



Anwar Sadat, Zhihong Lin, and Mike Campbell

摘要

在数据或视频链路中使用转接驱动器和重定时器的高速信号调节器，能够消除损耗和抖动，从而提高整体信号完整性。此类信号调节元件可提高链路裕量，扩展物理覆盖范围，并在不同的环境变化条件下提供可靠、稳健的性能。本文针对各种工业应用（尤其是工业 PC 系统）中使用的常见数据和视频接口，探讨了对应的信号调节元件。另外，本文还介绍并分析了适用于 USB、HDMI、DisplayPort、PCIe 和以太网的专用信号完整性解决方案。

内容

1 引言.....	2
2 信号调节器.....	2
2.1 USB 接口.....	3
2.2 HDMI 和 DisplayPort 接口.....	4
2.3 PCIe 接口.....	5
2.4 以太网接口.....	6
3 总结.....	8
4 参考文献.....	8

插图清单

图 2-1. 转接驱动器、重定时器和多路复用器的功能.....	2
图 2-2. 工业 PC 系统中的高速接口.....	3
图 2-3. 利用 USB2 转接驱动器通过合规性测试.....	4
图 2-4. 具有自适应 EQ 的 USB3 和 Type-C 转接驱动器.....	4
图 2-5. 采用 TI SN65DP159 的 HDMI2.0 重定时器示例.....	5
图 2-6. 使用 TI 转接驱动器和定时器的 PCIe 4.0 信号调节器功能.....	6
图 2-7. 采用以太网重定时器的 10GbE 通信交换机.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

通过集成图像处理、视频分析和传感器网络，工业自动化已经变得越来越复杂。高带宽数据通信为保持信号完整性带来了巨大的挑战，而保持信号完整才能避免高速工业通信链路上出现数据损耗。确保机器间具有可靠、低延迟的通信是实现精密工业操作的关键所在。

工业接口链路中使用了各种各样的高速通信协议，例如 USB、PCIe、HDMI、DisplayPort 和以太网。这些接口的速度级别已经增加到数千兆位，以便满足数据处理方面日益增长的带宽需求。在通过长印刷电路板 (PCB) 走线或长电缆进行传输时，高速信号在保持信号完整性 (SI) 方面面临巨大的挑战。为了克服各种信号完整性挑战并提供可靠、无错的链路，通常需要转接驱动器、重定时器或有源多路复用器等信号调节器。信号调节器可帮助补偿和克服高速链路中的信号损失和损耗。在链路中添加信号调节元件有助于以具有成本效益的方式达到标准要求并提供裕度。

2 信号调节器

工业应用中的高速数据和视频链路必须可靠而稳健，才能确保无缝而一致的数据吞吐量，进而保证高效运行。这些链路经常存在损耗过大、裕度偏小的问题，而且容易受到电源电压与温度变化以及内外部噪声等环境状况的影响。在数据或视频链路中使用高速信号调节器，可以消除损耗和抖动，从而提高整体信号完整性。

高速工业链路中的转接驱动器或重定时器等信号调节元件可通过均衡作用来有效消除码间串扰 (ISI)，从而增加整体链路长度和 SI 裕量。另外，重定时器元件还具有时钟和数据恢复电路 (CDR)，可消除随机抖动、串扰和反射等 SI 损失。如需了解转接驱动器和重定时器之间的其他区别，请观看 [TI 高精度实验视频](#)。图 2-1 介绍了转接驱动器、重定时器和有源多路复用器可在链路中发挥的功用。

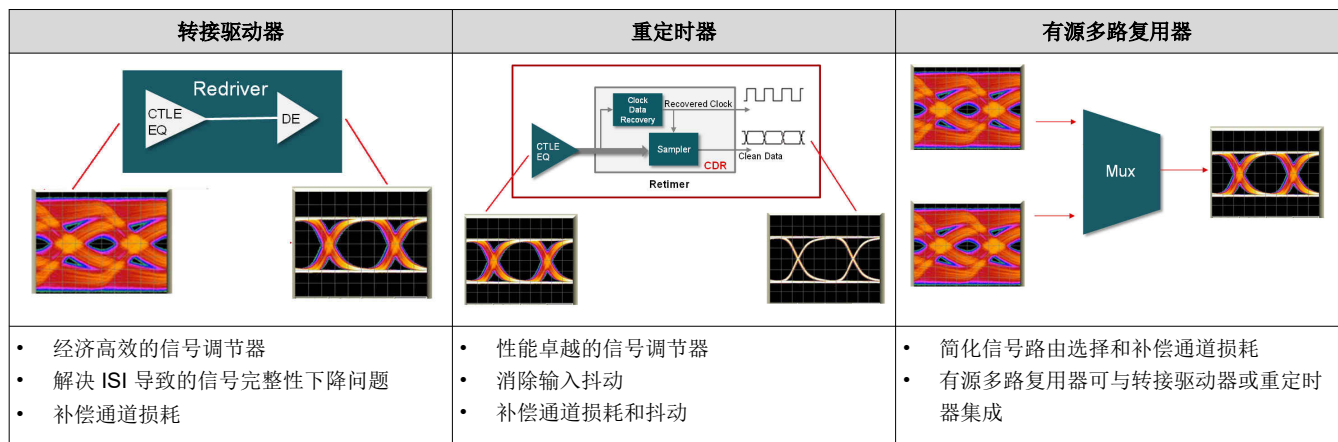


图 2-1. 转接驱动器、重定时器和多路复用器的功能

工业 PC 上使用的高速接口链路种类很可能是工业应用中最为多样的。这类系统可以说是工业自动化的大脑。它们负责处理和分析海量的数据来实现关键功能，与操作人员进行交互，并在工业监视器上显示结果。工业 PC 中经常会将多个 CPU 连接在一起以构成强大的计算集群。另外，多个系统还通过背板或网络连接在一起以实现复杂的功能。图 2-2 所示为工业 PC 系统中更为常用的接口。本文以工业 PC 系统为例探讨了不同的高速接口。不过，这个内容也可扩展到其他相关工业应用。

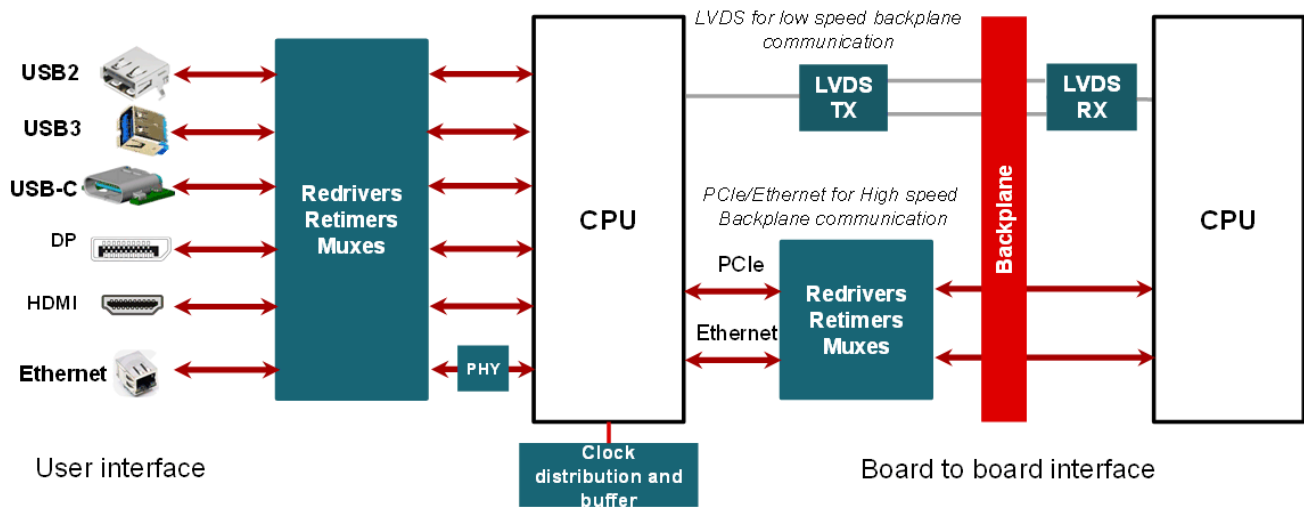


图 2-2. 工业 PC 系统中的高速接口

用户接口包括 USB、DisplayPort、HDMI 和以太网，这些都是外部接口，操作人员可通过这些接口连接到其他功能性终端设备，例如显示监视器、以太网网络、U 盘等等。板对板接口提供了不同电路板间通过背板实现的系统连接。LVDS 通常用于低速数据连接，而 PCIe 和以太网则用于背板应用中的高带宽数据连接。

用户接口端口通常需要满足相关行业标准，以便能够与连接的任何设备进行交互操作和通信。合规性测试要求信号满足一定的眼图张开度裕量和抖动性能标准，而高速数据在沿着 PCB 走线和连接器传输后会出现信号衰减，因此这一要求可能颇具挑战性。通过背板进行板间通信的信号也存在同样的信号完整性挑战。长 PCB 走线和连接器会导致信号质量下降，进而导致合规性问题和数据吞吐量下降，甚至会导致通信故障。通过在 CPU 系统中添加转接驱动器、重定时器和有源多路复用器等信号调节器，设计人员可确保连接器符合标准规范，同时提高接收器侧的信号质量，从而打造更加稳健的通信系统。

下面我们来看看一些更加详细的示例，了解如何使用信号调节器来解决 USB、PCIe、DisplayPort、HDMI 和以太网接口的信号损失问题。

2.1 USB 接口

USB 接口随处可见，在几乎所有电子产品上都能找到。工业应用中广泛采用 USB 来为操作人员提供简易的用户接口选项。该接口还用于通过在设备上连接外部设备来扩展设备的功能。根据预期功能的数据带宽需求，工业通信可使用 USB2、USB3 或 USB Type-C。

USB2 接口是一种广泛使用的用户接口，通常用作工业应用中的管理或控制接口。USB2 最高可支持达 480Mbps 的速度。尽管与其他千兆位接口相比，USB2 是一种速度相对较慢的接口，但是 USB2 具有非常严格的合格标准，很难在不违反连接器处眼罩行为的情况下将其满足。通过在 USB2 数据路径设计中添加转接驱动器可轻松应对这些挑战。

图 2-3 演示了 USB2 数据路径在包含和不包含 USB2 转接驱动器时的信号完整性情况。在没有转接驱动器的情况下，USB2 信号只能在使用 1 米电缆时通过合规性测试。向该系统中添加 TUSB216 等 USB2 转接驱动器后，此特定链路示例中便可在最长 5 米电缆时通过合规性测试。

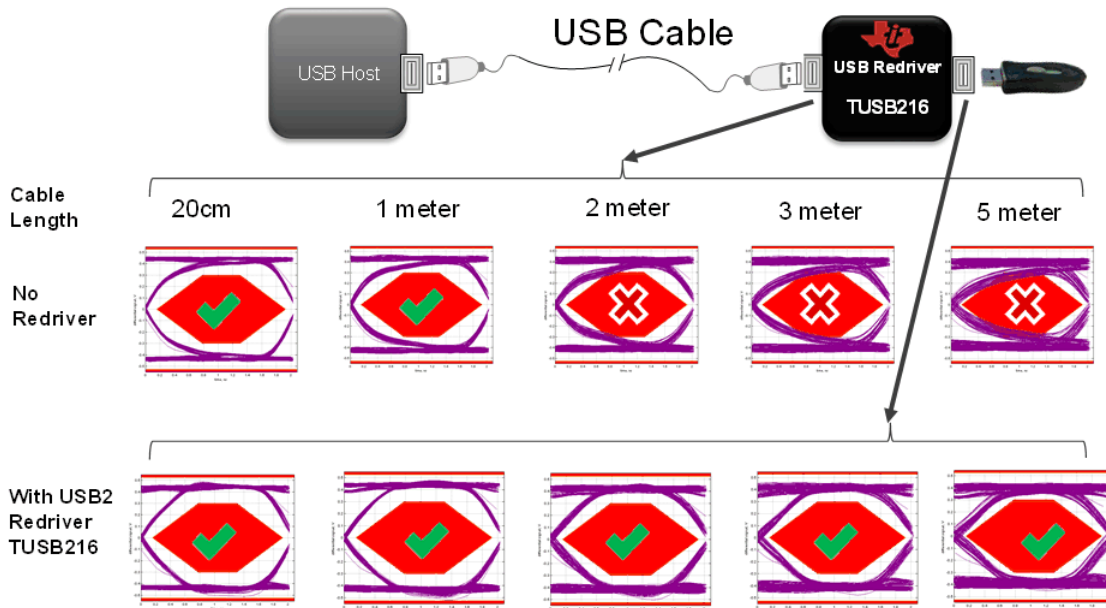


图 2-3. 利用 USB2 转接驱动器通过合规性测试

USB3 和 USB Type-C 可支持 5Gbps、10Gbps 甚至 20Gbps 的数据速率。这些高速接口通常用在需要通过 USB 接口发送视频或其他高带宽数据的场合。在工业 PC 系统中，USB 主机和 USB 连接器之间的距离是固定的，通道损耗曲线可以预先确定，使用具有固定均衡的转接驱动器可补偿链路的出口数据路径损耗。不过在主机入口路径中，来自连接器的信号损耗取决于远端连接的设备和电缆，因此具有自适应均衡 (AEQ) 功能有利于补偿各种通道损耗曲线，如图 2-4 中所示。自适应 EQ 提供了根据输入信号质量来调整接收器 EQ 设置的功能。例如，如果 USB 设备不通过电缆而直接插接到 USB 插座上，那么相较于 USB 设备通过电缆插接到插座的情况而言，转接驱动器的 AEQ 算法将会选择更小的 EQ 设置。自适应 EQ 功能使转接驱动器变得更加智能，不仅能够在输出端提供出色的信号质量，而且还可以节省器件调优方面的设计工作量。

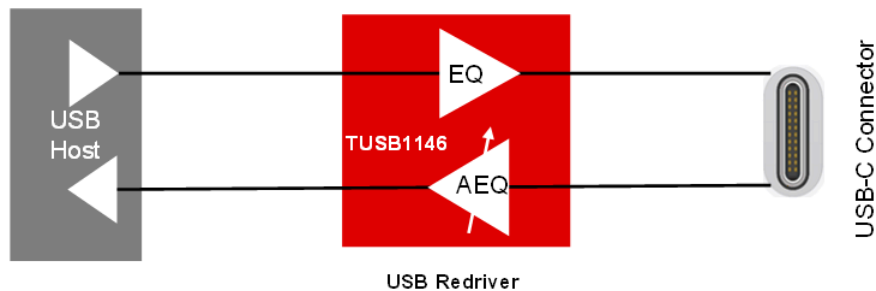


图 2-4. 具有自适应 EQ 的 USB3 和 Type-C 转接驱动器

2.2 HDMI 和 DisplayPort 接口

在工业 PC 系统中，HDMI 和 DisplayPort 用于连接外部显示器以显示高分辨率视频或人机界面 (HMI)。HDMI 可支持 3.4Gbps、6Gbps 和 12Gbps 的速度。DisplayPort 可支持 5.4Gbps、8.1Gbps 和 10Gbps 及更高的速度。这两种视频接口存在与 USB 相同的挑战，即 PCB 走线和电缆的信号损耗，而抖动会影响视频保真度并降低显示质量。

转接驱动器和重定时器的高速信号调节器可通过数项功能来提高信号完整性。出色的信号调节器可支持自适应或固定均衡，以便消除电路板走线和电缆因带宽受限而引起的码间串扰抖动或损耗。重定时器使用时钟数据恢复电路 (CDR) 来消除随机、相位和正弦抖动。出色的重定时器具有宽带 CDR 跟踪和窄带抖动清理功能，并能够在宽频率范围内工作。另外还具有可选的源端接来匹配走线和阻抗，从而减少信号路径上的信号反射。该器件提供多种特性，不仅有利于达到合规要求，还能够减少系统设计问题，可补偿驱动长电缆或高损耗电路板走线时的衰减。

图 2-5 所示为典型工业 PC 中的 HDMI 连接示例。在该实现中，SN65DP159 用作电平转换器重定时器，它是一款支持高达 6Gbps 速率的双模 DisplayPort 转 HDMI2.0 重定时器。SN65DP149 是一款支持 HDMI1.4b 和高达 3.4Gbps 速率的重定时器。这两个重定时器都能够提供交流耦合转直流耦合物理层转换（电平转换）。

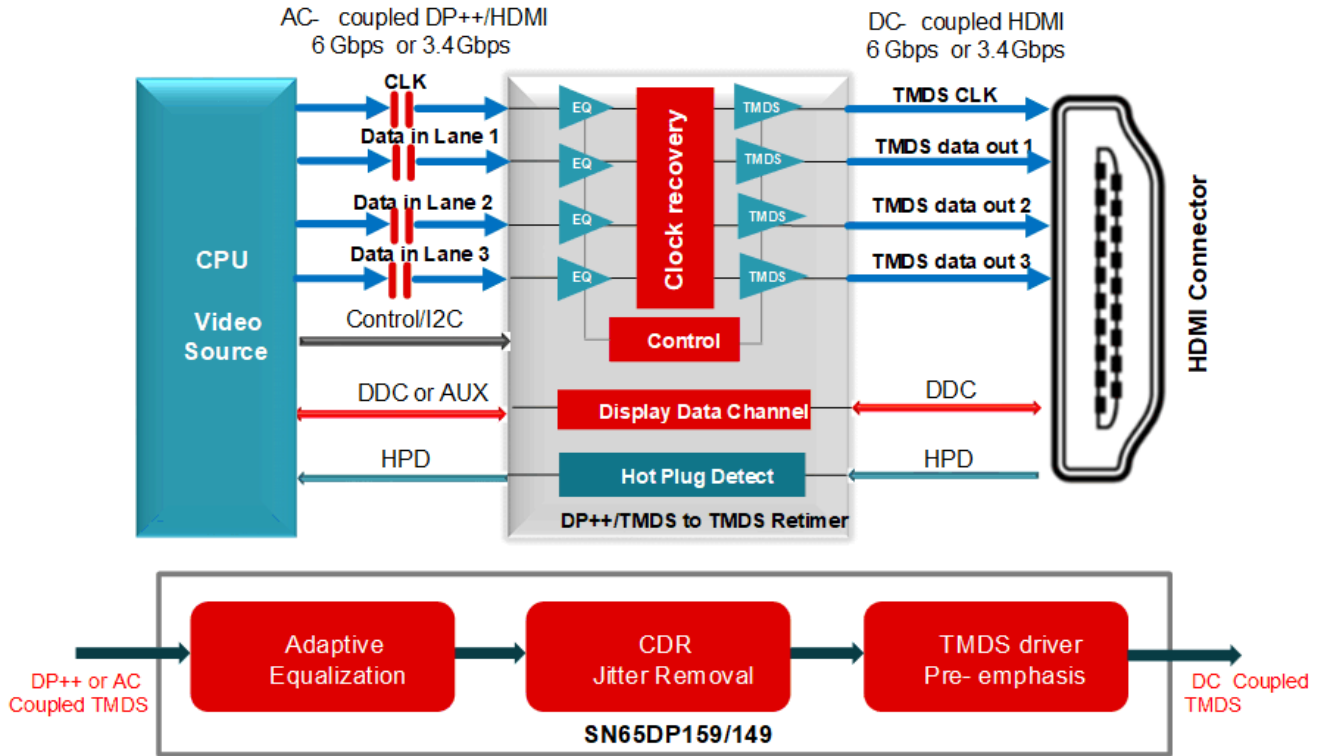


图 2-5. 采用 TI SN65DP159 的 HDMI2.0 重定时器示例

2.3 PCIe 接口

PCI Express 接口是一种在系统中不同元件之间传输高带宽数据的高效方式，例如在 CPU 之间、CPU 与附加功能（端点）之间，以及 CPU 与存储设备之间。虽然该接口是现如今在 PC 和服务器应用中批量进行数据传输的主要中坚力量，但其用途是多种多样的并且涉及各种工业应用。随着工业 PC、测试设备、工厂自动化和物联网中越来越多地需要处理和传输大量数据，PCIe 的使用变得越来越普及。

PCIe 链路可位于单个 PCB 内，也可通过电缆或借助背板来建立。PCIe 链路的数据速率各不相同，最高可达 32Gbps PCIe 5.0。电气链路的损耗曲线及其速度将决定信号完整性和保真度。PCIe 4.0/5.0 链路的建议损耗预算最大分别为 28dB 和 36dB。实际实现中经常会受到非理想传输线路、通道上不同元件之间的不连续性、串扰等信号损失的影响，这些会导致链路长度达不到理想的损耗预算。另外，很多系统实现还要求能够进一步延长链路长度。若要增加信号覆盖范围并/或提高信号完整性和保真度，可能采用以下三种方案，每种方案都有各自的权衡取舍：

- 低损耗电路板材料 - 显著增加电路板成本；
- 线性转接驱动器 - 适合额外通道损耗导致确定性抖动 (DJ) 过大而造成眼罩失败的系统；以及
- 协议感知重定时器 - 适合损耗很大或存在串扰、反射、偏斜和随机抖动等不可均衡损耗的系统。

根据具体的应用用例、信号完整性情况和其他因素，可使用线性转接驱动器或重定时器来实现信号调节。

DS160PR810 和 DS160PR410 等线性转接驱动器都是有助于减少插入损耗的简单元件。这类元件通常属于低功耗、低成本、低延迟方案。不过，相较于重定时器，线性转接驱动器功能有限。当主要目标是抵消一些额外通道损耗时，线性转接驱动器会是不错的选择。另一方面，DS160PT801 等重定时器是功能更强大的信号调节器，可解决插入损耗、抖动、串扰、反射和偏斜等链路损失问题。不过，除了额外的优势外，随之而来的还有价格升高以及复杂性和功耗增加。

根据实际的拓扑和 PCIe 链路总线宽度，系统实现可能需要采用各种配置的线性转接驱动器或重定时器，配置中包括单向、双向多路复用器、多路解复用器和交叉点多路复用器件。图 2-6 概述了 16Gbps PCIe 4.0 的各种此类选项。

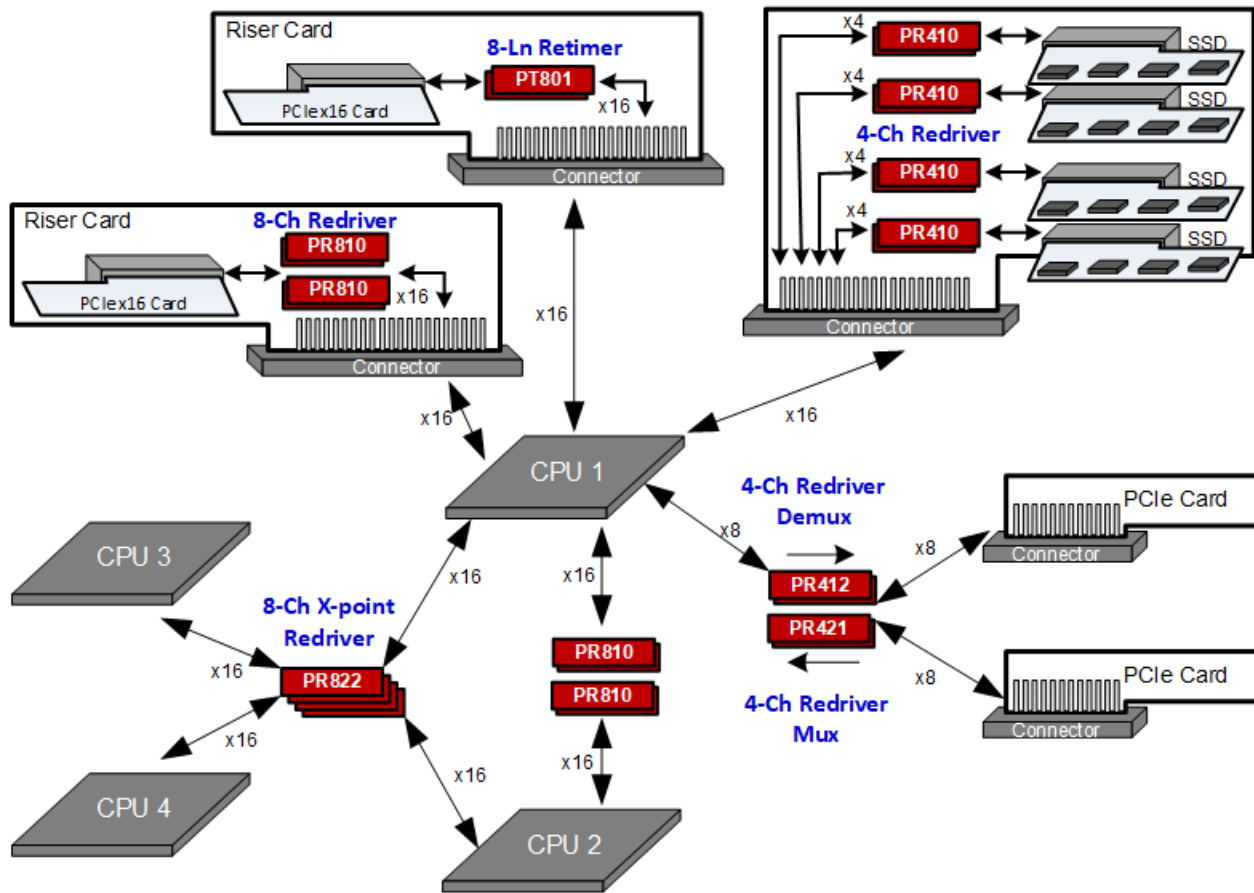


图 2-6. 使用 TI 转接驱动器和重定时器的 PCIe 4.0 信号调节器功能

除了 PCIe 兼容重定时器 and 转接驱动器外，工业系统实现方案中还经常使用时钟缓冲器。LMK00334、LMK00338 等时钟缓冲器和 CDCE6214、CDCM6208 等时钟发生器有助于为 PCIe 链路实现端到端 PCIe 兼容。

2.4 以太网接口

在工业 PC 通信模块和通信交换机应用中，以太网用于实现不同工业自动化网络的互连。工业通信交换机正在开始采用 1GbE、10GbE、25GbE 及更高的接口来聚合和分配以太网流量。

以太网数据可通过前端口光学或铜缆接口发送到远程设备，或者通过背板发送到另一 CPU 或 ASIC 进行处理。为提供出色的信号质量，可在处理器和前端口接口之间或者在 ASIC 和背板之间放置 10GbE 转接驱动器或重定时器来补偿通道损耗。例如，DS110DF111 高性能重定时器具有自适应 CTLE 和判决反馈均衡器 (DFE)，可用于单端口小型可插拔 (SFP) 接口。该器件可与 CDR 和发射驱动器一同实现最高 34dB 的均衡效果，以克服数据路径中的任何信号损失并实现通信通道的高可靠性。DS100DF410 是一款具有类似性能的 4 通道重定时器，通常用于 4 通道小型可插拔 (QSFP) 接口来实现信号清理。《10Gbps 以太网转接驱动器和重定时器》应用报告和《25G 重定时器与转接驱动器的优化实现》更加详细地介绍了以太网转接驱动器和重定时器的选型 [VG1] 及对应优势。在以太网数据路径中添加信号调节器，能够改善系统互操作性并实现稳健的工业通信。

通过这些 10Gb 接口聚合和分发的数据借助多个速度较低的 PHY 进行收发。这些 PHY 必须遵守前面所述的相同互操作性和一致性要求，同时满足远端节点引入的稳健性和时序要求。例如，能够承受制造期间的意外电气事件（例如 ESD）和有效运行期间的意外电气事件（例如 EFT），对于最大程度地降低制造和维护成本而言至关重要。此外，确定性时序特性提供了出色的系统精度，进而为系统的其他部分提供了额外的设计余量。DP83867IR 和 DP83867IS 系列提供了多种选项来满足具体的系统需求，同时提供了工业应用级的稳健性和时序特性。

为了保证遵从同步以太网和 IEEE 1588 精密时间协议标准，可使用 TI 的超低抖动和相位噪声网络同步器，包括 LMK05318B、LMK5B12204 和 LMK5C33216。

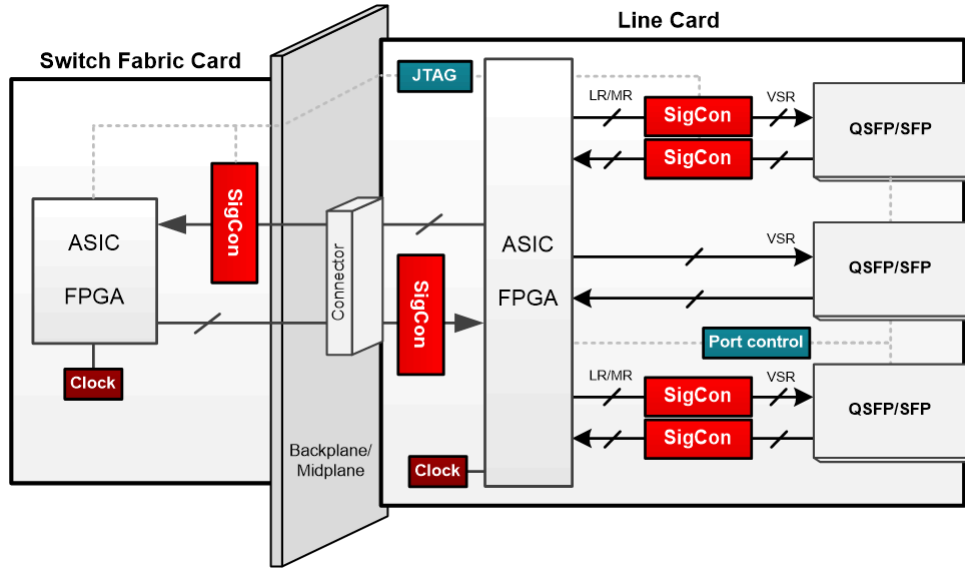


图 2-7. 采用以太网重定时器的 10GbE 通信交换机

3 总结

第四次工业革命已然来临，日益增加的自动化需求要求实现大规模机器对机器通信与高带宽网络。机器、设备、传感器和人机界面之间的数据通信量推动 CPU 接口速度不断加快，以便能够快速而智能地处理数据。通过向 [USB](#)、[HDMI](#)、[DisplayPort](#)、[PCIe](#) 和 [以太网](#) 等高速链路中添加转接驱动器或重定时器，能够克服高速接口上存在的信号完整性挑战，从而确保数据完整性并最大限度地减少噪声或抖动造成的信号损失。德州仪器 (TI) 提供完整的可扩展、高性能和低延迟信号调节解决方案，帮助现代工厂确保工业通信的质量和精度。

4 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [TI 高精度实验室 - 信号调节：线性转接驱动器和限幅转接驱动器之间有什么不同？](#) 培训和视频。
2. 德州仪器 (TI), [《10Gbps 以太网转接驱动器和重定时器》](#) 应用报告。
3. 德州仪器 (TI), [《25G 重定时器与转接驱动器的优化实现》](#) 应用报告。

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

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

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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