

总线转换器中使用滤波器的注意事项

作者：应用工程师Mike DeGaetano
2013年7月



目录	页	引言
引言	1	中转母线转换器（IBC）模块是一个基于Vicor的专利正弦振幅转换器（Sine Amplitude Converter T-M, SACTM）拓扑技术研发出来的高效率、薄身、隔离式、固定比率的dc-dc转换器。IBC展现出了低噪声，带宽广，高效率的特性。
IBC属性	1	
阻尼和转换器带宽	2	本应用笔记介绍应用滤波器以使IBC，达到模块最佳性能的必须的设计注意事项。本应用笔记中提供的应用也能应用于其他Vicor的dc-dc转换器，但用户必须知道正在实现的转换器的特性。
滤波	3	
滤波方法	4	IBC属性
L/C滤波器的品质因数	6	IBC具有低插入阻抗，这能有效地减少源阻抗来保持输入端的电压降。它具有宽带宽，能使能量迅速地传递到下游的非隔离式负载点稳压器（niPOL）。由于IBC K 因数小于1，所以输入端的电压差，都会以K因数衰减至输出端。
共模电感器	6	
在滤波器中使用的电感器	8	输入电感必须减到最小，以确保临界阻尼响应。因为转换器的输入电容可能会随高电感而出现谐振，所以如果电感超过了数据表中规定的输入电感值，就可能出现起振。
在滤波器中使用的共模电感器	11	
滤波结果	12	重要的是在IBC的输入端放置滤波器，以维持输出端的低阻抗。输出阻抗可减少DC和大约二分之一开关频率之间K系数的平方。
结论	14	
附录	14	

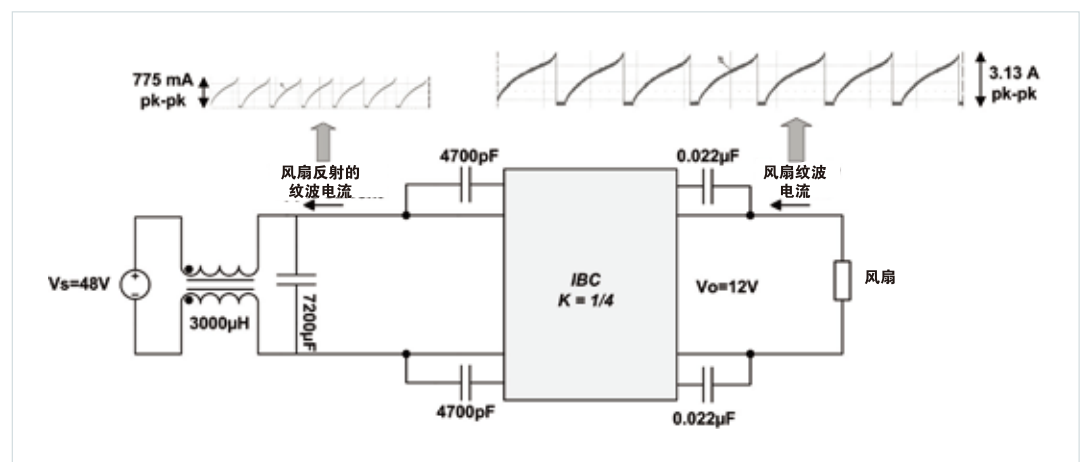


图1：
风扇作为负载时，
IB048E120T32N1-00
模块的响应

图1显示了连接到一个IBC输出和测试设置系统受一个12V风扇而产生的纹波电流。这由风扇产生噪声以K因数的衰减被IBC准确地转换为一个低频噪声（约680 Hz）。

图2:
niPOL作为负载的
IB048E120T32N1-00
模块的响应

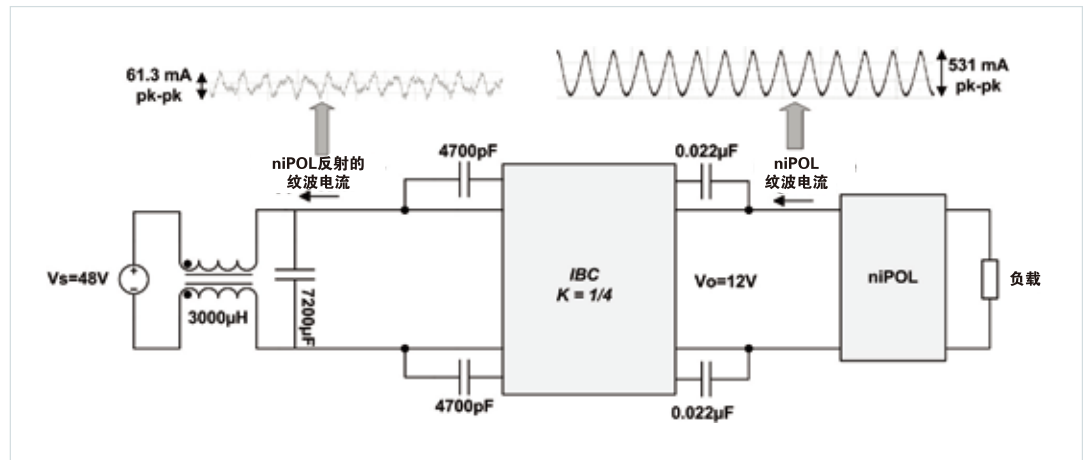


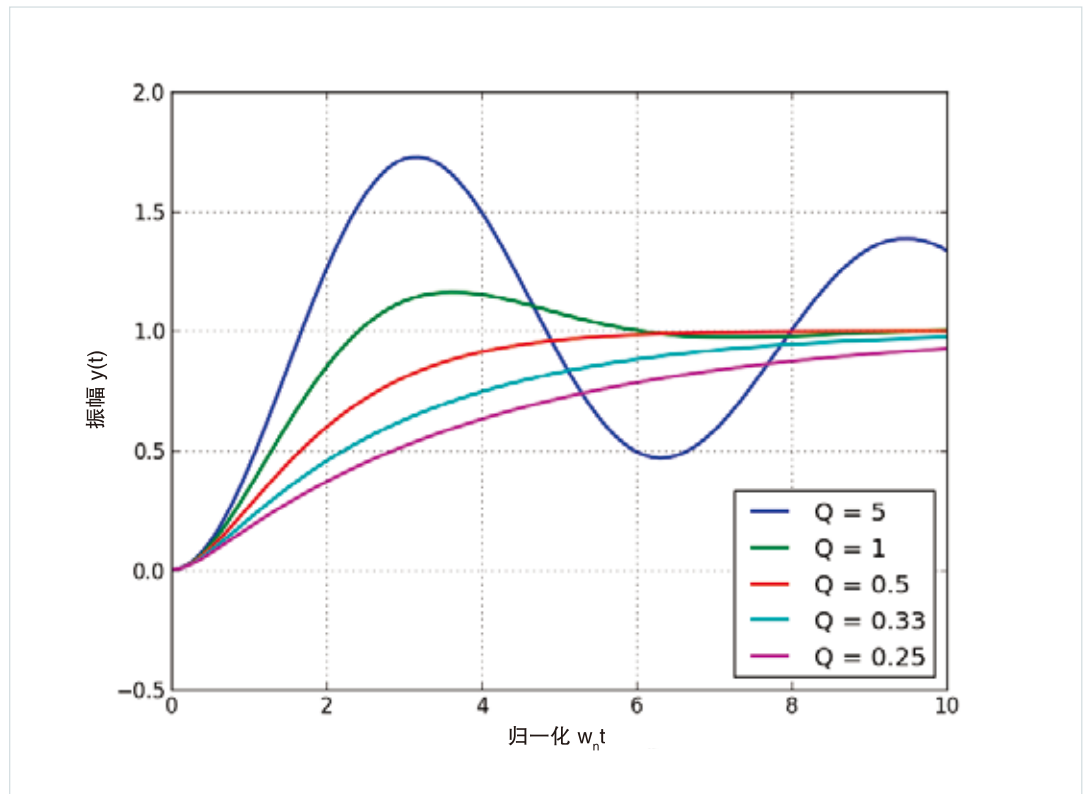
图2显示了连接到一个IBC输出和测试设置系统的一个12VniPOL所产生的纹波电流。在这里，IBC因niPOL而再产生一个高频噪声（约250kHz）。这反射纹波电流会以K因数衰减至IBC的输入端，并进一步被电路阻抗降低。由于带宽广，图1和2都显示IBC能够准确地将输出负载纹波电流转移到输入端。

输入滤波器设计注意事项

阻尼和转换器带宽

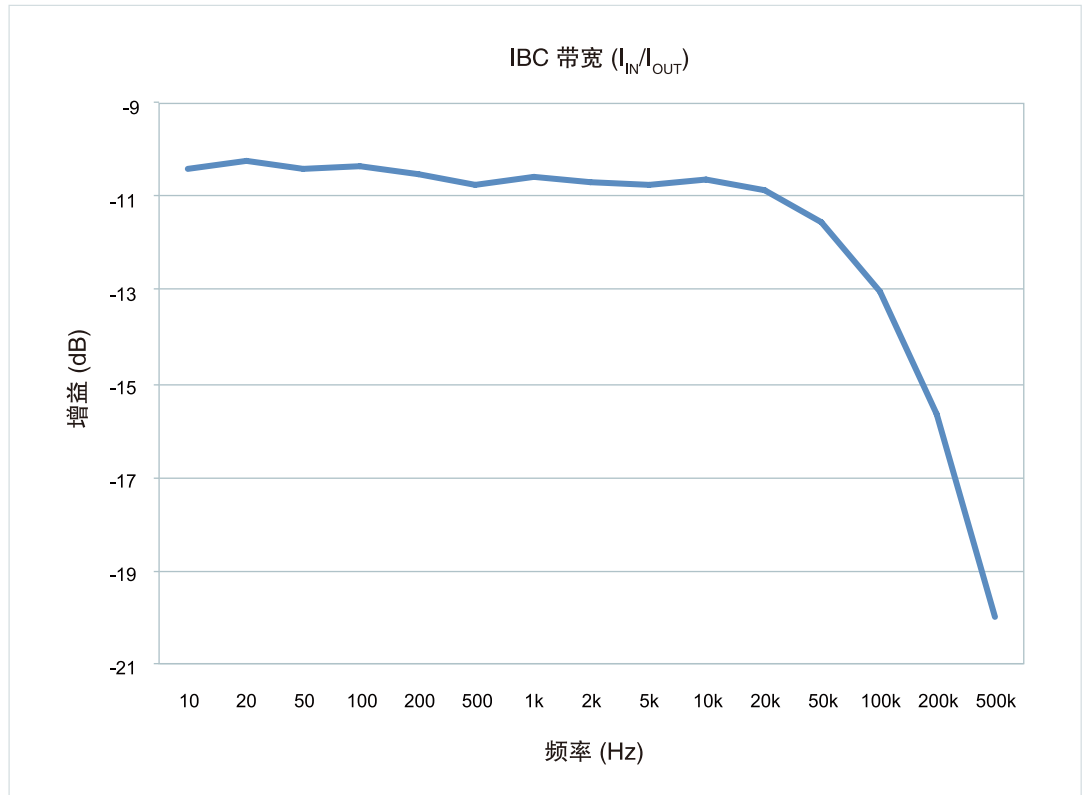
品质因数（Q因数）描述了一个系统的响应损失。Q < 1/2的低Q因数的系统为过阻尼；Q > 1/2的高Q因数系统为欠阻尼；Q = 1/2的中间Q因数系统为临界阻尼。图3显示了一个二阶系统阶跃响应的实例，并显示了欠阻尼情况（Q > 1/2）、过阻尼情况（Q < 1/2），以及临界阻尼情况（Q = 1/2）。

图3:
各种Q因数的实例



由于IBC的低输入阻抗，这能有效地把输入电感减到最小，以实现临界阻尼响应。谐振可以通过下游非隔离式负载点器（niPOL）转换器的负阻抗放大，而欠阻尼输入总线容易受到输入反射纹波电流振荡的影响。

图4:
IB048E120T32N1-00
模块的带宽

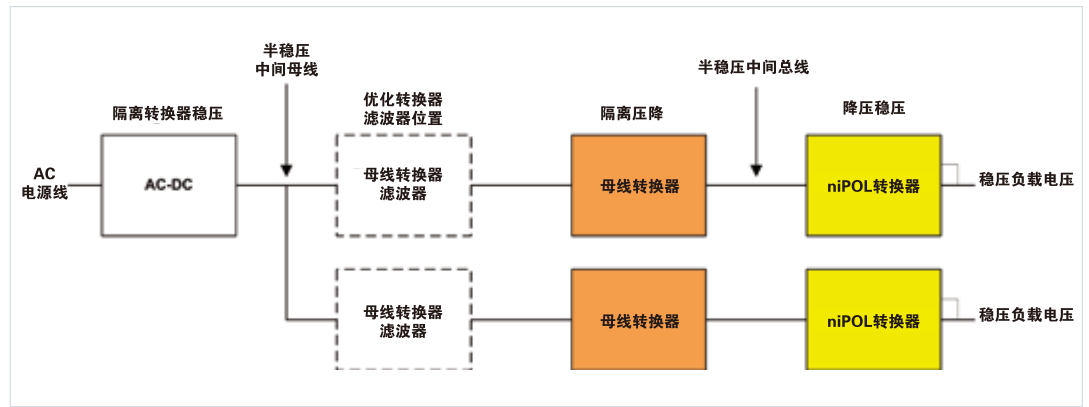


CIBC的带宽如图4所示。IBC具有宽带宽响应，可以处理高达500kHz的信号。任何下游转换器所产生的噪声都可以被滤掉。当设计一个滤波器时，为获得最优化性能，就需要考虑Q因数这样的固有属性。

滤波

中间母线架构（IBA）系统通常可通过一个称为中转母线转换器将高电压输入母线（48Vdc）转换为一个中间电压（通常为5-15Vdc）。中间母线转换器可提供DC隔离和固定比电压转换。负载点（POL）稳压器通常是非隔离式降压稳压器，可把中间母线电压降压并提供稳压输出。图5显示了一个集成了两个IBC阵列的典型IBA拓扑结构的方框图。在IBC模块前设计并放置一个滤波器，可以衰减下游负载和/或上游转换器所产生的噪声。

图5:
IBA框图



在一个使用多个IBC转换中间电压的系统中，设计人员可能要在整个并联阵列之前放置滤波器，或在每个阵列之前放置一个滤波器。从信号完整性的观点看，在实践中，在每个阵列之前放置滤波器更好，因为它可以增加隔离和阻尼。

如果把一个滤波器放在多个IBC及其负载之前，共模和差模电流可能从一个阵列流到另一个阵列。共模噪声包含高次谐波，因为地平面损耗增加，共模电压的幅度也增加了。每个阵列之前有一个滤波器将确保共模发射减到最小，从而减小共模电流，并抑制辐射和传导干扰。

由于其固有的低噪声和高工作频率，IBC相对容易滤掉传导干扰满足国际标准。然而，这可能需要一个大的滤波器来滤掉由负载工作频率较低的传统转换器产生的噪声。

滤波方法

正确的阻尼L/C滤波器可用减少反射输入电流。图7显示了一个有外部滤波器的常规设置的IBC，图8显示了有阻尼L/C滤波器的IBC（滤波元件以红色突出显示）。为了确定滤波器的值，转换器的输入阻抗必须是已知的，同时必须选择一个截止点（cutoff point）。转换器的输入阻值（ R_{in} ）不是恒定的，并随着工作电压和额定功率而有很大的变化。当转换器在最低输入电压满载工作时，视在 R_{in} 是在极小值。例如，一个工作在低输入电压满载输出（输入电压为38V，输出电流为32A）的IB048E120T32N1-00模块将有40Ω的视在 R_{in} ，如图6所示。

图6:
IB048E120T32N1-00
模块视在输入阻值

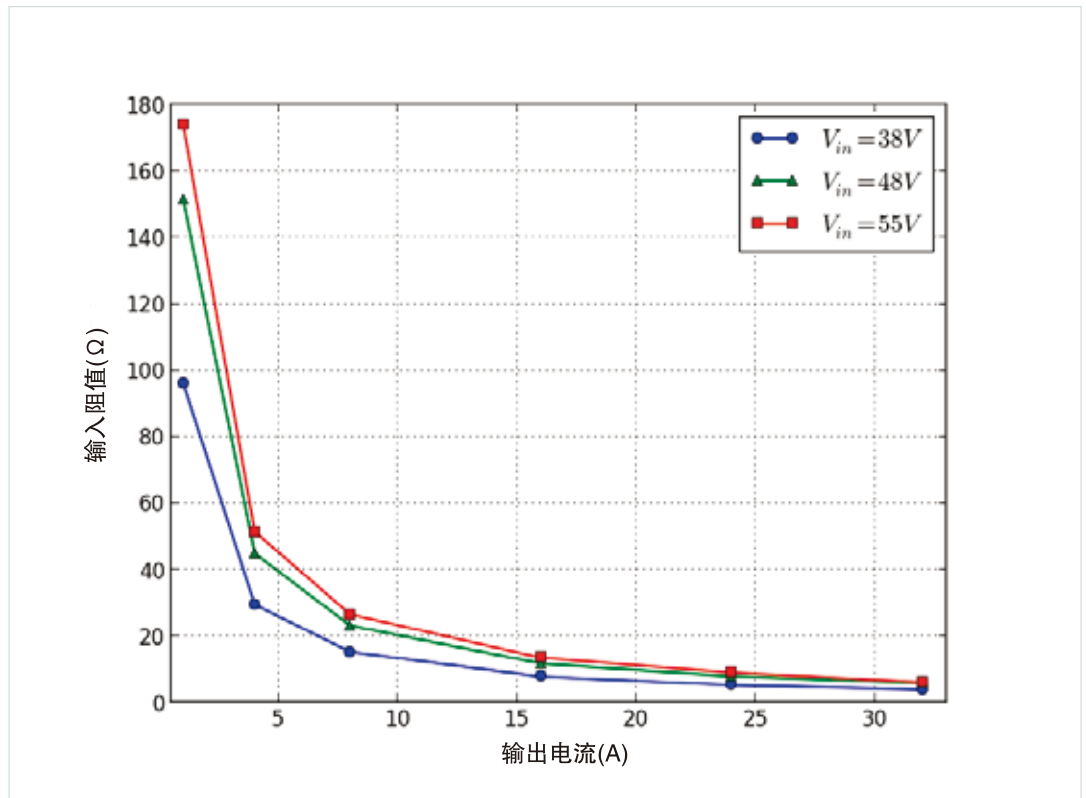


图7:
有外部滤波器的IBC

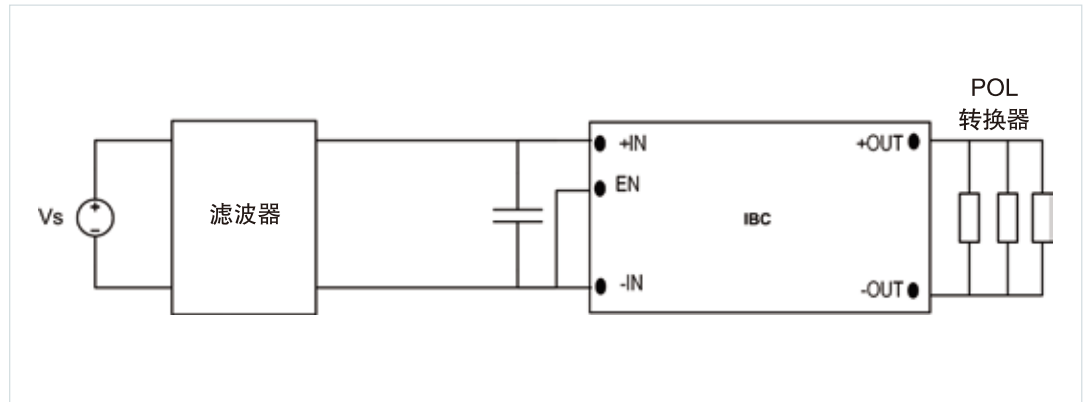
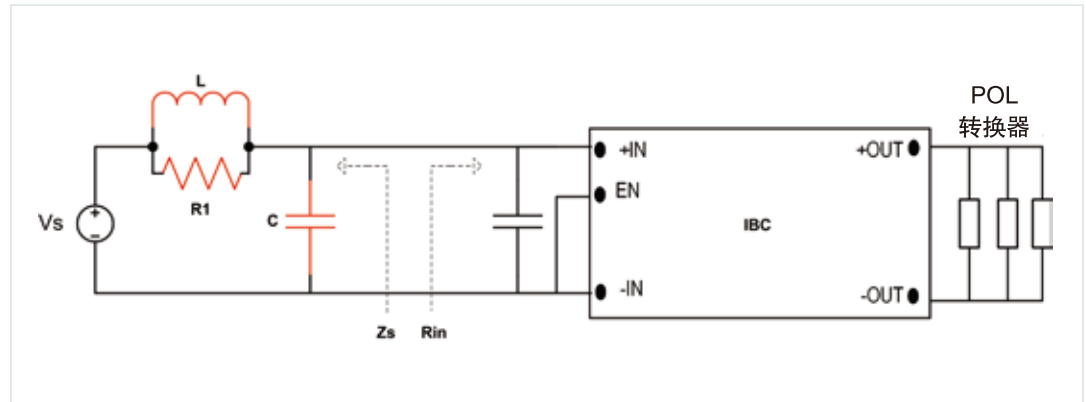
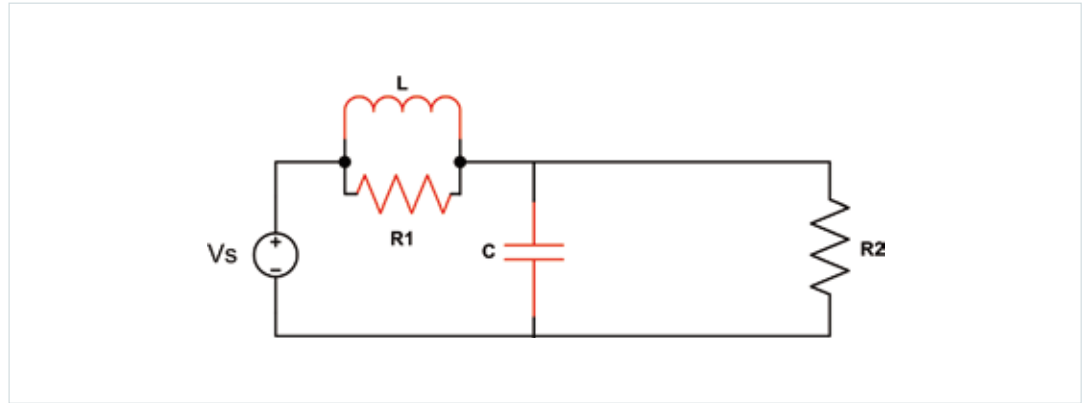


图8:
分流L/C滤波电路



在转换器带宽内的任何工作点，R1和L的并联阻抗应该明显小于Rin的10%，因为滤波器的固有频率必须与转换器的带宽来比较。如果IBC的最小视在Rin为40Ω，那么R1和L的并联阻抗应小于4Ω。注：因为10%的阻抗变化可导致9%的负载调节变化，所以应针对动态负载条件将源阻抗减到最小。在dc条件下IBC的Rin将被称为R2，它可简化分析，如图9所示。

图9：
固有响应等效电路模型



作为一个低通滤波器的滤波电路可衰减不需要的频率成分。如果R1比R2小得多，则Q因数主要是由R1控制的。重要的是要把滤波器的Q因数减低，以避免应用中振荡的风险。

在为滤波器选择一个电感器时，自谐振频率（SRF）必须予以考虑。SRF是由电感及其寄生电容形成的谐振电路而成的。电感应该有一个大于所需截止频率的SRF，因为对于SRF以上的频率，电感器具有电容性能，所以滤波器不会预期的衰减。

L/C滤波器的Q因数

如图9所示的L/C滤波器的Q因数可以使用下面的方程计算：

$$Q = R1 \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{方程7})$$

在附录中可以找到方程7的推导。

共模电感器

共模（CM）电感器可以用来作为阻尼L/C滤波器的一个元件，因为它对噪声滤波具有非常可取的特性。共模电感器可抑制共模噪声，而且由于绕组的漏感，也可以衰减差模电流。绕组电感的组合呈现的高共模阻抗可抵制共模电流。因为只是部分抵消了绕组中差动电流所产生的磁场，它也可以提供差分滤波。

图10:
共模电感模型

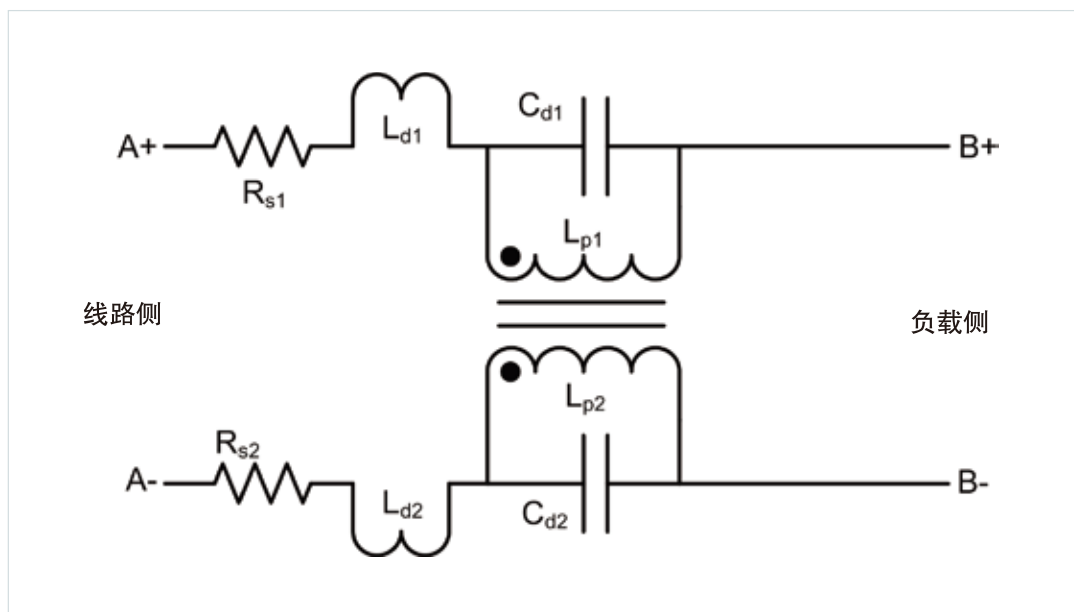


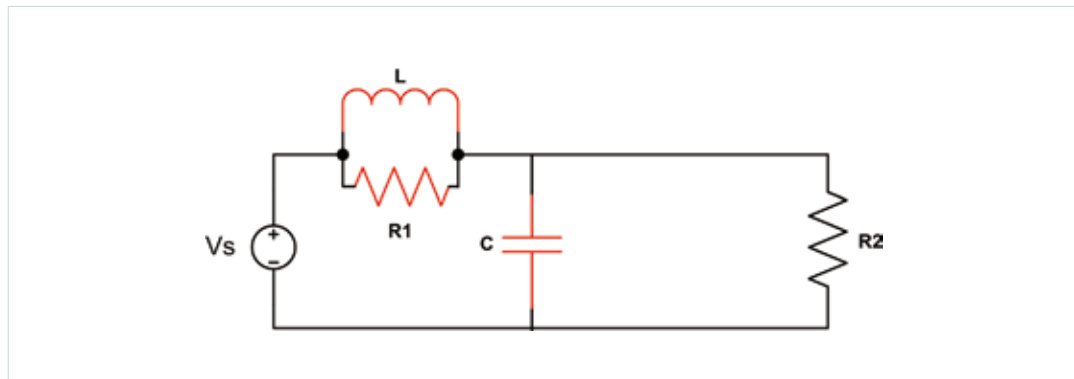
图10显示了一个CM电感器及其寄生效应的电路模型。图10所示的Ld1和Ld2的漏感是因为没有100%磁耦合的Ld1和Ld2的磁场的结果。由于绕组间寄生电容，所以CM电感器中有另一种寄生电容，Cd1和Cd2。串联电阻，Rs1和Rs2，是电感器导线中的电阻。

表1显示了测得的共模电感、漏感，以及几个CM电感器的漏感百分比，而该等数值是由工作频率为1kHz的LCR测试仪测量所得。CM电感器的漏感并不总是由制造商规定的，但是它通常是在1%至3%之间的共模值。漏感可以通过短接一个绕组和测量相反绕组的电感来测量。

表1:
共模电感器的测量

型号	标称共模电感值	测得的共模电感值	测得的漏感值	漏感值百分比% (测量值)
Vicor 31742	3000 μH	2800 μH	11.5 μH	0.4%
Vicor 31499-01	332 μH	330 μH	4.7 μH	1.3%
Vicor 31742	1000 μH	900 μH	11.6 μH	1.3%
Siemens B82723-A-N1	5600 μH	5985 μH	72 μH	1.2%

图11:
固有响应等效电路模型



应用于IBC的L/C滤波器

滤波器中使用的电感器

采用图9所示结构的阻尼L/C滤波器适用于滤掉图1中风扇所产生的反射纹波电流，它放在IBC和负载之间。利用方程2和7（附录中方程部分下面）可以为选择R1和C的值提供一些指导，当在IBC上使用一个滤波器时，需确保不超过数据表中规定的最大电容。

332 μ H电感器（Vicor型号31499-01）被选作滤波电感。所选择的一个2200 μ F电解电容器和一个0.5 Ω 电阻可得到大约1.3的Q因数（使用方程7）和320Hz的截止频率，以提供足够的衰减来滤掉12V风扇和niPOL所产生的纹波电流（风扇产生680Hz的纹波，而niPOL有开关频率为250kHz的纹波）。从方程（2）（在附录中）可见，滤波器的谐振频率为187Hz。以下几个图显示了滤波器的仿真阶跃响应和测得的阶跃响应。

图12a:
滤波器阶跃响应原理图

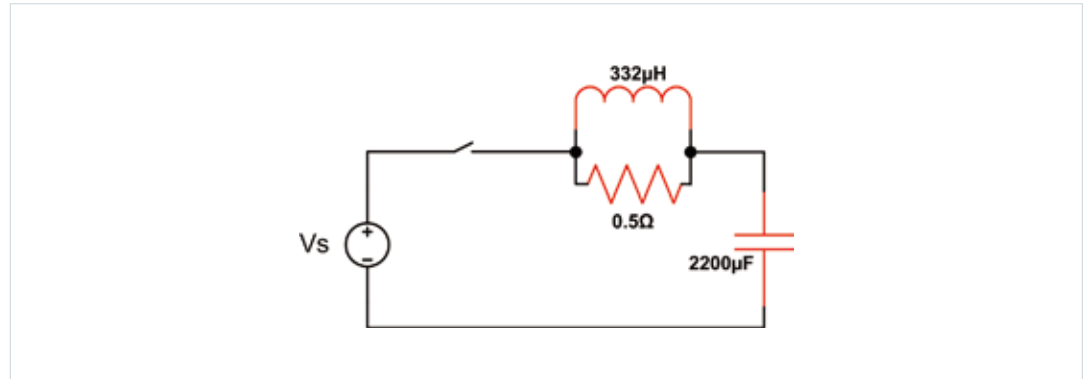


图12b:
使用理想元件
($R = 0.5 \Omega$, $C = 2200 \mu F$,
 $L = 332 \mu H$, $Q = 2.3$)
的滤波器的仿真阶跃响应

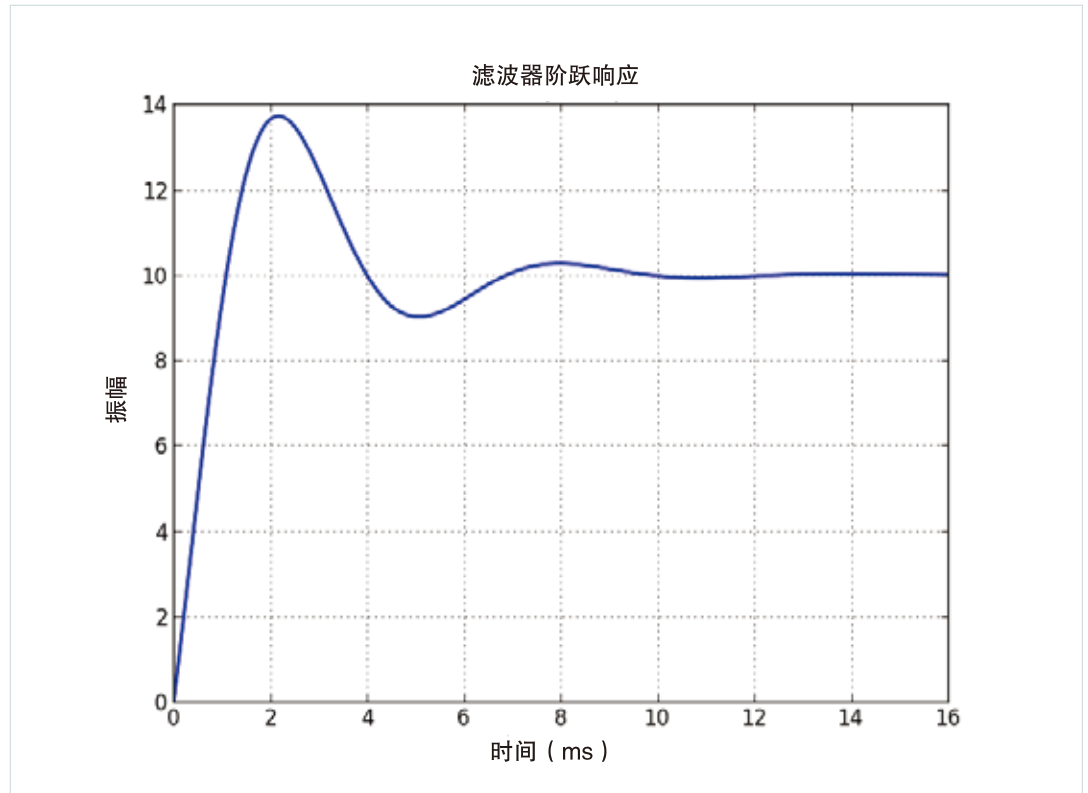


图13:

测得的滤波器阶跃响应
($R = 0.5\ \Omega$, $C = 2200\ \mu\text{F}$,
 $L = 332\ \mu\text{H}$)

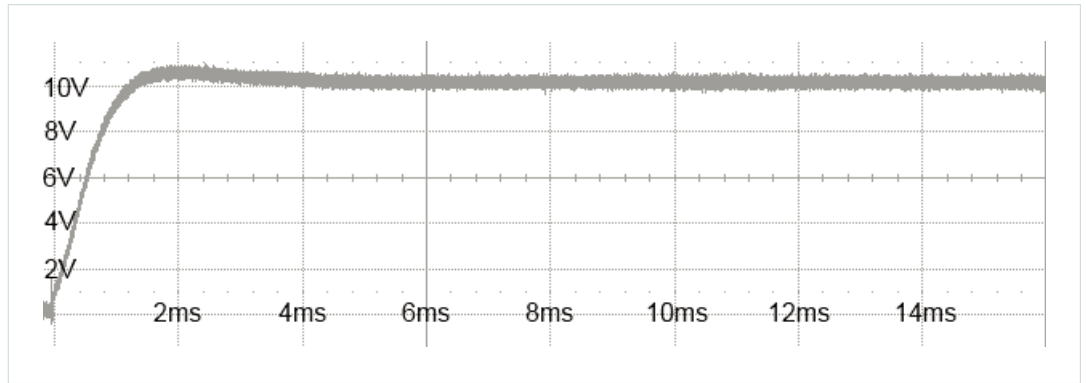
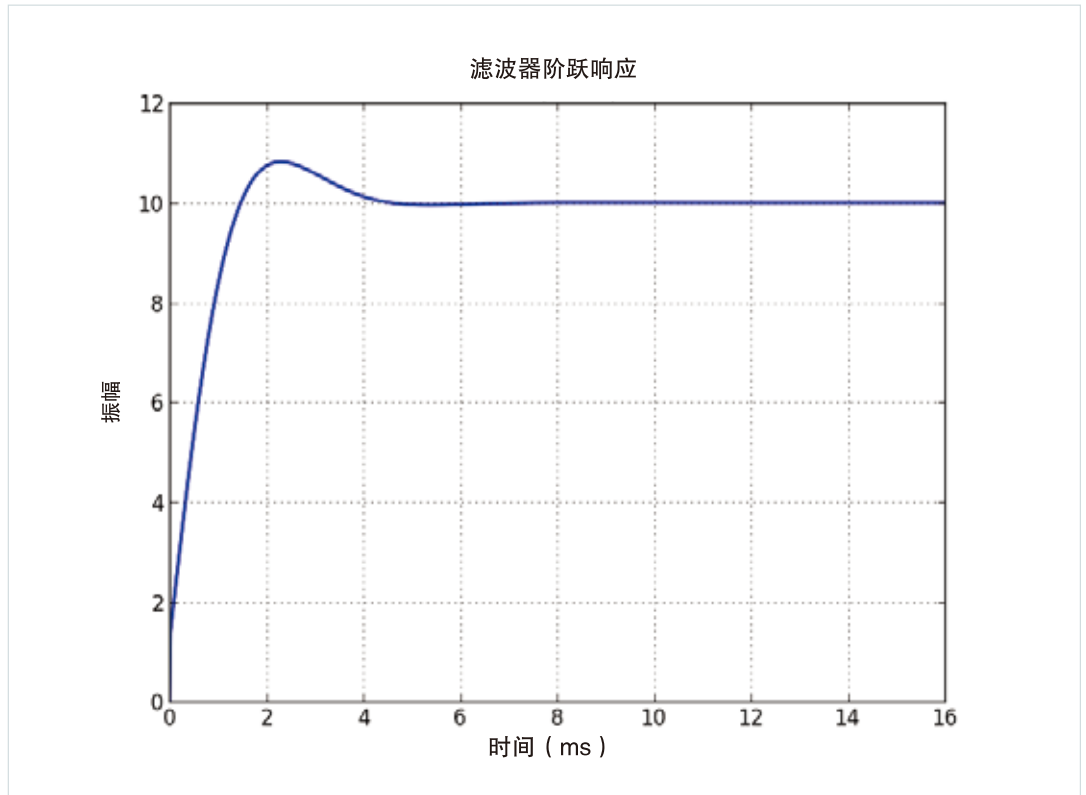


图14:

滤波器的仿真阶跃响应，
包括元件寄生效应
($R = 0.5\ \Omega$, $C = 2200\ \mu\text{F}$,
 $L = 332\ \mu\text{H}$)



电感器具有 $0.27\ \Omega$ 的ESR，以及 14pF 的分布电容。电容器的ESR测定值为 $0.07\ \Omega$ 。仿真阶跃响应与测得的阶跃响应相比，电感器和电容器的寄生效应增加了更多的滤波器阻尼，如图12b和图13所示。图14显示了当模型中出现电感器和电容器的寄生效应时，滤波器的仿真阶跃响应。

图15:
滤波器的仿真频率响应
($R = 0.5\ \Omega$, $C = 2200\ \mu\text{F}$,
 $L = 332\ \mu\text{H}$)

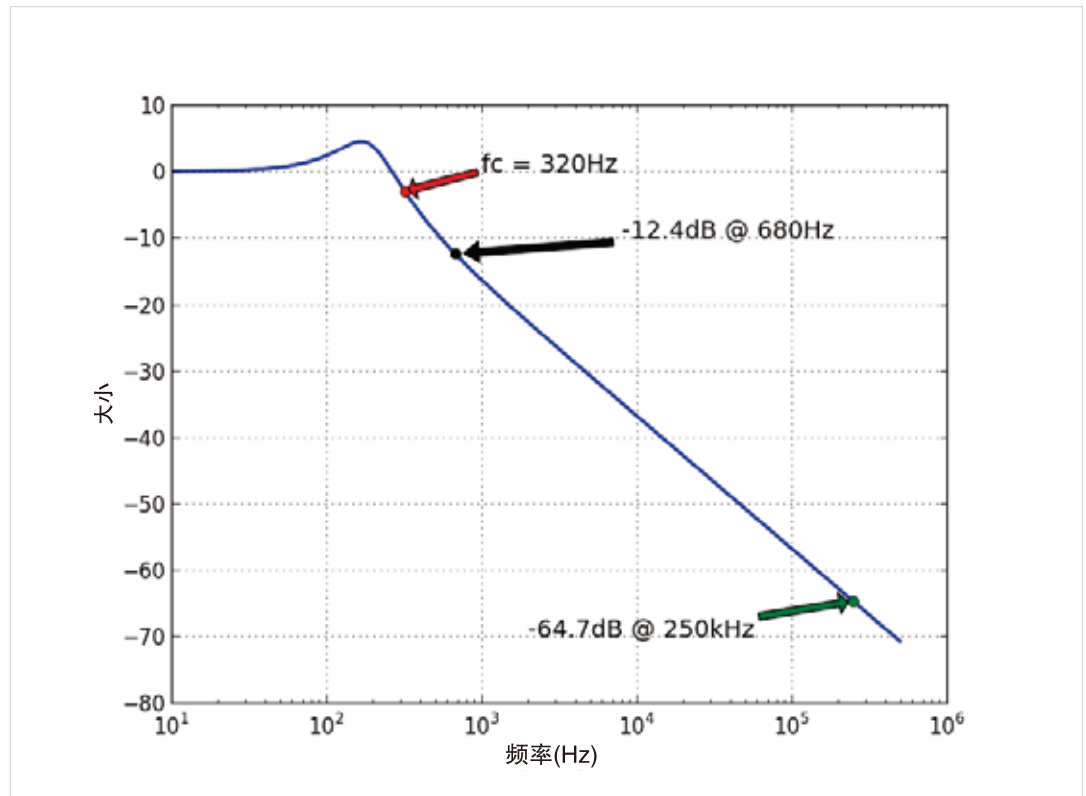


图16:
包括寄生效应的滤波器
仿真频率响应
($R = 0.5\ \Omega$, $C = 2200\ \mu\text{F}$,
 $L = 332\ \mu\text{H}$)

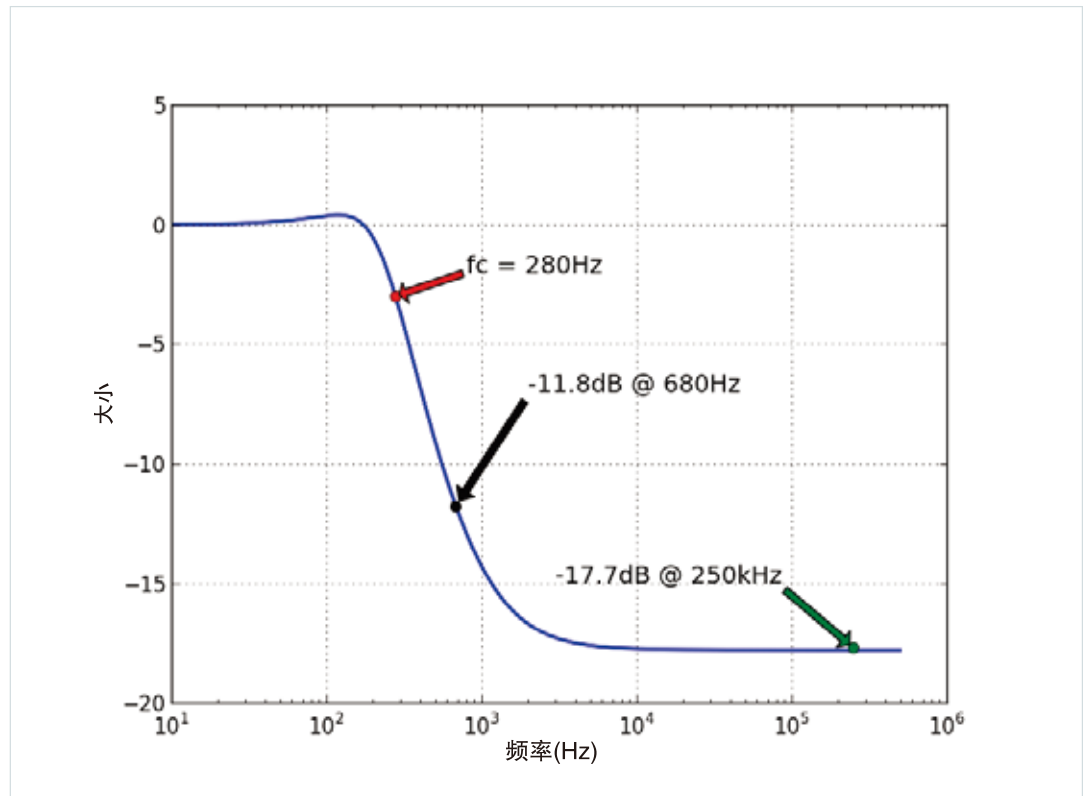


图15显示了滤波器的仿真频率响应，图16则显示了包括滤波器元件寄生效应的仿真频率响应。元件的寄生效应将截止频率从320Hz降低到280Hz，将680Hz的衰减从-12.4dB降低到-11.8dB，而且将250kHz的衰减从-64.7dB降低到-17.7dB。

在滤波器中使用的共模电感

为使该滤波器具阻尼特性和能滤掉共模和差模噪声的能力，选择了有 $3000\ \mu\text{H}$ 电感的CM电感器（Vicor器件号码31742）来取代滤波器中的 $332\ \mu\text{H}$ 电感和 $0.5\ \Omega$ 电阻。 $3000\ \mu\text{H}$ 共模电感器只有 $11.4\ \mu\text{H}$ 的差模电感，因此，使用这个电感的滤波器将能够充分衰减12VniPOL产生的 250kHz 噪声，但不能衰减由风扇产生的低频噪声。在下面的图17b中显示了测得的阶跃响应。

图17a:
阶跃响应滤波器原理图

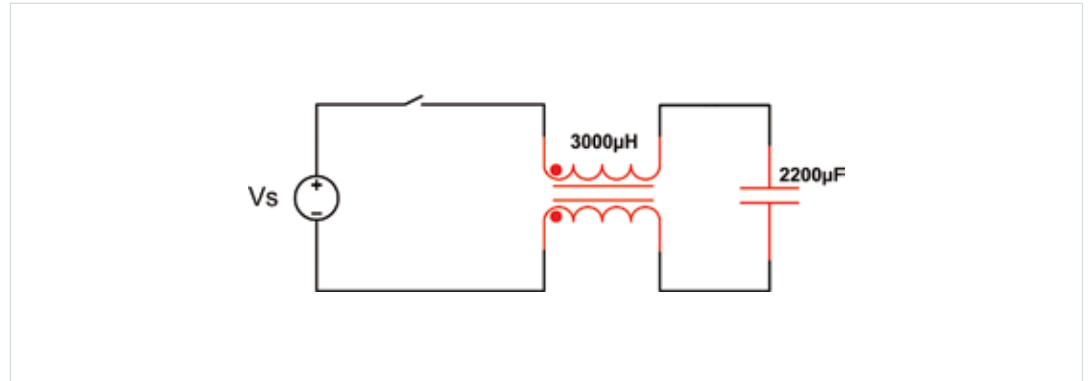
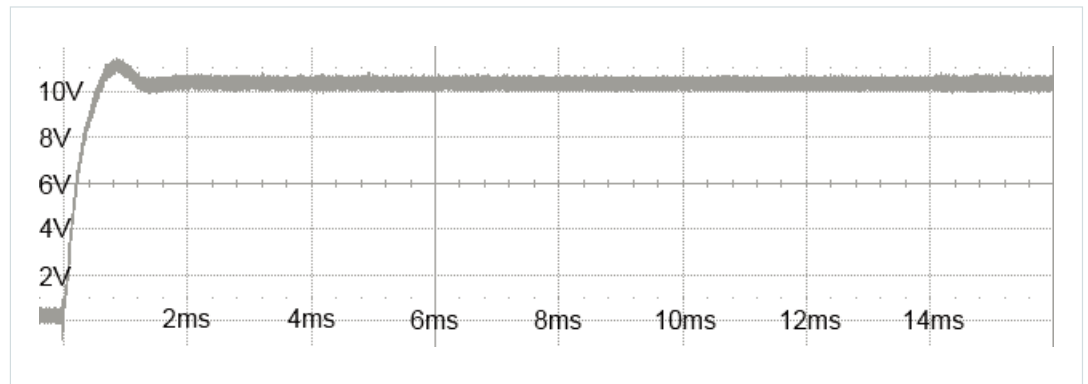


图17b:
测得的滤波器的阶跃响应
($C = 2200\ \mu\text{F}$, $L = 3000\ \mu\text{H}$)



由于元件中的寄生效应，即使电路中没有分立式电阻器，滤波器也可以提供足够的阻尼。CM电感器测得的等效串联电阻（ESR）为 $0.04\ \Omega$ ，寄生电容为 46pF ，这将产生一个 450kHz 的自谐振频率（SRF）。

滤波结果

图18:

12V风扇作为负载的
IB048E120T32N1-00模块和
滤波器中电感器的滤波响应

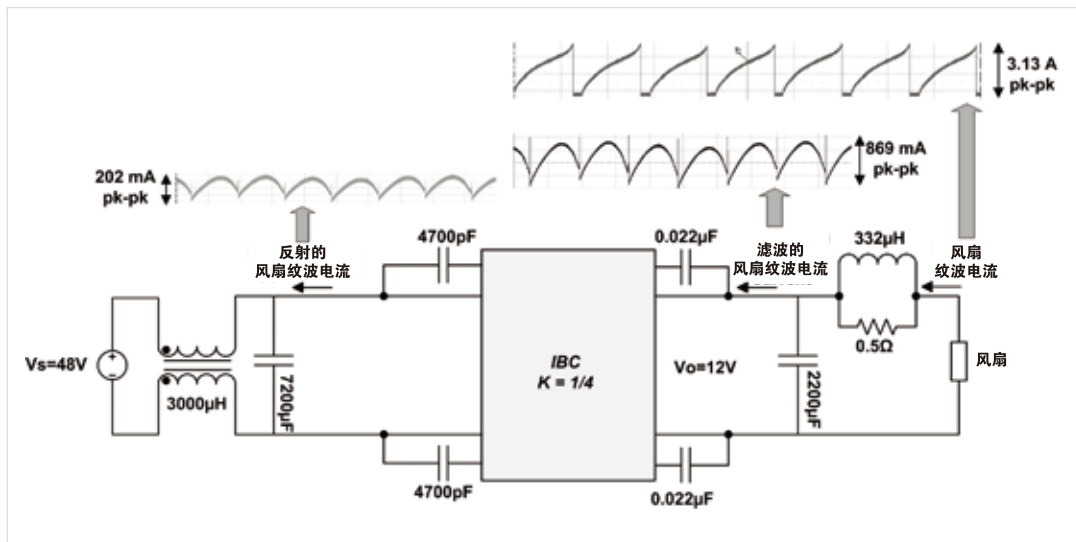
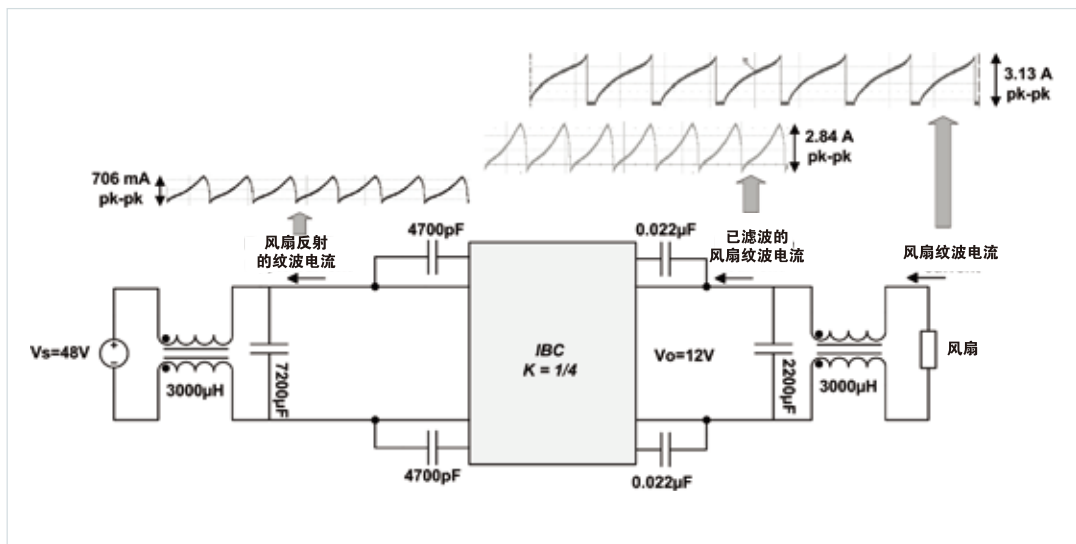


图19:

12V风扇作为负载的
IB048E120T32N1-00
模块和滤波器中共模滤波
电感器的滤波响应



当在IBC模块和负载之间放置阻尼L/C滤波器时，衰减了输入端纹波（被镜射的负载噪声）。图18显示了有12V风扇作为负载的IBC和滤波器中332 µH电感器的输出纹波电流和反射输入纹波电流。332 µH电感器（Vicor型号3149901）取代3000 µH CM电感器（Vicor型号31742）以用来衰减反射的纹波，如图19所示。当在滤波器中使用332 µH电感时，风扇产生的纹波电流被衰减了3.6倍（11.1dB），而使用3000 µH CM电感时，纹波电流被衰减了1.1倍（0.84 dB）。

在这种情况下，使用332 µH差模电感器的滤波器的表现优于有3000 µH CM电感器的滤波器，因为CM电感器的漏感只有11.5 µH，比差模电感器的电感低3.5%。增加两倍或三倍的电容值可改善滤波器的性能，但是这会超过IBC的输出电容的最大值。

图20:

niPOL作为负载的
IB048E120T32N1-00模块
和滤波器中电感的滤波响应

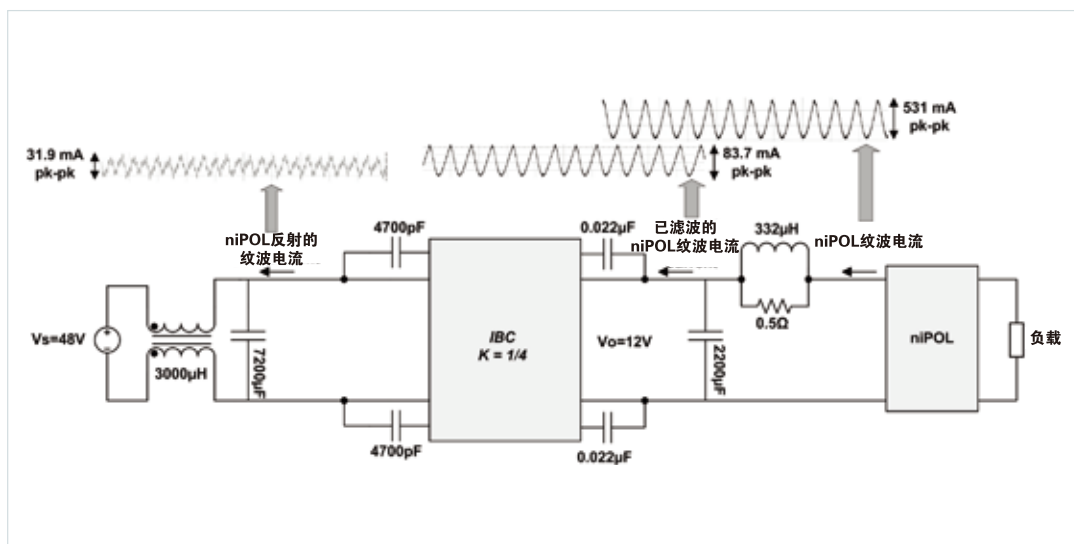


图21:

niPOL作为负载的
IB048E120T32N1-00模块和
滤波器中共模电感器的滤波响应

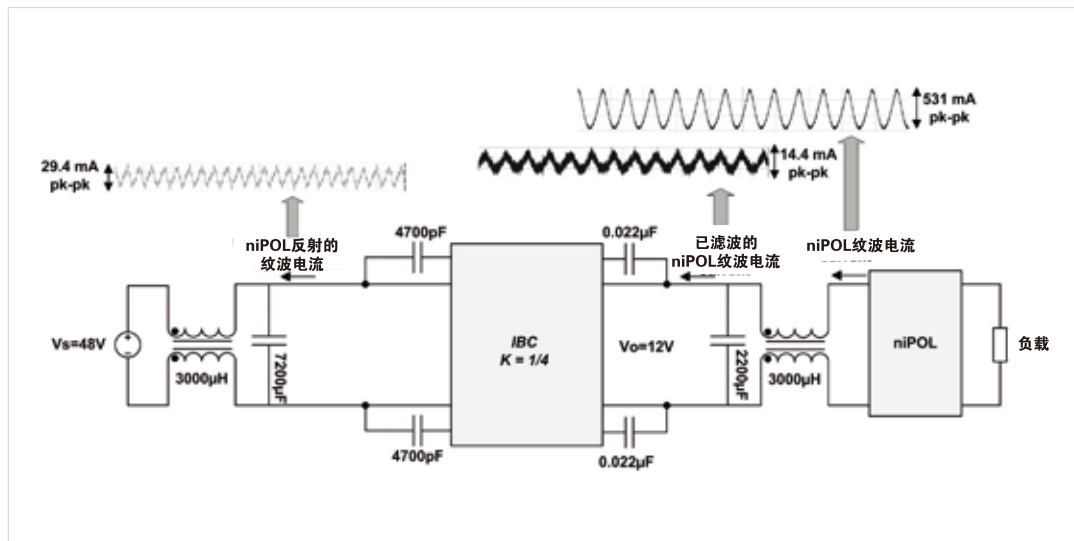


图20和图21显示了niPOL作为负载的IBC的输出纹波电流和反射输入纹波电流。当在滤波器中使用332 μ H电感器时，niPOL产生的纹波电流衰减了6.3倍（16dB），而使用3000 μ H共模电感器时，纹波电流衰减了36.9倍（31.3dB）。在这种情况下，有3000 μ H共模电感器的滤波器的表现优于有332 μ H的电感器的滤波器，因为元件中的寄生效应限制了滤波器的衰减，如第10页上的图16所示。

滤波器能衰减12V风扇和niPOL所产生的的反射噪声，不过，因为风扇是一个低频开关负载，衰减受到了限制。使用共模电感器可以有效地滤掉IBC开关频率产生的噪声和来自下游niPOL的反射纹波电流。

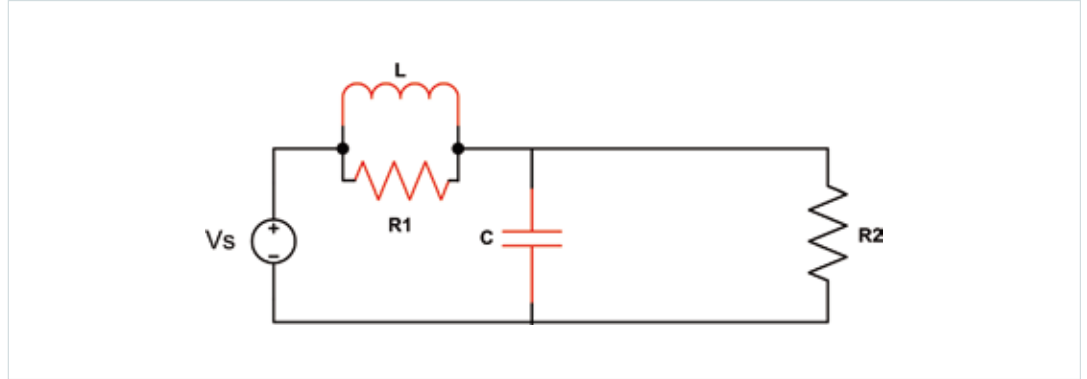
为了帮助设计一个阻尼L/C滤波或其他滤波器拓扑结构，请尝试使用我们的在线滤波器工具：
<http://app2.vicorpower.com/filterDesign/intiFilter.do>

结论

本应用笔记介绍了如何实现一个针对IBC的简单的L/C滤波器，以滤掉不同负载的干扰。由于IBC固有的低噪声，很容易满足国际标准所概括的干扰级别。多个IBC系统可以使用一个滤波器滤波，使每个阵列的干扰分布在整个频谱上。

附录

方程



上图所示的滤波器传递函数可以计算为：

$$TF = \frac{S \cdot \frac{1}{R1 \cdot C} + \frac{1}{L \cdot C}}{S^2 + \frac{1}{R1 \cdot C} + \frac{1}{L \cdot C}} \quad (\text{方程1})$$

一个RLC电路的固有谐振频率被定义为：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (\text{方程2})$$

滤波器是一个二阶系统，其中的阻尼比可以从系统的特征方程中提取。一般二阶特征方程有如下形式：

$$S^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0 \quad (\text{方程3})$$

使用方程1和3，可以计算阻尼比：

$$2 \cdot \zeta \cdot \omega_n = \frac{1}{R1 \cdot C} \quad (\text{方程4})$$

$$\zeta = \frac{1}{2 \cdot R1} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{方程5})$$

Q因数直接与阻尼比相关：

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \zeta} \quad (\text{方程6})$$

使用方程5和方程6，可以发现滤波器的Q因数：

$$Q = RI \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{方程7})$$

词汇表

频带宽度 —— 确定某种现象必需考虑的频率范围。

电容耦合 —— 两个电路之间通过的分立电容器或寄生电容产生的信号耦合。

共模噪声 —— 两导体对一基准点具有相等的噪声，通常是交流电源火线和中线对地的噪声。

阻尼比 —— 该参数描述了一个系统中的振荡衰减。

差模噪声 —— 排除共模噪声后，在两条电源线之间测出的电源对公共的噪声。合成结果为两电源线噪声分量之差。在电源系统中通常在直流输出端和直流返回端测试的差模噪声。

ESR —— 等效串联电阻。串联有一个理想电容器的电阻的值，体现了实际电容器的性能特点。

阻抗 —— 在一个指定频率下电压与电流的比值。

输出阻抗 —— 输出电压变化与负载电流变化的比值。

并行操作 —— 为获得更高输出电流的目的，将两个或多个电源的输出连接起来供电给负载。

Q因数 —— 品质因数。此参数基于阻尼比的倒数，描述了一个系统中存在的损耗。

反射纹波电流 —— 出现在电源输入端的rms或AC峰值电流，是转换器开关频率而产生的。

纹波和噪声 —— 一个电源DC输出端的AC讯号，通常以毫伏峰-峰值或rms为单位表示。对于一个线性电源，它通常是在AC电源的频率。对于一个开关电源，它通常是在转换级的开关频率。

开关频率 —— 开关模式电源中开关接通和关断的速率。

Y电容 —— 电源转换模块一般要求电源输入至底盘（大地）间加上旁路电容，以旁路共模噪声及把噪声局限于转换器内。但当转换器在交流整流电压操作，而旁路电容损坏时则可能引致严重漏电至电器底盘，触发接地故障及触电危险。因此，建议使用专门的电容（Y-电容）。这种电容有“自行痊愈”的介质特性，避免过量漏电。