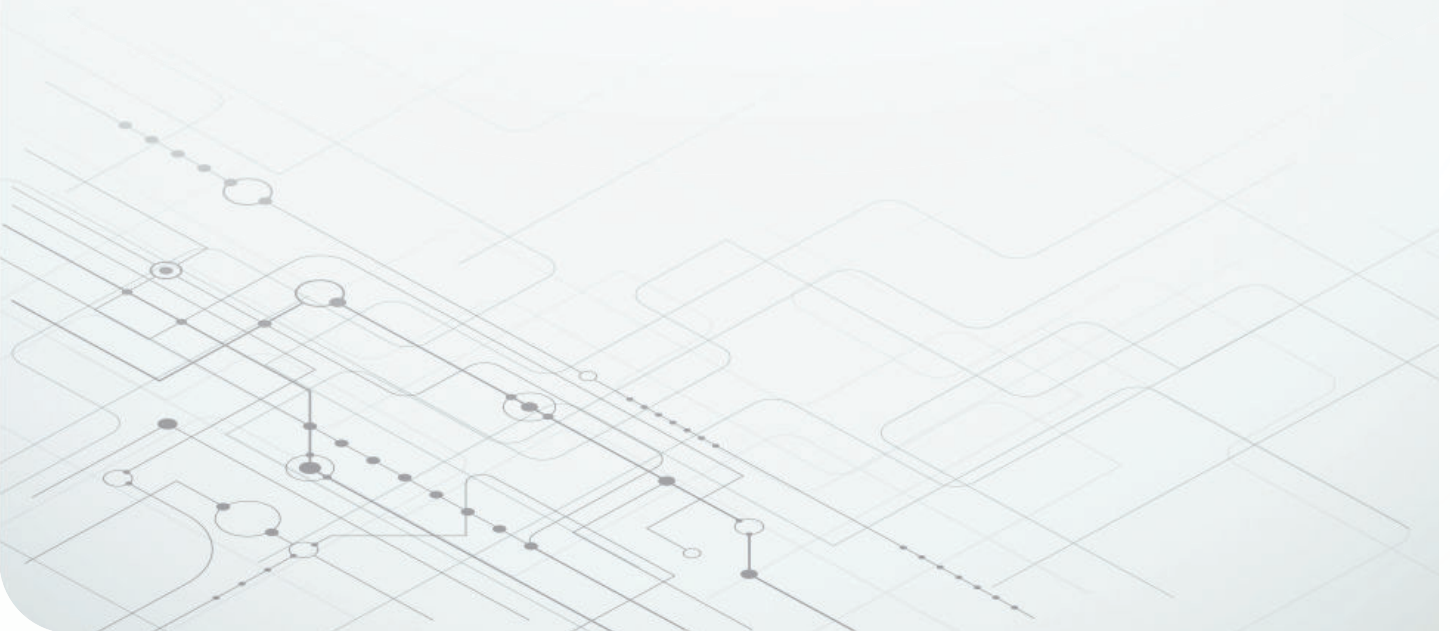


从检测到决策：深度解析下一代 ADAS



Taylor Gage
Systems Engineer
Automotive ADAS



内容概览



1 传感器融合

雷达、激光雷达和摄像头的集成，为 ADAS 在真实环境中的安全运行提供了必要的冗余与交叉验证



2 端到端 ADAS

自动驾驶汽车的成功取决于高级驾驶辅助系统 (ADAS) 在感知、计算、通信和执行之间的协同配合



3 支撑性基础设施

半导体技术的进步决定了系统能否可靠运行，以及能否扩展至 Level 3 以上的自动驾驶等级

简介

汽车自动驾驶的发展速度超出了大多数人的预期，但实现底层技术提升所需面对的工程挑战也随之增加。仅靠增加传感器数量或提升计算能力，并不能让车辆达到更高的 SAE 等级。车辆必须持续获得关于周边环境的精准感知数据，使其即使在雾、暴雨、眩光或道路碎片等恶劣环境条件下，也能处理复杂情况并在毫秒内采取行动。

政府和行业不断出台更严格的安全认证、可靠性和成本约束要求，并持续影响设计决策。汽车制造商面临的真正挑战，是构建一个完整的端到端 ADAS 平台，使其能够在毫秒级时间内安全、可靠地将检测结果转化为驾驶决策。这些更智能、具备环境感知能力的车辆能否成功，并不取决于单一系统的先进程度，而取决于所有系统能否实现无缝协同。

背后的驱动因素

曾经仅限于豪华车型的驾驶辅助功能，如今已成为现代车辆的标准配置。在消费者需求的推动下，市场已全面迈入汽车工程师学会 (SAE) J3016 Level 2 自动驾驶阶段。车道保持辅助和自适应巡航控制已成为标准配置，而自动泊车和高速领航辅助功能也正逐步进入中端及入门级车型。对于大多数汽车制造商而言，Level 2 及更高级别的自动驾驶已成为开发的起点。

政府法规同样在推动先进技术的开发与应用，以提升车辆安全性。当前法规要求包括驾驶员监测系统（用于确保驾驶员注意力保持在道路上）、用于避免碰撞的自动紧急制动，以及盲点检测和乘员监测系统，以防止儿童被遗留在无人看管的车辆中。虽然具体要求因地区而异，但全球监管机构（从美国国家公路交通安全管理局到欧盟委员会，再到中国工业和信息化部）都有着共同目标：保障驾驶员、乘客以及弱势道路使用者的安全。

要应对这些挑战，并在全球范围内提供安全可靠的自动驾驶汽车，汽车制造商需要在四个领域推动创新：

- 感知：系统捕获并理解周边环境。
- 计算：利用处理后的数据驱动实时驾驶决策。
- 通信：在全车范围内传输海量的原始数据和处理后的数据。
- 响应：智能底盘系统（如线控系统）在毫秒内将决策转化为实际行动。

感知：洞察周边环境

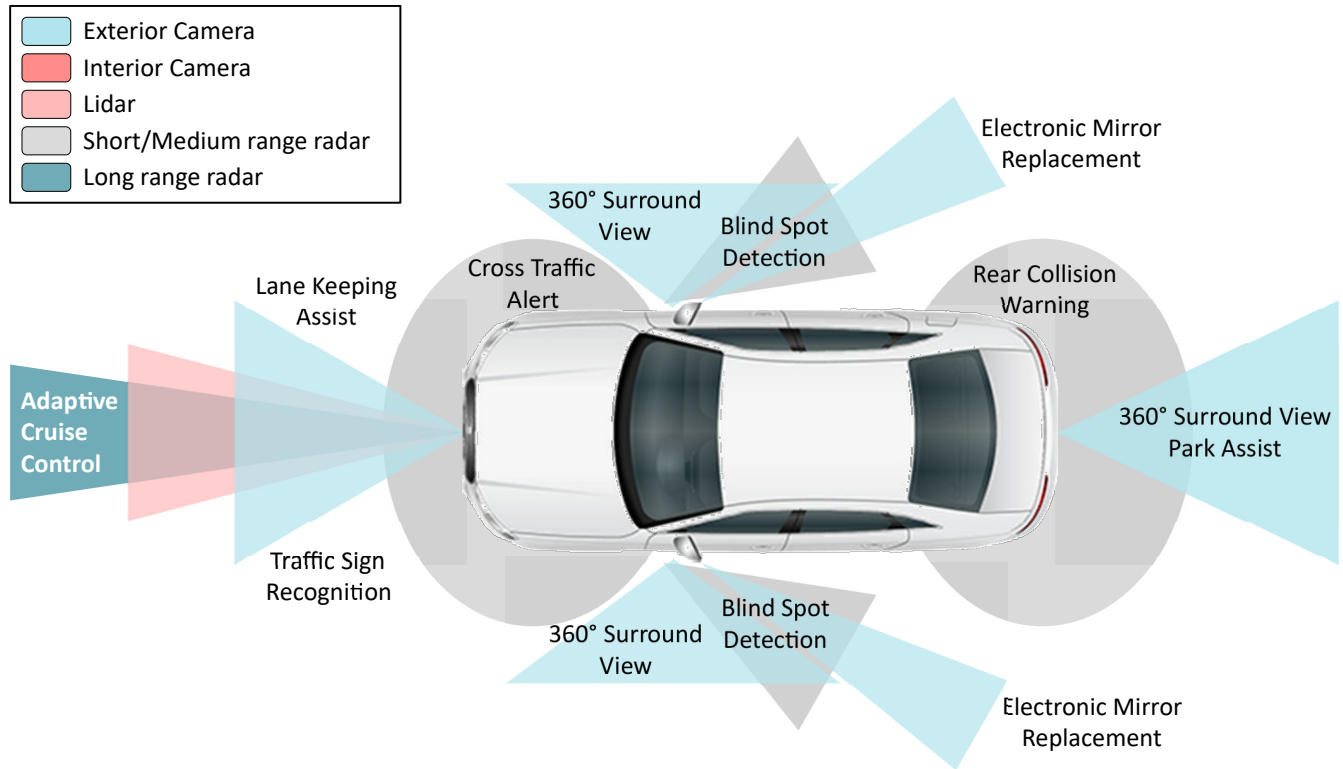


图 1. 按传感器类型划分的车辆覆盖范围

在任何时刻都能全面地感知车辆周边环境，是 ADAS 设计中面临的重大工程挑战之一。看似简单的问题，往往会迅速演变为重大瓶颈。如图 1 所示，该图展示了各类传感器在车辆上的典型覆盖范围。每种类型的传感器都有各自的优缺点，没有任何单一传感器能够独立提供车辆周边环境的全面视图。

ADAS 设计中的传感器考量因素

雷达擅长通过调频连续波 (FMCW) 测量进行距离和速度感知；即使在雾天、雨天或弱光环境下，也能基本不受环境条件影响地提供相关信息。高分辨率毫米波 (mmWave) 雷达传感器在超过 300m 的范围内持续提升探测精度，使车辆能够更早发现目标。

雷达传统上的不足在于低分辨率和高动态范围场景中的物体分类能力。然而，先进的 4D 成像雷达正在缩小这一差距，从而实现以往标准毫米波雷达无法达到的物体分类精度和高度探测能力。即便取得了这些进步，单凭雷达仍无法提供像摄像头那样丰富的颜色、文本及物体分类信息。

激光雷达提供了互补优势，尤其是在远距离分辨率方面。传统激光雷达系统采用飞行时间测量技术，通过近红外光构建车辆周边环境的精细 3D 地图，并获取物体的距离、形状和相对位置等信息。在感知并绕道路障碍物或在复杂地形中进行精细操控等复杂场景下，这些数据至关重要。

在远距离场景下，扫描式激光雷达具有功耗低和人眼安全等优点，但其对电机驱动转镜的依赖会产生机械应力，从而缩短使用寿命。在短距离场景下，闪光式激光雷达因取消了运动部件而得到快速普及；它能够同时触发阵列中的所有激光器，并在单帧中捕获完整场景。

闪光式激光雷达系统比扫描式系统更小巧、更易实现，但由于必须满足人眼安全要求所需的激光输出功率限制，因此无法支持远距离应用。虽然雾雪等恶劣天气仍是激光雷达面临的挑战，但激光脉冲激光雷达接收器技术的进步正在提升其在此类条件下的性能。工程师们正致力于将

FMCW 激光调制技术引入汽车激光雷达，以提升可靠性、减小所需孔径尺寸，并增加物体速度数据。

摄像头完善了三种感知模式，能够提供雷达和激光雷达无法实现的能力：颜色、文本以及丰富的物体分类数据。摄像头能够准确识别路标、交通灯和行人。车道保持辅助等功能完全依赖于摄像头系统，因为道路上的车道线是二维的，雷达或激光雷达无法检测到。然而，在三种感知模式中，摄像头最容易受到环境因素影响。弱光环境、强光眩光以及镜头上的泥污等杂物，都可能使摄像头系统实际上处于“失明”状态。

传感器融合。每种感知模式都有其擅长的场景，也有其存在不足的环境。因此，汽车制造商开始通过传感器融合实现更高等级的自动驾驶，即结合两种或多种感知模式，而非仅依赖单一模式。例如，将用于物体探测的雷达与用于物体分类的摄像头结合，可通过跨传感器验证和基于一致性的决策机制提升感知精度。多种传感器类型还能提供冗余设计，从而提升安全性。如果摄像头因光线不足而“失明”，雷达或激光雷达系统可以补充必要的视野，确保车辆安全运行。融合不同模式的传感器数据，能够集颜色感知、高分辨率、物体速度感知以及对抗恶劣天气的高鲁棒性等优势于一身。

利用传感器融合精准识别物体

传感器融合不仅能够应对恶劣天气和光照条件问题，还能解决更复杂的挑战。例如，如图 2 所示，不列颠哥伦比亚省多个地方政府曾设置一种名为“Pavement Patty”的视觉错觉装置。

这种路面图案旨在让超速驾驶员受到惊吓并减速，其视觉效果看起来像是一名儿童正在道路中央追逐皮球。实际上，这只是一个以特定角度铺设的 8 英尺乙烯基贴纸，用于在人眼中制造 3D 视觉错觉。问题在于，这种错觉同样会误导摄像头系统。纯粹依赖图像数据的自动驾驶汽车会判断车辆前方有儿童奔跑，从而采取紧急制动甚至驶入对向车道等激烈动作。由于图像传感器擅长物体分类，但并不擅长物体探测，因此可通过增加雷达或激光雷达传感器来避免这种误判。此时，当摄像头检测到道路上存在物体或行人时，系统可以利用擅长物体探测的传感器进行交叉验证。此时，雷达或激光雷达系统会正确识别前方道路不

存在危险，而整个 ADAS 系统则能够判断摄像头产生了“虚假危险”感知，从而避免执行危险操作。

这类视觉错觉原本旨在提醒人类驾驶员保持注意力并安全驾驶，但对于本就会遵守限速并持续监测环境的自动驾驶汽车而言，却会迫使其处理实际上并不存在的危险，从而带来挑战。“Pavement Patty”是一个极具代表性的案例，它揭示了每种感知模式都存在盲点。融合雷达、激光雷达和摄像头的传感器数据，能够提供实现更高等级自动驾驶所需的冗余与交叉验证，从而避免此类模糊场景。

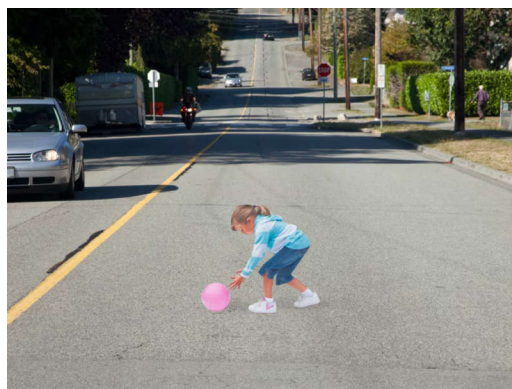


图 2. 加拿大温哥华的“Pavement Patty”3D 视觉错觉装置

计算：将感知数据转化为驾驶决策

感知环境数据只是自动驾驶运行的第一步。车辆必须将这些数据转化为完整的周边环境图像，并在毫秒内做出实时决策。在当今的许多车辆架构中，针对特定应用的数据处理是在传感器端完成的。例如，远程前向雷达可能是自适应巡航控制的唯一输入来源。随着自动驾驶技术的发展以及传感器融合程度不断提高，数据处理正从边缘侧转向集中式架构。

集中式计算单元具有多项优势，包括提升处理效率、简化软件更新部署以及增强功能扩展性，因为更换边缘侧传感器不再需要对整个电子控制单元或软件进行全面改造。

传感器融合应用和自动化决策需要专用计算加速器，例如神经处理单元、视觉数字信号处理器 (DSP) 以及雷达快速傅里叶变换加速器。这些技术有助于构建机器学习 (ML) 和预测性人工智能 (AI) 网络，从而在道路行驶过程中做出复杂的实时决策。德州仪器 (TI) 的 TDA5 驾驶辅助系统级芯片集成了多个计算域，可在单一封装内同时实现传感器处

理、实时控制和机器学习任务。参考设计和软件还能帮助工程师缩短开发周期，并更快实现量产。

通信：车辆的主干

可靠的传感和高性能计算固然重要，但如果没有高带宽、低延迟且长距离的通信系统网络，这些功能将处于彼此隔离的状态。如图 3 所示，一系列针对特定数据输入类型和任务需求定制的通信协议，将分布在全车各处的系统连接在一起。

诸如摄像头等高速、数据密集型应用，其连接至计算单元的电缆长度往往超过 10m。串行器和解串器 (SerDes) 为数据提供非对称传输管道：正向通道速率超过 7Gbps，而

双向通信则采用串行外设接口 (SPI) 或内部集成电路 (I²C) 等低速反向通道协议。

虽然 SerDes 技术传统上仅用于摄像头应用，但随着雷达和激光雷达系统技术不断演进，能够将原始数据直接发送至中央计算单元的流式架构逐渐兴起，而这同样需要 SerDes 提供高速性能支持。随着这些应用不断扩展，时间同步变得至关重要。这不仅能够防止雷达或激光雷达之间产生干扰，还能支持高分辨率级联雷达配置，而此类配置高度依赖传感器之间严格的时间耦合。有关具体示例，请参阅[适用于汽车前向雷达的单芯片毫米波流式雷达参考设计](#)。

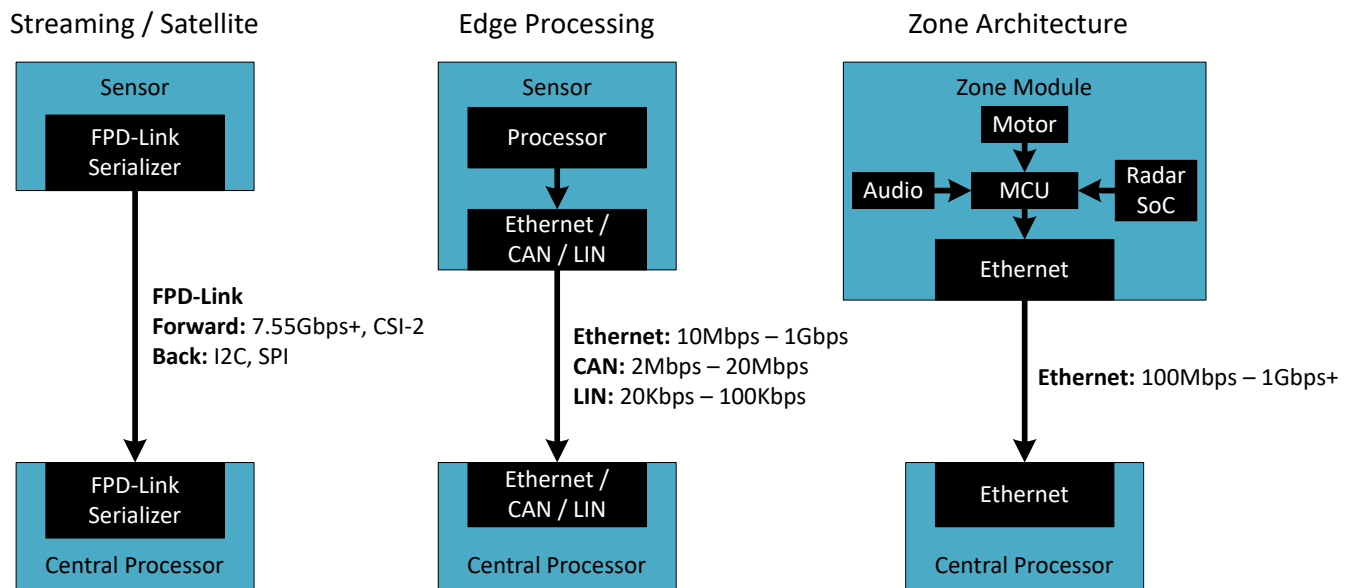


图 3. 支持不同车辆架构的各类网络协议及带宽的图表

除了 SerDes 之外，**汽车以太网**也已成为可靠的车载网络协议。以太网可连接各域控制器，并支持分布式处理及区域架构。对于需要独立计算单元的 ADAS 和信息娱乐应用，以太网提供了长距离双向信号链，并集成了媒体访问控制安全 (MACsec) 等安全特性，以满足日益增长的网络安全需求。

此外，以太网还支持严格的时间同步，确保整车范围内的数据与决策保持一致。在区域架构中，以太网可将角雷达、座椅电机控制和音频信号等多个数据源，以及控制器局域网 (CAN) 和本地互连网络 (LIN) 等传统协议，汇聚为

发送至中央计算单元的单一输出，从而降低布线成本和复杂度。10BASE-T1S 等标准将以太网连接扩展到了区域内的低带宽终端节点，进一步简化了布线并降低了成本。这种区域网络架构直接推动了软件定义汽车的实现，使车辆在出厂后仍可通过无线 (OTA) 更新获得新功能和新技术，从而减少对昂贵硬件修订的需求。要了解有关此主题的更多信息，请参阅文章“[以太网如何加速向软件定义汽车转型](#)”。

尽管区域架构和流式 ADAS 传感器推动了对以太网和 SerDes 的需求，但 CAN 和 LIN 对于整车中的控制系统仍

然不可或缺，包括座椅电机、后处理雷达数据以及照明系统。对于 ADAS 感知或动力总成等高性能应用，CAN 灵活数据速率 (CAN FD) 提供了支持双向命令传输的多主站拓扑结构。而对于暖通空调系统和座椅电机等较简单的应用，CAN FD Light 则提供固定比特率和单主站拓扑结构，从而降低终端节点和区域控制器的成本与复杂度。

随着车辆自动驾驶等级的提升以及架构不断演进，设计人员需要更灵活的网络方案，以支持精确的时间同步、功能安全和网络安全防护。

响应：将数据转化为行动

传感和计算固然重要，但如果无法转化为实际动作，就毫无意义。更全面的数据、更先进的计算能力以及更快速的通信，正汇聚于自动驾驶运行的最后一步：让车辆执行动作。**智能底盘系统**增加了关键的执行层，可将驾驶辅助决策转化为精确的物理响应；线控技术则能够在毫秒级时间范围内提供更高的控制精度和性能。

随着这些系统日益复杂，预测能力将基于经过验证的真实世界数据来缩短反应时间，从而即时规避风险，在驾驶员意识到危险之前保护乘客和行人。图 4 展示了此类过程的一个示例。

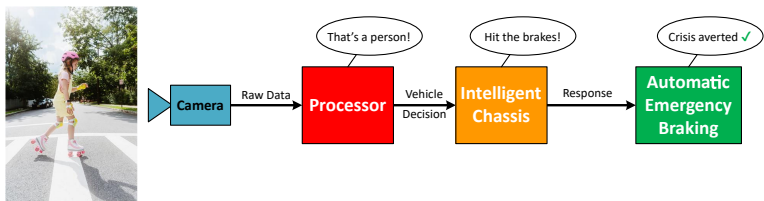


图 4. 从检测到决策的流程图

幕后功臣：成就一切的 IC 技术

即便最先进的 ADAS 平台，也依赖于模拟半导体和嵌入式处理器的支持，它们承载着全车的各大系统。体声波和**电源管理集成电路 (IC)** 在更广泛的自动驾驶讨论中常被忽视，但它们提升了感知、计算和网络层面的系统性能，确保这些系统在现实路况下能够可靠运行。TI 在设计这些器

件时，立足于整车架构进行全局考量，而非仅仅针对单一应用。

结语：迈向更高阶的自动驾驶之路

未来十年，自动驾驶技术的每一个层面都将迎来重大突破。FMCW 激光雷达将在已具备高精度的测距基础上，提供更加精确的速度和方向数据。更先进的 AI 模型将能够应对复杂驾驶环境以及当前系统尚无法处理的边缘工况。随着瓶颈从硬件转向软件，OTA 更新将为汽车制造商提供一条基于 Level 3 硬件实现 SAE J3016 Level 4 自动驾驶的路径。智能底盘系统将利用实时信息将数据转化为实际动作，从而提供更加平稳、响应更灵敏的驾乘体验。

这些技术早已跨越了概念阶段。随着采用规模持续扩大，成本不断下降，原本因成本过高而难以实现的设计也得以具备更高的安全水平。完全自动驾驶依赖于车辆中各系统之间的无缝集成。通过在传感、处理、连接和执行领域持续推动创新，TI 正帮助全球汽车制造商为世界各地的驾驶员打造更安全、更智能的车辆。

关于作者

Taylor Gage 是 TI 汽车 ADAS 工程与营销团队的系统工程师，专注于外部感知领域，包括摄像头、雷达和激光雷达系统设计。他利用在 FPD-Link 网络和 TI 雷达产品组合方面的专业知识，帮助 OEM 厂商和一级供应商推进自动驾驶技术发展，并开发更安全的车辆。Taylor 获得了德克萨斯农工大学电气工程学士学位，目前正在南卫理公会大学攻读 MBA 学位。

重要声明：本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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