



Jenna Moore

摘要

本文论述了为电池供电型应用实施降压转换器的不同架构，并介绍了每种架构的利弊权衡。要讨论的架构包括 (A) 降压转换器 + LDO，(B) 强制脉宽调制 (FPWM) 降压转换器，以及 (C) 降压转换器 + π 型滤波器。我们进行了多种测量，旨在展示每种架构在输出电压噪声、轻载和满载条件下的系统效率以及输入静态电流方面的性能。本文档可帮助设计人员确定哪种架构更适合其应用，并阐明自适应关断时间和 DCS-Control™ 降压转换器拓扑之间的差异。

内容

1 引言.....	2
2 主要产品.....	3
3 降压转换器架构.....	4
4 测试设置.....	6
5 测试结果.....	8
6 结果汇总.....	10
7 拓展阅读.....	10
8 修订历史记录.....	10

插图清单

图 3-1. 架构 A 方框图.....	4
图 3-2. TPS7A05 在 200mA 负载电流和 0.8V 输出电压下的 PSRR 曲线.....	4
图 3-3. 架构 B 方框图.....	5
图 3-4. 架构 C 方框图.....	5
图 3-5. π 型滤波器电路图.....	6
图 4-1. 测试设置图.....	6
图 4-2. 测试板图像.....	7

商标

DCS-Control™ are trademarks of TI.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

许多电池供电的产品（例如无线安防摄像头、可视门铃和智能锁）按照完全依靠电池电源供电来设计，即只能由电池供电，没有其他输入电源可供选择。这样一来，无论附近有没有电源插座，用户都可以在自行选择的任何位置安装设备，从而提供更完善的分散式家居安防覆盖。

系统设计面临的两大挑战分别是如何减少电源树自身的功率损耗，以及如何产生具有超低噪声的电源轨，从而满足外设输入电压噪声要求并提高性能。例如，为了使电池寿命达到两年，使用两节 AA 电池供电的无线安防摄像头的平均系统电流必须小于 127 μ A（包括开机和待机模式）。可使用 [方程式 1](#) 计算各种电池容量和所需寿命条件下的此电流，其中对电池总容量使用 30% 的安全裕度。

为了延长电池寿命，无线或电池供电的摄像头在满载和轻载条件下都需要非常低的静态电流 (I_Q) 和高效率。这些摄像头通常采用运动检测、人机界面、无线通信监控或这三者的任意组合，从而更大限度地减少高耗电状态的持续时间。器件的大部分寿命时间都处于低功耗状态，静态电流、子系统关断电流和高效率因而非常重要，其原因是这些待机电流会对整个电池寿命产生重大影响。

$$I_{avg} = \frac{0.7 \times \text{Battery Capacity}}{\text{Desired Lifetime}} \quad (1)$$

还要求电源轨具有高电压精度，尤其是为内核电源电压、高速 I/O 线路和模拟电源供电的电源轨。对于高清视频处理和流式传输，MPU 的时钟频率非常高，并且会采用严格的抖动预算。这些高速线路的电源噪声会引起抖动，从而增加误码率并降低高速信号的质量。此要求的一个示例是图像传感器模拟电压，这种情况下必须尽可能降低电源噪声以实现极高的对比度。

本文将探讨为电池供电型应用实施高效低纹波降压转换器的三种不同架构，并介绍了每种架构的利弊权衡。展示的可行解决方案包括：降压转换器 + LDO，强制脉宽调制 (FPWM) 降压转换器，以及降压转换器 + π 型滤波器。我们将根据输出电压纹波、满载和轻载条件下的系统效率以及 I_Q 来评估每种解决方案的性能。

2 主要产品

架构 A 通过降压转换器 [TLV62568](#) 和 LDO [TPS7A05](#) 实现。

[TLV62568](#) 是一款采用峰值电流控制拓扑、具有自适应关断时间和成本效益的高效降压转换器。该器件通常在中等负载至重负载电流下以 1.5MHz 频率 PWM 模式运行。根据 V_{IN}/V_{OUT} 的比率，只需一个简单的电路即可设置低侧 MOSFET 所需的关断时间。因此，无论输入电压、输出电压和负载电流如何变化，开关频率都会保持相对恒定。通过感应高侧开关的电流，可实现峰值电流控制，同时还会实现对开关电流的限制，从而防止器件从电池或输入电压轨汲取过多电流。一旦达到高侧开关电流限值，高侧开关将关断，而低侧开关将接通，因此可在自适应关断时间内降低电感器电流。

[TPS7A05](#) 是一款超小型低静态电流 LDO，可提供 200mA 的电流以及出色的瞬态性能。该器件的输出电压范围为 0.8V 至 3.3V，典型精度为 1%。该 LDO 提供了折返电流限制、关断和热保护功能。

架构 B 通过采用与架构 A 相同的 FPWM 版本降压转换器 [TLV62568A](#) 来实现。因此，控制拓扑和功能基本相同，不同之处在于 [TLV62568A](#) 在轻载时保持在 PWM 模式下，而 [TLV62568](#) 在轻载时进入脉冲频率调制 (PFM) 工作模式。

架构 C 通过采用降压转换器 [TPS62841](#) 来实现。该转换器具有 60nA 的超低标称 I_Q ，轻载效率高，并使用了 DCS-Control™。DCS - Control 是一种高性能控制方案，兼具磁滞和电压模式控制的优势。这种组合可实现出色的交流负载调节和瞬态响应、低输出纹波电压以及 PFM 和 PWM 模式之间的无缝过渡，同时最大限度地降低输出电压纹波。其中包含的交流环路可感应输出电压，并将该信息直接馈入快速比较器级。附加的电压反馈环路可实现精确的直流负载调节，而内部补偿的调节网络则使用小型外部元件和低 ESR 电容器实现快速稳定的运行。在 PFM 或节能模式下，开关频率随负载电流发生线性变化。

3 降压转换器架构

架构 A：降压转换器 + LDO



图 3-1. 架构 A 方框图

要讨论的第一种架构是一种常见的解决方案，其中在降压转换器之后采用 LDO 来降低输出电压纹波，进而达到所需的输出电压精度。

使用这种拓扑的好处在于，与单独的降压转换器相比，该解决方案可凭借 LDO 的电源抑制比 (PSRR) 实现低噪声敏感电源轨。当多个 LDO 依靠单个降压转换器进行级联来形成多个电源轨时，还带来一个额外的好处：只有一个而不是多个开关转换器为电源轨供电，因此抑制幅度和输出电压纹波的频率几乎相同。使用多个开关转换器时，输出电压频率和幅度之间没有相关性，而 LDO 的 PSRR 在特定开关频率下保持恒定，并且不会增加任何开关元件。

使用这种拓扑进行设计时，LDO 的噪声滤波能力值得注意。对于噪声敏感型电源轨，可选择高 PSRR 的 LDO。但是，此 PSRR 会随开关频率和输出电流而变化。图 3-2 举例说明了 TPS7A05 (架构 A 中使用的 LDO) 在这方面的特性。通常情况下，LDO 在较低的开关频率下 (例如，当转换器在 PFM 模式下运行时) 具有较好的噪声衰减，而在较高的开关频率下 (例如，当转换器在标称开关频率下运行时) 噪声衰减性能较差。这意味着，可通过增加输出电容值来改善高频下的 PSRR。

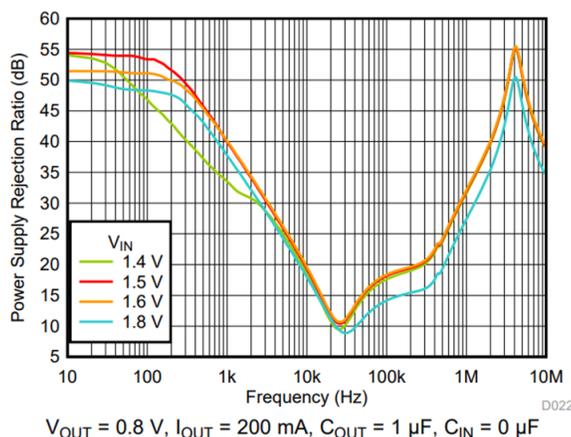


图 3-2. TPS7A05 在 200mA 负载电流和 0.8V 输出电压下的 PSRR 曲线

需要注意的另一点是 LDO 的效率，可按照方程式 2 进行计算。较高的压降会降低系统效率，从而导致电源树在所有负载水平下都从电池汲取更多电流，最终将缩短电池寿命。如方程式 3 和方程式 4 所示，较高的压降还会导致 LDO IC 内部温度升高，因此在需要满足室外工作温度要求的设计中尤其要注意这一点。

$$LDO\ Efficiency = \frac{I_O V_O}{(I_O + I_Q) V_I} \approx \frac{V_O}{V_I} \quad (2)$$

$$IC\ Temperature = T_A + R_{\theta JA} P_D \quad (3)$$

$$LDO\ IC\ Temperature = T_A + R_{\theta JA} I_O (V_I - V_O) \quad (4)$$

另一款可考虑用于该架构的 LDO 是 TPS7A02，即使处于压降状态，该器件也具有 25nA 的超低标称 I_Q 。TPS7A02 还经过了优化，具有出色的瞬态性能，并包含一个具有内部控制下拉电阻器的智能使能电路，有助于最大限度减少用于下拉使能引脚的外部元件数量。

架构 B：FPWM 降压转换器

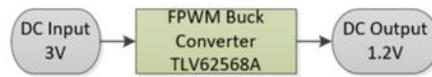


图 3-3. 架构 B 方框图

第二种架构是适用于噪声相关应用的简单解决方案。一个高效的开关转换器在轻载条件下被强制保持在 PWM 模式下，而不是进入节能的 PFM 模式。在 PFM 模式下，仅当输出电压降至标称输出电压以下时，转换器才会在短时脉冲下工作。这种模式仅在超过最小输出电压阈值时才进行导通和开关操作，因此降低了开关损耗，节省了功率。

对于以 PFM 和 PWM 两种模式工作的降压转换器，在动态负载条件下，随着降压转换器将工作模式从 PFM 更改为 PWM 或反向更改，可看到纹波电压和频率发生变化。在 FPWM 器件中看不到此行为，因为无论施加的负载如何，都会使该器件强制保持在 PWM 模式下。所以，FPWM 降压转换器的优势在于开关频率不会改变，从而为固定输出电容器提供了相当恒定的纹波，并改善了负载变化时的瞬态响应。此外，由于没有 LDO，满载时的系统效率比先前的级联架构要高得多。

这种架构的缺点是 I_Q 较高且轻载效率较低。这两个缺点都是 FPWM 模式直接造成的。无论负载条件如何，器件始终处于 PWM 模式下，因此即使空载，器件仍会高频开关并汲取更大的电流，这将导致高 I_Q 。出于同样的原因，降压转换器在轻载时汲取的电流远高于输出电流，因此轻载效率极低。

架构 C：降压转换器 + π 型滤波器



图 3-4. 架构 C 方框图

要讨论的第三种也是最后一种架构是一款高性能解决方案，其中对噪声敏感的电源轨由高效的开关转换器供电来生成所需的电压。如图 3-4 所示，其后是一个铁氧体磁珠 π 型滤波器，用于衰减开关噪声。在此配置中，降压转换器可在节能的 PFM 模式下工作，如前所述，这样便可在轻载条件下实现更高的效率。

实施此架构可在满载条件下产生超低且更为一致的输出电压纹波，因此该架构非常适合具有严格电源噪声要求的外设。这些外设在上电和处理数据时具有更严格的电源调节要求，而轻载通常对应于待机或关断模式下的外设，所以满载噪声水平比轻载噪声水平更值得关注。

除了低噪声外，该架构在所有负载水平下均可提供高效率。与架构 B 相似，该拓扑只有一个降压转换器而没有 LDO，因此系统效率比使用一个或多个 LDO 的电源架构高很多。与架构 B 不同，带有 π 型滤波器的降压转换器可从外部满足噪声要求，因此允许转换器在 PFM 模式下运行，并提高轻载条件下的效率。

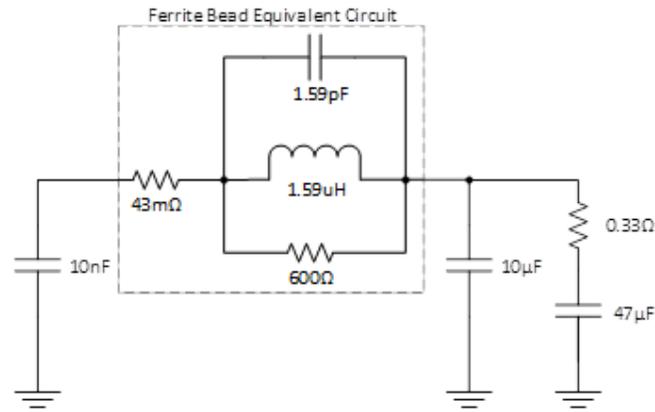
在使用此架构进行设计的过程中需要考虑一些因素。为了设计 π 型滤波器，有必要针对外设的工作负载条件计算降压转换器输出电压纹波的频率和幅度，并且在选择铁氧体磁珠及其周围的无源器件时需要进行进一步的计算。

π 型滤波器的实现并不像 LDO 那样简单，此过程需要在降压转换器的标称开关频率下选择足够大的 PSRR。此外， π 型滤波器实现抑制的带宽更为有限，并且稳定时间会有细微变化（稳定时间是滤波器值的函数）。

此设计采用铁氧体磁珠，并为 π 型滤波器选择以下值：

- $C_{IN} = 0.1\mu\text{F}$
- $C_{OUT} = 10\mu\text{F}$
- $R_{DAMP} = 0.33\Omega$
- $C_{DAMP} = 47\mu\text{F}$

π 型滤波器的设计使用 TIDA-01579 中的公式和条件完成。图 3-5 展示了铁氧体磁珠的滤波器电路和等效电路。

图 3-5. π 型滤波器电路图

4 测试设置

为了比较这三种架构，对每种架构进行了如下测试：

- 轻载 (10 μ A) 和满载 (200mA) 时的系统效率
- 轻载 (10 μ A) 和满载 (200mA) 以及空载 (启用 IC) 时的系统输入电流
- 轻载 (10 μ A) 和满载 (200mA) 时的纹波电压和纹波频率
- 1kHz 下在 50 μ A 和 200mA 之间动态切换负载时的纹波电压瞬态响应
- 热成像测试

图 4-1 所示的测试设置包含：

- 测试板
- Agilent 直流电源 E3633A
- Keithley 数字源表 2450
- Tektronix 混合域示波器 MDO3024，带宽为 200MHz，采样率为 2GSa/s
- Keysight 6-1/2 DMM 34461A
- Kikusui 电子负载 PLZ164WA

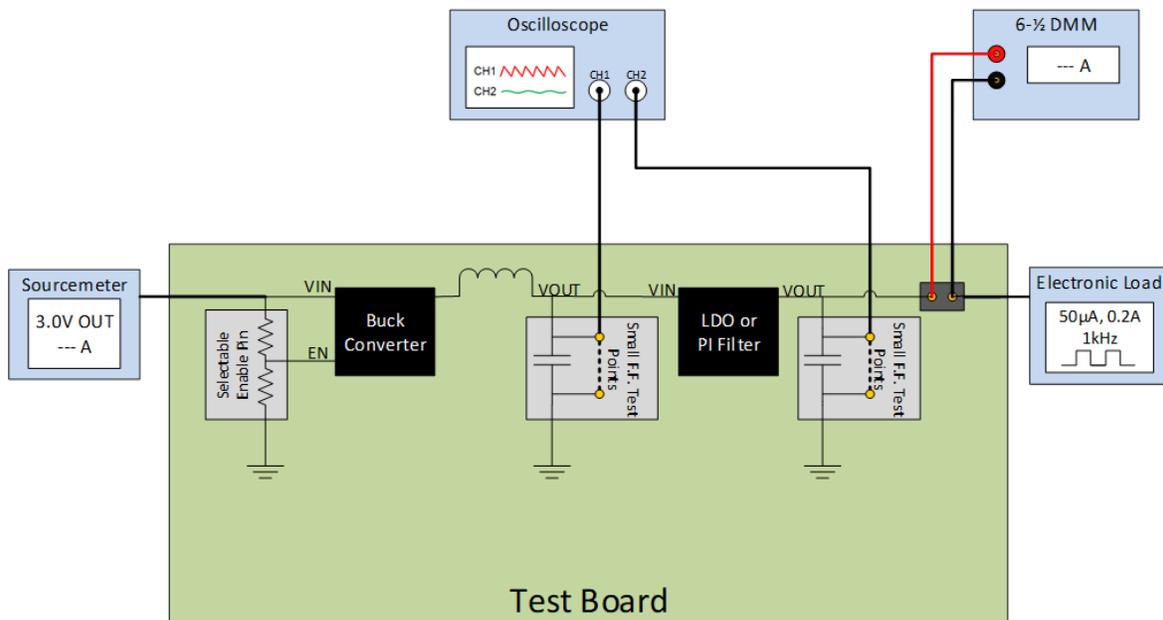


图 4-1. 测试设置图

为了测试和演示这些架构，我们设计并制造了一块包含所有三种架构的测试板。该测试板如图 4-2 所示，其中包括每种板上架构的尺寸，便于比较外形尺寸。请注意，为便于直接比较，所示测试板上的所有元件均位于其顶面，可通过将元件放在板的两面来减小布板面积。

部分纹波测量值是在所用示波器的本底噪声（据观察，该噪声为 -86dB ，或 $142\mu\text{Vpp}$ ）或在低于本底噪声时测出。这些结果在结果表中表示为“本底噪声”。

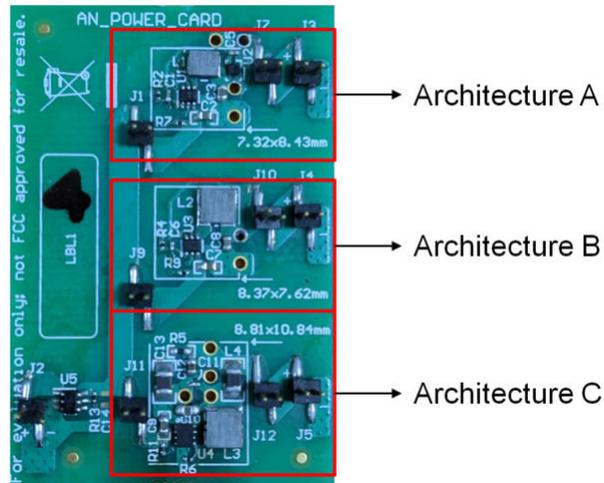
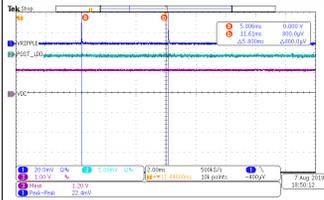
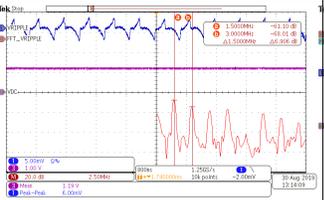
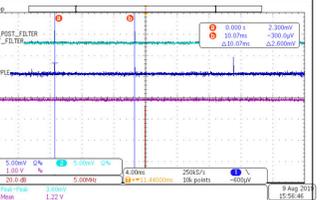
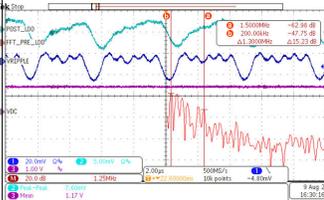
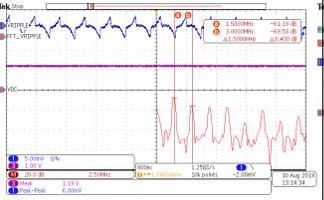
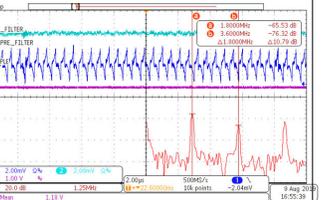
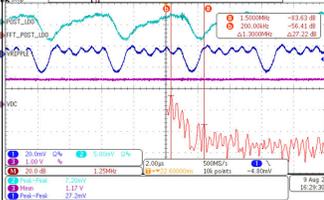
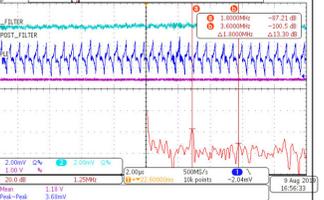
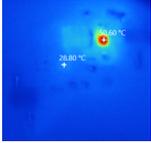
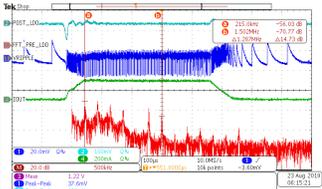
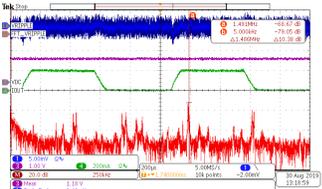
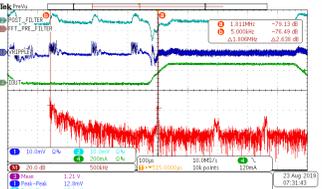
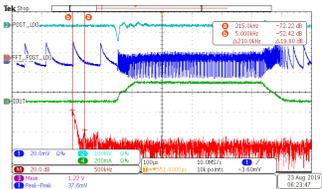
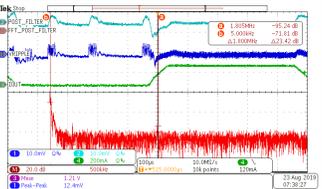


图 4-2. 测试板图像

5 测试结果

参数	架构 A	架构 B	架构 C
I_Q (负载 = 0A, 启用器件)	34 μ A	2.7mA	75nA
轻载 ($I_{LOAD} = 10\mu A$)			
系统效率	10%	0.1%	93%
1 级纹波	22.4mV 精度为 1.87%	6.0mV 精度为 0.50%	5.20mV 精度为 0.43%
	 <p>架构 A 处于 10μA 负载下。LDO 之前和之后的纹波分别以深蓝色和浅蓝色显示。在 20Hz PFM 频率下, LDO 抑制 > 50dB</p>	 <p>架构 B 处于 10μA 负载下。纹波 (深蓝色) 和纹波的 FFT 图 (红色) 显示了 1.5MHz 频率下的预期 PWM 纹波</p>	 <p>架构 C 处于 10μA 负载下。π 型滤波器之前和之后的纹波分别以深蓝色和浅蓝色显示。在 100Hz PFM 频率下, π 型滤波器仅抑制 3dB</p>
2 级纹波	本底噪声 精度小于 0.01%	不适用	3.60mV 精度为 0.30%
满载 ($I_{LOAD} = 200mA$)			
系统效率	61%	91%	88%
1 级纹波	28.0mV 精度为 2.33%	6.0mV 精度为 0.50%	3.68mV 精度为 0.31%
	 <p>LDO 之前的纹波 FFT 图, 带宽为 6.5MHz; 光标位于低频 200kHz 峰值处和标称开关频率 1.5MHz 峰值处</p>	 <p>FPWM 纹波 FFT 图, 带宽为 6.25MHz; 光标位于标称开关频率 1.5MHz 峰值处和一次谐波 3MHz 峰值处</p>	 <p>π 型滤波器之前的纹波 FFT 图, 带宽为 6.25MHz; 光标位于标称开关频率 1.8MHz 峰值处和一次谐波 3.6MHz 峰值处</p>
2 级纹波	7.6mV 精度为 0.63%	不适用	本底噪声 精度小于 0.01%
	 <p>LDO 之后的纹波 FFT 图, 带宽为 6.5MHz; 光标位于相同点处, 显示了 TPS7A05 在 1.5MHz 时预期的 22dB 抑制</p>		 <p>π 型滤波器之后的纹波 FFT 图, 带宽为 6.25MHz; 光标位于相同点处, 显示了在 π 型滤波器达到示波器本底噪声 (85 - 90dB) 后的纹波</p>

参数	架构 A	架构 B	架构 C
在 200mA 负载电流下导通 20 分钟后拍摄的热感图像	 <p>红外图像显示 20 分钟后 TLV62568 升温至 28.8°C 而 TPS7A05 升温至 50.6°C</p>	 <p>红外图像显示 20 分钟后 TLV62568A 升温至 22.5°C</p>	 <p>红外图像显示 20 分钟后 TPS62841 升温至 23.3°C</p>
瞬态 - 开关负载 (方波, 50uA-200mA, 1kHz)			
1 级纹波	 <p>随着负载发生变化, 动态改变工作模式 (PFM-PWM-PFM)。LDO 之前的 FFT 图, 带宽为 4MHz, 显示了在 PFM 频率变为 PWM 时的几个频率尖峰</p>	 <p>随着负载发生变化, 输出纹波继续为 PWM, 并在负载阶跃处具有最低的过冲和下冲。FFT 图, 带宽为 2.5MHz, 显示了 1.5MHz 的纹波, 符合预期</p>	 <p>随着负载发生变化, 动态改变工作模式 (PFM-PWM)。π 型滤波器之前的 FFT 图, 带宽为 4.25MHz, 显示了主要处于极低频率 (PFM) 和开关频率 (1.8MHz) 下的纹波</p>
2 级纹波	 <p>LDO 之后的 FFT 图, 带宽为 4MHz, 显示了更高的过冲和下冲值 (低频) 以及 LDO 产生的强噪声衰减</p>	不适用	 <p>π 型滤波器之后的 FFT 图, 带宽为 4.25MHz, 显示了存在下冲和过冲 (尽管小于架构 A 中的值) 以及 π 型滤波器产生的极强噪声衰减</p>
过冲 (在架构输出端)	24mV	3mV	6mV
过冲稳定时间	125μs	60μs	166μs
下冲 (在架构输出端)	76mV	3mV	8mV
下冲稳定时间	129μs	29μs	96μs

6 结果汇总

下文总结了每种架构的结果和说明。表中列出了旨在实现低 I_Q 、在所有负载水平下都具有高效率以及高输出电压精度的电池供电型器件的相关优缺点。

架构	优点	缺点
A : 降压转换器 + LDO	<ul style="list-style-type: none"> 在部分频率（通常为较低频率）下降低噪声（高速外设关闭） 采用单个开关转换器的级联 LDO 具有相似的纹波抑制能力 	<ul style="list-style-type: none"> 轻载和满载效率低 较高频率带宽下的纹波抑制能力有限，需要使用更大的输出电容器 热性能
B : FPWM 降压转换器	<ul style="list-style-type: none"> 在不同的负载下具有固定的输出纹波电压 在负载变化较大时具有更好的瞬态响应 满载效率高 简单的解决方案 	<ul style="list-style-type: none"> 轻载效率极低 I_Q (FPWM 器件的 I_Q 通常处于 mA 级别)
C : 降压转换器 + π 型滤波器	<ul style="list-style-type: none"> 轻载和满载效率极高 在较高的开关频率下具有很强的噪声衰减（高速外设开启） 	<ul style="list-style-type: none"> π 型滤波器对负载条件/范围的依赖性 针对 PFM 电压纹波的低频抑制能力有限

7 拓展阅读

如需进一步了解对无源器件的选择、 π 型滤波器设计以及无线摄像头电源树的布局注意事项，请参阅 [TIDA-01579](#)。

下文提供了可供浏览的相关终端设备页面，包括参考图、参考设计以及系统级别适用的更多资源：

- [无线安防摄像头](#)
- [可视门铃](#)
- [电子销售终端](#)
- [运动检测器](#)

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 * (August 2019) to Revision A (May 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