

使用旋转电感式位置传感器的 三相BLDC电机的磁场定向控制（FOC）

作者: Maria Loida Canada
Microchip Technology Inc.

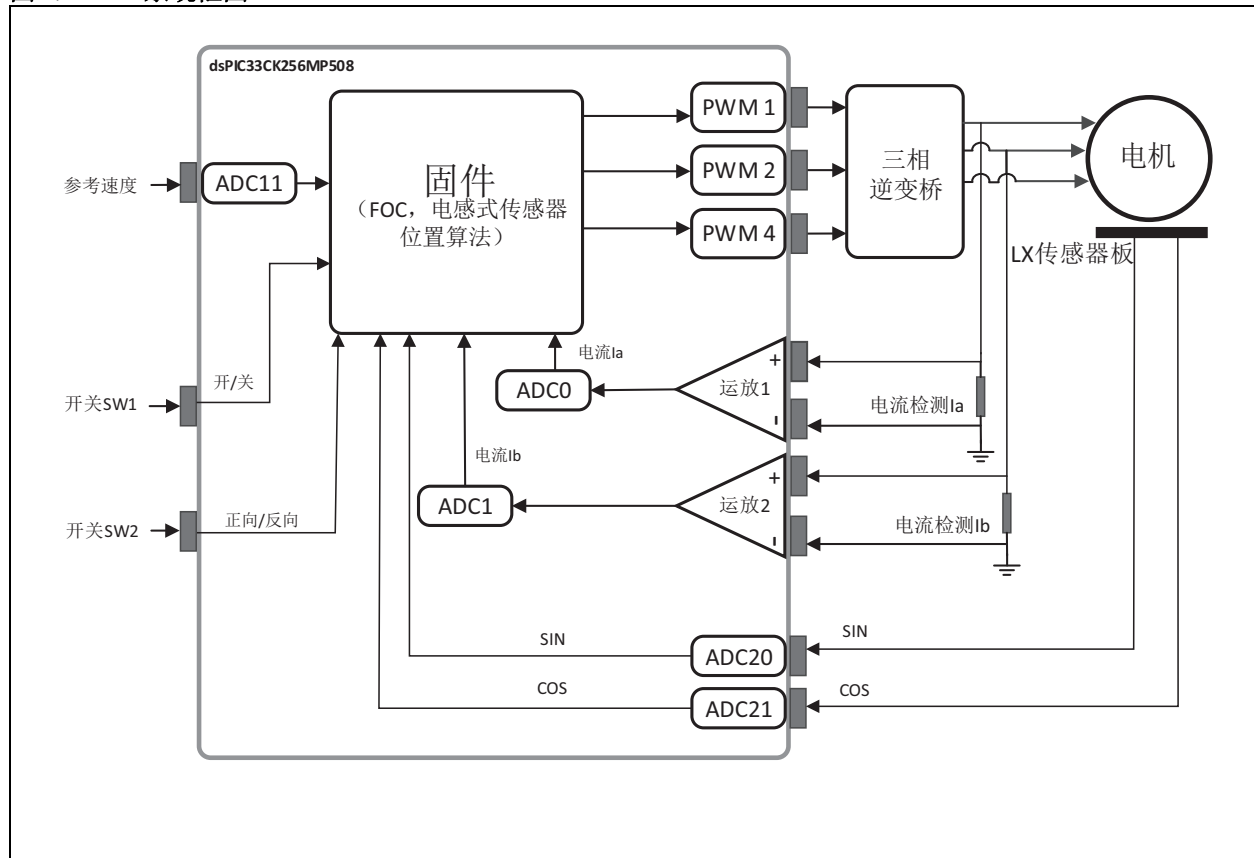
简介

由于汽车、工业和商业应用的需求增加，对高精度位置传感器（如电感式位置传感器）的需求也日益普遍。电感式位置传感器是基于磁性的位置和速度传感器（如霍尔效应传感器、光学编码器和磁解析器）的理想替代品。它们的精度更高、抗杂散磁场的能力更强，而且不需要磁铁作为目标。由于传感器并未与集成电路（Integrated Circuit, IC）或电机集成，因此它们提供了设计灵活性。

本应用笔记重点介绍LX34050电感式位置传感器在为FOC驱动技术提供精确转子位置方面的用途。对于需要对速度和转矩变化做出快速动态响应的应用，FOC非常有用。LX34050达到了ASIL-B汽车安全完整性级别。使用的控制单元是Microchip的16位dsPIC33CK DSC，这款产品具有用于快速数学计算的DSP引擎以及PWM、ADC和运放等片上外设，可简化实现并减少总体系统元件数量。

本文档探讨了电感式位置传感器、用于位置和速度测量的算法以及测试结果。这种解决方案可以高效地双向驱动电机。系统框图如下图所示。

图1: 系统框图



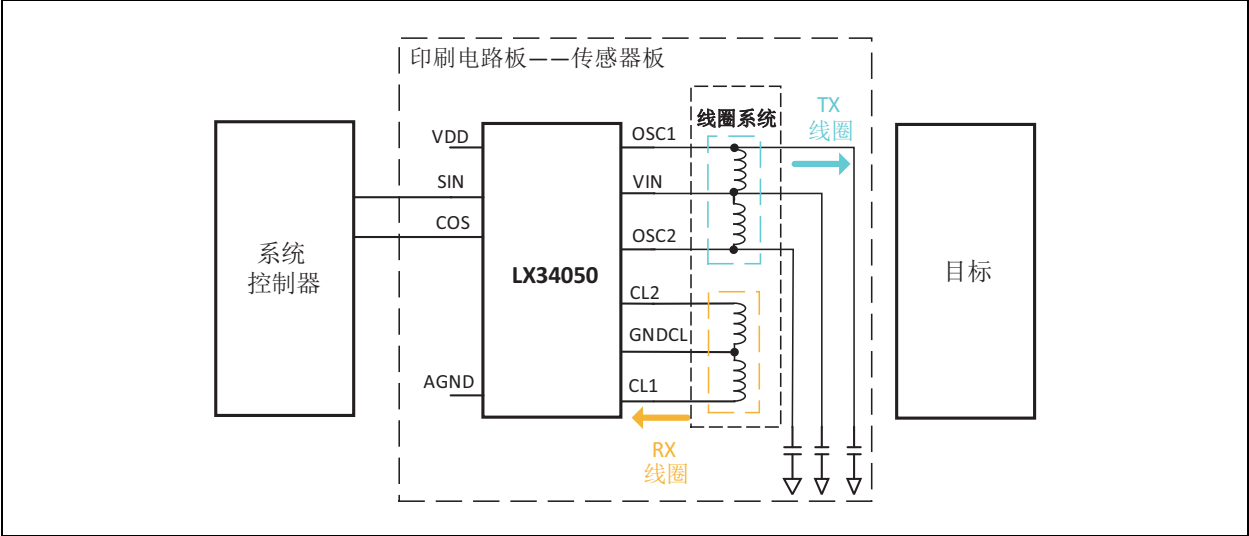
电感式位置传感器

电感式传感器用于测量位置。它可以检测接近传感器的金属目标，而无需与目标发生物理接触。根据工作原理，接近传感器大致分为以下三类：利用电磁感应的高频振荡型、利用磁铁的磁力型以及利用电容变化的电容型。此应用使用利用电磁感应的高频振荡型开发，因为它兼具金属传感的通用性和可靠性。

电感式传感器的框图

下图给出了典型的电感式位置传感器设置。它由与系统控制器的连接、集成电路与PCB上线圈系统（发送和接收线圈）的互连以及目标组成。目标安装在电机轴上并随转子旋转，与定子传感器没有物理接触。

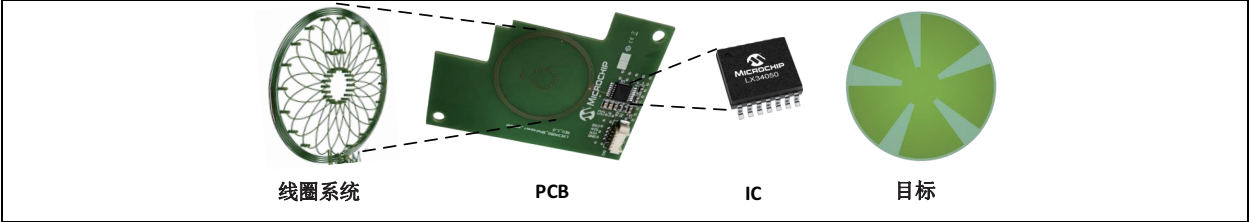
图2： 电感式传感器框图



电感式传感器的组件

电感式位置传感器模块具有四个关键元件，如下图所示：线圈系统、目标、IC和印刷电路板（Printed Circuit Board, PCB）。

图3： 电感式传感器元件



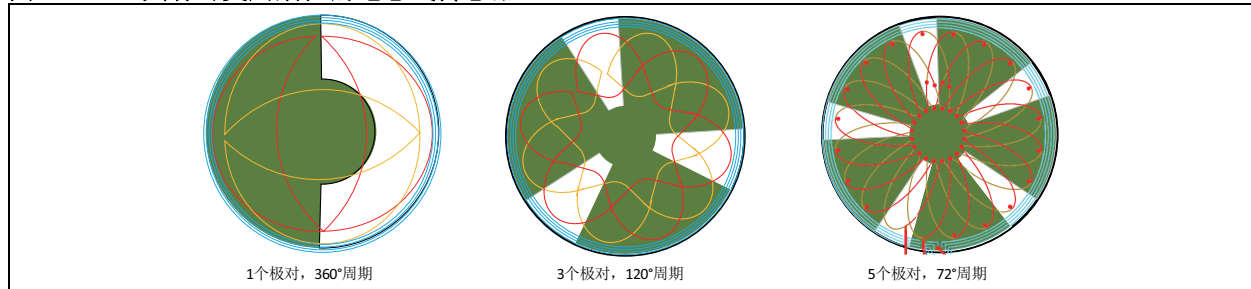
线圈系统

线圈在PCB上以走线的形式创建，放置初级（TX线圈）和次级（RX线圈）绕组来检测金属目标的运动。线圈是系统的变换器。线圈没有集成到LX34050芯片中；因此，电感式传感器为线圈设计提供了极大的灵活性。

线圈布置决定了周期性，它可以根据应用进行定制，并适当调整以与电机的极对数相适应。

可变周期性使传感器范围与电机电气周期相匹配，从而最大限度地提高传感器精度。下图给出了根据电机极对数变化的周期性示例。

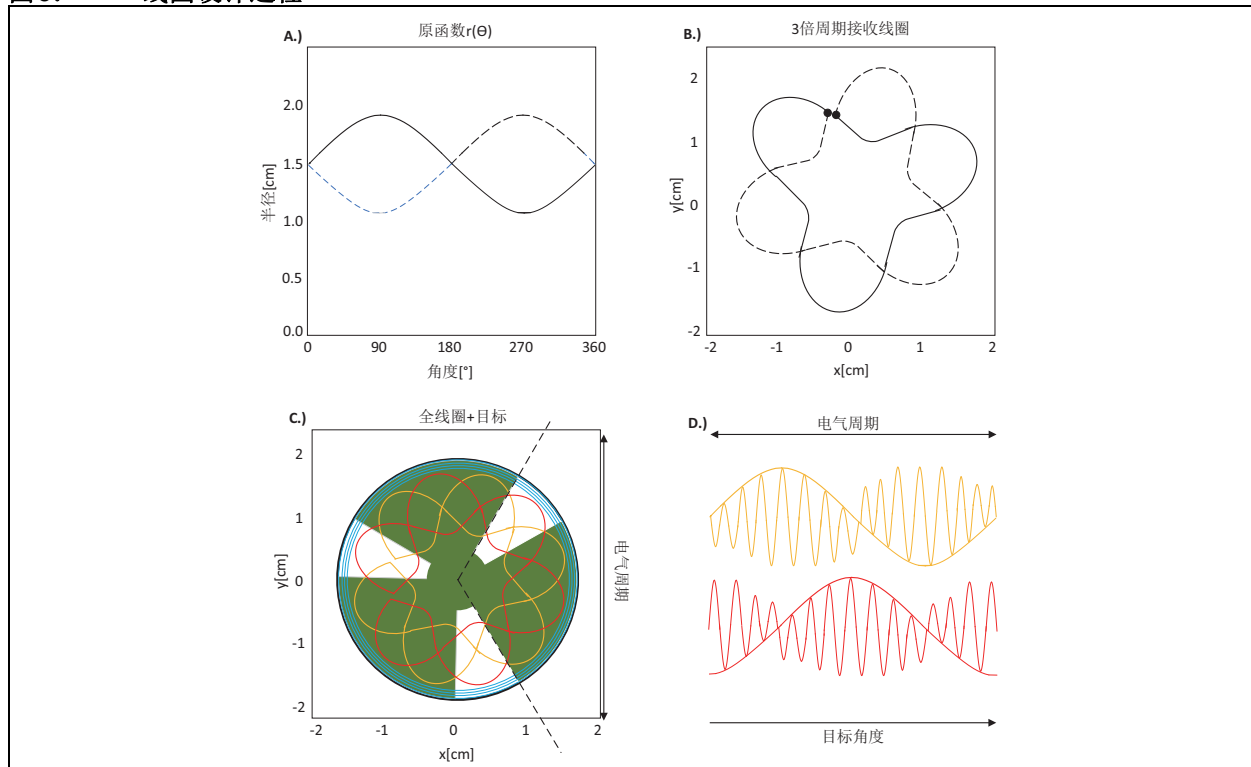
图4: 具有可变周期性的电感式传感器



下图给出了线圈设计的分步过程。RX线圈来自正弦原函数 $r(\theta) = R_0 + \Delta R \sin(\theta)$ 及其互补的 $r'(\theta) = R_0 - \Delta R \sin(\theta)$ 。随后, 使用极坐标变换 $x = r(N) \cos(\theta)$ 和 $y = r(N) \sin(\theta)$ 来适应一整圈的N个周期 (N是电机的极对数), 以获得RX线圈模式。

然后, 通过添加另一个RX线圈 (偏移 $90^\circ/N$)、围绕RX线圈的圆形TX线圈以及目标 (下图中的C), 即可完成完整的线圈组。此配置提供两相信号集, 如下图中的D所示。

图5: 线圈设计过程



目标

目标是连接到转子的圆形PCB, 其叶片等于电机极对数。来自TX线圈的能量会在目标上感应出涡流, 进而产生一个反向磁场并由RX线圈接收。

涡流是通过改变磁场感应出的, 会在垂直于磁场平面的导体内的闭环中流动。与流经导体的任何电流一样, 涡流也会产生磁场。楞次定律指出, 磁感应电流 (如涡

流) 具有这样的方向, 即感应电流产生的磁场总是会阻碍引起感应电流的磁场的变化。下一个结果是金属目标抵消了接收线圈上的磁场。

IC

LX34050是一款集成可编程数据转换IC, 设计用于连接和管理基于PCB的电感式位置传感器。

该器件包括一个集成振荡器电路（用于驱动电感式传感器的TX线圈），以及两条独立的模拟转换路径（分别用于调理、转换和处理来自传感器RX线圈的正弦和余弦信号）。每条路径都包括EMI滤波器、解调器和可编程放大器。

LX34050输出接口包括两个单端正弦和余弦信号，这些信号随着金属目标在传感器上移动而变化。模拟路径的传播延迟和带宽针对高速汽车、工业和医疗传感器应用进行了优化。LX34050是一个绝对位置传感器，因此，必须将传感器相位角与电机电角度对齐，以保证传感器正常工作。通过在固件中正确设置传感器角度和转子角度之间的 θ 偏移量，可以解决此问题。

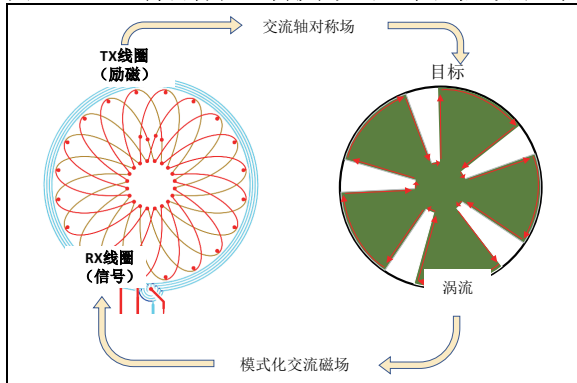
PCB

Microchip网站上提供了PCB设计。

电感式位置传感器操作

电感式位置传感器测量放置在一组感应线圈前面的金属目标的位置。目标连接到电机转子。它设计了多个与电机极对数相匹配的叶片。线圈在PCB上以走线的形式创建，PCB上还安装了LX34050芯片。这些线圈连接到集成电路接口。LX34050芯片的功能是驱动和读取线圈的电压，根据接收到的信号计算“目标”角度，并以单端正弦/余弦信号的形式输出计算值。

图6： 将目标位置转换为正弦/余弦信号的过程



如上图所示，外部圆形线圈（青色线圈）是TX线圈。它由传感器IC控制，以产生轴对称的交流磁场。TX线圈场在目标中激发涡流，从而产生称为目标场的次级场。目标由多个叶片组成；因此，目标场不具有圆柱对称性，但存在角度依赖性。目标与电机的转子一同旋转，并根据其位置抵消线圈上的磁场。角度域中的目标

场周期对应于两个相邻目标叶片包围的角度扇区。这种角跨度也被称为电气周期，其定义为等于 360° 电角度（ 1° 电角度 = $1^\circ/N$ 机械角度）。

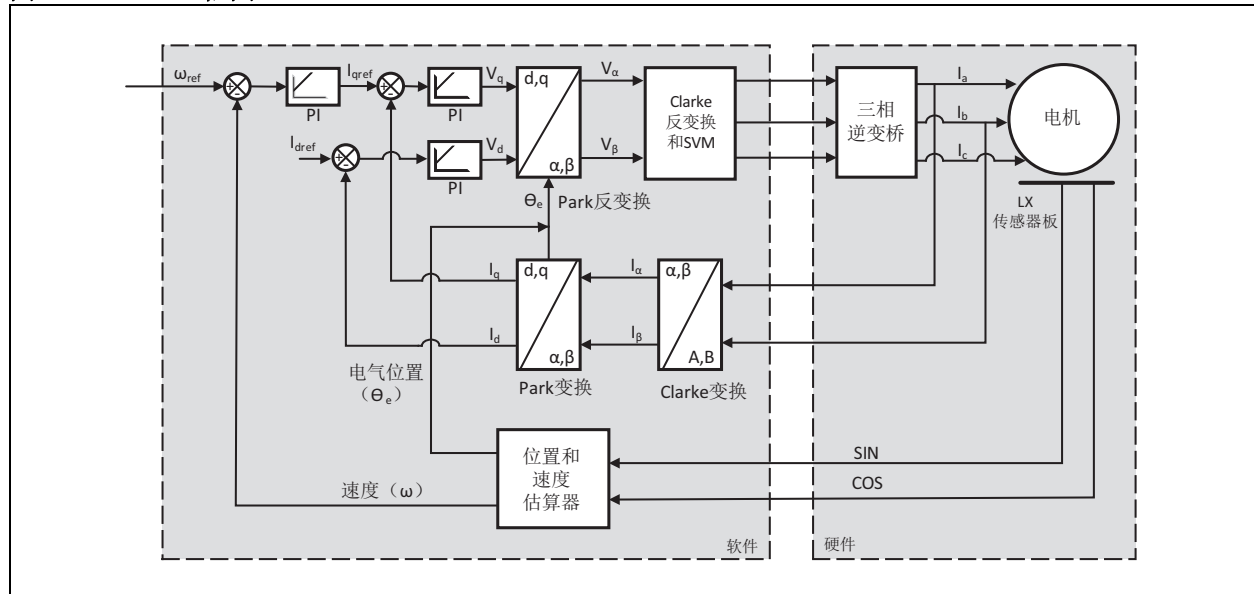
RX线圈（像旋转描记器一样的红色和棕色线圈）接收由发送器产生且被目标抵消的净场，并产生一组两个交流信号。接收（RX）线圈设计用于捕获目标场，同时对TX场不敏感。实现方法如下：通过缠绕每个RX线圈，使每个电气周期都包含两个串联的环，其中第一个环顺时针旋转，第二个环逆时针旋转。这样，圆柱对称的TX场便会被排除，因为它在两个环中产生相反的电压，同时，目标场会因匹配的周期性而被捕获。当目标旋转时，RX线圈在载波频率上产生一个通过调幅包络表征的交流电压，该包络在一个电气周期内近似为正弦曲线（见图5D）。通过优化RX线圈的形状，可以使包络曲线更接近理想的正弦曲线。

位置传感器接口IC将来自RX线圈的输入信号转换为单端正弦/余弦输出信号。这些信号被传递到控制器单元，该单元使用反正切函数计算角度，并根据每个周期的 θ 差值估算速度。

电感式位置传感器精度的提高归功于其极低的温度漂移、比例测量和动态信号补偿。次级RX通道使用同步解调来消除由于温度波动引起的差异。模拟路径的传播延迟和带宽已经针对高速传感器应用进行了优化。每条路径都包括EMI滤波器、解调器、抗混叠滤波器和可编程放大器。输出是精确的正弦和余弦信号，这些信号表示金属目标在基于PCB的传感器上的运动。

有传感器FOC框图

图7: FOC框图



上图中的控制过程总结如下：

- 测量三相定子电流。对于具有平衡三相绕组的电机，只需测量两相电流。使用以下公式计算第三相电流： $i_a + i_b + i_c = 0$ 。
- **Clarke变换**：将三相电流转换到静止双轴系统。该转换将通过测量的 i_a 和 i_b 值提供 $i_α$ 和 $i_β$ 变量。从定子的角度来看，值 $i_α$ 和 $i_β$ 是随时间变化的正交电流值。
- **Park变换**：使用变换（基于在控制环最后一次迭代时测量的角度）旋转静止双轴坐标系，以与转子磁通对准。该转换通过 $i_α$ 和 $i_β$ 提供 i_d 和 i_q 变量。变量 i_d 和 i_q 是变换到旋转坐标系的正交电流。对于稳态条件， i_d 和 i_q 恒定。
- 电流的参考值定义如下：
 - i_d 参考值：控制转子磁通
 - i_q 参考值：控制电机转矩输出
- 将误差信号馈入PI控制器。控制器的输出提供 v_d 和 v_q ，它们是将施加到电机上的电压矢量。
- 基于LX34050电感式传感器目标位置测量和计算新的变换角度。新角度将引导FOC算法确定放置下

一个电压矢量的位置。

- **Park反变换**：使用新的角度将来自PI控制器的 v_d 和 v_q 输出值旋转回静止参考坐标系。该计算可提供后续的正交电压值 $v_α$ 和 $v_β$ 。
- **Clarke反变换和SVM**： $v_α$ 和 $v_β$ 值用于计算将生成所需电压矢量的新PWM占空比值。
- 根据每个PWM周期发生的多个 θ 采样计算速度（ ω ）。FOC固件在ADC中断服务程序（Interrupt Service Routine, ISR）中实现，运行速度与PWM开关频率相同。

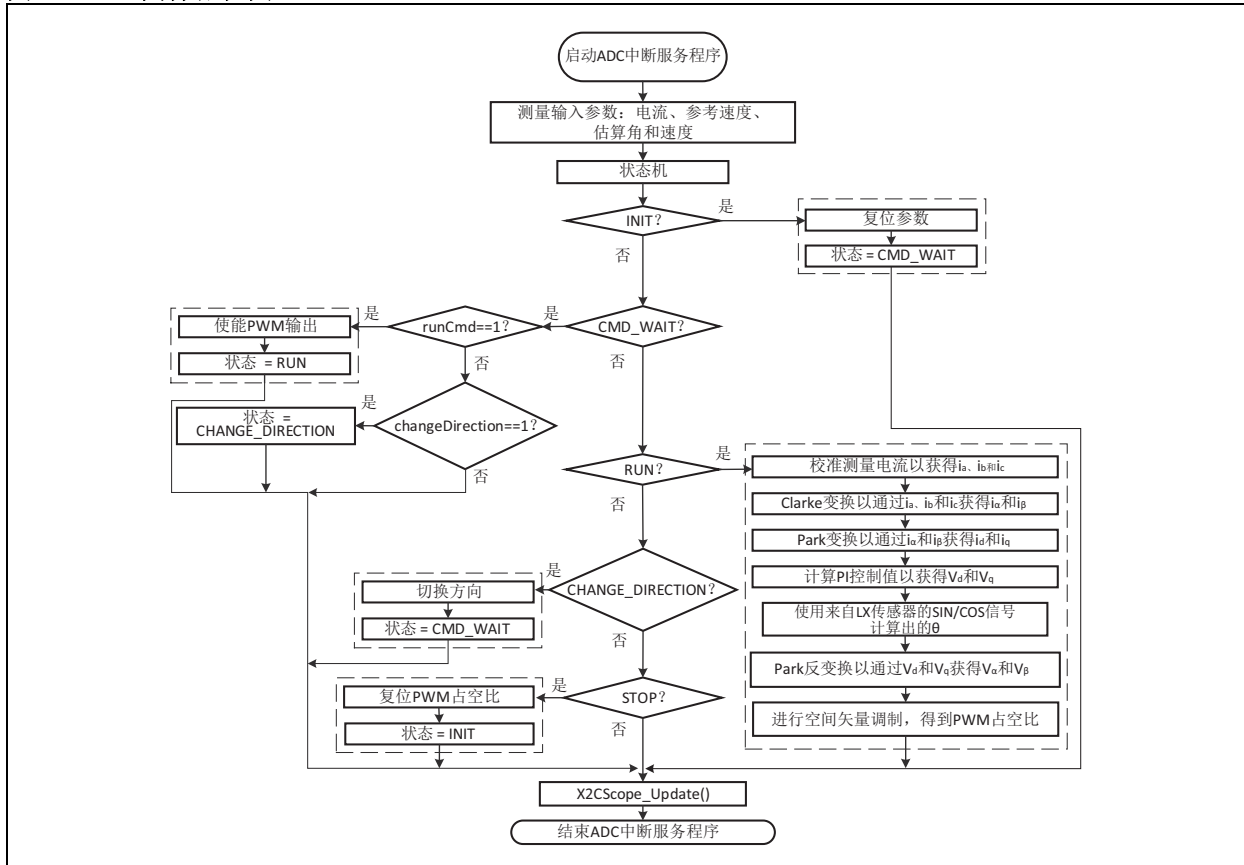
本应用笔记并未详细说明FOC操作。请参见AN1292，《利用PLL估算器和弱磁技术（FW）实现永磁同步电机（PMSM）的无传感器磁场定向控制（FOC）》了解深入的FOC讨论。

有传感器FOC和LX传感器算法的流程图

本章介绍了系统、位置估算器和速度估算器模块的流程图。

有传感器FOC流程图

图8： 固件流程图



上图中的流程图给出了在每个PWM周期中执行的ADC中断服务程序的程序流程。它首先测量所需的参数，如电流、所需速度的参考速度、计算角度和测量速度，然后是监控电机操作的状态机。该状态机由七个状态组成，简要说明如下：

- **INIT** —— 所有参数和变量均复位的初始状态。每当系统上电或电机停止后，都会进入此状态。
- **CMD_WAIT** —— 此状态监视 runCmd 和 changeDirection 变量。当清除其初始状态并按下开关 SW1 时，会将 runCmd 置 1。因此，每当按下开关 SW1 时，其值就会切换。同样，通过按下开关 SW2，可以切换 changeDirection 的值。
- **RUN** —— 电机使用 FOC 算法运行。
- **CHANGE_DIRECTION** —— 默认电机方向为正。按下开关 SW2 可以将方向从正向切换为反向。固件设计为只有在电机停止时才会切换方向。

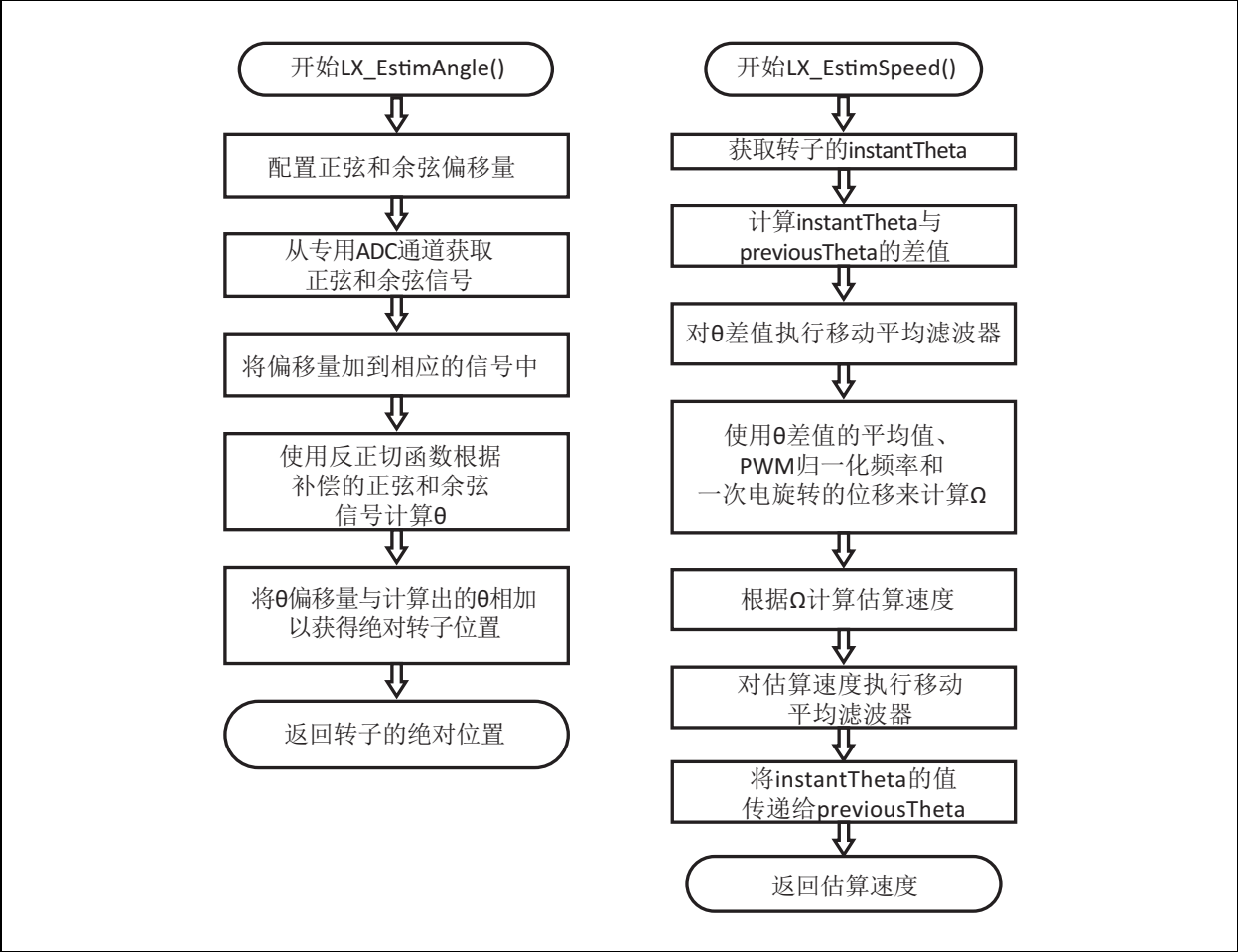
- **STOP** —— 清除 PWM 占空比，电机停止。

X2CScope_Update() 是用于更新在 X2CScope 示波器窗口和监视窗口上受监视的参数值的程序。X2CScope 是一款支持对此嵌入式应用进行运行时调试或监视的虚拟示波器工具。它是 MPLAB® X IDE 插件中提供的第三方插件工具，可以通过 MPLAB 代码配置器 (MPLAB Code Configurator, MCC) 进行配置。

基于 LX 传感器的位置和速度估算器的流程图

下图中的流程图总结了从通过 ADC 通道进入单片机的原始正弦/余弦信号获取位置和速度的过程。这是一个顺序程序，首先计算角度位置，然后计算速度，因为后者基于从每个 PWM 周期获取的角度差。

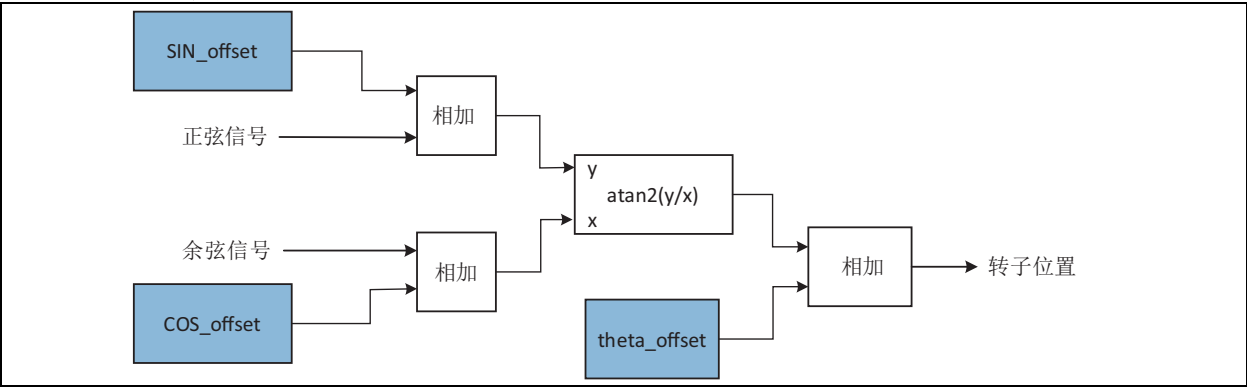
图9： 位置和速度估算器



LX34050 电感式位置传感器算法

本节讨论建议添加到模拟信号中的偏移量、计算给定正弦/余弦数字化值比率的角度的反正切函数以及速度估算。

图10： 位置估算器框图



上图介绍了获取绝对转子位置的软件块和互连。SIN_offset和COS_offset是用于补偿进入单片机的直流偏移量的值。可利用X2Cscope手动获得这些值。下一章将讨论获取SIN_offset和COS_offset的示例。正弦和余弦信号通过相应的ADC通道（ADC20和ADC21）进行测量。调整后的正弦和余弦信号将馈入atan2(y/x)函数。

ATAN2(Y, X) 函数

atan2(y/x)函数是一种“双参数反正切”，定义为正x轴与从原点到点(x, y)的射线之间的角度（以弧度为单位）。它的作用是为从笛卡尔坐标(x, y)转换到极坐标(r, θ)的角度θ返回一个准确且明确的值。这类似于计算y/x的反正切，只不过两个参数的符号用于确定结果的象限。

例1： 象限偏移值宏

```
#define ATAN2_OFFSET_Q2      0x4000
#define ATAN2_OFFSET_Q34    0x8000
```

例2： 初始θ设置

$$\theta = \begin{cases} 0, & \text{如果 } x > 0 \text{ 且 } y > 0 \\ ATAN2_OFFSET_Q2, & \text{如果 } x < 0 \text{ 且 } y > 0 \\ ATAN2_OFFSET_Q34, & \text{如果 } x < 0 \text{ 且 } y < 0 \\ ATAN2_OFFSET_Q34 + ATAN2_OFFSET_Q2, & \text{如果 } x > 0 \text{ 且 } y < 0 \end{cases}$$

θ的初始设置给出了指定象限中的基值。在第一种情况下，θ为0，这意味着不需要偏移量，因为θ位于第1象限。在第二种情况下，θ位于第2象限；因此，将x值取反以使其为正。符号反转导致增加ATAN2_OFFSET_Q2。对于第三种情况，由于θ在第3象限，因此x和y值都取反；这样，θ会初始化为ATAN2_OFFSET_Q34。第四种情况需要结合ATAN2_OFFSET_Q2和ATAN2_OFFSET_Q34以便为y值指定相反的符号，因为θ位于第4象限。

设置初始θ值后，测试y是否大于x；如果y > x，则交换x和y的值。计算y和x之比，并将结果用作从查找表中确定正确值的索引。查找表由一个包含257个元素的数组组成。这些值在绘制后类似于正弦信号的四分之一。获取索引指向的值并将其加到初始θ值中。结果为转子角度。

对于范围为(-π/2, π/2]的标准反正切函数，可表示为：

公式1： 两个数的反正切

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{如果 } x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & \text{如果 } x < 0 \text{ 且 } y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & \text{如果 } x < 0 \text{ 且 } y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & \text{如果 } x = 0 \text{ 且 } y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{如果 } x = 0 \text{ 且 } y < 0 \\ \text{未定义} & \text{如果 } x = 0 \text{ 且 } y = 0 \end{cases}$$

该算法基于上述段落讨论的原理创建。角度的象限取决于x和y的大小和符号。为了简化代码执行，根据角度所在的象限向角度中加了偏移值。以下示例中的宏中定义了这些偏移值。

旋转目标不在电机的绝对位置；因此，计算出的θ与theta.offset相加可获得转子的绝对位置。下一章中的示例将说明如何获得theta.offset。

速度测量

速度是根据后续转子角度(θ)之间差值的多个采样得出的。当前捕获的角度命名为instantTheta，而前一个捕获的角度称为previousTheta。获得instantTheta并与previousTheta进行比较；然后计算两者之间的差值。对得出的差值应用移动平均滤波器。移动平均滤波器是一种简单的低通有限脉冲响应滤波器，用于调节采样数据的数组。它一次获取M个输入采样，然后利用这些采样的平均值得到一个输出点。输出是经滤波的θ差值，用于计算Ω。使用以下公式计算Ω。

公式2: Ω 计算

$$\Omega = \frac{(\text{经滤波的 } \theta \text{ 差值} * \text{PWM 归一化频率})}{\text{归一化位移}}$$

PWM 归一化频率是 PWM 频率的简化值，归一化位移是转子在一个 PWM 周期内旋转的总角距离。然后，利用以下公式计算估算速度。

公式3: 估算速度

$$\text{速度} = \Omega * 60$$

使用移动平均滤波器对速度进行另一级滤波，以进一步减少随机噪声。经滤波的速度是馈入 PI 控制器的测量速度。

LX34050 传感器的示例应用

使用以下开发板测试固件：dsPIC33CK 低电压电机控制开发板（LVMC）、为 5 极对 Hurst 电机创建的定制 LX34050 传感器板、用于将传感器板连接到 LVMC 开发板的适配器板以及 PCB 中制造的目标导体。传感器板与目标之间的气隙建议在 1 mm 到 3 mm 之间。传感器板与目标导体的原理图位于 [附录 A: “电路原理图”](#)。

在使用 LX34050 传感器作为反馈运行电机之前，建议首先调整或设置偏移量。本节包含设置偏移量（正弦、余弦和 θ ）的分步过程。

该解决方案提供了两种设置偏移量的方法。一种方法是使用 PLL 估算器，另一种技术是手动设置偏移量。

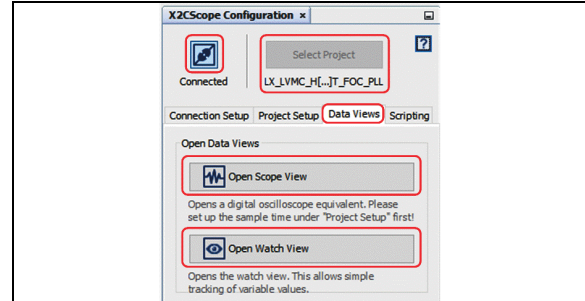
使用 PLL 估算器设置偏移量

固件配备了 PLL 估算器，用于在偏移量（正弦、余弦和 θ ）的初始设置下运行电机。在最初设置固件时，在 userparams.h 文件中使能 ESTIMATOR 和 SETTING_OFFSET 定义，如下图所示。

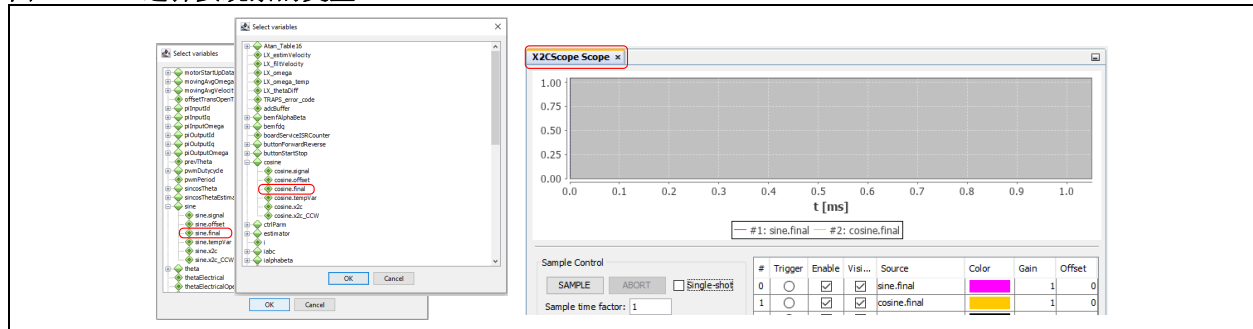
图11: USERPARAMS.H 定义

```
#define ESTIMATOR
#define SETTING_OFFSET
```

将程序加载到器件中。连接 X2CScope，然后打开“Data Views”（数据视图）。单击“Open Scope View”（打开示波器视图）和“Open Watch View”（打开观察视图），如下图所示。有关 X2CScope 的安装指南，请参见 [附录 C: “X2CScope”](#)。

图12: 打开示波器和观察视图

在 X2CScope 窗口中，从变量中选择 sine.final 和 cosine.final 作为通道 0 和通道 1 的来源。

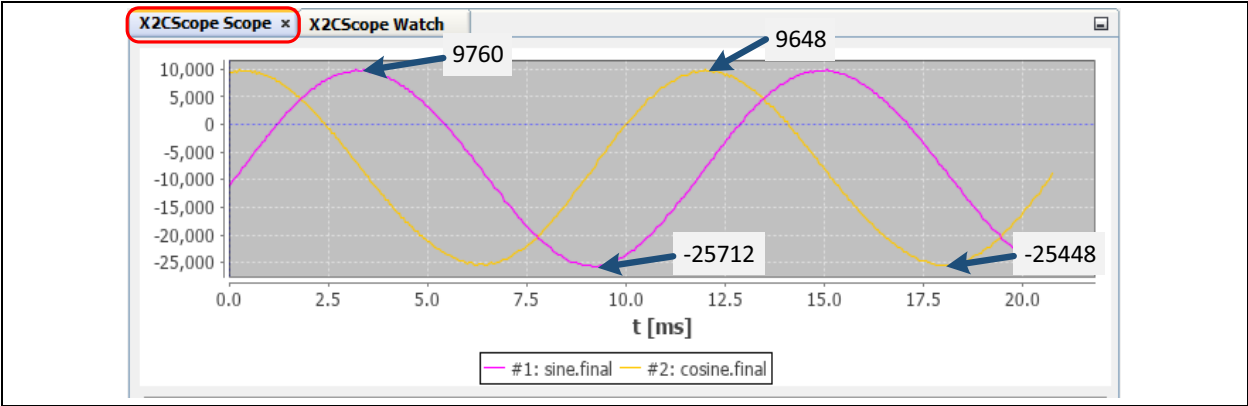
图13: 选择要观察的变量

运行电机并开始数据捕捉。请注意，下图中的正弦和余弦信号绕 x 轴不对称。使用以下公式计算每个信号的偏移量：

公式4: 正弦/余弦信号的偏移量

$$\text{偏移量} = \frac{|\text{最大值} + \text{最小值}|}{2}$$

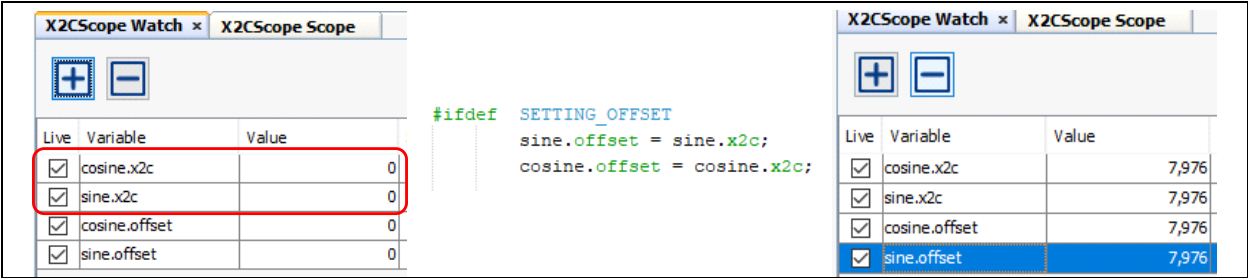
图 14: 无偏移量的正弦/余弦信号采样捕捉



下图给出了偏移值分配给相应变量的方式。计算偏移量后，打开观察视图，然后添加x2c变量（sine.x2c和cos.x2c）。这些变量是为了通过X2CScope自由调

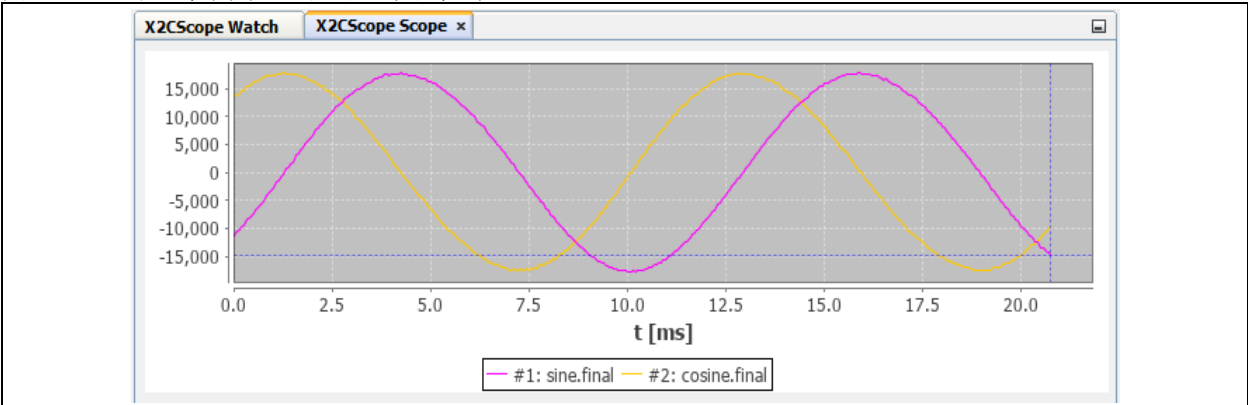
整偏移值而创建的，并且会分配给sine.offset和cosine.offset，这两个变量也会被添加到观察视图窗口中进行检查。将偏移值放置到相应的x2c变量中。

图 15: 将偏移量分配给相应的变量



运行电机，可观察到sine.final和cosine.final信号已经绕x轴对称，如下图所示。

图 16: 以X轴为中心的正弦/余弦信号

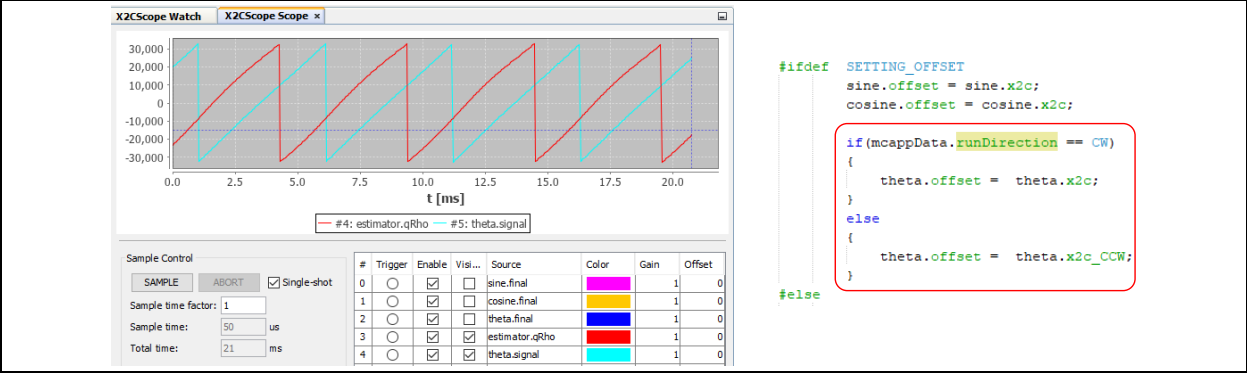


为正向的theta.offset分配值

监视theta.signal并将其与估算器给出的绝对转子位置进行比较。建议将theta.offset加到原始计算的theta.signal中，使其与estimator.qRho对齐。

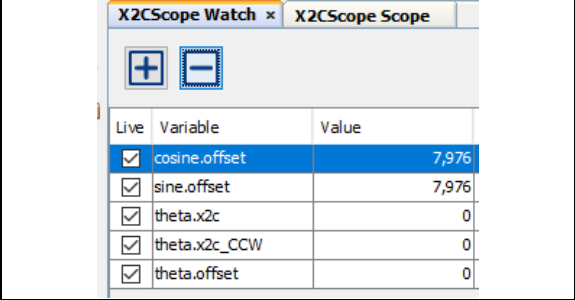
theta.x2c和theta.x2c_CCW用于通过X2CScope进行实时调整。这些变量分配给theta.offset。

图 17: 设置THETA.OFFSET



将theta.x2c和theta.x2c_CCW变量添加到观察视图，如下图所示。

图 18: 将THETA.X2C变量添加到观察视图



使用Excel工作表中的Theta_offset部分作为指南以更快地调整theta.offset。Excel工作表包含在代码文件夹中。theta.signal落后于estimator.qRho；因此，在Q15(0.5)或16383附近选择一个较大的正值并观察响应。调整数值，直到estimator.qRho和theta.final重叠。

表1: THETA.X2C 偏移量调整

第一次试验	X2CScope Watch X2CScope Scope <table><tr><td>Live</td><td>Variable</td><td>Value</td></tr><tr><td>☒</td><td>cosine.offset</td><td>7,976</td></tr><tr><td>☒</td><td>sine.offset</td><td>7,976</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.x2c</td><td>16,383</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.x2c_CCW</td><td>0</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.offset</td><td>16,383</td></tr></table> X2CScope Watch X2CScope Scope	Live	Variable	Value	☒	cosine.offset	7,976	☒	sine.offset	7,976	☒	theta.x2c	16,383	☒	theta.x2c_CCW	0	☒	theta.offset	16,383
Live	Variable	Value																	
☒	cosine.offset	7,976																	
☒	sine.offset	7,976																	
☒	theta.x2c	16,383																	
☒	theta.x2c_CCW	0																	
☒	theta.offset	16,383																	
第二次试验	X2CScope Watch X2CScope Scope <table><tr><td>Live</td><td>Variable</td><td>Value</td></tr><tr><td>☒</td><td>cosine.offset</td><td>7,976</td></tr><tr><td>☒</td><td>sine.offset</td><td>7,976</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.x2c</td><td>19,960</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.x2c_CCW</td><td>0</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.offset</td><td>19,960</td></tr></table> X2CScope Watch X2CScope Scope	Live	Variable	Value	☒	cosine.offset	7,976	☒	sine.offset	7,976	☒	theta.x2c	19,960	☒	theta.x2c_CCW	0	☒	theta.offset	19,960
Live	Variable	Value																	
☒	cosine.offset	7,976																	
☒	sine.offset	7,976																	
☒	theta.x2c	19,960																	
☒	theta.x2c_CCW	0																	
☒	theta.offset	19,960																	
第三次试验	X2CScope Watch X2CScope Scope <table><tr><td>Live</td><td>Variable</td><td>Value</td></tr><tr><td>☒</td><td>cosine.offset</td><td>7,976</td></tr><tr><td>☒</td><td>sine.offset</td><td>7,976</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.x2c</td><td>22,936</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.x2c_CCW</td><td>0</td></tr><tr><td>☒</td><td>theta.offset</td><td>22,936</td></tr></table> X2CScope Watch X2CScope Scope	Live	Variable	Value	☒	cosine.offset	7,976	☒	sine.offset	7,976	☒	theta.x2c	22,936	☒	theta.x2c_CCW	0	☒	theta.offset	22,936
Live	Variable	Value																	
☒	cosine.offset	7,976																	
☒	sine.offset	7,976																	
☒	theta.x2c	22,936																	
☒	theta.x2c_CCW	0																	
☒	theta.offset	22,936																	

为反向的theta.offset分配值

遵循与调整正向的偏移量相同的过程来获得反向的正确theta.offset。

表2: THETA.X2C.CCW 偏移量调整

第一次试验	X2CScope Watch X2CScope So Live Variable Value ☒ cosine.offset 7,976 ☒ sine.offset 7,976 ☒ theta.x2c 22,936 ☒ theta.x2c_CCW 22,936 ☒ theta.offset 22,936 X2CScope Watch X2CScope Scope 25,000 0 -25,000 0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0 t [ms] #3: theta.final #4: estimator.qRho
第二次试验	X2CScope Watch X2CScope So Live Variable Value ☒ cosine.offset 7,976 ☒ sine.offset 7,976 ☒ theta.x2c 22,936 ☒ theta.x2c_CCW 19,660 ☒ theta.offset 19,660 X2CScope Watch X2CScope Scope 25,000 0 -25,000 0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0 t [ms] #3: theta.final #4: estimator.qRho
第三次试验	X2CScope Watch X2CScope So Live Variable Value ☒ cosine.offset 7,976 ☒ sine.offset 7,976 ☒ theta.x2c 22,936 ☒ theta.x2c_CCW 13,106 ☒ theta.offset 13,106 X2CScope Watch X2CScope Scope 25,000 0 -25,000 0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0 17.5 20.0 t [ms] #3: theta.final #4: estimator.qRho

偏移值分配

获得所有偏移值后，会禁止ESTIMATOR和SETTING_OFFSET定义。所选值会分配给其在lx_sensor.c文件中的相应偏移量变量，如下图所示。

图 19: 偏移值分配

```
sine.offset = 7976;
cosine.offset = 7976;

if(mcappData.runDirection == CW)
{
    theta.offset = 22936;
}
else
{
    theta.offset = 13106;
}
```

现在通过电感式位置算法处理位置和速度估算。对器件进行编程并开始使用LX34050电感式位置算法运行电机。

使用手动方法设置偏移量

在最初设置固件时，在 userparams.h 文件中使能 OPEN_LOOP_FUNCTIONING 和 SETTING_OFFSET 定义，如下图所示。当 OPEN_LOOP_FUNCTIONING 定义有效时，电机在强制换相模式下以固定速度驱动。

图20： 用于设置正弦和余弦偏移量的 USERPARAMS.H 定义

```
#define OPEN_LOOP_FUNCTIONING
#define SETTING_OFFSET
```

请参见前面使用 PLL 估算器的部分，了解如何计算和获取正弦和余弦偏移量。执行相似的过程来获取偏移量，惟一区别是使用强制换相的开环电机驱动。确定正弦和余弦偏移量后，将这些值分配给相应变量（sin.x2c 和 cos.x2c）。下一步是首先确定顺时针方向的 theta.offset，然后再确定逆时针方向的该变量。

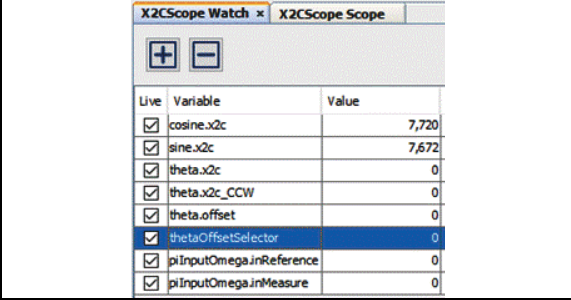
禁止 OPEN_LOOP_FUNCTIONING 模式，但使 SETTING_OFFSET 保持有效状态，如下图所示。编译代码并加载到器件。

图21： 用于设置 θ 偏移量的 USERPARAMS.H 定义

```
//#define OPEN_LOOP_FUNCTIONING
#define SETTING_OFFSET
```

禁止开环模式将允许驱动器使用开发板上的电位器改变速度。在 X2CScope 观察窗口中，添加 thetaOffsetSelector、theta.x2c、theta.x2c_CCW、piInputOmega.inReference 和 piInputOmega.inMeasure 变量，如上图所示。thetaOffsetSelector 的值用作 Theta_Offset[] 查找表的索引，该查找表包含预定义的 θ 偏移值，范围为 -32768 到 32767，可细分为 42 个子范围。代码随附一个 Excel 工作表文件，可作为轻松找到正确 θ 偏移值的指南。theta.x2c 用于调整顺时针方向的 θ 偏移量，而 theta.x2c_CCW 用于逆时针方向。正确的 θ 偏移量将在整个速度范围内提供平滑的驱动。piInputOmega.inReference 和 piInputOmega.inMeasure 用于确认电机在速度范围内是否正确旋转。

图22： θ 偏移量设置的变量



Live	Variable	Value
☒	cosine.x2c	7,720
☒	sine.x2c	7,672
☒	theta.x2c	0
☒	theta.x2c_CCW	0
☒	theta.offset	0
☒	thetaOffsetSelector	0
☒	piInputOmega.inReference	0
☒	piInputOmega.inMeasure	0

执行以下步骤来确定 theta.offset：

- 在运行电机之前，通过随附的 Excel 工作表文件为 thetaOffsetSelector 分配一个值。确保电位器处于最小位置。
- 运行电机并观察。如果选定的相应 θ 偏移量导致电机以远离参考值的速度旋转或者电机停转，则 θ 偏移量是错误的。通过切换 SW1 停止电机。
- 再次运行电机之前，为 thetaOffsetSelector 输入另一个值。在第 5 步中为 thetaOffsetSelector 尝试其他值，以更快地获得正确的 θ 偏移量。
- 正确的 θ 偏移量将使电机以最小速度旋转，因为电位器也处于最小位置。通过旋转将电位器的值从最小扫描到最大。
- 适当的 θ 偏移量将在整个速度范围内提供平滑的驱动。要微调 θ 偏移量，用户可以尝试电机以最小参考速度旋转的 θ 偏移值之前和之后的两个偏移值。
- 监视 theta.x2c 以确认顺时针方向的 θ 偏移值，并监视 theta.x2c_CCW 以确认逆时针方向的 θ 偏移值。
- 逆时针方向的 θ 偏移量通常比顺时针方向的偏移量小七个步长。例如，顺时针方向的正确 θ 偏移量为 -11468（在 thetaOffsetSelector 的值为 29 时获得），则在 thetaOffsetSelector 的值为 36 时，逆时针方向的 θ 偏移量为 -22937。
- 成功获得正确的 θ 偏移量后，将值分配给在 lx_sensor.c 源文件中编写 LX_EstimAngle() 函数中的相应变量。在 userparams.h 文件中禁止 OPEN_LOOP_FUNCTIONING 和 SETTING_OFFSET 定义。编译项目，将其加载到器件，并使用 LX 传感器反馈来运行系统。建议在每次更改转子中导体目标的位置时都设置 θ 偏移量。

结果

本节介绍了在无负载条件下测试LX34050有传感器FOC驱动的结果。其中说明了正弦和余弦信号、转子角位置 和SVM线对地电压。下面各图使用X2CScope捕捉。

图23: 正弦和余弦信号

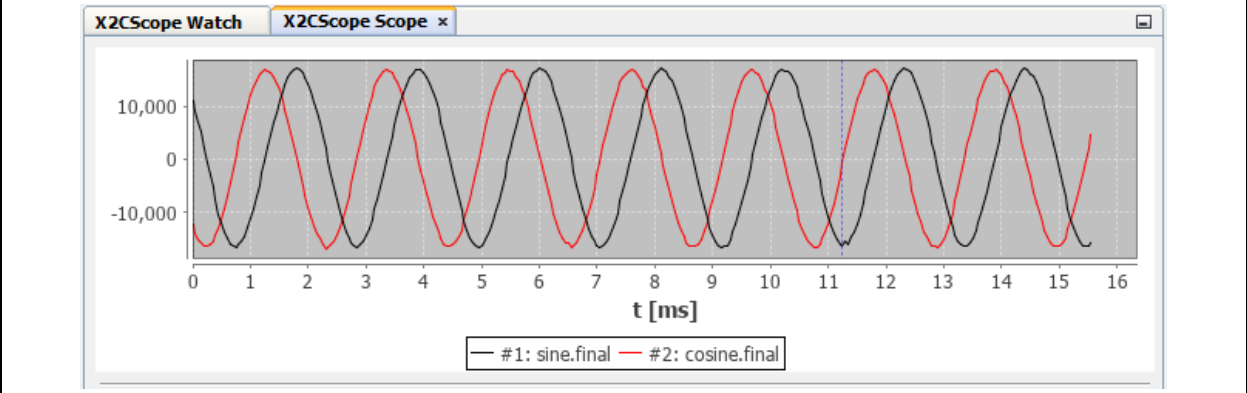


图24: 转子角位置

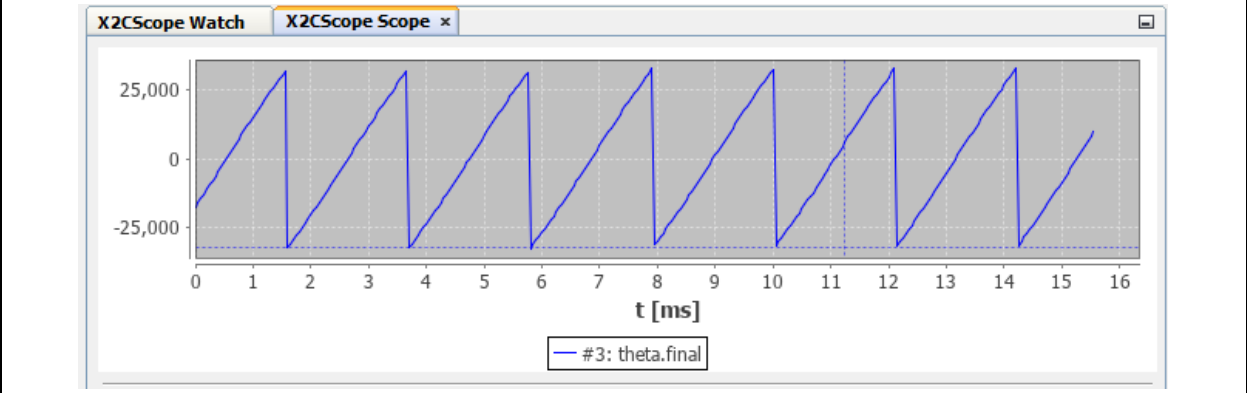
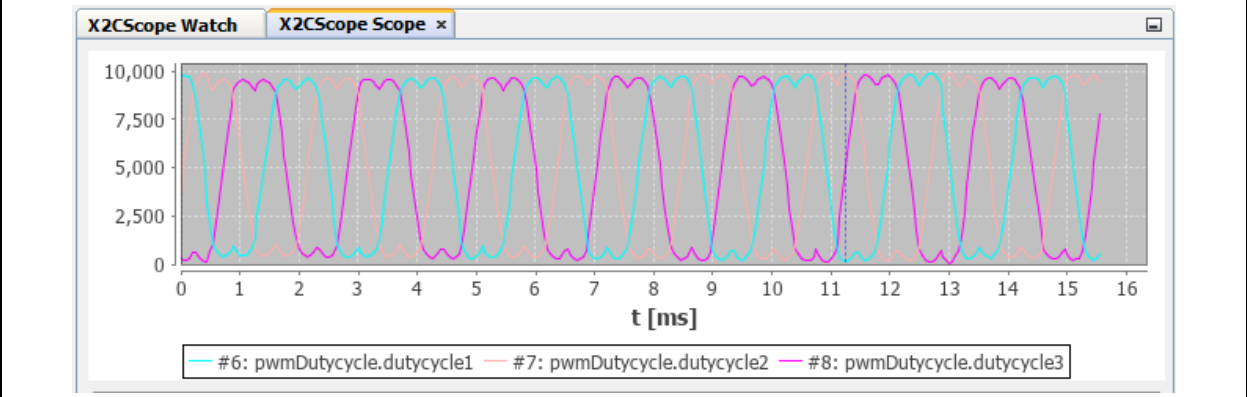


图25: SVM线对地电压

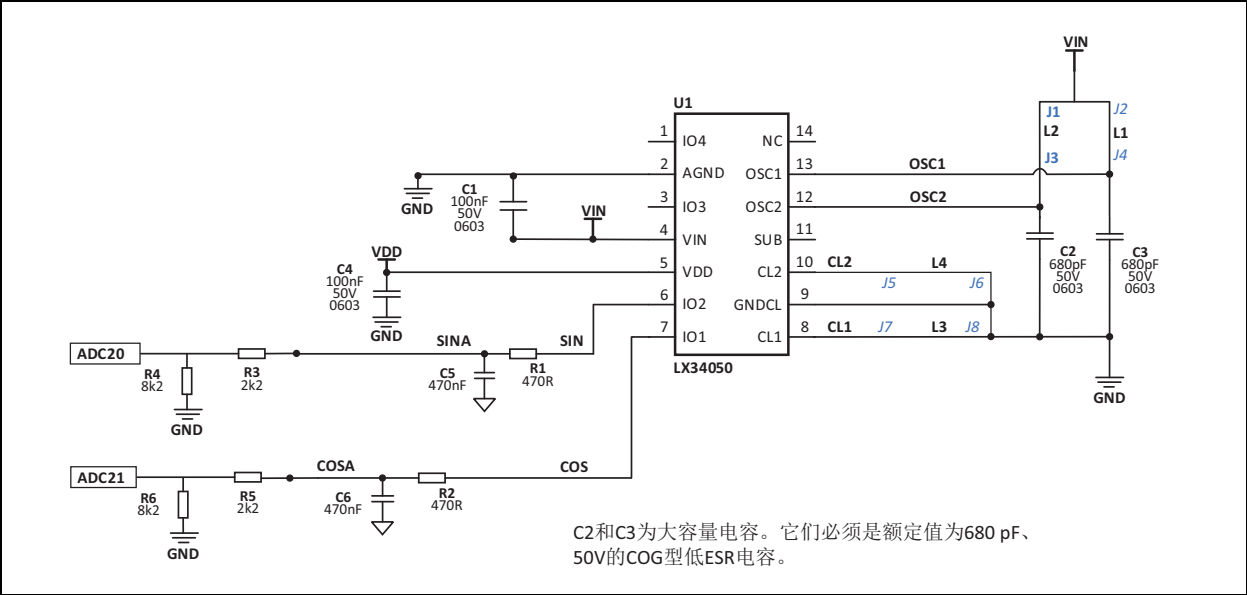


结论

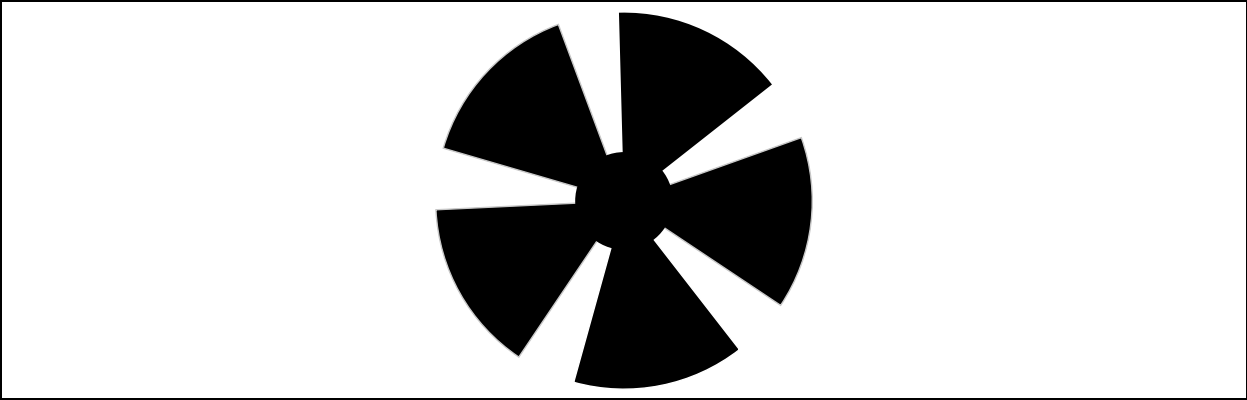
本文档介绍了如何使用电感式位置传感器作为反馈，在FOC驱动技术中提供精确的转子位置。LX34050已经过验证，对于连接和管理基于印刷电路板（PCB）的电感式位置传感器非常有效。Microchip的16位器件dsPIC33CK DSC高效利用其DSP执行FOC算法并使用其片上外设实现了经济高效的解决方案。X2CScope对于可视化和调试进出DSC的信号非常有用。总体而言，此应用可作为一个范例，方便地将LX34050电感式位置传感器应用到其他电机中。

附录A： 电路原理图

图A-1： LX34050 传感器板原理图



图A-2： 目标导体PCB布局





附录B：MCC系统模块和外设配置

MPLAB代码配置器是一款适合MPLAB X IDE的简单易用型插件工具，可根据在图形用户界面（Graphical User Interface，GUI）中的设置来生成Microchip单片机和DSC外设的控制代码。可使用MPLAB代码配置器轻松配置此电机控制应用中使用的固件。有关如何在MPLAB X IDE中安装和设置MCC的更多信息，请参见《MPLAB®代码配置器用户指南》（DS40001725B_CN）。

本节分步说明了如何在此电机控制应用中使用MCC。

B.1 MCC初始化

- 1. 在“System Module”（系统模块）选项卡中，将时钟设置为频率为8 MHz的FRC振荡器。禁止FRC后分频器，使能PLL，预分频比为1:1，反馈为1:150，后分频比1为1:3，后分频比2为1:1。产生的频率（FOSC）为200 MHz，指令周期（FOSC/2）为100 MHz。
- 2. 将ADC1模块的时钟源设置为FOSC/2，目标器件共用内核的采样时间为250 ns。选择通道并按照下图所示进行配置。

图B-1：ADC模块

Core	Enable	Core Channel	Pin Name	Custom Name	Trigger Source	Compare	Interrupt
Core0	☒	AN0	RA0	CH_AN0_IA	PWM1 Trigger1	None	☐
Core1	☒	AN1	RB2	CH_AN1_IB	PWM1 Trigger1	None	☒
Shared	☒	AN11	RB9	CH_AN11_POT	PWM1 Trigger1	None	☐
Shared	☒	AN20	RE0	CH_AN20_SIN	PWM1 Trigger1	None	☐
Shared	☒	AN21	RE1	CH_AN21_COS	PWM1 Trigger1	None	☐

- 3. 在PWM发生器模块中，选择系统时钟FOSC作为主时钟，时钟分频为100 MHz。选择所需的发生器：PG1、PG2和PG4。配置PWM主控设置，PWM输入时钟选择为200 MHz，PWM操作模式：中心对齐和互补PWM输出模式。主PWM周期设置为10 kHz。PWM初始化为0%占空比。PG1配置为在每个周期开始时自触发，并在EOC事件时触发输出。每次写入占空比时都会触发更新，更新模式为每个SOC更新。PG2和PG4配置为来自PWM1的触发信号以及在EOC事件时的触发输出选择。每次写入占空比时都会触发更新，更新模式为应请求SOC更新。所有PWM发生器的死区时间均设置为500 ns。
- 4. 内部运放的初始化过程如下图所示。

图B-2：运放配置

☒ Enable OPAMP

☒ Enable OPAMP 1

Input Voltage RangeWide input voltage range

☒ Enable OPAMP 2

Input Voltage RangeWide input voltage range

☒ Enable OPAMP 3

Input Voltage RangeWide input voltage range

- 5. 配置UART设置，如下图所示。

图B-3：UART设置

UART1

Easy SetupRegisters

Hardware Settings

☒ Enable UART

Clock SourceFOSC/2

Baud Rate115200

Error Rate = 0.006

ParityNone

Data Bits8

Stop Bits1 Stop bit sent, 1 checked at RX

Flow ControlNone

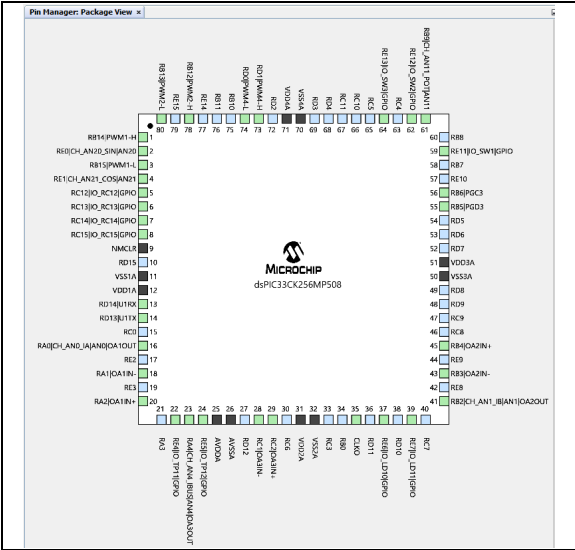
☐ Enable UART Interrupts

- 6. 在引脚管理器配置中，设置所有外设的输入 / 输出引脚，如下图所示。

© 2024 Microchip Technology Inc. 及其子公司

DS00004764A_CN 第 19 页

图 B-4: 引脚管理器封装视图



7. 配置完所有外设后，单击左上角Project Resources（项目资源）选项卡旁的“Generate Code”（生成代码）按钮。这将自动在项目中生成一个main.c文件，而且还会对模块进行初始化并留下一个空的while(1)循环，以使用户输入自定义代码。

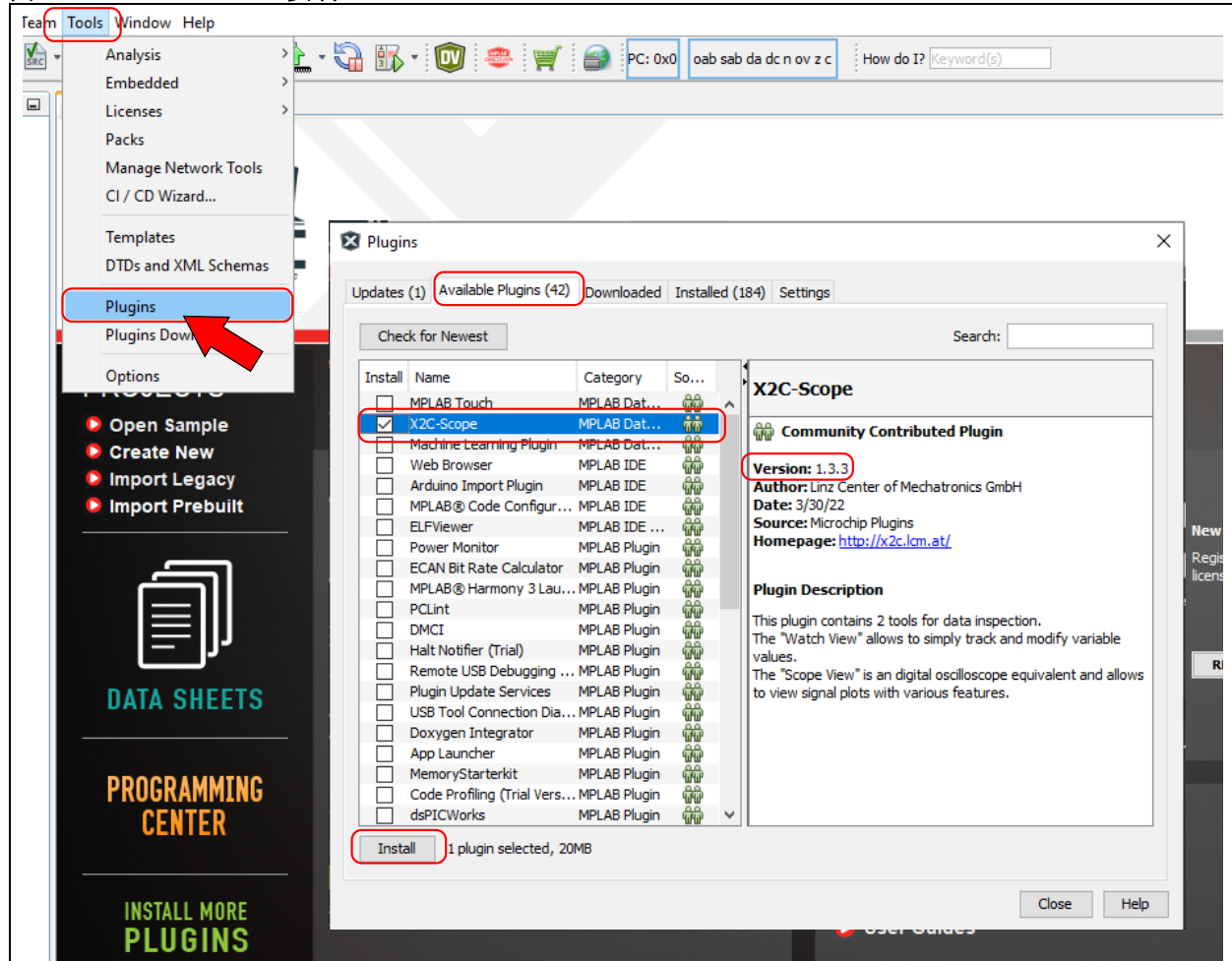
附录 C: X2CScope

X2C Scope是一个允许开发人员在应用程序运行时与应用程序交互的MPLAB X IDE插件。利用X2C Scope, 用户可以实时观察、更新和绘制全局变量(用于电机控制)。它使用UART与目标DSC通信。要使用X2C, 必须按照以下说明安装插件:

- 在MPLAB X IDE中, 转到Tools > Plugins (工具 > 插件), 然后单击Available Plugins (可用插件) 选项卡。
- 通过勾选其复选框来选择X2C Scope插件, 然后单击Install (安装)。

通过单击Tools > Embedded > X2C Scope (工具 > 已安装工具 > X2C Scope) 打开X2C Scope窗口。

图C-1: X2CScope 安装



附录D： 源代码列表

最新软件版本可从Microchip MPLAB Discover网站 (<https://mplab-discover.microchip.com/>) 下载。其中包含本应用笔记的IDE示例随附的源代码。最新版本为v1.0。

MICROCHIP 网站

Microchip 网站 (www.microchip.com) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

变更通知客户服务

Microchip 的变更通知客户服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 <http://microchip.com/support> 获得网上技术支持。

注:

请注意以下有关 Microchip 产品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规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》（Digital Millennium Copyright Act）。
- 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。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。

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。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 <https://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-supportservices>。

Microchip “按原样”提供这些信息。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，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。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损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中以或其他方式转让任何许可证。

有关 Microchip 质量管理体系的更多信息，请访问 www.microchip.com/quality。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maxStylus、maxTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzr、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、Clockstudio、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、KoD、maxCrypto、maxView、memBrain、mMidi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICKtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQL、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、Trusted Time、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2024, Microchip Technology Incorporated 及其子公司版权所有。

ISBN: 978-1-6683-3751-6

全球销售及服务网点

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://www.microchip.com/support>

网址: www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

奥斯汀 Austin, TX
Tel: 1-512-257-3370

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
Novi, MI
Tel: 1-248-848-4000

休斯敦 Houston, TX
Tel: 1-281-894-5983

印第安纳波利斯 Indianapolis
Noblesville, IN
Tel: 1-317-773-8323
Fax: 1-317-773-5453
Tel: 1-317-536-2380

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608
Tel: 1-951-273-7800

罗利 Raleigh, NC
Tel: 1-919-844-7510

纽约 New York, NY
Tel: 1-631-435-6000

圣何塞 San Jose, CA
Tel: 1-408-735-9110
Tel: 1-408-436-4270

加拿大多伦多 Toronto
Tel: 1-905-695-1980
Fax: 1-905-695-2078

亚太地区

中国 - 北京
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-577-8366

亚太地区

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

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-3090-4444

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

印度 India - Pune
Tel: 91-20-4121-0141

日本 Japan - Osaka
Tel: 81-6-6152-7160

日本 Japan - Tokyo
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 Korea - Daegu
Tel: 82-53-744-4301

韩国 Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-7651-7906

马来西亚 Malaysia - Penang
Tel: 60-4-227-8870

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

新加坡 Singapore
Tel: 65-6334-8870

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

越南 Vietnam - Ho Chi Minh
Tel: 84-28-5448-2100

欧洲

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

丹麦 Denmark - Copenhagen
Tel: 45-4485-5910
Fax: 45-4485-2829

芬兰 Finland - Espoo
Tel: 358-9-4520-820

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

德国 Germany - Garching
Tel: 49-8931-9700

德国 Germany - Haan
Tel: 49-2129-3766400

德国 Germany - Heilbronn
Tel: 49-7131-72400

德国 Germany - Karlsruhe
Tel: 49-721-625370

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

德国 Germany - Rosenheim
Tel: 49-8031-354-560

以色列 Israel - Ra'anana
Tel: 972-9-744-7705

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

意大利 Italy - Padova
Tel: 39-049-7625286

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

挪威 Norway - Trondheim
Tel: 47-7288-4388

波兰 Poland - Warsaw
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚 Romania - Bucharest
Tel: 40-21-407-87-50

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

瑞典 Sweden - Gothenburg
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 Sweden - Stockholm
Tel: 46-8-5090-4654

英国 UK - Wokingham
Tel: 44-118-921-5800
Fax: 44-118-921-5820