

Application Brief

类人机器人中的电机控制



Kristen Mogensen

引言

制造业和服务行业对更高自动化水平的需求不断增长，推动了类机器人的开发。类机器人变得更加复杂和精确，自由度 (DOF) 变得更高，并且对周围环境的响应时间（按毫秒计）缩短，从而能更好地模仿人类的动作。图 1 展示了类机器人的典型电机和运动功能。

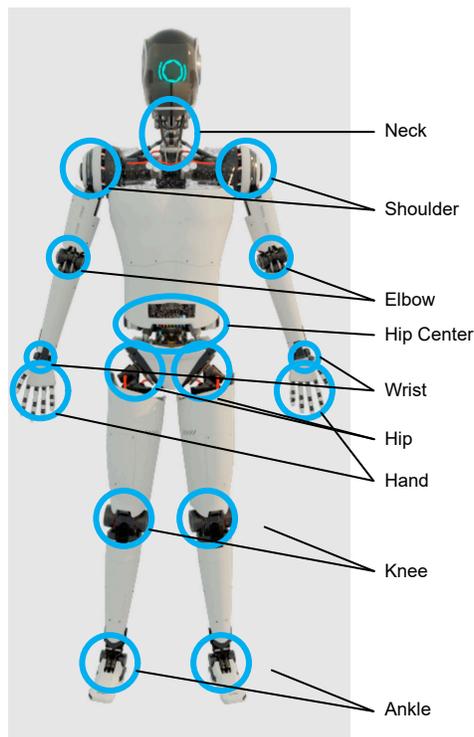


图 1. 显示类人机器人 DOF 变得更高的位置

具有更高的 DOF 意味着类机器人需要更多的电机驱动器。机器人设计中的驱动器位置决定了不同的驱动器要求。部分关键规格是：

- 通信接口架构
- 位置感测
- 电机类型
- 电机控制算法
- 功率级要求
- 电子电路尺寸
- 功能安全注意事项

目前，虽然针对协作机器人和工业机器人制定了相关标准，但没有规定类机器人功能安全要求的标准。随着需求的持续增长，预计标准机构将来会为类机器人规定安全要求。在制定安全要求之前，类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。

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。

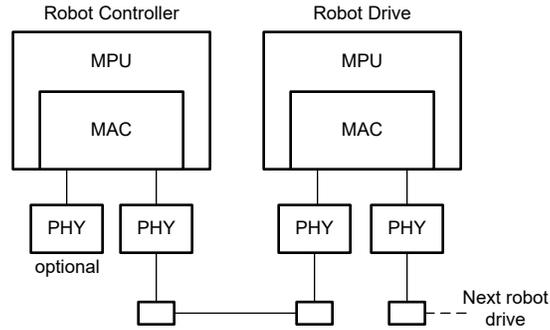


图 2. 菊花链通信

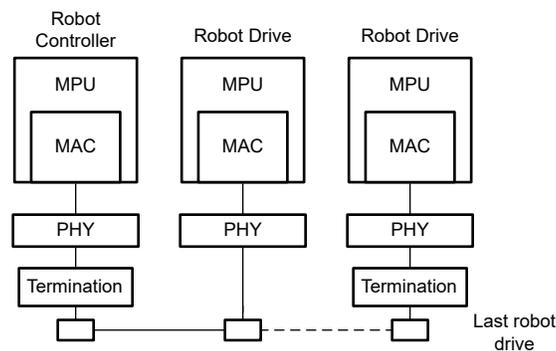


图 3. 线性总线拓扑

选择拓扑后，为了实现足够的驱动器响应时间，需要考虑带宽、时序和延迟要求。响应时间可以根据规定的数据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。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

类机器人在运动时，必须接收电机位置数据以定义路径规划。位置数据可实现类机器人受控的移动。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。根据所需的电机精度，使用多种转子位置传感器。下面是一些最常用的编码器：

- 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 提供模拟和处理器 IC 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

由于类机器人用电池供电，因此电机驱动器旨在更大幅度地提高效率，从而延长机器人的工作时间范围。

当使用高功率级别时，类机器人可以集成 PMSM 之类的电机。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，所有电机未来都将是无刷式电机。

PMSM 电机有两种绕组选择：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要素是更快地切换 FET，这样就可以使用能提高电机单位重量扭矩的新设计选项。

电机控制算法

选择电机类型后，用户可以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。

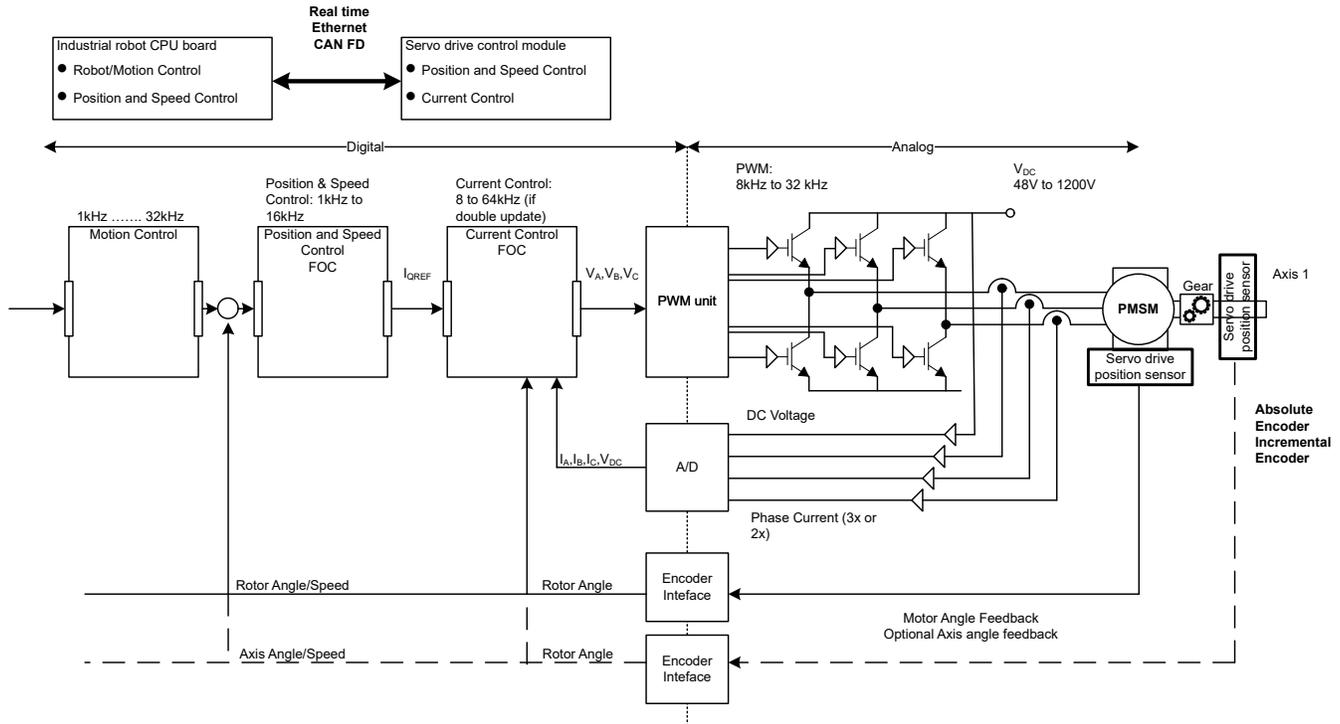


图 4. 机器人控制的实时通信时序需求

使用图 4 作为通用模板，表 1 列出了在选择算法 FOC 或阻塞换向时所需的外设和性能。

表 1. 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，可满足算法和角度传感器的要求。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](#)。

功率级要求

根据机器人的驱动器位置，功率级别在 10W 至 4kW 之间变化，大多数驱动器在 10W 至 1.5kW 之间。

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。在定义驱动器的电气规格后，还有其他设计注意事项。

可用于实现印刷电路板 (PCB) 的物理尺寸是另一个设计注意事项。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。

温度管理和空间的平衡促成功率级相对于单位尺寸瓦特数的平衡，这会影功率级架构。可能需要解决的一个问题是，确定功率级是否需要在更高的频率下工作。这一问题通常出现在 MosFET 中，但与基于 MosFET 的系统相比，GaN FET 等新技术也可提高开关性能。对于温度敏感型系统，与 MOSFET 技术相比，GaN FET 具有更高的

理论效率，因为其开关损耗非常低。频率的增加会导致 MCU 需要额外的功能，这样才能支持以足够高的分辨率实现更高频率开关所需的信号发送。

TI MOSFET 栅极驱动器让客户能够以尽可能高的速度开关 MOSFET，而 TI 低压 GaN FET 让客户能够快速比较和考虑机器人中每个位置的最佳 FET 类型。

需要使用高性能 MosFET 或 GaN FET 来实现驱动器，从而提高电机效率。精密算法有助于减少电机 FET 的开关需求和损耗。

类人机器人由电池供电，供电电压通常为 48V，或者在 39V 至 54V 之间，具体取决于电池的电量状态。使用的电压取决于所设定的最小电池电量级别。前面提到，驱动器在 39V 时所需的最大功率为 4kW，可以看出，机器人驱动器需要在大约 102Arm 的电流下以最高效率工作来提供所需的功率，但同时考虑到 0A 左右的精确测量，在这里缩短 FET 的死区时间还有利于 0A 左右电流测量的线性，让测量在低电流下更加精确。

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 2. 适用于同相电流测量的典型同相电流感测选项

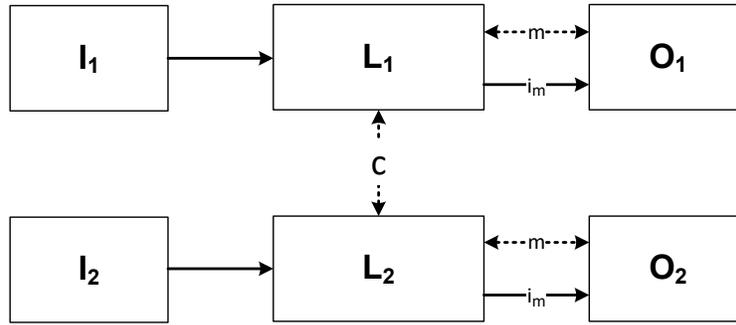
	电流检测放大器	$\Delta-\Sigma$ 调制器	霍尔传感器
精密	中	高	低
电流电平	50A	50A	100A
PCB 复杂度	中	中	低

对于电流感测放大器和 $\Delta-\Sigma$ 调制器，由于组件改进，这些技术所用的电流电平缓慢地移动到 100A 左右。

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

功能安全

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，至少需要考虑类人机器人的 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。

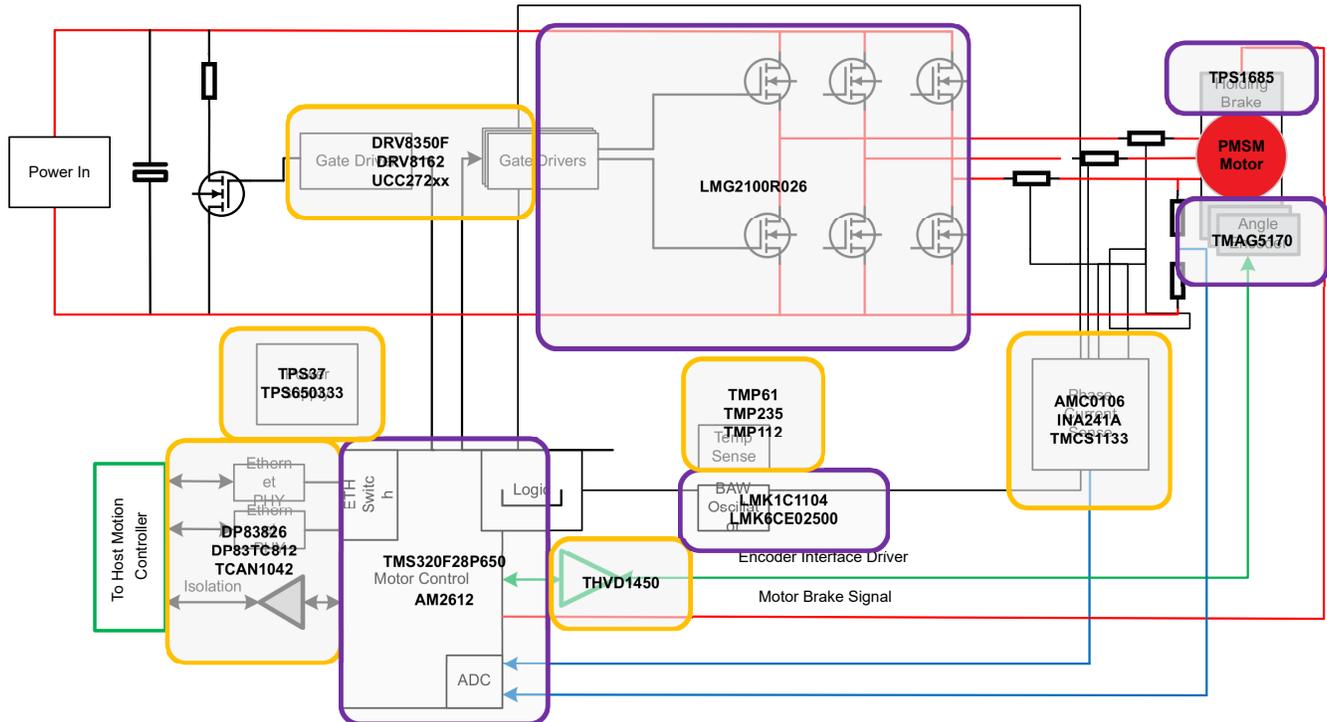


图 6. 示出实现系统可能所需器件的电机驱动器解决方案

有关更多器件信息，请参考以下 TI 设计和 EVM，以查看系统级性能结果：

- [TIDA-010936](#)
- [TIDA-010956](#)
- [LAUNCHXL-F28P65X](#)
- [DP83TC812-IND-SPE-EVM](#)
- [TIDA-060040](#)

总结

设计类人机器人驱动器需要精准、灵活和创新。德州仪器 (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。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、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