

全数字矢量控制 SVPWM 的变频调速系统实现

余艳¹, 余远华²

(1. 顺德职业技术学院 电子系, 广东 顺德 528333;

2. 武汉威科自动控制技术有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要: 运用矢量控制并结合电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术, 开发了以数字信号处理器(DSP)芯片 TMS320LF2407 为核心的全数字矢量控制的变频调速系统。对系统总体设计方案进行了研究分析, 硬件设计中详细介绍了控制回路的电流检测模块、电机转速和位置检测模块、PWM 输出和故障输入电路。软件控制程序主要由主程序和 SVPWM 中断服务子程序组成, 主程序主要完成 DSP 各功能部件的初始化、参数设定及转速实时显示; SVPWM 中断服务子程序主要完成电流值采样、当前转速和 θ 值的计算等。实验结果表明: 该实验装置结构简单, 控制精度高, 输出电流谐波失真小, 有较强的实时性。

关键词: 矢量控制; 空间矢量脉宽调制; 数字信号处理器; 变频调速系统

中图分类号: TN 787+2; TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)02-0076-04

矢量控制技术实现转子磁链和转矩的重构和解耦控制, 使异步电动机静、动态性能可与直流电机调速性能相媲美。脉宽调制(PWM)技术的发展和运用促进了变频装置的高性能化, 为交流调速技术的普及发挥了重大作用。PWM 技术种类很多, 并在不断发展。电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术的应用克服了相控原理的所有弊端, 使交流电动机定子得到了接近正弦波形的电压和电流, 提高了电机功率因数和输出效率。现代 PWM 生成电路大多采用具有高速输出 HSO 的单片机及数字信号处理器(DSP), 通过软件编程生成 PWM^[1]。而德州仪器 TMS320LF2407 DSP 控制器将实时处理能力和控制器外设功能集于一身, 具有处理性能更好(30 MIPS)、外设集成度更高、程序存储更大、A/D 转换速度更快等特点, 对电机的数字化控制较为适用^[2]。本文介绍了矢量控制的基本原理和系统总体设计方案, 用 TMS320LF2407 作为主控芯片, 实现了全数字化矢量控制 SVPWM 变频调速系统。实验结果表明使用该控制系统具有硬件电路简单、软件编制容易、控制精度和可靠性高、实时性强等优点。

1 矢量控制

矢量控制的思想就是将异步电动机模拟成直流电动机控制。通过坐标变换, 将定子电流矢量分解为按转子磁场定向的 2 个直流分量 i_{sM} 、 i_{sT} , 并对其分别加以控制, 从而实现磁通和转矩的解耦控制, 达到直流电机的控制效果。再经过相应的坐标反变换, 就能够控制异步电动机了。下面将直接应用根据异

步电动机的数学模型推导出的矢量控制方程式^[1]:

$$u_{sM} = R_s i_{sM} + \sigma L_s p i_{sM} + \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sM} - \frac{L_m R_r}{L_r} \psi_r - \omega_s \sigma L_s i_{sT} \quad (1)$$

$$u_{sT} = R_s i_{sT} + \sigma L_s p i_{sT} + \omega_s (\sigma L_s i_{sM} + \frac{L_m}{L_r} \psi_r) \quad (2)$$

$$\psi_r = \frac{L_m}{\tau_r p + 1} i_{sM}, \quad \Delta \omega = \frac{L_m}{\tau_r \psi_r} i_{sT} \quad (3)$$

式中 $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$; $\tau_r = L_r / R_r$ 为转子时间常数; R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻; L_m 为互感; L_s 、 L_r 为定、转子每相绕组的等效自感; ω_s 为同步转速; ω 为电机旋转电角频率; $\Delta \omega$ 为转差频率; p 为微分算子; p_n 为电机的极对数; T_e 为电机转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量。

从这些方程可以看出, 控制 i_{sM} 就可以控制励磁磁通 ψ_r , 只要保持 ψ_r 不变, 则控制 i_{sT} 就可以控制转矩 T_e 。从而使异步电动机具有如同直流电动机那样的控制特性。图 1 为转子磁通定向矢量控制变频调速系统原理框图^[3]。

2 系统硬件设计

整个系统为交-直-交变压变频电路, 由主回路和控制回路 2 大部分组成。主电路由整流器、中间直流环节和逆变器(智能电力电子模块 IPM)3 个主要部件组成。控制电路以 TMS320LF2407 DSP 为核心, 包括电流检测、转速检测、PWM 输出等模块

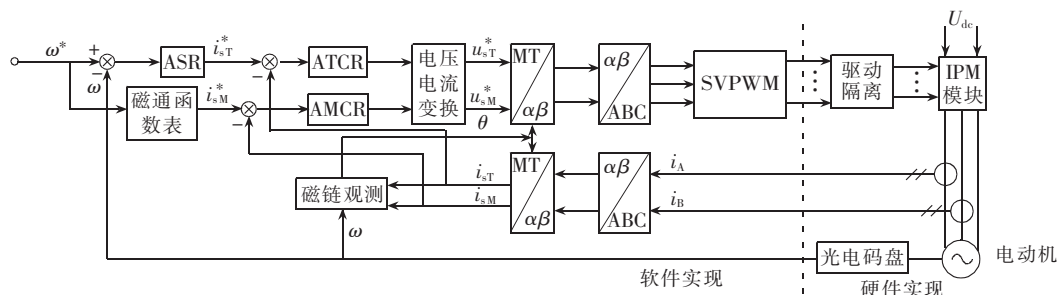


图 1 矢量控制变频调速系统原理图

Fig.1 The frequency-variable speed-adjustable system under field-oriented control

电路。构成功能齐全的全数字化矢量控制变频调速系统如图 2 所示^[4-5]。

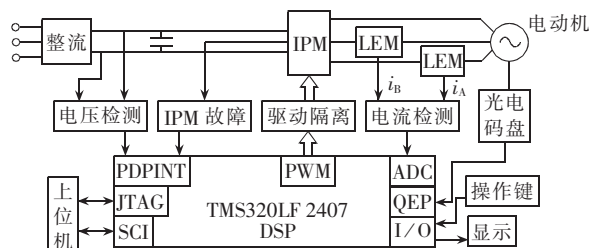


图 2 典型控制变频调速系统原理图

Fig.2 The digital vector controlled frequency-variable speed-adjustable system

2.1 电流检测模块

电流检测由霍尔传感器对 A,B 两相电流同时连续采样,经隔离放大后送到 LF2407 内进行 ADC 转换;通常电流传感器将强电转换成弱电信号,再经模拟信号处理电路形成 0~3.3V 的单极电压信号。

在实际系统中采用的传感器模块为莱姆公司的 BLYT,其工作电压为 $\pm 15\text{ V}$,测得的量以电流或电压的形式输出,输出电流为 $0\sim 10\text{ mA DC}$ 。在本系统中,由 2 个 LEM 模块检测 A 相和 B 相电流,并将电流信号转换成电压信号,图中 R 为霍尔器件所允许的负载电阻。选用运放 OP-07 构成同相放大器,经 1.5 倍放大后 U_0 输出电压为 $0\sim 3\text{ V}$,经低通滤波器后送入 ADC。因此,设计了如图 3 所示的电路进行信号处理。

2.2 电机转速和位置检测模块

速度检测采用光电编码器输出 2 个相差 90° 的方波脉冲,经整形送到 DSP 的正交编码脉冲接口单元 QEP。本系统采用的是 M 法测速原理,即在某一采样时间内,通过对脉冲的计数确定电机转速的大

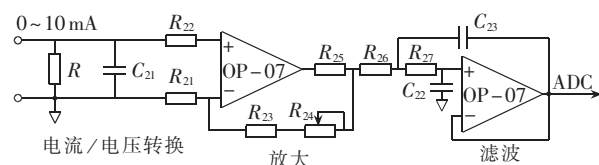


图 3 电流采样电路

Fig.3 Current sampling circuit

小。设采样时间为 t_c , 光电码盘的脉冲数为 P_n , 在采样时间内所测到的脉冲数为 m , 则电机转速 $n(\text{r/min})$ 为 $n = 60 m / (t_c P_n)$ 。电机的旋转方向可通过检测 2 个脉冲的哪一列先到达来确认^[6]。

本系统采用欧姆龙公司的旋转编码器 E6D-CWZ1E,它由 5~12V 供电,有 3 路输出,分别 A 相、B 相、Z 相;其中 A 与 B 用于测速,它们的相位差为 90°,每转 1 圈输出 1 000 个脉冲;而 Z 脉冲为每转 1 圈输出 1 个脉冲。光电脉冲编码器的 A、B 输出经高速光电隔离后接到 LF 2407 的 QEP3、QEP4 上。

2.3 PWM 输出和故障输入电路

采用矢量控制算法,产生 6 路具有可编程死区和可变输出极性的 SVPWM 波形,经驱动电路和光电隔离电路(6N136)驱动逆变器模块 IPM 功率器件,而获得具有变压变频效果的正弦波形,供给电机电源。

PWM 信号输出要求高速隔离,否则将会造成短路的严重后果。要注意 IPM 模块的输入逻辑是反向的,光耦 HCPL 4503 应接上拉电阻 R_{32} 到 15 V 使输出反向。而且这样接线时,万一主控板过去的信号线由于某种原因断线,对应 IGBT 将截止。上拉电阻 R_{32} 不能太大,否则输入信号易受干扰;也不能太小,要保证高速光耦的 OC 门输出能将输出电平拉低使 IPM 开通。图 4 为 PWM 隔离输出一路信号的电路图,另外的输出隔离电路也相同。同理,故障输入

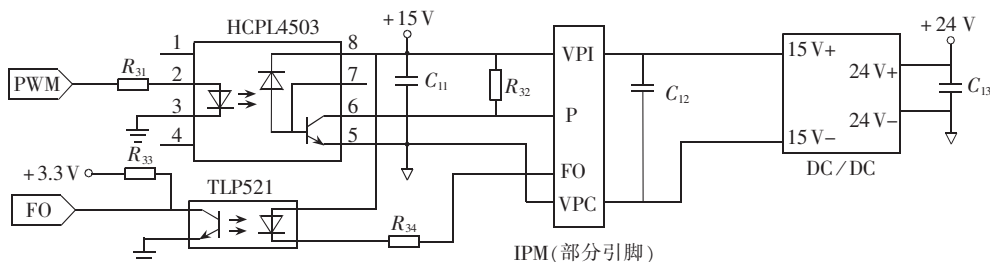


图 4 PWM 隔离输出到 IPM 电路

Fig.4 The isolated outputs of PWM to IPM

信号 FO 也必须要隔离后才能送到主控板。故障输入信号隔离采用普通低速光耦 TLP521 即可。

3 系统软件设计

系统软件控制程序主要由主程序和 SVPWM 中断服务子程序组成。主程序主要完成 DSP 各功能部件的初始化、参数设定以及转速实时显示。SVPWM 中断服务子程序主要完成电流值的采样、当前转速和 θ 值的计算,进行矢量变换以及输出 SVPWM 波形。

3.1 主程序

主程序主要分为系统初始化和变量初始化 2 部分。系统初始化指 DSP 运行以前的初始化,包括:设置系统时钟,CPU 系统时钟为 30 MHz;允许串行接收中断;初始化各种 I/O 口;A/D 采样初始化;设置事件管理器模块,6 相 PWM 输出,设置死区时间,使能正交编码脉冲 QEP 电路;变量的初始化指的是各个变量相对应的存储单元的初始化赋值^[6]。具体的主程序流程如图 5 所示。

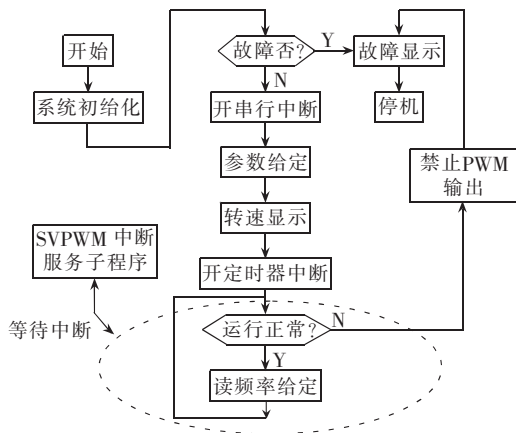


图 5 主程序流程图

Fig.5 Flowchart of main program

3.2 SVPWM 中断服务子程序

SVPWM 中断服务子程序主要任务是:负责 A,B 两相电流值的采样,并且实现 A/D 转换;根据脉冲编码器传递的信息计算当前的转速和 θ 值;根据测量值进行矢量变换和计算;SVPWM 输出。

具体的 SVPWM 中断服务子程序流程如图 6 所示^[7]。

4 实验结果

为避免变频实验装置的谐波损耗和污染问题,将直流电压利用率高的 SVPWM 取代 SPWM 波。采用高速的 DSP 芯片 LF2407 为核心构成矢量控制变频调速系统,可提高系统的响应速度。电动机设定的参数为:额定功率 2 kW,额定电压 220 V,额定电流 4.1 A,额定转速 1400 r/min。逆变器开关频率为 2.4 kHz,转速给定为 314 rad/s,电动机负载转矩在 1 s 时阶跃为 11 N·m。在该实验装置上进行实

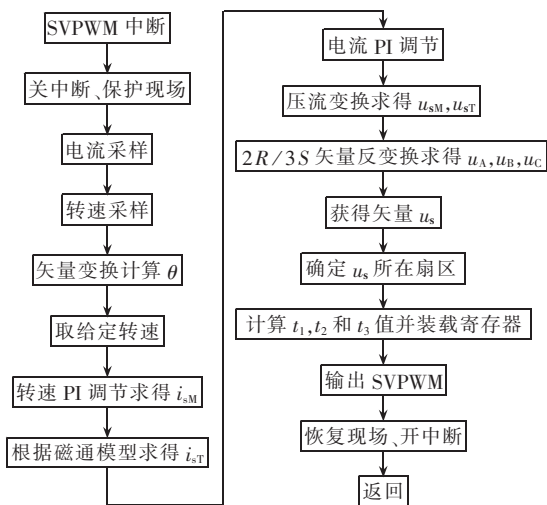


图 6 SVPWM 中断服务子程序流程图

Fig.6 Flowchart of SVPWM interruption subroutine

验,测得如图 7 所示的逆变器输出的 SVPWM 50Hz 实验波形(经 LC 滤波、数字示波器观察的结果),表明运用矢量控制及 SVPWM 以后,输出电压谐波失真更小;直流电压的利用率更高^[8]。由图 8 可见:系统可迅速达到稳态几乎无超调,表明本系统具有良好的动静态性能。

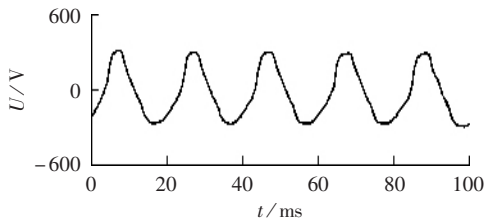


图 7 SVPWM 调制方式输出相电压

Fig.7 Phase voltage output under SVPWM modulation mode

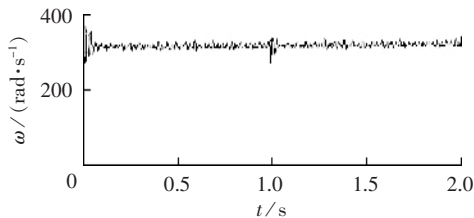


图 8 转速仿真结果

Fig.8 Simulative result of speed

参考文献:

- [1] 李华德. 交流调速控制系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 刘和平, 严利平, 张学锋. TMS320LF240x DSP 结构原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [3] WANG Chen-yuan, LI Hao-dong, XIA Jia-kuan. Study of intelligent vector control system based on TMS320LF240 [C]// **Applied Power Electronics Conference and Exposition**. Shenyang: Proceedings of the Fifth International Conference, 2001: 550-553.
- [4] 吴守箴, 臧英杰. 电气传动的脉宽调制控制技术[M]. 北京:

机械工业出版社,2003.

[5] LI Yong,HUANG Li-pei,LI Fa-hai. All digital space vector PWM induction motor drive based on flux control [J]. **IEEE TENCON**,2003,3(8):598-601.

[6] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.

[7] 王晓明,王玲. 电动机的 DSP 控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.

[8] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

余 艳(1972-),女,湖北松滋人,助教,硕士,研究方向为电力电子及计算机控制(**E-mail**:shelley186@sohu.com);

余远华(1978-),男,湖北武汉人,工程师,研究方向为电力电子、自动控制。

**Realization of digital vector controlled SVPWM frequency
-variable speed-adjustable system**

SHE Yan¹,SHE Yuan-hua²

(1. Shunde Polytechnic,Shunde 528333,China;

2. Wuhan Weike Autocontrol Technique Company,Wuhan 430014,China)

Abstract: By using field oriented control and voltage SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation),a suit of digital vector controlled frequency-variable speed-adjustable system based on DSP (Digital Signal Processor) TMS320LF 2407 is developed. The overall design scheme is researched. The hardware of current detection module,motor speed and location detection module and PWM output and fault input module is introduced in detail. The software is composed of main program and SVPWM interruption subroutine. The former realizes DSP initialization,parameter setting and speed real-time display,and the latter realizes current sampling and the calculation of current, speed and θ . The experimental results indicate that the prototype has simpler hardware construction,higher control precision,less output current harmonics distortion and better real-time performance.

Key words: field oriented control; SVPWM; DSP; frequency-variable speed-adjustable system