

## Application Note

## 为机器人设计具有确定性的可扩展以太网主干网



Shaunak Deshpande, Surbhi Kapoor, Ranga Rakesh Jonnalagadda, Pradeep HN, Nilabh Anand, Sriramakrishnan Govindarajan, Pratheesh Gangadhar TK

## 摘要

现代类人机器人面临一个关键的通信瓶颈，可能限制其性能、安全性和商业可行性。通信基础设施不再只是传感器和控制器之间的传输层，而是日益成为控制系统本身的一部分。这些复杂的系统必须协调多个电机驱动器、多个传感器（IMU、摄像头、触觉阵列）和控制器，实现紧密同步，从而实现平衡、移动和操控。本应用手册介绍了如何使用 AM261x-LP (LaunchPad) 实现菊花链以太网解决方案，该解决方案利用集成到器件中的 CPSW（通用平台交换机）外设。该架构使用 TSN 标准 IEEE 802.1AS (gPTP)、IEEE 802.1Qbu/Qbr（帧抢占）、IEEE 802.1Qbv（增强型流量调度）和基于 CPSW 的硬件 Inter-VLAN 路由和直通交换，可在串行连接的节点之间实现确定性通信。该实现方案为工程师设计系统提供了参考，适用于集中式以太网交换不可行且需要确定性、低延迟通信的场景。

## 内容

1 简介.....	2
1.1 机器人确定性挑战.....	2
1.2 为什么标准以太网无法支持实时通信.....	2
1.3 基于时间敏感网络 (TSN) 的建议解决方案.....	3
2 示例用例：机器人中的分布式运动控制.....	6
2.1 典型情景.....	6
2.2 网络拓扑要求.....	6
2.3 通信要求.....	7
2.4 测试实现.....	7
3 系统概述和架构.....	9
3.1 硬件架构.....	9
3.2 软件架构.....	12
4 实现示例.....	14
4.1 标准以太网 + CPSW InterVLAN 路由.....	14
4.2 集成 gPTP 时间同步 (IEEE802.1AS).....	16
4.3 集成 VLAN (IEEE802.1Q).....	17
4.4 集成 IET 帧抢占 (IEEE802.1Qbu/Qbr).....	18
4.5 集成 EST 调度 (IEEE802.1Qbv).....	19
5 结语.....	20
6 挑战和调试注意事项.....	21
6.1 网络拓扑验证.....	21
6.2 流量分析.....	21
6.3 主机端口流量监控.....	21
6.4 PHY 链路管理.....	21
6.5 数据包未转发到下一个节点.....	21
6.6 错误处理和重试.....	21
6.7 高优先级数据包的高延迟或抖动.....	21
6.8 gPTP 不同步.....	21
7 参考资料.....	22

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

### 1.1 机器人确定性挑战

工业机器人应用越来越需要分布式智能，其中传感器、传动器和控制逻辑分布在结构的多个点之间。例如，在多轴机械臂中，每个关节可能包含位置编码器、扭矩传感器、电机控制器和安全监视器，这些都必须与中央运动控制器进行通信。同样，模块化生产线由独立的加工站组成，通过实时消息交换进行协调。传统网络拓扑将星型配置与集中式以太网交换机一起使用，但当节点沿线性结构或铰接结构物理分布时，这种方法变得不切实际。将单根电缆从每个节点连接回中央开关会增加电缆重量、成本和机械复杂性，这对于必须穿过移动关节和旋转轴的机械臂尤其困难。菊花链拓扑通过串联连接节点来解决这些限制，其中每个器件都有两个以太网端口：一个从上游器件接收，另一个发送到下游器件。这样可以减少相邻节点之间单链路的布线，并消除对集中式交换机的需求。但是，菊花链配置会引入其他基本挑战，例如累积延迟。运动控制数据包可能需要有界延迟和极低的抖动，而遥测或诊断流量可以容忍一些延迟。

每个数据包必须经过多跳才能到达其目标，并且处理延迟会在每个中间节点累积。对于以 1 毫秒周期时间 (1kHz 控制环路) 运行的运动控制系统，当数据包必须通过四个或五个器件时，即使是很小的每跳延迟也会变得非常重要。因此，根本挑战是同时满足三个相互冲突的设计要求：

1. 对于以千赫兹频率运行的实时控制环路，具有确定性的亚毫秒级延迟
2. 千兆位带宽用于来自多个摄像头和激光雷达传感器的高分辨率感知数据
3. 使用高性价比的组件实现经济高效的可扩展性，不受供应商绑定，也无需支付许可费用
4. 高效处理混合的关键性流量。

传统现场总线协议 (CAN、EtherCAT、PROFINET) 提供确定性，但受到有限带宽 (CAN 为 1Mbps) 和造成供应商锁定的专有协议栈的困扰。现有的机器人通信解决方案分为以下几类。CAN 同时受到带宽限制 (1Mbps) 和高延迟的影响，根据总线负载和节点数，典型的往返时间范围为 2-10 毫秒，远远超过了动态平衡控制的亚毫秒级要求。EtherCAT 在主从配置中的周期时间为 250-500 微秒，提高了性能，但通过菊花链从站进行的多跳转发为每个节点增加了 20-50 微秒。AM26x MCU 上的 EtherCAT 实施范围仅为 100M。PROFINET IRT 可实现 1-2 毫秒的周期时间，但需要专用硬件和许可。更关键的是，这些协议依赖于刚性拓扑 (发送器-接收器拓扑，星形) 和专有栈。下表总结了现有解决方案与本应用手册中建议的解决方案。

**表 1-1. 现有解决方案与建议的解决方案**

协议	具有成本效益	带宽	具有确定性
CAN	是	否	否
PROFINET	否	是	是
EtherCAT	否	是	是
标准以太网	是	是	否
建议的以太网 + TSN 解决方案	是	是	是

### 1.2 为什么标准以太网无法支持实时通信

标准以太网是尽力而为协议。当多个数据流竞争带宽时，低优先级数据包可能会在高优先级流量传输过程中出现不可预测的延迟。三个具体问题会影响菊花链工业网络：

#### 1.2.1 队首阻塞

当高优先级数据包到达交换机时，若一个较大的低优先级帧正在传输中，该高优先级数据包必须等待整个低优先级帧传输完毕；在 100Mbps 速率下，对于最大尺寸的以太网帧，这一等待时间可能长达数百微秒。此延迟称为队首阻塞，会在菊花链的每一跳发生，导致不可预测性累积增加。

#### 1.2.2 缺少时间同步

闭环控制算法需要跨多个节点进行时间同步的传感器采样。如果没有统一的时间基准，协同运动将无法实现。

### 1.2.3 无流量调度

标准以太网没有为周期性控制流量预留带宽的机制。后台流量（如诊断、日志记录、参数更新）可能会干扰时间关键型消息，导致错过截止时间并引发控制不稳定。

不带 TSN 的标准以太网表现出高度不稳定的延迟，不能保证确定性和可靠性，而且具有高抖动和数据包丢弃情况。即便是近期应用于汽车和工业机器人的 TSN 实现方案，也主要集中于采用集中式交换机的星型拓扑，运行于工控机而非嵌入式微控制器之上，且鲜有针对超过 3 至 5 个节点的多跳菊花链配置的性能报告。为破解这一多维技术瓶颈，本研究验证了在具备成本优势的嵌入式微控制器上，通过协同运用标准以太网的时间敏感网络 (TSN) 扩展特性、优化后的菊花链级联架构以及混合型协议栈设计，可有效满足新一代机器人用例对确定性时延、充沛带宽、商业可扩展性及系统可靠性的综合需求。

## 1.3 基于时间敏感网络 (TSN) 的建议解决方案

### 1.3.1 什么是 TSN ?

时间敏感型网络 (TSN) 是 IEEE 802.1 标准的集合，无需专有协议或现代以太网交换机无法提供的专用硬件，即可为标准以太网增加确定性。该解决方案为整个机器人系统提出了一个基于以太网的通信骨干网，旨在提供确定性、可靠性和更好的性能，以满足严格的闭环延迟要求。此主干网将多个运行周期短、带宽要求高的系统组件互联起来，现有解决方案无法满足这些要求。实际上，TSN 允许以太网从尽力而为的数据包传输演变为确定性的通信结构。这很重要，因为机器人系统需要的不仅仅是带宽。重要的架构要点是，TSN 通过使时间、优先级和调度成为网络设计的一等元素来增强以太网。这正是机器人所需的。支持 TSN 的网络可以将传输对齐到公共时间基准，预留传输窗口，隔离流量类别，并减少由拥塞和争用引入的不确定性。

下表总结了 TI AM261x 器件支持的 TSN 标准。

表 1-2. AM261x 上的 TSN 支持摘要

TSN 标准	说明	在硬件/软件中提供支持	
		CPSW 3G	免费 RTOS 支持
802.1Q	VLAN	是	是
802.1AS-2020	时间同步 (AS-Rev)	是	是
802.1Qbv	时间感知整形器 (TAS) / 增强调度流量 (EST)	是	是
802.1Qbu	交错快速流量 (IET) : 帧占先	是	是
802.1Qav	时间敏感流的转发/排队 (FQTSS), 也称为 eAVB (以太网音视频桥接)	是	是
802.1Qci	按流过滤和管制 (PSFP)	无开/关功能 门控支持	部分
802.1CB	用于可靠性的帧复制和消除 (FRER)	否	不适用
802.1Qch	循环排队和转发	否	不适用
802.1Qcr	异步流量整形	否	不适用
802.1Qat	流预留协议 (SRP)	否	不适用
802.1Qcc	SRP 增强功能		
802.1BA	音视频桥接 (AVB) 系统	是	是
直通交换	没有经批准的 IEEE 标准	是	是
Inter/Intra VLAN 路由	没有经批准的 IEEE 标准	是	是

本应用手册建议在标准以太网应用中集成上述一些标准，以帮助引入机器人用例所需的确定性、稳健性和性能保证。

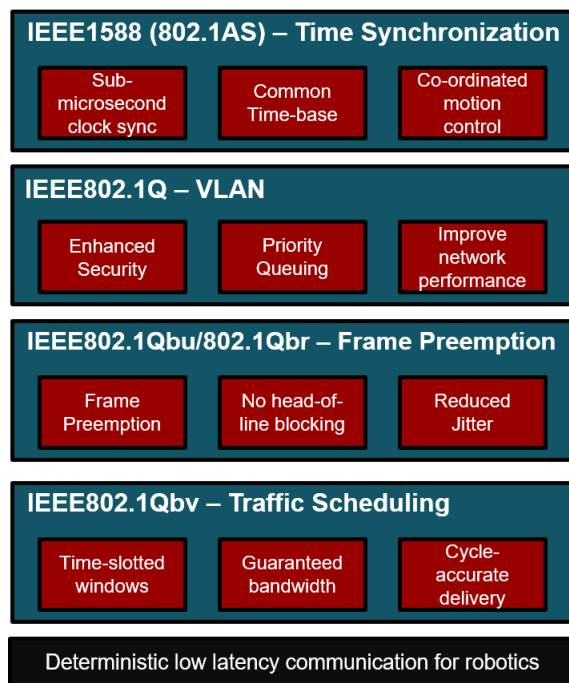


图 1-1. 建议的标准以太网 + TSN 解决方案

### 1.3.2 IEEE 1588 (802.1AS gPTP - 通用精确时间协议)

第一步是集成 IEEE802.1AS 精确时间协议。虽然单独的 PTP 同步无法保证确定性帧传输时序，但通过在所有网络节点之间建立纳秒级精度的时间同步，为确定性通信奠定了关键的基础。gPTP 可在以太网网络上的所有器件之间实现亚微秒级时间同步。每个器件通过定期交换时间戳消息来保持与主时钟同步的本地时钟。MAC 层上的硬件时间戳消除了软件处理抖动，从而在支持的硬件上实现优于 40 纳秒的精度。AM261x MCU 通过硬件和软件块的组合，支持两步 PTP 时间同步。同步时钟支持跨多个节点对传感器进行协调采样，实现基于时间的流量调度和精确的延迟测量。在运动控制中，这使中央控制器能够为位置命令添加时间戳，并确保所有关节同时开始运动。

PTP 关键基础角色：

- PTP 提供协调网络调度所需的同步时基
- 如果没有 PTP 同步，计划的传输将变得无效且无法预测
- 纳秒级计时精度可实现流量管理决策的精确协调

### 1.3.3 IEEE 802.1Q (VLAN)

要集成的下一个组件是 IEEE 802.1Q (VLAN)。VLAN 使用帧头中的优先级代码点字段来创建虚拟网络段。关键机器人控制数据包分配了优先级 7，而后台流量使用的优先级较低。交换机队列在低优先级流量之前处理高优先级帧，以减少控制循环延迟。

VLAN 协议限制：

- 优先级队列无法中断正在进行的大型帧传输
- 高优先级帧仍会经历来自后台流量的串行化延迟
- 网络节点之间没有时间同步会导致时序不一致

### 1.3.4 IEEE 802.1Qbu/Qbr (IET - 交错快速流量/帧抢占)

IET 允许高优先级帧抢占正在传输中的低优先级帧。当发送大型后台帧时，时间关键型数据包到达 MAC 层时，交换机会暂停后台帧，立即发送高优先级数据包，然后从中断的位置恢复后台帧。

抢占机制消除了队首阻塞，队首阻塞是菊花链网络延迟变化的主要来源。如果不采用抢占机制，以 100Mbps 速率运行的 1500 字节帧需要 120 微秒的时间来进行传输，在此期间，时间关键型数据包必须等待。在抢占模式下，延迟减少到几微秒。

### 1.3.5 IEEE 802.1Qbv ( EST - 调度流量增强 )

EST 提供时间感知调度机制：交换机依据与 gPTP 时间域同步的周期性调度表，针对不同流量类别定时开启和关闭传输门控。这将为时间关键型流量创建有保证的时间窗口，防止来自低优先级流的干扰。

EST 支持基于周期的通信，让所有节点都准确知道何时需要控制数据包。与 gPTP 结合使用，可以创建确定的端到端延迟界限，即使在多个跃点之间也是如此。

### 1.3.6 CPSW 专属硬件特性

除了上述 IEEE TSN 规范外，该设计还利用了 CPSW 子系统的硬件 InterVLAN 交换和直通交换。InterVLAN 交换允许在硬件中修改以太网数据包的某些参数，而无需依赖软件。可以修改的字段包括：源和目标 MAC 地址、源和目标 IP 地址、ALE 生存时间、VLAN 标签。

在这种情况下，如果数据包到达其目标节点，应用程序将交换源和目的 MAC 地址并将其环回；否则，数据包将被转发至下一个节点，直至抵达目标节点。

第 4 节详细讨论了实现方案及性能基准测试。

## 2 示例用例：机器人中的分布式运动控制

### 2.1 典型情景

以工业机械臂为例，其每个关节都包含：

- 带编码器的无刷直流电机（位置反馈）
- 扭矩传感器（用于柔顺运动的力反馈）
- 制动执行器（安全功能）
- 本地控制器（关节级别运动插值）

中央运动控制器以 1kHz（1 毫秒周期时间）生成轨迹命令，并需要所有关节提供位置反馈来计算下一个控制输出。需求规定，若任一关节未能在周期截止时间内响应，则所有关节必须进入安全制动状态。这需要一个强大、可靠且确定性的通信主干网，在本例中通过标准以太网实现。

### 2.2 网络拓扑要求

#### 2.2.1 为什么选择菊花链？

机械臂的机械结构天然适合采用菊花链拓扑：各关节从基座到末端执行器依次串联排列，若为每个关节单独铺设线缆回连至基座，则必须使线缆穿过旋转及铰接部位，这将极大增加布线难度与可靠性风险。每增加一根电缆就会增加：

- 活动部件上的机械磨损
- 电缆线束重量（会降低有载荷效能力）
- 安装和维护的复杂性

菊花链拓扑结构与机械臂的物理结构高度契合：中央控制器连接至关节 1，再连接至关节 2，接着连接至关节 3，依此类推，直至末端执行器。

#### 2.2.2 菊花链以太网解决方案的实际应用

菊花链以太网拓扑在具有结构化和线性部署环境的嵌入式系统中尤其有利。以下是一些相关的工业用例和嵌入式用例：

##### 1. 模块化工厂设备

在模块化生产线中，每个制造模块（例如拾放单元、焊站、检验块）都可以独立供电和联网。以菊花链方式连接这些模块可降低布线复杂性，并提供一种构建灵活生产线的可扩展方式。每个模块均由基于 AM26x 的控制器供电，无需集中式以太网交换机，即可与相邻的模块和中央控制单元通信。传感器读数、控制命令和诊断等实时数据会通过链传播。

##### 2. 机器人：关节臂和移动机器人集群

对于工业或协作机器人，每个关节或执行器级都可能有自己的嵌入式控制器。菊花链可通过中间关节实现从机器人底座（控制器）到末端执行器的高效通信。在直通模式下，可以使用内部 CPSW 开关，以具有确定性的方式对延迟关键型控制信号进行路由。在机器人集群中，可在充电或对接，或是交换日志、传感器数据或任务参数期间，链接多个移动平台，而无需无线主干。

##### 3. 分布式传感器网络

在结构运行状况监测等系统（例如桥梁、隧道或石油钻机）中，传感器模块会在远距离线性部署。菊花链支持简单、坚固的部署，其中每个传感器节点都对本地参数进行采样并转发到上游。AM26x 器件提供了适用于此类边缘分析的紧凑型低功耗处理单元。

##### 4. 楼宇自动化

大型建筑中的线性或逐层网络拓扑（例如 HVAC 控制、门禁面板、照明控制）通常自然地与菊花链布线对齐。每个控制单元与其相邻的面板和中央服务器进行通信，从而最大限度地减少布线和交换机基础设施。

##### 5. 电动汽车充电和电池管理

在具有多个充电插座的电动汽车充电站中，或者在多个模块需要交换信息（温度、充电水平、电流）的电池管理系统中，线性以太网连接可避免 CAN 或 RS485 中常见的总线仲裁问题，并提供更高带宽的确定性延迟。

## 2.3 通信要求

周期时间：1 毫秒（1kHz 控制环路）

流量类型：

1. 时间关键型控制流量（优先级 7）

- 位置命令：中央控制器 → 每个关节（64 字节数据包）
- 位置反馈：每个关节 → 中央控制器（64 字节数据包）
- 延迟要求：往返时间小于 150 微秒，低抖动
- 确定性：不得因后台通信而延迟

2. 后台流量（优先级 0-3）

- 参数更新（调优增益，运动限制）
- 诊断数据（温度、电流消耗、错误计数器、日志等）
- 文件传输（新的运动程序）
- 延迟要求：尽力而为，可以承受延迟

同步要求：

所有关节必须在 1ms 内同步采样位置并传输反馈，以避免因时间偏差测量而导致控制伪影。

## 2.4 测试实现

测试系统在菊花链中使用五个 AM261x LaunchPad，表示：

- Spirent/TI AM64x 处理器：中央运动控制器（或控制器网关）
- TI AM261x LaunchPad 节点 1 - 5：机械臂中的关节
- 该设置使用 100M RGMII 全双工链路。

外部 PC/ Spirent/ TI AM64x 处理器用作中央运动控制器，会在每个周期向网络中的每个节点生成数据包。因此，在每 1ms 周期开始时，会为第 5 个节点（最远节点）生成数据包并将其发送到该节点，然后发送到 4 个节点，最后一个数据包发送到第 1 个节点（最近节点）。

将第一个数据包发送到最后一个节点是为了避免外部 PC 和节点 1 之间的网络拥塞。网络流量：

1. **高优先级流量（优先级 = 7）**：在 1ms 周期开始时向每个节点发送 64B 单播数据包（针对 5 个 AM261x-LP 的 5 个数据包突发）。一旦传输了这 5 个数据包，后台流量就会开始传输。
2. **后台流量（优先级 = 0）**：512B 后台流量在 1ms 周期内从数据包生成器发送到节点，持续时间为剩余时间（首先寻址到最远节点，最后寻址到最近节点）。

高优先级流量与后台流量之间的标准 IPG 间隙（12B）。

3. **AM261x 生成的流量**：每 1ms，每个节点向数据包生成器发送一个单播数据包。（516B）

表 2-1. 数据包优先级

数据包优先级（基于 VLAN PCP）	数据包大小	数据包源	数据包目标
P-7（最高）- 高优先级控制流量	64B	数据包生成器	AM261x 节点
P-5 - 节点生成的流量	512B	AM261x 节点	数据包生成器
P-7（最低）- 后台流量	64B 或 512B	数据包生成器	AM261x 节点

要获得高度精确的时间戳，也可以使用诸如 ProfiShark 或其他硬件网络分路器等特殊的时间戳硬件。这里需要注意的一点是，当 Wireshark 与 Windows 一起使用时，观察到的时间戳与微秒级的刻度不准确，看到的结果可能有所不同。AM261x 可根据应用要求，支持多达 8 个不同的优先级。

数据包流入菊花链网络的流程如下所示：

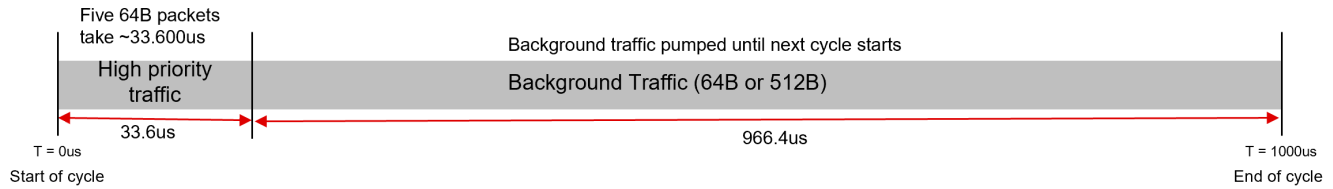


图 2-1. 一个周期内的以太网流量

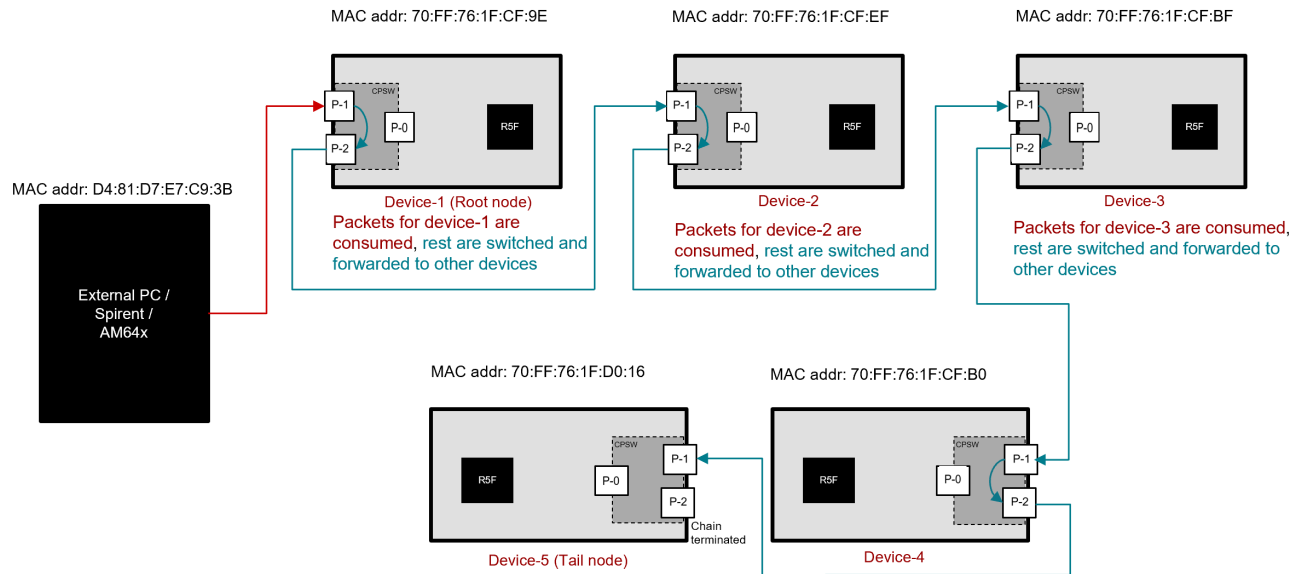


图 2-2. 对菊花链网络中的数据包传播进行采样

周期开始时，向菊花链网络发送五个高优先级 P0 帧，然后向网络发送低优先级后台流量，直到周期结束。

为高优先级流量计算每个节点的往返时间。此往返时间包括线路传播时间、CPSW 处理和交换时间，用于从外部数据包生成器到菊花链网络并返回数据包生成器的数据包发送。此设置有助于验证：

- TSN 能否确保传输至最远端节点（节点 5）的时延始终控制在 150 微秒以内。
- 延迟如何随跳数而变化
- 帧抢占是否有效地将高优先级流量与后台加载隔离开来
- gPTP 是否保持足够的同步精度。

虽然实际的机械臂可以有五个以上的关节，但五节点测试链对缩放行为进行了充分的验证，并为工程师提供了推断较长链性能的参考。

## 3 系统概述和架构

### 3.1 硬件架构

德州仪器 (TI) AM261x 是一款专为工业自动化应用设计的微控制器。此实现方案的主要特性：

- Arm Cortex-R5F CPU：

在 500MHz 下运行，具有实时处理功能和足够的计算能力，用于网络栈和应用逻辑，每个内核 256KB TCM 存储器和 1.5MB SRAM。这确保了 gPTP 软件栈的性能达到最优，从而有助于实现高精度的同步。

- CPSW3G 以太网交换机：

三端口千兆以太网交换机（一个主机端口，两个外部端口），支持硬件加速的 2 层交换和路由，具备 TSN 功能的交换机，支持 gPTP、IET（帧抢占）、EST（时间感知调度）、VLAN，以及线速直通交换；包含用于 MAC 地址过滤和 VLAN 管理的地址查找引擎 (ALE)；支持具有可配置路由规则的硬件 Inter-VLAN 路由；支持 MII、RMII、RGMII 接口，速率涵盖 10/100/1000M。

此实现方案采用单个 ARM R5F 内核，并通过板载 LaunchPad 上的两个 DP83869HM PHY 使用 100 Mbps RGMII 接口。

#### 3.1.1 AM261x LaunchPad

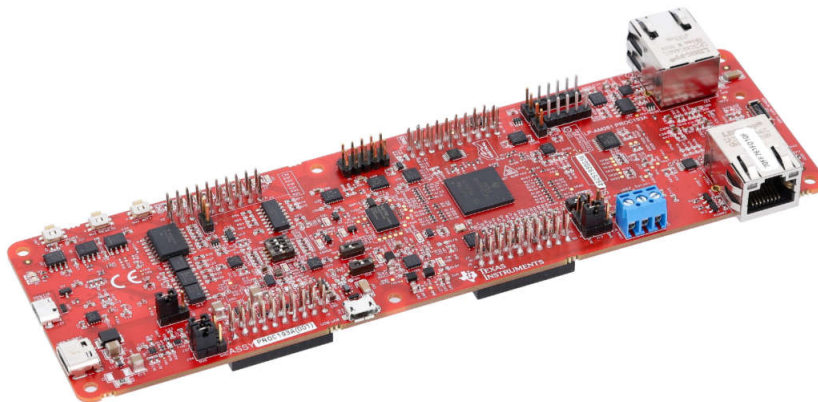


图 3-1. AM261x LaunchPad

测试硬件平台是 AM261x LaunchPad 开发板，以太网配置：

- 两个外部以太网端口（端口 1 和端口 2）
- DP83869HM 千兆位以太网 PHY 收发器
- 带有链路/活动 LED 的 RJ45 连接器
- AM261x MAC 和 PHY 之间的 RGMII 接口

电源和调试：

- 通过 XDS110 实现基于 USB 的 JTAG 调试接口
- 外部 5V 直流电源

电路板修改：此实现方案不需要修改电路板。LaunchPad 采用出厂默认配置。

*注意：虽然本文档讨论的是 AM261x，但可以使用 TI 的任何其他具有 CPSW 接口的微控制器/微处理器来实现类似的设计。*

### 3.1.2 CPSW 子系统概述：

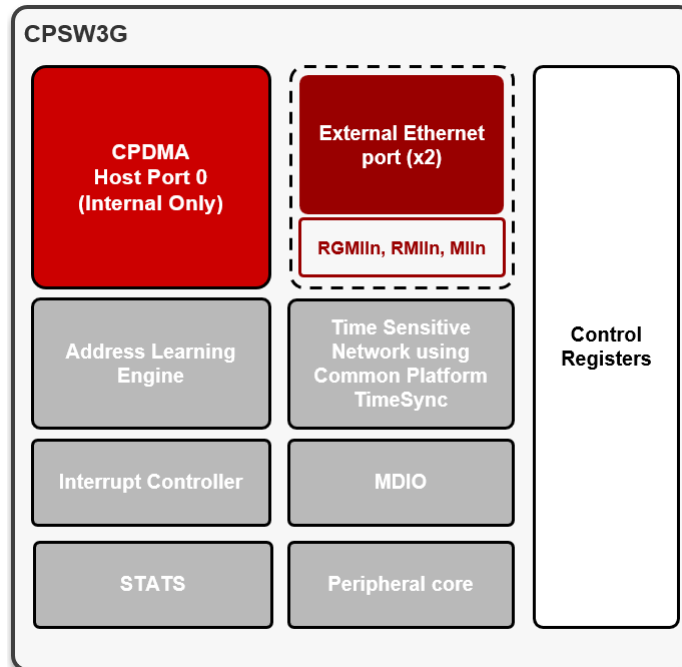


图 3-2. CPSW 子系统方框图

通用平台交换机 (CPSW) 是 TI 专有的硬件 IP，可支持 AM26x 器件上的网络功能。CPSW 子系统为器件提供 IEEE 802.3 标准以太网千兆位速度数据包通信，也可配置为以太网交换机。CPSW3G 支持 10/100/1000 以太网端口，具有可选的 MII、RMII 和 RGMII 接口。AM26x 器件携带一个 3 端口千兆位 CPSW3G 子系统。3 端口千兆位以太网子系统支持两个外部 MAC 端口和一个内部 CPPI 端口（通信端口编程接口）或主机端口。

内部端口：一个端口（端口 0）始终保留，用作在 CPU 和 CPSW 外设内核之间传输数据的 CPPI 主机端口（CPDMA 端口）。只有主机端口才能与 CPDMA 或 R5F 通信。任何传入或传出的数据都通过主机端口传递。

外部端口：CPSWNG 中的其他 (n-1) 个端口是外部 MAC 端口。例如，CPSW3G 有 2 个 MAC 端口（端口 1 和端口 2）和一个主机端口（端口 0）。外部端口是支持媒体独立接口 (MII) 的 MAC 端口，如 MII、千兆位媒体独立接口 (GMII)、简化媒体独立接口 (RMII)、简化千兆位媒体独立接口 (RGMII)、串行千兆位媒体独立接口 (SGMII) 和四串行千兆位媒体独立接口 (QSGMII)。

上述子块的软件配置由 Syscfg 自动生成的代码和 Enet-LLD 驱动程序来处理。根据应用的要求，可以在应用层中进一步配置这些子块。

- **CPDMA**：简而言之，CPDMA 负责在主机端口和 R5F 内核之间传输数据。CPDMA 子模块是数据包 DMA 传输控制器。主机 CPPI 接收和发送接口可支持以太网端口上的线速带宽。主机软件通过符合 CPDMA CPPI 3.0 和 CBA 3.1 标准的数据包 DMA 传输控制器主机接口与网络帧进行通信。
- **ALE (地址学习引擎)**：ALE 负责处理所有数据包（根据 ALE 和传入数据包的配置）并决定数据包的转发方式/位置。ALE 使用传入数据包接收端口号、目标地址、源地址、长度/类型和 VLAN 信息来确定数据包的转发方式。ALE 的输出是端口掩码，用于指示数据包应转发到的端口。
- **中断控制器**：CPSW 可以从 6 个不同的源触发中断，用于处理 Enet-LLD 驱动程序（软件）中的数据包。一些示例包括：THost（从以太网到主机）非逐步级中断，用于更新各端口统计信息的中断，以及用于处理链路状态变更、ECC 错误状况、配置修改和 ALE 事件等情形的杂项级中断。
- **统计模块**：CPSW 包含一个内置的统计信息模块，可存储每端口的统计信息。此模块对于评估应用性能和调试非常有用。CPSW 统计模块会捕获重要数据，例如正常帧和不良帧的帧计数，以及各种情况下的帧丢弃计数，如 ALE 溢出、FIFO 溢出、分片错误、端口掩码丢弃、过大/过小帧、CRC 和对齐错误等。
- **CPTS (通用平台时间同步)**：CPTS 子模块在器件上启用时间同步功能。它为从 CPSW 接收或发送的每个数据包启用事件时间戳。时间同步事件会推送到 CPSW FIFO

- MDIO (管理数据输入/输出) : 管理接口模块实施 802.3 串行管理接口, 使用两线制总线查询和控制外部以太网 PHY。MDIO 模块的一些主要功能包括:
  - MDIO 充当 CPSW 和 PHY 之间的桥接器
  - MDIO 模块允许 CPSW 配置和控制 PHY 器件的各个方面, 例如链路速度、双工、电源管理等。
  - MDIO 还用于监控每个 PHY 的状态, 从而检测链路接通/断开事件。
  - MDIO 还负责 CPSW 和 PHY 之间的自动协商

除此之外, CPSW 还支持与本应用手册相关的数据包分类、VLAN 支持、管制/速率限制等功能。某些应用需要在处理以太网数据包之前对其进行分类。不同的数据包类可能具有不同的处理逻辑或需要更快的周转时间。CPSW 可根据以下参数执行数据包分级:

- 目标 MAC 地址
- VLAN ID
- 优先级 (基于 VLAN ID)
- 以太网类型
- IP 标头字段
- 上述任何几项的组合

### VLAN 支持

虚拟 LAN (VLAN) 支持提供了一种在菊花链拓扑中对网络流量进行逻辑分段的机制。通过为来自或发往特定节点或功能块的流量分配不同的 VLAN ID, 开发人员可以将控制流量与数据流隔离, 区分安全关键型消息的优先级, 或通过同一物理网络实现多租户通信。这在工业自动化或模块化机器人系统中特别有用, 在这些系统中, 不同的子系统需要安全地共享通用以太网主干网, 而不会干扰彼此的数据域。VLAN 标签还有助于管理广播域并减少链中不必要的流量传播, 从而提高确定性和带宽利用率。CPSW 和 Enet-LLD 驱动程序支持具有 VLAN 标签的以太网数据包, 甚至支持基于 VLAN 标签的硬件分级

CPSW 还支持硬件中的 InterVLAN 和 IntraVLAN 路由。这意味着 CPSW 可以根据以太网数据包中的 VLAN 标签来决定需要将数据包转发到哪个 VLAN。

### 速率限制

策略器和速率限制机制可对以太网流量进行精细控制, 这在菊花链拓扑中尤为重要。策略器会监视传入或传出数据包的速率, 并通过丢弃或重新标签超出配置阈值的数据包来实施定义的带宽限制。这可确保没有任何设备或应用程序会使共享网络介质不堪重负, 从而保持了公平性并防止链中的拥塞。可在每个 MAC 端口的入口或出口应用速率限制, 以限制特定流量类别或流使用的带宽。在菊花链部署中, 这有助于保持可预测的延迟, 并确保低优先级或非关键流量不会使时间敏感型控制, 或避免同步数据包无法获得服务。与 QoS 和 VLAN 标签结合使用时, 策略器和速率限制可提供稳健的流量管理框架, 从而增强多节点工业以太网系统的可靠性和确定性。

每个 AM261x 节点配置为在引导时对 CPSW 进行初始化、设置端口 VLAN ID、使用 MAC 到端口映射来填充 ALE 表, 并根据其链位置运行网络应用逻辑。

在[此处](#)阅读有关 CPSW 的更多信息。

### 3.2 软件架构

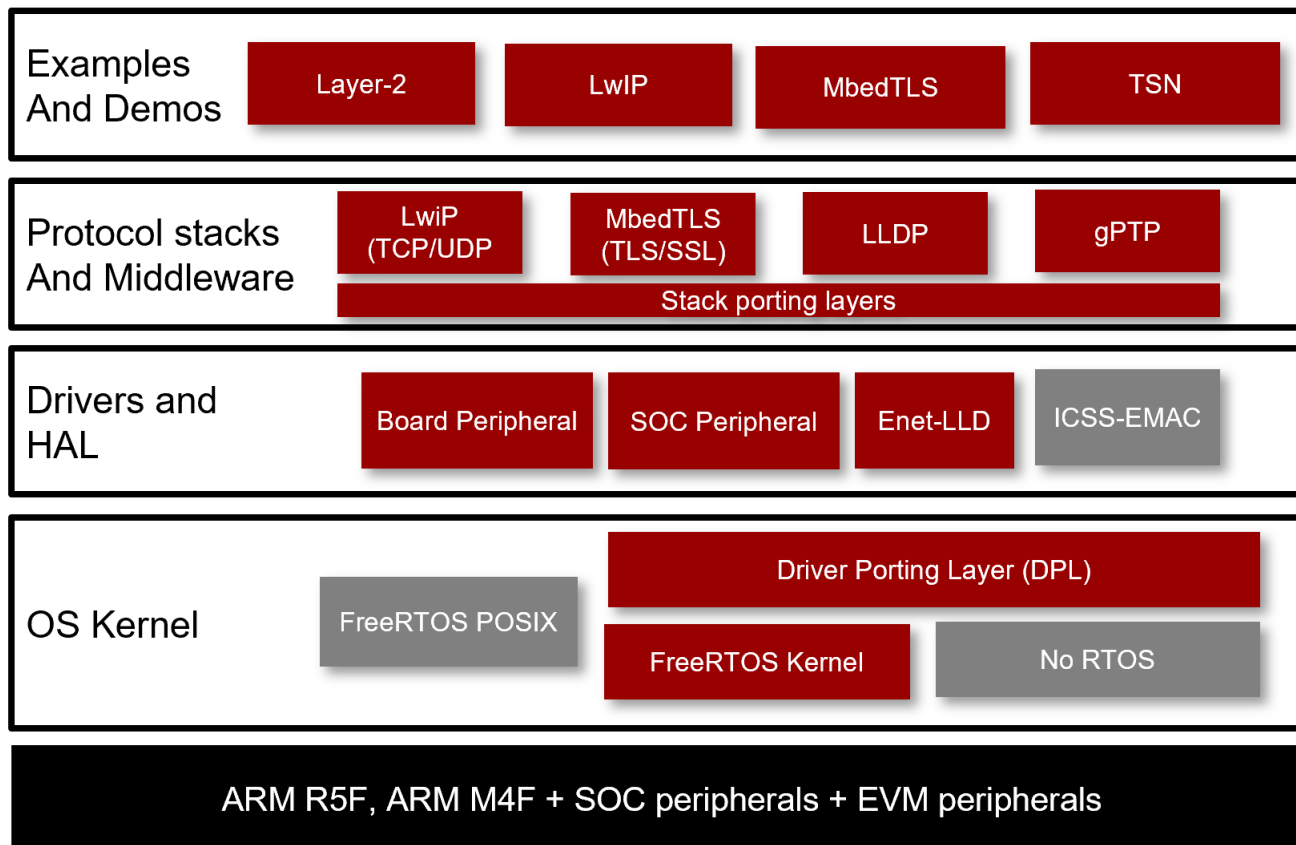


图 3-3. MCU\_PLUS\_SDK 方框图

对于在 AM261x 上运行的通用以太网应用，软件分为以下几层：

- 电路板和外设初始化：**这主要由 syscfg 自动生成的代码处理。example.syscfg 为客户提供了一个用于配置外设的 GUI 界面。然后，syscfg 自动生成代码以处理应用程序的 pinmux、时钟和初始化。
- CPSW 配置层 (Enet LLD)：**Enet-LLD 代码会对 CPSW3G 进行初始化，确保 PHY 和 MAC 已正确配置和启动。其中涉及到设置
  - 端口控制寄存器
  - ALE 条目
  - 端口状态（转发/阻止）
  - 使用适当的 PHY 驱动程序和链路监控来启动外部 MAC 端口。
  - 配置静态转发规则以避免 ALE 中的动态学习。
  - 缓冲区管理和 DMA 配置
  - 为主机端口设置 TX/RX 描述符。
  - 设置中断来处理运行时事件（如链路更改）
- 操作系统：**FreeRTOS 或 NoRTOS（裸机）层。该层提供 CPU 启动代码、中断处理、存储器保护单元 API、高速缓存、信标、计时器和队列相关 API 等功能。对于 FreeRTOS，该层还提供操作系统功能，例如任务调度等。Enet-LLD 驱动程序与该层无关，但中间件堆栈配置取决于所使用的操作系统。此应用将使用基于 FreeRTOS 的应用。
- 中间件栈 (LwIP、MbedTLS、TSN 等)：**在本例中，该层包含 TSN GPTP 栈。此外，该应用还可以使用 LwIP/MbedTLS 栈。
- 应用接口：**该应用负责创建以太网数据包的 Rx 和 Tx 任务，并在可能的情况下利用零复制策略（LwIP 栈）处理数据包分配、释放和缓冲区回收。ALE 在无学习模式下进行编程，以确保具有确定性的开关行为。该应用

负责根据某些标准创建 CPSW 分类器以进行数据包匹配。该应用负责对栈和接口层进行初始化。该层具有 IET、EST 和 InterVLAN 配置，但实际的硬件配置发生在 enet-llid 层。

下图描述了本应用手册中讨论的应用的形态。作为本应用手册一部分实施的完整应用，可在以下位置找到：  
[https://github.com/TexasInstruments/AM26x-add-on-SDK/tree/main/MCU\\_PLUS\\_SDK/reference\\_applications/AM261x\\_TSN\\_daisychain\\_app](https://github.com/TexasInstruments/AM26x-add-on-SDK/tree/main/MCU_PLUS_SDK/reference_applications/AM261x_TSN_daisychain_app)。该应用在 AM261x LaunchPad 上使用 v11.01.00.19 版本的 AM261x MCU\_PLUS\_SDK 进行了测试。

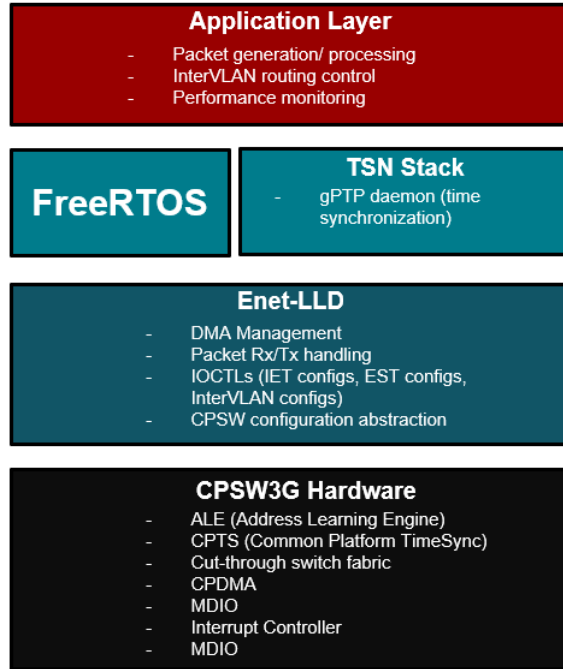


图 3-4. 应用方框图

## 4 实现示例

本节讨论了为降低往返时延而逐步改进的实现方案。

默认情况下，CPSW 启用了直通交换，这意味着在整个数据包到达之前不会阻止数据包转发，从而使系统传输更快。

下图显示了 CPSW 在 100M 和 1G 链路中的直通交换延迟（以 us 为单位）。

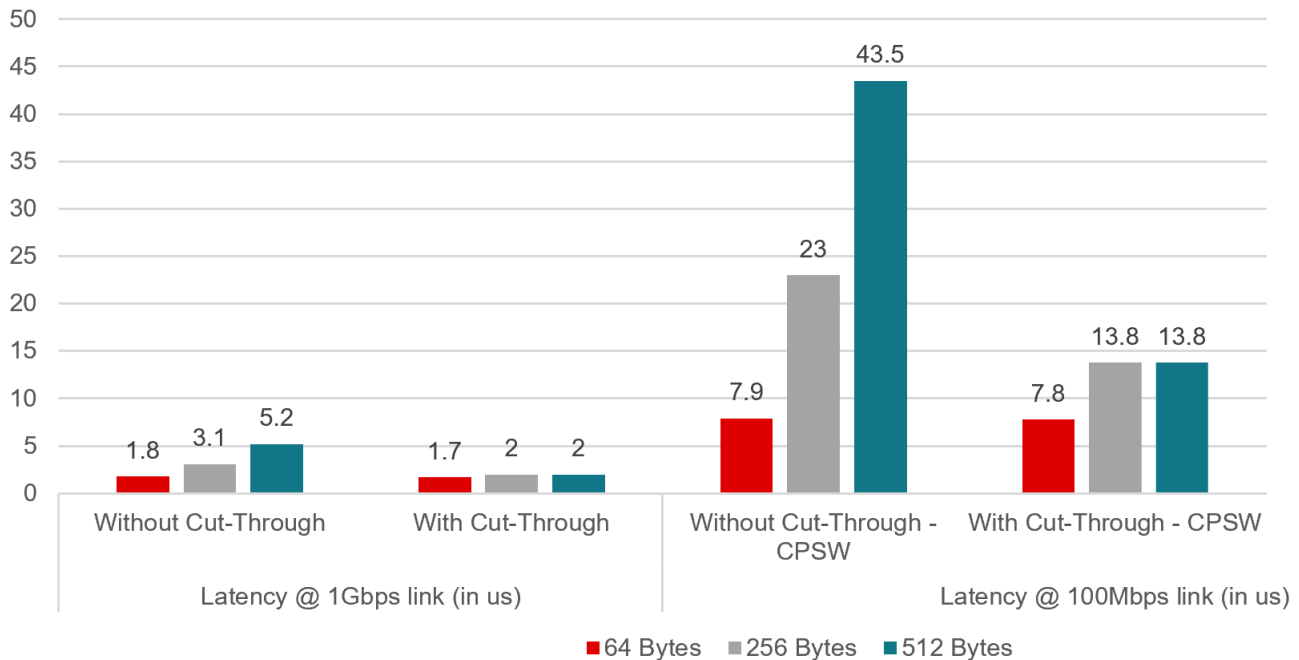


图 4-1. AM261x CPSW 开关延迟

### 4.1 标准以太网 + CPSW InterVLAN 路由

这是基线测试，实现方案使用 CPSW3G 交换机中的硬件 Inter-VLAN 路由。

#### 4.1.1 什么是 Inter-VLAN 路由

CPSW 支持 InterVLAN 路由功能，其中地址查找引擎 (ALE) 通过为相应路由配置的分类器/策略器，为每个需进行 VLAN 路由的数据包确定 InterVLAN 出口操作码。ALE 分类器/策略器可以使用入口数据包目标地址、源地址、VLAN、IPDA 和/或 IPSA 来确定数据包是否要进行 VLAN 路由。如果要路由数据包，则在以太网数据包出口处使用 InterVLAN 操作码。该路由功能支持修改部分数据包参数，例如 VLAN ID、IP 地址和 MAC 地址。

#### 4.1.2 此实现方案如何利用 Inter-VLAN 路由：

在此菊花链系统中，所有流量都使用单个 VLAN (VLAN 255)。Inter-VLAN 路由功能不用于实际的 VLAN 到 VLAN 转发，而是用于交换源/目标 MAC 地址交换功能，从而实现高效的数据包回送。检查传入数据包的目的 MAC 地址，如果它与当前节点的 MAC 地址不匹配，该数据包将被简单地交换并通过 MAC 端口 2 转发到下一个节点。如果 MAC 地址匹配，则交换源地址和目标地址，并环回数据包。

数据包流示例：

测试 PC 向节点 3 发送数据包

- 数据包通过节点 1 和节点 2 传输到节点 3。
- CPSW3G ALE (地址查找引擎) 执行查找：

1. 匹配目标 MAC = 节点 3 MAC

2. 匹配 VLAN = 255

3. ALE 路由规则已配置：“对于 VLAN 255 上发送到 MAC 的数据包，执行 SA/DA 交换并发送到端口 1

- 从节点 3 端口 1 传出的数据包通过节点 2 和节点 1 传回，并到达测试 PC。

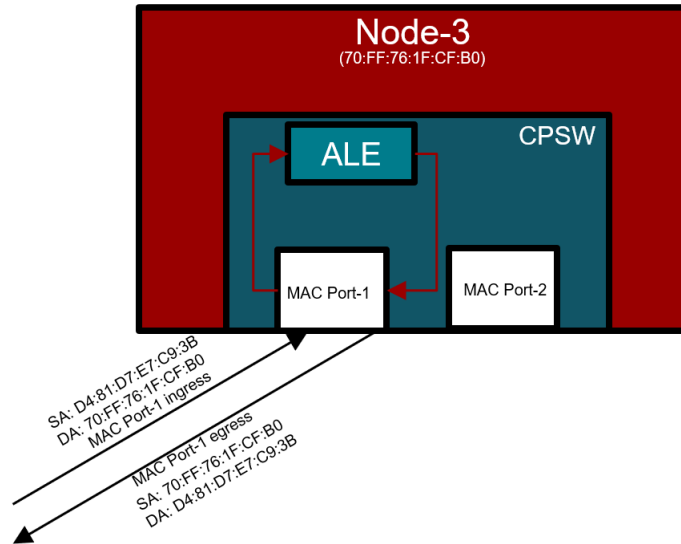


图 4-2. 使用 InterVLAN 路由实现数据包环回

#### 4.1.3 测试 1 基准测试

使用标准以太网获得的基线测试数据在表 4 中进行了讨论。对于每个节点，往返延迟是指数据包从数据包发生器传输到菊花链网络中的节点并环回到数据包生成器所需的时间（包括开关延迟、导线延迟、PHY 延迟、CPSW 处理时间）。

此测试不涉及任何后台流量。此测试的 CPSW 未配置为涉及 GPTP、EST 或 IET。

表 4-1. 基线结果

节点	往返时间 (us) - (无后台流量)
节点 1 (最近)	最小值：8.42 Max：528.81 平均值：511.96
节点 2	最小值：23.60 Max：803.47 平均值：656.64
节点 3	最小值：37.776 Max：816.82 平均值：671.89
节点 4	最小值：53.88 Max：830.17 平均值：686.91
节点 5 (最远)	最小值：69.128 Max：844.96 平均值：702.20

重要观察结果：

- 当流量注入刚开始时，往返延迟是理想的（最小数值）。“最小值”是在 100M RGMII 全双工链路下，菊花链拓扑所能达到的最佳情况数值。

- 从最远节点到最近节点每 1ms 按顺序发送 5 个数据包的突发。使用 550,000 个数据包的周期性突发 (12B IPG) 进行测试时，未观察到 CPSW 数据包丢弃。上述数字是 10 次测试迭代的平均值。
- 一段时间后，当网络数据包拥塞时，平均时间和最大时间会超出范围，导致这种实现方案不适合我们的用例。
- 在理想情况下，节点 2 和节点 1 延迟之间的差异为 (23.60us - 8.42us = 15.18us)。对于节点 “n” (n >= 1)，理想情况下的延迟可通过以下公式计算：

$$\text{延迟}(n) = \text{节点处理延迟} + 2 \cdot (n-1) \cdot (\text{直通延迟}) + \text{导线传播时间}$$

- 使用 100M 下的直通延迟为 7.6us，CAT5 以太网电缆的线路传播时间为 5ns/m，每个节点的平均延迟为 8.4244us。

近似地，

$$\text{延迟}(n) = 8.4224us + 2 \cdot (n-1) \cdot (7.6) + \text{导线传播时间}$$

- 由于网络中没有确定性、调度或同步，测试 1 中的平均往返延迟非常高。

## 4.2 集成 gPTP 时间同步 (IEEE802.1AS)

分布式确定性系统需要一个共享时基才能同步运行。如果不同步，每个节点都使用独立的本地时钟域运行，导致协调调度和同步驱动变得极其困难。GPTP 在链中的所有节点之间建立一个通用网络时间基准。

### 4.2.1 什么是 PTP 时间同步？

精确时间协议 (PTP) 由 IEEE 1588 标准定义，是一种网络协议，用于以亚微秒的精度同步整个计算机网络的时钟。

该协议使用主从架构运行。高精度基准时钟 (称为 Grandmaster) 通过网络将带时间戳的消息发送到从站器件。通过测量这些数据包的准确离开和到达时间，接收节点可以通过数学方法计算并消除网络路径延迟。这种对硬件级时间戳标签的依赖最大限度地减少了软件处理滞后，使得 PTP 比基于软件的传统方法 (如网络时间协议 (NTP)) 要精确得多。因此，它是时间关键型行业的关键技术，包括移动通信、电网、自动化制造和高频金融交易。

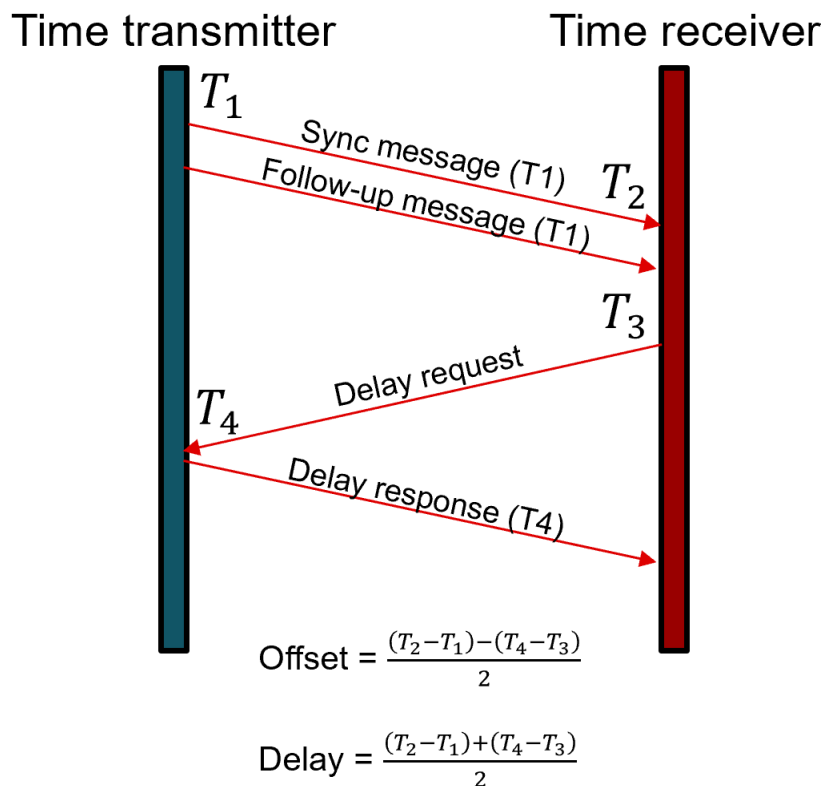


图 4-3. 两步 PTP 时间同步

TI AM261x 器件提供 2 步 PTP 机制，其中时间发送器 ( PTP 主器件 ) 在时间戳 T1 时共享 SYNC 消息，然后使用 T1 发送一条 FOLLOW UP 消息。SYNC 消息在 T2 时到达的接收器。然后，控制器在时间戳 T3 时发送 DELAY REQ。控制器在 T4 时接收到该信息。

使用 PTP 接收器上提供的这四个时间戳，计算延迟和偏移，并使用偏移量通过 CPSW 的 CPTS 块调整 PPM 时钟。

在 2 个节点之间，基准测试显示时间同步抖动小于 40ns。因此，对于两个对等 TI AM261x 器件，在同步后的任何时间点，时钟偏移不会超过 40ns。

#### 4.2.2 此实现方案如何使用 GPTP 时间同步

尽管实现该方案后未观察到往返延迟的改善，但该实现方案利用 GPTP 时间同步机制，实现了菊花链网络中所有节点的时钟同步。这为协调网络调度提供了所需的同步时基。如果没有 PTP 同步，调度的传输将变得无效且无法预测。纳秒级时间精度可实现流量管理决策的精确协调。

#### 4.2.3 测试 2 基准测试

启用时间同步并不有助于减少往返延迟，因此结果与第 4.1.3 节相同。

### 4.3 集成 VLAN (IEEE802.1Q)

#### 4.3.1 什么是 VLAN ?

VLAN 有助于使用帧头中的优先级代码点字段来创建虚拟网络段。这有助于创建 8 个不同的数据包优先级。IEEE 802.1Q 标准是定义虚拟局域网如何在以太网基础架构上运行的网络规范。该协议的工作原理是在以太网帧的标头中插入一个 4 字节识别标签。此标签包含一个唯一的 VLAN ID，允许单个网络交换机将物理流量分离到隔离的虚拟网络中。这种逻辑隔离有助于设计人员增强安全性和性能，并减少广播拥塞。当数据经由共享主干链路在交换机之间传输时，交换机会读取这些标签，并通过与帧抢占逻辑协同工作，将数据包以预定优先级专送至目标虚拟网络

#### 4.3.2 此实现方案如何利用 VLAN

此设计使用不同的数据包优先级，如第 2.4 节所述。所有数据包都使用 VLAN 标签 255，但这可以根据应用要求进行修改。CPSW 还支持基于 VLAN 标签的数据包过滤以及 VLAN 标签的硬件修改。该应用利用硬件中的 VLAN 数据包优先级划分和帧抢占逻辑来显著降低往返延迟

#### 4.3.3 测试 3 基准测试

表 4-2. 使用 IEEE802.1Q 进行基准测试

节点	往返时间 (us) ( 后台流量 512B )	平均改进 v/s 测试 1
节点 1 ( 最近 )	最小值 : 13.83 Max : 67.00 平均值 : 44.89	91.23%
节点 2	最小值 : 27.18 Max : 194.79 平均值 : 125.71	80.86%
节点 3	最小值 : 40.77 Max : 194.76 平均值 : 190.02	71.72%
节点 4	最小值 : 61.27 Max : 399.11 平均值 : 251.20	63.43%
节点 5 ( 最远 )	最小值 : 74.63 Max : 453.00 平均值 : 303.64	58.76%

## 4.4 集成 IET 帧抢占 (IEEE802.1Qbu/Qbr)

### 4.4.1 什么是 IET (交错快速流量) ?

IEEE 802.1Qbu 和 IEEE 802.3br 标准协同工作，定义了交错快速流量 (IET) 帧抢占机制。该技术降低了时间敏感型网络 (TSN) 应用中时间关键型数据的延迟。当高优先级快速数据包到达网络交换机时，如果已经发送低优先级的尽力而为数据包，交换机会暂时暂停低优先级帧的传输。紧急流量会立即通过线路发送出去。一旦时间关键型数据完全清除队列，交换机就会从中断的位置恢复分段的低优先级帧的传输。这种硬件级优化可以防止海量数据帧阻塞时间敏感型控制通信。它消除了对大型低效保护频带的需求，并确保在工业机器人和汽车网络等自动化环境中具有确定性。

### 4.4.2 此实现方案如何利用 IET

当 CPSW 交换机正在传输低优先级数据包时，若高优先级数据包到达 CPSW 出口 FIFO，则低优先级数据包的传输将被抢占，转而优先发送高优先级数据包，从而确保网络中关键信息的及时传递。在此应用中，P0 被标签为快速流量，所有 7 个其他优先级都被标签为可抢占流量。IET 完全可以通过应用的 `example.syscfg` 文件进行配置，包括流量的优先级划分。

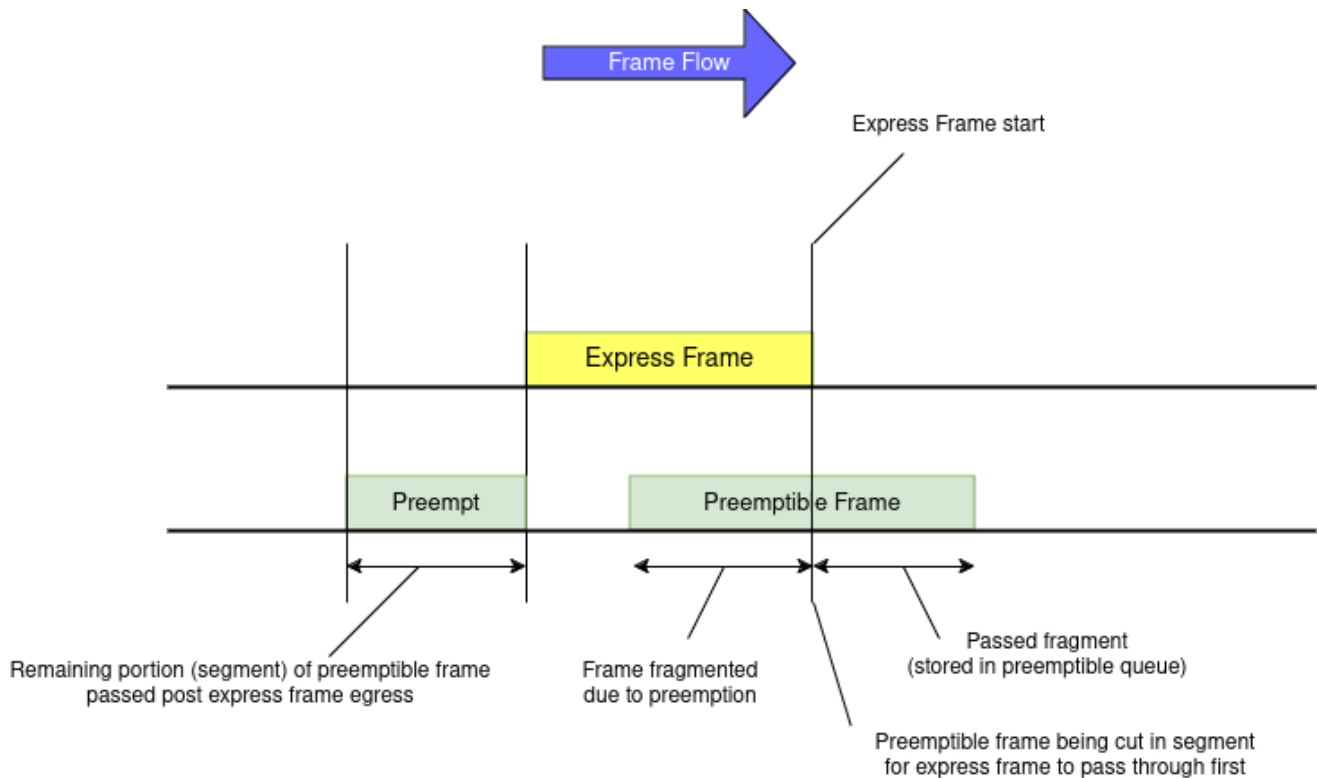


图 4-4. IET 帧抢占

### 4.4.3 测试 4 基准测试

集成 IEEE802.1Q、IEEE802.1AS、IEEE802.1Qbu/Qbr 后，整体往返延迟得到了显著改善。

表 4-3. 使用 IEEE802.1AS、IEEE802.1Q、IEEE802.1Qbu/Qbr 进行基准测试

节点	往返时间 (us) (后台流量 512B)	平均改进 v/s 测试 1
节点 1 (最近)	最小值 : 8.44 Max : 51.50 平均值 : 29.74	94.19%

表 4-3. 使用 IEEE802.1AS、IEEE802.1Q、IEEE802.1Qbu/Qbr 进行基准测试 (续)

节点	往返时间 (us) (后台流量 512B)	平均改进 v/s 测试 1
节点 2	最小值: 23.60 Max: 75.82 平均值: 49.82	92.41%
节点 3	最小值: 40.05 Max: 96.08 平均值: 69.10	89.72%
节点 4	最小值: 57.13 Max: 115.87 平均值: 85.86	87.50%
节点 5 (最远)	最小值: 70.67 Max: 135.90 平均值: 101.95	85.48%

## 4.5 集成 EST 调度 (IEEE802.1Qbv)

### 4.5.1 什么是 EST ?

IEEE 802.1Qbv 标准称为调度流量增强 (EST)，引入了时分多路复用机制，通过时间感知共享器 (TAS) 实现以太网。

该协议的工作原理是在网络交换机的出口传输队列中实施时间控制门机制。中央调度会指定这些队列门打开或关闭的确切时间，将网络流量划分为不同的重复时隙。通过在特定时间间隔内阻止标准的尽力而为流量，该标准在线路上创建了一个清晰的无争用窗口，专用于高优先级的时间关键型帧。这种确定性路由消除了紧急数据的队列延迟和数据包抖动。因此，它保证了在高度协调的环境（如航空航天通信和工业自动化）中精确、可预测的传输时间。

下图描述了门控机制如何屏蔽数据包优先级，并确保只有配置的优先级数据包可以在一个周期的特定时间段内发送/接收。

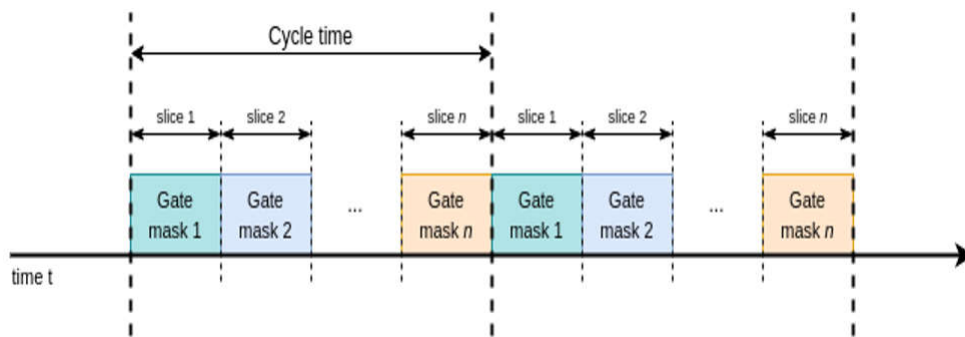


图 4-5. 增强流量调度

应用的这一部分尚未实现和测试。这被纳入为未来工作，但实现此功能的软件和硬件支持已经存在：

- 有关 EST 门控调度，请参阅开箱即用 SDK 示例：[https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api\\_guide\\_am261x/EXAMPLES\\_ENET\\_CPSW\\_EST.html](https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api_guide_am261x/EXAMPLES_ENET_CPSW_EST.html)

上面的示例演示了 CPSW 的配置，以调度不同优先级的流量。

- 确保测试设置在所有节点之间完成时间同步的同时，开始注入数据包。这将确保所有节点在所有周期中的门控开启和关闭是匹配的。
- 集成 EST 流量调度后的预期结果将略优于第 4.3.3 节中讨论的结果。

## 5 结语

本应用手册详细介绍了如何使用 AM26x 器件实现菊花链以太网拓扑，提供了对此类系统进行构建、配置和基准测试的全面指南。其中探讨了不同的 IEEE TSN 标准，以及每种标准的集成如何影响在使用 AM261x LaunchPad 和 CPSW 子系统创建的模拟延迟受限环境中的往返延迟。这套建议的设计方案有助于在标准以太网基础上实现 90% 以上的改进，从而确保性能、带宽、确定性，并且不存在专有的供应商锁定，也不需要专用的硬件/软件。

**表 5-1. 基准测试摘要**

节点	标准框架 (us)	+ GPTP + VLAN (us)	+ GPTP + VLAN + IET (us)	+ GPTP + VLAN + IET + EST (us)	总体改善 (%)
节点 1 (最近)	最小值: 8.42 Max: 528.81 平均值: 511.96	最小值: 13.83 Max: 67.00 平均值: 44.89	最小值: 8.44 Max: 51.50 平均值: 29.74	未来范围	<b>94.19%</b>
节点 2	最小值: 23.60 Max: 803.47 平均值: 656.64	最小值: 27.18 Max: 194.79 平均值: 125.71	最小值: 23.60 Max: 75.82 平均值: 49.82	未来范围	<b>92.41%</b>
节点 3	最小值: 37.776 Max: 816.82 平均值: 671.89	最小值: 40.77 Max: 194.76 平均值: 190.02	最小值: 40.05 Max: 96.08 平均值: 69.10	未来范围	<b>89.72%</b>
节点 4	最小值: 53.88 Max: 830.17 平均值: 686.91	最小值: 61.27 Max: 399.11 平均值: 251.20	最小值: 57.13 Max: 115.87 平均值: 85.86	未来范围	<b>87.50%</b>
节点 5 (最远)	最小值: 69.128 Max: 844.96 平均值: 702.20	最小值: 74.63 Max: 453.00 平均值: 303.64	最小值: 70.67 Max: 135.90 平均值: 101.95	未来范围	<b>85.48%</b>

- 可预测的延迟缩放：CPSW3G 交换机中的硬件加速 Inter-VLAN 路由可通过直通交换实现每跳一致的 7.6 微秒单向延迟。这种线性扩展使得在典型运动控制要求 ( $< 200 \mu\text{s}$  单向) 内，对 10-15 个节点的链路进行准确的延迟预算成为可能。
- 帧抢占机制可消除队头阻塞：IET (IEEE 802.1Qbu) 可在高后台流量负载下将最坏情况下的延迟降低约 85%。如果不采用抢占机制，512 字节的帧会在最坏情况下导致到第五个节点的往返延迟达到 473 微秒。在抢占模式下，往返延迟降至约 136 微秒，减少了 337 微秒。这使得混合关键性流量 (时间关键型控制 + 尽力诊断) 可在同一物理网络上使用。
- 低于 40 纳秒的时间同步：硬件时间戳 gPTP (IEEE 802.1AS) 可在所有节点之间实现低于 40 纳秒的同步精度，从而实现协调的传感器采样和基于时间的流量调度。这种精度比基于软件的 NTP 要高三个数量级，甚至足以满足要求苛刻的运动控制应用。
- 传输数据包的零 CPU 开销：CPSW3G 交换机完全在硬件中执行所有数据包转发、SA/DA 交换和抢占。即使在高流量期间，CPU 利用率也保持在 12% 以下，留下了 88% 的处理容量可用于应用逻辑、传感器融合和控制算法。
- 通过在每个周期结束时使用小保护频带 (例如，在约 100us 的时间内不传输新数据包，并且网络中已经存在的数据包有时间完成传播，避免任何新的拥塞)，可以进一步提高性能，
- 通过使用支持硬件时间戳处理的 PHY，可以进一步提高时间同步精度。PHY 添加时间戳并获取 T1、T2、T3、T4 值后，GPTP 软件栈将从 PHY 边界获取这些值，而不是在数据包进入 CPSW 子系统时为其添加时间戳，从而使偏移计算更加准确。

## 6 挑战和调试注意事项

本节将介绍常见的调试策略、架构限制以及确保系统稳健性和可靠性的最佳实践。

### 6.1 网络拓扑验证

- **链路完整性检查**：确保每个节点都已物理连接并且以太网 PHY 已正确链接。这可以使用 LED 或软件方法（例如观察 PHY-Alive 和 MAC 端口链路建立日志）进行验证。在菊花链拓扑中，每个节点的外部 MAC 端口连接到下一个节点，确保正确建立所有上行和下行连接并保持稳定。
- **交换机配置验证**：确保 CPSW3G 中正确填充地址查找引擎 (ALE) 条目，以实现静态流量转发。转发规则配置错误可能导致帧丢失或路由不当。确保应用的 example.syscfg 文件已正确完成所有 MAC 端口和主机端口配置。
- **循环保护**：如果无意中在节点之间建立了多条路径，菊花链以太网网络可能容易受到网络环路的影响。这可能会导致广播风暴和网络拥塞。确保只有正确的路径处于活动状态，并在需要时实施软件检查以进行环路检测。

### 6.2 流量分析

- **数据包捕获**：使用网络分析工具（如 Wireshark）在每个节点的外部 MAC 端口捕获数据包，以验证转发是否正常以及载荷是否正确。
- **流量模式**：观察节点之间的通信模式，确保转发按预期工作。重要的是要查找丢弃或路由错误的数据包，并验证是否正确处理了所有应用特定协议（例如 UDP、原始以太网）。如果在 AM26x 端遇到数据包丢弃问题，请使用 CPSW 统计信息验证丢弃问题及其根本原因。如需更多信息，请参阅：[AM26x Academy — 以太网调试指南](#)

### 6.3 主机端口流量监控

- **中断和事件监控**：禁用数据包中断节流（批处理），降低统计信息中断优先级，禁用

### 6.4 PHY 链路管理

- AM261x-LP 没有板载 PHY。确保所使用的 PHY 配置正确。如果使用自举设置，请确保相应地配置应用，以使用自举 PHY 设置。如果集成的是非 TI 的 PHY，请按照 PHY 驱动程序集成指南正确设置 PHY：[https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api\\_guide\\_am261x/enetphy\\_guide\\_top.html](https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api_guide_am261x/enetphy_guide_top.html)
- PHY 相关问题（例如链路协商不正确、双工设置不匹配或速度不正确）可能会导致不稳定。验证链路状态、自动协商过程，以及速率（10/100/1000 Mbps）和双工模式（半双工/全双工）等配置参数。有关更多详细信息，请参阅：[https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api\\_guide\\_am261x/enetphy\\_link\\_config\\_top.html](https://software-dl.ti.com/mcu-plus-sdk/esd/AM261X/latest/exports/docs/api_guide_am261x/enetphy_link_config_top.html)

### 6.5 数据包未转发到下一个节点

确保 ALE 表中存在针对所配置 VLAN 标签的条目，且其成员掩码正确。端口成员掩码决定了如何进一步传输数据包

### 6.6 错误处理和重试

上述测试中使用的应用没有实现任何重试机制，但在多跳菊花链网络中，如果节点检测到传输失败（例如，通过超时或校验和失败），则应采用数据包重传策略。

### 6.7 高优先级数据包的高延迟或抖动

在 MAC 端口的 CPSW 统计信息中检查 IET 统计数据。确保数据包被碎片化并重新拼接，并且正确配置 IET。请使用 CCS gel 脚本查看 CPSW 非零统计信息，或在 CCS 表达式窗口中手动添加表达式 (CSL\_Xge\_cpswRegs \*) 0x52820000 以监控统计数据。

### 6.8 gPTP 不同步

检查链路状态：两个端口必须显示链路接通，然后检查端口状态。检查时钟偏移，若持续出现较大偏移 (> 100µs)，则可能表明存在时间戳问题。请验证 gPTP 组播数据是否被正确转发，并检查 ALE 表中是否存在 01:80:C2:00:00:0E 条目。

## 7 参考资料

- [应用链接](#)
- [AM26x Academy](#)
- [AM26x 器件网络功能入门指南](#)
- [MCU+SDK 中的 Enet-LLD 驱动程序](#)
- [Enet-LLD API 指南](#)
- [PHY 集成指南](#)
- [PHY 链路指南](#)
- [LwIP 指南](#)
- [MCU+SDK 以太网单页概述](#)
- [IEEE802.1AS-20205](#)
- [IEEE802.1Qbu-2016](#)
- [IEEE802.1Qbv-2015](#)
- [IEEE802.1Q](#)

## 重要通知和免责声明

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、与某特定用途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、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月