

# 获得适用于激光雷达和 ToF 系统的纳秒级精密激光脉冲控制

**Leaphar Castro**

Member Group Technical Staff

**Anant Sinha**

Application Engineer, High-Speed Amplifiers

## 简介

随着自动驾驶汽车、工业自动化和高级机器人的日益普及，人们对可靠的 3D 测距和传感的需求也在不断增长。激光雷达和飞行时间 (ToF) 系统依靠精确控制的激光脉冲来测量距离和空间信息。要满足这些要求，就需要激光驱动器提供高峰值电流，并在温度和老化过程中保持脉冲间稳定性。无论是用于导航还是高速工业检测，这些系统都依赖于在实际条件下快速、稳定和可重复的激光脉冲。采用栅极驱动器、外部场效应晶体管和电流检测元件的传统分立拓扑结构虽能满足特定的设计要求，但通常在布局复杂度、校准工作量和热性能方面进行权衡。

## 激光脉冲控制的难点何在？

激光驱动器的功能不仅仅是传输电流。它们直接影响激光雷达和 ToF 系统用于计算距离的时序信息。考虑由多个来源组成的简单时序偏差余量，在本文中有三个因素：

- 上升和下降时间 ( $t_{r/f}$ )：脉冲通过检测阈值的速度。
- 传播延迟 ( $t_{pd}$ )：从触发器到实际光发射所需的时间。
- 脉冲间的变化 ( $t_{pp}$ )：时间或振幅在脉冲间漂移的程度。

## 上升和下降时间的影响

激光雷达和 ToF 系统通过计算激光脉冲传输到目标并返回接收器的往返时间来测量距离。区分小距离变化的能力取决于脉冲边沿从无光到全光状态的转换速度。更短的上升和下降时间可减少距离不确定性，并为接收器提供更清晰的参考点。在高分辨率系统中，上升和下降时间通常介于 1ns 至 5ns 之间。

当脉冲边沿较慢时，系统无法确定信号超过接收器检测阈值的确切时刻。因此，在  $t_{r/f}$  等于 1ns 边沿，可引入约 150mm 的距离不确定性、近似为 **方程式 1**：

$$\Delta D = \frac{ct_{r/f}}{2} \quad (1)$$

其中  $\Delta D$  是增量距离且  $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

这种不确定性会随着脉冲边沿变缓而增加，而封装和印刷电路板 (PCB) 的电感等寄生参数，以及激光二极管和驱动器输出的电容，都可能限制这种变缓。例如，将  $t_{r/f}$  从 500ps 增加到 1ns 会使距离加倍，而 2ns 的边沿会将其扩展到近 300mm，从而限制了系统区分小于  $\Delta D$  的目标距离差异的能力。

## 传播延迟

在高速光学系统中，每纳秒都很重要。如果传播延迟随温度、电源电压或元件容差的变化而变化，它会改变用于计算距离的时序基准，并且也可能中断通道间的同步。在直接 ToF 应用 (dToF) 中，根据 **方程式 2** 中所示的 ToF 关系， $t_{pd}$  100ps 的偏差对应于大约 30mm 的距离误差：

$$D = c \times t \quad (2)$$

其中  $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ， $D$  是距离， $t$  是时间。

任何多余的延迟都会直接转化为测距误差。如图 1 所示，500ps 的偏差可能会导致超过 150mm 的往返距离误差，这对以厘米级或毫米级精度为目标的 dToF 系统而言是不可接受的。

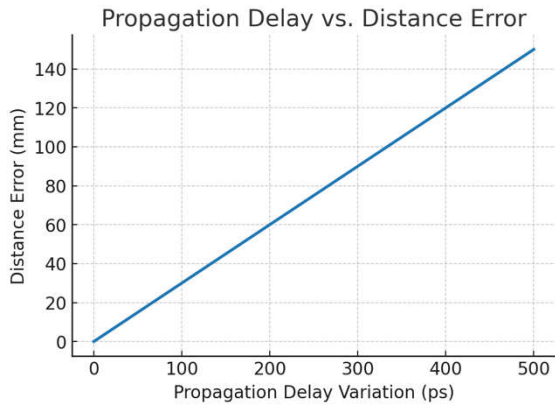


图1. 传播延迟与距离误差之间的关系 (估算值)

在系统对准过程中，虽然可以校准固定延迟，但诸如自热效应等可变延迟会导致测量结果之间存在难以校正的不确定性。

### 脉冲间稳定性

即使是快速、窄激光脉冲，每个脉冲之间也必须保持一致。峰值电流的波动会直接导致光功率的变化，从而降低测量精度和系统可靠性。此漂移的常见来源是温度变化、电源波动和器件老化。

从系统的角度来看，接收器依靠返回的光信号来确定距离。因此，脉冲强度差异可能会被误解为距离变化，尤其是在返回信号接近检测阈值的长距离条件下。在基于阈值的测距系统中，峰值电流 1% 的变化会产生大约 1% 的光功率变化，这可能会产生几十厘米级的距离误差。如图 2 所示，即使是 ±2% 至 ±5% 的微小振幅变化也会改变每个脉冲传递的脉冲包络和光能，随着时间的推移，测距精度和可重复性都会降低。因此，高性能设计可严格控制驱动电流，在所有运行条件下将  $t_{pp}$  变化保持在几个百分点以内。

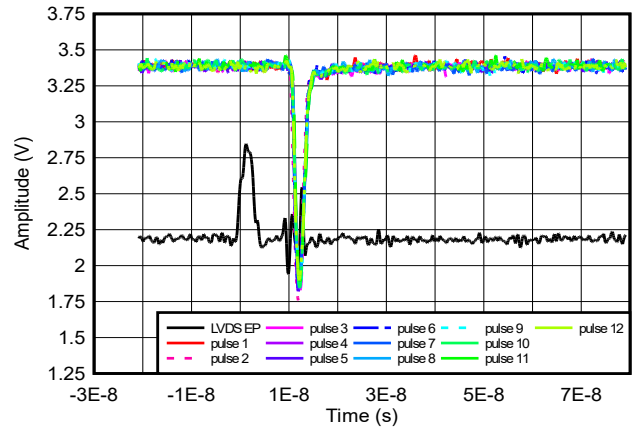


图2. 12 脉冲工况、1.5A 电流、 $R_{damp}=1\Omega$ 、2 组  $5\Omega$  电阻器和  $330pF$  电容组成的缓冲器、 $AVDD = PVDD = VLD = 5V$  条件下的脉冲间幅值

在定义了系统级时序约束后，下一步就是将其转化为可行的激光驱动器实现方案。

### 实现精确的激光脉冲控制

生成精确的激光脉冲需要的不仅仅是向二极管输送电流。驱动器必须提供具有快速边沿、可预测延迟和可重复脉冲振幅的高峰值电流。TI 的 LMH13000 高速激光驱动器通过将  $V_{SET}$  引脚上的输入电压转换为  $I_{OUT}$  处精确调节的灌电流来生成脉冲，如方程式 3 所述。数模转换器 (DAC) 或基准源设置  $V_{SET}$ ，而器件的内部电流镜和控制电路调节通过激光二极管的电流，如图 3 所示。通过仔细选择  $V_{SET}$ 、 $R_{SET}$  和激光阳极偏置电压 (VLD)，设计人员可以调整脉冲幅度、时序和整体脉冲稳定性。

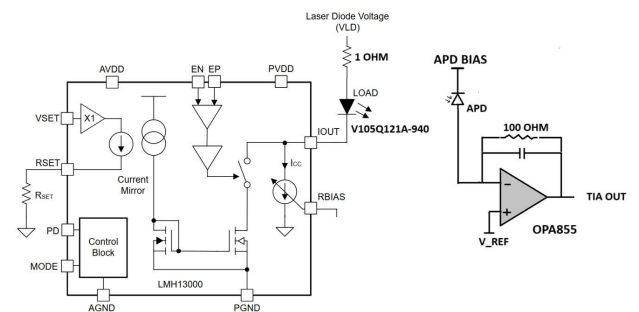


图3. 示例：发射路径采用 LMH13000 配合激光二极管，接收路径采用 OPA855 配合光电二极管

以下是设置脉冲电流和速度的设计步骤。

1. 定义目标输出电流 ( $I_{OUT}$ )。首先考虑激光二极管所需的光功率。**方程式 3** 所示的是由激光器斜率效率设置的峰值输出电流:

$$I_{OUT} = \frac{P_{OPT}}{\eta} \quad (3)$$

其中  $P_{OPT}$  是所需的光输出功率,  $\eta$  是激光器的斜率效率 (瓦/安培)。例如, 如果  $P_{OPT} = 1W$  且  $\eta = 0.5W/A$ , 则  $I_{OUT} = 2A$ 。

由于 LMH13000 支持高达 5A 的脉冲电流, 因此所选的激光二极管必须达到等于或低于此限值的目标光功率。精确设置  $I_{OUT}$  对于最大限度地减小  $t_{pp}$  和减少振幅驱动的时序误差至关重要。

2. 选择  $R_{SET}$  和  $V_{SET}$ 。LMH13000 使用  $V_{SET}$  与  $R_{SET}$  之比设置输出电流, 按内部增益系数  $k$  缩放 (**方程式 4**):

$$I_{OUT} = \frac{V_{SET}}{R_{SET}} \times k \quad (4)$$

在高电流模式下 (模式 = 1),  $k \approx 50k$ 。例如,  $R_{SET} = 20k\Omega$  且  $V_{SET} = 0.8V$  时:

$$I_{OUT} = \frac{0.8}{20k} \times 50k \approx 2.0A$$

可以通过使用 DAC 修整  $V_{SET}$  进行微调。由于 LMH13000 可调节片上电流, 因此该方法能最大限度地降低了对温度和电源变化的灵敏度, 有助于在时序余量范围内将  $t_{pp}$  保持在较小值。

3. 设置 VLD。VLD 必须足够高才能在快速电流转换期间支持所需的激光正向电压和动态电压。LMH13000 数据手册提供了 **方程式 5**, 以此作为尺寸指南:

$$VLD = V_{OUT(MIN)} + V_{FL} \times \frac{dI}{dt} + I_{OUT} \times (R_{LASER} + R_{DAMP}) \quad (5)$$

其中:

- $V_{IOUT}$  是  $I_{OUT}$  处的最小顺从电压
- $V_F$  是  $I_{OUT}$  处的激光器正向电压
- $L$  是总环路电感 (封装和 PCB)

- $dI/dt$  是根据上升和下降时间要求的电流压摆率 (安培/秒)
- $R_{LASER}$  是激光二极管的动态电阻
- $R_{DAMP}$  是激光二极管的外部电阻

例如, 在:

$$V_{IOUT(MIN)} = 6V$$

$$V_F = 2V$$

$$L = 3nH$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{2A}{1ns} = 2 \times 10^9 A/s$$

$$R_{LASER} = 0.3\Omega$$

$$R_{DAMP} = 1\Omega$$

$$VLD \approx 6 + 2 + (3 \times 10^{-9})(2 \times 10^9) + 2(0.3 + 1.0) \approx 16.6V$$

因此, 起始值为 17V 是合适的。增大 VLD 可提高边沿速度, 但也可能导致过冲加剧, 因此需要仔细调整。合理的选择 VLD 可确保快速转换, 同时限制过冲, 直接减小上升/下降时间 ( $t_{r/f}$ ) 对整体总时序偏差 ( $t_{total}$ ) 余量的影响。

4. 优化上升和下降时间及阻尼。驱动器的驱动能力与电路寄生参数共同决定了上升和下降时间。如果没有适当的阻尼, 快速电流脉冲转换会在激光和 PCB 环路中激发振铃, 从而导致过冲和不稳定的光脉冲。设计人员通常通过在  $I_{OUT}$  节点处添加阻尼电阻器和缓冲器网络来解决此问题。电阻器和缓冲器共同抑制寄生振铃, 保留快速边沿并防止  $t_{r/f}$  不必要地增加  $t_{total}$ 。

根据驱动器的输出电容选择缓冲器电容器, 使用 **方程式 6** 进行计算:

$$C_{SNUB} \approx 5 \times C_{IOUT} \quad (6)$$

其中  $C_{IOUT}$  是  $I_{OUT}$  引脚处的有效电容。如果  $C_{IOUT} = 40pF$ , 则  $C_{SNUB} \approx 200pf$ 。

添加一个与激光器和缓冲器网络串联的小阻尼电阻器可抑制不必要的振荡。如图 4 所示,  $R_{DAMP}$  和  $R_{SNUB}$  的典型值在 5Ω 至 10Ω 范围内, 缓冲器电容器的大小

与输出节点电容相匹配。选择  $C_{SNUB}$  作为最坏情况（最高）的  $C_{IOUT}$ ，在验证期间进行修整以平衡过冲和边沿速度。如图 5 所示，该方法减少快速转换和 PCB 寄生效应产生的振铃，同时保持精确脉冲控制所需的亚纳秒级  $t_{r/f0}$

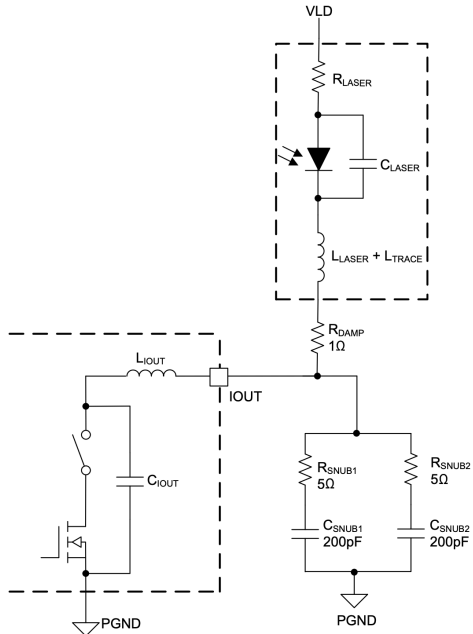


图 4. 阻尼电阻器和缓冲器网络电路

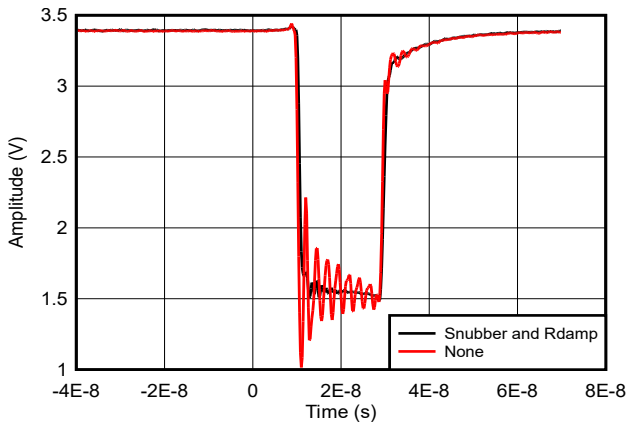


图 5. 配有和未配有缓冲器电路或  $R_{DAMP}$  的 LMH13000 脉冲

5. 控制传播延迟。与上升和下降时间不同，传播延迟并无固定计算公式，而是取决于以下布局与接口规范：

- 输入路由。EP 引脚和 EN 引脚采用差分走线并匹配 100Ω 端接电阻，也可采用单端输入走线，在 LMH13000 输入端做受控阻抗设计并配置合适端接。

- 输出环路。使高电流  $I_{OUT}$  环路保持较短并与 PGND 紧密耦合，从而最大限度地减少电感延迟和振铃。
- 系统校准。在 ToF 测量余量中纳入驱动器至激光器通路，以补偿所有残余系统延迟。

如图 6 所示，通过将布线电感降至最低并确保输入终端阻抗一致，可以减少  $t_{pd}$  的波动，从而使该项影响保持在较小且可预测的范围内。对于需要更高精度的应用，或者在基于温度的校准不切实际的情况下，LMH13000 数据手册的第 6.3.2 节介绍了一种通过直接监测激光台来生成高精度起始脉冲的技术。

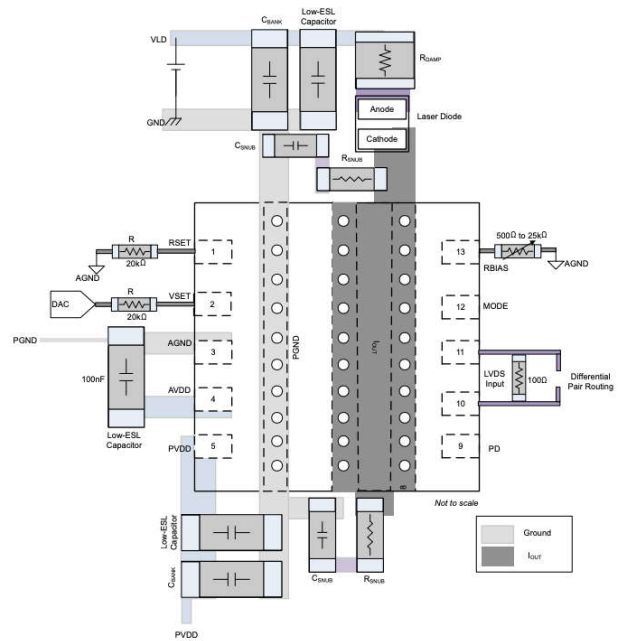


图 6. 采用表面贴装器件封装的 LMH13000 布局示例

### 脉冲系统中的精确脉冲控制

激光雷达和 ToF 系统通常在脉冲模式下运行，产生被长关断时间分隔的高电流突发。在此模式下，电流波形必须快速稳定并在每个脉冲上达到相同的峰值。一种常见方法是通过 VLD 预偏置激光阳极，并使用 LMH13000 的低压差分信号 (LVDS) 输入 (EP,EN) 来选通脉冲。这使得  $V_{SET}$  引脚能够设置振幅，而 LVDS 输入能够独立控制时序。

当  $R_{DAMP} = 2.6\Omega$ 、 $VLD = 12V$  且  $I_{OUT} = 400mA$  时（激光二极管：Osram 的 PLT5 518FB\_P），图 7 展示了使用激光二极管时的实验结果。在图中，蓝色为启用，黄色为启动脉冲，橙色为  $V_{ANODE}$ 。将幅度与时序解耦，可最大限度地

减少脉冲间漂移并保持快速沿，从而同时提升幅度稳定性 ( $t_{pp}$ ) 和边沿一致性 ( $t_{r/f}$ )，进而进一步降低  $t_{total}$

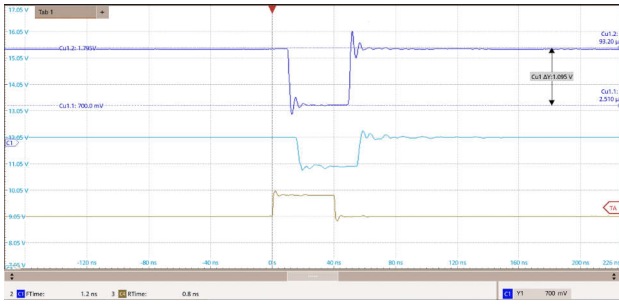


图 7. 脉冲模式下的精确脉冲控制

### 发送器测试结果的实际示例

在表 1 所示的激光雷达发送器条件下测试 LMH13000，验证了设计原理。

设计参数	值
二极管	V105Q121A-940
模拟 VDD 和电源 VDD	5V
模式	1
脉冲电流	2A 峰值
脉宽	0.6ns、0.7ns
$R_{SET}$	20k $\Omega$
$V_{SET}$	0.5V (由 DAC 设置)
VLD	4.5 V、5 V、6.5 V
阻尼网络	$R_{DAMP} = 1\Omega$ $R_{SNUB} =$ 不适用 $C_{SNUB} =$ 不适用 (无缓冲器)

表 1. LMH13000 脉冲驱动器设计参数示例

图 3 展示了测试设置，其中说明了用于给激光器施加偏置电压并配置 LMH13000 的电路原理图。

图 8 显示了脉冲工作期间 LMH13000 在不同 VLD 偏置电压下的光学响应。瞬态波形展示了 VLD 如何直接影响上升时间、过冲和稳态电流调节。降低 VLD 会导致边沿转换变慢，而调高 VLD 会提高速度，但可能会导致过冲加剧。因此，选择适当的 VLD 可平衡  $t_{r/f}$  与脉冲稳定性，以最大限度地减少其对总体变化余量的影响。

该设计展示了如何通过精确的偏置和阻尼，生成具有极小过冲且性能可重复的快速、稳定的光脉冲。根据偏差余量，此设计实现了  $t_{r/f} < 1ns$ 、 $t_{pd}$  变化  $< 50ps$  且  $t_{pp} <$

2%。总之，这些结果可以得出  $t_{total}$  远低于 1ns，从而实现毫米级距离精度。增设温度传感器可进一步优化性能，实时补偿延迟漂移与幅度漂移，进一步降低环境因素对偏差余量的影响。

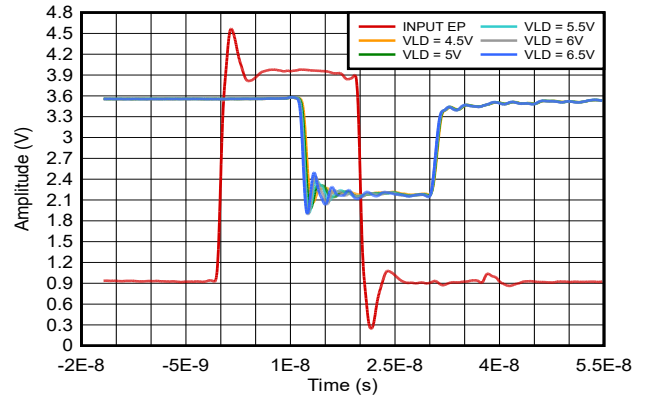


图 8. 在偏置电压分别为 4.5、5、5.5、6 和 6.5 VLD 时的光学响应特性

### 结语

精确的激光脉冲控制需要平衡边沿速度、时序精度、稳定性和光功率的一致性。通过将高速电流驱动和稳压功能集成到紧凑的解决方案中，LMH13000 既降低了设计复杂性，又提高了可重复性和性能。

结合简单的反馈和温度监测技术，这款激光驱动器为连续和脉冲激光操作提供了一个可靠的平台，可在要求严苛的激光雷达、ToF 及工业光学传感应用中实现可靠且精确的性能。

### 其他资源

- 阅读应用简报，[使用 LMH13000 实现激光二极管的自动功率控制](#)。
- 查阅白皮书，[《汽车激光雷达简介》](#)。
- 下载 [LMH13000 TINA-TI™ 软件 Spice 模型](#)。

### 关于作者

Leaphar Castro 是 Texas Instruments 的一名产品营销工程师，专攻高速放大器产品并支持包括工业自动化在内的各种工业市场。他于 2016 年获得中佛罗里达大学电气工程学士学位。Leaphar 是 TI 技术梯队的成员组技术人员。

Anant Sinha 是 Texas Instruments 的一名应用工程师，专攻高速放大器产品。他获得了贾达普尔大学仪器与电子工程学士学位。

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 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