・控制与检测・

文章编号:1001-2265(2007)11-0057-03

# 基于 DSP TMS320F2812 的永磁同步电机直接转矩控制

# 施丰苹,彭辉

(中南大学 信息科学与工程学院,长沙 410083)

摘要:文章根据永磁同步电机的数学模型和直接转矩控制的基本原理,设计了一种基于 TMS320F2812 的 全数字化直接转矩控制系统。首先利用 MATLAB 软件对直接转矩控制系统进行建模和仿真,得到电流、 转速、转矩以及磁链的仿真波形,然后对系统进行实验研究。 关键词:直接转矩控制;永磁同步电机;DSP

中图分类号:TG659 文献标识码:A

# Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Torque Control System Based on TMS320F2812 Controller SHI Feng-ping, PENG Hui

(Mechanical and Electrical Engineering College of China South University, Changsha 410083, China) Abstract: According to the mathematical model of Permanent Magnet Synchronous Motor and principle of Direct Torque Control System, a Digital DTC control system based on DSP TM S320F2812 is proposed in this paper. Firstly, the modeling and simulation of the control system are introduced based on MATLAB/ SIM ULINK. It is showed that the system was designed rightly. Then the control system can be experimented. Key words: direct torque control; permanent magnet synchronous motor; DSP

# 0 引言

二十世纪八十年代德国 Depenbrock 教授和日本学 者 Takahashi 分别提出直接转矩控制算法,虽然在理论 推导和实现方法上有所不同,但是基本思想是一致的, 即放弃了矢量控制中电流解耦的控制思想,去掉了 PWM 脉宽调制器和电流反馈环节,转而通过检测母线 电压和定子电流,直接计算出电机的磁链和转矩,并利 用两个滞环比较器直接实现对定子磁链和转矩的解耦 控制<sup>[1]</sup>。因此,与矢量控制相比,直接转矩控制具有转 矩响应快、控制结构简单、易于实现全数字化等特点。

## 1 永磁同步电动机的数学模型

永磁同步电机直接转矩控制矢量图如图 1 所示。 图中:a-b-c为三相静止坐标系, $\alpha$  轴指向实际定子 绕组 A 相轴线, $\alpha-\beta$ 为两相静止坐标;d, -q,为以转子 电角速度  $\omega$ ,旋转的两相旋转坐标系,d,轴指向转子永 磁体磁链  $\psi_{PM}$ 方向; $d_s - q_s$ 为以同步速  $\omega$ ,旋转的两相 坐标系, $d_s$ 轴指向定子磁链  $\psi_s$ 方向; $\theta$ 为  $d_r$ 轴相对定 子 A 相绕组 α 轴的转子空间位置角; δ 为定、转子磁链  $\psi_s$  与 $\psi_{PM}$ 间夹角,即电机功角。转子  $d_r - q_r$  坐标系下 的永磁同步电机的数学模型可表示为:



图 1 永磁同步电机直接转矩控制矢量图

 $\psi_d = L_d i_d + \psi_r \tag{1}$ 

$$\psi_q = L_q i_q \tag{2}$$

$$u_d = R_s i_d + p \psi_d - \omega_r \psi_q \qquad (3)$$

$$u_q = R_s i_q + p \psi_q + \omega_r \psi_{\mathcal{U}} \qquad (4)$$

$$T = \frac{3}{2} n_p \left( \psi_d i_q - \psi_q i_d \right) \tag{5}$$

式中, $L_d$ 、 $L_g$ 分别为  $d_r$ 、 $q_r$  轴电感; $n_p$  为极对数; $u_d$ 、 $u_q$ 、

作者简介:施丰苹(1982--),男,浙江湖州人,中南大学信息科学与工程学院硕士研究生,(E-mail)shifenping0000@163.com。

 $i_a, i_q, \psi_a, \psi_q$  分别为  $d_r, q_r$  的电压、电流和磁链分量; T 为电磁转矩; p 是微分算子。

# 2 直接转矩控制原理

直接转矩控制的控制原理图如下图 2 所示。



#### 图 2 直接转矩控制的控制原理图

控制时检测出直流母线电压  $U_a \ U_b \ U_c$  和定子电流  $i_a \ i_b \ i_c$ ,再按式(6)进行坐标变换到静止的定子坐 标系( $\alpha$ , $\beta$ )上。

$$X(t) = \begin{bmatrix} X_{\alpha}(t) \\ X_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\alpha}(t) \\ X_{b}(t) \\ X_{c}(t) \end{bmatrix}$$
(6)
$$\begin{bmatrix} X_{\alpha}(t) \\ X_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{d}(t) \\ X_{q}(t) \end{bmatrix}$$
(7)

其中  $X_a(t) \ X_b(t) \ X_c(t)$  是定子相应量的瞬时值, X(t) 是空间矢量,  $X_a(t) \ X_b(t)$  是( $\alpha, \beta$ ) 坐标系上的两 个分量。得到  $U_\alpha, U_\beta$  和  $i_\alpha, i_\alpha$  之后通过式(7)可以算出  $U_d, U_q$  和  $i_d, i_q$ 。根据式(1)、式(2)可算出  $\psi_d$  和  $\psi_q$ ,根 据式(5)可以算出电磁转矩  $T_\circ \psi_d, \psi_q$  再经磁链幅值和 区间计算模型,得到定子磁链的幅值  $\psi_s$  及其所在的区 间信号  $\theta_\circ$   $T = T^*$ 的偏差  $\Delta T$  经滞环比较器后得到转 矩调节信号  $T_q, \psi_s$  和  $\psi_s$  信号的偏差  $\Delta \psi$  经滞环比较器 后得到磁链调节信号  $\psi_{q\circ}$ 。在  $T_q, \psi_q, \theta$  三者的共同作 用下查取开关状态选择表,选取最佳的电压空间矢量, 形成 PWM 波形,经驱动电路送至逆变器,控制逆变器 从而实现对电机的控制。表 1 为电压矢量开关选择 表,  $\psi_q = 1$  表示实际磁链小于参考磁链,  $T_q = 1$  表示实 际转矩小于参考转矩,  $m\psi_q = 0, T_q = 0$  时相反<sup>[2]</sup>。

## 3 系统硬件设计

TMS320F2812 是 TI 公司的一款用于控制的高性 能、多用途、高性价比的 32 位定点 DSP 芯片。该芯片 指令系统最高可在 150MHZ 主频下工作,并带有 18K

组合机床与自动化加工技术

×16 位 0 等待周期片上 SARM 和 128K × 16 位片上 Flash(存取时间 36ns)。

表1 电压矢量开关表

磁链锁在扇区		1	2	2	4	5	6
ψ <sub>Q</sub>	T <sub>Q</sub>	1	2	3	4	3	o
1	1	110	010	011	001	101	100
	0	101	100	110	010	011	001
0	1	010	011	001	101	100	110
	0	001	101	100	110	010	011

本系统以 TMS320F2812 数字信号处理器为核心, 控制智能功率模块(IPM),从而把直流转换成交流,驱 动永磁同步电机。硬件电路包括三个部分:主电路、控 制电路、测量电路。图3 为系统硬件结构图。



#### 图 3 系统硬件结构图

# 4 系统软件设计

控制软件分为两个部分:主程 序和中断服务程序。中断服务子 程序是用两级中断来改变电压矢 量和采集主电路电流。这两级中 断的中断源是事件管理器中的定 时器1和定时器2。主程序框图和 定时器2的中断服务子程序框图 分别见图4和图5。





图 5 中断服务子程序流程图

# ・控制与检测・

(1)主程序

主程序主要完成系统初始状态、发生中断类型与 定时器2的设置工作,以及相应的定义。对于定时器2 是要他发生定时器下溢中断;此外,当系统处于故障运 行状态时,IMP 发出故障信号,经光电隔离作用后,在 DSP 的 PDPINT 引脚产生低电平,因此还要定义 PD-PINT 引脚的中断。这两个中断都属于 INT2 中断,因 此要进行 INT2 中断允许设置<sup>[3]</sup>。

(2)中断服务子程序

A 定时器下溢中断服务程序

主要用于完成数据采样、保存和电压矢量的刷新。 电压矢量的计算过程已经在前面介绍过了:定子磁链、 转矩的计算,定子磁链位置的判别以及电压矢量的查 表等过程。进入本中断服务子程序之后首先需要屏蔽 中断,然后进行采样,运算完成之后恢复现场,再跳出 本中断服务程序。

B PDPINT 中断

PDPINT 引脚的中断主要用于输入系统故障信号。

DSP 在检测到它为低电平时,就会发生 INT2 中断,在发 生电源保护中断之后,DSP 硬件会相应的使事件管理器 的输出为高阻态,从而中断系统运行,有效保护设备<sup>[4]</sup>。

## 5 系统仿真

为了验证所设计系统的正确性,利用 MATALAB 对系统进行仿真研究,建立了系统的仿真模型,整体设 计框图如图 6 所示。根据模块化思想,控制系统分割 为各个功能独立的子模块,其中主要包括:永磁同步电 机模块、开关电压矢量表模块、逆变器模块、坐标变换 模块、磁链计算模块、转矩计算模块、磁链区间位置判 断模块<sup>[5]</sup>。

其中永磁同步电机参数如下:  $R_s = 0.975\Omega$ ,  $L_d = 0.006H$ ,  $L_q = 0.006H$ ,  $\psi_f = 0.2Wb$ ,  $n_p = 4$ , B = 0,  $J = 0.001 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。为了验证直接转矩控制系统的动、静态性能, 速度给定 1000 转/分起动, 达到稳速之后, 0.06s时负载转矩由 1N·m 突变为 3N·m, 系统仿真结果如图 7 所示。



(下转第64页)

# ・控制与检测・



图 5 NURBS 曲线插补弓高误差图 表 1 NURBS 插补结果参数值分析

	步长 ΔL(mm)	步长(弦长)误差 δ(%)	弓高误差 h(mm)
max	0.3	0. 099	6. 125 × 10 <sup>-4</sup>
min	0. 2121	8. 42 × 10 <sup>-7</sup>	1. 19 × 10 $^{-13}$

对图 4、图 5 和表 1 分析知:插补结果各个指标参数值均在理论允许范围内。进给速度以 S 形速度曲线 平滑稳定加速。至匀速阶段后,随着插补的继续进行,自由曲线的曲率逐渐变大,阿当姆斯微分方程插补算 法根据轮廓误差要求,自适应性地减小进给速度(减小 每步的插补步长),轨迹插补至自由曲线较平滑处时,进给速度又随曲率改变而逐渐恢复至设定值。从而在 保证轮廓误差(弓高误差)与法向进给加速度被控制在 允许范围内的情况下,本算法以最大允许进给速度进 行插补加工,实现了插补精度和插补速度的优化。

#### 5 结论

NURBS 曲线曲面插补技术是当今高性能 CNC 系

(上接第59页)

从仿真波形可知,电机开始以最大转矩启动,转子 转速也迅速达到给定值,然后电机转矩调整至负载转 矩。在0.06s时负载转矩突变为3,电机转矩也能迅速 调整,而且转子转速仅有一个小的波动。定子磁链矢 量是一个近似圆形的轨迹,但是部分有一些畸变,这是 因为在控制中对转矩的调节是优先考虑的,当转矩误 差为负值时,就仅采用零矢量来减小转矩而不管定子 磁链的幅值是否超过滞环带的范围。

## 6 结论

本文设计了一种基于 TMS320F2812 的永磁同步 电机直接转矩控制系统。根据直接转矩控制的原理设 计了硬件电路,在永磁同步电机数学模型的基础上给 出了软件流程图。并利用 MATALAB/Simulink 对该系 统进行了仿真研究。仿真结果表明,该系统具有良好 组合机床与自动化加工技术

统的标志性功能之一。本文提出的基于阿当姆斯微分 方程的 NURBS 曲线插补算法,计算简便,插补实时性 良好,进给速度随曲线曲率自适应调整,在满足轮廓误 差和机床动态刚度的要求下,实现了插补精度和插补 速度的优化,提高了加工质量和效率。同时,本文提出 了一种 NURBS 曲线插补前抛物线——直线——抛物 线 S 型加减速控制方法,具有高度柔性,利用 NURBS 曲线对称性预测减速点,计算简便、位置精度高。

#### [参考文献]

- [1] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1994.
- [2] 游有鹏. 参数曲线的自适应插补算法[J]. 南京航空航天 大学学报,2000,32(6):667-671.
- [3] 彭芳瑜,何莹. NURBS 曲线机床动力学特性自适应直接插 补[J]. 华中科技大学学报,2005,33(7).
- [4] 游有鹏,王珉,朱剑英. NURBS 曲线高速高精度加工的插
  补控制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2001(10):943
  -947.
- [5] 边玉超. 自由曲线曲面 CNC 插补技术的研究[D]. 北京化 工大学硕士学位论文,2004.
- [6] 赵巍. 数控系统的插补算法及加减速控制方法研究[D]. 天津大学博士学位论文,2004.
- [7] 赵国勇,徐志祥,照福令. 高速高精度数控加工中 NURBS 曲线插补的研究[J]. 中国机械工程,2006.

(编辑 李秀敏)

的动、静态性能,速度及转矩输出相应快而且静差较 小。

[参考文献]

- [1] L. Zhong, M. F. Rahmam, et al. "A direct controller for permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 14(3):637-642.
- [2] Kazmierkowski M P, Kasprowicz A B. Improved direct torque and flux vector control of PW M inverter - fed induction motor drives[J]. IEEE Trans on IE, 1995, 42(4):344-350.
- [3] Zolghadri M R, Guiraud J, Davoine J, et al. A DSP Based Direct Torque Controller for Permanent Magnet Syn' chronous Morror Drives[A]. IEEE PESC'98[C]. 1998,2:17-22.
- [4] 苏奎峰. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [5] 张志勇. 精通 MATALAB6.5[M]. 北京:北京航空航天大
  学出版社,2003. (编辑 赵蓉)

· 64 ·