

# 使用第二级滤波器来减少电压纹波

Rich Nowakowski  
Product Marketing Engineer

Sarmad Abedin  
Power Design Services Engineer

## 引言

具有集成本点对点串行通信或模拟前端 (AFE) 的高级处理器和片上系统 (SoC) 的电源需要具有低输出电压纹波，才能保持信号完整性并提高性能。处理器负载点 (POL) 电源的输出电压纹波要求可能低于 2mV，这大约是典型纹波设计的十分之一，这给同步降压转换器带来了严重的设计限制。由于处理器的输出电流要求超出了线性后置稳压器的能力，因此采用具有更高开关频率和额外输出电容的第二级滤波器可大大减少 POL 纹波。同步降压转换器具有多种不同的控制架构，每种架构都具有独特方法，可在低纹波电压设计下确保稳定性。本文比较了实现 1mV 输出电压纹波的三种不同控制架构：外部补偿电压模式、恒定导通时间和可选补偿电流模式，并提供了使用相同电气规格的测试数据以及输出电压纹波、解决方案尺寸、负载瞬态和效率的比较结果。

## 选择并约束应用程序

设计并构建了三种不同电源，以展示在类似工作条件下每种控制模式的性能。对于每种设计，输入电压为 12V，输出电压为 1V，并且每个器件的输出电流能够达到 15A。这些是为高性能 SoC 供电的典型要求，高性能 SoC 集成了敏感的模拟电路，需要低输出电压纹波。

为了约束滤波器设计和性能预期，允许的纹波电压为输出电压的  $\pm 0.15\%$  或  $\pm 1.5\text{mV}$  (3mVpp)。我们采用三个 TI 直流/直流转换器进行比较：15A D-CAP3™ 降压转换器 (TPS548A28)、20A 内部补偿高级电流模式 (ACM) 降压转换器 (TPS543B22) 和 15A 电压模式降压转换器 (TPS56121)。我们在转换器支持类似第二级滤波器元件的能力范围内，选择了尽可能彼此接近的输出电压、输出电流和工作频率。

## 设计第二级滤波器

即使使用低等效串联电阻 (ESR) 陶瓷输出电容器，通过降压转换器的电感器和电容器 (LC) 输出滤波器来实现低输出电压纹波也是不切实际的。要实现低于 5mV 的输出纹波，设计人员可能需要使用第二级 LC 滤波器。有关第二级滤波器设计或纹波测量技术的更多信息，请参阅资源部分。可使用 **方程式 1** 并求解  $L_2$  来计算第二级滤波器的电感器值。电感器  $L_2$  是第二级电感器， $C_1$  是降压转换器的初级输出电容器， $C_2$  是第二级电容器网络。所有三种设计都使用了相同的第二级滤波器（如 **表 1** 所示），占用了  $92\text{mm}^2$  的电路板面积（如 **图 1** 所示）。

$$SWitching\ Frequency = 1 / \left( 2\pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_s} \right), \text{ Where } C_s = 1 / \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

器件型号	控制架构	开关频率	第二级电感	第二级电容
TPS548A28	D-CAP3	800kHz	2 x 0.68μH	4 x 100μF + 0.1μF
TPS543B22	ACM	1000kHz	2 x 0.68μH	4 x 100μF + 0.1μF
TPS56121	电压模式	500kHz	2 x 0.68μH	4 x 100μF + 0.1μF

表 1. 转换器控制架构和第二级滤波器。

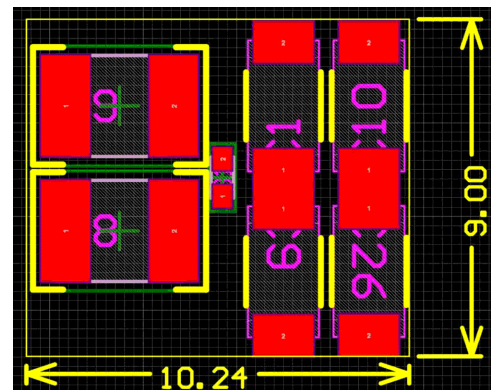


图 1. 第二级滤波器的电路板面积为  $92\text{mm}^2$ 。

选择第二级电感器值 (L2) 并组装元件后，下一步是通过增加第二级电感和电容来重新补偿直流/直流转换器的控制环路，以确保稳定性。必须指出的是，每个控制架构都有自己独特的技术，可在添加第二级滤波器后重新补偿控制环路（如需）。我们对每个控制架构的输出电压纹波、效率损失和稳定性进行了评估并汇总出结果。

## 电压模式控制架构

通过将输出电压和基准电压的电压误差信号与恒定锯齿-斜坡波形进行比较，可实现具有电压模式控制架构的脉宽调制 (PWM)。斜坡由振荡器发出的时钟信号启动。

**TPS56121** 采用外部补偿 3 类补偿来寻址双极功率级，从而允许在添加第二级滤波器后对转换器进行重新补偿。在添加第二级滤波器后调整外部电阻器和电容器值可确保稳定性。在没有额外滤波器的情况下，输出电压峰峰值纹波为 4.8mV。应用额外滤波器后，输出电压纹波为 1.9mV（如图 2 所示）。在这种情况下，TPS56121 设计无需调节环路补偿即可确保稳定性。图 3 显示了具有 10A 负载阶跃的负载瞬态波形，并且实施第二级滤波器后的输出电压波形没有不稳定的迹象。

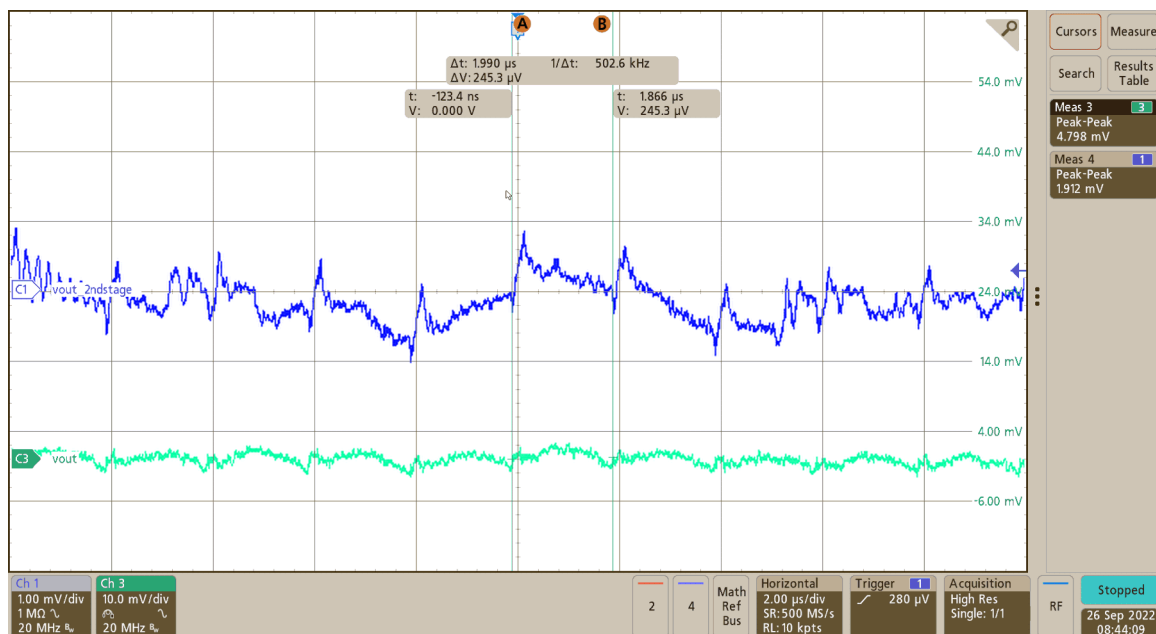


图 2. 具有和不具有额外第二级滤波器的 TPS56121 输出电压纹波。

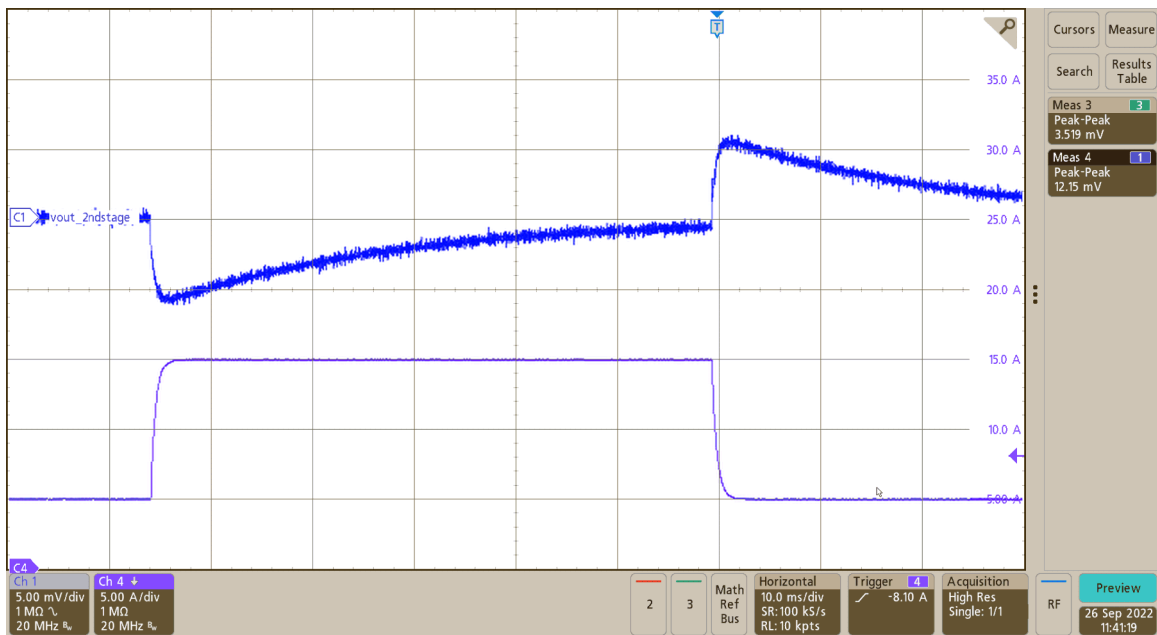


图 3. 使用电压模式控制的 TPS56121 的瞬态响应。

## D-CAP3 控制架构

D-CAP3 使用一次性计时器生成与输入电压和输出电压成正比的导通时间脉冲。当下降反馈电压等于基准电压时，将生成新的 PWM 导通脉冲。斜坡由输出电感器仿真。来自内部纹波注入电路的信号直接馈入比较器，消除了其失调电压，从而减少了对电容器 ESR 输出电压纹波的需求。D-CAP3 和其他恒定导通时间转换器的优势之一是无需额外的环路补偿电路。但是，如果器件支持此功能，并且在

输出电压反馈电阻分压器网络中添加了前馈电容，则控制环路的功能可通过可调斜坡进行调整。在没有额外滤波器的情况下，TPS548A28 输出电压峰峰值纹波为 7.6mV。应用额外滤波器后，输出电压纹波为 2.3mV（如图 4 所示）。在此情况下，TPS548A28 设计无需进行调整即可确保稳定性。图 5 显示了与之前的转换器具有相同 10A 负载阶跃的负载瞬态波形，并且实施第二级滤波器后的输出电压波形没有不稳定的迹象。

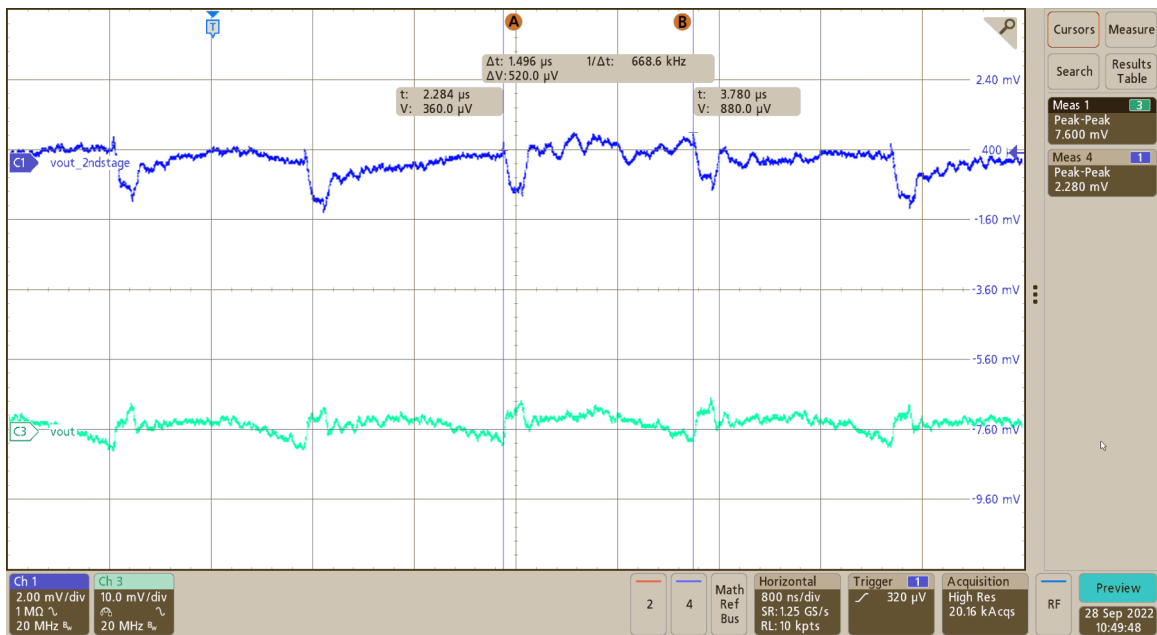


图 4. 具有和不具有额外第二级滤波器的 TPS548A28 输出电压纹波。

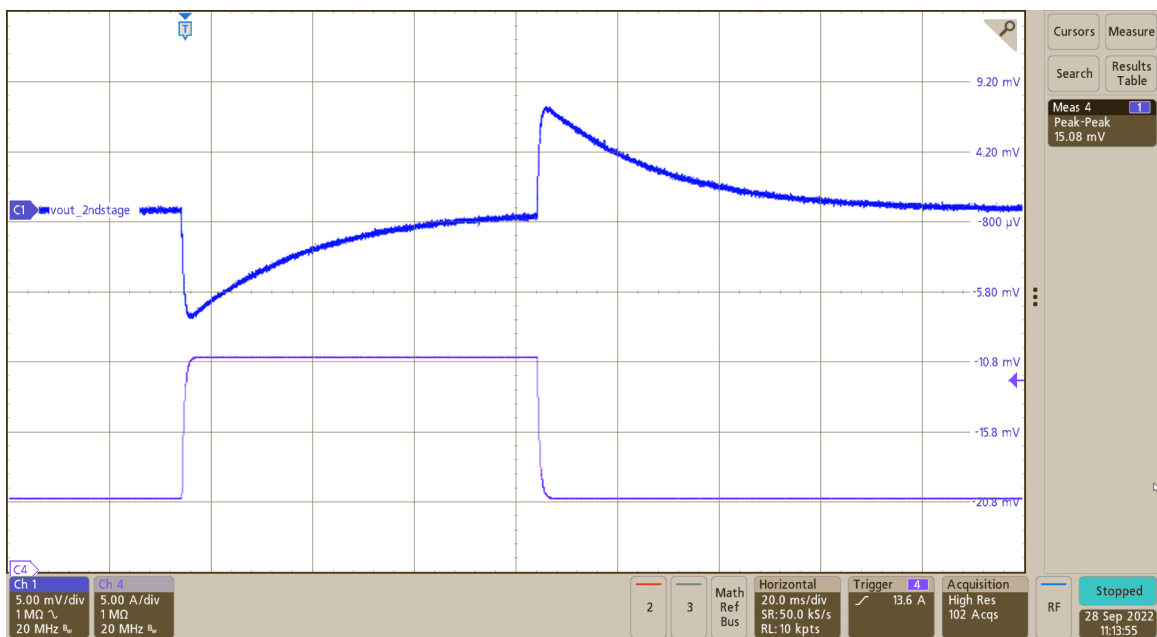


图 5. 使用 D-CAP3 控制的 TPS548A28 的瞬态响应。

## 高级电流模式 (ACM) 控制架构

内部补偿 ACM 是基于纹波的峰值电流模式控制方案，它使用内部生成的斜坡来表示电感器电流。这种控制模式可在非线性控制模式（如 D-CAP3）的更快瞬态响应速度与其他外部补偿固定频率控制架构（如电压模式控制）的广泛电容器稳定性之间实现平衡。ACM 是一种较新的控制架

构，它允许使用单个电阻器（而非电阻器和电容器网络）对环路进行补偿。TPS543B22 具有三个可选 PWM 斜坡选项，可在实施第二级滤波器时优化控制环路性能。有趣的是，我们注意到它的评估模块在电路板上具有电容器和电感器焊盘，可方便地容纳第二级滤波器元件。在没有额外滤波器的情况下，TPS543B22 输出电压峰峰值纹波为 7.4mV。应用额外滤波器后，输出电压纹波为 1.3mV（如

图 6 所示)。TPS543B22 设计无需调整斜坡即可确保稳定性。图 7 显示了与之前的转换器具有相同 10A 负载阶跃

的负载瞬态波形，并且实施第二级滤波器后的输出电压波形没有不稳定的迹象。

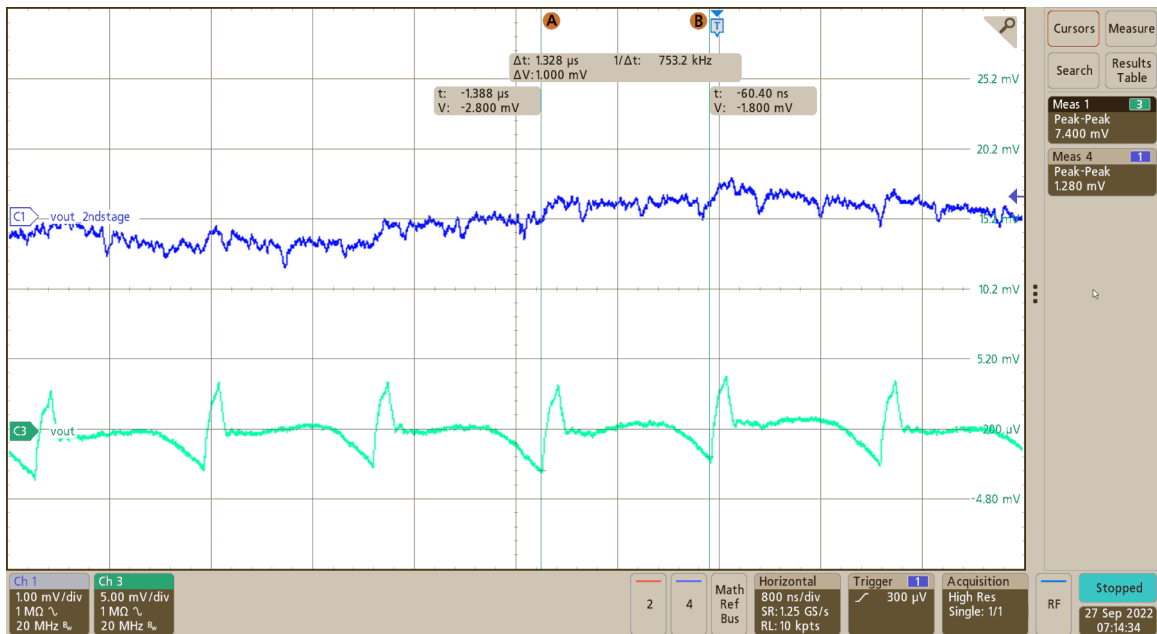


图 6. 具有和不具有额外第二级滤波器的 TPS543B22 输出电压纹波。

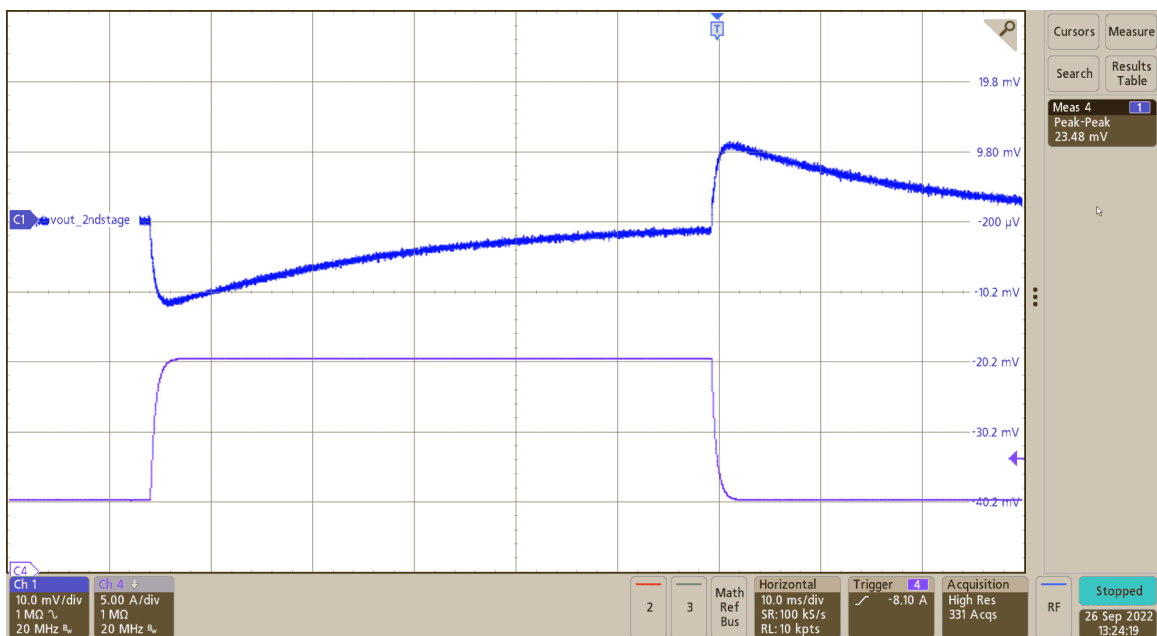


图 7. 使用 ACM 控制的 TPS543B22 的瞬态响应。

## 效率损失

在具有和不具有额外第二级滤波器的情况下测量了每个直流/直流转换器的满载效率以比较功率损耗。表 2 所示为相关结果。第二级滤波器的功率损耗和效率损失可忽略不

计。之所以测量效率和功率损耗差异，是因为每个直流/直流转换器都具有独特的功率 MOSFET，这会导致效率结论不准确。效率损失和额外所需的 92mm<sup>2</sup> 板载空间是否值得改善输出电压纹波，这由设计人员决定。

设计人员以前使用额外的低压降 (LDO) 稳压器对直流/直流转换器的输出电压进行后置稳压, 并实现低输出电压纹波。如果设计人员更喜欢使用 LDO 而不是第二级滤波器, 则可以并联 4A **TPS7A54** 来提供高达 8A 的电流。例如, 如果 LDO 的压降为 175mV, 则两个 LDO 在 8A 电流下的耗散功率为 1.4W, 而第二级滤波器的耗散功率为 0.02W。LDO 的输出电压纹波噪声较低, 为 4 $\mu$ V, 但如果第二级滤波器为 SoC 和 AFE 提供可接受的低输出电压纹波, 则优点是尺寸更小、功率损耗更低且元件成本更低。

P/N	输出电流 (A)	滤波器	效率	功率损耗 (W)
<b>TPS543B22</b>	<b>15</b>	主	86.43%	2.358
		初级 + 次级	86.33%	2.378
		差值	-0.1%	-0.02
<b>TPS548A28</b>	<b>15</b>	主	83.98%	2.829
		初级 + 次级	83.87%	2.850
		差值	-0.11%	-0.021
<b>TPS56121</b>	<b>15</b>	主	89.19%	1.834
		初级 + 次级	89.34%	1.806
		差值	-0.15%	-0.028

表 2. 效率和功率损耗比较。

## 结论

第二级滤波器是一种简单、小巧、高效且低成本解决方案, 可为高电流负载设计提供低输出电压纹波。没有适用于每种设计情况的完美控制模式, 但可以在许多降压转换器控制架构中实施第二级滤波器。如果您使用网络接口卡 SoC 或是使用 AFE 的远程无线电单元进行设计, 则第二级滤波器可提供比标准降压转换器低得多的纹波。表 3 总结了与每个器件相关的纹波以及效率和尺寸权衡。

器件	电流功能 (A)	控制架构	纹波电压 (mV)	滤波器尺寸	功率损耗影响 (W)
TPS543B22	20	ACM	1.3	92mm <sup>2</sup>	0.020
TPS548A28	15	D-CAP3	2.3	92mm <sup>2</sup>	0.021

器件	电流功能 (A)	控制架构	纹波电压 (mV)	滤波器尺寸	功率损耗影响 (W)
TPS56121	15	电压模式	1.9	92mm <sup>2</sup>	0.028

表 3. 纹波、尺寸和效率权衡。

## 参考文献

- 德州仪器 (TI): [电源设计小贴士: 设计两级 LC 滤波器](#)
- 德州仪器 (TI): [降低开关稳压器输出的噪声](#)
- 德州仪器 (TI): [控制模式快速参考指南 - 降压非隔离式直流/直流转换器](#)

## 相关网站

- TPS548A28** - 具有遥感功能和 3V LDO 的 2.7V 至 16V、15A 同步降压转换器
- TPS543B22** - 具有 4V 至 18V 输入和高级电流模式的 20A 同步 SWIFT™ 降压转换器
- TPS56121** - 4.5V 至 14V、15A 同步 SWIFT™ 降压转换器
- TPS7A54** - 4A、低 VIN (1.1V)、低噪声、高精度、超低压降稳压器

**重要声明:** 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。



## 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