

纹波注入电路简介

引言

传统恒定导通时间(COT)控制的核心逻辑是:当输出电压(经分压后的 FB 引脚电压)低于内部基准时,高侧 MOSFET 导通一个固定的时间(T_{on});导通结束后,芯片等待 FB 再次跌落到基准以下,开始下一个周期。这种工作方式省去了复杂的误差放大器和环路补偿,带来了极快的瞬态响应。然而,这种机制对反馈信号有一个硬性要求:在开关管的关断期间,FB 引脚上的电压必须呈现一个与电感电流同相位的、足够幅值的纹波。

如果输出电容选用低 ESR 的陶瓷电容,电容自身的 ESR 很小,无法产生足够的纹波电压。此时,转换器会出现开关频率抖动、次谐波振荡甚至不稳定。这就是需要人为“注入”纹波,在 COT 控制架构的降压转换器中,反馈比较器需要足够且“干净”的纹波信号才能稳定工作。

纹波注入方案

方案一

纹波生成方法使用一个与输出电容串联的单个电阻 RESR,所产生的电压纹波包含两个分量:由电感纹波电流对输出电容充放电引起的容性纹波,以及由电感纹波电流流入输出电容并流过串联电阻 RESR 所引起的阻性纹波。

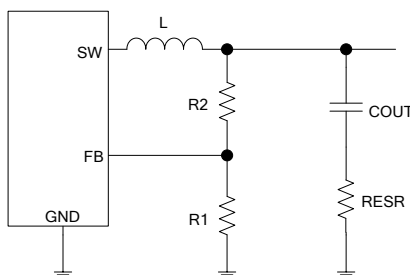


图 1. 方案一

优点:

1. BOM 少,成本低:元件仅需一个外部电阻(与输出电容串联)。
2. 无额外直流偏移:纹波直接来自 ESR 压降,不改变输出电压设定点。
3. 易于调试:用示波器可直接在输出端观测到与电感电流同相的锯齿波。

缺点:

1. 输出纹波会直接叠加到 FB 引脚,若输出本身纹波较大或含有高频噪声,系统抗噪性差。
2. 增加损耗:RESR 持续流过交流电流,产生额外功耗,降低效率。
3. 稳定性受工作点影响:电感纹波电流随 V_{IN} 、负载变化,轻载或高压输入时可能导致纹波不足,引起频率抖动。
4. 限制电容选型:必须使用高 ESR 电容(如铝电解、钽电容),无法发挥陶瓷电容低 ESR、高频特性好的优势。
5. EMI 性能差:输出端的高纹波会直接传导/辐射。

方案二

在方案一的基础上,直接在反馈电阻上并联一个前馈电容(CFF)。纹波取自输出端的开关纹波,通过 CFF 耦合到 FB 节点。

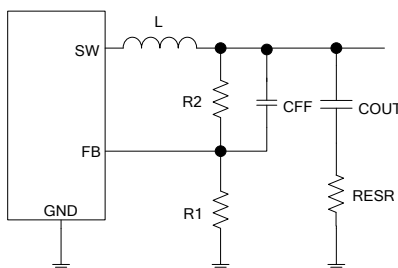


图 2. 方案二

优点:

1. 元件少，结构仍较简单：相比方案一仅增加一个电容，BOM 增加有限。
2. 输出纹波显著降低。
3. 改善稳定性：CFF 提供了高频通路，使 FB 能更快响应输出端变化，对负载瞬态有一定帮助。

缺点:

1. 依赖 ESR：纹波信号本质上仍来自输出电容的 ESR 压降，若输出电容选用陶瓷电容（ESR 极低），则无法产生足够纹波，因此仍需保留一定的 ESR（可能仍需串联小电阻或选用特殊电容）。
2. CFF 取值需谨慎：过小则纹波耦合不足，过大会引入额外极点，可能影响环路稳定性，通常需要计算或实验确定。
3. 无法完全隔离开关噪声：输出端的纹波直接耦合到 FB，若 PCB 布局不佳，仍可能引入噪声。

方案三

增加一个由 RA 和 CA 组成的 RC 串网络，该网络连接在 SW 节点和 VOUT 之间。CA 和 RA 产生一个与电感电流同相的三角波，再通过 CB 交流耦合到 FB 节点。

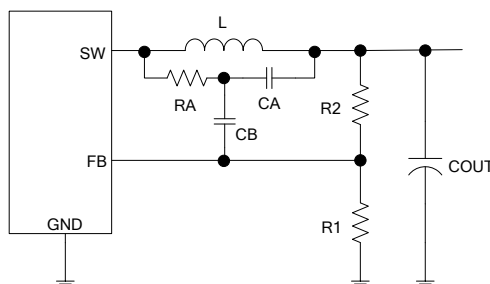


图 3. 方案三

优点:

1. 输出纹波极低，抗噪能力强。
2. EMI 性能优异，负载调整率更优。

缺点:

1. 元件数量多，成本增加，设计与计算较复杂，可能引入额外的直流偏移误差。
2. 对 CB 电容的材质有要求：只有容值极度稳定，才能在高压偏置和全温度范围内实现电压跟随。

方案三参数设计

纹波生成使用由 RA 和 CA 组成的 RC 网络以及开关节点电压来生成与电感器电流同相的三角波。此三角波通过电容器 CB 交流耦合到反馈节点。由于该电路不使用输出电压纹波，因此该电路专为低输出电压纹波至关重要的应用而设计。若最小纹波电压为 20mV，则各个参数计算为公式为：

$$CA \geq \frac{10}{f_{SW} * (R1 // R2)} \quad (1)$$

$$R_{ACA} \leq \frac{(V_{IN} - V_{OUT}) * T_{on}}{20mV} \quad (2)$$

$$CB \geq \frac{t_{TR-settling}}{3R2} \quad (3)$$

其中，CA 与 RA 共同形成一个 RC 滤波网络，其时间常数决定了注入纹波的幅值。CA 的下限由开关频率和反馈电阻的并联值决定。CB 的作用是将 RA、CA 生成的三角波纹波交流耦合到 FB 引脚，同时阻隔直流分量。 $t_{TR-settling}$ 是设计者期望的瞬态响应建立时间（从负载跳变到输出电压重新稳定的时间）。

结论

纹波注入电路是 COT 架构得以在低 ESR 陶瓷电容时代保持稳定和高效的桥梁。上文的三种方案展示了从“成本优先”到“性能优先”的设计梯度。其中方案三，可以在获得 COT 架构快速瞬态响应和轻载高效率的同时，实现极低的输出电压纹波和可预测的开关频率，满足工业、车载等严苛领域的电源需求。