


开关电源中吸收缓冲电路 的设计与仿真

世纪电源网2010深圳电源技术研讨会

李义 (nc965)



基本拓扑电路上一般没有吸收缓冲电路，实际电路上一般有吸收缓冲电路，吸收与缓冲是工程需要，不是拓扑需要。

吸收与缓冲的功效：

- 防止器件损坏，吸收防止电压击穿，缓冲防止电流击穿
- 使功率器件远离危险工作区，从而提高可靠性
- 降低（开关）器件损耗，或者实现某种程度的关软开
- 降低 di/dt 和 dv/dt ，降低振铃，改善EMI品质
- 提高效率（提高效率是可能的，但弄不好也可能降低效率）

也就是说，防止器件损坏只是吸收与缓冲的功效之一，其他功效也是很有价值的。

吸收

吸收是对电压尖峰而言。

电压尖峰的成因：

- 电压尖峰是电感续流引起的。
- 引起电压尖峰的电感可能是：变压器漏感、线路分布电感、器件等效模型中的感性成分等。
- 引起电压尖峰的电流可能是：拓扑电流、二极管反向恢复电流、不恰当的谐振电流等。

减少电压尖峰的主要措施是：

- 减少可能引起电压尖峰的电感，比如漏感、布线电感等
- 减少可能引起电压尖峰的电流，比如二极管反向恢复电流等
- 如果可能的话，将上述电感能量转移到别处。
- 采取上述措施后电压尖峰仍然不能接受，最后才考虑吸收。吸收是不得已的技术措施。

拓扑吸收

将开关管Q1、拓扑续流二极管D1和一个无损的拓扑电容C2组成一个在布线上尽可能简短的吸收回路。

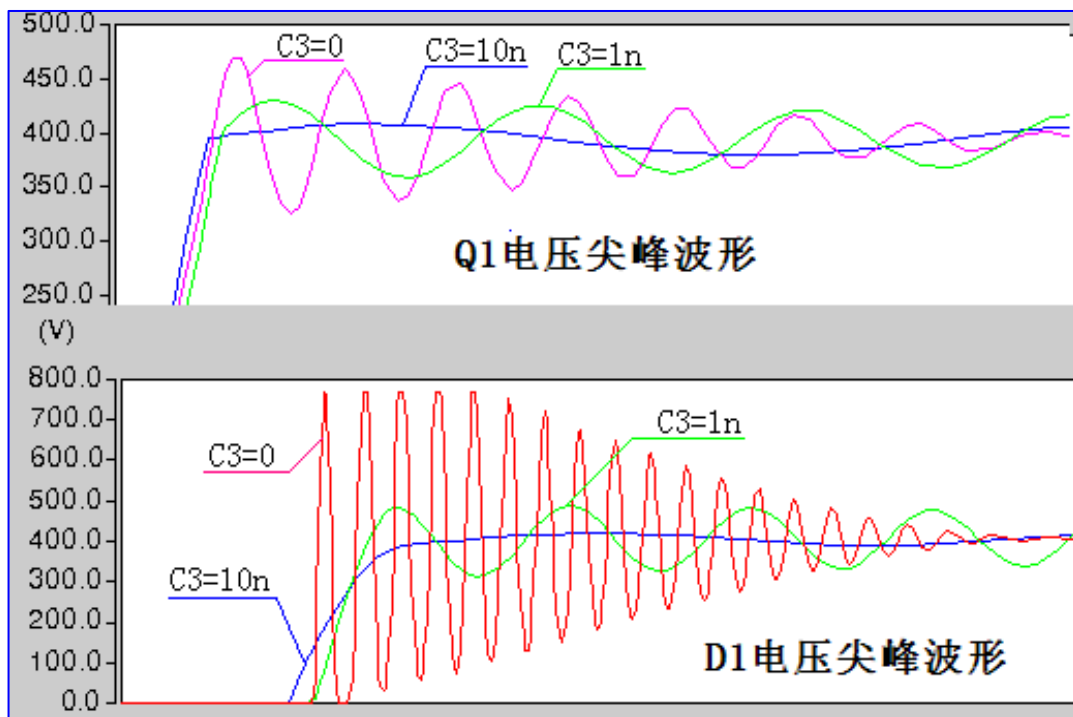
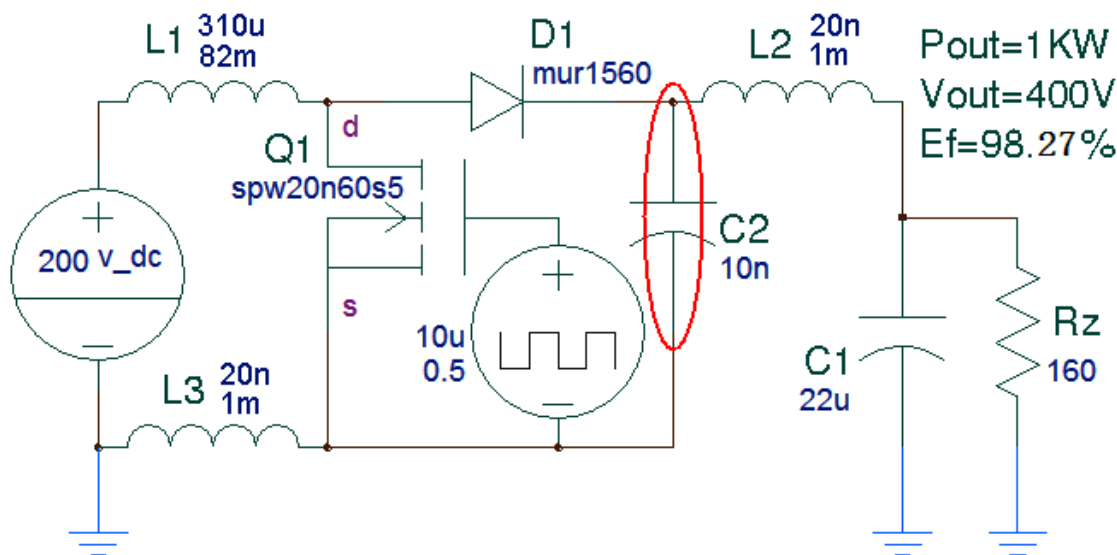
拓扑吸收的特点：

- 同时将Q1、D1的电压尖峰、振铃减少到最低程度。
- 拓扑吸收是无损吸收，效率较高。
- 吸收电容C2可以在大范围内取值。
- 拓扑吸收是硬开关，因为拓扑是硬开关。

体二极管反向恢复吸收

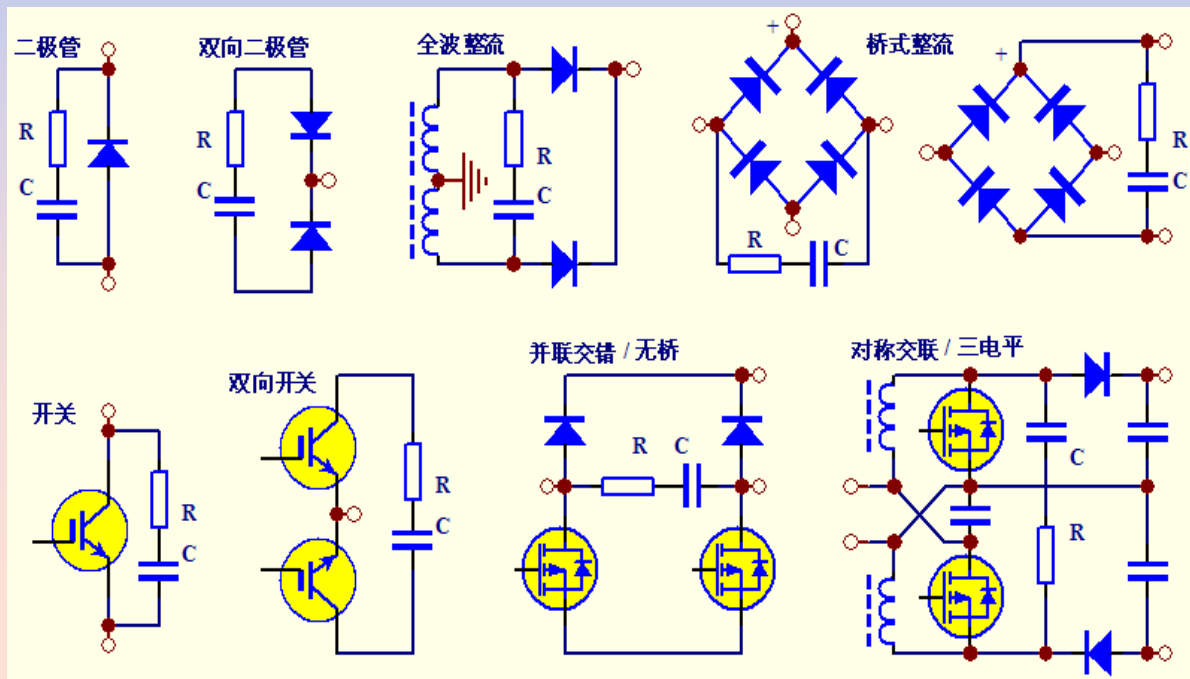
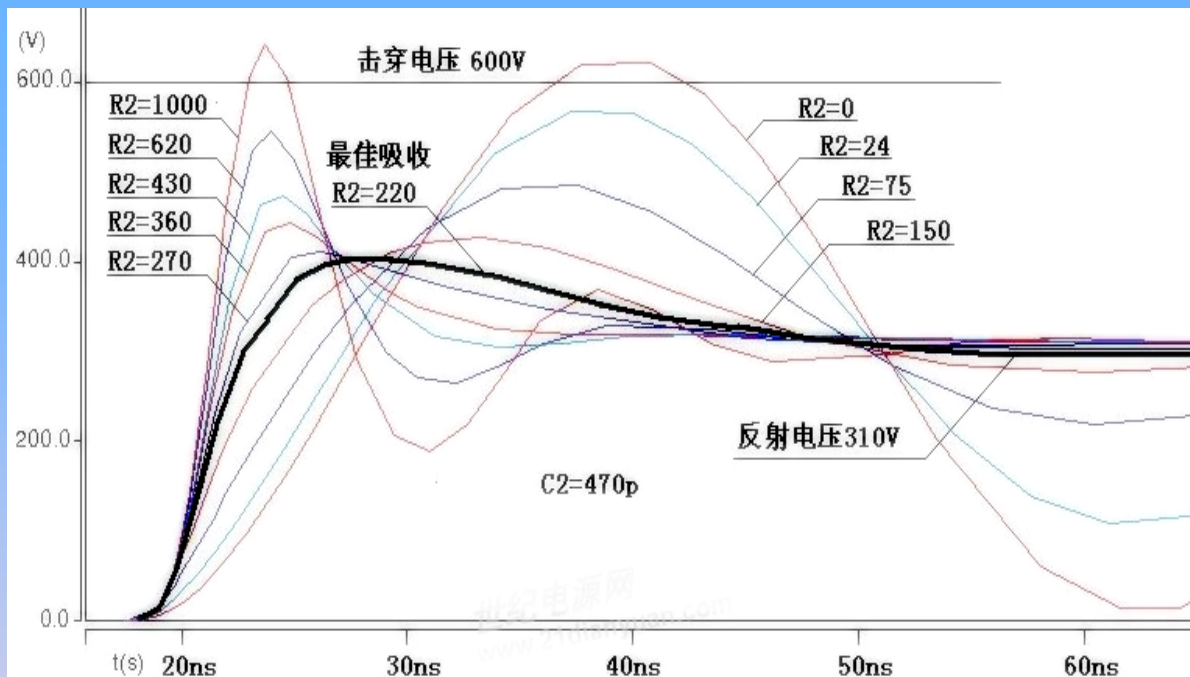
- 开关器件的体二极管的反向恢复特性，在关断电压的上升沿发挥作用，有降低电压尖峰的吸收效应。

设计仿真举例（Boost）：



RC吸收

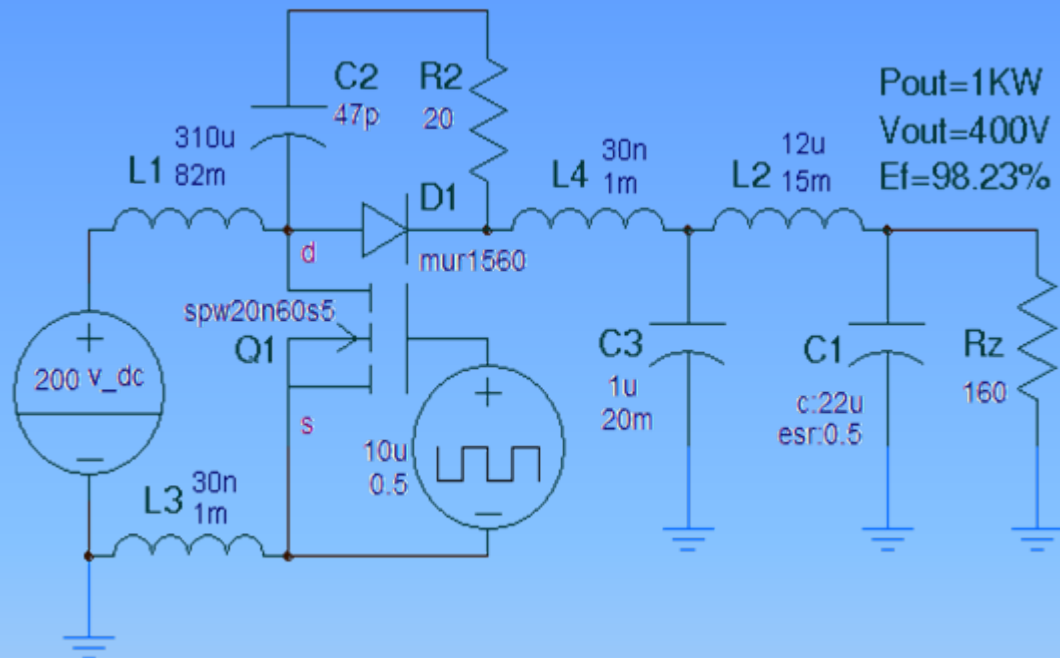
- RC吸收的本质是阻尼吸收。
- 有人认为 R 是限流作用，C是吸收。实际情况刚好相反。
- 电阻 R 的最重要作用是产生阻尼，吸收电压尖峰的谐振能量，是功率器件。
- 电容C的作用也并不是电压吸收，而是为R阻尼提供能量通道。
- RC吸收并联于谐振回路上，C 提供谐振能量通道，C 的大小决定吸收程度，最终目的是使R形成功率吸收。
- 对应一个特定的吸收环境和一个特定大小的电容C，有一个最合适大小的电阻R，形成最大的阻尼、获得最低的电压尖峰。
- RC吸收是无方向吸收，因此RC吸收既可以用于单向电路的吸收，也可用于双向或者对称电路的吸收。



RC吸收设计

- RC吸收的设计方法的难点在于：吸收与太多因素有关，比如漏感、绕组结构、分布电感电容、器件等效电感电容、电流、电压、功率等级、 di/dt 、 dv/dt 、频率、二极管反向恢复特性等等。而且其中某些因素是很难获得准确的设计参数的。
- 比如对二极管反压的吸收，即使其他情况完全相同，使用不同的二极管型号需要的RC吸收参数就可能有很大差距。很难推导出一个通用的计算公式出来。
- R 的损耗功率可大致按下式估算：

$$P_s = F C U^2$$
 其中U为吸收回路拓扑反射电压。
- 工程上一般应该在通过计算或者仿真获得初步参数后，还必须根据实际布线在板调试，才能获得最终设计参数。



以Boost电路续流二极管反压尖峰吸收为例的一个设计（调试）过程：

C	R	Vd	Vk	Pr	分析
无	无	770	471		无吸收
1n	150	665	440		放一个C、R，观察吸收效果，调整R到39Ω，尖峰425V很宽裕，损耗12.5W太大。
	82	557	419		
	39	425	409	12.5	
100p	39	479	447	0.93	C减少10倍，似乎还很宽裕。
56p	39	519	456	0.69	C再减少一半，或许还有潜力。
47p	39	541	458	0.63	C再减少一点到47pF，调整R直到最低尖峰525V，对应R=20Ω，损耗0.53W，可以采用标称2W的电阻长期运行。OK！
	24	539			
	20	525	458	0.53	
	18	533			
	12	570			

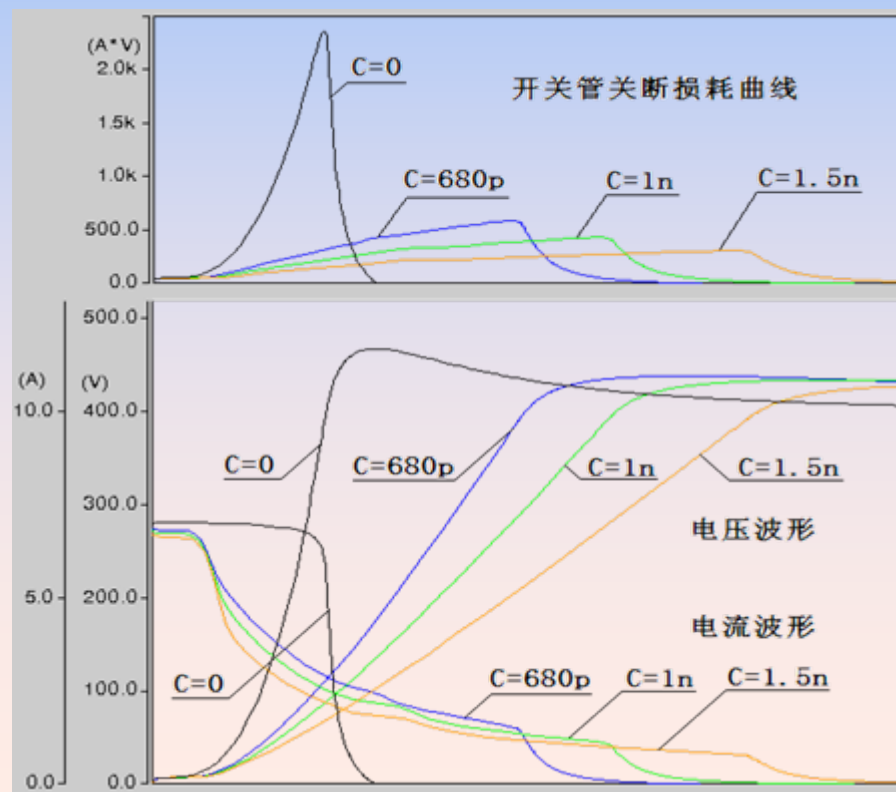
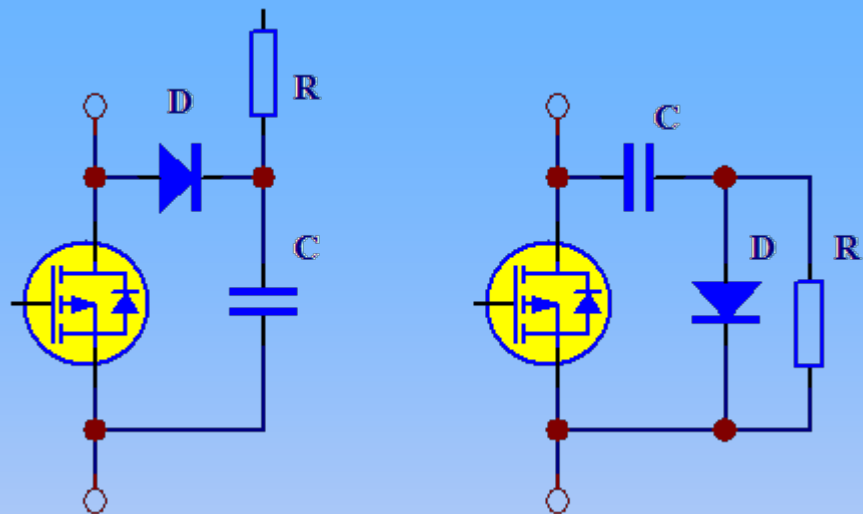
RCD吸收

特点

- RCD吸收不是阻尼吸收，而是靠非线性开关 D 直接破坏形成电压尖峰的谐振条件，把电压尖峰控制在任何需要的水平。
- C 的大小决定吸收效果（电压尖峰），同时决定了吸收功率（即R的热功率）。
- R 的作用只是把吸收能量以热的形式消耗掉。其电阻的最小值应该满足开关管的电流限制，最大值应该满足PWM逆程RC放电周期需要，在此范围内取值对吸收效果影响甚微。
- RCD吸收会在被保护的开关器件上实现某种程度的软关断，这是因为关断瞬间开关器件上的电压即吸收电容C上的电压等于0，关断动作会在 C 上形成一个充电过程，延缓电压恢复，降低 dv/dt ，实现软关断。

不适应性

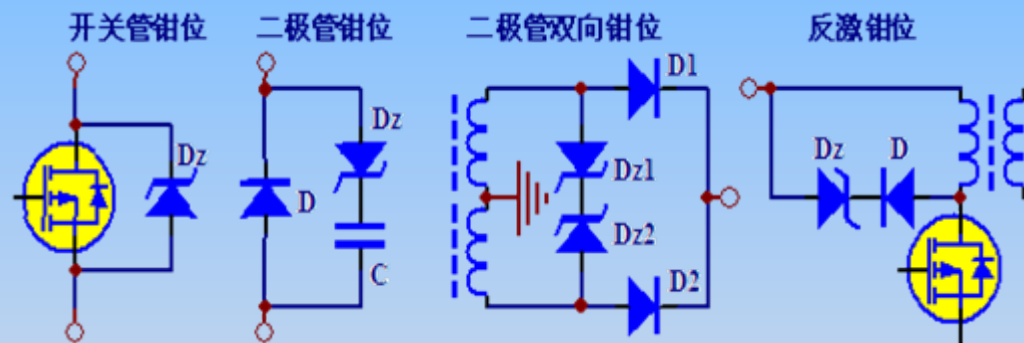
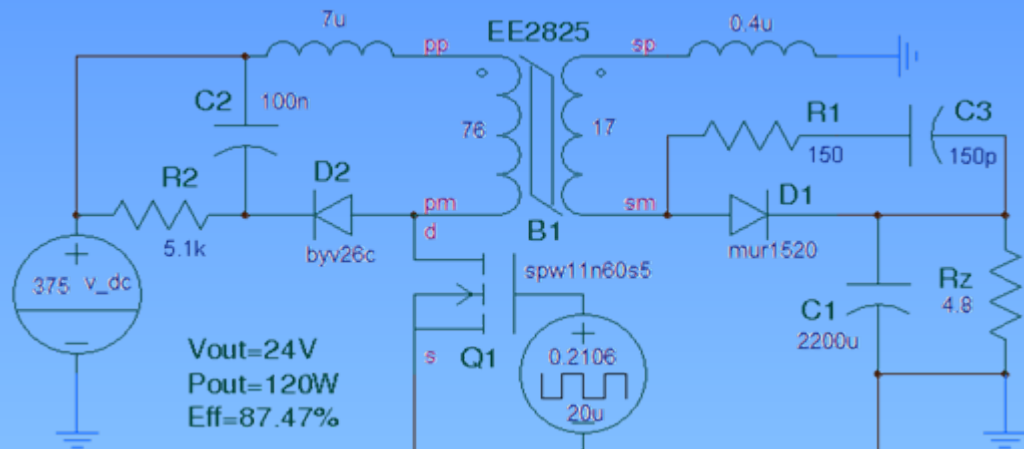
- RCD吸收一般不适合反激拓扑的吸收，这是因为RCD吸收可能与反激拓扑相冲突。
- RCD吸收一般不适合对二极管反压尖峰的吸收，因为RCD吸收动作有可能加剧二极管反向恢复电流。



钳位吸收

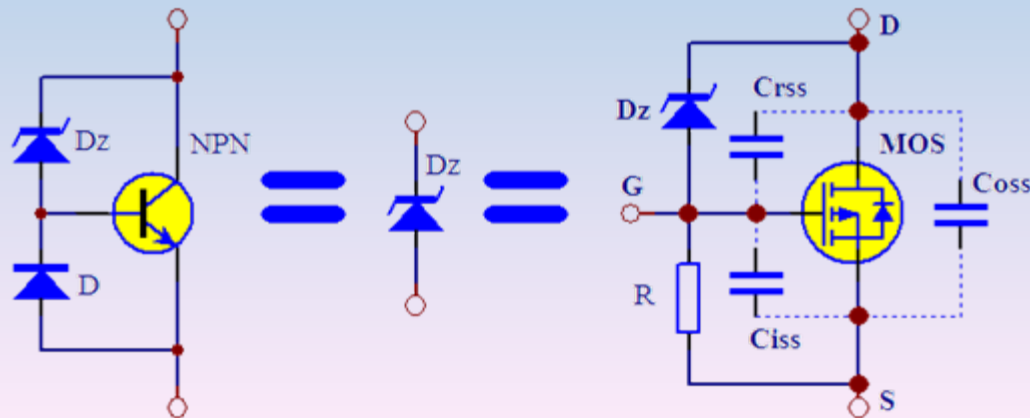
RCD钳位

- 尽管RCD钳位与RCD吸收电路可以完全相同，但元件参数和工况完全不同。RCD吸收RC时间常数远小于PWM周期，而RCD钳位的RC时间常数远大于PWM周期。
- 与RCD吸收电容的全充全放工况不同，RCD钳位的电容可以看成是电压源，其RC充放电幅度的谷值应不小于拓扑反射电压，峰值即钳位电压。
- 由于RCD钳位在PWM电压的上升沿和下降沿都不会动作，只在电压尖峰出现时动作，因此RCD钳位是高效率的吸收。



齐纳钳位

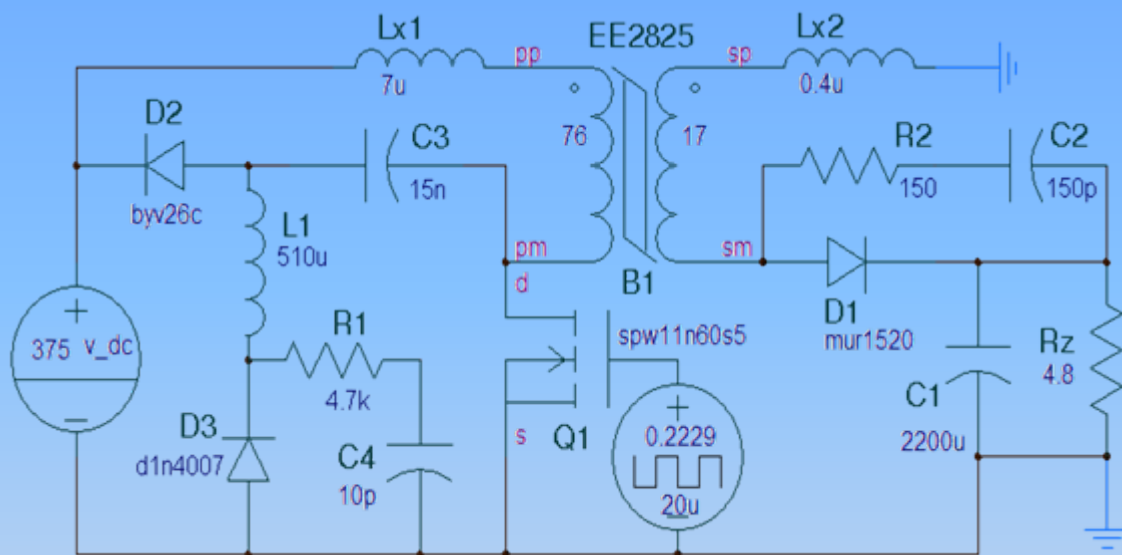
- 齐纳钳位的几种形式。
- 齐纳钳位也是在电压尖峰才起作用，也是高效率吸收。
- 某些场合，齐纳钳位需要考虑齐纳二极管的反向恢复特性对电路的影响。
- 齐纳吸收需注意吸收功率匹配,必要时可用有源功率器件组成大功率等效电路



无损吸收

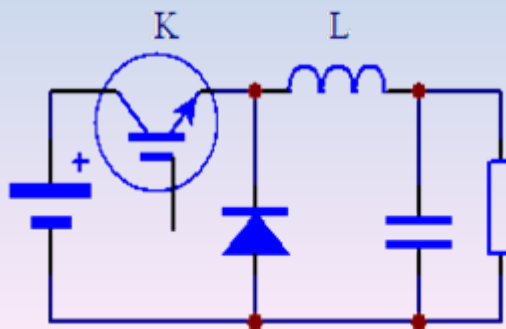
无损吸收的条件

- 吸收网络不得使用电阻。
- 不得形成LD电流回路。
- 吸收回路不得成为拓扑电流路径。
- 吸收能量必须转移到输入侧或者输出侧。
- 尽量减少吸收回路二极管反向恢复电流的影响。

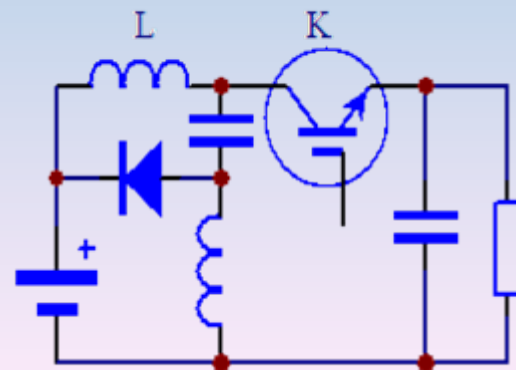


无损吸收是强力吸收，不仅能够吸收电压尖峰，甚至能够吸收拓扑反射电压，比如：

后馈式斩波---BUCK



前馈式斩波



缓冲

缓冲是对冲击尖峰电流而言

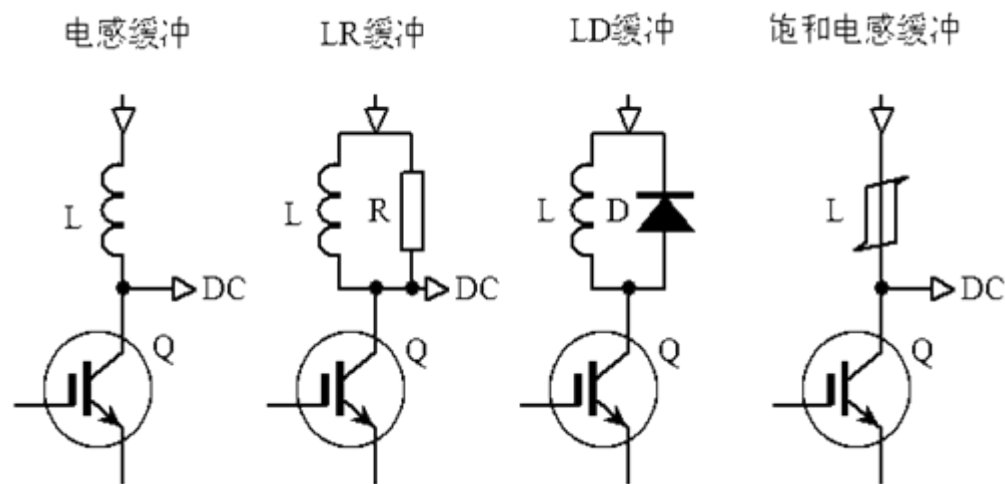
- 引起电流尖峰第一种情况是二极管（包括体二极管）反向恢复电流。
- 引起电流尖峰第二种情况是对电容的充放电电流。这些电容可能是：电路分布电容、变压器绕组等效分布电容、设计不恰当的吸收电容、设计不恰当的谐振电容、器件的等效模型中的电容成分等等。

缓冲的基本方法：

- 在冲击电流尖峰的路径上串入某种类型的电感，可以是以下类型：

缓冲的特性：

- 由于缓冲电感的串入会显著增加吸收的工作量，因此缓冲电路一般需要与吸收电路配合使用。
- 缓冲电路延缓了导通电流冲击，可实现某种程度的软开通（ZIS）。
- 变压器漏感也可以充当缓冲电感。

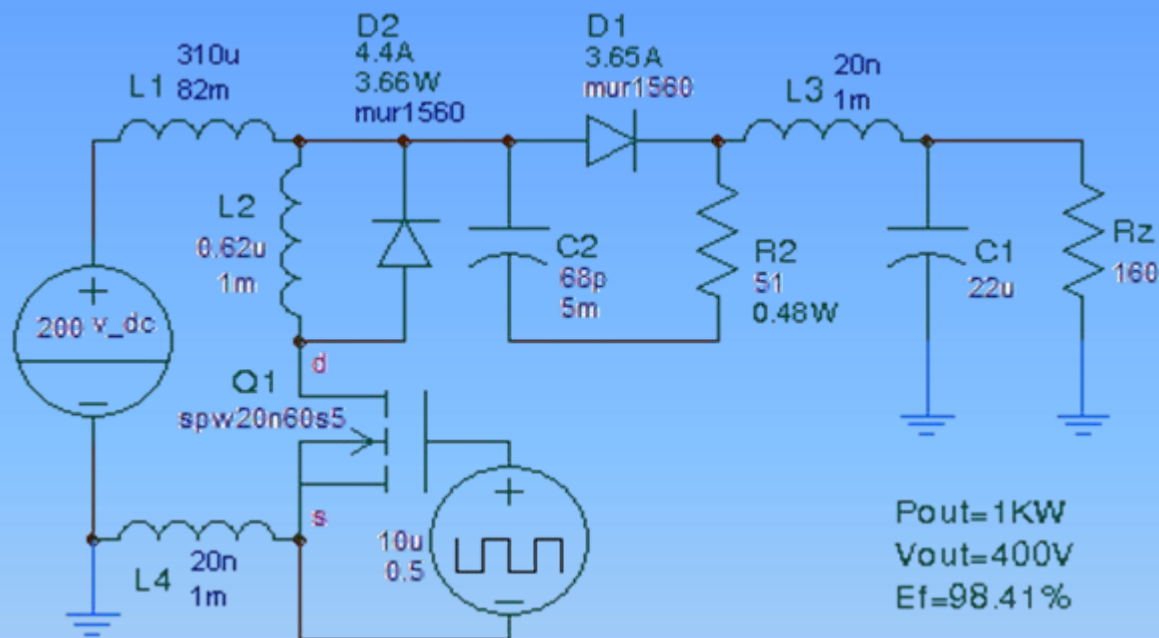


LD缓冲

特点:

- 可不需要吸收电路配合。
- 缓冲释能二极管与拓扑续流二极管电流应力相当甚至更大。
- 缓冲释能二极管的损耗可以简单理解为开关管减少的损耗。
- 适当的缓冲电感（L3）参数可以大幅度减少开关管损耗，实现高效率。

设计举例(boost):



LD吸收设计（调试）过程:

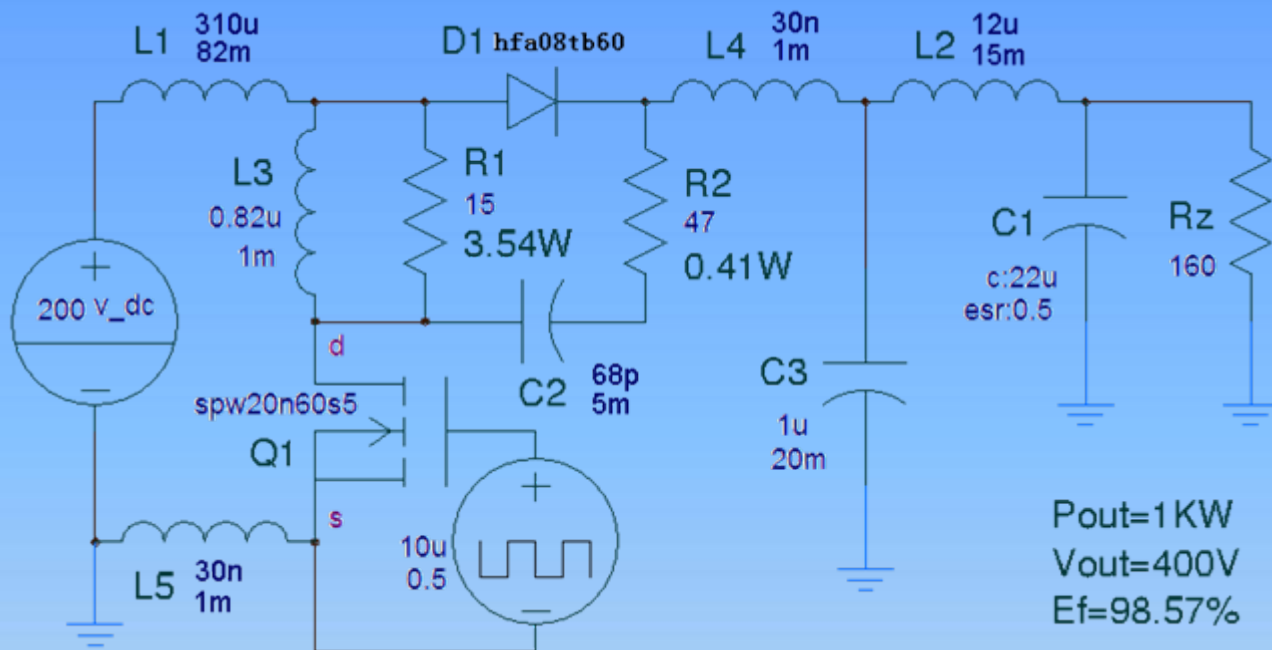
L2	Id2	Vd2	Pd2	Vd1	Vq1	Iqm	Pq	Eff	分析
0	0	0	0	770	471	20.1	11.2	98.22	无缓冲
0.62	2.82	367	3.96	668	471	11.1	6.09	98.4	调整缓冲电感L2, 0.62uH开关损耗最小, 但是二极管反压超标。
1u	3	375	4.17	641	471	10.3	6.18	98.54	
1.2	3.04	378	4.19	605	471	9.23	6.88	98.38	
2u	3.1	391	4.3	521	471	7.22	8.4	98.14	
0.62u	2.86	367	4.04	546	456	11.2	6.12	98.41	增加RC吸收68p+51Ω

LR缓冲

特点:

- 需要吸收电路配合以转移电感剩余能量。
- 缓冲释能电阻R的损耗较大,可简单理解为是从开关管转移出来的损耗。
- R、L参数必须实现最佳配合,参数设计调试比较难以掌握。
- 只要参数适当仍然能够实现高效率。

设计举例(boost):



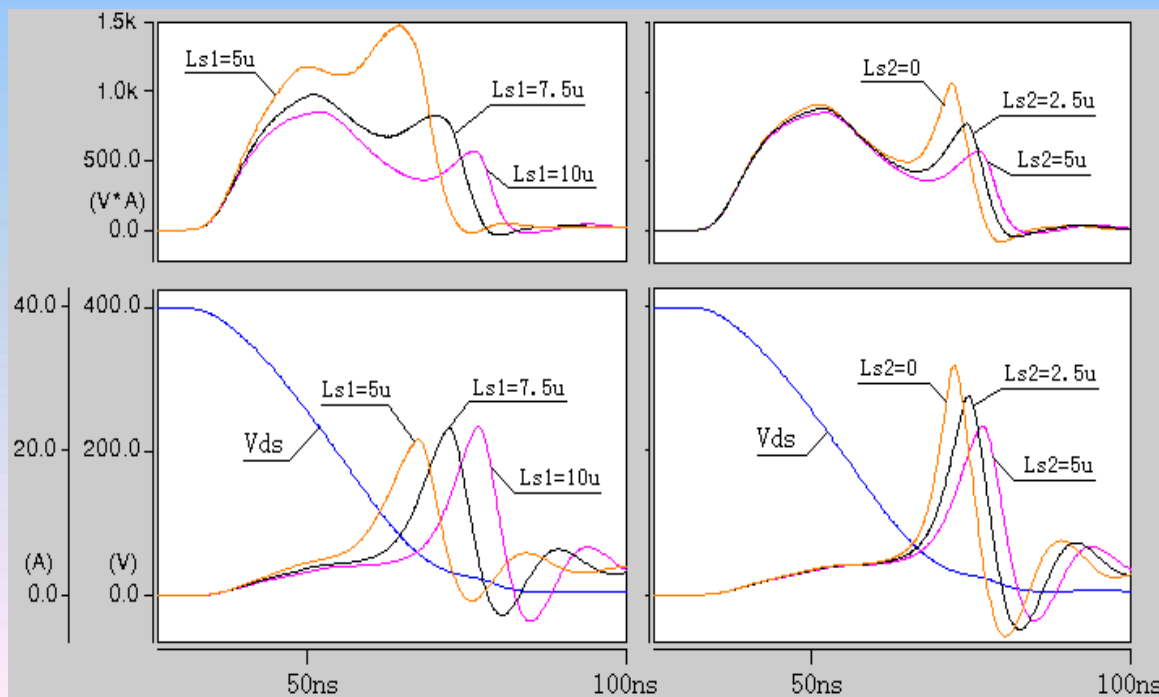
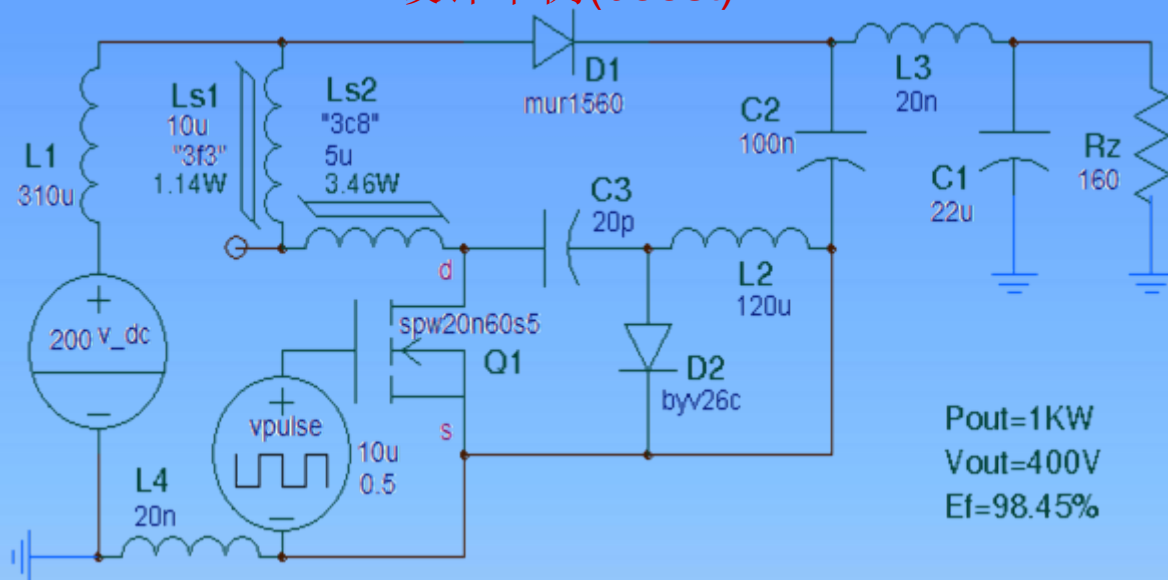
设计（调试）过程:

L'	R	Pr	Vd	Vk	I _{kf}	P _k	E _{ff}	分析
0	0	0	770	471	20.1	11.2	98.224	无缓冲
1	33						98.2	对应每个L'值, 求出最高效率之R'. 当820nH配合15Ω时最佳.
0.91	27						98.37	
0.82	15						98.42	
0.75	10						98.18	
0.82	15	3.54	472	499	15.3	9.89	98.57	微调RC吸收, 68p+47Ω最佳

饱和电感缓冲

- 饱和电感的电气性能表现为对 di/dt 敏感。
- 在一个冲击电流的上升沿, 开始呈现较大的阻抗, 随着电流的升高逐渐进入饱和, 从而延缓和削弱了冲击电流尖峰, 即实现软开通。
- 在电流达到一定程度后, 饱和电感因为饱和而呈现很低的阻抗, 这有利于高效率地传输功率。
- 在电流关断时, 电感逐渐退出饱和状态, 一方面, 由于之前的饱和状态的饱和电感量非常小, 即储能和需要的释能较小。另一方面, 退出时电感量的恢复可以减缓电压的上升速度, 有利于实现软关断。
- 以 $Ls2$ 为例, $5u$ 表示磁路截面积 $5mm^2$, 大致相当于1颗PC40材质 $4*4*2$ 的小磁芯。

设计举例(boost):



饱和电感特性

● 热特性

饱和电感是功率器件，通过进入和退出饱和过程的磁滞损耗（而不是涡流损耗或者铜损）吸收电流尖峰能量，主要热功率来自于磁芯。

这一方面要求磁芯应该是高频材料，另一方面要求磁芯温度在任何情况下不得超过居里温度。这意味着饱和电感的磁芯应该具有最有利的散热特性和结构，即：更高的居里温度、更高的导热系数、更大的散热面积、更短的热传导路径。

● 饱和特性

显然饱和电感一般不必考虑使用气隙或者不易饱和的低导磁率材料。

● 初始电感等效特性

在其他条件相同情况下，较低导磁率的磁芯配合较多匝数、与较高导磁率的磁芯配合较少匝数的饱和电感初始电感相当，缓冲效果大致相当。

这意味着直接采用1匝的穿心电感总是可能的，因为任何多匝的电感总可以找到更高导磁率的磁芯配合1匝等效之。

这还意味着磁芯最高导磁率受到限制，如果一个适合的磁芯配合1匝的饱和电感，将没有使用更高导磁率的磁芯配合更少匝数的可能。

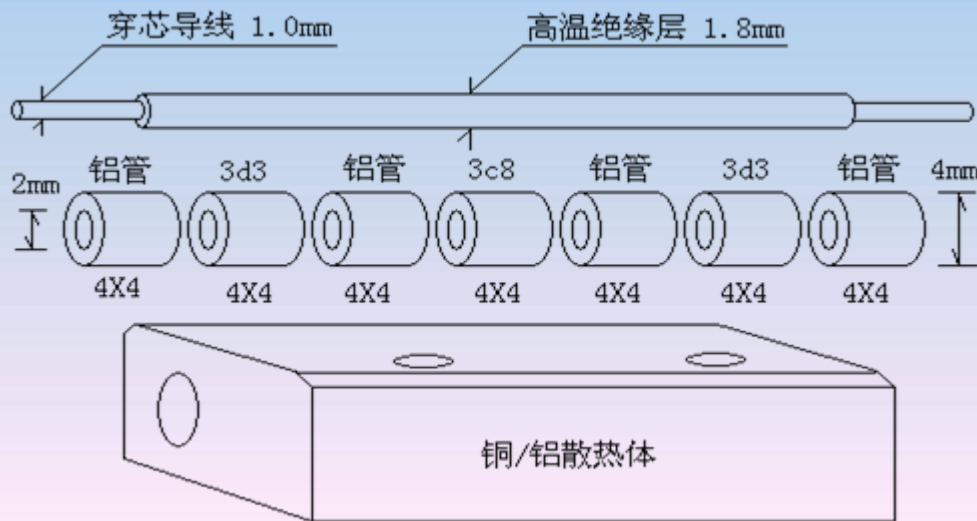
● 磁芯体积等效特性

在其他条件相同情况下，相同体积的磁芯的饱和电感缓冲效果大致相当。既然如此，磁芯可以按照最有利于散热的磁路进行设计。比如细长的管状磁芯比环状磁芯、多个小磁芯比集中一个大磁芯、穿心电感比多匝电感显然具有更大的散热表面积。

● 组合特性

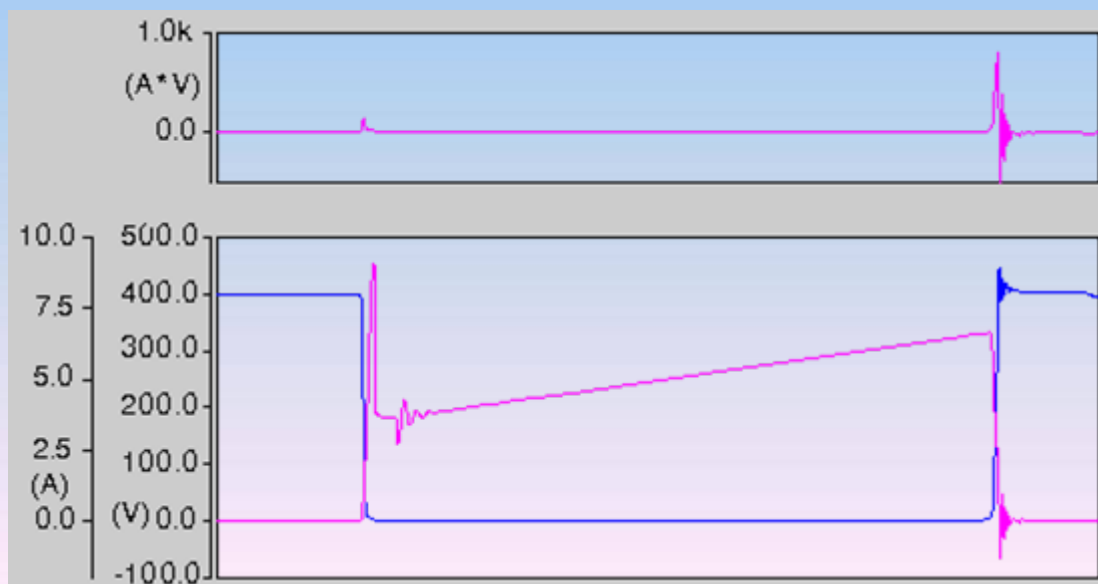
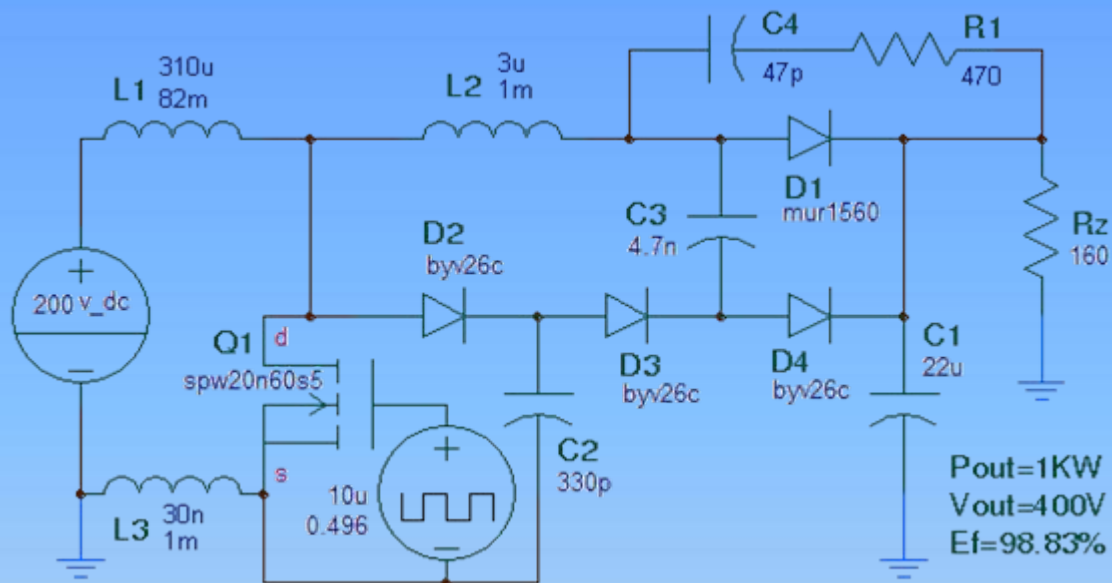
有时候，单一材质的磁芯并不能达到工程上需要的缓冲效果，采用多种材质的磁芯相互配合或许才能够满足工程需要。

一种饱和电感结构设计



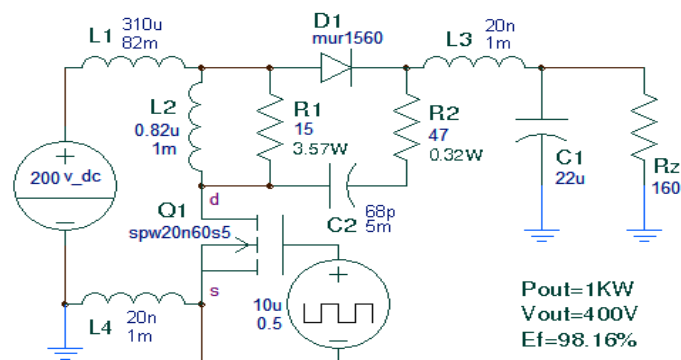
无源无损缓冲吸收

- 如果缓冲电感本身是无损的（非饱和电感），而其电感储能又是经过无损吸收的方式处理的，即构成无源无损缓冲吸收电路，实际上这也是无源软开关电路。
- 缓冲电感的存在延迟和削弱的开通冲击电流，实现了一定程度的软开通。
- 无损吸收电路的存在延迟和降低了关断电压的 dv/dt ，实现了一定程度的软关断。
- 实现无源软开关的条件与无损吸收大致相同。并不是所有拓扑都能够搭建出一个无源软开关电路。因此除了经典的电路外，很多无源软开关电路都是被专利的热门。
- 无源无损软开关电路效率明显高于其他缓冲吸收方式，与有源软开关电路效率相差无几。因此只要能够实现无源软开关的电路，可不必采用有源软开关。



吸收缓冲电路性能对比

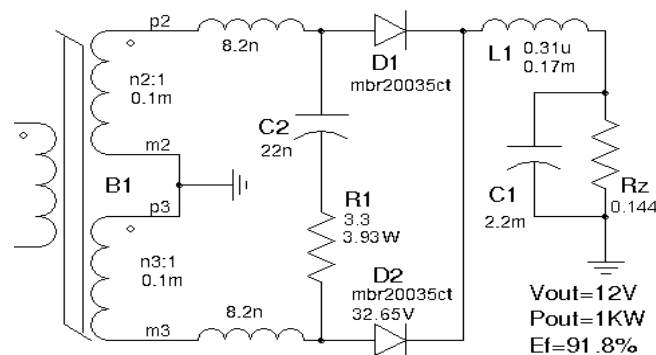
1KW400VBoost



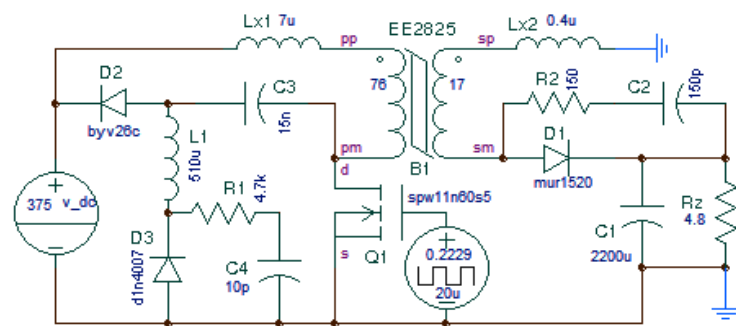
类型	吸收缓冲损耗	二极管反压	开关管电压	开关管损耗	整机效率
无吸收	0	759	463	11.47	98.33
拓扑吸收	0	415	414	12.36	98.27
RC吸收	0.21	511	459	11.64	98.31
LD缓冲	4.14	473	449	6.79	98.41
LR缓冲	3.89	403	496	9.93	98.16
饱和电感缓冲	4.61	552	404	6.05	98.45
无源软开关	1.91	544	447	5.08	98.83

1KW12V副边全波整流

	吸收缓冲损耗	二极管反压	Pin	Pout	整机效率
RC吸收	3.93	32.65	1090.9	1001.5	91.8
RCD钳位	1.96	32.81	1091	1003.5	91.98
齐纳钳位	1.5	33.46	1090.5	1003.6	92.03



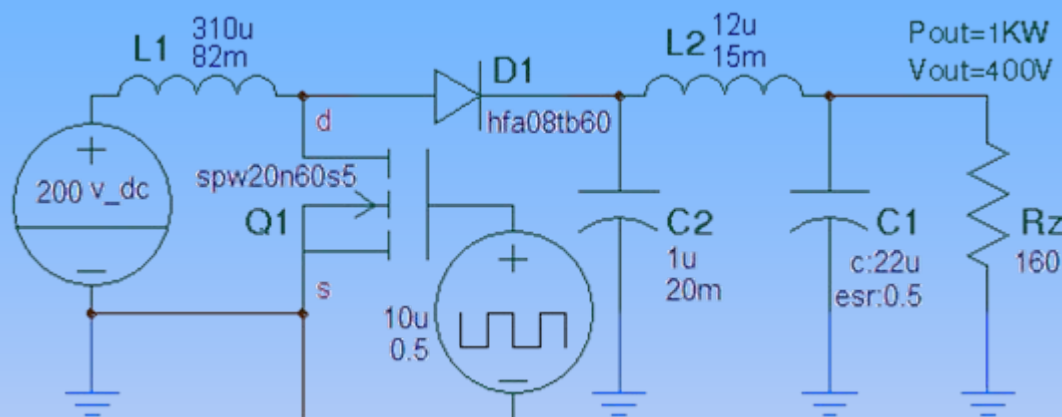
120W24V反激



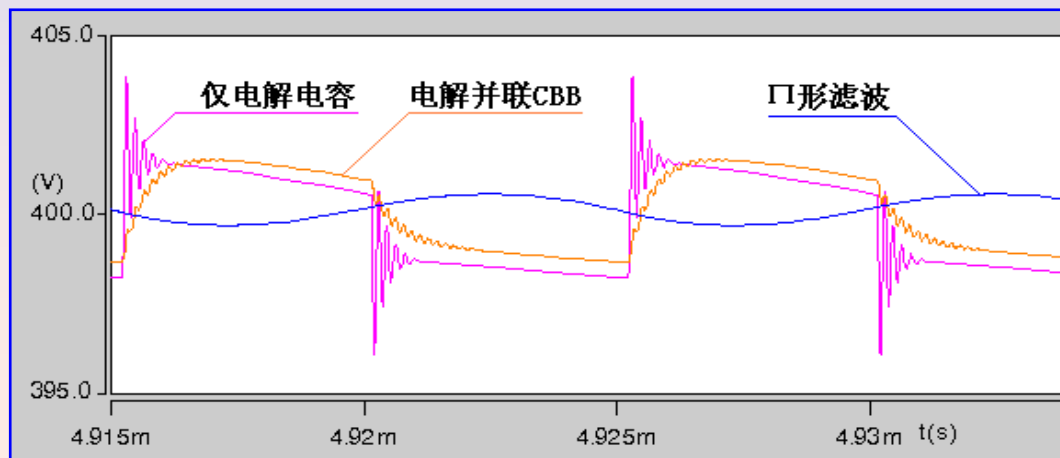
吸收类型	吸收功耗	副边二极管反压	开关管电压	开关管损耗	整机效率
无损吸收	1.08W	127V	590V	1.37W	92.44
RCD钳位	8.16W	141V	584V	1.71W	87.5
齐纳钳位	8.63W	141V	581V	1.66W	87.18
RC吸收	38W	136V	575V	1.83W	71.69

滤波缓冲

- 电路中的电解电容一般具有较大的ESR（典型值是百毫欧姆数量级），这引起两方面问题：一是滤波效果大打折扣；二是纹波电流在ESR上产生较大损耗，这不仅降低效率，而且由于电解电容发热直接导致的可靠性和寿命问题。
- 一般方法是在电解电容上并联高频无损电容，而事实上，这一方法并不能使上述问题获得根本的改变，这是由于高频无损电容在开关电源常用频率范围内仍然存在较大的阻抗的缘故。
- 提出的办法是：用电感将电解和CBB分开，CBB位于高频纹波电流侧，电解位于直流（工频）侧，各自承担对应的滤波任务。
- 设计原则： Π 形滤波网络的谐振频率 F_n 应该错开PWM频率 F_p 。可取 $F_p = (1.5 \sim 2) F_n$ 。
- 这一设计思想可以延伸到直流母线滤波的双向缓冲，或者其他有较大滤波应力的电路结构。



	纹波	电解损耗	整机效率
单电解	1.37V	3.71W	98.00%
电解并CBB	1.13V	2.53W	98.04%
插入电感	0.32V	0.19W	98.14%



振铃

PWM波形的频谱差不多都是线性分布的，一般不会MEI 超标

振铃的危害：

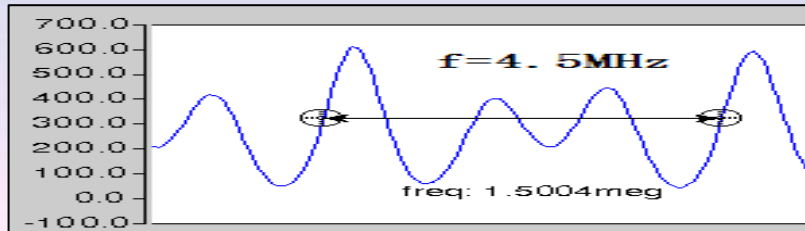
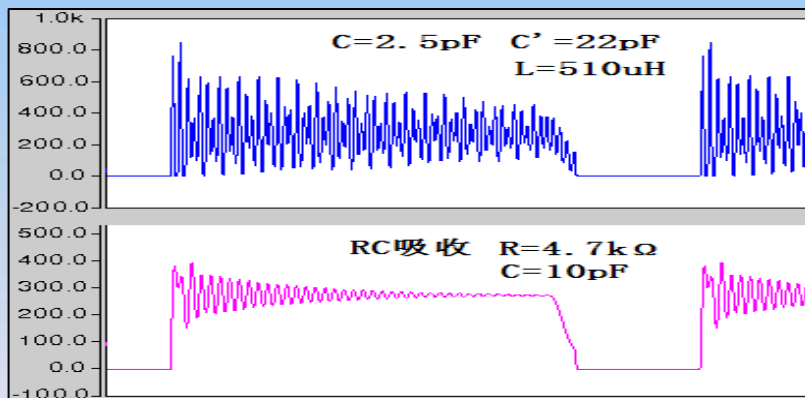
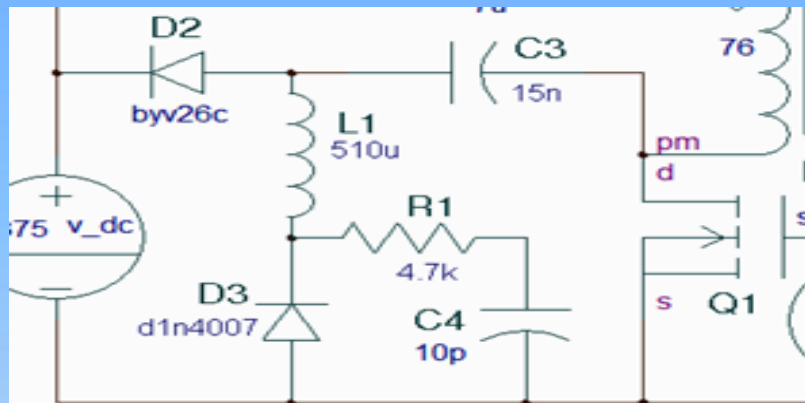
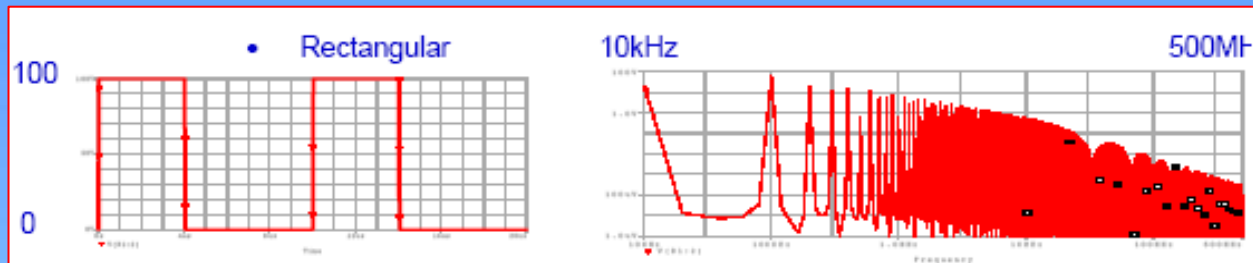
- MEI测试在振铃频率容易超标。
- 振铃将引起振铃回路的损耗，造成器件发热和降低效率。
- 振铃电压幅度超过临界值将引起振铃电流，破坏电路正常工况，效率大幅度降低。

振铃的成因：

- 振铃多半是由结电容和某个等效电感的谐振产生的。对于一个特定频率的振铃，总可以找到原因。电容和电感可以确定一个频率，而频率可以观察获得。电容多半是某个器件的结电容，电感则可能是漏感。
- 振铃最容易在无损（无电阻的）回路发生。比如：副边二极管结电容与副边漏感的谐振、杂散电感与器件结电容的谐振、吸收回路电感与器件结电容的谐振等等。

振铃的抑制：

- 磁珠吸收，只要磁珠在振铃频率表现为电阻，即可大幅度吸收振铃能量，但是不恰当的磁珠也可能增加振铃。
- RC 吸收，其中C可与振铃（结）电容大致相当，R 按RC吸收原则选取。
- 改变谐振频率，比如：只要将振铃频率降低到PWM频率相近，即可消除PWM上的振铃。
- 特别地，输入输出滤波回路设计不当也可能产生谐振，也需要调整谐振频率或者其他措施予以规避。

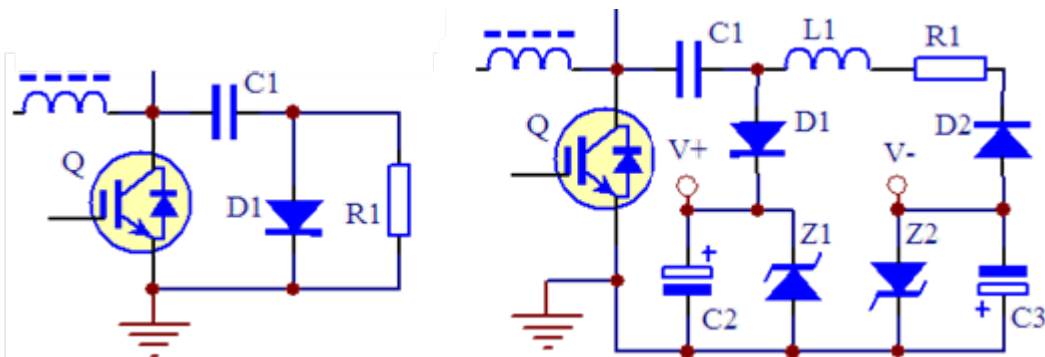


吸收缓冲能量再利用

RCD吸收能量回收电路

只要将吸收电路的正程和逆程回路分开，形成相对0电位的正负电流通路，就能够获得正负电压输出。其设计要点为：

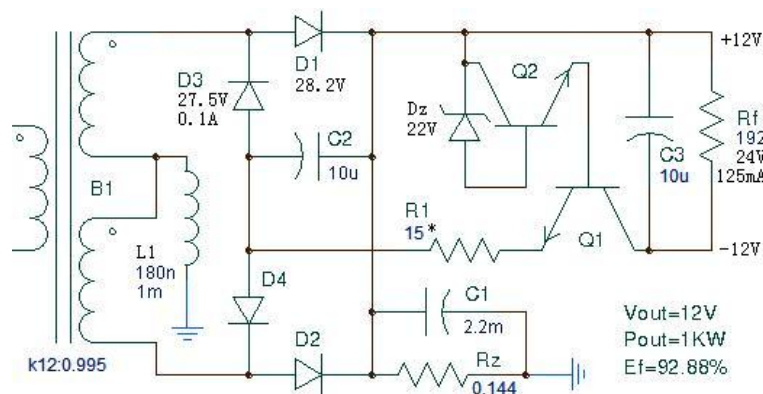
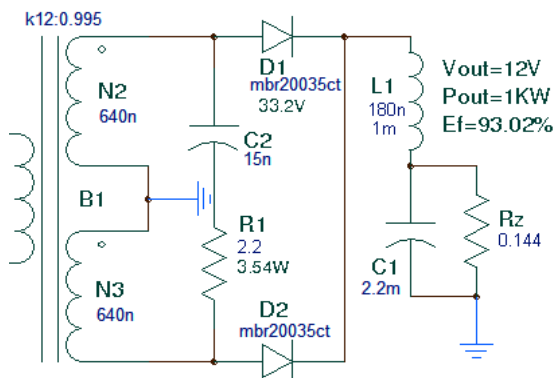
- RCD吸收电路参数应主要满足主电路吸收需要，不建议采用增加吸收功率的方式增加直流输出功率。
- 输出电流由L1、R1控制。逆程回路的阻抗同样应满足吸收回路逆程时间的需要，调整L1、R1的大小可控制输出功率大小，当R1减少到0时，该电路达到最大可能输出电流和最大输出功率。
- 输出电压基本上可由齐纳门槛电压任意设定，需注意齐纳二极管的功率匹配。



RCD钳位能量回收电路

下图为12V1KW副边全波整流原3.5WRC 吸收能量用RCD钳位吸收回收为3W24V风扇电源的电路。

- RCD钳位吸收回收电路输出电压与钳位电压有关，可控制范围有限。
- 如果回收电源负载不能确定，需要确保在任意负载状态下吸收状态不变，不影响主电路。
- 注意回收电路的接地，避免成为共模干扰源。
- 调整R1，严格控制吸收程度，确保钳位工况。



请大家多提宝贵意见

谢谢！

