

AN1078 调整指南

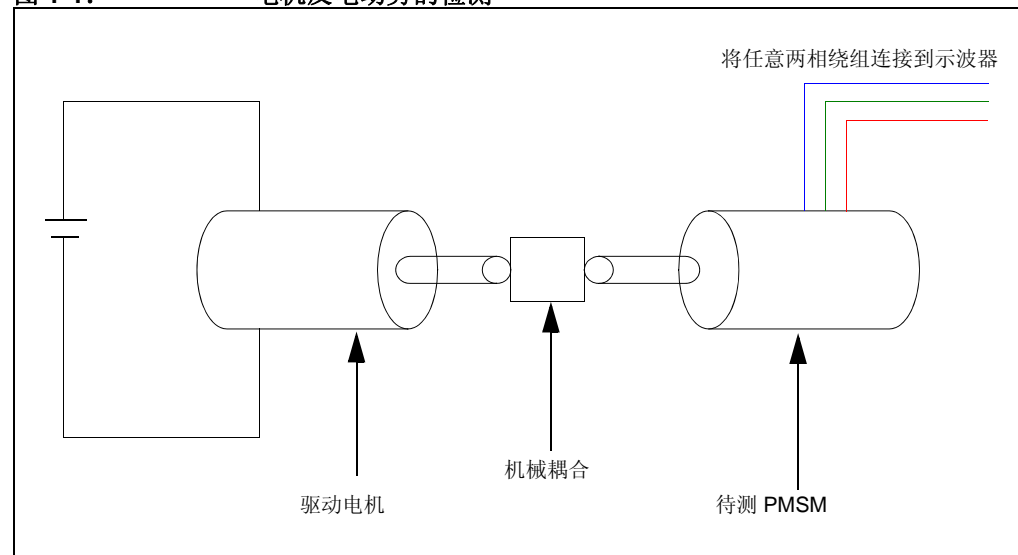
本文档介绍了使用 FOC 算法实现永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）调整所需的步骤和设置，该算法如 AN1078 《PMSM 电机的无传感器磁场定向控制》（DS01078A_CN）中所介绍。由于不同电机存在参数差异，因此需针对每种新的电机模型对该算法进行调整。

1.1 了解所使用的 PMSM

在使用 FOC 算法运行一台电机前，用户必须确定该算法是否支持其所使用的电机。FOC 算法只适用于正弦波反电动势的永磁同步电机。

图 1-1 给出了如何检测 PMSM 反电动势的安装示意图，包括待测的 PMSM 以及通过联轴器与之连接的另一台驱动电机。为观察反电动势的波形，使驱动电机运行于固定速度（例如，2000 RPM），并在示波器上观察其中两相反电动势的波形。

图 1-1: 电机反电动势的检测



1.2 在 dsPICDEM™ MCLV 开发板上成功测试的电机

下列电机均在 dsPICDEM MCLV 开发板上成功通过测试：

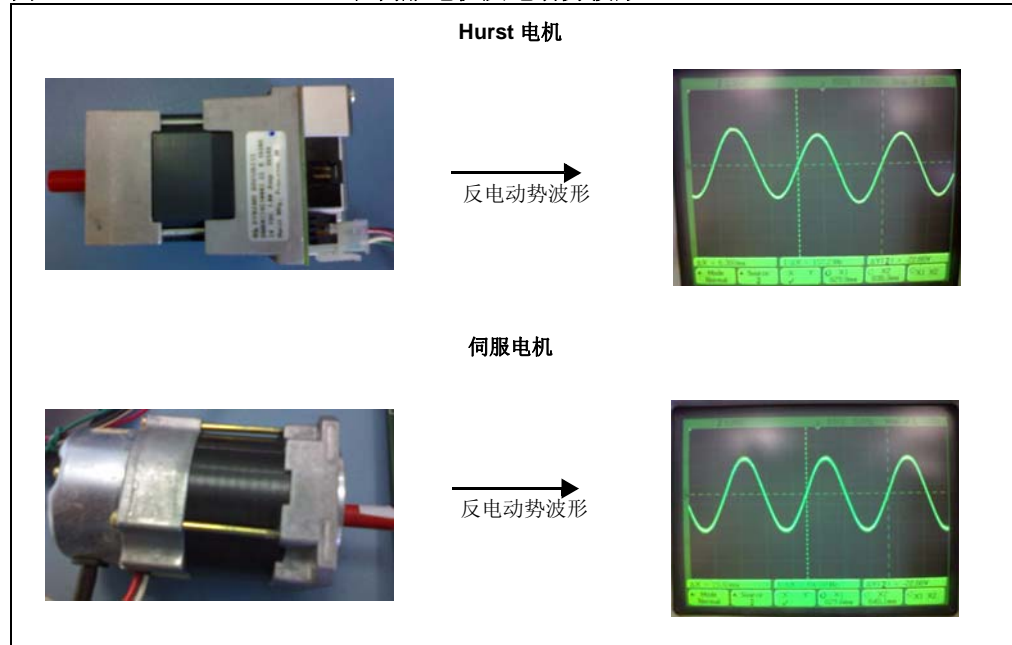
- Hurst 电机（部件编号：AC300020，可从 www.microchipdirect.com 购买）
电机及其反电动势波形如图 1-2 所示。该电机的额定值是 24V，5 对极，2500 RPM。关于该电机的其他技术规范，可访问 www.myhurst.com。

- 伺服电机

伺服电机及其反电动势波形如图 1-2 所示。电机的额定值是 24V，2 对极，3000 RPM。关于该电机的其他技术规范，可访问 www.shinano.com。

这些在 dsPICDEM MCLV 开发板上采用 FOC 算法成功测试的电机都是反电动势为正弦波的永磁同步电机。

图 1-2: HURST 和伺服电机反电动势波形



1.3 在 dsPICDEM™ MCHV 开发板上成功测试的电机

下列电机均在 dsPICDEM MCLV 开发板上成功通过测试：

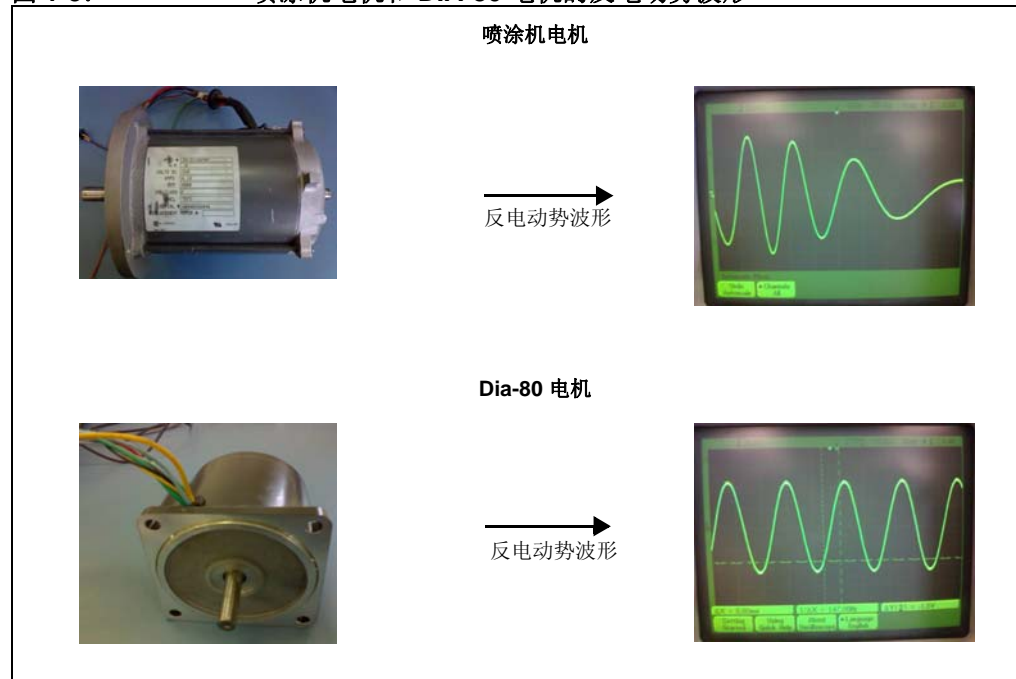
- 喷涂机电机（定制电机）

喷涂机应用的电机及其反电动势波形如图 1-3 所示。该电机额定值是 160 Vdc，3 对极，4000 RPM。

- Dia-80 电机

Dia-80 电机及其反电动势波形如图 1-3 所示。该电机的额定值是 220V，2 对极，3500 RPM。关于该电机的其他技术规范，请访问 www.eletechnic.com。

图 1-3: 喷涂机电机和 DIA-80 电机的反电动势波形



- Dia-YS50 电机

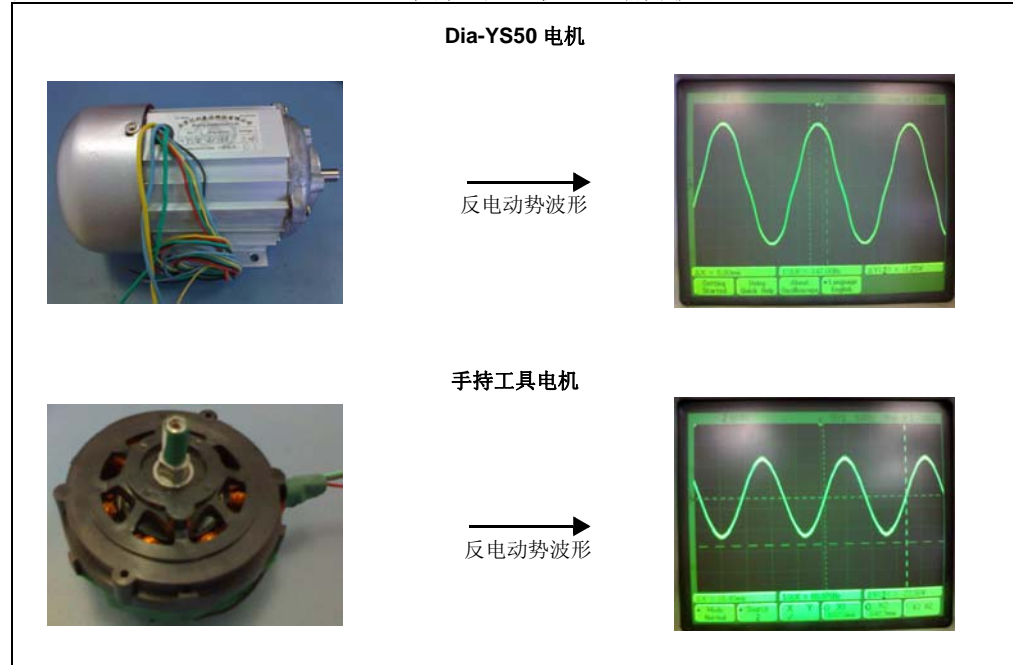
Dia-YS50 电机及其反电动势波形如图 1-4 所示。该电机额定值为 220V（有效值），2 对极，4000 RPM。

- 专业手持工具电机

图 1-4 中第二个电机即为专业手持工具电机应用及其反电动势波形。该电机额定值是 120V（有效值），两对极，17,000 RPM。

在 dsPICDEM MCHV 开发板上采用 FOC 算法成功通过测试的每一种电机皆为反电动势为正弦波的永磁同步电机。

图 1-4: DIA-YS50 和手持工具电机反电动势波形



1.4 不适合用 FOC 算法运行的电机

本节介绍的是无法在 FOC 算法下运行的电机。

图 1-5 所示为波形是梯形波的电机。反电动势是梯形波的无刷直流电机（Brushless Direct Current, BLDC）无法在 FOC 算法下运行。这些电机的反电动势波形不是正弦波，因此，它们不能运行至额定转速或无法在闭环控制时稳定运行。

图 1-5: 电机梯形波反电动势波形

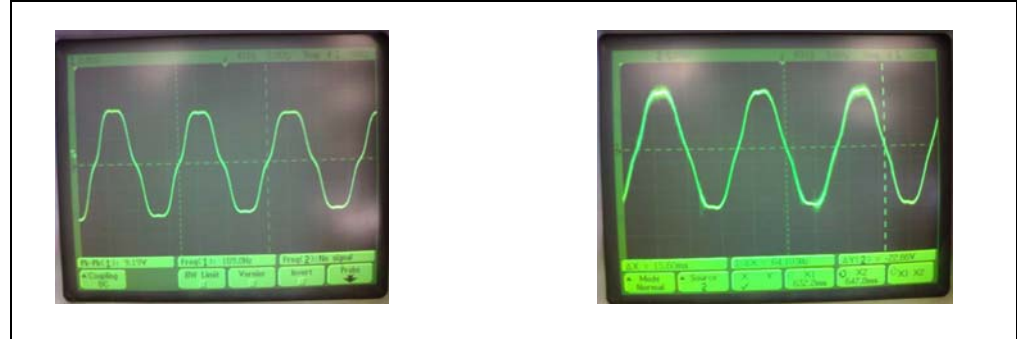
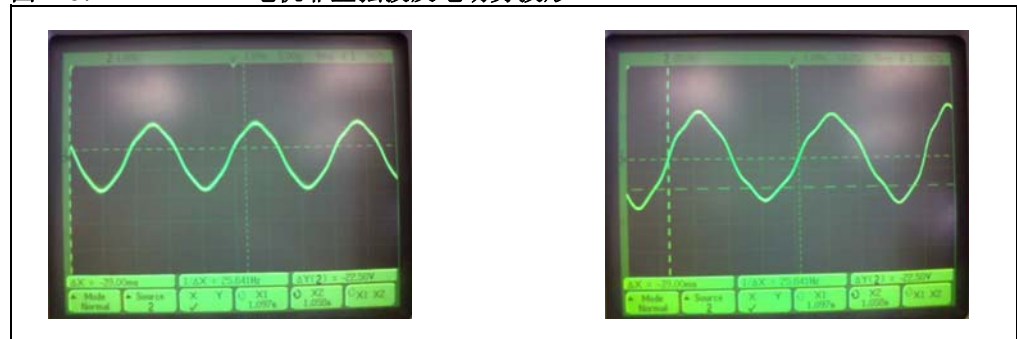


图 1-6 所示为非正弦波电机反电动势波形。反电动势波形不是正弦波的无刷直流电机无法在 FOC 算法下运行。

图 1-6: 电机非正弦波反电动势波形



1.5 硬件参数设置

硬件参数：RSHUNT、DIFFAMPGAIN 以及 VDD 都位于 UserParms.h 文件中。该文件中的参数根据硬件设计不同而有所变化。例 1-1 展示了 dsPICDEM MCLV 和 MCHV 开发板的硬件参数设置。

例 1-1： 硬件参数设置

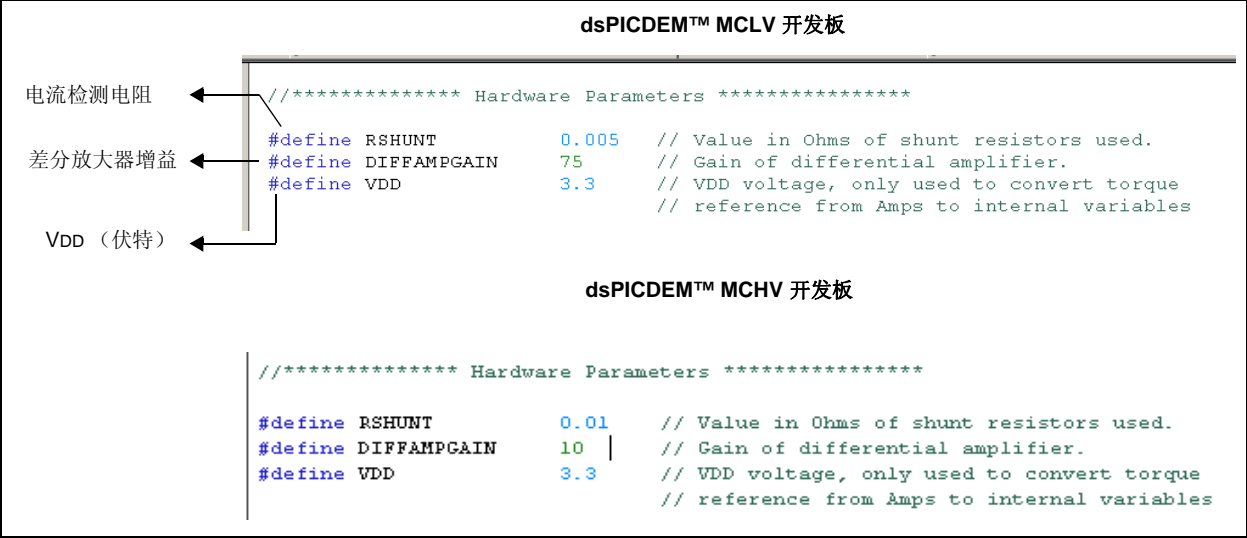
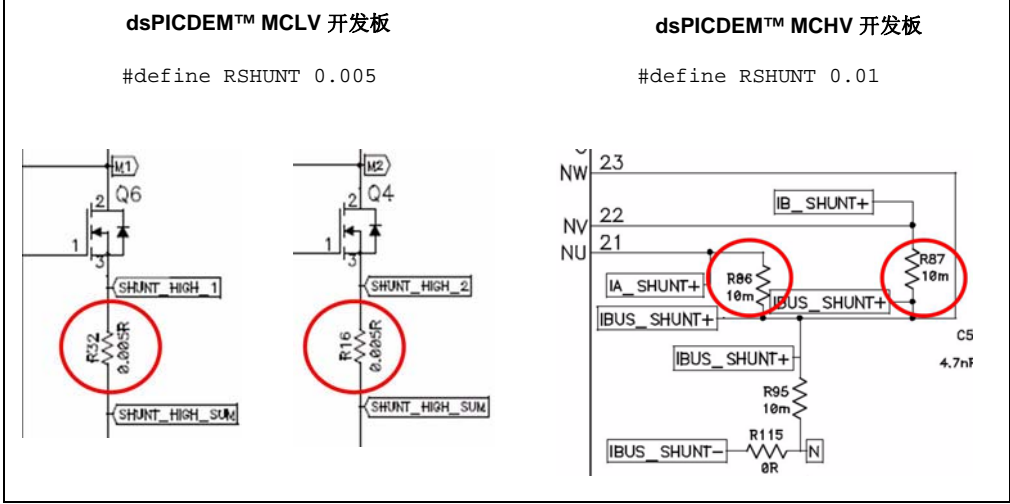


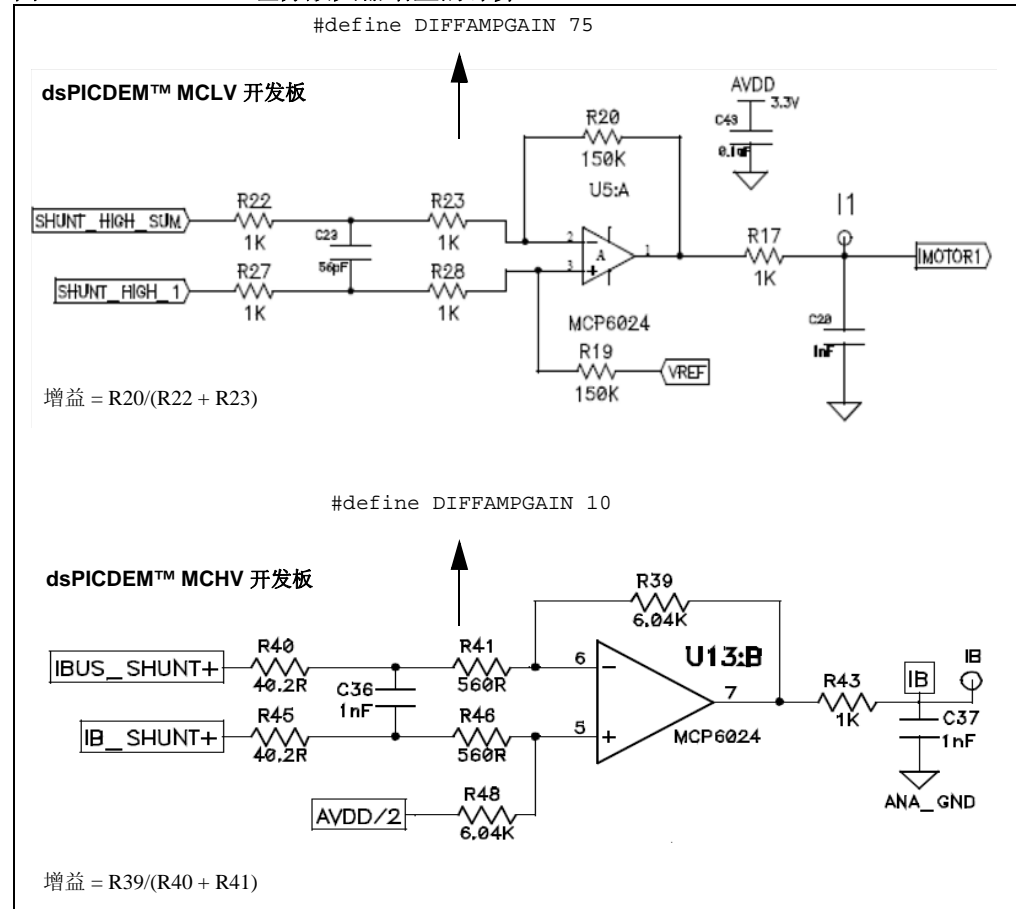
图 1-7 展示了如何在 dsPICDEM MCLV 和 MCHV 开发板中接入电流检测电阻以及其在 FOC 算法中使用的值。关于 dsPICDEM MCLV 和 MCHV 开发板原理图的信息，可参见“dsPICDEM™ MCLV Development Board User’s Guide”（DS70331）和“dsPICDEM™ MCHV Development System User’s Guide”（DS70605）。

图 1-7： 电流检测电阻连接



运算放大器用来放大电流检测信号。用户应根据硬件设定放大器增益值，为 UserParms.h 文件中的 DIFFFAMPGAIN 参数输入正确的值，如图 1-8 所示。

图 1-8: 差分放大器增益的计算



1.6 启动参数的设置

针对不同电机，启动参数值有所不同，其具体取值依赖于电机惯量、摩擦系数和负载转矩。用户必须微调这些值，使电机运行符合要求。启动参数的设置如例 1-2 所示。

例 1-2: 启动参数设置

```

//***** Start-Up Parameters *****

#define LOCKTIMEINSEC 0.25 // Initial rotor lock time in seconds
// Make sure LOCKTIMEINSEC*(1.0/LOOPTIMEINSEC)
// is less than 65535.
#define OPENLOOPTIMEINSEC 5.0 // Open loop time in seconds. This is the time that
// will take from stand still to closed loop.
// Optimized to overcome the brake inertia.
// (Magtrol AHB-3 brake inertia = 6.89 kg x cm2).
#define INITIALTORQUE 1.0 // Initial Torque demand in Amps.
// Enter initial torque demand in Amps using REFINAMPS()
// macro. Maximum Value for reference is defined by
// shunt resistor value and differential amplifier gain.
// Use this equation to calculate maximum torque in
// Amperes:
//
// Max REFINAMPS = (VDD/2)/(RSHUNT*DIFFAMPGAIN)
//
// For example:
//
// RSHUNT = 0.005
// VDD = 3.3
// DIFFAMPGAIN = 75
// Maximum torque reference in Amps is:
//
// (3.3/2)/(0.005*75) = 4.4 Amperes, or REFINAMPS(4.4)

#define ENDSPEEDOPENLOOP MINSPEEDINRPM

//***** Motor Parameters *****

#define POLEPAIRS 5 // Number of pole pairs

```

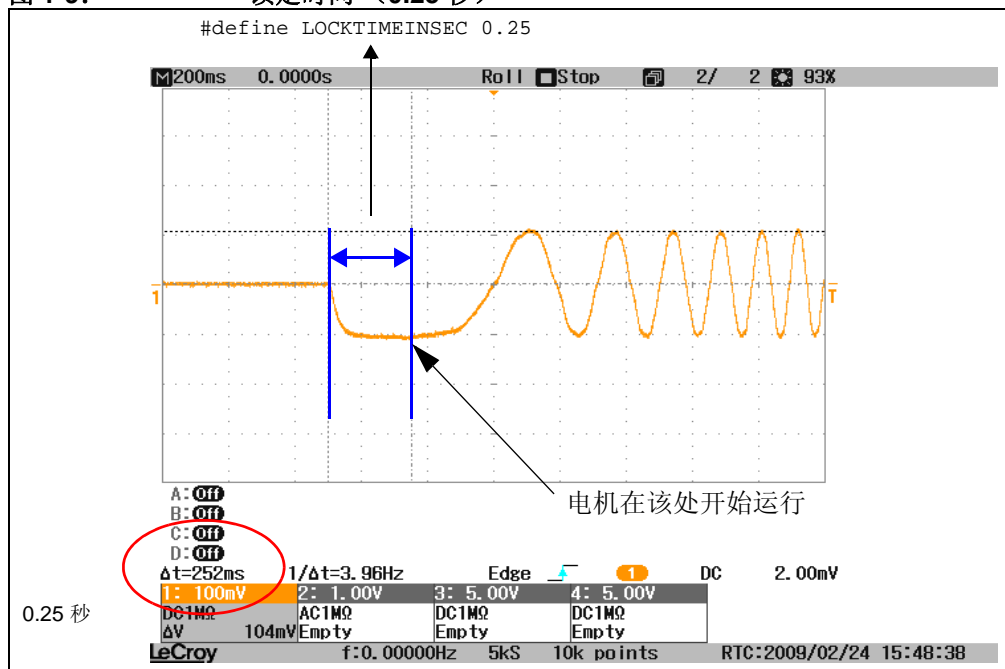
锁定时间 (秒)

开环斜坡上升时间 (秒)

起始转矩给定 (安培)

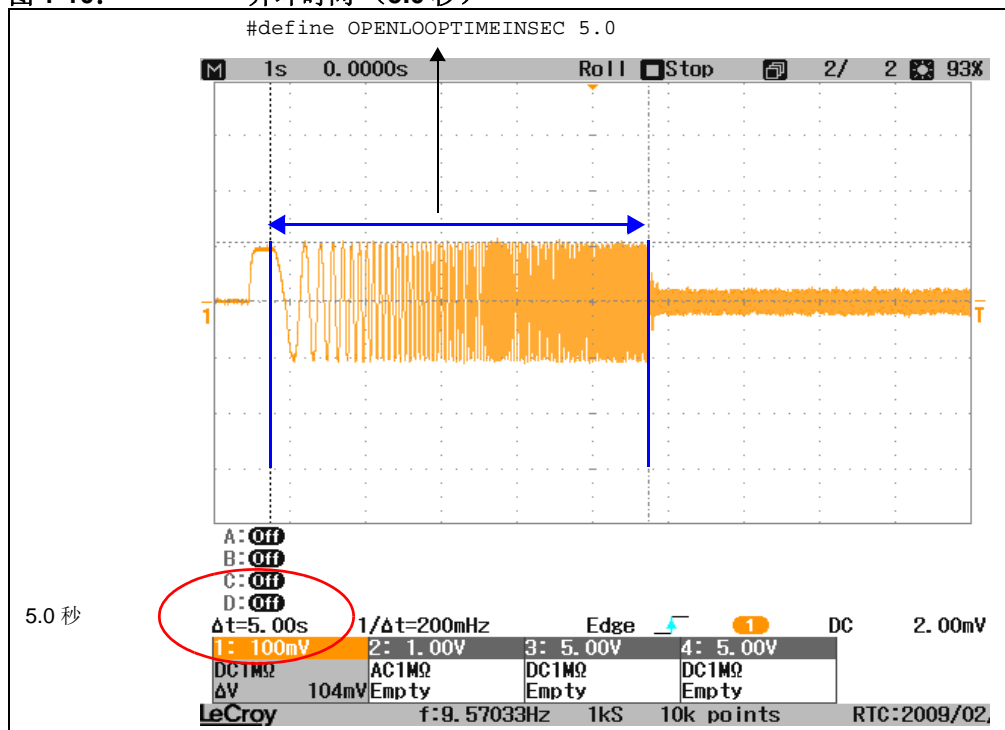
示波器所捕获的启动参数如图 1-9 至图 1-11。

图 1-9: 锁定时间 (0.25 秒)



锁定时间应足以让电机完成锁定并达到稳定转速。在锁定时间结束时转子不应出现振荡；如果转子振荡，就应增加锁定时间。

图 1-10: 开环时间 (5.0 秒)

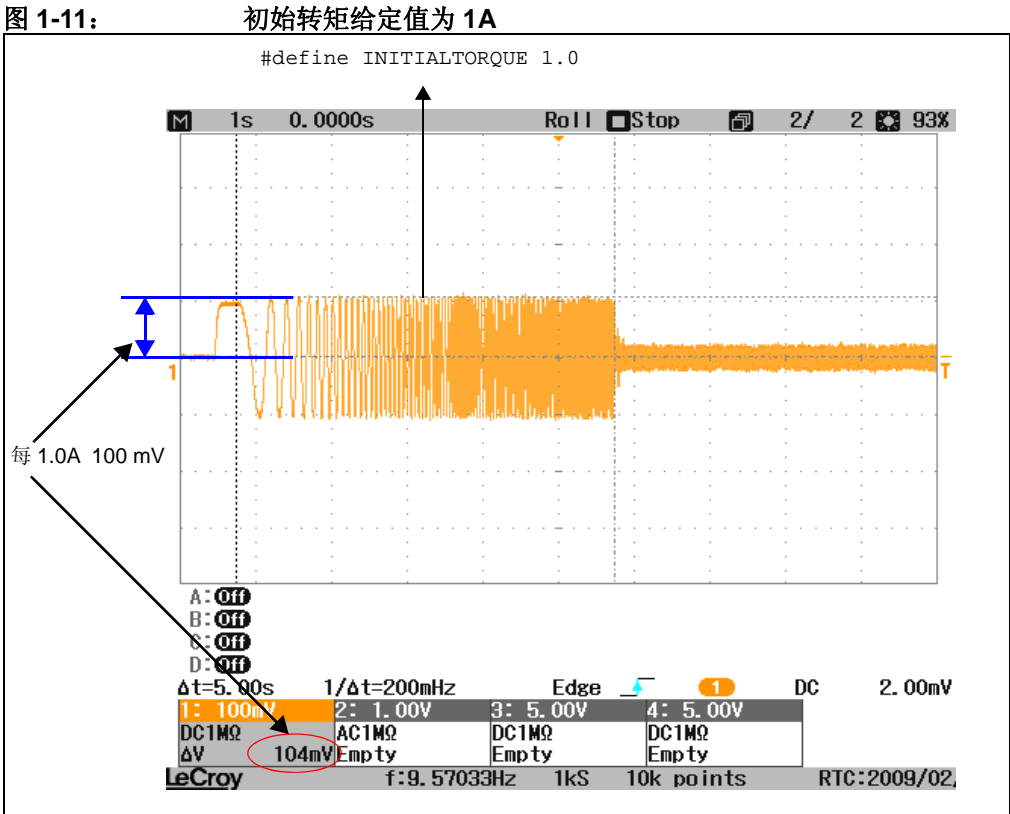


开环时间应足够长，使得转子能够跟随定子换相直至达到开环最终转速 (MINSPEEDINRPM)。如果没有达到，应增加开环时间。

为了让转子与旋转的定子磁通同步，可以把斜坡时间设置为一个更大值。当电机带负载运行时，需要对斜坡时间进行调整。

当电机转速斜坡上升到超过某个特定值时，若将初始转矩的给定值设置得低于要求值将会导致电机停转。在这种情况下，应当增加转矩的给定值。如果设置的转矩给定值高于要求值，将会导致电机的步进旋转。在这种情况下，就应减小转矩的给定值。将转矩给定值设置得很高可能会损坏电路板。

图 1-11 所示初始转矩给定值设置为 1A。



当电机开始运行时，初始转矩给定值应当足够大以带动负载。应确保硬件可支持所要求的转矩设置。启动时初始转矩给定值设置为 1.0，之后每次试启动都将这个值加倍直到斜坡时间结束时转子和定子磁场转速达到同步。

1.7 电机参数的设置

电机参数：POLEPAIRS、PHASERES、PHASEIND、NOMINALSPEEDINRPM 和 MINSPEEDINRPM 都位于 UserParms.h 文件中。电机参数依赖于电机的规范，当测试不同的电机时，应当更新电机参数值。电机参数的设置如例 1-3 所示。

例 1-3: 电机参数设置

极对数

相电阻

相电感

标称转速 (RPM)

最低期望转速 (RPM)

采用弱磁运行的最高期望转速 (RPM)

```
//***** Motor Parameters *****  
  
#define POLEPAIRS      5 // Number of pole pairs  
#define PHASERES      ((float)2.67) // Phase resistance in Ohms.  
#define PHASEIND      ((float)0.00192) // Phase inductance in Henrys.  
#define NOMINALSPEEDINRPM 3000 // Make sure NOMINALSPEEDINRPM generates a MAXOMEGA < 1.0  
// Use this formula:  
// MAXOMEGA = NOMINALSPEEDINRPM*SPEEDLOOPTIME*POLEPAIRS*2/6  
// If MAXOMEGA > 1.0, reduce NOMINALSPEEDINRPM or execute  
// speed loop faster by reducing SpeedLoopTime.  
// Maximum position of POT will set a reference of  
// NOMINALSPEEDINRPM.  
  
#define MINSPEEDINRPM 500 // Minimum speed in RPM. Closed loop will operate at this  
// speed. Open loop will transition to closed loop at  
// this minimum speed. Minimum POT position (CCW) will set  
// a speed reference of MINSPEEDINRPM  
  
#define FIELDWEAKSPEEDRPM 5500 // Make sure FIELDWEAKSPEEDRPM generates a MAXOMEGA < 1.0  
// Use this formula:  
// MAXOMEGA = FIELDWEAKSPEEDRPM*SPEEDLOOPTIME*POLEPAIRS*2/6  
// If MAXOMEGA > 1.0, reduce FIELDWEAKSPEEDRPM or execute  
// speed loop faster by reducing SpeedLoopTime.  
// Maximum position of POT will set a reference of  
// FIELDWEAKSPEEDRPM.
```

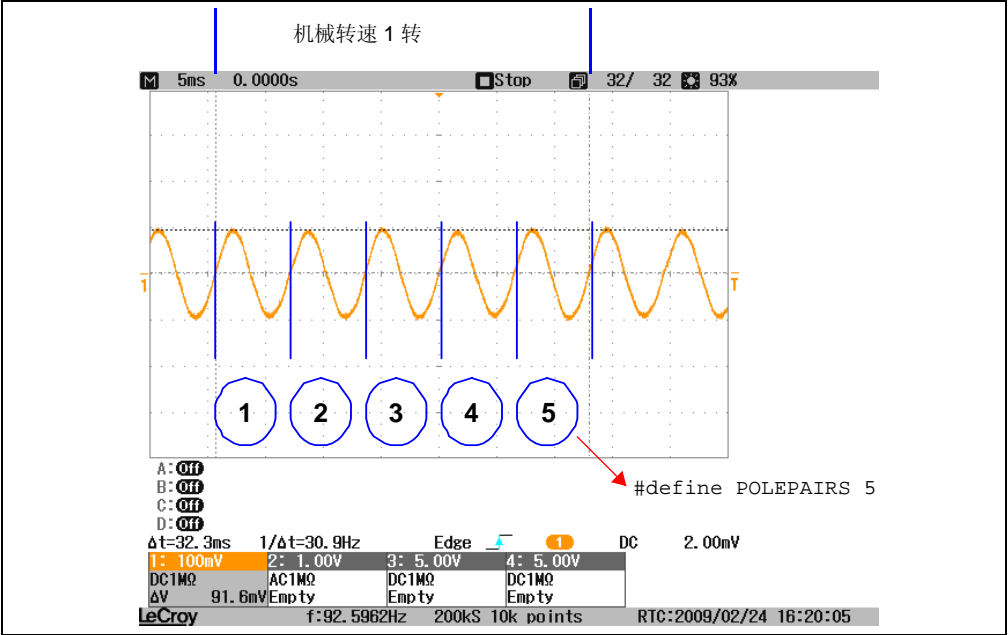
电机的极对数可从电机规范表中获取。也可通过以恒定的转速驱动电机（例如使用另一台电机拖动）并测量反电动势的频率获得。使用测量得到的频率值，经过公式 1-1 的计算即可得出极对数。

公式 1-1:

$$PolePair = (60 \bullet Frequency\ in\ Hertz)/(Speed\ in\ RPM)$$

机械转速和极数的关系如图 1-12 所示。

图 1-12: 机械转速和极数的关系



电机的相电阻和相电感的测量方法如下：

- 相电阻 —— 用万用表测量永磁同步电机两相绕组间的直流电阻值。将测得的电阻值代入下列公式：

$$PHASERES = \text{电阻测量值} / 2$$

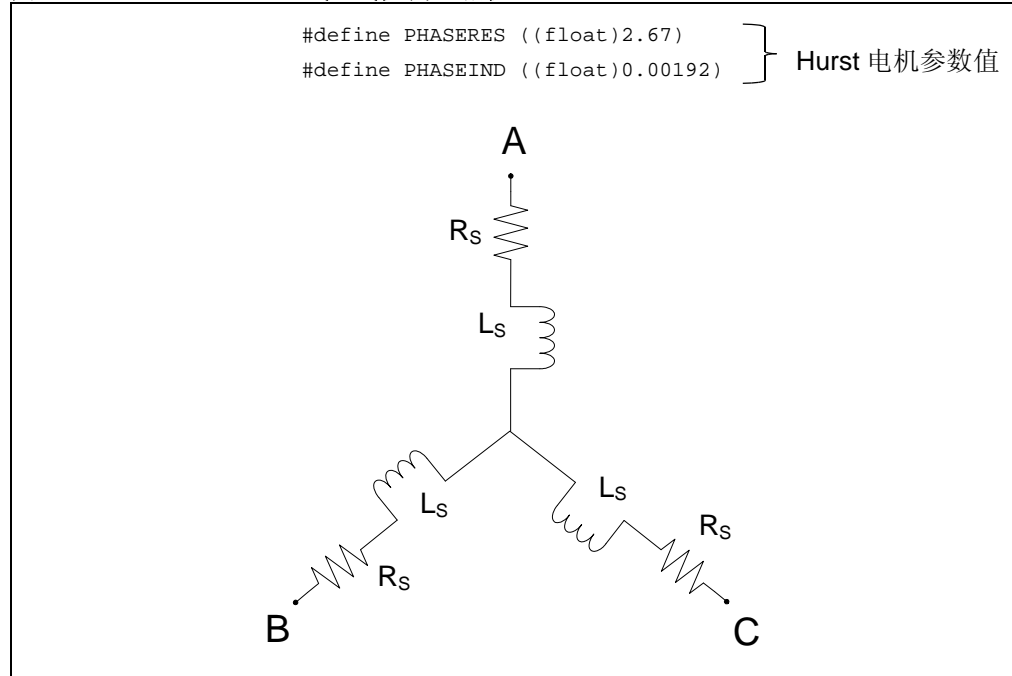
- 相电感 —— 使用 LCR 表测量永磁同步电机 1 kHz 时两相绕组间的电感。将所测得的电感值代入下面的公式：

$$PHASEIND = \text{电感测量值} / 2$$

这些值也可以在制造商的电机规范中找到。

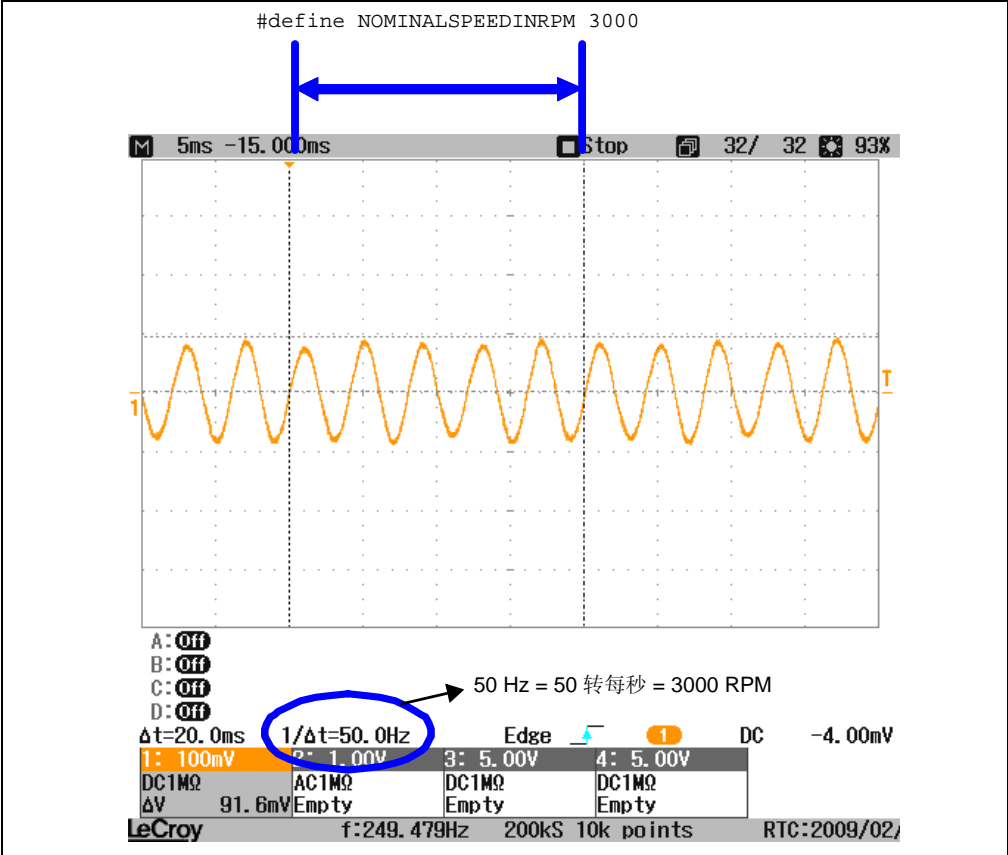
测量点如图 1-13 所示。

图 1-13: 通过线 - 线值测量相值



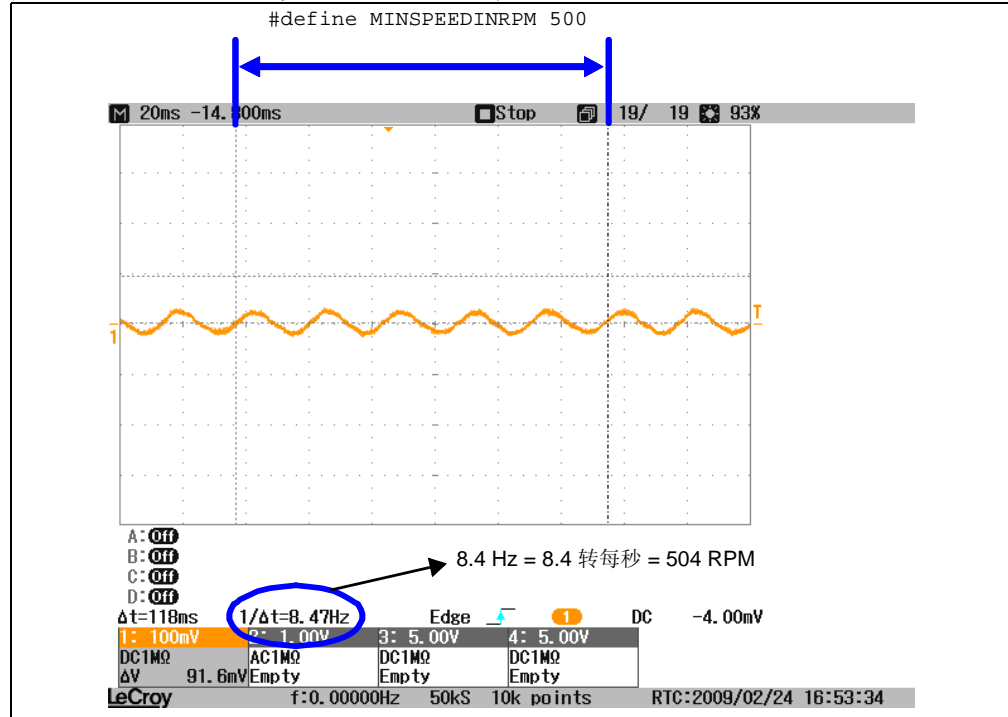
电机的额定转速可从电机规范表中获得。图 1-14 所示为电机运行在标称转速 3000 RPM 时的波形。

图 1-14: 电机以 3000 RPM 运行



MINSPEEDINRPM 是电机采用 FOC 算法运行能符合要求的最低转速。该参数可能会根据电机种类和负载转矩的不同而有所变化。图 1-15 所示为电机运行在最低转速 500 RPM 时的波形。最初，可将该值设置为电机额定转速的 10% 到 15% 之间，之后微调这个值。

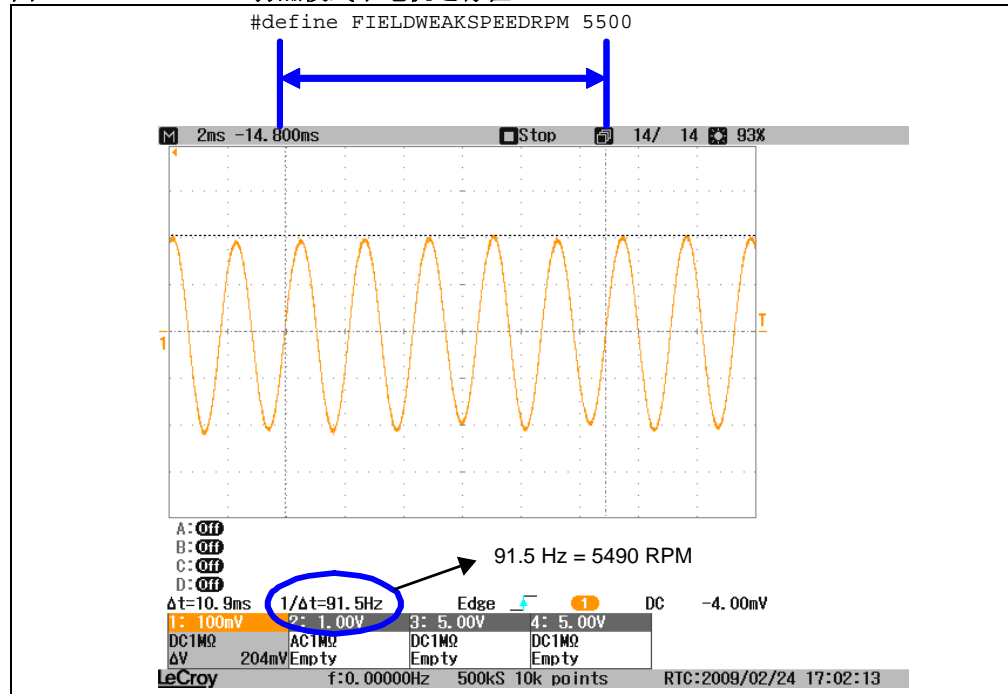
图 1-15: 电机以 500 RPM 运行



FIELDWEAKSPEED 是电机的最大期望转速，该速度下电机应运行在弱磁模式。如果不要电机弱磁运行，设置 FIELDWEAKSPEED 的值与 NOMINALSPEEDINRPM 相同。

图 1-16 所示为弱磁模式下电机转速为 5500 RPM 时的波形。

图 1-16: 弱磁模式下电机运行在 5500 RPM



1.8 PMSM FOC 调整步骤（开环）

第一步是禁止从开环过渡到闭环模式，这样用户可以通过使用示波器或数据监视控制界面（DMCI）观测电机电流波形。

通过注释例 1-4 中高亮显示的行，电机将保持开环运行状态，并允许用户对斜坡参数进行分析。

例 1-4: 电机开环运行设置

```

}

void CalculateParkAngle(void)
{
    smc1.Ialpha = ParkParm.qIalpha;
    smc1.Ibeta  = ParkParm.qIbeta;
    smc1.Valpha = ParkParm.qValpha;
    smc1.Vbeta  = ParkParm.qVbeta;

    SMC_Position_Estimation(&smc1);

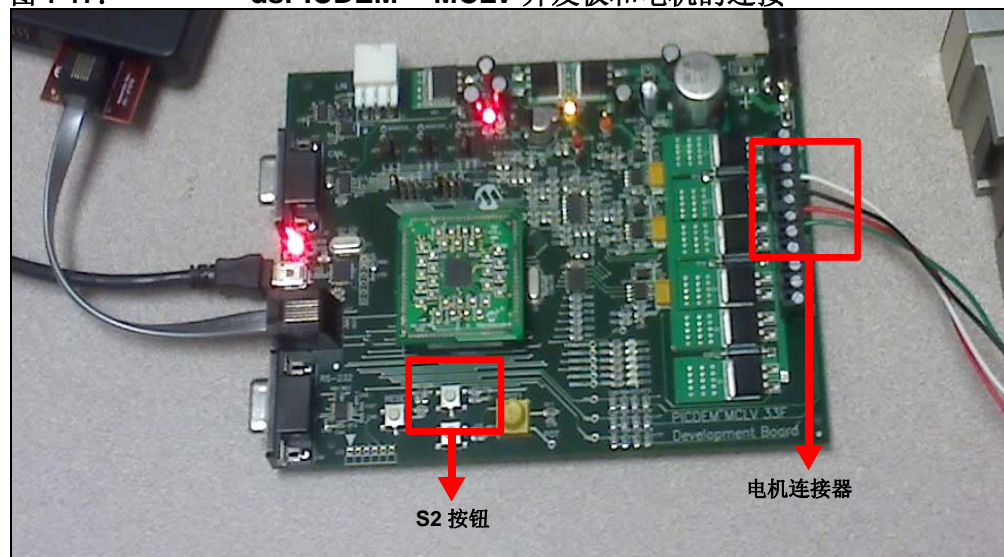
    if(uGF.bit.OpenLoop)
    {
        if (Startup_Lock < MotorParm.LockTime)
            Startup_Lock += 1; // This variable is incremented until
                               // lock time expires, then the open loop
                               // ramp begins
        else if (Startup_Ramp < MotorParm.EndSpeed)
            // Ramp starts, and increases linearly until EndSpeed is reached.
            // After ramp, estimated theta is used to commutate motor.
            Startup_Ramp += DELTA_STARTUP_RAMP;
        else
        {
            // This section enables closed loop, right after open loop ramp.
            // uGF.bit.ChangeMode = 1;
            // uGF.bit.OpenLoop = 0;
            // Difference between force angle and estimated theta is saved,
            // so a soft transition is made when entering closed loop.
            Theta_error = ParkParm.qAngle - smc1.Theta;
        }
    }
}

```

1.8.1 开环启动 dsPICDEM MCLV 开发板

1. 按图 1-17 所示把电机各相与 dsPICDEM MCLV 开发板连接。

图 1-17: dsPICDEM™ MCLV 开发板和电机的连接

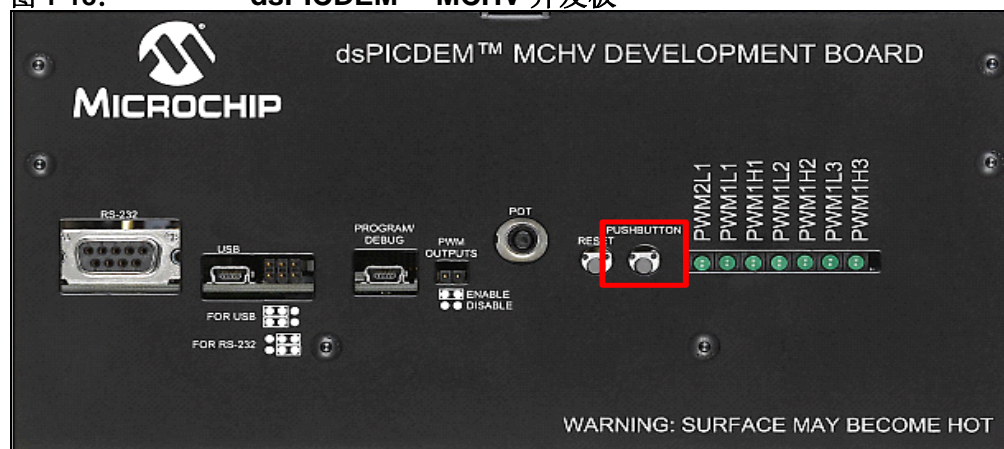


2. 使用 AN1078 对应的代码对 dsPIC® DSC 进行编程。
3. 按下 S2 按钮使电机开环运行。

1.8.2 开环启动 dsPICDEM MCHV 开发板

1. 将电机各相与 dsPICDEM MCHV 开发板连接。
2. 使用 AN1078 对应的代码对 dsPIC DSC 进行编程。
3. 按下 PUSHBUTTON 按钮使电机开环运行，如图 1-18 所示。

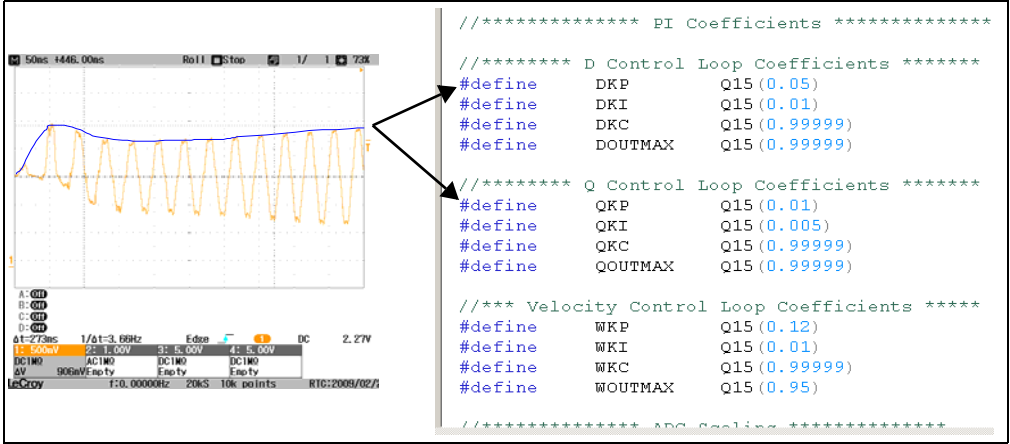
图 1-18: dsPICDEM™ MCHV 开发板



电机应处于开环状态并保持固定的电流幅值。

如果开环启动时电流振荡（见图 1-19），调整 Id 和 Iq 控制器的 PI 系数来消除振荡。减小比例增益（Kp）并确保积分增益（Ki）比 Kp 小 5 到 10 倍。图 1-19 显示了电流振荡和相应的 PI 系数值。

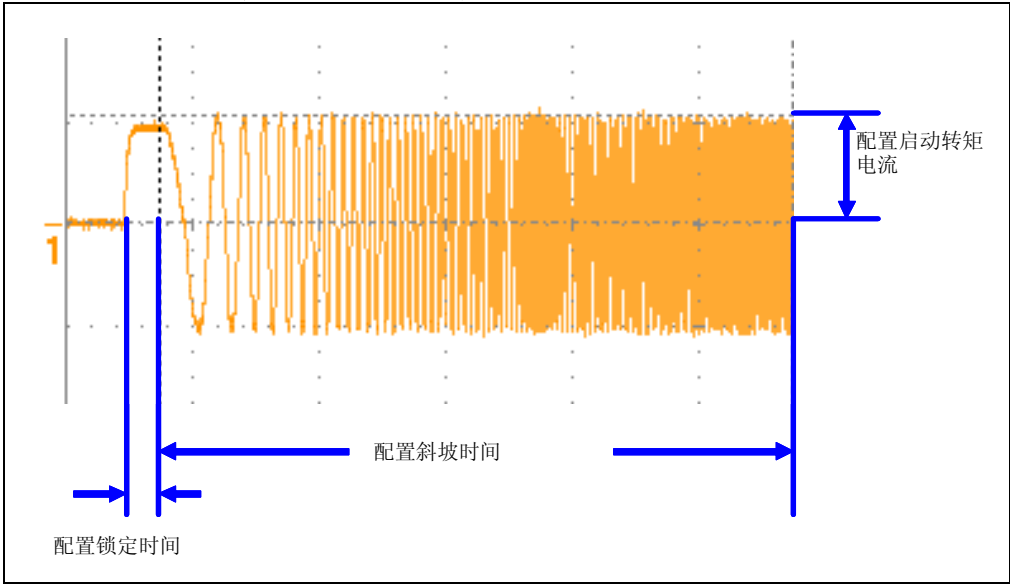
图 1-19: 电流波形的振荡



在开环斜坡上升过程中如果电机停止运行，用户应该增加斜坡上升时间。一旦电机可以运行到斜坡时间结束时，应略微增加初始转矩电流并减小斜坡时间直到电机运行符合启动要求。如果转子在电机通电时发生振荡并引起电机反转，则需增加锁定时间。

图 1-20 所示为电机开环运行时的电流波形。锁定时间、斜坡时间和转矩给定值在电流波形中都有所显示。

图 1-20: 完成调整的开环电机电流波形



使能数据监视和控制界面（DMCI）/ 实时数据监视（RTDM）变量。启用 Ialpha、估计的 Ialpha、Ibeta 和估计的 Ibeta 以确保滑模控制器（SMC）能够跟踪测量电流。例 1-5 给出了实现用 RTDM/DMCI 查看变量的代码设置。

例 1-5: 为用 RTDM 查看变量进行的代码设置

```

//***** Real Time Data Monitor, RTDM *****

#define RTDM          // This definition enabled Real Time
                      // to handle RTDM protocol, and arr
                      // information in real time

#ifdef RTDM
#define DATA_BUFFER_SIZE 150 //Size in 16-bit Words
#define SNAPDELAY      10 // In number of PWM Interrupts
#define SNAP1          smc1.Ialpha
#define SNAP2          smc1.Ibeta
#define SNAP3          smc1.EstIalpha
#define SNAP4          smc1.EstIbeta
#endif

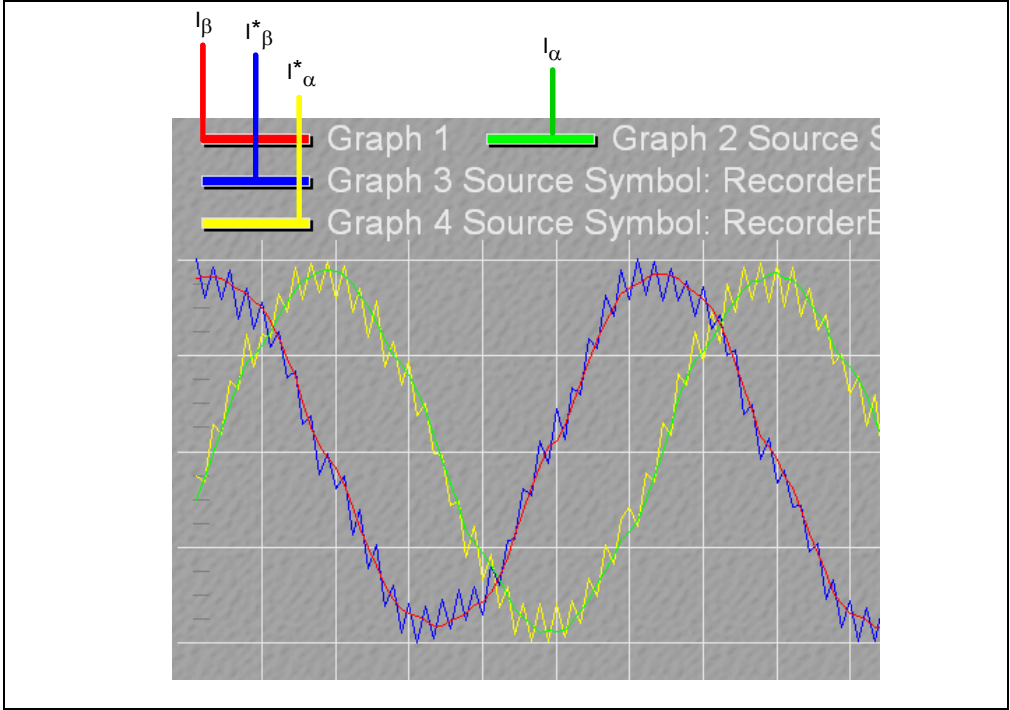
```

在这里输入变量名

运行电机并通过 DMCI 捕获数据。电流的估计值必须跟踪测量值，电流估计值的纹波应该在测量电流峰峰 - 值的 10% 到 30% 之间。

实际电流（红线和绿线）和估计电流（蓝线和黄线）的波形如图 1-21 所示。估计电流的纹波值应该在测得电流的 10% 到 30% 之间。否则，调整 D 轴和 Q 轴的 PI 增益。

图 1-21: 实际和估计的电流波形



启用 Ialpha、Ealpha、EalphaFinal 和 Theta 来检查位置估计结果。例 1-6 显示了如何使用 RTDM 工具来设置代码以实现不同变量的查看。

例 1-6: 设置代码来实现用 RTDM 进行变量查看

```
//***** Real Time Data Monitor, RTDM *****

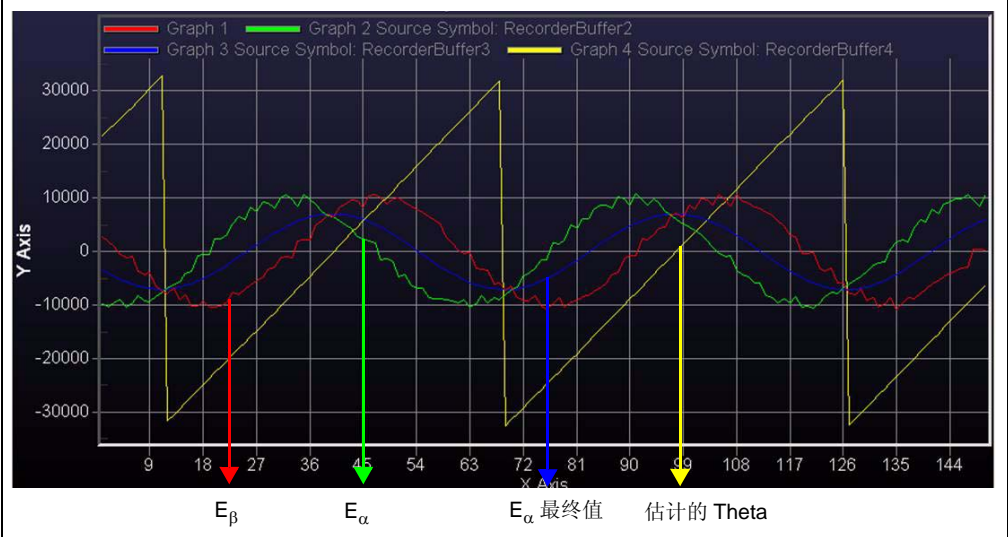
#define RTDM // This definition enabled Real Time Data Monitor, UART interrupts
              // to handle RTDM protocol, and array declarations for buffering
              // information in real time

#ifdef RTDM
#define DATA_BUFFER_SIZE 150 //Size in 16-bit Words
#define SNAPDELAY 10 // In number of PWM Interrupts
#define SNAP1 smc1.Ialpha
#define SNAP2 smc1.Ealpha
#define SNAP3 smc1.EalphaFinal
#define SNAP4 smc1.Theta
#endif
```

图 1-22 显示了四个不同波形间的关系。相位差异是由于每个信号正交特性或滤波器的相位延迟所造成。不同的波形如下所示：

- 绿色和红色分别是 Ealpha 和 Ebeta 波形，它们相位相差 90°。
- 蓝色波形是 EalphaFinal。EalphaFinal 和 EbetaFinal（图中没有画出）相位相差 90°。Ealpha 和 EalphaFinal 相位相差 45°。
- 黄色波形是估计的 Theta 波形。

图 1-22: 不同波形的关系



确保最终反电动势没有噪声和直流偏移。Theta 估计值是利用 CORDIC 函数由 EalphaFinal 和 EbetaFinal 计算所得。EalphaFinal 和 EbetaFinal 的波形应具有较小的噪声，这样才能估计出较为理想的 Theta 波形。

接下来，应对 SMC 参数进行修改。所有的控制器参数都在 UserParms.h 文件中。例 1-7 所示为 SMC 的增益和线性区域的设置。

例 1-7: 滑模控制器的设置

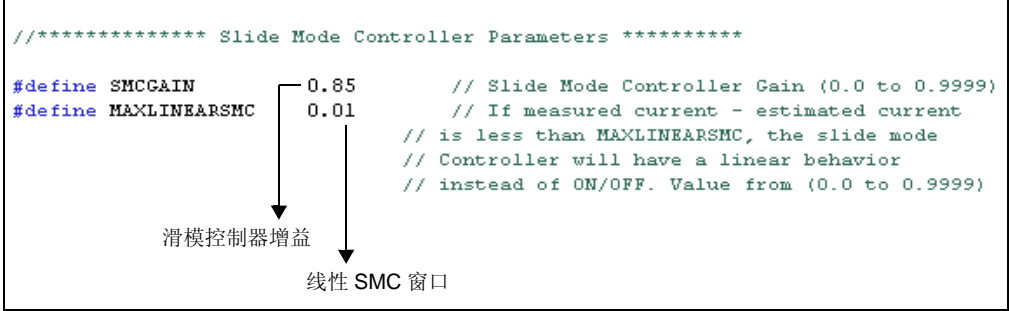


图 1-23 所示的 SMC 框图分别将增益和线性区域设置为 0.85 和 0.01。

图 1-23: 滑模控制器框图

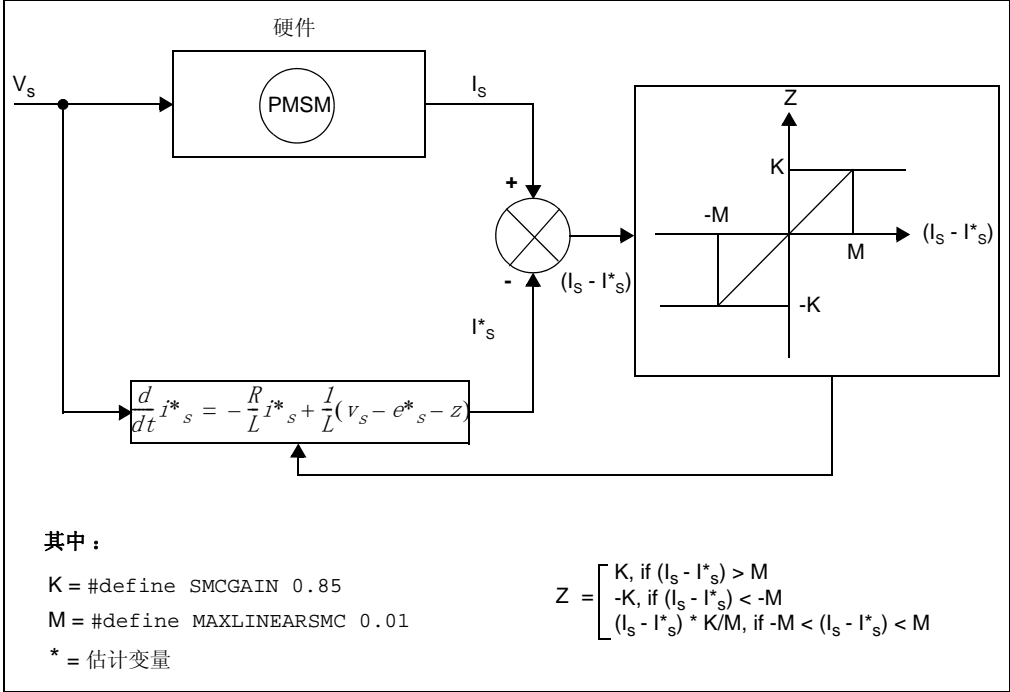
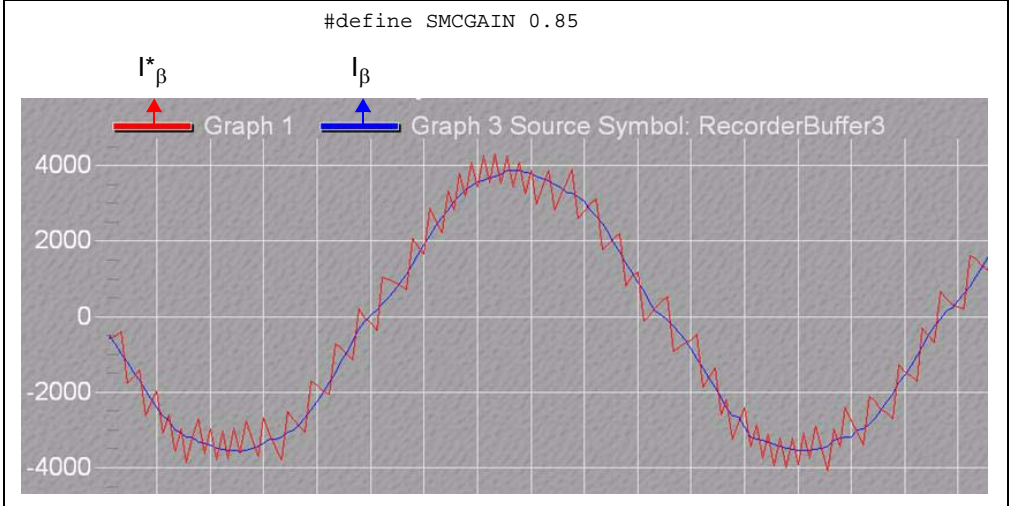


图 1-24 所示为估计电流波形与实际电流波形的对比。

图 1-24: 估计电流与实际电流



电流的估计值必须跟踪测量值，应对估计电流纹波值进行调整使其位于测量电流峰 - 峰值的 10% 到 30% 之间。

将 MAXLINEARSMC 的值设为 0.010 可以更平稳地追踪相同峰 - 峰值的估计纹波。图 1-25 所示为不同 MAXLINEARSMC 值时的估计电流波形。最佳的 MAXLINEARSMC 值将会显著减小估计电流的纹波峰值。

图 1-25: 滑模估计器输出

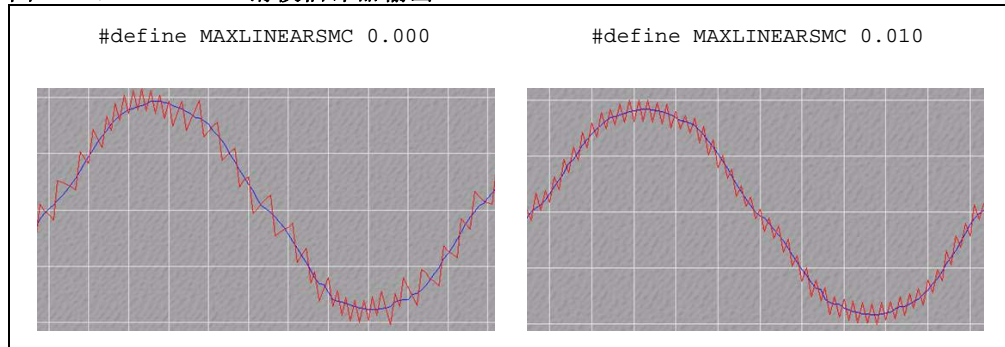
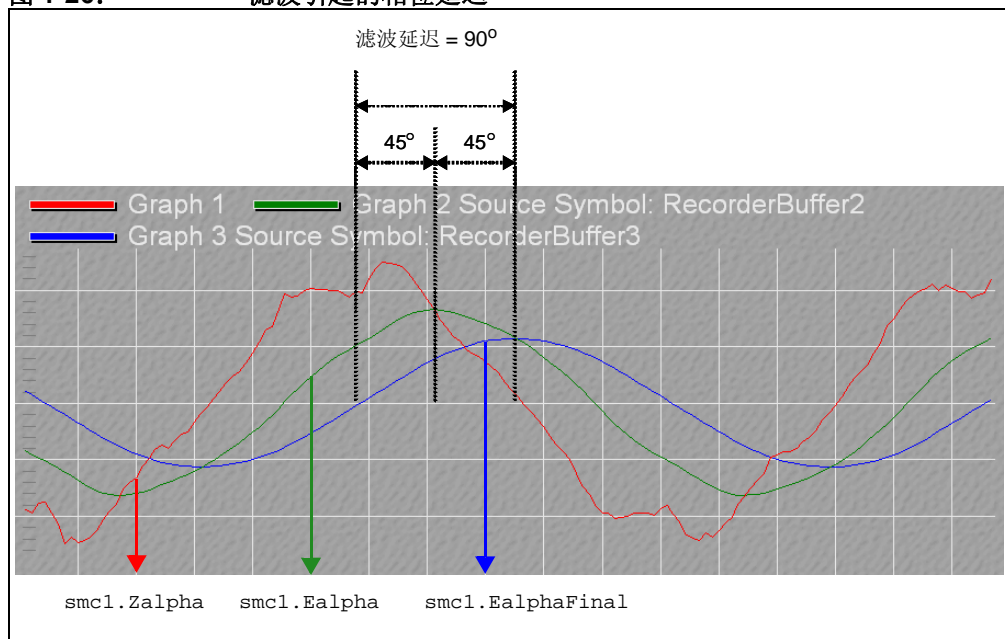


图 1-26 所示为滤波造成的相位延迟。不同波形的描述如下：

- smc1.Zalpha 是实际信号。
- smc1.Ealpha 信号是由 smc1.Zalpha 经截止频率等于输入频率的单极点数字低通滤波器滤波获得。因此，两个信号间有 45° 相位差。
- smc1.EalphaFinal 信号是由 smc1.Ealpha 经截止频率等于输入频率的单极点数字低通滤波器滤波获得。因此，两个信号间具有 45° 相位差。
- 最后，信号 smc1.Zalpha 和 smc1.EalphaFinal 之间总共具有 90° 相位差。

图 1-26: 滤波引起的相位延迟



1.9 PMSM FOC 调整步骤（闭环模式）

通过取消例 1-8 中高亮语句的注释，可以启动电机闭环控制。开环转速斜坡上升后，电机将使用估计的 Theta 实现闭环模式运行。

例 1-8: 启用闭环模式

```
void CalculateParkAngle(void)
{
    smc1.Ialpha = ParkParm.qIalpha;
    smc1.Ibeta = ParkParm.qIbeta;
    smc1.Valpha = ParkParm.qValpha;
    smc1.Vbeta = ParkParm.qVbeta;

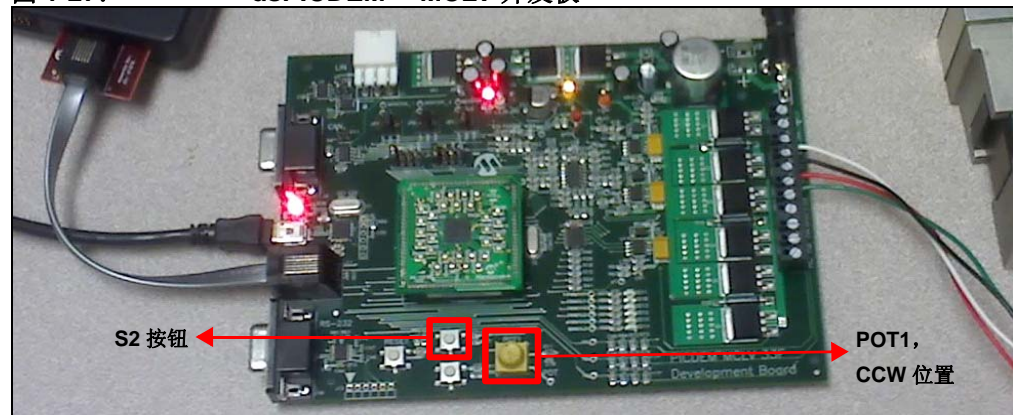
    SMC_Position_Estimation(&smc1);

    if(uGF.bit.OpenLoop)
    {
        if (Startup_Lock < MotorParm.LockTime)
            Startup_Lock += 1; // This variable is incremented until
                               // lock time expires, then the open loop
                               // ramp begins
        else if (Startup_Ramp < MotorParm.EndSpeed)
            // Ramp starts, and increases linearly until EndSpeed is reached.
            // After ramp, estimated theta is used to commutate motor.
            Startup_Ramp += DELTA_STARTUP_RAMP;
        else
        {
            // This section enables closed loop, right after open loop ramp.
            uGF.bit.ChangeMode = 1;
            uGF.bit.OpenLoop = 0;
            // Difference between force angle and estimated theta is saved,
            // so a soft transition is made when entering closed loop.
            Theta_error = ParkParm.qAngle - smc1.Theta;
        }
        ParkParm.qAngle += (int) (Startup_Ramp >> 16);
    }
    else
```

1.9.1 闭环启动 dsPICDEM MCLV 开发板

1. 逆时针（CCW）旋转电位器（POT1）来设置最小转速。
2. 使用更新后的软件程序对 dsPIC DSC 编程。
3. 按下 S2 按钮使电机开环运行，如图 1-27 所示。电机转速经斜坡上升后，电机将在 FOC 算法控制下自动进入闭环模式。

图 1-27: dsPICDEM™ MCLV 开发板



电位器用作转速的参考输入，S2 按钮控制电机的运行 / 停止。

1.9.2 闭环启动 dsPICDEM MCHV 开发板

1. 逆时针（CCW）旋转电位器（POT）来设置最小转速。
2. 用更新后的软件程序对 dsPIC DSC 编程。
3. 按下 PUSHBUTTON 按钮使电机开环运行。斜坡上升后，电机将在 FOC 算法控制下自动进入闭环模式。

图 1-28 中所示的电位器用作转速参考输入，按钮开关控制电机的运行 / 停止。

图 1-28: dsPICDEM™ MCHV 开发板

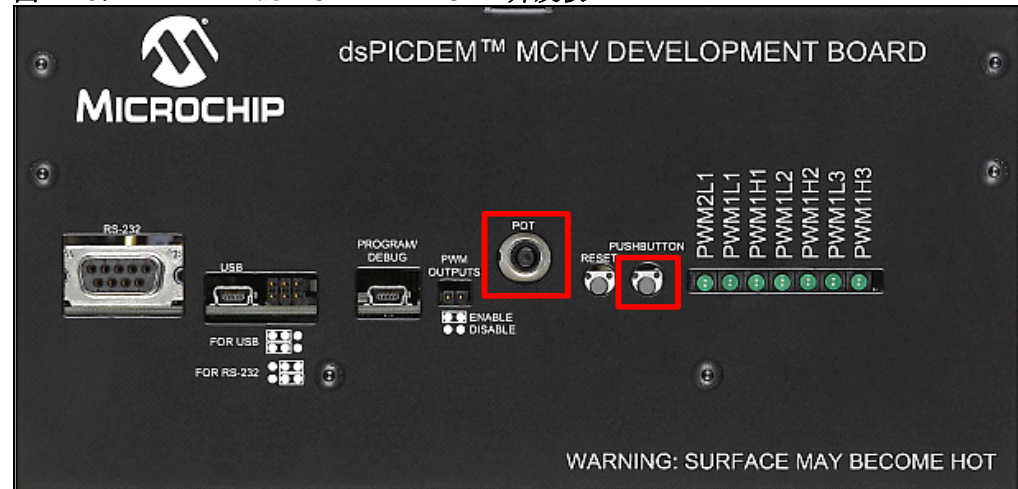
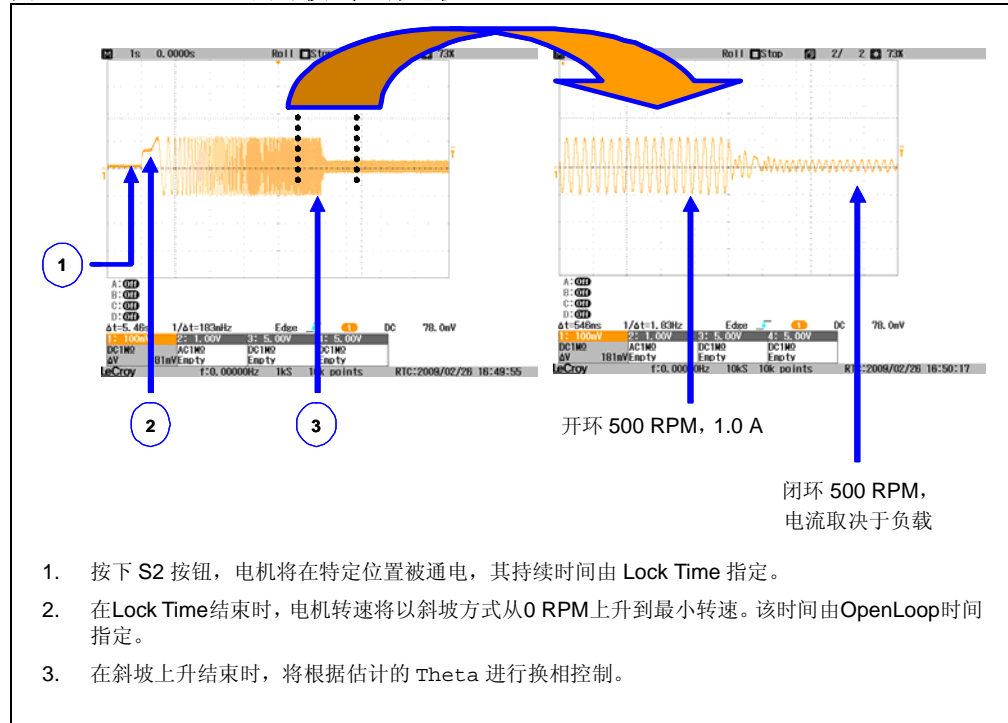


图 1-29 说明了闭环运行电机应遵循的步骤。第一步，按下 S2 按钮，电机自锁。第二步，开始电机转速斜坡上升且频率线性增长。第三步，斜坡上升结束且电机开始闭环运行。在斜坡上升过程中，计算估计的 Theta 值并在过渡到闭环模式的过程中使用该值。

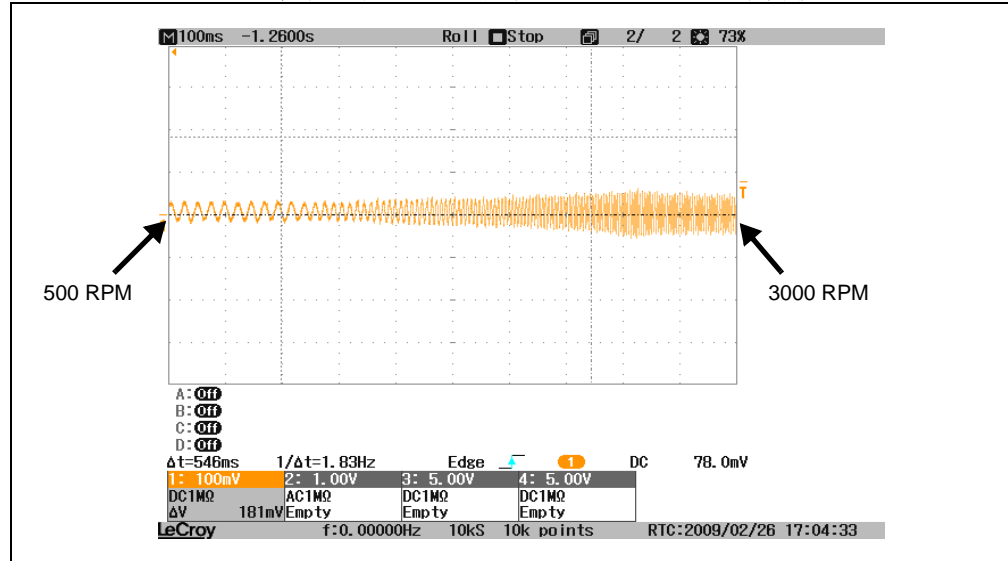
图 1-29: 闭环模式运行电机



1.9.3 闭环模式下调整 Id 和 Iq 的 PI 增益

通过顺时针 (CW) 旋转电位器 (POT) 增加转速参考值来验证电流的稳定性。电流应稳定，如果需要，调整 Id 和 Iq 轴的 PI 增益和 SMC 估计器的增益。电机转速从 500 到 3000 RPM 的反电动势波形如图 1-30 所示。

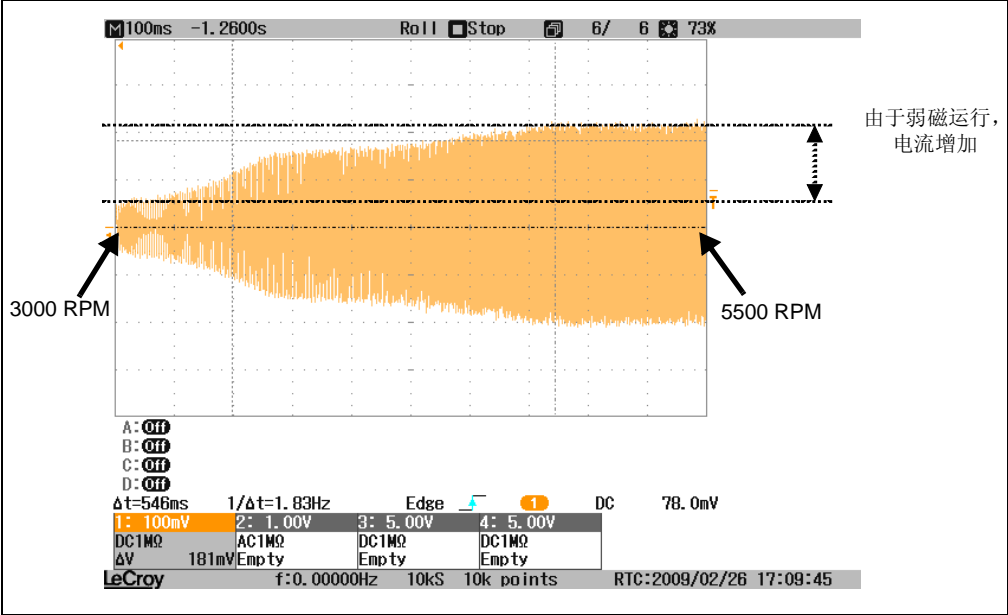
图 1-30: 电机转速从 500 上升到 3000 RPM 的反电动势波形



1.9.4 调整瞬态响应

图 1-31 显示如何用 dsPICDEM MCLV 开发板检测电机的瞬态响应和 FOC 算法。按下 S3按钮，电机给定转速加倍，通过示波器可以观察FOC算法下的响应。对于dsPICDEM MCHV 开发板，不可进行该步操作，因为它没有给定转速加倍开关。

图 1-31: 电机的瞬态响应



1.9.5 软件电流增益调整

如例 1-9 所示，根据硬件设计调整软件电流增益。根据硬件设计修改 UserParms.h 文件中的 ADC 量程变换参数（DQKA 和 DQKB）。如果 ADC 结果是小数，可通过修改量程变换参数和硬件设置来实现ADC的满量程读数，其分辨率为最大输入电流的 $\pm 0.5\%$ 之内。

例 1-9: 电流信号的软件增益

```

//***** ADC Scaling *****
// Scaling constants: Determined by calibration or hardware design.
#define DQK Q15((OMEGA10 - OMEGA1)/2.0) // POT Scaling
#define DQKA Q15(0.5) // Current feedback software gain
#define DQKB Q15(0.5) // Current feedback software gain

```

1.9.6 转矩模式下的调整

如果电机的开环性能良好，但在闭环运行时不能自锁，可尝试在转矩模式下运行电机。如例 1-10 所示，为了让电机在转矩模式下运行，取消 UserParms.h 文件中对 TORQUEMODE 的定义的注释。转矩模式省略了速度 PI 环，将电位器的输入作为转矩设置。转矩模式的微调是指在闭环模式下对 Id 和 Iq 的 PI 增益进行调整以获得平滑的电流控制。一旦微调完成，就通过注释 TORQUEMODE 定义使电机在 Speed 模式下运行。

例 1-10: 转矩模式下运行电机的代码设置

```
//***** Optional Modes *****  
#define TORQUEMODE  
//#define ENVOLTRIPPLE  
  
//***** PI Coefficients *****
```

1.9.7 电机电阻和电感参数的换算

对于某些电机，只有根据硬件的最大电流检测能力（ I_{max}/V_{rated} ）选择电机相电阻和相电感，才能实现闭环运行。dsPICDEM MCLV 和 MCHV 开发板的 I_{max} 值分别为 4.4A 和 16.5A。电机的额定电压可查询电机的规范表。

如果电机闭环运行时仍不能自锁，将相电阻和相电感的电压电流值换算至最大。MCLV 和 MCHV 开发板的最大电流计算公式分别如公式 1-2 和公式 1-3 所示。

公式 1-2: dsPICDEM™ MCLV 开发板

$$R_{shunt} = 0.005\Omega, \quad V_{DD} = 3.3V, \quad \text{增益} = 75$$
$$\text{最大电流} = (3.3/2)/(0.005 * 75) = 4.4A$$

公式 1-3: dsPICDEM™ MCHV 开发板

$$R_{shunt} = 0.01\Omega, \quad V_{DD} = 3.3V, \quad \text{增益} = 10$$
$$\text{最大电流} = (3.3/2)/(0.01 * 10) = 16.5A$$

对 dsPICDEM MCLV 开发板和 24V 电机的相电阻和相电感的换算如例 1-11 所示。

对于 dsPICDEM MCHV 开发板，用 16.5A 替代最大电流，而电压则应根据具体应用进行设置。使用 RMS 值作为电机的交流额定值。

例 1-11: 电阻和电感的换算

```
//***** Motor Parameters *****  
  
#define POLEPAIRS      5           // Number of pole pairs  
#define PHASERES      ((float)2.67 * (4.4/24)) // Phase resistance in Ohms.  
#define PHASEIND      ((float)0.00192 * (4.4/24)) // Phase inductance in Henrys.
```

一些电机由于其特殊的设计，无论是否按照上文所提到的步骤调整，闭环控制时均无法实现自锁。运行这类电机时，减小相电阻和相电感的值，使之小于 UserParams.h 文件中的测量值，并通过使用 DMCI/RTDM 来查看 PMSM.c 文件中 Theta_error 值是否也相应减小。Theta_error 的值应持续减小直到能够使电机闭环运行。例 1-12 所示为 PMSM.c 文件中的 Theta_error。

例 1-12: PMSM.C 文件中的 Theta_Error

```

1
//***** Motor Parameters *****

#define POLEPAIRS      5           // Number of pole pairs
#define PHASERES      ((float)2.67) // Phase resistance in Ohms.
#define PHASEIND      ((float)0.00192) // Phase inductance in Henrys.

// This section enables closed loop, right after open loop ramp.
uGF.bit.ChangeMode = 1;
uGF.bit.OpenLoop = 0;
// Difference between force angle and estimated theta is saved,
// so a soft transition is made when entering closed loop.
Theta_error ParkParam.qAngle - smcl.Theta;
}

```

Diagram illustrating the code structure for Example 1-12:

- The first three lines (POLEPAIRS, PHASERES, PHASEIND) are grouped by a bracket and labeled **UserParms.h**.
- The next three lines (ChangeMode, OpenLoop, and the comment) are grouped by a bracket and labeled **PMSM.C**.
- The line `Theta_error ParkParam.qAngle - smcl.Theta;` is circled.

1.9.8 小电感电机的调整

当控制一个电感小于 100 μH 的小型电机时，提高 PWM 的开关频率是有利的。这将使控制更平滑，同时可以降低噪音。对于低电感电机，PWM 开关时电流波形会出现尖峰，导致 ADC 不能有效测量电流。例 1-13 所示为在 Userparms.h 文件中设置 PWM 频率。

例 1-13: 在文件 UserParms.h 中设置 PWM 频率

```

//***** PWM and Control Timing Parameters *****

#define PWMFREQUENCY    20000      // PWM Frequency in Hertz
#define DEADTIMESEC     0.000002  // Deadtime in seconds
#define BUTPOLLLOOPTIME 0.100      // Button polling loop period in sec
#define SPEEDLOOPFREQ   1000       // Speed loop Frequency in Hertz. This value must
                                     // be an integer to avoid pre-compiler error

```

位于 UserParms.h 文件中的弱磁表如例 1-14 所示，其取值需要根据不同电机更改。

1.9.9 弱磁调整

例 1-14: 弱磁参数表

```
// in order to have field weakening, this reference value should be negative,  
// so maximum value in this example is -4.4, or REFINAMPS(-4.4)  
#define dqKFw0 REFINAMPS(0)  
#define dqKFw1 REFINAMPS(-0.435)  
#define dqKFw2 REFINAMPS(-0.650)  
#define dqKFw3 REFINAMPS(-0.915)  
#define dqKFw4 REFINAMPS(-1.075)  
#define dqKFw5 REFINAMPS(-1.253)  
#define dqKFw6 REFINAMPS(-1.432)  
#define dqKFw7 REFINAMPS(-1.670)  
#define dqKFw8 REFINAMPS(-1.838)  
#define dqKFw9 REFINAMPS(-1.952)  
#define dqKFw10 REFINAMPS(-2.042)  
#define dqKFw11 REFINAMPS(-2.064)  
#define dqKFw12 REFINAMPS(-2.100)  
#define dqKFw13 REFINAMPS(-2.100)  
#define dqKFw14 REFINAMPS(-2.100)  
#define dqKFw15 REFINAMPS(-2.100)
```

dsPICDEM MCLV 开发板的最大电流参考值是 4.4A，对于 dsPICDEM MCHV 开发板该值是 16.5A。表中的第一个值始终为零，这意味着在该转速下（对永磁同步电机而言）没有进行弱磁。通过实验尝试输入一个合适的负电流值，以符合 FW 速度的要求。

警告

通常，电机制造商给出的最大转速是在电机没有损坏的情况下可达到的（可能比额定电流下的制动点转速还要高）。否则，电机可能运行在更高的转速，但只能是短期的（间歇的），并可能导致电机去磁、机械损坏或与之相连设备的机械损坏的风险。

弱磁模式下，电机运行速度高于标称转速，如果出现角度计算错误导致控制器失效，那么可能导致变频器损坏。原因是反电动势（BEMF）的值将远大于标称转速下的值，从而超过直流母线电压值，而变频器的功率半导体器件和直流母线电容将不得不承受这个值。由于达到最佳状态之前，调整意味着对迭代系数的校正，因此应对变频器的相应保护电路进行调整使之能承受更高电压以防止高速旋转时出现停转。

1.10 总结

本文提供的调整技术可使 FOC 算法适用于任何永磁同步电机。该算法在 AN1078 《PMSM 电机的无传感器磁场定向控制》(DS01078A_CN) 中有所介绍。

许多不同电机的调整是在上述技术基础上发展实现的，因此 AN1078 中的 FOC 算法和本文调整技术的有效结合，可满足绝大部分 PMSM 的控制需求。文中所讨论的调整技术将有助于减少新项目开发中所花费的时间和精力。

注:

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。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、dsPIC、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PIC³² 徽标、rfPIC 和 UNI/O 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL 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、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICKtail、REAL ICE、rLAB、Select Mode、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、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。

© 2010, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN: 978-1-60932-771-2

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

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部、设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2002 认证。公司在 PIC[®] MCU 与 dsPIC[®] DSC、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

Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

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

克里夫兰 Cleveland

Independence, OH
Tel: 1-216-447-0464
Fax: 1-216-447-0643

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: 1-408-961-6444
Fax: 1-408-961-6445

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 - 重庆

Tel: 86-23-8980-9588
Fax: 86-23-8980-9500

中国 - 香港特别行政区

Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 南京

Tel: 86-25-8473-2460
Fax: 86-25-8473-2470

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 - 武汉

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

中国 - 西安

Tel: 86-29-8833-7252
Fax: 86-29-8833-7256

中国 - 厦门

Tel: 86-592-238-8138
Fax: 86-592-238-8130

中国 - 珠海

Tel: 86-756-321-0040
Fax: 86-756-321-0049

台湾地区 - 高雄

Tel: 886-7-213-7830
Fax: 886-7-330-9305

台湾地区 - 台北

Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

亚太地区

台湾地区 - 新竹

Tel: 886-3-6578-300
Fax: 886-3-6578-370

澳大利亚 Australia - Sydney

Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

印度 India - Bangalore

Tel: 91-80-3090-4444
Fax: 91-80-3090-4123

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 - Daegu

Tel: 82-53-744-4301
Fax: 82-53-744-4302

韩国 Korea - Seoul

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

马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur

Tel: 60-3-6201-9857
Fax: 60-3-6201-9859

马来西亚 Malaysia - Penang

Tel: 60-4-227-8870
Fax: 60-4-227-4068

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 - Druenen

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