*Technical White Paper*

# *汽车雷达的发展：为什么汽车以太网和 **PoDL** 正在重新定义传感架构*

*Hillman Lin*

## 摘要

现代自动驾驶汽车需要高带宽雷达数据，因此必须转向汽车以太网。为防止布线重量和复杂性的增加，本文建议采用数据线供电 (PoDL)。PoDL 将电源和数据集成到单根电缆中，从而更大限度地减少线束质量，并可能降低传感器成本，从而优化下一代传感架构的热管理。

## 内容

**1 简介**.....2
**2 关于当前传统部件通信拓扑和以太网优势的问题说明**.....2
**3 以太网的优势**.....2
**4 关键障碍：以太网转型中的电力输送**.....2
**5 答案：数据线供电 (PoDL)**.....3
**6 实现挑战和缓解方案**.....3
**7 结语**.....5

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。



English Document: STDA053
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

# 1 简介

随着汽车行业从高级驾驶辅助系统 (ADAS) 2+ 级向完全自主的 3 级和 4 级过渡，对高分辨率成像雷达的需求日益增长。这一演进需要从传统的通信协议转向汽车以太网。然而，向高带宽数据的转变带来了一系列衍生挑战：汽车中使用的雷达数量增加、每个雷达的功率需求增加，以及由此产生的接线物理功率损耗。

本文探讨了数据线供电 (PoDL) 如何成为以太网向雷达转变的关键促成因素。通过将电源和高速数据聚合到单根双绞线上，PoDL 解决了现代汽车设计面临的核心制约因素：重量、成本限制、热管理和架构可扩展性。

# 2 关于当前传统部件通信拓扑和以太网优势的问题说明

传统上，雷达传感器依赖于 CAN、LIN 等低带宽协议。这些协议虽然足以进行简单的物体检测，但由于以下几个原因无法满足现代雷达系统的要求：

- **带宽瓶颈**：高分辨率成像雷达会产生大量原始数据流，使传统总线不堪重负。ADAS 2+ 和 3+ 级的标准要求在雷达应用中使用更多天线、更宽的带宽以及原始数据输出。
- **局部计算**：由于 CAN 和 LIN 无法支持所需的吞吐量，因此大多数雷达处理必须在专用雷达 ECU 中执行，而不是在中央计算或 IVI 系统中执行。因此，ADAS 栈可用的原始数据较少，这降低了测量精度和整体系统性能。
- **延时和抖动**：实时自主决策需要确定性的数据传输。传统协议缺乏将雷达数据与不同传感器同步所需的强大时间敏感型网络 (TSN) 功能。
- **复杂拓扑**：传统的汽车系统是多个接口的组合：用于雷达的 CAN 接口和用于主干通信的以太网。这种组合引入了复杂的系统硬件和软件开发。

传统系统需要单独的电源线束和数据线束，因此增加了车辆电气架构的复杂性。

# 3 以太网的优势

汽车以太网（10BASE-T1S、100BASE-T1 和 1000BASE-T1）提供统一的主干，支持范围从成本可能较低的角雷达到高性能远距离传感器，同时还能提供安全关键型传感器融合所需的确定性性能 (TSN)。主要原始设备制造商 (OEM) 和一级供应商现在指定下一代雷达平台采用以太网。

该行业还朝着在中央计算单元中进行原始数据处理的方向发展，以提升 ADAS 和自动驾驶能力。将原始雷达数据从雷达 ECU 传输到中央 ADAS 处理器需要速度更高的链路：通常需要 100Mbps、1Gbps 甚至更快的速度。因此，从 CAN 或 LIN 到以太网的转换正成为现代自动驾驶架构的关键促成因素。

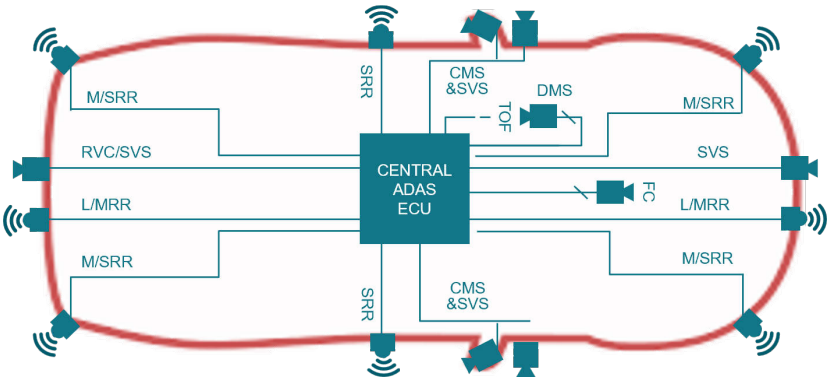



**图 3-1. 汽车中的雷达**

# 4 关键障碍：以太网转型中的电力输送

虽然迁移到以太网可以解决数据带宽问题，但如果未考虑电力输送，迁移会产生显著的物理层开销。在不使用数据线供电 (PoDL) 的传统以太网实现中，每个传感器都需要两个单独的电缆对：一个用于数据，一个用于电源。

同时，行业正在从传统的三雷达架构（前置、后置和侧置）转向每辆车使用五个甚至八个雷达的配置。每个额外的雷达都会增加一个馈电，因此电源线束的数量成比例增加。



English Document: STDA053
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

因此，数据线供电变得至关重要，因为其允许传输以太网数据的同一根双绞线同时提供所需的电源电压，从而无需额外的仅电源接线，并降低了线束的整体重量、成本和复杂性。

**分离电源线和数据线的影响：**

传统的雷达接口实现需要对电源线和数据线进行分离。这种分离带来了如表 4-1 所示的以下缺点。

**表 4-1. 传统雷达接口实现的缺点**

| | CAN + 电源 | 以太网 + 电源 | 以太网 + PoDL |
|---|---|---|---|
| 每个传感器的电缆重量 | 0.07kg | 0.08kg | 0.03kg |
| 每个传感器的电缆成本 | 0.45 美元 | 0.90 美元 | 0.30 美元 |
| 电缆束和连接器的数量 | 2 | 2 | 1 |
| 连接器数量（未更改） | 2 | 2 | 1 |

- **重量和成本**：由于带宽限制和不确定的延迟，基于 CAN 的雷达设计需要更多的总线和节点。
- **线束复杂性和安装风险**：当每个雷达传感器都配有专用电源线束和单独高速数据电缆时，线缆束很快就会变得笨重而不实用。在空间狭窄的位置（例如前保险杠、后角碰撞区或底板下梁），大直径线缆束在布线时很难避免弯曲超出线缆束的最小半径，而这可能会导致绝缘层开裂。每个增加的导线或连接器都会引入一个新的故障点。车辆采用环视雷达架构时，这种负面影响会加剧。仅添加两个模块就可能使电源线数量翻倍、以太网插孔数量翻倍且铜总质量增加数百克。这些额外的铜不仅增加了重量和成本，还提高了配电网络中的 $I^2R$ 损耗，这意味着更多的电池能量在到达传感器之前就以热量的形式被浪费了。
- **热管理**：电源线会产生局部热量。在高密度线束中，这会使冷却变得复杂，并导致电源连接在远距离传输时出现压降。局部散热不仅可以降低从电源线缆束传导至雷达位置的热量，还可以减少汽车电源线中的热损耗。

## 5 答案：数据线供电 (PoDL)

PoDL（基于 IEEE 802.3bu 标准）支持通过用于 100Base-T1 和 1000Base-T1 数据的同一根双绞线提供直流电源。在 ECU 或网关处使用电源设备 (PSE)，并在雷达处使用用电设备 (PD)，系统可以提供高达 50W 的功率，远高于大多数雷达模块小于 10W 的典型要求。

通过将电源和高速数据聚合到单根双绞线中，PoDL 有效地消除了单独线路架构中固有的效率低下问题。这种整合通过减少铜的质量和所需连接器数量，提供直接的重量和潜在的成本优势。由此产生的更细线束显著简化了布线，使电缆可以轻松集成到保险杠和格栅等空间狭小的区域中，笨重的独立线缆束在这些区域中容易损坏和弯曲疲劳。

此外，转用 PoDL 可更大限度地减少端接点数量和潜在的失效模式（例如摩擦或连接器错位），从而显著降低安装风险。除了组装之外，该架构还提高了热效率和电气效率。通过在雷达周围采用局部电源连接，可以降低中央电源线缆束产生的热损耗。局部电源连接还可缩短电缆长度并降低 $I^2R$ 损耗，从而高效地提升电力输送效率。PoDL 还使雷达设计具有更高的可扩展性，从而支持部署需要更多数据带宽和更高功率负载的高天线数成像雷达，而无需承受传统布线那种不成比例的重量和复杂性代价。

## 6 实现挑战和缓解方案

向高速数据线注入直流电源会带来信号完整性风险。增加差模电感 (DMI) 网络可降低线路上的差分阻抗，从而导致回波损耗恶化。两个导体之间的不平衡会产生共模电流，从而导致模式转换并加剧电磁辐射。添加串联电感可降低较低频率端的差分阻抗，并导致压降性能降级。

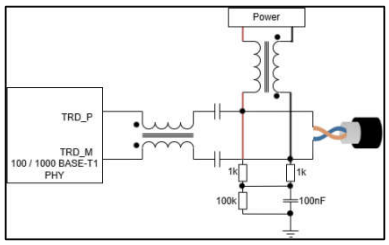



**图 6-1. PoDL 网络示例**


Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

**缓解策略**

- **磁性元件选择：**使用为 PoDL DMI 网络而设计的专用高隔离度磁性元件。DMI 网络的差分阻抗和耦合因子对 PoDL 性能有显著影响。

  增加 DMI 网络的电感值有助于改善回波损耗和压降。DMI 网络通常会在低频端增加额外的差分阻抗。增加电感值会使差分阻抗恶化转至较低的频率范围，并防止在工作频率范围内产生任何影响。

  与双隔离电感 DMI 网络相比，选择耦合电感 DMI 网络可降低模式转换因子。耦合 DMI 网络可滤除线路上的任何共模噪声，以帮助进行模式转换。此外，双隔离电感 DMI 网络的两个电感之间通常有一定的容差差异。具有更高的耦合因子可进一步降低差分噪声，并提供更好的模式转换测量结果。耦合 DMI 网络的另一个优势在于，通过增加互感因子，可提高线路上的差分电感或阻抗。

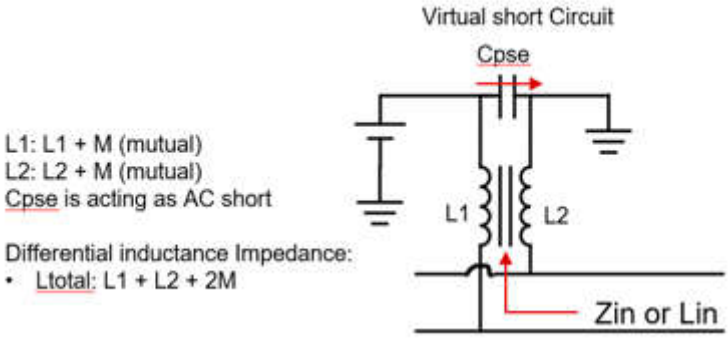



**图 6-2. PoDL 网络的阻抗计算**

  但是，较高的电感值通常会降低 DMI 网络上的电流支持。如果客户希望在大电流支持应用中获得更好的信号性能，则增加 DMI 网络的规模是 DMI 网络需要权衡的取舍：

- **功率损耗优化**：在雷达应用的高压系统中，CMT 网络的额外功耗始终是一个需要关注的问题。例如，在 48V 系统中，PSE 和 PD 电路板上始终存在额外的功耗 $V^2/R$。但是，图 6-3 中的以下 PoDL 设计可能有助于解决这种功率损耗情况。

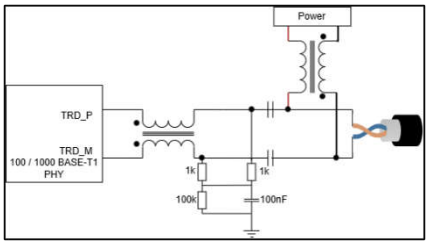



**图 6-3.**

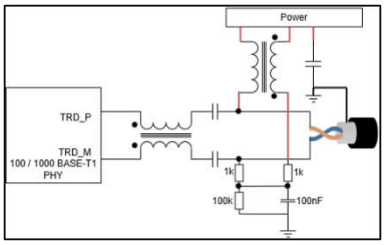



**图 6-4. PoDL 网络的设计 1 和设计 2，用于解决功率损耗问题**

- **设计 1（左图）**：将共模终端移至交流耦合电容之前。此设计完全消除了共模终端处的功率损耗。
- **设计 2（右图）**：将两根电线连接到正极电源，并使用电缆屏蔽层作为接地基准。此设计还消除了共模终端的功率损耗，是屏蔽电缆的常用方法。

- **PCB 布局优化**：对于严格的去耦网络优化和受控阻抗布线，请遵循布局说明以进一步提升信号完整性性能：
  - 将 DMI（差模电感）网络与 MDI 线路布置在同一层。
  - 直接在 DMI 封装上连接过孔，并在顶层将过孔与 MDI 线一起布线。
  - 尽量减少 DMI 和 MDI 线路之间的残桩。
  - 防止过孔过于靠近 DMI，以避免任何阻抗下降和模式转换。
  - 将底层的电源和接地多边形覆铜与 DMI 网络连接起来。
  - 在 DMI 和 CMC 网络下方留空。



English Document: STDA053
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

- TI 建议在底层放置共模终端。
- 使 MDI 线路和 DMI 网络保持对称。

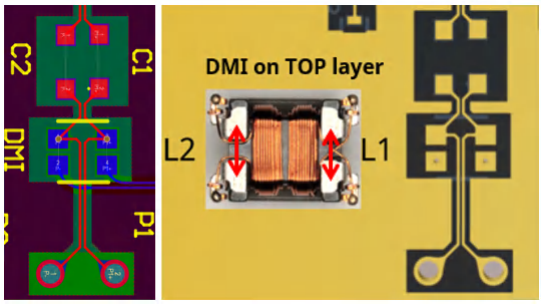



**图 6-5. PoDL 布局建议**

- **PoDL 网络的其他实现注意事项**：
  - **电缆选择**：电缆的额定值必须同时满足以太网所需的差分阻抗 (100Ω) 和 PoDL 负载所需的载流能力。
  - **安全性和可靠性**：实现必须遵循严格的汽车安全标准 (ISO 26262)，以防止电源故障危及安全关键型传感数据流的数据完整性。实现应采用 PSE 源器件，以在出现过流或欠流、意外分类、反向电压或电流保护时停止电力传输。

## 7 结语

将雷达传感器从旧的 CAN 或 LIN 总线切换到汽车以太网，可为驾驶辅助和自主系统提供必需的带宽和时序。问题在于，仅以太网仍需单独的电源接线，这会增加重量、成本和复杂性，尤其是在汽车的雷达数量从三个增加到五个或八个的情况下。

数据线供电 (PoDL) 通过同一根双绞线传输电力和发送高速数据，从而解决了这一问题。PoDL 减少了电缆数量，减轻了线束重量，并可能降低成本；其使布线更加简单，同时仍支持原始数据处理所需的高速链路。

简而言之，PoDL 是一种可让以太网完全取代汽车雷达传统协议的方案；其为当今和未来的自动驾驶提供了更轻便、潜在成本更低且可扩展的传感器网络。


Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

# 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