

## Design Guide: TIDA-050096

汽车级可扩展、高电流、并联  
参考设计

## 说明

该参考设计展示了并联 TPS7B7702-Q1 线性稳压器来实现幻象电源等常见应用所需的更高负载电流的两种方法。第一种方法使用外部运算放大器并联四个 TPS7B7702-Q1 通道，为负载提供高达 1.2A 的电流。该技术可扩展，可以并联更多线性稳压器通道来获得更大的电流。第二种方法使用镇流电阻器来并联两个 TPS7B7702-Q1 通道，可提供高达 500mA 的输出电流。

## 资源

TIDA-050096

设计文件夹

TPS7B7702-Q1

产品文件夹

OPA388-Q1

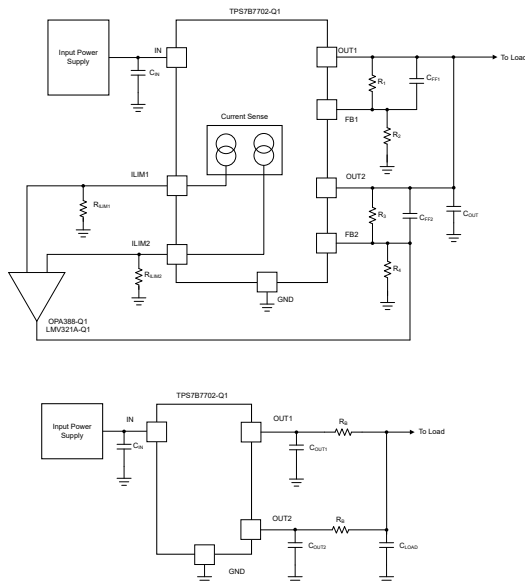
产品文件夹

LMV321A-Q1

产品文件夹



请咨询 TI E2E™ 支持专家

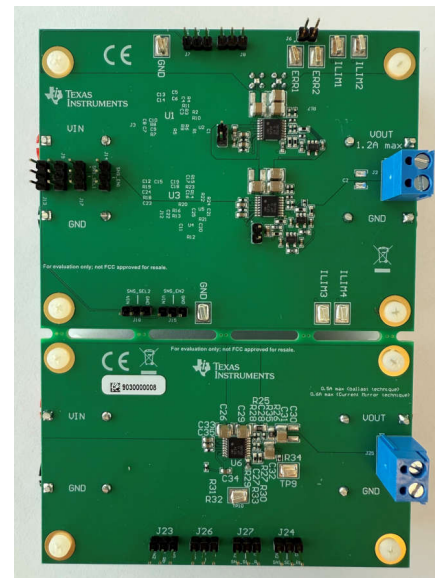


## 特性

- 输出电流：高达 500mA
  - 利用镇流电阻器和两个 TPS7B7702-Q1 线性稳压器通道
- 输出电流：可扩展
  - 利用运算放大器；使用四个 TPS7B7702-Q1 线性稳压器通道演示了 1.2A 电流能力
- 集成保护和诊断功能
- 4.5V 至 40V 宽输入电压范围，45V 负载突降
- 可调节电流限制（利用外部电阻器）

## 应用

- 数字驾驶舱处理单元
- 远程信息处理控制单元
- 环视系统 ECU
- 汽车音响主机
- 具有 ANC 的非升压音频放大器



## 1 系统说明

许多应用都需要低噪声低压降稳压器 (LDO)，以确保电源噪声不会耦合到信号链中。随着新传感器需要额外电流或组合不同的负载以节省空间，对 LDO 输出电流的要求不断提高。由于功率耗散限制或输出电流能力，使用单个 LDO 供电并不总是可行的。TIDA-050096 参考设计通过使用多个配置为并联共享电流的 LDO 解决了该问题。在此参考设计中有两种并联 TPS7B7702-Q1 的方法：

- 运算放大器**：第一种方法是利用运算放大器并联多个 TPS7B7702-Q1 通道。可利用多种运算放大器来并联 TPS7B7702-Q1，包括 OPA388-Q1 和 LMV321A-Q1。该参考设计中最多利用运算放大器并联四个 TPS7B7702-Q1 通道，为负载提供高达 1.2A 的电流，同时保持单个 TPS7B7702-Q1 通道的所有主要特性。该方法可以扩展到四个 LDO 通道以上；但是，利用该技术可并联放置的通道数量没有限制。
- 镇流电阻器**：第二种方法是利用镇流电阻器，这些镇流电阻器可以设计为印刷电路板 (PCB) 上的分立式电阻器或铜引线。在某些应用中，系统中固有的线束电阻也可用作所有镇流电阻的一部分。尽管利用该技术可并联的 TPS7B7702-Q1 LDO 通道数量理论上没有限制，但德州仪器 (TI) 建议将数量限制为两个通道。之所以这样建议，是因为由于反馈电阻器设置的增益，误差电压或每个单独 LDO 输出之间的差值<sup>[1]</sup>会随输出电压而增加。在较高电压下，增加的增益会放大误差电压，从而导致镇流电阻值更大，对于 TPS7B7702-Q1 可能会超过 1  $\Omega$ 。鉴于对负载调节的不利影响，增加镇流电阻的方法可能会不切实际。

### 1.1 主要系统规格

表 1-1. 主要系统规格 ( 利用运算放大器的并联 LDO )

参数	规格
输入电压范围	4.5V 至 40V
输出电压范围	1.5V 至 35V
针对输入电压优化, $V_{IN}$	12V
针对输出电压 $V_{OUT}$ 进行了优化	10V
最大输出电流	可扩展 利用运算放大器并联 2 个 TPS7B7702-Q1 通道可实现 600mA 的输出能力 利用运算放大器并联 3 个 TPS7B7702-Q1 通道可实现 900mA 的输出能力 利用运算放大器并联 4 个 TPS7B7702-Q1 通道可实现 1.2A 的输出能力
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 600mA 至 1.2A 至 600mA, 4 个并联通道, 1A/ $\mu$ s (典型值) <sup>(1)</sup>	+135mV <sub>PK</sub> / - 113mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 600mA 至 1.2A 至 600mA, 4 个并联通道, 0.1A/ $\mu$ s (典型值) <sup>(1)</sup>	+132mV <sub>PK</sub> / - 109mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 450mA 至 900mA 至 450mA, 1A/ $\mu$ s (典型值) <sup>(1)</sup>	+114mV <sub>PK</sub> / - 96mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 450mA 至 900mA 至 450mA, 0.1A/ $\mu$ s (典型值) <sup>(1)</sup>	+113mV <sub>PK</sub> / - 94mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 300mA 至 600mA 至 300mA, 1A/ $\mu$ s (典型值) <sup>(1)</sup>	+85mV <sub>PK</sub> / - 78mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 300mA 至 600mA 至 300mA, 0.1A/ $\mu$ s (典型值) <sup>(1)</sup>	+82mV <sub>PK</sub> / - 79mV <sub>PK</sub>
负载调整率	+16.7mV/A

(1) 每个 TPS7B7702-Q1 LDO 在 OUT 引脚上都有连接至 GND 的 10 $\mu$ F 陶瓷电容器。

表 1-2. 主要系统规格 ( 利用镇流电阻器的并联 LDO )

参数	规格
输入电压范围	4.5V 至 40V
输出电压范围	1.5V 至 35V
针对输入电压优化, $V_{IN}$	12V
针对输出电压 $V_{OUT}$ 进行了优化	10V
最大输出电流 <sup>(1)</sup>	500mA ( 利用镇流电阻器的 2 个 TPS7B7702-Q1 <sup>(2)</sup> 通道 )
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 300mA 至 600mA 至 300mA, $C_{FF}$ = 未安装, 1A/ $\mu$ s ( 典型值 ) <sup>(1)</sup>	+135mV <sub>PK</sub> / - 326mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 300mA 至 600mA 至 300mA, $C_{FF}$ = 22nF, 1A/ $\mu$ s ( 典型值 ) <sup>(1)</sup>	+28mV <sub>PK</sub> / - 226mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 300mA 至 600mA 至 300mA, $C_{FF}$ = 未安装, 0.1A/ $\mu$ s ( 典型值 ) <sup>(1)</sup>	+139mV <sub>PK</sub> / - 323mV <sub>PK</sub>
$V_{OUT}$ 瞬态偏差, 300mA 至 600mA 至 300mA, $C_{FF}$ = 22nF, 0.1A/ $\mu$ s ( 典型值 ) <sup>(1)</sup>	+29mV <sub>PK</sub> / - 223mV <sub>PK</sub>
镇流电阻器	1.33 $\Omega$
负载调整率	-662mV/A

- (1) 理论上, 利用镇流电阻器可并联的 LDO 通道数量没有限制。参考电压在并联 LDO 中是一个显著的误差源, 虽然内部基准在 TPS7B7702-Q1 封装内的两个 LDO 通道之间共享, 但独立的 TPS7B7702-Q1 封装并非如此。因此, TI 建议在利用镇流电阻器技术时将并联 TPS7B7702-Q1 LDO 通道的数量限制为两个。
- (2) 每个 TPS7B7702-Q1 LDO 在 OUT 引脚上都有连接至 GND 的 10 $\mu$ F 陶瓷电容器, 位于镇流电阻器之前。在镇流电阻器之后还有一个额外的 10 $\mu$ F 陶瓷电容器。

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

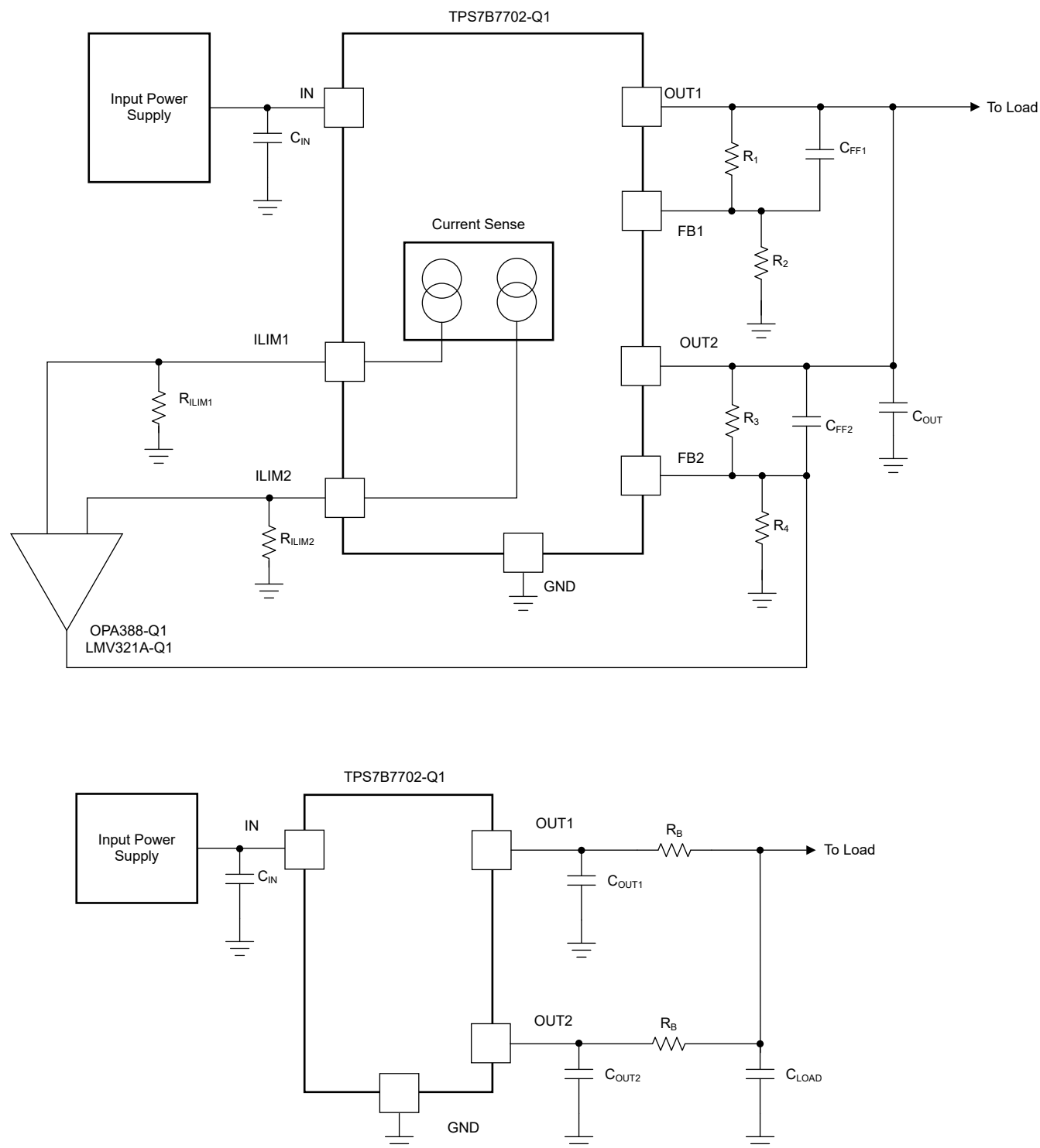


图 2-1. 方框图：运算放大器技术（顶部）和镇流电阻器技术（底部）



## 2.2 设计注意事项

该参考设计展示了两种并联 TPS7B7702-Q1 通道的不同技术。一种方法利用运算放大器并联多个 LDO 通道，另一种方法利用镇流电阻器并联 LDO 通道。节 2.2.2 和 节 2.2.3 讨论了这些不同技术的详细信息以及这些技术的设计注意事项。

### 2.2.1 故障检测和保护

TPS7B7702-Q1 包含模拟电流检测和数字故障引脚，可对不同的故障状况进行全面诊断。

电流检测电压量程是根据相关的输出电流范围来选择的。图 2-2 展示了一种可对每个故障进行全面诊断的推荐设置。在器件进入限流模式之前，输出电流检测电压与实际负载电流成线性比例。在热关断 (TSD) 和电池短路 (STB) 情况下，电流检测电压设置为 [TPS7B770x-Q1 具有电流检测功能的汽车级单通道和双通道天线 LDO](#) (TPS7B7702-Q1) 数据表 [电气特性](#) 表中指定的故障电压电平。

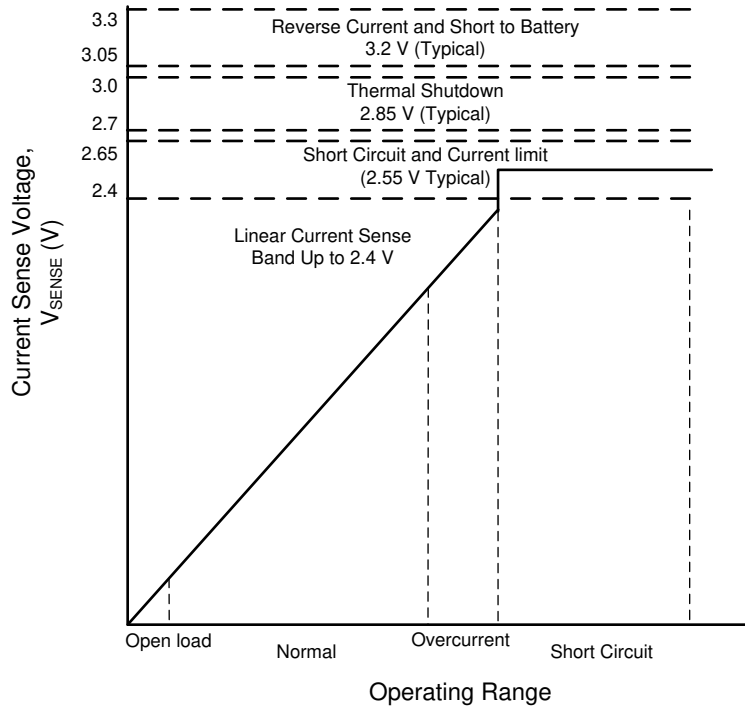


图 2-2. 电流检测输出的功能

### 2.2.2 工作原理 — 利用运算放大器的并联 LDO

此拓扑检测从每个 LDO 通道汲取的负载电流，并利用此信息将多个 LDO 通道并联在一起。该技术仅适用于可调输出 LDO。利用运算放大器并联 LDO 时，其中一个 LDO (称为初级 LDO) 用于控制总体输出。并联的每个附加 LDO 通道称为次级 LDO。在此配置中，放大器的输出连接到每个次级 LDO 的反馈引脚，从而使初级 LDO 能够控制总体输出。使用该方法可以并联任意数量的次级 LDO，从而使总可用电流等于各个 LDO 的电流之和，前提是电流检测保持准确。TPS7B770x-Q1 电流检测在最坏情况下的容差为  $\pm 8\%$ ，这为最坏情况下能够可靠汲取的总电流设定了实际限制。

运算放大器电路的补偿对于保持系统稳定性至关重要。在该参考设计中，运算放大器配置为简单的积分器。在运算放大器和 FB 引脚之间串联一个隔离电阻器 ( $R_{ISO}$ ) 以防止运算放大器受到容性负载的影响，否则会导致运算放大器变得不稳定 (请参阅参考资料 [8])。图 2-3 显示提供了最终的运算放大器电路。

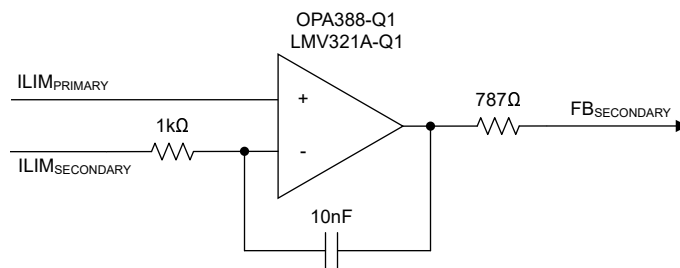


图 2-3. 最终运算放大器电路

提供了负载瞬态响应测量（请参阅 节 3.3），演示了电路的稳定性。此外还包括电源抑制比 (PSRR) 和其他测量值，以便进一步验证该设计的稳健性（再次参阅 节 3.3）。

### 2.2.3 工作原理 — 利用镇流电阻器的并联 LDO

镇流电阻器提供了一种将多个电压源连接在一起为常见负载供电的简便方法。尽可能减小每个 LDO 输出端的电压差（称为误差电压  $V_E$ ）至关重要。随着 LDO 精度的提高，可以减小镇流电阻器的大小。

每个 TPS7B7702-Q1 具有两个共享内部基准的内部 LDO 通道。这消除了利用镇流电阻器并联 LDO 时的主要误差源（即基准电压之间的差异）。其余的误差来自镇流电阻器、内部输出场效应晶体管 (FET) 和放大器。这些误差显示为失调电压，它也是线路和负载的函数。失调电压与设定点反馈电阻器的容差相结合，构成了每个 LDO 的总误差  $V_E$ 。为了在不同 LDO 之间实现最小的电流共享误差，请使用 0.1%（或更优的）容差反馈电阻器。失调电压被内部误差放大器增益放大，该增益被设置为用于确定  $V_{OUT}$  的所需输出电压的函数。在该参考设计中，为简单起见，所有镇流电阻器均配置为相同的值。

过去，使用 方程式 1 选择镇流电阻来设置并联 LDO 的电流不平衡  $I_{MAX}$ 。

$$R_B = \frac{\max_{1 < x < n} V_{En} - \min_{1 < x < n} V_{En}}{\Delta I_{MAX}} \quad (1)$$

该公式未考虑负载电压  $V_{LOAD}$ ，这也是大多数采用并联 LDO 设计的现代电源的要求。德州仪器 (TI) 已经使用镇流电阻器对并联 LDO 的设计和分析进行了现代化改造（请参阅参考资料 [4] 和 [6]），并开发了一个可下载的软件工具来为我们的 LDO 和一组系统要求设计  $R_B$ （请参阅参考资料 [5]）。采用镇流电阻器的并联 TPS7B7702-Q1 器件在设计时使用可下载的软件工具来评估系统要求并设计必要的镇流电阻。

TPS7B7702					
LDO Specifications					
Parameter	Value	Units	Optional User Entry	Units	
$V_{E, high}$	63.503278	mVdc	63.50327828	mVdc	
$V_{E, low}$	-63.44464	mVdc	-63.44464286	mVdc	
Thermal Impedance $T_{JA}$	40.3	°C / W		°C / W	
$V_{REF}$	1.233	Vdc			
Parallel LDO System Requirements					
Parameter	Value	Units			
$T_A$	25	°C			°C
Maximum $T_j$ per LDO	125	°C			°C
$V_{IN}$	12	Vdc	12	Vdc	
$V_{OUT}$	10.048	Vdc	10.048	Vdc	
Allowable load regulation	0.5	Vdc	0.5	Vdc	
System Noise Requirement (10 Hz - 100 kHz)	167	μVrms			μVrms
Total System Load:	0.5	A	0.5	A	
Minimum Ballast Resistance needed	423.15974	mΩ			
Optimum Ballast Resistance	1655.1184	mΩ			
Ballast Resistance Selected	1330	mΩ	1330	mΩ	
N =					
Minimum number of parallel LDO's required:	2				

图 2-4. 屏幕截图显示了利用镇流电阻器计算器的并联 LDO

除  $I_{OUTn}$  和  $V_{LOAD}$  之外，其他系统要求可能需要使用并联 LDO 拓扑，例如噪声、PSRR、压降和热限制。简而言之，利用镇流电阻器的并联 LDO：

1. 将系统噪声减少并联 LDO 数量的平方根倍
2. 与使用单个 LDO 相比，可提高系统 PSRR
3. 通过将负载电流分散在多个 LDO 上来降低压降要求
4. 通过将功率耗散分散在多个 LDO 上来降低线性稳压器的结温

有关所有这些系统要求的详细讨论，利用并联 LDO 如何提高性能，以及您的系统要求需要多少个并联 LDO，请参阅参考资料 [4]、[5] 和 [6]。

镇流电阻器通常用作 PCB 引线或分立式电阻器。一般而言，PCB 引线电阻器适用于低成本的应用。对于在窄温度范围内运行或经历极高温度的应用，PCB 引线电阻器也是不错的选择。引线电阻器是多个低电流器件并联在一起时的理想选择（例如在可用输出电流通常受到限制的高压 LDO 中可以看到）。

对于需要最高性能的应用（其中输出电压容差和瞬态响应至关重要），分立式电阻器是不错的选择。分立式电阻器方法还适用于并联高电流器件的应用（例如可随时使用高电流器件的低电压 LDO）。当环境温度超过 125°C 时，使用分立式镇流电阻器进行设计变得具有挑战性，在 150°C 以上时很难使用分立式镇流电阻器。有关镇流电阻器分析和设计的详细讨论，请参阅参考资料 [4]

**表 2-1. PCB 引线电阻器与分立式电阻器总结**

镇流电阻器选项	相关成本	容差	寄生电感	高温运行
PCB 引线电阻器	在 PCB 引线电阻器设计完成后无 <b>任何成本</b>	宽：电阻器值在整个工作温度范围内几乎翻倍	随 PCB 布线长度的增加而增加	仅受 FR4 的 Tg 限制
分立式电阻器	必须采购并安装在每个 PCB 上	紧：分立式电阻器具有 100ppm 或更低的容差	低	在较高温度下可能需要大电阻器封装尺寸（0805 或 1206）

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 TPS7B7702-Q1 具有电流检测功能的汽车双通道天线低压降 (LDO) 稳压器

TPS7B770x-Q1 系列器件配备具有电流检测功能的单通道和双通道高压低压降稳压器 (LDO)，设计为在 4.5V 至 40V 的宽输入电压范围内 (45V 负载突降保护) 工作。这些器件通过同轴电缆以每通道 300mA 电流为有源天线的低噪声放大器供电。每个通道还提供 1.5V 至 20V 的可调节输出电压范围。

这些器件通过电流检测和错误引脚提供诊断功能。为监视负载电流，高侧电流检测电路提供了与感测的负载电流成比例的模拟输出。精确的电流检测功能可以检测开路、正常和短路情况，无需进一步校准。各通道/器件之间可复用电流检测功能，以便节省模数转换器 (ADC) 资源。每个通道还利用外部电阻器实现可调节的电流限制。

集成反极性二极管消除了对外部二极管的需求。这些器件具有标准热关断、输出端电池短路保护和反向电流保护功能。在电感开关关断期间，每个通道都在输出端提供内部电感钳位保护。

这些器件可在 -40°C 至 +125°C 的环境温度范围内运行。

### 2.3.2 OPAx388 自动精密、零漂移、零交叉、真正的轨至轨输入/输出运算放大器

OPA388-Q1 和 OPA2388-Q1 (OPAx388-Q1) 是汽车级低噪声、快速稳定、零漂移高精度运算放大器，可实现轨到轨输入和输出运行。优异交流性能与仅为 0.25  $\mu\text{V}$  的失调电压以及 0.005  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  的温度漂移相结合，使 OPAx388-Q1 成为驱动高精度高分辨率模数转换器 (ADC) 的理想选择。零交叉技术更大程度地减小了共模范围内的失调电压变化。低漂移和超低 1/f 噪声相结合，使 OPAx388-Q1 能够监视和检测故障情况，而不会影响信号完整性。

这些器件的额定工业温度范围均为 -40°C 至 +125°C。

### 2.3.3 LMV321A-Q1 汽车级低电压轨到轨输出运算放大器

LMV3xxA-Q1 系列包括单通道 (LMV321A-Q1)、双通道 (LMV358A-Q1) 和四通道 (LMV324A-Q1) 低压 (2.5V 至 5.5V) 汽车类运算放大器，具有轨至轨输出摆幅功能。这些运算放大器为空间受限、需要低压运行和高容性负载驱动的应用 (例如信息娱乐系统和照明) 提供了一种具有成本效益的方法。LMV3xxA-Q1 系列的容性负载驱动器具有 500pF 的电容，而电阻式开环输出阻抗使其能够在更高的容性负载下更轻松地实现稳定。这些运算放大器专为低工作电压 (2.5V 至 5.5V) 而设计，性能规格类似于 LMV3xx-Q1 器件。

LMV3xxA-Q1 系列的稳健设计可简化电路设计。这些运算放大器具有单位增益稳定性，集成了 RFI 和 EMI 抑制滤波器，并且在过驱情况下不会出现相位反转。

LMV3xxA-Q1 可采用 SOIC、MSOP、SOT-23 和 TSSOP 等业界通用的封装。

### 3 硬件、测试要求和测试结果

#### 3.1 硬件要求

#### 3.2 测试设置

TIDA-050096 参考设计展示了两种并联 TPS7B7702-Q1 LDO 的方法。已组装评估所需的所有元件：安装了输入、输出、 $V_{CC}$ 、检测和前馈电容器，并且还安装了误差、电流限制、反馈和检测电阻。有关选择这些元件的指导，另请参阅 [TPS7B770x-Q1 具有电流检测功能的汽车级单通道和双通道天线 LDO](#) 数据表。TIDA-050096 参考设计配置为 12V 输入、10V 输出，具有一系列负载电流选项。

第一种并联 TPS7B7702-Q1 LDO 的方法是利用运算放大器实现 LDO 电流共享。利用两种不同的运算放大器来表征参考设计 (OPA388-Q1 和 LMV321A-Q1) 的性能。安装了补偿电容器和电阻器，以在添加新的反馈环路后保持稳定。TIDA-050096 参考设计支持多达四个并联 LDO 通道，可获得高达 1.2A 的输出电流，同时单个 TPS7B7701-Q1 LDO 已包含所有特性。

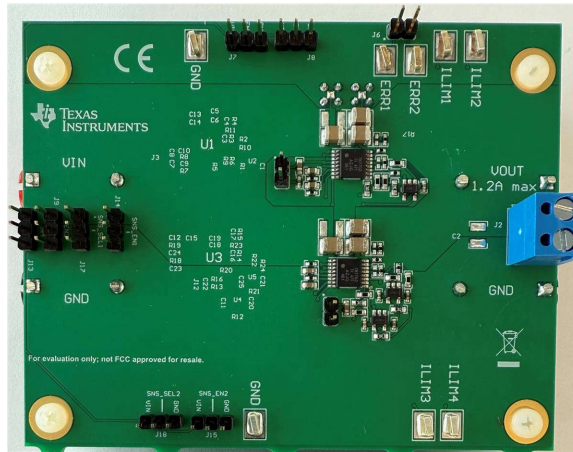


图 3-1. 利用运算放大器和电流检测的 2 - 4 个并联 LDO 通道

采用该技术时，LDO 的通道数量不限于 4 个。如果最终应用中需要更大的电流，必要时可以利用运算放大器技术并联额外的 LDO 通道。

第二种并联 TPS7B7702-Q1 LDO 的方法利用镇流电阻器。安装了推荐的镇流电阻器以及一个额外的负载电容器。虽然使用镇流电阻器并联的 LDO 数量没有基本限制，但由于不同封装的 TPS7B7702-Q1 器件无法共享单个基准源，跨封装并联 LDO 会导致误差电压增加。误差电压的增加与镇流电阻的增加直接相关。TI 建议将并联 TPS7B7702-Q1 通道的数量限制为封装内含两个 LDO，如果需要更多 LDO，则利用运算放大器并联方法。

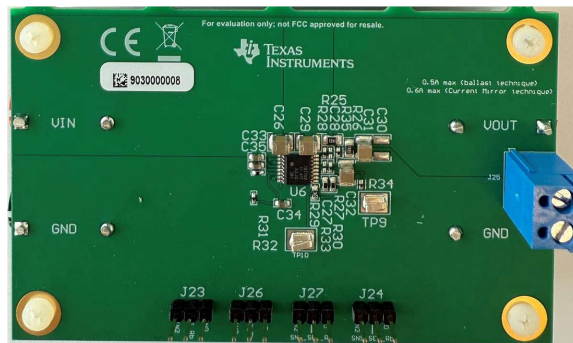


图 3-2. 利用镇流电阻器的 2 个并联 LDO 通道



可以使用 3 引脚接头 ( 运算放大器方法为 J7、J8、J9、J13 镇流电阻器方法为 J23 和 J26 ) 使能或禁用 TPS7B7702-Q1 LDO 通道。

- 将 3 引脚接头的中心引脚连接到  $V_{IN}$  可使能器件
- 将 3 引脚接头的中心引脚连接到  $GND$  可禁用器件

提供了测试点来测量每个 LDO 通道的  $ILIM$  电压, 以确认每个通道平均共享负载电流。2 引脚接头将 TPS7B7702-Q1 的  $V_{CC}$  连接到运算放大器的正电源轨, 可用于测量运算放大器的电流消耗。 $V_{CC}$  引脚可向外部电路提供高达 15mA 的电流消耗。J2 ( 利用运算放大器的并联 LDO ) 或 J25 ( 利用镇流电阻器的并联 LDO ) 可用于连接外部负载以进行评估。

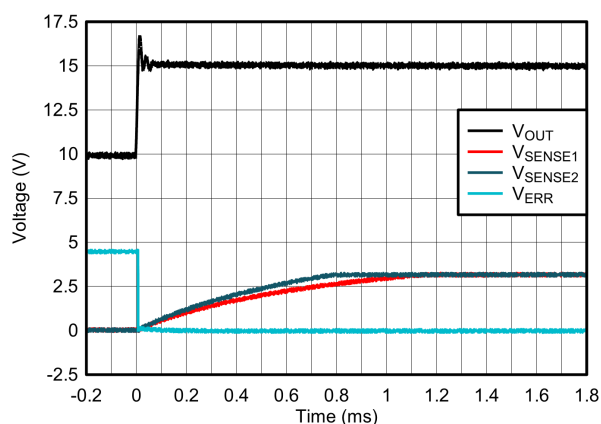
采用运算放大器设计的并联 LDO 包含用于评估的额外连接器。提供了 MMCX 连接器, 用于测量  $V_{IN}$  和  $V_{OUT}$ 。提供了测试点, 用于测量每个封装的  $V_{ERR}$  ( 顶部 IC 为  $V_{ERR1}$ , 底部 IC 为  $V_{ERR2}$  )。一个 2 引脚接头可用于将  $V_{ERR1}$  短接至  $V_{ERR2}$ , 这是本设计指南中捕获测量值的方式。

### 3.3 测试结果 — 利用运算放大器的并联 LDO

本节中的测试结果是在以下条件下得出的：

$V_{IN} = 12V$ 、 $V_{OUT} = 10V$ 、 $C_{INn} = 10 \mu F$ 、 $C_{OUTn} = 10 \mu F$ 、 $C_{FFn} = 22nF$ 、 $V_{ERR} = V_{ERR1} = V_{ERR2}$ , 运算放大器 = OPA388-Q1 ( 除非另有说明 )。

#### 3.3.1 电池短路



$V_{ERR} = V_{ERR1}$

图 3-3. 2 个 LDO 通道

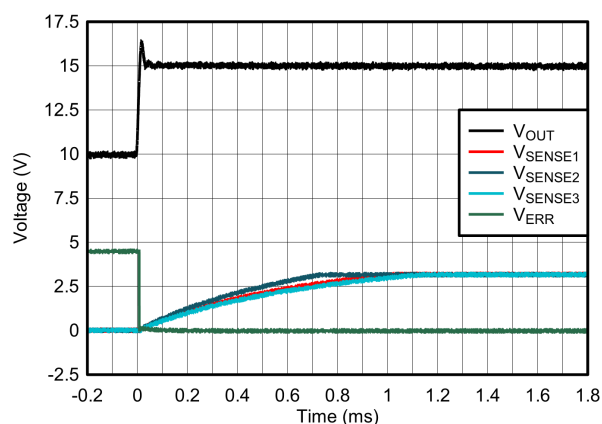


图 3-4. 3 个 LDO 通道

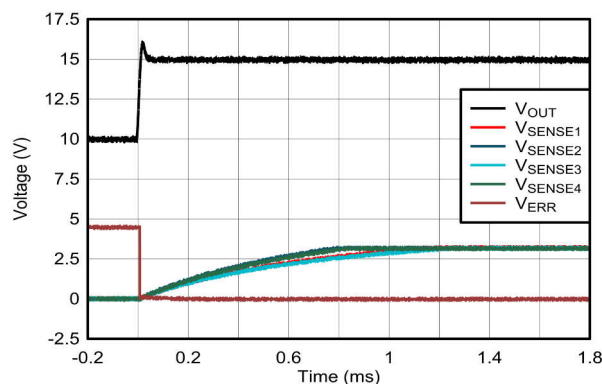
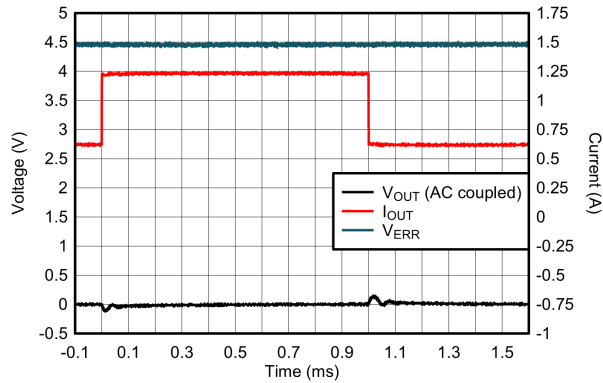


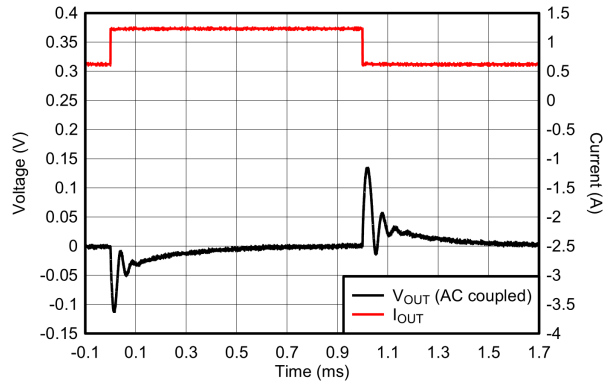
图 3-5. 4 个 LDO 通道

### 3.3.2 负载瞬态响应



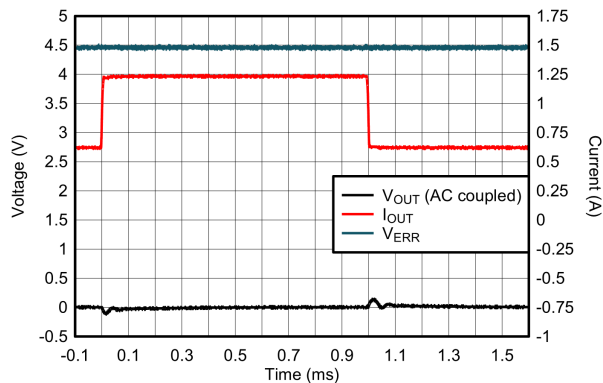
$I_{OUT} = 600\text{mA}$  至  $1.2\text{A}$  至  $600\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-6. 4 个 LDO 通道负载瞬态



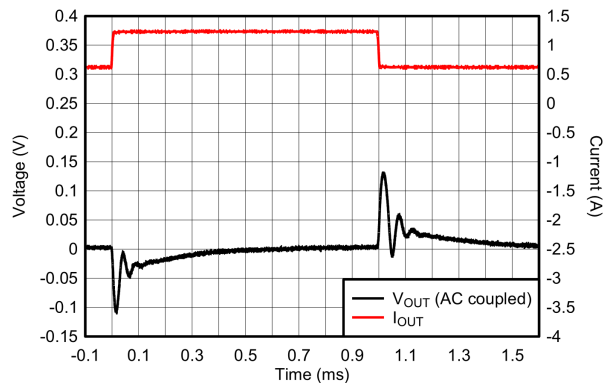
$I_{OUT} = 600\text{mA}$  至  $1.2\text{A}$  至  $600\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-7. 4 个 LDO 通道负载瞬态 (放大)



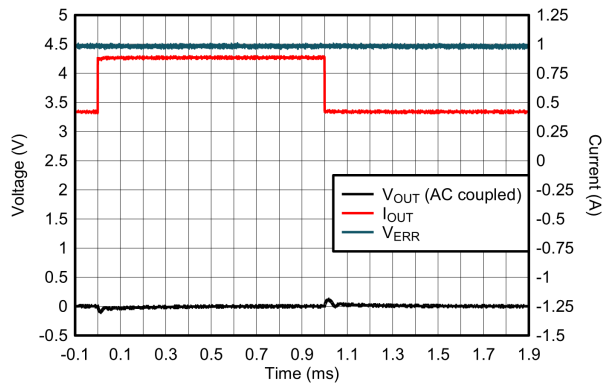
$I_{OUT} = 600\text{mA}$  至  $1.2\text{A}$  至  $600\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-8. 4 个 LDO 通道负载瞬态



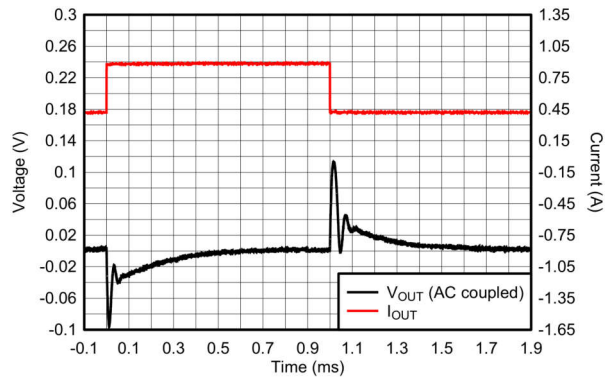
$I_{OUT} = 600\text{mA}$  至  $1.2\text{A}$  至  $600\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-9. 4 个 LDO 通道负载瞬态 (放大)



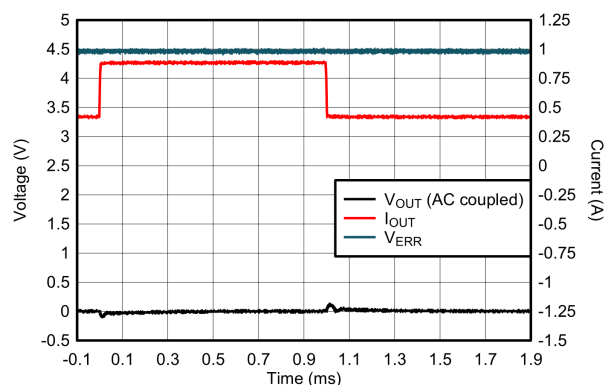
$I_{OUT} = 450\text{mA}$  至  $900\text{mA}$  至  $450\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-10. 3 个 LDO 通道负载瞬态



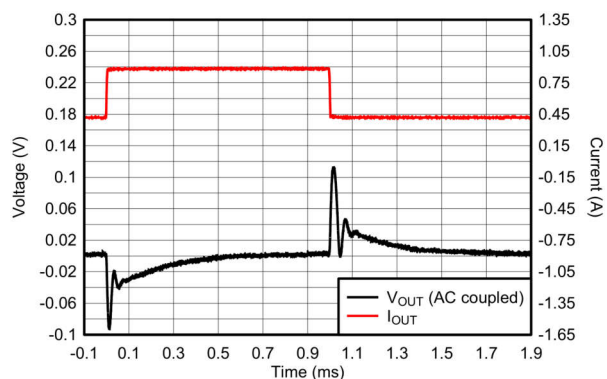
$I_{OUT} = 450\text{mA}$  至  $900\text{mA}$  至  $450\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-11. 3 个 LDO 通道负载瞬态 (放大)



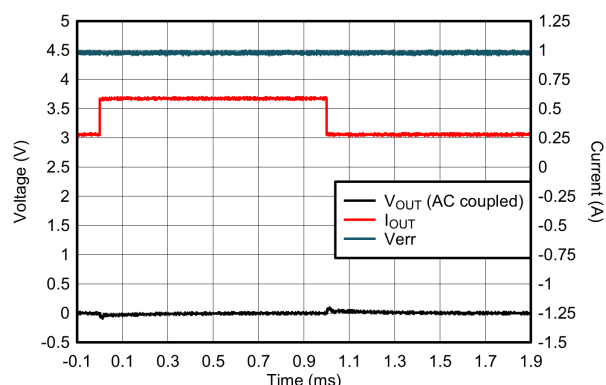
$I_{OUT} = 450\text{mA}$  至  $900\text{mA}$  至  $450\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-12. 3 个 LDO 通道负载瞬态



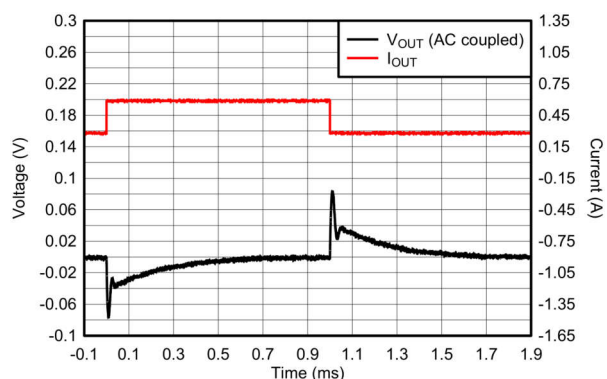
$I_{OUT} = 450\text{mA}$  至  $900\text{mA}$  至  $450\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-13. 3 个 LDO 通道负载瞬态 (放大)



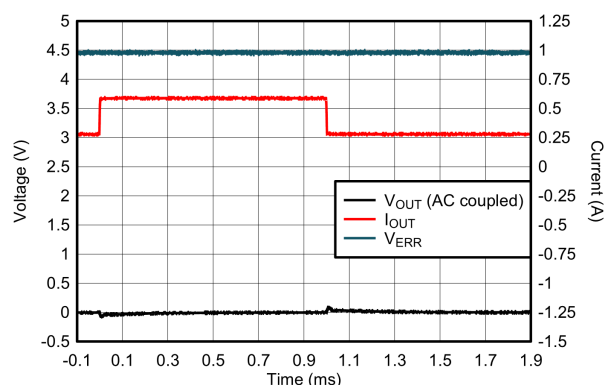
$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  
 $V_{ERR} = V_{ERR1}$

图 3-14. 2 个 LDO 通道负载瞬态



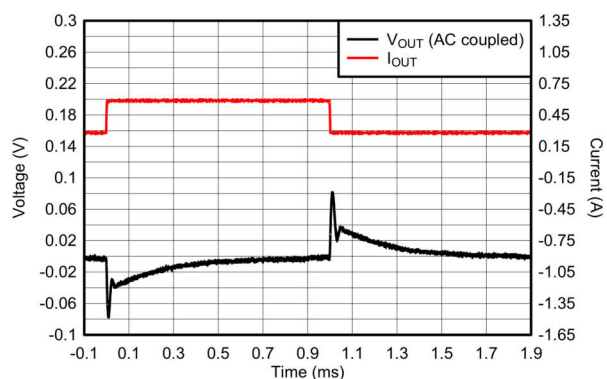
$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-15. 2 个 LDO 通道负载瞬态 (放大)



$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  $V_{ERR} =$   
 $V_{ERR1}$

图 3-16. 2 个 LDO 通道负载瞬态



$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$

图 3-17. 2 个 LDO 通道负载瞬态 (放大)



### 3.3.3 电流限值

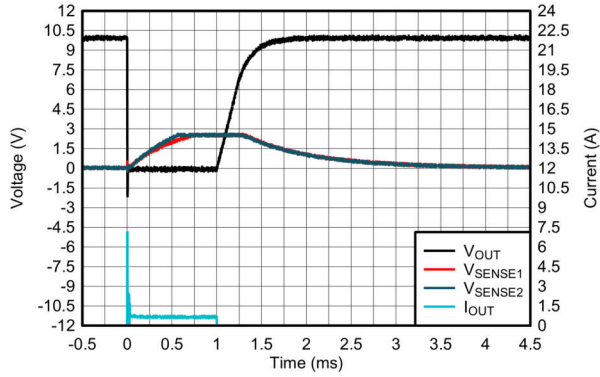


图 3-18. 2 个 LDO 通道

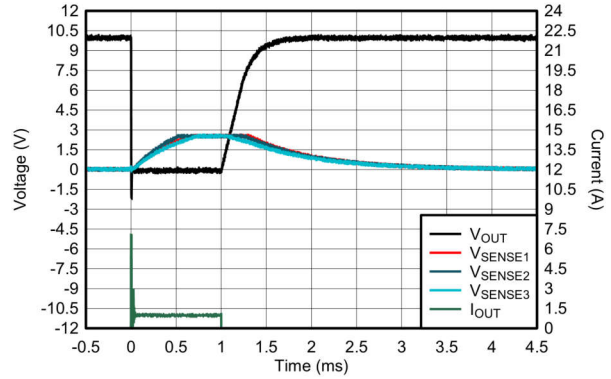


图 3-19. 3 个 LDO 通道

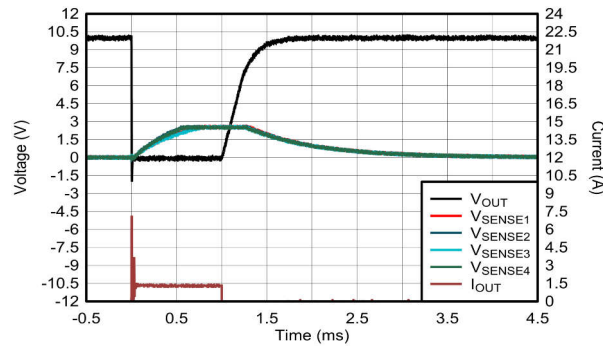
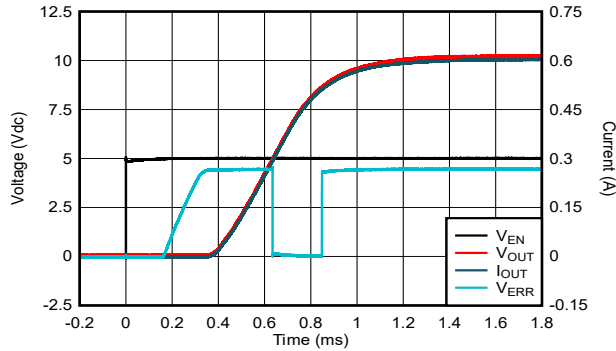


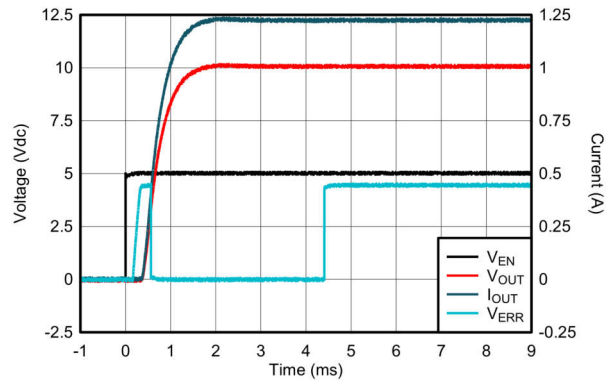
图 3-20. 4 个 LDO 通道

### 3.3.4 启动



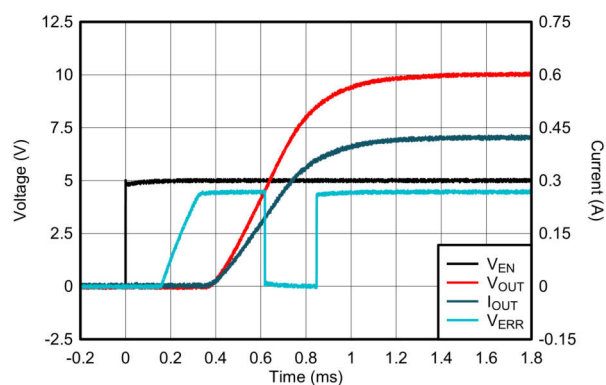
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 600mA$ , 4 个 LDO 通道

图 3-21. 启动至 600mA 负载



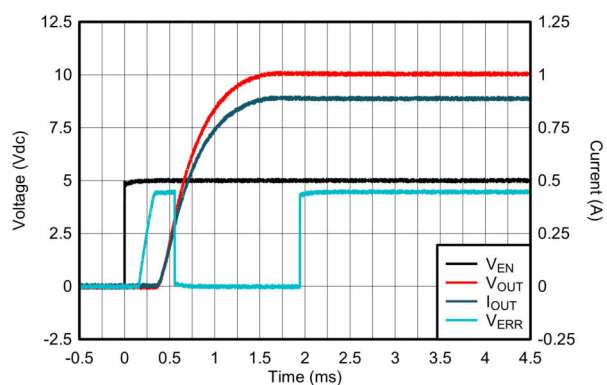
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 1.2A$ , 4 个 LDO 通道

图 3-22. 启动至 1.2A 负载



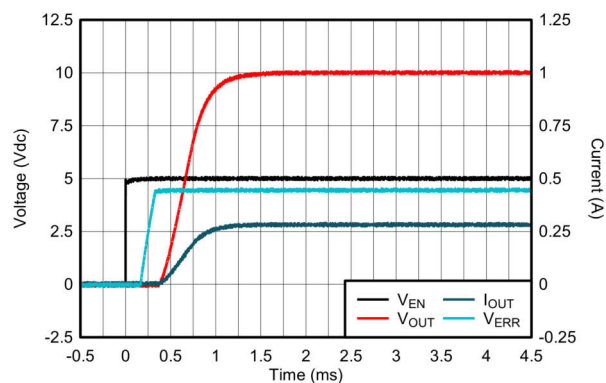
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 415mA$ , 3 个 LDO 通道

图 3-23. 启动至 415mA 负载



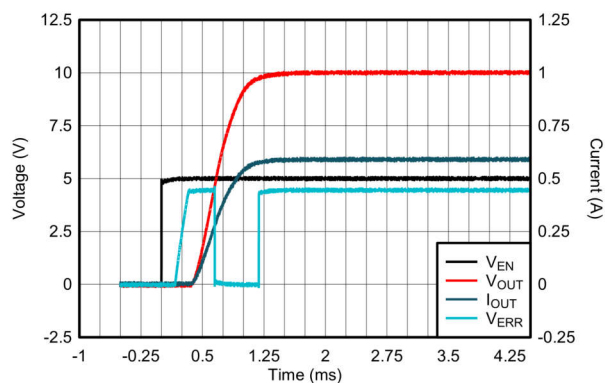
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 870mA$ , 3 个 LDO 通道

图 3-24. 启动至 870mA 负载



$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 275mA$ ,  $V_{ERR} = V_{ERR1}$ , 2 个 LDO 通道

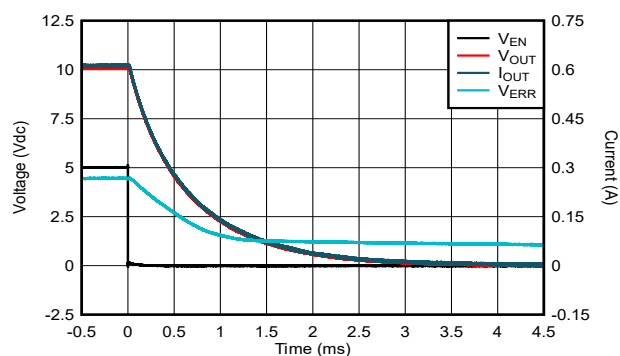
图 3-25. 启动至 275mA 负载



$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 580mA$ ,  $V_{ERR} = V_{ERR1}$ , 2 个 LDO 通道

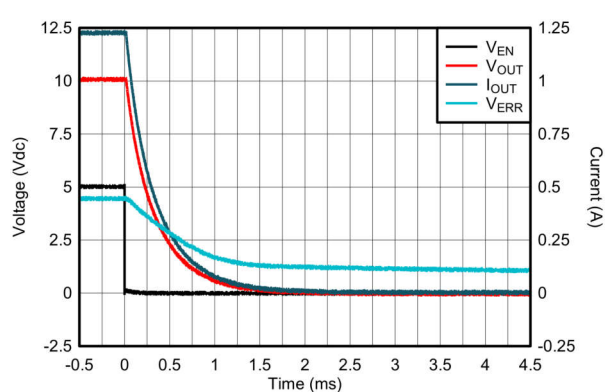
图 3-26. 启动至 580mA 负载

### 3.3.5 关断



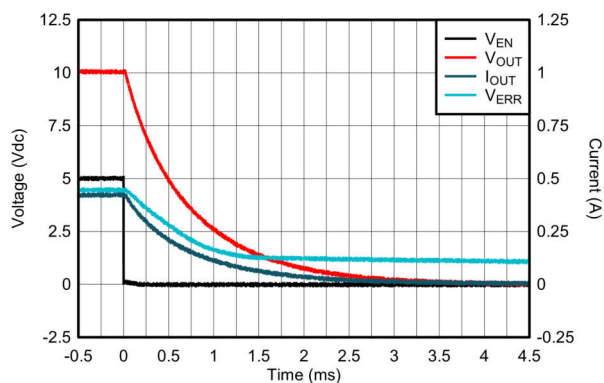
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 600mA$ , 4 个 LDO 通道

图 3-27. 关断至 600mA 负载



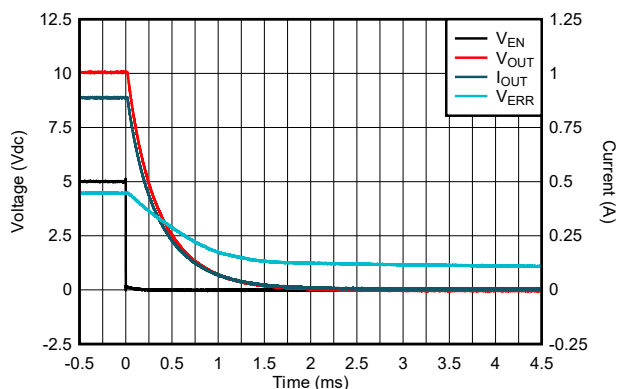
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 1.2A$ , 4 个 LDO 通道

图 3-28. 关断至 1.2A 负载



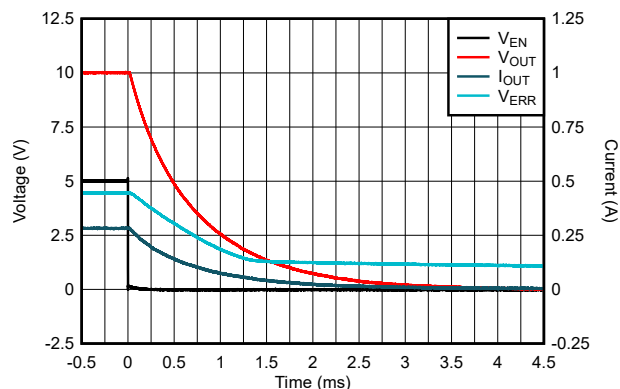
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 415mA$ , 3 个 LDO 通道

图 3-29. 关断至 415mA 负载



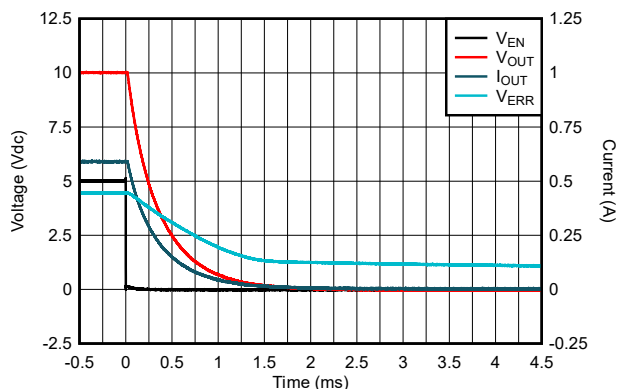
$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 870mA$ , 3 个 LDO 通道

图 3-30. 关断至 870mA 负载



$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 275mA$ ,  $V_{ERR} = V_{ERR1}$ , 2 个 LDO 通道

图 3-31. 关断至 275mA 负载



$V_{IN} = 12V$ ,  $I_{OUT} = 580mA$ ,  $V_{ERR} = V_{ERR1}$ , 2 个 LDO 通道

图 3-32. 关断至 580mA 负载

### 3.3.6 线路瞬态

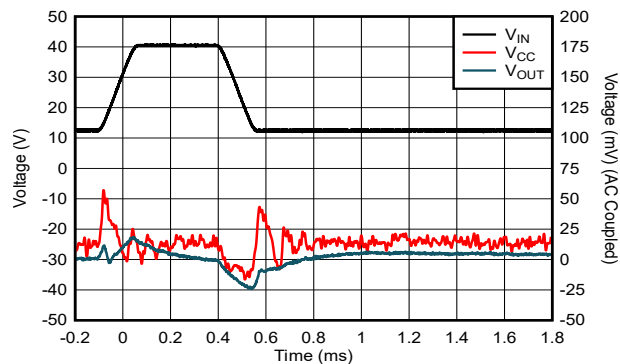


图 3-33. 运算放大器 = LMV321A,  $0.25V/\mu s$ , 2 个 LDO 通道, 625mA 负载

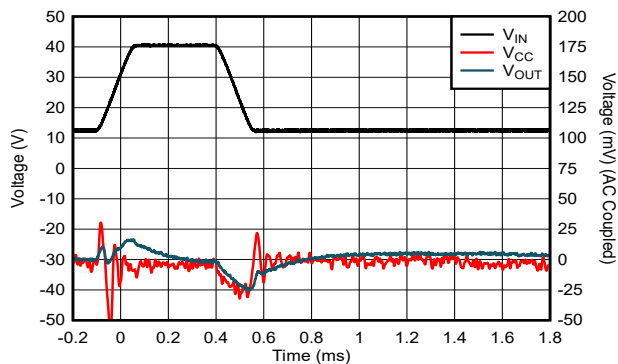


图 3-34. 运算放大器 = OPA388,  $0.25V/\mu s$ , 2 个 LDO 通道, 625mA 负载

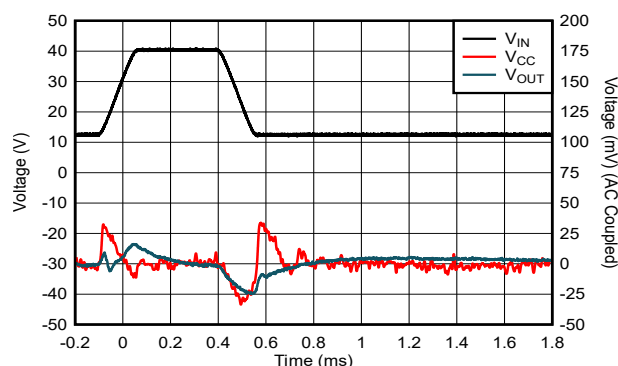


图 3-35. 运算放大器 = LMV321A,  $0.25\text{V}/\mu\text{s}$ , 3 个 LDO 通道, 900mA 负载

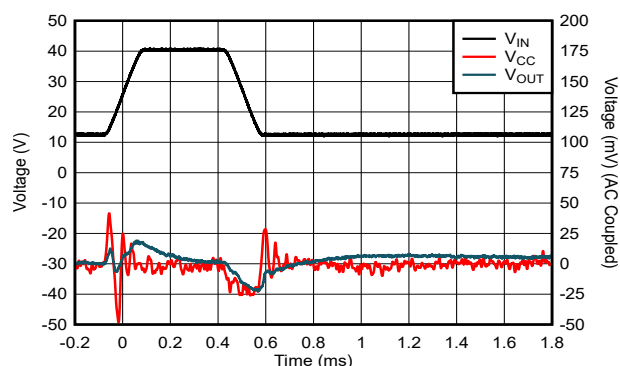


图 3-36. 运算放大器 = OPA388,  $0.25\text{V}/\mu\text{s}$ , 3 个 LDO 通道, 900mA 负载

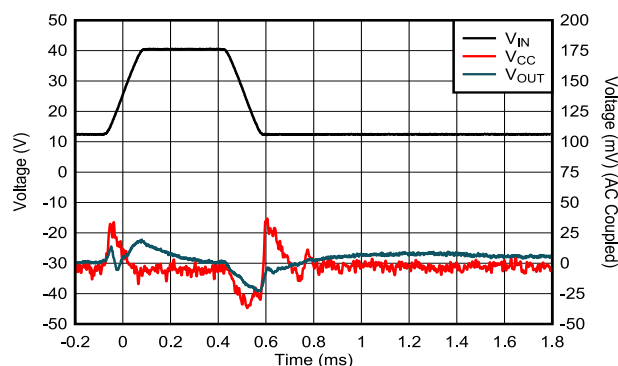


图 3-37. 运算放大器 = LMV321A,  $0.25\text{V}/\mu\text{s}$ , 4 个 LDO 通道, 1.2A 负载

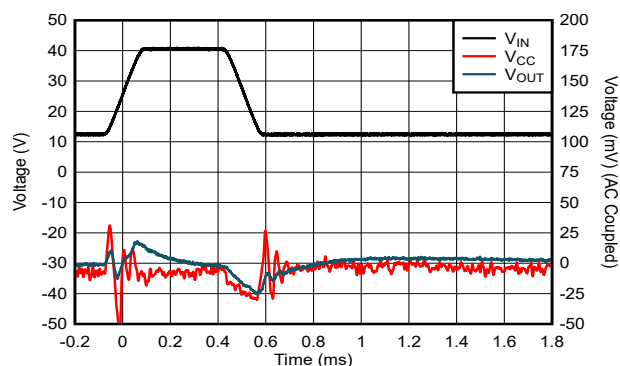
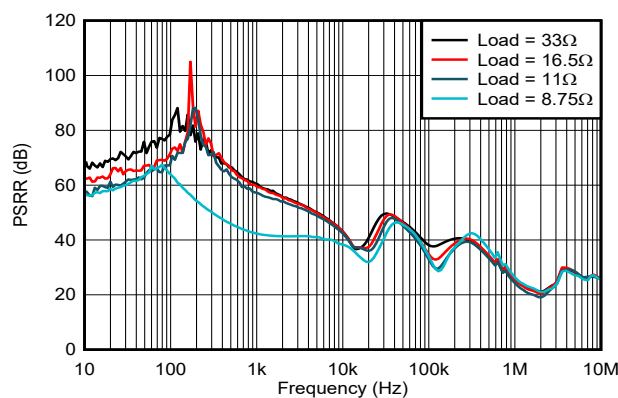


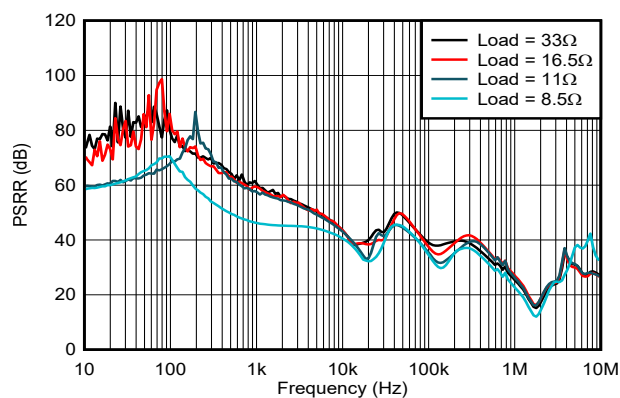
图 3-38. 运算放大器 = OPA388,  $0.25\text{V}/\mu\text{s}$ , 4 个 LDO 通道, 1.2A 负载

### 3.3.7 PSRR



运算放大器 = LMV321A-Q1

图 3-39. 4 个 LDO 通道 : PSRR 与频率和  $I_{\text{OUT}}$  间的关系



运算放大器 = OPA388-Q1

图 3-40. 4 个 LDO 通道 : PSRR 与频率和  $I_{\text{OUT}}$  间的关系

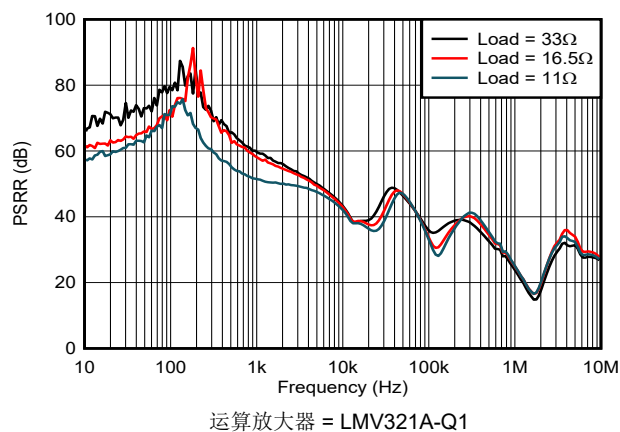


图 3-41. 3 个 LDO 通道 : PSRR 与频率和  $I_{OUT}$  间的关系

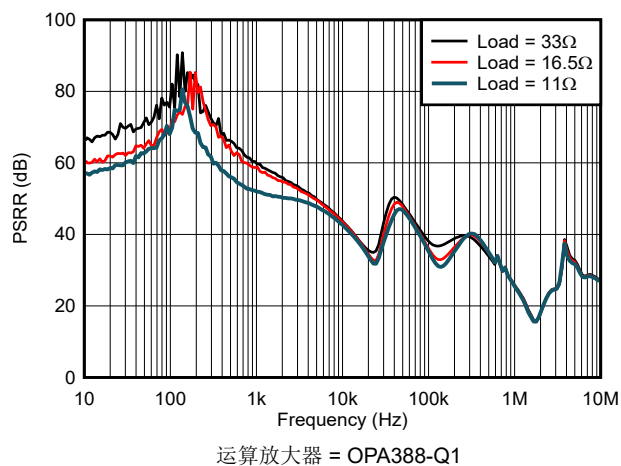


图 3-42. 3 个 LDO 通道 : PSRR 与频率和  $I_{OUT}$  间的关系

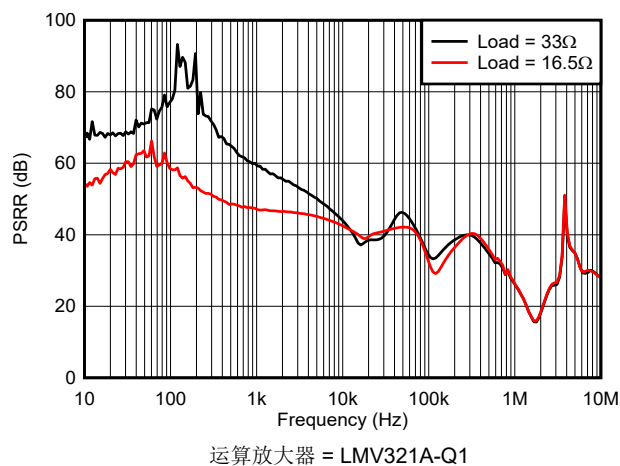


图 3-43. 2 个 LDO 通道 : PSRR 与频率和  $I_{OUT}$  间的关系

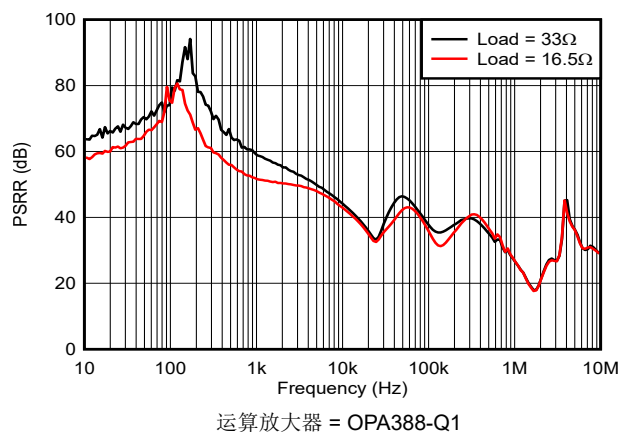
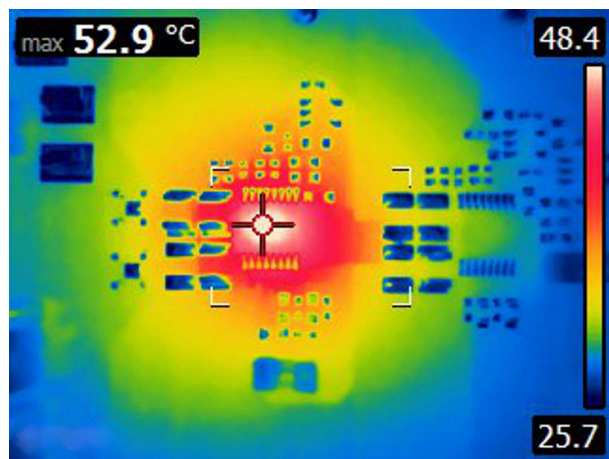


图 3-44. 2 个 LDO 通道 : PSRR 与频率和  $I_{OUT}$  间的关系

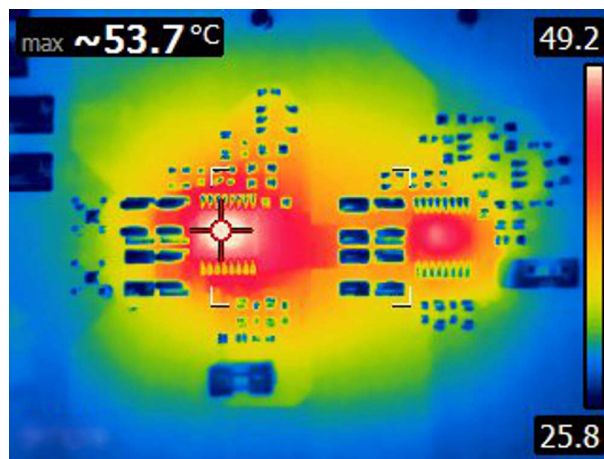
### 3.3.8 热性能

每次测量时施加负载 30 分钟。测量值在大约 26°C 环境温度下捕获。



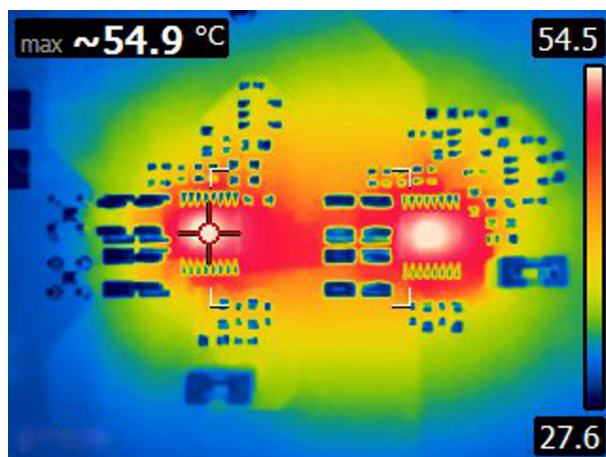
$I_{LOAD} = 600\text{mA}$ ，运算放大器 = OPA388-Q1

图 3-45. 2 个 LDO 通道



$I_{LOAD} = 900\text{mA}$ ，运算放大器 = OPA388-Q1

图 3-46. 3 个 LDO 通道

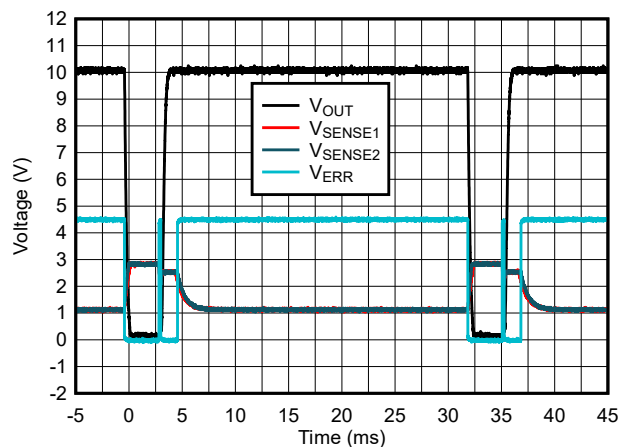


$I_{LOAD} = 1.2\text{A}$ ，运算放大器 = OPA388-Q1

图 3-47. 4 个 LDO 通道

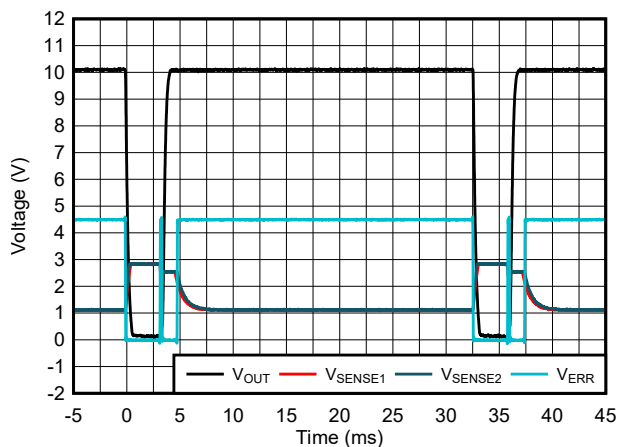
### 3.3.9 热限制保护

当每个 LDO 进入和退出热关断时，并联 LDO 通道的热保护性能在关闭和开启期间对  $V_{LOAD}$  表现出阶梯效应。热保护会反复启动，直到并联 LDO 通道的功率耗散消失。图 3-48 展示了 LDO 存在高功率耗散时热保护电路的预期效果。



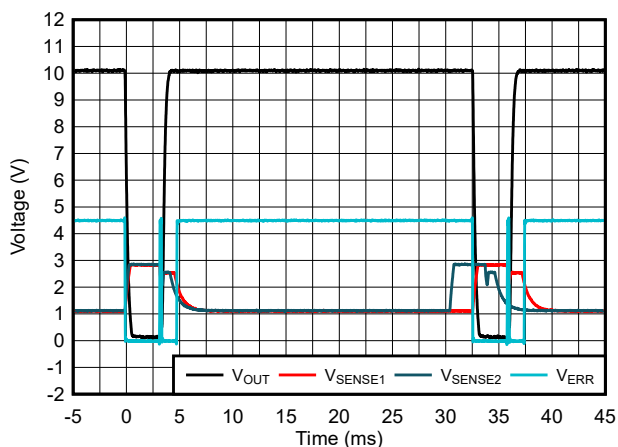
$V_{ERR} = V_{ERR1}$ ,  $V_{IN} = 21V$ ,  $I_{OUT} = 1.2A$

图 3-48. 2 个 LDO 通道



$V_{IN} = 21V$ ,  $I_{OUT} = 900mA$

图 3-49. 3 个 LDO 通道



$V_{IN} = 21V$ ,  $I_{OUT} = 1.2A$

图 3-50. 4 个 LDO 通道

### 3.4 测试结果 — 利用镇流电阻器的并联 LDO

本节中的测试结果是在以下条件下得出的：

$V_{IN} = 12V$ 、 $V_{OUT} = 10V$ 、 $C_{INn} = 10 \mu F$ 、 $C_{OUTn} = 10 \mu F$ 、 $C_{FFn} = 22nF$ 、 $R_B = 1.33 \Omega$ 、 $C_{LOAD} = 10 \mu F$  (除非另有说明)。

#### 3.4.1 电池短路

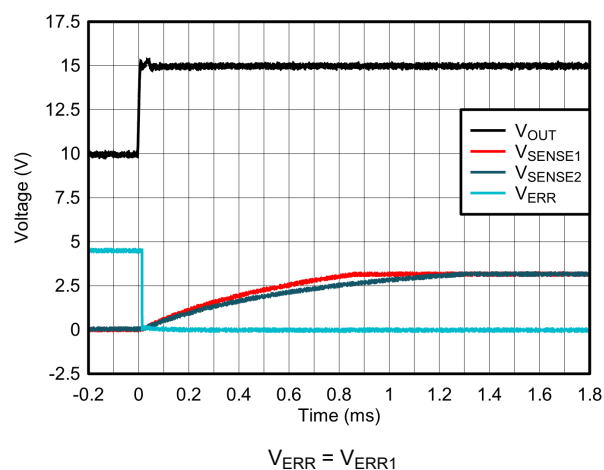
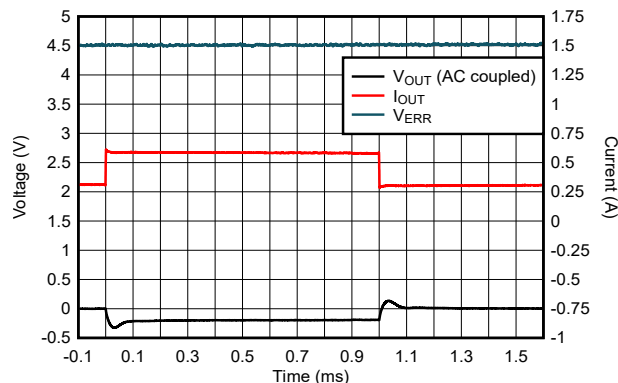


图 3-51. 2 个 LDO 通道

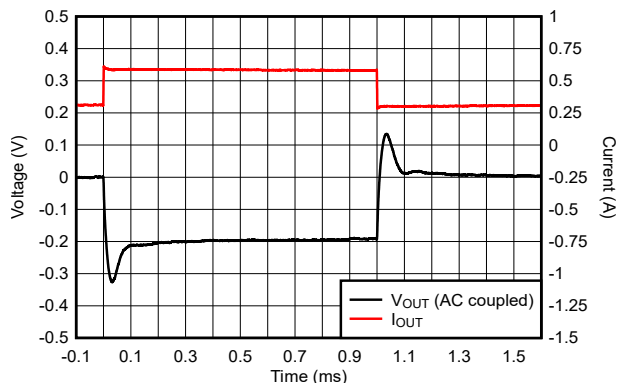


### 3.4.2 负载瞬态响应



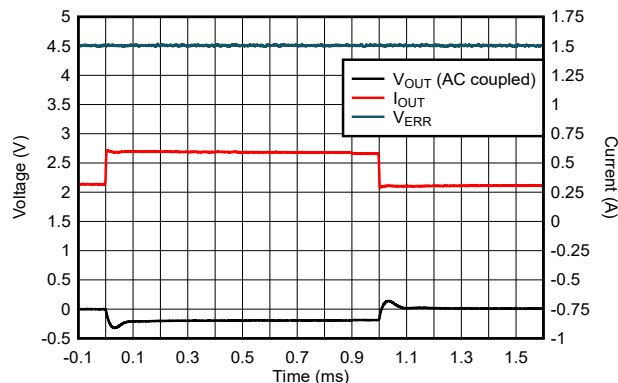
$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  
 $C_{FF} =$  未安装

图 3-52. 2 个 LDO 通道



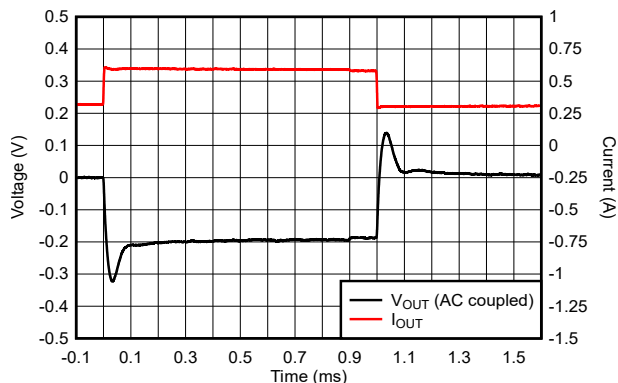
$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  
 $C_{FF} =$  未安装

图 3-53. 2 个 LDO 通道 (放大)



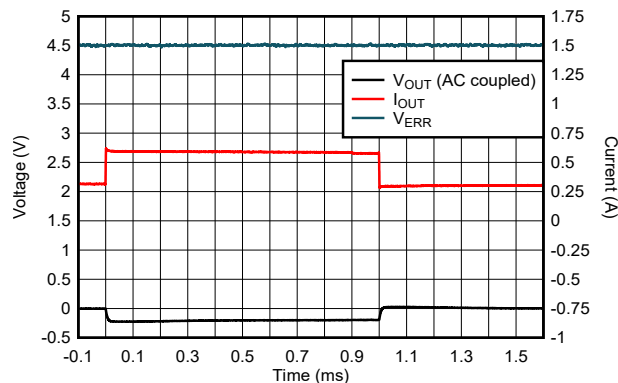
$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  
 $C_{FF} =$  未安装

图 3-54. 2 个 LDO 通道



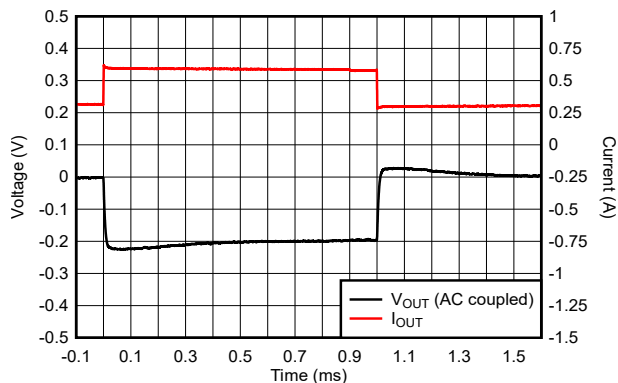
$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 0.1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  
 $C_{FF} =$  未安装

图 3-55. 2 个 LDO 通道 (放大)



$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  $C_{FF} =$   
 $22\text{nF}$

图 3-56. 2 个 LDO 通道



$I_{OUT} = 300\text{mA}$  至  $600\text{mA}$  至  $300\text{mA}$ ,  $SR = 1\text{A}/\mu\text{s}$ ,  
 $C_{FF} = 22\text{nF}$

图 3-57. 2 个 LDO 通道 (放大)

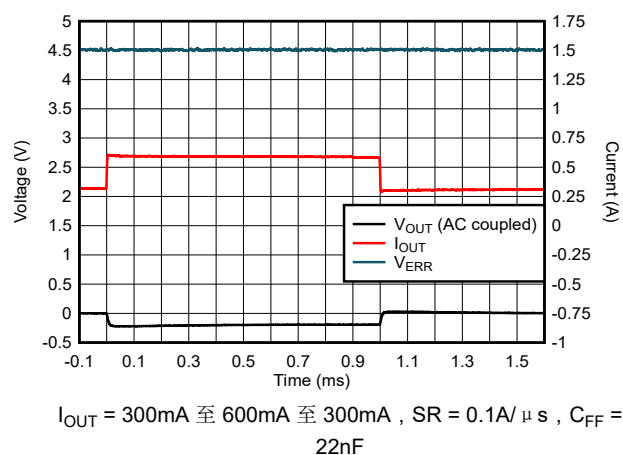


图 3-58. 2 个 LDO 通道

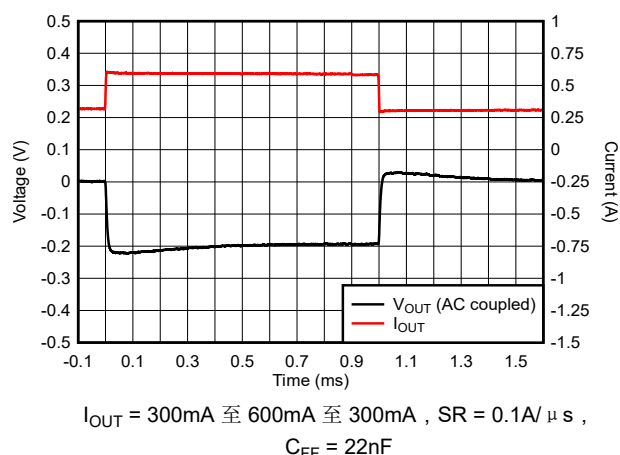


图 3-59. 2 个 LDO 通道 (放大)

### 3.4.3 电流限值

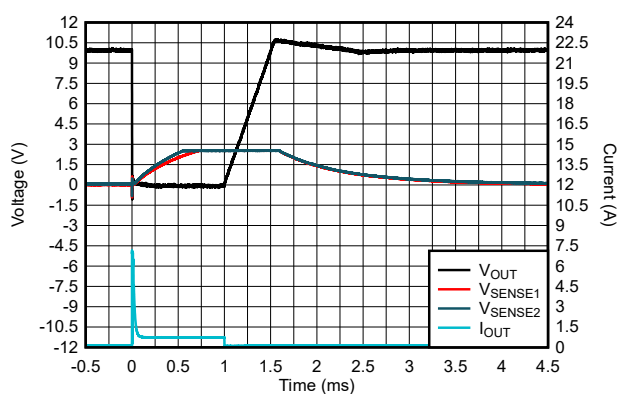


图 3-60. 2 个 LDO 通道

### 3.4.4 启动

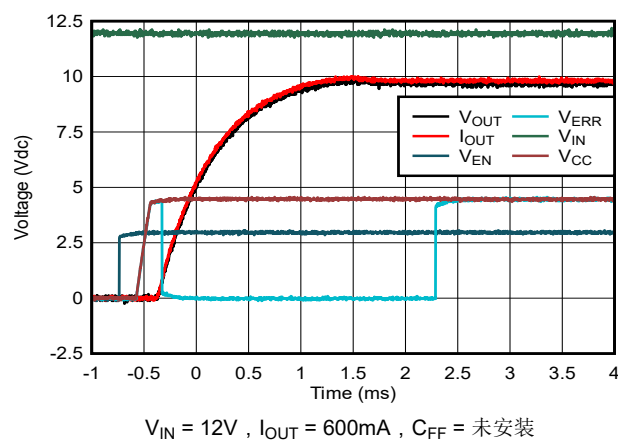


图 3-61. 启动至 600mA 负载

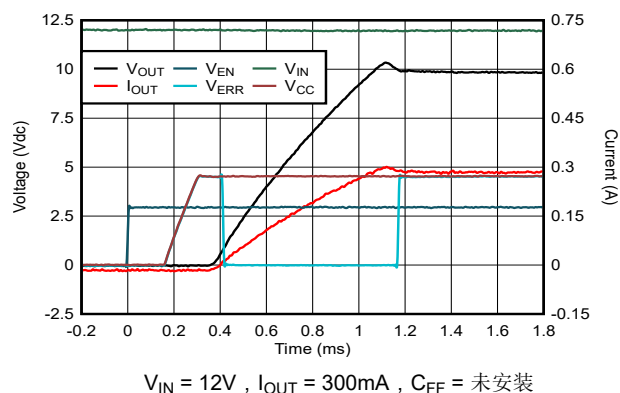


图 3-62. 启动至 300mA 负载

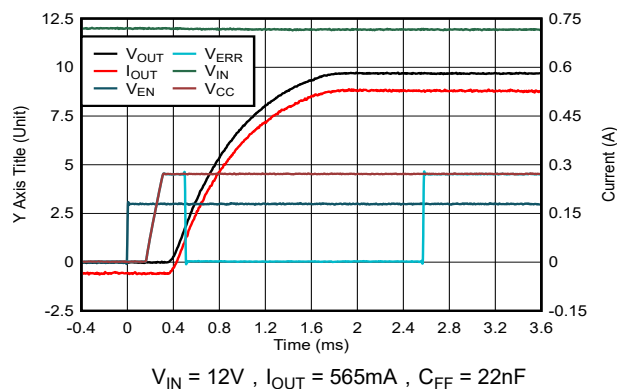


图 3-63. 启动至 565mA 负载

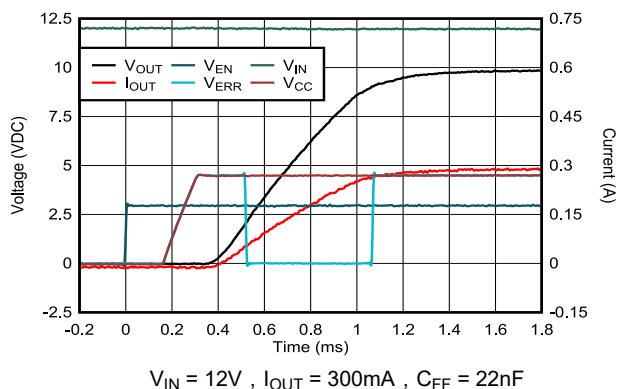


图 3-64. 启动至 300mA 负载

### 3.4.5 线路瞬态

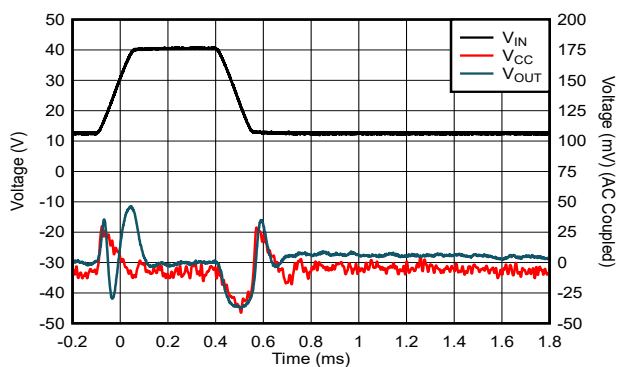


图 3-65. 0.25V/ $\mu s$ , 2 个 LDO 通道, 598mA 负载

### 3.4.6 热性能

每次测量时施加负载 30 分钟。测量值在大约 26°C 环境温度下捕获。

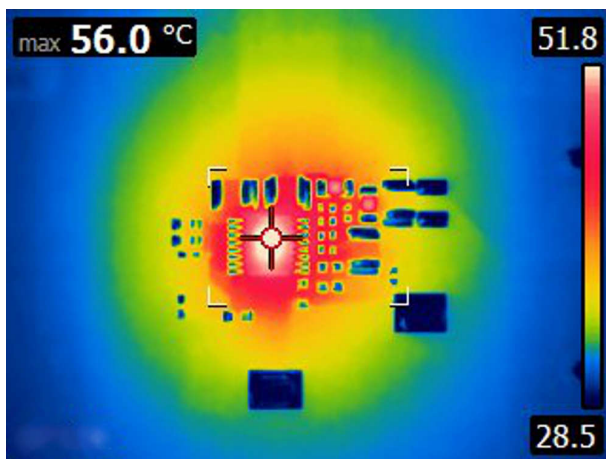
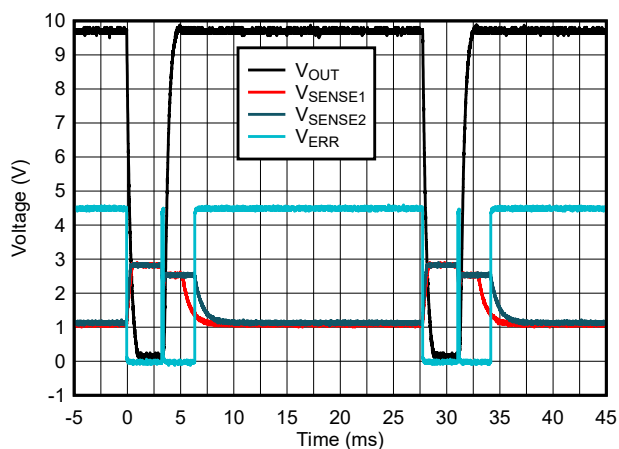


图 3-66. 2 个 LDO 通道

### 3.4.7 热限制保护

当每个 LDO 进入和退出热关断时，并联 LDO 通道的热保护性能在关闭和开启期间对  $V_{LOAD}$  表现出阶梯效应。热保护会反复启动，直到并联 LDO 的功率耗散消失。图 3-48 展示了 LDO 存在高功率耗散时热保护电路的预期效果。



$V_{ERR} = V_{ERR1}$ ,  $V_{IN} = 21V$ ,  $I_{OUT} = 600mA$

图 3-67. 2 个 LDO 通道 ( 镇流器 )

### 3.5 并联 LDO 技术之间的结果比较

本节中的测试结果是在以下条件下得出的：

$V_{IN} = 12V$ 、 $V_{OUT} = 10V$ 、 $C_{INn} = 10 \mu F$ 、 $C_{OUTn} = 10 \mu F$ 、 $C_{FFn} = 22nF$ 、 $R_B = 1.33 \Omega$ 、 $C_{LOAD} = 10 \mu F$ ，  
运算放大器 = OPA388-Q1 (除非另有说明)。

#### 3.5.1 $V_{LOAD}$ 与 $I_{LOAD}$ 之间的关系

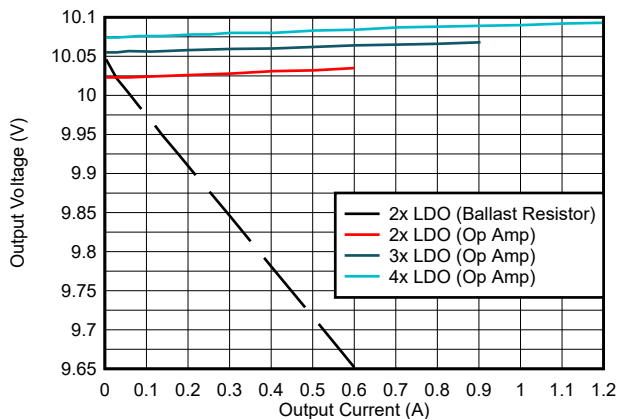


图 3-68. 负载电压与总负载电流之间的关系

#### 3.5.2 PSRR

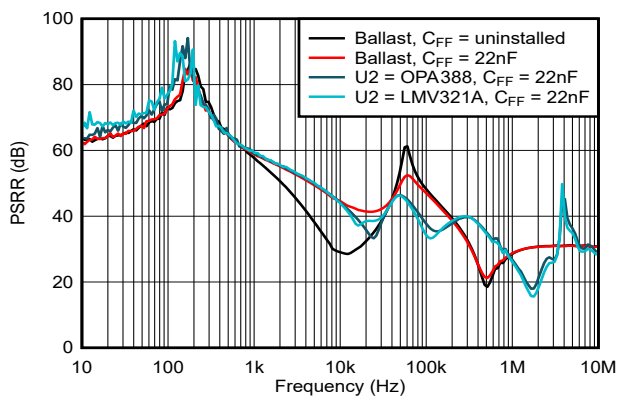


图 3-69. 2 个 LDO : PSRR 与频率间的关系

## 4 设计和文档支持

### 4.1 设计文件

#### 4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-050096](#) 中的设计文件。

#### 4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-050096](#) 中的设计文件。

#### 4.1.3 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-050096](#) 中的设计文件。

### 4.2 工具

使用[镇流电阻器的并联 LDO 计算器](#) 轻松计算满足一组系统要求 ( 温度、 $V_{IN}$ 、 $V_{OUT}$ 、 $I_{LOAD}$ 、负载调节和噪声 ) 所需的最少并联 LDO 数量。

### 4.3 文档支持

1. IPC-2221B 印制板设计通用标准
2. 德州仪器 (TI)，[《TPS7B770x-Q1 具有电流检测功能的汽车级单通道和双通道天线 LDO》数据表](#)
3. 德州仪器 (TI)，[《LMV321A-Q1、LMV358A-Q1、LMV324A-Q1 汽车级低电压、轨到轨输出运算放大器》数据表](#)
4. 德州仪器 (TI)，[《使用镇流电阻器的并联 LDO 的综合分析和通用公式》技术白皮书](#)
5. 德州仪器 (TI)，[并联低压降 \(LDO\) 计算器](#)
6. 德州仪器 (TI)，[使用镇流电阻器的并联 LDO 架构设计技术白皮书](#)
7. 德州仪器 (TI)，[《使用新的热指标》应用手册](#)
8. 德州仪器 (TI)，[《DIY：使运算放大器容性负载保持稳定的三种方法》技术文章](#)
9. 德州仪器 (TI)，[《OPAx388 精密、零漂移、零交叉、真正的轨至轨输入/输出运算放大器》数据表](#)

### 4.4 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

### 4.5 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 5 作者简介

**STEPHEN ZIEL** 是低压 LDO 应用和验证经理，于 2023 年当选为成员组技术人员 (MGTS)。在加入 TI 之前，Stephen 是一家大型航天和国防公司的首席工程师，他从事 1mW 至 1.5kW 电力电子产品的各个方面的工作。Stephen 在电源系统要求开发和架构设计、电源设计以及领导大型电源工程师团队的工程管理方面拥有超过 18 年的经验。Stephen 在密歇根州立大学获得 BSEE 和 MSEE 学位。

## 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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月