



说明

此设计指南介绍了如何搭配使用低静态电流 (11 μ A) 降压/升压转换器 (TPS63802) 和微控制器 MSP430FR2433 来实施热电制冷 (TEC) 驱动器，从而精确调节敏感器件的温度。

多种电子元件都需要调节温度，才能实现最佳性能和更长的使用寿命。低至 0.1 $^{\circ}$ C 的精确温度控制对于特定应用来说至关重要，例如用于光学模块的激光二极管，即使温度发生 1 $^{\circ}$ C 的改变，也会造成 0.1nm 的激光波长漂移。TEC 器件可利用珀耳帖效应在这些应用中控制温度。通过控制 TEC 中流通的电流方向，可以用它来升温或降温。

资源

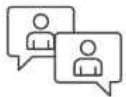
| | |
|------------------------------|-------|
| TIDA-050017 | 设计文件夹 |
| TPS63802 | 产品文件夹 |
| MSP430FR2433 | 产品文件夹 |
| LM4041D | 产品文件夹 |

特性

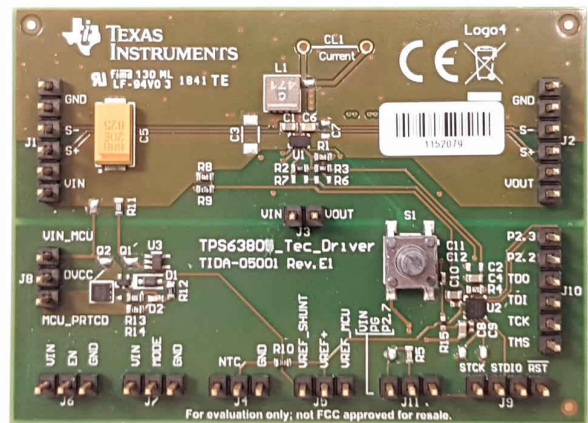
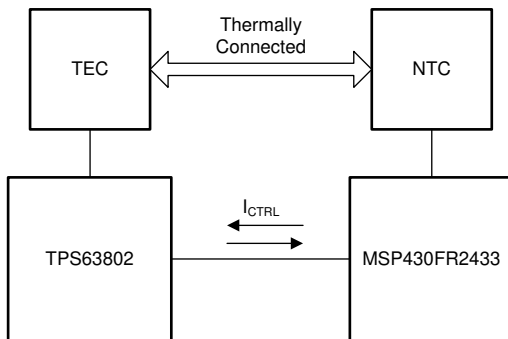
- 低成本解决方案
- 小尺寸功率级 (TPS63802) 解决方案 (< 30mm²)
- 低静态电流 (11 μ A) 功率级 (TPS63802)
- 数字 PI 控制
- 精确温度控制 < 0.1 $^{\circ}$ C

应用

- 激光二极管精确温度控制
 - 光学模块
 - 长距离海底
 - 地铁数据中心互连
 - 激光
- 电子器件封装冷却



咨询我们的 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

TPS63802 是具有高输出电流 (2A) 的高效率降压/升压转换器，采用 3mm × 2mm QFN 封装。该器件可在降压、降压/升压和升压模式之间无缝转换，无需进行任何不必要的切换。

对于此参考设计，TPS63802 由 3.3V 的稳压电压轨供电。TEC 元件连接在 TPS63802 的 VIN 和 VOUT 引脚之间。根据流经 TEC 元件所需的电流，通过使用串联电阻 R₃ 将控制电压 V_{CTRL} 注入 FB 引脚，TPS63802 的输出电压可在 1.8V 至 5V 之间变化。

可以通过 DAC 或低通滤波的脉宽调制 (PWM) 信号生成 V_{CTRL} 电压。此设计使用 PWM 信号选项。PWM 信号是由 TI 的一款超低功耗微控制器 (MSP430FR2433) 生成的，该微控制器有 BGA 和 4mm × 4mm QFN 两种封装形式。可以通过调整 PWM 信号的占空比来改变 V_{CTRL} 电压。将比例积分 (PI) 控制编程到微控制器单元 (MCU) 中，以将 TEC 元件的温度调节到目标值。

2 系统概述

2.1 方框图

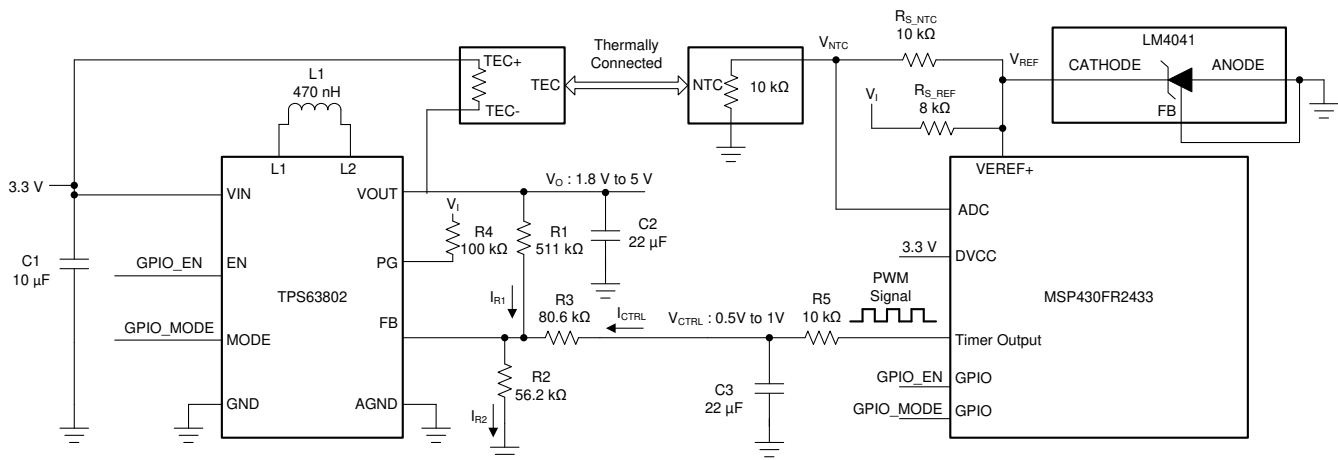


图 2-1. 系统原理图

2.2 设计注意事项

TPS63802 具有内置的省电 (PFM) 模式，在该模式下，开关操作会在低负载电流下暂停，以实现更高效率。当 V₁ < V_O 时，该模式可用于提高效率。对于 V₁ > V_O 的情况，采用强制脉宽调制 (PWM) 模式，在该模式下，器件会连续开关。这是因为 V₁ 通过 TEC 元件从外部对 V_O 进行充电，充电量超过其目标值。当 PWM 模式激活时，TPS63802 可通过功率 FET 灌入负电流，从而将 V_O 调节回其目标值。

2.2.1 调节 TPS63802 的输出电压

TPS63802 将反馈 (FB) 引脚处的电压调节至 0.5V。当 FB 电阻分压器网络仅由电阻器 R₁ 和 R₂ 组成时，通过方程式 1 设置输出电压。

$$V_O = \frac{(R_1 + R_2)}{R_2} \times V_{FB} \quad (1)$$

其中

- V_O = 输出电压
- R₁ = 反馈分压器上的上电阻器
- R₂ = 反馈分压器上的下电阻器
- V_{FB} = 反馈调整电压

通过在 FB 引脚上添加一个带有控制电压 V_{CTRL} 的电阻器 R₃，则可根据 R₃ 分支中的电流来动态地更改输出电压。此处所述的设计公式适用于 V_{CTRL} 仅能拉电流 (V_{CTRL_MIN} ≥ V_{FB}) 的情况。对于 V_{CTRL} 既能拉电流也能灌电

流 ($V_{CTRL_MIN} < V_{FB} < V_{CTRL_MAX}$) 的情况, 请参阅 [TIDUCA8](#) 中的公式。当 FB 电压调节至 0.5V 时, 从 FB 到接地的电流 I_{R2} 保持恒定。可通过将电流 I_{CTRL} 更改为 $I_{R1} = I_{R2} - I_{CTRL}$ 来调制电流 I_{R1} 。 I_{R1} 中的调制在 V_O 中反映为 $V_O = I_{R1} \times R_1 + V_{FB}$ 。

若要设计反馈分压器网络, 可根据 [SLVSEU9A](#) 中给出的范围选择 R_1 的值。一旦选择了控制电压 (V_{CTRL}) 的最小值和最大值, 就可根据 [方程式 2](#) 和 [方程式 3](#) 得出 R_3 和 R_2 的值。

$$R_3 = \frac{V_{CTRL_MAX} - V_{CTRL_MIN}}{V_{O_MAX} - V_{O_MIN}} \times R_1 \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{V_{FB} \times R_1 \times R_3}{V_{O_MAX} \times R_3 - V_{FB} \times (R_1 + R_3) + V_{CTRL_MIN} \times R_1} \quad (3)$$

其中

- R_3 = 控制电压与 FB 引脚之间的电阻器
- V_{CTRL_MAX} = 控制电压的最大值
- V_{CTRL_MIN} = 控制电压的最小值
- V_{O_MAX} = 输出电压的最大值
- V_{O_MIN} = 输出电压的最小值

例如, 如果将 R_1 选为 511k Ω , 并且 V_{CTRL} 在 0.5V 和 1V 之间变化, 则使 V_O 从 1.8V 变化到 5V 所需的 R_2 和 R_3 的计算值分别为 56.2k Ω 和 80.6k Ω 。可根据 [方程式 4](#) 计算出给定控制电压值的输出电压。

$$V_O = V_{FB} + \left(V_{FB} \times \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \frac{V_{CTRL}}{R_3} \right) \times R_1 \quad (4)$$

2.2.2 生成 PWM 信号

可以使用 MCU 的计时器之一生成可变占空比和频率的 PWM 信号。例如, MSP430FR2433 计时器可配置为处于向上计数模式, 在该模式下, 从 0 计数到 TAXCCR0 寄存器中指定的值。

根据 PI 控制器的输出, 通过设置 TAXCCR1 寄存器, 在每个周期调整 PWM 信号的占空比。计时器输出引脚本身可用作 PWM 源, 方法是将其设置为“复位/设置”等输出模式之一。或者, 如果 MCU 的另一外设在同一时间需要与计时器输出对应的端口引脚, 则可以利用计时器生成的中断将 GPIO 引脚用于 PWM 信号。

可以将 PWM 信号发送到一阶低通滤波器以生成 V_{CTRL} 信号。应根据所需的瞬态响应和所需的稳态温度精度来选择滤波器的转角频率。

2.2.3 数字 PI 控制器

可以通过在简单分压器配置中使用 NTC 元件来感应 TEC 元件的温度, 方法是添加一个具有精确电压源 V_{REF} 的串联电阻 R_{S_NTC} , 如 [图 2-1](#) 所示。NTC 元件的温度相对于电阻的查找表可以写入 MCU 存储器中。将目标温度输入 MCU 后, 便可从该查找表中获得相应的 NTC 电阻 (R_{NTC_TARGET})。可以使用 R_{NTC_TARGET} 、 V_{REF} 和 R_{S_NTC} 的值计算目标温度下 NTC 两端的电压。该电压用作 PI 控制器的基准电压 (V_{NTC_TARGET})。

ADC 用于对 NTC 元件的电压 (V_{NTC}) 进行采样。如果使用的 MCU 具有准确的内部基准电压, 则 ADC 基准和 NTC 电阻分压器网络源 (V_{REF}) 可由该基准本身提供。如果内部基准不够准确, 则需要使用诸如并联稳压器 (LM4041D) 之类的外部基准来达到正确的温度设定点。使用 LM4041D 时, 在电源和阴极引脚之间连接一个串联电阻 R_{S_REF} 。必须正确设置 R_{S_REF} 的值, 同时考虑为 NTC 电阻分压器网络供电所需的电流以及最小阴极偏置电流。LM4041D 在阴极和反馈引脚之间具有 1.233V 的基准电压。在此设计中, 将 R_{S_REF} 选为 8k Ω , 以使总可用电流达到 314 μ A ($(V_I - V_{REF}) / R_{S_REF}$)。

PI 控制器的误差是基准电压 (V_{NTC_TARGET}) 与测得的 NTC 电压 (V_{NTC}) 之间的差值。[方程式 5](#) 中给出的 PI 控制器的输出 U 是比例部分和积分部分的各个输出的总和。

$$U = K_P \times E_R + K_I \times (E_R - E_{R_PREV}) \times dt \quad (5)$$

其中

- U = 控制器输出
- K_P = 控制器比例部分的增益
- K_I = 控制器积分部分的增益
- E_R = 当前周期的误差
- E_{R_PREV} = 上一周期的误差
- dt = 两次 ADC 采样之间的时间

需要根据应用的热环境来调整控制器的增益 K_P 和 K_I 。使用矩形积分时，误差的积分部分的计算方式是将当前误差 (E_R) 与先前计算的误差 (E_{R_PREV}) 之差乘以两次 ADC 采样之间的时间 (dt)。

可以使用 MCU 计时器之一得出这项计算所需的 dt 值。使用 MSP430FR2433 时，计时器可以配置为在连续模式下运行。一旦 ADC 完成 V_{NTC} 电压的转换，就可以停止计时器并读出计时器计数器寄存器 $TAxR$ 的内容。然后可根据计时器频率和计数计算 dt 值。之后可以清除 $TAxR$ 寄存器并重新启动计时器。

PI 控制器的输出用于更新 PWM 信号的占空比。PWM 信号的占空比应限制在与 V_{CTRL_MIN} 和 V_{CTRL_MAX} 对应的范围内。如果占空比处于其中一个限值，则应钳制误差的积分，以防止积分器饱和。

2.2.4 程序流程图

图 2-2 所示为数字 PI 控制器在 MSP430FR2433 上的固件实施，对应于 TIDA-050017 中的设计原理图。

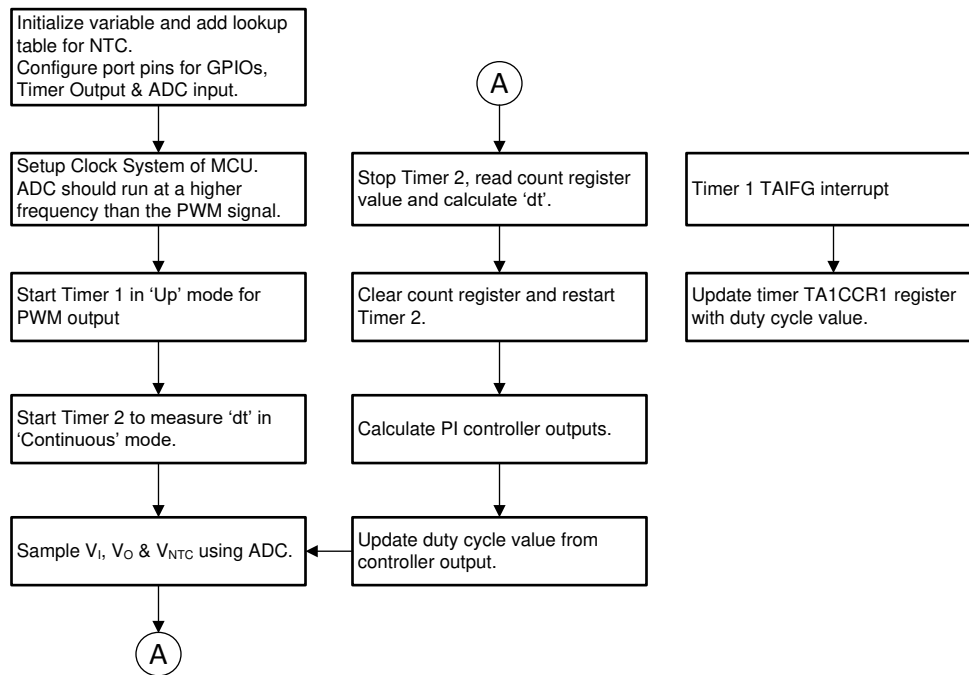


图 2-2. 程序流程图

3 测试结果

TEC 电流与控制电压 (V_{CTRL}) (图 3-1) 以及效率测量值 (图 3-2 至图 3-4) 是使用实际电阻器而不是 TEC 元件获得的。这是因为与电阻器相比，TEC 元件的电阻随温度的漂移要大得多。计算可能的最大 TEC 电流时，应考虑 TEC 电阻的这种温度变化。在较低负载电流 ($< 200\text{mA}$) 下，由于开关损耗较小，TPS63802 在 PFM 模式 (图 3-2) 下的效率优于在 PWM 模式 (图 3-3) 下。TEC 电阻值越高，效率就越高，但代价是最大 TEC 电流会减小。

为了显示此设计可达到的高温精度，图 3-5 中稳态温度误差随时间的变化图是通过低通滤波器使用 $R_5 = 10\text{k}\Omega$ 和 $C_3 = 22\mu\text{F}$ 的值测得。对于该测量，LM4041D 并联稳压器用于驱动 NTC 电阻分压器网络，并为 ADC 提供外部电压基准。

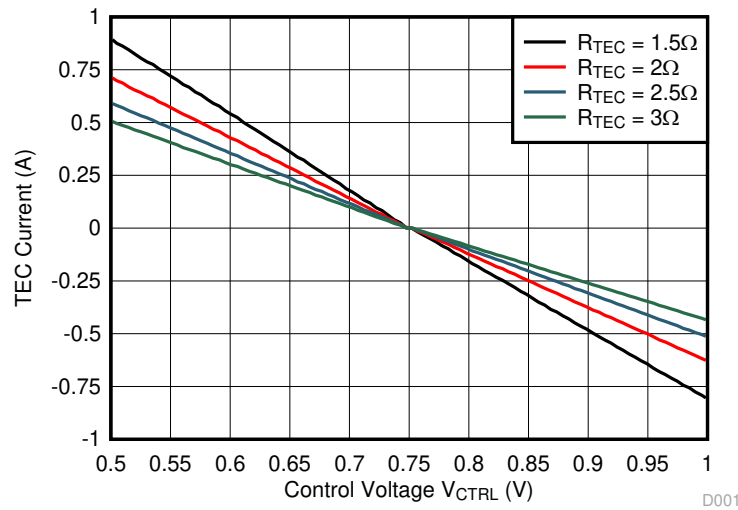


图 3-1. TEC 电流与控制电压 (V_{CTRL})

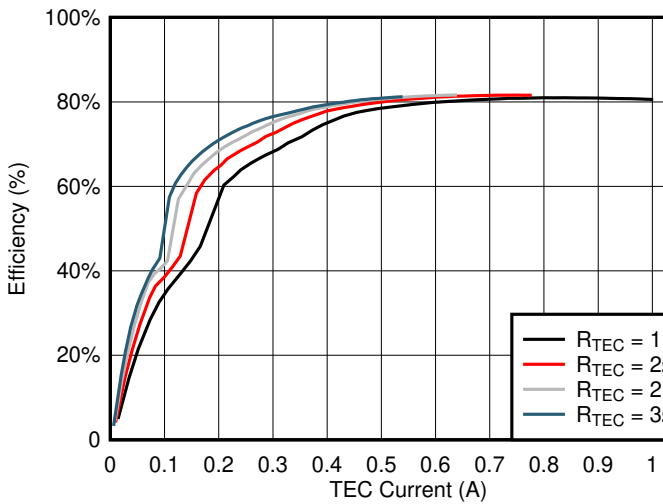


图 3-2. $V_O > V_I$ (PFM) 时的 TPS63802 效率

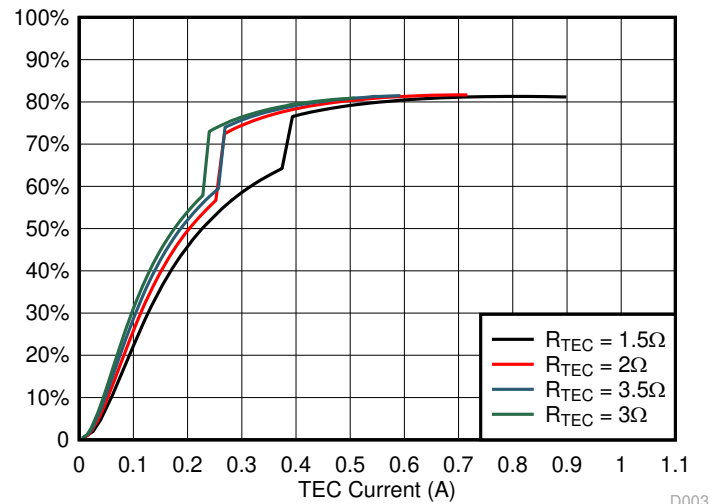


图 3-3. $V_O > V_I$ (PWM) 时的 TPS63802 效率

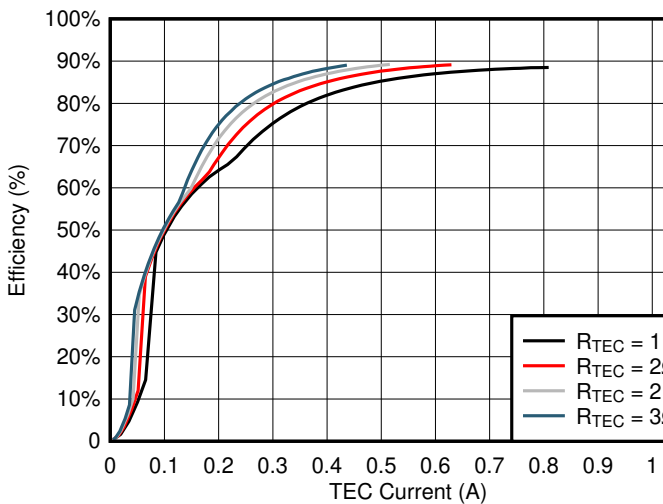


图 3-4. $V_O < V_I$ 时的 TPS63802 效率

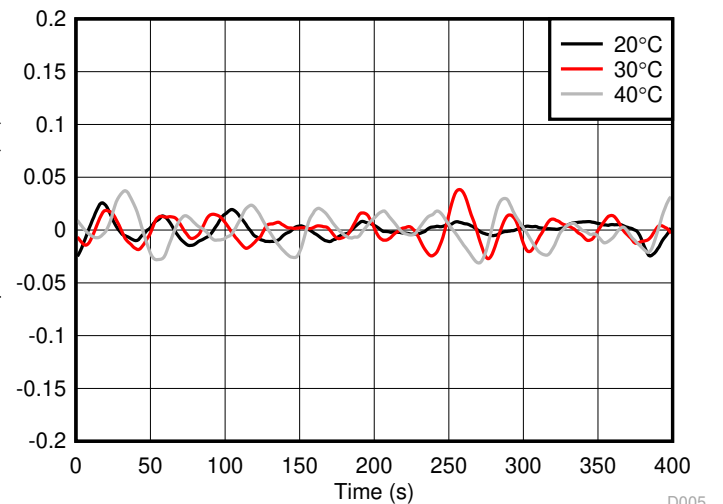


图 3-5. 设计的稳态温度误差

4 设计文件

4.1 原理图

若要下载原理图，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

若要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 布局图

若要下载板层图，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

若要下载 Altium Designer® 工程文件，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

若要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

若要下载装配图，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

5 软件文件

若要下载软件文件，请参阅 [TIDA-050017](#) 中的设计文件。

6 相关文档

- 德州仪器 (TI)，[5V 低功耗 TEC 驱动器参考设计](#)
- 德州仪器 (TI)，[《MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx 系列用户指南》](#)

6.1 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6.2 第三方产品免责声明

TI 发布的与第三方产品或服务有关的信息，不能构成与此类产品或服务或保修的适用性有关的认可，不能构成此类产品或服务单独或与任何 TI 产品或服务一起的表示或认可。

7 关于作者

Varun John 是德州仪器 (TI) 低功耗开关稳压器的验证工程师。

8 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

| Changes from Revision * (March 2019) to Revision A (August 2021) | Page |
|--|------|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。..... | 2 |

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司