

Hot Swap 外置软启电路设计

Antony Fu, Nison Wang

North West China OEM Team

摘要

在 Hot Swap 应用电路中，有时受限于 MOSFET 的 SOA 或者系统对 Inrush 电流的要求，依靠传统的 Hot Swap 芯片及其外围电路已经无法满足要求，或者需要非常昂贵的成本来实现。因此我们需要外置的软启电路来满足系统的设计要求。

本文以 TPS2477x 为例，首先介绍了 Hot Swap 的基本工作原理，然后阐述了外置软启电路的适用情况及其工作原理。针对软启电路中电阻和电容，本文给出了详细的计算过程和选型指导，并通过实验验证了外置软启电路的合理性与可行性。最后，本文提供了完整的 TPS2477x 设计示例，为其他设计者提供借鉴。

目录

1	Hot Swap 的基本工作原理	1
2	外置软启电路原理及设计	2
3	TPS2477x 设计示例	10
4	小结	13
	参考文献	13

图例

图 1	TPS2477x 典型应用电路	2
图 2	恒功率+恒流启动波形	2
图 3	TPS24772EVM-685 启动波形	3
图 4	具备自放电功能的外置软启电路	4
图 5	无自放电功能的外置软启电路	5
图 6	MOSFET 示意图	6
图 7	MOSFET SOA 曲线	7
图 8	无外置软启电路时的仿真结果	8
图 9	有外置软启电路时的仿真原理图	9
图 10	有外置软启电路时的仿真结果	9
图 11	有外置软启电路时的启动波形	10
图 12	MOSFET 最大耗散功率与持续时间的关系	12

1 Hot Swap 的基本工作原理

图 1 是基于 TPS2477x 的 Hot Swap 典型应用电路^[1]。在启动过程中，TPS2477x 通过 Current Limit 和 Power Limit 功能实现对 Inrush 电流的控制，从而控制输出端电压的 dv/dt ，避免在输出端产生浪涌电压，减小输入端的电压跌落，从而实现安全可靠的热插拔应用。

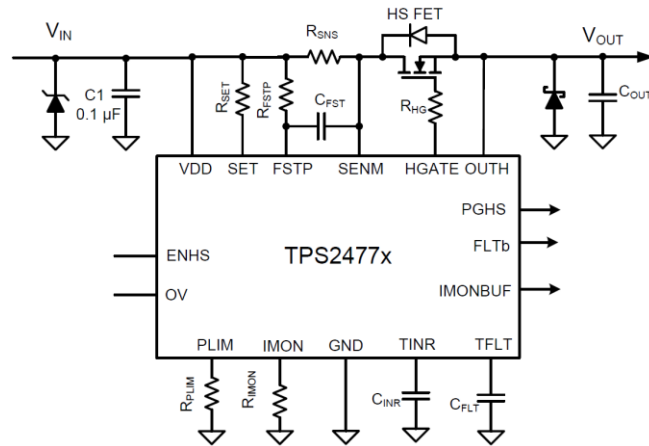


图 1 TPS2477x 典型应用电路

启动时，HGATE pin 会输出 55μA 的电流来驱动 MOSFET 的栅极。随着 V_{IMON} 的增加，HGATE pin 输出的驱动电流会变小以实现恒流控制或者恒功率控制。图 2 是一个恒功率+恒流的启动波形^[2]， t_1 段是恒功率区间， t_2 段是恒流区间。

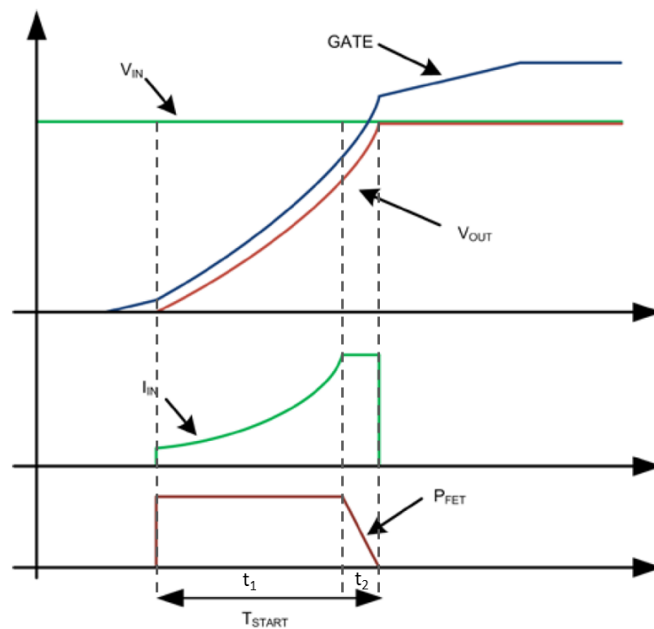


图 2 恒功率+恒流启动波形

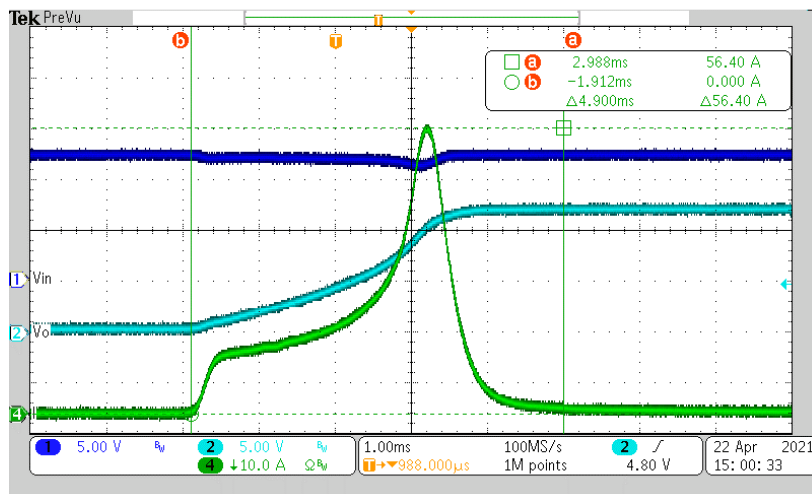
2 外置软启电路原理及设计

2.1 外置软启电路的适用场合

在某些应用场合，受限于 MOSFET 的 SOA 或者系统对 Inrush 电流的要求，依靠传统的 Hot Swap 芯片及其外围电路已经无法满足要求，必须依靠外置的软启电路。如下面几种情况：

- 启动时输入电压的波动不符合系统要求：如 12V 的供电系统一般允许±10%以内的波动，如果波动太大，有可能导致前端其他电路触发欠压或者过压保护。
- 启动时的 Inrush 电流不符合设计要求：如果 Inrush 电流太大，会对供电系统有更苛刻的要求，另外也比较容易导致输入端产生浪涌电压，导致系统可靠性变差。
- 启动时 MOSFET 的 SOA 不能满足要求：设计者无法找到 SOA 更好的 MOSFET，或者想用成本更低但 SOA 稍差的 MOSFET 来设计，在应用时有可能超出 SOA 而损坏 MOSFET。

图 3 是基于 TPS24772EVM-685 测试的启动波形，在 EVM 的基础上做了几点修改： R_{SNS} 更改为 $0.125m\Omega$ ， R_{PLIM} 更改为 $110k\Omega$ ， C_{OUT} 更改为 $8000\mu F$ ，其他参数维持不变。因此，相应的 Current Limit 和 Power Limit 值修改为表 1^[3]。启动时波形如图 3，启动时间大概 4.9ms。



DPO3054 - 4:51:03 PM 4/22/2021

图 3 TPS24772EVM-685 启动波形

表 1 TPS24772EVM-685 电气性能指标

Characteristic	TPS24772EVM-685
Input voltage range (operating)	11-13 V
Current Operating	100 A
C_{OUT} on EVM	440 μF → 8000 μF
Max allowed external C_{OUT}	5000 μF
Power Limit (nom)	117 W → 168W
Current Limit (nom)	110 A → 148A
Fault Timer (Nom)	300 ms
UVLO rising (Nom)	10 V
UVLO falling (Nom)	9.6 V
Overshoot rising (nom)	14 V
Overshoot falling (nom)	13.5 V
Pass "Hot-Short" on output	Yes
Pass "Start into short"?	Yes
Max T_A at Full load	55°C

由图 3 可知，在启动过程中，Inrush 电流完全依靠 Power Limit 来控制，Inrush 电流峰值达到 56.4A，导致输入电压有较大跌落（大概 1V 左右），因此我们需要进一步降低 Inrush 电流。一

一般来说，可以通过减小 Power Limit 的限值 P_{LIM} 来降低 Inrush 电流，但是 P_{LIM} 过小会导致 V_{SNS} 和 V_{IMON} 过小，从而 TPS2477x 内部运放 Offset 引入的误差就会过大。因此规格书建议应保证 $V_{SNS_MIN} > 1.5mV$ 且 $V_{IMON_MIN} > 27mV$ ^[1]，因此最小的 Power Limit 的限值 P_{LIM_MIN} 为：

$$P_{LIM_MIN} = \frac{V_{IN_MAX}}{R_{SNS}} \times \max\left(V_{SNS_MIN} + \frac{V_{IMON_MIN} \times R_{SET}}{R_{IMON}}\right) \geq \frac{13V}{0.125m\Omega} \times 1.5mV = 156W$$

由表 1 可知，当前 P_{LIM} 为 168W， P_{LIM_MIN} 为 156W，已经没有太多下降的空间。因此，只能考虑把 R_{SNS} 增大，从而减小 P_{LIM_MIN} ，使 P_{LIM} 有足够的下调空间。但是 R_{SNS} 的增大会导致 V_{SNS} 的增大，因此会导致 R_{SNS} 热耗的增加和系统效率的下降，得不偿失。并且， P_{LIM} 减小之后，Inrush 电流变小，输出电容 C_{OUT} 充电变慢，Inrush Time 较长，在设计时要选择一个稍大的 C_{INR} 值。这会带来一个问题，在启动前输出即短路的情况下，在 Power Limit 状态要持续比较长的时间才会触发保护，这会导致系统可靠性降低。

在当前 Power Limit 限值的情况下，CSD16415Q5 的 SOA 裕量已经非常小了（SOA 不能直接用 CSD16415Q5 的 SOA 曲线，需要考虑温度降额，这是一个比较复杂的话题，在此不做复杂陈述）。并且，CSD16415Q5 已经是 5mm*6mm QFN 封装里面 SOA 最好的 MOSFET，更换更大封装的 MOSFET 会受到 PCB 尺寸的限制，也会增加成本。因此，只能采用外置软启电路来进一步降低 Inrush 电流。

2.2 外置软启电路的工作原理

外置软启是指在 MOSFET 的栅极增加一个对地电容实现软启，目的是在启动时降低输出电压的 dv/dt ，从而降低 Inrush 电流和 MOSFET 上的功耗。与此同时，我们希望触发保护时，MOSFET 可以迅速关断。这就要求外置软启电路只能在系统启动时发挥作用，在 MOSFET 关断时不可减慢其关断速度。图 4 和图 5 是两种常用的外置软启电路，两者均有各自的优缺点和应用场景。

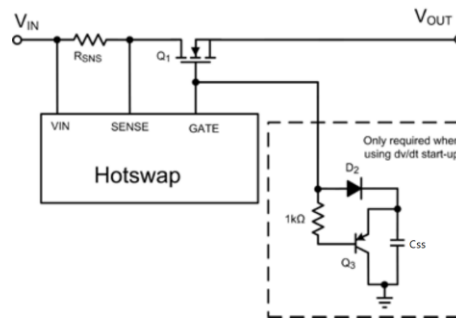


图 4 具备自放电功能的外置软启电路

图 4 是具备自放电功能的外置软启电路，在这个电路里面：

- C_{SS} 是软启电容，容量需要根据软启时间或者 Inrush 电流的要求来选择，耐压根据 V_{in} 和 Gate pin 钳位电压来选择，材质可以选择 COG，X7R 或 X5R。
- D_2 是反向截止二极管，可以用 1N4148 这种快恢复二极管或者小电流的肖特基二极管，耐压和 C_{SS} 的选择方式一样。48V 及以上的应用不能选择 1N4148。
- Q_3 是 PNP 三极管，用于泄放 C_{SS} 的能量，可以选择常用的 2N3906。
- 1kΩ 电阻为 PNP 基极串联电阻，用于限制基极电流。

其工作原理是：启动时 Gate pin 的驱动电流给 Q_1 的栅漏电容 C_{GD} 和 C_{SS} 一起充电，在 MOS 没有完全打开时，gate pin 和输出电压的 dv/dt 是完全一样的，由于 C_{SS} 比 C_{GD} 大得多，因此此电路可以有效减慢 MOSFET 开通速度从而控制 Inrush 电流。当需要关断 Q_1 时，Hot Swap 芯片会从 Gate pin 吸电流来关断 MOSFET，当 $V_{Gate} \leq V_{C_{SS}} - V_{be}$ 时， Q_3 会饱和导通快速泄放掉 C_{SS} 的能量，使 Q_1 的关断不受软启电路的影响。

这个电路的优点是比较安全可靠，适用于快速开关的应用场景；缺点是比较复杂， D_2 和 Q_3 会增加成本。

图 5 是无自放电功能的外置软启电路，此处 R_{ISO} 为隔离电阻，具体阻值需要根据 Gate pin 吸电流的能力来选择，一般用 $1k \sim 10k$ 左右的电阻。

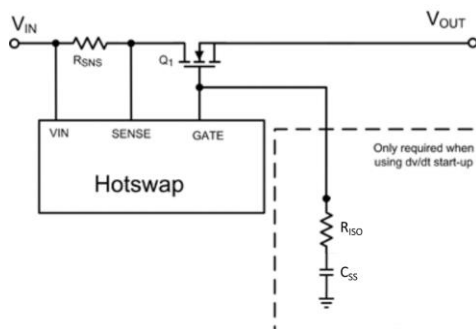


图 5 无自放电功能的外置软启电路

电路的工作原理是：启动时 Gate pin 的驱动电流给 Q_1 的栅漏电容 C_{GD} 和 C_{SS} 一起充电，由于 TPS2477x 驱动电流最大为 $55\mu A$ ，因此 R_{ISO} 上的压降可以忽略不计， Q_1 的 C_{GD} 和 C_{SS} 一起实现软启控制。当需要关断 Q_1 时，Hot Swap 芯片会从 Gate pin 吸电流来关断 Q_1 。此电流的典型值为 $44mA$ ，此时 R_{ISO} 的作用就凸显了出来，它可以隔离 C_{SS} 对 Q_1 关断的影响，让 Q_1 的关断速度尽量快。

相较于图 4 而言，这个电路的优点是简单方便，成本较低。缺点是会略微减慢 MOSFET 的关断速度。

2.3 外置软启电路的设计

本文主要研究图 5 中的无自放电功能的外置软启电路，接下来详细阐述其作用机理。图 6 是典型的 MOSFET 示意图^[4]，但 MOSFET 的规格书里一般不会提供 C_{GD} 、 C_{GS} 、 C_{DS} 的值。我们可以借用 C_{ISS} 、 C_{OSS} 和 C_{RSS} 来计算各个容值。

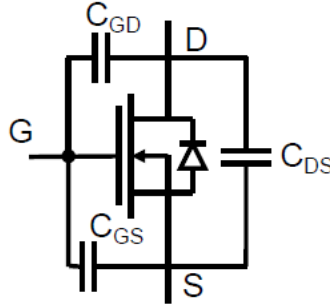


图 6 MOSFET 示意图

表 2 CSD16415Q5 电气性能指标^[5]

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
DYNAMIC CHARACTERISTICS					
C _{ISS}	Input Capacitance		3150	4100	pF
C _{OSS}	Output Capacitance		2530	3300	pF
C _{RSS}	Reverse Transfer Capacitance		175	230	pF

它们之间的数值关系为：

$$C_{ISS} = C_{GD} + C_{GS}$$

$$C_{OSS} = C_{GD} + C_{DS}$$

$$C_{GD} = C_{RSS}$$

一般来说 C_{GS} >> C_{GD}，得出：

$$C_{GS} \approx C_{ISS}$$

$$C_{DS} = C_{OSS} - C_{RSS}$$

$$C_{GD} = C_{RSS}$$

MOSFET 开通过程可以分为以下几个阶段：

- V_{GS} < V_{GS(th)}：MOSFET 工作在截止区，Gate pin 的驱动电流对 C_{SS}、C_{GD}、C_{GS} 一起充电。
- V_{GS} = V_{GS(th)}：MOSFET 刚刚开通，工作在放大区。在输出电压达到输入电压之前，V_{GS} 几乎保持不变。所以在这个阶段 Gate pin 的驱动电流只对 C_{SS} 和 C_{GD} 充电，有如下关系：

$$\frac{dV_{Gate}}{dt} = \frac{d(V_{out} + V_{GS})}{dt} \approx \frac{dV_{out}}{dt}$$

加入外置软启电路后，在启动过程中不会触发 Current Limit 和 Power Limit，因此 Gate pin 为恒流驱动，所以有如下关系：

$$\frac{dV_{Gate}}{dt} = \frac{I_{Gate}}{C_{SS} + n \times C_{GD}}$$

其中，n 为并联的 MOSFET 的数量。所以 Inrush 电流为：

$$I_{inrush} = C_{out} \frac{dV_{out}}{dt} = C_{out} \frac{dV_{Gate}}{dt} = C_{out} \frac{I_{Gate}}{C_{SS} + n \times C_{GD}}$$

启动时间 t_{ss} 为：

$$t_{ss} = V_{in} \frac{C_{SS} + n \times C_{GD}}{I_{Gate}}$$

- $V_{GS} > V_{GS(th)}$: MOSFET 工作在饱和区, MOSFET 完全导通, 输出电压等于输入电压, Gate pin 的驱动电流对 C_{SS} 、 C_{GD} 、 C_{GS} 一起充电, 直到 V_{GS} 电压达到 13.6V (TPS2477x gate pin 内部钳位电压) 左右。

软启电容的选择至关重要, 一般选择 COG, X7R 或 X5R 材质的陶瓷电容。耐压需要大于 $V_{in_max} + V_{gate_clamp}$, 并留至少 20% 的裕量。 V_{gate_clamp} 一般在 12V~14V 之间, 所以 12V 系统建议用 50V 耐压的电容, 48V 系统建议用 100V 的电容。

电容的容量设计相对复杂一些, 需要考虑以下几点因素:

- Inrush 电流和启动时间必须符合 MOSFET 的 SOA 曲线, 如图 7^[5]。一般外置软启电路时启动时间都会达到几十毫秒或者上百毫秒, 需要根据 SOA 曲线计算出裕量, 一般要求裕量 > 30%。
- 启动时 Inrush 电流必须小于 Current Limit 值 I_{LIM_CL} 。
- 启动时 MOSFET 的功耗必须在 Power Limit 设定的阈值之下, 不然有可能启动失败。注意: 启动时 Power Limit 的实际阈值略小于设定值, 需要根据具体 Hot Swap 芯片来评估。比如 TPS2477x, 为保证进入 Power Limit 时触发 Inrush Timer, 设定阈值 V_{IMON_PL} 与实际阈值 V_{IMON_TINR} 之间会有一个差值 ΔV_{IMON_TINR} , 最大值为 67mV, 在设计时必须将其考虑在内。

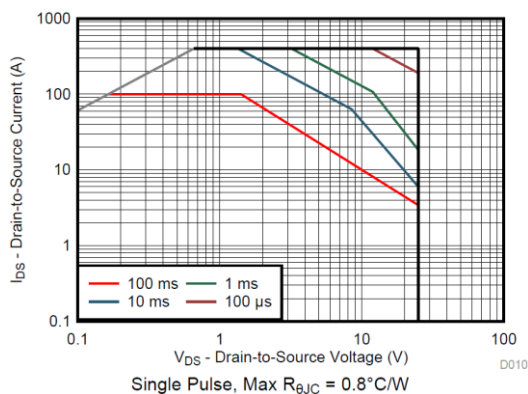


图 7 MOSFET SOA 曲线

R_{ISO} 的阻值选择也比较关键, 大阻值可以实现比较好的隔离效果, 但会导致 C_{SS} 放电慢, 不适用于某些快速开关机的场合。过小的 R_{ISO} 会导致 MOSFET 关断变慢, 可能会导致系统出现其他风险。 R_{ISO} 的具体阻值需要根据 Gate pin 的吸电流能力和从关断到下次开启的时间间隔来决定。一般来说, 控制 R_{ISO} 支路的分流占 Gate pin 总吸电流的 30% 以内, 并且保证下次启动时 C_{SS} 已经放电完毕。

下面举个例子说明如何选择 R_{ISO} 使其支路分流不超过 Gate pin 总吸电流的 30%: 以表 1 中的指标为例, 在 MOSFET 导通后,

$$V_o = V_{in} = 12V$$

$$V_{Gate} = V_{clamp} + V_o \approx 26V$$

大部分 Hot Swap 芯片的过流保护机制为: 在输出过流时, 栅极电压会降低到 $V_o + V_{GS(th)}$, 将输出电流限制在 Current Limit 值进行恒流控制。但是对于 TPS2477x 来说, 输出电流介于 OCP 和

Fast Trip 中间时触发 Current Limit，但不采取任何控制，只是 Fault Timer 开始计时，计时结束才会关断 MOSFET。

在 MOSFET 完全关断时，输出电压还是 12V。因此栅极电压降低到 13.5V 左右 ($V_o + V_{GS(th)}$) 时，MOSFET 完全关断，此时 R_{ISO} 支路的分流最大，其值为：

$$I_{ISO} = \frac{V_{CSS} - V_{Gate}}{R_{ISO}} \leq \frac{V_{CSS_max} - V_{Gate}}{R_{ISO}} = \frac{26V - 13.5V}{1k\Omega} = 12.5mA$$

Gate pin 总吸电流的典型值为 44mA， R_{ISO} 取值 1k Ω 即可保证其支路分流永不超过 Gate pin 总吸电流的 30%。

我们比较一下有无外置软启电路对 MOSFET 关断时间的影响。无外置软启电路时，关断时间为 (n 为 4 个 MOS 并联)：

$$t_{off1} = \frac{n \times C_{iss} \times dV_{Gate}}{I_{Gate}} = \frac{4 \times 3150pF \times 12.5V}{44mA} = 3.58\mu s$$

在 TINA 仿真软件中进行仿真^[6]，仿真结果如图 8，栅极电压从 26V 降低到 13.5V，大概需要 3.58 μs ，与计算结果相同。

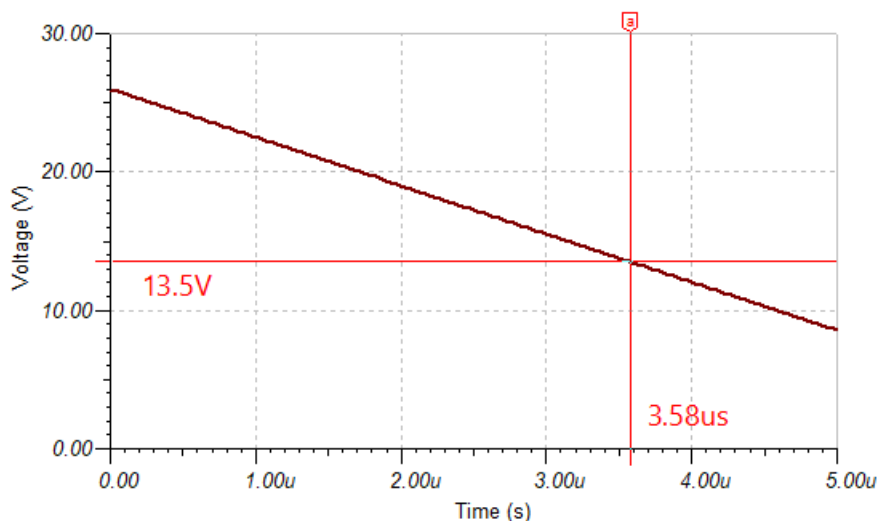


图 8 无外置软启电路时的仿真结果

有外置软启电路时，由于软启电路会分一部分驱动电流，并且此电流是实时变化的，因此此时关断时间计算比较复杂。但是，我们可以将 MOSFET 的关断电流简化为关断初始时刻和关断终止时刻的平均值，因此 MOSFET 的关断电流可以简化为：

$$I_{Gate}' = \frac{I_{Gate} + (I_{Gate} - I_{ISO})}{2} = \frac{44mA + (44mA - 12.5mA)}{2} = 37.75mA$$

MOSFET 的关断时间为：

$$t_{off2} = \frac{n \times C_{iss} \times dV_{Gate}}{I_{Gate}'} = \frac{4 \times 3150pF \times 12.5V}{37.75mA} = 4.17\mu s$$

搭建仿真原理图如图 9，软启电容取 68nF，隔离电阻取 1kΩ。仿真结果如图 10，栅极电压从 26V 降低到 13.5V，大概需要 4.19μs，与计算值非常接近。因此，可以得出结论：外置软启电路对 MOSFET 关断时间的影响较小。

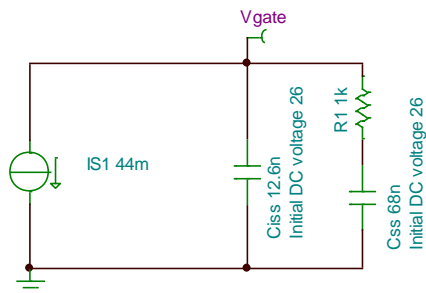


图 9 有外置软启电路时的仿真原理图

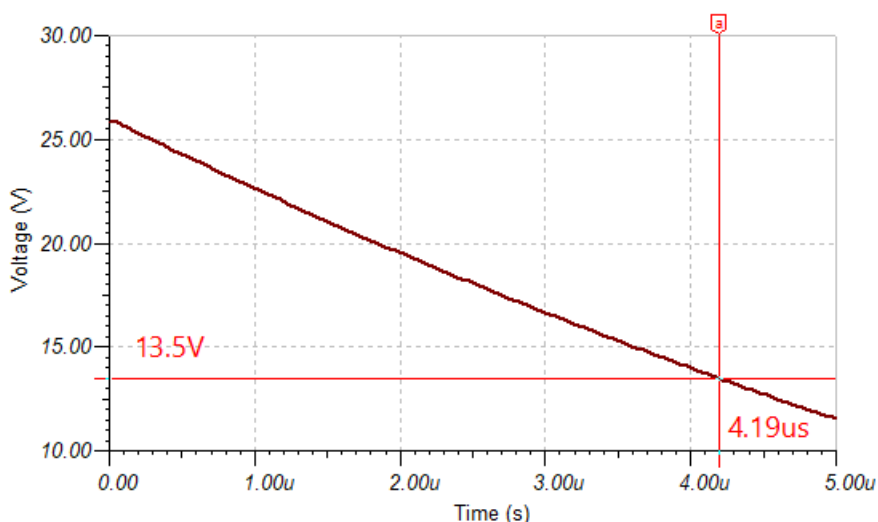
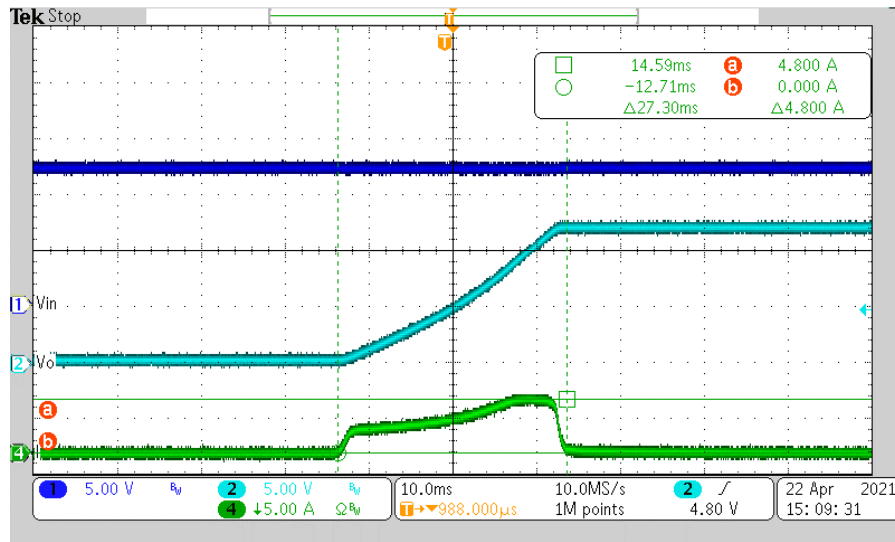


图 10 有外置软启电路时的仿真结果

以上分析针对 Current Limit 触发 MOSFET 关断的情况，另一种触发 MOSFET 关断的情况为负载电流值>Fast Trip 设定值，此时 Gate pin 吸电流的典型值为 1A，分析步骤类似，但是结论相同：软启电路对 MOSFET 关断速度的影响微乎其微。

2.4 外置软启电路的实验验证

基于 TPS24772EVM-685 评估板，软启电容取 68nF，隔离电阻取 1kΩ，启动波形如图 11。与图 3 相比，启动时间延长到 27.3ms，Inrush 电流减小到 4.8A，输入电压保持稳定，几乎没有被拉低。因此，外置软启电路可以起到很好的效果。



DPO3054 - 5:00:01 PM 4/22/2021

图 11 有外置软启电路时的启动波形

3 TPS2477x 设计示例

本文以 TPS2477x 为例提供设计示例，设计指标如表 3，

表 3 TPS2477x 设计指标

设计参数	示例数值
输入电压范围	11V~14V
最大 TDC 电流	150A
Current Limit 设定	160A
Fast Trip 设定	180A
最大输出滤波电容	8000uF
最大环境温度	45°C
散热条件	风冷

3.1 选择 MOSFET 的型号及数量

因为 TDC 电流及 Current Limit 都非常大，此处选择 CSD16415Q5。控制 TDC 电流下 MOSFET 的最高结温为 85°C，先计算出每个 MOSFET 允许的最大耗散功率：

$$P_{MOS} = \frac{T_{j,max} - T_{A,max}}{R_{QJA}} = \frac{85^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}}{40^{\circ}\text{C}/\text{W}} = 1\text{W}$$

因此 MOSFET 的数量为：

$$n = \sqrt{\frac{I_{TDC}^2 R_{DS(on)}}{P_{MOS}}} = \sqrt{\frac{(150\text{A})^2 \times 1.3\text{m}\Omega}{1\text{W}}} = 5.4$$

因此，选 6 个 MOSFET 并联比较合适。

表 4 CSD16415Q5 参数

设计参数	示例数值		备注
$R_{DS(on)}$	1.3mΩ		已考虑温升的影响
Estimated MOSFET $R_{\theta JA}$	40°C/W		根据实际的散热条件输入，不要照搬 datasheet
C_{RSS}	175pF		取典型值即可
100μs SOA	350A	4900W/0.49J	按 14V 最高输入电压
1ms SOA	75A	1050W/1.05J	
10ms SOA	22A	308W/3.08J	
100ms SOA	7A	98W/9.8J	

3.2 软启电容的计算

软启电路设计要同时满足：不触发 Current Limit 和 Power Limit，SOA 有一定裕量，Inrush 电流或者输入电压的波动符合要求。

软启电容有以下三种设计方式，其本质是相同的，只是计算步骤稍有不同。

- 根据目标 Inrush 电流确定软启电容和软启时间，同时校验 MOSFET 的 SOA 裕量。
- 根据目标软启时间计算软启电容，推导出 Inrush 电流，同时校验 MOSFET 的 SOA 裕量。
- 根据 MOSFET 的 SOA 来计算系统可以忍受的最大 Inrush 电流和软启时间，最后计算软启电容。

本文以第一种设计方法为例，如果 Inrush 电流要求是 6A，根据如下公式：

$$I_{inrush} = C_{out} \frac{I_{Gate}}{C_{SS} + n \times C_{RSS}}$$

可以推导出软启电容为:

$$C_{SS} = C_{out} \frac{I_{Gate}}{I_{inrush}} - n \times C_{RSS} = 8000\mu F \times \frac{55\mu A}{6A} - 6 \times 175pF = 72.28nF$$

选择比较接近的标准容值 68nF。输入电压为 12V 时，软启时间为:

$$t_{SS} = V_{in} \frac{C_{SS} + n \times C_{GD}}{I_{Gate}} = 15ms$$

接下来校验 MOSFET 的 SOA，SOA 与时间有关，如图 7。将表 4 中的 SOA 数据绘制在 log-log 坐标系中，耗散功率与持续时间是线性关系^[2]，如图 12。

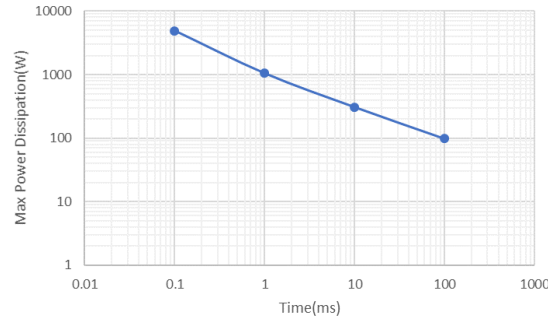


图 12 MOSFET 最大耗散功率与持续时间的关系

因此，其他时间参数的 SOA 可以用下面公式来计算:

$$m = \frac{\ln\left(\frac{ISOA(t1)}{ISOA(t2)}\right)}{\ln\left(\frac{t1}{t2}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{22A}{7A}\right)}{\ln\left(\frac{10ms}{100ms}\right)} = -0.5$$

$$a = \frac{ISOA(t1)}{t1^m} = \frac{22}{10^{-0.5}} = 69.57$$

$$ISOA(t) = a \times t^m = 69.57t^{-0.5}$$

其中，t 的单位为 ms，ISOA 的单位为 A。15ms 软启时间对应的 ISOA 为

$$ISOA(15ms) = 69.57 * 15^{-0.5} = 17.96A$$

接下来考虑 MOSFET 的 SOA 的温度降额，

$$ISOA(15ms, 85^\circ C) = ISOA(15ms, 25^\circ C) \times \frac{T_{J,max} - T_{C,max}}{T_{J,max} - 45^\circ C} = 11.12A$$

因此 SOA 的裕量为:

$$ISOA_{Margin} = \frac{ISOA(15ms, 85^{\circ}C) - I_{inrush}}{I_{inrush}} = 85\% > 30\%$$

接下来校验会不会触发 Power Limit，参考规格书^[1]，只要 Power Limit 的设定值大于 306.34W，即可保证启动过程不触发 Power Limit。由于最大 Inrush 电流远远小于 Current Limit，因此也不会触发 Current limit。但是需要注意一点，在短路启动的时候，Power Limit 值过大可能导致 MOSFET 过载，因此应减小 C_{INR} 以缩短 Inrush Timer。

$$\begin{aligned} P_{LIM_MIN} &= \left(I_{inrush} + \Delta V_{IMON, TINR, MAX} \times \frac{R_{SET}}{R_{IMON} \times R_{SNS}} \right) \times V_{IN, max} \\ &= \left(6A + 67mV \times \frac{80\Omega}{2.7k\Omega \times 0.125m\Omega} \right) \times 14V = 306.34W \end{aligned}$$

4 小结

本文介绍了 Hot Swap 的基本工作原理及传统应用电路中存在的问题，用外置软启电路可以规避这些问题，有效减小 Inrush 电流，防止输入电压有较大的跌落。并且，本文详细说明了软启电路的设计方法，提供了设计示例，并通过实验验证了外置软启电路的合理性与可行性。

参考文献

- [1]. TPS2477x Datasheet. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps24772.pdf>
- [2]. Robust Hot Swap Design. <https://www.ti.com/lit/an/slva673a/slva673a.pdf>
- [3]. TPS24772EVM-685 Evaluation Module User's Guide. <https://www.ti.com/lit/pdf/slvaug2>
- [4]. MOSFET Driver Circuit Design Guide for TPS512xx. <https://www.ti.com/lit/an/slva38a/slva38a.pdf>
- [5]. CSD16415Q5 Datasheet. <https://www.ti.com/lit/pdf/slps259>
- [6]. TINA-TI. <https://www.ti.com/tool/TINA-TI>

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.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 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：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司