

TPS1685 启动性能研究

Nison Wang

North West China OEM Team

摘要

随着人工智能的迅猛发展，AI 服务器的需求也越来越旺盛。为提高效率，目前 AI 服务器主要采用 48V 电源架构，这为 eFuse 的设计带来了新的挑战，比如刚开始启动时 eFuse 两端的压差高达 48V，受到 eFuse 内部 MOSFET SOA 的限制，启动电流一般设计得较小，导致启动时间较长。如果强行把启动电流增大，轻则触发 OTP 导致启动失败，重则导致 eFuse 烧坏。

近期 TI 推出了 TPS1685 这款 48V 集成式 eFuse，其具有启动限流和 Thermal Foldback 机制，以保证启动过程的安全可靠，但是这会导致启动时间难以用常规方法计算，使得用户难以在设计之初判断是否可以满足系统时序要求。为解决此痛点，本文首先介绍了 TPS1685 的启动基本原理，然后给出了不同场景下的启动时间计算方法，最后通过实验测试提出了更优化的启动时间评估方法，从而为其他设计者提供借鉴。

目录

1	TPS1685 的启动基本原理.....	1
2	两种场景下的启动时间计算方法	2
3	TPS1685EVM 的启动测试.....	5
4	优化的启动时间评估方法.....	7
5	小结.....	10
	参考文献	10

图例

图 1 TPS1685 的典型应用电路	2
图 2 TPS1685EVM 启动波形 1	5
图 3 TPS1685EVM 启动波形 2	6
图 4 单个 TPS1685 独立工作时的实测启动时间	8
图 5 单个 TPS1685 独立工作的启动时间拟合	9
图 6 两个 TPS1685 并联的实测启动时间	9
图 7 两个 TPS1685 并联工作的启动时间拟合	10

1 TPS1685 的启动基本原理

图 1 是 TPS1685 的典型应用电路^[1]。为实现热插拔等应用，TPS1685 具有软启动功能，在 dVdT 引脚对 GND 加一个电容即可实现软启动。dVdT 引脚悬空可以实现最快的启动速度，但是 TI 建议最小的 dVdT 电容为 22nF，以减小浪涌电流。具体计算公式如下：

$$SR(V/ms) = \frac{48}{C_{DVT}(nF)}$$

$$I_{INRUSH}(A) = SR(V/ms) * C_{LOAD}(mF)$$

TPS1685 具有启动限流功能，以应对启动过流故障。启动限流的典型值为 0.5A，当启动时电流超过 0.5A 时，TPS1685 会将电流限制在 0.5A。并且，启动限流还具有 Thermal Foldback 机制，eFuse 温度越高，启动限流值越小，以保证 eFuse 可以安全完成启动。

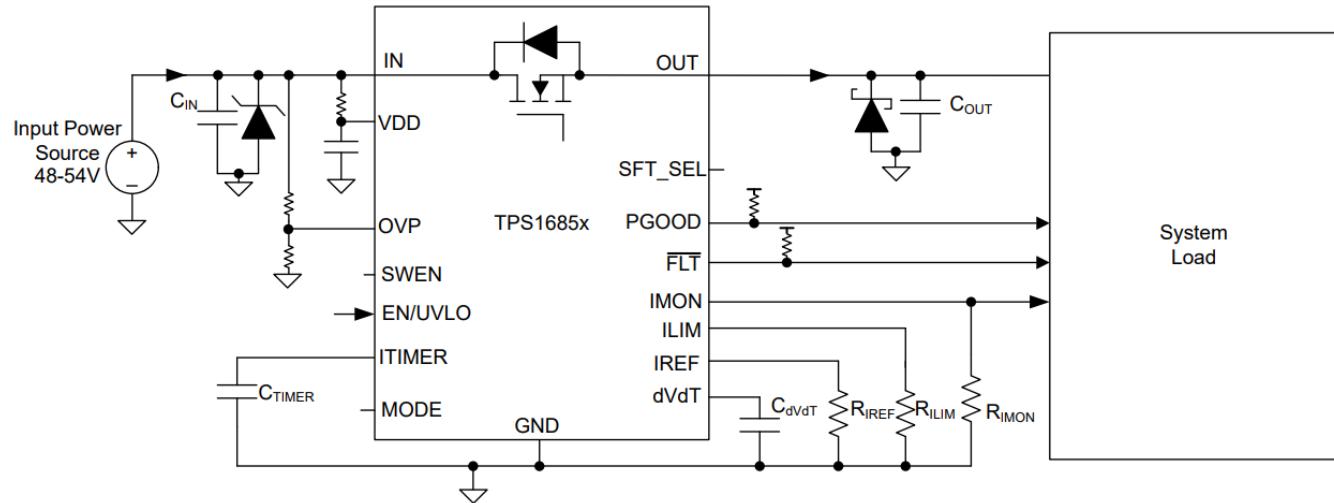


图 1 TPS1685 的典型应用电路

2 两种场景下的启动时间计算方法

在服务器中，时序控制至关重要，比如 NVIDIA 的 GPU 卡，其要求启动时间不超过 125ms。因此我们在设计时就需要对 eFuse 的启动时间进行计算，以确保其可以满足要求。本文分两种场景进行讨论：第一种为启动时未触发启动限流，第二种为启动时触发启动限流。第一种场景常见于输出电容较小，软启动电容较大的场合。第二种场景常见于输出电容较大，软启动电容较小的场合。对于第一种场景，其启动时间计算非常简单，直接使用以下公式即可。以 $V_{IN}=48V$, $C_{DVDT}=47nF$ 为例，启动时间计算结果为 47ms。

$$SR(V/ms) = \frac{48}{C_{DVDT}(nF)}$$

对于第二种场景，由于 Thermal Foldback 机制相对复杂，目前还没有任何技术文档有说明这种情况下启动时间应该如何计算。TI 产品线建议分为两个阶段进行计算，第一阶段为从进入 Thermal Foldback 直到电流降额为 100mA，第二阶段为启动限流稳定在 100mA。这里做了一个假设，即认为当启动限流为 100mA 时，eFuse 的功耗已经足够低，启动限流不会进一步衰减。第一阶段时间的经验公式为

$$t_1 \approx 0.4s * \ln \left(\frac{V_{IN}}{V_{IN} - 1V} \right)$$

第一阶段时间的初始时刻电流为

$$I_0 = SR(V/ms) * C_{LOAD}(mF) = \frac{48 * C_{LOAD}(mF)}{C_{DVDT}(nF)}$$

第一阶段时间的终止时刻电流为

$$I_{t1} = 0.1A$$

然后用平均值进行简化估算，因此第一阶段时间的平均电流为

$$I_{avg} = \frac{I_0 + I_{t1}}{2}$$

第一阶段时间终止时的输出电压为

$$V_{out_t1} = \frac{I_{avg} * t_1}{C_{LOAD}}$$

第二阶段启动限流值恒定为 100mA，因此计算较为简单，如下

$$t_2 = \frac{C_{LOAD} * (V_{IN} - V_{out_t1})}{0.1A}$$

启动总时间为

$$t_{start} = t_1 + t_2$$

以 $C_{LOAD}=3600\mu F$, $V_{IN}=48V$, $C_{DVDT}=47nF$ 为例，计算得

$$t_1 \approx 0.4s * \ln\left(\frac{V_{IN}}{V_{IN} - 1V}\right) = 8.42ms$$

$$I_0 = \frac{48 * C_{LOAD} (mF)}{C_{DVDT} (nF)} = \frac{48 * 3.6}{47} A = 3.68A$$

$$I_{avg} = \frac{I_0 + I_{t1}}{2} = \frac{3.68A + 0.1A}{2} = 1.89A$$

$$V_{out_t1} = \frac{I_{avg} * t_1}{C_{LOAD}} = \frac{1.89A * 8.42ms}{3600\mu F} = 4.42V$$

$$t_2 = \frac{C_{LOAD} * (V_{IN} - V_{out_t1})}{0.1A} = \frac{3600\mu F * (48V - 4.42V)}{0.1A} = 1.57s$$

$$t_{start} = t_1 + t_2 = 1.58s$$

可以发现，第一阶段的时间极短，几乎可以忽略，第二阶段占据了大部分的启动时长。在 $V_{IN}=48V$ 的情况下，随着 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 的变化，启动时间的计算结果如下。

表 1 不同 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 的启动时间计算结果 (100mA)

$C_{LOAD}(\mu F)$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=47nF$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=100nF$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=470nF$
200	91.62128	96.168	99.34213
300	135.3319	142.152	146.9132
400	179.0426	188.136	194.4843
550	244.6085	257.112	265.8409

750	332.0298	349.08	360.983
970	428.1932	450.2448	465.6393
1190	524.3566	551.4096	570.2957
1410	620.52	652.5744	674.952
1800	790.9915	831.912	860.4791
1900	834.7021	877.896	908.0502
2000	878.4128	923.88	955.6213
2100	922.1234	969.864	1003.192
2200	965.834	1015.848	1050.763
2350	1031.4	1084.824	1122.12
2550	1118.821	1176.792	1217.262
2770	1214.985	1277.957	1321.918
2990	1311.148	1379.122	1426.575
3210	1407.311	1480.286	1531.231
3600	1577.783	1659.624	1716.758

如果假设当启动限流为 60mA 时, eFuse 的功耗已经足够低, 启动限流不会进一步衰减。在 $V_{IN}=48V$ 的情况下, 随着 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 的变化, 启动时间的计算结果如下。

表 2 不同 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 的启动时间计算结果 (60mA)

$C_{LOAD}(\mu F)$	$t_{start}(ms)@C_{DVDT}=47nF$	$t_{start}(ms)@C_{DVDT}=100nF$	$t_{start}(ms)@C_{DVDT}=470nF$
200	149.8781	157.474	162.7768
300	222.7121	234.106	242.0602
400	295.5462	310.738	321.3436
550	404.7972	425.686	440.2687
750	550.4653	578.95	598.8355
970	710.7002	747.5404	773.259
1190	870.9351	916.1308	947.6825
1410	1031.17	1084.721	1122.106
1800	1315.223	1383.586	1431.311
1900	1388.057	1460.218	1510.595
2000	1460.891	1536.85	1589.878
2100	1533.725	1613.482	1669.161
2200	1606.559	1690.114	1748.445
2350	1715.81	1805.062	1867.37
2550	1861.478	1958.326	2025.937
2770	2021.713	2126.916	2200.36
2990	2181.948	2295.507	2374.784
3210	2342.183	2464.097	2549.207
3600	2626.236	2762.962	2858.413

3 TPS1685EVM 的启动测试

接下来基于 TPS1685EVM^[2]进行测试，以 $C_{LOAD}=3600\mu F$, $V_{IN}=48V$, $C_{DVDT}=47nF$ 为例，波形如图 2 所示。启动过程可以分为三个阶段，第一个阶段的输入电流首先按照 C_{DVDT} 的设定到达峰值，然后触发启动限流阈值（典型值为 0.5A），然后根据 Thermal Foldback 机制不断减小限流值，直到达到稳定状态。第二个阶段的输入电流为恒定值，保持在稳定状态。第三个阶段的输入电流缓慢翘起，这是因为随着输出电压的不断提高，TPS1685 内部 MOSFET 的 V_{DS} 不断下降，功耗减小，温度降低，Thermal Foldback 机制调控限流值慢慢增大。

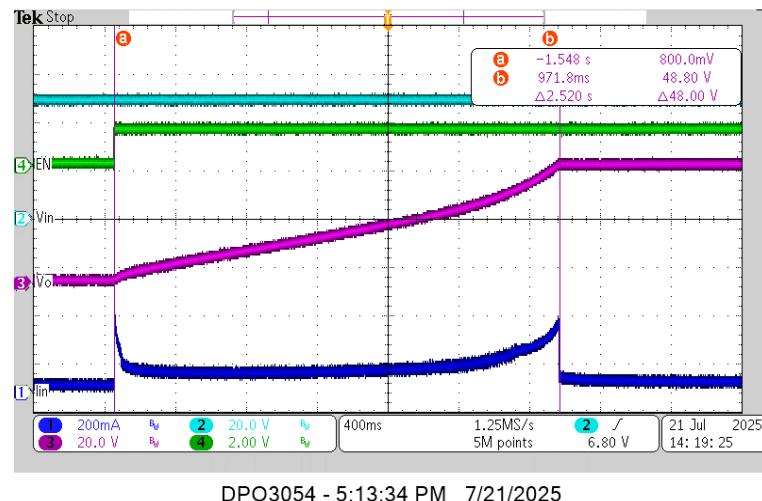


图 2 TPS1685EVM 启动波形 1

整个启动过程的时间为 2.52s，与上一章节的计算结果 1.58s 差异较大，这是因为上一章节假设启动限流会稳定在 100mA，但是图 2 中的启动限流稳定在了 60mA 左右，因此启动时间会变慢。值得强调的是，不同 PCB 板的散热条件不同，启动过程中的限流稳定值也会有所不同，但是对于同一块 PCB 板来说，可以认为其限流稳定值不变。

接下来基于 TPS1685EVM 测试不同 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 条件下的启动时间。表 3 为单个 TPS1685 独立工作时启动时间的测试结果。

表 3 单个 TPS1685 独立工作时不同 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 的启动时间测试结果

$C_{LOAD}(\mu F)$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=47nF$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=100nF$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=470nF$
200	46.8	100.0	492.2
300	66.4	100.0	492.2
400	87.82	100.0	492.2
550	149.2	142.2	492.2
750	225.2	174.2	492.2
970	352.9	346.2	496.2
1190	483.9	483.9	495.9

1410	627.9	631.9	643.9
1800	987.9	1028	1016
1900	1088	1120	987.9
2000	1224	1116	1120
2100	1180	1240	1144
2200	1248	1272	1292
2350	1360	1340	1480
2550	1336	1572	1448
2770	1712	1712	1764
2990	1916	1848	1860
3210	2128	2096	2080
3600	2520	2592	2400

可以发现：标绿的测试没有触发启动限流，其启动时间可以按照上一章节的第一种场景计算， $C_{DVDT}=47nF$ ， $100nF$ 和 $470nF$ 对应的理论启动时间为 $47ns$ ， $100ns$ 和 $470ns$ ，因此与实测结果还是比较吻合的。以 $C_{DVDT}=47nF$ ， $C_{LOAD}=200\mu F$ 为例，波形如图 3 所示，启动过程中输入电流维持恒定。因此，表 3 中的标绿数据无需与表 1 和表 2 中的数据进行对比，因为表 1 和表 2 的数据全都是基于触发启动限流计算的。未标绿的测试触发了启动限流，因此其启动时间比标绿测试更长，且输出电容越大，启动时间越长。在输出电容相同的情况下， C_{DVDT} 对启动时间的影响不大。

表 4 为两个 TPS1685 并联工作时启动时间的测试结果。同理，标绿测试没有触发启动限流，其数值与理论计算值比较吻合。对于触发启动限流的未标绿测试，可以发现与表 3 相比，表 4 的启动时间大大缩短，这是因为 TPS1685 具有启动均流特性，并联的启动限流值几乎是单个器件的两倍。

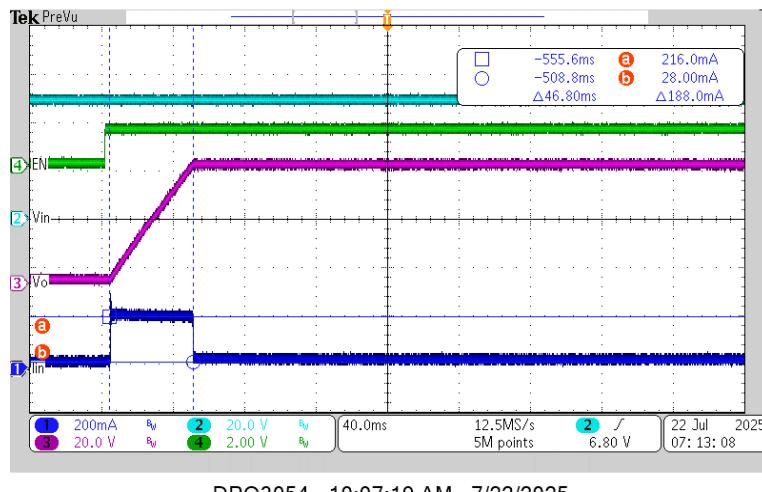


图 3 TPS1685EVM 启动波形 2

表 4 两个 TPS1685 并联工作时不同 C_{LOAD} 和 C_{DVDT} 的启动时间测试结果

$C_{LOAD}(\mu F)$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=47nF$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=100nF$	$t_{start}(ms) @ C_{DVDT}=470nF$
200	46.4	99.42	486.8
300	46.4	99.42	486.8
400	46.4	99.42	486.8
550	54.42	99.42	486.8
750	84.42	100.4	486.8
970	130.4	130.4	486.8
1190	173.4	179.4	486.8
1410	220.8	228.8	496.8
1800	392.8	342.8	492.8
1900	388.8	386.8	488.8
2000	418.8	378.8	472.8
2100	474.8	474.8	488.8
2200	488.8	498.8	514.8
2350	560.8	514.8	532.8
2550	562.8	544.8	600.8
2770	650.8	652.8	676.8
2990	762.8	746.8	780.8
3210	818.8	866.8	850.8
3600	987.8	1020	995.8

4 优化的启动时间评估方法

将表 3 中未标绿的数据与表 1 进行对比，发现差距较大，这说明第二章节针对第二种场景的计算方法不够精确，这是由限流值稳定在 100mA 的假设导致的。将表 3 中未标绿的数据与表 2 进行对比，发现差距小一些，但是依旧有误差。因此需要更为合理的启动时间评估方法，首先对表 3 中的数据绘制为图 4。可以发现在 C_{LOAD} 较大时，启动时间与 C_{LOAD} 几乎是线性关系，且与 C_{DVDT} 的关系不大。因此我们取 $C_{LOAD}=550\sim3600\mu F$ 的数据，将不同 C_{DVDT} 的启动时间进行平均，得到表 5。

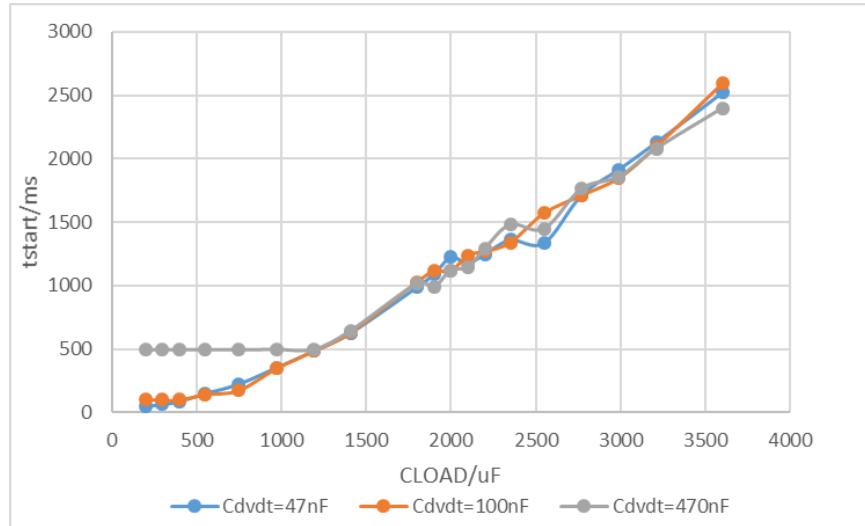


图 4 单个 TPS1685 独立工作时的实测启动时间

表 5 单个 TPS1685 独立工作时不同 C_{LOAD} 的启动时间平均值

$C_{LOAD}(\mu F)$	$t_{start_avg}(ms)$
550	145.7
750	199.7
970	349.6
1190	487.9
1410	634.6
1800	1010.6
1900	1065.3
2000	1153.3
2100	1188.0
2200	1270.7
2350	1393.3
2550	1452.0
2770	1729.3
2990	1874.7
3210	2101.3
3600	2504.0

使用在线曲线拟合工具^[3]对表 5 中的数据进行拟合，得到图 5，横轴为 C_{LOAD} ，单位为 μF ，纵轴为 t_{start} ，单位为 ms 。拟合方程式如下， t_{start} 单位为 ms ， C_{LOAD} 单位为 μF 。这样我们就可以得到任一 C_{LOAD} 对应的启动时间。

$$t_{start} = 0.768 * C_{LOAD} - 393$$

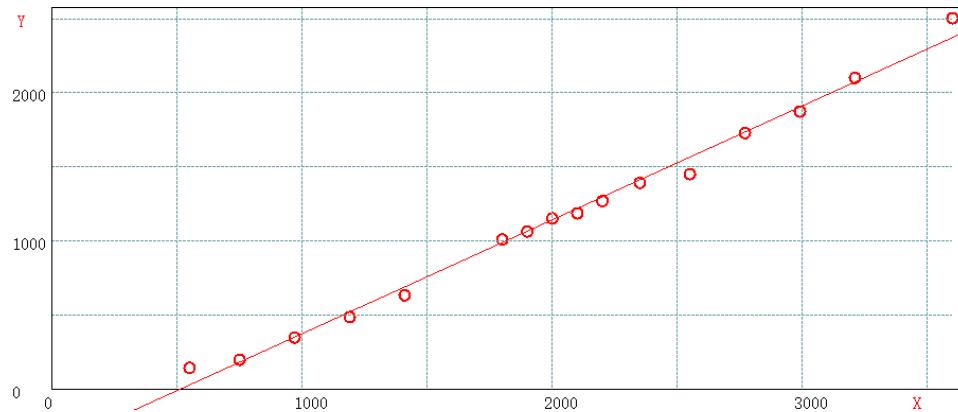


图 5 单个 TPS1685 独立工作的启动时间拟合

接下来研究 2 个 TPS1685 并联的情况。首先对表 4 中的数据绘制为图 6。可以发现在 C_{LOAD} 较大时，启动时间与 C_{LOAD} 几乎是线性关系，且与 C_{DVDT} 的关系不大。因此我们取 $C_{LOAD}=970\sim3600\mu F$ 的数据，将不同 C_{DVDT} 的值进行平均，得到表 6。

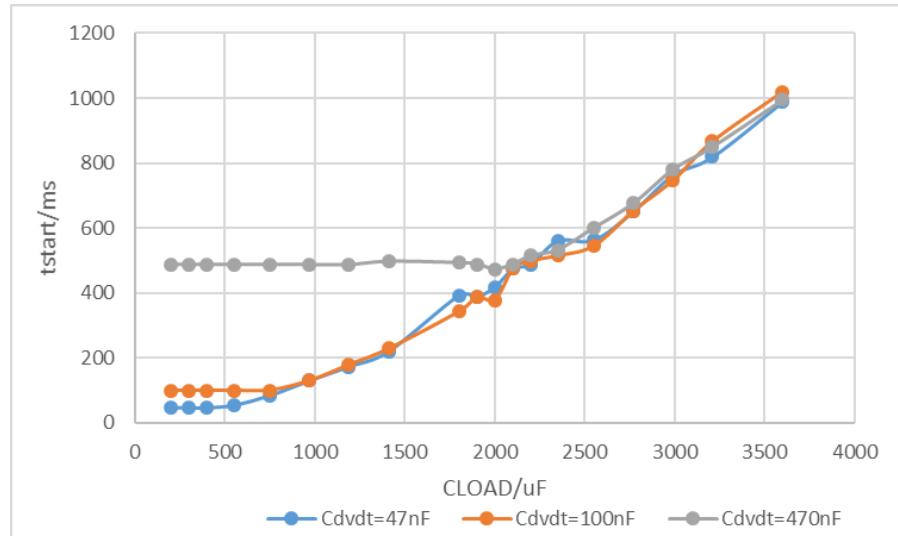


图 6 两个 TPS1685 并联的实测启动时间

表 6 两个 TPS1685 并联工作时不同 C_{LOAD} 的启动时间平均值

$C_{LOAD}(\mu F)$	$t_{start_avg}(ms)$
970	130.4
1190	176.4
1410	224.8
1800	367.8
1900	421.5
2000	423.5
2100	479.5
2200	500.8

2350	536.1
2550	569.5
2770	660.1
2990	763.5
3210	845.5
3600	1001.2

使用在线曲线拟合工具^[3]对表 6 中的数据进行拟合, 得到图 7, 横轴为 C_{LOAD} , 单位为 μF , 纵轴为 t_{start} , 单位为 ms。拟合方程式如下, t_{start} 单位为 ms, C_{LOAD} 单位为 μF 。这样我们就可以得到任一 C_{LOAD} 对应的启动时间。

$$t_{start} = 0.328 * C_{LOAD} - 221$$

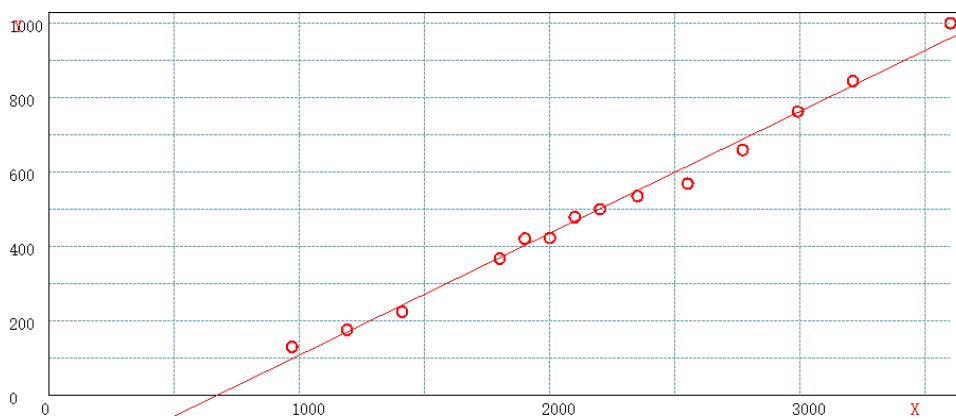


图 7 两个 TPS1685 并联工作的启动时间拟合

综上所述, 不管是单个 TPS1685 独立工作还是两个 TPS1685 并联的情况, 在启动限流的工况下, 都可以用 $t_{start}=A*C_{LOAD}+B$ 去估计其启动时间, A 和 B 与 TPS1685 的数量、Layout 以及 PCB 板的散热条件有关。并且, 可以发现两个 TPS1685 并联的 A 和 B 几乎是单个 TPS1685 的两倍。由于 TPS1685 启动时间与众多复杂因素息息相关, 难以量化, 本文建议用户直接参考本章节基于 EVM 的量化数据做前期评估使用。

5 小结

TPS1685 具有启动限流功能和 Thermal Foldback 机制, 在输出电容较大的场景, 其启动时间将无法按照规格书中的公式计算。本文介绍了产品线推荐的计算方法, 虽然计算简单但是误差较大。然后本文通过实测得到 TPS1685EVM 的启动数据, 进行曲线拟合就可以得到任何 C_{LOAD} 对应的启动时间。服务器系统中时序设计至关重要, 本文提供了不错的参考数据。

参考文献

- [1]. TPS1685 Datasheet. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps1685.pdf>
- [2]. TPS1685 Evaluation Module for eFuse. <https://www.ti.com/lit/ug/slvucw7a/slvucw7a.pdf>
- [3]. 在线曲线拟合方程. <https://www.qinms.com/webapp/curvefit/cf.aspx>

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出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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月