

适用于恶劣工业环境下 时限通信的可靠以太网 物理层解决方案

Maurice O'Brien, 战略营销经理

工业应用为什么要采用以太网?

越来越多的工业系统采用以太网连接来解决制造商面临的工业4.0和智能工厂通信关键挑战,包括数据集成、同步、终端连接和系统互操作性挑战。以太网互联工厂通过实现信息技术(IT)与操作技术(OT)网络之间的连接,可提高生产率,同时提高生产的灵活性和可扩展性。这样,使用一个支持时限通信的无缝、安全的高带宽网络便可监控工厂的所有区域。

规模计算和可靠的通信基础设施是互联工厂的命脉。当今的网络面临着流量负载不断增长以及众多协议之间互操作性的挑战,这些协议需要使用复杂且耗电的网关来转换整个工厂的流量。通过向工厂边缘终端无缝交付关键的确定性性能,工业以太网可解决同一网络中的这些互操作性问题。过去一直缺乏专为可靠的工业环境设计的适用以太网物理层(PHY)。长期以来,工业通信设备的设计人员不得不使用针对大众市场开发的消费级标准以太网PHY。在工业4.0时代,终端节点的数量正在加速增长,确定性对于实现互联工厂极其重要,因此增强的工业级工业以太网PHY至关重要。

IT与OT以太网连接

由于以太网是受到广泛支持的、可扩展、灵活的高带宽通信解决方案,所以一直以来都是IT领域的通信之选。此外,它还具有IEEE标准带来的互操作性优势。然而,实现IT和OT网络之间的连接以及基于以太网技术的无缝连接面临着一个关键挑战,那就是如何在要求时限连接的恶劣工业环境下进行部署。

工业以太网应用和以太网部署挑战

图1显示了智能工厂中基于工业以太网连接的互联移动应用。多轴同步和精密运动控制对于在智能工厂中实现高质量生产和加工至关重要。随着对生产能力和输出质量的要求越来越高,伺服电机驱动器也需要更快的响应时间和更高的驱动精度。系统性能提高要求终端设备中使用的伺服电机轴更紧密地同步。实时100 Mb以太网广泛用于当今的运动控制系统。但是,同步仅涉及网络主机和从机之间的数据通信。

网络需要支持跨网络边界同步到应用,从低于1 μ s的时间到伺服电机控制内的PWM输出。这提高了多轴应用的加工和生产精度,如采用更高数据速率的千兆以太网和IEEE 802.1时间敏感网络(TSN)的机器人和数控机床。利用实时工业以太网协议,所有设备均可连接到一个高带宽聚合网络,以实现边缘到云连接。

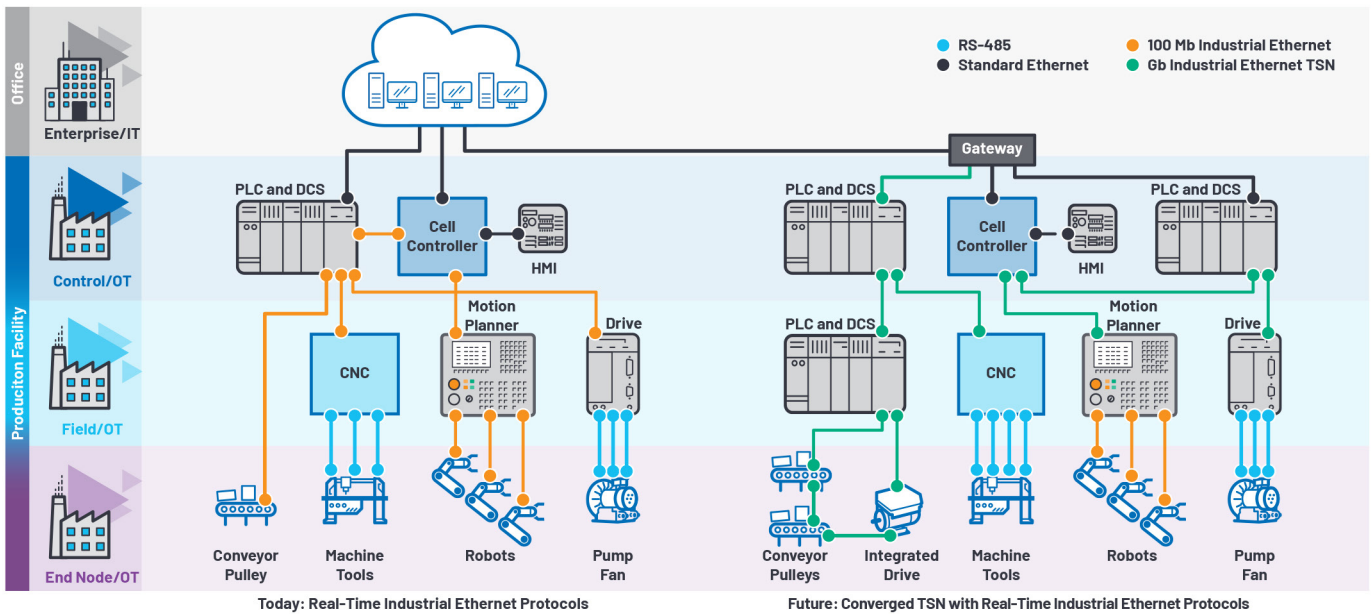


图1. 通过工业以太网实现的互联移动应用。

在工业环境中，部署以太网的网络安装人员面临的主要挑战就是稳健性和较高的环境温度。较长的电缆敷设路径周围存在来自电机和生产设备的高压瞬变，从而可能会损坏数据和设备。为成功部署工业以太网（如图1所示），需要一种增强型以太网PHY技术，要求性能稳定可靠，低功耗、低延迟，采用小型封装，并且可以在嘈杂的高温环境下工作。本文将讨论在互联工厂中部署以太网PHY解决方案所面临的挑战。

何为工业以太网物理层？

工业以太网PHY是一种物理层收发器器件，根据OSI网络模式收发以太网帧。在OSI模式中，以太网覆盖第1层（物理层）和第2层（数据链路层）的一部分，并由IEEE 802.3标准定义。物理层指定电信号类型、信号速度、介质和网络拓扑。它实施1000BASE-T（1000 Mbps）、100BASE-TX（100 Mbps，铜缆）和10BASE-T（10 Mb）标准的以太网物理层部分。

数据链路层指定如何通过介质进行通信，以及传输和接收消息的帧结构。这仅仅意味着位如何从电线上分离出来并进入位排列，以便从位流中提取数据。对于以太网，这称为介质访问控制（MAC），将集成至主机处理器或以太网交换机中。例如，[fido5100](#)和[fido5200](#)这两款ADI嵌入式、双端口工业以太网嵌入式交换机，用于支持多协议、实时工业以太网设备连接的第2层连接。

工业应用的以太网物理层要求

1: 功耗和较高的环境温度

工业应用中的以太网互联设备通常封装在IP66/IP67密封外壳中。IP等级是指电气设备对水、污垢、灰尘和沙子的耐受力。IP后面的第一个数字是IEC分配的防固体等级。在这里，6意味着与物质直接接触8小时后，无有害的灰尘或污物渗入设备中。随后是防水等级6和7。6意味着可在强大的喷射流中防止水渗入，而7意味着设备可浸入1米深的淡水中30分钟。

使用这些密封外壳后，由于外壳的导热能力下降，以太网PHY设备面临的两个主要挑战就是功耗和较高的环境温度。部署工业以太网时，需要使用工作温度高达105℃且功耗极低的以太网PHY设备。

典型的工业以太网网络采用线性和环形拓扑进行部署。与星形网络相比，这些网络拓扑减少了布线长度，且在环形网络中留有冗余路径。连接至线性或环形网络的每个设备都需要两个以太网端口，以便沿网络传递以太网帧。在这些用例中，以太网PHY功耗变得更为重要，因为每个互联设备都有两个PHY。千兆PHY功耗对总功耗有重大影响，而低功耗PHY可以为设备中的FPGA/处理器和以太网交换机提供更多的可用功耗预算。

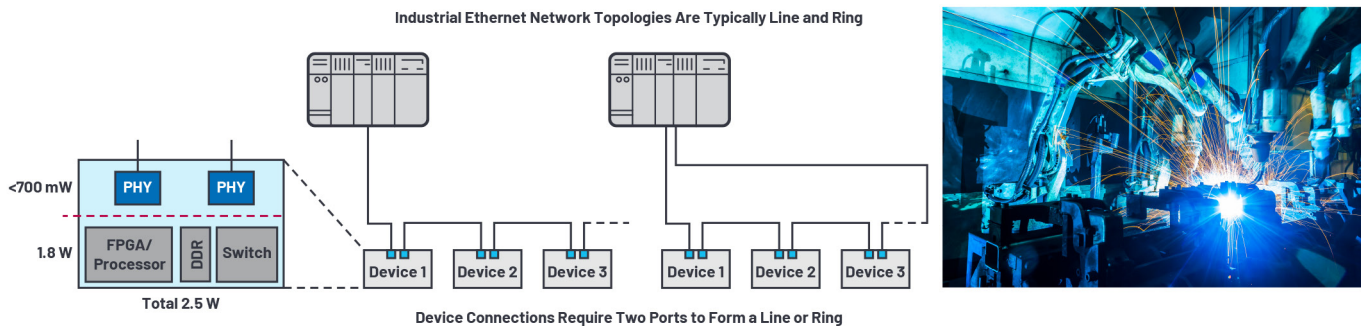


图2. 低功耗工业以太网PHY设备。

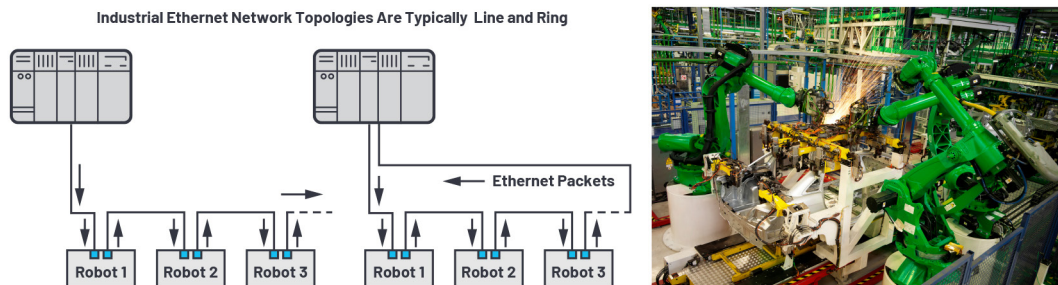


图3. 工业以太网网络中的以太网PHY延迟。

我们来看图2中的示例，设备的功耗预算为2.5 W，包括FPGA、DDR存储器和需要1.8 W功耗预算的以太网交换机。这样，两个PHY的可用功耗预算只剩下700 mW。为满足设备的散热要求，需使用功耗<350 mW的Gb PHY。当今市场上只有少数PHY满足这一功耗要求。

2: EMC/ESD稳健性

在生产设备噪音会产生高压瞬变和设备安装人员和操作人员可能带来静电放电事件的恶劣工厂条件下，工业网络的电缆敷设路径可能长达100米。因此，稳健可靠的物理层技术对于工业以太网的成功部署至关重要。

工业设备通常需要满足下述EMC/ESD IEC和EN标准：

- ▶ IEC 61000-4-5浪涌
- ▶ IEC 61000-4-4电快速瞬变脉冲群(EFT)
- ▶ IEC 61000-4-2 ESD
- ▶ IEC 61000-4-6射频场感应的传导抗扰度
- ▶ EN 55032电磁辐射骚扰
- ▶ EN 55032传导骚扰

产品通过这些标准认证的相关成本比较高，如果需要进行设计迭代来满足其中任何一个标准，那么新产品的推出通常会延迟。使用已经通过IEC和EN标准测试的PHY设备可显著降低新产品开发成本和风险。

3: 以太网PHY延迟

对于需要实时通信的应用（如图1所示），进行精确的运动控制非常重要，PHY延迟亦会是一个重要的设计规范，因为它是整个工业以太网网络周期时间的关键部分。网络周期时间是控制器收集和更新所有器件的数据所需的通信时间。降低网络周期时间可在时限通信中实现更高的应用性能。低延迟以太网PHY有助于最大限度地减少网络周期时间，允许更多器件连接到网络。

由于线性和环形网络需要两个以太网端口将数据从一个设备传输至下一个设备，所以对于有两个端口（数据输入端口/数据输出端口）的设备，以太网PHY延迟的影响也会翻倍，见图3。在一个拥有32台设备的网络(64 PHY)中，如果PHY延迟降低25%，那么这一工业以太网PHY延迟的降低将对可连接的节点数量和工业以太网网络性能（周期时间）产生显著的影响。

4: 以太网PHY数据速率可扩展性

采用支持不同数据速率的工业以太网PHY设备亦非常重要：10 Mb、100 Mb和1 Gb。PLC和运动控制器之间的连接需要高带宽的千兆(1000BASE-T) TSN以太网连接。现场级连接采用在100 Mb (100BASE-TX)PHY中运行工业以太网协议的以太网连接。对于终端节点/边缘节点连接，IEEE 802.3cg/10BASE-T1L中有一个新的物理层标准，支持在长达1千米的单根双绞线电缆上以10 Mb带宽采用低功耗以太网PHY技术，并且可用于过程控制中的本质安全应用。参见图4，了解过程控制以太网连接和可扩展以太网PHY数据速率（从PLC到终端节点执行器和现场仪器仪表）的需求。

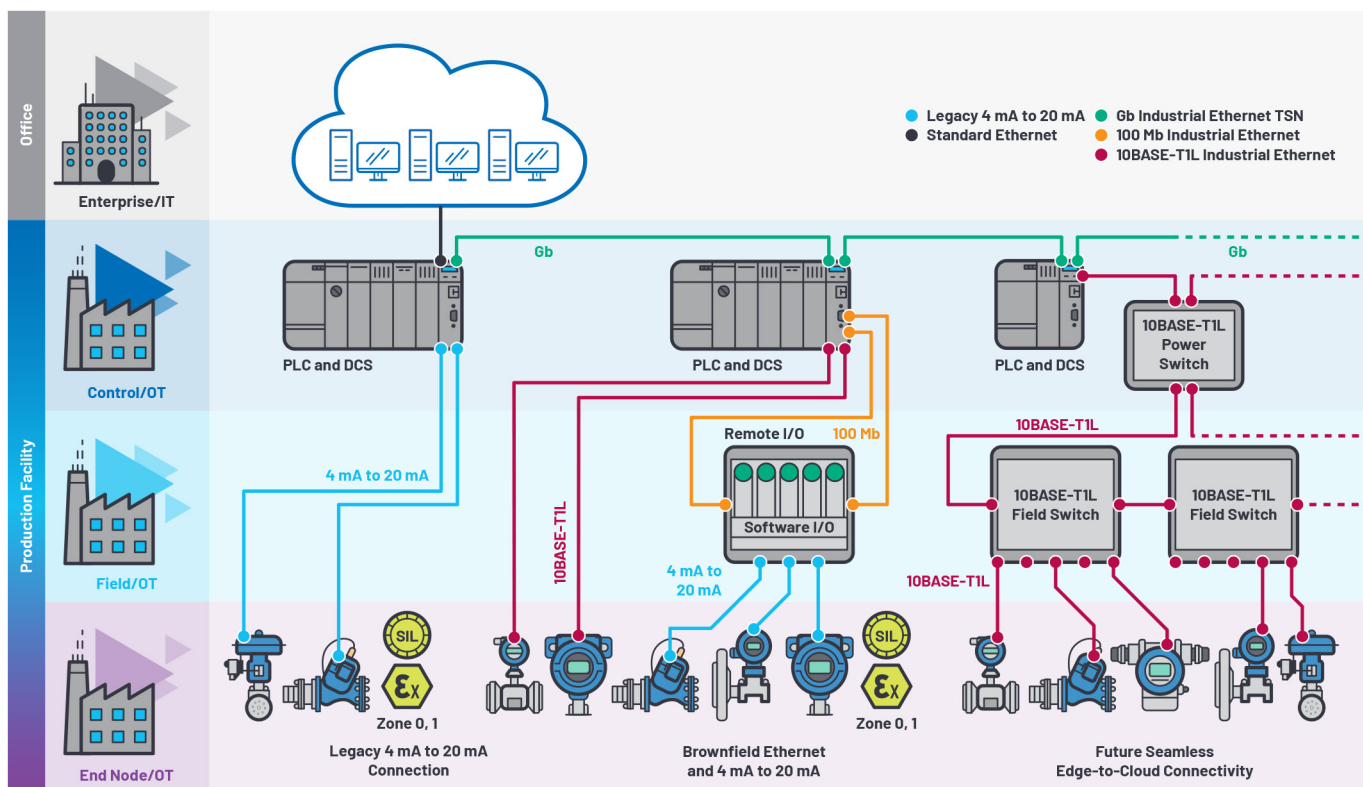


图4. 过程控制，无缝云端连接技术。

5: 解决方案尺寸

随着以太网技术向工业网络边缘扩散，互连节点的尺寸变得越来越小。以太网互联传感器/执行器的产品尺寸可以非常小，因此需要将PHY置于专为工业应用开发的小封装内。事实证明，引脚间距为0.5毫米的LFCSP/QFN封装较为可靠，无需昂贵的PCB制造流程，而且底部裸露焊盘可用于较高的环境温度条件下，从而增加了功耗。

6: 产品耐久性

产品寿命是工业设备制造商关心的一个问题，因为其设备通常可在现场使用15年以上。所以产品停产意味着需要重新设计新产品，这会带来高成本，而且非常耗时。工业以太网PHY设备必须具有较长的产品寿命，而消费电子、大众市场、以太网PHY供应商通常不支持这种产品。

适合可靠的工业以太网应用的工业以太网PHY要求概览

表1. 消费电子与工业以太网PHY要求

PHY主要特性	消费电子以太网PHY	工业以太网PHY	优势
工作温度	0°C至70°C	-40°C至+105°C	在恶劣的工业应用环境中可靠运行
Gb PHY延迟(RGMII)	>400 ns	<300 ns	减少了网络周期时间
Gb PHY功率	>500 mW	<350 mW	IP66/IP67产品，不含风扇或散热器
EMC/ESD稳健性	不需要	浪涌、EFT、ESD、射频电磁场辐射抗扰度、 射频场感应的传导抗扰度、 电磁辐射骚扰、传导辐射	减少产品开发和认证时间和成本， 产品稳定可靠
封装尺寸	48引脚、7 mm × 7 mm	40引脚、6 mm × 6 mm	产品尺寸更小
产品寿命	短路	20至25年	产品使用寿命长

表2. ADIN1200和ADIN1300特性

产品型号	数据速率 (Mbps)	MAC接口	I/O电压 (V)	电缆长度 (m)	断路检测(μs)	延迟 (ns)	功耗 (mW)	温度范围	封装
ADIN1200	10/100	MII/RMII/RGMII	1.8/2.5/3.3	180	<10	300 (MII)	139	-40°C至+105°C	32-LFCSP (5 mm × 5 mm)
ADIN1300	10/100/1000	MII/RMII/RGMII	1.8/2.5/3.3	150	<10	294 (RGMII)	330	-40°C至+105°C	40-LFCSP (6 mm × 6 mm)

表3. ADIN1300稳健型工业以太网Gb PHY EMC/ESD稳健性测试

测试/标准方法	相关标准限制	性能评估
CISPR 32 电磁辐射骚扰（3米远）	30 MHz至230 MHz QP 50 dBμV/m 230 MHz至1 GHz QP 57 dBμV/m 1 GHz至3 GHz PK 76 dBμV/m, AVE 56 dBμV/m 3 GHz至6 GHz PK 80 dBμV/m, AVE 60 dBμV/m	符合工业A类环境限制
CISPR 32 传导辐射	0.15 MHz至0.5 MHz: QP: 53 dBμA至43 dBμA, AVE: 40 dBμA至30 dBμA 0.5 MHz至30 MHz: QP: 43 dBμA, AVE: 30 dBμA	符合工业A类环境限制
IEC 61000-4-2 ESD	±4 kV接触 B类性能	RJ-45屏蔽线的±6 kV B类性能要求。
IEC 61000-4-5 浪涌	±1 kV接地线, I/O信号/控制, B类性能	±4 kV A类性能。
IEC 61000-4-4 EFT	±1 kV I/O信号/控制, B类性能	±4 kV B类性能。
IEC 61000-4-6 射频场感应的传导抗扰度	3 V, 150 kHz至80 MHz, A类性能	在AM和CW两种工作模式下, 符合10 V A类要求。
射频电磁场辐射抗扰度 IEC 61000-4-3	10 V/m (80 MHz至1 GHz, 3米), A类性能。 3 V/m (1.4 GHz至2 GHz, 3米), 1 V/m (2 GHz至2.7 GHz, 3米), 1 V/m (2.7 GHz至6 GHz, 3米)	符合工业A类环境限制 (高于1 GHz)。 符合3 V/m A类 (80 MHz至1 GHz)。 在CW和AM干扰模式下进行了测试。

ADIN1300: EMC/ESD功能性能分类:

► A类

- 链接不会断开。
- 连续丢失或错误的数据包不会超过两个。*
- 系统必须正常运行, 且在应力测试后无错误, 无需用户干预。

► B类

- 链接不会断开。
- 允许数据包丢失和出现错误的数据包。
- 系统必须正常运行, 且在应力测试后无错误, 无需用户干预。

► C类

- 在测试和/或系统需要用户干预时, 链接断开。例如, 在应力测试后重置或重启以恢复正常运行。

* 请注意, 功能测试软件无法确定数据包是否是连续的。

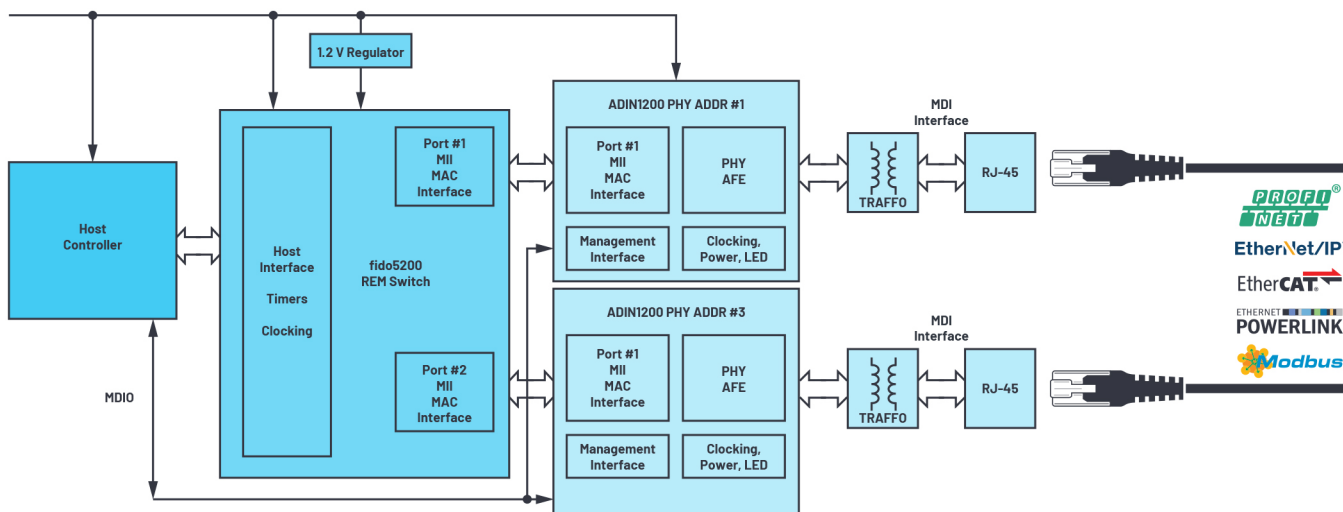


图5. 带有fido5200的ADIN1200，用于实时多协议工业以太网器件连接。

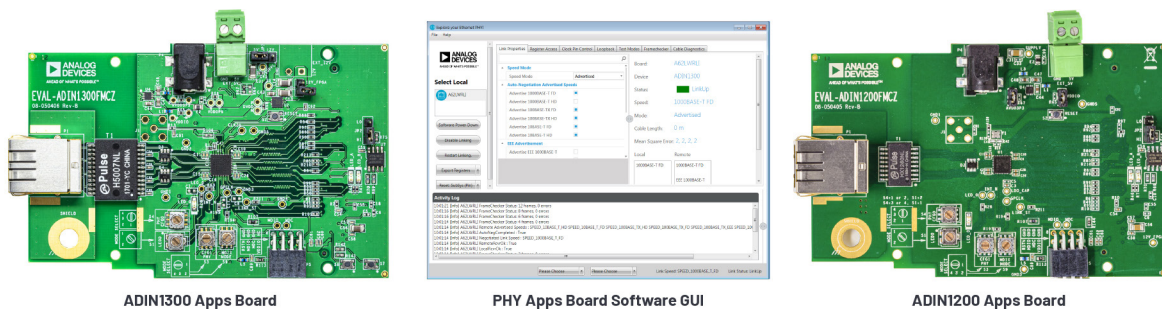


图6. ADIN1300和ADIN1200客户评估板和软件GUI。

新型工业以太网PHY技术

ADI公司最近发布了两款全新的工业以太网PHY，可在环境温度高达105°C的恶劣工业条件下可靠运行。公司一直致力于工业终端市场应用，确保为工业应用开发生产寿命较长的新产品。针对本文所述挑战而专门开发的ADIN1300和ADIN1200具有如下增强的PHY特性：

- ▶ 增强的链接断开检测，可在10 μs内检测到链接断开
 - 实时工业以太网协议要求（如EtherCAT®）
- ▶ 数据包起始检测支持IEEE 1588时间戳
 - 整个网络要求实现精确的时序
- ▶ MDI引脚提供增强ESD保护
 - RJ-45接头具有ESD稳健性
- ▶ PHY启动时间：<15 ms
 - 从电源状态良好到管理接口/寄存器可用的时间
- ▶ 片内电源监视器
 - 提高了上电时的系统稳定性

ADIN1200和ADIN1300工业以太网PHY特性概览参见表2。

ADIN1300是业界具有出色的功耗、延迟和封装尺寸特性的10 Mbps/100 Mbps/1000 Mbps工业以太网PHY，其EMC和ESD稳健性已经过广泛测试，可在高达105°C的环境温度下运行。ADIN1300 PHY已通过EMC/ESD标准测试，如表3所示。通过使用已通过IEC和EN标准广泛测试的以太网PHY技术，可显著降低产品合规性测试和认证的相关成本和时间。

ADIN1200低功耗10 Mbps/100 Mbps稳健型工业以太网PHY已经过广泛的EMC和ESD稳健性测试，可在高达105°C的环境温度下运行。带fido5200的ADIN1200为多协议、实时工业以太网设备连接提供系统级解决方案，支持Profinet®、EtherNet/IP™、EtherCAT、Modbus TCP和Powerlink实现嵌入式双端口设备连接，如图5所示。

支持Beckhoff EtherCAT和EtherCAT G工业以太网协议

ADIN1200 PHY满足EtherCAT工业以太网协议的所有要求，并包含在EtherCAT PHY选型指南中。ADIN1300 PHY满足EtherCAT G工业以太网协议的所有要求，并包含在EtherCAT G PHY选型指南中。更多详情，请参见Beckhoff的[应用笔记——PHY选型指南](#)。

客户支持

提供用于ADIN1300和ADIN1200的客户评估板，以及用于加快评估的软件GUI。有关应用板软件GUI功能的视频教程，参见analog.com的ADIN1300和ADIN1200产品页面。图6显示了应用电路板和软件GUI。

总结

为实现IT和OT网络的无缝连接，实现工业4.0的价值，针对工业应用而设计的增强物理层技术是一个关键的设计选择。稳健型工业以太网PHY技术可解决功耗、延迟、解决方案尺寸、105°C环境温度、稳健性(EMC/ESD)和较长产品寿命问题，是实现互联工厂的基础。为解决本文所述挑战，ADI公司近期推出了两款全新的稳健型工业以太网PHY，即ADIN1300(10 Mbps/100 Mbps/1000 Mbps)和ADIN1200(10 Mbps/100 Mbps/1000 Mbps)

有关ADI Chronous™工业以太网解决方案组合及其如何加速现实世界工业以太网网络的更多信息，请访问analog.com/Chronous。

作者简介

Maurice O' Brien是ADI公司工业连接部门的战略营销经理。他负责为工业应用提供工业以太网连接解决方案支持的策略。在此之前，Maurice在ADI公司的电源管理应用和营销领域工作了15年。他毕业于爱尔兰利默里克大学，获电子工程学士学位。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

