

Technical Article

以太网如何加速向软件定义车辆的转型



Madison Ecklund, systems manager, Body Electronics & Lighting

区域架构和以太网代表着车载网络的未来发展方向。车辆的新功能以及将传感器和执行器整合至区域控制模块的架构转型，均需要一套高带宽、低延迟的车载通信网络。采用以太网的区域架构能推动软件定义车辆的发展。

当今的大多数车辆都使用称为域架构的接线和电子控制单元 (ECU) 架构进行构建。域架构依据特定功能将 ECU 划分为不同功能域，而不考虑其在车内的物理位置。

与域架构相比、区域架构按位置而不是功能来组织通信、配电和负载控制，如所示 [图 1](#)。区域控制模块作为网络数据桥接器，连接车辆计算系统与智能传感器、ECU 等本地边缘节点。为减少车内布线，区域控制模块还将通过实现半导体智能熔断功能向不同边缘节点分配电力，处理低级计算任务，并驱动电机和照明等本地负载。

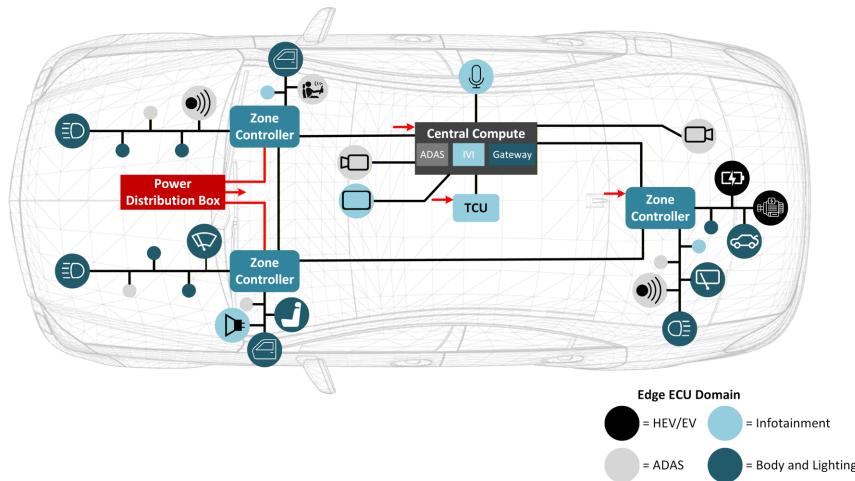


图 1. 区域架构示例

区域控制模块通过边缘节点通信网络传输来自各类传感器和 ECU 的数据，并将整合后的传感器数据通过主干通信网络转发至中央计算系统。同样地，区域控制模块通过主干通信网络，再次经由边缘节点通信网络，将从中央计算系统接收到的数据传输至各类执行器。中央计算系统与区域控制模块间的双向通信需依托高带宽、低延迟的主干网络，以处理多传感器高级驾驶辅助系统 (ADAS)、车辆运动控制及自适应驾驶光束等功能产生的海量数据。

区域架构中的带宽要求

为理解车载以太网的应用价值，我们按功能场景细分其应用场景。新确定的单对以太网支持 10Mbps 至 10Gbps 速率，具体通过以下标准定义：电气电子工程师学会 (IEEE) 802.3cg (10Mbps)、IEEE 802.3bw (100 Mbps)、IEEE 802.bu (1Gbps) 和 IEEE 802.3ch (10Gbps)。所有这些新型以太网技术均可通过单对线缆传输，通信距离可达 15m，足以覆盖车辆中最长的连接链路。以太网还能通过 IEEE 802.1AS 时间戳技术实现传感器数据的时间同步，从而降低延迟。

尽管以太网具备极高的传输速度，但并非所有场景都需如此高速。例如，与车门控制模块或暖通空调系统通信时，并不需要 100Mbps 的数据速率。对于低速率和低带宽需求的场景，采用 [DP83TD555J-Q1](#) 等 10Mbps 以太网 PHY 或控制器局域网 (CAN) 替代网络协议更为适宜，而高速率则可用于将区域控制模块聚合的摄像头及自动驾驶传感器数据传输至中央计算系统。[图 2](#) 图示说明了区域架构中不同以太网速率的应用场景。

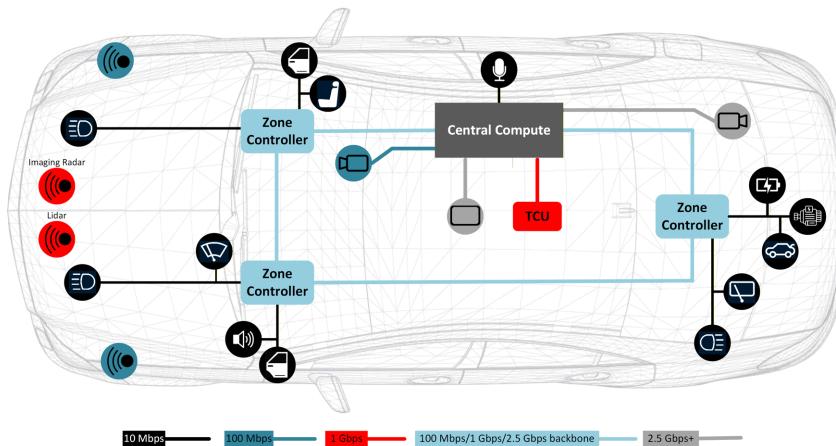


图 2. 区域架构中的以太网

使用 [图 2](#)，让我们深入探讨雷达、激光雷达、摄像头和车身应用中采用的通信速率。当雷达或激光雷达片上系统 (SoC) 处理数据时，通常通过 CAN、10Mbps 以太网或 100Mbps 以太网将激光雷达或雷达数据传输至区域控制模块。当仅进行一级或二级数据处理时，则通过 100Mbps 至 1Gbps 以太网将雷达和激光雷达数据传输至区域模块或中央计算机。将原始激光雷达或雷达数据发送到中央计算系统时，可通过多传感器融合技术提取更多信息。传输如此海量的原始数据需要更高带宽，通常采用串行/解串行器 (SerDes) 协议或 2.5Gbps 以上以太网。

在摄像头领域，当 ADAS 的数据量提升，需要前视摄像头输出的全部原始数据以进行后续处理时，像平板显示链路 (FPD) 这类 SerDes 便是最合适的选择。

若前视摄像头数据可压缩且无需增强级 ADAS 数据，则 100Mbps 以太网可作为替代方案。

车门把手传感器、车窗升降控制模块和侧后视镜控制模块等车身域模块以前使用 CAN 和本地互连网络 (LIN) 协议进行通信，因其无需高带宽支持。虽然设计人员将继续使用 CAN 和 LIN，但以太网在车辆中的日益普及也为 10Mbps 10BASE-T1S 多点以太网创造了应用空间。传统以太网采用点对点拓扑结构，而 10BASE-T1S 以太网则是首个支持总线拓扑功能的以太网标准。

区域架构中的数千兆位以太网

区域架构的潜在演进路径是什么？首先整合车身域数据，纳入电力分配系统，并实现计算集中化。随着时间的推移，区域架构将开始聚合来自 **ADAS** 和信息娱乐系统等其他域的数据。最终目标是将所有域整合到区域架构中。无论数据源自何种域，区域控制模块与中央计算系统仍将通过同一主干通信网络传输数据。音频数据是迁移至区域控制模块的首要目标，因其可借助音视频桥接标准[通过以太网传输](#)。

车身域功能通常需要 **10Mbps** 或更低的速率。但是，随着 **ADAS** 或车载信息娱乐功能（如雷达、激光雷达、音频和摄像头）融入区域架构，速度和带宽需求必须提升和/或以太网主干拓扑可能从星型转变为环型，以适应大量安全关键型和时敏型传感器数据的传输需求。

音频每通道生成约 **1.5Mbps**；雷达传感器通常生成 **0.1Mbps** 至 **15Mbps** 数据。激光雷达生成 **20Mbps** 至 **100Mbps** 的数据。摄像头产生最高数据量，达 **500Mbps** 至 **3.5Gbps**。当前车辆通常配备 **4-6** 个雷达传感器、**1-5** 个激光雷达传感器、**12-20** 个扬声器、**12-16** 个麦克风及 **6-12** 个摄像头。**表 1** 图示展示了各类传感器产生的数据量范围。

表 1. 在区域架构中生成的数据

类型	所生成的数据	传感器数量	低	中	高
音频扬声器	1.5Mbps	12 至 20	3.2Mbps	24Mbps	30Mbps
音频麦克风	1.5Mbps	12 至 16	3.2Mbps	21Mbps	24Mbps
雷达	0.1 - 15Mbps	4 至 6	0.4Mbps	35Mbps	90Mbps
激光雷达	20 - 100Mbps	1 至 5	20Mbps	100Mbps	500Mbps
摄像头	500Mbps - 3.5Gbps	6 至 12	3Gbps	9Gbps	42Gbps

正是不断增长的数据总量，推动了原始设备制造商 (OEM) 对 **2.5Gbps**、**5Gbps** 和 **10Gbps** 以太网的需求。区域架构需要一条主干通信网络，能够将 **ADAS** 传感器产生的海量数据传输至中央计算系统。未压缩的摄像头数据已超出当前以太网承载能力，而摄像头分辨率和像素数量仍在持续提升。随着车辆向自动驾驶迈进，传感器数量将持续增加。因此，支持更高的摄像头分辨率和传感器所需的带宽会相应增加。

OEM 厂商对以太网速率的需求差异，很可能源于将不同功能整合至区域控制模块的过渡时间表。车内扬声器的音频播放是首批应用于以太网主干的跨域数据类型之一。相比之下，这很可能是由较低的数据生成量造成的，因为 **20** 路音频扬声器通道大约会产生 **30Mbps** 的数据流量。现有的 **100Mbps** 或 **1Gbps** 以太网主干可轻松适应添加音频播放数据。总体而言，区域控制模块中的高级数据功能越多，对带宽的要求就越高。

采用以太网作为区域架构的主干，使车辆在连接互联网或远程 OEM 服务器时，能够通过车载网络传输更多数据。这使得通过远程固件空中下载 (FOTA) 更新实现订阅式服务和车辆诊断成为可能。FOTA 更新支持不同的硬件和软件更新周期，由于传感器和执行器与中央计算节点相互独立，这些更新周期可以异步进行。FOTA 更新还能推送新增功能与安全改进，无需等待新车型发布或车辆进厂维修。OEM 和消费者都从中获益：OEM 能够在车辆上市后自主控制新增功能的更新，而消费者则无需频繁前往经销商处更新固件，从而减少了不便。

区域架构中的 PHY

以太网需要使用 **PHY** 来发送和接收高速数据。汽车以太网 **PHY** 消除了以太网作为车辆布线主干时面临的诸多问题，例如在如此多变的环境中信号质量不佳的情况。德州仪器 (TI) 的以太网 **PHY** 能够在 **-40°C** 至 **125°C** 的温度范围内运行，符合汽车电子委员会 **Q100** 的 **1** 级标准。

以太网 **PHY** 还需通过以太网合规性标准测试，确保满足电磁兼容性、电磁干扰方面的互操作性与可靠性要求，同时符合开放联盟 **TC1** 和 **TC12** 标准规定的 **IEEE** 规范，方可再在车载环境中运行。凭借信号质量指示、时域反射测量和静电放电传感器等先进诊断功能，**PHY** 可检测错误发生时，识别故障并使主机系统主动响应。例如，如果发生静电放电 (ESD)，**PHY** 会向 **SoC** 和媒体访问控制发送中断信号以发出事件警报，然后检查系统中的其他器件。

以太网 **PHY** 还能通过单对以太网电缆唤醒远程 **ECU**，该技术基于开放联盟 **TC10** 规范的唤醒与休眠技术，从而无需额外布线即可唤醒处于休眠状态的 **ECU**。**IEEE 802.1AE** 介质访问控制安全 (**MACsec**) 技术同样至关重要，它能够实现网络 **ECU** 的身份验证，并对数据进行加密/解密以防范网络攻击，网络攻击正是汽车网络面临的最大威胁。

其他以太网 PHY 包括：

- 德州仪器 (TI) 的 [DP83TC812-Q1](#)、[DP83TC815-Q1](#)、[DP83TC814-Q1](#) 100BASE-T1 PHY 具备适用于豪华车型的下一代特性，而体积更小的 [DP83TC813-Q1](#) 100BASE-T1 PHY 在印刷电路板空间有限的场景中更具吸引力。[DP83TG720-Q1](#) 和 [DP83TG721-Q1](#) 可将区域模块连接至数据密集型功能单元，例如中央计算系统和远程信息处理控制单元，为后续型号增加新功能预留了空间，且无需对线束进行大规模改动。综合来看，这些 PHY 接口为道路上性能更先进和功能更强大的车辆铺平了道路。
- 德州仪器 (TI) 的单对以太网 PHY 产品组合在封装或引脚配置上均与德州仪器 (TI) 的 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 PHY 兼容。采用单板设计，能在未来的开发中升级功能集或带宽，而无需改动硬件。这种方法有助于加快开发周期、满足不同 OEM 的要求并缩短上市时间，从而节省研发成本。
- [DP83TD555J-Q1](#) 10BASE-T1S 串行外设接口 MAC PHY 无缝集成到现有的以太网主干网络中，在连接传统 CAN/LIN 边缘节点时无需使用协议转换网关及其相关的延迟和处理开销。该器件支持数据线供电，可通过单根双绞线电缆提供电源和 10Mbps 数据，有效减轻线缆重量并降低系统成本。内置 PHY 冲突规避机制提供确定性调度，为每个网络节点保障传输机会，确保通信时序可预测。更大的以太网帧有效载荷，能够从车辆边缘的 ECU 中提取更大的数据量与更多样化的数据类型，在维持实时性能的同时，为高级诊断和远程无线升级提供了便利。

结语

汽车以太网技术的进步将使汽车制造商能够为新车提供更多功能。采用以太网的区域架构将提供支持下一代自动驾驶功能所需的数据容量，加速向软件定义车辆的转型，从而打造更安全、更智能的道路交通环境。

其他资源

- 阅读白皮书，“[汽车区域架构中的 TSN：启用以太网环形架构和 AVB 分布式音频](#)”、了解时间敏感型网络如何提高汽车网络的可靠性。
- 如需区域架构的更多信息，请参阅白皮书，“[区域架构如何为全软件定义车辆铺平道路](#)”。
- 有关开放联盟 TC10 规范的更多信息，请查看应用手册“[DP83TC812-Q1 TC10 系统时序测量](#)”。

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