

# Technical White Paper

## 揭秘 LDO 开通 (启动) 时间



Stephen Ziel

### 摘要

本文全面讨论了影响现代 LDO 稳压器总启动时间的因素。本文档对于采用降噪 (NR) 滤波器、前馈 (FF) 电容器 ( $C_{FF}$ ) 的许多现代 LDO 稳压器，介绍了一种用于计算其开通斜坡时间的全新数学基础。设计人员可以使用这套全新分析框架对 LDO 稳压器的开通时间进行统计计算。此分析有助于评估器件的最短和最长开通时间以及预期浪涌电流。如果要求设计在启动过程中必须满足最大压摆率要求 (或上升速率要求)，也可以使用这套全新分析框架来确认启动斜率是否符合系统要求。

### 内容

1 线性稳压器开通时间简介.....	2
2 是什么影响了 LDO 的上升时间?.....	2
2.1 简单用例.....	3
2.2 具体用例和示例.....	9
3 系统注意事项.....	12
3.1 浪涌电流计算.....	12
3.2 浪涌电流分析.....	13
3.3 最大压摆率.....	13
4 总结.....	14
5 结语.....	15
6 参考资料.....	16

### 商标

E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 线性稳压器开通时间简介

LDO 稳压器的开通时间 ( $t_{ON}$ ) 是延迟时间 ( $t_D$ ) 和上升时间 ( $t_R$ ) 的总和 ( 请参阅 [方程式 1](#) 和 [图 1-1](#) )。延迟时间定义为从输出电压相对于外部激励开始上升到输出电压实际开始上升的固定延迟时间。如果 LDO 稳压器带有使能引脚, 则外部激励通常发生在切换使能电压以开启 LDO 稳压器之时。这种行为假定输入电压已加到 LDO 稳压器的输入端。对于不带 EN 引脚的 LDO 稳压器, 输入电压充当外部激励。

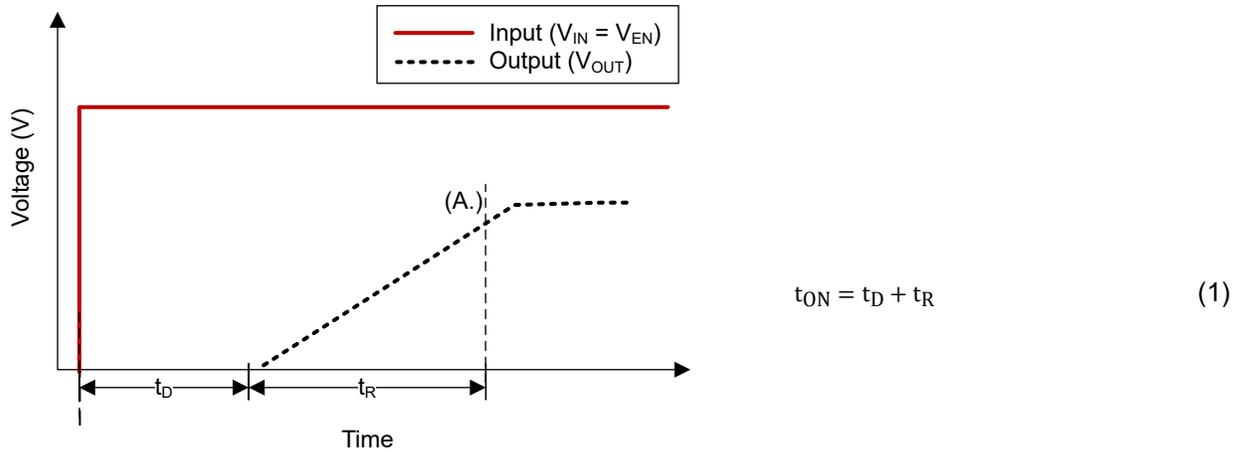


图 1-1. 总开通时间与输入电压之间的关系

A. 最低  $V_{OUT}$  稳压

与上升时间相比, LDO 稳压器的延迟时间通常较短。延迟时间取决于器件启动内部电路并开始增加输出电压的速度。LDO 稳压器数据表提供了延迟时间的最佳估计值, 因为在器件启用后, 外部电路对延迟时间几乎没有影响。上升时间是指将输出电压从 0V 提升到最小稳压值所需的时间。每种应用的稳压值各不相同, 因此最小稳压值要根据具体应用而定。例如, 一种设计可能允许  $\pm 3\%$  的容差, 而另一种设计可能允许  $\pm 5\%$  的容差。因此, 对于容差要求较宽的设计, 开通时间会更快。

## 2 是什么影响了 LDO 的上升时间?

线性稳压器基准可以使用精密电压源 ([图 2-1](#)) 或精密电流源 ([图 2-2](#))。线性稳压器开通时间受基准电压的开通或反馈环路中  $R_{TOP}$  和  $C_{FF}$  形成的 RC 时间常数的影响。通常情况下, 基准电压的启动速度非常快, 但在现代 LDO 稳压器中, 基准电压也可通过低通降噪 (NR) 电阻器和电容器进行滤波。

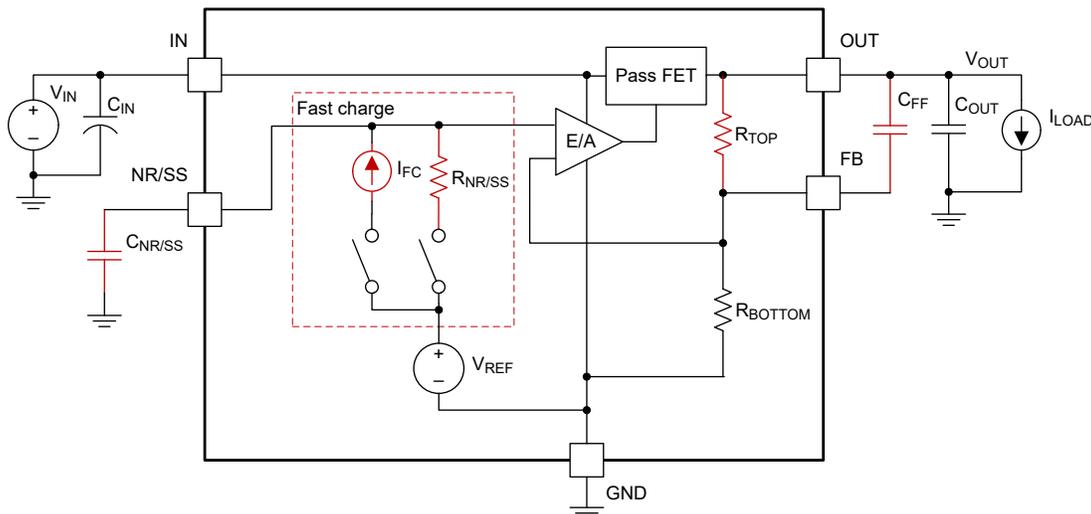


图 2-1. 精密电压基准

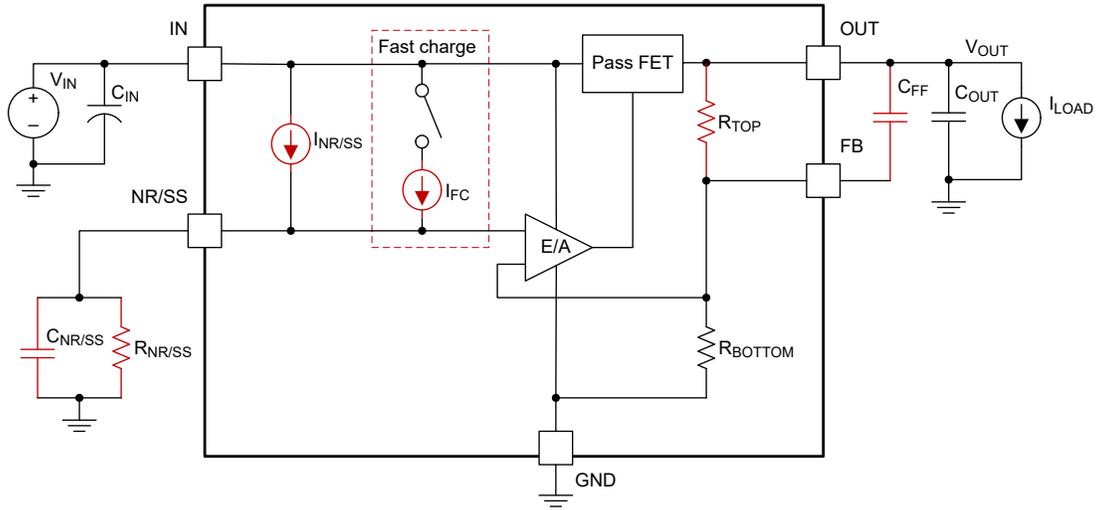


图 2-2. 精密电流基准

$R_{TOP}$  电阻两端的电压根据  $V_{REF}$  和  $R_{TOP}$  上的 RC 时间常数发生斜坡变化。方程式 2 表示 NR/SS 时间常量，方程式 3 表示 FF 时间常量。

$$\tau_{NR/SS} = R_{NR/SS} \times C_{NR/SS} \quad (2)$$

$$\tau_{FF} = R_{TOP} \times C_{FF} \quad (3)$$

在开通过程中， $V_{OUT}$  引脚上的电压是  $R_{BOTTOM}$  电阻器上的电压（或  $V_{FB}$ ）与  $R_{TOP}$  电阻器上的电压（或  $V_{TOP}$ ）的总和，如方程式 4 所示：

$$V_{OUT}(t) = V_{TOP}(t) + V_{FB}(t) \quad (4)$$

在开通过程中，基准电压的斜坡速度对于稳压器足够快，相对于更长的  $\tau_{NR/SS}$  时间常数，它近似于一个瞬时阶跃函数。当 LDO 稳压器的基准是精密电压源时，使用方程式 5 表示  $V_{FB}(t)$ ，当 LDO 稳压器是精密电流源时，则改用方程式 6 表示。

$$V_{FB}(t) = V_{REF} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{NR/SS}}}\right) \quad (5)$$

$$V_{FB}(t) = I_{NR/SS} \times R_{NR/SS} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{NR/SS}}}\right) \quad (6)$$

由于  $V_{FB}(t)$  并不总是阶跃函数，因此顶部设定点电阻上的电压计算起来更为复杂。当  $\tau_{NR/SS}$  和  $\tau_{FF}$  值相当时，两个时间常数都不会决定开通时间的计算。使用拉普拉斯变换和部分分式展开 [1 和 17]，得出  $V_{TOP}(t)$ ，如方程式 7 所示。

$$V_{TOP}(t) = V_{REF} \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \left(1 - \frac{\tau_{NR/SS}}{\tau_{NR/SS} - \tau_{FF}} \times e^{-t/\tau_{NR/SS}} - \frac{\tau_{FF}}{\tau_{FF} - \tau_{NR/SS}} \times e^{-t/\tau_{FF}}\right) \quad (7)$$

## 2.1 简单用例

当  $\tau_{NR} \gg \tau_{FF}$ ，或当 LDO 稳压器以单位增益反馈方式运行时（当  $R_{TOP} = 0 \Omega$  时），开通时间由  $\tau_{NR}$  决定，方程式 8 表示  $V_{OUT}(t)$ 。

$$V_{OUT}(t) \cong V_{FB}(t) \times \left(\frac{R_{TOP} + R_{BOTTOM}}{R_{BOTTOM}}\right) \quad (8)$$

当  $\tau_{NR} \ll \tau_{FF}$ ，方程式 7 可简化为方程式 9：

$$V_{TOP}(t) \cong V_{REF} \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \left(1 - e^{-t/\tau_{FF}}\right) \quad (9)$$

### 2.1.1 情况 1：带 NR 滤波器但不带 C<sub>FF</sub> 电容的 LDO

图 2-3 展示了 TPS7A20 [8]。此分析使用方程式 5 和方程式 8 来计算开通时间。

方程式 10 使用 10% 至 90% 的时间测量指标 (t<sub>10%-90%</sub>) 计算 RC 电路的 tau。使用方程式 5、方程式 8 和方程式 10 计算 t<sub>R</sub>，以满足图 1-1 中的稳压范围要求。测得的图 2-3 开通时间为 258.7μs，对于 TPS7A20 来说，相当于 τ = 117μs。

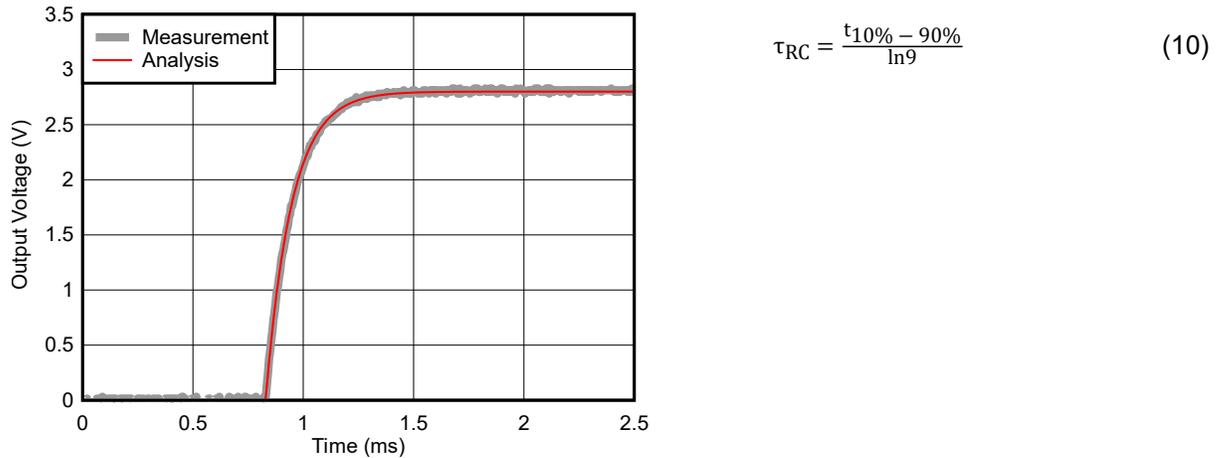


图 2-3. TPS7A20 开通时间

### 2.1.2 情况 2：带 C<sub>FF</sub> 电容的 NR 滤波器

图 2-4 显示了 TPS7A49 开通分析与实际测量的对比。此分析使用方程式 4、方程式 5 和方程式 7 来计算启动时间。R<sub>TOP</sub> = 11.5kΩ、R<sub>BOTTOM</sub> = 1.02kΩ、C<sub>FF</sub> = 100nF。

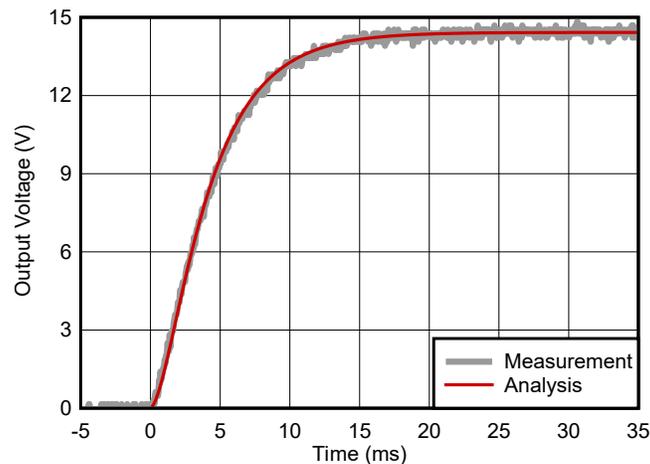


图 2-4. 输出电压与时间之间的关系

### 2.1.3 快速充电电路

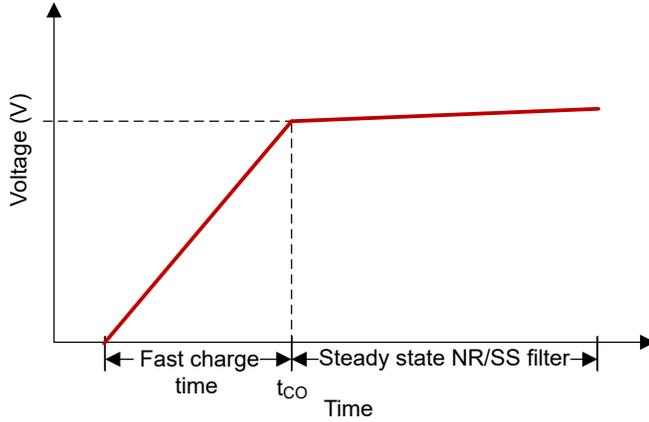
NR/SS 滤波器可明显提高 LDO 稳压器中的电源抑制比 (PSRR)，降低噪声 [21]。

对于某些应用，NR/SS 滤波器的时间常数可能会导致开通时间超过预期。现代 LDO 稳压器可能带有快速充电电路，用于缩短经滤波的基准电源的开通时间，进而缩短产生输出电压的时间。在使用稳态滤波器值时，当 V<sub>NR/SS</sub> 测量值小于转换电压 (V<sub>CO</sub>) 时，快速充电电路运行。

图 2-5 显示了使用快速充电的 LDO 稳压器的典型开通行为。

对于使用电压基准的 LDO 稳压器，快速充电电路可以是并联电阻器，也可以是与 NR/SS 电阻器并联的电流源，如图 2-1 所示。对于使用电流基准的 LDO 稳压器，快速充电电路会将 I<sub>REF</sub> 电流修改为更大的值，如图 2-2 所示。方程式 11 计算转换电压发生的时间 (t<sub>CO</sub>)。将 τ = t<sub>CO</sub> 输入到方程式 7，产生转换电压事件后 V<sub>TOP</sub> 上的初始条件 (V<sub>CO\_FF</sub>)。

如果 R<sub>NR/SS</sub> 上跨接有快速充电电流源，则使用方程式 12 而不是方程式 11 来计算 t<sub>CO</sub>。



$$t_{CO} = -\tau_{NR/SS} \times \ln\left(1 - \frac{V_{CO}}{V_{REF}}\right) \quad (11)$$

$$t_{CO} = -\tau_{NR/SS} \times \ln\left(1 - \frac{V_{CO}}{V_{REF} + I_{FC} \times R_{NR/SS}}\right) \quad (12)$$

图 2-5. 转换电压与时间之间的关系

V<sub>CO</sub> 的常见值是 V<sub>REF</sub> 的 95% 到 97%。在快速充电期间，使用方程式 5 或方程式 6 计算 V<sub>FB</sub>(t)，在快速充电完成后，改用方程式 13 计算。

$$V_{FB}(t) = V_{REF} + (V_{CO} - V_{REF}) \times \left(e^{-\frac{t - t_{CO}}{\tau_{NR/SS}}}\right) \quad (13)$$

如果 LDO 使用精密电流源 (如图 2-2 中所示)，使用方程式 14 计算。

$$V_{REF} = I_{NR/SS} \times R_{NR/SS} \quad (14)$$

使用方程式 15 计算转换事件后的 V<sub>TOP</sub>。方程式 13 定义了 V<sub>FB</sub>(t)。

$$V_{TOP}(\tau) = V_{REF} \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \left[1 - e^{-\tau/\tau_{FF}}\right] + (V_{CO} - V_{REF}) \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \frac{\tau_{NR}}{\tau_{NR} - \tau_{FF}} \times \left[e^{-\tau/\tau_{NR}} - e^{-\tau/\tau_{FF}}\right] + V_{CO\_FF} \times e^{-\tau/\tau_{FF}} \quad (15)$$

## 2.1.4 非优选 LDO 行为

以下条件可能影响 LDO 稳压器的总开通时间。

### 2.1.4.1 外加电压偏置

一般来说，外加电压偏置对开通时间的影响较小。现代陶瓷电容器在发生电压偏置后，需要大量时间才会改变有效电容 [4]。典型 LDO 稳压器的开通时间很短，电压偏置的变化不会对 C<sub>NR/SS</sub> 和 C<sub>FF</sub> 电容产生有效影响。在极少数用例中，LDO 稳压器特意设计了较长的开通时间，且运行时不启用限流，这种情况属于例外。

### 2.1.4.2 快速充电电流容差

快速充电电流源具有容差，如果变化较大，会影响软启动时间。I<sub>FC</sub> 会因工艺容差、温度和 V<sub>IN</sub> 或 V<sub>BIAS</sub> 值而变化。

表 2-1 列出了 TPS7A91 数据表中的快速充电电流容差。

表 2-1. 电气规格

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$I_{NR/SS}$	$V_{NR/SS} = GND$ 、 $V_{SS\_CTRL} = GND$	4.0	6.2	9.0	$\mu A$
	$V_{NR/SS} = GND$ 、 $V_{SS\_CTRL} = V_{IN}$	65	100	150	

### 2.1.4.3 内部误差放大器失调电压

大多数 LDO 稳压器都经过微调，以获得尽可能精确的基准电压。然而，在某些情况下，软启动引脚可能未进行微调，从而导致在开通过程中系统中残留非微量失调电压。在这些情况下，开通过程会比预期稍快。

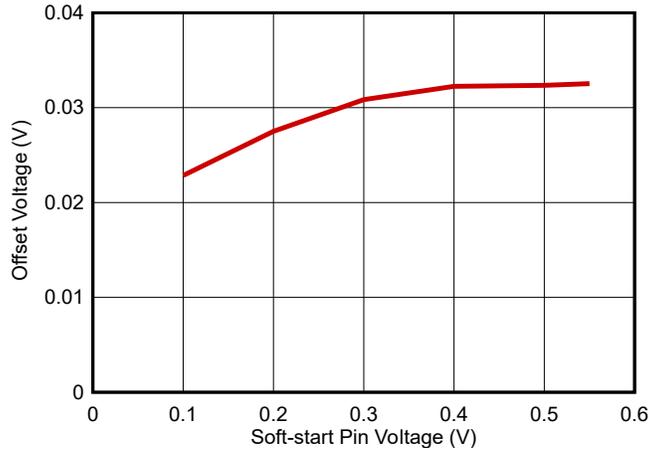
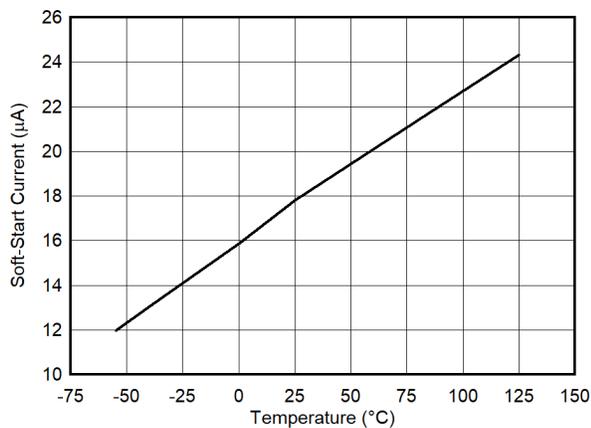


图 2-6. 开通过程中测得的 TPS7A74  $V_{Os}$

### 2.1.4.4 温度会影响快速充电电流源

LDO 稳压器在启动过程，由于器件对输出电容器  $C_{OUT}$  充电时会出现瞬态功率耗散，裸片温度会瞬间升高。结温的这种暂时升高会轻微改变某些器件中用作软启动电流源的与绝对温度成正比 (PTAT) 的电流源。器件数据表中通常会包含特性图和相关的测试条件，如图 2-7。在初始开通过期间，功率耗散较高，电流源会略有增加。在开通接近结束时，功率耗散会减小，电流源会减小。如图 2-8 所示，这种行为在启动波形中表现为轻微的弯曲。



$C_{IN} = C_{OUT} = 10 \mu F$        $C_{BIAS} = 1 \mu F$        $C_{SS} = 0nF$   
 $V_{BIAS} = V_{IN} = 6V$        $V_{OUT} = 0.65V$        $V_{EN} = 1.5V$   
 $I_{OUT} = 0A$       来自 TPS7A74 数据表

图 2-7. 软启动电流与温度间的关系

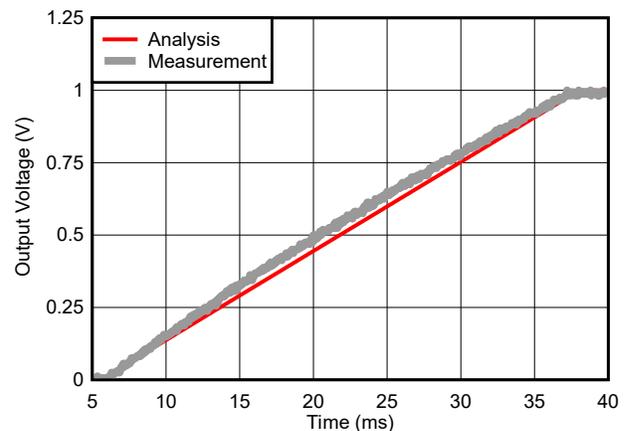


图 2-8. TPS7A74 直流输出电压与时间之间的关系

### 2.1.4.5 误差放大器共模电压

在较早的器件中，内部误差放大器的非优选共模电压 ( $V_{CM}$ ) 可能会导致 LDO 稳压器的开通响应突然出现阶跃。这种响应在大多数现代 LDO 稳压器中并不明显。带有这类感应阶跃响应的 LDO 稳压器斜坡时间更短，延迟时间更长。启动开始时小电压阶跃的斜率是 LDO 带宽的函数，每个 LDO 稳压器的带宽都不同。要获得该斜率，在施加系统负载后通过 EVM 采集测量值以获得更好结果。通过测量值可以更准确地评估器件带宽。

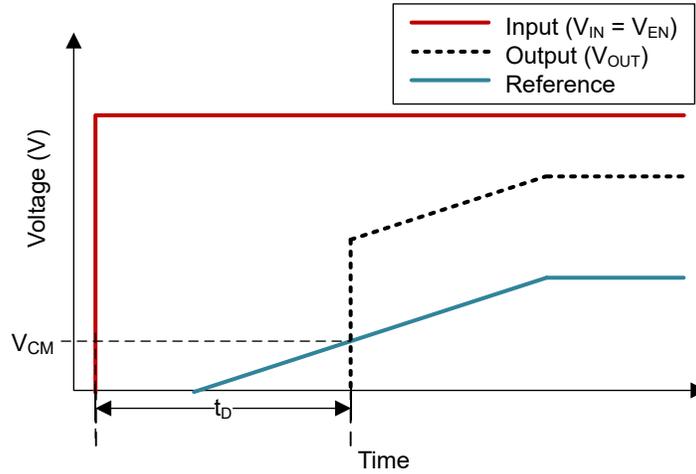


图 2-9.  $V_{CM}$  会影响开通时间

#### 2.1.4.6 基准电压 ( $V_{REF}$ ) 斜坡时间决定了开通时间

大多数现代 LDO 稳压器的基准电压开启速度比 NR/SS 和 FF 时间常数快得多。然而，在跟踪式 LDO 稳压器 [15] (参考电压位于 LDO 稳压器外部) 中，情况可能并非如此。图 2-11 和图 2-10 表示外加的基准电压和器件的相应输出电压。

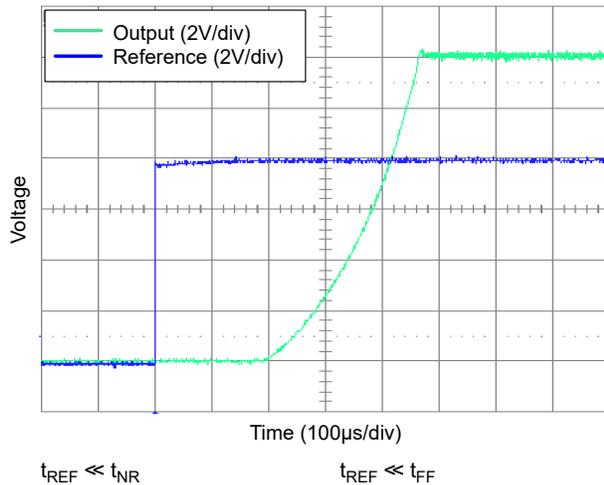


图 2-10. 快速开通时间与电压之间的关系

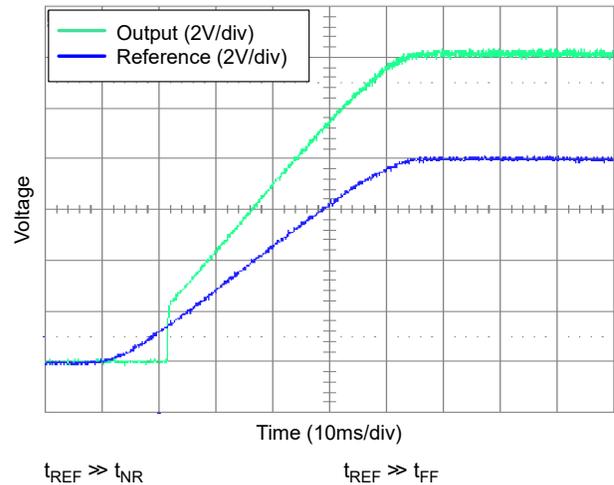


图 2-11. 慢速开通时间与电压之间的关系

#### 2.1.4.7 在压降模式下启动

当  $V_{IN}$  引脚和  $V_{EN}$  引脚连接在一起，且  $V_{IN}$  引脚电压缓慢增加时，LDO 在压降模式下运行，输出将以与  $V_{IN}$  引脚电压增加的相同速率增加。在压降模式下运行时启动，输出电压波形可能出现过冲 [20]。

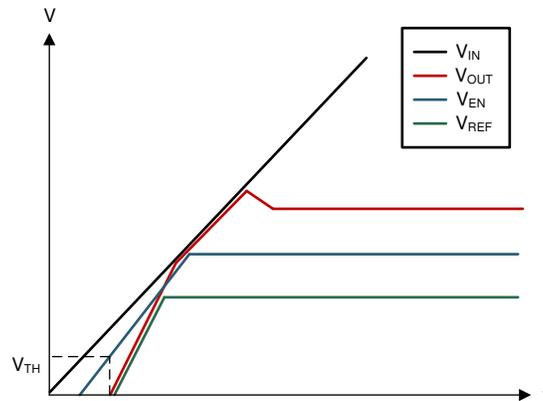


图 2-12. 通过过冲启动

#### 2.1.4.8 $C_{OUT}$ 值过大会导致内部限流

带有较大容性负载的 LDO 稳压器的开通时间可能导致器件限流。一般来说，LDO 稳压器的限流保护功能会在负载超过限流阈值  $20\mu\text{s}$  至  $50\mu\text{s}$  后启用。因此，前面的讨论适用于限流启用之前。限流启用后，LDO 近似于电流源，为输出电容器  $C_{OUT}$  充电。图 2-13 显示了为 TPS7A20 加载了较小 ( $1.4\mu\text{F}$ ) 的输出电容。虽然该器件在  $0.47\mu\text{F}$  和  $200\mu\text{F}$  负载电容范围内保持稳定，但在较高的负载电容值下运行可能会在启动期间触发限流，从而延长开通时间 (请参阅图 2-14)。

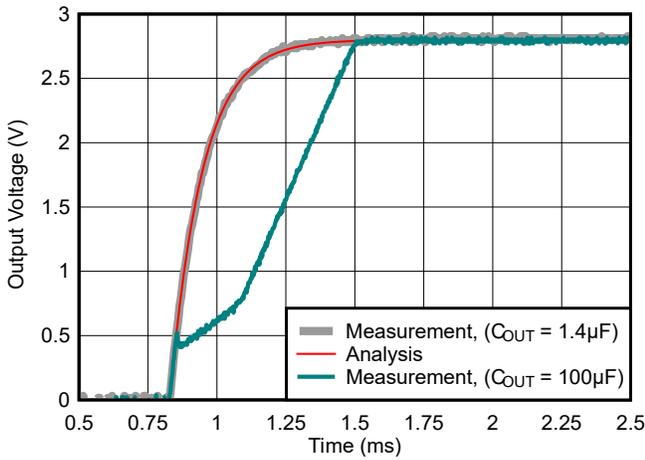


图 2-13. TPS7A20 开通对比

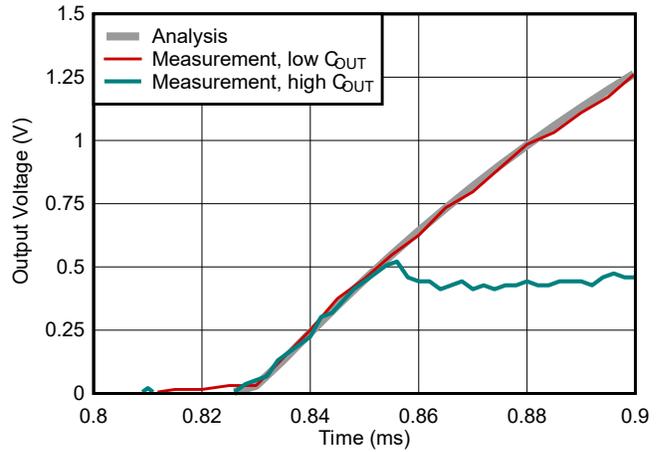


图 2-14. TPS7A20 限流功能在开通期间约 25µs 时启用

### 2.1.4.9 大信号 LDO 带宽的限制

在一些 LDO 稳压器中，内部误差放大器的带宽对开通时间有较大的影响。开通时间本质上是大信号行为，而某些器件中的误差放大器在响应此类行为时速度较慢。这种情况尤其出现在一些老旧器件（如 LM317 或 TLV1117）中，或者某些在基准电压和 NR/SS 滤波器之间存在放大器的器件（如 TPS7A47）中。为了获得更好结果，请查阅器件数据表，了解内部带宽限制 LDO 稳压器时，稳压器的预期开通时间。

## 2.2 具体用例和示例

### 2.2.1 情况 3：带 $R_{NR/SS}$ 和并联 $I_{FC}$ 快速充电的精密电压基准

如果图 2-1 描述的是 LDO 架构，且快速充电电路使用  $I_{FC}$ ，则在  $t > t_{CO}$  之后，方程式 6 可以改写为方程式 16。使用方程式 7 和方程式 11 至方程式 16 计算这些 LDO 稳压器的开通时间。 $I_{FC}$  与  $R_{NR/SS}$  并联，因此必须将方程式 7 中的  $V_{REF}$  修改为  $(V_{REF} + I_{FC} \times R_{NR/SS})$ 。

当  $t > t_{CO}$  时，使用方程式 13 计算  $V_{FB}(t)$ 。

当  $t \leq t_{CO}$  时，使用方程式 16 计算  $V_{FB}(t)$ 。

$$V_{FB}(t) = (V_{REF}(t) + I_{FC} \times R_{NR/SS}) \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{NR/SS}}}\right) \quad (16)$$

TPS7A91 使用精密电压基准、低通 NR 滤波器、可选外部  $C_{FF}$  电容器（位于  $R_{TOP}$  上），并包含恒流快速充电电路。用户可通过  $SS\_CTRL$  引脚选择快速充电电流。 $V_{CO}$  为  $V_{REF}$  的 97%。这些测量结果均使用了 EVM。

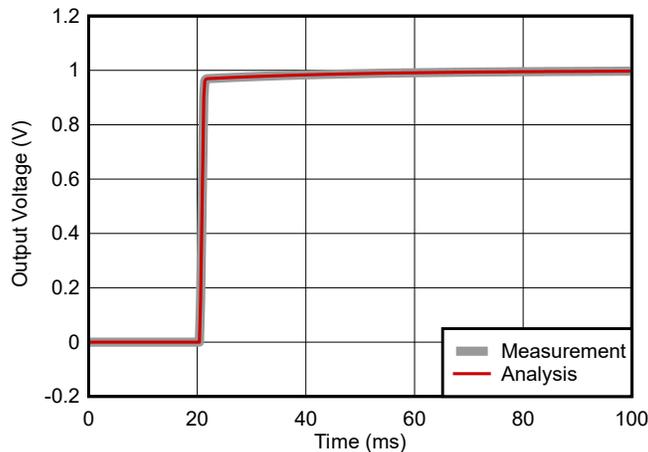


图 2-15. TPS7A49 开通时间

### 2.2.2 情况 4：带 $I_{FC}$ 快速充电但不带 $R_{NR/SS}$ 的精密电压基准

如果图 2-1 描述的是 LDO 架构，且快速充电电路仅使用  $I_{FC}$ （即  $R_{NR/SS}$  暂时断开），则在  $t < t_{CO}$  时，方程式 5 可以改写为方程式 17。使用方程式 11 至方程式 15 和方程式 17 至方程式 20 计算这些 LDO 稳压器的开通时间。

当  $t \leq t_{CO}$  时，使用方程式 17 和方程式 18 计算  $V_{FB}(t)$  和  $V_{TOP}(t)$ 。

当  $t > t_{CO}$  时，使用方程式 13、方程式 15、方程式 19 和方程式 20 计算  $V_{FB}(t)$  和  $V_{TOP}(t)$ 。

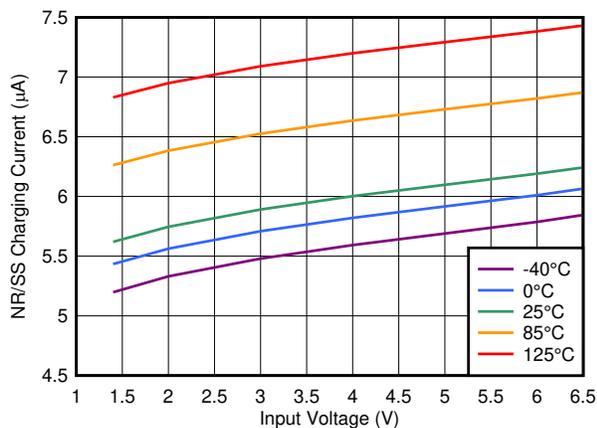
$$V_{FB}(t) = \frac{I_{FC}}{C_{NR/SS}} \times t \quad (17)$$

$$V_{TOP}(t) = V_{FB}(t) \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{FF}}}\right) \quad (18)$$

$$t_{CO} = C_{NR/SS} \times \frac{V_{CO}}{I_{FC}} \quad (19)$$

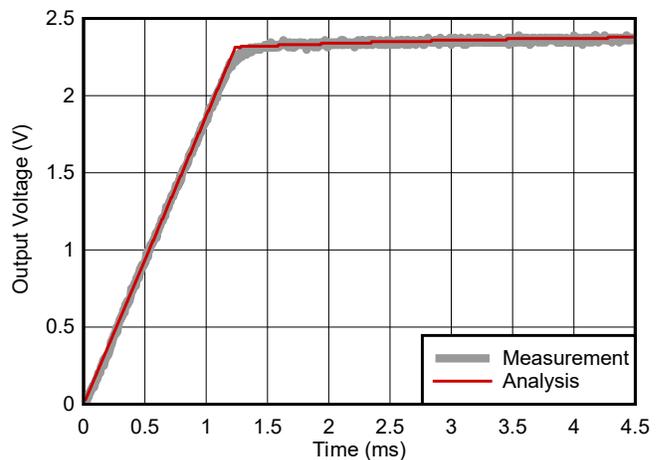
$$V_{CO\_FF} = V_{CO} \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \left(1 - e^{-t_{CO}/\tau_{FF}}\right) \quad (20)$$

TPS7A84A 使用精密电压基准、低通 NR 滤波器、外部  $C_{FF}$  电容器（位于  $R_{TOP}$  上），并包含恒流快速充电电路。TPS7A84A 数据表中的图 2-16 描述了快速充电电流与输入电压和温度的关系。 $V_{CO}$  为  $V_{REF}$  的 97%。 $C_{NR/SS}$  电容器的额定电压为 50V，有效电容几乎恒定为 9.6nF。这些测量结果均使用了 EVM。



来自 TPS7A84A 数据表  $V_{BIAS} = 0V$

图 2-16. 快速充电电流与输入电压之间的关系



TPS7A84A EVM  $V_{OUT} = 2.4V$

图 2-17. 直流输出电压与时间之间的关系

### 2.2.3 情况 5：精密电流基准

如果图 2-2 描述的是 LDO 架构，则  $V_{REF}$  可以写为方程式 21 或方程式 22。在快速充电期间的计算中使用方程式 5、方程式 7 和方程式 21。在转换事件发生后的计算中使用方程式 13、方程式 15、方程式 22 和方程式 23。

当  $t \leq t_{CO}$  时，使用方程式 21 计算  $V_{REF}$ 。

$$V_{REF} = I_{FC} \times R_{NR/SS} \quad (21)$$

当  $t > t_{CO}$  时，使用方程式 22 计算  $V_{REF}$ 。

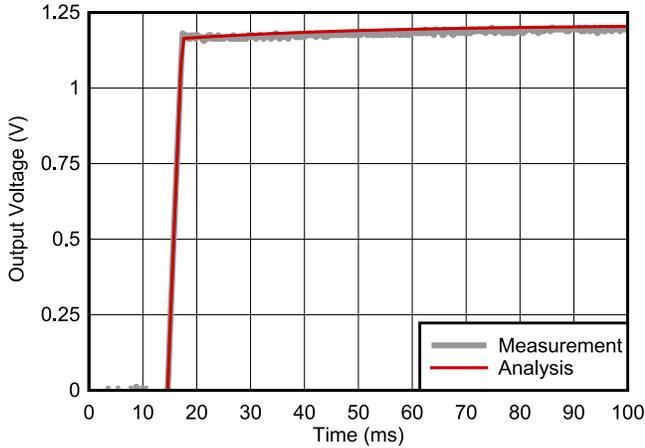
$$V_{REF} = I_{NR/SS} \times R_{NR/SS} \quad (22)$$

$$t_{CO} = -\tau_{NR/SS} \times \ln\left(1 - \frac{V_{CO}}{I_{FC} \times R_{NR/SS}}\right) \quad (23)$$

图 2-18 显示了 TPS7A96 ( 以及较低电流版本的 TPS7A94 ) 的上升时间, 该器件使用带 NR/SS 引脚的精密电流基准。在启动期间, LDO 使用快速充电电路快速启动  $V_{OUT}$ 。TPS7A94 和 TPS7A96 具有一个独特的特性, 即  $V_{CO}$  可通过 FB\_PG 引脚和外部电阻分压器进行编程。在此使用 EVM 的测试中,  $V_{CO}$  使用外部 FB\_PG 电阻器进行编程, 并设置为  $97\% \times V_{OUT} = 1.164V$ 。这些 LDO 稳压器以单位增益反馈方式运行, 因此  $V_{TOP} = 0V$ 。

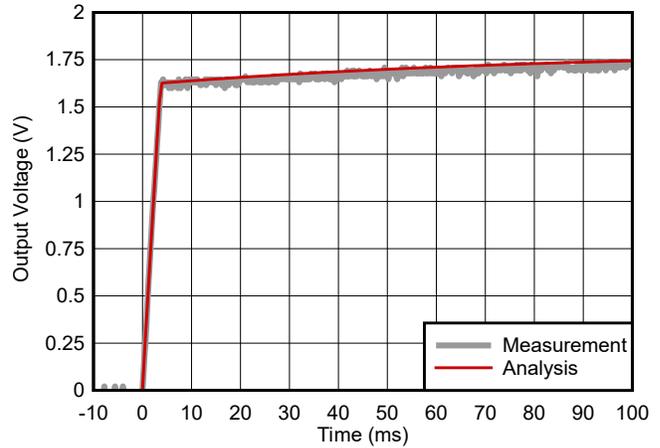
图 2-19 显示了 TPS7H1111 的上升时间, 该时间与 TPS7A94 和 TPS7A96 的上升时间相近, 只是 TPS7H1111 针对航天环境中的功率器件进行了优化。在此使用 EVM 的测试中,  $V_{CO}$  使用外部 FB\_PG 电阻器进行编程, 并设置为  $V_{OUT} = 1.626V$ 。这些 LDO 稳压器以单位增益反馈方式运行, 因此  $V_{TOP} = 0V$ 。

图 2-20 显示的是使用 TPS7A57 EVM 进行的测试。  $V_{CO}$  在内部设置为  $97\% \times V_{OUT} = 1.164V$ 。这些 LDO 稳压器以单位增益反馈方式运行, 因此  $V_{TOP} = 0V$ 。



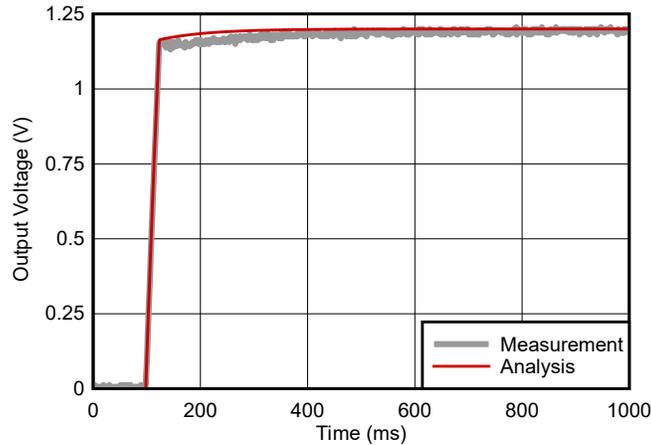
$R_{NR/SS} = 8.06k\Omega$        $V_{OUT} = 1.2V$   
 $I_{FC} = 2.1mA$        $I_{NR/SS} = 150\mu A$   
 $C_{NR/SS} = 4.7\mu F$       TPS7A96 EVM

图 2-18. TPS7A96 上升时间



$R_{NR/SS} = 18k\Omega$        $I_{FC} = 2.1mA$   
 $I_{NR/SS} = 100\mu A$        $V_{OUT} = 1.8V$   
 $C_{NR/SS} = 4.7\mu F$       TPS7H1111 EVM

图 2-19. TPS7H1111 上升时间



$R_{NR/SS} = 24k\Omega$        $I_{FC} = 200\mu A$   
 $I_{NR/SS} = 50\mu A$        $V_{OUT} = 1.2V$   
 $C_{NR/SS} = 3.8\mu F$       TPS7A57

图 2-20. TPS7A57 上升时间

## 2.2.4 情况 6 : 软启动时序

有些 LDO 稳压器使用软启动 (SS) 引脚启动, 该引脚与前面讨论的降噪和软启动 (NR/SS) 组合引脚不同。带有 SS 引脚的器件包括 TPS7A74、TPS74401 和 TPS748A。虽然 SS 引脚可设定  $V_{OUT}$  的上升时间, 但与 NR/SS

引脚不同，SS 引脚不会降低器件噪声。使用软启动引脚，并且假设未安装  $C_{FF}$ ，输出会通过跟踪外部软启动电容器的电压斜坡线性上升，直到电压超过内部基准电压。在这些 LDO 稳压器中，除了  $V_{CO} = V_{REF}$  外，其他分析和公式都与节 2.1.3 所示相同。

现代 LDO 稳压器经过微调，可在稳态期间提供出色的精度。但是，带有软启动引脚的器件在开通过程中目前无法进行微调，而且当  $V_{OS}$  不可忽略时，可能会影响开通过行为。这类行为包括启动时间（正  $V_{OS}$ ）比最初预期略短，以及在启动开始时输出电压出现一个小的电压阶跃。

当  $t > t_{CO}$  后，使用方程式 25 计算  $V_{CO\_FF}$ ，同时设置  $t = t_{CO}$ ， $V_{FB}(t) = V_{REF}$ 。

当  $t \leq t_{CO}$  时，使用方程式 24 和方程式 25。

当  $t > t_{CO}$  时、使用方程式 15 和方程式 19。

$$V_{FB}(t) = \left( \frac{I_{FC}}{C_{SS}} \times t \right) + V_{OS} \quad (24)$$

$$V_{TOP}(t) = V_{FB}(t) \times \left( \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \right) + \left( \frac{I_{FC}}{C_{SS}} \times \frac{R_{TOP}}{R_{BOTTOM}} \times \tau_{FF} \right) \times \left( e^{-t/\tau_{FF}} - 1 \right) \quad (25)$$

TPS7A74 使用带 SS 引脚的精密电压基准。TPS7A74 数据表中的图 6-37 说明了软启动电流随温度的变化 [12]。开通过程的失调电压如图 2-6 所示。分析中使用了  $V_{CO} = V_{REF}$ 、方程式 7、方程式 11 至方程式 14 和方程式 17 至方程式 20。根据电容器制造商提供的  $C_{SS} = 825\text{nF}$  的降额值，使用 EVM 进行测量。分析和测量结果之间的对比见图 2-8。

### 3 系统注意事项

#### 3.1 浪涌电流计算

使用前面的章节确定 LDO 稳压器的开通时间。使用方程式 26 计算利用了 LDO 稳压器输出端的负载产生的浪涌电流。浪涌电流是输出电流、输出电压上升时间和输出电容的函数。虽然 LDO 稳压器的静态电流确实会增加浪涌电流，但实际上这只是总浪涌电流中很小的一部分，通常可以在分析中忽略不计。

$$I_{INRUSH} = I_Q + I_{LOAD} + C_{OUT} \times V_{OUT}(t) \cong I_{LOAD} + C_{OUT} \times V_{OUT}(t) \quad (26)$$

随着浪涌电流增加，LDO 稳压器的温升也会暂时升高。在极少数情况下，如果浪涌电流非常高，内部键合线就会熔断 [3]。幸运的是，在绝大多数应用中，这都不是现代 LDO 稳压器的主要问题。大多数 LDO 稳压器的开通过程都足够快，结温不会明显升高，并使器件进入热关断模式。在大多数情况下，限流保护电路会在  $20\mu\text{s}$  至  $50\mu\text{s}$  内启用，防止异常大的浪涌电流熔断内部键合线。如果在限流保护电路启用之前存在强浪涌，则可通过 E2E 向德州仪器 (TI) 发送申请，要求检查熔断电流。因此，有关浪涌电流的大多数问题都是系统性的，例如输入电源可能出现断电，或输入电容  $C_{IN}$  因浪涌电流过大而出现压降。

图 3-1 显示了在三个位置 (A、B 和 C) 测得的浪涌电流。D 表示可选的阻尼网络。

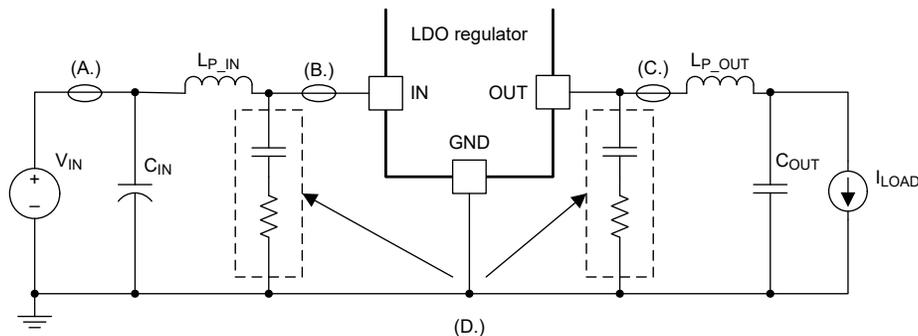


图 3-1. 浪涌电流探头测量位置

位置 A 是常用的测量点，但它可能无法准确反映通过 LDO 稳压器看到的真实浪涌电流。输入电容器  $C_{IN}$  为器件提供部分电流，因此测量点 A 显示的电流测量峰值较小，电流脉冲较长。

如果要捕捉通过 LDO 稳压器的整个浪涌电流，则位置 B 是首选测量点。与电流探头测量相关的电感 ( $L_{P\_IN}$ ) 通常会导致测量中出现过多振铃。可以安装可选的阻尼网络来消除大部分振铃，大幅简化测量。

位置 C 是最不可取的浪涌测量点。与电流环路相关的电感 ( $L_{P\_OUT}$ ) 会在开通测量期间产生过多的振铃，影响输出电压和输入电压的测量。添加阻尼网络可以提高测量的准确度，但电感可能会继续延长  $V_{OUT}$  引脚的启动时间。因此，即使安装了阻尼网络，在移除电流探头环路时，测量结果也可能无法反映器件的真实性能。

### 3.2 浪涌电流分析

如果知道开通过程的输出电容和负载，则可以使用前面的公式快速计算流经 LDO 稳压器的浪涌电流。图 3-3 介绍了使用 TPS7A20 的示例（请注意，该器件包含一个 NR 滤波器，它也能控制开通时间）。输出端安装了两个额定  $1\mu\text{F}$  的电容器，可提供  $1.4\mu\text{F}$  的有效电容。

图 3-3 介绍了使用 TPS7A84A 的示例。请注意，TPS7A84A 使用快速充电电流源（没有并联 NR 电阻器），并在 NR 滤波器中设置开关来实现稳态运行。分析中使用了  $C_{OUT} = 67\mu\text{F}$ ，峰值电流 ( $I_{PEAK}$ ) 完全在电容器的容差范围之内。

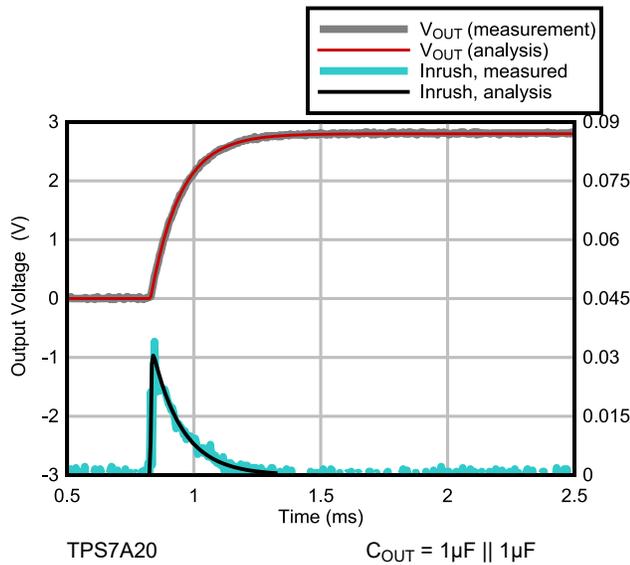


图 3-2. TPS7A20 开通和浪涌电流分析

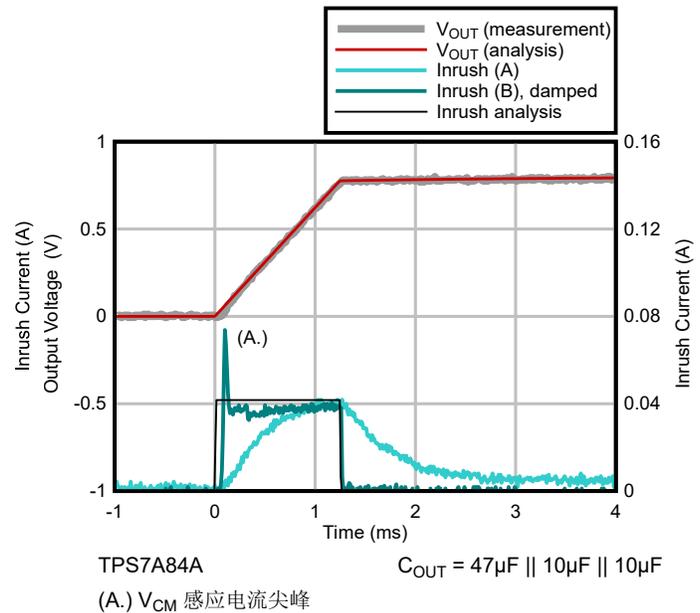


图 3-3. TPS7A84A 开通和浪涌电流分析

### 3.3 最大压摆率

在某些应用中，LDO 稳压器必须限制开通过程中的压摆率 [19]、[18] 和 [5]，实现此要求的最佳方法是调整  $C_{NR/SS}$  或  $C_{FF}$  电容。这些压摆率要求可在较窄的启动电压范围内执行，如 5V 输出的 2V 至 4V 之间，或在 0V 至稳态的整个电压范围内执行。一般来说，使用输出呈指数上升的器件比使用如图 3-4 所示的线性斜坡器件更难满足这些要求（如图 3-3 所示）。固定输出 LDO 稳压器的 NR 滤波器和反馈电阻器都在器件内部，要减慢其输出速度，唯一的办法就是增大输出电容  $C_{OUT}$ ，使限流环路在开通过程约  $20\mu\text{s}$  至  $50\mu\text{s}$  内启用。

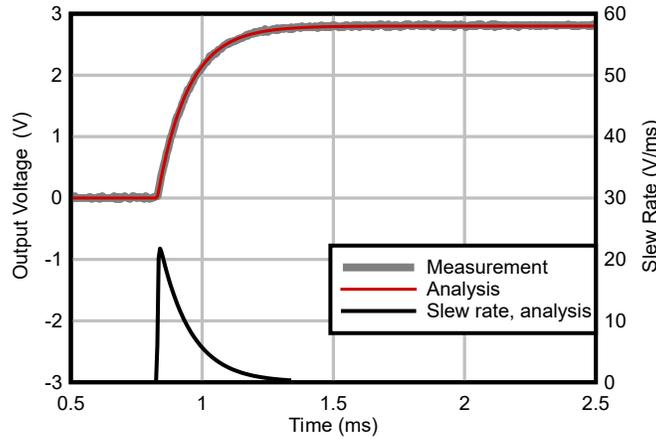


图 3-4. TPS7A20 输出电压压摆率

## 4 总结

表 4-1、表 4-2 和表 4-3 包括本白皮书中使用的体系结构用例摘要，包括：

- 了解这些用例中所使用架构类型的特性。
- 这些用例中所使用器件的示例。
- 这些用例中所使用的时间段和公式。
- 这些用例中所使用的关键参数。

表 4-1. 简单 架构用例 ( 无快速充电 )

用例	架构特性	示例器件	时间周期	要使用的公式	主要参数
用例 1 基本 NR 滤波器	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 精密电压基准</li> <li>• 无 <math>C_{FF}</math></li> </ul>	TPS7A20、TPS7A21	单个周期： $t \geq 0$	$V_{FB}(t)$ ：方程式 5 $V_{OUT}(t)$ ：方程式 8 $\tau$ 计算：方程式 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\tau_{NR/SS} = R_{NR/SS} \times C_{NR/SS}</math></li> <li>• <math>R_{TOP}</math>、<math>R_{BOTTOM}</math></li> <li>• 测量 <math>t_{10\%-90\%}</math></li> </ul>
用例 2 <sup>(1)</sup> NR + 前馈	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 精密电压基准</li> <li>• <math>C_{FF}</math> 已安装</li> </ul>	TPS7A13、TPS7A14、TPS7A49	单个周期： $t \geq 0$	$V_{FB}(t)$ ：方程式 5 $V_{TOP}(t)$ ：方程式 7 $V_{OUT}(t)$ ：方程式 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\tau_{NR/SS} = R_{NR/SS} \times C_{NR/SS}</math></li> <li>• <math>\tau_{FF} = R_{TOP} \times C_{FF}</math></li> <li>• 两个时间常数都很重要</li> </ul>

(1) 在前馈电容 ( $C_{FF}$ ) 非常小或无填充的情况下，这些器件使用案例 1 的分析运行。

表 4-2. 快速 充电模式下的 电压 基准

用例	架构特性	示例器件	时间周期	要使用的公式	主要参数
案例 3 并联快速充电	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 精密电压基准</li> <li>• NR/SS 滤波器</li> <li>• 快速充电： (<math>R_{NR/SS} // I_{FC}</math>)</li> <li>• 可选 <math>C_{FF}</math></li> </ul>	TPS7A91、TPS7A92	周期 1： $t \leq t_{CO}$ 周期 2： $t > t_{CO}$	周期 1： <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{FB}(t)</math>：方程式 5</li> <li>• <math>V_{TOP}(t)</math>：方程式 7</li> <li>• <math>t_{CO}</math>：方程式 11</li> </ul> 周期 2： <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{FB}(t)</math>：方程式 16</li> <li>• <math>V_{TOP}(t)</math>：方程式 15</li> <li>• <math>V_{CO\_FF}</math>：方程式 7，在 <math>t = t_{CO}</math> 时</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>V_{CO} = 0.95 - 0.97 \times V_{REF}</math></li> <li>• <math>I_{FC}</math> (快速充电电流)</li> <li>• 计算 <math>V_{CO\_FF}</math> 作为初始条件</li> </ul>

表 4-2. 快速充电模式下的电压基准 (续)

用例	架构特性	示例器件	时间周期	要使用的公式	主要参数
用例 4 开关式快速充电	<ul style="list-style-type: none"> <li>精密电压基准</li> <li>在快速充电期间, <math>I_{FC}</math> 会断开 <math>R_{NR/SS}</math></li> <li>需要 <math>C_{FF}</math></li> </ul>	TLV702、TLV703、TPS7A52、TPS7A53、TPS7A83A、TPS7A84A、TPS7A85A	周期 1: $t \leq t_{CO}$ 周期 2: $t > t_{CO}$	周期 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{FB}(t)</math>: 方程式 17</li> <li><math>V_{TOP}(t)</math>: 方程式 18</li> <li><math>t_{CO}</math>: 方程式 19</li> </ul> 周期 2 : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{FB}(t)</math>: 方程式 13</li> <li><math>V_{TOP}(t)</math>: 方程式 15</li> <li><math>V_{CO\_FF}</math>: 方程式 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>快速充电期间的线性斜率</li> <li><math>V_{FB}(t) = (I_{FC}/C_{NR/SS}) \times t</math></li> <li><math>V_{CO} = 0.97 \times V_{REF}</math> 典型值</li> </ul>

表 4-3. 备选参考架构

用例	架构特性	示例器件	时间周期	要使用的公式	主要参数
用例 5 电流基准	<ul style="list-style-type: none"> <li>精密电流基准</li> <li><math>R_{NR/SS}</math> 滤波器</li> <li>快速充电会修改 <math>I_{REF}</math></li> <li>可选 <math>C_{FF}</math></li> </ul>	TPS7A57、TPS7A94、TPS7A96、TPS7H1111-SP	周期 1: $t \leq t_{CO}$ 周期 2: $t > t_{CO}$	周期 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{REF}</math>: 方程式 21</li> <li><math>V_{FB}(t)</math>: 方程式 5 (将方程式 21 用于 <math>V_{REF}</math>)</li> <li><math>V_{TOP}(t)</math>: 方程式 7</li> <li><math>t_{CO}</math>: 方程式 23</li> </ul> 周期 2 : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{REF}</math>: 方程式 22</li> <li><math>V_{FB}(t)</math>: 方程式 13</li> <li><math>V_{TOP}(t)</math>: 方程式 15</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{REF} = I_{REF} \times R_{NR/SS}</math></li> <li>快速充电期间的 <math>I_{FC}</math></li> <li>稳定状态期间的 <math>I_{NR/SS}</math></li> <li><math>V_{CO}</math> 通过 FB_PG 进行编程</li> </ul>
仅限用例 6 软启动	<ul style="list-style-type: none"> <li>软启动引脚 (非 NR/SS)</li> <li>无降噪</li> <li>可选 <math>C_{FF}</math></li> <li><math>V_{OS}</math> 可能较大</li> </ul>	TPS7A74、TPS74401、TPS748A	周期 1: $t \leq t_{CO}$ 周期 2: $t > t_{CO}$  备注 $V_{CO} = V_{REF}$	周期 1 : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{FB}(t)</math>: 方程式 24</li> <li><math>V_{TOP}(t)</math>: 方程式 25</li> <li><math>t_{CO}</math>: 方程式 19 (设置 <math>V_{CO} = V_{REF}</math>)</li> </ul> 周期 2 : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>V_{FB}(t) : V_{REF}</math> (常量)</li> <li><math>V_{TOP}(t)</math>: 方程式 15</li> <li><math>V_{CO\_FF}</math>: 方程式 25, <math>t = t_{CO}</math> 时</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>C_{SS}</math> (非 <math>C_{NR/SS}</math>)</li> <li><math>V_{OS}</math> 失调电压 (请参阅节 2.1.4.3)</li> <li>具有偏移的线性斜率</li> <li>无 PSRR 改善</li> </ul>

## 5 结语

本文介绍了一种使用 NR 滤波器和/或前馈电容器进行 LDO 稳压器启动分析的框架。该框架包括快速充电电路的影响, 还介绍了 LDO 稳压器的两种内部精密基准 (电压基准和电流基准)。本文讨论了现代 LDO 稳压器的非偏好特性及其对 LDO 启动时间的影响。设计人员可以使用此框架计算开通斜坡时间和 LDO 浪涌电流, 还可以评估开通过程的输出电压压摆率, 从而确认 LDO 启动行为是否符合其系统要求。

## 6 参考资料

1. Lathi, B.P. (2000)。信号处理及线性系统。北京大学出版社。ISBN 978-0195219173。
2. Liu, Jason (2016)。电压跟踪 LDO 的各种应用，应用报告。德州仪器 (TI)。
3. Nöbauer, G. T. 和 Moser, H. (2000)。关于高级封装的 IEEE 事务中键合线和允许电流计算中的温度评估分析方法。IEEE 高级封装事务，23(3)，426 - 435。
4. Novak, I.、Williams, K.B.、Miller, J.R.、Blando, G. 和 Shannon, N. (2011)。电容器的直流和交流偏压依赖性，包括温度依赖性。DesignCon East 2011。
5. 德州仪器 (TI) (2025)。AM64x Sitara™ 处理器，数据表。
6. 德州仪器 (TI) (2025)。TPS74401 具有可编程软启动功能的 3.0A 超 LDO 稳压器，数据表。
7. 德州仪器 (TI) (2025)。TPS748A 具有可编程软启动功能的 1.5A 低压降线性稳压器，数据表。
8. 德州仪器 (TI) (2024)。TPS7A20 300mA、超低噪声、低  $I_Q$ 、高 PSRR LDO，数据表。
9. 德州仪器 (TI) (2023)。TPS7A96 2A 超低噪声、超高 PSRR RF 稳压器，数据表。
10. 德州仪器 (TI) (2023)。TPS7H1111-SP 和 TPS7H1111-SEP 1.5A 超低噪声、高 PSRR 耐辐射低压降 (LDO) 线性稳压器，数据表。
11. 德州仪器 (TI) (2022)。TPS7A57 5A、低  $V_{IN}$  (0.7V)、低噪声 ( $2.1\mu V_{RMS}$ )、高精度 (1%)、超低压降 (LDO) 稳压器，数据表。
12. 德州仪器 (TI) (2022)。TPS7A74 具有可编程软启动功能的 1.5A 低压降线性稳压器，数据表。
13. 德州仪器 (TI) (2020)。TPS7A84A 3A 高精度 (0.75%)、低噪声 ( $4.4\mu V_{RMS}$ ) LDO 稳压器，数据表。
14. 德州仪器 (TI) (2016)。TPS7A91 1A、高精度、低噪声 LDO 稳压器，数据表。
15. 德州仪器 (TI) (2016)，TPS7B4250-Q1 具有 5mV 跟踪容差的汽车类 50mA、40V 电压跟踪 LDO 数据表，数据表。
16. 德州仪器 (TI) (2015)。TPS7A49 36V、150mA 超低噪声正线性稳压器，数据表。
17. Thomas, R. E.、Rosa, A. J. 和 Toussaint, G. J. (2012)。线性电路的分析与设计 (第 7 版)。John Wiley & Sons。ISBN 978-1118065587。
18. TI E2E™ 论坛。
19. Traynham, Paul (2013)。克服最小 Vdd 斜率限制，应用手册。Renesas。
20. Zhang, Penn 和 Song, Jason (2020)。避免 LDO 启动过冲，应用报告。德州仪器 (TI)。
21. Ziel, Stephen (2024)。线性稳压器的提示、技巧和高级应用。德州仪器 (TI) 电源设计研讨会 SEM2600。

## 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