

## Application Brief

## 了解栅极驱动器压摆率控制、MOSFET 开关优化以及保护特性



Audrey Kuehler, Sarah Anthraper, Joseph Chou, Anthony Lodi

## 简介

直流电机的使用在汽车和工业市场中变得越来越普遍。选择栅极驱动器并非易事，因为每种终端设备通常都具有独特要求。电机驱动器系统有许多要求，包括电磁干扰 (EMI) 性能、热性能、声学噪声性能和系统故障响应。

为了满足客户系统的各种要求，TI 的电机驱动器产品系列提供了丰富的器件特性来满足各种需求。本文档旨在概述 TI 产品系列中各种电机驱动器栅极驱动器的一些可用特性，重点介绍用于 MOSFET 开关控制和优化的特性。相关特性包括 VDS 压摆率控制、死区时间控制、减少寄生  $dV/dt$  导通、前置和后置米勒 MOSFET 开关优化、占空比补偿以及在故障关断期间减少电压瞬态尖峰。表 1 概述了每个可用特性在哪些器件上提供。

表 1. 器件特性

	器件 (栅极驱动器)	VDS 压摆率控制 (IDRIVE) (O = 开环, C = 闭环)	可配置死区时间 (O = 开环, C = 闭环)	关断预放电电流 (O = 开环, C = 闭环)	导通预充电电流 (O = 开环, C = 闭环)	导通后充电电流 (O = 开环, C = 闭环)	占空比补偿	软关断故障	打开 $dV/dt$ 保护
有刷直流/步进电机	DRV8711	✓O							
	DRV8702/3-Q1	✓O							
	DRV8x05/6-Q1	✓O							
	DRV8714/8-Q1	✓O/C	✓C	✓C	✓C	✓C	✓		✓
	DRV8000/2-Q1	✓O/C	✓C	✓C	✓C	✓C	✓		✓
无刷直流	DRV8305-Q1	✓O							✓
	DRV3255-Q1	✓O (Note1)	O					✓	✓
	DRV3245-Q1	✓O (Note1)	O					✓	✓
	DRV3233-Q1	✓O	✓O/C	✓O		Note2		✓	✓
	DRV8334/-Q1	✓O	✓O/C	✓O		Note2		✓	✓
	DRV8161/2	✓O						✓	✓
	DRV8363/-Q1	✓O						✓	✓
	DRV8320/23	✓O	✓C						✓
	DRV8350/3	✓O	✓C					✓	✓
	DRV8340/3-Q1	✓O	✓C						✓
	DRV8328								
	DRV8329/-Q1								
	DRV8300/-Q1								

## 压摆率控制

压摆率控制是在设计电机系统时需要考虑的关键因素之一。要确定所需的 MOSFET 压摆率，需要在 EMI 性能和效率之间进行权衡。一般而言，压摆率控制有两种方法：开环压摆率控制和闭环压摆率控制。MOSFET 压摆率控制的实现方式是调整栅极电流来控制 MOSFET 的导通和关断时间。对于开环压摆率控制，设计人员需要为所需的压摆率选择栅极电流。为了实现闭环压摆率控制，栅极驱动器器件会通过一些硬件或软件配置自动调节栅极电流，以实现所需的压摆率。

## VDS 转换率控制

电机磁场和开关电流产生的电气噪声会产生 EMI，这可能会由于辐射或传导发射而干扰附近电子器件的运行。EMI 会受到电机设计、功率和电机转速的影响。电机驱动器系统中还有其他 EMI 源，但在本文中，我们重点介绍了电机设计中 MOSFET 开关期间产生的 EMI。

MOSFET Miller 区域期间的压摆率控制对于在电机设计中平衡 EMI 和热性能至关重要，如图 1 所示。降低 VDS 压摆率有助于降低 EMI，方法是抑制由开关节点电压快速上升或下降引起的高频开关噪声。尽管降低 VDS 压摆率可以提高 EMI，但 MOSFET 开关产生的功率损耗会增大。这是因为器件在具有高 VDS 电压和高 IDS 电流的区域中运行的时间更长，因此在米勒范围内的开关速度较慢期间会产生更大的功率损耗。对于设计工程师而言，选择能够平衡 EMI 性能与目标应用热性能的压摆率非常重要。

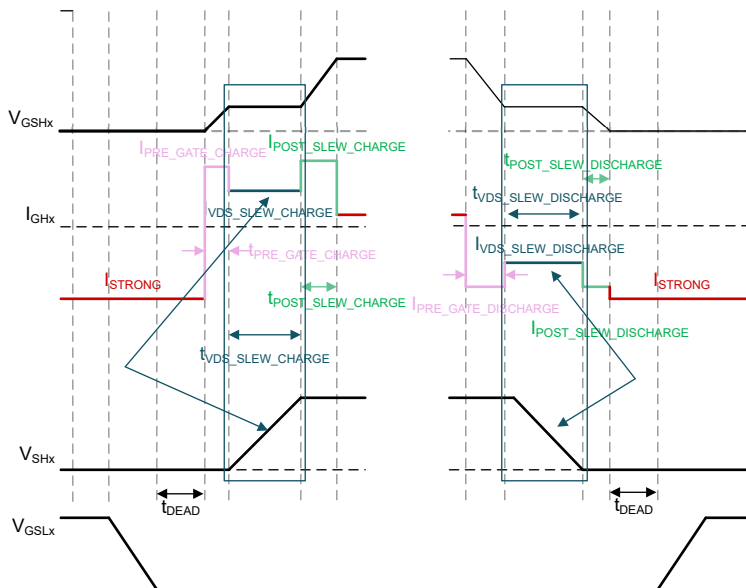


图 1. VDS 压摆率可调节性

TI 的几款电机驱动器提供可调压摆率控制，允许用户根据 EMI 和热因素调整 MOSFET 开关速度。压摆率控制有两种类型 - 开环压摆率控制和闭环压摆率控制。对于开环控制方法，设计人员可以通过 SPI 配置充电/放电栅极电流以控制压摆率。在 MOSFET 米勒区域期间，栅极电流控制装置是用于调整 MOSFET 的 VDS 上升和下降时间的关键元件。对于使用闭环方法控制压摆率的驱动器，工程师可以在栅极驱动器寄存器中配置目标压摆率，并且驱动器会根据需要自动调整栅极电流，从而通过监测 VDS 电压压摆率来实现目标压摆率。对于没有开环或闭环压摆率控制的驱动器，必须通过添加栅极电阻器等外部元件来调节 MOSFET 压摆率，从而减慢栅极电流。可配置的开环和闭环压摆率控制在开发阶段具有易用性优势，因为可配置的开环和闭环压摆率控制允许通过 SPI 进行简单调整，从而无需更改硬件即可使用不同的 MOSFET 调整压摆率。这样就能够在测试期间快速调整 MOSFET 的压摆率，从而找到理想设置。可配置的压摆率控制还通过移除电阻器和二极管组件来减小设计尺寸并降低设计成本，如图 2 所示。可配置的压摆率控制最多可为每个 MOSFET 节省三个电阻器 (R\_SOURCE、R\_SINK、RPD) 和一个二极管 (DSINK)。

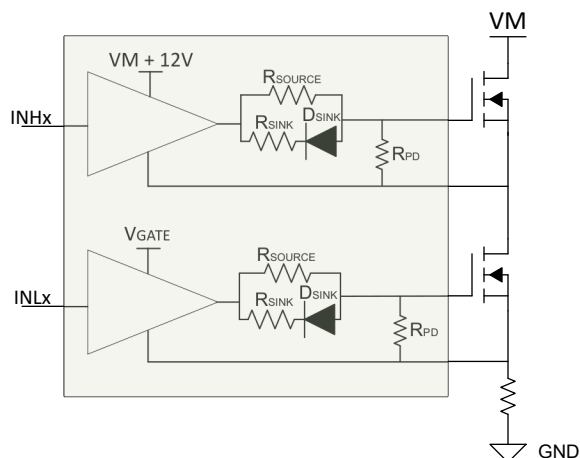


图 2. 硬件压摆率控制

## MOSFET 开关优化

### 关断预放电电流

MOSFET 栅极关断预放电功能可让用户对强大的预放电栅极电流进行编程，以将栅极电压快速放电到米勒区域。**图 3** 中展示了一个示例，其中对栅极施加了强大的栅极预放电电流以快速将栅极电压放电至米勒区域，此时驱动器会通过 EMI 临界区域切换到较慢的放电电流。

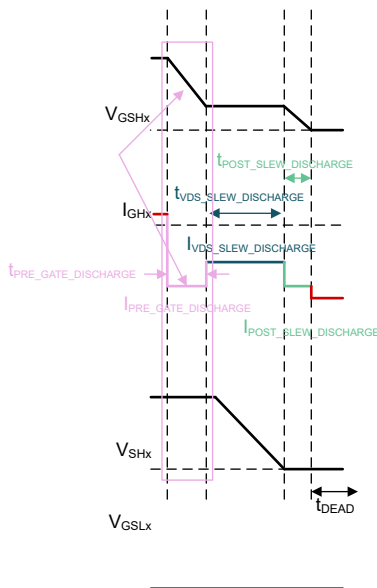


图 3. 预放电电流

由于米勒区域之前没有 **VDS** 压摆 (**VSHx**)，因此可以在该区域中使用高预放电电流，从而减少 **EMI** 问题。这可以在开环或闭环配置中完成。在开环中，用户选择所需的预放电栅极电流，并根据电流到达特定 **MOSFET** 的米勒区域所需的时间来选择施加栅极电流所需的时间。在闭环模式下，用户通过 **SPI** 对预放电时间进行编程，并且栅极驱动器会施加强大的预放电栅极电流，以根据编程的预放电时间将栅极放电到米勒区域。

使用关断预放电电流的优点包括：

1. MOSFET 开关损耗减少
2. 以更大占空比运行
3. 可减少占空比抖动

在 MOSFET 关断期间，在较高的  $R_{ds(on)}$  区域内缩短运行持续时间，因此可以减少 MOSFET 开关损耗。此外，可以实现更高占空比运行，并且可以由于缩短整体 MOSFET 关断时间而减少占空比抖动，从而通过缩短开关时间以提供更精确的占空比控制。

## 导通预充电电流

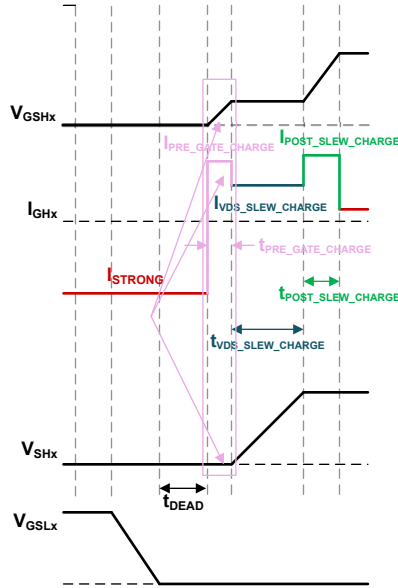


图 4. 预充电电流

导通预充电电流和关断预放电电流类似。对于导通预充电电流，用户能够对强大的预充电栅极电流进行编程，以快速为栅极电压充电，直至达到米勒区域。由于米勒区域之前不存在  $V_{DS}$  压摆，因此可以使用高预充电电流。目前，TI 的一些驱动器提供闭环配置来导通预充电电流。用户配置目标预充电时间，并且驱动器在 MOSFET 导通期间使用更强的栅极驱动电流以实现配置的预充电时间，直到驱动器检测到已达到米勒区域。

使用栅极导通预充电电流的优点与栅极关断预放电特性的优点相似：

1. 更短的 MOSFET 导通时间，从而降低 MOSFET 开关损耗
2. 以更大占空比运行
3. 可减少占空比抖动

MOSFET 导通时间越短，MOSFET 开关损耗就越小，而通过体二极管导通花费的时间更少、功率损耗也会更低。此外，可以实现更高的占空比运行，并且可以由于缩短整体 MOSFET 导通时间而减少占空比抖动，从而通过缩短开关时间提供更精确的占空比控制。

## 导通后充电电流

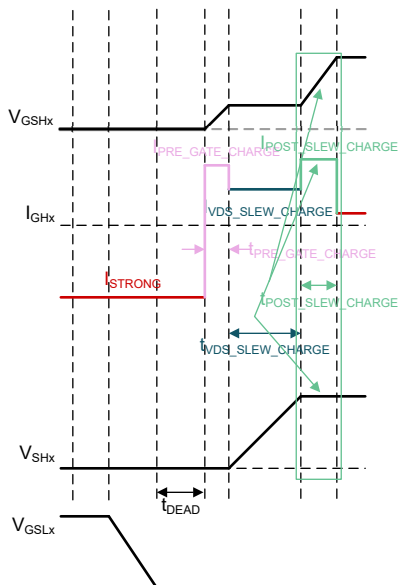


图 5. 后充电电流

栅极导通后充电电流是一个特性，用于在米勒区域完成后全面增强 MOSFET 栅极电压。这是通过施加强大的后充电栅极电流来实现的，该电流会在 VDS 电压完成压摆后快速将栅极电压充电至 12V。由于米勒区域完成后不存在 VDS 压摆，因此可以使用高后充电电流。此特性提供开环和闭环配置供选择。在开环配置中，用户选择所需的后充电栅极电流，一旦在 MOSFET 导通期间 IDRIVE 控制时间到期，驱动器就会切换到所选的电流。在闭环中，驱动器在 MOSFET 导通期间，在驱动器检测到 VDS 压摆完成后，使用更强的栅极驱动电流。

导通后充电电流的优点包括：

- 减少 MOSFET 导通期间的功率损耗。

通过在 VDS 压摆完成后快速将 MOSFET VGS 电压提高至约 12V，可以更快地降低 MOSFET Rdson，并且由于用于高 RDSON 运行的时间更少，从而降低功率损耗。

## 保护，故障，行为响应

### 导通 dV/dt 保护

dV/dt 导通是 MOSFET 快速压摆时会出现的系统问题。当开关节点（高侧和低侧 MOSFET 之间的连接点）快速压摆时（图 6），电压可通过该 MOSFET 的寄生栅漏电容 ( $C_{GD}$ ) 耦合到非开关 MOSFET 的栅极。耦合会导致 MOSFET 的栅源电压升高（本应保持关断状态）。如果栅极电压超过 MOSFET 阈值电压 ( $V_{th}$ )，则关断的 MOSFET 可能会短暂导通，而另一个 MOSFET 会导通，这会导致跨导或击穿。击穿可能会导致 MOSFET 过热，并可能造成损坏。通过在相反方向的 MOSFET 导通期间在关断的 MOSFET 上启用强下拉功能，栅极驱动器可以为耦合到栅极中的寄生电荷提供低阻抗路径。这种强大的栅极下拉路径有助于减少关断 MOSFET 的栅源极电压的任何上升，从而有助于防止 MOSFET 开关期间因 dV/dt 耦合而导致的寄生导通。

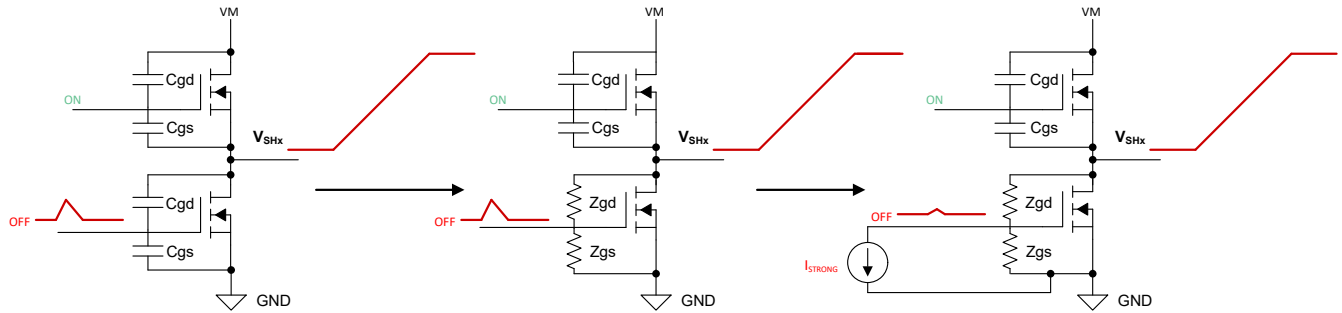


图 6. dV/dt 保护

导通 dV/dt 保护的优势：

- 可以通过强力下拉相反方向的 MOSFET 栅极来帮助减少 MOSFET 导通期间的 dV/dt 耦合，从而可能无需添加外部 Cgs 电容，具体取决于设计。（可能消除该需求）

### 可配置的死区时间

如讨论 dV/dt 保护时所述，在开关 MOSFET 系统时，应避免跨导或“击穿”条件，从而防止损坏功率 MOSFET 或系统电源。当高侧 MOSFET 和低侧 MOSFET 同时导通时，就会发生直通。电源和接地引入了一条低阻抗路径，允许大电流，可能损坏外部 MOSFET 或电源以及其他元件。

当从一个 FET 导通切换到另一个 FET 导通时，最容易发生击穿现象。必须在命令一个 FET 关断和命令另一个 FET 导通之间留出足够的时间，以确保器件为第一个 FET 提供足够的时间以达到完全关断，从而避免两个 MOSFET 同时导通。关断一个 MOSFET 与导通另一个 MOSFET 之间的这个延迟称为死区时间。由于二极管的传导损耗，较长的死区时间会降低电机驱动器的效率，但死区时间过短会导致两个 MOSFET 同时导通。

根据器件的不同，可配置死区时间要么使用闭环控制，要么使用开环控制。

在闭环可配置死区时间中，驱动器可以通过监测 MOSFET VGS 电压来更大限度地提高效率，从而为开关 MOSFET 系统提供优化的死区时间。VGS 监视器确保在启用命令 MOSFET 之前，驱动器将半桥中相反方向的 MOSFET 禁用。

除了直通（击穿）保护之外，该方法还通过降低二极管的传导周期来提供系统性能优势。MOSFET 内部体二极管的导通损耗通常比标准 MOSFET 导通损耗更糟糕，并降低了整体系统效率。当从低侧向高侧（或从高侧到低侧）外部 MOSFET 切换时，驱动器具有内部握手功能。握手功能旨在防止外部 MOSFET 进入跨导阶段。内部握手利用外部 MOSFET 的 VGS 监视器来确定何时禁用一个 MOSFET 以及何时启用另一个。通过这种握手，能够向系统插入一个优化的死区时间，而不会产生跨导的风险。

在开环控制中，用户选择所需的死区时间，驱动器监视输入命令关闭和相反输入命令开启之间的时间，并在设定的死区时间内强制输出为低电平。在闭环控制中，用户选择所需的死区时间，驱动器监测 VGS 电压以确定 FET 何时关断，然后插入死区时间

## 故障软关断

故障软关断可在发生导致关断事件（例如过流或击穿情况）的故障时，通过在 MOSFET 关断期间减慢 VDS 压摆来保护驱动器。减慢转换速度可以降低电感尖峰和瞬变，从而在过流事件期间提高设计稳健性。当系统中积聚高电流时，快速关断会导致严重的电感尖峰，从而可能损坏驱动器。在正常开关操作期间，MOSFET 可以相对较快地关断（图 7）。但是，如果 MOSFET 发生故障可能会导致过流故障，那么如果电流路径被快速切断并通过 MOSFET 体二极管重新路由，流经电路板上寄生电感的大电流会导致较大的尖峰。为了帮助用户克服这一挑战，驱动器通过将栅极电流降低至软放电电流来减慢 MOSFET 的关断速度，从而减慢故障响应期间的相电压转换速度。

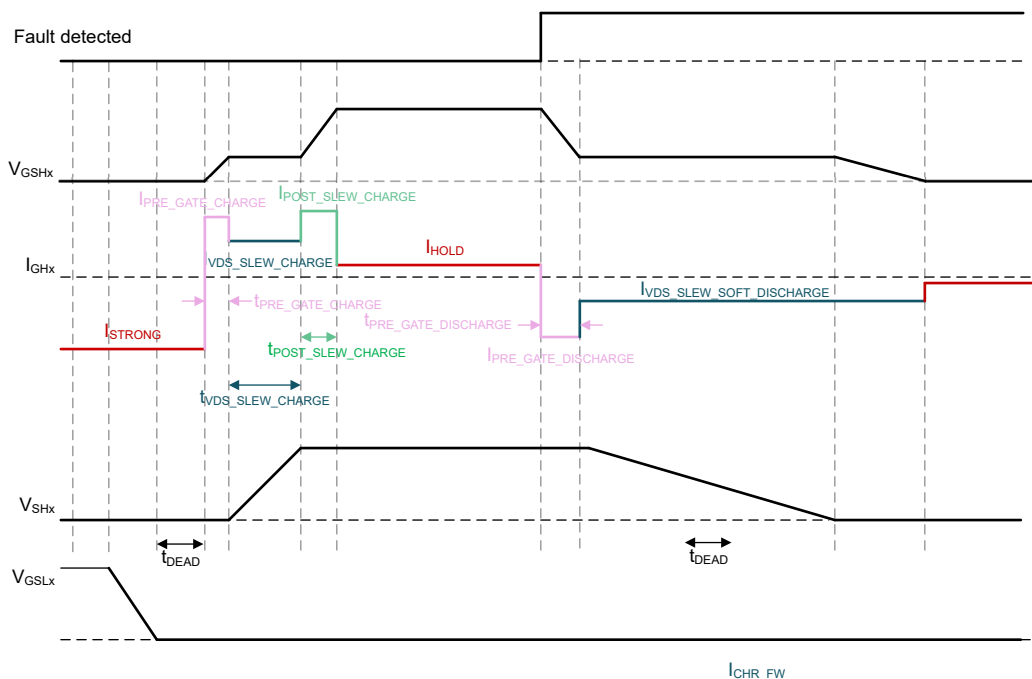


图 7. 故障响应

实现该软关断电流的方式因器件而有所不同。当驱动器检测到故障时，某些器件会将电流降低一定数量的阶跃，使其低于正常运行期间选择的栅极电流电平。其他驱动器让用户可以选择所需的较低栅极驱动电平。还有一些器件可在到达米勒区域之前，在关断事件期间实现预放电电流。用户可以对放电电流进行编程，以将栅极放电到米勒区域，然后切换到整个 Vds 压摆区域的软放电电流。关断期间具有预放电功能的器件有助于驱动器在使软放电电流完全关断 MOSFET 之前，尽快地进入米勒区域。这种预放电可缩短故障响应期间的总 MOSFET 关断时间，并缩短系统中存在高电流的时间，同时在关键 VDS 压摆区域期间仍会减慢速度。



## 占空比补偿

占空比补偿的目标是主动管理传播延迟及其对开关性能的影响，使输出相电压占空比等于命令的输入占空比。良好的开关性能对于实现电机在速度和扭矩控制方面的卓越性能非常重要。占空比补偿有助于补偿从输入到输出的延迟以及导通和关断行为期间的不匹配。这两个参数会直接影响最小和最大占空比、频率范围以及占空比步进分辨率。

虽然大多数栅极驱动器会规定自身的延迟和失配参数，但它们只是整个输入到输出延迟的一部分。另一个关键部分是 **MOSFET** 开关延迟。在高压摆率下，与驱动器延迟相比，**MOSFET** 对传播延迟和失配的贡献通常很小。相比之下，在 **EMC** 敏感系统中常见的慢速压摆率下，**MOSFET** 压摆率可能是主要影响因素。占空比补偿监控输出相位导通时间，并调整输出相位以匹配输入命令导通时间，从而调整电机电流方向的变化。这样的优势包括更精确的占空比控制，以及可对输出占空比进行调节，从而与命令的输入占空比非常接近。

## 结语

TI 提供各种有刷和无刷电机栅极驱动器，适用于各种工业和汽车应用。设计人员可以选择 **TI BDC** 或 **BLDC** 栅极驱动器，混合产品系列的多种特性来满足应用需求，包括有利于以下方面的特性：在 **EMI** 性能和热性能之间进行调优（通过控制开关压摆率）、在 **MOSFET** 开关期间进行额外的预先和后期米勒范围性能优化、通过可配置或自动死区时间插入实现击穿保护，以及 **dV/dt** 栅极导通预防，还有在故障事件期间进行软关断以降低过流故障电压尖峰（尤其是在过流故障事件中）。这些特性有助于克服 **EMI**、效率、声学、**MOSFET** 保护等方面的挑战。要了解有关 TI 电机驱动器产品的更多信息，请访问 [TI 电机驱动器](#)。

## 商标

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月