

Application Brief

人形机器人的功率级实现方案



人形机器人与现有工业及服务类机器人相似，但其设计旨在以高自由度 (DOF) 模仿人类运动，并可对周边环境实现毫秒级快速响应。机器人整机搭载大量电机，功率相关设计难点突出，这给系统工程师带来了极大挑战，如图 1 所示。

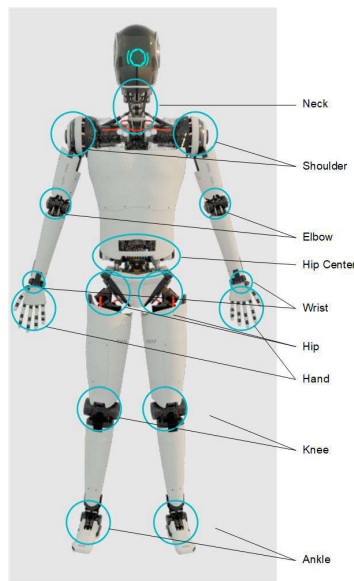


图 1. 展示人形机器人中 DOF 分布位置

图 1 中所示的 DOF 因电机驱动负载量不同而具有不同的功率要求，功率级别通常在 10W 至 4kW 之间变化，其中绝大多数驱动器的功率范围为 10W 至 1.5kW。

典型功率需求可划分为以下档位：

- 10W 至 100W：手腕和手
- 100W 至 300W：脚踝、肩部和颈部
- 1kW 至 1.9kW：肘部 1.5kW
- 2.5kW 至 4kW：膝盖、髋部和髋部中心

不同功率档位对电机尺寸与热性能要求各不相同，在器件选型时需综合考量。电机类型是另一项考量因素，需根据功率级别与效率要求进行选型。

以永磁同步电机 (PMSM) 为例，工程师在设计时可选用梯形波控制或正弦波控制拓扑。行业普遍选用正弦控制，这是因为绕组和控制算法会影响电机的控制精度。

人形机器人配套电池通常按照 SELV 电压规范设计，工作电压低于 60V。这意味着这些元件至少支持 60V 持续工作；为减少系统中潜在噪声对 FET 和栅极驱动器的影响，行业甚至更倾向于选用耐压可达 100V 的器件。

使用更高的开关频率可降低驱动器的扭矩纹波效应，使运动控制器实现更精确的扭矩控制，从而提高驱动器性能。为实现这一目标，驱动器的设计需采用支持更高开关频率的高性能 MOSFET 或 GaN FET，进而提升电机效率。氮化镓 (GaN) FET 具有低 FET 电容且没有体二极管，因此开关损耗更小。这一特性使其在高开关频率工况下，具备开关损耗更低的优势。精密算法同样能够帮助降低电机 FET 的开关动作负荷与功率损耗。

机器人存在严苛的温度限制，外壳表面温度不得超过 55°C ，该温度接触人体约 10 秒即可造成全层皮肤灼伤，因此电机驱动器的高功率密度是一项重要考量因素。人形机器人常与人近距离协同作业，此类高温接触风险极易瞬时发生。受限于人形机器人的整机尺寸与轻量化设计约束，热管理系统无法搭载风扇或液冷等装置。由于热管理设计无法选用主动冷却方案，机器人必须降低功率损耗，从而维持低温运行状态。

功能安全是人形机器人研发设计中的另一项重要考量因素。目前，虽然针对协作机器人和工业机器人制定了相关标准，但暂无专门针对人形机器人功能安全要求的标准。目前，全球已有多个专业研究机构针对人形机器人开展专项研究，旨在未来为其制定安全要求。在相关安全要求正式落地之前，人形机器人设计人员必须充分完善现有系统设计，最大限度减少未来因重新设计所带来的工作。现阶段可参考 ISO13482、ISO10218 和 ISO 3691-4 三项标准，预判人形机器人未来的合规设计方向。本主题为通用设计议题，适用于全品类电机驱动器，详细说明将在独立章节阐述。

10W 至 100W：手腕和手

人形机器人单只手通常搭载 8 个及以上电机，以此复现手腕与手的关键动作。在如此狭小的空间内集成大量电机，尺寸成为首要考虑因素。提升板载 IC 的集成度有助于减小总体设计的尺寸。

设计阶段需合理划分系统功能模块，在兼顾集成化优势的同时，最大限度优化设计尺寸。该档位电机驱动的典型方案是将适配完整三相的 FET、栅极驱动器及电流检测功能集成至单个器件中。该器件连接至电机控制器，后者可接收集成电机的信号并与机器人控制器通信。

TI 拥有品类齐全的电机驱动器和集成式 GaN 半桥产品系列。其中许多器件都具备高集成特性，完全满足设计人员针对紧凑型机器人的开发设计需求。

硅 FET：集成栅极驱动器

在选择 BLDC 电机驱动器时，器件高集成度与可实现的空间精简效果是关键的设计考虑因素。手腕和手的直流母线电压与人形机器人其他部位不同。根据实现方案，其电压轨范围为 24V 至 48V。选择 BLDC 驱动器时，建议选择其绝对最大电压为工作电压 1.5 至两倍的驱动器。针对 24V 工况设计需求，推荐采用 **DRV8316C** 器件。

DRV8316C 是一款 40V、额定峰值电流 8A 的三相电机驱动器，内部集成 FET 与三个 CSA。其高低侧 RDS (ON) 总和为 95mΩ，使其能够承受更高电流并有效管理系统热性能。该器件集成降压转换器和低压差线性稳压器 (LDO)，同时搭载 SPI 通信接口与硬件控制接口，采用 7×5mm QFN 封装。针对 36 至 48V 工作电压工况，**DRV8376** 是集成 FET BLDC 系列的全新产品。该器件为 70V、额定峰值电流 4A 的三相电机驱动器，内部集成 FET 与 3 个 CSA。其高低侧 RDS (ON) 总和为 400mΩ。**DRV8376** 具备 1.1V/ns 的可调输出电压摆率，可降低开关损耗。**DRV8376** 的死区时间低于 200ns，传播延迟低于 100ns，可实现低可闻噪音运行与简易化电机控制。该器件配备 SPI 接口与硬件接口，采用 6×5mm 小型 QFN 封装。对于集成式 FET 电机驱动器，可以使用热量计算器，根据系统要求确定器件的功率容量。**DRV8316C** 的典型运行功率为 80W，**DRV8376** 的典型运行功率为 50W。这些值可能因具体的系统实现方案而异。

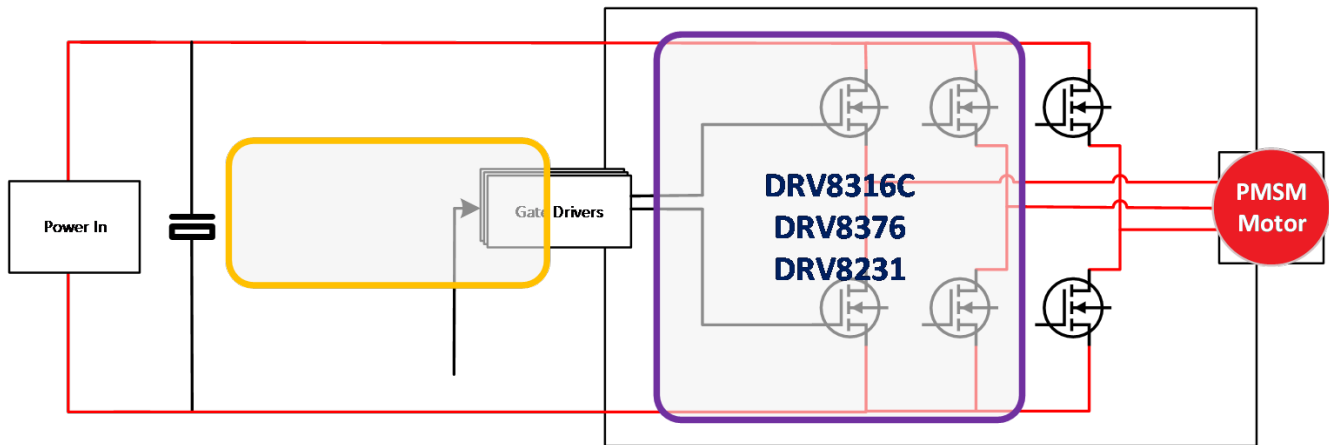


图 2. 栅极驱动器方框图

100W 至 300W：脚踝、肩部和颈部

这类系统的位置空间更为充裕，为此功率类别的驱动器设计提供了更多方案选择。

在设计这些驱动器时，客户需要选择能够同时满足功率要求和尺寸限制的电机驱动器。由于尺寸限制相对宽松，可采用集成 FET 的栅极驱动器方案，也可选用外置 FET 方案；但必须进行热设计考量，确保机器人整体温度维持在足够低的水平。

硅 FET：栅极驱动器

脚踝、肩关节及颈部所需功率更高，设计时通常采用栅极驱动器方案。这使工程师可在保持栅极驱动器设计不变的情况下，灵活更换 FET 以满足更高功率需求。该功率类别关节统一采用更高的 48V 电压轨。针对该电压与功率级别，推荐选用 **DRV8300**、**DRV835xF** 和 **DRV8162**。**DRV8300** 是一款集成度精简的 100V 三相栅极驱动器。该器件的主要应用场景为成本敏感且空间受限的系统。其封装形式多样，从 TSSOP 到 QFN 均有提供，可集成自举二极管，也可选择外置实现。**DRV8353F** 是一款高集成度 100V 耐压器件，具备功能安全品质管理认证，内部集成三个 CSA。多数机器人作业场景需与人近距离协作，设备安全性能为核心设计要素。**DRV8353F** 配套技术文档可辅助完成符合 IEC 61800-5-2 标准的功能安全系统设计。**DRV8162** 是一款智能型单半桥栅极驱动器，具有与 **DRV8353F** 相同的安全考量。如需了解 **DRV8162** 在机器人领域的更多应用，可参阅专题文章 [从协作机器人到人形机器人：将系统效率和安全性融入更大功率的机器人中](#)

GaN FET：功率级

GaN 器件也越来越多地用于人形机器人，以满足散热要求和空间限制。**LMG2100R044** 是一款 100V、4.4mΩ 的半桥驱动器件，内置自举二极管。该器件采用 4.5×5.5mm QFN 封装，可驱动最大 16A 电流的三相逆变器，且无需搭配散热器。如需更多信息，请参阅 [GaN 三相逆变器设计指南](#)。

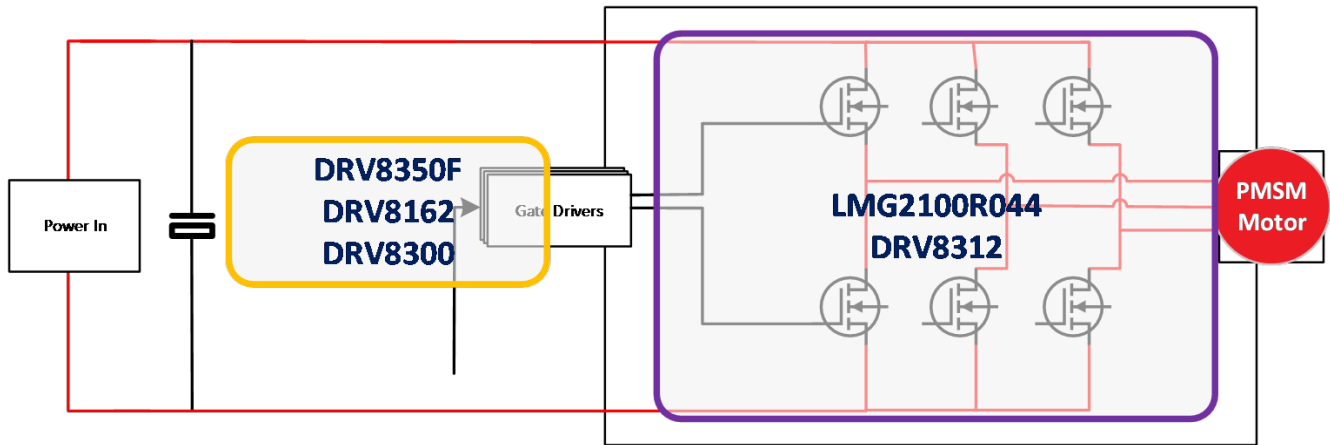


图 3. 栅极驱动器方框图

1kW 至 1.9kW : 肘部

功能安全和更高的功率都是人形机器人肘部电机驱动设计中的考量因素。该关节机械负载较大，因此驱动的散热性能与运行效率至关重要，设计人员必须采用高功率密度方案。

提升电机驱动器的工作频率以改善驱动的转矩与电流纹波，是实现更高效率的途径之一。

可以考虑选用 GaN FET 等方案，因为这些 FET 的损耗更低、设计尺寸更小。

图 4 展示了功率级方框图。

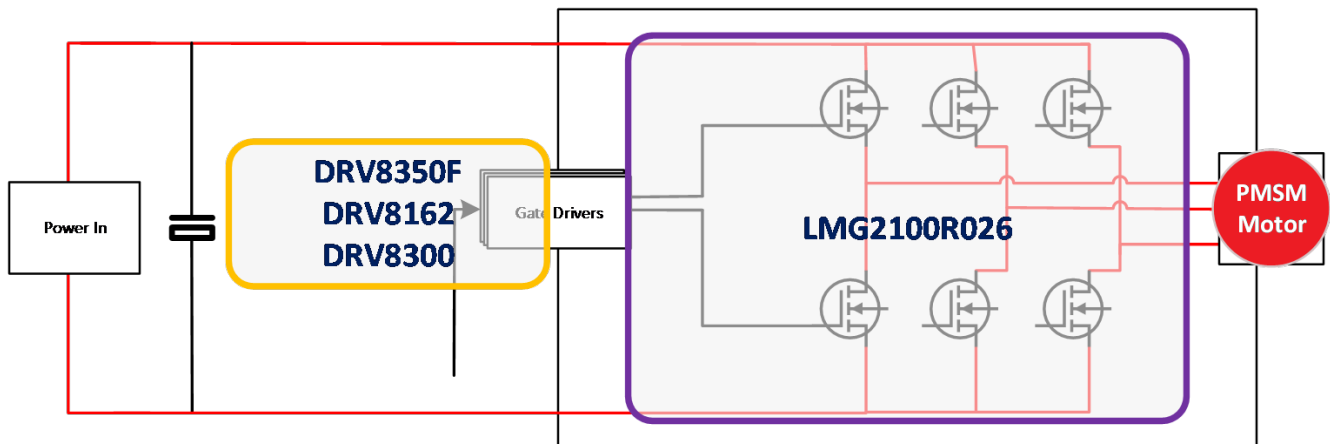


图 4. 功率级方框图

BLDC : 栅极驱动器

有关更多信息, 请参阅 [100W 至 300W : 脚踝、肩部和颈部](#)。

GaN FET : 功率级

针对肘部关节, [LMG2100R026](#) 既能实现高功率密度, 又能将损耗降至最低, 从而满足散热要求。LMG2100R026 采用 4.5×7mm QFN 封装, 集成栅极驱动器、自举二极管和 2.6mΩ GaN 半桥。该器件可使用 [BOOSTXL-LMG2100-MD](#) 进行评估。

2.5kW 至 4kW : 膝盖、髋部和髁部中心

该类电机为人形机器人功率需求最高的部件, 其设计的功率密度对功能实现至关重要。在这些电机中, 高效率和小尺寸是关键的设计问题。通常需要采用 FET 并联方案构建系统设计。这意味着对栅极驱动器的电流能力提出了额外的要求, 以实现快速开关, 提升系统整体效率。

快速开关时间还可支持更高的 PWM 频率, 从而改善系统的扭矩和电流纹波。

BLDC : 栅极驱动器

对于膝盖和髋部的 2.5-4kW 应用, [DRV8162](#) 是核心实现器件。

如需深入了解, 可参阅文章 [从协作机器人到人形机器人: 将系统效率和安全性融入更大功率的机器人中](#)。

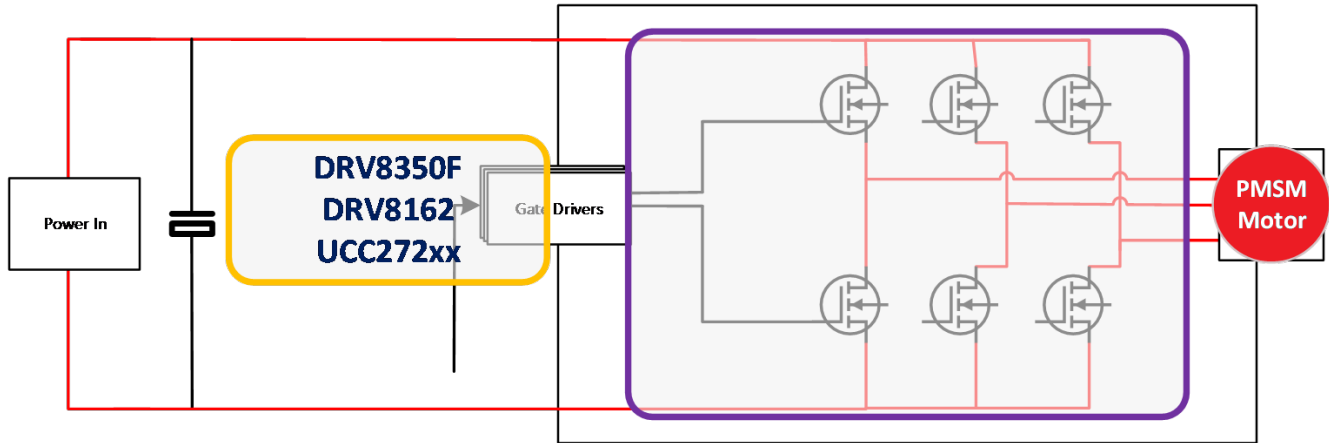


图 5. BLDC 栅极驱动器图

设计人员需分析多种场景并明确需求, 从而完成人形机器人电机驱动系统的优化设计。TI 可提供覆盖上述四类设计需求的方案, 助力设计人员构建人形机器人。

功能安全

在规划未来的设计时，选用能够简化功能安全认证的器件非常重要。ISO13482、ISO10218 和 ISO 3691-4 等标准为未来人形机器人的安全要求提供了参考方向。两项 C 类标准 (ISO10218 与 ISO3691-4) 均引用 ISO13849，要求系统需达到 PLd 等级，其中 ISO3691-4 未指定架构，由实施方自行设计，而 ISO10218 则强制要求采用 CAT3 架构。考虑到这些标准中的最坏情况要求，人形机器人的安全设计至少需满足 CAT3 PLd 等级的考量。图 6 中所示的安全架构需实现 CAT3 系统。

电机驱动的安全设计通常依据 IEC61800-5-2 或 IEC60204-1 标准，通过安全转矩关闭 (STO) 以及 0 类、1 类、2 类停机功能实现安全停机；该停机功能的实现高度依赖栅极驱动器及其功能的禁用机制。TI 正与南德公司 (TÜV SÜD) 联合编制技术文档，说明如何依托 TI 栅极驱动器实现此类安全功能。有关更多详细信息，请参阅 [使用集成式三相智能栅极驱动器设计更小的安全转矩关闭 \(STO\) 系统](#)。

TI 提供的很多器件都具有详尽的安全文档，能够帮助客户构建安全型系统，请参阅。

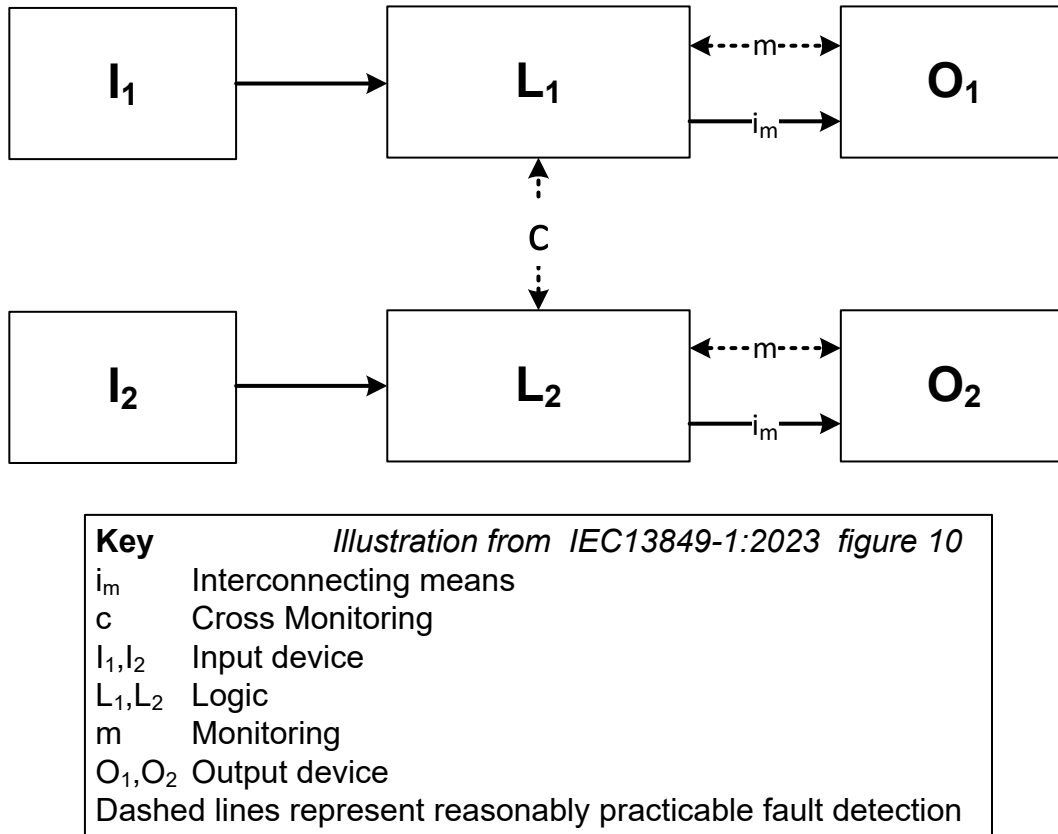


图 6. 图源：IEC13849-1:2015

结语

在设计人形机器人电机驱动器时，驱动器种类繁多，各类驱动器会根据机器人的功能用途，设定不同的设计规格。TI 拥有丰富的集成电路产品阵容，可助力客户满足不同的设计规格，打造能够快速响应环境变化的机器人。图 7 展示了采用多款 TI 产品的 1kW 至 1.9kW 电机驱动系统方框图。

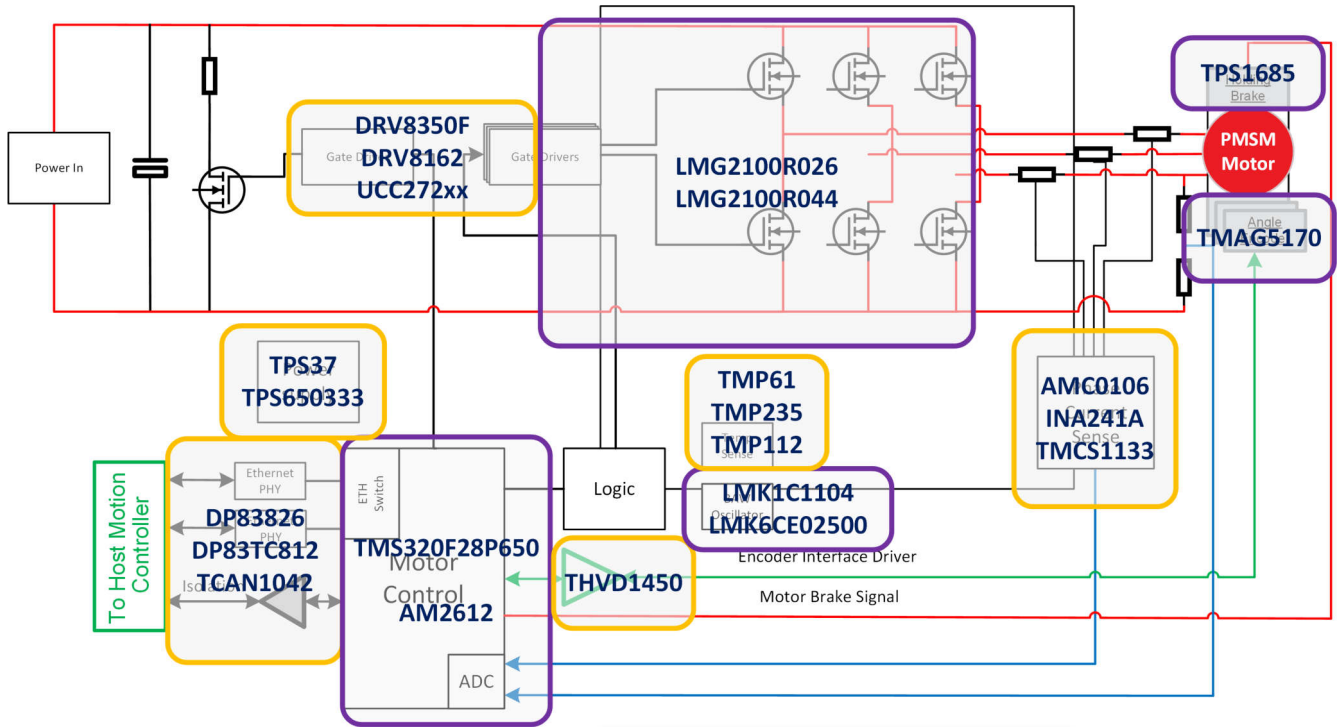


图 7. 1kW 至 1.9kW 系统方框图

TI 提供多款评估板与参考设计，可帮助工程师更快评估系统方案，同时精简量产级设计的开发流程。TI 还依托功能安全产品与设计工具，帮助设计人员简化并加快功能安全系统的设计流程。

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月