

Application Note

三相栅极驱动器与三个单半桥栅极驱动器的对比



Akshay Rajeev Menon

摘要

无刷直流电机是通过电气换向进行驱动的三相电机。通过向定子线圈施加电压生成磁场，该磁场与转子磁场相互作用，从而使转子旋转。换向所需的输入信号来自控制器，通过功率级进行放大后，将功率传递到电机各相。用于驱动电机的功率级通过控制每相的 MOSFET 半桥开通或关断实现。电机驱动器是基于多种 PWM 调制技术切换 MOSFET 的功率转换器，通过调制后的 PWM 电压驱动 BLDC 电机，从而实现对电机速度、扭矩和位置的控制。

市场上的主流电机驱动器实现方式，按照架构可分为以下两类（在本技术报告中进行了详细讨论）。

1. 三相 BLDC 驱动器
2. 半桥驱动器

本应用手册介绍了这两种架构的主要区别及优缺点。三相架构具有更高的半桥集成度，便于在单个封装中实现简化设计，但可能存在信号完整性问题。而采用三组单独的半桥设计则需要更多的本地无源器件，但能够在 MOSFET 放置方面提供灵活性，从而改善信号完整性并减少布线电感的影响。

内容

1 简介.....	2
2 三相栅极驱动器.....	3
2.1 架构.....	3
2.2 布局布线注意事项.....	3
2.3 典型应用.....	5
3 半桥（单相）栅极驱动器.....	6
3.1 架构.....	6
3.2 布局布线注意事项.....	7
3.3 典型应用.....	10
4 总结.....	10
5 参考资料.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

三相 BLDC 驱动器能够换向控制三个半桥（六个 MOSFET），而单半桥驱动器（如其名称所示）只能驱动一个半桥（两个 MOSFET）。

这两种系统都具有独特优势，适合其预期应用。了解系统级的优势有助于决定哪种方法对您的应用更为有利。

备注

无论哪种实现方式，驱动器都可以采用集成 MOSFET 或外部 MOSFET。本文重点介绍了外部 MOSFET 驱动器，也称为栅极驱动器。

德州仪器 (TI) 目前的无刷直流 (BLDC) 电机驱动器产品系列主要由三相 BLDC 驱动器组成，这些驱动器作为一个整体封装单元，用于驱动无刷电机。然而，随着诸如 DRV8161 和 DRV8162 驱动器的推出，德州仪器 (TI) 正在扩展产品组合，将单半桥驱动器纳入其中（图 1-1）。这些单半桥驱动器在缩短驱动器到功率级距离方面具有关键优势，大大提高了效率并减少了寄生效应的影响。

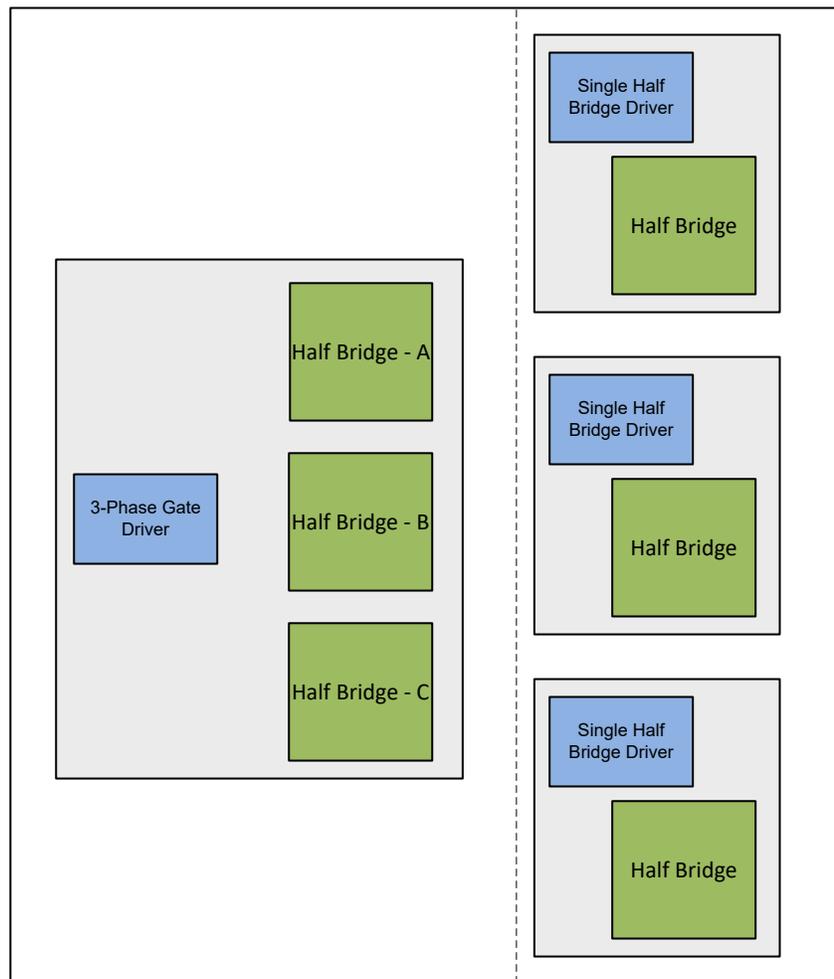


图 1-1. 架构概述：三相驱动器与单半桥驱动器

2 三相栅极驱动器

2.1 架构

三相栅极驱动器可以接收全部三个半桥的信号，并为功率级输出多达 6 个栅极驱动信号。图 2-1 展示了使用三相栅极驱动器驱动 BLDC 电机的实现方案。PWM 输入信号从微控制器传输到栅极驱动器单元，再传输到 MOSFET 功率级。

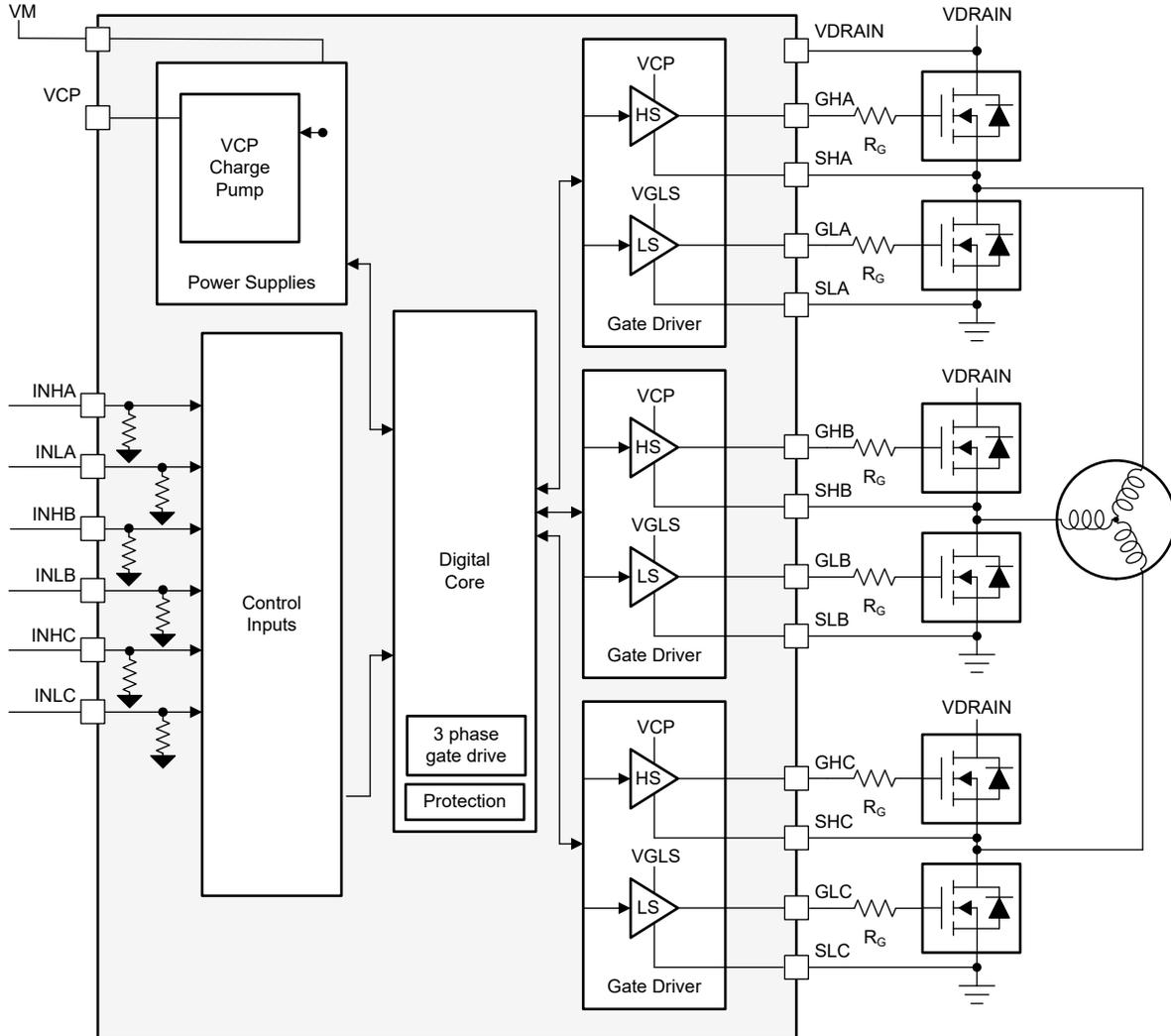


图 2-1. 功能方框图：三相栅极驱动器

2.2 布局布线注意事项

2.2.1 优点

2.2.1.1 MCU 到 DRV 信号布线

由于三相驱动器的预驱动功能完全封装在同一芯片中，在电路板设计中增加了驱动器放置的简便性。MCU 信号全部传输到输出 6 个栅极驱动信号的单个驱动器 IC，因此，简化了输入信号和串行数据通信信号（如 SPI）的布线。

2.2.1.2 减少元件

三相栅极驱动器可以共用所有三相主要电源信号所需的电容，例如 PVDD、V-Drain、充电泵等。因此所需的元件数量减少了。

2.2.2 挑战

2.2.2.1 MOSFET 放置

在电机驱动板设计中，最关键的信号是 MOSFET 的栅极和源极信号，因为这些信号对于高效换向至关重要。为了减少布线电感的影响，需要尽量缩短驱动器与 MOSFET 之间的栅极和源极信号距离。图 2-2 展示了功率级设计是如何将寄生电感引入栅极和源极信号的。

由于所有三个相位的栅极和源极信号都源自同一驱动器，因此由于元件尺寸的原因，将半桥靠近放置比较困难。在电路板空间受限的情况下，这一问题尤为严重。

这些布线挑战会带来以下问题

- **信号完整性问题：**

当三个单半桥与驱动器之间的距离或走线路径不均匀时，会产生另一个问题。这可能会导致 MOSFET 的导通/关断时间出现相间偏差，或导致通过 CSA 测量的相电流存在差异。

较长的栅极布线可能由于增加了电感导致驱动器发生过冲或下冲，从而超出绝对最大额定值。

- **源极节点瞬态问题：**

开关节点振铃是开关节点上由于 PCB 和功率 MOSFET 的寄生效应而产生的 LC 振荡。开关节点振铃不仅会导致 EMI，还会引起过冲或下冲电压。这种瞬态电压可能超出 MOSFET 漏源电压和栅极驱动器引脚的绝对最大额定值，从而降低功率级的效率。

较长的布线路径还会在栅极驱动器的 GND 和功率 MOSFET 的 GND 之间增加寄生阻抗。寄生阻抗会导致驱动器与低侧 MOSFET 的源极之间产生 GND 偏移，进而引发类似的问题。

备注

图 2-2 和图 3-4 所示的圆形 PCB 设计，常用于电动工具和电动自行车设计中，其中 PCB 安装在电机顶部。虽然此设计主要用于研究 MOSFET 放置和布线电感的影响，但其原理适用于各种电路板形状和尺寸。

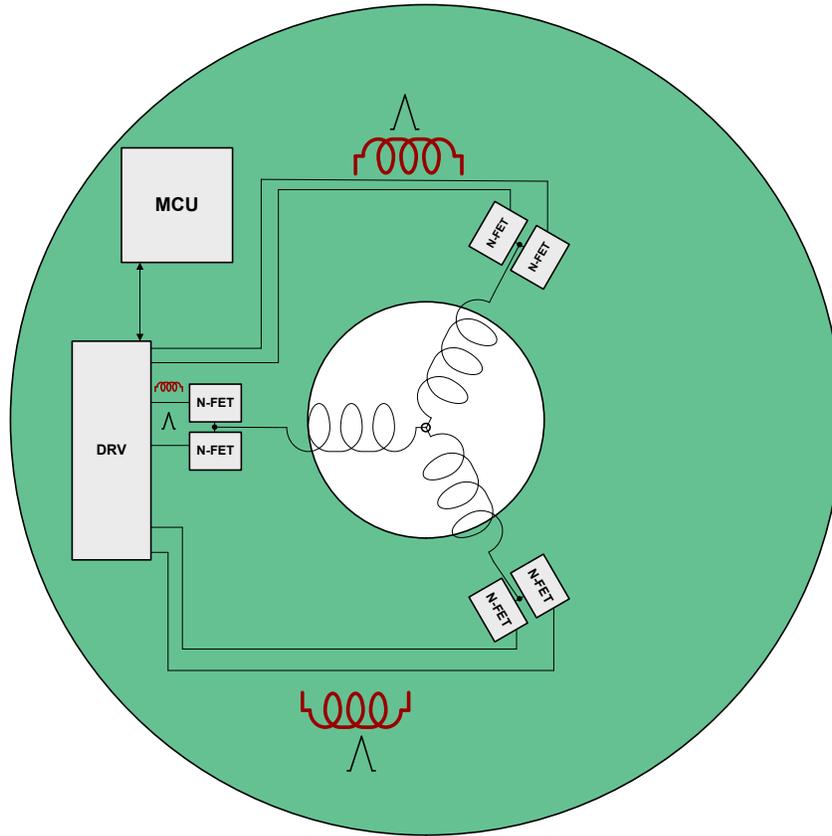


图 2-2. 三相栅极驱动器实现 - 显示由于布线电感的影响而导致的瞬态对栅极和源极信号的影响

2.3 典型应用

三相栅极驱动器因其满足多种应用需求，正逐渐成为业界通用的无刷电机。它们技术成熟、性能可靠，并集成了多种功能，提供三相换向的一站式解决方案。

三相驱动器广泛应用于几乎所有涉及 BLDC 电机的领域，包括电动工具、无人机、医用泵以及玩具和摄像机等日常用品。

3 半桥 (单相) 栅极驱动器

3.1 架构

单半桥驱动器仅接受两个输入信号，用于驱动 MOSFET 半桥的高侧和低侧栅极。由于每个 DRV 半桥驱动器只能驱动一个相，因此需要三个 DRV 单半桥 IC 来驱动三相 BLDC 电机。

图 3-1 展示了使用三个单半桥驱动器驱动 BLDC 电机的实现方案。

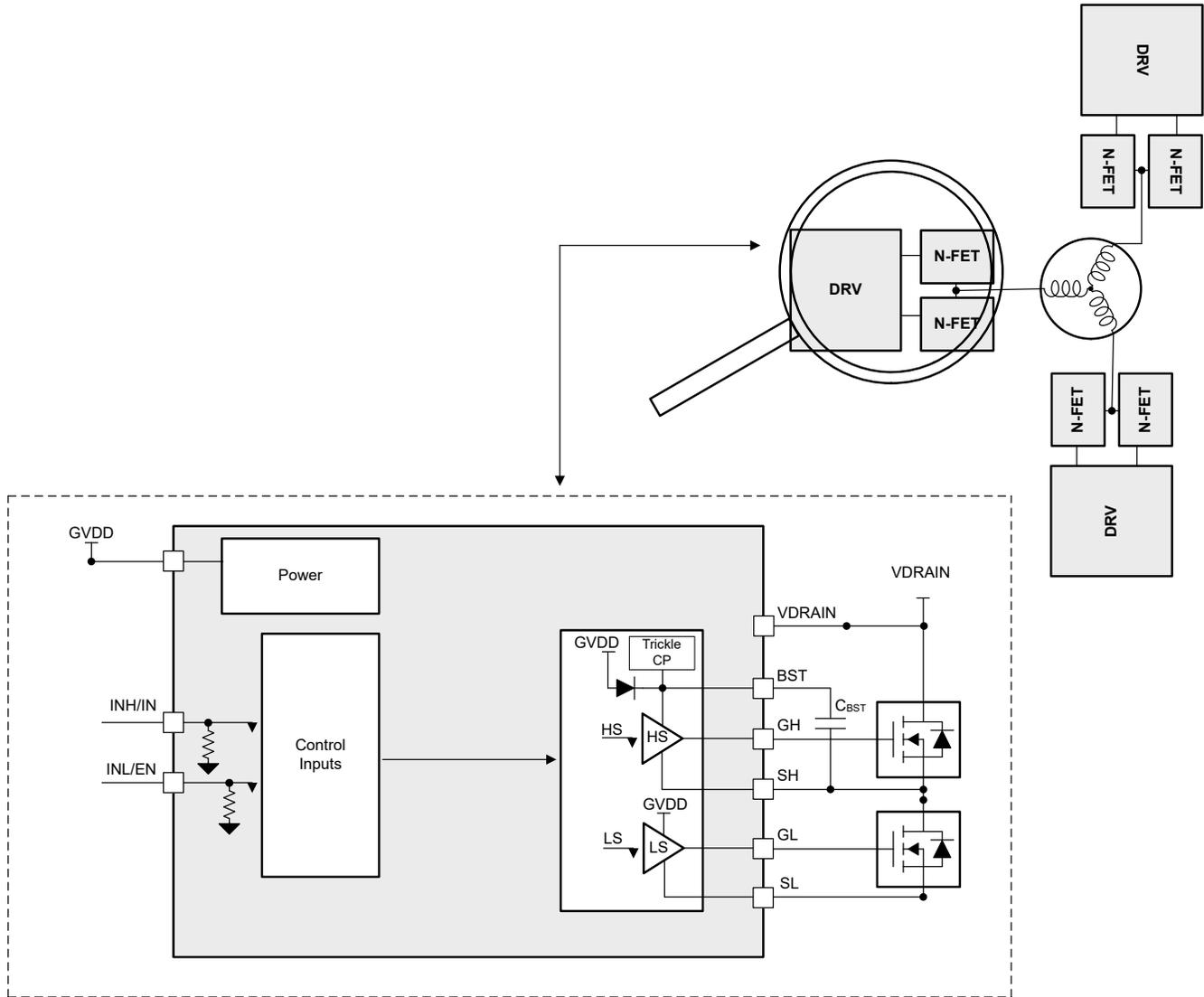


图 3-1. 功能方框图：具有放大单相信号功能的三个单半桥驱动器

3.2 布局布线注意事项

3.2.1 优点

3.2.1.1 MOSFET 放置

通过采用三个独立的单半桥设计，可以将每相的驱动 IC 尽量贴近其对应的 MOSFET 放置。这样可以提高信号完整性并减少栅极和源极节点上的寄生效应。

- 源极节点瞬态或振铃的改善：

更短的栅极或源极路径有助于减小布线电感的影响，从而降低源极节点振铃的影响，减少总环路电感，提高 EMI 性能。

寄生效应减弱后，源极电压骤降或瞬态会更小。图 3-2 展示了相位电压切换时可能出现的振铃

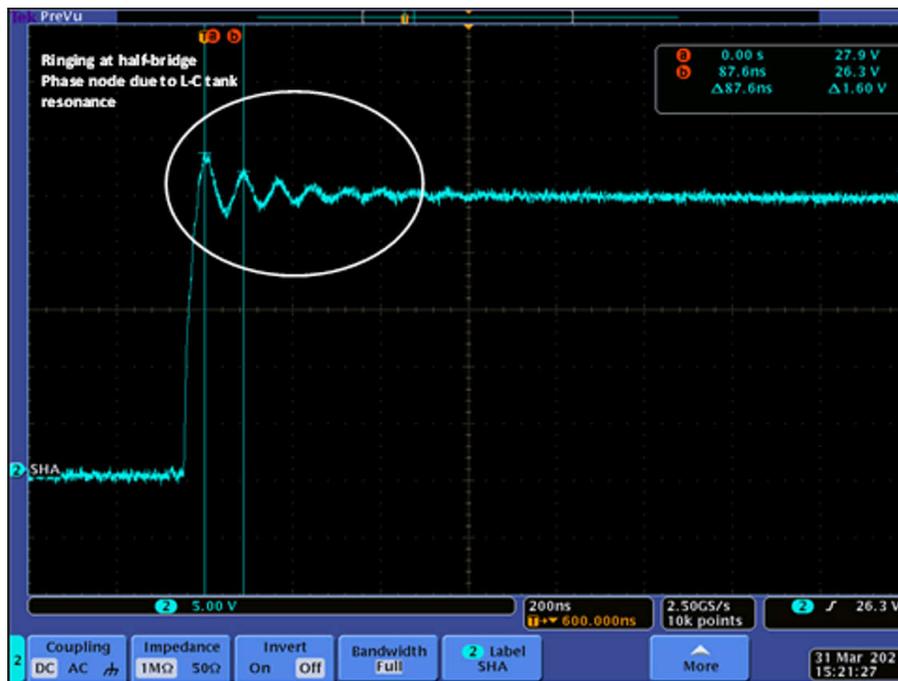


图 3-2. 显示振铃的电机驱动器相位输出波形

- 信号完整性的优化：

如果功率级信号的测量路径变短（例如信号源到驱动器测量点之间的路径），信号完整性会显著提升（图 3-3）。

由于 CSA 在物理上更靠近检测电阻，因此驱动器在分流电阻上检测到的电流会更准确。

过流保护中的 VDS 测量也是在驱动器的栅极和源极引脚上完成的。如果驱动器和 FET 之间的漏源电压差异很大，VDS 监测值将不准确。因此，将 MOSFET 靠近驱动器放置，可以减小寄生电感，降低栅极信号的过冲或振铃影响。

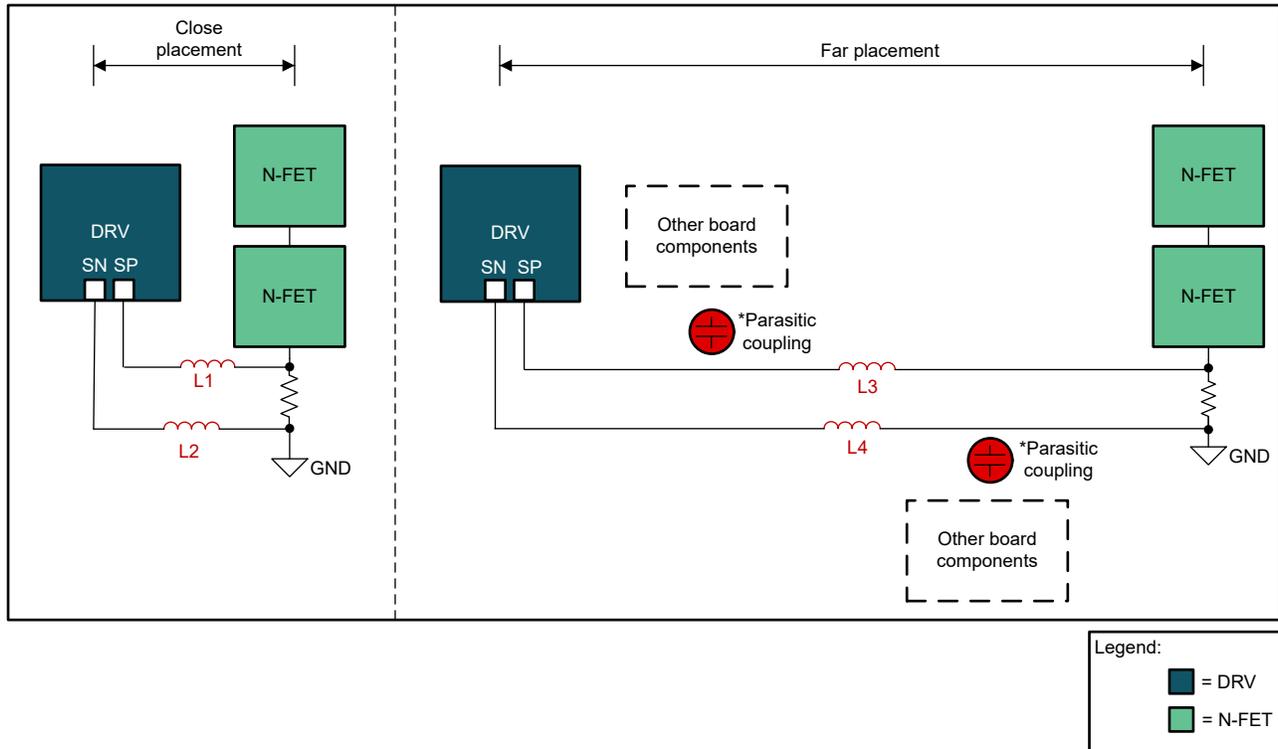


图 3-3. MOSFET 放置对信号完整性的影响

备注

如图 3-3 所示，由于布线长度较小，L1 和 L2 的电感会明显低于 L3 和 L4。L3 和 L4 由于路径较长，也更容易受到其他信号耦合的影响。

3.2.1.2 独立控制

由于每个半桥都是一个独立的单元，用户可以单独控制每个半桥。驱动器可以从 MCU 接收单独的命令，提高了设计和应用的灵活性。如果采用这种方法，可以针对不同相，设置不同的栅极驱动电流。对于非三相 BLDC 电机的驱动应用，这种灵活性尤为显著。例如，在使用 BDC 电机结合执行器的应用中。虽然三相栅极驱动器可以独立驱动每个相，但当只需要两相时，使用三相驱动器可能存在空间和成本劣势。此外，三相驱动器的设置（如 IDrive、增益和死区时间）是针对所有三相统一设置的，无法分开设置。

3.2.1.3 易于更换

如果某个相位的 IC 损坏，用户只需更换该相的 IC 即可，无需更换整个驱动器。这不仅降低了设备成本，还简化了运维难度。

3.2.2 挑战

3.2.2.1 栅极驱动器和微控制器之间的布线更长

在 PCB 设计中，需要特别关注对噪声敏感的模拟信号。如果单半桥栅极驱动器集成了电流检测放大器 (CSA)，建议遵循适当的设计规范，将 CSA 输出信号布线到微控制器。这些规范包括在 PCB 中使用适当布线或屏蔽技术，防止与噪声源发生耦合。对于分流电阻的布线，应遵循正确的布局实践，例如使用开尔文连接和并行布线，以确保测量的准确性。

3.2.2.2 需要额外元件

与三相栅极驱动器相比，使用单半桥栅极驱动器来驱动三相 BLDC 电机通常需要的无源器件更多。

每个单半桥驱动器可能都需要单独配置去耦电容器，如用于电荷泵、GVDD 和 VDRAIN 的电容器，而三相驱动器只需配置一次即可。

同样，用于器件配置的无源电阻（如 IDRIVE 设置、VDS 电平、死区时间等）也需要单独配置。这些额外的无源元件增加了单半桥驱动器的实现成本，但其架构提供定制化能力。

表 3-1 展示了三个单半桥系统与三相系统中所需的额外无源器件。请注意，具有 SPI 的器件不需要无源电阻器。

表 3-1. 三相 BLDC 驱动器与含三个单半桥的栅极 BLDC 驱动器实现方案中无源器件的差异

无源	引脚	三相	3 个半桥驱动器
电容器	GVDD	1	3
	VDRAIN	1	3
	CSAREF	1	3
电阻器	IDRIVE	1	3
	VDS 等级	1	3
	死区	1	3
	CSA 增益	1	3
	nFault	1	3

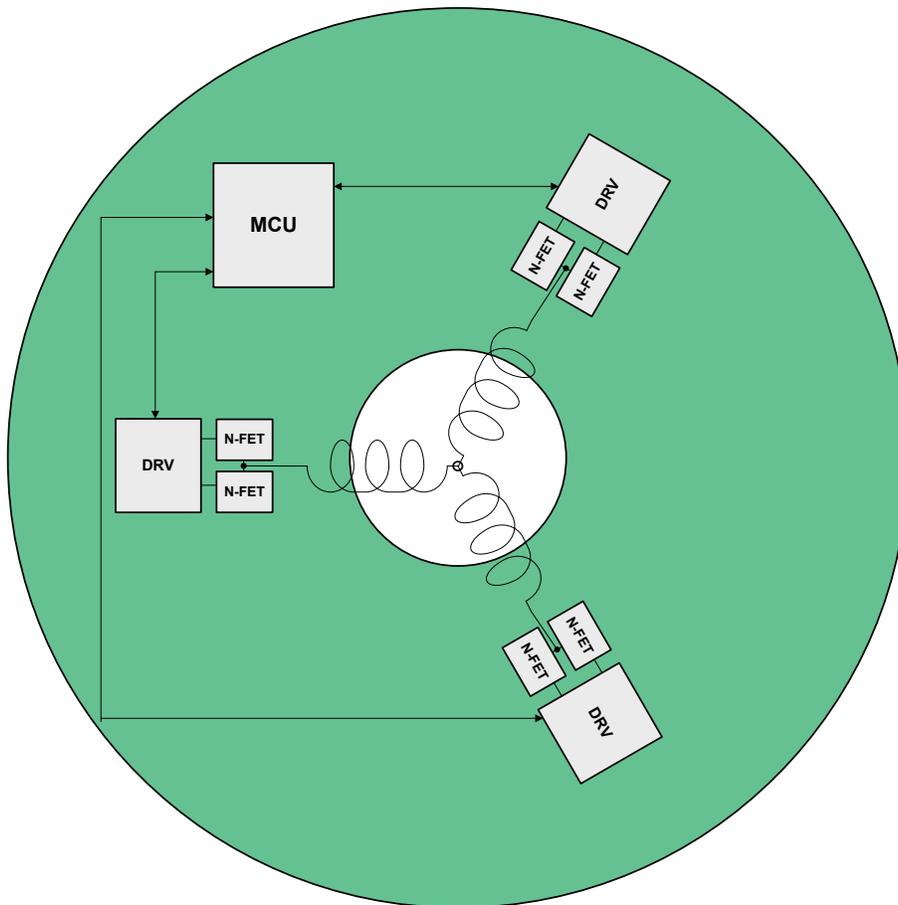


图 3-4. 三个单半桥驱动器 - 展示了栅极电感的降低以及布局优势

3.3 典型应用

单半桥驱动器的目标应用包括机器人和工厂自动化市场。当前市场正经历将机器人和协作机器人融入工厂自动化的大规模转型，以通过提高生产速度和效率来增加产量。BLDC 电机在提供现代工厂车间所需的高扭矩和高速度方面发挥着关键作用。

这些应用通常需要单半桥驱动器提供的 MOSFET 放置优势。许多电机设计都将驱动器的功率级紧邻电机相位磁体放置，用于改善信号完整性，减少电路板寄生效应的影响，并且还能减小系统尺寸。因此，单半桥布线的灵活性使其在此类应用中比标准三相栅极驱动器更具吸引力。

单路半桥驱动器的另一个新兴市场是电动出行领域，例如电动滑板车和电动自行车。这些应用通常面临源极节点瞬态问题，例如由于较高负载或意外进入发电模式而导致的瞬态。由于单半桥架构缩短了 MOSFET 与驱动器之间的距离，从而减少了电路板寄生效应的影响，非常适合这种系统需求。

4 总结

驱动无刷直流电机的基本原理是由微控制器向驱动器发送信号，驱动器将这些信号转换为 MOSFET 的栅极电压，从而实现电机旋转。

三相栅极驱动器和单半桥驱动器虽然目标相同，但在电路板设计和系统尺寸方面有本质区别。它们的实现差异决定了其适合不同的应用场景或市场需求。

三相栅极驱动器更适合需要一站式解决方案来驱动 BLDC 电机的应用，其较大的 IC 封装整合度较高，可减少外部元件数量。例如：电动工具、无人机等

三个单半桥驱动器更适合 MOSFET 放置空间受限、需要减少寄生效应或对信号完整性要求较高的应用。例如：机器人或协作机器人、工厂自动化等。

这两种驱动器架构各有优势，用户应根据系统需求选择适合的解决方案，从而在充分利用优势的同时，降低设计挑战。

要查找更适合您系统需求的驱动器、请访问 [Ti.com](https://www.ti.com) 上的 [BLDC 产品系列](#)

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [DRV816x 具有集成式保护和电流检测放大器的 100V 半桥智能栅极驱动器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI), [了解智能栅极驱动器](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [适用于集成式电机驱动器的 48V、3.5kW 小型三相逆变器参考设计](#) 设计指南。
- 德州仪器 (TI), [DRV8161EVM](#) 评估模块。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司