

# 电源模块 TPSM86325x 系列在仪器仪表供电方面的应用和纹波控制



Gary Zeng

## 摘要

集成了电感元件的电源模块芯片在仪器仪表中的有着广泛的应用和优势，主要体现在以下几个方面：

(1) 提供稳定电源，仪器仪表中的电子元件对电源稳定性要求高，电源模块芯片可将输入电压转换为稳定的输出电压，如 TPSM86325x 系列降压芯片，其输入电压范围 3V 到 17V，输出电压 0.6V 到 10V 可调，能提供高效的输出自适应准时控制模式，实现快速瞬态响应和良好回路稳定性。(2) 提高电源转换效率，仪器仪表通常需要长时间连续工作，电源模块芯片可提高电源转换效率以减少能耗和散热。如 TPSM86325x 系列降压芯片转换效率最高可达 95%，在轻型负载下进入 Eco 模式，提高转换效率，降低仪器仪表功耗。(3) 集成保护功能，电源模块芯片提供多种保护功能，增强仪器仪表可靠性和稳定性。如 TPSM86325x 系列降压芯片可显示故障，并提供过流、欠压和过压保护，过温关机保护。当仪器仪表遭遇电源浪涌、电压波动等情况时，这些保护功能可及时响应，避免仪器仪表出现故障或损坏，延长使用寿命。(3) 减小电路板尺寸，随着仪器仪表向小型化、便携化发展，对内部元件尺寸要求严格。高集成度的电源模块芯片可将多个功能模块集成于一体，大大简化了 PCB 板设计，减小电路板尺寸。

## 1. 电源模块的应用和输出纹波问题

### 1.1 电源模块给模拟信号链和 FPGA 供电时的纹波问题

目前，大量的仪器仪表使用了 FPGA 作为信号处理和运算的核心器件，FPGA 内部包含众多功能各异的模块，像逻辑单元、存储单元（如 Block RAM 等）、高速收发器等，不同模块工作时所需的电压不同，例如逻辑单元可能需要 1.0V 供电，而高速收发器也许需要 1.2V 或更高一点的电压，普通的 IO 也需要 1.8V 或 3.3V 的供电，每一路的电源轨的功耗也高达几百毫安到几个安培。使用电源模块为 FPGA 的不同电源轨供电，特别是为内核供电时，需要额外关注纹波问题。

Xilinx 的 ZYNQ 芯片有很多路电源轨的供电需求，例如，VCCO\_PSIO 主要是给 PS 端的 MIO（多路复用 I/O）供电的。MIO 是 ZYNQ 系列芯片中 PS 端的一种特殊的 I/O 接口，它可以被灵活地配置为不同的功能，如 GPIO、UART、SPI、I2C 等各种常见的外设接口，VCCO\_PSIO 为这些接口的正常工作提供所需的电源支持。从手册中可以看到它支持用户自定义供电范围从 1.8 V 到 3.3 V，纹波要求为  $\pm 5\%$ ，电流需求为 100mA。当使用 3.3V 供电时， $\pm 5\%$  的纹波则为  $\pm 165\text{mV}$ 。

### 1.2 TI 电源模块的电压纹波来源

TPSM863252 降压芯片集成了半桥开关管和电感元件，无需复杂的外围组件就可搭建降压供电电路。其输入电压范围 3V 到 17V，输出电压 0.6V 到 10V 可调，输出电流最大可达 3A。轻负载下 TPSM863252 会进入 Eco-mode，可在轻载时保持高效率，但是也会随之引入纹波的问题。

随着输出电流从重载状态减小，电感电流也随之减小，最终达到其波纹谷值触及零电平的点，这是连续导通和不连续导通模式之间的边界。当检测到零电感电流时，整流 MOSFET 关断。随着负载电流进一步减小，转换器进入不连续导通模式。不连续导通模式的导通时间与连续导通模式几乎相同，因此需要更长的时间才能以较小的负载电流将输出电容放电至参考电压水平。此事件使开关频率降低，与负载电流成比例，并保持轻载效率高。

输出电压纹波除了跟降压芯片开关控制模式有关以外，还跟输出电容的容值，等效串联电阻 ESR 和等效串联电感 ESL 相关。

输出电压纹波除了跟降压芯片开关控制模式有关以外，还跟输出电容的容值，等效串联电阻 ESR 和等效串联电感 ESL 相关。通常，由 ESL 导致的纹波电压很小，可以忽略不记。

### 1.3 连续导通模式下的输出电压纹波的计算

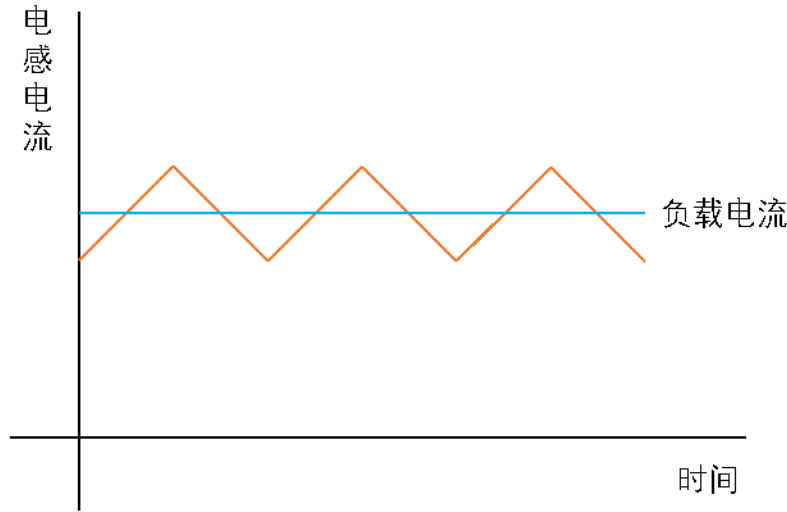


图 1. 降压电路连续导通模式下的电感电流波形

降压电路在连续导通模式下，电感纹波电流的计算公式通常为：

$$\Delta I_L = \frac{1}{L \cdot f} * (V_{in} - V_{out}) * D \quad (1)$$

其中，L 是电感值，f 为开关频率，D 是占空比。

连续导通模式下的输出电压纹波  $\Delta V$  大致由阻性纹波电压  $\Delta V_r$  和容性纹波电压  $\Delta V_c$  组成：

$$\Delta V = \Delta V_r + \Delta V_c \quad (2)$$

连续导通模式下输出电容上的电流等于电感的纹波电流  $\Delta I_L$ ，阻性输出纹波为电容纹波电流与电容等效串联电阻 ESR 的乘积，即：

$$\Delta V_r = \Delta I_L * ESR \quad (3)$$

容性输出电压纹波则为输出电容上的电压最大值与最小值的差值：

$$\Delta V_c = V_{c\_max} - V_{c\_min} = \frac{\Delta I_L}{8 * C_{out}} * T_{off} + \frac{\Delta I_L}{8 * C_{out}} * T_{on} = \frac{\Delta I_L}{8 * C_{out}} * T_{sw} = \frac{\Delta I_L}{8 * C_{out} * f_{sw}} \quad (4)$$

综上：连续导通模式下的输出电压纹波：

$$\Delta V = \Delta V_{esr} + \Delta V_c = \Delta I_L * ESR + \frac{\Delta I_L}{8 * C_{out} * f_{sw}} = \frac{1}{L * f} * (V_{in} - V_{out}) * D * ( ESR + \frac{1}{8 * C_{out} * f_{sw}} ) \quad (5)$$

## 1.4 断续导通模式下的电压纹波

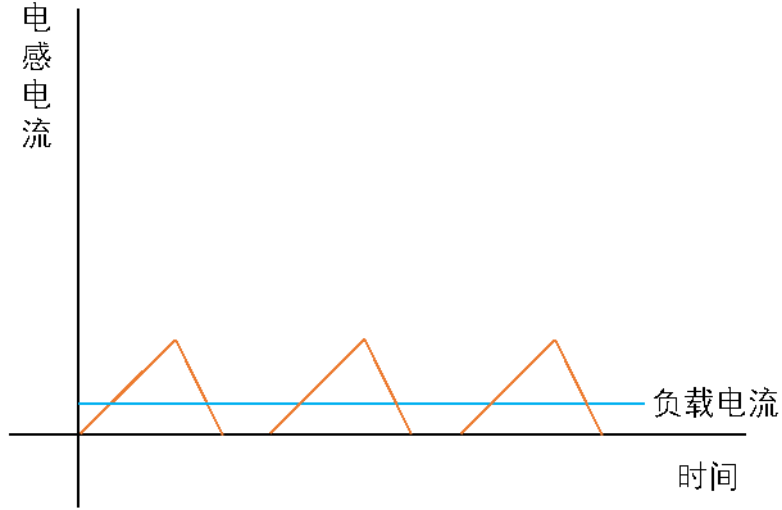


图 2. 降压电路断续导通模式的电流波形

当降压电路工作在断续导通模式时，电感的电流会降低到 0。在  $T_{on}$  时间内，电感电流从 0 增加到  $I_{L\_max}$ ，则电感电压和电流的关系为：

$$V_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta T} = L \cdot \frac{I_{L\_max}}{T_{on}} \quad (6)$$

$$T_{on} = L \cdot \frac{I_{L\_max}}{V_{in} - V_{out}} \quad (7)$$

输出端的电流变化量为：

$$\Delta I = I_{L\_max} - I_{load} \quad (8)$$

所以阻性输出电压纹波为：

$$\Delta V_r = \Delta I \cdot ESR = (I_{L\_max} - I_{load}) \cdot ESR \quad (9)$$

根据电荷公式  $\Delta Q = \Delta I \cdot T = C \cdot \Delta V$  可知：

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I \cdot T_{on}}{C} = \frac{(I_{L\_max} - I_{load}) \cdot L \cdot I_{L\_max}}{C \cdot (V_{in} - V_{out})} \quad (10)$$

所以断续导通模式下输出电压纹波为：

$$\Delta V = \Delta V_r + \Delta V_c = (I_{L\_max} - I_{load}) \cdot \left( ESR + \frac{L \cdot I_{L\_max}}{C \cdot (V_{in} - V_{out})} \right) \quad (11)$$

## 1.5 强制连续导通模式下的电压纹波

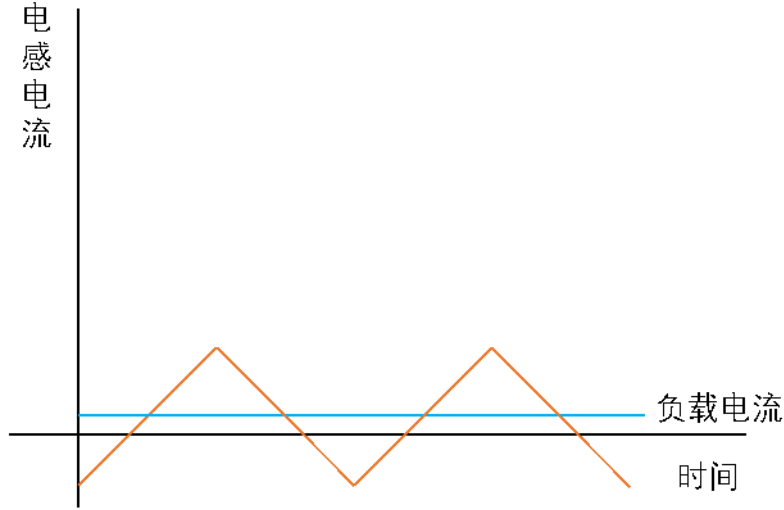


图 3. 降压电路强制连续导通模式的电流波形

当降压电路工作在强制连续导通模式时，电感的电流会降低到 0 以下，即反向流动。此时的电压纹波的来源主要有电感纹波电流和输出电压纹波两者决定的。

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} * D * T}{L} \quad (12)$$

降压电路 FCCM 模式下输出电压纹波计算公式为：

$$V_{ripple} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{\Delta I_L * T}{8 * C} = \frac{V_{in} * D * (T)^2}{8 * C * L} \quad (13)$$

## 2. 电源模块的 PSPICE 仿真

### 2.1 电源模块 TPSM863252 仿真

使用 TI 官网提供的 TPSM863252 的 PSPICE 模型，以 6.5V 输入，5V 输出，负载电流设置为 0.01A。

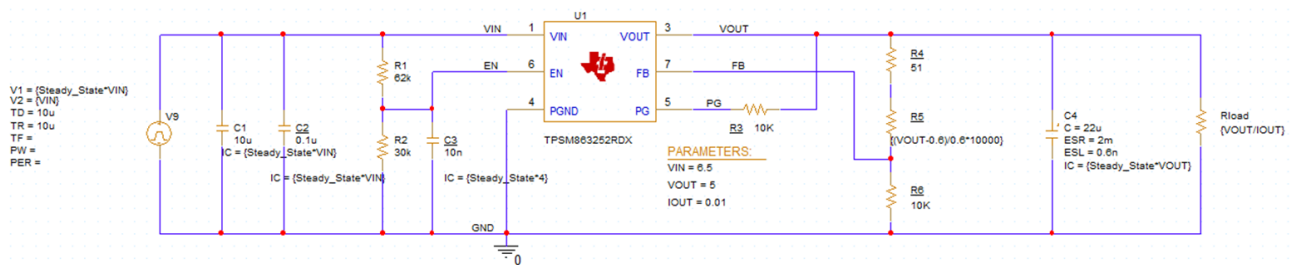


图 4. TPSM863252 PSPICE 仿真原理图

## 2.2 轻载输出

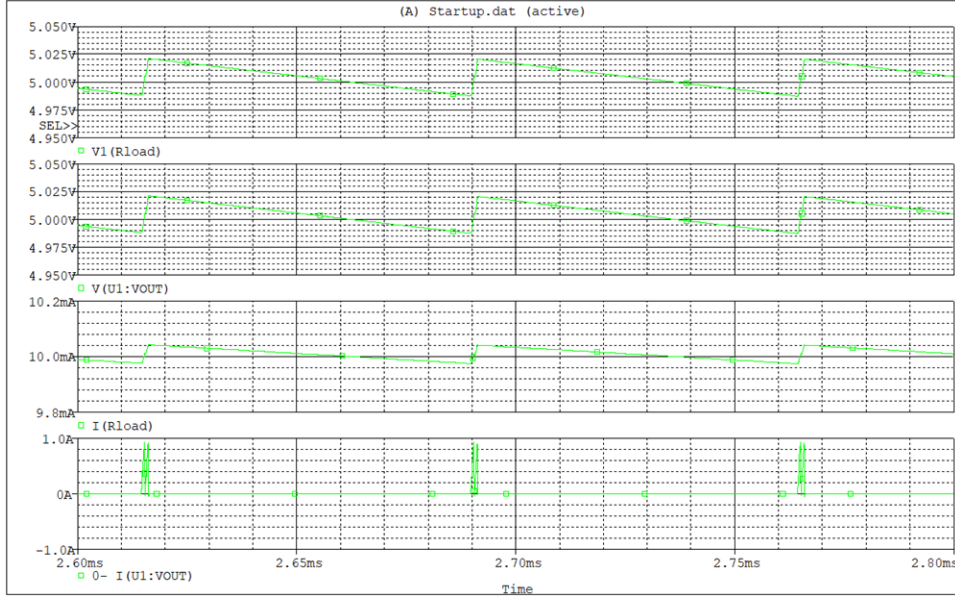


图 5. 轻载时 TPSM863252 的输出电压电流波形仿真结果

可以看到在轻载时，TPSM863252 进入了 Eco mode 模式，电感电流断续导通，开关频率降低，输出电压纹波的峰峰值达到了 30mV。

## 2.3 重载输出

而保持其他条件不变，将负载电流设置为 3A 时，波形如下：

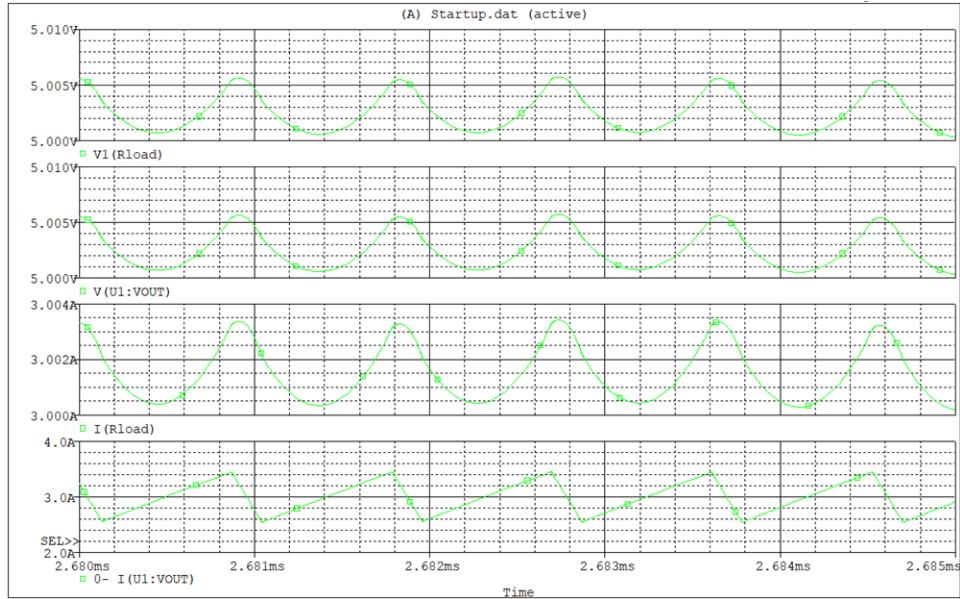


图 6. 重载时 TPSM863252 的输出电压电流波形仿真结果

可以看到增大输出负载电流到 3A，电源模块进入连续导通模式，开关频率约为 1.2MHz，输出电压纹波约为 5mV，相比轻载时 DCM 模式下的 30mV 大大减少。

## 2.4 增大输入输出电压差，输入电压提高到 15V，维持输出电压不变和轻载模式

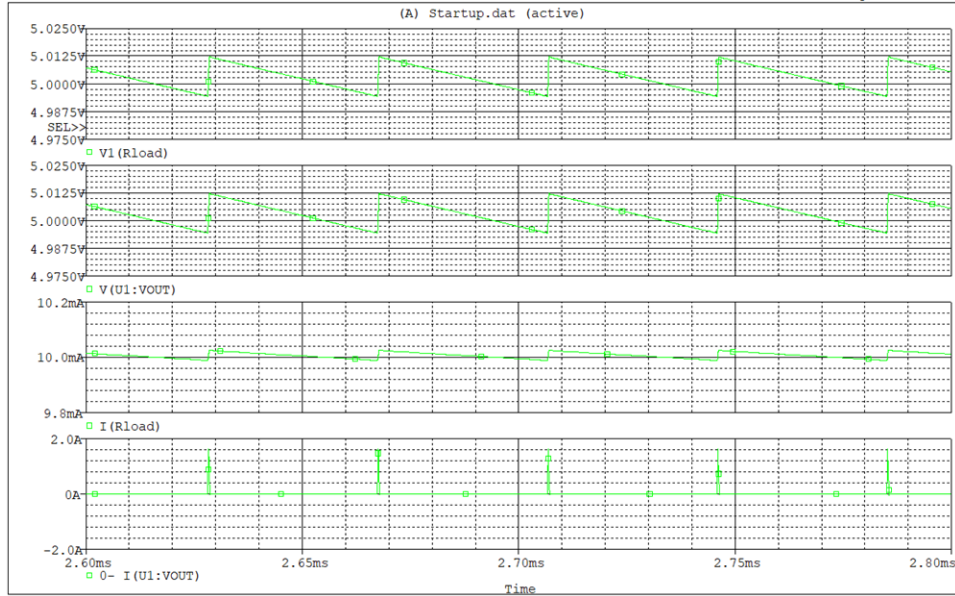


图 7. 大压差下的轻载模式的波形仿真结果

可以看到输入电压增大后，纹波电压增大到 14mV。断续导通模式下，纹波大小与输入电压成正比。

## 2.5 电源模块 TPSM863257 仿真

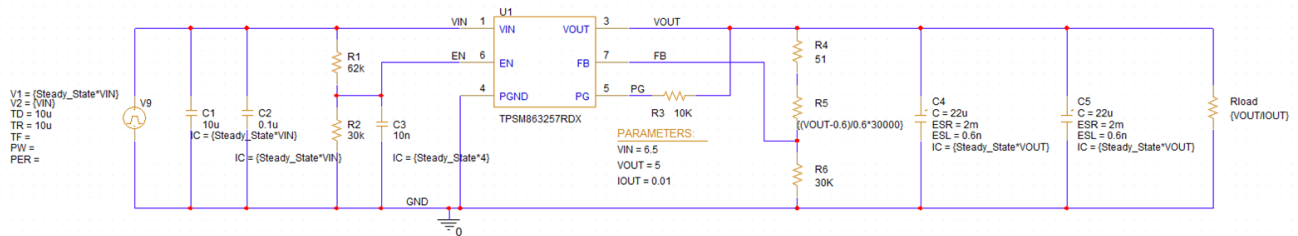


图 8. 电源模块 TPSM863257 仿真原理图

使用 TI 官网提供的 TPSM863257 的 PSPICE 模型，以 6.5V 输入，5V 输出，负载电流设置为 0.01A。

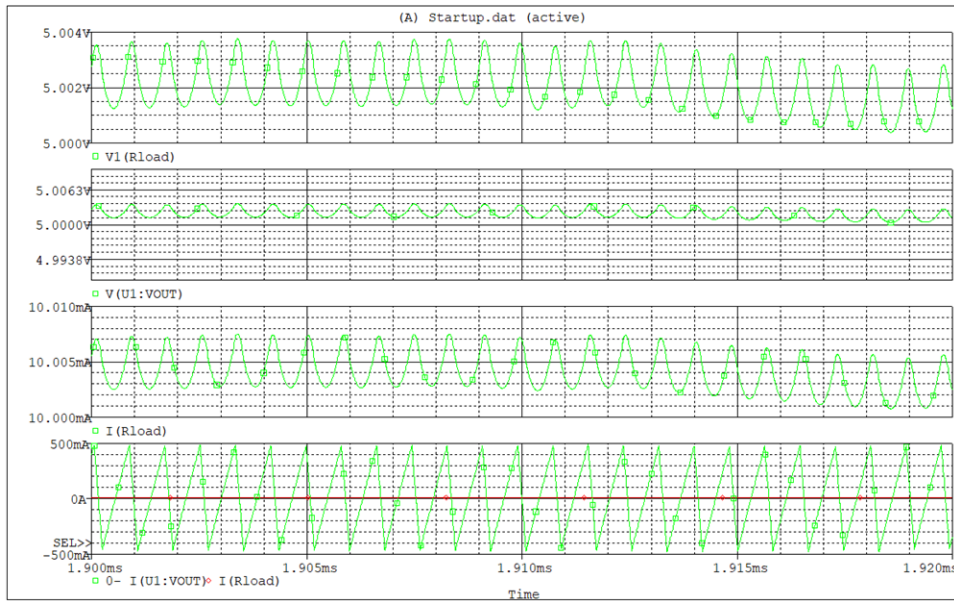


图 9. 轻载时 TPSM863257 输出电压电流波形仿真结果

可以看到轻载时，TPSM863257 的输出电压纹波的仿真结果约为 2.5mV。

### 3. 减小降压电路输出纹波的措施

#### 3.1 调整输出电容参数

由 CCM, DCM 和 FCCM 模式下的电压纹波的公式可以看到，选用大容值和小 ESR 的输出电容，可以减小轻载和重载时的纹波。

Output Voltage (V)	R5 (kΩ)	R6 (kΩ)	Minimum C <sub>OUT</sub> (μF)	Typical C <sub>OUT</sub> (μF)	Maximum C <sub>OUT</sub> (μF)	CFF (pF)
0.8	3.3	10.0	22	44	100	—
1.05	7.5	10.0	10	22	88	—
2.5	95.0	30.0	10	22	88	22
3.3	135.0	30.0	22	44	100	22
5	220.0	30.0	22	44	100	22
10	470.0	30.0	22	44	100	10

图 10. TPSM863252 手册中建议的分压电阻和电容值

如上表所示，可以选用 2 个 22μF 的电容并联在满足大输出范围的输出电压的同时还能降低 ESR/ESL。

理论上，电感纹波电流为 r 倍的输出电流的最大值：

$$\Delta I_L = r * I_{out\_max} \quad (14)$$

其中，r 为电流纹波系数，一般取值为 0.2 到 0.4。则  $\Delta I_L$  最大为 1.2A。按照 0.5% 的纹波要求，则 3.3V 输出电压时的输出电容的 ESR 被期望小于 13.75mΩ；0.6V 电压输出时，输出电容的 ESR 被期望小于 2.5mΩ。

#### 3.2 选用使用强制连续导通模式 FCCM 的 TPSM863257

如果不考虑轻载时的效率，可以选用 TPSM863257 芯片，由于该芯片使用了 FCCM 模式，整个开关周期内，电感电流连续，电感电流过零后反向，输出电压纹波较小。

#### 4. TPSM863257 EVM 测试波形

使用 TPSM863257EVM 进行测试，将 R6 电阻更换为 30k 欧姆，R5 电阻更换为 220k 欧姆，即将输出设置为 5V 输出。

直流电源设置为 6.5V 输出，demo 板连接电子负载，设置 CC 值为 3A，模拟重载环境。

示波器设置为 1x 探头增益，短地线和 20MHz 低通滤波后，用示波器进行纹波测量。

未在输出端并联 22uF 陶瓷电容时，测得电压纹波峰峰值约为 144mV。

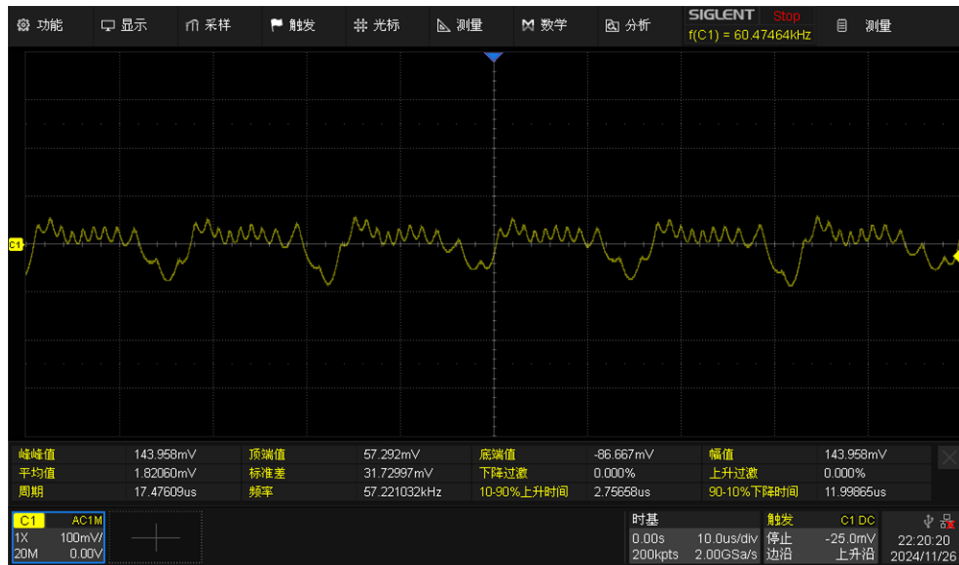


图 11. 电源模块 TPSM863257EVM 重载时的电压纹波

将电子负载的负载电流设置为 0.01A，模拟轻载的情况，如下图，测得电压纹波为 13.26mV。

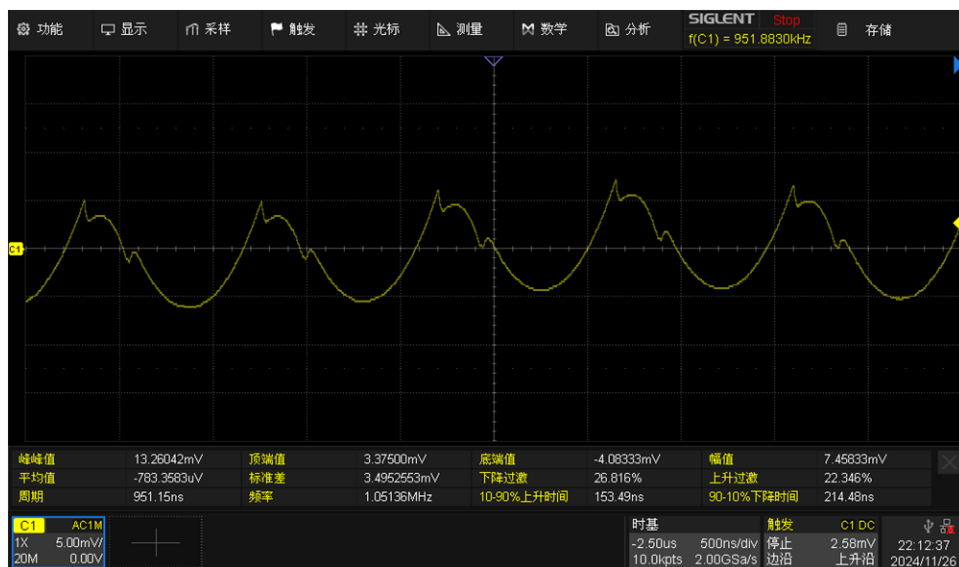


图 12. 电源模块 TPSM863257EVM 轻载时的电压纹波 (输出电容 22uF)

为了优化输出电压纹波，我们将输出电容上并联一颗 22uF 的陶瓷电容。如下图测量结果所示：电压纹波减小了一半至 6.63mV。



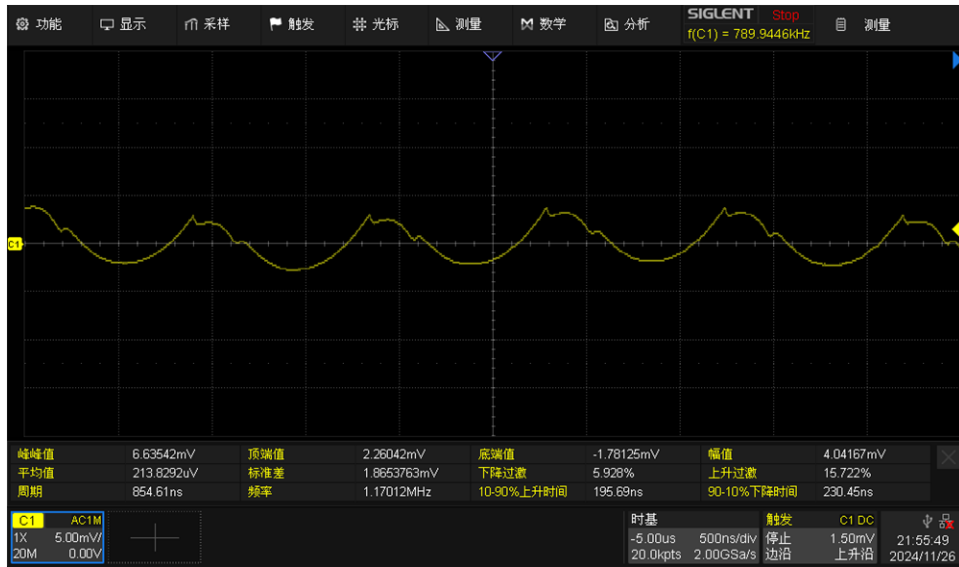


图 13. 电源模块 TPSM863257EVM 轻载时的电压纹波 ( 输出电容 44uF )

可以看到轻载时电源模块 TPSM863257 的电压纹波与仿真结果非常接近。

## 5. 总结

本文介绍了 TI 新推出的 17V 输入，3A 输出的集成了开关半桥和电感元件的电源模块 TPSM863252/TPSM863257，小体积，高功率密度，适用于提供电源给到仪器仪表类产品内部的 SOC/FPGA/运放/ADC 和 DAC，用公式推导了连续导通模式 CCM，断续导通模式 DCM 和强制连续导通模式的电压纹波的来源。可以得出，轻载下，强制连续导通模式的效率更低，输出电压纹波小，断续导通模式下的效率高，纹波更大。

在关心轻载下的效率而关心电压纹波的情况下，可以选用 TPSM863252，该电源芯片正常工作在连续导通模式，轻载时进入 **eco mode**，开关频率降低，提升了轻载时的效率。

在关心轻载下的纹波而不关心轻载的情况下，可以选用 TPSM863257，该电源芯片固定 1.2MHz 开关频率，电感电流连续，降低了轻载时的电压纹波，同时因开关损耗也降低了效率。

## 重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司