

如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

背景:

负载瞬变测试是检查功率转换器表现的一种快速方法，它可以反映出转换器的调整速度，能将转换器的稳定性问题凸显出来。转换器的负载调整特性、占空比极限、PCB 布局问题和输入电压的稳定性也可经此测试快速显现出来。

许多现今的电子设备都包含了计算和无线连接功能，这些功能电路常常表现出很重的脉冲负载特性。面对这种快速变化的脉冲负载，全新的 DC/DC 转换器需要具有快速的环路响应特性来维持输出电压的稳定。为了测试这种类型的转换器，拥有能够生成与最终应用类似的快速变化的负载的工具是很重要的。

应用背景

对于具有比较稳定的负载的通用型 DC/DC 转换器来说，快速的回路响应特性是不需要的，因而也不必进行负载瞬态响应特性的测试。但在把快速阶跃变化的负载施加到一个稳压器上时，必然在很宽的频带内对调节回路造成冲击，在某些情况下甚至可能逼迫它们运行在控制回路的极限之下。通过将一个快速变化的阶跃负载施加到一个转换器的输出端，再对其输出电压的响应过程进行分析，可让我们快速而且容易地知道这个转换器在面临这样的状况时能否维持其输出电压的稳定，同时也能凸显出可能存在的环路稳定性问题、电源供应的稳定性问题、斜坡补偿问题、负载调节性能和 PCB 布局问题。

图 1 显示了一个电流模式 Buck 转换器在其负载发生 1A 快速跳变时典型的响应过程，其输出电压正常值 $V_{OUT\ NOM} = 3.3V$ 。

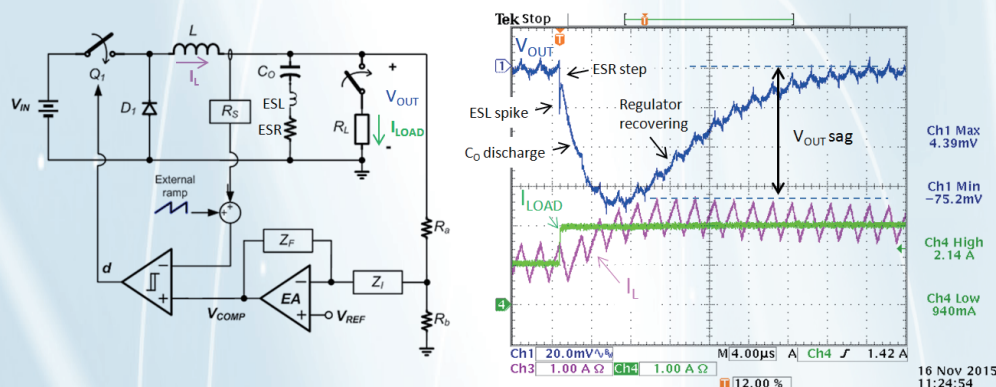


图 1：电流模式 Buck 转换器面对快速瞬变负载时的响应

如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

电流模式转换器对负载的阶跃变化不能做出即时响应，所以，当负载发生阶跃变化的时候，供给负载的电流最初是来源于输出电容里的储能。面对负载的快速跳变，输出电容的 ESR 和 ESL 首先起作用，在输出电压上表现为一个不大的跳变和尖峰，然后才是输出电容放电的开始，这将造成输出电压的下沉。输出电压的下降将被误差放大器感知到，相应地，这将导致 VCOMP 的上升，这又会增加开关 Q1 导通的占空比，电感电流因此增大以满足负载增大了的需要。在此过程关中，电压下沉的幅度和恢复的时间将取决于多种因素：输出电容的大小，负载电流跳变的幅度和它变化的速度 di/dt ，误差放大器的补偿水平和整个控制回路的带宽。

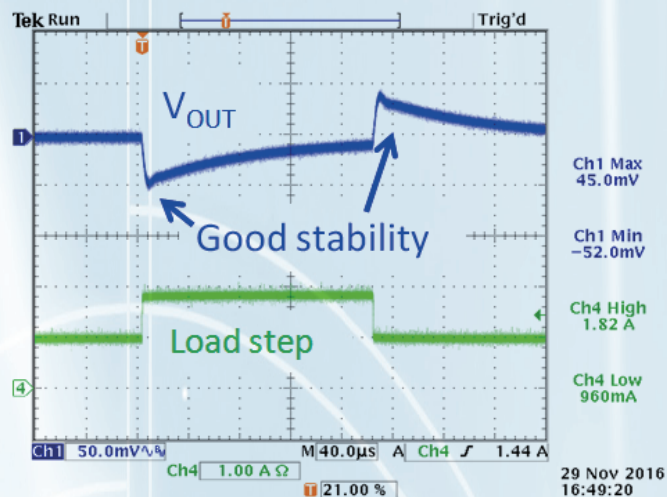
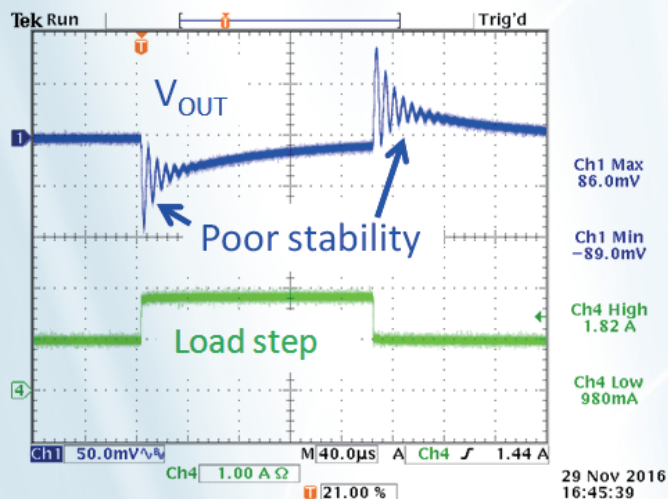
抛开由 ESR 和 ESL 造成的尖峰来看，转换器的阶跃响应过程在这个案例中看起来是非常平滑的，这表明此转换器的表现是稳健的。响应过程中的电压下沉幅度为 75mV，相当于输出电压的 2.2%，这对大部分 3.3V 的电源供应来说是可以接受的。需要注意的是，如果我们使用的输出电容是低 ESR 的 MLCC，由 ESR 所造成的跳变通常就看不出来。

可能影响转换器面对负载阶跃的响应过程的情形大概有这些：

- 1. 不稳定的控制回路：**当控制回路调整得不好时，转换器的控制作用可能过头，快速负载阶跃可能导致输出电压的颠簸或是存在振铃现象，某些情况下甚至可能进入振荡状态。
- 2. 不稳定的电源供应：**转换器输出端的负载跳变会导致转换器输入端的电源供应器的负载跳变。假如电源供应器的稳定性不好，或者是与转换器匹配得不好，则电源供应器自身就可能振荡起来，这必然会传递到转换器的输出端，看起来就像转换器的控制回路不稳定一样。
- 3. 斜坡补偿问题：**电流模式转换器采用斜坡补偿方法避免高占空比应用中可能出现的次谐波振荡。为了让斜坡补偿工作正常，适当程度的电感电流纹波是必须的。电感选择不当会导致不当的电流纹波，并在遇到阶跃负载时出现不稳定的次谐波。
- 4. 在占空比极限下工作：**当转换器在靠近最小 / 最大占空比的状态下运行时，负载的快速阶跃变化将使转换器触及占空比的极限，这将导致输出电压下沉或上冲过度，某些时候甚至会造成转换器运作在保护模式下。
- 5. PCB 布局问题：**假如由于 PCB 布局而造成的阻抗出现在转换器的小信号环节和功率环节上，电压的耗损和噪声的耦合就会发生，这将劣化转换器对阶跃负载的响应特性。假如负载处在远离转换器的地方，多出来的路径阻抗会在负载增加时导致电压的下沉，劣化转换器的负载调整性能。此外，当负载发生跳变时，路径电感也能导致振铃信号的出现。

如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

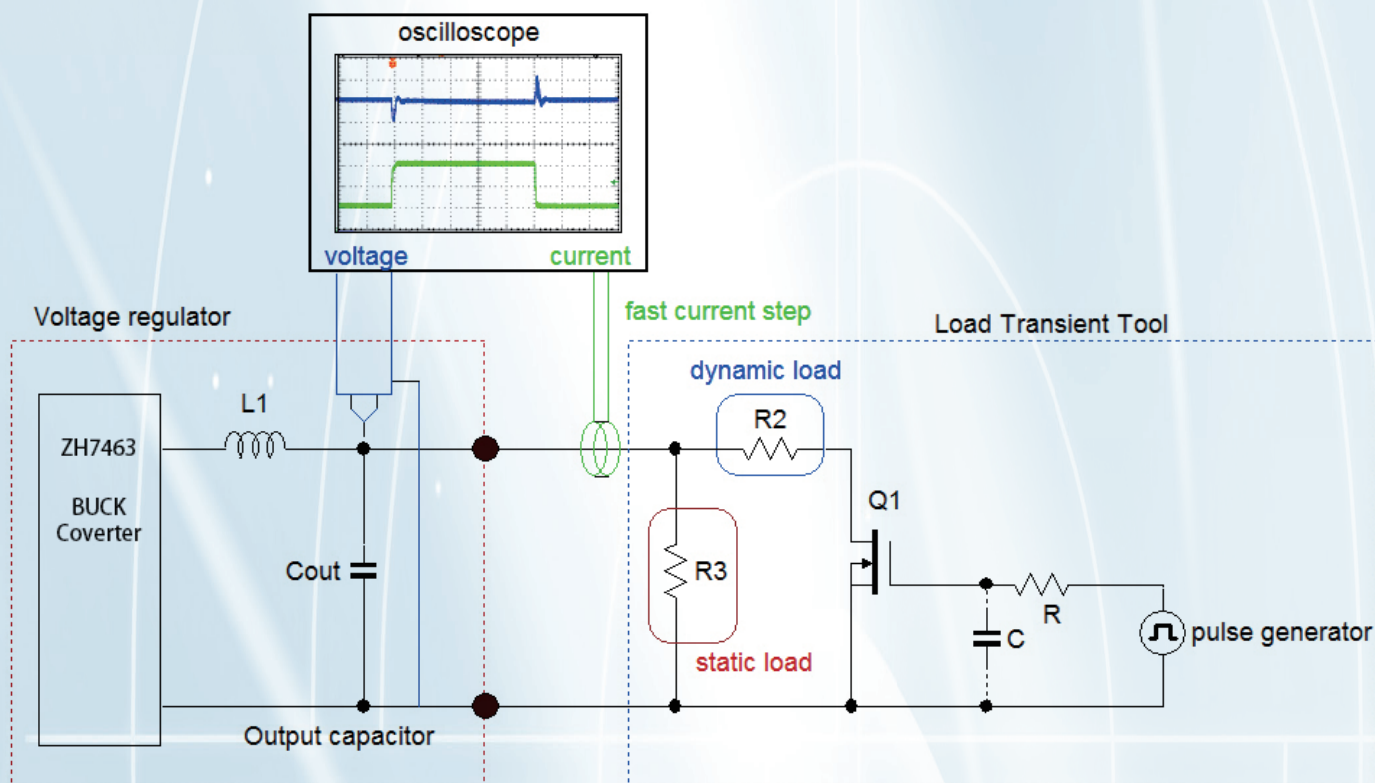
下图显示了一个 3.3V / 3A 转换器负载阶跃响应较差和良好的例子。左边的例子显示调节器输出电压在负载暂态后出现严重的振铃现象，说明控制回路具有边际稳定性。在大多数情况下，这与反馈回路补偿结合输出电容值有关。



测试的实施：

客户这边之前的产品没有测试过这个参数，批量生产后发现后端 MCU 在现场大量过压损坏。后更换 DCDC 芯片，厂商说绝对不会有类似问题。但是客户还是不放心的，希望我们可以协助测量一下。

我们采用了如下的测试方案：

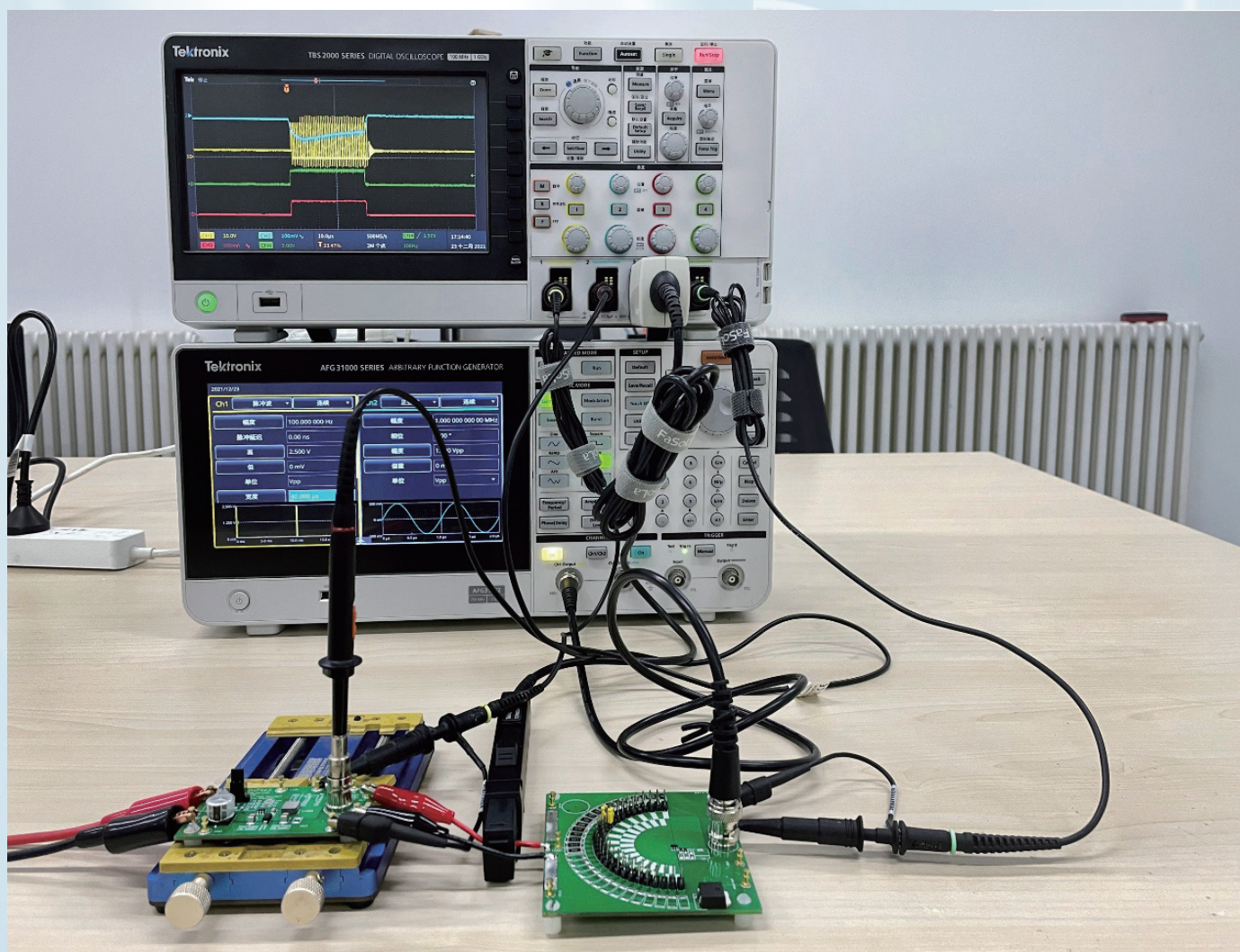


如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

一个受脉冲发生器控制其通 / 断的 MOSFET 开关。MOSFET 开关的切换速度可用其栅极的可选的 RC 网络进行调节；MOSFET 漏极连接的电阻 R2 可根据需要的动态负载调节幅度进行选择；电阻 R1 用于设定负载阶跃的静态基点。负载电流的阶跃变化可通过示波器的电流探头进行测量，对转换器输出电压的测量则需要在输出电容或是负载点上进行。

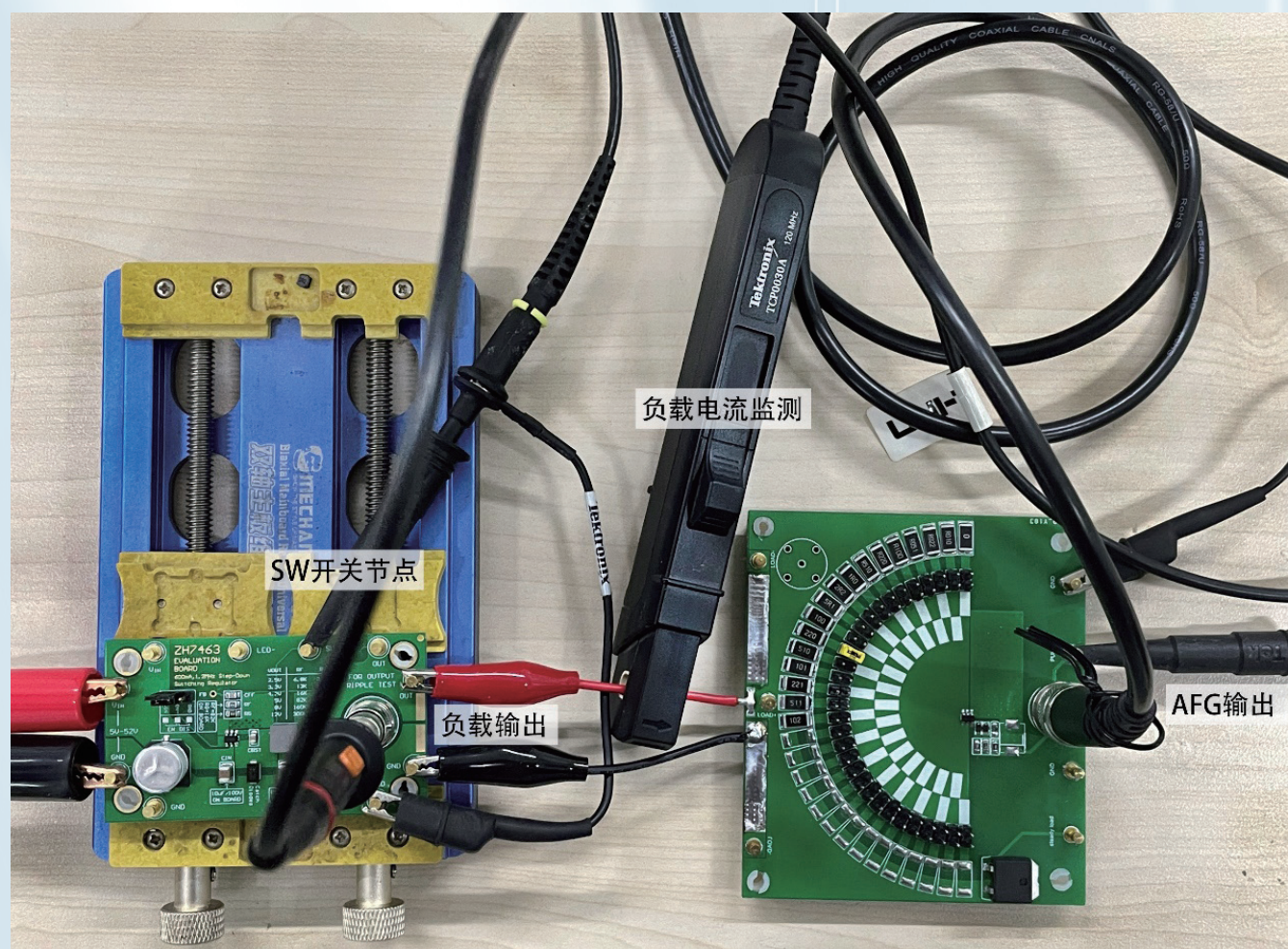
使用 AFG31252 产生一个快速脉冲，AFG31252 可以轻松产生 4ns 的上升或者下降边沿。

我们的测试环境搭建完毕：



我们使用了这款 DCDC 的评估板，这是一款耐压 52V 的 BUCK 的开关稳压器，评估板很贴心的使用了 BNC 接口，方便我们对纹波和 Load Transient 进行测量。

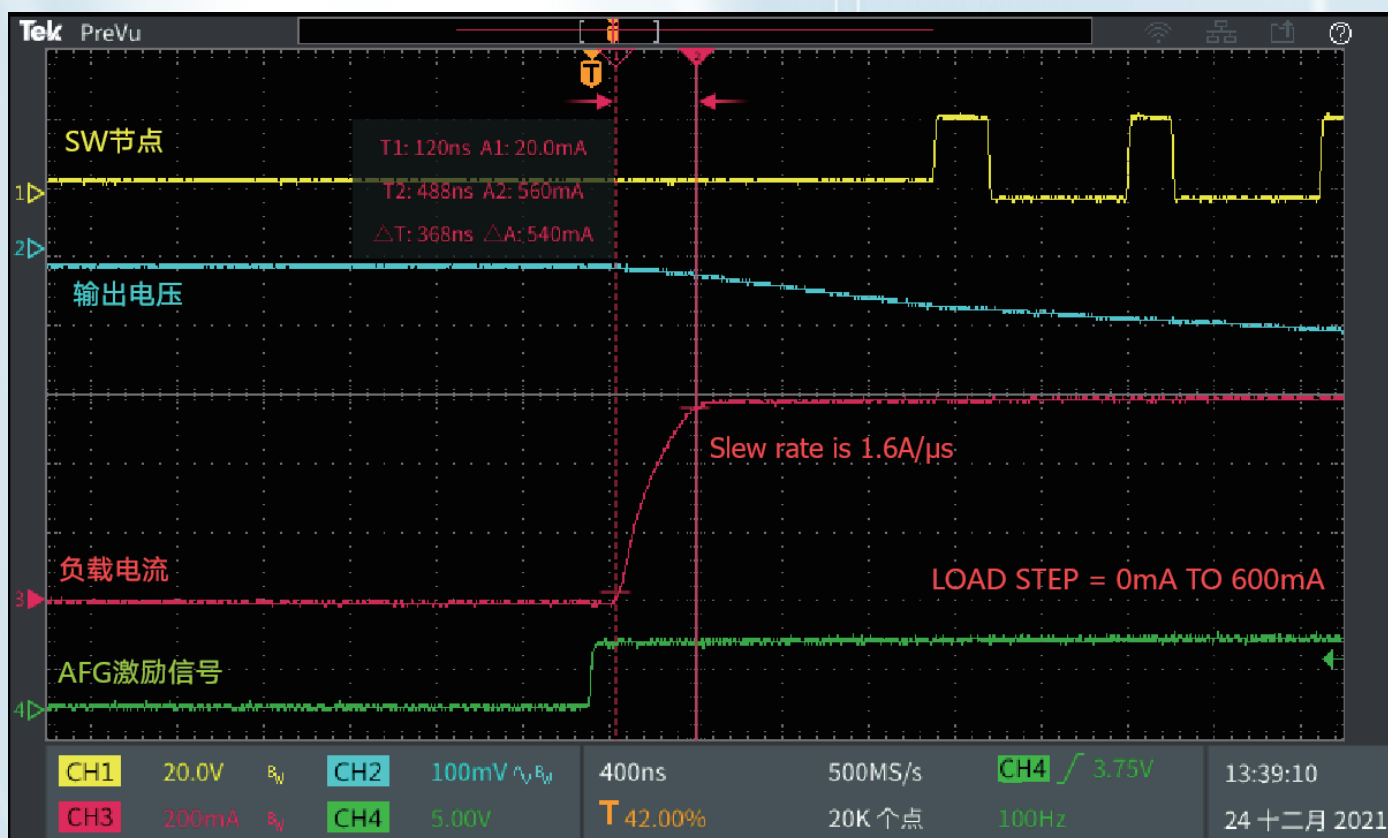
如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)



如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

我们看到，这颗芯片肯定做过非常特殊的处理。当负载发生大幅度快速阶跃时几乎完全没有电压过冲发生。这一定是对于电压敏感型负载特殊优化过，这对于一些需要 DCDC 后面直接带 MCU 这种对电压要求很敏感的需求来说非常重要。

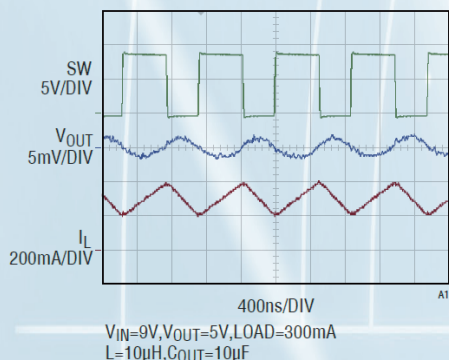
我们打开波形，可以看到，得益于 AFG31000 系列的 4ns 的上升速度和 TCP0030A 高速电流探头的 120MHz 带宽，得以观测到，这个电流快沿时间速度高达 $1.6\text{A}/\mu\text{s}$ ！



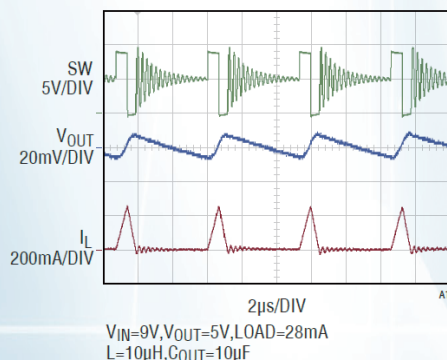
这样就够了么？可以告诉客户，放心用，不会再烧后端了。并没有！

通过手册我们得知，由于这颗芯片支持多模式开关方式切换，为了可以在各种工作电流情况下都得到最优的效率。

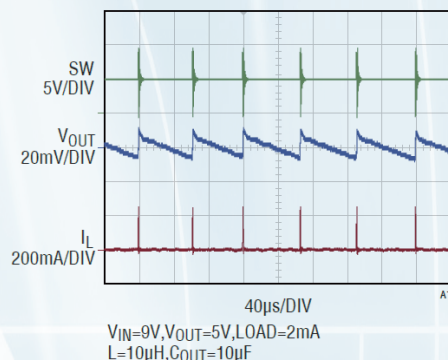
Switching Waveforms,
PWM Mode



Switching Waveforms,
Burst Mode Operation

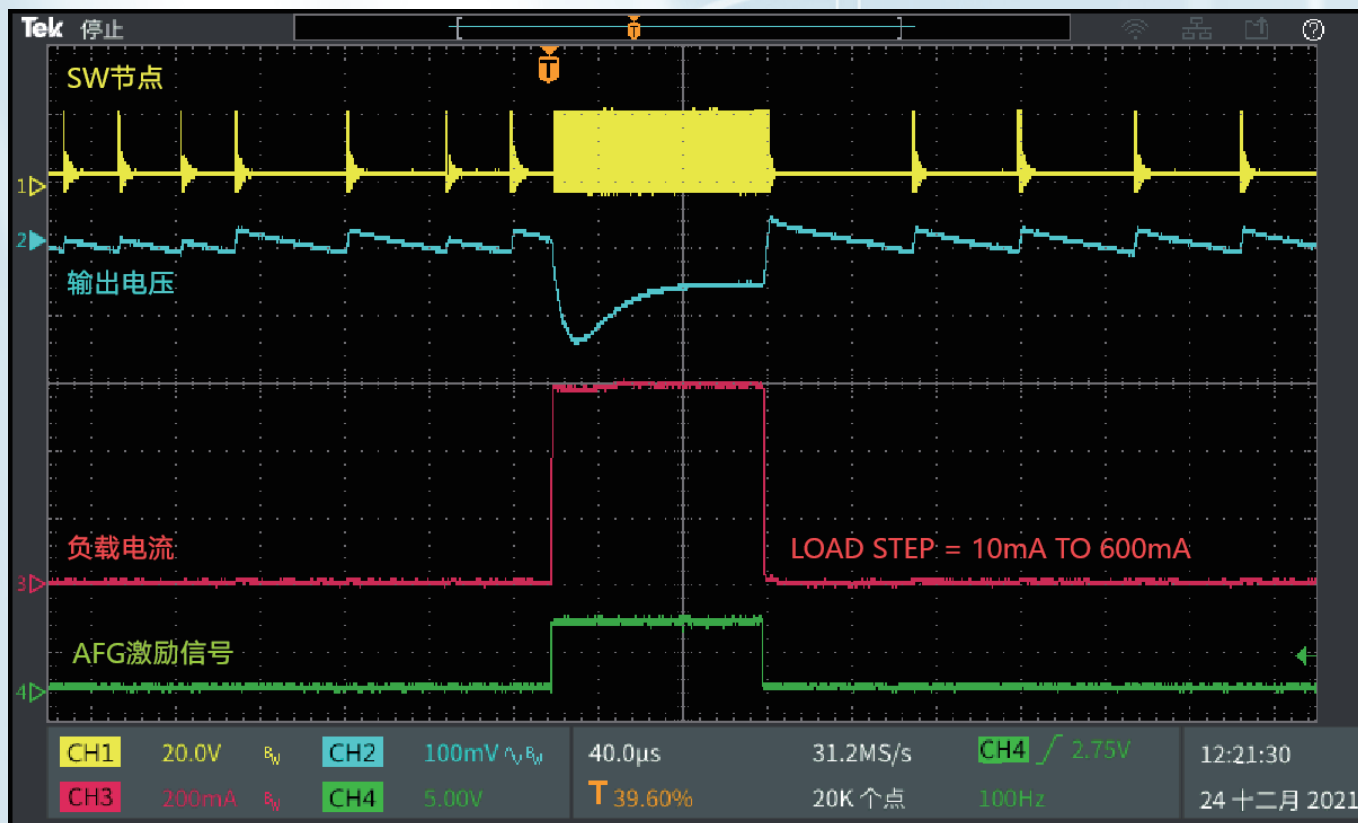


Switching Waveforms,
Pulse Skip Mode



如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

所以我们需要继续测试在各种模式转换过程中，是否存在过压发生。



如何使用 TBS2000B/AFG31000 系列 测试电源的负载瞬态响应 (Load Transient)

结论

经过对于多种工况的负载条件测试，基本都没有发现严重的过压情况发生，客户看到后对这套仪器的性能非常满意。我们通过这套组合，让客户一方面了解了这种需求的测试方式，另一方面辅助客户更快更可靠的实现快速量产。

主要设备名称	推荐型号	主要技术指标	系统应用
示波器	TBS2104B	四通道 100Mhz	1、快沿测试 2、高速电流测试 3、动态响应测试
探头	TCP0030A	120Mhz 30A 电流探头	
函数发生器	AFG31252	双通道 250Mhz 函数发生器	