



# 如何降低电源纹波噪声的 分析与应用



2009中国电源工程师深圳技术交流会

一. 什么是纹波?

二. 纹波的表示方法;

三. 纹波的测试方法;

四. 开关电源纹波的主要分类及抑制方法讲解;

五. 结语及附注

# 如何降低电源纹波噪声的分析与应用——什么叫纹波？

## 一、什么叫纹波？

纹波(ripple)的定义是指在直流电压或电流中, 叠加在直流稳定量上的交流分量。

它主要有以下害处:

- 1.1. 容易在用电器上产生谐波, 而谐波会产生更多的危害;
- 1.2. 降低了电源的效率;
- 1.3. 较强的纹波会造成浪涌电压或电流的产生, 导致烧毁用电器;
- 1.4. 会干扰数字电路的逻辑关系, 影响其正常工作;
- 1.5. 会带来噪音干扰, 使图像设备、音响设备不能正常工作。

## 二、纹波的表示方法

可以用有效值或峰值来表示，或者用绝对量、相对量来表示；

单位通常为：**mV**

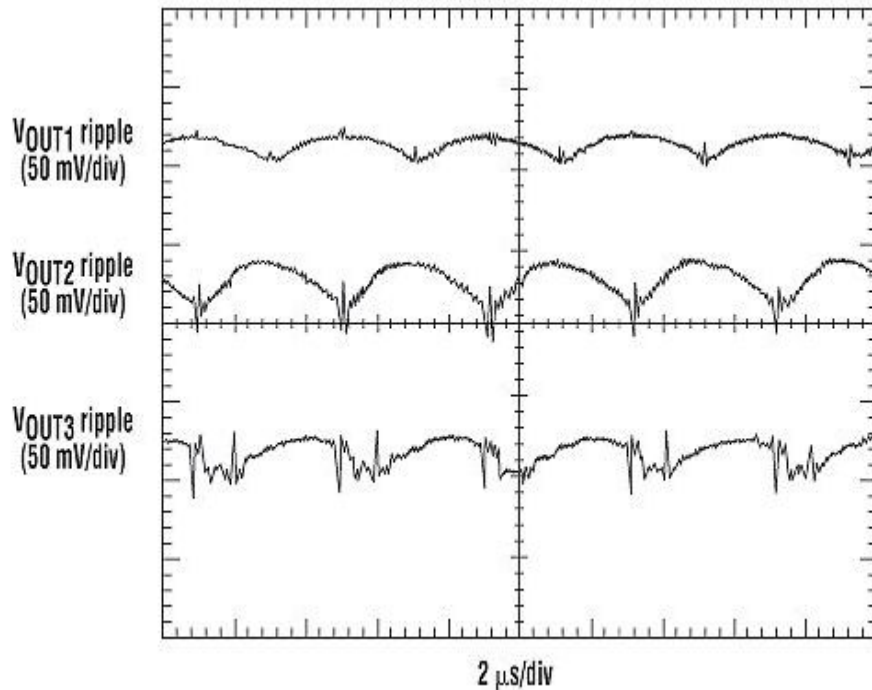
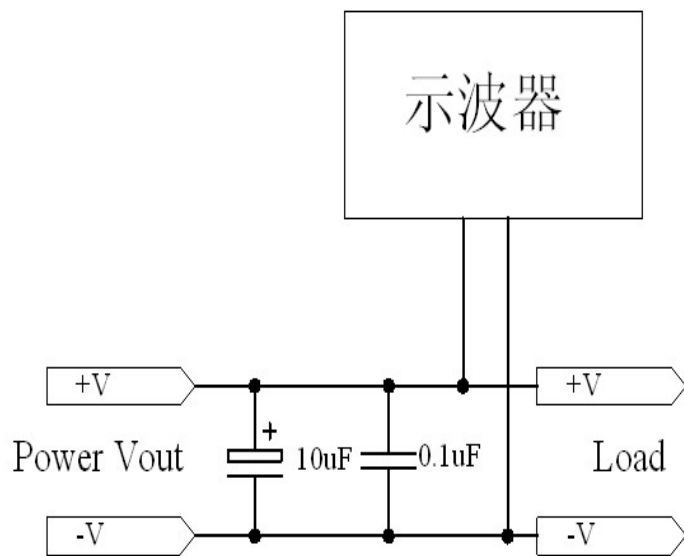
例如：

一个电源工作在稳压状态，其输出为**12V5A**，测得纹波的有效值为**10mV**，

这10mV就是纹波的绝对量，而相对量即纹波系数=纹波电压/输出电压=**10mv/12V=0.12%**。

## 三、纹波的测试方法

3.1. 以20M示波器带宽为限制标准，电压设为**PK-PK**（也有测有效值的），去除示波器控头上的夹子与地线（因为这个本身的夹子与地线会形成环路，像一个天线接收杂讯，引入一些不必要的杂讯），使用接地环（不使用接地环也可以，不过要考虑其产生的误差），在探头上并联一个**10UF**电解电容与一个**0.1UF**瓷片电容，用示波器的探针直接进行测试；如果示波器探头不是直接接触输出点，应该用**双绞线**，或者**50Ω**同轴电缆方式测量。



## 四、开关电源纹波的主要分类

开关电源输出纹波主要来源于五个方面：

4. 1. 输入低频纹波；
4. 2. 高频纹波；
4. 3. 寄生参数引起的共模纹波噪声；
4. 4. 功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声；
4. 5. 闭环调节控制引起的纹波噪声。

## 纹波的主要分类—输入低频纹波

### 4.1、输入低频纹波：

低频纹波是与输出电路的滤波电容容量相关。电容的容量不可能无限制地增加，导致输出低频纹波的残留。

交流纹波经DC/DC变换器衰减后，在开关电源输出端表现为低频噪声，其大小由DC/DC变换器的变比和控制系统的增益决定。

电流型控制DC/DC变换器的纹波抑制比电压型稍有提高。但其输出端的低频交流纹波仍较大。要实现开关电源的低纹波输出，必须对低频电源纹波采取滤波措施。

可采用前级预稳压和增大DC/DC变换器闭环增益来消除。

## 纹波的主要分类--输入低频纹波

低频纹波抑制的几种常用的方法:

a、加大输出低频滤波的电感，电容参数。

电容上的纹波有两个成分,一个是充放电时的电压升降量，一个是电流进出电容时ESR上的 $I \cdot R$ 电压降量。

通过输出纹波与输出电容的关系式： $v_{ripple} = I_{max} / (C_o \times f)$ 可以看出，加大输出电容值可以减小纹波。

或者考虑采用并联的方式减小ESR值,或者使用LOW ESR电容。

b、采用前馈控制方法，降低低频纹波分量。

feed forward control (FFC) 前馈控制是按照扰动产生校正作用的一种调节方式，主要用于一些纯滞后或容量滞后较大的被控参数的控制。

其目的是加速系统响应速度，改善系统的调节品质。



## 纹波的主要分类--高频纹波

### 4.2、高频纹波：

高频纹波噪声来源于高频功率开关变换电路

在电路中，通过功率器件对输入直流电压进行高频开关变换后整流滤波再实现稳压输出的，在其输出端含有与开关工作频率相同频率的高频纹波，其对外电路的影响大小主要和**开关电源的变换频率、输出滤波器的结构和参数**有关；

设计中尽量提高功率变换器的工作频率，可以减少对高频开关纹波的滤波要求。

## 纹波的主要分类--高频纹波

高频纹波抑制常用的方法有以下几种：

- a、提高开关电源工作频率，以提高高频纹波频率，其纹波电流 $\Delta I$ 可由下式算出：

$$\Delta I = \frac{(V_{ir} - V_{out}) * V_{out}}{L * V_{ir} * f}$$

可以看出，增加L值，或者提高开关频率可以减小电感内的电流波动。

- b、加大输出高频滤波器，可以抑制输出高频纹波。

- c、采用多级滤波。

一般滤波多采用C型、LC型、CLC型，为了更好的抑制纹波，可以采用增加多级LC滤波。

## 纹波的主要分类--寄生参数引起的共模纹波噪声纹波

### 4.3、寄生参数引起的共模纹波噪声：

由于功率器件与散热器底板和变压器原、副边之间存在寄生电容，导线存在寄生电感，减小与控制功率器件、变压器与机壳地之间的寄生电容，并将散热器有效接地（根据不同情况，可选择通过电容接地，或电容串电阻接地），同时在输出侧加共模电感及电容，可减小输出的共模纹波噪声。

因此当矩形波电压作用于功率器件时，开关电源的输出端因此会产生共模纹波噪声。减小与控制功率器件、变压器与机壳地之间的寄生电容，并在输出侧加共模抑制电感及电容，可减小输出的共模纹波噪声。

## 纹波的主要分类--寄生参数引起的共模纹波噪声纹波

### 4.3.1减小输出共模纹波噪声的常用方法:

a、输入、输出采用专门设计的EMI滤波器。

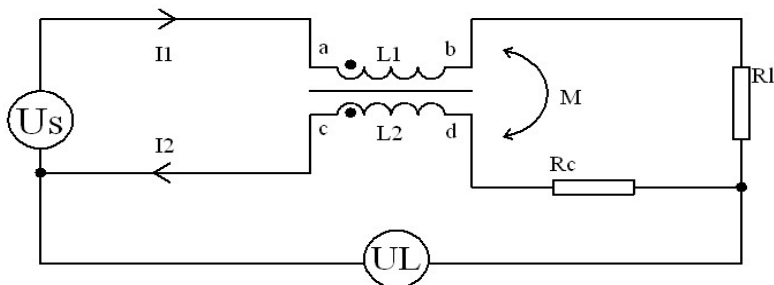


图1：共模电感等效电路

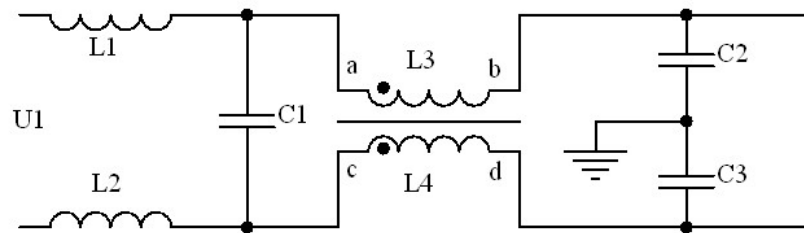


图2：电源进线端滤波电路

b、降低开关毛刺幅度。

主开关管是开关电源的核心器件，同时也是干扰源。其工作频率**直接与电磁干扰的强度相关**。随着开关管的工作频率升高，开关管电压、电流的切换速度加快，其传导干扰和辐射干扰也随之增加。

此外，主开关管上反并联的钳位二极管的反向恢复特性不好，或者电压尖峰吸收电路的参数选择不当也会造成电磁干扰。

## 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

### 4.4、功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

超高频谐振噪声主要来源于：

高频整流二极管反向恢复时二极管结电容、功率器件开关

时功率器件结电容与线路寄生电感的谐振；

频率一般为**1-10MHz**；

通过选用软恢复特性二极管、结电容小的开关管和减少布线长度

等措施可以减少超高频谐振噪声。

## 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

a、理想的二极管在承受反向电压时截止，不会有反向电流通过。

而实际二极管正向导通时，PN结内的电荷被积累，当二极管承受反向电压时，PN结内积累的电荷将释放并形成反向恢复电流，它恢复到零点的时间与结电容等因素有关。反向恢复电流在变压器漏感和其他分布参数的影响下将产生较强烈的高频衰减振荡。

因此，输出整流二极管的反向恢复噪声也成为开关电源中一个主要的干扰源。

二极管反向恢复的等效电路如下：

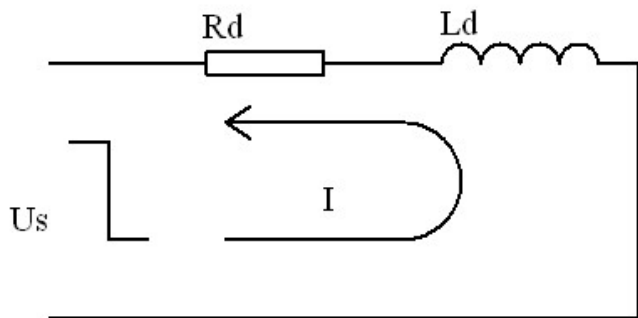


图3：反向恢复前期等效电路

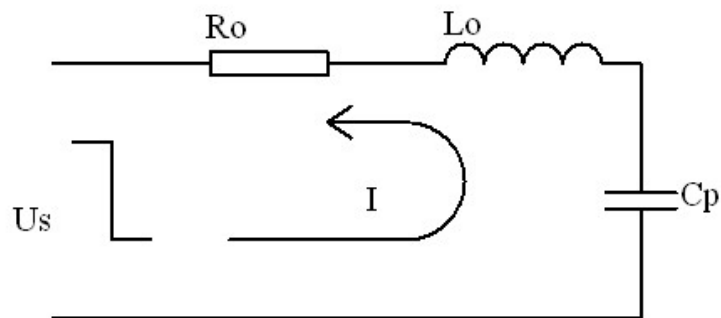


图4：反向恢复后期等效电路

## 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

图4中：R0为次级绕线电阻，引线电阻及二极管导通电阻之和；L0为变压器漏感和引线电感之和；

利用等效电路的计算公式 $i=U_s/R_0[1-e^{-(R_0/L_0)t}]$ 中，不难看出，在反向恢复前期的过程中所产生的电流尖峰是很大的。再加上后期恢复中因为关断结电容的存在，在 $U_s$ 上还叠加了一个正弦衰减振荡 $U_0e^{-at}\sin(\omega t+\theta)$ 。

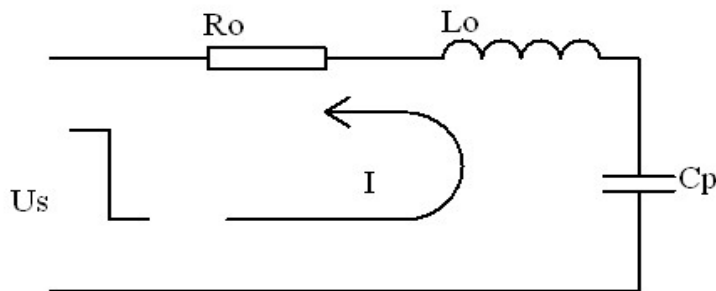
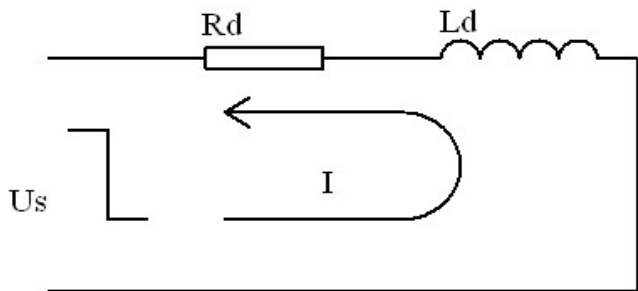


图3：反向恢复前期等效电路

图4：反向恢复后期等效电路

$$U_c(t) = U_m + U_0 e^{-at} \sin(\omega t + \theta)$$

$$\omega = \sqrt{I / L_0 C_{DI} + (R_0 / 2L_0)^2}$$

$$a = R_0 / 2L_0$$

## 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

输出整流二极管的反向恢复问题也可以通过在输出整流管上串联一个饱和电感来抑制。

如图5所示，饱和电感 $L_s$ 与二极管串联工作。饱和电感的磁芯是用具有矩形BH曲线的磁性材料制成的。同磁放大器使用的材料一样，这种磁芯做的电感有很高的磁导率，该种磁芯在BH曲线上拥有一段接近垂直的线性区并很容易进入饱和。实际使用中，在输出整流二极管导通时，使饱和电感工作在饱和状态下，相当于一根导线；当二极管关断反向恢复时，使饱和电感工作在电感特性状态下，阻碍了反向恢复电流的大幅度变化，从而抑制了它对外部的干扰。

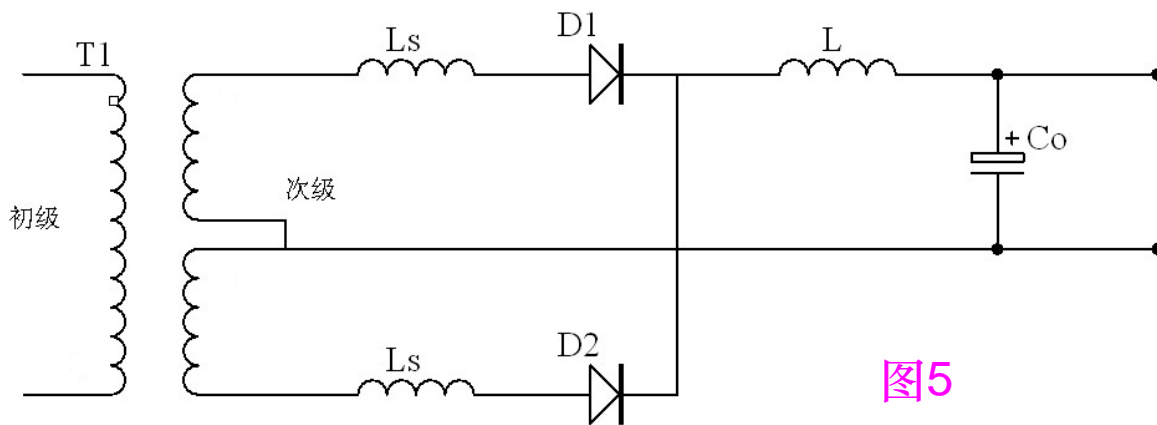


图5



## 纹波的主要分类 -- 功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

### 图5 饱和电感在减小二极管反向恢复电流中的应用

为了抑制二极管尖峰，需在二极管两端并联电容C或RC缓冲网络。

RC网络的取值原则：**C从 $0.01\mu\text{F} \sim 0.1\mu\text{F}$** ，串联电阻用于限制电容C的放电电流，也为了阻止由于回路阻抗而引起的共振，起阻尼作用。

一般按下式选取： **$U_0/I_0 \leq R$  (R不小于 $4\Omega$ )**

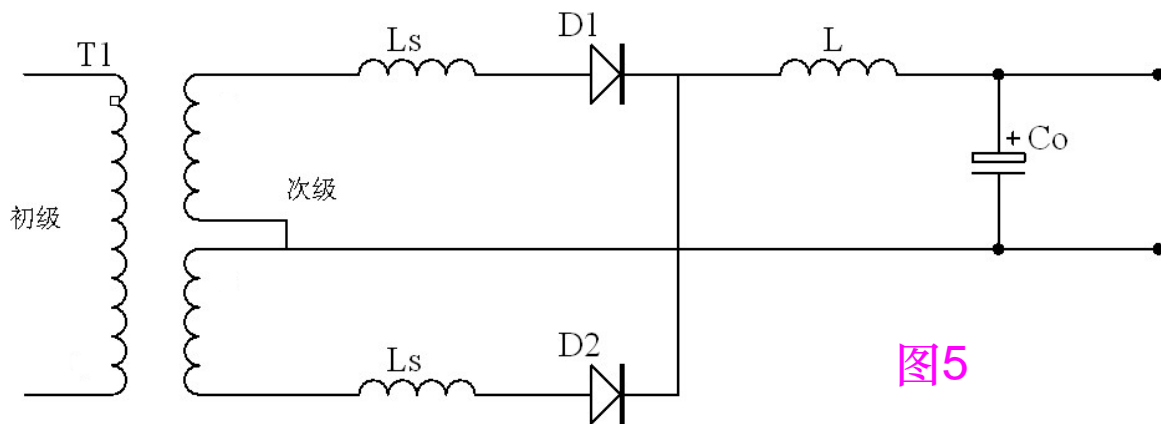


图5

## 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

### b、分布及寄生参数引起的开关电源噪声

b1、开关电源的分布参数是多数干扰的内在因素，开关电源和散热器之间的分布电容、变压器初次级之间的分布电容、原副边的漏感都是噪声源。

b2、共模干扰就是通过变压器初、次级之间的分布电容以及开关电源与散热器之间的分布电容传输的。其中变压器绕组的分布电容与高频变压器绕组结构、制造工艺有关。

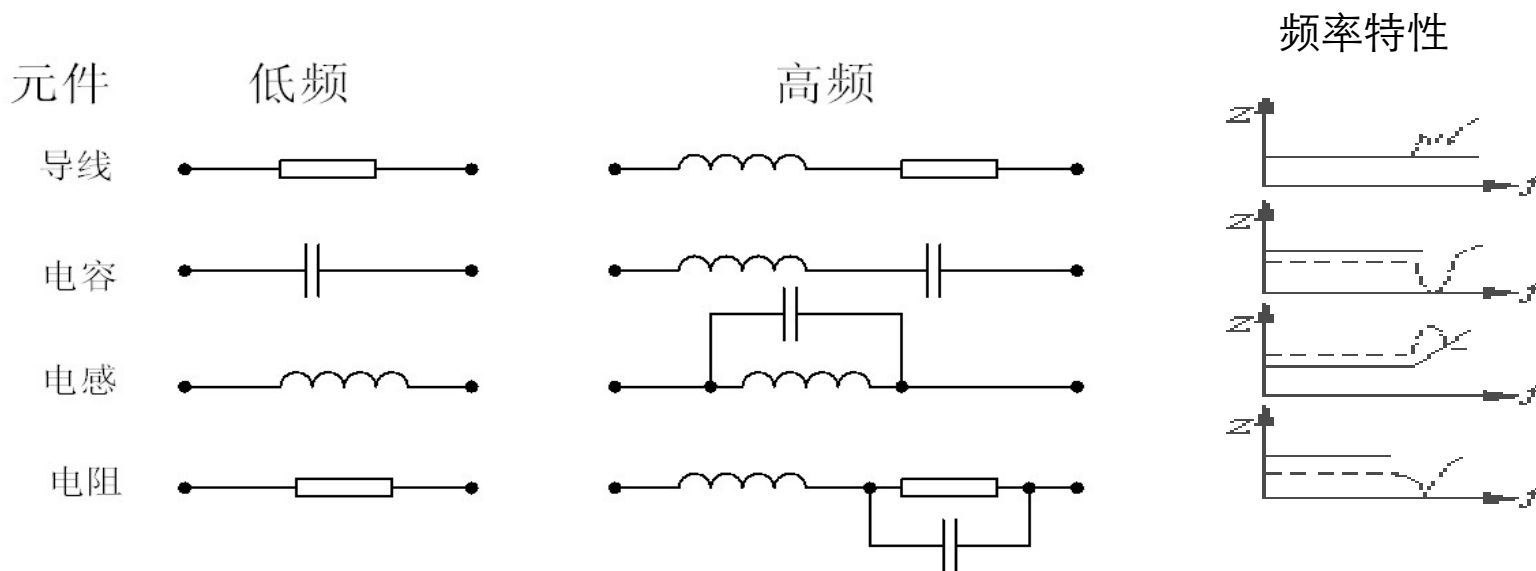
b3、可以通过改进绕制工艺和结构、增加绕组之间的绝缘、采用法拉第屏蔽等方法来减小绕组间的分布电容。

b4、而开关电源与散热器之间的分布电容与开关管的结构以及开关管的安装方式有关。采用带有屏蔽的绝缘衬垫可以减小开关管与散热器之间的分布电容。

# 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

如图6，在高频工作下的元件都有高频寄生特性，对其工作状态产生影响。高频工作时导线变成了发射线、电容变成了电感、电感变成了电容、电阻变成了共振电路。观察图6中的频率特性曲线可以发现，当频率过高时各元件的频率特性产生了相当大的变化。为了保证开关电源在高频工作时的稳定性，设计开关电源时要充分考虑元件在高频工作时的特性，选择使用高频特性比较好的元件。另外，在高频时，导线寄生电感的感抗显著增加，由于电感的不可控性，最终使其变成一根发射线。也就成为了开关电源中的辐射干扰源。导线长度 $l$ ，线径 $d$ 与其电感量的关系为： $L(\mu H) = 0.002 l \ln(4l/d) - 1$

图6



## 纹波的主要分类--功率器件开关过程中产生的超高频谐振噪声

c、设计PCB板最好注意以下几点:

c1、从输入到输出最好按顺序走线;

c2、开关变压器底下和附近不走取样电路, 保护电路, 主芯片及振荡相关电路的线路;

c3、总接地点取在输出滤波电容上比较合适, 各电路接地点应从总接地点分别引出;

c4、驱动信号到开关管走线尽可能短, 且尽可能的粗, 开关变压器到输出整流管也是一样;

## 纹波的主要分类--闭环调节控制引起的纹波噪声

### 4.5 闭环调节控制引起的纹波噪声

此纹波可通过以下方法进行抑制：

- a、在调节器输出增加对地的补偿网络，调节器的补偿可抑制调节器自激引起的纹波增大。

例如：

CCM模式的反激变换器控制至输出传递函数之间有一个右半平面的零点，当占空比开始变化时(占空比增加时)，输出将会先向相反的方向变化(电源输出电流减小)，易引起电路的振荡。

建议使用PID补偿器或DPID(在PID上加一超前补偿)补偿器。

## 纹波的主要分类--闭环调节控制引起的纹波噪声

### 4.5 闭环调节控制引起的纹波噪声

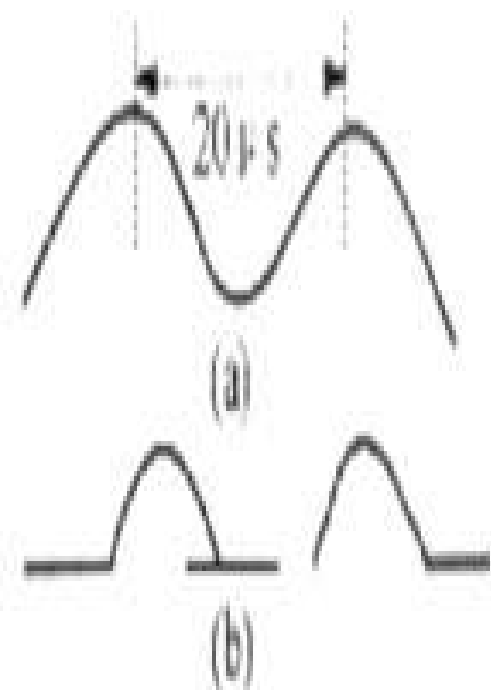
- b、合理选择闭环调节器的开环放大倍数和闭环调节器的参数，开环放大倍数过大会引起调节器的振荡或自激，使输出纹波含量增加，过小的开环放大倍数使输出电压稳定性变差及纹波含量增加。所以调节器的开环放大倍数及闭环调节器的参数要合理选取，调试中要根据负载状况进行调节，以获得足够的环路稳定裕量。
- c、在反馈通道中不增加纯滞后滤波环节，使延时滞后降到最小，以增加闭环调节的快速性和及时性，对抑制输出电压纹波是有益的。

## 纹波的主要分类—常见纹波噪声波形

几种常见噪声波形。

现对这些噪声波的形成原因及相应的抑制措施简述如下：

图7



(1) 噪声波形如图7 (a) 所示。

形成原因：辅助电源或基准电压稳定性不够所致。

抑制措施：在相关部位并大电容。

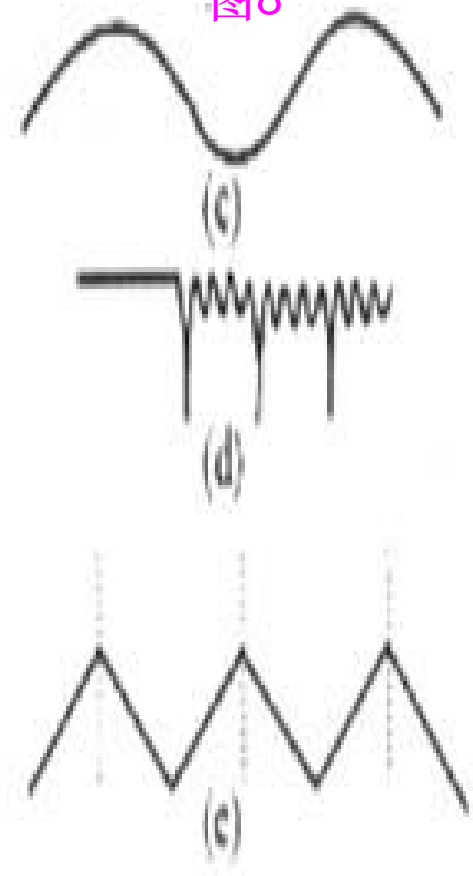
(2) 噪声波如图7 (b) 所示。

形成原因：布线不合理，引起交叉干扰。

抑制措施：调整布线。

## 纹波的主要分类—常见纹波噪声波形

图8



(3) 噪声波形如图8 (c) 所示。

形成原因：由于变压器漏感对采样形成干扰而引起自激，导致出现正弦振荡。

抑制措施：变压器要适当加以屏蔽，且屏蔽层要接地。  
改进变压器绕制工艺。

(4) 噪声波形如图8 (d) 所示。幅值变化随机、无规则。

形成原因：在于采样电阻所加电压过高或印制板绝缘不良。

抑制措施：改进采样。

(5) 噪声波形如图8 (e) 所示。

形成原因：整流二极管反向恢复期间引起的尖峰。

抑制措施：在二极管上并电容C或RC。



## 结语：

本文主要是对开关电源纹波进行了一些相关的分析，文中所诉的各个抑制措施都在实际应用上做过实验。但由于产生原因很多，因而其抑制措施也要视具体情况而定。只要对具体电路作出具体分析，找对源头所在，采取有针对性的抑制措施，就能取得较好的效果。

### 附：不同输出滤波结构的滤波电容计算公式（仅供参考）

C滤波

$$C=1440/r*RL$$

LC滤波

$$C=1.175/r/L$$

CLC滤波

$$C1*C2=3615/r*RL/L$$

(L大于或等于 $2RL/942$ )

(RL=欧) (C =uF) (L =H)

r=输出交流份量有效值/输出直流电压平均值

**演示完毕，感谢大家的参与！**