

*Application Note***Sitara 处理器上用于电网变电站通信的 HSR/PRP 解决方案****摘要**

德州仪器 (TI) AM64x/AM243x 处理器支持 PRU_ICSSG 子系统，该子系统与 AM3x/AM4x 处理器上的 PRU-ICSS 子系统不同，它能够支持高达 1Gbps 的带宽，而不是限制为 100Mbps。本白皮书详细介绍了 PRU_ICSSG 子系统如何实现 HSR/PRP 技术，并介绍了在需要 HSR/PRP 协议的应用中使用 PRU_ICSSG 的主要优势。

内容

1 智能电网变电站中的以太网冗余	2
1.1 高可用性无缝冗余 (HSR).....	3
1.2 并行冗余协议 (PRP).....	4
2 Sitara 处理器中的 HSR/PRP 实现方案	6
2.1 PRU_ICSSG 概述.....	6
2.2 PRU_ICSSG HSR/PRP 架构.....	7
2.3 PRU_ICSSG HSR/PRP 特性.....	7
2.4 PRU_ICSSG HSR/PRP 固件.....	8
2.5 PRU_ICSSG HSR/PRP 的优势.....	9
2.6 Linux HSR/PRP 解决方案.....	9
2.7 RTOS HSR/PRP 解决方案.....	10
3 HSR/PRP SDK 支持	11
4 总结	12
5 参考资料	13
6 修订历史记录	13

插图清单

图 1-1. 典型的电动智能电网.....	2
图 1-2. 过程总线与站总线.....	3
图 1-3. 典型的 HSR 网络拓扑.....	4
图 1-4. 典型的 PRP 网络拓扑.....	5
图 2-1. PRU_ICSSG 功能框图.....	6
图 2-2. HSR/PRP 软件方框图.....	7
图 2-3. PRU_ICSSG HSR/PRP 固件方框图.....	8
图 2-4. HSR 网络中使用的 AM64x 示例.....	9
图 2-5. Linux 硬件分流 HSR/PRP 方框图.....	10
图 2-6. RTOS 硬件分流 HSR/PRP 方框图.....	10

表格清单**商标**

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 智能电网变电站中的以太网冗余

在数字和智能电网变电站之前，传统变电站依靠模拟系统和手动操作来监控配电。由于需要系统以更高效率、灵活性和可靠性管理配电，行业正在向数字电网基础设施转型。数字电网使用先进的传感器和网络来收集和处理数据。与之前使用的传统电网不同，此次行业更新实现了实时监控和自动控制。智能电网是一种数字电网，具有先进的分析、管理和决策功能，可在更大范围内优化电网性能，从而进一步推动电网发展。

智能电网变电站是电网基础设施的关键组件，从整个配电网的高压发电设施到服务于住宅和企业的低压馈电设备，无处不在。变电站是转换传输电压电平并执行切换、监控和保护子系统等重要功能以保持电网效率和可靠性的主要因素。为了满足这些重要功能，需要快速、容错的通信来帮助运营商实现经济高效且可靠的操作。变电站网络需要的通信具有内置冗余和时间同步，并且不会由于网络中的单一故障而停机。如果发生故障，网络必须在给定的短时间内恢复。冗余会在源和目标之间创建多条路径，以便在发生故障时重新路由流量。



图 1-1. 典型的电动智能电网

运营商需要持续监控网络的运行状况，并采取行动以高效地保持运营。因此，需要操作员控制中心与变电站等高价值节点之间进行可靠且低延迟的通信。由于站和过程总线网络的要求不同，因此需要根据站和过程总线网络的具体性能特性实现不同的协议。

变电站内存在三个主要的不同级别的通信：站级、托架级和过程级。“临时总线”处理站层和托架层之间的通信，“过程总线”处理托架层和过程层之间的通信。三个主要级别中的每条总线都承载连接各种智能电子设备(IED)（例如保护继电器、托架控制器等）和智能控制/SCADA系统的以太网网络。站总线网络主要用于传输事件驱动的以太网消息以监控系统，并将整个变电站互连，并在托架层提供中央管理和各个 IED 之间的连接。站总线通常承载“通用面向对象的变电站事件”(GOOSE) 流量和 TCP/UDP 流量。站总线中的流量可以容忍帧丢失。

过程总线也传输 GOOSE 消息，但也主要用于以采样值(SV) 流量的形式承载测量流量。这些是承载测量值的小型以太网帧，由合并单元发送；例如，合并单元是变电站内的器件，用于测量仪表变压器发出的电流和电压信号。SV 流量不允许帧丢失，因此介质冗余必须不间断地工作。

过程总线通过高可用性无缝冗余协议(HSR)或并行冗余协议(PRPs)冗余连接到站总线。过程总线流量被发送到站总线进行分析和额外监控。

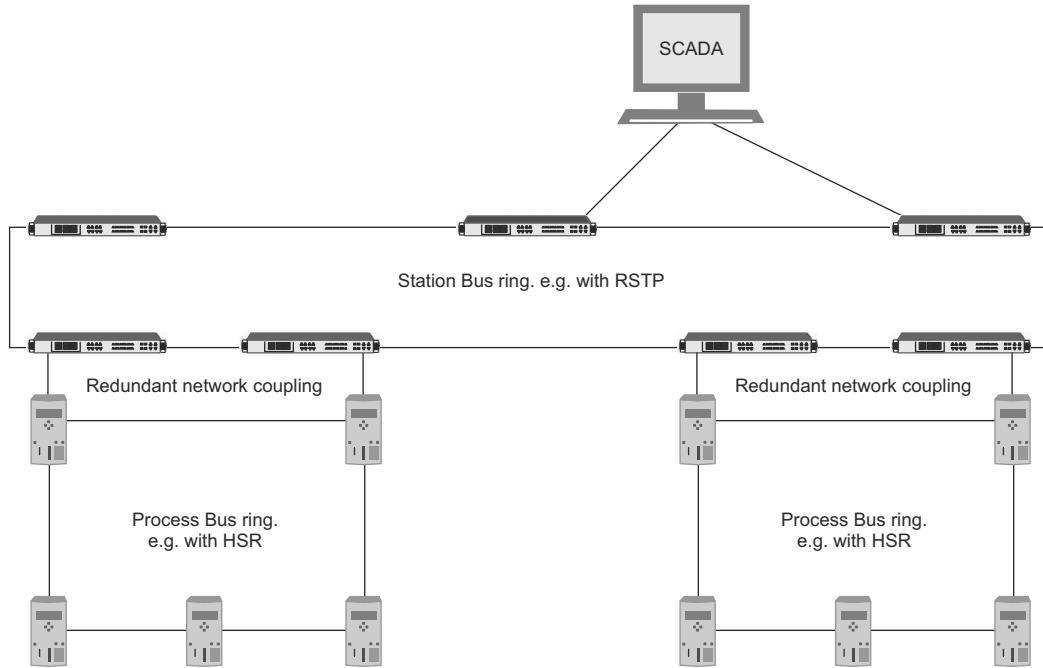


图 1-2. 过程总线与站总线

由于需要高性能、高可靠性和可预测的以太网网络，推动了 IEC 62439 标准的发展，目标是创建具有内置冗余功能的低成本、易于维护且可互操作的通用网络基础设施。

1.1 高可用性无缝冗余 (HSR)

IEC 62439-3 第 5 条将高可用性无缝冗余 (HSR) 协议定义为变电站自动化的冗余协议。HSR 是一种独立的冗余协议，基于通过环形拓扑网络双重传输消息帧，因此当一个连接失败时，第二个连接上的传输会成功。网络无需重新配置时间或重新学习通信路径。

由于在发生网络故障时，HSR 网络上的通信仍然可以不间断地继续，因此 HSR 非常适合过程总线应用。

HSR 帧由 HSR 标签唯一标识。现场器件连接到双连接节点 HSR (环形拓扑中的 DANH)，只有符合 DANH 标准的节点才可以连接到 HSR 网络。其他标准以太网设备 (单独连接的节点，SAN) 需要通过冗余盒 (RedBox) 进行连接，以便与 HSR 网络配合使用。HSR 标签用于管理 HSR 网络中的重复帧导致的冗余。

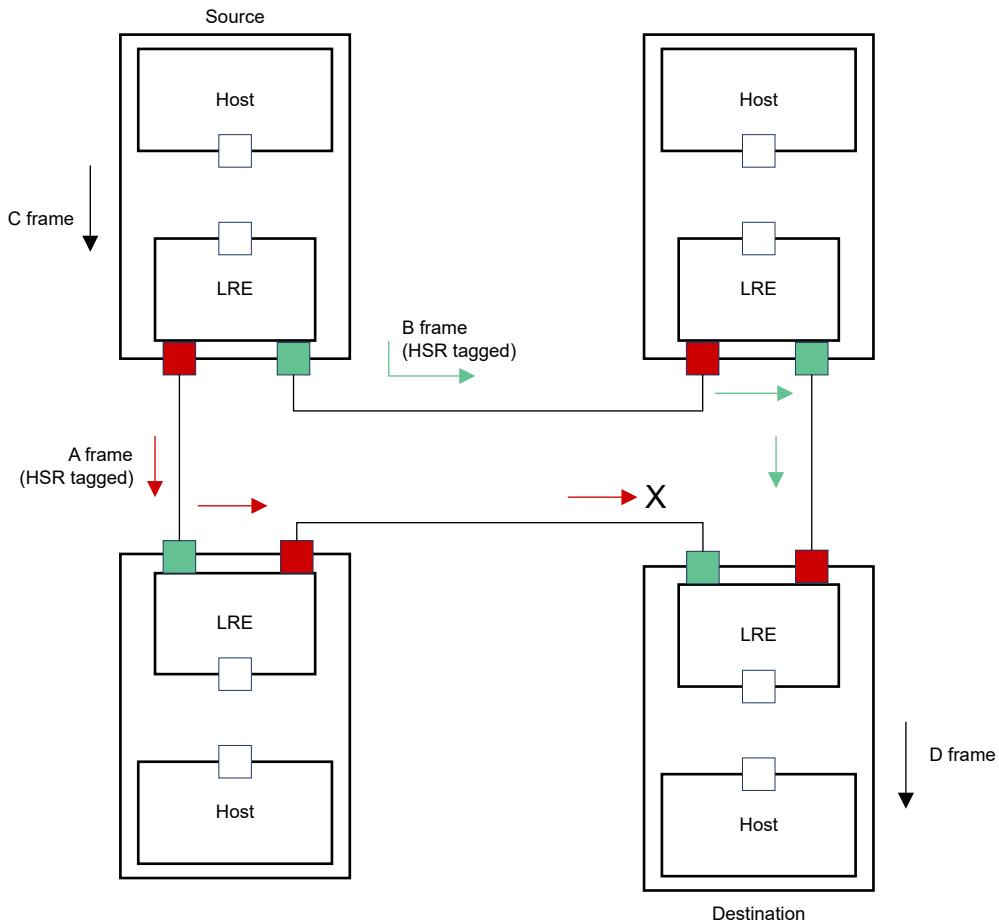


图 1-3. 典型的 HSR 网络拓扑

DANH 节点有两个并行操作的端口，包含通信栈的上层（在图中由“主机”表示）和链路冗余实体（LRE），这有助于向上层提供与非冗余网络适配器相同的接口，从而使上层不知道冗余。源 DANH 为从其上层传递的帧添加前缀（在图 1-3 中，这表示为“C frame”），带有 HSR 标记，用于标识帧重复项，并通过每个端口（从红色端口的“A frame”和从绿色端口的“B frame”）发送每个帧的相同副本。请注意，图中的红色和绿色端口仅代表每个 DANH 节点上的两个不同端口。

目标 DANH 在无故障状态下在特定时间间隔内接收两个相同的帧（每个端口一个）。它删除了第一个帧的 HSR 标签（在图 1-3 中表示的示例中，这将是“B frame”），然后将其传递到其上层（在图中，这由“D frame”表示）并丢弃任何重复的帧（在图中表示的示例中，这将是“A frame”）。

这些节点支持 IEEE 802.1D 桥接功能并将帧从一个端口转发到另一个端口，除非它们已经以相同的方向发送了相同的帧。特别是，节点不会转发它注入环的帧。若某节点是单播帧的唯一目的地，则该节点不会转发该帧，测试情形除外。在环中循环的帧携带由源插入的 HSR 标签，其中包含一个序列号。对于中间或“转发”节点（既不是源节点也不是目标节点），帧会直接转发，而无需移除 HSR 标签，因为目标节点负责移除 HSR 标签。偶极（源 MAC 地址，序列号）用于唯一标识同一帧的副本。丢弃重复帧可防止网络被不必要的流量淹没。

1.2 并行冗余协议 (PRP)

PRP 只是将必要的网络基础设施加倍，具体定义详见在 IEC 62439-3 第 4 条。凡是需要利用此冗余网络基础设施的所有设备，都必须通过双连接网络接口进行连接，该接口将两个接口连接到两个冗余局域网（LAN）A 和 B 中的一个。两个网络同时使用，两个网络携带由双连接节点 PRP (DANP) 冗余发送的相同数据。每个 DANP 都会复制其通过 LAN A 和 LAN B 传输的整个网络流量。

PRP 支持星型拓扑，通过承担更高的基础设施成本来保证固定跳数的延迟。

当两个 LAN 中的一个出现故障时，网络流量仍在另一个 LAN 上运行而不会中断。PRP 也是过程总线的备选方案，因为在一个网络发生故障时，SV 流量仍可安全地通过另一个网络传输到其目的地。

DANP 节点有两个并行运行的端口，它们通过链路冗余实体 (LRE) 连接到通信栈的同一上层。对于基本通信，LRE 向上层提供与非冗余网络适配器相同的接口，因此上层不知道冗余。LRE 有两项任务：处理重复项和管理冗余。从节点上层接收帧时，LRE 会将包含序列号的冗余校验拖车 (RCT) 附加到帧中，并在几乎同时通过两个端口发送帧。除了 LAN 标识符 (和校验和) 之外，这两个帧几乎相同。

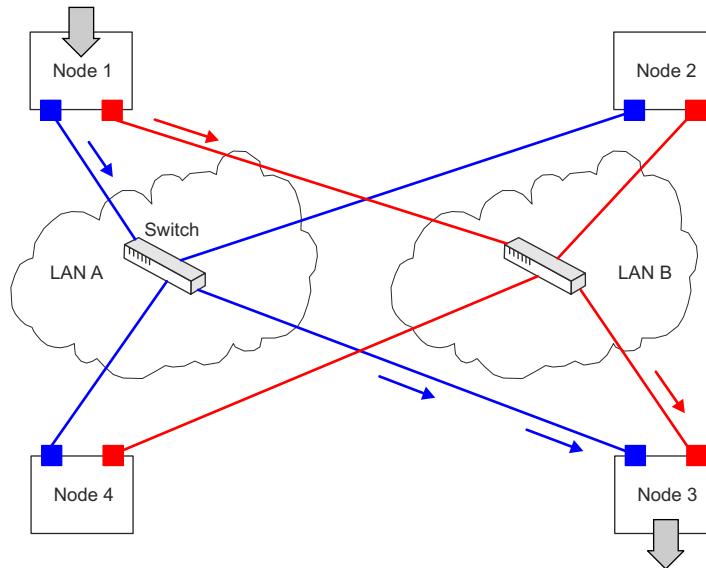


图 1-4. 典型的 PRP 网络拓扑

这两个帧以不同的延迟通过两个 LAN 传输，理想情况下它们到达目标节点的时间几乎相同。当从网络接收帧时，LRE 会将一对帧中接收到的第一个帧转发到其节点的上层，并丢弃重复的帧（如果有）。如果需要，它将移除 RCT。

图 1-4 是由 4 个 DANP 节点组成的示例 PRP 网络的简化视图。可以假定每个节点都包含一个 LRE，如上所述，这对于向其上层展示与非冗余网络适配器相同的接口和代表通信栈上层的主机至关重要。

2 Sitara 处理器中的 HSR/PRP 实现方案

本文重点介绍了德州仪器 (TI) AM64x/AM243x 微处理器上的 PRU_ICSSG 子系统如何实现 HSR/PRP 特性。以下各节首先将概述 PRU_ICSSG 子系统和 HSR/PRP 架构、特性和固件。最后将总结对 HSR/PRP 的 PRU_ICSSG 实现方案进行分流的主要优势，以及德州仪器 (TI) Linux 和 RTOS 软件开发套件 (SDK) 如何实现 HSR/PRP。

2.1 PRU_ICSSG 概述

AM64x/AM243x SoC 集成了 PRU_ICSSG 技术，使客户能够向系统添加 HSR-PRP 双连接节点支持。可编程实时单元和工业通信子系统千兆级 (PRU-ICSSG) 由 6 个 32 位 RISC 内核（可编程实时单元，PRU）、数据和指令存储器、内部外设模块及中断控制器 (INTC) 组成。凭借 PRU_ICSSG 的可编程特性及其对引脚、事件和所有 SoC 资源的访问权限，该子系统可以灵活地实现快速实时响应、专用数据处理操作以及定制外设接口，并灵活地减轻片上系统 (SoC) 其他处理器内核的任务负载。

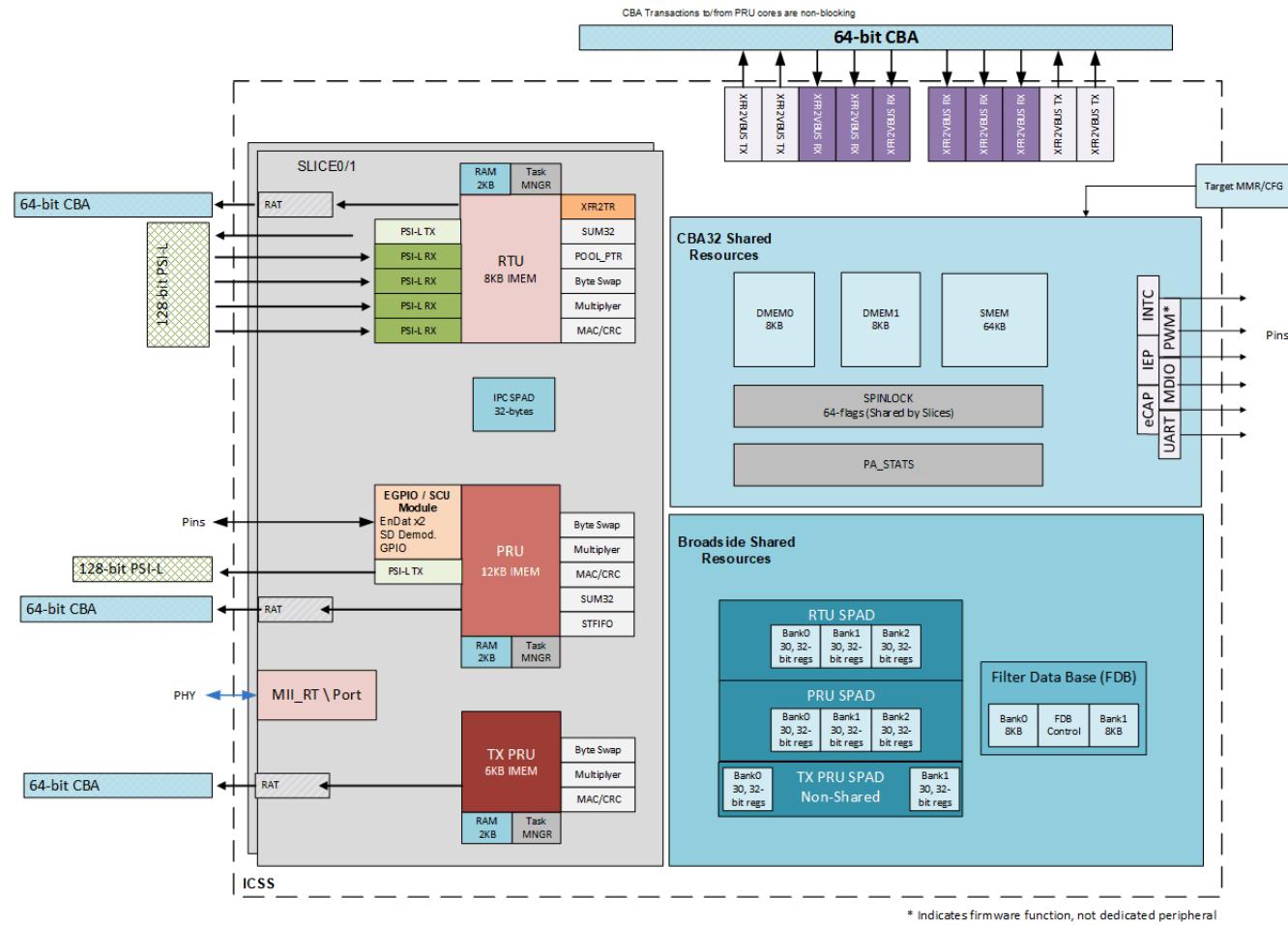


图 2-1. PRU_ICSSG 功能框图

每个 PRU_ICSSG 中的内核都可以通过 VBUSM 接口控制器端口来访问 SoC 上的所有资源。此外，外部主机处理器可以通过 VBUSP 接口目标端口来访问 PRU_ICSSG 资源。

使用 XFR2VBUS 后，允许使用 VBUSM 控制器端口以 256 位突发方式向 SoC CBASS0 互连传输 32 字节的宽边数据。32 位内部 CBASS 互连总线将是 PRU_ICSSG 内部所有组件之间的主要互连。

每个 PRU_ICSSG 中有两个相同对称的部分，称为 SLICE0 和 SLICE1。每个切片将共享多个资源，同时能够相互独立工作。每个切片有两组 XFR2VBUS。对于 SLICE0，XFR2VBUS 硬件加速器在 PRU0 和 RTU_PRU0 之间共享，相同的配置对 SLICE1 有效。TX_PRU0 和 TX_PRU1 内核还连接了 XFR2VBUS 硬件加速器。

INTC 负责处理系统输入事件，并将事件发布回器件级主机 CPU。PRU 内核是使用一个小型确定性指令集进行编程的。每个 PRU 可以独立运行或相互协调，也可以与器件级主机 CPU 协调工作。处理器之间的这种交互是由加载到 PRU 指令存储器中的固件的性质决定的。

PRU_ICSSG 还包含 FDB (滤波器数据库) 、 XFR2PSI 和 MII_G_RT (实时媒体独立接口) 等组件，这些组件是实现 HSR 和 PRP 功能的关键组件。

有关 PRU_ICSSG 的完整详细信息，请参阅 [AM64x/AM243x 技术参考手册 可编程实时单元和工业通信子系统千兆级 \(PRU_ICSSG\)](#)。有关 PRU 的更多详细信息，请参阅 [PRU Academy 培训模块](#)。

2.2 PRU_ICSSG HSR/PRP 架构

该实现方案包括 PRU_ICSSG 固件、驱动程序 (Linux/RTOS)、应用和 SNMP 支持。LRE 主要在 PRU_ICSSG 固件和驱动程序中进行处理。主内核 (Cortex-Ax 和 Cortex Rx) 运行驱动程序和应用程序代码。TI 提供了 PRU_ICSSG HSR 固件和驱动程序 (Linux 和 FreeRTOS) ；但是，客户可以开发该协议和相关应用。请注意，在本文中，术语 “RTOS” 和 “FreeRTOS” 可互换使用。

下面展示了 Sitara 器件上的 HSR/PRP 开关架构，该架构由固件、驱动程序、协议和应用组成。

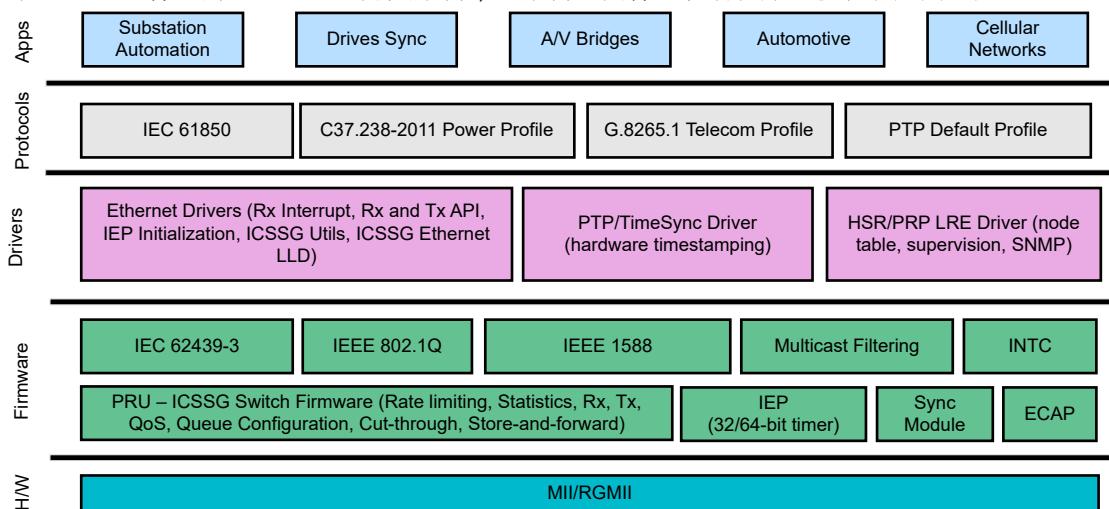


图 2-2. HSR/PRP 软件方框图

固件层在 PRU_ICSSG 上运行，目前实现了直通转发、重复生成和丢弃逻辑以及 HSR 标签插入和移除等功能，以启用 HSR 和 PRP。PRU_ICSSG 还能够实现对 IEEE 802.1CB (用于可靠性的帧复制与消除 - FRER) 的支持。驱动程序层将固件连接到协议层，并实现节点表、SNMP 支持等功能。协议层运行 IEC 61850、PTP 默认配置文件等功能以及与应用层的接口。请注意，TI 不提供协议层。

2.3 PRU_ICSSG HSR/PRP 特性

- HSR 终端节点 (DANH) 符合 IEC 62439-3 版本 3 第 5 条
- PRP 终端节点 (DANP) 符合 IEC 62439-3 版本 3 第 4 条
- 10/100/1000Mbps 全双工以太网接口
 - 对于 SDK 10.1 和更高版本的 SDK 中的 Linux，存在 1000Mbps 的数据速率
- 具有 HSR 功能的增强型 ICSSG 直通开关
 - 在 1Gbps 链路速度下实现切换时间小于 $2.5 \mu s$
- 在出口 (主机到以太网) 和入口 (以太网到主机) 路径上维护的 IEEE 802.1Q QoS 流量优先级
- IEEE 802.1Q 桥接规则支持，包括过滤器数据库 (FDB) (静态和可转换条目) 以及 RSTP 端口状态 (端口屏蔽、禁用、学习)
- IEEE 1588 - 具有 1-PPS 功能的 PTP 时间刻度计时器
- 采用速率限制机制，通过对 best-effort 流量的速率加以约束，从而防范风暴流量
- 节点表经过增强，能够为主机所接收的全部帧提供流量捕获 (统计数据) 功能

2.4 PRU_ICSSG HSR/PRP 固件

在 HSR/PRP 的 FreeRTOS 和 Linux 实现方案中，使用了一个常见固件。PRU_ICSSG 固件可处理直通转发、端口到主机/端口重复检测和消除、HSR/PRP 标签插入和移除、数据包复制等功能。

PRU_ICSSG 使用所有 6 个 PRU 内核运行链路冗余实体 (LRE)，从而使主机管理高层栈和用户应用及必要的平台初始化。

图 2-3 展示了有关 PRU_ICSSG 固件如何实现 HSR/PRP 逻辑的更多详细信息。

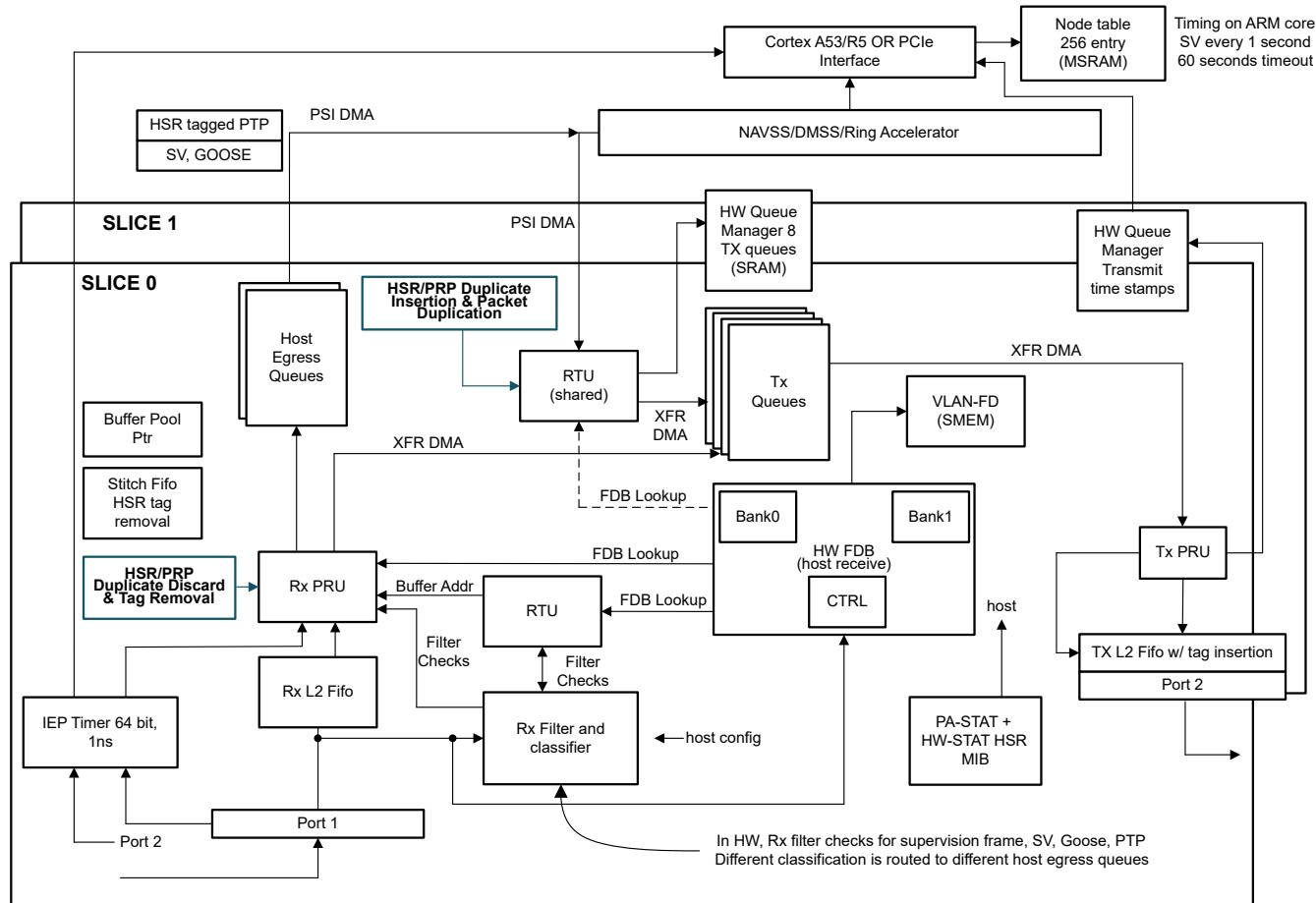


图 2-3. PRU_ICSSG HSR/PRP 固件方框图

2.5 PRU_ICSSG HSR/PRP 的优势

将 PRU_ICSSG 子系统用于 HSR/PRP 的主要优势在于，它能够将 HSR/PRP 的主要功能分流到 PRU 内核。例如，对于 HSR，AM64x/AM243x 能够分流以下任务：端口到端口转发，复制传出的 HSR 帧，插入唯一标签来标识 HSR 帧，以及移除 HSR 标签。由此带来的改进包括：降低 HSR 网络中转发器件上的应用内核（AM64x/AM243x 微处理器上的 A 系列内核或 R 系列内核）上的 CPU 负载。此外，在分流模式下，转发器件上的转发延迟也会降低，这在 HSR 网络中特别有用。

图 2-4 显示了有关如何在使用 HSR 拓扑的示例系统中进行分流的方框图。如本应用手册简介部分所述，IED 可以是从保护继电器到托架控制器的任何器件。这些器件可处理保护、控制和计量等功能。ICSSG 模块支持前面介绍的 HSR 分流任务。

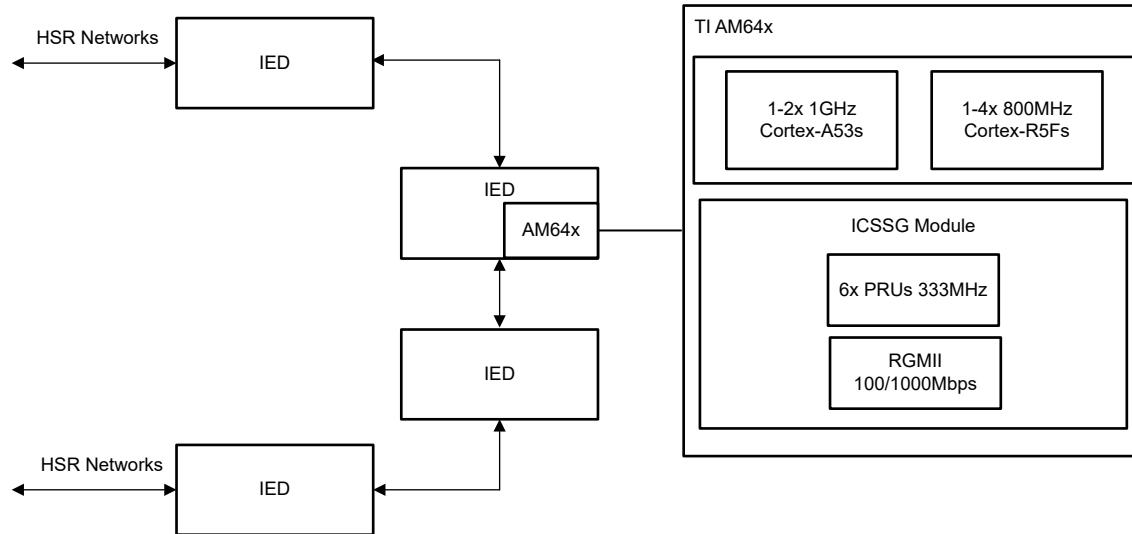


图 2-4. HSR 网络中使用的 AM64x 示例

2.6 Linux HSR/PRP 解决方案

由于 AM243x 微处理器主要采用 ARM cortex R 内核（不包含 A 系列内核），并且 TI 为 A 系列内核提供 Linux SDK 支持，因此只有 AM64x 微处理器（同时具有 A 系列内核和 R 系列内核）支持用于 HSR/PRP 的 Linux 产品。

[AM64x Linux 处理器 SDK](#) 支持将 HSR/PRP 硬件从 Linux PRU_ICSSG 以太网驱动程序分流到 PRU_ICSSG 固件。加载 HSR/PRP 固件时，PRU 以太网驱动程序将执行正确的固件配置，并在 `netdev` 功能标志中指示分流功能。目前，Linux HSR/PRP 驱动程序栈使用此功能标志来确定较低级别的以太网驱动程序是否支持硬件分流，并禁用其层处理。在 `netdev` 功能标记中，Linux 内核为 `hsr` 分流提供了以下标签：`hsr-dup-off`、`hsr-fwd-off`、`hsr-tag-ins-off`、`hsr-tag-rm-off`。有关这些标签的详细定义，请参阅 [Linux 内核文档](#)。

图 2-5 的左侧部分标记为“硬件非分流 HSR”，展示了实现 HSR/PRP 功能的 Linux HSR/PRP 驱动程序的组件，而无需将任何功能分流到 PRU_ICSSG。图的右侧部分标记为“硬件分流 HSR”，显示了因相应的 HSR 功能被分流到 PRU_ICSSG 而未使用的 Linux 组件，这些组件呈灰色显示。

一般而言，这些图展示了以太网数据包在非分流和分流情况下可能采取的三条不同路径。发送的数据包通过图中的“Tx 数据包路径”进行传输。收到的数据包通过“主机 Rx 路径”传输。最后，转发的数据包将通过“转发的 Rx 路径”传输。

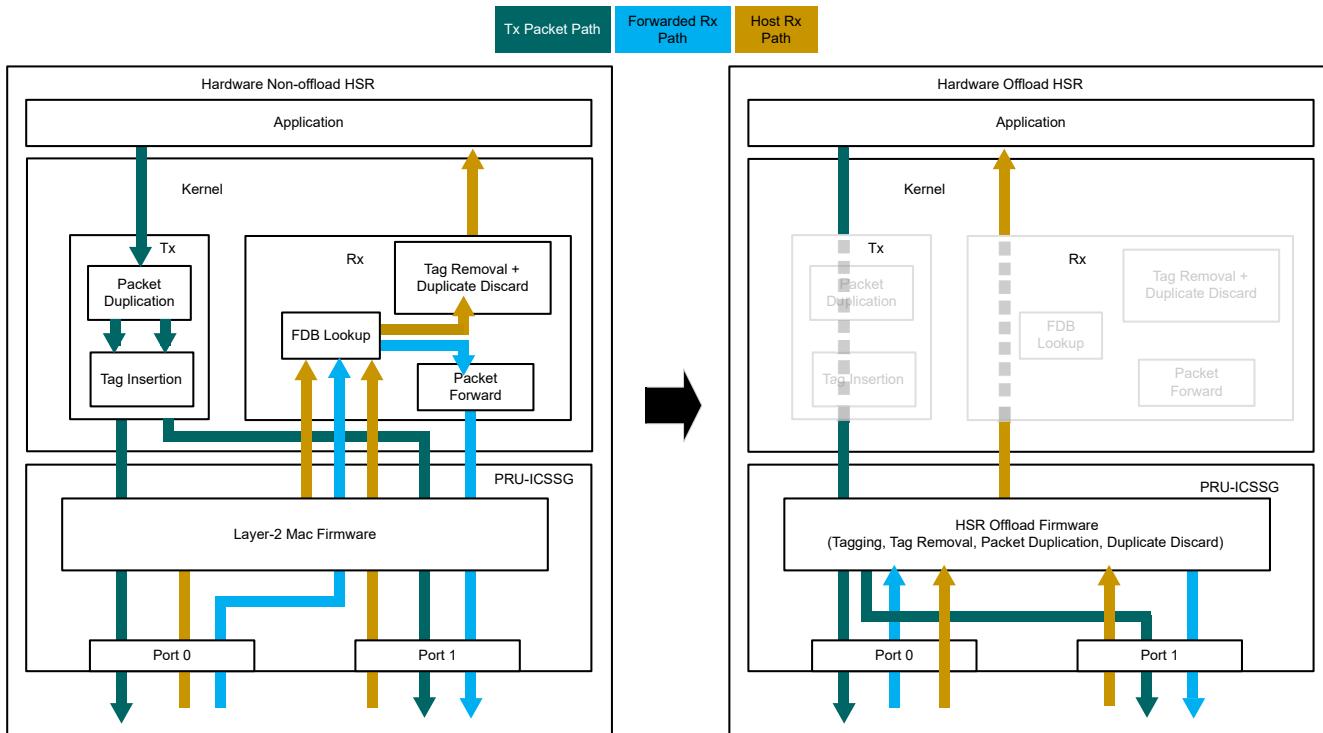


图 2-5. Linux 硬件分流 HSR/PRP 方框图

有关 Linux HSR/PRP 分流解决方案的特性、设置、测试过程和性能的更多信息，请参阅有关 [HSR 分流](#)或 [PRP 分流](#)的最新 AM64x Linux 软件文档。

2.7 RTOS HSR/PRP 解决方案

适用于 AM64x 的工业通信 SDK 和适用于 AM243x 的工业通信 SDK 具有基于 RTOS 的 HSR 和 PRP 支持。工业通信 SDK 软件包是适用于工业协议和驱动设计的单个可扩展软件平台，可简化跨不同 TI 处理器和 MCU 的开发。此软件包为开发各种 HSR/PRP 解决方案提供了基础软件。这些软件包还包括示例演示应用，展示了软件/硬件实施 1G HSR/PRP 的能力。为了使工业通信 SDK 有效运行，需要安装所需的 MCU+ SDK 软件包。有关如何使用工业通信 SDK 测试 HSR 和 PRP 的快速入门指南，请参阅 [1G HSR](#) 和 [1G PRP](#)。

图 2-6 展示了 SDK 提供的 RTOS 解决方案如何解决将 HSR/PRP 功能分流到 PRU_ICSSG 固件的问题。请注意，当前 SDK 中提供的 RTOS 解决方案上的“硬件非分流 HSR”意味着 HSR/PRP 功能完全禁用，并且不存在直接在 R 系列内核上运行 HSR/PRP 的概念。因此，“硬件非分流 HSR”图没有显示标记、标签删除、数据包复制、重复丢弃的位置。但是，经验丰富的 RTOS 开发人员可实现自己的 HSR/PRP 栈以在 R 系列内核上运行。

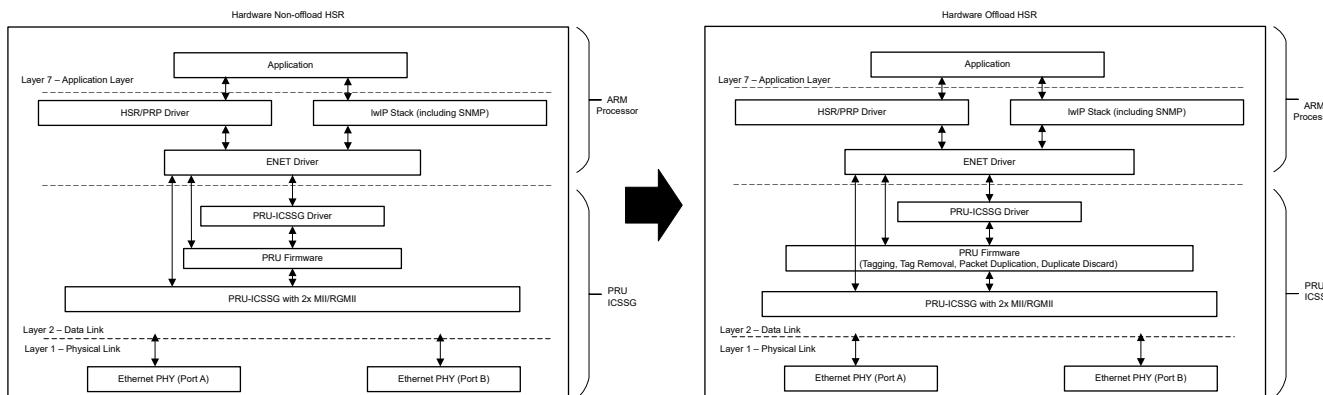


图 2-6. RTOS 硬件分流 HSR/PRP 方框图

3 HSR/PRP SDK 支持

如 [节 2.6](#) 和 [节 2.7](#) 中所述，TI 分别提供了适用于 Linux 和 RTOS 的处理器 Linux SDK 和工业通信 SDK。两个 SDK 软件包都包含有关如何在 AM64x 和 AM243x 微处理器上实施和测试 HSR 和 PRP 的示例和文档。

两个 SDK 软件包都包含以下内容：

- PRU_ICSSG 固件，用于实现 1G HSR/PRP LRE
- 相关的驱动程序
- 栈适配层
- 所选协议的协议栈库的评估版本
- 快速入门示例

在 AM3x/AM4x 微处理器中，还支持 HSR/PRP 功能。这些器件具有 PRU-ICSS 子系统。PRU-ICSS 和 PRU_ICSSG 的主要区别在于，PRU-ICSS 最高只能支持 100Mbps 带宽。有关 HSR/PRP 的 PRU-ICSS 实现方案的资源，[请点击此处](#)。

4 总结

德州仪器 (TI) 支持高可用性无缝冗余 (HSR) 和并行冗余协议 (PRP) , 适用于需要高可靠性关键流量的实时网络应用。这些协议在智能电网变电站中提供冗余 , 其中快速和容错通信是关键要求。Sitara 微处理器为使用 PRU_ICSSG 子系统的 AM64x/AM243x 器件提供 Linux 和 RTOS HSR/PRP 解决方案。使用 PRU_ICSSG 子系统能够分流关键 HSR/PRP 功能 , 从而降低 CPU 负载并减少延迟。

5 参考资料

- [AM64x/AM243x 技术参考手册](#)
- [PRU Academy 培训](#)
- [AM64x Linux 处理器 SDK](#)
- [Linux 内核 Netdev 文档](#)
- [适用于 AM64x 的工业通信 SDK](#)
- [适用于 AM243x 的工业通信 SDK](#)
- [PRU-ICSS HSR/PRP 固件](#)

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (April 2018) to Revision A (January 2026)	Page
• 添加了 PRU-ICSSG 概述一节.....	6
• 更新了图以反映当前的技术支持.....	6
• 添加了有关 AM64x 和 AM243x 处理器在支持 1Gbps 带宽的 PRU-ICSSG 子系统上支持 HSR/PRP 的信息....	7
• 新增了 PRU-ICSSG HSR/PRP 优势部分，重点介绍了分流技术的价值.....	9
• 扩充了 HSR/PRP Linux 和 RTOS 支持部分。.....	9
• 更新了 HSR/PRP 支持部分以介绍除 AM3x/AM4x 微处理器之外的 AM64x 和 AM243x 系列。	11

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出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