

MIMXRT1050 EVK上的PMSM磁场定向控制

URL: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN12169.pdf>

1 介绍

本应用笔记描述了在基于NXP i.MX RT1050处理器的MIMXRT1050评估套件 (EVK) 上, 三相永磁同步电机 (PMSM) 的有传感器和无传感器电机控制软件的实现, 包括电机参数识别算法。

恩智浦Freedom板FRDM-MC-LVPMSM用作PMSM控制参考解决方案的硬件平台。本文列举了电机控制软硬件相关的部分。包括详细的外设设置和驱动程序描述。同时包括了电机参数识别理论和算法的介绍。

本文档的最后一部分介绍并说明了基于FreeMASTER实时调试工具运行的电机控制应用调整工具 (MCAT) 页面。这些工具提出了一种简单且易于使用的电机参数识别, 算法调整, 软件控制, 调试和诊断方法。

内容

| | | |
|-----|-----------------------------|----|
| 1 | 介绍..... | 1 |
| 2 | 开发平台..... | 2 |
| 3 | MCU功能和外设设置..... | 2 |
| 3.1 | i.MX RT1050 EVK..... | 2 |
| 4 | 电机控制外设初始化..... | 8 |
| 5 | 调整和控制应用程序..... | 10 |
| 5.1 | PMSM参数识别..... | 11 |
| 5.2 | PMSM传感器/无传感器应用控制和使用MCAT进行调整 | 17 |
| 6 | 结论..... | 34 |
| 7 | 缩略语..... | 34 |
| 8 | 参考..... | 35 |

2 开发平台

FRDM-MC-LVPMSM开发平台的电源输入电压为24-48 VDC，带有反极性保护电路。创建5.5 VDC的辅助电源来为FRDM MCU板供电。输出电流高达5 A RMS。逆变器本身由三相桥式逆变器（6- MOSFET）和三相MOSFET栅极驱动器实现。在该板上检测模拟量（例如三相电机相电流，直流母线电压和直流母线电流）。还有一个速度和位置传感器接口（编码器，霍尔）。完整的恩智浦Freedom电机控制开发套件的框图如图1所示。

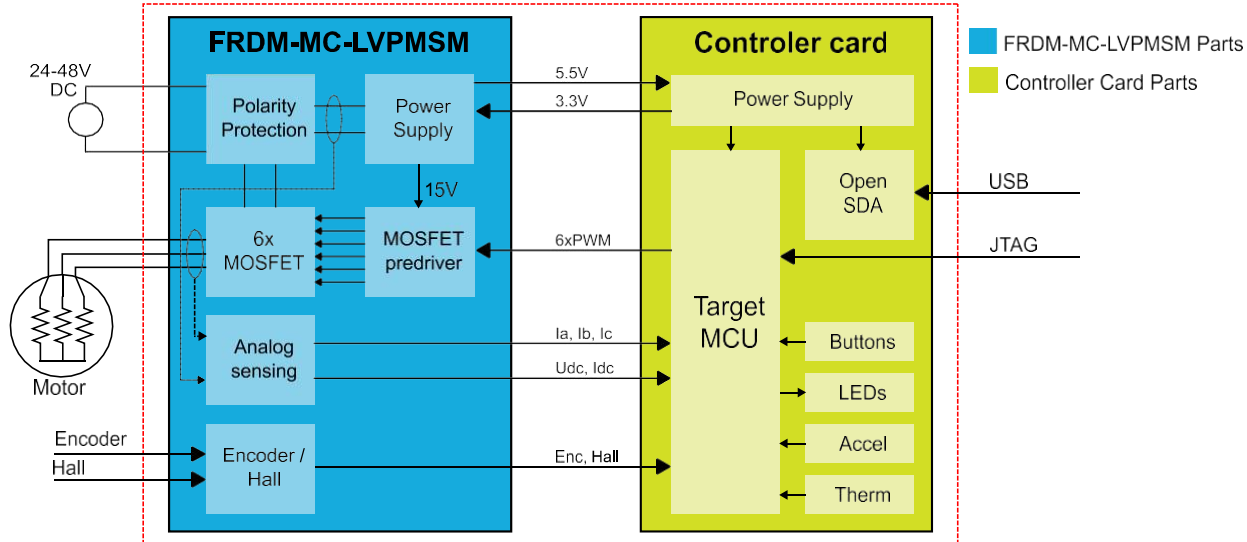


图1.电机控制开发平台框图

FRDM-MC-LVPMSM不需要复杂的设置，只需要通过电线将所有信号从i.MX RT1050 EVK连接到FRDM-MC-LVPMSM。相关的更多详细信息，请参阅用户指南。有关恩智浦Freedom开发平台的更多信息，请参阅 nxp.com/freedom。

3 MCU功能和外设设置

本章介绍外设设置和应用时序。i.MX RT1050是一款全新的处理器系列，采用了恩智浦先进的 ARM[®]Cortex[®]-M7内核，运行速度高达600 MHz。该处理器配有一个512 KB的片上RAM存储器。四个Flex脉冲宽度调制器（eFlexPWM）模块和两个12位16通道模数转换器（ADC）使该器件成为高端多电机控制应用的理想选择。

3.1 i.MX RT1050 EVK

MIMXRT1050 EVK板是一个旨在以小巧的低成本封装展示i.MX RT1050处理器最常用功能的平台。MIMXRT1050 EVK板是一个入门级开发板，可以帮助您在将大量或资源投入更具体的设计之前熟悉处理器。EVK板提供各种类型的存储器，尤其是64-Mbit Quad SPI Flash和512-Mbit Hyper Flash。

3.1.1 硬件时序和同步

正确和精确的时序对电机控制应用至关重要。因此，电机控制专用外设要注意硬件层的时序和同步。此外，可以将PWM频率设置为计算FOC算法的ADC中断（ADC ISR）频率的倍数。在本应用中，PWM频率等于FOC频率。时序图如图2所示。

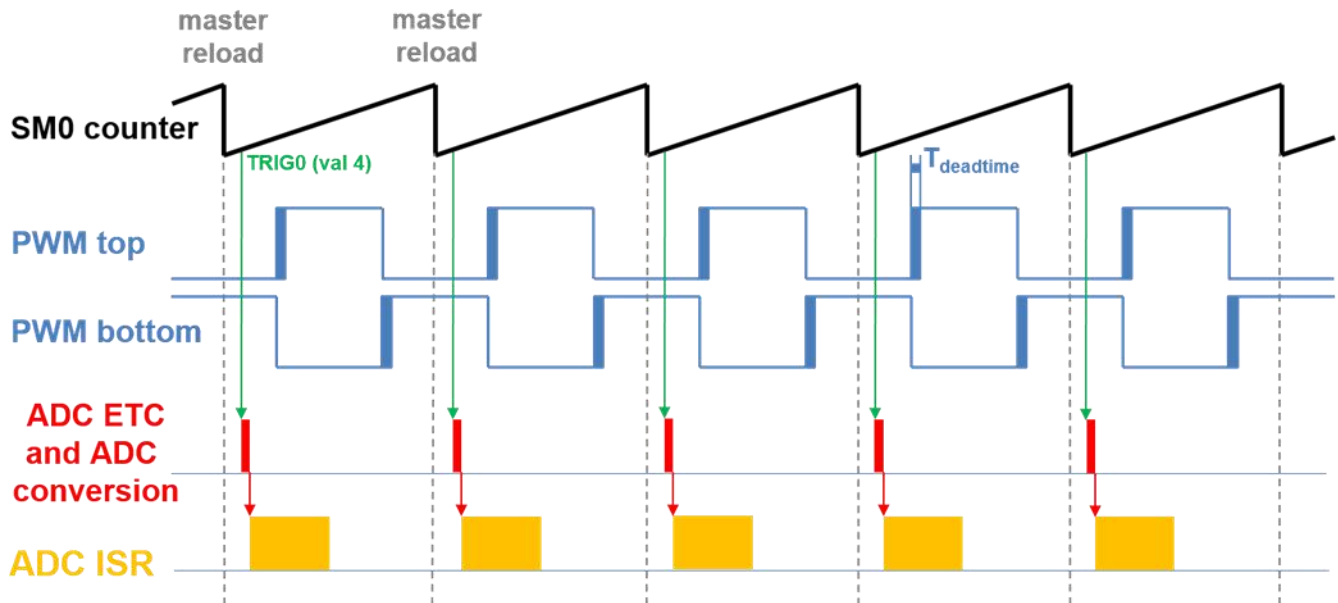


图2. i.MX RT1050上的硬件定时和同步

- 最上面的 信号为eFlexPWM计数器（SM0计数器）。PWM顶部和PWM底部信号插入死区时间。SM0子模块在每个PWM周期重新加载。
- 对于ADC_ETC（ADC外部触发控制），SM0产生触发信号0（当计数器计数到等于TRIG4值的值时），延迟大约为 $T_{deadtime} / 2$ 。该延迟确保在占空比接近100%时进行正确的电流采样。
- ADC_ETC启动ADC转换。
- ADC转换完成后，进入ADC ISR（ADC中断）。FOC计算在此中断中完成。

3.1.2 外设配置

本节介绍用于电机控制的外设配置。在i.MX RT1050上，增强型FlexPWM（eFlexPWM）有三个子模块用于6通道PWM生成，两个12位ADC用于相电流和直流母线电压测量。eFlexPWM和ADC通过eFlexPWM的子模块0进行同步。以下设置位于mcdrv_imxrt1050.c和board.c文件及其头文件中。

3.1.2.1 时钟控制模块 (CCM)

CCM生成并控制设计中各种模块的时钟并管理低功耗模式。该模块使用可用的时钟源来生成根时钟。

电机控制应用中使用的时钟源是：

- PLL2，也称为系统PLL，频率为528 MHz。
- PLL3，也称为USB1 PLL，频率为480 MHz。

ARM时钟内核的工作频率为528 MHz，时钟源为PLL2。对于此设置，将设置以下寄存器：clock_config.c 中的 CBCMR [PRE_PERIPH_CLK_SEL]，CBCDR [PERIPH_CLK_SEL] 和 CBCDR [AHB_PODF]。ADC，XBAR和PWM由 IPG_CLK_ROOT输出提供时钟频率为132 MHz的输出。必须为此设置CBCDR [IPG_PODF]寄存器。IPG_CLK_ROOT来自AHB_CLK_ROOT。LPUART来自PLL3，频率为480 MHz 除以6。

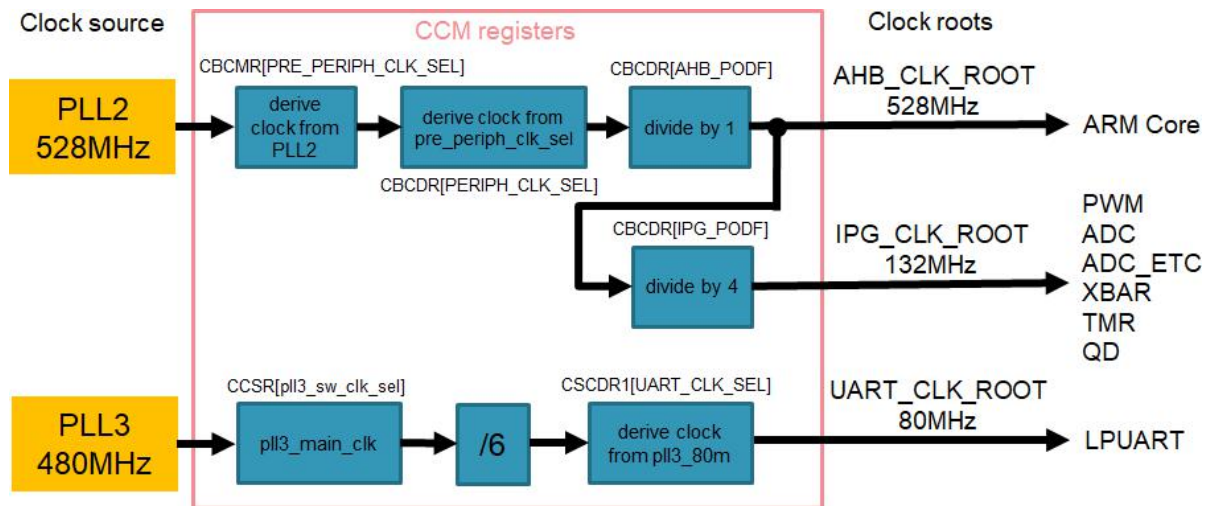


图3.用于电机控制外设的i.MX RT1050时钟源

用于电机控制的外围设备的时钟源列于表格1。

Table 1. i.MX RT1050用于电机控制外设的时钟源

| — | Clock source | Clock root | Clock root frequency |
|----------|--------------|---------------|----------------------|
| ARM core | PLL2 | AHB_CLK_ROOT | 528 MHz |
| PWM | PLL2 | IPG_CLK_ROOT | 132 MHz |
| ADCs | PLL2 | IPG_CLK_ROOT | 132 MHz |
| ADC_ETC | PLL2 | IPG_CLK_ROOT | 132 MHz |
| XBAR | PLL2 | IPG_CLK_ROOT | 132 MHz |
| TMR | PLL2 | IPG_CLK_ROOT | 132 MHz |
| QD | PLL2 | IPG_CLK_ROOT | 132 MHz |
| LPUART | PLL3 | UART_CLK_ROOT | 80 MHz |

有关更多详细信息，请参阅i.MX RT1050参考手册。

3.1.2.2 PWM生成-PWM1

- eFlexPWM的时钟频率为132-MHz IPG_CLK_ROOT。
- 来自三个子模块的六个通道用于三相PWM生成。子模块0每n个PWM周期生成一次重新加载事件，具体取决于用户定义的宏M1_FOC_FREQ_VS_PWM_FREQ。
- 子模块1和3从子模块0获取时钟。
- 子模块1和3的计数器与来自子模块0的主重载信号同步（不使用子模块2）。
- 子模块0用于与ADC_ETC同步。当计数器计数到VAL4时，子模块在PWM重新加载后生成输出触发。
- 在子模块0,1和3的通道A和B上启用故障模式，并自动清除故障（在故障输入返回到零后，在下次PWM重新加载时重新启用PWM输出）。
- PWM周期（频率）取决于计数器从INIT计数到VAL1所需的时间。默认情况下， $INIT = -MODULO / 2 = -6600$ 和 $VAL1 = MODULO / 2 - 1 = 6599$ 。eFlexPWM时钟为132 MHz，因此周期为0.0001 s（10 kHz）。
- 启用死区时间插入。死区时间长度由用户在M1_PWM_DEADTIME宏中定义。

3.1.2.3 ADC外部触发控制-ADC_ETC

ADC_ETC模块使多个用户能够以时分多路复用（TDM）方式共享ADC模块。外部触发器可以从Cross BAR（XBAR）或其他来源获得。ADC扫描通过ADC_ETC启动。

- 两个ADC都设置了自己的触发链。
- 触发链长度设置为2.启用背靠背ADC触发模式。
- SyncMode已打开。在SyncMode中，ADC1和ADC2由相同的触发源控制。触发源是PWM子模块0。

3.1.2.4 模拟传感-ADC1和ADC2

ADC1和ADC2用于电流和直流母线电压的模拟采样。

- ADC1和ADC2的时钟频率为66 MHz。它来自IPG_CLK_ROOT并除以2。
- ADC选择单端转换和硬件触发时，工作有效位为10位。通过eFlexPWM生成的触发信号从ADC_ETC触发ADC。
- 使能转换完成中断，并在ADC1完成最后一次采样后执行的FOC快速环算法。

3.1.2.5 正交解码器模块-QD

QD模块用于检测编码器传感器的位置和速度。

- 转换完成中断（用于在ADC1完成最后一次采样后生成的FOC快速环算法）被启用。
- 计数方向由用户在M1_POSPE_ENC_DIRECTION宏中设置。
- 使能模块计数和模块计数翻转/不足以递增/递减计数器。

3.1.2.6 外围互连-XBARA1

XBAR用于将PWM的触发互连到ADC_ETC，并将编码器（连接到GPIO）连接到QD。

- FLEXPWM1_PWM1_OUT_TRIG0_1输出触发（由子模块0生成）连接到ADC_ETC_XBAR0_TRIG0。
- 编码器信号Phase A - IOMUX_XBAR_INOUT14输出分配给ENC1_PHASE_A_INPUT
- （GPIO_AD_B0_00配置为pinmux.c中的XBAR1_INOUT14）。
- 编码器信号B相 - IOMUX_XBAR_INOUT15输出分配给ENC1_PHASE_B_INPUT（GPIO_AD_B0_01 在pinmux.c中配置为XBAR1_INOUT15）。

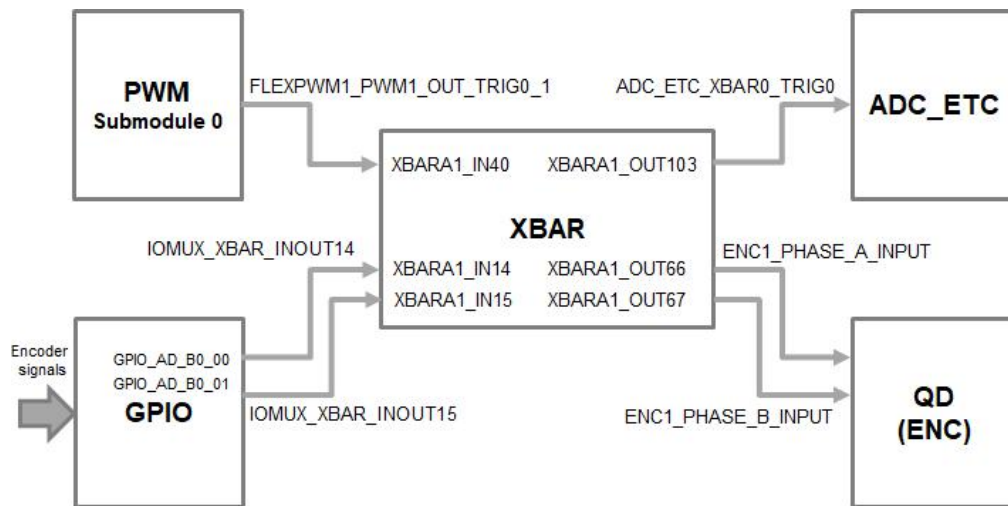


图4.交叉内部互连

3.1.2.7 慢环中断生成-TMR1

QuadTimer模块TMR1用于生成慢速环中断。

- QuadTimer TMR1的时钟频率为IPG CLK ROOT 16，因此TMR1的时钟频率为8.25 MHz。
- 慢环通常比快环慢十倍。因此，在计数器从CNTR0 = 0到COMP1 = IPG CLK ROOT / (16U * Speed Loop Freq) 计数后产生中断。速度环频率在M1_SPEED_LOOP_FREQ宏中设置，等于1000 Hz。
- 在重载事件中启用并生成中断（服务于慢环周期）。

3.1.2.8 FreeMASTER通信-LPUART0

LPUART0（低功耗通用异步接收器和发送器）用于MCU板和PC之间的FreeMASTER通信。

- 波特率设置为115200 bit / s。
- 接收器和发射器均已启用。
- 其他设置设置为默认值。

3.1.3 CPU负荷和内存使用情况

以下信息适用于在调试RAM和释放FLASH配置中使用IAR Embedded Workbench® IDE构建的演示应用程序。表2显示内存使用情况和CPU负载。内存使用量是从链接器.map文件（IAR IDE）计算的，包括在RAM中分配的2 KB FreeMASTER记录器缓冲区。使用SysTick计时器测量CPU负载。

CPU负载取决于快速环（FOC计算）和慢速环（速度环）频率。在这种情况下，它适用于10 Hz的快速环频率和1 kHz的慢环频率。使用以下等式计算总CPU负载：

$$CPU_{fast} = cycles_{fast} \cdot \frac{f_{fast}}{f_{CPU}} \cdot 100 [\%] \quad Eq. 1$$

$$CPU_{slow} = cycles_{slow} \cdot \frac{f_{slow}}{f_{CPU}} \cdot 100 [\%] \quad Eq. 2$$

$$CPU_{total} = CPU_{fast} + CPU_{slow} [\%] \quad Eq. 3$$

使用的字符是：

- CPU_{fast} - 快速环（ADC ISR）占用的CPU负载。
- $cycles_{fast}$ - 快速环消耗的周期数。
- f_{fast} - 快速环计算的频率（10 kHz）。
- f_{CPU} - CPU频率。
- CPU_{slow} - 慢速环（TMR ISR）占用的CPU负载。
- $cycles_{slow}$ - 慢环消耗的环环数。
- f_{slow} - 慢速环计算的频率（1 kHz）。
- CPU_{total} - 电机控制所占的总CPU负载。

Table 2. i.MX RT1050 CPU负载和内存使用情况

| — | i.MX RT1050 速度控制 (Debug RAM) | i.MX RT1050 位置控制 (debug RAM) | i.MX RT1050 速度控制 (release flash) | i.MX RT1050位置控制 (release flash) |
|--------------|---|---|--|--------------------------------------|
| CPU负荷[%] | 4.9 | 5.1 | 5.9 | 6.1 |
| ROM代码存储器[字节] | — | — | 19 828 | 19 828 |
| RAM代码存储器[字节] | 27 232 | 27232 | 9 148 | 9 148 |
| ROM数据存储器[字节] | — | — | 15 412 | 15 412 |
| RAM数据存储器[字节] | 24 424 | 24 424 | 15 701 | 15 701 |

4 电机控制外设初始化

通过在MCU启动期间和使用外设之前调用MCDRV_Init_M1 () 函数来初始化电机控制外设。所有初始化函数都在mcdrv_imxrt1050.c源文件和mcdrv_imxrt1050.h头文件中。用户指定的定义也在这些文件中。功能提供的功能包括三相PWM生成和三相电流测量，以及直流母线电压和辅助量测量。在无传感器PMSM磁场定向控制中描述了三相电流测量和使用空间矢量调制 (SVM) 技术生成PWM的原理 (文档[DRM148](#))。

mcdrv_imxrt1050.h头文件提供了几个宏，可以由用户定义：

- M1_MCDRV_ADC-该宏指定使用哪个ADC外设。如果选择不受支持的外围设备，则会发出预处理程序错误。
- M1_MCDRV_PWM3PH-该宏指定使用哪个PWM外设。如果选择不受支持的外围设备，则会发出预处理程序错误。
- M1_MCDRV_QD_ENC-该宏指定使用哪个QD外围设备。如果用户选择不受支持的外围设备，则会发出预处理器错误。
- M1_PWM_FREQ-该定义的值设置PWM频率。
- M1_FOC_FREQ_VS_PWM_FREQ-使您能够在第一次，第二次，第三次或第n次PWM重载时调用快速环中断。当PWM频率必须高于最大快速环中断频率时，这能很方便的实现。
- M1_SPEED_LOOP_FREQ-该定义的值设置速度环频率 (TMR1中断)。
- M1_PWM_DEADTIME - PWM死区时间的值，以纳秒为单位。
- M1_PWM_PAIR_PH [A..C] - 这些宏可以将物理电机相位简单分配给PWM外设通道 (或子模块)。以这种方式改变电机相的顺序。
- M1_ADC [1,2] _PH [A..C] - 这些宏用于为相电流测量分配ADC通道。一般规则是，必须在两个ADC转换器上测量至少一个相电流，并且必须在不同的ADC转换器上测量剩余的两个相电流。其原因是要测量的相电流对的选择取决于当前的SVM扇区。如果此规则被破坏，则会发出预处理程序错误。有关三相电流测量的更多信息，请参见无传感器PMSM磁场定向控制 (文档[DRM148](#))。
- M1_ADC [1,2] _UDCB-此定义用于选择用于测量直流母线电压的ADC通道。在电机控制软件中，可以使用这些支持API的ADC和PWM外设：
- ADC的可用API包括：
 - mcdrv_adc_t-MCDRV ADC结构数据类型。
 - bool_t M1_MCDRV_ADC_PERIPH_INIT () - 默认情况下，在MCDRV_Init_M1 () 函数调用的ADC外设初始化过程中调用此函数，并且在外设初始化完成后不应再次调用此函数。
 - bool_t M1_MCDRV_CURR_3PH_CHAN_ASSIGN (mcdrv_adc_t *) - 调用此函数可根据SVM扇区为下一个三相电流测量分配合适的ADC通道。该函数始终返回true。
 - bool_t M1_MCDRV_CURR_3PH_CALIB_INIT (mcdrv_adc_t *) - 该函数初始化相电流通道偏移测量。此函数始终返回true。

- `bool_t M1_MCDRV_CURR_3PH_CALIB (mcdrv_adc_t *)` - 此功能从静止电机的无动力阶段读取当前信息，并使用移动平均滤波器对其进行过滤。目标是获得测量偏移的值。默认情况下，移动平均滤波器的窗口长度设置为八个样本。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_CURR_3PH_CALIB_SET (mcdrv_adc_t *)` - 该函数将相电流测量偏移值置为内部寄存器。在足够数量的M1_MCDRV_CURR_3PH_CALIB () 调用后调用此函数。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_ADC_GET (mcdrv_adc_t *)` - 该功能读取并计算三相电流，直流母线电压和辅助量的实际值。此函数始终返回true。
- PWM的可用API包括：
 - `mcdrv_pwm3ph_t`-MCDRV PWM结构数据类型。
 - `bool_t M1_MCDRV_PWM_PERIPH_INIT` - 默认情况下，在MCDRV_Init_M1 () 函数调用的PWM外围设备初始化过程中调用此函数。
 - `bool_t M1_MCDRV_PWM3PH_SET (mcdrv_pwm3ph_t *)` - 该函数根据存储在M1_MCDRV_PWMIO_DUTY变量中的所需值更新PWM相位占空比。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_PWM3PH_EN (mcdrv_pwm3ph_t *)` - 调用此函数可启用所有PWM通道。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_PWM3PH_DIS (mcdrv_pwm3ph_t *)` - 调用此函数会禁用所有PWM通道。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_PWM3PH_FLT_GET (mcdrv_pwm3ph_t *)` - 该函数返回过流故障标志的状态并自动清除标志（如果已设置）。发生过流事件时，此函数返回true。否则，它返回false。
 - 正交编码器的可用API是：
 - `mcdrv_qd_enc_t`-MCDRV QD结构数据类型。
 - `bool_t M1_MCDRV_QD_PERIPH_INIT ()` - 默认情况下，在MCDRV_Init_M1 () 函数调用的QD外围设备初始化过程中调用此函数。
 - `bool_t M1_MCDRV_QD_GET (mcdrv_qd_enc_t *)` - 此函数返回实际位置和速度。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_QD_SET_DIRECTION (mcdrv_qd_enc_t *)` - 此函数设置正交编码器的方向。此函数始终返回true。
 - `bool_t M1_MCDRV_QD_CLEAR (mcdrv_qd_enc_t *)` - 此函数清除内部变量和解码器计数器。此函数始终返回true。

5 调整和控制应用程序

本节提供有关控制传感器/无传感器PMSM磁场定向控制（FOC）应用的工具和设置步骤的信息。该应用程序包含FreeMASTER实时调试监视器的嵌入式驱动程序和用于与PC通信的数据可视化工具。它支持非侵入式监控以及实时修改目标变量，这对于算法调优非常有用。除目标端驱动程序外，FreeMASTER工具还需要安装PC应用程序。有关更多信息，请参阅nxp.com/freemaster。

PMSM传感器/无传感器FOC应用可以使用PMSM的电机控制应用调整（MCAT）插件轻松控制和调整。PMSM的MCAT是一个用户友好的模块化页面，在FreeMASTER中运行。要启动它，只需执行项目旁边的.pmp文件即可。该工具由选项卡菜单，调整模式选择器和工作区组成图5。选项卡菜单中的每个选项卡代表一个子模块，使您可以调整或控制应用程序的不同方面。除了PMSM的MCAT页面之外，项目树中的多个范围，记录器和变量在FreeMASTER项目文件中预定义，以进一步简化电机参数调整和调试。可以使用“基本”和“专家”调整模式。选择“专家”模式将授予您修改MCAT中可用的所有参数和字段的权限。

对于没有经验的用户，建议使用“基本”模式。当FreeMASTER未连接到目标时，“App ID”行显示“离线”。当建立使用正确软件与目标MCU的通信时，“App ID”行显示板名“pmsm_evk_imxrt1050”，并且加载给定MCU的所有存储参数。

The screenshot shows the Motor Control Application Tuning Tool (MCAT) interface. The central workspace displays the 'Application Description' diagram, which includes a block diagram of the motor control system with components like Ramp, PI w AW, P w AW, SVM, and INVERTER. The diagram is labeled with '1'. The top of the interface shows the 'App ID' field with the value 'pmsm_evk_imxrt1050' and a 'Tuning Mode' dropdown set to 'Expert', both highlighted with red circles '3' and '4'. The right side of the interface features a 'Variable Watch' table with various parameters and their values, highlighted with a red circle '5'. The left side shows the 'Project Tree' with a tree structure of control modules, highlighted with a red circle '6'. A legend box at the bottom right of the screenshot lists the following items:

- 1 - Tab content
- 2 - Tab menu
- 3 - Connected board
- 4 - Tuning mode selector
- 5 - Variable Watch
- 6 - Project Tree

图5. MCAT布局

在默认配置中，以下选项卡可用：

- “简介” - 带有PMSM传感器/无传感器FOC图的欢迎页面以及应用程序的简短描述。

- “电机识别”-PMSM半自动参数测量控制页面。PMSM参数识别在本文档中进一步详细描述。
- “参数” - 此页面允许您修改电机参数，硬件规格和应用规模，对齐和故障限制。
- “电流环” - 电流环PI控制器的增益和输出限制。
- “速度和位置” - 此选项卡包含用于指定速度控制器比例和积分增益的字段，以及速度斜坡的输出限制和参数。位置比例控制器常数也在此处设置。
- “传感器” - 此页面包含编码器参数和位置观测器参数。
- “无传感器” - 此页面使您可以调整BEMF观测器的参数，跟踪观测器和开环启动。
- “控制结构” - 此应用程序控制页面允许您使用不同的技术（标量 - 伏特/赫兹控制，电压FOC，电流FOC，速度FOC和位置FOC）选择和控制在PMSM。应用程序状态也显示在此选项卡上。
- “输出文件” - 此选项卡显示PMSM传感器/无传感器FOC应用程序所需的所有计算常数。也可以生成m1_acim_appconfig.h文件，该文件随后用于在项目重新编译时永久预设所有应用程序参数。
- “应用页面” - 此选项卡包含图形元素，如速度表，直流母线电压测量条和各种开关，可实现简单，快速和用户友好的应用控制。故障清除和演示模式（其设定各种预定义的所需速度和位置随时间变化）也可以从这里进行控制。

大多数选项卡都可以使用“更新目标”按钮立即将MCAT中指定的参数加载到目标中，并使用“重新加载数据”和“存储数据”按钮从硬盘驱动器文件中保存（或恢复）它们。

以下部分提供了有关如何识别已连接PMSM电机参数以及如何正确调整应用的简单说明。

5.1 PMSM参数识别

由于PMSM驱动器的基于模型的控制方法是最有效和可行的，因此获得精确的电机模型是

驱动器设计和控制的重要部分。对于所实施的FOC算法，必须知道定子电阻 R_s ，直流电感 L_d ，正交电感 L_q 和BEMF常数 K_e 的值。

5.1.1 功率平台校正

每个逆变器会引入总误差电压 U_{error} ，其由死区时间，电流钳位效应和晶体管电压降引起。总误差电压 U_{error} 取决于相电流，并且在功率平台校正过程期间测量该相关性。逆变器误差特性的一个例子如图所示图6。功率平台校正是MCAT的一部分，可以通过“电机识别”选项卡进行控制。要执行特性分析，请将电机与已知的定子电阻 R_s 连接，并在“Calib R_s ”字段中设置该值。然后指定“校准范围”，它是定子电流的范围，其中执行 U_{error} 的测量。按“校准”按钮开始校正。校正逐渐执行65个当前步骤（从 $i_s = -I_s$ ，校准到 $i_s = I_s$ ，校准），每个步进300 ms，因此请注意，该过程大约需要20秒，并且电机必须承受此负载。获取的校正数据将保存到一个文件，稍后用于 R_s 测量过程中的相电压校正。可以使用最大电流 I_s ，calib进行以下 R_s 测量。建议使用低 R_s 的电机进行特性分析。

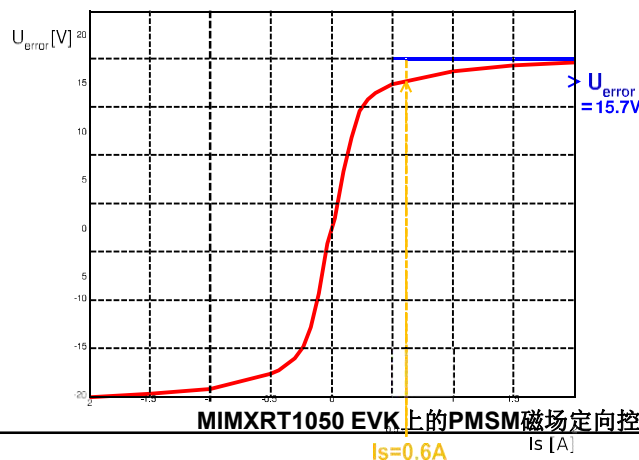


图6.功率级特性示例

目前仅仅用户自己的硬件板需要进行功率板校正。当NXP功率平台（TWR，FRDM或HVP）与被使用时，可以省略校正过程。获取的校正数据将保存到文件中，因此对于给定的硬件，只需执行一次校正程序。

5.1.2 定子电阻测量

定子电阻 R_s 用母线电流 I_{phN} 值测量，该电流施加到电机1200ms。使用电流控制器保持直流电压UDC。选择保守的参数以确保稳定性。定子电阻 R_s 使用欧姆定律计算：

$$R_s = \frac{U_{DC} - U_{error}}{I_{phN}} [\Omega] \quad \text{Eq. 4}$$

5.1.3 定子电感

为了定子电感 L_s 识别，将正弦测量电压施加到电动机。在 L_s 测量期间，启用电压控制。调整在实际测量之前获得正弦电压的频率和幅度。调整过程电压以0 V和 F 启动频率开始，电压从0以 $U_d \text{ inc}$ 的幅度逐渐增加到直流母线电压的一半（ $DCbus / 2$ ），直到达到 $I_d \text{ amp}$ 。如果即使使用 $DCbus / 2$ 和 F 启动也未达到 I_d 幅值，则测量信号的频率逐渐以 $F \text{ dec}$ 为步长降低到 $F \text{ min}$ ，直到达到 I_d 放大。如果仍未达到 I_d 放大，则测量继续进行 $DCbus / 2$ 和 $F \text{ min}$ 。调整过程如图所示 [图7](#)。

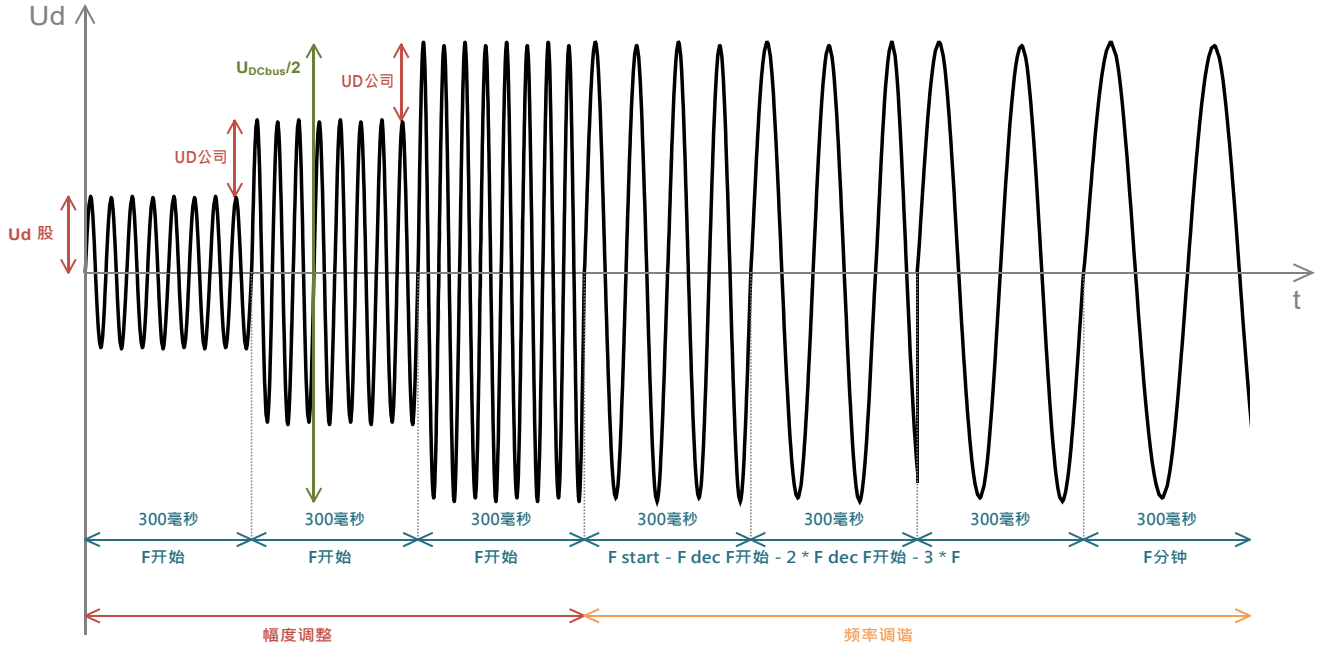


图7.调谐Ls测量信号

当调整过程完成时，将正弦测量信号（具有在调整过程中获得的幅度和频率）施加到电动机。然后根据电压和电流幅度计算RL电路的总阻抗，并且根据RL电路的总阻抗计算Ls。

$$Z_{RL} = \frac{U_d}{I_{d\text{ ampl}}} [\Omega] \quad \text{Eq. 5}$$

$$X_{Ls} = \sqrt{Z_{RL}^2 - R_s^2} [\Omega] \quad \text{Eq. 6}$$

$$L_s = \frac{X_{Ls}}{2\pi f} [\Omega] \quad \text{Eq. 7}$$

直轴电感Ld和交轴电感Lq测量以与Ls相同的方式进行。在进行Ld和Lq测量之前，将直轴电流施加到D轴，使转子对准。对于Ld测量，正弦电压施加在D轴上。对于Lq测量，在Q轴上施加正弦电压。

5.1.4 BEMF常数测量

在实际BEMF常数（Ke）测量之前，MCAT工具根据先前测量的Rs，Ld和Lq计算电流控制器和BEMF观测器常数。要测量Ke，电机必须旋转。Id通过“Id meas”控制，并且通过对从Nnom导出的所需速度进行积分来生成电子开环位置。当电机达到所需速度时，BEMF观测器获得的BEMF电压被滤波并计算Ke：

$$K_e = \frac{U_{BEMF}}{\omega_{el}} [\Omega] \quad \text{Eq. 8}$$

当测量Ke时，用户必须目视检查以确定电动机是否正常旋转。如果电机未正常旋转，请执行以下步骤：

- 确保pp的数量是正确的。Ke测量所需的速度也是从pp计算的。因此，pp的不准确性会导致所得Ke的不准确。
- 增加Id meas以在开环期间旋转时产生更高的扭矩。
- 减少Nnom以降低Ke测量所需的速度。

5.1.5 极对数测量

没有位置传感器，无法测量极对数。但是，有一个简单的辅助方式可以确定极对数（pp）。极对数测量过程会执行一次电气旋转，停止几秒钟，然后重复它。因为pp值是电气速度和机械速度之间的比率，所以可以确定每一次机械旋转的停止次数。建议不要在第一次机械旋转期间计算停止次数，因为在第一次旋转期间会发生对齐并影响停止次数。在pp测量期间，启用电流环路并将Id 电流控制为Id meas。通过积分开环速度产生电气位置。如果在启动pp助手后转子没有移动，请停止助手，增加Id meas，然后重新启动助手。

5.1.6 机械参数测量

转动惯量J和粘性摩擦系数B可以使用等式1来识别。在速度加速试验期间，用已知的产生转矩T和负载转矩Tload进行加速。

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T - T_{load} - B\omega_m) \text{ [rad/s}^2\text{]} \quad \text{Eq. 9}$$

等式中的 ω_m 字符是机械速度。机械参数识别软件使用扭矩曲线，如图所示图8。在整个测量期间，加载转矩（为简单起见）称为0。仅考虑摩擦力和电动机产生的扭矩。在测量的第一阶段，施加恒定转矩Tmeas，电机在时间t1内加速到其额定速度的50%。这些积分是在从t0（速度估计足够准确）到t1的时间段内计算出来的：

$$T_{int} = \int_{t_0}^{t_1} T dt \text{ [Nms]} \quad \text{Eq. 10}$$

$$\omega_{int} = \int_{t_0}^{t_1} \omega_m dt \text{ [rad/s]} \quad \text{Eq. 11}$$

在第二阶段期间，转子仅在摩擦的情况下自由减速而不产生扭矩。这使您可以简单地测量机械时间常数 $\tau_m = J/B$ ，作为转子从其原始值减速63%的时间。

最终的机械参数估计可以通过积分方程来计算。

$$\omega_m(t_1) = \frac{1}{J}T_{int} - B\omega_{int} + \omega_m(t_0) \text{ [rad/s]} \quad \text{Eq. 12}$$

惯性矩是：

$$J = \frac{\tau_m T_{int}}{\tau_m[\omega_m(t_1) - \omega_m(t_0)] + \omega_{int}} \text{ [kgm}^2\text{]} \quad \text{Eq. 13}$$

然后，粘性摩擦来自机械时间常数和转动惯量之间的关系。要使用机械参数测量，电流控制回路带宽

$f_{0, \text{Current}}$ ，速度控制回路带宽 $f_{0, \text{Speed}}$ 和机械参数测量扭矩必须设置 Trqm 。

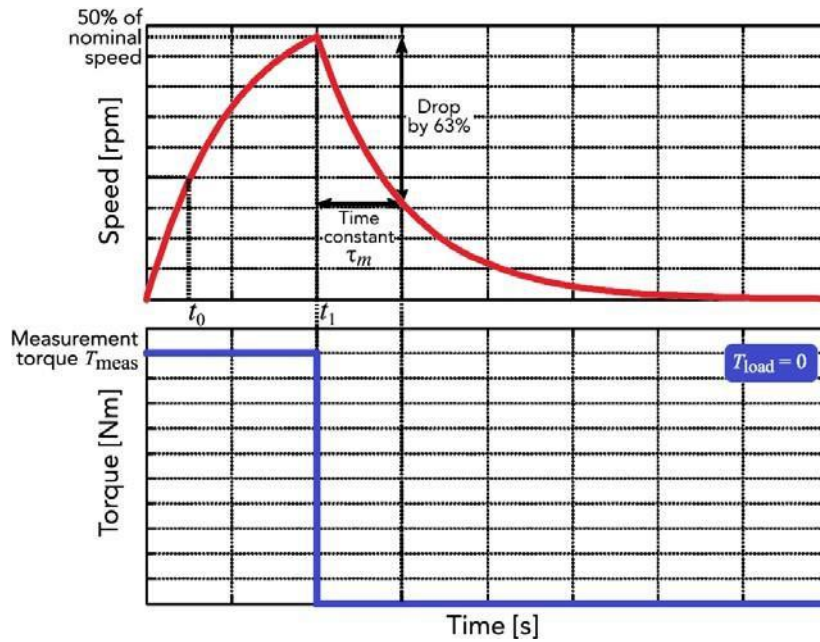
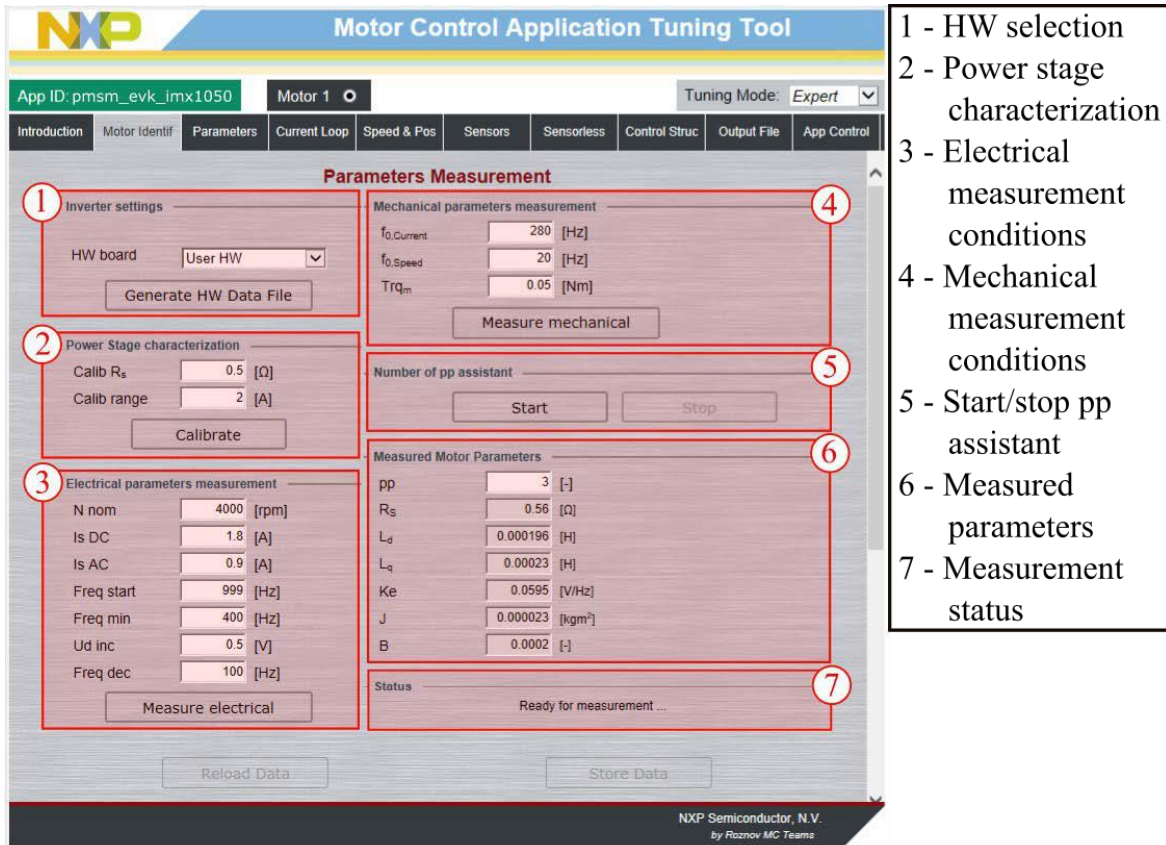


图8. PMSM标识选项卡

5.1.7 PMSM电气和机械参数测量过程

可以在MCAT“电机识别”选项卡中控制和设置电机参数辨识过程，如图所示图9。要测量自己的电机，请按照下列步骤操作：

- 选择您的硬件板。在标准恩智浦硬件之间进行选择或使用您自己的硬件。如果您使用自己的硬件，请在“参数”菜单选项卡中指定其基底（“ I_{max} ”和“ $U_{\text{DCB max}}$ ”）。
- 如果您不知道电机极对的数量，请使用第2节中描述的极对辅助数量5.1.5，“极对数的测量”。
- 如果您是第一次使用自己的硬件，请执行第2节中所述的功率板参数校正5.1.1，“功率板校正”。
- 输入电机测量参数（取决于“基本/专家”模式），然后按“测量电气”或“测量机械”按钮开始测量。您可以在“状态”栏中查看正在测量的参数。



- 1 - HW selection
- 2 - Power stage characterization
- 3 - Electrical measurement conditions
- 4 - Mechanical measurement conditions
- 5 - Start/stop pp assistant
- 6 - Measured parameters
- 7 - Measurement status

图9. PMSM标识选项卡

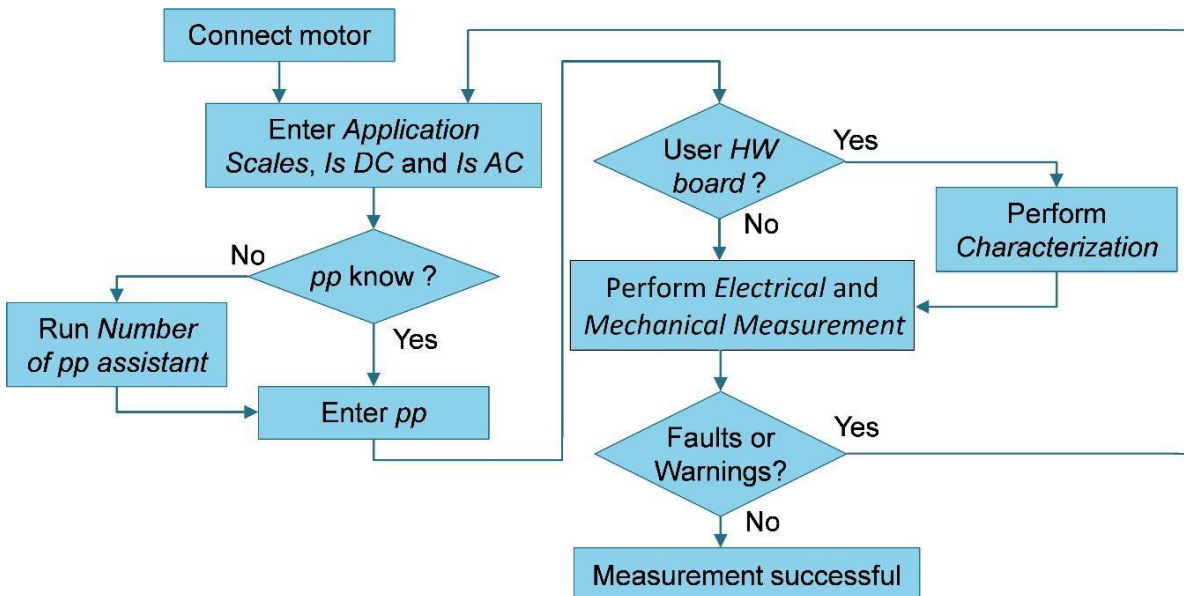


图10.测量过程图

在测量过程中，可能会出现测量故障和警告。请勿将这些故障与过流，欠压等应用故障混淆。这些故障及其描述和可能的故障排除列表如下所示表3。

Table 3. 测量故障和警告

| 故障编号 | 故障描述 | 错误的原因 | 故障排除 |
|------|------------------|----------------------------------|--|
| 1 | 电机未连接。 | 使用可用的DC总线电压无法达到 $I_d > 50$ mA。 | 检查电机是否已连接。 |
| 2 | R_s 太高，无法进行校准。 | 使用可用的直流电压无法达到校准。 | 使用具有较低 R_s 的电机进行功率板校准。 |
| 3 | 电流测量未达到DC。 | 未达到用户定义的 I_s DC，因此使用更低的IDC进行测量 | 升高直流母线电压以达到 I_s DC或降低 I_s DC以避免此警告。 |
| 4 | 电流幅度测量未达到AC。 | 未达到用户定义的AC AC，因此使用更低的Iac进行测量 | 提高直流母线电压或降低 F_{min} 到达是AC或降低是AC以避免此警告。 |
| 5 | 错误的特征数据。 | 用于电压校正的特征数据与实际功率平台不匹配。 | 选择用户硬件并执行校准。 |
| 6 | 机械测量超时。 | 机械测量时间过长 | 更改设置重新测量 |

5.2 使用MCAT进行PMSM传感器/无传感器应用控制和调整

FreeMASTER（通过MCAT页面启用）可用于完全控制和轻松调整PMSM无传感器FOC应用程序。用于PMSM子模块选项卡的MCAT（在5. “调整 并控制应用程序”列出）这里有更详细的描述。

5.2.1 使用MCAT进行应用程序控制

可以通过“Control Struc”选项卡控制应用程序，如图所示图11。屏幕左侧的状态控制区显示当前的应用程序状态，并允许您打开或关闭主应用程序开关（关闭正在运行的应用程序将禁用所有PWM输出）。“控制结构”区域位于屏幕的右侧。在这里，您可以使用适当的按钮在标量控制和FOC控制之间进行选择。通过选择“Voltage FOC”，“Current FOC”，“Speed FOC”

（传感器/无传感器）或“Position FOC”（传感器），可以启用FOC级联结构的选定部分。这对于应用程序调整和调试很有用。

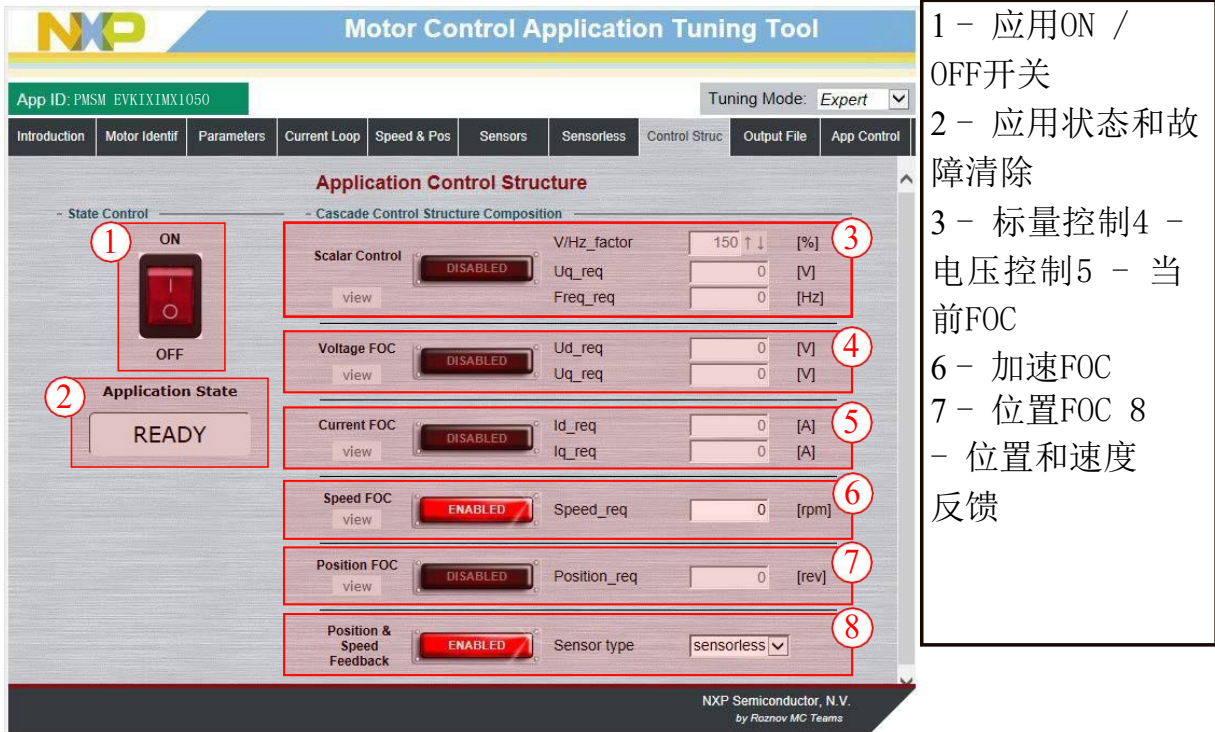
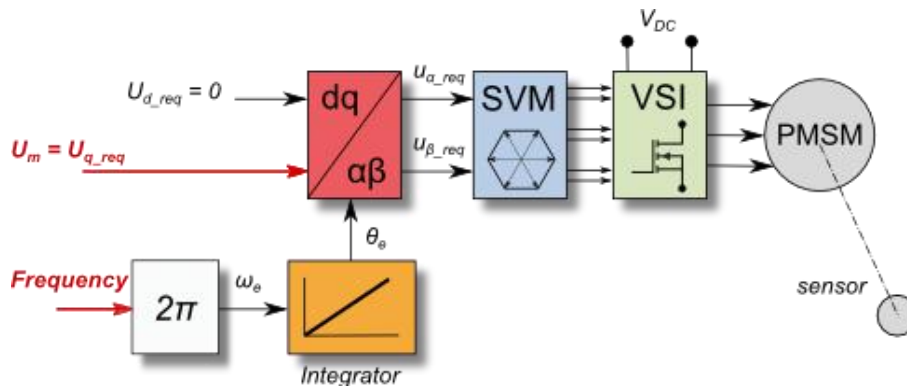


图11. PMSM控制页面的MCAT

标量控制图如图所示图12。它是最简单的电机控制技术。定子电压的大小与频率之间的比率必须保持在标称比率。因此，控制方法有时被称为Volt per Hertz或V / Hz。在“专家”调谐模式下输入所需的电压和频率时要特别注意。该比率在“基本”模式下保持恒定，唯一需要的输入是电压和频率。位置估计BEMF观测器和跟踪观测器算法（参见无传感器PMSM磁场定向控制（文件DRM148）（更多信息）在后台运行，即使没有直接使用估计的位置信息。这对BEMF观测器调整很有用。

图12.标量控制模式



电压FOC的框图如下图13.与标量控制不同，关闭BEMF观测器位置反馈，定子电压幅度不依赖于电机速度。可以使用“Ud_req”和“Uq_req”字段指定d轴和q轴定子电压。此控制方法对BEMF观测器功能检查很有用。

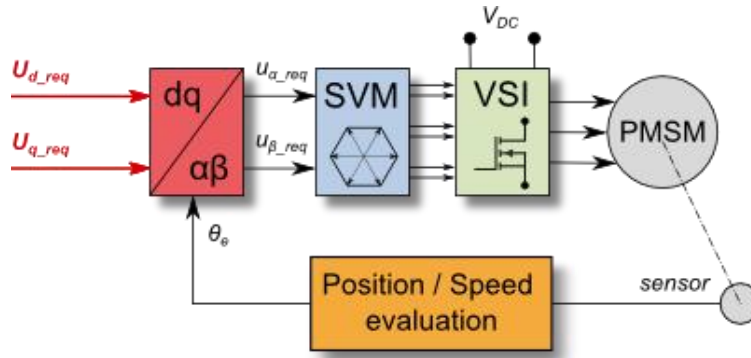
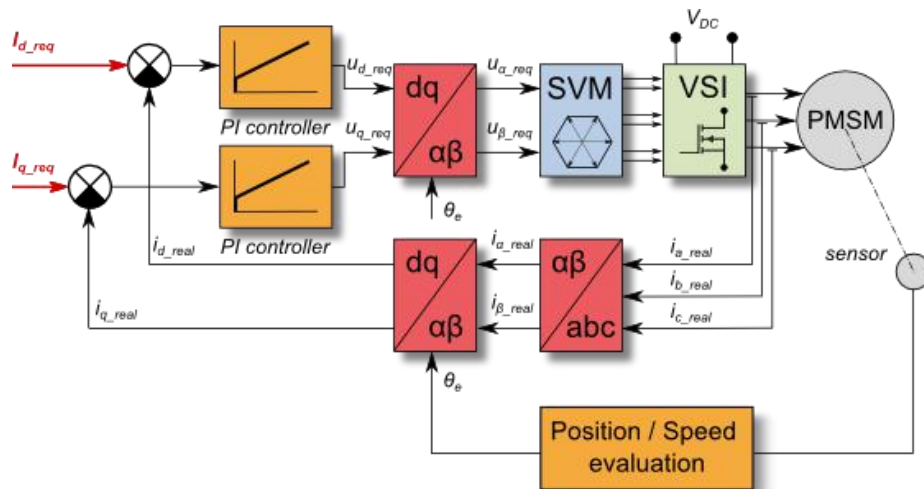


图13.电压FOC控制模式

当前FOC（或扭矩）控制需要转子位置反馈并且电流转换为dq参考系。有两个参考变量

（“ I_{d_req} ”和“ I_{q_req} ”）可用于电机控制，如框图所示图14。d轴电流分量 i_{d_req} 负责转子磁通控制。电流 i_{q_req} 的q轴电流分量产生转矩，电动机开始运转后通过改变电流 i_{q_req} 的极性，电动机改变旋转方向。假设BEMF观测器调节正确，可以使用电流FOC控制结构调整电流PI控制器。

图14.电流（转矩）控制模式



速度PMSM传感器/无传感器FOC（如图15所示）通过启用速度FOC控制结构激活。在“Speed_req”字段中输入所需的速度。在整个FOC控制期间，d轴电流参考保持为0。

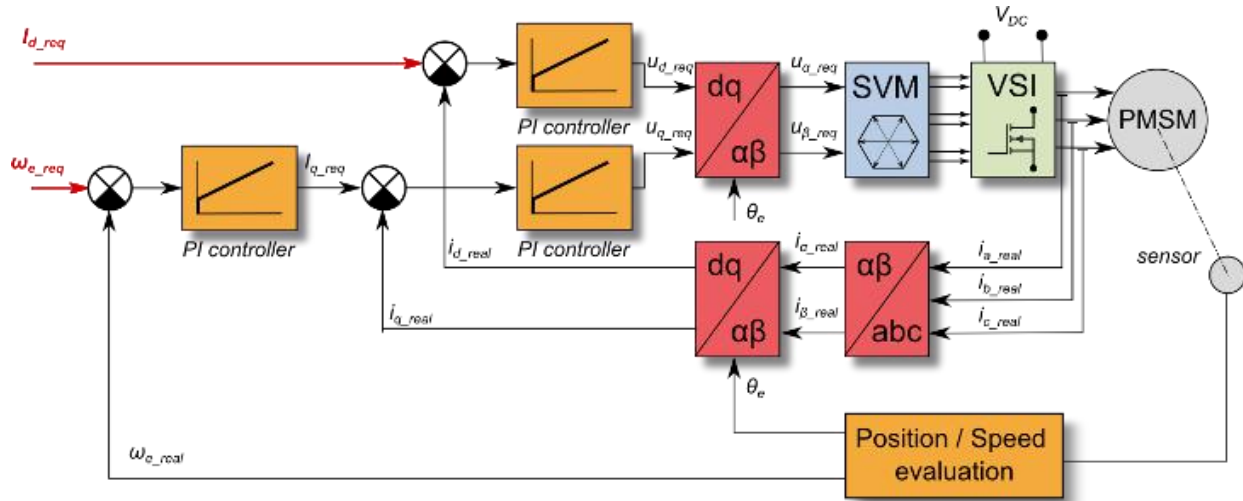
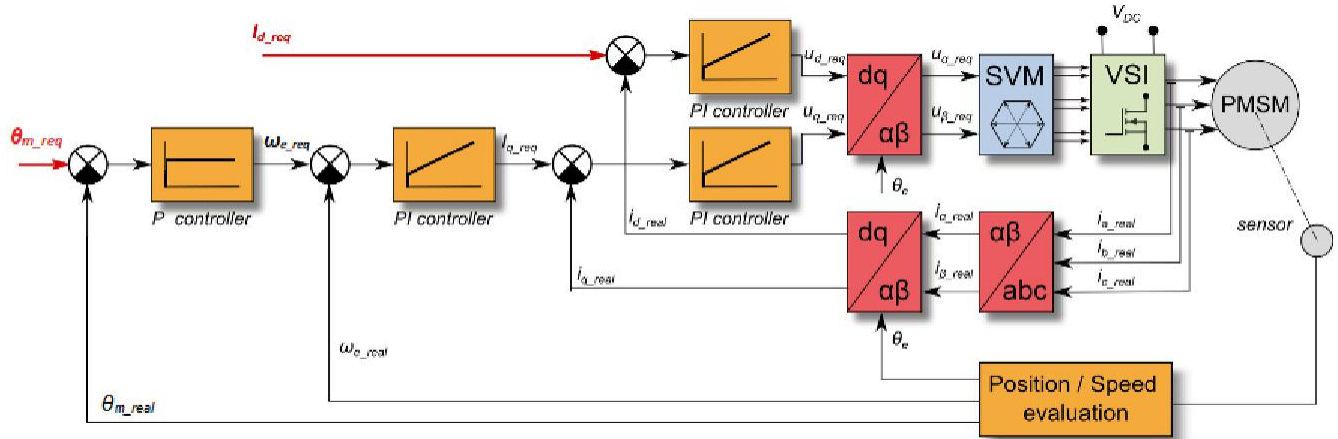


图15. Speed FOC控制模式

位置PMSM传感器FOC如图所示图16。可以在“速度和位置”菜单选项卡中调整使用P控制器的位置控制。反馈需要编码器传感器。没有传感器，位置控制不起作用。FRDM-MC-LVPM SM板上缺少制动电阻。因此，需要设置软速度斜坡（在“速度和位置”菜单选项卡中），因为当快速旋转的轴制动时，直流母线上的电压会升高。可能会导致过压故障。

图16.位置FOC控制模式



5.2.2 使用MCAT进行PMSM传感器/无传感器应用调整

本节提供有关如何分几步运行电机的指南。强烈建议仔细执行所有步骤，以消除调整过程中出现的任何问题。图17描述了典型的PMSM传感器/无传感器控制调整过程。以下各节将更详细地介绍每个调整阶段。

图17.运行新的PMSM

5.2.3 初始配置设置和更新

1. 打开包含专用MCAT插件模块的PMSM控制应用程序FreeMASTER项目。
2. 选择“基本”模式（推荐给没有电机控制理论经验的用户）。减少了所需输入参数的数量。
3. 选择“参数”选项卡。
4. 保留测量的电机参数或手动指定参数。电机参数可以从电机数据表或使用PMSM电气参数测量中描述的PMSM参数测量程序获得（文档[AN4680](#)）提供的所有参数表4可在“基本”和“专家”模式下访问。电机转动惯量J表示整个系统惯量，可以使用机械参数测量获得。J参数用于计算速度控制器常数。但是，手动控制器参数调节也可以得到控制器参数。

Table 4. MCAT电机参数

| 参数 | 单位 | 描述 | 典型范围 |
|---------------------|----------------------|---------|---------------|
| pp | [-] | 电机极对数 | 1 – 10 |
| Rs | [Ω] | 电机相电阻 | 0.3 – 50 |
| Ld | [H] | 电机相电感 | 0.00001 – 0.1 |
| Lq | [H] | 交轴电感 | 0.00001 – 0.1 |
| Ke | [V. sec /rad] | BEMF常数 | 0.001 – 1 |
| J | [kg·m ²] | 系统惯量 | 0.000001 – 1 |
| I _{ph nom} | [A] | 电机额定相电流 | 0.5 – 8 |
| U _{ph nom} | [V] | 电机额定相电压 | 10 – 300 |
| N _{nom} | [rpm] | 电机额定转速 | 1000 – 2000 |

5. 设置硬件定标值 - 使用标准功率板作为参考时，不需要修改这两个参数。这些定标值表示最大可测量的电流和电压模拟量大小。
6. 检查故障限制值 - 在“基本”模式下无法访问这些字段，根据电机参数和硬件定标值计算得到（参见表5）。

Table 5. 故障限制

| 参数 | 单位 | 描述 | 典型范围 |
|------------------------|-------|-----------------|--|
| U _{DCB trip} | [V] | 外部制动电阻开关打开时的电压值 | U _{DCB Over} ~ U _{DCB max} |
| U _{DCB under} | [V] | 检测到欠压故障的触发值 | 0 ~ U _{DCB Over} |
| U _{DCB over} | [V] | 检测到过压故障的触发值 | U _{DCB Under} ~ U _{max} |
| N _{over} | [rpm] | 检测到超速故障的触发值 | N _{nom} ~ N _{max} |
| N _{min} | [rpm] | 无传感器控制的最小实际速度值 | (0.05 ± 0.2) * N _{max} |

7. 检查应用程序定标值 - 这些字段在“基本”模式下无法访问，并使用电机参数和硬件定标值计算得到。

Table 6. 应用规模

| 参数 | 单位 | 描述 | 典型范围 |
|------------------|--------|---------|--------------------------|
| N _{max} | [rpm] | 速度定标值 | > 1.1 * N _{nom} |
| E _{max} | [V] | BEMF定标值 | Ke * N _{max} |
| kt | [Nm/A] | 电机转矩常数 | — |

8. 检查对齐参数 - 这些字段在“基本”模式下无法访问，并使用电机参数和硬件定标值计算。参数表示在转子对准期间施加到电动机的所需电压值及其持续时间。
9. 单击“存储数据”按钮将修改后的参数保存到内部文件中。

5.2.4 控制结构模式

1. 单击“标量控制”部分中的“禁用”按钮选择标量控件。按钮颜色变为红色，文本变为“ENABLED”。
2. 打开应用程序开关。应用程序状态更改为“RUN”。
3. 在“Freq_req”字段中设置所需的频率值;例如，“标量控制”部分中的15 Hz。电机开始运转（见图18）。

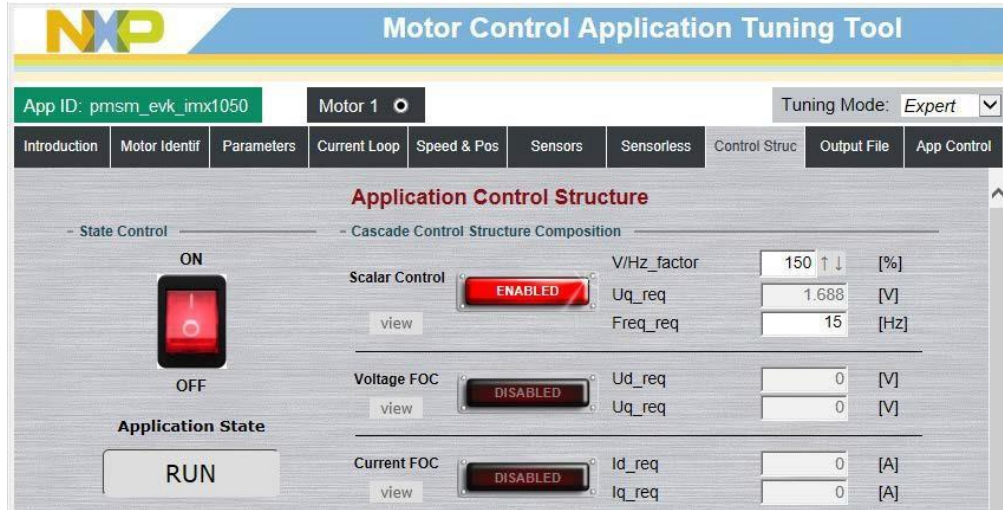
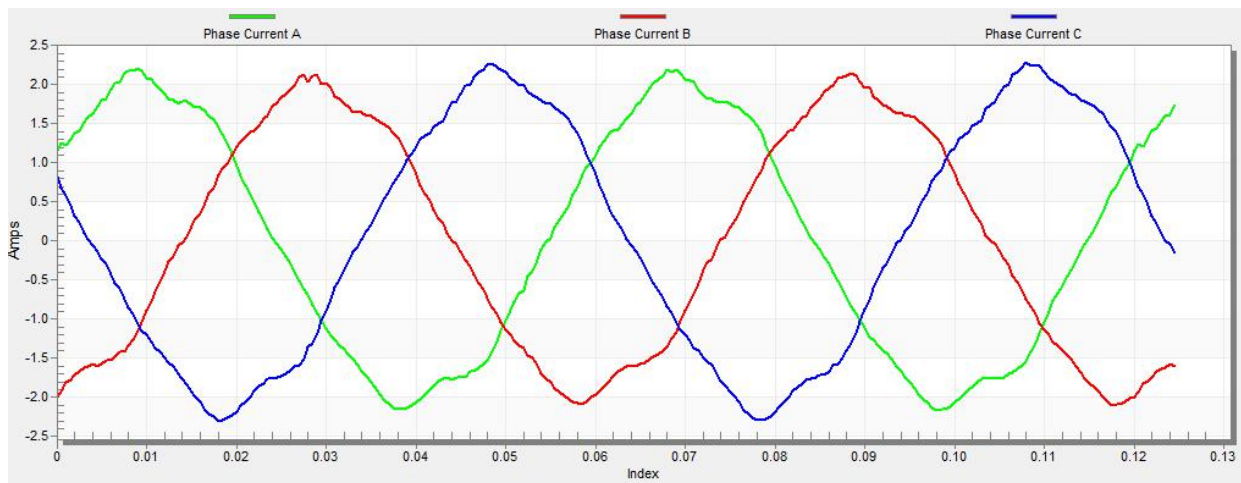


图18. MCAT标量控制

4. 从“标量和电压控制”FreeMASTER项目树中选择“Phase Currents”录波器。
5. 通过直接改变V / Hz系数或使用“UP / DOWN”按钮可以找到V / Hz曲线的最佳比率。电机电流的形状应接近正弦曲线形状 (见图19)。

图19.相电流



6. 选择“位置”录波器以检查观测器功能。“标量电角度”和“估计位置”之间的差异应该是最小的 (见图20) 使反电动势位置和速度观测器正常工作。位置差异取决于电机负载。负载越高, 由于负载角, 位置之间的差异越大。

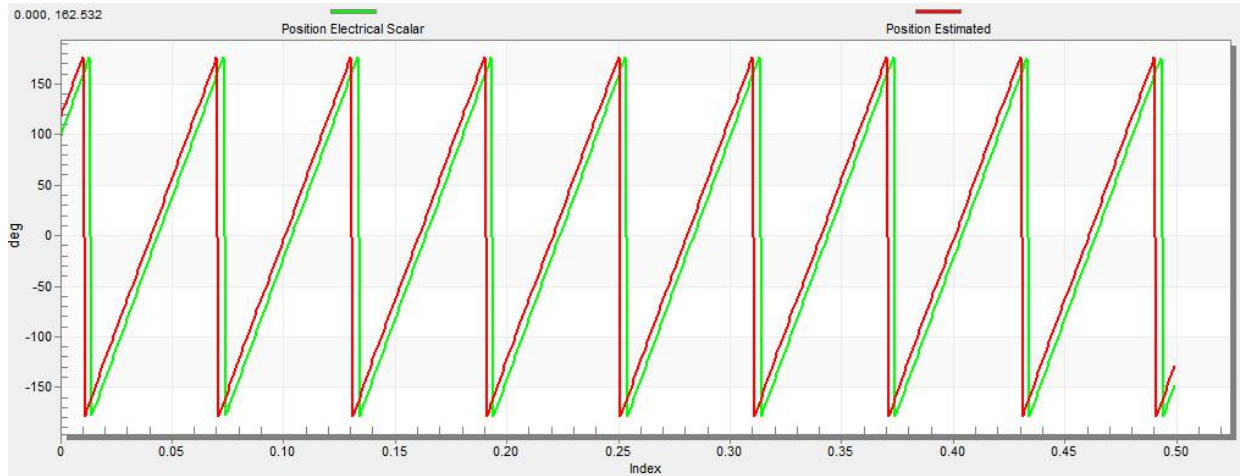


图20.生成和估计的位置

7. 如果需要相反的速度方向，请在“Freq_req”字段中设置负速度值。
8. 在此步骤中期望验证模拟量的测量和观测器的功能。
9. 在主应用开关关闭时，通过单击“Voltage FOC”部分中的“DISABLED”按钮启用电压FOC模式。
10. 打开主应用程序开关并在“Uq_req”字段中设置非零值。FOC算法使用估计的位置来运行电动机。

5.2.5 编码器设置

编码器设置位于“传感器”选项卡中。编码器使您可以计算传感器速度和位置控制所需的速度和位置。要进行正确的编码器计数，请设置每转一圈的编码器脉冲数和正确的计数方向。编码器脉冲的数量基于其制造商关于编码器的信息。如果编码器传感器每转具有更多脉冲，则速度和位置计算更准确。通过将编码器信号连接到恩智浦Freedom板，并通过连接电机相位来提供计数方向。旋转方向可以由以下方式确定：

1. 通过单击“控制结构”选项卡的“标量控制”部分中的“禁用”按钮来选择标量控制。按钮颜色变为红色，文本变为“ENABLED”。
2. 打开应用程序主开关。应用程序状态更改为“RUN”。
3. 在“Freq_req”字段中设置所需的频率值；例如，“标量控制”部分中的10 Hz。电机开始运转。
4. 检查编码器方向。从“标量和电压控制”项目树中选择“编码器方向范围”。如果编码器方向正确，则估计的速度等于测量的机械速度。如果测量的机械速度与估计的速度相反，则“传感器”选项卡中的方向必须从0更改为1（反之亦然）。

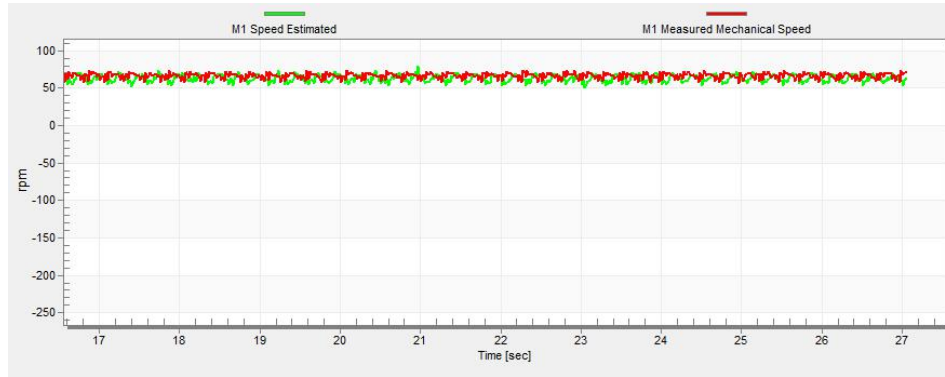


图21.编码器方向 - 方向正确

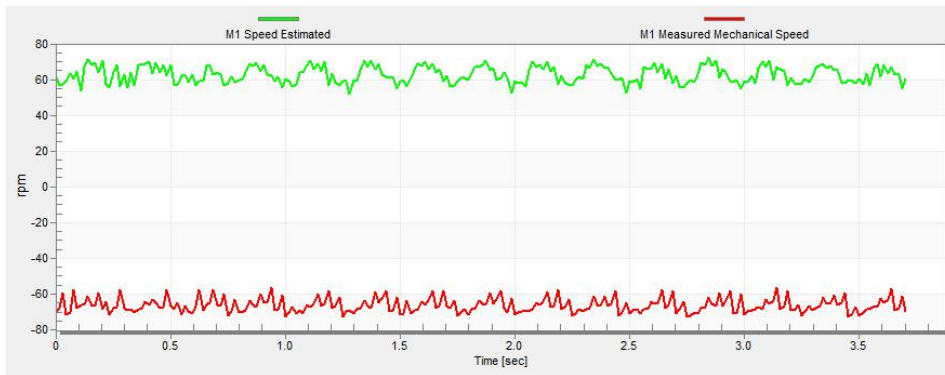


图22.编码器方向 - 方向错误

5.2.6 对齐调整

对于对齐参数，切换到“选项卡”菜单并选择“参数”。对齐程序将转子设置到准确的初始位置，并使您可以向电机施加完整的启动扭矩。转子对齐参数可在“专家”模式下进行编辑。需要正确的初始位置，主要用于高启动负载的工况（压缩机，洗衣机等）。对准的目的是使转子处于稳定位置，在启动之前没有任何振荡。

1. 对准电压是在对准期间施加到d轴的值。增加此值以获得更高的轴负载。
2. 对齐持续时间表示调用对齐例程的时间。调整此参数以使转子在对齐过程结束时没有振荡或移动。

5.2.7 电流环调节

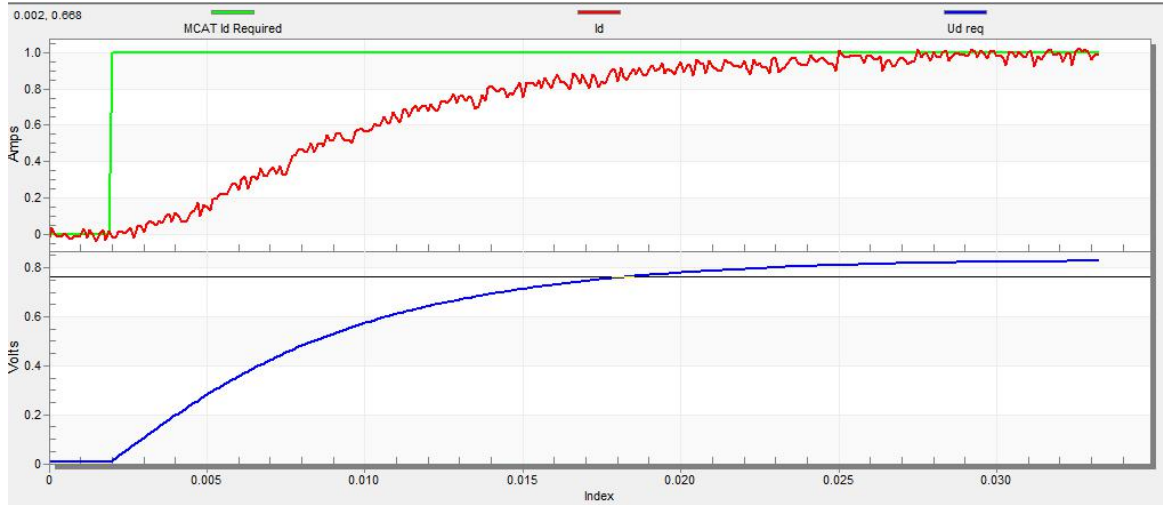
当前D, Q PI控制器的参数使用电机参数在“基本”模式下全部计算完成，在此模式下无需任何操作。如果计算出的环路参数与所需响应不对应，则可以调整带宽和衰减参数。

1. 将调整模式切换为“专家”。
2. 锁定电机轴。
3. 设置所需的环路带宽和衰减，然后单击“Current Loop”选项卡中的“Update Target”按钮。调节环路带宽参数决定了环路响应的速度

而调节环衰减参数决定了实际的过调幅度。

4. 选择“ID电流控制器”录波器。
5. 选择“控制结构”选项卡，切换到“电流FOC”，将“ I_{q_req} ”设置为一个非常低的值（例如0.01），并在“ I_{d_req} ”中设置所需的阶跃值。控制回路响应显示在示波器中（参见图6）。
6. 调整环路带宽和衰减，直到达到所需的响应。下面的示例波形显示了正确和错误的电流环参数设置下的响应波形环
 - 环路带宽较低（110 Hz）， I_d 电流的建立时间较长（见图21）。

图23. I_d 电流控制器的慢速阶跃响应



- 环路带宽（400 Hz）是最佳的，并且 I_d 电流的响应时间足够（参见图22）。

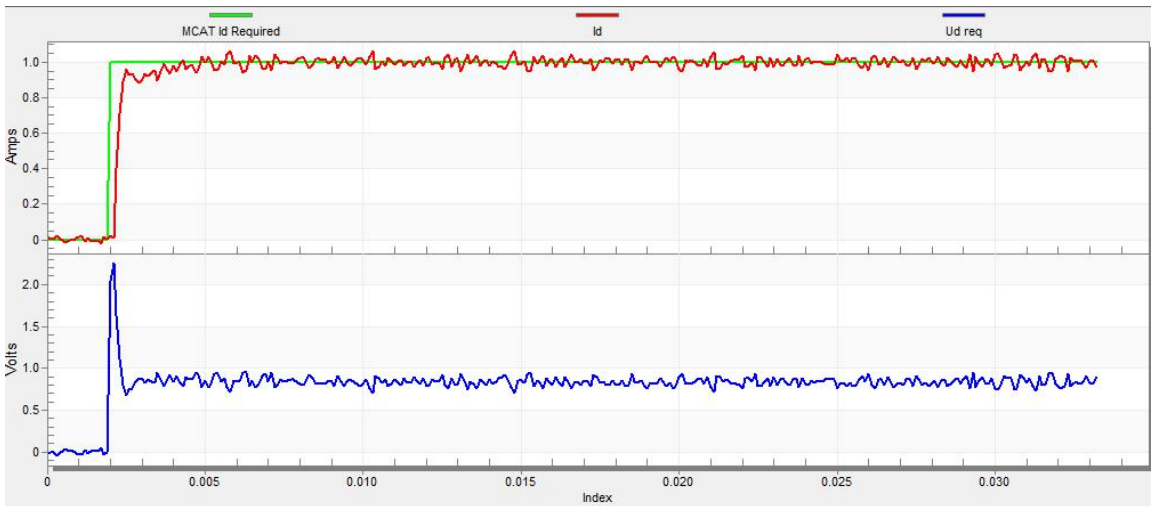


图24. I_d 电流控制器的最佳阶跃响应

- 环路带宽很高（700 Hz）， I_d 电流的响应时间非常快，但有振荡和过冲（见图23）。

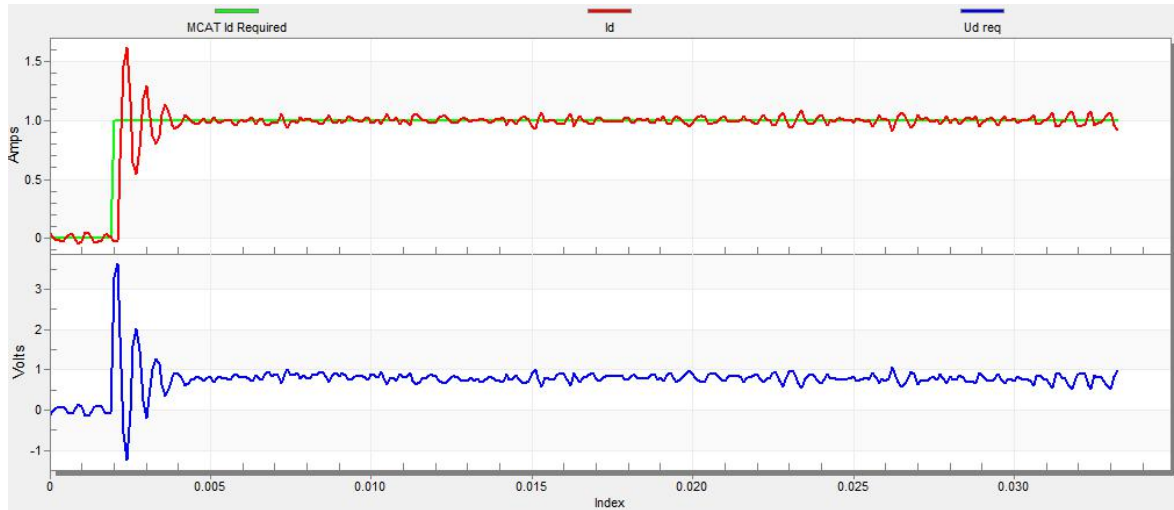


图25. Id电流控制器的快速阶跃响应

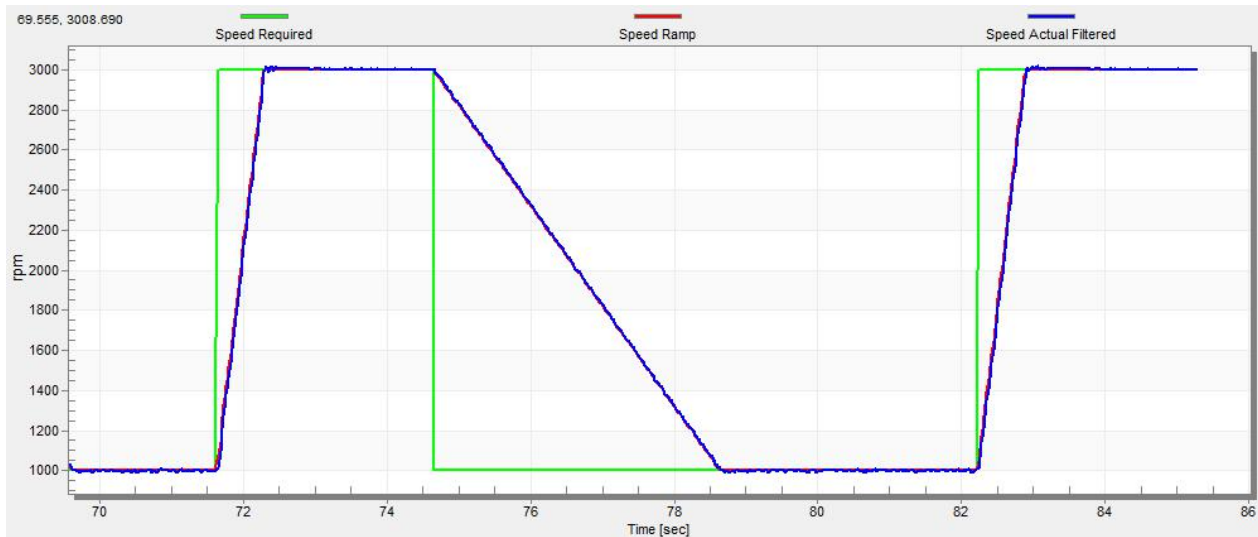
5.2.8 速度斜坡调整

速度命令通过速度斜坡应用于速度控制器。斜坡函数包含两个增量（向上和向下），表示每秒的电机加速度和减速度。如果增量非常高，则可能在加速期间导致过流故障，在减速期间可能导致过压故障。在“速度”范围内，您可以查看“Speed Actual Filtered”波形形状是否等于“Speed Ramp”曲线。

斜率对于标量和速度控制是常见的。斜率在“Speed & Pos”选项卡中设置，可在两种调整模式下访问。单击“更新目标”按钮将更改应用于MCU。示例速度配置文件显示在图24。斜坡下降斜率设置为500 rpm / sec，而上升斜率设置为3,000 rpm / sec。

启动斜坡斜率位于“无传感器”选项卡中，其值通常高于速度环斜坡的值。

图26.速度配置文件



5.2.9 开环启动

可以通过位于“无传感器”选项卡中的一组参数来调整启动过程。在两种调节模式下都可以访问其中两个（斜坡斜率和电流）。除了标量控制之外，还可以在所有控制模式下处理启动调整。设置最佳值可以使电机正常启动。对动态响应要求较低的应用场合（风扇，泵）的示例启动状态如下所示图25。

1. 从FreeMASTER项目树中选择“Startup”示波器。
2. 通常将启动斜坡斜率设置为高于速度环斜坡斜率的值。
3. 根据所需的启动转矩设置启动电流。对于风扇或泵等驱动器，启动转矩不是很高，可以设置为额定电流的15%。
4. 设置所需的合并速度 - 当开环和估计的位置合并开始时，阈值大多设置在标称速度的5%~10%的范围内。
5. 设置合并系数 - 在位置合并过程持续时间中，100%对应于电周期的一半。值越高，合并完成的速度越快。对于需要高启动转矩和开环与闭环之间平滑过渡的驱动器，推荐设置接近1%的值。
6. 单击“更新目标”按钮将更改应用于MCU。
7. 切换到“控制结构”选项卡，然后启用“速度FOC”。
8. 将所需速度设置为高于合并速度。
9. 检查示波器中的启动响应。
10. 调整启动参数，直到获得最佳响应。
11. 如果转子未开始运转，请增加启动电流。
12. 如果合并过程失败（转子卡住或停止），则减小启动斜坡斜率，增加合并速度，并将合并系数设置为5%。

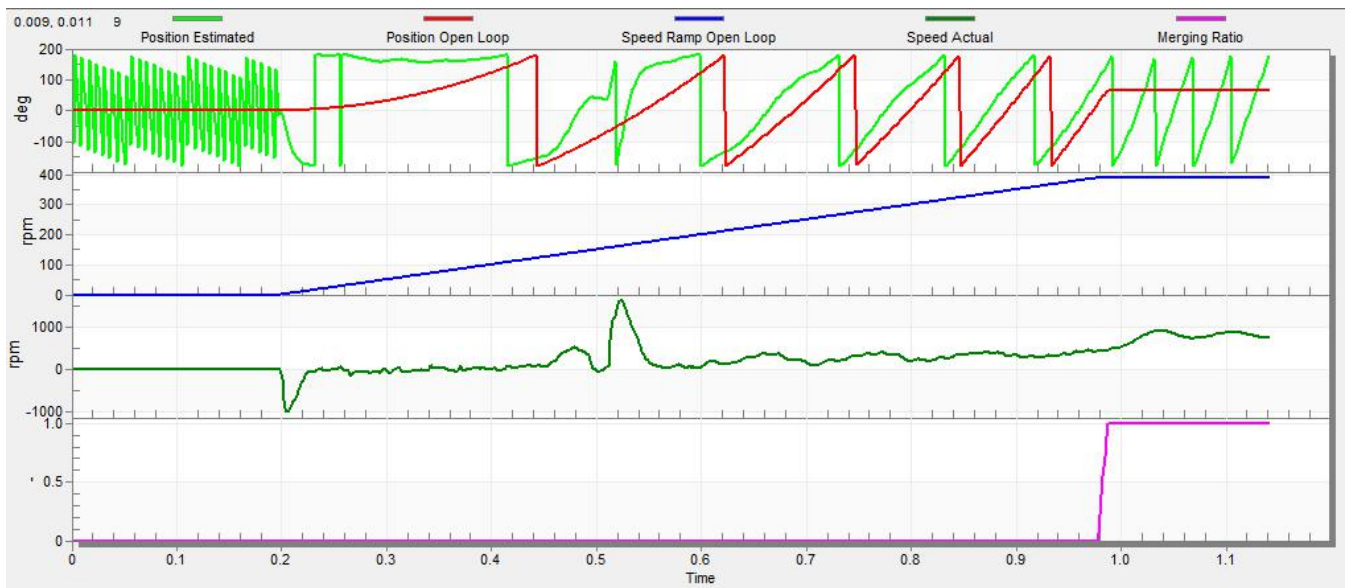


图27.电机启动

5.2.10 BEMF观测器调节

在“基本”模式下，BEMF观测器和跟踪观测器的参数使用电机参数计算得到，在此模式下无需任何操作。如果计算的环路参数与最佳响应不匹配，则可以调整带宽和衰减参数。

1. 将调整模式切换为“专家”。
2. 从FreeMASTER项目树中选择“Observer”示波器。
3. 设置BEMF观测器所需的带宽和衰减 - 带宽通常设置为接近当前环路带宽的值。
4. 设置跟踪观测器所需的带宽和衰减 - 对于大多数低动态响应要求的驱动（风扇，泵），带宽通常设置在10 - 20 Hz范围内。
5. 单击“更新目标”按钮将更改应用于MCU。
6. 检查示波器中的观测器的动态响应。

5.2.11 速度PI控制器调整

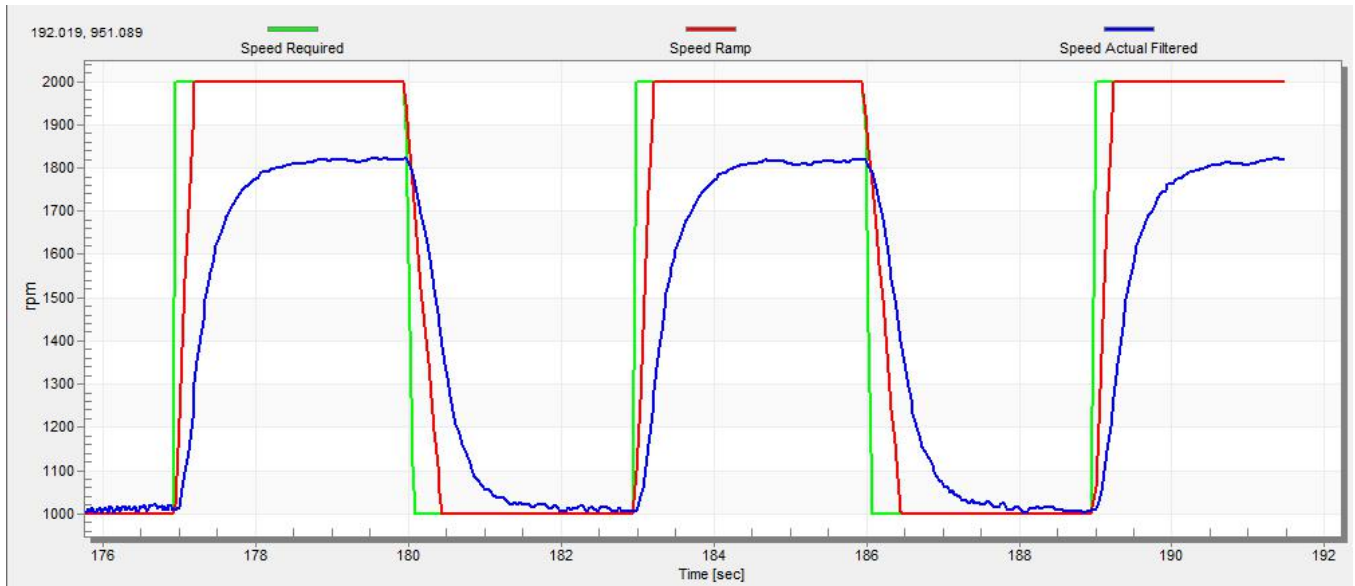
电机速度控制回路是一阶函数，其机械时间常数取决于电机惯量和摩擦力。使用PMSM电气和机械参数测量过程获得这些机械常数在第2节中描述5.1.6，“机械参数测量”和节5.1.7，“PMSM电气和机械参数测量过程”。如果这些机械常数可用，则可以使用环路带宽和衰减来调整PI控制器常数。否则，可以手动调节速度控制器的P和I部分，以获得所需的速度响应（参见示例响应 图26）。有许多方法可用于调整PI控制器常量。以下步骤提供了其中一个示例来设置和调整PMSM电机的速度PI控制器：

1. 从FreeMASTER项目树中选择“速度控制器”选项。
2. 选择“速度和位置”选项卡。
3. 选中“手动常量调整”选项 - 即禁用“带宽”和“衰减”字段，并启用“SL_Kp”和“SL_Ki”字段。
4. 调整比例增益：
 - a) 将“SL_Ki”积分增益设置为零。
 - b) 将速度斜坡设置为1000 rpm / sec（或更高）。
 - c) 切换到“控制结构”选项卡，以适当的速度运行电机（约为额定速度的30%）。
 - d) 将所需速度设置为Nnom的40%。
 - e) 切换回“速度环”选项卡。
 - f) 调整比例增益“SL_Kp”，直到系统正确响应所需值并且没有任何振荡或过度过冲：
 - 如果“SL_Kp”设置偏低，则系统响应缓慢。
 - 如果“SL_Kp”设置偏高，则系统响应更快。

- 当“SL_Ki”字段等于0时，系统很可能无法达到所需的速度。
- g) 单击“更新目标”按钮将更改应用于MCU。
- 5. 调整积分增益：
 - a) 慢慢增加“SL_Ki”字段，以将所需速度和实际速度之间的静差调整为0。
 - b) 调整“SL_Ki”字段，当速度阶跃被设置后，在实际调节过程中看不到明显的震荡和过调
 - c) 单击“更新目标”按钮将更改应用于MCU。
- 6. 调整环路带宽和衰减，直到达到所需的响应。以下波形展示了正确和不正确的速度环参数设置的响应波形：

- “SL_Ki”值很低，“滤波后的实际转速”未达到“速度命令”（参见“Speed Ramp”）图26).

图28.速度控制器响应-SL_Ki值低，未达到速度斜坡命令



- “SL_Kp”值很低，“滤波后的实际转速”超调很大，并且响应时间过长也不是我们所期望的（参见图27).

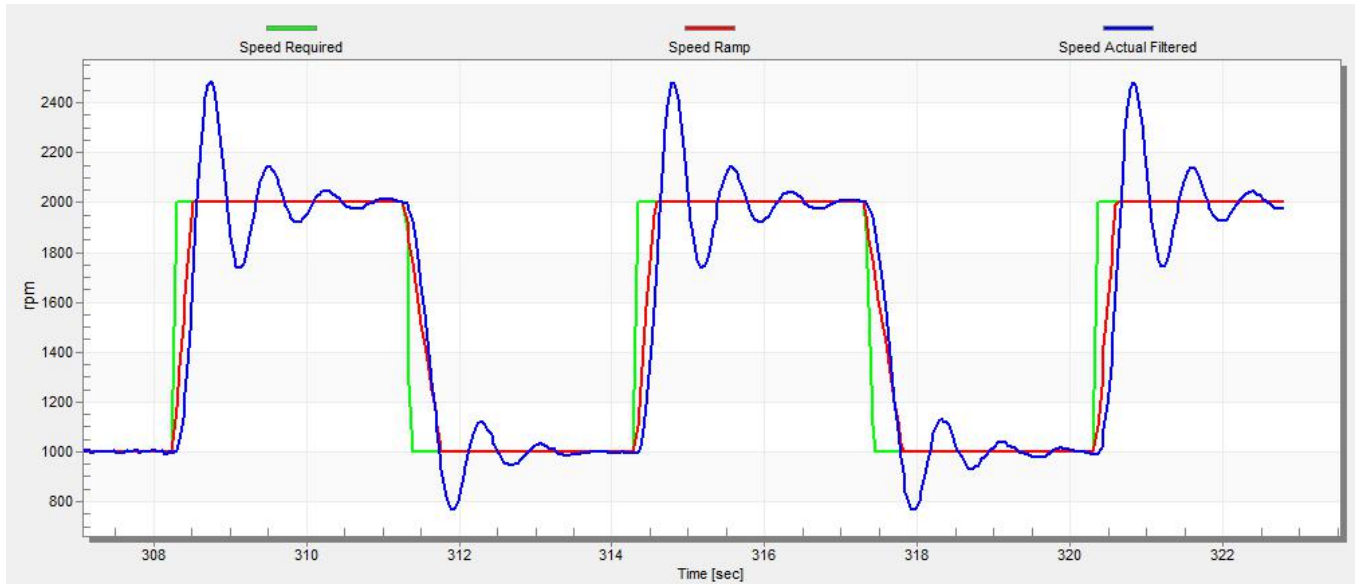


图29.速度控制器响应-SL_Kp值低，速度实际过滤大大超调

- 速度环响应具有小的过冲，并且“滤波后的实际转速”建立时间足够。这种响应可以被认为是最佳的（见图28）。

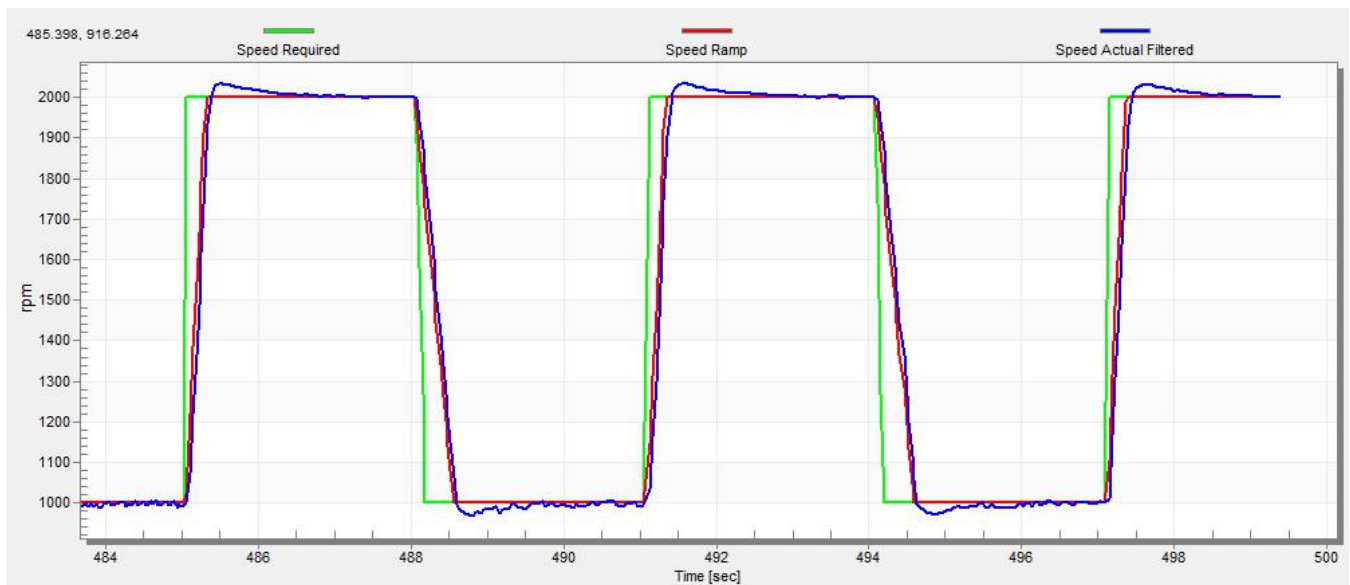


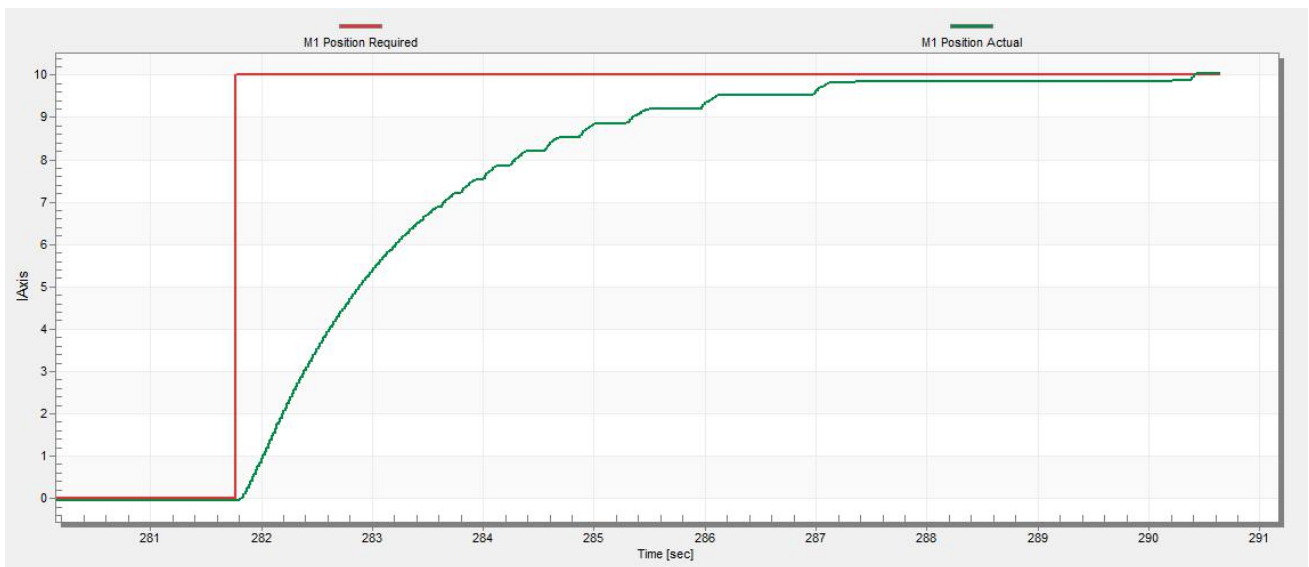
图30.速度控制器响应速度环路响应，具有小的过冲

5.2.12 位置P控制器调整

可以使用“速度和位置”菜单选项卡中的比例增益“PL_Kp”调整位置控制环。它是一个比例控制器，可用于非预置位置控制系统。最佳位置响应的关键是合适的控制器参数值，它简单地将误差乘以比例增益（Kp）以得到控制器输出。用户指南中介绍了TG驱动电机的预定义基准值，但对于不同的电机，可以手动更改。编码器必须用于位置控制。以下步骤提供了如何为PMSM电机设置位置环P控制器的参数：

1. 从FreeMASTER项目树中选择“位置控制器”。
2. 选择“速度和位置”选项卡。
3. 调整位置P控制器常数的比例增益：
 - a) 设置一个小值“PL_Kp”（M1位置环Kp增益）并单击“更新目标”按钮。
 - b) 切换到“控制结构”，选择位置控制并将所需位置（例如）设置为10转。
 - c) 选择“位置控制器”并观察实际位置响应。
4. 重复之前的步骤，直到获得所需的位置响应。

“PL_Kp”值很低，并且所需位置的实际位置对给定位置响应非常慢。



“PL_Kp”值太高，实际位置对所需位置响应有很大的超调。

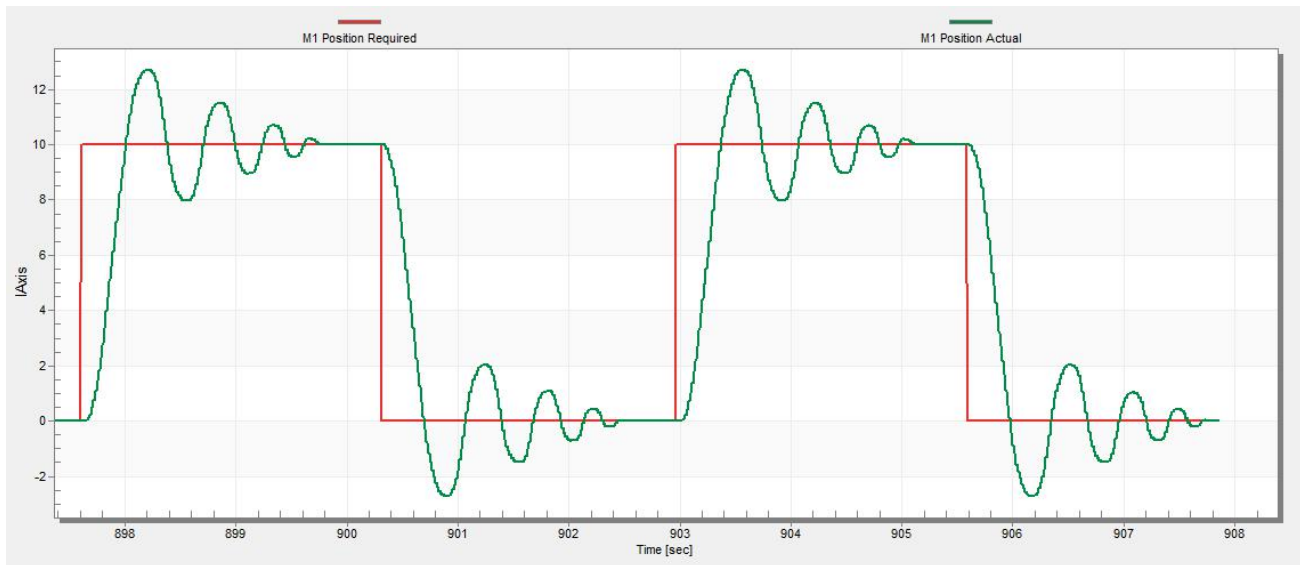


图32.位置控制器响应-PL_Kp值太高，实际位置超调

“PL_Kp”值最优，实际位置响应是最佳的。

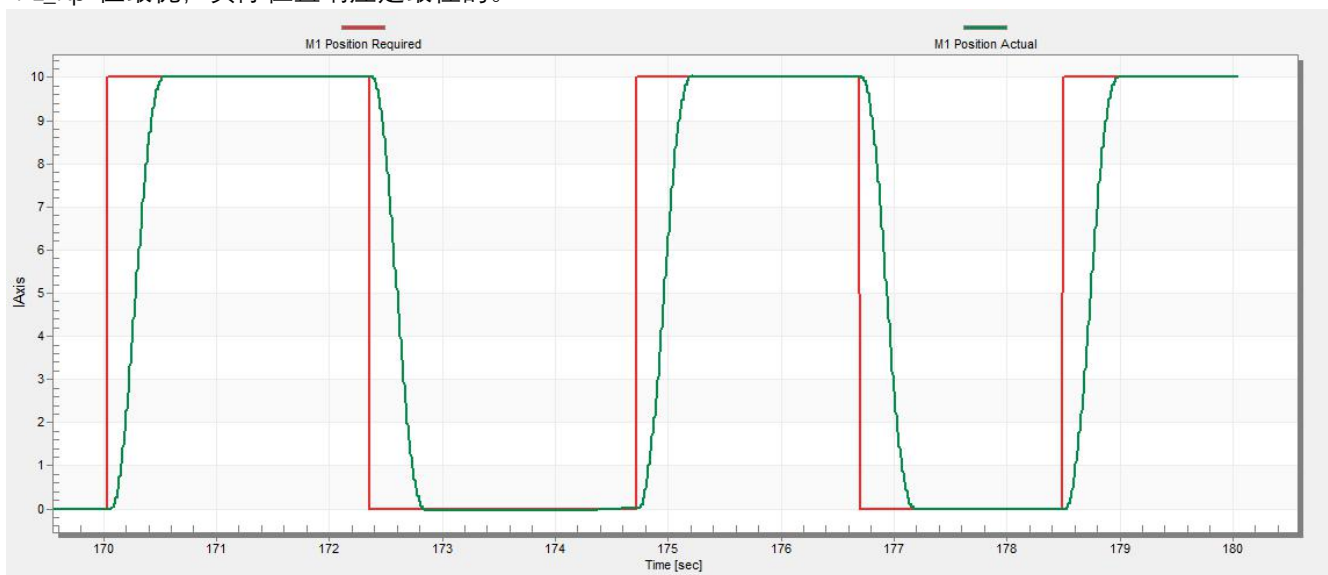


图33.位置控制器响应 - 实际位置响应良好

5.2.13 MCAT输出文件生成

成功完成应用程序调整并希望将所有计算参数存储到嵌入式应用程序后，选择“输出文件”选项卡。可以在那里查看MCAT生成的所有定义列表。单击“生成配置文件”按钮将覆盖旧版本的m1_pmsm_appconfig.h文件，该文件包含这些定义。请注意，对于电机参数文件生成的正确功能，必须提供文件的正确路径。要更改路径，请将鼠标光标导航到MCAT屏幕的右上角，直到出现带有螺丝刀和扳手的符号。单击此符号时，将显示“应用程序设置页面”。在“项目路径选择”区域中，您可以修改m1_pmsm_appconfig.h的路径。

6 结论

本应用笔记介绍了采用FRDM-MC-LVPMSM NXP Freedom开发平台在NXP MIMXRT1050 EVK上实现三相PMSM的传感器和无传感器磁场定向控制。控制软件的硬件相关部分（包括详细的外设设置，电机控制外设初始化和应用时序）将在章节中介绍3, “MCU功能和外设设置”。电机参数识别理论和识别算法本身在章节中描述5.1, “PMSM参数识别”。本文档的最后部分介绍并解释了基于FreeMASTER通信接口的电机控制应用调整（MCAT）工具所代表的用户界面。

7 缩略语

Table 7. 缩略语

| 缩写 | 含义 |
|---------|-------------|
| ADC | 模数转换器 |
| ACIM | 异步电动机 |
| ADC_ETC | ADC外部触发控制 |
| AN | 应用说明 |
| CCM | 时钟控制器模块 |
| CPU | 中央处理器 |
| DC | 直流电 |
| DRM | 设计参考手册 |
| ENC | 编码器 |
| FOC | 磁场定向控制 |
| GPIO | 通用输入/输出 |
| LPUART | 通用异步接收器/发送器 |
| MCAT | 电机控制应用调整工具 |
| MCDRV | 电机控制外设驱动器 |
| MCU | 微控制器 |
| PI | 比例积分控制器 |
| PLL | 锁相环 |
| PMSM | 永磁同步电机 |
| PWM | 脉冲宽度调制 |
| QD | 正交解码器 |
| TMR | 四路定时器 |
| USB | 通用串行总线 |
| XBAR | 外围交叉开关 |

8 参考

这些参考资料可在nxp.com:

1. 无传感器PMSM磁场定向控制 (文件[DRM148](#)).
2. 用于三相PMSM的电机控制应用调整 (MCAT) 工具 (文档[AN462](#)).
3. Kinetis KV上的无传感器PMSM磁场定向控制 (文件[AN523](#)).
4. i.MX RT1050处理器参考手册 (文件[IMXRT1050RM](#)).

如何联系我们：

主页：

nxp.com

网络支持：nxp.com/support

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use NXP products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits based on the information in this document. NXP reserves the right to make changes without further notice to any products herein.

NXP makes no warranty, representation, or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does NXP assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. “Typical” parameters that may be provided in NXP data sheets and/or specifications can and do vary in different applications, and actual performance may vary over time. All operating parameters, including “typicals,” must be validated for each customer application by customer’s technical experts. NXP does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. NXP sells products pursuant to standard terms and conditions of sale, which can be found at the following address:

nxp.com/SalesTermsandConditions.

NXP, the NXP logo, NXP SECURE CONNECTIONS FOR A SMARTER WORLD, Freescale, and the Freescale logo are trademarks of NXP B.V. All other product or service names are the property of their respective owners. Arm, Arm Powered, and Cortex, are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the EU and/or elsewhere. IAR Embedded Workbench is a registered trademark owned by IAR Systems AB. All rights reserved.

© 2018 NXP B.V.

文件号：AN12169

Rev. 0

05/2018

