

Application Note

低纹波电源的峰值电流模式转换器次级滤波器设计 - 第 I 部分：用于减少输出纹波的滤波器设计



Andrew Xiong, Miranda Gu

摘要

在 ADC、射频收发器和模拟前端 (AFE) 等应用的电源设计中，输出电压纹波是评估电源质量的一项重要因素。以前的直流/直流电源通常使用两级电源设计（包含降压转换器和 LDO）来满足低输出电压纹波要求。近年来，一种采用降压转换器和次级无源滤波器的电源设计引起了广泛关注。与采用 LDO 的传统设计相比，该设计可以减小设计尺寸并提高总体效率。但增加的无源滤波器可能会引入一对共轭极点，而这会威胁环路稳定性。

在 TI 的降压稳压器产品系列中，具有独特集成补偿的低纹波和低噪声电源设计 TPS6291x 和 TPSM8291x（3V 至 17V 输入）可以涵盖 12V 输入轨。为了填补具有更高输入电压的一级低纹波电源设计空白，本应用手册系列介绍了通用峰值电流模式降压转换器的第二级滤波器设计方法。本文以具有 3.8V 至 30V 输入电压和 3A 最大电流的 TPS62933F 为例来介绍此设计方法。

内容

| | |
|--------------------------|---|
| 1 引言..... | 2 |
| 2 次级滤波器的元件选择..... | 2 |
| 3 实验验证..... | 4 |
| 4 如何估算铁氧体磁珠的电感以减少纹波..... | 5 |
| 5 总结..... | 7 |
| 6 参考文献..... | 7 |
| 7 附录..... | 8 |

插图清单

| | |
|-------------------------------------|---|
| 图 2-1. 具有第二级滤波器的降压转换器..... | 2 |
| 图 2-2. 公式 (2) 的环路增益幅度图..... | 3 |
| 图 3-1. 无第二级滤波器时的输出电压纹波..... | 4 |
| 图 3-2. 使用第二级滤波器时的输出电压纹波..... | 5 |
| 图 4-1. BLE18PS080SN1 阻抗与频率间的关系..... | 5 |
| 图 4-2. BLM18SN220TH1 阻抗与频率间的关系..... | 5 |
| 图 4-3. BLE18PS080SN1 电感与频率间的关系..... | 6 |
| 图 4-4. BLM18SN220TH1 电感与频率间的关系..... | 6 |

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

对于使用 ADC、PLL 和射频收发器的信号处理系统设计的电源，低输出电压纹波是评估电源质量的一项重要因素。在一些旨在实现低输出电压纹波的电源设计中，通常第一级使用降压转换器进行降压，第二级使用 LDO 滤除纹波。然而，在一些紧凑或具有成本效益的应用中，BOM 成本、设计尺寸和转换效率可能会引起关切。

近年来，将次级无源 LC 滤波器与降压转换器相结合的新型低纹波电源设计引起了广泛的关注。与采用 LDO 的传统设计相比，该设计可以减小设计尺寸并提高效率。请参阅[通过 TPS62913 低纹波和低噪声降压转换器为 AFE7920 供电应用手册](#)。但增加的无源滤波器可能会引入一对共轭极点，而这会威胁环路稳定性。为了克服这一挑战，一些降压转换器设计了独特的内部补偿来支持第二级 LC 滤波器，例如称为低噪声和低纹波电源设计的 TPS62912/3 和 TPSM82912/3。请参阅[TPS6291x 具有集成式铁氧体磁珠滤波器补偿的 3V 至 17V、2A/3A 低噪声和低纹波降压转换器数据表](#)。

低纹波和低噪声通常代表电源的两种不同特性。纹波是指输出电压随开关频率的变化，它通过示波器进行测量并通过使用第二级 LC 滤波器来减少。噪声通常是指 100Hz 至 100kHz 频率范围内的电压变化，该变化通常利用噪声频谱进行测量，并受到独特 IC 设计的限制。

对于某些只需要低纹波但不需要低噪声的应用，本应用手册中提出了通用峰值电流模式降压稳压器的第二级 LC 滤波器设计方法，该方法可以有效降低输出电压纹波幅度，并确保环路稳定性。第 I 部分介绍了实现所需输出电压纹波的第二级滤波器元件选择方法。第 II 部分介绍了稳定性分析和设计方法。所提议的方法通过使用内部补偿峰值电流模式转换器 TPS62933F 进行了实验验证。请参阅[TPS6293x 采用 SOT583 封装的 3.8V 至 30V、2A/3A 同步降压转换器数据表](#)。

2 次级滤波器的元件选择

[图 2-1](#) 展示了具有第二级滤波器的降压转换器方案。电感器 L_2 和电容器 C_2 构成了一个二阶低通滤波器。该滤波器引入了一对新的共轭极点，这可以通过高频增益衰减来降低开关频率下的输出电压纹波和噪声。本节将分析电感器 L_2 和电容器 C_2 的选择方法。

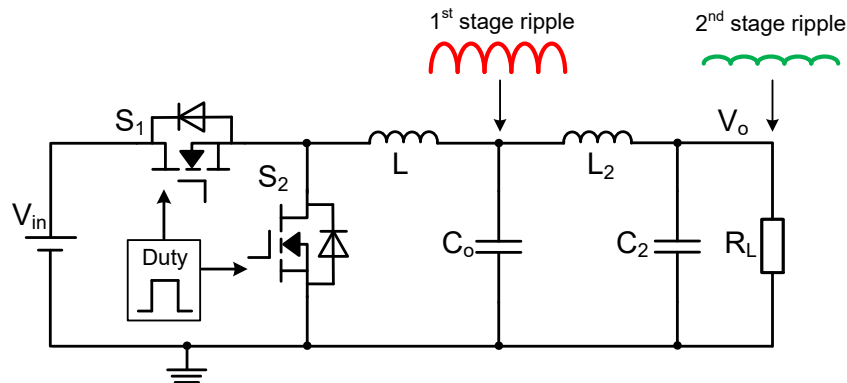


图 2-1. 具有第二级滤波器的降压转换器

在之前的几项研究中，我们已推导出第 1 级 LC 滤波器后的输出电压纹波表达式，如[方程式 1](#) 所示。另请参阅[降压开关稳压器的输出纹波电压应用手册](#)。

$$V_{o1\text{-ripple}} = \frac{V_o \left(1 - \frac{V_o}{V_{in}}\right)}{f_{sw} L} \left(r_c + \frac{1}{8f_{sw} C_o}\right) \quad (1)$$

其中， $V_{o1\text{-ripple}}$ 是第一级后输出电压纹波的峰峰值幅度。 V_o 是降压转换器的输出电压，而 V_{IN} 是降压转换器的输入电压。 f_{sw} 是开关频率。 L 和 C_o 分别是第一级滤波器的电感和电容。 r_c 是电容器 C_o 的 ESR。

第二级滤波器的传递函数如[方程式 2](#) 所示：

$$G_{vv\text{-2nd}}(s) = \frac{R_L}{s^2 R_L L_2 C_2 + s L_2 + R_L} \quad (2)$$

其中， R_L 是输出负载电阻。由于 MLCC 通常用作电容器 C_2 以减少第二级的输出纹波，因此 C_2 的 ESR 会被忽略。

传递函数 [方程式 2](#) 中包含一对共轭极点。极点频率可以近似表示为 [方程式 3](#)。环路增益幅度图如 [图 2-2](#) 所示。

$$f_2 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}} \quad (3)$$

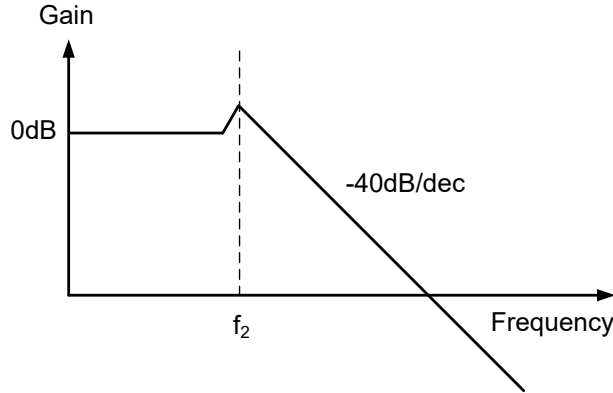


图 2-2. 公式 (2) 的环路增益幅度图

为了简化该关系式，我们忽略了共轭极点品质因数的影响，增益被视为频率 f_2 后斜率为 -40dB/dec 的衰减。然后，可以推导出如 [方程式 4](#) 所示的关系式。

$$\frac{0\text{dB} - 20\lg(A_{\text{sw}})}{\lg(f_2) - \lg(f_{\text{sw}})} = -40\text{dB/dec} \quad (4)$$

其中， A_{sw} 是开关频率 f_{sw} 处的增益幅度。

A_{sw} 的表达式可以通过 [方程式 5](#) 推导得出。

$$A_{\text{sw}} = \frac{f_2^2}{f_{\text{sw}}^2} = \frac{1}{4\pi^2 f_{\text{sw}}^2 L_2 C_2} \quad (5)$$

将衰减增益 A_{sw} 应用于 $V_{\text{o1-ripple}}$ 后，第二级纹波 $V_{\text{o2-ripple}}$ 表示为 [方程式 6](#)。

$$V_{\text{o2-ripple}} = A_{\text{sw}} V_{\text{o1-ripple}} = \frac{V_{\text{o}} \left(1 - \frac{V_{\text{o}}}{V_{\text{in}}}\right) \left(r_{\text{c}} + \frac{1}{8f_{\text{sw}} C_{\text{o}}}\right)}{4\pi^2 f_{\text{sw}}^3 L L_2 C_2} \quad (6)$$

为了满足 $V_{\text{o2-ripple}} \leq V_{\text{o2-ripple-target}}$ 的要求，可以通过 [方程式 7](#) 获得 L_2 和 C_2 的选择限制。

$$L_2 C_2 \geq \frac{V_{\text{o}} \left(1 - \frac{V_{\text{o}}}{V_{\text{in}}}\right) \left(r_{\text{c}} + \frac{1}{8f_{\text{sw}} C_{\text{o}}}\right)}{4\pi^2 f_{\text{sw}}^3 L V_{\text{o2-ripple-target}}} \quad (7)$$

如图所示，[方程式 7](#) 中仅给出了 $(L_2 \times C_2)$ 的限制，而分别没有给出 L_2 和 C_2 的限制。结合考虑 BOM 成本、DCR 损耗等，可以确定电感和电容。

在本应用手册系列的第 II 部分中，可以进一步分析添加无源滤波器对环路稳定性的影响，然后可以进一步推导具有稳定性限制的元件选择范围。通过结合考虑本文中的输出电压纹波限制和后续文章中的稳定性限制，可以获得完整的元件选择范围和应用设计方法。

3 实验验证

实验验证使用 PCM 转换器 TPS62933F 完成。运行条件为： $V_{in}=24V$ 、 $V_{out}=1.2V$ 、 $f_{sw}=500kHz$ 且 $I_{out}=0A$ 。所需的输出电压纹波幅度小于 $800\mu V$ 峰峰值。

为进行比较，首先给出了不使用第二级滤波器的应用案例。根据数据表中的典型建议元件值，针对该运行条件选择了 $L=2.2\mu H$ 和 $C_o=94\mu F$ 。 $94\mu F C_o$ 使用了 2 个 $47\mu F$ 电容器。

输出电压纹波测试波形如图 3-1 所示，输出电压纹波峰峰值幅度约为 $5.7mV$ ，比要求大得多。

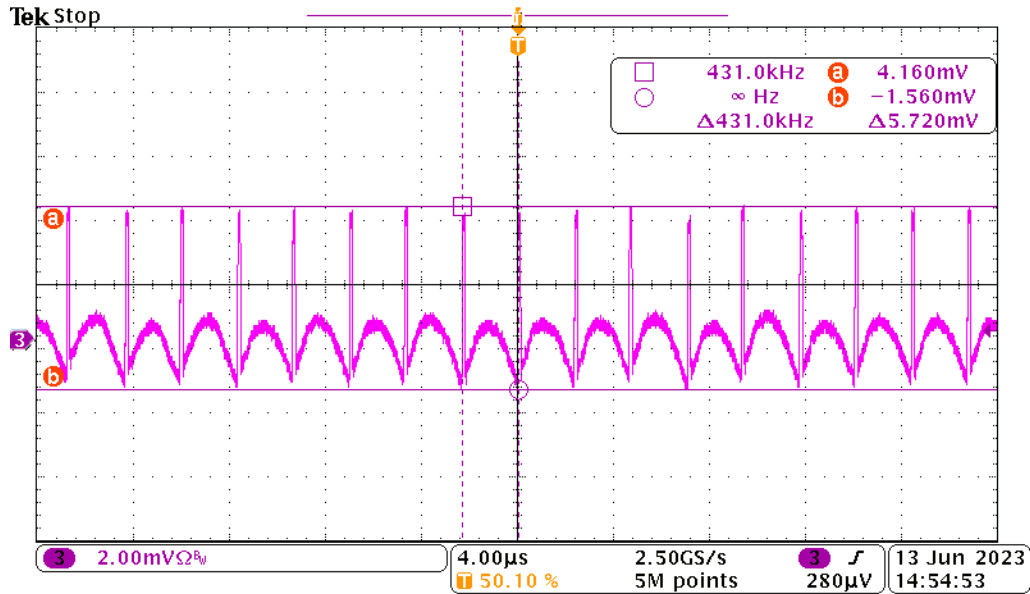


图 3-1. 无第二级滤波器时的输出电压纹波

然后，验证了所提议的第二级滤波器元件选择方法。在第一级和第二级滤波器的总电容同样为 $2 \times 47\mu F$ 的情况下，我们设置 $C_o=1 \times 47\mu F$ 且 $C_2=1 \times 47\mu F$ 。将所有参数代入方程式 7 后，可以得到 $L_2 \geq 14.9nH$ 作为 $800\mu V$ 输出电压纹波的限制。

选择 $L_2=20nH$ 后，图 3-2 显示了使用第二级滤波器时的输出电压纹波。输出电压纹波幅度为 $640\mu V$ 峰峰值，可满足 $800\mu V$ 要求。

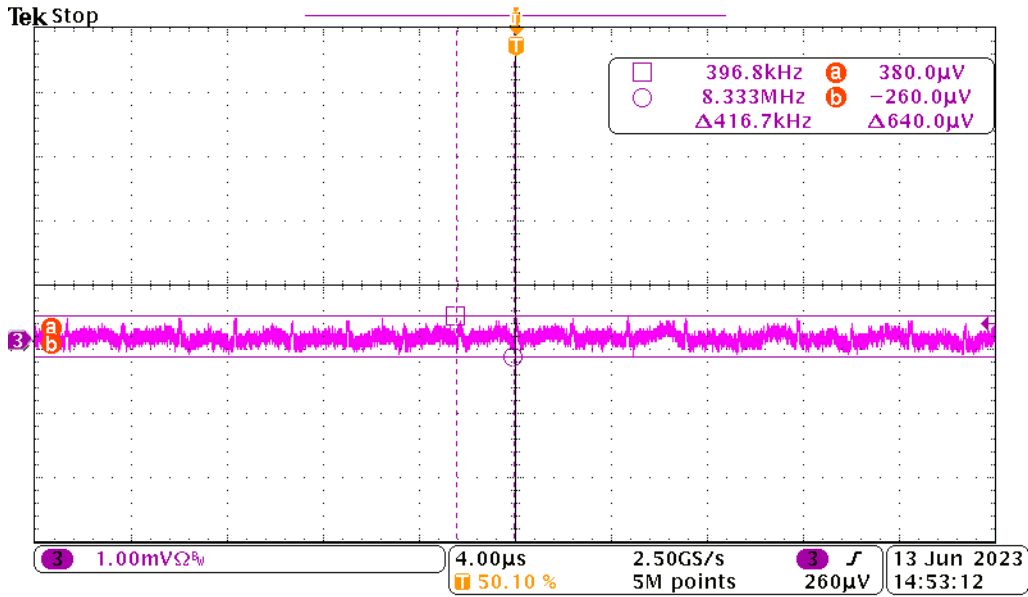


图 3-2. 使用第二级滤波器时的输出电压纹波

该示例验证了所提议设计方法的有效性。节 7 中显示了更多实验结果。

4 如何估算铁氧体磁珠的电感以减少纹波

在第二级滤波器的实际实现中，铁氧体磁珠通常用作第二级滤波器的 L_2 ，以提供 nH 级电感。在铁氧体磁珠的规格和数据中，通常会提供 100MHz 特定频率下的阻抗值以及与频率相关的阻抗曲线。

一种估算电感的直观方法是将给定的阻抗除以 $2\pi F$ （例如 $2\pi \times 100\text{MHz}$ ）。但这并不总是正确的，我们需要查看阻抗曲线，以检查电感是否是给定频率点的主要因素。这里以来自 Murata 的两个铁氧体磁珠为例进行了说明：BLE18PS080SN1 和 BLM18SN220TH1。

这两个铁氧体磁珠的规格中给出了 100MHz 下的阻抗值。但如图 4-1 和图 4-2 所示，在 100MHz 频率下，影响这两款器件阻抗的主要因素是不同的。

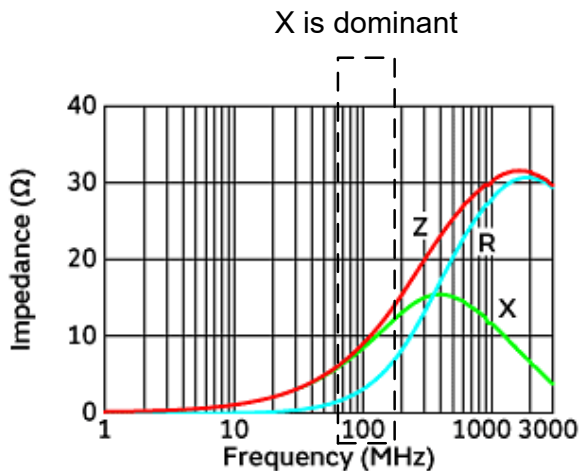


图 4-1. BLE18PS080SN1 阻抗与频率间的关系

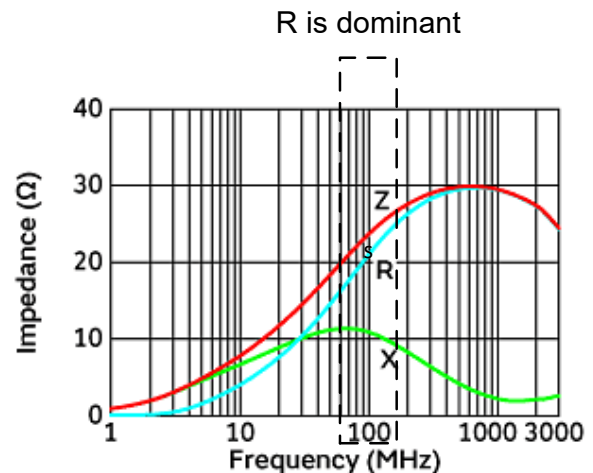


图 4-2. BLM18SN220TH1 阻抗与频率间的关系

在图 4-1 中，由 L 确定的感抗 X 是 BLE18PS080SN1 在 100MHz 处阻抗 Z 的主要部分。因此，如果假设电感随频率变化很小，那么使用阻抗 8.5Ω 除以 $(2\pi \times 100\text{MHz})$ 估算 L 值是合理的，这样我们可以得到 100MHz 下的电感为 13.5nH。

但在图 4-2 中，由 L 确定的感抗 X 不是 BLM18SN220TH1 在 100MHz 处阻抗 Z 的主要部分。因此，我们无法使用类似的方法来根据 100MHz 处给定的阻抗值来直接计算电感。这时我们可以从较低频率下的阻抗读取感抗值。

假设我们使用 TPS62933F 的 500kHz 开关频率，可以从给定曲线中的最低频率（即 1MHz 点）读取更准确的值。

图 4-3 和图 4-4 显示了上述两个磁珠的电感与频率间的关系曲线 [7]。我们可以在第二级 LC 滤波器设计中使用 BLE18PS080SN1 1MHz 电感 15.3nH 和 BLM18SN220TH1 1MHz 电感 103.4nH。

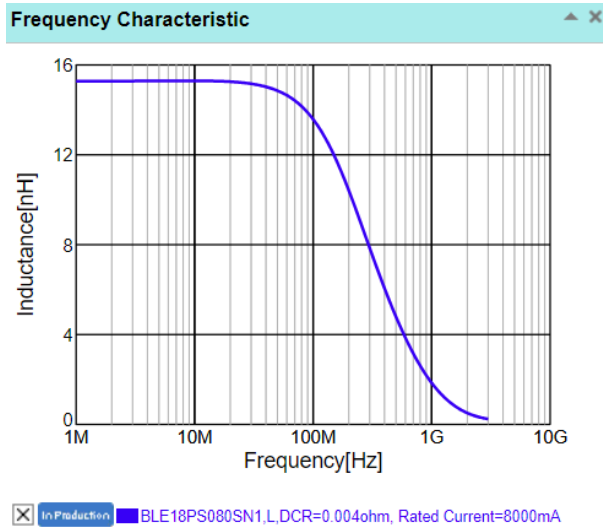


图 4-3. BLE18PS080SN1 电感与频率间的关系

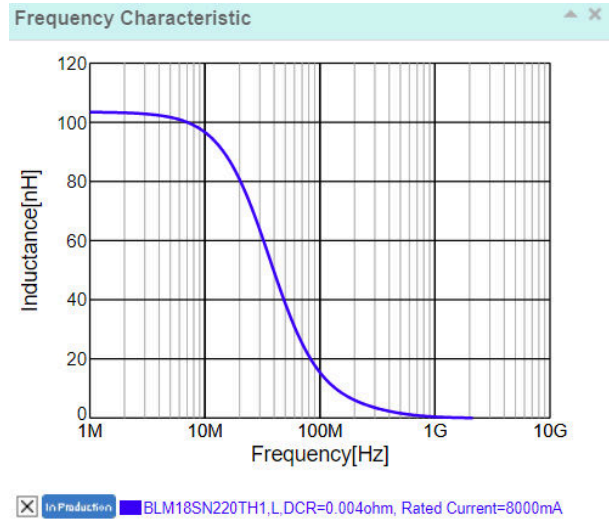


图 4-4. BLM18SN220TH1 电感与频率间的关系

5 总结

本应用手册提出了一种第二级滤波器的元件选择方法，以便满足低输出纹波要求。我们首先通过频域分析研究了第二级滤波器的高频增益衰减效应。然后，通过对第一级输出电压纹波施加增益衰减效应，我们推导出了第二级滤波器元件值和第二级输出电压纹波之间的关系，这可以直接指导元件的选择。

需要注意的是，本应用手册并未考虑第二级滤波器对转换器环路稳定性的影响。[低纹波电源的峰值电流模式转换器次级滤波器设计 - 第 II 部分：针对稳定性的混合传感网络设计](#) 应用手册讨论了稳定性分析和稳定性限制条件下的元件选择方法。

6 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [通过 TPS62913 低纹波和低噪声降压转换器为 AFE7920 供电](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI), [TPS6291x 具有集成式铁氧体磁珠滤波器补偿的 3V 至 17V、2A/3A 低噪声和低纹波降压转换器](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [TPS6293x 采用 SOT583 封装的 3.8V 至 30V、2A/3A 同步降压转换器](#) 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [降压开关稳压器的输出纹波电压](#) 应用手册。
5. Murata, [SimSurfing 设计工具](#) 仿真工具。
6. 德州仪器 (TI), [低纹波电源的峰值电流模式转换器次级滤波器设计 - 第 II 部分：针对稳定性的混合传感网络设计](#) 应用手册。

7 附录

为了便于验证，元件值 L 、 C_o 和 L_2 是固定的，并首先给定。 C_2 的限值通过 [方程式 7](#) 计算并通过实验进行验证。

| V_{in} (V) | V_o (V) | f_{sw} (kHz) | L (μ H) | C_o (μ F) | L_2 (nH) | 所需的纹波 (mV) | C_2 下限 (μ F) | C_2 选择 (μ F) | 测量的纹波 (mV) |
|--------------|-----------|----------------|----------------|------------------|------------|------------|---------------------|---------------------|------------|
| 12 | 1.2 | 1000 | 1 | 47 | 20 | 1 | 3.64 | 4.7 | <0.8 |
| 12 | 1.6 | 1000 | 1.5 | 47 | 20 | 1 | 3.11 | 4.7 | <0.8 |
| 24 | 1.2 | 500 | 2.2 | 47 | 20 | 1 | 27.96 | 30 | <0.8 |
| 24 | 1.6 | 500 | 3.3 | 47 | 20 | 1 | 24.44 | 30 | <0.8 |

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