

1 介绍

本应用笔记描述了采用 NXP LPC553x/ LPC55S3x 处理器的双伺服演示，这也可作为基于其他产品的电机控制应用开发的参考。

LPC553x/LPC55S3x 是一款具有单个 Arm Cortex-M33 核的处理器，其运行速度高达 150 MHz。它改进了产品结构和集成度、降低了功耗，并提供了高级的安全功能，使 LPC553x/LPC55S3x 成为众多高性能应用的理想选择。

该演示包括 LPCXpresso55S36、两个 FRDM-MC-PMSM 驱动电路板和两个三相伺服电机。LPC553x/LPC55S3x 处理器通过 ADC 采样电机的电流和电压。ENC 模块接收编码器信号以获得转子位置和速度，并基于 FOC 算法生成 PWM 以驱动电机。同时，UART 可以用来与 FreeMASTER 通信，实现命令发送、变量观察等功能，方便用户调试。最后，可以实现精确的位置控制和平滑的速度调节。

[系统结构和软件](#)部分介绍双伺服演示的系统结构和软件。[关键外设配置](#)部分介绍双伺服演示的外设配置。[演示操作](#)部分介绍如何操作双伺服演示。

2 系统结构和软件

本节专门讨论系统和软件的具体情况。

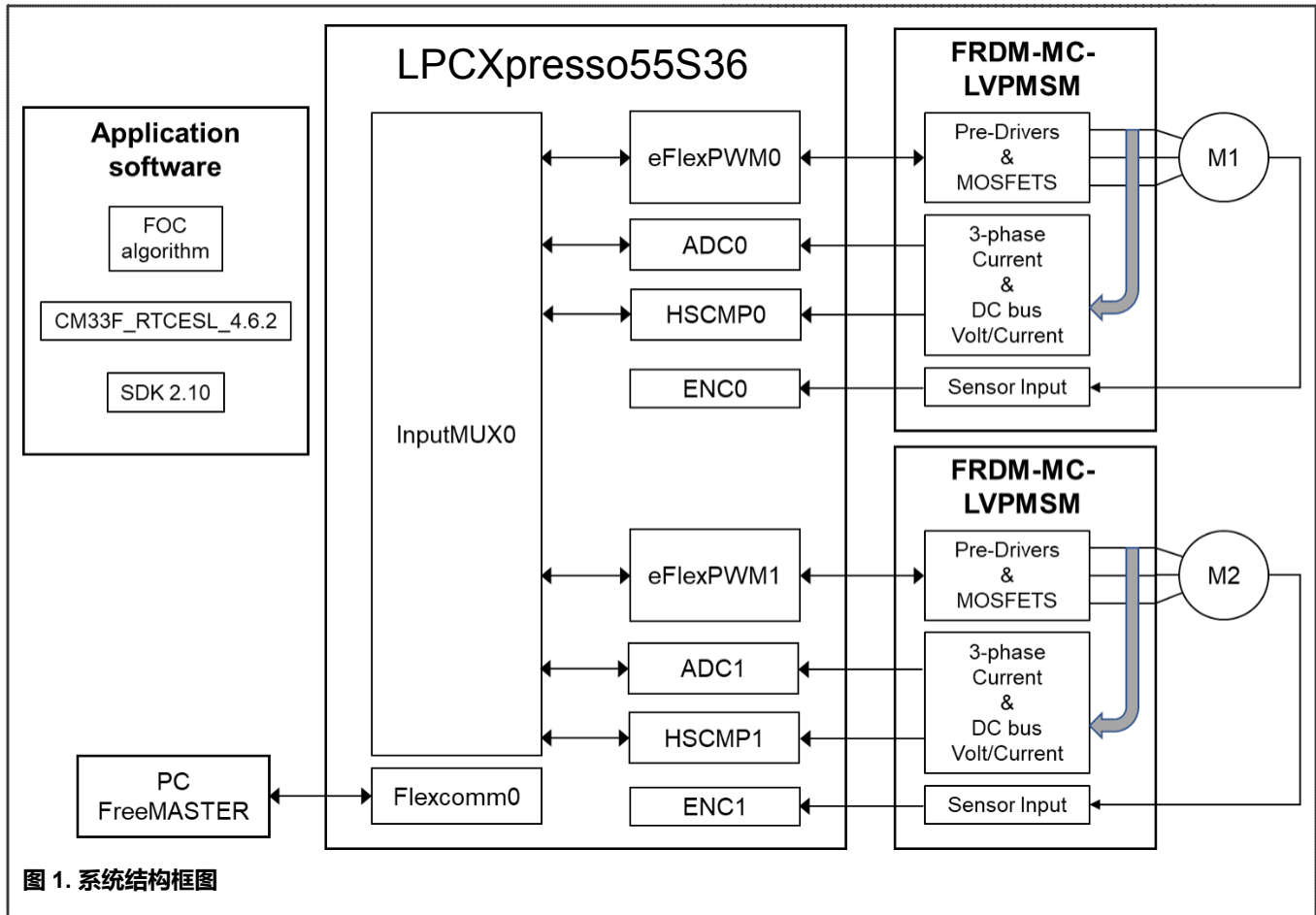
2.1 系统结构

[图 1](#) 展示了该双伺服演示的系统结构框图。

目录

1	介绍	1
2	系统结构和软件	1
3	关键外设配置	4
4	演示操作	11
5	参考资料	19
6	修订历史	19
	法律声明	20





- 恩智浦设计的 LPCXpresso55S36 包含 LPC553x/LPC55S3x 芯片和外围接口。
- 恩智浦设计的 FRDM-MC-LVPMSM 是一块电机驱动电路板，包含驱动桥、模拟采样电路和一个编码器接口。
- M1 和 M2 是带有 1000 线编码器的伺服电机。
- eFlexPWM、ENC、ADC 是片上外设，分别用于电机控制、编码器信号采集和模拟量采样。
- InputMUX 是一个输入多路复用模块，可以为芯片的内部外设提供不同的信号路径选择。在这个演示中，它负责为 PWM 同步、ADC 硬件触发和故障保护提供信号连接。
- 应用软件在 LPC553x/LPC55S3x 上运行，该应用软件包括 FOC 算法、CM33_RTCESL_4.6.2（实时控制嵌入式软件电机控制和电源转换库）和 SDK 2.10。
- Flexcomm 提供了各种外围功能选项，可以通过软件配置成 USART、SPI、I2C、I2S 功能。这里我们将其配置为 USART 功能，以实现 FreeMASTER 调试工具与 LPC553x/LPC55S3x 之间的通信，进行用户操作的演示。

2.2 伺服控制结构

如图 2 所示，本演示中伺服控制的控制框图是一个经典的 3 环路结构。

最里面的环路是电流控制环路（快速环路），它包含模拟信号采样、FOC 算法和 PWM 占空比更新。

中间的环路是速度控制环路。期望速度和用测速方法得到的测量速度之间有一个速度误差。这个速度误差被输入到速度 PI 控制器中，为产生扭矩的定子电流分量生成一个新的期望值。

最外层的环路是位置控制环路。位置指令由高级应用层输入。实际位置命令和测量位置之间有一个位置误差。该位置误差被输入到位置控制器，生成一个新的参考速度。

注意

为了使系统平稳地运行，位置参考必须经过路径规划。如果位置参考信号是不连续的，就要在位置控制器之前增加斜坡和轨迹滤波处理。

此外，位置控制环路中还添加了一个前馈控制器。它是一个根据干扰或给定值的变化而工作的控制系统。它的特点是，当干扰产生而被控变量不发生变化时，它根据干扰进行控制，以补偿对被控变量的影响。在此应用中，所需位置的差值被用作前馈输入，输出为参考速度。经过合理的调试，可以达到较好的位置跟踪效果，减少位置误差，提高响应速度。

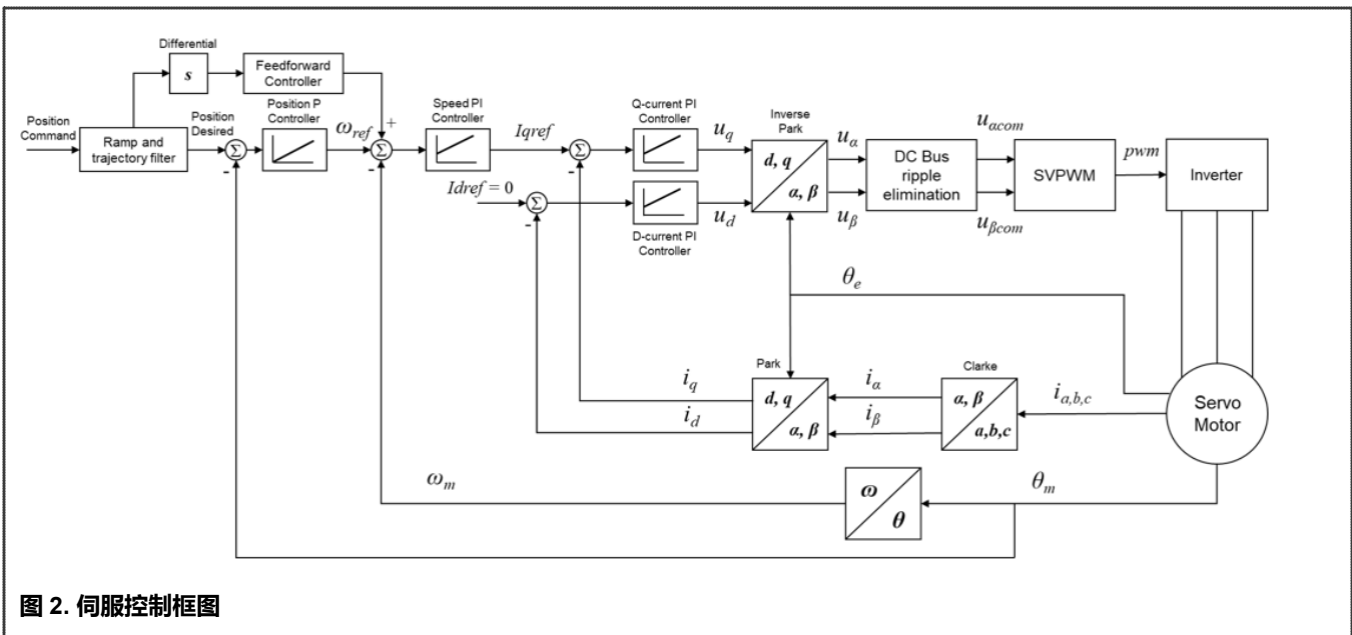


图 2. 伺服控制框图

其中，FOC 是一种基于定子磁场定向的矢量控制技术。其基本思想是将定子电流解耦为一个控制磁场的分量和一个控制扭矩的分量。解耦后，这两个电流分量是独立控制的，互不干扰。现在该电机的控制器结构与单独励磁直流电机的控制器一样简单。

要实现 FOC 控制，需要执行以下步骤：

1. 检测电机的物理量（相电流、电压、转子位置）。
2. 用克拉克变换将三相定子电流转换到两相坐标系（ α ， β ）。
3. 使用帕克变换将 α 、 β 轴定子电流旋转变换到 d 、 q 坐标系。
4. 独立控制转矩电流（ i_{sq} ）分量和励磁电流（ i_{sd} ）分量。
5. 使用解耦模块计算输出定子空间电压矢量。
6. 通过反帕克变换将定子空间电压矢量从 d 、 q 坐标系转换到 α 、 β 坐标系。
7. 使用空间矢量调制来产生三相电压输出。

为了将定子电流分解为转矩分量和磁通分量，就要知道电机励磁磁通的位置，而这需要准确检测和获得转子的位置和速度信息。在本应用实例中，通过 LPC553x/LPC55S3x 中的 ENC 模块采集电机编码器的输出信号，来获得转子位置和速度信息。该部分的细节将在第 3.6 节[正交解码器 \(ENC\)](#) 中介绍。

3 关键外设配置

本双伺服电机演示只使用了应用代码中实现的双电机控制技术必不可少的外设。

3.1 系统配置 (SYSCON)

SYSCON 模块具有多种功能，如系统和总线控制、时钟选择和控制、锁相环配置和复位唤醒控制。本设计中的主要功能是生成和控制每个子模块的时钟，并管理其工作模式。

在这个电机控制演示中，使用了两个时钟源：

- PLL0，它是由外部晶体振荡器输入，经过锁相环的倍频和分频得到，频率为 150 MHz。
- FRO_HF，它是由芯片上的晶体振荡器产生，并且是分频的，频率为 96 MHz。

Arm 核的工作频率为 150 MHz，时钟源为 PLL0。对于这种情况，已经在 `clock_config.c` 中设置以下寄存器：
MAINCLKSELB[SEL], AHBCLKDIV[DIV].

ENC 模块的时钟源与 Arm 核相同，频率为 150 MHz。

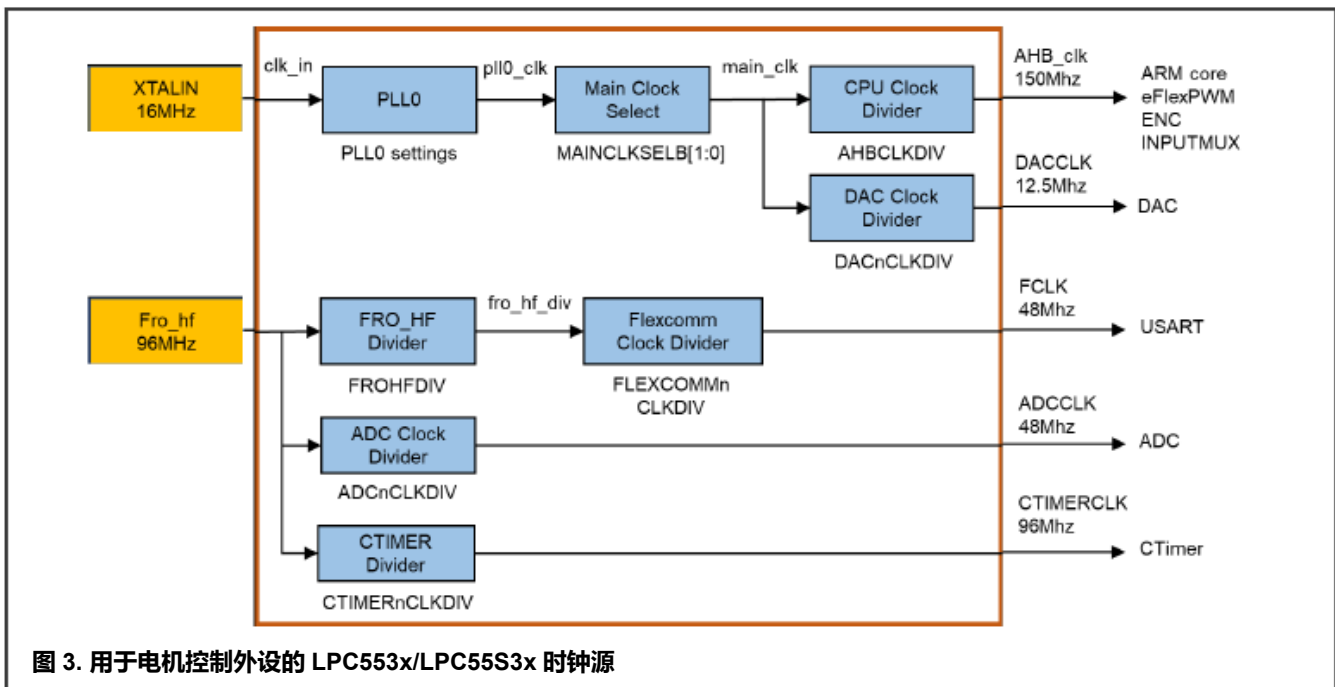
CTimer 模块由 `fro_hf` 提供时钟，频率为 96 MHz。

ADC 模块由 `fro_hf` 提供时钟，然后以 48 MHz (除以 2) 的频率工作。

Flexcomm 由 `fro_hf_div` 提供时钟，频率为 48 MHz。

DAC 模块由 `main_clk` 提供时钟，然后以 12.5 MHz (除以 12) 的频率工作。

图 3 显示了本应用中用于电机控制外设的时钟结构图。



3.2 模拟量采样 (ADC)

ADC0 和 ADC1 用于电机控制电流和直流母线电压的模拟量采样。

- ADC0 和 ADC1 的时钟频率是 48 MHz。它取自 FRO_{HF} 并除以 2。
- ADC 操作为 16 位，选择单端转换和硬件触发。
- ADC 触发源通过“输入多路复用器” (INPUTMUX) 得到路由。触发信号来自 eFlexPWM 模块。必须为该功能设置 $TCTRL[HTEN]$ 寄存器。
- 每个 ADC 模块有两个独立的结果队列，并且每个都包含 16 个条目。

两个 ADC 都有自己的触发链。触发采样后，采集相电流和母线电压，并依次存储在结果队列缓冲区中。

由于相位电流是在下桥臂晶体管导通期间测量的，如果占空比非常高（电压值在正弦曲线的最大区域），如图 4 所示，可以测量电流的时间就非常短。为了获得稳定的电阻电压降采样，下桥臂晶体管必须至少开启一个临界脉冲宽度。因此，我们使用 ADC 的双单端采样模式，同时对两相电流进行并行采样，第三相电流根据公式计算。通道是根据产生的定子空间电压矢量的扇区来选择的，这种分配是在 ADC 中断服务程序的末尾进行的。ADC 通道的配置如表 1 所示。

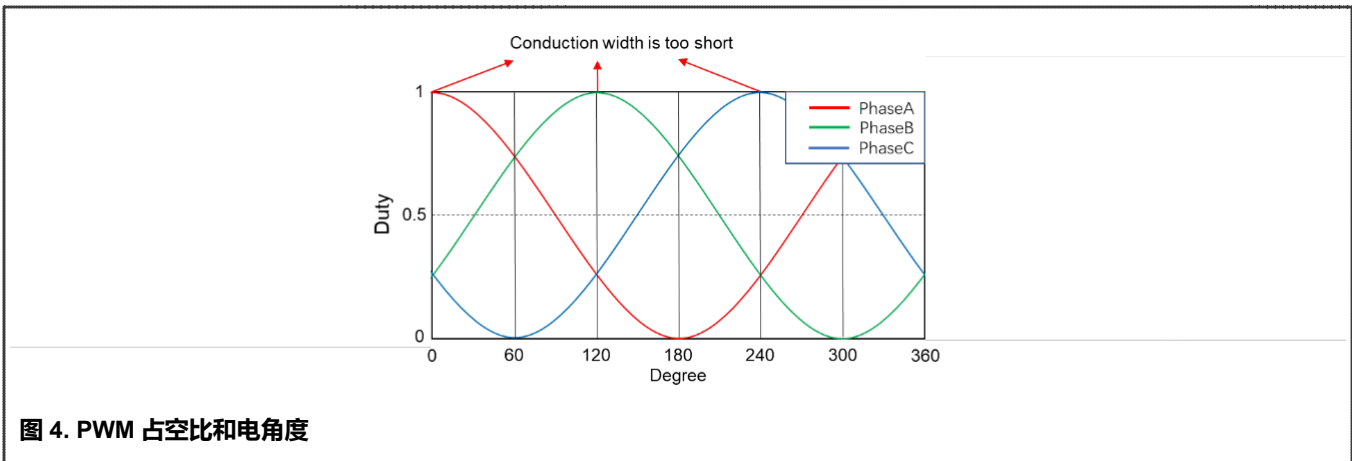


图 4. PWM 占空比和电角度

表 1. ADC 采样通道配置

扇区号	ADC 通道 A	ADC 通道 B
扇区 1	B 相	C 相
扇区 2	A 相	C 相
扇区 3	A 相	C 相
扇区 4	A 相	B 相
扇区 5	A 相	B 相
扇区 6	B 相	C 相

为了实现双单端模式下的灵活采样功能，需要在 $CMDLx[ALTBEN]$ 寄存器中启用备用通道功能，并在 $CMDLx[ALTB_ADCH]$ 寄存器中设置需要的 B 通道号。而在读取 ADC 结果寄存器时，要根据当前空间电压矢量所在的扇区号和公式计算出完整的三相电流值。

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

这两个触发器队列有各自的转换完成中断。当 ADC0 转换完成后，触发 ADC0 中断，进入 ADC0_IRQHandler，执行电机 1 的快速控制环路。当 ADC1 转换完成后，触发 ADC1 中断，进入 ADC1_IRQHandler，执行电机 2 的快速控制环路。

3.3 增强型柔性脉宽调制器 (eFlexPWM)

eFlexPWM 包含 4 个 PWM 子模块，每个子模块被设置为控制一个半桥功率级。提供故障通道支持。这个 PWM 模块可以产生各种开关模式，包括高度复杂的波形。它可以通过预驱动程序，生成连接到 MOSFET H-桥的三相 PWM 信号。

每个 eFlexPWM 模块都有一个 16 位的计数器，只能向上计数到 VAL1 值，然后复位到 INIT 值。在计数过程中，计数值与 VAL2/VAL3 寄存器中的值进行比较，以控制输出电平的高低切换。如果计数范围刚好是 2 的倍数，可以将 INIT 值和 VAL1 值设置为 0 为中心的相反数字，同样将 VAL2 和 VAL3 值设置为数字相同，但符号不同。如果所有子模块的信号边缘都遵循同样的惯例，那么这些信号就会彼此居中对齐。

本演示中使用的电机 1 的三个 PWM 子模块配置如下：

- PWM0_Submodule_0
 - IPBus 时钟源 150 MHz。
 - 运行频率为 16 kHz，周期为 62.5 μ s。
 - INIT 寄存器为 -4687，VAL1 寄存器为 4686。
 - 互补模式，死区时间为 0.5 μ s。
 - 每次从这个子模块转到其他子模块时，都生成 PWM 重加载和初始化信号。
 - 从 VAL0(0) 触发一个信号，通过 INPUTMUX 模块，提供与电机 2 的 PWM1 同步。
- PWM0_Submodule_1
 - PWM_0 时钟源。
 - 运行频率为 16 kHz，周期为 62.5 μ s。
 - INIT 寄存器为 -4687，VAL1 寄存器为 4686。
 - 互补模式，死区时间为 0.5 μ s。
 - PWM 重加载和初始化信号来自子模块 0。
 - 从 VAL4(-4687) 触发一个信号，通过 INPUTMUX 模块，提供与 ADC 模块采样同步。
- PWM0_Submodule_2
 - PWM_0 时钟源。
 - 运行频率为 16 kHz，周期为 62.5 μ s。
 - INIT 寄存器为 -4687，VAL1 寄存器为 4686。
 - 互补模式，死区时间为 0.5 μ s。
 - PWM 重加载和初始化信号来自子模块 0。

本演示中使用的电机 2 的 3 个 PWM 子模块配置如下：

- PWM1_Submodule_0
 - IPBus 时钟源 150 MHz。
 - 运行频率为 16 kHz，周期为 62.5 μ s。
 - INIT 寄存器为 -4687，VAL1 寄存器为 4686。

- 互补模式，死区时间为 0.5 μs 。
 - 来自 PWM0 的 EXT_SYNC 信号导致初始化。
 - 每次从这个子模块转到其他子模块时，都生成 PWM 重加载信号。
 - 从 VAL4(-4687) 触发一个信号，通过 INPUTMUX 模块，提供与 ADC 模块采样同步。
- PWM1_Submodule_1 & Submodule_2
 - PWM_0 时钟源。
 - 运行频率为 16 kHz，周期为 62.5 μs 。
 - INIT 寄存器为 -4687，VAL1 寄存器为 4686。
 - 互补模式，死区时间为 0.5 μs 。
 - 来自 PWM0 的 EXT_SYNC 信号导致初始化。
 - PWM 重加载信号来自子模块 0。

为了合理分配 CPU 负载，避免两个电机同时消耗能量，需要实现两个电机的 PWM 波之间有 180 度的滞后。如图 6 所示，对 INIT 和 VAL1 进行合理配置，使 PWM 计数器在固定周期内运行。实现 180 度延迟的关键是，每当 PWM0 计数器达到 VAL0 时，它就向 PWM1 触发一个 EXT_SYNC（外部同步）信号，以初始化 PWM1 的计数器。

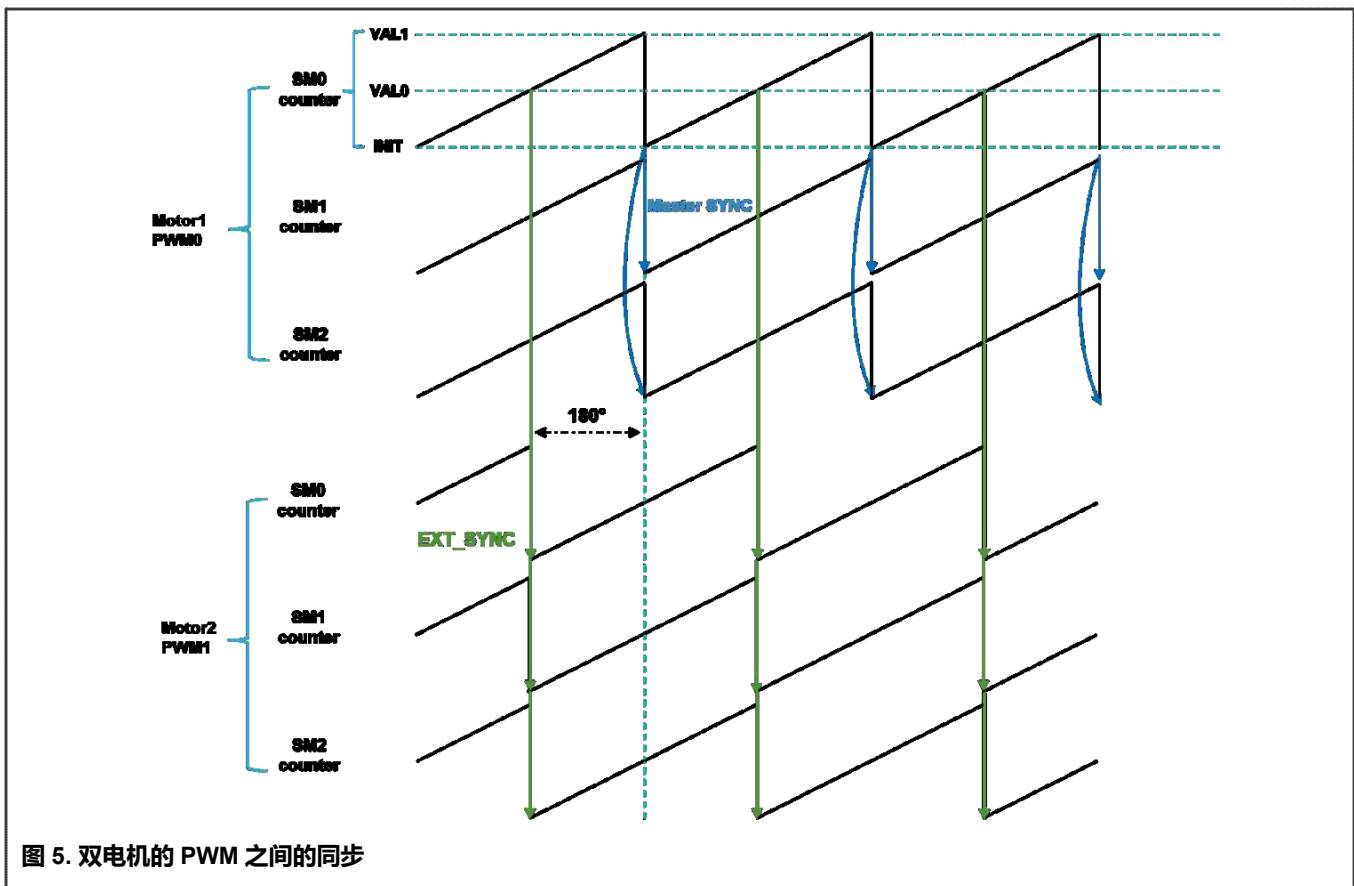


图 5. 双电机的 PWM 之间的同步

正如我们所讨论的，双电机的 PWM 之间有 180 度的相位滞后，ADC 模块在此基础上使用 eFlexPWM 的触发器来实现对双电机模拟信号的分时采样。

图 6 显示了 ADC 和 PWMs 之间的同步情况。

一旦 eFlexPWM0 计数器达到 PWM0SM1VAL4，就触发 ADC 对电机 1 的模拟信号进行采样。在 ADC 转换完成之后，触发 ADC0 转换完成中断，并进入 ADC0_IRQHandler，以运行电机 1 的控制算法。

一旦 eFlexPWM1 计数器达到 PWM1SM0VAL4，就触发 ADC 对电机 2 的模拟信号进行采样。在 ADC 转换完成后，触发 ADC1 转换完成中断，进入 ADC1_IRQHandler，以运行电机 2 的控制算法。

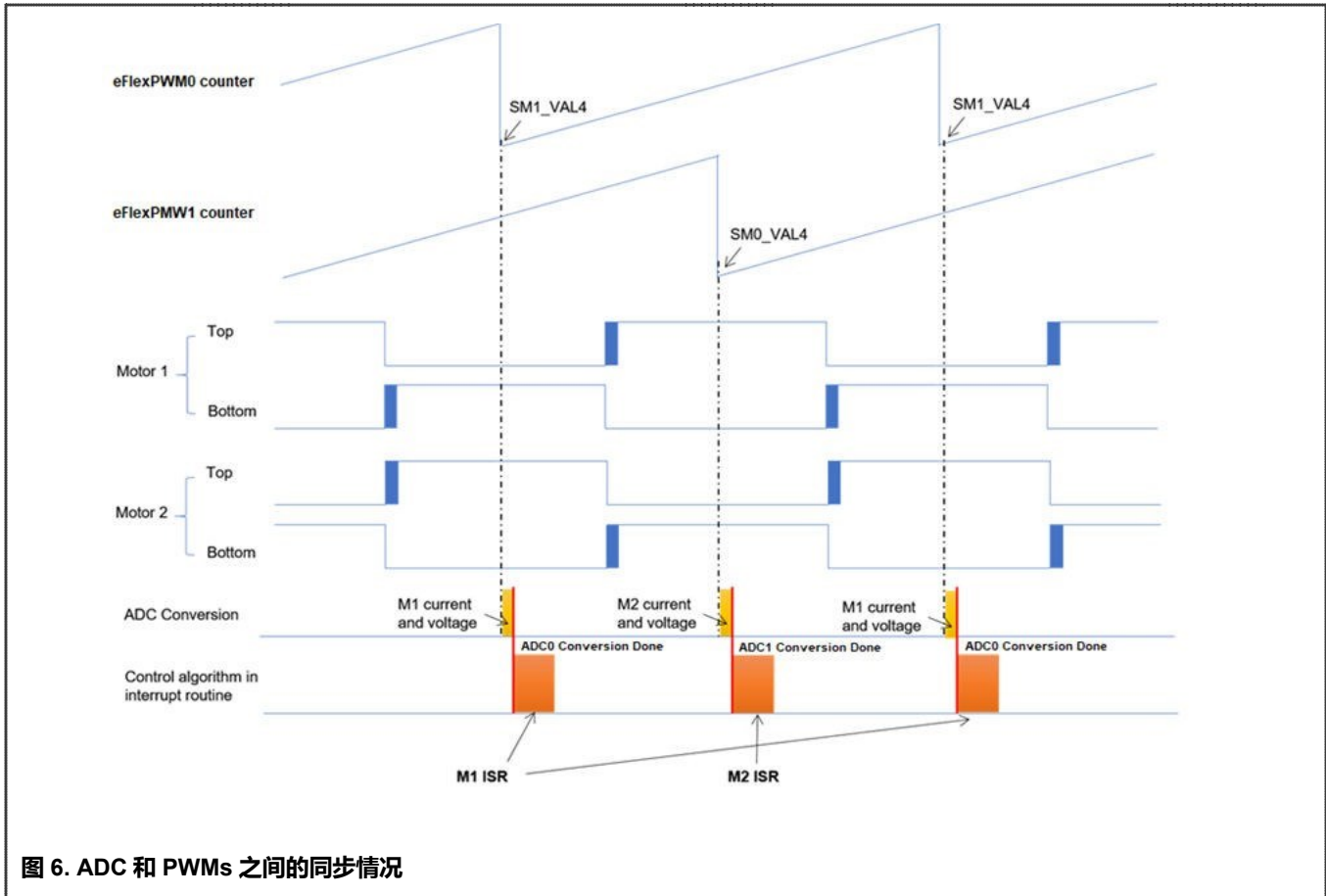


图 6. ADC 和 PWMs 之间的同步情况

3.4 标准计数器/计时器 (CTIMER)

CTimer 包含五个子模块：CTIMER0，CTIMER1，CTIMER2，CTIMER3，CTIMER4。

每个子模块都有一个 32 位的计数器和可编程的分频器，它可以以 CTIMER 时钟或外部提供的时钟为周期进行计数，并可以根据 4 个匹配寄存器的内容有选择地产生中断或对指定的计时器值进行其他操作。

在这个双伺服的示例中，CTimer0 和 CTimer1 用于两个电机的慢速控制环路的同步，计数值设置为 48000，并启用中断，因此中断频率为 2 kHz。

3.5 输入多路复用 (INPUTMUX)

输入多路复用模块 (INPUTMUX) 可以为芯片的内部外设提供不同的信号路径选择。外设的输入信号可以被多路复用到多个输入源，这些输入源可以是外部引脚、中断、其他外设的输出信号或其他内部信号。

在这个双伺服电机控制演示中，图 7 显示了通过 INPUTMUX 在模块间传输的所有信号。

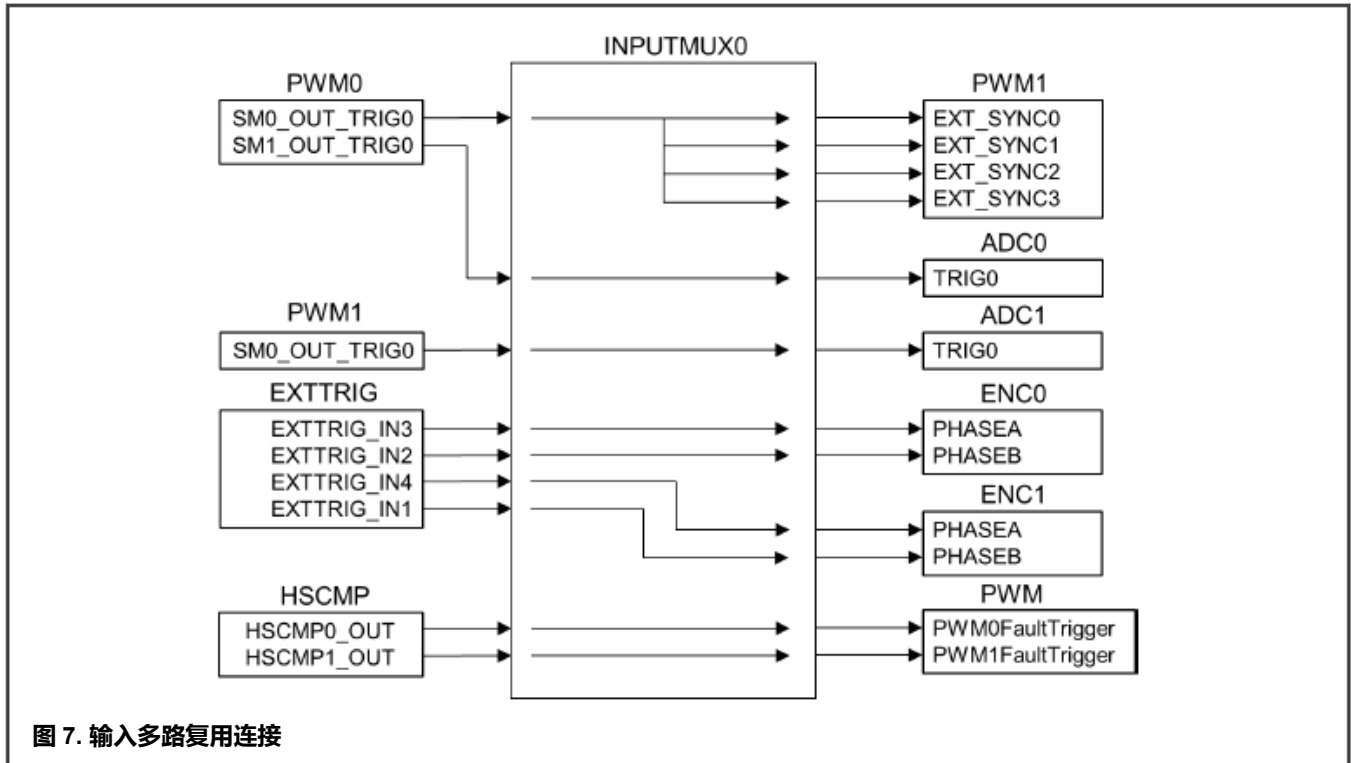


图 7. 输入多路复用连接

- PWM0SM1_OUT_TRIG0 用作 ADC0 的采样触发信号。
- PWM1SM0_OUT_TRIG0 用作 ADC1 的采样触发信号。
- PWM0SM0_OUT_TRIG0 用作 PWM1 的外部同步信号，以实现相位同步控制。
- EXTTRIG_IN3 用作 ENC0 的 A 相信号。
- EXTTRIG_IN2 用作 ENC0 的 B 相信号。
- EXTTRIG_IN4 用作 ENC1 的 A 相信号。
- EXTTRIG_IN1 用作 ENC1 的 B 相信号。
- HSCMP0_OUT 用作 PWM0 故障触发信号。
- HSCMP1_OUT 用作 PWM1 故障触发信号。

3.6 正交解码器 (ENC)

ENC 包含两个子模块 ENC0 和 ENC1。

它们有一个 32 位的计数器/计时器组，适合解码编码器信号。每个计数器/计时器组包括预分频器、滤波器、位置计数器、旋转计数器、位置偏差计数器、保持寄存器、看门狗时钟、脉冲累积器等。

在此应用中，ENC 模块用于获取电机转子位置信息和速度测量结果。

图 8 显示了如何使用 ENC 模块来实现电机编码器信号的计数。

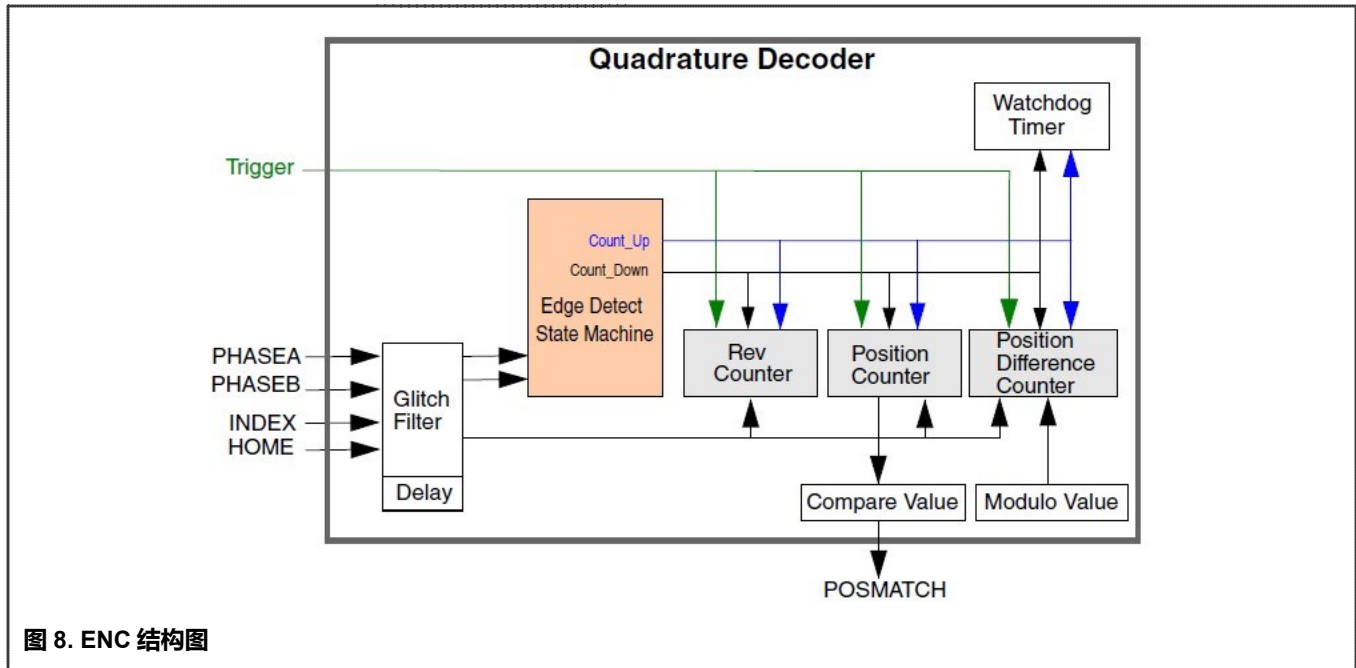


图 8. ENC 结构图

32 位位置计数器对每个脉冲进行加计数或减计数，由 PHASEA 和 PHASEB 的相位差产生。位置计数器作为一个积分信息，其计数值与位置成正比。计数的方向由 Count_Up 和 Count_Down 信号决定。图 9 显示了正交增量位置解码器的基本操作。

- 如果 PHASEA 领先 PHASEB，则运动方向为正方向。
- 如果 PHASEA 滞后 PHASEB，则运动方向为负方向。

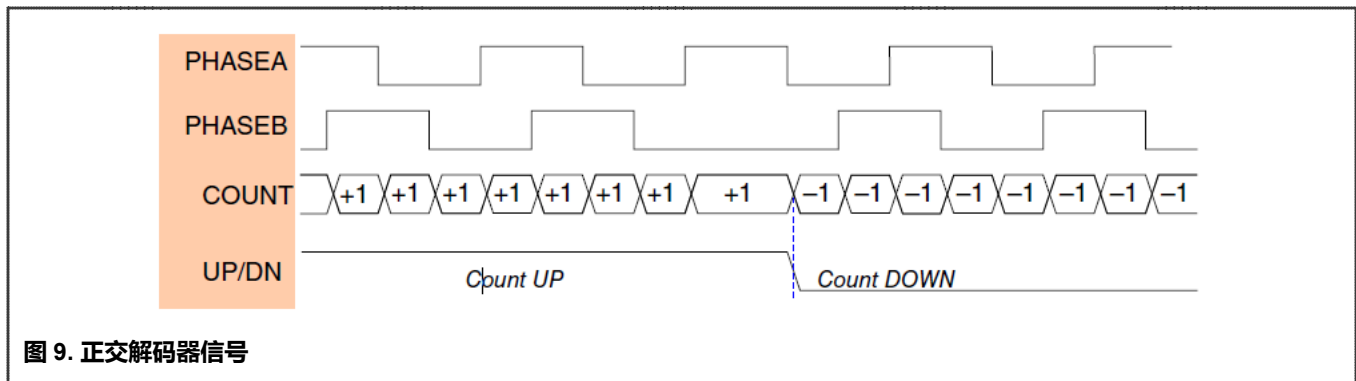


图 9. 正交解码器信号

为了实现电机速度测量功能，在 ENC 模块中有几个关键的寄存器：POSD, POSDH, POSDPERH, LASTEDGEH。

读取 POSD 寄存器可以将每个寄存器的值加载到相应的保持寄存器中，实现数据同步。

POSDH 是在两次读取位置寄存器之间发生的位置值变化。

POSDPERH 使用由 CTRL3[PRSC]预标定的外围时钟作为参考，并存储两个编码器脉冲之间的计数器值的变化，以反映两个编码器脉冲之间的时间差；

LASTEDGEH 反映了自上次编码器脉冲以来的时间。

T_{timer} 是 ENC 模块的时钟周期；

Line 是指电机编码器的线数。

对于电机转速的测量，M 法和 T 法分别适用于高速和低速工况，因此需要实现不同转速工况下两种转速测量方法的灵活切换。对于高速情况，可以用 M 法计算速度：

$$Speed = \left(\frac{POSDH}{POSDPERH * T_{timer}} * \frac{60}{4 * Line} \right) RPM$$

对于低速情况，可以用 T 法计算速度。

$$Speed = \left(\frac{1}{LASTEDGEH * T_{timer}} * \frac{60}{4 * Line} \right) RPM$$

使用 ENC 模块，可以轻松实现两种方法的自动切换，从而实现精确的速度测量。具体算法请参见 LPC55S3xRM 的 ENC 章节。

3.7 故障保护 (HSCMP 和 DAC)

在电机运行过程中需要故障保护功能，以便在发生过流故障时，电机能够及时关闭 PWM 输出，保护设备。LPC553x/LPC55S3x 有 3 个 HSCMP 和 3 个 DAC 模块用来处理过流故障。

在这个演示中，我们使用 HSCMP0 和 HSCMP1 比较母线电流，然后在过流发生时产生故障信号，DAC0 和 DAC1 提供我们想要的参考电压。

- HSCMP0 输入负端是 DAC0_OUT，输入正端是 HCCMP0_IN3。
- HSCMP1 输入负端是 DAC1_OUT，输入正端是 HCCMP1_IN3。
- 启用 HSCMP 高功率/高速度模式。
- DAC 使用 VDDA 电源作为参考电压。
- 将 main_clk 连接到 DAC，并将 DACnCLKDIV[DIV] 设置为 11，因此时钟频率为 $150/(11+1) = 12.5$ MHz。

3.8 FreeMASTER 通信 - Flexcomm0

Flexcomm (Flexcomm 串行通信) 用于 LPC553x/LPC55S3x 和 PC 之间的 FreeMASTER 通信。

- Flexcomm0 配置为用于 UART。
- 波特率被设置为 115200 bit/s。
- 接收器和发射器都启用。
- 其他设置都设置为默认。
- 在 freemaster_cfg.h 文件中，添加使用的串行通信模块和寄存器的基地址，例如 UART0。

4 演示操作

本节演示双伺服电机的操作。

4.1 项目文件结构

项目中的源文件 (*.c) 和头文件 (*.h) 的总数较大，因此本文只对关键的项目文件进行详细描述，其余的将分组进行描述。

主项目文件夹被划分为七个目录：

- \boards\dual_servo — 包含硬件电路板的初始化配置文件。
- \boards\dual_servo\iar — 包含编译器必要的文件。
- \boards\dual_servo\mc_drivers — 包含每个模块的驱动文件。

- \boards\dual_servo\motor_control — 包含电机控制算法文件和状态机文件。
- \boards\dual_servo\parameter — 包含参数头文件和配置文件。
- \CMSIS — Cortex 微控制器软件接口标准。
- \devices\LPC553x\LPC55S3x — LPC553x/LPC55S3x 软件开发工具包。
- \FM_ControlPage — FreeMASTER 控制页文件。
- \middleware\freemaster — FreeMASTER 支持文件。
- \middleware\CM33_RTCESL_4.6.2_IAR — 实时控制嵌入式软件电机控制和电源转换库。

文件夹中的文件：

- M1_statemachine.c 和 M1_statemachine.h 包含当应用程序处于特定状态或状态转换时执行的软件程序。
- State_machine.c 和 state_machine.h 包含应用状态机结构定义，并管理应用状态和应用状态之间的切换。
- Motor_structure.c 和 motor_structure.h 包含结构定义和专门用于执行电机控制算法（矢量控制算法、位置和速度估计算法、速度控制环路）的子程序。
- Motor_def.h 包含主控和故障结构定义。

4.2 电机参数

我们使用的电机是直流无刷伺服电机。表 2 提供了电机规格信息。

表 2. 伺服电机规格

制造商名称	深圳市杰美康机电有限公司	定子电阻/欧姆	0.58
型号	42JSF630AS	定子绕组电感 d-轴/ μH	308
额定速度/rpm	3000	定子绕组电感 q-轴/ μH	330
额定母线电压/V	24	极对数	4
额定功率/W	64	线数	1000

应用参数（位置、速度和电流控制器）是为轴上安装有塑料环（套件的一部分）的电机设置的，否则可能会出现速度振荡。

4.3 设置双伺服演示

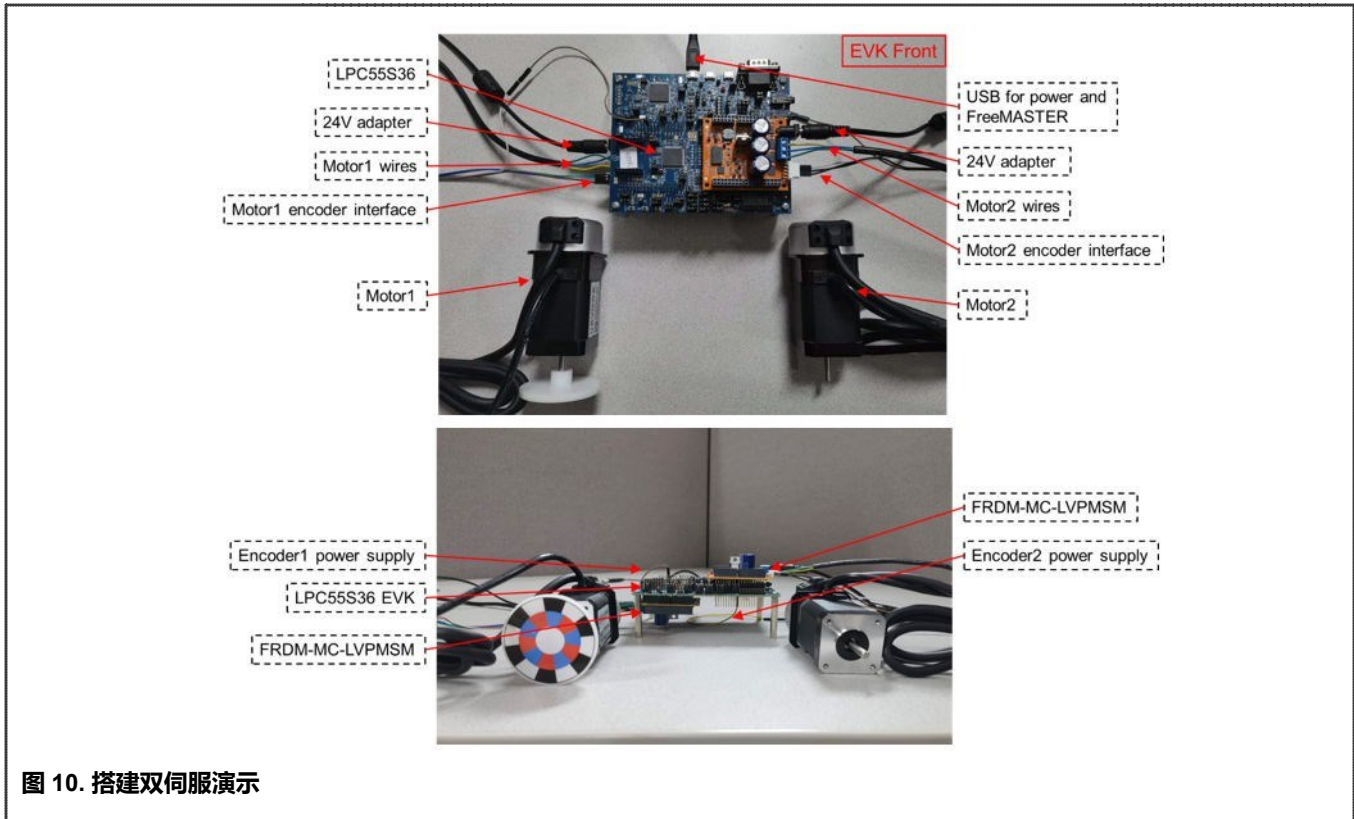


图 10. 搭建双伺服演示

硬件需求：

- LPCXpresso55S36 电路板
- 两块 FRDM-MC-LVPMSM 电路板
- 两个 24 V 的伺服电机
- Micro USB 连接线

请按照下面的步骤来设置双伺服演示：

注意

使用 FRDM-MC-LVPMSM 电路板上的 TPS54060 DC-DC 转换器作为 LPCXpresso55S36 的电源会导致电压纹波。因此建议断开 EVK 电路板上的跳线 JP71，使用 EVK 电路板上的 5V 引脚（而不是 FRDM 电路板上的引脚）作为电机编码器的电源。在开始这个过程之前，确保适配器的电源已经关闭。

1. 根据图 10，通过 Arduino 接口将 LPCXpresso55S36 和 FRDM-MC-LVPMSM 电路板插在一起，连接电机线和编码器接口。
2. 接通 24 V 适配器，给 FRDM-MC-LVPMSM 电路板供电。
3. 通过 USB 接口连接 LPCXpresso55S36 和 PC。
4. 打开软件包中的 FM_DualServo.pmp（FREEMASTER 版本必须不低于 3.1.2）。
5. 点击 GO！按钮，启用 PC 和 LPC553x/LPC55S3x 之间的通信，如图 11 所示。
6. 点击 DualServo 页面。
7. 点击“开始”按钮来开启演示。
8. 通过点击控制页面上的其他按钮来操作演示。

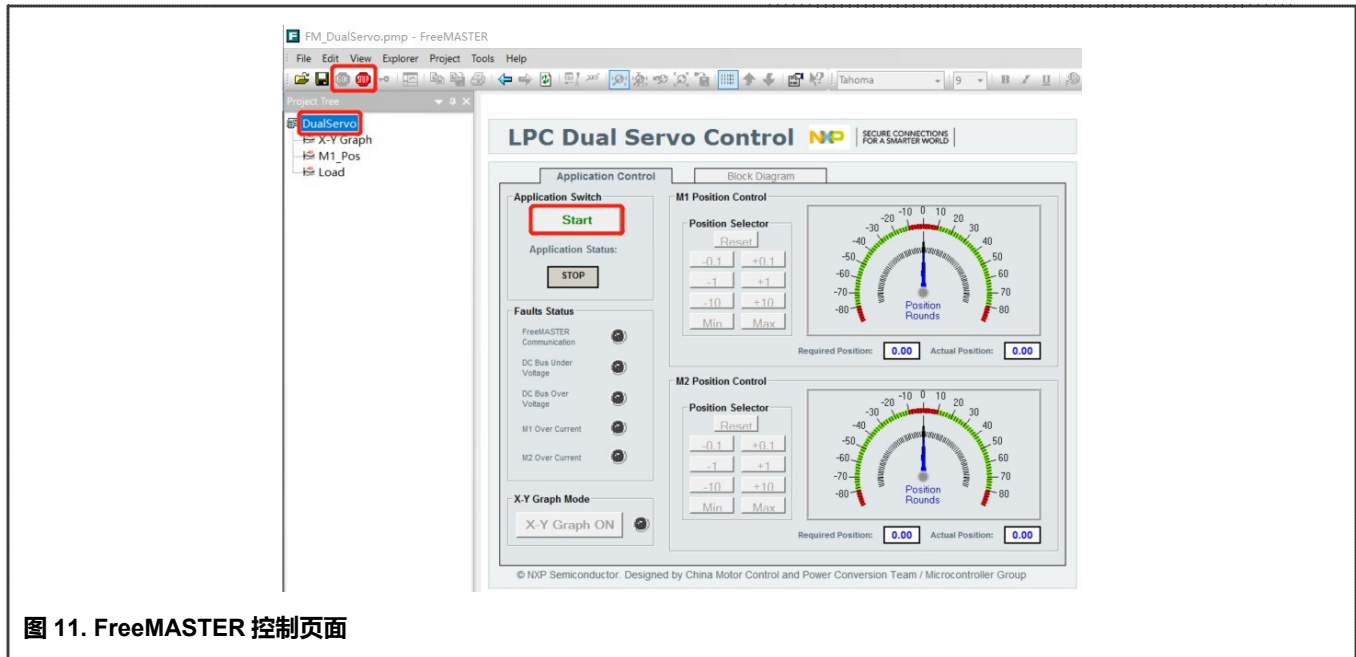


图 11. FreeMASTER 控制页面

4.4 参数配置

如果用户的伺服电机参数与本演示中默认电机的参数不同，必须重新配置参数以匹配不同的电机。

要进行重新配置，请按照以下步骤进行：

1. 打开头文件 M1_Params.h 或 M2_Params.h，将电机体的基本参数输入到相应的位置。

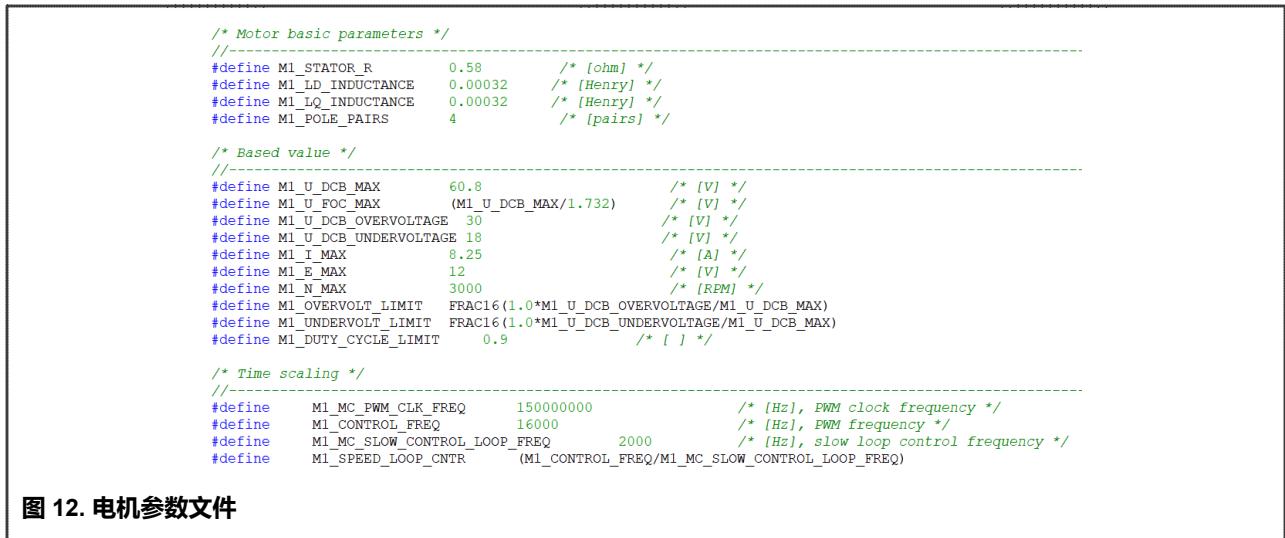


图 12. 电机参数文件

2. 在相应的电流环路、速度环路、位置环路、滤波器等中填写所需的带宽和其他参数。具体的控制器和滤波器参数将通过公式计算，并在程序运行时分配给相关结构。
3. 如图 13 所示，速度环路和位置环路的控制参数必须手动输入，并在文件中调试。而电流环路相当于一个二阶控制系统，通过设置衰减和带宽频率，可以自动生成相应的 PI 控制系数，如图 14 所示。对于使用 IIR 滤波器的速度和电压，可以手动输入滤波器的截止频率进行调试，如图 15 所示。具体的控制器和滤波器参数将通过公式计算，并分配给相关的结构，以便在程序运行时执行。

```

/*Speed Loop */
#define M1_Spd_Ramp 20000 /* [RPM/s], mechanical speed accelerating ra
#define M1_Spd_Ctrl_AW_Limit 1 /* [A], current output limitation */
#define M1_SPEED_PI_PROP_GAIN ACC32(2.5) /* proportional gain */
#define M1_SPEED_PI_INTEG_GAIN ACC32(0.12) /* integral gain */
//-----
#define M1_RAMP_INC_SPD_CL FRAC32(1.0F*M1_Spd_Ramp/M1_MC_SLOW_CONTROL_LOOP_FREQ/M1_N_MAX)
#define M1_SPEED_LOOP_UPPER_LIMIT FRAC16(M1_Spd_Ctrl_AW_Limit/M1_I_MAX)
#define M1_SPEED_LOOP_LOWER_LIMIT -FRAC16(M1_Spd_Ctrl_AW_Limit/M1_I_MAX)

/* Positon Loop */
#define M1_Pos_Speed_Limit_Up 1200 /* [RPM/s], position ramping rate for a p
#define M1_Pos_Speed_Limit_Down 1200 /* [RPM/s], position ramping rate for a p
#define M1_Pos_Ctrl_AW_Limit 2000 /* [RPM], mechanical speed - position con
#define M1_Pos_Ctrl_PropGain 0.08 /* proportional gain */
#define M1_POS_CTRL_PROP_GAIN_SHIFT 0 /* proportional gain shift */
//-----
#define M1_POS_BASE 180
#define M1_POS_RAMP_UP FRAC32(M1_Pos_Speed_Limit_Up/60.0/M1_MC_SLOW_CONTROL_LOOP_FREQ)
#define M1_POS_RAMP_DOWN FRAC32(M1_Pos_Speed_Limit_Down/60.0/M1_MC_SLOW_CONTROL_LOOP_FREQ)
#define M1_POS_CTRL_PROP_GAIN_BASE 100
#define M1_POS_CTRL_PROP_GAIN FRAC32(M1_Pos_Ctrl_PropGain)
#define M1_POS_CTRL_UPPER_LIMIT FRAC32(1.0*M1_Pos_Ctrl_AW_Limit/M1_N_MAX)
#define M1_POS_CTRL_LOWER_LIMIT FRAC32(-1.0*M1_Pos_Ctrl_AW_Limit/M1_N_MAX)

```

图 13. 位置和速度环路参数

```

/*ACR parameter*/
#define M1_CLOOP_ATT (0.85F) /* Attenuation */
#define M1_CLOOP_FREQ (1000.0F) /* [Hz], Current loop bandwidth frequency */
#define M1_CLOOP_LIMIT (0.5F) /* Voltage output limitation, based on real tim
//-----
/*Damping Coefficient D&Q_ACR= 0.85 */
/*bandwidth= 1000 [Hz]*/
#define M1_D_KP_GAIN_A32 ACC32((2.0*M1_CLOOP_ATT*2*PI*M1_CLOOP_FREQ*M1_LD_INDUCTANCE -
#define M1_D_KI_GAIN_A32 ACC32(2*PI*M1_CLOOP_FREQ*2*PI*M1_CLOOP_FREQ*M1_LD_INDUCTANCE/
#define M1_D_POS_LIMIT FRAC16(M1_CLOOP_LIMIT)
#define M1_D_NEG_LIMIT -FRAC16(M1_CLOOP_LIMIT)

#define M1_Q_KP_GAIN_A32 ACC32((2.0*M1_CLOOP_ATT*2*PI*M1_CLOOP_FREQ*M1_LQ_INDUCTANCE -
#define M1_Q_KI_GAIN_A32 ACC32(2*PI*M1_CLOOP_FREQ*2*PI*M1_CLOOP_FREQ*M1_LQ_INDUCTANCE/
#define M1_Q_POS_LIMIT FRAC16(M1_CLOOP_LIMIT)
#define M1_Q_NEG_LIMIT -FRAC16(M1_CLOOP_LIMIT)

```

图 14. 电流环路参数计算

```

/* Filters */
#define M1_UDCBUS_FILTER_CUTOFF_FREQ 100 /* [Hz] */
//-----
// Udc bus IIR, cutoff freq = 100 [Hz] Ts = 0.0000625 [s]
#define M1_FILTER_UDCBUS_B1 WARP(M1_UDCBUS_FILTER_CUTOFF_FREQ, M1_CONTROL_FREQ)/(
#define M1_FILTER_UDCBUS_B2 WARP(M1_UDCBUS_FILTER_CUTOFF_FREQ, M1_CONTROL_FREQ)/(
#define M1_FILTER_UDCBUS_A2 (M1_FILTER_UDCBUS_B1 + M1_FILTER_UDCBUS_B2 - 1.0F)

```

图 15. 直流母线电压滤波器参数计算

4.5 实验性能演示

以下所有的实验结果都是在电机加载一个轻质塑料环时测试的。而所有的数据都来自于 FreeMASTER。

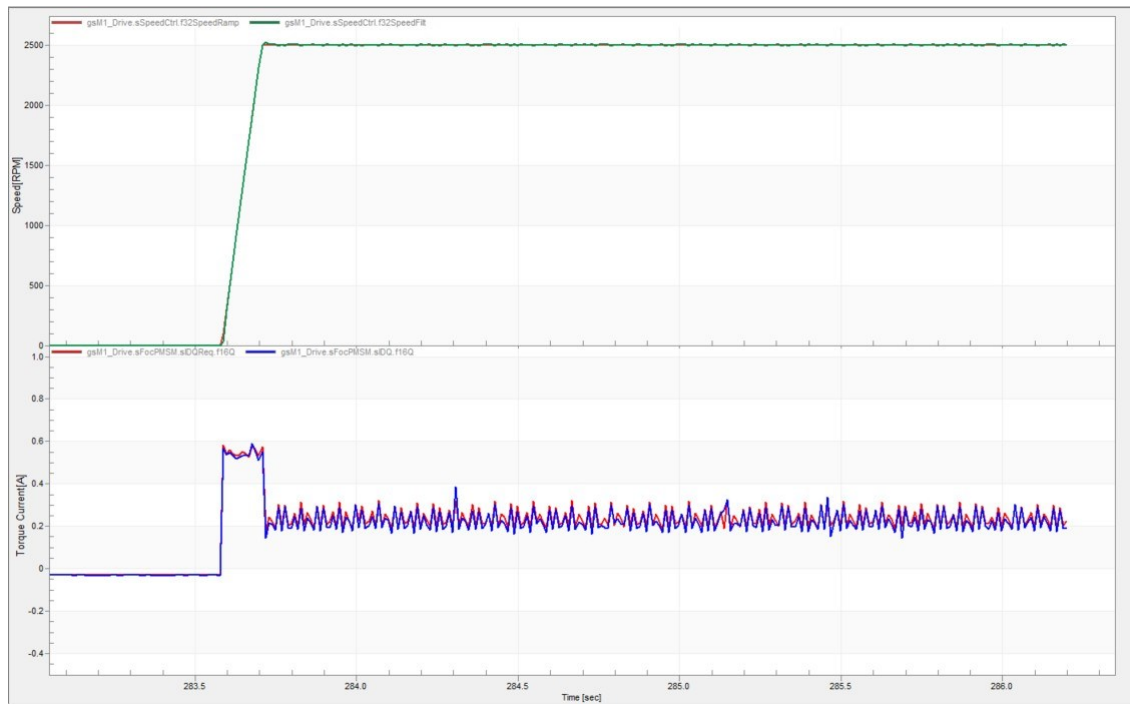


图 16. 速度和电流响应

图 16 显示了当电机启动在 2500 RPM 时的速度和电流波形。红线是速度要求，绿线是实际速度，蓝线是转矩电流。我们可以看到，它可以在 0.13 秒内加速到 2500 RPM，而且过冲量非常小。

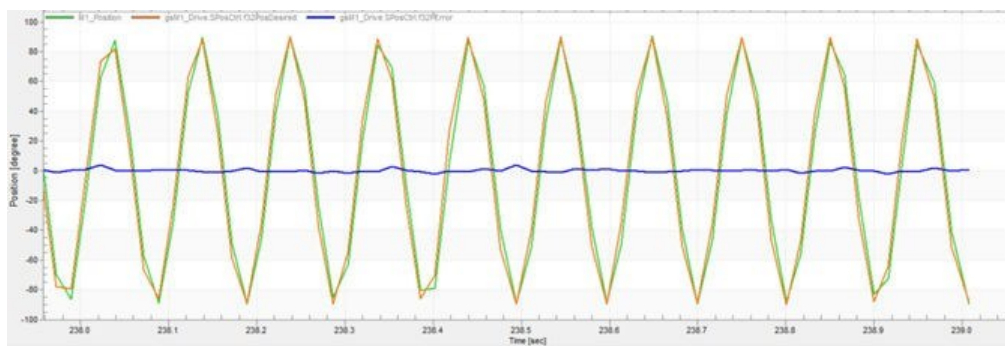


图 17. 正弦波位置响应

图 17 显示了位置要求为 10 Hz 正弦波和运动范围为 180° 机械角时的位置响应。我们可以看到，转子位置（绿线）可以很好地跟踪给定值（红线）的变化，最大误差（蓝线）约为 2°。

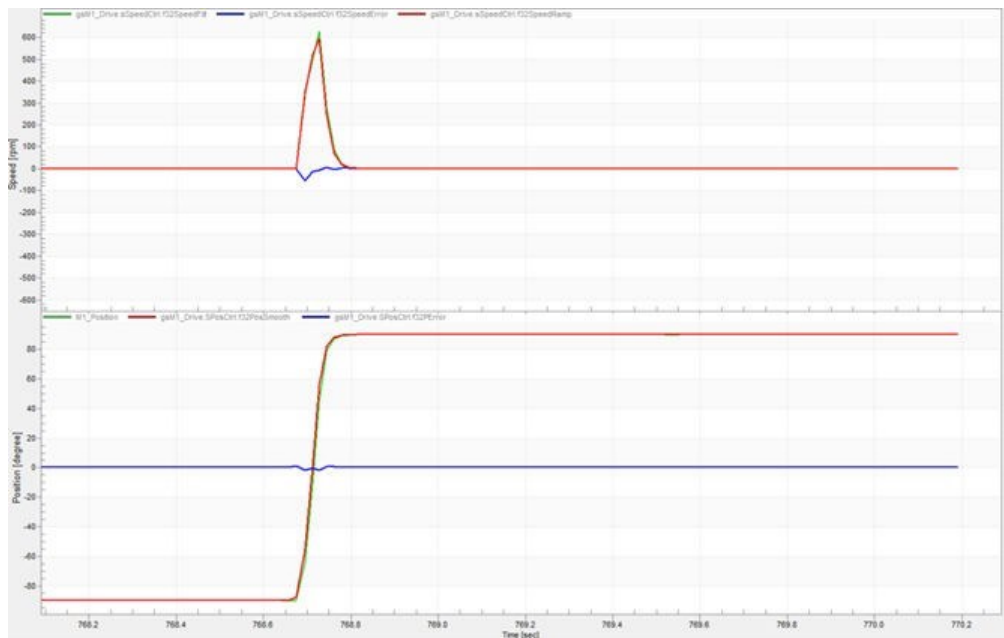


图 18. 位置和速度响应

如图 18 所示，上面的波形显示速度响应，底部的波形显示位置响应。红线是要求，绿线是实际值，蓝线表示它们之间的误差。在设定了 180° 的位置给定后，大约需要 0.1 秒达到所需的位置。我们可以看到，动态响应的误差很小，静态响应非常稳定。

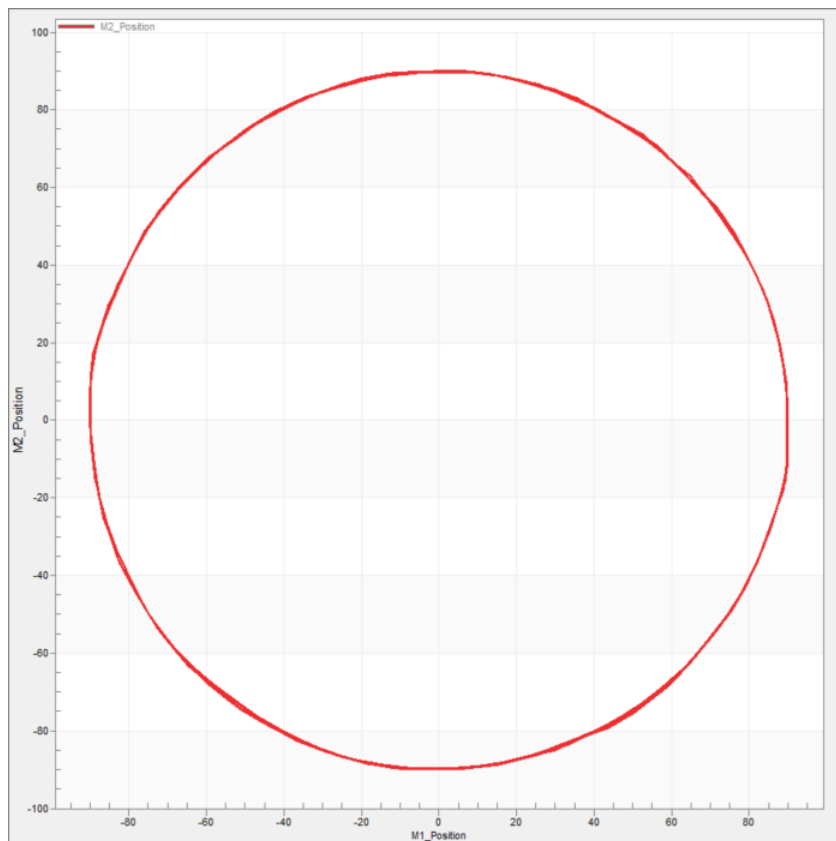


图 19. 双电机位置轨迹

如果我们设一个周期性变化的变量 x ，两个电机的位置就分别设为 $\sin(x)$ 和 $\cos(x)$ ，两个电机的转子位置就分别作为横坐标和纵坐标。坐标点的理想轨迹是一个圆，圆的边缘越平滑，位置控制就越精确。点击 FreeMASTER 控制页面上的 X-Y Graph ON 按钮，开始进行演示。实验结果如图 19 所示。

4.6 CPU 负载和内存使用情况

以下信息适用于使用 IAR 嵌入式开发平台 (IAR Embedded Workbench) 构建的演示应用。

IDE v8.50.9 处于 Debug RAM 和 FLASH 配置中，优化级别设置为高。表 3 显示了内存用量和 CPU 负载。内存用量是从链接器.map 文件 (IAR IDE) 计算出来的，包括分配在 RAM 中的 4KB FreeMASTER 记录器缓冲区。CPU 负载是用 SysTick 计时器测量的。

在这种情况下，它适用于 16 kHz 的快速环路频率和 2 kHz 的慢速环路 (速度和位置环路) 频率。

表 3. LPC553x/LPC55S3x 双伺服演示 CPU 负载和内存使用情况

—	快速环路 (闪存)	慢速环路 (闪存)	快速环路 (RAM)	慢速环路 (RAM)
ROM 代码内存[字节]	22996	22996	—	—
RAM 代码内存[字节]	—	—	22996	22996
ROM 数据内存[字节]	3940	3940	—	—

表格在下一页继续...

表 3. LPC553x/LPC55S3x 双伺服演示 CPU 负载和内存使用情况 (续)

—	快速环路 (闪存)	慢速环路 (闪存)	快速环路 (RAM)	慢速环路 (RAM)
RAM 数据内存[字节]	15510	15510	19450	19450
CPU 周期 单电机	2323	1056	1149	405
CPU 负载	52.37%		25.59%	

5 参考资料

以下文件可提供进一步参考。

- LPC553xRM
- MCUXpresso SDK 3 相 PMSM 控制 (LPC)。([3PPMSMCLPCUG](#))

6 修订历史

表 4. 修订历史

版本号	日期	实质性变更
0	2022 年 2 月 23 日	初版发布
1	2022 年 5 月 26 日	用 LPC553x/LPC55S3x 取代了 LPC55(S)3x

Legal information

Definitions

Draft — A draft status on a document indicates that the content is still under internal review and subject to formal approval, which may result in modifications or additions. NXP Semiconductors does not give any representations or warranties as to the accuracy or completeness of information included in a draft version of a document and shall have no liability for the consequences of use of such information.

Disclaimers

Limited warranty and liability — Information in this document is believed to be accurate and reliable. However, NXP Semiconductors does not give any representations or warranties, expressed or implied, as to the accuracy or completeness of such information and shall have no liability for the consequences of use of such information. NXP Semiconductors takes no responsibility for the content in this document if provided by an information source outside of NXP Semiconductors.

In no event shall NXP Semiconductors be liable for any indirect, incidental, punitive, special or consequential damages (including - without limitation - lost profits, lost savings, business interruption, costs related to the removal or replacement of any products or rework charges) whether or not such damages are based on tort (including negligence), warranty, breach of contract or any other legal theory.

Notwithstanding any damages that customer might incur for any reason whatsoever, NXP Semiconductors' aggregate and cumulative liability towards customer for the products described herein shall be limited in accordance with the Terms and conditions of commercial sale of NXP Semiconductors.

Right to make changes — NXP Semiconductors reserves the right to make changes to information published in this document, including without limitation specifications and product descriptions, at any time and without notice. This document supersedes and replaces all information supplied prior to the publication hereof.

Suitability for use — NXP Semiconductors products are not designed, authorized or warranted to be suitable for use in life support, life-critical or safety-critical systems or equipment, nor in applications where failure or malfunction of an NXP Semiconductors product can reasonably be expected to result in personal injury, death or severe property or environmental damage. NXP Semiconductors and its suppliers accept no liability for inclusion and/or use of NXP Semiconductors products in such equipment or applications and therefore such inclusion and/or use is at the customer's own risk.

Applications — Applications that are described herein for any of these products are for illustrative purposes only. NXP Semiconductors makes no representation or warranty that such applications will be suitable for the specified use without further testing or modification.

Customers are responsible for the design and operation of their applications and products using NXP Semiconductors products, and NXP Semiconductors accepts no liability for any assistance with applications or customer product design. It is customer's sole responsibility to determine whether the NXP Semiconductors product is suitable and fit for the customer's applications and products planned, as well as for the planned application and use of customer's third party customer(s). Customers should provide appropriate design and operating safeguards to minimize the risks associated with their applications and products.

NXP Semiconductors does not accept any liability related to any default, damage, costs or problem which is based on any weakness or default in the customer's applications or products, or the application or use by customer's third party customer(s). Customer is responsible for doing all necessary testing for the customer's applications and products using NXP Semiconductors products in order to avoid a default of the applications and the products or of the application or use by customer's third party customer(s). NXP does not accept any liability in this respect.

Terms and conditions of commercial sale — NXP Semiconductors products are sold subject to the general terms and conditions of commercial sale, as published at <http://www.nxp.com/profile/terms>, unless otherwise agreed in a valid written individual agreement. In case an individual agreement is concluded only the terms and conditions of the respective agreement shall apply. NXP Semiconductors hereby expressly objects to applying the customer's general terms and conditions with regard to the purchase of NXP Semiconductors products by customer.

Export control — This document as well as the item(s) described herein may be subject to export control regulations. Export might require a prior authorization from competent authorities.

Suitability for use in non-automotive qualified products — Unless this data sheet expressly states that this specific NXP Semiconductors product is automotive qualified, the product is not suitable for automotive use. It is neither qualified nor tested in accordance with automotive testing or application requirements. NXP Semiconductors accepts no liability for inclusion and/or use of non-automotive qualified products in automotive equipment or applications.

In the event that customer uses the product for design-in and use in automotive applications to automotive specifications and standards, customer (a) shall use the product without NXP Semiconductors' warranty of the product for such automotive applications, use and specifications, and (b) whenever customer uses the product for automotive applications beyond NXP Semiconductors' specifications such use shall be solely at customer's own risk, and (c) customer fully indemnifies NXP Semiconductors for any liability, damages or failed product claims resulting from customer design and use of the product for automotive applications beyond NXP Semiconductors' standard warranty and NXP Semiconductors' product specifications.

Translations — A non-English (translated) version of a document, including the legal information in that document, is for reference only. The English version shall prevail in case of any discrepancy between the translated and English versions.

Security — Customer understands that all NXP products may be subject to unidentified vulnerabilities or may support established security standards or specifications with known limitations. Customer is responsible for the design and operation of its applications and products throughout their lifecycles to reduce the effect of these vulnerabilities on customer's applications and products. Customer's responsibility also extends to other open and/or proprietary technologies supported by NXP products for use in customer's applications. NXP accepts no liability for any vulnerability. Customer should regularly check security updates from NXP and follow up appropriately.

Customer shall select products with security features that best meet rules, regulations, and standards of the intended application and make the ultimate design decisions regarding its products and is solely responsible for compliance with all legal, regulatory, and security related requirements concerning its products, regardless of any information or support that may be provided by NXP.

NXP has a Product Security Incident Response Team (PSIRT) (reachable at PSIRT@nxp.com) that manages the investigation, reporting, and solution release to security vulnerabilities of NXP products.

Trademarks

Notice: All referenced brands, product names, service names, and trademarks are the property of their respective owners.

NXP — wordmark and logo are trademarks of NXP B.V.

AMBA, Arm, Arm7, Arm7TDMI, Arm9, Arm11, Artisan, big.LITTLE, Cordio, CoreLink, CoreSight, Cortex, DesignStart, DynamIQ, Jazelle, Keil, Mali, Mbed, Mbed Enabled, NEON, POP, RealView, SecurCore, Socrates, Thumb, TrustZone, ULINK, ULINK2, ULINK-ME, ULINK-PLUS, ULINKpro, μ Vision, Versatile — are trademarks or registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere. The related technology may be protected by any or all of patents, copyrights, designs and trade secrets. All rights reserved.

Airfast — is a trademark of NXP B.V.

Bluetooth — the Bluetooth wordmark and logos are registered trademarks owned by Bluetooth SIG, Inc. and any use of such marks by NXP Semiconductors is under license.

Cadence — the Cadence logo, and the other Cadence marks found at www.cadence.com/go/trademarks are trademarks or registered trademarks of Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved worldwide.

CodeWarrior — is a trademark of NXP B.V.

ColdFire — is a trademark of NXP B.V.

ColdFire+ — is a trademark of NXP B.V.

EdgeLock — is a trademark of NXP B.V.

EdgeScale — is a trademark of NXP B.V.

EdgeVerse — is a trademark of NXP B.V.

eIQ — is a trademark of NXP B.V.

FeliCa — is a trademark of Sony Corporation.

Freescale — is a trademark of NXP B.V.

HITAG — is a trademark of NXP B.V.

ICODE and I-CODE — are trademarks of NXP B.V.

Immersiv3D — is a trademark of NXP B.V.

I2C-bus — logo is a trademark of NXP B.V.

Kinetis — is a trademark of NXP B.V.

Layerscape — is a trademark of NXP B.V.

Mantis — is a trademark of NXP B.V.

MIFARE — is a trademark of NXP B.V.

MOBILEGT — is a trademark of NXP B.V.

NTAG — is a trademark of NXP B.V.

Processor Expert — is a trademark of NXP B.V.

QorIQ — is a trademark of NXP B.V.

SafeAssure — is a trademark of NXP B.V.

SafeAssure — logo is a trademark of NXP B.V.

StarCore — is a trademark of NXP B.V.

Synopsys — Portions Copyright © 2021 Synopsys, Inc. Used with permission. All rights reserved.

Tower — is a trademark of NXP B.V.

UCODE — is a trademark of NXP B.V.

VortiQa — is a trademark of NXP B.V.

arm

Please be aware that important notices concerning this document and the product(s) described herein, have been included in section 'Legal information'.

© NXP B.V. 2022.

All rights reserved.

For more information, please visit: <http://www.nxp.com>

For sales office addresses, please send an email to: salesaddresses@nxp.com

Date of release: 26 May 2022

Document identifier: AN13569