维普资讯 http://www.cqvip.com

基于TMS320F2812的SVPWM变频调速系统

张月芹,薛重德,侯小强
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:提出了一种以TMS320F2812为控制核心的异步电机空间矢量脉宽调制(SVPWM)变频调速系统。详细叙述了SVPWM的原理及其基于数字信号处理器(DSP)实现的两种算法,并对系统的结构和硬件进行了设计。利用SVPWM的Matlab/Simulink仿真波形验证了其结论,并对两种不同算法得到的波形进行了分析。实验结果表明,该系统实现简单,电压利用率高,实时性强,有效地提高了电机的运行性能。

关键词:TMS320F2812;空间矢量脉宽调制;变频调速;数字信号处理器
中图分类号:TM343⁺.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-4551(2008)01-0056-04

SVPWM variable-frequency speed regulating system based on TMS320F2812

ZHANG Yue-qin, XUE Zhong-de, HOU Xiao-qiang
(*College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing* 210016, *China*)

Abstract: A control system of induction motor based on TMS320F2812 was presented. The principle of space vector pulse width modulation (SVPWM) and two methods of its implementation based on digital signal processor (DSP) were introduced in detail, the structure and hardware of the system were designed, the results with the simulation waveforms of SVPWM based on Matlab/Simulink software were verified, and the waveforms which were from two different methods were analyzed. The results prove that the system has many advantages, such as simple structure, high voltage utilization ratio, real-time control function, and improves the induction motor's work performance effectively.

Key words: TMS320F2812; space vector pulse width modulation (SVPWM); variable-frequency speed regulating; digital signal processor (DSP)

0 前 言

在电气传动中,脉宽调制(PWM)技术得到了广泛地应用。上世纪80年代末,德国学者提出了空间矢量脉宽调制(SVPWM)策略。该方法模型简单,便于微机实时控制,并且具有转矩脉动小、噪音低、电压利用率高的优点,因此,目前无论在开环调速系统或闭环调速系统中均得到了广泛应用[1]。

本研究基于TMS320F2812设计异步电机控制系统,实现对交流异步电机的全数字控制,并给出实现SVPWM波的两种方案。

1 SVPWM的基本原理

1.1 基本电压空间矢量

SVPWM技术从电动机的角度出发,其目标是使电动机产生圆形磁场。电动机的三相定子相电压分别加在三相绕组上,形成3个相电压空间矢量U_A、U_B、U_C,其方向在各自的轴线上,大小随时间按正弦规律变化,故它们相加可得到一个以电源角频率速度旋转的电压空间矢量U:

$$U = U_A + U_B + U_C \tag{1}$$

同样,由电流和磁链的空间矢量I和Ψ得:

$$U = RI + \mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}t \tag{2}$$

当忽略定子电阻R时,式(2)可简化为:

$$U \approx \mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}t \tag{3}$$

由于$\Psi = \Psi_m e^{j\omega t}$,所以:

$$U = \mathrm{d}(\Psi_m e^{j\omega t})/\mathrm{d}t = j\omega\Psi_m e^{j\omega t} = \omega\Psi_m e^{(j\omega t+\pi/2)} \tag{4}$$

由式(4)可知,当供电电源保持压频比即U/ω不变时,磁链幅值Ψ_m是固定的。在SVPWM控制技术中,即是取以Ψ_m为半径的磁链圆为基准。

收稿日期:2007-06-19
作者简介:张月芹(1983-),女,山东菏泽人,主要从事交流变频控制及机电一体化方面的研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

典型的三相电压源逆变器的结构示意图，如图 1 所示。对于 180° 导通型的逆变器，它的 3 个桥臂的 6 个开关器件共可形成 8 种开关模式。用 a、b、c 分别代表 3 个桥臂的开关状态，假设当上桥臂的功率管导通时，开关状态为 1，下桥臂的功率管导通时，开关状态为 0，则逆变器的 8 种开关模式对应 8 个电压空间矢量，如图 2 所示，其中，非零矢量 $U_0(100)$ ~ $U_{300}(101)$ 及零矢量 $U_{000}(000)$ 和 $U_{111}(111)$，6 个非零矢量间互差 60° 相位角，每两个非零矢量之间形成一个扇区，共划分为 0 ~ 5 共 6 个扇区。

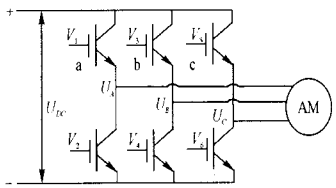


图 1　三相电压源逆变电路

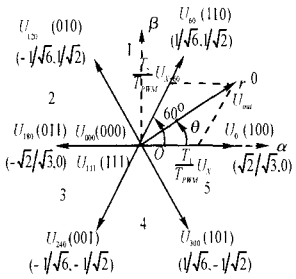


图 2　基本电压空间矢量及扇区划分

由图1可以推导出各相的 U_A、U_B、U_C 与桥臂的通/断有如下的关系：

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中　U_{DC}— 直流电源电压。

为了便于数字信号处理器（DSP）程序计算，利用坐标变换，可以得到两相 α、β 静止坐标系中的电压如下式：

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \tag{6}$$

将式(5) 代入到式(6) 中，可得开关状态与相电压在两相 α、β 静止坐标系的对应关系。

1.2　磁链轨迹控制

由上述的异步电机供电电压与定子磁链圆轨迹的关系可知，要使磁链轨迹为圆形必须获得尽可能多的电压空间矢量。但是非零的基本电压空间矢量只有 6 个，为此可以利用这 6 个非零的基本电压矢量的线性时间组合来得到更多的开关状态。

在图 2 中，U_x 和 U_{x+60}（以逆时针为例，当为顺时针时取 U_{x-60}）代表相邻的两个基本电压空间矢量，U_{out} 是输出的参考相电压矢量，其幅值代表相电压的幅值，其旋转角速度就是输出正弦电压的角频率。U_{out} 可由 U_x 和 U_{x+60} 的线性时间组合来合成，如下式：

$$U_{out} = (t_1/T_{PWM})U_x + (t_2/T_{PWM})U_{x+60} \tag{7}$$

式中　t_1 和 t_2—U_x 和 U_{x+60} 的作用时间，T_{PWM}—U_{out} 的作用时间，从 0 到 5 共 6 个扇区，x—0，120，120，240，240，0。

1.3　U_{out} 所在扇区号的确定

本控制系统中，U_{out} 以幅值和相角的形式给出，故可直接根据其相角的大小确定它所在的扇区，简化了算法。

1.4　两相邻矢量作用时间 t_1 和 t_2 的计算

当 U_{out}、U_x 和 U_{x+60} 投影到两相 α、β 静止坐标系中时，式(7) 可表示为：

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = T_{PWM} \begin{bmatrix} U_{x\alpha} & U_{(x+60)\alpha} \\ U_{x\beta} & U_{(x+60)\beta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_{out\alpha} \\ U_{out\beta} \end{bmatrix} \tag{8}$$

当已知逆阵 $\begin{bmatrix} U_{x\alpha} & U_{(x+60)\alpha} \\ U_{x\beta} & U_{(x+60)\beta} \end{bmatrix}^{-1}$ 和 U_{out} 在 α、β 坐标系的投影 $\begin{bmatrix} U_{out\alpha} \\ U_{out\beta} \end{bmatrix}$ 后，即可确定 t_1 和 t_2。

由于 t_1 和 t_2 之和很难与 T_{PWM} 正好相等，采用零矢量来补偿，以使 PWM 波的基波频率等于所要求的频率。零矢量的作用时间 t_0 可由下式计算：

$$T_{PWM} = t_1 + t_2 + t_0 \tag{9}$$

若只把零矢量加在某一个点上，输出电压的 PWM 波形将变差，甚至使电机出现转矩脉动，为此采用零矢量分割技术[2]，将零矢量分成多点插入到磁链轨迹中。添加零矢量以使功率开关管的开关次数最少为原则。在零矢量作用的时间里，电动机的定子磁链矢量是静止的，可以调整磁链的角频率，从而达到变频的目的。

2　基于 DSP 的 SVPWM 波的算法实现

由上述的 SVPWM 的原理可知，要产生 SVPWM 波，需要根据异步电动机在两相 α、β 静止坐标系上的电压来确定参考电压矢量 U_{out} 所在的扇区，然后计算 U_x 和 U_{x+60} 的作用时间 t_1 和 t_2，将计算得出的时间存入 DSP 相应的比较寄存器中，从而通过 DSP 的 PWM 输出口产生 SVPWM 波。

利用 TMS320F2812 DSP 产生 SVPWM 波，有两种方案[3]：通过软件编程确定开关次序的软件法和利用 TMS320F2812 自带的 SVPWM 硬件模块的硬件法。该控制系统的程序由主程序、定时器下溢中断子程序组

维普资讯 http://www.cqvip.com

成。其中，主程序主要完成各种初始化工作，中断下溢子程序主要完成 A/D 采样、转换及 SVPWM 控制技术的算法，是整个数字控制系统的核心。所有程序均采用 C 语言编写[4]，充分利用了该芯片的高速运算能力，同时缩短了开发时间，增强了程序的可读性，且有利于软件的模块化。

2.1 软件实现算法

按照上述原理计算 U_{out} 在两相 α、β 静止坐标系上的投影、所在扇区及两相邻矢量的作用时间，对应不同的扇区矢量切换点的计算如下。

设 $T_A = (T_{PWM} - t_1 - t_2)/4$、$T_B = (T_{PWM} + t_1 - t_2)/4$、$T_C = (T_{PWM} + t_1 + t_2)/4$，第 0 扇区 SVPWM 波形，如图 3 所示。由图 3 可知，矢量切换点的时间（以 0 扇区为例）T_{CMP1}、T_{CMP2}、T_{CMP3} 分别为 T_A、T_B、T_C。其他扇区切换时间，如表 1 所示。

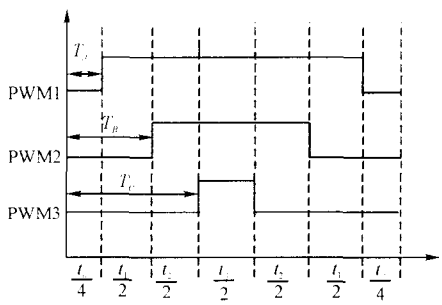


图 3 第 0 扇区的 SVPWM 波形

表 1 各扇区矢量切换时间顺序表

扇区号	0	1	2	3	4	5
T_{CMP1}	T_A	T_B	T_C	T_C	T_B	T_A
T_{CMP2}	T_B	T_A	T_A	T_B	T_C	T_C
T_{CMP3}	T_C	T_C	T_B	T_A	T_A	T_B

2.2 硬件实现算法

TMS320F2812 DSP 事件管理器模块的硬件结构极大地简化了 SVPWM 波形的产生，此外，软件还可以控制 SVPWM 输出。

对硬件的设置：①配置 ACTRx 寄存器，确定比较输出引脚的极性；②配置 COMCONx 寄存器，使能比较操作和 SVPWM 模式，设置 CMPRx 的重新装载的条件；③设置通用定时器 Tx，以产生对称的 PWM 波形。

在每个 PWM 周期，按上述原理确定两相邻矢量 U_x 和 U_{x+60}；计算参数 t_1 和 t_2；将 U_x 对应的开关状态写到 ACTRx[14 ~ 12]位，并将方向参数 1 或 0 写入 ACTRx[15]中，其中 1 代表顺时针，0 代表逆时针；将值 $(t_1/2)$ 和 $(t_1 + t_2)/2$ 分别写到 CMPR1 和 CMPR2 中。

3 系统结构及硬件设计

系统的总体结构，如图 4 所示。主电路采用典型的电压源型交—直—交变频器电路。整个系统主要由电源板、DSP 控制板及功率驱动板等组成。其中，频率给定值由电位器设定，DSP 通过 A/D 转换读出电位器的电压信号，并将该电压信号转换成频率信号，电机的参考电压 U_{out} 由 U/F 曲线确定，由 U_{out} 的幅值和相位角以及 SVPWM 技术计算出三相 SVPWM 波形，通过 DSP 的 PWM 口输出，经过光藕隔离驱动电路后控制逆变器 6 个功率开关管的通/断，从而实现异步电机的变频调速。由于高压的存在，主回路中同时设有对欠压、过压、过流、过热的硬件保护，保护元器件及保证整个电路的正常运行。

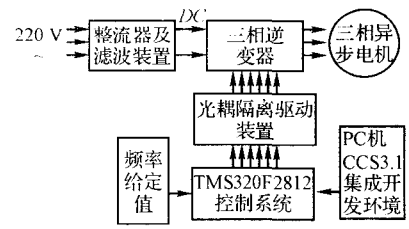


图 4 系统结构框图

（1）电源板。电源板由自藕变压器、交流电源滤波及整流滤波装置组成。将 220 V、50 Hz 的交流电经 0 ~ 250 V 的自藕变压器调压，再经过 DL-6A 的交流电源滤波器，最后通过整流滤波可得到 0 ~ 350 V 的可调直流母线电压。

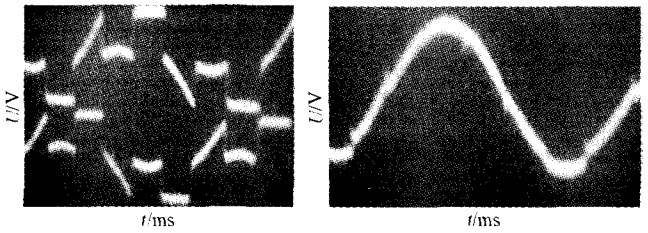
（2）DSP 控制板。在电机控制中，电机的电气时间常数较小，一般的微控制器不能满足要求，所以，在变频调速控制领域应用 DSP，可使系统向高可靠性、高性能和维护方便的全数字方向发展。美国 TI 公司的高性能数字信号处理器 TMS320F2812 是电机控制专用芯片[5]，具有丰富的微控制器外设模块，可以工作在 150 MHz 的工作频率下，高效的 C/C++ 编译程序，完全可以满足电机的实时控制，且性价比较高，本系统采用 TMS320F2812 DSP 作为控制器，所有输入/输出经光耦隔离。

（3）功率驱动板。由于从 DSP 发出的 PWM 驱动信号只有 3.3 V 的电压，而整流逆变电路选用 IRFP450A 型号的 MOSFET 功率开关管，其栅极驱动电压为 8 ~ 20 V，必须放大 PWM 控制信号的驱动能力，同时还要保证转换的速度和精度。为此，在驱动电路中选用高速光耦 HCPL0453、高速 MOSFET 驱动器 MC33151D 和 MC33152D。通过功率驱动电路可获得 15 V 的 PWM 驱动信号，能够成功地驱动 MOSFET 功率开关管。

维普资讯 http://www.cqvip.com

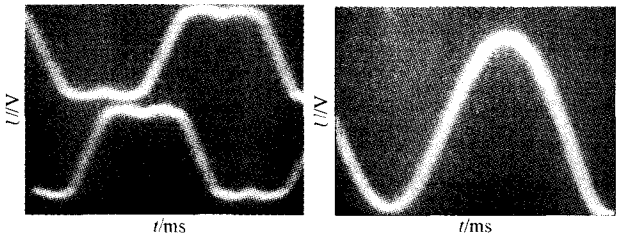
4　仿真实验结果及其分析

经过 DSP 软件调试得到的波形，如图 5、图 6 所示。经过二踪示波器输出的滤波后的两路相电压或线电压波形，频率为 30 Hz，从中可以看出两路相电压相位角相差 120°，线电压的正弦度良好。利用 Matlab/Simulink 对 SVPWM 进行仿真[6]，其结果，如图 7、图 8 所示。仿真中三角载波的频率为 10 kHz，直流母线电压为 260 V，频率为 50 Hz。对实验波形与仿真波形进行比较分析可知，实验结果是正确的。且将生成的 SVPWM 波通过逆变器驱动异步电机，其运行性能良好，实现了对异步电机的实时数字化控制。试验所用三相异步电机为：型号 JW5624，额定电压 380 V，额定功率 120 W，额定电流 0.3 A，频率 50 Hz，转速 1 400 r/min，电机定子采用星形接法。



(a) 两路相电压U_A、U_B波形　　(b) 线压电U_{AB}波形

图 5　由硬件法得到的电压波形



(a) 两路相电压U_A、U_B波形　　(b) 线压电U_{AB}波形

图 6　由软件法得到的电压波形

分别对比图 5 及图 6 中(a)和(b)可知，由于硬件算法中一个扇区内始终取某个固定的零矢量(U_{000}或U_{111})，相应有一个桥臂是不动作的，该方式虽能够减少开关损耗，但谐波相对较高一些；而软件法中采用两个零矢量，虽然开关次数较多，但谐波明显减少，线电压的正弦度好。

5　结束语

本研究介绍了 SVPWM 技术的原理及两种实现方法，以 TMS320F2812 为控制核心，利用该技术构成的变频调速系统实现了异步电机的全数字化控制。产生的 SVPWM 波谐波少、电压利用率高、实现方便，系统的硬件结构简单可靠，实时性强，是目前电机控制中理想而实用的方法。

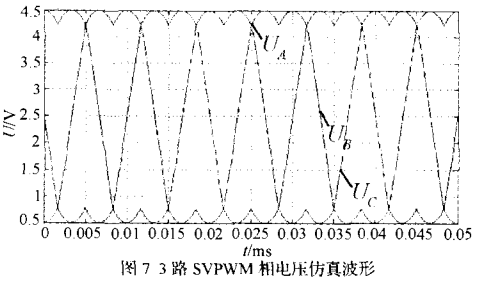
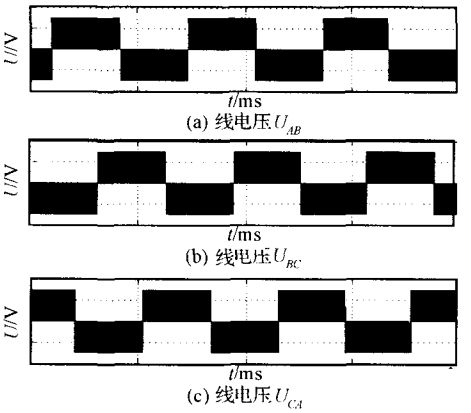


图 7 3 路 SVPWM 相电压仿真波形

图 7　3 路 SVPWM 相电压仿真波形



(a) 线电压U_{AB}

(b) 线电压U_{BC}

(c) 线电压U_{CA}

图 8　线电压 U_{AB}、U_{BC}、U_{CA} 仿真波形

参考文献(Reference)：

[1]　李华德，白　晶，李志明，等. 交流调速控制系统[M]. 北京：电子工业出版社，2003.

[2]　吴守箴，臧英杰. 电气传动的脉宽调制技术[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[3]　王晓明，王　玲. 电动机的 DSP 控制：TI 公司 DSP 应用[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2004.

[4]　苏奎峰，吕　强，耿庆锋，等. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京：电子工业出版社，2005.

[5]　Texas Instrument Inc.. TMS320F2810, TMS320F2812 Digital Signal Processors Data Manual[EB/OL]. [2001-04-01]. http://focus.ti.com/lit/ds/sprs1740/sprs1740.pdf.

[6]　魏昌洲，薛重德，翟红存. 基于 SVPWM 变频调速系统的建模与仿真[J]. 中小型电机，2005(3)：45-48.

[编辑：张　翔]