

使用 dsPIC30F DSC 实现 PMSM 电机的正弦驱动

作者: *Jorge Zambada*
Microchip Technology Inc.

简介

本文档介绍了如何使用 dsPIC30F 数字信号控制器 (Digital Signal Controller, DSC) 控制正弦电流来驱动具有位置传感器的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)。电机控制固件使用 dsPIC30F 外设, 而数学运算则由 DSP 引擎完成。为充分利用 dsPIC30F 的特殊 DSP 运算性能, 固件采用 C 语言编写, 只有某些子程序采用汇编语言编写。

应用特性

- 使用空间矢量调制 (Space Vector Modulation, SVM) 方法产生用于驱动 PMSM 电机各相的正弦电流
- 正弦电压与 PMSM 电机转子位置同步
- 四象限运行, 可实现正向、反向和制动运行
- 基于数字比例—积分—微分 (Proportional Integral Derivative, PID) 控制的闭环转速控制
- 相位超前技术可实现更宽的调速范围
- 由 dsPIC[®] DSC 的 DSP 引擎实现小数数学运算

利用数字信号控制器实现电机控制

dsPIC30F 电机控制系列器件专门设计为用于控制包括交流感应电机 (AC Induction Motor, ACIM)、有刷直流电机 (Brushed DC Motor, BDC)、无刷直流电机 (Brushless DC Motor, BLDC) 和永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 在内的大多数常用电机类型。Microchip 目前已发布了几个应用笔记, 介绍如何采用 dsPIC30F 电机控制系列器件实现交流感应电机控制 (AN984、AN908 和 GS004) 和无刷直流电机控制 (AN901、AN957 和 AN992)。可从 Microchip 网站 (www.microchip.com) 获取这些应用笔记的中英文版本。

本应用笔记介绍了如何使用 dsPIC30F2010 实现有位置传感器 PMSM 电机的正弦电压控制。设计中利用了 dsPIC30F 中特别适用于电机控制的外设模块: 电机控制脉宽调制 (Motor Control Pulse Width Modulation, MCPWM) 模块和高速 A/D 转换器。dsPIC30F2010 中的 DSP 引擎可提供所需的快速数学运算能力。

dsPIC30F2010 系列器件为 28 引脚 16 位 DSC, 专门设计为用于实现低成本和高效率的电机控制应用。dsPIC30F2010 具有以下重要特性:

- 30 MIPS 的处理性能
- 六个独立 PWM 输出或可配置为三组专用于电机控制的互补 PWM 输出对
- 六输入、1 Msps ADC, 可同时对多达 4 路输入进行采样
- 多种串行通信方式: UART、I²C[™] 和 SPI
- 适用于嵌入式控制应用的小型封装 (6 mm x 6 mm QFN)
- DSP 引擎可确保控制环的快速响应

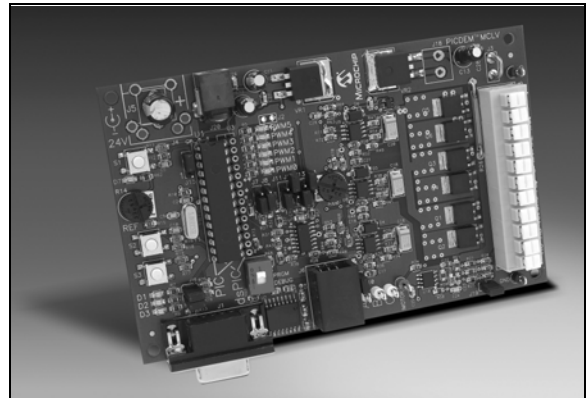
所需的硬件

用户需要如下硬件来实现本文中介绍的电机控制应用:

- PICDEM[™] MCLV 开发板 (图 1)
- Hurst DMB0224C10002 BLDC 电机
- 24 VDC 稳压电源

用户可从 Microchip 购买上述全部硬件或个别组件。有关订购信息可参见 Microchip 网站中的开发工具部分。

图 1: PICDEM[™] MCLV 开发板

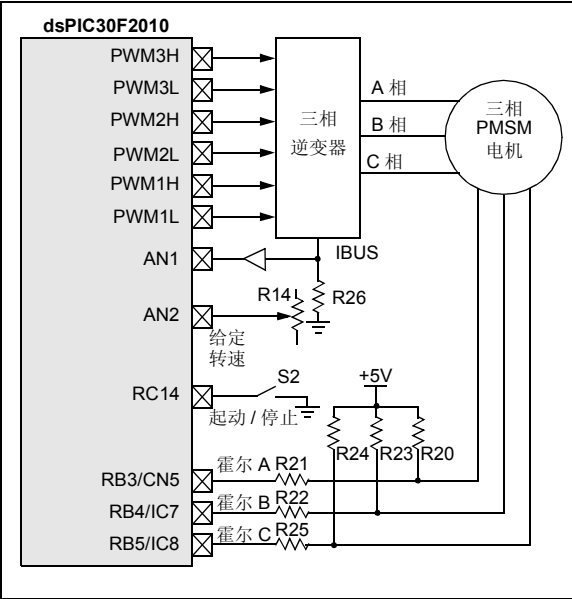


使用 DSPIC30F DSC 实现 PMSM 电机的正弦驱动

我们强烈推荐用户阅读 “PICDEM™ MCLV Development Board User's Guide” (DS51554) 以全面了解本应用笔记中使用的硬件拓扑。可从 Microchip 网站下载该用户指南。

图 2 给出了正弦PMSM电机控制应用的简化系统框图。该图有助于用户开发自己的硬件电路。

图 2: 系统框图



该拓扑中的重要组成部分:

- 电位器 R14 用以选择期望的转速 (给定转速)
- 通过连接至引脚RB3、RB4 和RB5 的霍尔效应传感器实现转子位置检测
- 通过简单的运算放大器电路实现电流反馈
- 与电流反馈电路相连的比较器电路负责产生故障输入信号。电流采样通过 0.1 Ω 的电阻 (R26) 实现。

用户可根据应用中使用电机的电流额定参数来选择合适的电流采样电阻阻值。另一方面, 本应用中的电机驱动电路是针对 24V PMSM 电机进行设计的。用户可更改硬件电路以满足特定电机的驱动要求。

注: 有关如何更改硬件以驱动高于或低于 24V 的电机的信息, 可参阅 “PICDEM™ MCLV Development Board User's Guide” (DS51554)。

电压的最低极限值为 10V, 而最高极限值为 48V。应注意, IGBT 散热器的散热效果有限, 因此 PICDEM™ MCLV 开发板可能难以满足较高的功率要求。

在将 PICDEM™ MCLV 开发板用于本应用之前, 应参考表 1 所示的跳线设定和表 2 和表 3 中所示的电机连接。

表 1: PICDEM™ MCLV 开发板跳线设置

跳线	用于正弦控制的位置 (dsPIC® DSC, 有位置传感器)
J7、J8 和 J11	开路
J12、J13 和 J14	开路
J15、J16、J17 和 J10	开路
J19	短路

表 2: 电机绕组的连接 *

连接排 J9	用于正弦控制的位置 (dsPIC® DSC, 有位置传感器)
M3	A 相 (白色)
M2	B 相 (黑色)
M1	C 相 (红色)
G	地线 (绿色) (如果有的话)

表 3: 电机霍尔传感器的连接 *

连接器 J9	用于正弦控制的位置 (dsPIC® DSC, 有位置传感器)
+5V	红色
GND	黑色
HA	白色
HB	棕色
HC	绿色

* 表2和表3中给出的电机绕组和霍尔传感器接线颜色设置适用于 Microchip 提供的 Hurst 24V 电机。某些电机不提供地线。

在完成代码开发并将代码载入 dsPIC30F 后, 用户可通过点按开关 S2 以起动或停止电机。通过标示为 REF 的电位器 (R14) 可实现电机给定转速和旋转方向的设置。在电机运行过程中可对电机旋转方向进行更改而无需在电机停止之后进行。

使用 dsPICDEM™ MCLV 开发板对 dsPIC30F2010 编程

通过 dsPICDEM MCLV 开发板可对 dsPIC30F2010 进行在线编程。要对器件编程，应将 DIP 开关 S4 拨至 PRGM 位置。当编程完成后，用户应将 DIP 开关拨至 DEBUG 位置来执行代码。如果要将 MPLAB® ICD 2 连接到 PICDEM™ MCLV 开发板作为调试器使用，用户应将 RJ11 电缆接到开发板上的 J6 连接器。如果 MPLAB ICD 2 仅作为编程器使用，则应连接 RJ11 电缆对器件进行编程，而在正常执行程序时将其拔除。

通过以下配置即可使应用在 PICDEM™ MCLV 开发板上工作：

振荡器源：	主振荡器
主振荡器模式：	XT，带 PLL 16x
通信通道选择：	EMUC2 和 EMUD2

根据需要，可启用或禁止其他设置或在应用中对其进行修改。

背景知识

由于具有体积小、控制方便和高效率的特点，许多消费者和工业应用都所采用 BLDC 电机。BLDC 电机愈来愈多地出现在汽车应用中以取代传动带和液压系统，这样可进一步增强功能和降低油耗。在高性能应用中，如机床设备和低噪声风机应用中，平稳的转矩输出是至关重要的。

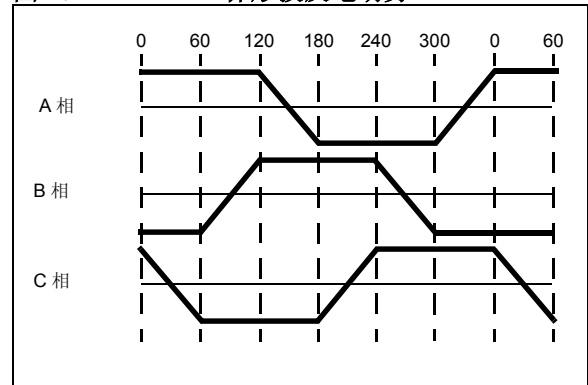
由于采用非正弦分布的定子绕组，使得 BLDC 电机难以应用在需要低转矩脉动和低噪声运行的场合。如图 3 所示，具有非正弦绕组分布的 BLDC 电机将产生梯形波的反电动势。具有梯形波反电动势的 BLDC 电机专门设计为采用与电机转子角位置同步的方波电压进行驱动。这种控制方式通常称为六拍换相。

这里假定读者已充分了解六拍换相技术方面的知识，本应用笔记将不再对该控制方式作进一步介绍。然而，有关如何通过六拍换相控制 BLDC 电机的详细信息，可参阅 Microchip 的其他应用笔记：

- AN857 “Brushless DC Motor Control Made Easy” (DS00857)
- AN957 《使用 dsPIC30F2010 控制带传感器的 BLDC 电机》(DS00957A_CN)

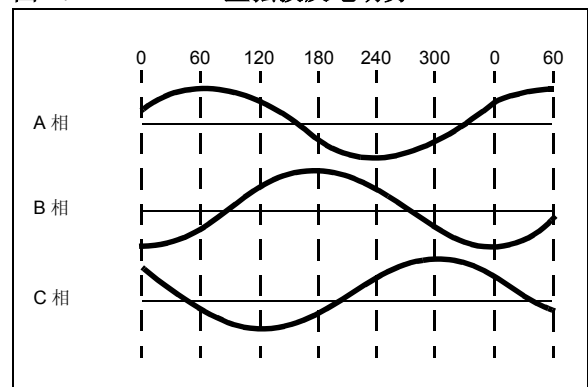
为更好地了解 BLDC 电机及其基本工作原理，可参阅 AN885 “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals” (DS00885)。

图 3： 梯形波反电动势



BLDC 电机中绕组的梯形分布将在电机运行过程中导致转矩脉动，这是由于产生的电流也是梯形分布的。这种转矩脉动将导致小的转速振荡从而产生音频噪声。另一方面，具有正弦反电动势的 BLDC 电机，也称作永磁同步电机 (PMSM)，采用正弦电流进行驱动，减小了转矩脉动，从而将音频噪声降低到最小限度。图 4 显示了正弦绕组分布的 PMSM 电机中产生的正弦波反电动势电压。

图 4： 正弦波反电动势

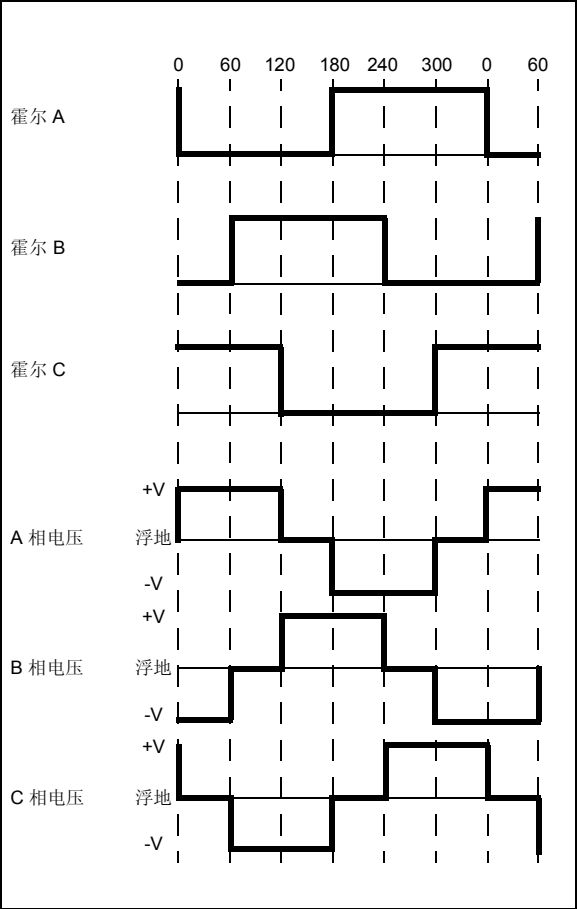


本应用笔记中假定控制对象为具有正弦波反电动势和三个霍尔效应传感器的三相 PMSM 电机。

基于位置传感器的 BLDC 电机工作原理

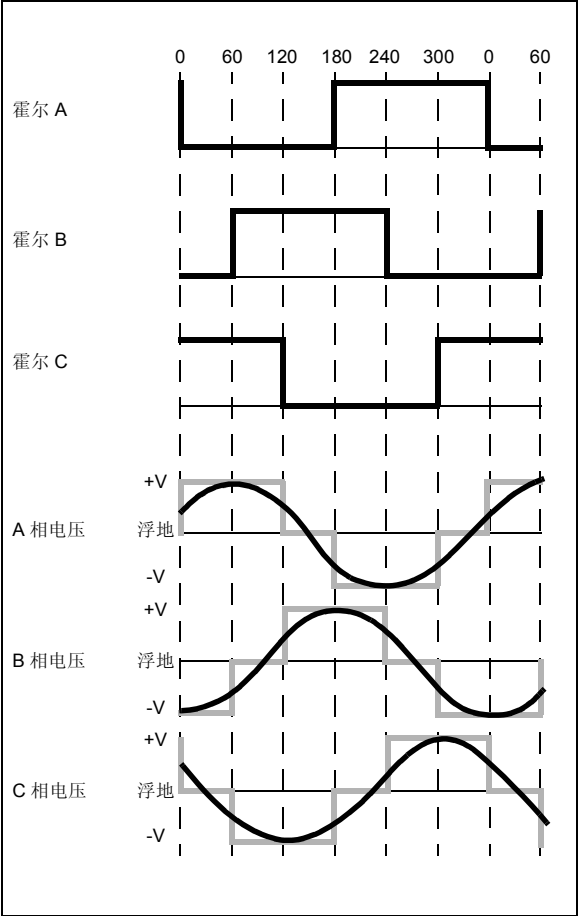
为使电机能够正确换相，必须对每一个电周期内的转子绝对位置进行测量。通常采用三个霍尔效应传感器来获得转子位置信息。这三个位置传感器沿定子圆周分布，在每个电周期内产生六个不同的逻辑状态。电周期和机械转速之间的比率关系取决于电机极对数。例如，本应用笔记中使用的电机具有 5 对极，因此电机每转一周需经历 5 个电周期。对于常规的电压激励方式（六拍换相），在每一个电周期内需进行六次等间距的换相操作。这通常通过使用三个霍尔效应或光电开关联合安装在转子上的相应的磁盘来实现。无需连续位置信息，只需对换相时刻进行检测。图 5 显示了三个传感器输出信号和相应电机绕组中的驱动电压波形。

图 5: 梯形波 BLDC 电机的六拍换相



从上图可见，在每一特定 60 度电角度区间内电压将不发生变化直至检测到一个新的电机位置或当霍尔效应传感器信号组合发生变化。本应用笔记中介绍的技术与六拍换相技术中相同，都是采用三个霍尔效应传感器检测转子位置。然而，在电机绕组中施加的驱动电压却是一个连续的正弦波电压，而非方波电压。图 6 显示了正弦波相电压与三个霍尔效应传感器位置信号之间的对应关系。正弦电压的幅值决定了特定机械负载条件下的电机转速。

图 6: 正弦波 BLDC 电机的电压产生



正弦电压控制的实现

图 7 给出了应用软件的原理框图表示。当电机运行时，从转速测量值中减去转速给定值（期望转速），PID 控制器对转速误差进行处理，其输出作为正弦波幅值的给定控制量。可通过外部电位器设定转速给定值，而电机转速测量值则根据霍尔效应传感器的反馈信号来计算。

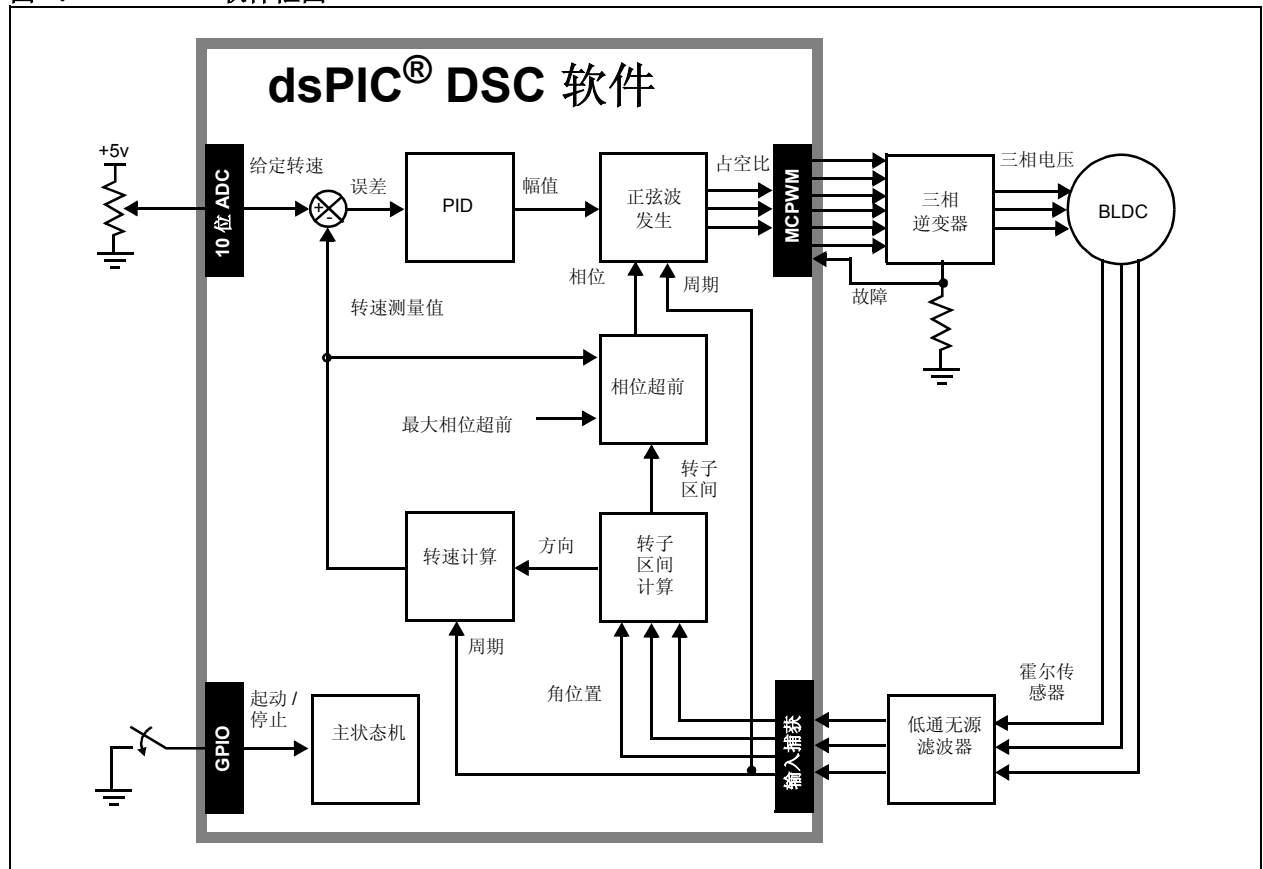
一旦正弦波幅值给定已知，还需其余两个参数来实现正弦波的发生。第一个参数是正弦波的周期，该值可通过其中一个霍尔效应传感器的反馈信号来获得。另一个参数是相位，该参数可通过使用相位超前模块来计算，取决于转速范围需求和来自霍尔效应传感器的转子位置。

幅值变量设置了电机电流和产生的电机转矩的大小。转矩的增加对应转速的增加。转速控制环仅对幅值进行控制。来自相位超前模块的相位值根据霍尔效应传感器信息进行计算以保持正弦电压与转子位置同步。

以软件原理框图作为基准点，本应用笔记中的后续章节将对软件功能作详细说明。介绍将从主状态机开始，该模块将与其他所有使用全局变量的软件模块进行交互。随后，介绍将主要针对转速测量（给定转速和测量转速）并引导出对 PID 控制器软件实现的说明。其中讨论的内容包括有关 PID 控制的一些背景知识。

接下来，将对产生三相正弦波所需的参数计算进行讨论，包括转子位置区间和相位超前的计算。最后，使用空间矢量调制实现正弦电压发生，其中参数包括幅值、相位和周期。

图 7: 软件框图



主状态机

图 8 中的状态图显示了每一个中断（以粗体、黑线显示）是如何同电机控制软件进行交互的。在上电复位时，软件将对所有程序变量进行初始化并对应用中所使用的所有外设模块进行使能。在对变量和外设进行初始化后，软件执行将进入电机停机状态并保持该状态直至用户点按外部按钮开关执行起动指令（按下 S2）。

当按下 S2 时，调用 RunMotor() 子程序并将执行该子程序中的第一个进程（ChargeBootstraps()）。逆变器电路使用 N 沟道 MOSFET 作为上下桥臂器件。自举电路将产生用于上桥臂功率器件门极驱动的浮地电压源。自举电路产生的电压可比逆变器电压轨高出 15V 以确保上桥臂器件的导通。在每次电机运行之前首次上电时需通过 ChargeBootstraps() 子程序对自举电容进行充电。ChargeBootstraps() 子程序将首先导通下

桥臂功率器件并使之导通 10 ms 以确保这些电容能够充电到足够高的电压，随后输出控制将被转交给 PWM 控制模块。

接下来，将对电机控制所使用的变量进行初始化。随后是对 PID 转速控制器中使用的 PID 系数、误差累计和控制输出变量进行初始化。在 RunMotor() 子程序中，定时器计数器将被初始化为零，用于存放霍尔效应传感器周期捕获值的变量也将被初始化。在子程序的最后，将清除中断标志并使能中断。

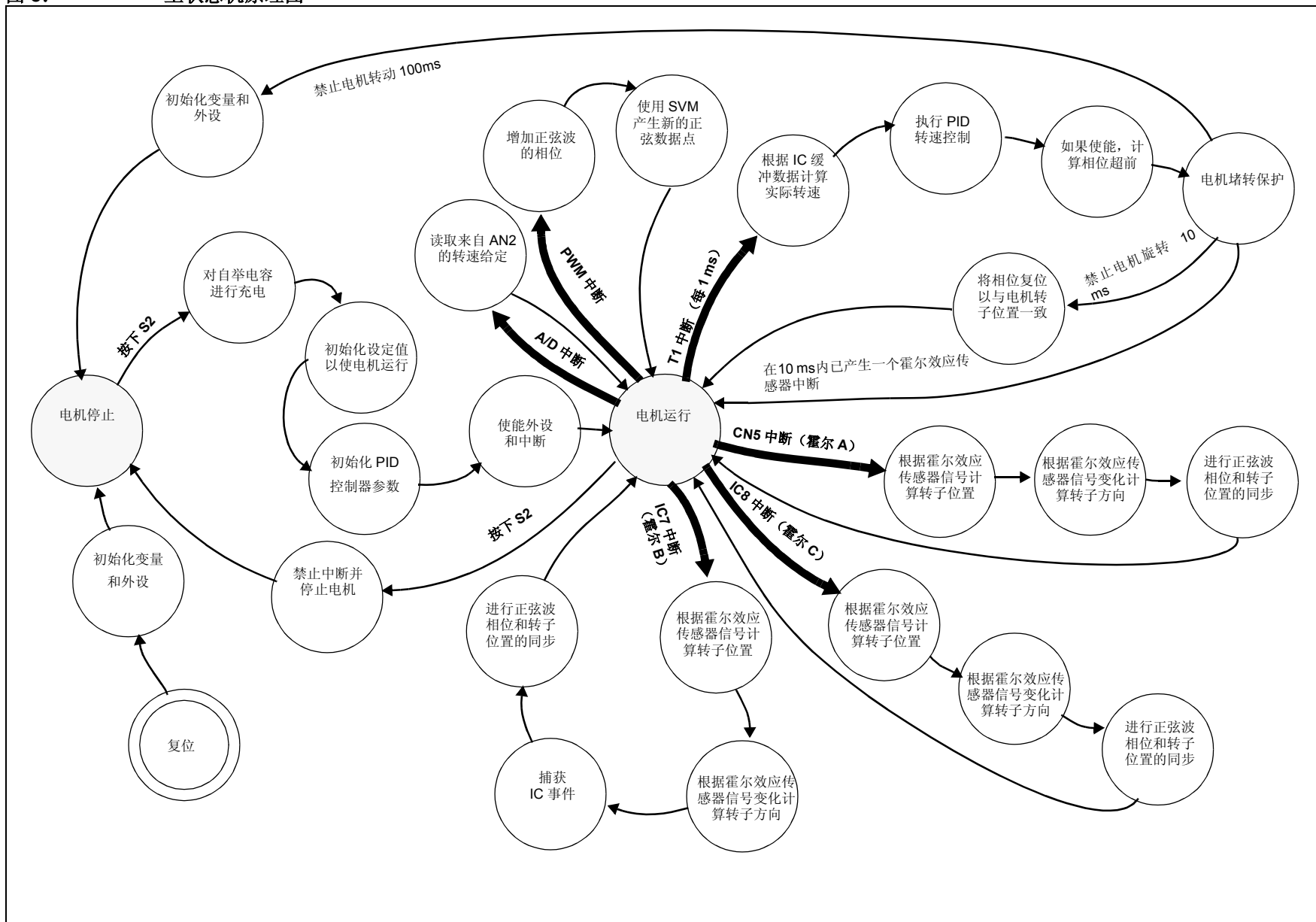
一旦 RunMotor() 子程序完成变量初始化，状态机中所有的其他功能皆由中断服务程序（ISR）实现。表 4 对所有中断服务程序进行了汇总，并对其调用条件和每个特定 ISR 执行的操作进行了说明。

当在电机运行中按下 S2 时，StopMotor() 子程序将禁止所有中断并停止电机。

表 4： 中断服务程序一览

中断	何时调用	执行操作
A/D	20 kHz	• 读取来自 AN2 的新转速给定值
PWM	20 kHz	• 使用 SVM 产生正弦波
T1	1 kHz	• 使用 IC7 数据进行测量转速计算 • 执行 PID 控制 • 计算相位超前 • 提供电机堵转保护
CN5	每一个霍尔 A 信号跳变	• 计算转子位置 • 确定转子机械方向 • 实现正弦波指针与转子位置的同步
IC7	每一个霍尔 B 信号跳变	• 计算转子位置 • 确定转子机械方向 • 使用 IC 进行霍尔信号跳变时序的捕获 • 实现正弦波指针与转子位置的同步
IC8	每一个霍尔 C 信号跳变	• 计算转子位置 • 确定转子机械方向 • 实现正弦波指针与转子位置的同步

图 8:



转速计算

给定转速计算

A/D 中断中将读入通过 A/D 转换器 (AN2 输入引脚) 转换后的转速给定值 (见图 7)。将 A/D 转换器配置为中断触发模式且中断频率为 PWM 速率 (本应用中为 20 kHz)。在 A/D ISR 中, A/D 转换缓冲器中的内容将以有符号小数格式存放到变量 (RefSpeed) 中。该变量表征期望转速范围从 -1.0 至 0.99997。表 5 汇总说明了这一变量的最小值和最大值, 及其对本应用笔记中所使用电机的实际意义。

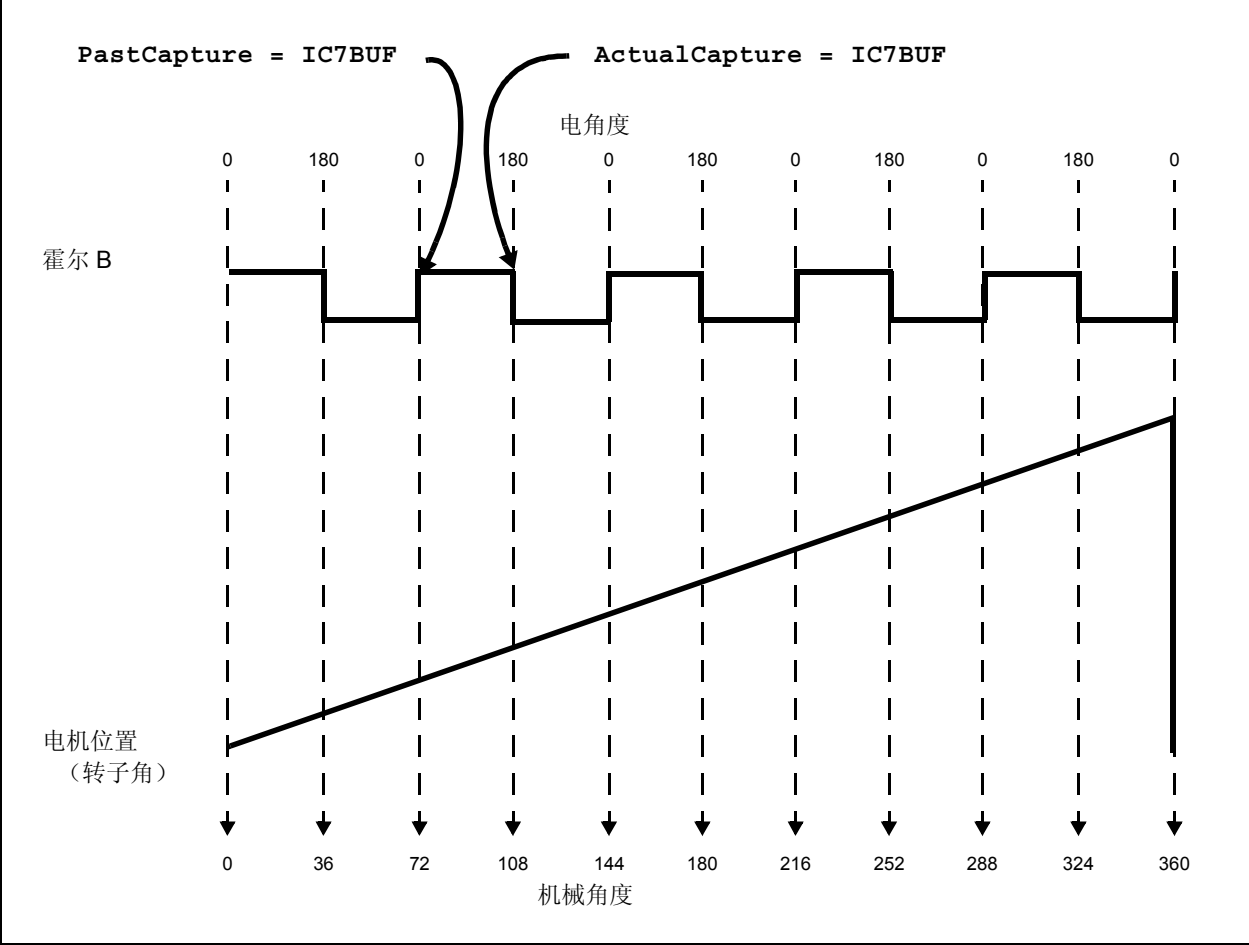
测量转速计算

电机的实际转速根据一个霍尔效应传感器 (霍尔 B) 的反馈信号进行计算。计算使用输入捕获通道 (IC7 输入引脚) 测量霍尔效应传感器 B 的相邻两个信号跳变沿之间的时间间隔。图 9 中的时序图中显示了捕获事件和用于存放相邻两次捕获值的变量 (用于测量霍尔效应传感器 B 的相邻两个信号跳变沿之间的时间间隔)。为更清楚地表示霍尔效应传感器 B 反馈信号与电机实际机械运动之间的关系, 在同一图中绘出了 5 对极电机的机械旋转角变化曲线。

表 5: 给定转速计算举例

	RefSpeed 变量		
	Hex 值	小数值	期望转速 (RPM)
最小值	0x8000	-1.0	6000 RPM 反转
最大值	0x7FFF	0.99997	6000 RPM 正转

图 9: 霍尔 B 反馈信号和电机机械位置的时序对应关系



用于存放相邻跳变沿间隔时间的变量称为 **Period**（周期）。该变量在 **Timer 1 ISR** 中进行计算。该 **ISR** 每隔 **1 毫秒**调用一次并执行转速控制操作。用于计算当前电机转速的公式如下所示：

$$Period = ActualCapture - PastCapture$$

其中 **ActualCapture**（当前捕获）和 **PastCapture**（上一次捕获）包含霍尔效应传感器 **B** 相邻两个跳变沿的时序信息，如图 9 中所示。**Period**用于计算用于产生正弦波的指针的步长，因为产生的正弦电压需要与霍尔效应位置传感器反馈信号保持相同的频率。

对于转速计算，以下公式用来将相邻两个跳变沿之间的时间间隔（**Period**）转换为测量转速（**MeasuredSpeed**）：

$$MeasuredSpeed = FractionalDivide\left(\frac{MINPERIOD}{Period}\right)$$

MINPERIOD 为一个常数值，如果根据霍尔效应传感器反馈信号检测到最大转速 **6000 RPM**，用于计算产生 **0.99997** 的小数值。**MINPERIOD** 的公式为：

$$\begin{aligned} MINPERIOD &= \frac{(Timer\ 1\ 输入时钟) \times 60}{(最大转速) \times (电机极数)} \\ &= \frac{(20\ MHz/64) \times 60}{6000\ RPM \times 10} \\ &= 312 \end{aligned}$$

表 6 给出了根据存放在 **PastCapture**（上一次捕获）和 **ActualCapture**（当前捕获）中的输入捕获值进行转速计算（**MeasuredSpeed**）的示例。

是否为 **MeasuredSpeed**（测量转速）添加符号取决于变量 **CurrentDirection**（当前转向）。该变量在霍尔效应传感器中断服务程序中进行计算。**CurrentDirection** 的计算是根据相邻两个霍尔效应传感器信号组合（或相邻两个区间）来进行的。如果电机正向旋转（**CW**），**MeasuredSpeed** 将保持为正值。如果电机反向旋转（**CCW**），**MeasuredSpeed** 将转换为负值。

表 6： 测量转速计算举例

ActualCapture	PastCapture	Period	MeasuredSpeed		
			十六进制数	小数	转速（RPM）
0x0000	0xFEC7	0x0139	0x7F97	0.99679	5990.4
0x2000	0x1D8E	0x0272	0xFCB	0.49838	2995.2
0x4000	0xC5EE	0x7A12	0x0147	0.00998	60

PID 转速控制器

每隔 1 毫秒在 T1 中断服务程序（Timer 1 ISR）中执行一次 PID 转速控制。其子程序为 SpeedControl()，该子程序将对有符号小数格式的给定转速（RefSpeed）和电机当前实际转速（MeasuredSpeed）进行处理。通过从 RefSpeed 中减去 MeasuredSpeed 以确定转速误差（Error），该值可确定电机应升速还是减速。为确保电机能够平稳运行，误差值将被解析为比例、积分和微分分量以产生一个合成输出控制量，该输出量用于补偿转速误差。

PID 控制器的实现利用了 dsPIC DSC 的 MAC 指令以实现快速执行。用于产生控制器输出（ControlOutput）的公式根据前三次 T1 中断中获取的三个误差值（ControlDifference[0]、ControlDifference[1] 和 ControlDifference[2]）以及 PID 系数（PIDCoefficients[0]、PIDCoefficients[1] 和 PIDCoefficients[2]）进行计算。公式为：

$$\begin{aligned} \text{ControlOutput} = & \text{ControlOutput} \\ & + \text{ControlDifference}[0] \times \text{PIDCoefficients}[0] \\ & + \text{ControlDifference}[1] \times \text{PIDCoefficients}[1] \\ & + \text{ControlDifference}[2] \times \text{PIDCoefficients}[2] \end{aligned}$$

表 7 提供了 PID 控制变量的简要说明。

PID 的实现过程中使用了 MAC 指令以及执行 MAC 操作时 dsPIC DSC 的自动饱和功能。当对 PID 增益进行整定时，用户应避免 PID 系数达到或超过最大值。这些值为小数值，必须在以下取值范围内：

$$Kp + Ki + Kd < 0.9999 (0x7FFF)$$

$$-Kp - 2 \times Kd > -1.0 (0x8000)$$

$$Kd < 0.9999 (0x7FFF)$$

图 10 的流程图中说明了 SpeedControl() 函数的实现。

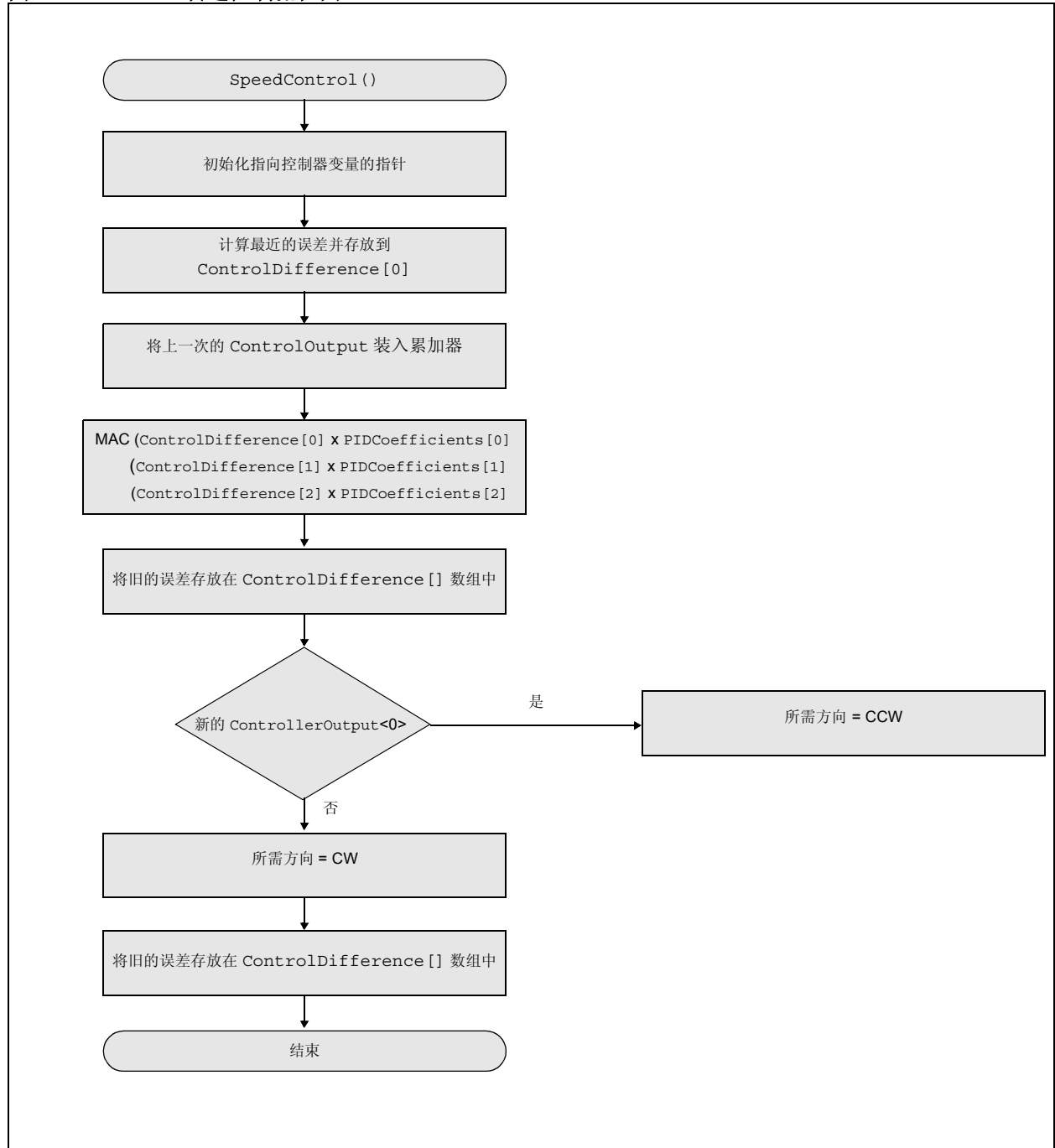
Required_Direction 取自 PID 控制器输出（ControlOutput）的符号，该参数告知软件是使电机 CW（正向）还是 CCW（反向）运行。以下代码示例说明了软件中是如何进行所需转向的计算的：

```
// ControlOutput 确定电机所需转向
if (ControlOutput < 0)
    Required_Direction = CCW;
else
    Required_Direction = CW;
```

表 7: PID 控制变量

变量	说明
ControlOutput	控制器输出采用 16 位有符号小数格式
ControlDifference[0]	最近计算的转速误差（RefSpeed - MeasuredSpeed）
ControlDifference[1]	前一 T1 ISR 中计算的转速误差（1 ms 前）
ControlDifference[2]	ControlDifference[1] 前的转速误差（2 ms 前）
PIDCoefficients[0], PIDCoefficients[1] and PIDCoefficients[2]	从常规 PID 形式改进至类滤波器 PID 实现形式后的 PID 系数： $PIDCoefficients[0] = Kp + Ki = Kd$ $PIDCoefficients[1] = -Kp - 2Kd$ $PIDCoefficients[2] = Kd$

图 10: 转速控制流程图



PID 的背景知识

本应用笔记不提供有关比例—积分—微分（PID）控制器的完整介绍。不过仍将对 PID 控制器基本工作原理的相关内容进行简要介绍。

PID 控制器将对闭环控制环中的误差信号进行处理并试图对被控量进行调节以获得期望的系统响应。被控参数可以是任何可测量的系统参量，如转速、转矩或磁通。PID 控制器的优点在于可根据经验对一个或多个增益值进行整定并观察系统响应变化情况来确定合理的增益参数。

数字 PID 控制器的以周期性采样方式执行。假定控制器的执行频率足够高可以满足系统控制要求。误差信号通过将被控参数的期望设定值减去该参数的实际测量值来获得。误差的符号表明控制输入所要求的变化方向。

PID 控制器的比例（P）项由误差信号乘以 P 增益形成，该项使 PID 控制器产生的控制响应为误差幅值的函数（即比例关系）。当误差信号增大时，控制器的 P 项也将变大以实现更大的校正效果。P 项的效果是随着时间变化趋向于使系统总误差减小。然而，当误差趋近于零时，P 项的效果将不明显。在大多数系统中，被控参数的误差将十分接近于零但并不收敛。因此仍存在小的静态误差。

PID 控制器的积分（I）项用来消除小的静态误差。I 项将对误差信号连续累计。因此，随着时间变化小的静态误差可累计为较大的误差值。将该累计误差信号与 I 增益因子相乘即可获得 PID 控制器的 I 输出项。

PID 的微分（D）项用于改善控制器的速度并响应误差信号的变化率。D 项输入通过将前一误差值减去当前误差值来获得。两者的差值乘以 D 增益因子便获得 PID 控制器的 D 输出项。系统误差变化越快，则控制器的 D 项将产生的控制输出越大。

PID 增益整定

PID 控制器的 P 增益设定了整个系统的响应。当开始调节控制器时，应将 I 和 D 增益设置为零。随后，可增加 P 增益直至系统对设定点变化响应良好，没有过大的超调或振荡发生。使用较小的 P 增益值将使得系统响应较慢，而较大的 P 增益值将使得系统响应较快。此时，可能无法使系统响应收敛到设定值。

在确定合适的 P 增益之后，可缓慢增加 I 增益值以使系统误差为零。在大多数系统中只需设置较小的 I 增益值。需要注意的是，如果 I 增益取值过大，其效果可能抵消 P 项的作用，即使得整体控制响应变慢并使系统在设定点附近振荡。如果发生振荡，减小 I 增益并增大 P 增益通常可以解决这一问题。

D 增益可加快系统响应。然而，在使用该增益时必须注意，该项可能产生较大的输出摆动，从而可能引起电机机械损坏。

转子区间计算

根据图 2 中的软件原理框图，需要获得转子区间值来实现正弦电压的产生。转子区间是转子的绝对位置，以电角度为单位，每 60 度电角度划分为一个转子区间。通过读入来自三个霍尔效应传感器的反馈信号数据值可获得转子区间信息。转子区间计算软件模块使用了三个霍尔效应传感器中断（CN5、IC8 和 IC7 中断，如图 8 所示）。根据表 8 中给出的关系进行转子区间信息的计算：

表 8： 区间与角位置之间的关系

霍尔 C	霍尔 B	霍尔 A	区间
0	0	0	无效
0	0	1	4
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	0
1	0	1	5
1	1	0	1
1	1	1	无效

在计算当前电机转向（Current_Direction）时，需对过去相邻两次霍尔效应传感器中断中获得的转子区间值进行比较。根据表 9 汇总了相邻两个转子区间值组合下的转向计算结果。

表 9： 当前转向计算

LastSector (上一区间)	Sector (当前区间)	Current_Direction (当前转向)
0	1	CCW
1	2	CCW
2	3	CCW
3	4	CCW
4	5	CCW
5	0	CCW
0	5	CW
1	0	CW
2	1	CW
3	2	CW
4	3	CW
5	4	CW

转速计算模块将使用当前电机转向参数。如果当前转向为 CCW，转速将为负值。

以下代码说明了这一过程：

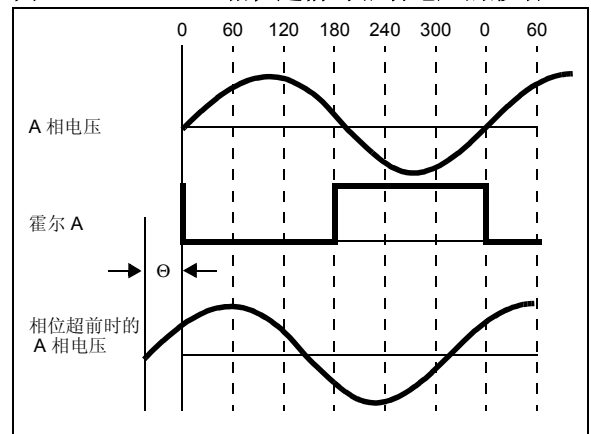
```
// MeasuredSpeed 符号调节基于电机当前旋转方向
if (Current_Direction == CCW)
    MeasuredSpeed = -MeasuredSpeed;
```

通过测量转速和最大相位超前可实现转子区间计算值的修改以设定正弦电压的相位角。

相位超前

正常条件下，电机转速受到逆变器提供给电机绕组的电压大小的限制。从图 11 中 A 相电压和霍尔 A 位置信号的相位关系可见，电机绕组中所施加的电压通常与转子位置保持同步。这一情形将使得定子中产生相位超前于转子磁场 90 度电角度的旋转电枢磁场，从而在电机中产生最大每安培转矩。

图 11： 相位超前对驱动电压的影响



如果定子电枢磁势相对于常规情况超前某个角度（ θ ），则定子磁势和转子磁势之间的夹角将增加。相位超前技术将在电机中产生一个相对于转子磁场为负的去磁分量，这将削弱转子永磁体产生的磁场。相位超前技术的一些重要影响包括：

- 由于相位超前技术使定子磁势和转子磁势之间的夹角增加，因此在电机额定转速的基础上进一步扩展了转速范围。
- 由于产生了一个去磁分量，相位超前技术削弱了转子磁场。磁场削弱使得电机的总转矩输出能力降低。
- 当使用相位超前技术时电机电流消耗、电机运行温度和音频噪声都将增加，这是因为定子磁场削弱了转子磁场。

使用 DSPIC30F DSC 实现 PMSM 电机的正弦驱动

对于需要扩展电机转速范围的应用场合，建议使用相位超前算法。该算法可通过在 SinusoidalBLDC v1.1.c 文件中定义 PHASE_ADVANCE 来使能。在本应用笔记中该功能被禁止。

```
#define PHASE_ADVANCE // 要求扩展转速范围时需定
                        // 义该变量
```

使用空间矢量调制实现正弦波发生

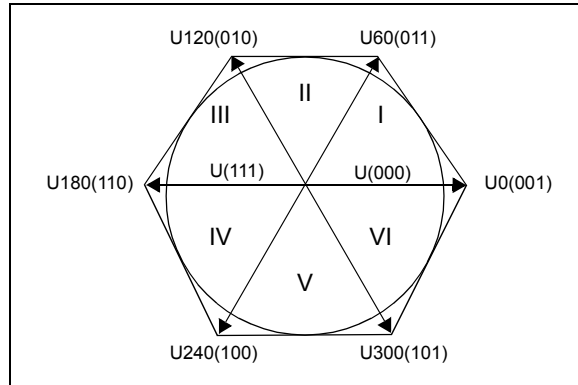
PMSM电机正弦控制的最后一步是产生用于三相电机电压信号的脉宽调制信号。通过使用空间矢量调制（Space Vector Modulation，SVM），三相中每一相电压信号的脉宽产生过程将简化为几个简单的公式。三个逆变器输出中的任何一个都将处于以下两个状态之一：连接至 + 母线轨或 - 母线轨。因此，如表 10 所示，输出可具有 8 种可能的状态（ $2^3 = 8$ ）。

表 10: 空间矢量调制逆变器状态

C	B	A	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	V _{ds}	V _{qs}	矢量
0	0	0	0	0	0	0	0	U(000)
0	0	1	V _{DC}	0	-V _{DC}	2/3V _{dc}	0	U ₀
0	1	1	0	V _{DC}	-V _{DC}	V _{DC} /3	V _{DC} /3	U ₆₀
0	1	0	-V _{DC}	V _{DC}	0	-V _{DC} /3	V _{DC} /3	U ₁₂₀
1	1	0	-V _{DC}	0	V _{DC}	-2V _{DC} /3	0	U ₁₈₀
1	0	0	0	-V _{DC}	V _{DC}	-V _{DC} /3	-V _{DC} /3	U ₂₄₀
1	0	1	V _{DC}	-V _{DC}	0	V _{DC} /3	-V _{DC} /3	U ₃₀₀
1	1	1	0	0	0	0	0	U ₍₁₁₁₎

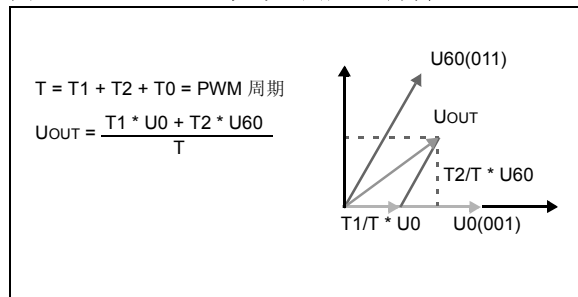
所有三相输出全部连接至 + 母线或 - 母线的两个状态被认为是无效状态，因为在任意两相之间不存在线电压。这两个状态对应的空间矢量在 SVM 星型的原点绘出。其余的六个状态表示为六个空间互差 60 度的基本空间矢量，如图 12 所示。

图 12: 空间矢量调制



空间矢量调制可采用相邻两个基本空间矢量的矢量和来表征任一合成矢量。在图 13 中， U_{OUT} 是期望的合成矢量。该矢量位于 U_{60} 和 U_0 之间的区间内。如果在给定的 PWM 周期 T 内， U_0 的输出时间为 T_1/T 而 U_{60} 的输出时间为 T_2/T ，则整个周期内的平均矢量将为 U_{OUT} 。

图 13: 平均空间矢量调制



T_1 和 T_2 的值将从查找表中获取。该表包含 0 至 60 电角度之间的 172 个小数正弦值。因此，对于 6 个区间中的任何一个区间，将有一个轴与此对应，另外两个轴对称分布在该区间边界。沿这两个边界轴的矢量分量值等于 T_1 和 T_2 。有关计算的详细内容，可参阅本应用笔记附带的 SVM.c 文件。

如图 14 中所示，在 PWM 周期 T 中，矢量 T_1 输出时间为 T_1/T ，矢量 T_2 输出时间为 T_2/T 。在一个周期内的剩余时间内将输出空矢量。dsPIC30F 器件配置为中心对齐 PWM 模式，即强制沿周期中心对称。这种配置将在每一个周期内产生两个线-线脉冲。有效的开关频率加倍了，在不增加功率器件开关损耗的情况下可降低纹波电流。

图 14: 周期 T 内的 PWM

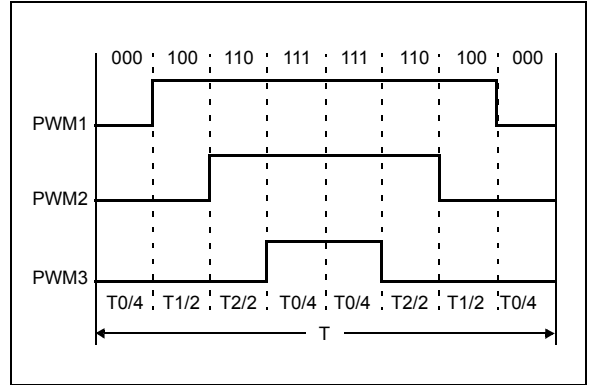
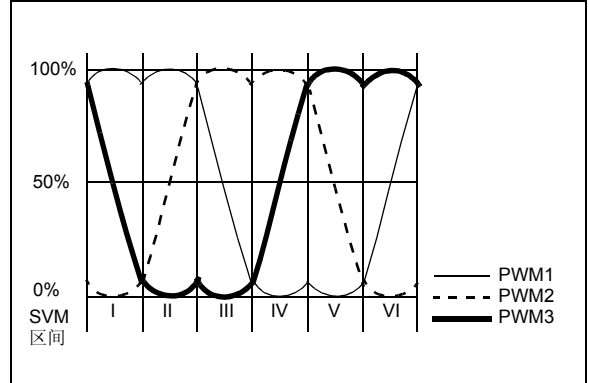


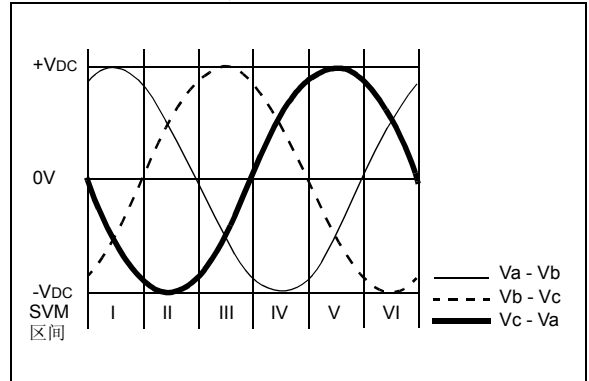
图 15 显示了采用 SVM 时的一个完整电周期内的占空比波形。表征占空比的值在 0% 和 100% 之间。

图 15: 使用 SVM 时的线-地电压波形



产生的线-线电压如图 16 所示。将满幅输出的正弦电压施加到电机绕组。

图 16: 使用 SVM 时的线-线电压



结论

dsPIC30F2010 可提供实现 PMSM 电机正弦电压控制的理想低成本解决方案。电机控制外设，如 MCPWM，联同器件的快速处理能力，使得用于产生正弦波的空间矢量调制算法和控制电机转速所需的 PID 控制环算法的实现成为可能。

dsPICDEM™ MCLV 开发板具有运行本应用程序所需的硬件配置，同时使整个系统成本较低。

AN1017.zip 文件中的软件文件可从 Microchip 网站 www.microchip.com 下载。

版本历史

版本 A（2005 年 12 月）

- 本文档的初始版本。

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其他受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。Microchip 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任，并加以赔偿。在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Accuron、dsPIC、KEELOQ、microID、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PRO MATE、PowerSmart、rfPIC 和 SmartShunt 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AmpLab、FilterLab、Migratable Memory、MXDEV、MXLAB、SEEVAL、SmartSensor 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、FlexROM、fuzzyLAB、In-Circuit Serial Programming、ICSP、ICEPIC、Linear Active Thermistor、Mindi、MiWi、MPASM、MPLIB、MPLINK、PICkit、PICDEM、PICDEM.net、PICLAB、PICtail、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、REAL ICE、rfLAB、rfPICDEM、Select Mode、Smart Serial、SmartTel、Total Endurance、UNI/O、WiperLock 和 ZENA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 是 Microchip Technology Inc. 在美国的服务标记。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2006, Microchip Technology Inc. 版权所有。

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe、位于俄勒冈州 Gresham 及位于加利福尼亚州 Mountain View 的全球总部、设计中心和晶圆生产厂均于通过了 ISO/TS-16949:2002 认证。公司在 PIC® 8 位单片机、KEELOQ® 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器 and 模拟产品方面的质量体系流程均符合 ISO/TS-16949:2002。此外，Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。

全球销售及服务中心

美洲

公司总部 **Corporate Office**
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:
<http://support.microchip.com>
网址: www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Alpharetta, GA
Tel: 1-770-640-0034
Fax: 1-770-640-0037

波士顿 Boston
Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago
Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas
Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Farmington Hills, MI
Tel: 1-248-538-2250
Fax: 1-248-538-2260

科科莫 Kokomo
Kokomo, IN
Tel: 1-765-864-8360
Fax: 1-765-864-8387

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608

圣克拉拉 Santa Clara
Santa Clara, CA
Tel: 408-961-6444
Fax: 408-961-6445

加拿大多伦多 Toronto
Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 1-905-673-0699
Fax: 1-905-673-6509

亚太地区

亚太总部 **Asia Pacific Office**
Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 北京
Tel: 86-10-8528-2100
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511
Fax: 86-28-8665-7889

中国 - 福州
Tel: 86-591-8750-3506
Fax: 86-591-8750-3521

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355
Fax: 86-532-8502-7205

中国 - 上海
Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8203-2660
Fax: 86-755-8203-1760

中国 - 顺德
Tel: 86-757-2839-5507
Fax: 86-757-2839-5571

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300
Fax: 86-27-5980-5118

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7250
Fax: 86-29-8833-7256

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-536-4818
Fax: 886-7-536-4803

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-572-9526
Fax: 886-3-572-6459

亚太地区

澳大利亚 Australia - Sydney
Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-4182-8400
Fax: 91-80-4182-8422

印度 India - New Delhi
Tel: 91-11-4160-8631
Fax: 91-11-4160-8632

印度 India - Pune
Tel: 91-20-2566-1512
Fax: 91-20-2566-1513

日本 Japan - Yokohama
Tel: 81-45-471- 6166
Fax: 81-45-471-6122

韩国 Korea - Gumi
Tel: 82-54-473-4301
Fax: 82-54-473-4302

韩国 Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 或
82-2-558-5934

马来西亚 Malaysia - Penang
Tel: 60-4-646-8870
Fax: 60-4-646-5086

菲律宾 Philippines - Manila
Tel: 63-2-634-9065
Fax: 63-2-634-9069

新加坡 Singapore
Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

泰国 Thailand - Bangkok
Tel: 66-2-694-1351
Fax: 66-2-694-1350

欧洲

奥地利 Austria - Wels
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦 Denmark-Copenhagen
Tel: 45-4450-2828
Fax: 45-4485-2829

法国 France - Paris
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 Germany - Munich
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

意大利 Italy - Milan
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

荷兰 Netherlands - Drunen
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

西班牙 Spain - Madrid
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

英国 UK - Wokingham
Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820