

Sales and Marketing/China Automotive

Scarlett Cao

摘要

在众多的电机应用场景中，步进电机因其能够精确控制转动角度、定位精度高等优势而被广泛使用于汽车头灯控制、抬头显示 (HUD)、热管理膨胀阀、打印机、摄像头等应用领域。然而，步进电机在运行过程中产生的噪声问题却在一定程度上限制了它在噪声敏感环境下的应用。本文将围绕 TI 在汽车电子领域的明星产品 DRV8889-Q1 和 DRV8899-Q1 步进电机驱动芯片在应用时的噪声问题展开探讨，从电气、机械等维度对噪声产生根源进行深入分析，包括安装稳固性、电机系统谐振频率、人耳听力范围等因素。针对这些问题，本文提出了采用更高微步数、配置合理电流、根据负载特点和应用需求配置合理的控制模式等优化策略，为降低 DRV8889-Q1 和 DRV8899-Q1 应用中的噪声问题提供实践指导。

1. 步进电机驱动原理，噪声问题和根源分析

1.1 步进电机驱动原理

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或者线为转移的开环控制电机。每接收到一个脉冲信号，步进电机就会按照固定的步距角转动。下图 1 以双极性步进电机的绕组和驱动电路为例，一个步进电机驱动需要两个 H 桥来控制两个绕组中的电流变化。电流的方向决定了绕组产生的磁场方向。在下图中，A 绕组和 B 绕组产生电流方向正交，形成的磁场方向正交。H 桥控制可以通过 PWM 斩波调节独立控制 A 绕组和 B 绕组在每一步的电流大小，进而改变合成磁场的大小和方向。如图 2 绕组电流波形所示，通过控制 A 和 B 绕组的电流变化，可以形成叠加的旋转磁场，从而使得转子随着步进信号转动，并稳定在合成的磁场位置。

步进电机输出的电流大小可以等效为

$$I_{OUT} = \sqrt{I_A^2 + I_B^2} \quad (1)$$

旋转稳定的角度位置

$$\theta = \tan^{-1} \frac{I_B}{I_A} \quad (2)$$

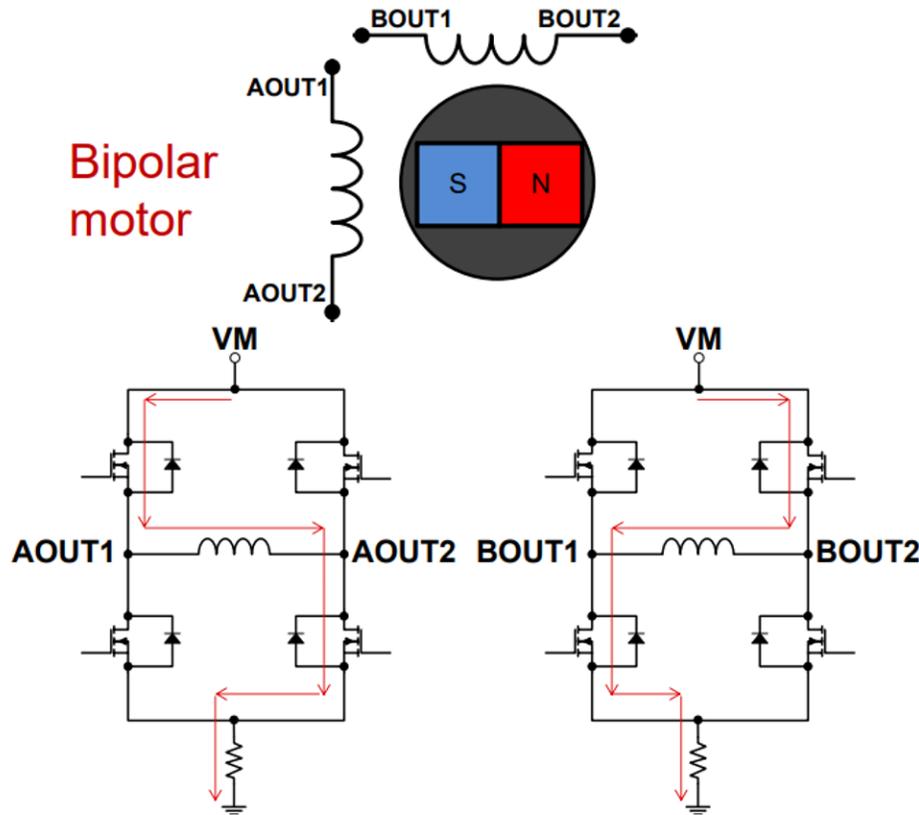


图 1. 双极性步进电机驱动电路图示

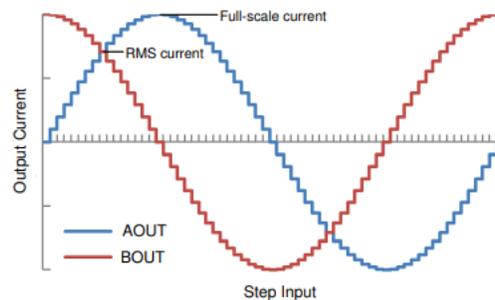


图 2. 双极性步进电机绕组电流波形

1.2 步进电机应用噪声根源分析

步进电机应用中的噪声问题源头可以分为机械原因和电气原因两大类。

步进电机在运行时，如果安装不稳固，电机在运转过程中就会产生晃动，使电机与安装部件之间产生额外的摩擦，进而发出异响²。另外，电机内部的机械部件之间接触不良也是导致噪声的一个因素。电机的转子与定子之间若存在间隙不均匀或者有杂物进入，会在运转时引发不规则的摩擦，从而产生噪声。对于这类机械原因造成的噪声问题，可以通过调整电机本体和安装方式确保其稳固安装，并适当增加减震装置减少振动传递，来降低由此产生的噪声。

从电气角度来看，人耳能够听到的声音频率范围一般在 20Hz 到 20kHz 之间，如果步进电机运行时产生的振动频率落在这个区间内，就容易被人耳察觉形成噪声。从原理来看，步进电机也是脉冲电机，当驱动电路给电机发送指令使其进入新的一步时，类似于阶跃响应，转子会产生过冲现象，并在下一个位置附近产生机械震动，而这个震动所对应的频率如果处于人耳听力范围内，就会产生可听见的噪声。另外，电机的控制模式、驱动电流的设置等电气参数不合理，也会引起人耳听力范围内的干扰增加，我们将在下一小节详细说明。

还需注意的电机系统的谐振频率。电机系统谐振频率由电机的绕组电感、电容（包括电机内部的寄生电容和外部连接电路的电容）及机械结构的弹性等多种因素共同决定。当外界激励频率接近电机系统的谐振频率时，系统就会发生谐振现象。在谐振状态下，电机的振动幅度会显著增大，从而产生强烈的噪声。以一个典型的步进电机驱动电路为例，电机绕组的电感和外部连接电容构成一个谐振电路，当驱动脉冲的频率接近该谐振电路的固有频率时，电路中的电流和电压会发生剧烈振荡，导致电机产生大幅度振动。这种谐振现象在一些特定的电机运行条件下更容易发生，如在电机启动或停止过程中，由于驱动信号的频率变化范围较大，更容易与谐振频率匹配，从而引发噪声问题。

2. 基于 DRV8889-Q1 驱动优化降低噪声的策略

2.1 使用更小的微步

当驱动发指令进入新一步，电机绕组中的电流变化会产生磁场力，作用于转子使其转动。但由于电机系统的惯性和电感等因素，转子的运动不会立即稳定，而是会产生过冲和振荡，如下图 3 所示。DRV8889-Q1 集成了业界领先的微步控制算法，其内置的分度器逻辑支持多种微步进模式，能实现 1/4、1/8、1/16、1/32、1/64、1/128 和 1/256 微步进等。当我们将原来的单步划分为更加细分的微步（microstep）后，转子每步转动的角度会减小。且每步引起的扭矩变化也减小³，如下公式所示。因而可以通过更高的微步数减小机械振动的产生和振动能量的传递。在实际应用中采用更高的微步数，相比传统的大步进模式能使电机运行更加平稳，如下图 4 所示。当然，微步的细分也需要综合考虑系统的响应速度等其他因素，确保整体性能不受影响。

$$T_{INC} = T_{HFS} \times \sin\left(\frac{90^\circ}{N}\right) \quad (3)$$

T_{INC} 为每个微步引起的扭矩变化， T_{HFS} 为全步进模式下的扭矩， N 为微步数

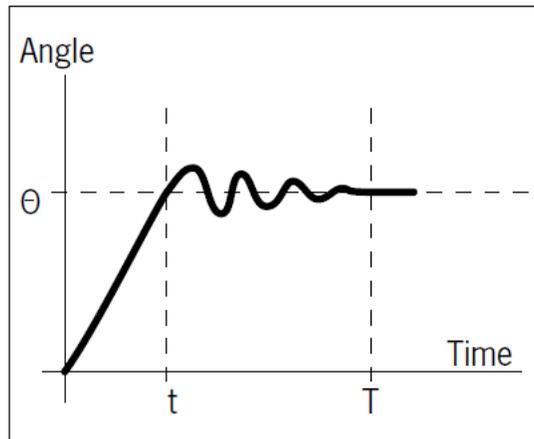
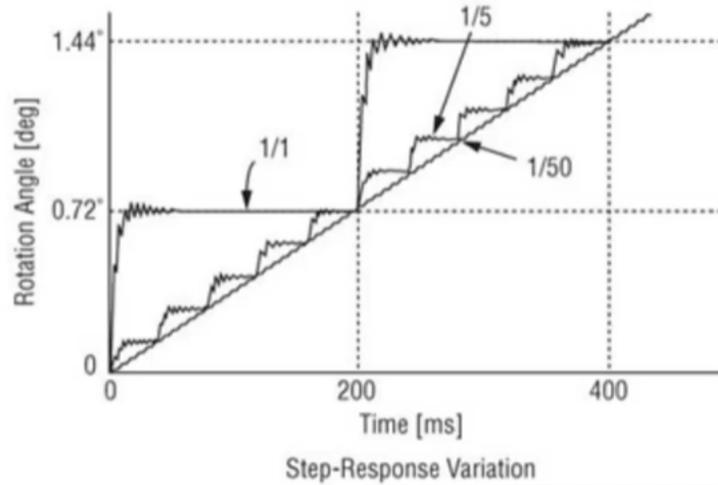


图 3. 步进电机转动中的阶跃响应和振荡



www.orientalmotor.com

图 4. 增加微步数的阶跃响应对比⁴

2.2 配置合理的驱动电流

电机的驱动电流与扭矩输出密切相关。电机的转矩公式如下

$$T = \frac{PN}{2\pi} \theta I \quad (4)$$

其中 T 为扭矩，P 为极对数，N 为圈数， θ 为磁通量，I 为电流。电流过大会导致扭矩过剩，电机内部的磁场力会超过实际负载所需，使得电机产生不必要的加速和震动，从而引发噪声。DRV8889/A-Q1 为 2.4A 峰值、1.5A 满量程。开发者需要精确地按照额定电流以及实际负载、转速要求等需求来配置合适的电流值，避免因扭矩过剩等原因造成的震动和噪声问题。

2.3 选择合适的控制模式，规避人耳听力范围的 PWM 开关频率

如果 PWM 开关频率落在人耳听力范围内，同样会产生能够听到的噪声，并且噪声的程度与电流纹波的大小相关。在 DRV8889-Q1 步进电机驱动器应用中，衰减模式的合理选择对 PWM 开关频率有很大影响，从而对于降低噪声起着关键作用。DRV8889-Q1 具有多种衰减模式选项，包括慢速衰减模式、快速衰减模式、慢速-混合衰减模式、智能调优动态衰减模式和智能调优纹波控制模式等。下面第三小节将对不同衰减模式的应用进行分析，并针对实际系统需求给出建议。

3. 基于 DRV8889-Q1 不同衰减模式驱动优化降低噪声的策略

3.1 慢速衰减模式

在 DRV8889-Q1 所具备的不同控制模式里，慢速衰减模式的电流纹波相对最小。如下图 5 所示，在慢速衰减模式下，H 桥的两个低侧 MOSFET 均处于开启状态，以便实现电流再循环⁵。它的优势在于给定的 toff 下，没有给绕组施加反向电压，电流下降的速度比较慢，电流纹波是所有衰减模式中最低的。在电机运行速度相对平稳、负载变化不大的场景中，慢速衰减模式能展现出较好的效果。不过，慢速衰减模式也存在一定的局限性。在电流步进下降时，慢速衰减需要较长时间才能稳定至新的 I_{TRIP} 电平，因为慢速衰减模式下电流下降速度非常慢。当关断时间结束时的电流高于 I_{TRIP} 电平时，慢速衰减将延长到另一个关断时间，依此类推，直到关断时间结束时的电流低于 I_{TRIP} 电平为止。如果电流保持很长时间（STEP 引脚无输入）或步进速度非常慢，由于电机绕组上不存在反电动势，电机电流上升速度会非常快，可能需要极长的关断时间，导致电流调节损耗和波形畸变，产生不均衡的扭矩。这种不均衡扭矩作用于电机，就会造成电机的震动以及噪声的产生。

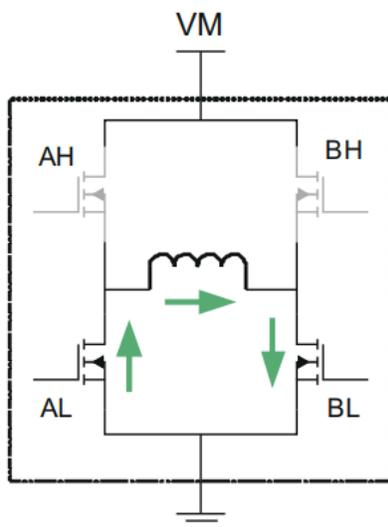


图 5. 慢速衰减

3.2 快速衰减模式

快速衰减模式下，一旦达到 PWM 斩波电流电平，H 桥便会进行状态逆转，使绕组电流反向流动，如图 6 所示。其优点在于电流步进下降的过渡时间要比慢速衰减短得多，因而非常适合需要电流快速响应控制信号进行调整的应用场景。不过，快速衰减模式的电流纹波是比较高的，快速变化的电流会产生较大的磁场变化从而引起电磁振动。在一些对噪声较为敏感且追求低纹波电流的应用场景中，单独使用快速衰减模式可能会因纹波产生可听见的噪声，影响使用体验。

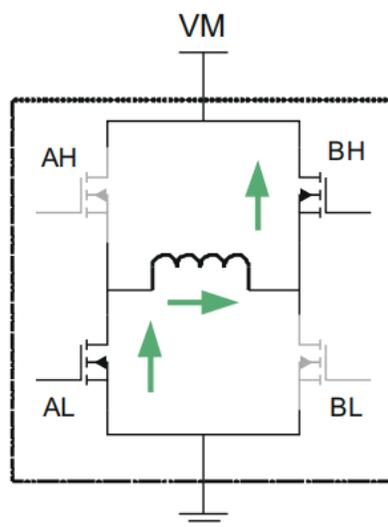


图 6. 快速衰减

3.3 智能调优动态衰减模式

智能调优动态衰减是一种较为先进的电流调节控制方法，通过在慢速、混合和快速衰减之间自动配置衰减模式，实现对衰减模式的智能优化。在混合衰减过程中，智能调优将动态地调整总混合衰减时间中的快速衰减百分比，在每个 PWM 周期进行迭代优化。具体来说，如果电机电流超过目标跳变电平，则衰减模式在下一个周期变得更加激进（增加快速衰减百分比）以防止调节损失；如果必须长时间驱动才能达到目标跳变电平，则衰减模式在下一个周期变得不那么激进（去除快速衰减百分比），从而以更少的纹波实现更高效地运行，如下图 7 所示。在步进下降时，该模式也会自动切换到快速衰减，以便快速进入下一步进状态。对于需要实现小电流纹波且希望在电

流调节方案中保持固定频率的应用，智能调优能有效降低因电流波动等电气原因产生的噪声，提升电机运行的平稳性和安静程度。

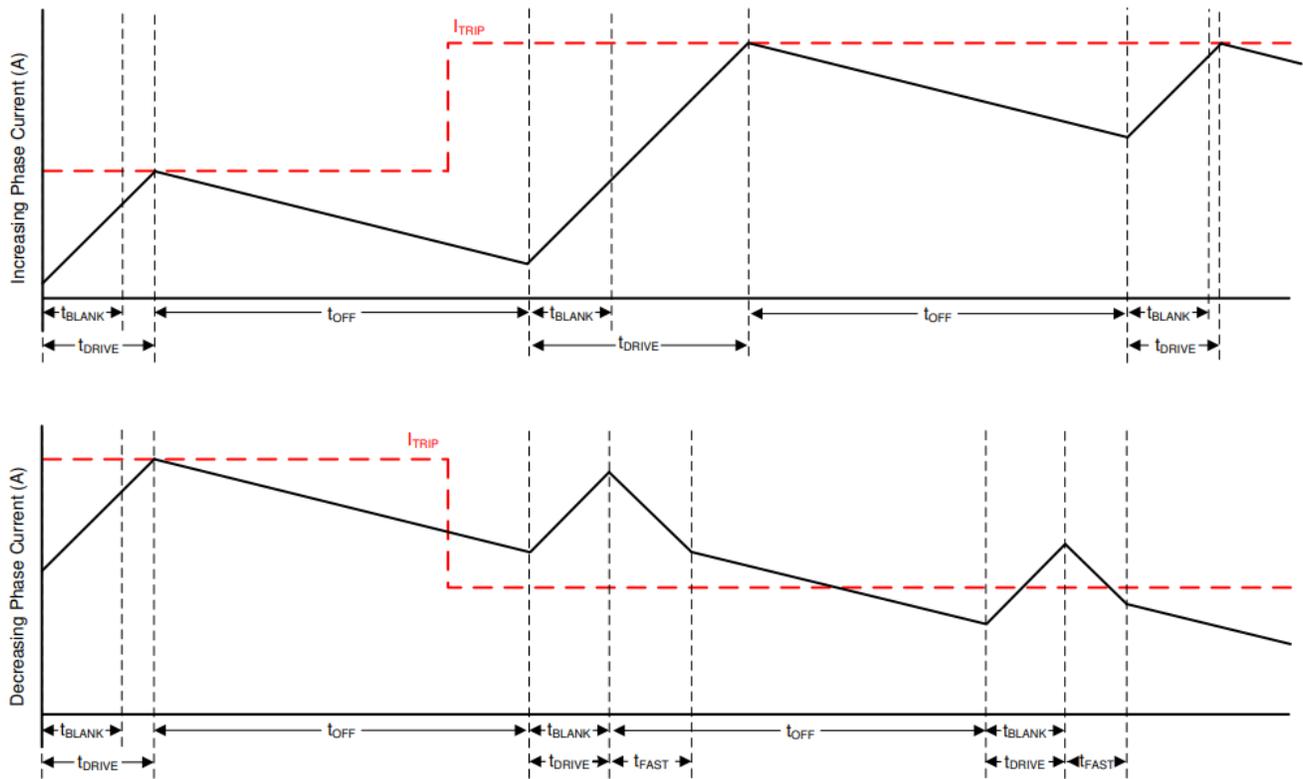


图 7. 智能调优动态衰减模式

3.4 智能调优纹波控制模式

智能调优纹波控制模式通过在 I_{TRIP} 电平旁设置一个 I_{VALLEY} 电平来进行精确的电流调节。当电流电平达到 I_{TRIP} 时，驱动器不是进入慢速衰减直到 t_{off} 时间结束，而是进入慢速衰减直到达到 I_{VALLEY} ，如图 8 所示。在此模式下， t_{off} 根据电流电平和运行条件而变化。这种控制方法可以更严格地调节电流电平，使得电流波形尽可能接近理想的正弦波，从而提高电机效率和系统性能。在能够承受可变关断时间和开关频率的系统中，该模式可实现较小的电流纹波，进而减少因电流纹波引起的电机震动以及由此产生的噪声。然而需要注意在智能调优纹波控制模式下 t_{off} 时间会随着电流减小而延长，所以在低电流条件下可能会使得开关频率进入人耳可听的频段范围，造成噪声问题。

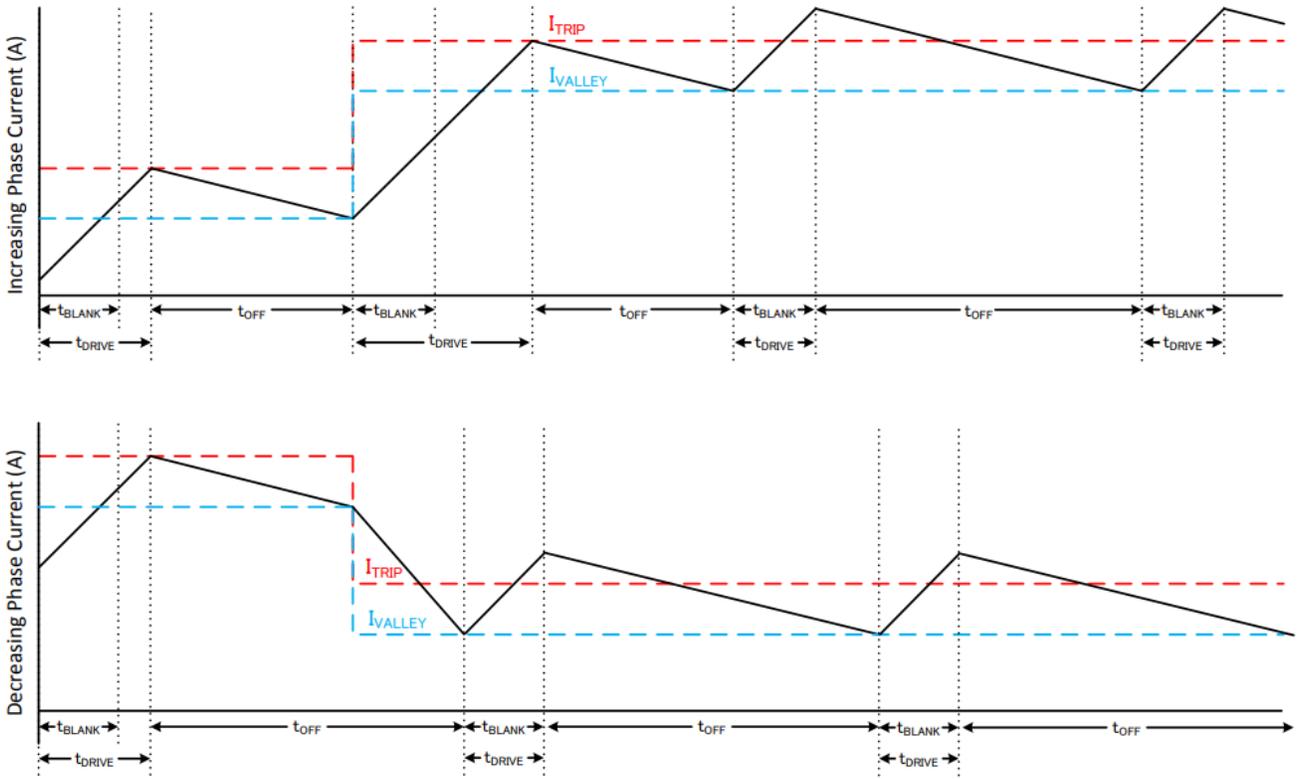


图 8. 智能调优纹波控制模式

4. 总结

在实际的步进电机应用中，通过综合考虑电机的负载情况、运行速度、对电流纹波的耐受程度以及具体的噪声要求等多方面因素，合理选择控制模式，可以降低因电气方面原因产生的噪声问题。结合机械方面的优化手段，可以降低噪声，提升整个步进电机应用系统的性能和使用体验。

参考文献

1. [DRV8889-Q1 数据手册](#)
2. [How to Reduce Audible Noise in Stepper Motors \(SLVAES8\)](#)
3. [How to Improve Motion Smoothness and Accuracy of Stepper Motors \(SLOA293A\)](#)
4. www.orientalmotor.com
5. [Current Recirculation and Decay Modes \(SLVA321A\)](#)

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