



## 摘要

许多应用都需要低压降 (LDO) 稳压器，因为与开关转换器相比，此类稳压器本身具有低噪声，能够提供简单且成本更低的解决方案。但在某些应用中，即使是超低噪声 LDO 也无法满足所需的噪声规格，例如高性能射频电路、激光电流驱动器等。如果选择正确的并联 LDO 架构，并联 LDO 可进一步降低噪声。本文档全面分析了使用镇流电阻器的新型并联 LDO 降低噪声的情况。将镇流电阻器技术与其他两种并联 LDO 技术进行比较：(1) 使用运算放大器和一个额外的反馈环路并联 LDO，以及 (2) 使用匹配的 BJT 形成的电流镜并联 LDO。

## 内容

1 介绍利用镇流电阻器的并联 LDO	1
2 利用镇流电阻器的并联 LDO 的噪声分析	2
3 LDO 输出阻抗	2
4 降低并联 LDO 系统噪声的策略	3
5 利用镇流电阻器的并联 LDO 的噪声	3
5.1 TPS7A57	3
5.2 TPS7A94	4
6 替代并联 LDO 架构的噪声测量	4
6.1 TPS7B7702-Q1	5
7 结语	6
8 参考资料	6

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 介绍利用镇流电阻器的并联 LDO

近年来，并联 LDO 变得越来越流行，德州仪器 (TI) 产品系列中的许多 LDO 并联用于多种应用的实际设计中。德州仪器 (TI) 使用镇流电阻器对并联 LDO 的设计和分析进行了现代化改造 ( 请参阅[参考资料](#)一节中的 [1] 和 [2] )。TI 还开发了一款可下载的软件工具，用于根据一组用户定义的系统要求为 TI 的 LDO 设计镇流电阻器 ( $R_b$ ) ( 请参阅[参考资料](#)一节中的 B ) ( 请参阅[参考资料](#)一节中的 [3] )。与单个 LDO 相比，并联 LDO 具有许多优势，例如：

1. 负载电流更大
2. 针对给定的负载电流改善了 PSRR
3. 散热性能更出色
4. 余量要求 ( 压降 ) 更低
5. 与其他转换器相比体积更小： $C_{OUT}$  通常驱动最大系统高度
6. 更低的噪声

有关这些优势的全面讨论，请参阅[参考资料](#)一节中的 [1-3]。迄今为止，尚未提供全面的白皮书来对比三种常见并联 LDO 技术的噪声性能。本白皮书旨在填补这一空白，并展示使用镇流电阻器的并联 LDO 相对于同类竞争并联 LDO 技术的噪声性能优势。

## 2 利用镇流电阻器的并联 LDO 的噪声分析

如参考资料 [1] 所述, 使用镇流电阻器的并联 LDO 可以重新绘制, 如图 2-1 中的原理图所示,  $V_{LOAD}$  公式在公式 1 中提供。

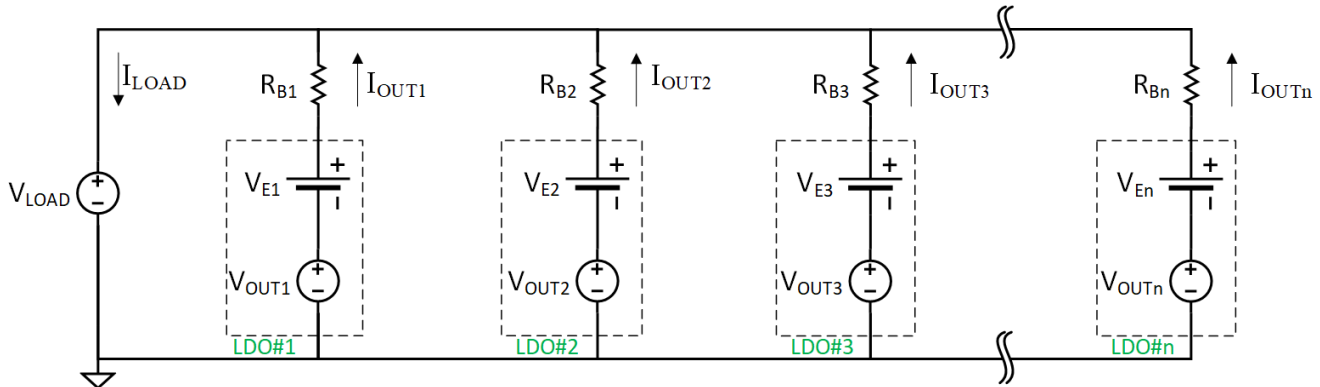


图 2-1. 使用镇流电阻器的 n 个并联 LDO 的等效模型

$$V_{LOAD} = \frac{\sum_{n=1}^n \frac{V_{OUTn} + V_{En}}{R_{Bn}} - I_{LOAD}}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{R_{Bn}}} \quad (1)$$

假设有一个并联网路, 其中没有 LDO 调节另一个 LDO, 并且稳压器的每个反馈环路独立于其他 LDO 运行。假设  $Z_{OUTn}$  表示并联阵列中第 n 个 LDO 的输出阻抗。由于噪声分析是在稳态条件下进行, 负载电流  $I_{LOAD}$  不包含交流分量; 因此, 负载电流保持恒定 (例如, 频率含量为零)。因此, 可以通过应用这些假设来简化公式 1。

1. 设定  $R_{Bn} = Z_{OUTn} + R_B = "R"$
2. 将  $V_{OUT1}$ 、 $V_{OUT2}$ 、 $\dots$ 、 $V_{OUTn}$  替换为噪声源  $e_n$
3. 设定  $V_{E1} = V_{E2} = \dots = V_{En} = 0V$
4. 设定  $I_{LOAD} = 0$

使用这些假设, 将公式 1 重写为公式 2 和公式 3。

$$e_{n, LOAD} = \frac{\sum_{n=1}^n \frac{e_n}{R}}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{R}} = \frac{\sum_{n=1}^n e_n / R}{\frac{n}{R}} = \frac{\sum_{n=1}^n e_n}{n} = \sqrt{\sum_{n=1}^n \left(\frac{e_n}{n}\right)^2} \quad (2)$$

$$e_{n, LOAD} = \frac{e_n}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

并联 LDO 的输出噪声会降低, 降低幅度为并联 LDO 数量的平方根倍。从根本上说, 这些假设意味着所有并联 LDO 都表现出相同的固有噪声 (因为使用了相同的 LDO IC), 在相同温度下运行, 产生零误差或可忽略不计的电压误差, 使用具有低容差 (< 1%) 的相同镇流电阻器, 并且在输出阻抗 ( $Z_{OUT}$ ) 方面非常匹配。

## 3 LDO 输出阻抗

以 TPS7A57 为例 [2], 输出阻抗  $Z_{OUT}$  随着负载电流的增大而减小 (图 3-1)。在非常低的频率下,  $Z_{OUT}$  主要由内部导通 MOSFET 的漏源电阻 ( $R_{DS}$ )、PCB 布线阻抗和内部键合线阻抗决定。在中频带区域, 内部误差放大器的性能成为主要因素。在高于中频带的频率下, 输出电容器的串联阻抗连同 PCB 寄生效应决定  $Z_{OUT}$ 。为了满足  $R$  超出公式 2 的条件, 所有并联 LDO 的输出阻抗必须相同。

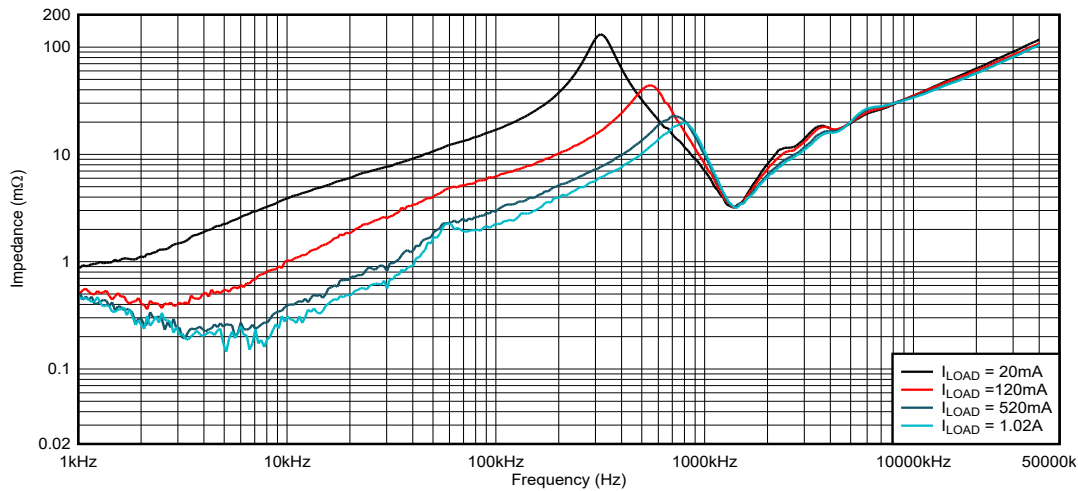


图 3-1. TPS7A57  $Z_{OUT}$  随负载电流的变化

## 4 降低并联 LDO 系统噪声的策略

在第 2 节和第 3 节中，各个 LDO 的  $Z_{OUT}$  之间的任何变化都会降低公式 3 预测的总体噪声性能。以下设计实践有助于均衡并联 LDO 架构中稳压器每个输出端的有效电阻（“R”）。

1. **共模输入电压** - 为来自同一输入电压源的所有稳压器供电，使每个器件具有相同的结温和输入电压。
2. **匹配的输出电容器** - 在每个 LDO 上使用相同且容差严格的电容器（容值和 ESR），以保持  $Z_{OUT}$  的电容量一致。
3. **匹配的镇流电阻器** - 选择具有相同标称值和低容差（ $\leq 1\%$ ）的分立式镇流电阻器。
4. **遥感** - 将 LDO 的远程检测引脚作为开尔文检测布线直接连接到镇流电阻器的  $V_{OUT}$  焊盘，以消除  $V_{OUT}$  和  $R_B$  之间的引线导线和布线电阻。
5. **PDN 阻抗匹配** - 验证每个镇流电阻器和负载之间的功率分配网络，以及从负载到 LDO RTN 引脚的返回路径是否具有每个稳压器的匹配阻抗。
6. **公共基准节点** - 将所有 LDO 的基准引脚连接在一起，使这些引脚共享相同的基准电压。
7. **偏好单位增益架构** - 尽可能选择在单位增益模式下运行的 LDO（无外部反馈分频器），从而消除一个失配源。
8. **匹配的反馈网络（如果需要）** - 如果器件不支持单位增益，请为每个稳压器使用具有相同、低容差器件的反馈电阻网络来设置输出电压。

通过应用这八种设计实践，并联 LDO 的输出阻抗会紧密匹配，从而使系统实现公式 3 所示的降噪性能。

## 5 利用镇流电阻器的并联 LDO 的噪声

### 5.1 TPS7A57

使用镇流电阻器捕获并联 TPS7A57 LDO 的测量值 [3]。每个并联 LDO 的 PCB 阻抗变化很小，这会影响 LDO 之间的总镇流电阻 [1]。镇流电阻的这种变化会导致每个 LDO 向负载提供略有不同的电流 [1]，从而导致每个 LDO 的输出阻抗彼此之间略有不同（请参阅图 3-1）。

为了减轻不相等 PCB 阻抗的影响，镇流电阻值从  $2.5\text{m}\Omega$  增加到  $50\text{m}\Omega$ 。图 5-1 展示了产生的噪声频谱。

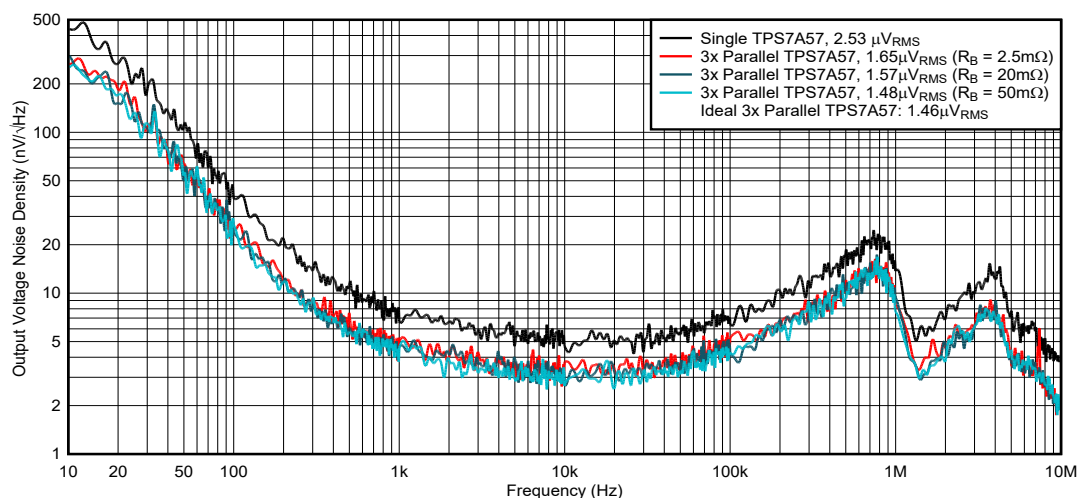


图 5-1. 并联 TPS7A57 LDO 的噪声测量

如果噪声是必须绝对最小化的关键参数，则比增加  $R_B$  更好的方法是匹配 LDO 的每个  $R_B$  之后 PCB 平面的阻抗。如果镇流电阻器上的压降并不重要（例如将并联 LDO 配置为恒流源时 [4]），则一种潜在的更简单方法是使用足够大的  $R_B$ （例如  $50m\Omega$ ）来减轻寄生 PCB 阻抗的影响。

## 5.2 TPS7A94

TPS7A94 LDO [5] 目前具有仅  $0.46\mu V_{RMS}$  (10Hz - 100kHz) 的业界领先噪声频谱密度。TPS7A94 的额定负载电流为 1A，而 TPS7A96 的额定负载电流为 2A [6]。这两个 LDO 都设计为使用镇流电阻器并联。并联这些 LDO 可在线性稳压器设计中实现尽可能低的噪声。业内最多并联十个 TPS7A94 LDO 以实现超低噪声电源轨。并联 TPS7A94 LDO 的噪声分析（节 2 中介绍的条件）如图 5-2 所示。

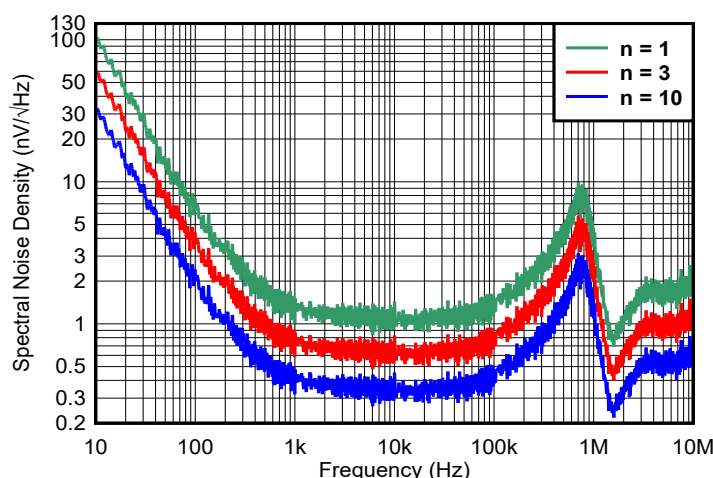


图 5-2. 并联 TPS7A94 的噪声性能

## 6 替代并联 LDO 架构的噪声测量

其他并联 LDO 架构将一个 LDO 配置为主 LDO，其余 LDO 配置为辅助 LDO。主 LDO 通过附加的反馈环路控制辅助 LDO。与镇流电阻器技术不同，LDO 不会彼此独立运行。对于这些架构，前面的分析不再有效，系统噪声不会降低  $\sqrt{n}$ 。由于反馈环路通常连接到未滤波的反馈引脚，这些外部元件可能会导致噪声增加。如果外部元件承载大量噪声，这些元件也可能导致并联 LDO 系统产生更大的噪声。

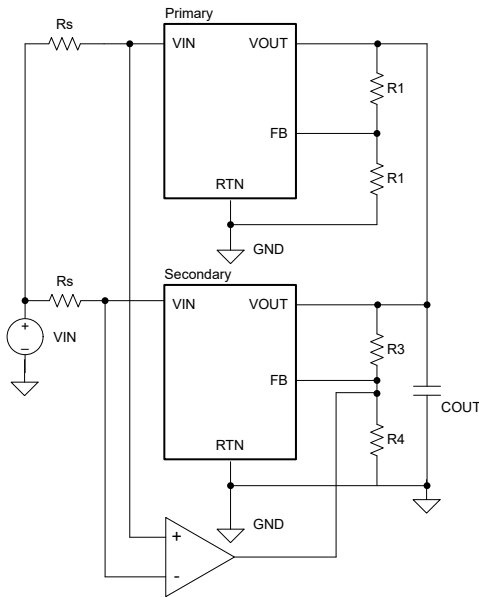


图 6-1. 使用运算放大器的并联 LDO

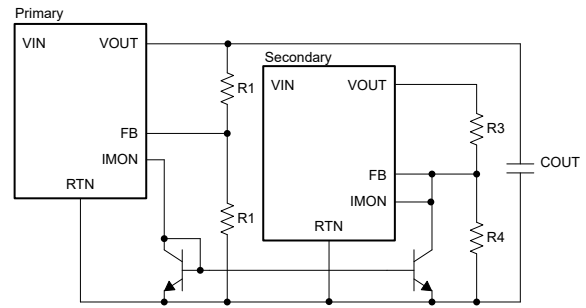


图 6-2. 使用电流镜的并联 LDO

## 6.1 TPS7B7702-Q1

TPS7B7702-Q1 [7] 是一款双路线性稳压器，具有诊断功能，通常用于独立或并行应用。镇流电阻器可用于并联 TPS7B7702-Q1 (请参阅图 6-1)，在使用该架构时，噪声会随着  $\sqrt{n}$  的增加而降低 (请参阅图 6-2)。有关使用镇流电阻器和运算放大器的并联运行的测试数据，请参阅参考设计 [10]。TPS7B7702-Q1 内的两个通道共享相同的  $V_{IN}$  引脚，因此在 [10] 中使用了实现类似并联 LDO 的修改后原理图 (如下方图 6-3 所示)。

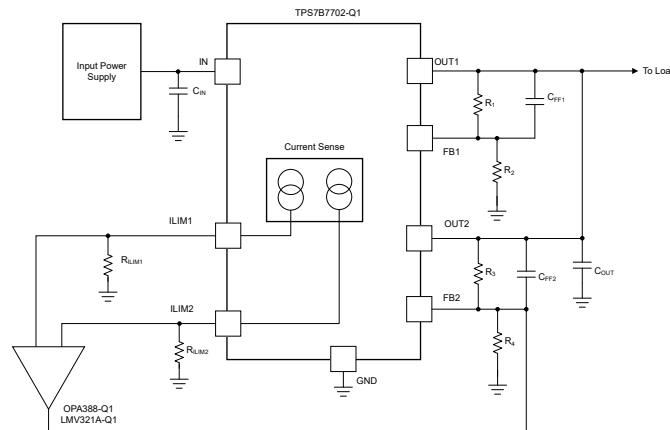


图 6-3. 使用运算放大器的并联 TPS7B7702-Q1

我们使用 TPS7B7702-Q1 LDO 评估了三种并联 LDO 拓扑的噪声性能：

1. **运算放大器受控架构** - 一个单主 LDO 通道通过外部运算放大器驱动多达三个辅助 LDO 通道。
2. **电流镜架构** - 两个 TPS7B7702-Q1 通道使用电流镜网络并联 (请参阅图 6-3)。
3. **镇流电阻器架构** - 两个 TPS7B7702-Q1 通道与放置在稳压器每个输出端的分立式镇流电阻器并联。

噪声是在每种拓扑的并联 LDO 输出端测量。使用两个并联 LDO 通道对电流镜和镇流电阻器配置进行了测试；而使用最多四个并联 LDO 通道 (一个主通道和三个辅助通道) 评估了运算放大器受控架构。

配置产生的输出噪声水平等于或高于单个 TPS7B7702-Q1 的噪声，但镇流电阻器方法除外。只有镇流电阻器拓扑实现了可测量的噪声降低，这证实了本白皮书前面介绍的理论预测 (请参阅图 6-4)。

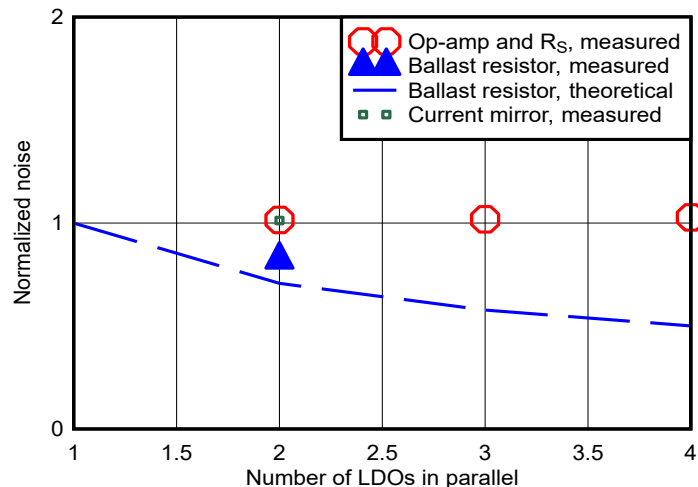


图 6-4. 只有镇流电阻技术可降低系统噪声

## 7 结语

本文档对比了三种常见的并联 LDO 技术的噪声性能。本文首次讨论了使用镇流电阻器降低并联 LDO 噪声的技术基础，同时展示了其他技术无法提供相同的噪声优势。对于单个 LDO 无法满足噪声规格的应用，设计人员现在可以构建正确的并联 LDO 架构，以便满足特定的设计要求，包括超低噪声规格。

## 8 参考资料

- 德州仪器 (TI), [使用镇流电阻器的并联 LDO 的综合分析和通用公式](#) 白皮书
- 德州仪器 (TI), [使用镇流电阻器的并联 LDO 架构设计](#) 白皮书
- 德州仪器 (TI), [并联低压降 \(LDO\) 计算器](#) 工具
- 德州仪器 (TI), [TPS7A57 5A、低  \$V\_{IN}\$  \(0.7V\)、低噪声 \(2.1 \$\mu V\_{RMS}\$ \)、高精度 \(1%\)、超低压降 \(LDO\) 稳压器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [可扩展、高电流、低噪声并联 LDO 参考设计](#) 设计指南
- 德州仪器 (TI), [线性稳压器的技巧、窍门和高级应用](#), 德州仪器 (TI) 电源设计研讨会 SEM2600, 2024
- 德州仪器 (TI), [TPS7A94 1A、超低噪声、超高 PSRR 低压降稳压器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [TPS7A96 2A 超低噪声、超高 PSRR 射频稳压器](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [TPS7B770x-Q1 具有电流传感功能的汽车级单通道和双通道天线 LDO](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [可扩展、高电流并联汽车类参考设计](#) 设计指南

## 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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月