

摘要

无刷直流 (BLDC) 电机的使用在汽车和工业市场中变得越来越普遍。尽管电机旋转颇具挑战性，但德州仪器 (TI) 的 BLDC 电机驱动器通过降低设计复杂性同时提高系统效率，使 BLDC 电机旋转变得易如反掌。TI 提供多样化的 BLDC 电机驱动器产品系列，支持各种架构、集成和控制方法，可广泛应用于各种场景。该产品系列分为驱动器、控制和安全系列，每个系列都包含关键技术。这些技术使开发人员能够设计更小、更高效的系统，降低设计复杂性，并满足功能安全标准和认证。

内容

1 电机注意事项以及为何选择无刷直流电机？	3
2 电机驱动器架构	4
2.1 栅极驱动器与集成式 FET 驱动器：电源、电压和电流要求	4
2.2 三种用例：速度、扭矩或位置	5
2.3 控制方法：陷波、正弦或 FOC	6
2.4 有传感器与无传感器	8
2.5 电流检测放大器	10
2.6 接口	11
2.7 功率集成	11
2.8 100% 占空比支持	12
3 德州仪器 (TI) 的无刷直流电机驱动器	13
3.1 栅极驱动器：DRV8x 和 DRV3x 系列	13
3.2 集成式 MOSFET：DRV831x 系列	14
3.3 控制和栅极驱动器：MCx 系列	15
3.4 完全集成：MCx831x 和 DRV10x 系列	16
4 结论	18
5 修订历史记录	18

插图清单

图 1-1. 电机驱动器注意事项和选择流程	3
图 2-1. 电机驱动器架构	4
图 2-2. 三种用例的比较	6
图 2-3. 梯形控制 (120°)	7
图 2-4. 正弦控制 (180°)	7
图 2-5. 磁场定向控制状态矢量图	8
图 2-6. 使用霍尔效应传感器确定电机位置	8
图 2-7. 使用 BEMF 比较器估算反电动势	9
图 2-8. 使用已知电机参数和一阶差分方程计算反电动势	9
图 2-9. 使用外部分流电阻器的 CSA 集成	10
图 2-10. 使用内部低侧电流检测的 CSA 集成	10
图 2-11. BLDC 电机驱动器中的接口类型	11
图 2-12. BLDC 电机驱动器中集成的降压和 LDO 稳压器示例	12
图 2-13. BLDC 电机驱动器中的自举和涓流电荷泵架构 (左) 和电荷泵架构 (右)	12
图 3-1. DRV8x/DRV3x 系列的栅极驱动器架构	13
图 3-2. DRV8328 和 DRV835x 工业栅极驱动器的简化原理图	13
图 3-3. DRV3205 功能安全栅极驱动器的简化原理图	14
图 3-4. DRV831x 系列的集成式 FET 架构	14
图 3-5. DRV8311 和 DRV8316 集成式 FET 驱动器的简化原理图	15

图 3-6. MCx 系列的控制和栅极驱动器架构.....	15
图 3-7. DRV10x 和 MCx831x 系列的完全集成架构.....	16
图 3-8. MCT8316A 和 MCF8316A 器件的简化原理图.....	17
图 3-9. DRV10974 和 DRV10987 器件的简化原理图.....	17

表格清单

表 1-1. 电机类型比较.....	3
表 2-1. 电机驱动器架构.....	5
表 2-2. 不同控制方法的比较.....	6
表 2-3. TI BLDC 电机驱动器系列中的接口.....	11
表 3-1. MCF 和 MCT 器件中突出显示的控制功能.....	16

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 电机注意事项以及为何选择无刷直流电机？

由于无刷直流 (BLDC) 电机相对于有刷直流电机和步进电机等替代电机类型具有性能优势，因此无刷直流 (BLDC) 电机在各种应用中的使用变得越来越普遍。如表 1-1 所示，与有刷直流电机和步进电机相比，BLDC 电机更高效、更安静，并且功率密度更高、扭矩更大、速度更快且使用寿命更长。

表 1-1. 电机类型比较

电机类型	优点	缺点
无刷直流	寿命长、安静且功率密度出色	设计复杂，成本更高
有刷直流	成本低且易于使用	噪声大，存在 EMI 磨损和会产生火花
步进	寿命长、安静，并具备开环位置和速度控制	需要电流控制，而且不像 BLDC 那样节能，噪声大

BLDC 电机具有多项显著优势，但也有一个重要缺点：设计复杂度更高。使用 BLDC 电机进行产品开发需要了解如何设计高效系统和使电机旋转。德州仪器 (TI) 的 BLDC 团队正在努力通过创新的电机驱动器器件来降低这种门槛并简化 BLDC 设计。本文档探讨了选择 BLDC 电机驱动器时的注意事项，旨在帮助简化 BLDC 设计 (图 1-1)。

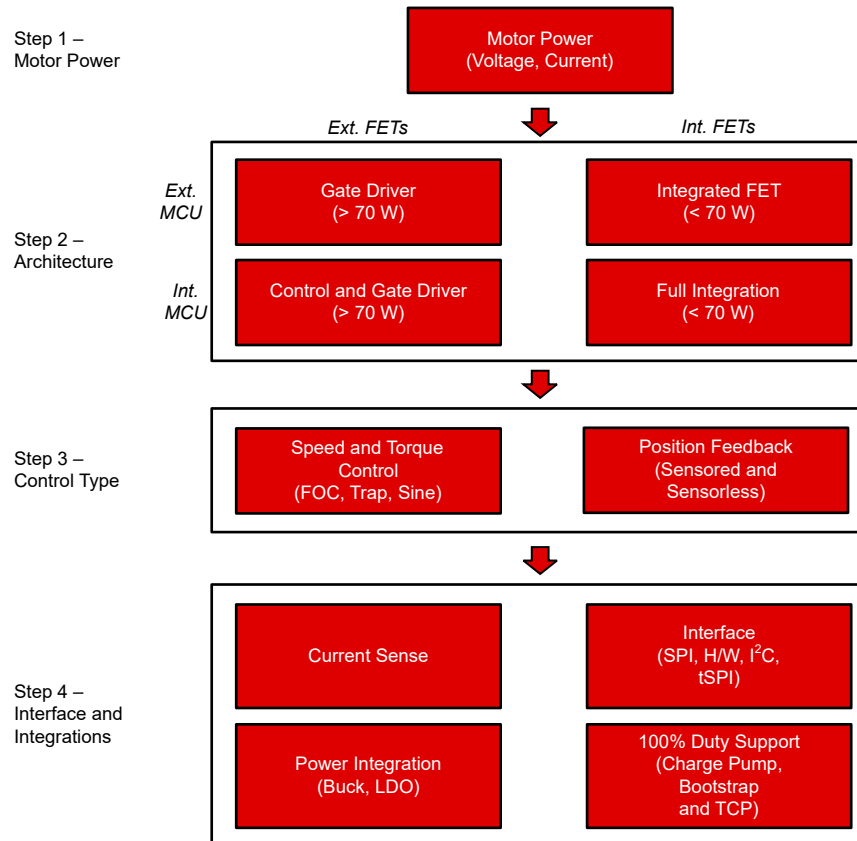


图 1-1. 电机驱动器注意事项和选择流程

2 电机驱动器架构

选择 BLDC 驱动器时，第一步是确定哪种架构最适合应用。架构种类繁多，涵盖适用于中低功率应用的集成 FET 驱动器以及支持大功率电机驱动系统的栅极驱动器。此外，TI 的 BLDC 产品系列还提供集成控制驱动器，用于有传感器和无传感器正弦和梯形控制。图 2-1 展示了 TI BLDC 产品系列中的各种电机驱动器架构，例如栅极驱动器（蓝色）、集成 FET 驱动器（蓝色 + 紫色）和有传感器与无传感器集成控制（绿色 + 蓝色或绿色 + 蓝色 + 紫色）。

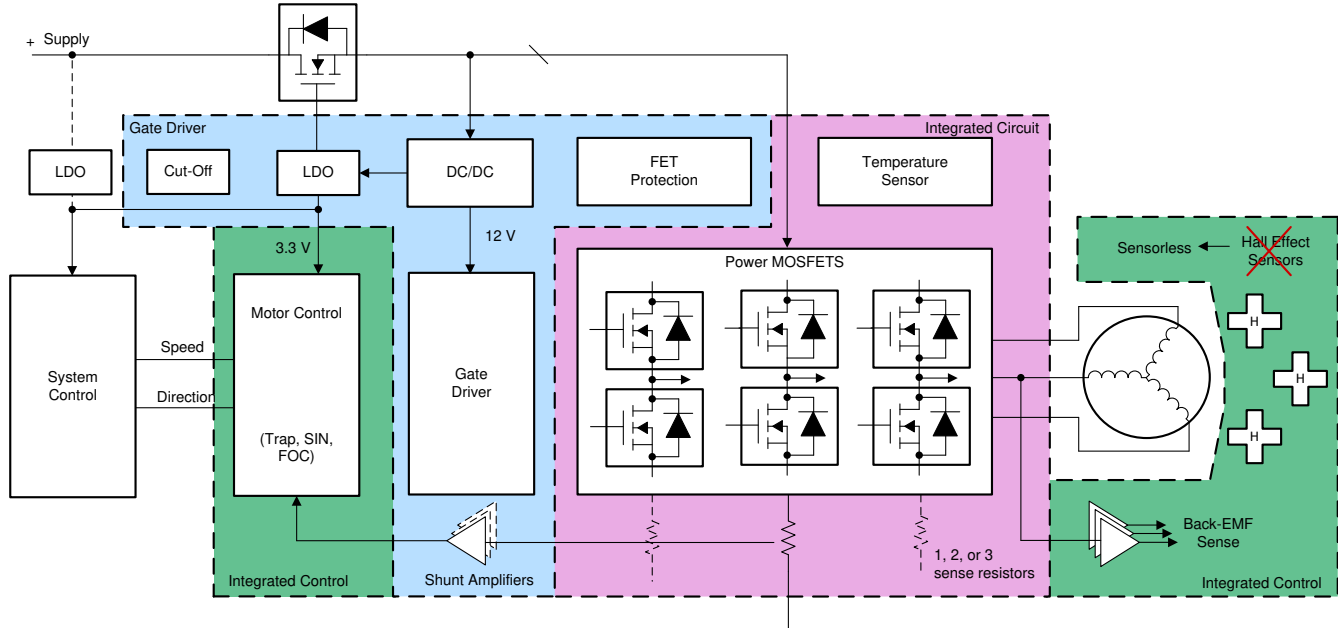


图 2-1. 电机驱动器架构

2.1 栅极驱动器与集成式 FET 驱动器：电源、电压和电流要求

在选择应用所需的电机驱动器架构类型时，确定系统中的电源电压、输出电流和电机功率是其中的首要步骤。

电源电压分为两类：电池供电和线路供电。在电池供电系统和线路供电系统中，电源电压都可能会发生变化，因此电机驱动器应至少支持电池的最大电压，并提供额外的裕量，防止系统中出现电压反馈或瞬态。对于稳压良好的电源和低功耗电机，TI 建议使用额定电压高达最大电压 1.2 倍的电机驱动器，而对于大功率电机和电池系统，则建议使用 1.5 倍到 2 倍的电机驱动器。德州仪器 (TI) 拥有广泛的电机驱动器产品系列，支持高达 56V 的电池系统。

一般来说，集成式 FET 架构和外部 FET 架构具有不同的电源要求。大功率 (>70W) 系统使用栅极驱动器，而中低功率系统 (<70W) 使用集成式 FET 驱动器。与集成式 FET 相比，外部 FET 能够驱动更高的功率，因为它们不受单芯片集成式 FET 驱动器器件尺寸的限制。对于集成式 FET 解决方案，峰值电流、RMS 电流和内部 FET 的 $R_{DS(on)}$ 都是与电机功率直接相关的重要注意事项。对于外部 FET 解决方案，外部 MOSFET 的 $R_{DS(on)}$ 和电流额定值与电机可驱动功率有关。

- 集成式 FET

- 集成式 FET 架构的电机功率可通过 [方程式 1](#) 计算得出，其中 V_M 是电机电压， I_{RMS} 是电机的标称电流。

$$P = V_M \times I_{RMS} \quad (1)$$

- **峰值电流** 是电机中可能由开关、浪涌或寄生效应引起的最大短时电流。如今，许多电机驱动器都具有过流保护等内置保护功能。峰值电流是在过流保护功能启动之前可以驱动的最大电流。TI 的集成式 FET 驱动器可以驱动高达数十安培的峰值电流。
- **RMS 电流（或连续电流）** 是电机的标称电流，与电机的功率耗散直接相关。
- 对于大功率系统，可能很难找到符合峰值和 RMS 电流规格的集成式 FET 驱动器，这意味着系统需要使用栅极驱动器，而不是集成式 FET 驱动器。

- 栅极驱动器 + 外部 FET :
 - 由于外部 FET 的 $R_{DS(on)}$ 较低，因此与内部 FET 架构相比，外部 FET 架构可以驱动更高的功率。由于外部 FET 尺寸更大，因此其 $R_{DS(on)}$ 会低得多，而又不会影响电机驱动器芯片尺寸。例如，内部器件的 $R_{DS(on)}$ 可能为数百毫欧，而外部 FET 的该电阻可能小于 $10m\Omega$ 。
 - 栅极驱动器电流是提供给外部 MOSFET 栅极的电流，其中外部 MOSFET 控制开/关切换速率。虽然它不与电机功率直接相关，但却是一个重要的考虑因素，因为它与 MOSFET 的压摆率、EMI 性能和热性能相关。TI 栅极驱动器架构可以提供高达 3.5A 的电流和吸收高达 4.5A 的栅极驱动器电流。
 - 栅极驱动电流与导通 FET 所需的上升时间之间的关系如方程式 2 所示，其中 Q_{GD} 是 FET 的栅漏极电容（这是影响 FET VDS 压摆率的主要因素），IDRIVE 是栅极驱动电流。

$$Q_{GD} = IDRIVE \times t_{rise} \quad (2)$$

- 如果 IDRIVE 栅极电流过高，可能会导致过冲、下冲或开关节点振铃，从而对 EMI 性能产生负面影响。相反，如果 IDRIVE 栅极电流过低，MOSFET 中的热损耗可能会因开关损耗产生的功率损耗而增加，其中电机电流在 MOSFET 饱和区域期间继续流动。
- 在某些栅极驱动器中，例如 TI 的智能栅极驱动器中，栅极电流可以通过 IDRIVE 设置轻松配置，而无需重新设计栅极驱动器和外部 FET 之间的外部电路。这让设计人员可以更加灵活地配置系统，以便实现 EMI 与热性能方面的权衡。有关 TI 智能栅极驱动技术的更多信息，请参阅节 3.1.1。

表 2-1 比较了栅极驱动器和集成式 FET 驱动器架构的规格。

表 2-1. 电机驱动器架构

	栅极驱动器	集成
电源	大功率 (通常大于 70W)	中低功率 (通常小于 70W)
电压范围	最高 100 V	通常为 60V 或更低
栅极驱动器电流	拉电流/灌电流大于 3.5A/4.5A	-
峰值电流	-	高达 13A
MOSFET	外部	内部
热性能	功率在外部 MOSFET 中耗散	受集成封装尺寸的限制
解决方案尺寸	更大	更小

2.2 三种用例：速度、扭矩或位置：

电机驱动器通常用于三种非常适合特定电机驱动器架构的应用。如节 2.1 所述，电源、电压和电流决定了最佳选择是栅极驱动器还是集成式 FET 驱动器架构。下一个考虑因素是是否集成控制，具体取决于以下三种用例之一及其典型应用：

- **速度**：电机应保持可变或一致的速度
 - 电器风扇、真空吸尘器、笔记本电脑冷却风扇、鼓风机、吊扇
- **扭矩**：电机应该用于施加力
 - 电动工具、电动自行车、自动门、电动座椅、智能锁

- **位置 (伺服控制)** : 电机应移动到特定位置、能够保持该位置并来回移动
 - IP 网络摄像机、无人机云台、协作机器人、HVAC 阻尼器

图 2-2 突出显示了三种用例及其相应架构之间的关系。

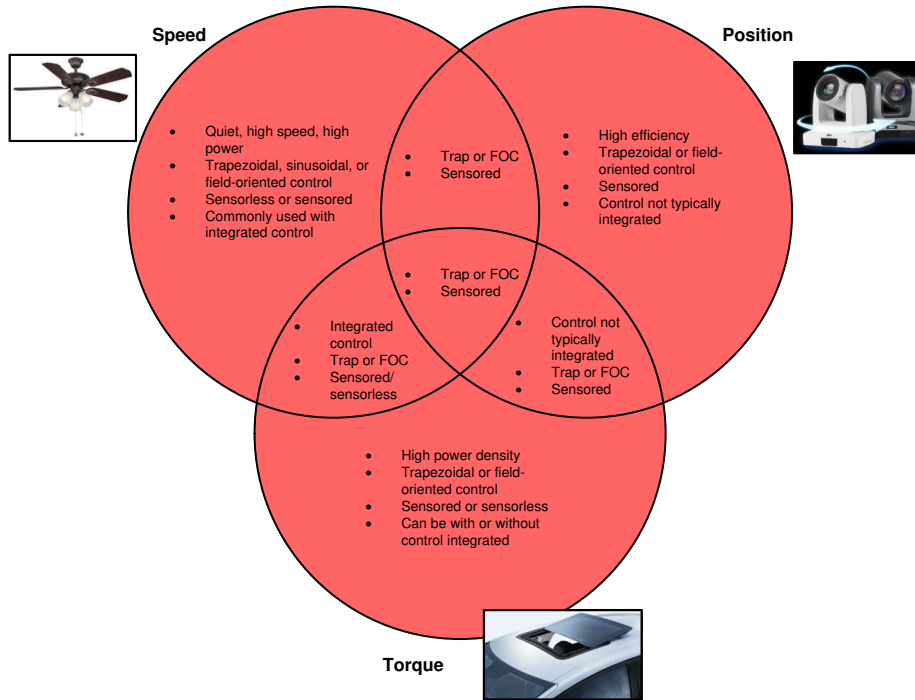


图 2-2. 三种用例的比较

2.3 控制方法：陷波、正弦或 FOC

许多无刷直流电机换向方法可用于满足特定的系统要求。换向方法在很大程度上取决于系统所需的电机类型、应用和解决方案。每种电机控制方法都可以通过外部微控制器实现或集成到电机驱动器中。TI 的 BLDC 电机驱动器在控制与栅极驱动器和完全集成产品系列中提供广泛的集成式梯形、正弦和磁场定向控制产品系列。

电机结构应该是选择控制方法时要考虑的主要因素。无刷直流电机采用梯形或正弦绕线，具体由其反电动势 (BEMF) 波形决定。为了更大限度地提高扭矩和效率，驱动电机的电流应该与反电动势波形的形状相匹配。在选择控制方法来优化性能参数时，还应考虑应用类型 (扭矩、速度或位置)。

表 2-2 中简要列出了控制方法性能参数。

表 2-2. 不同控制方法的比较

	梯形波	正弦波	磁场定向控制
算法复杂度	低	中	高
电机效率 (MTPA)	低	中	高
最大速度	高	低	中 (标准 FOC) 高 (磁场变弱)
MOSFET 开关损耗	低电平	高	高
扭矩纹波	高	中	低
可闻噪声	高	低	低电平

有关每种控制方法如何工作及其优势的更多详细信息，请观看关于 BLDC 电机驱动器的 TI 高精度实验室视频。

2.3.1 梯形波

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（图 2-3）。

陷落可以通过有传感器或无传感器的方式来确定电机的位置并有效地对电机进行换向。它是一种低成本、易于实施的解决方案，可产生高扭矩和速度，并将 MOSFET 开关损耗降至最低。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。

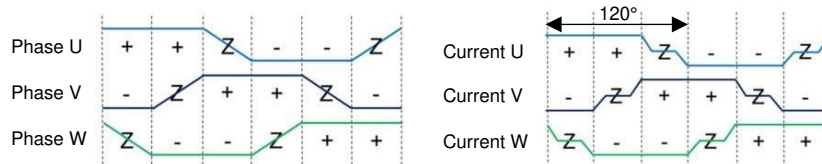


图 2-3. 梯形控制 (120°)

2.3.2 正弦波

正弦换向是另一种换向方法，它一次驱动电流流经全部三个相位，并且所有三个电机绕组中的电流波形在 180 度电角内平滑地呈正弦变化（图 2-4）。来自定子的正弦磁通会吸引永磁转子，从而使转子平稳旋转。具有正弦反电动势 (BEMF) 的电机会产生非常低的扭矩纹波，因为电机电流也是正弦波形且传递的扭矩是恒定的。这意味着电机噪音小，功效高。然而，在正弦换向中，由于换向在整个 180 度电角内发生，并且没有高阻态窗口，因此开关损耗很高。

在有传感器控制中，会根据转子位置生成换向信号（每个相位的可变 PWM 占空比波形），以便驱动 MOSFET 并生成定子电流的平滑正弦调制。无传感器控制中实现了换向查找表。根据 BEMF 估算，换向信号会驱动 MOSFET，以便生成定子电流的平滑正弦调制。

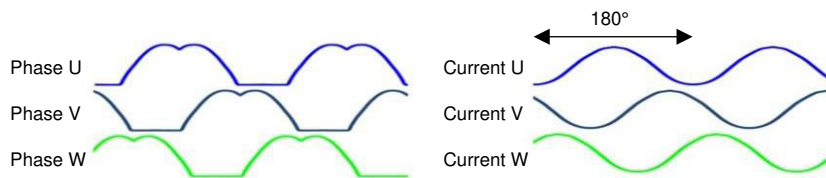


图 2-4. 正弦控制 (180°)

2.3.3 磁场定向控制

FOC 是 Field-Oriented Control 的缩写，即磁场定向控制，它是一种高效换向技术，用于精确高效地控制电机的速度和扭矩。顾名思义，FOC 技术会使定子磁场与转子磁通垂直，以便实现最大扭矩。

FOC 的实现可能非常复杂，因为它需要复杂的软件和处理能力来处理数学变换和计算，例如 Clarke Park 变换、逆向 Clarke 变换和逆向 Park 变换。如果通过相位定子电流和电压以无传感器的方式估算位置和速度，则微控制器必须足够快，以便在电机旋转时估算角度和速度。这可能需要使用实时数字信号处理器 (DSP) 来对这些数学计算进行流水线处理或实施大型查找表并同时计算其余变换。传动器和机械臂等需要高精度的 FOC 应用需要高精度编码器。根据编码器的分辨率，可以使用最小的扭矩纹波来精确控制位置。

为了简化设计过程，TI MCx 控制系列中的 **MCF 器件** 将无代码磁场定向控制集成到电机驱动器中。这些高度集成的 **BLDC 电机驱动器** 无需开发、维护和验证电机控制软件，从而节省了数月的设计时间。此外，这些 **MCF 器件** 可智能地提取电机参数，使设计人员能够快速调优电机，同时提供一致的系统性能，而不受电机制造差异的影响。这些电机驱动器集成了无传感器技术来确定转子位置，因此无需外部传感器，从而降低了系统成本并提高了可靠性。

对于外部微控制器，TI 通过其 **InstaSPIN™** 库提供了无传感器 **FOC 解决方案**。它使用户能够通过实时三相电压和电流监控来识别、调整和完全控制电机参数。此外，用户调优的速度控制器和磁场控制器可使电机获得比设计更优的速度。

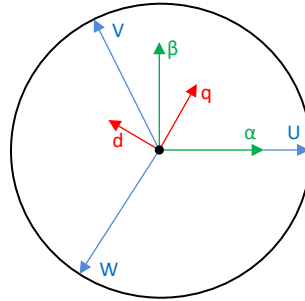


图 2-5. 磁场定向控制状态矢量图

2.4 有传感器与无传感器

在对无刷直流电机进行换向时，必须始终知道转子的位置，以便高效地使电机旋转并提供方向控制。TI 电机驱动器包含有传感器和无传感器解决方案。它们可以采用或不采用外部 **MCU** 来检测位置反馈并满足各种系统设计的要求。

2.4.1 带传感器

有传感器解决方案结合使用编码器、旋转变压器或霍尔效应传感器来始终检测转子相对于定子的位置，从而实现正确的换向。一种流行的解决方案是霍尔效应传感器，它会检测永磁转子的磁场并将不断变化的磁场转换为逻辑电平信号。这些信号可用作电机驱动器或 **MCU** 的直接输入，以便有效地对电机驱动器进行换向 (图 2-6)。

速度、扭矩和位置应用都可以使用有传感器解决方案。

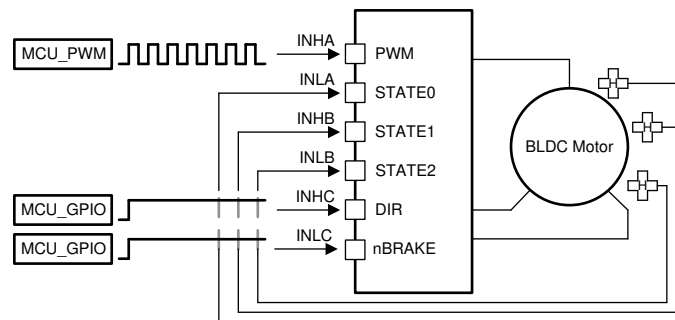


图 2-6. 使用霍尔效应传感器确定电机位置

2.4.2 无传感器

无传感器解决方案从设计中移除了任何有传感器组件，这有助于节省 BOM 成本。许多 TI 电机驱动器都可以在不使用霍尔效应传感器的情况下检测无刷直流电机的位置，方法是测量电机驱动器未连接绕组上产生的反电动势电压 (图 2-7)，或者在内部使用绕组电阻 (R)、绕组电感 (L)、相电流 (Is) 和电机电压 (Vs) 来估算生成的反电动势电压 (Es) (图 2-8)。

无传感器控制通常用于速度应用，因为电机在以恒定速度旋转时会产生足够的反电动势。位置控制不能无传感器，扭矩控制很难以无传感器的方式实现。

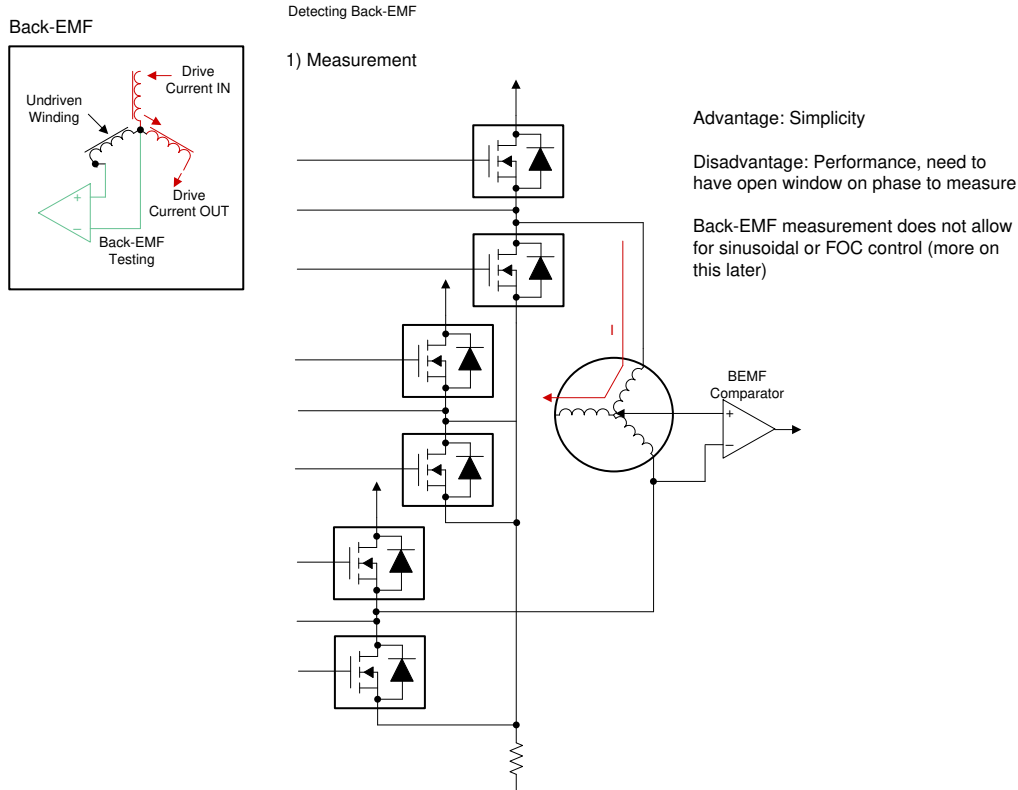


图 2-7. 使用 BEMF 比较器估算反电动势

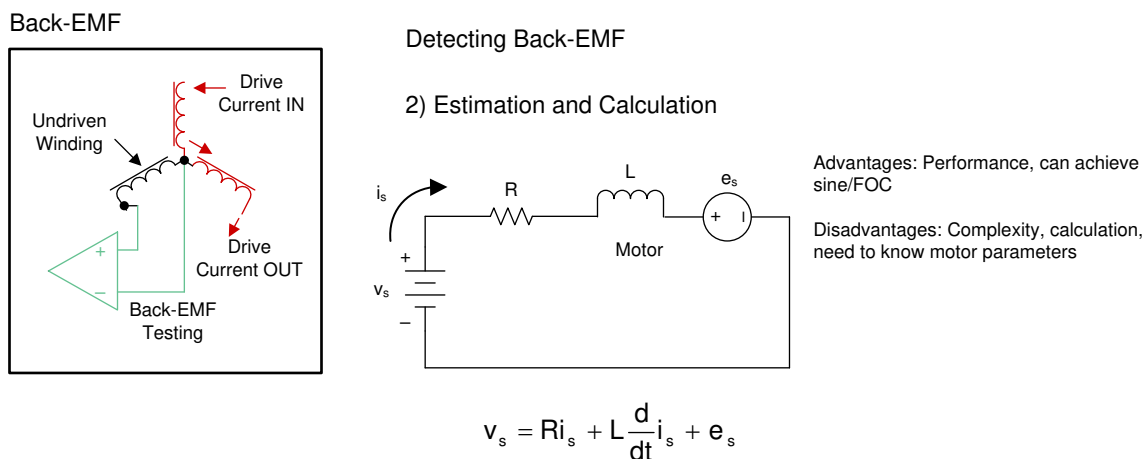


图 2-8. 使用已知电机参数和一阶差分方程计算反电动势

2.5 电流检测放大器

电流检测反馈在电机系统中非常重要，用于实现闭环扭矩控制或检测电流限制。TI 的 BLDC 电机驱动器可以提供 1 个、2 个或 3 个电流检测放大器 (CSA) 来检测电机相电流，并作为微控制器模数转换器的模拟电压反馈。TI BLDC 电机驱动器中实现了两种 CSA 架构：外部分流电阻器和集成式低侧电流检测。

在外部分流电阻器架构中，电机电流通过外部分流器产生成比例的 CSA 输出电压。这些主要用于栅极驱动器架构，因为分流电阻器的额定功率很高，并且在毫欧范围内。

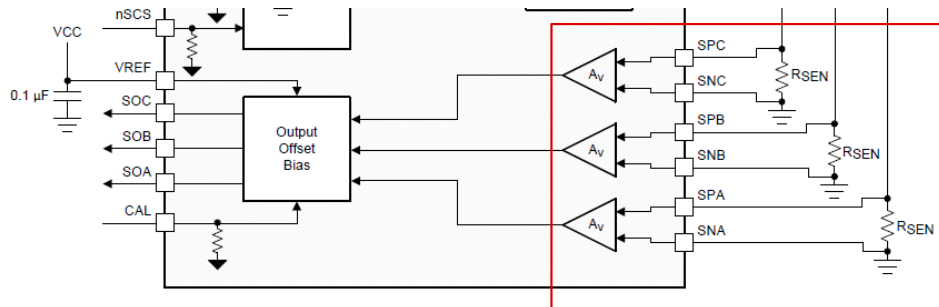


图 2-9. 使用外部分流电阻器的 CSA 集成

集成式低侧电流检测架构无需外部分流电阻器；这时通过电流镜像技术检测进入低侧 MOSFET 的电机电流并将其转换为模拟电压。这种形式的电流检测主要用于集成式 MOSFET BLDC 电机驱动器。

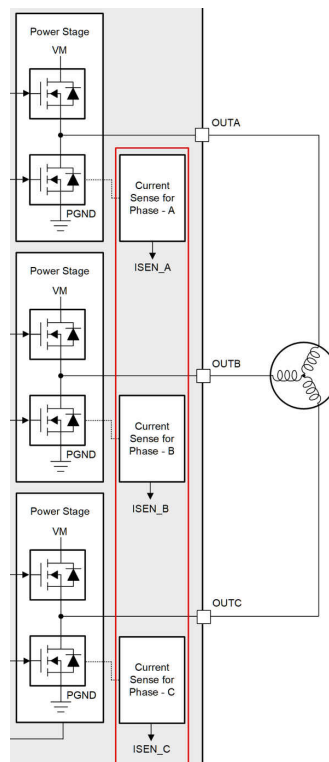


图 2-10. 使用内部低侧电流检测的 CSA 集成

2.6 接口

在驱动 BLDC 电机旋转之前，必须对许多驱动器设置进行适当配置和调优，以便电机系统能够稳健高效地工作。例如，其中一些设置可能包括过流保护阈值、栅极驱动电流设置或 PWM 输入模式。TI BLDC 电机驱动器提供多种接口来简化配置设置、诊断电机故障，甚至是控制电机本身。支持的 4 个接口为串行外设接口 (SPI)、硬件 (H/W) 接口、内部通信 (I²C) 接口和德州仪器(TI) SPI (tSPI) 接口。

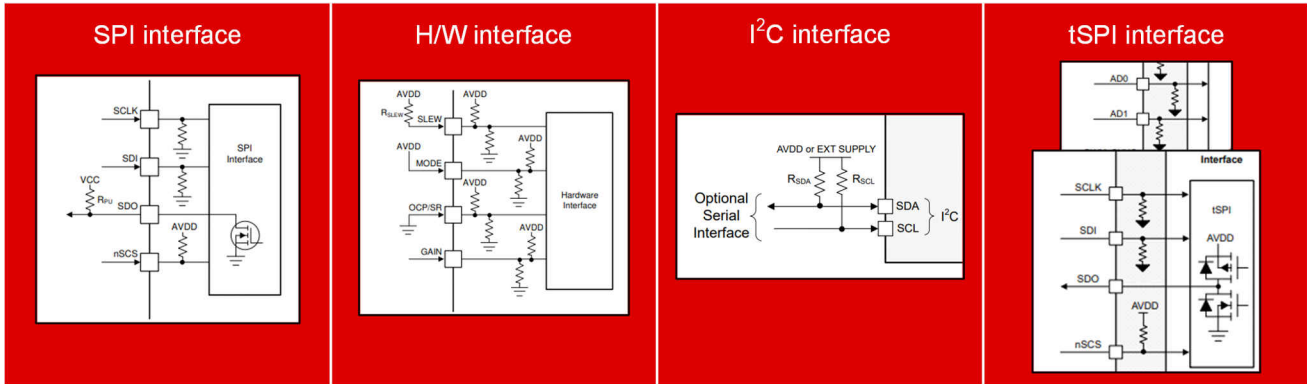


图 2-11. BLDC 电机驱动器中的接口类型

SPI - SPI 接口使用传统的 4 线 SPI 协议和高达 10MHz 的时钟速度来从一个或多个电机驱动器器件读取数据/向这些器件写入数据。SPI 器件允许在控制寄存器映射中配置许多电机设置，并允许在状态寄存器映射中进行详细的故障诊断。

H/W - 硬件接口使用由外部电阻器设置的 2 到 5 个专用引脚来配置驱动器设置。在某些器件上，硬件引脚将 SPI 线替换为四种可调设置，而许多其他设置在器件内部是固定的。硬件器件有助于简化电机驱动器设计和开发过程。

I²C - I²C 器件仅使用两根导线和外部上拉电阻器来配置多个器件，最大频率高达 400kHz。这些器件通过控制和状态寄存器提供可配置设置和故障诊断。

tSPI - tSPI 接口使用传统的 4 线 SPI 接口来独立控制多达 15 个电机。tSPI 命令为每个可寻址的 tSPI 器件提供 PWM 占空比和频率信息，以便控制每个电机。该接口将三相电机的控制线数减少了 (N*6)-4，并显著缩小了系统尺寸。

表 2-3 快速比较了哪个系列包含哪些接口。

表 2-3. TI BLDC 电机驱动器系列中的接口

	栅极驱动器 (DRV8x、DRV3x)	集成式 FET (DRV831x)	控制 + 栅极驱动器 (MCx)	完全集成 (MCx831x)
SPI	✓	✓		
硬件	✓	✓	✓	✓
I ² C			✓	✓
tSPI		✓		

2.7 功率集成

为了提供外部电源轨来为系统中的其他器件或电路供电（例如 MCU 和 CSA 基准电压），许多 TI BLDC 电机驱动器都提供了集成式降压稳压器和线性压降稳压器 (LDO)。这些稳压器无需 [missing content]，即可提供高效率。

集成降压稳压器可以支持高达 600mA 的外部负载电流，具体取决于器件。在许多器件上，稳压器的输出电压可以通过 SPI/硬件借口进行调节设计或配置。对于 3.3V 或 5V 的固定电压轨 (AVDD 或 DVDD)，集成式 LDO 可以支持高达 100mA 的外部负载电流，具体取决于器件。

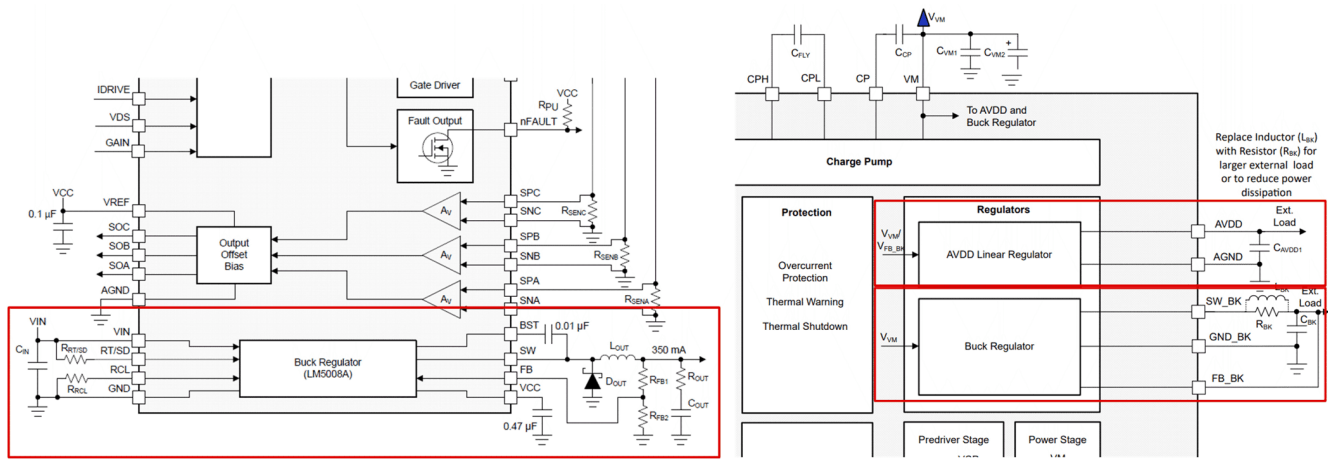


图 2-12. BLDC 电机驱动器中集成的降压和 LDO 稳压器示例

2.8 100% 占空比支持

外部功率级中的高侧 N 型 MOSFET 需要比电机电压高大约 10V 的电压，才能完全增强 MOSFET。在某些应用中，此 FET 需要在整个 PWM 周期内（100% 占空比支持）导通，这在提供稳压栅极电压和栅极电流的设计中带来了挑战。TI 提供了两种集成选项来支持高侧 MOSFET 增强所需的 100% 占空比：自举或电荷泵架构。

自举架构使用外部自举电容器来通过外部提供或内部生成的栅极驱动电压 (GVDD) 提供高侧 MOSFET 增强。为了刷新自举电容器，必须断开高侧 FET，并且必须在最短时间内导通低侧 FET。为了支持 100% 占空比，器件中集成了涓流电荷泵，以便增强高侧 MOSFET。自举架构成本低、集成度小，且效率高。

电荷泵架构集成了倍增或三倍电荷泵控制器，用于调节来自电机驱动器电源电压的高侧栅极驱动电压。这样就无需使用外部自举电容器，并且只需两个电容器即可实现电荷泵运行。倍增或三倍电荷泵可满足更低的最低电源电压要求，从而生成高侧 MOSFET 栅极驱动电压。

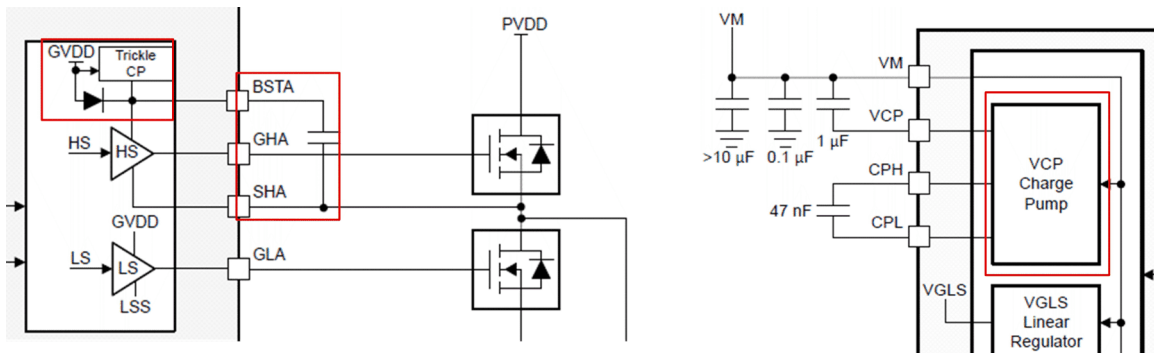


图 2-13. BLDC 电机驱动器中的自举和涓流电荷泵架构（左）和电荷泵架构（右）

3 德州仪器 (TI) 的无刷直流电机驱动器

TI 的无刷直流电机驱动器产品系列支持上述架构和用例的各种组合。该产品系列分为四组：栅极驱动器 (DRV8x 和 DRV3x 系列)、集成式 MOSFET 驱动器 (DRV831x 系列)、集成式控制驱动器 (Mcx 系列) 和完全集成式 (MCx831x 和 DRV10x 系列)。每个系列均支持工业级和汽车级器件，并提供各种封装、型号和集成。

以下各节将详细介绍每个系列支持的关键技术。如需详细了解每个系列中的特定产品，请访问 ti.com/blcdc。

3.1 栅极驱动器：DRV8x 和 DRV3x 系列

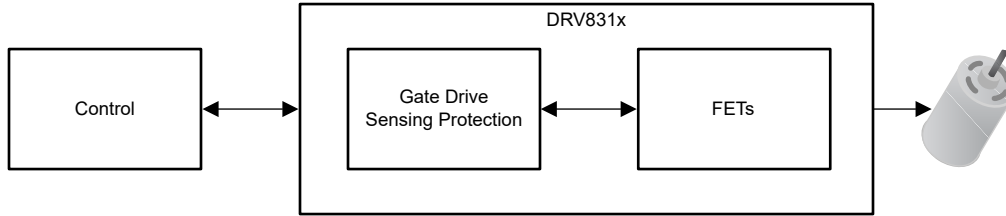


图 3-1. DRV8x/DRV3x 系列的栅极驱动器架构

3.1.1 DRV8x 系列

TI 的 DRV8x 栅极驱动器系列包括具有保护、检测或电源管理解决方案的工业和汽车栅极驱动解决方案。DRV8x 器件包括电荷泵架构和自举架构，这是提供高达 100% 占空比的高侧 N 型 MOSFET 增强的两种方式。许多器件支持 6 个 PWM 输入信号用于电机控制，但某些选项包括 3 个 PWM 或 1 个 PWM 接口，以便减少外部 MCU 所需的 PWM 输入数量。这些器件无需外部组件或控制信号，即可创建安全、简单和稳健的电机驱动应用。DRV8x 器件的电压范围为 4.5V 至 102V，适用于高达 56V 的系统。

许多器件都包括 TI 的 *智能栅极驱动* 技术，该技术结合了保护功能和栅极驱动可配置性。该器件具有许多特性，包括 MOSFET 压摆率可调节性、闭环死区时间、集成栅极故障保护功能和强大的下拉功能，可防止意外 dV/dt 导通。这些内部栅极驱动电路使设计人员能够通过 SPI 命令或硬件电阻器配置栅极寄存器，而不用重新设计原理图，从而快速轻松地优化开关损耗和 EMI 性能。通过将性能和保护电路集成到芯片中，与分立式驱动器或不采用智能栅极驱动技术的驱动器相比，这不仅减小了系统尺寸并降低了总成本，而且还提高了灵活性、易用性和设计简易性。

TI 的栅极驱动器包括电流检测和电源等额外的可选集成。集成电流检测放大器 (CSA) 可以通过外部分流电阻器测量低侧 FET 的相电流，并将此信息作为检测电压发送到微控制器。部分 DRV8x 器件提供集成电荷泵、涓流电荷泵、LDO 或降压稳压器，以便为微控制器供电或提供具有出色效率和低输入静态电流的系统电压轨。这进一步减小了系统尺寸和降低了成本，并有助于简化制造采购。

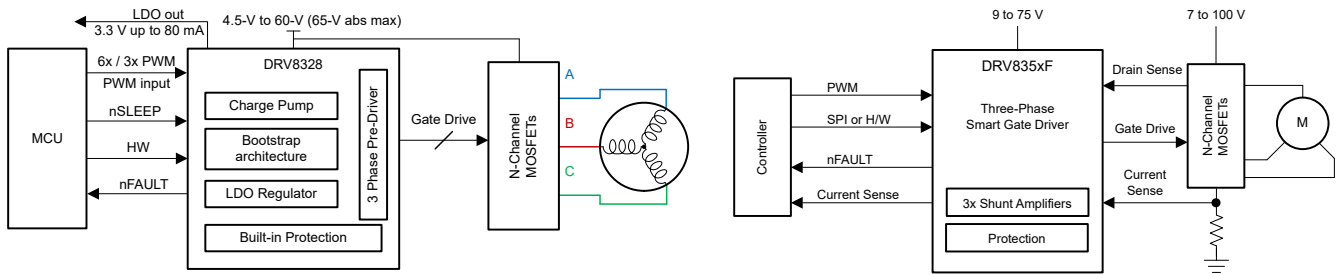


图 3-2. DRV8328 和 DRV835x 工业栅极驱动器的简化原理图

3.1.2 DRV3x 系列

TI 的 DRV32xx 系列三相栅极驱动器专为开发功能安全汽车电机系统的客户而设计。TI 的 DRV32xx 系列包括专为 12V 和 48V 汽车电池曲线定制的器件。这些器件采用符合 AEC-Q100 1 级 (-40°C 至 125°C 环境温度) 和 0 级 (-40°C 至 150°C 环境温度) 标准的封装。这些器件采用经过 ISO-26262 认证的工作流程开发而成，并包含额外的诊断和监控功能，从而使系统设计人员能够针对高达 ASIL-D 的 ASIL 等级进行设计。

DRV32x 栅极驱动器还附带额外的支持文档，可帮助系统设计人员实现目标 ASIL 等级。安全手册详细介绍了由独立安全元素 (SEoC) 支持的监控和诊断功能。安全分析报告包括详细的失效模式影响和诊断分析 (FMEDA) 以及器件的 FIT 率计算。

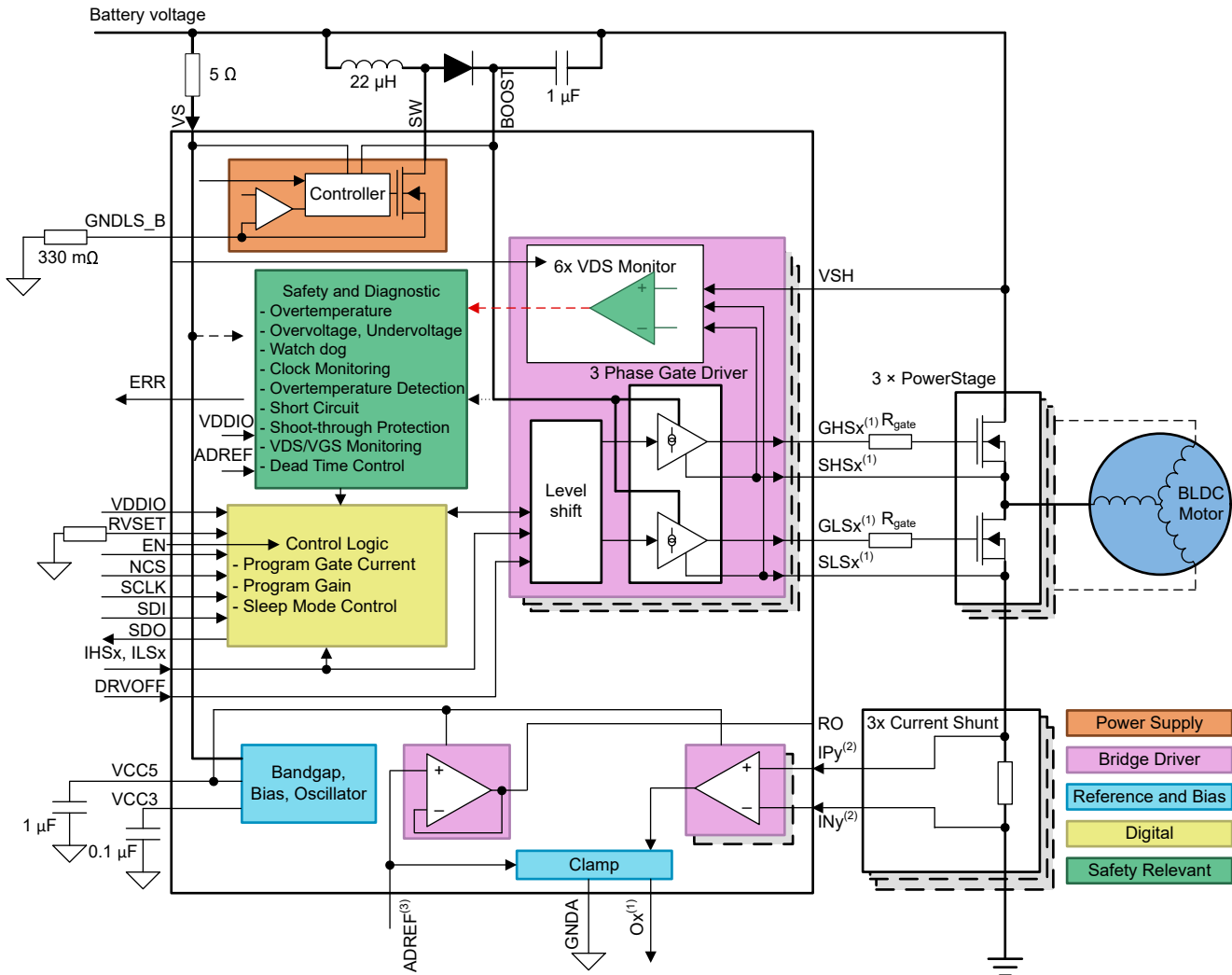


图 3-3. DRV3205 功能安全栅极驱动器的简化原理图

3.2 集成式 MOSFET : DRV831x 系列

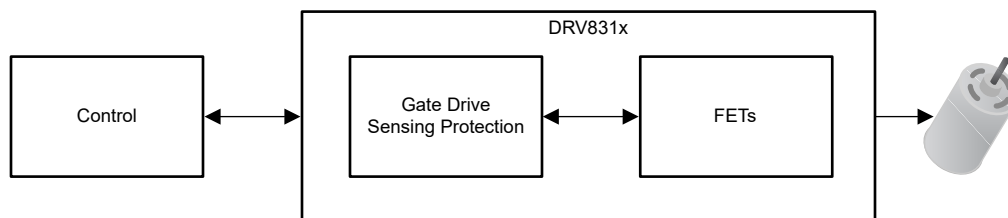


图 3-4. DRV831x 系列的集成式 FET 架构

TI 的 DRV831x 系列包括集成式 MOSFET 解决方案，可进一步节省布板空间并降低总体系统成本。集成式 MOSFET 解决方案可提供高效的开关和电流控制，从而更最大限度地提高单个集成电路的输出电流能力。为了控制 MOSFET 开关，许多集成式和外部 MOSFET 架构都采用 1x、3x、6x 或 tSPl 控制方案。这些 PWM 模式使设计人员能够支持各种换向和控制方法，并为 MCU 释放 I/O 引脚。TI 提供多种低功耗 (<15W) 和中等功耗 (<70W) 集成式 MOSFET 解决方案。

许多集成式 MOSFET 驱动器都包含三个集成式 CSA，用于检测低侧 FET 电流，因此无需外部分流电阻器。此外，一些器件还包含可调节降压稳压器和 LDO，可在高效散热型封装中提供外部电源轨。集成式 MOSFET 驱动器提供多种可配置的保护功能，以便保护器件免受异常电源电压、过流事件或过热的影响。

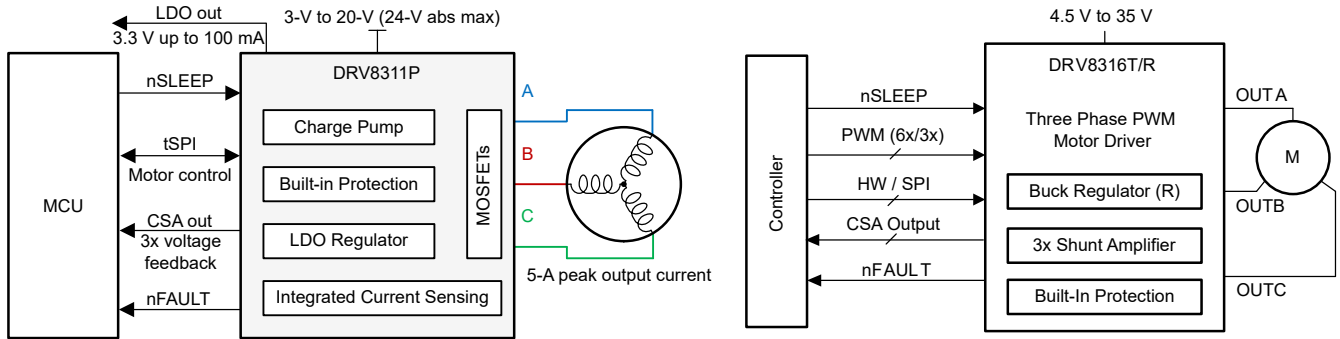


图 3-5. DRV8311 和 DRV8316 集成式 FET 驱动器的简化原理图

3.3 控制和栅极驱动器：MCx 系列

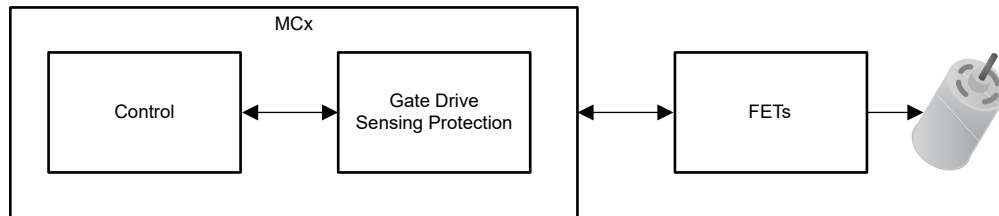


图 3-6. MCx 系列的控制和栅极驱动器架构

TI 的 MCx 系列控制和栅极驱动器将控制功能集成到驱动器中，让器件在无需 MCU 协助的情况下即可使电机旋转。集成控制可实现通过可编程 EEPROM 进行无代码梯形和磁场定向控制，以及通过 I²C 或硬件接口配置设置。控制和栅极驱动器器件适用于大于 70W 的电机驱动系统，可为传统上使用外部 MCU 进行传统电机控制的系统提供更小的 BOM 尺寸。这些器件需要外部 N 型功率 MOSFET 和 1 个或多个电流检测电阻器，以便实现精确的梯形或磁场定向控制。

MCx 器件中的控制器可实现通过模拟输入、具有不同占空比和频率的 PWM 输入或速度命令进行速度控制。MCx 系列器件可以采用 I²C、SPI 或硬件接口，以便支持各种低成本 MCU 进行配置。电机控制的所有阶段都具有可配置性，包括预启动、启动、开环、闭环和电机停止。为了协助配置设置，GUI 和调优指南可用于评估。

MCF (集成磁场定向控制) 器件提供多种独特的功能。电机参数提取工具 (MPET) 会自动执行电机识别，以便确定电机电阻、电感和磁通等电气参数以及惯性矩和摩擦系数等机械参数。此外，MCF 器件会使用确定的机械和电气参数来自动调整 PI 控制器增益，以便实现速度和扭矩调节和稳定性。

MCT (集成梯形控制) 器件支持高达 3kHz 的电气频率，启动时间小于 50ms，减速时间小于 150ms。控制算法支持 120° 和 150° 电流调制以提高声学性能，并包含超前角调节以优化电机效率。此外，MCT 器件还包括主动消磁功能，以便减少低电感电机的功率损耗。

表 3-1. MCF 和 MCT 器件中突出显示的控制功能

MCF 器件 (集成磁场定向控制)	MCT 器件 (集成梯形控制)
使用电机参数提取工具 (MPET) 离线测量电机参数	支持高达 3kHz 的电气频率
5 点可配置速度配置文件支持	非常短的启动时间 (< 50ms)
通过自动死区时间补偿提高了声学性能	快速减速 (< 150ms)
在室温下，内部时钟精度为 3%、外部时钟基准精度为 1% 的速度环路	支持 120° 或 150° 调制，以改善声学性能
自动调优的扭矩和速度 PI 控制器增益	主动消磁支持减少功率损耗
展频和压摆率，用于降低 EMI	超前角调节以优化效率

MCx 器件包括过热、过压、欠压、过流、逐周期电流限制等驱动器故障保护功能。此外，还提供针对 IPD、MPET、异常速度/BEMF、电机锁定、速度/扭矩饱和等的控制器故障保护功能。最后，MCx 器件可能包含电源集成选项，例如 LDO、可调节降压稳压器和具有涓流电荷泵架构的集成自举 (用于高侧 MOSFET 增强)。

3.4 完全集成：MCx831x 和 DRV10x 系列

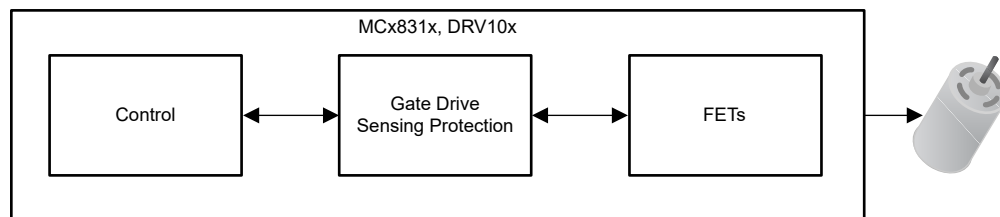


图 3-7. DRV10x 和 MCx831x 系列的完全集成架构

3.4.1 MCx831x 系列

TI 的 MC831x 系列完全集成式电机驱动器兼具电机控制和 MOSFET，为电机驱动器提供了一种单芯片解决方案。集成控制仅需一个外部 MCU，即可实现无代码梯形和磁场定向控制设置，从而通过 I²C 进行设置配置。这些器件的电压范围为 4.5V 至 40V，峰值电流高达 8A，并支持高达 70W 的电机驱动。

TI 的 **MCx** 系列控制和栅极驱动器将控制功能集成到驱动器中，让器件在无需 **MCU** 协助的情况下即可使电机旋转。集成控制和 **MOSFET** 可实现完整的片上系统解决方案，从而通过可编程 **EEPROM** 实现无代码梯形和磁场定向控制，并通过 **I²C** 或硬件接口进行设置配置。完全集成式 **MCx831x** 器件为传统上使用外部 **MCU** 和 **N** 型功率 **MOSFET** 进行传统电机控制的系统提供了最小的 **BOM** 尺寸。电流检测功能集成到器件中，无需外部检测电阻器。**MCx831x** 器件包括一个用于增强高侧 **MOSFET** 的集成式电荷泵，以及一个支持外部逻辑电平电源轨的可调节降压稳压器和 **LDO**。

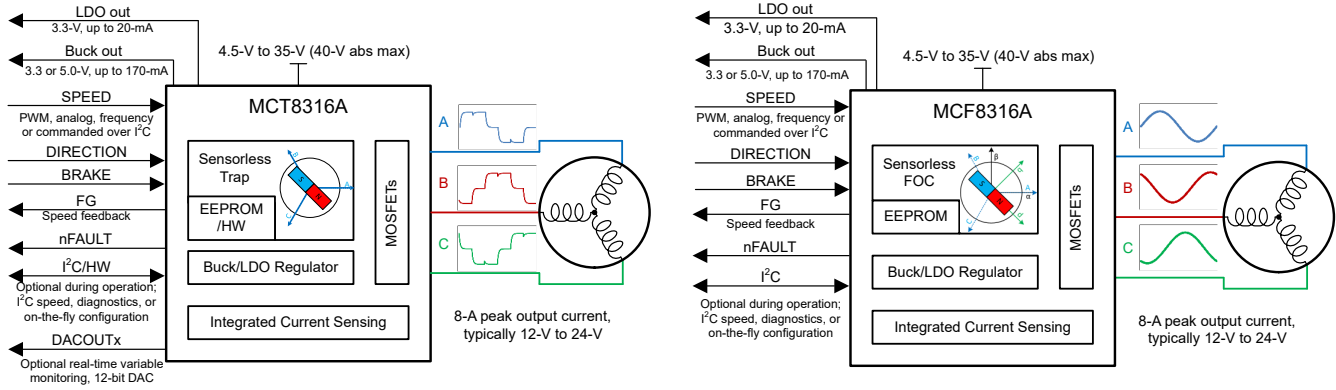


图 3-8. MCT8316A 和 MCF8316A 器件的简化原理图

3.4.2 DRV10x 系列

TI 的 **DRV10x** 系列电机驱动器具有栅极驱动器、集成式 **MOSFET** 和集成式控制功能，无需外部微控制器，即可驱动电机旋转。**DRV10x** 器件采用真实准确的 **180°** 正弦算法，能够尽可能地降低噪声和振动。我们的电机驱动器具有陷波、正弦和 **FOC** 控制型号，可提高各种电机的效率。无传感器算法通过移除霍尔传感器进一步降低了设计复杂性。

DRV10x 系列通过施加 **PWM** 输入来控制驱动电压的幅度，从而提供对电机速度的简单控制。这是通过使用模拟电压驱动 **PWM** 引脚或直接通过 **I²C** 端口写入速度命令并监控 **FG** 引脚的速度反馈来实现的。由于 **DRV10x** 器件具备超前角调节功能，因此用户可通过调整相电流和相反电动势来优化驱动器效率。无论电机参数和负载条件如何，超前角调节功能都能实现最佳效率。**DRV10x** 器件以 **2.1V** 至 **30V** 的输入电源电压为电机提供电流。在某些器件中，如果电源电压高于最大电压阈值，器件将停止驱动电机并保护器件电路。**DRV10x** 器件具有一个集成降压稳压器，可准确地将电源电压降至 **5V** 或 **3.3V**，从而为内外部电路供电。这些器件提供休眠模式和待机模式两种型号，可在电机停止运转时实现节能。

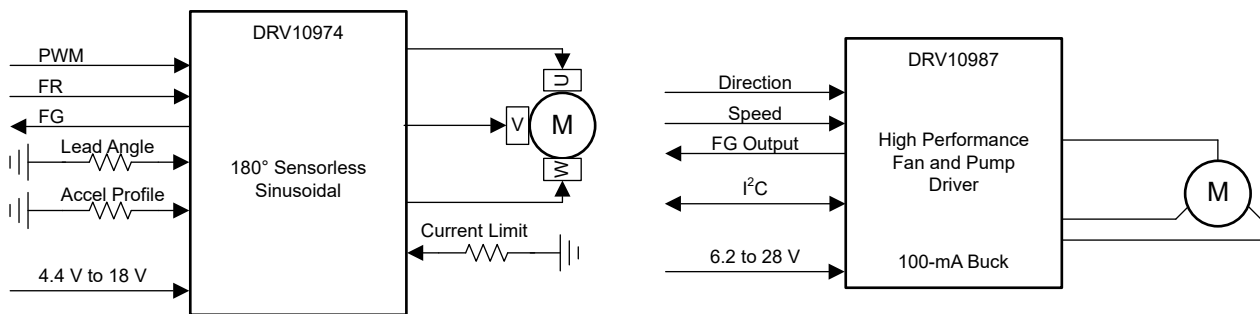


图 3-9. DRV10974 和 DRV10987 器件的简化原理图

4 结论

随着如今在应用中使用 BLDC 电机变得越来越普遍，无论是为了尺寸优化、提高热效率或降低换向复杂性，还是为了降低总 BOM 成本，在选择特定 BLDC 电机驱动器时了解架构选项和关键注意事项对于充分利用设计都至关重要。如本文档所述，TI 的 BLDC 电机驱动器产品系列支持各种架构和用例，使各种应用的设计人员都能够充分利用其 BLDC 系统。要了解更多有关 BLDC 电机驱动器解决方案的信息，请访问 <http://www.ti.com.cn/zh-cn/motor-drivers/brushless-dc-bldc-drivers/products.html> 上的产品页面。

5 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 * (June 2020) to Revision A (May 2022)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	1
• 更新了节 1	3
• 更新了节 2.3.3	7
• 添加了节 2.5	10
• 添加了节 2.6	11
• 添加了节 2.7	11
• 添加了节 2.8	12
• 更新了节 3.1	13
• 更新了节 3.2	14
• 更新了节 3.3	15
• 更新了节 3.4	16

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