维普资讯 http://www.cqvip.com



中图分类号：TM343+.2　　文献标志码：A　　文章编号：1001-6848(2008)04-0036-03

# 基于 TMS320F2812 的 SVPWM 算法分析与实现

祝恩国，邹和平，赵　兵，吕英杰
（中国电力科学研究院，北京　100085）

**摘　要：**分析了 SVPWM 的原理，深入研究了 SVPWM 的具体算法和实现方法，建立了基于 TMS320F2812 的数字控制系统，给出硬件总体结构和软件程序设计方法。实验结果表明，该方案电路简单、易于实现，而且提高了系统工作的实时性和可靠性，为实际电机控制系统的设计和调试提供了新的思路，具有一定的参考价值。

**关键词：**异步电动机；SVPWM；数字信号处理器；实验

**Algorithm Analysis and Realization Method of SVPWM Based on TMS320F2812**

ZHU En-guo, ZOU He-ping, ZHAO Bing, LV Ying-jie
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The principle of SVPWM was analyzed and its algorithm and realization method was discussed in detail. Set up digital control system based on TMS320F2812 and provides total structure of hardware and design method of software. Experiment results show that the circuit is easy to be realized and the method can improve working real-time and reliability of system. It offers a new strategy for designing and debugging motor control system in actual application and has special reference value.

**Key words:** Asynchronous motor; SVPWM; Digital signal processing; Experiment

## 0　引　言

空间矢量 PWM 方法是一种先进的脉宽调制生成方法。由于其自身优秀的特性与功能，近年来得到广泛应用。空间矢量并不代表实际存在的物理量，它只是一种数学分析方法，便于控制和分析，具有概念清晰、算法简单、适合于数字控制等优点，因此，SVPWM 成为国内外学者研究的热点[1-3]。随着大规模集成电路的发展，DSP 芯片快速的数据处理能力、强大的控制功能和价格的不断降低，使其逐渐取代单片机成为控制系统的核心产品。本文在研究 SVPWM 具体实现算法的基础上，以 TMS320F2812 芯片为例研究 DSP 在电机控制中的应用。

## 1　SVPWM 算法原理

三相电压型变流器主电路如图 1 所示。它由 A、B、C 三个桥臂组成。设 $V_{DC}$ 为直流侧电容电压，P 点电位为 $V_{DC}$，Q 点电位为零。输出电压由对应桥臂上功率器件的开关状态决定，每一桥臂的上下两个开关器件的驱动信号都是互补的。当器件 $T_1$ 的门极有驱动信号时，$T_4$ 门极无驱动信号，此时 $T_1$ 导通、$T_4$ 关断，$U_A = V_{DC}$；反之，$T_4$ 门极有驱动信号而 $T_1$ 无驱动信号时，此时 $T_4$ 导通、$T_1$ 关断，$V_A = 0$。

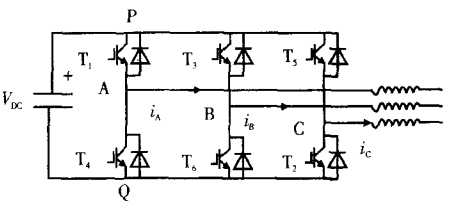


图 1　三相电压源变流器主电路

设桥臂 A、B、C 的开关变量为 $S_a$、$S_b$、$S_c$，且 $S_a = U_A/V_{DC}$，$S_b = U_B/V_{DC}$，$S_c = U_C/V_{DC}$，则：

$$U_k = S_k \cdot V_{DC} = \begin{cases} V_{DC}(S_k = 1) \\ 0 \quad (S_k = 0) \end{cases} \tag{1}$$

式 1 中，$S_k$ 为 1 时同一桥臂的上开关器件导通，下开关器件关断；$S_k$ 为 0 时同一桥臂的下开关器件导通，上开关器件关断。因此，每个桥臂输出端的电压可以用各桥臂的开关变量和电容电压 $V_{DC}$ 的乘积来表示。三相变流器的输出电压由 A、B、C 三桥臂的开关变量 $S_a$、$S_b$、$S_c$ 的组合来决定，不

收稿日期：2007-08-13

维普资讯 http://www.cqvip.com



同的开关组合对应不同的开关状态。由于 $S_a$、$S_b$、$S_c$ 各有 1 或 0 两种状态，则整个变流器共有 23 = 8 种开关状态，即 0(000)、1(001)、2(010)、3(011)、4(100)、5(101)、6(110)、7(111)8 个相互独立的状态。其中的 0 状态和 7 状态为各相桥臂中下开关器件或上开关器件同时导通的状态，对应这两种状态的输出相电压和线电压都为 0，称之为零状态，其他 6 种为非零状态。8 种状态对应着 8 个不同的基本电压矢量，包括 6 个非零电压矢量($U_1 \sim U_6$)和两个零电压矢量($U_0$、$U_7$)。6 个非零电压矢量构成了图 2 中的一个六边形，并将六边形分成了 6 个扇区。

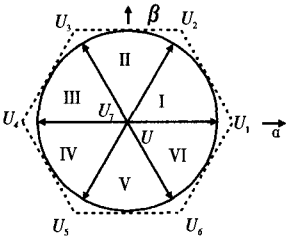


图 2　三相桥式变流器输出的电压空间矢量

非零电压矢量的模为 $2V_{DC}/3$，8 种状态下的电压矢量可以表示为：

$$U_k = U_\alpha + jU_\beta = \begin{cases} \frac{2}{3}V_{DC}e^{j\frac{k-1}{3}\pi} & (k=1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6) \\ 0 & (k=0,\ 7) \end{cases} \tag{2}$$

式中，$U_\alpha$、$U_\beta$ 分别为基本电压矢量在 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴上的投影。

从变流器的 6 个非零电压矢量中选择两个相邻的矢量和零矢量来合成一个等效的旋转空间矢量，且旋转空间矢量的大小和相位可以调控，从而实现三相变流器输出电压的调控。因此，根据平行四边形法则，这 6 个基本电压矢量和两个零矢量可以合成任意角度和模长的等效合成矢量。

设在每一个采样时刻内，根据若干个基本电压矢量通过合理组合合成任意给定的参考电压矢量为 $U_{ref}$，当它位于由基本电压矢量 $U_k$ 和 $U_{k+1}$ 组成的扇区内时，如图 3 所示，利用两个非零基本电压矢量 $U_k$、$U_{k+1}$ 和两个零电压矢量 $U_0$ 和 $U_7$ 就可以合成参考电压矢量 $U_{ref}$。

## 2　算法分析与设计

### 2.1　判断参考电压矢量 $U_{ref}$ 所在扇区

设 $U_{\alpha ref}$、$U_{\beta ref}$ 为参考电压矢量 $U_{ref}$ 在 $\alpha$ 轴、$\beta$ 轴上的投影，即：

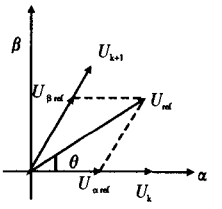


图 3　参考电压矢量的合成方法

$$U_{ref} = |U_{ref}|(\cos\theta + j\sin\theta) = U_{\alpha ref} + jU_{\beta ref} \tag{3}$$

定义 3 个变量 $U_x$、$U_y$、$U_z$，且 $U_x$、$U_y$、$U_z$ 满足以下关系：

$$\begin{cases} U_x = U_{\beta ref} \\ U_y = \dfrac{\sqrt{3}U_{\alpha ref} - U_{\beta ref}}{2} \\ U_z = -\dfrac{\sqrt{3}U_{\alpha ref} + U_{\beta ref}}{2} \end{cases} \tag{4}$$

定义变量 $x$、$y$、$z$，若 $U_x > 0$，则 $x = 1$，否则 $x = 0$；若 $U_y > 0$，则 $y = 1$，否则 $y = 0$；若 $U_z > 0$，则 $z = 1$，否则 $z = 0$。设 $N = x + 2y + 4z$，则数值 $N$ 与参考电压矢量 $U_{ref}$ 所在扇区的对应关系如表 1 所示。

**表 1　数值 $N$ 与参考电压矢量 $U_{ref}$ 所在扇区的关系**

| $x$ | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $y$ | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| $z$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| $N$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 扇区 | Ⅱ | Ⅵ | Ⅰ | Ⅳ | Ⅲ | Ⅴ |

### 2.2　计算相邻矢量的作用时间

产生 PWM 输出的一种简便方式就是利用参考电压矢量 $U_{ref}$ 所在扇区的两个基本电压矢量，使其各自工作部分时间，从而使平均输出满足参考矢量的要求。

首先以第一扇区为例计算合成参考空间矢量时，扇区的两相邻基本电压矢量 $U_1$、$U_2$ 的作用时间。设 $T_1$、$T_2$ 分别为基本电压矢量 $U_1$、$U_2$ 的作用时间，$T_0$ 为零电压矢量($U_0$ 或 $U_7$)的作用时间，$T_c$ 为采样周期，则由空间电压矢量合成的平衡原则得：

$$\begin{cases} T_c = T_1 + T_2 + T_0 \\ U_{ref} = \dfrac{T_1}{T_c}U_1 + \dfrac{T_2}{T_c}U_2 \end{cases} \tag{5}$$

再由正弦定理对式(5)求解，即可得出 $T_1$、$T_2$、$T_0$ 的作用时间：

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{\sqrt{3}T_cU_{ref}}{V_{DC}}\sin(\dfrac{\pi}{3} - \theta) \\ T_2 = \dfrac{\sqrt{3}T_cU_{ref}}{V_{DC}}\sin\theta \\ T_0 = T_c - T_1 - T_2 \end{cases} \tag{6}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com



同理，可以计算出参考电压矢量 $U_{ref}$ 在其他扇区时空间电压矢量合成的作用时间

$$\begin{cases} T_1 = \dfrac{\sqrt{3}T_c U_{ref}}{V_{DC}}\sin(\dfrac{k\pi}{3} - \theta) \\ T_2 = \dfrac{\sqrt{3}T_c U_{ref}}{V_{DC}}\sin(\theta - \dfrac{(k-1)\pi}{3}) \\ T_0 = T_c - T_1 - T_2 \end{cases} \tag{7}$$

式中，$k=1, 2, 3, 4, 5, 6$。当作用时间饱和时，即 $T_c < T_1 + T_2$，则取：

$$T_1 = \frac{T_1}{T_1 + T_2} \cdot T_c,\ T_2 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} \cdot T_c \tag{8}$$

令变量 $X$、$Y$、$Z$ 取值为：

$$\begin{cases} X = \dfrac{\sqrt{3}T_c V_{\beta ref}}{V_{DC}} \\ Y = \dfrac{\sqrt{3}T_c}{V_{DC}}\left[\dfrac{\sqrt{3}}{2}V_{\alpha ref} - \dfrac{1}{2}V_{\beta ref}\right] \\ Z = \dfrac{\sqrt{3}T_c}{V_{DC}}\left[\dfrac{\sqrt{3}}{2}V_{\alpha ref} + \dfrac{1}{2}V_{\beta ref}\right] \end{cases} \tag{9}$$

对于不同扇区，相邻两个空间矢量的作用时间 $T_1$、$T_2$ 可以按表 2 来取值。

表 2　各扇区相邻空间矢量的作用时间表

| 扇区 | Ⅰ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | Ⅴ | Ⅵ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_1$ | Y | -Y | X | -X | -Z | Z |
| $T_2$ | X | Z | -Z | -Y | Y | -X |

## 3　基于 TMS320F2812 的系统设计与实验

### 3.1　系统硬件设计

控制系统选用 32 位定点 DSP 芯片 TMS320F2812[4]。它既有快速的数字信号处理能力，又具有强大的事件管理能力和嵌入式控制功能，特别适用于需要处理大批量数据的 SVPWM。控制系统的基本结构如图 4 所示。

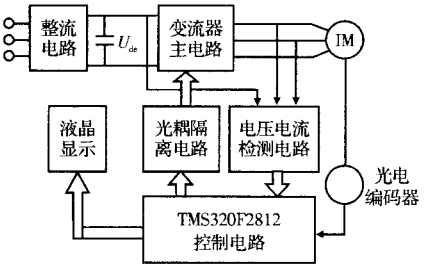


图 4　控制系统组成结构图

传感器将检测到的直流侧电容电压、定子电流转换后送入具有 16 个通道、12 位分辨率、转换频率为 25 MHz 的模数转换器，经 A/D 变换后进行相关计算。光电编码器将测得的脉冲信号反馈至 TMS320F2812 的 CAP1、CAP2，控制系统根据一定时间段内的脉冲个数来计算电机的运转速度。

TMS320F2812 的两个事件管理器（EVA、EVB）提供了很多完善的外设功能部件，非常适用于复杂的电机控制和运动控制。每个 EV 都具有控制三个半桥的能力。在此电路设计中，采用 EVA 控制各个桥的 PWM 对，带有可编程死区的 3 个全比较单元可单独产生 3 对（6 个）PWM 输出，经驱动电路驱动后控制 IGBT 的导通和关断。对单片机来说，要实现 SVPWM 运算并产生 PWM 输出信号其算法是非常复杂的，而且单片机会受到运行速度和计算时间的限制，不利于提高系统工作的实时性，因此，用 TMS320F2812 取代单片机来实现 SVPWM 算法具有很大的优越性。

TMS320F2812 中的串行外设接口模块 SPI 可以与液晶显示器进行通讯，用于显示供电电压、电流、电机运行速度和工作状况。

### 3.2　系统软件设计

软件编程按照自上而下、逐步细化的模块化设计，采用 C 语言和汇编语言混合编程的方法，分为主程序、中断服务子程序两部分。主程序首先进行系统初始化，对看门狗、中断使能、系统时钟等进行相关设置，然后进入循环等待状态。中断服务程序根据光电编码器返回的脉冲信号计算电机转速，读取传感器检测到的 $U_{dc}$、$i_a$、$i_b$，根据设计的算法判断参考电压矢量 $U_{ref}$ 所在扇区并计算相邻矢量的作用时间，产生三相 SVPWM 信号。

### 3.3　系统实验和数据分析

为了检验控制系统的工作性能，对基于高性能芯片 TMS320F2812 的控制系统进行实验研究。变流器直流侧电容电压由整流电路对三相交流电压整流、滤波产生。三相异步电机参数为：额定功率 2.2 kW，额定电流 5.0 A，额定电压 380 V，额定频率 50 Hz，额定转速 1 420 r/min。图 5、图 6 分别是电机运行时的速度曲线和电流波形。

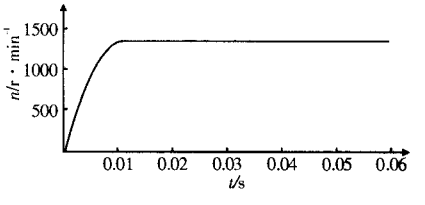


图 5　电机运行的速度曲线

（下转第 48 页）

维普资讯 http://www.cqvip.com



机转速快速下降，最后在指定位置停转。系统响应平稳快速，实现了位置伺服控制。同时，伺服系统仿真模型还比较了有无零矢量对系统性能的影响。从图8中看出，有零矢量时系统的转矩脉动幅值和频率比无矢量时小，从而证明了零矢量可以更好地抑制转矩脉动。

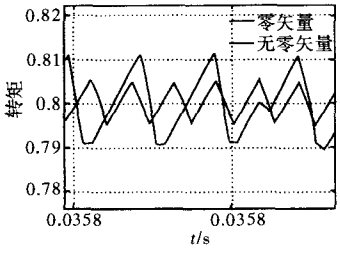


图8　有零矢量和无零矢量时的转矩脉动比较

## 5　结　论

（1）直接转矩控制系统减弱了对电机参数的依赖性，转矩响应快、动态性能好，同时加入零电压矢量能进一步减小转矩脉动，提高系统的稳态特性。

（2）仿真表明，在位置调节全过程中，系统响应快速平稳，实现了位置伺服的精确控制，为实际PMSM伺服控制系统的设计和调试提供了理论基础。

## 参考文献


[1] Rahman M F, Zhong L, Hu W Y, et al. A Direct Torque Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor Drivers [J]. IEEE. 1997.

[2] Pillay P, Krishnan R. Modeling of Permanent-magnet Motor Drives[J]. IEEE Trans. On Industry Electronics, 1988, 35 (4): 537-541.

[3] 谢运祥，卢柱强. 基于Matlab/Simulink的永磁同步电机直接转矩控制仿真建模[J]. 华南理工大学学报，2004，32(1)：19-23.

[4] 李志民，张遇杰. 同步电动机调速系统[M]. 北京：机械工业出版社，1996.

[5] 李钟明，刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京：机械工业出版社，1999.



**作者简介**：徐建德(1982－)，男，硕士生，研究方向为电机调速与控制技术。

马瑞卿(1963－)，男，教授，从事稀土永磁电机及其控制技术、电力电子技术的研究。


（上接第38页）

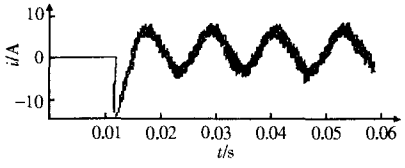


图6　电机运行的定子电流

从系统工作的图形来看，电机在开始运行0.015 s的时间内就可以达到额定转速且基本保持稳定状态，电机定子电流基本为正弦波形。实验结果表明，基于TMS320F2812的数字控制系统结构简单、系统工作实时性好、动态响应快。该控制方案具有优良的工作性能。

## 4　结　语

空间矢量脉宽调制方法输出电压谐波含量少、转矩脉动小、噪音低，能提高电压源变流器直流供电电源的利用率。基于TMS320F2812的数字控制系统电路简单、易于实现，而且系统工作的实时性和可靠性也得到很大提高。实验结果验证了理论分析的正确性和控制方案的可行性。

## 参考文献


[1] 陈伯时，陈敏逊. 交流调速系统[M]. 北京：机械工业出版社，2000.

[2] 张兴，张崇巍. PWM可逆变流器空间电压矢量控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报，2001，21(10)：102-105.

[3] 杨贵杰. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报，2001，21(5)：79-83.

[4] TI Incorporated. TMS320C28x系列DSP的CPU与外设[M]. 北京：清华大学出版社，2005.



**作者简介**：祝恩国(1978－)，男，工程师，研究方向为电力电子技术，电能质量、配电自动化。

邹和平(1976－)，男，工程师，从事嵌入式控制系统、配用电自动化研究。

赵　兵(1972－)，男，工程师，研究方向为控制理论与应用、电力系统自动化。

吕英杰(1977－)，女，工程师，从事用电自动化研究。