

通过实施有源滤波，减少噪声敏感、高瞬态应用的负载电容



作者：产品营销经理Chester Firek和
应用工程师Bob Kent
2007年8月

摘要

电源架构师从事需要低输出噪声和快速瞬态响应的系统设计，如RF发射器、功率放大器、测试系统、显示器、支持低电压ASIC的设计和激光二极管发射机等，明白到当使用无源元件来尝试特定设计电源系统以满足上述两个要求，而这两个目标会是截然相反的。最大限度降低周期性和随机偏差（PARD）需要进行滤波，而滤波却会阻碍快速瞬态响应。

DC-DC转换器、负载的特性，无源元件的电特性以及可用的PCB面积，所有这些都呈现额外的设计约束，会进一步限制设计人员的选择。如果设计人员无法用最适用的DC-DC转换器开始其设计，来匹配瞬变和噪声要求，那这个任务就变得更加困难了。这可能是由于缺乏内部设计资源、很短的设计机的、现成的DC-DC转换器。

以下白皮书采用了典型的现成隔离式DC-DC转换器，演示了与无源做法相比，一个有源滤波器怎样不仅提供优异的滤波，也可以提供一个简单的整体方案，来满足具有挑战性的瞬态响应要求。这种方法要么或不使用降噪用的负载电容，或可以减少多达10倍的电容量以得到等效的瞬变能力。本文中演示的性能改进也将适用于采用优化的定制DC-DC转换器的应用。

DC-DC转换器注意事项

为了正确了解与优化“电源系统”实现低噪声和快速瞬态响应所涉及的问题，重要的是先建立起DC-DC转换器的基准性能。许多今天的现成的高密度开关模式电源转换器设计都是为了优化功率密度和效率，这是选择转换器两个最常用的标准。DC-DC转换器只是整个电源系统的一个组成部分，一个元件并非一个整体解决方案。虽然一些转换器的输出纹波和噪声水平对于今天的最终系统需求已经足够，但它们对于一些比较敏感的模拟或数字系统可能就不够了。而作为功率元件，DC-DC转换器通常会提供一个良好的电流源“引擎”来支持负载瞬变，而且一般不会有太大的内部能量存储能力。诸如低纹波和快速瞬态响应等参数是对密度和效率的设计权衡，而且由于不同应用的特定需求可能会有所不同，DC-DC制造商将提供使用外部元件进一步优化这些参数的方法，而不是将这些元件加到转换器的内部。针对低噪声和快速瞬态响应优化（用外部元件）的转换器能力，将取决于转换器的拓扑结构、开关频率和转换器制造商可能对使用外部元件规定的任何限制，譬如最大负载电容。

纹波的选择

DC-DC转换器输出端纹波和噪声的两个主要来源是由转换器产生的开关噪声，以及来自转换器的电压纹波（如果由离线源供电，通常是120Hz）。对于线电压纹波，DC-DC转换器会提供一定程度抑制，任何剩余纹波都会出现在负载上。概括地说，一个稳压DC-DC转换器的输出纹波规格可以从100mV p-p（5Vout）到240mV p-p（24Vout）或以上，这取决于转换器。作为输出电压的百分比，5Vout转换器的取值范围可以是2%，而24Vout转换器为1%（见表1）。加上低ESR（等效串联电阻）电容可以减少高达50%的纹波；使用前面的例子将得到一个50mV至120mV p-p的范围。纹波的进一步减少可以通过增加一个有低DC电阻的串联电感来实现。增加一个电感器可实现高达50-60%的额外改善；5Vout转换器可降低纹波到大约20mV p-p，24Vout转换器可达50mV p-p或以上。虽然改善非常明显，但一个使用28V RF 功率放大器（PA）的应用可能需要低至10mV p-p或更低纹波水平，以防止边带频率（sideband frequency）峰起。减少输入线反射纹波的进一步改进将需要低频率条件下更好的衰减，这需要使用大型电感器和较大的电容器。为了节省空间，衰减剩余低频噪声更实用的方法是使用有源滤波。

表1:
采用各种滤波器解决方案的
隔离式DC-DC转换器的
输出纹波指标

	输出电压		
	5 V	12 V	24 V
无额外滤波器	100 mV	150 mV	240 mV
低ESR电容	50 mV	75 mV	120 mV
LC输出滤波器	20 mV	35 mV	50 mV
QPO和uRAM系列有源滤波器	<10 mV	<10 mV	<10 mV

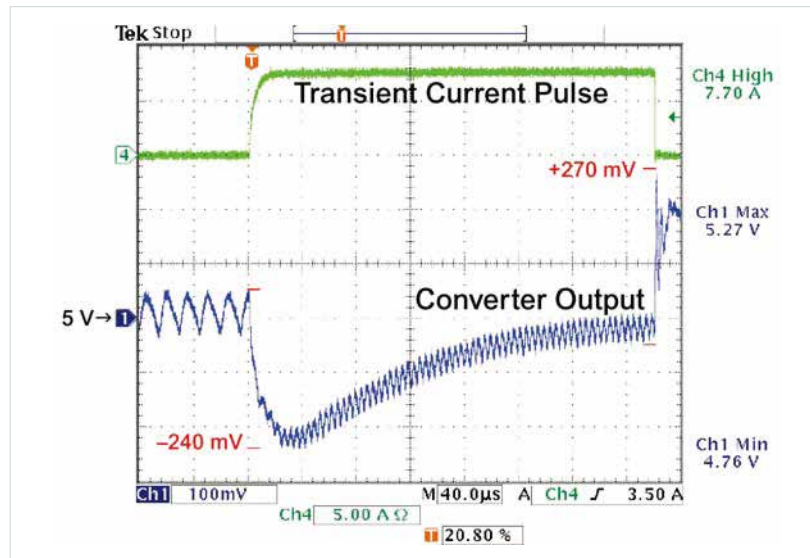
瞬态响应

噪声敏感的应用，如RF功率放大器和激光二极管发射机也需要非常快的瞬态负载响应。在RF功率放大器的情况下，系统可能稳态运行在10%负载条件下，然后负载几乎在瞬间增加至接近100%。对于一般DC-DC转换器来说，其对大负载阶跃的响应可能需要几百微秒，而功率放大器却可能需要小于一百微秒的负载时间恢复时间。对于一个现成的隔离式DC-DC转换器，控制反馈环路的响应时间（约等于转换器开关频率的1/5）对于识别瞬态事件，并在足够时间内做出响应，以避免输出电压的显著下跌实在是太慢了。增加无源元件进一步减慢了转换器的环路响应。有源滤波器在DC-DC转换器和负载之间提供了一个缓冲区，而无源解决方案不能提供这种功能。负载响应主要是由有源滤波器提供的，它可以提供比DC-DC转换器速度快几个数量级的环路响应。图1中的波形描绘了一个典型转换器对7.7 A瞬态负载电流的响应，而没有使用外部滤波或电容。

对于图1中的转换器，在稳态下的输出纹波大约是100mV p-p，远高于大多数噪声敏感的应用。然而，系统设计人员较大的关注可能是输出电压的下跌。所示的例子中，输出在负载瞬态事件开始时下跌，然后在瞬态事件结束点，负载电流下降时上冲，产生约±250 mV的整体输出电压偏差，这也将是敏感应用的一个问题。

为了提供更快负载瞬态响应，通常需要增加额外输出保持电容作为电流源来满足额外负载。取决于瞬态要求，这可能意味着将需要增加非常大量的额外电容。增加额外电容器的缺点是元件的成本、其占用的电路板空间，以及额外电容器对系统可靠性的影响。此外，由于电容器的内部ESR，仍然会有固有的瞬态电压降，因此电容器无法提供一个理想的解决方案。以这种配置的能力要在瞬态期间保持一个干净稳定的输出电压是值得怀疑的。在“增加‘保持’电容”和“解决方案尺寸及重量的比较”一节进一步讨论了增加电容的话题。

图1:
采用5Vout转换器的
瞬态负载电流^[1]

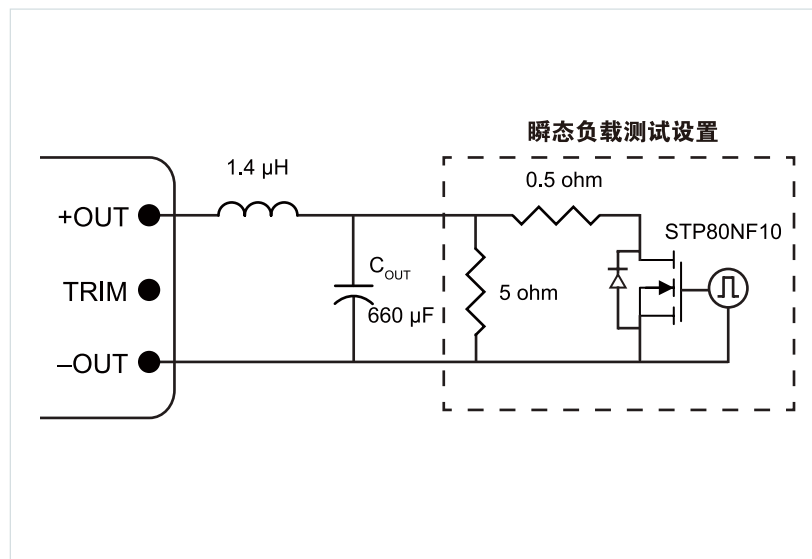


LC滤波网络

滤掉输出纹波的最常用方法是在转换器的输出端增加串联电感和并联电容，这通常被称为“LC网络”，（如图2所示）。如表1所示，LC网络中的电感器可以比单独的电容器提供更好的纹波衰减。

增加电感的固有问题在于，当瞬态负载发生时，通过电感器的电流不能足够快地改变，为负载提供电流，所以所有能量都必须由负载电容器来提供。需要的电容值将取决于系统要求，以及负载电流与时间 $[di/dt]$ 的变化关系。但是，因为电容器提供了必要的电流，由于非理想的寄生因素，仍然有可能引起输出电压不必要的下降；其下降等于瞬态电流的值乘以电容器的等效串联电阻（ESR），以及在电气串联电感（ESL）两端的频率有关的压降。

图2:
测试设置，有LC滤波器的
DC-DC转换器



^[1]DC-DC转换器采用了Vicor编号V48C5C100BN的器件

图3和图4中的波形显示了LC网络对转换器输出纹波（Ch2）滤波的结果。虽然纹波大大降低了，但也增加了负载电压的瞬态下降。在瞬态开始时，来自滤波器的输出电压急剧下降。由于通过电感的电流不能瞬间改变，瞬态负载的电流必须来自输出电容器。这种初始电压降是瞬态电流乘以电容器ESR的结果。为了减少电压降，将不得不减少输出电容的整体ESR；方法是通过仔细选择较低ESR的电容，或通过使用更多电容器并联其ESR分量。在这种情况下，在转换器开始恢复并使输出达到稳压之前，负载上的电压下降超过了300 mV。

图3:
在输出端使用LC
滤波器的5Vout转换器的
纹波和负载响应

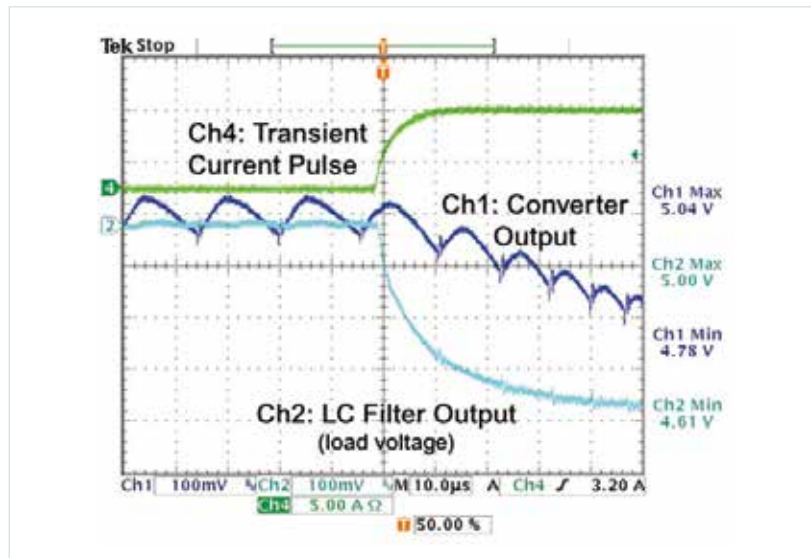
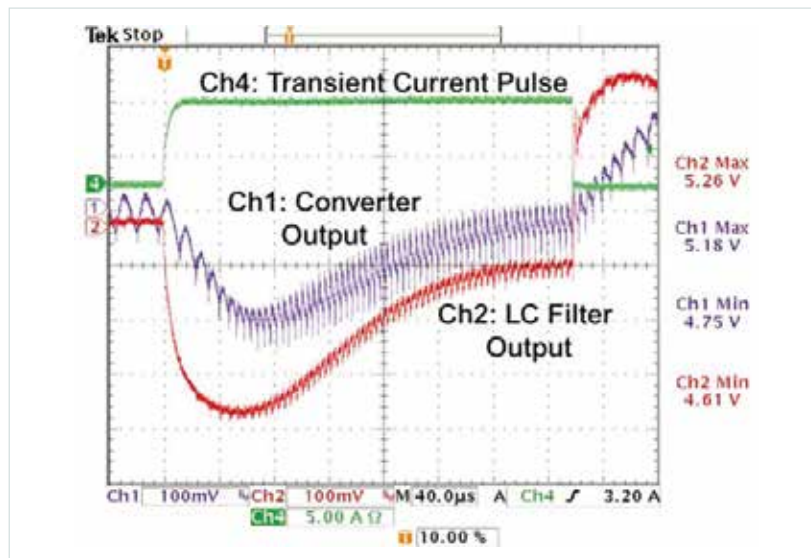


图4中的波形（下边）显示了完整的瞬态事件，以及由此产生的LC滤波器的下冲（undershoot）和过冲，因为在其共振频率LC滤波器会出现振铃。到瞬态结束时，通过电感器的电流提供瞬态负载电流。当负载瞬态结束时，通过电感的电流保持不变，因为它不能瞬间改变，并注入负载电容，迫使电容的存储能量将输出电压提升到大约300mV，导致600mV的峰-峰值变化。

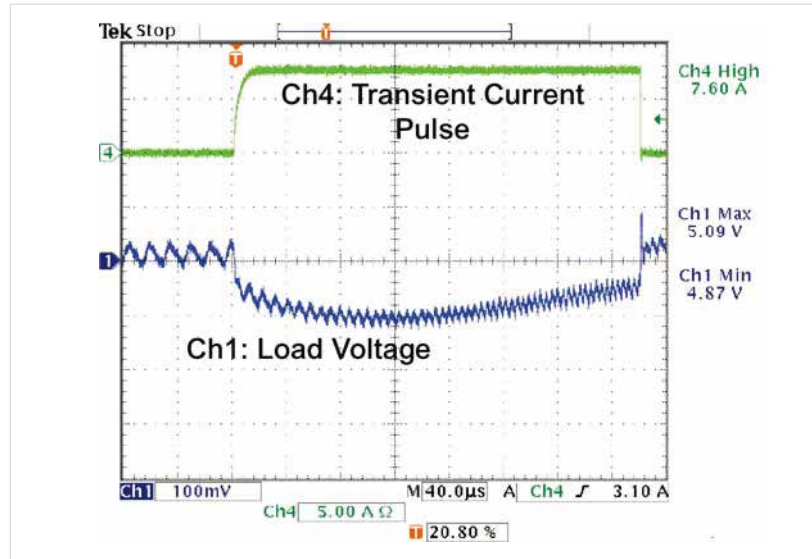
图4:
5Vout转换器和LC网络的
完整瞬态负载事件



增加“保持”电容

为了弥补输出电压这样的戏剧性变化，需要在负载上增加额外的电容，以“保持”负载上的电压。考虑到负载电容的影响，首先展示了没有电感的相同电路。图5中的波形显示了，在转换器输出端有额外8mF电容的瞬态负载期间相同的转换器输出电压。

图5:
有5V_{out}转换器和
8个并联1mF电容
(总共8mF)
的瞬态负载电流



在这种情况下，增加的电容减少电压降到大约100mV，而不是用LC滤波器得到的300mV。正如预期的那样，与独立的DC-DC转换器相比，纹波的幅值减小了（到约40mV p-p）；虽然该纹波高于用LC滤波器的情况。

虽然，使用这种方法的结果显示提高了整体性能，但实现这些结果应该权衡解决方案的总体尺寸，以及及与转换器兼容性有关的任何潜在的可靠性问题。

注：大多数DC-DC制造商都对转换器输出端可以增加的电容数量规定了限制，以避免环路稳定性的问题。在上述所示的例子中，超过了转换器制造商所规定的最大电容值，这里显示的是一个极端的例子。请务必参阅制造商的DC-DC转换器规格来确定可接受的电容水平。

保持电容与电感

图6显示了一个测试电路，组合了来自LC滤波器的 $1.4\ \mu\text{H}$ 电感器与来自前面例子的 8mF 保持电容。图7所得的波形显示输出纹波有所改善，但瞬态响应略有下降。由于有 8mF 电容的LC滤波器的谐振频率低得多，很显然，电压的第一个步跃是电容的ESR和电感的电抗引起的。

在这个例子中，负载电容比图2所示的第一个LC滤波器例子的用量增加了十倍以上。在这个例子中，保持电容的好处似乎已达到最大化。增加电感再一次降低了纹波水平。使用较大的电感器可能进一步减少纹波。现在，这些无源设计的几近优化的结果可以与有源滤波器的性能相媲美。

图6:
测试设置，有 $1.4\ \mu\text{H}$ 电感器
和 8mF 负载电容的
 5V_{out} 转换器

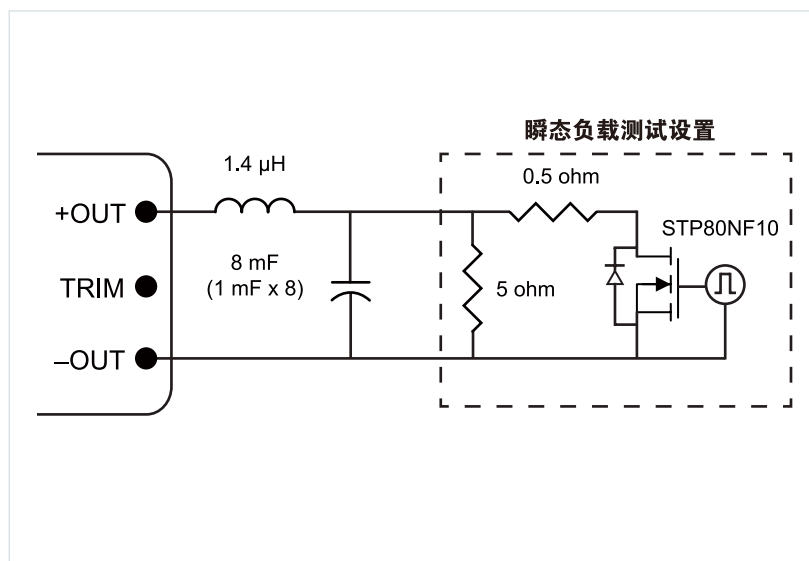
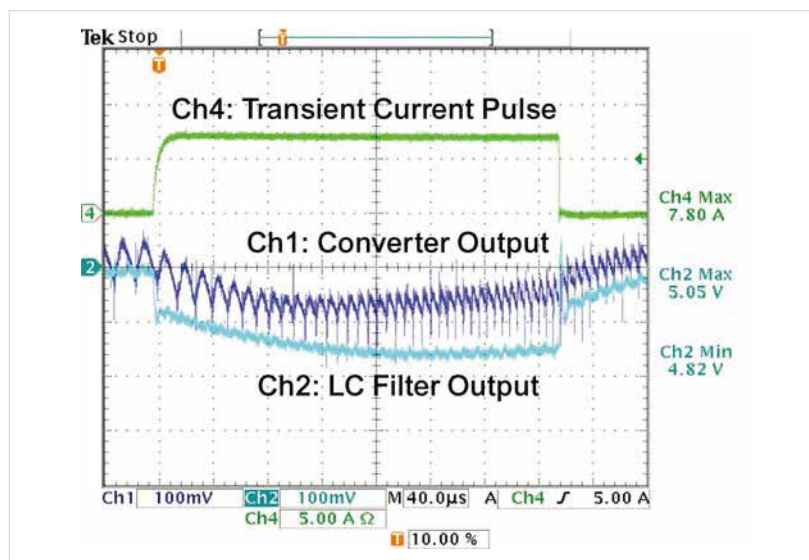


图7:
有 $1.4\ \mu\text{H}$ 电感器和
 8mF 负载电容的
瞬态负载电流



有源滤波和瞬态响应

正如前面的例子所示，无源方法的主要缺点在于对瞬态响应的电感，以及保持电容两端的电压降的影响。有源滤波器通过取代无源电感（ di/dt 本来就慢）改善了瞬态响应，快得多且体积更小的有源元件如图8所示。在有源方法中，电感电抗被一个功率FET所取代，该FET由一个高速控制器调制建立起线性电阻^[2]。在瞬态条件下，由滤波器的输入电压的变化除以滤波器的输出电压变化（ $\Delta V_{in}/\Delta V_{out}$ ）得出，滤波器的环路增益增加了对输入端到滤波器电容的影响。这显著降低了所需的电容量，同时缩短了 di/dt 瞬态响应时间。

通过减少其正输入和输出引脚之间的内部电阻路径，有源滤波器（如Picor的QPO和uRAM模型）能够响应的瞬变速度远远超过了转换器。由于QPO输入端的电压大于其输出的电压，这个电压差可以用来补偿瞬态的额外负载要求。这个电压差（ ΔV_{hr} ）被称为净空电压（headroom voltage），是由用户选择的，提供了一个大于所需负载电压的转换器输出电压。在瞬态期间，转换器的输出将会下跌，而有源滤波器将通过减少净空电压来补偿，以维持恒定的输出电压，前提是电压降不大于所选择的 ΔV_{hr} 。QPO有源环路的最小电压降基于QPO最小电阻。

图8：
测试设置，有QPO-1
有源输出滤波器的
5V_{out}转换器

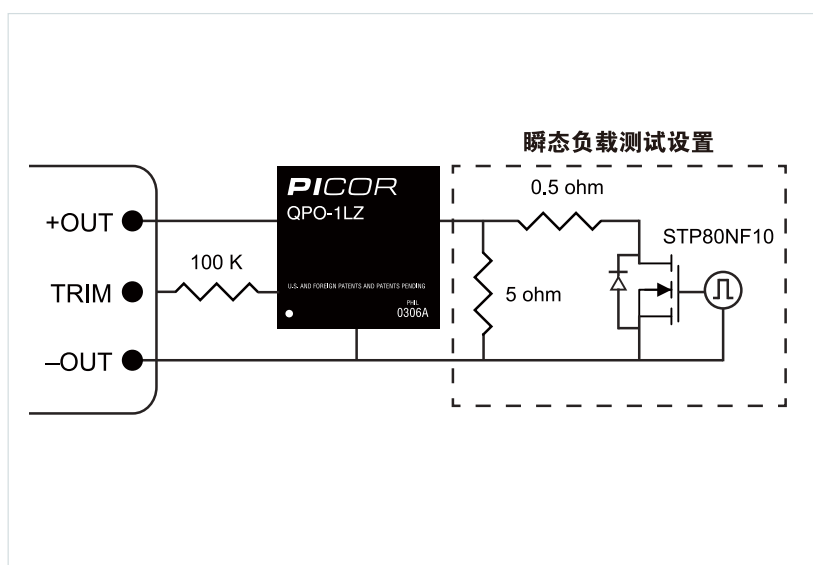
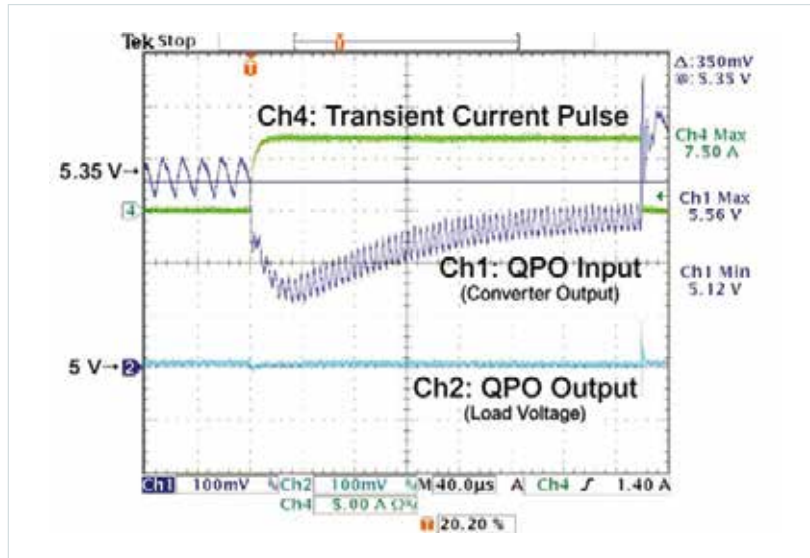


图9中的波形显示了在瞬态负载事件期间，QPO从转换器滤掉纹波电压以及转换器电压降的能力。在这个例子中，在低负载条件下，QPO测试板的设计有350mV的净空电压；这个测试的负载是一个1A的恒定负载。Ch1是QPO输入端看到的电压；Ch2是QPO输出电压。两个通道均为5V偏移DC测量，参考点移离中心低两格。

图9中的负载阶跃（Ch4）仅监视瞬态电流，不包括静态1A的负载。观察图形，从波形的左边开始，Ch1和Ch2之间的平均dc电压差是350mV。经过约80 μ s之后，瞬态电流事件发生（约1A/ μ s），来自转换器的电压（Ch1）跌落。整个瞬态持续时间QPO输出电压（Ch2）保持在5V不变。因此，QPO滤波器几乎消除了纹波及与7.7A瞬态相关的负载电压跌落，没有使用额外电容，显著优于所有无源方案。

^[2] “有源模拟电源滤波器为EMC及EMI提供解决方案” 2004年，作者Jeff Dumas、Bob Lanoue和Bishara Tahhan。

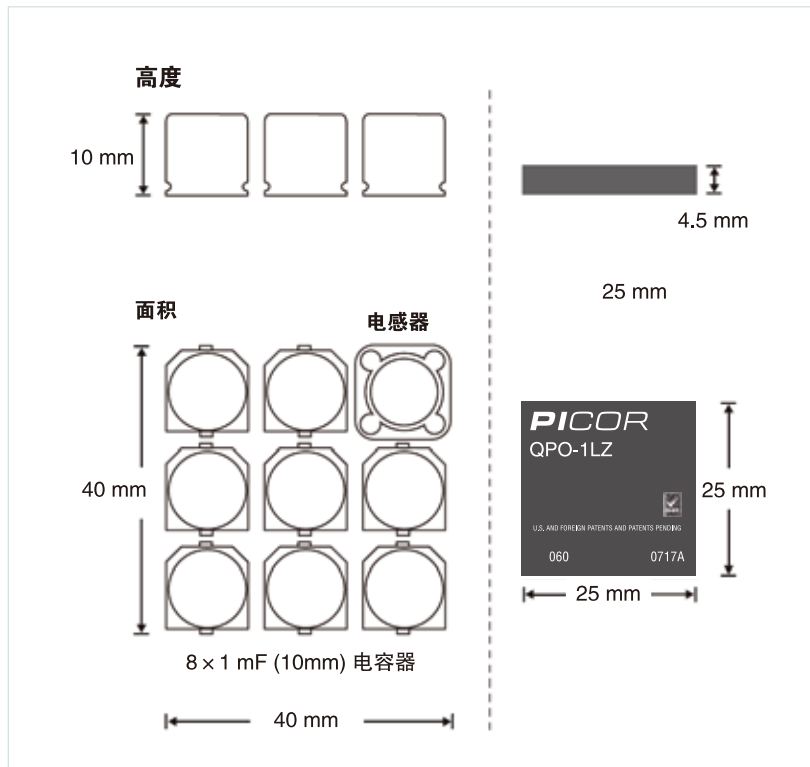
图9:
使用相同的5V_{out}
转换器和QPO有源输出
滤波器的瞬态负载



解决方案尺寸及重量的比较

除了改善瞬态和输出纹波性能外，有源滤波器在尺寸和重量方面还有额外的好处。使用图6中电路的元件，在图10中示出了元件尺寸的比例图。电感器和电容器所需的电路板面积（其中包括每个元件间适当的间隙）大约为1,600mm²，高度为10mm。相比较而言，一个QPO滤波器占位面积为625mm²，高度只有4.5mm；相比无源电路，面积大约减少了60%，体积减少了约80%。除了节省空间外，有源滤波器重量本来就轻。本例中的QPO滤波器的重量只有3.1克，大约只是一个电容器的重量，对便携式或移动设备应用是又一个额外的好处。

图10:
QPO滤波器和图6中使用的
无源元件的尺寸比较



总结

在设计需要低噪声和快速瞬态响应的电源系统时，重要的是要了解将组成“电源系统”的所有元件的取舍和限制；包括DC-DC转换器、滤波器和保持电容。DC-DC转换器会是要改善的始线。在DC-DC的输出端增加无源滤波器元件将减少纹波，但这样会造成对瞬态响应的负面影响，并可能造成稳定性的问题。要改善瞬态响应将需要更多的电容。根据所需改善纹波和瞬态响应的程度，无源解决方案也可能会变得非常大，可能使解决方案空间望而却步。

如前面的例子所示，因为有更快的环路响应和更低的电阻，有源滤波比无源方法提供了更好的整体滤波和负载瞬态性能。在图8和图9提供的例子中，QPO-1表现出了显著改善的瞬态响应，而没有使用额外的负载电容。通过减少低噪声、高瞬态负载系统中所需的负载电容量，可以优化电源设计的性能和尺寸。

Picor的有源滤波器可以提供0.5V至30V的输入范围，并且可以支持高达30A的电流水平。QPO滤波器采用25mm × 25mm表面贴装LGA封装，uRAMs为57.9mm × 36.8mm的DC-DC 1/4砖式，采用通孔封装。两者都兼容大多数DC-DC转换器。

表2:
Picor的有源输出
滤波器型号

型号	工作电压范围	额定电流
QPO-1	3.0 – 30 Vdc	10 Amps
QPO-2	0.3 – 5.5 Vdc	20 Amps
uRAM-2	3.0 – 30 Vdc	20 Amps
uRAM-3	3.0 – 30 Vdc	30 Amps

PICOR
Semiconductor Power Solutions