

Technical White Paper

用于机器人的毫米波雷达



Dominic Schwarzenbach, Product Marketing Engineer Intern
Habeeb Ur Rahman Mohammed, PhD., Business Development Manager

摘要

机器人在工厂车间、履约中心和医院等结构化环境，以及室外配送等非结构化环境中与人类协同工作时，面临着仅靠摄像头、激光雷达和飞行时间 (ToF) 传感器无法解决的传感挑战。毫米波雷达提供了一个不受光照影响的互补检测层，具备其他传感方式所不具备的原生速度测量、透明表面检测和功能安全认证选项。

每个有源传感器都通过发射能量并对回波计时来测量世界。各传感方式的区别在于：每种传感器测量回波的哪种物理属性，以及该属性在真实工况下的表现如何。雷达发射射频能量，该能量可在任意环境光照条件下从物体表面反射，并能穿透会散射或阻挡光波的灰尘、蒸汽和空气悬浮颗粒。与摄像头和激光雷达不同，雷达可穿透服装并从人体组织产生强反射，还能检测出对光学传感器透明或难以辨识的玻璃和镜面。这些属性并非边缘场景下的优势；在工业、履约和医疗环境中，它们是基本要求。

内容

1 机器人为何需要雷达.....	2
2 为何选择用于机器人的 TI 毫米波 FMCW 雷达？.....	2
3 适用于任何机器人应用的雷达产品.....	3
4 适用于机器人的 TI 毫米波雷达产品系列.....	4
5 机器人市场要求——雷达解决的问题.....	5
5.1 人形机器人和双足机器人.....	5
5.2 自主移动机器人 (AMR).....	5
5.3 工业固定式雷达.....	6
5.4 医疗和外科机器人.....	6
6 推荐产品.....	7
6.1 IWR6243 高分辨率级联雷达.....	7
6.2 外形尺寸优化的 IWR6843 AOP 雷达.....	7
7 设计和文档支持.....	9
7.1 工具与软件.....	9
7.2 文档支持.....	9
7.3 资源.....	9
8 鸣谢.....	9

商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

NVIDIA® is a registered trademark of NVIDIA Corporation.

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 机器人为何需要雷达

摄像头是机器人中的默认感知模式，但在对安全部署最重要的场景中会出现可预见的性能下降。雷达是一种互补模式，可弥补摄像头无法可靠覆盖的空白。

场景	预期响应	
	仅摄像头	摄像头和毫米波雷达
弱光或无光环境	检测降级或失败	雷达性能不受光照影响，在摄像头性能下降的场景下仍能保持检测
雾、灰尘、冷凝水、烟雾	遮挡和漏检	雷达对颗粒物的耐受性明显更高，在摄像头面临挑战的条件下仍能保持检测
玻璃墙、透明包装、镜子	不可见或分类错误	玻璃透射光线而非反射光线；抛光表面会将光线偏转到镜头之外。无论光学透明度如何，雷达都能从任何固体表面产生回波
人、机器人与物体的分类	在光照良好的条件下有效；在远距离或光照变化条件下性能下降	雷达微多普勒特征可提供额外的分类信号，不受光照条件和外观的影响
物体速度测量	需要帧差分，在低帧率下延迟和噪声会增大	原生支持逐点多普勒速度测量，无需帧差分
安全气泡执行	区域边界处原生速度数据有限；可能存在 FOV 盲区	距离和速度共同支持动态区域的定义与执行
工厂和仓库安全	基于摄像头的系统在工业照明变化、灰尘和蒸汽条件下会性能下降。	增加雷达层可提供不受光照和环境影响的检测输入，并具备经 IEC 61508 安全完整性等级 (SIL) 2 认证的硬件完整性

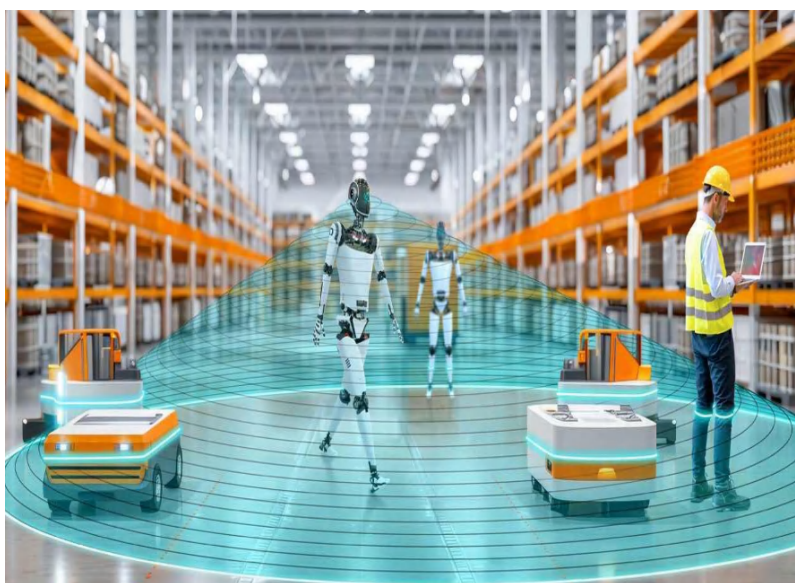


图 1-1. 人形机器人与物理环境的交互

2 为何选择用于机器人的 TI 毫米波 FMCW 雷达？

TI 毫米波 FMCW 雷达发射一系列调频脉冲（线性调频脉冲），并处理反射回波，从每个被检测到的表面提取三个独立的测量维度：

- **距离**——指每次线性调频脉冲回波的往返时间延迟，通过 FMCW 处理可实现厘米级精度
- **径向速度**——指连续线性调频脉冲之间的多普勒相移；速度是直接测量得到的，而不是通过跟踪滤波器估算的
- **角度（方位角或仰角）**——指接收天线阵列各通道之间的相位差；多个 Rx 通道可解析 2D 角度位置，从而生成 3D 点云

短波长使天线阵列可以做得紧凑，在兼容机器人本体尺寸的外形下提供有实用价值的角分辨率。每一帧都能提供逐点径向速度，无需多帧跟踪，这使毫米波雷达成为唯一能在所有工况下输出带瞬时速度标记的 3D 点云的传感方

式。在多模态传感器堆栈中，雷达是对摄像头和激光雷达的天然补充。雷达提供的信息是这些其他模态无法独立提供的。

3 适用于任何机器人应用的雷达产品

TI 的雷达产品系列覆盖了机器人各细分市场所需的完整性能范围：高性能前端收发器提供人形机器人和移动机器人感知并构建周围环境地图所需的距离、分辨率和处理能力；紧凑型集成片上系统 (SoC) 器件则为检测附近物体或引导机械臂等任务提供低功耗、短距离传感。根据距离、分辨率、处理架构、功率预算和监管环境选择合适的器件。

产品系列分为两个层级：TI 的机器人雷达产品系列包括高性能雷达和低功耗雷达两大系列。两个产品系列均包含工作在 60GHz 频段 (57 - 64GHz) 和 77GHz 频段 (76 - 81GHz) 的器件，客户可根据应用要求和所在地区的法规合规性选择合适的设计。

高性能雷达器件专为需要更远探测距离、高角分辨率和高级信号处理的应用而设计，探测距离覆盖几厘米到数百米。该产品系列包括可级联前端收发器和单芯片 SoC (片上系统) 雷达传感器。可级联器件可组合使用，以实现极高的虚拟天线数量和出色的角分辨率，非常适合成像雷达和激光雷达替代应用。单芯片 SoC 将射频前端、DSP、硬件加速器和处理单元集成到一个完整的雷达设计中，最高可配置 4 个发射和 4 个接收通道；级联系统则可从 8T8R 扩展至 32T32R 及更高。高性能器件还采用封装上装载 (LoP) 技术，以最大限度地提升射频性能。

低功耗雷达器件专为电池供电和功率受限的系统设计，此类系统对能效要求极高。这些产品适用于短距离检测应用，例如测距、存在检测、占用检测和 PIR 替代。低功耗器件还采用封装天线 (AoP) 技术，可实现高度紧凑的系统设计，同时保持稳健的感知性能。

4 适用于机器人的 TI 毫米波雷达产品系列

TI 的产品系列提供多种产品，具体选择取决于机器人市场中每种终端设备的距离、分辨率、处理架构和功率限制。

器件	频段	可级联	架构	封装	建议探测距离	距离分辨率	可实现的角度分辨率	AI 功能	安全	接口
IWR6243	57-64GHz	是	仅限前端	标准	0.1 – 500+m	2.14cm	<1° (级联 12Tx × 16Rx)	否	经 IEC 61508 认证，最高可达到 SIL 2 等级	CSI-2 (MIPI)、SPI、I ² C、UART
IWR2188	76-81GHz	是	仅限前端	LOP	0.1 – 700+m	3.75cm 至 15cm	<0.5° (级联 16Tx × 16Rx、24Tx × 24Rx、32Tx × 32Rx)	否	经 IEC 61508 认证，最高可达到 SIL 2 等级	CSI-2 (MIPI)、SPI、I ² C、UART
AWR2944P	76-81GHz	否	前端、HWA2.1 400MHz、DSP C66x、MCU、HSM	标准	0.1 – 300+m	3.75cm 至 15cm	约 4° 至 6°	是	ISO26262 最高可达 ASIL B 级	SPI、CAN-FD、UART、I ² C、以太网 1Gbps
AWR2E44P				LOP						
IWR6843	60-64GHz	否	前端、HWA1.0 200MHz、DSP C67x、MCU	标准	0.1 – 100+m	3.75cm	约 15° az 或约 15° el	是	经 IEC 61508 认证，最高可达到 SIL 2 等级	CAN-FD、SPI、I ² C、UART
IWR6843AOP				AOP	0.1 – 50+m					
IWRL6844	57-64GHz	否	前端、HWA1.2 200MHz、DSP C66x、MCU	标准	0.1 – 100+m	2.14cm	约 4° 至 6°	是	经 IEC 61508 认证，最高可达到 SIL 2 等级	CAN-FD、SPI、I ² C、UART
IWRL6432	57-64GHz	否	前端、HWA1.2 200MHz、MCU	标准	0.1 – 30+m	2.31cm	约 26° az 或约 42° el	是	经 IEC 61508 认证，最高可达到 SIL 2 等级	CAN-FD、SPI、I ² C、UART
IWRL6432AOP				AOP	0.1 – 20m					

5 机器人市场要求——雷达解决的问题

TI 的雷达产品系列满足四个机器人细分市场的不同技术要求。每个细分市场的探测距离要求、安全约束和部署环境各不相同；推荐的器件层级取决于这些约束条件。

5.1 人形机器人和双足机器人

关键应用：人机共存、安全气泡执行、全身场景感知

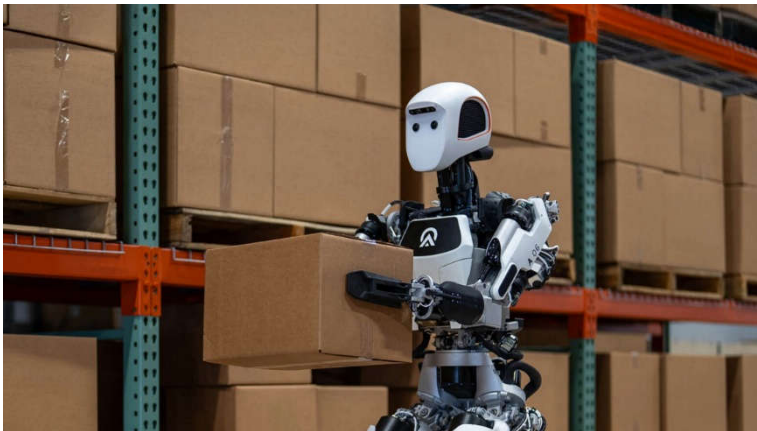


图 5-1. 仓库中的人形机器人

- **人机安全气泡：**围绕机器人整个躯干的分层接近区域（4 个层级：停止、减速、警戒、正常）。雷达在每个区域边界提供距离和速度；仅靠摄像头无法消除区域边缘的速度歧义。IEC 61508 SIL 2 认证可支持无防护人机共存所需的功能安全论证。
- **人体检测和分类：**在该应用中，需要将人类工人与其他机器人以及密集工厂环境中的静态基础设施区分开来。需要高角分辨率和逐点多普勒速度；级联 IWR6243 的输出直接馈送到 NVIDIA® Jetson Thor 或等效算力平台上的 AI 推理流水线。

5.2 自主移动机器人 (AMR)

关键应用：导航安全、避障、仓库与履约中心感知



图 5-2. 自主移动机器人在工厂车间导航

- **导航安全和避障：**在共享空间内导航的移动平台需要在所有照明条件下可靠地检测人员和动态障碍物。雷达提供了一个感知层，当基于摄像头的系统在灰尘、眩光或低光照仓库环境中性能下降时，该感知层保持稳定。
- **透明与镜面障碍物检测：**玻璃墙、反光地板和透明包装对摄像头而言是不可见的：玻璃透射光线而非反射光线，抛光或镜面表面会将光线偏转到镜头之外。无论光学透明度如何，雷达都能从任何固体材料表面产生回波。这些功能对于在零售、仓库和履约环境（此类表面十分常见）中导航的 AMR 至关重要。
- **3D 场景建图/SLAM 辅助：**雷达以带速度标注的点云，对激光雷达和立体摄像头 SLAM 系统进行增强。可检测到摄像头和激光雷达漏检的移动障碍物，并提供跨模态一致性检查，从而提高动态场景中的定位稳健性。

- **传感器融合深度层：**雷达提供了摄像头所缺乏的速度和距离维度。TI 雷达与 RGB 或热成像通过 AI 融合流水线相结合，弥合了单一传感器不足以应对的环境中的模态差距。有关使用 IWR6243 毫米波雷达传感器和摄像头并部署在 NVIDIA Holoscan 平台上的示例，请参阅 NVIDIA Holoscan 平台上的实时 AI 原始传感器融合与 IWR6243 毫米波雷达和摄像头。

5.3 工业固定式雷达

关键应用：资产监控、起重机定位、工厂车间交通管理



图 5-3. 工业固定机械臂

- **工业资产和起重机监控：**集装箱码头或工业厂房区域中的固定式高分辨率雷达，可检测大型金属资产、起重机位置和入侵区域。级联 IWR6243 提供 10 - 30m 距离范围内所需的角分辨率，可进行散料检测和高分辨率的集装箱码头建图。

5.4 医疗和外科机器人

关键应用：手术室人员接近检测、手术臂空间感知



图 5-4. 手术机器人在样品表面上操作

- **手术室人员安全与接近检测：**外科手术机器人系统在受控环境中与患者和临床工作人员近距离作业，此类环境可随时获取高性能计算资源。当外科医生或刷手技师进入机械臂的操作范围时，手术机器人必须停止或暂停。
- **手术臂空间感知：**在患者上方作业的机械臂需要实时感知其周围的空间体积，以防止意外接触。雷达生成的空间图谱不受手术室照明条件的影响；头顶手术灯、阴影和反光的手术铺单会让摄像头面临挑战，但不会影响毫米波性能。

6 推荐产品

6.1 IWR6243 高分辨率级联雷达

IWR6243 是 TI 的 57GHz 至 64GHz FMCW 雷达收发器前端，专为高性能机器人应用而打造，以下三项架构决策使其与众不同：

- 使用 CSI-2 的仅前端输出——原始 ADC 样本通过 4 通道 MIPI D-PHY 接口流式传输到主机计算平台，从而为主机端处理流水线保持完整的信号保真度
- 级联架构——多个收发器使用 20GHz 参考信号进行相位同步，形成一个大的虚拟孔径，可直接扩展角分辨率而不增加单芯片面积；级联系统可从 6Tx×8Rx 扩展至 12Tx×16Rx 及更多
- 通过 TÜV SÜD 的 IEC 61508 SIL 2 认证——满足工业和协作机器人部署共同的功能安全要求

6.1.1 参考设计

许多机器人感知应用都需要一个经过验证的良好设计基础。[NVIDIA Holoscan 平台上的实时 AI 原始传感器融合与 IWR6243 毫米波雷达和摄像头](#)中所述的示例包含一条经过验证的集成路径，用于将 IWR6243 级联 EVM 连接到 NVIDIA 的 Holoscan 平台，以实现雷达与视觉传感器融合。此设计介绍了经过验证的硬件和软件集成路径，可将 IWR6243 原始雷达数据与摄像头输入一起流式传输到 NVIDIA Holoscan AI 流水线。此示例建立了在该平台上构建机器人感知应用所需的数据路径、软件栈和生态系统合作伙伴关系 (D3 Embedded)。其中不包括针对特定机器人用例的性能验证。

6.1.2 硬件栈

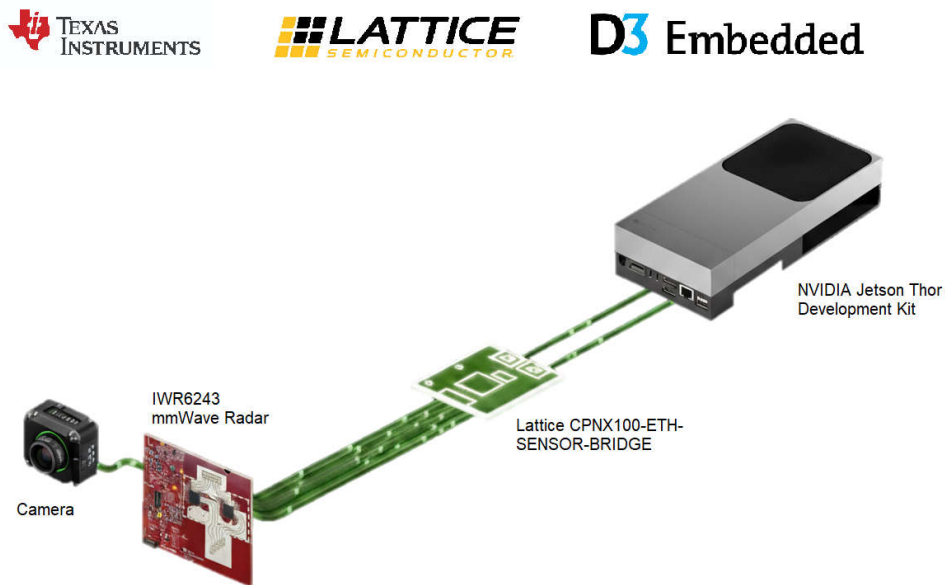


图 6-1. 适用于机器人感知应用的 IWR6243 和 Nvidia Holoscan 集成

6.1.3 软件栈

- **NVIDIA Holoscan SDK**：用于雷达信号处理、摄像头推理和多模态融合的基于图的执行运行时
- **NVIDIA Holoscan 传感器桥接软件**：实现从传感器到 GPU 内存的确定性数据传输
- **D3 Embedded 应用软件**：IWR6243 雷达配置、点云生成、摄像头对齐和 AI 融合逻辑
- **mmWaveLink SDK**：IWR6243 线性调频脉冲配置和寄存器访问

6.2 外形尺寸优化的 IWR6843 AOP 雷达

IWR6843 AOP 是 TI 的 57GHz 至 64GHz FMCW 单芯片雷达传感器，专为尺寸、功耗和集成深度比最大角分辨率更关键的应用而打造。有三项架构决策使该器件脱颖而出：

- **封装天线 (AoP)**——发送和接收天线直接集成在封装内，无需 PCB 天线布线、匹配网络和射频电路板特性表征。因此，这是一个紧凑、布局友好的模块，可放置在机械空间受限的位置：关节外壳、末端执行器、机器人周边区域，以及无法容纳分立式天线 PCB 的狭小外壳
- **全面的板载信号处理**——集成的 HWA1.0 硬件加速器、C67x DSP 和 Arm® Cortex®-R4F MCU 在片上运行完整的雷达信号链。与搭配外部算力的纯前端器件相比，距离多普勒处理、CFAR 检测和点云输出无需任何外部主机处理器即可完成，减少了系统元件数量、PCB 面积和功耗
- **通过 TÜV SÜD 的 IEC 61508 SIL 2 认证**——功能安全资质与 IWR6243 相同，支持人机共存部署，此类部署的安全论证要求硬件完整性经过认证

IWR6843 AOP 面向每个传感器节点必须自包含的用例：机器人肢体周边的接近检测、协作臂上的安全气泡执行、以及电池供电 AMR 中的短距离障碍物检测（专用雷达主机不可用或不经济）。

6.2.1 参考设计

[面向更安全机器人感知的毫米波雷达传感参考设计](#)参考设计指南为在经认证的机器人系统中部署 IWR6843AOP 提供了经过验证的硬件基础。此设计是一块经全面组装并通过性能验证的电路板，将 IWR6843AOP 雷达与 LP87745 安全 PMIC 搭配使用。

本设计指南介绍了 PMIC 与雷达之间的 Q&A 看门狗通信、电平和 PWM 错误信号监测 (ESM)、安全诊断以及雷达复位，使用了符合 SIL 2 的机器人感知模块的硬件侧构建块。TIDA-010281 设计指南中使用的示例还给出了看门狗通信、错误信号监测、安全诊断和雷达复位的验证测试结果。这些结果为开发者提供了一个经过验证的良好起点，用于开发面向 AMR、AGV、人形机器人和协作机器人且符合 SIL 2 的机器人感知节点。

[TIDA-010281](#) 工具页面中提供了原理图、BOM 和 Gerber 文件等补充文档。

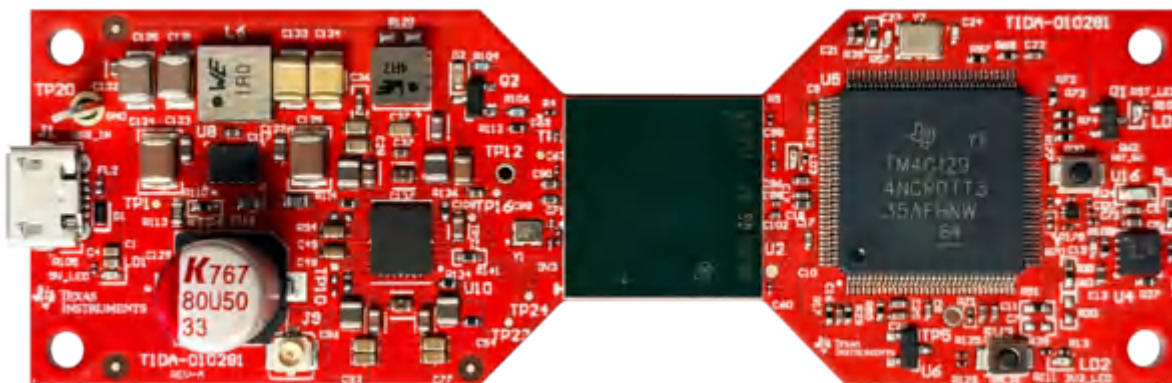


图 6-2. TIDA-010281 机器人安全感知参考设计

7 设计和文档支持

7.1 工具与软件

工具

MMWAVE-SDK 适用于 xWR1443、xWR1642、xWR1843、xWR6443 和 xWR6843 的毫米波软件开发套件 (SDK)

NVIDIA Holoscan SDK 一种多模态计算平台，专为流式边缘数据的实时、可扩展、软件定义处理而设计。

软件

D3 Embedded 应用软件 支持 IWR6243 雷达配置、点云生成、摄像头对齐和 AI 融合逻辑

NVIDIA Holoscan 传感器 桥接软件 Holoscan 计算平台提供加速的全栈基础设施，可对边缘侧运行的流式数据进行可扩展、软件定义和实时的处理

7.2 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[毫米波雷达传感器](#)，网页
- 德州仪器 (TI)，[NVIDIA Holoscan 平台上的实时 AI 原始传感器融合与 IWR6243 毫米波雷达和摄像头](#)，应用简报

7.3 资源

IWR6243	产品文件夹
IWR6843AOP	产品文件夹
IWR6843	产品文件夹
IWR6443	产品文件夹
IWRL6432	产品文件夹
IWRL6432AOP	产品文件夹
AWR2188	产品文件夹
AWR2944	产品文件夹
AWR2944P	产品文件夹
TIDA-010281	设计文件夹



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

8 鸣谢

作者谨感谢 Anand Dabak、German Aguirre、Thomas Schneider、Preeti Udupudi、Robert Tolbert、Ethan Cope、Gunter Schmer、Zorah Ahmad 和 Cesar Iovescu 为本白皮书作出的贡献。

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