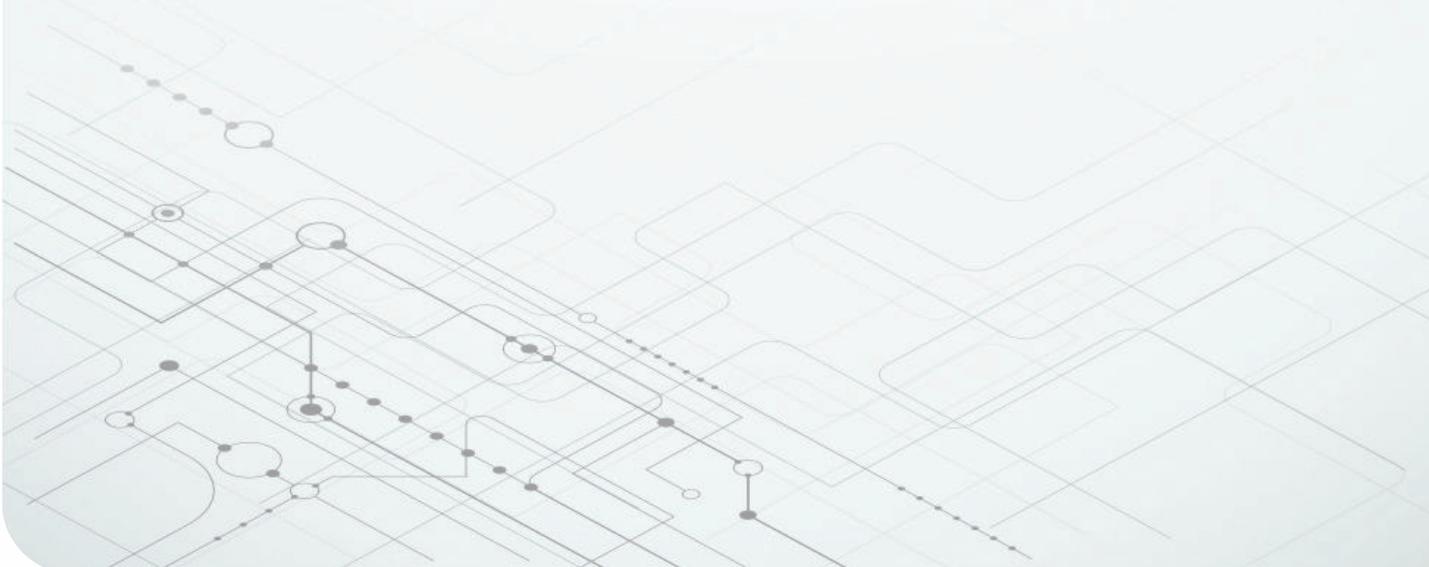


深入了解工业以太网通信协议



Zhihong Lin,
Strategic Marketing Manager
Texas Instruments

Stephanie Pearson,
Strategic Marketing Manager
Texas Instruments



为了保持竞争力并发展壮大，很多企业越来越倾向于通过先进的工业自动化来最大限度地提高工作效率、规模经济与质量。日益互连的世界必然将连通工厂车间。人机界面 (HMI)、可编程逻辑控制器 (PLC)、电机控制和传感器需要采用可扩展的高效方式进行连接。

过去，很多工业元件通过控制区域网 (CAN)、Modbus®、PROFIBUS® 和 CC-Link 等不同的串行现场总线协议进行连接。最近几年，工业以太网逐渐普及，其应用无处不在，在提高速度的同时扩大了连接距离，并且能够连接更多节点。在不同工业设备制造商的推动下，多种不同的工业以太网协议呈百家争鸣之势。这些协议包括 EtherCAT®、PROFINET®、EtherNet/IP™ 和 Sercos® III 等。时间敏感网络 (TSN) 在工业以太网通信领域也日益流行。在本文中，我们将详细探讨多个工业以太网协议以及对统一硬件和软件平台日益增长的需求，这些平台支持多个标准并提供工业通信所需的实时、确定性和低延迟特性。

工业自动化元件简介

实现工业自动化需要四种主要元件，包括 PLC 控制器、HMI 面板、工业驱动器和传感器。

PLC 控制器是工业自动化系统的大脑；它提供继电器控制、运动控制、工业输入和输出处理控制、分布式系统和联网控制等功能。PLC 常常需要在恶劣的环境条件下工作，承受炎热、寒冷、潮湿、振动和其他极端条件，同时通过可靠的通信链路为工业自动化系统的其他部件提供精确、确定性和实时控制的功能。

HMI 是用于工业控制的图形用户界面。它可提供用于控制工业机械的命令输入和反馈输出界面。HMI 通过公共通信链路连接到工业系统的其他部件。

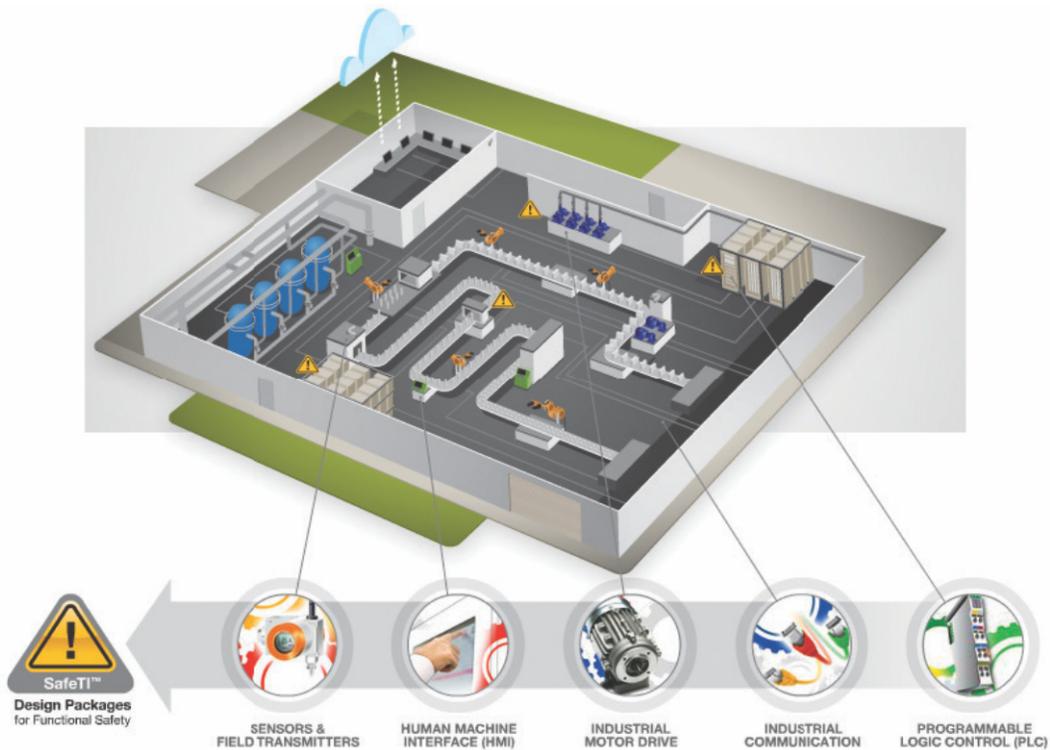


图 1. 工业自动化元件和通信链路。

工业驱动器是用于实现理想电机操作的电机控制器。它们广泛用于各种工业应用，可支持多种电压和功耗水平。工业驱动器包括但不限于交流和直流驱动器以及使用电机反馈系统来控制 and 调整伺服机制的行为和性能的伺服驱动器。

传感器是工业自动化系统的手和脚，可实时监控工业操作状态、检查和测量情况等。它们是工业自动化系统必不可少的组成部分，可为系统控制提供触发点和反馈。

要通过工业元件构建高效的自动化生产系统，离不开有效通信。图 1 中的示例说明了所有元件通过通信链路协同工作的原理。

传统工业通信协议

过去，人们在串行接口上进行工业通信，这些接口最初由不同的公司创建，后来都成为标准，于是市场上涌现出很多不同的标准。由于这些标准背后都有大型企业支持，因此工业自动化设备公司需要在一个工业系统内实施多种协议。由于工业系统的生命周期长，包括 PROFIBUS®、CAN 总线、Modbus® 和 CC-Link® 在内的很多包含主从配置的基于串行的协议现在仍然非常流行。

PROFIBUS 是世界上较为成功的现场总线技术，广泛部署于包括工厂和过程自动化在内的工业自动化系统中。PROFIBUS 可提供针对过程数据和辅助数据的数字通信，速度高达 12 Mbps，并支持多达 126 个地址。

控制区域网 (CAN) 总线是一种高度完整的串行总线系统，最初作为自动汽车总线创建，后来成为一种用于实现工业自动化的现场总线。它可为串行通信提供物理层和数据链路层，速度高达 1Mbps。CANopen® 和 DeviceNet 是 CAN 总线之上更高级别的标准化协议，可与相同工业网络中的设备实现互操作性。CANopen 在网络中支持 127 个节点，而 DeviceNet 在同一个网络中支持 64 个节点。

Modbus 是一种简单而强大的串行总线，它公开发布，不收专利费，在链路中可连接多达 247 个节点。Modbus 易于实施并在 RS-232 或 RS-485 物理链路上运行，速度高达 115K 波特。

CC-Link 最初由 Mitsubishi 开发，在日本和亚洲是一种流行的开放式架构工业网络协议。CC-Link 基于 RS-485，可连接同一网络中的多达 64 个节点，速度高达 10Mbps。

工业以太网通信协议

以太网无处不在，并且具有成本效益，它采用公共物理链路且速度更快。正因如此，多种工业通信协议正转移到基于以太网的解决方案上。支持 TCP/IP 的以太网通信通常具有不确定性，反应时间通常约为 100ms。工业以太网协议使用经过修改的介质访问控制 (MAC) 层来实现非常低的延迟和确定性响应。以太网还使系统具备灵活的网络拓扑和灵活的节点数量。我们来详细了解一些流行的工业以太网通信协议。

EtherCAT 最初由 Beckhoff 开发，支持高速数据包处理并可为自动化应用提供实时以太网，它还可为从大型 PLC 直至 I/O 和传感器级别的整个自动化系统提供可扩展的连接。

EtherCAT 是一种针对过程数据进行优化的协议，使用标准 IEEE 802.3 以太网帧。每个从节点将处理数据电报并在每个帧通过之时将新数据插入到帧中。这个过程在硬件中处理，因此每个节点需要的处理延迟极小，从而可实现极短的响应时间。**EtherCAT** 是 MAC 层协议，对于如 TCP/IP、UDP、Web 服务器等任何更高级别的以太网协议而言都是透明的。**EtherCAT** 可连接系统中多达 65,535 个节点，而 **EtherCAT** 主站可以是标准以太网控制器，从而简化网络配置。每个从节点延迟较低，因此 **EtherCAT** 可提供灵活、低成本且兼容网络的工业以太网解决方案。

EtherNet/IP 是最初由 Rockwell 研发的工业以太网协议。与作为 MAC 层协议的 **EtherCAT** 不同，**EtherNet/IP** 是 TCP/IP 上的应用层协议。**EtherNet/IP** 使用标准以太网物理层、数据链路层、网络层和传输层，并使用 TCP/IP 上的通用工业协议 (CIP)。CIP 为工业自动化控制系统提供一组通用的消息和服务，可用于多种物理介质。例如，CAN 总线上的 CIP 称为 **DeviceNet**，专用网络上的 CIP 称为 **ControlNet**，而以太网上的 CIP 称为 **EtherNet/IP**。

EtherNet/IP 通过一个 TCP 连接、多个 CIP 连接建立从一个应用节点到另一个应用节点的通信，可通过一个 TCP 连接来建立多个 CIP 连接。

EtherNet/IP 使用标准以太网和交换机，因此它在系统中拥有的节点数不受限制。这样，就可以跨工厂车间的多个不同终点部署一个网络。**EtherNet/IP** 提供完整的生产者-消费者服务，并可实现非常高效的从站对等通信。

EtherNet/IP 兼容多个标准互联网和以太网协议，但其实时和确定性功能比较有限。

PROFINET 是 Siemens 和 GE 等主要工业设备制造商广泛使用的工业以太网。它具有三种不同类别。**PROFINET A** 类可通过代理访问 **PROFIBUS** 网络，借助 TCP/IP 上的远程过程调用来桥接以太网和 **PROFIBUS**。其周期时间约为 100ms，主要用于参数数据和循环 I/O。典型应用包括基础设施和楼宇自动化。**PROFINET B** 类也称为 **PROFINET 实时 (PROFINET RT)**，它引进了基于软件的实时方法并将周期时间减少至大约 10ms。**B** 类通常用于工厂自动化和过程自动化。**PROFINET C** 类 (**PROFINET IRT**) 是等时实时传输，需要使用专用硬件才可将周期时间减少至 1ms 以下，从而在实时工业以太网中提供运动控制操作所需的性能。

PROFINET RT 可用于 PLC 型应用，而 **PROFINET IRT** 非常适合运动应用。分支和星型是 **PROFINET** 的常用拓扑结构。若要使 **PROFINET** 网络实现所需的系统性能，就需要谨慎进行拓扑规划。

POWERLINK 最初由 B&R 开发。以太网 **POWERLINK** 在 IEEE 802.3 上采用，因此可自由选择网络拓扑、交叉连接和热插拔。它使用轮询和时间分片机制来实现实时数据交换。**POWERLINK** 主站或“托管节点”通过数据包抖动将时间同步控制在数十纳秒范围内。此类系统适用于从 PLC 与 PLC 通信和可视化到运动和 I/O 控制的各种自动化系统。可使用开源堆栈软件，因此实施 **POWERLINK** 时遇到的障碍很小。此外，**CANopen** 是标准的构成部分，方便从以前的现场总线协议轻松进行系统升级。

Sercos III 是第三代串行实时通信系统 (**Sercos**)。它结合了高速数据包处理功能，可提供实时以太网和标准 TCP/IP 通信，以打造低延迟工业以太网。

与 **EtherCAT** 非常相似，从 **Sercos III** 通过快速提取数据并将其插入以太网帧的方法来处理数据包，从而实现低延迟。**Sercos III** 将输入数据和输出数据分成两个帧。周期时间从 31.25 微秒开始，与 **EtherCAT** 和 **PROFINET IRT** 一样快。**Sercos III** 支持环型或线型拓扑。使用环型拓扑的一个主要优点是通信冗余。即使因一个从节点故障导致环断开，所有其他从节点仍然可获得包含输入/输出数据的

Sercos III 帧。Sercos III 在一个网络中可拥有 511 个从节点，主要用于伺服驱动器控制。

时间敏感型网络 (TSN) 是由电气和电子工程师学会 (IEEE) 定义的对以太网的一种扩展，旨在使基于以太网的网络更具确定性。TSN 是一种局域网 (LAN) 级解决方案，可与非 TSN 以太网一起工作，但只有在 TSN LAN 内部才能保证及时性。您可以根据 TSN 解决的用例对 TSN 标准进行分组：通用的时间视图、保证极大延迟，或与背景流量或其他流量共存。与任何流行的标准一样，TSN 的标准工具箱也在不断发展。

德州仪器 (TI) 的工业通信机制

为了让工业设备制造商能够以经济灵活的方式实施各种工业通信协议，德州仪器 (TI) 在多种片上系统上集成了低延迟可编程实时单元工业通信子系统 (PRU-ICSS)。与 FPGA、ASIC 和其他备用解决方案相比，PRU-ICSS 可为工业通信提供更具成本效益且面向未来的灵活解决方案。通过将 PRU-ICSS 集成到单个芯片上，TI 灵活的硬件平台帮助制造商打造更具成本效益的确定性、高效软件可编程工业自动化系统。

未来趋势

我们处于第四次工业革命的初期，工业自动化将再次成为经济发展的推动因素。工业自动化的成功依赖于可靠且高效的通信网络，这种网络可将工厂的所有部分都连接起来以实现高效运转。以太网的普及度和适用性将持续刺激传统工厂升级到工业以太网。

现场实施了很多不同的工业以太网协议，每个协议都各有利弊。将来的工业以太网协议将不断发展融合，以打造具有更高可靠性和集成安全性的实时、确定性稳定通信链路。以太网还需要一种通用的可编程硬件平台，例如德州仪器 (TI) 推出的具有集成 PRU-ICSS 的 Sitara™ 处理器，以打造低成本的灵活系统。该系统支持多个协议和新协议的前瞻性实施，可为工业自动化提供工业通信引擎。

有关 Sitara 产品系列的更多信息，请访问 TI 的[工业以太网处理器概览页面](#)。

致谢

本文在撰写过程中得到了 Srik Gurrapu、Thomas Leyrer、Frank Walzer、Thomas Mauer、Stacie Ocnaschek、Jessica Callaway 和 Avner Goren 的帮助，作者在此表示感谢。

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。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司