

驱动芯片退饱和保护 (DESAT) 应用 指导

Scarlett Cao

Sales and Marketing/China Automotive

ABSTRACT

新能源汽车的电驱系统将动力电池的直流电能转换为三相交流电，驱动电机为整车提供动力。在所有的故障种类中，功率模块的短路故障尤为危险。在短路过程中迅速产生的大量热会烧毁功率模块和电驱系统，因此需要被快速识别并响应，在功率模块的 SOA (Safe Operating Area) 内及时进行保护对电驱系统的运行安全与寿命就显得格外重要。本文主要介绍了短路保护类型和隔离栅极驱动芯片退饱和保护 (DESAT) 的功能，并针对具体的应用需求和芯片方案提供了调试建议。

Contents

1	短路能力评估	2
2	驱动芯片的退饱和和保护功能介绍	2
	2.1 退饱和电路工作原理	2
	2.2 退饱和电路的关键组成和影响因素	4
3	驱动芯片的退饱和和保护功能的调试	5
	3.1 如何增加 DESAT 充电电流	5
	3.2 如何调整 DESAT 阈值电压	5
	3.3 如何使用 OC 功能搭建退饱和电路	6
	参考文献	8

Figures

Figure 1.	短路时间构成	2
Figure 2.	退饱和电路原理-IGBT 开通时 ³	3
Figure 3.	退饱和电路原理-IGBT 关断时	3
Figure 4.	退饱和电路增加外置上拉电流源	5
Figure 5.	退饱和电路阈值电压构成	6
Figure 6.	如何将 OC 用作 DESAT ¹²	7

1 短路能力评估

功率模块的短路承受能力的评估分为短路时间评估和短路能量评估两大类。

短路时间由短路检测时间与短路关断时间共同构成，如下图 1 所示。短路检测需要兼顾时效性与抗扰性能，要求系统能够及时响应，避免功率模块损坏。同时能够屏蔽开关过程的干扰，避免误触发。短路检测时间受短路保护阈值、前沿消隐时间、滤波时间、电容大小等多重因素影响，通常其设计需要在时效性与抗扰性上取平衡。而短路关断时间受具体关断方式的影响。因为短路故障发生的时候电流等级是非常高的，如果突然关断输出，则 di/dt 会造成很大的电压过冲，可能导致功率级的损坏，所以建议采用具有软关断或者两级关断方式的驱动芯片，在短路时间和能量满足要求的条件下，降低电压过冲对功率模块的损伤。

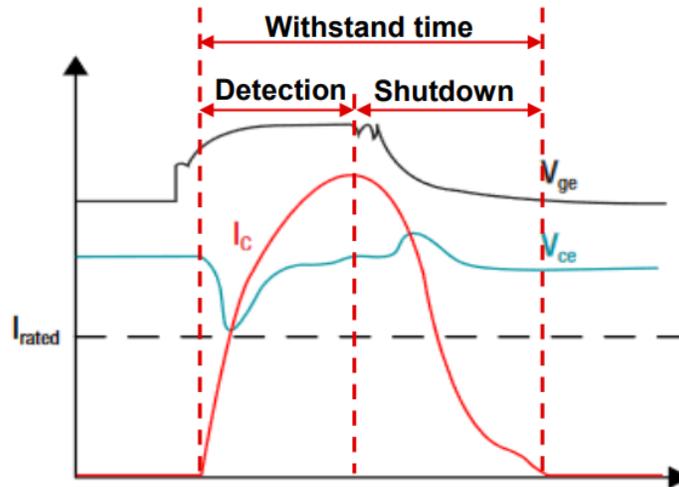


Figure 1. 短路时间构成

事实上，短路时间并不是最合适衡量器件短路能力的指标，通常只用作参考。在短路时芯片内瞬时产生大量能量无法散出，累计的能量才是器件失效的根本原因。而评估短路能量则需要对电流和电压进行积分计算。因而短路电流越大，短路承受的时间就越短；直流母线电压越低，短路承受的时间就越长。

2 驱动芯片的退饱和和保护功能介绍

功率模块的短路承受时间一般是微秒级别的，因此过流条件下的采样带宽或响应时间就尤为关键。系统的短路保护设计需要能够在短路情况出现时迅速响应。短路检测也需要在开通后有一段消隐时间，以避免开关过程中的干扰造成误触发。短路保护的方式可分为检测短路电流和检测压降两大类¹。检测电流的方式常见为通过 senseFET 或通过 shunt 电阻方式，而电压检测为退饱和和保护。鉴于大部分功率模块并不具备集成的 senseFET，外加 shunt 电阻会增加系统成本，因而退饱和和保护为业界更常见的保护方式。下面我们主要介绍的是退饱和保护的设计注意事项，并对短路保护的时效性和抗干扰能力进行评估²。

2.1 退饱和和电路工作原理

退饱和电路的基本原理是电压检测。短路时，器件漏源两端的压降会异常升高。因而比较功率管两端正常与异常情况下的电压即可作为短路或过流的判断。

对 MOSFET 或 IGBT 来说，关断状态下其两端通常要承受很高的电压，因而无法直接对功率管两端的电压进行采样，所以首先要在漏极和 DESAT 端口放置一个高压二极管。

让我们以 IGBT 为例，在正常导通时候，其 VCE 两端的电压可能为 2V。芯片内部的上拉电流源 I_{CHG} 电流从 DESAT 端口流出，通过 R_{LIM} 和 D_{HV} 流到 IGBT。此时 C_{BLK} 即 DESAT 端口两端压降约为 IGBT VCE 压降加高压二极管正向导通压降加 R_{LIM} 两端压降。

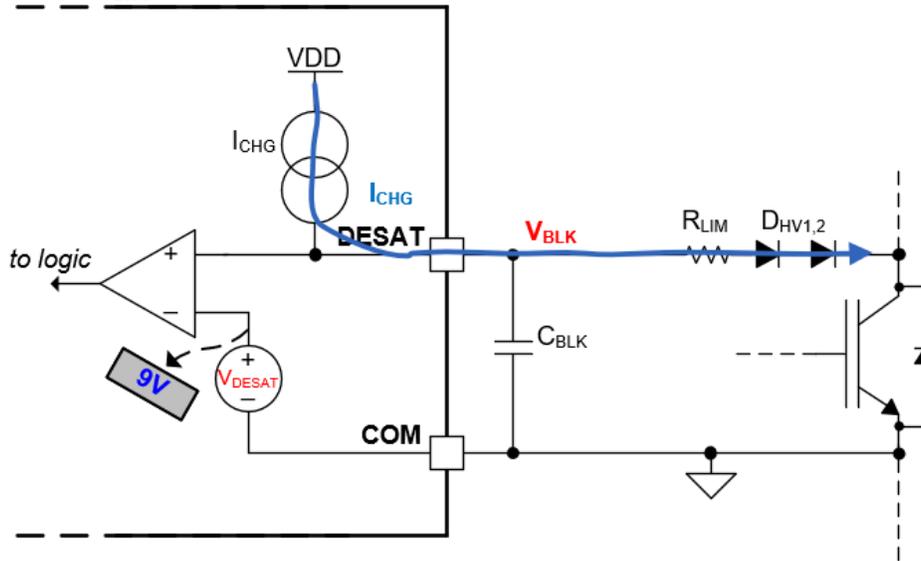


Figure 2. 退饱和电路原理-IGBT 开通时¹

当短路情况发生时，VCE 两端的压降会迅速上升，这时高压二极管会发生反偏，内部电流源电流只有一条流向即给 C_{BLK} 电容充电，当 C_{BLK} 电容两端压降即 DESAT 电压超过了阈值电压，便会触发短路保护。

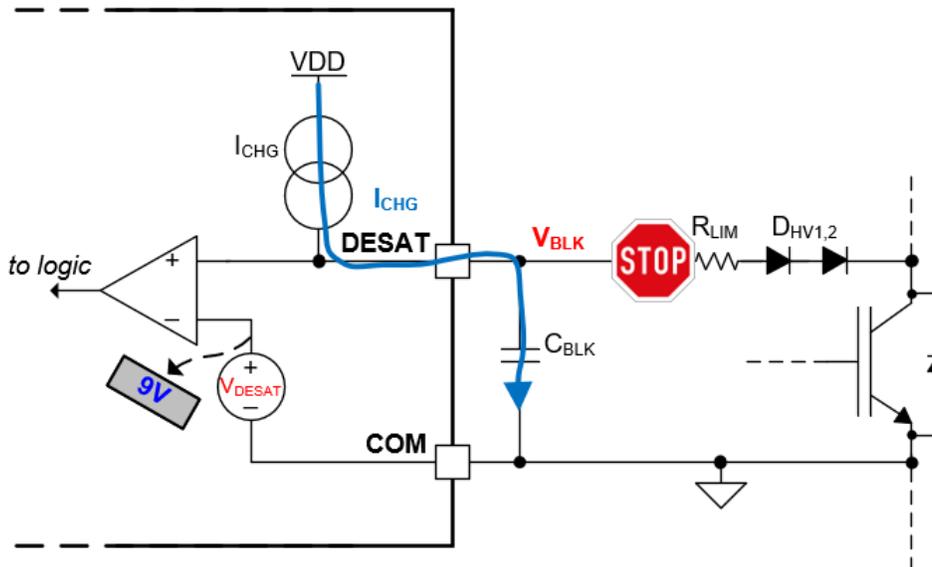


Figure 3. 退饱和电路原理-IGBT 关断时

2.2 退饱和电路的关键组成和影响因素

下面我们将对驱动芯片外围电路和内部参数两方面来介绍退饱和电路的关键组成和影响因素。

从外围电路的角度来看，

- 对短路检测时间影响最大的因素就是 C_{BLK} 电容，给这个电容充电的时间直接决定了 DESAT 电压到达阈值的时间。

$$t_{BLK} = \frac{V_{DESAT} C_{BLK}}{I_{CHG}}$$

- 用户常通过给 DESAT 管脚并联二极管的方式钳位功率级引起的负压，其结电容也会增加等效的消隐电容容值。

从驱动芯片的参数角度，以下几个参数对短路承受时间影响较大：

- 首先是 DESAT pin 的充电电流，在 UCC21750-Q1⁴ 及系列产品中，这一电流是固定的 500uA。而在功能安全驱动 UCC5870-Q1⁵ 中，这一电流源大小可以通过 SPI 灵活可配，最高可以实现 1mA，在 UCC5880-Q1⁶ 中最高为 2mA。在驱动芯片输入悬空或低时，DESAT pin 通过内部的下拉电流源拉低以避免误触发。在驱动信号输入电平为高时，经过前沿消隐时间后，DESAT 充电电流源才会启动，给外部电容充电。更大的充电电流可以快速将电容充置阈值电压，提升短路检测时间。
- 另外一个关键参数是芯片的 DESAT 阈值，UCC21750-Q1 及系列产品中这一阈值为固定值，UCC21750-Q1 和 UCC21759-Q1⁷ 为 9V，UCC21755-Q1⁸ 和 UCC21756-Q1⁹ 为 5V。而在 UCC5870-Q1 及 UCC5880-Q1 中这一阈值是通过 SPI 灵活可配的。
- 为了避免被系统中的干扰源误触发，DESAT 内部也会设计 deglitch filter 数字滤波器，只有当 DESAT 电压高于阈值的时间超过这个滤波窗口时间，才会触发退饱和和保护。在 TI 的 SPI 型驱动中这一参数也是多档可配的。使用较长的窗口时间可以有效避免被系统的干扰误触发保护，但也会响应增加短路检测时间和短路能量。
- 另外一部分对整体短路承受时间与短路能量影响比较大的就是关断方式，常见有两级关断和软关断两种不同的方式。采用这样减缓关断的方式是为了尽量减小过大的 di/dt 造成的电压过冲。电压过冲受环路和功率模块的寄生电感关系比较大，如果寄生电感可以适当减小，则关断速度也可以加快。

除了满足功率模块短路承受时间或能量要求外，设计时也需注意兼顾 DESAT 误触发的风险：

- 首先应尽量减小高压二极管的结电容。因为 DESAT 电路采样的是功率管漏源级的电压，而在开关过程中这一电压产生的 dv/dt 会通过高压二极管的结电容以位移电流的方式给 C_{BLK} 充放电。正向的 dv/dt 会给 DESAT 灌电流，而负向的 dv/dt 会从 DESAT 拉电流。因此，高压二极管的选型需要格外注意其结电容参数，也可以采用两个高压二极管串联的方式减少等效的寄生电容。
- C_{BLK} 电容常见选型值为 33pF-330pF，注意不宜过低，否则也容易因高压二极管结电容耦合的位移电流而误动作，这一影响对使用 SiC MOSFET 的系统来说尤其明显。
- R_{LIM} 电阻建议设计为 500-2kohm 的范围，可以有效降低震荡的幅值。 R_{LIM} 与 C_{BLK} 共同构成一个滤波电路，降低功率级耦合的瞬态干扰。
- 对于有 SPI 接口的可配置驱动来说，也可以通过选择更长的 deglitch filter 滤波时间增加对系统干扰的屏蔽。

3 驱动芯片的退饱和和保护功能的调试

3.1 如何增加 DESAT 充电电流

对没有 SPI 接口的驱动芯片来说，固定的 DESAT 参数适配不同的功率模块选型通常有些困难，因而需要根据功率模块参数和实际测试结果灵活调整。

首先，如果短路响应时间（或短路保护能量）不能满足要求，又担心降低 C_{BLK} 之后误触发的风险，可采用外部上拉电流源的方式，增加给 C_{BLK} 的充电电流

外部上拉电流源通常有两条可行的路径，分别为上拉到二次侧电源 VDD/VCC2 或上拉到输出 OUTH/OUT，两种方式各有优劣。

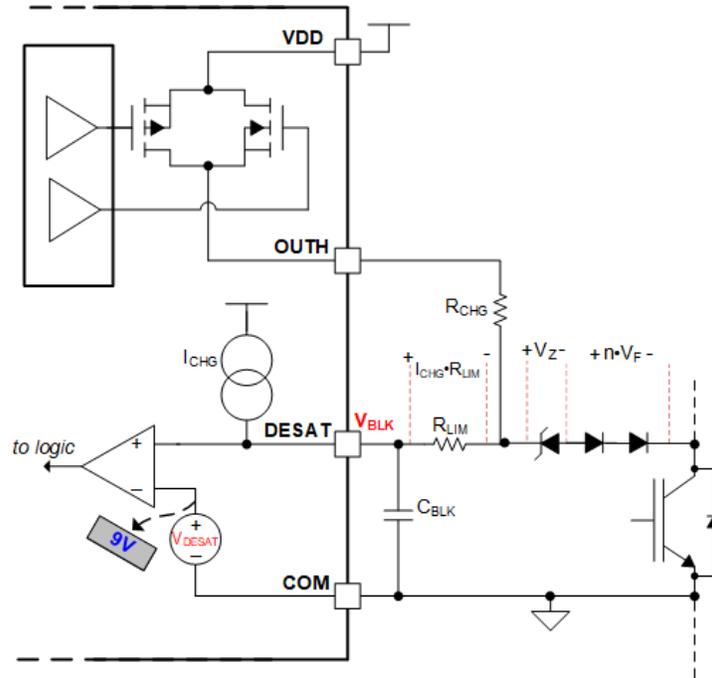


Figure 4. 退饱和电路增加外置上拉电流源

上拉到输出的好处是这个外置电流源只在输出为高的时候启动，一方面可以降低这部分电阻上额外产生的功率损耗，另一方面避免了消隐时间内开关过程还没结束 C_{BLK} 被充电的情况，降低了开关过程中误触发的风险。但如果系统使用的是负压关断而非 0V 关断，则需要考虑 DESAT pin 的负压承受能力问题，或增加钳位管对 DESAT pin 进行保护。

另一种增加外置电流源的方式是上拉到 VDD/VCC2，这种方式不会有负压方面的顾虑，但是功耗相比前一种更大一些。此外这种电流源为常开电流源，与输入输出状态无关。因而在增加等效的 DESAT 充电电流的同时，也削弱了关断状态和消隐时间内下拉电流源的能力。工程师需根据实测结果评估是否有误触发的风险。

3.2 如何调整 DESAT 阈值电压

系统设计时会确定需要触发 DESAT 保护的阈值电压，应高于正常工作电流范围下的电压阈值。需注意 DESAT 电压并不等于 V_{DS} (V_{CE}) 两端的电压，同样也需要考虑路径上的 R_{LIM} 电阻和高压二极管的压降。TI 带 SPI 接口的功能安全驱动 UCC5870-Q1 可以使用寄存器配置合适的 DESAT 阈值电压。而对于不带 SPI 接口的驱动 UCC217XX-Q1 系列来说，则需要根据功率模块的类型进行选择，如驱动 IGBT 模块选择 9V DESAT

电压版本的 UCC21750-Q1 或 UCC21759-Q1，驱动 SiC MOSFET 模块选择 5V DESAT 阈值的 UCC21755-Q1 或 UCC21756-Q1，然后通过调节 R_{LIM} 电阻的方式对实际的保护阈值进行微调。如果希望能够使用相同的 IC 选型兼容 IGBT 与 SiC MOSFET 模块，可以考虑选用 9V 阈值的 UCC21750-Q1 系列，通过在选择 SiC MOSFET 的应用中增加齐纳二极管降低实际的保护阈值。需注意考虑齐纳管的压降时应带入 DESAT 充电电流 I_{CHG} 条件下的压降。

$$V_{CE(DESAT)} = V_{DESAT} - V_Z - n \cdot V_F - I_{CHG} \cdot R_{LIM}$$

这里的 V_{DESAT} 对 UCC5870-Q1, UCC5880-Q1 系列来说为可配阈值电压，对 UCC21750-Q1 或 UCC21755-Q1 来说为芯片固定的 9V 或 5V。而 $V_{CE(DESAT)}$ 为实际功率模块测 DESAT 保护时的 V_{CE} 电压。

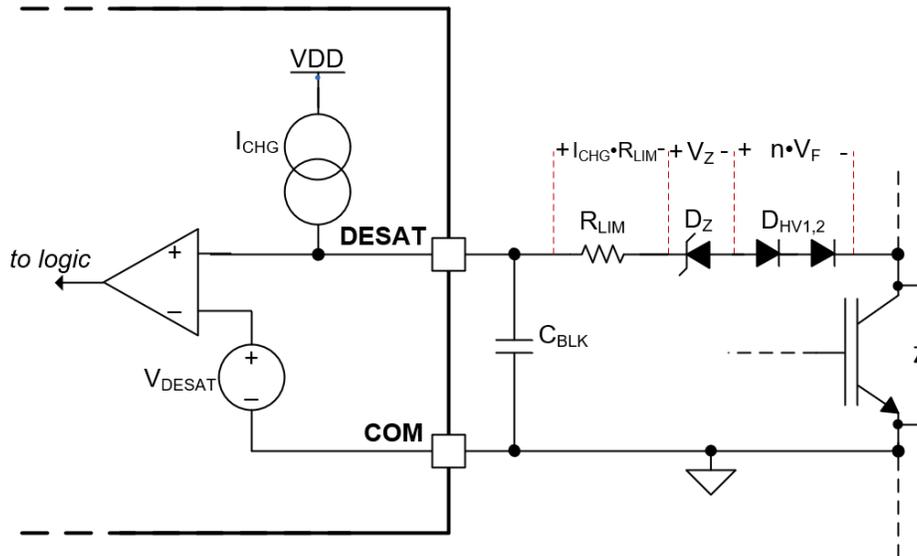


Figure 5. 退饱和电路阈值电压构成

3.3 如何使用 OC 功能搭建退饱和电路

对于只有 OC pin 的 UCC21710-Q1¹⁰, UCC21732-Q1¹¹ 等芯片来说，同样可以通过外围电路的调整实现 DESAT 保护的功能。OC 保护本意为通过测量 shunt 电阻两端的压降来反推此时通过功率模块的电流大小。考虑到 shunt 上产生的功耗问题，其保护阈值通常比较小，如对 UCC21710-Q1 来说其保护阈值为 0.7V。可以通过如下图 R2 和 R3 的外部分压电阻将这一阈值电压匹配到需要保护时的 V_{DS} (V_{CE}) 两端的电压，并采用类似 DESAT 的外围电路，增加 D_{HV} 的方式隔离关断状态下的高压，使用 R1 上拉到 VDD 或 OUT 创造充电电流源，给 OC pin 外加的 C_{BLK} 充电。

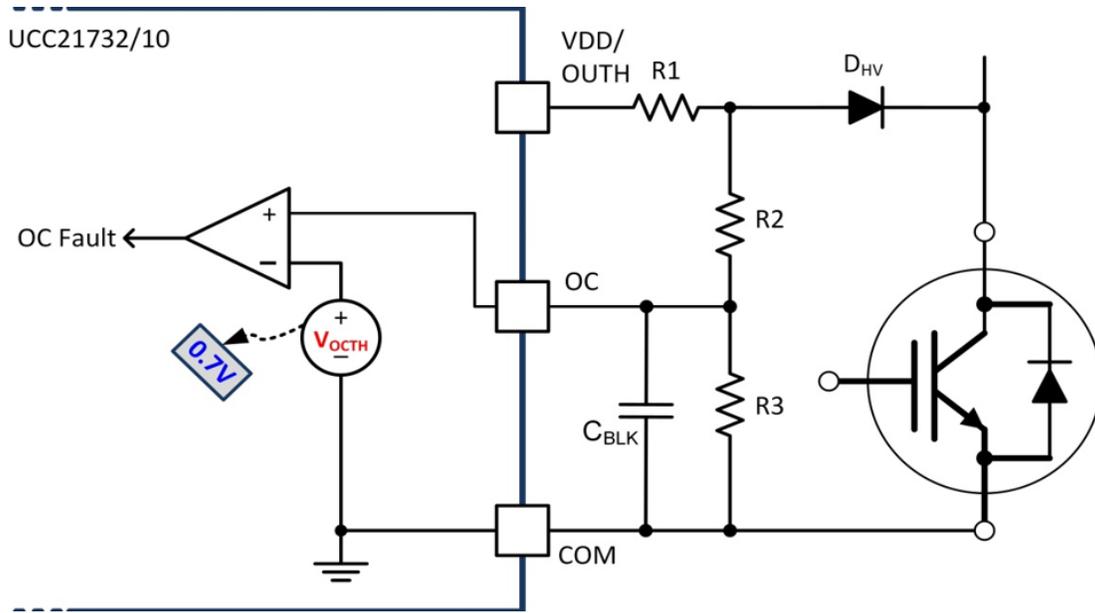


Figure 6. 如何将 OC 用作 DESAT¹²

使用上图接法后等效的 DESAT 保护阈值和相应时间计算方式如下, 也可使用 TI 提供的计算工具[12]进行评估。

$$V_{OCDET} = V_{OCTH} * \frac{R2 + R3}{R3} - V_F$$

$$t_{BLK} = -\frac{R1 + R2}{R1 + R2 + R3} * R3 * C1 * \ln\left(1 - \frac{R1 + R2 + R3}{R3} * \frac{V_{OCTH}}{VDD}\right)$$

V_{OCTH} 为芯片本身的 OCP 保护阈值, V_F 为高压二极管的正向压降。

TI 的 SPI 型功能安全芯片同样也有 OCP 功能, 工程师也可以采用上述的方法将 OC 保护配置为 DESAT 进行功率模块的短路保护。

参考文献

1. [Understanding the Short Circuit Protection for Silicon Carbide MOSFET \(SLUA863C\)](#)
2. [SiC Gate Driver Fundamentals e-book \(SLYY169\)](#)
3. <https://e2e.ti.com/support/power-management-group/power-management/f/power-management-forum/1037256/faq-ucc21750-how-can-we-increase-desat-charging-current-for-faster-short-circuit-detection-time-in-ucc217xx-and-iso5x5x>
4. [UCC21750-Q1 数据手册 \(SLUSDH9D\)](#)
5. [UCC5870-Q1 数据手册 \(SLUSD86C\)](#)
6. [UCC5880-Q1 数据手册 \(SLUSF39\)](#)
7. [UCC21759-Q1 数据手册 \(SLUSEB4A\)](#)
8. [UCC21755-Q1 数据手册 \(SLUSEM9\)](#)
9. [UCC21756-Q1 数据手册 \(SLUSEN8\)](#)
10. [UCC21710-Q1 数据手册 \(SLUSDH8C\)](#)
11. [UCC21732-Q1 数据手册 \(SLUSDH7B\)](#)
12. [UCC217xx XL Calculator Tool \(SLUC695\)](#)

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司