

基于 TMS320F28335 的永磁同步电机数字化矢量控制器设计

陈 高, 杨家强*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了提高永磁同步电机控制器的控制性能, 设计和开发了一套以浮点型 TMS320F28335 数字信号处理器(DSP)为控制核心, 主回路为“交-直-交”拓扑结构的永磁同步电机数字化矢量控制器。与采用 TMS320LF2407、TMS320F2812 等传统定点型 DSP 为控制核心的永磁同步电机控制器相比, 其具有编程简单、运算速度快、片内 A/D 精度高等优势。该控制器使用 TMS320F28335 的内部 A/D 采样电压、电流信号; 采用增量式光电编码器与 DSP 自带的增强型正交编码脉冲(EQEP)模块测量转速和位置。控制器有软件、硬件两种保护; 并充分利用 DSP 的增强型 PWM(EPWM)模块, 能灵活生成高精度的空间矢量脉宽调制(SVPWM)信号。实验结果证明, 控制器具有编程简单、运算速度快、控制灵活等特点。

关键词: 永磁同步电机; 数字信号处理器; 矢量控制器; 增强型正交编码脉冲; 空间矢量脉宽调制

中图分类号: TM341; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)09-1090-05

Design of digital vector controller for PMSM based on TMS320F28335

CHEN Gao, YANG Jia-qiang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the performance of vector controller, a digital vector controller for permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on float-point digital signal processor(DSP) TMS320F28335 was designed. Compared with the conventional PMSM control system based on fixed-point DSP such as TMS320LF2407 and TMS320F2812, it had advantages in programming, computing speed and accuracy of A/D. The main circuit used the AC-DC-AC topology structure. The voltage, current signals were sampled by internal A/D of TMS320F28335. Speed and position were measured in the enhanced quadrature encoder pulse (EQEP) module based on incremental photoelectric encoder. And software and hardware double protection circuits were designed. The high-precision space vector pulse width modulation (SVPWM) signals can be generated flexibly in the enhanced pulse width modulator (EPWM) module. The experimental results indicate that this control system has advantages of simple programming, fast computing speed and flexible control.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); digital signal processor(DSP); vector controller; enhanced quadrature encoder pulse (EQEP); space vector pulse width modulation(SVPWM)

0 引 言

永磁同步电动机(PMSM)具有结构简单、运行可靠、体积小、重量轻,以及较高的效率和功率因数等优点,因此在高性能的伺服驱动等领域具有广阔的应用空间^[1-4]。成熟的矢量控制理论与高性能的电机控制

芯片 DSP 相结合已经成为高性能交流伺服控制器的标志。然而由于目前常用的电机控制芯片多为定点型 DSP(如 TMS320F2407, TMS320F2812 等),在某些控制算法比较复杂,控制精度要求较高的场合,控制器存在编程相对复杂、运算速度相对较慢、片内 A/D 精度相对较低、内部存储空间相对较小等问题^[5-9]。

为了解决这些不足之处,本研究在分析 PMSM 的数

收稿日期:2011-01-04

作者简介:陈 高(1986-),男,山东泰安人,主要从事电机控制方面的研究. E-mail:chengao85@126.com

通信联系人:杨家强,男,副教授,硕士生导师. E-mail:yjq1998@163.com

学模型和矢量控制理论的基础上,设计一套以32位浮点型DSP TMS320F28335芯片为控制核心,主回路为AC/DC/AC拓扑结构的PMSM全数字化矢量控制器。并在该控制器下,完成对一台三相PMSM的矢量控制。控制器采用三菱公司的智能功率模块(IPM)PM50CLA120为主回路开关器件,使用增量式光电编码器检测PMSM转子的位置与速度,并有软、硬件两种保护。该控制器具有硬件结构简单、控制精度高等特点。

1 PMSM 数学模型及控制算法

一台三相永磁同步电机的解析模型如图1所示。在忽略铁芯饱和效应,气隙磁场呈正弦分布等条件下,永磁同步电机在d、q坐标系下的电压方程式与电磁转矩方程式分别为:

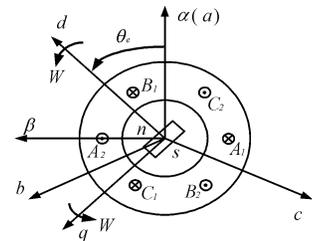


图1 三相永磁同步电机的解析模型

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + PL_d & -wL_q \\ wL_d & R + PL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w\psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = 1.5P_n[\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

式中: u_d, u_q —d、q轴的定子电压; i_d, i_q —d、q轴的定子电流; L_d, L_q —d、q轴上的定子绕组的等效自感; w —转子的电角速度; R —定子绕组电阻; T_e —电磁转矩; P_n —电动机的极对数; ψ_f —转子永磁磁链。

当采用 $i_d = 0$ 矢量控制方法时,电磁转矩方程式(2)右边的第2项变为零。此时电机的电磁转矩与交轴电流成线性关系,所以该控制方法实现比较简单,没有直轴电枢反应,不会引起永磁体退磁。三相永磁同步电机的矢量控制原理框图如图2所示,控制器采用电流内环和转速外环组成的双环控制。其中,设d轴电流的给定值为0;q轴电流的给定值由给定转速与实际转速的差值经过PI调节得到。电流传感器检测到的三相电流经坐标变换可得d、q轴的实际电流值。电流给定值与实际值的差值经过PI调节可以得到d、q轴的定子电压给定值,再经过坐标变换可以得到SVPWM所需的 V_α^* 和 V_β^* 。由这两个电压分量可以确定合成电压矢量所在的扇区,并可计算出该扇区内两相邻电压矢量以及零矢量的作用时间,最后输出SVPWM信号来控制逆变器。

2 控制器硬件设计

控制系统的主控芯片采用一款32位浮点型DSP

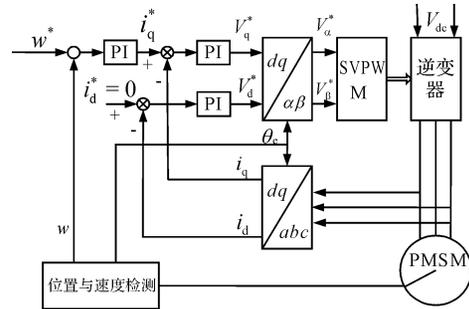


图2 三相永磁同步电机矢量控制原理框图

芯片TMS320F28335。其运算主频达到150MHz,支持IEEE标准单精度浮点数,并有256KB×16片上Flash,34KB×16SARAM储存空间^[10]。TI公司给出的定点与浮点芯片性能基准^[11]如表1所示。从表中可以看到,TMS320F28335等浮点芯片较TMS320F2812等定点芯片实现除法运算法则时,可以提高50%的处理速度。所以其实现相同算法的时间将会大大缩短,可以适应具有更高开关频率的开关器件。由于支持32位IEEE单精度浮点数,TMS320F28335等浮点芯片数据的表示范围为 $\pm 1.7^{-38} \sim \pm 3.4^{+38}$;而定点芯片数据的表示范围为 $\pm 2^{-31} \sim \pm 2^{+31}$ 。因此采用浮点芯片降低了计算溢出的可能性,防止了定点数运算中可能出现的倒置现象;并且不需要利用IQmath库将浮点算法转化为定点算法,缩短了代码长度,提高了计算精度。为了获得更好的控制性能,控制器采用的控制算法等也变得更为复杂,TMS320LF2407和TMS320F2812等芯片的内部存储空间往往不足。TMS320F28335可以提供更大的内部存储空间,可以更好地满足要求。

表1 定点与浮点芯片性能基准

运算法则	TMS320C28x (定点)	TMS320C2833x (浮点)
除法	70	24
开方	60	27
sin, cos	92	44
arctan	118	53
FFT	~27 000	~11 000
IIR	14次循环	8次循环

注:数字单位均为CPU时钟周期,以上数据均由TI公司提供。

三相永磁同步电机的矢量控制器硬件框图如图3所示。该控制器主要由主回路、检测电路和以DSP为控制核心的控制器等构成。主回路包括不控整流模块、IPM逆变模块以及PMSM。检测电路主要包括电压、电流信号检测电路,故障信号检测电路,速度位置检测电路等。控制器实现的主要功能有:矢量算法的实现,PWM驱动信号的输出,输入信号的处理,键盘等控制信号的输入,LCD的控制显示等。

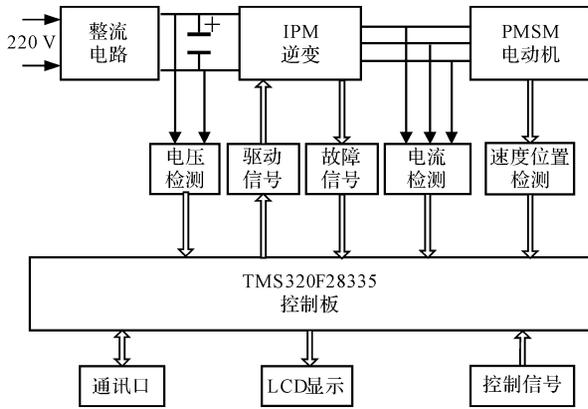


图 3 三相永磁同步电机矢量控制硬件框图

2.1 转速与位置检测电路

采用增量式光电编码器检测转速和位置时,常用的测速方法有 M 法、T 法和 M/T 法。其中 M/T 法兼顾高低转速,是综合性能最佳的一种。为了方便与光电编码器配合,TMS320F28335 配置了相应的增强型正交编码脉冲(EQEP)模块。只要将模块中相应的控制寄存器进行简单设置,利用其位置计数单元和捕捉单元可方便地实现以上 3 种测速方法。而 TMS320F2812 等采用的是事件管理器中的 QEP 单元,此时的捕获功能被禁止;其实现 M/T 法需要占用较多的程序资源。因此采用 TMS320F28335 较采用 TMS320F2812 大大简化了程序的复杂程度。

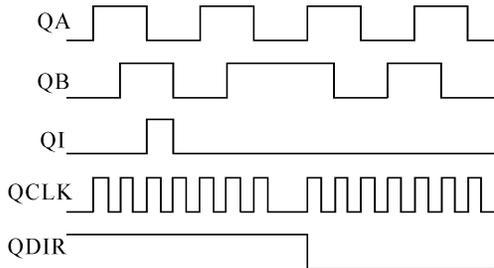


图 4 增量式光电编码盘输出信号

增量式光电编码器的输出信号如图 4 所示。增量式光电编码器一般输出 A、B、Z 这 3 个信号到 EQEP 模块。其中,QA、QB、QI 分别代表光电编码器的 A、B、Z 信号;QCLK 为 QA 与 QB 产生的正交编码脉冲;QDIR 为转子旋转方向。由于 EQEP 模块对双沿有效,所以 QCLK 为 QA(QB)信号的 4 倍频信号。在控制器中,光电编码器采用 5 V 直流电源供电。为了减少干扰并与 TMS320F28335 的供电电平进行匹配,需将光电编码器的输出信号经过光耦隔离电路变为 3.3 V 电平后再引入 EQEP 模块的对应管脚。同时为保证输入信号的精确性,光耦隔离电路采用的光耦必须为 6N127 等型号的高速光耦。

2.2 电流检测电路

TMS320LF2407、TMS320F2812、TMS320F28335 等均有 16 路 A/D 转换通道。其中 TMS320F2812 和 TMS320F28335 采样精度为 12 位,而 TMS320LF2407 的采样精度相对较低,仅为 10 位。TMS320F28335 的内部 A/D 在 TMS320F2812 内部 A/D 的基础上进行了改进;能够提供更准确的采样基准,减小了增益误差并且能够内部纠正偏置误差。这提高了 TMS320F28335 内部 A/D 的采样精度,能够适用于采样精度要求较高的场合。为了保证控制器整体的采样精度,控制器采用高精度的 LAH 25-NP 型霍尔电流传感器测量定子电流。由于 TMS320F28335 的 ADC 模块的输入电压范围为 0 V ~ 3 V,电流采样电路需将霍尔互感器输出的电流信号调整为大小在 0 V ~ 3 V 范围内的电压信号。电流检测电路如图 5 所示, R_1 为精密电阻,用于将电流霍尔传感器输出的电流信号转换为电压信号;运放 B 与相邻的电阻、电容组成二阶低通滤波器,对电流进行滤波处理,去除采样通道等的干扰;运放 C 的电压加法电路,用于提升电流检测信号的电压;3.0 V 稳压管用于保护 DSP 的 ADC 模块的输入端。

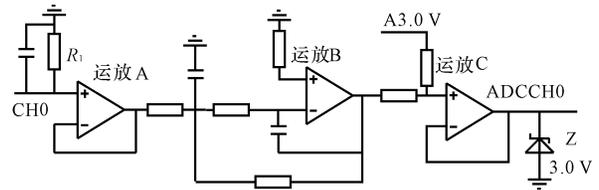


图 5 电流检测电路

2.3 双保护电路

控制器设计了硬件保护和软件保护两种保护。两种保护的主要动作均是封锁 PWM 信号的输出。PWM 信号在逻辑上需要与两个使能信号相与后才能经光电隔离后输出,驱动 IPM 模块。这两个使能信号分别是硬件保护使能信号 PDPINT 与软件保护使能信号 ENPWM。当控制器检测到编码器出错、电压过高、电流过大等故障时,DSP 将软件使能信号 ENPWM 拉低;DSP 输出的 PWM 信号与 ENPWM 相与后变为无效信号,IPM 的 3 组桥臂均处于不动作状态。由于软件保护中的故障信号要经过 DSP 处理后才能封锁 PWM 信号,软件保护动作时间较长。

控制器的硬件保护电路如图 6 所示。当 IPM 出现故障时,IPM 的故障信号 IPMER 拉低,硬件保护使能信号 PDPINT 随之拉低。PWM 信号与之相与后变为无效信号。硬件动作保护不需要经过 DSP 处理直接封锁 PWM 信号,所以其动作快,延时时间短,保证

能够实现快速保护的功能。

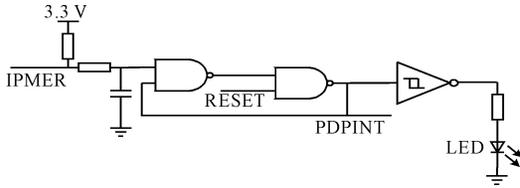


图6 IPM故障保护电路

3 控制器软件设计

3.1 DSP程序的介绍

DSP程序是整个控制器软件的核心组成部分,控制器的主要功能是由DSP程序实现的。由于TMS320F28335芯片为浮点构架,与其他DSP控制芯片相比,DSP程序运算性能优越、编程结构简单、代码长度短、运算精度高。而且芯片在具体模块设计上更加细化,这不但增加了模块使用的灵活性,而且使得DSP程序的编写更加简单和灵活多样。

DSP程序流程图如图7所示,主要包括主程序和中断控制程序。其中,DSP主程序主要用于完成DSP芯片及其子模块的初始化,判断有无故障,初始参数设定,主循环等;中断控制程序主要用于完成电压、电流的采样,位置、转速的检测和SVPWM的生成等。

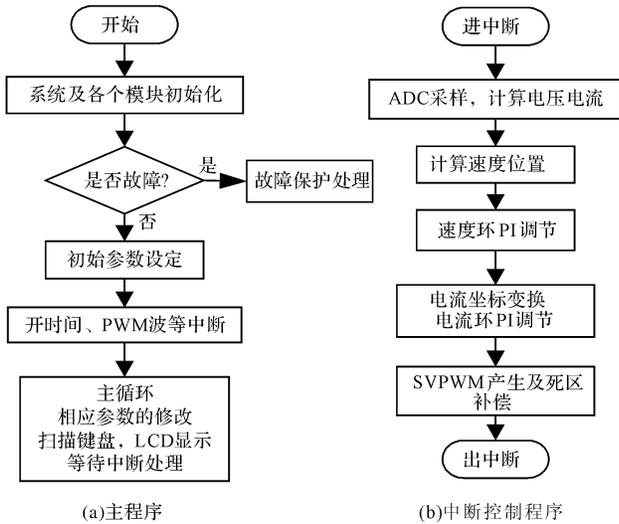


图7 DSP程序流程图

3.2 PWM信号生成程序

在PMSM矢量控制器中,PWM信号的生成程序是最关键的DSP程序。PWM信号的生成程序的基础是对TMS320F28335芯片的增强型PWM(EPWM)模块的设置。与TMS320F2812不同,TMS320F28335的6路EPWM模块是相互独立的。在EPWM模块初始化设置时,需将各路设置为同步。由图7(b)可知,根据

矢量控制算法可以计算得出相应的各个PWM波周期的高电平的占空比。由于同一桥臂上下两组PWM控制信号是相反的,可以将上桥臂的PWM波取反得到下桥臂的PWM波。为了防止同一桥臂发生上下直通的现象,PWM波需要注入死区时间。PWM波生成原理图如图8所示。由EPWM模块中的比较子模块可以得到未注入死区时间的上桥臂控制信号EPWMxAin;EPWMxAin信号经过上升沿延时可以得到上桥臂的最终控制信号EPWMxAOUT,EPWMxAin信号经过下降沿延时并取反后可以得到下桥臂的最终控制信号EPWMxBOUT。与TMS320F2812不同,上升沿延时与下降沿延时的时间长短分别在两个10位计数器中设定。计数器设定值由死区时间与EPWM模块的工作频率运算得到,而且设定值不可超过10位。

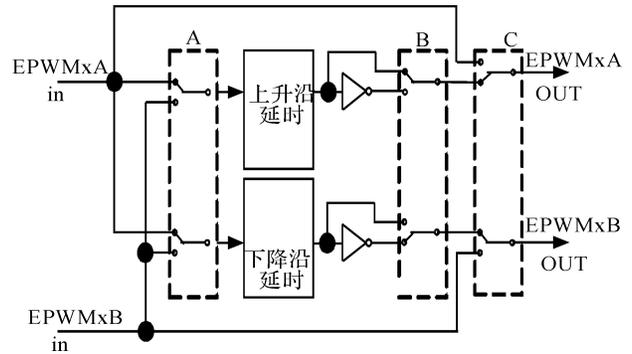


图8 PWM信号生成原理图

4 实验结果

为了验证上述控制器的控制性能,本研究基于一台三相永磁同步电动机进行了实验验证。电机参数为:额定线电压220V,额定电流4.8A,额定转速2000r/min。PWM开关频率为10kHz,死区时间为4.5μs。负载为磁滞测功机,其最大负载转矩为20N·m。

空载时,电机从0r/min~500r/min的起动转速波形如图9所示。可以看出,在阶跃给定转速信号的情况下,实际转速波形较为平滑;并且在60ms内较快的稳定在500r/min。由于采用M法测速,加速过程中实际转速曲线成阶梯状。

在额定负载4.6N·m时,电机从0r/min~500r/min的起动电流波形如图10所示。可以看出,除起动瞬间有所波动外,其余的电流波形均十分平滑。

在额定负载4.6N·m时,速度稳定在500r/min时的定子电流波形如图11所示。可以看出,电流波形具有较好的正弦度。

在额定负载4.6N·m下,由200r/min突然切换到500r/min时的定子电流波形如图12所示。可以看

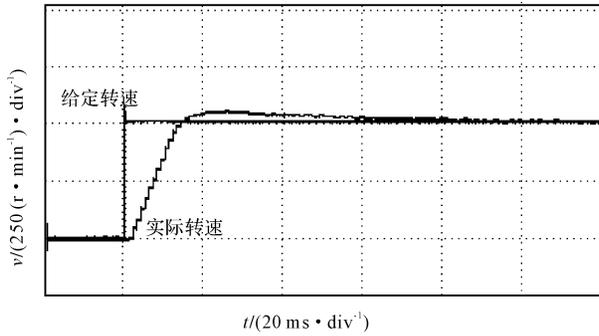


图 9 空载时 0 r/min ~ 500 r/min 的起动转速波形

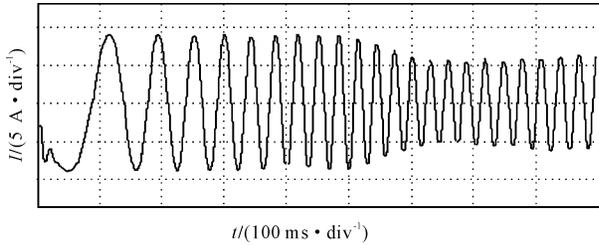


图 10 额定负载时 0 ~ 500 r/min 的起动电流波形

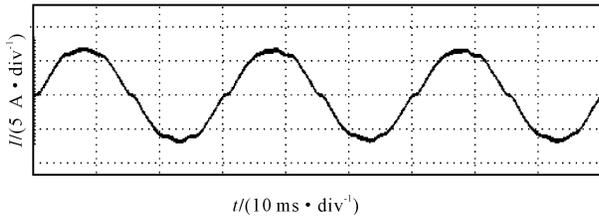


图 11 500 r/min 额定负载时定子电流波形

出,整个过程中,定子电流均比较平滑。

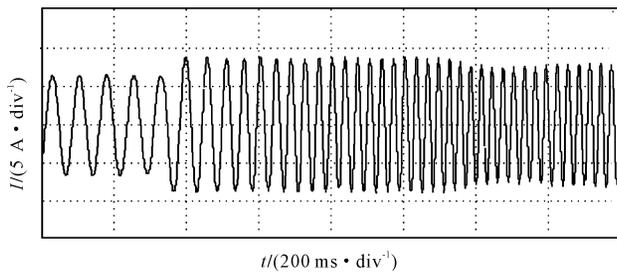


图 12 200 r/min 额定负载切换 500 r/min 时定子电流波形

500 r/min 时,递减和递增负载转矩的定子电流波形如图 13 所示。可以看出,整个减载和加载过程中电流波形均比较平滑。由于所用的磁滞测功机无法实现瞬间突加和突减负载转矩,未能给出突加和突减负载转矩的电流波形^[12-15]。

5 结束语

本研究介绍了一套基于浮点型 TMS320F28335 的三相永磁同步电动机数字化矢量控制器。该控制器充分利用了 TMS320F28335 片内的丰富资源和高速运算能力,有效简化了控制器电路结构;并且编程简单。在该控制器下,PMSM 具有良好的控制性能。与传统的以定点型 DSP 芯片为控制核心的 PMSM 控制器相比,

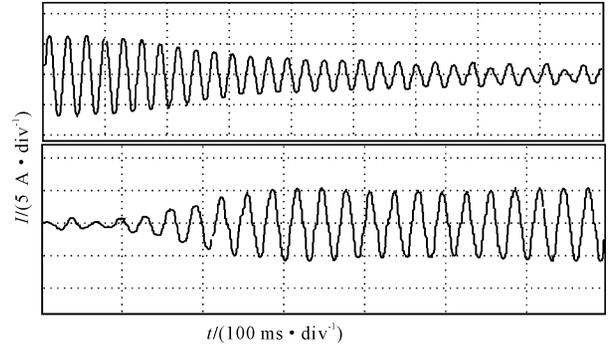


图 13 500 r/min 时递减和递增负载转矩的定子电流波形

其内部 A/D 转换精度更高,实现相同算法的代码和时间更短;提高了运算速度和控制精度。

参考文献 (References) :

- [1] 寇宝泉,程树康. 交流伺服电机及其控制 [M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 郭庆鼎,孙宜标,王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统 [M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 何杰,王家军. 基于 SVPWM 的永磁同步电动机系统建模与仿真 [J]. 机电工程,2009,26(7):77-82.
- [4] WANG Zheng-guang, JIN Jian-xun, GUO You-guang. Modeling and Simulation of PMSM Control System based on SVPWM [C]// Proceedings of the 27th Chinese Control Conference. Kunming: [s. n.], 2008: 724-728.
- [5] 林立. 基于 DSP 和 IPM 的永磁同步电动机调速控制系统 [J]. 电机与控制学报,2005,9(4):401-405.
- [6] 苏祖全,邓友娥,颜志森. 基于 DSP 的永磁同步电动机矢量控制系统的研究 [J]. 机电工程技术,2005,34(11):24-26.
- [7] WANG Song, SHI Shuang-shuang, CHEN Chao. Simulation of PMSM Vector Control System based on Non-linear PID and Its Easy DSP Realization [C]// Control and Decision Conference. Chinese: [s. n.], 2009: 949-953.
- [8] MOUSSA M F, GABER Y, ATTAR E I. Vector Control Drive of Permanent Magnet Motor without a Shaft Encoder [C]// Power System Conference. Middle-East, [s. n.], 2008: 249-254.
- [9] 刘果,欧阳红林,曲全磊,等. 基于 TMS320F28335 的 PMSM 伺服系统的设计 [J]. 电力电子技术,2008,42(10):16-17.
- [10] Ti 公司. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module [M]. Ti 公司,2008.
- [11] SOUKUP A. Enabling Greener Embedded Control Systems with Floating-Point DSCs [N]. Texas Instruments White Paper, 2008.
- [12] 赵荣辉. 数字式停电保磁控制设备中电机控制技术改进设计 [J]. 现代制造技术与装备,2010(5):6-8.
- [13] 张洪民,胡夏夏,高爱兵. 超声波电机摩擦驱动模型及其有限元仿真 [J]. 轻工机械,28(6):82-85.
- [14] 杨勇. 基于模糊自整定的改进型永磁同步电机矢量控制仿真研究 [J]. 机电工程技术,2010,39(8):47-49.
- [15] 郭佰平,凌云. 基于 MRAS 的新型永磁同步电机的速度辨识方案 [J]. 机电工程技术,2009,38(10):32-35.

[编辑:张翔]