



摘要

本调优指南提供了设置 MSPM0 MCU 和配套驱动器硬件板的分步指导，便于使用通用 FOC 电机控制库调优和旋转三相无刷直流电机。

通用 FOC 电机控制库是一个开源 FOC 库，支持广泛的转子位置估算算法。该初始版本的通用 FOC 支持增强型滑模观测器和有限 BEMF 估算方法，用于无传感器 FOC 中的转子位置估算。

备注

本调优指南参考的是 SDK 版本 **2.03.00.00** 中的通用 FOC v1.00.00。

内容

1 引言.....	4
2 硬件设置.....	4
2.1 EVM 硬件设置.....	5
2.2 IPD 使用的外设配置.....	6
2.3 PWM 输出的引脚配置.....	6
2.4 ADC 电流的引脚配置.....	6
2.5 ADC 电压的引脚配置.....	7
2.6 有关故障的引脚配置.....	8
2.7 GPIO 输出功能的引脚配置.....	8
2.8 SPI 通信的引脚配置.....	8
2.9 UART 通信的引脚配置.....	9
2.10 评估板的外部连接.....	9
3 软件设置.....	11
4 GUI 设置.....	11
4.1 串行端口配置.....	11
4.2 GUI 主页.....	12
4.3 系统配置.....	12
4.4 寄存器映射.....	13
4.5 电机调优页面.....	13
4.6 配套资料页面.....	14
4.7 加载和保存寄存器配置.....	14
5 寄存器映射.....	15
5.1 GUI 中的寄存器映射页面.....	16
5.2 用户控制寄存器 (基址 = 0x20200400h)	16
5.3 用户输入寄存器 (基址 = 0x20200000h)	20
5.4 用户状态寄存器 (基址 = 0x20200430h)	43
6 基本调优.....	44
6.1 系统配置参数.....	44
6.2 基本电机旋转的控制配置.....	49
6.3 故障处理.....	59
7 高级调优.....	60
7.1 控制配置调优.....	60
8 硬件配置.....	67
8.1 方向配置.....	67
8.2 制动配置.....	67

8.3 Main.h 定义.....	67
8.4 实时变量跟踪.....	69

插图清单

图 1-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器的简化原理图.....	4
图 2-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器 - 无传感器 FOC 方框图.....	5
图 2-2. CSA 输出滤波器.....	6
图 2-3. ADC 分压器.....	7
图 2-4. MSPM0 LaunchPad 套件和 DRV83xx EVM 外部配置.....	10
图 2-5. LP-MSPM0G3507 反向通道连接到 UART3.....	10
图 4-1. 用于选择串行端口设置的选项.....	11
图 4-2. 串行端口配置.....	12
图 4-3. 用于选择系统配置的选项.....	12
图 4-4. 选择寄存器映射页面的选项.....	13
图 4-5. 选择电机调优页面的选项.....	13
图 4-6. 用于选择配套资料页面的选项.....	14
图 4-7. 保存配置寄存器的选项.....	14
图 4-8. 加载寄存器配置的选项.....	15
图 5-1. CCS 调试模式中输入、控制和状态寄存器的表达式.....	15
图 5-2. GUI 中的寄存器映射页面.....	16
图 5-3. CCS 调试模式中的用户控制寄存器.....	16
图 5-4. CCS 调试模式下的用户输入寄存器.....	20
图 5-5. CCS 调试模式下的用户状态寄存器.....	43
图 6-1. CCS 调试模式下的系统配置寄存器.....	45
图 6-2. GUI 系统参数配置.....	46
图 6-3. 电阻测量.....	47
图 6-4. 电感测量.....	47
图 6-5. BEMF 常量测量.....	48
图 6-6. 寄存器映射 GUI 页面.....	50
图 6-7. 在 GUI 中禁用 ISD.....	51
图 6-8. GUI 中的电机启动.....	51
图 6-9. 在 GUI 中设置禁用闭环.....	52
图 6-10. 在 GUI 中禁用电流环路.....	52
图 6-11. 无传感器 PMSM 转子位置估算方框图.....	53
图 6-12. 估算器选择的配置.....	53
图 6-13. 基于滑模观测器的 BEMF 估算.....	54
图 6-14. 基于 PLL 的转子速度和位置估算.....	55
图 6-15. GUI “Motor Tuning” 页面中的 PI 环路调优.....	56
图 6-16. 通过 GUI 设置速度输入.....	58
图 6-17. 从 GUI 读取故障状态.....	59
图 7-1. 控制模式配置.....	61
图 7-2. 反向驱动功能.....	62
图 7-3. 禁用 AVS 时的电源电压和相电流波形.....	66
图 7-4. 启用 AVS 时的电源电压和相电流波形.....	66

表格清单

表 2-1. 使用 MSPM0 进行通用 FOC 时支持的硬件.....	5
表 2-2. PWM 输出的引脚配置.....	6
表 2-3. DRV8316 中采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置.....	6
表 2-4. DRV8323 中不采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置.....	7
表 2-5. DRV8329 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置.....	7
表 2-6. ADC 相电压的引脚配置.....	7
表 2-7. 适用于 DRV8316 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置.....	8
表 2-8. 适用于 DRV8323 和 DRV8329 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置.....	8
表 2-9. 有关故障的引脚配置.....	8
表 2-10. SPI 连接的引脚配置.....	8
表 2-11. UART 连接的引脚配置.....	9
表 3-1. FOC 控制的软件支持.....	11

表 4-1. GUI 连接类型.....	11
表 5-1. 用户控制寄存器.....	16
表 5-2. 寄存器配置访问类型代码.....	17
表 5-3. SPEED_CTRL 寄存器字段说明.....	17
表 5-4. 算法调试控制 1 寄存器字段说明.....	17
表 5-5. 算法调试控制 2 寄存器字段说明.....	18
表 5-6. 算法调试控制 3 寄存器字段说明.....	19
表 5-7. DAC 配置寄存器.....	19
表 5-8. 用户输入寄存器.....	20
表 5-9. 寄存器配置访问类型代码.....	20
表 5-10. 电机电阻配置寄存器 (偏移 = 0h)	21
表 5-11. 电机电感配置 (偏移 = 4h)	21
表 5-12. 电机凸极配置 (偏移 = 8h)	21
表 5-13. 电机 BEMF 常数配置 (偏移 = Ch)	21
表 5-14. 基极电压配置 (偏移 = 10h)	21
表 5-15. 基极电流配置 (偏移 = 14h)	21
表 5-16. 电机最大速度配置 (偏移 = 18h)	21
表 5-17. 电机最大功率配置 (偏移 = 1Ch)	21
表 5-18. 速度环路比例增益 (偏移 = 20h)	21
表 5-19. 速度环路积分增益 (偏移 = 24h)	21
表 5-20. 扭矩环路比例增益 (偏移 = 28h)	22
表 5-21. 扭矩环路积分增益 (偏移 = 2Ch)	22
表 5-22. 弱磁控制器比例增益 (偏移 = 30h)	22
表 5-23. 弱磁控制器积分增益 (偏移 = 34h)	22
表 5-24. ESMO 观测器的滑动控制增益 (偏移 = 38h)	22
表 5-25. ISD_CONFIG 寄存器.....	22
表 5-26. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明.....	25
表 5-27. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明.....	27
表 5-28. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明.....	31
表 5-29. CLOSED_LOOP2 寄存器字段说明.....	35
表 5-30. FIELD_CTRL 寄存器位说明.....	37
表 5-31. FAULT_CONFIG1 寄存器字段说明.....	37
表 5-32. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明.....	38
表 5-33. MISC_ALGO 寄存器字段说明.....	40
表 5-34. PIN_CONFIG 寄存器字段说明.....	41
表 5-35. PERI_CONFIG1 寄存器字段说明.....	42
表 5-36. 用户状态寄存器.....	43
表 8-1. 用于 DAC 监控的地址表.....	70

商标

LaunchPad™ is a trademark of Texas Instruments.
 Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.
 所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

MSPM0Gxxx 系列 80MHz Arm®-Cortex® M0+ MCU 可通过多种无传感器和带传感器 FOC 控制对三相无刷直流 (BLDC) 电机进行换向。

BLDC 电机由三相无刷直流 (BLDC) MOSFET 栅极驱动器或集成式 MOSFET 电机驱动器 (标称直流轨) 或电池组电压驱动。该驱动器通常集成了三个电流检测放大器 (CSA)，用于检测 BLDC 电机的三相电流，从而实现出色的 FOC 控制。

图 1-1 所示为 MSPM0Gxxx MCU 和 BLDC 电机驱动器的简化原理图。

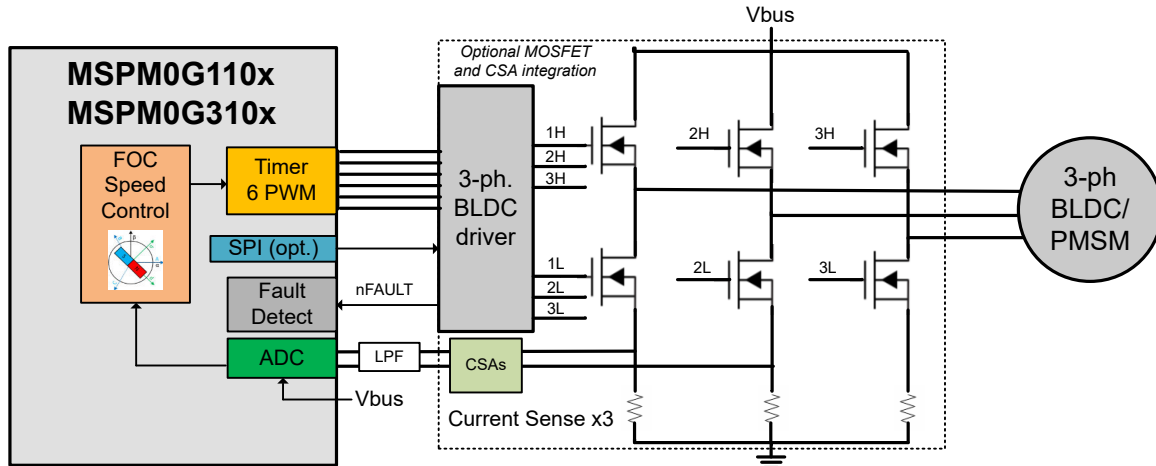


图 1-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器的简化原理图

本调优指南提供了使用 MSPM0Gxxx MCU 对三相 BLDC 电机进行调优的步骤。调优过程分为四个部分：**硬件设置**、**软件设置**、**基本调优**和**高级调优**。

- **硬件设置**：设置 TI 提供的硬件或使用定制 PCB 进行调优过程的步骤。
- **软件设置**：设置 TI 提供的软件以旋转和调节 BLDC 电机的步骤。
- **GUI 设置 (可选)**：使用图形用户界面 (GUI) 旋转和调优 BLDC 电机的步骤。
- **基本调优**：在闭环中成功使电机旋转的调优步骤。
- **高级调优**：符合用例并探索器件中功能的调优步骤。

2 硬件设置

使用本调优指南时需具备以下各项：

- LP-MSPM0G3507 电路板
- 支持的 DRV83xx 电机驱动器评估模块 (EVM)
 - BOOSTXL-DRV8323RS
 - DRV8316REVM
 - DRV8329 EVM
- 用于引脚表连接的跳线
- 安装了 MSPM0 FOC 软件的计算机
- 要使用此流程进行调优的电机。电机数据表对您有所帮助，但并非强制性要求。
- 适合电机的直流电源。
- 基本实验室设备，例如数字万用表 (DMM)、示波器、电流探针和电压探针

图 2-1 展示了无传感器 FOC 电机系统的连接方框图。此系统可由以下组件构建：

- TI 提供的硬件 (LP-MSPM0G3507 和 DRV83xx EVM)
- 具有板载 MSPM0Gxxx MCU 和 BLDC 电机驱动器的定制 PCB 硬件

以下各节介绍了如何为无传感器 FOC 方框图的每个部分配置引脚。

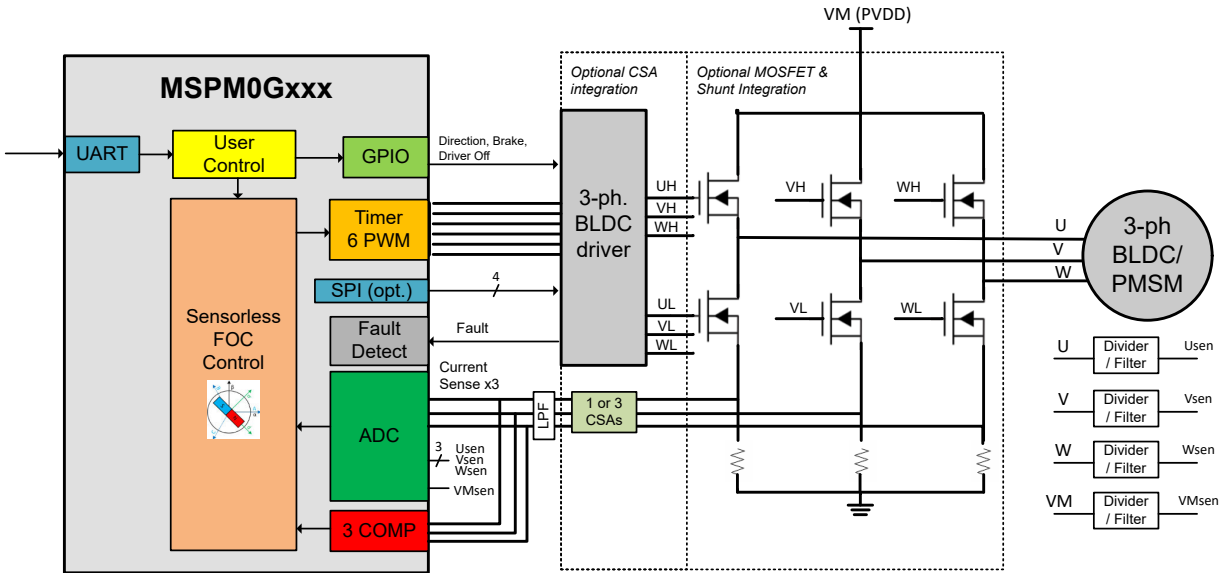


图 2-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器 - 无传感器 FOC 方框图

系统配置工具 (SysConfig) 有助于配置电机控制系统中的引脚。为 EVM 硬件设置提供了默认引脚配置来旋转电机，但引脚可以在 SysConfig 中直观地重新映射到其他引脚。这对于重新配置定制 PCB 上的不同引脚 (例如 PWM、ADC 或其他控制信号) 或在 MSPM0 器件上扩展到不同的封装非常有用。

2.1 EVM 硬件设置

TI 提供用于评估 MSPM0 Arm Cortex-M0+ 微控制器的 LaunchPad™ 开发套件，以及用于评估 DRV83xx 系列无刷直流电机驱动器的评估模块 (EVM)。这些评估板可从 ti.com 上获取，并可用作通用 FOC 电机控制的系统评估平台。

有关支持的评估板，请参阅节 2.1.1。

备注

默认提供具有预配置的引脚，这些引脚支持硬件评估板。如果使用定制 PCB，请参阅以下 [引脚配置](#) 部分，为三相电机驱动器分配支持的引脚。

2.1.1 EVM 硬件支持

表 2-1 展示了支持的 MSPM0 LaunchPad 套件和 EVM 以及用于三相通用 FOC 电机控制的连接指南。

表 2-1. 使用 MSPM0 进行通用 FOC 时支持的硬件

MSPM0Gxxx LaunchPad™ 套件	电机驱动器硬件	硬件用户指南	电流检测放大器	SPI 驱动器支持	建议的电机电压范围	建议的电机功率
LP-MSPM0G3507	BOOSTXL-DRV8323RS	BOOSTXL-DRV8323Rx EVM 用户指南	3	是	6V 至 60V	< 1000W
LP-MSPM0G3507	DRV8316REVM	DRV8316REVM 用户指南	3	是	4.5V 至 35V	< 80W
LP-MSPM0G3507	DRV8329EVM	DRV8329AEVM 用户指南	1	否	4.5V 至 60V	<1000W
MSPM0G1507	TIDA-010250 参考设计	TIDA-010250 设计指南	1、2、3	否	265V 最大交流电源	<1000W

备注

确保 LaunchPad 套件和 EVM 的跳线配置正确。如需更多信息，请参阅 LaunchPad 套件和 EVM 的用户指南。

2.2 IPD 使用的外设配置

初始位置检测算法利用 ADC 电流检测路径来识别相电流上升时间，从而检测转子位置。ADC 的窗口比较器根据预设的 IPD 阈值电流限值持续监测相电流，从而生成电流脉冲。计时器用于捕获不同扇区的这些不同的脉冲上升时间，并进行比较以检测转子位置。计时器和 ADC 配置会在 IPD 初始化期间根据 Sysconfig 进行更新。算法会根据所选的电流检测和 [节 8.3.1](#) 配置所需的 WCOMP 设置。

备注

在 IPD 脉冲时间内，其余的算法中断将停止，从而以非常高的采样率持续监测 ADC 电流。IPD 操作完成后，将恢复正常中断操作。

2.3 PWM 输出的引脚配置

[表 2-2](#) 展示了 PWM 输出的默认引脚配置。所需的连接为六个 PWM 输出信号，这些信号发送换向图形以实现通用 FOC 电机控制。TIMA 包括针对电机控制的特性，例如具有死区的互补 PWM 输出、响应时间 <40ns 的故障处理以及用于配置 FOC 环路速率的重复计数器。

TIMA0 是电机控制的首选计时器，因为它从同一计时器计数器（例如 TIMA0_C1 和 TIMA0_C1N）提供三对互补的 PWM 输出，但可以使用任何 TIMA0 或 TIMA1 输出对并进行交叉触发来提供六个 PWM 输出信号。

表 2-2. PWM 输出的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
TIMA0_C0	TIMA0 通道 0 输出引脚	INHA	A 相高侧 PWM 输入
TIMA0_C0N	TIMA0 通道 0 互补输出引脚	INLA	A 相低侧 PWM 输入
TIMA0_C1	TIMA0 通道 1 输出引脚	INHB	B 相高侧 PWM 输入
TIMA0_C1N	TIMA0 通道 1 互补输出引脚	INLB	B 相低侧 PWM 输入
TIMA0_C2	TIMA0 通道 2 输出引脚	INHC	C 相高侧 PWM 输入
TIMA0_C2N	TIMA0 通道 2 互补输出引脚	INLC	C 相低侧 PWM 输入

2.4 ADC 电流的引脚配置

三相电流检测的 ADC 配置：[表 2-3](#) 和 [表 2-4](#) 展示了三相电流检测的 ADC 电流的默认引脚配置，具体取决于所使用的 DRV 器件。需要将三个 ADC 输入连接到电机驱动器或外部 CSA 的三个 CSA 输出。

ADC0 和 ADC1 是两个同时采样的 4MSPS 模数转换器，用于测量相电流和电压。ADC0 和 ADC1 在正常电机运行条件下同时测量相电流，并根据转子角度按顺序测量总线电压。

从 CSA 输出到 ADC 输入，可串联一个低通 RC 滤波器（可选），以滤除开关输出信号中的任何高频噪声，从而进行正确的 ADC 采样，如 [图 2-2](#) 所示。

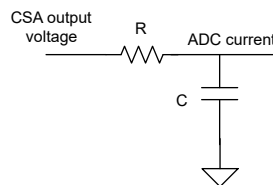


图 2-2. CSA 输出滤波器

选择一个至少为 PWM 开关频率 (f_{PWM}) 10 倍的滤波频率 f_c 。根据 RC 滤波器设计，使用 [方程式 1](#) 计算 f_c 。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

表 2-3. DRV8316 中采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A0_3	ADC0，通道 3 输入	SOA	A 相电流检测输出
A0_2	ADC0，通道 2 输入	SOB	B 相电流检测输出

表 2-3. DRV8316 中采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置 (续)

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A1_2	ADC1, 通道 2 输入	SOB	B 相电流检测输出
A1_1	ADC1, 通道 1 输入	SOC	C 相高侧 PWM 输入

表 2-4. DRV8323 中不采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A1_2	ADC1, 通道 2 输入	SOA	A 相电流检测输出
A0_3	ADC0, 通道 2 输入	SOB	B 相电流检测输出
A1_3	ADC1, 通道 3 输入	SOC	C 相高侧 PWM 输入

单分流器电流检测的 ADC 配置：DRV8329 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置展示了 DRV8329 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置。

在单分流器电流检测中，ADC0 和 ADC1 用于在单个 PWM 周期的两个不同实例对相同的分流电流进行采样，以便估算三相电流。用户需要将两个 ADC 配置为对相同的电流检测输出进行采样，并为电流检测通道配置存储器"0"索引，以便实现适当的 FOC 运行。

表 2-5. DRV8329 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A0_3	ADC 0, 通道 3 输入	SOX	直流总线电流检测
A1_2	ADC 1, 通道 2 输入	SOX	直流总线电流检测

2.5 ADC 电压的引脚配置

ADC 电压的默认引脚配置如下表所示。所需连接为四个 ADC 输入：

- 三个 ADC 输入连接到来自电机的检测到的三个相电压 (VSENA、VSENB、VSENC)
- 一个 ADC 输入连接到检测到的 VM 电机电压 (VSENVVM)

检测到的电压通过一个电阻分压器和一个可选的旁路滤波电容实现，如图 2-3 所示。调整电阻器的大小，使任何电机电压瞬变都不超过 ADC 输入的最大电压。有关电阻分压比的更多信息，请参阅节 6.1.6。

备注

仅当需要初始速度检测功能时，才需要相电压检测。

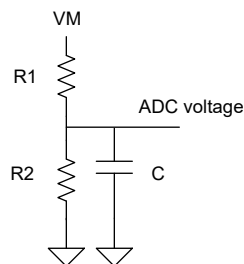


图 2-3. ADC 分压器

表 2-6. ADC 相电压的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A1_6	ADC1, 通道 6 输入	VSENA	A 相检测电压输出
A0_7	ADC0, 通道 7 输入	VSENB	B 相检测电压输出
A1_5	ADC1, 通道 5 输入	VSENC	C 相检测电压输出

表 2-7. 适用于 DRV8316 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A1_3	ADC1, 通道 3 输入	VSEN -Vm	直流总线电压输出

表 2-8. 适用于 DRV8323 和 DRV8329 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
A0_2	ADC0, 通道 2 输入	VSEN -Vm	直流总线电压输出

2.6 有关故障的引脚配置

有关故障的默认引脚配置如表 2-9 所示。电机驱动器或 MCU 可在硬件中检测故障。

通常，当检测到系统中存在故障时，电机驱动器会驱动低电平有效的开漏故障引脚 (nFAULT)，比如，在驱动器内与 MOSFET 过流、栅极驱动或电源相关故障的连接中。

MSPM0 MCU 可以通过专用硬件路径检测故障输入，从而实现低延迟和快至 40ns 的响应速度。这比使用具有软件延迟的传统 GPIO 中断要快。故障输入路径可使用 TIMA 故障处理程序配置用于故障处理，例如在过流情况下关闭 PWM。TIMA 输入的示例包括外部故障引脚（例如 TIMA_FLT0）和使用比较器的低侧过流（例如 COMP0_IN0+）。

表 2-9. 有关故障的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
TIMA0_C2	TIMA0 通道 2 输入引脚	nFAULT	开漏低电平有效故障引脚

2.7 GPIO 输出功能的引脚配置

MSPM0 的许多 GPIO 输出功能可用于由逻辑电平引脚控制的电机驱动器特定功能。电机驱动器功能的示例包括：

- 使能引脚 (ENABLE)/低电平有效睡眠模式控制 (nSLEEP)
- 高电平有效栅极驱动器关断 (DRVOFF)
- 高电平有效 CSA 校准 (CAL)
- 高电平有效制动 (BRAKE)/低电平有效制动 (nBRAKE)
- 方向引脚 (DIR)

备注

有关 GPIO 可配置引脚，请参阅电机驱动器数据表和用户指南。

2.8 SPI 通信的引脚配置

SPI 连接的默认引脚配置如节 2.8 所示。一些电机驱动器包括可选的 SPI，用于配置控制寄存器和读取状态寄存器以进行故障诊断。SPI 寄存器的一些示例包括：

- 配置栅极驱动拉电流/灌电流强度
- 配置 CSA 输出行为
- 运行诊断
- 检测到故障引脚为低电平有效时读取故障位
- 故障条件消除后清除故障状态位
- 清除看门狗计时器

备注

如果使用 SPI 或硬件接口来配置系统设置，请参阅电机驱动器器件特定数据表。

表 2-10. SPI 连接的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
SPIx_CSy	SPI 芯片选择 (y = 0、1、2、3)	nSCS	SPI 芯片选择

表 2-10. SPI 连接的引脚配置 (续)

MSPM0 引脚	功能	DRV 连接	DRV 功能
SPIx_SCK	SPI 时钟	SCLK	SPI 时钟
SPIx_POCI	SPI 外设输出控制器输入	SDO	SPI 数据输出
SPIx_PICO	SPI 外设输入控制器输出	SDI	SPI 数据输入

备注

要确定 SDO 引脚是否为开漏引脚以及是否需要上拉电阻器，请参阅电机驱动器器件特定数据表。

2.9 UART 通信的引脚配置

UART 可用于接收命令以配置、旋转和控制电机。这些命令从主机 MCU 或 GUI 发送，并可选择性地用于 LIN 通信等高级协议。

备注

当与 DMA 和 LIN 接口一同使用时，使用 UART 实例 0 (UART0_RX、UART0_TX) 来配置 UART 接口。

备注

当与 DMA 一同使用时，使用 UART 实例 3 (UART3_RX、UART3_TX) 为 GUI 通信配置 UART 接口。

表 2-11. UART 连接的引脚配置

MSPM0 引脚	功能
UARTx_RX	UART 接收
UARTx_TX	UART 发送

2.10 评估板的外部连接

将 MSPM0 LaunchPad 连接到 DRV83xx EVM 时，请按照以下步骤操作：

1. 将三个电机相位端子连接到驱动器板 (A、B 和 C 相)。如果电机具有用于连接霍尔效应传感器的中心抽头连接或导线，请将这些导线保持未连接状态。
2. 通过将 EVM 与 LaunchPad 套件匹配或使用跳线来实现从 MSPM0 LaunchPad 套件到 DRV83xx EVM 的器件间连接，如图 2-4 所示。有关硬件用户指南连接的详细信息，请参阅节 2.1.1。

备注

如果使用 GUI 通过 USB 连接到反向通道 UART 来与 MSPM0 器件进行通信，请将反向通道 UART 连接到 UART3_TX 和 UART3_RX，如图 2-5 所示。

3. 用 Micro-USB 电缆将 MSPM0 LaunchPad 套件连接到 PC。
 - a. 如果需要将 PC 与电机系统隔离，请移除电桥上的 GND 和 3V3 隔离跳线。如果完成了这一步，则必须在外部或从 DRV83xx EVM 板 (如果可用) 提供 3V3。
4. 提供符合电源电压 (VM) 范围的电压。有关建议的电压范围，请参阅特定于电路板的用户指南或 DRV 特定数据表。

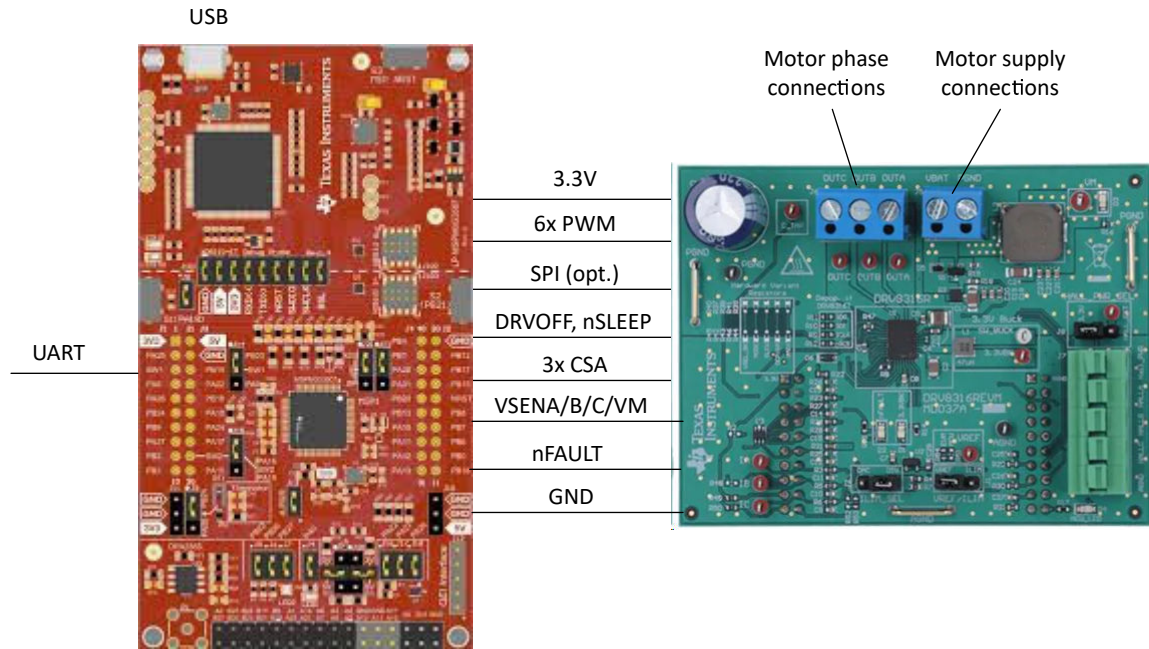


图 2-4. MSPM0 LaunchPad 套件和 DRV83xx EVM 外部配置

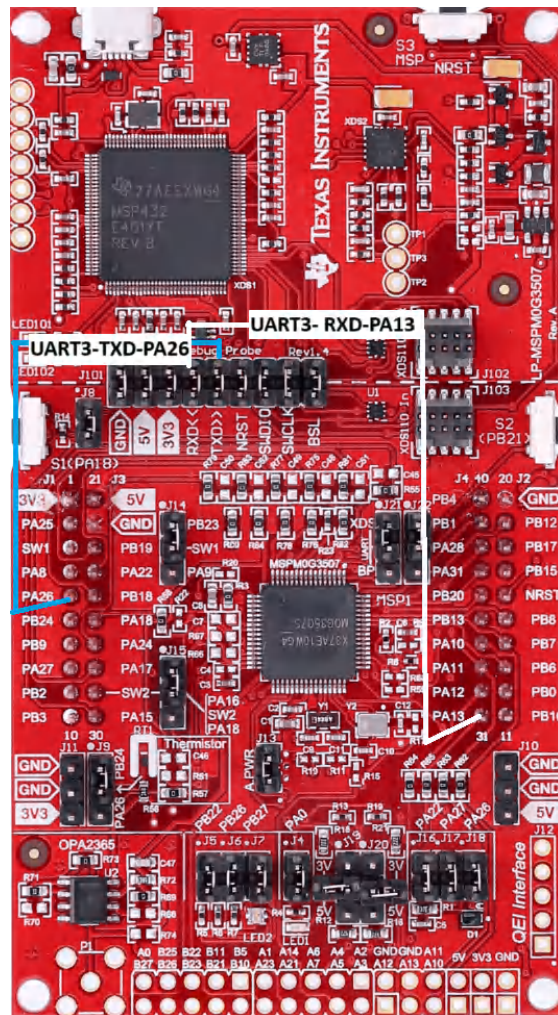


图 2-5. LP-MSPM0G3507 反向通道连接到 UART3

3 软件设置

MSPM0 MCU 的通用 FOC 电机控制库示例作为 MSPM0-SDK 的一部分提供，可使用 Code Composer Studio IDE 进行评估。

表 3-1 展示了 TI Resource Explorer 中的通用 FOC 控制支持的软件和文档。

表 3-1. FOC 控制的软件支持

通用 FOC 用户指南 ⁽¹⁾	代码示例	GUI
通用 FOC 用户指南	通用 FOC 示例	MSPM0G 通用 FOC GUI

(1) 包括库概述、软件设置、硬件设置等。

4 GUI 设置

用户可以选择将 [MSPM0 通用 FOC GUI](#) 用作主机，向目标端的 MSPM0 MCU 发送命令，以使用串行转 UART 接口控制电机。

GUI 包括一个 USB 转 UART 编解码器，该编解码器可作为主机将 UART 命令发送到 MSPM0 LaunchPad 套件。应用软件包括可配置的 UART 寄存器映射和数据格式，用于将 UART 数据转换为简化的电机控制命令。

表 4-1. GUI 连接类型

连接	接口	硬件连接
GUI 至目标 MSPM0 MCU	UART	UART3_TX、UART3_RX

要启动 GUI，请转到 [MSPM0 通用 FOC GUI](#) 页面。

4.1 串行端口配置

根据 PC 上的已连接端口来配置串行端口，并将波特率配置为 115200。

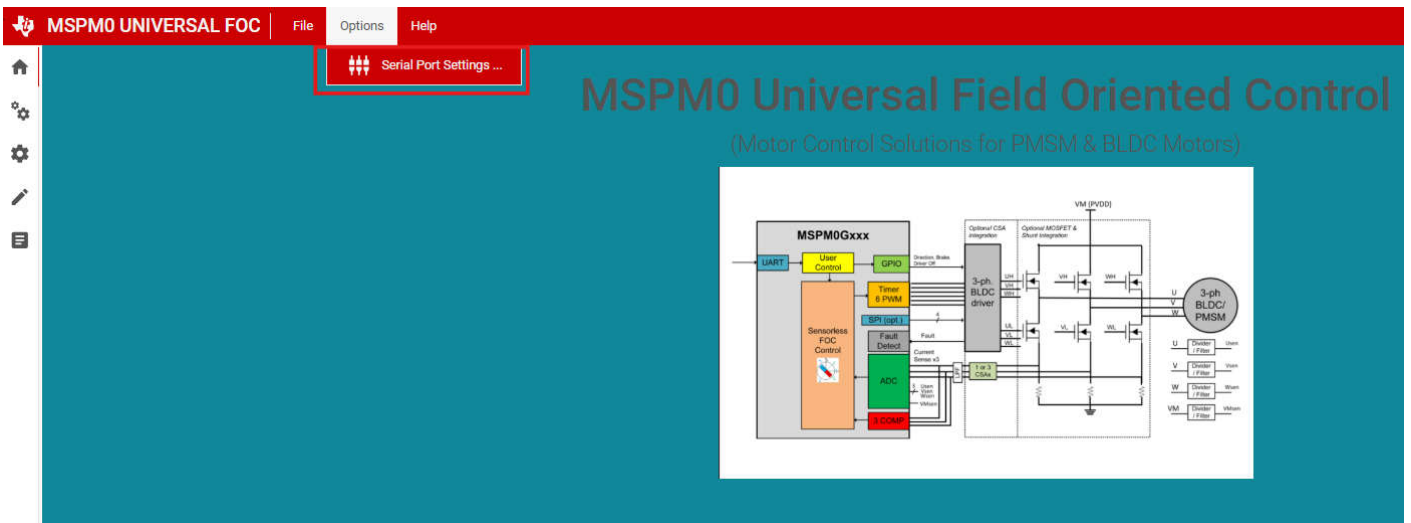


图 4-1. 用于选择串行端口设置的选项

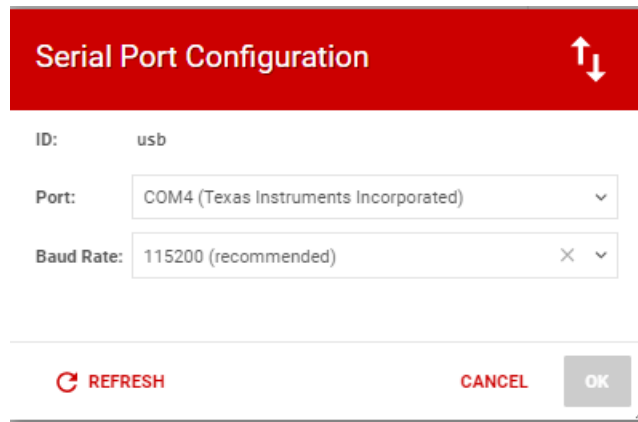


图 4-2. 串行端口配置

4.2 GUI 主页

用户可从下面的 GUI 主页导航到各种窗口来进行特定配置。

4.3 系统配置

用户可以从系统配置页面设置电机和 EVM 系统参数的基本配置

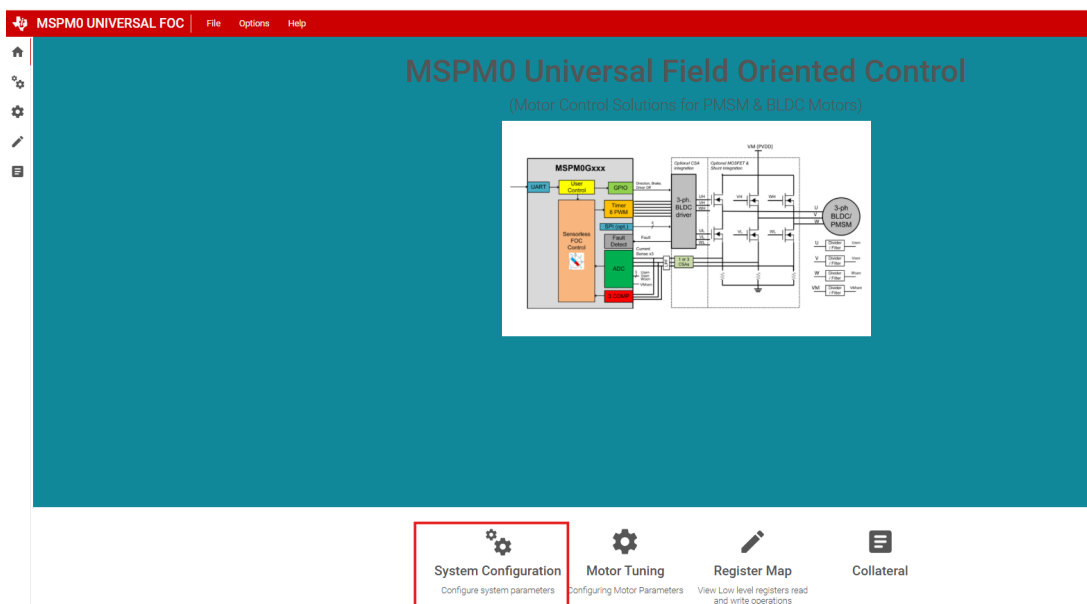


图 4-3. 用于选择系统配置的选项

4.4 寄存器映射

寄存器映射页面包含可在启动电机之前配置的所有可用电机调优参数的配置。寄存器映射页面还包含状态变量，可以对这些变量进行持续监控。

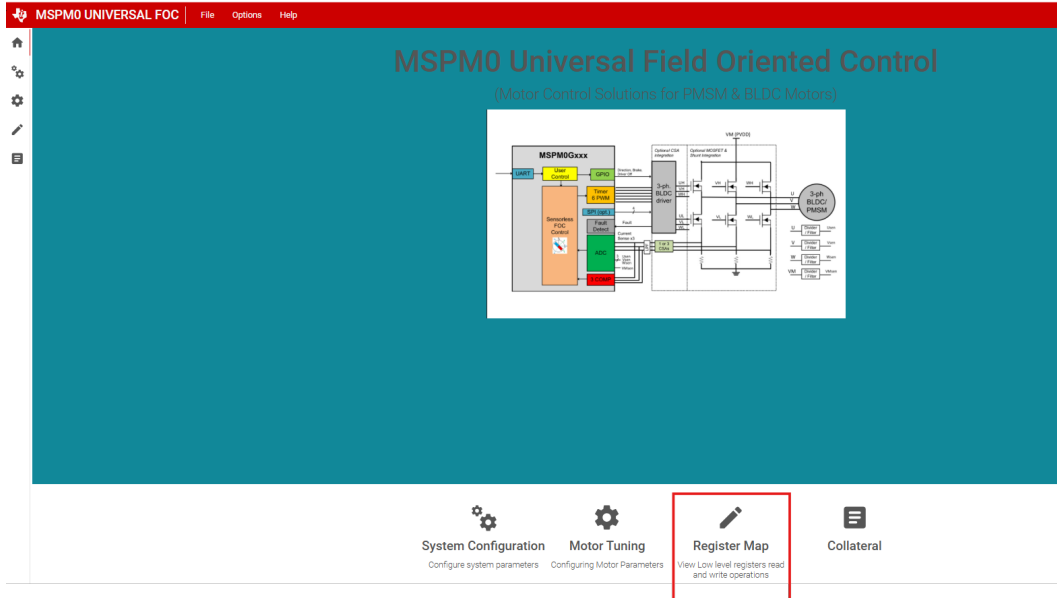


图 4-4. 选择寄存器映射页面的选项

4.5 电机调优页面

用户可以设置速度命令，并在此窗口中监控电机状态和故障变量。

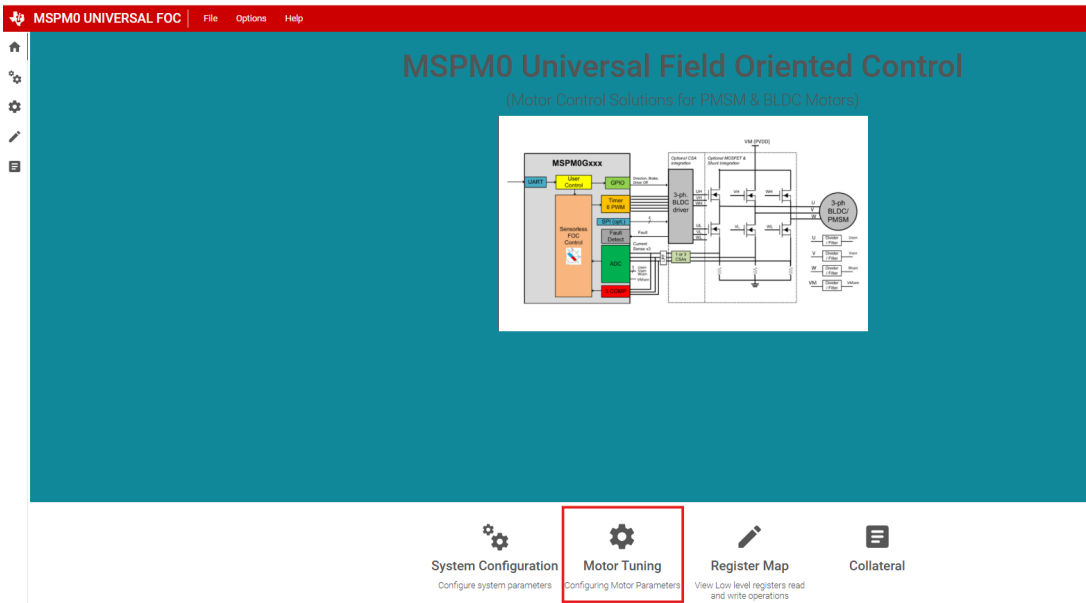


图 4-5. 选择电机调优页面的选项

4.6 配套资料页面

此页面包含指向各种用户指南的链接，这些指南涵盖了设置软件和迁移到不同平台的说明。

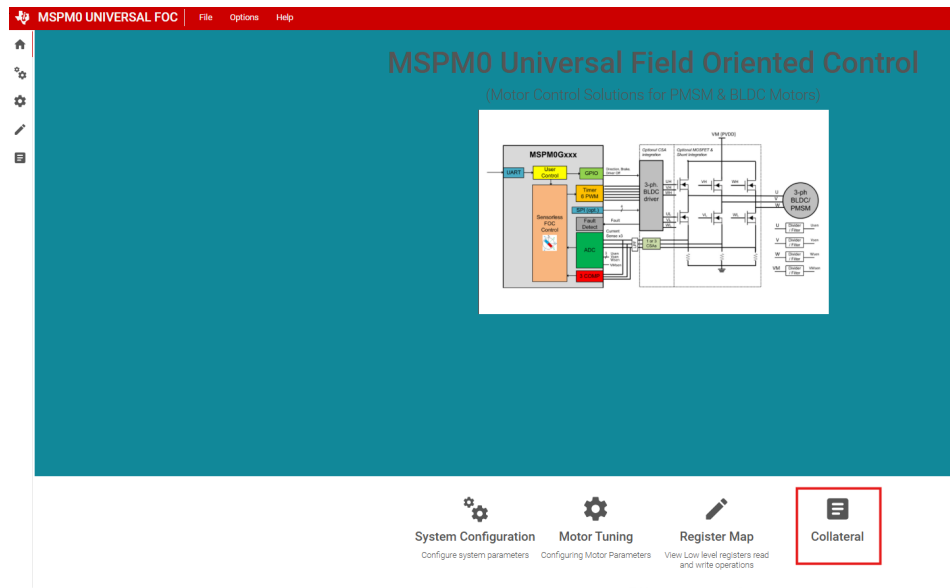


图 4-6. 用于选择配套资料页面的选项

4.7 加载和保存寄存器配置

一旦针对给定电机完成了所需的调优，可以保存调优配置以供将来参考。在顶部菜单中，如下所述点击“文件”→“保存寄存器”选项，将配置保存到下载。

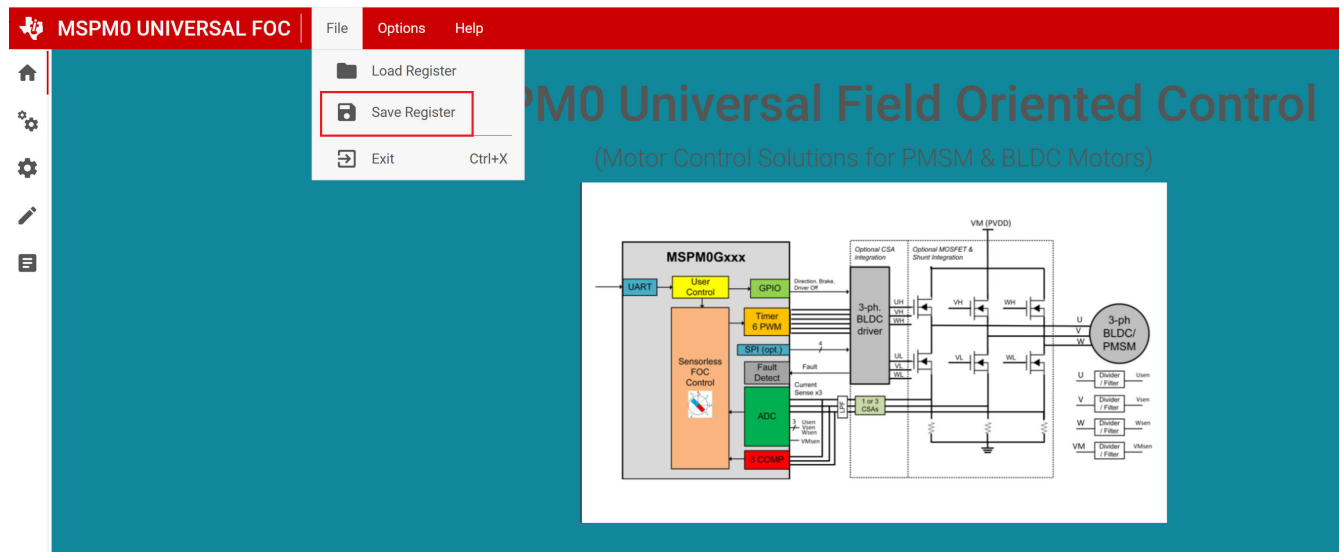


图 4-7. 保存配置寄存器的选项

同样，要加载之前保存的已调优配置，请点击菜单选项“文件”→“加载寄存器”将配置填充到寄存器空间中。

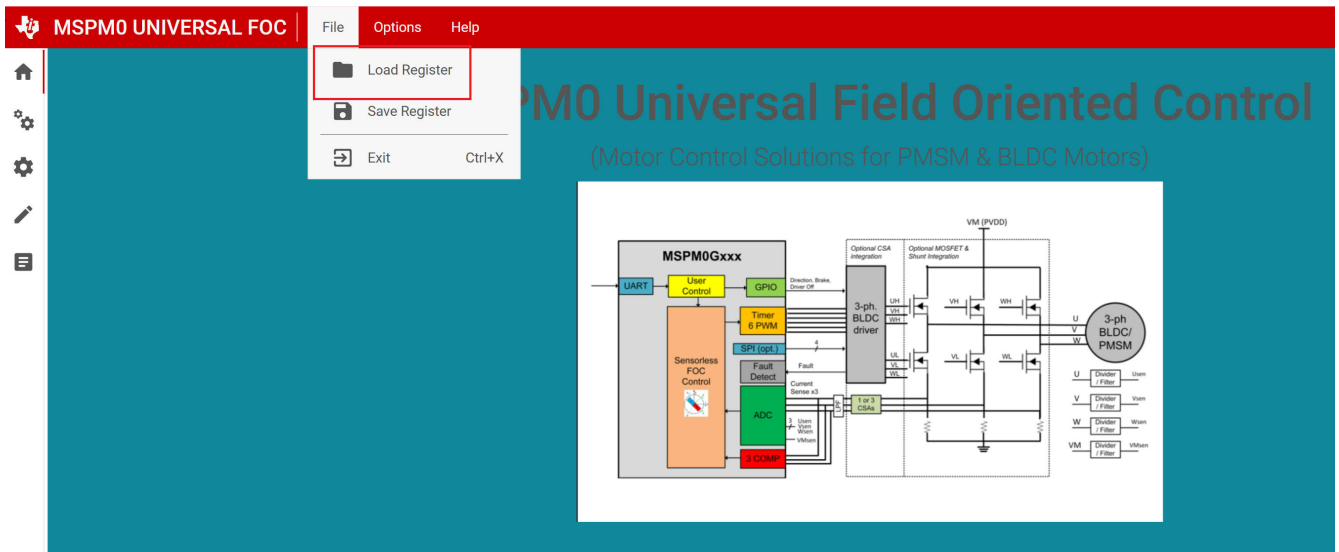


图 4-8. 加载寄存器配置的选项

5 寄存器映射

寄存器映射包含一组三个寄存器结构，分别使用用户输入寄存器、用户状态寄存器和用户控制寄存器来设置电机控制调优参数、监控电机状态变量和设置实时控制参数。

可以通过三种方式执行 FOC 寄存器的实时控制。

1. 在代码调试期间，将结构导入 CCS 的表达式窗口，如 图 5-1 中所示。

Expression	Type	Value	Address
> pUserCtrlRegs	struct USER_CTRL_INTERFACE_T *	0x20200400 {speedCtrl={b={speedIn...	0x20201218
> pUserStatusRegs	struct USER_STATUS_INTERFACE_T *	0x20200430 {systemFaultStatus=NO_...	0x20201220
> pUserInputRegs	struct USER_INPUT_INTERFACE_T *	0x20200000 {systemParams={mtrRes...	0x2020121C
+ Add new expression			

图 5-1. CCS 调试模式中输入、控制和状态寄存器的表达式

2. 按照 [UART_COMMUNICATION_GUIDE](#) 中的说明，通过 UART 读取/写入参数
3. 使用 [通用 FOC GUI](#) 控制和监测变量。

以下各节说明了寄存器以及与这些结构相关的变量。

5.1 GUI 中的寄存器映射页面

上述寄存器变量也可以使用 GUI 进行配置。图 5-2 详细说明了通用 FOC 应用中提供的所有用户可配置寄存器。将 GUI 与控制器连接后，点击寄存器页面中的 **Read All** 选项，即可反映默认的编程参数。

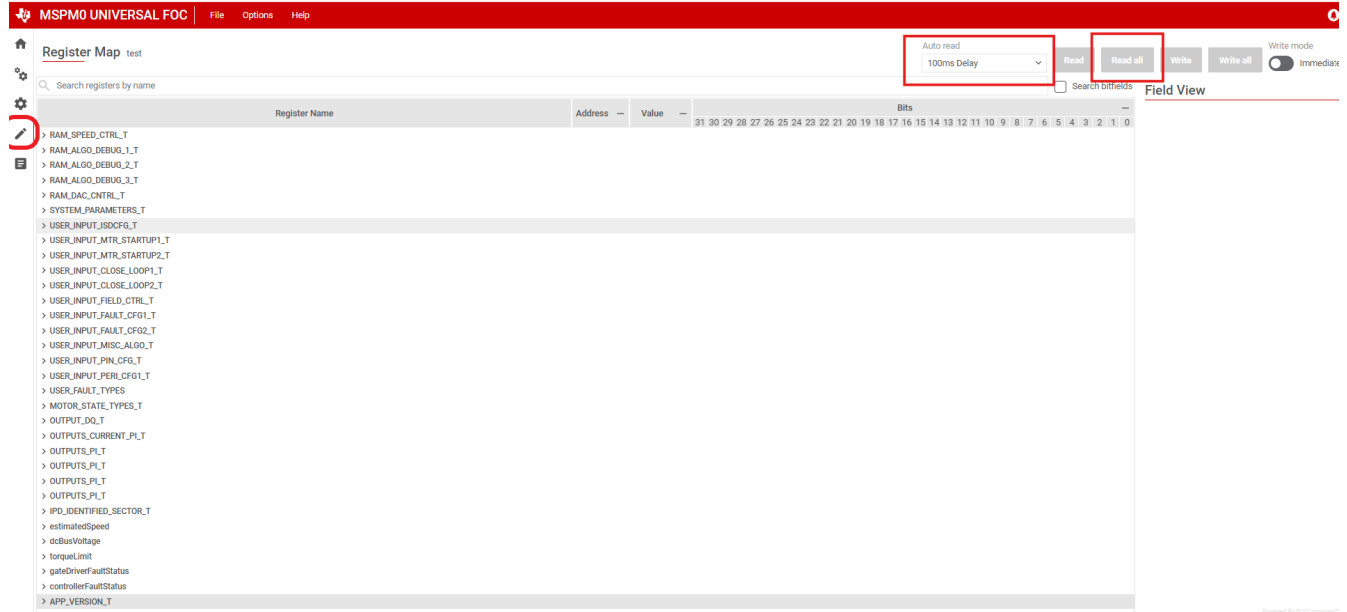


图 5-2. GUI 中的寄存器映射页面

5.2 用户控制寄存器 (基址 = 0x20200400h)

用户控制寄存器是一组用户可配置参数，用于实时控制电机。

可以在应用程序代码中使用指针变量 **pUserCtrlRegs** 修改这些寄存器组。图 5-3 展示了在 CSS 表达式窗口中导入的用户控制寄存器集合。

Expression	Type	Value	Address
▼ pUserCtrlRegs	struct USER_CTRL_INTERFACE_T *	0x20200400 {speedCtrl={b={speedIn...	0x20201218
▼ *(pUserCtrlRegs)	struct USER_CTRL_INTERFACE_T	{speedCtrl={b={speedInput=0,reserv...	0x20200400
> speedCtrl	union RAM_SPEED_CTRL_T	{b={speedInput=0,reserved=0},w=0}	0x20200400
> algoDebugCtrl1	union RAM_ALGO_DEBUG_1_T	{b={iqRefSpeedLoopDis=0,forceAlig...	0x20200404
> algoDebugCtrl2	union RAM_ALGO_DEBUG_2_T	{b={reserved=0,forceVQCurrLoopDis...	0x20200408
> algoDebugCtrl3	union RAM_ALGO_DEBUG_3_T	{b={fluxModeReference=0,reserved1...	0x2020040C
> dacCtrl	struct RAM_DAC_CNTRL_T	{dacEn=1,dacShift=0,dacScalingFact...	0x20200410

图 5-3. CCS 调试模式中的用户控制寄存器

表 5-1. 用户控制寄存器

偏移	首字母缩写词	寄存器名称	部分
0h	SPEED_CTRL	速度控制寄存器	节 5.2.1
4h	ALGO_DEBUG_CTRL1	算法调试控制 1 寄存器	节 5.2.2
8h	ALGO_DEBUG_CTRL2	算法调试控制 2 寄存器	节 5.2.3
Ch	ALGO_DEBUG_CTRL3	算法调试控制 3 寄存器	节 5.2.4
10h	DAC_CTRL	DAC 配置和控制寄存器	节 5.2.5

复杂的位访问类型经过编码可适应小的表格单元格，如表 5-2 所示。

表 5-2. 寄存器配置访问类型代码

访问类型	代码	说明
读取类型		
R	R	读取
写入类型		
W	W	写入
复位或默认值		
-n		复位后的值或默认值

5.2.1 速度控制寄存器 (偏移 = 0h) [复位 = 0000000h]

表 5-3 展示了用以控制电机速度的寄存器。

表 5-3. SPEED_CTRL 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31 - 15	RESERVED	R	0h	保留
14-0	SPEED_CTRL	W	0000000000 00000b	目标电机转速/扭矩值 速度或扭矩命令的百分比 × 32768

5.2.2 算法调试控制 1 寄存器 (偏移 = 4h) [复位 = 0000000h]

表 5-4 展示了用于控制算法调试函数的寄存器。

表 5-4. 算法调试控制 1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31	CLEAR_FAULT	W	0b	用以清除设置控制器和栅极驱动器故障的位。位会自动复位。 1h = 清除故障命令
30-22	FORCED_ALIGN_ANGLE	W	000000 000b	在强制对齐状态 (FORCE_ALIGN_EN = 1) 期间使用的 9 位值 (以 ° 为单位)。应用的角度 (°) = FORCED_ALIGN_ANGLE % 360°
21-16	RESERVED	R	0h	
15	CLOSED_LOOP_DIS	W	0b	用于禁用闭环 0h = 启用闭环 1h = 禁用闭环，在开环中进行电机换向
14	FORCE_ALIGN_EN	W	0b	强制对齐状态使能 0h = 禁用强制对齐状态，如果将 MTR_STARTUP 选择为对齐或双对齐，器件会退出对齐状态 1h = 启用强制对齐状态，如果将 MTR_STARTUP 选择为对齐或双对齐，器件会保持对齐状态
13	FORCE_SLOW_FIRST_CYCLE_EN	W	0b	强制慢速首循环使能 0h = 禁用强制慢速首循环状态，如果将 MTR_STARTUP 选择为慢速首循环，器件会退出慢速首循环状态 1h = 启用强制慢速首循环状态，如果将 MTR_STARTUP 选择为慢速首循环，器件会保持慢速首循环状态
12	FORCE_IPD_EN	W	0b	强制 IPD 使能 0h = 禁用强制 IPD 状态，如果将 MTR_STARTUP 选择为 IPD，器件会退出 IPD 状态 1h = 启用强制 IPD 状态，如果将 MTR_STARTUP 选择为 IPD，器件会保持 IPD 状态

表 5-4. 算法调试控制 1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
11	FORCE_ISD_EN	W	0b	强制 ISD 使能 0h = 禁用强制 ISD 状态, 如果设置了 ISD_EN, 器件会退出 ISD 状态 1h = 启用强制 ISD 状态, 如果设置了 ISD_EN, 器件会保持 ISD 状态
10	FORCE_ALIGN_ANGLE_SRC_SEL	W	0b	强制对齐角度状态源选择 0h = 由 ALIGN_ANGLE 定义的强制对齐角度 1h = 由 FORCED_ALIGN_ANGLE 定义的强制对齐角度
9-0	保留	R	0b	保留

5.2.3 算法调试控制 2 寄存器 (偏移 = 8h) [复位 = 00000000h]

表 5-5 展示了用于控制算法调试函数的寄存器。

表 5-5. 算法调试控制 2 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31 - 30	RESERVED	R	0h	保留
29	UPDATE_SYS_PARAMETERS	W	1h	每 200ms 动态更新一次系统参数, 例如速度/扭矩环路的 PI 增益, 以便调优并获得所需的性能 0b = 禁用动态系统更新 1b = 启用动态系统更新
28	UPDATE_CONFIGS	R	0b	该位为用户提供配置更新的状态。当调优配置由算法更新并且电机未旋转时, 该位每 200ms 复位一次。为了确保用户配置反映在算法中, 用户可以在进行所需的调优配置后设置该位并等待该状态位复位, 然后再给出速度命令。
27	STATUS_UPDATE_ENABLE	W	0b	此位会启用用户状态变量的实时持续更新。
26	CURRENT_LOOP_DIS	W	0b	用于控制 FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS 和 FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS。如果 CURRENT_LOOP_DIS = 1b, 则电流环路和速度环路被禁用 0h = 启用电流环路 1h = 禁用电流环路
25-16	FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS	W-IQ(9)	0h	在禁用电流环路和速度环路时以 IQ(9) PU 设置 Vd_ref。如果 CURRENT_LOOP_DIS = 1b, 则使用 FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS 控制 Vd, 如果 FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS < 500, 则 Vd_ref = (FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS / 500), 如果 FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS > 512, 则 Vd_ref = (FORCE_VD_CURRENT_LOOP_DIS - 512) / 500。有效值为: 0 至 500 以及 512 至 1000
15-6	FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS	W-IQ(9)	0h	在禁用电流环路和速度环路时以 IQ(9) PU 设置 Vq_ref。如果 CURRENT_LOOP_DIS = 1b, 则使用 FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS 控制 Vq, 如果 FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS < 500, 则 Vq_ref = (FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS / 500), 如果 FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS > 512, 则 Vq_ref = (FORCE_VQ_CURRENT_LOOP_DIS - 512) / 500。有效值为: 0 至 500 以及 512 至 1000
5-0	RESERVED	R	0h	保留

5.2.4 算法调试控制 3 寄存器 (偏移 = Ch) [复位 = 00000000h]

表 5-6 展示了用于控制算法调试 3 函数的寄存器。

表 5-6. 算法调试控制 3 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-10	RESERVED	R	0h	
9-0	FLUX_MODE_REF	W-IQ(9)	0h	当要控制电机沿 D 轴的磁通时，以 IQ(9) PU 设置 Id_ref 正 Id 控制： (FLUX_MODE_REF/511)，如果 FLUX_MODE_REF < 512 负 Id 控制： -(FLUX_MODE_REF - 512) / 511 (如果 FLUX_MODE_REF > 512)。有效值为 0 至 511 以及 512 至 1000

5.2.5 DAC 配置寄存器 (偏移 = 10h) [复位 = 00000000h]

DAC 控制寄存器定义了相应的配置，用于使用 MSPM0G 上提供的 12 位 DAC 在示波器上监控实时算法和硬件寄存器数据。有关如何使用 DAC 监控算法变量的详细示例，请参阅表 5-7。

表 5-7. DAC 配置寄存器

变量	类型	复位	说明
DAC_EN	无符号短整型 (RW)	0h	0h = 禁用 DAC 1h = 启用 DAC
DAC_SHIFT	短整型 (RW)	0h	+ve 值指定将值加载到 12 位 DAC 寄存器之前的左移位位数。 -ve 值指定在将值加载到 12 位 DAC 寄存器之前的右移位位数。 DAC 移位用于监控无符号整数和寄存器
DAC_SCALING_FACTOR	整数 (RW)	0x00000000h	对于以 IQ 格式表示的数字，通过 DAC 进行监控时，需要使用非零比例因子。为了监控全局 IQ(27) 格式变量，使用 _IQ(1.0) 的 DAC 比例因子。 要表示其他 IQx 格式变量，请将 DAC 比例因子设置为 IQx/IQGlobal。
DACOUT_ADDRESS	无符号整型 (RW)	0x00000000h	定义要通过 DAC 进行监控的 32 位变量的 32 位对齐地址。

5.3 用户输入寄存器 (基址 = 0x2020000h)

用户输入寄存器是一组可配置寄存器，为各种电机控制功能实时调优电机性能，并在达到所需的性能调优后将其保存在闪存中。

下面是可使用结构指针 `pUserInputRegs` 在 CCS 表达式窗口中导入的一系列输入寄存器。

Expression	Type	Value	Address
*(pUserInputRegs)	struct USER_INPUT_INTERFACE...	{systemParams={mtrResist=9500,m...	0x20200000
> systemParams	struct SYSTEM_PARAMETERS_T	{mtrResist=9500,mtrInductance=12...	0x20200000
> isdCfg	union USER_INPUT_ISDCFG_T	{b={Reserved1=10,statDetectThr=2...	0x2020003C
> mtrStartUp1	union USER_INPUT_MTR_STAR...	{b={Reserved1=0,oIllLimitCfg=0,ip...	0x20200040
> mtrStartUp2	union USER_INPUT_MTR_STAR...	{b={thetaErrRampRate=6,FirstCycFr...	0x20200044
> closeLoop1	union USER_INPUT_CLOSE_LO...	{b={Reserved1=0,Reserved2=0,avs...	0x20200048
> closeLoop2	union USER_INPUT_CLOSE_LO...	{b={Reserved1=3216,leadAngle=0,...	0x2020004C
> fieldCtrl	union USER_INPUT_FIELD_CTR...	{b={fluxWeakeningEn=0,fluxWeakC...	0x20200050
> faultCfg1	union USER_INPUT_FAULT_CFG...	{b={mtrLckMode=0,lockRetry=3,Re...	0x20200054
> faultCfg2	union USER_INPUT_FAULT_CFG...	{b={maxVmMode=0,maxVmMtr=0,...	0x20200058
> miscAlgo	union USER_INPUT_MISC_ALG...	{b={Reserved1=5,brkCurrPersist=0,...	0x2020005C
> pinCfg	union USER_INPUT_PIN_CFG_T	{b={brakeInp=2,brakePinMode=0,...	0x20200060
> periphCfg1	union USER_INPUT_PERI_CFG1_T	{b={dirChangeMode=0,dirInp=1,...	0x20200064

图 5-4. CCS 调试模式下的用户输入寄存器

表 5-8. 用户输入寄存器

偏移	首字母缩写词	寄存器名称	部分
0h	SYSTEM_PARAMETERS	系统参数	节 5.3.1
3Ch	ISD_CFG	初始速度检测配置	节 5.3.2
40h	MOTOR_STARTUP1	电机启动 1 配置	节 5.3.3
44h	MOTOR_STARTUP2	电机启动 2 配置	节 5.3.4
48h	CLOSELOOP1	关闭 Loop1 配置	节 5.3.5
4Ch	CLOSELOOP2	关闭 Loop2 配置	节 5.3.6
50h	FLIED_CTRL	磁通控制配置	节 5.3.7
54h	FAULT_CONFIG1	故障配置 1	节 5.3.8
58h	FAULT_CONFIG2	故障配置 2	节 5.3.9
5Ch	MISC_ALGO_CONFIG	其他算法配置	节 5.3.10
60h	PIN_CONFIGURATION	引脚配置	节 5.3.11
64h	PERI_CONFIG	外设配置	节 5.3.12

复杂的位访问类型经过编码可适应小的表格单元格，如下所示。

表 5-9. 寄存器配置访问类型代码

访问类型	代码	说明
读取类型		
R	R	读取
写入类型		
W	W	写入
复位或默认值		
-n		复位后的值或默认值

5.3.1 SYSTEM_PARAMETERS (偏移 = 0h)

电机控制系统功能所必需的一组基本系统配置参数。

表 5-10. 电机电阻配置寄存器 (偏移 = 0h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	MTR_RESISTANCE	R/W	0000h	以毫欧为单位的电机电阻

表 5-11. 电机电感配置 (偏移 = 4h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	MTR_INDUCTANCE	R/W	0000h	以微亨为单位的电机电感。对于凸极电机 (Lq + Ld)/2

表 5-12. 电机凸极配置 (偏移 = 8h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	MTR_SALIENCY	R/W	0.0 (浮点)	以浮点数表示电机的凸极 (Lq-Ld)/(Lq+Ld)。

表 5-13. 电机 BEMF 常数配置 (偏移 = Ch)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	MTR_BEMF_CONSTANT	R/W	0000h	电机 BEMF 常数，单位为 mV/Hz × 10。

表 5-14. 基极电压配置 (偏移 = 10h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	VOLTAGE_BASE	R/W	0.0 (浮点)	电路板的基极电压计算为 方程式 7 MAX_DC_VOLTAGE/sqrt(3) 中详述的最大可测量电压

表 5-15. 基极电流配置 (偏移 = 14h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	CURRENT_BASE	R/W	0.0 (浮点)	该电路板的基极电流是根据 CSA 增益计算得出 (1.65V - ADC 偏移电压/CSA 增益，单位为伏/安培)，单位为安培。 1.65V 是 ADC 用于双向电流检测的参考中点电压。 0.4125 是 DRV8329 中的偏移电压 如果 CSA 增益以 V/V 为单位，则乘以以欧姆为单位的电流检测电阻值，以伏/安为单位计算 CSA 增益

表 5-16. 电机最大速度配置 (偏移 = 18h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	MOTOR_MAX_SPEED	R/W	0.0 (浮点)	数据表中以 Hz 为单位的额定电机转速

表 5-17. 电机最大功率配置 (偏移 = 1Ch)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	MOTOR_MAX_POWER	R/W	0.0 (浮点)	数据表中以 Hz 为单位的额定电机功率

表 5-18. 速度环路比例增益 (偏移 = 20h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	SPEED_POWER_LOOP_KP	R/W	0.0 (浮点)	以浮点方式进行闭环速度控制/功率环路控制的比例增益

表 5-19. 速度环路积分增益 (偏移 = 24h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	SPEED_POWER_LOOP_KI	R/W	0.0 (浮点)	以浮点方式进行闭环速度控制/功率环路控制的积分增益

表 5-20. 扭矩环路比例增益 (偏移 = 28h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	CURR_LOOP_KP	R/W	0.0 (浮点)	以浮点方式进行闭环扭矩控制的比例增益

表 5-21. 扭矩环路积分增益 (偏移 = 2Ch)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	CURR_LOOP_KI	R/W	0.0 (浮点)	以浮点方式进行闭环扭矩控制的积分增益

表 5-22. 弱磁控制器比例增益 (偏移 = 30h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	FLUX_WEAK_KI	R/W	0.0 (浮点)	以浮点方式进行弱磁控制的比例增益

表 5-23. 弱磁控制器积分增益 (偏移 = 34h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	FLUX_WEAK_KP	R/W	0.0 (浮点)	以浮点方式进行弱磁控制的积分增益

表 5-24. ESMO 观测器的滑动控制增益 (偏移 = 38h)

位	字段	类型	复位	说明
31-0	KSLIDE	R/W	0.0 (浮点)	ESMO 估算器的滑动增益

5.3.2 ISD_CONFIG 寄存器 (偏移 = 3Ch) [复位 = 00000000h]

表 5-25 显示了用于配置初始速度检测的寄存器。

表 5-25. ISD_CONFIG 寄存器

位	字段	类型	复位	说明
31-30	保留	R	00b	保留
29	ISD_EN	R/W	0b	ISD 启用 0h = 禁用 1h = 启用
28	BRAKE_EN	R/W	0b	制动使能 0h = 禁用 1h = 启用
27	HIZ_EN	R/W	0b	启用高阻态 0h = 禁用 1h = 启用
26	RVS_DR_EN	R/W	0b	反向驱动使能 0h = 禁用 1h = 启用
25	RESYNC_EN	R/W	0b	启用重新同步 0h = 禁用 1h = 启用

表 5-25. ISD_CONFIG 寄存器 (续)

位	字段	类型	复位	说明
24-21	FW_DRV_RESYN_THR	R/W	0h	与闭环重新同步的最小速度阈值 (占 MAX_SPEED 的百分比) 0h = 5% 1h = 10% 2h = 15% 3h = 20% 4h = 25% 5h = 30% 6h = 35% 7h = 40% 8h = 45% 9h = 50% Ah = 55% Bh = 60% Ch = 70% Dh = 80% Eh = 90% Fh = 100%
20	BRK_CONFIG	R/W	0b	制动配置 0h = 制动时间用于脱离制动状态 1h = 制动电流阈值用于脱离制动状态
16-19	BRK_TIME	R/W	0b	制动时间 0h = 10ms 1h = 50ms 2h = 100ms 3h = 200ms 4h = 300ms 5h = 400ms 6h = 500ms 7h = 750ms 8h = 1s 9h = 2s Ah = 3s Bh = 4s Ch = 5s Dh = 7.5s Eh = 10s Fh = 15s

表 5-25. ISD_CONFIG 寄存器 (续)

位	字段	类型	复位	说明
15-12	HIZ_TIME	R/W	0b	高阻态时间 0h = 10ms 1h = 50ms 2h = 100ms 3h = 200ms 4h = 300ms 5h = 400ms 6h = 500ms 7h = 750ms 8h = 1s 9h = 2s Ah = 3s Bh = 4s Ch = 5s Dh = 7.5s Eh = 10s Fh = 15s
11-9	STAT_DETECT_THR	R/W	000b	用于检测电机是否静止的 BEMF 阈值 0h = 50mV 1h = 75mV 2h = 100mV 3h = 250mV 4h = 500mV 5h = 750mV 6h = 1000mV 7h = 1500mV
0-9	保留	R	0b	保留

5.3.3 MOTOR_STARTUP1 寄存器 (偏移 = 40h) [复位 = 00000000h]

表 5-26 展示了用于配置电机启动设置 1 的寄存器。

表 5-26. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-30	MTR_STARTUP_OPTION	R/W	00b	电机启动方法 0h = 对齐 1h = 双对齐 2h = IPD 3h = 慢速首循环
29-26	ALIGN_SLOW_RAMP_RATE	R/W	0h	对齐、慢速首循环和开环电流升降速率 0h = 0.1A/s 1h = 1A/s 2h = 5A/s 3h = 10A/s 4h = 15A/s 5h = 25A/s 6h = 50A/s 7h = 100A/s 8h = 150A/s 9h = 200A/s Ah = 250A/s Bh = 500A/s Ch = 1000A/s Dh = 2000A/s Eh = 5000A/s Fh = 无限值 A/s
25-22	ALIGN_TIME	R/W	0h	对齐时间 0h = 10ms 1h = 50ms 2h = 100ms 3h = 200ms 4h = 300ms 5h = 400ms 6h = 500ms 7h = 750ms 8h = 1s 9h = 1.5s Ah = 2s Bh = 3s Ch = 4s Dh = 5s Eh = 7.5s Fh = 10s

表 5-26. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
21-17	ALIGN_OR_SLOW_CURRENT_ILIMIT	R/W	00h	对齐/慢速首循环期间的电流限制 (占 CURRENT_BASE 的百分比) 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 55% 18h = 60% 19h = 70% 1Ah = 75% 1Bh = 80% 1Ch = 85% 1Dh = 90% 1Eh = 95% 1Fh = 100%
16-14	IPD_CLK_FREQ	R/W	000b	IPD 时钟频率 0h = 50Hz 1h = 100Hz 2h = 250Hz 3h = 500Hz 4h = 1000Hz 5h = 2000Hz 6h = 5000Hz 7h = 10000Hz
13-7	IPD_CURR_THR	R/W	0h	IPD 电流限制 \times CURRENT_BASE / 2^7 的 7 位值
6	保留	R	0b	保留
5-4	IPD_ADV_ANGLE	R/W	00b	IPD 超前角度 0h = 0° 1h = 30° 2h = 60° 3h = 90°

表 5-26. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
3-2	IPD_REPEAT	R/W	00b	IPD 执行次数 0h = 1 次 1h = 平均 2 次 2h = 平均 3 次 3h = 平均 4 次
1	OL_ILIMIT_CONFIG	R/W	0b	开环电流限值配置 0h = 由 OL_ILIMIT 定义的开环电流限值 1h = 由 ILIMIT 定义的开环电流限值
0	保留	R	0b	保留

5.3.4 MOTOR_STARTUP2 寄存器 (偏移 = 44h) [复位 = 0000000h]

表 5-27 展示了用于配置电机启动设置 2 的寄存器。

表 5-27. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-27	OL_ILIMIT	R/W	0h	开环电流限制 (占 CURRENT_BASE 的百分比) 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 55% 18h = 60% 19h = 70% 1Ah = 75% 1Bh = 80% 1Ch = 85% 1Dh = 90% 1Eh = 95% 1Fh = 100%

表 5-27. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
26-23	OL_ACC_A1	R/W	0h	开环加速系数 A1 0h = 0.01Hz/s 1h = 0.05Hz/s 2h = 1Hz/s 3h = 2.5Hz/s 4h = 5Hz/s 5h = 10Hz/s 6h = 25Hz/s 7h = 50Hz/s 8h = 75Hz/s 9h = 100Hz/s Ah = 250Hz/s Bh = 500Hz/s Ch = 750Hz/s Dh = 1000Hz/s Eh = 5000Hz/s Fh = 10000Hz/s
22-19	OL_ACC_A2	R/W	0h	开环加速系数 A2 0h = 0.0Hz/s ² 1h = 0.05Hz/s ² 2h = 1Hz/s ² 3h = 2.5Hz/s ² 4h = 5Hz/s ² 5h = 10Hz/s ² 6h = 25Hz/s ² 7h = 50Hz/s ² 8h = 75Hz/s ² 9h = 100Hz/s ² Ah = 250Hz/s ² Bh = 500Hz/s ² Ch = 750Hz/s ² Dh = 1000Hz/s ² Eh = 5000Hz/s ² Fh = 10000Hz/s ²
18	RESERVED	R	0h	保留

表 5-27. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
17-13	OPN_CL_HANDOFF_THR	R/W	0h	开环到闭环切换阈值 (占 MAX_SPEED 的百分比) 0h = 1% 1h = 2% 2h = 3% 3h = 4% 4h = 5% 5h = 6% 6h = 7% 7h = 8% 8h = 9% 9h = 10% Ah = 11% Bh = 12% Ch = 13% Dh = 14% Eh = 15% Fh = 16% 10h = 17% 11h = 18% 12h = 19% 13h = 20% 14h = 22.5% 15h = 25% 16h = 27.5% 17h = 30% 18h = 32.5% 19h = 35% 1Ah = 37.5% 1Bh = 40% 1Ch = 42.5% 1Dh = 45% 1Eh = 47.5% 1Fh = 50%

表 5-27. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
12-8	ALIGN_ANGLE	R/W	0h	对齐角度 0h = 0° 1h = 10° 2h = 20° 3h = 30° 4h = 45° 5h = 60° 6h = 70° 7h = 80° 8h = 90° 9h = 110° Ah = 120° Bh = 135° Ch = 150° Dh = 160° Eh = 170° Fh = 180° 10h = 190° 11h = 210° 12h = 225° 13h = 240° 14h = 250° 15h = 260° 16h = 270° 17h = 280° 18h = 290° 19h = 315° 1Ah = 330° 1Bh = 340° 1Ch = 350° 1Dh = 不适用 1Eh = 不适用 1Fh = 不适用
7-4	SLOW_FIRST_CYC_FREQ	R/W	0h	闭环启动中首循环的频率 (占 MAX_SPEED 的百分比) 0h = 1% 1h = 2% 2h = 3% 3h = 5% 4h = 7.5% 5h = 10% 6h = 12.5% 7h = 15% 8h = 17.5% 9h = 20% Ah = 25% Bh = 30% Ch = 35% Dh = 40% Eh = 45% Fh = 50%
3	FIRST_CYCLE_FREQ_SEL	R/W	0h	开环中用于对齐、双对齐和 IPD 启动选项的首循环频率 0h = 由 SLOW_FIRST_CYC_FREQ 定义 1h = 0Hz

表 5-27. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
2-0	THETA_ERROR_RAMP_RATE	R/W	0h	用于减小估算的 θ 与开环 θ 之间的差值的升降速率 0h = 0.01°/ms 1h = 0.05°/ms 2h = 0.1°/ms 3h = 0.15°/ms 4h = 0.2°/ms 5h = 0.5°/ms 6h = 1°/ms 7h = 2°/ms

5.3.5 CLOSED_LOOP1 寄存器 (偏移 = 48h) [复位 = 0000000h]

表 5-28 展示了用于配置闭环设置 1 的寄存器。

表 5-28. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-30	RESERVED	R/W	0h	保留
29-28	CONTROL_MODE	R/W	0h	FOC 闭环运行模式 0h = 闭环速度控制 1h = 闭环功率控制 2h = 闭环扭矩控制 3h = 电压控制模式。
27	HIGH_FREQ_FOC_EN	R/W	0b	启用/禁用高 FOC 采样率。采样率越高，可用于其他任务的 CPU 带宽就越低。 0h = 高频 FOC 启用 (最大 FOC 频率 16KHz) 1h = 高频 FOC 禁用 (最大 FOC 频率 8KHz)

表 5-28. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
26-22	ILIMIT	R/W	0h	闭环扭矩模式和闭环速度控制下的电流限制 (占 CURRENT_BASE 的百分比) 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 55% 18h = 60% 19h = 70% 1Ah = 75% 1Bh = 80% 1Ch = 85% 1Dh = 90% 1Eh = 95% 1Fh = 100%
21-20	MTR_STOP	R/W	00b	电机停止方法 0h = 高阻态 1h = 主动降速 2h = 制动 3h = 保留
19	OVERMODULATION_ENABLE	R/W	0b	过调制使能 0h = 禁用过调制 1h = 启用过调制

表 5-28. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
18-14	CL_ACC	R/W	0h	闭环加速 0h = 0.5Hz/s 1h = 1Hz/s 2h = 2.5Hz/s 3h = 5Hz/s 4h = 7.5Hz/s 5h = 10Hz/s 6h = 20Hz/s 7h = 40Hz/s 8h = 60Hz/s 9h = 80Hz/s Ah = 100Hz/s Bh = 200Hz/s Ch = 300Hz/s Dh = 400Hz/s Eh = 500Hz/s Fh = 600Hz/s 10h = 700Hz/s 11h = 800Hz/s 12h = 900Hz/s 13h = 1000Hz/s 14h = 2000Hz/s 15h = 4000Hz/s 16h = 6000Hz/s 17h = 8000Hz/s 18h = 10000Hz/s 19h = 20000Hz/s 1Ah = 30000Hz/s 1Bh = 40000Hz/s 1Ch = 50000Hz/s 1Dh = 60000Hz/s 1Eh = 70000Hz/s 1Fh = 无限值
13	CL_DEC_CONFIG	R/W	0h	闭环减速配置 0h = 由 CL_DEC 定义的闭环减速 1h = 由 CL_ACC 定义的闭环减速

表 5-28. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
12-8	CL_DEC	R/W	0h	闭环减速。仅当 AVS 被禁用且 CL_DEC_CONFIG 被设置为“0”时，才使用该寄存器 0h = 0.5Hz/s 1h = 1Hz/s 2h = 2.5Hz/s 3h = 5Hz/s 4h = 7.5Hz/s 5h = 10Hz/s 6h = 20Hz/s 7h = 40Hz/s 8h = 60Hz/s 9h = 80Hz/s Ah = 100Hz/s Bh = 200Hz/s Ch = 300Hz/s Dh = 400Hz/s Eh = 500Hz/s Fh = 600Hz/s 10h = 700Hz/s 11h = 800Hz/s 12h = 900Hz/s 13h = 1000Hz/s 14h = 2000Hz/s 15h = 4000Hz/s 16h = 6000Hz/s 17h = 8000Hz/s 18h = 10000Hz/s 19h = 20000Hz/s 1Ah = 30000Hz/s 1Bh = 40000Hz/s 1Ch = 50000Hz/s 1Dh = 60000Hz/s 1Eh = 70000Hz/s 1Fh = 无限值
7-8	PWM_FREQ_OUT	R/W	0h	输出 PWM 开关频率 0h = 5kHz 1h = 10kHz 2h = 16kHz 3h = 20kHz 4h = 25kHz 5h = 32kHz 6h = 40kHz 7h = 48kHz 8h = 50kHz 9h = 64kHz Ah = 80kHz Bh = 不适用 Ch = 不适用 Dh = 不适用 Eh = 不适用 Fh = 不适用

表 5-28. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
14	PWM_MODE	R/W	0b	PWM 调制 0h = 连续空间矢量调制 1h = 不连续空间矢量调制
3	AVS_EN	R/W	0b	AVS 启用 0h = 禁用 1h = 启用
2	RESERVED	R	0b	保留
1	SPEED_LOOP_DIS	R/W	0b	禁用速度环路 0h = 启用 1h = 禁用

5.3.6 CLOSED_LOOP2 寄存器 (偏移 = 4Ch) [复位 = 00000000h]

表 5-29 展示了用于配置闭环设置 2 的寄存器。

表 5-29. CLOSED_LOOP2 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-28	ACT_SPIN_THR	R/W	0h	主动降速的速度阈值 (占 MAX_SPEED 的百分比) 0h = 100% 1h = 90% 2h = 80% 3h = 70% 4h = 60% 5h = 50% 6h = 45% 7h = 40% 8h = 35% 9h = 30% Ah = 25% Bh = 20% Ch = 15% Dh = 10% Eh = 5% Fh = 2.5%
27-24	BRAKE_SPEED_THRESHOLD	R/W	0h	BRAKE 引脚和电机停止选项 (低侧制动、高侧制动或对齐制动) 的速度阈值 (占 MAX_SPEED 的百分比) 0h = 100% 1h = 90% 2h = 80% 3h = 70% 4h = 60% 5h = 50% 6h = 45% 7h = 40% 8h = 35% 9h = 30% Ah = 25% Bh = 20% Ch = 15% Dh = 10% Eh = 5% Fh = 2.5%

表 5-29. CLOSED_LOOP2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
23-19	BRK_CURR_THR	R/W	0h	制动电流限值 (占 CURRENT_BASE 的百分比) 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 55% 18h = 60% 19h = 70% 1Ah = 75% 1Bh = 80% 1Ch = 85% 1Dh = 90% 1Eh = 95% 1Fh = 100%
18-14	LEAD_ANGLE	R/W	0h	在电压控制模式下施加的超前角 (以度为单位) 0 - 15 = 1 * 位值 15 - 31 = 2 * (位值 - 15) + 15
13-0	RESERVED	R/W	0h	保留

5.3.7 FIELD_CTRL 寄存器 (偏移 = 50h) [复位 = 00000000h]

表 5-30 显示了用于配置磁通控制设置的寄存器。

表 5-30. FIELD_CTRL 寄存器位说明

位	字段	类型	复位	说明
31-7	保留	R	0h	保留
6	MTPA_EN	R/W	0b	启用/禁用每安培最大扭矩控制 (MTPA) 0h = 禁用 MTPA 1h = 启用 MTPA
5-4	FLUX_WEAK_REF	R/W	00b	在弱磁模式下跟踪的调制指数基准 0h = 70% 1h = 80% 2h = 90% 3h = 95%
3-1	FLUX_WEAK_CURR_RATIO	R/W	000b	弱磁电流基准的最大值 (以 ILIMIT 百分比表示) 0h = 仅存在循环限制 1h = 80% 2h = 70% 3h = 60% 4h = 50% 5h = 40% 6h = 30% 7h = 20%
0	FLUX_WEAK_EN	R/W	0b	启用/禁用弱磁控制 (MTPA) 0h = 禁用弱磁 1h = 启用弱磁

5.3.8 FAULT_CONFIG1 寄存器 (偏移 = 54h) [复位 = 00000000h]

表 5-31 展示了用于配置故障设置 1 的寄存器。

表 5-31. FAULT_CONFIG1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-6	RESERVED	R/W	0h	保留
5-2	LCK_RETRY	R/W	0h	锁定检测重试时间 0h = 100ms 1h = 500ms 2h = 1s 3h = 2s 4h = 3s 5h = 4s 6h = 5s 7h = 6s 8h = 7s 9h = 8s Ah = 9s Bh = 10s Ch = 11s Dh = 12s Eh = 13s Fh = 14s

表 5-31. FAULT_CONFIG1 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
1-0	MTR_LCK_MODE	R/W	00b	电机锁定模式 0h = 电机锁定检测导致锁存故障；nFAULT 有效； 1h = 故障在 LCK_RETRY 时间后自动清除。 2h = 电机锁定处于仅报告模式。 3h = 禁用电机锁定检测

5.3.9 FAULT_CONFIG2 寄存器 (偏移 = 58h) [复位 = 0000000h]

表 5-32 展示了用于配置故障设置 2 的寄存器。

表 5-32. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-27	RESERVED	R/W	0h	保留
26	LOCK1_EN	R/W	0b	锁定 1：异常速度使能 0h = 禁用 1h = 启用
25	LOCK2_EN	R/W	0b	锁定 2：异常 BEMF 使能 0h = 禁用 1h = 启用
24	LOCK3_EN	R/W	0b	锁定 3：无电机使能 0h = 禁用 1h = 启用
23-21	LOCK_ABN_SPEED	R/W	000b	异常速度锁定阈值 (占 MAX_SPEED 的百分比) 0h = 130% 1h = 140% 2h = 150% 3h = 160% 4h = 170% 5h = 180% 6h = 190% 7h = 200%
20-18	ABNORMAL_BEMF_THR	R/W	000b	异常 BEMF 锁定阈值 (估算 BEMF w.r.t Vdc 的百分比, 低于该阈值时, 触发异常 BEMF 故障) 0h = 1% 1h = 2% 2h = 3% 3h = 5% 4h = 8% 5h = 10% 6h = 12% 7h = 15%

表 5-32. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
17-13	NO_MTR_THR	R/W	00000b	无电机电流限值 (占 CURRENT_BASE 的百分比) 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 55% 18h = 60% 19h = 70% 1Ah = 75% 1Bh = 80% 1Ch = 85% 1Dh = 90% 1Eh = 95% 1Fh = 100%
12-8	RESERVED	R/W	0h	保留。
7-5	MIN_VM_MOTOR	R/W	000b	运行电机的最小电压 (占 BASE_VOLTAGE 的百分比) 0h = 无限值 1h = 5% 2h = 10% 3h = 12% 4h = 15% 5h = 18% 6h = 20% 7h = 25%
4	MIN_VM_MODE	R/W	0b	欠压故障模式 0h = 欠压锁存 1h = 如果电压处于界定范围之内, 则自动清除

表 5-32. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
3-1	MAX_VM_MOTOR	R/W	000b	运行电机的最大电压 (占 BASE_VOLTAGE 的百分比) 0h = 60% 1h = 65% 2h = 70% 3h = 75% 4h = 80% 5h = 85% 6h = 90% 7h = 最大电压
0	MAX_VM_MODE	R/W	0b	过压故障模式 0h = 过压锁存 1h = 如果电压处于界定范围之内, 则自动清除

5.3.10 MISC_ALGO 寄存器 (偏移 = 5Ch) [复位 = 0000000h]

表 5-33 展示了用于多种杂项算法配置的寄存器。

表 5-33. MISC_ALGO 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-22	RESERVED	R/W	0h	保留
21-20	IPD_MAX_OVERFLOW	R/W	00b	16 位计时器以 80MHz 运行, 在达到 IPD 超时故障之前溢出的最大数 0b = 5 次溢出 (4ms) 1b = 10 次溢出 (8ms) 10b = 20 次溢出 (16ms) 11b = 40 次溢出 (32ms)
19-16	CL_SLOW_ACC	R/W	0h	估算器尚未完全对齐时的闭环加速 0h = 0.1Hz/s 1h = 1Hz/s 2h = 2Hz/s 3h = 3Hz/s 4h = 5Hz/s 5h = 10Hz/s 6h = 20Hz/s 7h = 30Hz/s 8h = 40Hz/s 9h = 50Hz/s Ah = 100Hz/s Bh = 200Hz/s Ch = 500Hz/s Dh = 750Hz/s Eh = 1000Hz/s Fh = 2000Hz/s
15-14	RESERVED	R	0b	保留
13-12	ISD_STOP_TIME	R/W	00b	声明电机已停止的持续时间 0h = 1ms 1h = 5ms 2h = 50ms 3h = 100ms
11-10	ISD_RUN_TIME	R/W	00b	声明电机正在运行的持续时间 0h = 1ms 1h = 5ms 2h = 50ms 3h = 100ms

表 5-33. MISC_ALGO 寄存器字段说明 (续)

位	字段	类型	复位	说明
9-5	RESERVED	R	0b	保留
4-3	BRAKE_CURRENT_PERSIST	R/W	00b	制动期间电流低于阈值的持续时间 0h = 50ms 1h = 100ms 2h = 250ms 3h = 500ms
2-0	RESERVED	R	0b	保留

5.3.11 PIN_CONFIG 寄存器 (偏移 = 60h) [复位 = 00000000h]

表 5-34 展示了用于配置硬件引脚的寄存器。

表 5-34. PIN_CONFIG 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-20	RESERVED	R/W	0h	保留
19	VDC_FILT_DIS	R/W	0b	Vdc 滤波器禁用 0h = 启用 1h = 禁用
18-3	RESERVED	R/W	0h	保留
2	BRAKE_PIN_MODE	R/W	0b	制动引脚模式 0h = 低侧制动 1h = 对齐制动
1-0	BRAKE_INPUT	R/W	00b	制动引脚覆盖 0h = 硬件引脚制动 1h = 根据 BRAKE_PIN_MODE 覆盖引脚和制动/对齐 2h = 覆盖引脚, 不制动/对齐 3h = 硬件引脚制动

5.3.12 PERI_CONFIG 寄存器 (偏移 = 64h) [复位 = 00000000h]

表 5-35 展示了用于配置外设的寄存器。

表 5-35. PERI_CONFIG1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-15	RESERVED	R	0h	保留
14-9	MCU_DEAD_TIME	R/W	0h	高侧和低侧开关之间应用的死区时间 = 50ns × MCU_DEAD_TIME
8-4	BUS_CURRENT_LIMIT	R/W	00000b	总线电流限值 (占 CURRENT_BASE 的百分比) 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 55% 18h = 60% 19h = 70% 1Ah = 75% 1Bh = 80% 1Ch = 85% 1Dh = 90% 1Eh = 95% 1Fh = 100%
3	BUS_CURRENT_LIMIT_ENABLE	R/W	0b	总线电流限制使能 0h = 禁用 1h = 启用
2-1	DIR_INPUT	R/W	00b	DIR 引脚覆盖 0h = 硬件引脚 DIR 1h = 通过顺时针旋转 OUTA-OUTB-OUTC 覆盖 DIR 引脚 2h = 通过逆时针旋转 OUTA-OUTC-OUTB 覆盖 DIR 引脚 3h = 硬件引脚 DIR
0	DIR_CHANGE_MODE	R/W	0b	对 DIR 引脚状态变化的响应 0h = 在检测到 DIR 变化时遵循电机停止选项和 ISD 例程 1h = 在持续驱动电机的同时通过反向驱动改变方向

5.4 用户状态寄存器 (基址 = 0x20200430h)

用户状态寄存器是一组合并变量，用户可使用这些寄存器来读取电机状态和分析控制性能。

图 5-5 展示了可使用结构指针 *pUserStatusRegs* 在 CCS 表达式窗口中导入的一系列状态寄存器。

Expression	Type	Value	Address
pUserStatusRegs	struct USER_STATUS_INTERFACE_T *	0x20200430 {systemFaultStatus=NO_F...	0x202016A4
*(pUserStatusRegs)	struct USER_STATUS_INTERFACE_T	{systemFaultStatus=NO_FAULTS,motor...	0x20200430
systemFaultStatus	enum USER_FAULT_TYPES	NO_FAULTS	0x20200430
motorState	enum MOTOR_STATE_TYPES_T	MOTOR_IDLE	0x20200432
VdqFilt	struct OUTPUT_DQ_T	{d=-542405247,q=872035120}	0x20200434
currentPI	struct OUTPUTS_CURRENT_PI_T	{kp=0.5,ki=1000.0}	0x2020043C
piSpeed	struct OUTPUTS_PI_T	{reference=0,feedback=0}	0x20200444
piPower	struct OUTPUTS_PI_T	{reference=0,feedback=0}	0x2020044C
pild	struct OUTPUTS_PI_T	{reference=539000832,feedback=0}	0x20200454
piIq	struct OUTPUTS_PI_T	{reference=539000832,feedback=0}	0x2020045C
estimatedSpeed	int	0	0x20200464
dcBusVoltage	int	30375936	0x20200468
torqueLimit	int	0	0x2020046C
gateDriverFaultStatus	unsigned int	0	0x20200470
controllerFaultStatus	unsigned int	0	0x20200474

图 5-5. CCS 调试模式下的用户状态寄存器

表 5-36 列出了可用于监控的变量的定义。

表 5-36. 用户状态寄存器

变量	类型	复位值	说明
SYSTEM_FAULT_STATUS	USER_FAULT_TYPES	NO_FAULT	定义电机故障的状态。 MOTOR_STALL ：指示电机锁定故障 - 异常 BEMF、无电机、异常速度 VOLTAGE_OUT_OF_BOUNDS ：指示欠压或过压。 LOAD_STALL ：指示 IPD 故障。 HARDWARE_OVER_CURRENT ：指示直流总线电流限制故障 HV_DIE ：如果适用，指示栅极驱动器故障。
MOTOR_STATE	MOTOR_STATE_TYPE	MOTOR_IDLE	定义当前电机运行状态 MOTOR_IDLE ：电机空闲状态 MOTOR_ISD ：电机处于初始速度检测状态 MOTOR_TRISTATE ：电机处于三态或 Hi-Z 模式。 MOTOR_BRAKE_ON_START ：启动期间的电机制动。 MOTOR_IPD ：电机处于初始位置检测 MOTOR_SLOW_FIRST_CYCLE ：电机采用慢速首循环启动方法。 MOTOR_ALIGN ：电机处于对齐启动状态 MOTOR_OPEN_LOOP ：电机处于开环斜升状态。 MOTOR_CLOSE_LOOP_UNALIGNED ：电机处于闭环运行状态且角度未对齐 MOTOR_CLOSE_LOOP_ALIGNED ：电机处于闭环运行状态且角度对齐。 MOTOR_SOFT_STOP ：电机处于停止状态 MOTOR_BRAKE_ON_STOP 电机处于制动停止状态 MOTOR_FAULT 电机处于电机故障状态

表 5-36. 用户状态寄存器 (续)

变量	类型	复位值	说明
V_DQ_FILT	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示施加于电机的滤波 Vd 和 Vq。电流 PI 控制器的输出。
I_DQ_PI	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示电流 PI 控制器的 Kp 和 Ki 值。
PI_SPEED	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 算法以 PU 设置的速度 PI 控制器的基准值和反馈值。
PI_POWER	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 算法以 PU 设置的功率 PI 控制器的基准值和反馈值。
PI_ID	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 算法以 PU 设置的直流 PI 控制器的基准值和反馈值。
PI_IQ	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 算法以 PU 设置的正交电流 PI 控制器的基准值和反馈值。
IPD_IDENTIFIED_SECTOR	COMMUTATION_STATE	0b	指示 IPD 识别的最近转子状态。
ESTIMATED_SPEED	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 观测器算法估算的电机转速，以 PU 为单位。
DC_BUS_VOLTAGE	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示以 PU 为单位的直流总线电压值
TORQUE_LIMIT	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 设置的正交电流控制器饱和和限制。此值基于 ClosedLoop1 配置中设置的限值。
GATE_DRIVER_FAULT_STATUS	无符号整型	0x0000000h	定义在 gateDriverLib 中定义的栅极驱动器特定故障的索引。
CONTROLLER_FAULT_STATUS	无符号整型	0x0000000h	定义在 main.h 中定义的 FOC 控制算法特定故障的索引。
APP_VERSION	无符号十六进制	0x0000000h	定义应用程序固件的版本号

6 基本调优

本节旨在帮助用户以最少的配置在闭环中成功使电机旋转。本节提供了对各参数进行调优的标准必要步骤，以确保在闭环中成功使电机旋转。“闭环”定义为无传感器闭环场定向控制，其中电机以命令的速度/扭矩基准旋转。

6.1 系统配置参数

系统配置定义了与电机控制系统相关的主要参数，用于在闭环扭矩/速度控制模式下启动电机旋转。

图 6-1 展示了为实现准确的无传感器 FOC 运行而指定的一组系统参数。可以使用 pUserInputRegs 将这些变量添加到“Expressions”窗口中。

Expression	Type	Value	Address
*(pUserInputRegs)	struct USER_INPUT_INTERFACE...	{systemParams={mtrResist=9500,m...	0x20200000
systemParams	struct SYSTEM_PARAMETERS_T	{mtrResist=9500,mtrInductance=12...	0x20200000
mtrResist	unsigned int	9500	0x20200000
mtrInductance	unsigned int	1250	0x20200004
mtrSaliency	float	1.35547825e-19	0x20200008
mtrBemfConst	unsigned int	78	0x2020000C
voltageBase	float	25.7440491	0x20200010
currentBase	float	11.0	0x20200014
maxMotorSpeed	float	800.0	0x20200018
maxMotorPower	unsigned int	25	0x2020001C
speedLoopKp	float	0.009999999978	0x20200020
speedLoopKi	float	0.0500000007	0x20200024
currLoopKp	float	1.0	0x20200028
currLoopKi	float	500.0	0x2020002C
fluxWeakeningKi	float	500.0	0x20200030
fluxWeakeningKp	float	1.0	0x20200034
kSlide	float	0.100000001	0x20200038

图 6-1. CCS 调试模式下的系统配置寄存器

6.1.1 从 GUI 配置系统参数

使用 GUI 中的 **System Configuration** 页面配置系统参数，如下所示。如果已在给定系统的固件中对参数进行了编程，则 GUI 页面会在按下 READ ALL REGS 时显示默认编程值。根据下述步骤对这些参数进行相应更新。

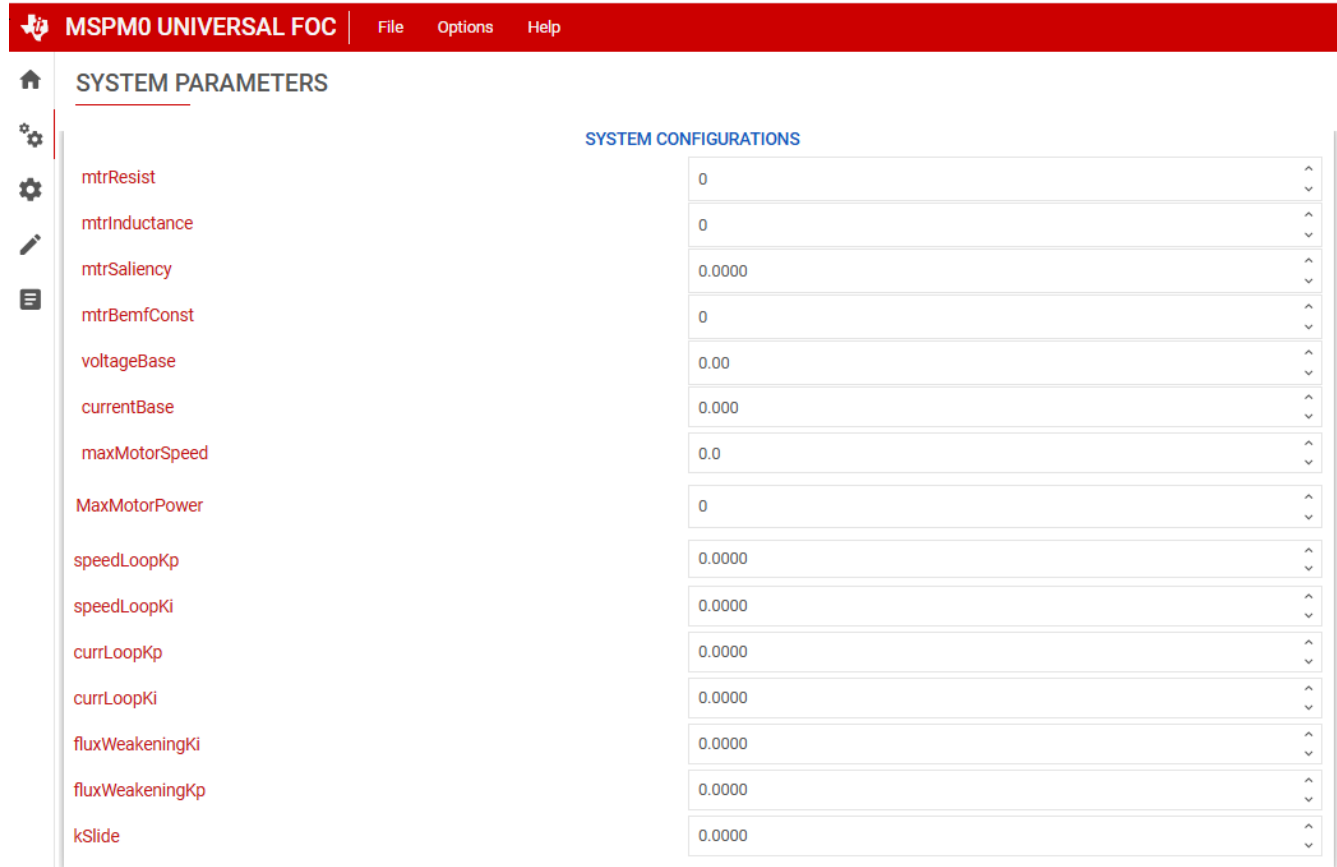


图 6-2. GUI 系统参数配置

6.1.2 以毫欧 ($m\Omega$) 为单位的电机电阻

使用电机数据表，用户可以使用 **System Configuration** 页面中的 *mtrResist* 参数输入电机相电阻（以毫欧 ($m\Omega$) 为单位）。如果电机没有数据表，则使用数字万用表测量任意两相的相间电阻，并通过将相间电阻除以 2 来计算相电阻，如 [电阻测量](#) 所示：

$$\text{Phase resistance} = \text{Measured Phase to Phase Resistance} \times (0.5) \quad (2)$$

电机相电阻是指等效的相位到中心抽头电阻 R_{PH} ，如图 6-3 所示。此测量对星形绕组和三角形绕组电机均适用。

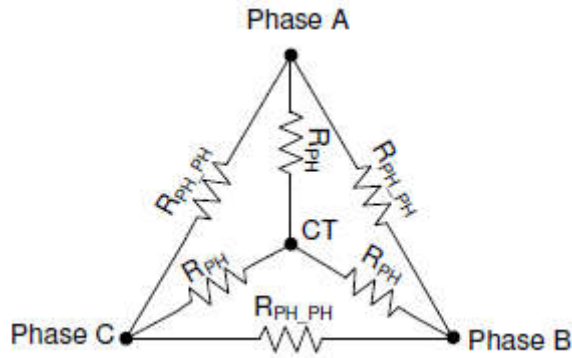


图 6-3. 电阻测量

6.1.3 以微亨 (μH) 为单位的电机电感

从电机数据表中，使用 **System Configuration** 页面中的 *mtrInductance* 参数以微亨 (μH) 为单位输入电机相电感。如需了解电机电感，请使用 LCR 表在 1kHz 频率下测量任意两相的相间电感。通过将相间电感除以 2 来计算相电感，如图 6-4 所示。

$$\text{Phase Inductance} = \text{Measured Phase to Phase Inductance} \times (0.5) \quad (3)$$

电机相电感是指从相输出到中心抽头的电感 L_{PH} ，如图 6-4 所示。对于具有不同相间电感的电机（凸极电机），应测量下一节中定义的 L_d 和 L_q 值，以计算平均值 $(L_d + L_q)/2$ 并使用该值作为相间电感。此测量对星形绕组和三角形绕组电机均适用。

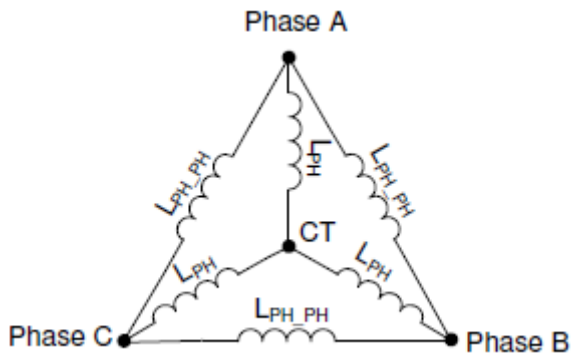


图 6-4. 电感测量

6.1.4 IPMSM 电机的凸极

IPMSM 电机的凸极是对正交轴和直接转子轴之间电感变化的度量。对于 FOC 算法，按照 $(L_q - L_d)/(L_d + L_q)$ 以浮点数变量的形式给出此值。

推断 L_d 和 L_q 值的简单方法是测量任意两相的电感，并在一次完整的旋转中缓慢改变转子位置。最大测量电感值可标记为 L_q ，最小测量电感值可标记为 L_d 。

6.1.5 电机 BEMF 常数

使用电机的数据表，用户能够以 mV/Hz 为单位输入电机的 BEMF 常数 K_e ，并在 **System Configuration** 页面上将 *mtrBEMFConst* 编程为 $K_e \times 10$ 。

可以使用 [方程式 4](#) 和 [方程式 5](#) 将 K_e (以 mV/rpm、mV*sec/rad 为单位) 和扭矩常数 K_t 转换为 K_e (以 mV/Hz 为单位)。

$$\text{BEMF Constant} \left[\frac{\text{mV}}{\text{Hz}} \right] = \frac{K_e \left[\frac{\text{mV}}{\text{RPM}} \right] * 60}{\# \text{ pole pairs}} \quad (4)$$

$$\text{BEMF Constant} \left[\frac{\text{mV}}{\text{Hz}} \right] = \frac{K_t \left[\frac{\text{mN} \cdot \text{m}}{\text{A}} \right] * 2\pi}{\# \text{ pole pairs}} \quad (5)$$

如果电机没有数据表，则通过手动旋转电机，使用示波器测量电机任意两相间的电压。示波器上应出现正弦或梯形电压。测量峰值电压 E_p (以毫伏为单位) 和时段 T_p (以秒为单位)。计算 BEMF 常数 K_e ，如 [方程式 6](#) 所示。

$$\text{Bemf Constant } K_e = E_p * T_p / \sqrt{3} \quad (6)$$

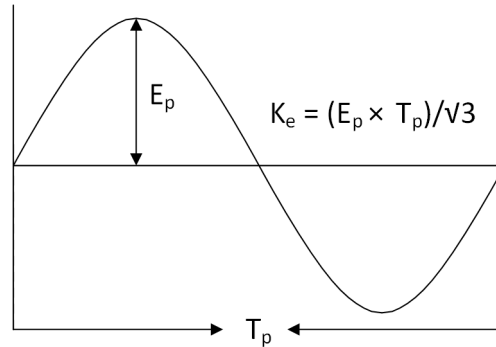


图 6-5. BEMF 常量测量

6.1.6 基极电压 (V)

基极电压表示电机控制系统中可测量的最大总线电压和相位电压。在 **GUI System Configuration** 页面的 **voltageBase** 参数中输入系统基极电压 (以伏特为单位)。用户可以根据电压调节电阻分压器电桥值 R_1 和 R_2 以及 3.3V 的满量程 ADC 电压 (FSV) 计算系统基极电压，如 [方程式 7](#) 中所示。有关分压器调节率的硬件配置，请参阅 [图 2-3](#)。

$$\text{BaseVoltage} = \frac{\text{ADC Full Scale Value}}{\text{Voltage Divider Scaling Ratio}} = \frac{3.3V}{\frac{R_1}{R_1 + R_2}} \quad (7)$$

例如，在从直流电源电压到 ADC 输入的电桥分压器调节率为 1/20 的系统中，基极电压或 ADC 可测量的最大系统电压为 $3.3V / (1/20) = 66V$ 。

6.1.7 基极电流 (A)

基极电流表示电机控制系统中可测量的最大电机相电流。用户在 **GUI System Configuration** 页面的 **currentBase** 参数中输入系统基极电流 (以安培为单位)。用户可以根据以伏/安为单位的电流检测放大器增益 (CSAGAIN)、3.3V 的满量程 ADC 电压 (FSV) 和来自 CSA 的零电流偏移电压来计算系统基极电流，如 [方程式 8](#) 中所示：

$$\text{Base Current} = \frac{3.3v - \text{ADC_Offset_volts}}{\text{CSA_GAIN} \left(\frac{\text{V}}{\text{A}} \right)} \quad (8)$$

在双向电流检测时，零电流偏移通常被选为 1.65V，即 ADC 满量程电压 3.3V 的一半。

对于单向电流检测，通常将 ADC 满量程电压的 80-90% 用于 +ve 电流检测。通常，单向电流检测用于单分流直流总线电流检测架构。

如果系统使用电流检测电阻 (R_{SENSE}) 和以伏/伏 (V/V) 为单位的 CSAGAIN, 则可以使用 [方程式 9](#) 计算 CSA 增益 (以伏/安培为单位)。

$$CSA\ GAIN\left(\frac{\text{volts}}{\text{Amp}}\right) = R_{sense} \times CSA\ GAIN\left(\frac{\text{volts}}{\text{volts}}\right) \quad (9)$$

例如, 在 $CSAGAIN = 0.15V/A$ 且 ADC 偏移电压为 $1.65V$ 的系统中, 基极电流或 ADC 的最大可测量系统电流为 $(3.3V - 1.65V)/(0.15V/A) = 11A$ 。

在 R_{sense} 为 10 毫欧、CSA 增益为 $10V/V$ 且 ADC 偏移电压为 $0.4125V$ 的系统中, 基极电流推导为 $(3.3 - 0.4125)/(10m * 10) = 28.875A$

备注

在某些驱动器器件中, 可通过 I2C 或 SPI 或由硬件使用电阻器值将 CSAGAIN 设置为寄存器。有关如何配置驱动器 CSAGAIN 设置的信息, 请参阅特定于器件的驱动器数据表。

6.1.8 最大电机频率 (Hz)

使用电机的数据表, 用户可以使用 **System Configuration** 页面中的 *maxMotorSpeed* 参数输入最大电机频率 (以 Hz 为单位)。如果此数据不可用, 用户可以输入极对数和电机机械转速 (RPM)。用户可以使用 [方程式 10](#) 将以 RPM 为单位的电机机械转速转换为以 Hz 为单位的电机频率。

$$f_{Electrical} = \frac{n_{PolePairs} \cdot \omega_{Mechanical}}{60} \quad (10)$$

其中:

- $\omega_{Mechanical}$ 是机械转速, 单位为转/分钟 (RPM)
- $f_{Electrical}$ 是频率, 单位为赫兹 (Hz)
- $n_{PolePairs}$ 是电机极对数

备注

在没有电机数据表的情况下确定电机极数:

1. 使用实验室电源, 并确保电流限制设置为低于电机额定电流。请勿打开电源。
2. 将电源的 V+ 连接到电机的 A 相, 将电源的 V- 连接到 B 相。如果三相都没有标记, 则可以随机选择三相中的任意两相。
3. 打开电源, 转子应在注入电流后稳定在一个位置。
4. 手动旋转转子, 直到转子对齐到另一个稳定位置。转子在一个机械周期周围的不同位置趋于稳定。
5. 对一次完整机械循环的稳定位置数进行计数, 该数字即为极对数。乘以 2 后便可计算出极数。

注意电机内的传动系统。传动比将确定多少转子转数与轴的机械旋转相关联。

6.1.9 最大电机功率 (W)

当需要闭环功率控制时, 用户需要输入电机的最大额定功率。要确定电机的最大额定功率, 请参阅电机数据表, 计算电机额定电压 (以伏特为单位) 和电机额定电流 (以安培为单位) 的乘积, 并将该值馈入系统参数中的 MOTOR_MAX_POWER。

6.2 基本电机旋转的控制配置

在 GUI 中配置系统参数后, 用户可以前往 **Register Map** 页面并配置寄存器映射调优参数, 如 [图 6-6](#) 中所示。默认情况下, 固件具有建议的设置, 可以通过按“READ ALL REG”按钮将其读取到 GUI 中。

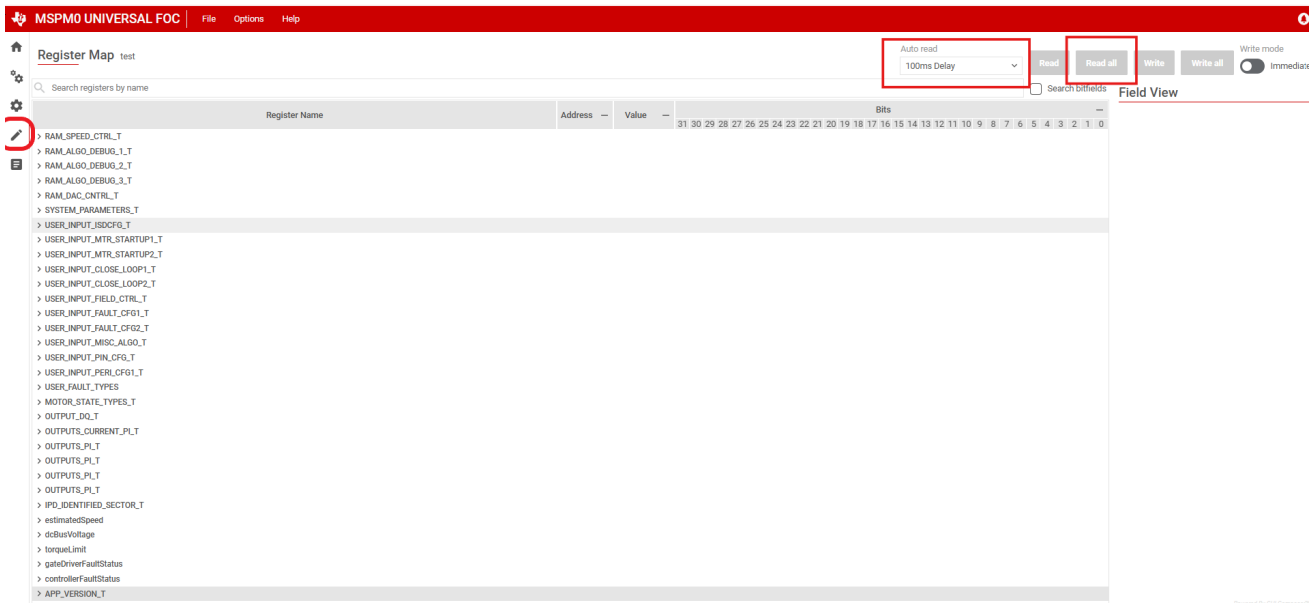


图 6-6. 寄存器映射 GUI 页面

6.2.1 基本电机启动

无传感器 FOC 依靠从 BEMF 估算的位置检测来精确驱动电机。启动时，由于电机可能处于停止状态或电机可能以未知速度旋转，因此转子位置未知。

FOC 算法具有多种启动算法，能够以足够的速度可靠地启动电机并使其斜升，或者在切换到用于连续转子位置跟踪的估算器之前估算已在旋转的电机的位置。以下各节介绍了启动电机并使其从静止状态斜升直到开环旋转所需的基本配置。如果在基本开环旋转过程中观察到任何电机故障，请参阅节 6.3。

6.2.1.1 禁用 ISD

初始速度检测 (ISD) 功能可在电机已在旋转时自动进入电机。这也称为迎风/顺风启动或实时启动。对于电机的基本旋转，默认情况下会通过 **Register Map** 页面上设置 `isdEn = 0` 来禁用 ISD 功能。对于基本电机调优，电机应在发出速度命令之前处于静止状态。要针对 ISD 调优电机，请参阅 [节 7](#)。

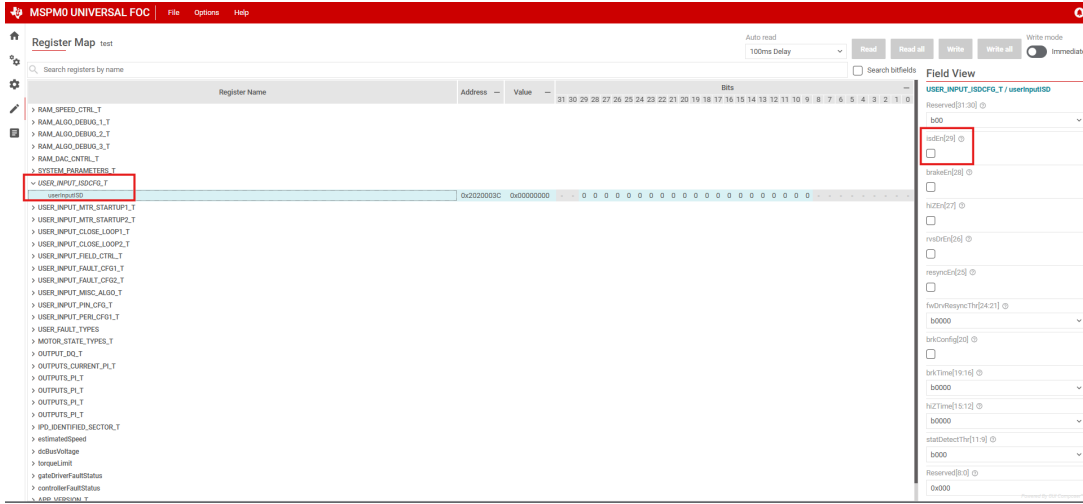


图 6-7. 在 GUI 中禁用 ISD

6.2.1.2 电机启动选项 - 对齐

当电机从静止状态斜升时，电机对齐启动算法会强制转子与固定的 `ALIGN_ANGLE` 对齐，其中定义的电流限制用作预定义 `ALIGN_TIME` 的扭矩基准。默认情况下，在 `MOTOR_STARTUP1` 的 `MTR_STARTUP` 配置中，电机启动选项设置为对齐 (`mtrStartUpOption = 0b`)。对于基本旋转，请使用适用于大多数电机的默认参数。

如果电机未能在给定负载设置下对齐，请在 **Register Map** 页面上增大 `alignOrSlowCurrentLimit` 参数。有关微调电机对齐配置的信息，请参阅 [节 7](#)。

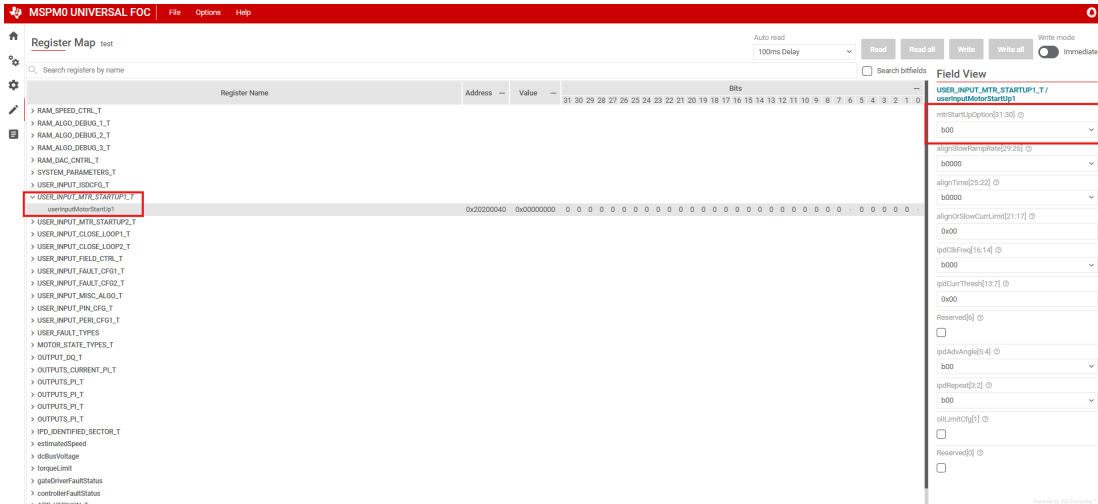


图 6-8. GUI 中的电机启动

6.2.1.3 电机开环斜坡

为了准确估算转子位置，电机在切换到闭环之前需要构建足够的 BEMF。在启动期间，FOC 算法用二阶开环斜坡曲线使电机加速以提高速度，直到建立足够的 BEMF。默认情况下，对于电机的基本旋转，开环斜坡参数配置为加速缓慢的线性一阶配置，该配置适用于大多数电机。禁止切换到闭环控制以验证开环的正常功能，方法是在 **Motor Tuning** 页面上的 **ALGO_DEBUG_CTRL** 中将 *closedLoopDis* 设为 1b。若要进一步优化启动时间，请参阅 [节 7](#) 对启动性能进行微调。

根据电机的负载，一旦启用了闭环，即应将 *OL_ILIMIT* 调整到尽可能低的值以实现平滑切换 (*closedLoopDis* = 0b)。

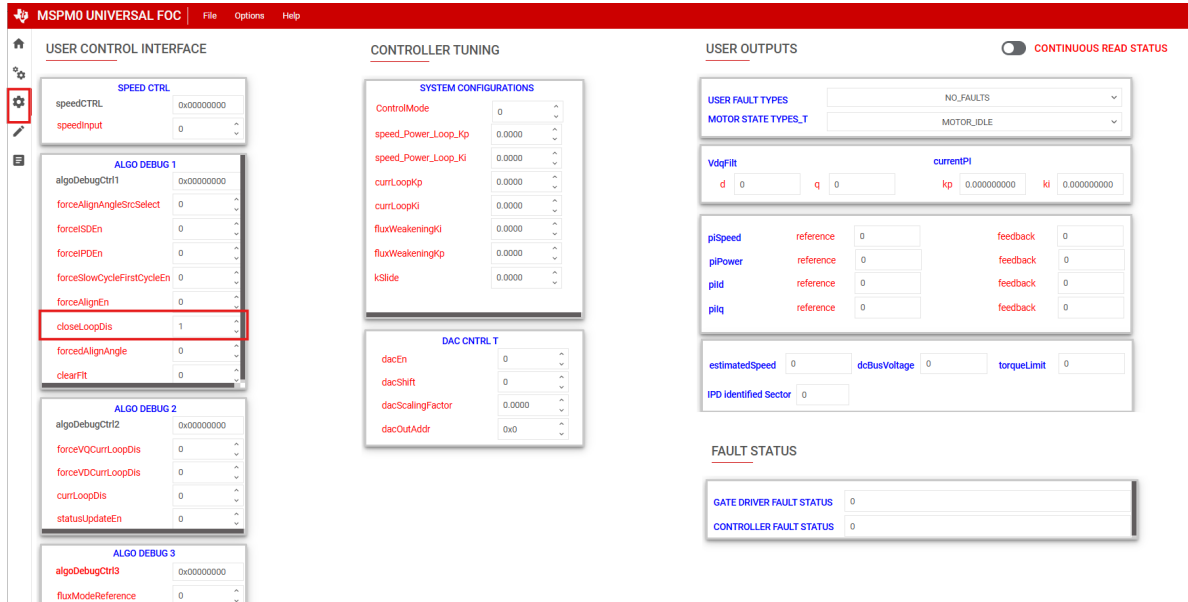


图 6-9. 在 GUI 中设置禁用闭环

6.2.1.4 电机开环调试

如果电机无法在开环中持续旋转，或者电机电流在不旋转电机的情况下振荡，用户可以在 **RAM ALGO DEBUG 2** 参数中对开环配置进行微调。

要验证信号路径或检查电机参数精度，用户可以在 **Register Map** 页面上设置 *currLoopDis* 位并设置 *forceVQCurrLoopDis* 和 *forceVDCurrLoopDis* 来禁用电流环路。

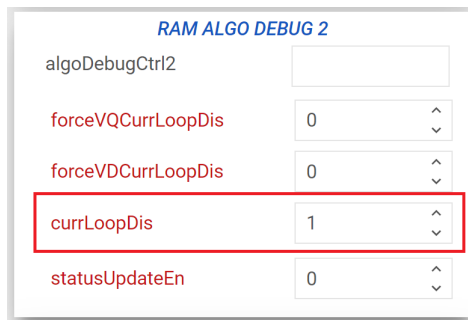


图 6-10. 在 GUI 中禁用电流环路

调整 *Vd* 和 *Vq* 值以使电机旋转。一旦电机以恒定速度旋转，请观察 **Motor Tuning** 页面的“User Outputs”部分中的 *Id* 和 *Iq* 输出以检查电流环路的稳定性。

6.2.2 用于在闭环中旋转电机的控制器配置

在电机持续处于开环状态的情况下调节开环后，用户可以通过在 **Motor Tuning** 页面上清除 `ALGO_DEBUG_CTRL` 中的 `closedloopDis = 0b` 来切换到闭环。按照以下步骤实现闭环速度控制。

6.2.2.1 用于无传感器转子位置检测的 BEMF 估算

在与家用电器类似的应用中，机械传感器会增加成本、影响可靠性并增加维护工作量。通常，在不要求以超低速度运行的应用中，会采用基于无传感器的转子位置估算方法来高效驱动电机。为了使用无传感器方法检测转子位置，我们使用多种方法来估算电机的 BEMF，并且根据转子速度和角度进行了近似计算。在通用电机控制应用程序代码中，用户可以选择滑模观测器或有限差值 BEMF 估算方法。滑模观测器由于其在各种系统参数变化下的可靠性和稳健性而被广泛使用。有限 BEMF 估算是基于简单方程的 BEMF 估算方法，没有用于 BEMF 的滑动模式控制器和滤波器，这消除了 `Kslide` 调谐和滤波器调谐工作，但 BEMF 容易产生噪声，并可能产生稳定性问题。这两种方法得出的估算 BEMF 用于使用 PLL 进行转子位置跟踪，详情如下。

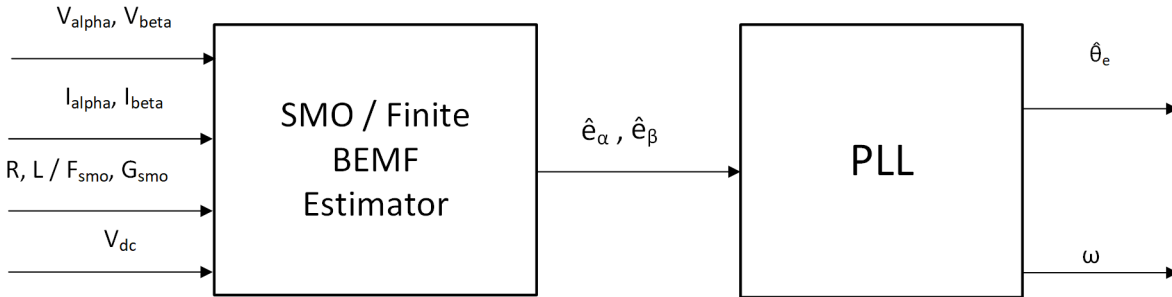


图 6-11. 无传感器 PMSM 转子位置估算方框图

通过保留预定义符号 `ESMO_ESTIMATOR`，可以选择基于 SMO 的 BEMF 估算作为默认值。要选择基于有限差分方程的 BEMF 估算器，用户可以从 CCS 工程设置中将此预定义符号修改为 `ESMO_ESTIMATOR_N`，如下所示。

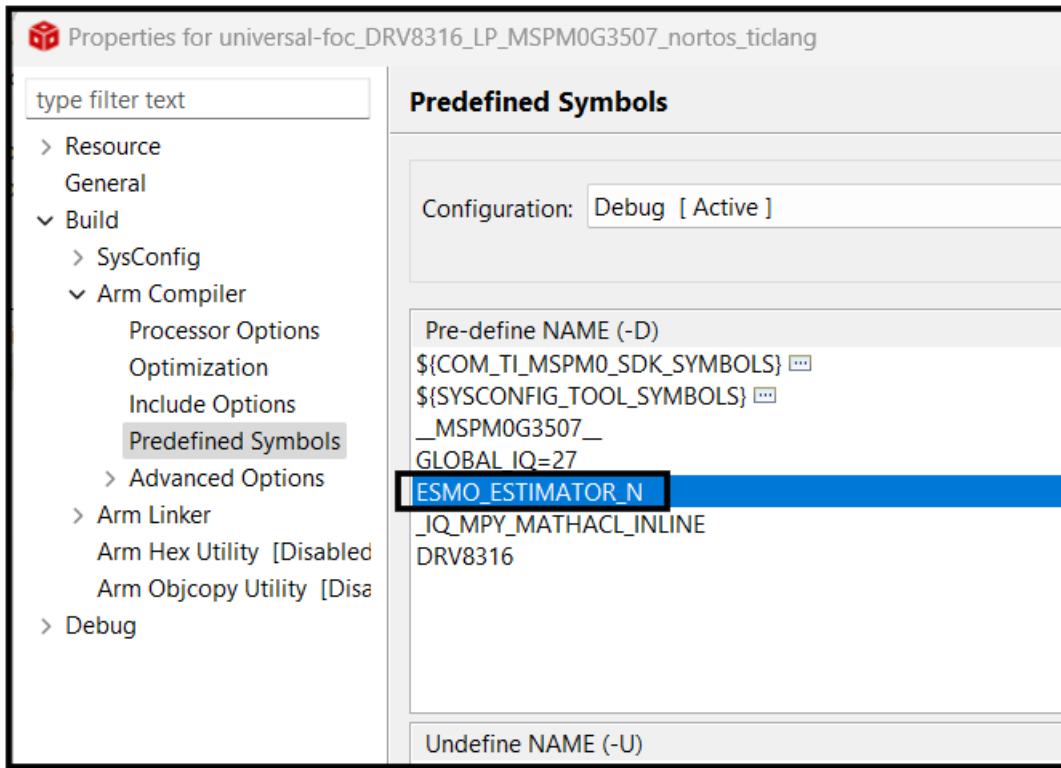


图 6-12. 估算器选择的配置

6.2.2.1.1 增强型滑模观测器

基于模型的 BEMF 估算方法用于实现 IPMSM 驱动系统在电机以中高速运行时的无位置传感器控制。模型法通过反电动势或磁链模型估算转子位置。滑动模式观测器是基于滑模控制的观测器设计方法。系统的结构不是固定的，而是根据系统的当前状态有目的地改变，迫使系统按照预定的滑模轨迹运动。优点包括响应速度快、稳健性高以及对参数变化和干扰不敏感。

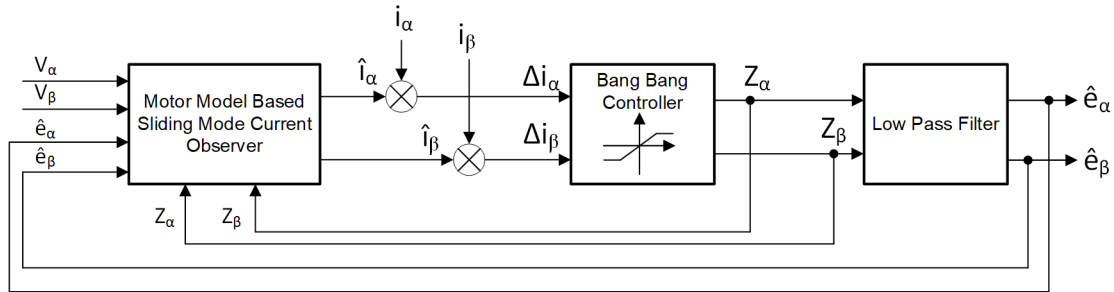


图 6-13. 基于滑模观测器的 BEMF 估算

在数字控制应用中，需要使用 SMO 的时间离散方程。欧拉法是变换为时间离散观测器的合适方法。静止坐标系中给出了电机模型的时间离散系统矩阵，如 方程式 11 中所示。

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha}(n+1) \\ \hat{i}_{\beta}(n+1) \end{bmatrix} = F_{smo} \begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha}(n) \\ \hat{i}_{\beta}(n) \end{bmatrix} + G_{smo} \begin{bmatrix} V_{\alpha}(n) - e_{\alpha}(n) - z_{\alpha}(n) \\ V_{\beta}(n) - e_{\beta}(n) - z_{\beta}(n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中， F_{smo} 和 G_{smo} 是根据电机参数定义的常数，如下所示。

$$F_{smo} = e^{-\frac{R}{L}}, G_{smo} = \frac{1}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}}) \quad (12)$$

z_α 和 z_β 是滑模分量，其定义为：

$$\begin{bmatrix} z_\alpha \\ z_\beta \end{bmatrix} = K_{slide} \begin{bmatrix} \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 K_{slide} 是通过李雅普诺夫稳定性分析设计的恒定滑模增益。可使用系统参数调整 K_{slide} 值。较高的 K_{slide} 可更快地追踪滑动表面电流，但具有非常高的 K_{slide} 会由于开关噪声而导致 BEMF 估算出现误差。

以下公式表示滤波 BEMF 的时间离散形式。低通滤波器移除高频滑模输出，其中截止频率 f_c 通常被选为定子电流的基频。这会引入 45 度的相移，可从估算的转子位置进行补偿。

$$\begin{bmatrix} e_{\hat{\alpha}}(n+1) \\ e_{\hat{\beta}}(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{\hat{\alpha}}(n) \\ e_{\hat{\beta}}(n) \end{bmatrix} + 2\pi f_c \begin{bmatrix} z_\alpha(n) - e_{\hat{\alpha}}(n) \\ z_\beta(n) - e_{\hat{\beta}}(n) \end{bmatrix} \quad (14)$$

6.2.2.1.2 基于电机模型的有限 BEMF 估算

在不需要 K_{slide} 调优或系统中的噪声干扰极小的情况下，用户可以选择有限 BEMF 估算器。在有限 BEMF 估算方法中，BEMF 是根据定子坐标系电压方程推导，如 [方程式 15](#) 中所示。

$$\begin{bmatrix} e_{\hat{\alpha}} \\ e_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\hat{\alpha}} \\ v_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\hat{\alpha}} \\ i_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_0 - L_1 \cos(2\theta) & -L_1 \sin(2\theta) \\ -L_1 \sin(2\theta) & L_0 + L_1 \cos(2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\hat{\alpha}} \\ i_{\hat{\beta}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中， $L_0 = \left(\frac{L_{ds} + L_{qs}}{2}\right)$, $L_1 = \left(\frac{L_{ds} - L_{qs}}{2}\right)$ ；

如果电机没有任何凸极，例如在表面贴装 PMSM 电机中，则 L_1 值设置为零。默认情况下，应用程序代码假设电机是非凸极电机。

6.2.2.2 使用 PLL 的转子位置和转速估算

在传统的基于 SMO 的转子位置估算器中，转子磁通角是根据估算的静止坐标 BEMF 值的反正切来确定，如 [方程式 16](#) 所示：

$$\theta_{\hat{e}} = -\tan^{-1}\left(\frac{e_{\hat{\alpha}}}{e_{\hat{\beta}}}\right) \quad (16)$$

在这种方法中，由于噪声和谐波分量的存在，位置和转速估算的精度会受到影响。为了消除该问题，可使用 PLL 模型对 PMSM 的无传感器控制结构中的转速和位置进行估算。估算的 BEMF 值 $e_{\hat{\alpha}}$ 和 $e_{\hat{\beta}}$ 可与 PLL 模型配合用来收敛电机角速度并计算转子位置，如 [图 6-14](#) 所示。

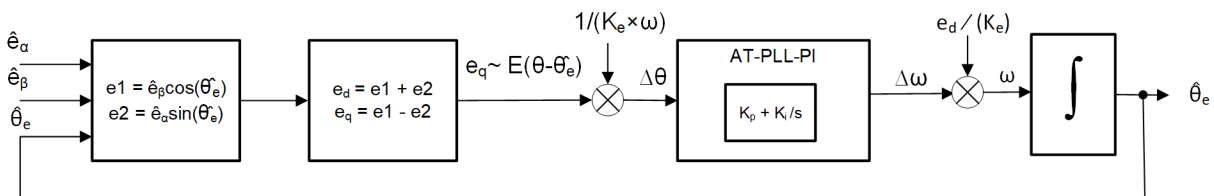


图 6-14. 基于 PLL 的转子速度和位置估算

由于 $e_{\hat{\alpha}} = E \cos(\theta)$, $e_{\hat{\beta}} = E \sin(\theta)$ 和 $E = K_e \times \omega$, $\Delta\theta$ 实际转子位置 θ 与估算的转子角度之间的角度误差 $\theta_{\hat{e}}$ 可以计算为

$$e_q = E\cos(\theta)\sin(\theta \hat{e}) - E\sin(\theta)\cos(\theta \hat{e}), \quad e_q = E\sin(\theta - \theta \hat{e}); \quad (17)$$

$$\text{as } \Delta\theta \text{ approaches near } 0, e_q \approx E(\theta - \theta \hat{e}), \text{ with normalization } e_n = (\theta - \theta \hat{e}); \quad (18)$$

上述被控对象的闭环传递函数可被视为二阶传递函数，包括 PI 控制器和位置估算器的积分器，由 方程式 19 定义：

$$\frac{\theta \hat{e}}{\theta} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (19)$$

此处，PI 增益由 定义， $k_p = 2\zeta\omega_n$ ， $k_i = \omega_n^2$ 其中 ζ 是响应的阻尼因子，而 ω_n 是二阶响应的固有频率。

添加了估算速度的前馈项后，PI 控制器仅估算速度误差，因此 K_p 和 K_i 可以与速度无关，并且可以是固定值，除非预计负载会产生噪声或突然干扰。默认情况下， K_p 和 K_i 值在 `modules/algoLib/libraries/semiCloseLoopEstim/source` 下的“angleTrackingPLL.c”中定义。

6.2.2.3 针对闭环速度控制的 PI 控制器调优

6.2.2.3.1 电流环路 PI 调优

FOC 算法使用两个电流 PI 控制器，每个控制器用于 I_d 和 I_q ，分别控制磁通和扭矩。两个 PI 控制器的 K_p 和 K_i 系数相同，可通过 **Motor Tuning** 页面中的 `currLoopKp` 和 `currLoopKi` 进行配置。

对于基本调优，请将 `currLoopKp` 和 `currLoopKi` 参数配置为“0”，以便根据电机参数自动计算这些值，并反映在 GUI 中 **Motor Tuning** 页面的“User Outputs”部分中。这些值可进一步更新，以微调性能并控制系统的动态。通常，默认生成的 K_p 和 K_i 值可进一步缩小三至 10 倍，以满足所需的过阻尼响应。

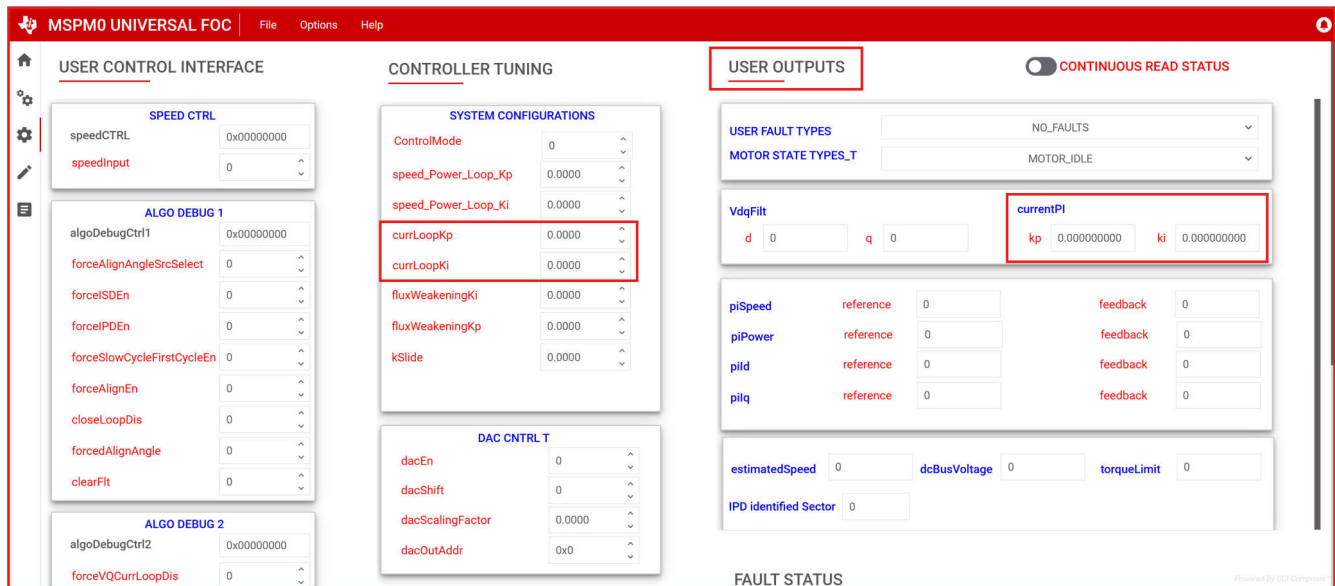


图 6-15. GUI “Motor Tuning” 页面中的 PI 环路调优

6.2.2.3.2 速度控制器调优

FOC 算法使用集成式速度控制环路/功率控制环路，该环路有助于在不同的运行条件下保持恒定的速度/恒定的功率。可通过 **Motor Tuning** 页面上“System Configurations”部分中的 `speedLoopKp` 和 `speedLoopKi` 配置 K_p 和 K_i 系数。速度环路/功率环路的输出用于生成扭矩控制的电流基准。通过在 GUI 的“Register Map”页面中以 `closedLoop1` 配置来配置 `iLIMIT`，可以限制速度环路/功率环路的输出。当速度环路/功率环路的输出饱和时，积分器被禁用以防止积分饱和。

要调优速度环路的 K_p 和 K_i 值，请执行以下操作：

1. 通过将 *closedloopDis* 设置为 *1b*，将电机配置为在开环中持续旋转。通过将 *autoHandOffEn* 设置为 *0b* 来禁用自动切换。
2. 使用 *oIClHandOffThr* 将闭环切换阈值设置为最大速度的约 50%。
3. 将 *userInputMotorStartUp1* 寄存器中的 *iqRampEn* 位设置为 *1b*。
4. 电流基准逐渐降低，并稳定至可能的最低 *Iqref*，以便以给定的阈值速度运行。
5. 使用此公式计算速度环路 *Kp* [SPD_LOOP_KP]：SpeedLoop $K_p = \text{Current Reference at oIClHandOffThr in Amps} / \text{oIClHandOffThr in Hz}$
6. 使用此公式计算速度环路 *Ki* [SPD_LOOP_KI]：Speed Loop $K_i = \text{Speed Loop } K_p \times 0.1$
7. 通过清除 GUI Register Map 页面中配置的 *closedloopDIS* to (*0b*)，启用闭环。

备注

速度环路 *Kp* 和 *Ki* 的调优是试验性的。如果上述建议不起作用，则建议手动调优速度环路 *Kp* 和 *Ki*，直到实现所需的结果。

下表显示了控制器增益增加时的一般动态变化。

参数	上升时间	过冲	趋稳时间	稳态错误	稳定性
<i>Kp</i>	减小	提高	微小变化	减小	降级
<i>Ki</i>	减小	提高	提高	消除	降级

6.2.2.4 测试是否成功启动至闭环

1. 应用非零速命令。

将“Speed Input Command”的值更改为非零值。发出速度命令后，器件开始换向，电机以与 Speed Command × MAXIMUM MOTOR SPEED / 32767 成正比的速度旋转。

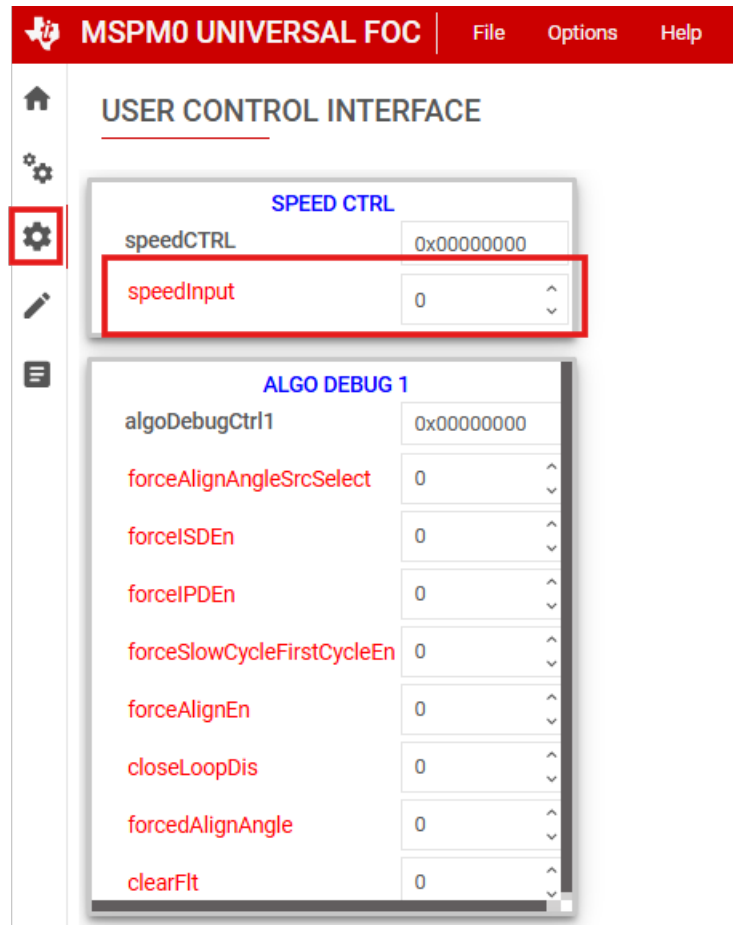


图 6-16. 通过 GUI 设置速度输入

2. 检查电机是否以命令的转速在闭环中旋转。

启用 GUI 右上角的“Continuous Read status”切换按钮并监控故障状态寄存器。如果未触发任何故障，则转到节 7。

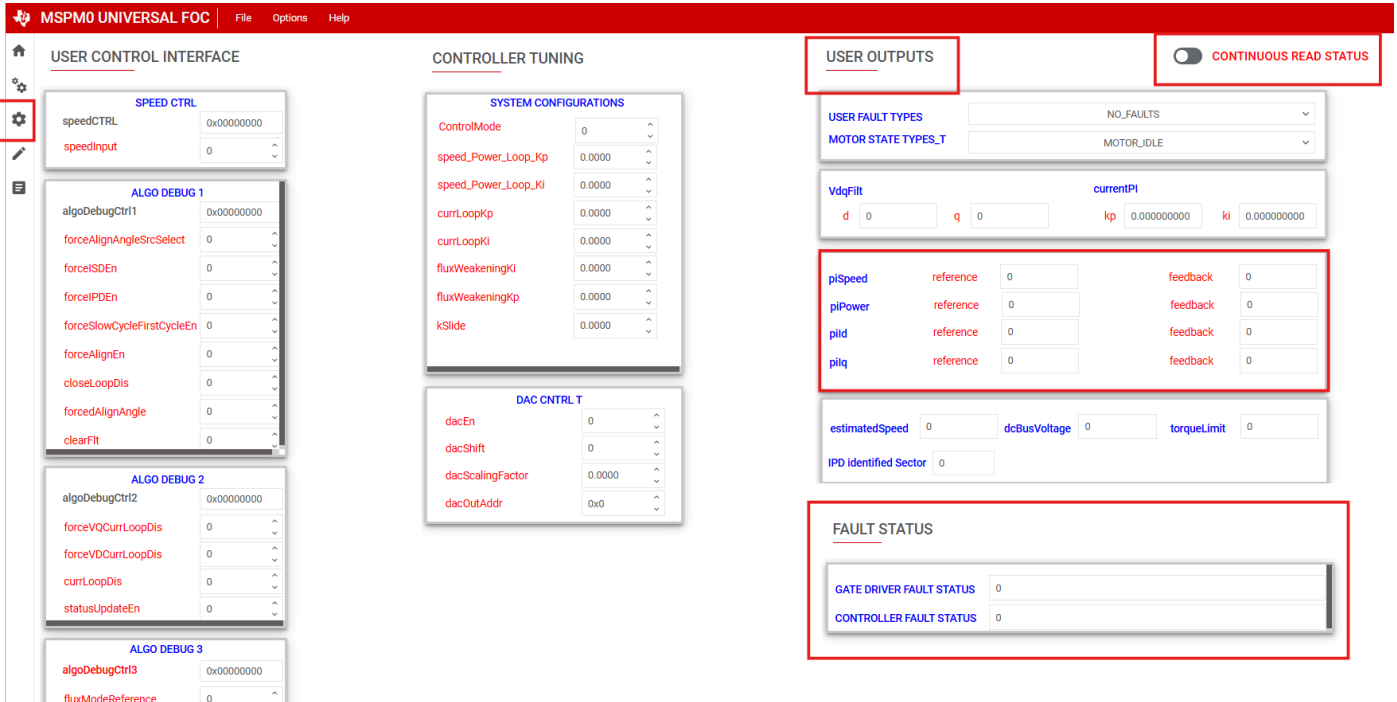


图 6-17. 从 GUI 读取故障状态

3. 如果触发了任何故障，请使用以下步骤调整故障处理配置：

- 通过将速度输入命令设置为 0，设置零速命令。
- 通过置位 ALGO DEBUG CTRL1 寄存器中的清除故障位 (*ClearFit*) 来清除故障状态寄存器。
- 查看并执行节 6.3 中的步骤来调试故障。

6.3 故障处理

以下各节介绍了可根据默认寄存器配置触发的故障。

6.3.1 异常 BEMF 故障 [ABN_BEMF]

当估算的 BEMF 电压降至编程的异常 BEMF 阈值百分比 [ABNNORMAL_BEMF_THR] 以下时，会触发此故障。例如，如果估算/测量的 K_e 为 5mV/Hz，编程的异常 BEMF 阈值为 40%，则当估算的 K_e 降至 2mV/Hz 以下时，将会触发此故障。当编程的 K_e 不准确时，也会触发此故障。

BEMF 阈值有两种情况：

情况 1：估算的 BEMF 电压随着电机转速的下降而下降。负载动态变化（负载突变）可导致电机转速下降。对于具有动态负载的应用，转速会下降然后恢复。因为转速下降，BEMF 电压也会下降，并触发此故障。对于此类应用，建议将异常 BEMF 阈值设置为 10%，从而避免触发此故障。

情况 2：如果编程的 K_e 不准确，可能会触发此故障。请按照 MOTOR_BEMF_CONSTANT 部分中建议的步骤操作，以便获得准确的 K_e 。

6.3.2 监控电源电压波动以防止电压越界故障

在电源有波动的应用中，用户需要指定最小和最大电源电压范围。在欠压情况下，电机可能会在过调制区运行，以实现目标转速，从而导致电流失真、效率低下或噪声。在过压情况下，MOSFET 和电机会持续以高电压运行，从而导致负荷过大。

调优欠压限制 1：继续降低电源电压，直到速度下降。测量转速下降时的总线电压，并将 MIN_VM_MOTOR 设置为该值。可以配置的最小总线电压范围在 0 至最大 BASE_VOLTAGE 的 25% 之间。

调优过压限制：继续增加总线电压，直到电机相电压达到电机的最大额定电压。MAX_VM_MOTOR 将是电机相电压达到电机最大额定电压时的总线电压。可以配置的最大总线电压范围在 60% 至最大 BASE_VOLTAGE 之间。

备注

FOC 算法提供欠压恢复模式 [MIN_VM_MODE] 和过压恢复模式 [MAX_VM_MODE]。可以将欠压恢复模式配置为自动清除欠压故障 [MTR_UNDER_VOLTAGE] 或在发生欠压故障时闭锁。可以将过压恢复模式配置为自动清除过压故障 [MTR_OVER_VOLTAGE] 或在发生过压故障时闭锁。

6.3.3 无电机故障 [NO_MTR]

当相电流低于基极电流的无电机锁定阈值百分比时，会触发此故障。

第 1 步：确保电机相位连接到终端，如“硬件用户指南”中所示。

第 2 步：如果故障仍然存在，请降低无电机锁定电流阈值 [NO_MTR_THR]。

7 高级调优

本节可帮助您以最少的配置成功地在闭环中旋转电机。本节提供了对各参数进行调优的标准必要步骤，以确保在闭环中成功使电机旋转。闭环定义为无传感器闭环，其中，电机以命令速度和扭矩基准旋转。

7.1 控制配置调优

7.1.1 控制运行模式

可使用 CLOSED_LOOP1 寄存器中的变量 CONTROL_MODE 在以下四种模式下控制 FOC 应用。速度/功率/扭矩/电压的基准输入可通过 SPEED_CTRL 寄存器来配置。

7.1.1.1 闭环速度控制模式

可以通过将 CLOSED_LOOP1 寄存器中的 CONTROL_MODE 设置为 0h 来选择此模式。在速度控制模式下，根据速度控制寄存器中设置为 SPEED_CTRL 值 (IQ15 格式的 P.U 值) 的输入基准，使用闭环 PI 控制来控制电机速度 (以电气频率表示)。P.U 速度计算为 SYSTEM_PARAMETERS 中配置的 ACTUAL_MOTOR_SPEED / MOTOR_MAX_SPEED 值。

示例：如果 MOTOR_MAX_SPEED 设置为 100Hz，则将 SPEED_CTRL 中的基准输入设置为 0x3FFFh (IQ15 格式的 0.5 P.U)，可将电机速度设置为 50Hz。

7.1.1.2 闭环功率控制模式

可以通过将 CLOSED_LOOP1 寄存器中的 CONTROL_MODE 设置为 1h 来选择此模式。在功率控制模式下，根据速度控制寄存器中设置为 SPEED_CTRL 值 (IQ15 格式的 P.U 值) 的输入基准，使用闭环 PI 控制来控制电机的输入电功率 (以瓦特为单位)。P.U 功率计算为 SYSTEM_PARAMETERS 中配置的 ACTUAL_MOTOR_POWER / MOTOR_MAX_POWER 值。

示例：如果 MOTOR_MAX_POWER 设置为 100W，则将 SPEED_CTRL 中的基准输入设置为 0x3FFFh (IQ15 格式的 0.5 P.U)，系统会以 50W 的恒定功率运行电机。

7.1.1.3 闭环扭矩控制模式

可以通过将 CLOSED_LOOP1 寄存器中的 CONTROL_MODE 设置为 2h 来选择此模式。在扭矩控制模式下，根据速度控制寄存器中设置为 SPEED_CTRL 值 (IQ15 格式的 P.U 值) 的输入基准，使用闭环 PI 控制来控制电机

的扭矩分量电流 I_q (以安培为单位)。电流的 P.U 扭矩分量计算为 `SYSTEM_PARAMETERS` 中配置的 `TORQUE_CURRENT_COMPONENT / CURRENT_BASE` 值。

示例：如果 `CURRENT_BASE` 设置为 10 安培，则将 `SPEED_CTRL` 中的基准输入设置为 `0x3FFFh` (IQ15 格式的 0.5 P.U)，系统会以 5A 的恒定 I_q 电流运行电机 (将适当的负载连接至电机)。

7.1.1.4 电压控制模式

可以通过将 `CLOSED_LOOP1` 寄存器中的 `CONTROL_MODE` 设置为 `3h` 来选择此模式。在电压控制模式下，根据在速度控制寄存器中设置为 `SPEED_CTRL` 值 (IQ15 格式的 P.U 值) 的输入基准来控制电机的调制指数。

示例：将 `SPEED_CTRL` 中的基准输入设置为 `0x3FFFh` (IQ15 格式的 0.5 P.U)，以 0.5 的恒定调制指数运行电机。

超前角控制：在电压控制模式下，可以调节超前角，以便获得给定速度下电机的出色效率。`CLOSED_LOOP2` 寄存器中的 `LEAD_ANGLE` 配置可用于设置超前角。

对于给定的超前角 θ ，外加电压 V_q 和 V_d 定义为

$$V_q = \text{MODULATION_INDEX} * \cos \theta$$

$$V_d = \text{MODULATION_INDEX} * \sin \theta$$

可以使用图 7-1 通过 GUI 来设置上述控制模式。

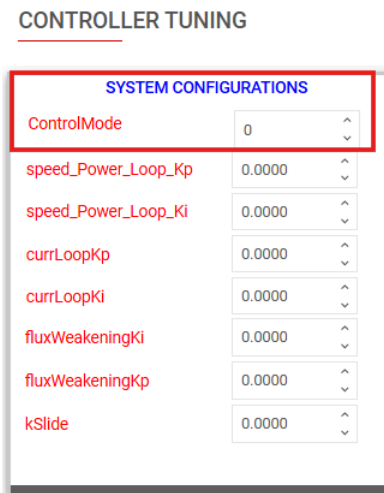


图 7-1. 控制模式配置

7.1.2 对电机进行初始速度检测，以实现可靠的电机重新同步

初始速度检测 (ISD) 功能用于识别电机的初始状态。有必要知道电机的初始状态，才能实现可靠的重新同步。当器件尝试启动电机，而电机正在与预期旋转方向相反的方向滑行或旋转时，可能会发生电机重新同步故障。在需要频繁启动和停止电机的应用中，或者从外部强制运行电机或发生断电时，电机可能会滑行。如果电机相线按错误顺序连接到了 OUTA、OUTB 和 OUTC 或者发出了错误的方向命令，电机可能以与预期旋转方向相反的方向旋转。具有更高惯性的电机滑行的时间会更长。在需要频繁启动和停止电机并使用较高惯性电机的应用中，启用 ISD。

例如，吊式风扇电机由于风扇叶片而具有较高惯性，在停止之前可能会滑行很长时间。

第 1 步：启用 ISD [ISD_EN]

第 2 步：启用电机 ISD 重新同步 [RESYNC_EN]

备注

如果电机无法启动：

1. 增大电机静态 BEMF 阈值 [STAT_DETECT_THR]。
2. 增大电机静态持续时间 [ISD_STOP_TIME]。
3. 增大电机运行持续时间 [ISD_RUN_TIME]。
4. 增加最小转速阈值，以重新同步到闭环。

7.1.3 检测反向旋转的单向电机驱动

对于需要在特定方向旋转电机的应用，了解电机是否在与预期旋转方向相反的方向滑行或旋转非常重要。MSPM0 FOC 算法反向驱动功能执行后会使电机反向减速至零速，并在改变方向后加速，直到转入闭环，如图 7-2 所示。

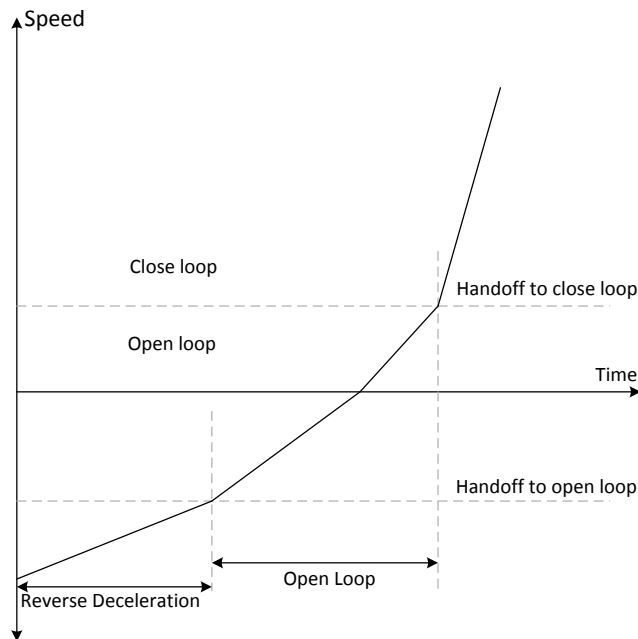


图 7-2. 反向驱动功能

MSPM0 FOC 算法提供了一个选项，可在电机在反方向滑行或旋转时应用制动并停止电机，然后在改变方向后使电机加速至进入闭环。

在吊扇和泵等应用中，必须在特定方向旋转电机，才能获得所需的结果。对于此类应用，请遵循以下建议：

第 1 步：启用 ISD [ISD_EN]

第 2 步：启用电机 ISD 反向驱动 [RVS_DR_EN]

第 3 步：启用反射重新同步 [RESYNC_EN]

备注

如果电机无法在反方向重新同步，请遵循以下建议：

1. 增加反向减速速度阈值，以转换到开环
 2. 启用开环反向驱动配置 [REV_DRV_CONFIG]
 3. 增加反向驱动开环电流基准 [REV_DRV_OPEN_LOOP_CURRENT]
 4. 减小反向驱动期间的开环加速系数 A1 和 A2
-

7.1.4 在启动期间防止转子回旋

在不接受反向旋转的应用中，可以将初始位置检测算法 (IPD) 功能作为替代方法来启动电机。通过进行适当的 IPD 设置，可以比使用对齐方法更快地启动电机。虽然此功能适用于高惯性电机（比如重叶片，例如吊扇或电器风扇），但它不适用于低惯性电机（比如小叶片，例如计算机风扇），因为电流注入会导致电机抖动，从而造成 IPD 不准确。

对于在启动过程中不接受 IPD 产生声学噪声（“线性调频脉冲”）的应用，请选择“慢速首循环”作为启动方法。

7.1.4.1 选项 1：IPD

第 1 步：如果选择 IPD 作为启动方法，请在 GUI 的“USER INPUT MTR_STARTUP1_T configuration of REGISTER MAP”选项卡中的电机启动选项 [MTR_STARTUP] 中选择 IPD。

第 2 步：选择 IPD 电流阈值 [IPD_CURR_THR]。根据电机的电感饱和点来选择 IPD 电流阈值。电流越高，准确检测初始位置的机率就越高。但是，较高的电流会导致转子运动、振动和噪声。建议先设置为电机额定电流的 50%。如果电机启动失败，则增加阈值，直到电机成功启动。不要将 IPD 电流阈值设置为高于电机的额定电流。

第 3 步：选择 IPD 时钟值 [IPD_CLK_FREQ]。IPD 时钟定义施加 IPD 脉冲的速度。电机电感和电流阈值越高，电流稳定所需的时间就越长，因此将时钟设置为较慢的时间。但是，较慢的时钟会使 IPD 噪声更大，持续时间更长，因此在 IPD 电流能够完全稳定的前提下，将时钟设置为尽可能快的时间。

备注

如果电机电感非常高或电机未连接，该器件会触发 IPD 超时故障 IPD_FAULT_CLOCK_TIMEOUT。如果触发了此故障，请确保电机连接到器件。如果故障仍然存在，在直流总线电压的任何过冲都可接受的情况下，请将 IPD 释放模式 [IPD_RLS_MODE] 设置为三态。

如果 IPD 时钟频率设置得过高，器件会触发 IPD 频率故障 IPD_FAULT_DECAY_TIME。如果触发了此故障，则减小 IPD 时钟值 [IPD_CLK_FREQ]。

第 4 步：选择 IPD 超前角 [IPD_ADV_ANGLE]。从 90° 开始，以实现最大启动扭矩。如果在启动过程中观察到急冲，请将该角度减小到 60° 或 30°，以实现更平稳的启动。

7.1.4.2 选项 2：慢速首循环

如果选择慢速首循环作为启动方法，请按照下面的步骤操作：

第 1 步：在 GUI 的“Control Configuration - Motor Startup Stationary”选项卡中的电机启动选项 [MTR_STARTUP] 中选择“Slow first cycle”。

第 2 步：选择对齐或慢速首循环电流基准 [ALIGN_OR_SLOW_CURRENT_ILIMIT]。较低的电流基准可能使电机失去同步。较高的电流可能导致高惯性电机持续振荡，或导致低惯性电机急冲。建议先设置为电机额定电流的 50%。在启动扭矩较高的应用中，电机可能会失去同步。在此类应用中，请增大电流基准。在观察到持续振荡或急冲的应用中，请减小电流基准。

第 3 步：选择对齐或慢速首循环电流斜升速率 [ALIGN_SLOW_RAMP_RATE]。斜升电流基准可避免电机反向旋转。较低的电流斜升速率可能使电机失去同步。较高的电流斜升速率可能导致高惯性电机持续振荡，或导致低惯性电机急冲。建议先将斜升时间设置为 0.5 秒，以斜升到电机的额定电流。在启动扭矩较高的应用中，电机可能会失去同步。在此类应用中，请增加电流斜升速率。在观察到持续振荡或急冲的应用中，请减小电流斜升速率。

第 4 步：选择首循环的频率 [SLOW_FIRST_CYC_FREQ]。较低的频率可能在启动时产生急冲。较高的频率可能无法同步电机。建议先设置为电机最大转速的 20%。在启动扭矩较高的应用中，电机可能会失去同步。在此类应用中，请降低频率。在观察到急冲的应用中，请增加频率。

7.1.5 逐渐和平稳启动动作

对于需要慢速和逐渐启动以在转换期间降低速度过冲的应用，请遵循以下建议：

第 1 步：减小开环加速系数 A1 [OL_ACC_A1] 和开环加速系数 A2 [OL_ACC_A2]。

第 2 步：转换到闭环后启用 Iq 斜降 [IQ_RAMP_EN]

如果出现速度过冲，请降低斜升速率，以减小估算的 θ 与开环 θ 之间的差值 [THETA_ERROR_RAMP_RATE]。

7.1.6 缩短启动时间

启动时间是指电机从零速达到目标速度所需的时间。对于需要较短启动时间的应用，我们建议选择初始位置检测 (IPD) 或慢速首循环作为启动方法。

7.1.6.1 选项 1：初始位置检测 (IPD)

第 1 步：选择 IPD [MTR_STARTUP] 作为电机启动方法。

第 2 步：将 IPD 电流阈值 [IPD_CURR_THR] 提高到电机的额定电流。

第 3 步：将 IPD 时钟值 [IPD_CLK_FREQ] 提高到更高的频率，在此值条件下，器件不会触发 IPD 频率故障。有关更多详细信息，请查看节 7.1.4 (第 3 步)。

第 4 步：为 IPD 重复次数 [IPD_REPEAT] 选择 1 次。

第 5 步：选择开环电流限制 [OL_ILIMIT]，使其与扭矩 PI 环路电流限制 [ILIMIT] 相同。

备注

将电流限制配置为高于电机失速电流的值时，可能会导致电机过热或损坏。

第 6 步：增加开环加速系数 A1 [OL_ACC_A1] 和开环加速系数 A2 [OL_ACC_A2]。

第 7 步：为用于转换的最小 BEMF [AUTO_HANDOFF_MIN_BEMF] 选择 0mV。

如果器件触发异常 BEMF [ABN_BEMF] 故障，则建议增加 [AUTO_HANDOFF_MIN_BEMF]。

第 8 步：继续增加斜升速率，以将估算的 θ 与开环 θ 之间的差值减小至 2deg/ms。

第 9 步：增加闭环加速率 [CL_ACC]

7.1.6.2 选项 2：慢速首循环

第 1 步：在 [MTR_STARTUP] 中选择慢速首循环作为电机启动方法。

第 2 步：选择对齐或慢速首循环电流限制 [ALIGN_OR_SLOW_CURRENT_ILIMIT]，使其与扭矩 PI 环路电流限制 [ILIMIT] 相同。

第 3 步：继续增加对齐或慢速首循环电流斜升速率 [ALIGN_SLOW_RAMP_RATE]，直到开环电流达到电机额定电流的 100%。

第 4 步：按选项 1 中的第 5 步至第 9 步操作。

7.1.7 快速停止电机

对于需要快速停止电机的应用，建议将电机停止选项 [MTR_STOP] 配置为低侧制动：

第 1 步：将电机停止选项 [MTR_STOP] 配置为低侧制动。

第 2 步：选择制动引脚和电机停止选项的速度阈值。将速度阈值设置为较高的速度将导致 FET 承载大电流。将速度阈值设置为较低的速度将延长电机的停止时间。建议从最大转速的 50% 开始，如果电机相电流超过 FET 的最大额定电流，则减小阈值。如果停止时间过长，则建议在不达到最大电流限值的情况下增大阈值。

7.1.8 弱磁：以高于额定速度的速度运行电机

FOC 算法通过改变磁通电流分量 I_d 来控制转子磁通的调整。减小转子磁通使电机进入磁场减弱区，通过这个区域，电机转速可超过额定速度。

备注

在磁通减弱运行期间，电机无法提供额定扭矩。扭矩限值 I_q 根据 $I_{LIMIT} = I_d^2 + I_q^2$ 定义的循环电机电流限值自动调整。

启用弱磁的步骤：

1. 将 FieldCtrl 寄存器中的 FLUX_WEAK_EN 位设置为 1b。
2. 调整 FLUX_WEAK_CURR_RATIO，限制电流的最大磁通分量与电流扭矩分量的比率。此值限制磁通分量电流 I_d 并根据循环限值 ILIMIT 将扭矩分量电流 I_q 维持为 $I_d^2 + I_q^2$ 。
3. 可使用 FLUX_WEAKE_REF 配置来调整最大调制指数，超过此值时启用磁场减弱。此寄存器字段值设置调制指数值的平方值，超过该值时，将调节 I_d 以减弱通量。

备注

低于额定速度时，进入磁场减弱模式效率不高。建议仅当达到调制指数限值并且不再能够通过正弦调制满足所需的速度要求时，才激活磁场减弱。

7.1.9 每安培最大扭矩：提高 IPMSM 电机的效率

用户可以使用 FOC 算法为具有凸极的电机 (IPM 电机) 实现出色效率。用户可以按照凸极参数说明中的详细描述，将电机的凸极配置为非零值。

用户可以在节 5.3.7 中配置 MTPA_EN 来启用此功能。

7.1.10 在电机停止期间防止电源电压过冲。

对于需要在电机停止期间防止电源电压过冲的应用，请选择主动降速作为电机停止选项。在不需要快速停止，但接受一定量的电感能量回输到电源的应用中，可以使用主动降速作为电机停止选项。

第 1 步：将电机停止选项 [MTR_STOP] 配置为主动降速

第 2 步：配置主动降速速度阈值 [ACT_SPIN_THR]。建议将 ACT_SPIN_THR 设置为最大转速的 50%。如果电源发生电压过冲，请减小 ACT_SPIN_THR，直到电压过冲达到可接受的限制。

7.1.11 保护电源

在电池供电应用或电源内未内置过流或过压保护装置的应用中，保护电源，以防消耗较高的电流或发生潜在的电压过冲非常重要。

第 1 步：当电机上的负载增加时，器件会从电源消耗较高的电流。要限制从电源消耗的电流，请启用总线电流限制 [BUS_CURRENT_LIMIT_ENABLE] 并配置总线电流限制 [BUS_CURRENT_LIMIT]，以保护电源，避免消耗较高的电流。

例如，需要限制从电池等电源消耗的电流，因为电池寿命取决于充电或放电周期数。启用总线电流限制将会限制电机转速，从而限制电源电流。

第 2 步：当发出让电机减速的命令后，根据减速率，来自电机的能量将会泵回到电源，从而将电源电压提升到对于电子器件来说可能不安全的水平。启用抗电压浪涌 [AVS] 可保护电源避免电压过冲，它会覆盖由任何其他寄存器设置的任何减速限制，并自动应用安全的减速率。

图 7-3 展示了禁用 AVS 时的电源电压过冲。电机以 7000Hz/s 的减速率将占空比从 100% 降至 10%。图 7-4 展示了启用 AVS 时电源电压无过冲。

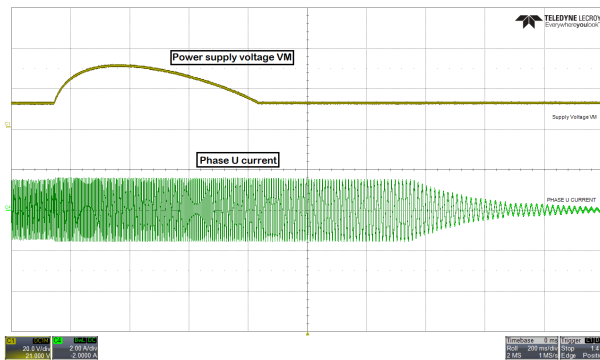


图 7-3. 禁用 AVS 时的电源电压和相电流波形

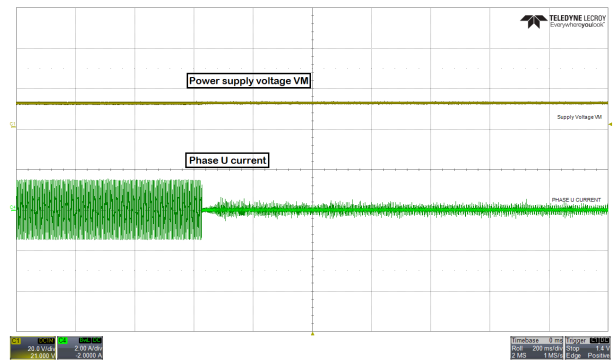


图 7-4. 启用 AVS 时的电源电压和相电流波形

7.1.12 FOC 带宽选择

在中断例程中定期执行 FOC 算法，以便更新转子角度，从而使电机达到出色的效率。用户可以根据应用带宽要求来配置此 FOC 速率。

节 5.3.5 中的 HIGH_FREQ_FOC_EN 位配置可以设置为 1b 来获得 10kHz 的最大 FOC 执行速率。将这个位设定为 0b 可将最大 FOC 执行速率降低 2 倍。

备注

FOC 例程只能在 PWM 频率的倍数值时执行，因此，10kHz 的最大可实现 FOC 速率适用的 PWM 频率为 10kHz 的倍数（例如 10kHz、20kHz、30kHz）。对于 15kHz、45kHz 等 PWM 频率，最大 FOC 速率为 7.5kHz（15kHz/2、45kHz/6 等）。

8 硬件配置

8.1 方向配置

FOC 算法允许您使用基于寄存器的方向配置来设置电机的方向：

- **基于寄存器的方向配置**

电机旋转方向可根据寄存器设置进行设置，如下所示：

- **DIR_INPUT 01b**：应用相位序列 OUT A → OUT B → OUT C。
- **DIR_INPUT 10b**：应用相位序列 OUT A → OUT C → OUT B。

8.2 制动配置

FOC 算法使用户能够在各种情况下制动电机。可以通过 **BRAKE_PIN_MODE** 将制动状态配置为低侧制动 (Low-Side Braking) 或对齐制动 (Align Braking)。FOC 算法会在进入制动状态之前将输出速度降至由 **BRAKE_SPEED_THRESHOLD** 定义的值。只要 BRAKE 驱动为“高电平”，电机就会保持在制动状态。可通过以下方式实现制动功能：

- **基于寄存器的制动配置。**

用户可以使用如下所示的寄存器设置来配置 **PIN_CONFIG** 寄存器中的 **BRAKE_INPUT**，以应用制动器。

- **BRAKE_INPUT - 1b**：根据 **BRAKE_PIN_MODE** 覆盖引脚和制动/对齐
- **BRAKE_INPUT - 10b**：覆盖引脚，不制动/对齐

8.3 Main.h 定义

8.3.1 检测放大器配置

检测放大器配置定义了 CSA 输出的方向。流出相位的正电流导致 CSA 输出减少时，表明检测放大器是反相的。正电流的 CSA 输出增大表明使用的是同相电流检测放大器。

对于反相放大器配置，必须在 main.h 中包括 **#define _INVERT_ISEN**。

对于同相放大器配置，必须在 main.h 文件中包括 **#define _NONINVERT_ISEN**

8.3.2 驱动器传播延迟

驱动器传播延迟定义了馈送到栅极驱动器的输入 PWM 逻辑边沿与实际栅极驱动器输出之间的延时时间，以 ns 为单位。此延迟影响实际栅极驱动器输出的电流检测采样实例，必须馈送到算法以进行精确的电流检测。

此值以 ns 为单位，必须使用 main.h 文件中的 **#define DRIVER_PROPAGATION_DELAY_nS** 宏来定义。

8.3.3 驱动器最小导通时间

驱动器最小导通时间定义了电流检测放大输出的合并上升时间和稳定时间。如果电流分流器上的电压发生满量程变化，则必须单独捕获此值。为了获得准确的电流检测读数，在捕获电流信号之前电流检测放大器输出应稳定下来。

此 CSA 稳定时间 + 上升时间使用 main.h 文件中的 `#define DRIVER_MIN_ON_TIME_nS` 宏来设置。

8.3.4 电流分流配置选择

SDK FOC 示例可针对单分流器、双分流器和三分流器等各种分流器配置选项进行配置。为确保算法正常运行，必须根据硬件设计选择适当的分流器配置。

FOC 应用支持在给定实例中同时对两个相位采样，从而优化电流采样时间。默认情况下，在所有分流器配置中，通过两个 ADC 实例来使用同步采样功能。用户需要将至少一个电流检测路由到两个 ADC 实例通道中的每个通道，并且必须在 main.h 配置中定义适当的分流器配置，如下所示。

8.3.4.1 三分流器配置

`#define CURRENT_THREE_SHUNT_AB_C`：如果通过 ADC0 检测 A 相和 B 相，而通过 ADC1 检测 C 相，则选择此配置。

`#define __CURRENT_THREE_SHUNT_A_BC`：如果通过 ADC0 检测 A 相，而通过 ADC1 检测 B 相和 C 相，则选择此配置。

用户也可以将其中一个相位（比如“B”）路由到 ADC0 和 ADC1 实例，并将其他两个相位路由到两个不同的 ADC 实例。例如，假设将“A 相”路由到 ADC0，将“C 相”路由到 ADC1，B 相路由到 ADC0 和 ADC1 实例。在此示例中，算法可以动态切换到这两个样本，从而根据给定的扇区提供更好的电流采样时间。

在这种三分流器配置中，应用支持将电流检测估算动态地转移到两个相位，从而更最大限度地提高调制指数。与平衡三相电机一样，其中任何一个相电流都可以使用另外两个相电流来估算，即 $i_a = -(i_b + i_c)$ 。根据运行的扇区，选择具有最低调制指数的两个相位进行电流测量，并使用其他两个相电流估算具有最高调制指数的第三个相位。此方法有助于通过持续 SVM 运行将调制指数扩展到更高的限值。

要选择此配置，用户可以在 main.h 文件中包括 `#define __CURRENT_THREE_SHUNT_DYNAMIC` 宏。此外，用户还需要将宏 `#define DYNAMIC_CURRENT_SHUNT_CONFIG_EN` 设置为 `TRUE`，从而启用动态分流器选择。

8.3.4.2 双分流器配置

`#define __CURRENT_TWO_SHUNT_A_B`：如果只在 A 相和 B 相有两个分流检测通道可用于进行电流采样，并且 A 路由到 ADC0，B 路由到 ADC1，则选择此配置。

`#define __CURRENT_TWO_SHUNT_B_C`：如果只在 B 相和 C 相上有两个分流检测通道可用于进行电流采样，并且 B 路由到 ADC0，C 路由到 ADC1，则选择此配置。

`#define __CURRENT_TWO_SHUNT_C_A`：如果只在 A 相和 B 相上有两个分流检测通道可用于进行电流采样，并且 A 路由到 ADC0，B 路由到 ADC1，则选择此配置。

备注

如果用户使用与 SDK 中的默认连接不同的相位组合来路由到 ADC0 和 ADC1 实例。则可以在以下文件中进行适当的更改：`projectroot/modules/hal/gateDriverInterface/source/<driverSpecific>_focHalInterface.c`

8.3.4.3 单分流器配置

如果在硬件中使用单个分流器进行电流检测，则为确保电机正常运行，需要包括以下定义。

在 main.h 文件中包括 `#define __CURRENT_SINGLE_SHUNT` 宏。

8.3.5 CSA 偏移比例因子选择

FOC 应用根据可通过 ADC 检测到的最大电流通过 ADC 将采样电流转换为 PU 系统值。这取决于从放大器引入的 CSA 偏移。通常，对于双极性电流检测测量，满量程值 $ADC\ 3.3V / 2 = 1.65V$ 作为偏移给出。对于电流检测始终为单极的应用，将偏移值设置为小于 0.5V，以便使用最大满量程 ADC 输出来测量 +ve 电流，并留出较小的裕度来测量 -ve 电流。

为实现适当的功能，FOC 应用要求指定此标度。当 ADC 12 位值转换为 PU 值时，如果偏移设置为 0：然后，将比例因子设置为 `_IQ(1)`。

如果对于双极电流检测测量，硬件中的 CSA 偏移设置为 1.65V (3.3V/2)，则比例因子设置为 `_IQ(2)`。

对于任何任意偏移值，缩放值需要指定为：

`_IQ(3.3v/(3.3v - 以伏特为单位的 CSA_OFFSET))`。此值作为宏定义添加到 `projectroot/modules/hall/gateDriverInterface/source/<driverSpecific>_focHallInterface.c` 中。

例如：请参阅示例工程 DRV8329 - 其中 `#define DRV8329_CURRENT_SF_IQ` 指定为 `_IQ(1.42857142)`，CSA 偏移为 0.4125V。

8.4 实时变量跟踪

可通过 DAC 从 MCU 实时输出 32 位算法变量。通过设置 `DAC_EN = 1` 来启用 DAC 输出。MSPM0 中的 DAC 为 12 位，因此需要在输出之前应用调节。在输出前，用户有两种缩放变量的方法。

- 对于全局 IQ 格式的变量 (IQ27)：

$$\text{DAC_OUTPUT_VOLTAGE} = (\text{VARIABLE_VALUE} \times \text{DAC_SCALING_FACTOR} + 1) \times 1.65\text{V} \quad (20)$$

在上面的公式中，将 `DAC_SCALING_FACTOR` 设置为 1 让用户能够在 0V 至 3.3V 范围内表示 `IQ(1.0)` 至 `IQ(-1.0)` 的数据。要表示超过值 1.0 的数据，请使用更低的 `DAC_SCALING_FACTOR`。

例如：要表示 -2.0 至 +2.0 范围内的数据，请将 `DAC_SCALING_FACTOR` 设置为 0.5。

- 对于其他 IQ 格式的变量：

对于任何其他 IQ 的输出，用户可以使变量左移位或右移位，以便在输出之前将数据置于 12 位范围内。可以通过将 `DAC_SCALING_FACTOR` 设置为 0 来选择此模式。

如果变量值小于 12 位值，请将 `DAC_SCALE` 设置为正，DAC 输出如方程式 21 所示：

$$\text{DAC_OUTPUT_VOLTAGE} = (\text{VARIABLE_VALUE} \ll \text{DAC_SCALE}) \times 3.3\text{V} \quad (21)$$

如果变量值大于 12 位值，请将 `DAC_SCALE` 设置为负，DAC 输出如方程式 22 所示：

$$\text{DAC_OUTPUT_VOLTAGE} = (\text{VARIABLE_VALUE} \gg \text{DAC_SCALE}) \times 3.3\text{V} \quad (22)$$

备注

通过设置 `DAC_EN = 1`，可将变量输出馈送到 DAC 寄存器，但用户需要在 TI SysConfig 中启用 DAC 外设，以便 DAC 外设正常运行。此外，确保 DAC 输出引脚未被任何其他外设载入。

表 8-1. 用于 DAC 监控的地址表

变量	地址
A 相电流	0x20200608
B 相电流	0x2020060C
C 相电流	0x20200610
A 相电流原始 ADC 值	0x20200614
B 相电流原始 ADC 值	0x20200618
C 相电流原始 ADC 值	0x2020061C
A 相电压	0x20200678
B 相电压	0x2020067C
C 相电压	0x20200680
A 相电压原始 ADC 值	0x20200684
B 相电压原始 ADC 值	0x20200688
C 相电压原始 ADC 值	0x2020068C
D 轴电流	0x20200750
Q 轴电流	0x20200754
D 轴电压	0x20200758
Q 轴电压	0x2020075C
D 轴经过滤波的 BEMF	0x20200BD4
Q 轴经过滤波的 BEMF	0x20200BD8
滤波后的估算电机转速	0x20200BF4
估算的转子角度	0x20200BFC
功率反馈	0x20200930
SVM 输出占空比 A 相	0x20200720
SVM 输出占空比 B 相	0x20200724
SVM 输出占空比 C 相	0x20200728

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司