

电子书

# 工业机器人设计工程师指南

机器人系统设计技术文档汇编

 TEXAS INSTRUMENTS

[ti.com/robotics](https://ti.com/robotics) Q2 | 2020

## 1. 简介

1.1 工业机器人系统简介..... [3](#)

## 2. 机器人系统控制器

### 2.1 控制面板

2.1.1 将 Sitara™ 处理器应用于工业  
4.0 伺服驱动器..... [9](#)

### 2.2 机器人系统的伺服驱动器

2.2.1 隔离式栅极驱动器的影响..... [13](#)

2.2.2 了解峰值源电流和灌电流参数..... [17](#)

2.2.3 带 UVLO 和 BJT 图腾柱的低侧栅极驱动器... [19](#)

2.2.4 适用于栅极驱动器的外部栅极电阻器设计指南 [20](#)

2.2.5 用于提供过流保护的高侧电机电流监测 ..... [22](#)

2.2.6 增强型 PWM 抑制为直列式电机控制带来的  
五大好处..... [24](#)

2.2.7 如何避免控制系统遭受热损坏..... [26](#)

2.2.8 高精度电机驱动控制如何推动工业发展..... [29](#)

2.2.9 在整个温度范围内发挥功率级的最大效用... [33](#)

2.2.10 非分立式解决方案:如何简化 48V 至 60V<sub>DC</sub> 馈  
电的三相逆变器设计..... [35](#)

2.2.11 选择三相电机驱动器中使用的基于分流器的  
电流感应放大器..... [38](#)

2.3.1 机器人系统中与伺服驱动相关的参考设计... [44](#)

## 3. 机械臂和驱动系统(机械手)

3.1.1 如何保护电池的电源管理系统免受热坏..... [45](#)

3.1.2 保护电池并不像您想的那么难..... [46](#)

3.1.3 机器人系统中与位置反馈相关的参考计..... [47](#)

## 4. 传感和视觉技术

4.1 机器人应用中的 TI 毫米波雷达传感器..... [48](#)

4.2 边缘智能为自主工厂提供助力..... [53](#)

4.3 对智能机器人使用超声波传感..... [55](#)

4.4 传感器数据如何赋能机器人技术中的 AI..... [57](#)

4.5 将机器学习引入嵌入式系统..... [61](#)

4.6 机器人可以应对新的挑战和功能..... [65](#)

4.7 机器人系统的视觉和传感技术参考设计..... [66](#)

## 5. 机器人工具技术(末端执行器)

5.1 利用 TI DLP® 技术驱动的结构光系统实现  
高精度的捡拾功能..... [67](#)

## 6. 机器人工业通信

6.1 为传感器选择合适的工业通信标准..... [69](#)

6.2 赋能机器人以实现更高水平的工厂自动化..... [73](#)

6.3 您的工厂比五年级学生聪明吗?..... [76](#)

6.4 机器人系统中与工业通信相关的参考设计..... [78](#)

# 第 1 章：简介

德州仪器 (TI) 的模拟和嵌入式技术以及参考设计可帮助工程师开发智能、自主和协作的机器人。本电子书旨在一站式提供与机器人技术相关的内容。

利用我们的技术可以构建多种类型的工业机器人，实现精确的电机控制、差异化的传感技术和边缘处理功能，以及强大的实时通信。本电子书中讨论的机器人的主要类型是协作机器人和工厂机器人：

- 协作机器人与人类并肩工作，以提高工作质量。协作机器人可以检测并停止运动，从而帮助创建一个更安全的工作环境。
- 工厂机器人在制造过程中执行自动可编程动作。为了创建一个更安全的工作环境，机械或传感器技术有助于防止机器人干扰人类活动。
- 工业机器人有六种类型：
  - 垂直关节型。
  - 笛卡尔坐标型。
  - 圆柱坐标型。
  - 球坐标型。
  - 选择顺应性装配机器人手臂机器人 (SCARA)。
  - Delta 机器人。

所有这些机器人类型都提供了具有不同轴配置的机械手，并包括使机器人能够管理其任务的电子内容。任务管理的进步由软件、传感器和电子技术共同推动，并在过去 50 年中推动了工业机器人市场的发展。

本电子书汇集了技术文章、白皮书和应用手册，介绍了适用于这些工业机器人系统构建块的 TI 技术：

- 机器人控制器系统。
- 机械手 (机械臂) / 驱动系统。
- 传感和视觉技术。
- 末端执行器 (机器人工具)。

## 1.1 工业机器人系统简介

在介绍典型机器人系统中使用的不同技术之前，让我们先讨论一下机器人系统的不同组成部分，如图 1 所示。您可以看到，该系统分为不同的构建块：控制器系统、机械手、示教器、视觉和传感器以及末端执行器 (机器人工具)。



图 1. 采用协作机器人的机器人系统。

国际标准化组织 (ISO) 8373:2012 标准描述了图 1 所示的各个构建块，并定义了与工业和非工业环境中运行的机器人和机器人设备相关的术语：

- 控制器系统。ISO 8373 标准规定：“一组逻辑控制和电源功能，可以监测和控制机器人的机械结构并与环境 [设备和用户] 进行通信。”它是机器人的大脑，可包括运动控制器、内部和外部通信系统以及任何潜在的功率级。

- **机械手**.ISO 8373 标准还规定:“一种机器,其机构通常由一系列相互连接或滑动的部分组成,目的是通常在几个自由度或轴上抓持和/或移动物件(零件或工具)。机械手不包括末端执行器。”机械手通常称为机械臂。它是机器人的一部分,其定义了机器人配备的轴数,以实现执行某一任务而需要进行的移动。
- **示教器**.用于对工业机器人进行编程和教学的多功能便携式设备。示教器通常由 LCD 触摸面板、启用按钮和紧急停止按钮组成。示教器连接到机器人控制器系统。
- **机器人末端执行器**.连接在机器人“手腕”或臂端工具(EOAT)上的设备。系统控制器通过对简单工具使用离散输入/输出(I/O)或对更高级的工具使用工业通讯协议来控制机器人末端执行器。
- **视觉和传感器**.机器人的这些器件能够扫描周围环境,并在人类接近时停止(对于工业机器人而言)或降低(对于协作机器人而言)机器人的速度。视觉/传感是通过激光雷达(LIDAR)、基于雷达的安全区域扫描仪或 3D 摄像机来实现的。除了安全区域扫描仪之外,协作机器人有时还会穿戴基于传感器的“安全皮肤”,当有人触摸或接近机械臂时,它会停止机械臂。

在设计机器人系统的构建块时,需要了解机电一体化、机器人功能和电气注意事项,并在开始实际设计之前熟悉规范。

让我们讨论一下定义机器人系统架构时的一些典型注意事项。

### 机器人应该执行哪种类型的任务?

根据应用的不同,不同类型的机器人具有不同的优势。典型的工业机器人有:

- **关节型**.这种机器人设计具有旋转轴,旋转轴的数量从简单的三轴结构到 10 个或更多关节不等。机械手通过扭转关节连接到基座。旋转轴连接机械手中的连杆。每个轴提供额外的自由度或运动范围。

- **笛卡尔坐标型**.这些也称为直线型或龙门式机器人。笛卡尔坐标型机器人具有三个使用笛卡尔坐标系(x、y 和 z)的线性轴。它们可能具有一个实现旋转运动的连接轴。三个平移关节便于沿轴线进行线性运动。
- **圆柱形**.该机器人在基座上具有至少一个旋转轴和至少一个连接到连杆的平移轴。旋转轴使用沿轴线的旋转运动,而平移轴使用线性运动。圆柱坐标型机器人在圆柱形工作环境中工作。
- **极坐标**.球坐标机器人也称为球形机器人。对于这些类型的机器人,机械手通过扭转轴以及两个旋转轴和一个线性轴的组合连接到基座。轴形成球坐标系并创建球形工作环境。
- **选择顺应性装配机器人手臂机器人(SCARA)**.通常用于装配应用中,这种选择顺应性装配机器人机械手在设计上主要是圆柱形的。它具有两个平行轴,可在一个选定的平面内提供顺应性。
- **Delta(增量)**.这些蜘蛛状机器人由连接到公共基座的有关节平行四杆机构构建而成。Delta 机器人的平行四杆机构有三个轴。对于末端执行器,它可以具有一到三个轴。平行四杆机构在圆顶形的工作区域中移动单个 EOAT。该机器人配置广泛用于食品、制药和电子行业,能够提供精细、精确的动作。

### 机器人的有效载荷(重量)和臂展是多少?

如果机器人要移动重物,则它需要在电机上施加足够的力才能实现该功能。该力由电能产生,并从功率级提供给电机。此功率要求是确定机器人属于高压系统还是低压系统的其中一个因素。高压机器人系统需要定义隔离架构以确保安全运行。

### 电子设备会集中到系统控制器中吗?

在集中式系统中, 机器人控制柜包括控制机器人机械手的大多数电子模块。图 2 是一个集中式机器人的示例。

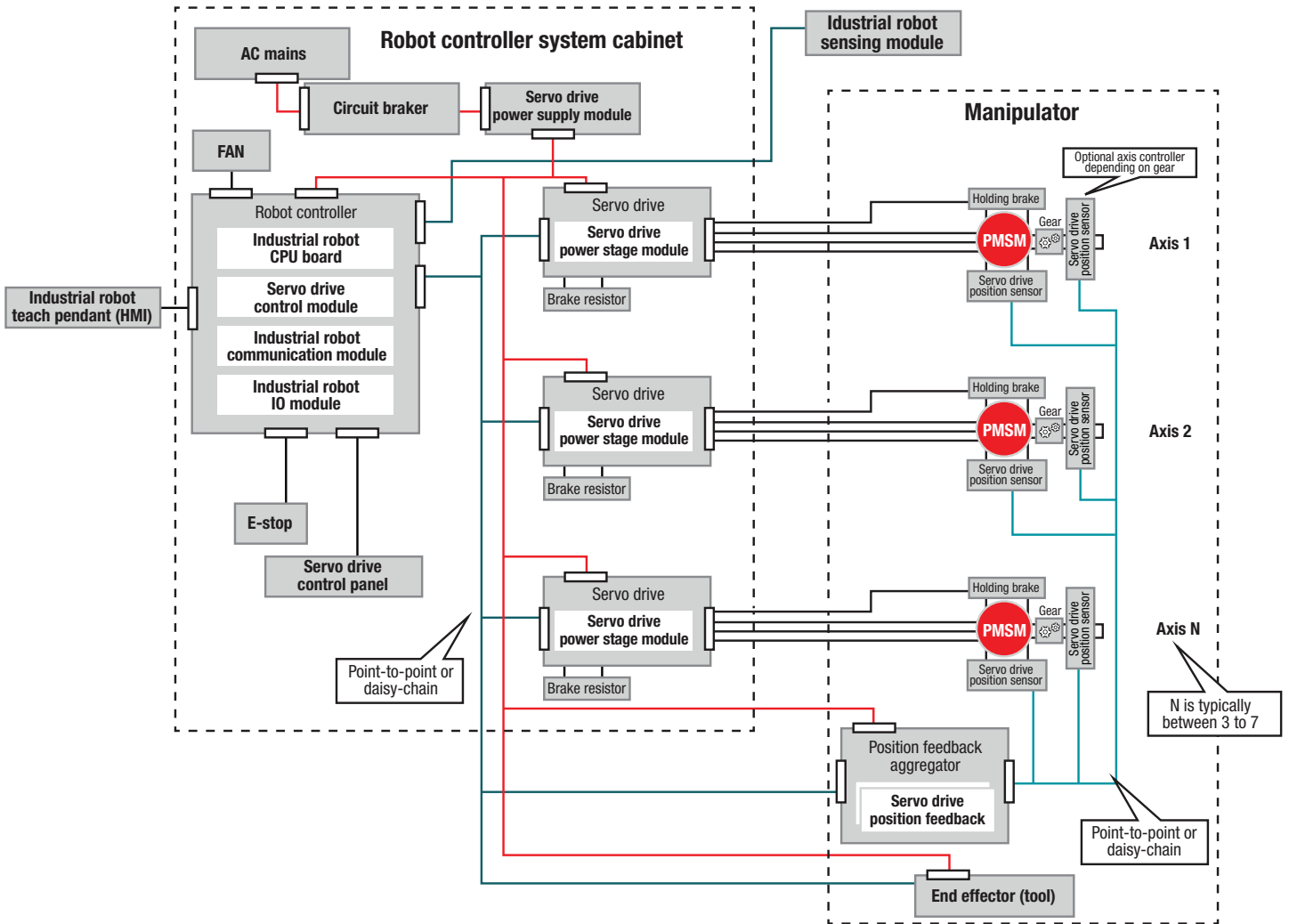


图 2.集中式机器人系统示例.

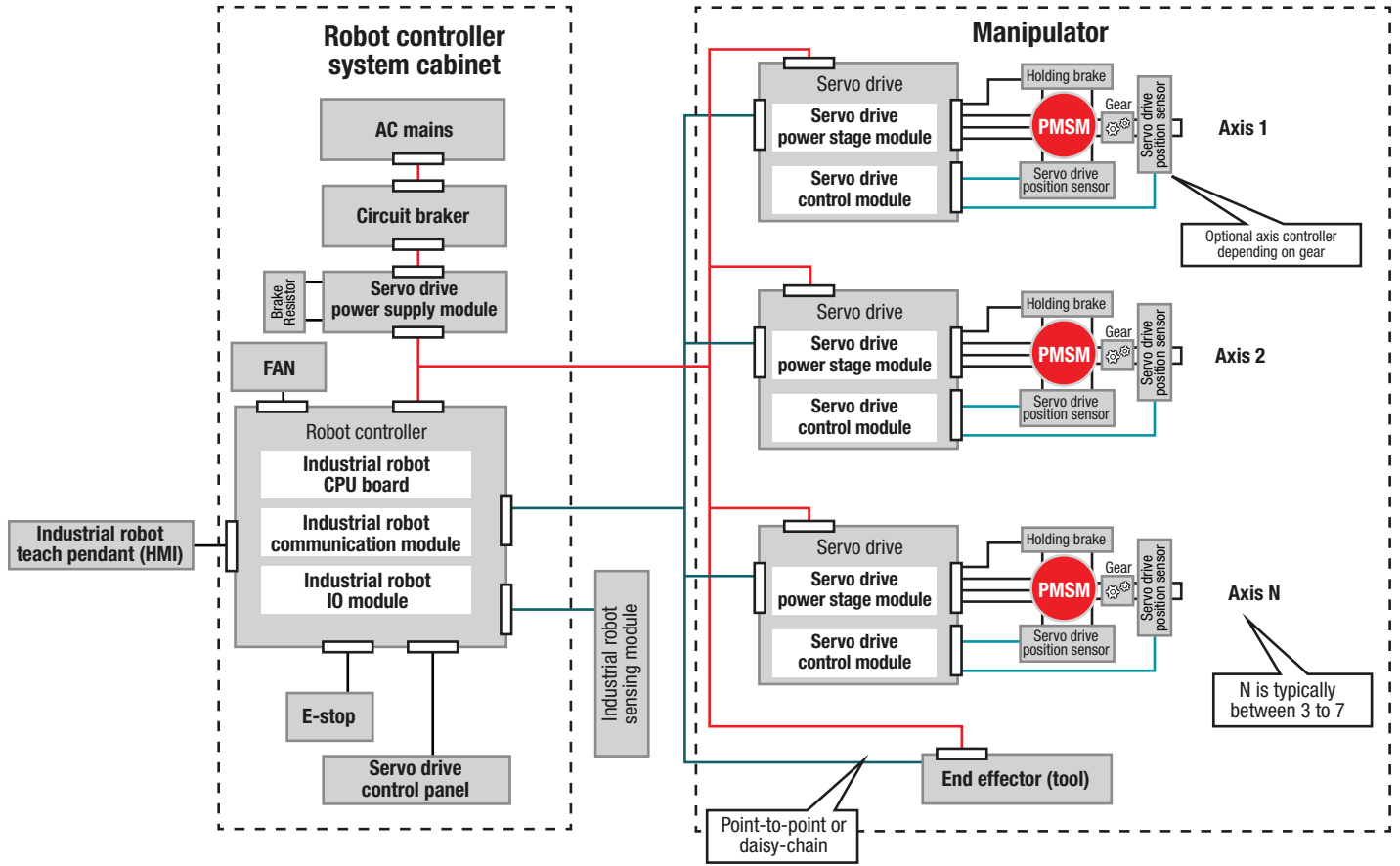


图 3.分散式机器人系统示例.

在分散式系统中, 这些模块中的其中一些模块将移至机器人机械手, 以支持多种外形尺寸, 包括机柜的外形尺寸、电缆等。

图 3 是一个分散式机器人的示例。

在分散电子内容时, 请务必记住, 现在使用电子产品的环境与集中式系统的环境不同。这种环境变化需要对电子产品进行重新规范, 并且通常需要对部分系统进行重新开发。

### 机器人的不同子系统之间将如何通信?接口要求是什么?

为了确保实时功能, 需要定义子系统之间传递哪些控制参数, 以及末端执行器和机械手通信的参数重复率和延迟。

图 4 包括了一些典型的机器人实时时序值。

现在, 机器人可以移动了, 它需要知道如何移动, 这就引出了下一系列的问题。

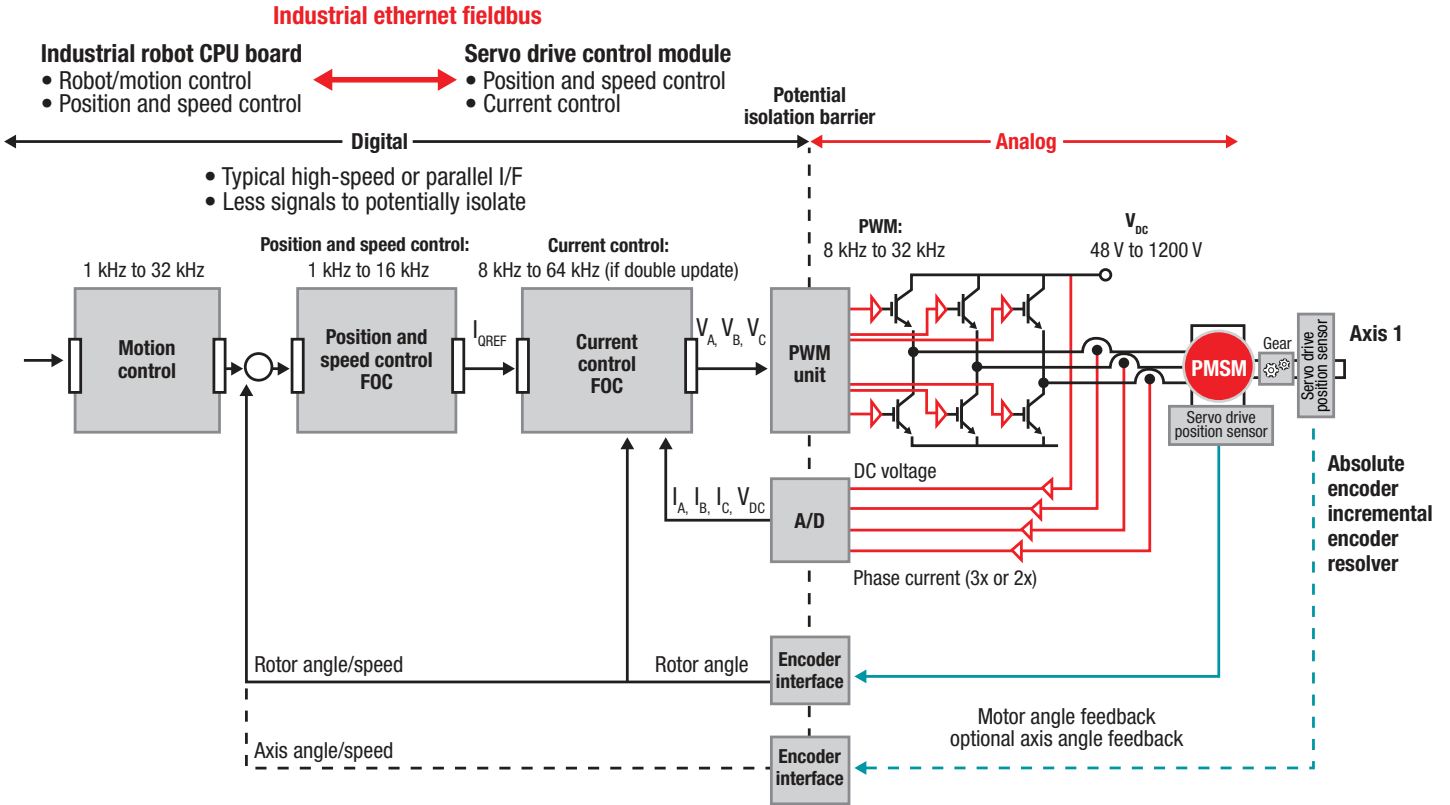


图 4. 机器人控制的实时通信时序需求.

**编程接口是如何工作的?机器人将通过用户界面还是通过任务编程进行操作?您是否需要一个额外的接口来连接示教器或操纵杆以启用操作员功能?**

在设计过程中尽早对这些问题做出答案很重要。图 4 还包括一些运动控制时序的一些设计考虑。现在,来看一下最后一个问题。

**机器人是非自适应机器人还是自适应机器人?**

非自适应机器人不会接收到来自环境的反馈,而是将按照编程程序执行其任务。自适应机器人使用输入和输出数据来生成环境数据。利用这些数据,机器人可以对环境变化做出反应,并在必要时停止其任务。

对于自适应机器人,定义机器人正在对其做出响应的环境数据非常重要。数据可能是预定义的参数,例如用于质量定义的材料数量、尺寸或形状。或者可能是不受控制的参数,例如有人在机器人周围走动或发生故障,当检测到这些情况发生时会将机器人置于安全状态。

自适应机器人需要一个传感模块。区域安全扫描仪或安全皮肤放置在机器人的基座或安装在机器人顶部的某个位置。它可以监控机械手的周围区域,并防止人类或其他机器离机器人太近;如果他们离机器人太近,机器人就会停止或减速。

在设计机器人系统时,应该遵循全球和本地安全标准。不了解相关标准便开始设计工作可能会大大延迟产品上市时间。许多组织可提供咨询服务,帮助您了解根据安全标准设计安全系统的硬件含义,这些组织包括技术监督协会(TÜV) – 莱茵、TÜV – 南德和 TÜV – 北德。

## 结论

机器人是一个非常复杂的系统,在机电一体化和功能性以及电气方面存在许多设计挑战。在实现一个可行的工作系统前,您需要解决了这些挑战或做出一些决定。

利用机器人系统的所有不同技术特性,德州仪器(TI)的模拟和嵌入式技术提供了许多不同的产品和设计,可以帮助解决与机器人有关的问题,实现智能、自主和协作机器人的开发。

这本电子书汇集了技术文章、白皮书和应用手册,它们均包括有助于帮您设计下一个机器人系统的技术。

作者:Kristen Mogensen



## 2.1 控制面板

### 2.1.1 将 Sitara™ 处理器应用于工业 4.0 伺服驱动器

制造和自动化行业已经使用了多年的伺服电机控制技术，但是工业 4.0 和智能工厂的兴起加速了自动化系统的应用，进而增加了对具有更多功能、可控制更多轴并且更智能的伺服驱动器的需求。

以前，高端微控制器和大型现场可编程门阵列 (FPGA) 执行低级控制算法，并提供外设以连接至驱动器输出和电机反馈。但是，随着设备变得更加智能且性能更高，伺服驱动器必须满足的要求也在迅速变化。网络通信、功能安全、预测性维护和可编程逻辑控制器 (PLC) 等功能已被引入到伺服控制板中，旨在通过取消外部板来优化成本和空间。集成水平的提高和对更高性能的需求，促使设计人员寻求异构处理器 (例如 TI 的 [Sitara™ 处理器](#)) 来满足工业 4.0 应用的大部分 (甚至全部) 处理需求。

## 性能

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，每个回路都有自己的实时处理要求。电流或扭矩回路是最严格的控制回路。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 中的模块非常适合用于跨异构处理器内核或在处理器与微控制器之间进行逻辑分区。在多核处理器的不同内核之间分散各个回路，可以使专用于每个回路的处理带宽最大化。当处理器内核接收到其控制回路输入数据时，它可以尽快运行算法以使其完成，为下游回路提供参考值，然后继续提供其他服务，直到准备好下一组输入数据为止。

具有较高原始性能的处理器可以更快完成控制处理，并具有更多可用带宽来提供其他服务和功能。32kHz 控制回路中的周期时间接近 31.25 $\mu$ s 时，或必须几乎同时处理来自多个轴的输入时，快速处理至关重要。

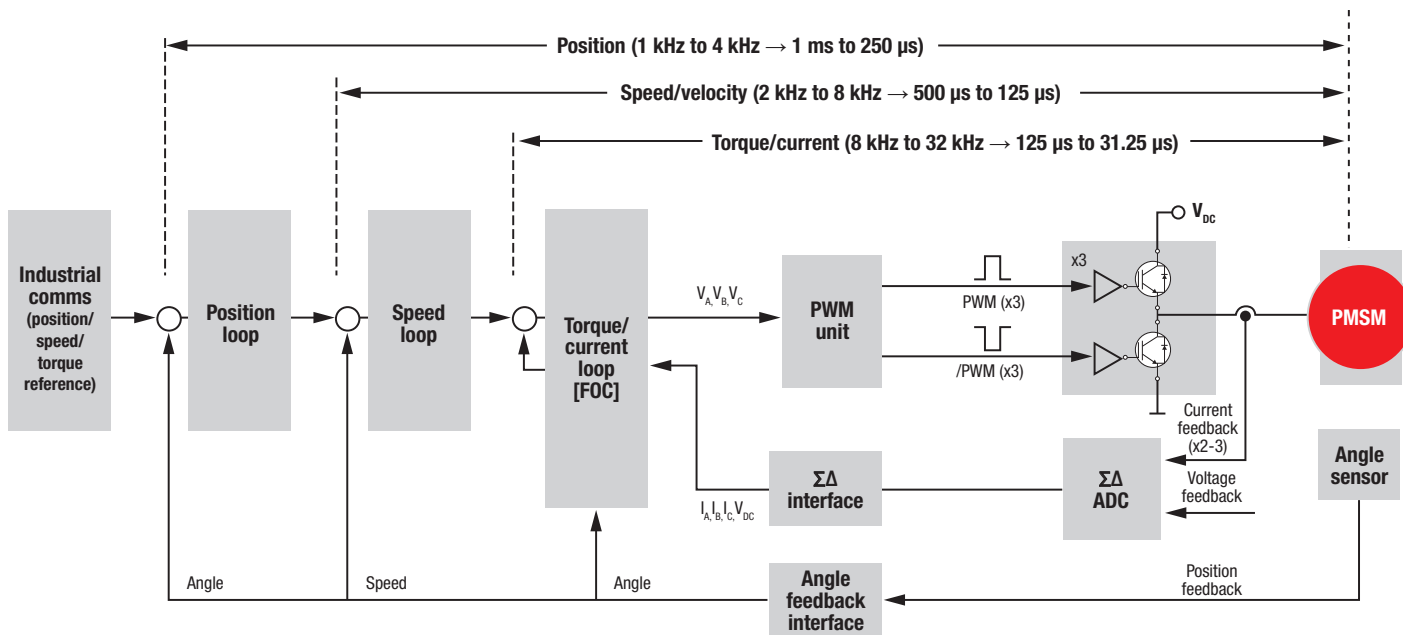


图 1. 典型的伺服电机控制回路技术。

对于伺服控制的严格实时处理要求,有几种选择,包括[数字信号处理器 \(DSP\)](#)、FPGA 和标准 Arm® 处理内核。选择合适的处理内核可能很困难,因为需要在灵活性与优化控制算法之间保持平衡。过去,优化控制算法是第一要务,因此 DSP、专用集成电路 (ASIC) 和 FPGA 是确定无疑的选择。

现在,由于需要向伺服驱动器添加工业 4.0 服务,因此开始采用标准的 Arm Cortex®-A 和 Cortex-R 内核。Cortex-A 内核可以实现非常高的带宽,这对于快速处理非常有用,但这种内核缺少 Cortex-R 的实时组件,这便是 Cortex-R 在伺服控制方面比 Cortex-A 更适合的原因。另一方面,Cortex-A 比 Cortex-R 更适合许多其他服务,例如网络或预测性维护。幸运的是,诸如 Sitara AM6x 处理器之类的多核器件可以包含此处提到的所有处理元件,因此可以在单个芯片中实现所有必要的元素。

### 工业通信

工业 4.0 给工厂带来了许多令人振奋的新事物,但工业伺服驱动器行业中最引人注目的现象之一是多协议工业以太网的迅速应用。市场上存在着针对工业以太网、现场总线和位置编码器的十多种不同通信协议,每种都有其优缺点。EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/Industrial Protocol (IP) 是伺服驱动器市场中最受欢迎的基于以太网的协议,而 Hiperface Digital Servo Link、EnDat 2.2 和 Bidirectional Interface for Serial/Synchronous C 则是最受欢迎的位置编码器协议。

这些协议中的许多协议都有 ASIC 可以附加到主机处理器上以支持该特定通信协议。在某些情况下,采用多芯片解决方案

时,协议栈在主机处理器上运行,而 ASIC 执行媒体访问控制层。仅计划支持单个协议的制造商更喜欢这种分布式体系结构,因为 ASIC 通常针对该特定通信标准进行了优化。一旦出现了支持多种协议的需求,多芯片解决方案便会由于多种原因而失去吸引力。每种新协议都要求您熟悉新器件(这会增加开发工作量和成本)。对于每种不同的协议,制造商必须维护其电路板的多个版本。

诸如 Sitara 处理器之类的解决方案已将多协议支持能力集成到主机处理器中,有助于节省成本、缩减布板空间和减少开发工作量,同时还可以最小化外部组件与主机之间通信的相关延迟。支持多种标准的单一平台使您能够为最终产品的不同版本维护一块单板。

如果需要使产品适应未来需求,还必须考虑对于时间敏感网络 (TSN) 的支持需求。选择用于工业通信的平台必须足够灵活,能够适应不断发展的 TSN 标准,否则一旦最终确定标准,便有可能面临过时风险。Sitara AM6x 处理器系列通过其灵活的可编程实时单元-工业通信子系统 (PRU-ICSS) 提供了一种解决方案,支持千兆位 TSN 以及传统的 100Mbps 协议(例如 EtherCAT)。

### 功能安全

自主机器决策与操作的发展趋势以及在潜在危险工厂环境中人机交互的不断增加,意味着“功能安全”对于智能工厂中的许多应用(包括伺服驱动器)而言越来越重要。有关功能安全标准以及 Sitara 处理器如何在工业环境中发挥作用的详细说明,请阅读白皮书[《工业 4.0 中的功能安全状态》](#)。

### 系统分区

伺服驱动器中的级联控制回路通常跨越至少两个电路板, 电路板之间由增强型隔离边界隔开。这种隔离边界将形成所谓的“热侧”和“冷侧”。热侧最靠近电机, 并包括向电机供电的高压组件。冷侧在隔离的另一侧, 通常容纳控制单元。

跨隔离边界划分系统时, 电机驱动器中各种控制回路的模块化特性为您提供了许多可能性。图 2、3 和 4 显示了伺服驱动器一些可能的分区。

图 2 显示了一种包含两个芯片的解决方案, 其中的两个片上系统 (SoC) 被隔离边界隔开。这种架构的好处在于, 场定向控制回路从电机获取输入并返回电流的总时间很短, 因为整个回路都在功率级板上运行。

图 3 也显示了一种包含两个芯片的解决方案, 但是这次位于控制板上的两个 SoC 都处于冷侧。控制回路在两个 SoC 之间分开: 一个 SoC 负责算法处理, 另一个 SoC 充当聚合器并提供跨隔离边界的脉宽调制器 (PWM)。这种架构的好处在于, 可以使用成本更低的功率级板, 但保持相同的性能水平, 而图 2 所示的分区则需要两个 SoC 之间具有高速接口。

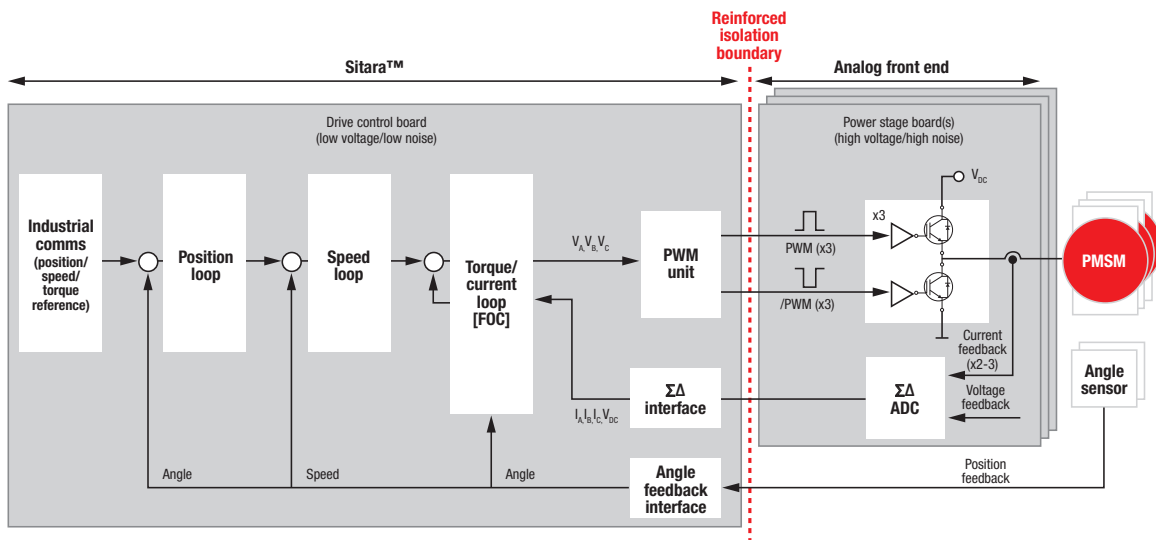


图 2. Sitara 处理器跨隔离边界与系统热侧的单独控制单元进行通信。

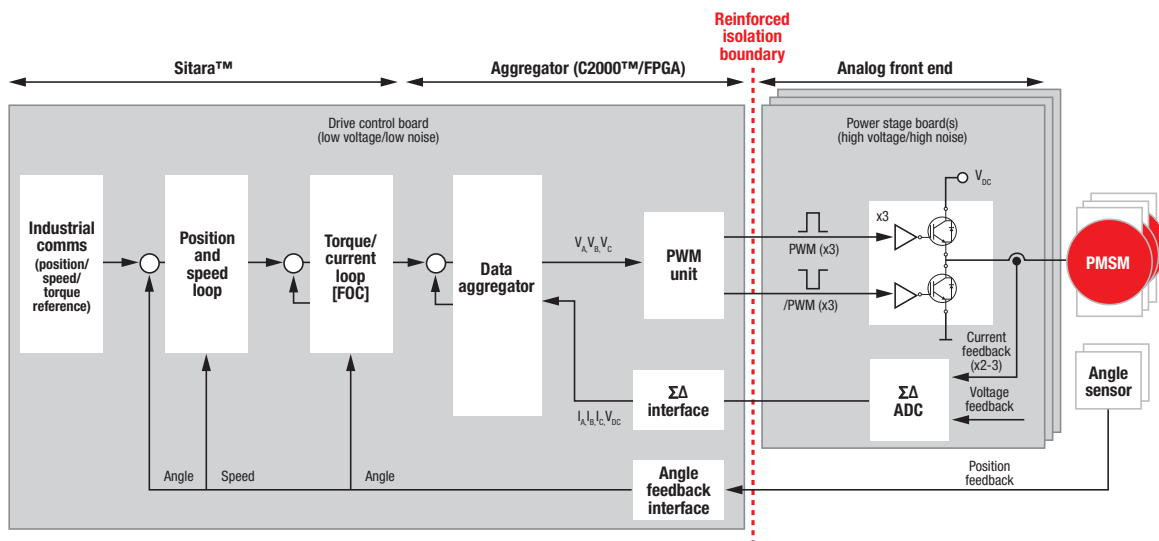


图 3. Sitara 处理器充当伺服处理器, 并将不同的控制功能卸载到系统冷侧的 C2000 微控制器或 FPGA。

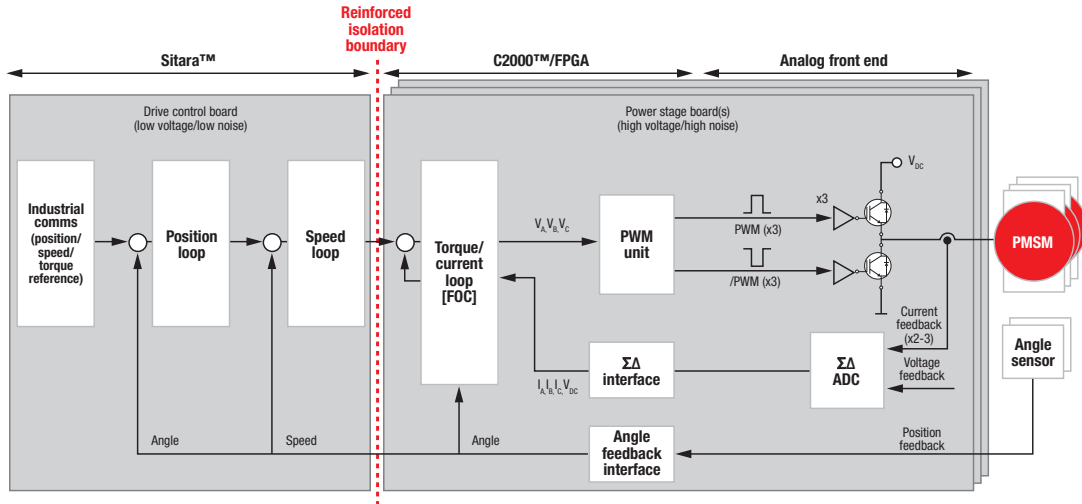


图 4.使用 Sitara™ 处理器在冷侧实现完全伺服控制。

在图 4 中, 包含 PWM 和运动曲线生成功能(通常由 PLC 处理)的整个控制回路都集成在冷侧的单个 SoC 中。这种架构可通过集成节省更多成本, 并消除 SoC 之间接口的相关延迟。

**解决方案**

Sitara 处理器系列的 SoC 可满足从独立工业通信模块到本章所讨论系统分区的全功能多轴伺服驱动器的所有需求。图 5 显示了使用 Sitara、Hercules™ 和 C2000 微控制器系列中的不同处理器可以实现解决方案。Sitara AMIC 处理器包含 PRU-ICSS 子系统, 并已针对独立的多协议工业通信模块进行了优化。

Sitara 系列的其余产品集成了 PRU-ICSS 子系统以及其他内核和外设以实现控制和通信。AM6x 处理器系列提供基于 Hercules 微控制器的集成安全功能, 为通信、伺服控制和某些级别的功能安全性提供了单芯片解决方案, 集成度得到进一步提高。

**结论**

工业 4.0 引入了伺服驱动器的新准则和系统要求, 因此, 设计人员选择适合当前和未来伺服驱动器需求的解决方案非常重要。Sitara AM65 处理器之类的器件同时包含 Cortex-A 和 Cortex-R 内核并支持 100Mbps 和 1Gbps 工业联网功能, 能够满足现有和未来伺服驱动器的需求。TI 还提供多种产品, 包括其他 Sitara 处理器和 C2000 微控制器, 旨在满足工业市场不断变化的需求。

TI 的伺服驱动器产品		Sitara™ AMIC110 Processor	Sitara™ AM335x Processors	Sitara™ AM437x Processors	Sitara™ AM57x Processors	Sitara™ AM6x Arm Processors	Hercules™ MCU	C2000™ F2837x Delfino™ MCU	C2000™ F28004x Piccolo™ MCU
产品		AMC110 处理器	AM335x 处理器	AM437x 处理器	AM57x 处理器	AM6x Arm 处理器	Hercules MCU	C2000 F2837x Delfino MCU	C2000 F28004x Piccolo MCU
安全	集成的功能安全特性					4	4	4	4
工业 4.0 服务	时间敏感型网络 (TSN)					4			
	集成安全特性		4	4	4	4		4	4
控制	预测维修		4	4	4	4		4	4
	高速串行接口				4	4		4	4
通信	集成伺服电机控制			4		4		4	4
	工业以太网	多协议	多协议	多协议	多协议	多协议		EtherCAT®	

图 5.适用于伺服驱动器的 TI 处理产品。

## 2.2 机器人系统的伺服驱动器

### 2.2.1 隔离式栅极驱动器的影响

随着全球范围内信息交换和城市化的发展,对电源管理的需求比以往任何时候都更加重要。

因此,高效可靠的系统必须使用具有先进智能性的电力电子器件,以便满足功耗需求。需要满足这些要求的几种日常应用包括数据中心、电信基站、工业自动化、电机驱动器和电网基础设施。每种应用都有自己的功率级别要求、拓扑以及适合的电源开关选择。

例如,数据中心和电信应用使用功率金属氧化物半导体(MOSFET)的原因很简单,即这些应用需要在提高系统功率密度的同时加快开关速度。另一方面,工业自动化和电机驱动器由于具有高电压要求和更高的功率水平,通常会部署绝缘双极栅极晶体管(IGBT)。诸如光伏逆变器之类的电网基础设施设备可以根据逆变器类型和功率水平来灵活选择任何电源开关。

这些应用涉及人机界面(HMI)。此外,诸如控制器和通信外设之类的智能系统需要保护以免受大功率和高压电路的影响。这是通过隔离实现的。而且,将隔离电路与电源传输组件集成在一起有助于减小系统尺寸并降低成本。一种主要趋势是将栅极驱动器与称为隔离式栅极驱动器的隔离器(执行隔离功能的器件)集成在一起。这种逐渐形成的主要趋势使得这些系统级特性极具吸引力。

本电子书的这一节涵盖两个方面。第一个方面是了解隔离式栅极驱动器为何变得如此具有吸引力(通过了解某个应用领域即可看出这一点)。第二个方面是确定在电源开关中使用隔离式驱动器的要求。

## 为何使用隔离式栅极驱动器?

### 数据中心应用

信息交换和检索的需求与应用无处不在。例如,在使用智能设备时不能浪费一分一秒。看看社交媒体、讯息或电子邮件中有些什么内容。所有这一切都在云中发生。这种云是全球实时连接的主力军。云实际上位于数据中心内。

与数据中心之间往返的信息通过光缆或同轴电缆之类的线路传输,或者通过电信基站以无线方式传输。数据中心内部包含电源传输单元,通常称为“电源”。信息存储在称为“云服务器”的服务器中。这些服务器需要强大的功能来存储信息并与用户之间相互检索信息。这些电源单元的功率范围在几百瓦到几千瓦之间。它们使用电网(数百伏范围的交流线路电压)。因此,它们被称为高压单元。

为了提高服务器效率,需要使用几种低压组件,例如控制器和通信组件。而且,这些服务器在出售时有标定的效率额定值,因此必须遵循这些额定值。此外,在云运行期间,人类通过HMI与服务器进行交互。必须避免任何击穿以及电流从高压单元泄漏到HMI中的情况,因为这种问题可能损坏所有低压组件,例如控制器和通信组件。

### 解决办法是隔离

作为一种半导体集成电路(IC),[隔离器件](#)允许数据和电力在高压和低压单元之间传输,同时可以防止任何危险的直流电或不受控制的瞬态电流从电网中流出。一个众所周知的例子便是雷击。通过隔离可以打破在具有高能量流的电路中形成的接地环路。隔离方法有若干种。在所有隔离方法当中,电流隔离是针对巨大电位差提供保护的一种隔离方法。

这种电力需求每天都在持续增加。不仅如此, 人们希望立即收到这些信息。这意味着, 随着数据需求的增加, 数据中心的容量也在与日俱增; 因此, 电力输送系统需要提供越来越多的电力。但是, 数据中心的机房空间有限。扩大机房空间的成本高昂, 非常不经济。

解决此需求的一种方法是增加功率密度并确保隔离可靠性。为实现此目的, 可显著提高电源效率并增大电力传输率(也称为开关频率, 以 kHz 为单位)。此改进有助于减小电源单元的尺寸。通过将隔离器与关键电源组件(即高速栅极驱动器)集成在一起, 可以实现隔离可靠性。这种集成器件便是大家所知道的隔离式栅极驱动器。

### 栅极驱动器功能

为了进一步了解这种集成解决方案的价值, 首先需要了解如何使用栅极驱动器。**栅极驱动器在采用开关模式电源的系统中实现, 其中的电源开关在 ON 和 OFF 模式下工作, 因此理论上在高开关频率下具有零功耗。**两种常用的电源开关是功率 MOSFET 和 IGBT。开关模式电源在基于控制器的闭环电源拓扑中运行。对 ON/OFF 状态的控制在这些开关的栅极上进行, 旨在调节电压和通过开关的电流。让我们以功率 MOSFET 为例。**图 1** 说明了栅极端子的工作原理。

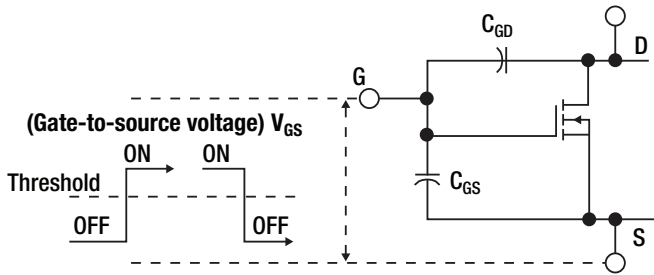


图 1. 控制电源开关中的栅极端子。

首先, 栅极 (GATE) 端子控制 MOSFET 的 ON/OFF 状态。 $V_{GS}$  表示栅极与源极之间的电压。

- 要开启 (ON), 请施加正电压,  $V_{GS} >$  阈值电平。
- 要关闭 (OFF), 请降低  $V_{GS} <$  阈值水平。
- 栅极 (GATE) 是具有高阻抗的电容器输入端。
- 它具有  $C_{GS}$  和  $C_{GD}$  作为 MOSFET 内部结构中的两个寄生电容。

这便是栅极驱动器的用武之地。它充当功率放大器, 接受来自控制器 IC 的低功率输入, 并产生适当的大电流栅极驱动以使功率 MOSFET 开通或关断。

### 隔离式栅极驱动器与传统变压器隔离

对于高压应用(例如数据中心电源), 根据控制器的放置位置, 需要在控制器和驱动器之间进行隔离。一种传统的隔离方法是使用栅极驱动器变压器。

**图 2a** 显示了由简单低侧非隔离式栅极驱动器向变压器施加脉冲到桥式拓扑相脚(**图 2b**)的位置。这称为 A 型。

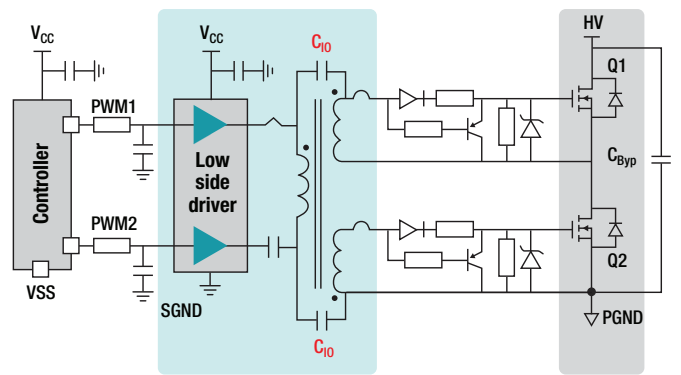


图 2a. 变压器隔离驱动相脚中的两个高侧、低侧开关。

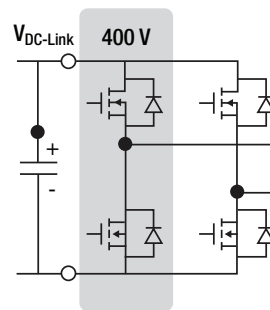


图 2b. 全桥拓扑的一个相脚。

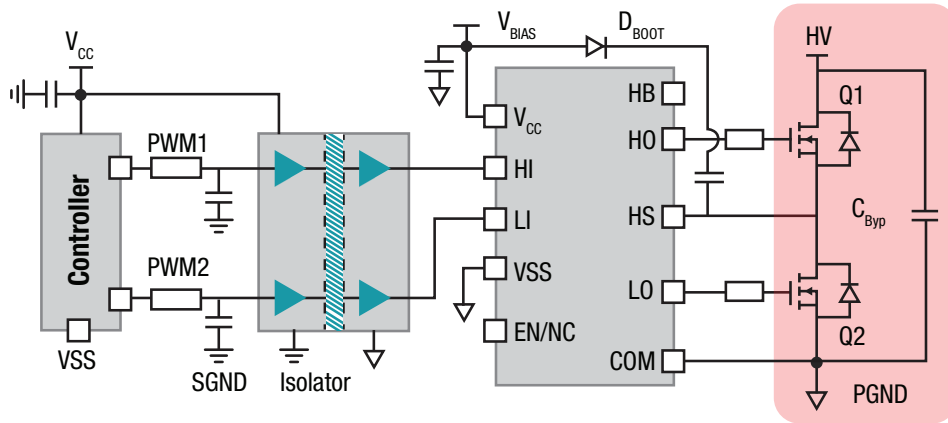


图 3. 隔离器和栅极驱动器配置突出了相脚控制器。

现在考虑使用隔离器 IC 代替位于控制器与高侧、低侧驱动器之间的变压器 (图 3)。这称为 B 型。

表 1 显示了 A 型和 B 型之间的典型比较。

技术规格	类型 A	类型 B
T <sub>Prop</sub>	=20ns	=100ns
偏置电源	否	是
C <sub>io</sub>	≥10pF	≤1pF
寄生效应	大 (LLK)	非常小
过冲	大	较小
尺寸	体积大	较小

表 1. A 型与 B 型的比较。

请注意, 与变压器隔离相比, 隔离器和栅极驱动器组合的尺寸较小。但是, B 型的传播延迟 (高功率密度应用的关键指标) 要高得多。

现在考虑将隔离器和驱动器集成到一个 IC 或多芯片模块中, 如图 4 所示。这称为 C 型。此解决方案便是隔离式栅极驱动器。

C 型提供的传播延迟类似于或优于分立式变压器解决方案, 同时还使面积大幅减小了 50% 以上。此外, 可对 C 型进行定制, 使之提供大于 100V/ns 的共模瞬态抗扰度 (CMTI), 这一数字明显高于 A 型解决方案所能达到的水平。CMTI 是决定栅极驱动器可靠性的关键参数。

如数据中心应用中所述, 系统解决方案的尺寸越来越小。这促使电源具有更高的功率水平和更小的布板空间。集成尽可能多的组件至关重要, 因此这就成为了电源解决方案的趋势。隔离式栅极驱动器 (C 型) 正是顺应这一趋势的解决方案。电隔离技术通常涉及电容、光学和电感。此外, 隔离级别 (例如增强级别、基本级别和功能级别) 取决于应用。

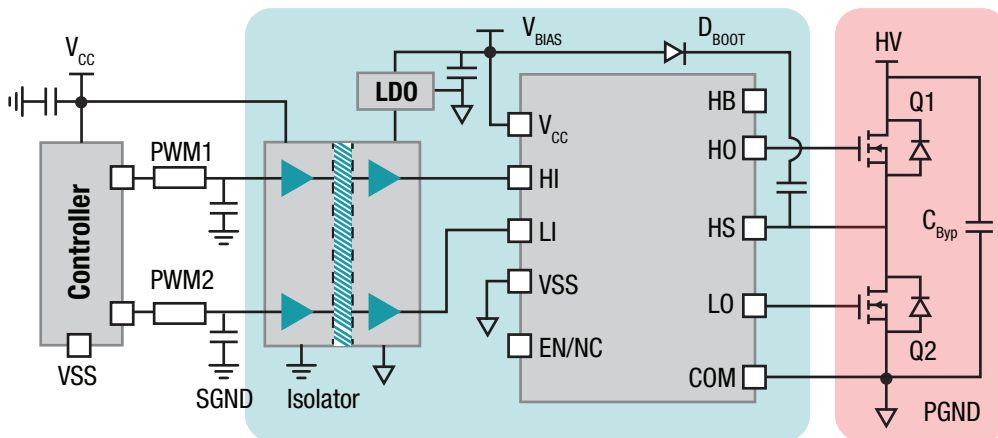


图 4. 在集成解决方案中由隔离式栅极驱动器驱动相脚。

## 隔离驱动器在电源开关中的应用

隔离式驱动器的功能与非隔离式栅极驱动器非常相似, 例如以下方面:

- 传播延迟.
- 共模瞬态抗扰度 (CMTI).
- 上升时间/下降时间.
- 最大驱动器侧电源电压.
- UVLO.
- 通道间延迟.
- 保护方案.
- 死区时间控制和重叠.
- 启用/禁用特性.

规格参数的重要性由应用决定。例如, 数据中心服务器和电信基础设施中使用的电源以高于 20kHz 的高开关频率运行。

对于此类使用功率 MOSFET 的应用, 最大限度降低开关损耗是关键。因此, 诸如上升时间/下降时间和传播延迟的参数非常重要。另外, 电机驱动器和大功率 (> 5kW) 光伏逆变器等应用的开关频率范围为 5kHz 至 20kHz。对于此类使用 IGBT 的大功率应用, 必须具有良好的保护方案和较高的驱动器侧电源电压, 从而确保您的设计能够耐受这些应用中的恶劣环境。

隔离式栅极驱动器的一个独特参数是 CMTI; 在较高开关频率下运行系统时必须考虑这一参数。CMTI 表示栅极驱动器 IC 中的隔离器承受其两个接地端之间的高压摆率电压瞬变而不会破坏其中所通过信号的能力。CMTI 较高意味着隔离式栅极驱动器可用于高开关频率应用中。而且, 随着诸如氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 等宽带隙开关的出现, CMTI 正在成为隔离式栅极驱动器可能最重要的参数。

尤其是, SiC MOSFET 凭借其出色的材料性能, 已成为电力电子领域的颠覆性解决方案, 因此在高电压、高功率应用中产生了各种节能、可靠且紧凑的系统。随着电动汽车和可再生能源电力系统的出现, 这些应用越来越引起人们的关注, 进而使得 SiC 的栅极驱动器要求非常关键。TI 拥有一个隔离式栅极驱动器系列 UCC217x, 其具有用于 SiC MOSFET 的快速集成式感应能力。UCC217x 系列充分利用 TI 的电容隔离技术, 最大限度延长绝缘栅的使用寿命, 同时还提供高增强隔离等级、快速的数据速度和高密度封装。

这源于 TI 的电容隔离层和具有极高介电强度的绝缘体 (SiO<sub>2</sub>)。每个电容隔离层都使用我们的 TI 专有技术构建而成, 其隔离浪涌电压保护强度超过 12.8kV, 且额定隔离电压为 5.7kV, 可以确保增强的系统级可靠性。此外, 快速的短路保护和快速的响应速度增强了系统保护。

**表 2** 比较了 MOSFET 和 IGBT 隔离式栅极驱动器, 并总结了前面所述的差异。

电源开关	MOSFET	IGBT
开关频率	高 (>20kHz)	中低 (5kHz-20kHz)
通道数量	单通道和双通道	单通道
具有保护特性	无	有 - 去饱和, 米勒钳位
V <sub>DD</sub> 最大值 (电源电压)	20V	30V
V <sub>DD</sub> 范围	0V 至 20V	-10V 至 20V
工作电压 V <sub>DD</sub>	10V 至 12V	12V 至 15V
UVLO	8V	12V
CMTI	50 至 100V/ns	<50V/nx
传播延迟	越小越好 (<50ns)	高 (不严重)
电源轨电压	高达 650 V	>650V
典型应用	电源: 服务器、数据通信、电信、工厂自动化、车载和非车载充电器、太阳能微伏逆变器和串式逆变器 (<3kW)、400V 至 12V 直流/直流转换器、汽车	电机驱动器 (交流电机)、UPS、集中式和串式太阳能逆变器 (>3kW)、汽车牵引逆变器

**表 2.** MOSFET 和 IGBT 隔离式栅极驱动器的比较.



总结

在电源、光伏逆变器和混合动力汽车/电动汽车直流/直流转换器等电源管理应用中, 高功率密度和稳健性变得越来越重要。随着功率水平的提高, 对 HMI 和智能系统的保护非常重要。因此, 隔离式栅极驱动器正成为这些应用的首选解决方案。本节将隔离式栅极驱动器的价值与传统变压器方法进行了比较。我们以这种驱动器作为电源开关和应用的一部分为例, 强调并说明了这种驱动器的关键要求。TI 为这些电源开关提供了多款隔离式栅极驱动器。这些产品包括可用于多种应用 (例如电源、电机驱动器、光伏逆变器和汽车电气化系统等) 的隔离式栅极驱动器 (例如 [UCC21710-Q1](#)、[UCC21732-Q1](#)、[UCC21750](#)、[UCC21520](#)、[ISO5451/5452](#)、[UCC5350](#) 和 [UCC21220](#) 系列)。

2.2.2 了解峰值拉电流和灌电流参数

由于数据表中的高电平输出电流 ( $I_{OH}$ ) 和低电平输出电流 ( $I_{OL}$ ) 规格, 栅极驱动器经常被混淆为连续电流源。例如, 查看 TI [UCC5320SC](#) 的设计人员可能会看到“4.3A 拉电流”和“4.4A 灌电流”参数, 并错误地认为这些器件能够连续提供这些电流。

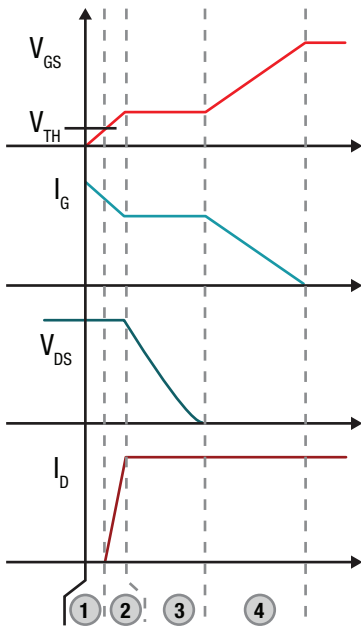


图 1. MOSFET 开通时间间隔。

栅极驱动器不需要提供恒定电流, 因为它们仅需在切换 MOSFET 或 IGBT 的栅极时拉出或灌入电流。

图 1 显示了开通波形。

要了解  $I_{OH}$  和  $I_{OL}$  规格, 必须查看器件内部的上拉和下拉结构。栅极驱动器的输出级通常具有某种类似图 2 的变体形式。UCC5320SC 采用分离输出的引脚排列, 因此更容易控制上升和下降时间, 而无需添加诸如肖特基二极管之类的额外组件。

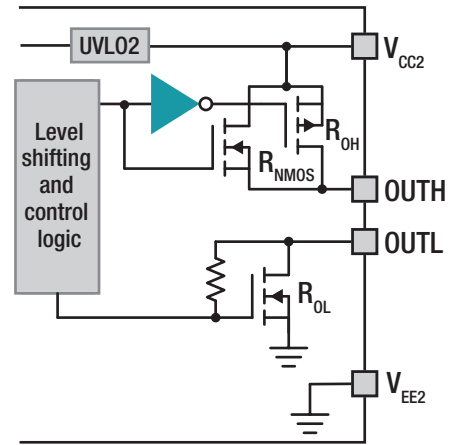


图 2. 栅极驱动器输出级。

在空载条件下,  $I_{OH}$  取决于  $V_{CC2}$  以及  $R_{NMOS}$  与  $R_{OH}$  的并联组合, 而  $I_{OL}$  由  $V_{CC2}$  和  $R_{OL}$  设定。 $R_{NMOS}$  帮助上拉结构输送峰值电流, 并在米勒平台区域期间短暂增加峰值拉电流, 如图 1 中的间隔 3 所示。这是通过在输出状态从低电平变为高电平的狭窄瞬间开通 N 沟道 MOSFET 来实现的。将 MOSFET 和 IGBT 驱动为高电平时, 外部栅极电阻器  $R_{ON}$  和晶体管的内部栅极电阻  $R_{GFET\_Int}$  会降低峰值输出电流, 如方程 1 所示:

$$I_{OH} = \min \left( 4.3A, \frac{V_{CC2}}{R_{NMOS} || R_{OH} + R_{ON} + R_{GFET\_Int}} \right) \quad (1)$$

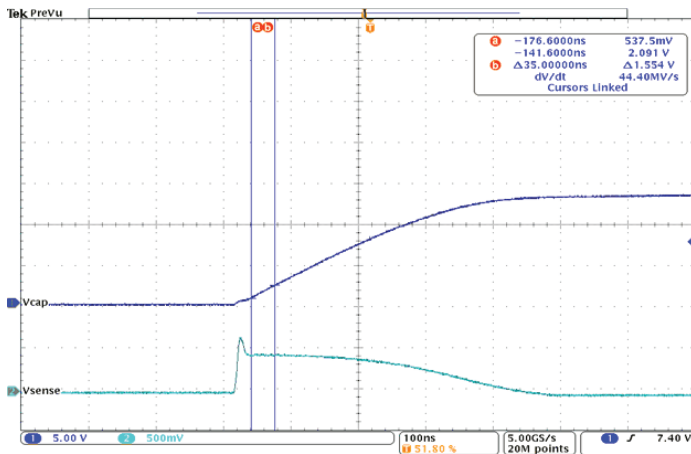
同样, 峰值灌电流受制于外部栅极电阻器  $R_{OFF}$  (与  $R_{OL}$  和  $R_{GFET\_int}$  串联), 并由方程 2 确定:

$$I_{OL} = \min \left( 4.4A, \frac{V_{CC2}}{R_{OL} + R_{OFF} + R_{GFET\_Int}} \right) \quad (2)$$

我们可以演示使用 UCC5320SC 隔离式单通道栅极驱动器和 100nF 容性负载来确定峰值驱动电流的不同方法。第一种方法根据方程 1 和 2 计算预期的峰值电流。在为系统选择栅极驱动器时,可使用这些方程来估算峰值驱动电流。

为了在将 MOSFET 或 IGBT 安装到印刷电路板上之前对 MOSFET 或 IGBT 的驱动过程进行仿真,请选择一个等效于开关输入电容 ( $C_{ISS}$ ) 的负载电容器。在驱动电压条件下,从 MOSFET 或 IGBT 的数据表中查找所需的栅极电荷来确定输入电容。

第二种方法使用  $C_{ISS}$  以及开关波形的瞬态电压 ( $dv/dt$ ) 来确定拉电流或灌电流。**图 3** 使用光标来测量  $dv/dt$ , 方法是将光标设置为固定的 35ns 间隔并扫过上升沿以查找峰值  $dv/dt$ 。原则上,将示波器的光标设置为时间间隔  $\Delta t$  (大约是上升时间的 10%) 以确定流过负载电容器的电流。

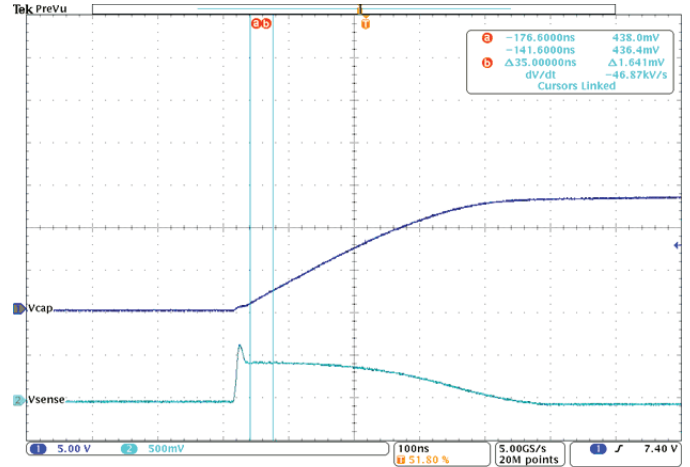


**图 3.**测量负载电容器上的峰值  $dv/dt$ 。

使用测得的峰值  $dv/dt$  和负载电容值,根据方程 3 计算峰值电流:

$$I_C = C \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

第三种方法是在电容器和接地端之间插入一个  $0.1\Omega$  的感应电阻来计算  $I_{OH}$  或  $I_{OL}$ 。**图 4** 显示了感应电阻器上的电压波形 ( $V_{SENSE}$ ),其测量值与  $V_{cap}$  波形的最高  $dv/dt$  值一致。



**图 4.**串联感应电阻器上的电压。

**表 1** 列出了这三种方法的结果。即使与电容器串联一个  $0.1\Omega$  的感应电阻器,方程 1 仍可估算出  $4.30A$  的拉电流。方程 3 使用在栅极驱动波形的线性区域中测得的最大  $dv/dt$  值,得出的估算值为  $4.53A$ 。在这一相同的线性区域中,感应电阻器上的电压在图 4 中进行测量,由欧姆定律确定峰值  $I_{OH}$  为  $4.29A$ 。

理论与实测	方法	结果
理论	公式 1: $I_{OH} = \min(4.30 A, 4.44 A)$	$4.30A$
根据测量值计算	公式 3: $I_C = 102nF (4.44 = MV/s)$	$4.53A$
根据测量值计算	欧姆定律: $I_{OH} = 438mV/102m\Omega$	$4.29A$

**表 1.** 测量结果比较。

第一种方法是选择栅极驱动器时的良好起点,但您获得的不是实际的测量值。第二种方法依赖于使用固定  $\Delta t$  并扫过整个波形来精确测量最高  $dv/dt$ 。最后,在  $0.1\Omega$  感应电阻器上测得的电压将提供一个使用图 4 和欧姆定律根据峰值驱动电流测量值计算得出的值。第三种测量方法的关键是选择一个阻值较小的感应电阻器,以防止峰值输出电流受到任何限制。所有提供的方法都是栅极驱动器峰值输出电流的可接受近似计算方法。

重申一下, $I_{OH}$  和  $I_{OL}$  不是连续直流值。峰值电流会在瞬间使  $C_{ISS}$  充电或放电,然后在开关开通时减小值。

### 2.2.3 带 UVLO 和 BJT 图腾柱的低侧栅极驱动器

栅极驱动器已在越来越多的场合取代了双极结型晶体管 (BJT) 图腾柱来驱动低端应用中的电源开关。栅极驱动器具有许多内置的安全特性,可以消除分立式解决方案中缺少保护措施所带来的风险。在驱动 MOSFET 和 IGBT 时,安全特性对于确保可预测的开关和稳定的栅极驱动非常重要。让我们比较一下 UCC27517 栅极驱动器和分立式图腾柱,看看它们各自在欠压锁定 (UVLO) 条件下的性能。

#### UVLO 的重要性

UCC27517 栅极驱动器具有重要的内置保护特性,可在电源未达到 UVLO 阈值时将驱动器的输出端接地。**图 1** 显示了  $V_{GS}$  的不同值在给定漏源电压下对 MOSFET 的影响。红色曲线的右侧是饱和区域,该区域由恒定的漏源电流定义,取决于栅源电压而与漏源电压无关。由于同时存在高漏极电流和高漏源电压,该饱和区域的功率损耗可能很高。红色曲线的左侧是线性区域,漏极电流与 MOSFET 的低  $R_{DS(on)}$  成正比。对于具有高漏极电流的应用,栅源电压的下降可能会对 MOSFET 构成危险。UCC27517 以及 UCC 系列中的其他低侧驱动器通过其内置的 UVLO 来防止该下降,从而实现安全上电。

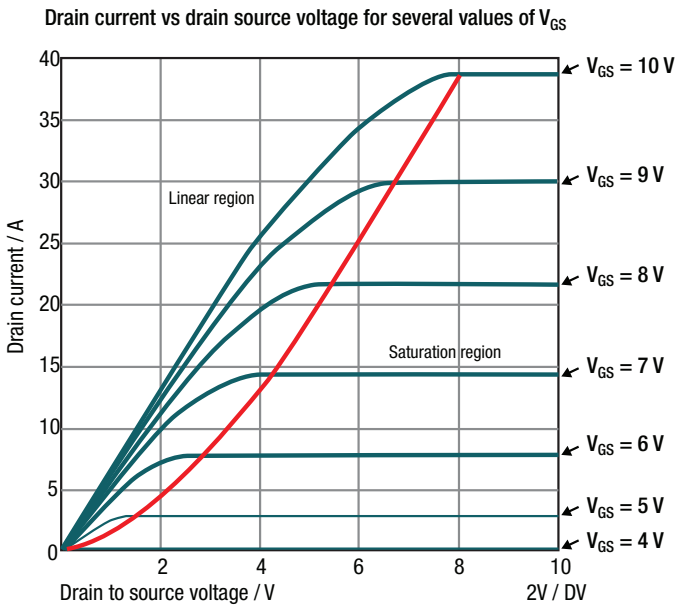


图 1. MOSFET 1 至 5 的特性。

#### 为什么 BJT 图腾柱不提供保护

**图 2** 显示了用于驱动 MOSFET 的 BJT 图腾柱配置。图 2 显示的是一个典型的栅极驱动电路,其中使用旁路电容器和附加的基极电阻来限制输入电流。上电和断电时,在 BJT 驱动器电源稳定之前, MOSFET 可能会同时经受高电压和大电流。可在该电路中添加外部 UVLO 电路,但是这种添加会导致组件数量、电路板尺寸和物料清单 (BOM) 成本增加。

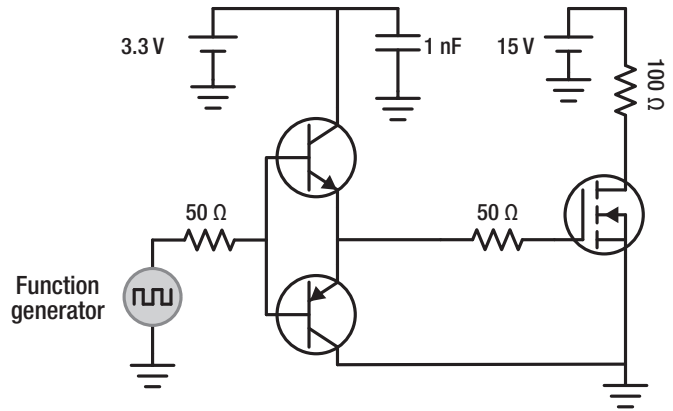


图 2. BJT 图腾柱原理图。

**图 3** 显示了 UCC27517 器件在相同条件下驱动电源开关的情况,但具有内置 UVLO (通常为 4.2V 且典型迟滞为 300mV)。当电源电压达到 UVLO 时,驱动器的输出随  $V_{DD}$  的升高而上升,直至达到稳定状态为止。该解决方案还使用更少的组件,具有更小的尺寸,并可节省 BOM 成本。

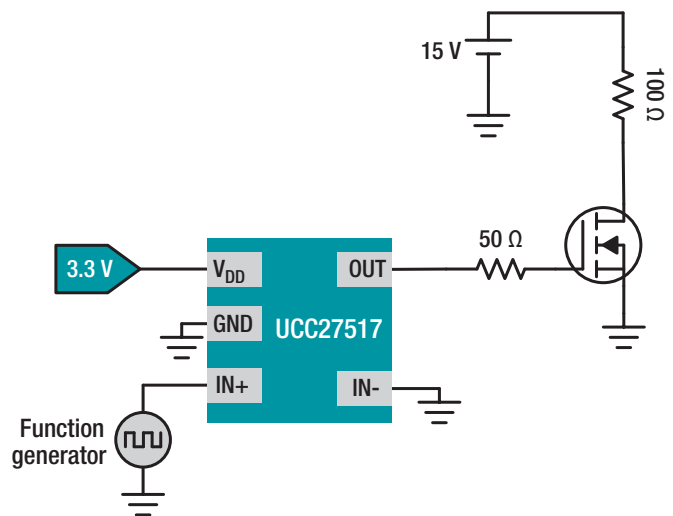


图 3. UCC27517 原理图。

### 使用带 UVLO 的 UCC27517 来保护 MOSFET 和 IGBT

在 3.3V 启动时,两个栅极驱动器的热性能存在显著差异。UCC27517 栅极驱动器会钳制其输出,从而防止开关及其输出端的场效应晶体管 (FET) 上出现漏源电压降。图 4 中的波形展示了这一事件。通道 2 (VDS\_517) 未捕获到 MOSFET 上的电压降,而通道 4 (IDS\_517) 显示了上电期间接地的漏极电流。此过程一直进行到电源电压达到 UVLO 上升阈值为止。但是,BJT 允许 MOSFET 上的电压降(由通道 1 [VDS\_BJT] 捕获),而漏极电流则显著上升(如通道 3 [IDS\_BJT] 所示)。这样的电流上升会导致功耗过大,并可能损坏 MOSFET。

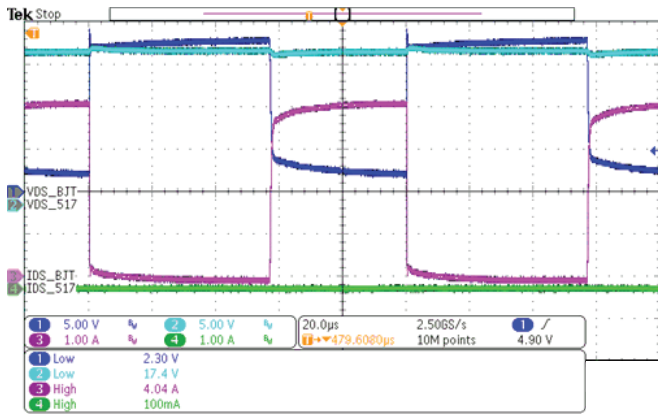


图 4. UCC27517 和 BJT 图腾柱栅极驱动器在 3.3V 上电时的波形。

图 5 显示了此事件的热感图像。在左侧, UCC27517 驱动 MOSFET (使用其内置 UVLO), 通过将其输出端接地来防止 FET 结过热。在 UVLO 条件下, 无论输入如何, 驱动器的输出端都会保持接地。但是, 在右侧, 由于没有保护, BJT 图腾柱输出端的 FET 会由于功耗增加而承受过热的风险。

UVLO 作为一项重要特性, 可确保仅在提供足够的电压时才进行开关, 从而实现 MOSFET 的平滑上电和断电。UCC27517 通过将其输出端接地并由此防止 MOSFET 过热来解决其内部 UVLO 的这一问题。由于在上电和断电期间会在 MOSFET 结处产生过多的功耗并可能损坏 FET, 因此该特性至关重要。

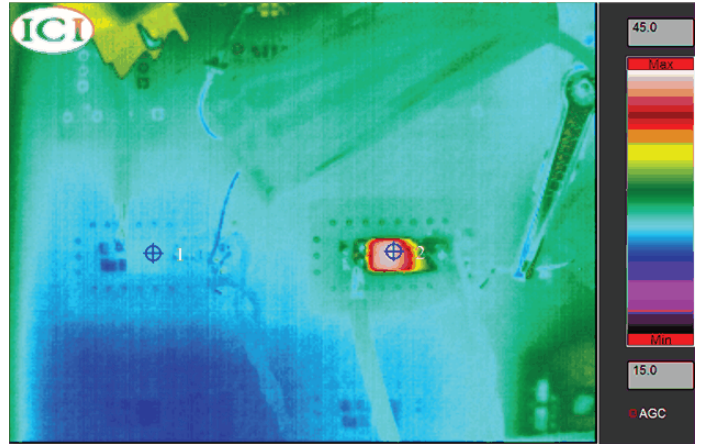


图 5. UCC27517 驱动 MOSFET (左) 和 BJT 驱动 MOSFET (右) 在 3.3V 上电时的热感图像。

内部 UVLO 保护不仅限于 UCC27517 栅极驱动器, 还扩展到了 UCC 低侧栅极驱动器系列中的其他器件。

### 2.2.4 适用于栅极驱动器的外部栅极电阻器设计指南

外部栅极驱动电阻器在限制栅极驱动路径中的噪声和振铃方面发挥着至关重要的作用。如果没有尺寸合适的栅极电阻器, 寄生电感和电容、高瞬态电压 (dv/dt) 和瞬态电流 (di/dt) 以及体二极管反向恢复可能导致不良行为。

图 1 显示了栅极驱动路径中的常见元件: 栅极驱动器的内部电阻、外部栅极电阻以及 MOSFET 或 IGBT。R<sub>GATE</sub> 是唯一调整栅极驱动波形的组件。

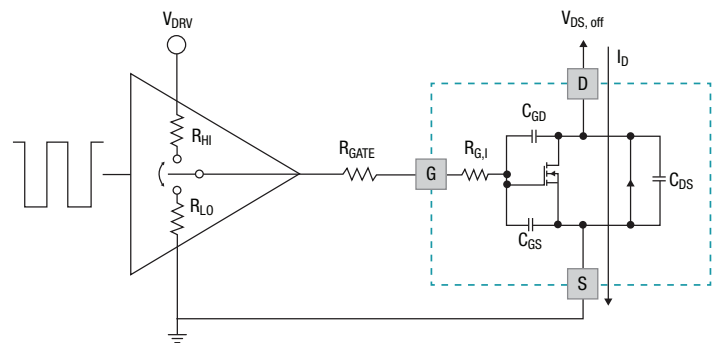


图 1. 栅极驱动元素。

图 2 显示了寄生电感及其对由较长布线长度和不良 PCB 设计产生的栅极驱动波形的影响。

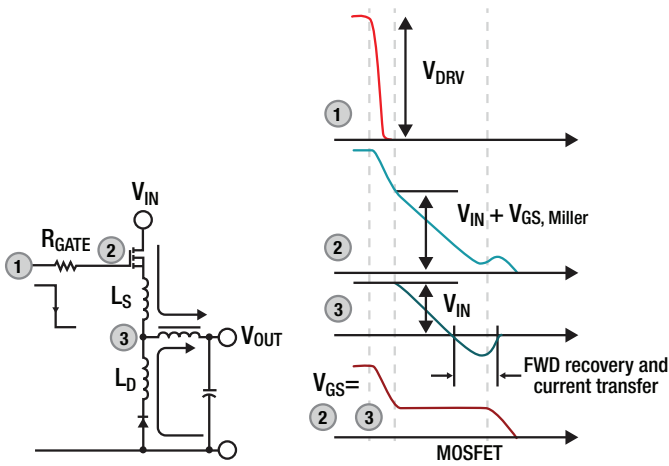


图 2. 开关原理.

寄生电感和电容会在栅极驱动回路中引起振荡, 并通过谐振电路进行建模。幸运的是, 可以衰减输入电容  $C_{ISS}$  ( $C_{GD} + C_{GS}$ ) 和源极电感  $L_S$  之间原本非常高的  $Q$  谐振, 方法是使用回路的串联电阻分量  $R_G$  ( $R_G = R_{HI}$  或  $L_O + R_{GATE} + R_{G,I}$ )。

最佳的栅极电阻器选择是高性能设计的关键。如果未经优化, 小电阻值也会导致栅极驱动电压波形产生过冲, 还会导致加快开通速度。升高电阻值也会导致振荡过阻尼并延长开关时间, 对于栅极驱动设计没有太多好处。

最好可以让选择的栅极电阻器给设计带来 0.5 (临界阻尼) 到 1 (欠阻尼) 之间的品质因数  $Q$ 。如果品质因数大于 0.5, 则可以根据需要加快开通和关闭速度。

首先记录没有外部电阻的栅极驱动振铃。这便是方程 1 中使用的振铃频率  $f_R$ :

$$L_S = \frac{1}{CISS(2\pi f_R)^2}$$

MOSFET 或 IGBT 数据表将提供  $C_{ISS}$ , 这将帮助您计算  $L_S$ 。

针对欠阻尼或临界阻尼性能, 确定  $R_G$  何时等于或两倍于电感器的电抗。从总串联电阻中减去内部栅极驱动和晶体管栅极电阻, 即可确定外部栅极电阻, 如方程 2 所示:

$$Q = \frac{X_L}{R_G} = \frac{\omega L_S}{R_G} \tag{2}$$

此处描述的方法是一个迭代过程, 该过程从  $0\Omega$  的外部栅极电阻开始, 根据振铃频率、源极电感和输入电容来计算新的外部栅极电阻值。

半桥配置中的两个隔离式单通道栅极驱动器提供了概念验证。由 15V 电源驱动的两个 UCC5310MC 栅极驱动器将驱动两个 100V CSD19536KCS MOSFET (典型的内部栅极电阻  $R_{G,I}$  为  $1.4\Omega$ )。

CSD19536KCS MOSFET 较小的内部栅极电阻显示了添加外部栅极电阻的效果。如果 MOSFET 或 IGBT 的内部栅极电阻足够大, 则可能不需要外部栅极电阻。

在  $0\Omega$  时, 栅源波形上会出现不必要的振铃。CSD19536KCS MOSFET 的内部栅极电阻不足以抑制图 3 中的振荡。

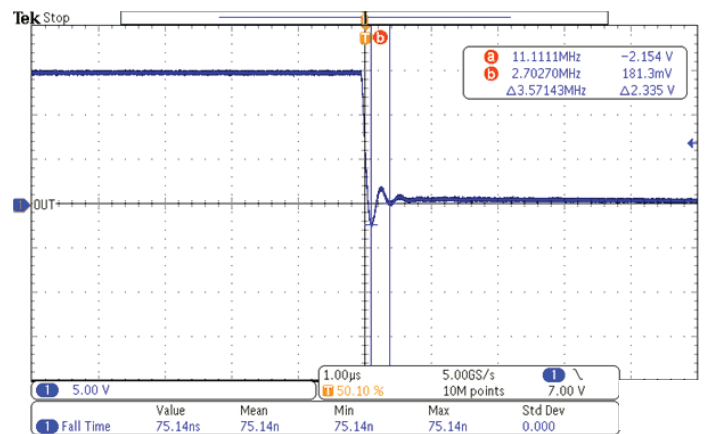


图 3. 外部栅极电阻器, 其中的  $R_{GATE} = 0\Omega$ .

- (1) 使用 3.57MHz 振铃频率和 9,250pF 输入电容, 方程 1 和 2 可以确定临界阻尼电阻值。不要忘记从该计算结果值中减去串联电阻元件阻值  $R_{G,I}$  和  $R_{HI}$  或  $L_O$ 。图 4 (下一页) 演示了在栅极驱动路径上添加 7 $\Omega$  电阻器的效果 (使波形严重衰减)。

外部栅极电阻器的选择将影响三个方面:驱动电流、栅极驱动器功耗以及上升和下降时间。图 3 和图 4 显示了栅极电阻器的抑制效果及其对上升和下降时间的影响。

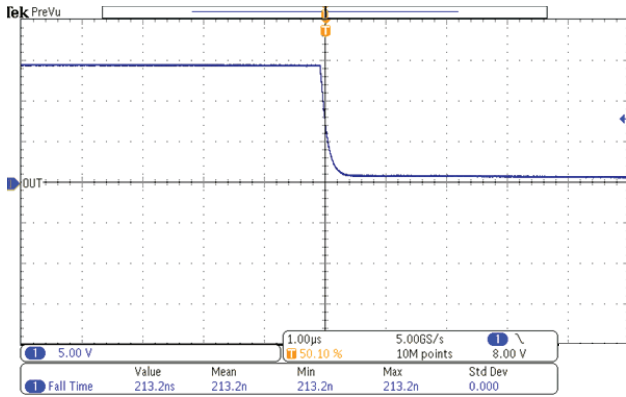


图 4.临界阻尼的外部栅极电阻, 其中的  $R_{GATE} = 7\Omega$ .

如果添加优化的栅极电阻后, 上升和下降时间太慢, 则另一种选择是将 Q 因素设置为 1 计算栅极电阻。这将促成欠阻尼解决方案, 但要小心防止过冲或下冲。如果仍然出现过冲或下冲情况, 请查看栅极驱动器的拉电流和灌电流, 并找到一个峰值电流更大的器件来代替它。这将会以更快的速率对 FET 进行充电和放电, 但需要一个新的优化栅极电阻器来防止过冲。

有关备选器件建议, 请参阅表 1。

器件	经优化的参数	性能折衷
UCC5350MC	米勒钳位功能可用	由于较高的拉电流/灌电流, 因此需要较大的栅极电阻
UCC5320SC	分离输出功能可用	需要设计一种防止米勒电流感应导通的方法
UCC5390EC	提供以 GND2 为基准的 UVLO2 功能	真正的 UVLO2 监测, 但没有分离输出或米勒钳位
UCC21220	配置为一个半桥或两个低侧驱动器	使用双通道时, 很难将两个晶体管布置在靠近每个输出的位置

表 1. 备选器件建议。

从图 5 所示的串联  $R_{LC}$  电路中减少振铃的另一种方法是最大限度降低高侧晶体管源极与低侧晶体管源极之间的回路电感。将对晶体管栅极进行充电和放电的高峰值电流限制在最小的物理区域内至关重要。必须将栅极驱动器放置在尽可能靠近晶体管的位置以减少寄生效应。

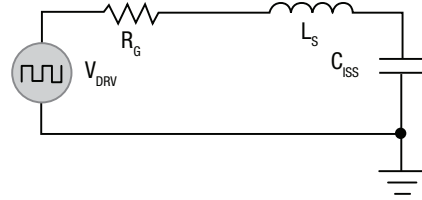


图 5.栅极驱动设计中的谐振电路。

快速上升和下降时间与振荡之间的权衡是栅极驱动设计的外部栅极电阻元件如此重要的原因。

### 2.2.5 通过高侧电机电流监测实现过流保护

大功率精密电机系统通常需要详细的反馈, 例如速度、扭矩和位置。将此反馈发送到电机控制电路有助于控制电机的运行, 从而使其更加精确和高效。其他电机控制应用 (例如固定运动任务) 无需同等系统复杂度即可执行相关作业。确保电机没有失速或没有在电机路径中遇到意外物体, 或者确保存在电机绕组短路, 这可能是所有必要的反馈。添加简单的超出范围检测功能可以使指示超出范围事件的速度有所提升, 因此用于实现动态控制和主动监测的更复杂电机控制系统能够从中获益。

将电流感应放大器与直流电源串联来驱动电机驱动电路的高侧 (如图 1 所示) 可以测量流入电机的总电流并检测超出范围的情况。要检测微小的泄漏, 还可以测量低侧返回电流。高侧和低侧电流电平之间的差异表明在电机或电机控制电路内存在泄漏路径。

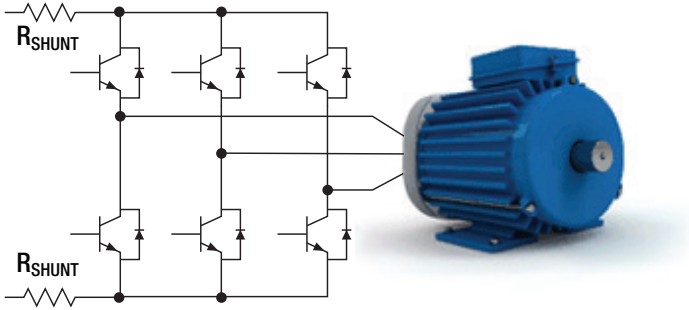


图 1. 低侧和高侧电流检测。

直流电压电平随电机额定电压而异，因此需要可适应相应电压电平的多种电流测量解决方案。对于低电压电机（约 5V），选择用于监测此电流的电路很简单：多种放大器类型（电流感应、运算、差分、仪表）可执行电流测量功能以支持共模输入电压范围。

对于电压较高的电机（24V 和 48V），唯一可行的选择是专用电流感应放大器和差分放大器。随着电压要求不断提高，测量误差将开始影响有效确定超出范围情况的能力。一种用于说明放大器在高输入电压水平下运行时的有效性的规格是共模抑制。该规格直接说明了放大器输入电路对高输入电压干扰的抑制效果。

在最佳条件下，放大器可以完全抑制或消除两个输入引脚的共用电压并且仅对两者之间的差分电压进行放大。但是，随着共模电压的上升，放大器输入级中的漏电流将导致额外的输入失调电压。监测较大的输入范围电平将按比例产生较大的测量误差。

例如，共模抑制规格为 80dB 的差分放大器或电流感应放大器会根据输入电压电平在测量结果中引入较大的失调电压。共模抑制规格为 80dB 时，对于施加到输入端的每伏特电压，在测量中将相应产生额外的 100 $\mu$ V 失调电压。

许多器件具有规定的工作条件（例如， $V_{CM} = 12V$ ,  $V_S = 5V$ ），这为默认的共模抑制和电源抑制比规格建立了基线。本示例中，在 60V 共模电压下运行会导致  $V_{CM}$  变化 48V（60V 至 12V）。共模抑制为 80dB 时，除了器件数据表中指定的输入失调电压之外，48V 的变化还会导致产生额外的 4.8mV 失调电压。

采用校准方案的应用受这种额外引入的失调电压影响较小。不过，对于系统校准无法解决该失调电压漂移的应用，必须选择具有更佳共模电压抑制规格的放大器。

INA240 是一款专用的电流感应放大器，其共模输入电压范围为 -4V 至 +80V，在该器件整个输入和温度范围内最坏的共模抑制规格为 120dB。120dB 的共模抑制对应于共模电压每变化 1V 便额外产生 1 $\mu$ V 的输入失调电压。温度对放大器抑制共模电压能力的影响在许多产品的数据表中都没有详细记录，因此除了室温规格之外，您还应对该影响进行评估。INA240 在整个 -40 $^{\circ}$ C 至 +125 $^{\circ}$ C 的温度范围内可确保 120dB 共模抑制规格。图 2 显示了 INA240 在整个温度范围内的典型共模抑制性能为 135dB（每变化 1V 产生的失调电压小于 0.2 $\mu$ V）。

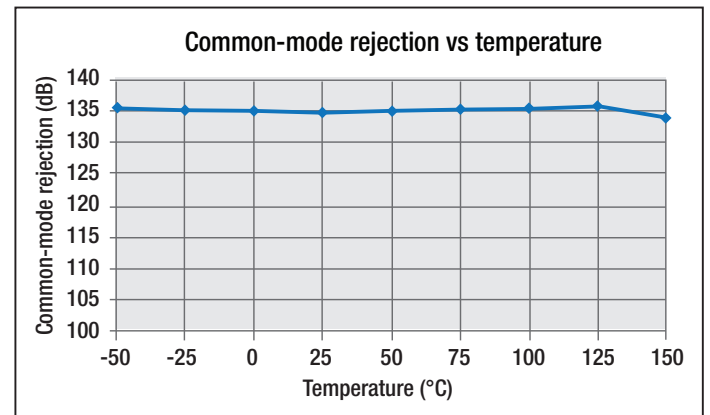


图 2. 共模抑制与温度间的关系。

系统控制器能够根据电流反应放大器的测量结果来评估系统的总体运行情况。将当前信息与预定义的运行阈值进行比较可以检测出超出范围事件。高侧电流感应放大器随后的比较器可以轻松检测并快速向系统发出警报,以便采取纠正措施。

图 3 显示了用于在测量驱动电机驱动电路的高电压轨上的电流时监测和检测超出范围偏移的信号链路径。与输入电流测量值成正比的输出信号将导向至模数转换器;输出信号也将发送到比较器以检测过流事件。如果输入电流电平超出作为比较器基准电压的预定义阈值,则比较器警报将置位。

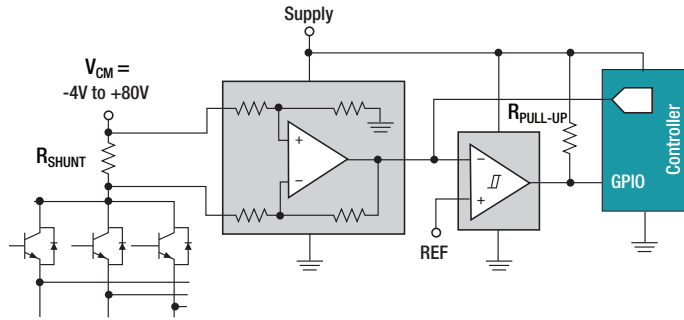


图 3.高侧过流检测.

对过流检测电路的一项关键要求是能够检测出超出范围情况并快速作出响应。100kHz 的信号带宽和 2V/ $\mu$ s 的压摆率使 INA240 能够精确测量和放大输入电流信号,并将输出发送到高速比较器,因此可以在发生短路情况时在短短几微秒内发出警报。该短暂的响应时间可确保系统中流过的意外过大电流不会损坏其他关键系统组件。

### 备选器件建议

对于测量高电压并需要更高信号带宽或更小封装的应用,可考虑使用 LMP8640。对于需要能够承受更高电压的应用,可选择 INA149,这是一款高性能差分放大器,能够连接高达

$\pm 275\text{V}$  的共模电压(电源电压为  $\pm 15\text{V}$ ),并保证共模抑制为 90dB(即输入每变化 1V 便产生 31.6 $\mu\text{V}$  的失调电压)。

表 1 汇总了这些备选器件建议。

器件	经优化的参数	性能折衷
<a href="#">LMP8640HV</a>	封装: SOT23-6, 信号带宽	精度
根据测量值计算	$V_{CM}$ 范围: $\pm 275\text{V}$	CMR, 增益
根据测量值计算	板载比较器; 35 $\mu\text{V}$ $V_{OS}$	$V_{CM}$ : 0V 至 36V

表 1. 备选器件建议.

INA301 是一款具有板载比较器的精密电流检测放大器,可检测高达 36V 的共模电压下的过流事件。

### 2.2.6 增强型 PWM 抑制为直列式电机控制带来的五个好处

解决问题的方法永远不止一个。有时,最常用的方法不一定效果最好。从事电机控制项目的系统设计人员使用各种电流测量方法来确保电机高效运行并防止可能的损坏。

如图 1 所示,在三相电机驱动系统中有三种不同的电流测量方法:低侧、直流链路和直列式。图 1 显示了使用三对功率 MOSFET (IGBT 也很常见) 驱动直流电机所需的传统三相脉冲宽度调制 (PWM) 逆变器,同时图 1 还包括高侧电流感应(通常用于严重故障情况,例如接地短路)。



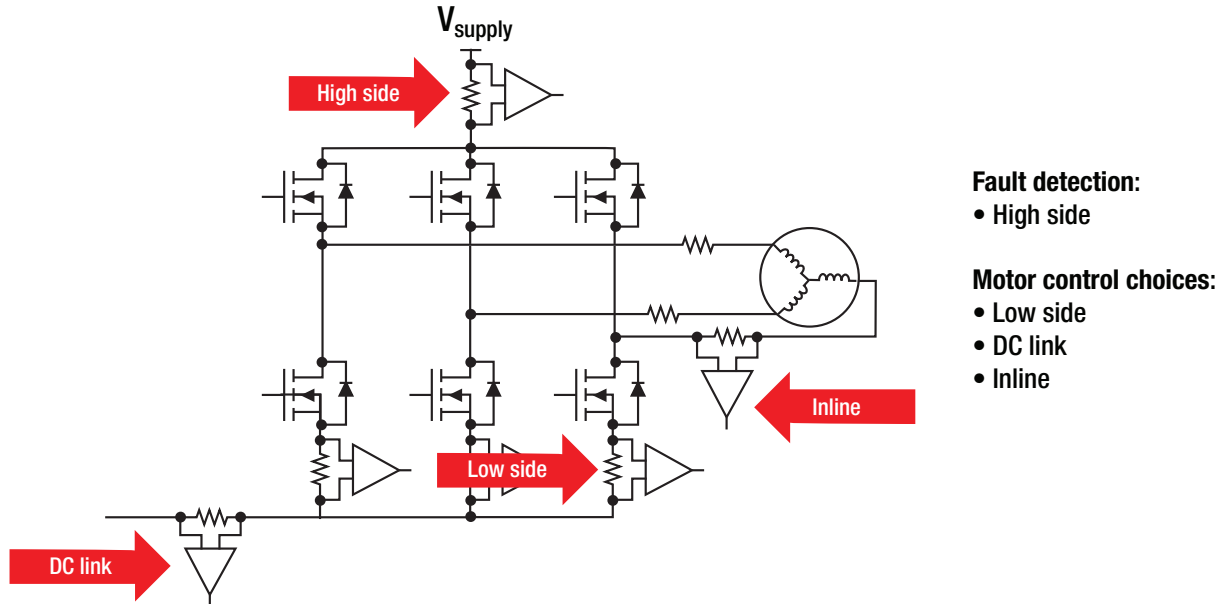


图 1.三相电机驱动系统的各种电流感应方法。

许多设计人员使用前两种方法 (低侧、直流链路及其各种组合) 是因为标准电流感应解决方案随时可用, 且通常具有快速响应时间、高带宽, 快速输出压摆率和低共模输入电压。但是, 仅仅因为存在可以通过低侧或直流链路来感应相电流的产品, 并不意味着这些解决方案代表的是最简单的方法。测量电流背后的思路是试图复制驱动到电机绕组中的电流。这种复制工作在软件中进行; 此过程可能会涉及很多, 而且并不可能真正精确。

直列式电流感应方法似乎是最合乎逻辑的方法, 因为那是您最终要测量的电流, 但是这种方法面临一定的挑战。驱动 MOSFET 或 IGBT 的 PWM 信号会对电流感应放大器造成严重破坏。位于感应电阻器上的共模信号以非常快速的瞬态开关特性被从电源电压驱动到接地端, 而电流感应放大器则试图在感应电阻器自身上测量一个很小的差分信号。

图 2 是由 PWM 逆变器产生的正弦相电流 (红色波形) 的示波器快照。在此例中, PWM 频率为 100kHz, 由 LMG5200 氮化镓半桥功率级提供。直列式电流感应放大器在测量相电流时会经受快速开关信号。

如果可以用一个类比的话, 这就像是在飓风期间测量海上漂浮的杯子中的液体一样。难怪大多数设计人员都使用低侧感应!

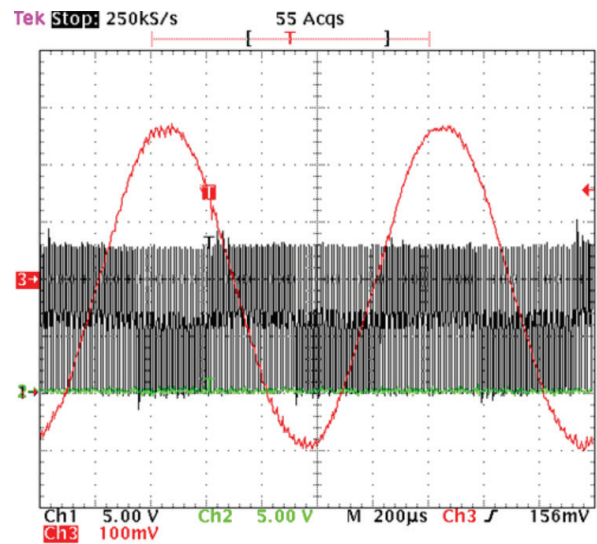


图 2.在快速共模瞬变过程中测量相电流。

在说明使用增强型 PWM 抑制进行直列式电机电流感应的潜在好处之前, 我先解释一下增强型 PWM 抑制。增强型 PWM 抑制是一种有源电路, 使输出电压趋稳的速度比传统方法要快得多。当电流感应放大器检测到快速转换的输入共模信号时, 内部有源电路会将可能传播到器件输出端的干扰降至最低。

减少这些干扰(也称为振铃)的另一种方法是使用高带宽放大器(兆赫级)来尽快使输出进入稳定状态,但这种方案可能成本高昂。

图 3 显示了消除噪声后表示的每个相位的输出电压信号。红色波形表示信号,表明经过电子换向的功率晶体管将正弦波形尽可能准确地复制到电机。电流感应放大器将经受从电源轨(例如  $V_{BATT} = 48V$ ) 到接地端的输入共模电压信号。

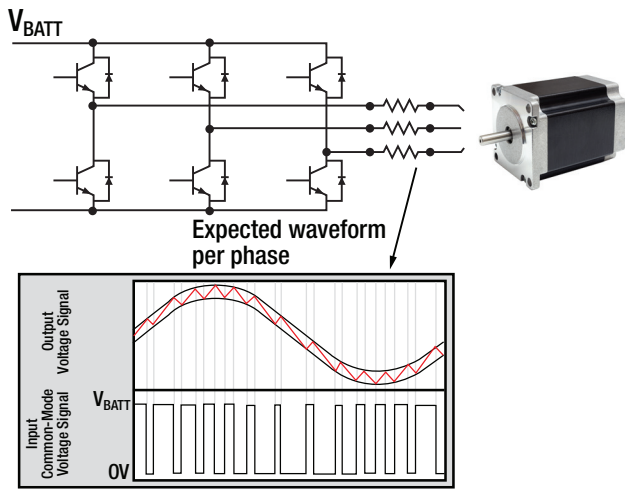


图 3.采用增强型 PWM 抑制时的预期电压波形。

使用增强型 PWM 抑制进行直列式电机电流感应的五大主要好处包括:

- **缩短消隐时间。**共模 PWM 瞬态抑制可减少电流感应放大器输出端的振铃。必须等待电压信号稳定是一个主要缺点,特别是对于需要低占空比( $\leq 10\%$ )的系统,因为进行电流测量的时间缩短了(在业界通常称为消隐时间)。

- **直列式电流检测。**结合高共模输入电压,增强型 PWM 抑制有助于进行直列式电流监测。由于处于恶劣环境中,电流感应放大器必须具备稳健性。除此要求外,该放大器还必须具有较高的交流和直流精度,以便提供精密的电流传感器测量。
- **可能消除电隔离。**增强型 PWM 抑制的另一个好处不易察觉,但很重要。借助增强型 PWM 抑制,当电隔离并不属于系统要求时,也许可以不使用隔离式电流感应器件。隔离式器件将对 PWM 信号流经感应电阻器时产生的噪声进行去耦。有了增强型 PWM 抑制后,不再需要这种去耦。
- **优化算法。**利用增强型 PWM 抑制,复制或计算相电流的需求不再是问题,因为已经直接提供了解决方案。只需最少的软件即可高效运行电机。
- **提高电机效率。**电机制造商和电机驱动系统设计人员一直在寻找提高电机效率的方法。高交流和直流精度、快速输出响应和更短消隐时间使电机能够尽可能以最高效率运行。多相电机的精密计时控制可以最大限度减少消隐时间,进而最大限度提高电机效率。

TI 的 [INA240](#) 电流感应放大器整合了增强型 PWM 抑制,因此能够为电机设计带来诸多系统级好处。

### 2.2.7 如何保护控制系统免受热损坏

在许多控制系统中,工作温度是影响系统性能、可靠性和安全性的众多因素之一。了解温度对控制系统的影响可以帮助系统设计人员预测和防止热损坏。

通常,控制系统在有限的温度范围内工作。但是,只要系统运行超出其额定温度范围,其行为就变得不可预测。在高温下工作时,控制系统通常会出现效率降低、热耗散增加和加速老化的情况。另一方面,过低的温度也会对系统的安全性和功能性产生负面影响,因为工作条件会受到诸如凝结之类的影响。这些影响加在一起可能导致代价高昂的故障。

有许多分立式或集成式解决方案旨在保护控制系统免受热损坏。通常,这些解决方案由温度传感器、比较器和电压基准组成(请参阅图 1)。

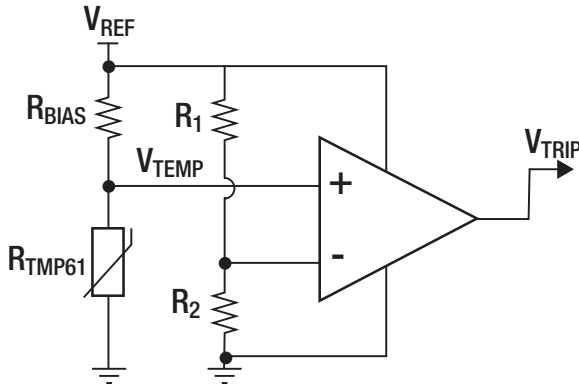


图 1.用于阈值检测的热敏电阻 + 比较器.

这种方法可提供实时热保护,而不会中断控制处理系统。

图 2 显示了温度开关行为的示例。在此示例中,跳闸点设置为 60°C,迟滞为 10°C。

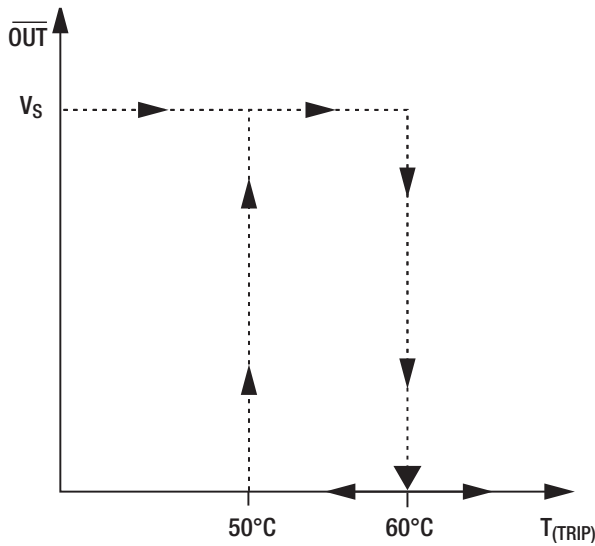


图 2.带有迟滞的温度开关跳闸行为示例.

有些应用需要热保护和监测功能,因此还需要模数转换器(请参阅图 3)。

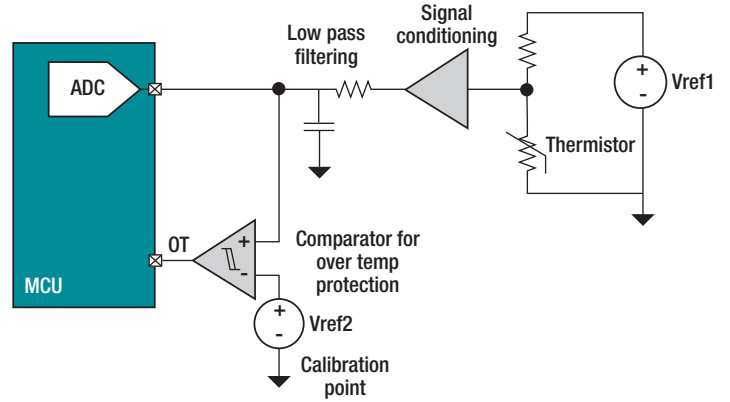


图 3.温度监测器和开关的分立式实施示例。

具体实施将取决于以下应用要求:

- 特性.
- 成本.
- 覆盖面积.
- 增强.
- 精度.

需要考虑的其他特性包括迟滞、跳闸点可编程性、跳闸测试、资质认证(如汽车或美国保险商实验室)、输出类型、通道数和电源电压范围。

### 分立式解决方案

使用负温度系数 (NTC) 热敏电阻进行温度开关的分立式实施很常见,因为这些器件的运用已经很广泛。热敏电阻解决方案通常也被认为是低成本的解决方案。考虑到热保护的苛刻要求(如保证性能),分立式解决方案通常极具挑战性且成本高昂。

设计分立式热保护解决方案时的一些挑战包括精度、可靠性和效率。例如:

- 由于 NTC 热敏电阻具有非线性特征,因此如果不使用精密组件,则难以在高温或低温下维持高精度跳闸点,但这些组件会增加系统成本。
- 校准在基于硬件的开关应用中不实用。
- 分立式实施方式需要多个组件协同工作,因此可能降低系统可靠性。
- NTC 分立式解决方案会在高温条件下消耗大量功率,因为 NTC 电阻在高温条件下将显著降低。

## 集成电路解决方案:温度开关/恒温器

另一种用于控制系统的热保护解决方案是使用集成式温度开关/恒温器。通常情况下,这些器件在单个芯片上完全集成了温度传感器、比较器和电压基准。这些温度开关是能够自主做出决策的智能传感器,可提供实时的过热保护而不会中断控制处理系统。这些传感器的主要优点如下:

- 能够独立于控制单元自主启用热保护。
- 无需软件。
- 通过迟滞功能保证了跳闸点的温度精度。
- 简单且具有成本效益的过温和/或欠温检测。
- 各种阈值编程选项(电阻器、引脚编程、出厂预设)。
- 有些器件还提供模拟输出。

高度集成的传感器可降低解决方案成本,并在安全应用中实现冗余。

TI 可提供广泛的温度开关和热敏电阻产品系列,例如 [TMP302](#)、TMP390 和 TMP61,如图 4 所示。TMP302 采用小外形晶体管-563 封装 (1.6mm x 1.2mm)。该器件允许通过引脚选择跳闸点并带有迟滞,因而具有低功耗(最大 15 $\mu$ A)且简单易用。TMP302 在 -40°C 至 125°C 的温度范围内无需任何校准即可实现  $\pm 2^\circ\text{C}$  的跳闸点精度。

### 设计技巧

TMP302 可以测量器件引线的温度。仔细考虑 PCB 布局对于精确测量环境温度或电路板温度至关重要。与任何物理板设计一样,环境因素会严重影响系统性能。为避免泄漏和腐蚀,系统必须保持绝缘和干燥。如果系统在可能发生冷凝的低温下运行,则尤其如此。印刷电路涂层有助于确保水汽不会腐蚀传感器或其连接。

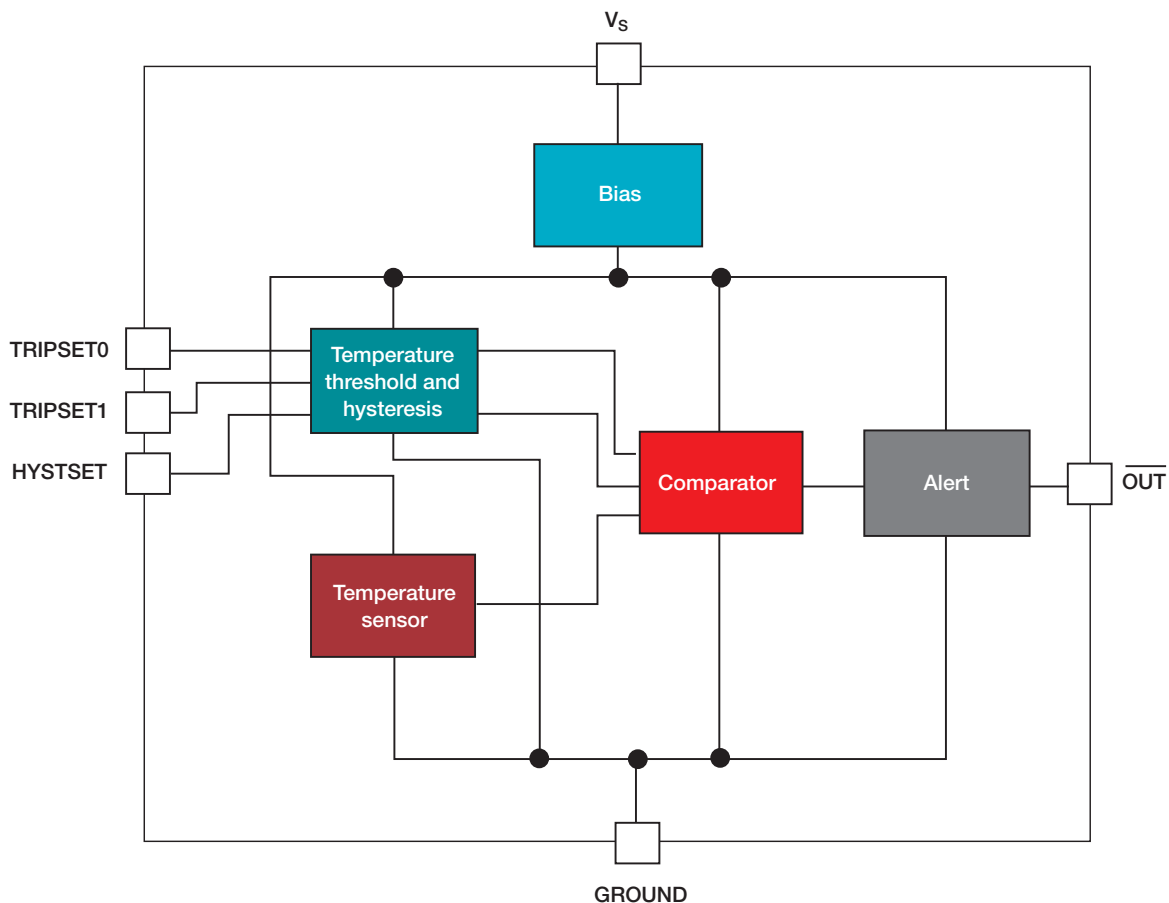


图 4. 引脚可编程 IC 温度开关框图。

### 2.2.8 高精度电机驱动控制如何推动工业发展

想象汽车制造厂中的一个机器人。它拾起一个发动机缸体,将其移到汽车底盘上,精确地放置缸体,释放它,然后返回到其初始位置,以重复该过程。该机器人可以举起的重量远大于人类,能够更加持续稳定地将物品移动到特定的位置,并且能够不停地重复同样的操作 - 如有必要,可以一天 24 小时工作。

此类机器人已成为汽车制造和许多其他行业的支柱,其使用在持续增长。但如果没有精确的电机驱动控制,机器人就无法运行。在多轴机器人运行中的每个点,它必须在三个维度上使用不同大小的力才能移动发动机。机器人中的电机能够在精确的点提供可变速度和扭矩(旋转力),机器人的控制器使用它们沿着不同的轴协调运动,从而实现精确的定位。在机器人释放汽车发动机之后,电机减小扭矩,同时将机械臂返回到其初始位置。

正如电机驱动控制能够促进机器人和其他领域发展一样,电机控制本身依赖于电子技术的发展,该技术能够在实时运行期间实现精确的控制。高端电源、智能电机驱动器、高性能控制信号处理和精确感应反馈一起提供复杂机器瞬间所需的精确速度和扭矩。这样就可以实现更出色的功能、更高的工作效率以及设备和人员更高的安全性。

TI 提供了支持高级电机控制系统开发的一系列集成解决方案。TI 为设计工程师提供包括软件和工具在内的集成电路 (IC) 产品,从而使他们能够开发各个行业需要的且精度要求不断提高的电机驱动控制。凭借与领先电机制造商的多年接触, TI 可帮助工程师简化电机控制系统设计,同时提高其产品的性能。

### 电机控制的优点

电子控制的电机驱动所实现的精度可以提供更低的成本、更高的工作效率和全新的制造能力。驱动控制可确保转子相对于分流器保持稳定的位置,以便电机输出更可预测并且电力使用更高效。当电机上的负载发生变化时,电子控制可即时修改电压输入和提供的扭矩,从而使机器的输出力和功耗与应用更匹配。

电子输入控制还使更改电机本身内部的驱动速度成为可能,而无需依赖昂贵的齿轮、皮带和皮带轮来输出不同的速度。控制使步进电机能够以机器人运动控制所需的微小增量或微小移动电机位置。出于以上原因,高效的运行使应用能够使用针对作业进行更佳调节的受控电机,从而消除许多原本需要的开销。

运行效率与更高的工作效率紧密相连。例如,装配线上的传送带通常与在传送带上装载零件、对零件进行操作或从传送带上接收零件以执行后续步骤的其他系统协同工作。传送带通常以稳定不变的速度向前运行,但操作有时可能需要改变速度、停止或短暂调转方向。这些移动与传送带上零件数量和重量的持续变化一起需要受控的电机驱动,从而能够自动调节输出。可能还需要电机之间的协调,因为工厂中的多条传送带通常会进行同步,从而使零件以最佳速度移动。使传送带在变化的条件下始终以可预测的方式移动的受控电机不仅对整个工厂的工作效率具有积极的影响,而且在现代制造环境中发挥着至关重要的作用。

精确受控的电机还可以实现全新的制造能力。机器人可提供最显著的示例,其中电子控制的电机提供精密的移动控制,该控制通常与人类无法达到的强度和速度结合在一起。早期的移动发动机缸体的机器人示例说明了强度,而其他示例强调移动的精度或速度。例如,取放机器人重复执行具有微米级容差的微动控制,并且其速度远快于人类。

通过将人类从高速、重复性、有时危险的任务中解放出来,电子控制的电机使工作环境更加安全。随着机器人被设计为与人类配合安全地工作,现在正随着该趋势进行全新的开发。尽管安全问题通常与系统运行和员工过程相关,但它们还包括内部控制电子产品,这些电子产品必须为设备和工人提供保护,使其不因放电而损坏/受伤。在工业机器以及运行它们的电机设计中,安全性始终是一个重要元素。

### 设计挑战 精确电机控制的

许多类型的电机都用于特定的任务,但大多数工业电机依靠交流电源提供的三相电运行。图 1 显示了用于此类系统的典型控制电子产品的方框图。交流电源输入被整流为直流电。脉

宽调制 (PWM) 开关三相逆变器可生成三个高频脉冲电压波形,它以独立相将这些波形输出到电机的三相绕组中。在这三个功率信号中,电机负载的变化会影响感应、数字化并发送到数字处理器(如微控制器 [MCU]、微处理器 [MPU] 处理器或现场可编程门阵列 [FPGA]) 的电流反馈。数字处理器中的高速数字信号处理算法实时决定变化的条件是否使调节所提供的功率变得有必要。处理器向三相逆变器发送具有 PWM 的控制输出,以选通电源开关并调节到绕组的功率输出,从而使电机提供更大或更小的扭矩或速度。可以将其他感应数据馈送到控制器中,以跟踪系统输入电压和温度变化。

所有这些组件都需要具有高水平的性能才能实现精确的电机控制。用于为控制系统供电的开关模式电源 (SMPS) 必须具有以稳定的高分辨率控制的超高速开关功能。由于涉及到高电压和高频率并且需要大量的无源组件,从而会引入难以管理的相互起作用的阻抗,因此电源设计要求非常严格。幸运的是,由于采用了新的高频材料和集成式 SMPS 模块,设计用于控制系统的高性能电源变得容易得多。

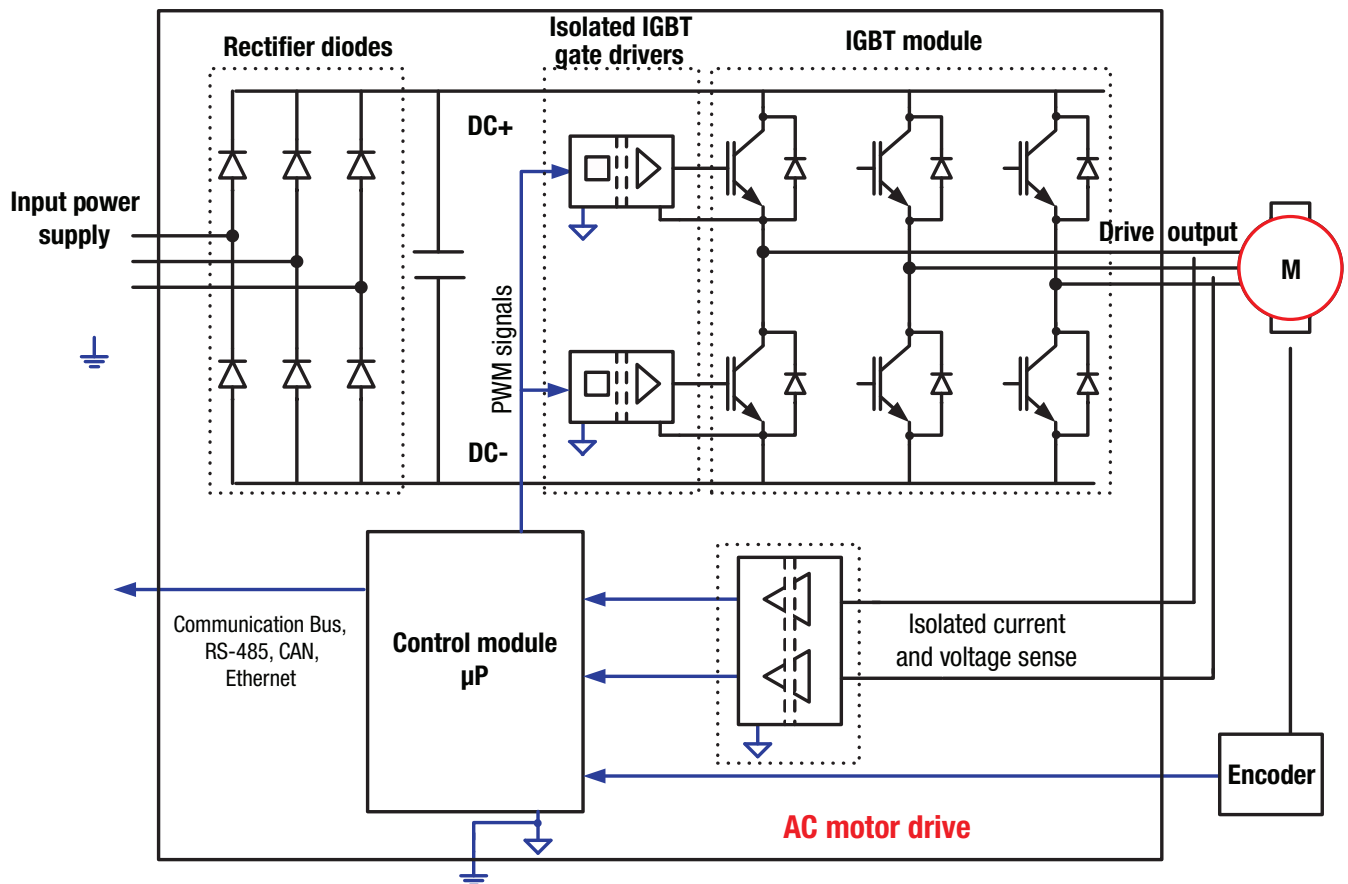


图 1.三相交流感应电机控制。

精确的电机控制还需要进行实时的极高速计算,具有数字信号处理器 (DSP) 功能的 MCU 可以最佳地提供该计算。DSP 还能够执行数字滤波和其他功能,以帮助保护系统免受功率瞬态和其他信号缺陷的影响,同时减少对执行这些功能的模拟组件的需求。

尽管专用逻辑和通用 MCU 可用于低成本应用,在这些应用中采用基本控制就足够了,但机器人和其他高级制造设备中的工业电机需要即时响应和精度以及数字信号控制 MCU 提供的编程灵活性和高级算法。

电机控制系统面临的最大挑战之一在于设计高分辨率的电流和电压检测反馈。设计可以测量仅来自一个分流器的电流反馈,但更彻底的(如果计算更加密集)方法可以测量来自全部三个分流器的反馈。为了避免可能发生模拟信号丢失或干扰,设计人员应该在尽可能靠近传感器的位置越来越多地对反馈信号进行数字化。不过,数字反馈信号可能具有潜在的计时问题,尤其是在时钟速度增大和采样率上升时,这些情况会导致计时窗口变窄。用于时钟和数据信号的不同布线长度可能会使该问题加剧,这样一来,如果在运行期间组件变热时发生信号漂移,则可能导致数据错误。使用高级信号调制器的良好设计实践可最大程度地减轻这些问题;修改变量以保持温度增益的算法也可以进行补偿。

应用要求越精确,电机就必须越仔细地处理温度、电压输入、计时和其他因素的变化。例如,当系统在高温下工作时,在三维空间中沿直线移动物体的机械臂可以改变其轨迹,除非控制设计通过温度感应和算法调整对这些变化进行了补偿。这些相同类型的动态调整对于实现精密机器人取放移动而言可

能是必要的,以进行稳定的微米级测量,而不是随着温度升高而漂移至精度更低且容差为毫米级的移动。由于制造环境在温度、灰尘、振动和其他应力方面通常要求非常严苛,因此仔细设计电机控制电子产品以在各种条件下稳定地实现精确运行就变得非常重要。

### 电机驱动控制的使能技术

TI 提供必要的支持技术以用于设计可在当今集成式制造环境中高效运行的精确电机控制和可靠驱动器电子产品。该公司的解决方案包括隔离式和非隔离式开关栅极驱动器、反馈信号转换和用于实时控制的高速处理以及可编程时钟发生器和直流/直流电源等辅助功能。对于高级 SMPS 和三相逆变器设计, TI 可提供高频氮化镓 (GaN) 栅极驱动器和包含 GaN 开关和栅极驱动器的模块。对于较低电压三相逆变器, TI 还提供高性能智能栅极驱动器、具有内置 FET 的驱动器和具有集成控制功能的驱动器,它们可实现简化但精确的控制和极短的开发时间。产品包含满足工业规范的增强型隔离等安全特性,并经过测试,符合在恶劣工业环境中使用的标准。

在 TI 针对电机控制推出的新近创新中,最重要的当属 [AMC1306](#) 隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器,该器件可将来自电流和其他传感器的信号进行数字化,并输出组合的数据和时钟信号,从而最大限度提高计时效率。AMC1306 整合了 TI 的集成式电容隔离技术,从而以最小的尺寸实现增强型隔离。传感器输出电平变化的  $\Delta$ - $\Sigma$  模数转换后跟到数据流中的时钟频率曼彻斯特编码,如图 2 所示(下一页)。

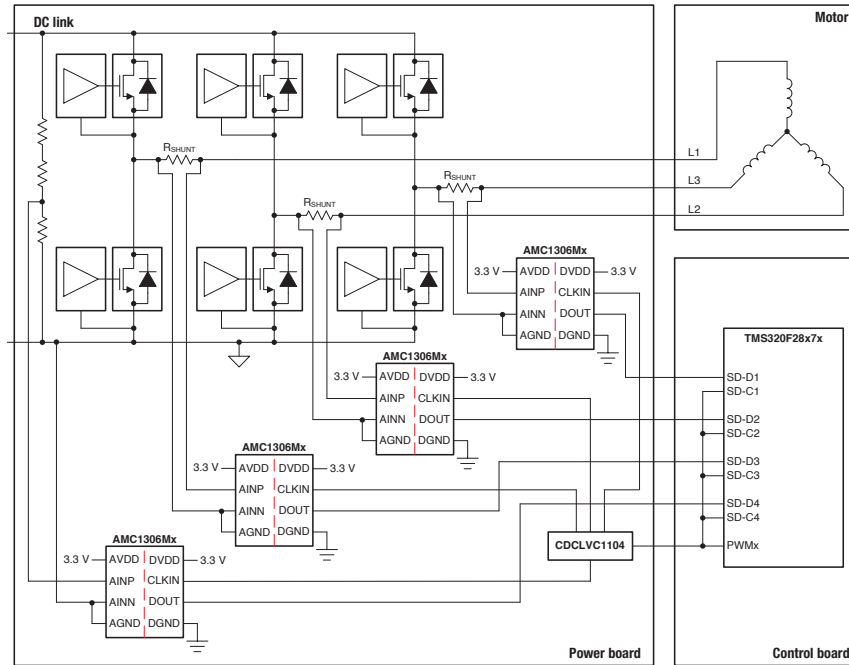


图 2. 具有小型  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器的增强型隔离式相位电流感应参考设计。

这样就可以实现高度稳定可靠的信号,可极大地减少在工作温度变化时可能发生的设置时间和保持时间问题,从而简化三相电机控制系统的设计和布线。

### 时钟嵌入在数据流中的曼彻斯特编码

为了帮助实现 AMC1306 调制器, TI 创建了具有小型  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器的**增强型隔离式相位电流感应参考设计**。图 2 显示了该参考设计的功能,包括用于电流、温度和电压感应信号的 AMC1306。(该器件用于在进入电机分流器的全部三个功率信号上进行电流感应,但为了减少细节,图 2 仅显示了一个信号。)该参考设计电路中的红色虚线表示它进行了有效隔离,以实现安全性。AMC1306 三角形内的省略号以及 UCC5320 和 UCC23513 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 开关驱动器(这些开关驱动器也采用了 TI 的集成式电容隔离技术)内的红色虚线表示具体的增强型隔离点。

图 2 显示了使用 [TMS320F28379D](#) Delfino™ 32 位浮点 MCU (属于 TI 的 C2000™ MCU 系列,

专为高性能计算和轻松编程而设计)及用于控制系统的外集的控制处理。支持各种电机类型的 C2000 DesignDRIVE 软件平台可帮助加快算法开发和系统实现。InstaSPIN™ 电机控制解决方案可提供用于评估、快速学习和快速开发的算法、工具和参考设计。TI 的 DSP 和模拟专业知识融合在综合解决方案中,这些解决方案可以在开发者设计高级电机驱动控制时为他们节省时间。

### 用于集成制造的精密电机

更精确的控制、更出色的机器人间通信、更广泛的感应输入以及机器人和人工智能中的新功能正推动着各个行业的不断发展。这些进展正在带来更高水平的集成自动化和数据交换,称之为第四次工业革命或[工业 4.0](#)。

精确受控的电机为工业 4.0 作出了重要的贡献,因为它们几乎驱动工业机器的所有运动。TI 的先进技术在实现高分辨率电机控制方面发挥着重要的作用,它将继续帮助制造商将电机和运行控制提升到更高的水平。



### 2.2.9 在整个温度范围内发挥功率级的最大效用

在设计用于电机控制的功率级时,通过特别进行效率方面的考虑,可以降低系统总成本。这包括优化场效应晶体管、开关节点和控制算法。在设计过程中,需要保护系统免受过热问题的影响。如果系统达到一定温度水平,则印刷电路板 (PCB) 上的组件将超出其规格范围,因此可能会损坏组件并导致驱动系统发生故障。

温度传感器可以监测并保护功率级组件,使驱动系统保持在安全工作区域 (SOA) 内。SOA 是为某个系统定义的工作温度范围,表示该系统在特定视在负载或均方根 (RMS) 电流下处于驱动器可以支持而无需额外冷却功能的阶段中。工业设备的温度范围通常为 -40°C 至 85°C 的环境温度。

图 1 显示了通过[适用于伺服驱动器且具有智能栅极驱动器的 48V/500W 三相逆变器参考设计](#)生成的 SOA 曲线。该曲线是根据热像仪测试和  $10A_{RMS}$  效率测量结果得出的。在假定零温度误差的情况下,可将该曲线用作负温度系数 (NTC) 热敏电阻和 TI TMP235A2 传感器的参考。SOA 的差异是传感器温度误差的结果,表明需要安全裕度以确保在驱动器的 SOA 中运行。

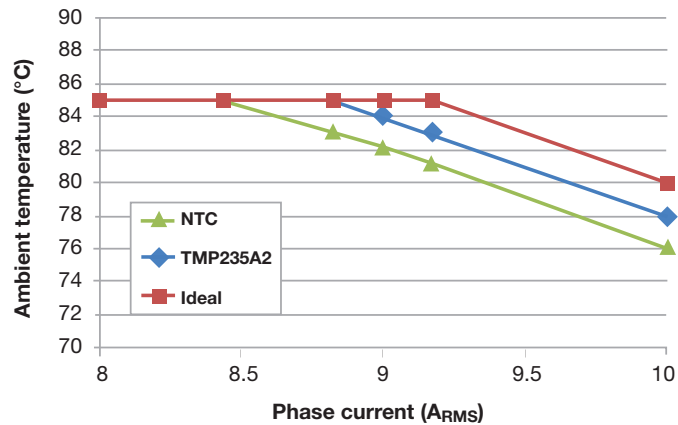


图 1. 传感器温度误差补偿引起的 SOA 差异.

### SOA 的温度误差降低如何影响系统性能?

图 1 显示了温度误差对于环境温度下 RMS 电流的影响,其中假设 NTC 的误差为 3.9°C 且 TMP235A2 的误差为 2.0°C。借助于最大相电流与环境温度关系的 SOA 曲线,可以确定在需要冷却之前可能的最大相电流。在给定特定的温度传感器误差的情况下,可以使用此最大相电流来计算功率级的功率降级。

图 2 是基于三相逆变器参考设计中的计算结果得出的。

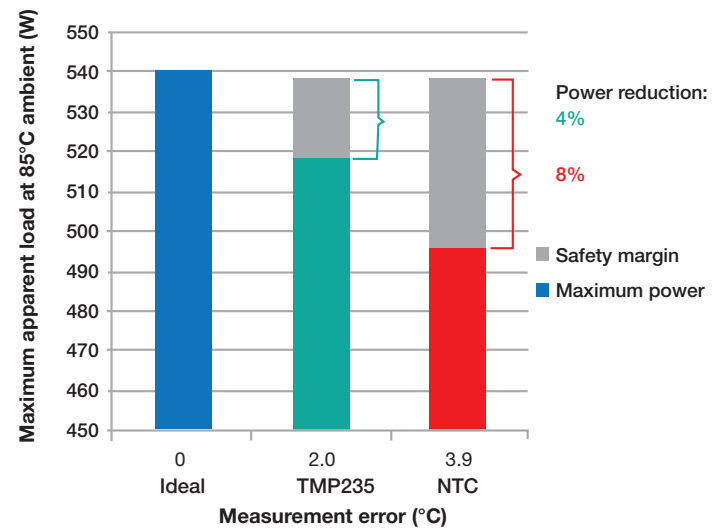


图 2. 使用不同温度传感器在 85°C 时可用的视在负载.

可以看到,功率级可以支持 539W (如果可以正确无误测量温度)。现在,由于传感器的温度误差,需要添加安全裕度。此安全裕度意味着需要将功率级降低伺服驱动器功率级模块系统潜在功耗用量的 4% 或 8%。如果功率级需要支持 500W (显然可以实现,如图 1 所示),但您选择使用 NTC,则需要为系统增加额外的冷却功能以支持系统的整个温度范围,或者重新设计系统以提高效率。

为确保仅在建议的温度下使用功率级,温度传感器将监测温度,并在过热情况下关闭功率级。由于温度安全裕度,温度传感器的精度会影响功率级的最大温度极限。下面我们将讨论如何生成正确的配置以充分利用功率级,以及设计时应牢记的一些注意事项。

上文中,我们确定了温度传感器误差会引入安全裕度,从而影响功率级的安全工作区域。除了传感器误差外,在图 1 所示的比较中未考虑的另一个误差是模数转换器 (ADC) 误差,因为 TMP235A2 和负温度系数热敏电阻 (NTC) 都在传递模拟信号。ADC 误差将对两个信号产生同等影响,但是在较高温度下,NTC 将具有非常明显的非线性特征,这会增加获得精确测量结果的难度。像 TMP235 这样的硅温度传感器可在整个温度范围内保持线性,因此更容易补偿误差。

TMP117 之类的数字温度传感器可以消除 ADC 误差,并且获得的视在负载明显接近于使用热像仪获得的“理想”曲线。

当系统在 85°C 的环境温度下运行时,由于 IC 的自发热作用,PCB 和 IC 的实际工作温度会更高。典型的工业级 IC 具有 125°C 或更高的工作温度。

当环境温度为 85°C 时,IC 的自发热只能将 IC 的温度最多升高 40°C。如果 IC 升到更高温度,IC 将超出工作温度范围。有关自发热的更多详细信息,请参阅:

设计指南:[适用于伺服驱动器且采用智能栅极驱动器的 48V、500W 三相逆变器参考设计。](#)

为避免工作温度超出建议的温度范围,需要确保系统温度不超过 125°C。在智能栅极驱动器参考设计中,热像仪可测量温度。在实际系统中,由热敏电阻或 IC 传感器测量该温度。在图 1 所示的比较中,由于错误地假设热像仪没有误差而且是理想化的,因此在计算中引入了一个小误差。电阻温度检测器探针将提供更准确的基线感应方法。

各种传感器类型的各种方法都会增加测量误差,因此需要从理想测量中进行补偿。误差越小,三相逆变器在由于过热误差而必须关闭系统之前可以提供的功率就越大。换句话说,温度传感器将限制整个系统的视在负载能力,甚至无需查看栅极驱动器、FET 或其他任何影响功率级效率的因素。这就是为什么温度传感器精度如此重要的原因。

这对您的设计而言意味着什么?让我们以智能栅极驱动器参考设计为例,比较 NTC 热敏电阻与 TMP235A2 IC 温度传感器的温度误差。首先,您如何量化温度误差?

在 TMP235A2 的数据表中可以看到,其在整个温度范围内的温度误差为  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。数据表中有一处小小的脚注引用了用于校正器件温度漂移的查找表。

对于 NTC,计算误差要花费更多时间。数学方程式可生成一个模型以用于计算误差(摄氏度)。这些方程式通常可以在 NTC 数据表或 NTC 应用手册中找到。使用这些方程式可以生成代表 NTC 模型的曲线,如 TMP6131 参数仿真器中所示。

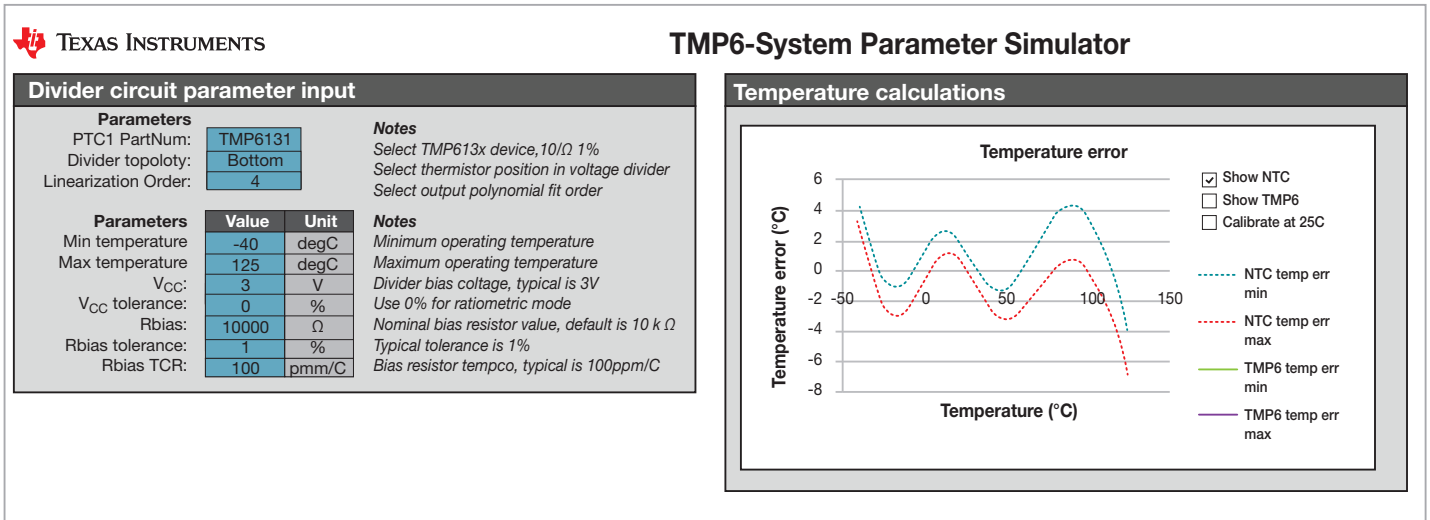


图 3.使用 TMP6131 系统参数仿真器计算 NTC 的温度误差。

与查找表相反, TMP6131 系统参数仿真器可以仿真 NTC 模型并估计应用多项式拟合时的精度。图 3 显示了用于仿真的设置以及结果。

图 2 中的蓝色曲线定义了温度误差。使用的区间为  $-40^{\circ}\text{C}$  至  $+125^{\circ}\text{C}$ 。可以看到, 最大负误差和正误差分别为  $-3.6^{\circ}\text{C}$  和  $+4.3^{\circ}\text{C}$ 。为了便于计算, 我们将此温度误差范围标准化为 NTC 的  $\pm 3.9^{\circ}\text{C}$ 。由于 NTC 在整个温度范围内的非线性特征, 因此应在系统的额定温度范围内进行补偿。

有两种在软件中性线性化热敏电阻的基本方法: 多项式拟合和查找表。这些方法将使 NTC、PTC 和 TMP235A2 的测量值更接近理想的测量值和实际温度。在仿真工具中, 多项式拟合将减少线性化误差。使用更高的多项式拟合阶数可以提高 NTC 的精度, 但也会增加处理器计算温度所花费的时间。这种额外的计算时间会导致额外的功耗, 因此也会影响系统效率。查找表需要处理器内存。

仿真中不考虑校准误差, 但会对两个传感器的影响类似。

本章节将 NTC 精度误差定义为  $\pm 3.9^{\circ}\text{C}$ , 将 TMP235A2 误差定义为  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , 讨论了这些误差如何转化为功率级总视在功率的降额, 并解释了温度传感器误差对功率级系统性能的影响。

### 2.2.10 非分立式解决方案可为: 如何简化 48V 至 60V<sub>DC</sub> 馈电的三相逆变器设计

假设您正在设计伺服、计算机数控 (CNC) 或机器人应用的下一个功率级。在本实例中, 功率级是低压直流馈电三相逆变器, 其电压范围为  $12\text{V}_{\text{DC}}$  至  $60\text{V}_{\text{DC}}$ , 额定功率小于 1kW。该额定电压涵盖了通常在电池供电型电机系统或低压直流馈电型电机系统中用于电池电压的范围。最重要的是, 您的老板说: “顺便说一句, 你的设计不能对功率级进行额外冷却。设计的尺寸必须尽可能小, 以便适应目标应用的需求, 当然, 还必须保证低成本。”

#### 没问题, 对吧?

好了, 在这种情况下, 有一种可行的解决方案使设计的逆变器可以满足这位虚构 (但要求严苛的) 老板的要求。

但是, 在开始定义指定的功率级、电流感应和保护电路之前, 必须查看一个适用于伺服驱动器且具有智能栅极驱动器的 48V/500W 三相逆变器参考设计, 此设计是非常真实且方便易用的参考设计。

这个适用于伺服驱动器且具有智能栅极驱动器的 48V/500W 三相逆变器参考设计使用高度集成的电路实现了小尺寸;集成电路中包括三个半桥栅极驱动器,它们具有 100% 占空比以及 50mA 至 2A 的可选拉电流/灌电流。 $V_{DS}$  感应可实现过流保护,防止损坏功率级和电机。 $V_{GS}$  握手特征可以保护功率级免遭脉宽调制配置错误所引起的击穿。

典型低压直流馈电伺服驱动器功率级的分区可类似于图 1 (其基于直流馈电伺服驱动器功率级模块)。红色框表示模块。

在图 1 中, 低压直流馈电伺服驱动器涵盖的模块对系统性能有很大影响, 并会影响设计注意事项。

可以向半桥栅极驱动器添加故障检测功能来实现  $V_{DS}$  感应和软关断, 由此构建一个稳健可靠的系统。这些集成特性使栅极驱动器系统能够检测到典型的过流或短路事件, 而无需添加额外的电流感应或硬件电路来实现死区时间插入。因此, MCU 不能提供错误的驱动信号, 无法通过击穿短路损坏功率级或电机。

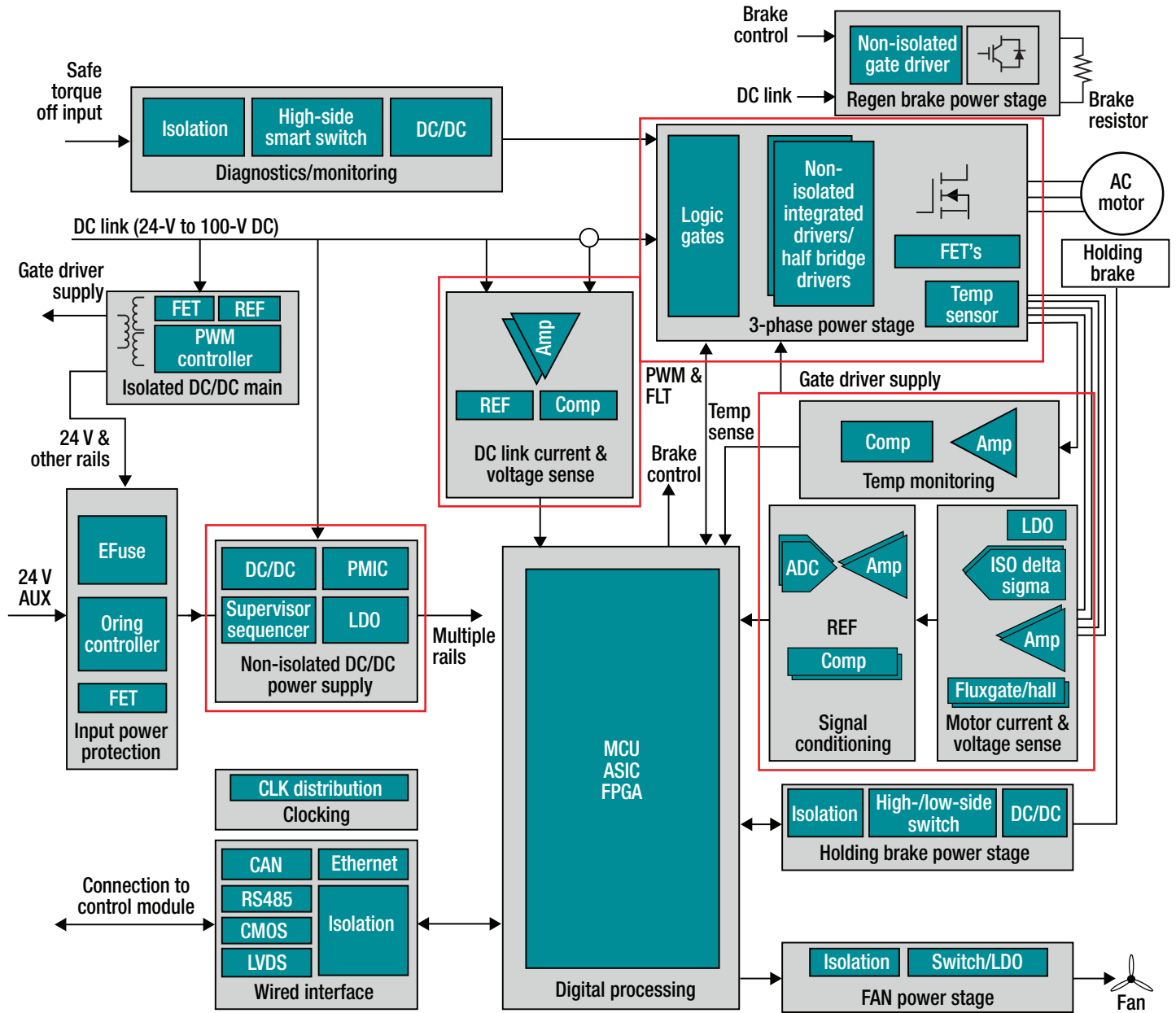


图 1. 直流馈电伺服功率级。

为了构建稳健可靠的系统, 需要考虑的一个因素是优化效率以便降低散热器和辐射发射 (电磁干扰) 的成本而不是提高开关速度。使用 100V 单桥或半桥场效应晶体管 (FET) 栅极驱动器来实现这些特性需要额外的有源和无源组件, 这会增加物料清单 (BOM) 成本和 PCB 尺寸, 同时会降低修改栅极驱动器强度等参数的灵活性。在分析系统效率时, 电流感应电路、具有低  $R_{DS(on)}$  的 FET 以及用于提高开关速度的低栅极电荷会影响系统效率表现。系统设计人员通常希望实现 99% 的功率级效率。

为了以最小的损耗实现连续的相电流感应, 该参考设计使用了  $1m\Omega$  直列式分流器。电阻值是精度与效率之间的折衷因素。

非隔离型直列式放大器的主要挑战是系统使用的宽共模电压 (0V 至 80V), 因为该参考设计中的分流器满量程电压为  $\pm 30mV$  (设计目标是  $\pm 30A_{RMS}$ )。与 48V 的共模电压相比, 这是一个很小的信号。因此, 需要一个具有大共模电压范围以及极高直流和交流共模抑制比的电流感应放大器。由于分流器阻抗较低,

具有附加集成式固定增益和零失调电压的放大器可进一步帮助降低系统成本, 同时确保高精度的电流测量。

一个  $100V_{DC}$  降压稳压器从直流输入产生中间轨, 为栅极驱动器和负载点供电。功率级需要高效运行以减少自发热, 从而满足行业的工作环境温度要求 (通常为  $85^{\circ}C$ )。鉴于此要求, 系统中使用的 IC 需要支持甚至更高的温度, 因为电子器件始终会出现一定的温度增加情况 (自加热)。

该伺服驱动器参考设计已使用永磁同步电机在 0W 至 500W 的输出功率下进行了测试。图 2 显示电机负载由握力计进行控制。

### 结论

该三相逆变器参考设计展示了如何设计具有低 BOM 数量、同相电流感应、故障诊断功能和高效率的紧凑型硬件保护功率级。该参考设计使用具有降压调节器的 TI DRV8530 100V 三相智能栅极驱动器以及具有增强型脉宽调制抑制功能的 INA240 80V 低侧/高侧双向零漂移电流感应放大器 (可以优化低压直流馈电功率级)。

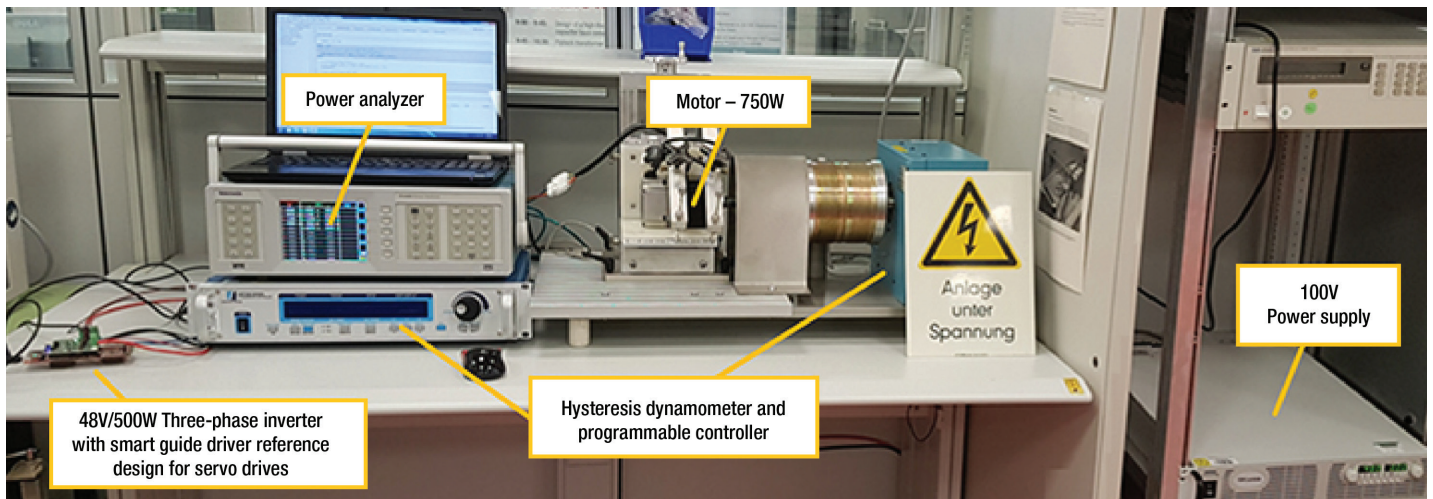


图 2. 电机驱动器功率级的测试设置.

### 2.2.11 选择用于三相电机驱动器的基于分流器的电流感应放大器

精确的相电流采样会对矢量控制的工业电机驱动器三相逆变器的性能产生重大影响。可以通过霍尔效应传感器、磁通门传感器、基于变压器的磁传感器或分流电阻器来测量电机相电流。磁传感器可提供天然的隔离和宽电流范围，而分流器解决方案则是具有成本效益的高线性、高带宽感应选项。相电流可能会高达 100A，三相逆变器的工作电压

介于 110 到 690VAC 或 12 到 60VDC 之间。为了获得电机相电流，通常将分流器放在连接到接地端的直流链路回路处、底部开关与接地端之间或者与电机的三相电源内联（参阅图 1）。

每个分流器位置都各自利弊且具体要求不一，因此放大器可以将小分流电压转换为模拟信号或数字信号以供微控制器 (MCU) 处理。图 2 显示了每个分流器位置在一个脉宽调制 (PWM) 周期中的理想分流电流与相电流。

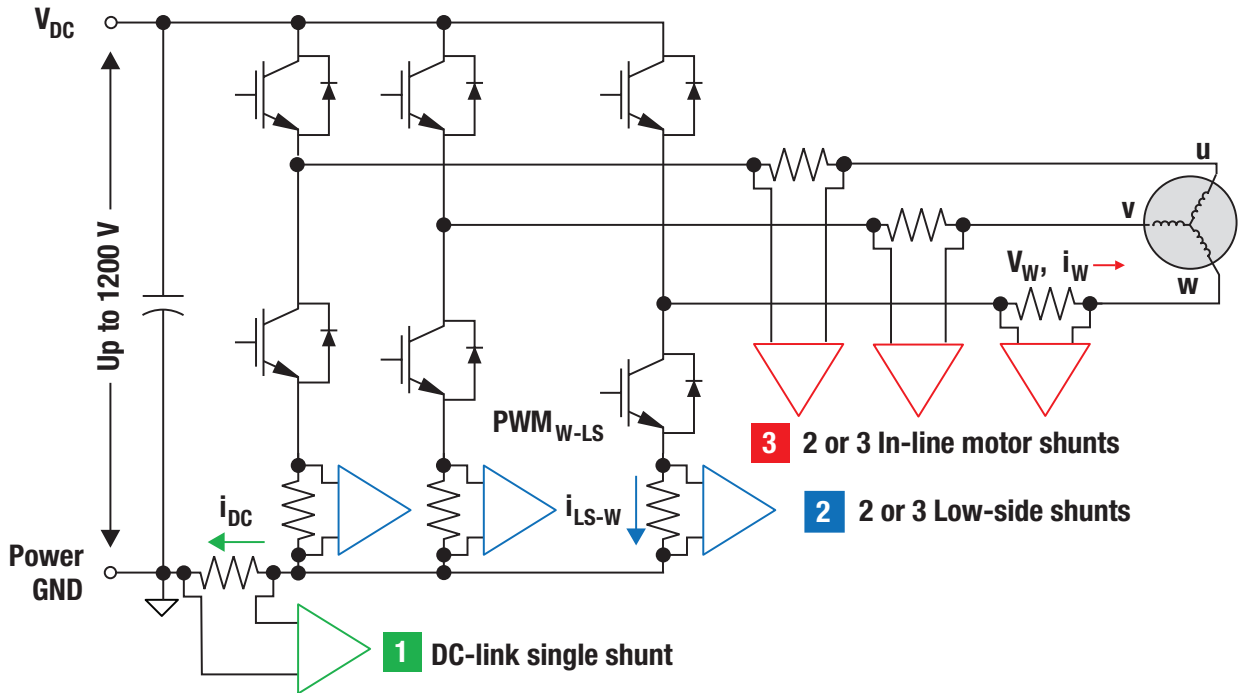


图 1. 三相逆变器中的分流器选项。

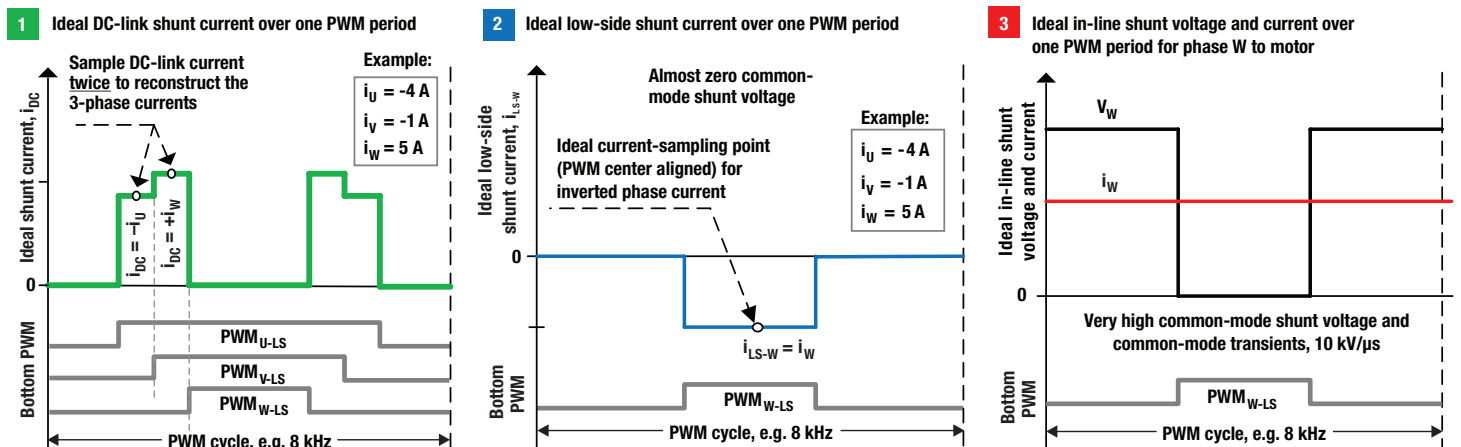


图 2. 取决于分流器位置的分流器电流、相电流和共模。

从系统的角度来看,电机直列式分流器可提供重要的性能优势,而从放大器的角度来看,低侧分流器是成本更低的解决方案,如表 1 所示。

在基于分流器的系统中,分流电阻和封装要同时兼顾精度、热性能、PCB 尺寸和成本。在电机驱动器中,分流电阻确保在最大相电流时的压降通常介于  $\pm 25\text{mV}$  到  $\pm 250\text{mV}$  之间。随后的放大器将小双极分流电压转换为典型的单极输出电压,并使偏置电流与 ADC 的 3V 到 5V 输入范围匹配。增益设置通常介于 10 到 100V 之间。

对于这三种分流器位置,随温度变化的分流电阻容差和漂移以及放大器的增益、输入失调电压和相关漂移都会对精度产生类似的影响。

考虑一个最大电压为  $\pm 50\text{mV}$  (100mV 满量程输入范围)的分流器,并假设每个参数在工业温度范围内都不会造成超过  $\pm 0.1\%$  的绝对误差。放大器输入失调电压不能  $\leq 100\mu\text{V}$  且失调电压漂移必须  $\leq 1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。放大器的增益设置电阻器以及分流器需要具有 0.1% 的容差以及  $\leq 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$  的漂移。当然,并非所有驱动器都要求如此高的精度和参数尺度。与增益误差不同,失调电压误差通常更为关键,因为它会造成与电流大小无关的绝对误差,特别是在低电流条件下会影响逆变器的性能。

### 位置 1:直流链路和接地端之间的单一分流器

单一直流链路分流器在低成本、低功耗、矢量控制的风扇和泵中更为常用,在工业交流和伺服驱动器中用的较少。每个 PWM 周期中,必须在两种不同的 PWM 开关状态下测量两次直流链路电流,以重建三相电流。要在如此小的电压条件下且在短测量周期内执行测量,需要使用类似 TI OPA835 的放大器。这款放大器可提供至少高达 20MHz 的大信号单位增益带宽和可以在  $<1\mu\text{s}$  内保持稳定的高压摆率 ( $>10\text{V}/\mu\text{s}$ )。这种方法不适用于零相电压,因为除非使用复杂的 PWM 补偿算法延长,否则所有三个 PWM 占空比都是 50%。

### 位置 2:低侧分流器

低侧分流器非常适合功率高达约 5kW 的紧凑型交流线路馈电逆变器,以及采用连接到电源接地端的非隔离式控制 MCU 的 12 到 60V<sub>DC</sub> 馈电电机驱动器。这些分流器可以放在三相逆变器的两个或三个引脚上。

和随后的 ADC 一样,放大器应采用单电源供电运行。由于分流器压降以接地端为基准,因此接近于接地负轨的输入共模电压至关重要。为了在开关期间从接地反弹去耦,差分到单端配置中的放大器会将小双极分流电压转换为单极电压(通常为 0V 到 3.3V,

	优势	挑战	精度
直列式电机分流器	<ul style="list-style-type: none"> <li>直接、连续的相电流感应。</li> <li>允许在一个 PWM 周期中均摊相电流,以获得更高的精度及/或让电流控制器能够在每个 PWM 中运行两次。</li> <li>检测相间短路和相位与接地之间的短路。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放大器需要使用具有高共模抑制比 (CMRR) 的高共模输入电压。</li> <li>交流线路馈送逆变器通常采用一种隔离方法。</li> </ul>	高
低侧分流	<ul style="list-style-type: none"> <li>可检测击穿。</li> <li>较低的系统成本:由于共模输入电压几乎为零,因此可以使用非隔离式电流感应放大器/运算放大器。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>间接、不连续的逆变相电流感应。只能在低侧开关打开时测量。</li> <li>无法在一个 PWM 周期中均摊和让电流控制器在每个 PWM 中运行两次。</li> <li>无法检测相位与接地之间的短路。</li> </ul>	中
直流链路单分流器	<ul style="list-style-type: none"> <li>可以与矢量控制和梯形控制配合使用。</li> <li>较低的系统成本:由于共模输入电压几乎为零,因此可以使用非隔离式电流感应放大器/运算放大器。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在每个 PWM 周期中,要求执行两次与 PWM 模式同步的测量。</li> <li>要求每个激活的 PWM 模式达到最短持续时间,并采用 PWM 补偿算法以确保达到最短持续时间。</li> <li>需要使用具有高带宽和高压摆率的放大器。</li> </ul>	低

表 1. 用于测量电机相电流的分流器位置的比较。

中偏置为 1.65V)，以驱动 ADC。放大器的关键参数包括：

- 输入共模电压几乎为零的轨至轨输入。
- 轨至轨输出。
- 单电源电压。
- 失调电压和失调电压漂移，此参数可能不那么重要，因为可以在低侧开关关闭时在每个 PWM 周期中测量失调电压。
- 带宽和压摆率，这两个参数会影响最短稳定时间，此时间应小于低侧开关的特定最短开通时间。

当使用三个分流器时，用于实现极短低侧打开时间的权变措施应当只考虑具有最长打开时间的两个相位，并计算出第三个相位。这种方法不适用于双分流器解决方案；但是，放大器必须至少在指定的最短开通时间内保持稳定，通常甚至要在一半的最短开通时间内保持稳定，因为 PWM 通常以对称方式对电流进行采样。

**表 2** 提供了单位带宽增益积为 10MHz 的放大器（例如 TLV9062）的示例稳定时间。TLV9062 满足这些规格要求并在单个 8 引脚封装中提供双放大器，因此，对于使用两个低侧相脚分流方法的系统，其 BOM 成本可降至最低。

为了进一步减少 BOM，设计人员可以取消外部增益设置电阻器和具有内部固定增益设置的放大器，例如 INA181、INA2181（双通道）和 INA4181（四通道）电流感应放大器。

### 位置 3:直列式电机分流器

对于 12 到 60V<sub>DC</sub> 馈送逆变器，非隔离式电流感应放大器以直流接地为基准，这种方法因可降低系统成本而极具吸引力。主要的挑战在于巨大的共模电压，这一电压甚至比满量程的分流电压还高 100 到 1,000 倍。这样就需要使用具有以下特性的放大器：

- 非常高的直流和交流共模抑制比 (CMRR)，可精确测量电流，而不会在瞬变之后产生恢复纹波。直流 CMRR 应至少为 -100dB，输出应在几微秒内保持稳定。**表 3** 概要介绍了 CMRR 的影响。
- 用于在开关期间提供裕度的至少 -1V 到 70V 的宽共模电压范围，且直流链路电压在电机制动期间增大。

和随后的 ADC 或嵌入了 MCU 的 ADC 一样，放大器应采用 3.3V 单电源运行。这样就无需使用钳位二极管来保护 ADC 输入。具有 400kHz 配置增益的放大器带宽可提供用时  $\leq 1\mu\text{s}$  (10% 到 90%) 的过电流采样。采用这种配置时，很难补偿失调电压和增益误差，特别是在工作温度范围内。如前所述，失调电压和失调电压漂移对于逆变器的低电流性能至关重要，可接受的失调电压误差取决于所需的电流测量精度。

运算放大器	增益	带宽	3.3V 时的最小压摆率	稳定到 1% 的建立时间	建立时间至 3%
10MHz	20	500kHz	$\geq 3\text{V}\mu\text{s}$	1.5 $\mu\text{s}$	1.1 $\mu\text{s}$
10MHz	50	200kHz	$\geq 1.2\text{V}\mu\text{s}$	3.7 $\mu\text{s}$	2.7 $\mu\text{s}$

**表 2.** 稳定时间和放大器增益带宽.

参数	值	精度和 $\pm 50\text{mW}$ 的功率	注释
CMRR (直流)	-120dB	0.1%	在 48V 共模时
CMRR (交流)	-90dB	3.3%	在 0V 到 48V 共模瞬态时，快速趋稳需要“PWM 抑制”

**表 3.** CMRR 对精度的影响.



图 3 显示了采用增强 PWM 抑制和 48V 三相 GaN 逆变器的电流采样放大器 (INA240) 的瞬态响应。借助高的直流和交流共模抑制, 相电流可以在大约 2.5 $\mu$ s 内趋稳。假设执行中心对齐的采样, 为了精确测量相应相电流而需要的最短 PWM 开通或关闭时间为 5 $\mu$ s。为了缩短开通/关闭时间, 使用三分流器方法可以从另外两个具有更长开通/关闭时间的相位计算出第三个相电流。

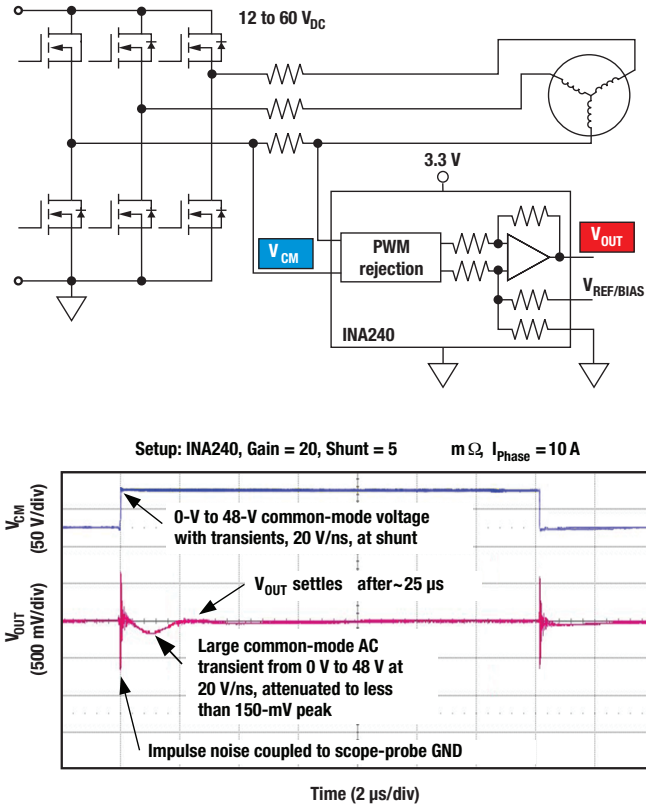


图 3. 在 48V 时的一个 PWM 周期中的直列式电流感应放大器和瞬态响应。

### 隔离式直列式相电流采样

对于具有 300 到 1200VDC 直流链路电压的交流线路馈送逆变器, 隔离式放大器或  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器可通过直列式分流器提供精确的相电流感应。隔离功能可以对表 1 中所示的高共模电压和瞬变进行抑制。由于工业电机驱动器需要满足国际电工委员会 (IEC) 61800-5-1 电气安全要求, 因此需要进行基本绝

缘或增强绝缘。基本或增强隔离式放大器和  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器可用于此目的。

### 隔离式 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器

图 4 (下一页) 显示了使用直列式分流器和隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器执行的隔离相电流测量。这种方法可以测量三相电流或两相电流并相应计算出第三个相电流。浮地分流电压经过低通滤波、放大并馈送到二阶  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器中, 随后与输出隔离。隔离式输出是调制器时钟频率 (通常为 5MHz 到 20MHz) 下的 1 和 0 组成的位流。MCU 中的抽取滤波器必须处理此位流, 以获得精确的高分辨率结果。

从系统的角度来看, 隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器应当提供:

- 一个带有抗混叠滤波器的增益放大器。
  - $\pm 50$ mV 的输入范围与传统的  $\pm 250$ mV 范围相比可以将分流器损耗减少 80%。
  - 非常低的增益、失调电压和相关漂移对于精度至关重要, 因为很难对它们进行补偿。非常低并具有  $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  漂移的  $50\mu\text{V}$  失调电压可以在  $25^\circ\text{C}$  到  $85^\circ\text{C}$  的温度范围内实现小于 0.11% 的误差。
  - 集成式抗混叠滤波器会将噪声衰减到调制器时钟频率的一半以上, 以免噪声再次混叠并影响目标频带内的精度。
  - 共模输入电压应当至少是负满量程输入范围的一半。
- 以 20MHz 时钟频率运行的  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器, 以便能够执行高精度、高线性、低延迟的电流感应。具有曼彻斯特编码位流选项的调制器可以简化从处理器到所有三个调制器的时钟路径。
- 宽范围高侧电源电压和低电流消耗, 最好使用集成式低压降稳压器 (例如 AMC1304), 以便能够使用浮动栅极驱动电源。
- 诊断功能, 可检测高侧功率损耗, 以免产生难以预料的测量结果。
- 基本或增强隔离, 对电磁场具有高抗扰度并具有至少  $10\text{kV}/\mu\text{s}$  的高共模瞬态抗扰度 (CMTI), 可抑制开关节点瞬态。
- 互补金属氧化物半导体或低电压差分信号 (LVDS) 数字接口选项。在高噪声环境中对于长走线, LVDS 可实现更高的共模噪声抗扰度。

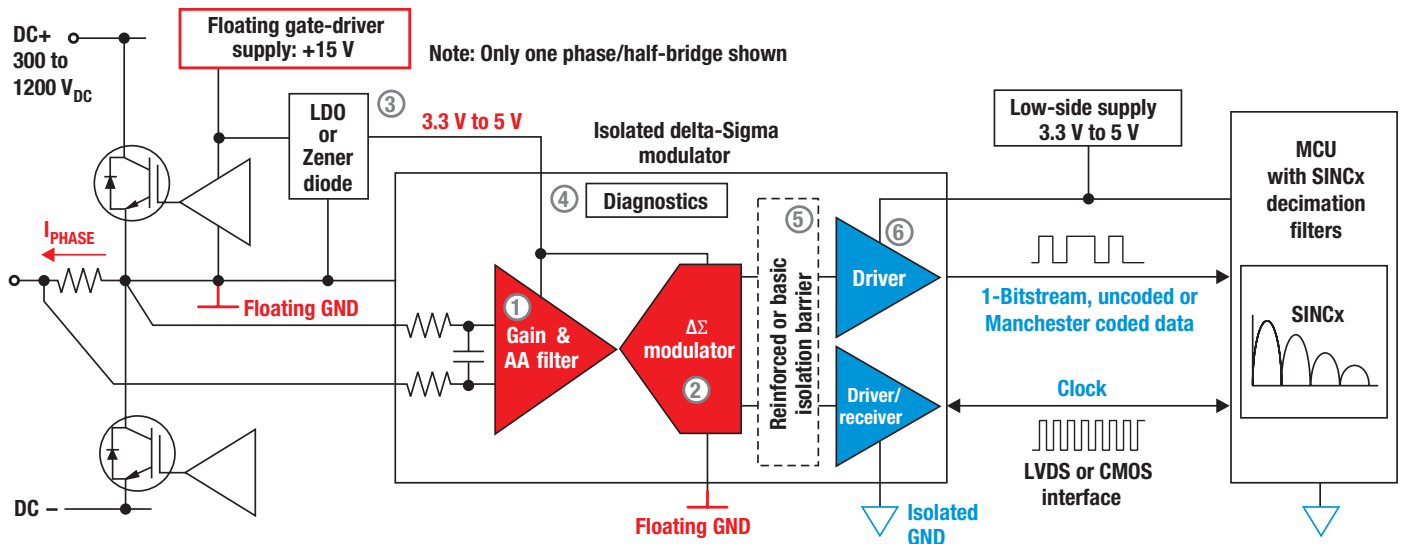


图 4. 采用隔离式 Δ-Σ 调制器且基于直列式分流器的相电流感应。

处理器的抽取低通滤波器 (例如 sinc 滤波器) 通过切断高频噪声来设置输出信号的带宽和分辨率。有效位数 (ENOB) 和建立时间会随着 sinc 滤波器阶数和过采样率的增大而增加; 参阅图 5。数字滤波器的优势是可以在软件中配置分辨率与带宽和稳定时间的关系, 并可以对同一个位流应用两个或更多的

滤波器。这一优势有助于实现高分辨率相电流, 以进行精确控制 (例如使用 sinc<sup>3</sup> 滤波器实现的 12 ENOB 和 64 次过采样) 和非常快的过电流感应 (例如使用 sinc<sup>3</sup> 滤波器实现的 1.2 μs 和 8 次过采样)。

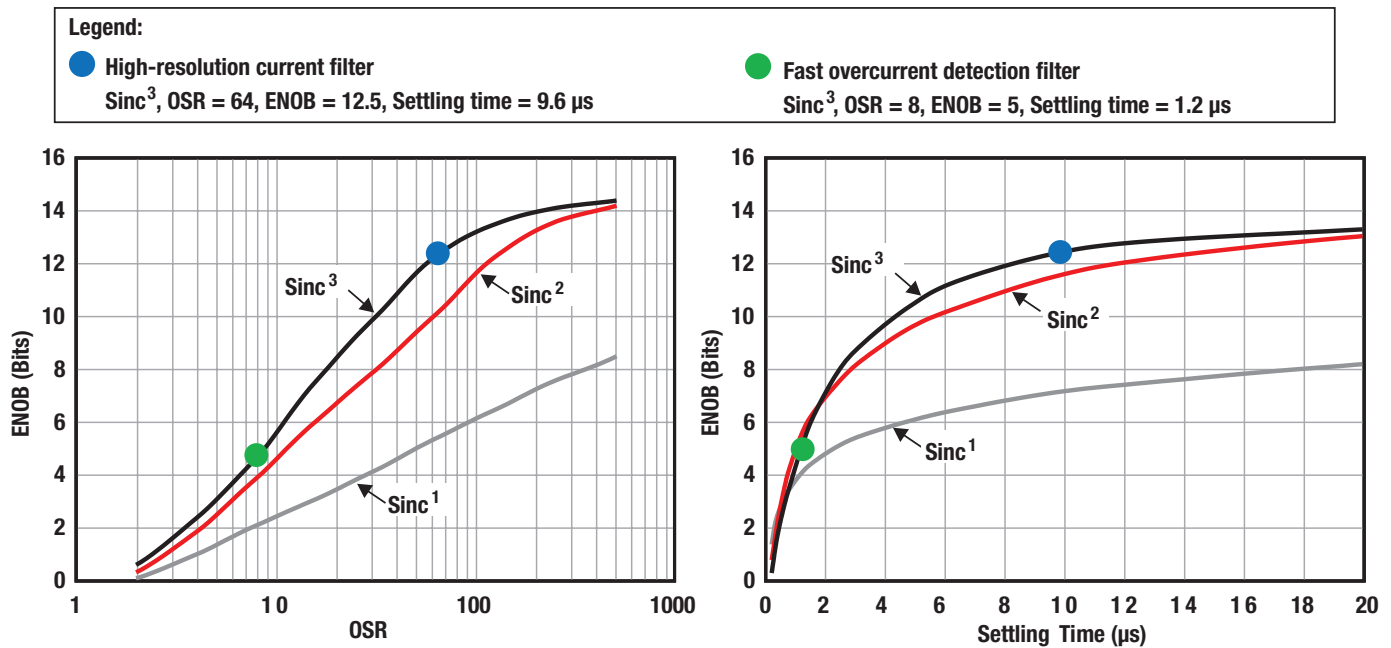


图 5. 20MHz 调制器时钟 (AMC1306) 的 ENOB 和过采样率以及建立时间。

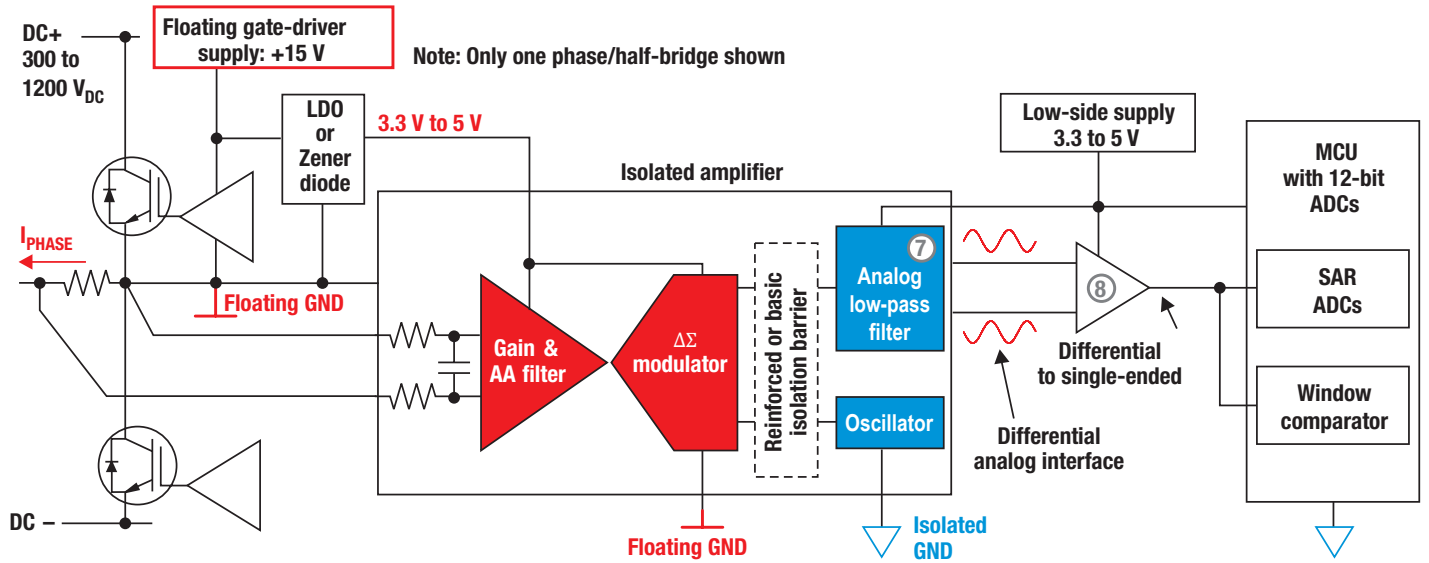


图 6.采用隔离式放大器且基于直列式分流器的相电流感应.

### 隔离式放大器

图 6 显示了使用隔离式放大器的相电流采样。隔离式放大器的非隔离式子系统(显示为红色)与图 4 中的隔离式  $\Delta\Sigma$  调制器相同。主要区别在于包含输出滤波器(以蓝色显示的子系统)。具有固定截止频率的有源低通滤波器可消除位流中的高频率量化噪声,并提供高线性差分模拟输出。前面应该列出的  $\Delta\Sigma$  调制器的特性也适用于隔离式放大器。但模拟带宽和稳定时间由硬件固定,并取决于器件的特定振荡器时钟和隔离式放大器的低通滤波器。

基于隔离式放大器的相电流感应系统具有三个转换级:隔离式放大器、一个额外的差分到单端放大器(通常情况下具有)单端的 12 位逐次逼近寄存器 ADC。短路检测要求每个相

位具有一个额外的窗口比较器。

主要系统优势在于,简单的模拟接口可连接多种嵌入了 ADC 的 MCU。对于单端 ADC,需要另一个不会导致性能下降的运算放大器。为了提高噪声抗扰度,应将运算放大器放在靠近 MCU 的位置,以保持尽可能长的模拟走线差分。从系统性能的角度来看,隔离式  $\Delta\Sigma$  调制器系统非常出色。表 4 提供了比较。

### 结论

TI 为本文中介绍的每种系统配置提供了一个参考设计,并提供了详细的硬件设计指南和系统测试结果。

参数	隔离式放大器	隔离型 $\Delta\Sigma$ 调制器
分辨率/精度	三个转换级:系统分辨率也会受到通常 $\leq 12$ 位的外部 ADC 的影响。	单一模数转换:可实现 16 位分辨率、14 位精度,数字滤波器配置待定。请参阅图 5。
带宽/稳定时间	固定。高性能放大器可提供 300kHz 的带宽和不到 $3\mu s$ 的稳定时间。	灵活。处理器上的数字滤波器待定。请参阅图 5。
短路检测	需要使用额外的模拟硬件(窗口比较器)。	无需使用额外的硬件;在处理器上计算出。
处理器的接口	模拟差分接口:可轻松连接到任何嵌入了 SAR ADC 的 MCU,但需要使用额外的放大器。	CMOS 或 LVDS 接口。需要使用性能更高并具有集成式 $\Delta\Sigma$ 接口或现场可编程门阵列(FPGA)的 MCU/微处理器单元(MPU)。
EMC 抗扰度	中等,因为使用的是模拟差分输出信号	高到非常高,因为使用的是数字信号和 LVDS 接口选项。

表 4.隔离式放大器与隔离式  $\Delta\Sigma$  调制器的比较.

## 2.3.1 机器人系统中与伺服驱动相关的参考设计

<a href="#">适用于伺服驱动器且具有智能栅极驱动器的 48V/500W 三相逆变器参考设计</a>	对于最高可驱动 $60V_{DC}$ 的紧凑型直流馈电驱动器而言, 高效、保护和集成均为重要的设计因素。此参考设计展示了一款三相逆变器, 它具有 $48V_{DC}$ 标称输入电压和 $10A_{RMS}$ 输出电流。
<a href="#">适用于工业驱动器的基本隔离式三相紧凑型功率级参考设计</a>	该用于工业驱动器的三相紧凑型功率级参考设计使用支持基本电容隔离要求的 UCC5350 栅极驱动器, 可通过光耦合器提供更长的使用寿命和更佳的传播延迟匹配, 从而最大程度地减小逆变器死区失真和损耗。
<a href="#">具有小型 <math>\Delta-\Sigma</math> 调制器的增强型隔离式相位电流感应参考设计</a>	此参考设计采用绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 栅极驱动器以及隔离式电流/电压传感器实现了增强型隔离式三相逆变器子系统。AMC1306E25 $\Delta-\Sigma$ 调制器可执行精确的基于分流器的直列式电机相电流感应。
<a href="#">适用于 200-480VAC 驱动器且具有光模拟输入栅极驱动器的三相逆变器参考设计</a>	该参考设计采用隔离式 IGBT 栅极驱动器以及隔离式电流/电压传感器实现了增强型隔离式三相逆变器子系统。

[查找更多有关机器人系统控制器的参考设计。](#)

撰稿人: Eddie Esparza、Jason Reeder、Martin Staebler、Nagarajan Sridhar、Mateo Begue、Mamadou Diallo、Scott Hill、Manny Soltero、Harald Parzuber、Kristen Mogensen 和 Martin Staebler。

## 第3章：机械臂和驱动系统(机械手)

### 3.1.1 如何保护电池的电源管理系统免受热损坏

如今，消费者希望其个人电子产品具有更长的电池寿命、更短的充电时间和更小的外形尺寸。不断增大的充电和放电电流以及不断减小的外形尺寸使得电池组容易受到热损坏。此外，不同的电池技术对充放电温度要求也不同，如表 1 所示。

电池类型	充电温度	放电温度
铅酸	-20°C 至 50°C	-20°C 至 50°C
镍镉, 镍氢	0°C 至 45°C	-20°C 至 65°C
锂离子电池	0°C 至 45°C	-20°C 至 60°C

表 1. 各种电池的常见充放电温度限制。

电池的放电温度范围通常较宽，但充电温度范围会受到限制。如果电池温度介于 10°C 至 40°C 之间，则可以安全地进行快速充电。这些温度限制与电池化学和温度相关的化学反应有关。如果充电速度太快，电池压力会逐渐积累升高，导致泄气，并缩短电池寿命。

如果工作温度过高，则会发生电池降解并导致热失控和爆炸。如果工作温度过低，则会发生不可逆的电池化学反应，并缩短电池寿命。因此，电池温度监测对于电池管理系统至关重要。

#### 热保护解决方案

无论是分立式还是集成式温度传感解决方案都可以保护电池管理系统免受热损坏。如图 1 所示，分立式解决方案包括热敏电阻、比较器和电压基准。这种方法可提供实时热保护，而不会中断控制处理系统。

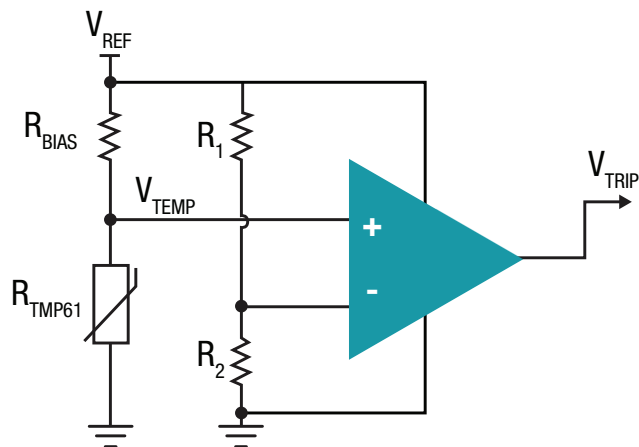


图 1. 用于阈值检测的热敏电阻 + 比较器。

由于电池应用在高温和低温环境下均需提供保护，因此温度窗口比较器是一个更好的解决方案。图 2 展示了此输出的一个示例。在此示例中，跳变点设置为 60°C 和 0°C，迟滞为 10°C。

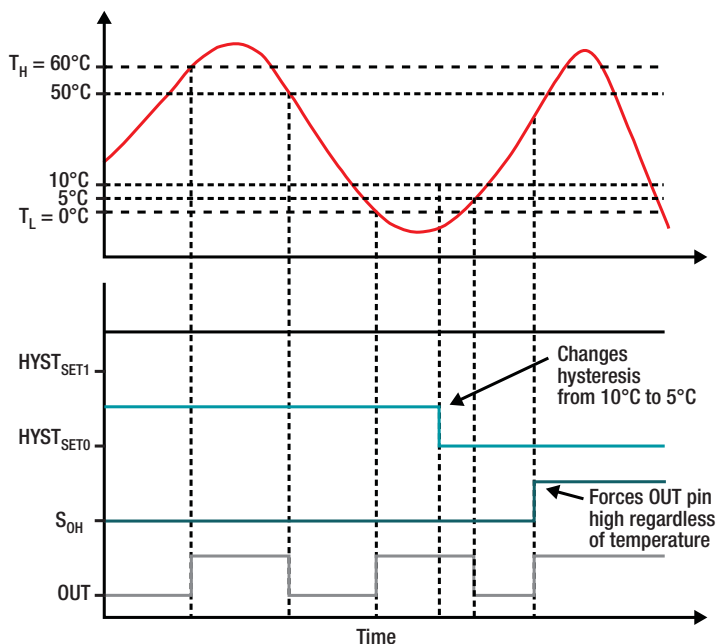
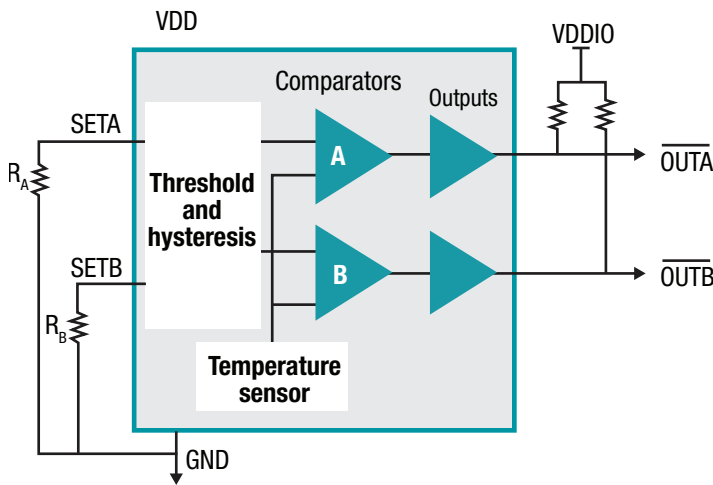


图 2. 温度窗口比较器输出行为示例。

请注意,图 2 中的设置输出高电平 (SOH) 是一个系统诊断测试功能,通过该功能,您可以独立于温度将输出强制为高电平。

TI 可提供广泛的温度开关和热敏电阻产品组合,例如 TMP303、TMP390 和 TMP61。TMP303 使用窗口比较器,并通过超小尺寸(小外形晶体管 563)、低功耗(最大 5 $\mu$ A)和低至 1.4V 的电源电压能力提供了设计灵活性。无需额外器件即可正常运行,窗口比较器可以独立于微处理器或微控制器正常工作。通过不同的器件选项可获得七个跳变点,这些均可在出厂时编程为任何温度。

**图 3** 所示的 TMP390 是一个可通过电阻器进行编程并具有两个内部比较器和两个输出的双输出温度开关。TMP390 采用相同的小型封装,具有超低功耗(最大 1 $\mu$ A)和低电源电压(1.62V)特性。



**图 3.** TMP390 框图。

仅使用两个电阻器,即可将高低温跳变点配置为任何所需的温度窗口,其中迟滞选项介于 5 $^{\circ}$ C 至 30 $^{\circ}$ C 之间。单独的高低温跳变输出会产生独立的警告信号,以供微处理器解释。

### 3.1.2 保护电池并不像您想的那么难

对于任何类型的保护,解决方案理应简单。保护方案一经设计和设置,应该再无后顾之忧;至少应该是这样。但是,当涉及到更多更好的电池保护时,您可能会担心它们未来会产生什么后果。

鉴于电池保护电路通常位于电池组内部看不见的地方,人们通常不会将其视为一种炫酷、时尚的新应用功能,因此可能无需您对其给予过多的关注。但是如果电池保护做得不好,可能会登上新闻头条。

对于任何保护器件,人们都希望其设置简单:一个可以保护您的系统但不会消耗大量电流的集成电路。TI 的 BQ77905 系列电池保护器适用于三到五节及更多串联电池,其有助于以较低的功耗为您的系统提供所需的保护。

在电池应用中,您始终需要有一个主保护器来作为第一道防线;其后的任何保护都用作二级保护。二级保护是电池保护的最后一道保护手段,通常是简单的过压保护,例如 BQ7718 系列。

**图 1** 所示的 BQ77905 是电动工具、园艺工具、吸尘器和机器人应用(如无人机、扫地机器人和割草机器人)等应用的主要保护器。这些类型的工业消费类应用会给电池组造成巨大损害,因为消费者希望电动工具或扫地机器人能够像使用交流电一样正常工作。在这些应用中,典型的连续电流消耗可能高达 50A(在电动工具中),低至(但仍然很高) 15A(在扫地机器人中)。

除了支持大电流消耗外,内部电池组电路还需要消耗超低功耗,以延长电池寿命和总体运行时间。这就是平均电流消耗为 6 $\mu$ A 的 BQ77905 器件的用武之地。

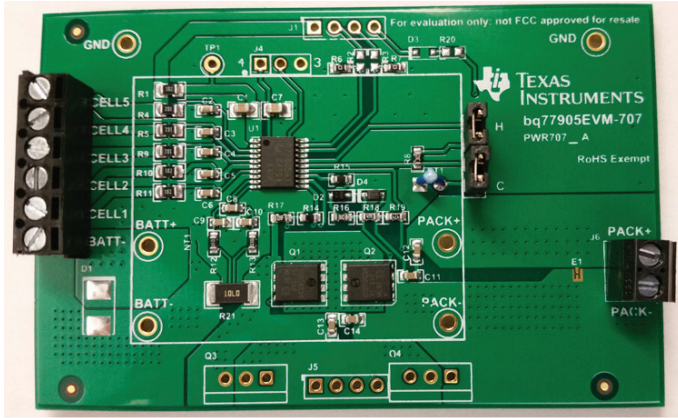


图 1. BQ77905 3 节至 5 节高级可堆叠低功耗电池保护器 EVM。

工业消费类应用通常包括由 3 节 (小型电动工具或无人机)、4 节 (无人机)、5 节 (专业电动工具)、6 节 (工业无人机)、7 节 (真空吸尘器)、10 节 (园艺工具或电锯之类的大型电动工具) 甚至 20 节电池组成的电池组。为了适应这些不同尺寸, 创建一个通用的电池组设计平台, 消除了不同 IC 架构带来的重新设计和再熟悉过程等相关工程成本。BQ77905 还具有堆叠功能, 可为设计提供灵活的电池节数。

如果需要像电池平衡和休眠模式这样的附加功能, 则升级到 BQ77915 可能是一个不错的选择。电池平衡在高电池节数应用中非常有用, 这类应用需要通过保持每节电池适当平衡来延长电池组的寿命。

通常, 保护应简单明了、易于使用且不应花费太多 (功耗、价格、安全性)。此外, 电池保护器件应提供灵活性并支持各种电池节数的可扩展方法, 从而有助于管理总体设计成本。保护永远不应限制应用的功能。

### 3.1.3 机器人系统中与位置反馈相关的参考设计

#### [1-4 节串联锂离子电池组管理器参考设计](#)

此参考设计采用 BQ40z50-R1 电池组管理器, 具有集成的电量监测和保护功能, 可完全自主操作 1 节至 4 节锂离子和锂聚合物电池组。该架构可通过 SMBus 广播命令在电量监测处理器与内部电池充电器控制器之间进行通信。

#### [用于绝对编码器的高 EMC 抗扰度 RS-485 接口参考设计](#)

此高电磁兼容性 (EMC) 抗扰性参考设计展示了一种 RS-485 收发器, 该收发器可与驱动器以及 EnDat 2.2、BiSS 和 Tamagawa 等编码器一起使用。EMC 抗扰度 (尤其是逆变器开关噪声抗扰度) 对于工业驱动器中的位置编码器反馈系统而言非常重要。

[查找更多有关机器人系统 \(机械手\) 的参考设计。](#)

撰稿人: Miguel Rios 和 Bryan Tristan

## 第 4 章：传感和视觉技术

### 4.1 机器人应用中的 TI 毫米波雷达传感器

当脑海中浮现机器人的形象时，您可能会联想到巨大的机械手臂，工厂车间里盘绕的随处可见线圈和线束，以及四处飞溅的焊接火花。这些机器人与大众文化和科幻小说中描绘的机器人大不相同，在后者中，机器人常以人们日常生活助手的形象示人。

如今，人工智能技术的突破正在推动服务型机器人、无人飞行器和自动驾驶车辆的机器人技术发展。

随着机器人技术的进步，互补传感器技术也在进步。就像人类的五官感觉一样，通过将不同的传感技术结合起来，可在将机器人系统部署到不断变化、不受控制的环境中时取得最佳效果。

### 机器人传感器技术

机器人传感器技术包括力和扭矩传感器、触摸传感器、1D/2D 红外 (IR) 测距仪、3D 飞行时间激光雷达 (LIDAR) 传感器、摄像机、惯性测量单元 (IMU)、GPS 等。互补金属氧化物半导体 (CMOS) [毫米波 \(mmWave\) 雷达传感器](#)是机器人感知方面一项相对较新的技术。CMOS 毫米波雷达传感器可精确测量其视野范围内物体的距离以及任何障碍物的相对速度。这些传感技术各有优缺点，如表 1 所示。

与基于视觉和激光雷达的传感器相比，毫米波传感器的一个重要优势是不受雨、尘、烟、雾或霜等环境条件影响。此外，毫米波传感器可在完全黑暗中或在阳光直射下工作。这些传感器可直接安装在无外透镜、通风口或传感器表面的塑料外壳后，非常坚固耐用，能满足防护等级 (IP) 69K 标准。此外，TI 的毫米波传感器的体积小、重量轻，设计产品的体积是微型激光雷达测距仪的三分之一，重量是其一半。



测量	检测范围	检测角度	距离分辨率	可检测信息	恶劣天气	夜间作业	检测性能
毫米波 	长	窄、宽	好	速度、距离、角度	好	有	强大、稳定
摄像机 	中	中	中	目标分类	差	无	计算物体坐标复杂
激光雷达 	长	窄、宽	好	速度、距离、角度	差	无	天气恶劣时性能差
超声波 	短接	宽	好	范围	好	无	短程应用

表1.传感器技术比较。



### 检测玻璃墙

图 1 说明了玻璃墙和隔墙在现代建筑中的应用,而服务型机器人(例如真空吸尘或拖地机器人)需要感知这些表面以防止碰撞。事实证明,使用摄像机和红外传感器很难检测这些元素。但毫米波传感器可检测到玻璃墙的存在及其后面的物体。



图 1.现代建筑广泛使用玻璃表面。

为演示这一功能,我们设置了一个简单的实验,对 80cm 远的一块玻璃使用 IWR1443 单芯片 76GHz 至 81GHz TI 毫米波传感器评估模块 (EVM)。然后,我们玻璃后面 140cm 处的位置放置了一个墙板,如图 2 所示。

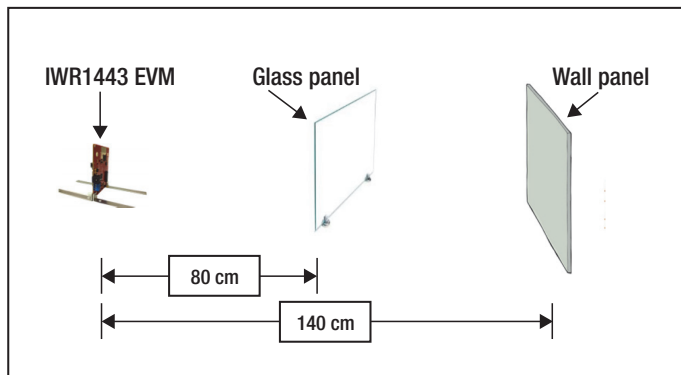


图 2.设置用于检测玻璃墙的检测。

在毫米波演示可视化工具中使用 EVM 随附的演示软件和可视化工具,图 3 中显示的结果明确证明了 TI 毫米波传感器可检测玻璃墙面及其背后的墙板。

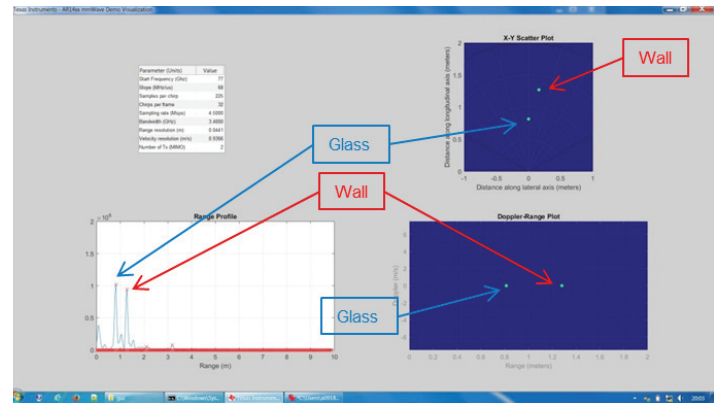


图 3.显示玻璃板和墙板检测的测试结果。

### 使用 TI 毫米波传感器测量对地速度

精确的里程计信息对于机器人平台的自主移动必不可少。可通过测量机器人平台上车轮或皮带的转动来获得里程信息。然而,如果车轮在松散砾石、泥地或湿地等表面上打滑时,这种低成本方法显然无法轻松凑效。

更先进的系统可通过增加一个 IMU (有时通过 GPS 进行增强) 来确保里程信息非常精确。TI 毫米波传感器可通过向地面发送线性调频信号并测量返回信号的多普勒频移,为穿越不平坦的地形或底盘俯仰和偏航情况较多的机器人提供额外的里程信息。

图 4 (下一页) 显示了对地速度毫米波雷达传感器在机器人平台上的潜在配置。无论是将雷达指向平台前(如图所示)还是指向平台后(农用车辆的标准做法),都需要进行权衡。如果指向平台前,则也可使用同一 TI 毫米波传感器来检测表面边缘,避免不可恢复的平台损失,如从仓库装运台上跌落。如果指向平台后,则可将传感器安装在平台的重心点上,尽量减少俯仰和偏航对测量的影响,这在农业应用中是一个大问题。

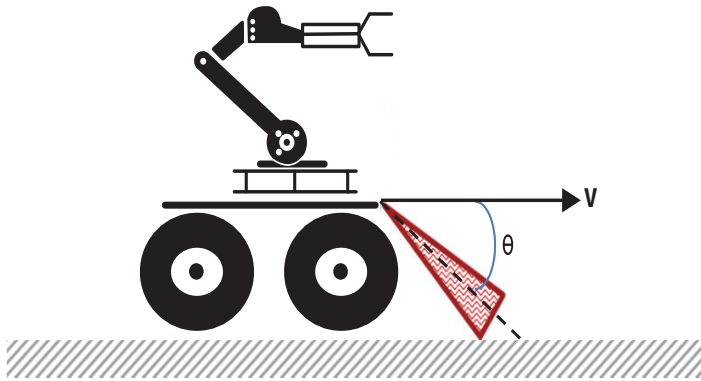


图 4. 机器人平台上的对地速度雷达配置。

方程 1 可以计算均匀理想条件下的速度。

$$fd = (2V / \lambda) \cdot \cos\theta \quad (1)$$

扩展方程 1 能够补偿变量 (例如, 导致传感器俯仰、偏航和翻滚的非均匀地形) 的速度测量误差, 并引入转动速度分量。

### 机械臂周围的安全防护装置

随着机器人在服务能力或在灵活的低批量处理自动化任务中与人类发生更多的交互, 必须确保它们不会对与之交互的人造成伤害, 如图 5 所示。

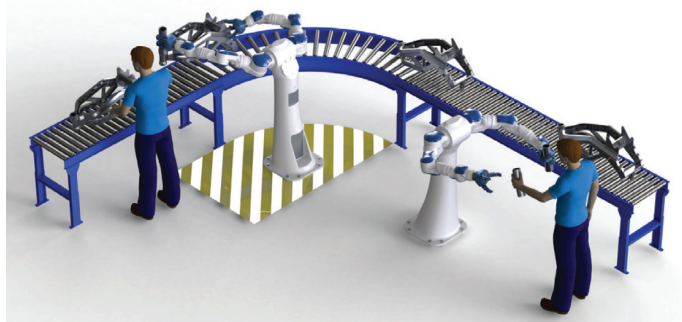


图 5. 未来的机器人将与人类有更多的交互。

过去通常在机器人的工作区域周围设置一个安全屏障或排除区域, 确保物理隔离, 如图 6 所示。

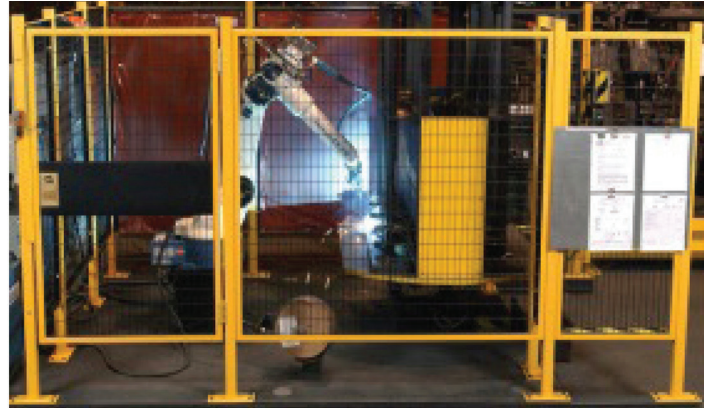


图 6. 带有物理安全笼的机械臂。

传感器使虚拟安全幕或气泡能够将机器人操作与非计划的人类交互分开, 同时避免机器人与机器人发生由于密度和操作可编程性增加而导致的碰撞。基于视觉的安全系统需要受控的照明, 这会增加能耗、产生热量且需要维护。在尘土飞扬的制造环境 (如纺织或地毯编织) 中, 需要经常清洁和观察透镜。

由于 TI 毫米波传感器非常强大, 无论车间的照明、湿度、烟雾和灰尘情况如何, 都可以检测物体, 因此它们非常适合取代视觉系统, 并能以极低的处理延迟 (通常少于 2ms) 提供这种检测。由于这些传感器视野宽阔且探测距离较长, 将其安装在工作区域上方可简化安装过程。只使用一个毫米波传感器即可检测多个物体或人员, 减少所需传感器数量并降低成本。

### 毫米波传感器生成的点云信息

TI 毫米波雷达传感器可通过模数转换器将射频 (RF) 前端模拟数据转换为数字表示形式。这种数字转换的数据需要高速外部数据总线, 以将数据流引入处理链, 然后经过一系列数学运算对在传感器视野范围内检测到的点生成距离、速度和角度信息。由于这些系统通常规模较大且

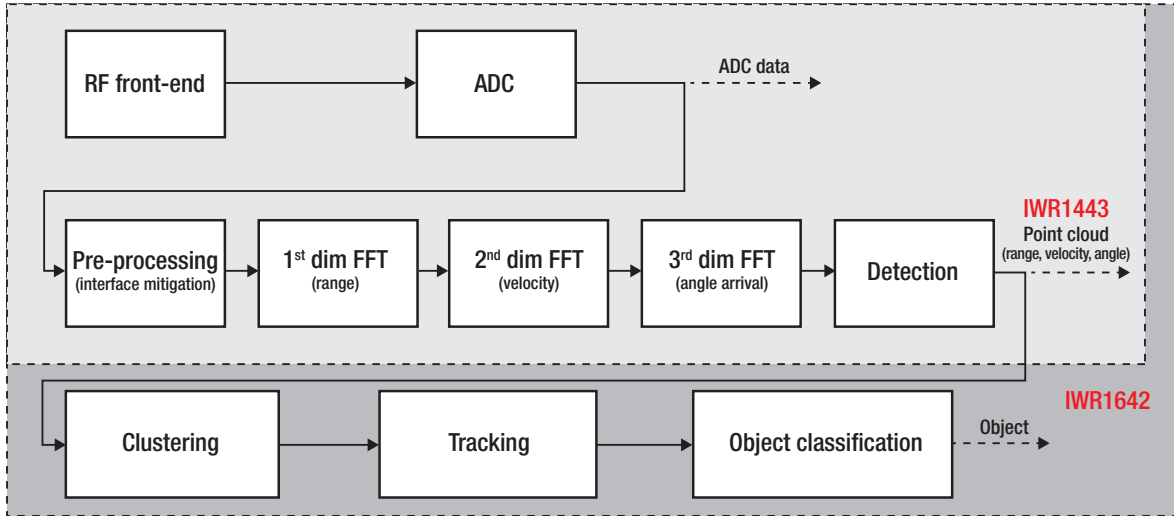


图 7. TI 毫米波传感器处理链。

且成本高昂,因此 TI 设法将所有这些功能集成到了一个单片 CMOS 器件上,从而减小尺寸并降低成本和功耗。额外的数字处理资源现可进行聚合、跟踪和分类等任务的数据后处理,如图 7 所示。

走在 TI 毫米波传感器前面的人会产生多个反射点。在机器人操作系统 (ROS) 可视化 (RVIZ) 工具中,可将检测到的所有点映射到相对于传感器的 3D 区域中(如图 8 所示)。此映射会收集四分之一秒内的所有点。收集到的点信息密度可提供高保真度,可清晰看到腿和手臂的运动,因此物体分类算法会将其归类为一个移动的人。3D 区域中开放空间的清晰性对于移动机器人来说也是非常重要的数据,可确保它们能够自主操作。

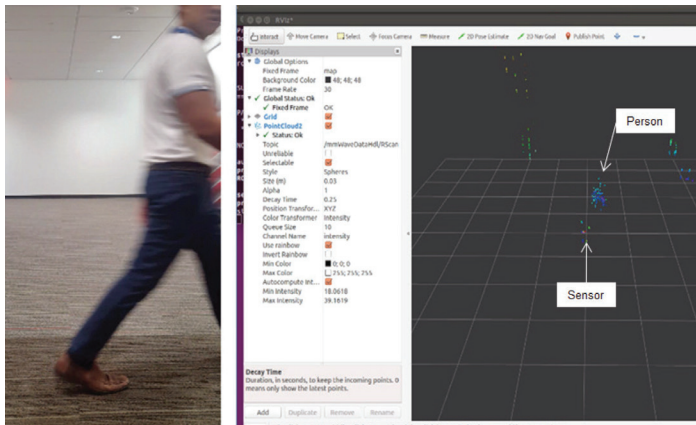


图 8. RVIZ 中显示的由 IWR1443 EVM 捕捉的人体点云。

### 使用 TI 毫米波传感器映射和导航

使用 [IWR1443 EVM](#) 检测到的物体点信息,然后就可以演示如何使用 TI 毫米波雷达精确地映射房间内的障碍物并在确定的自由空间内进行自主操作。为了快速演示如何在映射和导航应用中使用毫米波雷达,我们选择了 Robot OS 机器人开源 Turtlebot 2 开发平台,并在该平台上安装了 IWR1443 EVM,如图 9 所示。



图 9. 安装在 Turtlebot 2 上的 IWR1443 EVM。

通过对 EVM 实现基本驱动程序 (ti\_mmwave\_ropkg),我们使用 OctoMap 和 move\_base 库将点云信息集成到导航堆栈中,如图 10 (下一页) 所示。

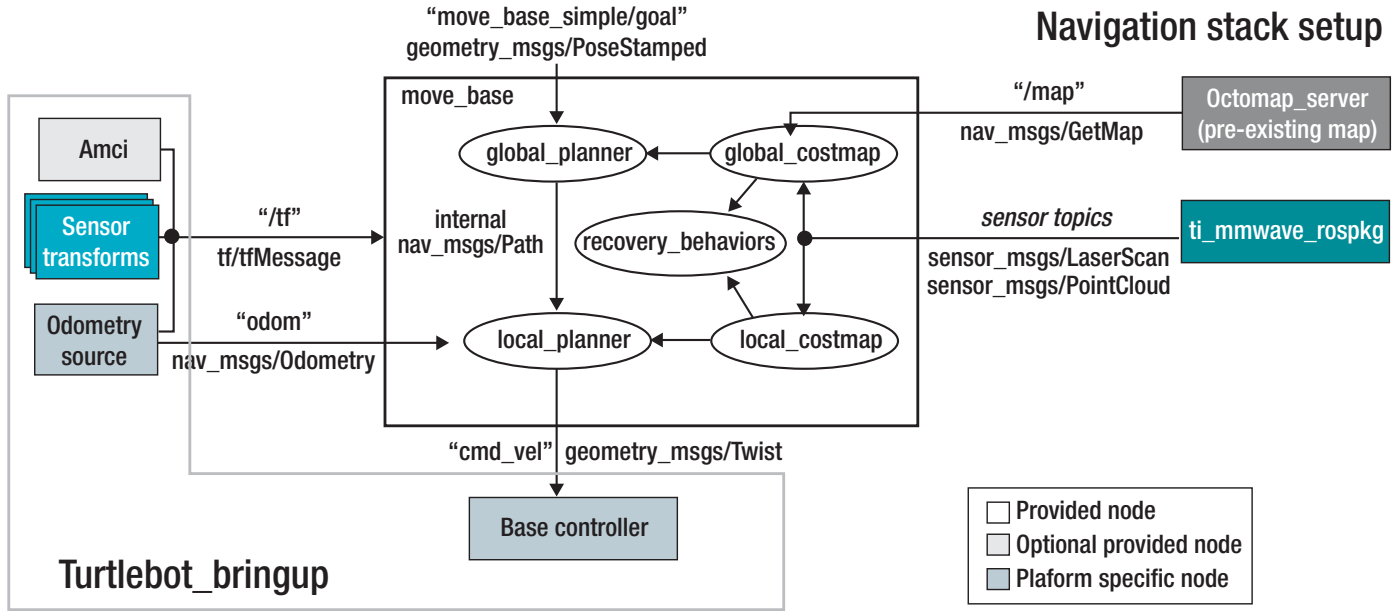


图 10.与配备有 IWR1443 EVM 的 Turtlebot 2 配合使用的 Robot OS 库导航堆栈。

我们在室内办公环境中设置障碍并使 Turtlebot 2 通过该区域,使用 OctoMap 库建立一个 3D 占据栅格地图。图 11 是使用 RVIZ 的占据栅格屏幕截图。

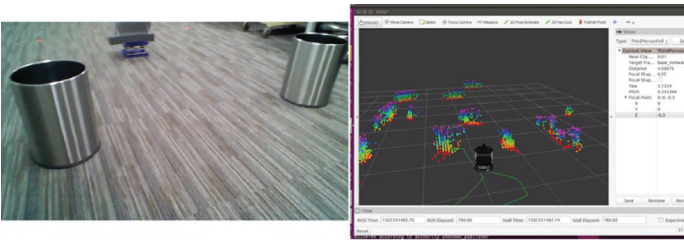


图 11.在 Robot OS 中使用 OctoMap 库生成占据栅格地图。

我们使用的是通过 move\_base 从 OctoMap 生成的地图,输入最终目的地和姿势位置,如图 12 屏幕截图中的绿色箭头所示。Turtlebot 2 成功高效地导航到了选定的位置,然后旋转到适当的姿势,避开了其路线中的静态和动态物体。这证明了使用一个面向未来的毫米波传感器快速在 Robot OS 环境中进行基本自主机器人导航的效果。

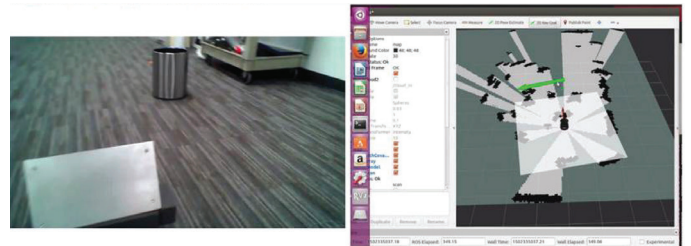


图 12.使用 IWR1443 EVM 占据栅格地图和 Robot OS move\_base 库使 Turtlebot 2 进行自主导航。

### 结论

TI 毫米波传感器最初非常昂贵且尺寸较大,并需要多个分立组件。然而,由于现在 TI 将射频、处理和内存资源集成到一个单片 CMOS 芯片上,可以说毫米波传感器将补充或取代传统的机器人传感技术。

与其他技术相比, TI 毫米波传感器的优势如下:

- TI 毫米波传感器对环境条件 (如阳光直射、阴影或水的光反射) 不敏感。
- TI 毫米波技术可检测玻璃墙、隔墙和家具,而基于光的传感解决方案则可能无法做到。

- TI 毫米波传感器提供物体的多普勒速度信息,因此在车轮在潮湿表面可能会打滑时有助于增强机器人里程测量能力。
- TI 毫米波传感器的机械复杂度较低,从而减少了制造校准和误差校正过程。没有通风口或透镜,它们可直接安装在塑料外壳后。集成校准意味着在线制造复杂性更低。广阔的视野使得不再需要机械旋转式的传感器机制。
- 集成式的单个单片 CMOS TI 毫米波传感器使所有处理都可在传感器内发生。与基于视觉的系统相比,这降低了 BOM 成本、缩小了尺寸并减少了中央控制器处理器需要提供的每秒百万指令数 (MIPS)。

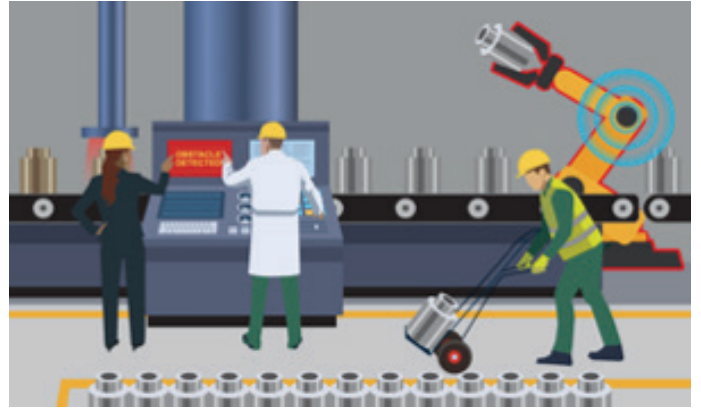
TI 毫米波传感器技术提高了机器人的智能化操作,同时在实际环境中增强了耐用性。这项技术的应用将进一步加快机器人系统的快速采用。

### 4.2 边缘智能赋能自主工厂

从传统的工业机器人系统到如今最新的协作机器人,各种机器人都依赖于能够生成并处理数量庞大、种类纷多的数据的传感器。这些数据有助于在自主机器人中进行实时决策,从而实现更智能的事件管理,同时在动态的现实环境中保持工作效率,如图 1 所示。

#### TI 毫米波传感器如何在工厂实现边缘智能

德州仪器 (TI) 毫米波传感器有一个集成处理器,该处理器可以处理片上数据以进行实时决策。相较于某些基于光或视觉的传感器,这种集成有助于实现更小的设计。



**图 1** 毫米波传感技术有助于监测机器周围区域以便进行实时事件管理。

此外,只需使用一个传感器即可检测多个物体并处理数据,因此可降低总体系统成本。

不受灰尘、烟雾和可变光照等环境条件影响是工厂环境中的另一个重要考虑因素。TI 毫米波传感器可以在任何这类条件下运行,并可安装在塑料外壳后面,无需外部透镜、通风口或传感器表面。所有这些属性使得毫米波传感器在工业传感应用中具有出色表现。

TI 毫米波技术不仅可以实现距离测量

智能边缘处理使工厂机器和机器人能够与人类进行交互并减少事故发生。例如,可以配置 TI 毫米波传感器,使其监测机器周围的特定区域、定义排除区域以及向该区域内的人员发出警告。通过对这些区域进行分区,可让传感器根据区域占用或人员靠近情况做出相应的反应。

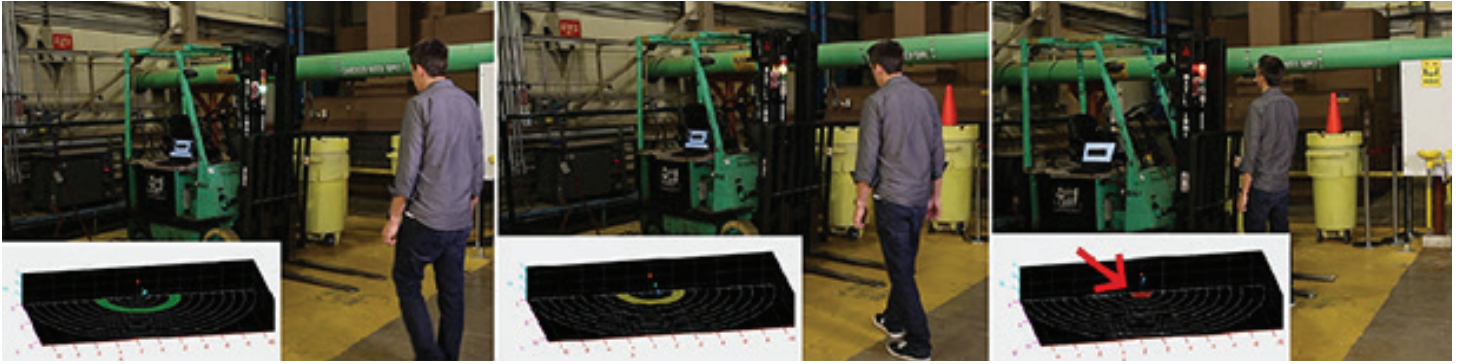


图 2. 一个人缓慢走过机器, 在 1m 处开始闪烁危险信号。

图 2 说明了此功能, 其中将区域标记为安全 (绿色)、警告 (黄色) 和危险 (红色) 以指示与机器的接近程度。

TI 毫米波传感器可精确测量其视野范围内物体的距离以及任

何障碍物的相对速度。因此, 机器人可以根据物体接近传感器的速度采取更具预测性的操作, 例如停止机器。图 3 显示了机器如何根据人员接近机器的速度快速触发危险区域警告。

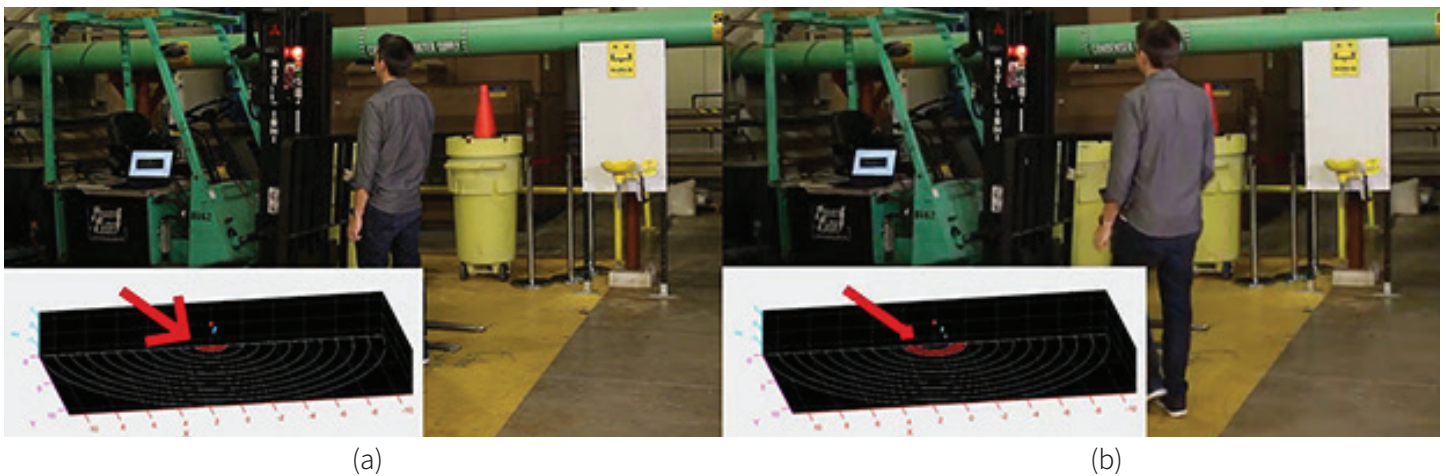


图 3. 当人缓慢行走时在 1m 处触发危险信号 (a); 当人快速行走时在 2m 处危险信号 (b)。

为了提高生产率, 您希望避免因误触发而停止机器。图 4 中的示例显示了集成的跟踪算法如何让传感器精确判定人的方向。当人离开机器时, 不会开启警告信号, 也不会采取其他任何操作。

### 简化设计并加快开发速度

为了简化机器人系统的设计以及缩短开发时间, 使用具有集成封装天线的毫米波传感器的区域扫描仪参考设计使用了 IWR6843 EVM, 该模块在 60GHz 频段上工作并在器件上集成了完整的雷达处理链。

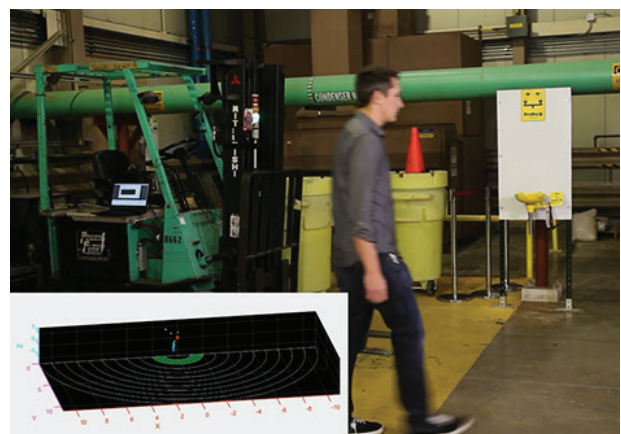


图 4. 由于人正在离开机器, 传感器不指示危险信号。

### 4.3 对智能机器人使用超声波传感

在不久的将来,机器人将执行人类目前执行的许多任务。我们已经有了扫地机器人帮助我们打扫房屋,还有割草机器人可以在院子里割草。在工厂车间,机器人正在制造我们使用的从牙刷到汽车的各种产品。机器人在中国和日本的餐厅提供服务,而无人机则在给农场施肥以及运送货物。

因此,不久之后,机器人就可以帮助我们建造房屋、铺设道路以及驾驶车辆。但是,为了实现这样一个未来世界,一项关键要求是使机器人具有与人类相似的感官。

机器人设备的最大挑战之一是如何在不撞到墙壁、家具、设备、人类或其他机器人的情况下找到自己的行走路径。为了避开障碍物并高效完成工作,机器人应能够检测到几英尺到几厘米远的障碍物,以便它们有时间导航到其他地方。

检测障碍物的常用技术包括:

- 超声波传感,这种技术可以发送超声波并侦听从任何障碍物反射回来的回声。
- 光学飞行时间 (ToF) 传感器,这种传感器使用光电二极管捕获来自障碍物的反射光波。
- 雷达传感器,这种传感器使用射频波和物体返回的回波来确定运动物体的方向和距离。

第一种技术(超声波传感)是一种替代雷达的低成本且低速的方案,适用于在家中和工厂中不需要高速运行的机器人。由于超声波传感不受障碍物反射光量的影响,因此在避开障碍物方面,超声波传感比光学 ToF 传感更可靠。超声波传感的另一个好处是它使用声波而不是光来检测物体,因此可以感应玻璃或任何其他透明表面。

#### 机器人的大量应用

例如,一个扫地机器人根据命令或按照设定的计划离开其基座,然后在房屋中移动以清扫地板。设计此系统时,一种好方法是使用嵌入在扫地机器人侧面的超声波传感器提供 360 度全

覆盖。传感器的间距和数量将取决于扫地机器人的形状和超声波传感器的视野 (FOV)。

当扫地机器人运动时,超声波传感器网络会映射障碍物,计算障碍物的距离,并将此信息提供给中央处理单元 (CPU) 以避开障碍物。集成超声波传感器的类似方法也适用于割草机器人、互动玩具机器人或者餐厅或零售机器人,如图 1 所示。



图 1.服务机器人的示例.

第二个示例是装配线机器人以及在工厂车间内及在工厂车间与仓库之间移动原材料或成品的机器人。

在如今的工厂中,机械臂四处移动拾取和放置零件并安装螺母和螺栓来组装产品,如图 2 所示。工厂所有者和机器人系统制造商的主要关注点在于如何在机械臂上安装传感器,从而防止地板上的多个机器人之间发生碰撞。在机械臂或机器人移动车辆上的适当位置安装的超声波传感器可以提供有关附近物体的情报,以及可由这些机器人系统的 CPU 用来避免碰撞的距离信息。

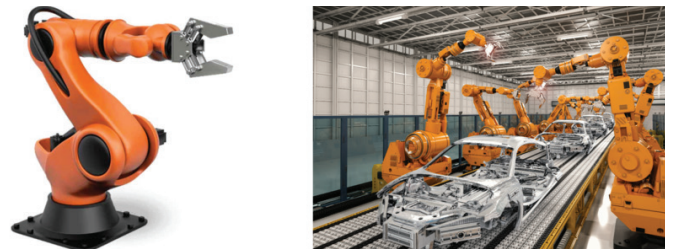


图 2.装配线机器人系统组件.

在机器人中使用的超声波避障系统的组件包括:

- **超声波传感器。**这些传感器是压电式晶体,当施加交流电压时会振荡产生超声波,而当回波返回时则反之。这里有两种类型的传感器:顶部封闭的传感器,其中的压电式晶体经过密封(保护其免受环境影响);顶部敞开的传感器,其中的晶体暴露或覆盖着类似于网状网络的东西。顶部封闭的传感器需要较高的驱动电压,进而需要附加的系统组件:变压器。
- **变压器。**单端或中心抽头变压器将产生驱动顶部封闭的传感器所需的高电压。
- **超声波信号处理器和传感器驱动器。**例如, TI 的 [PGA460](#) 可以驱动变压器,处理从回波返回的电信号,并实时计算每个相关回波的 ToF 数据。

- **CPU。**机器人系统的此组件使用来自机器人周围多个超声波传感器的 ToF 信息来映射障碍物,并根据机器人的编程情况来停止或帮助其避开障碍物。

**图 3** 是超声波收发器模块的示例,该模块整合了超声波传感器和 TI PGA460 超声波信号处理器和驱动器 IC。该模块的设计文件可用作参考。

### 开始使用超声波传感

超声波传感是适用于家庭和工厂机器人系统的经济、可靠和实用的解决方案。TI 提供了若干不同的器件和各种各样的配套工具,旨在帮助您[快速开发基于超声波传感的设计](#)。

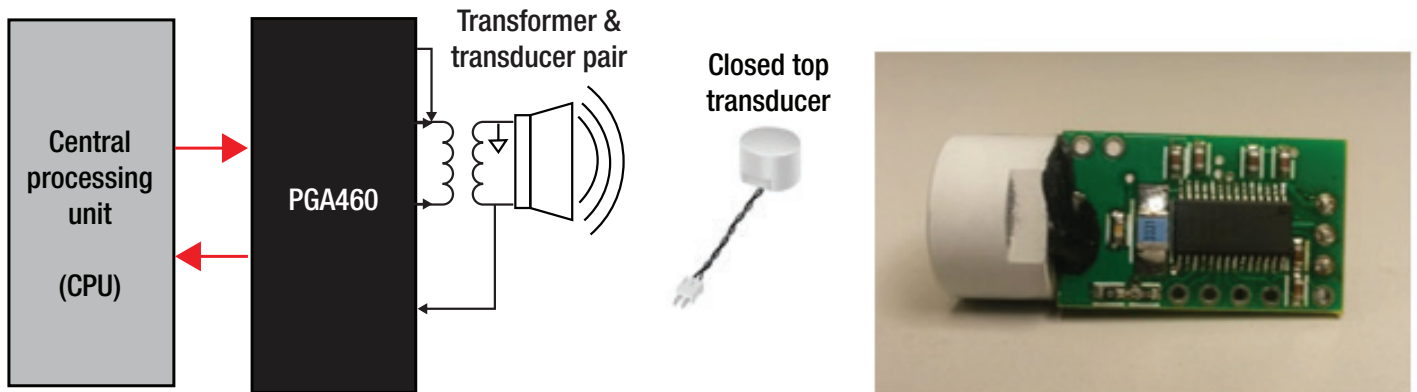


图 3.超声波收发器模块示例.



## 4.4 传感器数据如何赋能机器人技术中的 AI

从传统的工业机器人系统到如今最新的协作机器人(简称“cobot”),各种机器人都依赖于能够生成数量日益庞大、种类繁多多样的数据的传感器。

这些数据可以帮助构建更好的机器学习(ML)和人工智能(AI)模型,机器人可以依靠这些模型来实现自主性,从而做出实时决策并在动态的现实环境中导航。

工业机器人通常放置在封闭的环境中,当人类进入其环境时将停止运转。但是限制人类与机器人协作会导致无法实现许多好处。自主能力将使人类与机器人安全高效地共存。

机器人应用中的传感和智能感知非常重要,因为机器人系统(尤其是 ML/AI 系统)的有效性能在很大程度上取决于向这些系统提供关键数据的传感器的性能。如今,各种越来越精密和精确的传感器,再加上能够将所有这些传感器数据融合在一起的系统,使得机器人拥有越来越出色的感知和意识。机器人的感知能力示例如图 1 所示。

### AI 的发展

一段时间以来,机器人自动化一直是制造业中的一项革命性技术,但是在未来几年中,将 AI 集成到机器人中有望改变整个行业。

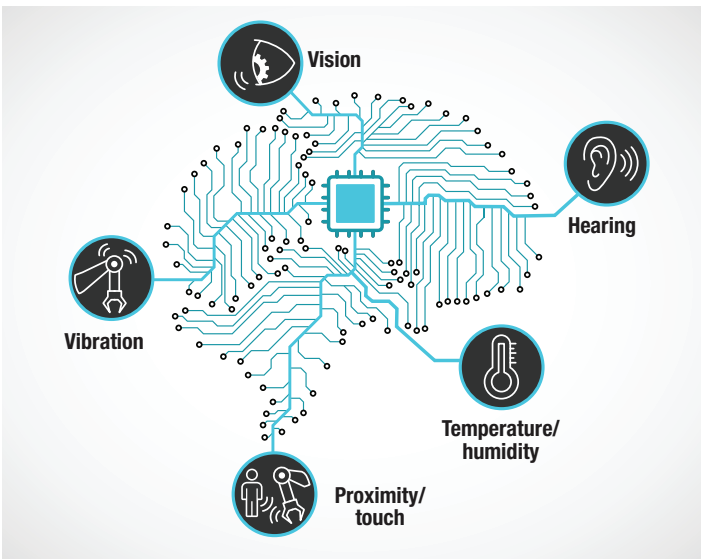


图 1.机器人的不同感官.

机器人和自动化目前有哪些主要趋势?什么样的技术会将 AI 与需要智能化的数据联系起来?最后, TI 传感器是如何运用(融合)到 AI 系统中的?

### 将机器人的 AI 处理推向边缘

ML 包含两个主要部分:训练和推理,两者可以在完全不同的处理平台上执行。训练部分通常在桌面平台或云中离线进行,需要将大量数据集馈送到神经网络中。实时性能或功耗在该阶段不会有问题。训练阶段的成果是经过训练的 AI 系统,该系统在部署后可以执行特定任务,例如检查装配线上的瓶子、对房间内的人进行计数和跟踪或确定票据是否是伪造的。

但是,为了让 AI 在许多行业中发挥其应有的作用,推理(此部分旨在执行经过训练的 ML 算法)期间产生的传感器数据必须进行(近乎)实时的融合。因此,ML 和深度学习模型必须处于边缘,将推理部署到嵌入式系统中。

假设为了与人类紧密协作而构建了一个协作机器人。该机器人依靠来自接近传感器和视觉传感器的数据来确保成功保护人类免受伤害,同时支持人类从事对人类而言具有挑战性的活动。所有这些数据都需要实时处理,但云计算速度不足以支持协作机器人所需的实时低延迟响应。为了突破这一瓶颈,当今的先进 AI 系统被推到了边缘,对于机器人来说,这意味着必须具备板载处理能力。

### 去中心化的 AI 模型

去中心化的 AI 模型依赖于具有以下功能的高度集成式处理器:

- 丰富的外设,用于连接各种传感器。
- 高性能处理能力,可以运行机器视觉算法。
- 一种加速深度学习推理的方法。

为了存在于边缘,所有这些功能还必须具有高效率、相对较低的功耗和较小的尺寸。

随着 ML 越来越流行,功耗和大小经过优化的“推理引擎”也越来越多。这些引擎是专门用于执行 ML 推理的专用硬件产品。

集成式 SoC 通常是嵌入式领域中一个不错的选择,因为除了容纳能够执行深度学习推理的各种处理元件外,SoC 还集成许多用于整个嵌入式应用的必要组件。一些集成式 SoC 包括显示、图形、视频加速和工业联网功能,使单芯片解决方案的功能不仅限于运行 ML/AI。

**Sitara™ AM57x 处理器是在边缘运行 AI 的处理器典范。**这些处理器具有用于连接多个传感器(例如视频、ToF、LIDAR 和毫米波传感器)的多个高速外设,还包括以 C66x 数字信号处理器内核和嵌入式视觉引擎子系统形式呈现的专用硬件,旨在加速 AI 算法和深度学习推理。

让我们看看目前机器人的一些主要技术趋势。

### 协作机器人

人类通常无法接近处于运行状态的传统工业机器人,否则会置身于危险之中。相反,协作机器人旨在与人类一起安全工作(如图 2 所示),能够缓慢从容地移动。

根据国际标准化组织 TS 15066 的定义,协作机器人是一种能够在协作性操作过程中使用的机器人,在这种操作过程中,机器人和人类可以在定义的工作区中同时进行生产操作(这不包括机器人加机器人系统或并置的人类与机器人,它们是在不同时间进行操作)。由于需要定义和部署协作机器人来预见机器人的物理部分(或诸如激光之类的虚拟扩展部分)与操作员之间可能发生的碰撞,因此使用传感器来确定操作员的确切位置和速度变得更加重要。

协作机器人制造商必须在机器人系统中实现高水平的环境感知和冗余度,以快速检测和防止可能发生的碰撞。连接到控制单元的集成传感器将感应机器人手臂与人类或其他物体之间即将发生的碰撞;在即将发生的碰撞时,控制单元将立即关闭机器人。如果任何传感器或其电子电路出现故障,机器人也会关闭。

随着协作机器人在苛刻的工业环境中变得越来越强大,制造商将在工厂车间增加越来越多的协作机器人,尤其是那些具有严格投资回报率目标并希望缩短产品周期的制造商。

### 物流机器人

物流机器人是在可能有人在场或不在场的环境(例如仓库、配送中心、港口或园区)中工作的移动装置。物流机器人取回货物并将其带到包装站,或者将货物从公司现场的一处建筑物运到另一处;有些物流机器人也可以提取和包装货物。这些机器人通常在特定环境中移动,并且需要传感器来进行定位、制图以及防止碰撞(尤其是与人的碰撞)。

直到最近,大多数物流机器人都使用的是预先定义的路线;而现在,物流机器人能够根据其他机器人、人类和包裹的位置来调整导航。超声波、红外和激光雷达(LIDAR)传感都是支持性技术。由于此类机器人需要移动,因此控制单元位于内部,通常与中央远程控制单元进行无线通信。物流机器人现在采用更先进的技术,例如 ML 逻辑、人机协作和环境分析技术。



图 2.协作机器人在工厂环境中与人类一起工作。

不断上涨的人工成本和严格的政府法规正在推动物流机器人的普及。此类机器人越来越流行还得益于设备成本、传感器等组件的成本以及集成成本不断降低(以及所需时间不断减少)。

### 最后一英里的送货机器人

在产品从仓库货架到客户家门口的旅程中,最后一英里送货是该过程的最后一步:包裹最终到达买家的家门口。除了影响客户满意度之外,最后一英里送货既昂贵又费时。

最后一英里的送货成本占总运送成本的很大一部分:总体上占 53%。因此,提高最后一英里的送货效率已成为开发和实施可以推动流程改进和提高效率的新机器人技术的重点。

### ToF 光学传感器

此类传感器依赖于 ToF 原理,并使用光电二极管(单个传感器元件或阵列)以及主动照明来测量距离。来自障碍物的反射光波将与透射光波进行比较以测量延迟,而该延迟可以表示距离。然后,此数据有助于创建物体的 3D 地图。

TI 的 ToF 芯片组支持基于 ToF 的传感,这种传感技术超越了接近检测功能,可支持下一代机器视觉。此类芯片组支持最大限度的灵活性,允许开发者使用各种工具来定制用于机器人视觉和其他应用的设计;这些工具中包括评估模块和高度可配置的摄像头开发套件,而此套件可提供每个像素的 3D 位置以绘制有助于进行定制的精确定深度图。分立式解决方案利用各种拓扑和半导体技术,例如时数转换器和 GaN,如[LIDAR 脉冲飞行时间参考设计](#)和[适用于 LIDAR 的纳秒级激光驱动器参考设计](#)中所示。

诸如 TI [OPT8320](#) 之类的 3D ToF 传感器使机器人能够确定螺钉的准确角度,然后微调螺丝刀,使螺钉始终对准,无需人工干预。像 OPT3101 这样基于 ToF 的模拟前端可以帮助识别机械臂到目标的距离,并有助于精确定位。

对于更高分辨率的 3D 传感,灵活的结构光(采用 DLP® 技术实现,如[基于 AM572x 处理器并采用 DLP 结构光的 3D 机器视觉参考设计](#)中所示)有助于将分辨率提高到微米级或以下。

### 温度和湿度传感器

许多机器人需要测量机器人所在环境以及机器人组件(包括电机和主要的 AI 主板)的温度,有时还需要测量湿度,以确保它们在安全范围内运行。这一点对于机器人尤其重要,因为电机在承受重负载时功耗极高并发热。

精确的温度监测可以保护电机,同时更高的温度精度能够使电机在达到安全裕度极限之前更难以驱动。此外,几乎所有其他传感器都对温度敏感并受益于热补偿。通过了解温度,即可校正其他传感器的温度漂移,进而获得更准确的测量结果。

在靠近赤道的工厂和热带气候地区,温度和湿度传感器可以预测露点,便于进行电子系统保护和预测性维护。

### 超声波传感器

如果机器人被强光照射或发现自身处于非常黑暗的环境中,视觉传感器可能无法工作。通过发射超声波并侦听从物体反射回来的回声(类似于蝙蝠的做法),超声波传感器在黑暗或明亮的条件下均具有出色的性能,可以克服光学传感器的局限性。

超声波传感是一种替代雷达的低成本低速技术,适用于不需要高速运行的机器人。由于超声波传感不受障碍物反射光量的影响,因此在避开障碍物方面,超声波传感比光学 ToF 更可靠。例如,超声波传感使用声波而不是光来检测物体,因此可以感应玻璃或其他透明表面。

### 振动传感器

预测性维护需要进行状态监控,工业振动传感便是其中不可或缺的技术。集成式电子压电式传感器是工业环境中最常用的振动传感器。

振动传感器使机器人能够知道其某些机械装置是否已损坏或老化,从而有助于在操作濒临危险之前进行预防性维护。使用 AI/ML 可以使这些预测的准确性更上一层楼。

## 毫米波传感器

毫米波传感器使用无线电波(图 3)及其回波来测量三个分量(速度、角度和范围),从而确定移动物体的方向和距离。因此,机器人可以根据物体接近传感器的速度采取更具预测性的操作。雷达传感器在黑暗中具有出色的性能,并可以穿透石膏板、塑料和玻璃等材质进行感应。

如《机器人应用中的 TI 毫米波雷达传感器》白皮书所述,CMOS 毫米波雷达传感器能够以极高的精度测量其视野范围内物体的距离以及任何障碍物的相对速度。

互补金属氧化物半导体(CMOS)毫米波雷达传感器能够以极高的精度测量其视野范围内物体的距离以及任何障碍物的相对速度。

TI 高度集成的单芯片毫米波雷达传感器具有体积小、重量轻的特点,支持在传感器边缘进行实时处理,通常无需额外的处理器。

采用毫米波技术的设计的体积是微型激光雷达测距仪的三分之一,重量是其一半。与基于视觉的系统相比,这降低了 BOM 成本、缩小了尺寸并减少了中央控制器处理器需要提供的每秒百万指令数。这些传感器可直接安装在无外部透镜、通风口或传感器表面的塑料外壳后,非常坚固耐用,能满足防护等级 69K 标准。

毫米波传感器最初非常昂贵且尺寸较大,并需要多个分立组件。然而,由于现在 TI 将射频、处理和内存资源集成到一个单片 CMOS 芯片上,可以说毫米波传感器将在未来几年补充或取代传统的机器人传感技术。

更先进的雷达传感系统可通过增加一个惯性测量单元(有时通过 GPS 进行增强)来确保里程信息非常精确。毫米波传感器可通过向地面发送线性调频信号并测量返回信号的多普勒频移,为穿越不平坦的地形或底盘俯仰和偏航情况较多的机器人提供额外的里程信息。

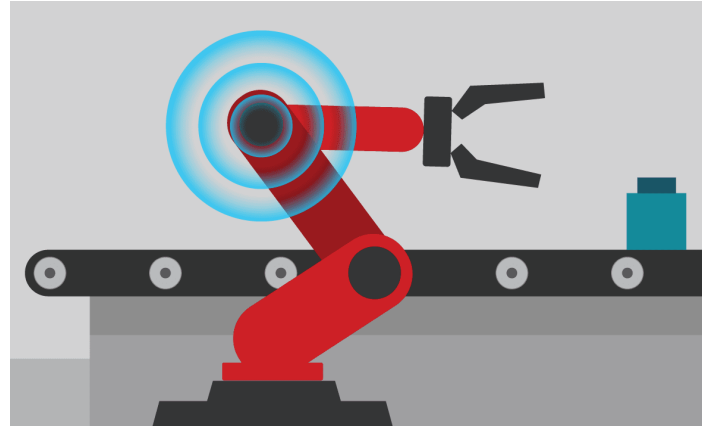


图 3.采用毫米波传感器的机械臂.

### 适用于整个 AI 机器人信号链的 TI 解决方案

自我学习的自适应 AI 机器人系统的信号链需要实时融合各种传感器数据。协作机器人的传感器在某些方面类似于人类的五种感官,所有这些感官对于完全自主操作都是至关重要的。人类的每一种感官都使用大脑的不同部分以及不同的大脑处理工作量。例如,视觉比听觉或嗅觉需要更多的脑力。

与之类似,机器人将有越来越多的传感器连接到机器人内部运行的 AI 和 ML 系统,因此 AI 机器人系统制造商面临的主要挑战在于,他们需要处理由混合传感器数据驱动的混合 ML 系统中多个并行运行并通信的 AI 系统。

机器人开发人员可依赖高级 IC 解决方案以最大程度地减少电路设计和认证带来的麻烦,加快产品开发速度,使其能够快速交付给工业客户。推动工业机器人进步的 IC 必须提供精确的传感、高速传感器信号转换、快速计算/信号处理,以实现实时响应和高速通信。IC 还能与 GaN FET 等先进的半导体配合使用,以实现高效率和小尺寸电源。新的 IC 还为行业带来了新的标准,例如单一双绞线以太网和单一双绞线供电,从而降低布线复杂性并提高可靠性。

TI 可以提供下一代机器人所需的各种产品,从传感器到处理器,应有尽有,其广泛的产品和解决方案涵盖了整个 AI 机器人信号链。从传感器输入到执行器或电机输出,从单个设备单元到工厂级控制等等, TI 解决方案覆盖了整个信号链,并提供机器人应用所需的处理能力和电源。产品具有增强型隔离等功能,并经过测试,符合在严苛工业环境中使用的标准。

### 4.5 将机器学习引入嵌入式系统

机器学习的前景不容小觑,其最新发展的深度学习已被人们视为会影响世界的基础技术,与互联网或之前的晶体管旗鼓相当。

得益于计算能力的巨大进步以及大量标记过的数据集,深度学习已在图像分类、虚拟助手和游戏体验方面带来了重大改进,未来可能还会给无数行业带来同样的效果。与传统的机器学习相比,深度学习可以提供更高的精度、更大的灵活性以及更好地利用大数据,而实现所有这一切所需的相关领域专业知识却更少。

为了让机器学习在许多行业中发挥其应有的作用,必须将推理(此部分旨在执行经过训练的机器学习算法)部署到嵌入式系统中。这一部署过程有其独特的一系列挑战和要求。

### 训练和推理

深度学习包含两个主要部分:训练和推理,两者可以在完全不同的处理平台上执行,如图 1 所示。深度学习的训练部分通常在桌面平台或云中离线进行,需要将大量标记过的数据集馈送到深度神经网络 (DNN) 中。实时性能或功耗在该阶段不会有问题。

如《传感器数据如何赋能机器人技术中的 AI》白皮书所述,训练阶段的成果是经过训练的神经网络,该神经网络在部署后可以执行特定任务,例如检查装配线上的瓶子、对房间内的人进行计数和跟踪或确定票据是否是伪造的。

将经过训练的神经网络部署到执行算法的设备上称为“推理”。根据嵌入式系统施加的约束,训练神经网络的处理平台通常不同于运行推理的平台。为了便于本文讨论,术语“深度学习”和“机器学习”指代推理。

### 前沿的机器学习

将计算推向更接近传感器收集数据的位置的概念是现代嵌入式系统的核心,即网络的边缘。使用深度学习时,此概念对于在边缘实现智能和自主变得更加重要。

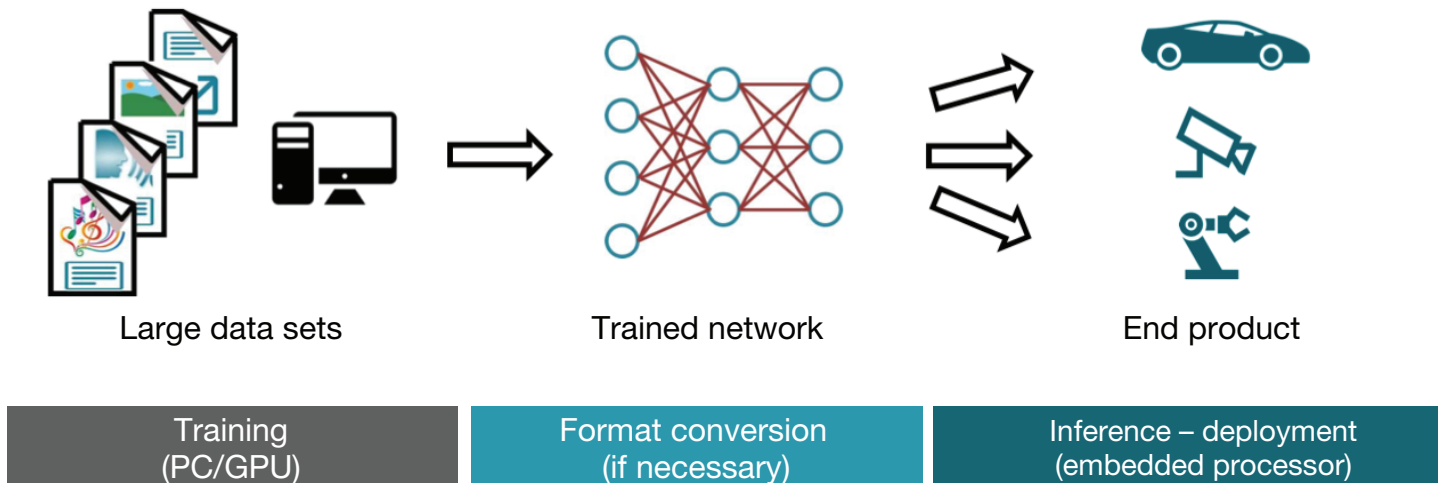


图 1.传统深度学习开发流程.

许多应用(从工厂车间的自动化机械和工业机器人,到家庭中的自导式扫地机器人,再到田野中的农用拖拉机)必须在本地实施处理。

进行本地处理的原因可能因应用而有很大差异。以下仅仅是有一部分促使需要进行本地处理的原因:

- **可靠性高.**依靠互联网连接通常不是可行的选择。
- **低延迟.**许多应用都需要即时响应。应用可能无法忍受在其他地方发送数据进行处理的延时时间。
- **隐私.**数据可能是私有的,因此不应在传输或存储到外部。
- **带宽.**网络带宽效率通常是一个关键问题。在每个用例中都连接到服务器是不可能的。
- **增强.**功耗始终是嵌入式系统的首要考虑因素。移动数据会消耗能量。数据需要传输得越远,所需的能量就越多。

### 选择用于机器学习的嵌入式处理器

需要进行本地处理的许多原因与嵌入式系统中固有的要求是重叠的,特别是功耗和可靠性。嵌入式系统还需要考虑其他一些因素,这些因素与系统的物理局限性有关或缘于这些局限性。在尺寸、内存、功耗、温度、寿命以及成本方面,经常都存在固定的要求。

在对特定嵌入式应用的所有要求和关注点进行平衡的过程中,选择处理器来执行边缘机器学习推理时需要考虑一些重要因素。

- **考虑整个应用.**在选择处理解决方案之前首先要了解的一点是整个应用的范围。执行推理是唯一需要的处理,还是要将传统机器视觉与深度学习推理相结合?系统在较高层面运行传统的计算机视觉算法并随后在需要时运行深度学习通常会更高效。例如,高帧率(fps)的整个输入图像可以运行经典的计算机视觉算法来执行对象跟踪,而在图像中具有较低帧率的确定子区域上使用深度学习进行对象分类。在该示例

中,跨多个子区域的对象分类可能需要多个推理实例,甚至可能需要在每个子区域上运行不同的推理。在后一种情况下,选择的处理解决方案必须能够同时运行传统计算机视觉和深度学习以及不同深度学习推断的多个实例。**图 2**显示了通过图像的子区域跟踪多个对象并对每个被跟踪的对象执行分类的示例用法。

- **选择合适的性能点.**了解整个应用的范围后,必须了解需要多少处理性能才能满足应用需求。对于机器学习,这可能很难了解清楚,因为很多性能都是与具体应用相关的。例如,对视频流上的对象进行分类的卷积神经网络(CNN)的性能取决于网络中使用的层、网络的深度、视频的分辨率、帧率要求以及用于网络权重的位数,等等。但是,在嵌入式系统中尝试衡量所需的性能非常重要,因为在此问题上投入性能过于强大的处理器通常意味着需要在增加的功耗、尺寸和/或成本方面做出让步。尽管特定的处理器可以支持 ResNet-10(这是一种在高功率集中式深度学习应用中常用的神经网络模型)的 30fps@1080p,但如果某个应用将在 244 x 244 目标区域上运行更符合嵌入式需求的网络,这样的处理器可能有点大材小用。
- **考虑嵌入式需求.**选择适合的网络与选择适合的处理器同样重要。并非每种神经网络架构都适合嵌入式处理器。将模型限制到运算量较少的模型将有助于实现实时性能。在选择网络的基准测试时,应该优先考虑符合嵌入式需求的网络,这样的网络将牺牲一定的准确性以大幅降低计算工作量,而不是诸如 AlexNet 和 GoogleNet 等更为知名的网络,因为这些网络不是为嵌入式领域设计的。同样,选择的处理器能够有效利用工具将这些网络融入嵌入式领域。例如,神经网络可以容许很多错误;使用“量化”是降低性能要求并使精度降低最少的一种好方法。可支持动态量化并有效利用稀疏度(限制非零权重数量)等其他技术的处理器是嵌入式领域中的理想选择。

• **确保易用性。**易用性是指易于开发和易于评估。如前文所述,确定适合的处理器性能是一个重要的设计考虑因素。正确执行此过程的最佳方法是在现有处理器上运行选定的网络。某些方案提供了相应的工具,这些工具可以在给定网络拓扑的情况下显示出给定处理器上可实现的性能和精度,因此无需实际硬件和最终确定网络即可进行性能评估。对于开发而言,必须能够从诸如 Caffe 或 TensorFlow Lite 之类的常见框架中轻松导入经过训练的网络模型。

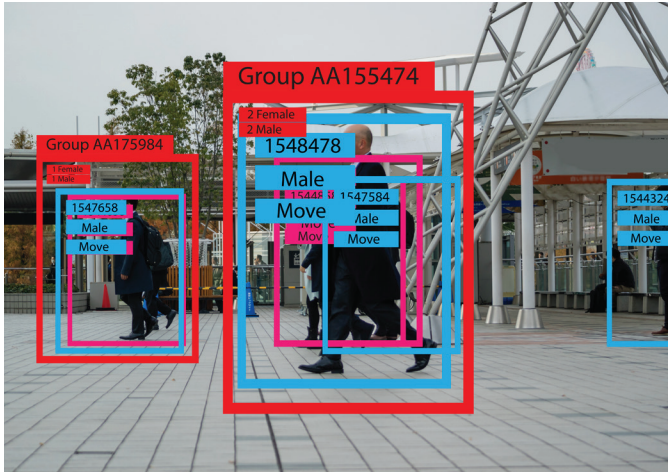


图 2.使用嵌入式深度学习进行的对象分类示例.

此外,对诸如 Open Neural Network eXchange (开放神经网络交换) 之类的开放式生态系统的支持意味着将支持更大范围的开发框架。

选择用于深度学习的处理器时,有许多不同类型的处理器可供考虑,它们各有优缺点。通常会首先考虑图形处理单元 (GPU),因为这种处理器在网络训练中得到了广泛应用。尽管 GPU 的功能非常强大,但考虑到嵌入式应用中经常出现的功耗、尺寸和成本限制,其仍难以在嵌入式领域中获得青睐。

随着深度学习越来越流行,功耗和大小经过优化的“推理引擎”也越来越多。这些引擎是专门用于执行深度学习推理的专用硬件产品。一些引擎经过了优化后可以使用 1 位权重并可以执行简单的功能(例如关键词检测),但是若要进行这样大幅度的优化来节省功耗和计算处理资源,则需要牺牲有限的系统功能和精度。如果应用需要进行对象分类或执行细粒度的工作,则较小的推理引擎在性能上可能不够强大。

在评估这些引擎时,请确保它们的大小适合于应用。当应用需要深度学习推理以外的额外处理时,这些推理引擎的局限性就会显现。在大多数情况下,这种引擎需要与系统中的另一个处理器并存,用作深度学习协处理器。

集成式 SoC 通常是嵌入式领域中一个不错的选择,因为除了容纳能够执行深度学习推理的各种处理元件外,SoC 还集成许多用于整个嵌入式应用的必要组件。一些集成式 SoC 包括显示、图形、视频加速和工业联网功能,使单芯片解决方案的功能不仅限于运行深度学习。

用于深度学习的高集成度 SoC 的一个示例是 TI 的 [AM5729](#) 器件,如图 3 所示。AM5729 具有两个用于系统处理的 Arm® Cortex®-A15 内核、两个用于运行传统机器视觉算法的 C66x 数字信号处理器 (DSP) 内核以及四个用于运行推理的嵌入式视觉引擎 (EVE)。TI 的深度学习 (TIDL) 软件产品包括 TIDL 库,该库在 C66x DSP 内核或 EVE 上运行,因此可以在器件上同时运行多个推理。另外,AM5729 提供了丰富的外设、一个用于实

现 EtherCAT 等工厂车间协议的工业通信子系统 (ICSS) 以及用于视频编码/解码及 3D 和 2D 图形的加速功能,有助于在也会执行深度学习的嵌入式领域中使用此 SoC。

为嵌入式应用选择处理器通常是产品最重要的组件选择,对于许多改变行业并将机器学习推向边缘的产品而言,便是如此。

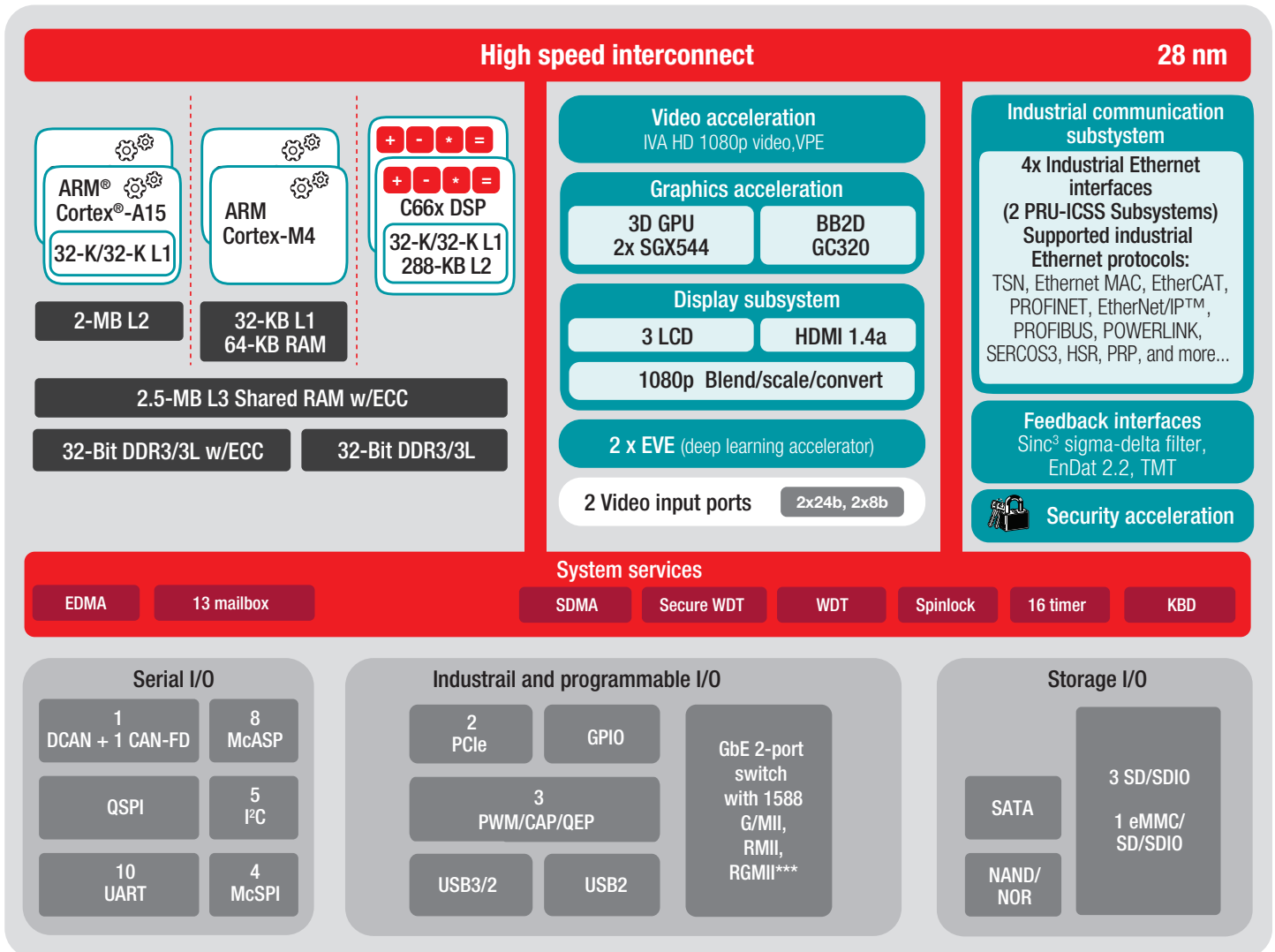


图 3. Sitara™ AM5729 SoC 的框图。



## 4.6 机器人可以应对新的挑战和功能

为了跟上在线购物的增长步伐,物流中心的数量成倍增加,同时轮式机器人的数量也随之增加,这种机器人可以处理这些物流中心的许多繁重任务。轮式机器人的下一个挑战将是如何满足最后一英里送货的需求,从而帮助减少城市地区的交通拥堵。

同时,对人类友好的机器人开始在实体店中进行实时库存管理,使超市可以减少每种产品的货架空间并增加库存种类。轮式机器人甚至正在进入酒店,提供从入住到客房服务的各种接待服务。

这些轮式机器人的工作并不都是严肃的工作;它们很快就会将披萨(如图1所示)或咖啡送到工作场所和园区宿舍。随着餐馆逐渐转向全面的食物外送服务,即由一家公司负责所有的客户互动管理、烹饪和物流工作,对轮式机器人的要求将是越快送达食物越好。



图1.运送披萨的轮式机器人示例.

随着轮式机器人的出现(有些人认为它们是变相的机器人),让我们看一下目前业界使用的整个机器人产品阵容:

- 工业机器人(或机械臂)在工厂中处理诸如焊接、码垛、分类和举升等任务。这种机器人通常位于地板、天花板或墙壁上的固定位置。它们由基座或机械臂附近的控制器进行管理。

- 虽然诸如机械臂之类的大型工业机器人已经使用了很多年(大多数都用在汽车行业),但随着人类与机器人之间的协作机会不断增加,一种称为协作机器人(简称cobot)的较小变种正以显而易见的速度进入市场。
- 物流机器人出现在仓库、配送中心、港口甚至园区内。这些机器人取回货物并将其带到包装站,或者将货物从一处建筑物运到另一处。这些机器人在特定环境中移动,并且需要大量用于定位和制图的传感器以及用于防止碰撞的传感器。
- 接待机器人出现在超市、机场和酒店中。这些机器人保持虚拟存在,用于欢迎和引导客户/来宾(图2)。
- 库存机器人出现在超市或库房中。这些机器人定期扫描货架,确保商店的产品不会售罄。



图2.接待机器人示例.

如机器人白皮书《[传感器数据强化AI](#)》中所述,工业机器人通常放置在封闭的环境中,当人类进入其环境时将停止运转。但是限制人类与机器人协作会导致无法实现许多好处。自主能力将使人类与机器人安全高效地共存。

机器人应用中的传感和智能感知非常重要,因为机器人系统(尤其是机器学习应用)的有效性能在很大程度上取决于向这些系统提供关键数据的传感器的性能。如今,各种越来越精密和精确的传感器,再加上能够将所有这些传感器数据融合在一起的系统,使得机器人拥有越来越出色的感知和意识。这些类型的传感器示例包括摄像头、LIDAR、毫米波和 ToF。

传感技术特别重要的应用是在扫地机器人的运行过程中。ToF 传感器使机器人能够准确绘制运行环境图,并确保机器人高效完成其任务。红外“悬崖探测”传感器可以保护机器人免于掉下楼梯或猛烈坠落。

正如人类依靠感官和智慧来完成任务一样,机器人需要大量的技术来模仿人类理所当然的行为。TI 提供了一些解决方案来满足许多这类技术需求,包括传感、智能和功耗方面的需求。

### 4.7 机器人系统的视觉和传感技术参考设计

<a href="#">使用具有集成封装天线的 TI 毫米波传感器的区域扫描仪参考设计</a>	此设计利用 TI 的单芯片毫米波技术实现可在 3D 空间中进行检测和定位的区域扫描仪。
<a href="#">在 Sitara™ MPU 和封装天线毫米波传感器上使用 ROS 的自主机器人参考设计</a>	此设计展示了 Linux 处理器软件开发套件 (SDK) 在 Sitara AM57x 处理器上运行、毫米波 SDK 在 IWR6843 评估模块上运行的自主机器人。此设计展示了嵌入式机器人系统的功能,其中在机器人操作系统 (ROS) 上运行的 Sitara AM57x 处理器将处理毫米波雷达传感过程中的点云数据,并且是用于总体系统控制的主处理器。
<a href="#">具有 IO-Link 的超声波距离传感器参考设计</a>	此设计采用了超声波距离传感器,此类传感器集成度高且布局经过优化,因而适合 M12 外壳。此设计提供一个 IO-Link 接口以便与系统控制进行通信,进而支持工业 4.0。
<a href="#">LIDAR 脉冲飞行时间参考设计</a>	LIDAR 系统利用光在物体之间传输所需的时间尝试测量与此目标之间的距离。此设计展示了如何基于时数转换器 (TDC) 为 LIDAR 设计时间测量后端以及相关的前端。

[查找更多有关机器人系统的参考设计。](#)

撰稿人: Dennis Barrett、Adrian Alvarez、Prajakta Desai、Ram Sathappan、Matthieu Chevrier、Mark Nadeski 和 Lali Jayatilleke。

### 5.1 利用 TI DLP® 技术驱动的结构光系统实现高精度的捡拾功能

在工业环境中,每天都要处理形状、尺寸、材料和光学特性(反射率、吸收率)各不相同的零件。这些零件必须以特定的方向进行拾取和放置以进行加工处理,这些从环境到容器的拾取和放置活动的自动化过程称为捡拾。

这项任务对机器人末端执行器(安装在机械臂末端的设备)来说是一项挑战,它需要知道想要抓握的物体的确切 3D 位置、尺寸和方向。为了在箱壁以及可能在里面的其他物体周围导航,机器人的机器视觉系统除了需要 2D 摄像机信息之外,还需要获取深度信息。

结构光技术可以解决与拾取对象的 3D 图像捕捉有关的挑战。基于结构光技术的 3D 扫描仪和摄像机通过将一系列图案投影到被扫描的物体上并使用摄像机或传感器捕捉捕获失真来工作。然后,三角测量算法计算数据并输出 3D 点云。影像处理软件(例如 MVTech 公司的 Halcon)计算物体的位置和机械臂的最佳接近路径(图 1)。

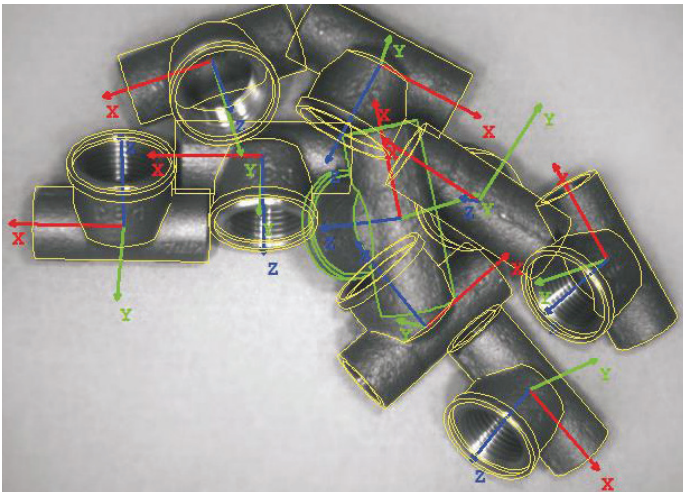


图 1. 管接头与相应的 3D 模型匹配示例(来源: MVTech 公司的 Halcon)。

DLP® 技术通过组装在半导体芯片(称为数字微镜器件(DMD))顶部的微镜矩阵提供高速图形投影功能,如图 2 所示。DMD 上的每个像素代表投影图像中的一个像素,可实现精确的像素图像投影。微镜的过渡时间约为  $3\mu\text{s}$ ,可将通过投影透镜或光场反射入射到物体上的光。前者在投影场景中实现亮像素,而后者则创建暗像素。

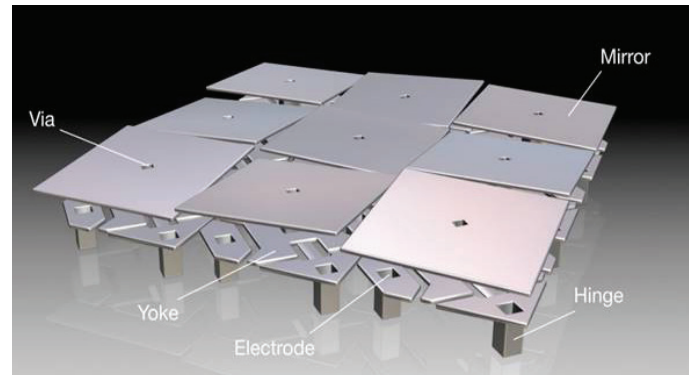


图 2. DLP 芯片包含数以百万计的微镜,可分别在高速下进行控制并有针对性地反射光以创建投影图案。

DLP 技术还具有独特的优势,它能够使用各种光源(例如灯、LED 和激光)在较宽的波长范围(420nm 至 2500nm)内投射图案。

对于捡拾操作, DLP 技术驱动的结构光具有以下优点:

- **稳健可靠,可抵御环境光。**在需要机器视觉进行捡拾操作的应用中,工厂的照明条件(例如低光照和不同照明区域之间的高对比度)或闪烁的光线(可能会干扰机器视觉系统)可能是一个挑战。由 DLP 技术驱动的结构光具有固有的主动照明,这使得它能够抵御这些条件。
- **无活动部件。**结构光系统可一次捕获整个场景,而无需将光束扫过物体或移动物体使其通过光束(如在扫描解决方案中)。结构光系统不会在宏观层次上使用运动器件,因此不会因机械性能变差而受到磨损。

- **实时 3D 图像采集。**DLP 芯片中的微镜在高速下进行控制, 并提供高达 32kHz 的定制图案投影。DLP 控制器提供触发输出和输入, 用于将摄像机和其他设备与投影的图案序列同步。这些特性有助于实现实时 3D 图像采集, 从而实现同时扫描和拾取操作。
- **投影图案的高对比度和分辨率。**由于每个微镜要么将光反射到目标物体上, 要么反射到吸收面上, 因此可以实现高对比度, 并且可以独立于物体表面属性进行精确的点检测。有了高分辨率 DLP 芯片以及分辨率高达 2560 x 1600 像素的反射镜, 意味着人们可以检测到微米级以下的物体。
- **适合对象参数。**与使用衍射光学元件的系统相比, 可编程图案和各种点编码方案 (例如相移或灰度编码) 使结构光系统更适合于对象参数。
- **加快开发时间。**尽管机器人具有很高的可重复性, 但在非结构化环境中, 拾取操作仍需要精确度, 在这种环境下, 每次从存储箱中取出物体时, 物体都会不断移动位置和变换方向。要成功应对这一挑战, 就需要可靠的工艺流程, 从机器视觉到计算软件, 再到机器人的灵巧性和抓握力, 不一而足。使所有系统协同工作可能是一个挑战, 需要花费大量的开发时间。

TI 的 DLP 技术评估模块可将结构光快速植入机器视觉工作流程。为了证明这一功能, TI 以一定的距离和角度在单色摄像机上安装了 DLP LightCrafter™ 4500 评估板。DLP 评估板由摄像机通过一条将两者连接起来的触发电缆触发, 参见图 3。

评估板和摄像机都经由 USB 连接到 PC, 整个设置都指向校准板。使用 DLP 技术参考设计的 3D 机器视觉应用精确点云生成软件可校准摄像机和投影仪的焦距、焦点、镜头畸变、摄像机相对于校准板的平移和旋转等参数。《参考设计用户指南》将分步介绍整个过程。

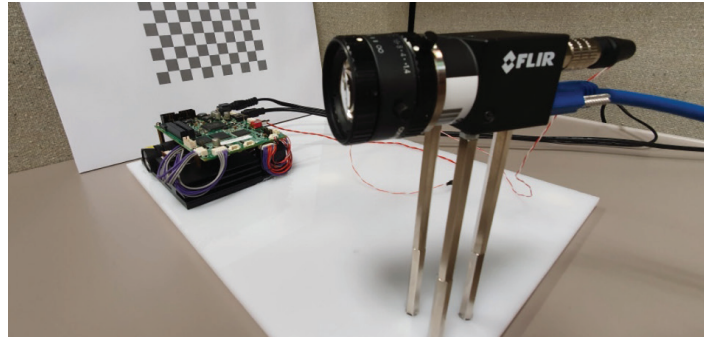


图 3. 结构光设置, 包括 DLP® 产品 LightCrafter™ 4500 (左)、Point Grey 前视红外 Flea3 摄像机 (右) 和校准板 (后)。

只有当摄像机相对于 DLP 产品电路板发生了移动时, 才需要重新校准。

设置完成后, 就可以创建真实目标的点云了。这些云由软件以任意文件格式输出, 然后通过 Halcon 的 HDevelop 平台中的简短代码进行读取和显示。图 4 显示了一个点云, 其中彩色编码表示装满咖啡杯的盒子的深度信息。

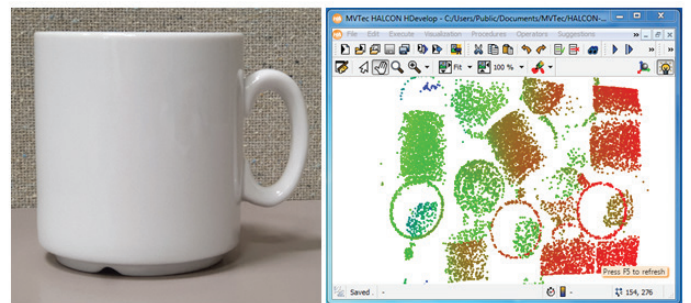


图 4. 捕获的杯子 (左) 和在 Halcon HDevelop 中显示的盒子中 (右) 使用 DLP® 驱动的多杯子的结构光捕获点云。

Halcon 的表面匹配可以通过将点云与杯子的 3D 计算机辅助设计模型进行比较来确定杯子的 3D 姿势。机械臂现在可以“看到”物体, 从而可以计算出机械臂的最佳接近路径, 这样它就可以从盒子中拾取物体, 并可以在非结构化和变化的环境中避开障碍物。

作者: Franz Schellhase

### 6.1 为传感器选择合适的工业通信标准

继蒸汽动力、装配线和早期自动化革命之后，更大规模的工厂连接和控制正在引领第四次工业革命，即工业 4.0。

这场运动以数据、带宽和网络的指数级增长推动了机器对机器间的通信，从而创建了在各个级别上都具有更高响应自动化的智能工厂。

尽管人们的关注点大多集中在机器人和配套装配线之类的大型系统，但如果没有与运行生产线的可编程逻辑控制器 (PLC) 进行通信的传感器和执行器，它们所能支持的自动化就不可能实现。传感器和执行器，无论是在本地还是远程运行，其数量往往远远超过它们所支持的复杂系统。如图 1 所示，优化整个工厂通信对于满足各种规模系统的各种要求而言是必要的。

事实证明，适合工业应用的以太网协议在工厂现场作为现场总线很受欢迎。这些工业以太网协议（例如 EtherCAT 和 Profinet）可提供高带宽、长物理连接、低延迟和确定性的数据传输，以及自动化制造所需的其他功能。此外，基于这些标准的现场网络能轻松连接到大型工厂数据网络和互联网。

但是，对于传感器和执行器而言，工业以太网通常过于强大。这些系统通常需要点对点通信而不是现场总线，并且它们的带宽要求通常很低。

一种创新的解决方案是使用 IO-Link，这是一种基于标准布线和物理互连的双向通信协议。IO-Link 不仅能有效地将数据从工厂车间高效地传输到 PLC，而且还支持改进的设置、诊断和维护，并且与现有现场总线布线互补。

由于 IO-Link 和工业以太网是互补的，因此了解这两个标准如何协同工作对联网工厂系统的设计人员而言大有裨益。

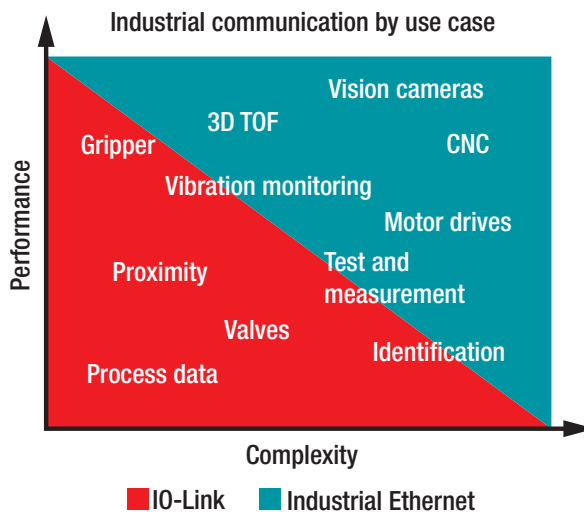


图 1. 按用例列出的工业通信。

#### 低带宽 IO-Link

传感器和执行器是自动化的最基本单元，它将信息馈入网络系统并根据网络系统的指令执行操作。一直以来，这些器件通过智能化程度较低的接口连接到控制单元，因此它们很少或根本不交换配置和诊断信息。安装新器件需要在使用现场进行手动配置，并且如果没有诊断，则无法进行及时的预防性维护。

IO-Link（国际电工委员会 [IEC] 61131-9）是一种开放式标准协议，它解决了传感器和执行器等小型器件智能控制的需求。本标准提供了器件与通常用作现场总线和 PLC 网关的主机之间的低速点对点串行通信。智能链路可简化数据交换、配置和诊断通信。

使用一根长达 20 米的非屏蔽三芯电缆（通常配有 M12 连接器）来建立 IO-Link 连接。数据速率范围高达 230kbps，非同步最小周期时间为 400 $\mu$ s，+10%。四种操作模式支持双向输入/输出 (I/O)、数字输入、数字输出和停用。未指定安全机制和确定性数据传输。称为 IO 器件描述 (IODD) 的配置文件包含通信属性、器件参数、标识、过程和诊断数据，以及相关器件和制造商的信息。

IO-Link 系统的许多优点包括标准化布线、更大的数据可用性、远程监视和配置、简单的器件更换和高级诊断。IO-Link 允许工厂经理接收传感器更新, 并为即将进行的维护或更换制定计划。更换需要更换的传感或执行单元, 并通过 IO-Link 主机从 PLC 配置新的传感或致动单元, 可消除手动设置并减少停机时间。在不访问工厂现场的情况下将生产从一种配置远程切换到另一种配置可以简化产品定制(图 2)。工厂可以将生产线轻松升级到 IO-Link, 因为它与现有的标准 I/O 设备和电缆向后兼容。总之, 这些功能可降低总体成本、提高流程效率并提高机器可用性。

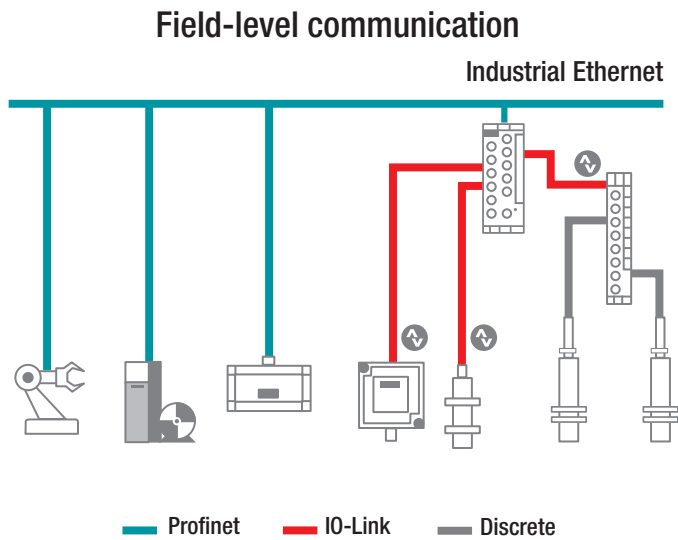


图 2. 现场级通信.

### 工业以太网: 智能工厂的骨干

近年来, 工业以太网已在高度自动化的工厂中显示出其价值, 成为大型现场网络(包括复杂系统、PLC 和支持与外部网络交互的网关)的首选标准。高速、通用接口和长连接距离等优点

使得以太网在数据网络中无处不在。此外, 工业以太网使用改进的媒体访问控制 (MAC) 层, 以低延迟提供确定性数据传输, 并支持时间触发事件。支持环形和星形拓扑以及传统的内联连接, 可确保在电缆断开时的安全性和可靠性。

工业以太网不是唯一的单一规范, 而是由不同的工业设备制造商驱动的用于在现场级应用中实现的一大组不同协议实现。常用协议包括 EtherCAT、Profinet、以太网/IP、Sercos III 和 CC-Link IE Field 等。白皮书“[工业以太网通信协议洞察](#)”对这些协议进行了比较, 并讨论了旧版非以太网串行现场总线协议, 如控制器局域网 (CAN)、Modbus 和 Profibus。

Profinet 和 EtherCAT 是使用最广泛的两种协议, 它们说明了工业以太网的类型之间以及它们与 IO-Link 之间的区别。两者均指定为 100Mbps 的传输速率, 并且最大传输距离为 100m。Profinet 需要独立于数据电缆电源的电源, 而 EtherCAT 提供的版本 (EtherCAT P) 在同一根电缆中包含电源和数据。Profinet 支持全双工通信, 并能够将数据包发送到网络上的每个节点。该协议还提供了三个类, 允许用户匹配网络所需的性能级别。相比之下, EtherCAT 在网络上向一个方向发送一个共享帧, 所有的从机都将其数据放在这个共享帧中, 该方案支持极快的转发时间。

Profinet 和 EtherCAT 都比 IO-Link 具有更快的周期时间, 而容差却小得多。两者都基于网络同步而不是像 IO-Link 一样从通信开始就计时。附加协议为连接提供功能安全性。工业以太网协议通常提供许多服务, 以简化自动化环境中的集成。

尽管大多数传感器不需要工业以太网连接提供的强大功能集, 但视觉传感是一个重要的例外。摄像机产生的海量数据本身就足以需要一个比 IO-Link 所能提供的数据速率要高的连接。视觉传感以及有时其他类型的传感可能会为实时过程控制提供必要的输入, 因此需要工业以太网的确定性传输。

例如, ToF 应用跟踪并预测物体的三维运动。典型的响应是机械手臂移动以拦截物体。IO-Link 可以提供足够的速度和分辨率, 以便在这些应用中有限地检测存在, 但是工业以太网可提供足够的带宽和足够低的延迟来确定物体及其周围空间的某些特征。通过千兆以太网, 使用摄像机馈送, 甚至可以进行更高级别的识别, 但是此处讨论的工业以太网协议尚不支持这些速率。您可以在图 3 中看到 ToF 的选择示例。

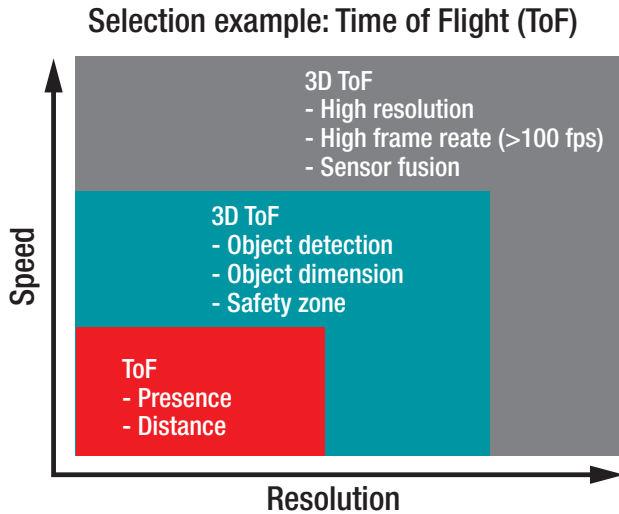


图 3. 选择示例: ToF。

### 面向智能工厂通信的 TI 技术

竞争性工业以太网协议中存在许多可能性, 可用于摄像机、电机、机器人、PLC 和其他复杂系统。即使是简单的传感器和执行器也需要在更大的工业以太网环境中有效运行。由于自动化设备之间有如此多的通信选择, 工业系统设计人员需要灵活但易于使用的解决方案。TI 技术通过基于一系列标准(包括 IO-Link 和最常用的工业以太网协议)的工业通信集成解决方案来满足这些要求。

TI 的 [TIOL111x](#) 收发器系列为自动化系统中的传感器和执行器提供了完整的 IO-Link 功能以及静电放电、电快速瞬变和电涌保护。EVM 可用于查看运行中的器件, 而参考设计有助于加快变送器、接近开关、螺线管驱动器、超声和其他应用的开发。

需要更大带宽和确定性时序的应用设计人员必须确定要支持多少工业以太网协议, 以使其系统与多个现场总线环境兼容。传统上, 添加协议需要创建附加接口或插入到主板的可互换模块。每个决策都涉及到额外的硬件设计、更大的材料清单以及更长的测试和认证周期。

TI [Sitara™ 系列](#) Arm® 处理器无需添加硬件, 即可提供支持多协议工业以太网的集成可编程实时单元和工业通信子系统 (PRU-ICSS)。图 4 (下一页) 显示了一个基于 Sitara 处理器与 IO-Link 主机直接通信的系统示例。

PRU 在器件运行时加载工业协议固件, 并提供 EtherCAT、Profinet、Sercos III、Ethernet/IP 和 Ethernet PowerLink 选项。PRU-ICSS 处理实时关键任务, 否则这些任务会内置到应用特定的集成电路 (ASIC) 或现场可编程门阵列 (FPGA) 中, 从而在您需要添加新功能或协议时提供基于软件的可升级解决方案。基于可扩展的 Arm 内核 (Cortex®-A8、A9 或 A15, 取决于处理器), Sitara 处理器支持使用多种工业以太网协议为工厂自动化提供单芯片解决方案。

TI 为工业以太网和其他标准 (如 CAN) 提供了广泛的接口 (如表 1 (下一页) 所示), 既可以作为独立解决方案, 又可以作为其他集成解决方案中可用的技术模块使用。许多 TI 网络产品都具有增强的隔离功能, 以保护电路和人员安全, 而其他器件则在设计中提供了增强的隔离功能。深入的开发支持包括用于自动化工业设备中各种应用的软件、工具、EVM 和参考设计。

## IO-Link master with Sitara™ AM437x processor

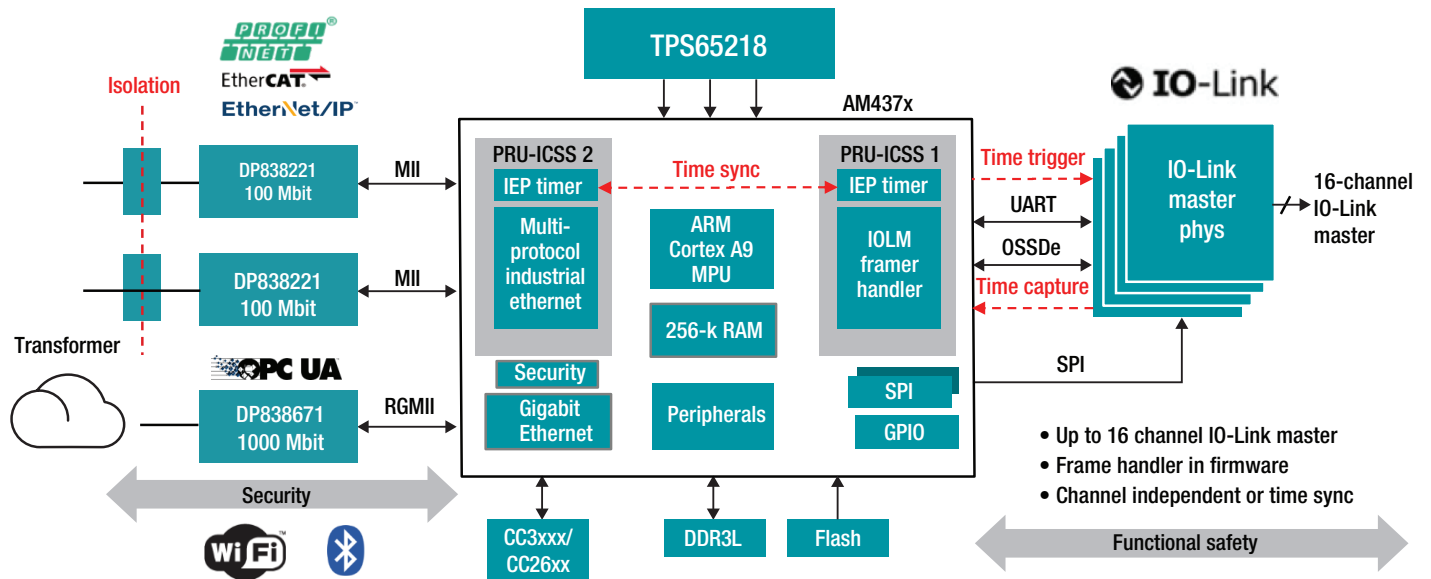


图 4. 一个基于 Sitara™ 处理器与 IO-Link 主机直接通信的系统。

特性	IO-Link	Profinet	EtherCAT	注释
物理层	≤230kbit、半双工、20米、同一电缆供电	100Mbit、全双工、100米、独立电源	100Mbit、共享数据包、100米、同一电缆供电	仅 Profinet 支持并发接收和传输数据包
拓扑	点对点	线型、环型、星型	线型、环型、星型	以太网支持大规模网状
最小周期时间	400μs + 10%	250μs (31.25 μs, 带 DFP)	31.25μs	IO-Link 允许 +10% 的额外公差
时间同步	基于通信启动	PTCP <±1μs, IRT 测试 <250ns	分配时钟 ±100ns	IO-Link 没有应用时间
安全性	不可用	没有 Profinet 流量的限制	不可用	所有这些都需要 IT 连接附加安全协议
功能安全	仅在冗余信道上存在迹象	Profisafe	功能安全存在于 EtherCAT	以太网传输被视为黑通道
配置文件和服务	智能传感器、现场总线集成、固件更新、OPC UA	Profidrive、CiR、系统冗余、诊断	SoE、CoE、EoE、FoE、AoE、EAP	全部支持集成到自动化网络中, IO-Link 上没有驱动器配置文件

表 1. 用于制造现场通信的 IO-Link 和工业以太网。

### 面向未来智能工厂的技术

智能工厂的发展有赖于多功能网络的实现, 该网络可以将各个设备单元的要求与工厂的整体通信需求相匹配。工业以太网协议为连接到 PLC、摄像机、机器人和其他复杂自动化系统的现场总线连接提供了高带宽和快速、有保证的计时。IO-Link

为现场总线主机和传感器或执行器之间的点对点连接提供了一种简单的替代方法, 有助于进行配置和维护。TI 提供了广泛的解决方案和灵活的技术产品组合, 可帮助设计人员利用这些互补标准在第四次工业革命中实现自动化领域的创新。



## 6.2 赋能机器人, 实现更高水平的工厂自动化

半个多世纪以来,机器人在制造领域扮演着越来越重要的角色,成功实现了多个行业的变革,从汽车到电子产品再到消费品行业,无不见证着它的影响。机器人为重复性任务的执行带来了生产力、成本效益以及通常更高的安全性。

机器人不断发展,提供更多的功能、灵活性、运动范围、速度和精度。除了在装配线的受保护空间中发挥作用外,机器人还越来越多地并肩操作并与人类互动,在某些情况下,它们还会将材料从一个地方移到另一个地方。机器人要想以这些越来越复杂的方式运行,就必须能够处理有关环境的大量传感数据,能够在彼此之间以及与中央控制单元进行通信,并执行适应环境变化的控制功能,防止它们伤害人类。

通过为工业自动化提供创新的电子解决方案, TI 提供了一系列 IC 产品,可进行高级机器人系统开发。从工厂的最高控制层到执行器和传感器, TI 为控制、通信、电源和安全提供了单独的产品和完整的解决方案。TI 系统的专业知识基于与许多行业领先制造商的多年合作,该公司的深入支持有助于简化机器人系统的设计并缩短开发时间。

### 工业自动化中机器人应用的类型

尽管人们对类人型和类动物型机器人、无人机甚至扫地机器人给予了广泛关注,但工业环境中使用的机器人仍然是机器人市场的主流。机器人开发人员在设计工业用产品时面临的许多问题也适用于机器人技术的其他领域,而为满足工厂要求而创建的技术通常可以在制造业之外实现新的机器人应用。

尽管工业自动化中使用的所有机器人在技术上都是工业机器人,但在本次讨论中,重点将放在三组机器人应用上:如图 1 所示的工业机器人、物流机器人和协作机器人。工业机器人是固定在适当位置的装置,用于处理焊接、喷漆、拾放、组装和提升物体等任务,以将其放置在托盘或容器中。控制信号来自机器人控制器,它是机柜中的一个控制单元,通常位于机器人的底部或旁边。

工业机器人旨在快速、准确地执行任务,并且不需要与人类直接交互。因此,它们没有用于感知人的存在的传感器,也不能在其操作空间中容纳人员。当需要人机交互时,机器人通常会被关闭。为了人身安全和不干扰操作,工业机器人通常位于围栏、透明墙、光敏屏障、地垫阵列(当踩踏时会切断电源)或其他保护性屏障内。



图 1.机器人在工业自动化与服务中的应用。

物流机器人是在可能有人在场的环境(例如仓库)中工作的移动装置。物流机器人可以取回货物并将其带到包装站,或者将货物从公司现场的一处建筑物运到另一处;一项最新的发展是使用机器人运送外卖,尽管它们目前需要由人工搬运员陪同。这些机器人通常在特定环境中移动,并且需要多个传感器来进行定位和制图,以防止碰撞,尤其是与人的碰撞。超声波、红外和 LIDAR 传感都是可能的技术。由于这种机器人具有移动性,因此控制单元位于内部,通常与中央远程控制进行无线通信。

协作机器人与人类的交互最为复杂,通常需要在同一时间在同一物体上与人类直接协作。协作机器人可能会在人类目视检查物体或执行微调任务时握住物体。然后,机器人可能会将物体放置在另一个机器人可以捡起区域中,也可能将其移动到新位置以便与其他工人进行协作。

协作机器人制造商必须在机器人系统中实现高水平的环境感知和冗余度,以快速检测和防止可能发生的碰撞。连接到控制单元的集成传感器将感应机械手臂与人类或其他物体之间的碰撞;控制单元将立即关闭机器人。如果任何传感器或其电子电路出现故障,机器人也会关闭。协作机器人通常与控制单元一起固定在机柜中,但也可以安装在车辆上。

### 工业机器人技术要求

投资于机器人的制造商正在寻求更高的生产效率,同时在合理的时间范围内获得良好的投资回报。实现这些目标取决于机器人在困难任务中的精确度、在高度重复性任务中的性能速度、在危险任务中保持安全的能力或这些能力的某种组合。

具有灵活应用功能的机器人(例如图 2 所示的机器人)经常使用摄像头观察物体,这可以使制造商不必投资于更专业的机器,同时在工厂车间实现更完整、更短和更高效的生产运行和新用途。此外,如今许多工厂正在为生产线增加更多的通信和控制层,将更多的数据整合在一起,以实现更好的过程控制和设备维护,同时也使工艺对产品需求的变化做出更快的响应。机器人和其他设备之间的通信和更高层次的控制对于完全集成的工厂至关重要。

机器人开发人员依靠先进的 IC 解决方案来满足这些要求。推动工业机器人进步的 IC 产品必须提供精确的传感、高速传感器信号转换、快速计算/信号处理,以实现实时响应和高速通信。IC 还能与 GaN FET 等先进的半导体配合使用,以实现高效率和小尺寸电源。

随着传感器数量和环境刺激的增加,所有这些因素都特别重要。机器人开发人员所依赖的解决方案可以最大程度地减少电路设计和认证带来的麻烦,加快产品开发速度,使其能够快速交付给工业客户。

高级集成电路必须提供以下功能:

- 具有电路保护和低噪声排放的高效高压电源。
- 工作温度范围的特性。
- 支持工业以太网和其他广泛使用的工业通信标准。
- 易于编程,具有更大的灵活性。
- 快速、精确的模数和数模信号转换。
- 增强型隔离,符合工业安全标准。
- 与其他 IC 结合使用时,可为安全关键型应用提供控制冗余。
- 将电路放置在狭小空间(例如移动物流机器人)或在机械手臂(以及空间狭小的其他设备,如传感器和电机外壳)中进行电机控制时,占地面积小。
- 低功耗(对物流机器人和传感器等电池供电或环境供电设备至关重要)。
- 全面的支持,包括参考设计和 EVM,以最大程度地缩短设计时间并使设计人员专注于增值技术。



图 2. 具有机器人交互功能的装配线。

## TI 的工业机器人使能技术

TI 可提供设计灵活的机器人所需的全套先进技术, 这些机器人可以在当今的集成制造工厂环境中运行。从传感器输入到执行器或电机输出, 从单个设备单元到工厂级控制等等, TI 解决方案可处理整个信号链, 以及机器人应用所需的处理能力和电源。产品具有增强型隔离等功能, 并经过测试, 符合在严苛工业环境中使用的标准。为达到这一目的, TI 为其 IC 产品提供深入支持以简化其设计并加快开发速度。

在 TI 为机器人和其他工业设备提供的众多解决方案中, 尤其值得注意的是:

- **Sitara™ 处理器。**任何控制单元的核心都是处理器, 而 TI 经过系统优化的 Sitara 处理器旨在为机器人和其他工业设备提供灵活、快速的设计。基于 ARM® Cortex®-A 内核, Sitara 处理器提供灵活的外设、连接和统一的软件支持, 可覆盖各种应用。单核和多核器件的广泛组合为每个应用提供了集成性、连接性和性能的完美平衡。完全可扩展的软件平台可实现统一的软件体验, 从而简化了 Sitara 处理器和 TI DSP 系列之间的开发和代码迁移。处理器系列内的引脚兼容选项可以实现硬件无缝升级。

Sitara 处理器旨在满足长期应用的工业要求, 产品生命周期通常超过 10 年。当实现专门的数据处理操作、定制外设接口和短至 5ns 的快速实时响应时, 这些器件提供了可编程的灵活性。可编程实时单元工业通信子系统 (PRU-ICSS) 作为 Sitara 处理器系列内部的硬件模块, 用单芯片解决方案替代现场可编程门阵列 (FPGA) 或应用特定 IC (ASIC)。轻松获得免费软件和设计工具, 加上大量的开源社区支持, 减少了开发障碍。

- **接近传感。**协作机器人需要对附近的事物和人进行复杂的感知, 以确保其安全无虞。TI 在传感技术方面的专业知识包括接近传感解决方案, 这些解决方案可用于检测目标物体是否存在, 并在需要时测量其距离的应用。TI 支持的接近传感技术包括超声波、电磁、电容、电感和 ToF。
- **3D ToF/光学传感。**借助 TI 产品, 基于 ToF 的传感技术便能够超越接近检测技术, 实现下一代机器视觉。TI 的 3D ToF 芯片组为您提供了最大的灵活性, 可为机器人视觉或其他应用定制设计。工具包括一个 EVM 和一个高度可配置的摄像机开发套件; 后者为精确的深度图提供了每个像素的 3D 位置, 有助于对给定应用进行自定义设计。
- **GaN 电源。**除了各种开关和线性稳压器、开关控制器、电源监控和其他支持电源管理器件的电源管理产品组合外, TI 还提供 [GaN 模块、驱动器和控制器](#), 为工业系统中的高压电源提供出色的功率密度。GaN 技术极大地降低了开关损耗, 因此在减少或消除散热器的同时, 能够实现更快的开关速度。易于使用的模块提供了一个完整的解决方案, 具有优化的布局和效率, 以及符合工业标准的最小电磁辐射和噪声。完整的支持包括 EVM、开发板以及用于加快设计速度的快速启动工具集。为了精确控制精密驱动器, TI 的参考设计库包括一个 [48V 三相逆变器, 该逆变器配备基于分流器的直列式电机相电流感应参考设计](#)。
- **工业以太网。**TI 在网络通信方面的深入专业知识意味着可以支持多种标准。该协议包括基本的设置任务, 开源固件可实现产品差异化。

## 为一体化工厂打造更好的机器人

随着制造业在各个层面的高度一体化程度不断提高, 机器人将在执行各种各样的装配任务中扮演越来越重要的角色, 这些任务可以提高产量并为人类提供更安全的工作场所。传统的工业机器人、物流机器人和协作机器人都有自己的工作要做, 机器人开发人员需要能够使所有机器人实现准确、安全、具有成本效益的操作的解决方案。

TI 的信号、处理、通信和电源管理 IC 产品有助于提供机器人制造商所需的解决方案。TI 通过软件工具、EVM 和参考设计以及其他形式的支持来支持其半导体和 IC 产品, 这些支持有助于使设计机器人的工作变得更快、更有利可图。随着机器人对制造业的持续改善, TI 正在帮助开发人员改进机器人。

### 6.3 您的工厂比五年级生聪明吗?

展望工厂自动化的未来, IO-Link 是工业 4.0 的支持接口。您可以使用 IO-Link 双向、独立于制造商的通信协议来开发高效且可扩展的“智能工厂”。

TI TIOL111 IO-Link 收发器和 TIOS101 数字输出开关将有助于在工厂中实现下一代传感器和执行器, 同时提供进一步优化产品和简化物料清单的功能。

您可以利用 TIOL111 和 [TIOS101](#) 器件之间的引脚兼容性来开发一个完整的 IO-Link 和支持标准输入/输出 (SIO) 的传感器产品组合, 而无需为每个产品使用两个单独的 PCB。每个器件都支持预期的接口, 同时还支持高级集成保护, 包括:

- 16kV 国际电工委员会 (IEC) 61000-4-2 静电放电 (ESD)。
- 4kV IEC 61000-4-4 电快速瞬变 (EFT) 标准 A。
- 1.2kV/500Ω IEC 61000-4-5 (浪涌)。
- ±65V 瞬态公差。
- 反极性高达 ±55V。
- 过电流/过电压/过热。

通过消除或大大减小最初提供保护的外部瞬态电压抑制 (TVS) 二极管器件的尺寸, 这种保护级别可以简化设计, 从而与上一代或同类解决方案相比, 降低了总体 BOM 和相关成本。

传感器的物理尺寸将会继续缩小。这些传感器中最小的一种可能是圆柱形传感器, 如图 1 所示。

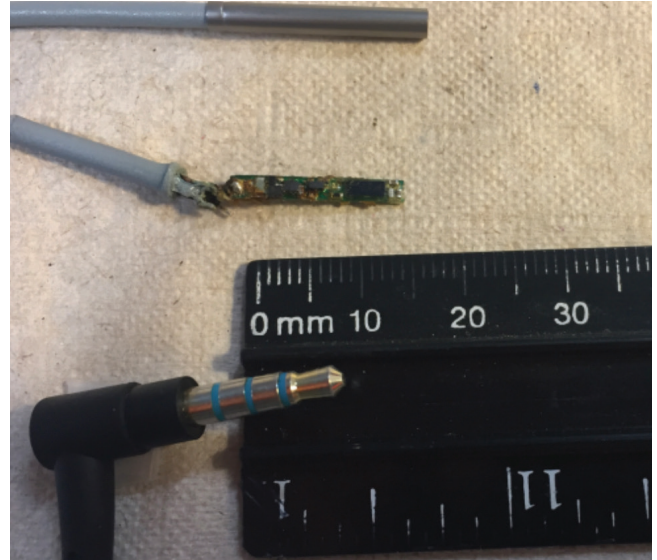


图 1. IO-Link 圆柱形传感器。

图 1 顶部的传感器是带有圆柱形外壳的成品。中间的导线是传感器的内部 PCB。该 PCB 尺寸为 17.5mm x 2.5mm。为了适应这些小型尺寸, 需要一个同样小的器件来实现 IO-Link 或 SIO 输出。了解这些系统要求推动了 TIOL111 和 TIOS101 的新封装开发。DMW 封装是目前可用的最小的热增强型 IO-Link 封装之一。DMW 封装尺寸为 3.0mm x 2.5mm, 它还支持用于导热的散热焊盘和直通引脚排布。直通引脚排布 (图 2) 通过在一个 X 轴上支持到微控制器的逻辑接口, 在另一个 X 轴上支持 24V IO-Link 接口, 为 PCB 布局和器件放置提供进一步帮助。

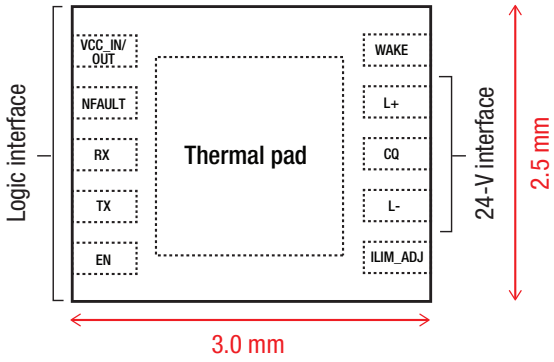


图 2. TIOL111/TIOS101 直通封装.

TIOL111 和 TIOS101 的残余电压很低, 仅有 1.75V。使用 IO-Link 和 SIO 的传感器坚固、密封且通常很小。这种小巧的封闭式外形带来了众多设计挑战, 其中热性能是最具挑战性的挑战之一。通过支持 1.75V/250mA 的超低残留电压, TIOL111 和 TIOS101 为功耗和相关系统热管理提供了卓越的基础。表 1 列出了高侧和低侧的驱动器电流输出和残余电压。

	驱动器电流输出	残余电压
高侧	100mA	1.1V
	200mA	1.5V
	250mA	1.75V
低侧	100mA	1.1V
	200mA	1.5V
	250mA	1.75V

表 1. 功率耗散 = 残余电压 × 10.

可配置的电流限制是一项附加保护功能, 可以保护传感器并可能防止网络关闭。通过一个 0kΩ 至 100kΩ 的电阻器, TIOL111 和 TIOS101 可以支持 50mA 至 350mA 的电流限制。该限制器可以将过电流情况通知可编程逻辑控制器 (PLC), 并通过定期监测过电流情况来关闭器件的输出。

可配置的限流电阻位于 ILIM\_ADJ 引脚上 (参见图 3)。

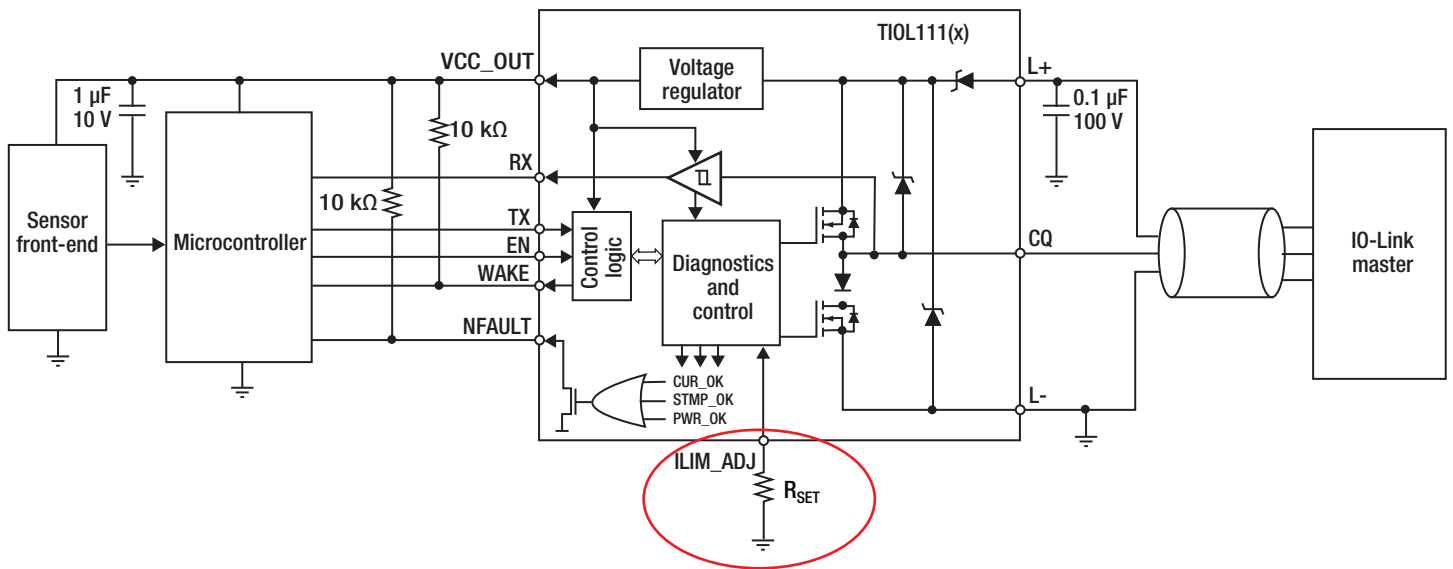


图 3. TIOL111 应用原理图.

如图 4 所示, 在 ILIM\_ADJ 引脚上使用 0Ω 电阻会将最大电流限制默认为 350mA。

TIOL111 和 TIOS101 的这些及其他特性和优点可以实现最小的传感器尺寸, 同时提供灵活性以支持多种平台和当前的配置要求。

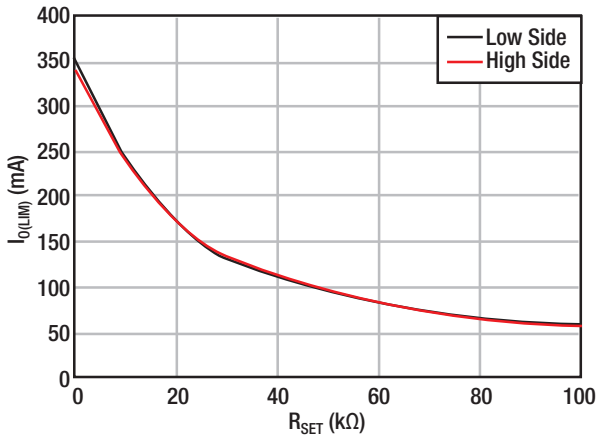


图 4. 电流限制与 R<sub>SET</sub> 间的关系。

## 6.4 机器人系统中与工业通信相关的参考设计

<a href="#">EtherCAT 从属设备和多协议工业以太网参考设计</a>	该设计实现了一个成本优化的高电磁兼容性抗扰性 EtherCAT 从站 (双端口), 具有与应用处理器相连接的串行外设接口。该硬件设计能够利用 AMIC110 工业通信处理器来支持多协议工业以太网和现场总线。
<a href="#">适用于交流逆变器和伺服驱动器的冗余双通道安全转矩关闭 (STO) 参考设计</a>	此参考设计使用双通道隔离式安全转矩关闭 (STO) 信号控制逆变器为电机提供电源, 从而在变速驱动器中实现 STO 功能 (符合国际电工委员会 61800-5-2 标准)。
<a href="#">采用 PRU-ICSS 的简单开放实时以太网 (SORTE) 主系统参考设计</a>	此参考设计实现了包含可编程实时单元 (PRU) 和工业通信子系统的 SORTe 主机。SORTE 使应用能够在 4μs 周期时间内在主机和器件之间交换处理数据。该设计包含开源的 PRU 固件。
<a href="#">EtherCAT P - 单根电缆供电和 EtherCAT 数据传输参考设计</a>	此参考设计展示了电源耦合在 EtherCAT P 供电设备电路中的物理实现方式。本设计符合 EtherCAT P 官方实施指南的所有要求。

[查找更多有关机器人系统的参考设计。](#)

撰稿人: Thomas Leyrer、Miro Adzan、Anant Kamath、Tobias Puetz 和 Russell Crane。

# TI 全球技术支持

---

## TI 支持

感谢您的订购。要查找有关您支持需求的答复或联系我们的支持中心, 请访问

[www.ti.com.cn/support](http://www.ti.com.cn/support)

中国: <http://www.ti.com.cn/guidedsupport/cn/docs/supporthome.tsp>

日本: <http://www.tij.co.jp/guidedsupport/jp/docs/supporthome.tsp>

## 技术支持论坛

在 TI 的 E2E™ 社区 (工程师对工程师) 中搜索数百万个技术问题和答案, 请访问

[e2e.ti.com](http://e2e.ti.com)

中国: <http://e2echina.ti.com/>

日本: <https://e2e.ti.com/group/jp/>

## TI 培训

从技术基础到高级实施, 我们提供点播和直播培训以帮助您实现下一代设计。即刻体验,

请访问 [training.ti.com](http://training.ti.com)

中国: <http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/gencontent.tsp?contentId=71968>

日本: <https://training.ti.com/jp>

**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。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

平台标识、C2000、LightCrafter、E2E、Delfino、InstaSPIN、Hercules、Piccolo 和 Sitara 是商标, DLP 是德州仪器 (TI) 的注册商标。所有其它商标均是其各自所有者的财产。

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司



## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司