



电机驱动：
探索电子电机
控制的迷人世界

访问 [ANALOG.COM/INTELLIGENT-MOTION](https://www.analog.com/intelligent-motion)



前言

作者：**DARA O'SULLIVAN**，ADI公司工业自动化智能机器与机器人系统应用总监

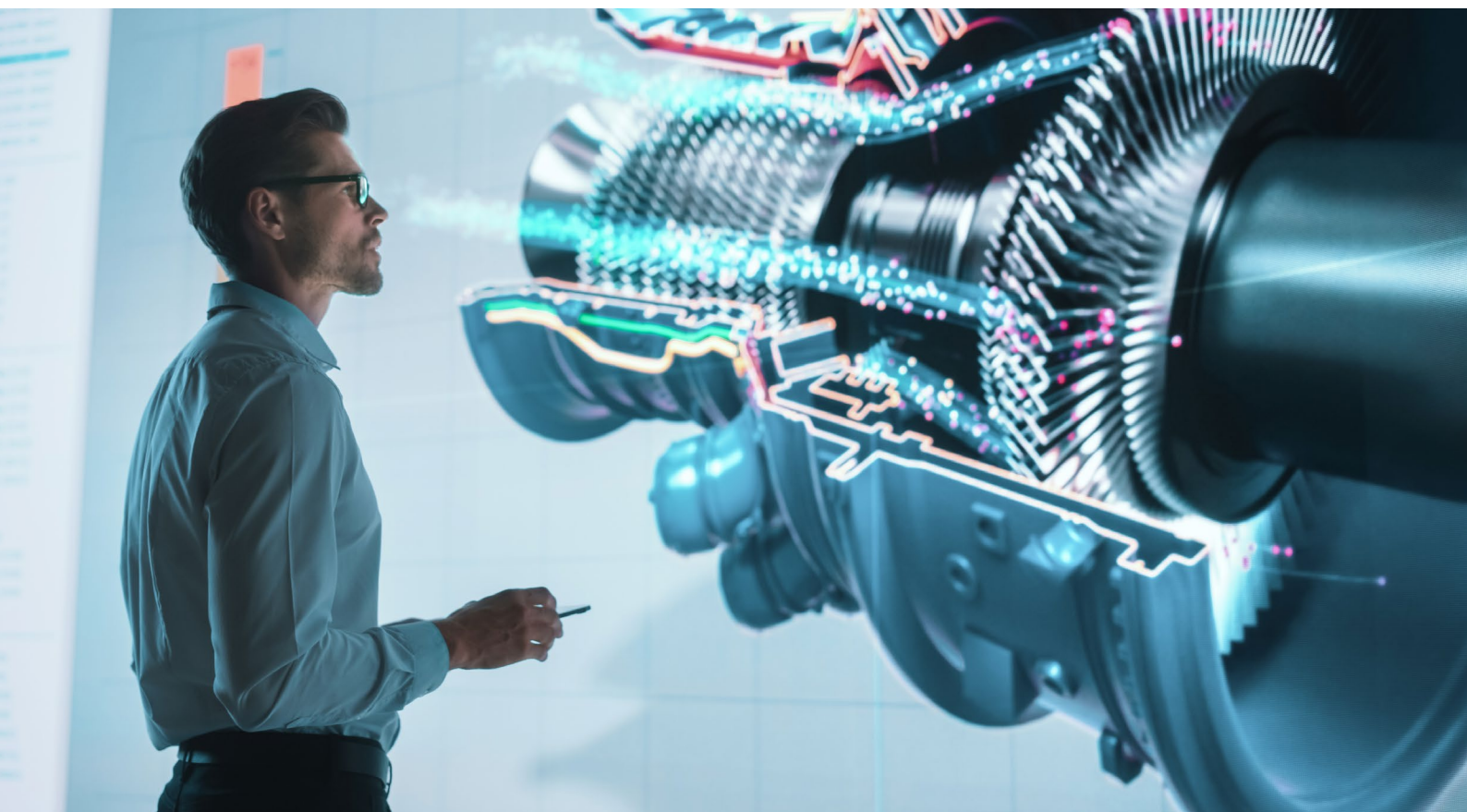
工业消耗了全球总用电量的30%，而电机能耗约占工业用电量的70%。电机广泛用于各种工业应用，以驱动泵、风扇、压缩空气系统、物料搬运、加工系统等。据估计，如果所有已部署的电机驱动系统都以最高能效运行，那么到2030年，全球电力需求将减少10%，碳排放量减少24.9亿吨。

智能运动控制融合了精确反馈、先进检测、高性能控制和无缝连接技术，可提供确定性运动解决方案，实现高度灵活且高效的制造工艺。工业应用运动控制解决方案已从基本的开/关定速电机发展到复杂的多轴伺服驱动解决方案。这种转变是为了适应自动化技术日益复杂的趋势，以满足在智能制造中提供更高水平的性能和自主性的需求。

本电子书系统地介绍了电机驱动技术。开篇概述了工业自动化趋势对运动控制发展的推动作用，然后深入讲解电机控制架构，探索具体的组成要素，包括输入级、电源、逆变器级、主控制器、反馈环路和连接等考虑因素。

目录

通过改善电机性能保护地球环境	4
面向第四次工业革命的电机控制	8
变速驱动器基本原理	12
插入电源：变速驱动器的交流输入级	14
为驱动器供电——不仅仅是插入电源那么简单	18
逆变器级：释放电力电子的力量	24
利用电流检测来增强电机控制	28
我们如何看待位置检测？	32
强劲动力背后的“大脑”：现代电机驱动器中的控制器和处理器	36
建立正确的连接来与电机驱动器应用进行通信	40
为驱动器的未来提供安全保障	44



通过改善电机性能保护地球环境

接下来的章节将从多个不同角度探讨电机驱动器，从架构到电源管理，从连接到网络安全等。我们首先从宏观视角切入，第一章将探讨提高电机能效如何有助于减少有害气体的排放，延缓气候变化。

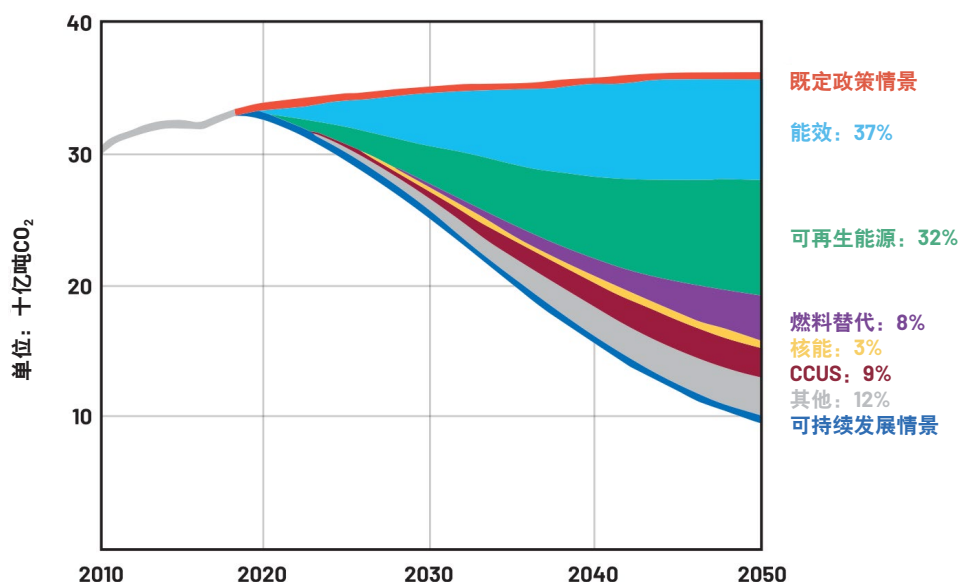
2015年的《巴黎协定》要求将全球变暖限制在 1.5°C 以内。要实现2050年 1.5°C 的控温目标， CO_2 排放量必须比2018年减少约70%。当前的全球变暖趋势有可能引发严重的经济、社会和环境危机。全球已经升温 1.1°C ，专家称本世纪30年代增幅可能会突破 1.5°C 。



全球已经升温 1.1°C ，
专家称本世纪30年代增幅可能会突破 1.5°C 。

图1显示了将 CO_2 排放量减少至100亿吨以下来实现 1.5°C 控温目标的途径，详见《2019年世界能源展望》^[1]。在该报告中，国际能源署(IEA)研究了全球排放趋势的两种情景。第一种是既定政策情景，根据公开宣布的政府政策来估算排放量。第二种是可持续发展情景，探讨减少排放的其他途径。在IEA的可持续发展情景中，减少 CO_2 排放的可能突破口是提高能效，相较于既定政策情景，占可持续发展情景减排量的37%。2022年，工业 CO_2 排放量占总排放量的25%^[2]，加速工业能效投资将是实现2050年净零排放目标的重要举措之一。

图1：减少 CO_2 排放的途径^[1]



工业电机为何如此重要

2022年全球电力供应量为28,642太瓦时，产生的碳排放量达132亿吨^[3]。据估计，工业消耗了全球总用电量的30%，而电机能耗约占工业用电量的70%^[1]。显然，电机的能效对于图1所示的节能减排起着非常重要的作用。最基础、最低效的运动解决方案基于直接交流并网三相电机，使用开关设备来提供开关控制和基本保护。此类运动控制解决方案以相对固定的速度运行，不受负载变化影响。节流阀、阻尼器、阀门等机械控制装置可调整输出变量（例如泵和风扇中的流体流量），而齿轮可实现显著的速度变化。

部署可持续运动解决方案可将全球能源消耗量减少10%

4.5亿台
已安装电机

0.52亿台/年
新安装电机

30%
工业能耗占
总能耗的比例

96%
电机能耗占
工业能耗的比例

图2：工业电机能耗在全球总能耗中的占比

如图3(b)所示，增加整流器、直流母线和三相逆变器级会得到可变频率和可变电压输出的逆变器，应用于电机可实现变速控制。这种由逆变器驱动电机可以使电机在负载和应用中以优化的速度运行，从而大幅降低系统能耗，示例包括高效率的泵和风扇。将逆变器添加到泵、风扇或压缩机的现有电机时，功耗可以降低25%至60%，具体取决于电机和应用^[4,5]。对于更高性能的运动控制应用，变速驱动器(VSD)可以助力实现精准的扭矩、速度和位置控制，如图3(c)所示。

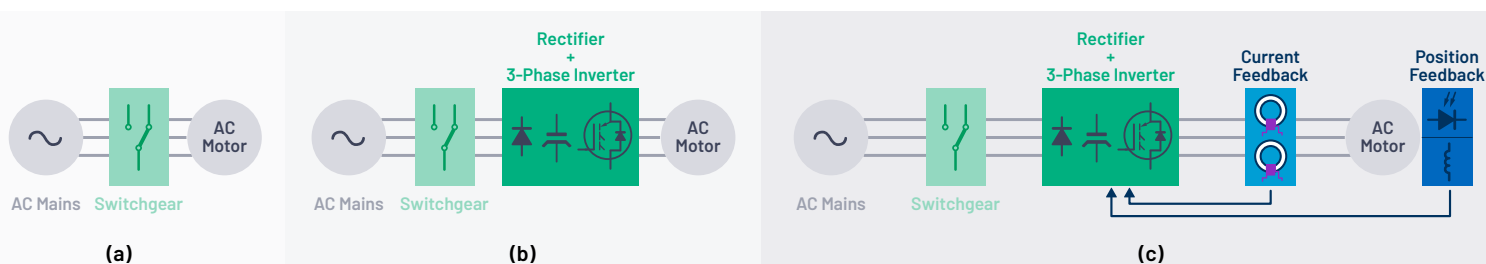


图3：(a)并网交流电机，(b)逆变器驱动电机，(c)变速电机驱动器

据估计，工业领域部署的所有电机中，只有大约1/6是由逆变器驱动或连接到VSD^[6]。通过将更多已部署的运动设备从并网电机改为使用逆变器或VSD，可以显著降低能耗和CO₂排放量。能耗降低可以助力可持续制造，同时减少CO₂排放。据估计，如果所有已部署的电机驱动系统都以最高能效运行，那么到2030年，全球电力需求将减少10%，CO₂排放量减少24.9亿吨^[7]。

电机能效标准

为加速部署更高效的电机驱动系统，国际电工委员会(IEC)推动制定了节能电机标准，包括IEC 60034-2-1电机测试标准和涵盖四级电机能效（IE1到IE4）的IEC 60034-30-1分类方案（未来还将引入IE5级别）。要达到更高级别的标准，可以采用更高效的电机设计，或在标准电机设计中添加逆变器或VSD。随着能效标准日益提高，仅通过改进电机设计来满足这些要求变得愈发困难，成本也在攀升。鉴于变速控制为应用带来的额外优势，越来越多的工业电机倾向于加装VSD。

[下一章](#)将重点介绍工业自动化领域除能效之外的其他趋势，这些趋势推动了运动控制从简单的并网机器向高度可控的多轴VSD系统发展。

参考资料

[\[1\]](#) 《2019年世界能源展望》，国际能源署，2019年。

[\[2\]](#) 《2022年世界能源展望》，国际能源署。

[\[3\]](#) 《2023年电力市场报告》，国际能源署，2023年2月。

[\[4\]](#) "Achieving the Paris Agreement: The vital role of high-efficiency motors and drives in reducing energy consumption", ABB, 2021年。

[\[5\]](#) "Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings", R. Saidur, S. Mekhilef, M.B.Ali, A. Safari, H.A.Mohammed, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012年1月。

[\[6\]](#) "U.S. Industrial and Commercial Motor System Market Assessment Report, Volume 1", Lawrence Berkeley National Laboratory, 2021年1月。

[\[7\]](#) "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems", 国际能源署，2011年。



2022年全球
电力供应量为
28,642太瓦时，
产生的碳排放量
达132亿吨。

面向第四次工业革命的电机控制

本章介绍电机控制架构和功能如何演变以满足工业4.0的要求：从简单的并网电机到复杂的多轴伺服驱动解决方案。

消费端、供应链和智能制造的快速数字化趋势，要求具备更高的生产效率、灵活度和自主性，使得自动化技术日益复杂，导致电机控制的演变不断加速^[1]。对敏捷生产和大量访问生产数据的需求，共同推动了电机控制系统复杂性的增加。



对敏捷生产和大量访问生产数据的需求，共同推动了电机控制系统复杂性的增加。

敏捷生产

随着行业不断根据消费者需求和不断改变的购买者行为做出调整，需要通过基于可重新配置生产线的敏捷生产来提供更多定制，实现更快的周转时间。消费者需求正在推动从低组合、大批量制造向高组合、小批量制造转变，这就需要工厂车间具有更高的灵活性。复杂、重复且通常较危险的任务现在可由工业机器人和协作机器人完成，以实现更高的产出和生产力。生产模式的转变导致对更复杂、可定制、自主化、智能自动化硬件的需求提高，而它们的核心正是电机控制系统。例如，传送机和搬运机等系统需要变得更加智能，具有更多的运动轴，并且高度可配置。



访问生产数据

到2023年，全球在数字化转型方面的支出将达到6.8万亿美元^[2]。变速驱动器能够提供电压、电流、位置、温度、功率、能耗等机器数据，并结合外部传感器来监测振动和其他过程变量。借助融合了信息技术/操作技术(IT/OT)的以太网网络，电机和机器数据及相关洞察现在更加易于访问，并且可由强大的云计算和人工智能(AI)进行分析，以优化制造流程并监测整个装置中资产的当前健康状况。制造流程的优化将有助于进一步降低智能制造的能源消耗。

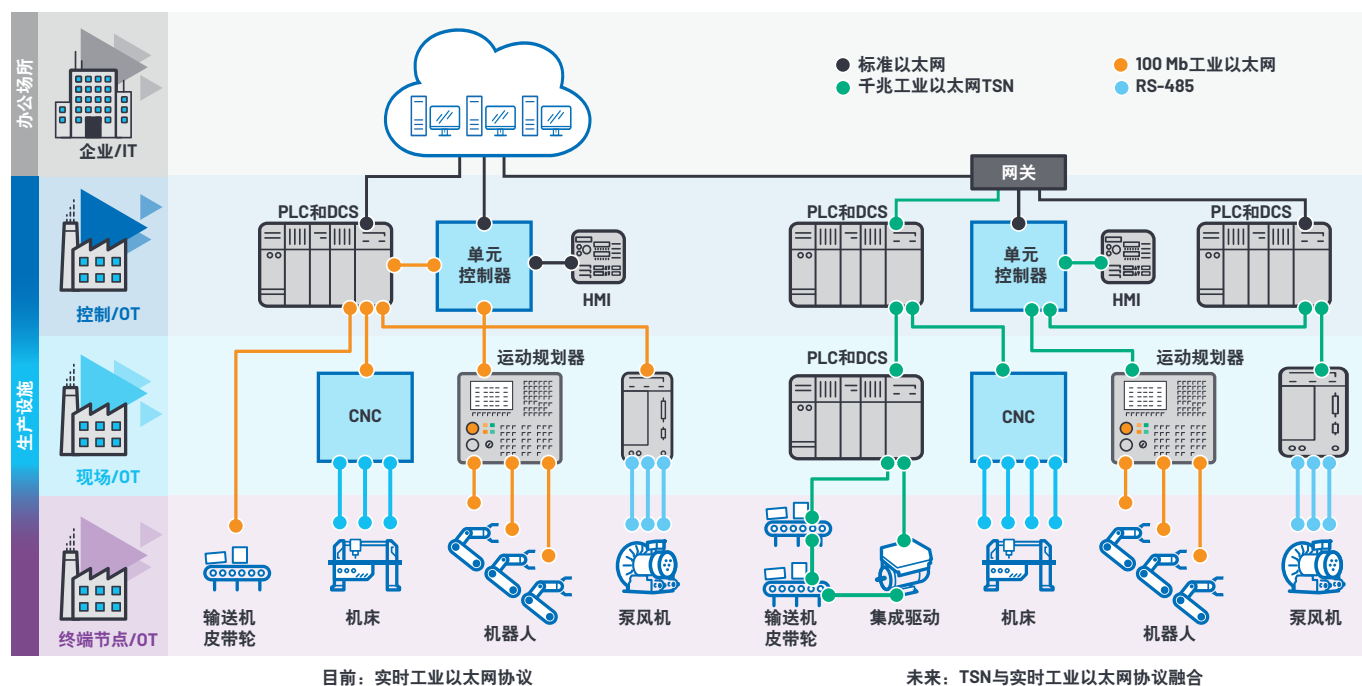


图1：无缝工业以太网连接助力实现数字转型

为实现这一目标，运动控制系统正在转向融合连接方式，传统的混杂式工业以太网通信协议正逐渐被基于时间敏感网络(TSN)的系统所取代。TSN系统遵循IEEE802.1网络标准^[3]，如图1所示。这将确保整个网络的所有区域都能实时获取终端设备产生的时间同步数据。

电机控制解决方案概览

最终，现代生产系统会混合使用简单和复杂的电机控制系统，如图2所示。其中，并网驱动器和简单的逆变器驱动器越来越多地被互连式、集成传感器的同步系统所取代。下面简要说明一下每种电机控制的特点及其应用。

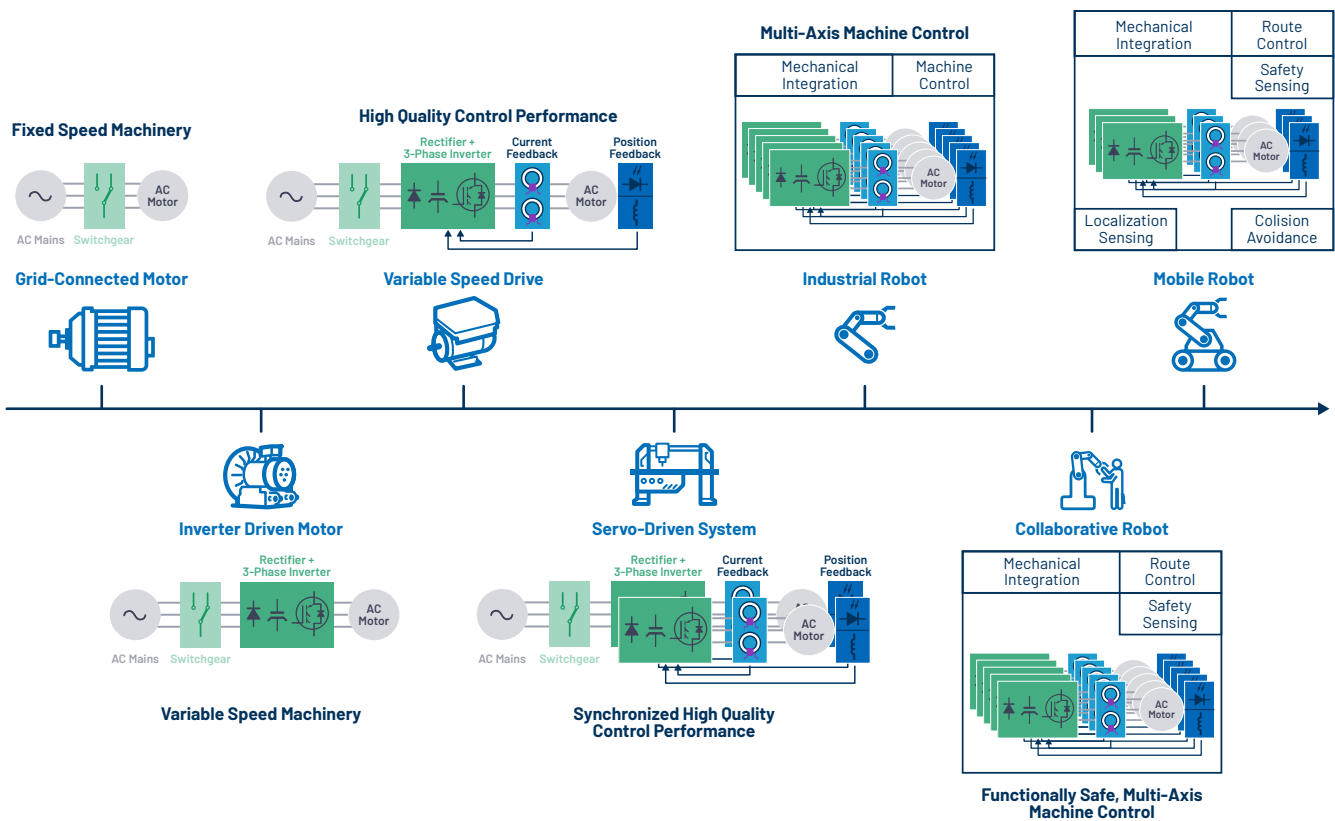


图2：现代自动化领域使用的各种电机控制解决方案

并网电机：此类基本的运动控制解决方案以相对固定的速度运行。真正的恒速应用在工业中并不多见。然而，在电机仅偶尔运行，且使用VSD又不划算的情况下，例如低功耗、间歇使用的鼓风机、水泵、阀门和执行器等，仍会使用这种电机。

逆变器驱动电机：为电机控制添加一个简单的开环逆变器，可以使电机在负载和应用中以优化的速度运行，从而大幅降低能耗。典型的应用包括泵、风扇、鼓风机和比较低级的控制系统（如平台移动器）。

变速驱动器：对于更高性能的运动控制应用，变速驱动器(VSD)可以助力实现精准的扭矩、速度和位置控制。为了实现上述控制，我们在基本的开环逆变器驱动器中增加了电流和位置测量。需要VSD的典型应用包括输送机、卷绕、印刷和挤压机械。

伺服驱动系统：同步多轴伺服驱动系统用于更复杂的运动应用中。机床和数控机床要求多轴同步操作，因此需要极为准确的位置反馈。精密加工和增材制造是利用多轴伺服驱动器的主要应用。

工业机器人/协作机器人/移动机器人：工业机器人需要将多轴伺服驱动、机械集成和先进的机器控制算法组合使用，以实现复杂的3D空间定位。协作机器人基于工业机器人解决方案构建，但增加了功率和力限制(PFL)及安全检测，以提供功能安全的多轴机器控制，让操作人员能够在协作机器人旁安全工作。移动机器人增加了定位检测和防撞功能。机器人系统的应用领域不断扩大，已从传统的汽车制造，延伸到搬运、码垛、取放、包装和物流。

在**下一章**中，我们将开始探讨电机驱动器本身的架构，并拆解为若干子系统和组件进行介绍。

参考资料

[1] [“The Fourth Industrial Revolution: what it means and how to respond” | 世界经济论坛\(weforum.org\)](#)

[2] Shawn Fitzgerald、Daniel-Zoe Jimenez、Serge Findling、Yukiharu Yorifuji、Megha Kumar、Lianfeng Wu、Giulia Carosella、Sandra Ng、Robert Parker、Philip Carter、Meredith Whalen, “IDC FutureScape: Worldwide Digital Transformation 2021 Predictions”, IDC, 2020年10月。

[3] <https://1.ieee802.org/>



到2023年，全球
在数字化转型
方面的支出将达到
6.8万亿美元。

变速驱动器基本原理

本章重点介绍变速驱动器的基本工作原理。在输送机、卷绕、印刷、挤压机和许多其他工业应用中，变速驱动器是实现精密准确电机控制的关键组件。据估计，工业领域部署的所有电机中，只有20%到30%是由逆变器驱动或连接到变速驱动器。如果每台电机都以尽可能高效的方式驱动，即匹配适当的负载并采用合适的电机驱动器，则全球能源使用量有望减少高达10%。



变速驱动器(VSD)有助于优化能源消耗，提高生产力，延长设备寿命，提升电机驱动系统的整体能效。

变速驱动器(VSD)将固定频率和电压的输入转换为可变频率和电压的输出，从而实现对电机速度和扭矩的精确控制。它有助于优化能源消耗，提高生产力，延长设备寿命，提升电机驱动系统的整体能效。电机驱动器主要位于交流电网和电机之间。它从交流电网获取主电源，并利用整流器和电容滤波器，将交流电源电压转换为直流电压。滤波电容组有助于减少直流母线上的交流纹波。直流电压经平滑处理后，被施加到逆变器级。

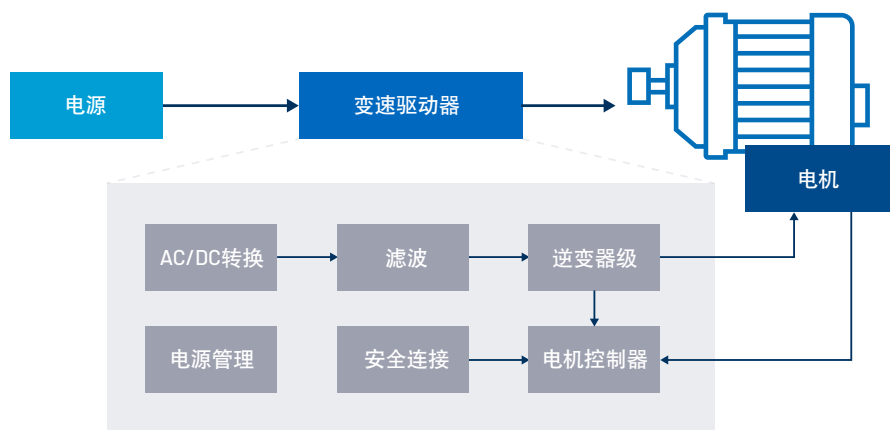


图1：框图

逆变器级是变速驱动器中最重要的部分，它负责将直流输入转换为变频输出。它由功率晶体管、隔离式栅极驱动器、电压和电流反馈电路以及其他保护和监控电路组成。功率晶体管将高压直流母线转换为变频、变压三相交流输出供电机使用。在逆变器级，栅极驱动器利用电机控制器产生的脉宽调制(PWM)信号来导通和关断功率晶体管，从而根据电机负载来改变电机所需的交流输出（电压和频率）。栅极驱动器能够高效地导通和关断功率晶体管，调节输出电压和频率，同时保护它们免受故障影响。

电压和电流检测电路对于电机控制非常重要，它负责测量电机中的电流和电压，并将测量的值反馈回电流控制环路。电机电流与电机扭矩直接相关，而电流控制环路的带宽决定了变速系统的整体扭矩响应。为确保每安培电流产生最大扭矩，并优化电机能效，需要采取精确且稳健的测量方法。这还有助于节省电能，增强可持续性。

逆变器直接连接到电机本身。在许多系统中，电机都会安装一个编码器装置，用于测量电机转子的位置并将位置信息反馈给电机控制器。电机控制器是处理单元，它从编码器、逆变器和任何外部接口获取输入，并将输出优化的脉宽调制信号传回逆变器，以使电机高效运行。处理器的选择取决于应用和算力需求，可以是微控制器、FPGA、高性能微处理器，或这些器件的某种组合。安全连接模块是用户和网络接口与电机驱动器交互的地方。连接和安全正成为电机驱动器与外界进行通信的关键要素。为使电机驱动器能够在恶劣的高噪声环境中可靠运行，必须设计具有增强抗扰度和鲁棒性的连接解决方案。随着连接需求的日益增长，器件层面的安全性能需求随之增加。制造商必须保护生产资产免受恶意软件和不可信命令的攻击，确保安全启动和可信执行，保障网络通信的安全性。



插入电源： 变速驱动器的交流输入级

上一章简要说明了组成变速驱动器(VSD)的不同要素。下面的图1详细展示了VSD的功能框图，包括驱动器的不同部分，与电机、编码器和外部网络的各种外部接口，以及不同元件之间的电力传输和数据流。

每种驱动架构略有不同，特别是在如何管理高压区域和安全超低压(SELV)区域之间的电气隔离方面，但图1所示的架构相当常见。

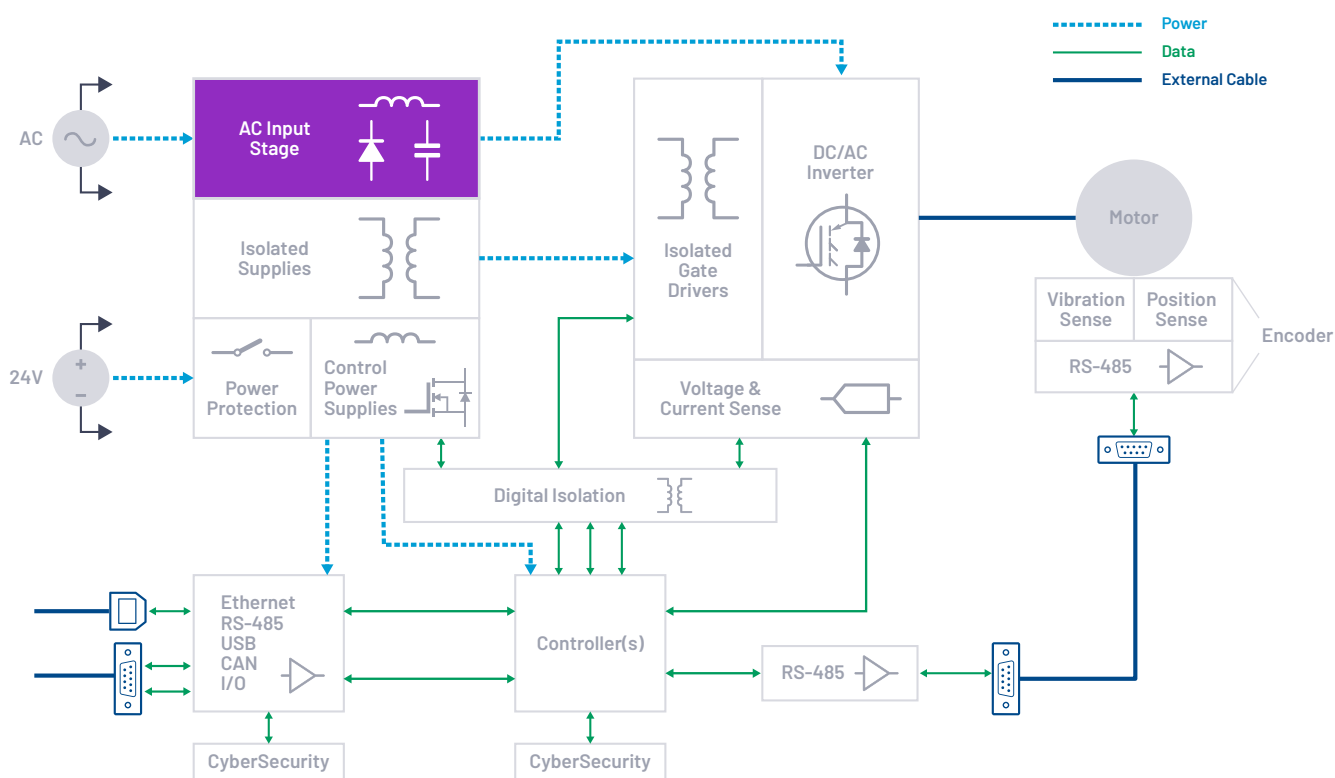


图1: 变速驱动器的详细架构

本章将深入探讨交流输入级模块。如图1所示，交流输入级是从交流电网电源到DC/AC逆变器级的主电源路径。本章将讨论此模块承担的不同功能，包括：

- ▶ AC/DC转换
- ▶ EMI滤波
- ▶ 浪涌保护
- ▶ 瞬变保护



交流输入级是从交流电网电源到DC/AC逆变器级的主电源路径。

AC/DC转换

整流器的主要作用是将交流输入（单相或三相）转换为直流母线电源，作为DC/AC逆变器级的输入。这一般是通过六二极管桥式整流器实现的，随后在直流母线上连接一个大型电解电容组。该电容组对整流后的交流信号进行平滑处理，使其更接近直流，实质上起到大型低通滤波器的作用。直流母线上存在的“纹波”量与直流母线电容组的大小成正比。同时，为了保证驱动器在交流电源短暂断电时还能继续工作，也必须合理选择该电容组的大小，以提供足够的电力维持时间。有些变速驱动器采用完全受控的AC/DC转换器，使用功率开关而非功率二极管。通过功率开关，可以完全控制输入交流电流，以便管理低频谐波。然而，这些元件要昂贵得多，在大多数应用中也不需要。

EMI滤波

AC/DC整流器级也很重要，它有助于确保驱动器符合传导EMI规定，例如国际电工委员会(IEC)发布的EN61000-3-2。DC/AC逆变器是一种开关转换器，会产生许多快速瞬态电压和电流，这些电压和电流会通过寄生电感和电容产生显著的差分和共模高频电流，必须防止这些电流污染交流网络和影响其他设备。为了对输入EMI进行滤波，通常混合使用差模和共模扼流圈，并在交流线路之间及交流线路与地之间混合使用高频旁路电容（分别称为X电容和Y电容）。这些元件对高频电流表现出高串联阻抗，而对地则表现出低阻抗，因而能够将高频电流导入地线。

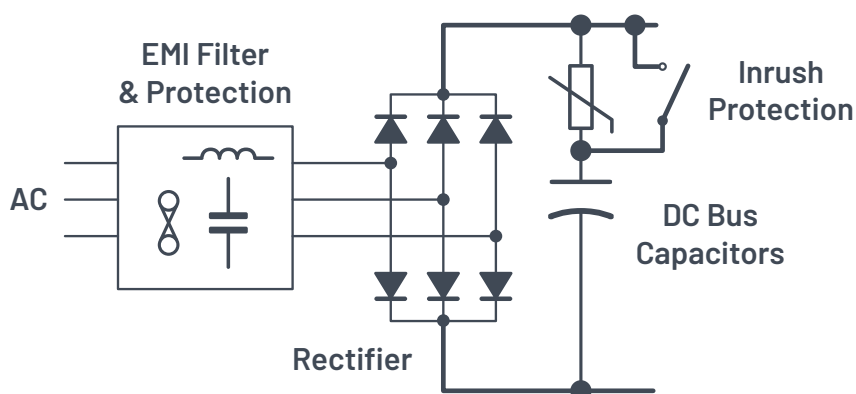


图2：输入级电路

浪涌保护

浪涌保护是输入AC/DC级承担的另一项重要功能。启动时，直流母线电容组完全放电，从交流线电压到直流母线的充电电流仅受EMI滤波器扼流圈和桥式二极管的阻性阻抗限制。

如果没有额外的限流措施，非常高的瞬态充电电流将从交流线流向直流母线电容组，这可能导致滤波器元件和/或整流二极管过载。为了解决这一问题，有时会在充电路径中插入一个串联热敏电阻。当温度较低时，热敏电阻的阻值较高，从而将充电电流限制在合理水平。温度上升后，阻值就会急剧减小，从而降低功率损耗。这种形式的浪涌保护存在一个问题，如果设备在短时间内多次重启，热敏电阻可能没有足够的时间冷却，导致破坏性的过电流出现。更好的解决方案是使用标准限流电阻，并且并联一个继电器或固态开关，一旦浪涌周期结束，开关随即导通，如图2所示。

瞬变保护

最后值得一提的是，瞬态电压保护是输入AC/DC级承担的一项关键功能。由于各种原因，交流电网中可能会出现瞬态电压尖峰和浪涌，这些情况可能会对电机驱动器造成永久性损坏。为了解决这一问题，通常将瞬态电压抑制器(TVS)二极管或金属氧化物压敏电阻(MOV)等元件与交流线各相并联。这些元件的作用是钳制电压尖峰并吸收与之相关的能量，从而保护其余电子设备。

图3显示了Rockwell电机驱动器内部的交流输入级的各种元件。尽管从电子角度来看，这些元件相对简单，但它们占据了电机驱动器内很大的空间，并且对驱动器的整体可靠性、保护功能和寿命有很大影响。

图3：变速驱动器中的交流输入级元件

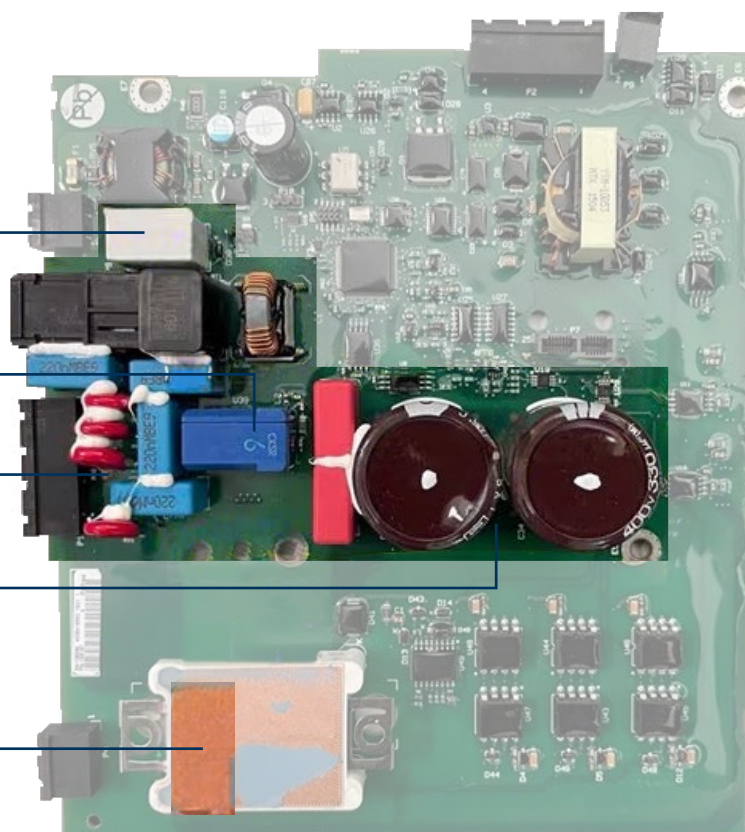
浪涌保护

EMI滤波器

瞬变保护

直流母线电容

二极管整流器



据估计，工业领域
部署的所有电机中，
只有**20-30%**
是由逆变器驱动或
连接到变速驱动器。



为驱动器供电——不仅仅是插入电源那么简单

上一章讨论了电机驱动器的交流输入级。它主要是一个AC-DC电源转换级，将交流输入电源转换为直流电源，为主要三相逆变器提供输入。除了高压逆变器电源域之外，驱动器还需要几个其他电源域。对于变速驱动器设计人员而言，管理电源域，提供适当的接地参考和隔离，保护电源域免受外部瞬变影响，是一项关键任务。

本章探讨变速驱动器中的电源管理，并研究不同电源域中存在的一些要求。在上一章中，我们介绍了一个典型架构的示意图，下面的图1再次展示了该示意图。本章探讨的驱动器部分以高亮显示。

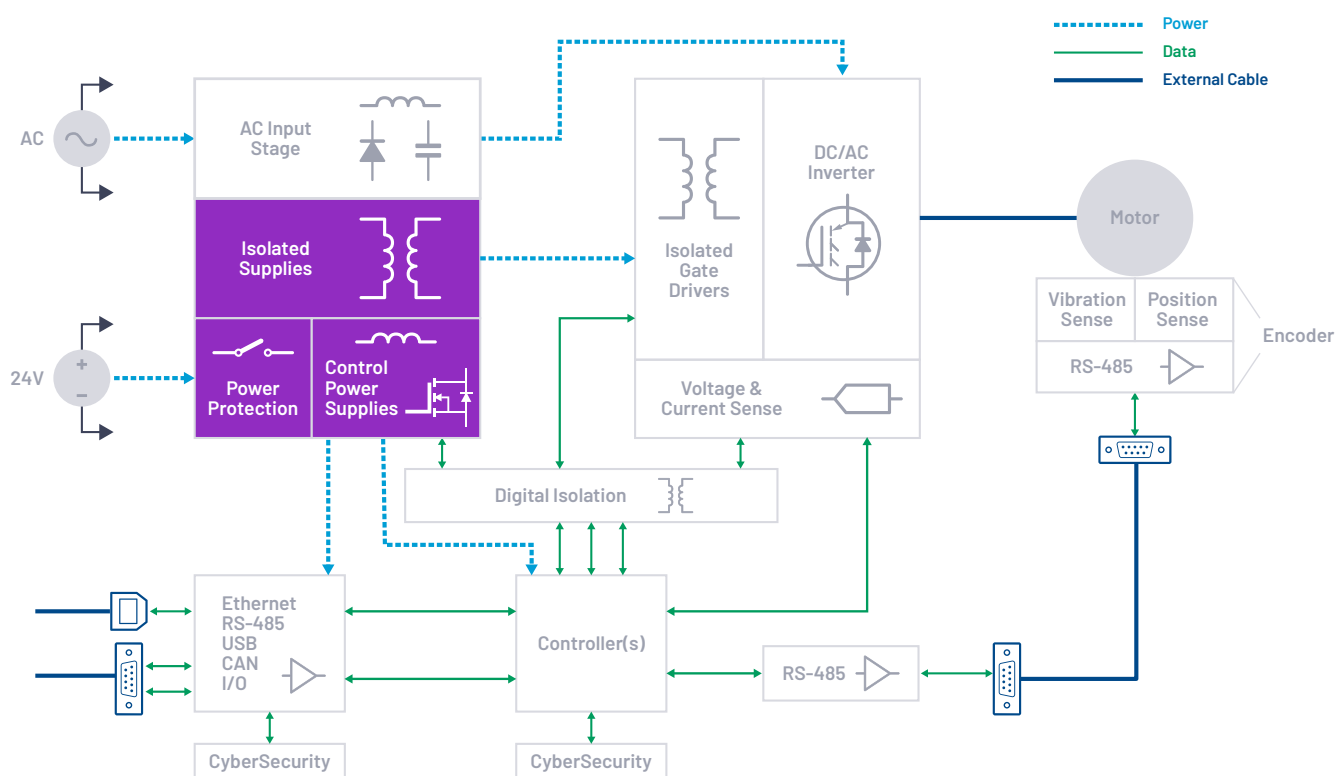


图1：变速驱动器的详细架构

首先，我们来识别变速驱动器内的主要电源。它们分别是：

- ▶ 主控电源
- ▶ 逆变器隔离电源
(栅极驱动器和电机相电流检测)
- ▶ 多个低压控制电源轨



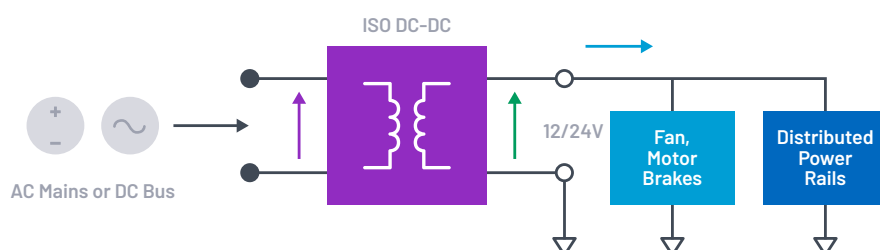
管理电源域并保护它们免受外部瞬变影响是变速驱动器设计人员的一项关键任务。

图2：主控电源

每个电源都有各自特有的功能，并存在特定的要求。

主控电源

主控电源通常是24V直流母线（有时也可以是12V母线）。主控电源有多种功能。它充当中间直流电压源，为低压轨分配所需的电压。它还可用于直接为驱动器外壳内可能需要的散热风扇供电，或为其他更高电压负载（如电机制动器）供电，如图2所示。



这主要是通过隔离式DC-DC转换器从主高压直流母线获得的。在某些情况下，可以直接从其中一个交流输入相获得。无论哪种情况，常见的电源拓扑选择都是反激式转换器。但是，反激式转换器并非最理想的电源转换器！它的噪声相当大，并且难以严格控制输出电压。然而，它具有一些不容小觑的重要优势：结构简单（单个晶体管、单个磁元件）、成本低。对于变速驱动器而言，成本是决定产品竞争力的重要因素，而且变速驱动器本身就是高噪声源，因此反激式转换器的优点足以盖过其缺点。图3显示了ADI公司的解决方案示例，这种解决方案的优点是能够很好地控制输出电压，无需光耦合器向控制器提供输出电压反馈，也就是“无光耦反激式转换器”。在更高功率的变速驱动器中，反激式转换器可能不合适，通常选择半桥或全桥隔离拓扑（如LLC转换器）。

逆变器隔离电源

栅极驱动器负责控制逆变器功率开关，每个栅极驱动器单元都需要隔离电源。通常需要三个12-20V电源轨（有时也带有负电源轨，以三个电机相开关节点为基准）和一个低端电源（以直流母线负电源轨为基准）。这些电源的“接地”并未与安全接地相连，甚至没有与低噪声的接地参考相连，并且对于栅极驱动器电源而言，电压会迅速超过数百伏，因此需要隔离。总的来说，这通常相当于四个隔离式DC-DC转换器，一般是从中间直流母线转换为栅极驱动器电源。

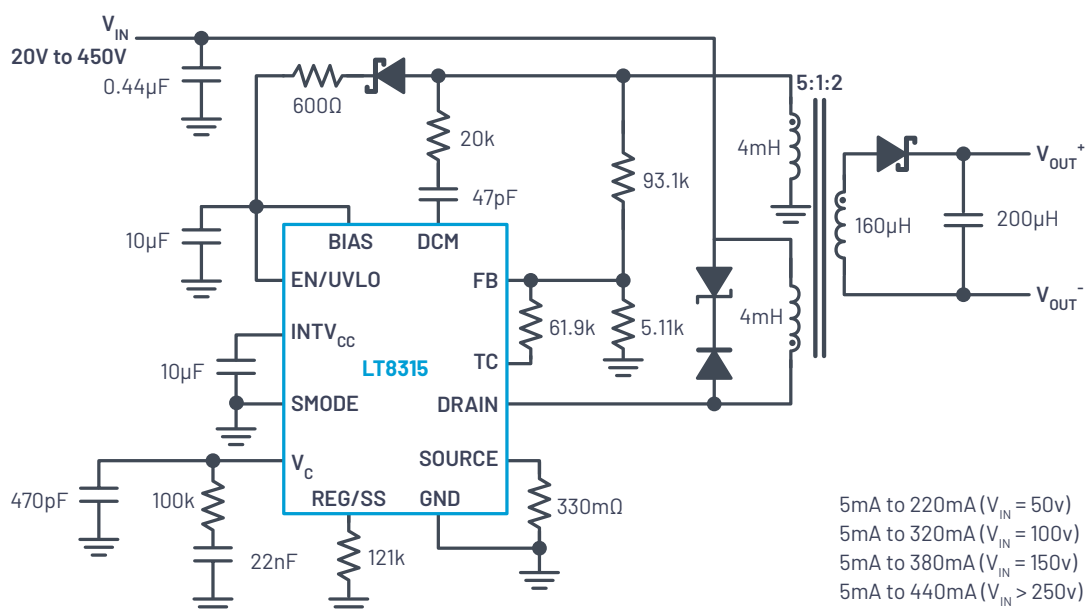


图3：无光耦反激式转换器示例

这些隔离电压轨用于为VSD中使用的功率晶体管（功率MOSFET、IGBT或SiC/GaN器件）提供开关电压。电机各相中连接的电流传感器通常也需要隔离电源电压，这些电压通常直接来自栅极驱动器电源，通过LDO（低压差）稳压器获得，如图4所示。

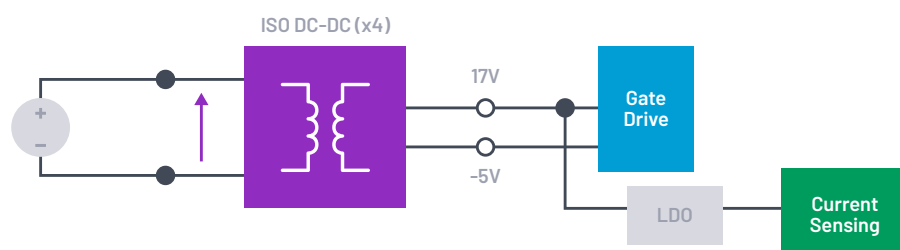


图4：逆变器隔离电源

同样，对于这些电源，多输出反激式转换器仍是可行的解决方案，不过由于需要许多路输出，其变压器设计往往相当复杂，而且体积庞大。

控制电源保护

在VSD中，保护主控电源（通常为24V）免受瞬变和异常情况的影响极为重要。原因在于该电源轨通常有两条路径。第一条路径如前所述，其中24V控制电源来自交流主电源，或通过隔离式电源转换级从高压直流母线获得。但是，该24V电源轨通常也可以直接由连接到VSD的辅助电源输入供电。

大多数自动化环境会在控制柜周围分配24V电源，以服务于一系列控制设备，VSD通常会利用此电源。这个辅助24V输入通常与转换器产生的24V电源形成二极管“或门”连接，以确保每次只有一个电源处于活动状态。这种方案的优势在于，即使交流电源断电或跳闸，辅助24V电源通常仍会继续运行，因此VSD的控制电子元件可以保持通电，从而能够快速重新启动VSD，并且不会丢失任何上下文信息。缺点在于，VSD电源将因此受到整个工厂内24V供电系统上存在的所有电压瞬变的影响。造成这些瞬变的原因有多种，例如：负载切换激发配电电缆产生电压振铃，雷电事件在系统中传播，附近电场或人体接触产生静电放电，电缆拾取电磁干扰，等等。因此，必须为这个辅助电源输入提供可靠的保护。

VSD功能安全标准IEC 61800-5-2附件A（第B.3.2节）展示了针对此类24V直流电源轨的推荐电源(PS)和电压监控器(VM)子系统。其中包括针对各种常见故障的保护，例如极性接反、过流和电压瞬变。

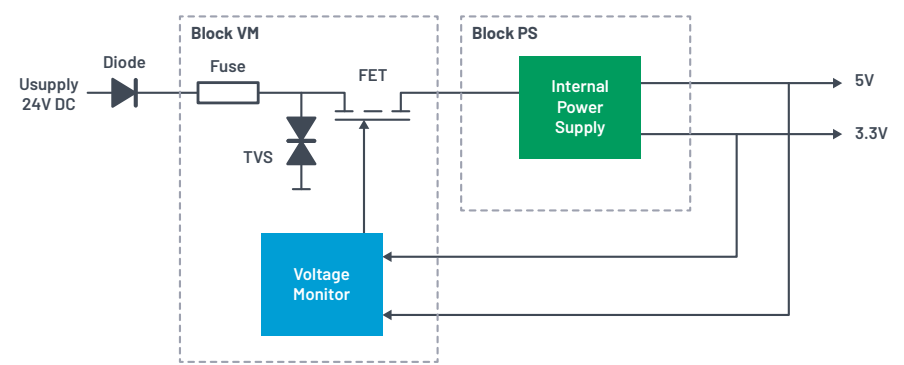
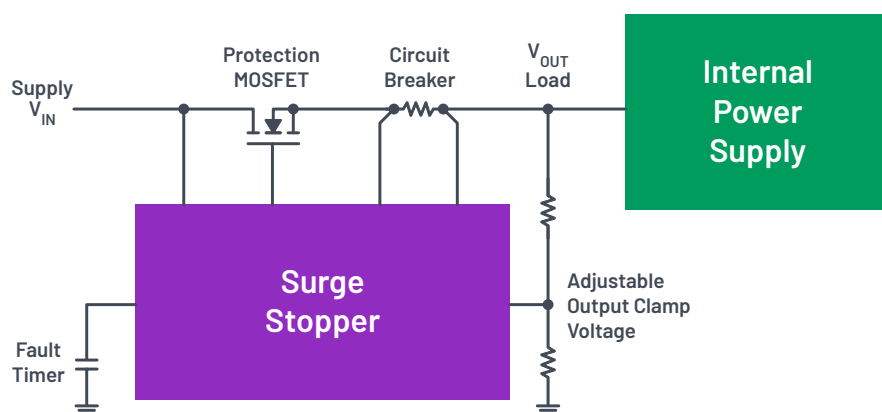


图5： IEC 61800-5-2推荐的辅助电源保护

由于各种瞬变的能量水平和持续时间可能不同，设计分立电路可能非常耗时且容易出错，长期可靠性也可能很差。ADI浪涌抑制器系列等集成解决方案集成了IEC 61800要求的所有保护功能，包括输入极性接反检测和保护、过流/短路/浪涌电流检测和保护以及高压瞬变断开。

图6展示了如何利用ADI的浪涌抑制器来实现IEC61800-5-2中所述的保护建议。LT4363或集成式MOSFET变体LTC4381等器件可以为主控电源提供稳健可靠的保护解决方案。

图6：符合IEC 61800-5-2标准的
ADI浪涌抑制器实现方案



低压负载点(POL)电源

主控电源的下游是低压(<12V)电源轨。这些基本上是负载点(POL)电源，直接为主控制器（CPU、FPGA）、其他数字器件（存储器、收发器、接口）、模拟电路（ADC、DAC、运算放大器等）以及I/O器件和终端供电。这些电源架构的具体设计对于每个VSD而言都不一样，很难一概而论，但图7和图8展示了实现这些电源的典型方法。在图7中，一些关键低压轨采用单级开关稳压器；针对噪声敏感的模拟轨或电压较低的超低电流轨，则增加了下游低压差(LDO)稳压器。

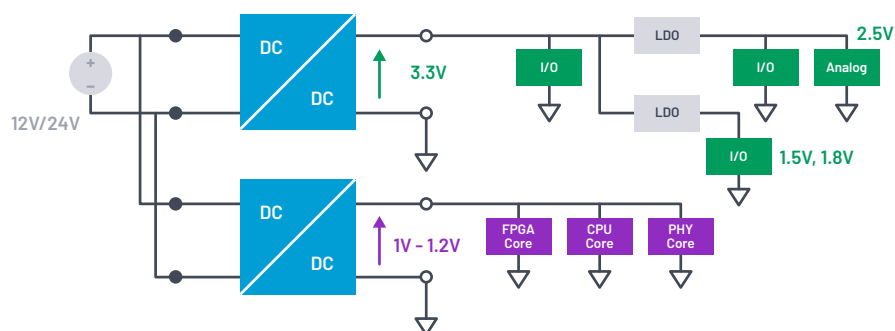


图7：单级开关稳压器方法

在图8中，首先生成单个中间轨（本例中为5V），然后根据POL器件的需要，进一步降压到各电源轨。其中还显示了可能需要控制启动时序或跟踪电源轨，这对于许多VSD中使用的复杂多控制器系统可能很重要。

POL电源架构设计很复杂，涉及与整体能效、成本、空间和噪声相关的许多权衡。ADI公司的LTpowerCAD、LTpowerPlanner和LTSPICE等工具有助于减轻设计难度。

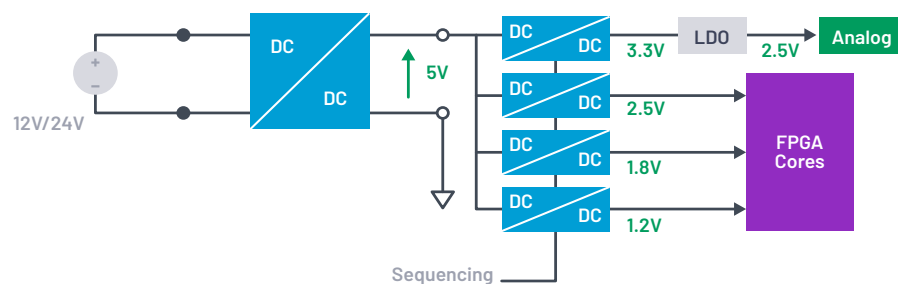


图8：多级开关稳压器方法

总结

变速驱动器内的电源承担着不同的功能，对于驱动器的整体运行至关重要。对于许多此类电源而言，出于电气安全原因进行隔离，或是基于电压基准电平进行电气分离，都是不可或缺的重要措施。

本章讨论了变频驱动器中，为了提供主控电源及逆变器电子器件（包括栅极驱动器和电流检测电路）电源，所涉及的各项要求和电路设计。重点强调了保护电路的重要性，并提及了与POL低压电源设计相关的挑战。



逆变器级：释放电力电子的力量

逆变器级好比是驱动器的“肌肉”，作为电力电子模块直接向电机提供经过调节的稳定电源，以最终应用所需的方式驱动电机，从而提供产生扭矩所需的电流，产生调节速度和磁通所需的电压，并高效地控制速度和扭矩所需的频率和相位关系。

在上一章中，我们介绍了变速驱动器(VSD)内的电源功能。在本章中，我们将进入驱动器的核心——逆变器级。图1突出显示了逆变器级。

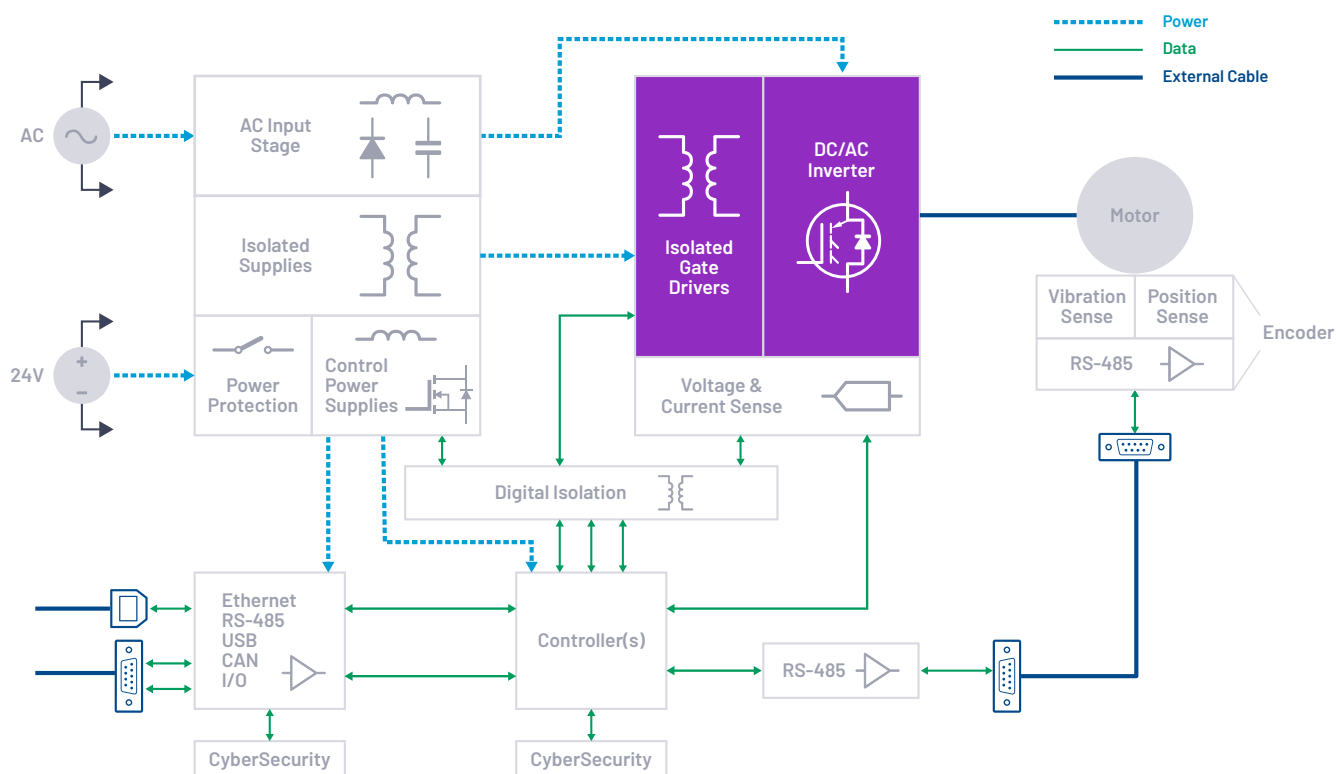


图1：变速驱动器的详细架构

逆变器级的基本结构包含两组输入和一组输出。主电源输入是直流母线（上一章输入级中讨论过）。主电源输出是电机的三相线。主控制输入是逆变器每个桥臂中每个开关功率晶体管的栅极信号。逆变器有多种类型，不同类型的逆变器具有不同的相数和不同的电源电子拓扑结构（多电平、矩阵等），但市面上绝大多数逆变器都是三相、两电平逆变器，如图2所示。

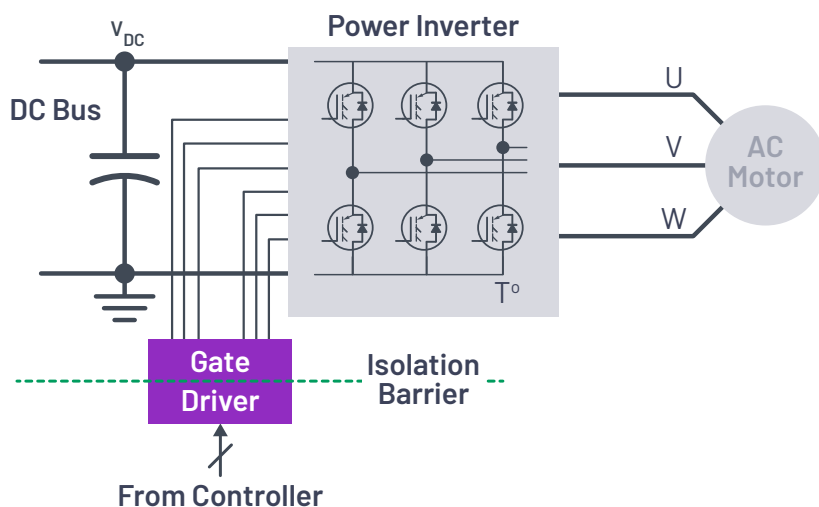


图2：逆变器级驱动三相电机功率晶体管

逆变器每个桥臂中的功率晶体管都是功率开关器件，以高频率（通常在5-20kHz范围内）和受控的占空比或调制指数完全导通或完全关断。功率晶体管充当准理想开关，调制施加于每个电机相绕组上的电压，并重新创建一个波形。该波形具有与电机速度（通常在DC-1kHz范围内）和瞬时位置相关的低频分量（通常为正弦波），以及与电机速度和额定磁通量相关的平均电压幅度，如图3所示。输出逆变器相至负极的电压是一个在直流母线电压和零之间切换的脉宽调制方波。电机绕组的固有电感会对此信号进行滤波，产生一个具有所需低频相位、频率和幅度的电机电流，但其中存在一些不良的开关频率纹波。

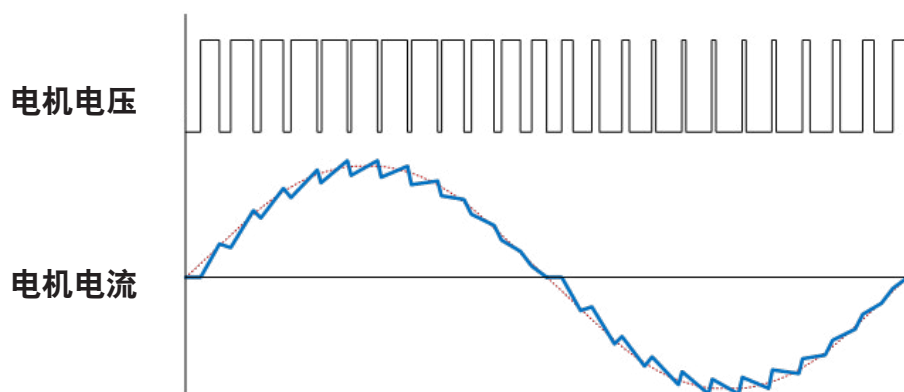


图3：逆变器相输出电压和电流

功率晶体管和相关的热管理部件（散热器、风扇）通常是VSD中最昂贵的部件，占用的空间往往也最多，尤其是在功率水平较高的情况下。晶体管之所以有功率损耗，是因为它并非理想开关，在传导电流时，两端存在较小电压降，并且当开关内的高电压和大电流短时间重叠时，导通和关断的开关时间不为零，从而导致开关损耗。从历史上看，MOSFET和IGBT一直主导着功率晶体管市场，但近年来，开始转向更宽带隙的SiC和GaN功率晶体管。这些晶体管的开关损耗更低，可以实现更高开关频率的逆变器，或在相同开关频率下实现更高能效的逆变器。



功率逆变器是VSD的核心，负责管理施加于电机的电流和电压。

相较于其他应用领域，VSD设计人员转向SiC和GaN的动机不是那么强烈。这是因为，在其他应用领域，提高开关频率有助于减小滤波器尺寸；但在VSD中，滤波器是电机绕组，因此在许多应用中，提高开关频率并不会带来显著优势。

栅极驱动器

栅极驱动器负责将来自电机控制器的逻辑电平信号，转换为具有适当的电压幅度和电流驱动能力、能够完全控制功率晶体管的信号，并确保这些驱动信号的基准正确无误，如图4所示。

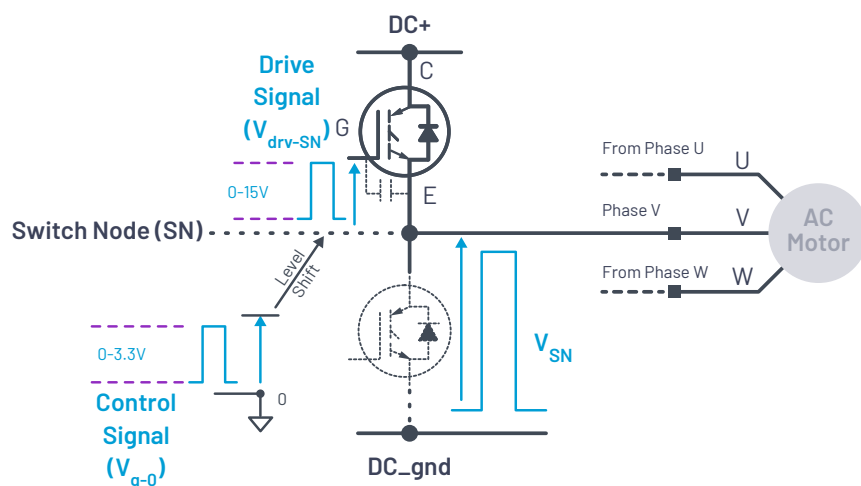


图4：栅极驱动器的开关功能

栅极驱动器提供的其他功能包括：

- ▶ 功率晶体管保护（例如逆变器/电机短路情况下去饱和检测）
- ▶ 功率晶体管的受控切换（例如，对栅极驱动信号应用不同的摆率以管理某些情况下的EMI）
- ▶ 电机控制器与逆变器级的电气和安全隔离
- ▶ 报告逆变器和功率晶体管的故障情况

因此，栅极驱动器既可以是具有完整通信接口的复杂器件（如ADuM4177），也可以是仅有驱动功能的简单器件（如MAX22700）。无论栅极驱动器包含哪些功能，抗瞬变稳健性（以共模瞬变抗扰度CMTI等参数来表示）都是一项重要特性，因为这些器件处于逆变器的一个高噪声域中，需要能够在电机控制器的低噪声、低压环境与功率晶体管的高电压、大电流、高噪声域之间运行。

总结

功率逆变器是VSD的核心，负责管理施加于电机的电流和电压。功率逆变器内功率晶体管的安全、稳健、高效切换，是VSD内栅极驱动器承担的一项重要功能。[下一章](#)将讨论在逆变器级内测量的一些信号，以便精准控制逆变器级的运行。



利用电流检测来增强电机控制

上一章着重阐述了逆变器的控制对于驱动器整体运行的重要性。任何闭环控制系统通常都需要一个设定值（例如所需的工作点）和一个与之比较的测量变量（称为反馈），使得控制回路可以对这两个量之间的差异做出响应。在驱动器中，关键测量变量通常是电机电流和电机位置。其他变量（如直流母线电压）也有助于控制环路的运行。

在本章中，我们将讨论电流反馈和直流母线电压的测量，这些活动发生在上一章介绍的逆变器级中，下面的架构示意图同样高亮显示了这部分内容。

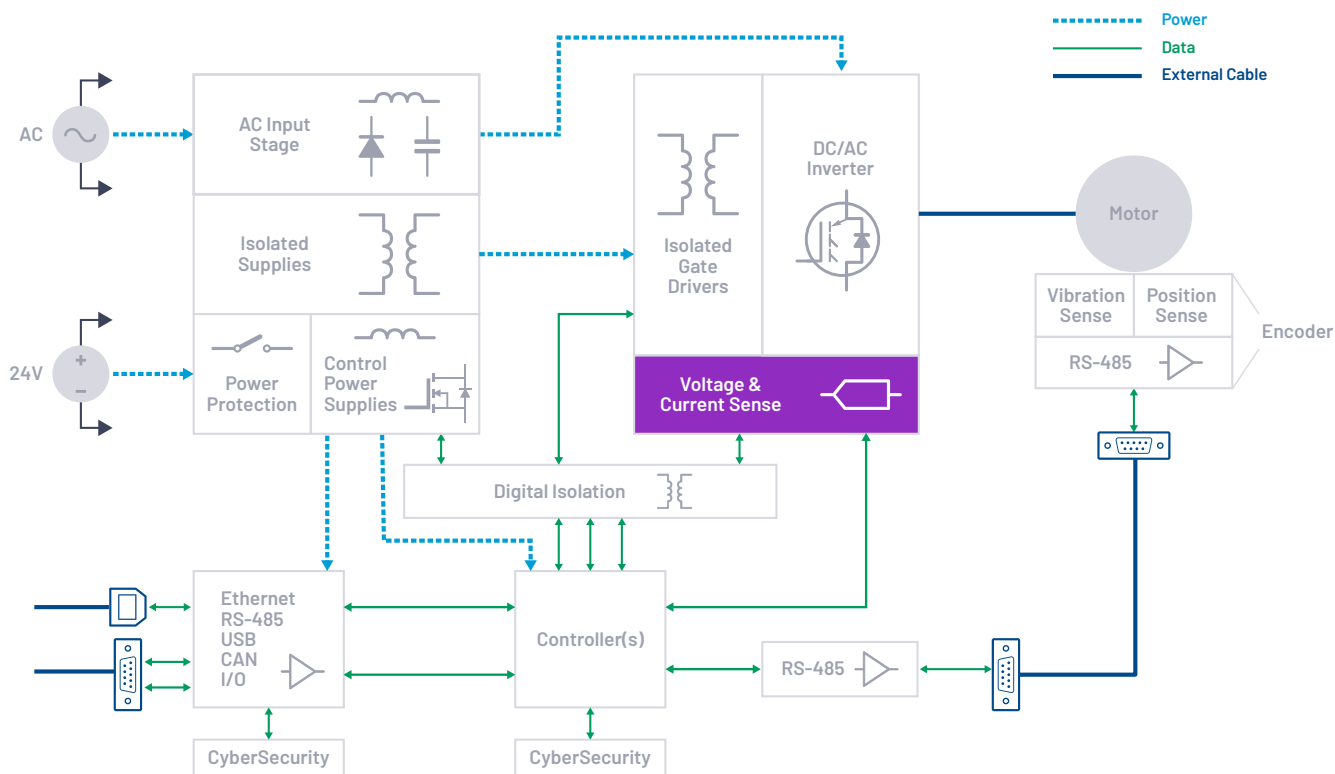


图1: 伺服驱动架构示意图



在驱动器中，关键测量变量通常是电机电流和电机位置。

在电流反馈路径中，重要的是测量活动与PWM周期同步，从而不将高频开关电流纹波引入反馈路径。为此，需要精确控制电流采样时序，从而在波形的中点进行采样。此时的波形，瞬时电流等于PWM周期平均值，测量中不会包含任何PWM开关纹波电流。图2以简化的方式解释了这一情况，其中显示了相电流波形上的采样点，以及它与PWM高端开关波形的相对对齐关系和开关周期 T_{sw} 。PWM_SYNC脉冲指示了在此场景中必须触发电流采样的时间点。在采用 $\Sigma-\Delta$ ADC类型采样（非单点采样）的情况下，此点也可以理解为数字滤波器的中心点，参见^[1]。

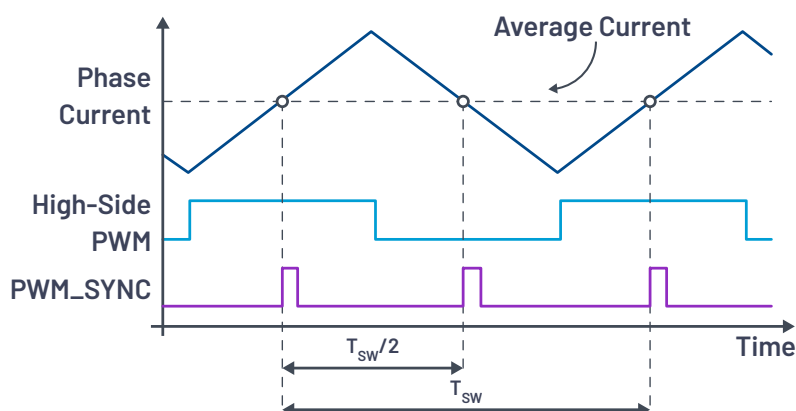


图2：电机电流中点采样

它还要求对至少两个相位进行同步采样，通常14-16位测量分辨率就足够了，延迟须为微秒级，以便控制环路可以在PWM周期时间(T_{sw})内做出响应，或者更高性能的控制环路可以在1/2周期时间内做出响应。

有几种不同方法可以实现电流测量，如图3所示，图中还提供了为20A应用实现相应方案所用的一些示例器件型号。测量电机电流最准确的位置是在实际电机相中，即逆变器的输出线，但这些节点存在高电压，因此通常需要电气隔离。电机电流测量值也可以从其他位置推断出来，例如逆变器桥臂和直流母线正/负轨，不过这些测量位置虽然实施起来可能成本较低，但也有其他缺点。

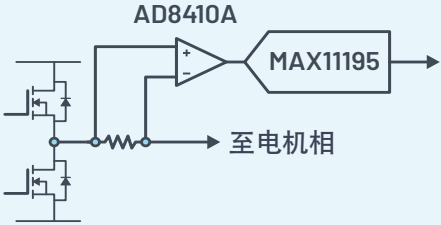
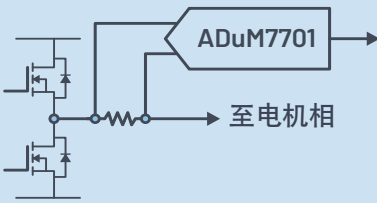
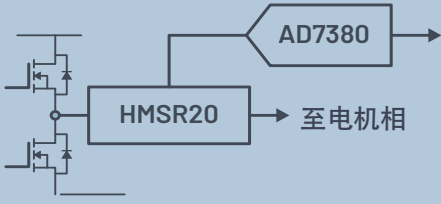
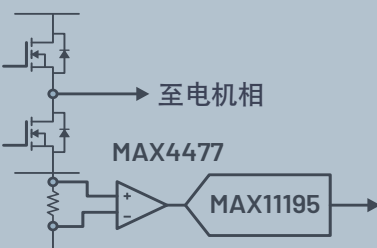
电流反馈方案	说明	备注	示例器件(20A)
	串联分流电阻 + 高共模电压(CMV) 运算放大器 + 同步采样 ADC (SSADC)	通常用于100V以下的 应用，高CMV运算放 大器通常在此范围内 工作	CFN1206AFXR010 (Bourns) AD8410A (ADI) MAX11195 (ADI)
	串联分流电阻 + 隔离式ADC	最适合需要高抗扰 度、小尺寸和高性能 的应用。比特流输出 - 需要数字滤波器	CFN1206AFXR010 (Bourns) ADuM7701-8 (ADI)
	霍尔电流检测 + SSADC	适合较高电流水平 (分流电阻在此情况 下效率太低) 的解决 方案	HMSR 20-SMS (LEM) AD8515 (ADI) AD7380 (ADI)
	桥臂分流电阻 + 运算放大器 + SSADC	成本最低的解决方案 (因为如果控制器是 直流母线接地，则无 需隔离)。精度低于 同相分流方案	CFN1206AFXR010 (Bourns) MAX4477 (ADI) MAX11195 (ADI)

图3: 电流反馈方案

高保真度、高精度电流反馈对于逆变器的整体控制环路非常重要，对整体控制带宽和扭矩纹波有很大影响。带宽决定了电机控制的瞬态性能，而瞬态性能在贴片机等应用中非常重要。在研磨、切割和抛光等应用中，扭矩纹波会影响加工质量和成品公差。

电流反馈是从逆变器到控制器的最重要反馈变量，而直流母线电压作为控制前馈变量也很有价值。它不是用作受控量，但因为直流母线电压的变化会影响电流控制环路的动态性能，所以它可以用作前馈变量，用于改善整体电流控制器的动态性能。结果如图4所示。

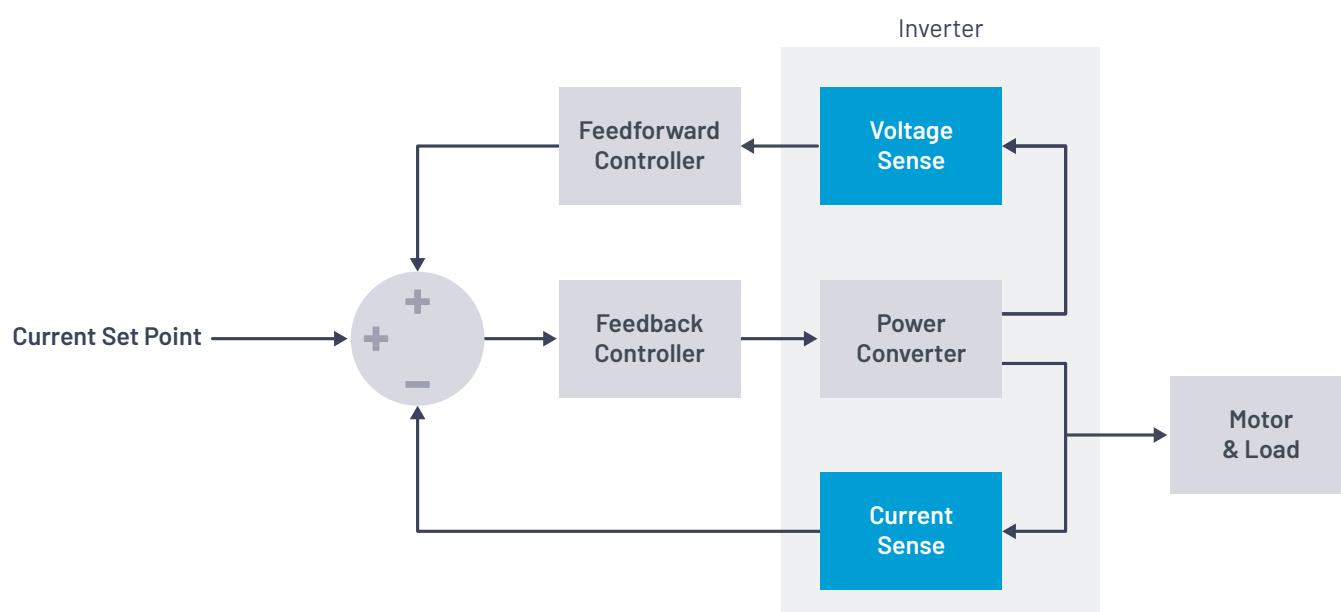


图4：电流控制器框图

如果控制器接地位于直流母线负极，则可以直接从直流母线两端的分压器获得直流母线电压检测信号；如果不是，则可以通过连接到分压器输出的隔离放大器或ADC（例如前面提到的ADuM7701）获得。

下一章将讨论另一个重要的反馈变量——位置检测，它与本章中介绍的电流和电压检测一起用于电机控制系统的另一组成部分。

参考资料

[1] “第1部分：用于电机控制的优化 Σ - Δ 调制电流测量”，Jens Sorensen、Dara O'Sullivan和Shane O'Meara, <https://www.analog.com/cn/resources/analog-dialogue/articles/optimized-sigma-delta-modulated-current-measurement-for-motor-control.html>

我们如何看待位置检测？

在上一章中，我们探讨了电流控制环路，并介绍了提供反馈变量的电流和电压检测电路。本章将探讨对许多驱动器都很重要的另一个检测变量——电机位置检测和反馈。

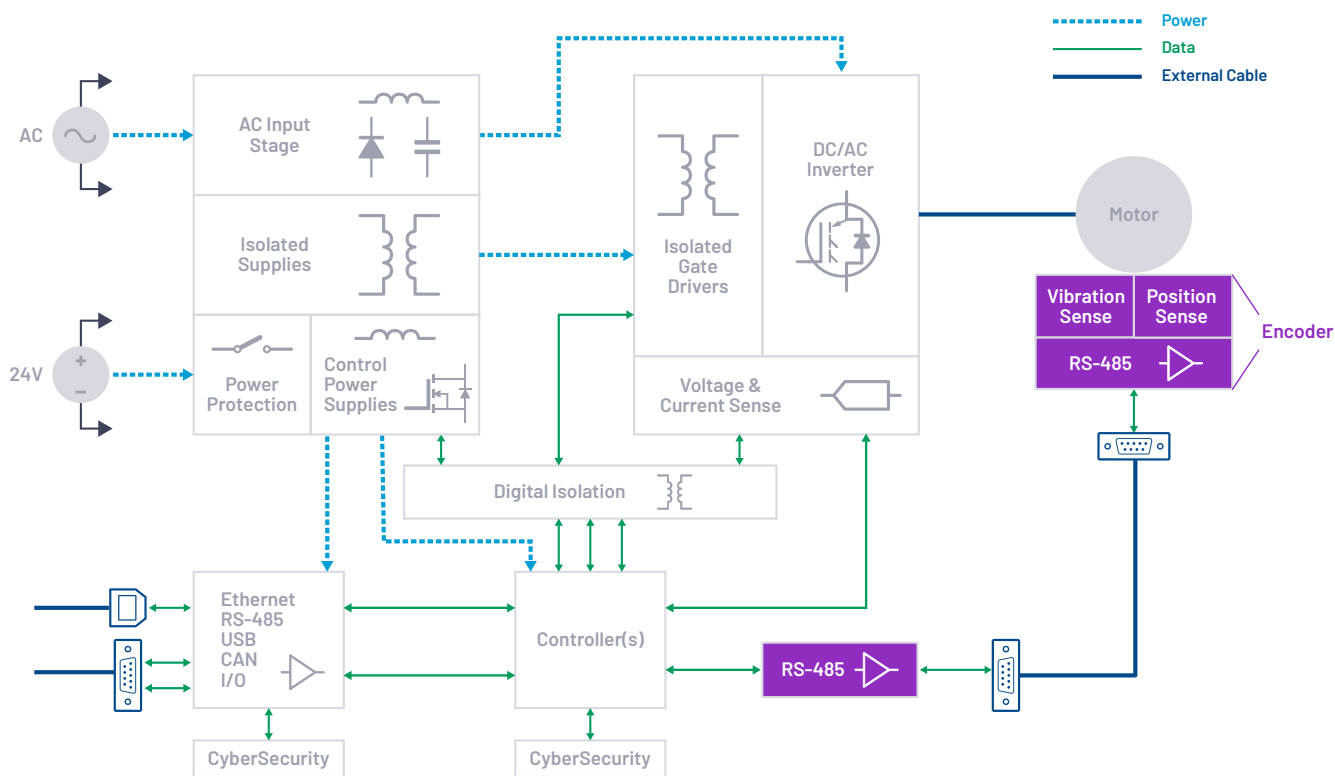


图1：伺服驱动架构示意图

同样，本章探讨的模块在上面的架构示意图中以高亮显示。这些模块中的大多数实际上并不位于电机驱动器本身，而是位于一个称为编码器的位置反馈器件内，编码器通常与电机本身集成，或作为与电机紧密耦合的单独器件加装。编码器的用途是实时测量电机转子（旋转部件）的位置，而对于永磁或同步电机，则是测量转子磁场的位置及其纯机械位置。

本章不会详细介绍编码器，而是讨论与驱动器本身相关的位置反馈方面一些具体事项。



电机位置控制在机器人、贴片和其他动态应用中非常重要。

是否始终需要位置反馈？

需要指出的是，许多性能较低的电机驱动器在连接到感应电机时，无需位置反馈即可运行。这是因为，感应电机内的磁场是由施加的定子电压引起的（感应电机正是因此而得名），故电机旋转频率会自动与所施加的三相电压频率保持同步（存在一个较小差值，称为“滑差”）。在此类开环驱动器中，电机没有安装编码器，控制器也不使用位置反馈。

位置反馈在驱动器中起什么作用？

永磁/无刷直流(BLDC)电机伺服驱动器由于以下两个原因，而需要位置反馈。第一个原因是为了让电机磁场位置与伺服驱动器施加的电机电压和电流同步。转子磁场与定子绕组中因施加三相电流而产生磁场相互作用，并由此产生电机扭矩。这些磁场必须彼此同步，否则无法产生有用的扭矩。事实上，为使每安培电机电流产生的扭矩最大，这些磁场必须在空间中彼此正交，并且在时间上同步（称为磁场定向控制FOC）。

位置检测的第二个功能是作为位置控制或速度控制环路中的反馈变量，用来精确控制电机的速度或位置。电机位置控制在机器人、贴片和其他动态应用中非常重要。电机速度控制在机械加工、输送机、滚筒、卷绕等应用中也很重要。对于速度控制，速度反馈值通常是位置反馈的导数。图2显示了位置反馈信号在电机驱动器控制器中的这些用途，驱动器有内外两个环路：外环路是位置控制环路，内环路是速度和电流控制环路。

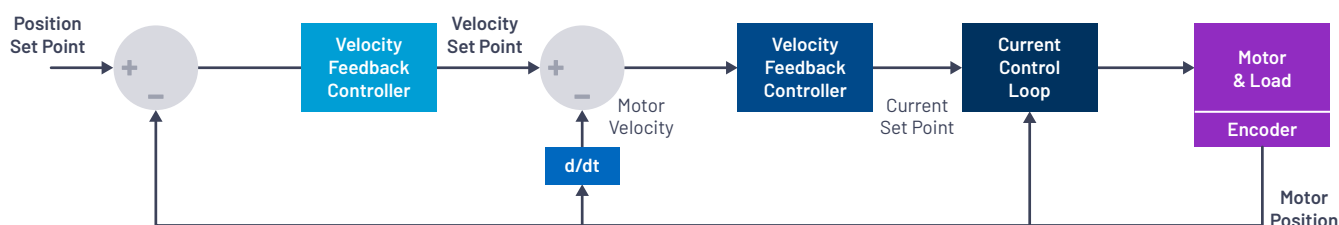


图2：电机位置反馈在驱动器中的用途

位置反馈如何从编码器传送到电机驱动器？

工业应用中使用的大多数编码器采用方波增量编码器反馈（称为ABZ或ABI），或基于数字协议的反馈。因此，大多数伺服驱动器需要能够与这两种信号类型中的一种进行对接。有些编码器还提供电机绕组中嵌入的磁霍尔传感器产生的3个方波信号，它们以较低分辨率指示转子磁场的绝对位置。基于数字协议的反馈采用特定协议，如EnDat^[1]、Hiperface^[2]、BiSS^[3]。其中大多数是供应商专用协议，并且基于RS-422/RS-485作为物理层。在任何情况下，编码器都必须具备对于静电放电(ESD)、电快速瞬变脉冲群(EFT)及噪声引起的共模电压的抗干扰能力。此外，编码器可能还需要支持连接长电缆。针对这些不同接口，下表给出了一些器件建议。

反馈类型	驱动器接口要求	器件建议
ABZ	标准数字I/O - 可能需要差分式， 例如RS-422	MAX14890
霍尔	标准数字I/O	任何标准缓冲器IC， 例如MC74AC125
协议	稳健的RS-485，最高可达30Mbps， 通常不隔离，但有时支持隔离	ADM3065E MAX22500E (适用于长电缆)

下一章将讨论本章和上一章讨论的两种控制环路（位置控制和电流控制）如何结合在一起，并在整体驱动控制器电子设备内部实现。

参考资料

[1] https://www.heidenhain.us/addl-materials/enews/stories_1012/EnDat.pdf

[2] https://cdn.sick.com/media/docs/5/65/865/operating_instructions_specification_hiperface%C2%AE_motor_feedback_protocol_en_im0064865.pdf

[3] <https://biss-interface.com/c/downloads/biss-interface/>



强劲动力背后的“大脑”：现代电机驱动器中的控制器和处理器

上一章研究了位置反馈系统，介绍了如何通过编码器将电机位置信息提供给电机驱动器。本章讨论电机驱动器系统的“大脑”——控制器模块。

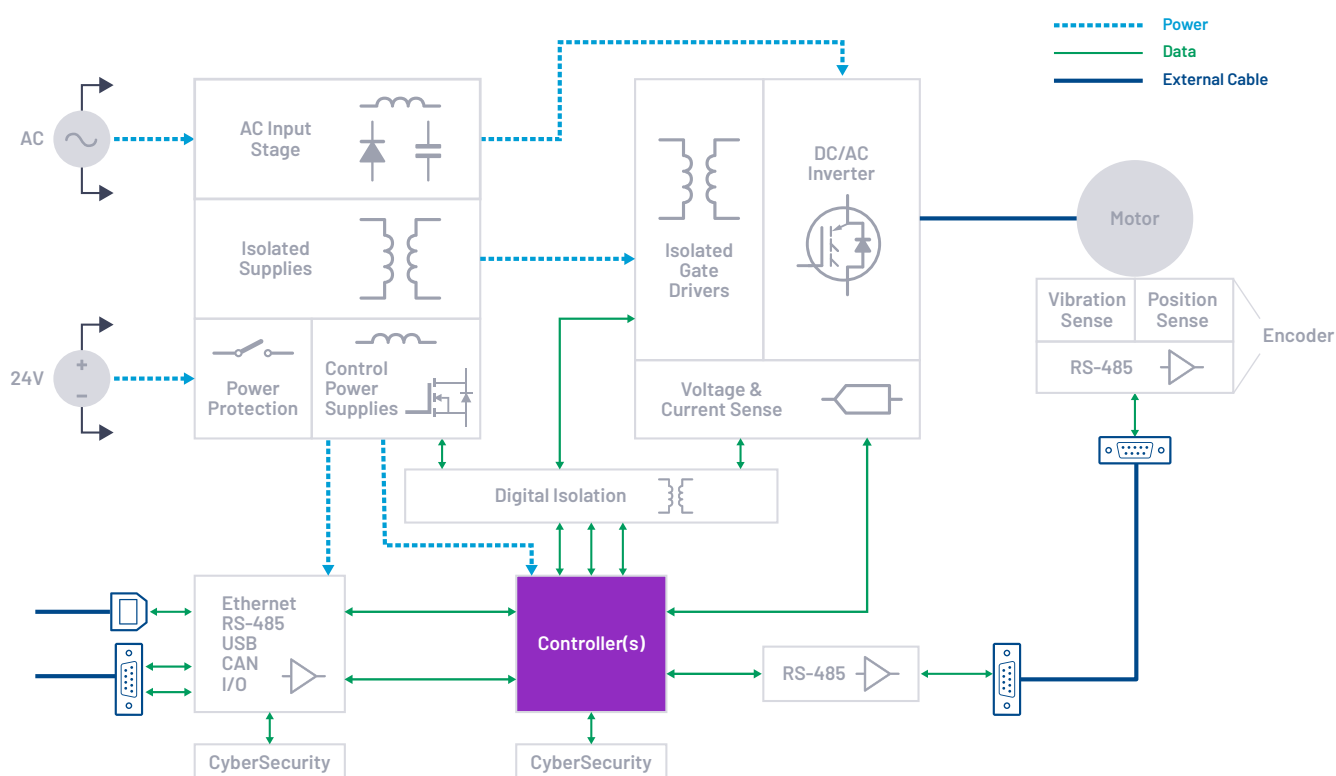


图1：伺服驱动架构示意图

同样，本章探讨的概念模块在上面的架构示意图中以高亮显示。从图中可以清楚地看出，控制器确实是系统的核心，其他每个模块都以某种形式与它连接。本章将研究与控制器模块相关的两个主要方面：功能和实现。从一开始就必须强调的是，虽然在概念上，它显示为单个模块，但实际上，它通常由一个以上的IC组成。实现部分中会更详细地讨论这方面内容。

控制器模块实现了哪些功能？

控制器的一大核心功能在于实现电机驱动器控制环路，而这个功能对控制器的设计和架构有着重要影响。在某种意义上，所有其他功能都是辅助性的，有些甚至是可选功能，但控制环路的执行是控制器唯一不可或缺的功能。前面已经介绍了电机驱动器所需的控制环路，图2中再次显示了这些环路，阴影部分表示控制器内部的情况。

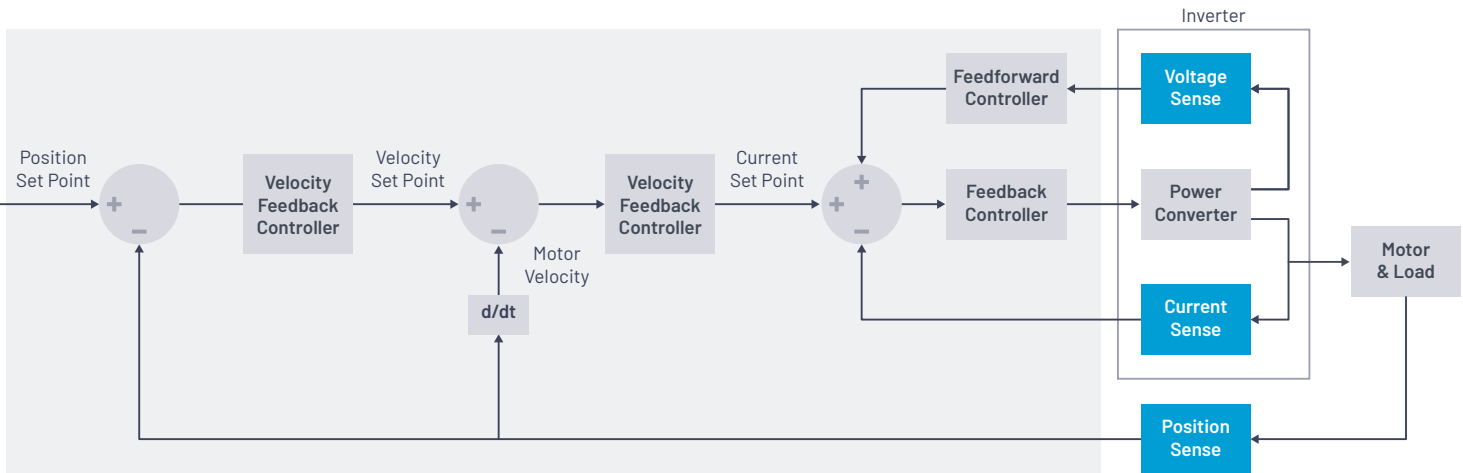


图2：电机控制环路

在更简单的驱动器中，并非所有这些模块都会被实现，而在最简单的驱动器中，甚至没有闭环控制，通常只有一个非常简单的开环控制器，如图3所示，其中控制器内的部分同样以阴影表示。在这些非常简单的系统中，没有反馈或反馈非常有限，并且控制器可以是相对简单的器件。在本章的后续讨论中，假设系统如图2所示，同时假设控制环路全部在数字引擎（例如微处理器或 FPGA）中实现。除了一些非常特殊的应用外，电机控制已不再使用模拟控制。

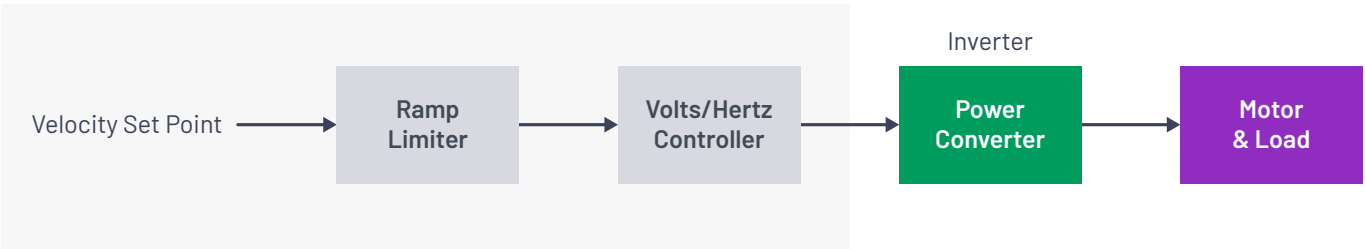


图3：简单的开环驱动控制器



电机驱动器控制环路的执行是控制器唯一不可或缺的功能。

控制器在实现驱动控制算法时，一个关键要求是这些数字控制环路必须以实时且具有确定性的方式实现。假设控制环路更新速率为10kHz，那么控制算法必须始终在10kHz时间窗口内实现。控制环路任务必须始终享有最高优先级。如果控制环路任务超时，电机控制将停止工作，这常常会导致电机损坏，因为电源转换器将无法正确切换。

除了控制环路（以及编码器和电流传感器等反馈元件的相关数据处理）之外，控制器还必须实现其他多种重要功能：

- ▶ 通信接口：工业以太网软件协议栈，例如用于与PLC和其他设备通信的以太网I/P、用于用户界面的USB
- ▶ 用户或诊断应用程序：数据记录、驱动器/电机诊断或驱动器配置应用程序
- ▶ 系统管理：启动控制，监控驱动器故障，向控制环路传递命令和参考信号
- ▶ 物理安全功能：监控和管理物理安全功能，例如安全扭矩关断(STO)
- ▶ 信息安全功能：管理安全引导、安全通信和安全固件更新，通常与身份验证器等安全硬件结合使用

控制器通常如何实现？

很明显，控制器需要处理许多并行操作，必须保证控制环路实时执行，不受其他任务影响。

1. 单控制器IC

采用单控制器IC方法时，一切都在一个微处理器或片上系统(SoC)中实现。随着电机驱动器越来越复杂，需要更多的网络接口、用户功能、诊断和安全功能，因而这种方法变得越来越少见。但在不太复杂的驱动器和开环逆变器中，如图3所示，它仍然很常见。而在更复杂的驱动器中，可以使用Xilinx Ultrascale等复杂SoC。通过将多个高性能处理内核与可配置的数字模块相结合，可以有效实现不同控制器功能的划分。

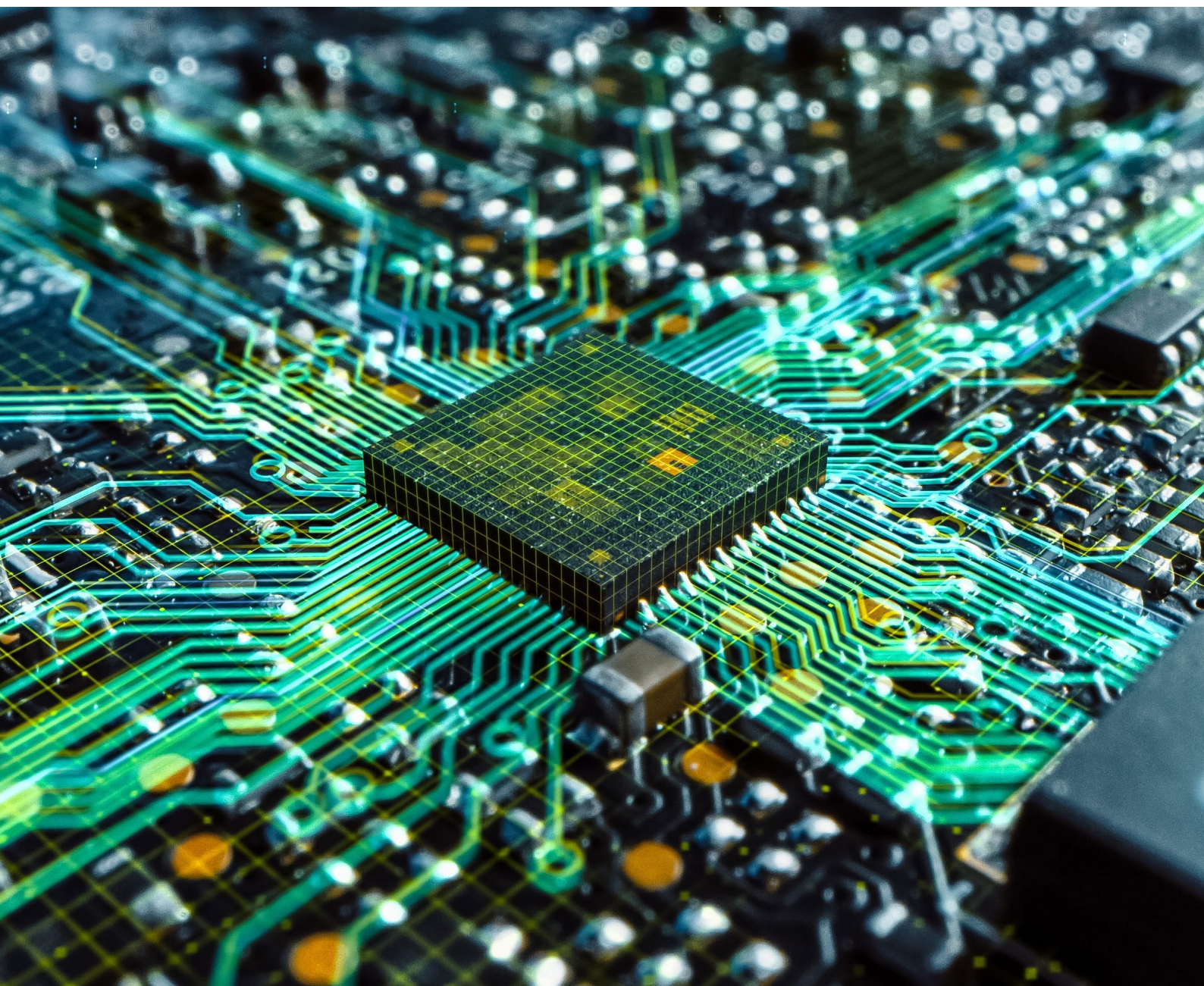
2. 单独的电流环路控制器IC

在许多驱动架构中，电流控制器功能（包括电流反馈的处理和脉宽调制(PWM)功能）作为单独的IC进行处理，通常位于与功率逆变器相同的参考接地端上。

此功能对具有确定性的实时操作有着极为严格的要求，因此建议采用以下几种实现方案：带有电机控制专用外设的分立专用微控制器；FPGA SoC，例如Xilinx Zynq；或小型FPGA与微控制器的组合。在此类架构中，位置/速度控制器和其余控制器功能将在一个更强大的微处理器上实现，它通常位于驱动架构的安全接地侧。

3. 单独的网络协议栈和接口IC

最后，网络接口功能可以独立出来，通过网络协议栈处理器、ASIC或FPGA实现。这种划分方式非常实用，既能单独处理工业以太网接口的复杂性，又能让另一处理器专注于用户界面、安全功能和诊断任务。这种方式能够简化网络接口的模块化设计，支持多种协议，并且有效隔离各种网络流量问题。



建立正确的连接来与电机驱动器应用进行通信

上一章探讨了电机驱动器应用的核心部分——主控制器。在本章中，我们将深入探讨连接所发挥的关键作用。

要从主系统控制器（通常是可编程逻辑控制器(PLC)）向电机驱动器发送所需的控制输入，系统必须连接网络。除控制输入外，驱动器还有许多参数需要用户进行配置和参数化。用户/控制系统可能需要从电机驱动器中收集实时值（如扭矩、电流、速度、位置）、设定的斜率和单位以及许多其他参数。所有这些都是通过外部接口进行通信，即图1高亮显示的部分。从广义上讲，更强的驱动器连接能力，尤其是基于以太网的连接，被认为是自动化行业数字化的一个关键因素，因为它能够为自动化系统中的每个终端设备提供可见性和网络访问能力。

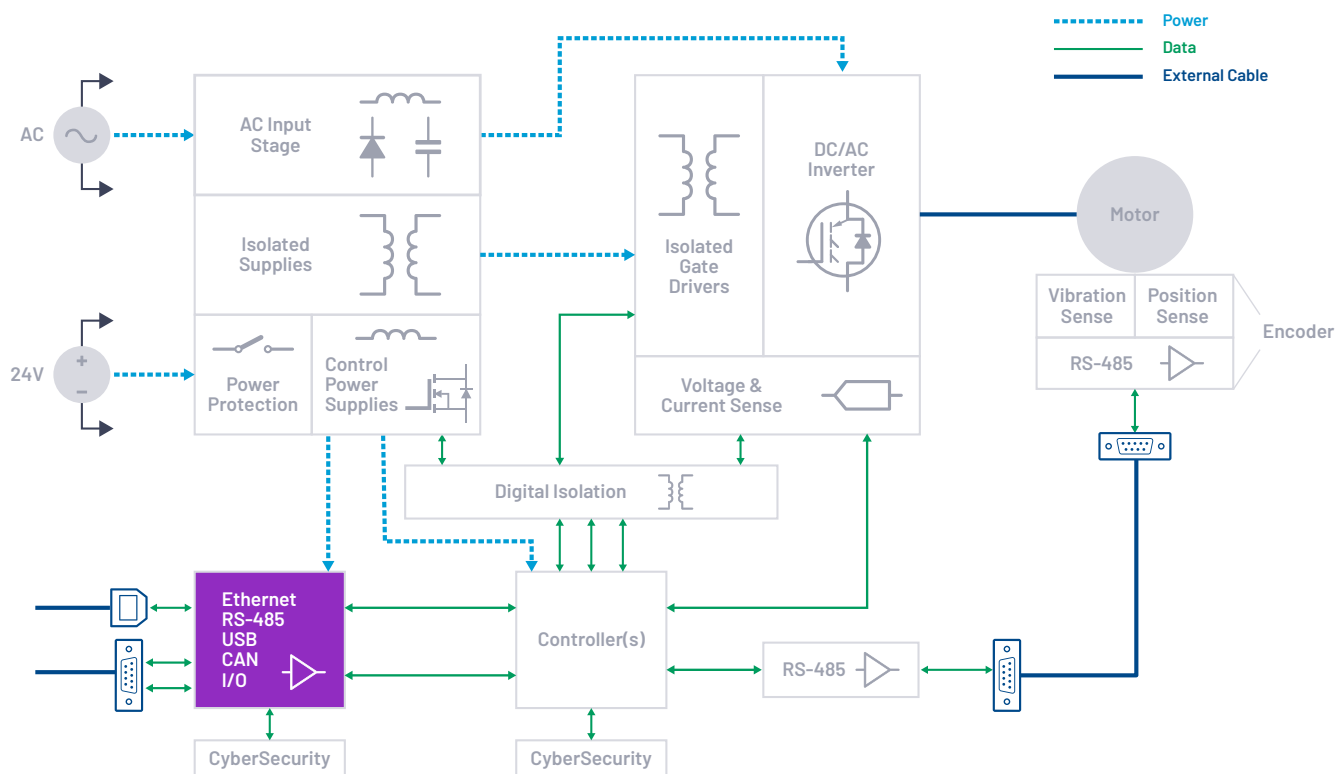


图1：变速驱动器的详细架构

ODVA、PI North America和EtherCAT Technology Group等组织，通过定义EtherNet/IP、PROFIBUS/PROFINET和EtherCAT等协议，帮助推动电机驱动器通信的标准化。这些是当今工业自动化领域最常用的协议^[1]。物理通信层最常见的类型是串行链路（如RS-485或RS-422）和以太网。协议建立在这两个物理层之上。那么，针对具体连接解决方案，应该选择哪种协议？我们先来梳理关于PROFIBUS/PROFINET、EtherNet/IP和EtherCAT的主要信息，然后据此做出决定。

PROFIBUS/PROFINET

PROFIBUS是串行链路(RS-485)上使用最广泛的协议，而PROFINET使用的是以太网。PROFIDRIVE是驱动器技术的标准“应用协议”，位于PROFIBUS和PROFINET通信系统之上，如图2所示。

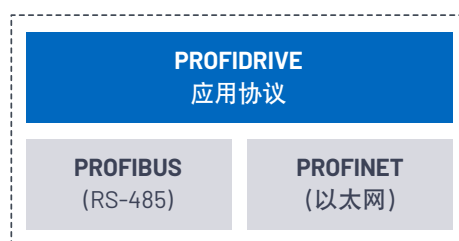


图2：PROFIDRIVE协议

PROFIDRIVE等协议定义了特定于应用的参数和功能，使得电机驱动器等相似设备之间更容易通过网络进行通信^[2]。PROFIDRIVE支持将标准驱动和“运动控制”功能与PLC时序控制逻辑相集成，主要功能包括：

- ▶ 电机电流控制
- ▶ 速度控制
- ▶ 位置控制
- ▶ 路径插值
- ▶ 逻辑控制

EtherNet/IP

EtherNet/IP基于标准以太网物理层，支持点对点连接，允许利用通用工业协议(CIP)在多个控制器和驱动器之间分发实时运动控制信息。驱动器应用协议CIP Motion是CIP的一部分，建立在通用标准以太网协议栈之上。这意味着，除了IEEE-802.3规范中定义的物理层和数据链路层之外，CIP还使用一般以太网应用中通常部署的标准网络层和传输层。因此，设备可以通过标准交换机、路由器和其他基础设施组件轻松互连。

CIP Motion点对点连接旨在通过单个多播连接，将高速运动数据从生产控制器或设备传输到多个消费控制器或设备^[3]。

EtherCAT

EtherCAT是一种实时工业以太网技术，最初由Beckhoff Automation研发。EtherCAT在研发时注重三个方面：短周期时间($\leq 100 \mu\text{s}$)，通过低抖动实现精确同步($\leq 1 \mu\text{s}$)，低硬件成本。EtherCAT将有效载荷嵌入到标准以太网帧中。EtherCAT协议针对短周期过程数据进行了优化，因此无需TCP/IP或UDP/IP等庞大的协议栈。当应用中有多个分散于各处的流程且需要同时操作时，精确同步尤为重要。与完全同步通信（通信错误会直接影响质量）相比，分布式同步时钟对通信系统中的抖动具有很高的容忍度。因此，EtherCAT节点同步解决方案基于分布式时钟(DC)^[4]。CAN over EtherCAT (CoE)，尤其是CiA 402协议，是电机驱动器最常用的EtherCAT应用协议。通过CoE协议，EtherCAT提供与CANopenR标准EN 50325-4相同的通信机制：对象字典、过程数据对象(PDO)和服务数据对象(SDO)的映射。



甚至网络管理也类似。因此，原本使用CANopen的设备现在可以轻松实现EtherCAT，甚至CANopen固件的大部分都可以直接复用。设备协议（例如CiA 402驱动协议）也同样可以直接用于EtherCAT。

协议	电机驱动器应用	用例/特性	ADI支持产品
EtherCAT	CiA 402	EtherCAT针对需要严格同步的应用进行了优化，支持低至50us以下的快速周期时间，最适合伺服驱动器。	ADIN1200
PROFINET/ PROFIBUS	PROFIDRIVE	PROFINET拥有最大的市场份额，可以连接非常广泛的自动化硬件和基础设施，尤其是西门子的设备。	ADIN1300 FID05200
Ethernet I/P	CIP Motion	Ethernet I/P的功能最透明，适合与其他以太网流量和系统协同工作，在美国系统中占主导地位。与EtherCAT和PROFINET IRT相比，它通常不支持亚毫秒级周期时间。	ADIN2299 MAX14942

哪项协议最终胜出？

下表比较了本章重点介绍的三种通信协议。每种协议都有其优势和适合特定应用的特性。下表还列出了ADI公司的一些支持所有这些协议的典型产品^[5]。

参考资料

[1] “Industrial Communications Report – 2023 Analysis” , Omdia

[2] [PROFIdrive - The Leading Drive Control Profile: PROFINET](#)

[3] [CIP Motion | Common Industrial Protocol | ODVA Technologies](#)

[4] [EtherCAT Technology Group | HOME](#)

[5] [ADI公司工业以太网解决方案](#)

为驱动器的未来提供安全保障

在最后一章中，我们将简要说明概念化框图的最后一个元素（图1高亮显示的部分），即驱动器的网络安全。

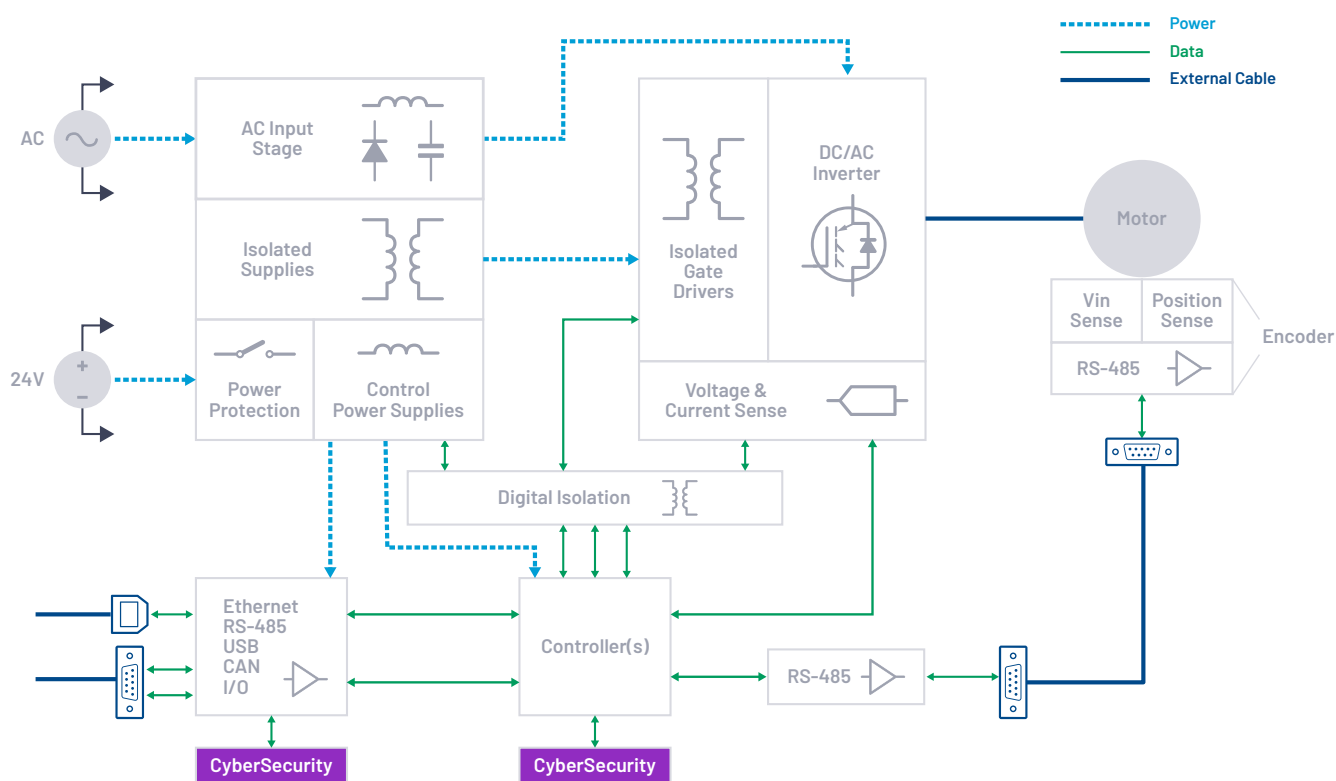


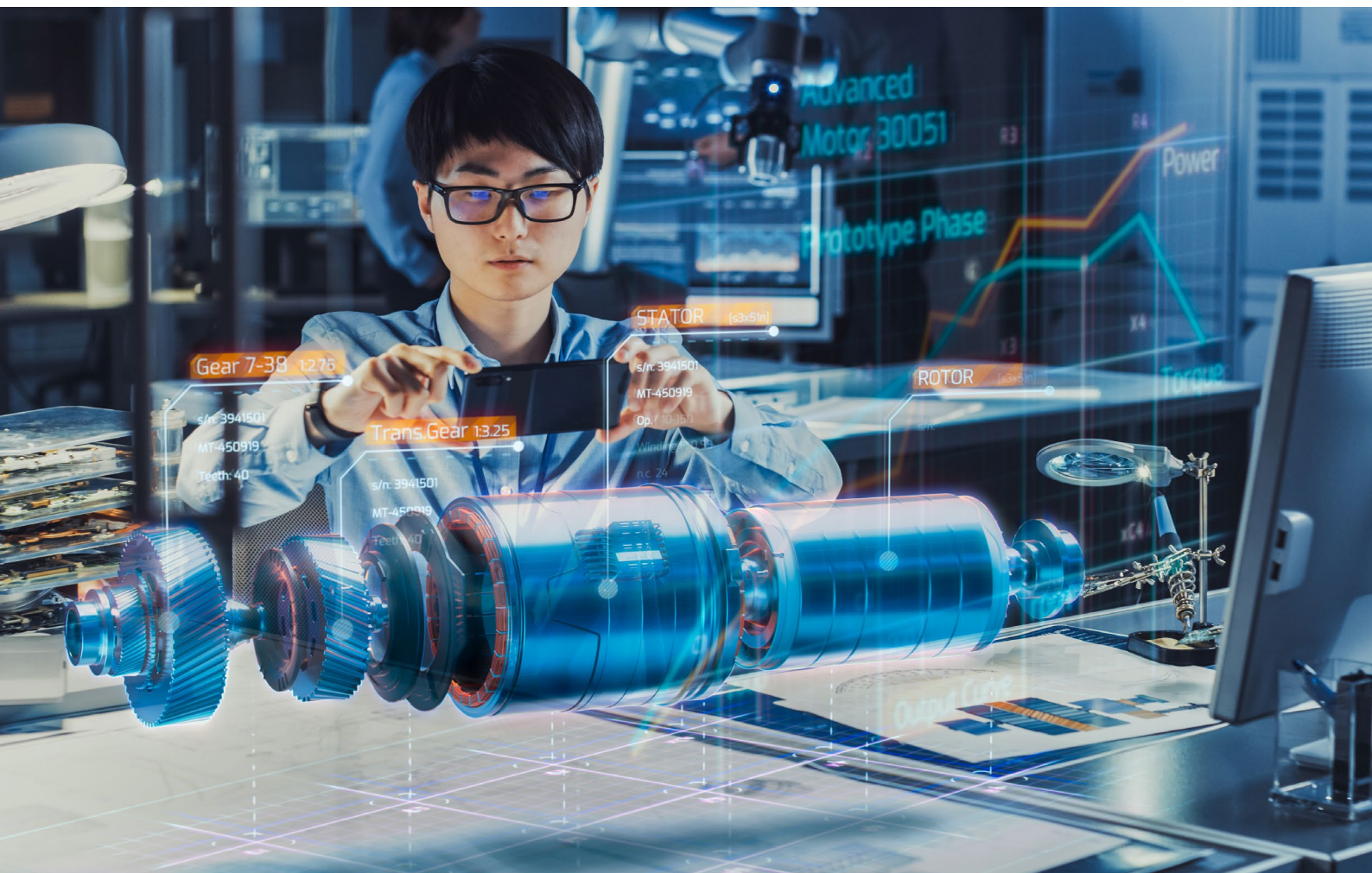
图1：伺服驱动架构示意图

电机驱动器的网络安全是一个新兴话题，长期以来并未受到开发者的重视。这是因为，在绝大多数应用中，电机驱动器与外界完全隔离，避免了潜在的安全威胁。电机驱动器过去通常不会直接或间接连接到工厂系统内的运营技术(OT)网络或云端，因此可能发生未经授权访问的漏洞点非常有限。

为何电机驱动器的网络安全越来越受关注？

正如上一章所述，大多数驱动器的以太网连接能力得到提升，因此情况正在发生变化。此外，厂商对网络安全漏洞和潜在恶意行为者的防范意识有所增强，这些恶意行为者如果入侵供应商的系统，可能会对厂商的声誉造成重大损害。即使对于无网络连接的系统，通过USB进行固件升级现在也被视为安全漏洞。另一个值得关注的领域与IP保护有关。电机驱动器市场竞争日益激烈，驱动器制造商希望确保自身的控制软件不会被从驱动器存储器中提取并非法复制。

对于希望在欧盟销售产品的驱动器制造商而言，面临的另一个压力是《网络弹性法案》(CRA)。这一法案预计将于2025年生效，它要求每种含有数字元素、直接或间接连接到其他设备或网络的产品必须通过设计保证安全，满足一系列网络安全要求，并且可能需要通过标准评估或第三方评估。尽管该法案的细节尚未最终确定，但对不合规行为可能会处以严厉处罚，这意味着每台新的电机驱动器都必须具备全面的网络安全保护。





随着数字化程度的提高，安全性成为一个无法回避的议题。

哪些网络安全特性对驱动器制造商最为重要？

网络安全是一个极其宽泛的概念，涉及诸多方面，其重要性和具体含义会因应用场景的不同而有所差异。例如，在网上购物时，保护信用卡详细信息等个人隐私数据在网络上的传输安全，可能是交易中最关键的需求。相比之下，当电机驱动器在正常运行过程中通过网络交换数据时，一般来说数据本身并不是极为重要，原因是数据本身的有效时间通常非常短。电压、电流或电机速度等变量通常仅在几微秒内有效，并且它们本身在任何特定时刻并不代表任何机密信息。因此，就驱动器而言，数据隐私（需要采取加密等安全措施）不是那么重要。对驱动器而言，最重要的通过身份验证机制，确保所连接的对象的身份真实正确。例如，如果有命令发送至驱动器（如启动/停止或更改设定速度），发送者可能是伪装成可编程逻辑控制器(PLC)的恶意行为者，命令可能会对驱动器运行的流程造成损害。

驱动器的另一个重要安全环节是安全固件更新。在驱动器的生命周期内，驱动器固件升级可能会发生多次。升级时，由于整个控制程序都被更改，驱动器可能暂时面临安全风险。为了防止驱动器运行出现故障，确保安全更新和安全启动（即验证更新和启动映像的真实有效性）极为重要。驱动器往往涉及危险和复杂的处理流程，例如加工厂操作、金属成型、离心机等。因此，一旦驱动器发生故障，无论是控制代码被意外或蓄意破坏，还是通过网络传输的命令/参数出现错误，都可能造成严重的物理损坏和声誉损失。

如何实现这些功能特性？

网络安全功能的实现方式有很多种，通常涉及硬件和软件的结合。ADI公司提供一系列安全认证器和安全微控制器产品，既有1-wire安全认证器DS28E30等简单的器件，也有MAXQ1065等安全微控制器。这些产品可以结合主系统控制器提供简单的信任根功能，或提供更完整的加密功能，帮助满足未来电机驱动器的要求。

至此，我们完成了对电机驱动器的深入解析，阐述了从交流输入功率级到控制器、通信和安全的方方面面。电机控制技术在当今世界的众多领域日益普及。希望通过这些章节的介绍，读者对电子电机控制这一迷人领域有了更深入的认识。

电源管理	
LT8315	微功耗无光耦隔离反激式转换器
MAX17690	无光耦隔离反激式控制器
LT4363	高压浪涌抑制器
LTC4381	具有浪涌保护功能的低静态电流eFuse
ADP5054	集成式四通道降压调节器电源解决方案
MAX14721	高精度可调功率限制器
栅极驱动器	
ADuM4177	SiC隔离式栅极驱动器
ADuM4221	隔离式半桥栅极驱动器
MAX22700E	具有超高CMTI的单通道隔离式栅极驱动器
电流和位置反馈	
AD8410A	高压、高带宽电流检测放大器
MAX11195	双通道14位同步采样SAR ADC
AD7380	双通道16位同步采样SAR ADC
ADuM7701	16位隔离式 Σ - Δ 调制器
AD8515	低功耗CMOS运算放大器
MAX4477	低噪声、低失真、宽带、轨到轨运算放大器
MAX14890E	增量式编码器接收器
通信	
ADIN1200	10 Mbps和100 Mbps以太网PHY
ADIN1300	10 Mbps、100 Mbps和1Gbps以太网PHY
FID05200	实时以太网多协议(REM)交换机芯片
ADIN2299	多协议双端口工业以太网平台
MAX14942	20 Mbps隔离式RS-485/PROFIBUS-DP收发器
ADM3065E	50 Mbps半双工RS-485收发器
MAX22500E	适用于长电缆的100 Mbps半双工RS-485收发器
网络安全	
DS28E30	1-Wire ECDSA安全认证器
DS28S60	DeepCover加密协处理器
MAXQ1065	超低功耗加密控制器



访问 [ANALOG.COM/INTELLIGENT-MOTION](https://analog.com/intelligent-motion)