

# Application Note

## MSPM0 电机控制



Aaron Barrera

### 摘要

利用针对电机控制应用进行了优化的 TI 全新 MSPM0 MCU 产品系列，MSP 电机控制可为您提供一站式服务，让您能够在 10 分钟内借助 MSPM0 MCU 使有刷、步进或三相电机旋转。

### 内容

1 引言.....	3
2 MSPM0 电机控制入门.....	4
3 有刷直流电机控制.....	5
3.1 背景.....	5
3.2 软件架构.....	6
3.3 方框图.....	6
3.4 硬件支持.....	7
3.5 软件支持.....	7
3.6 使用 MSP 电机控制 SDK 评估有刷直流.....	8
4 步进电机控制.....	8
4.1 背景.....	8
4.2 软件架构.....	10
4.3 方框图.....	10
4.4 硬件支持.....	12
4.5 软件支持.....	12
4.6 使用 MSP 电机控制 SDK 评估步进电机.....	12
5 BLDC 有传感器 TRAP 控制.....	13
5.1 背景.....	13
5.2 软件架构.....	13
5.3 方框图.....	14
5.4 硬件支持.....	15
5.5 软件支持.....	15
5.6 使用 MSP 电机控制评估有传感器 TRAP.....	15
6 三相无传感器 FOC 控制.....	15
6.1 背景.....	16
6.2 软件架构.....	17
6.3 方框图.....	17
6.4 硬件支持.....	18
6.5 软件支持.....	18
6.6 使用 MSP 电机控制评估无传感器 FOC.....	19
6.7 无传感器 FOC 性能.....	19
7 参考资料.....	19
修订历史记录.....	19

### 插图清单

图 1-1. 使用 MSPM0-SDK 开发资源进行 MSP 电机控制.....	3
图 3-1. 适用于有刷直流电机的 H 桥电机控制.....	5
图 3-2. 采用 MSPM0 的有刷直流库的软件架构.....	6
图 3-3. 使用 MSPM0L1xxx 和 H 桥电机驱动器的有刷直流电机控制方框图.....	6

图 3-4. 使用 MSPM0L1xxx 和具有直列式电流检测放大器的 H 桥栅极驱动器的有刷直流电机控制方框图.....	7
图 4-1. 步进电机控制中的全步进和半循环步进.....	9
图 4-2. 步进电机控制中的微步进.....	10
图 4-3. 采用 MSPM0 的步进库的软件架构.....	10
图 4-4. 用于步进电机控制的 4 PWM 接口方框图.....	11
图 4-5. 用于步进电机控制的单 PWM 接口方框图.....	12
图 5-1. 梯形换向相电压和相电流波形.....	13
图 5-2. 霍尔传感器 A/B/C 六步换向波形.....	13
图 5-3. 采用 MSPM0 的 BLDC 有传感器 TRAP 库的软件架构.....	14
图 5-4. 使用 MSPM0Lxxx/MSPM0Gxxx 和三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.....	14
图 6-1. 使用两个电流传感器的无传感器磁场定向控制.....	16
图 6-2. 采用 MSPM0 的无传感器 FOC 库的软件架构.....	17
图 6-3. 使用 MSPM0Gx10x 和三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.....	17
图 6-4. 使用 MSPM0Gx50x 并具有模拟集成功能和三相栅极驱动器功率级的 BLDC/PMSM/ACIM 电机的无传感器 FOC 方框图.....	18

## 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 2-1. MSP 电机控制支持资源.....	4
表 3-1. MSPM0 有刷直流控制支持的硬件.....	7
表 3-2. 有刷直流控制的软件支持.....	7
表 4-1. 使用 MSPM0 进行步进电机控制时支持的硬件.....	12
表 4-2. 步进电机控制的软件支持.....	12
表 5-1. 使用 MSPM0 进行 BLDC 有传感器 TRAP 控制时支持的硬件.....	15
表 5-2. 步进电机控制的软件支持.....	15
表 6-1. 使用 MSPM0 进行无传感器 FOC 电机控制时支持的硬件.....	18
表 6-2. 步进电机控制的软件支持.....	19
表 6-3. 无传感器 FOC 设计规格.....	19
表 6-4. 无传感器 FOC 电机性能.....	19

## 商标

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

Eclipse® is a registered trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

MSP 电机控制是一个集成在 **MSPM0-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 MSPM0 固件示例，可在 10 分钟或更短时间内旋转电机。表 1-1 展示了工业和汽车应用当前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、驱动器和接口

电机控制类型	MSPM0 LaunchPad™	驱动器 IC	接口
有刷直流	LP-MSPM0L1306	<ul style="list-style-type: none"> <li>H 桥电机驱动器</li> <li>H 桥栅极驱动器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PWM (2x)</li> <li>相位/使能 (PH/EN)</li> <li>半桥</li> <li>独立模式</li> </ul>
步进	LP-MSPM0L1306	<ul style="list-style-type: none"> <li>具有电流调节功能的双路 H 桥电机驱动器</li> <li>具有电流检测和失速检测功能的双路 H 桥智能电机驱动器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PWM (4x)</li> <li>STEP (1x PWM)</li> </ul>
无刷直流有传感器梯形	<ul style="list-style-type: none"> <li>LP-MSPM0L1306</li> <li>LP-MSPM0G3507</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>三相栅极驱动器</li> <li>三相电机驱动器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PWM (6x)</li> </ul>
BLDC/PMSM/ACIM 无传感器磁场定向控制	LP-MSPM0G3507	<ul style="list-style-type: none"> <li>三相栅极驱动器</li> <li>三相电机驱动器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PWM (6x)</li> </ul>

### 备注

对于 BLDC 电机控制，MSPM0 软件仅支持 6x PWM 控制模式，但根据选择的驱动器，3x 或 1x PWM 模式也可以实现相似的性能。

MSP 电机控制在 **MSPM0-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)
- 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

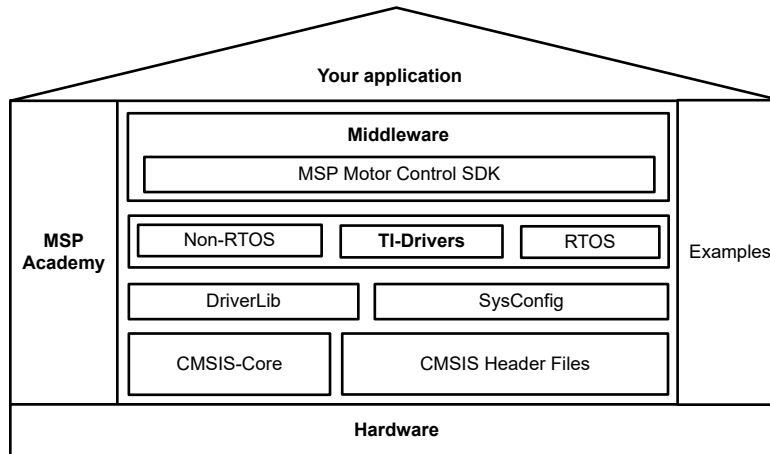


图 1-1. 使用 MSPM0-SDK 开发资源进行 MSP 电机控制

如图 1-1 所示，MSP 电机控制作为中间件封装嵌入 **MSPM0-SDK** 中，可与非 RTOS 和 RTOS 驱动程序、MSPM0 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，以快速构建软件解决方案。它提供

了一个易于使用的生态系统，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™ v12.0.0 或更高版本
  - 对 Eclipse® 和 Theia 软件包的支持
- MSPM0-SDK V1.00.00 或更高版本
- 未来对 IAR Systems 和 Keil 嵌入式开发工具的支持

## 2 MSPM0 电机控制入门

要开始使用 MSPM0 电机控制，请按照以下步骤操作。有关详细信息，请参阅 [表 2-1](#)。

1. 订购 MSPM0 LaunchPad 和 DRV8xxx 电机驱动器 EVM。请参阅下面的 [硬件支持](#)。
2. 使用各种方法在 10 分钟或更短时间内旋转电机。请参阅下面的 [软件支持](#)。
  - a. TI Gallery 中在线提供的 GUI
  - b. 来自 Code Composer Studio (CCS) IDE 内 MSPM0-SDK 的软件示例
  - c. 在线使用的 CCS Cloud
3. 有关更多资源和文档，请查看 TI Resource Explorer 中的用户指南资源。请参阅下面的 [用户指南](#)。

**表 2-1. MSP 电机控制支持资源**

	有刷直流	步进	有传感器 TRAP	无传感器 FOC <sup>1</sup>
软件支持	请参阅 <a href="#">有刷直流软件支持</a>	请参阅 <a href="#">步进电机软件支持</a>	请参阅 <a href="#">有传感器 TRAP 软件支持</a>	请参阅 <a href="#">无传感器 FOC 软件支持</a>
硬件支持	请参阅 <a href="#">有刷直流硬件支持</a>	请参阅 <a href="#">步进电机硬件支持</a>	请参阅 <a href="#">有传感器 TRAP 硬件支持</a>	请参阅 <a href="#">无传感器 FOC 硬件支持</a>
用户指南	<a href="#">有刷直流电机用户指南</a>	<a href="#">步进电机用户指南</a>	<a href="#">有传感器 TRAP 用户指南</a>	<a href="#">无传感器 FOC 用户指南</a>

1. 无传感器 FOC 解决方案目前仅用于演示目的，并不推荐用于全面量产解决方案。将于 2024 年 1 月推出电机识别、自动 PI 调优和具有扩展硬件支持的其他闭环功能。

### 3 有刷直流电机控制

MSPM0 有刷直流电机控制设计的主要特性包括：

- 双 PWM 控制，具有互补输出和高达 100kHz 的 PWM 频率
- 可调 0% 至 100% 占空比控制
- 制动和方向控制
- 用于电流限制的电压基准 (VREF)
- 用于配置驱动器设置并诊断驱动器故障的 SPI 接口 (仅限 SPI 器件)
- 通过故障引脚进行故障检测

#### 3.1 背景

有刷直流电机控制非常简单：在电机端子上施加电压可以改变转子上的磁场并产生连续的旋转运动。尽管存在热耗散、高转子惯性和电磁干扰等缺点，但有刷直流电机不需要电流反馈且易于控制，因此是适用于如图 3-1 所示的许多应用的简单低成本设计。

通常，有刷直流电机在启动时需要大电流来克服惯性，然后只需要小电流即可维持稳态运行。为此，使用 PWM 占空比控制来调制控制波形，使 N 型 MOSFET (控制开关电流) 在 PWM 周期的一部分 (而不是全部时间) 内导通。此外，H 桥逆变器用于控制电机方向和衰减模式，以优化电机制动和再循环电流。

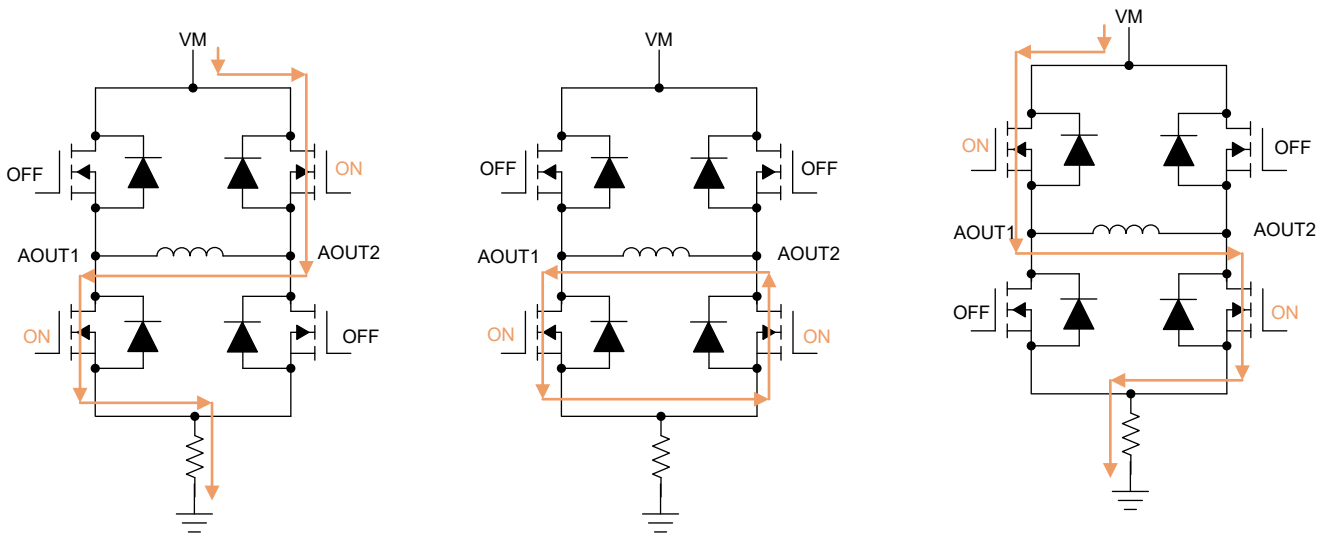


图 3-1. 适用于有刷直流电机的 H 桥电机控制

对于需要向微控制器提供电流反馈以实现高级换向 (如纹波计数或扭矩控制) 的系统，可将一个电流采样电阻放置在 H 桥低侧或内联到电机相位。

H 桥驱动器可以集成各种类型的电源和模拟控制，以缩小系统外形尺寸。MCU 提供控制算法，而模拟集成可以集成到 MCU 或驱动器中。

### 3.2 软件架构

如图 3-2 所示，该软件包使用 MSPM0 系统配置工具为有刷直流电机控制初始化必要的外设，并使用抽象层与各种分立和集成步进电机驱动器设计连接。

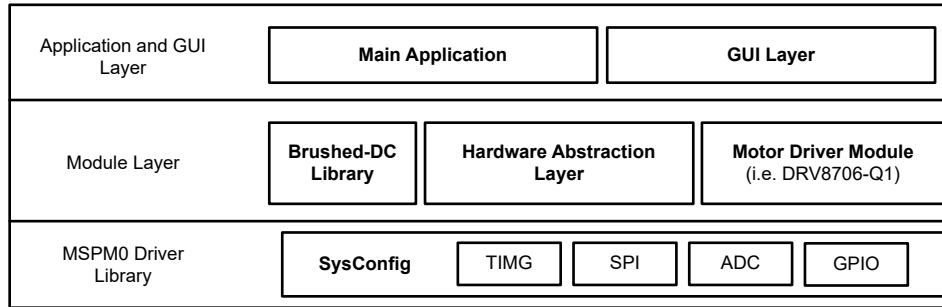


图 3-2. 采用 MSPM0 的有刷直流库的软件架构

### 3.3 方框图

方框图展示了有刷电机控制示例中支持用于有刷直流电机的 MSPM0L1xxx 设计。

- 双 PWM 控制接口 (PWM)
- 相位使能接口 (PH/EN)
- 半桥控制
- 独立模式控制

支持的两种拓扑是 H 桥电机驱动器和 H 桥栅极驱动器。

#### 3.3.1 H 桥电机驱动器

MSPM0L1xxx 可支持适用于低成本、低电压 H 桥电机驱动器的双 PWM 控制，以驱动小功率 BDC 电机。这些电机驱动器通常非常小，集成了 4 个 N 型 MOSFET，并且这些系统架构用于个人电子产品、个人护理用品、智能锁、机器人/玩具等应用。使用 MSPM0 内的集成式 OPA 或 COMP 可实现总线过流检测或基本扭矩控制。低成本 MSP MCU 提供 PWM、GPIO 控制和模拟集成，同时使用驱动器的故障引脚或可选过流检测来检测故障情况。

如图 3-3 所示，H 桥电机驱动器控制中使用的信号包括：

- 具有可调占空比和脉宽 (PWM) 的双 PWM 信号
- 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)
- 来自分流电阻器的可选低侧电流检测<sup>1</sup>

(1) 可使用集成式 COMP 或 OPA 实现电流检测，仅适用于 MSPM0L130x。

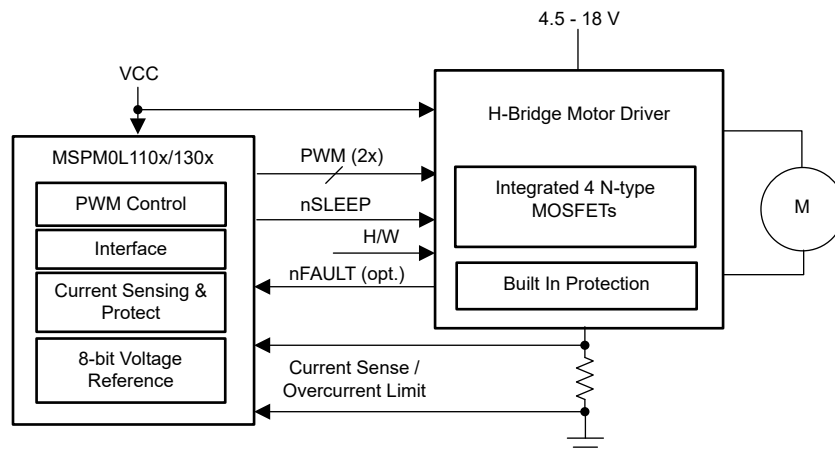


图 3-3. 使用 MSPM0L1xxx 和 H 桥电机驱动器的有刷直流电机控制方框图

### 3.3.2 H 桥栅极驱动器

对于具有可选内联或低侧电流检测功能的栅极驱动器，MSPM0L1xxx 可支持双 PWM 控制，以通过闭环扭矩控制功能驱动高功率、更高电压 BDC 电机。这些栅极驱动器提供电流来驱动 4 个外部 N 型 MOSFET，与集成式 MOSFET 相比，N 型 MOSFET 具有更高的电流和温度额定值。这些系统架构用于大功率汽车应用，例如电源模块、车门模块、车窗、天窗、后备箱以及其他车身应用。低成本 MSP MCU 提供 PWM、GPIO、SPI 通信接口和模拟集成来支持这些 H 桥栅极驱动器。

如图 3-4 所示，具有直列式电流检测放大器的 H 桥栅极驱动器中使用的信号包括：

- 具有可调占空比和脉宽 (PWM) 的 4 PWM 信号
- 具有睡眠模式引脚的驱动器的低功耗模式信号 (nSLEEP)
- 可选 SPI 读取/写入接口 (适用于具有 SPI 接口的驱动器)
- 来自驱动器的逻辑低电平故障信号 (nFAULT)
- CSA 基准 (VREF)<sup>1</sup>
- 来自分流电阻器的可选低侧电流检测<sup>2</sup>

(1) 可使用集成式 COMP 中的 8 位 DAC 来输出 CSA 基准电压。

(2) 可使用集成式 COMP 或 OPA 进行电流检测。COMP 和 OPA 都仅在 MSPM0L130x 中可用。

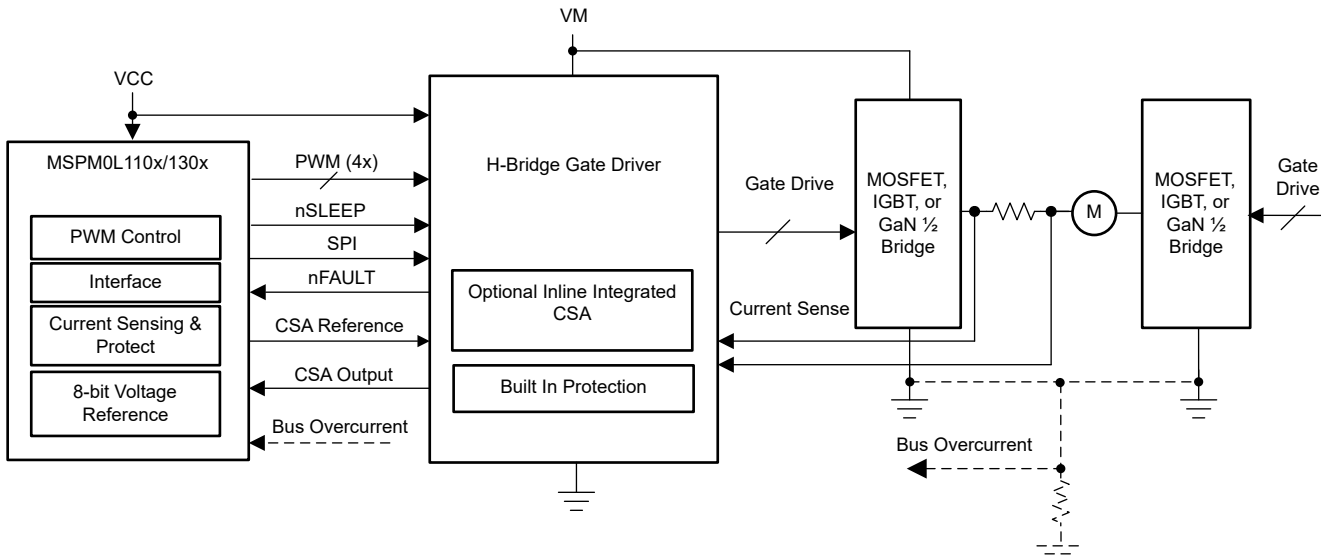


图 3-4. 使用 MSPM0L1xxx 和具有直列式电流检测放大器的 H 桥栅极驱动器的有刷直流电机控制方框图

### 3.4 硬件支持

表 3-1 展示了使用 MSPM0-SDK 进行有刷直流电机控制时支持的硬件。

表 3-1. MSPM0 有刷直流控制支持的硬件

LaunchPad	电机驱动器硬件	硬件指南	控制接口	电流检测	SPI 驱动器	电机电压范围	建议电机功率
LP-MSPM0L1306	DRV8706S-Q1EVM	DRV8706S-Q1EVM	PWM (2x)、PH/EN、半桥、独立	1	是	4.9V 至 37V	>5W

### 3.5 软件支持

表 3-1 显示了 TI Resource Explorer 中的有刷直流电机控制所支持的软件。

表 3-2. 有刷直流控制的软件支持

快速入门指南	库软件概述	代码示例	GUI	GUI 用户指南
有刷快速入门指南	有刷库概述	DRV8706-Q1	DRV8706-Q1	有刷 GUI 用户指南



### 3.6 使用 MSP 电机控制 SDK 评估有刷直流

有关完整说明和信息，请访问 TI Resource Explorer 中的[有刷直流电机控制用户指南](#)。

要使用 MSPM0 旋转有刷直流电机，请执行以下三个简单步骤：

1. 订购受支持的 LaunchPad 和 DRV8xxx EVM。根据指定 EVM 的硬件用户指南连接硬件和电机。
2. 从 TI Gallery 中启动指定的 GUI。使用 MSPM0 MCU 启用驱动器，旋转电机并评估器件特性。
3. 在 [Code Composer Studio](#) 或 [CCS Cloud IDE](#) 中评估固件。

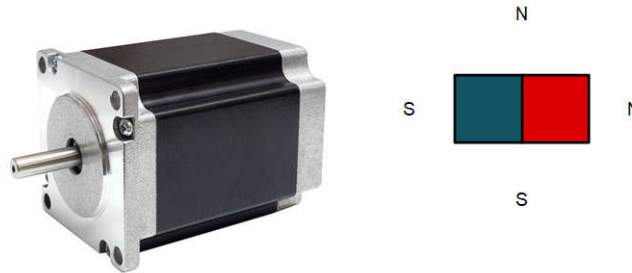
## 4 步进电机控制

MSPM0 步进电机控制设计的主要特性包括：

- 使用全步进或半步进实现高达 100kHz 的 4 PWM 步进控制，或使用 1/256 微步进实现高达 500kHz 的单 PWM 步进控制
- 根据所选步长在开环中旋转或步进电机
- 用于电流限制的电压基准
- 用于配置驱动器设置并诊断驱动器故障的 SPI 接口（仅限 SPI 器件）
- 使用故障引脚进行故障检测

### 4.1 背景

步进电机之所以得到广泛使用，是因为它们无需外部传感器或复杂的控制算法即可实现精细的位置控制。这称为开环位置控制，可用于允许步进电机根据系统要求进行连续运动，以保持转子位置固定。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 4-1 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。



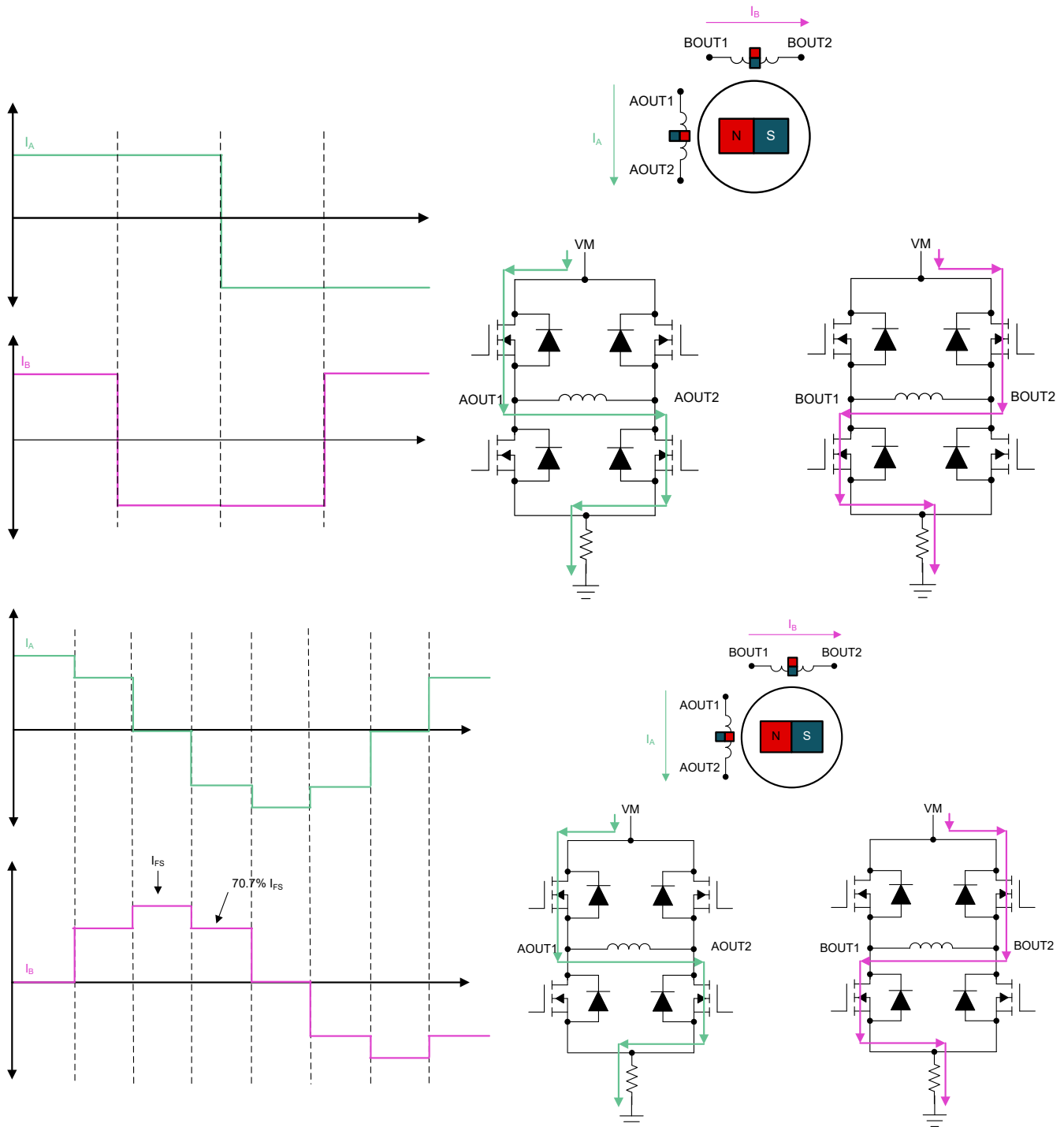


图 4-1. 步进电机控制中的全步进和半循环步进

可通过一半的因数 (  $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 、 $1/32$  等 ) 乃至小到  $1/256$  的因数来实现较小步长, 从而产生正弦电流驱动, 并降低在步进电机中实现的噪声和扭矩。使用小于  $1/4$  的步长通常称为 *微步进*, 因为分度器和电流调节用于实现离散间隔, 以精确控制位置和扭矩。图 4-2 展示了使用  $1/16$  微步进的示例。微步进在软件中较难实现, 因此, 要实现低噪声、高精度的步进驱动, 建议使用智能步进电机驱动器以及具有单 PWM 和模拟集成的简单 MCU。

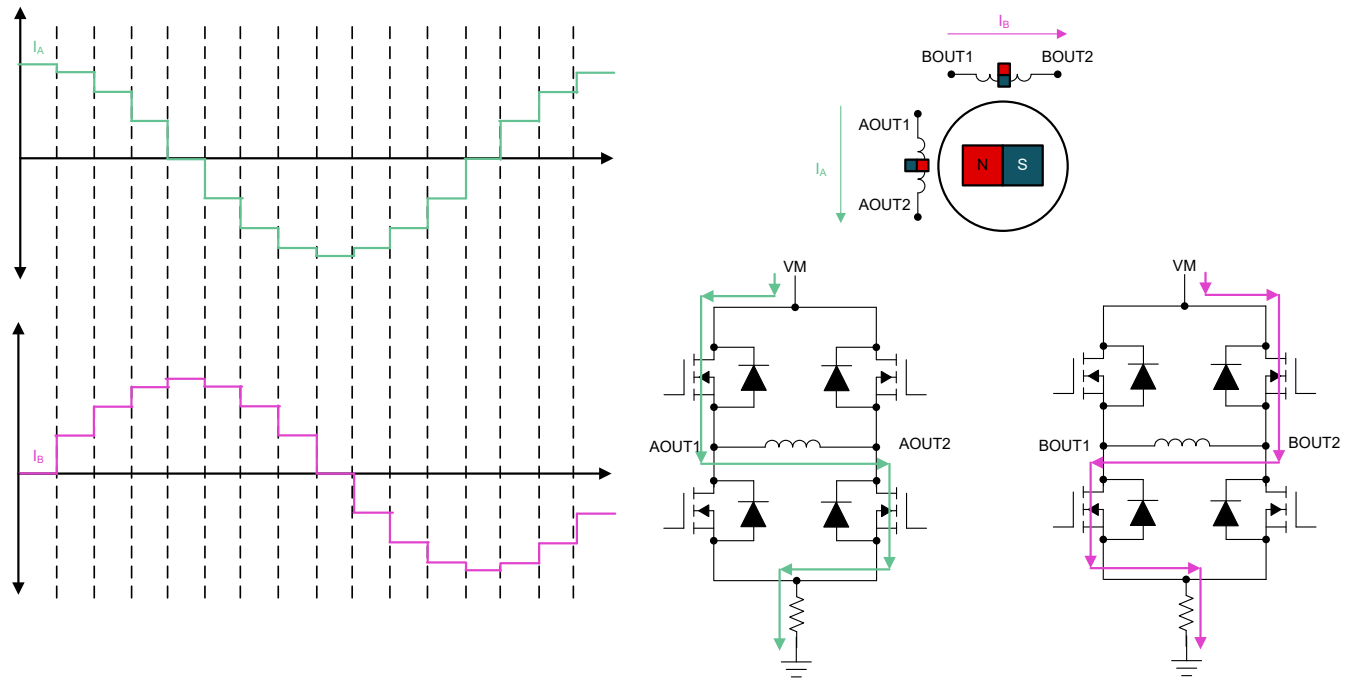


图 4-2. 步进电机控制中的微步进

## 4.2 软件架构

如图 4-3 所示，该软件包使用 MSPM0 系统配置工具为步进电机初始化必要的外设，并使用抽象层与各种分立和集成步进电机驱动器设计连接。

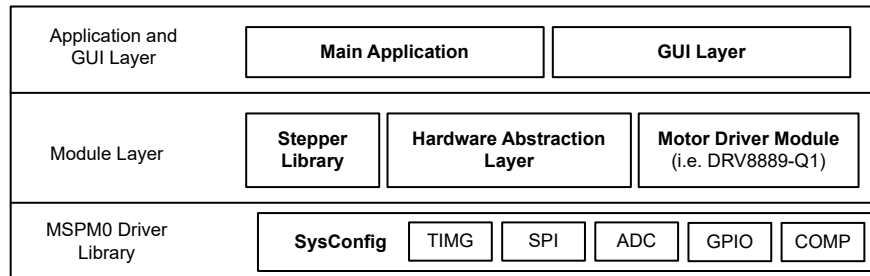


图 4-3. 采用 MSPM0 的步进库的软件架构

## 4.3 方框图

方框图展示了 MSPM0L1xxx 步进 SDK 中支持用于步进电机的两种 MSPM0L1xxx 设计：

- 4 PWM 控制 ( PWM 接口 )
- 单 PWM 控制 ( STEP 接口 )

如图 4-4 所示，4 PWM 控制 ( PWM 接口 ) 中使用的信号包括：

- 4 个具有边沿对齐同步的 PWM 信号 ( PWM 4x )
- 用于电流调节的 8 位 DAC 基准电压 ( VREF )<sup>(1)</sup>
- 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 )
- 来自集成电流检测功能的 ADC 电流检测反馈，用于测量电机相电流

(1) VREF 可使用 COMP 模块中的 8 位 DAC，仅在 MSPM0L130x 中提供。

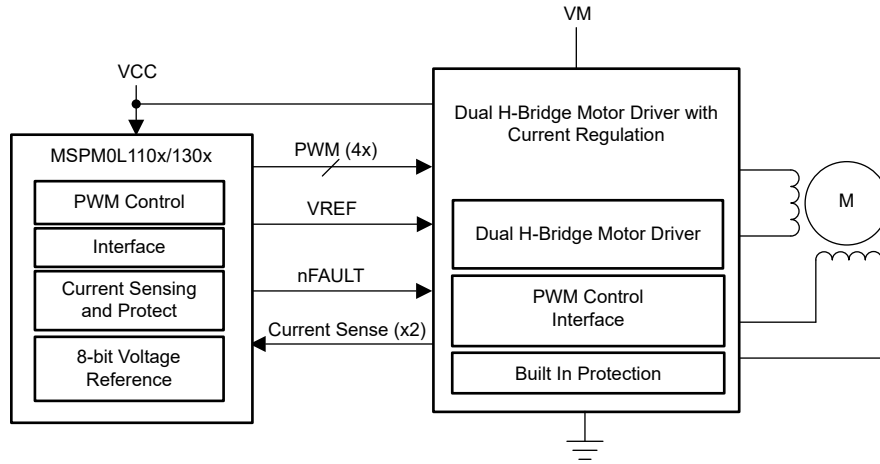


图 4-4. 用于步进电机控制的 4 PWM 接口方框图

如图 4-5 所示，单 PWM 控制 ( PWM 接口 ) 中使用的信号包括：

- 具有可调占空比和脉宽 (STEP) 的单 PWM 信号
- 方向引脚 (DIR)
- 用于电流调节的 8 位 DAC 基准电压 (VREF)
- 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)
- 可选 SPI 读取/写入接口 (适用于具有 SPI 接口的驱动器)

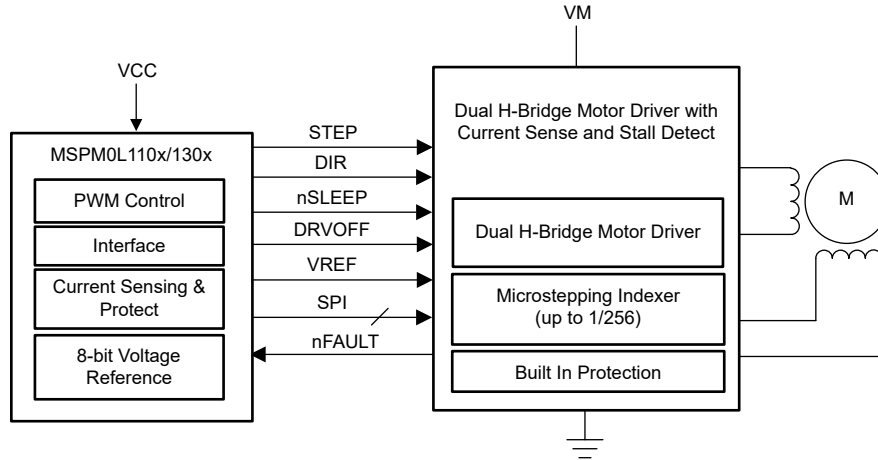


图 4-5. 用于步进电机控制的单 PWM 接口方框图

#### 4.4 硬件支持

表 4-1 展示了使用 MSPM0-SDK 进行步进电机控制时支持的硬件。

表 4-1. 使用 MSPM0 进行步进电机控制时支持的硬件

LaunchPad	电机驱动器硬件	硬件用户指南	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-MSPM0L1306	DRV8411AEVM	DRV8411AEVM	PWM (4)	2	否	1.65V 至 11V	2.5A	5W 至 10W
	DRV8889-Q1EVM	DRV8889-Q1EVM	STEP (1)	1	是	4.5V 至 45V	2.4 A	<75W

#### 4.5 软件支持

表 3-1 显示了 TI Resource Explorer 中步进电机控制支持的软件。

表 4-2. 步进电机控制的软件支持

库软件概述	代码示例	GUI	GUI 用户指南
步进电机库概述	DRV8411A、DRV8889-Q1	DRV8411A、DRV8889-Q1	DRV8411A、DRV8889-Q1

#### 4.6 使用 MSP 电机控制 SDK 评估步进电机

有关更多信息，请访问 TI Resource Explorer 中的[步进电机控制用户指南](#)。

要使用 MSPM0 旋转步进电机，请执行以下三个简单步骤：

1. 订购受支持的 LaunchPad 和 DRV8xxx EVM。根据指定 EVM 的硬件用户指南连接硬件和电机。
2. 从 TI Gallery 中启动指定的 GUI。使用 MSPM0 MCU 启用驱动器，旋转电机并评估器件特性。
3. 在 [Code Composer Studio](#) 或 [CCS Cloud IDE](#) 中评估固件。

## 5 BLDC 有传感器 TRAP 控制

MSPM0 BLDC 有传感器 TRAP 控制设计的主要特性包括：

- 6 PWM 控制，具有互补输出、高达  $2\mu\text{s}$  的可调死区和高达 200kHz 的 PWM 频率
- 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/欠压检测

### 5.1 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  $60^\circ$  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  $120^\circ$  梯形电流波形，如图 5-1 所示。

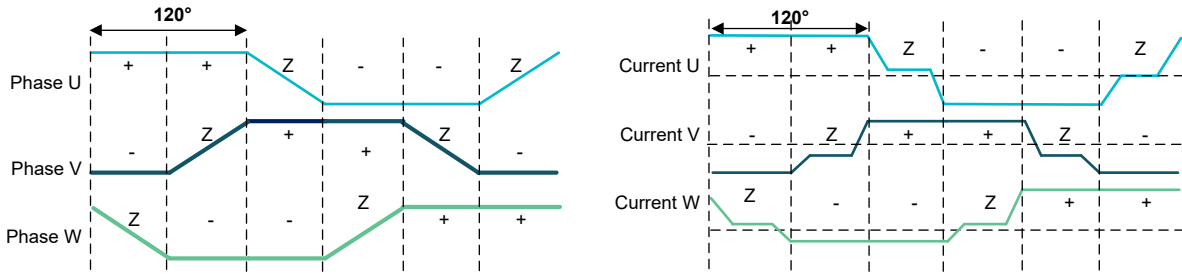


图 5-1. 梯形换向相电压和相电流波形

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 5-2 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。

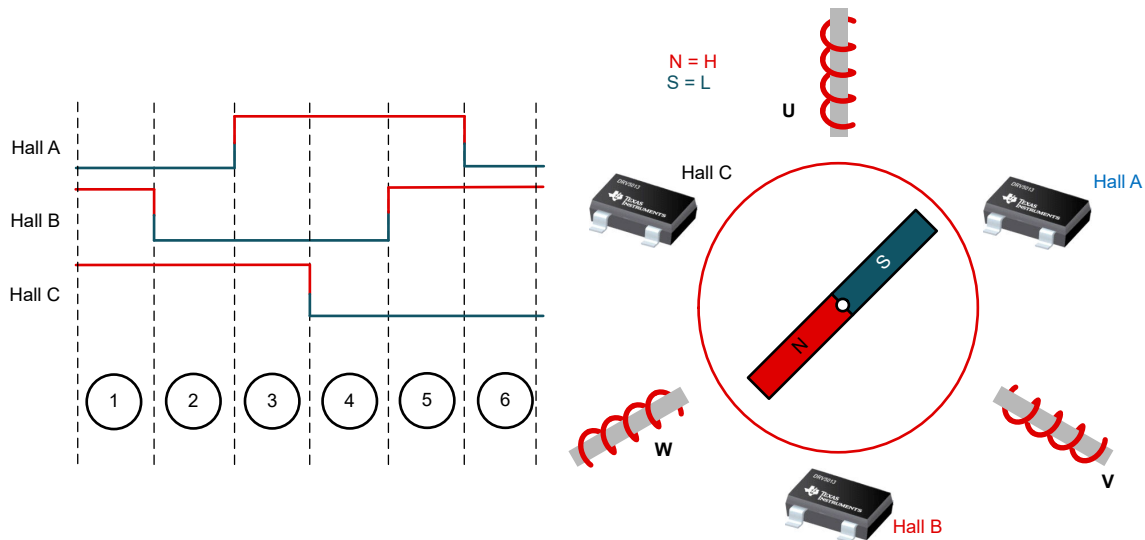


图 5-2. 霍尔传感器 A/B/C 六步换向波形

### 5.2 软件架构

如图 5-3 所示，该软件包使用 MSPM0 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三相电机驱动器和栅极驱动器解决方案连接。

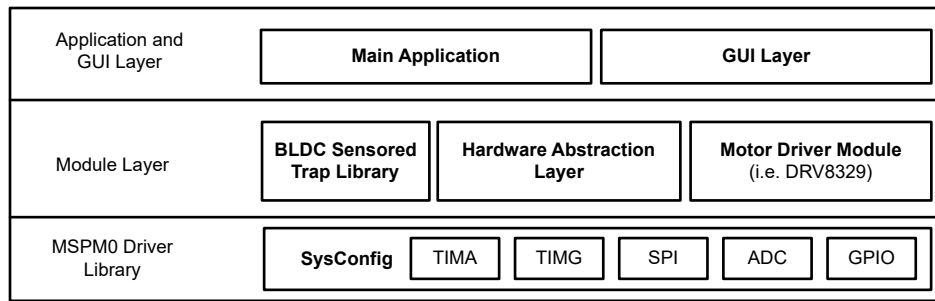


图 5-3. 采用 MSPM0 的 BLDC 有传感器 TRAP 库的软件架构

### 5.3 方框图

MSP 电机控制中支持的 MSPM0Lxxx/MSPM0Gxxx MCU 以及三相栅极/电机驱动器方框图如图 5-4 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)

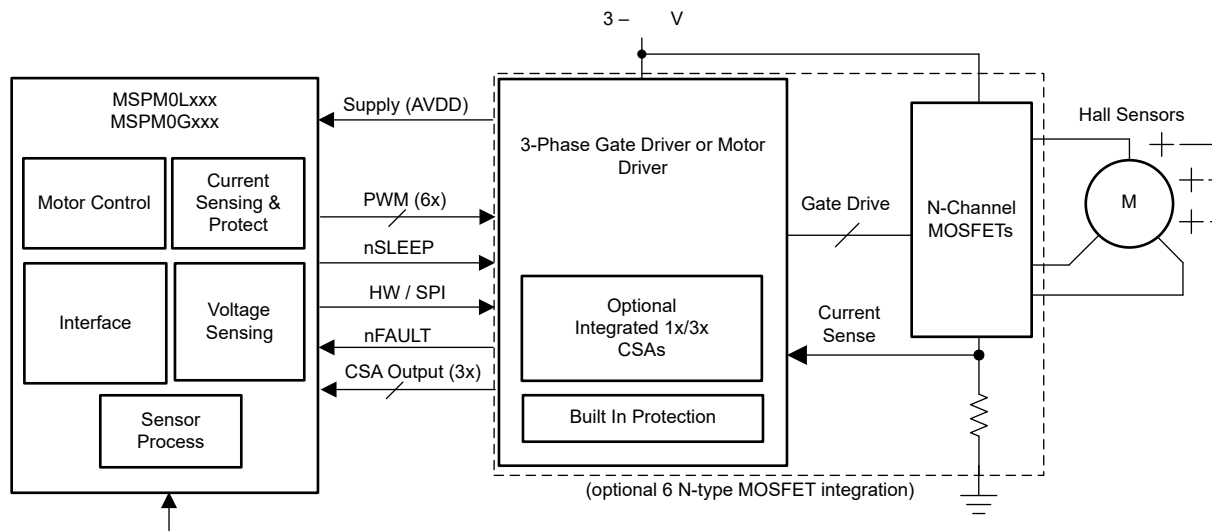


图 5-4. 使用 MSPM0Lxxx/MSPM0Gxxx 和三相栅极或电机驱动器的 BLDC 电机 6 PWM 有霍尔传感器梯形控制方框图

## 5.4 硬件支持

表 5-1 展示了使用 MSPM0-SDK 进行 BLDC 有传感器 TRAP 电机控制时支持的硬件。

表 5-1. 使用 MSPM0 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	硬件用户指南	电流检测放大器	SPI 驱动器支持	电机电压范围 (建议值)	建议电机功率
LP-MSPM0L1306	DRV8329AEVM	DRV8329AEVM	1	否	4.5V 至 60V	<1000W
LP-MSPM0G3507	DRV8311HEVM	DRV8311HEVM	3	否	3V 至 20V	<25W
	DRV8316REVM	DRV8316REVM		是	4.5V 至 40V	<75W
	DRV8317HEVM	DRV8317HEVM			4.5V 至 20V	<25W
	DRV8328AEVM	DRV8328AEVM	0	否	4.5V 至 60V	<1000W
	DRV8329AEVM	DRV8329AEVM	1		4.5V 至 60V	
	BOOSTXL-DRV8323RH	BOOSTXL-DRV8323RH	0		6V 至 60V	
			3		4.6V 至 100V	<2000W
	DRV8300DIPW-EVM	DRV8300DIPW-EVM	0		8V 至 100V	
DRV8353RH-EVM	DRV8353RH-EVM	0				
		3				

## 5.5 软件支持

表 3-1 显示了 TI Resource Explorer 中的有霍尔传感器 TRAP 电机控制所支持的软件。

表 5-2. 步进电机控制的软件支持

MSPM0 LaunchPad	库软件概述	软件用户指南	代码示例	GUI	GUI 用户指南
LP-MSPM0G3507	BLDC 有传感器 TRAP 库概述	BLDC 有传感器 TRAP 软件用户指南	DRV8300、 DRV8311、 DRV8316、 DRV8317、 DRV8323RH、 DRV8328、 DRV8329、 DRV8353RH、 TIDA-010251	DRV8300、 DRV8311、 DRV8316、 DRV8317、 DRV8323RH、 DRV8328、 DRV8329、 DRV8353RH	DRV8300、 DRV8311、 DRV8316、 DRV8317、 DRV8323RH、 DRV8328、 DRV8329、 DRV8353RH
LP-MSPM0L1306			DRV8329	DRV8329	

## 5.6 使用 MSP 电机控制评估有传感器 TRAP

有关更多信息，请访问 TI Resource Explorer 中的 [BLDC 电机控制用户指南](#)。

要使用 MSPM0 通过有传感器 TRAP 旋转 BLDC 或 PMSM 电机，请执行以下三个简单步骤：

1. 订购受支持的 LaunchPad 和 DRV8xxx EVM。根据指定 EVM 的硬件用户指南连接硬件和电机。
2. 从 TI Gallery 中启动指定的 GUI。使用 MSPM0 MCU 启用驱动器，旋转电机并评估器件特性。
3. 在 [Code Composer Studio](#) 或 [CCS Cloud IDE](#) 中评估固件。

## 6 三相无传感器 FOC 控制

MSPM0 无传感器 FOC 设计的主要特性包括：

- 基于双分流器的电流检测设计
- 增强型滑模观测器 + 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 50kHz) 和死区



### 备注

当前的解决方案目前是演示版，仅供评估之用。未来的 MSPM0-SDK 版本将包括基本的无传感器 FOC 控制功能，例如电机参数识别、自动 PI 调谐、磁场减弱控制等。

## 6.1 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 6-1 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](#)。

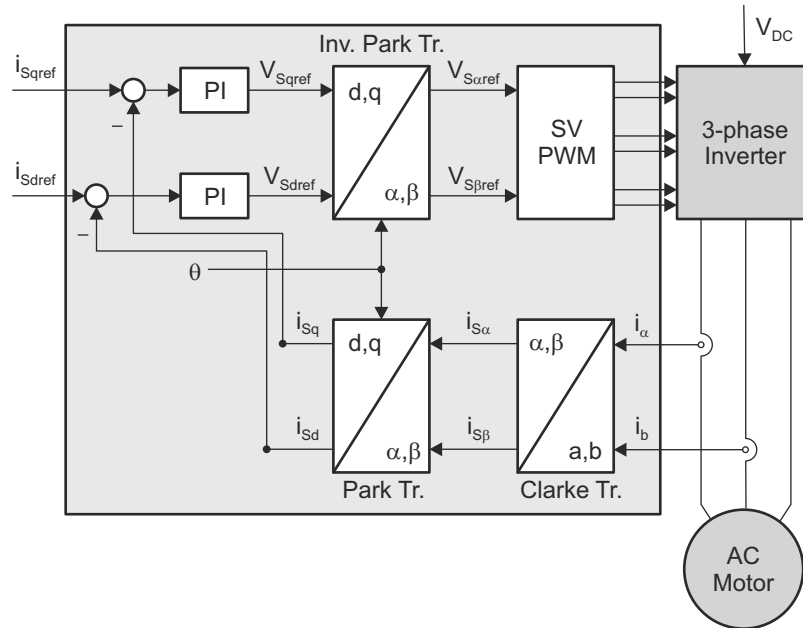


图 6-1. 使用两个电流传感器的无传感器磁场定向控制

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。

## 6.2 软件架构

如图 6-2 所示，该软件包使用 MSPM0 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。

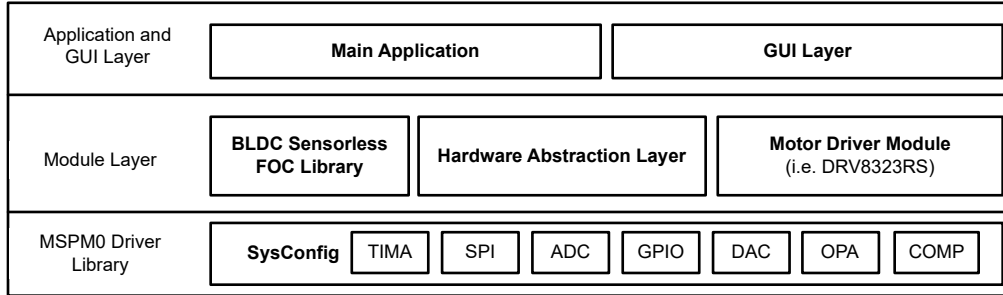


图 6-2. 采用 MSPM0 的无传感器 FOC 库的软件架构

## 6.3 方框图

有两种适用于无传感器 FOC 的拓扑，具体取决于相电流反馈所需的模拟信号链是集成在 MSPM0Gxxx MCU 中，还是在系统外部。

### 6.3.1 具有模拟/MOSFET 集成的 MSPM0Gx10x 和栅极驱动器

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 MSPM0Gx 器件的模拟要求。无模拟集成的 MSPM0Gx10x 器件采用小至 VSSOP-20 和 24-VQFN 的封装，可减小系统尺寸并降低成本。MSPM0 可以使用 12 位同步采样 4Mbps 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 6-3 所示，此系统拓扑使用的信号包括：

- 具有可调死区的 6 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)

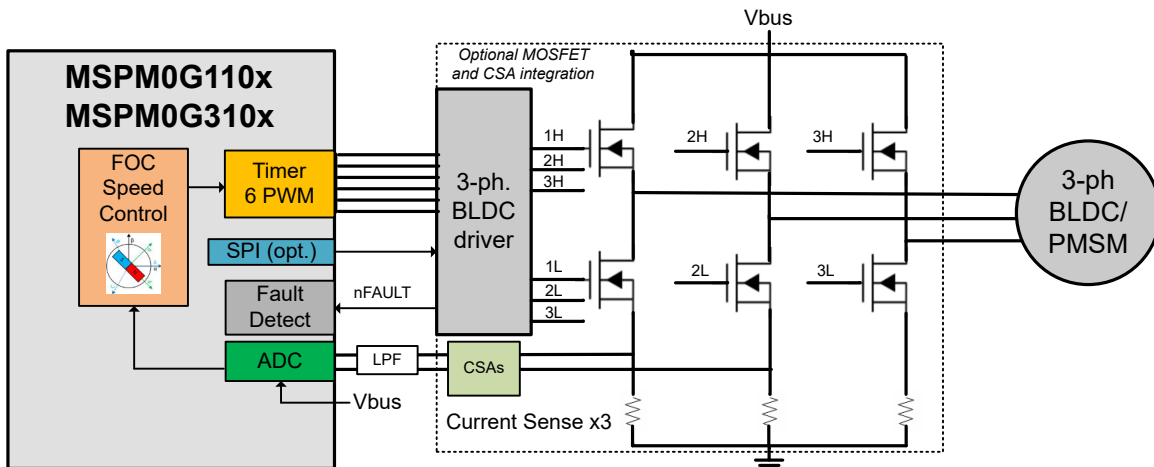


图 6-3. 使用 MSPM0Gx10x 和三相栅极或电机驱动器 (具有可选 CSA 和 MOSFET 集成) 的 BLDC 电机无传感器 FOC 方框图

### 6.3.2 MSPM0Gx50x 模拟集成和栅极驱动器

借助可扩展的模拟集成，MSPM0Gx50x 器件可以准确检测电机相电流和电压，计算实时电机转速和误差计算，并输出空间-矢量生成的 PWM 信号以闭合速度环路。两个可编程增益放大器 (PGA) 可放大通过两个分流电阻器检测到的相电流之间的差异和经调节的 DAC 输出电压，PGA 的输出可直接由内部 ADC 采样。此外，MSPM0G350x 系列器件还提供硬件数学加速器 (MATHACL)，可提高 FOC 变换所需数学函数 (如乘法、除法、反正切、正弦和余弦) 的计算吞吐量。

该拓扑为使用分立式模拟信号链提供了一种低成本替代方案，专为需要高电压和高效率的 BLDC、PMSM 和 ACIM 电机而设计。一些应用示例包括伺服驱动器、HVAC 电机和大型电器。

如图 6-4 所示，此系统拓扑使用的信号包括：

- 具有可调死区的 6 PWM 信号 (6x PWM)
- 来自驱动器的逻辑低电平故障信号 (nFAULT)
- 两个采用反相或同相配置并具有可编程增益的集成运算放大器
- 通过集成运算放大器输出和总线检测电压进行的 ADC 电流检测
- 适用于外部电流检测信号偏置的 12 位 DAC 基准
- 使用集成低侧比较器的可选总线过流保护

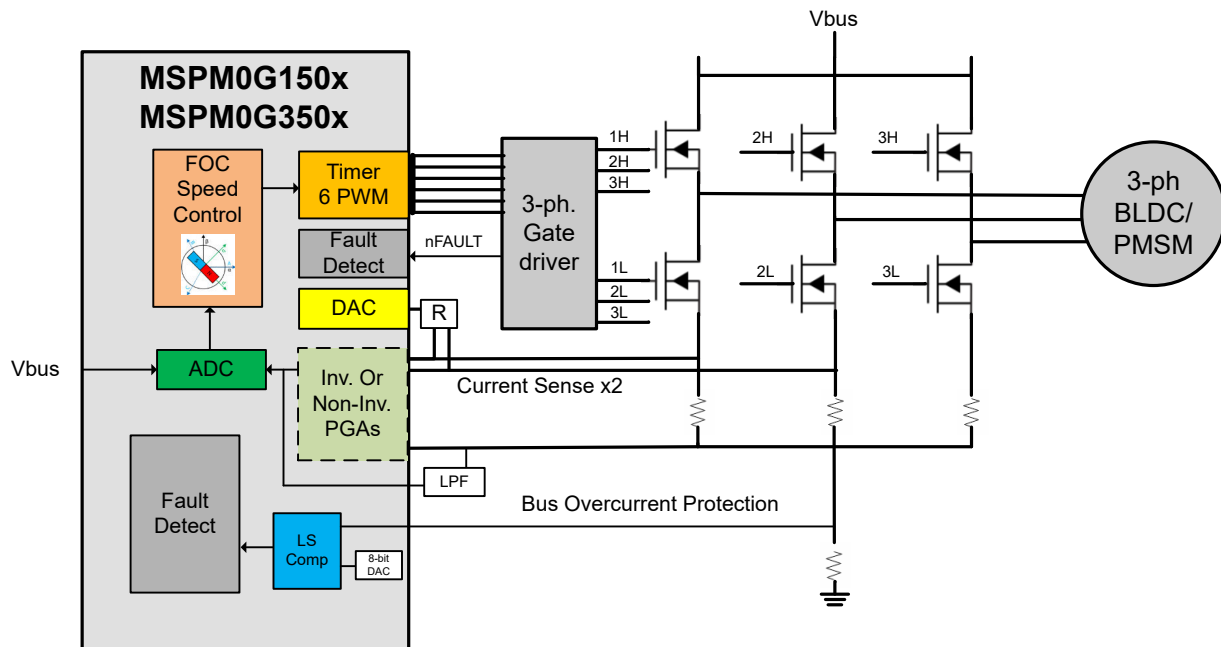


图 6-4. 使用 MSPM0Gx50x 并具有模拟集成功能和三相栅极驱动器功率级的 BLDC/PMSM/ACIM 电机的无传感器 FOC 方框图

## 6.4 硬件支持

表 6-1 展示了使用 MSPM0-SDK 进行三相无传感器 FOC 电机控制时支持的硬件和经过测试的电机。

表 6-1. 使用 MSPM0 进行无传感器 FOC 电机控制时支持的硬件

LaunchPad	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	电机电压范围 (建议值)	建议电机功率
LP-MSPM0G3507	BOOSTXL-DRV8323RS	BOOSTXL-DRV8323RS	3	是	6-60V	< 1000W

## 6.5 软件支持

表 3-1 显示了 TI Resource Explorer 中的无传感器 FOC 控制支持的软件。

表 6-2. 步进电机控制的软件支持

库软件概述	软件用户指南	代码示例	GUI	GUI 用户指南
无传感器 FOC 库概述	无传感器 FOC 软件用户指南	DRV8323RS	DRV8323RS	DRV8323RS

## 6.6 使用 MSP 电机控制评估无传感器 FOC

有关更多信息，请访问 TI Resource Explorer 中的[无传感器 FOC 控制用户指南](#)。

要使用 MSPM0 通过无传感器 FOC 旋转 BLDC 或 PMSM 电机，请执行以下四个简单步骤：

1. 订购受支持的 LaunchPad 和 DRV8xxx EVM。根据指定 EVM 的硬件用户指南连接硬件和电机。
2. 获取电机的相电阻 (Rs)、相电感 (Ls)、极数和最大转速 (RPM)。
3. 从 TI Gallery 中启动指定的 GUI。指定电机参数，使用 MSPM0 MCU 启用驱动器，旋转电机并评估器件特性。
4. 在 [Code Composer Studio](#) 或 [CCS Cloud IDE](#) 中评估固件。

## 6.7 无传感器 FOC 性能

表 6-3 和表 6-4 展示了三相无传感器 FOC 设计性能（对以下电机进行了测试）。

### 无传感器 FOC 设计规格

- PWM 频率 = FOC = 10kHz - 无传感器
- 编译器 - Code Composer Studio 12.0 版 (CCS)

表 6-3. 无传感器 FOC 设计规格

MCU	CPU 时钟 (MHz)	Cortex	电流检测	总工作量	代码总数 (Kb)	总 SRAM (kB)
MSPM0G	80	M0	2 个分流器	55%	12.8	1.64

### 电机性能

- BOOSTXL-DRV8323RS, VM = 24V
- 启用了数学加速器 (MATHACL)
- PWM 频率 = FOC 环路频率

表 6-4. 无传感器 FOC 电机性能

	LVSERVOMTR	LVBLDCMTR
闭环速度范围 (RPM)	200 - 4500 RPM	280 - 5830 RPM
最大电气频率范围 (kHz)	265 Hz	389.5 Hz
速度精度误差	<1%	<1%
PWM 频率 (kHz)	15kHz	15kHz
最大功率 (W)	约 100W 至 400W	约 100W 至 400W

## 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](#)

## 修订历史记录

<b>Changes from Revision A (July 2023) to Revision B (October 2023)</b>		<b>Page</b>
• 更新了 <a href="#">节 1</a> 。	.....	3
• 更新了 <a href="#">节 2</a> 。	.....	4
• 更新了 <a href="#">节 3.4</a> 。	.....	7
• 添加了 <a href="#">节 3.5</a> 。	.....	7
• 更新了 <a href="#">节 4.4</a> 。	.....	12
• 添加了 <a href="#">节 4.5</a> 。	.....	12
• 更新了 <a href="#">节 5.4</a> 。	.....	15
• 添加了 <a href="#">节 5.5</a> 。	.....	15
• 更新了 <a href="#">节 6.1</a> 。	.....	16
• 更新了 <a href="#">节 6.4</a> 。	.....	18
• 添加了 <a href="#">节 6.5</a> 。	.....	18

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司