

# 基于 MSPM0 MCU 实现采用无传感器 FOC 算法的 BLDC 和 PMSM 控制



Aaron Barrera

在现代环境中，电机广泛用于电动工具、电动自行车、电动汽车、工业机器人等许多产品。尤其是 BLDC (无刷直流) 和 PMSM (永磁同步电机) 电机在高效率、低噪声和长寿命方面具有优势。对于 BLDC 或 PMSM 的控制方法，磁场定向控制 (FOC) 算法被用于电机必须以高效率和超小可闻噪声平稳运行的许多应用。MSPM0 MCU 凭借其品类丰富的产品系列、高效的数学加速器和高性能特性，可以充分发挥 FOC 控制的作用。



家用电器



电动工具



工业电机



个人交通

## 什么是 BLDC、PMSM 和 FOC ?

BLDC 和 PMSM 是无刷电机，使用定子和转子不一致的磁场产生的力来驱动电机。此类电机的转子是永磁体，定子由多个电磁线圈组成。

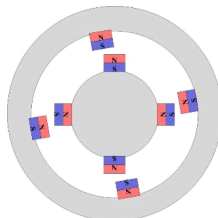


图 1. 一致的磁场

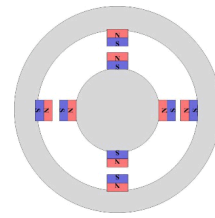


图 2. 不一致的磁场

矢量控制也称为磁场定向控制 (FOC)，是一种变频驱动 (VFD) 控制方法，其中三相交流或无刷直流电机的定子电流视为可以用一个向量可视化表示的两个正交分量。一个分量定义电机的磁通量，另一个分量定义扭矩。驱动器控制系统根据驱动器转速控制给出的磁通和扭矩基准计算相应的电流分量基准。

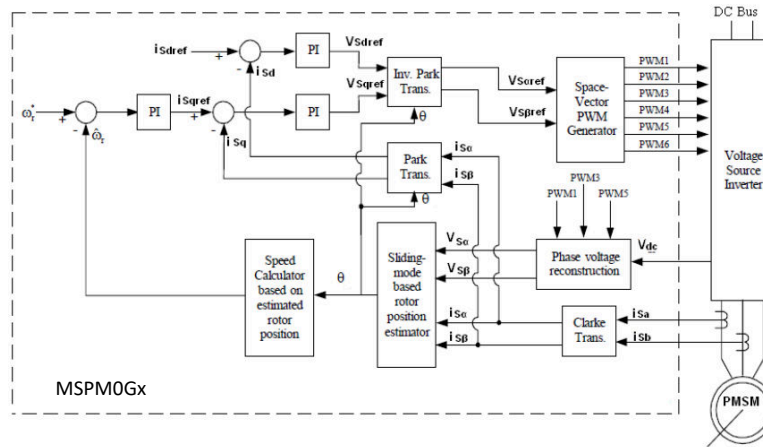


图 3. FOC 控制算法方框图

在与 BLDC 和 PMSM 相关的应用中，用户必须精确控制电机转速、扭矩和其他变量，以满足实际应用的要求。因此，所使用的主要资源如下：

### 硬件

- **微控制器 (MCU)**：电机驱动器控制器可控制模拟数据采集，运行控制算法，监控电机状态并与其他产品通信
- **前置驱动器**：功率级/逆变器电桥的前置驱动器
- **功率级和逆变器电桥**：6 个 N 型 MOSFET、IGBT 或氮化镓 (GaN) FET
- **模拟反馈**：收集总线电压、电机相电压和电机相电流
- **位置检测 (可选)**：绝对编码器、旋转变压器、正弦/余弦传感器

### 软件

- **应用程序**：任务管理和调度
- **算法**：根据电机的反馈和用户输入转速/扭矩基准实时计算电机的驱动信号输出

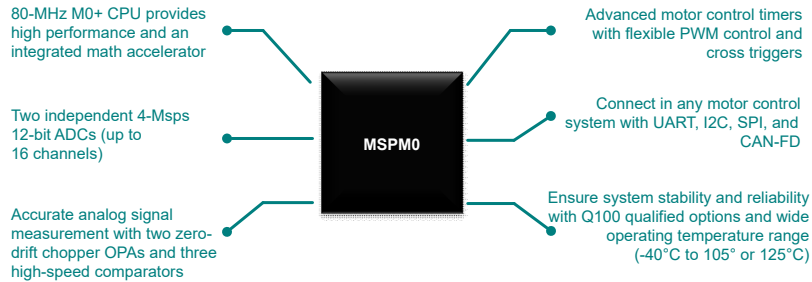
### TI 器件

TI 器件可以针对各种三相电机电压和功率为驱动器和功率级实现所有这些功能。

MCU	电机电压 (开关类型)	前置驱动器	逆变器功率级
MSPM0Gxxxx ARM Cortex M0+ 80MHz MCU	3V 至 40V (MOSFET)	三相 BLDC 电机驱动器 ( DRV831x 系列 )	
	6V 至 100V (MOSFET)	三相 BLDC 栅极驱动器 ( DRV83xx 系列 )	N 沟道 MOSFET ( CSD 系列 )
	高达 650V (GaN)	GaN IC ( LMG3xx 系列 )	
	高达 700V ( MOSFET、IGBT )	半桥驱动器 ( UCC2xxx 系列、LMxxx 系列 )	MOSFET、IGBT

## MSPM0 为什么适用于 BLDC、PMSM 和 FOC ?

德州仪器 (TI) 的可扩展 M0+ MSPM0Gxx 高性能 MCU 具有先进的片上电机控制外设，可以为各种电机控制应用提供设计。该产品系列涵盖 32KB 至 128KB 的闪存，并具有可扩展的模拟集成、电机控制外设和 CAN。



- **80MHz M0+ CPU** - 缩短 FOC 算法和检测信号的处理时间
- **集成数学加速器**
  - 用于定点和 IQ 格式数字的 32 位硬件除法器 ( 8 个周期 )
  - 在 21 个周期内完成平方根运算
  - 在 29 个周期内完成 24 位三角函数计算 ( sin、cos、atan )
- **两个独立的 4MSPS 12 位 ADC 模块 ( 多达 16 个通道 )**
  - 多达 11 个 ENOB 并具 SNR
  - 在 250ns 内进行高达 4MSPS 的 ADC 升压电机相电流检测
- **两个“零漂移”斩波运算放大器** - 精确放大两相电流并计算三相电流
- **三个高速比较器** - 以零等待时间实现电机的硬件低侧电流限制
- **先进的电机控制计时器** - 灵活的 6 PWM 控制和交叉触发器
  - 中心对齐的 PWM 生成
  - 非对称 PWM 允许以受控的相移生成两个中心对齐的 PWM 信号。
  - 具有死区插入的互补 PWM
  - 交叉触发器生成 ADC 时序以捕获两相电流
- **具有毛刺干扰滤波器的稳健 IO 设计** - 提供在存在电机噪声的情况下仍可靠运行的系统。
- **全面的通信接口** - 包括 UART、I2C、SMBus、SPI 和 CAN-FD，可满足电机控制系统的所有通信要求。
- **FOC 算法库** - 缩短电机控制设计的上市时间。
- **可扩展 MCU 产品系列** - 涵盖各种闪存选项的引脚对引脚兼容器件。
- **低成本、小尺寸封装** - 适用于空间受限的设计的选项。
- **宽工作温度范围 ( -40°C 至 +125°C )**
- **符合汽车级 Q100 标准的功能安全选项 ( 高达 ASIL-B )**，可确保系统稳定性和可靠性。

## MSPM0 在 BLDC、PMSM 和 FOC 中有什么作用？

在 BLDC、PMSM 和 FOC 应用中，MSPM0 监控电机状态并运行 FOC 算法。根据系统架构和电机电压，FOC 应用中使用了两种主要的模拟集成拓扑，特别是在需要使用观测器估算电机实时位置的无传感器 FOC 应用中。MSPM0G 还提供了一个集成硬件加速器用于执行计算，以在 30kHz PWM 频率或更高频率下实现高效的 FOC 性能。

### MSPM0 模拟集成和栅极驱动器

借助可扩展的模拟集成，MSPM0 可以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。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。该拓扑设计用于需要高电压、低成本或高效率的 FOC 应用，例如同步驱动器、HVAC 电机和大型电器。

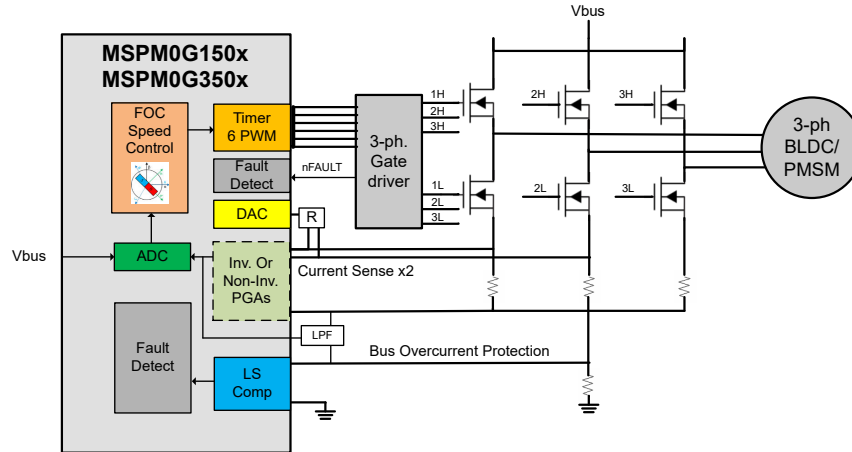


图 4. 用于 FOC 的 MSPM0Gx50x + 栅极驱动器方框图

### 具有模拟集成的 MSPM0 和栅极驱动器

在低电压电机应用中，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 MSPM0Gx 器件采用小至 24-VQFN 的封装，可减小系统尺寸。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小外形尺寸的 FOC 应用，例如泵、风扇、鼓风机和小型电器。

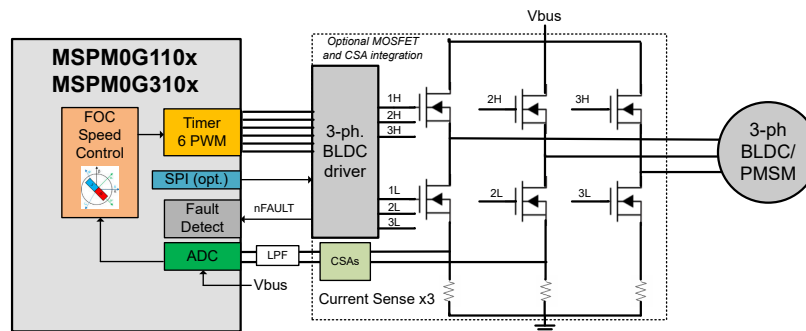


图 5. 用于 FOC 的 MSPM0Gx10x + 栅极驱动器方框图

## 设计详情

- **MSPM0-SDK** 中的电机控制设计
  - **MSPM0 无传感器 FOC 库**
    - 支持具有集成电流检测功能的 DRV830x、DRV831x、DRV832x、DRV834x、DRV835x 器件
    - 支持使用 MSPM0Gx 集成模拟进行高达 650V 的电流检测的三相栅极驱动器设计
- **FOC 算法库**
  - 硬件抽象层 (HAL)
    - 用于使特定于器件的外设 (例如 PWM、ADC 和计时器) 在算法的其余部分通用, 以便于移植。
  - 空间矢量调制 (SVM)
    - 用于创建连续旋转空间矢量的 PWM 控制算法, 可在每个 PWM 周期为栅极驱动器生成相应的栅极信号。
  - Clarke 和 Park 变换 (和逆变换)
    - 该算法中用于实现直接正交零变换 (这是 FOC 理论的关键要素) 的数学模块。此处将该模块用于控制三相定子和转子质量, 从而尽可能地增大扭矩。
  - 估算器
    - 用于测量无传感器 FOC 系统中的转子磁通大小和角度。
  - PID 控制器
    - 典型的比例积分微分控制器可用于稳定闭环性能。
  - 用户
    - 包含所有用户可调参数以实现所需性能模块。
- **计时器和 ADC**
  - 从一个计时器 (TIMA0) 生成 6 个外部 PWM 信号并触发 2 次 ADC 模块转换以同时对相电流、相电压和总线电压进行采样。
  - **PWM**: 具有死区插入功能的中心对齐互补 PWM。

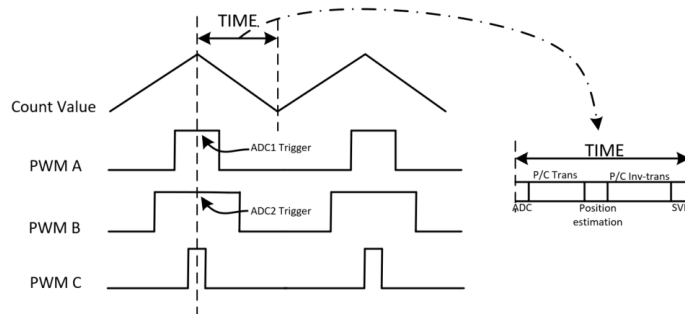


图 6. 用于 FOC 的 MSPM0Gx TIMA 和 ADC 序列

- **OPA - 标准 (STD) 模式**
  - STD 模式下具有 6MHz GBW、4V/ $\mu$ s 压摆率和 6 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C 温漂

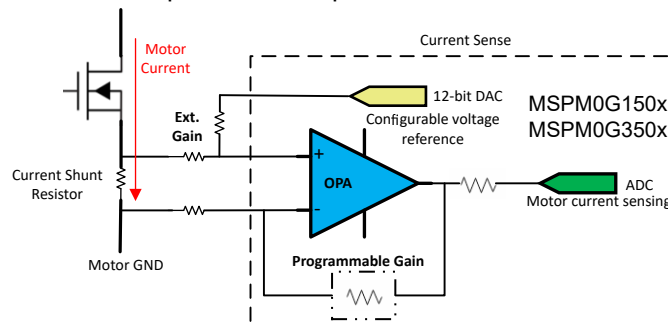


图 7. 用于电流检测的 MSPM0Gx OPA 方框图

- **COMP - 高速模式**
  - COMP 模块内的 8 位 DAC (1 $\mu$ s 稳定时间) 支持 40ns 的响应时间来设置电流限制阈值

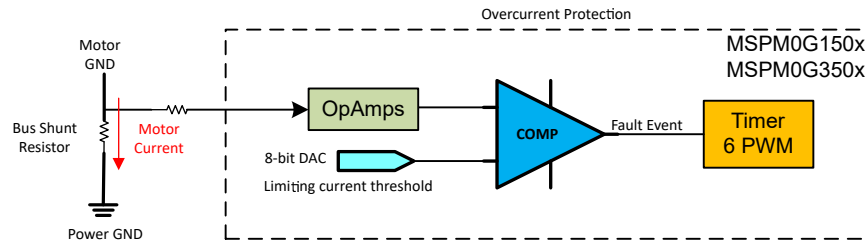


图 8. 用于电流保护的 MSPM0Gx COMP 方框图

## 资源

立即订购 [MSPM0 LaunchPad 开发套件](#) 和 [DRV83xx EVM](#)，开始评估用于电机控制系统的 MSPM0。借助 MSPM0 代码示例和交互式在线培训，快速开始您的电机控制设计。以下链接显示了其他可用资源。

- MSPM0 :
  - [MSPM0-SDK](#)
  - [MSPM0 Academy](#)
  - [MSPM0 登录页面](#)
- DRV83xx EVM :
  - [DRV8311HEVM](#)、[DRV8316REVM](#) 和 [DRV8317HEVM](#)
  - [BOOSTXL-DRV8320RS](#)
  - [BOOSTXL-DRV8323RH](#)、[BOOSTXL-DRV8323RS](#)
  - [DRV8353RH-EVM](#)、[DRV8353RS-EVM](#)
- MSPM0 LaunchPad 开发套件
  - [LP-MSPM0L1306](#)
  - [LP-MSPM0G3507](#)
- [TI 高精度实验室 - 电机驱动器：无刷直流基础知识](#)

## 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