此控制系统仿真模型中,包括斜坡发生器(RC)模块、锯齿波发生器(RG)模块、比例积分控制器(PID)模块(如图 4(a))、空间矢量控制算法(SVPWM)模块(如图 4(b))、克拉克变换(CLARK)模块(如图 4(c))、派克变换(PARK)模块(如图 4(d))、永磁同步电机(PMSM)本体模块(如图 4(e))等。其

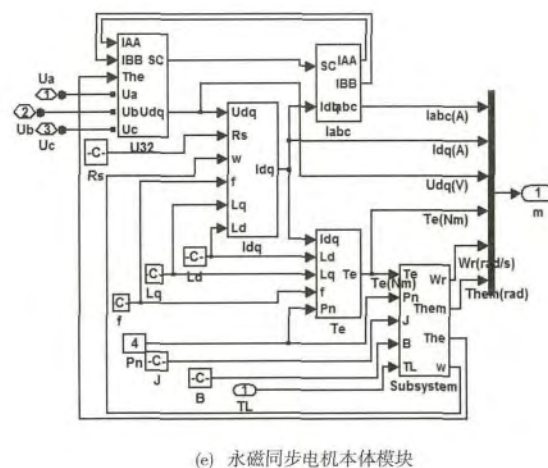
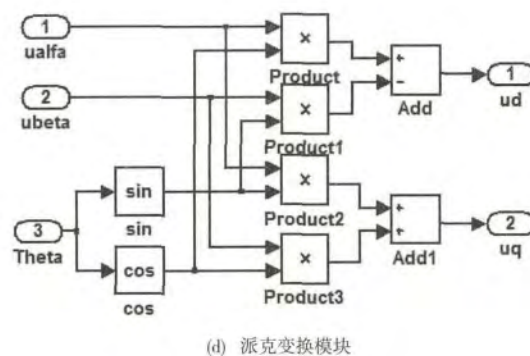
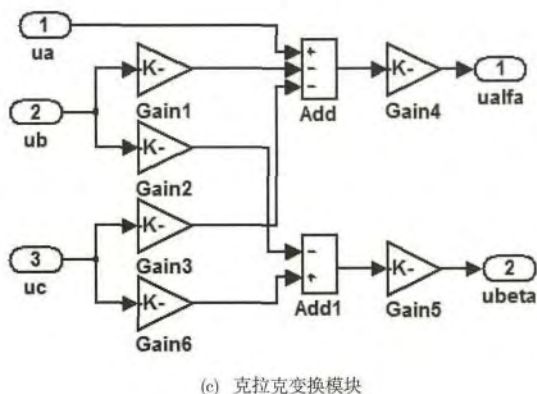
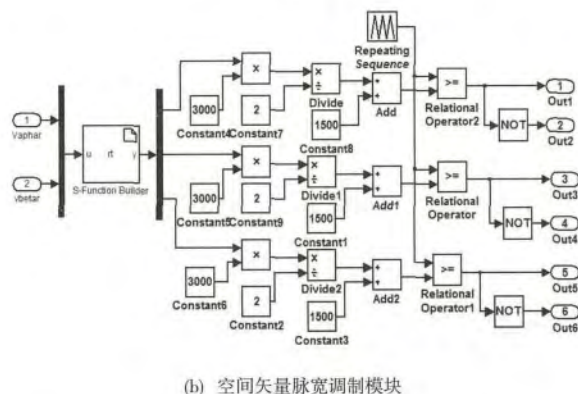
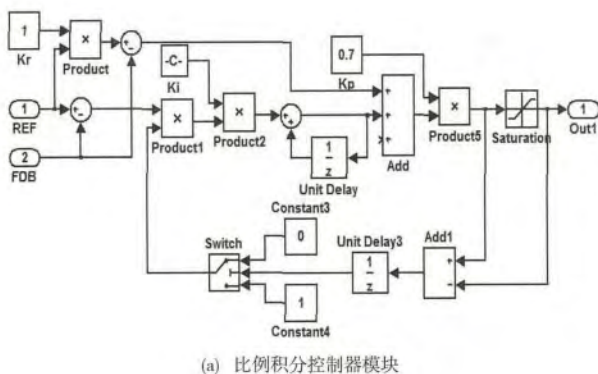


图 4 模块仿真图

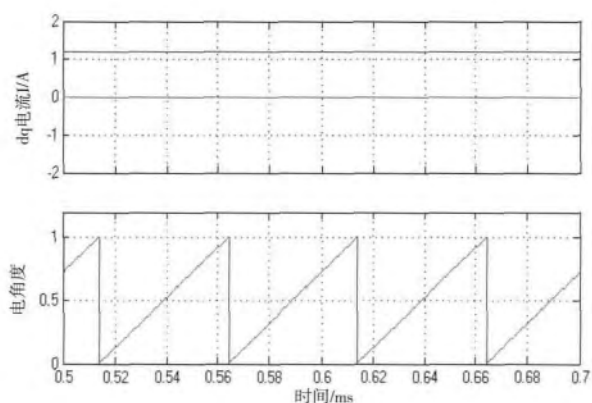
中 RC 模块是斜坡发生器,使电机可以平滑启动。RG 模块可以产生一定频率的锯齿波,为旋转磁场提供一定频率的电角度。以实际系统为参照,通过仿真观察各个模块实际的波形进而进行参数调节。

3.3 仿真结果与实验结果分析

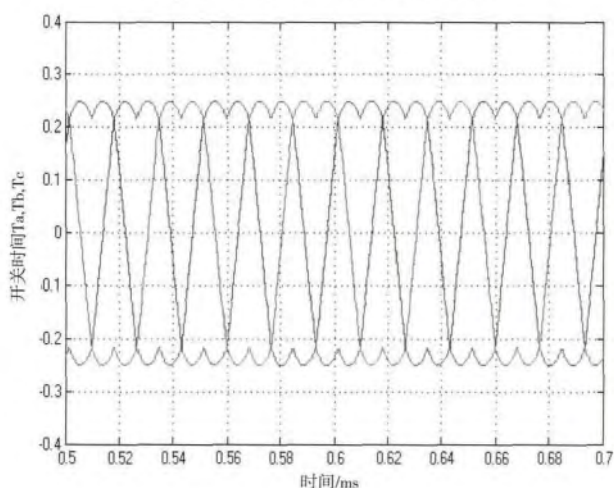
为验证仿真系统的正确性,仿真系统的参数采用实际硬件电路参数。其中采用雷赛 BL-M5702 电机,定子相绕组电阻 $R = 1.73\Omega$, $d\ q$ 轴等效电感 $L_q = L_d = 3.36\text{mH}$,转动惯量 $J = 0.03\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。极对数 $N_p = 4$ 直流侧电压为 2V。电机控制实验中,以 DSP28335 为控制器,DRV8312 为驱动器搭建实验平台,为了采集控制器内部实时数据,系统中设计了一个高速的 USB 虚拟示波器,在上位机中,利用 NI 的 LabView 设计了实时显示的人机界面,实现实际采样数据和仿真数据的对比。实验装置中电流环采样频率是 20kHz, SVPWM 的输出分辨率是 13 位。

图 5 为 matlab 仿真输出波形。图 5(a) 是 dq 坐标系的分量和旋转磁场的电角度。dq 坐标系的分量作为电流的输入。旋转磁场的电角度作为转速的输入。图 5(b) 为在此输入信号下产生的开关时间点 $T_a\ T_b\ T_c$ 。图 5(c) 是采集的三相电流 $I_a\ I_b\ I_c$ 。

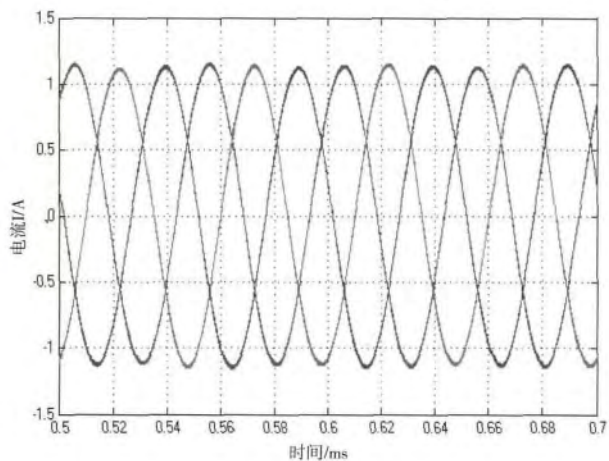
图 6 为实际电机控制输出波形。图 6(a) 为实测的电角



(a) dq 坐标系 i_d , i_q 和给定旋转磁场电角度



(b) 仿真开关时间点 T_a , T_b , T_c



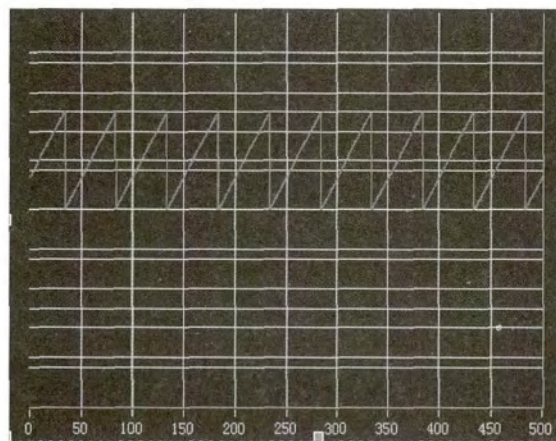
(c) 仿真三相正弦电流

图5 仿真波形图

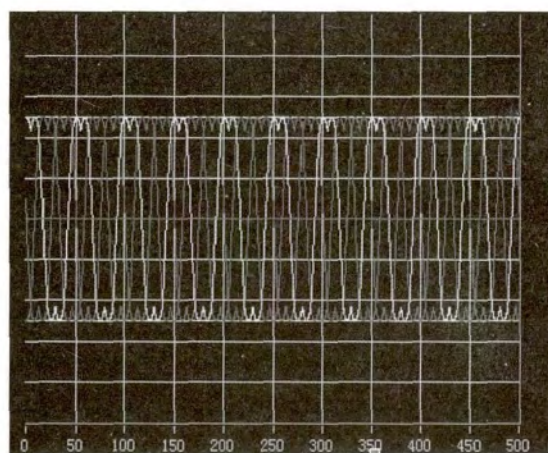
度波形。图 6(b) 为实测的开关时间点 T_a 、 T_b 、 T_c ，图 6(c) 为实测的 I_a 、 I_b 、 I_c 三相正弦电流的波形。

仿真输出波形和实测波形对比可知：

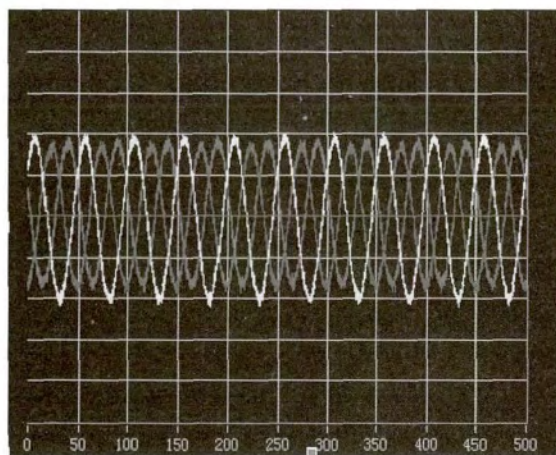
1) 伺服电机的转速和正弦波的频率成正比，给定的锯齿波(电角度)频率越高，转速越快，正弦波的频率也就越高。



(a) 实测输入的电角度



(b) 实测开关时间点 T_a 、 T_b 、 T_c



(c) 实测三相正弦电流

图6 实测波形图

2) 在给定电流幅值和频率一致的情况下，仿真模型产生的开关时间点和实测开关时间点均为频率相同相位相差 120 度的马鞍波，这证明仿真模型是正确性。

3) 仿真模型和实际波形的给定电流值为 1.2A，频率为 20kHz 时，仿真输出结果和实测结果电流 (下转第 301 页)

次数和降低用户费用等方面优于传统算法。

4 结语

本文针对以往垂直切换决策算法的不足,提出了一种更为客观科学的算法,该算法区分不同业务类型,并全面地考虑了影响网络选择的各种决策因素,提高了最终决策的准确性。通过建模仿真分析对算法进行验证。由仿真结果比较得出,新提出的算法提高了最优网络选择的可靠性与有效性,并兼顾了网络的系统性能,达到了资源的优化利用。同时弥补了以往算法中赋权较为主观,对不确定性问题难以处理,算法复杂度过高等不足。

参考文献:

- [1] Abubeker A Yussuf, Wan H Hassan, Sinzobakwira Issa. A Review of VHD Approaches in Next Generation Wireless Networks [C]. 2012 2nd International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications, DICTAP 2012, 2012: 363 - 367.
- [2] 刘敏,李忠诚,过晓冰. 一种基于速度感知的垂直切换算法[J]. 电子学报, 2008, 30(6): 1198 - 1201.
- [3] A Serrador and L M Correia. Policies for a cost function for hetero-

geneous networks performance evaluation [C]. Proc. of 18th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIM-RC'07), Athens Greece, Sept. 2007: 96 - 103.

- [4] 杨剑波. 多模智能终端在异构无线网络中的垂直切换技术研究[D]. 信息工程大学, 2013.
- [5] W Wanalerlak, B Lee, C Yu, M Kim, S M Park and W T Kim. Behavior-based mobility prediction for seamless handoffs in mobile wireless networks [J]. Wirel. Netw., 2011, 17(3): 645 - 658.
- [6] R Chakravorty et al. Performance issues with vertical handovers experiences from GPRS cellular and WLAN hot-spots integration [C]. 2nd IEEE Conference on Pervasive Computer and Communication, Orlando USA, 2004: 155 - 164
- [7] 3GPP. Technical Specification TS23.107, V.4.0.0 [S]. 3GPP. QoS, Concept and Architecture, 2000 - 1.



[作者简介]

陈珏瑜(1989 -),女(汉族),上海人,硕士研究生,主要研究领域为移动通信。

蔡家麟(1964 -),男(汉族),上海人,副教授,硕士研究生导师,主要研究领域为移动通信。

(上接第264页)

幅值均为都在1.2A左右,相位相差120°的正弦波,验证了仿真模型的正确性。

在仿真中,实际调节的参数是 $K_p = 0.25$, $K_d = 0$, $K_i = 0$ 。在实际试验中得到的 $K_p = 0.23$, $K_i = 0.055$, $K_d = 0$ 。从数据上来看,仿真的PID和实验装置的PID参数基本相同,这样可以通过仿真观察系统参数调节的趋势,并且运用到实际当中,加快运动控制的设计和调试。但是从波形图也可以看到实测的波形有比较大的谐波,这是因为系统存在的摩擦力和硬件上有些干扰造成的,尤其是输出的PWM会干扰采集到的AD数值。如果要得到和实验装置更加一致的仿真结果,还要加上这些因素。

4 结束语

实验证明,在仿真模型中算法模块、逆变器、电机模型与实验装置一致的基础上,仿真结果和实验结果基本一致,建立的交流伺服控制系统仿真模型正确可用。通过系统的仿真观察系统的动态性能,对实际控制系统的参数的调试提供了便利之处。

参考文献:

- [1] 陈荣. 永磁同步电机控制系统[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008 - 2.
- [2] 舒志兵. 交流伺服运动控制系统[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [3] T Instruments. Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx [J]. Application Report BP - RA, 1996 48.

- [4] 陈荣. 永磁同步电机伺服系统电流环的仿真[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(9): 20 - 25.
- [5] L M Grzesiak, T Tarczewski. PMSM servo drive control system with a state feedback and a load torque feed forward compensation [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2012, 32(1): 364 - 382.
- [6] 薛定宇,陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [7] X Wang, R Na, N Liu. Simulation of PMSM field-oriented control based on SVPWM [C]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE. IEEE, 2009: 1465 - 1469.
- [8] 鲍建成. 永磁同步电机PID参数优化研究[J]. 计算机仿真, 2012 - 4: 247 - 250.
- [9] 徐殿国,等. 永磁同步电动机伺服系统控制策略综述[J]. 伺服控制, 2005, (1): 16 - 21.
- [10] Bimal K Bose 著,王聪译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

[作者简介]

刘丽伟(1974 -),女(汉族),吉林通化人,博士研究生,主要研究领域为模式识别和智能系统。

张小杰(1988 -),男(汉族),河北邯郸人,硕士研究生,主要研究领域为电力电子和自动控制。



丁圆圆(1988 -),女(汉族),山东菏泽人,硕士研究生,主要研究领域为图像处理和模式识别。

樊冰剑(1988 -),男(汉族),山东泰安人,硕士研究生,主要研究领域为现在电子变换应用研究。