

Hotswap 启动时间计算及 SOA 评估

Nison Wang

China PEC Team

摘要

Hotswap 在服务器中应用十分广泛，可以实现卓越的系统级保护，有助于提高系统可靠性。由于 Hotswap 控制器必须搭配 MOSFET 工作，因此设计时必须使 MOSFET 的 SOA 在任何工况下都有充足的裕量，以免造成 MOSFET 烧毁等严重事故。Hotswap 启动时，尤其是带载启动，MOSFET 会承受巨大的压力，因此本文主要对此种工况进行研究。

本文以 LM5066I 为例，首先介绍了 Hotswap 的基本架构，然后研究了无外置软启动电路时无载启动和带载启动的启动时间计算方法，并给出 SOA 的评估办法。继而研究了有软启动电路时带载启动的启动时间计算方法，并给出 SOA 的评估办法，最后通过实验进行验证。

目录

1	Hotswap 简介	2
2	无外置软启电路时的空载启动	2
3	无外置软启电路时的带载启动	5
4	外置软启电路时的带载启动	8
5	实验验证	10
6	小结	11
	参考文献	11

图例

图 1	LM5066I 典型应用电路	2
图 2	Power Limit 和 Current Limit 启动过程	3
图 3	LM5066IEVM-626 的设计参数	3
图 4	Excel 分段线性法计算表	5
图 5	Excel 分段线性法计算结果 (Step=0.1 μ s)	5
图 6	Excel 分段线性法计算结果 (Step=1 μ s)	5
图 7	Excel 分段线性法计算表	6
图 8	Excel 分段线性法计算结果 (Step=0.1 μ s)	7
图 9	Excel 分段线性法计算表	7
图 10	Excel 分段线性法计算结果 (Step=0.1 μ s)	7
图 11	Hotswap 软启动波形	8
图 12	MOSFET 功率图	9
图 13	Excel 分段线性法计算表	10
图 14	LM5066I 启动波形	11

1 Hotswap 简介

图 1 是基于 LM5066I 的 Hotswap 典型应用电路^[1]。Hotswap 有两种启动方式，一种为利用 Power Limit 和 Current Limit 功能启动，另一种为借助软启动电路进行启动。前者比较适用于负载电流小、输出电容小的场合，后者比较适用于负载电流大、输出电容大的场合。因为增加负载电流会降低电流检测电阻，从而提高最低的 Power Limit 限值。使用更大的输出电容会导致启动时间更长，并且需要更长的 Timer。因此，更长的 Timer 和更大的 Power Limit 会在短路工况给 MOSFET 带来更大的压力。最终，将没有能够满足此类要求的 MOSFET^[2]。因此，负载电流大、输出电容大的场合必须使用软启动电路。

在大部分应用场景中，启动过程中除了需要考虑输出电容，还需要考虑启动时的后级电流负载，这会导致 MOSFET 承受更大的压力。后级电流负载与 Hotswap 后级所接的设备息息相关，其并非简单的恒流或恒阻负载，这为我们设计 Hotswap 电路造成了巨大的挑战。并且，不管是 TI 的 Hotswap 设计工具还是相关的技术文档都没有对带载启动进行过详细研究，因此本文的研究至关重要，可以为设计者提供借鉴。

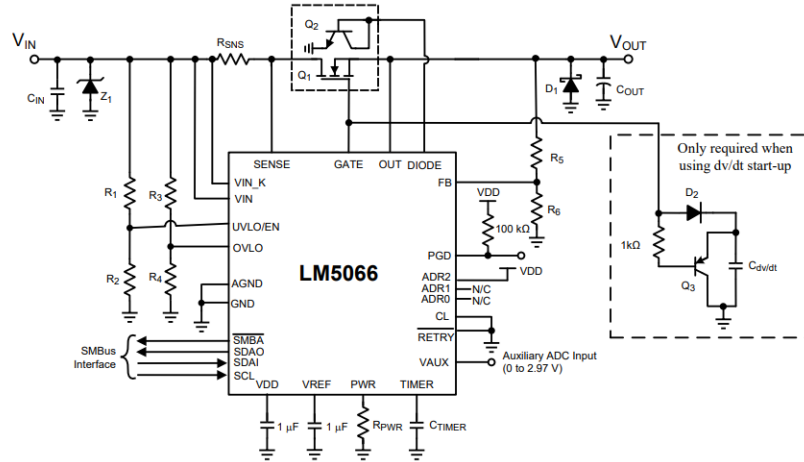


图 1 LM5066I 典型应用电路

2 无外置软启电路时的空载启动

当无外置软启动电路时，Hotswap 会借助 Power Limit 和 Current Limit 功能启动，以抑制启动时的浪涌电流，并减小输入电压波动。启动过程如图 2 所示，分为两个阶段，第一个阶段为恒功率段，第二个阶段为恒流段。

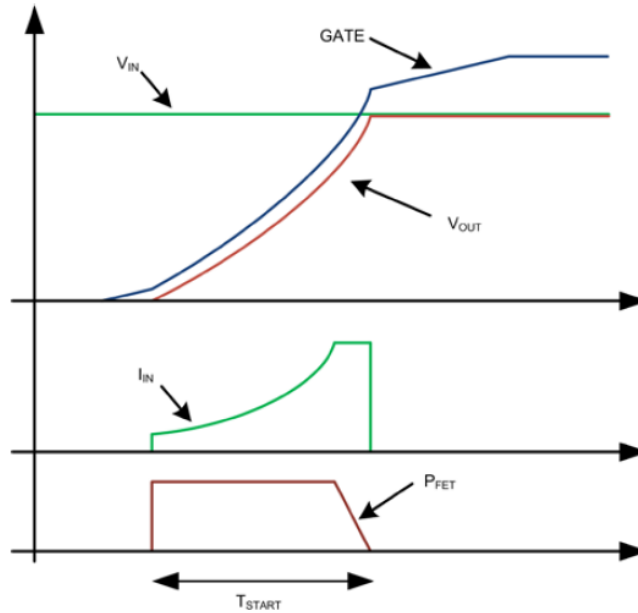


图 2 Power Limit 和 Current Limit 启动过程

以 LM5066IEVM-626 的设计参数为例^[3], 见图 3, 输出只有 440μF 电容负载, 没有电流负载。首先计算两个启动阶段的输出电压切换点, 根据下式

$$P_{limit} = (V_{in} - V_o) * I_{limit} \quad (1)$$

可得

$$V_o = V_{in} - \frac{P_{limit}}{I_{limit}} = 60V - \frac{239W}{26A} = 50.8V \quad (2)$$

因此, 当输出电压上升到 50.8V 时, LM5066I 从恒功率模式切换为恒流模式。接下来介绍三种常用的启动时间计算方法, 由于空载启动较为简单, 因此本文最建议用第二种计算方法。

Characteristic	LM5066IEVM-626
Input voltage range (operating)	40 to 60 V
Current operating	20 A
Power limit (nom)	239 W
Current limit (nom)	26 A
Fault timer (nom)	520 μs

图 3 LM5066IEVM-626 的设计参数

2.1 启动时间计算方法 1

首先研究恒功率段(0~t₁), 根据电路原理, 可以得到以下联立方程组:

$$\begin{cases} i(t) = C_o \frac{dV_o(t)}{dt} \\ i(t) * [V_{in} - V_o(t)] = P_{limit} \\ V_o(0) = 0V \end{cases} \quad (3)$$

因此，可以得到一阶常微分方程

$$C_o \frac{dV_o(t)}{dt} * [V_{in} - V_o(t)] = P_{limit} \quad (4)$$

简化得

$$[V_{in} - V_o(t)]dV_o(t) = \frac{P_{limit}}{C_o} dt \quad (5)$$

对公式(5)进行积分得

$$\begin{cases} \int_{V_o(0)}^{V_o(t)} [V_{in} - V_o(t)]dV_o(t) = \int_0^t \frac{P_{limit}}{C_o} dt \\ V_o(0) = 0V \\ V_o(t_1) = 50.8V \end{cases} \quad (6)$$

简化得

$$\frac{1}{2}V_o(t)^2 - V_{in}V_o(t) + \frac{P_{limit}}{C_o}t = 0 \quad (7)$$

将 $V_{in}=60V$, $P_{limit}=239W$, $C_o=440\mu F$ 代入上式可得

$$t_1 = 3.2360ms \quad (8)$$

然后研究恒流段($t_1 \sim t_2$)，根据电路原理，可以得到下式

$$\begin{cases} I_{limit} = C_o \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_o(t_1) = 50.8V \\ V_o(t_2) = 60V \end{cases} \quad (9)$$

将 $I_{limit}=26A$, $C_o=440\mu F$ 代入，简化得

$$t = \frac{60V-50.8V}{26A} * 440\mu F = 0.1557ms \quad (10)$$

因此总启动时间为 3.3917ms。

2.2 启动时间计算方法 2

首先研究恒功率段($0 \sim t_1$)，根据能量守恒定律，电源提供的能量等于 MOSFET 上消耗的能量加上电容上储存的能量，得到下式

$$C_o * V_{in} * V_o = P_{limit} * t_1 + \frac{1}{2} * C_o * V_o^2 \quad (11)$$

将 $V_{in}=60V$, $P_{limit}=239W$, $C_o=440\mu F$, $V_o=50.8V$ 代入，简化得

$$t_1 = \frac{C_o * V_{in} * V_o - \frac{1}{2} * C_o * V_o^2}{P_{limit}} = \frac{440\mu F * 60V * 50.8V - \frac{1}{2} * 440\mu F * 50.8V^2}{239W} = 3.2360ms \quad (12)$$

可以发现此种方法的计算结果与 2.1 章节的结果完全相同，因此互相验证了计算的准确性。

恒流段($t_1 \sim t_2$)与 2.1 章节的计算方法完全相同，因此总启动时间为 3.3917ms。

2.3 启动时间计算方法 3

针对恒功率段，运用 Excel 分段线性法进行计算。如图 4 所示，A 列为时间，B 列为 MOSFET 电流，C 列为输出电压。Step 为时间间隔，这个由用户自己确定，Step 越大，计算量越小，精度越低。Step 越小，计算量越大，精度越高。此处我们选择 $0.1\mu\text{s}$ 作为时间间隔以保证较高的精度。

	A	B	C	D	E	F	G
1	t(ms)	Ifet(A)	Vo(V)		Step	0.0001 ms	
2	0	3.98333	0		Vin	60 V	
3	0.0001	3.98339	0.00091		Plimit	239 W	
4	0.0002	3.98345	0.00181		Co	440 uF	

图 4 Excel 分段线性法计算表

我们以第二行和第三行为例解释计算的基本逻辑，其他行用 Excel 的自动填充功能即可。具体公式如下：

$$\begin{aligned}
 A2 &= 0 \\
 B2 &= \text{\$F\$3}/(\text{\$F\$2}-C2) \\
 C2 &= 0 \\
 A3 &= A2 + \text{\$F\$1} \\
 B3 &= \text{\$F\$3}/(\text{\$F\$2}-C3) \\
 C3 &= C2 + \text{\$F\$1} * B2 / \text{\$F\$4} * 1000
 \end{aligned}$$

计算结果如下，在 $t=3.236\text{ms}$ 时，输出电压达到 50.8V 。此结果与前两种计算方法也完全相同。恒流段计算与 2.1 章节相同，因此总启动时间为 3.3917ms 。

	A	B	C
32360	3.2358	25.9467	50.7888
32361	3.2359	25.9633	50.7947
32362	3.236	25.9799	50.8006
32363	3.2361	25.9966	50.8065
32364	3.2362	26.0133	50.8124

图 5 Excel 分段线性法计算结果 (Step= $0.1\mu\text{s}$)

如果把 Step 设定为 $1\mu\text{s}$ ，计算结果如图 6。那么在 $t=3.714\text{ms}$ 时，输出电压达到 50.8V ，可以发现此时误差是比较大的。因此，应该尽量用较小的 Step 去进行计算。

	A	B	C
3714	3.712	25.6283	50.6744
3715	3.713	25.7894	50.7326
3716	3.714	25.9535	50.7912
3717	3.715	26.1208	50.8502
3718	3.716	26.2914	50.9096

图 6 Excel 分段线性法计算结果 (Step= $1\mu\text{s}$)

3 无外置软启电路时的带载启动

带载启动时的启动时间有两种计算方法，第一种计算方法适用于负载电流比较容易函数化的场景，第二种计算方法适用于负载电流非常不规则且难以建模的情况。

3.1 启动时间计算方法 1

恒功率段(0~ t_1)的方程关系为:

$$\begin{cases} i(t) - i_o(t) = C_o \frac{dV_o(t)}{dt} \\ i(t) * [V_{in} - V_o(t)] = P_{limit} \\ V_o(0) = 0V \\ V_o(t_1) = 50.8V \end{cases} \quad (13)$$

恒流段($t_1 \sim t_2$)的方程关系为:

$$\begin{cases} I_{limit} - i_o(t) = C_o \frac{dV_o(t)}{dt} \\ V_o(t_1) = 50.8V \\ V_o(t_2) = 60V \end{cases} \quad (14)$$

$i_o(t)$ 是启动时的后级负载电流, 如果其易于建模, 则可以用此计算方法。比如其为 1A 恒流负载, 将 $i_o(t)=1A$, $P_{limit}=239W$, $C_o=440\mu F$, $V_{in}=60V$ 带入公式 (13) 可以计算得恒功率段的时间为

$$t_1 = 3.92ms \quad (15)$$

恒流段的时间为

$$t_2 - t_1 = \frac{C_o * [V_{in} - V_o(t_1)]}{I_{limit} - i_o(t)} = \frac{440\mu F * (60V - 50.8V)}{26A - 1A} = 0.16ms \quad (16)$$

总启动时间为 6.45ms。可以发现, 相较于空载启动, 带载启动的启动时间有所延长, 这对于 MOSFET SOA 的挑战是更大的。如果 $i_o(t)$ 比较复杂, 则建议用下一章节的计算方法。

3.2 启动时间计算方法 2

针对恒功率段, 本小节运用 Excel 分段线性法进行计算。如下图 7 所示, A 列为时间, B 列为 MOSFET 电流, C 列为负载电流, D 列为输出电压。Step 选择 0.1 μs 以保证较高的精度。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	t(ms)	lfet(A)	lload	Vo(V)		Step	0.0001 ms	
2	0	3.983333	1	0		Vin	60 V	
3	0.0001	3.983378	1	0.000678		Plimit	239 W	
4	0.0002	3.983423	1	0.001356		Co	440 uF	

图 7 Excel 分段线性法计算表

我们以第二行和第三行为例解释计算的基本逻辑, 其他行用 Excel 的自动填充功能即可。具体公式如下:

$$\begin{aligned} A2 &= 0 \\ B2 &= \$G\$3 / (\$G\$2 - D2) \\ C2 &= 1 \\ D2 &= 0 \\ A3 &= A2 + \$G\$1 \\ B3 &= \$G\$3 / (\$G\$2 - D3) \end{aligned}$$

$$C3=1$$

$$D3=D2+\$G\$1*(B2-C2)/\$G\$4*1000$$

当 C 列电流始终为 1A 时，计算结果如图 8 所示，在 $t=3.9196\text{ms}$ 时，输出电压达到 50.8V，此结果与 4.1 章节计算结果非常吻合，因此互相验证了计算的准确性。针对负载电流特别复杂的情况，可以先将负载电流波形通过示波器采出，然后将其数据输入到 C 列即可进行分段线性计算。

	A	B	C	D
39196	3.9194	25.95398	1	50.79139
39197	3.9195	25.96997	1	50.79706
39198	3.9196	25.98599	1	50.80274
39199	3.9197	26.00205	1	50.80842
39200	3.9198	26.01813	1	50.8141

图 8 Excel 分段线性法计算结果 (Step=0.1μs)

针对恒流段，依旧运用 Excel 分段线性法进行计算。如下图 9 所示，A 列为时间，B 列为 MOSFET 电流，C 列为负载电流，D 列为输出电压。Step 选择 0.1μs 以保证较高的精度。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	t(ms)	I _{fet} (A)	I _{load} (A)	V _o (V)		Step	0.0001 ms	
2	0	26	1	50.8		V _{in}	60 V	
3	0.0001	26	1	50.80568		P _{limit}	239 W	
4	0.0002	26	1	50.81136		C _o	440 μF	
5	0.0003	26	1	50.81705		I _{limit}	26 A	

图 9 Excel 分段线性法计算表

我们以第二行和第三行为例解释计算的基本逻辑，其他行用 Excel 的自动填充功能即可。具体公式如下：

$$A2=0$$

$$B2=C2=26$$

$$C2=C3=1$$

$$D2=50.8$$

$$A3=A2+\$G\$1$$

$$D3=D2+\$G\$1*(B2-C2)/\$G\$4*1000$$

当 C 列电流始终为 1A 时，计算结果如图 10 所示，在 $t=0.1622\text{ms}$ 时，输出电压达到 60V，此结果与 4.1 章节计算结果非常吻合，因此互相验证了计算的准确性。针对负载电流特别复杂的情况，可以先将负载电流波形通过示波器采出，然后将其数据输入到 C 列即可进行分段线性计算。

1620	0.1618	26	1	59.99318
1621	0.1619	26	1	59.99886
1622	0.162	26	1	60.00455
1623	0.1621	26	1	60.01023
1624	0.1622	26	1	60.01591

图 10 Excel 分段线性法计算结果 (Step=0.1μs)

3.3 带载启动 SOA 评估

计算出启动时间 t_{start} 后，我们就可以确定 Timer 的保护时间 t_{flt} ，为保证充足的裕量，我们一般取 t_{flt} 为 1.5 倍的 t_{start} 。接下来需要对 MOSFET 的 SOA 进行评估，以保证在任何工况下都不至于烧坏 MOSFET。有三种场景对 MOSFET 的 SOA 考验比较大：带载启动，启动后热短路，短路后启动。需要注意的是，对于第一种场景，无论带多大负载启动，由于 Power Limit 的存在，其最恶劣的工况都为：MOSFET 的功耗为 P_{limit} 且持续时间为 t_{flt} 。这与第二种和第三种场景是完全相同的。

因此在无外置软启动电路时，Hotswap 会按照 Power Limit 和 Current Limit 启动，此时 SOA 的评估条件为 P_{limit} 持续 t_{flt} ，具体 SOA 的计算细节可以参考其他设计资料，本文不再赘述。

4 外置软启电路时的带载启动

软启电路可以控制输出电压缓慢抬升，以减小浪涌电流，一方面可以减小输入电压的波动，另一方面也可以减小 MOSFET 的 SOA 应力。需要注意的是：软启动过程中不可以触发 Power Limit 或者 Current Limit，不然启动就可能失败。因此，启动过程中是不会触发 Timer 的，因此 t_{flt} 的取值与启动时间无关。评估 MOSFET 的 SOA 时，依旧需要考虑三种场景：带载启动，启动后热短路，短路后启动。对于后两种情况，按照 P_{limit} 持续 t_{flt} 时长去评估 SOA 即可，如果不满足 SOA 要求，可以适当降低 t_{flt} 。但是对于第一种情况，需要额外特殊考虑，这也是本章节的重点。

还是以 LM5066IEVM-626 的设计参数为例^[3]，软启动电容为 10nF，对应的输出电压上升斜率为 2V/ms，因此启动过程中输出电容的充电电流为

$$I_c = C_o * 2V/ms = 0.88A \quad (17)$$

接下来会介绍两种计算方法，第一种计算方法适用于负载电流比较容易函数化的场景，第二种计算方法适用于负载电流非常不规则且难以建模的情况。

4.1 启动时间计算方法 1

以下图 11 中的启动波形为例， V_{out} 为输出电压， I_{load} 为负载电流， I_{cap} 为输出电容充电电流。可以发现整个启动过程都没有触发 Power Limit 或者 Current Limit。

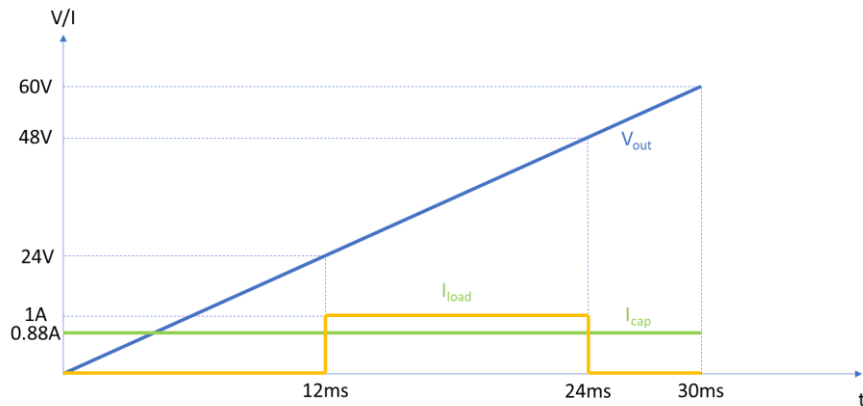


图 11 Hotswap 软启动波形

根据图 11，绘制 MOSFET 功率图如下，将图中折线做积分可得功耗为 1.08J，因此根据面积等效原理，MOSFET 所承受的压力为 36W 持续 30ms，可以以此去评估 MOSFET 的 SOA。

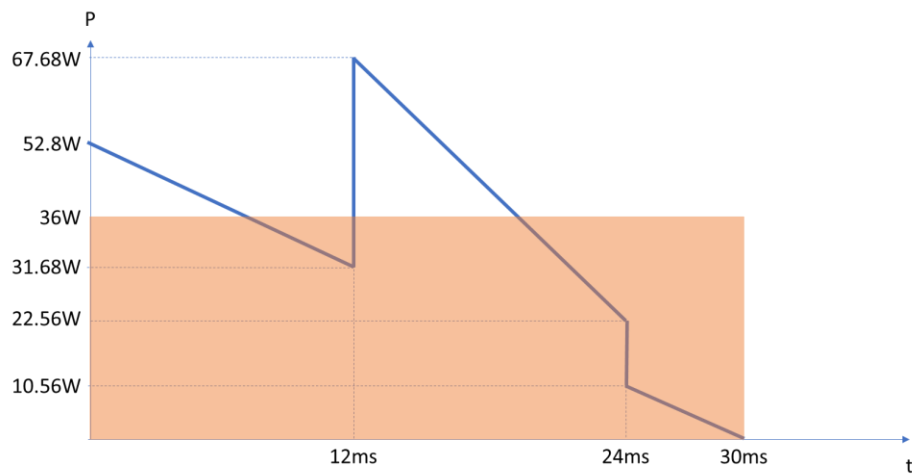


图 12 MOSFET 功率图

4.2 启动时间计算方法 2

本小节依旧运用 Excel 分段线性法进行计算，如下图 13 所示，A 列为时间，B 列为输出电容充电电流，C 列为负载电流，D 列为输出电压。Step 选择 0.1ms。

我们以第二行和第三行为例解释计算的基本逻辑，其他行用 Excel 的自动填充功能即可。具体公式如下：

$$\begin{aligned} A2 &= 0 \\ B2 &= B3 = 0.88 \\ D2 &= 0 \\ A3 &= A2 + \$H\$1 \\ D3 &= D2 + \$H\$1 * \$H\$3 \\ E3 &= ((\$H\$2 - D2) * (B2 + C2) + (\$H\$2 - D3) * (B3 + C3)) * \$H\$1 / 2 \end{aligned}$$

注意：C 列需要按照真实的负载电流情况填写，此处以图 11 中的阶跃电流波形为例。对 E 列做求和即可得到总功耗结果为 1.081J，与第一种计算方法还是非常接近的。因此根据面积等效原理，MOSFET 所承受的压力为 36W 持续 30ms，可以以此去评估 MOSFET 的 SOA。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	t(ms)	Ic(A)	Iload(A)	Vo(V)	E(mJ)		Step	0.1 ms	
2	0	0.88	0	0			Vin	60 V	
3	0.1	0.88	0	0.2	5.2712		Slew rate	2 V/ms	
4	0.2	0.88	0	0.4	5.2536		Co	440 uF	
5	0.3	0.88	0	0.6	5.236				
6	0.4	0.88	0	0.8	5.2184				
7	0.5	0.88	0	1	5.2008				
8	0.6	0.88	0	1.2	5.1832				
9	0.7	0.88	0	1.4	5.1656				
10	0.8	0.88	0	1.6	5.148				
11	0.9	0.88	0	1.8	5.1304				

图 13 Excel 分段线性法计算表

5 实验验证

基于 LM5066IEVM-626，输入电压 48V，软启动电容为 10nF，对应的输出电压上升斜率为 2V/ms，因此启动时间为 24ms，启动过程中输出电容的充电电流为 0.88A，设定电子负载为恒流 1A，根据 4.2 章节中介绍的方法可以得到 MOSFET 总功耗为 1.08J，因此需要承受 45W（48V*0.94A）持续 24ms。EVM 上使用的 MOSFET 型号为 CSD19536KTT，因此

$$m = \frac{\ln\left[\frac{ISOA(t_1)}{ISOA(t_2)}\right]}{\ln\frac{t_1}{t_2}} = \frac{\ln\frac{15A}{5A}}{\ln\frac{1ms}{10ms}} = -0.48 \quad (18)$$

$$a = \frac{ISOA(t_1)}{t_1^m} = \frac{15}{1^{-0.48}} = 15 \quad (19)$$

$$ISOA(t) = a * t^m = 15 * t^{-0.48} \quad (19)$$

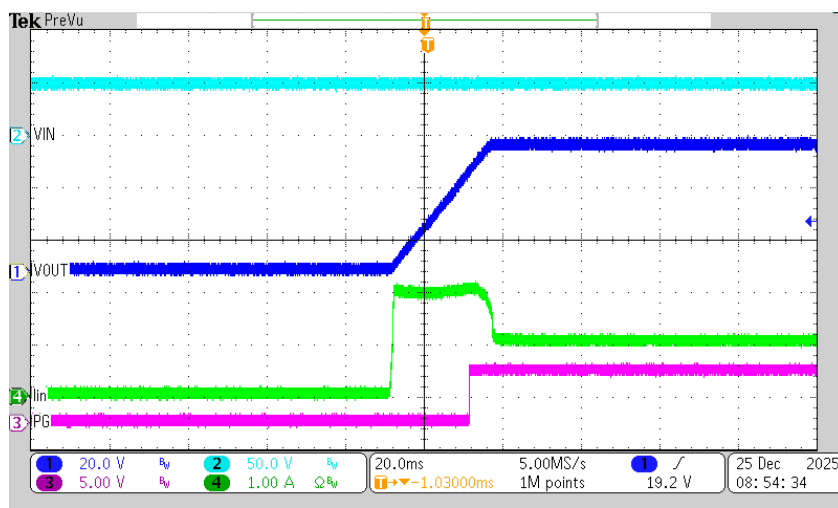
其中，t 的单位为 ms，ISOA 的单位为 A。24ms 软启时间对应的 ISOA 为

$$ISOA(24ms) = 15 * 24^{-0.48} = 3.26A \quad (20)$$

接下来考虑 MOSFET 的 SOA 的温度降额，

$$ISOA(24ms, 85^\circ C) = ISOA(24ms, 25^\circ C) \times \frac{T_{J_max} - 85^\circ C}{T_{J_max} - 25^\circ C} = 1.96A > 0.94A$$

注意 SOA 要留够 50% 的裕量即可。启动过程的波形如下，启动正常，验证了计算方法的可靠性。



DPO3054 - 11:55:32 2025/12/25

图 14 LM5066I 启动波形

6 小结

实际应用中，带载启动非常常见，除了会导致启动失败，还给 MOSFET 的 SOA 带来巨大挑战，因此必须对此进行研究。

本文以 LM5066I 为例，首先介绍了 Hotswap 的基本架构，然后研究了无外置软启动电路时无载启动和带载启动的启动时间计算方法，并给出 SOA 的评估办法。最后研究了有软启动电路时带载启动的启动时间计算方法，并给出 SOA 的评估办法。最后通过实验进行验证，本文弥补了 Hotswap 带载启动设计的空白，为设计者提供了不错的借鉴。

参考文献

- [1]. LM5066I Datasheet. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/LM5066I.pdf>
- [2]. Robust Hot Swap Design. <https://www.ti.com/lit/an/slva673a/slva673a.pdf>
- [3]. LM5066IIEVM-626 Evaluation Module (EVM). <https://www.ti.com/lit/ug/snvu444/snvu444.pdf>

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、与某特定用途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、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月