

Application Note
理解 I²C 总线



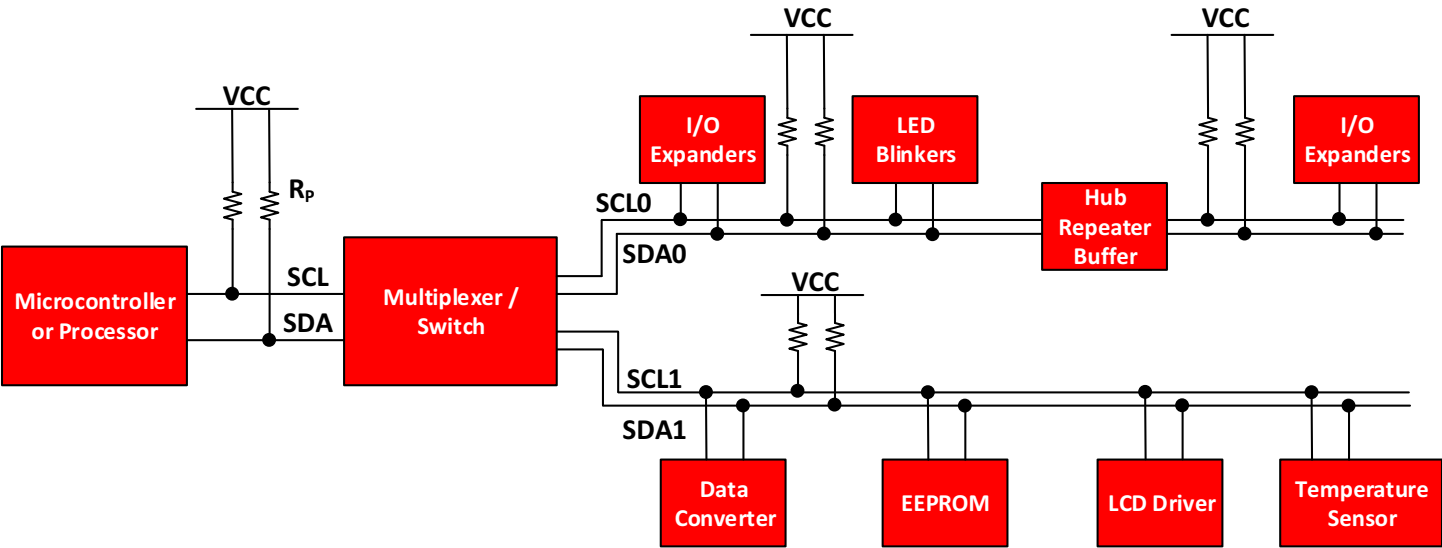
Jonathan Valdez, Jared Becker

摘要

I²C 总线是一种非常常用且功能强大的总线，用于在控制器（或多个控制器）与单个或多个目标器件之间实现通信。下图说明了多个不同外设可以共享一条仅通过 2 根线连接到处理器的总线，这是 I²C 总线与其他接口相比具有的最大优势之一。

本应用手册旨在帮助用户了解 I²C 总线的工作原理。

下图展示了一个用于嵌入式系统的典型 I²C 总线，其中使用了多个目标器件。微控制器代表 I²C 控制器，并控制 IO 扩展器、各种传感器、EEPROM、ADC/DAC 等。所有这些仅通过控制器的 2 个引脚进行控制。



I²C 总线示例

内容

1 电气特性.....	2
1.1 通过漏极开路实现双向通信.....	2
2 I ² C 接口.....	3
2.1 常规 I ² C 运行.....	3
2.2 数据有效性与字节格式.....	4
2.3 确认 (ACK) 和否定确认 (NACK).....	5
3 I ² C 数据.....	5
3.1 在 I ² C 总线上向目标器件写入.....	6
3.2 在 I ² C 总线上从目标器件读取.....	6
4 修订历史记录.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 电气特性

I²C 在同一线路上使用带输入缓冲器的漏极开路/集电极开路结构，从而允许使用单根数据线传输双向数据流。

1.1 通过漏极开路实现双向通信

漏极开路指的是一种输出类型，它可以将总线下拉至某一电压（大多数情况下为接地），或“释放”总线并让其由上拉电阻器上拉。当总线被控制器或目标器件释放时，线路上的上拉电阻器 (R_{PU}) 负责将总线电压上拉至电源轨。由于任何器件都不能强行将线路拉高，这意味着总线永远不会遇到一个器件试图发送高电平、另一个器件发送低电平而导致短路（电源轨接地）的通信问题。I²C 要求，在多控制器环境中，如果某个控制器发送高电平，但发现线路为低电平（另一个器件正在将其拉低），则应停止通信，因为另一个器件正在使用总线。推挽接口不允许存在这种自由度，这是 I²C 的一个优势。

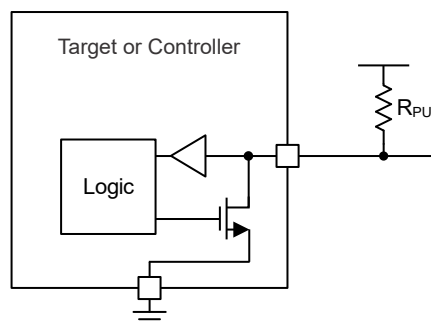


图 1-1. SDA/SCL 线路的基本内部结构

图 1-1 展示了目标器件或控制器在 SDA/SCL 线路上的内部结构简化视图，包括用于读取输入数据的缓冲器和用于发送数据的下拉 FET。器件只能将总线拉低（对地短路）或释放总线（对地高阻抗），并让上拉电阻器升高电压。在处理 I²C 器件时，这是一个需要认识到的重要概念，因为任何器件都不能将总线保持为高电平。这一特性使得双向通信得以实现。

1.1.1 漏极开路拉低

如上一节所述，漏极开路配置只能将总线拉低，或“释放”总线并让电阻器将其拉高。图 1-2 展示了将总线拉低的电流流向。希望发送低电平的逻辑将激活下拉 FET，从而提供对地短路，将线路拉低。

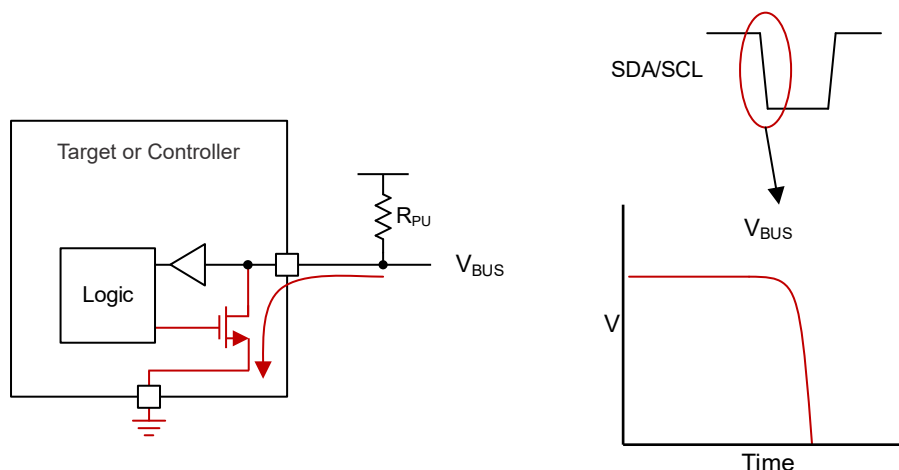


图 1-2. 使用漏极开路接口拉低总线

1.1.2 漏极开路释放总线

当目标器件或控制器希望发送逻辑高电平时，只能通过关断下拉 FET 来释放总线。这样会使总线悬空，上拉电阻器将电压上拉至电压轨，从而被解释为高电平。图 1-3 展示了流经上拉电阻器来将总线拉高的电流。

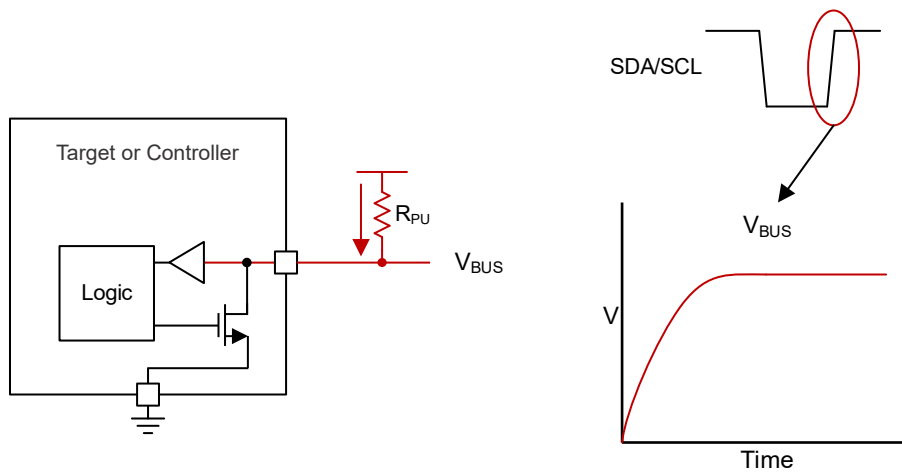


图 1-3. 使用漏极开路接口释放总线

2 I²C 接口

2.1 常规 I²C 运行

I²C 总线是一种使用控制器与目标器件通信的标准双向接口。除非目标器件已被控制器寻址，否则目标器件不能发送数据。I²C 总线上的每个器件都有一个特定的器件地址，以便区别于同一 I²C 总线上的其他器件。许多目标器件在启动时需要进行配置来设置器件行为。这通常在控制器访问目标器件内部的寄存器映射时进行，这些寄存器映射具有唯一的寄存器地址。一个器件可以有一个或多个用于存储、写入或读取数据的寄存器。

物理 I²C 接口由串行时钟 (SCL) 和串行数据 (SDA) 线组成。SDA 和 SCL 线都必须通过上拉电阻器连接至 V_{CC}。上拉电阻器的大小由 I²C 线上的电容量 (有关进一步细节，请参阅 [I²C 上拉电阻器计算](#)) (SLVA689) 决定。只有当总线处于空闲状态时，才能启动数据传输。如果在停止条件后，SDA 和 SCL 线都为高电平，则认为总线处于空闲状态。

控制器访问目标器件的一般过程如下：

1. 假设控制器想要向目标器件发送数据：
 - 控制器/发送器发送一个 **START** 条件并对目标/接收器进行寻址
 - 控制器/发送器向目标/接收器发送数据
 - 控制器/发送器以 **STOP** 条件终止传输
2. 如果控制器想要接收/读取目标器件的数据：
 - 控制器/接收器发送一个 **START** 条件并对目标/发送器进行寻址。
 - 控制器/接收器将要读取的寄存器地址发送给目标/发送器
 - 控制器/接收器接收目标/发送器的数据。
 - 控制器/接收器以 **STOP** 条件终止传输

2.1.1 启动条件和停止条件

与该器件的 I²C 通信由控制器发送启动条件开始，并由控制器发送停止条件终止。当 SCL 为高电平时，SDA 线上从高电平到低电平的转换定义了启动条件。当 SCL 为高电平时，SDA 线上从低电平到高电平的转换定义停止条件。

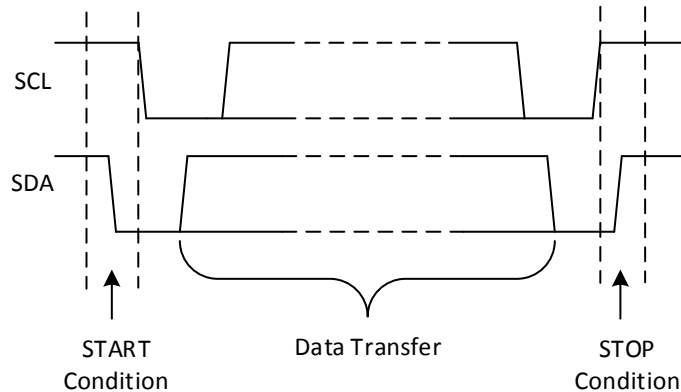


图 2-1. START 条件和 STOP 条件示例

2.1.2 重复 START 条件

重复启动条件与启动条件类似，用于代替背靠背停止条件和启动条件。它看起来与 START 条件相同，但与 START 条件其实并不同，因为它发生在 STOP 条件之前（此时总线尚未空闲）。当控制器希望开始新的通信，但不希望总线因停止条件而进入空闲状态时，这很有用；在多控制器环境中，一旦发出 STOP 条件，控制器就有可能将总线控制权丢失给另一个控制器。

2.2 数据有效性与字节格式

SCL 的每个时钟脉冲期间会传输一个数据位。SDA 线上的一个字节由 8 个位组成。一个字节可以是器件地址、寄存器地址，或是写入目标器件或从目标器件读取的数据。传输数据时，最高有效位 (MSB) 优先。在 START 和 STOP 条件之间，可以将任意数量的数据字节从控制器传输到目标器件。在时钟周期的高电平阶段，SDA 线上的数据必须保持稳定，因为在 SCL 为高电平时数据线上的变化会被解释为控制命令（启动或停止）。

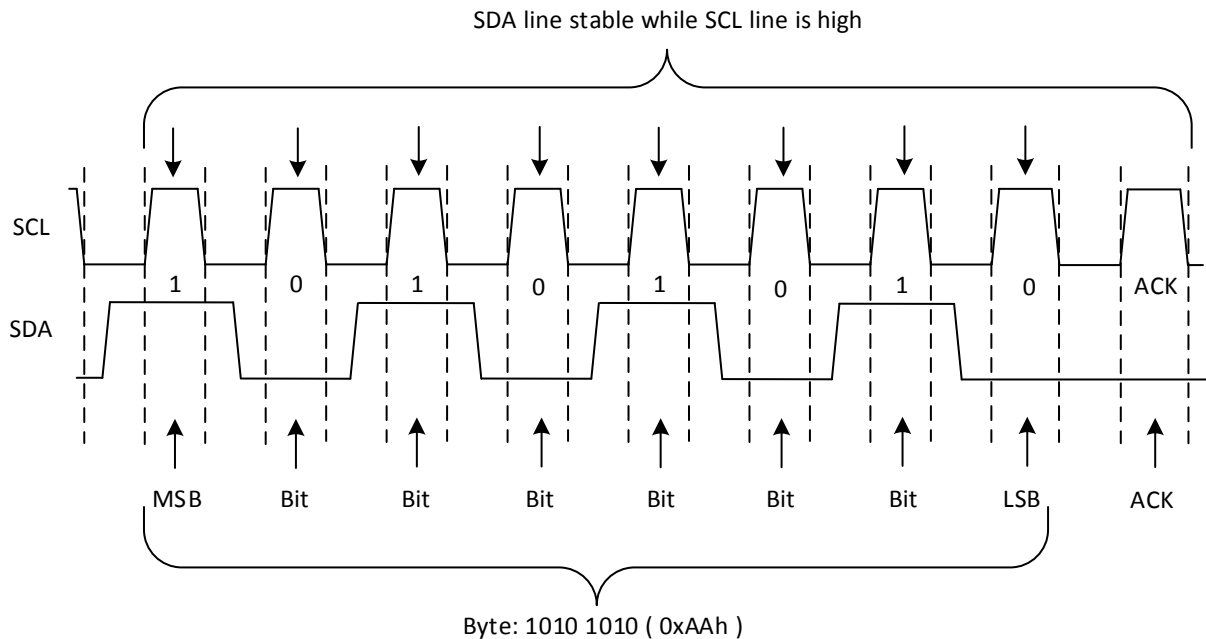


图 2-2. 单字节数据传输示例

2.3 确认 (ACK) 和否定确认 (NACK)

每个数据字节 (包括地址字节) 后跟一个来自接收器的 ACK 位。ACK 位允许接收器与发送器通信, 指示已成功接收该字节且可发送另一个字节。

在接收器可以发送 ACK 之前, 发送器必须释放 SDA 线。要发送 ACK 位, 接收器应在 ACK/NACK 相关时钟周期 (周期 9) 的低电平阶段下拉 SDA 线, 以使 SDA 线在 ACK/NACK 相关时钟周期的高电平阶段保持稳定的低电平。必须将建立和保持时间考虑在内。

当 SDA 线在 ACK/NACK 相关时钟周期内保持高电平时, 会被解释为 NACK。有几种情况会导致生成 NACK:

1. 接收器正在执行某些实时功能且尚未准备好与控制器开始通信, 因而无法接收或发送。
2. 在传输过程中, 接收器收到其无法理解的数据或命令。
3. 在传输过程中, 接收器无法接收更多数据字节。
4. 控制器/接收器已完成数据读取, 并通过 NACK 向目标器件指示这一情况。

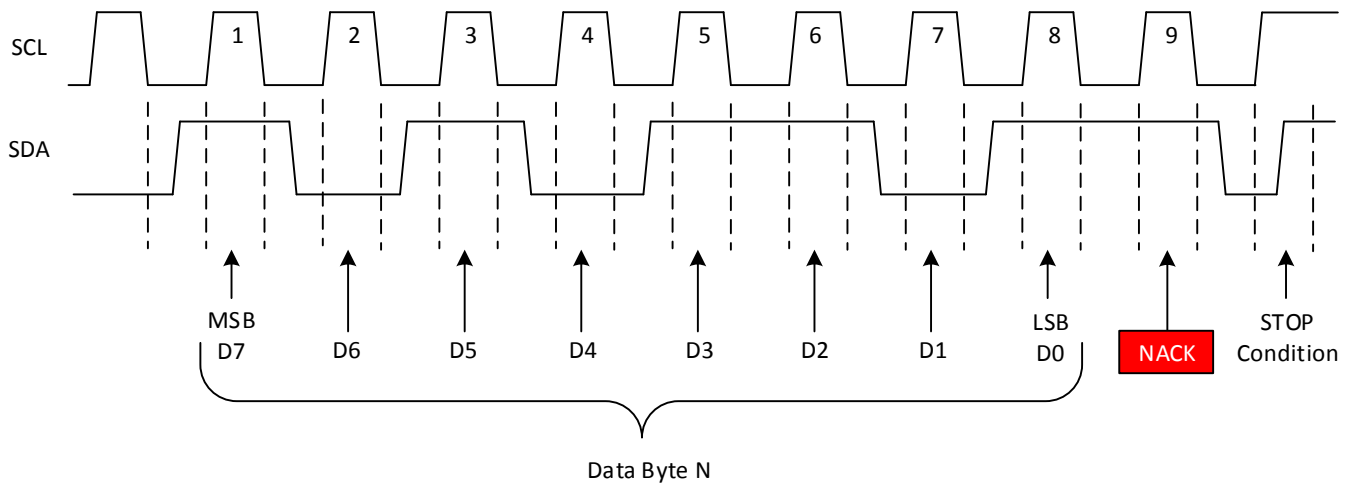


图 2-3. NACK 波形示例

3 I²C 数据

数据必须发送到目标器件或从目标器件接收, 但实现方式是对目标器件中的寄存器进行读取或写入。

寄存器是目标器件内存中的位置, 其中包含信息, 无论是配置信息还是一些要发送回控制器的采样数据。控制器必须将信息写入此类寄存器, 从而指示目标器件执行任务。

虽然 I²C 目标器件中通常有寄存器, 但请注意, 并非所有目标器件都会有寄存器。有些器件很简单, 只包含一个寄存器, 可以通过在目标地址之后立即发送寄存器数据来直接写入寄存器, 而不是对寄存器进行寻址。单寄存器器件的一个示例是通过 I²C 命令控制的 8 位 I²C 开关。由于它只需要 1 位来启用或禁用通道, 因此只需要 1 个寄存器, 并且控制器仅在目标地址之后写入寄存器数据, 会跳过寄存器号。

3.1 在 I²C 总线上向目标器件写入

要在 I²C 总线上进行写入，控制器在总线上发送一个启动条件，其中带有目标器件地址以及设置为 0 的最后一位（R/W 位），这表示一次写入。目标器件发送应答位后，控制器随后发送要向其写入的寄存器的寄存器地址。目标器件再次进行确认，告知控制器它已准备就绪。此后，控制器开始向目标器件发送寄存器数据，直到控制器发送完其需要发送的所有数据（有时仅为一个字节），控制器以 STOP 条件终止传输。

图 3-1 显示了向目标寄存器写入单个字节的示例。

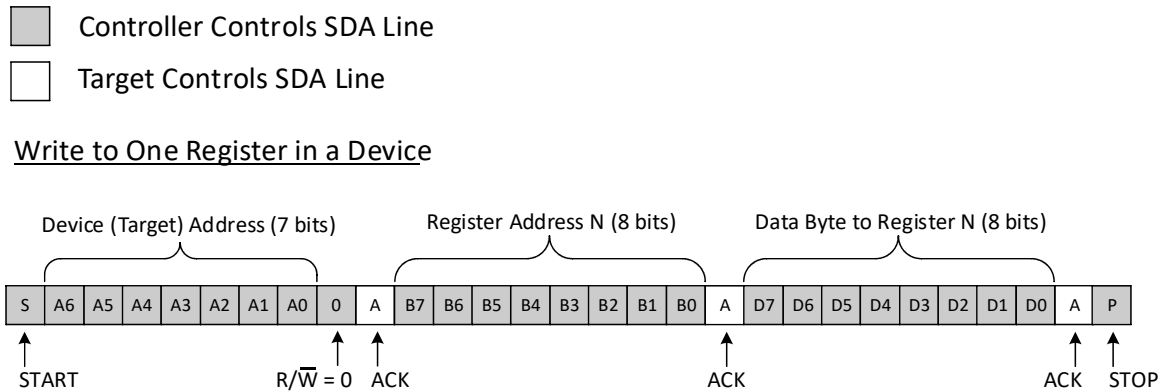


图 3-1. 向目标器件寄存器的 I²C 写入示例

3.2 在 I²C 总线上从目标器件读取

从目标器件读取与向其写入非常相似，但有一些额外的步骤。为了从目标器件读取数据，控制器必须首先向目标器件指示它希望从哪个寄存器读取。为此，控制器以与写操作类似的方式启动传输：发送地址并将 R/W 位置为 0（表示写操作），随后发送它希望读取的寄存器地址。目标器件应答该寄存器地址后，控制器再次发送一个 START 条件，随后发送目标器件地址并将 R/W 位置为 1（表示一次读取）。这一次，目标器件应答读取请求，控制器释放 SDA 总线，但继续向目标器件提供时钟。在这一事务过程中，控制器成为控制器/接收器，目标器件成为目标/发送器。

控制器继续发送时钟脉冲，但释放 SDA 线，以便目标器件可以发送数据。在每个数据字节结束时，控制器向目标器件发送一个 ACK，告知目标器件它已准备就绪，可接收更多数据。一旦控制器收到了预期的字节数，它就会发送一个 NACK，通知目标器件停止通信并释放总线。控制器随后会发出一个 STOP 条件。

图 3-2 显示了从目标寄存器读取单个字节的示例。

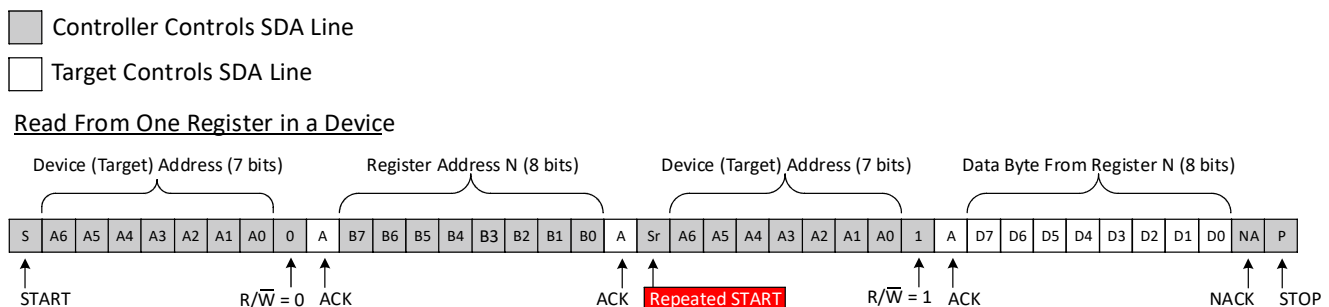


图 3-2. 从目标器件寄存器的 I²C 读取示例

4 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (June 2015) to Revision A (October 2026)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	1
• 将提到 I ² C 的旧术语实例通篇更改为控制器和目标.....	1

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