

Application Note

了解多路复用器应用中的 THD 和 THD + N



Rami Mooti

摘要

总谐波失真 (THD) 和总谐波失真加噪声 (THD + N) 是评估模拟系统信号保真度的关键性能指标。在音频、测试和测量以及生物医学仪器等应用中，即使轻微的失真也会显著降低性能和可靠性。本应用手册介绍了 THD 和 THD + N 的数学原理，概述了多路复用器 (mux) 特性表征的标准测试设置，并重点说明导通电阻 (R_{ON}) 和 R_{ON} 平坦度对失真性能的影响。文中提供了实际应用案例，以说明 TMUX4827、TMUX7612 等低 THD 多路复用器如何增强音频开关、精密测量、可编程增益放大回路和生物医学检测方面的性能。通过了解多路复用器器件中的 THD 行为并选择 R_{ON} 特性经过优化的元件，工程师可以确保在各种应用中实现准确的信号再现和强大的系统性能。

内容

1 简介.....	2
2 什么是 THD.....	2
3 什么是 THD + N.....	2
4 多路复用器的 THD (+N).....	2
4.1 了解多路复用器的 THD (+N).....	3
5 低 THD 多路复用器应用.....	5
6 低 THD 多路复用器器件建议.....	7
7 总结.....	8
8 参考资料.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在音频设备、测量系统和通信设备中，确保信号尽可能精准再现至关重要。无论您是设计高保真扬声器、校准高灵敏度实验室仪器还是确保清晰的数据传输，失真和噪声都会降低性能。这就是总谐波失真 (THD) 和总谐波失真加噪声 (THD + N) 等指标的价值所在。THD 用于衡量系统引入原始信号中不存在的谐波成分的程度。虽然 THD + N 包括该失真和任何额外噪声，但这使得它成为一项更全面的性能指标，更能反映实际应用场景下的系统表现。

THD 数值越高，输出信号的失真度与劣化程度越严重，可能产生不良干扰，例如在音频应用中出现声音模糊或静音噪声。而低 THD 可确保系统准确地再现原始信号，不会引入影响性能的干扰。这在医疗设备或测试测量 DAC 和 ADC 等关键应用中变得越来越重要，在这些应用中，即使非常轻微的失真也会对所需的精确测量产生严重负面影响。器件的 THD 性能可帮助工程师评估和比较元件，从而确保系统输出纯净、可靠的信号。

2 什么是 THD

更具体地说，THD 用于衡量因器件非线性特性，导致输入信号在输出端以谐波形式引入的失真程度。对于固定频率的输入，THD 可以计算为各次谐波幅值的均方根 (RMS) 和与基波输入信号 RMS 幅值之比，也可以表示为百分比或分贝比：

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} 2V_i^2}}{V_1} \times 100\% \quad \text{THD}(dB) = 20 \times \log_{10} \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} 2V_i^2}}{V_1} \quad (1)$$

其中 V_1 为基波电压幅值， V_i 为第 i 次谐波电压幅值。每个振幅都以 V_{RMS} 表示。

3 什么是 THD + N

THD + N 与 THD 相似，在低噪声环境中，两者的表现可能差异甚小。但随着系统噪声增大，相较于单独使用 THD，THD+N 指标能更准确地反映系统性能。系统级噪声的来源可能包括高频干扰、通道或器件间的串扰、60Hz 基波或其谐波 (120Hz、240Hz 等) 频率下的电源线接地环路耦合以及互调失真。其中一些影响可通过适当的屏蔽、PCB 布线间距、接地或滤波技术来控制，但难以完全消除。此外，半导体器件 (包括多路复用器) 会产生热噪声、闪烁噪声和散粒噪声，这些都会影响 THD+N 的基准噪声水平。

总谐波失真加噪声 (THD + N) 在 THD 的定义基础上进行了扩展，将噪声纳入测量范围：

$$\text{THD} + \text{N}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} 2V_i^2 + V_N^2}}{V_1} \times 100\% \quad \text{THD} + \text{N}(dB) = 20 \times \log_{10} \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} 2V_i^2 + V_N^2}}{V_1} \quad (2)$$

其中 V_1 是基波电压幅值， V_i 是第 i 次谐波电压幅值， V_N 表示噪声电压幅值。每个振幅都以 V_{RMS} 表示。

4 多路复用器的 THD (+N)

图 4-1 中展示了多路复用器 (MUX) 设备的 THD + N 测试设置示意图。将低失真正弦波源 V_{in} 施加到待测试的多路复用器通道 S_1 到 D 。输出信号、噪声及谐波由精密数字化仪采集。该测量在 V_{in} 频率范围内进行 (例如，对于音频应用，扫描频率为 20Hz 至 20kHz)，并将结果整合后形成 THD + N 随频率变化的曲线图。

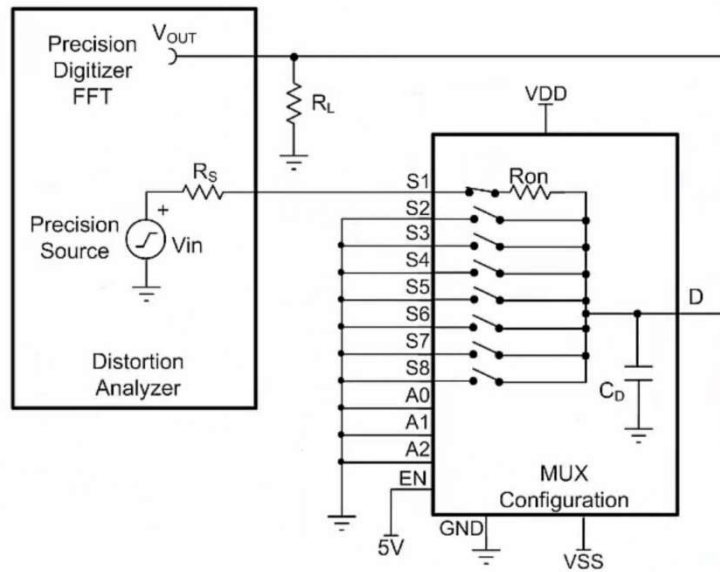


图 4-1. 测量多路复用器 THD + N 的测试设置原理图

4.1 了解多路复用器的 THD (+N)

对于多路复用系统，观察到的 THD (+N) 性能取决于器件的导通电阻 (R_{ON})、 R_{ON} 平坦度 (多路复用器通道 R_{ON} 在所施加信号范围内的变化) 和负载电阻 R_L 。 R_L / R_{ON} 比值越大, THD+N 性能越优越。这是因为 R_{ON} 与 R_L 共同构成了一个幅值相关的分压器, 如图 4-2 所示。由此可推知, 当 R_L 较大时 (例如同相放大器的高阻抗输入), 多路复用器输出端观测到的谐波失真可降至最低。

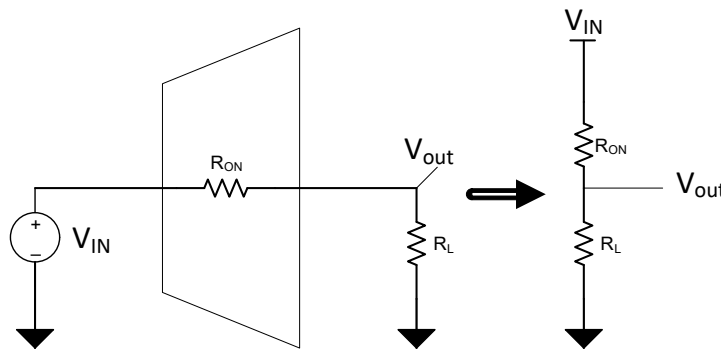


图 4-2. 由多路复用器 R_{ON} 和 R_L 构建的分压器

通常而言, 在 THD 至关重要的应用场景中, 工作峰峰值电压范围可能小于多路复用器所能承受的最大电压摆幅。因此, 务必要验证设备的工作电压不会处于多路复用器的 R_{ON} 会大幅波动的区域。部分 R_{ON} 曲线在整个电压区域内保持平坦, 而另一些则在特定输入电压区域内能够具备优化性能。图 4-3 展示了在施加不同工作峰峰值 (V_{pp}) 电压的条件下, 同一器件如何呈现出不同的 THD 性能。

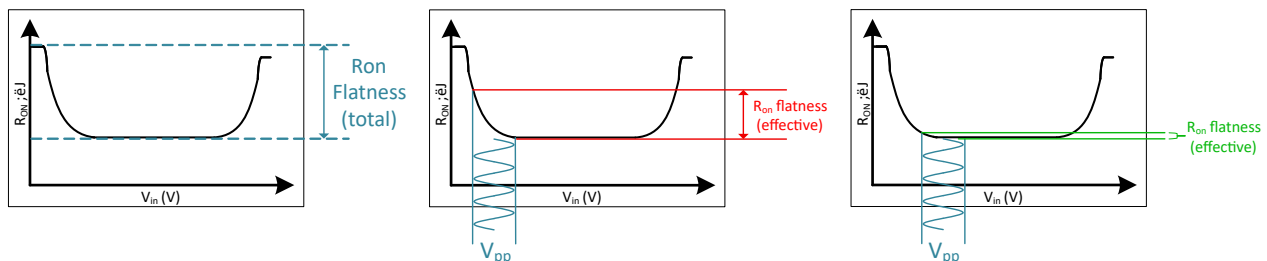


图 4-3. 具有优化 (绿色) V_{pp} 区域与非优化 (红色) V_{pp} 区域的 R_{ON} 曲线

为了优化 THD 性能，建议选用多路复用器中 R_{ON} 最平坦的区域。图 4-4 展示了模拟多路复用器常见 R_{ON} 曲线对应的优化 THD 区域。图 4-5 突出标注了，在 TMUX4827 器件中，超平坦的 R_{ON} 特性如何实现 THD 性能优化。

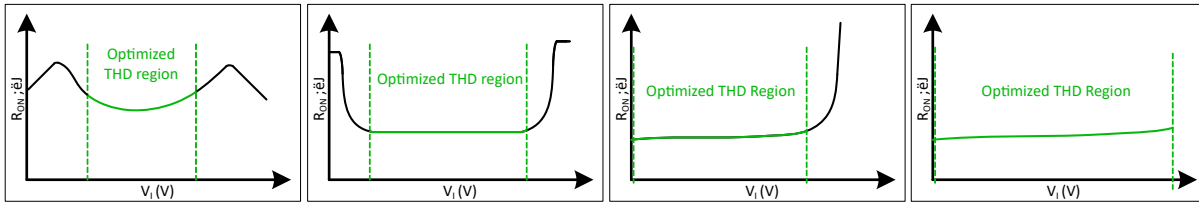


图 4-4. 优化 THD 性能的最佳 V_{IN} 区域

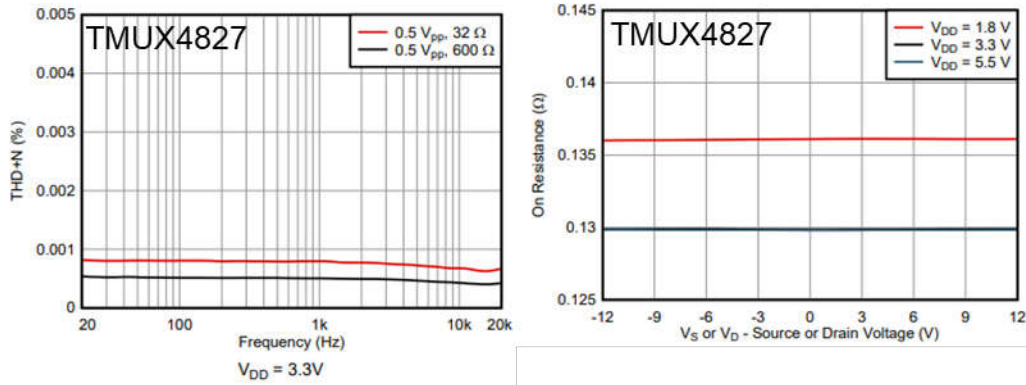


图 4-5. TMUX4827 通过超平坦 R_{ON} 实现优化的 THD 性能

5 低 THD 多路复用器应用

在信号保真度与准确性要求较高的应用中，低 THD 多路复用器至关重要。在音频系统中，声音的清晰度与精准再现是首要需求，低 THD 多路复用器可确保信号完整性不受破坏，不会引入影响听觉体验的失真。这在高保真音频设备或专业音频系统中尤为关键，此类场景下，即便微小的失真也可被察觉。图 5-1 展示了 TMUX4827 (具有 0.001% 的 THD + N 和 $1\text{m}\Omega$ R_{ON} 平坦度) 如何在音频系统中实现内置与外置扬声器或不同音频源之间的切换。

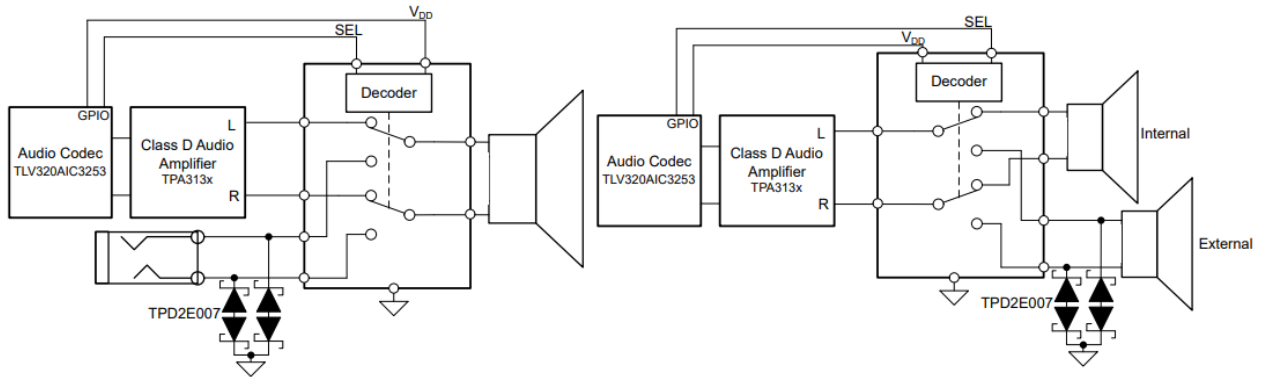


Figure 8-1. Audio Amplifier Switching

图 5-1. 使用低 THD 多路复用器进行音频放大器切换

在测试测量场景中，尤其是涉及 ADC 与 DAC 的应用，需采用低 THD 多路复用器以保证模数转换或数模转换过程的精度，从而为精准的分析与诊断提供准确的信号表示。此外，PGA 反馈环路中使用的多路复用器需要低 THD 来维持较高的信噪比 (SNR)，从而最大限度降低噪声的放大。图 5-2 展示了如何使用 TMUX7612 来切换 PGA 中的反馈电阻器以改变输入信号的放大倍数。

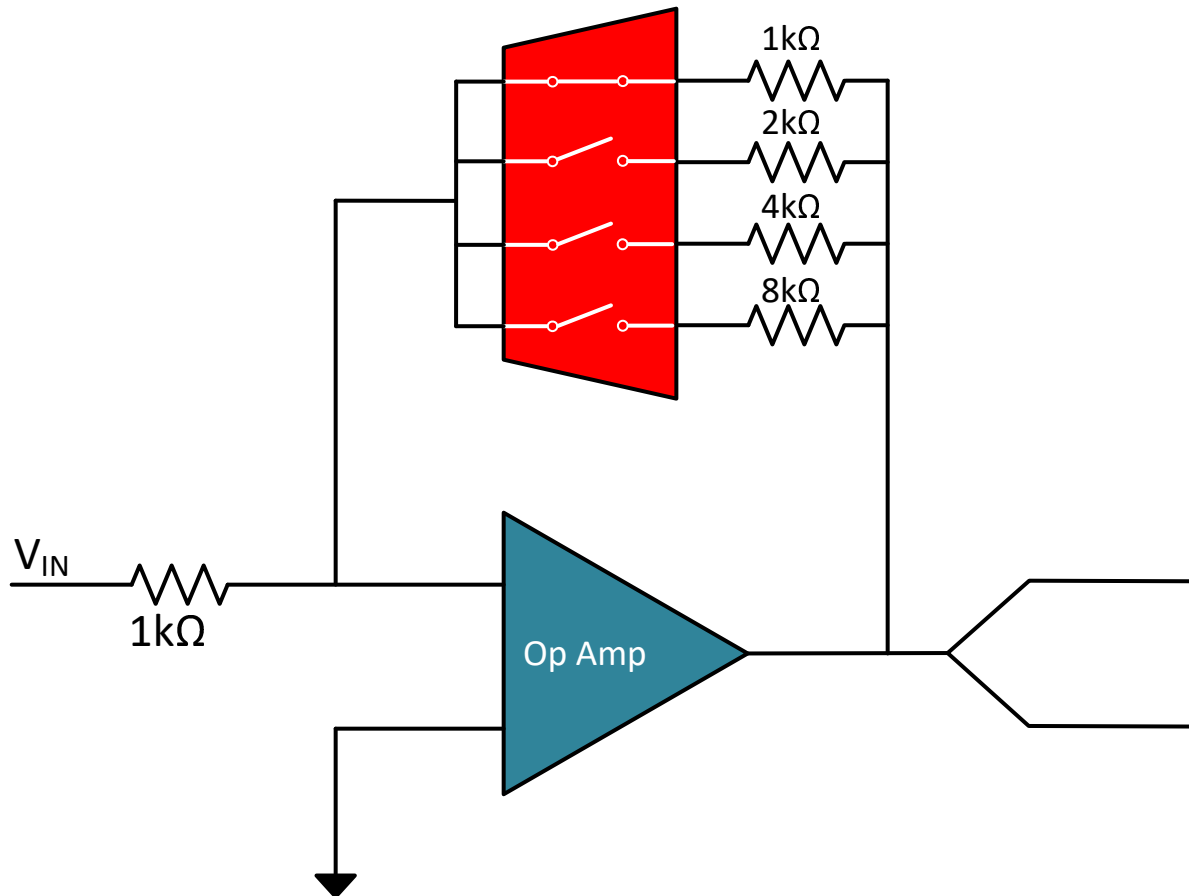


图 5-2. TMUX7612 在 PGA 反馈环路中用于改变增益放大倍数的应用

同样，在生物医学应用中，低 THD 对于以最小的失真捕获和分析生理信号至关重要。无论是检测心搏 (ECG)、脑部活动 (EEG) 还是肌肉活动 (EMG)，这类敏感测量中的微小失真也会导致错误诊断或影响研究结果，因此，低 THD 多路器是保障生物医学数据质量与可靠性的关键元件。在 ECG 系统中，多路复用器可用于实现不同传感器之间的切换。低 THD 性能允许精确检测生物医学信号。

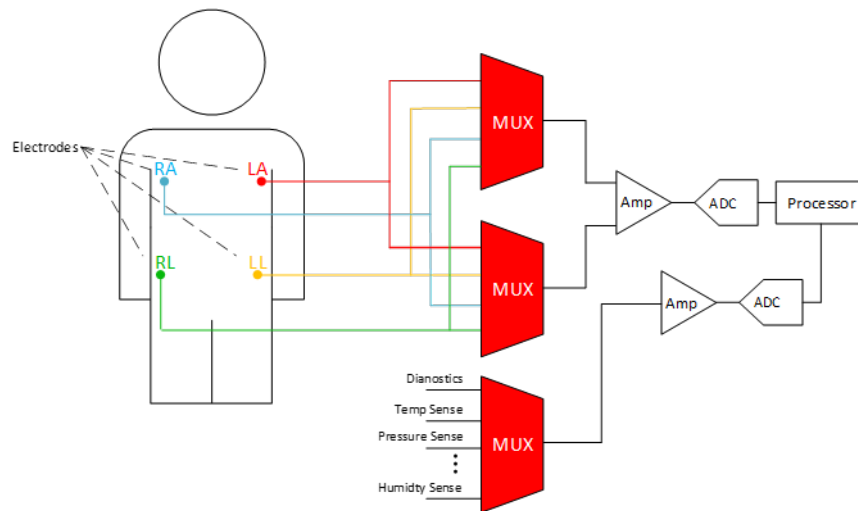


图 5-3. 多路复用 ECG 信号需要低 THD 多路复用器来保证信号准确性

6 低 THD 多路复用器器件建议

表 6-1. 低 THD 模拟多路复用器建议

器件	配置	I/O 电压 (最大值)	电源电压	R _{on} (典型值)	R _{on} 平坦度	THD
TMUX4827	2:1, 2 通道	-12V 至 +12V	1.8V 至 5.5V	0.13Ω	0.001Ω	0.0006%
TMUX2889	2:1, 2 通道	-5.5V 至 +5.5V	1.8V 至 5.5V	0.15Ω	0.001Ω	0.0006%
TS5A12301E	2:1, 1 通道	0V 至 5.5V	2.25V 至 5.5V	0.5Ω	0.1Ω	0.003%
TS5A3159	2:1, 1 通道	1.65V 至 5.5V	1.65V 至 5.5V	0.75Ω	0.15Ω	0.01%
TS5A22364	2:1, 2 通道	-3.2V 至 5.5V	2.3V 至 5.5V	0.65Ω	0.18Ω	0.01%
TS5A22362	2:1, 2 通道	-3.2V 至 5.5V	2.3V 至 5.5V	0.65Ω	0.18Ω	0.01%
TS5USBA224	2:1, 2 通道	-2.2V 至 3.3V	3.3V	4Ω	1.5Ω	0.05%
TMUX7612	1:1, 4 通道	4.5V 至 50V, ±4.5V 至 ±25V	4.5V 至 50V, ±4.5V 至 ±25V	1Ω	0.0003Ω	0.0006%
TMUXS7614D	1:1, 8 通道	4.5V 至 50V, ±4.5V 至 ±25V	4.5V 至 50V, ±4.5V 至 ±25V	1Ω	0.0003Ω	0.0006%
TMUX5412	1:1, 4 通道	4.5V 至 50V, ±4.5V 至 ±25V	4.5V 至 50V, ±4.5V 至 ±25V	21Ω	0.005Ω	0.001%

7 总结

总谐波失真 (THD) 和 THD + N 是衡量信号保真度的关键指标，在音频与精密模拟系统中尤为重要。多路复用器的失真程度与其导通电阻特性相关，特定工作区域可实现优化的性能表现。设计人员通过研究测试设置、 R_{ON} 曲线及实际应用案例，可更清晰地判断何时需关注 THD 性能，以及如何最大限度降低其影响。

8 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TMUX4827](#) 产品文件夹
2. 德州仪器 (TI), [TMUX2889](#) 产品文件夹
3. 德州仪器 (TI), [TS5A12301E](#) 产品文件夹
4. 德州仪器 (TI), [TS5A3159](#) 产品文件夹
5. 德州仪器 (TI), [TS5A22364](#) 产品文件夹
6. 德州仪器 (TI), [TS5A22362](#) 产品文件夹
7. 德州仪器 (TI), [TS5USBA224](#) 产品文件夹
8. 德州仪器 (TI), [TMUX7612](#) 产品文件夹
9. 德州仪器 (TI), [TMUXS7614D](#) 产品文件夹
10. 德州仪器 (TI), [TMUX5412](#) 产品文件夹

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出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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月