User's Guide

MSPM0 带传感器 FOC

TEXAS INSTRUMENTS

摘要

本调优指南提供了设置 MSPM0 MCU 和配套 DRV 硬件板的分步指导，便于使用带传感器 FOC 算法调整和旋转三相无刷直流电机。

备注

本调优指南参考的是 SDK 版本 **2.04.00.00** 及更高版本中的带传感器 FOC 版本 **1.02.00**。

内容

1 简介....3
2 硬件设置....4
2.1 EVM 硬件设置....4
2.2 PWM 输出的引脚配置....5
2.3 ADC 电流的引脚配置....5
2.4 ADC 电压的引脚配置....6
2.5 通过 GPIO 进行霍尔传感器输入的引脚配置....7
2.6 有关故障的引脚配置....7
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....8
2.10 评估板的外部连接....9
3 软件设置....12
4 GUI 设置....12
4.1 串行端口配置....12
4.2 GUI 主页....13
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）....19
5.4 用户状态寄存器（基址 = 0x20200430h）....37
6 基本调优....38
6.1 系统配置参数....38
6.2 基本电机旋转的控制配置....42
6.3 故障处理....49
7 高级调优....50
7.1 控制配置调优....50
8 硬件配置....54
8.1 方向配置....54
8.2 制动配置....54
8.3 Main.h 定义....54
8.4 实时变量跟踪....56
9 修订历史记录....57

插图清单

图 1-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器的简化原理图....3
图 2-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器 - 带传感器 FOC 方框图....4

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

图 2-2. CSA 输出滤波器.....5
图 2-3. ADC 分压器.....6
图 2-4. MSPM0 LaunchPad 套件和 DRV8316 EVM 外部配置.....9
图 2-5. LP-MSPM0G3507 反向通道连接到 UART3.....10
图 2-6. LP-MSPM0G3519 反向通道连接到 UART0.....11
图 5-1. GUI 寄存器映射页面.....16
图 6-1. GUI 系统参数配置.....39
图 6-2. CCS 调试窗口.....40
图 6-3. 电阻测量.....40
图 6-4. 电感测量.....41
图 6-5. 霍尔角度表值.....43
图 6-6. 霍尔校准配置.....44
图 6-7. 霍尔校准使能.....44
图 6-8. 霍尔校准完成.....44
图 6-9. 生成霍尔角度表.....44
图 6-10. 更新霍尔角度表.....45
图 6-11. 从 GUI 进行霍尔传感器校准.....45
图 6-12. HalAngleTable.....46
图 6-13. 速度环路和电流环路调优.....47
图 6-14. 通过 GUI 设置速度输入.....48
图 6-15. 从 GUI 读取故障状态.....49
图 7-1. 控制模式配置.....51
图 7-2. 禁用 AVS 时的电源电压和相电流波形.....53
图 7-3. 启用 AVS 时的电源电压和相电流波形.....53

表格清单

表 2-1. 使用 MSPM0 进行带传感器 FOC 时支持的硬件.....5
表 2-2. PWM 输出的引脚配置.....5
表 2-3. DRV8316 + LP-MSPM0G3507 中采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置.....6
表 2-4. DRV8316 + LP-MSPM0G3519 中采用同步采样的 ADC 电流的引脚配置.....6
表 2-5. TIDA010251 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置.....6
表 2-6. 适用于 DRV8316 + LP- MSPM0G3507 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置.....6
表 2-7. 适用于 DRV8316 + LP- MSPM0G3519 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置.....7
表 2-8. 适用于 TIDA010251 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置.....7
表 2-9. DRV8316 上霍尔传感器 GPIO 引脚的引脚配置.....7
表 2-10. TIDA010251 上霍尔传感器 GPIO 引脚的引脚配置.....7
表 2-11. SPI 连接的引脚配置.....8
表 2-12. UART 连接的引脚配置.....9
表 3-1. FOC 控制的软件支持.....12
表 4-1. GUI 连接类型.....12
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.....17
表 5-6. 算法调试控制 3 寄存器字段说明.....18
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）.....20
表 5-11. 电机电感配置（偏移 = 4h）.....20
表 5-12. 电机凸极配置（偏移 = 8h）.....20
表 5-13. 电机 BEMF 常数配置（偏移 = Ch）.....20
表 5-14. 基极电压配置（偏移 = 10h）.....20
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

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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）.....21
表 5-21. 扭矩环路积分增益（偏移 = 2Ch）.....21
表 5-22. 弱磁控制器比例增益（偏移 = 30h）.....21
表 5-23. 弱磁控制器积分增益（偏移 = 34h）.....21
表 5-24. 电机极对数（偏移 = 38h）.....21
表 5-25. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明.....22
表 5-26. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明.....24
表 5-27. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明.....27
表 5-28. CLOSED_LOOP2 寄存器字段说明.....30
表 5-29. FIELD_CTRL 寄存器位说明.....31
表 5-30. FAULT_CONFIG1 寄存器字段说明.....32
表 5-31. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明.....32
表 5-32. MISC_ALGO 寄存器字段说明.....34
表 5-33. PIN_CONFIG 寄存器字段说明.....35
表 5-34. PERI_CONFIG1 寄存器字段说明.....35
表 5-35. 用户状态寄存器.....37
表 6-1. 更改控制器增益的指南.....48
表 8-1. 用于 DAC 监控的地址表.....56

商标

LaunchPad™ and Code Composer Studio™ are trademarks 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 简介

MSPM0Gxxx 系列 80MHz Arm®-Cortex® M0+ MCU 可通过 FOC 控制对嵌入了霍尔传感器的三相无刷直流 (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（标称直流轨为 12V 或 24V）或电池供电应用驱动。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。

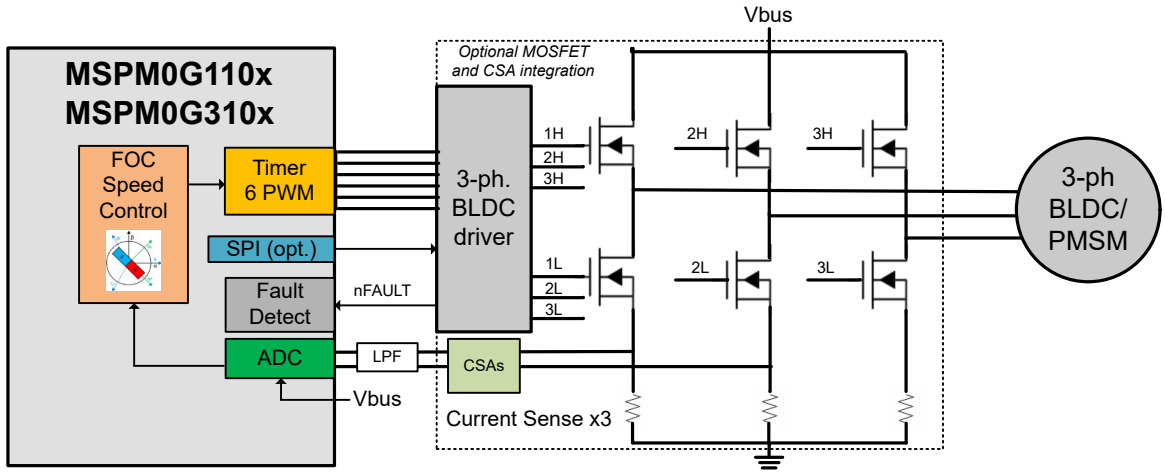


图 1-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器的简化原理图

本调优指南提供了使用 MSPM0Gxxxx 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。
- ***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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2 硬件设置

使用本调优指南时需具备以下各项：

- LP-MSPM0G3507/LP-MSPM0G3519 板
- 支持的 DRV83xx 电机驱动器评估模块 (EVM)
  - DRV8316REVM
- 用于引脚表连接的跳线
- 安装了最新 MSPM0 SDK 软件的计算机
- 要使用此流程进行调优的带霍尔传感器电机。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 展示了带传感器 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/LP-MSPM0G3519 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带传感器 FOC 方框图的每个部分配置引脚。

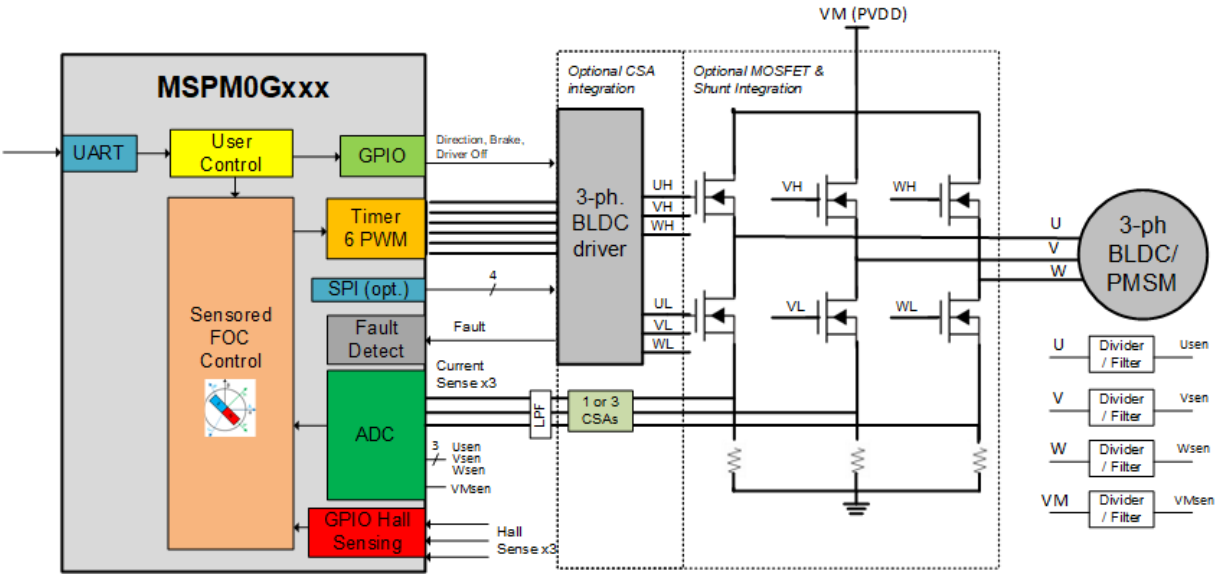


图 2-1. MSPM0Gxxx + BLDC 电机驱动器 - 带传感器 FOC 方框图

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，并可用作带传感器 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。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2.1.1 EVM 硬件支持

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

表 2-1. 使用 MSPM0 进行带传感器 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	DRV8316REVM	DRV8316REVM 用户指南	3	是	4.5V 至 35V	< 80W
LP-MSPM0G3519						
MSPM0G1507	TIDA-010251 参考设计	TIDA010251-Design-Guide	1	否	21V 最大直流电源	600W

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 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 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 可配置为提供三对互补的 PWM 输出（例如 TIMA0_C1 和 TIMA0_C1N），并且是电机控制应用的首选计时器。但可以使用并交叉触发任何 TIMA0 或 TIMA1 输出对来提供六个 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

2.3 ADC 电流的引脚配置

三相电流检测的 ADC 配置： 表 2-3 展示了三相电流检测的 ADC 电流的默认引脚配置。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。

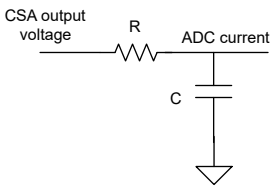


图 2-2. CSA 输出滤波器

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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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

表 2-3. DRV8316 + LP-MSPM0G3507 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 相电流检测输入
A0_2	ADC0，通道 2 输入	SOB	B 相电流检测输入
A1_2	ADC1，通道 2 输入	SOB	B 相电流检测输入
A1_1	ADC1，通道 1 输入	SOC	C 相电流检测输入

表 2-4. DRV8316 + LP-MSPM0G3519 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
A1_13	ADC1，通道 13 输入	SOA	A 相电流检测输入
A1_14	ADC1，通道 14 输入	SOB	B 相电流检测输入
A0_12	ADC0，通道 12 输入	SOB	B 相电流检测输入
A0_2	ADC0，通道 2 输入	SOC	C 相电流检测输入

单分流器电流检测的 ADC 配置： TIDA010251 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置 展示了 TIDA010251 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/ADC1 中的任何一个用于在单个 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。用户需要配置相应的 ADC，以对存储器“0”索引和存储器“1”索引的电流检测输出进行采样，从而实现 FOC 控制。有关单分流器电流检测的 ADC 配置的详细信息，请参阅《带传感器 FOC 用户指南》。

表 2-5. TIDA010251 中的单分流器电流检测的 ADC 引脚配置

MSPM0 引脚	功能	连接	功能
A1_13	ADC 1，通道 13 输入	缓冲模式下的内部放大器	直流总线电流检测

2.4 ADC 电压的引脚配置

ADC 电压的默认引脚配置如下表所示。在带传感器 FOC 应用中，将一个 ADC 输入连接到检测到的 VM 电机电压 (VSENVM)，用于故障传感。

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 6.1.2.5。

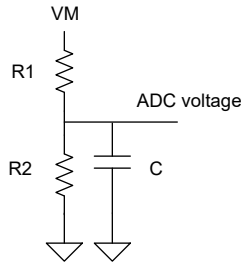


图 2-3. ADC 分压器

表 2-6. 适用于 DRV8316 + LP- MSPM0G3507 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

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 2-7. 适用于 DRV8316 + LP- MSPM0G3519 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_4	ADC0，通道 4 输入	VSEN -Vm	直流总线电压输出

表 2-8. 适用于 TIDA010251 的 ADC 直流总线电压检测的引脚配置

MSPM0 引脚	功能	HW 连接	DRV 功能
A0_1	ADC0，通道 1 输入	VSEN -Vm	直流总线电压输出

2.5 通过 GPIO 进行霍尔传感器输入的引脚配置

带传感器 FOC 需要来自 BLDC/PMSM 电机的数字霍尔传感器数据才能在闭环速度控制下运行电机并高效驱动电机。通过通用输入/输出 (GPIO) 输入来馈送三引脚霍尔传感器数据，并且根据 GPIO 电平变化来生成事件。所有三个 GPIO 引脚都连接到同一端口，并且根据三个 GPIO 输入电平变化中的任何一个来触发计时器捕获事件。表 2-9 汇总了两个硬件板 DRV8316 和 TIDA010251 上具有 MSPM0 功能的 GPIO 引脚配置。通常，霍尔信号需要外部上拉电阻来驱动 GPIO 输入。

表 2-9. DRV8316 上霍尔传感器 GPIO 引脚的引脚配置

MSPM0 引脚	MSPM0 功能
GPIO_IN_PA10	GPIO 端口 A 输入触发 TIMG12 捕获事件
GPIO_IN_PA11	GPIO 端口 A 输入触发 TIMG12 捕获事件
GPIO_IN_PA12	GPIO 端口 A 输入触发 TIMG12 捕获事件

备注

默认情况下，MSPM0G3507 LP 上的 PA10 和 PA11 通过 XDS 连接到反向通道 UART 引脚。将 J21 和 J22 上的跳线移至引脚位置 2-3，以便通过 BoosterPack 启用这些引脚上的 GPIO 功能。

表 2-10. TIDA010251 上霍尔传感器 GPIO 引脚的引脚配置

MSPM0 引脚	MSPM0 功能
GPIO_IN_PA1	GPIO 端口 A 输入触发 TIMG12 捕获事件
GPIO_IN_PA2	GPIO 端口 A 输入触发 TIMG12 捕获事件
GPIO_IN_PA3	GPIO 端口 A 输入触发 TIMG12 捕获事件

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+）。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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

有关使能/DRVOFF 功能，请参阅电机驱动器器件特定数据表。

2.8 SPI 通信的引脚配置

串行外设接口 (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 2-11. 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
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。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 2-12. 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 DRV8316 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）。如果电机有中心抽头连接，请将这些导线保持未连接状态。将三个霍尔传感器输入连接到接头 J7。
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 来与带有 DRV8316 的 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。

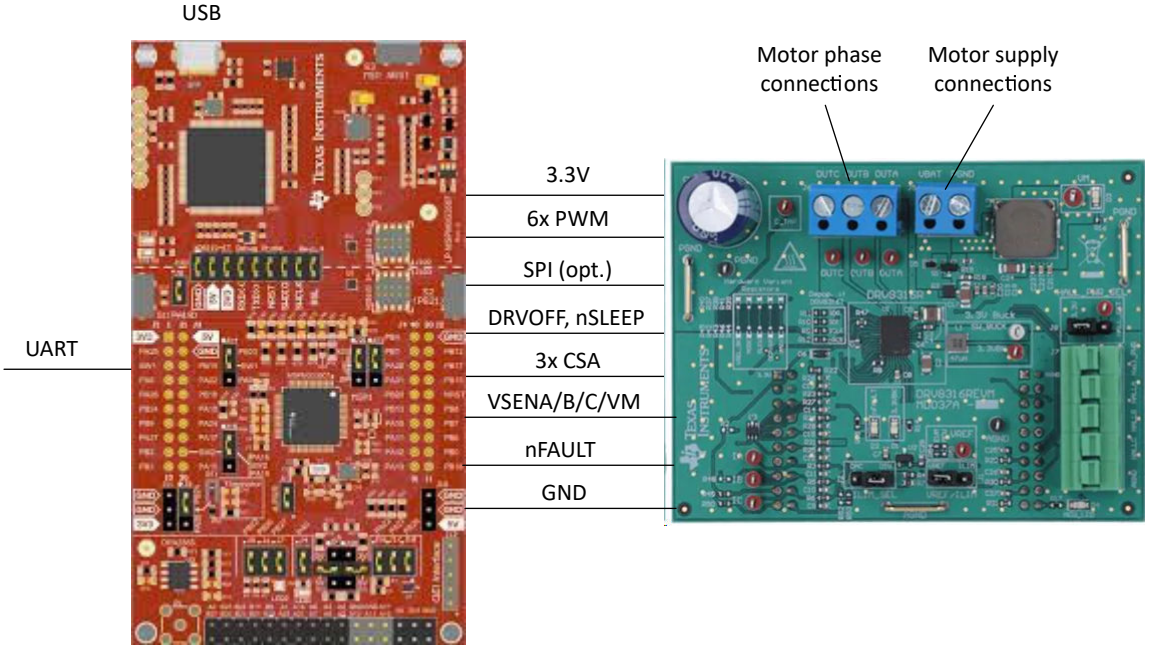


图 2-4. MSPM0 LaunchPad 套件和 DRV8316 EVM 外部配置

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

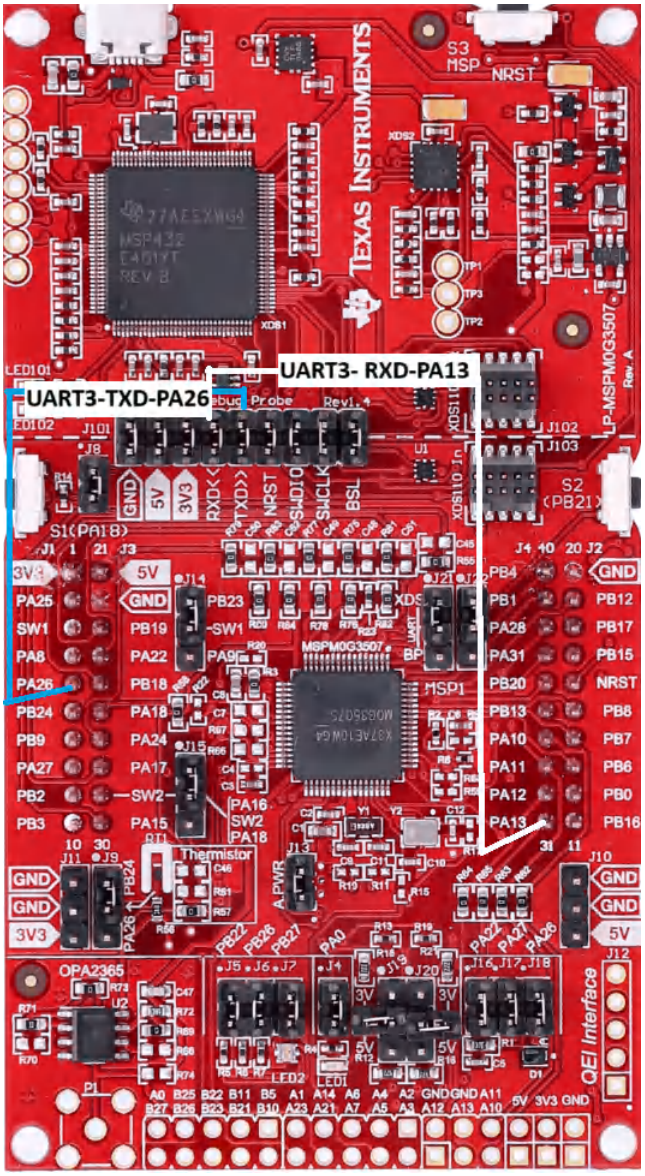


图 2-5. LP-MSPM0G3507 反向通道连接到 UART3

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

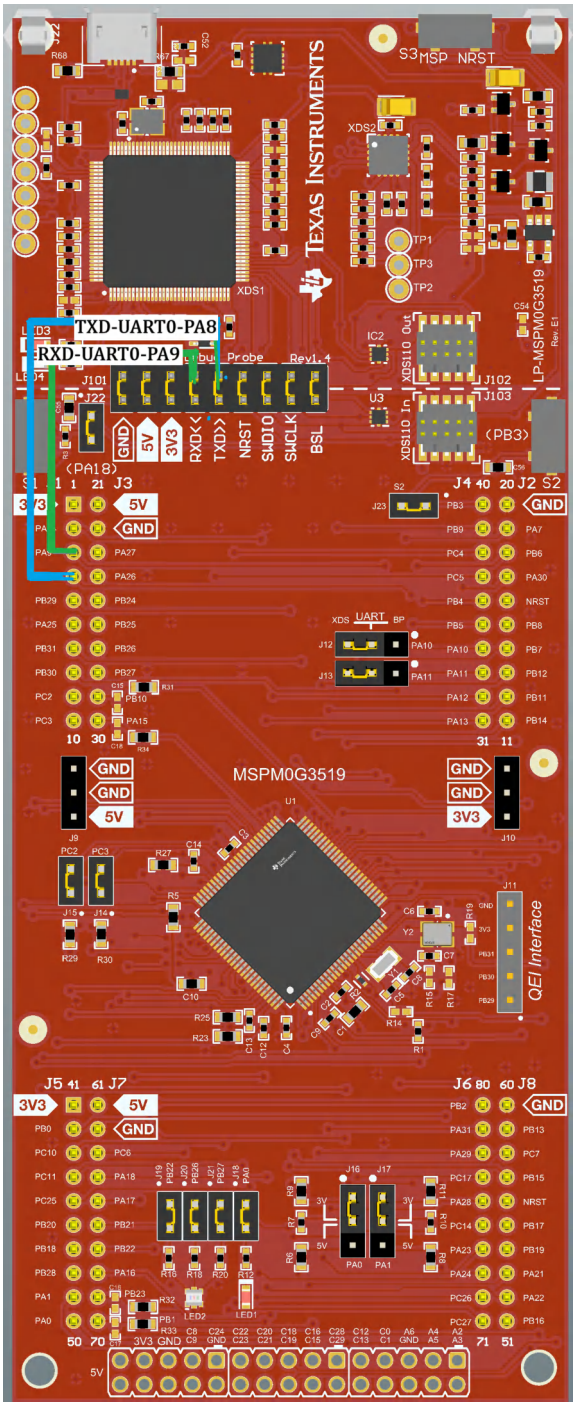


图 2-6. LP-MSPM0G3519 反向通道连接到 UART0

备注

如果使用不同的 UARTn 端口连接串行引脚，请在 CCS 工程的 SYSCONFIG 文件中配置相应的 UART 实例引脚。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3 软件设置

MSPM0-SDK 中提供了 MSPM0 MCU 的带传感器 FOC 软件，并且提供了示例工程以供使用 Code Composer Studio™ IDE 进行评估。

表 3-1 展示了 TI Resource Explorer 中的带传感器 FOC 控制支持的软件和文档。

表 3-1. FOC 控制的软件支持

带传感器 FOC 用户指南(1)	代码示例	GUI
带传感器 FOC 用户指南	带传感器 FOC 示例	MSPM0G 带传感器 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 带传感器 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。

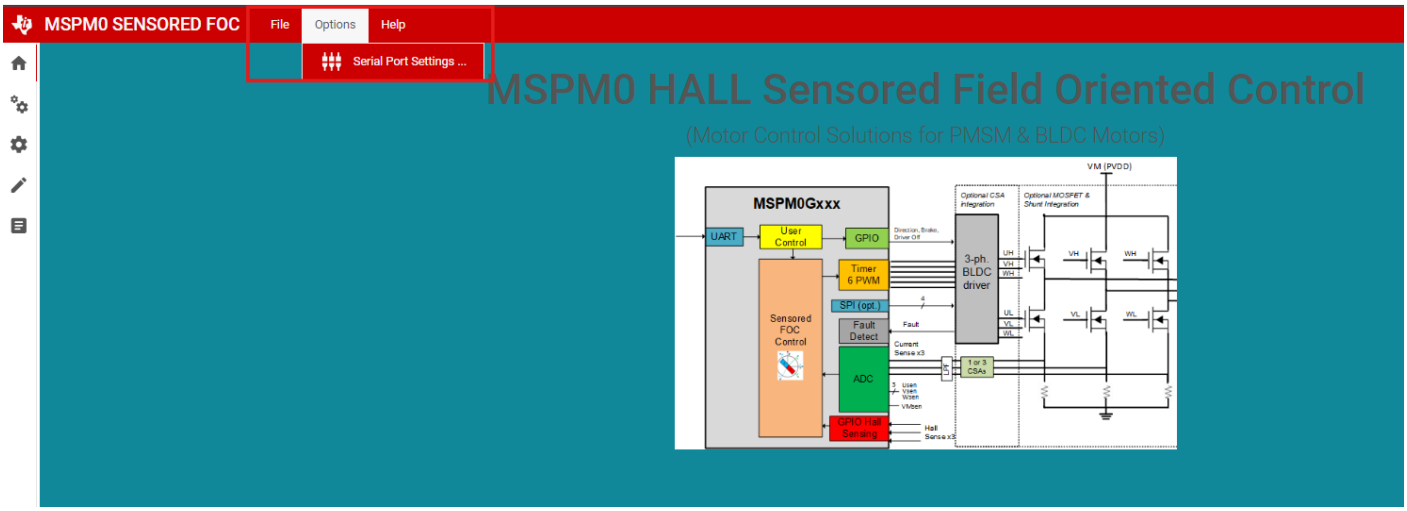
表 4-1. GUI 连接类型

连接	接口	硬件连接
GUI 至目标 MSPM0 MCU	UART	UARTn_TX、UARTn_RX (***n*** : 基于器件的可用 UART 外设)

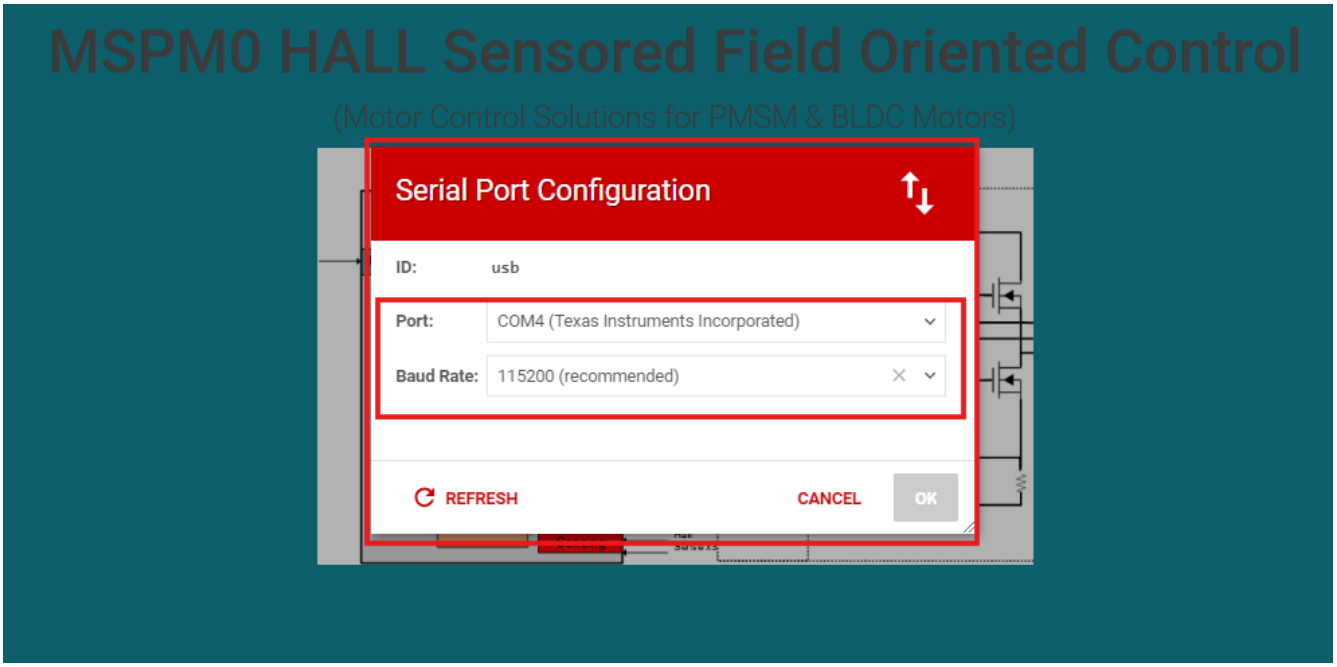
要启动 GUI，请转到 MSPM0 带传感器 FOC GUI 页面。

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。



English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

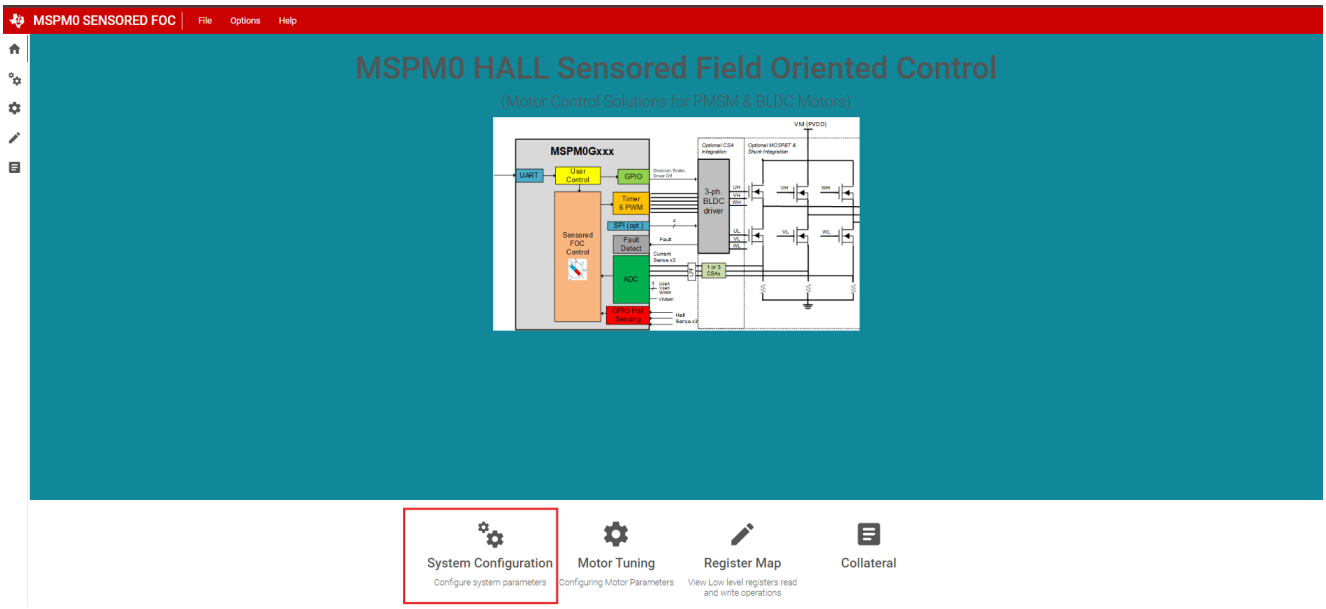


4.2 GUI 主页

用户可从下面的 GUI 主页导航到各种窗口来进行特定配置。

4.2.1 系统配置

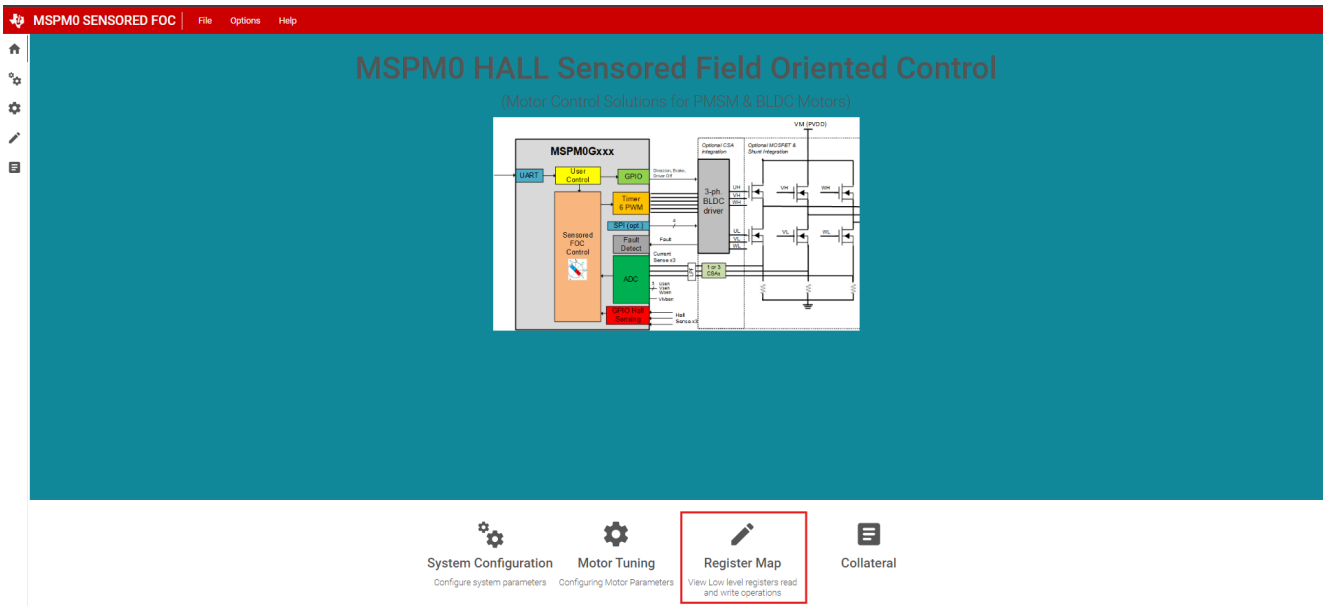
用户可以从系统配置页面设置电机和 EVM 系统参数的基本配置。



Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

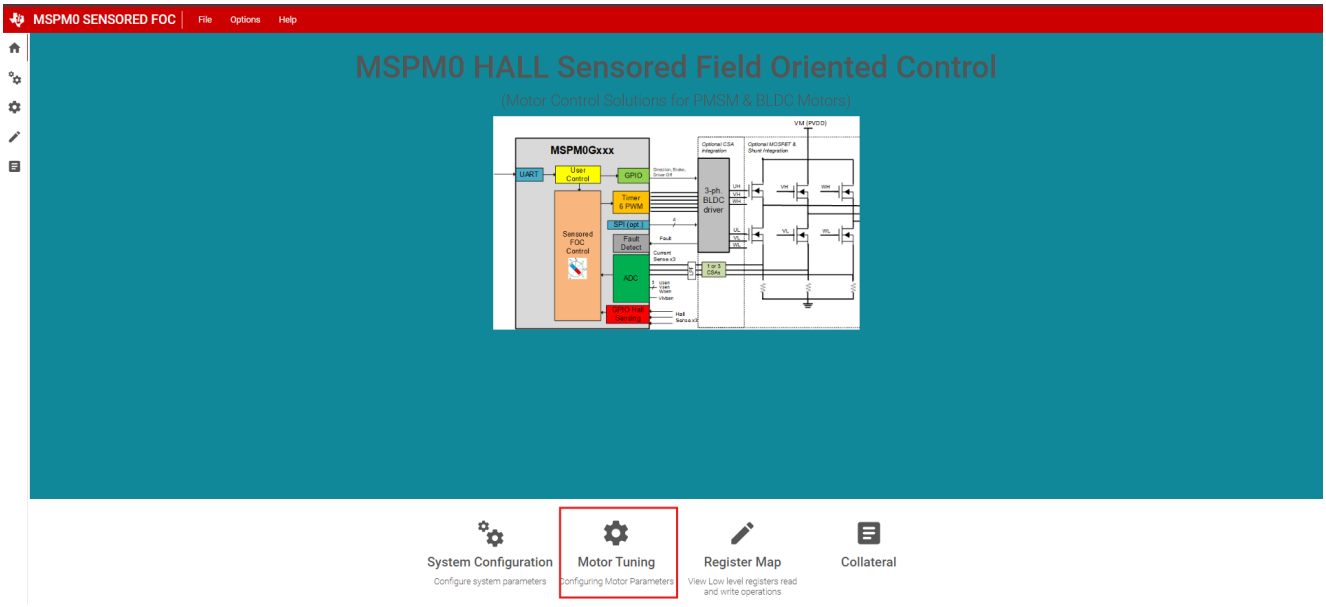
4.2.2 寄存器映射

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可持续监控的状态变量。



4.2.3 电机调优页面

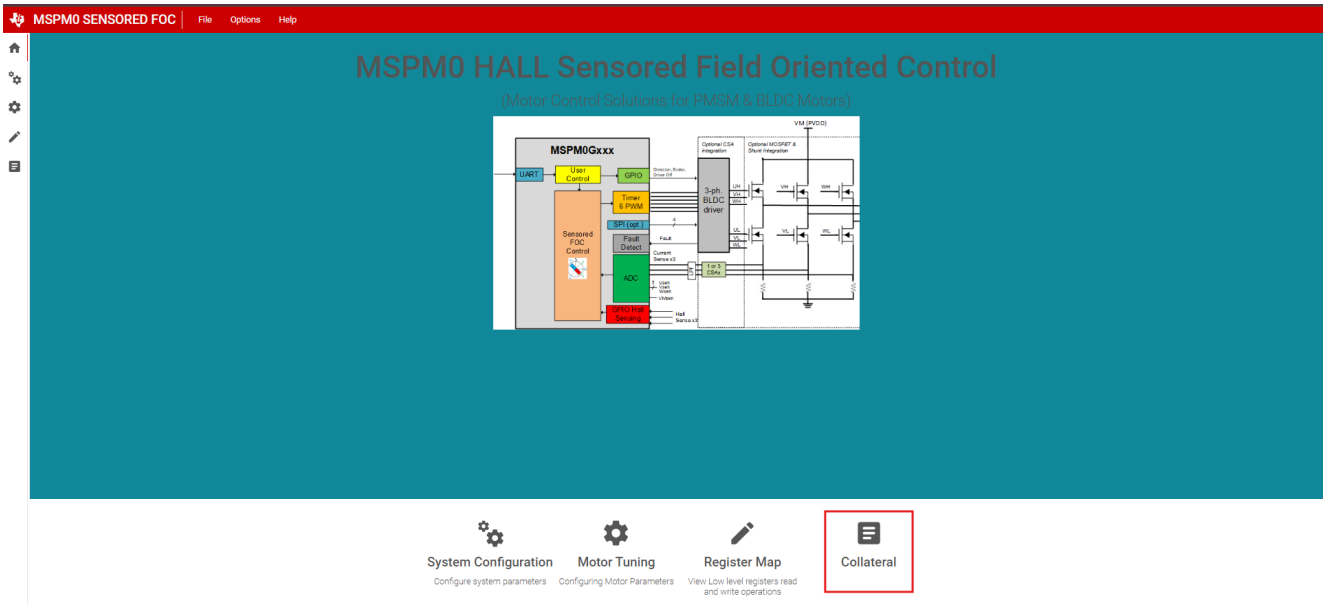
用户可以设置速度命令，并在此窗口中监控电机状态和故障变量。



English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

4.2.4 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。

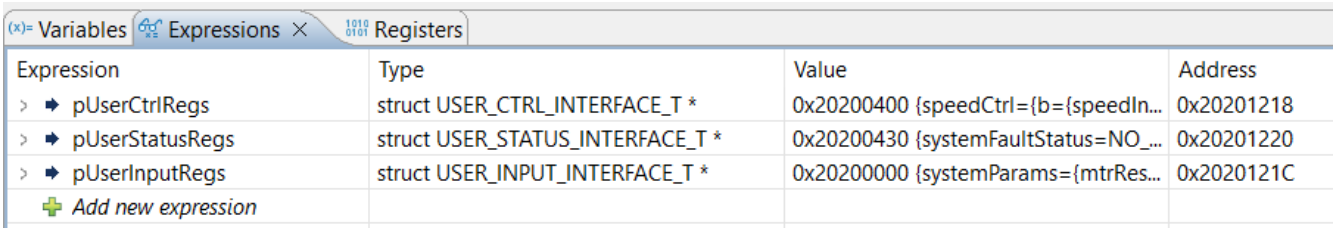


5 寄存器映射

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。

可以通过两种方式执行 FOC 寄存器的实时控制。

1. 在代码调试期间，将结构导入 CCS 的“Expressions”窗口，如下所示。



2. 按照 UART_COMUNICATION_GUIDE 中的说明，通过 UART 读取/写入参数。

备注

通过根据应用需求在“configTables.c”中设置适当的值，可以在源代码中更新表中参数的默认值。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 5-1 详细说明了带传感器 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。

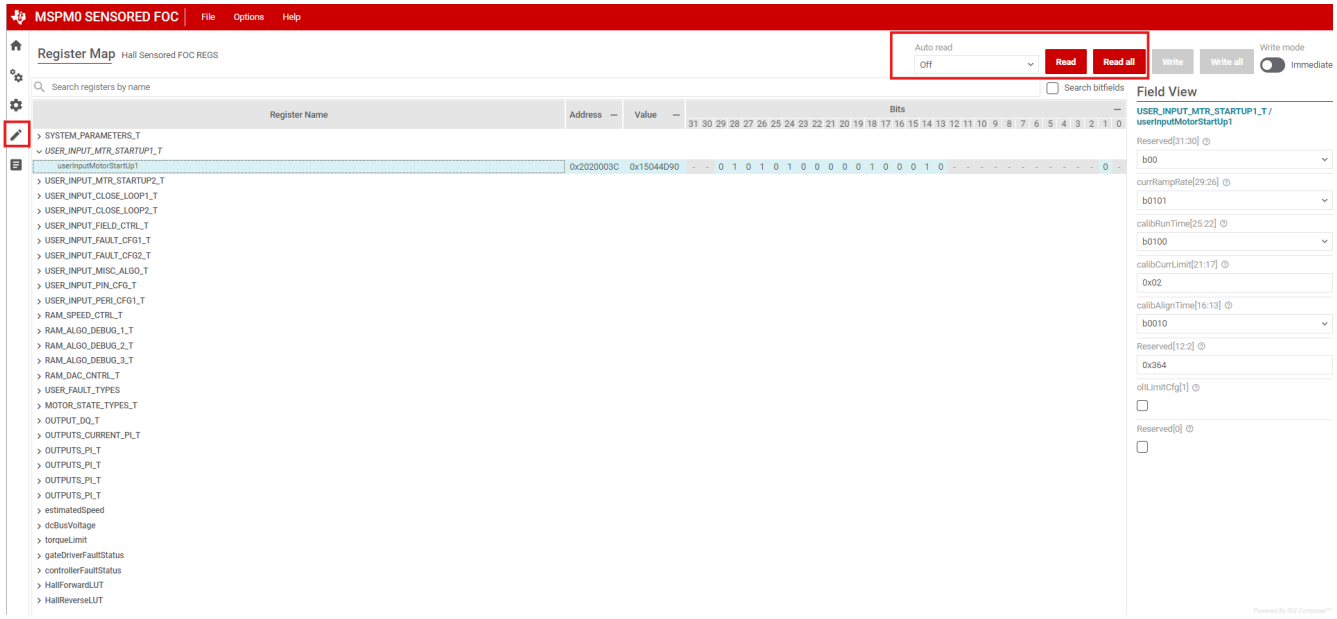


图 5-1. GUI 寄存器映射页面

以下各节说明了寄存器以及与这些结构相关的变量。

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。表 5-1 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

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	表 5-4
8h	ALGO_DEBUG_CTRL2	算法调试控制 2 寄存器	表 5-5
Ch	ALGO_DEBUG_CTRL3	算法调试控制 3 寄存器	表 5-6
10h	DAC_CTRL	DAC 配置和控制寄存器	表 5-7

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 = 00000000h]

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	保留	R	0h	保留
14-0	SPEED_CTRL	W	000000000000000b	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 = 00000000h]

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。
30-0	保留	R	0000000000b	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	RESERVED	R	0h	保留
30	UPDATE_SYS_PARAMETERS	W	1h	每 200mS 动态更新一次系统参数（例如速度/扭矩/磁通的 PI 增益等），以调优至达到所需性能 0b = 动态系统更新已禁用 1b = 动态系统更新已启用
29	HALL_CALIB_ENABLE	W	0b	用于启用自动霍尔校准。校准完成后，此位会自动复位。 0h = 已禁用/完成霍尔校准 1h = 启用霍尔校准
28	UPDATE_CONFIGS	R	0b	当算法更新配置时，该位会复位。用户可以在发出调优命令后设置此位，并等待此位复位，然后再启动速度命令。
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，则禁用电流环路和速度环路 0h = 启用电流环路 1h = 禁用电流环路

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-5. 算法调试控制 2 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
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	当需要控制电机沿 D 轴的磁通时，以 IQ(9) PU 格式设置 Id_ref 正 Id 控制： 如果 FLUX_MODE_REF < 512，则为 (FLUX_MODE_REF/511) 负 Id 控制： 如果 FLUX_MODE_REF > 512，则为 (FLUX_MODE_REF - 512)/511。有效值为 0 至 511 和 512 至 1000

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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，请参阅节 8.4。

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 寄存器之前的左位移位数。 -ve 值指定在将值加载到 12 位 DAC 寄存器之前的右移位数。 DAC 移位用于监控无符号整数值和寄存器
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 位变量的地址。

5.3 用户输入寄存器（基址 = 0x20200000h）

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。

pUserInputRegs	struct USER_INPUT_INTERFACE_T *	0x20200000 {systemParams={mtrRes...	0x2020121C
*(pUserInputRegs)	struct USER_INPUT_INTERFACE_T	{systemParams={mtrResist=590,mtrI...	0x20200000
systemParams	struct SYSTEM_PARAMETERS_T	{mtrResist=590,mtrInductance=550,...	0x20200000
isdCfg	union USER_INPUT_ISDCFG_T	{b={revDrvOpenLoopCurr=10,revDrv...	0x20200034
rvsDrvCfg	union USER_INPUT_RVSDRVCFG_T	{b={activeBrakeKi=400,activeBrakeK...	0x20200038
mtrStartUp1	union USER_INPUT_MTR_STARTUP1_T	{b={iqRampEn=0,olILimitCfg=0,ipdR...	0x2020003C
mtrStartUp2	union USER_INPUT_MTR_STARTUP2_T	{b={thetaErrRampRate=6,FirstCycFre...	0x20200040
closeLoop1	union USER_INPUT_CLOSE_LOOP1_T	{b={speedLoopDis=0,deadTimeCom...	0x20200044
closeLoop2	union USER_INPUT_CLOSE_LOOP2_T	{b={reserved=363664,brkCurrThr=18,...	0x20200048
fieldCtrl	union USER_INPUT_FIELD_CTRL_T	{b={fluxWeakeningEn=0,fluxWeakCu...	0x2020004C
faultCfg1	union USER_INPUT_FAULT_CFG1_T	{b={mtrLckMode=0,lockRetry=3,rese...	0x20200050
faultCfg2	union USER_INPUT_FAULT_CFG2_T	{b={maxVmMode=0,maxVmMtr=0,m...	0x20200054
miscAlgo	union USER_INPUT_MISC_ALGO_T	{b={avsRevDrvOLDec=5,brkCurrPersi...	0x20200058
pinCfg	union USER_INPUT_PIN_CFG_T	{b={brakeInp=2,brakePinMode=0,res...	0x2020005C
periphCfg1	union USER_INPUT_PERI_CFG1_T	{b={dirChangeMode=0,dirInput=1,b...	0x20200060

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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	MOTOR_STARTUP1	电机启动 1 配置	节 5.3.1
40h	MOTOR_STARTUP2	电机启动 2 配置	节 5.3.3
44h	CLOSELOOP1	关闭 Loop1 配置	节 5.3.4
48h	CLOSELOOP2	关闭 Loop2 配置	节 5.3.5
4Ch	FLIED_CTRL	磁通控制配置	节 5.3.6
50h	FAULT_CONFIG1	故障配置 1	节 5.3.7
54h	FAULT_CONFIG2	故障配置 2	节 5.3.8
58h	MISC_ALGO_CONFIG	其他算法配置	节 5.3.9
5Ch	PIN_CONFIGURATION	引脚配置	节 5.3.10
60h	PERI_CONFIG	外设配置	节 5.3.11

表 5-9 显示，复杂的位访问类型经过编码可适应小型表单元。

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）

这些表显示了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）	该电路板的基极电压基于分压器计算得出（3.3V × 分压比 / √3），单位为伏特。3.3V 是 ADC 的满量程值。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 增益计算得出的（1.65V/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基准中点电压。 如果 CSA 增益以 V/V 为单位，则将乘以电流检测电阻值（以欧姆为单位）来计算 CSA 增益（以伏/安为单位）

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）	电机的最大额定功率。 **备注** FOC 算法计算 PU 功率，该功率用于控制闭环中的输入功率。 **备注** PU 功率定义为 MOTOR_MAX_POWER/ √3 * VOLTAGE_BASE * CURRENT_BASE

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/闭环功率控制的比例增益

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/闭环功率控制的积分增益

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_KP	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_KI	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. 电机极对数（偏移 = 38h）

位	字段	类型	复位	说明
31-0	POLE_PAIRS	R/W	0(Int)	总电机极对数或极数/2。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

5.3.2 MOTOR_STARTUP1 寄存器（偏移 = 3Ch）[复位 = 00000000h]

表 5-25 展示了用于配置电机启动设置 1 的寄存器。

表 5-25. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-30	RESERVED	R	00b	保留
29-26	CURR_RAMP_RATE	R/W	0h	霍尔校准期间的初始电流斜升速率，直至达到最大电流。 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	CALIB_RUN_TIME	R/W	0h	针对每个 CALIBRATION_ANGLE_STEP（在 hallCalib.h 中定义）校准霍尔时花费的时间 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

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-25. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
21-17	CALIB_CURRENT_ILIMIT	R/W	00h	霍尔校准期间的电流限制，以 CURRENT_BASE 的百分比表示 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%
16-13	CALIB_ALIGN_TIME	R	000b	开始霍尔校准之前，转子初始对齐到零度所花的时间。 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 Dh = 5s Eh = 7.5s Fh = 10s
12-2	RESERVED	R	0h	保留
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

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-25. MOTOR_STARTUP1 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
0	RESERVED	R	0b	保留

5.3.3 MOTOR_STARTUP2 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 2 的寄存器。

表 5-26. 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%

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-26. 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/s2 1h = 0.05Hz/s2 2h = 1Hz/s2 3h = 2.5Hz/s2 4h = 5Hz/s2 5h = 10Hz/s2 6h = 25Hz/s2 7h = 50Hz/s2 8h = 75Hz/s2 9h = 100Hz/s2 Ah = 250Hz/s2 Bh = 500Hz/s2 Ch = 750Hz/s2 Dh = 1000Hz/s2 Eh = 5000Hz/s2 Fh = 10000Hz/s2
18	RESERVED	R/W	0h	保留

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-26. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
17-13	OL_MAX_SPEED	R/W	0h	在强制换向期间，第一个电气周期的最大工作电气频率（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%
12-8	保留	R	0h	保留
7-4	OL_FIRST_CYC_FREQ	R/W	0h	开环中第一个周期的频率（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%

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-26. MOTOR_STARTUP2 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
3	FIRST_CYCLE_FREQ_SEL	R/W	0h	开环中第一个周期的频率 0h = 由 OL_FIRST_CYC_FREQ 定义 1h = 0Hz
2-0	RESERVED	R	0h	保留

5.3.4 CLOSED_LOOP1 寄存器（偏移 = 44h）[复位 = 00000000h]

表 5-27 展示了用于配置闭环设置 1 的寄存器。

表 5-27. 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）
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%

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-27. CLOSED_LOOP1 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
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	过调制启用 0h = 禁用过调制 1h = 启用过调制
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

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-27. 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

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-27. 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	DEADTIME_COMP_EN	R/W	0b	死区时间补偿启用 0h = 禁用 1h = 启用
1	RESERVED	R/W	0b	保留

5.3.5 CLOSED_LOOP2 寄存器（偏移 = 48h）[复位 = 00000000h]

表 5-28 展示了用于配置闭环设置 2 的寄存器。

表 5-28. 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%

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-28. 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	电压控制模式下应用的超前角（以度为单位） 0 - 15 = 1 * 位值 15 - 31 = 2 * (位值 - 15) + 15
13 - 0	RESERVED	R	0h	保留

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

用于配置磁通控制设置的寄存器

表 5-29. 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%

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-29. FIELD_CTRL 寄存器位说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
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

5.3.7 FAULT_CONFIG1 寄存器（偏移 = 50h）[复位 = 00000000h]

用于配置故障设置 1 的寄存器

表 5-30. FAULT_CONFIG1 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-6	保留	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
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 = 在 LCK_RETRY 时间后自动清除故障 2h = 电机锁定处于仅报告模式 3h = 禁用电机锁定检测

5.3.8 FAULT_CONFIG2 寄存器（偏移 = 54h）[复位 = 00000000h]

表 5-31 展示了用于配置故障设置 2 的寄存器。

表 5-31. 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	ABN_SPEED_LOCK_EN	R/W	0b	锁定 1：异常速度锁定 0h = 禁用 1h = 启用

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-31. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
25	HALL_INVALID_LOCK_EN	R/W	0b	锁定 2：无效霍尔输入锁定 0h = 禁用 1h = 启用
24	NO_MOTOR_LOCK_EN	R/W	0b	锁定 3：无电机锁定启用 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	RESERVED	R	0b	保留
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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-31. FAULT_CONFIG2 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
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
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

5.3.9 MISC_ALGO 寄存器（偏移 = 58h）[复位 = 00000000h]

表 5-32 展示了用于多种杂项算法配置的寄存器。

表 5-32. MISC_ALGO 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-10	RESERVED	R/W	0h	保留
9-6	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
5-2	RESERVED	R	0b	保留

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-32. MISC_ALGO 寄存器字段说明（续）

位	字段	类型	复位	说明
1-0	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

5.3.10 PIN_CONFIG 寄存器（偏移 = 5Ch）[复位 = 00000000h]

表 5-33 展示了用于配置硬件引脚的寄存器。

表 5-33. PIN_CONFIG 寄存器字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-20	保留	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	保留	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

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

表 5-34 展示了外设的寄存器。

表 5-34. 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

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-34. PERI_CONFIG1 寄存器字段说明（续）

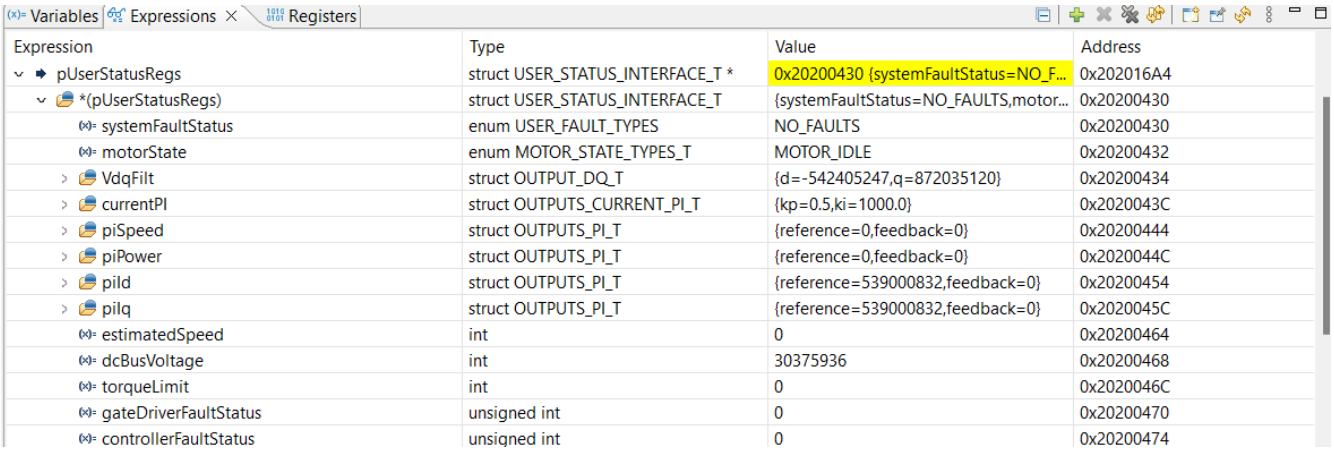
位	字段	类型	复位	说明
8-4	BUS_CURRENT_LIMIT	R/W	00000b	总线电流限值（占 CURRENT_BASE 的百分比） 0h = 7.5% 1h = 8.0% 2h = 8.5% 3h = 9.0% 4h = 9.5% 5h = 10% 6h = 11% 7h = 12% 8h = 13% 9h = 14% Ah = 15% Bh = 16% Ch = 17% Dh = 18% Eh = 20% Fh = 22.5% 10h = 25% 11h = 27.5% 12h = 30% 13h = 35% 14h = 40% 15h = 45% 16h = 50% 17h = 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	总线电流限制启用 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

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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。

下面是可使用结构指针 *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
pilq	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

下表列出了可用于监控的变量的定义。

表 5-35. 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 - 霍尔传感器无效、无电机、异常速度 **VOLTAGE_OUT_OF_BOUNDS**：指示欠压或过压。 **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_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
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。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 5-35. 用户状态寄存器（续）

变量	类型	复位值	说明
PI_POWER	IQ GLOBAL 27	IQ27(0)	指示由 FOC 算法以 PU 格式设置的 PI 控制器的电源基准值和电源反馈值。 **备注** FOC 算法计算 PU 功率，该功率用于控制闭环中的输入功率。 **备注** PU 功率定义为 MOTOR_MAX_POWER/ √3 * VOLTAGE_BASE * CURRENT_BASE
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。
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限制。此值基于 ClosedLoop1 配置中设置的限值。
GATE_DRIVER_FAULT_STATUS	无符号整型	0x00000000h	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	0x00000000h	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	0x00000000h	定义应用固件的版本号

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**定义为闭环场定向控制，其中电机以指定的速度/扭矩/功率/电压基准旋转。

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参数，用于在闭环控制模式下启动电机旋转。

以下是为实现全功能带传感器 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。

备注

电机电阻、电机电感用于电流环路 Kp 和 Ki 值的初始估算。如果手动调整了电流环路 Kp 和 Ki，则忽略配置这些参数。

备注

电机的电机电感、凸极和电机 BEMF 常数对于 MTPA 算法的运行至关重要。如果使用了凸极电机（内部 PMSM）并启用了 MTPA，则必须配置这些参数。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

pUserInputRegs	struct USER_INPUT_INTERFACE_T *	0x20200000 {systemParams={mtrR...	0x20201394
*(pUserInputRegs)	struct USER_INPUT_INTERFACE_T	{systemParams={mtrResist=590,mt...	0x20200000
systemParams	struct SYSTEM_PARAMETERS_T	{mtrResist=590,mtrInductance=55...	0x20200000
mtrResist	unsigned int	590	0x20200000
mtrInductance	unsigned int	550	0x20200004
mtrSaliency	float	1.35547825e-19	0x20200008
mtrBemfConst	unsigned int	290	0x2020000C
voltageBase	float	25.7440491	0x20200010
currentBase	float	11.0	0x20200014
maxMotorSpeed	float	200.0	0x20200018
maxMotorPower	unsigned int	15	0x2020001C
speedLoopKp	float	0.0538999997	0x20200020
speedLoopKi	float	0.0359999985	0x20200024
currLoopKp	float	0.00999999978	0x20200028
currLoopKi	float	10.0	0x2020002C
fluxWeakeningKi	float	500.0	0x20200030
fluxWeakeningKp	float	1.0	0x20200034
polePairs	unsigned int	4	0x20200038

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。

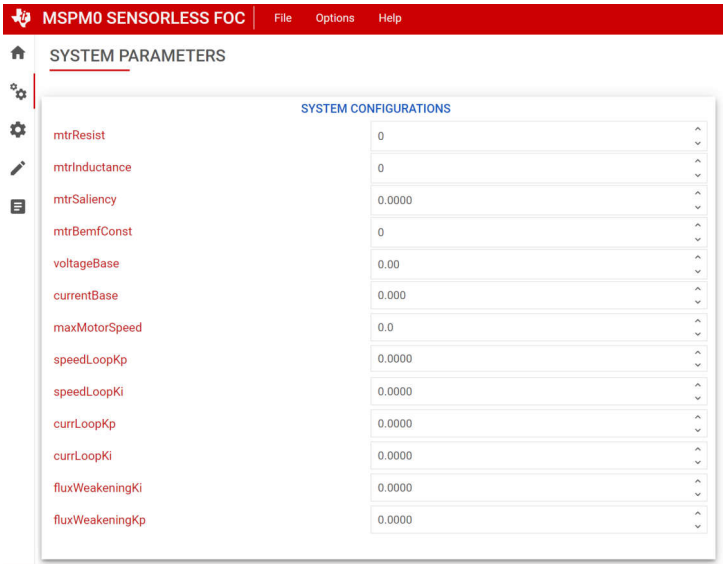


图 6-1. GUI 系统参数配置

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6.1.2 通过 CCS 调试窗口更新系统参数

或者，用户可以从“CCS Debug”窗口更新系统参数，如图 6-2 所示。

pUserInputRegs	struct USER_INPUT_INTERFACE_T *	0x20200000 {systemParams={mtrR...	0x20201394
*(pUserInputRegs)	struct USER_INPUT_INTERFACE_T	{systemParams={mtrResist=590,mt...	0x20200000
systemParams	struct SYSTEM_PARAMETERS_T	{mtrResist=590,mtrInductance=55...	0x20200000
mtrResist	unsigned int	590	0x20200000
mtrInductance	unsigned int	550	0x20200004
mtrSaliency	float	1.35547825e-19	0x20200008
mtrBemfConst	unsigned int	290	0x2020000C
voltageBase	float	25.7440491	0x20200010
currentBase	float	11.0	0x20200014
maxMotorSpeed	float	200.0	0x20200018
maxMotorPower	unsigned int	15	0x2020001C
speedLoopKp	float	0.0538999997	0x20200020
speedLoopKi	float	0.0359999985	0x20200024
currLoopKp	float	0.00999999978	0x20200028
currLoopKi	float	10.0	0x2020002C
fluxWeakeningKi	float	500.0	0x20200030
fluxWeakeningKp	float	1.0	0x20200034
polePairs	unsigned int	4	0x20200038

图 6-2. CCS 调试窗口

6.1.2.1 以毫欧 (mΩ) 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 (mΩ) 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。

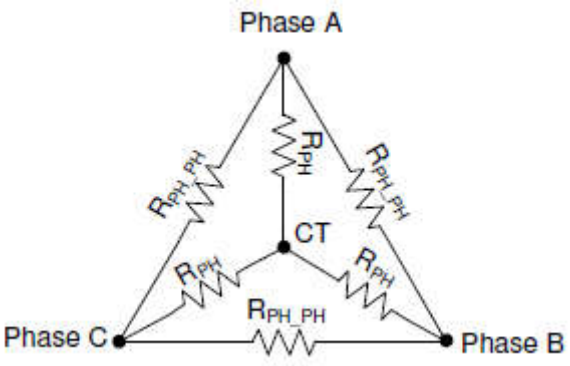


图 6-3. 电阻测量

6.1.2.2 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），请测量所有三个相间电感，并计算其平均值，然后使用此值作为相间电感。此测量对星形绕组和三角形绕组电机均适用。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

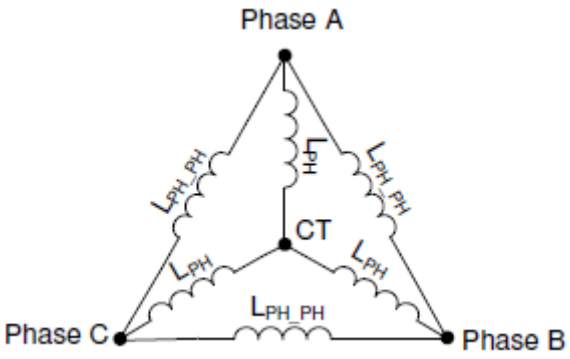


图 6-4. 电感测量

6.1.2.3 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 (Lq – Ld)/(Ld + Lq) 以浮点数变量的形式给出此值。

推断 Ld 和 Lq 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 Lq，最小测量电感值可标记为 Ld。

6.1.2.4 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 Ke，并在 **System Configuration** 页面上将 *mtrBEMFConst* 编程为 Ke × 10。

可以使用方程式 4 和方程式 5 将 Ke（以 mV/rpm、mV*sec/rad 为单位）和扭矩常数 Kt 转换为 Ke（以 mV/Hz 为单位）。

$$\text{BEMF Constant in } \left(\frac{\text{mV}}{\text{Hz}}\right) = \frac{\text{Ke}\left[\frac{\text{mV}}{\text{RPM}}\right] \times 60}{\#\ \text{pole pairs}} \tag{4}$$

$$\text{BEMF Constant in } \left(\frac{\text{mV}}{\text{Hz}}\right) = \frac{\text{Kt}\left[\frac{\text{mN} \times \text{m}}{\text{A}}\right] \times 2\pi}{\#\ \text{pole pairs}} \tag{5}$$

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 Ep（以毫伏为单位）和时间段 Tp（以秒为单位）。计算 BEMF 常数 Ke，如方程式 6 所示。

$$\text{BEMf Constant Ke} = \text{EP} \times \text{TP}/\sqrt{3} \tag{6}$$

6.1.2.5 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 R1 和 R2 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。

$$\text{Base}_{\text{Voltage}} = \frac{\text{ADC Full Scale Value}}{\text{Voltage Divider Scaling Ratio}} = \frac{3.3\text{V}}{\frac{\text{R1}}{\text{R1} + \text{R2}}} \tag{7}$$

例如，在从直流电源电压到 ADC 输入的电阻分压器调节率为 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**。有关分压器调节率的硬件配置，请参阅节 2.3。

6.1.2.6 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) 和

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

3.3V 的满量程 ADC 电压 (FSV) 来计算系统基极电流，如方程式 8 中所示。在以 1.65V 作为零电流偏移的情况下，考虑使用因数 2 来支持双向电流检测。

$$\text{Base}_{\text{Current}} = \frac{\text{3.3V Full Scale Value}}{2 \times \text{CSA_GAIN}\left[\frac{\text{V}}{\text{A}}\right]} = \frac{\text{3.3V}}{2 \times \text{CSA_GAIN}\left[\frac{\text{V}}{\text{A}}\right]} \quad (8)$$

例如，在 CSAGAIN = 0.15V/A 的系统中，基极电流或 ADC 的最大可测量系统电流为 3.3V / (2 × 0.15V/A) = **11A**。

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，请参阅驱动器数据表。

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）。

$$\text{CSA_GAIn}\left[\frac{\text{V}}{\text{A}}\right] = \text{R}_{\text{SENSE}} \times \text{CSA_GAIN}\left[\frac{\text{V}}{\text{V}}\right] \quad (9)$$

6.1.2.7 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。

$$\text{f}_{\text{Electrical}} = \frac{\text{nPolePairs} \times \omega\text{Mechanical}}{60} \quad (10)$$

其中：

- $\omega_{\text{Mechanical}}$ 是机械转速，单位为转/分钟 (RPM)
- $\text{f}_{\text{Electrical}}$ 是频率，单位为赫兹 (Hz)
- $\text{n}_{\text{PolePairs}}$ 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。

6.1.2.8 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“Expressions”窗口中配置系统参数后，用户可以更新其余输入参数，以便调整电机来开始在闭环中旋转。以下是在闭环中开始使电机旋转所需的一些重要配置。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6.2.1 霍尔传感器自动校准

在基于霍尔传感器的 FOC 中，霍尔信号用于检测转子位置信息并高效驱动电机。FOC 应用需要三个数字霍尔输入，这些输入以电气方式相隔 60 度，并连接到 GPIO，作为馈送转子位置信息的输入。

对于给定的霍尔序列，用户需要参考 ISR.c 文件中的相位连接以 IQ27 P.U 格式适当地填入霍尔角度表，如图 6-5 所示。

```
const uint32_t forwardHallIndexLUT[MAX_HALL_INDEX] = {_IQ(0), _IQ(0.91667) , _IQ(0.25),
                                                      _IQ(0.0833) , _IQ(0.5833) , _IQ(0.75),
                                                      _IQ(0.41667)};

const uint32_t reverseHallIndexLUT[MAX_HALL_INDEX] = {_IQ(0), _IQ(0.0833) , _IQ(0.41667),
                                                      _IQ(0.25) , _IQ(0.75) , _IQ(0.91667),
                                                      _IQ(0.5833)};
```

图 6-5. 霍尔角度表值

通常，霍尔传感器的放置位置可能存在误差，电气位移可能小于或大于 60 度。霍尔位置中的任何误差都会导致产生扭矩纹波和非正弦电流。霍尔引脚序列对于电机相位连接也很重要，给定相位的驱动角取决于连接顺序。此信息通常可以在数据表中找到。

通过霍尔校准，用户不再需要参考数据表，并纠正了霍尔传感器的安装误差，从而改善了具有安装误差的电机中的电流波形。

上述霍尔角度表值可通过霍尔校准例程自动生成，如下所述：

校准例程：

- **Motor_Align**：校准序列的第一步是将电机对齐到已知的转子角度。在此例程中，电机在用户输入电机启动 1 参数中设置的持续时间 *calibAlignTime* 内对齐到 *CALIBRATION_ALIGN_ANGLE* 宏。要配置足够的 *calibAlignTime*，以便在启动校准之前使电机对齐并停止移动。
- **Motor_Calib_Run**：成功完成对齐步骤后，转子会以 *CALIBRATION_ANGLE_STEP* 宏中指定的角度进行微步进，并持续 *calibRunTime*（在用户输入电机启动 1 参数中设置）。电机在正向和反向旋转一个完整的机械周期（Pole_Pairs * 电气周期），以便计算平均霍尔角。
- **Motor_Calib_Complete**：成功完成电机校准后，霍尔角度表中会生成前进和后退方向上每个霍尔状态转换的转子角度，分别为 *hallAngleTableForward* 和 *hallAngleTableReverse*。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

以下是自动霍尔传感器校准应遵循的顺序：

1. 配置和调整以下输入参数。
   - 在系统参数中配置电流环路 Kp 和 Ki 参数。
   - 按以下方式配置电机启动 1 参数，以便调整电机对齐和电机校准运行状态

pUserInputRegs->mtrStartUp1.b.CalibCurrLimit	unsigned int : 5	10
pUserInputRegs->mtrStartUp1.b.calibAlignTime	unsigned int : 4	6
pUserInputRegs->mtrStartUp1.b.CalibRunTime	unsigned int : 4	0
pUserInputRegs->mtrStartUp1.b.CurrRampRate	unsigned int : 4	2

图 6-6. 霍尔校准配置

     - *CalibCurrLimit*：校准期间强制 Id 电流
     - *calibAlignTime*：首次对齐时对 CALIBRATION_ALIGN_ANGLE 应用的时间（以毫秒为单位）。
     - *calibRunTime*：在微步进并以 HALL_CALIBRATION_STEP 步长扫描机械周期时应用的时间（以毫秒为单位）。
     - *CurrRampRate*：第一次对齐到 CALIBRATION_ALIGN_ANGLE 期间 Id 电流的斜升速率。
2. 设置算法调试控制 2 寄存器中的霍尔传感器校准使能位，并将电机转速设置为非零值。

pUserCtrlRegs->speedCtrl.b.speedInput	unsigned int : 15	10000	0x20200400 bit 0-14
pUserCtrlRegs->algoDebugCtrl2.b.hallCalibEnable	unsigned int : 1	1	0x20200408 bit 29
g_pMC_App->foc.hallCalibObj.calibState	enum HALL_CALIBRATION_STATE_e	HAL_CALIB_RUN_FORWARD	0x20200A18

图 6-7. 霍尔校准使能

3. 校准序列完成后，CalibState 更改为 HALL_CALIB_COMPLETE。

pUserCtrlRegs->speedCtrl.b.speedInput	unsigned int : 15	0	0x20200400 bit 0-14
pUserCtrlRegs->algoDebugCtrl2.b.hallCalibEnable	unsigned int : 1	0	0x20200408 bit 29
g_pMC_App->foc.hallCalibObj.calibState	enum HALL_CALIBRATION_STATE_e	HAL_CALIB_COMPLETE	0x20200A18

电机控制应用变量中的霍尔角度表按如下方式进行更新。角度表默认为 Q27 格式。_IQ27(1.0) 对应于 360 度电气周期。

图 6-8. 霍尔校准完成

g_pMC_App->hallAngleTableForward	int[7]	[0,31014708,78922849,57531958,1262...	0x20200B4C
[0]	int	0.0 (Q-Value(27))	0x20200B4C
[1]	int	0.2310775816 (Q-Value(27))	0x20200B50
[2]	int	0.5880210474 (Q-Value(27))	0x20200B54
[3]	int	0.42864649 (Q-Value(27))	0x20200B58
[4]	int	0.9404506385 (Q-Value(27))	0x20200B5C
[5]	int	0.08315858245 (Q-Value(27))	0x20200B60
[6]	int	0.7286456674 (Q-Value(27))	0x20200B64
g_pMC_App->hallAngleTableReverse	int[7]	[0,56017413,100197294,78386973,108...	0x20200B68
[0]	int	0	0x20200B68
[1]	int	0.4173622504 (Q-Value(27))	0x20200B6C
[2]	int	0.7465280145 (Q-Value(27))	0x20200B70
[3]	int	0.5840284601 (Q-Value(27))	0x20200B74
[4]	int	0.08055487275 (Q-Value(27))	0x20200B78
[5]	int	0.2513877377 (Q-Value(27))	0x20200B7C
[6]	int	0.9201386496 (Q-Value(27))	0x20200B80

图 6-9. 生成霍尔角度表

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

4. 执行了令人满意的校准例程，以使电机在闭环运行时平滑旋转之后，用户可以将这些校准后的角度值存储在 ISR.c 中定义的 *forwardHallIndexLUT* 和 *reverseHallIndexLUT* 中。MCU 重新启动后，默认情况下会使用这些 LUT 中的值来使电机旋转。

```
97 const uint32_t forwardHallIndexLUT[MAX_HALL_INDEX] = {_IQ(0), _IQ(0.23107) , _IQ(0.58802),
98                                                      _IQ(0.42864) , _IQ(0.94045) , _IQ(0.08315),
99                                                      _IQ(0.72864)};
100
101 const uint32_t reverseHallIndexLUT[MAX_HALL_INDEX] = {_IQ(0), _IQ(0.41736) , _IQ(0.74652),
102                                                      _IQ(0.58402) , _IQ(0.08055) , _IQ(0.251387),
103                                                      _IQ(0.92013)};
```

图 6-10. 更新霍尔角度表

6.2.1.1 通过 GUI 进行霍尔传感器校准

也可以在 GUI 控制页面中使用以下小工具执行霍尔传感器校准例程，其中的参数调优如上一节中所述。

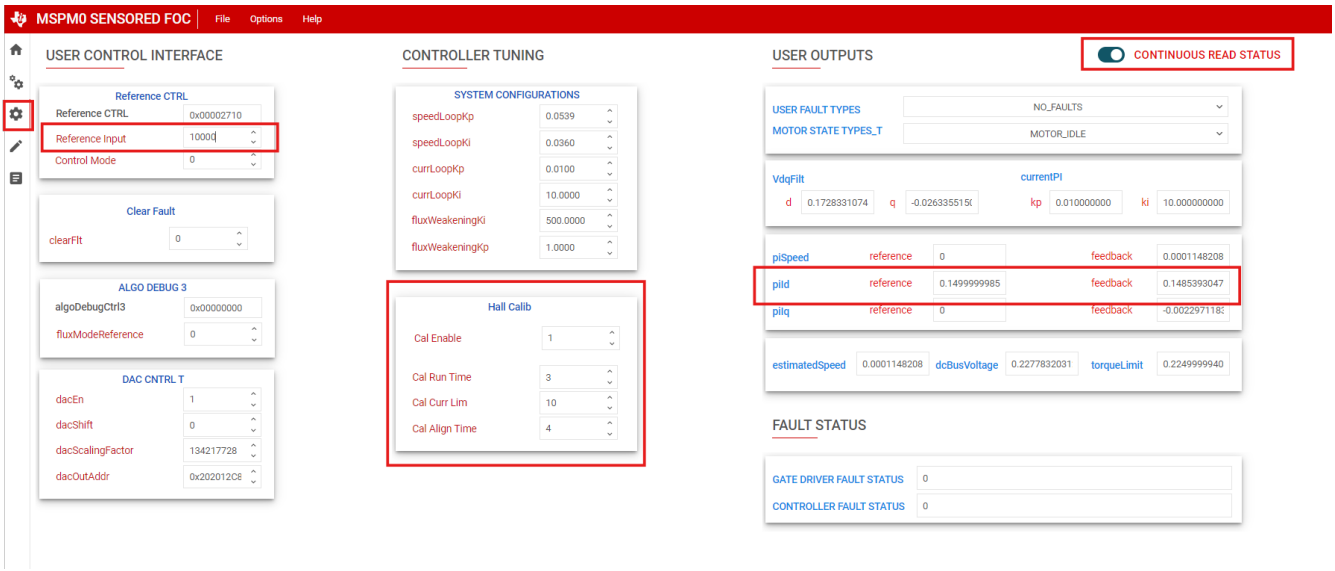


图 6-11. 从 GUI 进行霍尔传感器校准

如上一节所述，将霍尔校准使能位设置为 1，配置霍尔校准参数，将电机转速设置为非零值，开始霍尔校准。用户可以启用连续读取状态按钮来监控 Id 电流基准和反馈跟踪以及更新后的霍尔角度表值。

如果 Id 电流反馈有很大变化，请调整电流环路 Kp、Ki 并增加校准运行时间。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

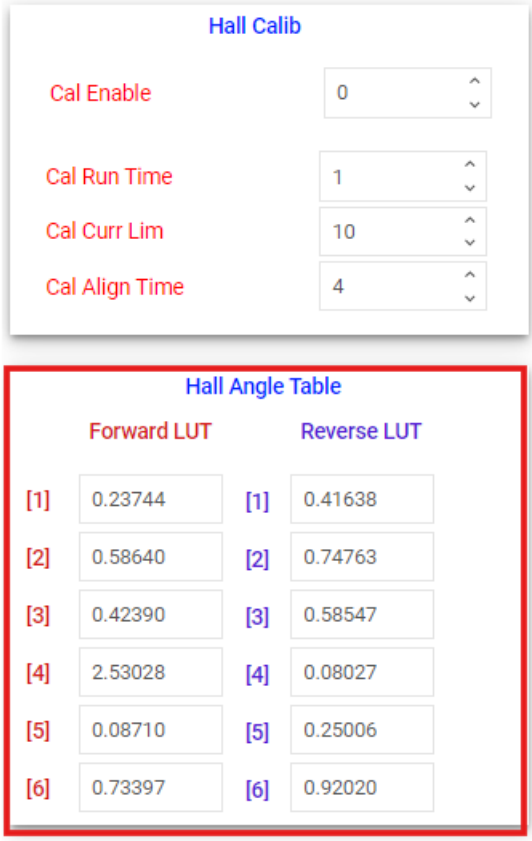


图 6-12. HalAngleTable

以 IQ27 P.U 格式（_IQ(1.0) P.U 对应于 30 度）在正向和反向霍尔角度表中填入校准后的霍尔角度表。执行了令人满意的校准例程（即电机在闭环运行时平滑旋转）后，用户可以将这些校准后的角度值存储在 ISR.c 中定义的 *forwardHallIndexLUT 和 reverseHallIndexLUT* 中。MCU 重新启动后，默认情况下会使用这些 LUT 中的值来使电机旋转。

6.2.2 电机开环斜坡

在基于霍尔传感器的 FOC 应用中，速度由霍尔信号时序的变化速率决定，在启动的前几个换向周期，电机的速度会发生变化，速度读数以 60 度的间隔更新，并且由于电机继续加速，因此不用于角度插值。因此，对于第一个电气周期，根据由开环参数确定的开环曲线，电机斜升且角度递增。具有速度反馈的速度环路在第一个电气周期完成后启用，并根据霍尔传感器的速度生成角度。

在开环启动期间，FOC 算法用二阶开环斜坡曲线使电机加速以提高速度，并根据开环曲线速度来计算角度。在每个霍尔事件发生时，角度会根据从霍尔信号导出的扇区的程序设定角度进行重置。

默认情况下，开环斜升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。USR 可以使用 MotorStartup2 参数调整二阶开环参数。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6.2.3 针对闭环速度控制的 PI 控制器调优

6.2.3.1 电流控制器调优

FOC 算法使用两个电流 PI 控制器，每个控制器用于 Id 和 Iq，分别控制磁通和扭矩。两个 PI 控制器的 Kp 和 Ki 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。这些值可以进一步更新，以便微调性能和控制系统的动态。

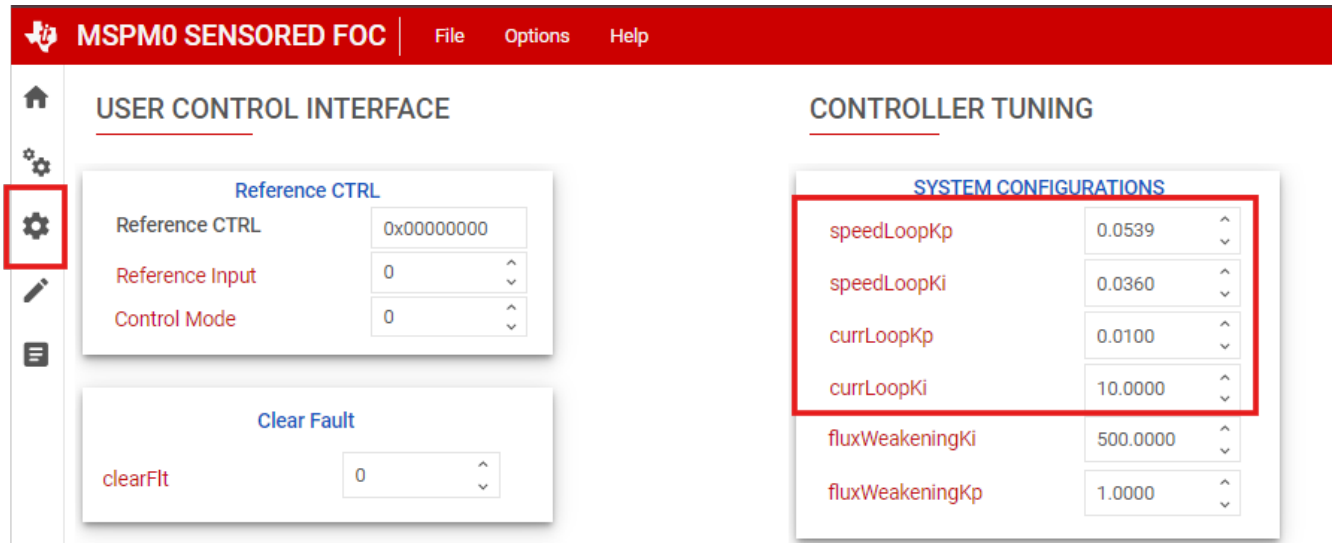


图 6-13. 速度环路和电流环路调优

6.2.3.2 速度/功率控制器调优

FOC 算法使用集成式速度/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/功率。可通过 **Motor Tuning** 页面上“System Configurations”部分中的 *speedLoopKp* 和 *speedLoopKi* 配置 Kp 和 Ki 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/功率环路的输出。当速度/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 Kp 和 Ki 值，请执行以下操作：

1. 通过将 closedLoop1 中的 controlMode 设置为 10b，将电机配置为在闭环扭矩模式中持续旋转。
2. 调整扭矩基准，使电机以额定速度的 50% 旋转。
3. 电流反馈逐渐稳定至设定的 Iqref，以便以目标速度运行。
4. 使用此公式计算速度环路 Kp [SPD_LOOP_KP]： SpeedLoop K_p = Current Reference in Torque Mode / Operating Speed in Hz
5. 使用此公式计算速度环路 Ki [SPD_LOOP_KI]：Speed Loop K_i = Speed Loop K_p × 0.1
6. 如果速度持续波动而不稳定下来，请调整电流环路 Kp 和 Ki，使电机在给定扭矩基准下稳定到恒定速度。

备注

在记录下令人满意的 Kp 和 Ki 值之后，将 controlMode 切换至 0b，以便在闭环速度控制下运行电机。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。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 6-1 展示了更改控制器增益的通用指南。

表 6-1. 更改控制器增益的指南

参数	上升时间	过冲	稳定时间	稳态错误	稳定性
Kp	减小	提高	微小变化	减小	降级
Ki	减小	提高	提高	消除	降级

6.2.4 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。

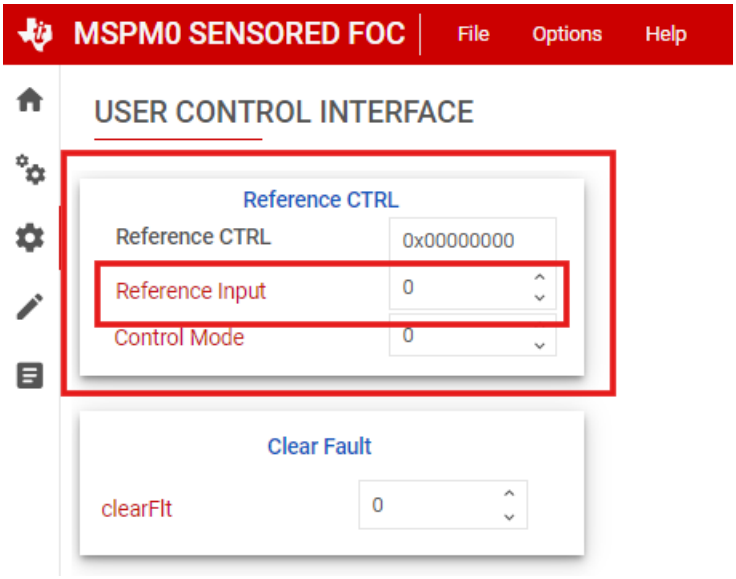


图 6-14. 通过 GUI 设置速度输入

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

2. **检查电机是否以命令的转速在闭环中旋转。**

   启用 GUI 右下角的“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 部分。

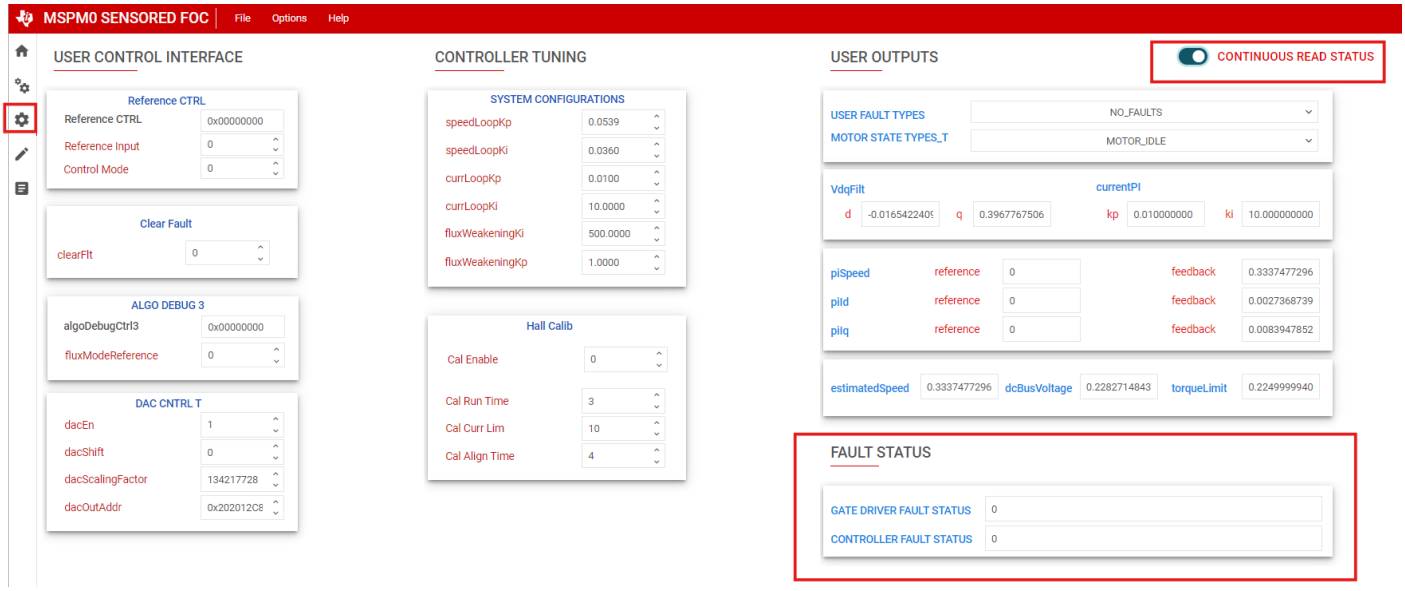


图 6-15. 从 GUI 读取故障状态

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：
   a. 通过将速度输入命令设置为 0，设置零速命令。
   b. 通过置位 ALGO DEBUG CTRL1 寄存器中的清除故障位 (*ClearFlt*) 来清除故障状态寄存器。
   c. 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 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。

6.3.2 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。

1. 确保电机相位连接到终端，如“硬件用户指南”中所示。
2. 如果故障仍然存在，请降低无电机锁定电流阈值 [NO_MTR_THR]。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

6.3.3 霍尔无效故障

如果 FOC 应用检测到无效霍尔状态（例如 **0** 或 **7** ），则会触发霍尔无效故障。通过故障状态锁定来报告此故障。

如果出现霍尔无效故障，请按照以下步骤找出问题的根源。

1. 确保霍尔引脚连接至少上拉至 3.3V，并在手动旋转电机轴时检查引脚值是否正在切换。
2. 确认连接到霍尔引脚的 GPIO 已在 SYCONFIG 中正确配置。
3. 手动旋转轴时，在“CCS debug”窗口的寄存器视图中检查 GPIO 引脚值的变化。

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。闭环定义为闭环速度/功率/扭矩环路，其中，电机以指定的速度、功率和扭矩基准旋转。

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 Iq（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 Iq 电流运行电机（将适当的负载连接至电机）。

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。

7.1.1.4 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。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 Vq 和 Vd 定义为

Vq = MODULATION_INDEX * Cos θ

Vd = MODULATION_INDEX * Sin θ

可以使用图 7-1 通过 GUI 来设置上述控制模式。

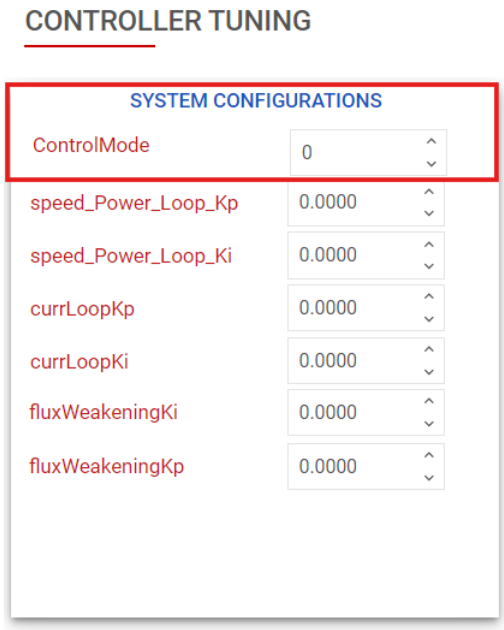


图 7-1. 控制模式配置

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

7.1.2 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：

1. 将电机停止选项 [MTR_STOP] 配置为低侧制动。
2. 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。

7.1.3 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 Id 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 Iq 根据 $I_{LIMIT} = Id^2 + Iq^2$ 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 Id 并根据循环限值 ILIMIT 将扭矩分量电流 Iq 维持为 $Id^2 + Iq^2$。
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 Id 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。

7.1.4 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 5.3.6 中配置 MTPA_EN 来启用此功能。

7.1.5 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：

1. 将电机停止选项 [MTR_STOP] 配置为主动降速。
2. 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。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

7.1.6 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。

1. 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。
2. 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 7-2 展示了禁用 AVS 时的电源电压过冲。电机以 70000Hz/s 的减速率将占空比从 100% 降至 10%。图 7-3 展示了启用 AVS 时电源电压无过冲。

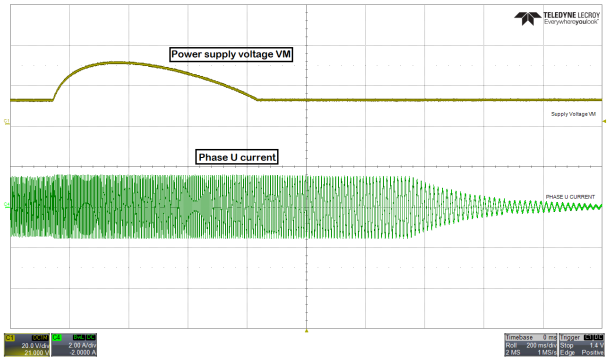


图 7-2. 禁用 AVS 时的电源电压和相电流波形

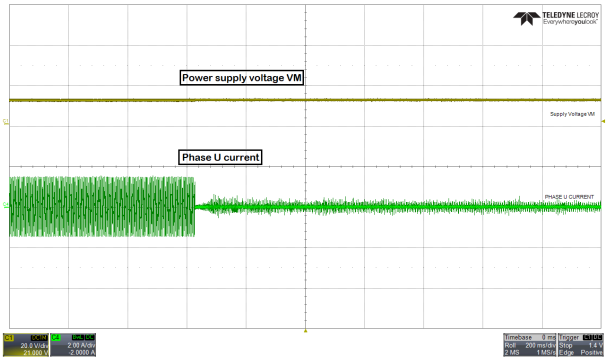


图 7-3. 启用 AVS 时的电源电压和相电流波形

7.1.7 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 5.3.4 中的 HIGH_FREQ_FOC_EN 位配置可以设置为 0b 来获得 16kHz 的最大 FOC 执行速率。将这个位设定为 1b 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 16 的倍数（例如 16kHz、32kHz、48kHz）。对于 10kHz、20kHz、30kHz 等 PWM 频率，最大 FOC 速率为 10kHz（10kHz/1、20kHz/2 等）。

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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。

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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 $i_a = -(ib + i_c)$。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*

8.3.5 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：

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

_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/hal/gateDriverInterface/source/<driverSpecific>_focHalInterface.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)：**

  DAC_OUTPUT_VOLTAGE = (VARIABLE_VALUE × DAC_SCALING_FACTOR + 1) × 1.65V

  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，请使用更高的 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 输出如下：

  DAC_OUTPUT_VOLTAGE = (VARIABLE_VALUE << DAC_SCALE) × 3.3V

  如果变量值大于 12 位值，请将 DAC_SCALE 设置为负，DAC 输出如下：

  DAC_OUTPUT_VOLTAGE = (VARIABLE_VALUE >> DAC_SCALE) × 3.3V

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	0x202005FC
B 相电流	0x20200600
C 相电流	0x20200604
A 相电流原始 ADC 值	0x20200608
B 相电流原始 ADC 值	0x2020060C
C 相电流原始 ADC 值	0x20200614
A 相电压	0x2020066C
B 相电压	0x20200670
C 相电压	0x20200674
A 相电压原始 ADC 值	0x20200678
B 相电压原始 ADC 值	0x2020067C
C 相电压原始 ADC 值	0x20200680
D 轴电流	0x20200778
Q 轴电流	0x2020077C
D 轴电压	0x20200780
Q 轴电压	0x20200784
滤波后的估算电机转速	0x20200A5C
估算的转子角度	0x20200A64

English Document: SLAU948
Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

表 8-1. 用于 DAC 监控的地址表（续）

变量	地址
SVM 输出占空比 A 相	0x20200748
SVM 输出占空比 B 相	0x2020074C
SVM 输出占空比 C 相	0x20200750

9 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision A (January 2025) to Revision B (March 2025) **Page**

- 在节 2.1.1 中添加了对 MSPM0G3519 器件的支持.....5
- 在节 2.3 中添加了对 MSPM0G3519 器件的支持.....5
- 在 节 2.4 中添加了对 MSPM0G3519 器件的支持.....6
- 在节 2.10 中添加了对 MSPM0G3519 器件的支持.....9
- 在节 7.1.1 中添加了电源模式、扭矩模式和电压控制模式。.....50

Copyright © 2025 Texas Instruments Incorporated

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出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