

Technical White Paper

无传感器感知：为什么 Wi-Fi 是明智之选



Maddy Marsh

摘要

Wi-Fi® 感知是一项快速兴起的技术，它将现有 Wi-Fi 基础设施转变为能够追踪运动的非侵入式空间感知传感器。依托边缘人工智能 (AI) 的最新进展，Wi-Fi 感知模型和算法有可能直接在低成本 Wi-Fi MCU 上运行，并利用现有 Wi-Fi 基础设施。本白皮书探讨了 Wi-Fi 感知的目的和优势，以及嵌入式处理和软件的进步如何使各种应用中的实现变得比以往更容易。本文探讨了行业活动，以及 Wi-Fi 联盟和 IEEE 等标准组织如何推进该技术的标准化和互操作性。本文还探讨了为实现这些新兴用例，TI Wi-Fi 正在开发的硬件和软件解决方案。

内容

1 简介.....	2
2 Wi-Fi 感知有哪些优势？.....	2
3 目前业界正在开展哪些活动？.....	4
4 德州仪器 (TI) 如何推动 Wi-Fi 感知的发展？.....	4
5 其他资源.....	5
6 结语.....	5

商标

CCStudio™ is a trademark of Texas Instruments.
Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.
蓝牙® is a registered trademark of Bluetooth® SIG, INC.
Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries or affiliates) in the US and/or elsewhere.
所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

随着全球对智能互联器件的依赖程度不断提升，创新用例不断涌现。Wi-Fi 感知就是在物联网 (IoT) 市场获得关注的技术之一。与需要专用硬件的传统传感器不同，Wi-Fi 感知利用大多数楼宇和器件中已有的无线基础设施，为活动检测和环境感知提供了更具成本效益且更易扩展的设计。

传统上，Wi-Fi 只有一个用途：在器件之间无线传输数据。数据包携带有用的信息，如互联网流量、视频流或网页。Wi-Fi 感知改变了这一传统，它将 Wi-Fi 信号重新用于完全不同的应用场景——检测和分析运动，而不捕获运动所携带的数据。Wi-Fi 感知不关注数据包内的信息，而分析承载这些数据包的 Wi-Fi 信道的质量和特性。

当 Wi-Fi 无线电在空中传输数据包时，信号会遇到信号路径中的障碍物（如墙壁、家具或人）并以复杂模式反射。当物体或人在信号路径内移动时，反射会发生可测量的变化。这些变化可以通过信道状态信息 (CSI) 捕获，CSI 是对物理层属性（如标准 Wi-Fi 无线电数据中已有的 OFDM 子载波上的信号振幅和相位）的详细测量数据。CSI 本质上表征了发射器和接收器之间的 Wi-Fi 信道的当前状态，以提供反映信道周围环境的数据流。通过持续分析 CSI 测量数据，系统可以检测环境中的细微变化，并推断正在发生的运动或活动。

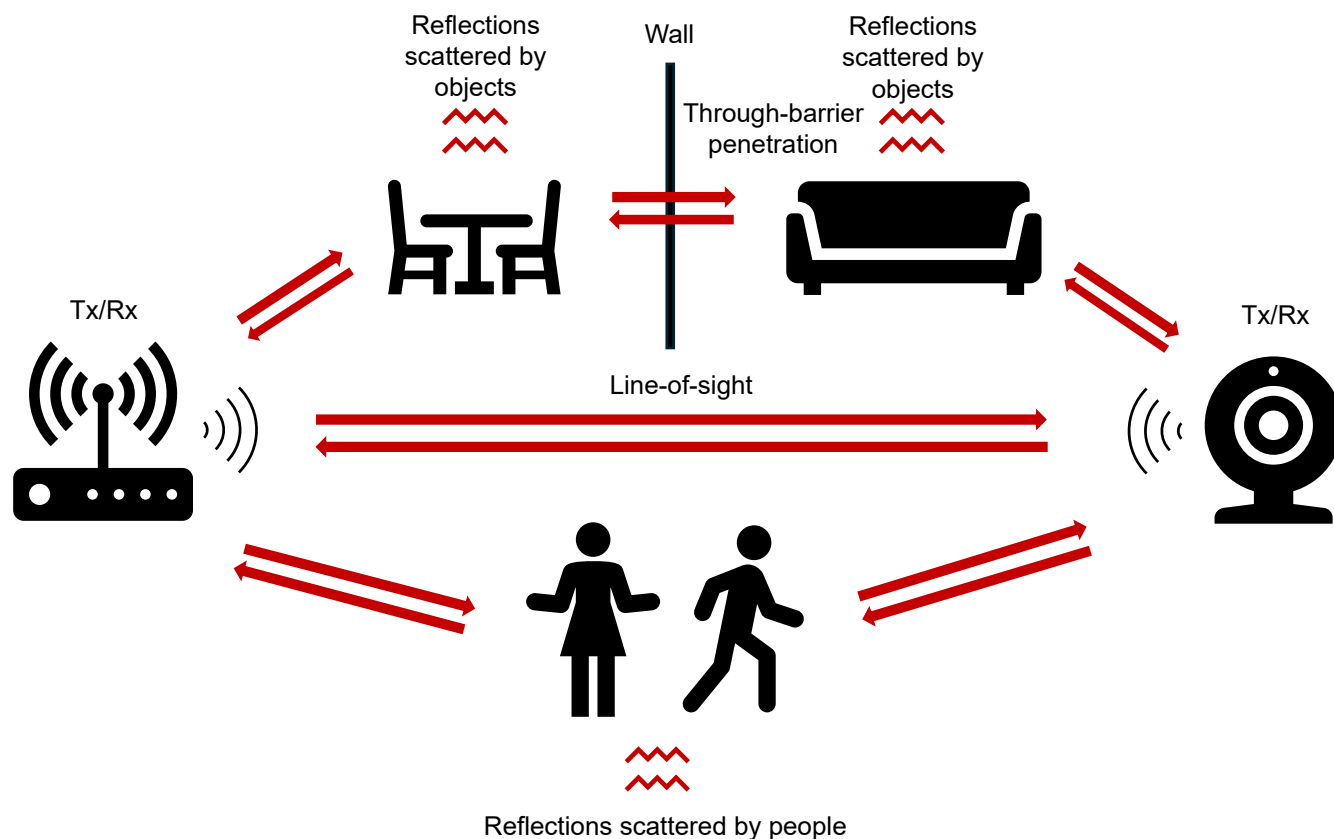


图 1-1. 流程图

原始 CSI 数据需要精密分析才能提取出有意义的洞察。这正是边缘 AI 发挥关键作用的地方，它能够在数据源附近本地运行 AI 模型。经过 CSI 模式训练的机器学习模型可以学习识别特定活动、检测人员是否存在、监测生命体征或识别手势。这些工具使开发人员能够在资源受限的器件上高效训练模型，并将这些模型部署到最终产品中。

2 Wi-Fi 感知有哪些优势？

Wi-Fi 感知具有多项引人注目的优势，使该技术对产品开发人员极具吸引力。首先，该技术利用现有 Wi-Fi 协议和基础设施——信道状态信息可以从 802.11 传输前导码原生的传统长训练字段 (L-LTF) 计算得出。802.11 帧传输时带有 L-LTF，其中包含所有子载波中的已知符号。这使接收器能够提取表示为复数数组的信道状态，每个子载波对应一个复数。对于 20MHz 信道中的 OFDM 传输，有 52 个这样的子载波，产生信道状态中的 52 个复数。通常，信道状态在接收器中用于解码数据载荷，然后被丢弃，但在 Wi-Fi 感知用例中，各个信道状态是值得关注的。

的。通过比较信道状态逐帧变化的方式，可以感知发射器和接收器之间射频信道的物理变化，这些变化对应物体的移动或其他物理变化。

因此，CSI 是 802.11 OFDM 的原生功能，无需修改协议或添加硬件。这意味着在任何现代 Wi-Fi 芯片上都可能启用 Wi-Fi 感知以复用现有 Wi-Fi 网络，而没有额外的系统成本，从而创造一种为互联器件添加感知功能的更具成本效益的方式。

此外，Wi-Fi 信号的运行不受环境光照条件影响，并且由于 Wi-Fi 信号可以穿透物理障碍，Wi-Fi 感知无需保持视线通畅。例如，卧室的智能插座可以检测外面走廊上的运动，这是传统运动传感器无法实现的功能。个人数据隐私是 Wi-Fi 感知所保留的最重要优势之一，因为 Wi-Fi 感知完全依赖标准无线信号，无需摄像头或其他侵入式监控设备。

这些优势已在 IoT 市场开辟了新的应用领域，使 Wi-Fi 能够提供更具成本效益的感知选择。在家庭安全或视频监控中，Wi-Fi 感知具有穿墙功能，可检测摄像头盲区的人员存在情况。智能 HVAC、照明和家电系统使用 Wi-Fi 感知实现能源优化，例如，智能恒温器可以检测到长时间无人状态并降低空调功率，直到住户返回家中。从节能到增强安全性再到健康监测，Wi-Fi 感知是更智能、更具空间感知能力的产品的赋能技术。

Wi-Fi sensing enabled devices for occupancy detection

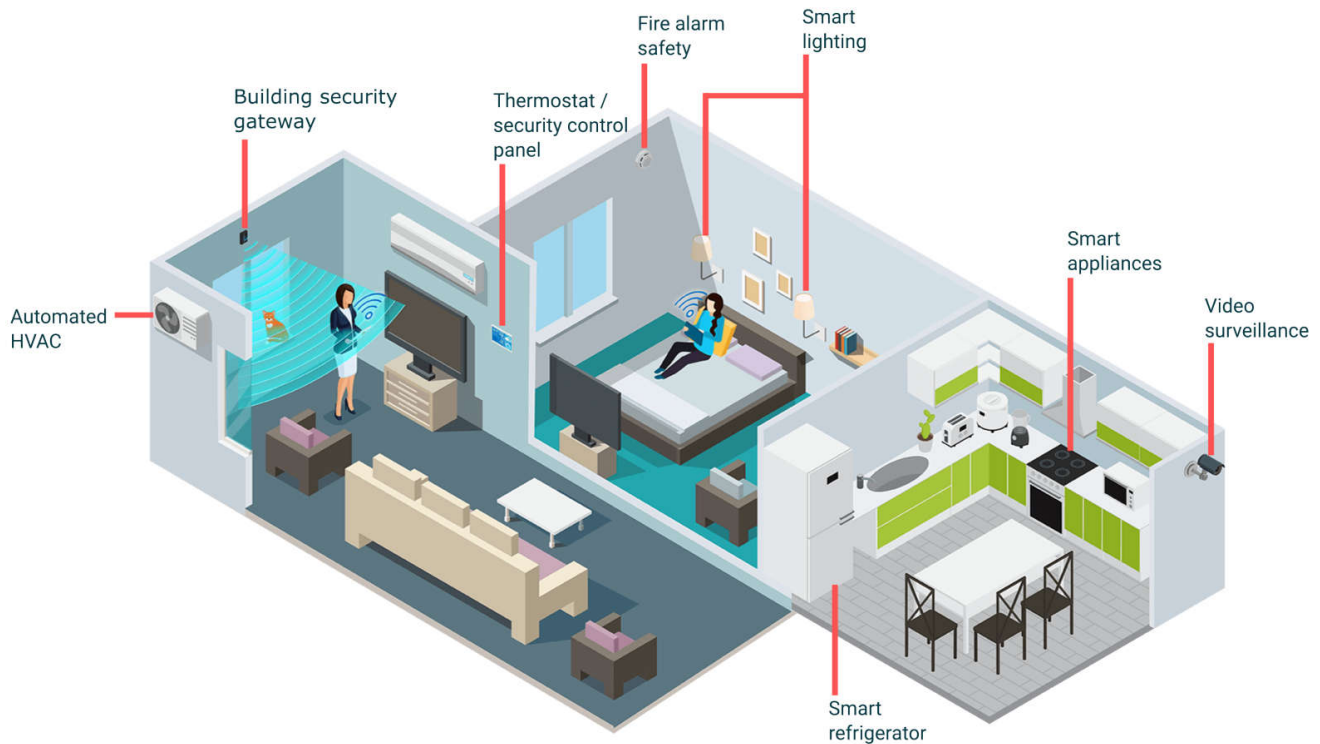


图 2-1. 智能家居

随着 Wi-Fi 感知在智能器件市场获得关注，在产品部署前有一些重要的取舍需要了解。与擅长精确定位和速度测量的雷达等其他技术相比，Wi-Fi 感知以定位精度换取了穿透障碍物和利用现有基础设施的能力。

功耗是另一个考虑因素，Wi-Fi 感知需要在一定时间内持续传输数据包，因此功耗显著高于被动红外等超低功耗感知替代方案。因此，如今的 Wi-Fi 感知通常未针对电池供电设计进行优化。

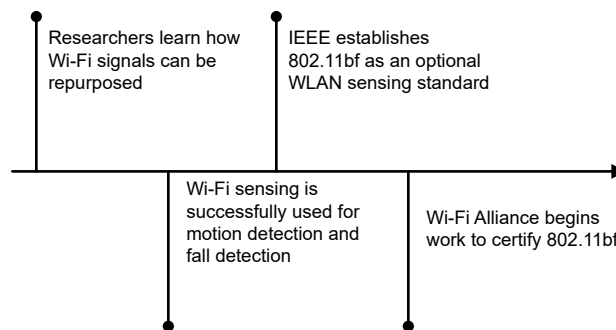
此外，Wi-Fi 感知需要两个器件（发送器和接收器对）来提取 CSI 数据，这是一个基本的架构制约因素。环境因素可能具有重要影响，例如，房间中的密集障碍物会削弱信号，发送器和接收器的物理位置会直接影响感知精度。开发人员必须仔细考虑器件放置并针对特定环境调整算法，这是 TI 正在积极研究和开发的领域。

表 2-1. Wi-Fi 感知的优势和注意事项

优势	注意事项
• 利用现有 Wi-Fi 基础设施，无需额外硬件或修改协议 • 可在任何光照条件下工作 • 可穿透物理障碍和墙壁，无需视线畅通 • 无需摄像头或侵入式监控设备，保护隐私 • 支持多样化空间感知应用（例如家庭安全、占位检测、能源优化和健康监测）	• 定位精度比雷达低 • 需要连续传输数据包（高功耗） • 需要发送器和接收器对架构 • 对环境因素和障碍物很敏感——器件的位置会影响精度 • 需要针对特定环境进行仔细的算法调优

3 目前业界正在开展哪些活动？

Wi-Fi 感知技术已存在十多年，但在标准化工作开始之前，其实现方案大多是专有的，且硬件支持是排他性的。在 Wi-Fi 感知发展的早期，许多研究人员开始学习如何将 Wi-Fi 信号重新用于位置感知和运动检测。几年后，开发人员创建了 Wi-Fi 感知设计来检测人体跌倒。当这项技术最终于 2019 年进入消费市场时，IEEE 介入研究了该技术，并最终于 2020 年将 802.11bf 标准确立为官方 WLAN 感知标准。使用当前基础设施进行 Wi-Fi 感知并不需要 802.11bf 标准，但该标准提供了可选的扩展，可实现增强型功能。


图 3-1. Wi-Fi 感知的发展历程

802.11bf 标准通过添加用于控制和协调的标准化机制，扩展了 Wi-Fi 感知功能。该标准定义了 WLAN 感知器件如何告知其他站点其 WLAN 感知功能，请求和配置支持感知的传输，以及交换感知反馈和信息。

随着开发人员对 Wi-Fi 感知的兴趣增长，Wi-Fi 联盟已开始设计框架来对 802.11bf 标准实现进行认证。该认证计划旨在促进不同供应商器件之间的互操作性，并加速市场普及。

4 德州仪器 (TI) 如何推动 Wi-Fi 感知的发展？

德州仪器 (TI) 通过硬件和软件创新推动 Wi-Fi 感知的普及。CC3551E 是一款专为感知应用打造的 Wi-Fi 6 和蓝牙®低功耗 5.4 无线 MCU。该 MCU 将 Arm® Cortex®-M33 处理器与嵌入式神经处理单元 (NPU) 相结合，通过自定义数据通路扩展 (CDE) 来实现高性能、高能效的 AI 加速。

CC3551E 的架构对工作负载进行分配，使用 M33 主处理器处理标准应用代码和无线网络协议栈，同时 NPU 并行执行机器学习算法和 CSI 数据分析的复杂运算。该器件从与连接的对等设备交换的标准 Wi-Fi 信号中原生提取 CSI 数据，并通过 API 公开此数据，应用程序可访问该 API 并将数据传递给 NPU 进行进一步分析。

提取 CSI 数据只是第一步。开发人员需要能够以极少的编程专业知识来分析、测试和部署 AI 模型的工具。德州仪器 (TI) 通过两种互补的方法解决了这一问题。对于寻求完全控制 Wi-Fi 感知实现的经验丰富的开发人员，可以开发具有专有感知能力和市场差异化优势的自定义设计。对于希望试验 Wi-Fi 感知应用但不具备深厚模型开发专业知识的开发人员，德州仪器 (TI) 提供了 CCStudio™ Edge AI Studio。

TI 的 CCStudio™ Edge AI Studio 包含一系列图形和命令行工具，可简化和加速德州仪器 (TI) 嵌入式器件（如 CC3551E）上的边缘 AI 开发。这些工具包括模型编排器、模型分析器、模型选择工具和模型制作器，使设计人员无需物理连接评估板即可快速评估模型及其性能。开发人员还可以根据自己的数据训练模型以进行特定环境优化，然后通过集成工具部署这些模型，通过这些工具处理 CC3551E 的模型压缩和片上 AI 处理。凭借多样化的开发路径，CCStudio™ Edge AI Studio 使更广泛的开发人员能够将创新应用推向市场。

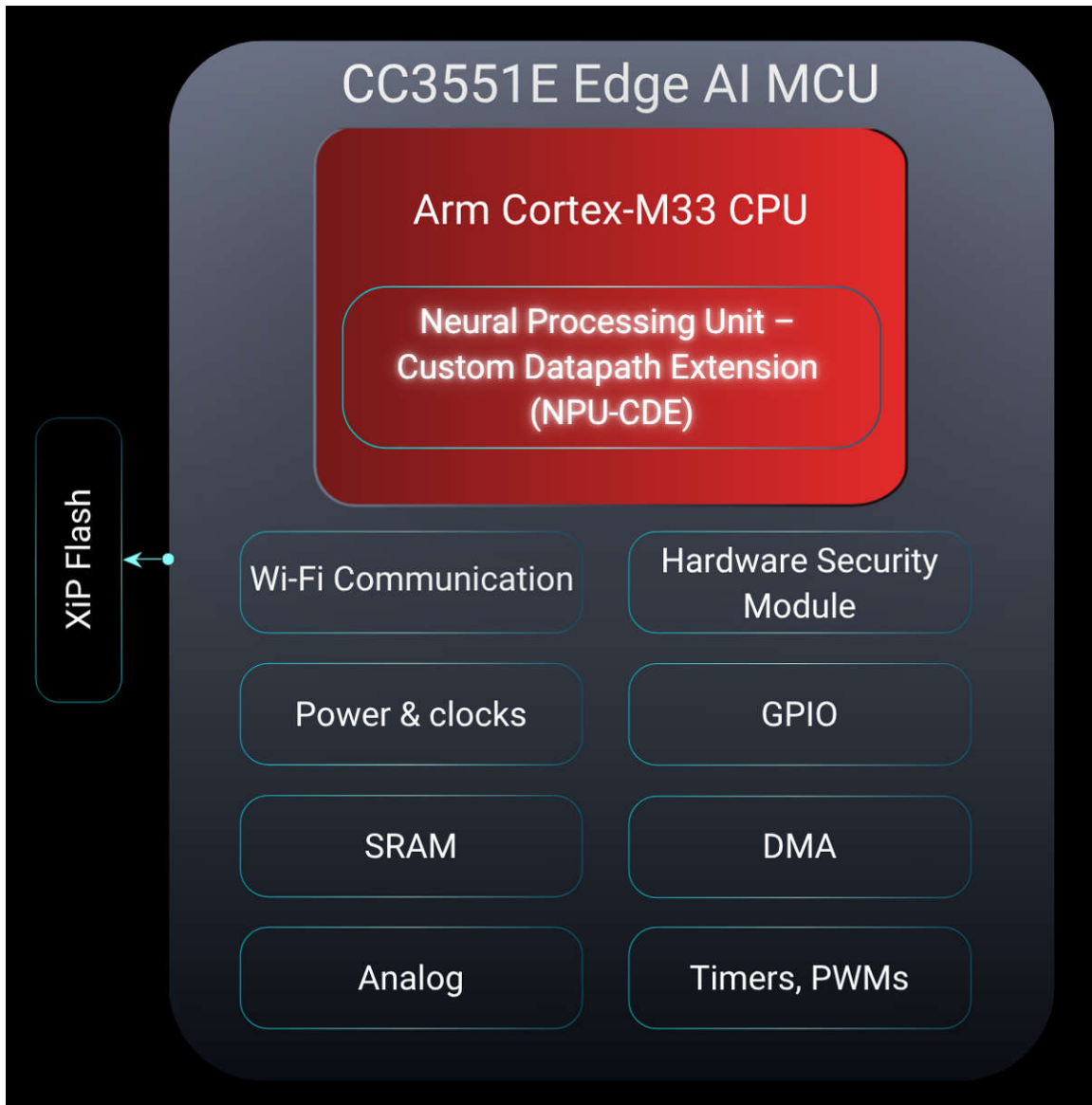


图 4-1. 边缘 AI + CC3551E 方框图

5 其他资源

- 探索 TI 的 [CC3551E](#) — Wi-Fi 6 + BLE 5.4 组合无线 MCU
- 开始使用 TI 的 [LP-EM-CC35X1](#) 评估套件
- 了解 TI 的 [边缘 AI Wi-Fi 感知用例](#)

6 结语

尽管 Wi-Fi 感知仍处于早期发展阶段，但 Wi-Fi 感知重塑空间感知应用的潜力已日益显现，特别是在无需专用硬件或摄像头即可增添智能感知能力方面。借助 802.11bf 标准等标准化工作、集成 AI 加速功能的 CC3551E 等改进型硬件，以及 CCStudio™ Edge AI Studio 等直观的软件工具，实现 Wi-Fi 感知的门槛从未如此之低。任何经验水平的设计人员现在都可以试验感知应用，根据自己的数据训练模型，并部署针对其特定环境量身定制的设计。随着更多开发人员熟悉该技术，业界可以预期 Wi-Fi 感知将成为智能家居器件、工业 IoT 系统和互联应用中的标配特性。随着每一代 Wi-Fi 器件和配套工具的迭代，Wi-Fi 感知持续为隐私保护、经济高效的感知能力开辟新的可能性。

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