

Application Note

MSPM33 电机控制



Xiaodong Li, Ella Tang

摘要

TI 针对电机控制应用优化了新的 MSPM33 MCU 产品组合，让 MSP 电机控制成为使用 MSPM33 单片机旋转步进电机或 3 相电机的一站式方案。

内容

1 简介.....	3
2 MSPM33 电机控制入门.....	3
3 步进电机控制.....	4
3.1 背景.....	4
3.2 软件架构.....	6
3.3 方框图.....	7
3.4 硬件支持.....	7
4 BLDC 有传感器 TRAP 控制.....	8
4.1 背景.....	8
4.2 软件架构.....	9
4.3 方框图.....	9
4.4 硬件支持.....	10
5 3 相无传感器 FOC 控制.....	10
5.1 背景.....	10
5.2 软件架构.....	11
5.3 方框图.....	11
5.4 硬件支持.....	11
6 总结.....	13
7 参考资料.....	13

插图清单

图 1-1. 使用 MSPM33-SDK 开发资源进行 MSP 电机控制.....	3
图 3-1. 步进电机控制中的全步进和半循环步进.....	5
图 3-2. 采用 MSPM33 的步进库的软件架构.....	6
图 3-3. 用于步进电机控制的 4 PWM 接口方框图.....	7
图 4-1. 梯形换向相电压和相电流波形.....	8
图 4-2. 霍尔传感器 A/B/C 六步换向波形.....	8
图 4-3. 采用 MSPM33 的 BLDC 有传感器 TRAP 库的软件架构.....	9
图 4-4. 使用 MSPM33C321A 和 3 相栅极或电机驱动器的 BLDC 电机 6 PWM 有霍尔传感器梯形控制方框图.....	9
图 5-1. 使用两个电流传感器的无传感器磁场定向控制.....	10
图 5-2. 采用 MSPM33 的无传感器 FOC 库的软件架构.....	11
图 5-3. 使用 MSPM33C321A 和 3 相栅极或电机驱动器 (具有可选 CSA 和 MOSFET 集成) 的 BLDC 电机无传感器 FOC 方框图.....	11

表格清单

表 1-1. MSP 电机控制支持的电机类型、驱动器和接口.....	3
表 3-1. 使用 MSPM33 进行步进电机控制时支持的硬件.....	7
表 4-1. 使用 MSPM33 进行 BLDC 有传感器 TRAP 控制时支持的硬件.....	10
表 5-1. 使用 MSPM33 进行无传感器 FOC 电机控制时支持的硬件.....	12

商标

LaunchPad™ and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

MSPM33 电机控制是一个集成在 [MSPM33-SDK](#) 内的中间件封装，支持用户使用具有流行电机驱动器设计和拓扑结构的小型、简化 MSPM33 固件示例，可在短时间内旋转电机。[表 1-1](#) 展示了工业和汽车应用支持的电机类型和电机控制算法。

表 1-1. MSP 电机控制支持的电机类型、驱动器 and 接口

电机控制类型	MSPM33 LaunchPad™	驱动器 IC	接口
步进 FOC	LP-MSPM33C321A	步进栅极驱动器	- PWM (4x) - 插入器板
无刷直流有传感器梯形	LP-MSPM33C321A	3 相 BLDC 栅极驱动器	- PWM (6x) - 插入器板
BLDC/PMSM/ACIM 无传感器磁场定向控制	LP-MSPM33C321A	3 相 BLDC 栅极驱动器	- PWM (6x) - 插入器板

MSP 电机控制在 [MSPM33-SDK](#) 中提供了大量资源，以支持所有电机控制开发。资源示例包括：

- 受支持的硬件设计，使用 MSP 控制板 (LaunchPad) 和电机驱动器评估模块 (EVM)
- 受支持的插入器板，位于 MSPM33 LP 和 DRV EVM 之间，具有目标 DRV EVM 兼容性
- 可直接用于生产环境的软件，使用硬件抽象层 (HAL) 提供可扩展的 MSP 和驱动程序支持
- 易于评估的图形用户界面 (GUI)，可在 10 分钟内旋转电机
- TI Resource Explorer 中的用户指南和支持文档

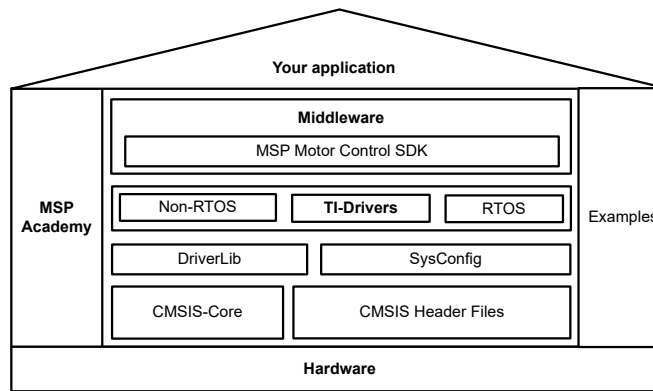


图 1-1. 使用 MSPM33-SDK 开发资源进行 MSP 电机控制

如图 1-1 所示，MSP 电机控制作为中间件封装嵌入 [MSPM33-SDK](#) 中，可与非 RTOS 和 RTOS 驱动程序、MSPM33 DriverLib 支持以及图形配置工具（如 SysConfig）连接。此外，MSP 电机控制可与 CAN 和 LIN 驱动器等其他中间件示例配对，并可在 MSP 电机控制之上轻松添加子系统代码示例，以快速构建软件设计。它提供了一个简单的生态系统，可针对使用有刷直流、步进、BLDC、PMSM 和 ACIM 电机的各种应用评估电机控制。

MSP 电机控制需要以下工具：

- Code Composer Studio™ Theia v20.4.0 或更高版本
- MSPM33-SDK V1.00.00 或更高版本
- 对 IAR Systems 和 Keil 嵌入式开发工具的支持

2 MSPM33 电机控制入门

为了满足高性能和高效率电机控制应用的需求，MSPM33 平台设计为支持三种主要的电机控制类型，如[表 1-1](#)所示。在当前开发阶段，步进电机 FOC 设计已完全实现和验证，其余两种类型正在积极研究和开发中。

经验证的步进电机 FOC 解决方案在基于 MSPM33 LaunchPad、DRV8962 电机驱动器 EVM、电流放大器及磁编码器的专用硬件评估平台上执行。该软件架构会实现有电机传感器的矢量控制。通过利用实时相电流反馈和转子位置跟踪，系统将电机的磁通和扭矩分离。该方法使系统能够为步进电机实现实时闭环 FOC。

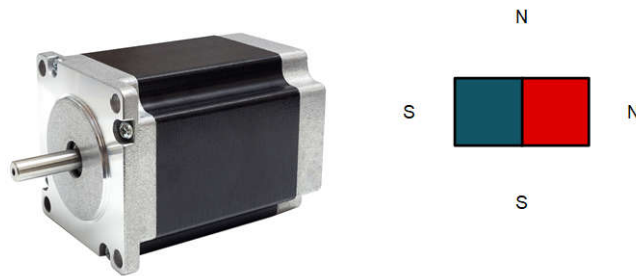
3 步进电机控制

MSPM33 步进电机控制设计的主要特性包括：

- 使用 FOC 或正弦波换向实现高达 20kHz 的 4-PWM 步进控制
- 基于磁编码器的实时反馈进行完全闭环执行，用于速度和位置跟踪
- 使用外部电流检测放大器进行内联相电流检测
- 使用睡眠引脚的低功耗待机管理
- 使用故障引脚进行故障检测

3.1 背景

步进电机可以提供连续运动或保持固定的转子位置，具体取决于系统要求。这些特性使得步进电机易于实现，并为系统设计人员提供了低成本设计。



步进电机通过为两相通电来换向，这需要两个全 H 桥来为每相电流提供电流方向和幅度。这用于移动步进电机中的转子，并根据应用进行位置和扭矩控制。双极步进电机还具有以“每全步进的度数”为单位的指定分辨率，用于指示在每个相位上施加完整电气周期时，步进电机将换向多少个机械角度。

通常，**全步进**是指使用四个分度在所有四个电流方向上为两个绕组通电（以在指定机械周期内使步进电机换向）的完整电气周期。为提供更精确的位置和扭矩控制，**非循环半步进**或**循环半步进**可提供更高分辨率和电流调节能力，从而通过使用八个分度为两个绕组通电来平滑处理电气换向模式。全步进和循环半步进电流波形如图 3-1 所示。利用微控制器的 GPIO 或 PWM 引脚和具有 PWM 接口的简单步进驱动器，可轻松实现这些全步进、非循环半步进和循环半步进方法。

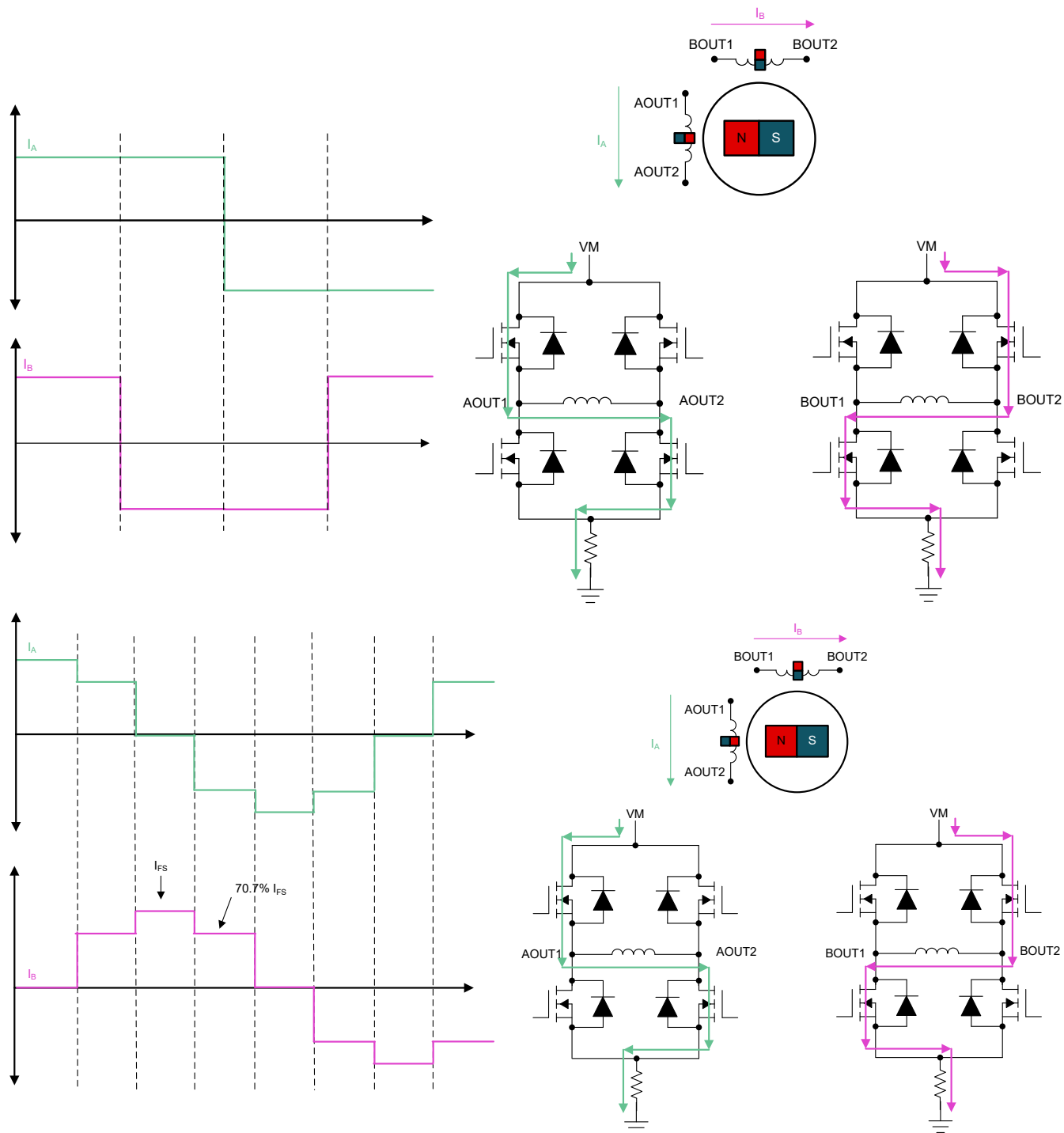


图 3-1. 步进电机控制中的全步进和半循环步进

3.2 软件架构

此步进电机控制设计的软件架构采用模块化分层设计。该框架将高级应用逻辑与低级硬件依赖项分离，验证了出色的代码可移植性和可扩展性。软件包被系统地分为三个功能层，如图 3-2 所示：

应用程序层和 GUI 层：该器件管理主应用程序控制逻辑，并为主机/GUI 数据交换提供通信接口。

模块层：这部分包括硬件抽象层及步进电机库。

MSPM33 驱动程序库层：该器件基于 MCU 的低级固件库，可直接初始化和驱动硬件外设，包括计时器、高速模数转换器和通用输入/输出。

- 来自磁性编码器的正交编码器信号或 SPI 接口，用于反馈实时电机转子角度和位置 (ABZ / SPI)

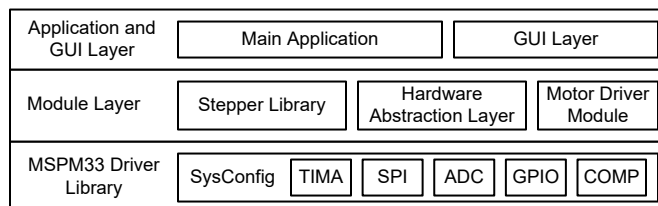


图 3-2. 采用 MSPM33 的步进库的软件架构

3.3 方框图

系统硬件架构基于 MSPM33C321A 和 DRV8962 四通道半桥驱动器构建，形成了一个高度集成的闭环磁场定向控制 (FOC) 步进电机驱动系统。

如图 3-3 所示，互联信号和拓扑描述如下：

- 4 个具有中心对齐或边沿对齐同步的 PWM 信号 (PWM 4x)
- 用于硬件电流调节的 12 位 DAC 基准电压 (VREF)
- 具有睡眠模式引脚的驱动器的低功耗模式信号 (nSLEEP)
- 来自驱动器的逻辑低电平故障信号 (nFAULT)
- 从外部 INA240A1 电流检测放大器向 MCU 高速 ADC (电流) 提供高精度模拟电流反馈
- 来自磁性编码器的正交编码器信号或 SPI 接口，用于反馈实时电机转子角度和位置 (ABZ / SPI)

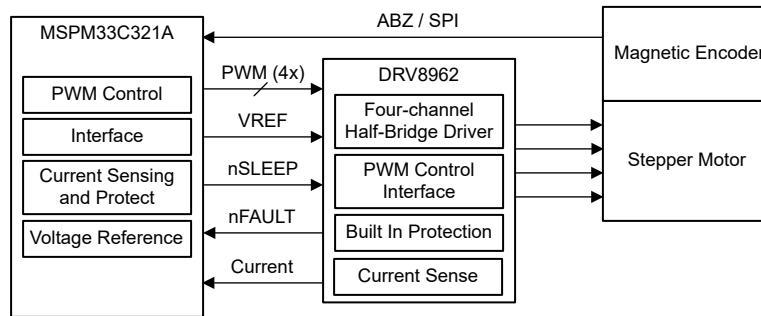


图 3-3. 用于步进电机控制的 4 PWM 接口方框图

3.4 硬件支持

表 3-1 列出了使用 MSPM33-SDK 进行步进电机控制时支持的硬件。

表 3-1. 使用 MSPM33 进行步进电机控制时支持的硬件

LaunchPad	电机驱动器硬件	控制接口	电流检测	SPI 接口	电机电压范围	电机电流 (峰值)	电机功率
LP- MSPM33C321A	DRV8962EVM	PWM (4)	4	是	4.5V 至 65V	5A	<300W

4 BLDC 有传感器 TRAP 控制

MSPM33 BLDC 有传感器陷阱控制设计的主要特性包括：

- 六个 PWM 控制，具有互补输出、可调死区、纳秒级分辨率，PWM 频率高达 200kHz
- 可调 0% 至 100% 占空比控制
- 制动和方向控制
- 总线电压、相电压和相电流监测
- SPI 读取/写入，用于配置驱动器设置并诊断驱动器故障（可选）
- 软件过流和过压和欠压检测
- 硬件故障制动和逐周期过流保护

4.1 背景

梯形换向是旋转三相无刷直流电机的最基本方法。这是通过每 60 度电角以 6 步模式为绕组通电来实现的，这样一来，一个相位为电机提供拉电流，另一个相位为电机提供灌电流，最后一个相位保持未连接（高阻态）。这会为每个相位产生 120° 梯形电流波形，如图 4-1 所示。

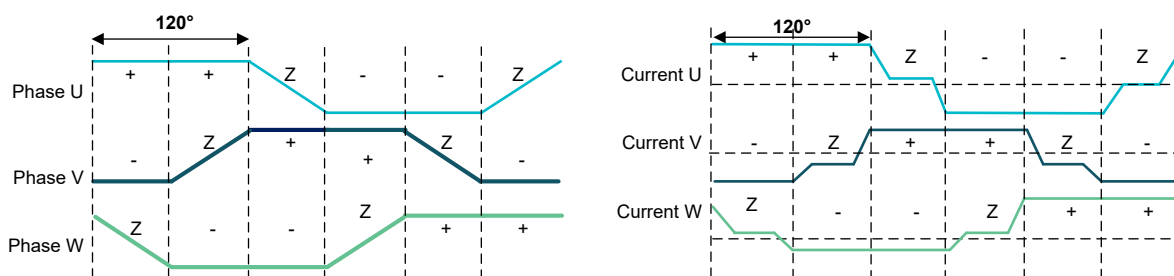


图 4-1. 梯形换向相电压和相电流波形

为了确定电机的实时位置并将电机换向至下一状态，通常在 3 个电机相位之间放置一些霍尔传感器，以测量电机的磁场并将数字信号输出到 MCU，如图 4-2 所示。三个霍尔传感器信号可作为逻辑输入，并使用一个 6 步表来解码下一个 PWM 控制状态。这通常称为霍尔传感器梯形换向，是一种低成本、易于实现的解决方案，可以产生高扭矩和速度并尽可能降低 MOSFET 开关损耗。然而，由于电流驱动不理想，它的分辨率很低，并且会导致扭矩纹波和可闻噪声。

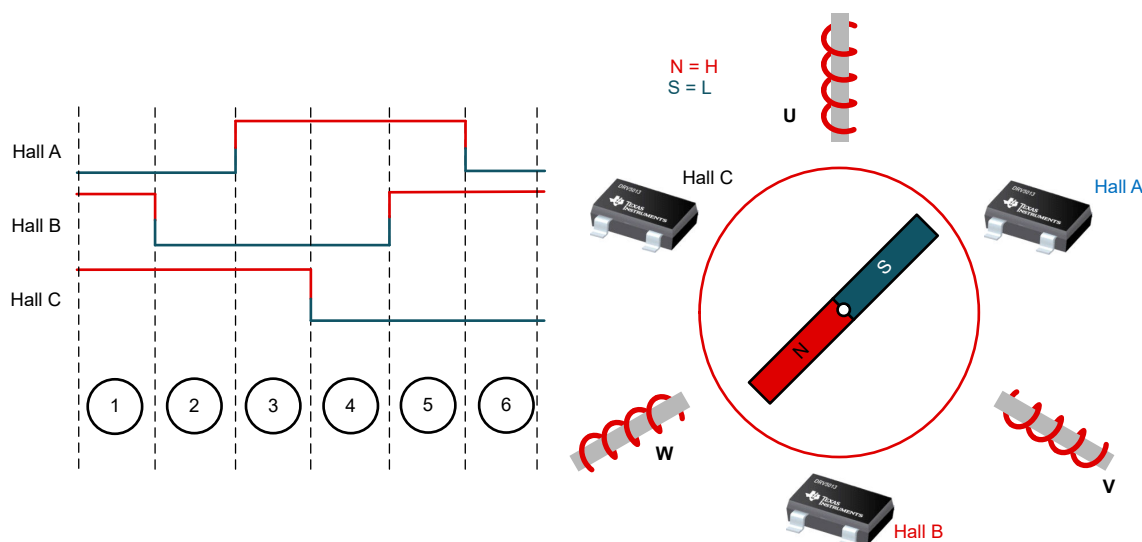


图 4-2. 霍尔传感器 A/B/C 六步换向波形

4.2 软件架构

如图 4-3 所示，该软件包使用 MSPM33 系统配置工具为传感梯形初始化必要的外设，并使用抽象层与各种 3 相电机驱动器和栅极驱动器解决方案连接。

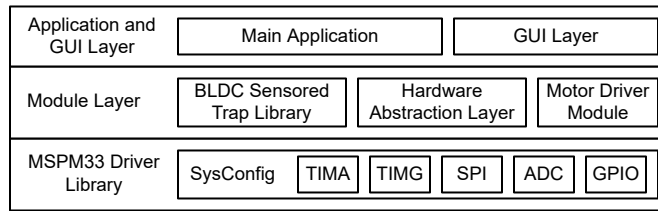


图 4-3. 采用 MSPM33 的 BLDC 有传感器 TRAP 库的软件架构

4.3 方框图

MSP 电机控制中支持的 MSPM33C321A MCU 以及 3 相栅极/电机驱动器方框图如图 4-4 所示。控制信号、反馈信号和接口包括：

- 具有可调死区的 6 PWM 信号 (PWM 6x)
- 来自驱动器的逻辑低电平故障信号 (nFAULT)
- 栅极驱动器关断信号 (DRVOFF)
- 具有睡眠模式引脚的驱动器的低功耗模式信号 (nSLEEP)
- 来自集成式或外部电流检测放大器的 ADC 电流检测反馈，用于测量电机相电流
- 可选 SPI 读取/写入接口 (适用于具有 SPI 接口的驱动器)

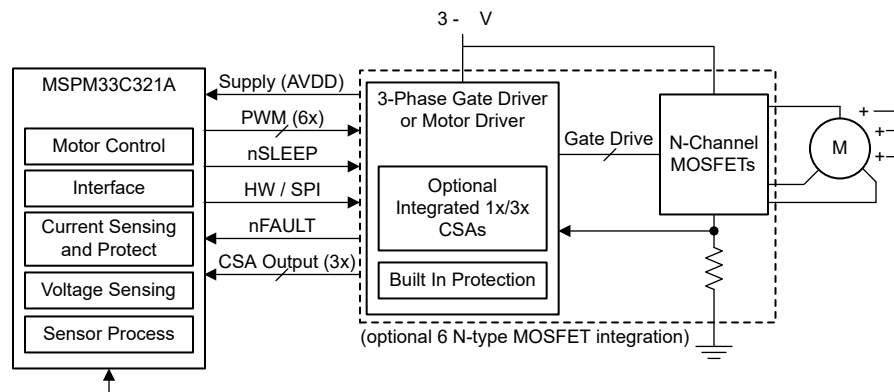


图 4-4. 使用 MSPM33C321A 和 3 相栅极或电机驱动器的 BLDC 电机 6 PWM 有霍尔传感器梯形控制方框图

4.4 硬件支持

表 4-1 展示了使用 MSPM33-SDK 进行 BLDC 有传感器 TRAP 电机控制时支持的硬件。

表 4-1. 使用 MSPM33 进行 BLDC 有传感器 TRAP 控制时支持的硬件

LaunchPad	支持的电机驱动器硬件	电流检测放大器	SPI 驱动器支持	电机电压范围 (建议值)	建议的电机功率
LP-MSPM33C321A3	DRV8316REVM	3	是	4.5V 至 40V	< 75W
	DRV8334EVM	3	是	12V-24V	< 300W
	DRV8363-Q1AEVM	3	是	8V-85V	< 500W
	DRV7308EVM	0-3	是	15V-450V	< 250W

5 3 相无传感器 FOC 控制

MSPM33 无传感器 FOC 设计的主要特性包括：

- 基于 2 分流器或者 3 分流器的电流检测设计
- 增强型滑模观测器和锁相环观测器 (eSMO+PLL)
- 可配置的用户电机参数和目标 RPM 转速
- 对齐、减慢第一个周期或 IPD 启动方法
- 从启动到闭环速度控制的自动切换
- 可调 PWM 频率 (高达 100kHz) 和死区

5.1 背景

此设计使用增量式系统构建来展示在宽速度范围内的完整定点无传感器磁场定向控制 (FOC) 设计，并通过处理电机的动态模型来考虑扭矩随瞬态相位的变化情况。每个增量构建都使用模块化软件块来创建完整的无传感器 FOC 设计，在此过程中使用 2 个电流传感器、用于角度和速度估算以及速度和扭矩调节的宏，并使用 Park、Clarke、逆向 Park 和空间矢量 PWM 生成 (SVGEN)。使用两个电流传感器的无传感器 FOC 的方框图如图 5-1 所示。

更多有关使用此设计实现无传感器 FOC 的理论背景信息，请参阅 [PMSM 的无传感器 FOC](#)。

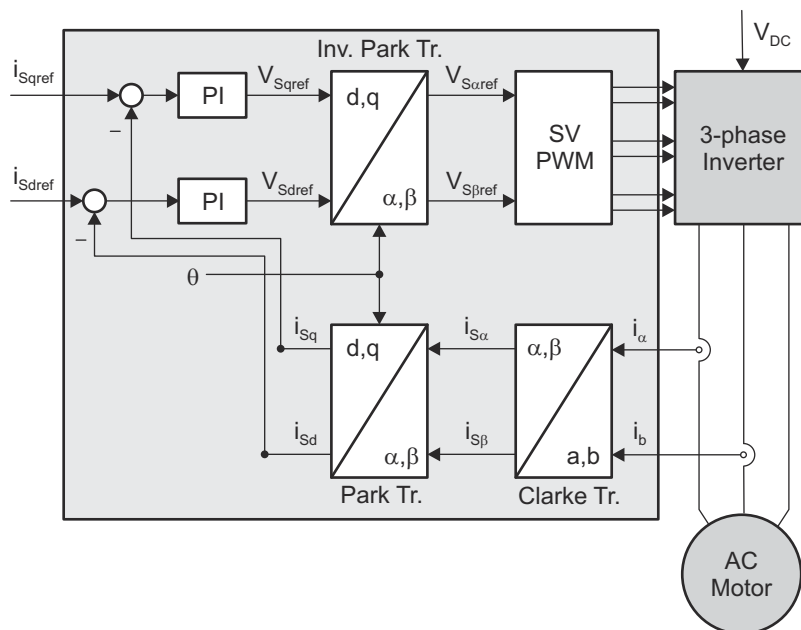


图 5-1. 使用两个电流传感器的无传感器磁场定向控制

使用带锁相环 (PLL) 的增强型滑模观测器 (eSMO) 宏进行角度估算，以准确估算 BLDC/PMSM 电机的实时转速。使用状态变量来控制该算法的电机状态，以自动将电机从启动状态转换至开环状态，以及从开环状态转换至闭环状态。在闭环状态下，可以实时控制电机且基准电流极小，还可以在扭矩变化或负载条件下进行调速。

5.2 软件架构

如图 5-2 所示，该软件包使用 MSPM33 系统配置工具为无传感器 FOC 初始化必要的外设，并使用 HAL 层与各种三相电机驱动器和栅极驱动器设计连接。

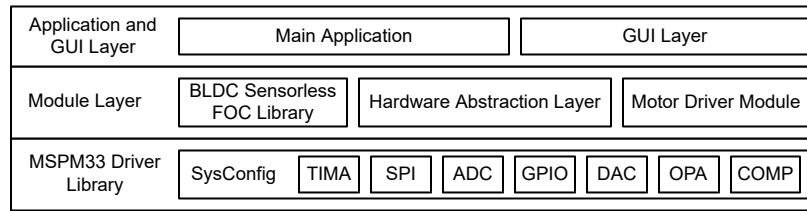


图 5-2. 采用 MSPM33 的无传感器 FOC 库的软件架构

5.3 方框图

在低电压 FOC 应用中，许多栅极驱动器或电机驱动器器件集成了多达三个具有可编程增益的电流检测放大器，从而降低了 MSPM33 器件的模拟要求。无模拟集成的 MSPM33 器件采用小至 48-VQFN 和 64-LQFP 的封装，可减小系统尺寸并降低成本。MSPM33 可以使用 12 位同步采样 4MSPS ADC 快速准确地检测电机相电压、总线电压、电流和转速，从而为 FOC 算法提供反馈。该拓扑的设计适用于低成本和小外形尺寸的 FOC 应用，例如泵、风扇、鼓风机和小型电器。

如图 5-3 所示，此系统拓扑使用的信号包括：

- 具有可调死区的六 PWM 信号 (6x PWM)
- 来自驱动器的逻辑低电平故障信号 (nFAULT)
- 来自集成式或外部电流检测放大器的 ADC 电流检测反馈，用于测量电机相电流和总线检测电压
- 可选 SPI 读取/写入接口 (适用于具有 SPI 接口的驱动器)

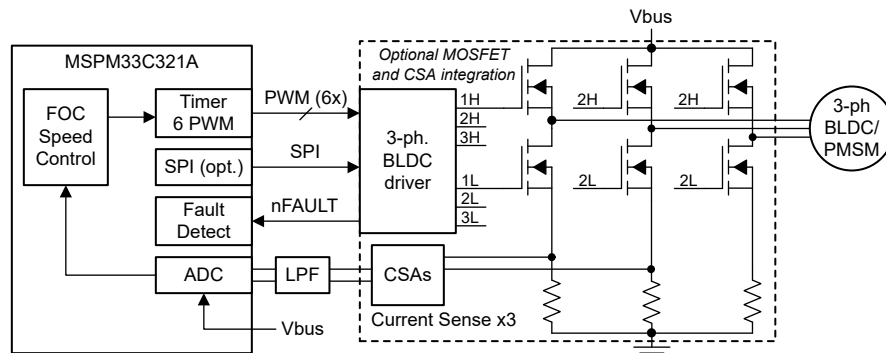


图 5-3. 使用 MSPM33C321A 和 3 相栅极或电机驱动器 (具有可选 CSA 和 MOSFET 集成) 的 BLDC 电机无传感器 FOC 方框图

5.4 硬件支持

表 5-1 展示了使用 MSPM33-SDK 进行 3 相无传感器 FOC 电机控制时支持的硬件和经过测试的电机。

表 5-1. 使用 MSPM33 进行无传感器 FOC 电机控制时支持的硬件

LaunchPad	支持的电机驱动器硬件	电流检测放大器	SPI 驱动器支持	电机电压范围 (建议值)	建议的电机功率
LP-MSPM33C321A3	DRV8316REVM	3	是	4.5V 至 40V	< 75W
	DRV8334EVM	3	是	12V 至 24V	< 300W
	DRV8363-Q1AEVM	3	是	8V 至 85V	< 500W
	DRV7308EVM	0-3	是	15V 至 450V	< 250W

6 总结

本应用手册概述了 MSPM33 系列中的电机控制中间件封装，并重点介绍了步进电机、BLDC 有传感器的陷阱和 3 相无传感器 FOC 控制的技术设计。除了基本知识之外，本文档还为用户列出了参考资料和进一步阅读材料。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[三相永磁同步电机的无传感器磁场定向控制](#) 应用手册。

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月