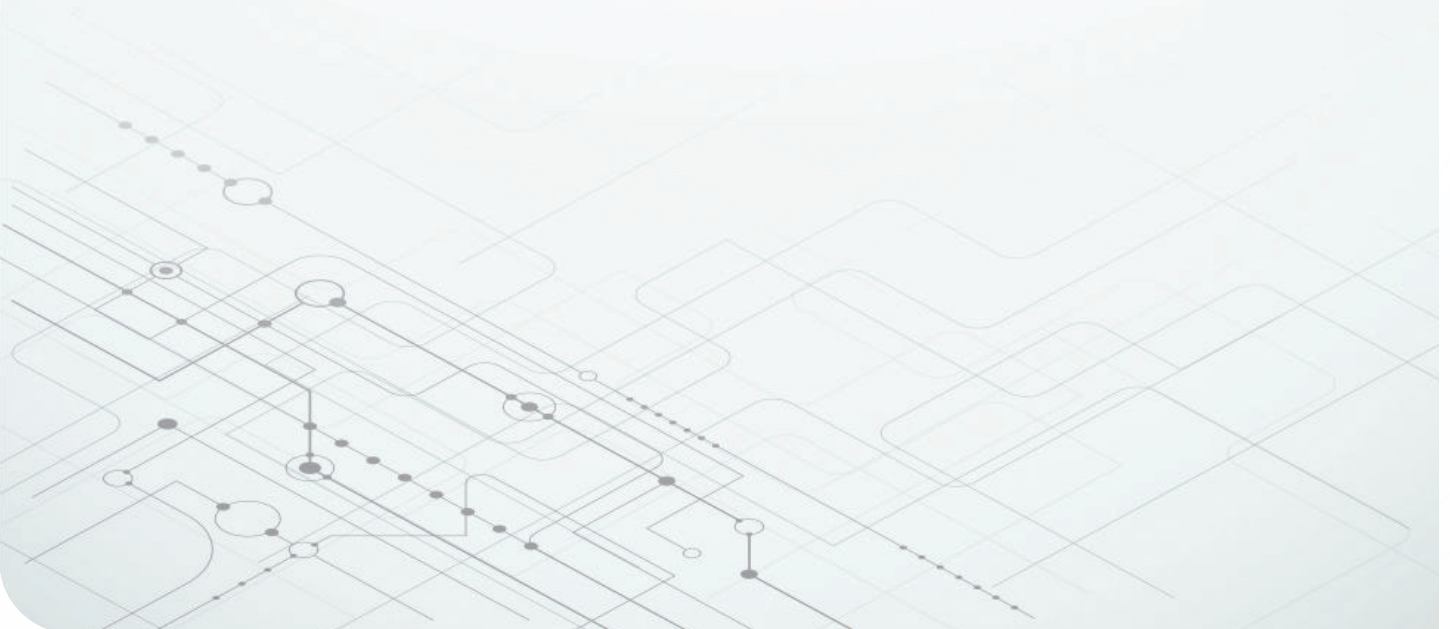


# 三相集成 GaN 技术如何更大限度地 提高电机驱动器的性能



**Manu Balakrishnan**  
Systems engineer  
Motor drivers



# 内容概览

- 1 GaN 如何提高逆变器效率
- 2 使用 GaN 电源开关提高电机性能
- 3 在电机驱动器中使用 GaN 时的设计注意事项

在应对消费类电器、楼宇暖通空调 (HVAC) 系统和工业驱动装置的能耗挑战中，业界积极响应，通过实施诸如季节性能效比 (SEER)、最低能效标准 (MEPS)、Energy Star 和 Top Runner 等项目推进建立系统能效评级体系。

变频驱动器 (VFD) 可为加热和冷却系统提供出色的系统效率，特别是在这些系统具有范围非常宽的精确速度控制的情况下。VFD 使用逆变器控制电机转速，并进行高频脉宽调制 (PWM) 开关，可获得真正的可变速度控制。

虽然这些逆变器目前是使用绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 和金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 作为电源开关来实现的，但由于总体损耗较高，开关频率和电力输送受到限制。不过，随着宽带隙技术的进步，在电机驱动器中使用基于氮化镓 (GaN) 的电源开关有助于提高功率密度、电力输送能力和效率。

## GaN 如何提高逆变器效率

GaN FET 导致的导通损耗与 GaN 的导通状态电阻成正比，这一点与 MOSFET 类似。但对于 IGBT，导通损耗取决于拐点电压和动态导通状态电阻，这通常高于 GaN FET 或 MOSFET。

在开关损耗方面，与 MOSFET 和 IGBT 相比，GaN FET 的损耗要低得多，原因是：

- GaN 提供零反向恢复。通过零反向恢复，可以非常高的电流压摆率 ( $di/dt$ ) 和电压压摆率 ( $dv/dt$ ) 切换 GaN

FET。在 MOSFET 中，体二极管会出现较高的零反向恢复，从而限制开关  $di/dt$  和  $dv/dt$ ，并导致额外的损耗和相位节点电压振铃。对于 IGBT，即使添加经过优化的反向并联二极管，仍然会带来与反向恢复相关的难题。

- 关闭时，IGBT 会受到少数载流子复合电流（通常称为尾电流）的影响，该电流会增加关断损耗。GaN 没有任何尾电流。
- 与 IGBT 和 MOSFET 相比，GaN 的电容更低，因此电容开关损耗更低。
- 受控和更快的  $di/dt$  和受控  $dv/dt$  有助于优化开关期间的电压-电流重叠损耗。

图 1 展示了在开关频率为 20kHz、基于 GaN 的逆变器的相位节点电压压摆率限制为 5V/ns、环境温度为 55°C 的情况下，基于 GaN、IGBT 和 MOSFET 的解决方案的逆变器效率理论比较。可以看到，GaN 解决方案可帮助将功率损耗至少降低一半。

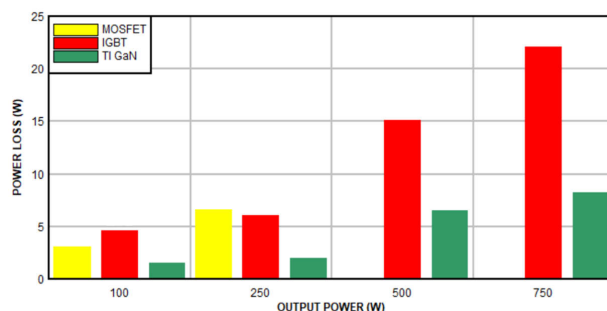


图 1. GaN、MOSFET 和 IGBT 解决方案的效率比较。

图 2 比较了德州仪器 (TI) DRV7308 三相 GaN 智能电源模块 (IPM) 和峰值电流额定值为 5A 的 IGBT IPM 的效率。相应的值在以下条件下测得：电源电压为 300V<sub>DC</sub>、开关频率为 20kHz、环境温度为 25°C、风扇电机电缆长度为 2m、提供 0.85A 的均方根绕组电流和 250W 的逆变器输出功率。GaN IPM 的压摆率配置为 5V/ns。

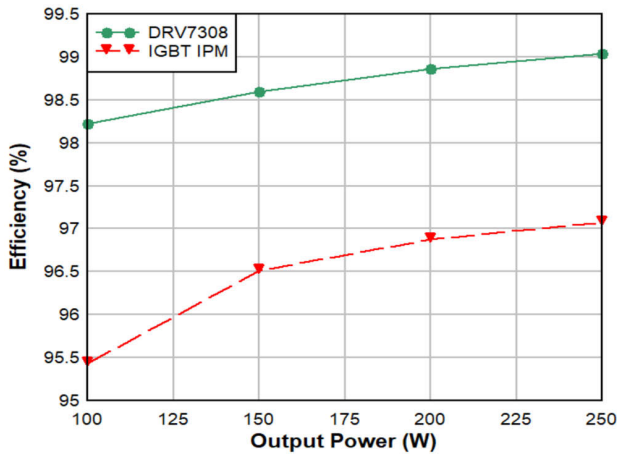


图 2. 250W 应用中 DRV7308 和 IGBT IPM 的效率比较。

### 使用 GaN 电源开关提高电机性能

专为高速电机或电感较低的电机而设计的永磁同步电机通常需要高 PWM 频率，以减少电流纹波并实现出色的电机性能。终端设备示例包括吹风机、鼓风机和泵。

电机绕组中较高的电流纹波会导致不必要的扭矩纹波，增加铜和磁芯损耗，并导致开关期间检测到的平均电机电流不准确。

基于 MOSFET 或 IGBT 的 IPM 的额定使用频率通常为 20kHz；但是，由于开关损耗较高，它们通常用于较低的开关频率（6kHz 至 16kHz）。由于 GaN 即使在较低的 dv/dt 下也能提供低得多的开关损耗，因此能够以高得多的频率进行开关以提高电机效率和性能。

图 3 展示了 DRV7308 的功能方框图，此器件集成了针对所有 GaN FET 且具有相位节点电压压摆率控制功能的前置驱动器。DRV7308 有助于在 Quad Flat No-lead (QFN) 12mm x 12mm 封装内的三相调制、场定向控制驱动的 250W 电机驱动应用中实现超过 99% 的逆变器效率，无需散热器。

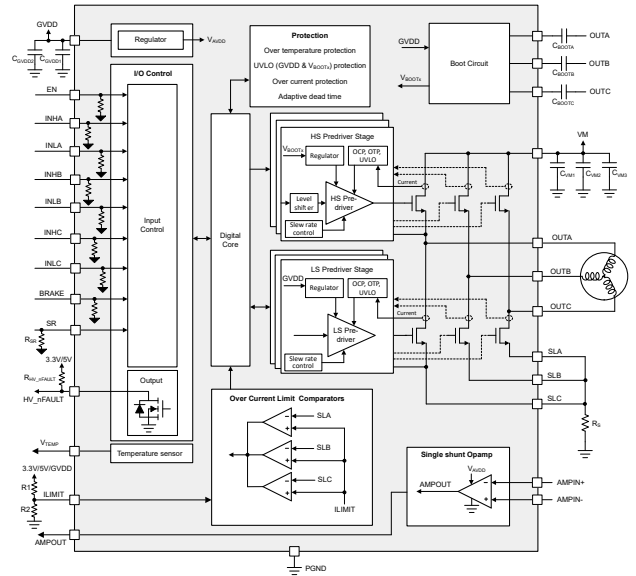


图 3. DRV7308 功能方框图。

### 在电机驱动器中使用 GaN 时的设计注意事项

设计人员通常必须考虑 dv/dt 对电机绝缘、轴承寿命、电磁干扰 (EMI) 和可靠性的影响。

DRV7308 包含一个集成前置驱动器压摆率控制电路，此电路控制相位节点上的 dv/dt。可以将压摆率设置控制在 5V/ns 以下，并在电机绕组绝缘和开关损耗优化之间权衡配置压摆率。DRV7308 的较低压摆率设置涵盖了现有 IGBT 提供的范围，而较高的压摆率有助于将开关损耗保持在低得多的值。

图 4 和图 5 展示了 DRV7308 在 1A 负载、300V、10V/ns 压摆率设置和 2m 电机电缆条件下的相位节点开关电压。具有较低寄生效应的 GaN FET 零反向恢复和前置驱动器压摆率控制有助于实现干净的电压开关波形。

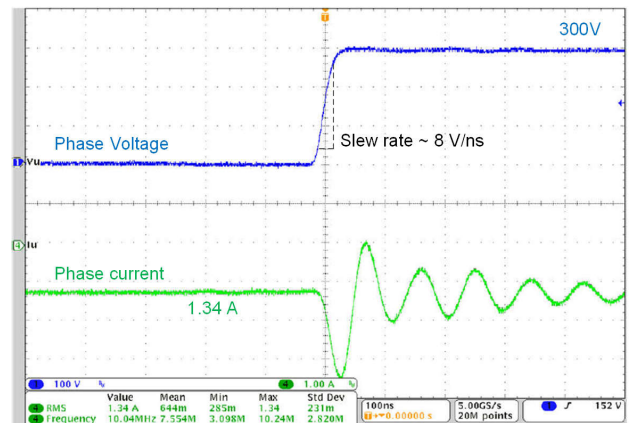


图 4. 使用 2m 电缆和风扇电机时的相位节点电压上升压摆率。

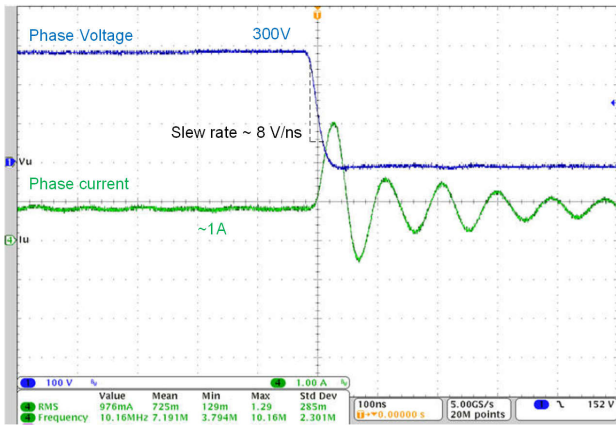


图 5. 使用 2m 电缆和风扇电机时的相节点电压下降压摆率。

## 对系统效率的影响

空调和制冷系统通常需要变化很大的速度控制，以实现更高的压缩机和加热系统效率。死区时间大于  $1\mu\text{s}$  且传播延迟大于  $500\text{ns}$  的传统 IPM 会限制最大和最小工作 PWM 占空比，并缩小运行速度范围。较长的死区时间还会降低电机的可用电压，并且要增加电机电流才能实现相同的电力输送。

DRV7308 提供自适应死区时间，最大死区时间小于  $200\text{ns}$ ，传播延迟低于  $200\text{ns}$ ，可帮助设计人员扩大工作 PWM 占空比范围，从而扩大速度范围，同时还提高电机的可用电压。例如，能够在空调系统中实现从超低到高速的转换，有助于设计人员在启动时设置最高速度，从而使系统更快地制冷和制热。然后，在达到设定的温度后，设计人员可根据空调负载的变化，使用更精细的低速和容量控制。这种更精细、更出色的负载点控制有助于提高系统效率。

超低死区时间和传播延迟以及低传播延迟失配特性可实现精确的平均电流检测，从而提高控制精度，尤其是对于场定向控制驱动。图 6 展示了传播延迟对平均电流检测精度的影响。在 PWM 期间，在 PWM 导通时间段的中间对电流进行采样将获得每个 PWM 周期中的平均电机电流。图 6 还展示了传播延迟如何使电流检测偏离中值。电流检测误差 ( $\Delta I$ ) 取决于传播延迟、施加的电压、PWM 开关频率和电机电感。对于低电感电机，误差将很高。电流检测误差还会影响无传感器控制驱动器中的电机位置检测（估算器）精度。电机位置估算误差会导致电机效率降低。

DRV7308 具备超低传播延迟和传播延迟失配，有助于实现精确的平均电流检测并提高电机效率。

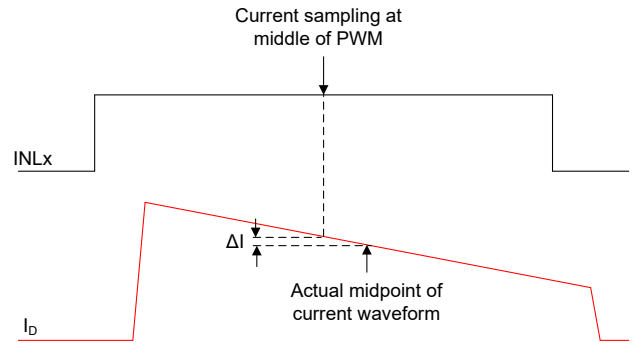


图 6. 传播延迟对电流检测精度的影响。

## 对可闻噪声的影响

在电机驱动系统中，导致可闻噪声的主要来源之一是电流失真引起的扭矩纹波。对于电机，电流失真取决于多个因素，包括 PWM 频率、死区时间和电流检测精度。

与基于 IGBT 或 MOSFET 的解决方案相比，DRV7308 可显著降低开关损耗，并实现更高的 PWM 频率。在较高的开关频率下，较低的绕组电流纹波可实现较低的扭矩纹波，超出了可闻频率范围。

在基于 IGBT 和 MOSFET 的系统中，死区时间为  $1\mu\text{s}$  到  $2\mu\text{s}$  或更长，导致相当高的电机电流失真。死区时间失真以每  $60^\circ$  电角出现一次，并导致电流波形上的第六次谐波，这通常位于可闻频率范围内。DRV7308 的自适应死区时间逻辑可实现短于  $200\text{ns}$  的死区时间，从而实现超低的电流失真，进而降低可闻噪声。

图 7 比较了在死区时间为  $0.2\mu\text{s}$  的情况下测试 DRV7308 时的电机绕组电流总谐波失真 (THD)，以及在死区时间为  $2.5\mu\text{s}$  的情况下测试 IGBT IPM 时的电机绕组电流总谐波失真。与 IGBT IPM 相比，DRV7308 失真非常低。由于低占空比或低逆变器调制指数，死区时间的影响更大，因此在输送功率较低时，IGBT IPM 的这种失真将呈指数级升高。

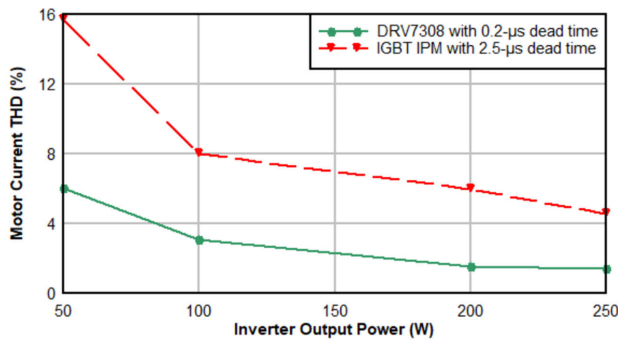


图 7. 电机电流 THD 在不同死区时间下的比较。

## 传导发射和辐射发射的注意事项

传导和辐射发射取决于开关频率、 $dv/dt$ 、 $di/dt$ 、开关电压振荡和反射以及开关电流环路面积。

DRV7308 整合了多种设计技术和印刷电路板 (PCB) 布局选项，以解决 EMI 和电磁兼容性问题：

- **PWM 开关频率。** 开关频率越高，对 EMI 频谱的影响越大。较高的开关频率有助于降低电流纹波和电容器要求，从而满足传导发射要求。DRV7308 提供宽范围开关频率，从极低值到高达 60kHz。设计人员可以根据系统性能和 EMI 要求选择合适的频率。
- **$dv/dt$ 。** DRV7308 前置驱动器能够控制相位节点开关电压摆率，以满足 EMI 要求。
- **$di/dt$ 。** 由于 GaN 具有零反向恢复和低寄生效应，可以提供更好的开关性能，而不会在开关期间在相位节点上产生电压过冲和振荡。图 4 和图 5 显示了 DRV7308 的干净开关，这意味着 EMI 更低。
- **较小的开关电流环路面积。** 本地去耦电容器将在开关期间提供脉冲电流。DRV7308 的设计使得直流电压去耦电容器 ( $C_{VM}$ ) 的开关电流环路面积非常小，如图 8 中所示。

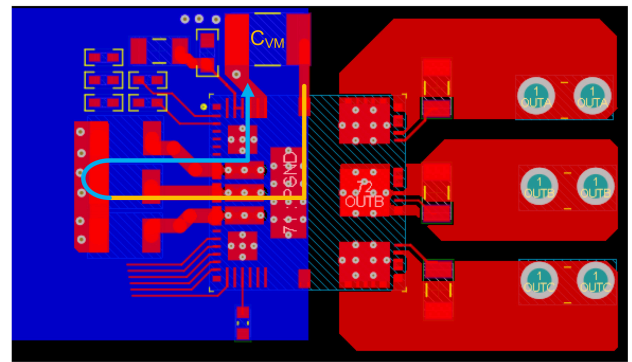


图 8. DRV7308 的典型布局参考 (展示了较小的电流环路面积)。

## 对解决方案尺寸的影响

除了封装尺寸小和无需散热器外，DRV7308 还提供高度集成功能，包括一个用于电机电流检测的运算放大器、三个用于电流限制的比较器、一个温度传感器和一套保护功能。与基于 IGBT 或 MOSFET 的解决方案相比，这些集成使逆变器电路板尺寸减小多达 55%。

尺寸的减小还支持在靠近电机的位置集成逆变器，这在风扇、风机和泵等用例中非常有用，并且无需从逆变器板到电机的布线。鉴于无需使用电缆，还能避免电缆电容造成的开关损耗，并减轻长电缆引起的传导和辐射 EMI。

## 具有保护功能的可靠系统设计

GaN 需要更快、更可靠的过流保护来消除饱和。集成保护可消除寄生效应的影响，并提供大约几百纳秒的更快响应。逆变器和电机需要过流保护来消除过载状况下的热失控。

230V<sub>AC</sub> 线路供电的电机驱动器可根据交流线路的电压容差或使用有源功率因数校正电路提供高达 450V<sub>DC</sub> 整流直流总线电压。逆变器需要设计为采用 450V 工作电压。如果电机产生的反电动势超过电源电压或存在电感反冲，则一些电机驱动器需要在短时间内处理更高的电压。逆变器可能还需要处理更高的关断状态阻断电压，以防止在输入线路电压浪涌或电快速瞬变事件等过压情况下造成损坏。

DRV7308 采用集成漏源电压保护设计，可在过流事件期间保护 GaN FET。该器件还集成了过流比较器，可实现逐周期电流限制，专为具有 650V 关断状态阻断电压额定值的

450V 工作电压设计。其他保护功能可监控欠压、过流和引脚对引脚短路等故障情况。

## 结语

DRV7308 等基于 GaN 的 IPM 不断进步，将持续助力提高电器和 HVAC 系统电机驱动器的功率密度、电力输送能力和效率，同时节省系统成本并提高可靠性。

## 其他资源

- [DRV7308 三相 650V、5A、GaN 智能电源模块数据表](#)
- [GaN IPM 产品系列](#)
- [了解有关 TI GaN 技术的更多信息](#)
- [PWM 开关频率和调制指数对无槽永磁电机的铁损耗和性能的影响](#)
- [交流电力驱动器中的宽带隙器件：机遇和挑战](#)

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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