

Technical White Paper

利用 AM261x 微控制器上的 USB 功能



Shaunak Deshpande

摘要

对嵌入式系统中高效、灵活且可靠的高速通信接口的需求正在不断增加，尤其是在需要实时数据处理、远程管理和用户交互的工业和汽车应用领域。德州仪器 (TI) AM261x 微控制器凭借先进的 USB 功能在这个赛道中脱颖而出，可以实现无缝连接和强大的数据处理能力。AM261x 利用强大的开源 TinyUSB 栈和硬件 USB 3.0 控制器 IP 实现了多种 USB 类，确保开发人员能够满足不同的应用需求。

本白皮书探讨了市场对嵌入式系统中 USB 功能的迫切需求，并讨论了工程师在开发高效、用户友好，同时又易于实现和维护的解决方案时所面临的设计挑战。本文档通过探讨 AM261x 的硬件和软件功能以及实际用例和应用，重点介绍了微控制器如何有效应对这些挑战。

内容

1 简介.....	2
1.1 USB 的实际应用.....	2
1.2 本文中使用的首字母缩写词.....	3
2 AM261x USB 产品.....	3
2.1 AM261x USB 硬件.....	3
2.2 AM261x USB 软件.....	4
3 USB 用例和应用.....	7
4 参考资料.....	8

插图清单

图 2-1. AM261x 硬件方框图.....	4
图 2-2. AM261x USB 软件方框图.....	5
图 2-3. 软件架构.....	6
图 2-4. AM261x USB DFU 示例.....	6
图 2-5. AM261x USB DFU 引导模式.....	7

商标

FreeRTOS™ is a trademark of Time Engineers Ltd.

Bluetooth® is a registered trademark of Bluetooth SIG, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

通用串行总线 (USB) 凭借其多功能性、易用性和支持高速数据传输的能力, 已成为一种广泛应用的连接标准。德州仪器 (TI) 的 AM261x 微控制器旨在有效利用 USB 功能, 其集成的先进功能使开发人员可以创建能够执行复杂任务的系统, 同时保持高水平的可靠性和用户可访问性。

值得一提的是, AM261x 微控制器集成了 USB 硬件控制器及 TinyUSB 栈, 可为各种 USB 类提供强大的支持。它提供固件升级 (DFU) 和通信器件类 (CDC) 等功能, 以及可通过 TinyUSB 栈快速启用的其他器件类。AM261x 使开发人员能够创建能满足用户和行业不断变化的需求的高效系统。AM261x 上的 USB PHY 支持 USB 2.0, 这意味着其可以利用 USB 2.0 的以下特性:

- **数据传输速率:** 支持 480Mbps (高速) 的最大数据传输速率。
- **向后兼容性:** 与 USB 1.1 器件完全兼容。
- **增强的电源管理:** 允许器件从总线消耗最高 500mA 电流。
- **多种器件类:** 支持 CDC、DFU 等各种器件类。可以支持 NCM、RNDIS、MSC 等类。
- **热插拔 (即插即用):** 允许器件在不关闭系统电源的情况下连接和断开。
- **电缆长度:** 对于标准 USB 电缆, 支持最长 5 米的电缆长度。
- **点对点连接:** 利用点对点架构实现器件之间的直接通信。
- **增加带宽:** 提供增强的带宽以满足高速器件的要求。

1.1 USB 的实际应用

在对更多能够高效自主运行的互联设备的需求的推动下, 工业格局正在迅速演变。随着各行各业集成自动化和物联网 (IoT) 技术, 以下主要市场需求应运而生:

- **增强的互联互通**

随着工业 4.0 的兴起, 器件彼此之间以及器件与中央控制系统之间的通信能力变得无比重要。USB 可作为建立这些连接的可靠接口, 使器件能够实时共享数据并有效协调操作。USB 可以与通用异步收发器 (UART)、CAN、以太网等其他各种技术连接, 所有这些技术都在 AM261x 器件中得到固有支持。USB 2.0 支持高达 480Mbps 的速度

- **远程监控和管理, 固件升级**

随着企业努力提高运营效率, 对远程管理功能的需求也在不断增长。嵌入式系统必须支持安全直接的固件更新、配置更改和诊断方法, 而无需物理访问。这对于尽可能减少停机时间和降低维护成本至关重要。

- **实时数据处理和分析**

数据驱动型决策是现代工业实践的基石。嵌入式系统需要实时记录、处理和传输数据, 以便及时洞察和调整操作。USB 的高速数据传输能力可实现高效的数据处理, 使其成为需要快速访问关键信息的应用的理想选择。凭借高速和对多连接的支持。

- **用户友好的互动**

嵌入式系统要发挥有效性, 还必须对用户友好。无论是配置、校准还是数据检索, 设计人员都需要创建能让用户与器件轻松交互的接口。USB 提供了一种简单且标准化的方式来连接人机接口 (HMI) 和其他外设, 从而简化了用户体验。

- **安全性与合规性**

随着连接性的增加，安全措施的增强变得愈加必要。器件之间的互联性提升，未经授权的访问和数据泄露的风险也随之增加。嵌入式系统必须采用安全通信协议，确保固件更新和数据交换受到保护。AM261x 的 USB 功能支持安全认证和访问控制措施，可保护关键基础设施应用中的敏感操作。

- **可扩展并面向未来**

最后，随着技术的不断发展，嵌入式解决方案迫切需要具备可扩展性和适应性。AM261x 支持多种 USB 类，使开发人员能够轻松集成新功能，满足新兴市场的需求，而无需彻底改造现有系统，从而使其设计满足未来需求。

1.2 本文档中使用的首字母缩写词

- CAN — 控制器局域网
- CDC — 通信器件类
- DCD — 器件核心驱动程序
- DFU — 器件固件升级
- DMA — 直接存储器存取
- HID — 人性化接口器件
- HMI — 人机接口
- IoT — 物联网
- LwIP — 轻量级 TCP/IP 栈
- Mbps — 兆比特每秒
- NCM — 网络控制模型
- OTG — 便捷移动
- RNDIS — 远程网络驱动程序接口规范
- SoC — 片上系统
- TRB — 传输请求缓冲区
- UART — 通用异步接收器/发送器
- USB — 通用串行总线

2 AM261x USB 产品

USB 2.0 支持高速接口，支持的速度为 1.5Mbps (低速)、12Mbps (全速) 和 480Mbps (高速)。USB 描述符可以是器件或主机 (接口) 其中之一。AM261x 支持这两种模式。AM261x 使用不同类型的端点支持各种 USB 类，用于如 HID、CDC、DFU、音频/视频器件、大容量存储器等各种应用。这些端点包括控制端点、批量端点、中断端点和等时端点。AM261x 可以支持所有四种端点和各种应用类。以下各节简要介绍 AM261x 上的 USB。

2.1 AM261x USB 硬件

AM261x 的硬件 USB 控制器支持 USB 3.0，采用软件可配置架构，具有内部 DMA 控制器、描述符缓存、多传输队列支持、省电功能、端点动态 FIFO 内存分配、低 MIPS 要求和中断调节 (在主机模式下)。此功能丰富的 IP 集成在 AM261x 上，可与 ARM R5F 内核配合使用。图 2-1 显示控制器如何与 R5F 和 USB 2.0 PHY 及其使用的存储器连接。

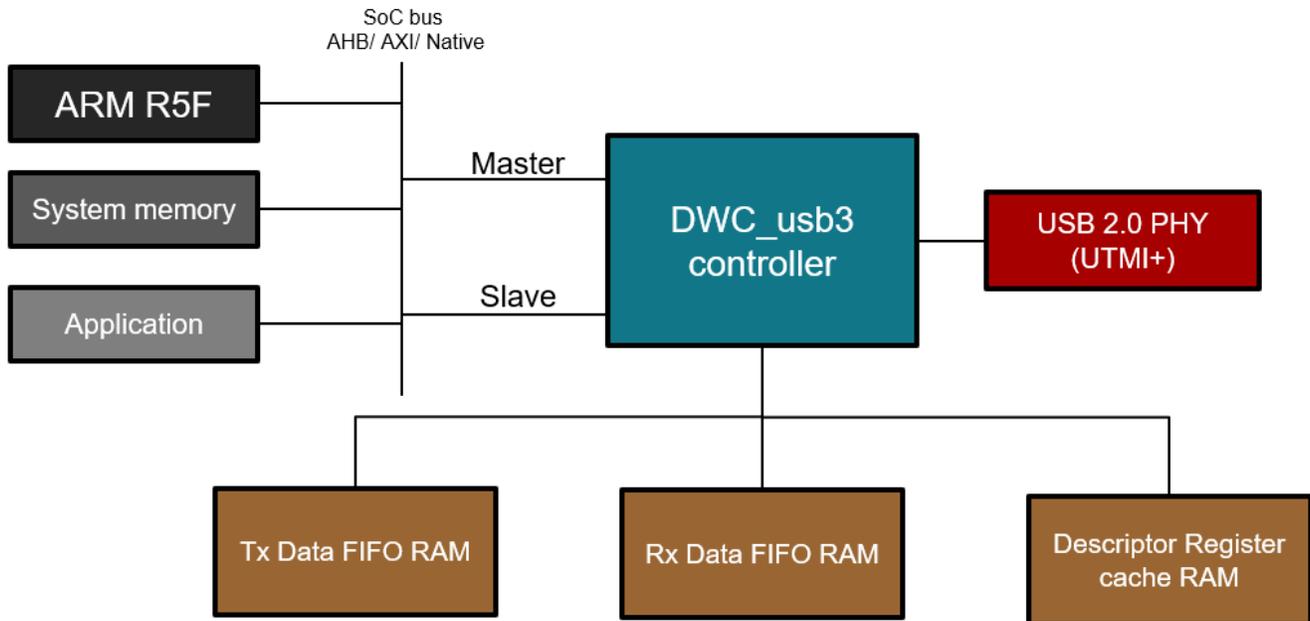


图 2-1. AM261x 硬件方框图

AM261x 上的 USB 支持双角色器件，其支持 15 个输入端点、15 个输出端点和一个双向 EP0 端点。USB 子系统提供四个可编程中断和一个用于其他事件的杂项中断线路。USB 子系统能够与高带宽应用和便携式电子器件配合得非常好。

USB 低电平驱动程序仅参与设置传输描述符和数据结构。软件将创建传输请求缓冲区 (TRB)，并在系统内存中分配事件缓冲区和数据缓冲区。硬件将处理完整的数据封装并布线到管道。内部 DMA 控制器和 BMU 处理核心 DMA 操作和数据缓冲要求。TRB 仅包含实际数据缓冲区的缓冲区指针、数据长度和 TRB 控制块数据。下图显示了软件启动和配置传输的方式。

AM261x 上的 USB 可以在上电时静态配置为主机或器件。运行时无法进行 OTG 切换，并且硬件也不支持。嵌入式 PHY 不支持 USB-OTG 标准的 OTG 功能 (ID 引脚检测和 VBUS 检测)。AM261x 有一个用于连接外部世界的 USB Micro-AB 端口。

2.2 AM261x USB 软件

强大的驱动程序库提供了微控制器与 USB 外设之间的无缝交互，简化了开发过程。USB 有时被视为一种相当复杂的协议，而 TinyUSB 则让 USB 变得简单易用。TinyUSB 栈是一个功能非常丰富的开源 USB 栈，具有线程安全和内存安全特性，并且不进行动态运行时内存分配。借助 TinyUSB 栈，开发人员可以使用 TinyUSB 栈中提供的 USB 类轻松创建应用。TinyUSB 栈的源代码中已经内置了一些器件和主机模式的示例。例如，该栈包含 HID 主机控制器的示例，其可以轻松从栈中移植出来并内置在 MCU_PLUS_SDK 中。为了支持 RNDIS 等采用 TCP/IP 协议的类，TinyUSB 栈也可以配置为与 LwIP 栈一起使用。

低电平 USB 驱动程序可分为两部分：一部分是片上芯片 (SoC) 移植层，其包含 AM261x 上端口的特定信息；另一部分是实际的 USB 器件核心驱动程序，其实现了完整的 USB 功能。应用开发人员可以直接使用驱动程序而无需中间件栈 (TinyUSB 栈) 的参与，并在其上编写应用；也可以使用中间件栈，这将大量简化开发过程。

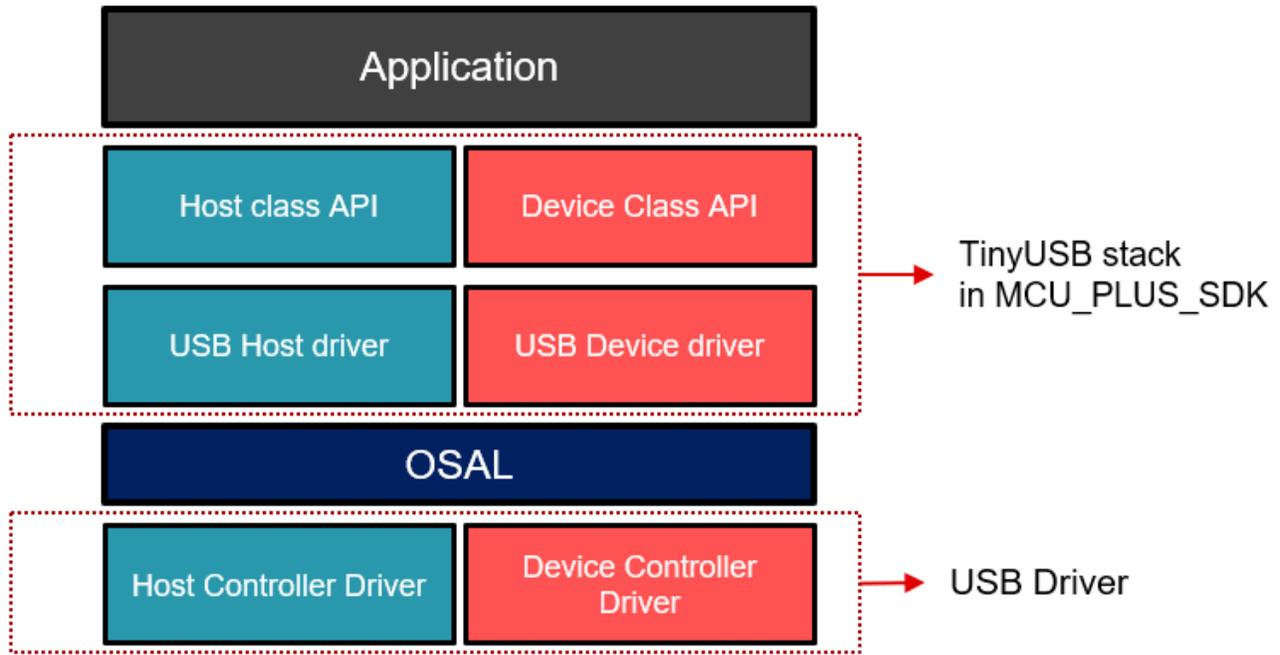


图 2-2. AM261x USB 软件方框图

TinyUSB 栈支持以下类：音频、视频、Bluetooth、CDC、DFU、HID、MIDI、MSC、网络、USBTMC、供应商等，但并非所有这些类都能在 AM261x 上运行（例如，由于 AM261x 上没有 Bluetooth 硬件，因此无法启用 Bluetooth® 类）。要启用 SDK 开箱即用后不支持的新类，开发人员只需：

1. 创建一个 `tusb_config.h` 文件，描述端点的大小、类、Tx 和 Rx 缓冲区的大小等。
2. 让器件驱动程序支持所有必需的端点和传输回调函数。
3. 使用所需的 USB 类构建应用。
4. 重新构建 TinyUSB 栈并将其链接到应用。
5. 重新构建应用。

通过上述步骤，用户可以快速启用非标准 SDK 产品的不同 USB 类。

2.2.1 软件架构

图 2-3 说明了 AM261x 器件上 USB 产品的架构。MCU_PLUS_SDK v10.00 具有开箱即用的 DFU 和 CDC 应用，这些应用使用底层 TinyUSB 栈类。FreeRTOS™ 和 NoRTOS 都支持 USB 应用和类，并且 TinyUSB 移植层和器件驱动程序层与操作系统无关，这意味着用户可以在 NoRTOS 和 FreeRTOS 之间自由选择，然后从栈中选择 USB 类并无缝构建 USB 应用。

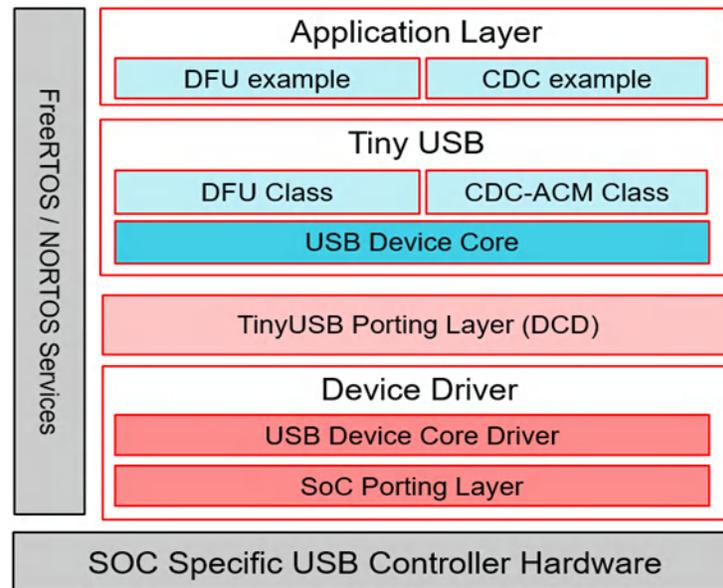


图 2-3. 软件架构

USB DCD 层定义了 API，用于打开、关闭、配置端点，初始化器件类驱动程序和 USB 驱动程序，配置中断以及启用或禁用中断。DCD 层还具有输入和输出完成回调函数，以及提交传输请求的函数和通用调试日志记录功能。

2.2.2 AM261x USB 应用示例

图 2-4 显示 AM261x 如何作为 USB 器件运行 DFU 应用程序。DFU 功能可用于在现场通过 USB 更新固件二进制文件。这意味着不会出现停机时间，并且可以将增强版固件加载到 MCU 中。具有 USB 主机的主机计算机运行 dfu-utility 程序。此程序用于将文件从主机 PC 发送到充当 USB 器件的 AM261x 器件。

有关 dfu-util 命令的更多详细信息，请参阅此处：[AM261x MCU_PLUS_SDK USB DFU 示例](#)。

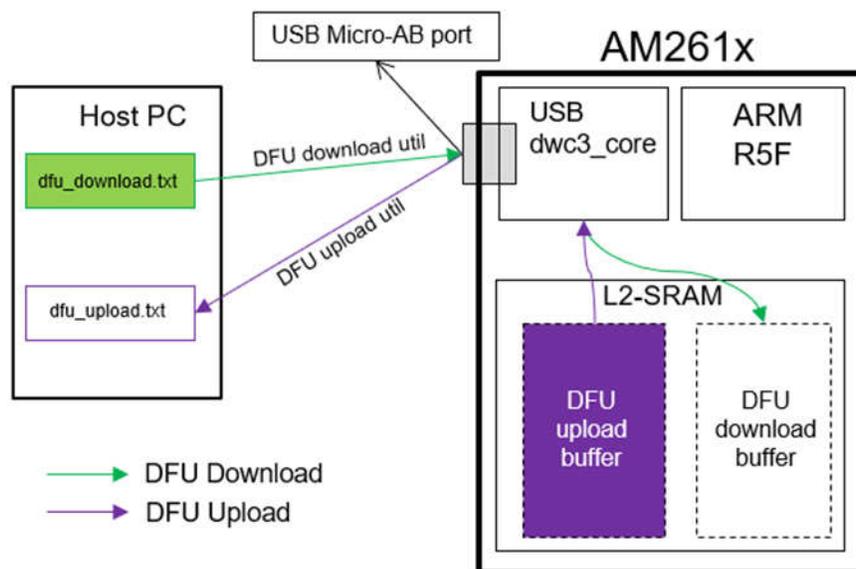
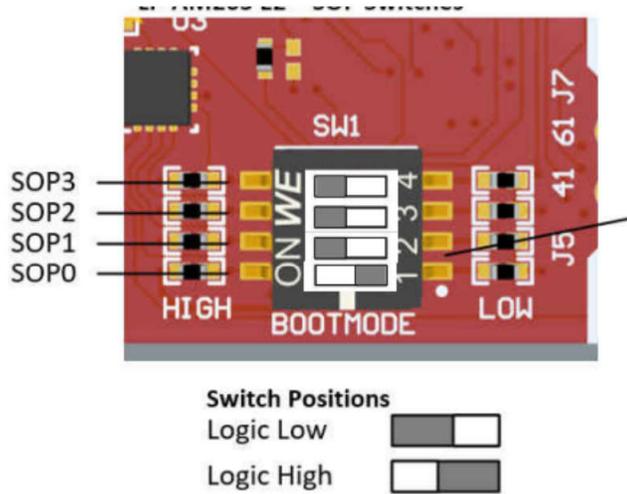


图 2-4. AM261x USB DFU 示例

2.2.3 USB DFU 引导加载程序

AM261x 器件还支持 DFU 引导模式，这意味着器件可以通过 USB DFU 接收应用（单核与多核映像）。使用 TinyUSB 栈中的 DFU 类，该类可以实现 DFU 任务。此任务接收应用映像并将其存储到器件 RAM 中。完成此操作后，再使用标准引导加载程序 API 引导该应用。



DFU BOOT MODE

图 2-5. AM261x USB DFU 引导模式

USB 引导加载程序通过 USB SBL UniFlash 应用或 SBL DFU python 脚本支持。

在此处阅读有关 USB 引导加载程序的更多信息：

- SBL DFU：[SDK 示例链接](#)
- SBL DFU UniFlash：[SDK 示例链接](#)

3 USB 用例和应用

本节讨论可以利用 AM261x USB 功能构建实际应用的一些可能的应用领域。

• 现场固件更新 (DFU 模式)

AM261x 支持 DFU 模式，允许在现场进行无缝固件更新。这一功能对于最大限度地缩短停机时间并确保器件保持安全和正常运行至关重要。无需物理访问，即可直接向器件提供增强功能和错误修复。

应用：EV 充电站，工业控制器：定期固件更新，以改进充电算法和安全功能。

• 诊断和通信 (CDC 模式)

利用 CDC，AM261x 可以建立多个虚拟 COM 端口连接，方便诊断和数据通信。

应用：电机控制单元、测试设备：对电机性能和运行状况的实时监控和诊断功能，通过 USB 连接简化的数据记录和分析过程。

- **USB 用于数据记录和传输**

AM261x 可通过 USB 实现高效的数据记录和检索，使其适用于需要本地数据存储的应用。

应用：便携式数据记录仪和智能能源表：轻松传输数据以进行现场分析和报告，收集数据以进行消耗分析和性能优化。

- **USB 用于配置和校准的**

USB 功能便于对器件进行直接配置和校准，使现场技术人员能够轻松使用。

应用：医疗器件：校准设备以确保符合健康标准。工业传感器：根据不同操作条件进行配置调整，以优化性能。

- **USB 作为人机接口 (HMI)**

AM261x 可以通过 USB 连接到 HMI，允许用户与嵌入式系统进行交互和控制系统。

应用：自动机械：用于控制和监控系统性能的操作员界面。医疗保健设备：用于患者数据输入和系统管理的用户友好型界面。

- **USB 用于连接外设器件**

AM261x 允许连接各种 USB 外设，从而增强嵌入式系统的功能。

应用：工厂自动化系统（例如）：与条形码扫描仪和其他外设集成，提高运营效率。消费类电子产品：与外部存储和输入器件的连接。

- **安全器件认证和访问**

USB 可用于安全认证，确保只有授权人员才能访问敏感的系统功能。

应用：楼宇自动化系统：通过安全 USB 令牌控制对关键系统的访问。关键基础设施：保护重要的操作系统，防止未经授权的访问。

- **便携器件集成：**

AM261x 支持与便携式器件集成，便于数据传输和器件管理。

应用：便携式医疗器件：轻松传输患者数据以进行监控和分析。现场测试设备：快速卸载数据以便立即审查和调整。

- **USB 作为网络适配器：**

AM261x USB 可通过启用 USB 器件的 RNDIS 类充当虚拟以太网适配器。该协议通过 USB 模拟以太网链路。

应用：USB 转以太网桥接器，用于不同器件之间的数据传输，以及工业环境中的远程数据传输。

AM261x 微控制器的 USB 功能使嵌入式系统能够满足各行各业不断发展的需求。AM261x 能够满足实时通信、固件更新和用户可访问性等关键市场需求，作为一个面向开发人员的多功能解决方案脱颖而出。硬件和软件解决方案的集成，结合其强大的 USB 实现，使 AM261x 成为现代嵌入式应用的重要元件。

4 参考资料

- AM261x 产品页面：[AM2612 产品页面](#)
- AM261x USB MCU+ SDK 文档：[AM261x USB SDK 文档](#)
- AM261x USB DFU 示例：[USB DFU 示例](#)
- AM261x USB CDC 示例：[USB CDC 示例](#)
- USB 类的类型：[定义的类代码](#)
- USB 2.0 规范：[USB 2.0 规范](#)
- TinyUSB 栈：[TinyUSB 栈](#)

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司