

Application Brief

类人机器人中的电机控制



简介

人形机器人有望彻底革新自动化解决方案需求持续增长的各类工业场景。与传统固定式自动化系统不同，人形机器人具备独特优势：可在以人为核心的作业空间内自主移动、操控专为人类手部设计的工具，并能在动态工况下与人类工人安全协同作业。

但想要释放该应用潜力，必须攻克人形机器人关节增设更多自由度 (DOF) 带来的复杂技术难题。现代人形机器人最多可搭载 70 个 DOF，以此实现媲美人类的灵活操作能力与移动性能，而传统工业机械臂通常仅配备 6 至 12 个 DOF。图 1 展示了人形机器人各 DOF 的典型布置位置。

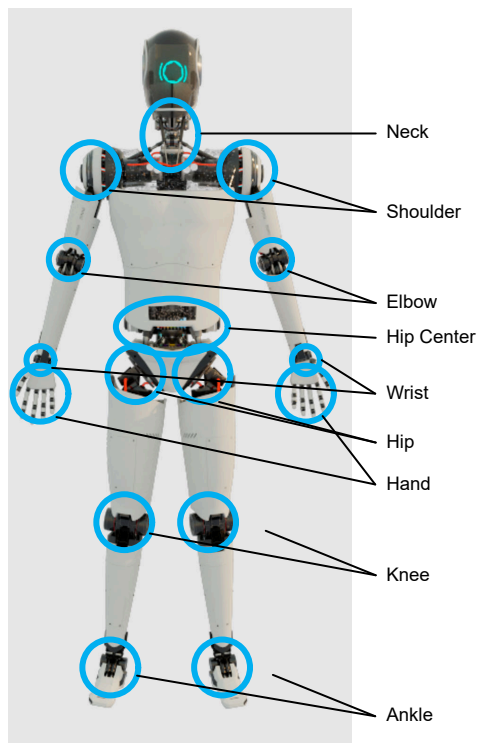


图 1. 人形机器人中 DOF 典型布置位置

支持额外 DOF 需要精确的驱动、感应和控制功能，这会增加系统设计复杂性。系统内 DOF 数量越多，所需电机驱动的数量就越多，同时其安装位置会衍生出各类配套设计约束条件。表 1 汇总了其中部分关键要求。

表 1. 人形机器人电机驱动设计的主要规格

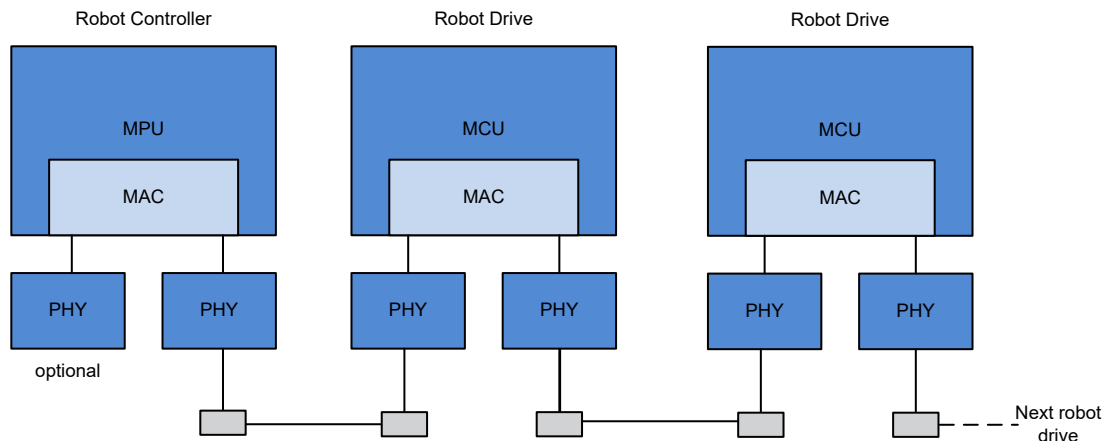
规格	重要性
通信接口架构	确定系统级协调、延迟和可扩展性（多达 70 个执行器）。带宽不足或时序不确定会导致运动不稳定和协调故障。
位置检测	为闭环控制提供反馈；精度直接影响运动精度和稳定性。分辨率不足会导致限制周期振荡和轨迹跟踪不良。
电机类型	定义了效率、扭矩密度、控制复杂性和热特性。电机选型可影响系统性能、电池寿命和外形尺寸。
电机控制算法	确定转矩脉动、效率、运行噪声和动态响应。先进的算法可在硬件配置不变的条件下实现更优性能。
功率级要求	定义效率、热性能和功率密度。功率级电路能效设计不足会导致设备温升过高、电池续航缩短且执行器体积偏大。
电子电路尺寸	确定电子设备是否适配仿人关节的内置安装腔。电路尺寸过大会导致机器人无法实现真人肢体级紧凑外形规格。
功能安全注意事项	确保安全的人机交互和法规合规性。安全设计不足会妨碍协作环境中的部署。

进一步提升设计难度的是机器人双足行走与精细操作过程中的动态稳定性控制需求，而这要求控制环路响应时间在亚毫秒范围内、位置更新频率在 1kHz 至 4kHz 以及电流调节超过 10kHz。

为了应对这些挑战，工程师必须从机械、电气、热和控制领域多维度同步优化执行器性能，同时管理尺寸、重量、功耗和成本方面的限制。嵌入式处理器的选型同样至关重要，一方面需均衡分配中央运动规划与分布式关节控制的运算负载，另一方面要兼容各类确定性实时通信协议。

通信接口架构

鉴于驱动器在机器人中的位置，因此优化与所有驱动器的通信，同时最大限度地减少布线数量非常重要。实现优化的备选方法有很多；最常用的方法是菊花链通信系统和线性总线拓扑，如图 2 和图 3 所示。


图 2. 菊花链通信

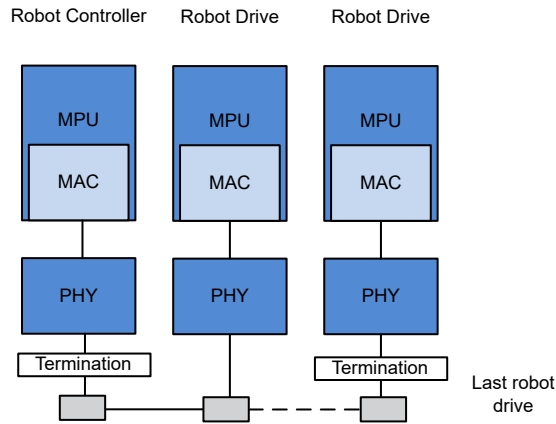


图 3. 线性总线拓扑

在选择拓扑结构后，工程师必须考虑带宽、时序和延迟要求，以实现足够的驱动响应时间。响应时间可以根据规定的帧大小确定需要哪种支持实时通信的通信协议。通信接口的带宽要求也会受到以下方面决定的影响：如何在分散式电机驱动器、集中式和外部机器人运动控制器之间拆分电机控制算法，从而最大限度地减小节点之间所需的通信帧大小。

通常，通信系统的最低带宽要求约为 8Mbit/s。但是，随着设计趋势的发展变化，这些趋势表明对系统诊断和安全功能的要求在不断提高。

根据系统要求，类人机器人系统中通常使用的通信接口基于 CAN-FD 或以太网（包括 EtherCAT）。TI 提供物理层 (PHY) 收发器和嵌入式处理器，旨在支持这些通信协议。

[CAN 收发器](#)和 [以太网 IC](#) 是类人机器人系统开发中使用的器件。

位置检测

人形机器人中的执行器必须接收电机位置数据以定义路径规划。为了以高精度实现受控移动，机器人必须配备转子位置传感器以在电机上捕获信息，并能够通过电机驱动器高效地将信息传递到中央处理计算机。根据电机所需的精度，设计人员可以使用各种转子位置传感器。

最常用的编码器包括：

- 光学编码器
- 磁性编码器
- 增量编码器
- SIN/COS 旋转变压器

这些编码器具有不同的接口来连接至驱动器并提供转子角度数据，在进行位置控制时需要使用这些数据。这些接口需要特定的硬件，因此电机控制处理器至少需要支持以下编码器配置之一：

- 专用串行接口，如 BiSS、Endat、Hiperface 或其他数字绝对编码器
- 具有采样保持功能且适用于旋转变压器接口的 ADC 转换器
- 增量编码器的正交编码器脉冲
- 用于接合磁性编码器的串行接口

一个电机可能需要多个编码器，具体取决于电机和电机传动装置的实现方式。TI 提供模拟和嵌入式处理器以及 MCU [MS1] 来实现编码器接口系统。在位置感测方法中使用了 [RS-485 和 RS-422 收发器](#)以及 [多轴线性和角度位置传感器](#)。

电机类型

电机驱动器旨在更大限度地提高效率，以延长机器人的运行时间，因为人形机器人使用电池供电。

人形机器人可以在需要高功率等级的情况下整合 PMSM 等电机。有刷直流电机可用于一些低功耗情况，例如手部控制和手指控制。但是，当前的设计趋势表明，大多数电机未来可能都是无刷式电机。

采用 PMSM 开展设计时，绕组分为两种方案：梯形绕组或正弦绕组。对绕组和控制算法的选择会影响电机控制的精确度。

电机设计的另一个关键主题是更快地切换 FET。该方案带来全新设计思路，能够提升电机的重量转矩密度。

电机控制算法

选择电机类型后，用户需确定控制电机的方法。实现控制回路有多种备选方法，但电机控制通常与图 4 中所示类似，其中显示了所需的模拟子系统和处理器外设。

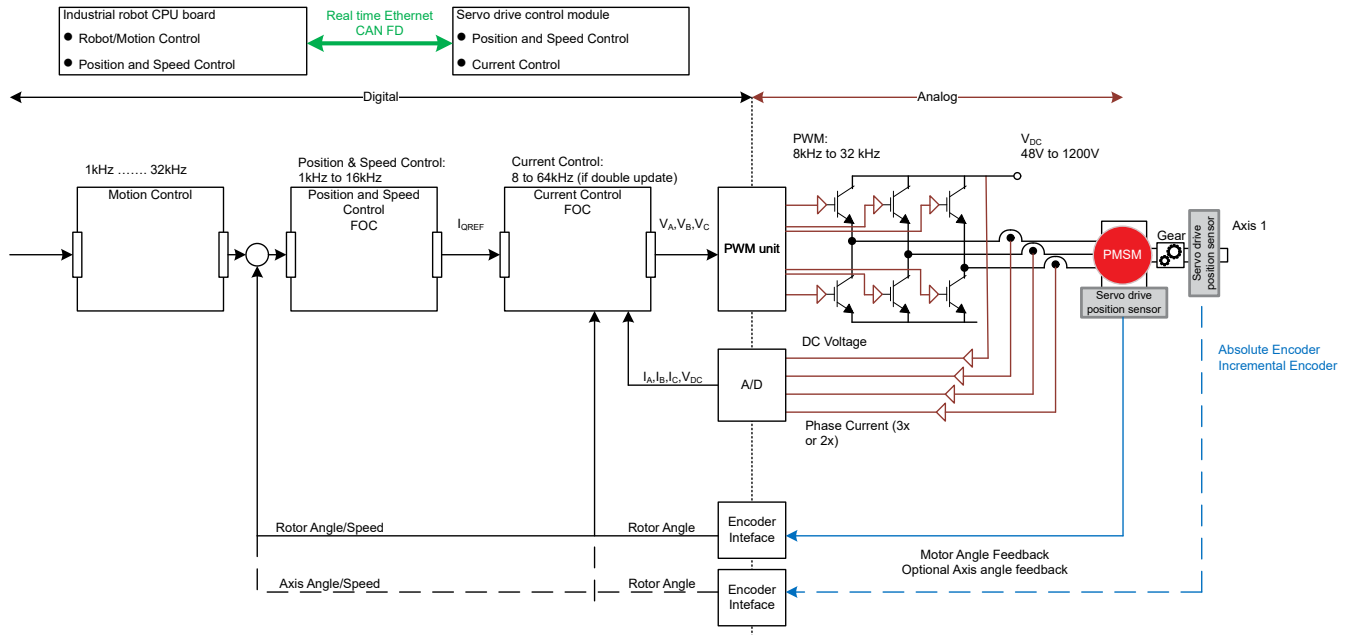


图 4. 机器人控制的实时通信时序需求

使用图 4 作为通用模板，表 2 列出了在选择算法 FOC 或阻塞换向时所需的外设和性能。

表 2. 电机控制类型的外设和电路需求

电机类型	有刷电机	梯形 PMSM	正弦 PMSM
半桥	×2	×3	×3
电流检测	×1	×1	×2 至 ×3
电压感测直流链路	×1	×1	×1
角度传感器精度	≤1°	60°	≤1°
处理能力	低	低	中
效率	低	中	高

TI 具有许多不同的 MCU，可满足人形机器人在算法和角度传感器方面的各项要求，重要的因素包括 IC 的大小和实现高性能驱动系统的实时能力。在电机控制算法中使用了 C2000™ 实时微控制器和基于 Arm® 的微控制器。

- **TMS320F28P650DK** : TMS320F28P65x 系列 MCU 最多搭载三个 CPU (2 个 32 位 C28x DSP CPU 和 1 个 CLA CPU) ，均以 200MHz 运行，可提供相当于 1000MHz Arm Cortex-M7 的实时控制算力。这些器件包含浮点单元以及三角函数运算单元 (TMU)、快速除法 (FINTDIV) 和 CRC 引擎等加速器，可提高计算效率。F28P65x 系列提供全新的超小型 9mm x 9mm² BGA 封装，具有集成 EtherCAT 控制器。它通过了 IEC 61508 SIL 2 功能安全认证，系统功能高达 SIL 3。
- **AM2612** : AM2612 MCU 最多搭载两个 500MHz 的 Arm Cortex-R5F 内核并带有工业通信子系统，可提供高性能实时处理和低延迟控制。它支持 EtherCAT 和 Gbps 时间敏感型网络 (TSN) 以太网，并实现小于 2us 的超低以太网直通延迟。AM261x 系列 MCU 提供小至 10mm x 10mm² BGA 的紧凑尺寸，并通过了 IEC 61508 SIL 3 功能安全认证。
- **AM13E23019** : AM13E23019 等 AM13E23x 系列 MCU 是业界首款单芯片集成高性能 Arm Cortex-M33 内核、TinyEngine NPU 和高级实时控制架构的器件。该类 MCU 可为多达四个电机维持精确的实时控制回路，同时 TinyEngine NPU 运行自适应控制算法，实现负载检测和能耗优化。其集成的三角函数数学加速器的计算速度比坐标旋转数字计算机 (CORDIC) 实现方式快 10 倍，提供更精确、响应更快的电机控制性能。AM13E23x MCU 符合 IEC 61508 SIL 2 标准。

功率级要求

人形机器人中的功率级别可以在 4kW 至 10W 之间变化，大多数驱动器在 10W 至 1.5kW 之间，具体取决于机器人的驱动器位置。

驱动器通常在低于 60V 的 SELV 电压范围内工作。因此，组件必须在最高达 60V 的电压下工作。对于放大器、FET 和栅极驱动器，为了减轻系统中潜在噪声的影响，最好使用最高可在 100V 电压下运行的元件。

在确定驱动器的电气规格后，还有其他设计注意事项，例如可用于实现印刷电路板 (PCB) 的物理尺寸、温度管理和电流检测。

小尺寸 IC 和高度优化的功率密度设计对于实现小空间设计目标至关重要。高功率密度会导致机器人的潜在温度限制，在该限制下机器人的外部不得高于 55°C。在 55°C 时，在 30 秒内会发生全厚度皮肤灼伤。温度管理方法不得包括风扇或液体等额外冷却方式。

散热需求与紧凑空间存在设计制衡，设计人员需优化功率电路来提升功率密度，这会直接影响功率级架构的选择。更高的开关频率可实现更小的无源器件和更高的功率密度，但会带来散热挑战，尤其是对于 MOSFET。与 MOSFET 技术相比，GaN FET 具有极小的开关损耗，因此在温度敏感型系统中具有优势，可实现更高的理论效率。但是，提高开关频率需要 MCU 支持高分辨率 PWM 信号输出能力，以便在更高频率下保持精确控制。

表 3 列出了用于人形机器人应用的 MOSFET 和 GaN FET 技术的主要特性：

表 3. 电机驱动器的 MOSFET 与 GaN FET 比较

特性	MOSFET	GaN FET
开关速度	中等	高
开关损耗	更高	更低
功率效率	良好	非常好
功率密度	中	高
典型应用	通用驱动器	高频、空间受限型应用

人形机器人由电池供电，通常采用 48V 标称电压，工作电压范围约为 39V 至 54V，具体取决于电池电量状态。在 39V 的最低工作电压下，4kW 驱动器需要大约 102A_{rms} 才能提供最大功率。电流范围很宽，从低扭矩工作期间接近 0A 到峰值功率时超过 100A，因此需要在整个工作频谱范围内进行精确的电流检测。缩短 FET 死区时间可改善低电流下的测量线性度，从而在整个工作范围内实现更准确的检测。

TI 提供栅极驱动器、分立式 GaN FET 和集成式功率级解决方案，可满足人形机器人关节的各种功耗和空间要求。集成解决方案结合了 FET、栅极驱动器、电流检测和保护功能，可降低设计复杂性并减小 PCB 尺寸，同时更大幅度地降低 EMI。这些解决方案使工程师能够针对特定关节位置和功率级别来快速评估 MOSFET 和 GaN FET 技术。

关键 TI 器件包括：

- **DRV7167A**：采用紧凑型 7.00mm× 4.50mm 封装的 100V 集成式 GaN 半桥，适用于 BLDC 电机驱动器应用。
- **DRV8378**：具有 70V 电压能力和集成电流检测功能并支持 FOC、正弦或梯形控制的集成式三相功率级。

电流检测

在评估功率级要求和选择适当的电流检测器件以实现所需的性能水平时，电流检测也是一个重要的设计考虑因素。

TI 提供同相电流感测和低侧电流感应模拟选项，以及有关如何高效实现系统的设计指南。通常使用同相电流感测，以便始终能够检测电流并提高测量的精度。

有三种不同的电流测量选项：

表 4. 适用于同相电流测量的典型同相电流感测选项

	电流检测放大器	$\Delta-\Sigma$ 调制器	霍尔传感器
性能	高/中	高	中
尺寸	中	中	小

在所有技术上，电流通常可能高达 200A，且会因元件的热性能而受到限制。

- [电流检测放大器](#)
- [\$\Delta-\Sigma\$ 调制器](#)
- [霍尔传感器](#)
- [GaN Fet 功率级](#)
- [栅极驱动器](#)

更多信息，请参阅以下技术内容：

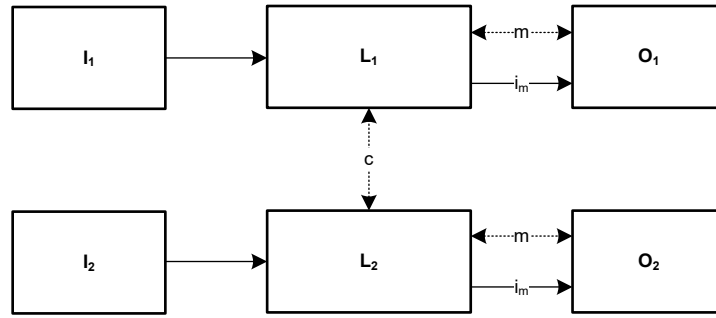
“[适用于 48V 机器人和伺服驱动器的高分辨率、小尺寸相电流检测](#)”

“[选择用于三相电机驱动器基于分流器电流检测的放大器](#)”

功能安全

标准机构将持续完善人形机器人相关安全规范，例如针对人形机器人移动性问题的 ISO 25785-1 标准。但随着各类安全规范逐步落地，人形机器人设计人员必须对当前系统设计进行相应调查，从而在将来尽可能减少因重新设计所带来的工作。ISO13482、ISO10218 和 ISO 3691-4 可以阐明未来的预期。

在规划未来的设计时，选择能够简化功能安全认证的器件非常重要。ISO13482、ISO10218 和 ISO 3691-4 标准阐明了未来对类人机器人的预期。两种 C 类标准 (ISO10218 和 ISO3691-4) 都参考了 ISO13849，规定系统必须是 PLd。但是，ISO3691-4 将架构交给实现者来确定，而 ISO10218 则要求 CAT3 架构。考虑到这些标准中的最糟糕情况，至少需要考虑人形机器人的 CAT3 PLD 安全注意事项。实现 CAT3 系统时，必须采用 [图 5](#) 所示的安全架构。



Key *Illustration from IEC13849-1:2023 figure 10*
 i_m Interconnecting means
 c Cross Monitoring
 I_1, I_2 Input device
 L_1, L_2 Logic
 m Monitoring
 O_1, O_2 Output device
 Dashed lines represent reasonably practicable fault detection

图 5. IEC13849-1:2015 中的插图 图 10

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。

示例系统

图 6 中的框图显示了建议解决方案，以使用 TI 组件解决 1.5kW 系统设计问题，下面示出了具体可以使用的元件。

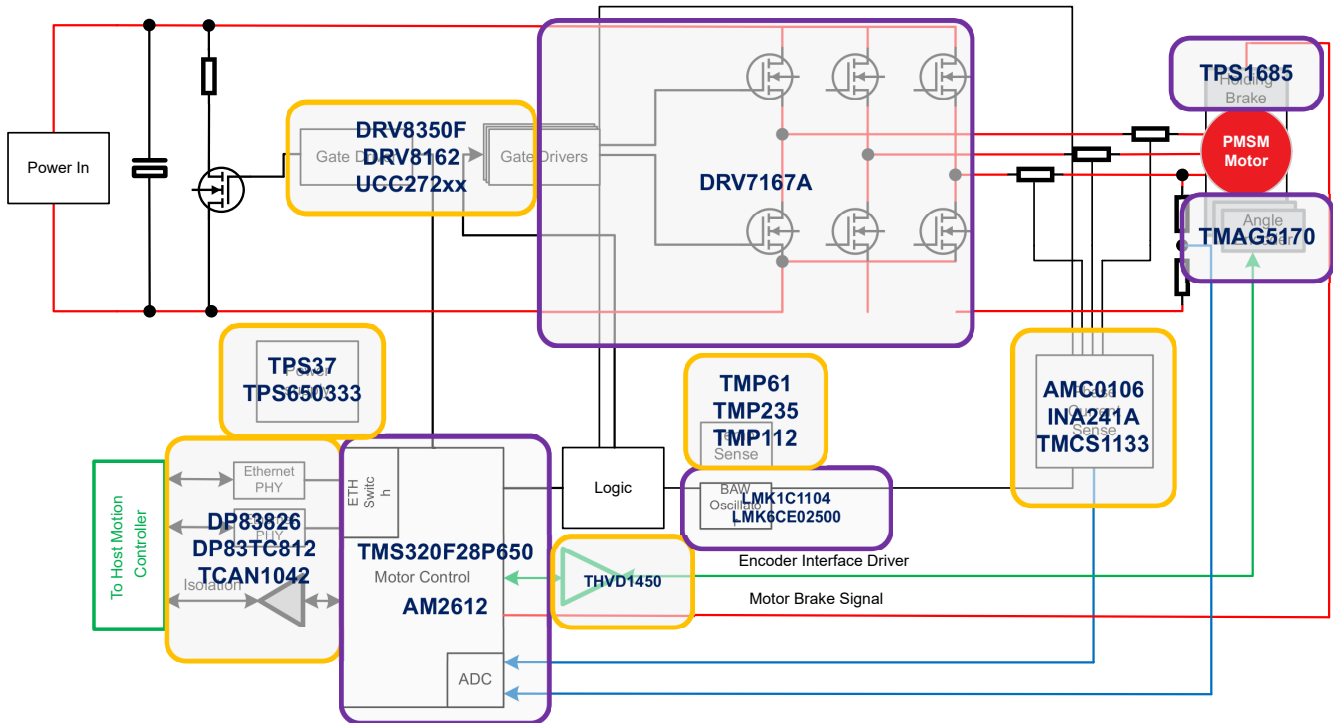


图 6. 示出实现系统可能所需器件的电机驱动器解决方案

如需查看这些器件系统级性能数据，可参阅以下 TI 官方参考设计与 EVM 资料：

- [TIDA-010936](#)
- [TIDA-010956](#)
- [TIDA-010979](#)

- [LAUNCHXL-F28P65X](#)
- [DP83TC812-IND-SPE-EVM](#)
- [TIDA-060040](#)

总结

设计人形机器人驱动器需要精准、灵活和创新。TI 提供了全面的集成电路产品系列，让工程师能够满足各种设计规格，从而构建能够与机器人环境顺畅交互的机器人。凭借丰富的评估模块、参考设计和符合安全标准的器件，TI 简化了开发流程，有助于缩短上市时间并安心地获得功能安全认证。设计人员与 TI 携手，打造更智能、更快速、更安全的机器人，让您的愿景变成现实。

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