

**AN2154****应用说明**

使用 8 位 ST7MC 微控制器和 ST7MC-KIT/BLDC 入门套件进行空间矢量调制

引言

由于空间矢量调制（SVPWM）可用于交流电机的矢量控制（磁场定向），因此是利用三相逆变器产生正弦线对线电压和电流的最广泛应用技术之一。

本应用说明首先阐述了空间矢量调制理论，然后介绍了使用 8 位微控制器 ST7MC 实现 SVPWM 的算法。

目录

1	空间矢量调制理论.....	4
2	用于 SVPWM 的 ST7MC 电机控制外设的 PWM 发生器模块	7
	2.1 对称空间矢量调制	8
3	ST7MC 实现对称 SVPWM.....	10
	3.1 固定设置	10
	3.2 对称 SVPWM 算法说明	11
4	结论和实验结果.....	13
	4.1 CPU 负载评估	13
	4.2 输出波形捕捉	14
5	修订历史	15



图表清单

图 1.与三相逆变器相连的电机
4

图 2. 空间矢量图5

图 3.ST7MC 电机控制外设的 12 位 PWM 模块发生器8

图 4. 中心对齐 PWM 波形：比较 0 寄存器 = 8，比较寄存器值 = 4.....8

图 5. 边缘对齐的 PWM 波形：比较 0 寄存器 = 8，比较寄存器值 = 48

图 6. 边缘对齐的 SVPWM 模式9

图 7. 中心对齐 SVPWM 模式.....10

图 8.更新中断服务例程框图14

图 9.相电压、线对地电压和中性点对地电压14

图 10.电机相电压的.....幅值谱
15



1 空间矢量调制理论

图 1 显示了一台与星形连接电机相连的三相逆变器。

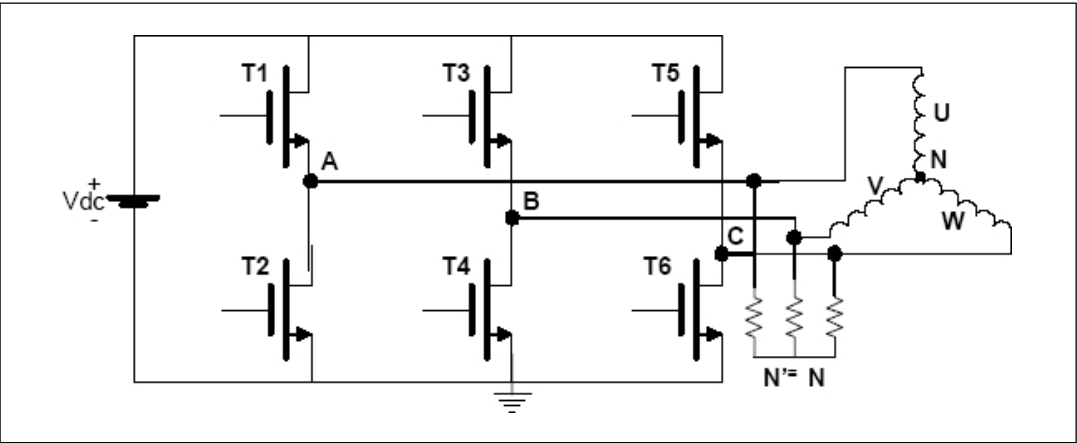


图 1. 连接到三相逆变器的 电机

显然，为了避免直流电源 V_{dc} 短路，必须同时只接通每个脚的一个晶体管。根据开启的晶体管不同，只有八种可能的开关状态：

表 1. 三相逆变器允许的状态

国家	导电晶体管
000	T2、T4、T6
001	T2、T4、T5
010	T2、T3、T6
011	T2、T3、T5
100	T1、T4、T6
101	T1、T4、T5
110	T1、T3、T6
111	T1、T3、T5

请注意，在状态 000 和 111（空态）中，A、B 和 C 点分别通过低侧和高侧晶体管与直流母线负极和正极短接，因此电机上没有线对线电压。相反，在其余六种状态下，电机相间存在电压，导致电流流过定子绕组，并由该电流产生磁通。

用空间矢量来表示表 1 中的状态非常有用。如图 2 所示，六个活动矢量和两个空状态可以绘制在复平面上：



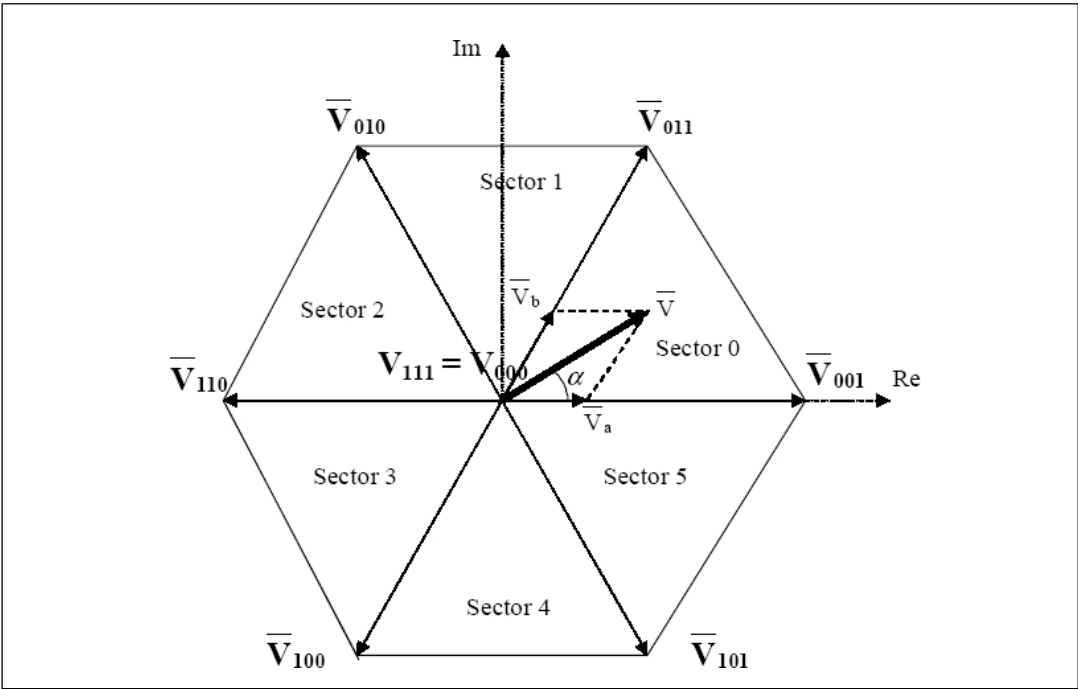


图 2. 空间矢量图

每一个参考电压 V100、V110.....都对应表 1 中的一种开关状态。为了在电机相位上获得正弦波电压，必须产生一个连续旋转的矢量 V，这样矢量 V 在复平面上的一整圈代表电机的一个电气转数（在单极对电机的情况下，与一个机械转数相吻合）。正如随后将演示的那样，当采用线性调制时，旋转矢量所描述的圆周必须保持在图 2 所示的六边形内。空间矢量调制的目的正是为了产生适当的 PWM 信号，以便通过 "时间加权" 约束 V 所在扇形的两个参考矢量，产生六边形内的任何矢量 V。如图 2 所示，矢量 V 可以表示为

公式 1

$$V = V_a + V_b$$

其中， V_a 和 V_b 分别是矢量 V 相对于 V_{001} 和 V_{011} 的分量。
如前所述，矢量 V_a 和 V_b 将分别通过在 PWM 周期 T_0 的一定百分比内应用参考矢量 V_{001} 和 V_{011} 而产生。因此，通过将 t_a 、 t_b 和 t_0 定义为矢量 V_{001} 、 V_{011} 和 V_{111} （或 V_{000} ）在 PWM 周期内的持续时间，可以写成

公式 2

$$V = V_a + V_b = \frac{t_a}{T_0} \cdot V_{001} + \frac{t_b}{T_0} \cdot V_{011} + \frac{t_0}{T_0} (V_{111} \text{ 或 } V_{000})$$

与

公式 3

$$t_a = \frac{V_a}{V_{001}} \cdot T_0$$



公式 4

$$t_b = \frac{V_b}{V_{000}} \cdot T_{000}$$

公式 5

$$t_0 = T_0 - t_a - t_b$$

此外，参考 [图 2](#) 很容易证明这一点：

公式 6

$$V \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) = V_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

公式 7

$$V \cdot \sin \alpha = V_b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3}\right)$$

从中获取：

公式 8

$$V_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot V \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)$$

公式 9

$$V_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot V \cdot \sin \alpha$$

如果我们现在将 [方程 8](#) 和 [9](#) 代入 [方程 3](#) 和 [4](#)，就可以计算出时间 t_a 、 t_b 和 t_0 与角度 α 和调制指数 $m_i = V/V_{xxx}$ 的函数关系：

公式 10

$$t_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot T_0 \cdot m_i \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$$

公式 11

$$t_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot T_0 \cdot m_i \cdot \sin \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{3}$$

公式 12

$$t_0 = T_0 - t_a - t_b$$

请注意，当调制指数超过 $\sqrt{3}/2$ 时， t_0 的值在一定的 α 值下可能变为负值。由于这并不具有物理意义，因此可以肯定，保证空间矢量调制在线性区域正常工作的最大 m_i 值恰好是 $\sqrt{3}/2$ 。更高的 m_i 值会导致过度调制，此时 [等式 10 - 12](#) 不再有效。

从图形上看，这意味着要使空间矢量调制正常工作，矢量 V 的大小必须足够小，以确保矢量完全包含在 [图 2](#) 所示的六边形内。



2 用于 SVPWM 的 ST7MC 电机控制外设的 PWM 发生器模块

本节介绍 ST7MC 电机控制外设中嵌入的 12 位 PWM 发生器的基本功能。

[图 3](#) 是 PWM 发生器的框图。3 个 PWM 信号是通过一个自由运行的 12 位 PWM 计数器和 3 个 13 位比较寄存器（U、V 和 W 相）（MCMPU、MCMPV 和 MCMPW 寄存器）产生的。第四个 12 位寄存器（MCMP0）用于设置 PWM 载波频率。然后，所有三个 PWM 信号（U 相、V 相和 W 相）都被导向通道管理器，其中可能会添加死区时间。

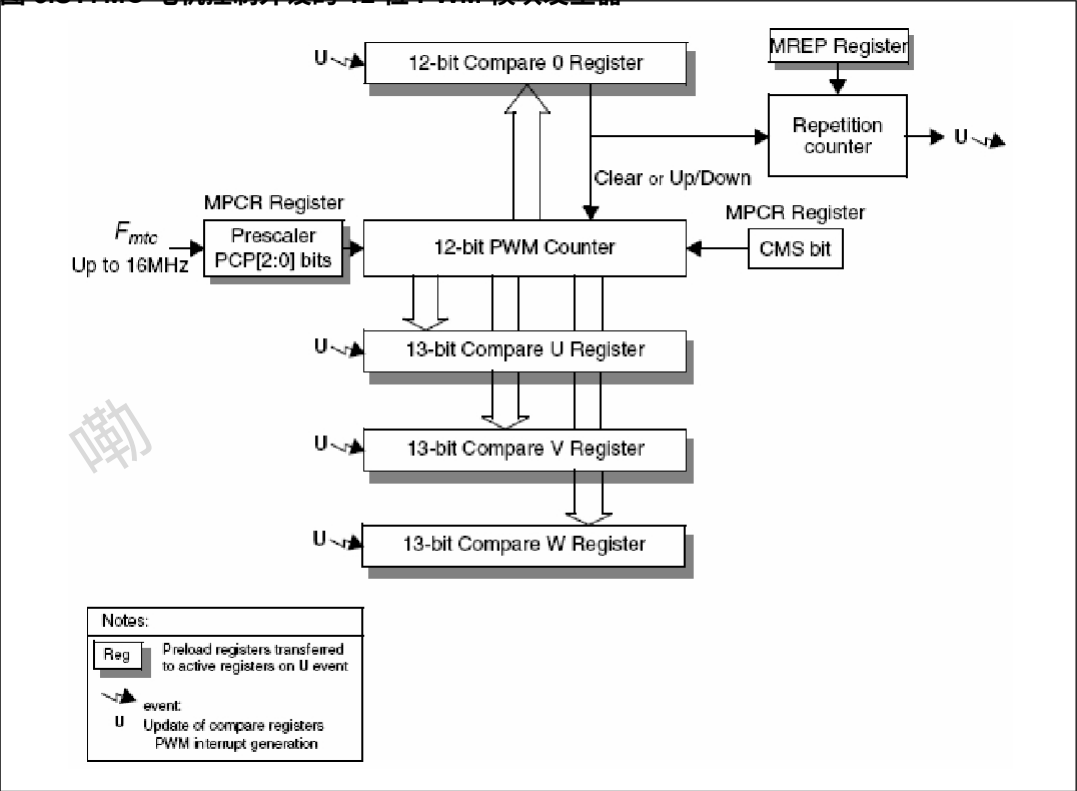
12 位 PWM 计数器时钟通过 3 位预分频器提供，以便产生较低的 PWM 载波频率。它将 F_{mtc} 除以 1、2、3.....8，得到 $F_{counterc}$

PWM 发生器可以在中心对齐或边缘对齐模式下工作，具体取决于 MPCR 寄存器中的 CMS 位设置：

- 中心对齐模式（CMS 位 = 1）：在这种工作模式下，PWM 计数器向上计数，直到加载到 12 位比较 0 寄存器 (MCMP0) 中的值。随后，计数器开始向下计数，直至到达零，然后重新开始向上计数。当 PWM 计数器在向上计数过程中达到相应的 13 位比较寄存器值时，PWM 信号被设置为 "0"；当 PWM 计数器在向下计数过程中再次达到 13 位比较寄存器值时，PWM 信号被设置为 "1"。[图 4](#) 显示了中心对齐的 PWM 波形，其中 0 比较寄存器的值等于 8。
- 边缘对齐模式（CMS 位 = 0）：在此工作模式下，PWM 计数器计数到装入 12 位比较寄存器的值。然后清零 PWM 计数器，重新开始计数。当 PWM 计数器在向上计数过程中达到相应的 13 位比较寄存器值时，PWM 信号被设置为 "0"；当 PWM 计数器被清除时，PWM 信号被设置为 "1"。[图 5](#) 显示了边缘对齐的 PWM 波形，其中 0 比较寄存器的值等于 8。在中心对齐模式和边缘对齐模式下，当 PWM 计数器发生欠溢或溢出，且 8 位重复倒计时达到零时，四个比较寄存器（一个比较 0 寄存器和三个用于 U、V 和 W 相的比较寄存器）都会更新（如果启用，则会产生更新'U'事件中断）。这意味着每隔 N 个 PWM 计数器周期，数据就会从预加载比较寄存器传输到比较寄存器，其中 N 是边缘对齐模式下 8 位重复寄存器的值。使用中心对齐模式时，PWM 计数器每次溢出或不足时，重复倒计时都会递减。虽然这将最大重复次数限制在 128 个 PWM 周期，但这使得每个 PWM 周期可以更新占空比两次。



图 3.ST7MC 电机控制外设的 12 位 PWM 模块发生器



中心对齐PWM 波形：比较 0 寄存器 = 8，比较寄存器值 = 4

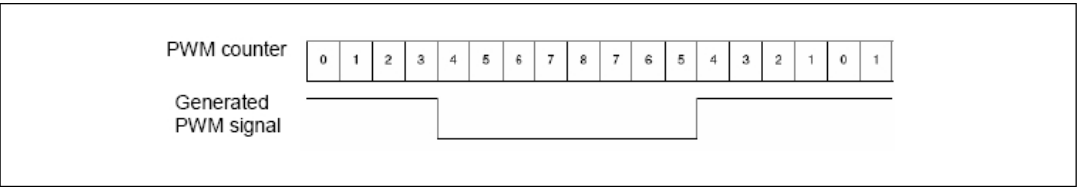
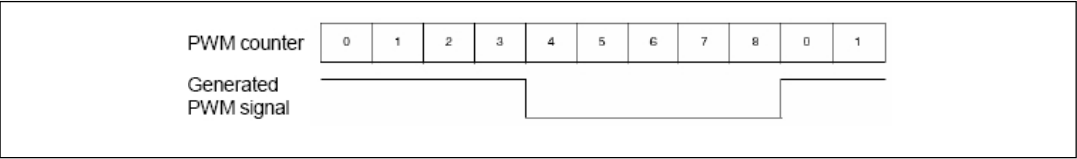


图 5. 边缘对齐PWM 波形：比较 0 寄存器 = 8，比较寄存器值 = 4



2.1 对称空间矢量调制

如第 2 章所述，SVPWM 的目标是产生三个适当的 PWM 信号，以便在电机相位上产生三个矢量 V，这三个矢量 V 在复平面上的空间矢量六边形内移动（相互之间移动 120°）并连续旋转。此外，我们还讨论过，要在六个扇形中的一个扇形内创建矢量 V，必须使用公式 10 - 12 对绑定该扇形的参考矢量进行 "时间加权"。



在 PWM 周期内分配时间 t_0 （与两个空扇区之一相关）有几种可能的方法。

第一种可能性 [如图 6](#) 所示。它利用 ST7MC 电机控制外设的 12 位 PWM 发生器，采用边缘对齐模式。

请注意，边缘对齐意味着存在空态 000 和空态 111 之间的通道，因此需要三个同步开关换向。

文献表明，为了减少换向次数和开关损耗，最好采用相邻连续状态的状态序列。这意味着，从一个状态进入下一个状态时，只需进行一次开关换向。

这意味着空状态 111 必须始终位于状态 110、101、011 之一之后，而空状态 000 必须始终位于状态 100、001、010 之一之后。

[图 7](#) 显示了 ST7MC 电机控制外设 12 位 PWM 发生器在 "中心对齐" 模式下产生的典型开关模式。可以看出，上述规则得到了遵守。

请注意，为了与上一段所述保持一致，PWM 周期应报告为 T_0 ，而在 [图 7 中](#) 则表示为 $1/f_s$ 。事实上，从这一点出发，用 T_0 表示 PWM 周期的一半是比较方便的。不难理解，在 t_a 、 t_b 如 [图 7](#) 所示的情况下，[等式 10 - 12](#) 仍然有效。

请注意，与空状态相关的时间 t_0 被分为两部分： t_0' 相对于状态 111 的永存时间， t_0'' 相对于状态 000 的永存时间。由于 [方程 12](#) 没有给出这两个时间值的任何信息，因此它们的选择可能是任意的。尽管如此，文献资料表明，在下列情况下，线路至中性点电压和电机电流的总谐波失真度最佳：

公式 13

$$\begin{matrix} t' & = & t'' \\ 0 & & 0 \end{matrix} = \frac{t_0}{2}$$

在这种情况下，调制称为对称 SVPWM。

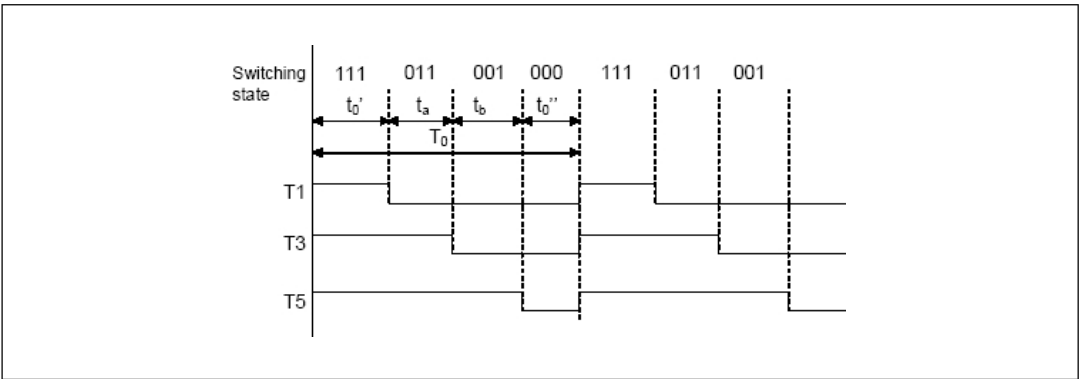


图 6. 边缘对齐的 SVPWM 模式



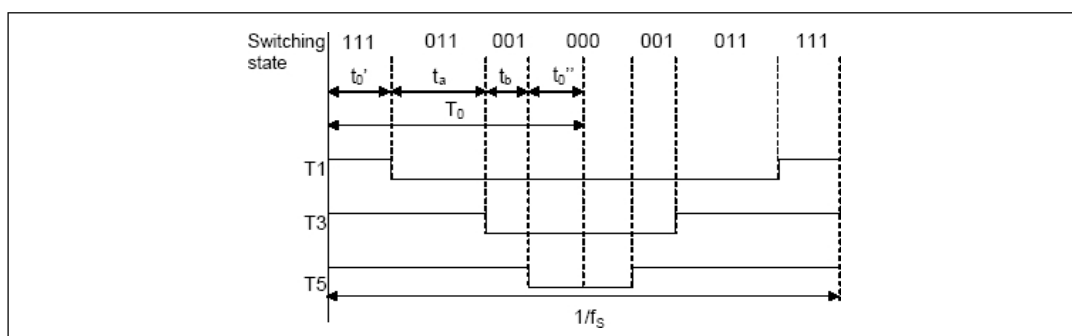


图 7. 中心对齐 SVPWM 模式

3 ST7MC 实现对称 SVPWM

ST7MC 是意法半导体专用于电机控制的 8 位微控制器，它实现了对称 SVPWM 的实际应用。得益于其嵌入式电机控制外设，空间矢量调制可以轻松实现，而不会给 CPU 带来过多的计算负荷。开发的固件主要基于三相交流感应电机控制软件库，可从网站 www.st.com 下载，并在应用说明 AN1904（可从同一网页下载）中作了广泛介绍。该库可处理交流异步电机的开环和闭环控制，利用正弦调制和 3 次谐波注入实现最佳滑差调节。从上述库开始，对称 SVPWM 主要通过修改专用于正弦加 3 次谐波波形生成的 "U" 事件中断服务例程来生成。

3.1 固定设置

本段旨在说明在对称 SVPWM 算法开发过程中，交流感应电机控制库中定义的哪些参数已被固定。所有这些设置都不是强制性的，但修改其中一个参数可能需要对固件进行一些修改，以恢复固件的全部功能。关于交流异步电机控制库，已设置的主要参数如下：

- 速度调节：已选择开环运行。
- PWM 模式：对称 SVPWM 必须选择中心对齐 PWM。
- PWM 频率：设定为 15.625 kHz。这是通过将 MCMP0 寄存器固定为 255，并将预分频器设置为 1 ($F_{\text{counter}} = F_{\text{mtc}}/2$) 来实现的。这样既可以消除开关带来的声学噪音，又可以执行所有必要的计算，以 8 位格式生成 PWM 模式。
- 重复计数器：固定为 2，以便每 1.5 个 PWM 周期产生一个 U 事件。
- 根据 ST7MC 入门套件原理图 C-6 版，分度调制由电位器 RV2 在 0 至 0.866 之间调节，输出波形频率由电位器 RV1 在 0 至 0.866 之间调节。根据 ST7MC Starning Kit 原理图 C-6，指数调制可通过电位器 RV2 在 0 至 0.866 之间调节，输出波形频率可通过电位器 RV1 在 3 至 225 Hz 之间调节。通过改变 MTC_param.h 头文件中的 HIGHEST_FREQ 和 LOWEST_FREQ 参数值，可最终改变最大和最小频率。



3.2 对称 SVPWM 算法说明

如第 1 章所述，为了产生 SVPWM，矢量 V 必须在空间矢量六边形内连续旋转。这意味着时间 t_a 、 t_b 和 t_0 必须按照 [等式 10 - 12](#) 连续变化。由于这些等式只适用于 0 至 $\pi/3$ 范围内的 α ，因此用 11 位变量表示角度 α 非常方便。这样，最有效的 3 位可以用来表示扇形，而最不有效的 8 位可以包含所识别扇形内矢量 V 的角度。分辨率为 $\pi/(3.256)$ 弧度，相当于 0.234 度。在实际应用中，为了保持较高的频率分辨率，有必要用 16 位变量来存储角度 α 。根据前面的讨论，最有效的 3 位用于识别扇形，连续的 8 位用于识别扇形内的角度，最不有效的 5 位不用于 t_a 、 t_b 和 t_0 计算。

为了减少中央处理器的计算负荷，我们使用了一个查找表，利用 [等式 10](#) 和 [11](#) 以及调制指数 m_i 的最大允许值（即 0.866 ）来存储时间 t_a 和 t_b 。

此外，比较 [公式 10](#) 和 [11](#) 可以发现， t_a 表与反向的 t_b 表完全相同。这意味着只需要一个查找表。在运行过程中， t_a 和 t_b 的查找时间必须根据用户指定的调制指数值进行相应调整。这分两步完成：首先， t_a 和 t_b 与从电位器 RV2 读取的 8 位变量（SineMag）相乘，因此只考虑最显著字节的结果（相当于除以 256）。

在 t_a 和 t_b 缩放之后，必须计算出要载入比较寄存器的三个值，以产生 [图 7](#) 所示的波形。举例来说，假设矢量 V 在一个众所周知的瞬间位于 0 扇区，因此必须在状态 001 和 011 之间进行“时间加权”（[图 7](#) 揭示了这种情况）。需要载入比较寄存器的值是

公式 14

$$U \text{ 相比较寄存器 (MCMPU)} = \left\lfloor \frac{t_0}{2} \right\rfloor \cdot \text{计数器}$$

公式 15

$$V \text{ 相比较寄存器 (MCMPV)} = \left\lfloor \frac{t_0}{2} \right\rfloor \cdot F$$

公式 16

$$W \text{ 相比较寄存器 (MCMPW)} = \left\lfloor \frac{t_0}{2} \right\rfloor \cdot \left(\frac{T}{2} - \frac{t_0}{2} \right) \cdot F$$

此外，由于

公式 17

$$T_0 = \frac{1}{(2 \cdot f_s)} = \frac{1}{(2 \cdot 15.625)} = 32 \mu s$$

和

公式 18

$$MCMP0 = T_0 \cdot F_{\text{counter}} - 1 = 255$$

由此可见， $T_0 - t_0$ 简单地等于 $\sim t_0$ (即 $\text{NOT}(t_0)$)。此外，考虑到方程

公式 19

$$\frac{t_0}{2} - \frac{(T_0 - (t_a + t_b))}{2} = \frac{(t_a - t_b)}{2}$$

可以将 X 阶段比较寄存器 (X=U、V、W) 表示为仅与 t_a 和 t_b 有关的函数 (从这里开始将省略与 F_{counter} 有关的函数)：

公式 20

$$\text{U 相比较寄存器} = \left\lceil \frac{(\sim t_a + t_b)}{2} \right\rceil$$

公式 21

$$\text{V 相比较寄存器} = \left\lceil \frac{(\sim t_a + t_b)}{2} \right\rceil + t_a$$

公式 22

$$\text{W 相比较寄存器} = \left\lceil \frac{(\sim t_a + t_b)}{2} \right\rceil$$

框图。

$$\left(\frac{t_a + t_b}{2} \right)$$

表 2

显示了根据矢量 V 所在扇区的不同，需要加载到 U、V 和 W 相比较寄存器中的值。

表 2. 比较寄存器值

部门	U 相比较寄存器 (MCPUH)	五相比较寄存器 (MCPVH)	W 相比较寄存器 (MCPWH)
0	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2}$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right) + t_a$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$
1	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2}$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$
2	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2} + t_a$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2}$
3	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right) + t_b$	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2}$
4	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2}$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right) + t_a$
5	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right) + t_b$	$\frac{(\sim(t_a + t_b))}{2}$	$\sim\left(\frac{(\sim t_a + t_b)}{2}\right)$



表 3

列出并简要说明了 SVPWM 算法中使用的变量，图 8 显示了算法

表 3.SVPWM 算法中使用的 变量

变量名称	尺寸可变	物理意义	决议
阶段	16 位 (0x00000xBFFF)	角度 α	0.234 度
正弦波频率	16 位	da/dt	0.212 赫兹
Ta	8 位	ta	12 位定时器分辨率 (125 毫微秒)
Tb	8 位	tb	12 位定时器分辨率 (125 毫微秒)
SineMag	8 位	mi*256	≈ 0.0039
t ₀	它不是一个定义变量。它的计算公式总是 T0- ta- tb		
T ₀	T ₀ 不是一个确定的变量。它恒定在 15.625 kHz 的载波频率上		

4 结论和实验结果

从 ST7MC 三相异步电机控制库开始，我们开发了一种对称 SVPWM 算法。本节说明了为评估 CPU 负载而进行的测量，并显示了示波器捕获的输出波形。

4.1 CPU 负载评估

使用 ST7MC 仿真器 (ST7MDT50-EMU3) 测量了 U 中断例程在 8 MHz 时钟频率下的执行时间，估算了所实施的算法对 CPU 负载的贡献。结果表明，上述例程的平均执行时间等于

公式 23

$$t_{ex} = 23.1 \mu sec$$

因此，SVPWM 执行对 CPU 负载的贡献是在暴露的情况下通过关系计算得出的：

公式 24

$$CPULOAD = \frac{\text{文本}}{0.5 \cdot t_{PWM} \cdot (repcounter + 1)} = 24.1\%$$



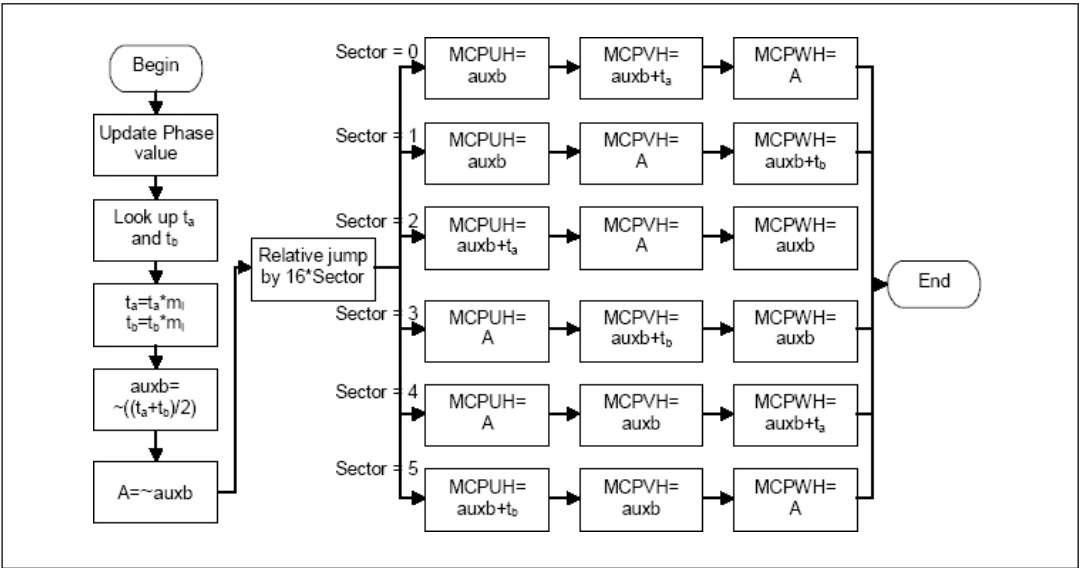
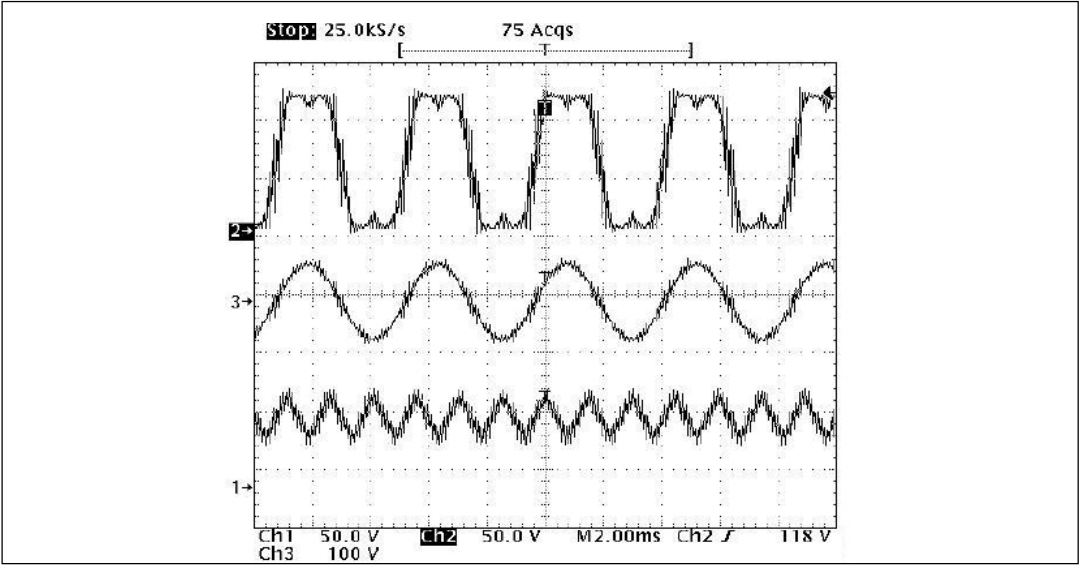


图 8.更新中断服务例程框图

4.2 输出波形捕捉

参照图 2，图 9 显示了中性点 N 相对于地的电压（通道 1）、A 点相对于地的电压（通道 2）以及电机三相中其中一相的相电压（ V_{AN} ，通道 3）。图 10 显示了电机相电压的幅值频谱。

图 9. 相电压、线对地电压和中性点对地电压





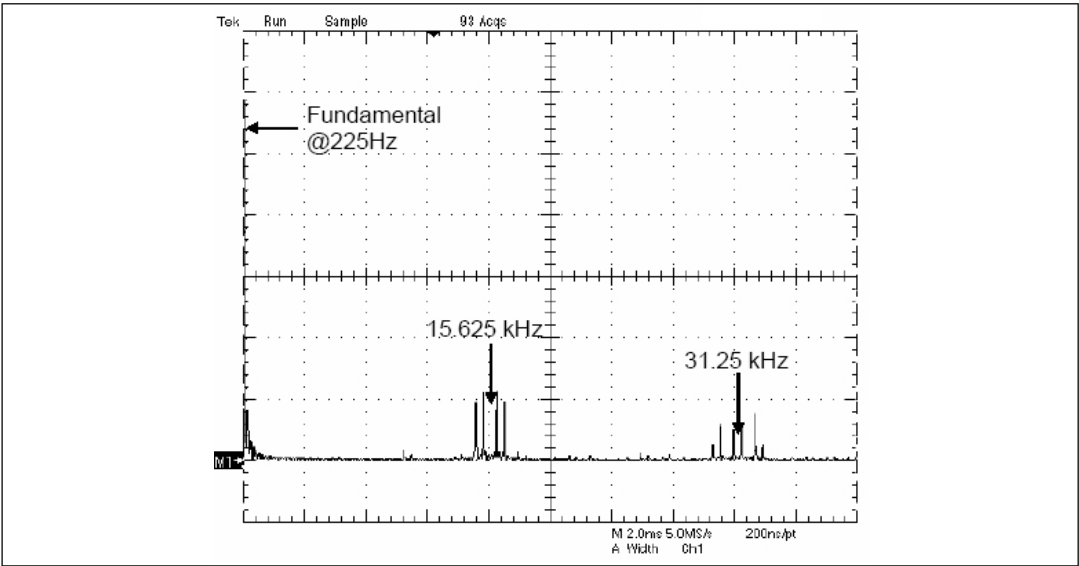


图 10. 电机相电压幅值谱

5 修订历史

表 4. 文件修订历史

日期	修订	变化
2005 年 5 月 24 日	1	首次发布
2007 年 11 月 19 日	2	删除提及过时产品的内容
2007 年 11 月 21 日	3	去除水印，内容不变



请仔细阅读：

本文档中的信息仅与意法半导体产品有关。STMicroelectronics NV 及其子公司（以下简称 "ST"）保留随时对本文档以及其中描述的产品和服务进行变更、更正、修改或改进的权利，恕不另行通知。

所有 ST 产品均根据 ST 的销售条款和条件进行销售。

购买者对本文所述 ST 产品和服务的选择、挑选和使用负全部责任，ST 不承担与本文所述 ST 产品和服务的选择、挑选或使用有关的任何责任。

本文件未授予任何明示或默示、禁止反言或其他形式的知识产权许可。如果本文件的任何部分提及任何第三方产品或服务，则不应视为 ST 授予使用此类第三方产品或服务或其中包含的任何知识产权的许可，也不应视为以任何方式使用此类第三方产品或服务或其中包含的任何知识产权的保证。

除非 St 的销售条款和条件中另有规定，否则 St 拒绝就 St 产品的使用和/或销售提供任何明示或默示保证，包括但不限于适销性、特定用途适用性（以及任何司法管辖区法律规定的同等条件）或侵犯任何专利、版权或其他知识产权的默示保证。

除非经 ST 授权代表书面明确批准，否则不建议、不授权或不保证将 ST 产品用于军事、航空、航天、救生或生命维持应用，也不建议、不授权或不保证将 ST 产品用于失效或故障可能导致人身伤害、死亡或严重财产或环境损害的产品或系统。未指定为 "汽车级" 的 ST 产品只能用于汽车应用，用户须自行承担风险。

如果转售的意法半导体产品的规定与本文档中的声明和/或技术特性不同，则意法半导体对本文档中描述的意法半导体产品或服务所提供的任何担保将立即失效，并且不会以任何方式产生或扩大意法半导体的任何责任。

ST 和 ST 徽标是 ST 在不同国家的商标或注册商标。本文件中的信息取代并代替以前提供

的所有信息。

ST 徽标是意法半导体的注册商标。所有其他名称均为其各自所有者的财产。

© 2007 STMicroelectronics - 保留所有权利 STMicroelectronics

公司集团

澳大利亚 - 比利时 - 巴西 - 加拿大 - 中国 - 捷克共和国 - 芬兰 - 法国 - 德国 - 香港 - 印度 - 以色列 - 意大利 - 日本 - 澳大利亚 - 比利时 - 巴西 - 加

拿大 - 中国 - 捷克共和国 - 芬兰 - 法国 - 德国 - 香港 - 印度 - 以色列 - 意大利 - 日本

马来西亚 - 马耳他 - 摩洛哥 - 新加坡 - 西班牙 - 瑞典 - 瑞士 - 英国 - 美国

www.st.com

