

# 基于 DSP 的 SVPWM 快速算法研究

吴凤江 高晗璿 孙力 王有琨  
哈尔滨工业大学

**摘要:**提出一种易于与矢量控制算法接口的 SVPWM 快速算法。推导了各空间矢量作用时间与  $\alpha-\beta$  坐标系下电压分量的线性矩阵关系表达式,无需在线计算三角函数,只需简单的四则运算即可实现 SVPWM。实验结果证明了该算法的正确性和有效性。

**关键词:**空间矢量脉宽调制(SVPWM) 快速算法 数字信号处理器(DSP) 矢量控制

## Research on Fast Algorithm of SVPWM Based on DSP

Wu Fengjiang Gao Hanying Sun Li Wang Youkun

**Abstract:**A novel fast algorithm of SVPWM which is easily joined with vector control algorithm is proposed. The matrix equation of operation time of each space vector responding to voltage components in the two-phase rectangle coordinates is derived. SVPWM can be implemented with simple arithmetic operation, thus the calculation of circular function is avoided. The experimental results prove that the fast algorithm is valid and available.

**Keywords:**space vector pulse width modulation(SVPWM) fast algorithm digital signal processor(DSP) vector control

## 1 引言

与 SPWM 相比,空间矢量 PWM(SVPWM) 以其直流电压利用率高、易于数字化实现的优点,在各种变流器中得到了日益广泛的应用。在现代高性能电机伺服驱动器中,通常将矢量控制与 SVPWM 相结合,以获得高精度的运行特性<sup>[1]</sup>,但是在传统 SVPWM 算法中,各空间矢量作用时间的获得是基于计算电机转子角位置三角函数值的,需要进行复杂的正弦函数和反正切函数计算,导致计算量大,其复杂的算法对高精度实时控制产生了不可忽视的影响<sup>[2]</sup>。考虑到矢量控制算法能够提供包含转子角度和电压矢量幅度信息的两相静止直角坐标系下的电压分量,本文从传统 SVPWM 算法入手,获得了各扇区空间矢量作用时间与两相静止直角坐标系下电压分量的线性矩阵关系表达式,通过离线计算各扇区的转换矩阵,避免了复杂的在线实时三角函数转换计算。结合定点 DSP 芯片 TMS320LF2407A 的数据处理特点,为提高计算精度,将转换数据进行定标处理,进而简化了软件,减小了 DSP 的运算时间,提高了系统的实时性及系统精度。给出了基于该算法

的硬件法与软件法生成的 SVPWM 实验波形,实验结果证明了该算法的正确性和有效性。

## 2 传统 SVPWM 算法原理

图 1 示出了三相电压型逆变器的基本结构,由 6 个开关器件组成。

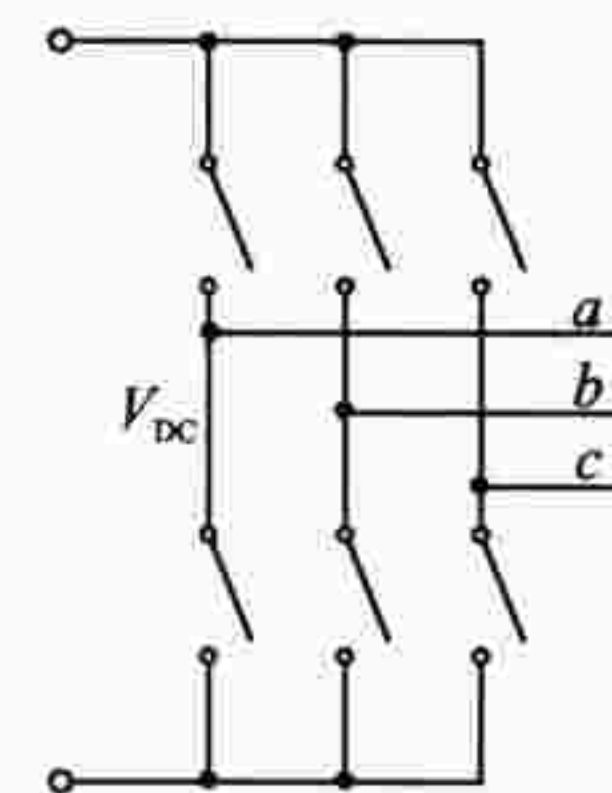


图 1 三相逆变器结构图

逆变器输出的合成电压空间矢量为

$$\mathbf{V} = \frac{2}{3}(V_a + e^{j2\pi/3}V_b + e^{j4\pi/3}V_c) \quad (1)$$

式中:  $V_a, V_b, V_c$  为逆变器三相输出的瞬时电压。

由三相电压型逆变器的桥臂开关状态共组成 8 种电压空间矢量,表示为

$$\mathbf{V}_k = \begin{cases} \frac{2}{3}V_{DC}e^{j\frac{k-1}{3}\pi} & k=1,2,3,4,5,6 \\ 0 & k=0,7 \end{cases} \quad (2)$$

如图 2 所示,8 个电压空间矢量将空间分成 6 个扇区。

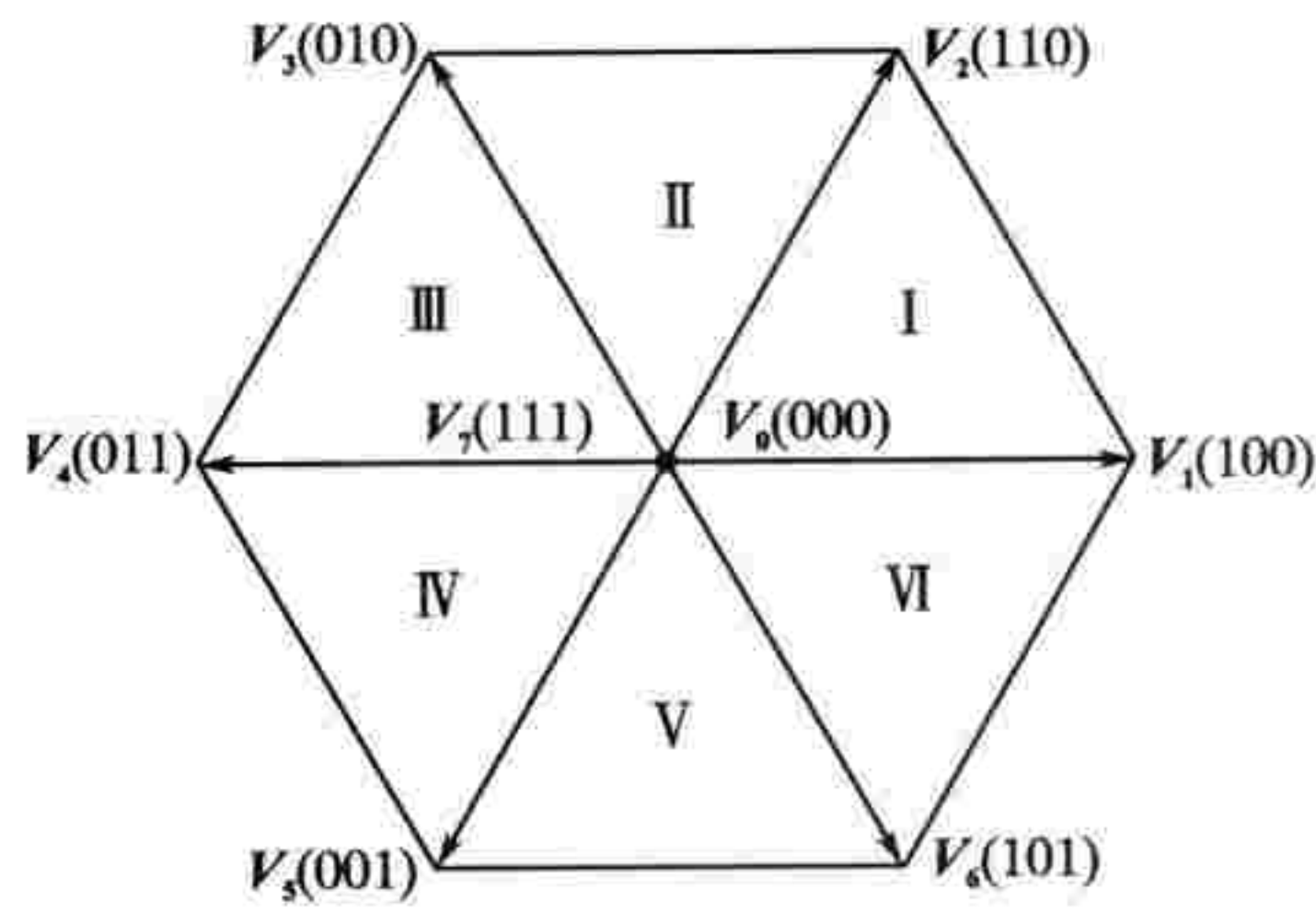


图 2 SVPWM 空间矢量分布图

SVPWM 调制的基本原理是用若干个电压空间矢量逼近给定的参考合成电压空间矢量  $V^*$ ,以第 I 扇区为例, $\theta$  为合成电压矢量与  $V_4$  的夹角, $V_{DC}$  为直流母线电压, $T_s$  为 PWM 周期,各空间矢量的作用时间为

$$\begin{cases} t_1 = \frac{\sqrt{3} |V^*| T_s \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)}{V_{DC}} \\ t_2 = \frac{\sqrt{3} |V^*| T_s \sin \theta}{V_{DC}} \\ t_0 = t_7 = \frac{1}{2} (T_s - t_1 - t_2) \end{cases} \quad (3)$$

传统 SVPWM 的算法步骤为:将合成电压矢量在  $\alpha - \beta$  两相直角坐标系下进行分解,通过反正切函数求出合成矢量的相角  $\theta$ ,根据相角判断矢量所在扇区并确定电压矢量,并由式(3)计算各电压空间矢量的作用时间<sup>[2]</sup>。可见传统 SVPWM 算法复杂,计算量大,计算精度以及控制系统的实时性将会受到不可忽视的影响。本文提出一种实现 SVPWM 的快速算法,能够有效降低算法计算时间,进而提高了系统的实时性。

### 3 SVPWM 的快速算法

在高性能矢量控制交流调速系统中,通常采用坐标变换,参考电压矢量  $V^*$  是以在  $\alpha - \beta$  坐标轴上的分量形式给出的,表示为

$$V^* = V_\alpha + jV_\beta \quad (4)$$

#### 3.1 开关作用时间的计算

如图 3 所示,假设参考电压矢量  $V^*$  在第 I 扇区,在  $Rt\triangle ACB$  中

$$\begin{cases} \frac{V_2 T_2}{T_s} = \frac{V_\beta}{\sin 60^\circ} \\ BC = \frac{V_\beta}{\tan 60^\circ} \end{cases} \quad (5)$$

由此可解得

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_s}{V_{DC}} \left( \frac{3}{2} V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} V_\beta \right) \\ T_2 = \sqrt{3} \frac{T_s}{V_{DC}} V_\beta \end{cases} \quad (6)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \frac{T_s}{V_{DC}} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

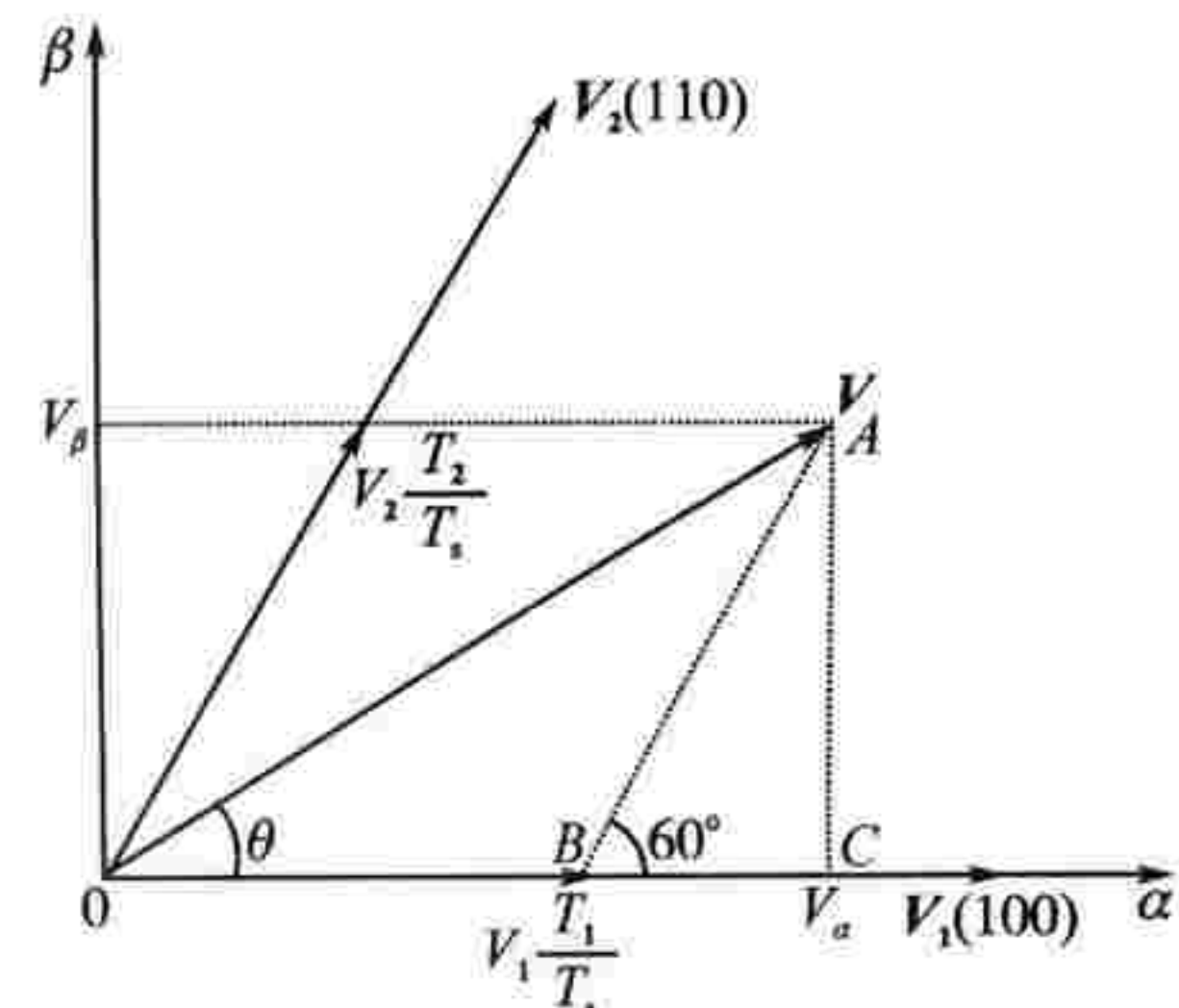


图 3 第 I 扇区电压矢量分解图

同理可以计算出其它扇区的矩阵表达式,如表 1 所示。由上述分析可知,表达式中已不存在相角的三角函数项,因而可以简化计算,提高系统的实时性。

表 1 各扇区矢量作用时间转换矩阵

扇区 I	扇区 II
$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \sqrt{3} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$
扇区 III	扇区 IV
$\begin{bmatrix} 0 & \sqrt{3} \\ -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$
扇区 V	扇区 VI
$\begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{3}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} \\ \frac{3}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$

#### 3.2 参考电压矢量所在扇区的判断

传统 SVPWM 判断参考电压矢量所在扇区的一般方法是根据  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  计算出电压矢量的幅值,再结合  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  的符号进行判断,这种方法由于含有非线性函数,计算复杂,导致系统效率低下。本文采用一种简单快捷的判断方法。

定义以下变量

$$\begin{cases} B_0 = V_\beta \\ B_1 = V_\alpha - \frac{V_\beta}{\sqrt{3}} \\ B_2 = -V_\alpha - \frac{V_\beta}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (8)$$

再由下式计算 P 值

$$P = 4\text{sign}(B_2) + 2\text{sign}(B_1) + \text{sign}(B_0) \quad (9)$$

即可根据 P 值查表 2 获得扇区号。

表 2 P 值与扇区号的对应关系

P	1	2	3	4	5	6
扇区号	1	5	0	3	2	4

### 4 基于 DSP 的算法实现

由前述可知,本文所提出的算法不需在线计算三角函数,只需通过简单的四则运算以及查询表格的方式即可实现 SVPWM,能够很好地适应定点 DSP 芯片的数据处理特点。本文基于 TI 公司的 TMS320LF2407A 定点 DSP 芯片进行了算法实现。

考虑到定点 DSP 芯片无法表示小数,表 1 的数据需要进行定标处理。本文采用 Q14 格式将数据放大,以提高系统精度,算法数据的 Q14 格式如表 3 所示。

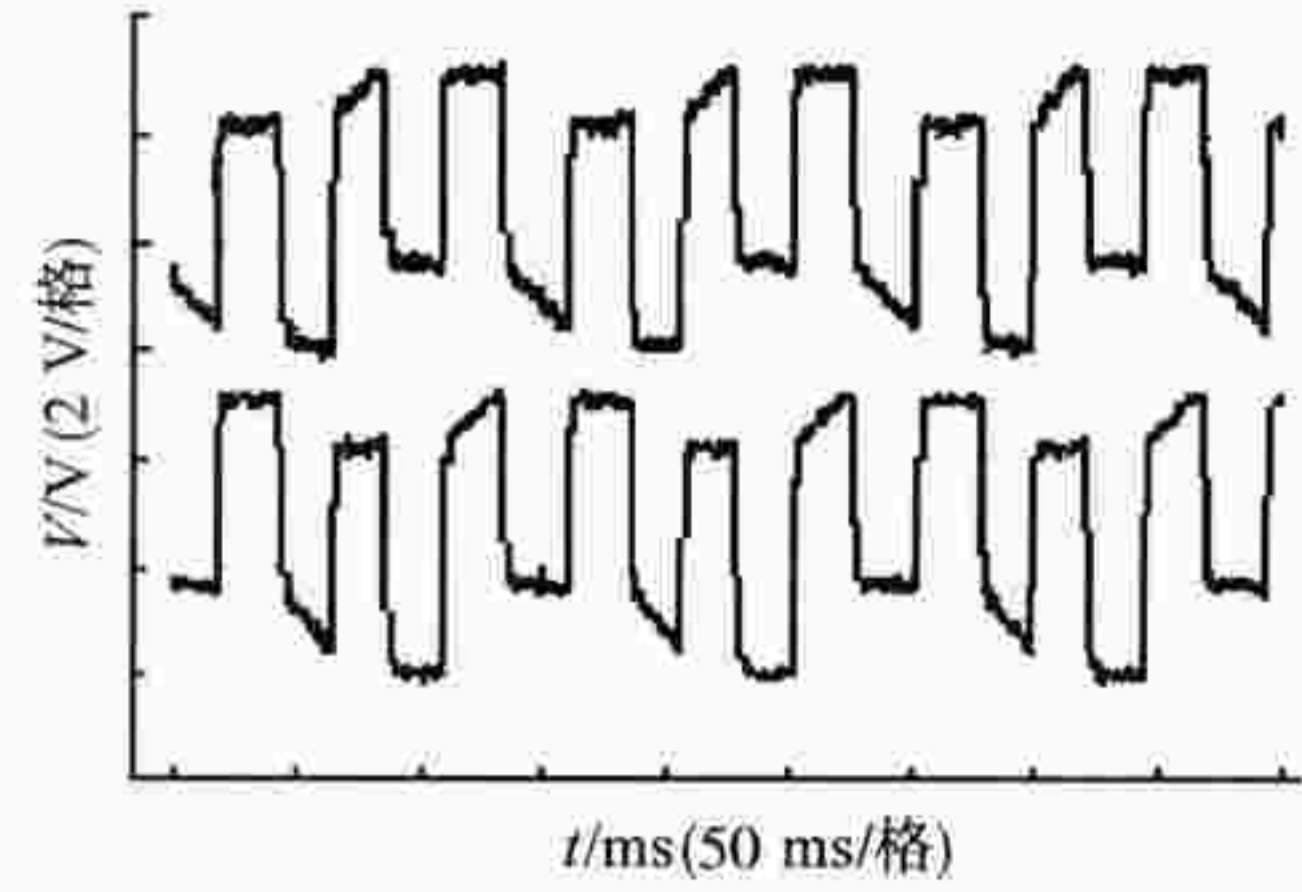
表 3 算法数据的 Q14 格式

扇区 I	扇区 II
$\begin{bmatrix} 24576 & -14188 \\ 0 & 28377 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 24576 & 14188 \\ -24576 & 14188 \end{bmatrix}$
扇区 III	扇区 IV
$\begin{bmatrix} 0 & 28377 \\ -24576 & -14188 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -24576 & 14188 \\ 0 & -28377 \end{bmatrix}$
扇区 V	扇区 VI
$\begin{bmatrix} -24576 & -14188 \\ 24576 & -14188 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -28377 \\ 24576 & 14188 \end{bmatrix}$

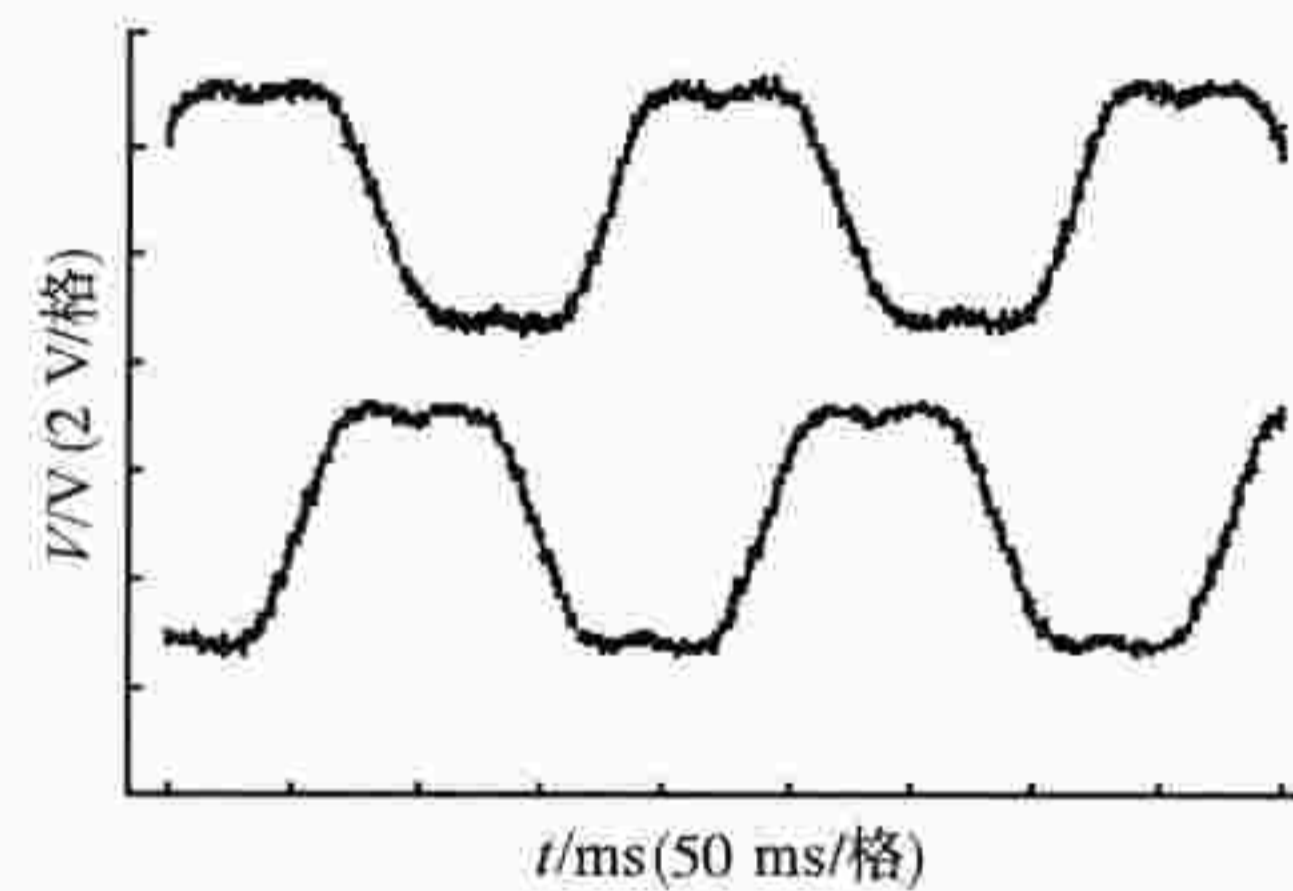
本文所提出算法的具体实现步骤为:在每一个 PWM 周期中断子程序中,首先根据矢量控制算法提供的  $V_\alpha$  和  $V_\beta$  计算 P 值,再查表 2 得扇区号,由扇区号查表 3 获得转换矩阵的算法数据,由式(7)即可获得各空间矢量作用时间。

TMS320LF2407A 有软件法和硬件法两种实

现 SVPWM 的方法。图 4 为基于上述快速算法的硬件法与软件法实现 SVPWM 的实验波形,可以看出基于该算法和传统算法实现的 SVPWM 波形<sup>[3]</sup>具有很好的一致性。



(a) 硬件法实现SVPWM相电压波形



(b) 软件法实现SVPWM相电压波形

图 4 基于快速算法实现的 SVPWM 实验波形

### 5 结论

本文提出了一种易于 DSP 实现的快速算法,尤其适用于矢量控制交流调速系统。与传统算法相比,该快速算法原理简单,无需进行三角函数计算,编程简洁,有效降低了系统运算时间。实验结果证明了该算法的正确性和有效性,能够满足高性能电机控制系统的实时性要求。

#### 参考文献

- 1 李叶松, 黄恒, 雷力等. 高性能全数字交流感应电机驱动系统的研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2): 75~77
- 2 杨贵杰, 孙力, 崔乃政等. 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
- 3 朱志昆, 季文龙, 宋小庆. 基于 DSP 的 SVPWM 两种生成方式的比较分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2002, 16(1): 73~77

收稿日期: 2005-08-25

修改稿日期: 2006-03-20