

开关电源电磁兼容技术系列培训



EMC基础知识及标准体系



EMC试验技术



EMC干扰诊断技术



EMC设计技术_EMI



EMC设计技术_EMS

EUR · USA · JPN · AUS

EMC认证体系

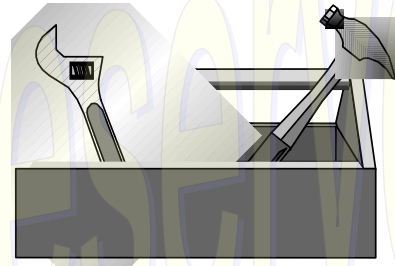
开关电源电磁兼容培训系列教材之四

开关电源EMI设计技术

李 静

开关电源EMI设计技术

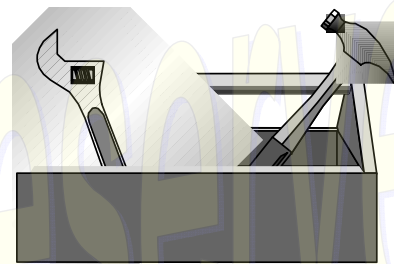
- EMC设计的目的
- EMC设计的对象
- 相关的EMC基础知识
- EMC试验的原理
- EMI试验结果的分析
- 减小开关电源EMI的方法
- 方法一——开关电源噪声源分析和对策
- 方法二——开关电源EMI耦合途径的切断



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI设计技术

- 接地和地环路
- PCB LAYOUT
- 开关电源的EMI仿真
- 开关电源EMI中的谐振问题
- 典型案例分析



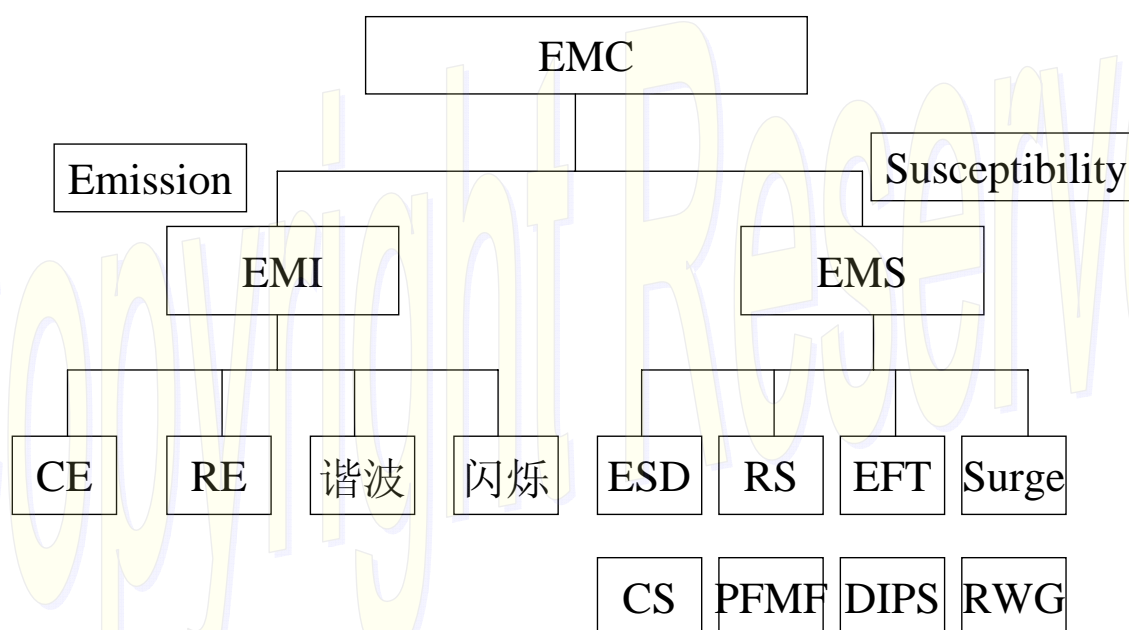
电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC设计的目的

- 在复杂的电磁环境中，减少设备相互间的电磁骚扰，使各种设备能正常运转。同时减轻恶劣的电磁环境对人类及生态产生不良的影响。
- 产品的各个模块可以共存，不致引起相互骚扰
- 从企业产品设计的实用性出发，就是要通过各种技术壁垒的限制，即通过电磁兼容性试验。取得生产和销售的通行证。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC设计的对象



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC设计的对象

- 针对开关电源产品，其中的重点和难点主要是EMI性能，而EMI中的难点又比较多的集中在CE和RE。

CE: Conducted Emission
传导发射

RE: Radiated Emission
辐射发射

- 本次讲解的内容主要就是针对开关电源的CE和RE设计的。

相关的EMC基础知识

- 电磁兼容设计是一门综合性的边缘学科,其核心是电磁波,其理论基础包括:数学,电磁场理论,电路理论,微波理论与技术,天线与电波传播,通信理论,材料科学,计算机与控制理论,机械工艺学,核物理,生物医学,以及法律学,社会学等.

相关的EMC基础知识

- 传输线阻抗（圆截面导线）
 - $Z=R_{ac}+j\omega L$
 - $R_{ac}=1/\pi d\delta\sigma$ ， δ 为集肤深度。
 - $L=0.2*l*\ln(4l/d)$
- 传输线对（平行圆截面直导线）

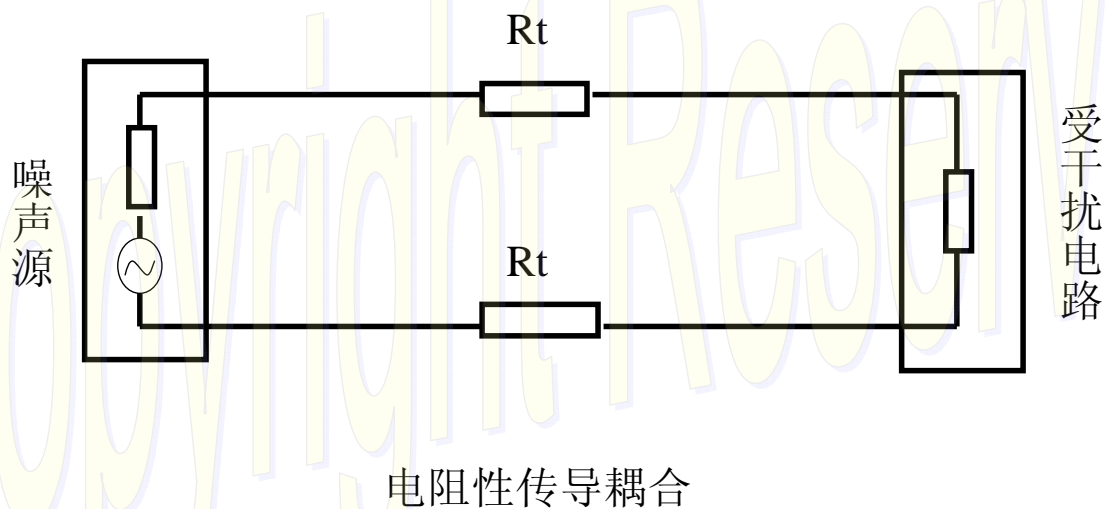
$$C=1.21\times 10^{-11}\frac{1}{\lg\left(\frac{d+\sqrt{d^2-4r^2}}{2r}\right)}\times l$$

$$M=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\ln\frac{\sqrt{d^2+4h^2}}{d}$$

相关的EMC基础知识

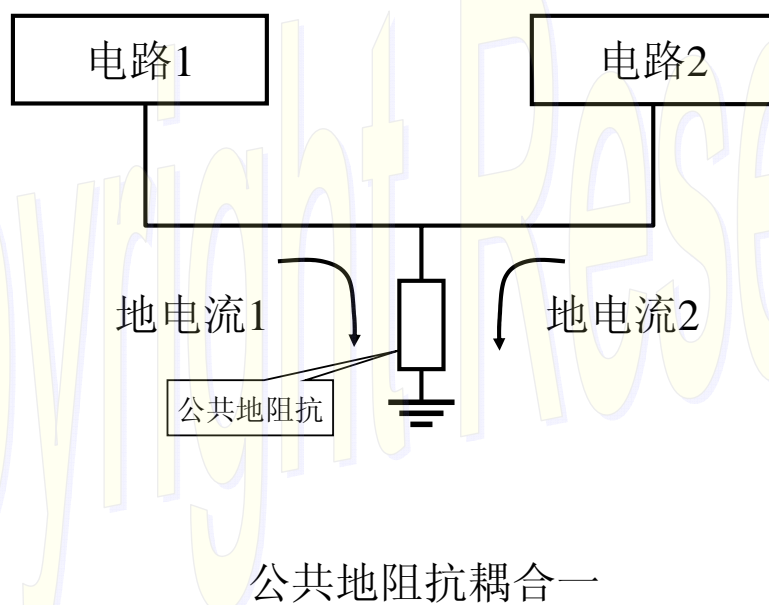
- 传导耦合
 - 电阻性直接耦合
 - 公共地阻抗耦合
 - 公共电源阻抗耦合
- 辐射耦合
 - 近场耦合
 - 电容性耦合
 - 电感性耦合
 - 远场耦合
 - 天线对天线耦合
 - 场对天线耦合

相关的EMC基础知识



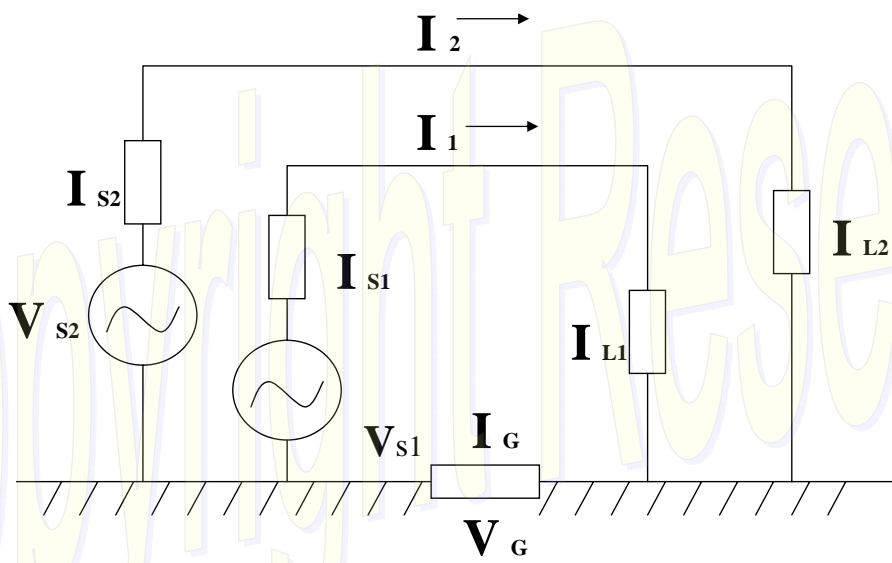
电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

相关的EMC基础知识



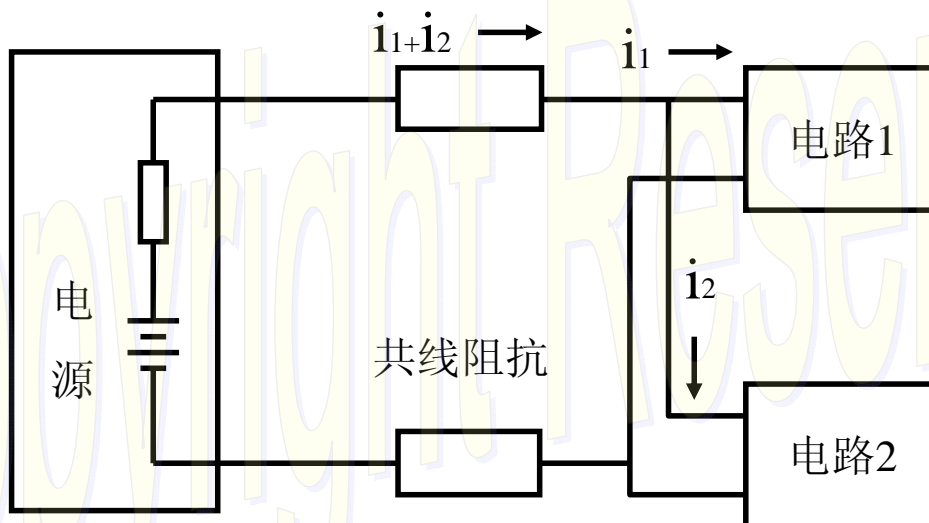
电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

相关的EMC基础知识



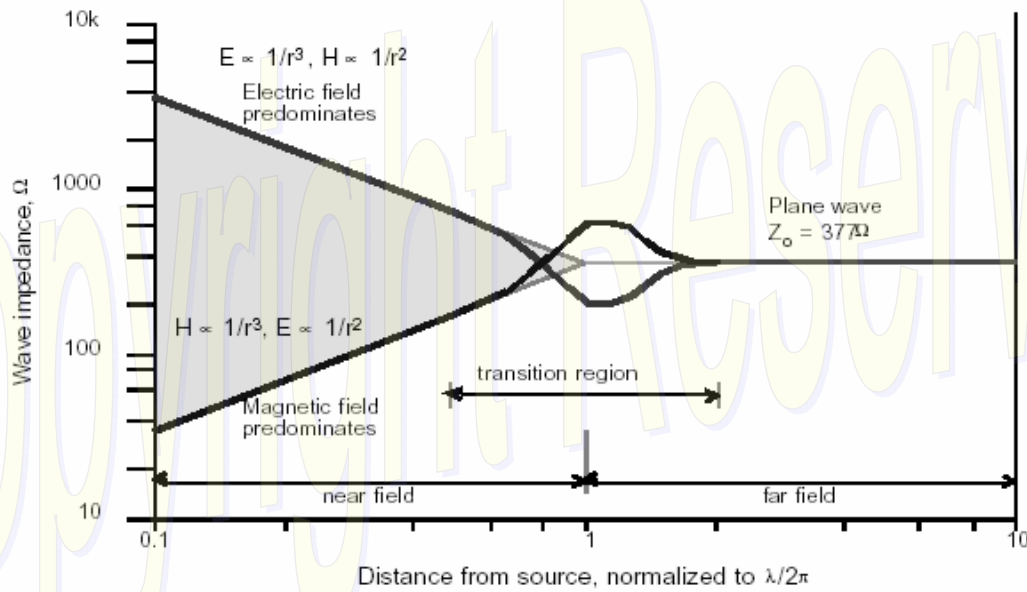
公共地阻抗耦合二

相关的EMC基础知识



共电源阻抗耦合

相关的EMC基础知识



波阻抗 $Z = E/H$

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

相关的EMC基础知识

波阻抗: $Z_0 = E/H$ 为媒质的本质阻抗, 与媒质的参量有关.

近场 ($r \ll \lambda / 2\pi$)

波阻抗: $Z_0(\text{电}) = 120\pi (\lambda / 2\pi r) \gg 377\Omega$

$Z_0(\text{磁}) = 120\pi (2\pi r / \lambda) \ll 377\Omega$

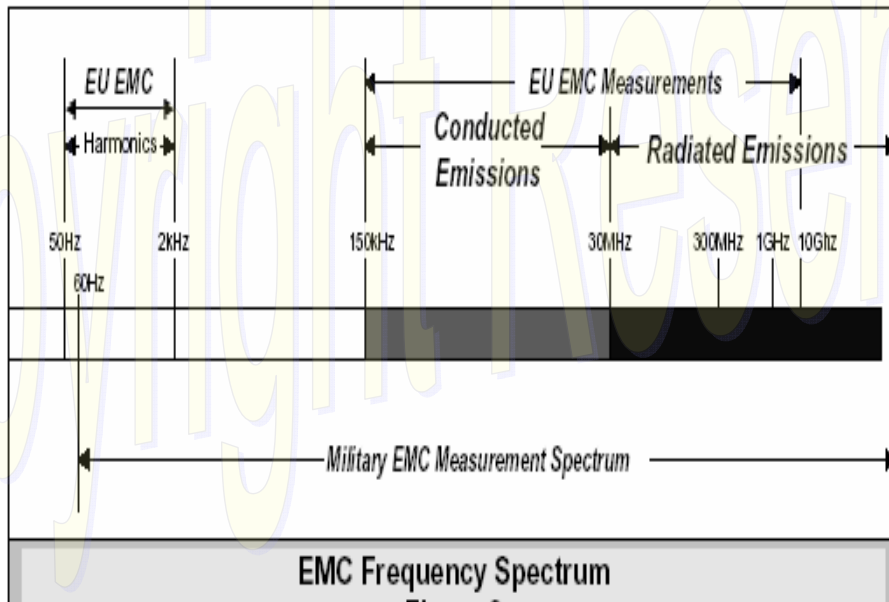
远场 ($r \gg \lambda / 2\pi$)

波阻抗: $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi = 377\Omega$

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

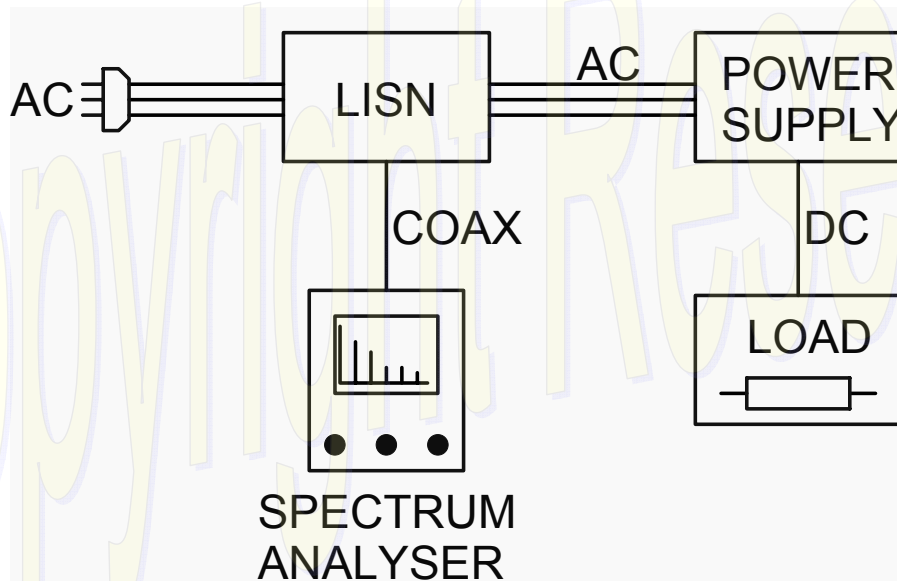
要产品通过CE/RE的测试，必须先弄明白其测试的原理



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

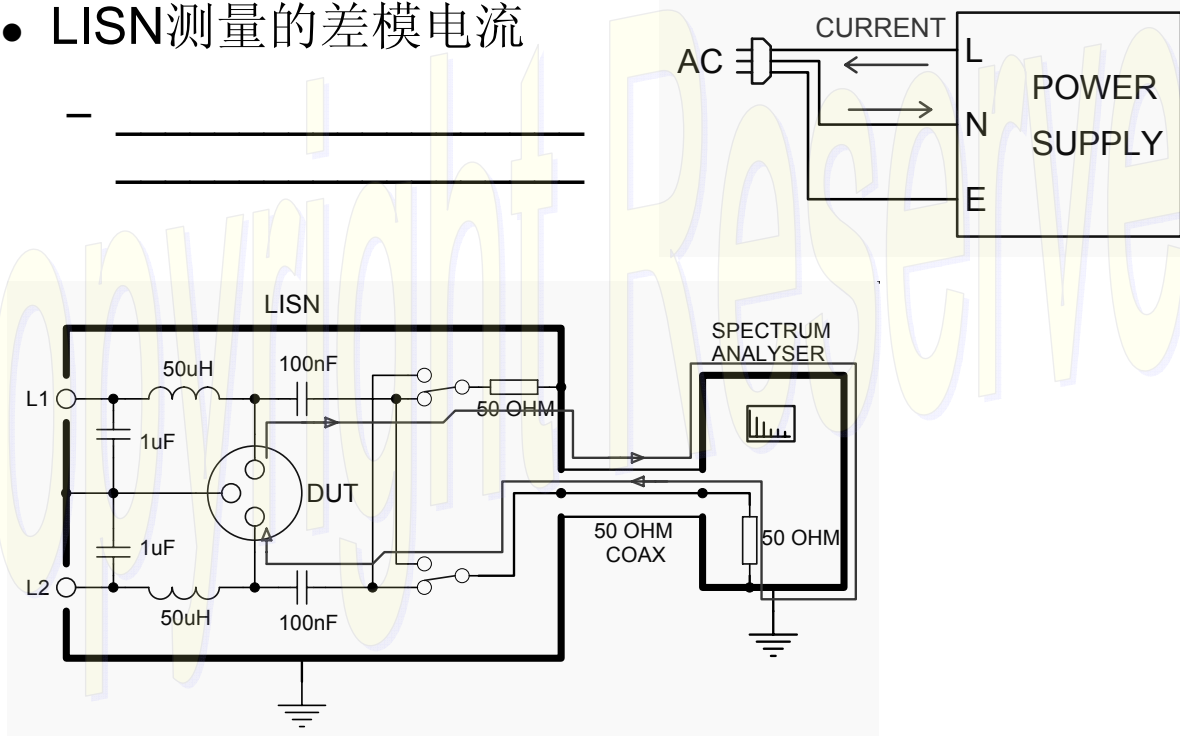
- 传导的测试配置（对AC输入端口）



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

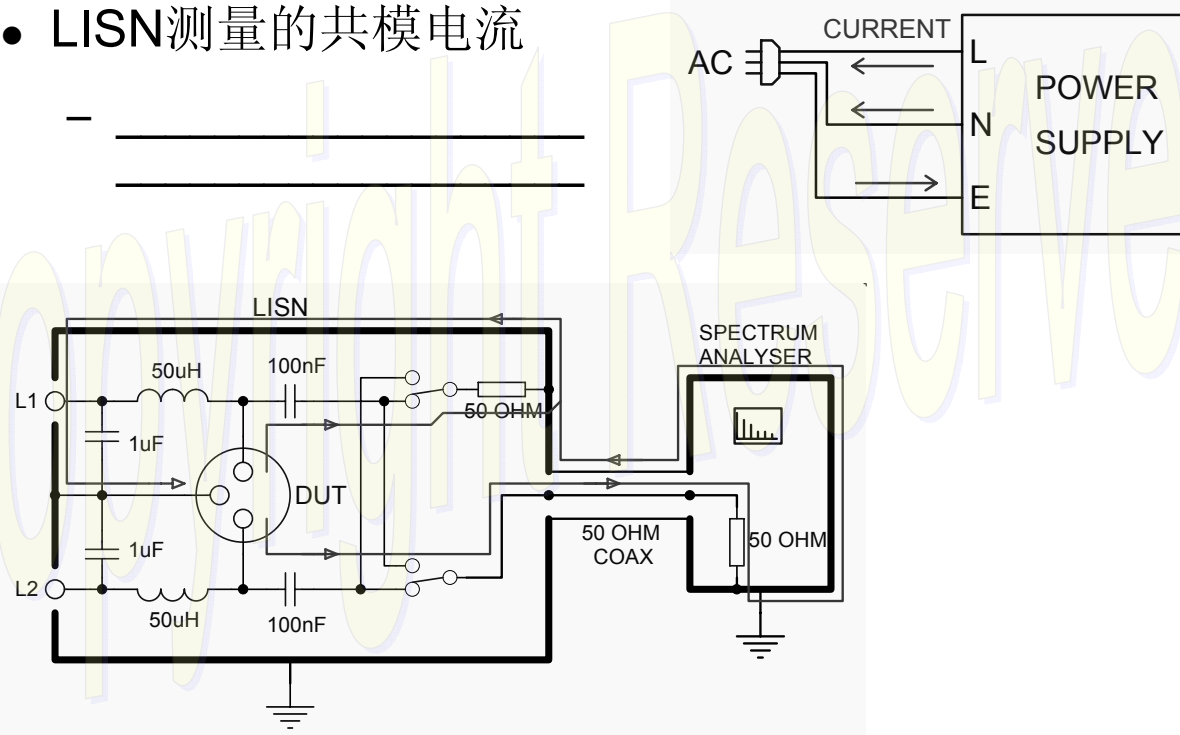
• LISN测量的差模电流



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

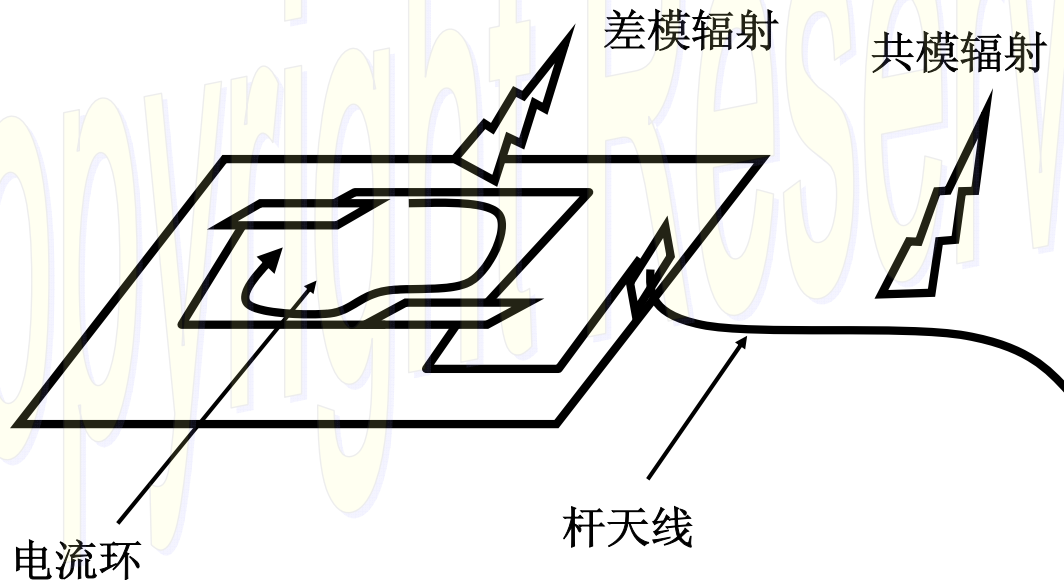
• LISN测量的共模电流



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

- 杆天线和环天线
- 后面在开关电源中，我们将看到和分析很多这样的天线。



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

差模电流 流过电路中的导线环路时，将引起差模辐射。这种环路相当于小环天线，能向空间发射辐射磁场，或接收磁场。因此，必须限制环路的大小和面积。

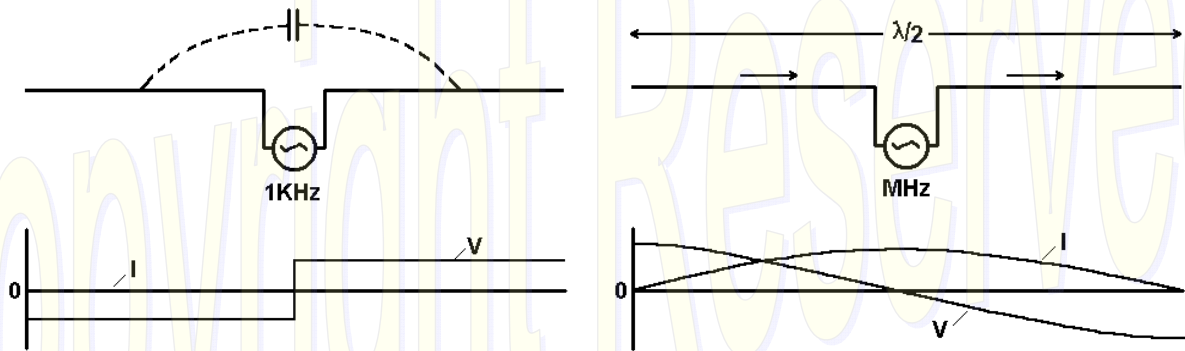
共模电流 是由于电路中存在电压降，某些部位具有高电压的共模电压，当外接电缆与这些部位连接时，就会在共模电压激励下产生共模电流，成为辐射电场的天线。这多数是由于接地系统中存在电压降所造成的。共模辐射通常决定了产品的总辐射性能。

结合 di/dt ， dv/dt ，源阻抗，环天线，杆天线（单极子和偶极子天线）理解

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC试验的原理

• 偶极子天线



电压源从1kHz增加到MHz，在 $l=\lambda/2$ 时形成谐振。称为半波长偶极子天线

• $\lambda = 300/f_0$ (λ in metres, f_0 in Mhz)

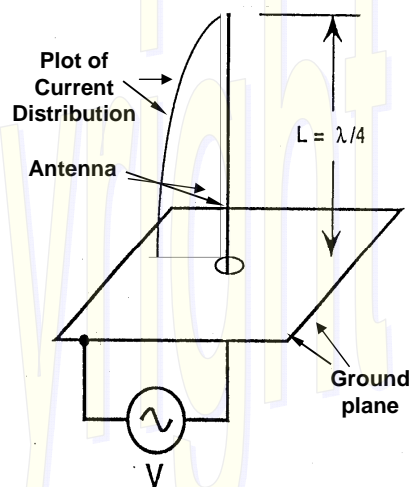
• Examples:

• $L = 2.5m, \lambda = 5m, f_0 = 60 \text{ MHz}$

• $L = 1m, \lambda = 2m, f_0 = 150 \text{ MHz}$

EMC试验的原理

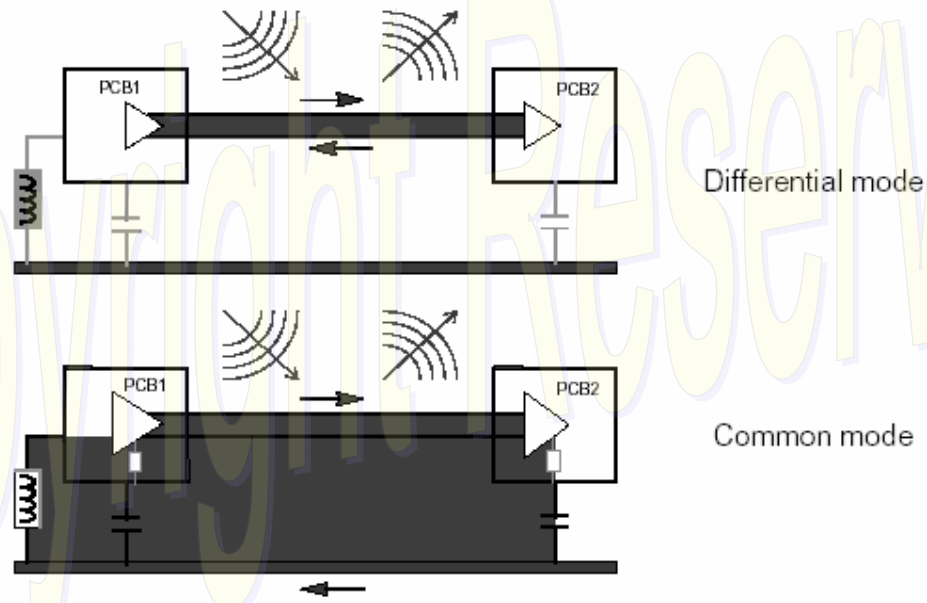
• 单极子天线



$Z = V/I$

在天线端处具有很高的阻抗，尤其当V大时

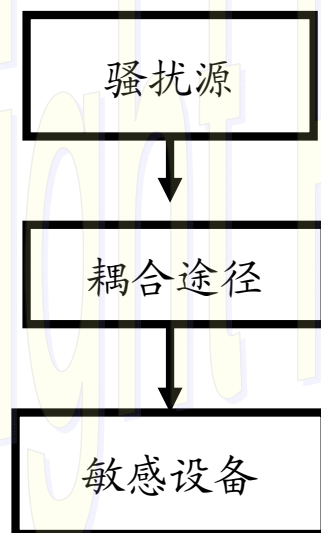
EMC试验的原理



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

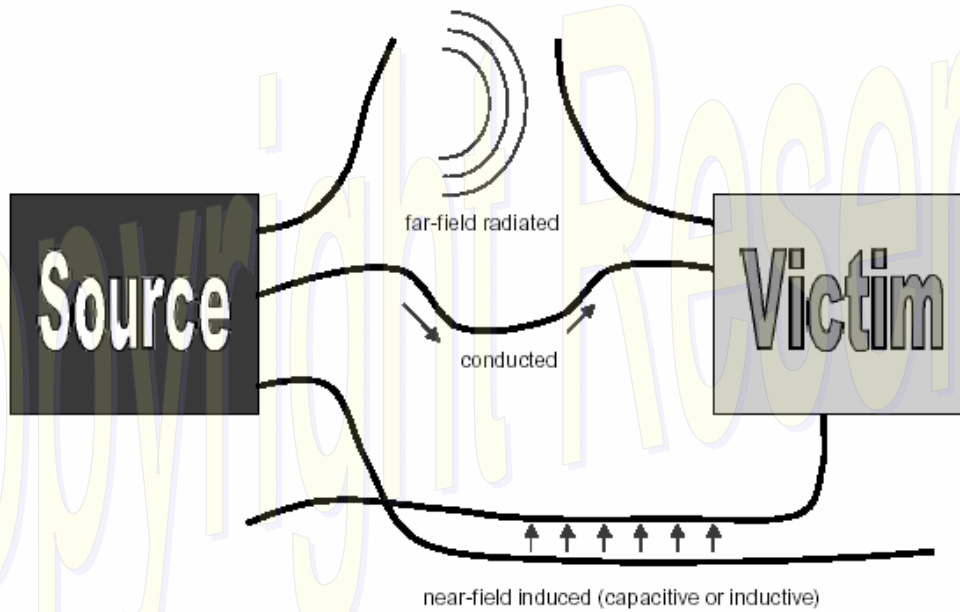
EMI试验结果的分析

- 电磁干扰的三要素



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMI试验结果的分析



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMI试验结果的分析

- 在CE和RE的测试中，敏感设备即LISN和天线是不受控的，因此无法从这第三个因素着手。
- 在剩下的两个因素，骚扰源和耦合途径上想办法是普遍应用在EMI问题解决中的主要思路

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

减小开关电源EMI的方法

- 从前面的分析中，可以知道，减小EMI的方法有两条途径：
 - 减小噪声源
 - 减小 I_{cm} , I_{dm}
 - 减小 f
 - 吸收式滤波
 - 切断、阻止或改变耦合途径
 - 反射式滤波器
 - 屏蔽
 - 去藕，旁路

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

减小开关电源EMI的方法

当差模发射用小环天线产生的发射来模拟时，可设环电流为 I ，环面积为 S ，在距离为 γ 的远场，测得电场强度为 $E=131.6 \times 10^{-16} \times (f^2 \times S \times I) \times (1/\gamma) \sin\theta$

式中：

E : 电场强度 (V/M) f : 频率 (Hz)

S : 面积 (m^2) I : 电流 (A)

γ : 距离 (m)

θ : 测量天线与辐射平面的夹角 ($^\circ$)

差模发射与环电流和环面积成正比，与频率的平方成正比。因此，可采用下述三种方法控制差模发射：

1)减小电流幅度 I ：

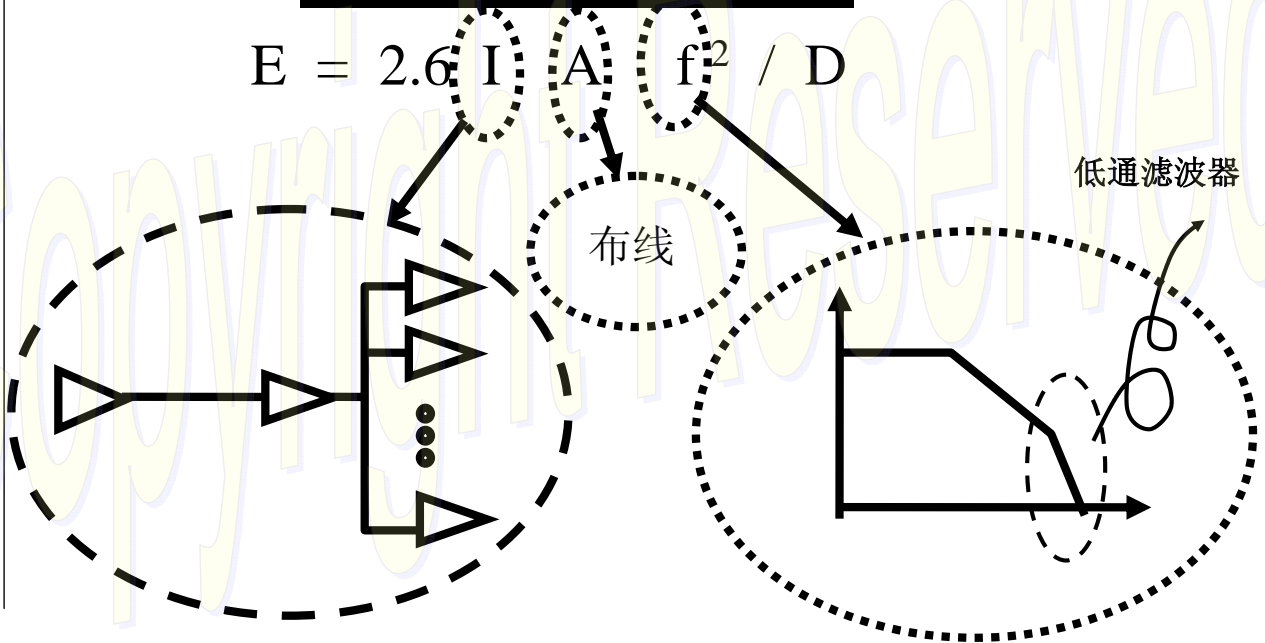
2)减小信号频率 f 及其谐波，加大数字信号上升/下降沿 tr ；

3)减小环面积 S ，将信号线紧挨接地回线。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

减小开关电源EMI的方法

怎样减小差模发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

减小开关电源EMI的方法

共模发射可用对地电压激励的、长度小于1/4波长的简单极子天线来模拟。

对于接地平面上长度为 l 的简单极子天线来说，在远场 γ 处的电场强度为

$$E = 4\pi \times 10^{-7} \times (f \times I \times l) \times (1/\gamma) \sin\theta$$

式中 l 为天线长度 (m)。

共模发射与频率 f 、共模电流 I 及天线长度 l 成正比，应分别予以限制，而限制共模电流 I 是减小共模发射的基本方法。

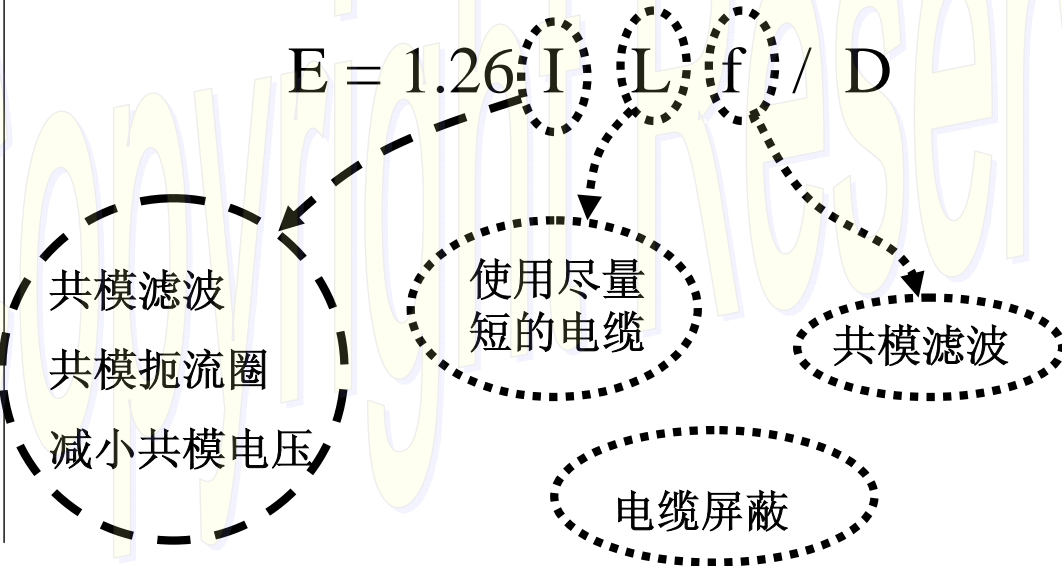
为此，需要做到以下几点：

- 1) 尽量减小激励此天线的源电压，既地电位；
- 2) 提供与电缆串联的高共模阻抗，即加共模扼流圈；
- 3) 将共模电流旁路到地；
- 4) 电缆屏蔽层与屏蔽壳体作360°端接。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

减小开关电源EMI的方法

怎样减小共模发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

小结

- 噪声源的特性
- 近场和远场
- 阻抗、电流、共模/差模
- 单极子天线，双极子天线
- 开关电源EMI抑制的思路
- 抑制差模发射的原理
- 抑制共模发射的原理

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

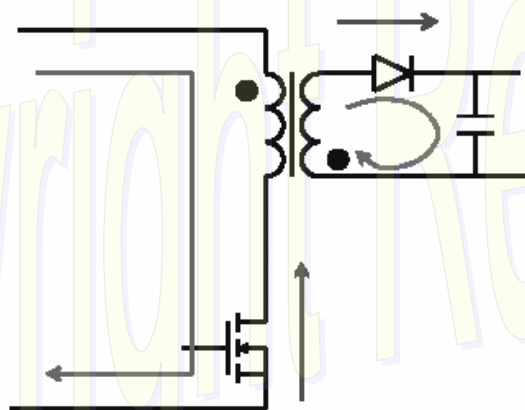
Any Short Question

Take a break?

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

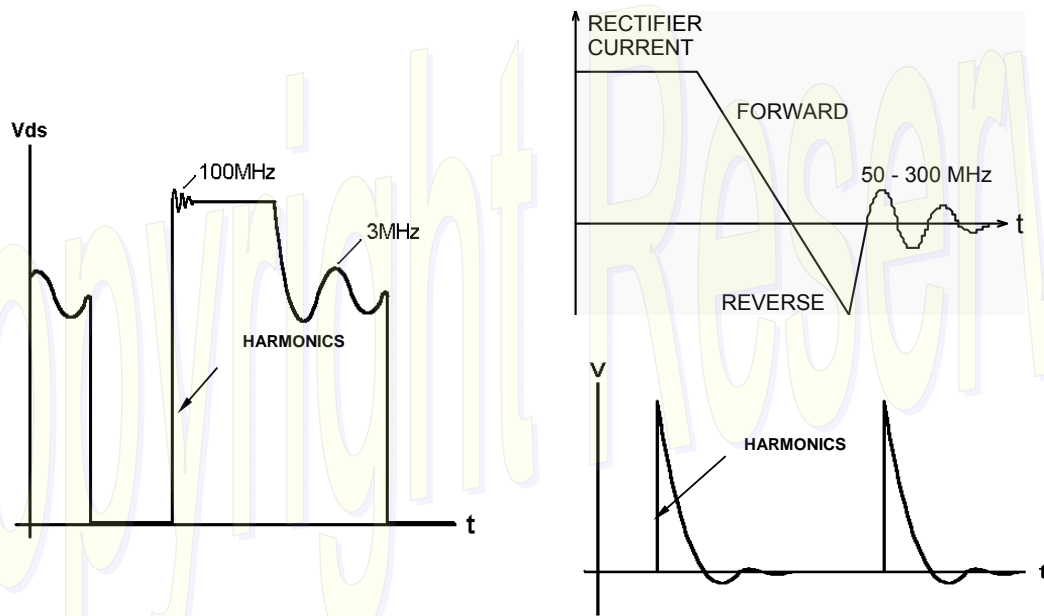
- 开关电源噪声源的来源



- Switching voltage and current waveforms in a switching power supply

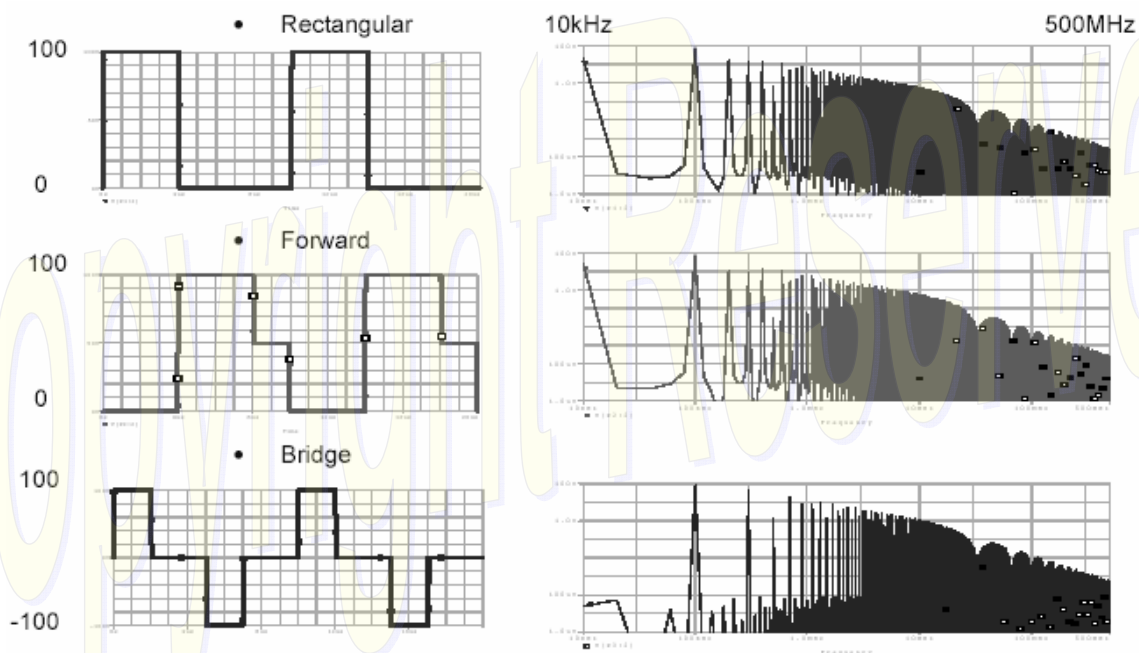
电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

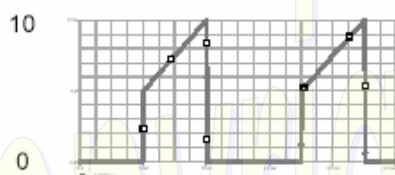
开关电源噪声源分析和对策



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

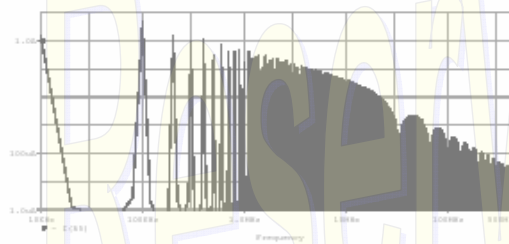
开关电源噪声源分析和对策

- Continuous Flyback

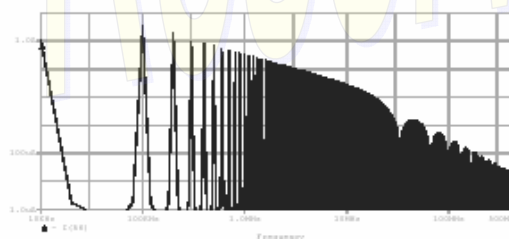
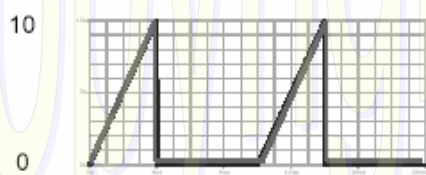


10kHz

500MHz



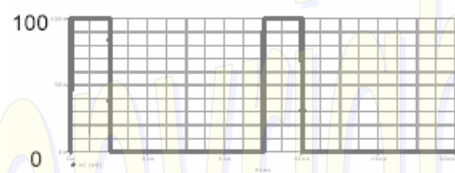
- Discontinuous Flyback



开关电源噪声源分析和对策

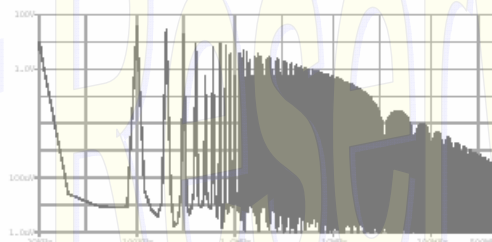
- Duty cycle的影响

- Duty cycle = 0.2

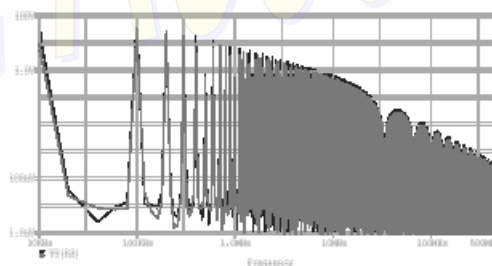


10kHz

500MHz

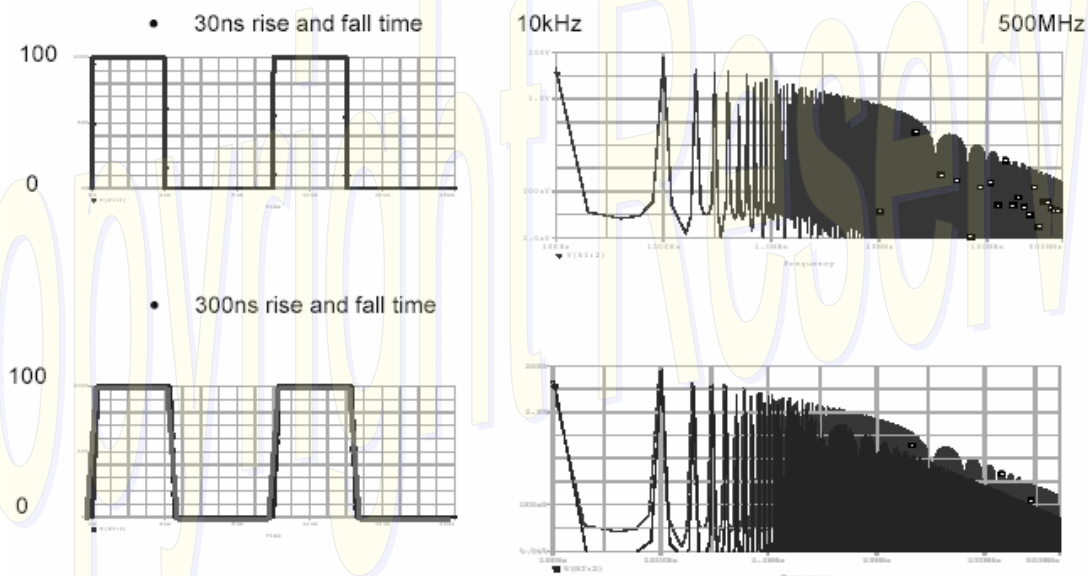


- Duty cycle = 0.6



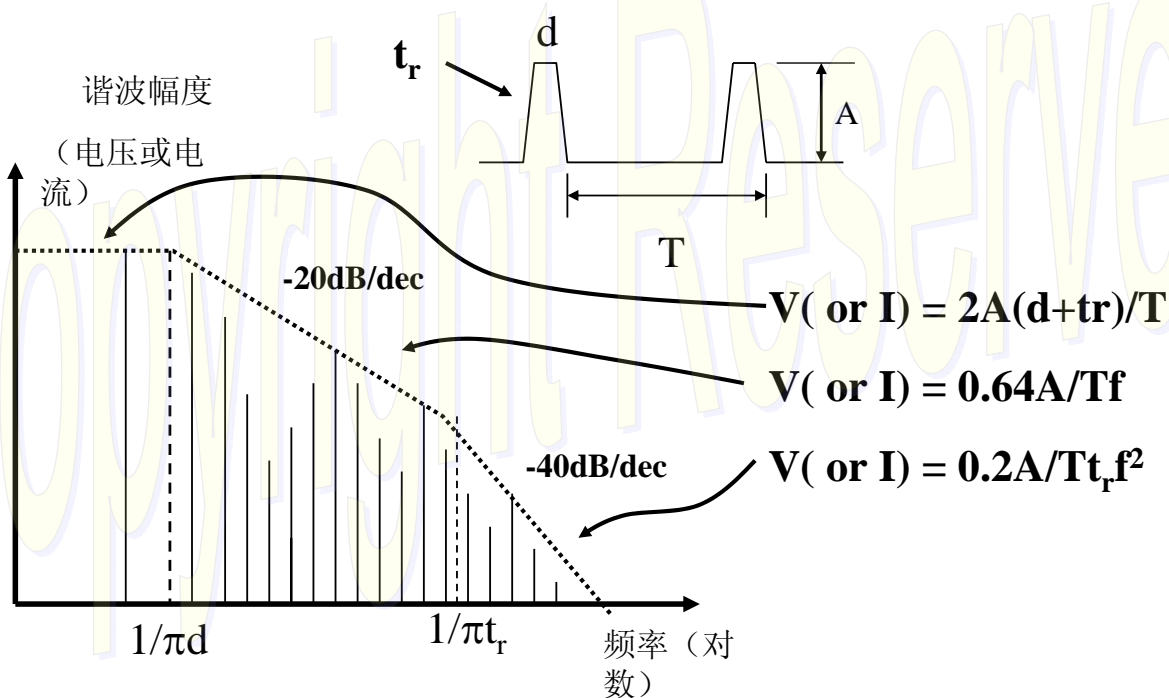
开关电源噪声源分析和对策

● 上升沿/下降沿的影响



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

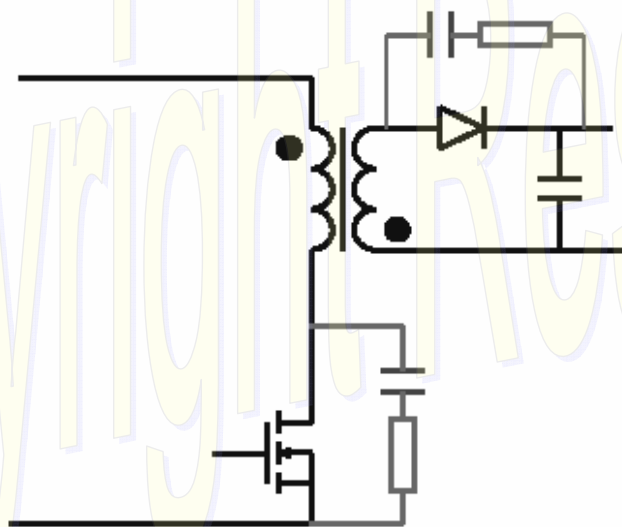
开关电源噪声源分析和对策



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

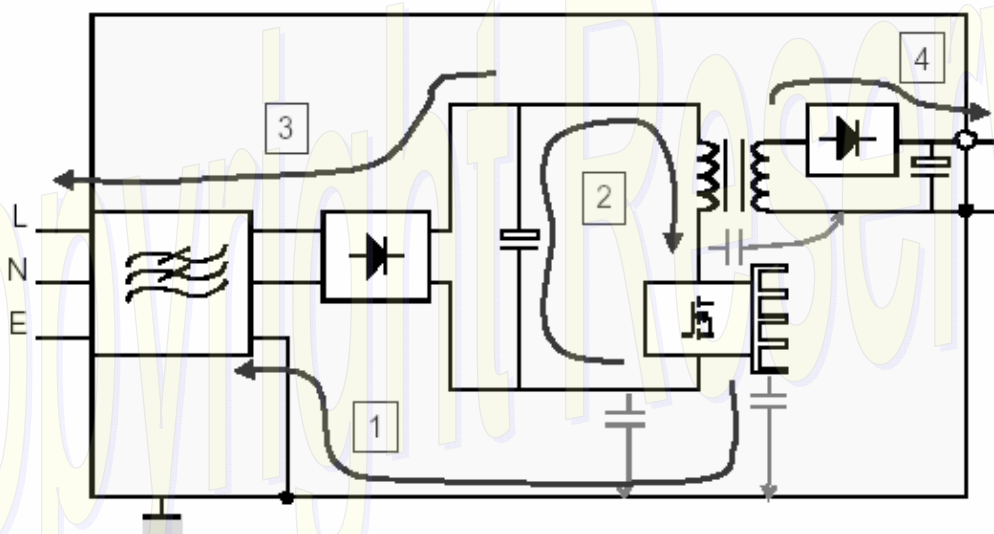
开关电源噪声源分析和对策

- Snubber吸收电路可以减小 dv/dt



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

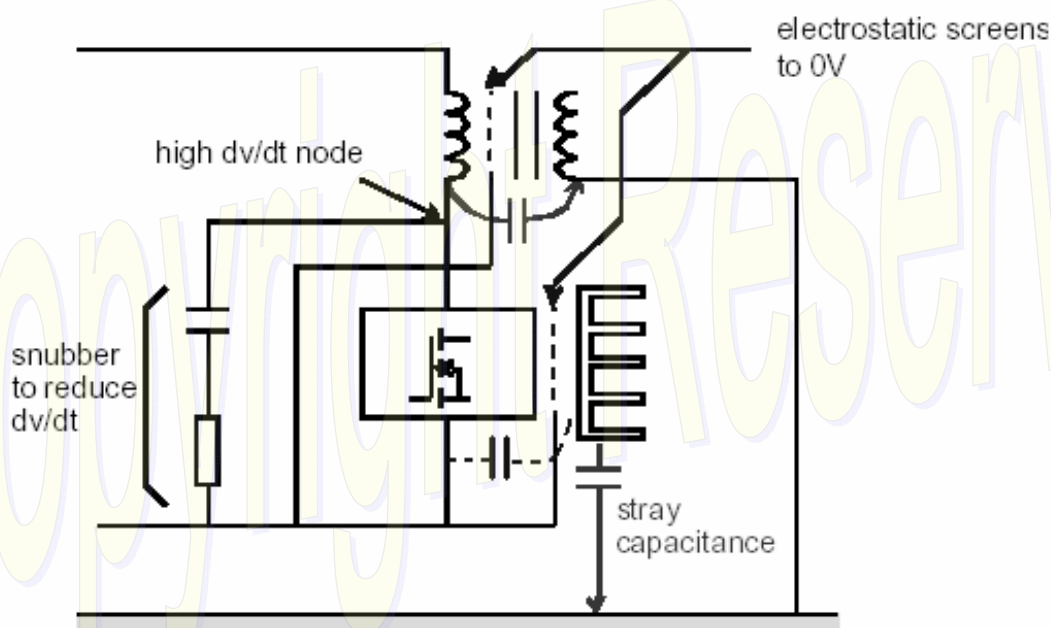
开关电源噪声源分析和对策



几处典型的噪声源

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

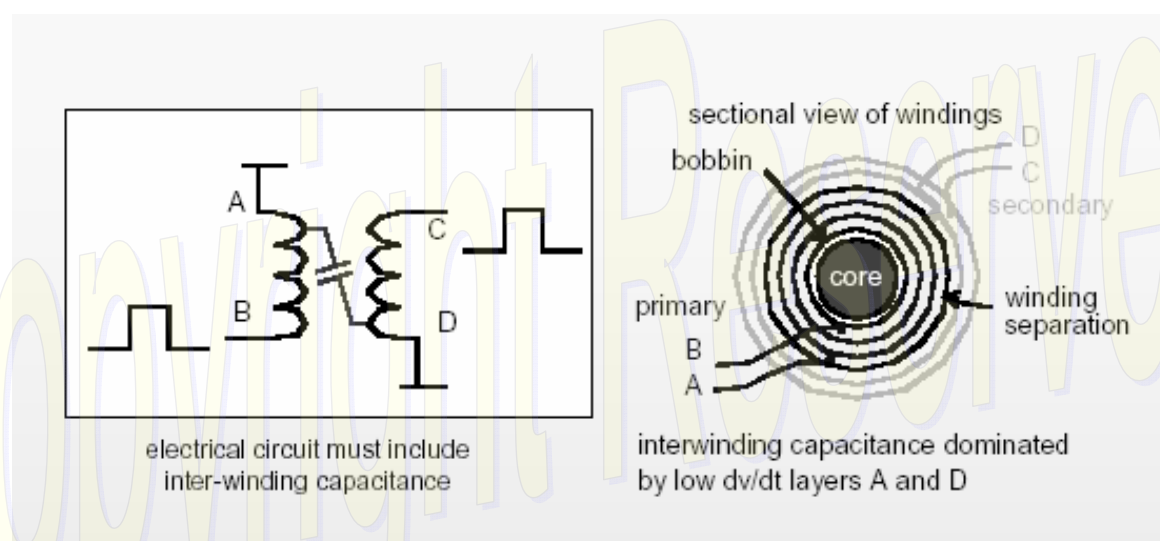
开关电源噪声源分析和对策



由大的 dv/dt 引起的高阻抗源的共模发射

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

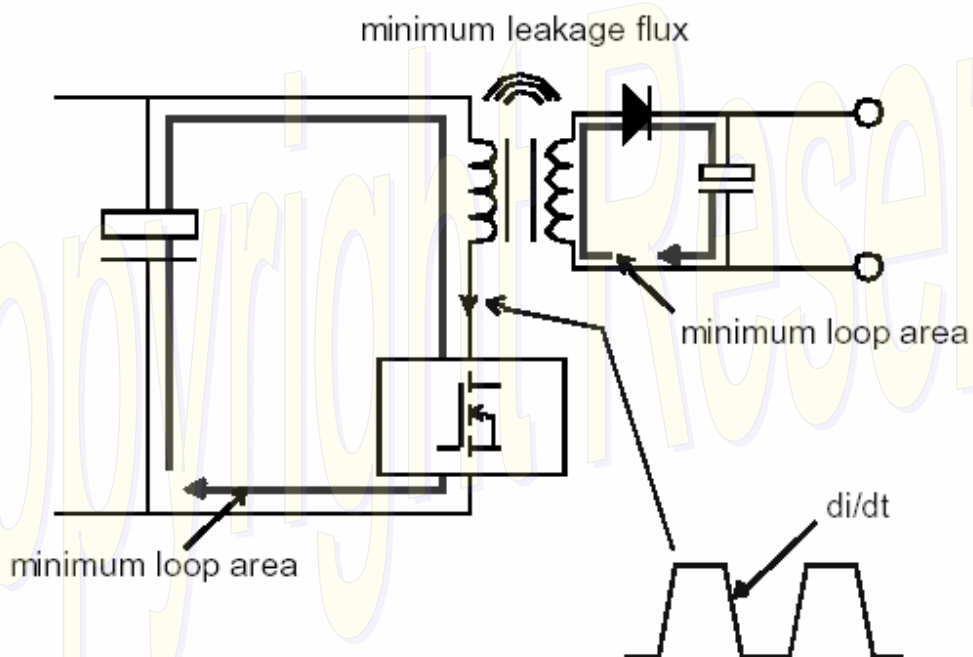
开关电源噪声源分析和对策



一个偶极子天线

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

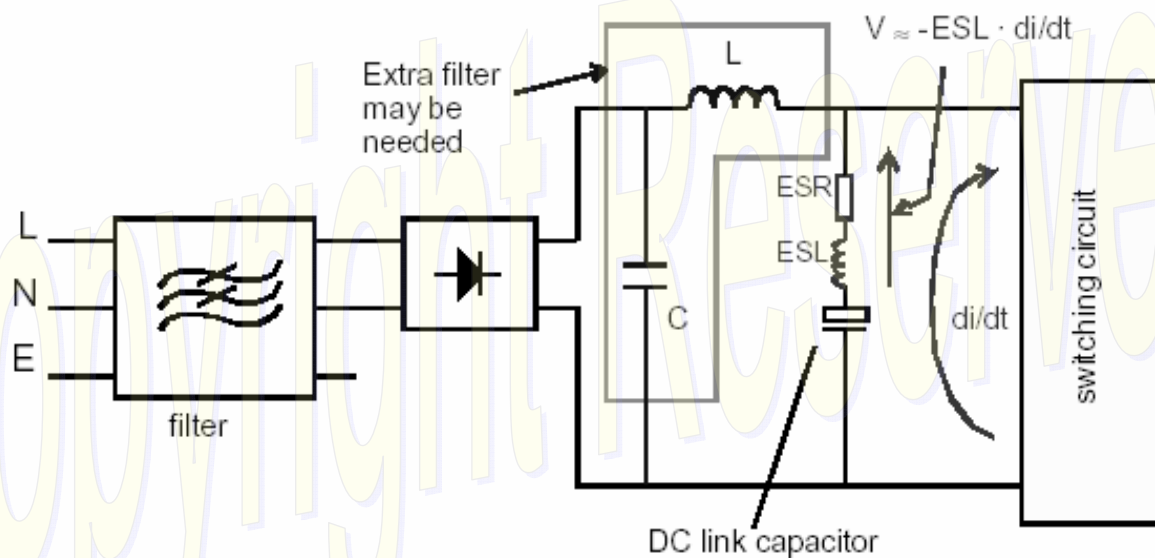
开关电源噪声源分析和对策



由大 di/dt 引起的环路磁场差模发射

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

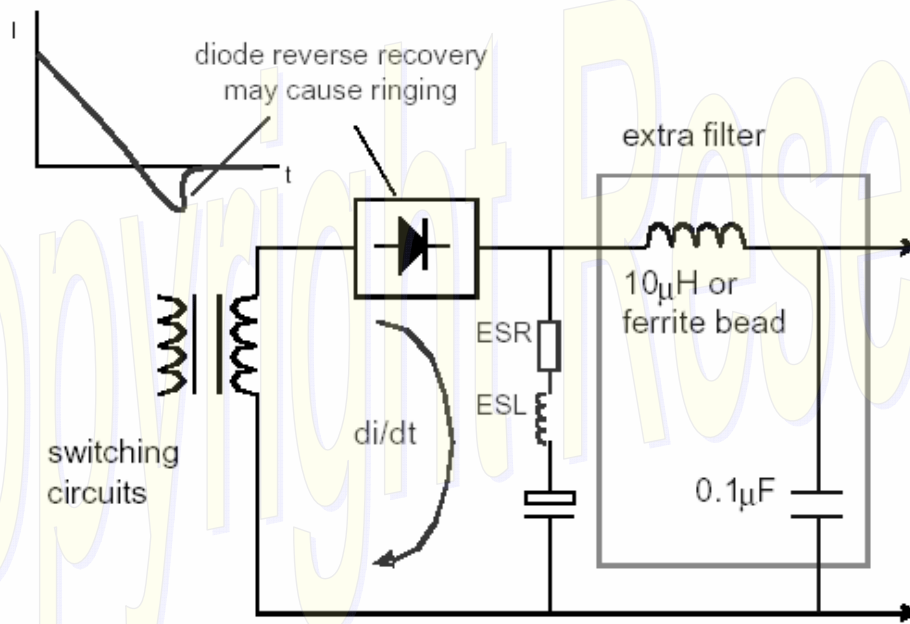
开关电源噪声源分析和对策



传导形式的差模发射

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

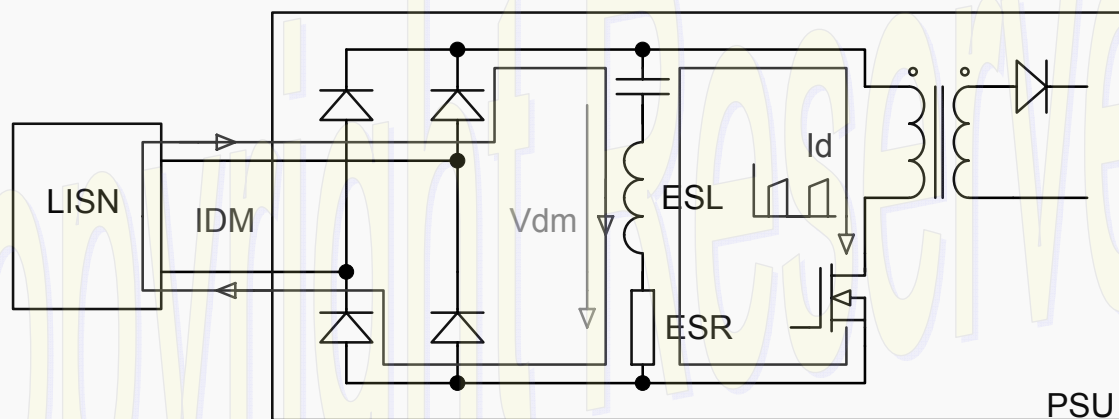


输出端 di/dt 引起的发射

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

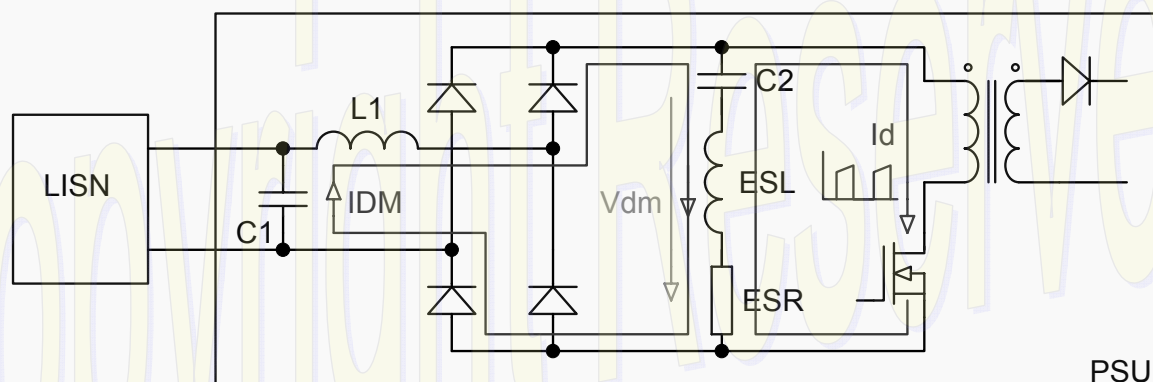
- 传导测试中的差模噪声



Note: _____

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

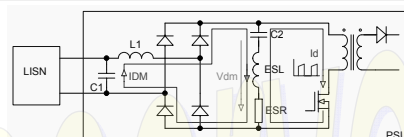


Note: _____

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

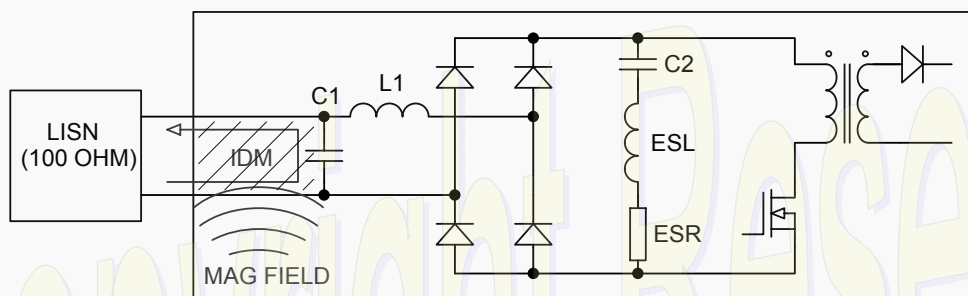
开关电源噪声源分析和对策

- 测试时发现差模传导依然超标
- 增大X电容，例如加大一倍——发现无效
- 再增大X电容——仍然无效，甚至变差
- 理论上应该看到-6dB和-12dB的变化
- 差模噪声没有经过滤波器，那么差模噪声如何出来？



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策



Note: _____

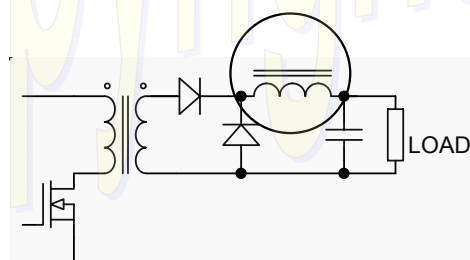
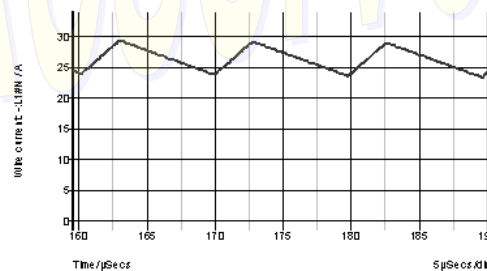
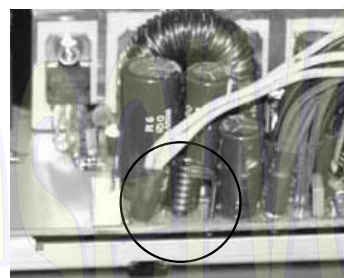


从何而来?

开关电源噪声源分析和对策

●寄生磁场从何而来

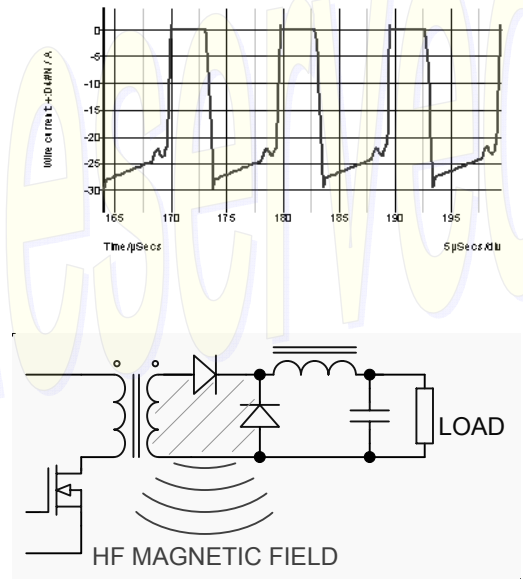
Note: _____



开关电源噪声源分析和对策

● 寄生磁场从何而来

Note: _____



开关电源噪声源分析和对策

● 寄生磁场从何而来

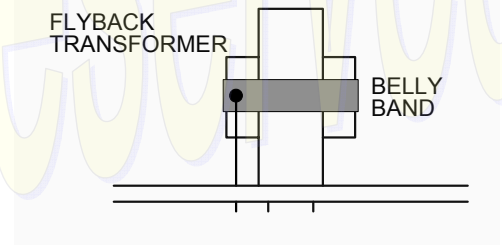
Note: _____



开关电源噪声源分析和对策

- 反激电路中的变压器有高频漏磁，产生在磁心的气隙处

- _____
- _____
- _____
- _____



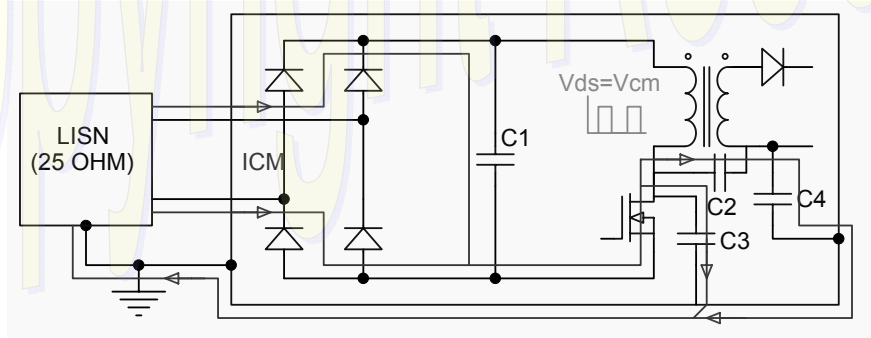
传导测试中的差模噪声——小结

- 开关电源典型波形的频谱
- 典型的差模噪声源
- 差模噪声源的通路
- 常用的抑制方法
- 寄生磁场的影响与对策

开关电源噪声源分析和对策

- 传导测试中的共模噪声

- _____
- _____
- _____

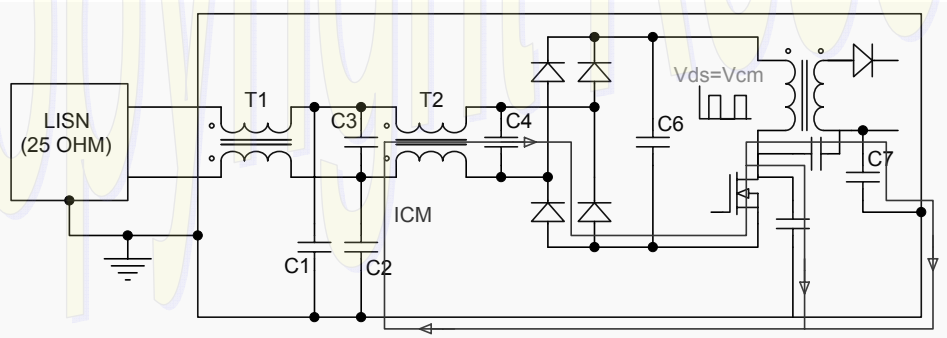


电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 共模滤波器

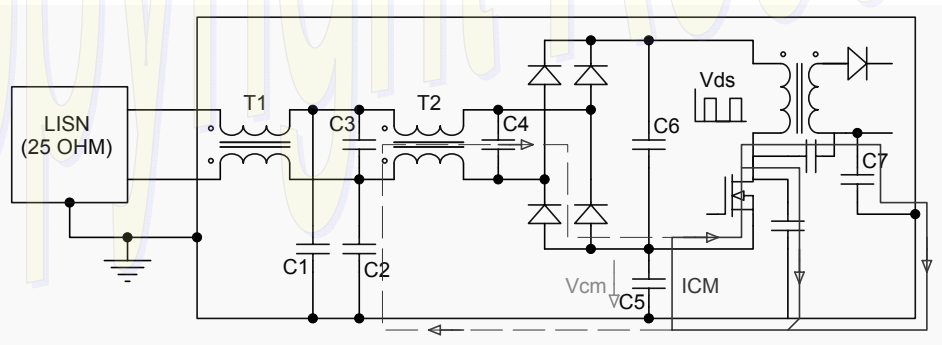
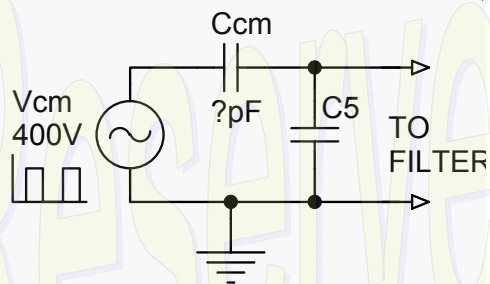
- _____
- _____
- 关于电源EMI滤波器的设计在后续章节中会专门介绍



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- _____
- _____
- _____



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

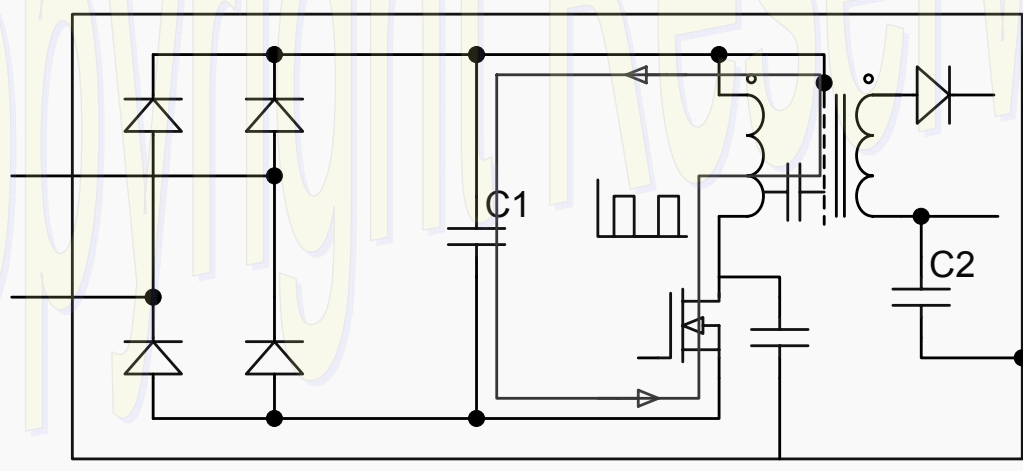
● 减小对地的分布电容

- _____
- _____
- _____
- _____

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

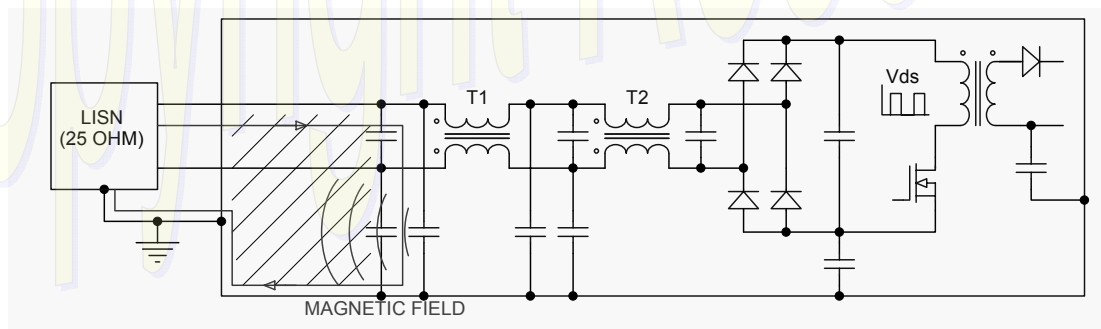
- 减小变压器原副边之间的分布电容



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 交流端口的Y电容

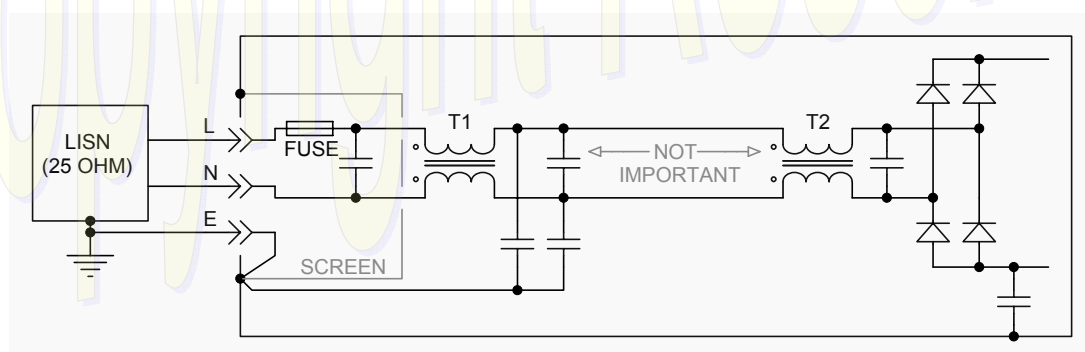


电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 能否将滤波器分离

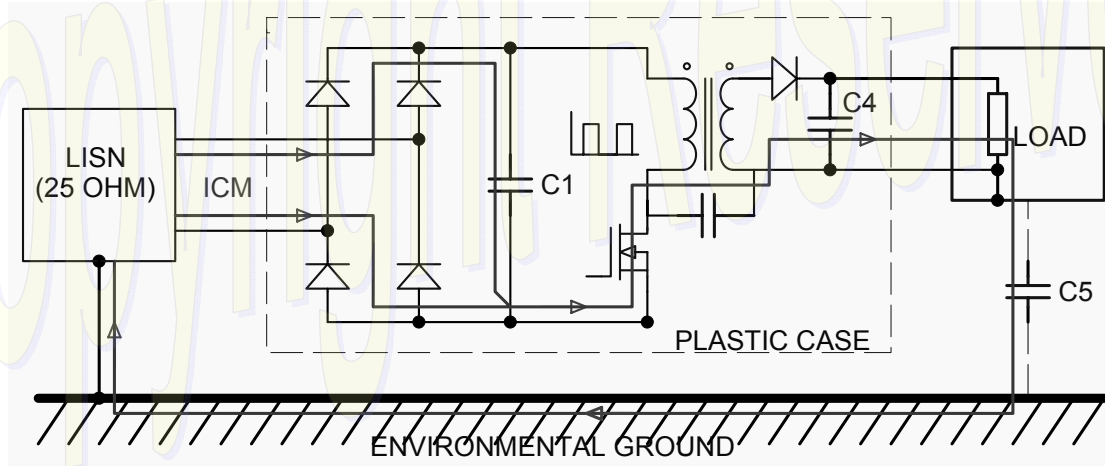
- _____
- _____
- _____
- _____



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 如果开关电源没有保护地
 - 例如手机充电器
 - 塑料机壳

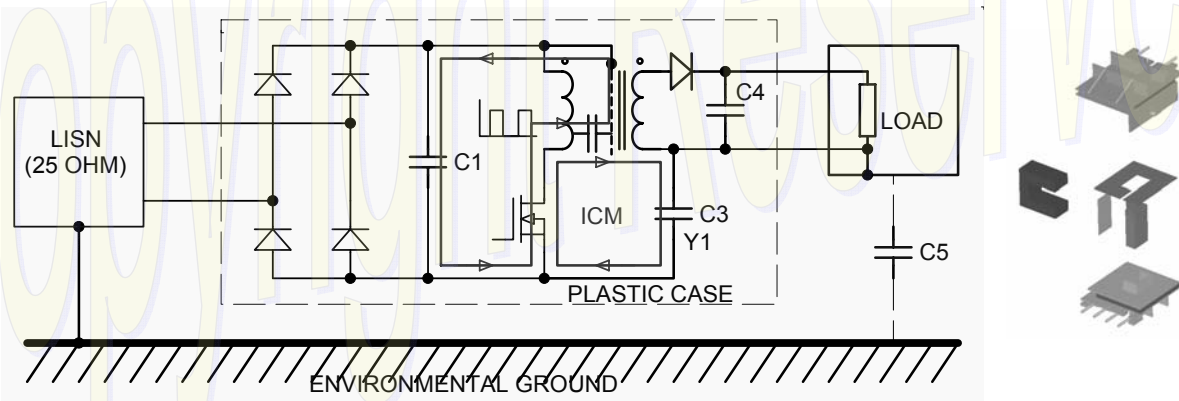


电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 解决措施

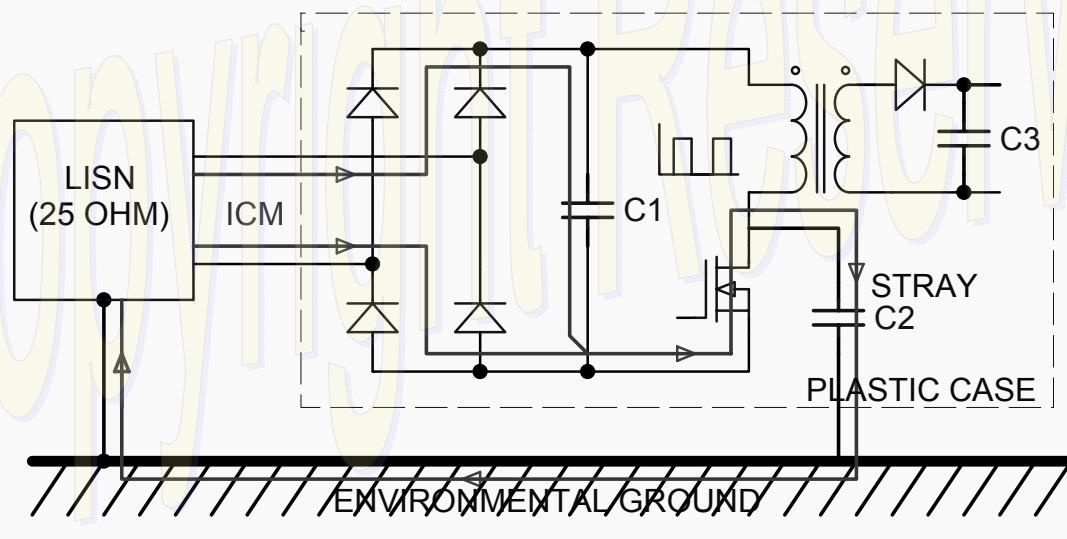
- _____
- _____



开关电源噪声源分析和对策

- 另外，还有杂散电场导致的共模超标

- _____



开关电源噪声源分析和对策

- 解决措施

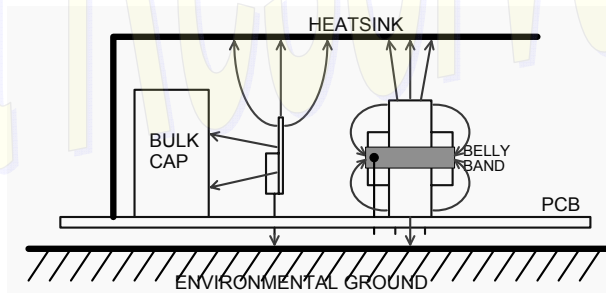
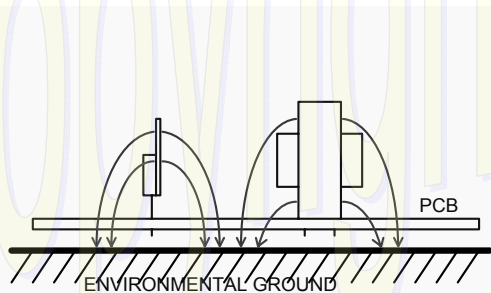
— _____

- 可用做屏蔽的器件

— _____

— _____

— _____



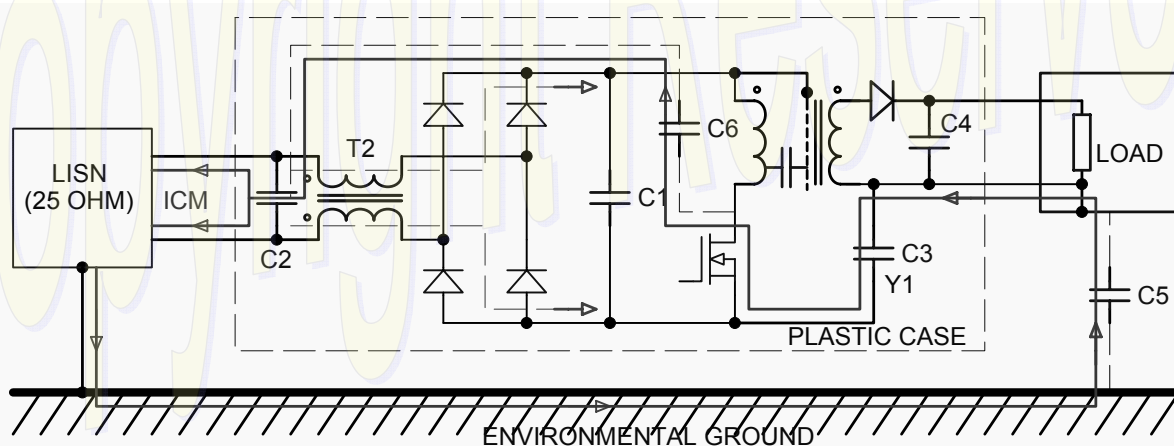
开关电源噪声源分析和对策

- 手机充电器中的导致共模超标的一种特殊情况

— _____

— _____

— _____



开关电源噪声源分析和对策

- C6的大小

- 假设:

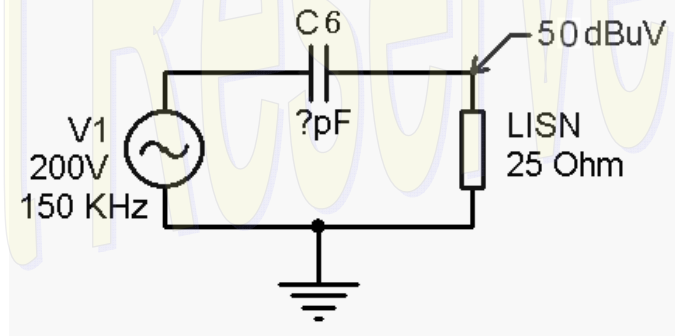
—

—

—

- C6=

—



传导测试中的共模噪声—小结

- 开关电源中的共模噪声源
- 共模噪声的通路
- 抑制共模发射的对策和措施
- 滤波器的分离及屏蔽
- 没有保护地（塑料机壳）电源的共模抑制
- 杂散电场的影响以及抑制方法

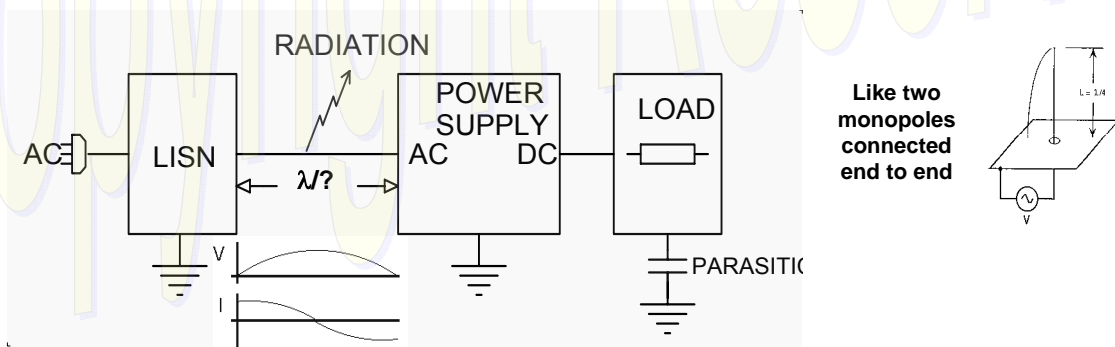
To Be Continue

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 辐射发射——由电缆引起

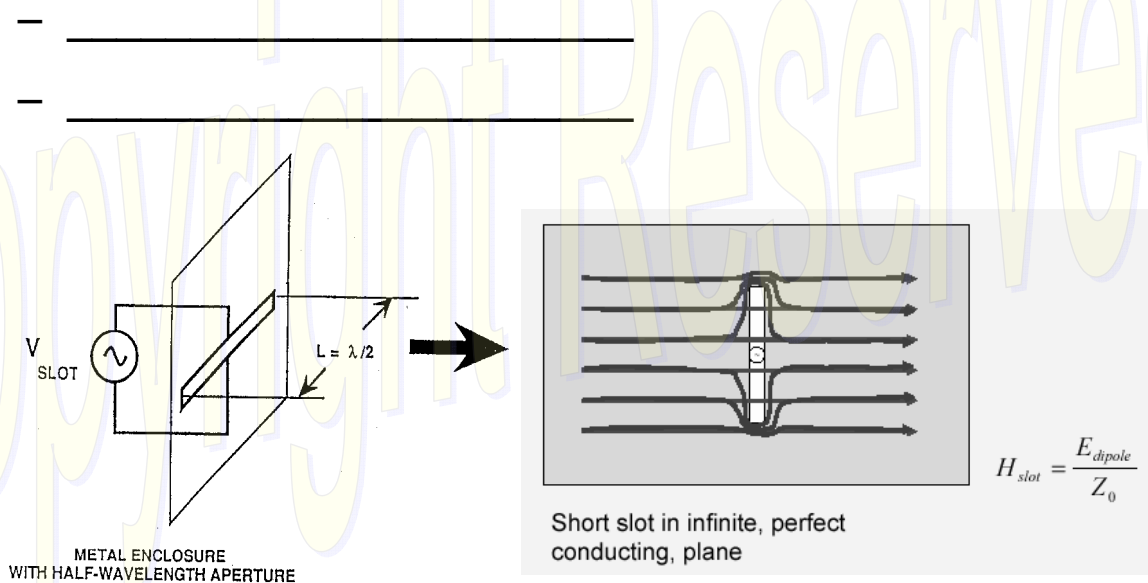
- _____
- _____
- _____
- _____



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 辐射发射——由孔缝泄漏引起



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

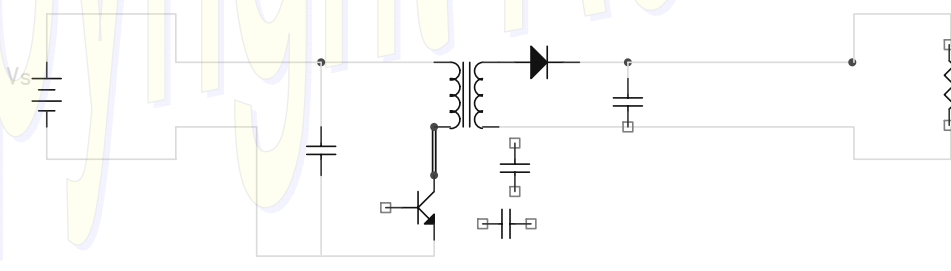
开关电源噪声源分析和对策

- 请总结一些自己的看法：

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

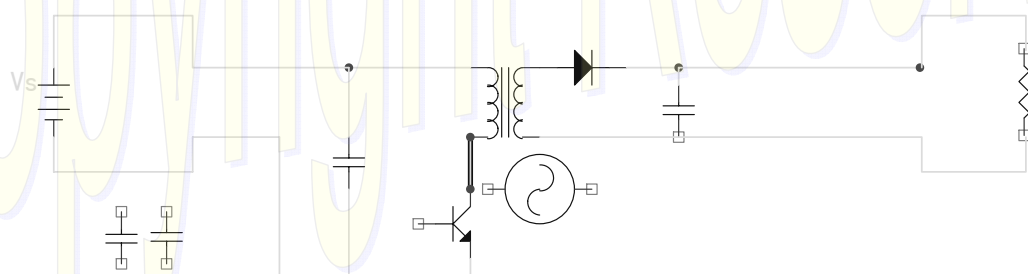
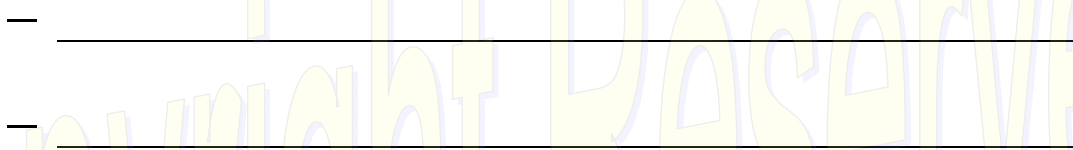
- 差模电流引起的辐射发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

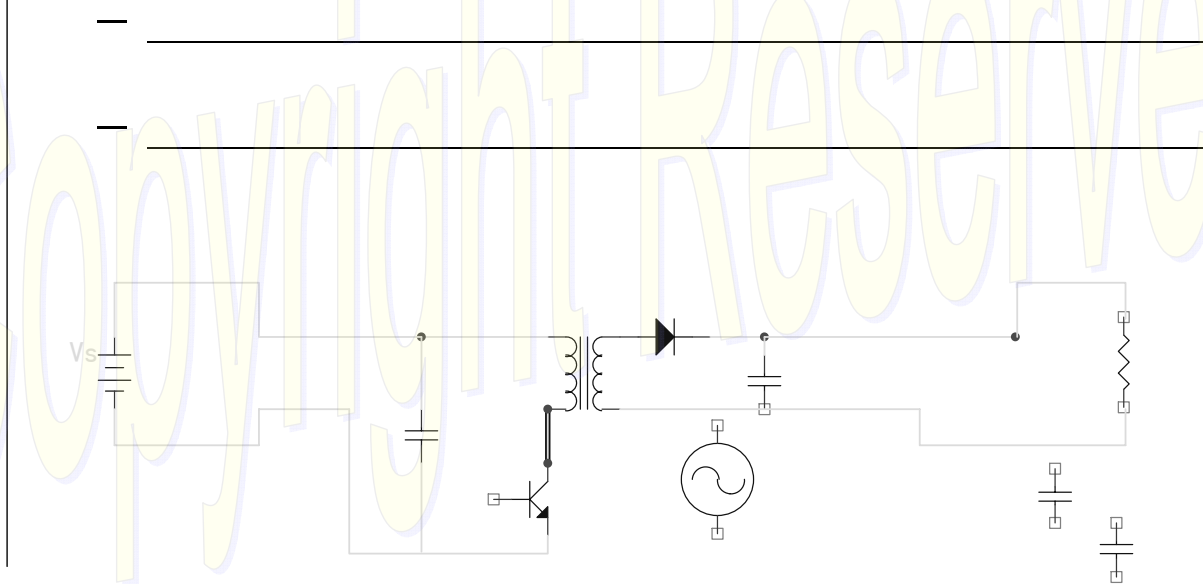
- 共模电流引起的辐射发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

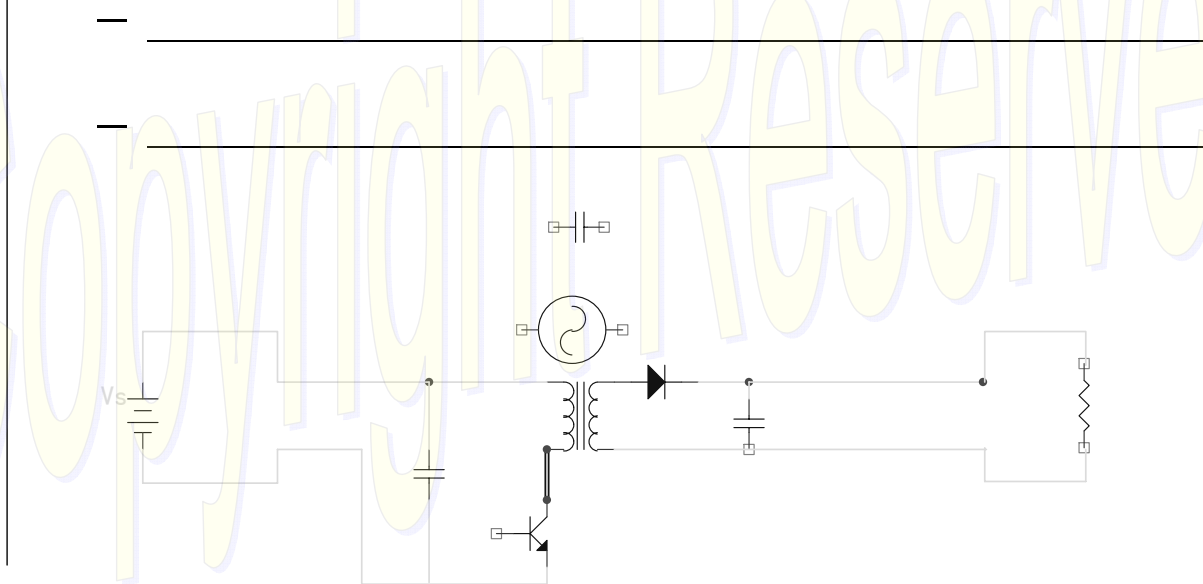
- 共模电流引起的辐射发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

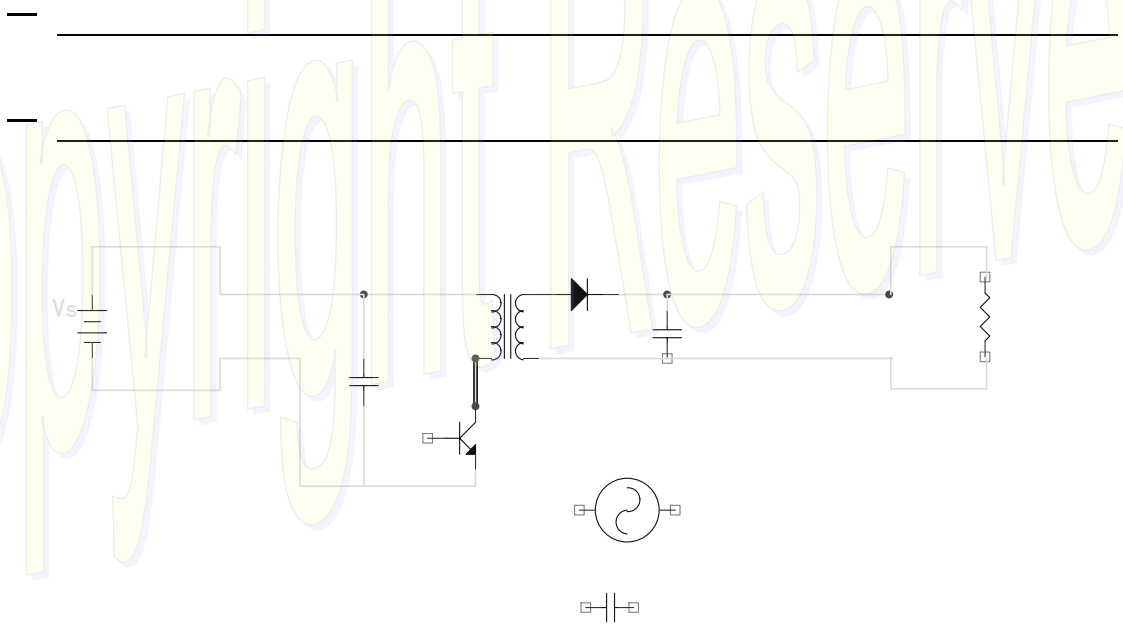
- 共模电流引起的辐射发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

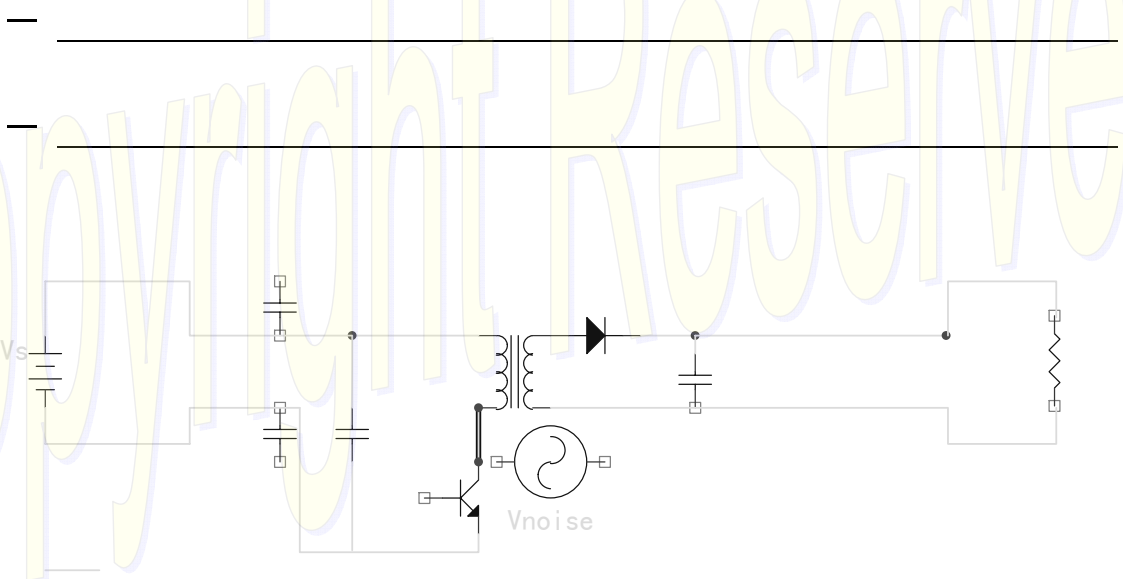
- 共模电流引起的辐射发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 解决措施

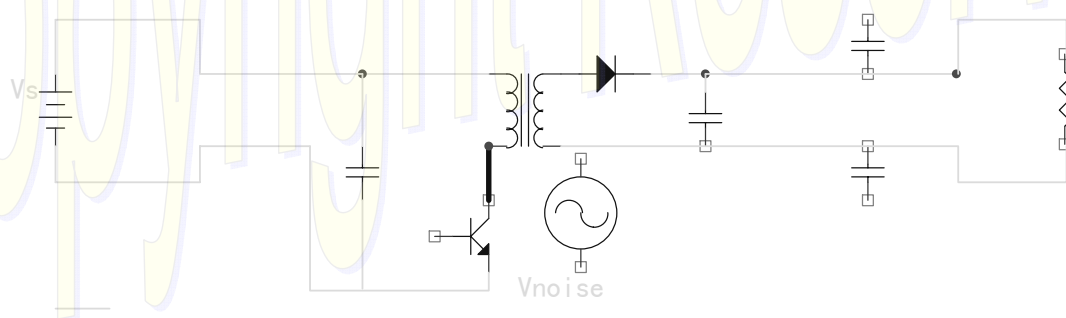


电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源噪声源分析和对策

- 解决措施

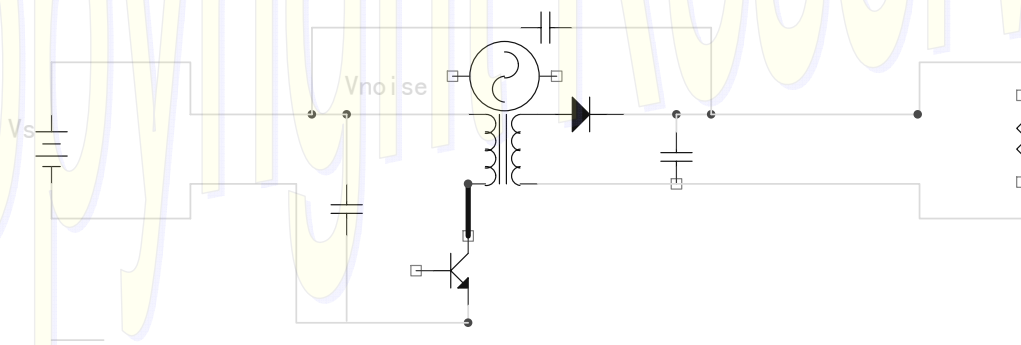
-
-



开关电源噪声源分析和对策

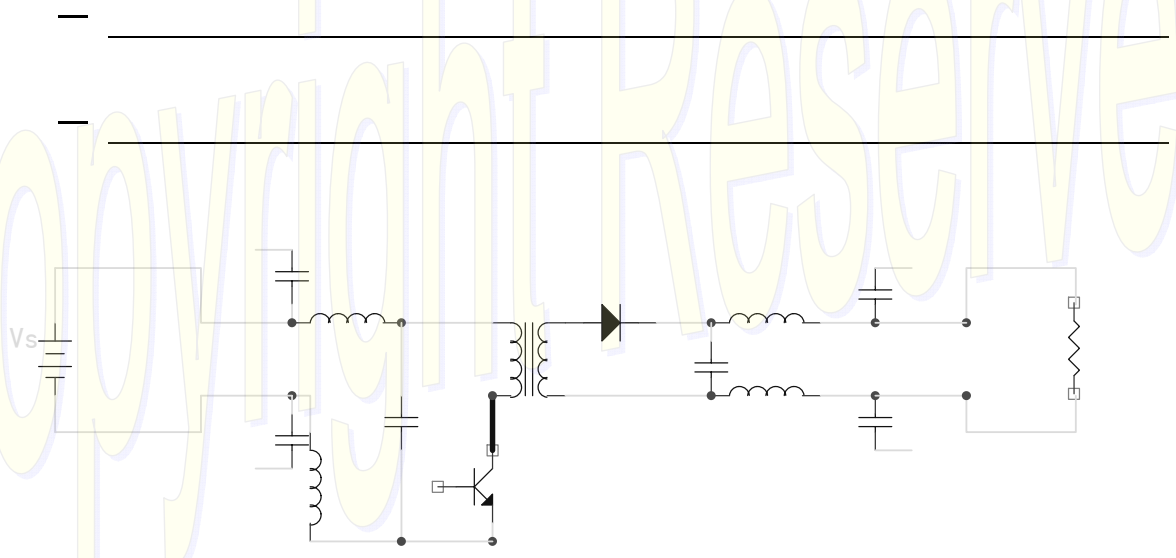
- 解决措施

-
-



开关电源噪声源分析和对策

- 对于差模辐射场



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源辐射发射——小结

- 辐射发射的原因和种类
 - 电缆泄漏
 - 孔缝泄漏
- 差模电流引起的辐射发射
- 共模电流引起的辐射发射
- 抑制这些辐射发射的对策和措施

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

Any Short Question

Take a break?

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

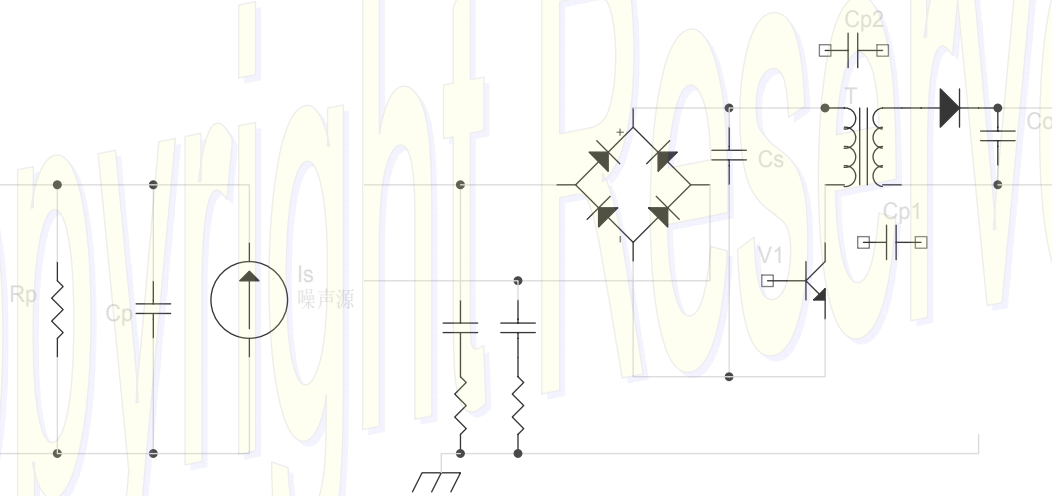
开关电源EMI耦合途径的切断

- 主要是指阻止或者改变EMI噪声的耦合通路
- 最重要也是最有效的方法，即电源EMI滤波器
- 它是一种发射式的滤波器，原理是利用低通滤波器将噪声衰减，也可以说将噪声反射回噪声源。阻止噪声电流流出端口进入LISN，或者通过输入输出电缆从空间辐射发射出去。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

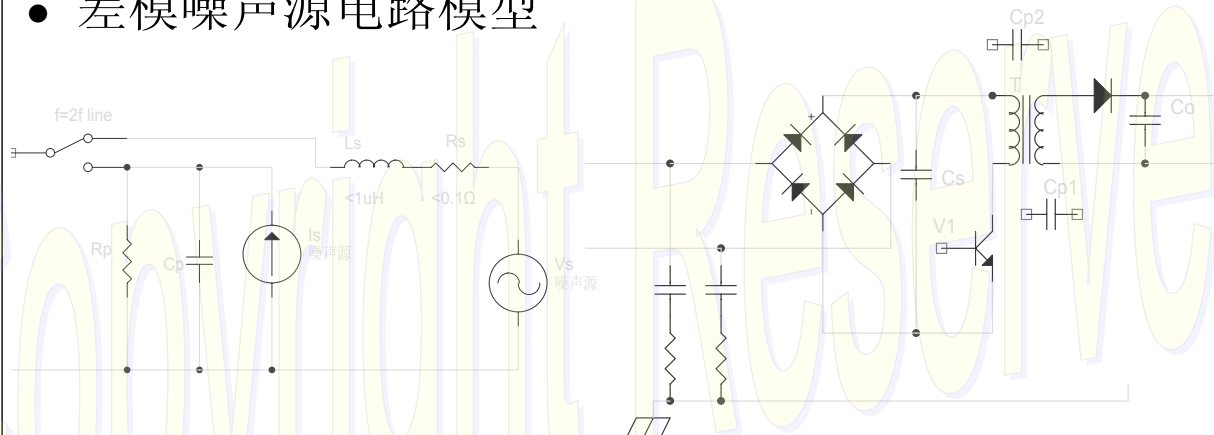
● 共模噪声源电路模型



Note: _____

开关电源EMI耦合途径的切断

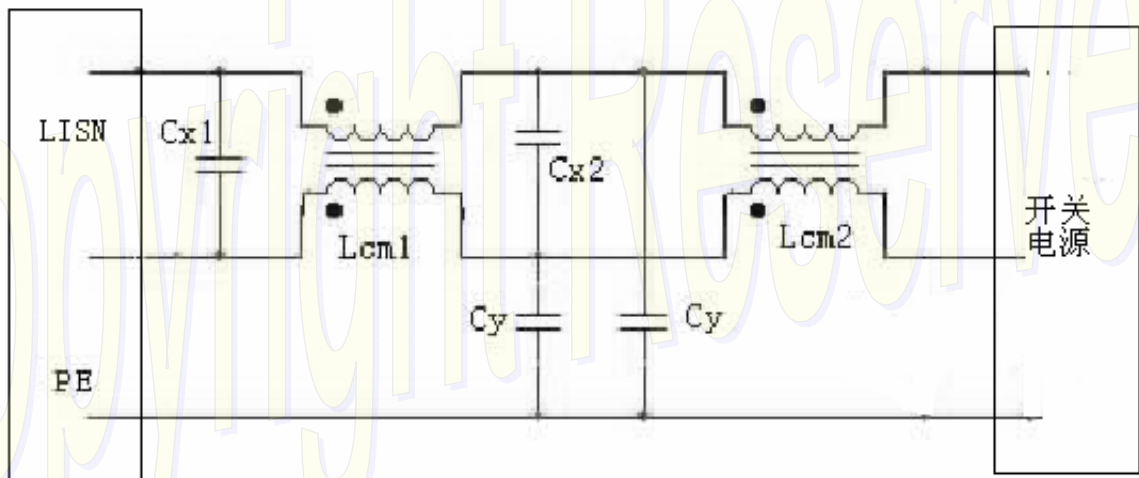
● 差模噪声源电路模型



Note: _____

开关电源EMI耦合途径的切断

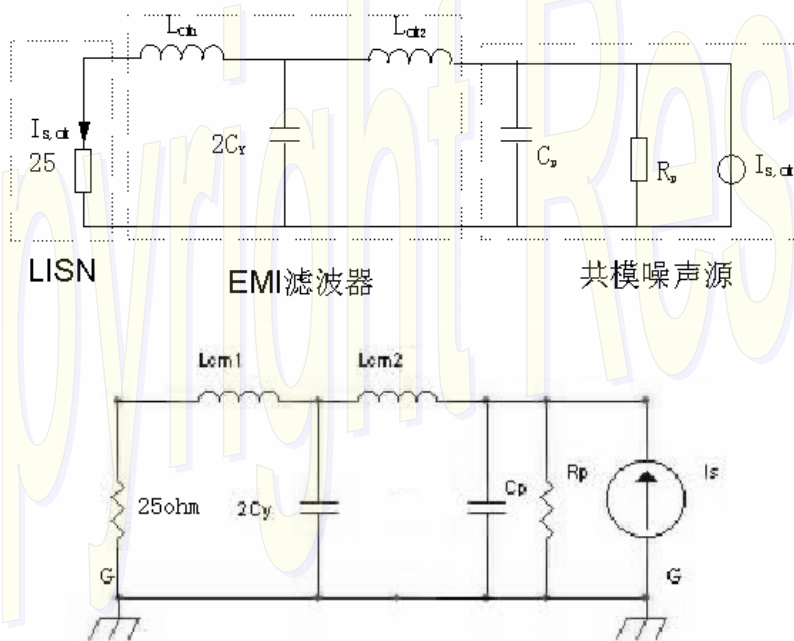
- 典型滤波器电路为例



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

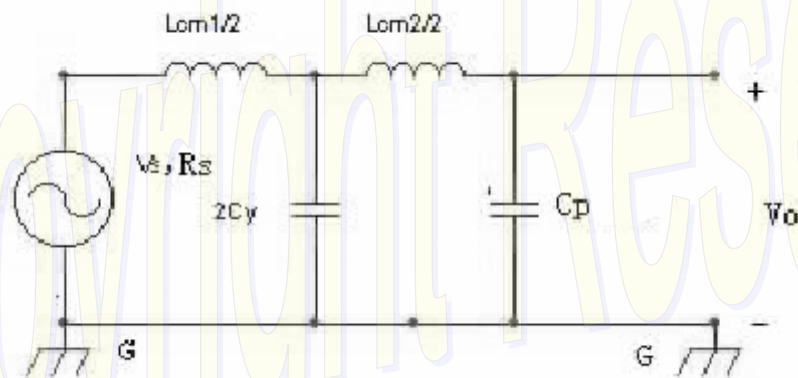
- 共模滤波等效电路



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

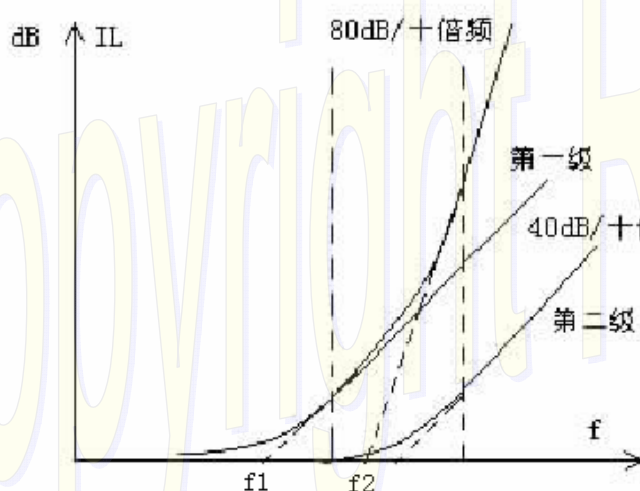
- 应用戴维南和互易定理，将噪声源放在左边



可见此共模抑制是一个两级LC低通滤波网络，在阻带有24dB/倍频的衰减斜率

开关电源EMI耦合途径的切断

- 其插损曲线为两条40dB/十倍频的曲线叠加



$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{cm1}2C_y}}$$
$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{cm2}C_p}}$$

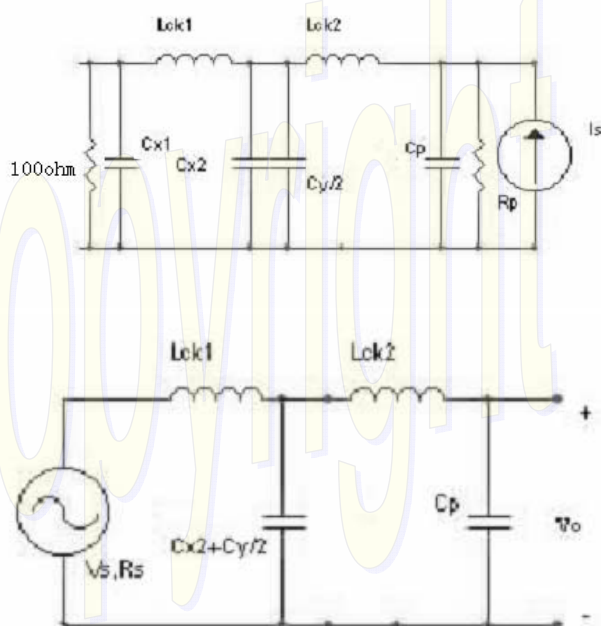
开关电源EMI耦合途径的切断

- 差模滤波等效电路

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 当输入整流桥关断时，对应S关断时的等效电路



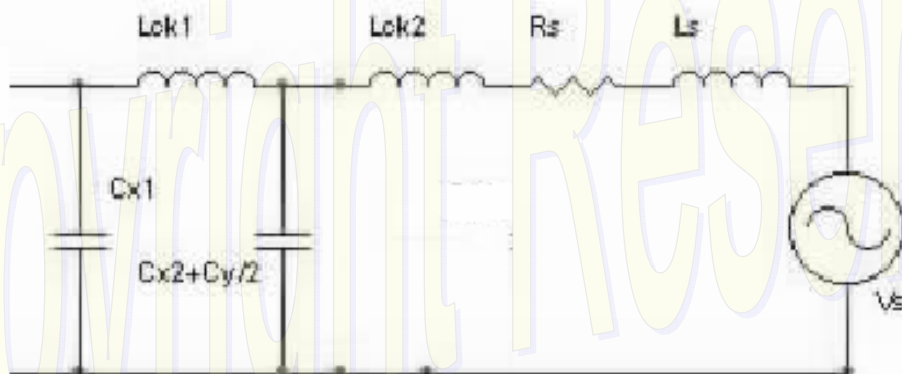
$$\frac{1}{j\omega C_{x1}} \ll 100\Omega$$
$$j\omega L_{lk1} \gg 100\Omega$$

同样，共模抑制是一个两级LC低通滤波网络，在阻带有24dB/倍频的衰减斜率。f1, f2计算方法同前

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 当输入整流桥导通时，对应S闭合时的等效电路

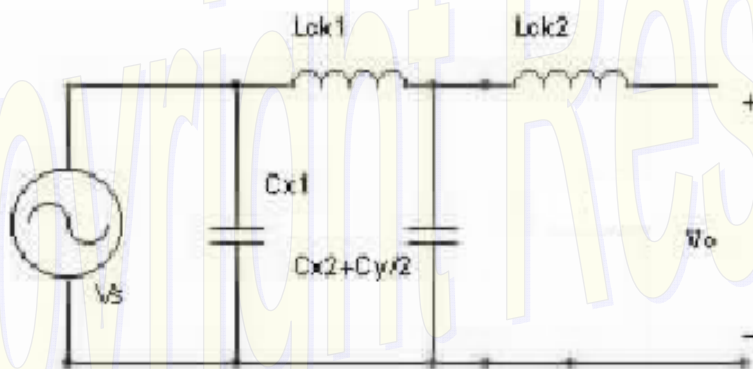


电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 通常 $L_s < 1\mu\text{H}$, $R_s < 0.1\Omega$

$$\left| \frac{1}{j\omega(C_{x2} + C_y/2)} \right| \gg |R_s + j\omega L_s|$$



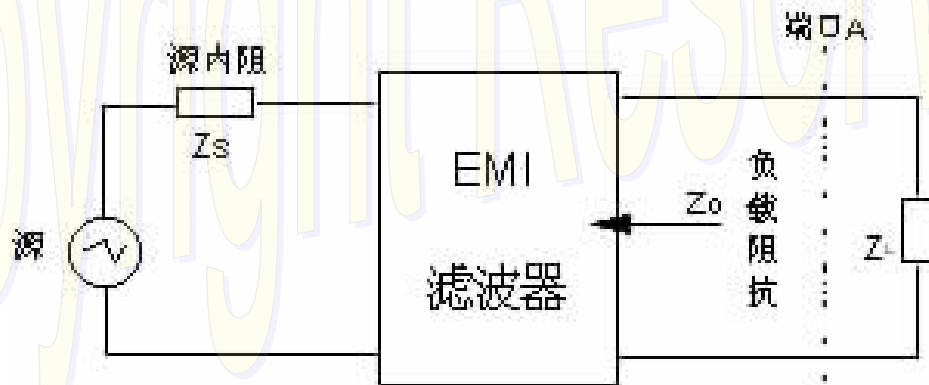
差模插入损耗曲线以及滤波器的剪切频率同前

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 阻抗失配原则

-
-



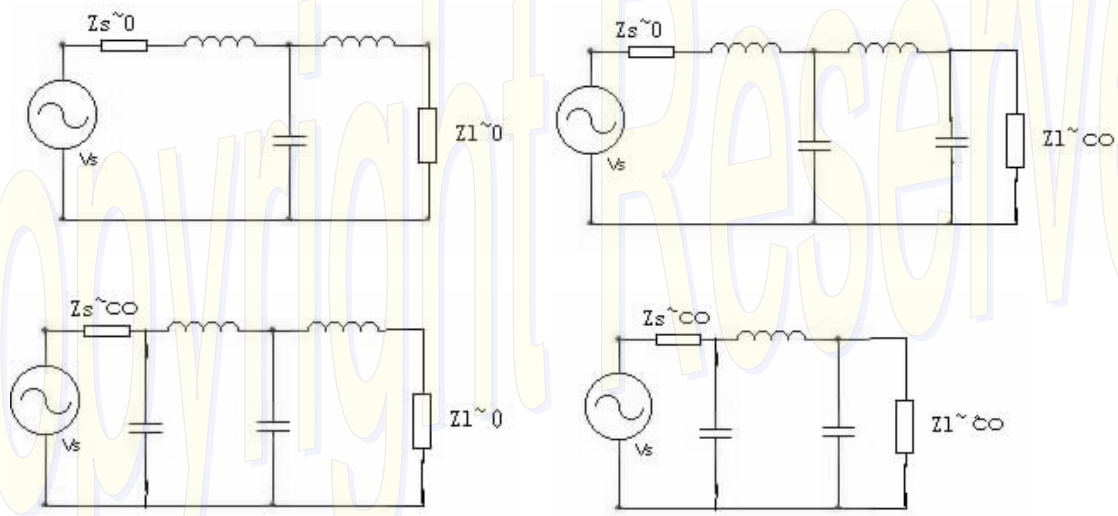
开关电源EMI耦合途径的切断

- 失配原则的原理

-
-
-

开关电源EMI耦合途径的切断

- 阻抗失配的例子

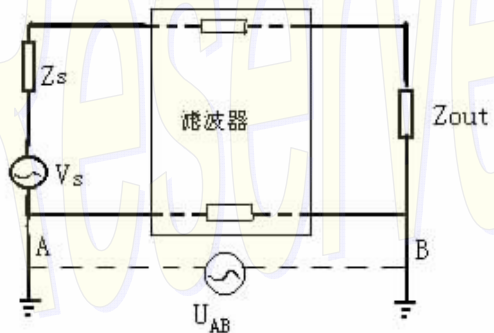
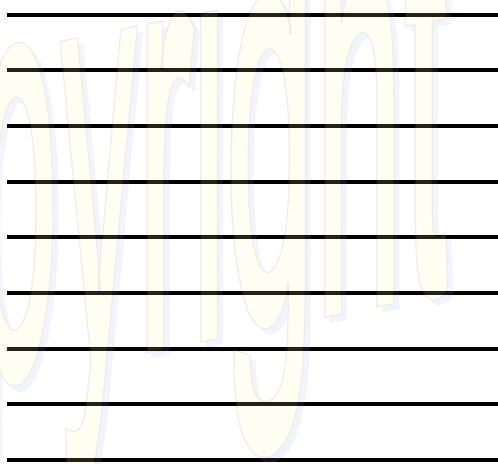


电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 平衡阻抗

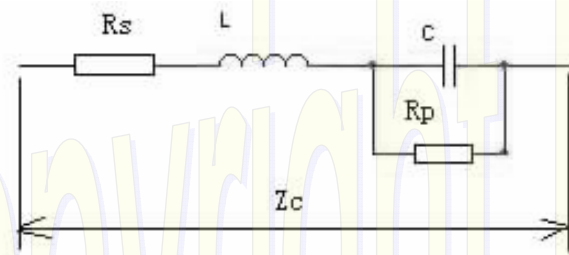
—



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

• 滤波器器件——电容

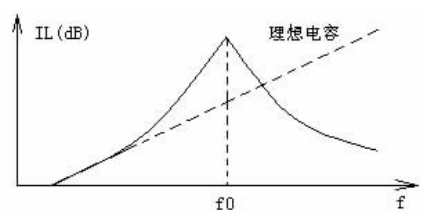
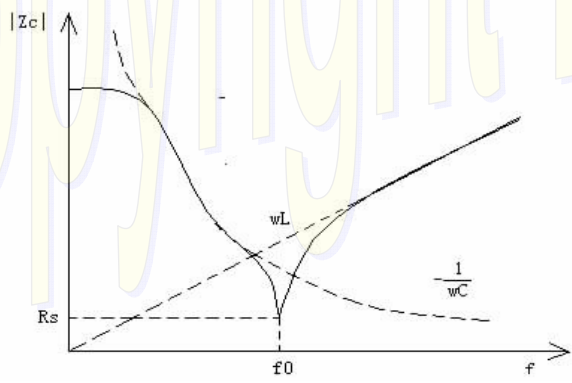


$$Z_c = R_s + j\omega L + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C}$$

$$R_p \gg \frac{1}{j\omega C}$$

$$Z_c = R_s + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}$$

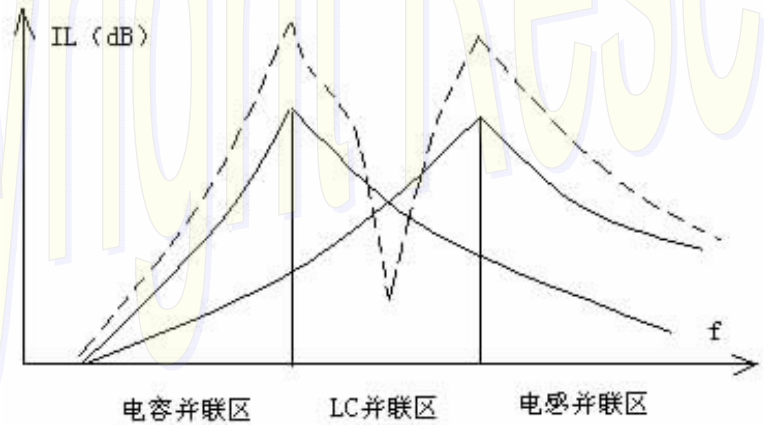
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

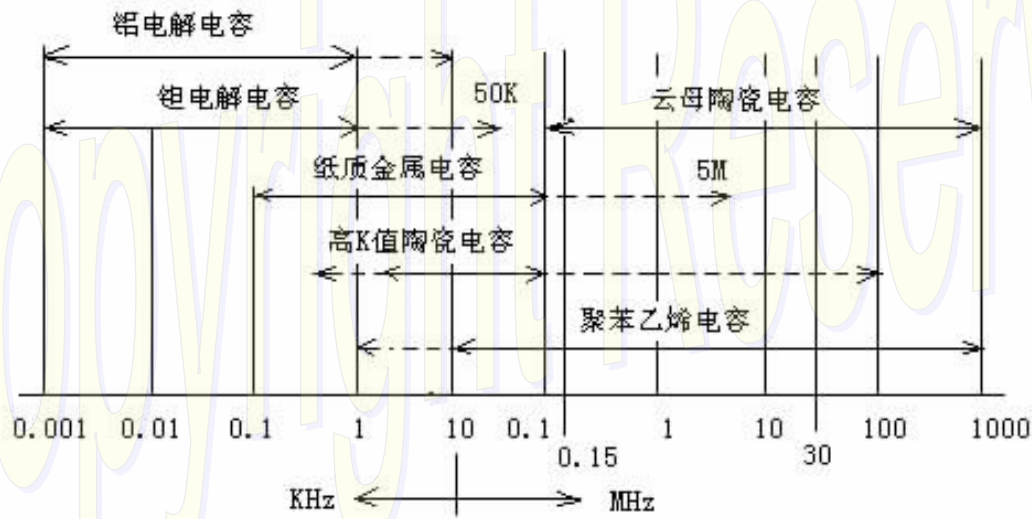
- _____
- _____



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

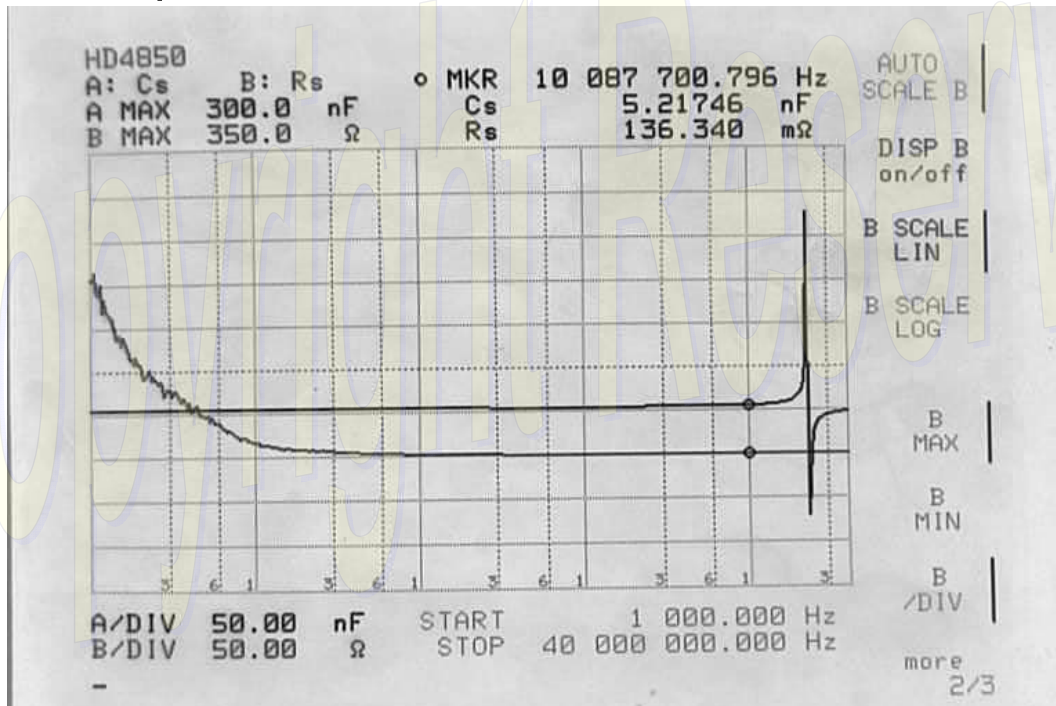
● 电容的选择



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

● 4700pFY电容的频率特性



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

● 1000pFY电容的频率



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

● 电容的选择

X电容

安规电容安全等级	应用中允许的峰值脉冲电压	过电压等级 (IEC664)	应用场合	耐压测试中施加峰值脉冲电压 U_p
X1	$>2.5kV$ $\leq 4.0kV$	III	高脉冲电压	当 $C_R \leq 1.0\mu F$, $U_p = 4.0kV$; 当 $C_R > 1\mu F$, $U_p = 4/C_R^{1/2} kV$.
X2	$\leq 2.5kV$	II	普通	当 $C_R \leq 1.0\mu F$, $U_p = 2.5kV$; 当 $C_R > 1.0\mu F$, $U_p = 2.2/C_R^{1/2}$
X3	$\leq 1.2kV$	—	普通	—

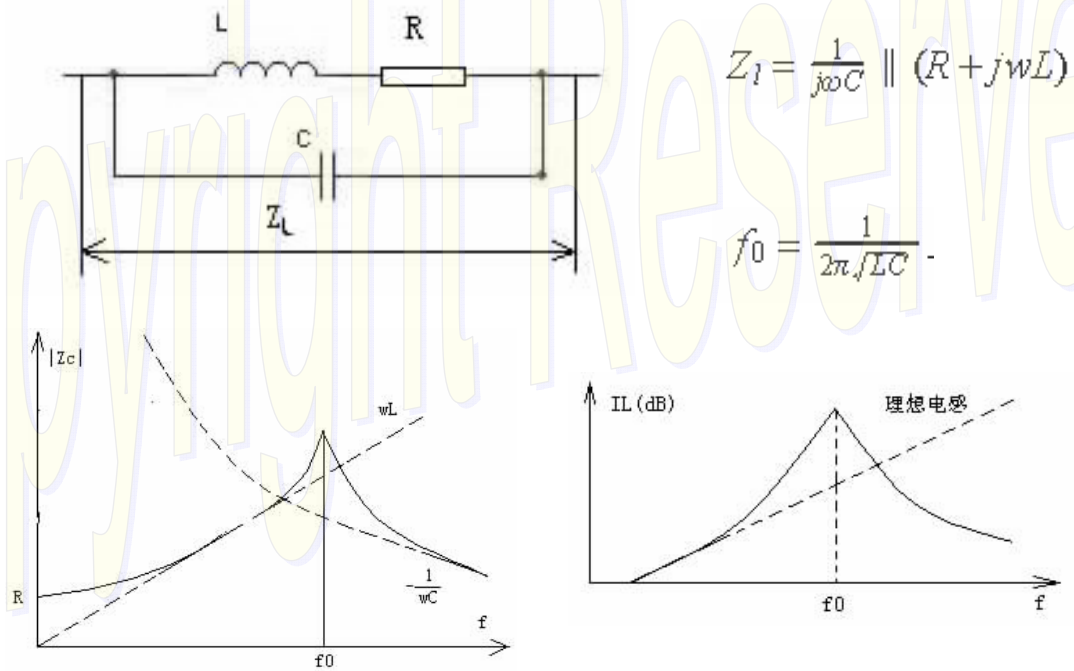
Y电容

安规电容安全等级	绝缘类型	额定电压范围	耐压测试电压
Y1	双重绝缘或加强绝缘	$\geq 250V$	8.0kV
Y2	基本绝缘或附加绝缘	$\geq 150V$ $\leq 250V$	5.0kV
Y3	基本绝缘或附加绝缘	$\geq 150V$ $\leq 250V$	—
Y4	基本绝缘或附加绝缘	$< 150V$	2.5kV

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

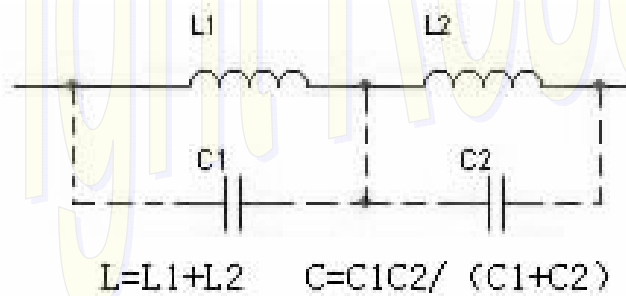
- 滤波器件——电感



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

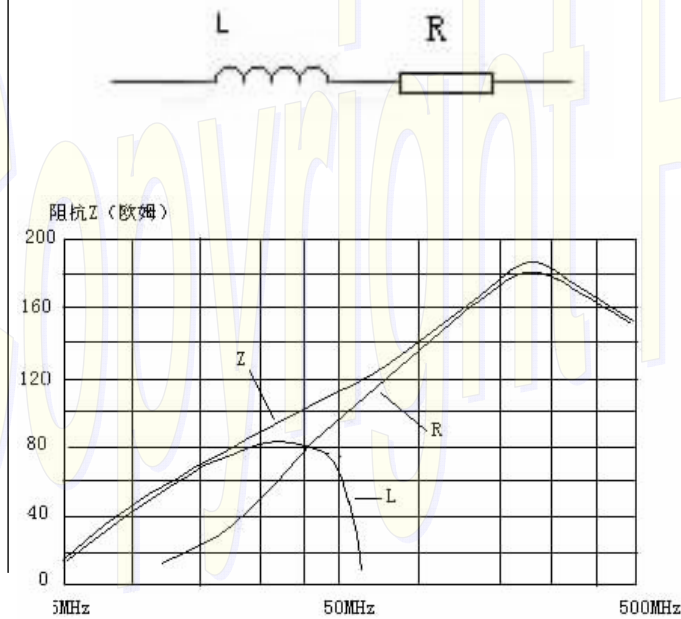
- _____
- _____



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

● 滤波器件——铁氧体材料



$$Z=R+j\omega L$$

式中， $R=R_m+R_e$ （所有串联电阻之和），是频率的函数，随频率变化而变化

R_m =磁损耗等效电阻

R_e =铜损耗等效电阻

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

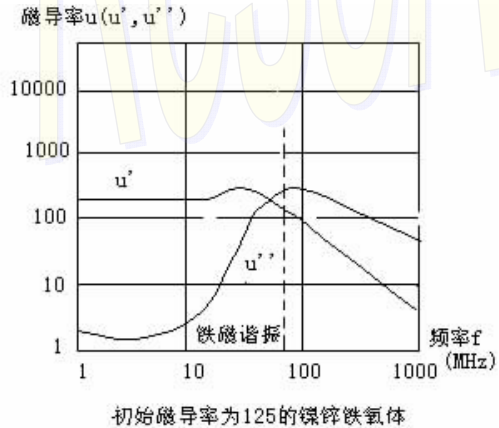
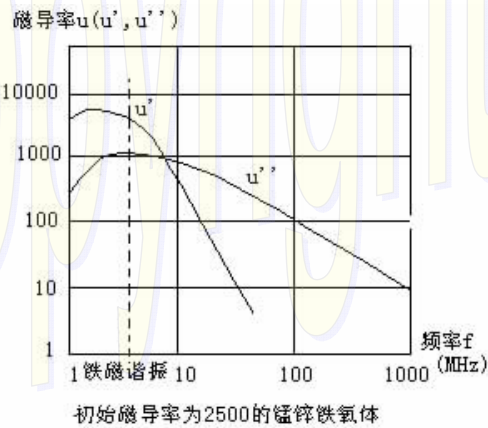
● 铁氧体一般通过三种方式来抑制骚扰信号：

- _____
- _____
- _____

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- _____
- _____
- _____
- _____



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

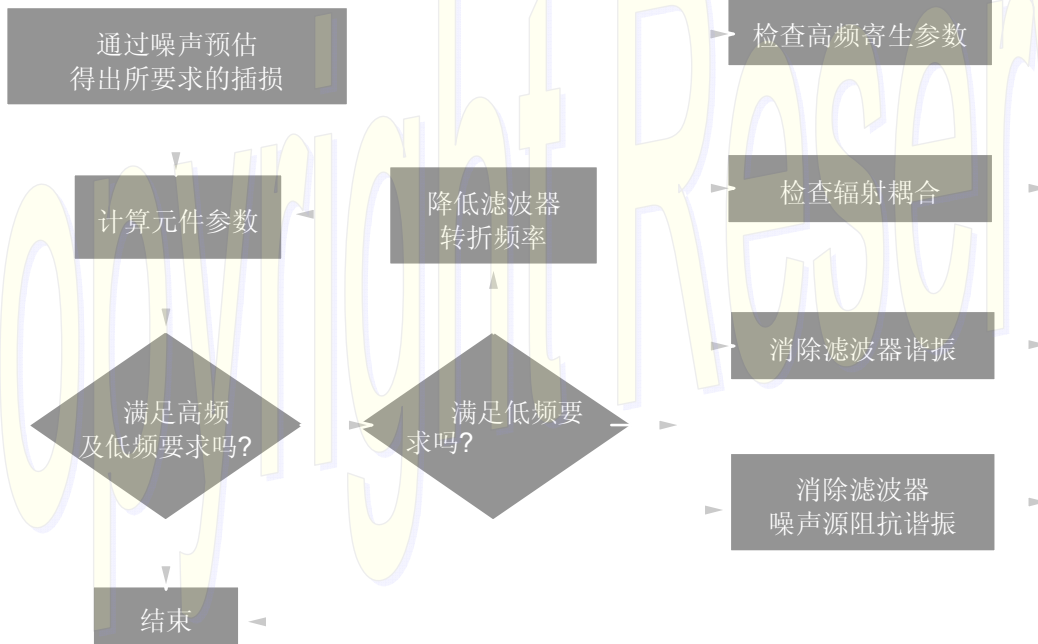
- _____
- _____
- _____

初始磁导率	最佳抑制频率范围
125	>200MHz
850	30MHz~200MHz
2,500	10MHz~30MHz
5,000	<10MHz

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

• EMI滤波器设计步骤



开关电源EMI耦合途径的切断

• 电源EMI滤波器设计过程实例详解

EMI滤波器

切断噪声耦合通路方法——小结

- 开关电源共模噪声源电路模型
- 开关电源差模噪声源电路模型
- EMI电源发射式滤波器电路模型
- 滤波器的插损曲线和分析
- 阻抗失配
- 平衡阻抗
- 常用滤波器件
- 滤波器的设计

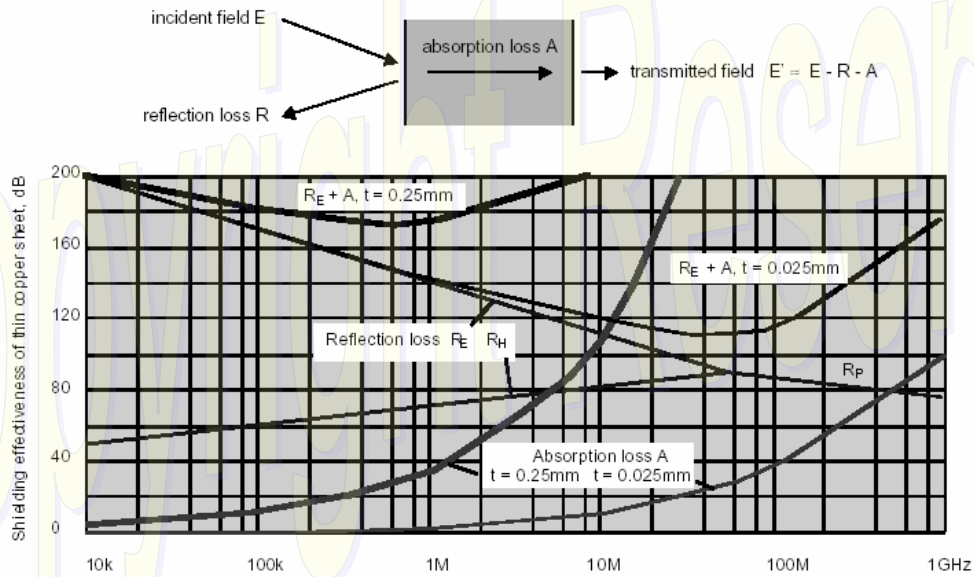
电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

To Be Continue

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 屏蔽

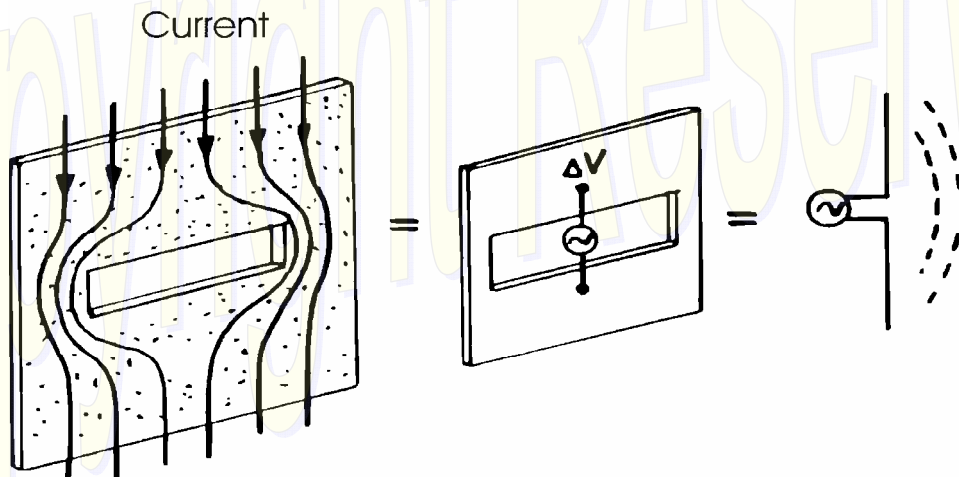


$$SE(\text{dB}) = R(\text{dB}) + A(\text{dB}) + B(\text{dB})$$

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

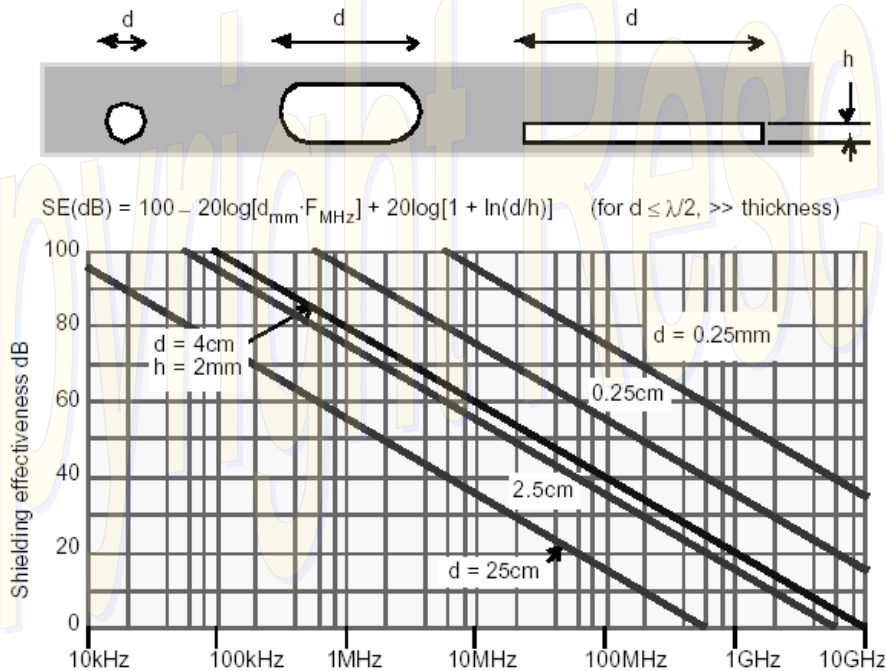
- 孔缝形成的天线发射



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 当 $d = \lambda/2$, $SE = 0$



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI耦合途径的切断

- 在实际设计中，无法预测涡流的方向，所以唯一的办法是尽量减小缝隙的长度，一般要求缝隙长度 l 满足：

$$l < \lambda / 10 \sim \lambda / 100$$

- 式中： l —缝隙长度，圆孔代表直径

λ -波长

- 例如：开关管关断时的上升沿为1ns，则，

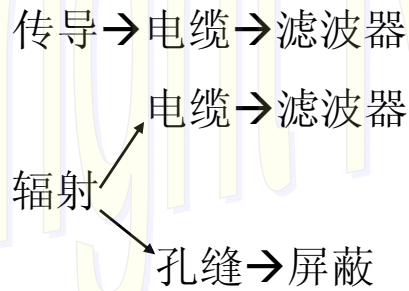
$$f = 1 / (3.14 \times 10^{-9}) = 318 \text{ MHz},$$

$$l = 3 \times 10^8 / (318 \times 10^6) = 0.94 \text{ m}$$

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

切断噪声耦合通路方法二——小结

- 屏蔽效能
- 孔缝天线
- 屏蔽设计



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

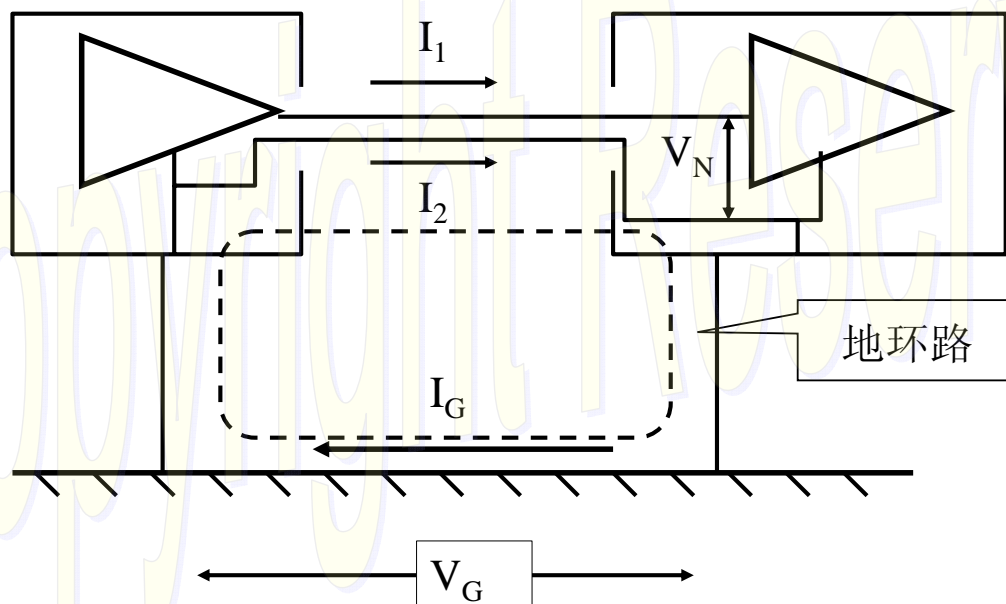
接地和地环路

- 单点接地，多点接地，混合接地（不再赘述）
- 屏蔽层“猪尾巴”效应（不再赘述）
- 接地网格（不再赘述）
- 接地平面（不再赘述）
- 地环路（重点介绍）

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

接地和地环路

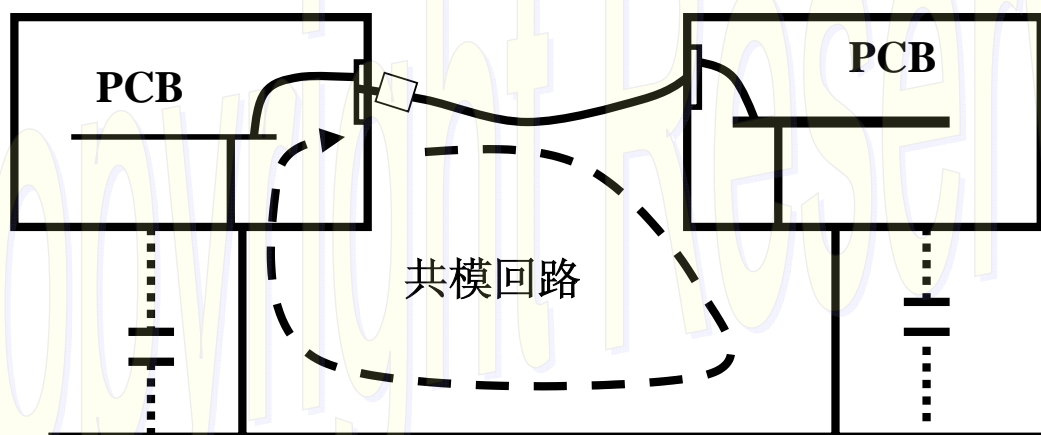
- 典型地环路模型



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

接地和地环路

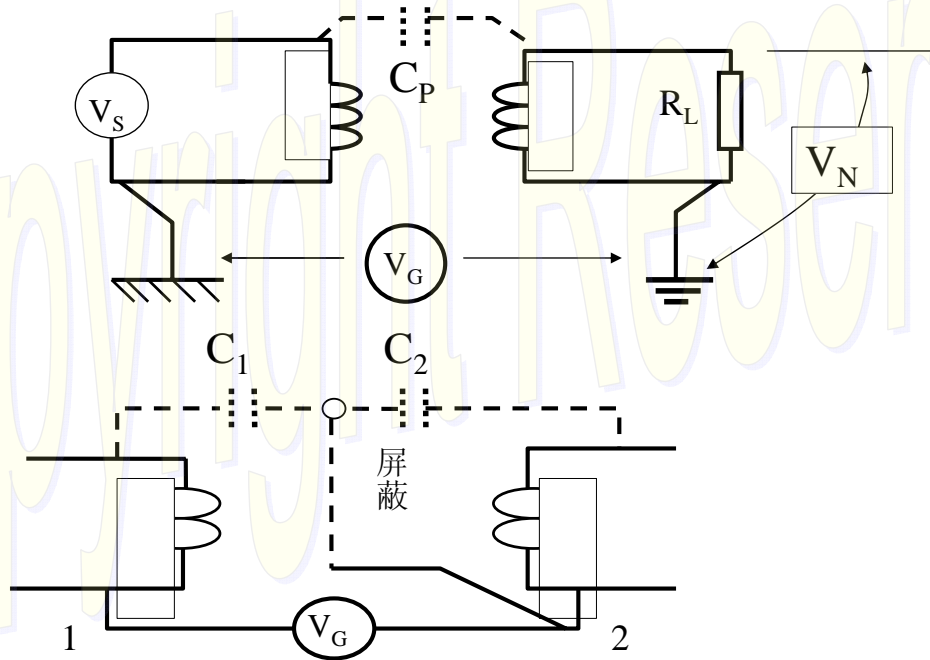
- 增加共模回路的阻抗



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

接地和地环路

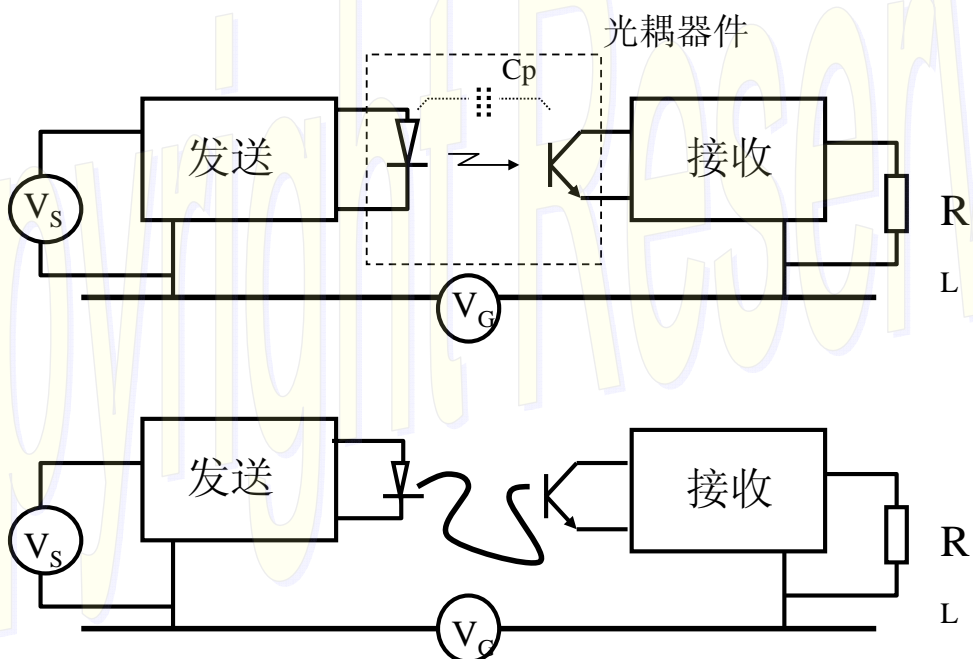
- 增加隔离变压器



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

接地和地环路

- 增加光电隔离器



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

接地和地环路

- 实际应用案例分析

地环路——共零线

小结

- 接地方式
- 地环路模型
- 消除地环路的方法
- 实际案例

PCB LAYOUT

- 电力电子产品由于其本身的特殊性，相对于高速数字电路在PCB布局方面有诸多不同之处，研究和实施功率电子PCB布局方面的技术主要包含以下几个特点：

-
-
-
-

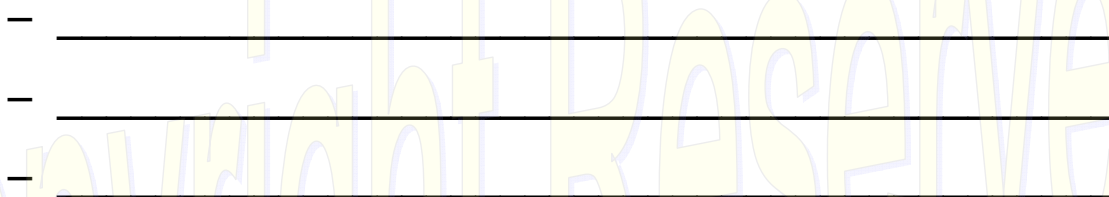
PCB LAYOUT

- **功率主回路的PCB EMC布局原则**

- EMC设计在电力电子电路中按照EMI和EMS划分，主电路由于其本身处理高电压、大电流（相对于EMS试验中的试验应力）的能力较强，对于单一的斩波电路而言，其抗扰性在整个系统中是最强的，因此对EMS的设计主要集中在端口电路以及地系统的设计中。同样也由于主电路处理的电压和电流较高，对EMI的贡献也就最大，因此抑制主电路的EMI是PCB EMC设计的主要目的。

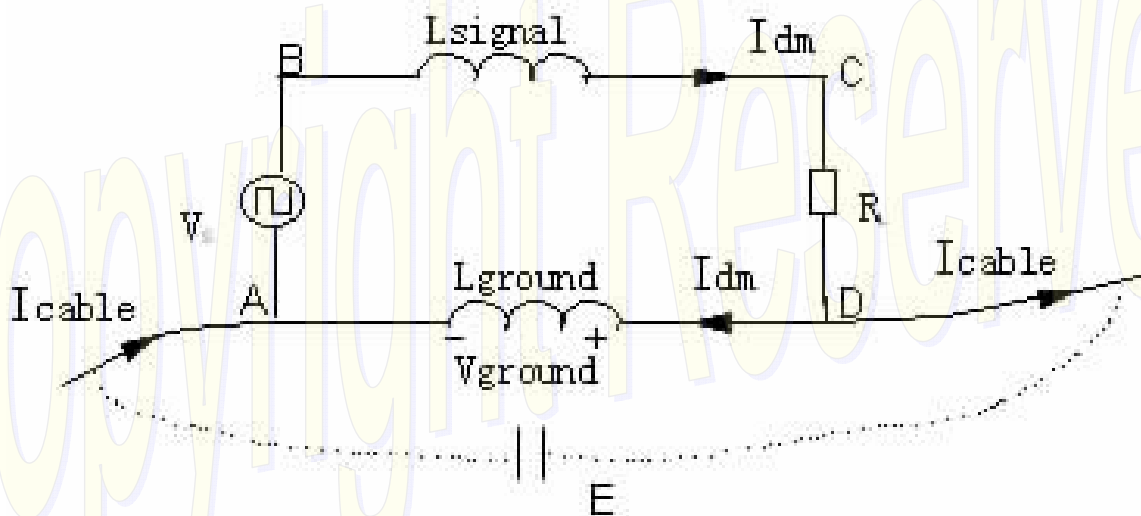
PCB LAYOUT

- PCB辐射场产生的原因



PCB LAYOUT

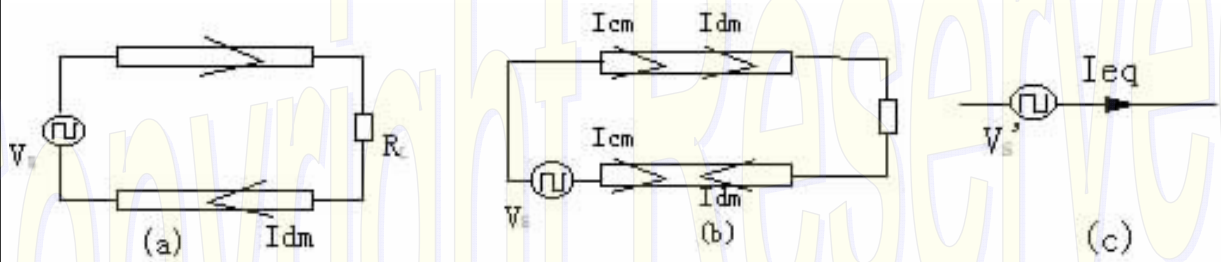
- 前两种方式



$$V_{ground} = L \frac{di}{dt}$$

PCB LAYOUT

- 共模不平衡偶极子天线



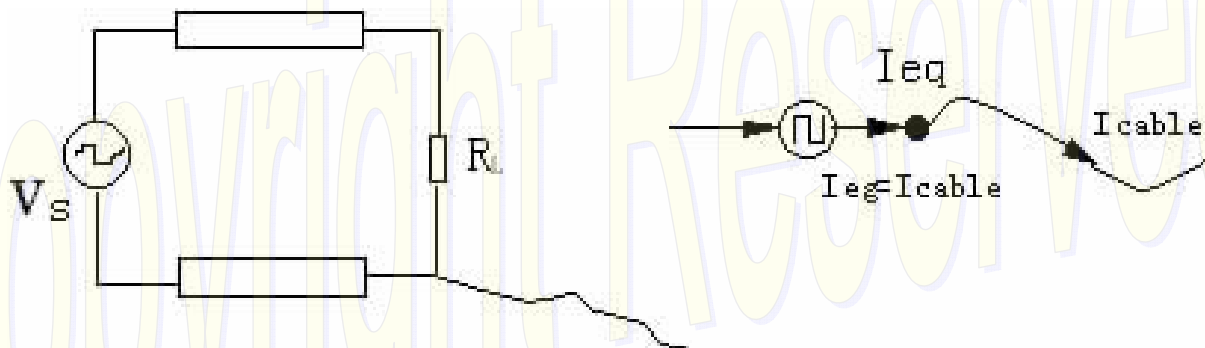
Note:

PCB LAYOUT

- PCB EMC 布局原则

PCB LAYOUT

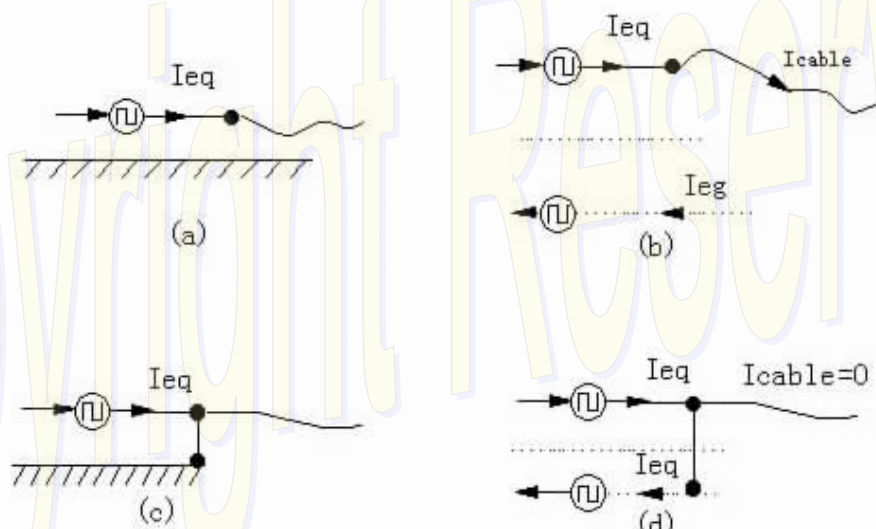
- 地回路连接的一根电缆及其作为一个非平衡偶极子天线的等效电路图



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

- 放置在PCB轨线下的导体平面称为镜像平面



Note:

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

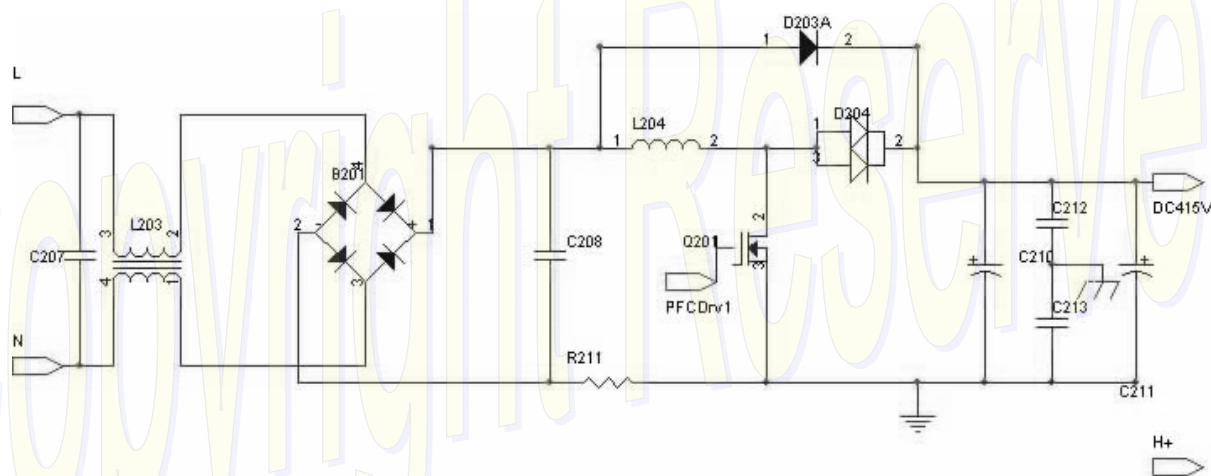
• PFC电路的布局

- PFC电路由于主要处理低频谐波和功率因数的校正，因此在设计考虑上一般都以不给系统效率增加太大的负担，保证电路工作的稳定性为首要目的，但是从电磁骚扰的角度看，PFC电路是电路系统中主要的噪声源之一，尽管为降低器件应力以及提高效率考虑采用了一些诸如ZVT、ZCT的技术，但由于机械结构的密度限制，在较小的空间里的布置数目较多的开关元件，其电磁辐射密度较DC/DC部分一般都有过之而无不及。尤其是断续工作方式的PFC，由于PFC电感在电流断续时造成的电流振荡，使得开关元件的通断波形均在不同程度上存在着潜在的振荡，这样就大大地增加了电磁辐射。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

• PFC电路在PCB EMC布局方面的注意事项及相关对策



PFC LAYOUT

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

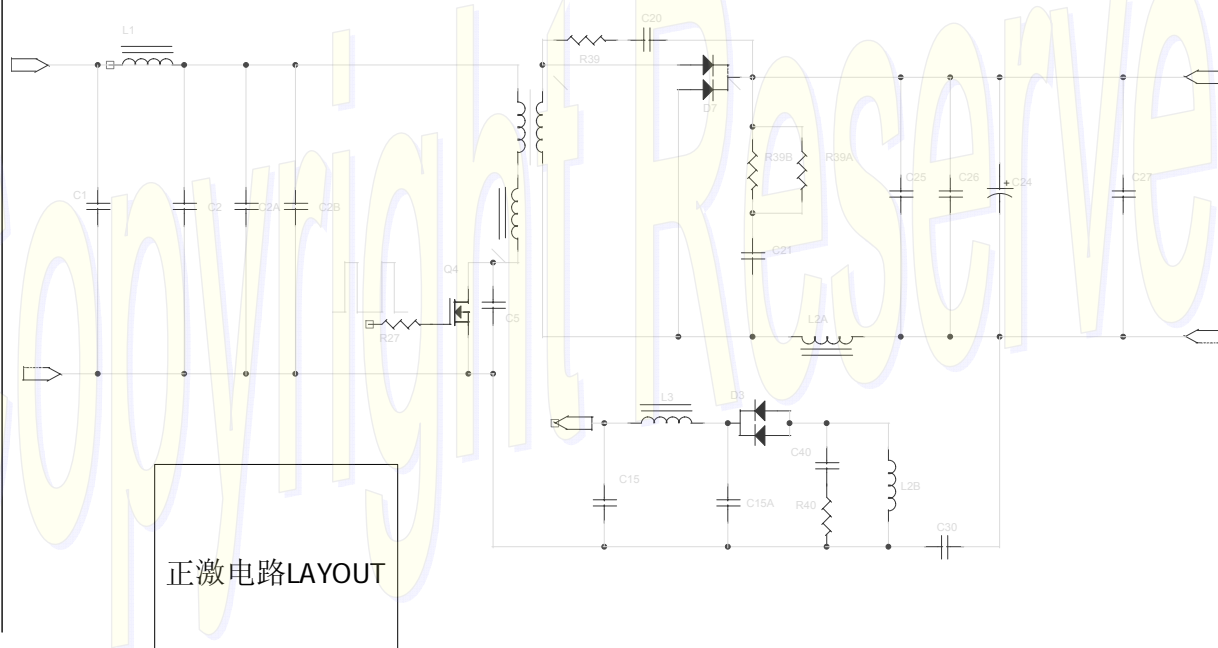
● 单端正激电路的布局

- 单端正激电路由于成本低，高可靠性等优点，在开关电源中得到了非常广泛的运用。按输出主要分为：同步整流电路、肖特基整流电路。按变压器复位方式主要分为：绕组复位、RCD复位、电容谐振复位。下面从其拓扑结构着手讨论它的PCB设计的EMC注意事项。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

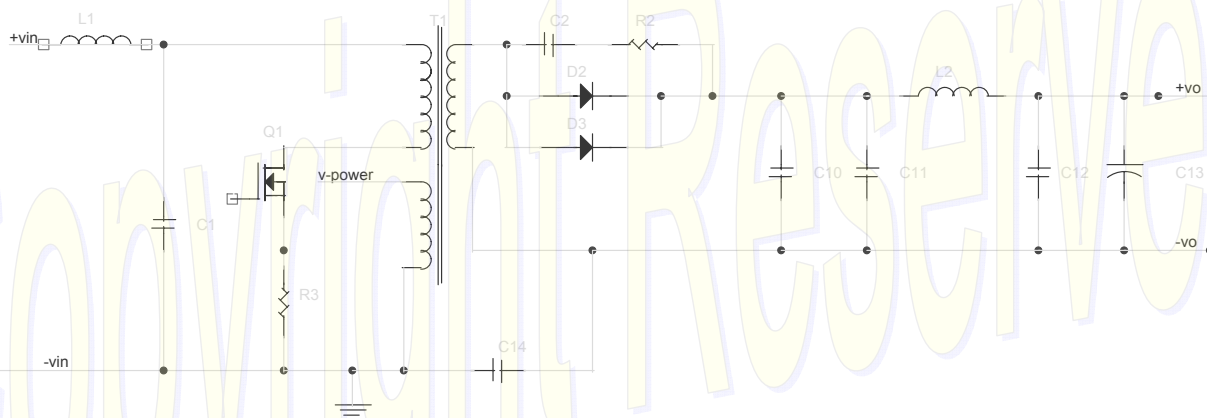
● 单端正激电路在PCB EMC布局方面的注意事项及相关对策



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

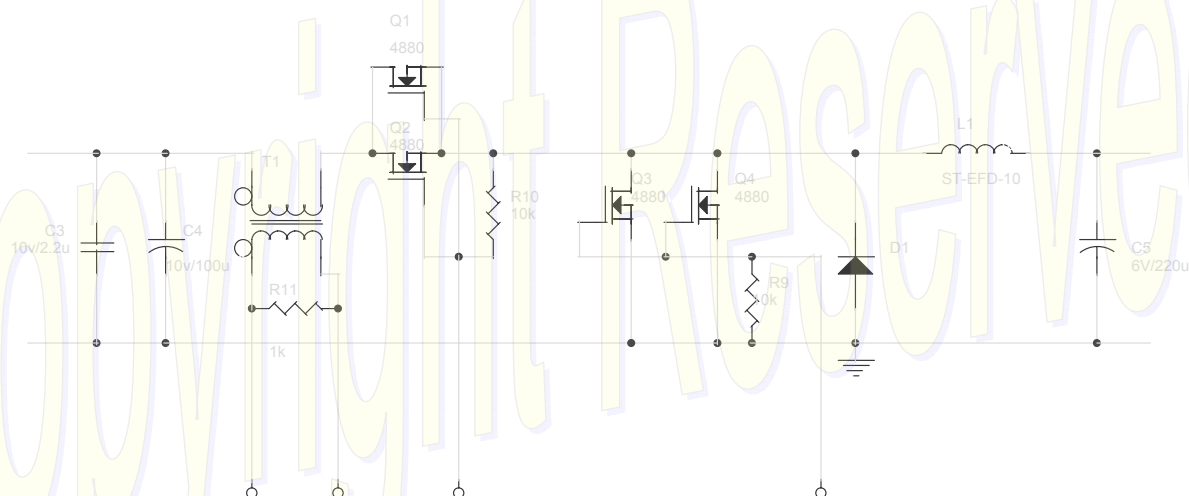
● 单端反激电路的布局



分析同正激电路

PCB LAYOUT

● 非隔离电路（正激）

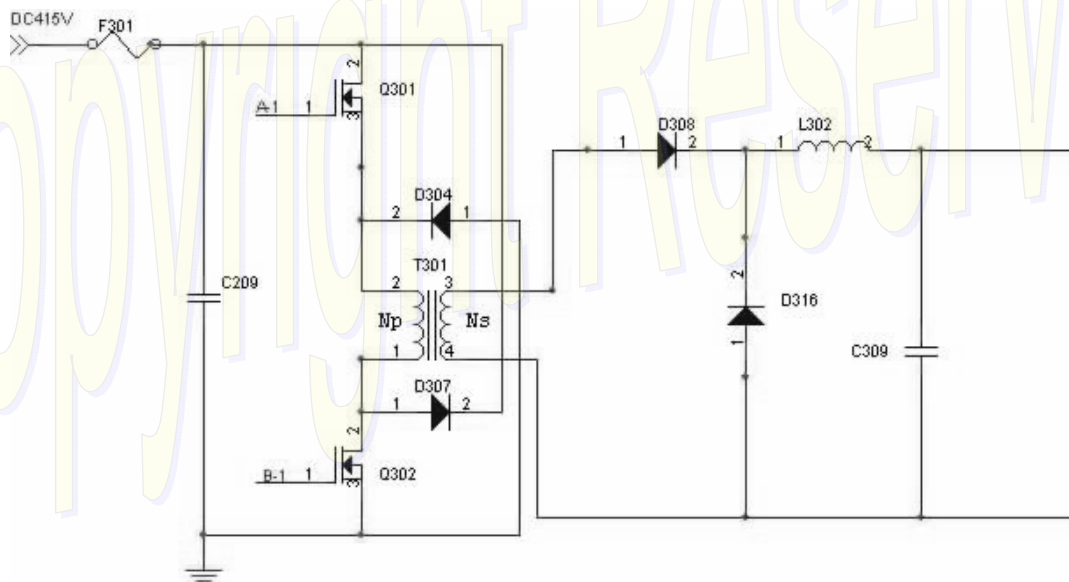


非隔离电路在回路的控制方面与正激电路也是相同的（只是没有变压器）

PCB LAYOUT

• 双正激电路的布局

- 双正激电路由于其开关应力低、无桥臂直通危险等低成本、高可靠性的优点工业电源中得到了广泛的运用。



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

• 双正激电路在PCB EMC布局的分析及相关对策

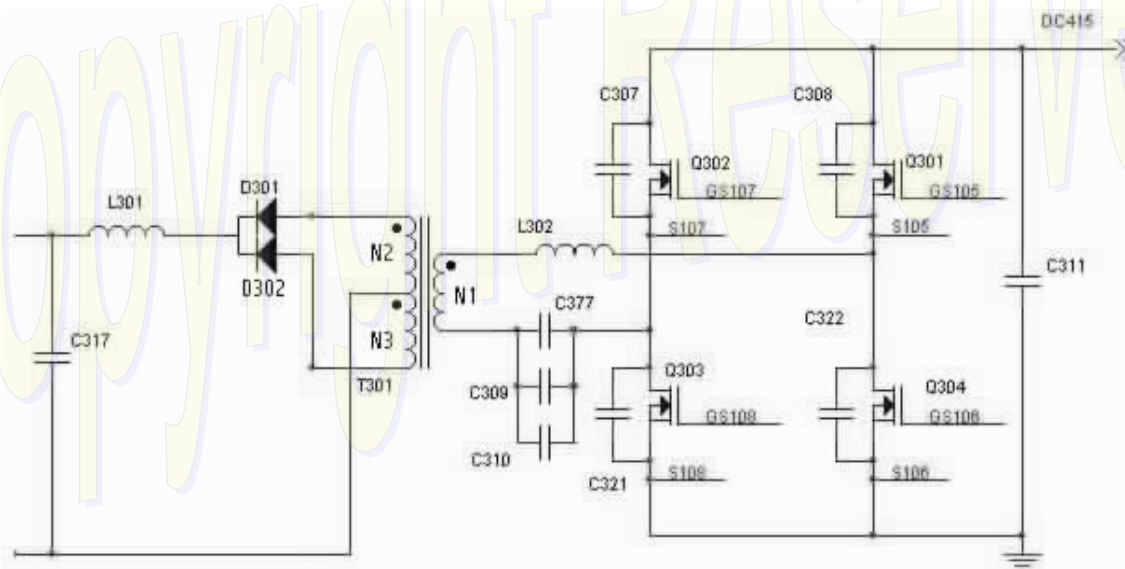
双正激LAYOUT

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

• 全桥电路电路的布局

- 在中、大功率的应用场合较多的采用了全桥变换器。例如很多电源模块采用的就是ZVS移相全桥控制电路。



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

• 全桥电路在PCB EMC布局的分析及相关对策

全桥LAYOUT

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

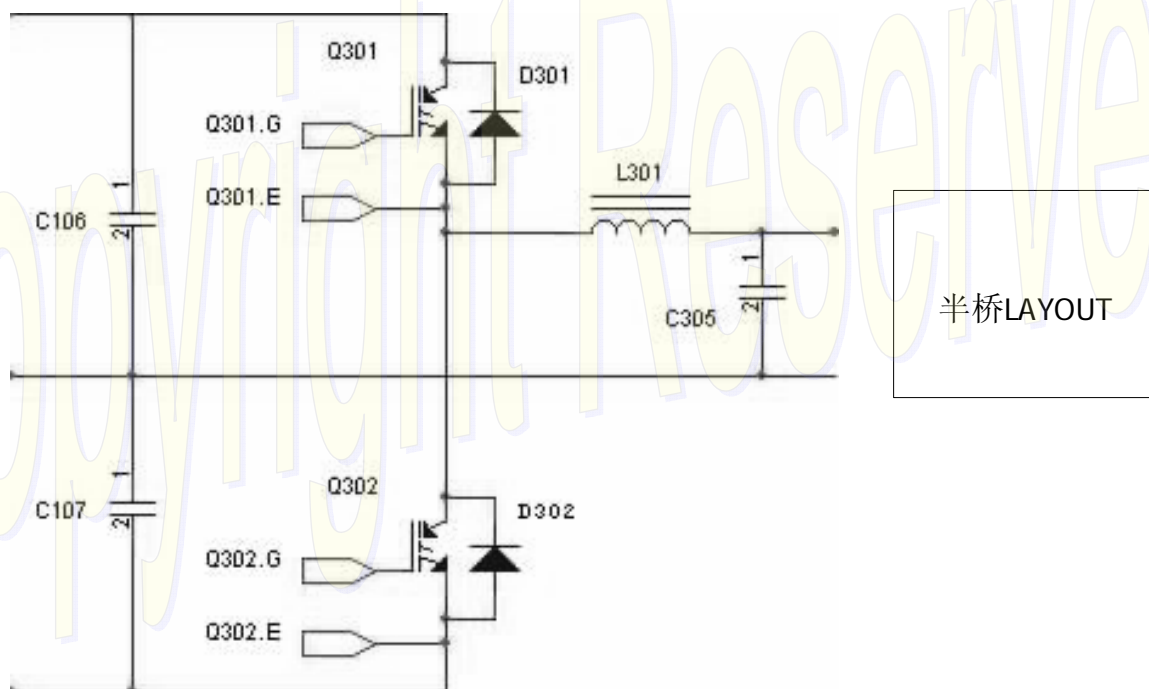
• 半桥逆变电路的布局

- 由于非隔离式逆变器共零线的要求，在高频系列单进单出UPS系统中，普遍采用半桥式逆变电路。其特点是：半桥逆变电容与前级PFC电路的输出电容共用，逆变器输出的零线与UPS输入零线共用。

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

• 半桥逆变电路在PCB EMC布局的分析及相关对策



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

- **电源EMI滤波器的PCB设计**

- 输入线与输出线的布置
- 多级滤波器级联
- EMI滤波器的位置
- 共模/差模电感的布置
- 电容的布置

PCB LAYOUT

- **输入线与输出线的布置**

PCB LAYOUT

- 多级滤波器级联

- 多级滤波器级联时，级间距离尽量做到远些，避免级间电感互感藕合。多级滤波器布局的布局，根据这一原则，选择相应的排列方式，一般是按直线型排列，且相邻两个电感方向互相垂直较好。

PCB LAYOUT

- EMI滤波器的位置

PCB LAYOUT

• 共模/差模电感的布置

- 在EMI滤波器中，共模电感会产生强烈的杂散磁场，这些杂散磁场容易干扰其它器件，因此滤波电容应尽量远离，尤其是电容引线较长时更是如此。其它敏感信号线也要避免从该区域穿过。共模（差模）电感是由线圈绕在磁芯上组成，电感上的线圈很容易拾取干扰，因此尤其要注意使电感远离开关管变压器等易于产生干扰的地方

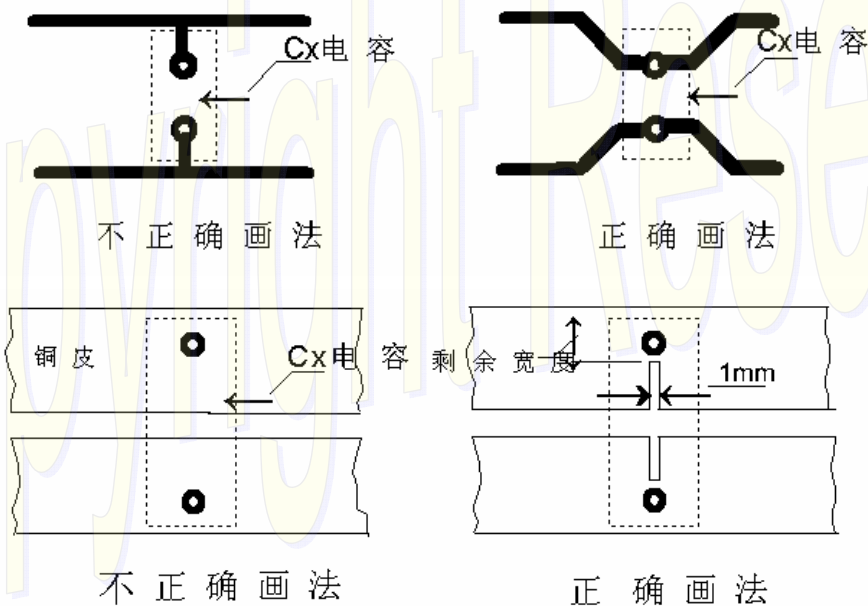
正确

错误

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

PCB LAYOUT

• 电容的布置



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

小结

- PCB辐射场产生的原因
- 镜像平面
- 各种电源拓扑的PCB LAYOUT
- 滤波器及其器件的PCB LAYOUT

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

Any Short Question

Take a break?

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源的EMI仿真

- 业界较为著名的几家EMC仿真软件
 - EMC-Engineer
 - Omega-plus
 - Commos/EMC
 - Quiet Extension to XTK (★)
 - Ansoft/Maxwell Eminence (★)
 - Flo/EMC (★)

开关电源的EMI仿真

- Quiet Extension to XTK和Ansoft/Maxwell Eminence主要的优势在于高速数字电路，对于告诉数字电路其可以作板级仿真，主要处理信号完整性、信号串扰等，但对于模拟电路，ANSOFT采用的理论基础是有限元分析法，数据计算量很大，而且不能处理模拟电路实际存在的线宽效应的问题，使用起来十分复杂，要定义好MAXWELL边界条件，而在电力电子产品方面，边界条件的给出本身近似性就较差，因此仿真的结果与实际测试结果相差较远
- Flo/emc经过试用，并且同厂家共同作了板级的仿真实例，结果是板级仿真准确性为33%，相比试用软件的初衷，不能满足要求。但由于Flo/emc软件采用传输线模型的方法，因此可能在仿真较大的系统的机壳屏蔽效能方面应该可以。

开关电源的EMI仿真

• 仿真软件在开关电源中应用的现状总结

- 由于仿真软件采用的理论基础的近似性以及电路模型的边界条件的不确定性，在短期内通过仿真场强的方式不太可能出现较为准确的软件工具。
- 通过软件仿真近场场强，本身只能像近场扫描仪一样，在EMC整改过程中给出近似的方向，但由于电源模块集成度的不断提高和体积的限制，即使是通过近场扫描设备的探测结果也是不准的，因为感性器件泄漏的强大近场磁场会掩盖远场实际信息，因此EMC仿真软件试图从近场场强方面着手，目前是无法解决与实际测试的一致性的，甚至连方向性也没有。
- 目前EMC仿真软件的应用价值
从另一个角度考虑问题，不去比较仿真软件的结果与一致性测试的结果比对，而是利用仿真软件的电路仿真能力和模拟能力，解决EMC对策实施过程中的故障查询问题，间接地解决场的问题。

To Be Continue

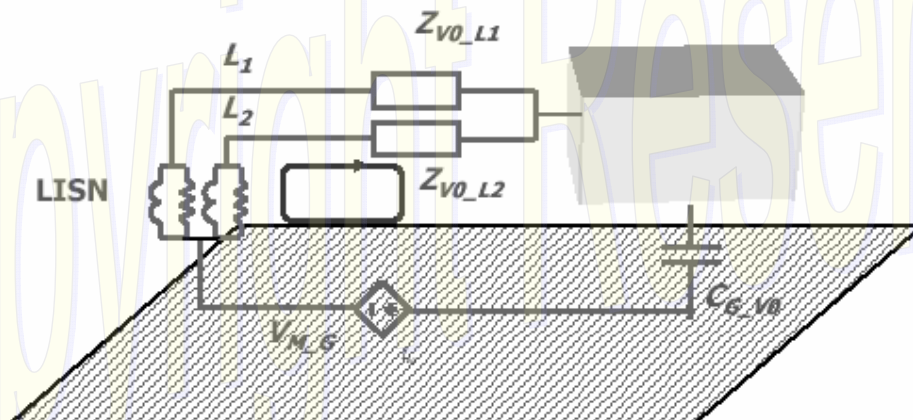
开关电源EMI中的谐振问题

- 开关电源中的谐振往往是导致传导和辐射超标的重要原因之一
- 滤波器的设计中我们已经在滤波器的调整中提到要解决可能出现的谐振问题
- 下面我们结合谐振等效电路的仿真来看看开关电源中的谐振现象
- 谐振通常是因为电路中（PCB板）上的分布电感和分布电容形成并联谐振或者串联谐振引起的

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI中的谐振问题

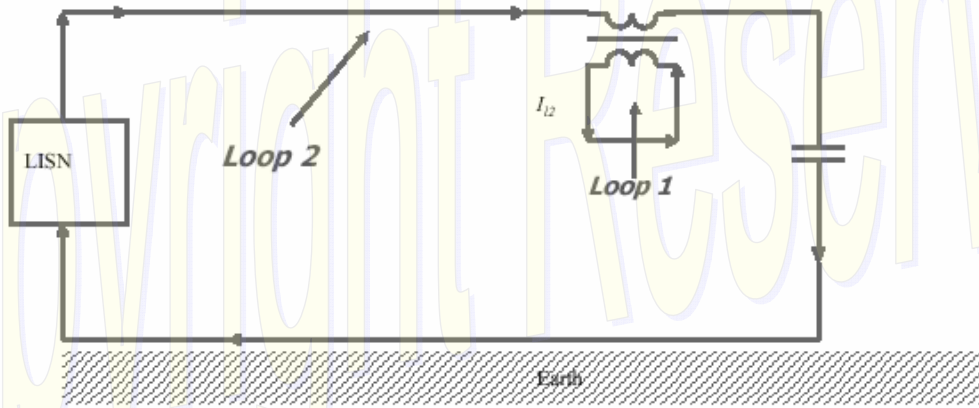
- 传导测试中的共模环路



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI中的谐振问题

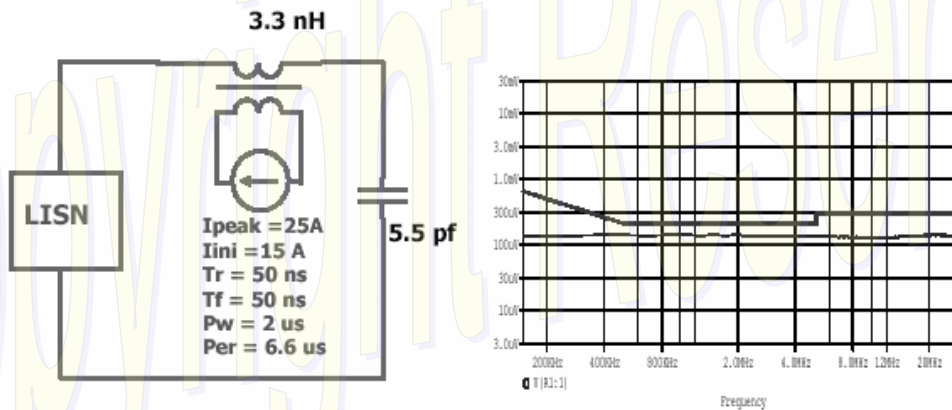
- 等效电路



Note:

开关电源EMI中的谐振问题

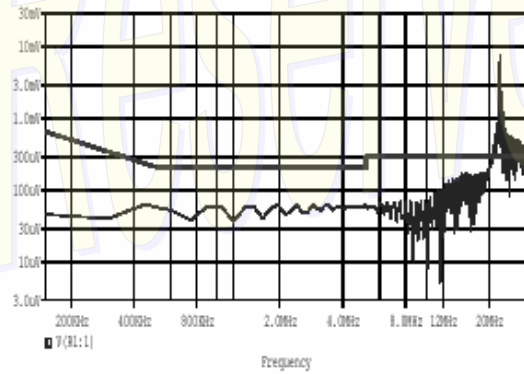
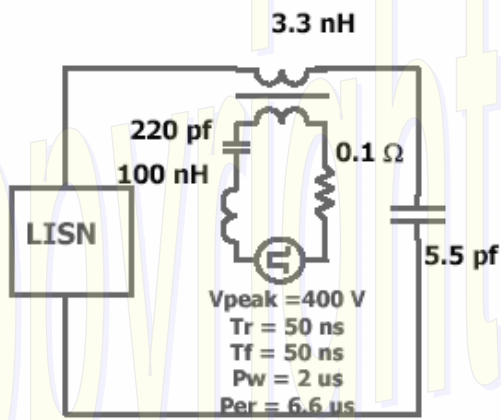
- 不考虑环路1噪声源电路的分布参数时，假设脉冲电流为25A



Note:

开关电源EMI中的谐振问题

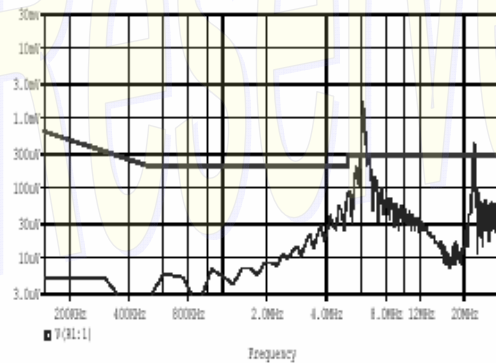
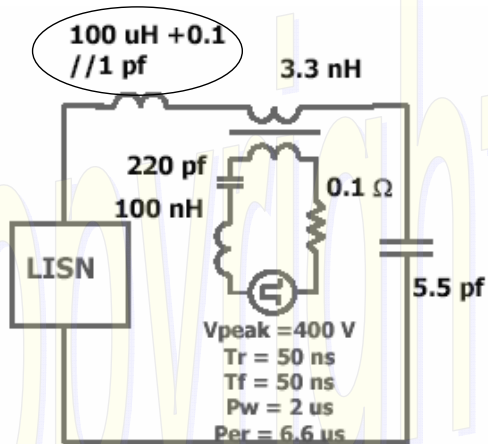
- 考虑环路1的分布参数， $I=300\mu\text{A}$ 时已经超标



Note:

开关电源EMI中的谐振问题

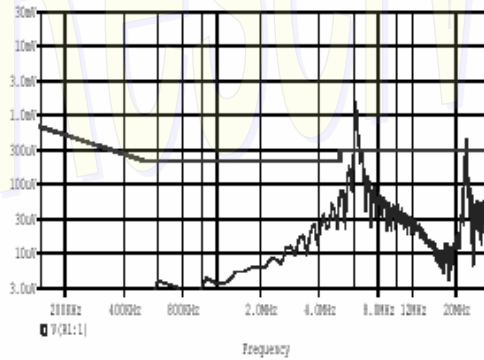
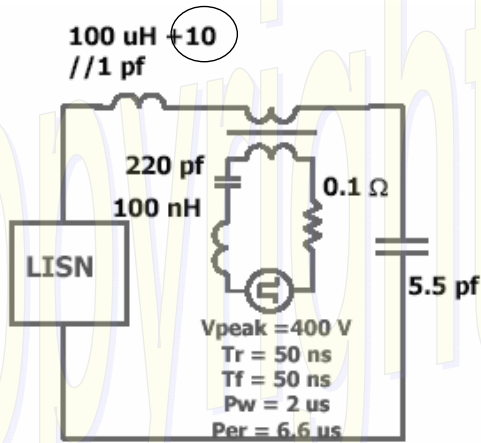
- 解决措施——加电感，增大环路的阻抗



Note:

开关电源EMI中的谐振问题

- 解决措施——在前面的措施上，加大环路的电阻：
0.1ohm→10ohm

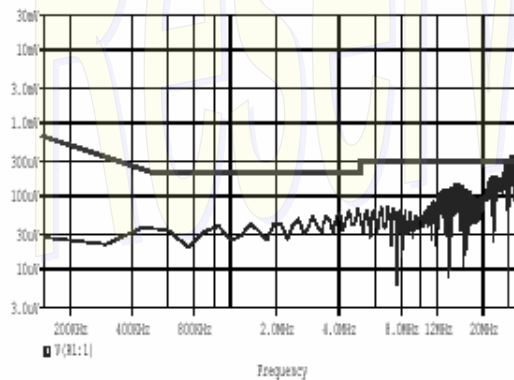
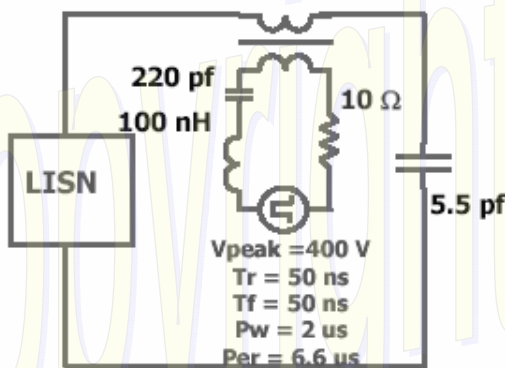


Note:

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI中的谐振问题

- 选择增大阻抗的位置不对，改为环路2：
0.1ohm→10ohm

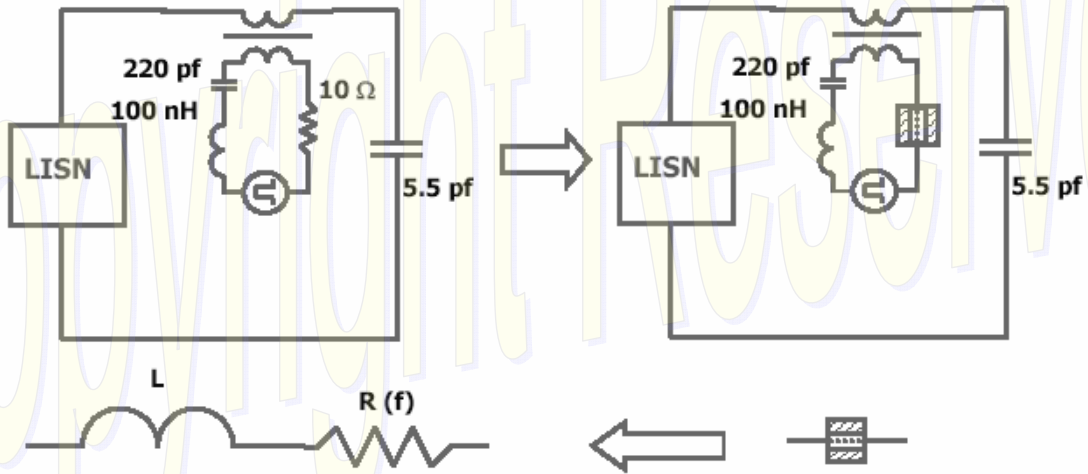


Note:

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

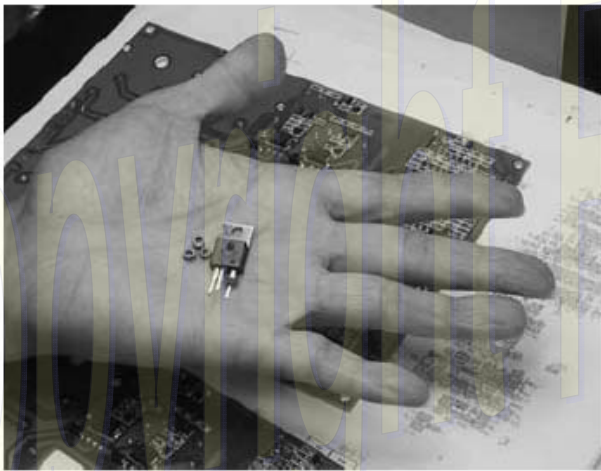
开关电源EMI中的谐振问题

- 利用铁氧体磁珠



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

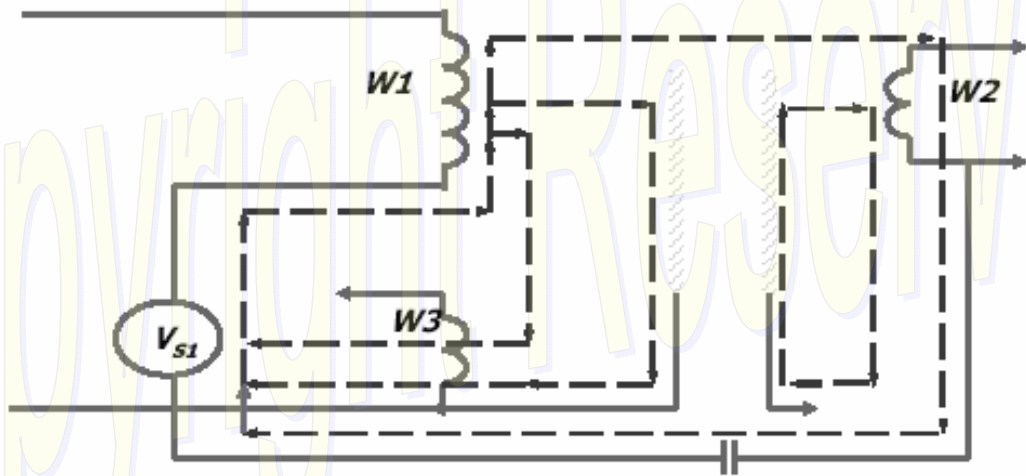
开关电源EMI中的谐振问题



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI中的谐振问题

- 其它可能导致谐振的环路



变压器往往有很大的分布电容，容易形成很多看不见的谐振环路

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

小结

- 谐振的等效电路
- 谐振现象产生的分析
- 几种对策方法的对比分析
- 铁氧体器件的应用

电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

EMC服务内容

- EMC企业培训
- EMC设备购买
- EMC实验室建设
- EMC开发流程管理
- EMC项目设计
- EMC项目整改
- EMC认证服务
- EMC技术咨询服务

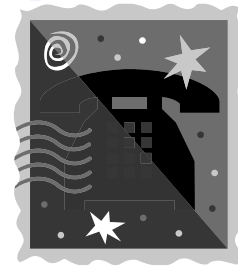
联系方式:

李静

e-mail:

szmeijoe@gmail.com

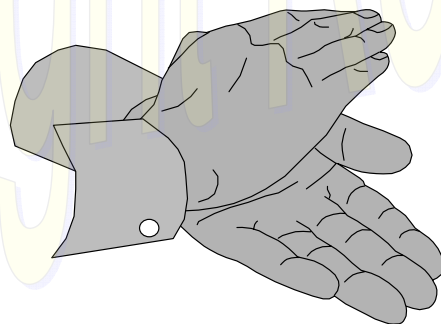
Tel: 13923424327



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved

开关电源EMI设计技术

本章结束，谢谢！



电磁兼容技术培训 Prepared by King Lee, 2003.5 (Version 3.0) All Copyright Reserved