

推动在智能制造中实现更高水平的灵活性、生产力和可持续性

Maurice O'Brien, 战略营销经理

智能运动控制在智能制造中的重要性

智能运动控制是智能制造的核心构建模块，可实现高度灵活的高效制造。智能运动控制融合了精确反馈、先进感知、高性能控制和无缝连接技术，可提供确定性运动解决方案。利用PLC和制造执行系统(MES)运动洞察信息的无缝连接执行高级分析，以优化制造流程，及早识别潜在问题避免停产。使用智能运动控制的智能制造可以快速重新配置，以支持更敏捷和可扩展的制造，包括批量大小为1的生产。通过缩短完成制造步骤的时间，并优化制造流程实现更高产出，同时降低能耗，从而实现更可持续的智能制造。智能运动应用包括：

- ▶ 泵
- ▶ 打印
- ▶ 风扇
- ▶ 冲压
- ▶ 起重机
- ▶ 机器
- ▶ HVAC
- ▶ 机器人
- ▶ 输送机
- ▶ 贴片
- ▶ 绕组
- ▶ 搬运，以及其他

智能运动控制解决方案的发展和演进

运动控制随着时间推移不断演变，从简单的并网电机发展到适用于机床和工业机器人的复杂的多轴伺服驱动解决方案。为了在智能制造中实现更高水平的生产力、灵活性和自动化，自动化技术日益复杂，这也促进了相关技术发展和演进（参见图1）。

并网电机

最基本的运动解决方案是基于并网或交流3相定速电机，它们使用开关设备来提供开关控制和保护电路。这些基本的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。使用机械控制装置来降低输出，例如节流阀、阻尼器、齿轮或阀门、泵以及风扇等都属于此类装置。

逆变器驱动电机

增加整流器、直流母线和3相逆变器级实际上会生成可变频率和可变电压源，现在被应用到电机中，以实现变速控制。这种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，从而大幅降低能耗。例如高效率的泵和风扇。

变速驱动

对于更高性能的运动控制应用，变速驱动(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中增加了电流和位置测量。这样可以更准确地控制电机速度、位置和扭矩。例如输送机、绕组、打印和冲压机器就是这些应用的典型示例。

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。在CNC加工中，5轴协调很常见，但是有些应用会用到多达12个轴，其中工具和工件在特定空间内相对移动。

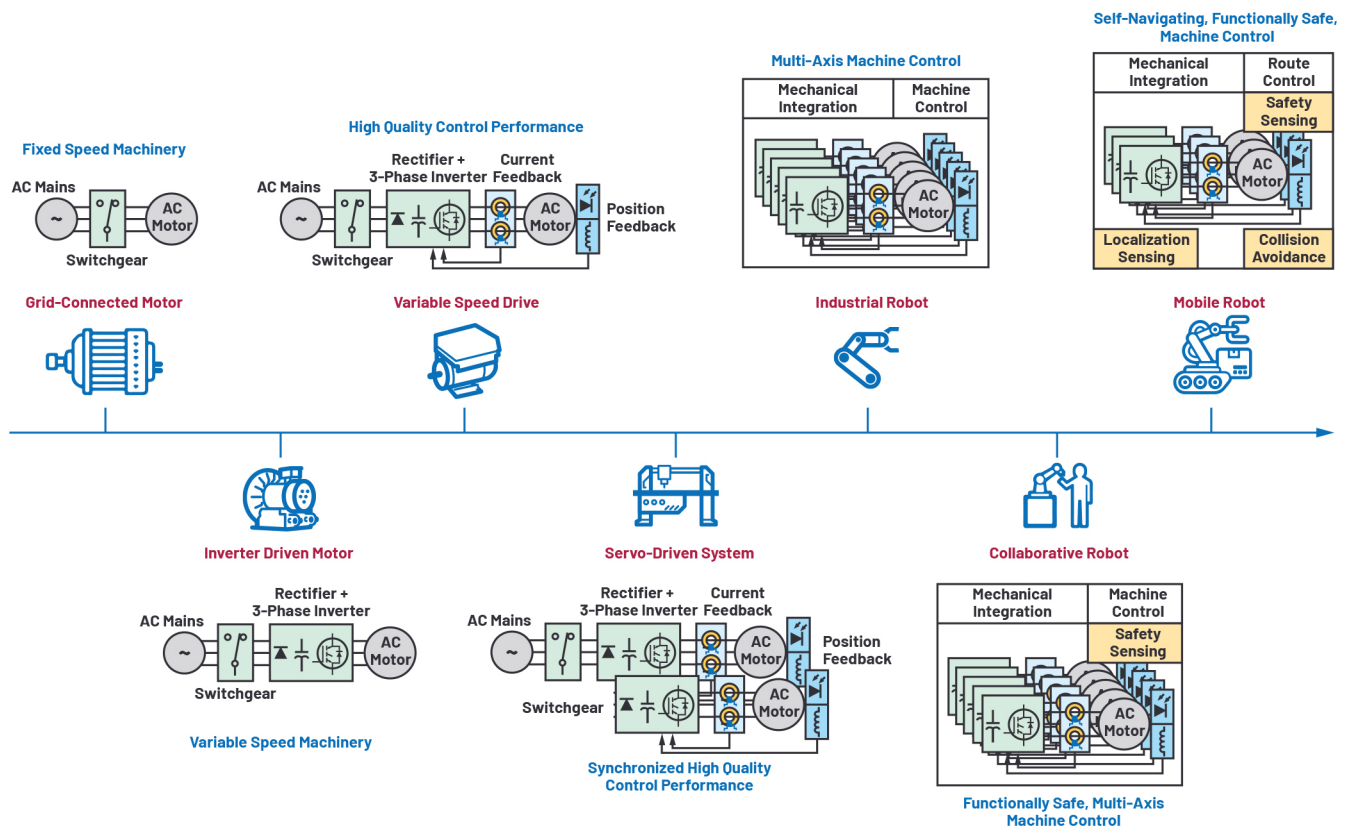


图1. 智能互连运动应用的发展和演进。

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。机器人一般有6个轴，这些轴必须协调有序，如果有时候机器人沿轨道移动，则会有7个轴。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)，以提供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。最后，移动机器人采用了自导航功能安全机器控制，支持定位传感和避撞。

推动智能运动控制发展的驱动因素

智能运动控制在四个关键增长驱动因素推动下加速发展：能耗降低、敏捷生产、数字化转型，同时向智能制造中基于减少停机时间和增加资产利用率、以服务为基础的新商业模式转变也有一定的促进作用。让我们详细看看这四个关键的增长驱动因素。

降低能耗

电机系统消耗的电力占到整个行业消耗电力的近70%。¹智能运动解决方案通过让越来越多的应用从定速电机转向高效率电机和变速驱动，正在并将继续大幅降低能耗，这在一定程度上是受到能效法规推动。这种能耗降低可以助力实现更具可持续性的制造。获取与优化制造流程有关的运动见解，将有助于进一步降低智能制造的能源消耗。

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完成，以实现更高的产出和生产力。敏捷生产提高了发生中断时的弹性，可以更快应对不断变化的客户需求。

数字化转型

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变速驱动器和伺服驱动器使用来自电压、电流、位置、温度、功率、能耗的数据，结合使用外部传感器来监测振动和其他过程变量。利用融合了信息技术/操作技术(IT/OT)的以太网网络，运动应用彼此互联，并传输数据和见解。运动数据和见解现在更易访问，可由强大的云计算和AI（算法）进行分析，以优化制造流程和监控整个装置中资产当前的健康状况（参见图2）。

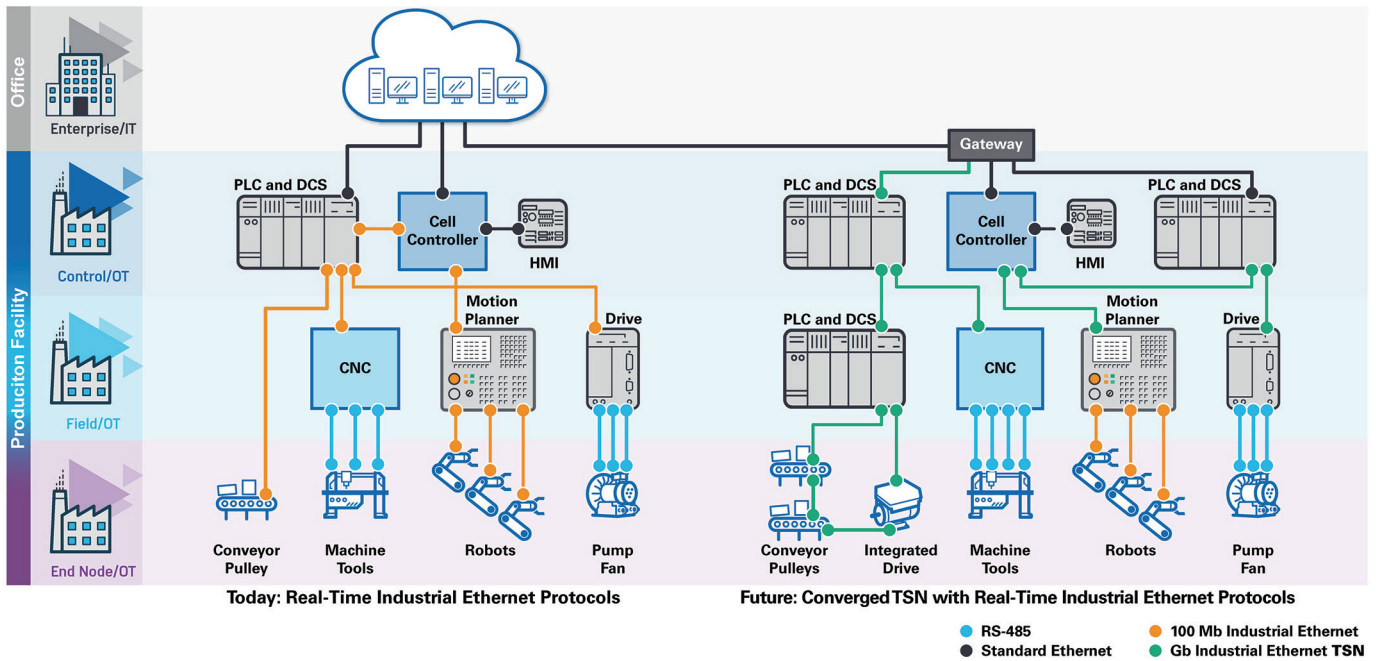


图2. 由无缝工业以太网连接助力实现的数字转型。

适用于部署资产的新商业模式

资产制造商希望出售的不仅仅是资产，他们想要扩展其商业模式，包括基于生产力和资产利用率的售后服务合同。例如，泵制造商希望使用新的预测性维护服务产品，根据泵送的液体（例如，水或油）体积来销售，并按泵送的每立方米(m^3)来收费，而不只是销售泵。预计在未来5年，泵OEM 50%至60%的收入将来自与服务相关的活动。³系统集成商希望根据他们安装的制造资产的运行时间来收费，而不仅仅是收取资产的初始安装费。新智能运动解决方案集成了状态监控功能，以实时监控资产的健康状况，并据此安排维护计划。这种监控可以消除计划外的资产停机，提供更高水平的生产力和资产利用率，成为基于服务的新合同的基础。

智能运动控制要求

为了提高智能制造的生产力和可持续性，需要采用新的先进运动控制解决方案来发挥上述四个发展推动因素的作用。智能运动控制的关键要求如图3所示。

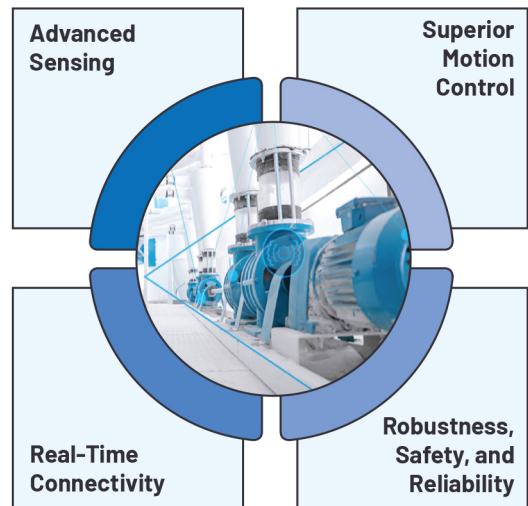


图3. 智能运动控制要求。

出色的运动控制

出色的运动控制会缩短制造步骤完成的时间，从而增加产出和制造生产力，同时降低能耗。例如：通过精准的位置和扭矩控制，实现更高的质量和更快的加工速度，例如以更少的工序步骤和更短的时间加工一个复杂的部件。提供出色的运动控制的关键要求包括：提高控制环路的性能、可用于严苛的工业部署的可靠解决方案，以及高水平集成，以实现高度可靠但小巧的解决方案。这些由低延迟、低漂移、多相电流、位置检测，以及具有高瞬态可靠性和高度集成组件的信号链共同实现。

耐用、安全且可靠

耐用、可靠的解决方案可以延长资产的可用寿命，是实现更可持续的智能制造的关键。通过延长资产的使用寿命，可以大幅减少用于制造替换资产所耗费的原材料和能源。用于电源调节和电源保护的电源管理解决方案是提供更耐用、更可靠的资产的关键部件。电源管理要求包括：适用于绝缘栅双极晶体管(IGBT)的高端电源、适用于FPGA和处理器的功率密度解决方案、电源管理遥测的数字负载点(PoL)、EMC坚固性、高环境温度运行，以及保护用户免受高电压影响的数据和电源隔离。新型宽带隙电源开关（由碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)制成）的可靠使用为提供快速过流保护系统和可靠运行带来了新的挑战和要求。

实时连接

在高性能多轴同步运动应用中，需满足精准、确定性、时间先决这些控制时序要求，且需要最小化端到端延迟，尤其是在控制周期时间变短、控制算法复杂性增加的情况下。这些高性能应用要求实时连接和亚毫秒网络周期时间，以控制复杂的运动

应用。智能制造使用视觉系统和运动应用来监控制造质量和提高生产安全性。工业以太网网络必须支持实时确定性运动控制流量和最大视觉流量在同一网络（带宽可达Gb）上共存。连接到网络的设备和控制器必须能够互操作，以在整个制造设备中提供无缝的数据流，并确保对更高等级的管理系统保持数据透明，同时，通过缩短调试时间，让这些网络更灵活且可扩展。融合(IIOT)以太网网络确保能够无缝访问更高等级的管理软件系统的运动信息，进行分析，以优化制造流程和加速数字转型。

高级检测

高级检测解决方案创建运动信息，可用于优化制造流程和及早检测故障迹象。检测模块包括位置、电流、电压、磁场、温度、振动和冲击。目前，正通过使用高级检测来部署对资产健康状况的实时监控来创建新商业模式，以提供预测性维护服务合同（基于不断增加的资产正常运行时间）。高级检测要求包括：在严苛工业环境（例如，多尘环境）下的坚固性、准确的位置检测、非接触式高电流检测、高带宽电流和振动检测、减少校准以确保解决方案的准确性，以及解决方案尺寸小巧，以适用于编码器类应用。

加快实现更高价值的运动控制解决方案的关键技术

要实现用于智能制造的下一代智能运动控制解决方案，需要组合使用多种技术。这些技术组合使用时可以对严苛的工业部署提供可靠、精准的运动控制，且可访问来自高级检测的系统信息（参见图4）。



图4. 加快实现更高价值的运动控制解决方案的关键技术，且可访问系统信息。

精准测量

复杂的运动控制需要精确的转换器技术，以提供高质量的电流反馈，利用隔离和非隔离解决方案，提供既高度精确，又具有快速瞬态响应的控制回路性能。电流反馈是提高驱动性能的基本构建模块，决定了总体控制带宽和响应时间。电流反馈的关键要求包括：PWM周期同步测量、隔离或高共模测量、低失调漂移以最小化扭矩纹波，以及14至18位分辨率的低延迟同步采样，以测量相位电流。还需要采用精确转换器技术，以在编码器和线性跟踪应用中提供准确的位置测量，以提供更高的产出和提高生产力。

隔离和接口

支持实现复杂的运动控制的下一代驱动器和电机需要采用数字隔离技术，以提供隔离数据和隔离通信接口，例如RS-485、USB和LVDS。还需要使用绝缘栅驱动器来驱动高端和低端功率半导体，以提供可靠、安全且高度可靠的资产。栅驱动器将逻辑电平PWM信号转化为控制功率晶体管的高端参考信号。高压逆变器应用通常使用IGBT，未来则倾向于使用SiC和GaN来提高开关频率和/或降低开关损耗。低压应用一般使用基于MOSFET的开关。栅驱动器的关键要求包括：高速、低传输延迟、低延迟偏差、坚固性和共模瞬变抑制、开关保护功能（DESAT、米勒箝位、软关断、UVLO），以及可控开关（转换速度可变的开关）。标准数字隔离器在许多驱动器中，起着在高压电源电子领域和安全特低电压(SELV)领域（PWM和其他信号）之间传输信号的重要作用。示例包括集成电源模块(IPM)的隔离信号。全集成隔离电源解决方案也可以和数字隔离器或其他隔离功能组合使用，以大幅减小解决方案的尺寸（与分立式变压器解决方案相比）。

工业以太网

要在运动控制应用（伺服器和驱动器）中进行确定性实时通信，需要采用工业以太网连接和亚毫秒周期时间网络性能。可靠的物理层器件（100 Mb和Gb速度）与2层工业以太网协议（例如EtherCAT、PROFINET、EtherNET/IP和IEEE时间敏感性网络(TSN)）组合，确保提供确定性以太网连接。下一代设计转而采用融合网络上的Gb TSN，采用多种流量类型，使用循环通信进行控制，使用非循环通信来提供最大流量（例如，视觉和监控流量）。需要使用低延迟工业以太网解决方案在多轴应用中缩短周期时间。这些确定性运动控制解决方案支持实现更复杂的运动控制应用，以推动实现更高水平的制造生产力和灵活性。

磁传感

磁传感以异向性磁电阻(AMR)位置传感器解决方案为基础，为编码器应用提供可靠且精准的位置检测。位置反馈用于执行直接位置控制，或推断伺服驱动器的转速和执行机器速度控制。与光学编码器相比，磁传感提供更低成本的解决方案，且在易受灰尘和振动影响的工业环境中提供更为可靠的解决方案。

电源管理

智能运动应用通常部署在严苛的工业环境中，这些环境要求能够在高环境温度下运行，且能够抵御传导噪声和高压瞬变。在一些分散应用中，驱动器更靠近采用更小封装的电机，在其他应用中，驱动器则与电机集成在一起。需要使用能在高环境温度下运行的更高功率密度的电源管理解决方案，以支持实现这些尺寸更小巧的智能运动控制应用。

机器健康

机器健康使用振动和冲击传感器来对机器健康执行实时状态监控，以消除计划外的停机，延长资产的使用寿命，同时降低维护成本。通过将机器健康监控集成到运动应用中，可以通过数字化策略产生新的收入流，这些策略基于确保的正常运行时间来创建基于服务的新商业模式，以实现更高级别的制造生产力。基于振动、冲击和温度的资产健康数据被终端AI转化为资产健康洞察，然后通过有线或无线解决方案传输至管理控制软件，提供重要资产的实时健康状态。

结论

为了快速响应不断变化的消费者需求和支持高效生产（批量大小低至1），需要施行敏捷生产。敏捷生产由可快速重构的智能连接资产助力实现。这些互连资产实时共享数据；这些数据可用于识别生产瓶颈，以及通过监测资产的健康状况来消除计划外的停机，从而改善运营效率。基于智能运动控制解决方案构建的智能制造消耗的能源更少，且支持更复杂的运动，以推动实现更高的灵活性、生产力和可持续性。如需详细了解ADI公司用于智能运动控制的技术和平台，以及我们如何帮助客户和合作伙伴加快实现更高价值的运动控制解决方案，请浏览以下页面或访问analog.com/intelligentmotion查看我们的解决方案系列。

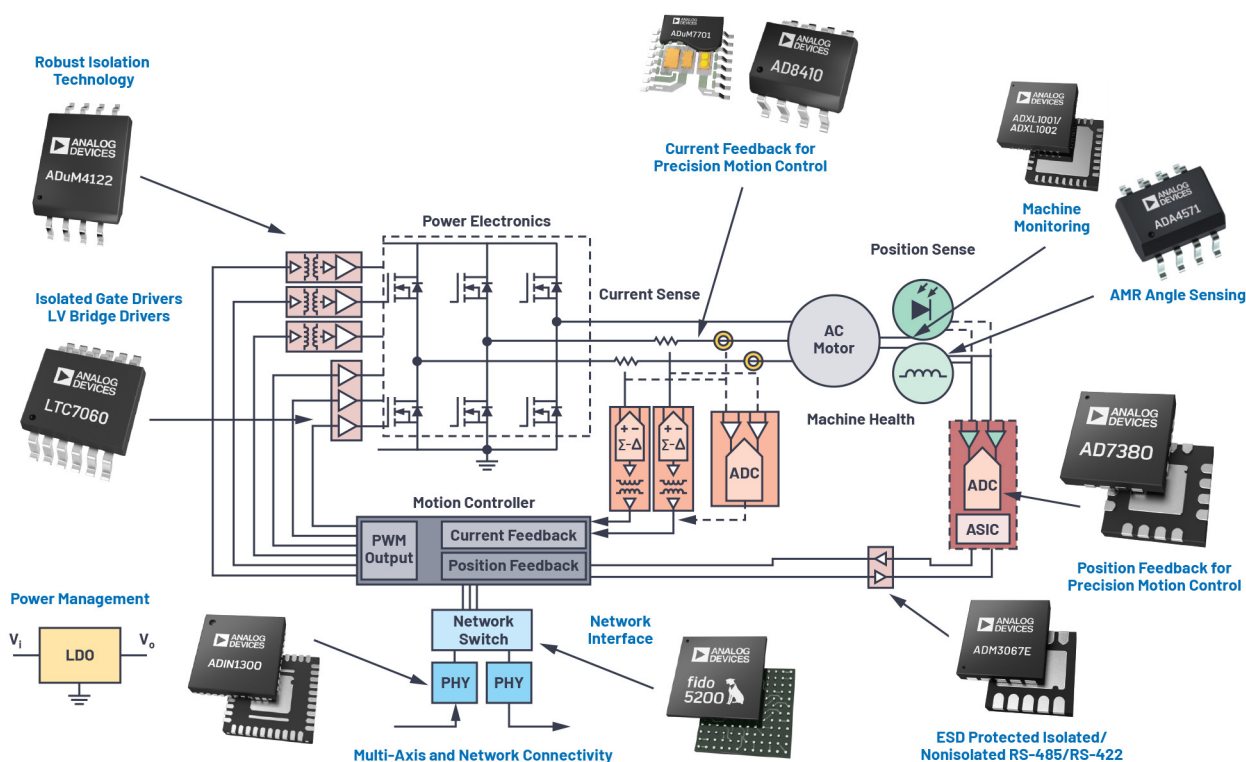


图5. ADI公司用于智能运动控制应用的解决方案。

智能运动控制解决方案

ADI公司用于智能运动控制应用的技术和系统级解决方案支持实现更高级别的性能，同时降低能耗和减少停机时间。图5概要介绍典型的电机驱动器信号链，该信号链由6个主要模块构成，每个模块代表一种ADI解决方案。

功率电子器件

功率电子器件在电机驱动器系统中提供功率转换。高压系统(>100 V)使用绝缘栅驱动器来驱动功率半导体。ADuM4122是单栅绝缘栅驱动器，提供3 A短路(<3 Ω)，支持功能性或增强绝缘（高达~800 V直流母线），提供摆率控制，以实现EMI/功率损耗优化；还支持高共模瞬变抑制(CMTI)和低传播延迟，以配合SiC和GaN功率半导体使用。ADuM160N多通道数字隔离器可用于隔离PWM信号，与集成了栅驱动器和功率半导体的集成功率模块(IPM)配合使用。ADuM6028隔离功率器件可与数字隔离器、隔离型收发器和隔离型数据转换器一起使用，提供完全通过安全认证、可即时使用的非常小巧的8引脚解决方案。

对于低压系统(<100 V)，可使用提供浮动接地和可编程死区时间的100 V半桥驱动器LTC7060，或采用PassThru™技术和自适应击穿保护的150 V受保护高端NMOS静态开关驱动器LTC7000来驱动低压半导体。LTC7000还支持可编程死区时间（用于优化效率）、增强型电流控制和摆率控制（用于降低EMI）。

电流检测

ADuM7701是一款高性能、二阶Σ-Δ调制器，片上的数字隔离采用ADI公司的iCoupler®技术，能将模拟输入信号转换为高速单位数据流，以进行隔离电流检测测量。ADuM7703提供低失调漂移（最

大0.6 μV/°C），可降低扭矩纹波，采用紧凑型8引脚封装，集成LDO，以简化电源设计和减小板面积。提供150 V/ns CMTI（最小额定值），可配合GaN和SiC功率电子器件使用。

AD8410高压电流检测放大器提供高增益（20 V/V、50 V/V、100 V/V）、低失调漂移(~1 μV/°C)和高带宽(2 MHz)，以实现优化电流控制。AD8410还包括双向电流测量输入（高达100 V共模输入）。LTC6102精密零漂移电流检测放大器确保在广泛的工作条件下提供精度，在电流分流检测应用中可由高端电压（高达100 V）供电。

位置检测

位置反馈用于执行直接位置控制，或推断转速和执行机器速度控制。ADA4570和ADA4571将AMR角度传感器和集成式信号调节器集成在一起，为电机驱动器和伺服器应用提供更高精度的绝对位置检测（误差<0.1°，使用寿命/温度<0.5°）。它们能在严苛的磁性环境中可靠运行，支持宽气隙公差且不降低角误差精度（与霍尔/GMR/TMR不同），并简化系统设计考量。与工业应用中的光学传感器相比，ADA4570和ADA4571不受灰尘或污垢影响，与市场上内置校准引擎的数字输出解决方案相比，它们的延迟非常低。ADA4571生成两个单端模拟输出（正弦和余弦），用于表示周围磁场的角位置，ADA4570则生成两个差分模拟输出对。ADA4571的双版本(ADA4571-2)也可用于安全关键应用中需要完全冗余的地方。

AD7380是一款4 MSPS双通道同步采样16位SAR ADC，提供精度、吞吐量和最小尺寸，适用于编码器应用。AD7380采用小封装(3 mm × 3 mm)，用于使编码器小型化，提供4 MSPS吞吐量，以实现最低延迟和控制环路快速瞬态响应。AD7380过采样引擎可以在较慢的工作条件下实现更高的精度。

机器健康

振动和冲击传感器正被集成到编码器或电机中，以提供资产健康状况信息。ADXL1002超低噪声（ ± 50 g范围内为 $25 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）、高频率 ± 50 g MEMS加速度计提供高达11 kHz（3 dB点）的高数据带宽振动检测，谐振频率为21 kHz。ADXL1002是替代压电传感器的低成本、低功耗方案。与压电传感器相比，ADXL1002可以监测低至直流的低转速设备，同时降低校准要求。ADXL354是一款低噪声、低功耗3轴MEMS加速度计，采用小型封装（3 mm × 5 mm），具有数字接口、SPI（3线和4线）和I²C，为编码器提供紧凑型振动检测集成解决方案。

ADI OtoSense™智能电机传感器是基于AI的全套硬件和软件解决方案，将一流的检测技术和领先的数据分析结合起来，对电机实施状态监控。无论是哪种类型的电机，ADI OtoSense SMS都提供最关键的诊断，将数据转化为可执行的信息，帮助用户预测维护周期和规避计划外的停机。

网络接口

智能制造基于智能运动应用网络，在资产和更高级别的控制和管理网络之间共享数据。ADI提供的可靠、低功耗和低延迟PHY包括ADIN1200（10/100）PHY和ADIN1300（10/100/1000）PHY。这两种工业以太网PHY都是为要求工作环境温度高达105°C的工业应用而开发的，已根据EMC和可靠性标准进行广泛测试，以在严苛的工业应用中运行。低延迟PHY支持更低的周期时间网络，支持将更多设备连接到网络，并满足复杂、高性能确定性运动应用的时序要求。为了实现确定性工业以太网连接，ADI的2层工业以太网嵌入了2端口开关。fido5100和fido5200支持PROFINET、以太网/IP、EtherCAT、Modbus TCP和Ethernet POWERLINK工业以太网协议，以及任何处理器、协议和堆栈。

运动控制器

运动控制器提供处理引擎，生成PWM信号来驱动功率半导体，并接收电流和位置反馈信号来控制电机的速度和扭矩。需要使用可靠、高环境温度、高功率密度电源管理解决方案来控制电机供电，该控制器通常是FPGA或处理器，提供可选的上电顺序和电源遥测功能。ADI公司的Power by Linear™电源管理IC和电源模块为推动当今和未来的智能运动控制应用提供了基础。运动控制器通常位于中央机架，需要与编码器进行远距离通信。此时可以使用ADI的隔离和非隔离RS-485收发器，以串行通信的方式将编码器位置反馈信息传输给运动控制器。ADM3066E是一款 ± 12 kV IEC ESD保护全双工50 Mbps RS-485收发器，提供高带宽、高环境温度（125°C）、可靠的通信解决方案，采用3 mm × 3 mm小封装，适用于编码器应用。

参考资料

- ¹ João Fong、Fernando J.T.E.Ferreira、André M. Silva、Aníbal T. de Almeida。 “IEC 61800-9系统标准，作为提高全球电机驱动系统的效率的工具。” 发明，2020年3月。
- 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：2021年全球数字转型预测。” IDC，2020年10月。
- ³ 2025年展望：互连世界中泵的未来。弗若斯特沙利文咨询公司，2020年6月。

作者简介

Maurice O'Brien是ADI公司工业自动化部的战略营销经理。他负责交付以工业自动化为重点的系统级解决方案。在此之前，Maurice在ADI公司的工业以太网领域工作了3年，在电源管理应用和营销领域工作了15年。他拥有爱尔兰利默里克大学的电子工程学士学位。联系方式：maurice.obrien@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛

与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn

