

## Application Brief

## GaN FET 在类人机器人中的应用



Eason Tian, Kyle Wolf

## 引言

类人机器人集成了许多子系统，包括伺服控制系统、电池管理系统 (BMS)、传感器系统、AI 系统控制等。如果要将这些系统集成到等同人类的体积内，同时保持此复杂系统平稳运行，会很难满足尺寸和散热要求。类人机器人内空间受限最大的子系统是伺服控制系统。为了实现与人类相似的运动范围，通常在整个机器人中部署大约 40 个伺服电机 (PMSM) 和控制系统。电机分布在机器人身体的不同部位，例如颈部、躯干、手臂、腿、脚趾等。该数字不包括手部的电机。为了模拟人手的自由操作，单只手即可能集成十多个微型电机。这些电机的电源要求取决于所执行的具体功能；例如，驱动机器人手指的电机可能只需要数安培电流，而驱动髋关节或腿的电机可能需要 100 安培或更高的电流。

与传统伺服系统相比，类人机器人的伺服系统具有更高的控制精度、尺寸和散热要求。本文介绍了 GaN (氮化镓) 技术在电机驱动器中的各种优势，并展示了 GaN 如何帮助解决类人机器人中伺服系统面临的挑战。

## 更精确的控制

在伺服电机驱动应用中，电机控制通常分为几个控制回路层：电流/扭矩回路、速度回路、位置回路和更高级别的运动控制回路。这些回路通常以级联的形式排列，每个回路都有“实时”处理要求。电流/扭矩回路是速度最快的控制回路。每个上游回路以其之前回路的倍数运行，并为下游回路提供输入参考。图 1 显示了典型的级联控制拓扑。

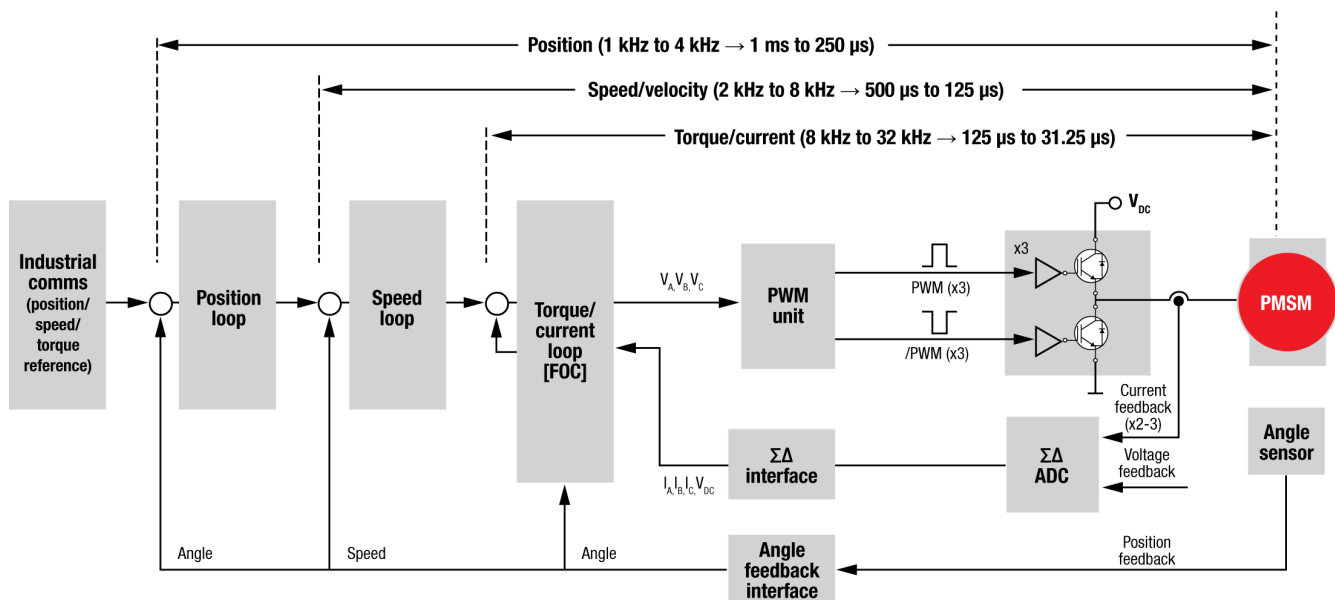


图 1. 典型的伺服电机控制回路技术

控制回路最重要的部分是电流回路。通常，FET 开关频率与电流回路相同，约为 8kHz 至 32kHz。电流回路的速度直接影响电机控制的精度和响应速度。类人机器人的一个简单动作涉及多个伺服电机的控制。为了协调机器人身体中的近 40 个电机，同时保持系统的稳定性，每个关节的控制精度和响应速度必须满足非常高的要求。可通过提高电机控制回路的速度和 PWM 频率来满足这些要求。例如，100kHz (图 2) 的开关频率可以实现分辨率更高的

电机电流，从而实现更小的电机电流纹波和更精确的控制。高分辨率电机电流波形也意味着可以获得更好的正弦电流，这可以提高电机的运行效率并减少电机发热。

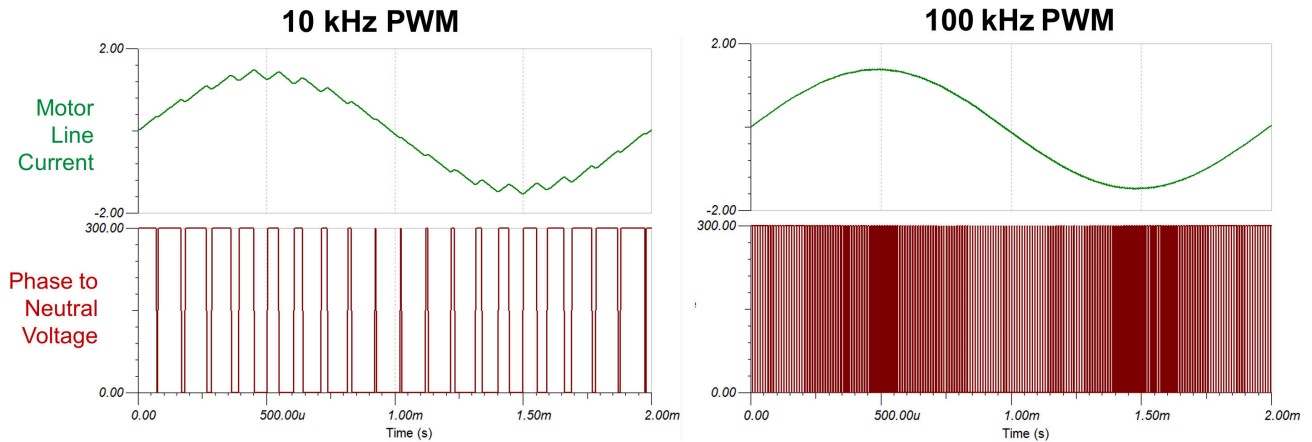


图 2. 100kHz 和 10kHz PWM 电机电流

此外，增加 PWM 开关频率可以减小 DC 总线电容器的尺寸和电容。对于要替换为陶瓷电容器的电解电容器，需要满足的总线电容要求降低。伺服功率级 FET 通过 PWM 信号定期从总线电容器汲取电流。当 PWM 频率增加时，每个单位时间消耗的电荷量减小，这意味着所需的总线电容减少。根据 TIDA-010936 的测试，将 PWM 频率从 20kHz 提高到 80kHz 后，可以用电容相等的陶瓷电容器代替电解电容器，以获得相似的总线电压纹波。与电解电容器相比，陶瓷电容器具有明显优势：更小的尺寸、更长的使用寿命、更好的高频特性等。

因此，在设计类人机器人时必须考虑速度更高的电流回路和更高的 PWM 频率。对于 MOSFET 型伺服驱动器，PWM 开关频率的增加会带来很大的额外损耗，从而导致驱动器严重发热。当开关频率从 10kHz 增加到 20kHz 时，MOSFET 型驱动器会让总体损耗增加 20%至 30%，这对于类人机器人是不可接受的。此外，GaN FET 在高频下具有较低开关损耗。在 TIDA-010936 测试中，电路板损耗在 40kHz 和 80kHz 下几乎相同，因此 GaN 特别适合高开关频率场景。

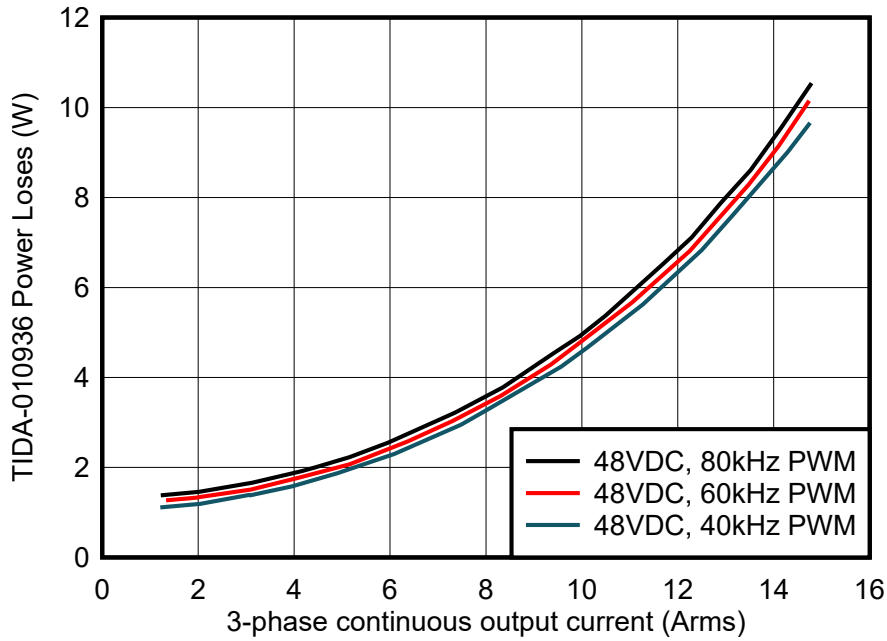


图 3. TIDA-010936 电路板在 48V 输入电压下的损耗与三相输出电流间的关系

### 减少开关损耗

GaN 之所以能够实现如此低的开关损耗，源于 GaN 器件的特性。GaN 器件具有更小的栅极电容 (CG) 和更小的输出电容 (Coss)，可实现达到 Si-MOSFET 100 倍的开关速度。由于关断和开通时间缩短，可以在较短的范围内控制死区时间，例如 10-20ns，而 MOSFET 通常需要约 1us 的死区时间。死区时间的缩短可降低开关损耗。此外，GaN FET 没有体二极管，但续流功能通过第三象限操作实现。在高频 PWM 场景中，MOSFET 的体二极管会导致较大的反向恢复损耗 (Qrr 损耗)。第三象限操作还可避免开关节点响铃和由体二极管引起的 EMI 风险，从而降低对高功率密度类人机器人中其他器件的干扰。

### 尺寸更小

类人机器人的关节空间有限。电源板通常是直径为 5-10 cm 的环形 PCB。此外，关节必须集成电机、减速器、编码器甚至传感器。重要的是，设计人员必须在有限的空间内实现更高的功率和更稳定的电机控制。与 MOSFET 相比，GaN 具有更小的 RSP (比电阻、裸片面积尺寸比较)，这意味着与具有相同 RDSon 的 MOSFET 相比，GaN 具有更小的裸片面积。德州仪器 (TI) 通过集成 FET 和栅极驱动器进一步减小了占用空间。这样可以实现 4.4mΩ 半桥 + 栅极驱动器，并且封装仅为 4.5 x 5.5mm。

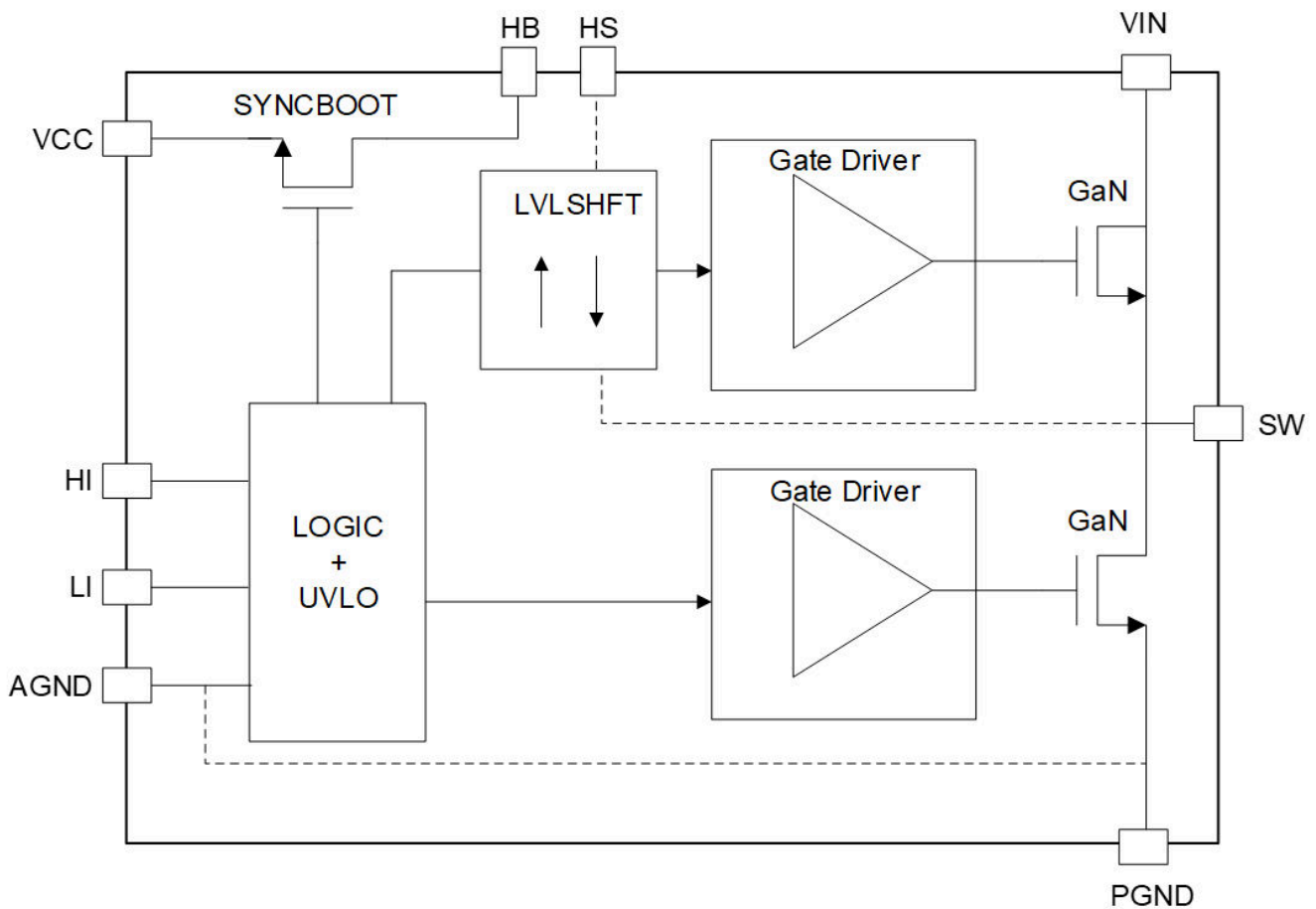


图 4. LMG2100 方框图

以 LMG2100R026 为例。该器件集成了半桥的 FET 和半桥驱动器，可承受 55A 的持续电流。将驱动器与 FET 集成有许多优势，包括：

- 减少了栅极响铃，让运行更可靠
- 减小了电源回路电感并且优化了封装尺寸
- 通过集成栅极驱动器减小了尺寸
- 通过集成的保护功能保护器件

为了在设计中比较 GaN 和 MOSFET，我们可以查看提供类似功率级别的 [TIDA-010936](#) 和 [TIDA-01629](#) 设计。如图 5 所示，由于集成了栅极驱动器并降低了 GaN 的 RSP，整个功率器件的芯片面积减小了 50% 以上。

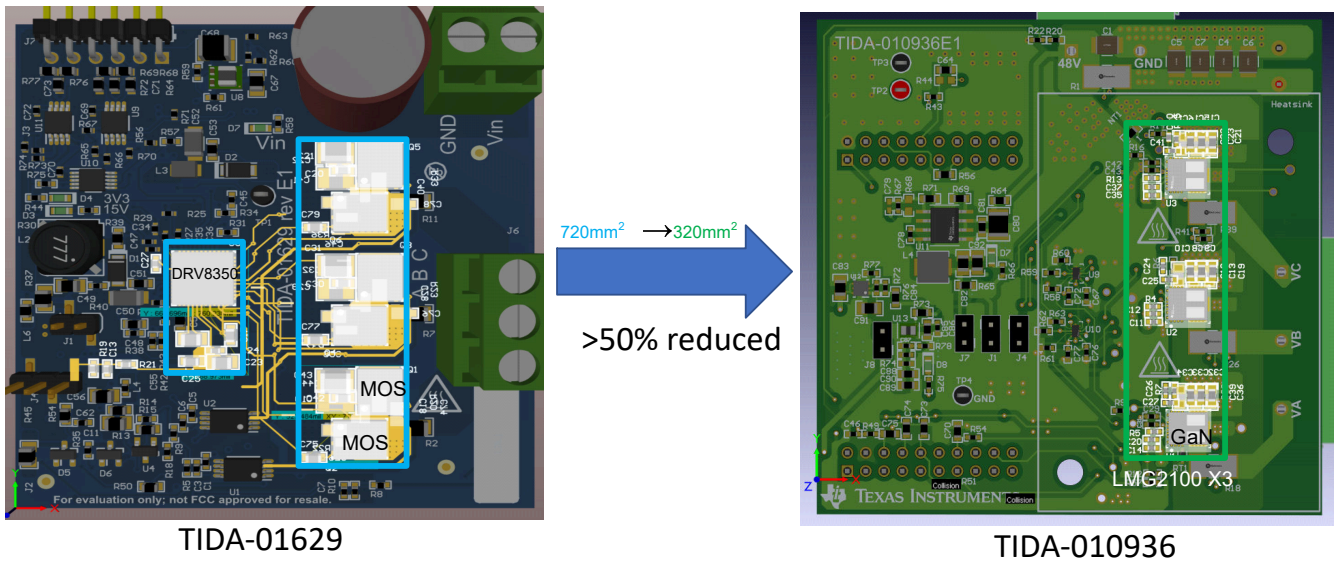


图 5. GaN 与 MOSFET 功率级比较

### 总结

类人对控制精度和功率密度的要求较高。GaN 可以在高 PWM 频率下以低损耗轻松实现更高精度的电机控制。GaN 的高功率密度特性与德州仪器 (TI) 的集成式驱动器的特性相结合，可进一步减小尺寸。由于这些优势，GaN 型电机驱动器可能会成为类人的首选设计，带来更高效、更稳定和更智能的机器人设计。

除了类人机器人之外，GaN 技术也是其他类型机器人（协作机器人、外科手术机器人、AGV）、工业伺服系统、家用电器和其他需要高功率密度的应用的理想选择。

### 参考资料

1. [TIDA-010936](#)
2. [LMG2100R026](#)
3. [LMG2100R044](#)
4. [TIDA-01629](#)
5. [GaN 是否具有体二极管？ - 了解 GaN 的第三象限操作](#)

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司