

Technical White Paper

如何以及为何要在工业机器人环境中使用单对双绞线以太网 (SPE)



Kristen Mogensen

Systems Engineer, Robotics

摘要

为跟上第四次工业革命（即工业 4.0）的步伐，机器人系统设计中的通信正在经历一场变革。从现状来看，机器人通信必须稳定、准确，具有出色的时序特性，并且既不能阻碍轴的运动，也不能受到轴运动的负面影响。多年来，为了满足机器人通信的严格要求，一些重要但互不相同的通信接口不断发展演变。机器人不断增长的速度和带宽要求开始超出这些非常有效的接口的能力。

内容

1 引言.....	2
2 更改通信接口时需要了解的系统挑战.....	3
3 具有最小延时的确定性实时通信.....	5
4 Base-T1 接口的电磁兼容性.....	10
5 工业环境中的预测性维护.....	11
6 结论.....	11

插图清单

图 2-1. 分散式机器人架构示例.....	4
图 3-1. 理解确定性的要点.....	5
图 3-2. 用于 STE 延时测量的系统测试设置.....	5
图 3-3. 通信层延时的影响因素.....	6
图 3-4. 每个子系统延时的影响因素.....	6
图 3-5. DP83TC812 - 100BASE-T1 周期和延时时序.....	7
图 3-6. DP83TG720 - 100BASE-T1 周期和延时时序，RS 编码器模块已启用.....	7
图 3-7. DP83TG720 - 100BASE-T1 周期和延时时序，PHY RS 编码器模块已禁用.....	8
图 4-1. 电流去耦.....	10
图 4-2. 电容去耦.....	10

表格清单

表 1-1. 物理通信接口特性.....	2
表 3-1. 系统性能（如果 100Base-T1 PHY 包括 5m 电缆，假设 RX 和 TX 时间的 MAC 延时相同）.....	8
表 3-2. 通过 10 个子系统的半双工周期时间.....	9
表 4-1. 比较 SPE 中电流耦合和电容耦合电路的尺寸.....	10

1 引言

随着设计人员不断探寻新的方法来实现更短的周期时间和更高的吞吐量，从而满足大数据要求，使带宽更宽的系统以超高效率工作，并更大限度地缩短停机时间，他们也希望通过重复使用现有布线基础设施来更大限度地减少对升级的影响。大多数系统还采用高级功能，例如更智能的诊断、更高的安全规格以及更快、更好的实时特性来进行电机控制。

机器人系统架构必须满足带宽裕度等通信接口要求。随着带宽要求不断提高，设计人员将整合以太网和光学设计，这些设计比 RS-485 和控制器局域网 (CAN) 等传统接口更快。但是，在迁移到以太网时，需要考虑如何通过 Ethernet/IP、EtherCAT、Profinet 等工业以太网协议，或通过实现专有的通信协议，更大限度地减少以太网协议实时性能的延时。

本文讨论了 SPE (Base-T1) 在机器人应用中的优势，以及为机器人系统设计紧凑、高效、稳健且低噪声的通信接口时面临的主要挑战。需要了解这些挑战，才能在机器人系统中实现单对双绞线以太网，同时仍实现所需的性能来高效地操作机器人。

通常，两个关键设计参数是数据速率和电缆尺寸或长度。这两个参数是相关的，这意味着某些通信接口的电缆长度定义了可实现的数据速率。第二个参数是实现接口所需的电缆和连接器引脚的物理数量。

表 1-1 列出了机器人系统中通常使用的 PHY 类型的标准数据速率和电缆长度。

表 1-1. 物理通信接口特性

通信接口	数据速率	电缆长度	双绞线
4mA 至 20mA I/O	0.01Mbps ⁽¹⁾	3000m	1
HART	00012Mbps	3000m	1
CAN	1Mbps	40m	1
CAN 灵活数据速率 (FD) 或 CAN 信号改善功能	10Mbps	10m	1
RS-485	20Mbps	40m	1
100Base-TX	100Mbps	100m	2
1000Base-TX	1,000Mbps	100m	4
1000Base-SX	1,000Mbps	1,000m	多模光纤
1000Base-LX	1,000Mbps	5,000m	单模光纤
低电压差分信号	360Mbps	10m	1
100Base-T1	100Mbps	50m (UTP) 100m (STP)	1
1000Base-T1	1,000Mbps	15m (UTP) 40m (STP)	1
10Base-T1L	10Mbps		1
10Base-T1S	10Mbps		1

(1) 通常不会以 bps 为单位定义 4mA 至 10mA I/O，因为这是一个具有预定义频率的一位信号，但此处提供它是为了进行数据速度比较。

在考虑特定机器人系统所需的数据速率和电缆长度时，还应考虑系统中使用的电缆的电缆老化（很大程度上受机器人运动的影响）、成本、直径和重量。由于电缆老化，机械臂中机械手的电缆通常每 2 至 3 年更换一次。这属于预防性维护，无需测试电缆功能。考虑到这一点，通过减少电线数量（可能会老化）并在 PHY 中引入智能诊断功能（以了解电缆的持续质量），故障点会更少，而电缆和连接器的运行状况会表明是否需要更换电缆，而不是每隔几年，无论是否需要，都随意更换电缆。另一个好处是由于布线较小电缆所需的较小空间，因此机械臂的机械结构变得更小且更具有成本效益。

除了数据速率和电缆选择之外，还有一些规格会影响机器人系统的性能，因此必须了解这些规格。以下列表显示了一些会影响机器人系统性能的系统元素，在系统设计中必须考虑这些点。

- 具有最小延时的确定性实时通信
- 不同数据包之间的抖动
- **Base-T1** 接口的电磁兼容性
- 用以实现带宽和延时的硬件和软件因素
- 用于检测电缆缺陷的诊断

2 更改通信接口时需要了解的系统挑战

由于不同的子系统要求，诸如机器人等复杂系统需要支持多个通信接口，并且可能会混合使用不同接口。图 2-1 显示了一个分散式机器人系统，该系统具有多条通信接口路径，每条路径的规格都不相同。

从这些接口更改为 **SPE** 有助于机械尺寸测量和降低总体系统成本。然而，**SPE** 还需要确保实现必要的计时性能。

图 2-1 中的绿线表示通信接口，该接口通常采用实时协议，来确保通信的确定性和高数据传输速率。蓝线表示电机驱动编码器接口，该接口通常使用基于 **RS-485** 的专有数字协议或模拟编码器接口来实现。

机器人的内部通信路径在靠近电机开关相位的位置运行。此实现可以减少电缆数量并降低机器人中的功率级别，同时还无需在机器人关节处进行冷却。然而，将电力电子装置移至机械手内可能会在系统的通信接口中产生连续噪声。这反过来又会带来新的挑战，即，由于所选接口或设计的噪声性能不佳而导致通信数据丢失。在 **SPE** 中，高噪声环境下的性能在很大程度上取决于所选 **PHY** 去耦类型。节 4 说明了电流去耦和电容去耦。如前所述，另一个挑战是机械手不断地移动电缆的位置，随着时间的推移会损坏电缆。

电池供电型机器人还可以从使用 **SPE** 实现电缆数量减少中受益，因为这样可以减轻重量、提高系统效率并更大幅度地延长充电间隔时间（延长电池寿命）。

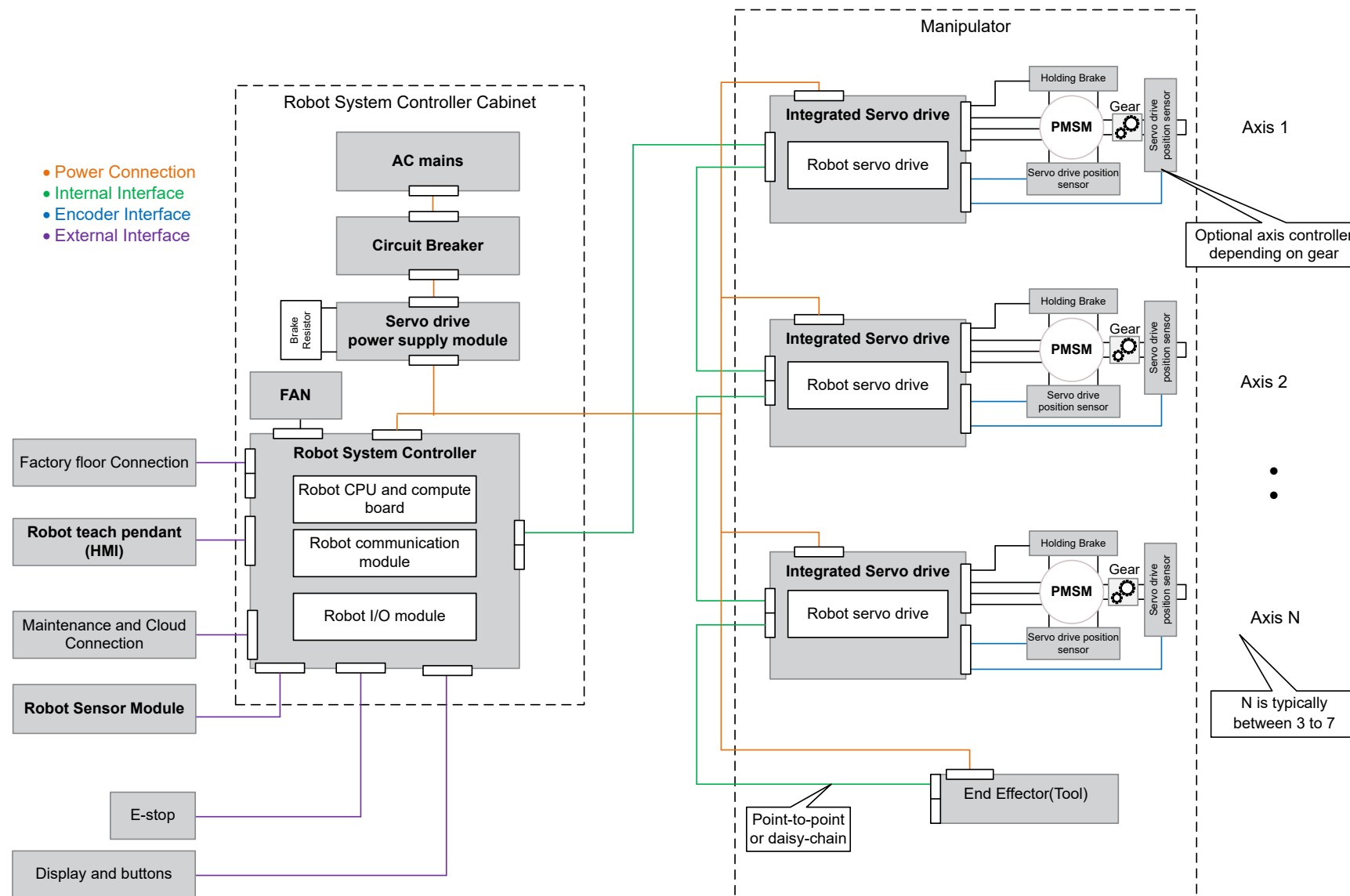


图 2-1. 分散式机器人架构示例

3 具有最小延时的确定性实时通信

图 3-1 显示了影响机器人系统实时性能的延时和抖动，需要对其量化以确保实现必要的计时性能。

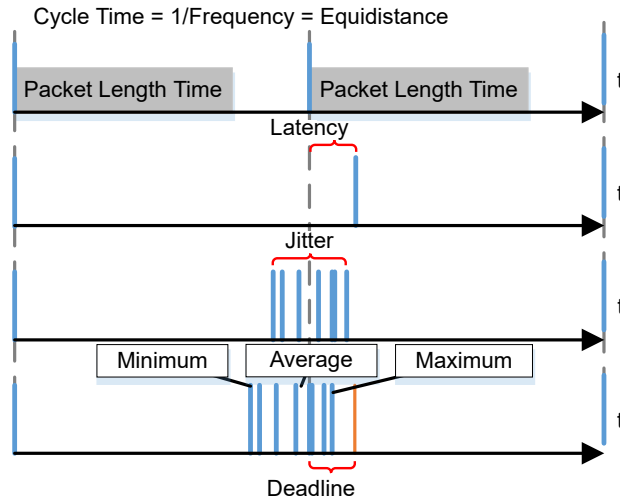


图 3-1. 理解确定性的要点

量化抖动和延时性能定义了机器人控制移动的最大加速度和速度。必须在每个物理层 (PHY) 上进行测试，以确定抖动和延时性能。通过这些测试的结果，可以了解潜在的接口更改可能对系统性能产生的时序影响。

因此，设计人员必须了解协议的最后期限要求，由此可以通过测量该接口的抖动和延时来轻松确定所选的 PHY 是否能够满足所要求。

物理层确定性的量化也会影响所选的工业协议。迄今为止，尚未最终确定可在 SPE PHY 层上使用的通用工业协议。相反，设计人员必须开发专有系统或使用尚未标准化的协议，从而导致产品开发时间和风险增加。人们正在不断努力解决在工业环境中采用 SPE 的这一障碍，并且市场上已经有使用该技术的系统。

为了量化和评估单对双绞线 PHY 的确定性性能，我们设计了一种测试设置来执行这些测量。该测试旨在对菊花链工业系统进行仿真，其中添加了测试点以简化 TX_CTRL 和 RX_CTRL MII 信号的测量。图 3-2 展示了系统测试设置。

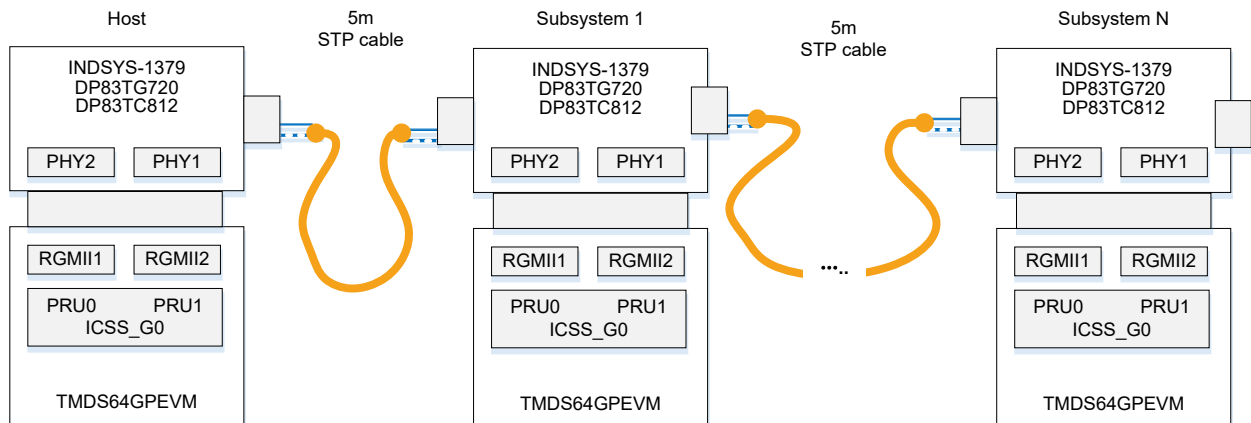


图 3-2. 用于 STE 延时测量的系统测试设置

主机传输并定义发送到电缆上的以太网数据包。子系统 1 构建为中继器功能，可将数据包转发至下一块电路板。子系统 N 构建为环回功能，用于接收以太网数据包并将数据包传回同一根电缆。

需要使用这些模块来模拟工业菊花链系统，该系统通常用于 EtherCAT、简单开放实时以太网 (SORTE)、Profinet 等工业协议。

每个模块都有两个以太网 PHY (PHY1 和 PHY2)，这会增加数据包传输的延时。图 3-3 说明了此延时的影响因素。

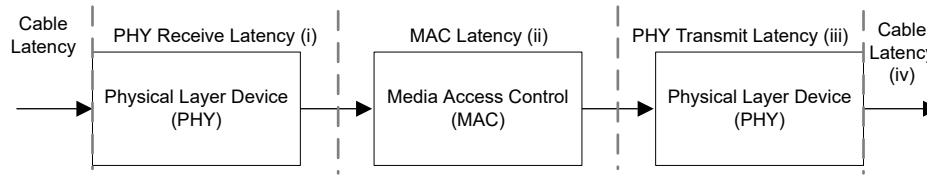


图 3-3. 通信层延时的影响因素

图 3-3 显示了这些 PHY 和 MAC 如何影响延时。每个影响因素的编号依次为 (i) 到 (iii)。图 3-4 说明了如何将带有编号的延时与图 3-2 中的子系统相关联。

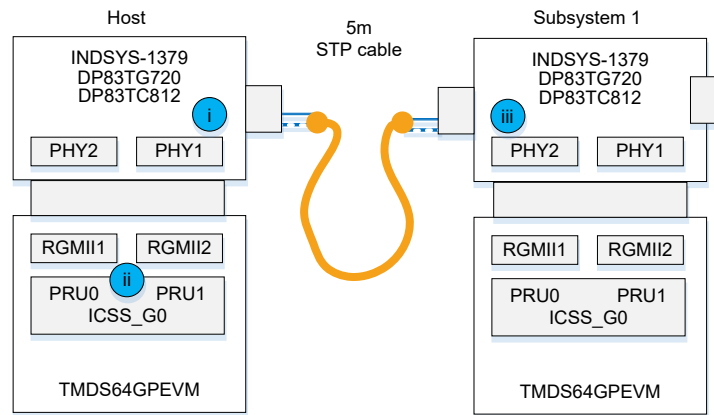


图 3-4. 每个子系统内的延时影响因素

图 3-4 中的延时影响显示在一个方向上，对于测量，这意味着主机向子系统 1 发送数据包，该数据包现在位于从子系统 1 发送回主机的 MAC 中。此设置使得在系统级测量 TI 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 PHY 的周期时间成为可能。在本例中，如前所述，测试期间使用了 0.5m STP 电缆。

以下条件适用于图 3-5 至图 3-7 中所示的屏幕抓图。

- 测量点 1 显示了 PHY1 (i) 和 PHY 2 (iii) 产生的总延时，显示了 PHY 的 RX 和 TX 组合延时。
- 测量点 2 显示了系统 MAC 层产生的延时。
- 测量点 3 显示了 PHY2 (i) 和 PHY 1 (iii) 产生的总延时，显示了 PHY 的 RX 和 TX 组合延时。

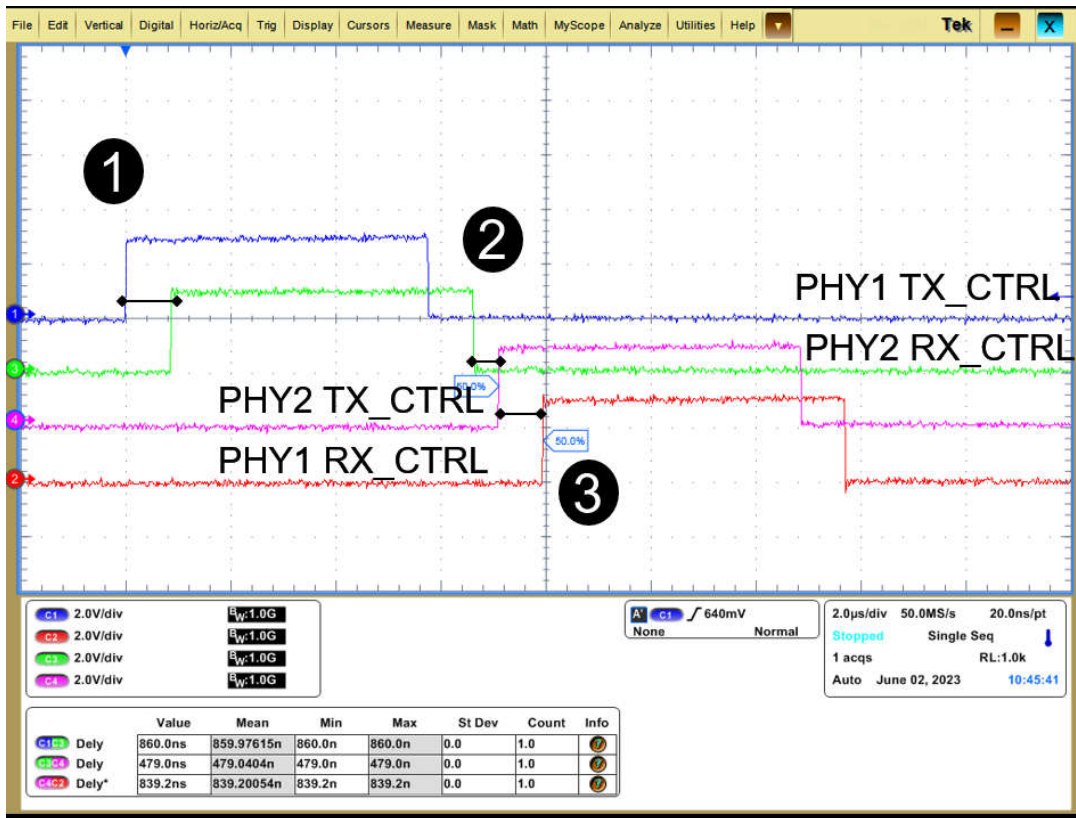


图 3-5. DP83TC812 - 100BASE-T1 周期和延时时序

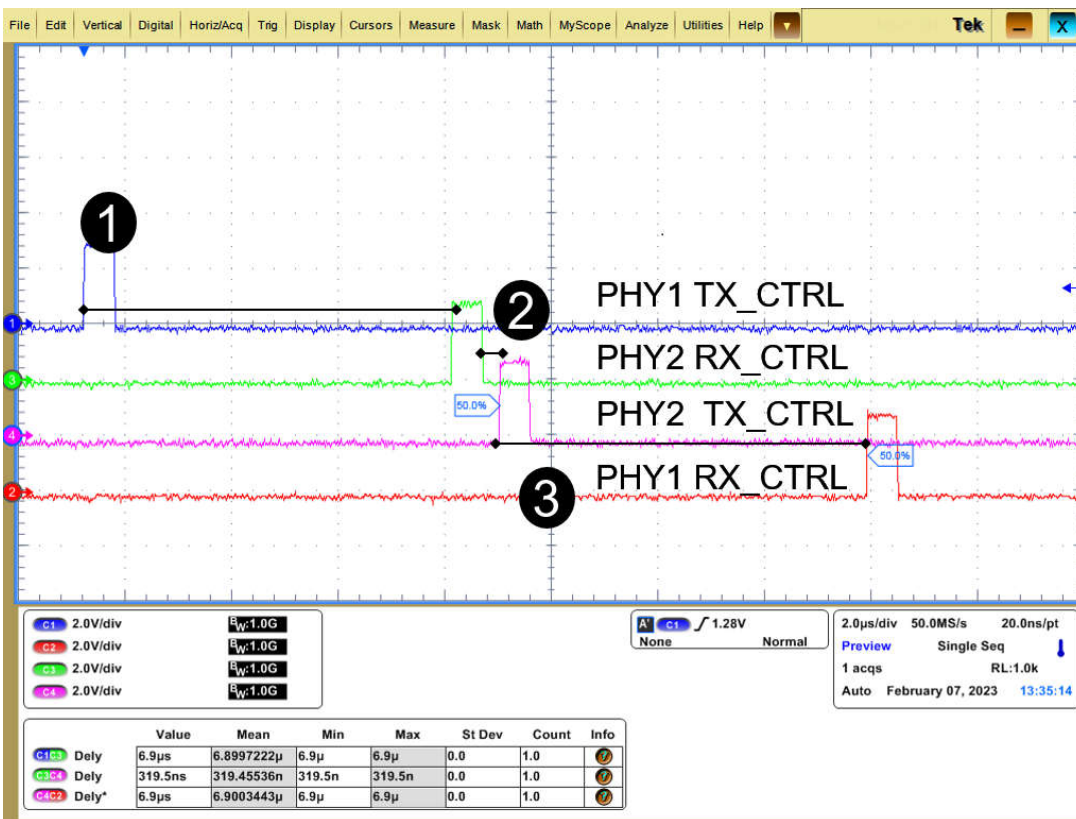


图 3-6. DP83TG720 - 1000BASE-T1 周期和延时时序，RS 编码器模块已启用

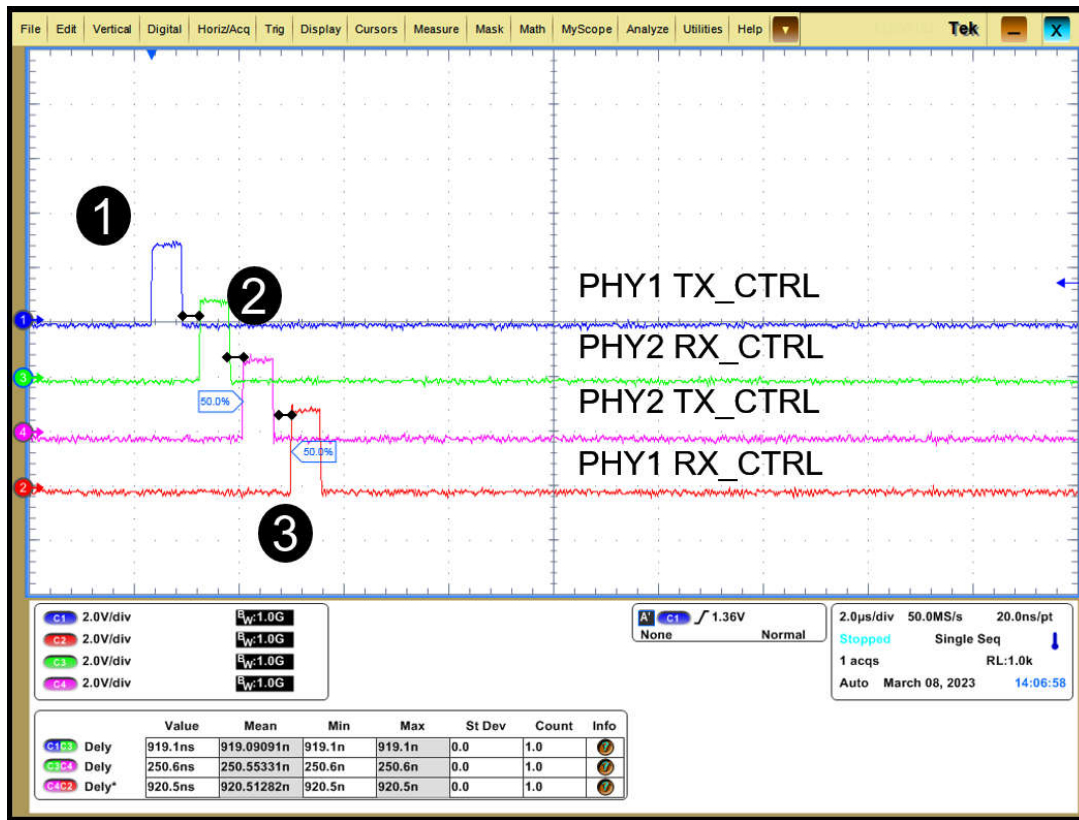


图 3-7. DP83TG720 - 100BASE-T1 周期和延时时序，PHY RS 编码器模块已禁用

图 3-5 显示了 DP83TC812 PHY 的 RGMII 延时和 AM64x Sitara™ 处理器的 MAC 延时。DP83TC812x-Q1 符合 TC-10 标准的 100BASE-T1 汽车以太网 PHY 数据表中也提供了 PHY 延时规格。图 3-6 类似地显示了 DP83TG720 PHY 的 RGMII 延时和 AM64x Sitara 处理器的 MAC 延时。

周期时间还受数据包长度的影响，了解所选 PHY 层上所需的带宽也需要数据包长度。对于测试设置，以太网数据包的定义方式如下：64 字节有效载荷和 12 字节有效载荷开销。除了系统延时之外，还需要考虑数据包长度时间。表 3-1 列出了对图 3-4 中所示系统进行测试所得的测量值。

默认情况下，DP83TG720 会实现用于错误控制编码 (ECC) 和前向纠错 (FEC) 的 Reed Solomon (RS) 编码器。这种编码会明显增加周期延时。有关 Reed Solomon 编码的更多信息，请参阅 [Reed Solomon 解码器：TMS320C64x 实现](#) 应用手册。

表 3-1. 系统性能 (如果 100Base-T1 PHY 包括 5m 电缆，假设 RX 和 TX 时间的 MAC 延时相同)

以太网类型	PHY 延时 (1) (3) 发送和接收	MAC 延时 (2)	总延时	数据包长度时间 (76 字节)	数据包长度和延时
RGMII - 100Base-T1	860ns	480ns	1340ns	566ns	7006ns
RGMII - 1000Base-T1, 禁用 RS FEC 旁路模式	6900ns	320ns	7430ns	566ns	7996ns
RGMII - 1000Base-T1, 启用 RS FEC 旁路模式	920ns	250ns	1450ns	566ns	2016ns

对于菊花链通信分支上具有 7 到 10 个子系统的机械臂来说，这对于系统性能意味着什么？表 3-2 中的数据是在假设数据包在重新传输之前已完全接收到的情况下获得的。这种比较假设完整的数据包作为半双工数据传输发送，即使 Base-T1 可以支持全双工模式。使用收发器的全双工能力可以改善数据传输的延时；但是，使用 PHY 的这一特性在很大程度上取决于用于实现系统的协议。

表 3-2 中的结果表示 PHY 延时、MAC 延时和数据包长度时间的影响

表 3-2. 通过 10 个子系统的半双工周期时间

以太网类型	主机	子系统 1	子系统 2	子系统 3
RGMII - 100Base-T1	0	7.006 μ s	14.012 μ s	21.018 μ s
RGMII - 1000Base-T1, 启用编码器	0	7.946 μ s	15.892 μ s	23.838 μ s
RGMII - 1000Base-T1, 禁用编码器	0	2.016 μ s	4.032 μ s	6.048 μ s
	子系统 4	子系统 5	子系统 6	子系统 7
RGMII - 100Base-T1	28.024 μ s	35.030 μ s	42.036 μ s	49.042 μ s
RGMII - 1000Base-T1, 启用编码器	31.784 μ s	39.730 μ s	47.676 μ s	55.622 μ s
RGMII - 1000Base-T1, 禁用编码器	8.064 μ s	10.08 μ s	12.096 μ s	14.112 μ s
	子系统 8	子系统 9	子系统 10	全环回
RGMII - 100Base-T1	56.048 μ s	63.054 μ s	70.060 μ s	140.12 μ s
RGMII - 1000Base-T1, 启用编码器	63.658 μ s	71.514 μ s	79.460 μ s	158.92 μ s
RGMII - 1000Base-T1, 禁用编码器	16.128 μ s	18.144 μ s	20.16 μ s	40.32 μ s

该示例仅考虑将数据包从主机移动到子系统 10 所需的时间。发送数据包，使其通过所有子系统，然后再返回主机时，要使用 MAC 延时加上 RX (PHY1) 和 TX (PHY2) 延时来定义延时值。该时间会加倍，如表 3-2 的全环回列中所示。

对于该使用 10 个菊花链子系统的机器人系统，发送一个数据包来回最快为 40.32 μ s，最慢为 158.92 μ s。这些时间限制了定义的系统级最大通信时间可达到的范围。

对于使用多达 10 个子系统的机器人，该时间间隔通常足够快，能够实现良好的系统性能。

4 Base-T1 接口的电磁兼容性

有多项标准可帮助确保连续噪声不会导致系统故障；国际电工委员会 (IEC) 61000-4 的辐射和传导噪声类型测试就是一个例子。该标准的公认标准水平表明了系统在受到噪声影响时的性能。特别是 IEC 61000-4-4 电气快速瞬变 (EFT) 测试，该测试是一项模拟电机开关相位的符合性测试。

为了通过 EFT 测试，应优化通信接口的端接以提供出色性能。可通过两种方法来端接单线对以太网接口：电容耦合或电流耦合。图 4-1 和图 4-2 显示了两个耦合选项的简化版本。

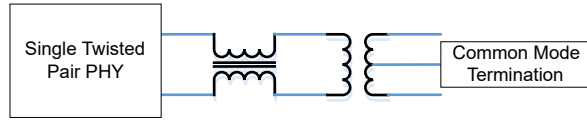


图 4-1. 电流去耦

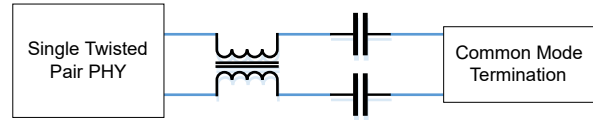


图 4-2. 电容去耦

鉴于工业系统中通信线路的隔离要求，电容器的额定值必须与隔离需求一样高。例如，如果按照 IEC 62368-1 标准构建机器人，请使用 1.5kV。

在典型的 100Base-T1 实现中，仅基于元件尺寸比较基于电流和电容的耦合大小，如表 4-1 所示。

表 4-1. 比较 SPE 中电流耦合和电容耦合电路的尺寸

参数	电	电容 100V	电容 2kV
去耦合	28mm ²	36mm ²	144mm ²
共模扼流圈	8mm ²	20mm ²	20mm ²
共模端接	90mm ²	180mm ²	180mm ²
总计	126mm²	236mm²	344mm²
成本比较标准化价格	1.0	0.7	0.68
所用元件的最大高度	2.9mm	2.8mm	2.8mm

本总结未考虑数据线路供电 (PoDLSPoE) 电路的耦合；不过，将 PoDL 包括在内并不会对耦合通信部分的分析产生太大影响。PoDL 耦合的附加电路可能会改变分析结果。表 4-1 表明，使用电流耦合并不会增大所用元件的尺寸，事实上，在整个电路中，使用电流耦合会减小元件的尺寸。该分析基于 Würth Electronics 提供的元件。有关 Würth 的 SPE 元件的更多详细信息，请参阅[单线对以太网](#)。

为了比较电流耦合和电容耦合，构建了两个测试系统，以展示每个实现方案在 EMC 测试期间的性能。

在这些测试中，电流耦合的性能明显优于电容耦合。这是由于电容器失配导致的，使得此电路对噪声更加敏感。还观察到，当采用电容耦合时，以太网链路断开，而采用电流耦合时，链路保持稳定，丢失的数据包极少。

总之，德州仪器 (TI) 对电容和电流耦合进行了测试，结果表明：

- 电流去耦不易受噪声的影响。
- 与电容去耦相比，电流耦合具有更好的模式转换损耗和回波损耗性能响应，这意味着在频率范围内，电流耦合对信号的衰减较小，从而提高了信号质量和抗噪稳定性
- 电容差和寄生效应更可控，从而提高了针对工业环境进行 IEC61000-4-x 测试时的性能。

一般来说，如果在工业环境中使用 SPE，很可能需要使用电流耦合来缓解 EMC 系统测试和 IEC61000-4-x 期间观察到的电容耦合的不良性能。

初步测试结果表明，在 EMC 和 EMI 测试期间，电流耦合能够实现零误码，从而达到性能标准 A。有关这些结果的更多详细信息，请与您当地的 TI 代表联系。

5 工业环境中的预测性维护

某些 Base-T1 PHY 的另一个优势是能够在数据通信期间对接口进行诊断。使用诊断工具需要介质访问控制接口来提供对 PHY 串行管理接口的完全访问。

以下是 TI PHY 当前的集成诊断功能：

- 信号质量指示和电缆质量指示
- 时域反射法
- 静电放电传感器
- 电压传感器
- 温度传感器
- 假随机二进制序列内置自检

有关更多详细信息，请参阅 [DP83TG720S-Q1 1000BASE-T1 具有 SGMII 和 RGMII 的汽车以太网 PHY](#) 数据表的诊断工具套件部分。

低电缆数量和高带宽等 Base-T1 以太网技术特性可实现实时诊断功能，包括可检测电缆出现损坏或性能降低的电缆诊断。此检测功能使工程师能够在正常维护期间更换电缆，而无需停止生产线。

6 结论

单对双绞线以太网的许多优势对于工业和机器人应用非常有价值，可用于简化系统功能并对其进行成本优化。TI Base-T1 PHY 中添加的其他诊断工具为实现预测性维护提供了新的可能性。Base-T1 以太网可在工业系统中方便地使用，助力实现 **IT 和 OT 的融合**。尽管如此，对于任何新技术而言，了解影响系统性能的细节非常重要。因此，TI 执行测试表明 TI Base-T1 PHY 可以支持工业 EMC/EMI 要求，并可按要求提供测试结果。同样，**SPE Industrial Partner Network** 等组织和其他公司也正在研究在工业环境中使用 Base-T1 以太网接口的初期障碍，以了解和改进该技术。通过展示初始测试结果和所学经验，TI 可以帮助您克服这些初期障碍，从而加快在工业系统中使用 Base-T1 PHY 的步伐。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司