

## Application Note

## 如何为直流电机驱动器选择栅极驱动器



Olivia Brandel

## 摘要

要选择合适的栅极驱动器，必须在稳健性、尺寸/成本以及与其他系统元件（例如，微控制器和电源开关）的兼容性之间进行权衡。本应用手册重点介绍适用于无刷直流电机、步进电机或线性电机等直流电机驱动器的栅极驱动器 IC。表 6-1 和表 6-2 总结了常见设计注意事项，并比较了相关的半桥和低侧栅极驱动器。

## 内容

1 引言.....	2
2 栅极驱动器 IC 配置.....	2
3 主要电压和电流规格.....	3
3.1 额定电压.....	3
3.2 峰值电流.....	3
4 稳健特性.....	5
4.1 欠压锁定.....	5
4.2 负电压处理能力.....	5
4.3 跨导保护.....	5
5 布板空间、热性能和其他注意事项.....	6
6 总结.....	8
7 参考资料.....	10

## 插图清单

图 5-1. 使用三个 LM2105DSGR 半桥驱动器的 BLDC 电机驱动器 PCB 布局示例.....	6
图 5-2. 使用 LM2103、LM2104 的不同输入配置示例.....	7

## 表格清单

表 3-1. 用于计算栅极驱动器最小驱动强度的参数汇总.....	4
表 6-1. 半桥驱动器快速参考表.....	8
表 6-2. 低侧驱动器快速参考表.....	8

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

有电机的地方就需要驱动器元件。鉴于市面上的驱动器数量繁多，即使是来自一家制造商的产品，选择正确的驱动器可能也会让人不知所措。此外，每款器件都有一长串的参数。在做决策时需要重点关注哪些规格或特性？

驱动器元件可以采用栅极驱动器 IC (独立栅极驱动器) 或电机驱动器 IC (电源开关和驱动器集成在一个封装中) 的形式。此外，这两种类别都可以集成电机控制功能。本应用手册重点介绍选择用于直流电机驱动应用的半桥和低侧栅极驱动器 IC 的设计注意事项，例如以下应用：

- 有刷和无刷直流 (BLDC) 电机
- 步进电机
- 直流输入伺服电机 (永磁同步电机)
- 线性电机线圈阵列

有关电机驱动器 IC 或集成控制栅极驱动器 IC 的更多信息，请参阅[选择合适的集成度来满足电机设计要求](#)。

## 2 栅极驱动器 IC 配置

电机驱动器的桥式拓扑通常包含一个或多个半桥级：单个半桥、两个半桥 (H 桥)、三个半桥 (BLDC) 或四个半桥 (步进)。从 TI 的栅极驱动器 IC 产品系列中，可以选择集成多相的单个驱动器，或选择独立半桥。这种选择通常取决于设计人员的喜好，需要考虑以下几点：

- H 桥和三相 BLDC 电机驱动器通过将多个半桥级集成到一个封装中来简化设计。
- 每相使用一个半桥驱动器可以最大限度减小驱动器与电源开关之间的间距，从而减少开关损耗和 EMI 挑战。
- 对于更复杂的电机控制，多相器件有时提供自动电机调优、无传感器控制和系统级集成功能。
- 半桥驱动器是更通用的器件，因此单个器件型号可用于不同的平台 (例如，三个器件用于 BLDC 电机系统，四个器件用于步进电机系统)。

对于以地为基准的驱动电源开关，也可考虑将低侧驱动器用于电机驱动应用。低侧驱动器最常见的电机应用之一是有刷直流电机。这些情况下通常使用单开关斩波拓扑，仅需要单通道低侧驱动器。如果系统有多个低侧开关要驱动，设计人员也可以考虑双通道低侧驱动器。

本文档中涵盖的许多主题适用于多种器件类别，但本应用手册主要关注独立半桥和低侧栅极驱动器 IC (没有集成控制或电源开关)。如需浏览 TI 的所有电机驱动器，请访问[电机驱动器概述](#)页面。

### 3 主要电压和电流规格

选择栅极驱动器时要考虑的主要规格包括：

- 栅极驱动器电压 -  $V_{DD}$ 、 $V_{HS}$  和  $V_{HB}$ <sup>1</sup>
  - $V_{DD}$  是指正电源轨上的电压 ( 引脚通常名为  $V_{DD}$ 、 $V_{GVDD}$  或  $V_{CC}$  )。
  - $V_{HS}$  ( 仅限半桥驱动器 ) 是指与电源开关的高侧源连接 ( 引脚通常名为  $HS$  或  $SH$  )。这也可以称为 *开关节点电压*。
  - $V_{HB}$  ( 仅限半桥驱动器 ) 是指高侧自举电源引脚上的电压 ( 引脚通常名为  $HB$  或  $BST$  )。 $V_{HB}$  以  $V_{HS} + V_{DD}$  的形式计算。
- 系统电压 -  $V_{BUS}$ 
  - $V_{BUS}$  是指半桥高侧漏极的电压 ( 也称为 *直流链路电压* )。
- 栅极驱动器电流 - 峰值拉电流和灌电流 ( $I_{PK}$ )
  - 有时称为峰值上拉和下拉电流, 或统称为 *驱动强度*。

#### 3.1 额定电压

对于半桥和低侧驱动器, 都必须考虑电源电压 ( $V_{DD}$ )。该规格主要与电源开关相关。除了一般灵活性外, SiC MOSFET 或 IGBT 适合选择宽  $V_{DD}$  范围 ( 例如 UCC27531 : 10V 至 32V ), 因为对于这些开关的高栅源电压 ( $V_{GS}$ ), 该范围可以在栅极驱动器输出上提供更大的裕度。一些系统需要较低的  $V_{DD}$  工作电源, 以便栅极驱动器输出与 Si MOSFET 或 GaN 等电源开关兼容 ( 例如 UCC27517 : 4.5V 至 18V )。

在半桥驱动器电路中, 还必须考虑  $V_{DD}$ , 避免违反  $V_{HB} - V_{HS}$  等关键电压规格。因此, 在最终选择驱动器之前, 请检查器件数据表中的建议运行条件表, 以确认所选的  $V_{DD}$  不会出现违反规格的情况。

除了半桥驱动器的规格外, 需要考虑的另一个关键电压是系统的总线电压。该电压以及系统的合理余量决定了所需的  $V_{HS}$  和  $V_{HB}$ 。

直流电机驱动系统的常见总线电压范围为 12V 至 110V ( 直流 )。通常, 系统使用的元件额定电压比总线电压高 50 - 100%。例如, 对于 48V 系统, 具有 100V 或 120V  $V_{HS}$  电压的驱动器通常可以提供足够的瞬态裕度。噪声控制良好的系统通常不需要太多的余量。在其他情况下, 设计人员更喜欢使用具有更高裕度的驱动器, 而不是将布局噪声降至最低。

#### 3.2 峰值电流

通常, 直流电机驱动系统以较低的频率运行 ( 与功率转换应用相比 ), 因此不需要高电流规格。所以, 针对电机应用进行优化的驱动器通常具有小于 2A 的峰值电流。若要并联驱动多个电源开关或以更高的频率运行, 请采用具有快速开关特性且峰值电流约为 3A 或更高的器件。鉴于这些原因, 电流较大的器件也是驱动线性电机功率级线圈阵列的良好选择。

系统所需的最小驱动强度取决于系统和栅极驱动器的特性。要估算所需的最小驱动强度, 必须考虑表 3-1 所示的参数。

<sup>1</sup> 请注意,  $V_{HB}$  和  $V_{HS}$  不适用于低侧驱动器。

**表 3-1. 用于计算栅极驱动器最小驱动强度的参数汇总**

参数	信息来源	示例值	关系
<b>V<sub>GS</sub></b> 所需的栅源电压	系统参数	12V	较高的值通常需要较大的电流。
<b>Q<sub>G,max</sub></b> 所需 V <sub>GS</sub> 下的最大栅极电荷	电源开关数据表 ( V <sub>GS</sub> 与 Q <sub>G</sub> 曲线, 或电气特性表中的最大值 )	15nC	较高的值通常需要较大的电流。
<b>T<sub>ON,OFF</sub></b> 所需的上升和下降时间	系统参数 <sup>2</sup>	60ns	较低的值 ( 更快的开关速度 ) 通常需要较大的电流。
<b>N</b> 由一个驱动器输出驱动电源开关数量	系统	1 个开关	较高的值 ( 更多的并联开关 ) 通常需要较大的电流。

利用这些信息可以估算等效电容 (C<sub>eq</sub>) :

$$C_{eq} = \frac{Q_{G,max} \times N}{V_{GS}} = \frac{15 \text{ nC} \times 1 \text{ sWitch}}{12 \text{ V}} = \frac{5}{4} \text{ nF} \quad (1)$$

进而可以提供最小峰值电流 :

$$I_{PK,min} = C_{eq} \times \frac{dV}{dt} = \frac{5}{4} \text{ nF} \times \frac{12 \text{ V}}{60 \text{ ns}} = 0.25 \text{ A} \quad (2)$$

此示例建议选择峰值电流规格至少为 0.25A 的驱动器。因此, 像 LM2105 (0.5A/0.8A) 这样的驱动器的峰值驱动强度能力就足够了。若要轻松估算此值, 请参阅 [\[常见问题解答\] LM2105 : 半桥栅极驱动器最小电流计算器](#) 中提供的 Excel 工具。有关前述栅极驱动器主要参数的进一步说明, 请参阅 [MOSFET 和 IGBT 栅极驱动器电路的基本原理](#)。

<sup>2</sup> 此参数指的是电源开关输入 ( 例如, MOSFET 的栅极 ) 的上升和下降时间。这也与开关节点的上升和下降时间密切相关。

## 4 稳健特性

选择栅极驱动器时，必须考虑器件如何响应欠压事件、负瞬态或跨导（在半桥配置中）。稳健的规格和集成特性使栅极驱动器能够更好地应对这些事件，从而有助于提高系统的可靠性。

### 4.1 欠压锁定

UVLO 是一种保护功能，可将驱动器输出拉低，直到电源电压达到设定阈值。如果没有这样的保护功能，过多的功率耗散可能会使电源开关面临损坏的风险。要了解更多信息，请参阅[具有 UVLO 的低侧栅极驱动器与 BJT 图腾柱的比较](#)。UVLO 阈值与  $V_{DD}$  规格的下限有关。要选择最合适的驱动器，请根据电源开关选择 UVLO 阈值。Si MOSFET 通常需要 4V、5V 或 8V UVLO。IGBT 通常需要 8V 或 12V UVLO。SiC MOSFET 通常需要 12V、15V 或 17V UVLO。

### 4.2 负电压处理能力

虽然通常可以通过系统设计最大限度降低寄生电感，但这种影响始终无法消除。因此，许多栅极驱动器被设计为可以处理瞬态并帮助避免损坏。

负电压处理能力是指栅极驱动器承受系统中可能由寄生电感引起的负电压的能力。输入和输出引脚（以及半桥驱动器的 HS 引脚）通常都有额定的负电压容差。数据表通常包含直流电压和重复脉冲（通常小于 100ns）的负电压规格。为了实现稳健的设计，请采取预防措施通过布局限制负电压，并选择能够支持系统中预期负电压的驱动器。许多 TI 栅极驱动器数据表都包含有关通过布局降低负电压的信息。

### 4.3 跨导保护

特别是对于半桥配置，两个电源开关还存在跨导或击穿的风险。一些半桥驱动器有一个基于逻辑的功能可以防止这种称为互锁的情况。互锁逻辑可在高侧和低侧输入同时为高电平时关闭输出，从而防止高侧和低侧输出同时导通。当寄生布局电感导致输入信号上出现振铃时，可能会发生这种情况。栅极驱动器还可以集成最小死区时间功能以避免跨导。这个值通常是固定值，但一些驱动器有一个额外的引脚可以对死区时间持续时间进行编程，以提供更大的设计灵活性。

## 5 布板空间、热性能和其他注意事项

栅极驱动器有助于减小布板空间的主要原因在于其封装。

例如，假设有一种三相 BLDC 电机驱动器配置。使用具有大封装的驱动器时，可能很难让驱动器 IC 相对于三个电源开关之间实现均匀间距，因此会导致其中一个信号出现相位差。紧凑的半桥驱动器有助于最大限度减小驱动器与电源开关之间的间距。最大限度缩短驱动器与开关之间的 PCB 布线有助于减弱布局产生的寄生效应。图 5-1 展示了一个 BLDC 布局示例，其中包含采用 2mm x 2mm WSON 封装选项的 LM2105 器件 LM2105DSGR ( U1、U2 和 U3 )。

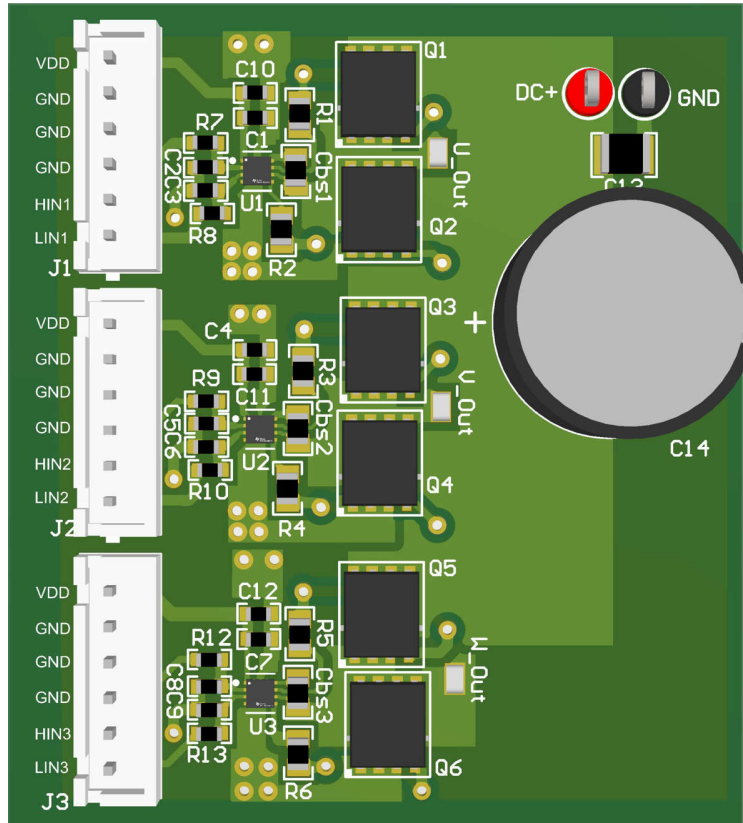


图 5-1. 使用三个 LM2105DSGR 半桥驱动器的 BLDC 电机驱动器 PCB 布局示例

栅极驱动器的某些功能还可以消除对外部电路的需求，因此可以进一步减少元件的数量，进而减小整体尺寸。例如，UCC27624 等器件中的集成负电压容差和反向电流处理能力有助于消除驱动器输入和输出端的钳位二极管。

半桥设计通常利用由电容器、电阻器和二极管组成的自举电路。节省布板空间的另一种方法是选择在驱动器内集成了自举二极管 ( 和电阻器 ) 的半桥驱动器。对于此类驱动器，电路板上唯一需要的自举元件是电容器。

诸如步进电机驱动器之类的应用通常需要来自微控制器的许多信号。因此，还需要注意尽量减少栅极驱动器所需的 PWM 输入数量。在这些情况下，请选择具有单 PWM 兼容性的栅极驱动器，这种兼容性通常通过以下两种方式之一实现：

- 一个输入引脚 ( PWM 或 IN ，或者命名为高侧输入 HI 或 INH )。此引脚与第二个可选输入 ( 如用于使能或关断功能的 EN 或 SD ) 配对。请参阅图 5-2 中使用半桥驱动器 LM2104 的示例。
- 高侧输入引脚 ( HI 或 INH ) 与反相低侧输入 ( nLI 或 nINL ) 配对。请参阅图 5-2 中使用半桥驱动器 LM2103 的实施示例。

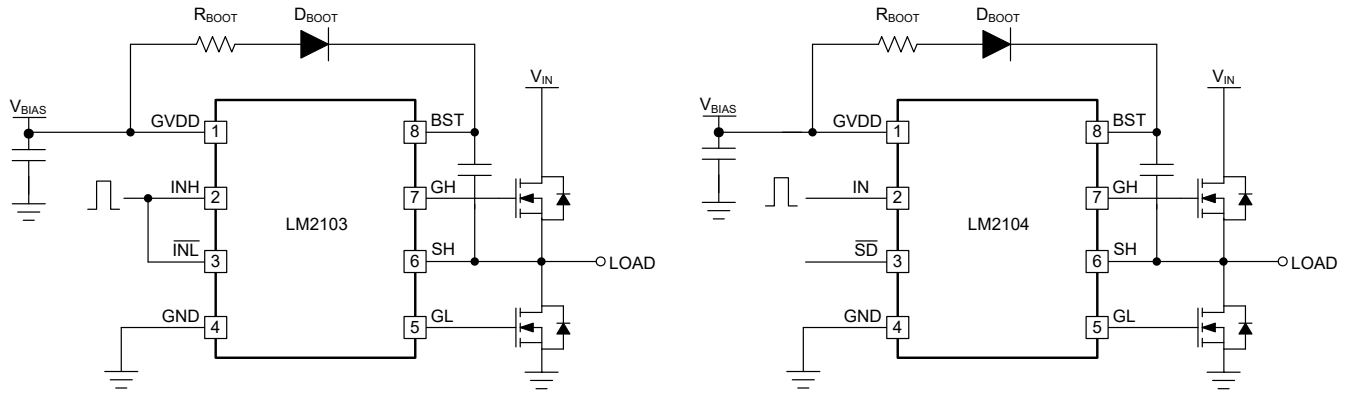


图 5-2. 使用 LM2103、LM2104 的不同输入配置示例

栅极驱动器在多个此类元件组合在一起时特别有助于减小尺寸。例如，LM2105 ( 105V、0.5A/0.8A 半桥驱动器 ) 具有集成的自举二极管和 -18V 负瞬态电压能力 ( 在  $V_{HS}$  上 )，全都采用 2mm x 2mm WSON 封装 ( TI 封装名称为 “DSG” )。

除了节省布板空间外，DSG 封装等小型封装还具有散热优势。例如，在 BLDC 系统中，三个半桥驱动器均使用紧凑型封装，可使每个驱动器分别进行功率耗散 ( 而不是全部三相都通过一个较大的封装进行功率耗散 )。DSG 封装还包括一个散热焊盘，有助于进行额外的功率耗散并进一步提高热效率。

为了量化这种热性能的改善，本示例对 LM2105 的 SOIC ( “D” ) 封装和 WSON ( “DSG” ) 封装进行了比较。可以使用结温和环境温度以及结至环境热阻 ( $R_{\theta JA}$ ) 来计算栅极驱动器中的最大功率耗散 ( $P_{MAX}$ )，如器件数据表的热性能信息一节所述：

$$P_{MAX} = \frac{T_J - T_A}{R_{\theta JA}} \quad (3)$$

在结温 ( $T_J$ ) 和环境温度 ( $T_A$ ) 相同的条件下，LM2105 各型号的最大功率耗散与  $R_{\theta JA}$  成反比。D 封装版本的  $R_{\theta JA}$  大约是 DSG 封装版本的 1.7 倍 ( 分别为 133.2 和 78.2 )。因此，在相同的温度条件下，DSG 封装版本的功率耗散最多是 SOIC 封装版本的 1.7 倍。有关热指标的更多信息，请参阅 [半导体和 IC 封装热指标](#) 应用手册。



## 6 总结

要选择合适的栅极驱动器，必须在稳健性、尺寸/成本以及与其他系统元件（如微控制器和电源开关）的兼容性之间进行权衡。例如：

- **紧凑型家用电器**可能很重视如何尽可能减小 PCB 尺寸，并选择具有集成元件并提供更高热性能的小型 SON 封装。
- **电动自行车等大批量消费类市场**可能会强调选择采用多源引脚排列且具有成本效益的通用驱动器。
- **具有较大噪声的电机系统**可能会优先考虑稳健性，并根据电压范围或击穿保护方法进行精心挑选。
- **步进驱动系统**可能需要适应有限的 GPIO 微控制器，并寻找支持单 PWM 输入的驱动器。

表 6-1 和表 6-2 总结了直流电机驱动系统的一些常见设计注意事项，以及可以满足这些需求的栅极驱动器。有关特性和规格的更多详细信息，请参阅器件数据表。

表 6-1. 半桥驱动器快速参考表

设计注意事项	LM2101	LM2103、 LM2104	LM2105	LM5108	UCC27710	UCC27301A
<b>自举电源电压</b> 绝对最大 $V_{HB}$ （针对电机瞬态的裕度）。	107V	107V	107V	110V	700V	120V
<b>负电压处理能力<sup>3</sup></b> 绝对最小瞬态 $V_{HS}$ （针对负瞬态的裕度）。	-19.5V	-19.5V	-19.5V	-7V	-11V <sup>4</sup>	-(24 - $V_{DD}$ ) V
<b>互锁或死区时间</b> 击穿保护。	x	✓ (固定死区时间)	x	✓ (互锁)	✓ (互锁)	✓ (互锁)
<b>集成式自举二极管</b> 减少元件。	x	x	✓	✓	x	✓
<b>封装</b> 大致尺寸。	5x4mm (SOIC) 2x2mm (WSON)	5x4mm (SOIC)	5x4mm (SOIC) 2x2mm (WSON)	3x3mm (VSON)	5x4mm (SOIC)	5x4mm (SOIC) 3x3mm (VSON)
<b>拉电流/灌电流</b> 无需外部升压级即可获得更大电流。	0.5A/0.8A	0.5A/0.8A	0.5A/0.8A	1.6A/2.6A	0.5A/1.0A	3.7A/4.5A
<b>UVLO</b> 有助于防止电源开关过热。	8V	8V	5V	5V	10V	8V
<b>单输入兼容性</b> 减少 PWM 信号。	x	✓ <sup>5</sup>	x	x	x	x
<b>推荐使用的场合</b>	只需极少的功能，或者只有成本最为关键。	支持单个 PWM 输入是首要任务。	布板空间和成本最为关键。	并联驱动多个开关或高频驱动。	高压应用要求 VHB 裕度 > 120V。	驱动线圈（线性电机）或高频直流电机。

表 6-2. 低侧驱动器快速参考表

设计注意事项	UCC27517A	UCC27531	UCC27624
<b>通道数量</b>	1	1	2
<b>电源电压 (<math>V_{DD}</math>)</b> 绝对最大 $V_{DD}$ （针对瞬态的裕度）。	20V	35V	30V

<sup>3</sup> 这些值仅根据特征进行验证，并未经过生产测试。

<sup>4</sup> 这是建议的最小规格（没有为此器件指定绝对最小值）。当  $HB - HS = 20V$  时，HS 的逻辑工作电压为 -11V 至 +600V。更多详细信息，请参阅 [UCC27710 数据表](#)。

<sup>5</sup> LM2103 具有反相 LI 引脚 (nLI)。LM2104 具有一个输入引脚 (INH) 和一个反相关断引脚 (nSD)。



表 6-2. 低侧驱动器快速参考表 (续)

设计注意事项	UCC27517A	UCC27531	UCC27624
<b>负电压处理能力</b> 建议最小瞬态 $V_{IN}$ (针对负瞬态的裕度)。	0V	-5V	-10V
<b>封装</b> 大致尺寸。	2.9x1.6mm (SOT-23)	5x4mm (SOIC) 2.9x1.6mm (SOT-23)	5x4mm (SOIC) 3x3mm (VSON)
<b>拉电流/灌电流</b> 无需外部升压级即可获得更大电流。	4A/4A	2.5A/5A	5A/5A
<b>UVLO</b> 有助于防止电源开关过热。	5V	8V	5V
<b>推荐使用的场合</b>	驱动单个 MOSFET 以及布板空间和成本最为关键。	驱动单个 IGBT (或 MOSFET) 以及稳健性最为关键。	驱动多个 MOSFET 以及稳健性最为关键。

## 7 参考资料

- 德州仪器 (TI), [MOSFET 和 IGBT 栅极驱动器电路的基本原理](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [具有 UVLO 的低侧栅极驱动器与 BJT 图腾柱的比较](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [半导体和 IC 封装热指标](#) 应用手册。

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司