

# 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

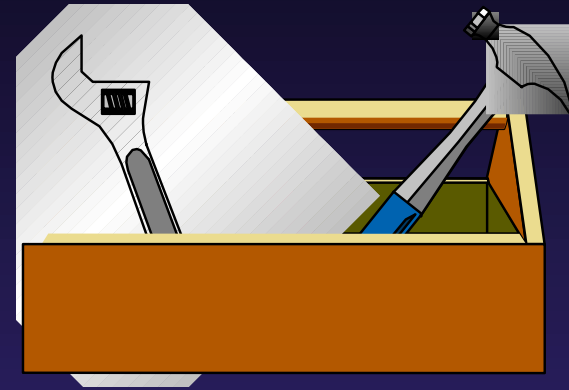


**EMC**设计技术\_EMS

**EMC**认证体系

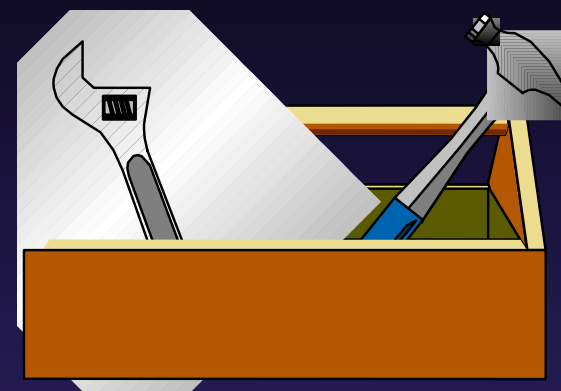
# 开关电源EMI设计技术

- 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



# 开关电源EMI设计技术

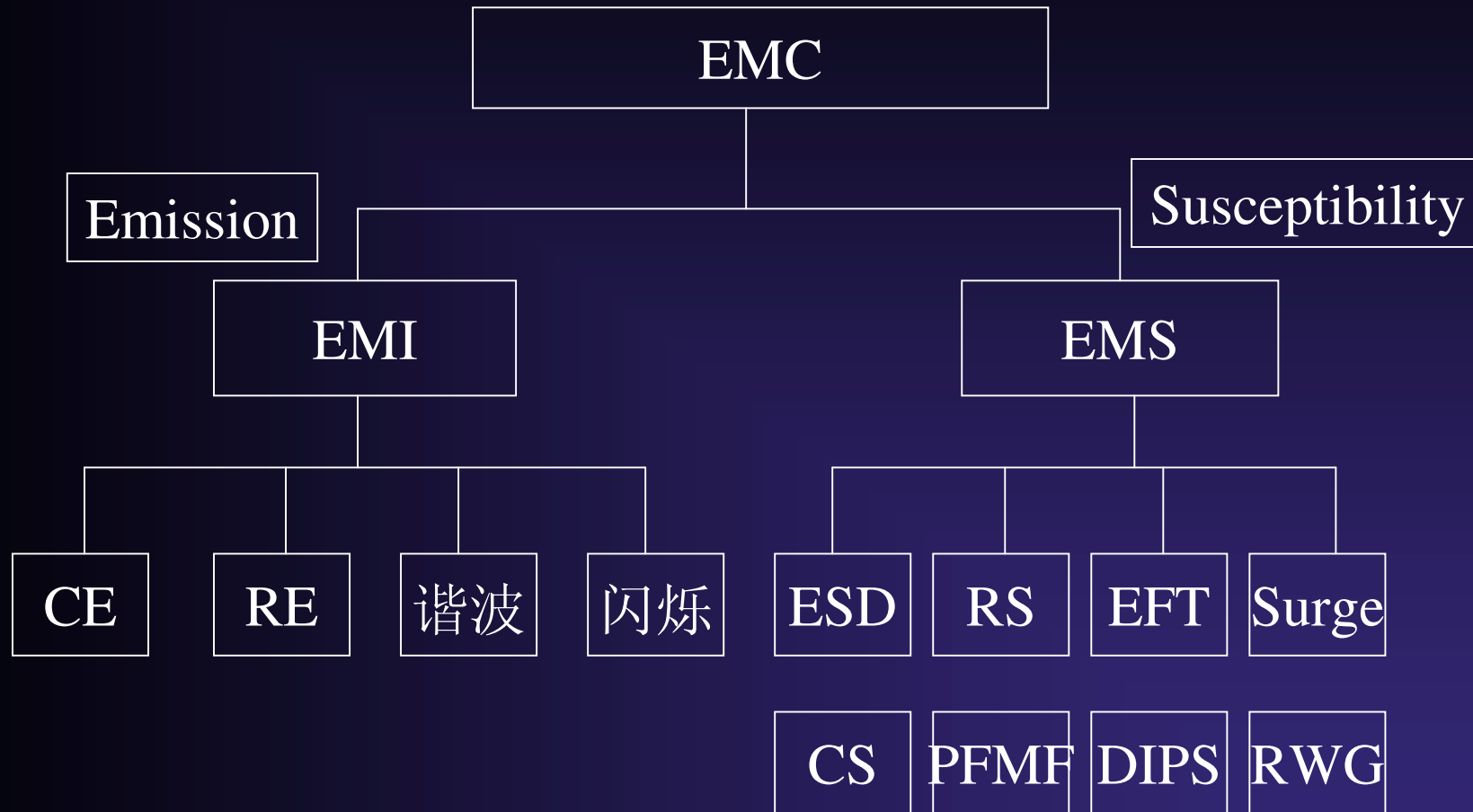
- 接地和地环路
- PCB LAYOUT
- 开关电源的EMI仿真
- 开关电源EMI中的谐振问题
- 典型案例分析



# 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。

# EMC设计的对象



# 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）

- $Z = R_{ac} + j\omega L$

- $R_{ac} = 1 / \pi d \delta \sigma$ ,  $\delta$ 为集肤深度。

- $L = 0.2 * l * \ln(4l/d)$

- 传输线对（平行圆截面直导线）

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

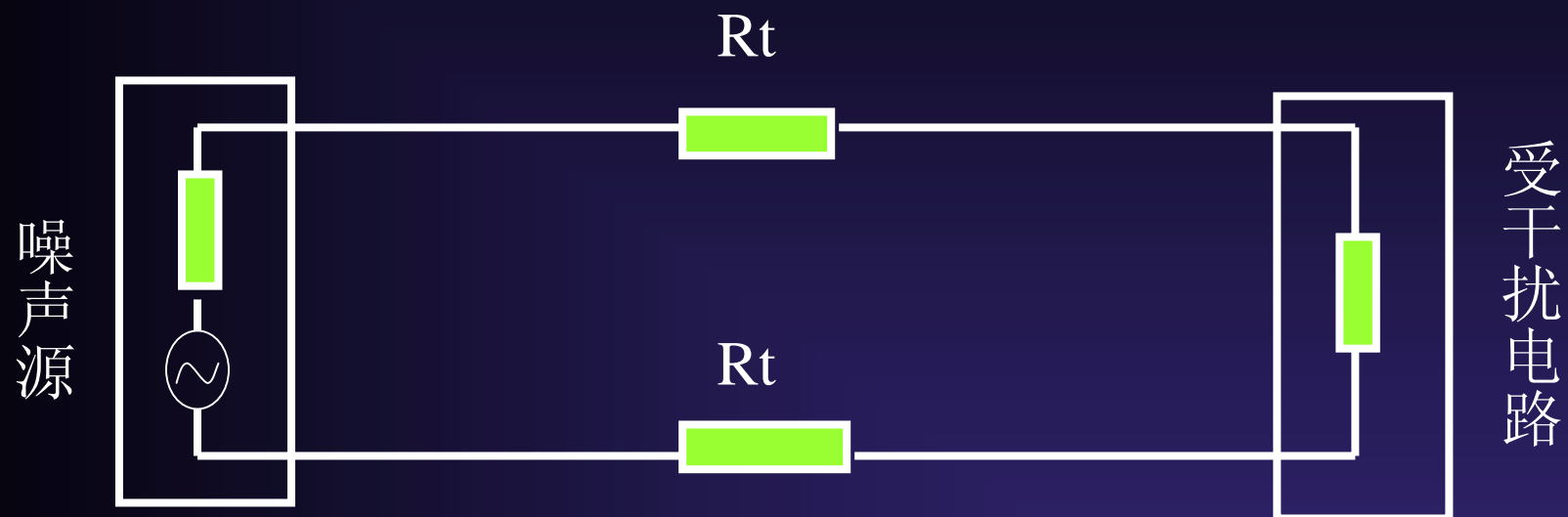
$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{d^2 + 4h^2}}{d}$$



# 相关的EMC基础知识

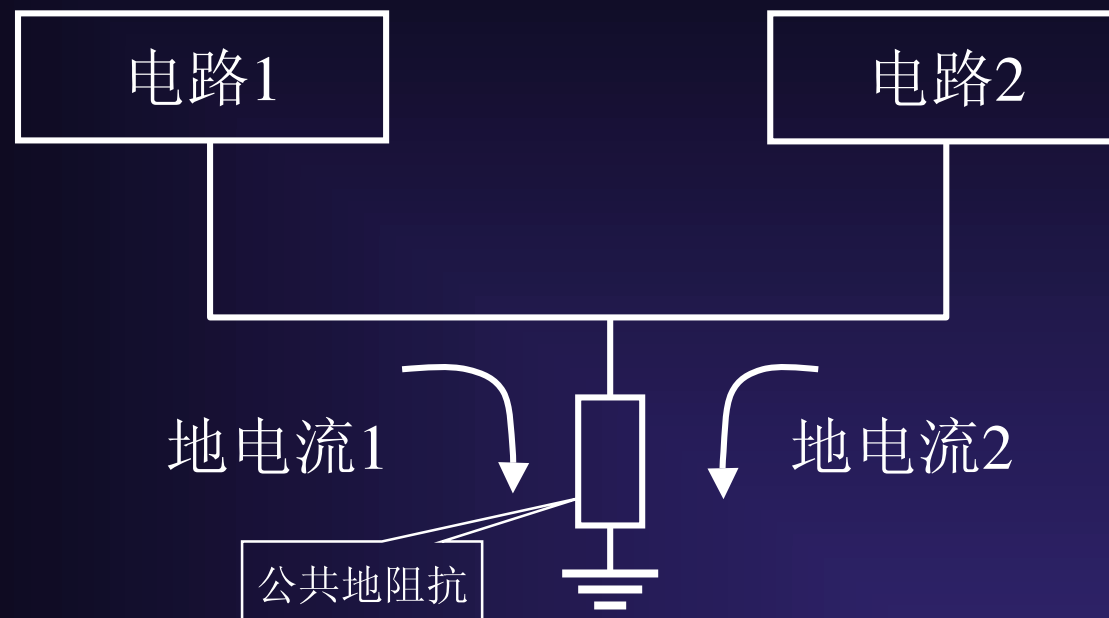
- 传导耦合
  - 电阻性直接耦合
  - 公共地阻抗耦合
  - 公共电源阻抗耦合
- 辐射耦合
  - 近场耦合
    - 电容性耦合
    - 电感性耦合
  - 远场耦合
    - 天线对天线耦合
    - 场对天线耦合

# 相关的EMC基础知识



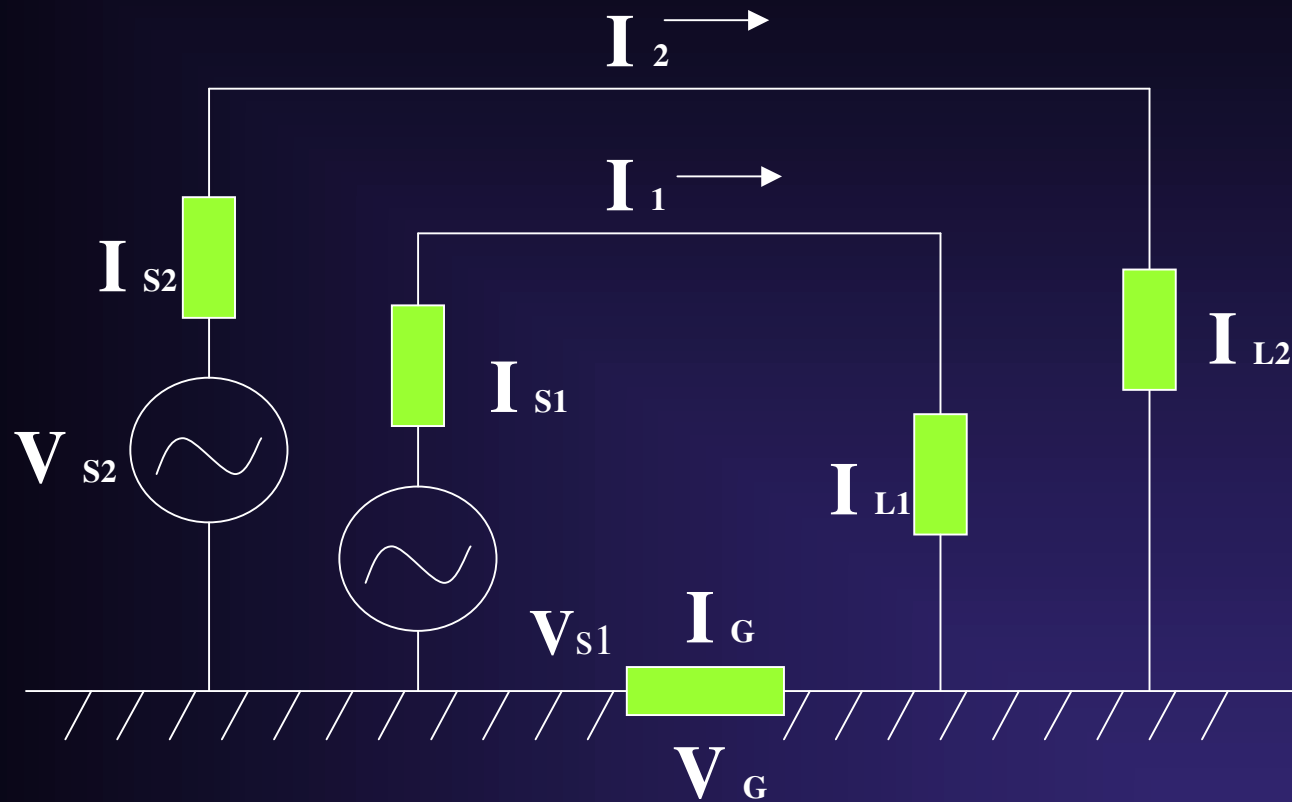
电阻性传导耦合

# 相关的EMC基础知识



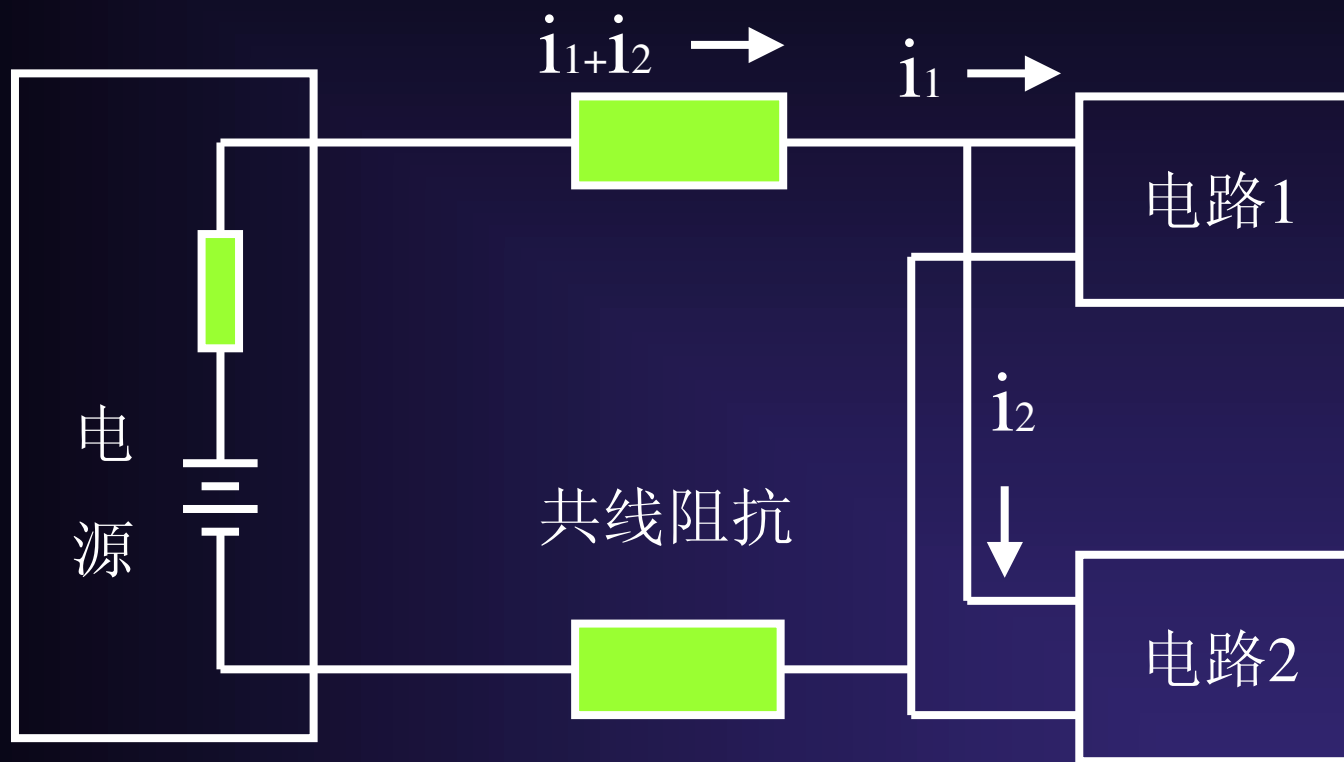
公共地阻抗耦合一

# 相关的EMC基础知识



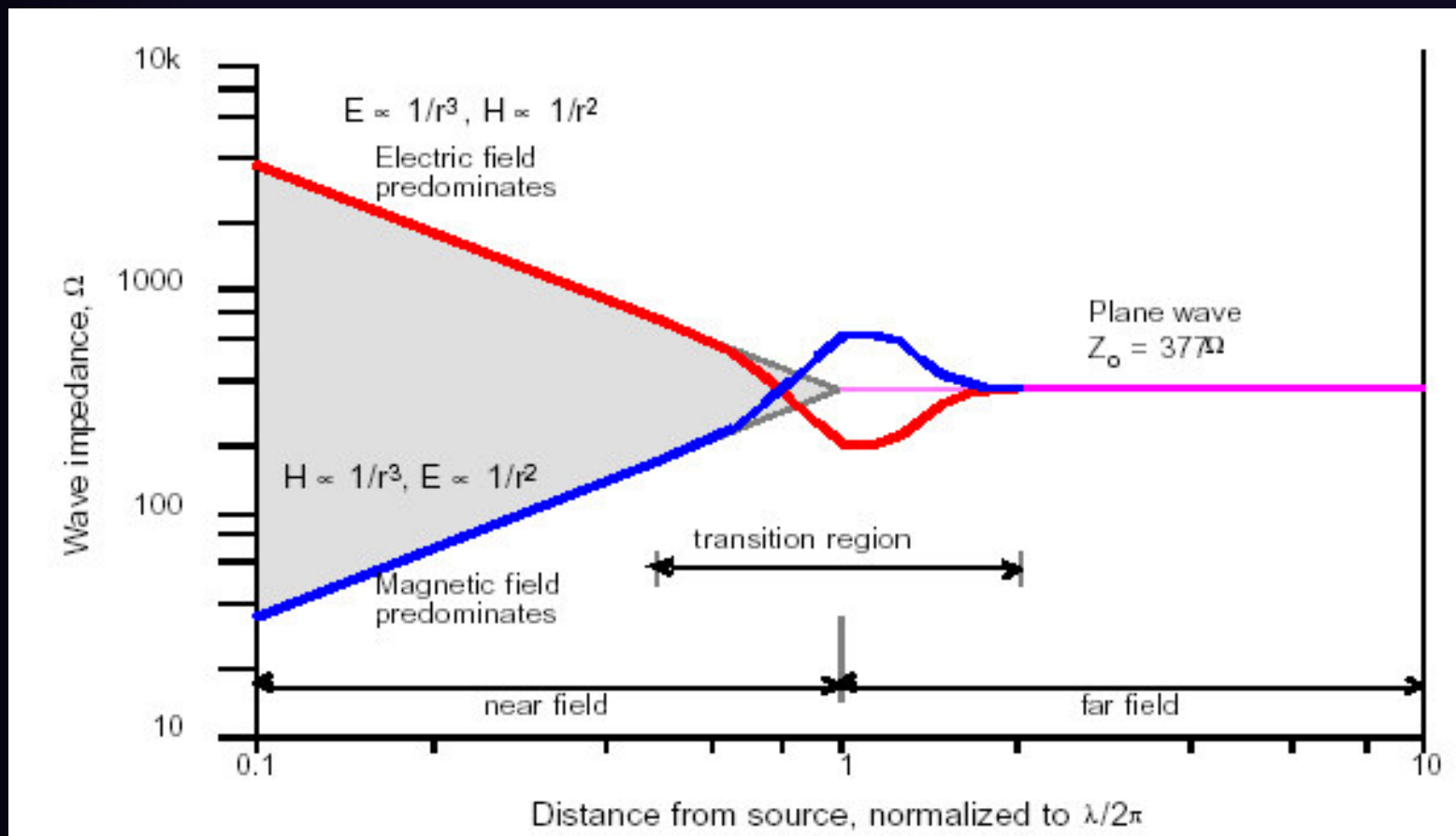
公共地阻抗耦合二

# 相关的EMC基础知识



共电源阻抗耦合

# 相关的EMC基础知识



$$\text{波阻抗 } Z = E/H$$

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

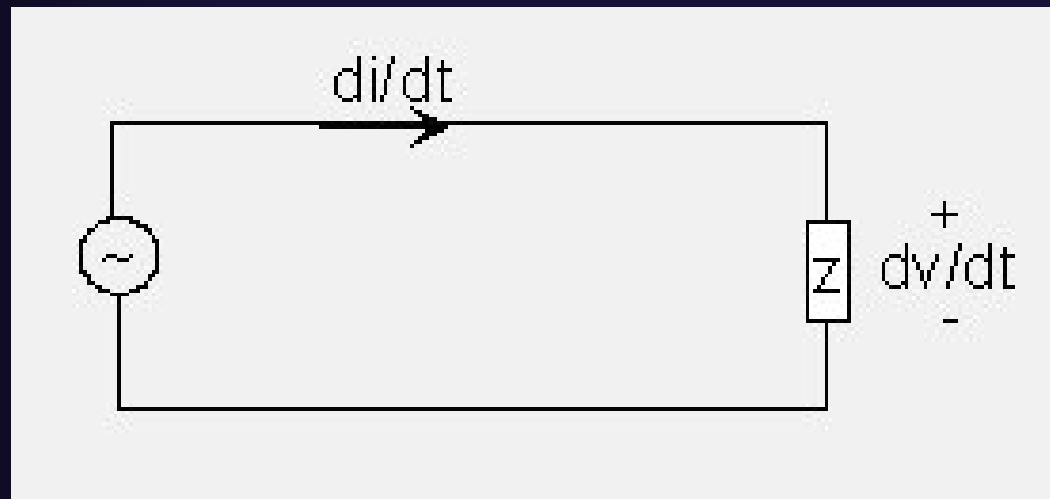
$Z_0(\text{磁})=120\pi (2\pi r / \lambda) \ll 377\ \Omega$

远场( $r \gg \lambda / 2\pi$ )

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

## 相关的EMC基础知识

- 辐射的产生原因不是因存在 $dv/dt$ 而产生电场，就是因为存在 $di/dt$ 而产生磁场



$$dv/dt = Z di/dt$$

如果Z很小，则 $di/dt \gg dv/dt$ ，为低阻抗场

如果Z很大，则 $di/dt \ll dv/dt$ ，为高阻抗场

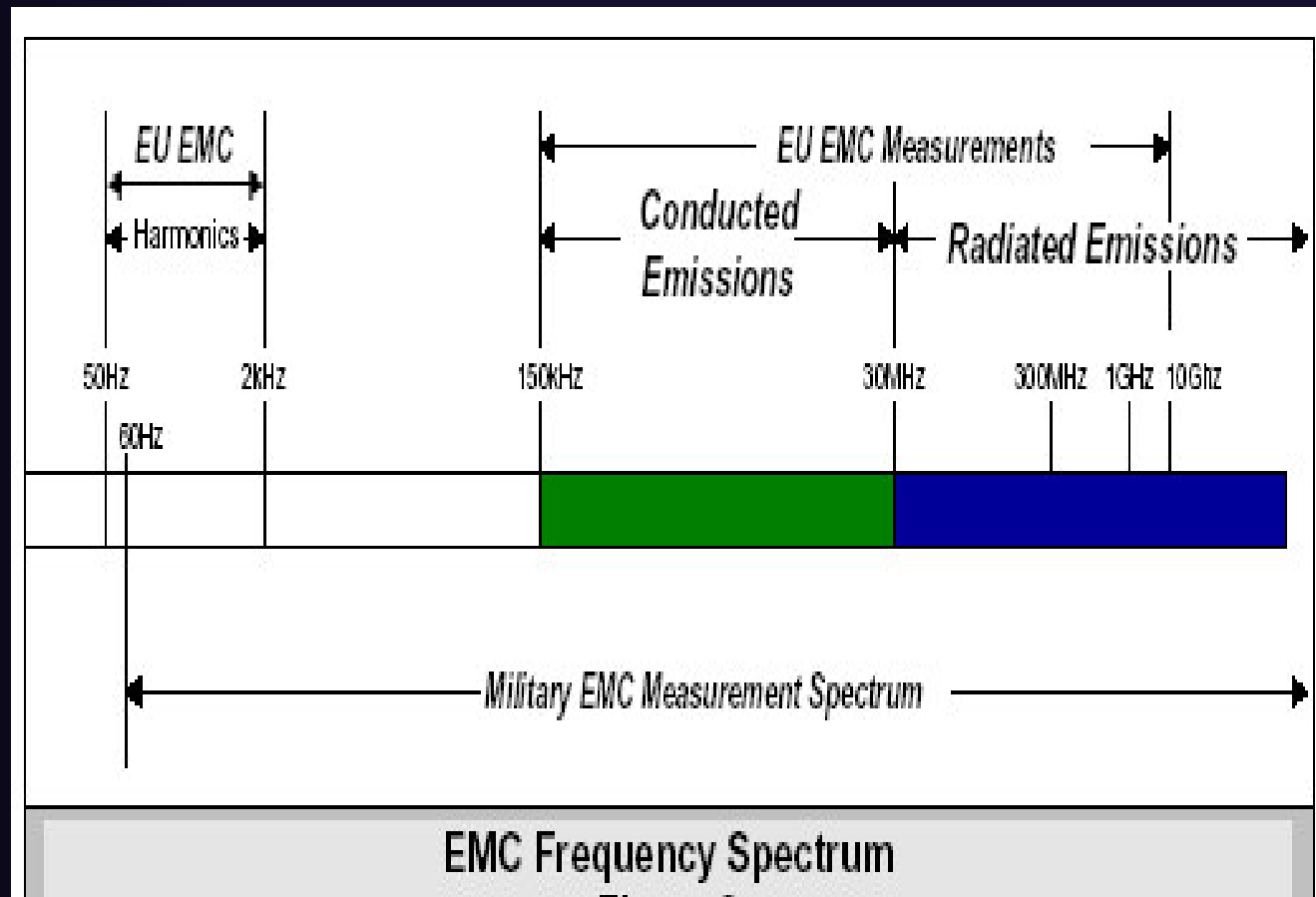


# 相关的EMC基础知识

- 一般磁场与差模电流有关，而电场与共模电流有关。
- 在近场区，辐射源阻抗高低将决定是电场占主要地位还是磁场占主要地位。
- 单极天线的近场为高阻抗场 ( $Z > Z_0$ )，以电场为主，通常由  $dv/dt$  引起的共模发射。
- 小环天线的近场为低阻抗场 ( $Z < Z_0$ )，以磁场为主，通常由  $di/dt$  引起的差模发射。

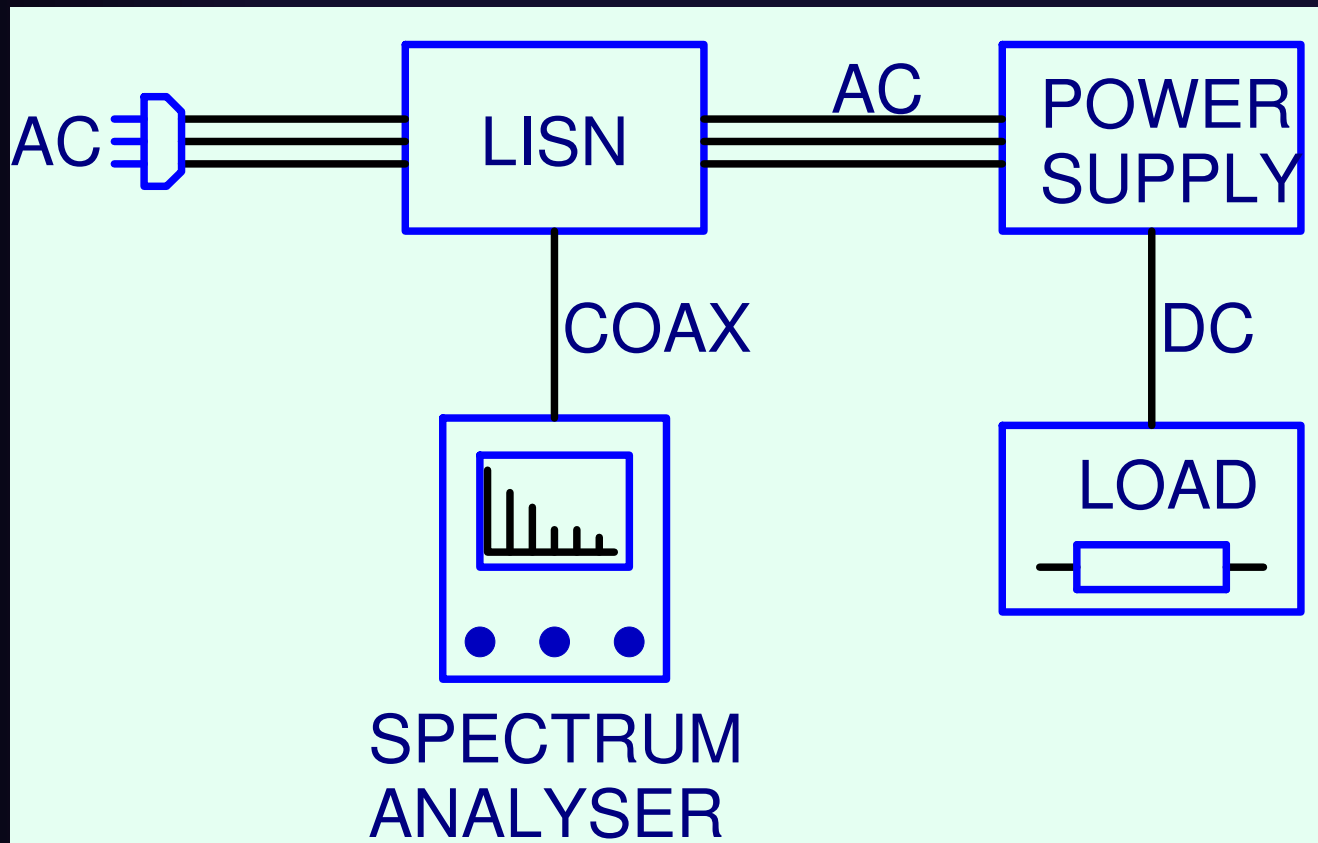
# EMC试验的原理

要产品通过CE/RE的测试，必须先弄明白其测试的原理



# EMC试验的原理

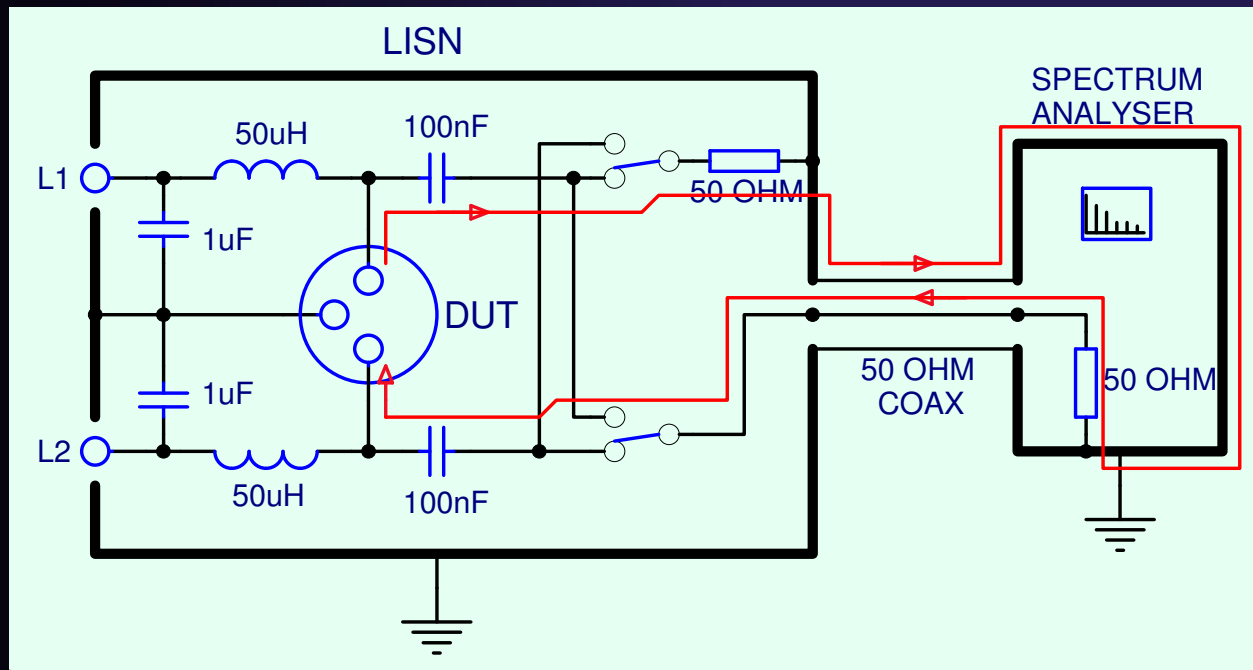
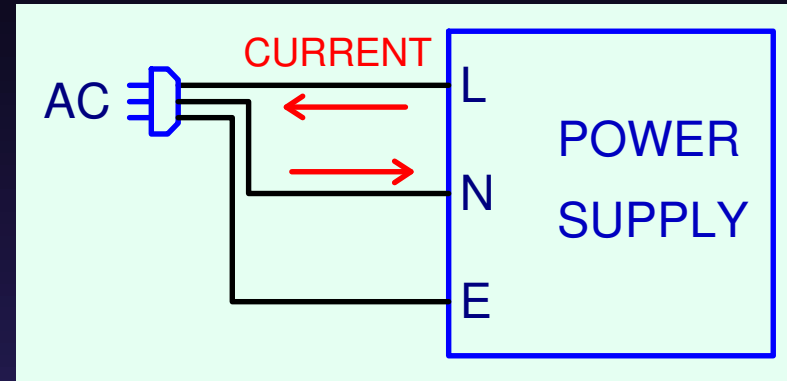
- 传导的测试配置（对AC输入端口）



# EMC试验的原理

- LISN测量的差模电流

- 当  $f \gg 150\text{KHz}$  时，从DUT端看进去LISN的测量阻抗为  $100\text{ ohm}$  ( $50 + 50$ )



### Impedances at 150KHz:

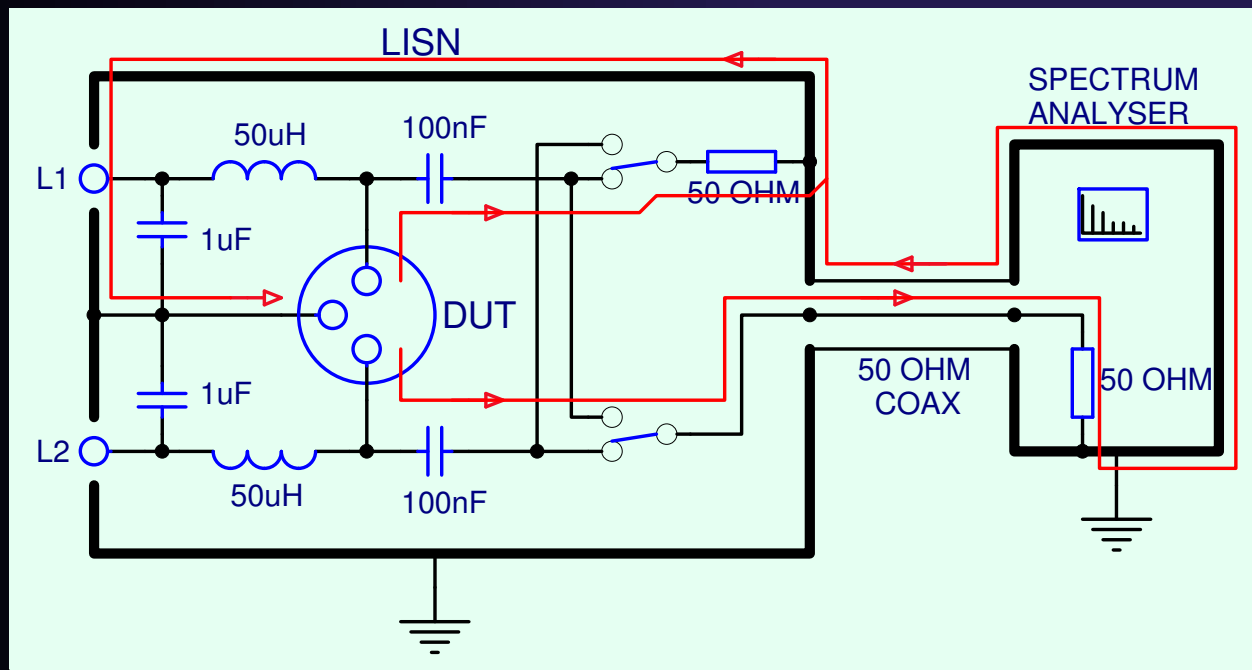
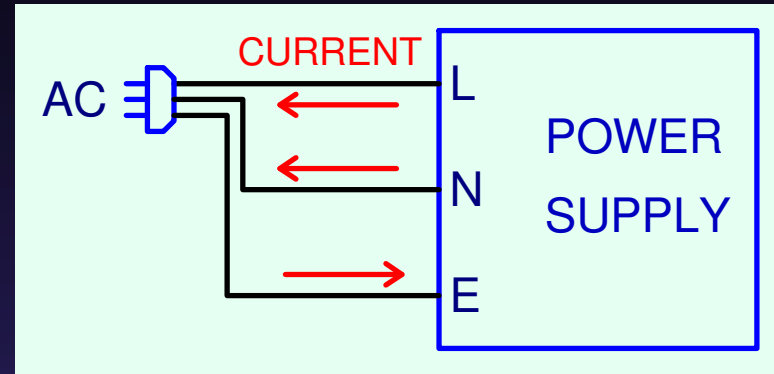
1uF:	1.06 ohm
50uH:	47 ohm
100nF:	10.6 ohm

50ohm dominates at high frequency

# EMC试验的原理

- LISN测量的共模电流

- 当  $f \gg 150\text{KHz}$  时，从DUT端看进去LISN的测量阻抗为25 ohm ( $50 // 50$ )



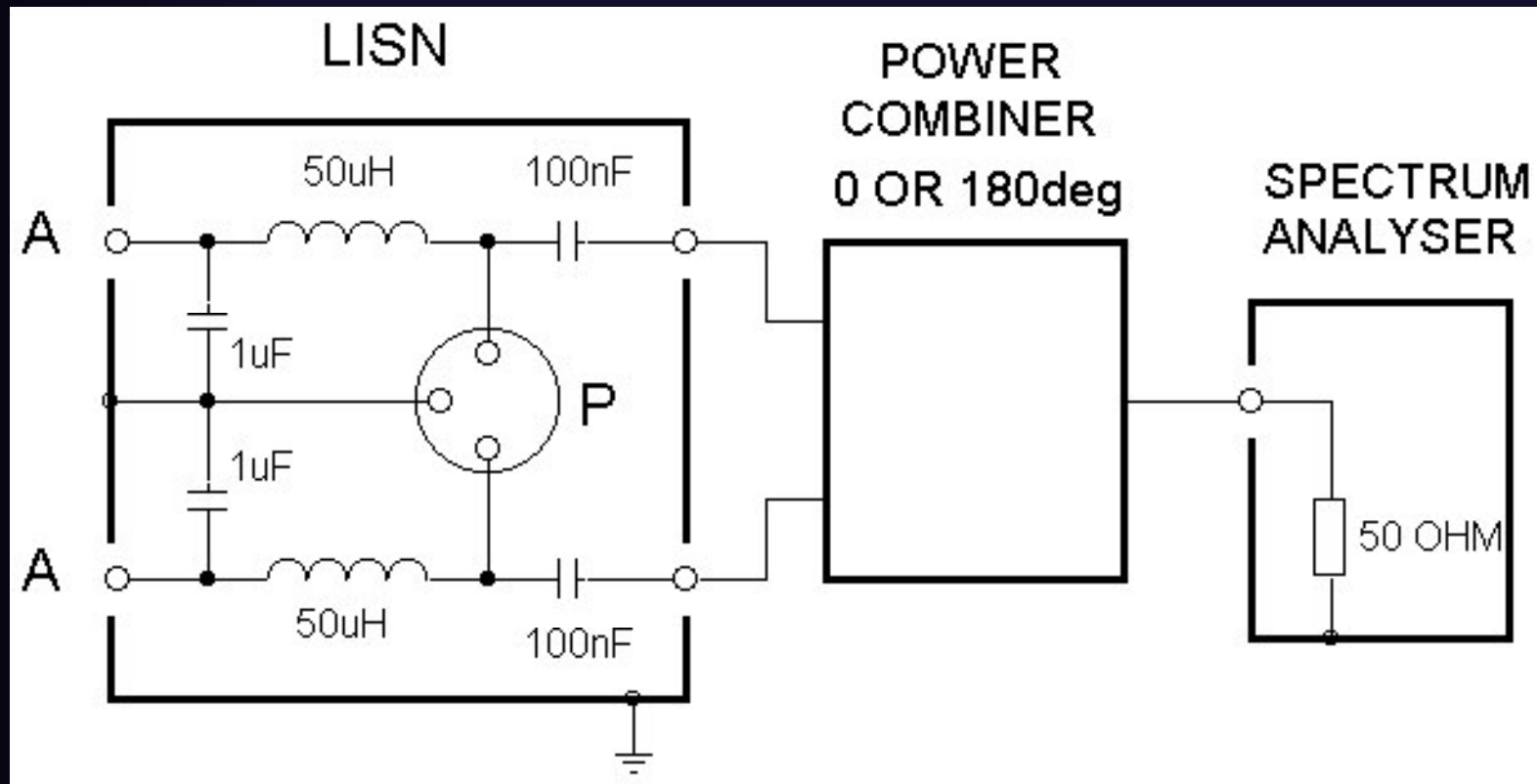
### Impedances at 150KHz:

1uF:	1.06 ohm
50uH:	47 ohm
100nF:	10.6 ohm

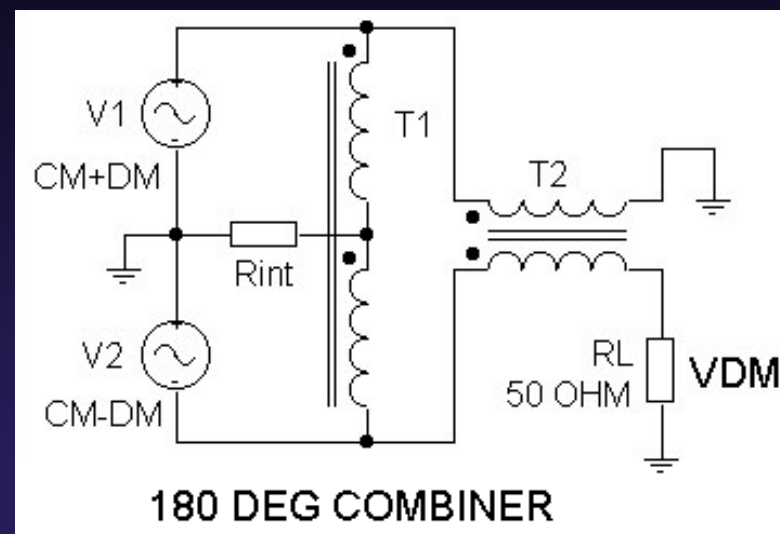
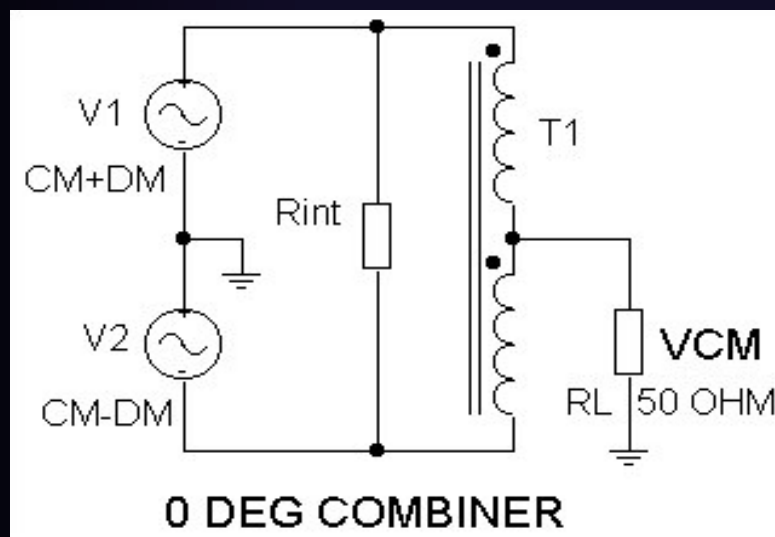
50ohm dominates at high frequency

# EMC试验的原理

- 分离共模和差模噪声的方法

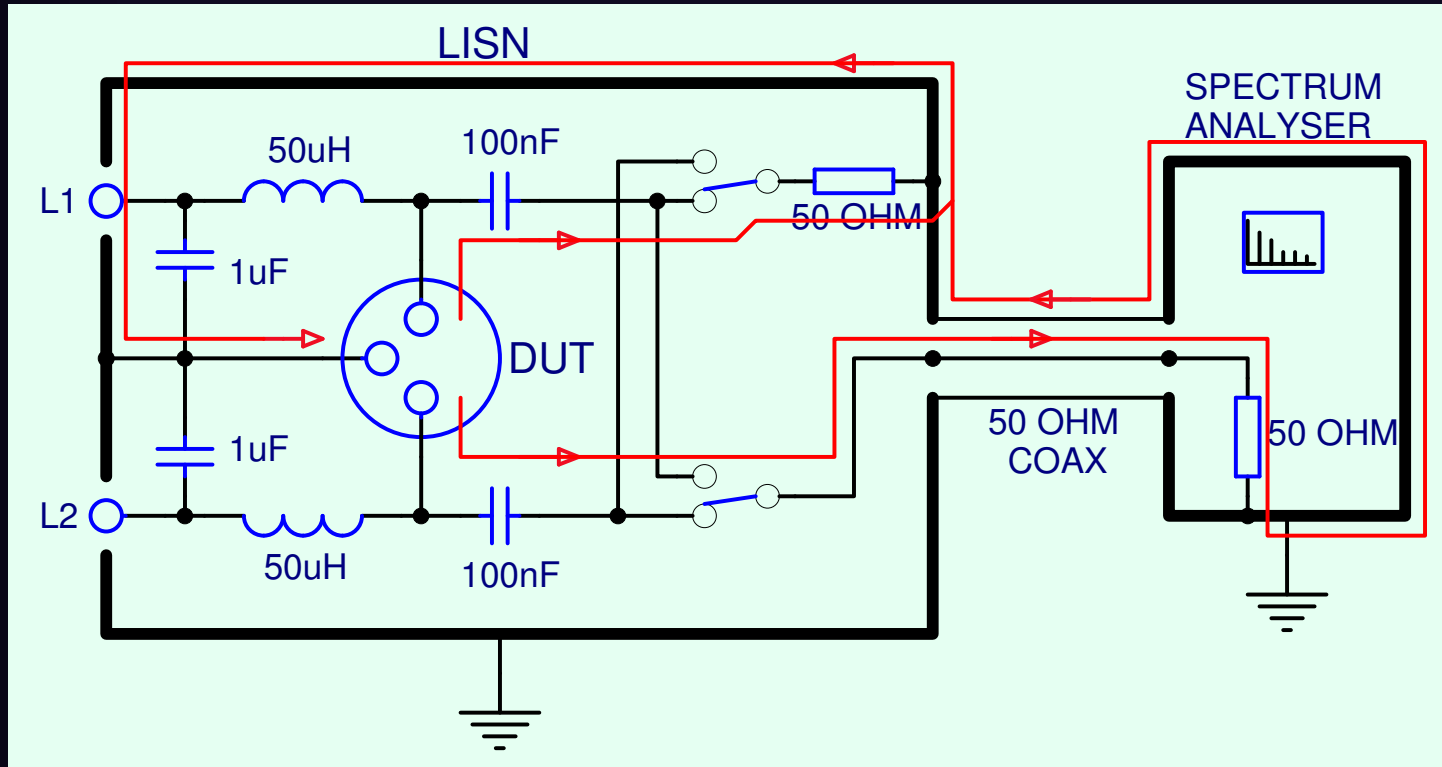


# EMC试验的原理



需要一台双端口输入的LISN

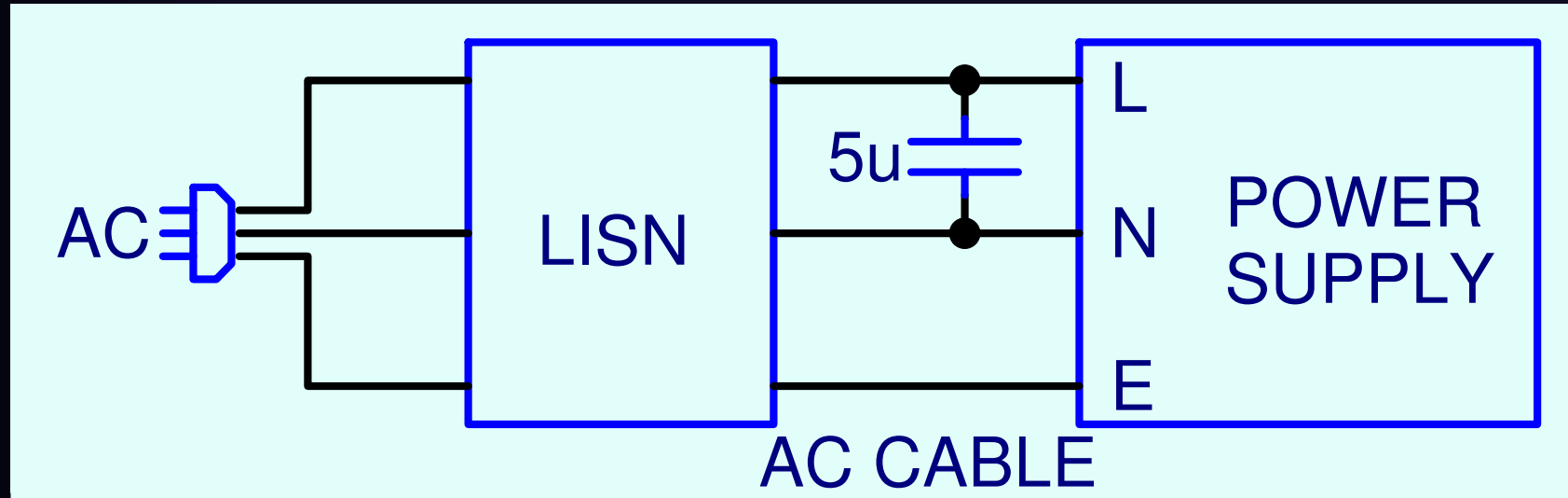
# EMC试验的原理



- 断开电源端口的PE，阻止共模电流
- 如果LISN或者DUT有另外的接地
- DUT对地之间的分布电容



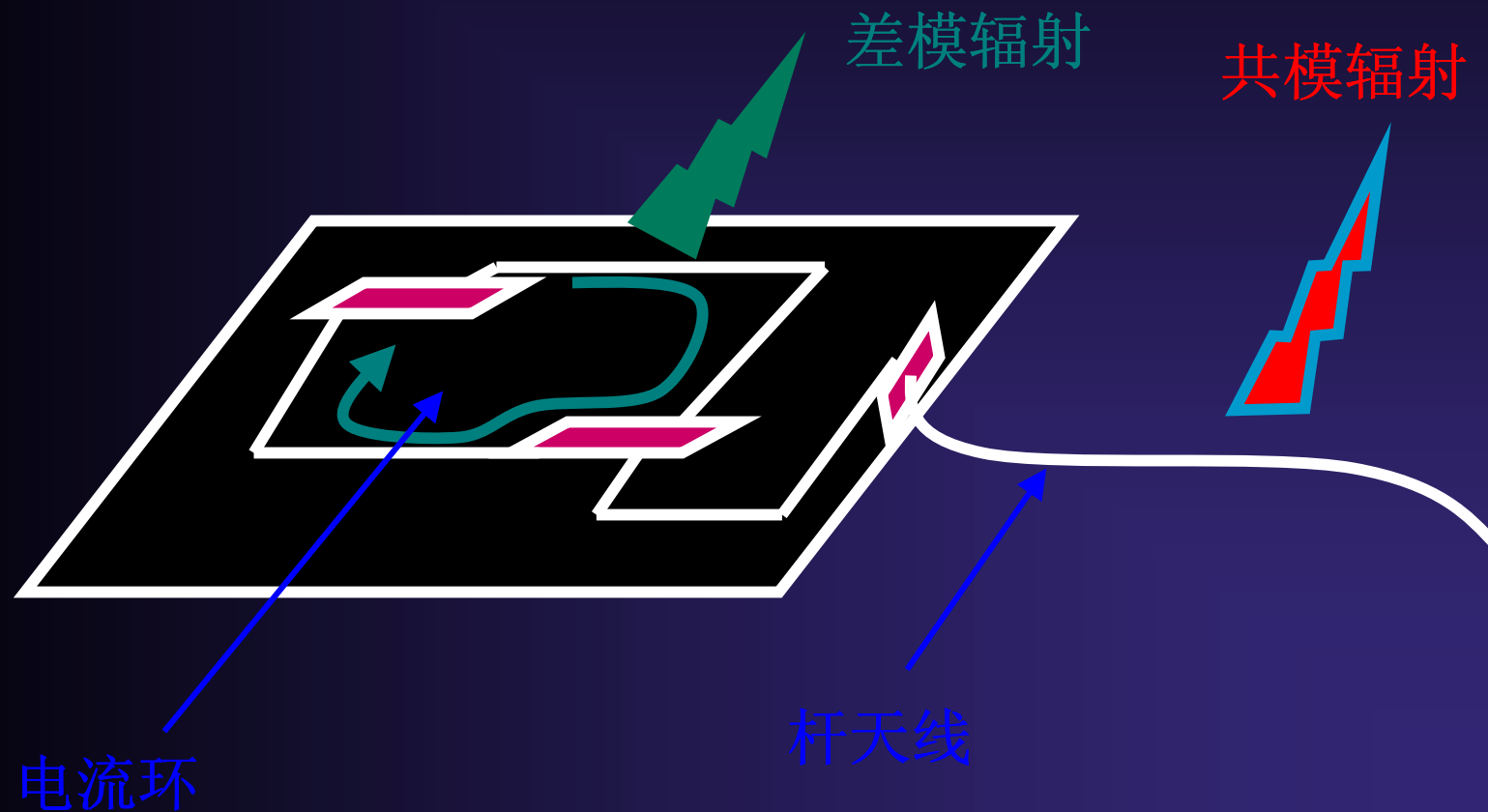
# EMC试验的原理



- 在DUT外加一个大的差模电容，短路差模电流
- 主要看到的是共模成分

# 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。



# EMC试验的原理

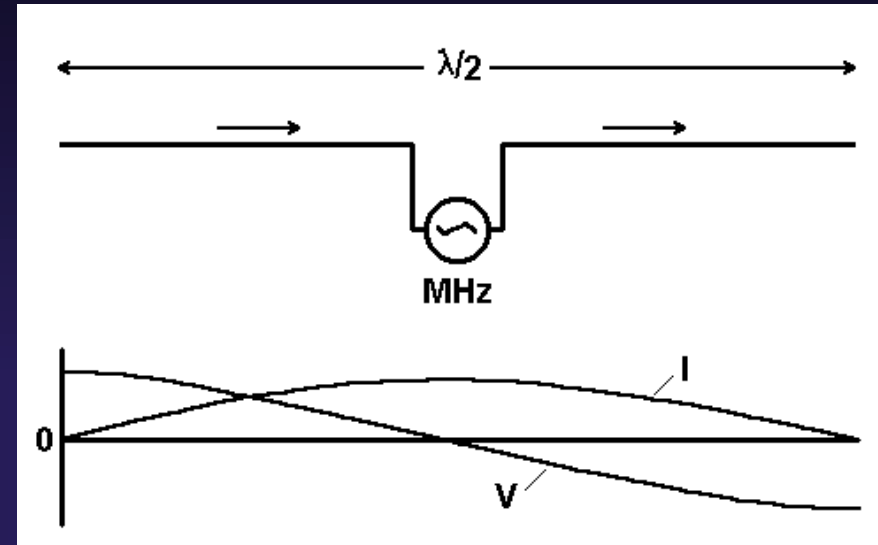
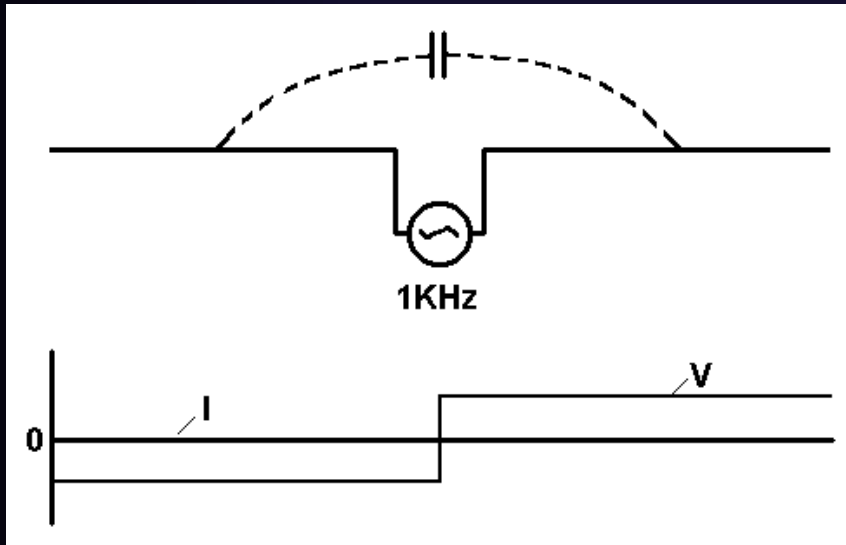
**差模电流** 流过电路中的导线环路时，将引起差模辐射。这种环路相当于小环天线，能向空间发射辐射磁场，或接收磁场。因此，必须限制环路的大小和面积。

**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

# 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

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

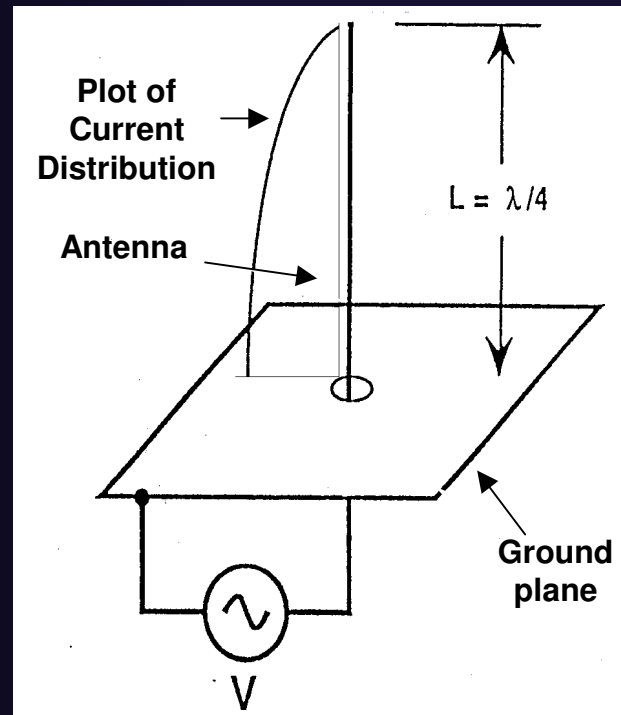
- Examples:

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

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

# EMC试验的原理

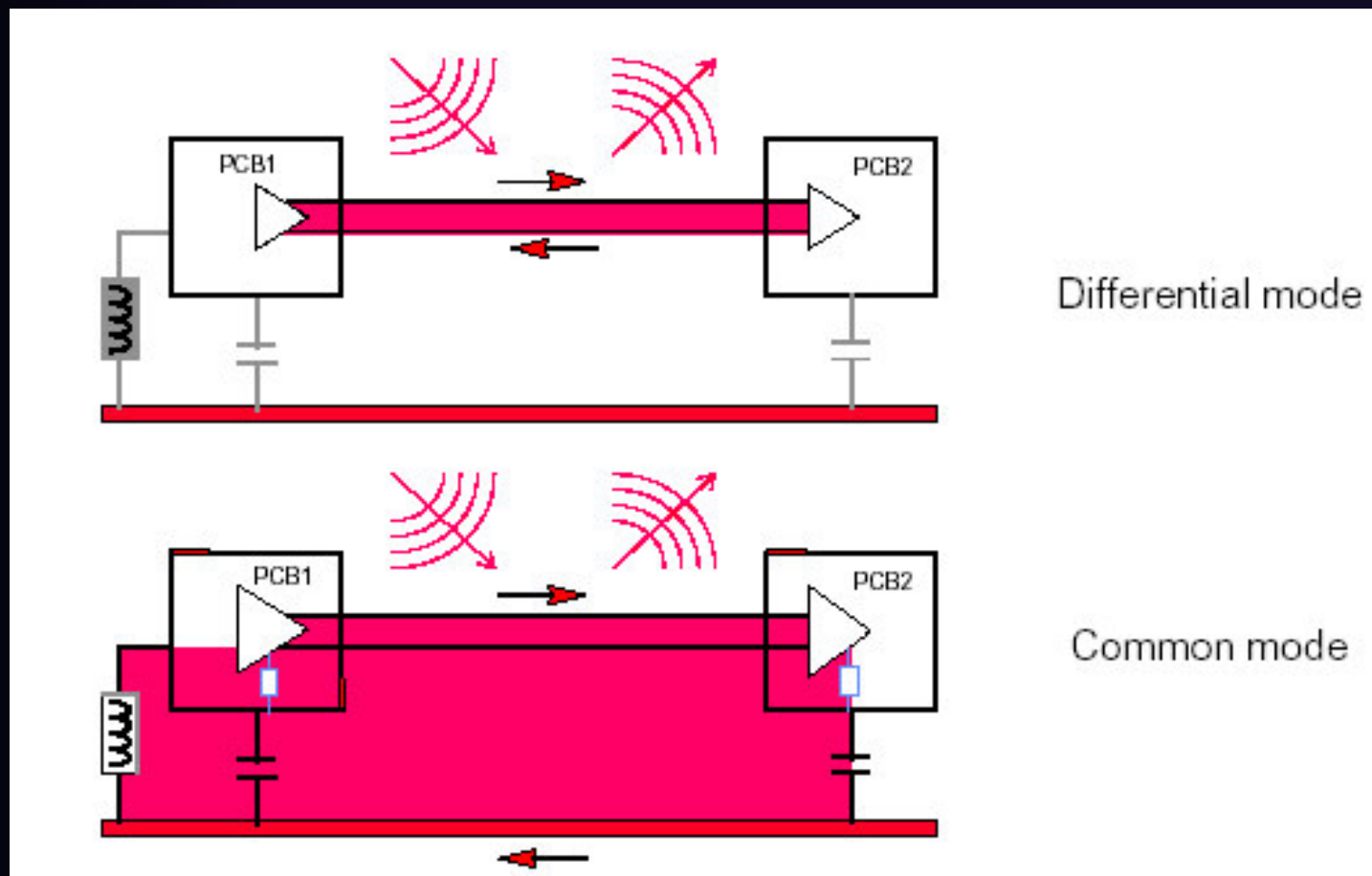
- 单极子天线



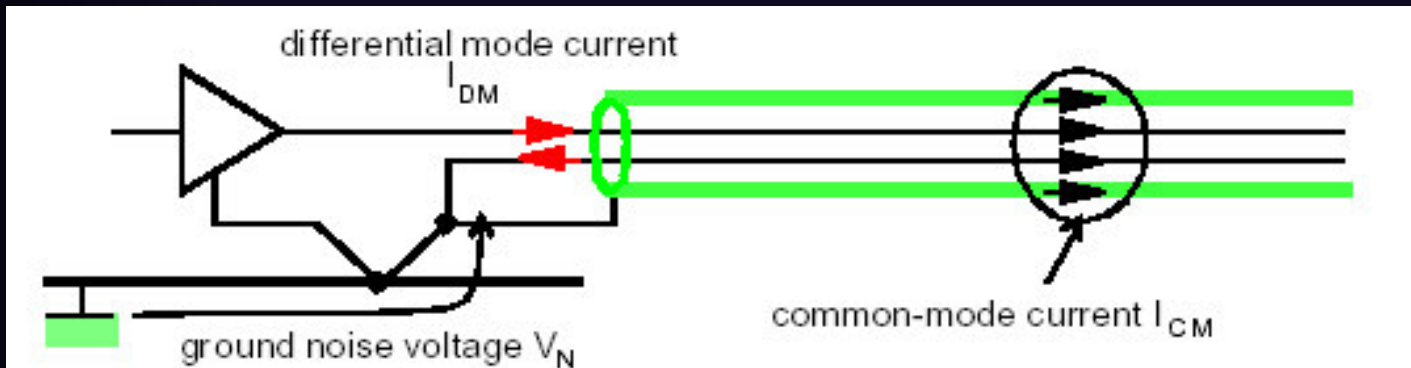
$$Z=V/I$$

在天线端处具有  
很高的阻抗，尤  
其当V大时

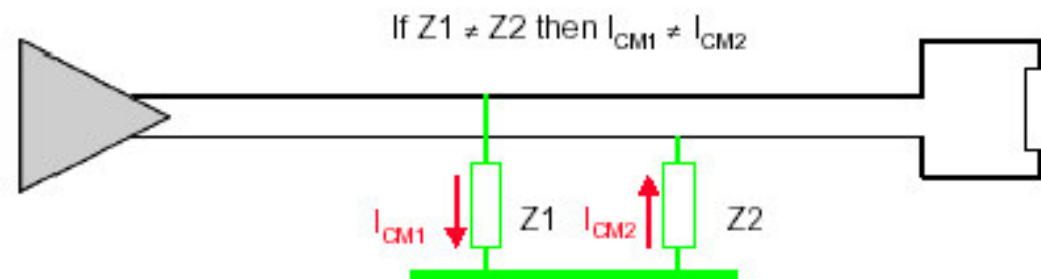
# EMC试验的原理



# EMC试验的原理



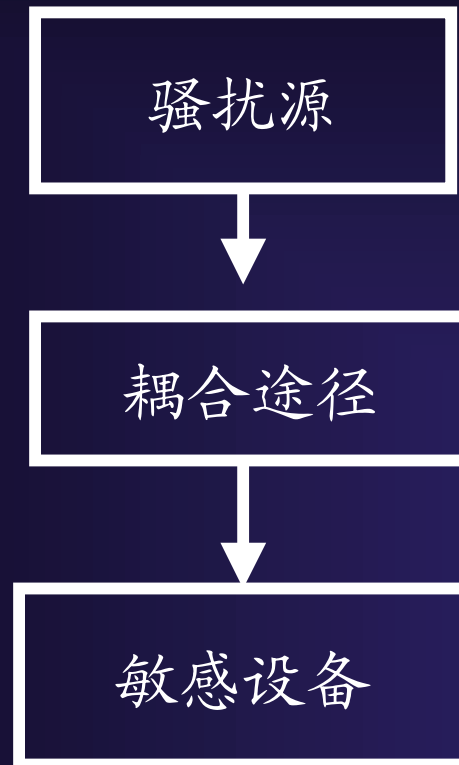
A common but mistaken cable screen connection couples ground noise out



Longitudinal (differential to common mode) conversion

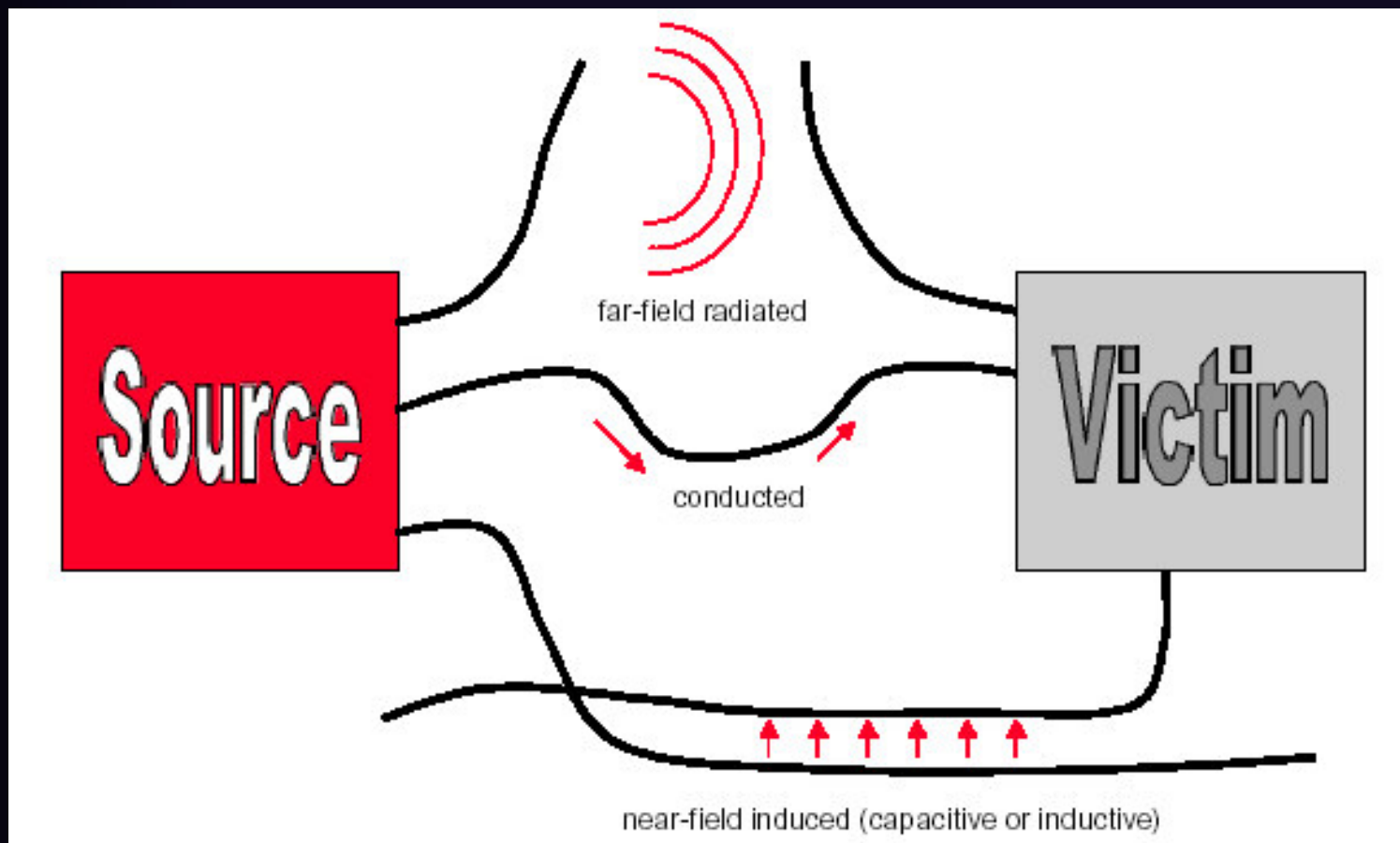
# EMI试验结果的分析

- 电磁干扰的三要素





# EMI试验结果的分析



## 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

# 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

# 减小开关电源EMI的方法

当差模辐射用小环天线产生的辐射来模拟时，可设环电流为I，环面积为S，在距离为 $\gamma$ 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<sup>2</sup>)                                I: 电流 (A)

$\gamma$ : 距离 (m)

$\theta$ : 测量天线与辐射平面的夹角 (°)

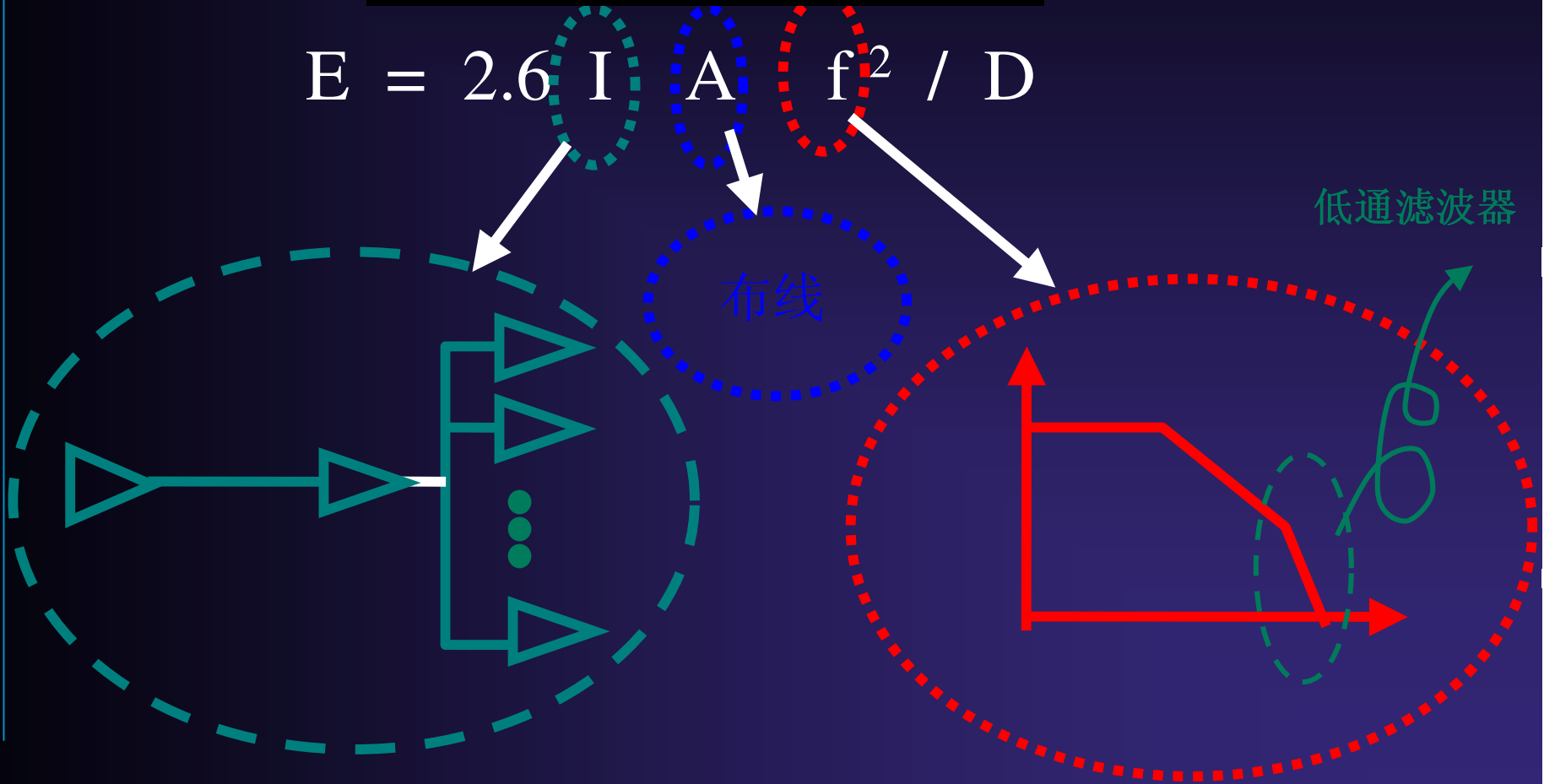
差模辐射与环电流和环面积成正比，与频率的平方成正比。因此，可采用下述三种方法控制差模辐射：

- 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。

# 减小开关电源EMI的方法

## 怎样减小差模辐射

$$E = 2.6 I A f^2 / D$$



# 减小开关电源EMI的方法

共模辐射可用对地电压激励的、长度小于1/4波长的短单极子天线来模拟。

对于接地平面上长度为 $l$ 的短单极天线来说，在远场 $\gamma$ 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）。

共模辐射与频率 $f$ 、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 $I$ 是减小共模辐射的基本方法。

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。

# 减小开关电源EMI的方法

## 怎样减小共模辐射

$$E = 1.26 I L f / D$$

共模滤波

共模扼流圈

减小共模电压

使用尽量  
短的电缆

共模滤波

电缆屏蔽

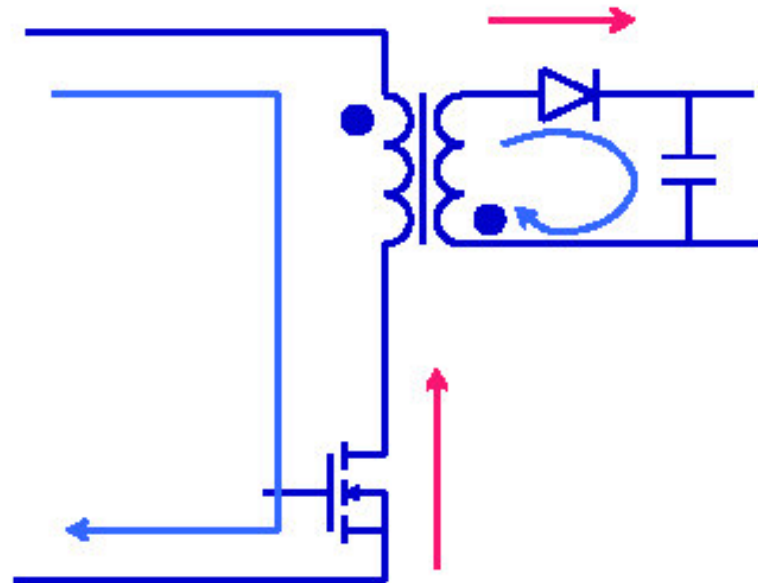
***Any Short Question***

Take a break?



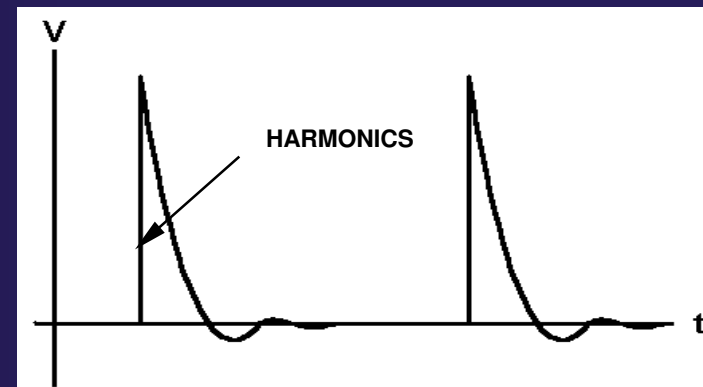
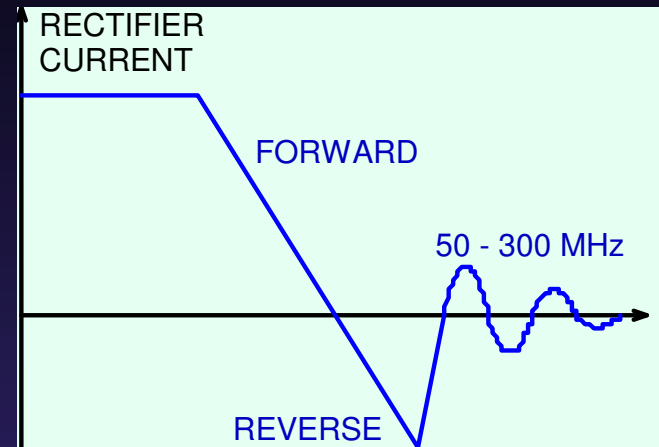
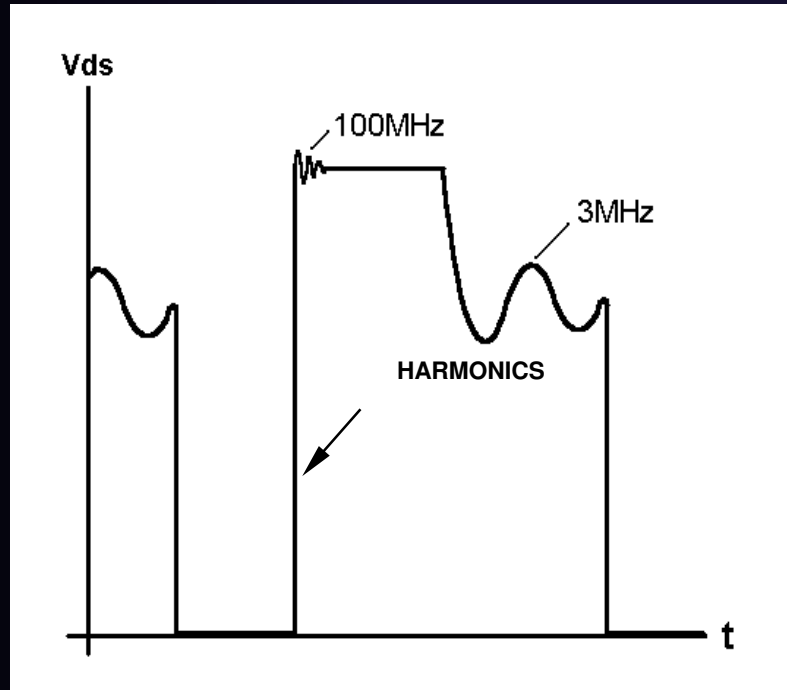
# 开关电源噪声源分析和对策

- 开关电源噪声源的来源

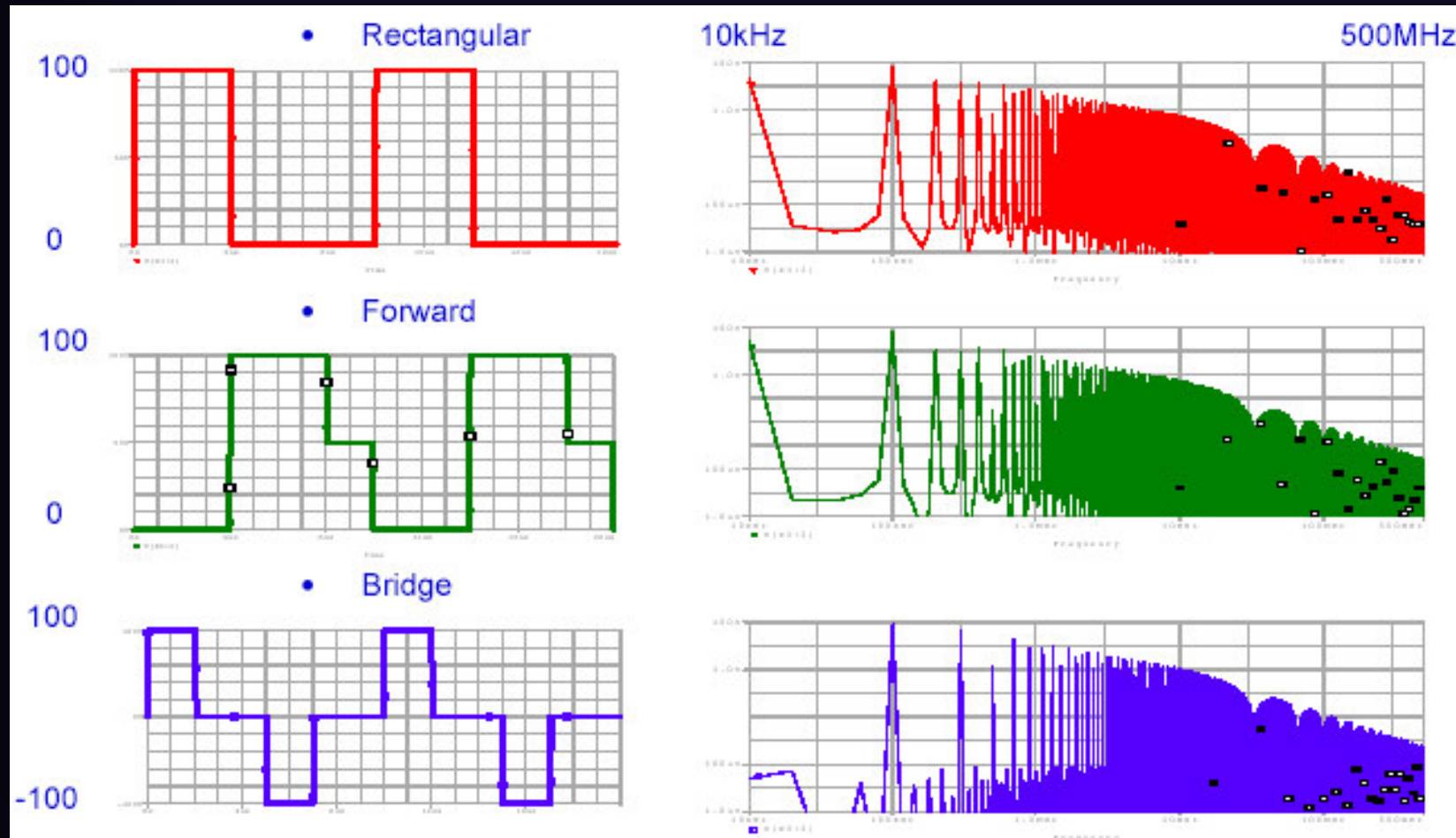


- Switching voltage and current waveforms in a switching power supply

# 开关电源噪声源分析和对策

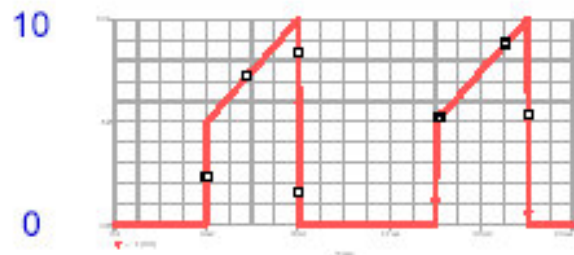


# 开关电源噪声源分析和对策



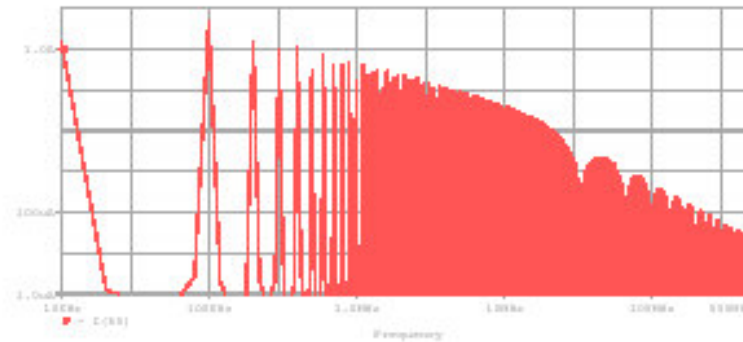
# 开关电源噪声源分析和对策

- Continuous Flyback

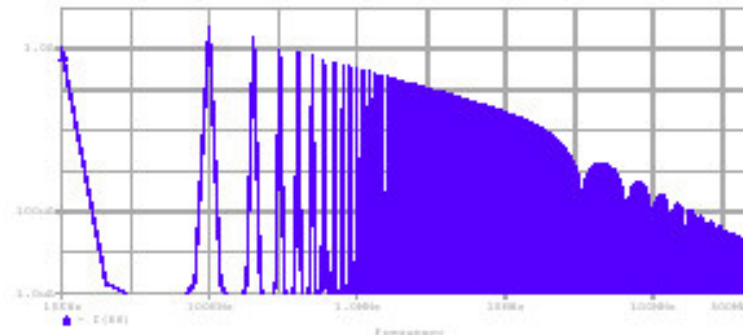
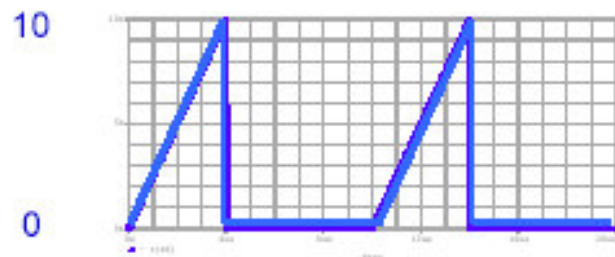


10kHz

500MHz

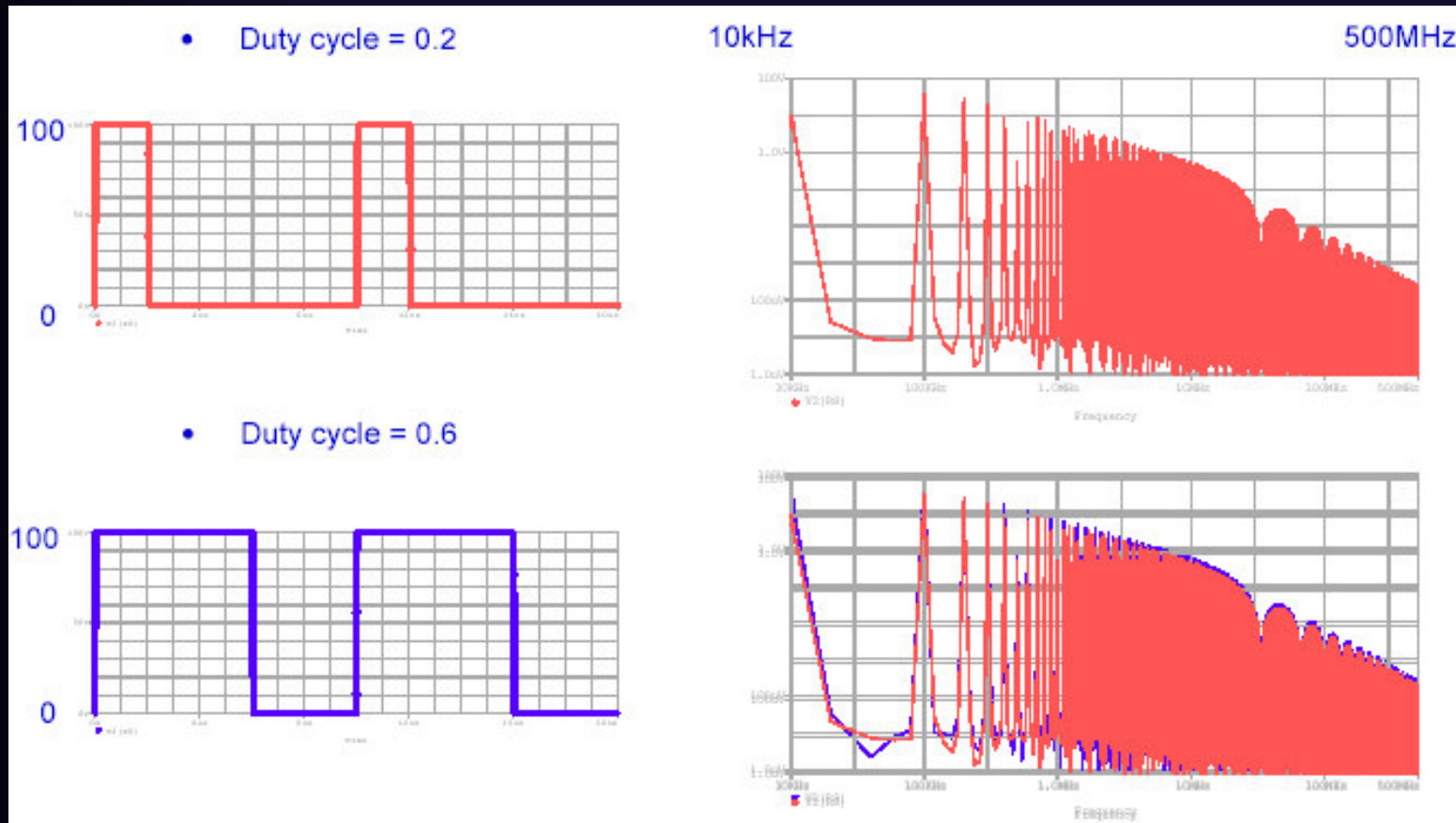


- Discontinuous Flyback



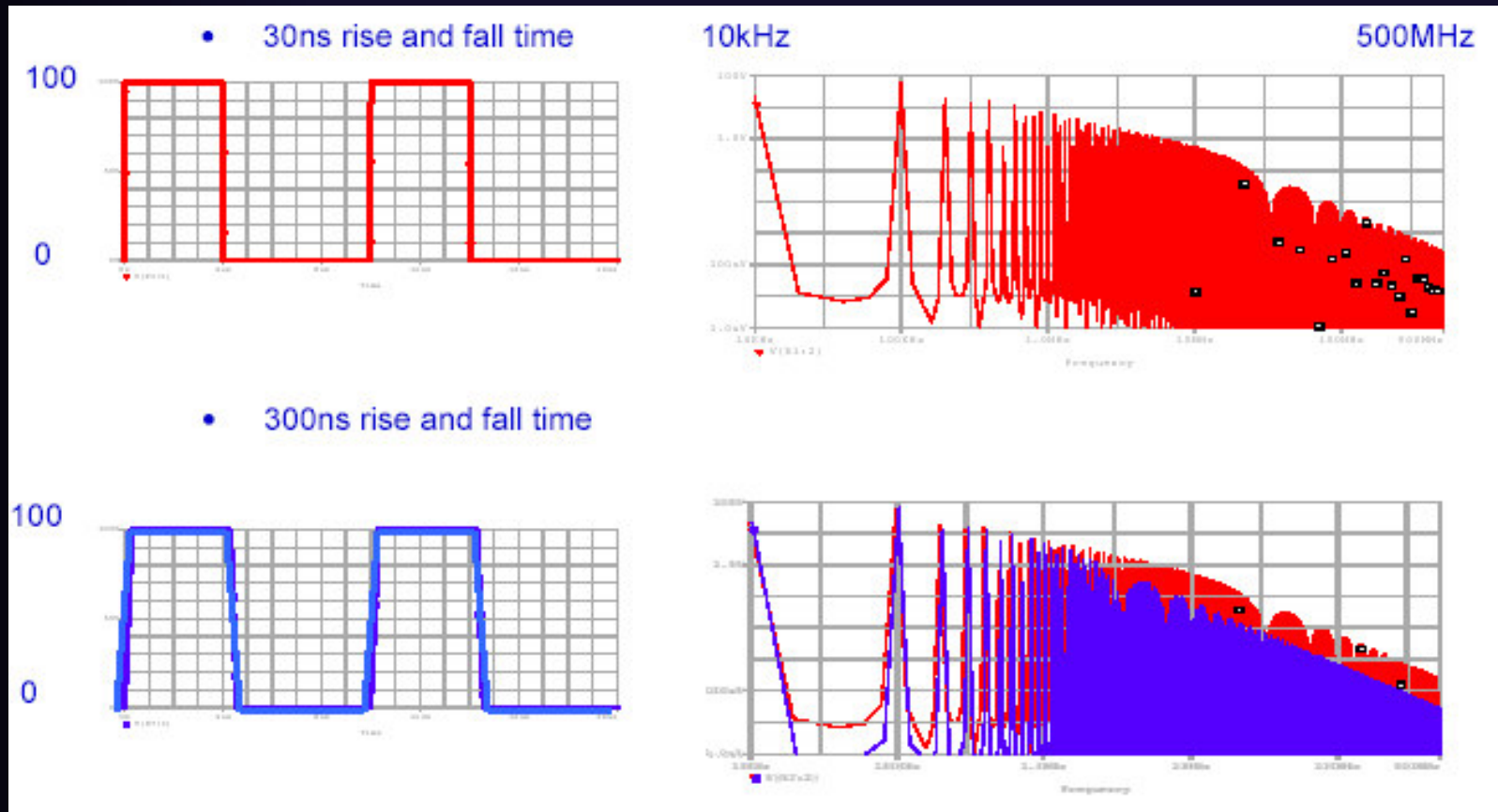
# 开关电源噪声源分析和对策

- Duty cycle的影响

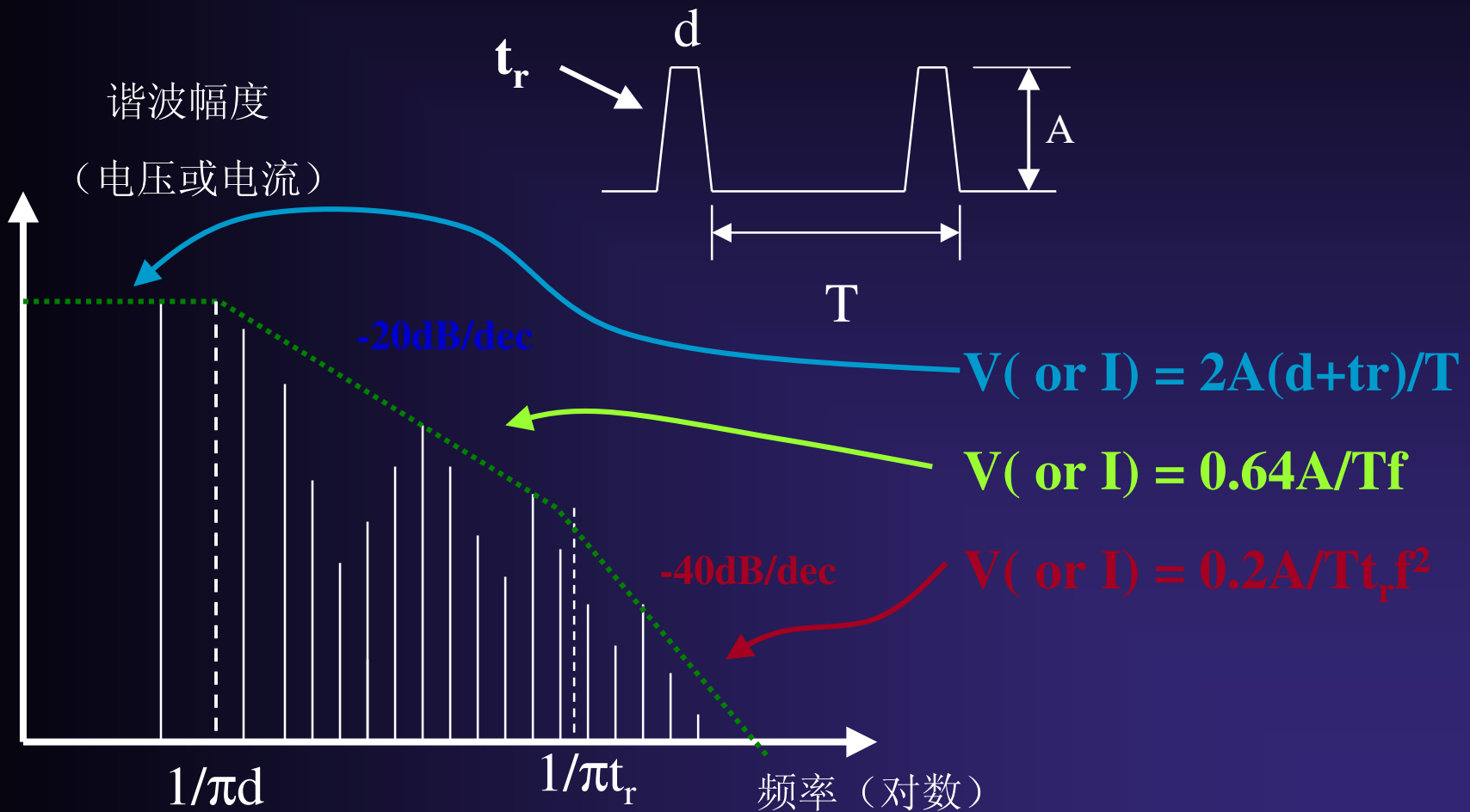


# 开关电源噪声源分析和对策

- 上升沿/下降沿的影响

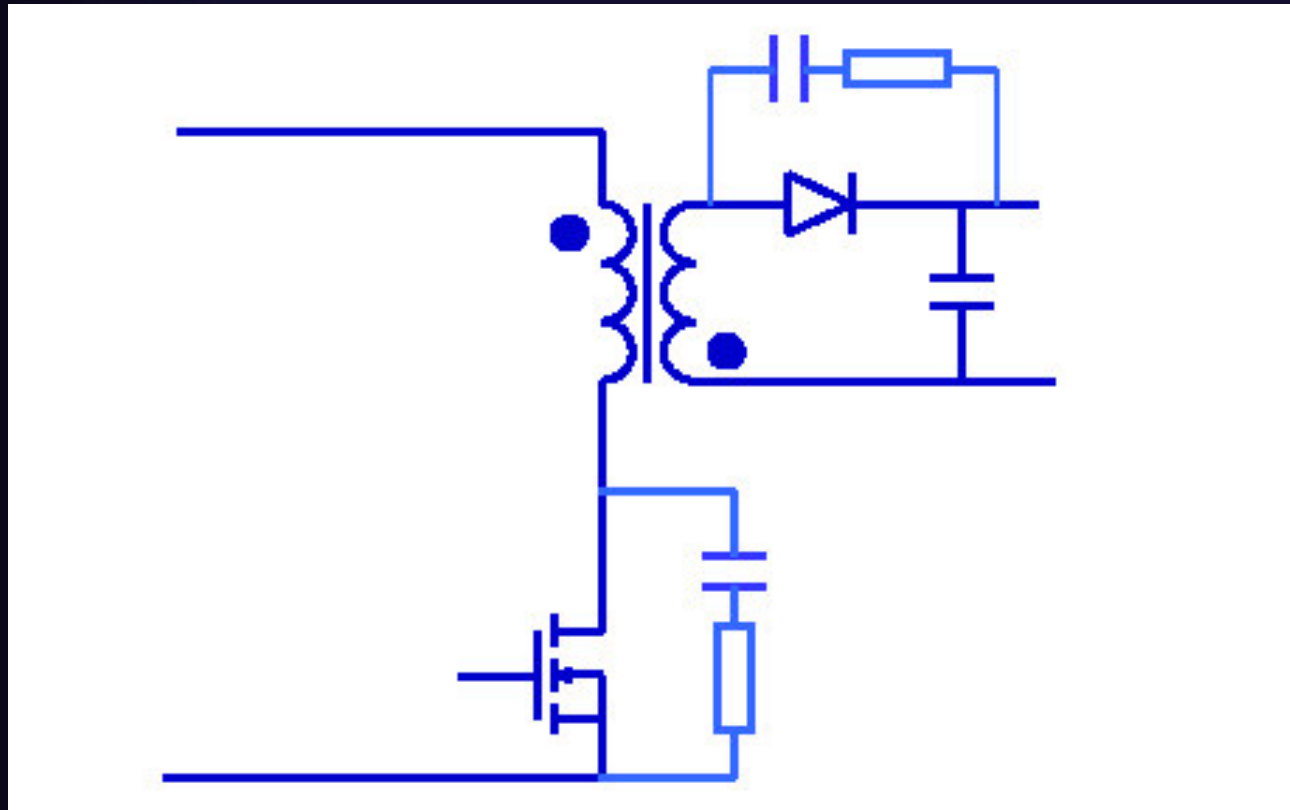


# 开关电源噪声源分析和对策



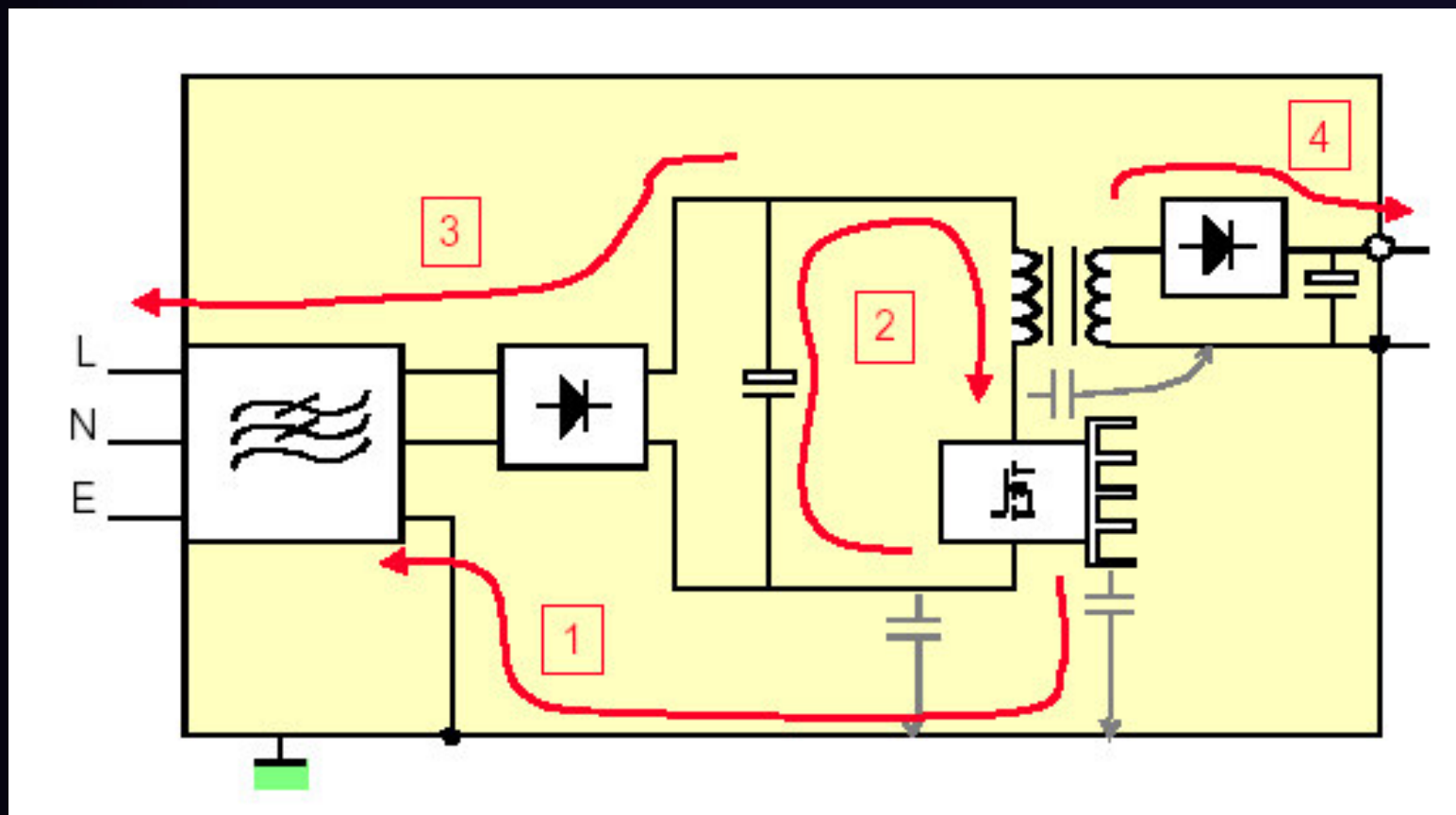
# 开关电源噪声源分析和对策

- Snubber吸收电路可以减小 $dv/dt$



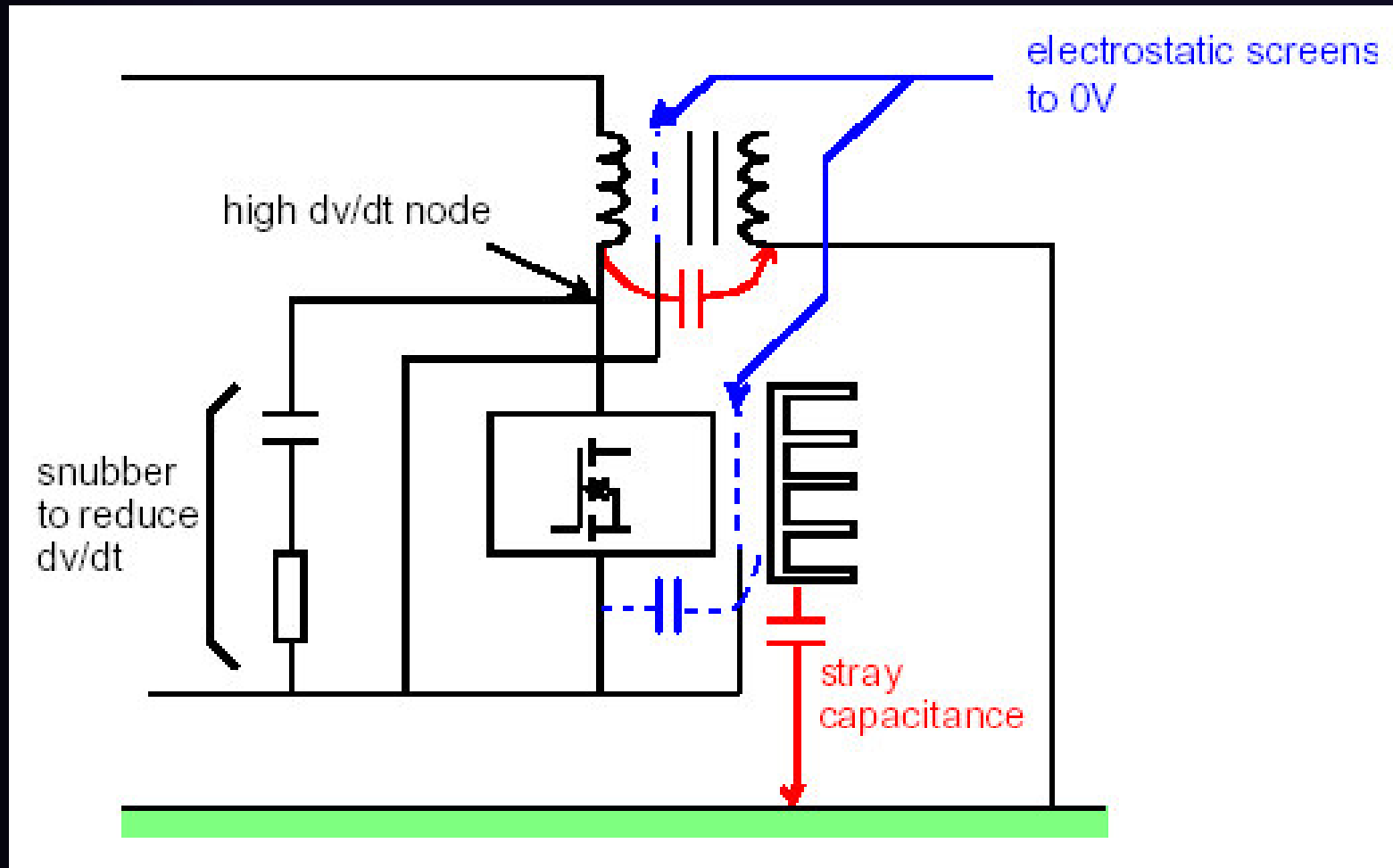


# 开关电源噪声源分析和对策



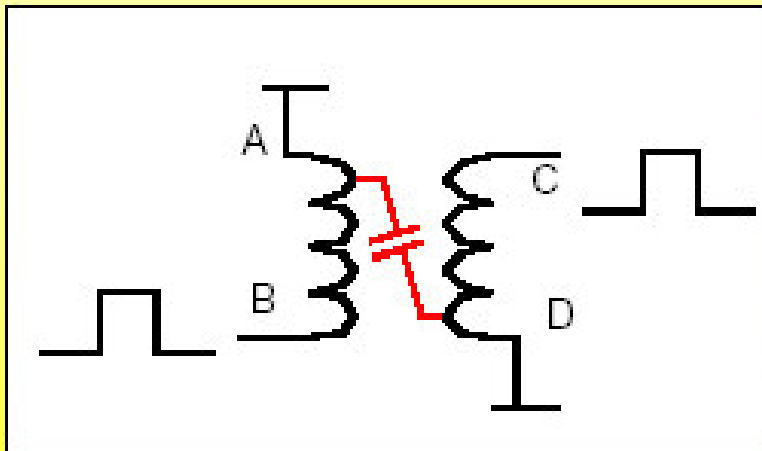
几处典型的噪声源

# 开关电源噪声源分析和对策

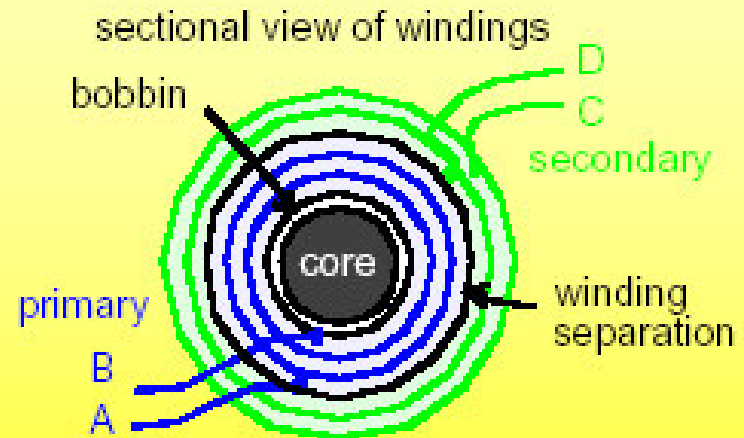


由大的dv/dt引起的高阻抗源的共模发射

# 开关电源噪声源分析和对策



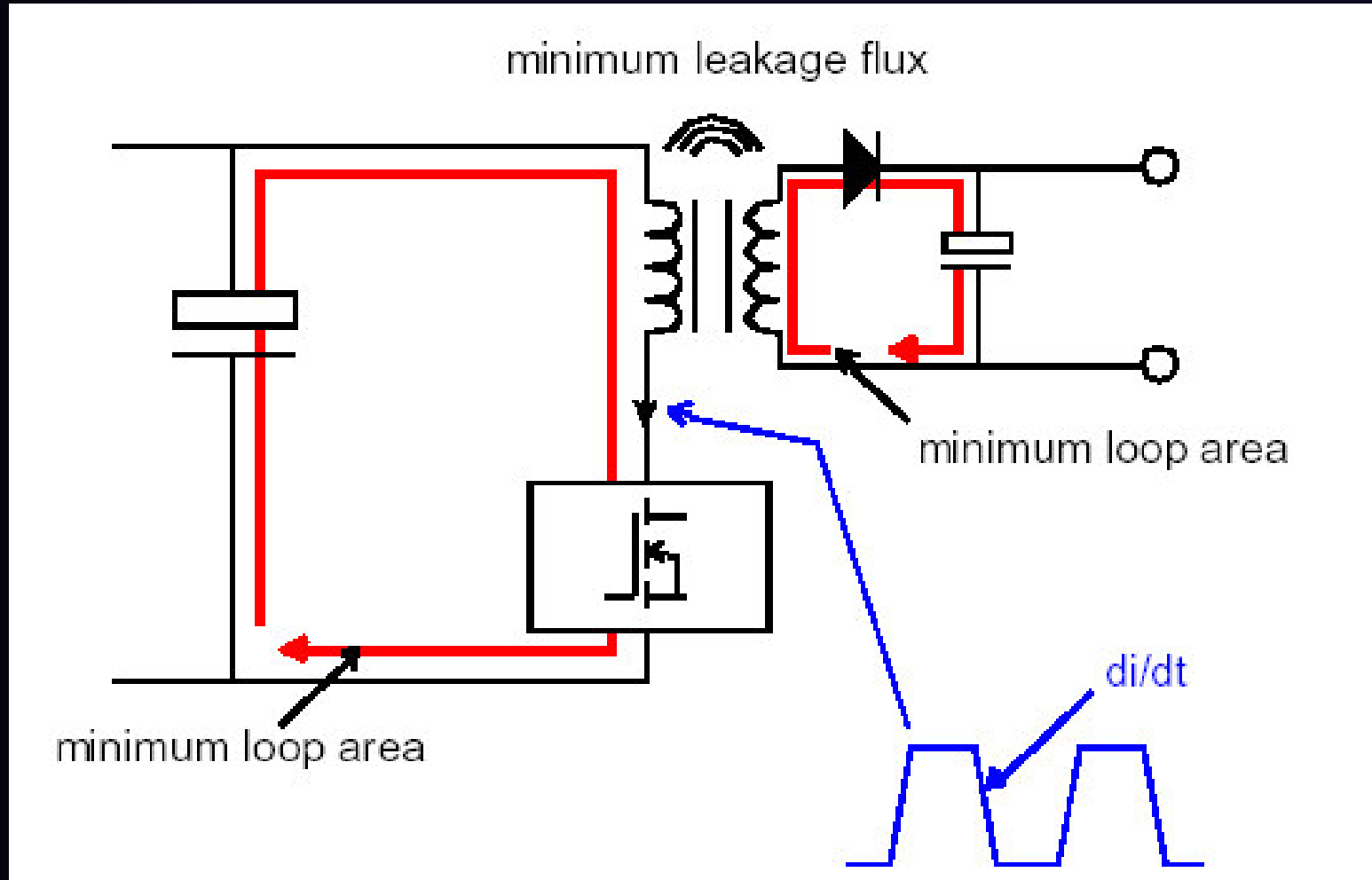
electrical circuit must include inter-winding capacitance



interwinding capacitance dominated by low  $dv/dt$  layers A and D

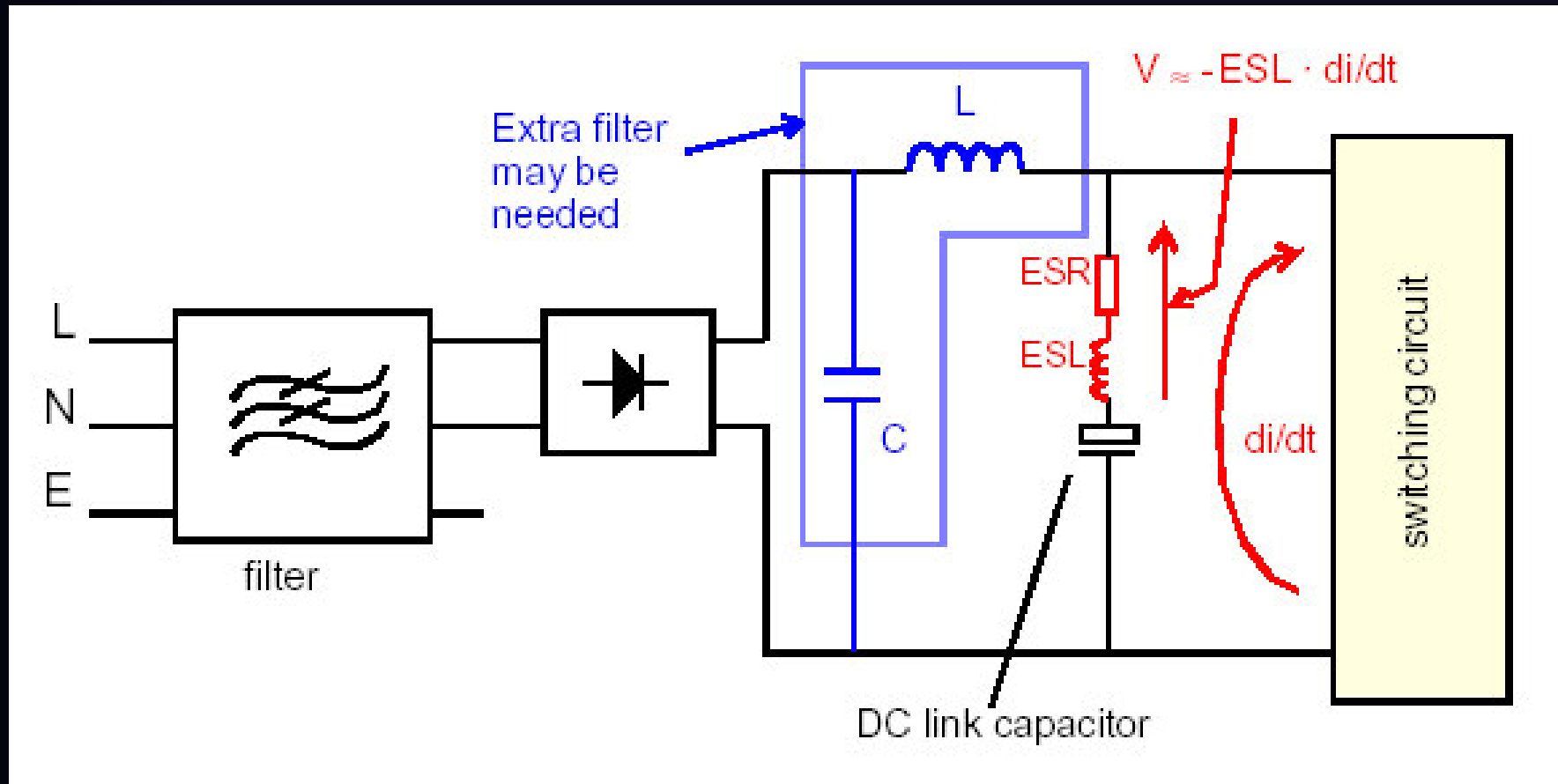
一个偶极子天线

# 开关电源噪声源分析和对策



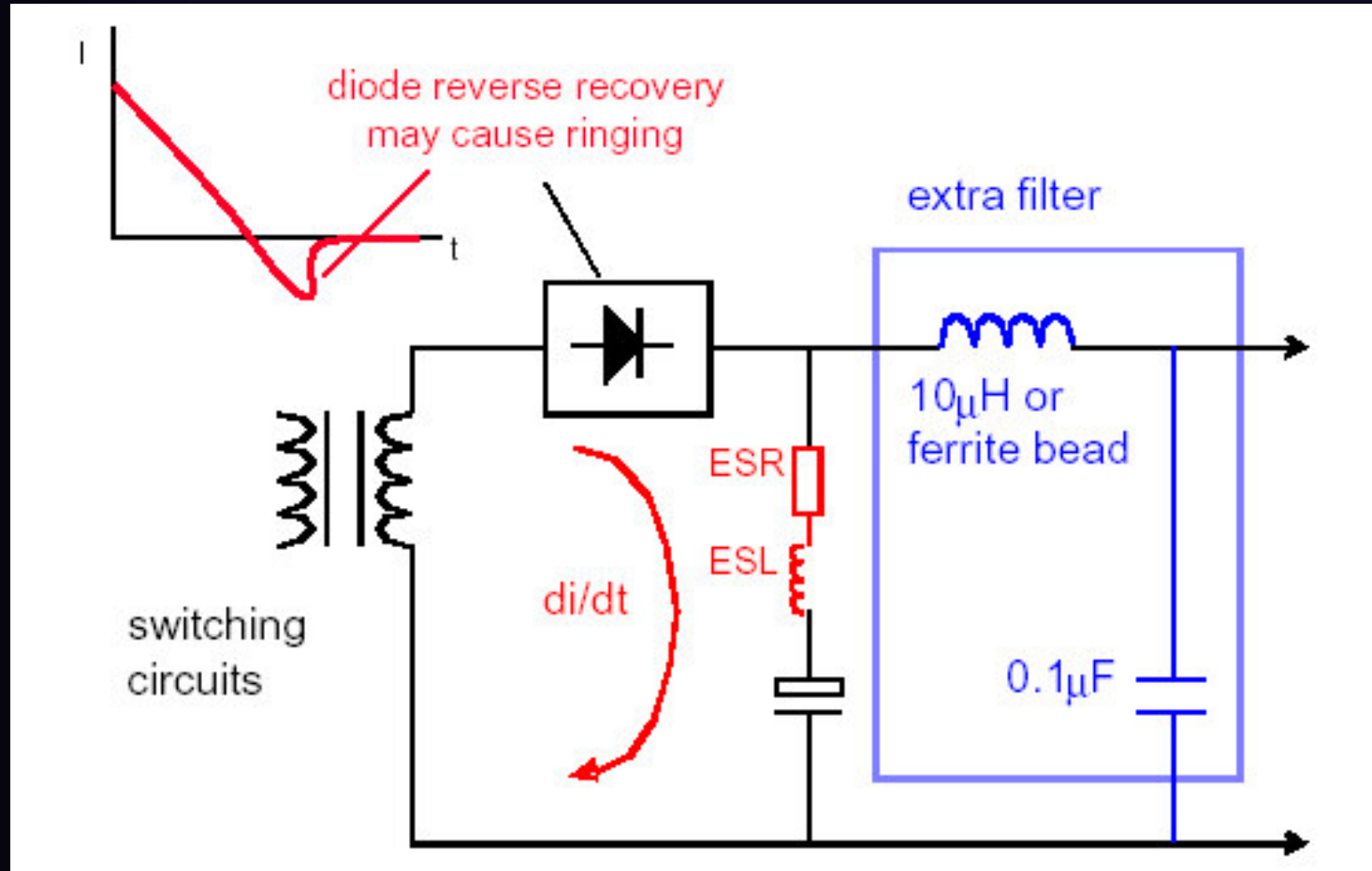
由大 $di/dt$ 引起的环路磁场差模发射

# 开关电源噪声源分析和对策



传导形式的差模发射

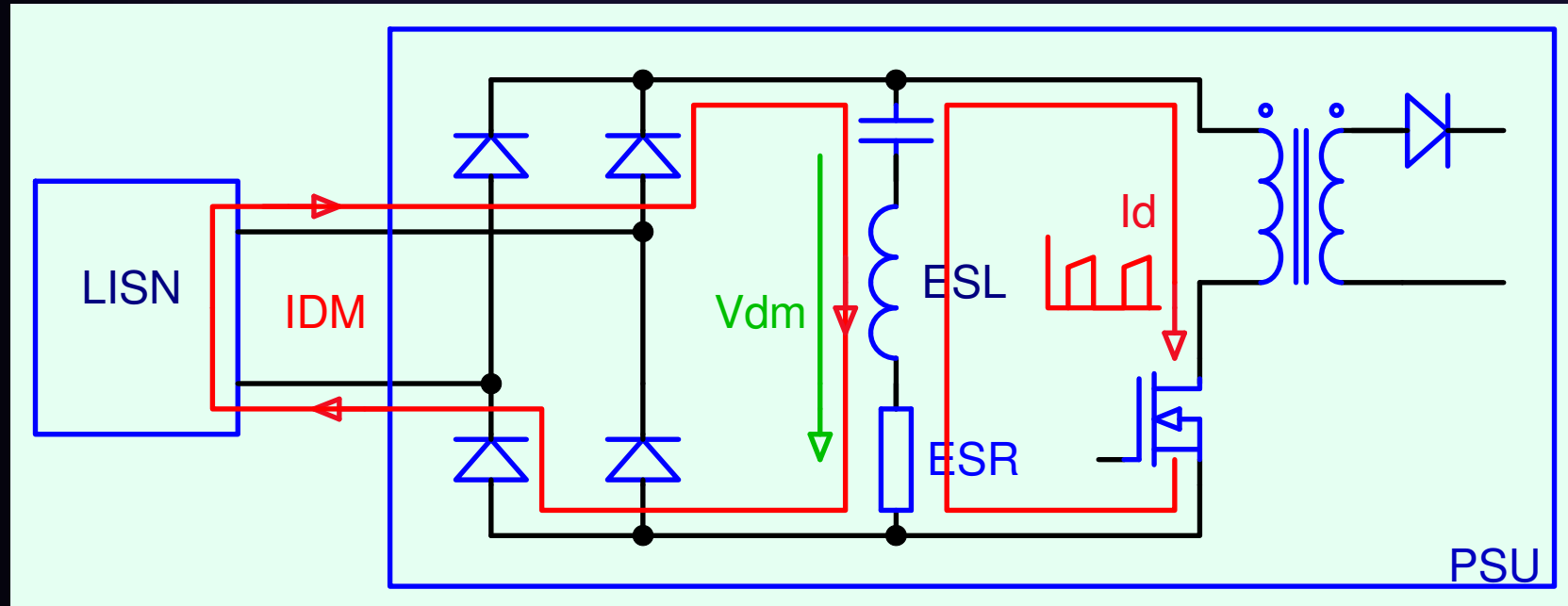
# 开关电源噪声源分析和对策



输出端 $di/dt$ 引起的发射

# 开关电源噪声源分析和对策

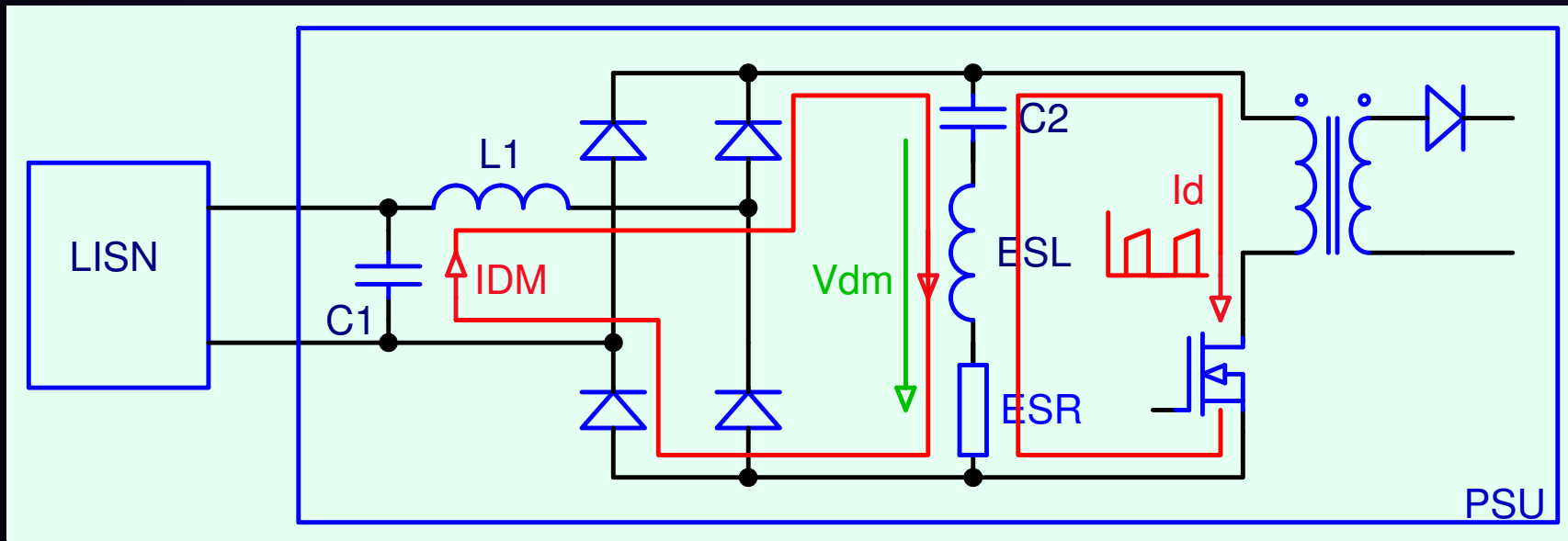
- 传导测试中的差模噪声



由  $V_{dm}$  驱动的  $I_{dm}$  导致输入 AC 端口差模发射，LISN 阻抗 100ohm， $V_{dm}$  为低阻抗

$$V_{dm} = \frac{1}{C} \int i_d dt + L \frac{di}{dt} + R_{ESR} \cdot i_d$$

# 开关电源噪声源分析和对策

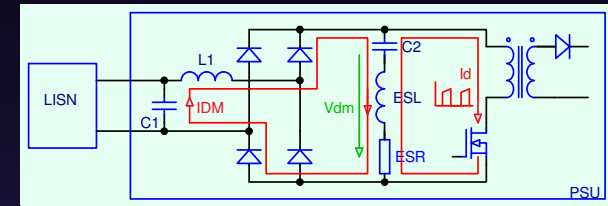


L1,C1构成低通滤波器，L1通常为100~300uH铁粉心电感，也可由共模电感的漏感形成。C1通常为100nF~2.2uF的聚酯X2电容。

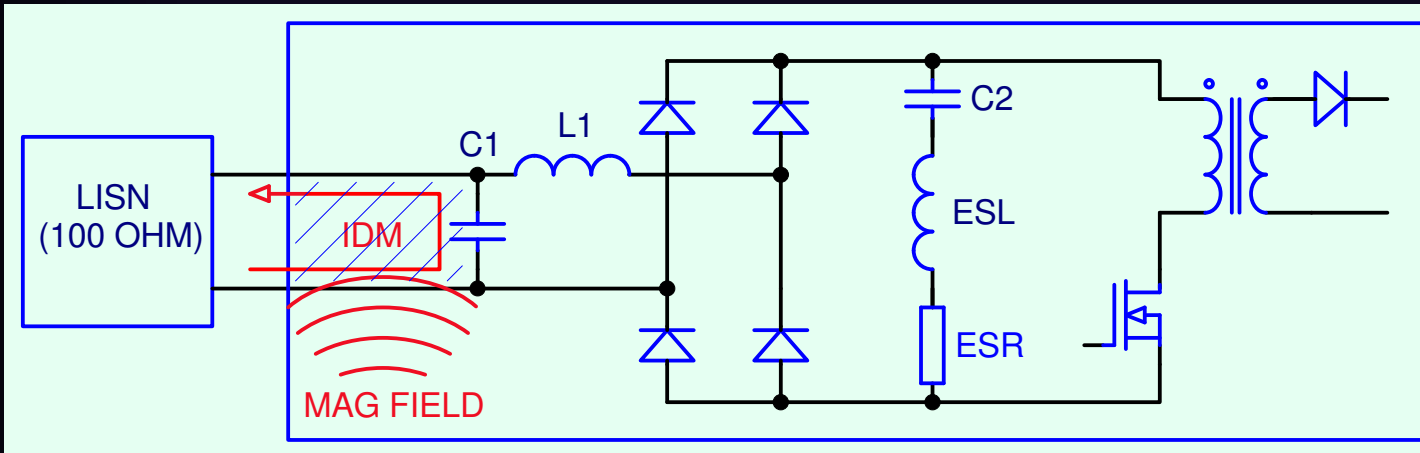


# 开关电源噪声源分析和对策

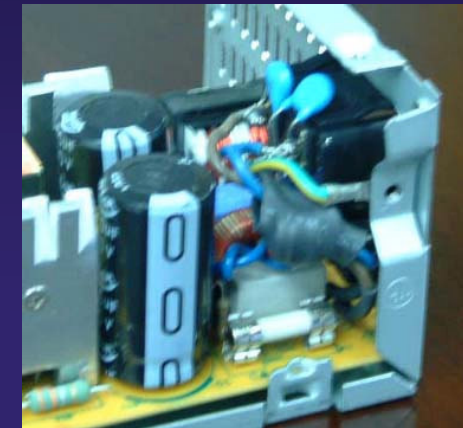
- 测试时发现差模传导依然超标
- 增大X电容，例如加大一倍——发现无效
- 再增大X电容——仍然无效，甚至变差
- 理论上应该看到-6dB和-12dB的变化
- 差模噪声没有经过滤波器，那么差模噪声如何出来？



# 开关电源噪声源分析和对策

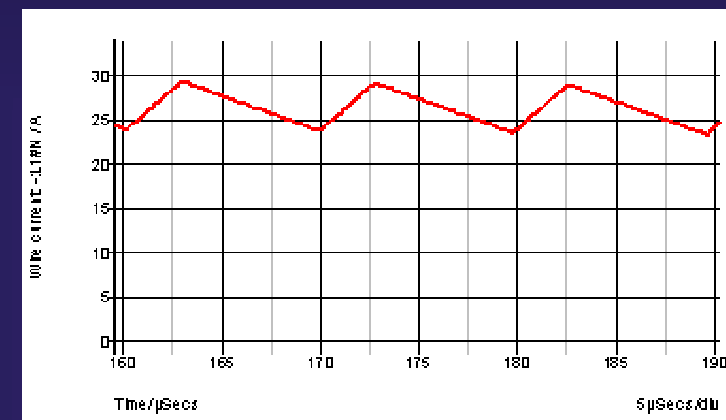
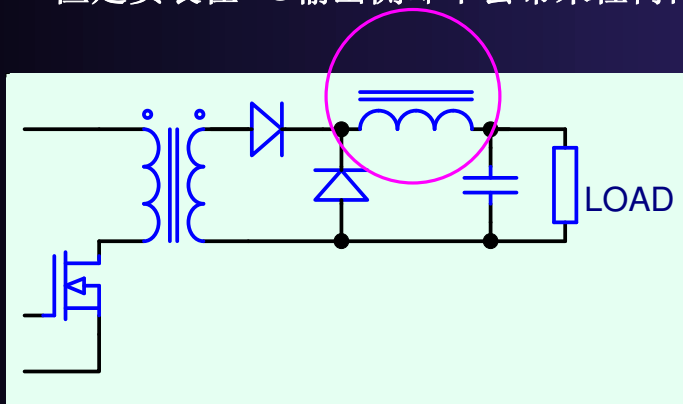


- 差模干扰可以由寄生磁场产生
- 在靠近AC连接端口的区域对磁场很敏感
  - 共模电流  $I_{DM}$  直接进入LISN 而不经过滤波器！
- 可以采取对C1和AC连接器进行屏蔽
  - 屏蔽EMI滤波器的其他部分基本没有什么改进。
- 可以采取双绞线的方式减小敏感区域的面积。



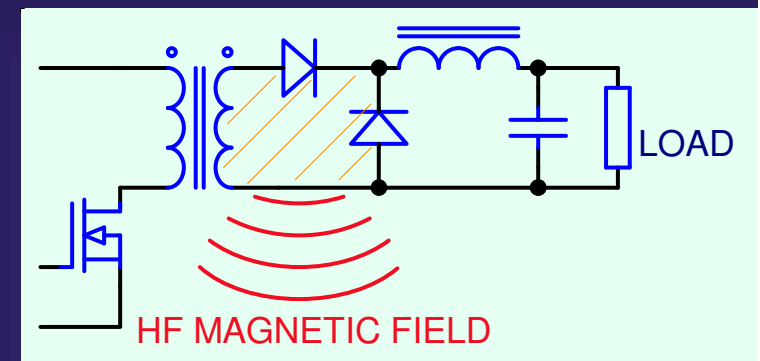
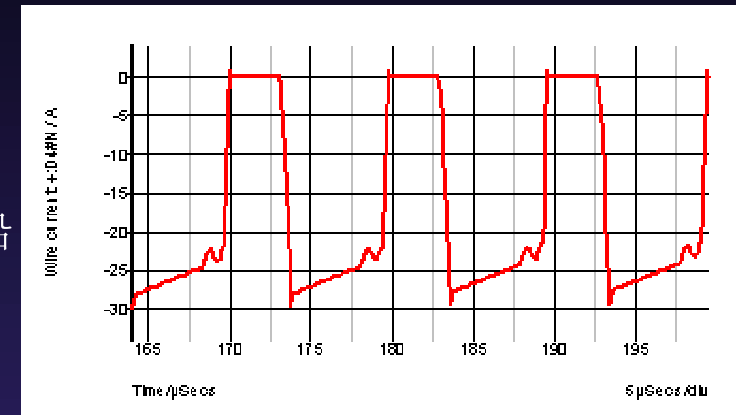
# 开关电源噪声源分析和对策

- 寄生磁场从何而来
- 它不大可能由变压器的磁心或者滤波器的扼流圈引起！
  - 它电流波形为三角形，含有较少的谐波成分。
  - 具有很短的磁力线路径
- 例如：
  - 输出端的棒状电感
  - 它具有较大的泄漏磁场
  - 但是安装在DC输出侧却不会带来任何问题



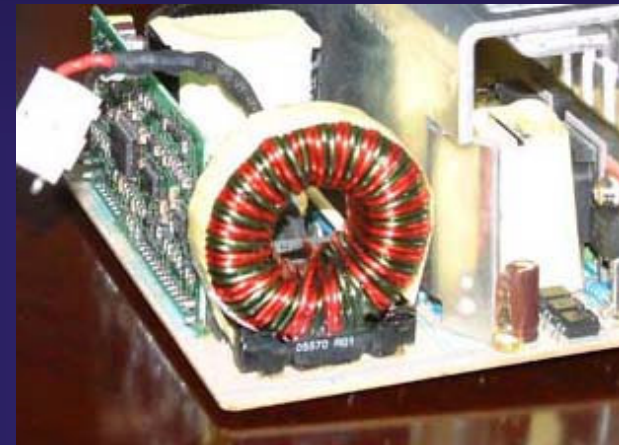
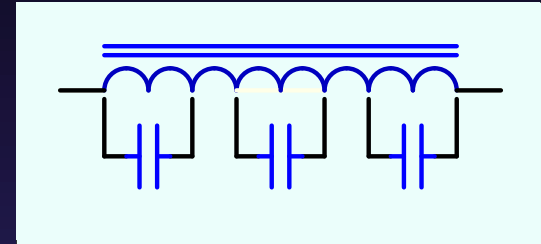
# 开关电源噪声源分析和对策

- 寄生磁场从何而来
- 一个可能是从输出的整流电路来的
  - 整流电路波形为方波，具有很陡的上升和下降沿
  - 在二极管恢复期间有反向的电流脉冲
- 另一个可能是输入PFC boost电路
  - 同样的原因
- 使环路面积最小



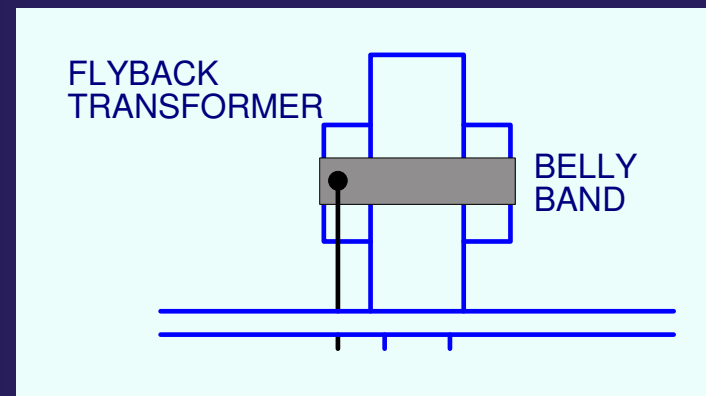
# 开关电源噪声源分析和对策

- 寄生磁场从何而来
- 还有可能由环形的PFC电感的并联自谐振产生
  - 由于绕线之间的分布电容
  - 高的Q值对电流和磁场有放大作用
- 影响往往在10 to 20 MHz的范围内
- 由线圈的几何尺寸及工艺决定
  - 减小绕线之间的分布电容
  - 避免不完整的绕线层，减小漏磁。



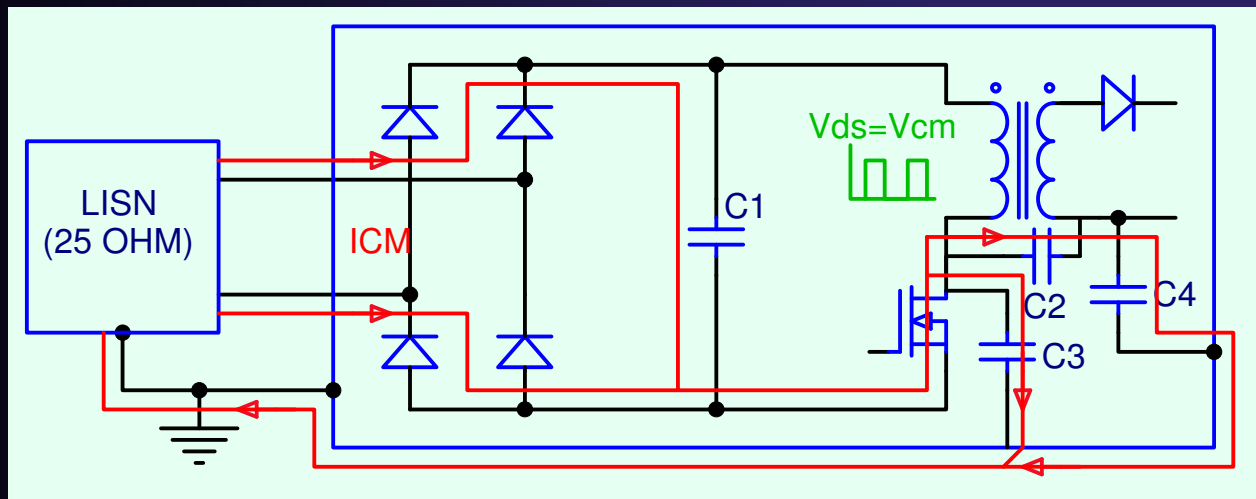
# 开关电源噪声源分析和对策

- 反激电路中的变压器有高频漏磁，产生在磁心的气隙处
- 用铜带绕制在气隙外，可以有效的减小漏磁
- 该铜带必须焊接成一个封闭的环，并且具有较高的电导率
- 宽度并不重要
- 对于磁场，接地并不必要



# 开关电源噪声源分析和对策

- 传导测试中的共模噪声
- 由高频的幅值大的 $dv/dt$ 引起
  - Eg: 功率开关管
- 对地的分布电容
  - Eg: C3和C4
- 分布电容虽然很小，但AC电压却很高







# 开关电源噪声源分析和对策

- 在负母线（开关管S极）对地之间加 C5

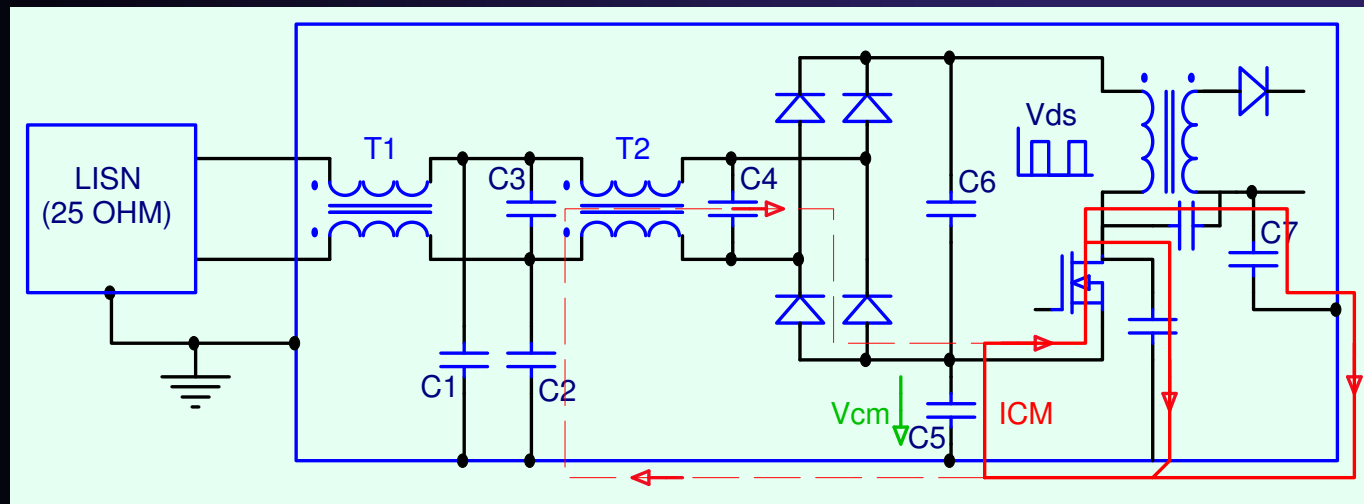
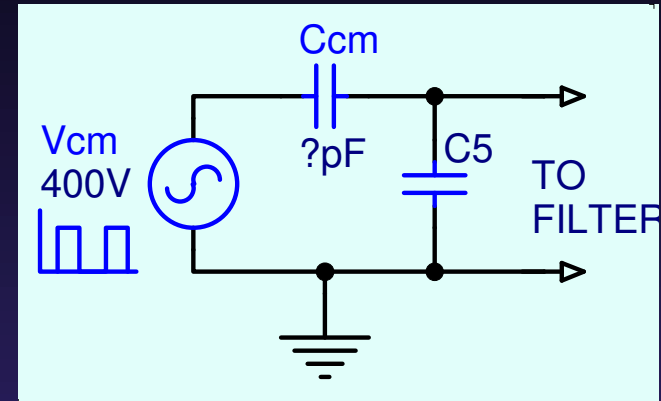
C5 为共模电流提供了一个短的低阻通路

- C5 串入分布电容通路后，起到了分压的作用

共模电压源电压减小，为C5上电压

- 没有C5时，共模源类似一个恒流源

导致共模电感作用降低

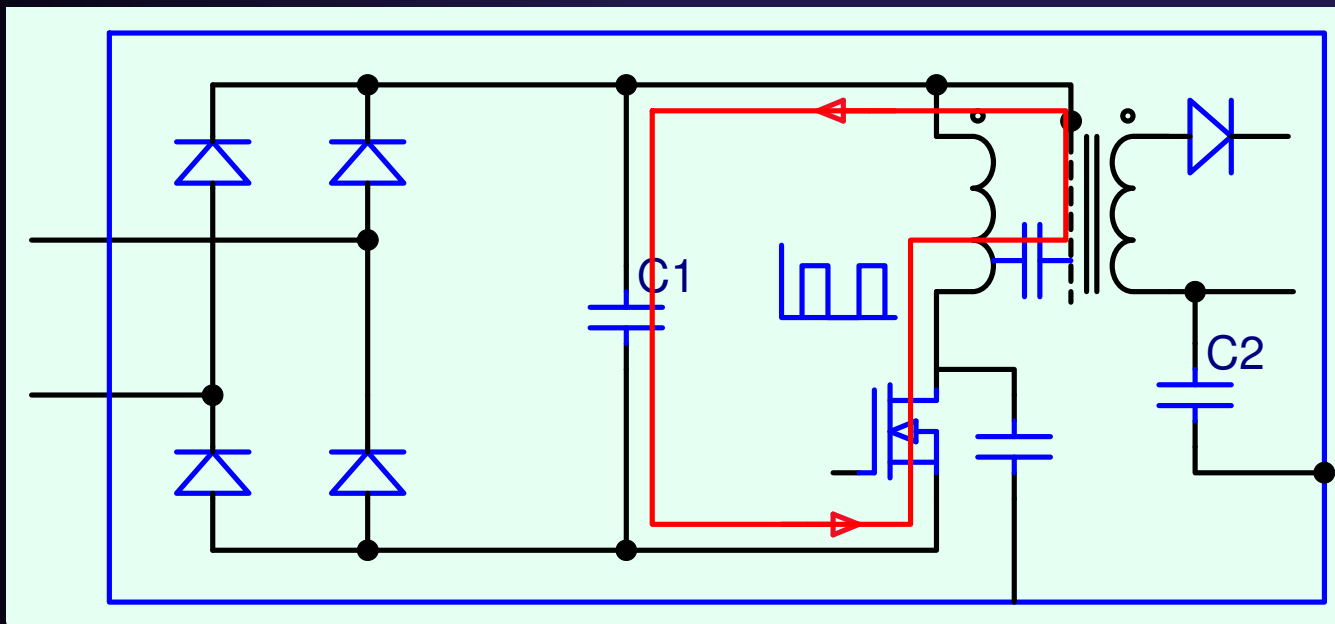


# 开关电源噪声源分析和对策

- 减小对地的分布电容
- 将开关管的散热器接到负母线上
  - 电容电流直接流回噪声源
  - 如果能不将散热器连到保护地最好
- 减小开关管D极对地的分布电容
  - PCB离底座和机壳尽量远
  - 减少连接到D极的元件
  - 连接到D极的PCB越短越好
- 减小变压器线圈间的分布电容
  - 绕线工艺，线包的安排

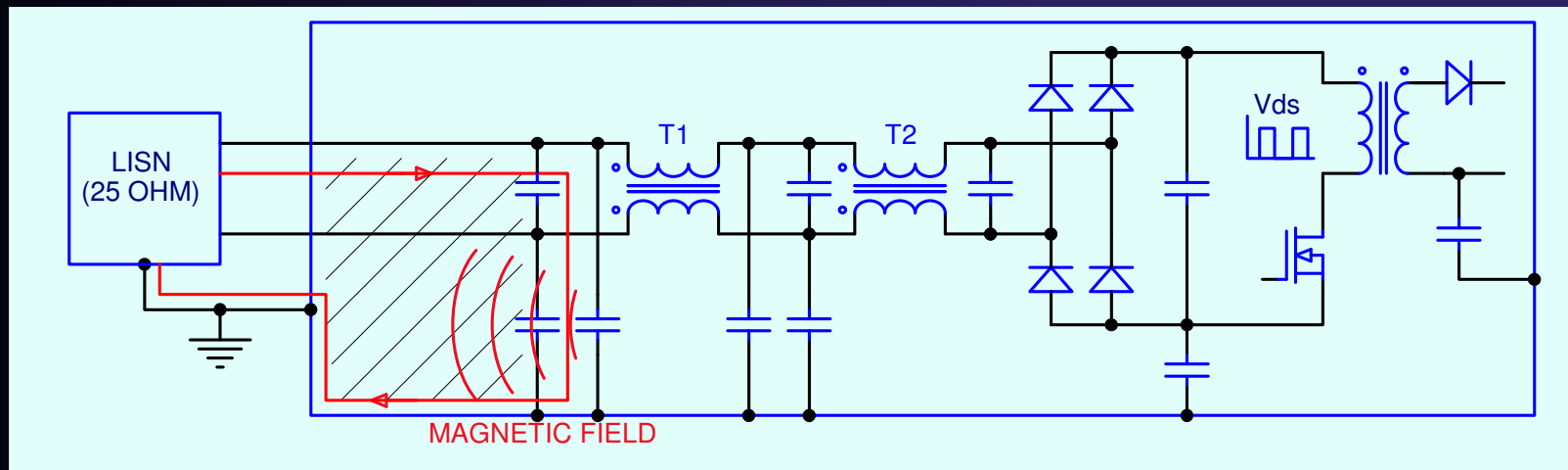
# 开关电源噪声源分析和对策

- 减小变压器原副边之间的分布电容
  - 原副边线包之间加入很薄的铜箔
  - 连接到母线正或者负



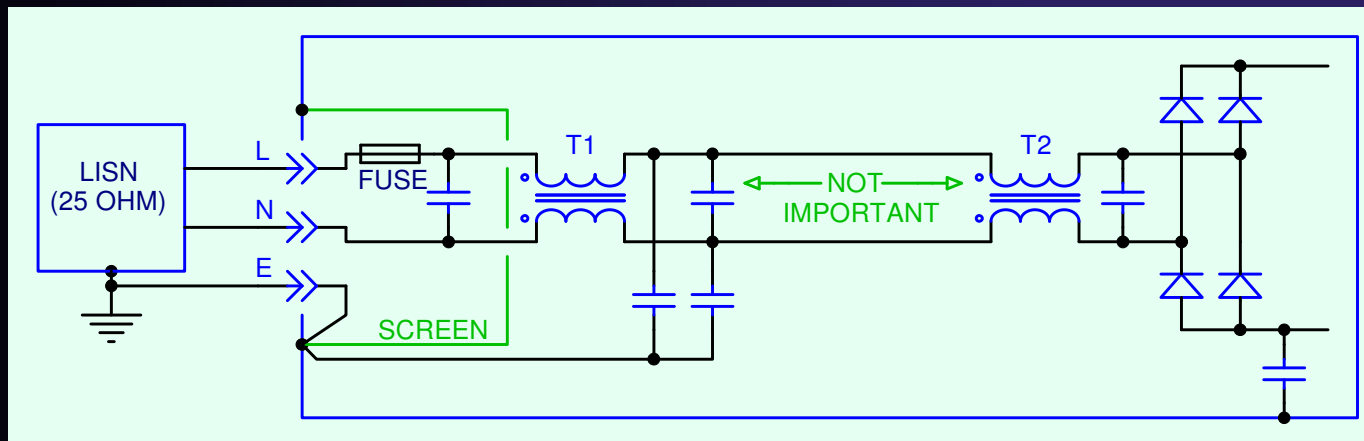
# 开关电源噪声源分析和对策

- 交流端口的Y电容
- 端口的Y电容有时能提供更好的共模滤波效果
  - 尤其是对于阻抗小于 **25 ohms** 的高频噪声源
  - 对辐射发射可以起到短路单极子天线的作用，在后面阐述
- 但是有时也会耦合更大的噪声到LISN，使结果变差!
  - 磁场耦合
  - Y电容的接地后地线中的噪声电流
  - 不推荐这样接Y电容，除非能有屏蔽措施



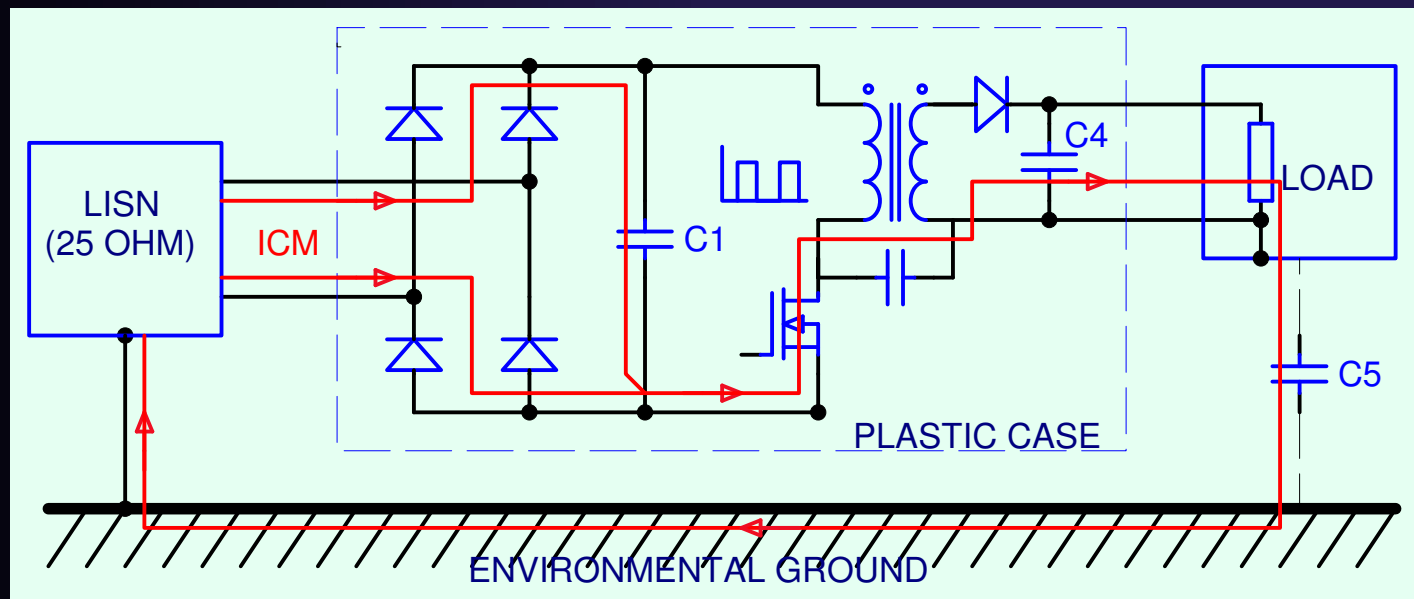
# 开关电源噪声源分析和对策

- 能否将滤波器分离
- 在最靠近端口的X电容处可以分离，推荐在此处进行屏蔽
- T1 和 Y 电容应该尽量靠近端口
- T2 可以位置并不重要
- Y电容必须良好接地（正确的安装方式）



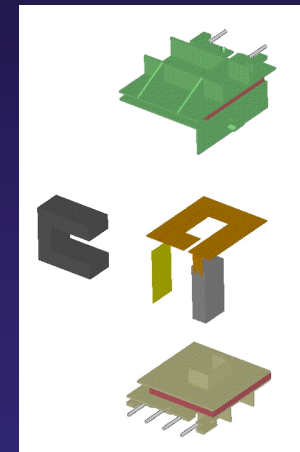
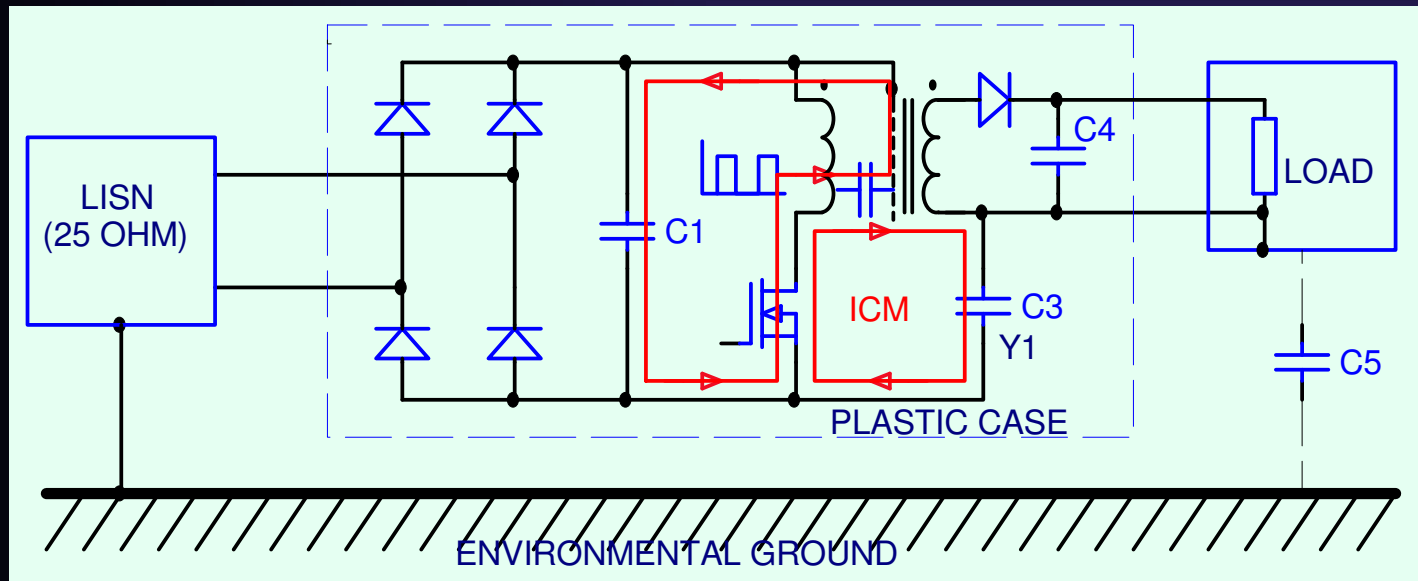
# 开关电源噪声源分析和对策

- 如果开关电源没有保护地
  - 例如手机充电器
  - 塑料机壳



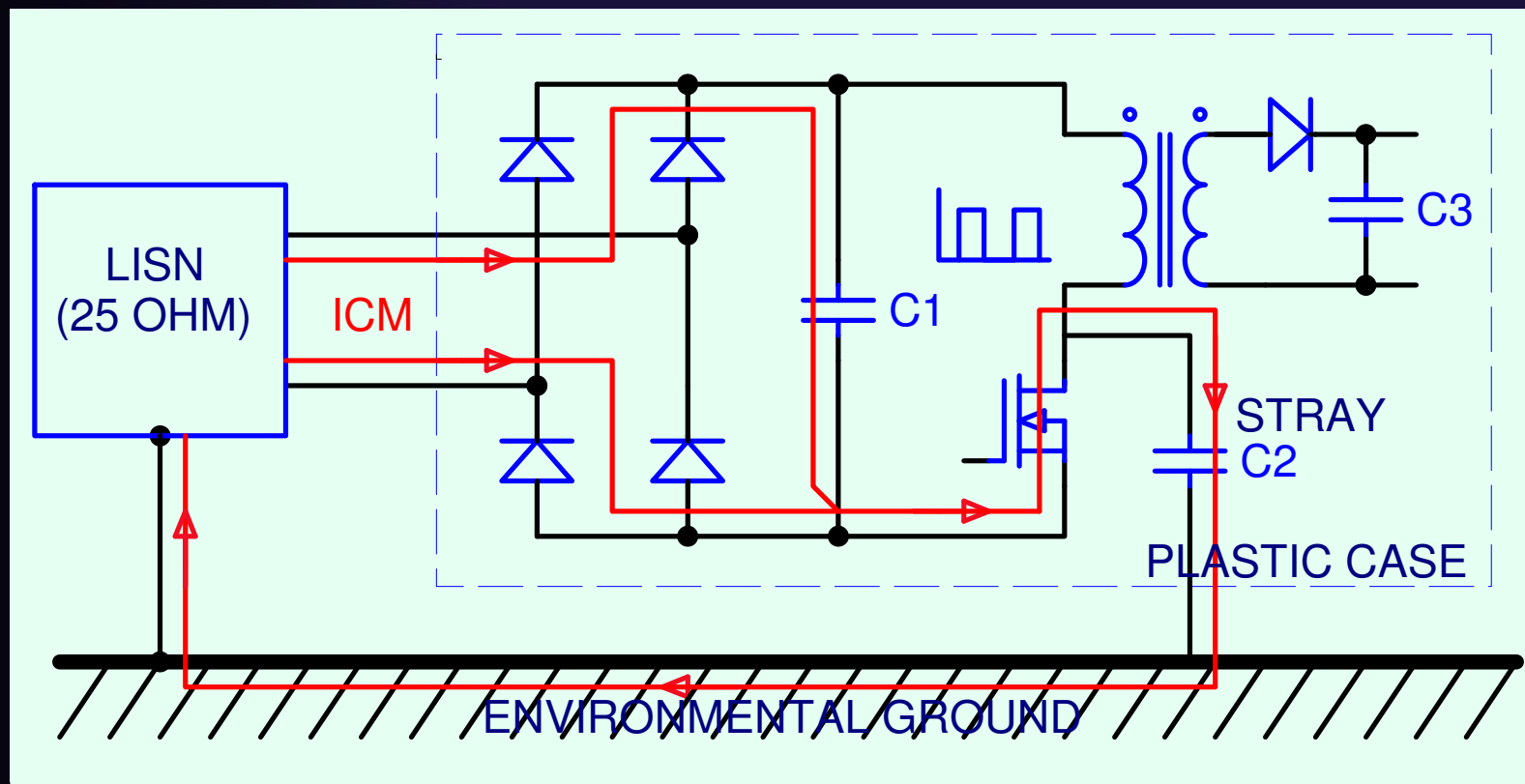
# 开关电源噪声源分析和对策

- 解决措施
  - C3
  - 变压器屏蔽



# 开关电源噪声声源分析和对策

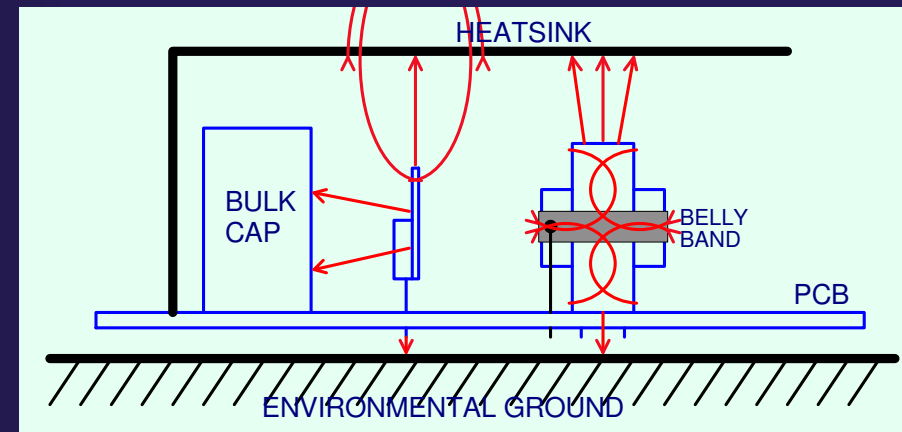
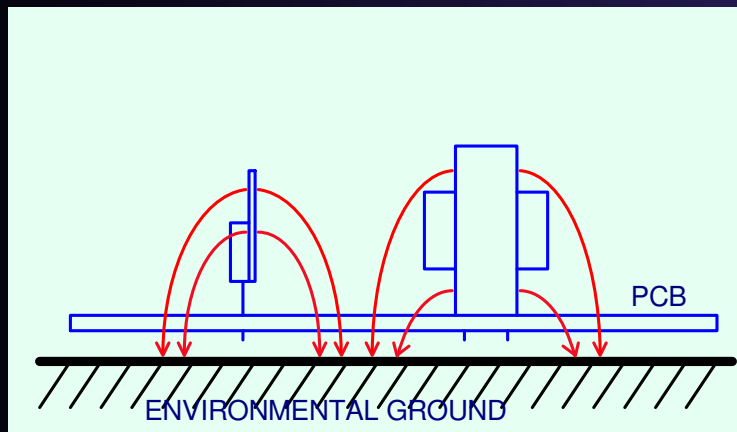
- 另外，还有杂散电场导致的共模超标
  - 塑料机壳对这样的电场是透明的





# 开关电源噪声声源分析和对策

- 解决措施
  - 法拉第屏蔽
- 可用做屏蔽的器件
  - 母线电容
  - 散热器（连接到固定电位）
  - 变压器的铜带





# 开关电源噪声声源分析和对策

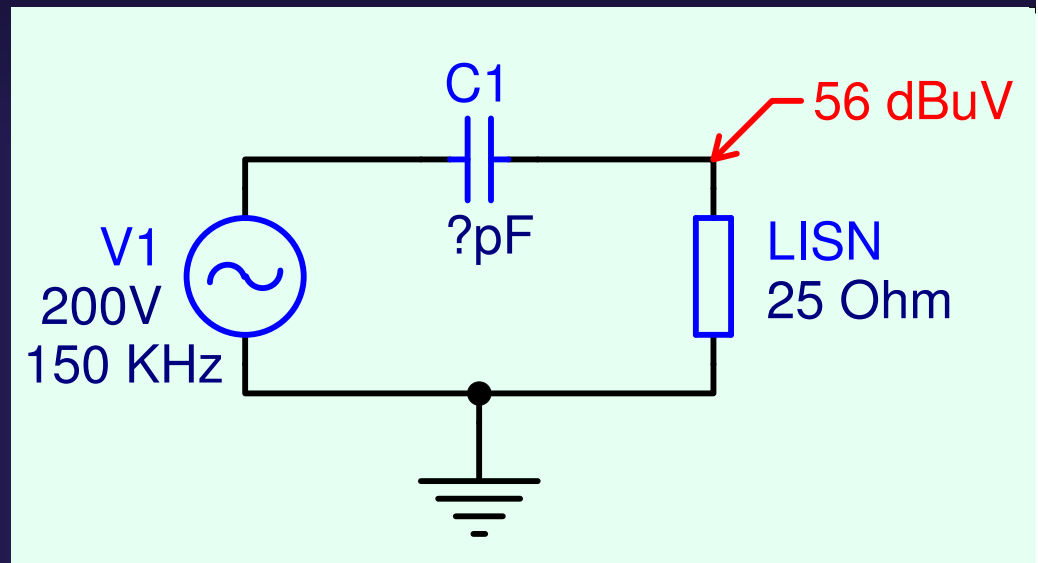
- C6的大小

多大的容量就能产生50dBuV在150KHz?

- 假设:

- $V_{ds} = 200V$  rms at 150KHz
- LISN阻抗 = 25 ohms
- 50dBuV = 316uV (rms)

- $C6 = 0.067pF$  !

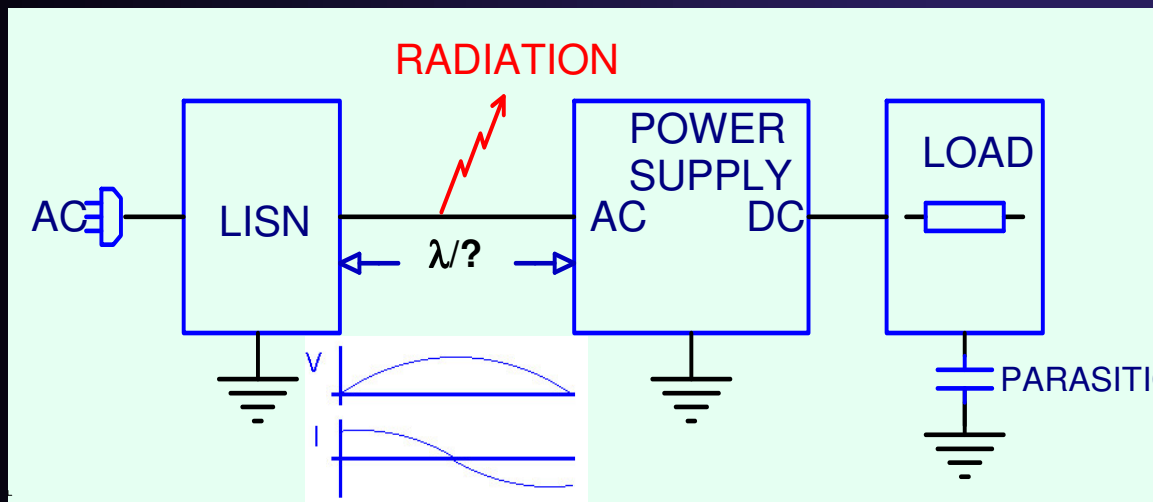


***Any Short Question***

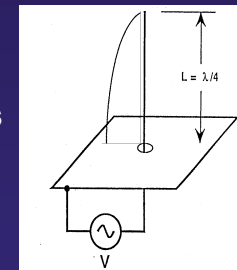
Take a break?

# 开关电源噪声声源分析和对策

- 辐射发射——由电缆引起
- 1m电源线类似一根单极子天线
- 天线的阻抗为 25 ohms (LISN)
- 电缆总部电压最高
- 在半波长谐振  $\lambda/2$      $\lambda = 2m$      $f_0 = 150MHz$

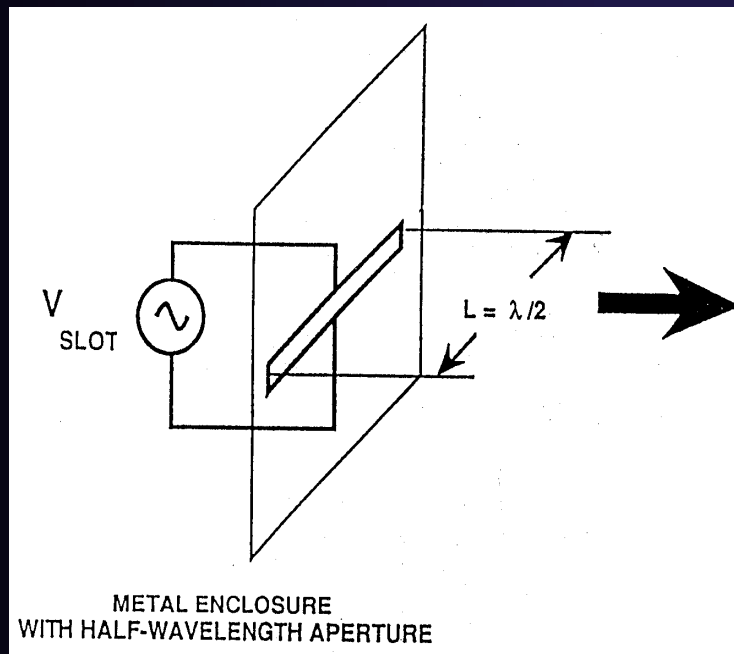


Like two  
monopoles  
connected  
end to end



# 开关电源噪声声源分析和对策

- 孔缝泄漏
  - $\lambda/2$ 的偶极子天线
  - 10cm的缝， $f=1500\text{MHz}$



# 开关电源噪声声源分析和对策

- 如果外壳开孔长度小于  $\lambda/20$ ，则波长大于  $\lambda$  的电磁波泄漏能量较小，可忽略。对于辐射干扰的测试频率起始点为 30MHz，其波长：

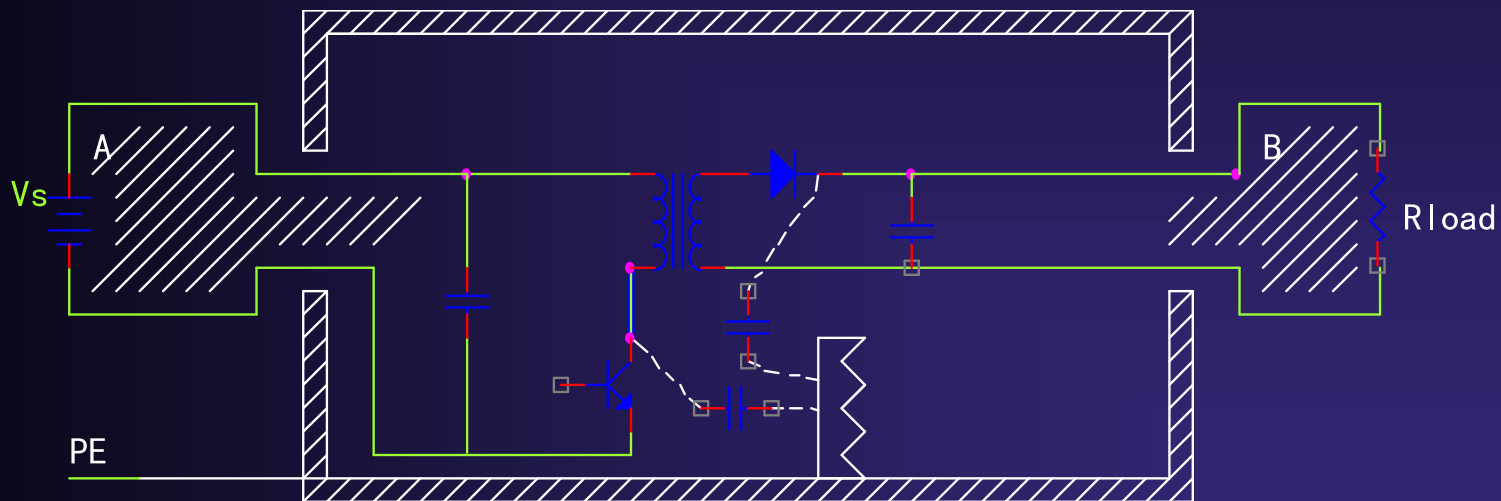
$\lambda = 3 \times 10^8 / 30M = 10$ 米，则  $\lambda/20 = 50$ cm，对于 300MHz 的辐射干扰，孔缝的开口长度必须小于 5cm，因此对于开关电源产品，孔缝开口应小于 5cm 就基本能满足要求。

- 开孔最好开成圆孔，避免开长方孔
- 根据天线理论，当偶极子天线长度为  $\lambda/4$  的整数倍时，其发射效率最高，因此，必须尽量缩短  $dv/dt$  大的支路长度。同样为减小发射，应尽量缩小  $di/dt$  大的回路面积。

# 开关电源噪声声源分析和对策

- 差模电流引起的辐射发射

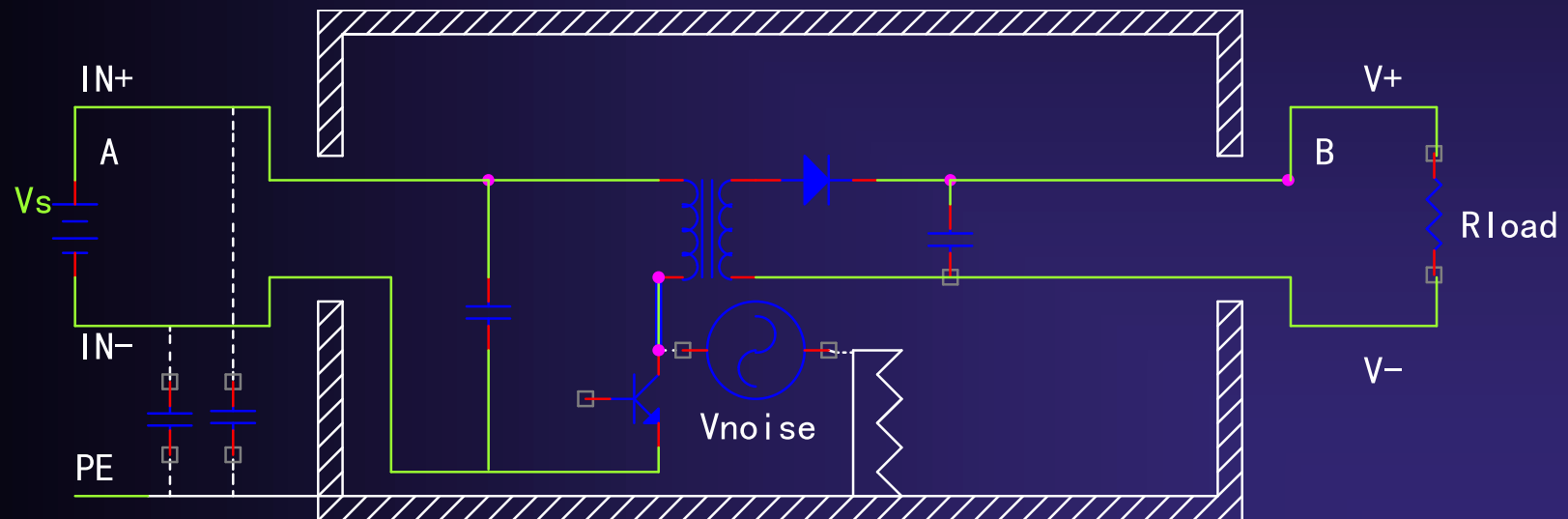
- 由差模电流产生的辐射发射，对开关电源而言近场主要表现为磁场形式。因两导体上差模电流大小相等方向相反，因而只要将两导体紧紧靠近，如图三所示尽量减小A、B部分面积，差模电流产生的电磁场对外界的影响可以忽略，而主要考虑由共模电流产生的辐射发射。





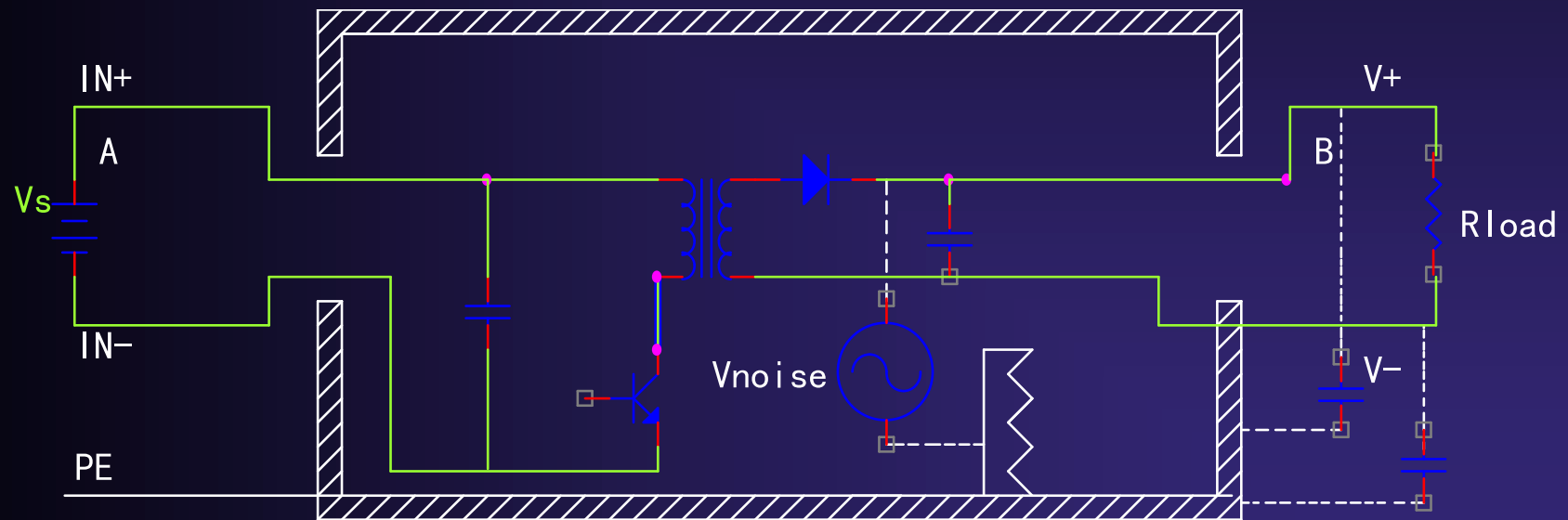
# 开关电源噪声声源分析和对策

- 共模电流引起的辐射发射
  - 因开关管与地存在分布电容，在开关管开通或关断时，产生充放电电流，这样外壳（保护地线PE）与IN+/IN-就构成由共模电流驱动的偶极子天线



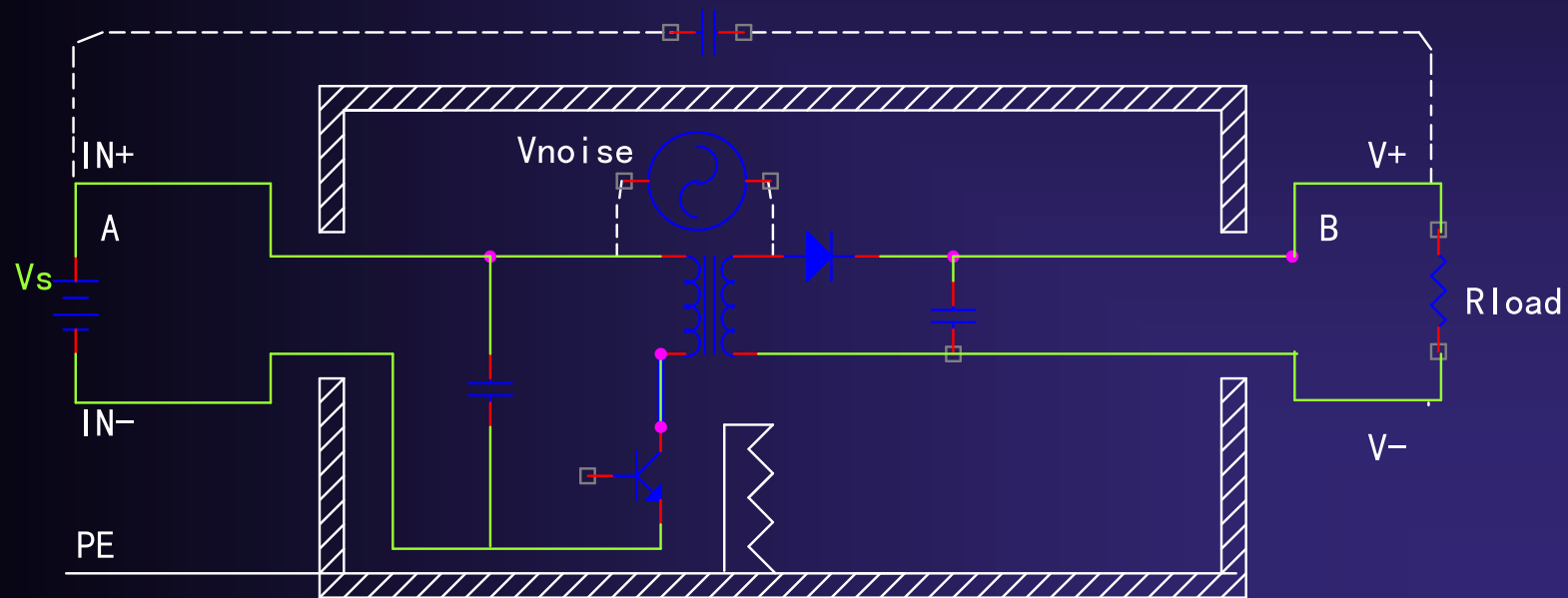
# 开关电源噪声声源分析和对策

- 共模电流引起的辐射发射
  - 同样，因输出整流管与地之间存在分布电容，而二极管阳极存在较大 $dv/dt$ ，从而对该电容充放电，这样外壳与 $V+$ / $V-$ 就构成了由共模电流驱动的偶极子天线。



# 开关电源噪声声源分析和对策

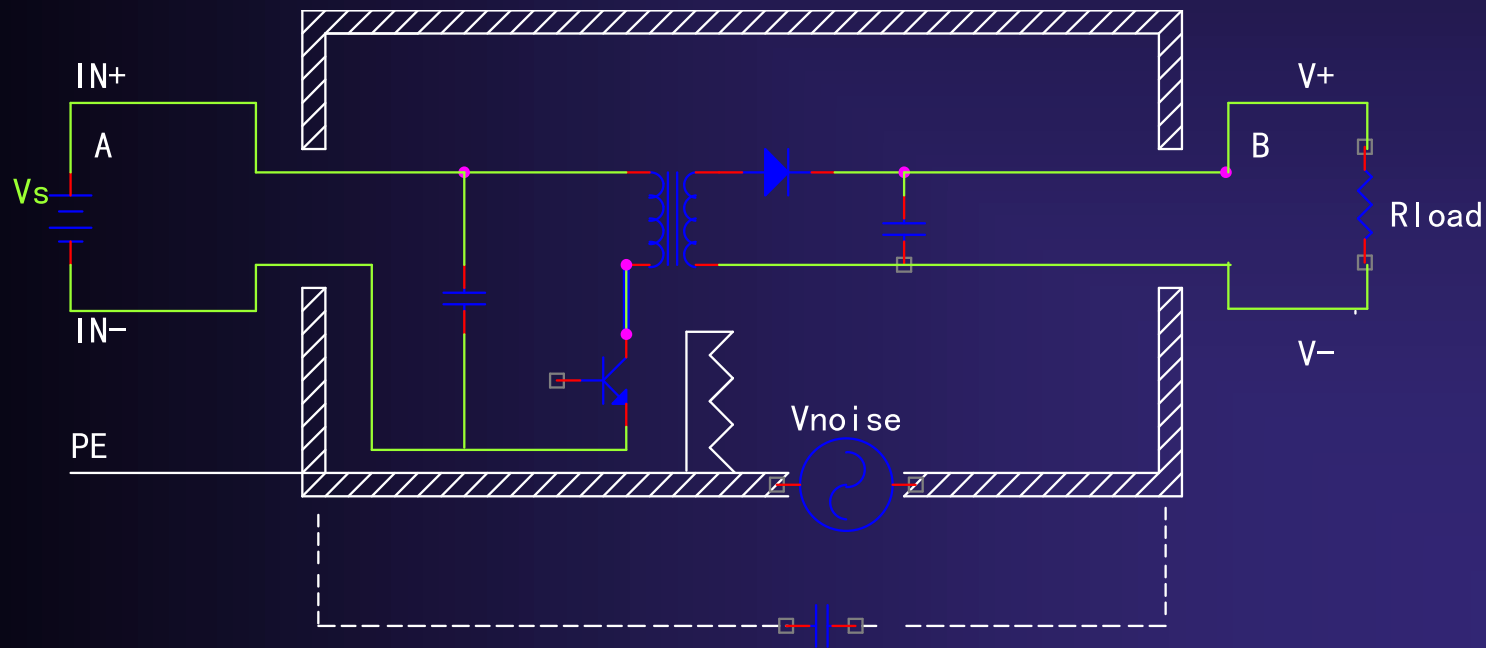
- 共模电流引起的辐射发射
  - 因变压器原副边存在分布电容，工作时该电容流过噪声电流，这样 $I_{N+}/I_{N-}$ 与 $V_{+}/V_{-}$ 就构成了由该电流驱动的偶极子天线



# 开关电源噪声声源分析和对策

- 共模电流引起的辐射发射

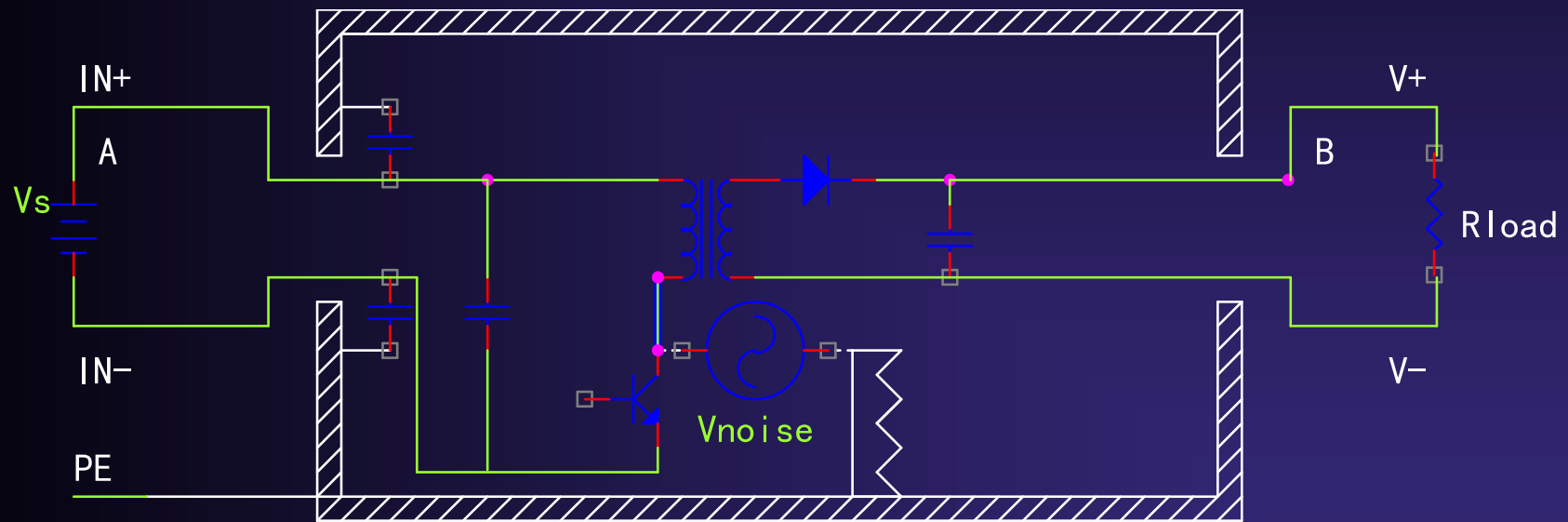
- 开关电源工作时， $di/dt$ 大的回路， $dv/dt$ 大的支路会产生强烈的辐射场，由于地线存在电感，在保护地上会产生感生电势，这样，外壳就构成了电压驱动的单极子或偶极子天线。



# 开关电源噪声声源分析和对策

- 解决措施

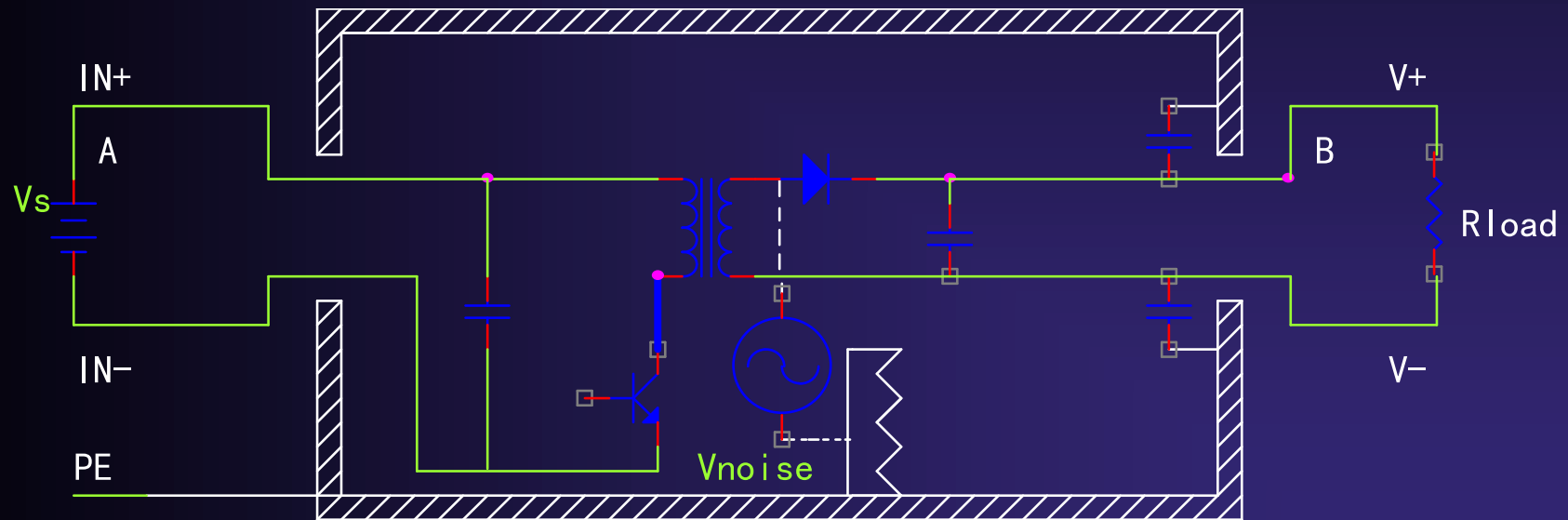
- 对于由流过开关管对机壳的分布电容的噪声电流驱动的偶极子天线，可在开关电源输入端口接Y电容



# 开关电源噪声声源分析和对策

- 解决措施

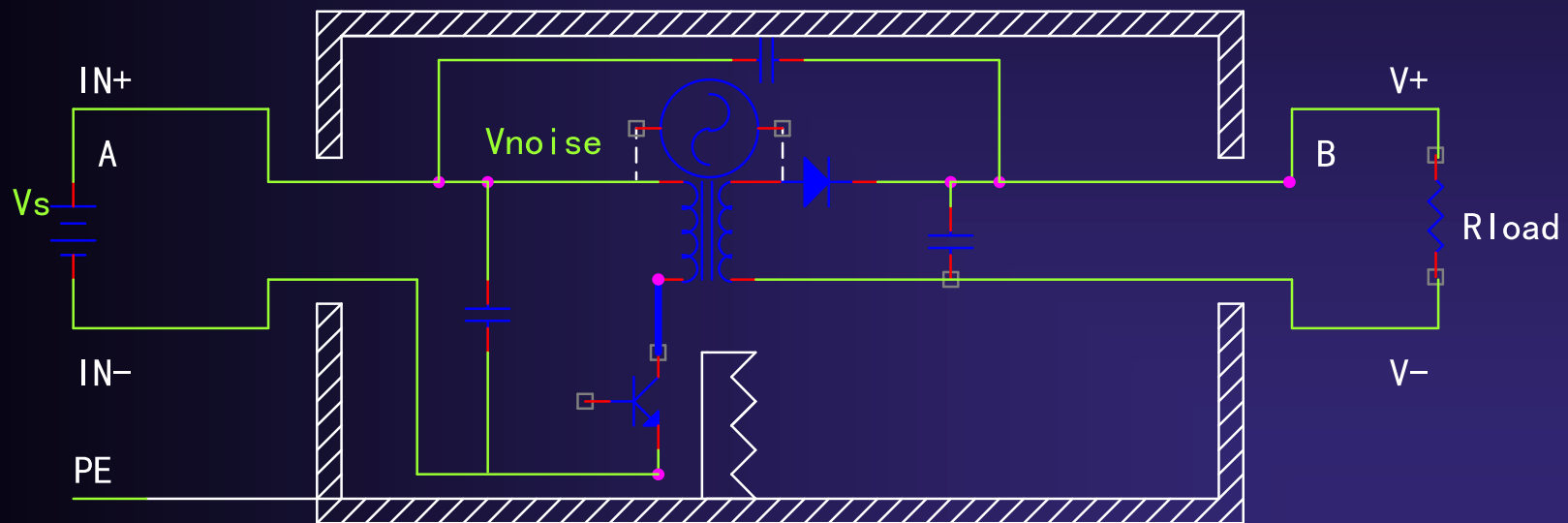
- 对于由流过输出整流二极管与保护地之间的分布电容的噪声电流驱动的偶极子天线，可在输出端口处接Y电容



# 开关电源噪声声源分析和对策

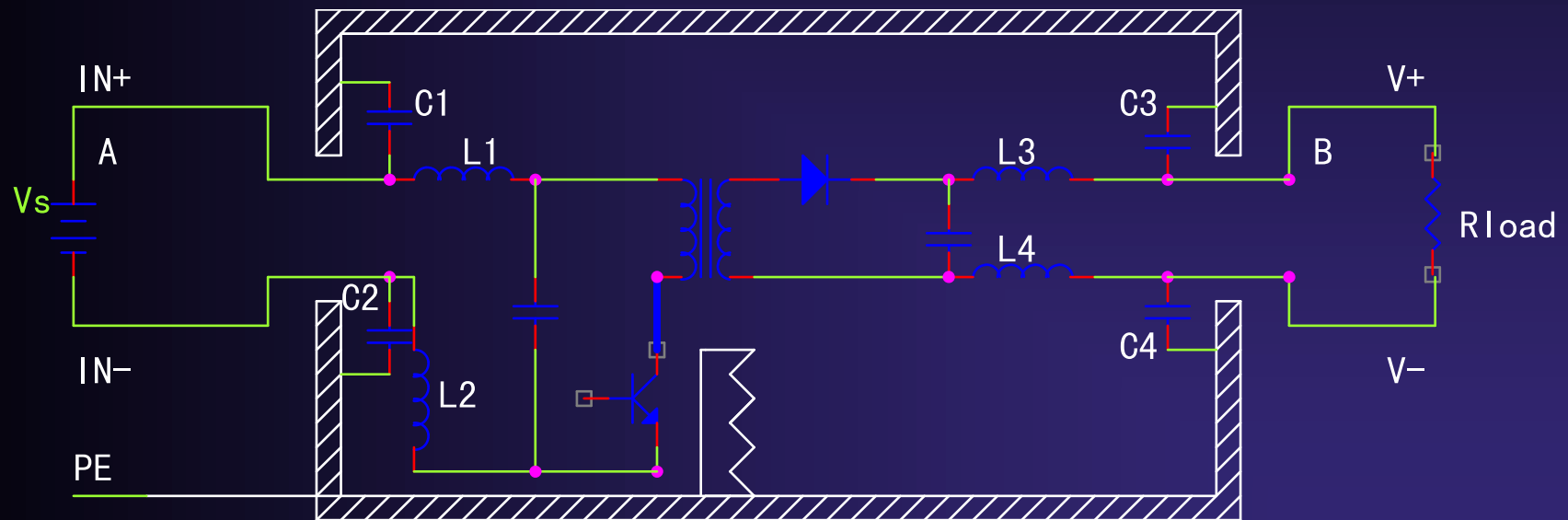
- 解决措施

- 对于由流过变压器原副边分布电容的噪声电流驱动的偶极子天线产生的辐射发射，可在变压器原副边跨接Y电容加以解决。



# 开关电源噪声声源分析和对策

- 对于差模辐射场
  - 除了应尽量靠近构成回路的两导体外，还可以在输入/输出线中串入频率特性好的电感L1, L2, L3, L4



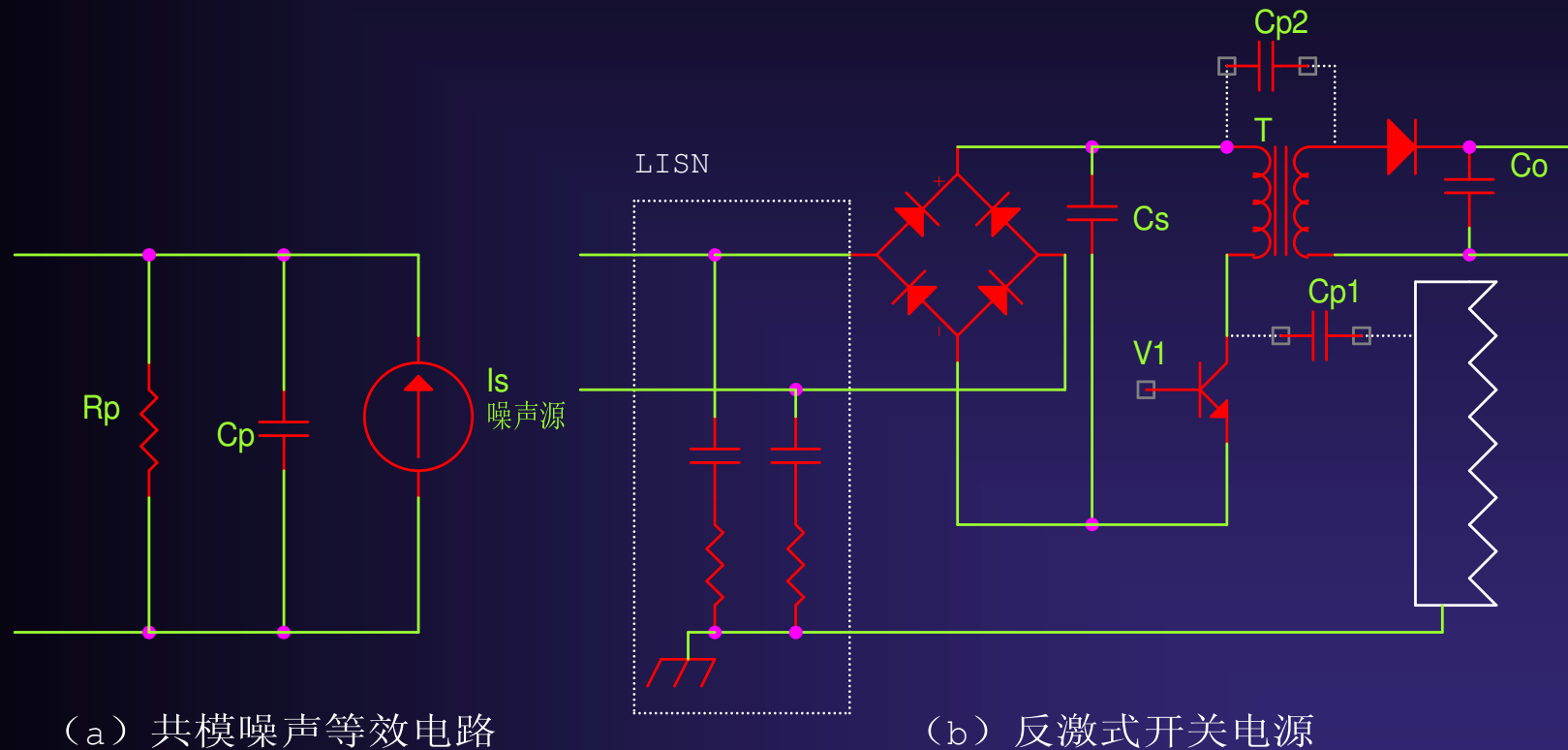


## 开关电源EMI耦合途径的切断

- 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。

# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 共模噪声源电路模型



(a) 共模噪声等效电路

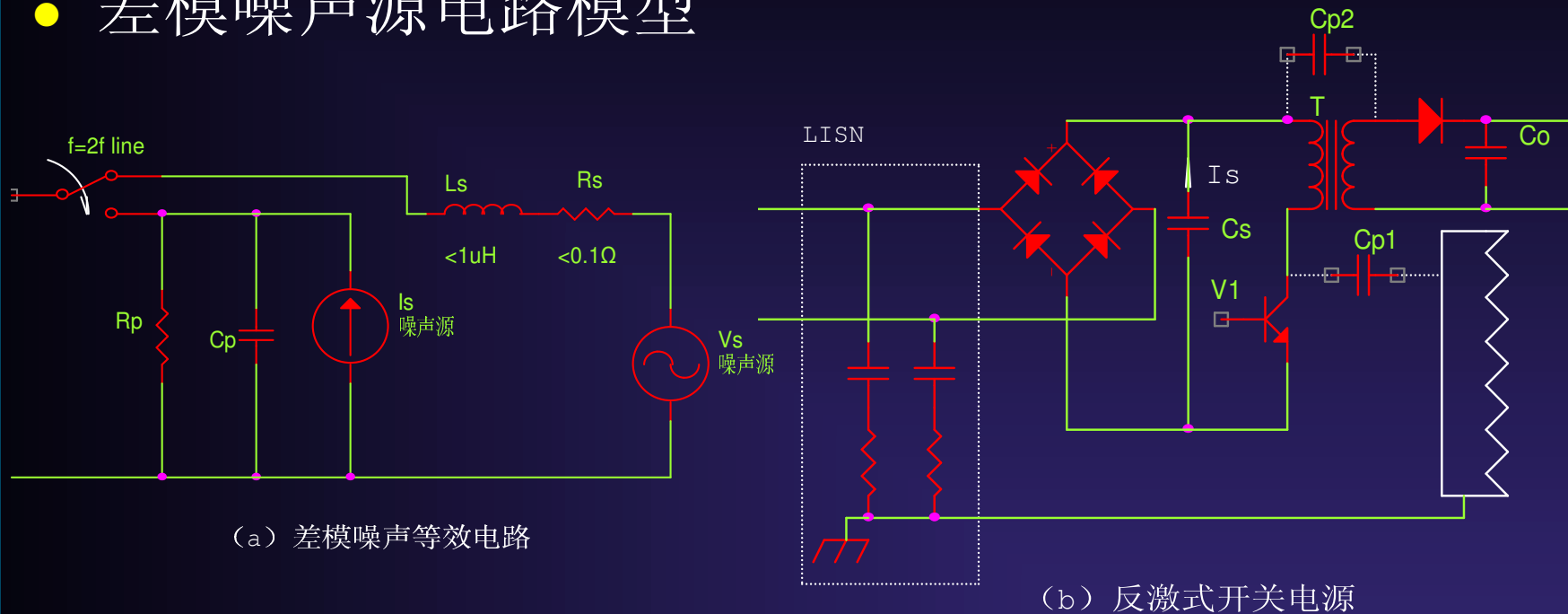
(b) 反激式开关电源

其电路模型为一个有并联电容 $C_p$ 和并联电阻 $R_p$ 的电流源，呈容性

$C_p$ 一般在几百至几千pF之间

# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 差模噪声源电路模型



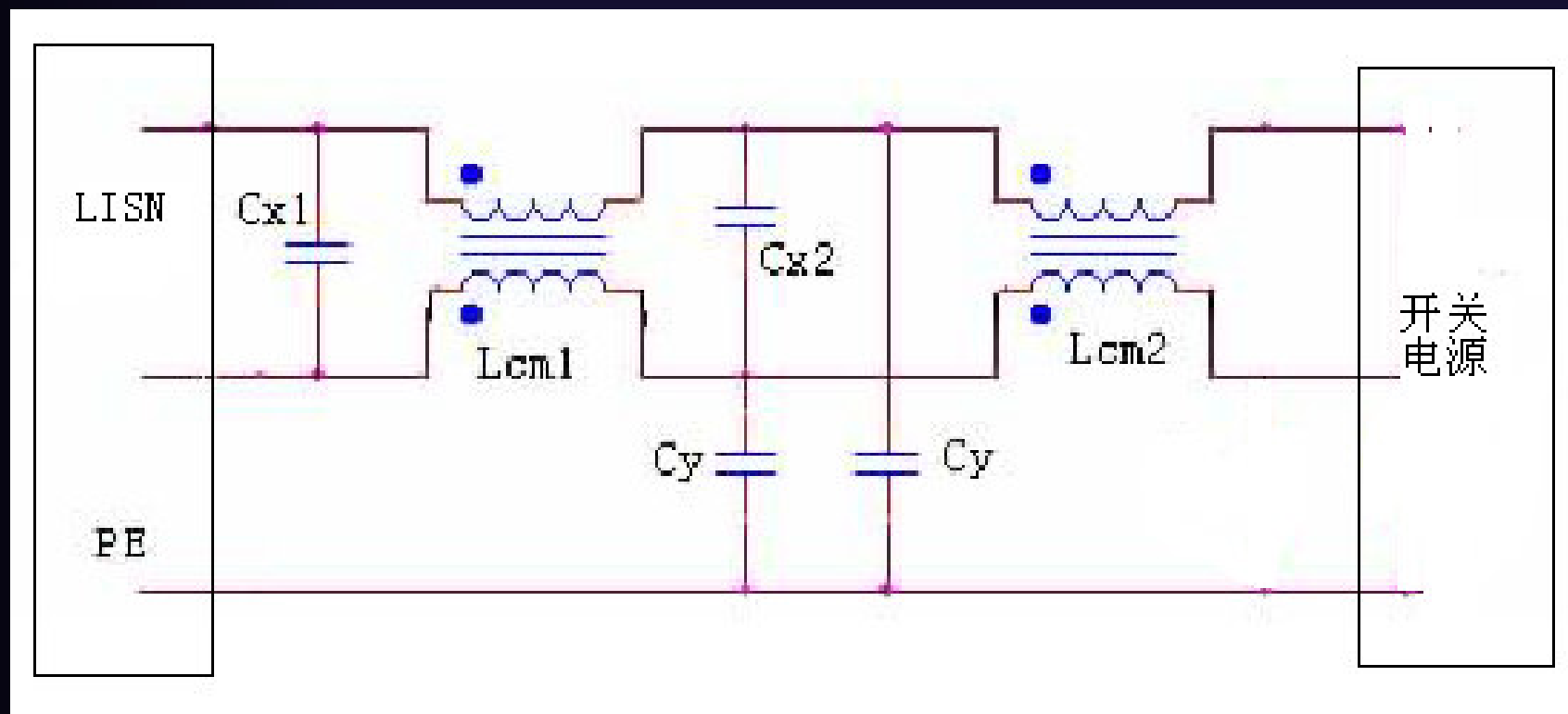
(a) 差模噪声等效电路

(b) 反激式开关电源

它由两部分组成，一部分为高阻抗噪声等效电路，另一部分是低阻抗噪声等效电路。在整流桥导通时，电容上电压低于电网电压，电网通过 $L_s$ （包括PCB电感， $C_s$ 的ESL）及 $R_s$ （包括PCB电阻及 $C_s$ 的ESR）向电容 $C_s$ 充电，差模噪声为低阻抗等效电路。而当 $C_s$ 电压高于电网瞬时电压时，输入整流桥截止，其各臂整流二极管相当于电容器，其等效电路为高阻抗噪声等效电路，开关 $S$ 是与输入整流器流桥导通与否相对应的，其开关频率为输入交流电网频率的两倍

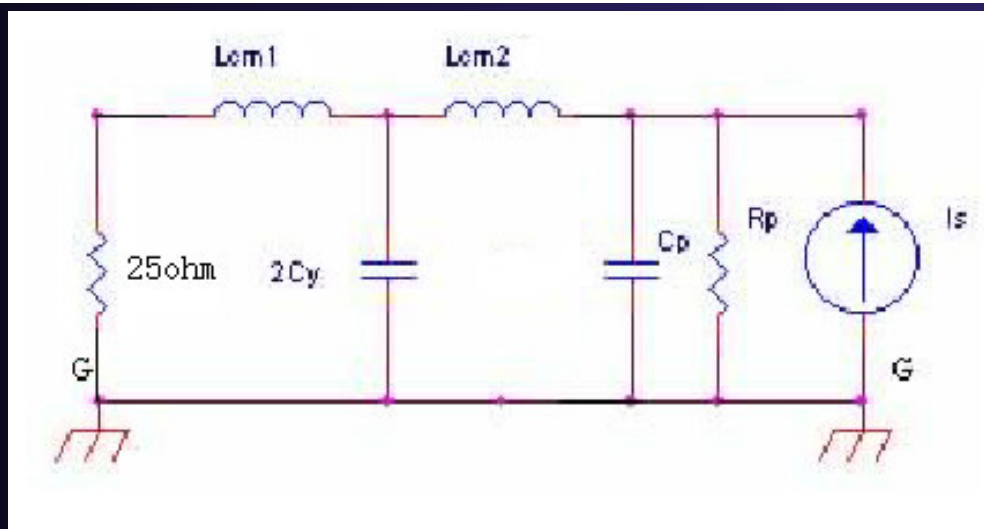
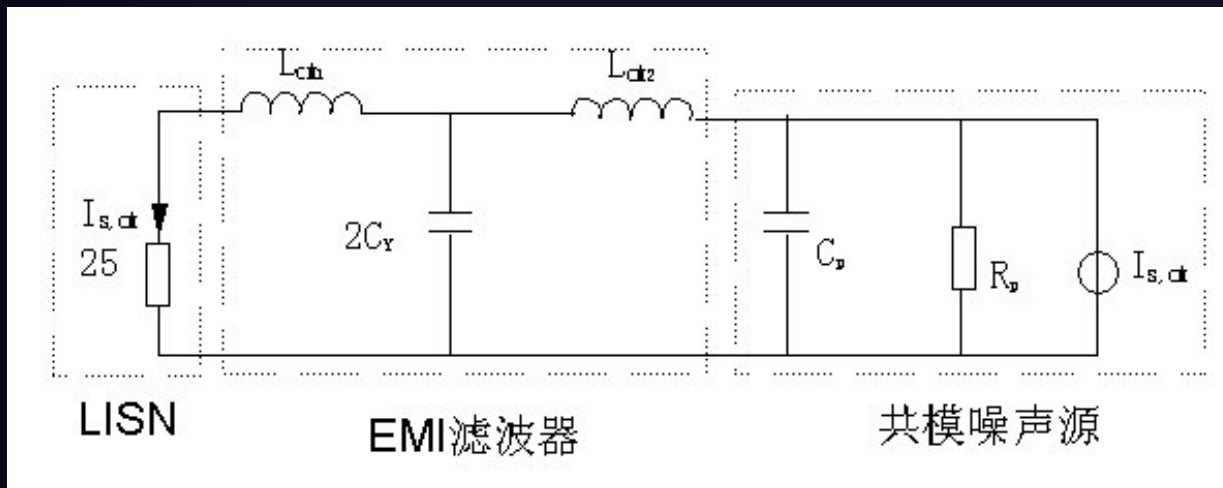
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 典型滤波器电路为例



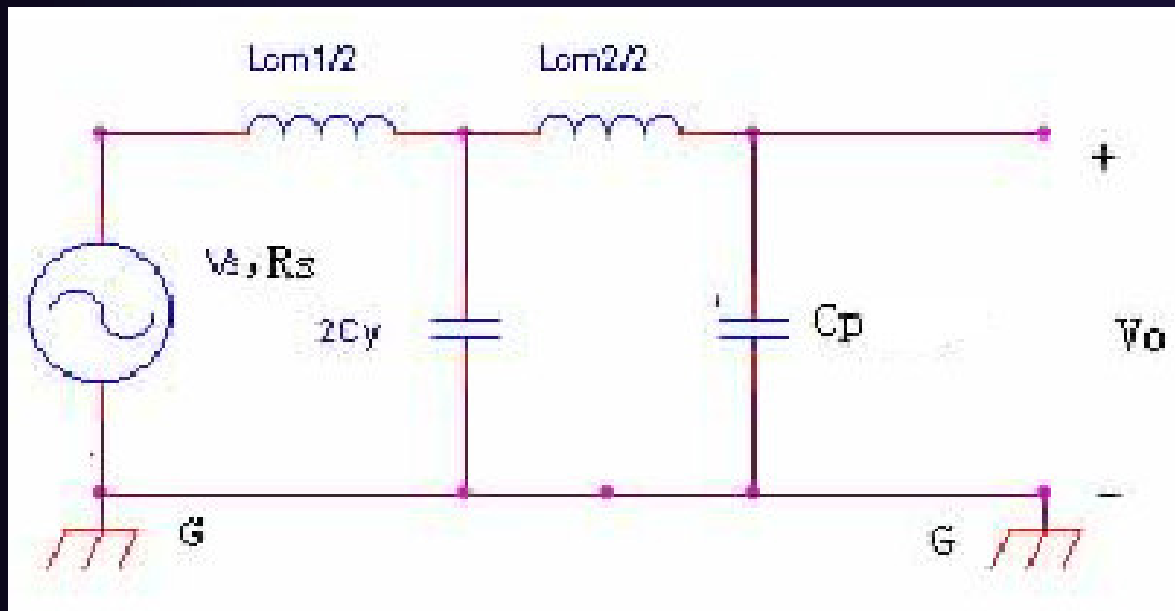
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 共模滤波等效电路



## 开关电源EMI耦合途径的切断

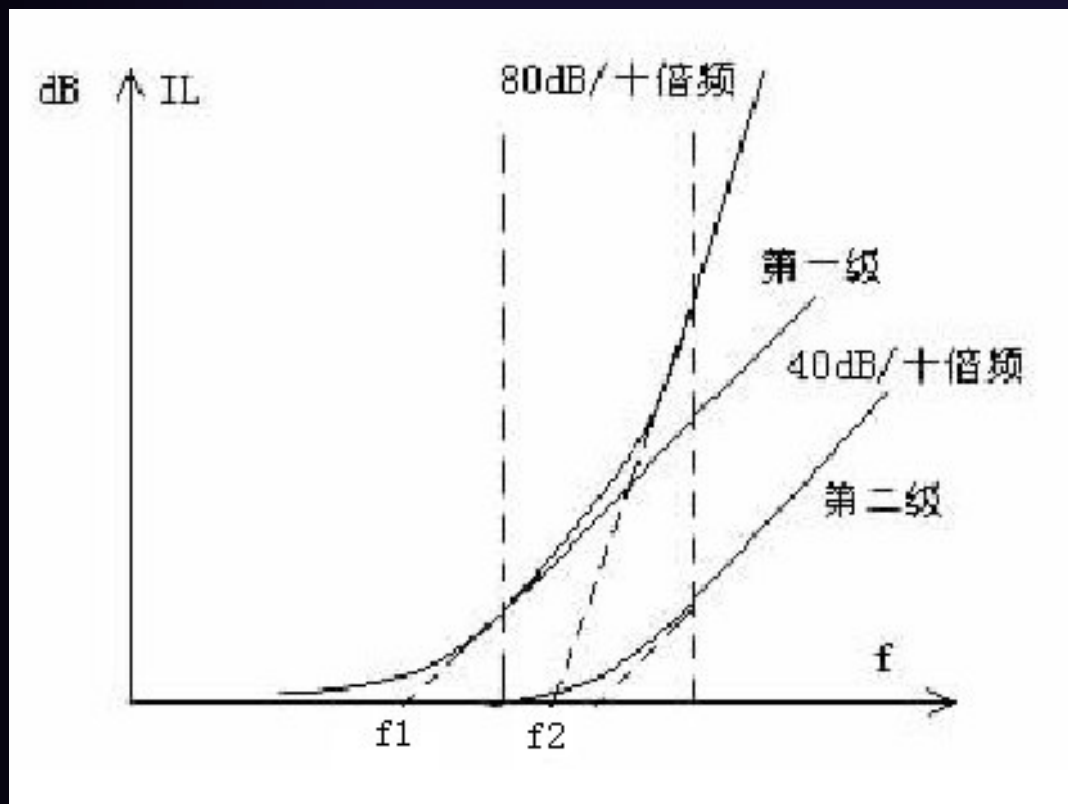
- 应用戴维南和互易定理，将噪声源放在左边



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

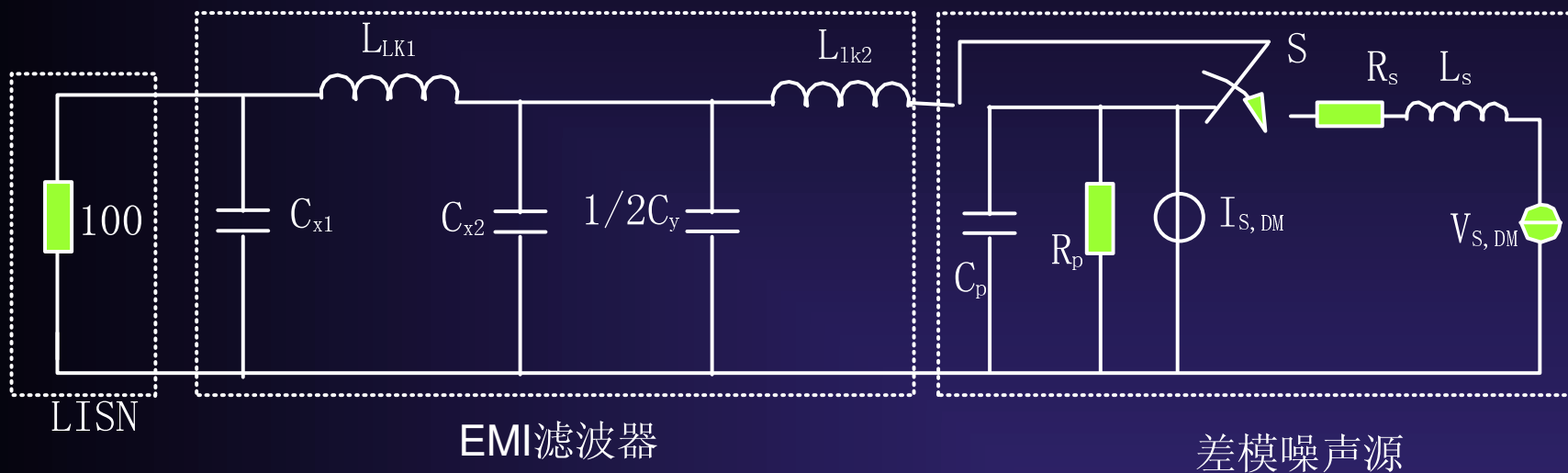


$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{cm1} 2C_y}}$$

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

# 开关电源EMI耦合途径的切断

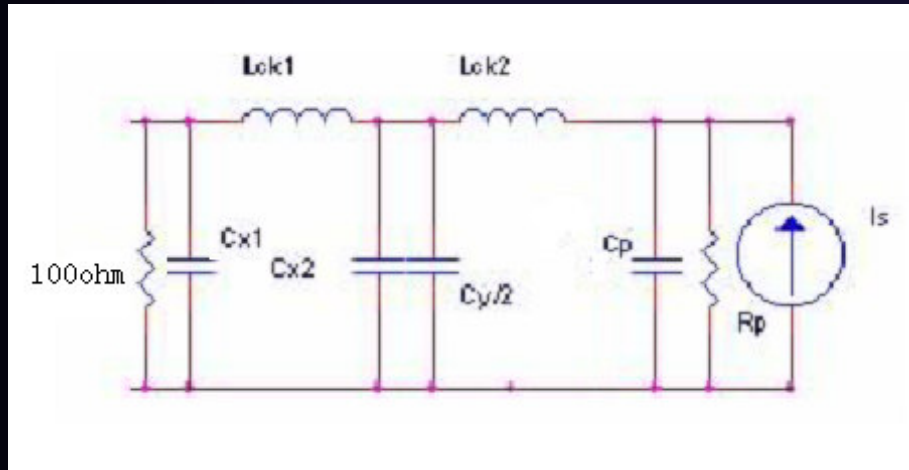
- 差模滤波等效电路



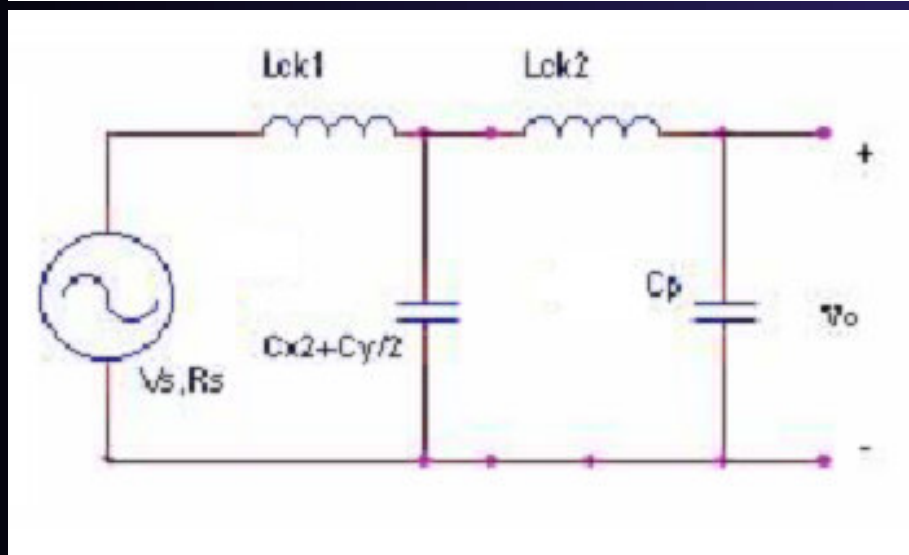


# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 当输入整流桥关断时，对应S关断时的等效电路



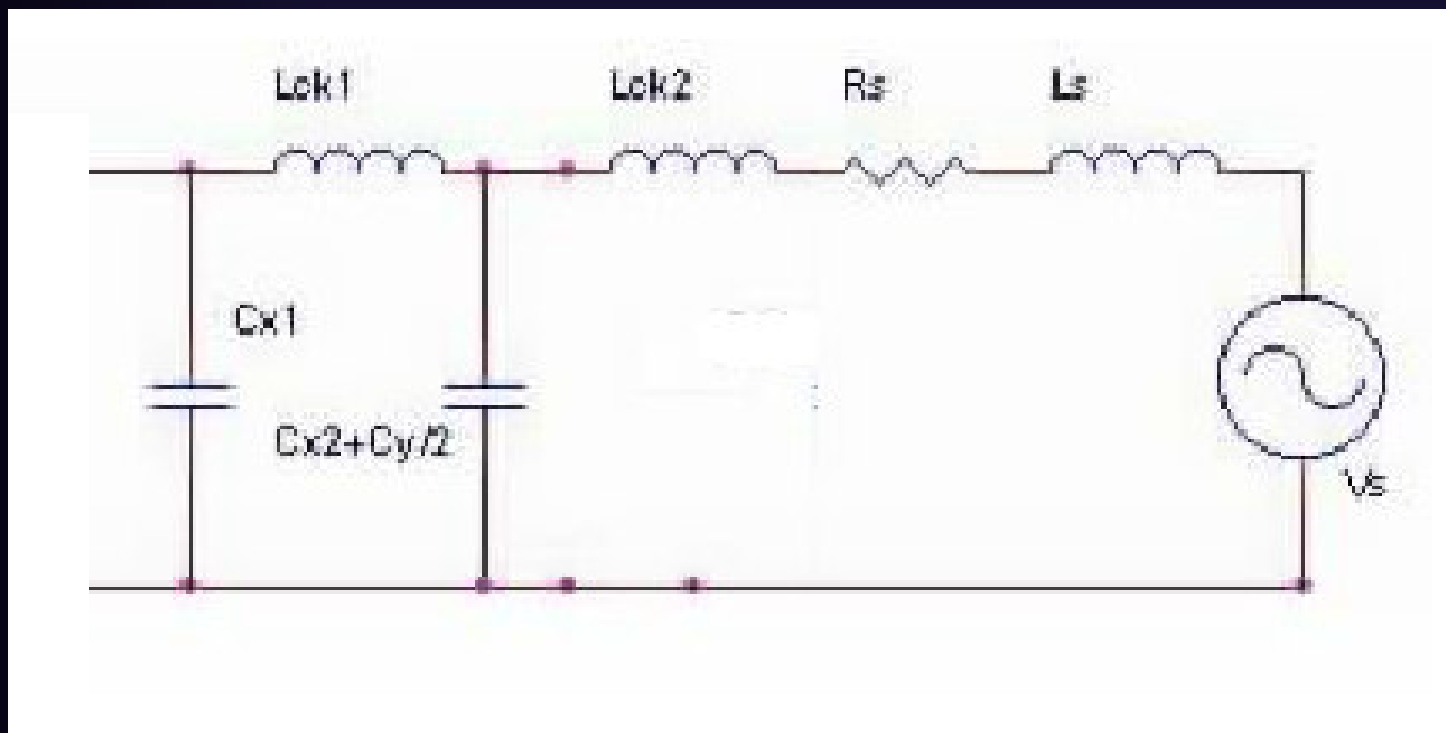
$$\frac{1}{j\omega C_{x1}} \ll 100\Omega$$
$$j\omega L_{lk1} \gg 100\Omega$$



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

## 开关电源EMI耦合途径的切断

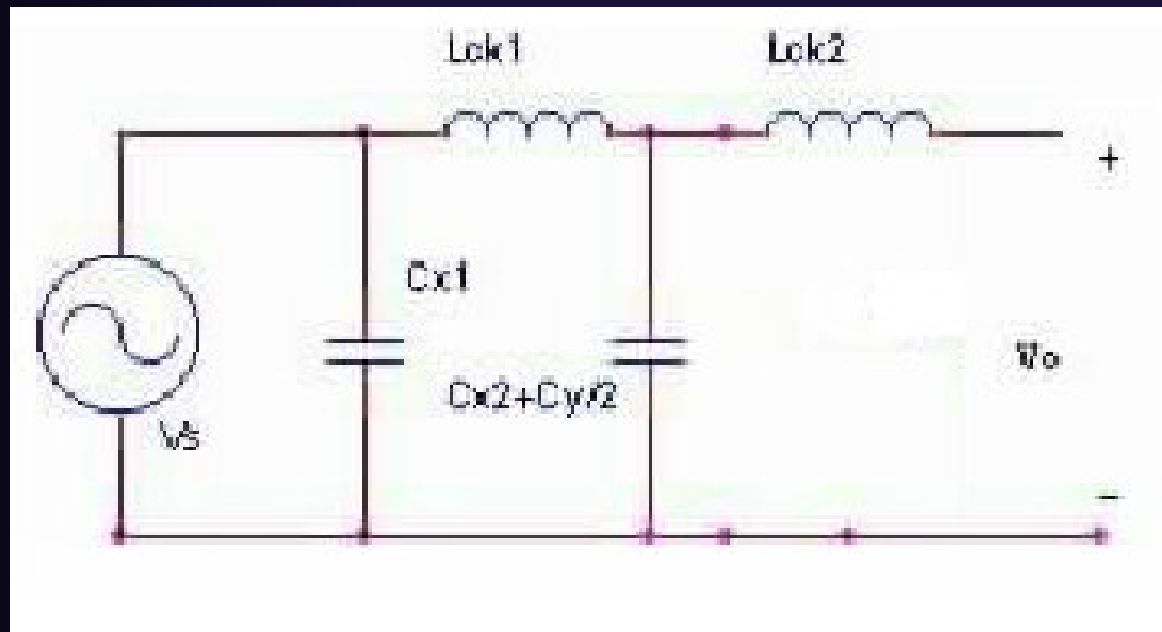
- 当输入整流桥导通时，对应S闭合时的等效电路



# 开关电源EMI耦合途径的切断

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

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

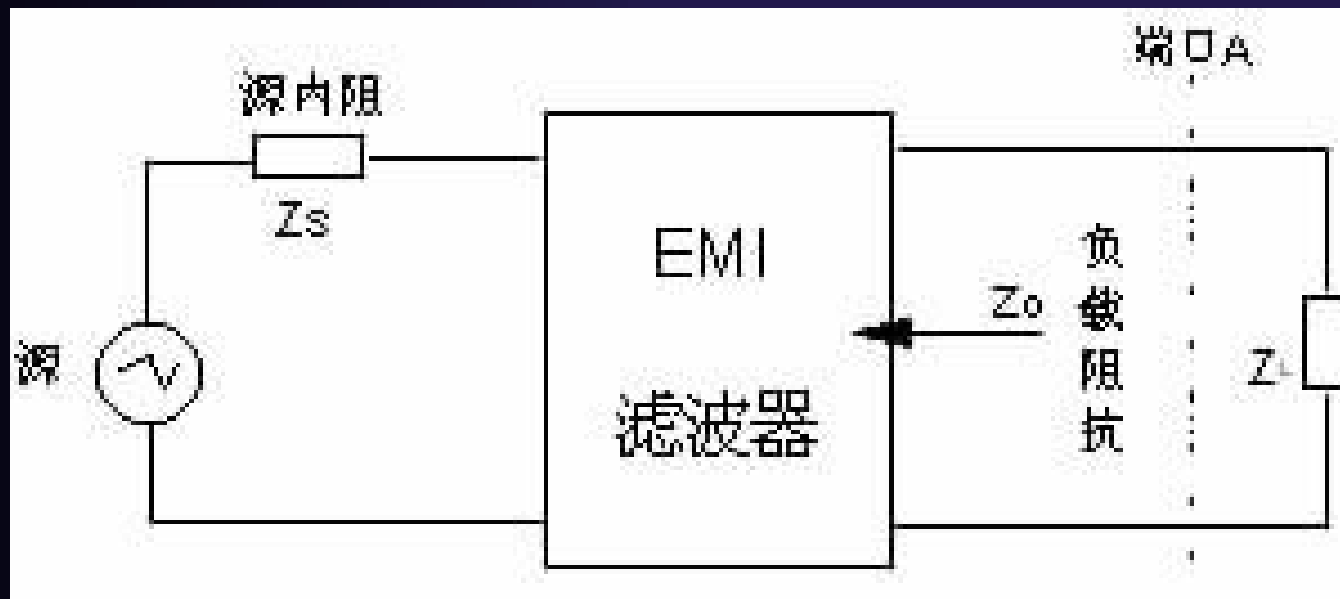


差模插入损耗曲线以及滤波器的剪切频率同前

# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 阻抗失配原则

- 当滤波器输出阻抗 $Z_0$ 和与之端接的负载阻抗 $Z_L$ 不相等时，在该端口A上产生反射。反射系数 $\rho$ 定义为： $\rho = (Z_0 - Z_L) / (Z_0 + Z_L)$

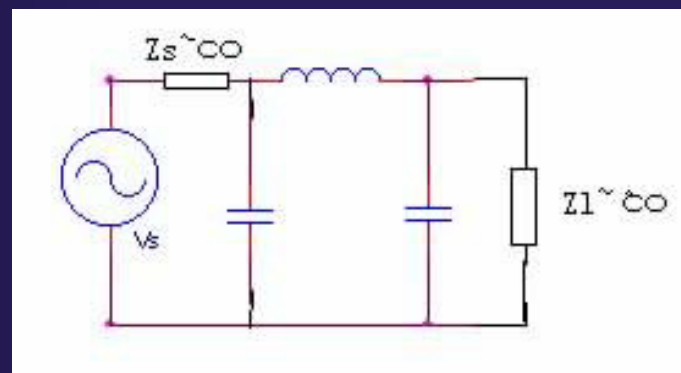
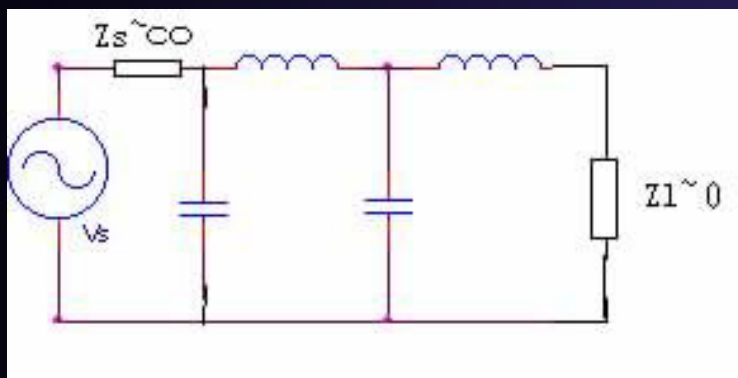
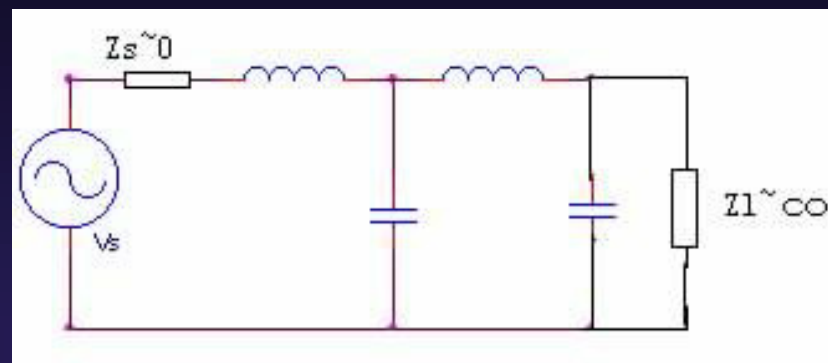
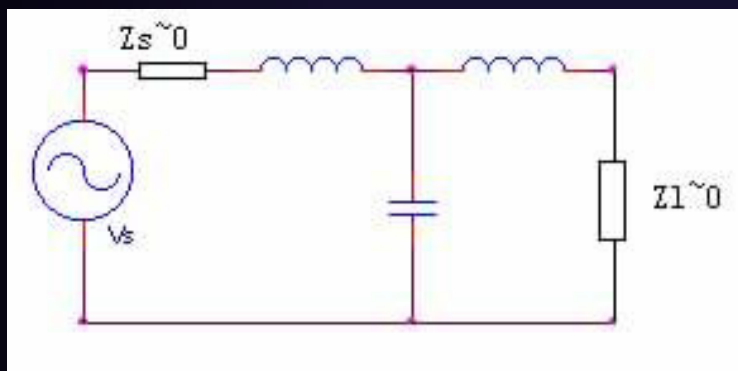


## 开关电源EMI耦合途径的切断

- $Z_0$ 与 $Z_L$ 相差越大， $\rho$ 便越大，端口A产生的反射将越大。因此电源EMI滤波器的输出阻抗与噪声源阻抗失配越严重，滤波器性能越好。这就是滤波器结构选取的“阻抗失配”原则，这是与信号滤波器最大的区别之处。厂家给出的滤波器或元器件的插损曲线都是在源阻抗和负载阻抗为 $50\Omega$ 的情况下测得的，而实际应用时源阻抗和负载阻抗往往都不是50，并且会随频率而变化，所以在标准50系统下具有良好插损特性的滤波器在实际电路中也不一定有效，甚至有时更差，所以必须按照阻抗失配的原则选择滤波器结构。

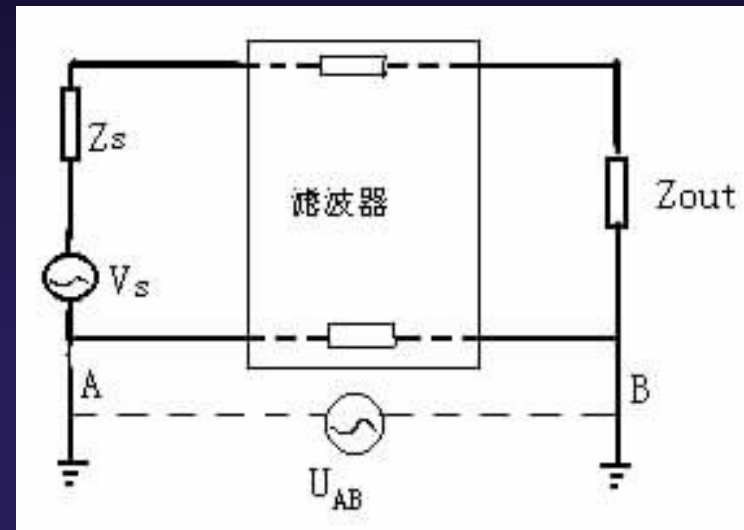
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 阻抗失配的例子



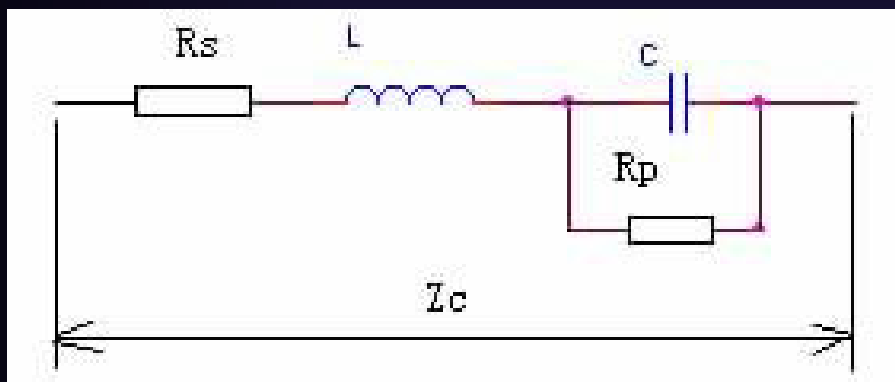
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 平衡阻抗
  - 如果A点和B点的地电位不同，存在一定电位差 $U_{ab}$ ，或者由于外界电磁场的作用，在回路中产生感应电动势 $U_{ab}$ ，则 $U_{ab}$ 将加到输入和输出之间的L和N线上，如果L和N线对地阻抗不对称，则 $U_{ab}$ 在两根线上产生的共模电流大小不等，最后在输出 $Z_{out}$ 端产生差模电压，这是一种共模干扰。所以在设计滤波器时，尽量保证每条线上的阻抗一致，即将不平衡网络转换为平衡网络



# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 滤波器器件——电容

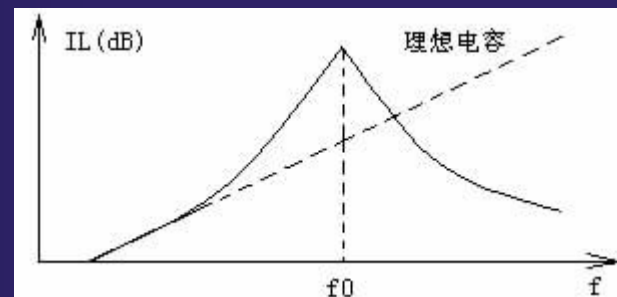
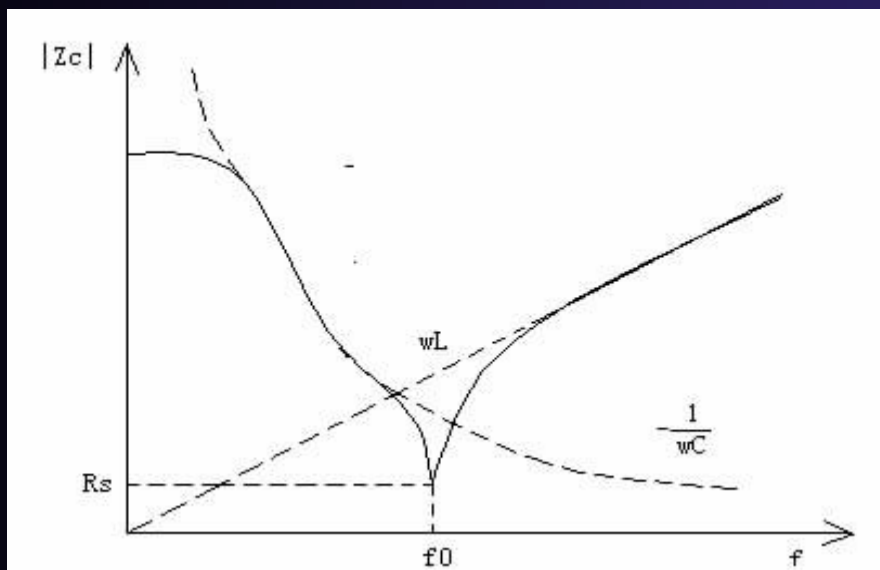


$$Z_c = R_s + j\omega L + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C}$$

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

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

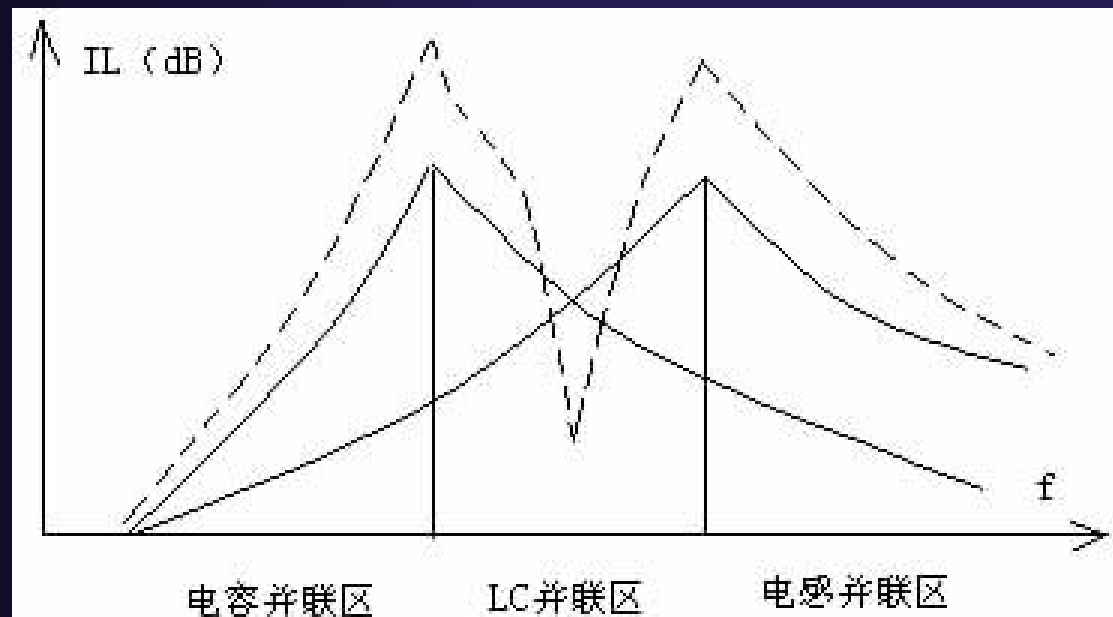
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$





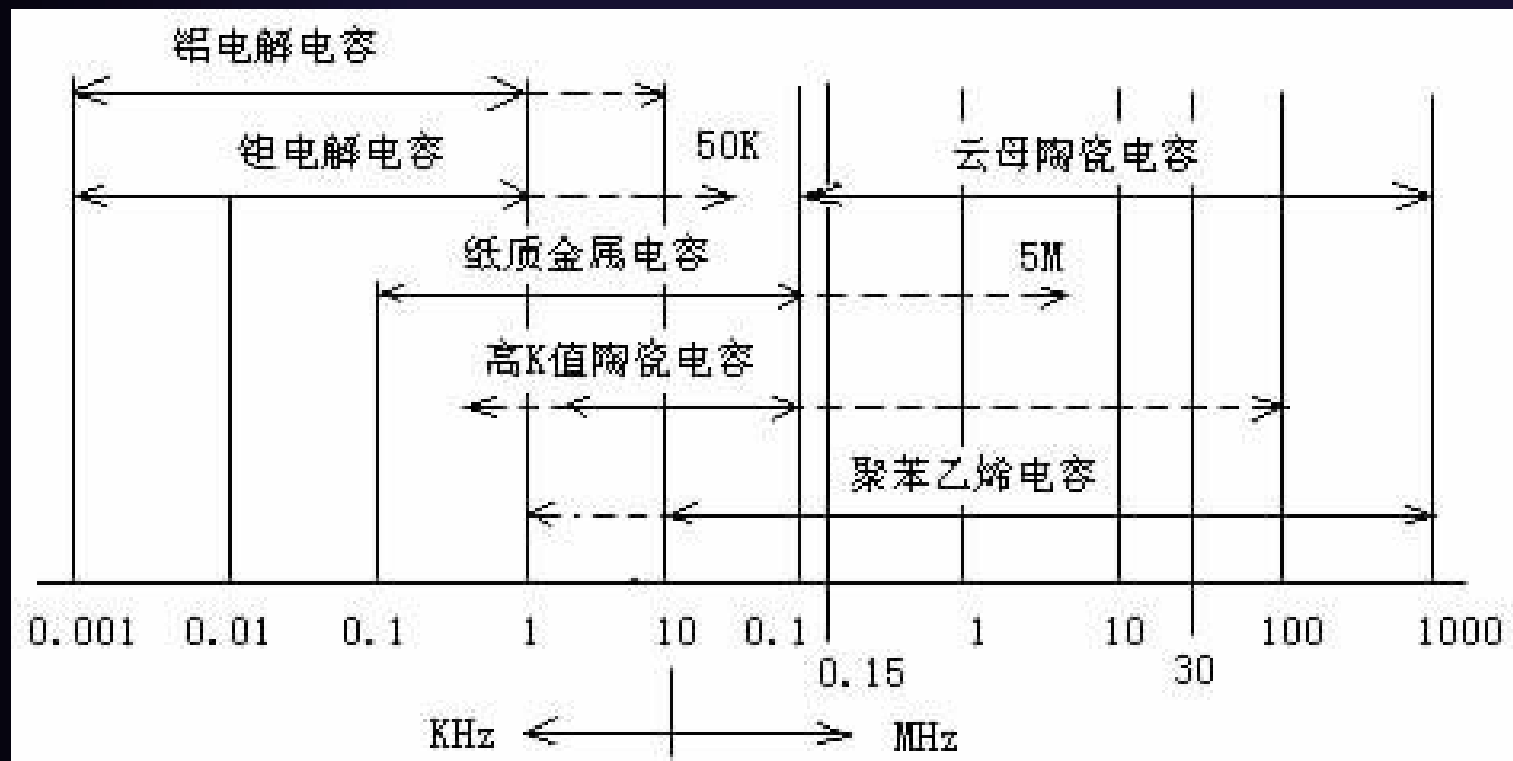
## 开关电源EMI耦合途径的切断

- 提高谐振频率的方法是减小引线电感和电容，但有时为了要滤除频率较低的干扰信号必须使用较大的电容。因此减小引线电感才是最有效的方法
- 即用一个电容和一个小电容并联起来使用的解决方案



# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 电容的选择



# 开关电源EMI耦合途径的切断

## ● 电容的选择

### X电容

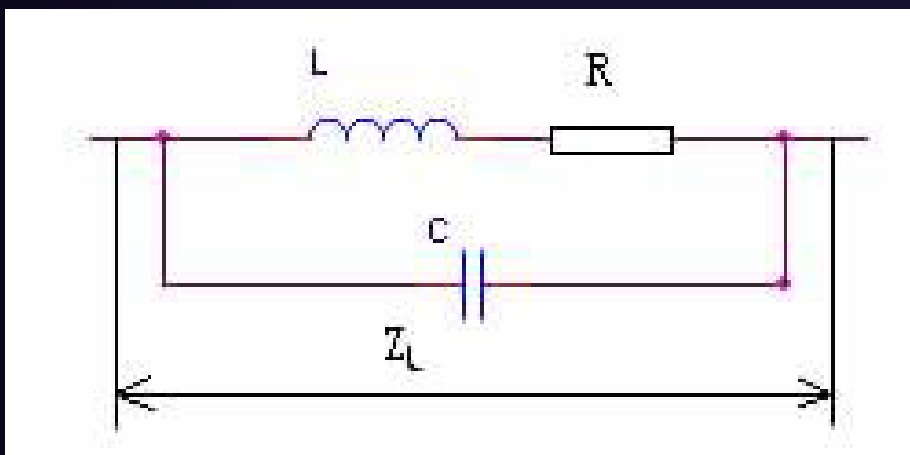
安规电容安全等级	应用中允许的峰值脉冲电压	过电压等级 (IEC664)	应用场合	耐压测试中施加峰值脉冲电压 $U_p$
X1	$>2.5kV$ $\leq 4.0kV$	III	高脉冲电压	当 $C_R \leq 1.0\mu F$ , $U_p = 4.0kV$ ; 当 $C_R > 1\mu F$ , $U_p = 4/C_R^{1/2} kV$ .
X2	$\leq 2.5kV$	II	普通	当 $C_R \leq 1.0\mu F$ , $U_p = 2.5kV$ ; 当 $C_R > 1.0\mu F$ , $U_p = 2.2/C_R^{1/2}$
X3	$\leq 1.2kV$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

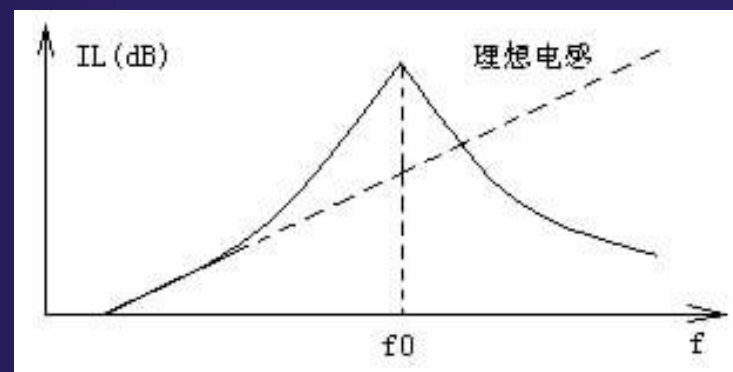
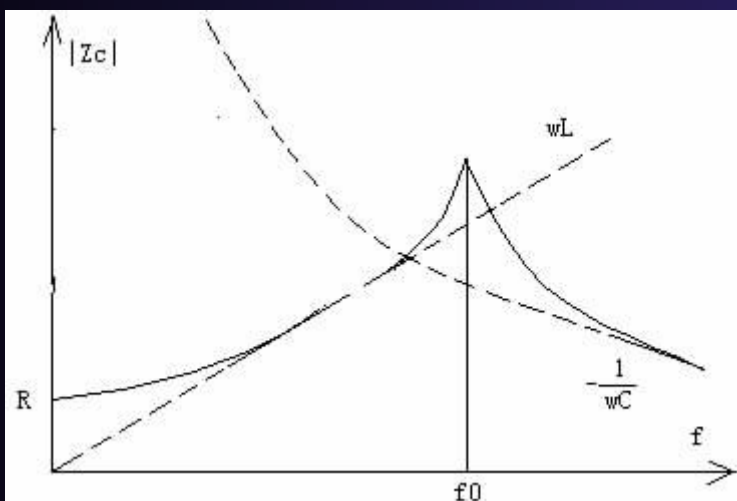
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 滤波器件——电感



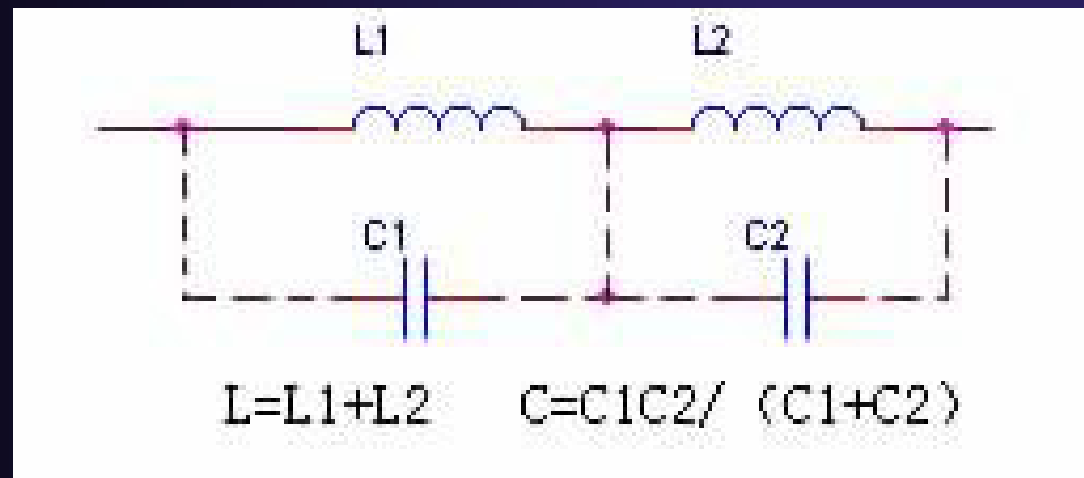
$$Z_L = \frac{1}{j\omega C} \parallel (R + j\omega L)$$

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



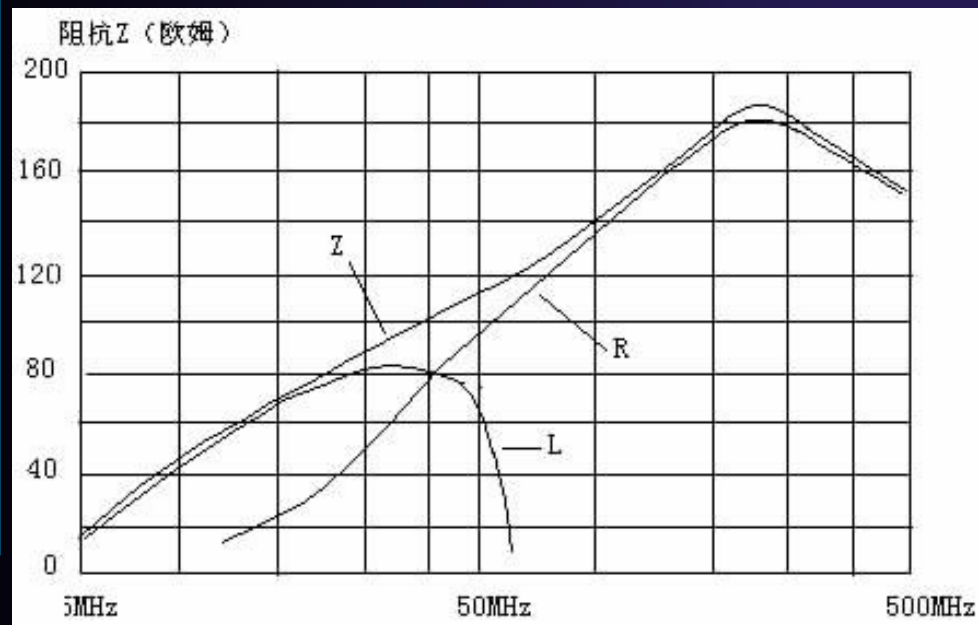
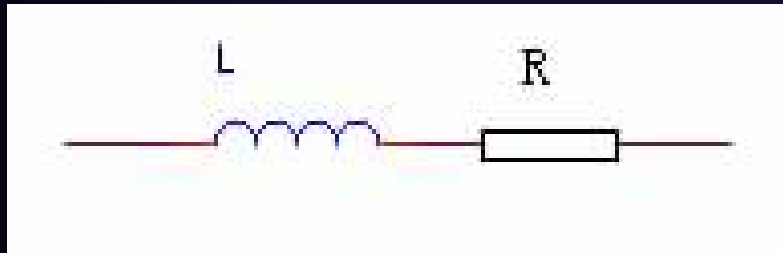
## 开关电源EMI耦合途径的切断

- 要拓宽电感的频率范围，可以采用电容并联的思路，将两个谐振点不同的电感串联起来使用。
- 当滤波器要求不高时，也可以在同一个磁芯上将电感分段绕制。同时要注意增加电感的匝数，能够增加低频的阻抗，但由于寄生电容的存在，会降低高频的插入损耗。



# 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

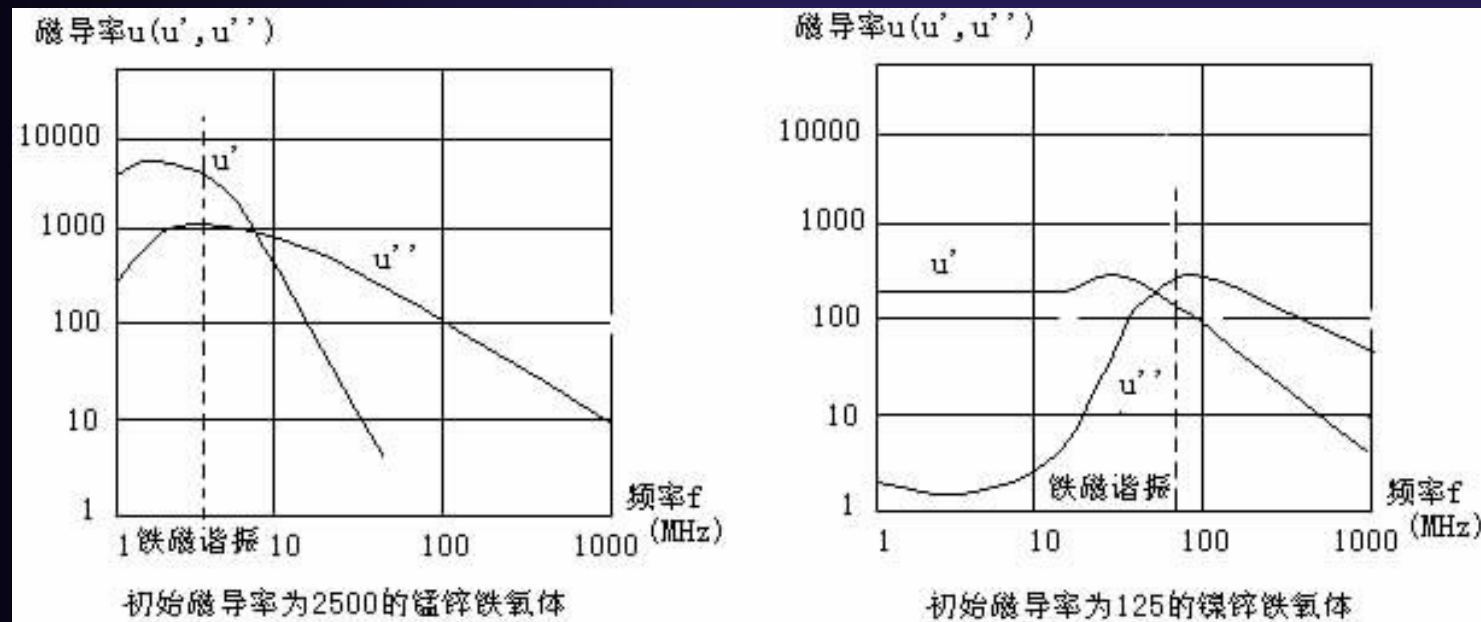
$R_e$ =铜损耗等效电阻

## 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：
  - 不太常用的，将铁氧体作为屏蔽层来做电磁场隔离。
  - 其次，将铁氧体作为电感器，构成低通滤波器。
  - 最后，最常用的是将铁氧体芯直接用于元器件的引线或PCB电路上。在这种应用中，铁氧体芯能抑制任何寄生振荡并衰减线路中的无用信号。

# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 磁导率 $\mu$ 、饱和磁通密度 $B_s$ 是铁氧体材料最重要的磁性参数。磁导率 $\mu$ 越高，意味着绕制同样的匝数其电感量越高，这是我们优选的条件之一，但同时要引起重视的是：磁导率是频率的函数，它随频率的变化明显，特别是当频率升高到一定值时，磁导率会急剧下降，这不是磁通饱和的问题（电流很小），而是由于发生了被称为自旋共振的铁磁谐振。





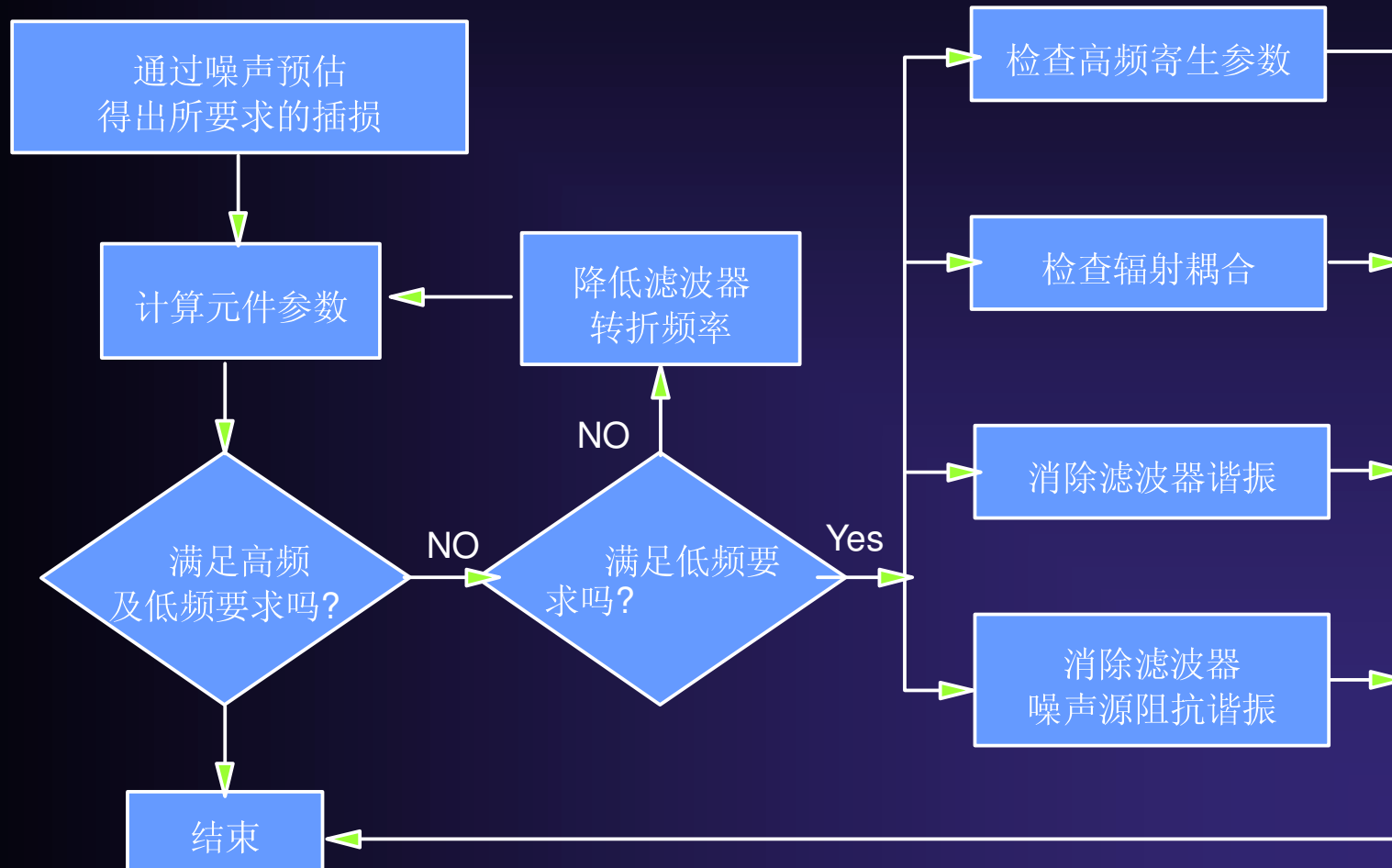
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 不同的铁氧体抑制材料，有不同的最佳抑制频率范围，与初始磁导率有关。通常材料的初始磁导率越高，适用抑制的频率就越低
- 注意：在有DC或低频AC偏流的情况下，要考虑到抑制性能的下降和饱和，尽量选用磁导率低的材料

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

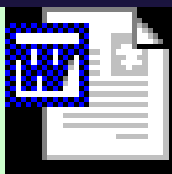
# 开关电源EMI耦合途径的切断

## ● 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



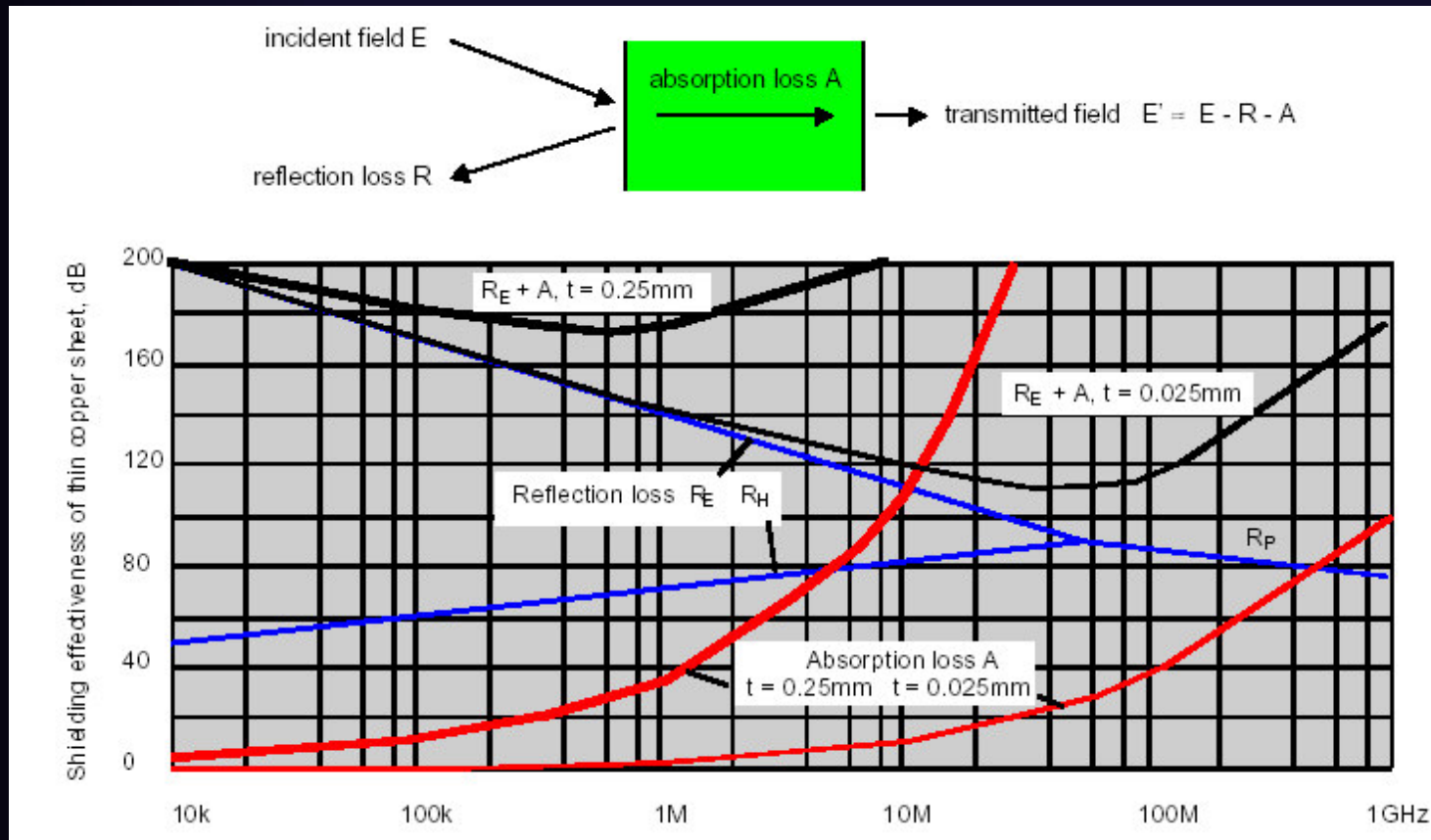
EMI滤波器

***Any Short Question***

Take a break?

# 开关电源EMI耦合途径的切断

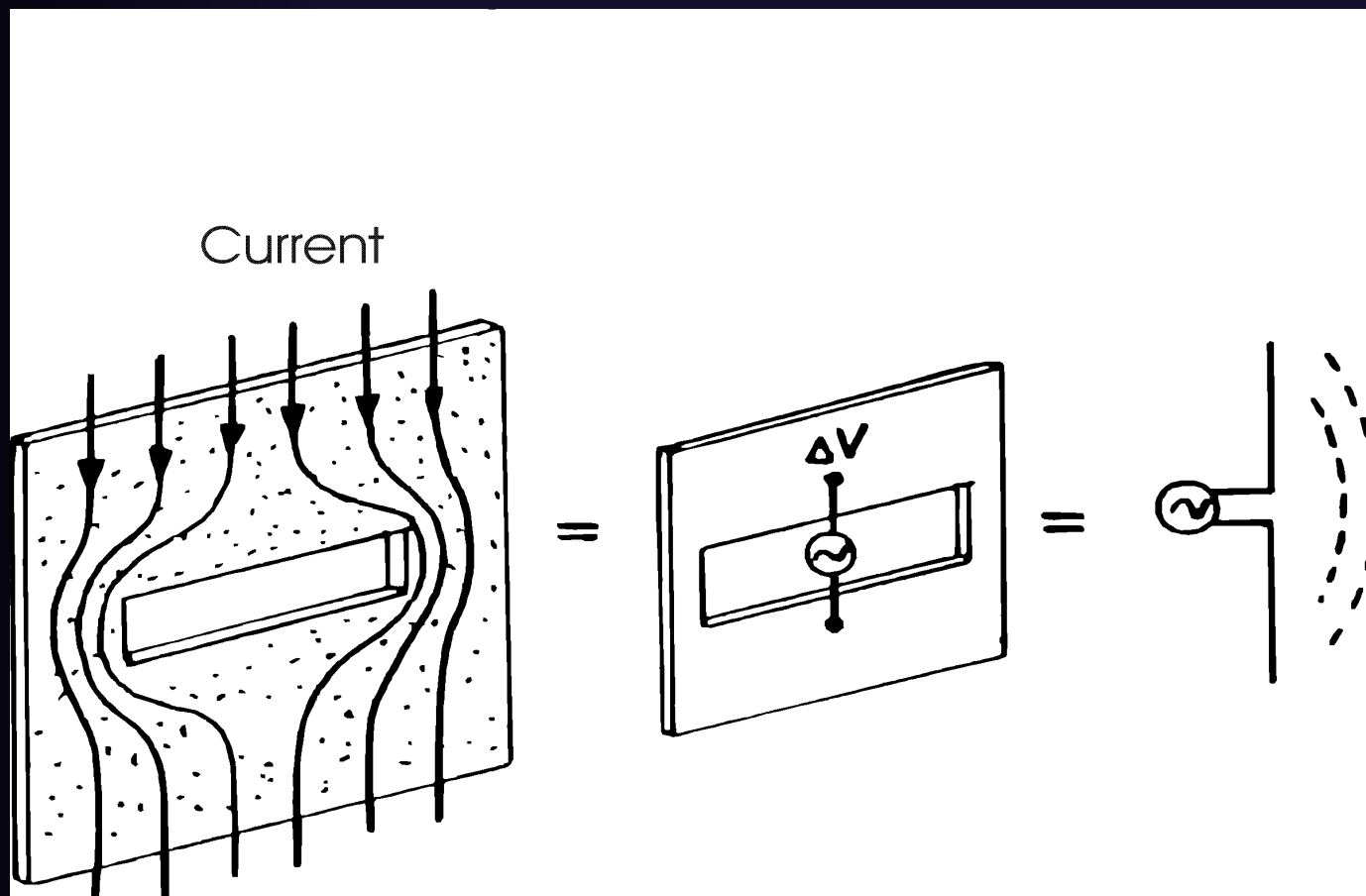
- 屏蔽



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

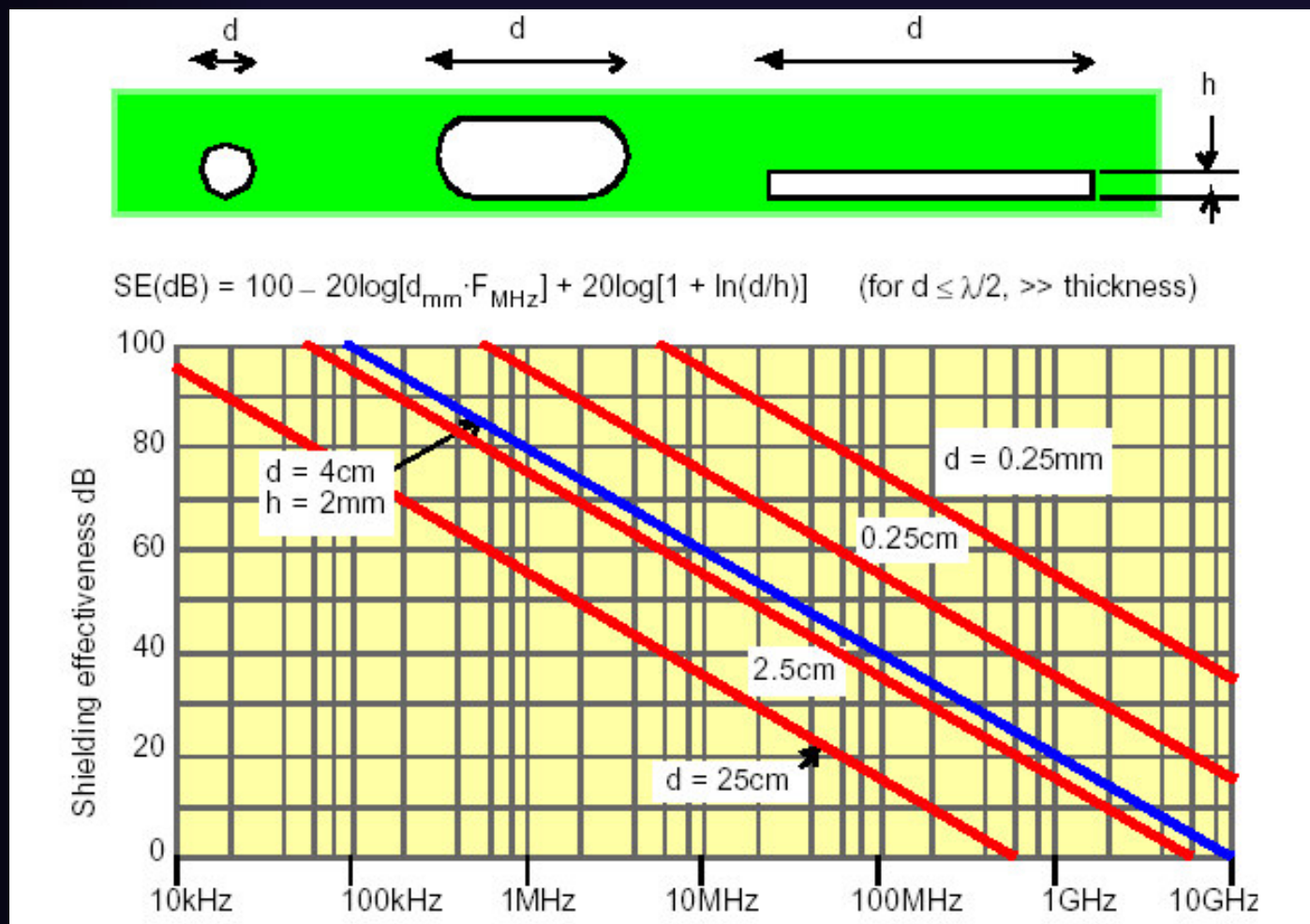
# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 孔缝形成的天线发射



# 开关电源EMI耦合途径的切断

- 当 $d=\lambda/2$ ,  $SE=0$



## 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  
 $\lambda$ —波长
- 例如：开关管关断时的上升沿为1ns，则，  
 $f = 1/(3.14 \times 10^{-9}) = 318\text{MHz}$ ，  
 $l = 3 \times 10^8 / (318 \times 10^6) = 0.94\text{m}$   
 $l = 0.94 / 100 = 9.4\text{mm}$

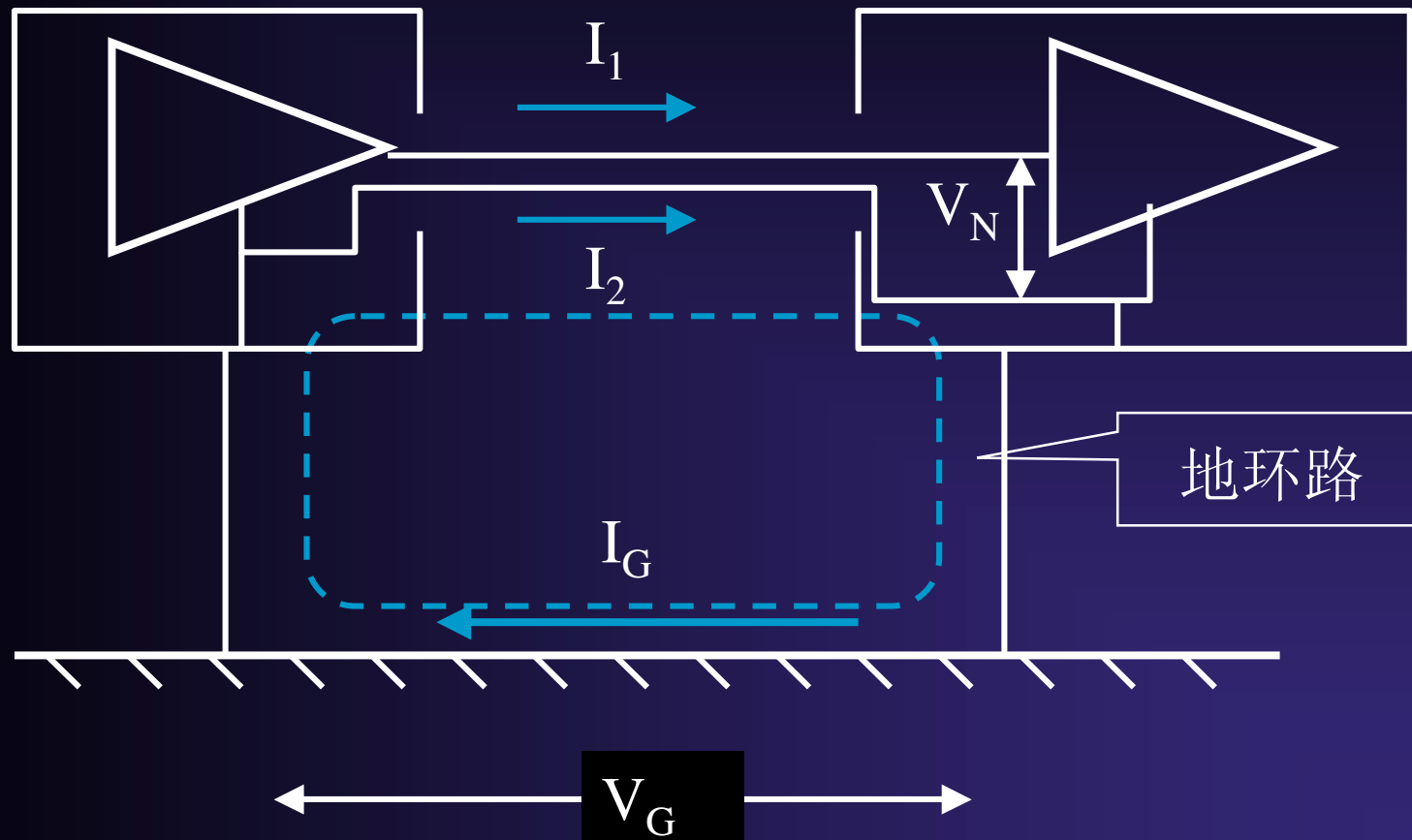


## 接地和地环路

- 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）

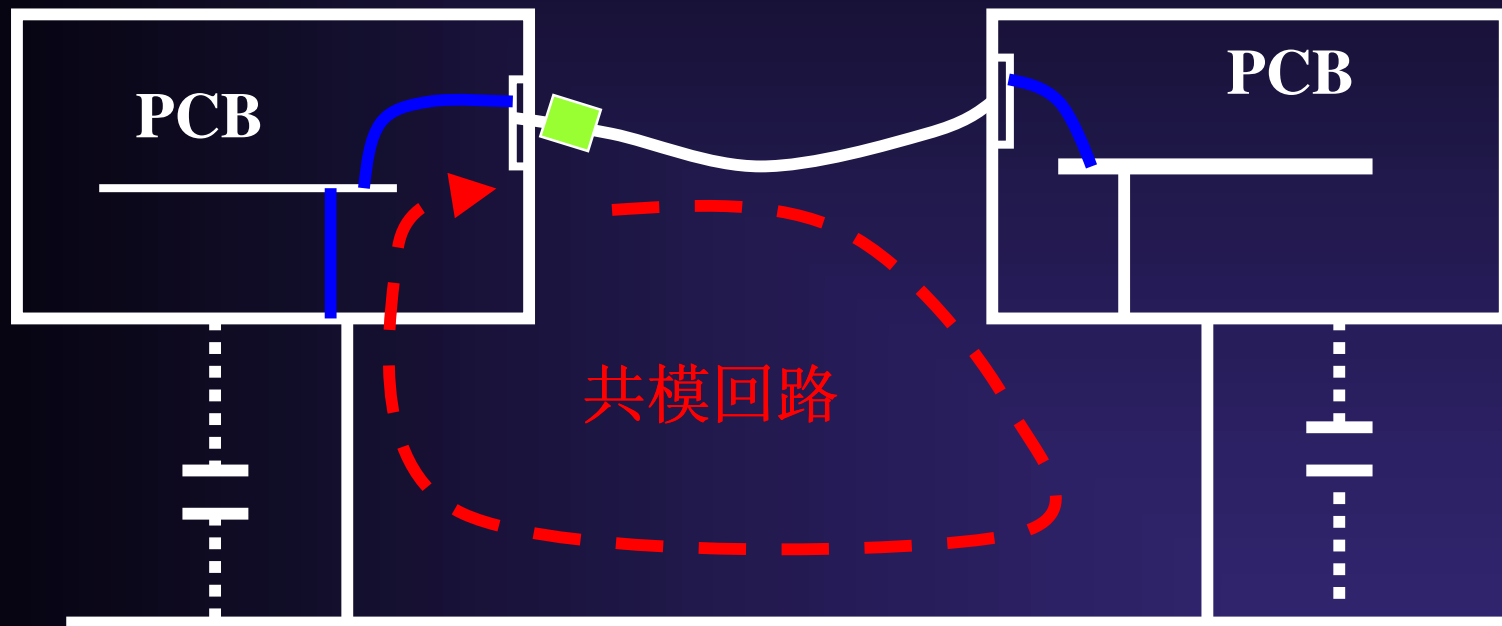
# 接地和地环路

- 典型地环路模型



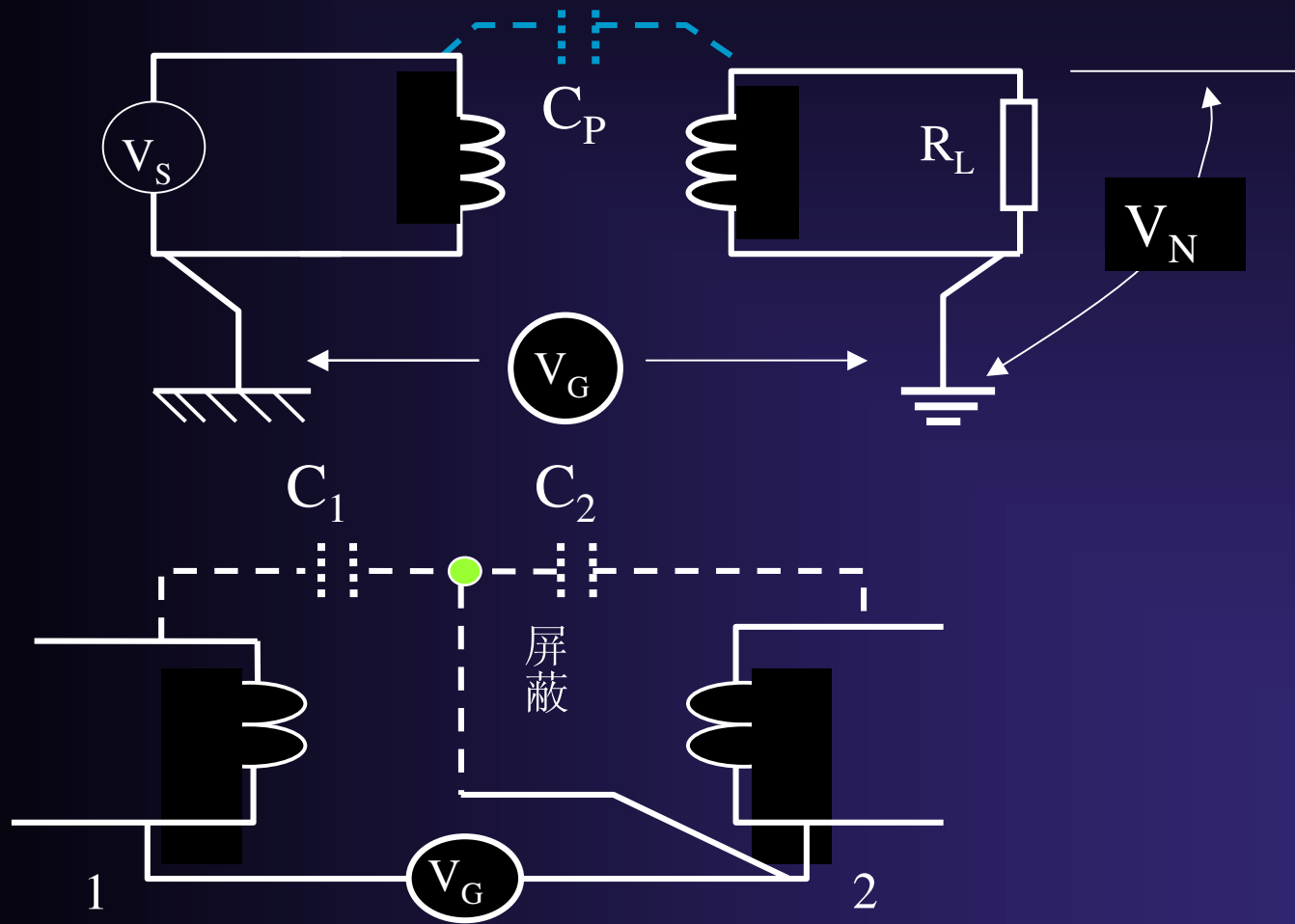
# 接地和地环路

- 增加共模回路的阻抗



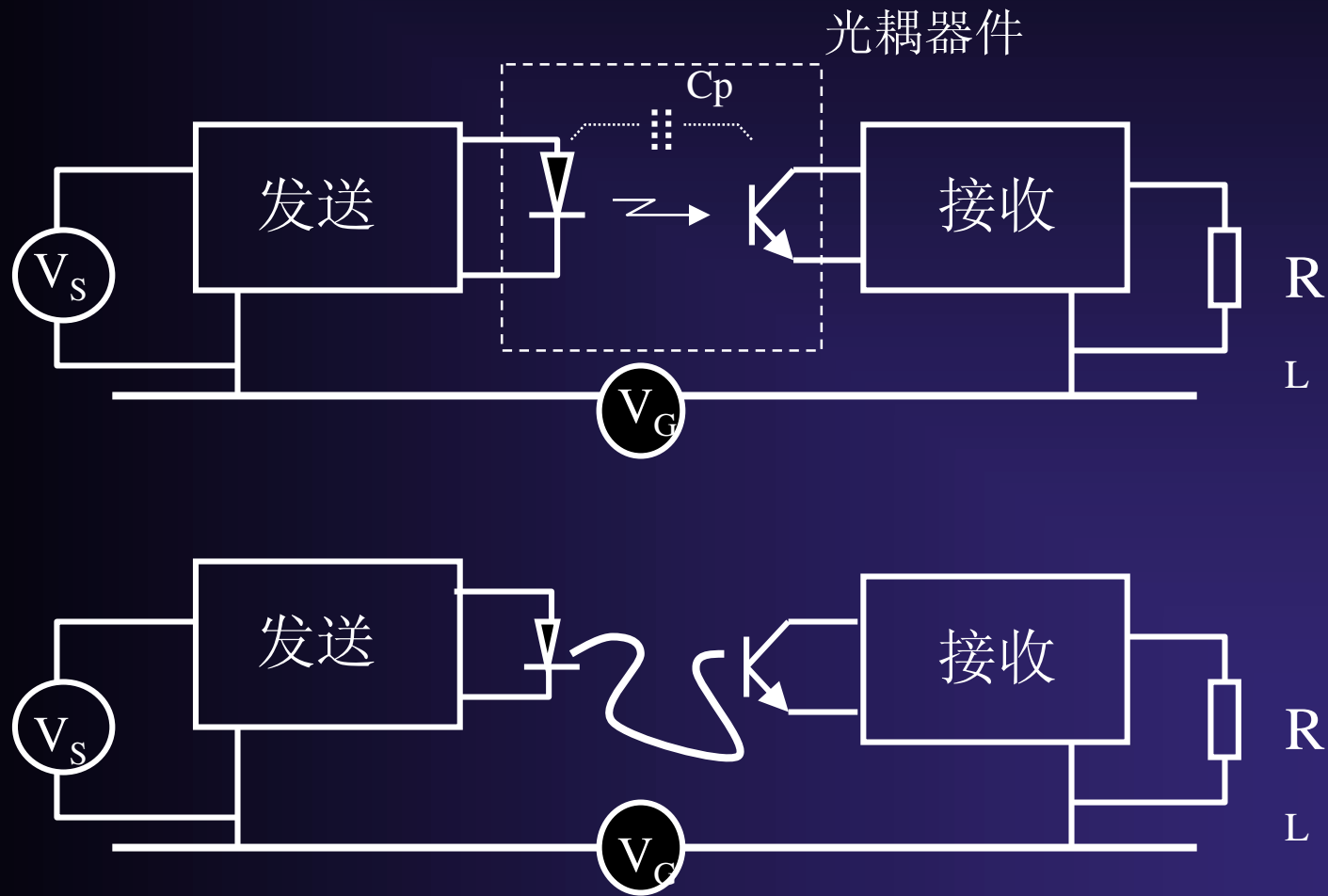
# 接地和地环路

- 增加隔离变压器



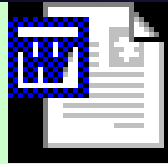
# 接地和地环路

- 增加光电隔离器

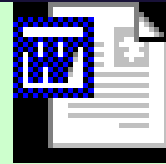


# 接地和地环路

- 实际应用案例分析



地环路——UPS输出传导



地环路——共零线

# 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：
  - EMI的噪声源主要集中在功率主电路
  - 噪声的频率主要集中在200MHz以下，因此串扰等问题相比不突出
  - 噪声的发射效率与主电路的布线中所形成的天线形状和长度密切相关
  - 由于 $dv/dt$ 和 $di/dt$ 较大，而功率电路的结构日趋紧凑，因此近场耦合比较严重

# PCB LAYOUT

- 功率主电路的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。

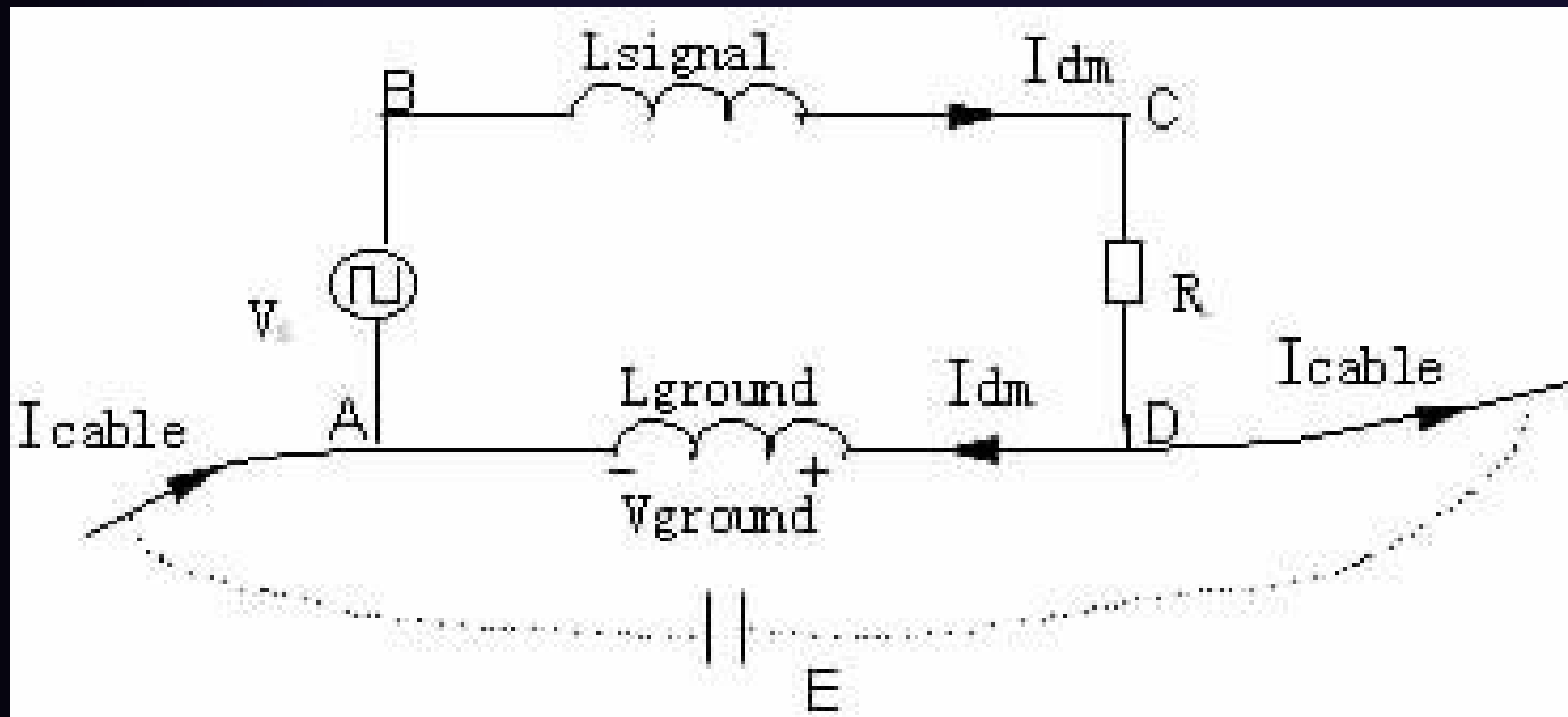


# PCB LAYOUT

- PCB辐射场产生的原因
  - 差模回路形成的环形天线辐射
  - 共模电流形成的偶极子天线
  - 电路形成了共模不平衡偶极子天线

# PCB LAYOUT

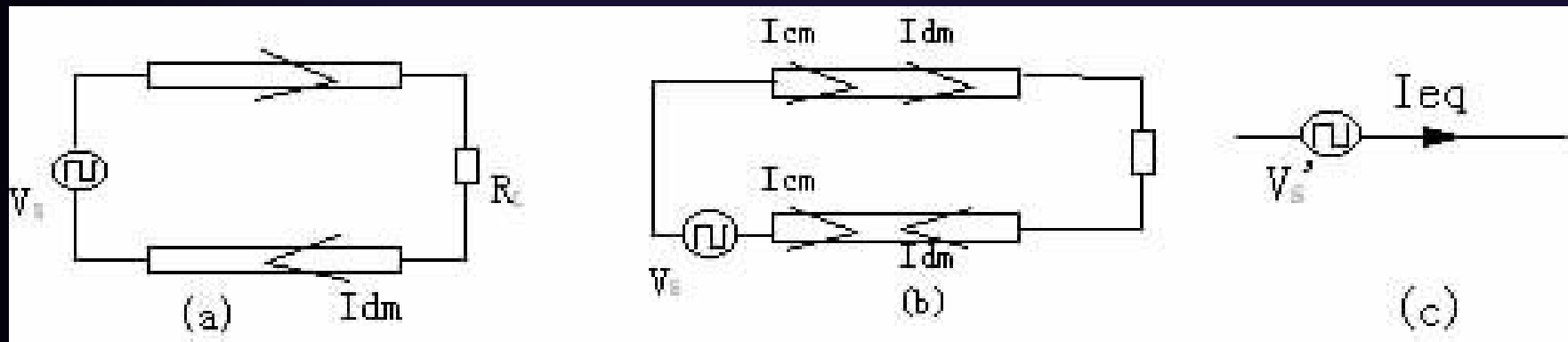
- 前两种方式



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

# PCB LAYOUT

- 共模不平衡偶极子天线



所示电压源 $V_s$ 的连接使PCB轨线不平衡，虽然两根轨线所生产的场强也相互削弱，但若轨线相距远小于其长度，则会产生同方向的共模电流。共模电流所产生的场强将远大于差模电流所产生的场强，因为它们电流方向一致，因而产生场强是同向叠加的。

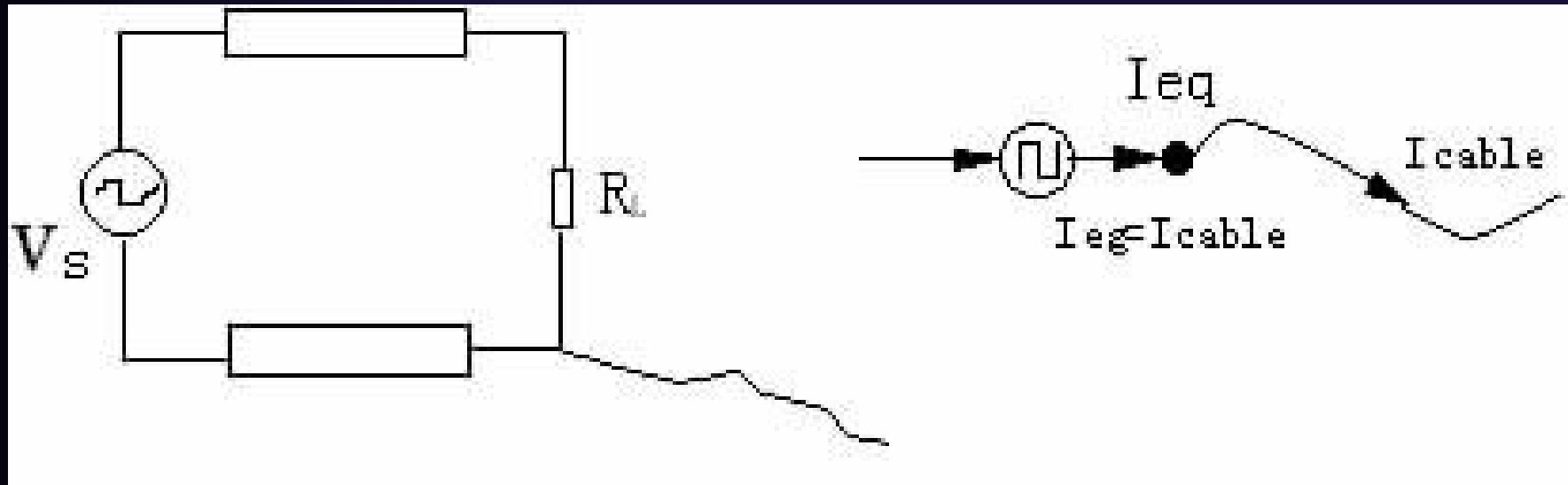
# PCB LAYOUT

- PCB EMC 布局原则

- 对于差模回路形成的环形天线辐射，由于不可能做到环路走线的对称，因此在PCB布局上满足工作绝缘的前提下，要尽量减小来回走线之间的距离，以减小差模环路面积以降低天线辐射效率和辐射能量。
- 因共模电流是辐射干扰产生的重要原因，所以首先应减小PCB的共模电流。主要通过减小工作电流，或增加脉冲上升时间。
- 减小地线电感，在PCB附近或PCB层内放置导体层。该PCB轨线的镜像电流产生的辐射场将抵消流经PCB布线的共模或差模电流产生的辐射场

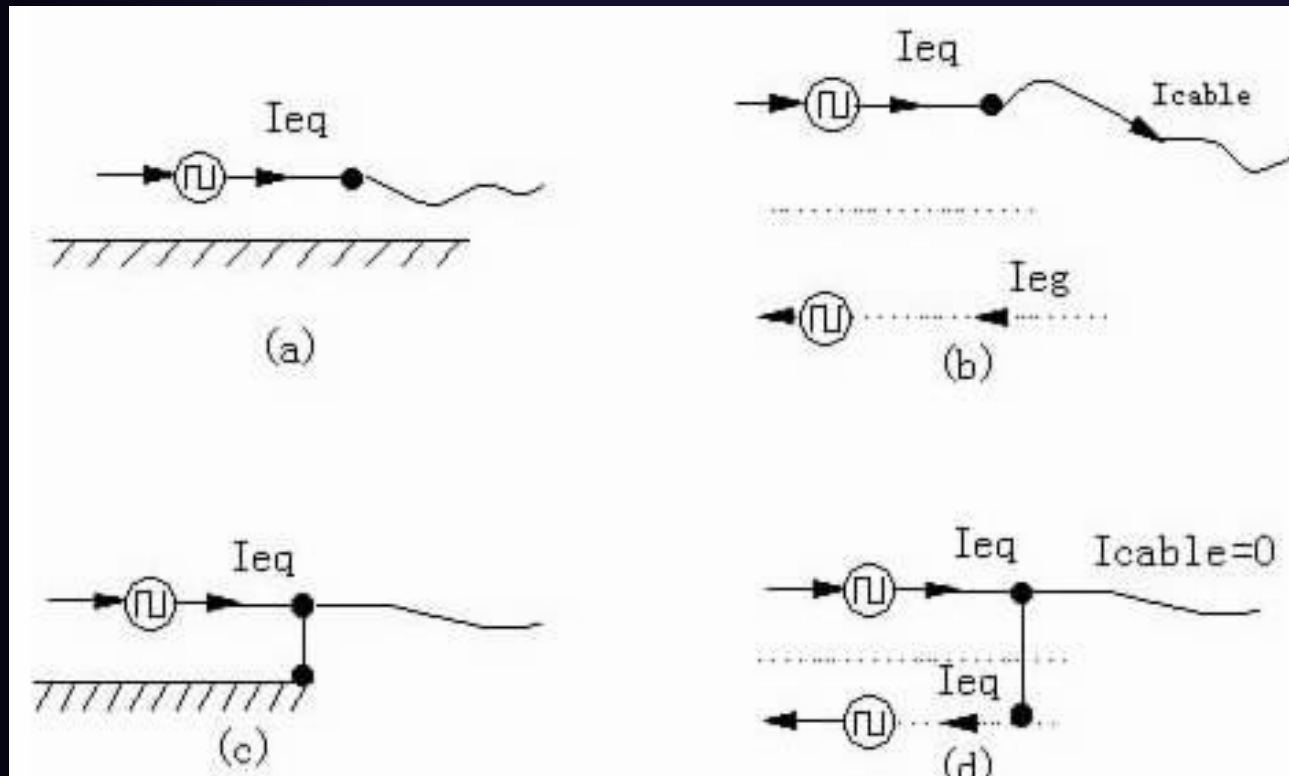
# PCB LAYOUT

- 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



# PCB LAYOUT

- 放置在PCB轨线下的导体平面称为镜像平面



若在PCB轨线下放置导电平面：如图（a）所示，则只减小PCB轨线的电感及噪声电压，外接电缆上仍有电流流过。若将电缆与PCB轨线的连接点用导线与镜像平面连接图（c），则电路可等效为图（d），因镜像电流的作用而使电缆电流为零，从而降低了电缆的辐射

# 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。





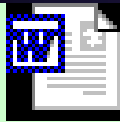
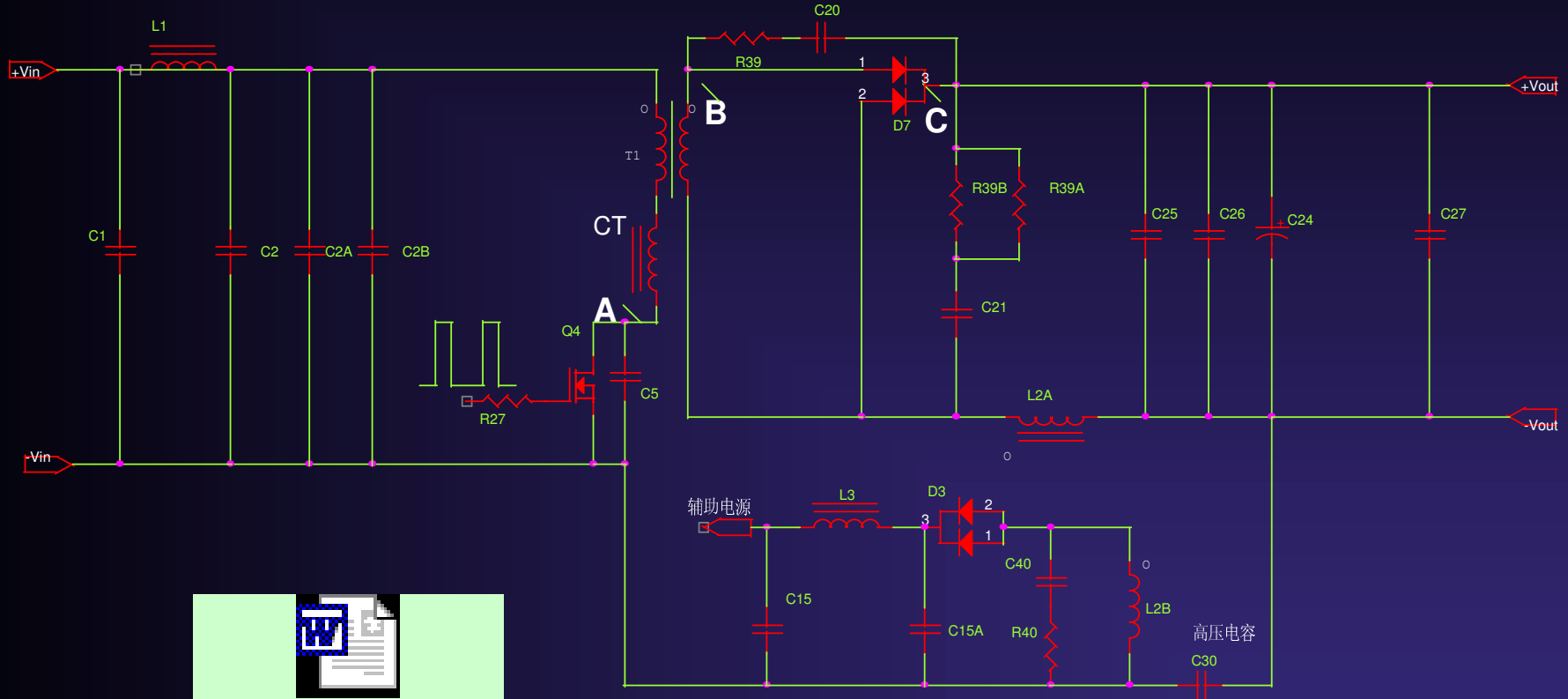
# PCB LAYOUT

- 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。

# PCB LAYOUT

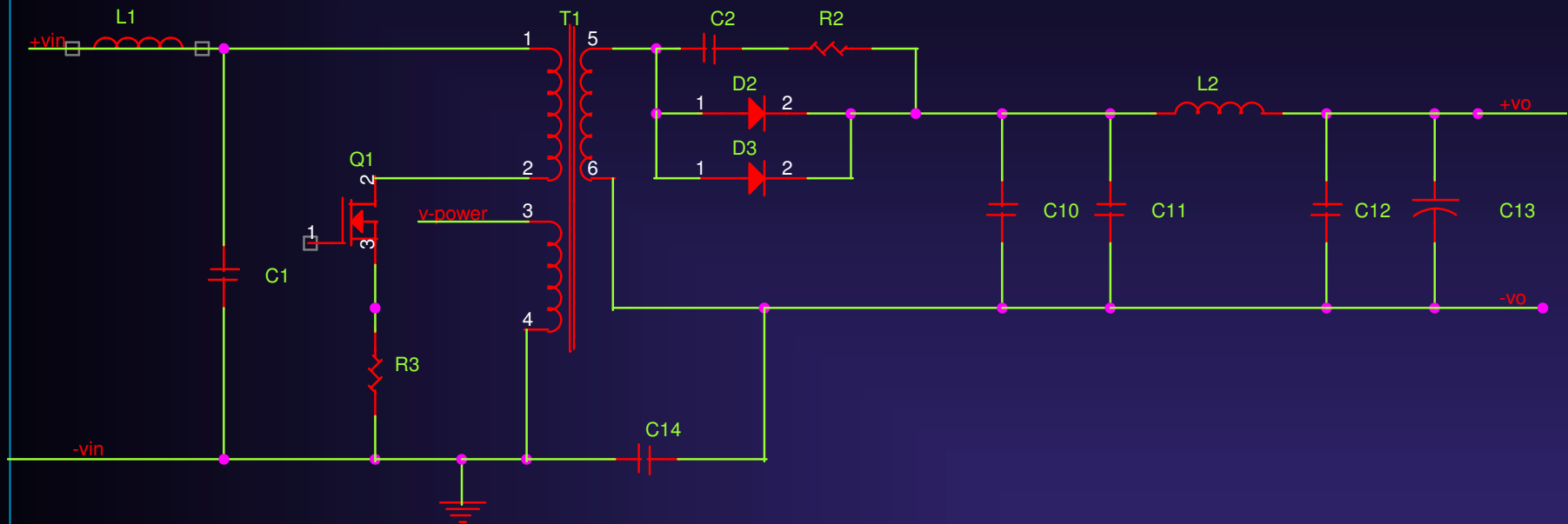
- 单端正激电路在PCB EMC布局方面的注意事项及相关对策



正激电路LAYOUT

# PCB LAYOUT

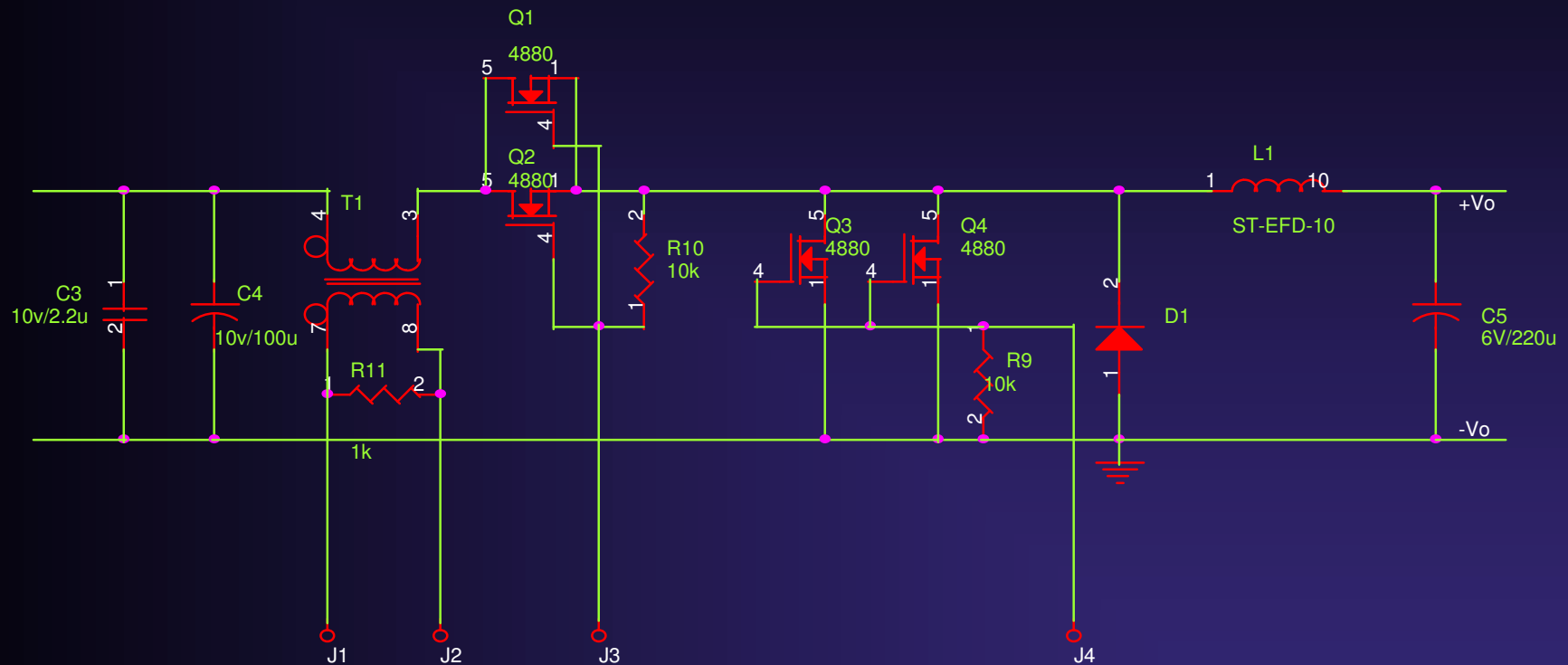
- 单端反激电路的布局



分析同正激电路

# PCB LAYOUT

- 非隔离电路（正激）

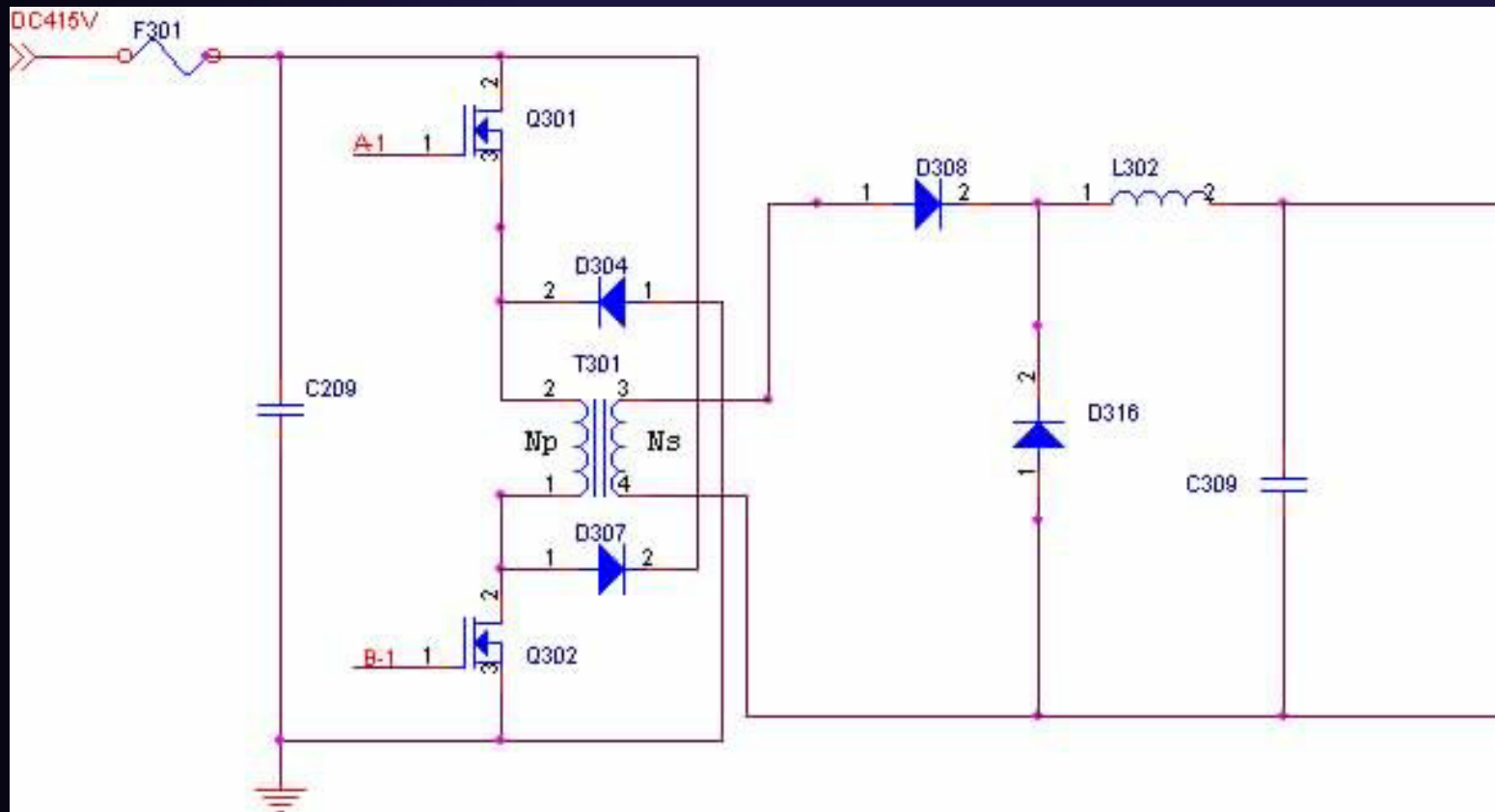


非隔离电路在回路的控制方面与正激电路也是相同的（只是没有变压器）

# PCB LAYOUT

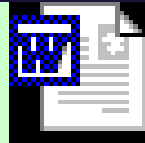
- 双正激电路的布局

- 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。



# PCB LAYOUT

- 双正激电路在PCB EMC布局的分析及相关对策

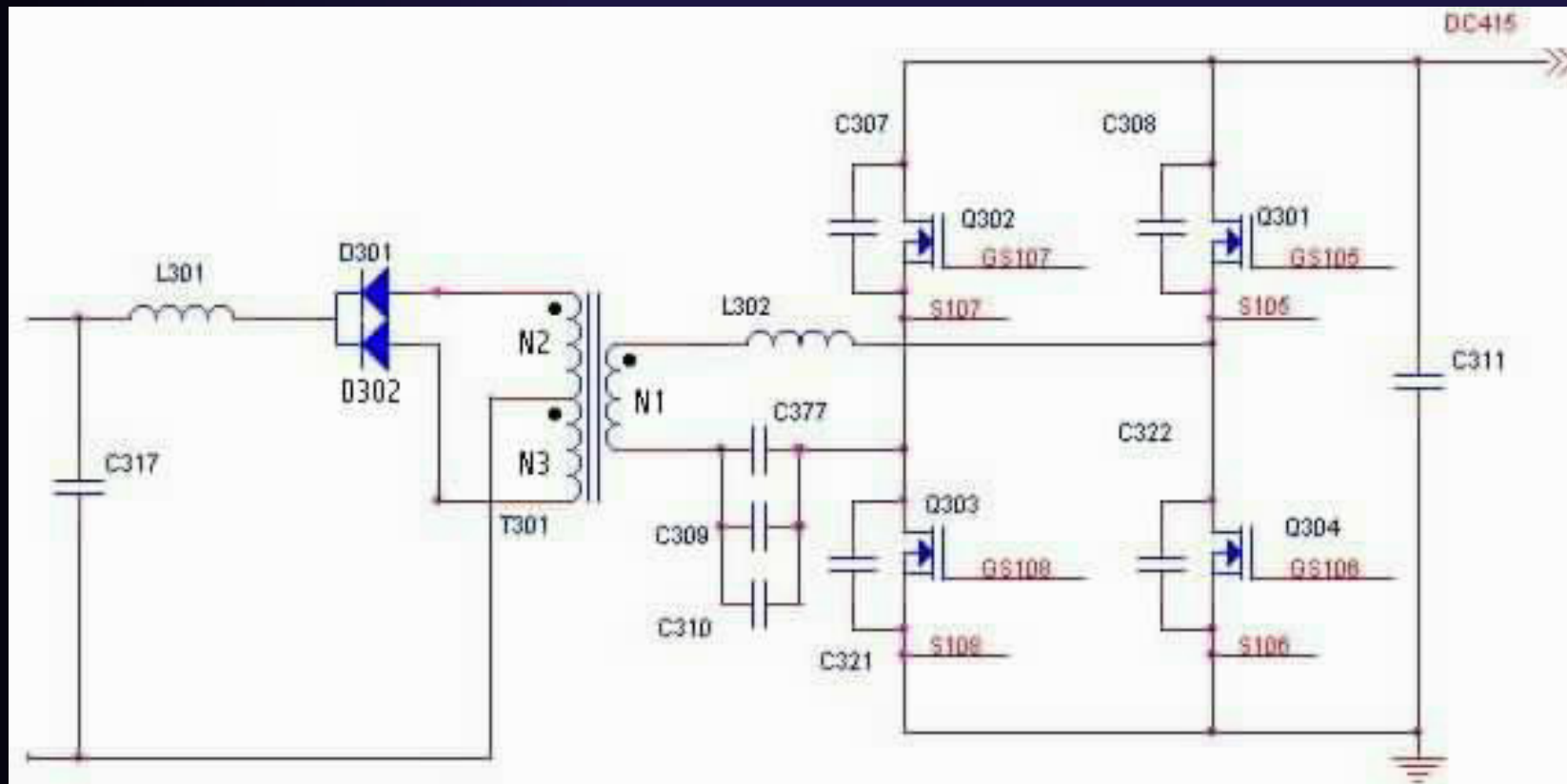


双正激LAYOUT

# 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。



# PCB LAYOUT

- 全桥电路在PCB EMC布局的分析及相关对策





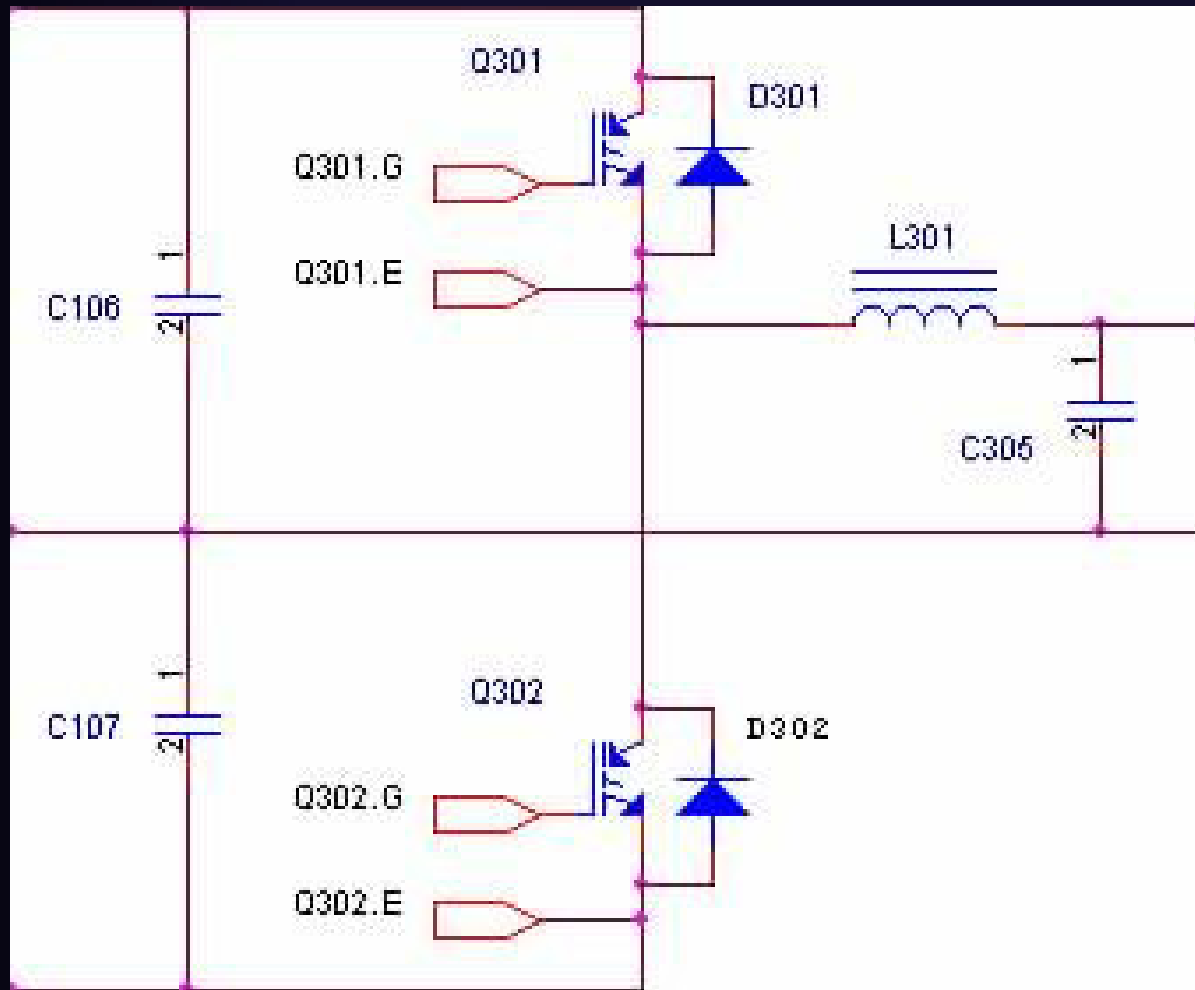
# PCB LAYOUT

- 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。

# PCB LAYOUT

- 半桥逆变电路在PCB EMC布局的分析及相关对策

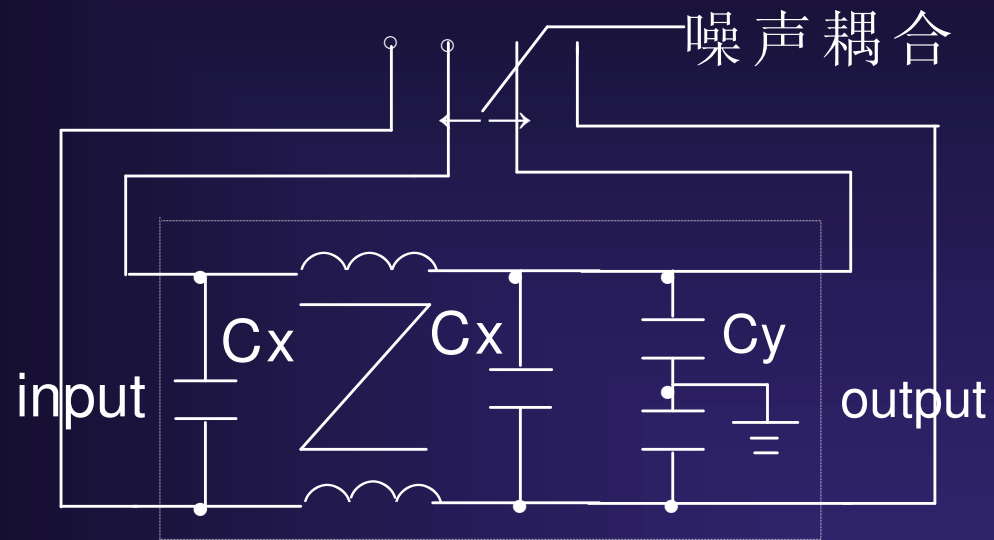


# PCB LAYOUT

- 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

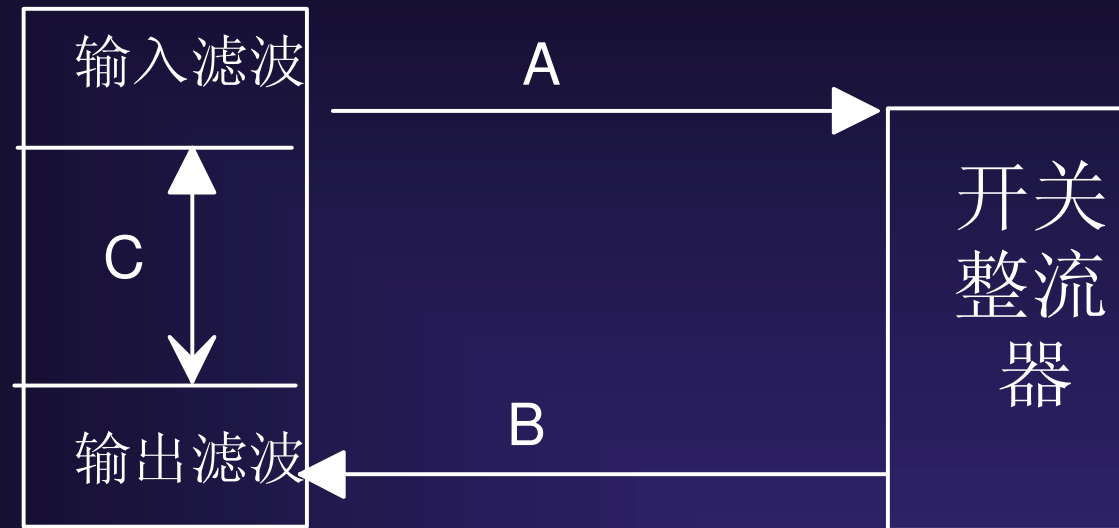


# PCB LAYOUT

- 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

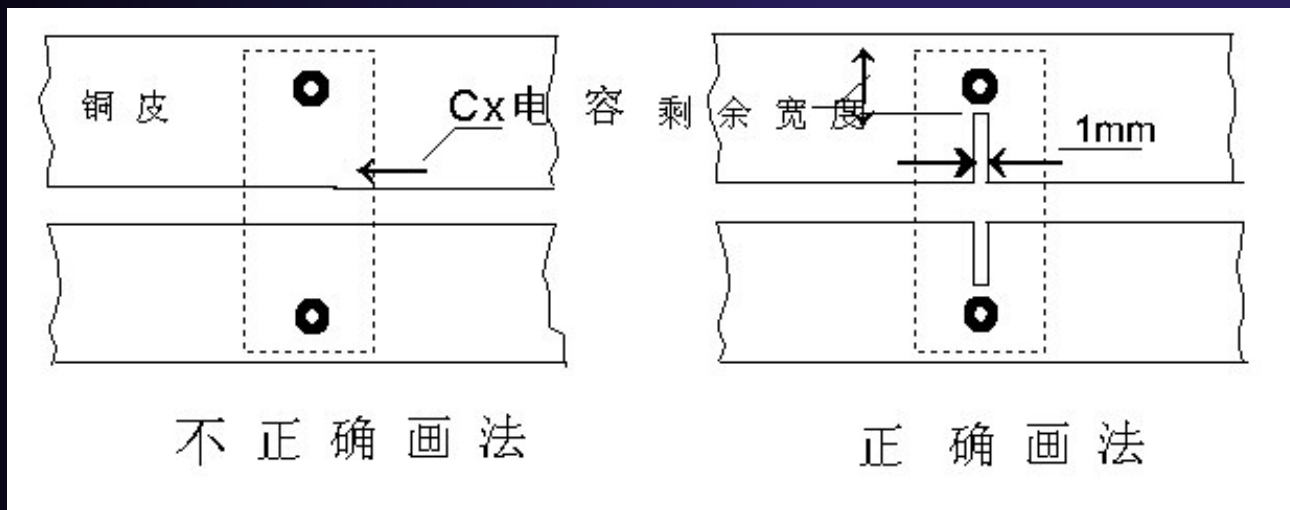
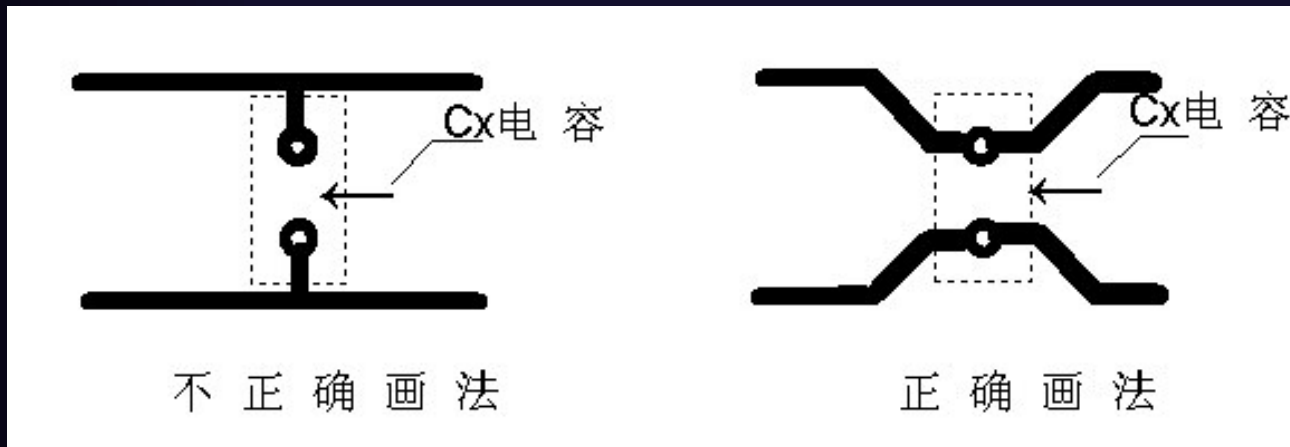
## ● 共模/差模电感的布置

- 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



# PCB LAYOUT

- 电容的布置





***Any Short Question***

Take a break?

# 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。

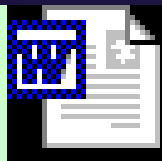
# 开关电源的EMI仿真

- 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。

# 开关电源的EMI仿真

- AC/DC电源的一个仿真实例



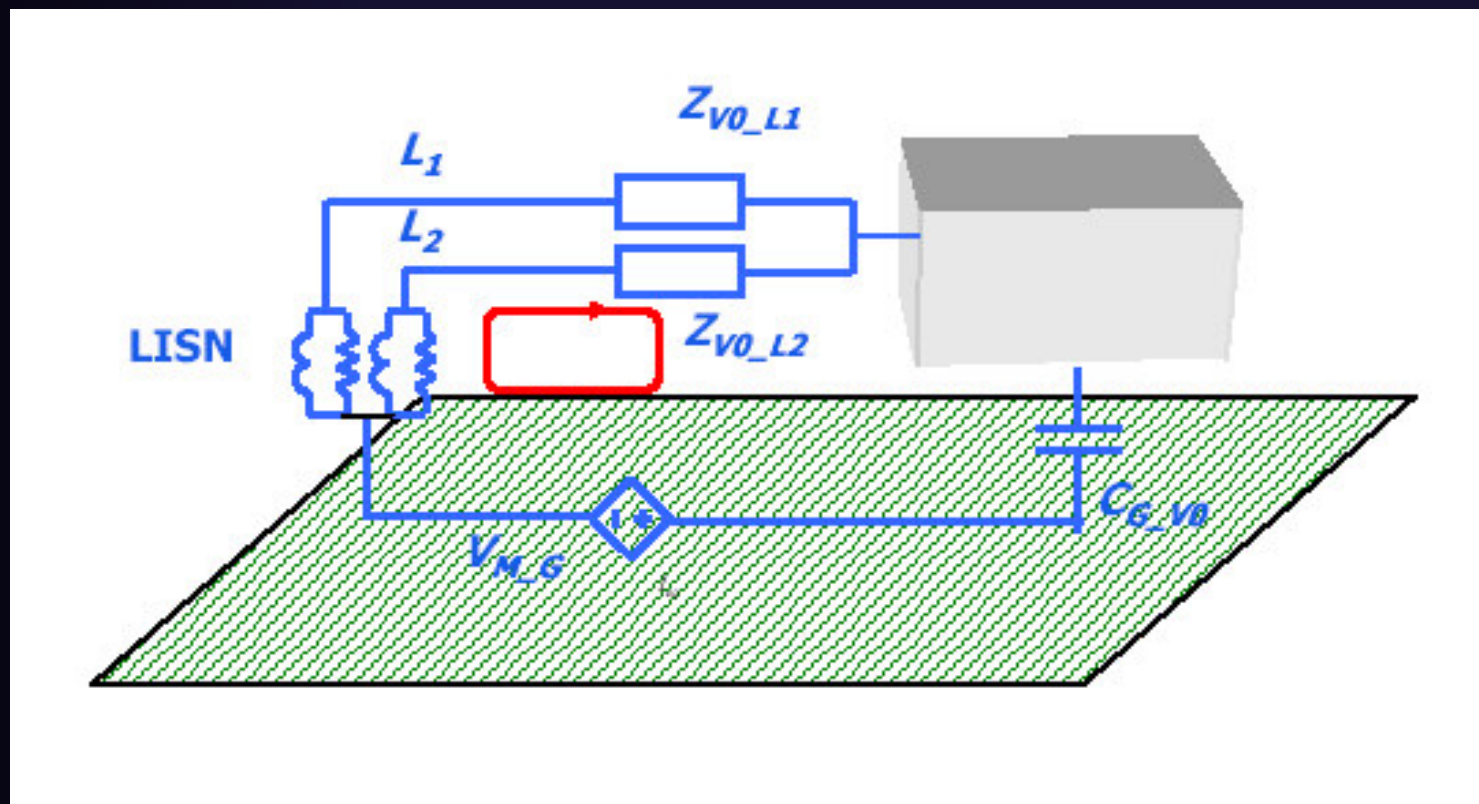
AC/DC仿真

# 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

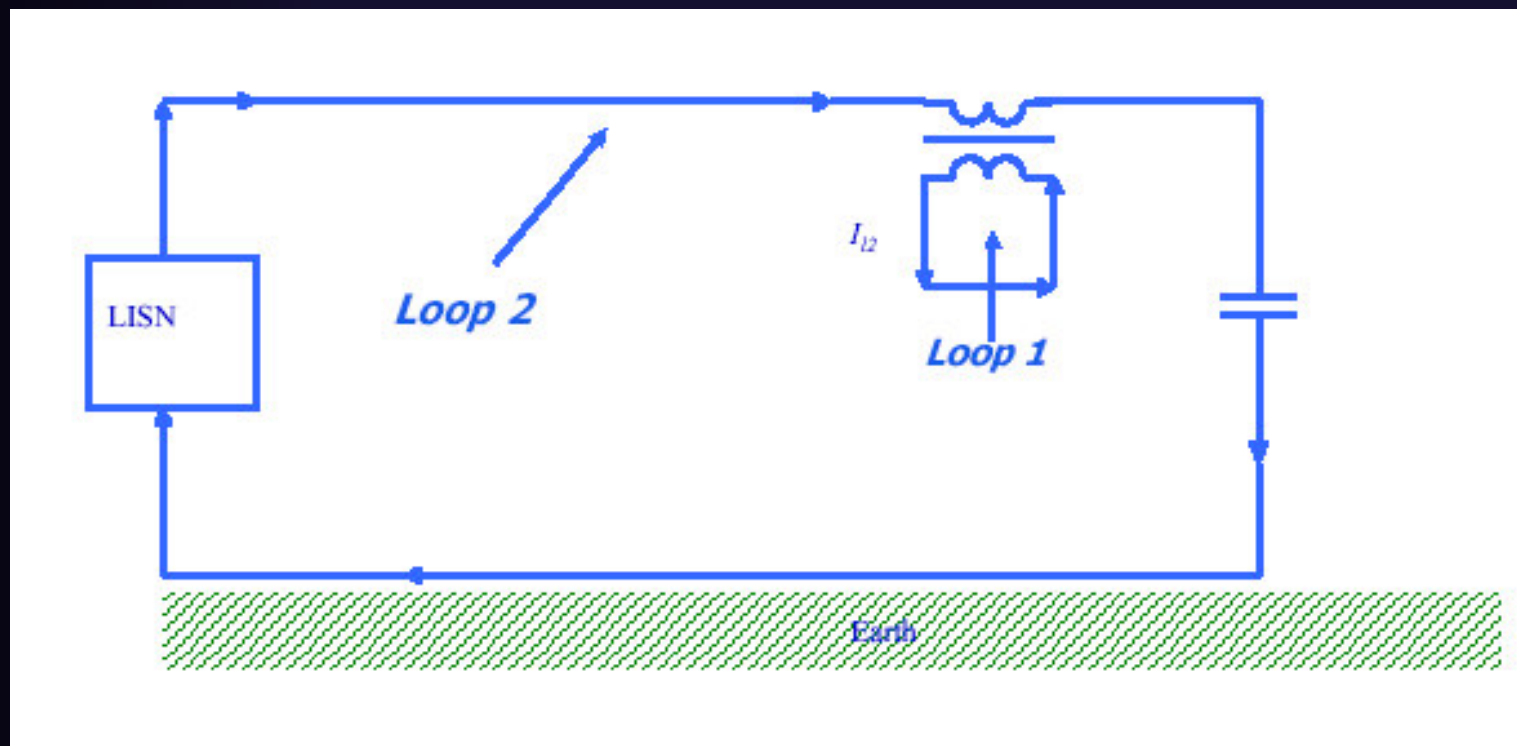
# 开关电源EMI中的谐振问题

- 传导测试中的共模环路



# 开关电源EMI中的谐振问题

- 等效电路

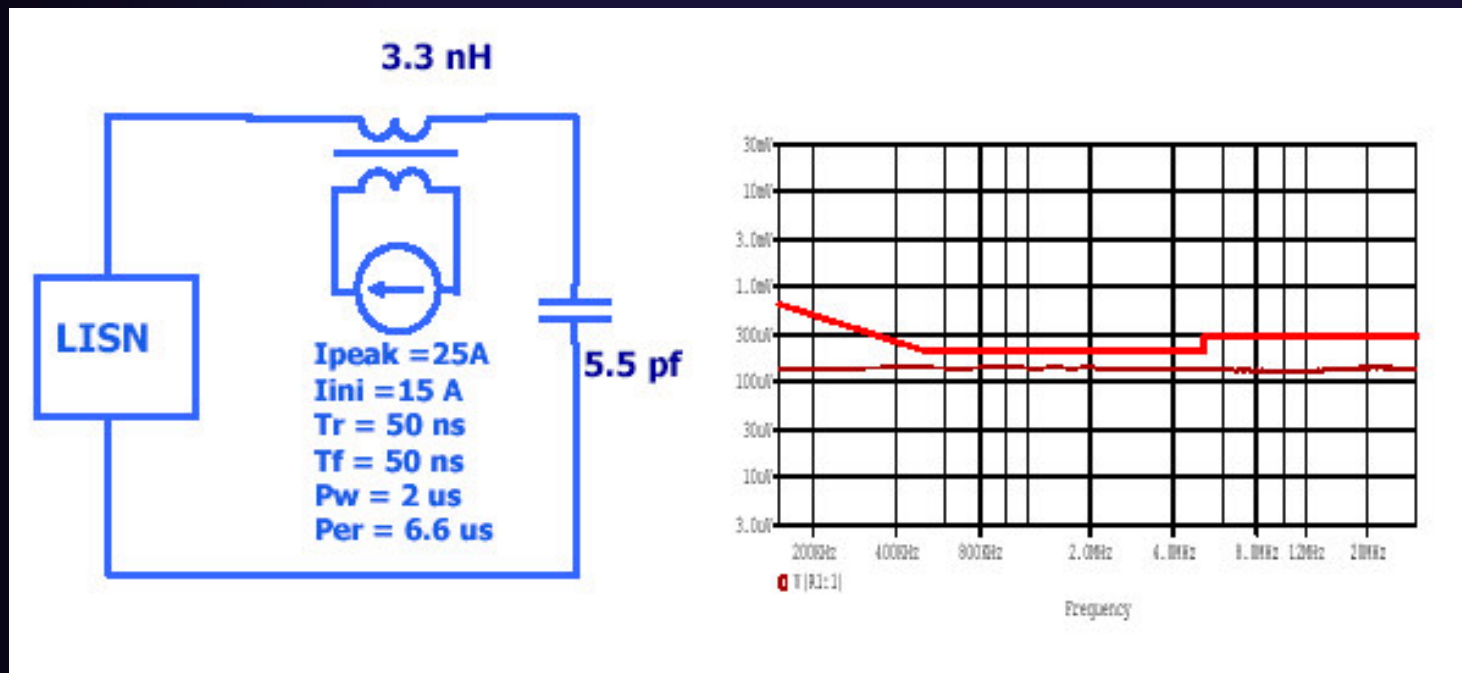


假设环路2分布参数 $C_{\text{drain}}=5.5\text{pF}$ ,  $Z_{\text{line\_circle}}=3.3\text{nH}$



# 开关电源EMI中的谐振问题

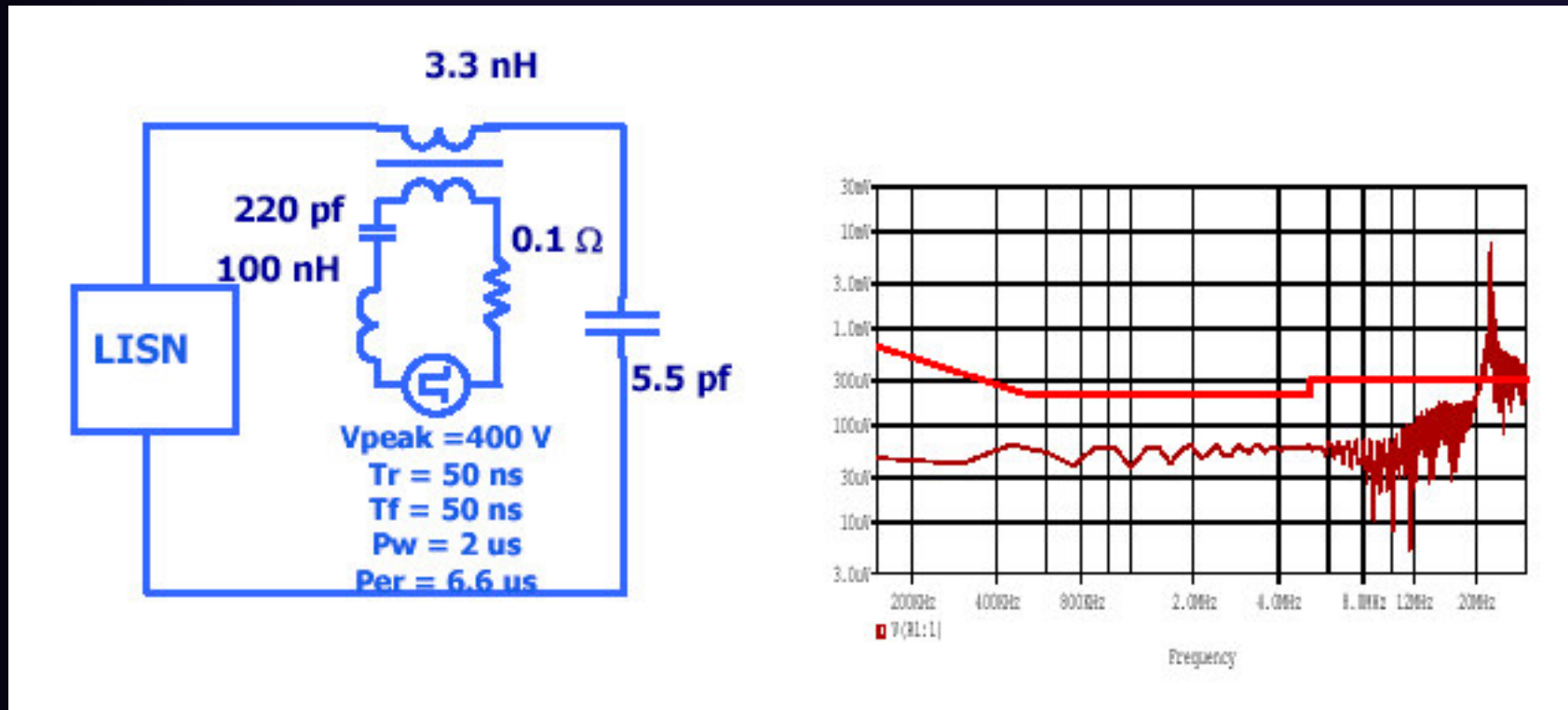
- 不考虑环路1噪声源电路的分布参数时，假设脉冲电流为25A



结果没有超标，但很接近

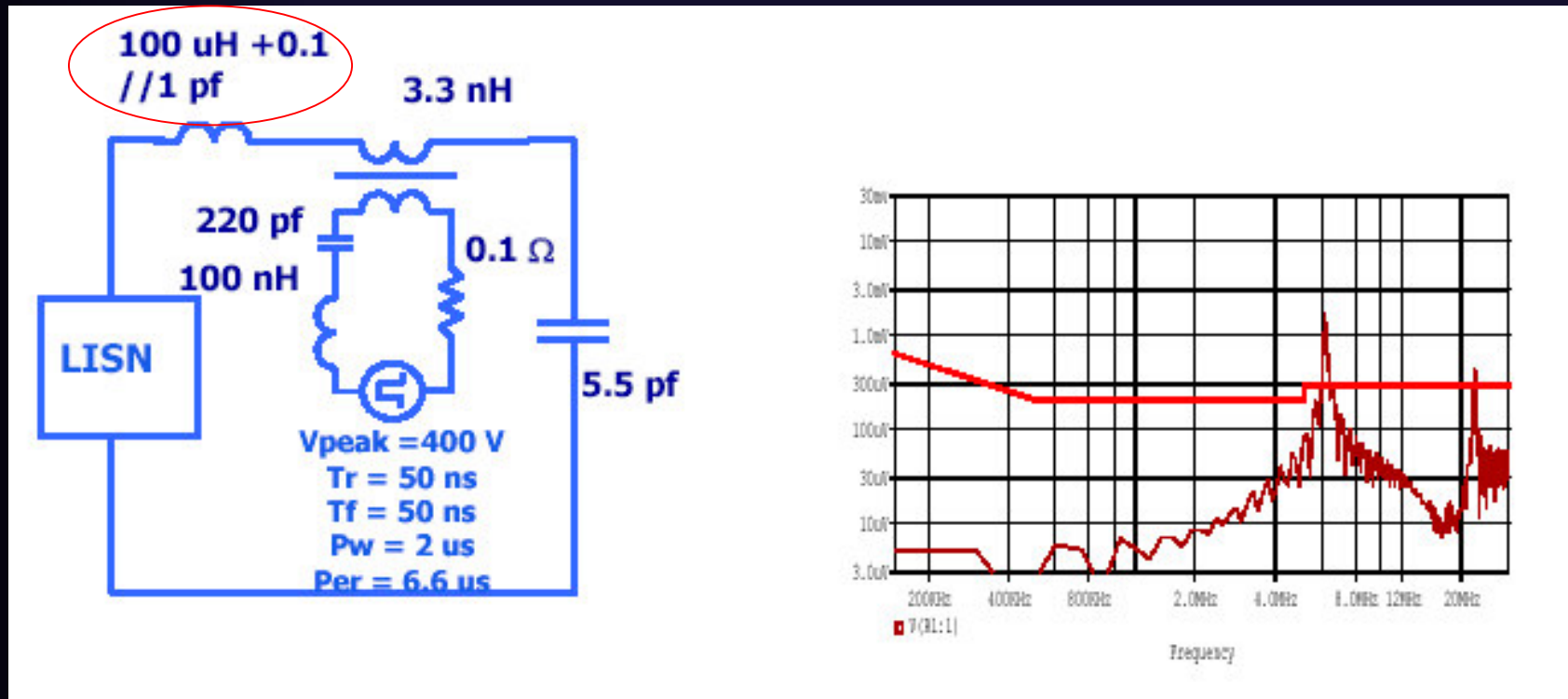
# 开关电源EMI中的谐振问题

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



# 开关电源EMI中的谐振问题

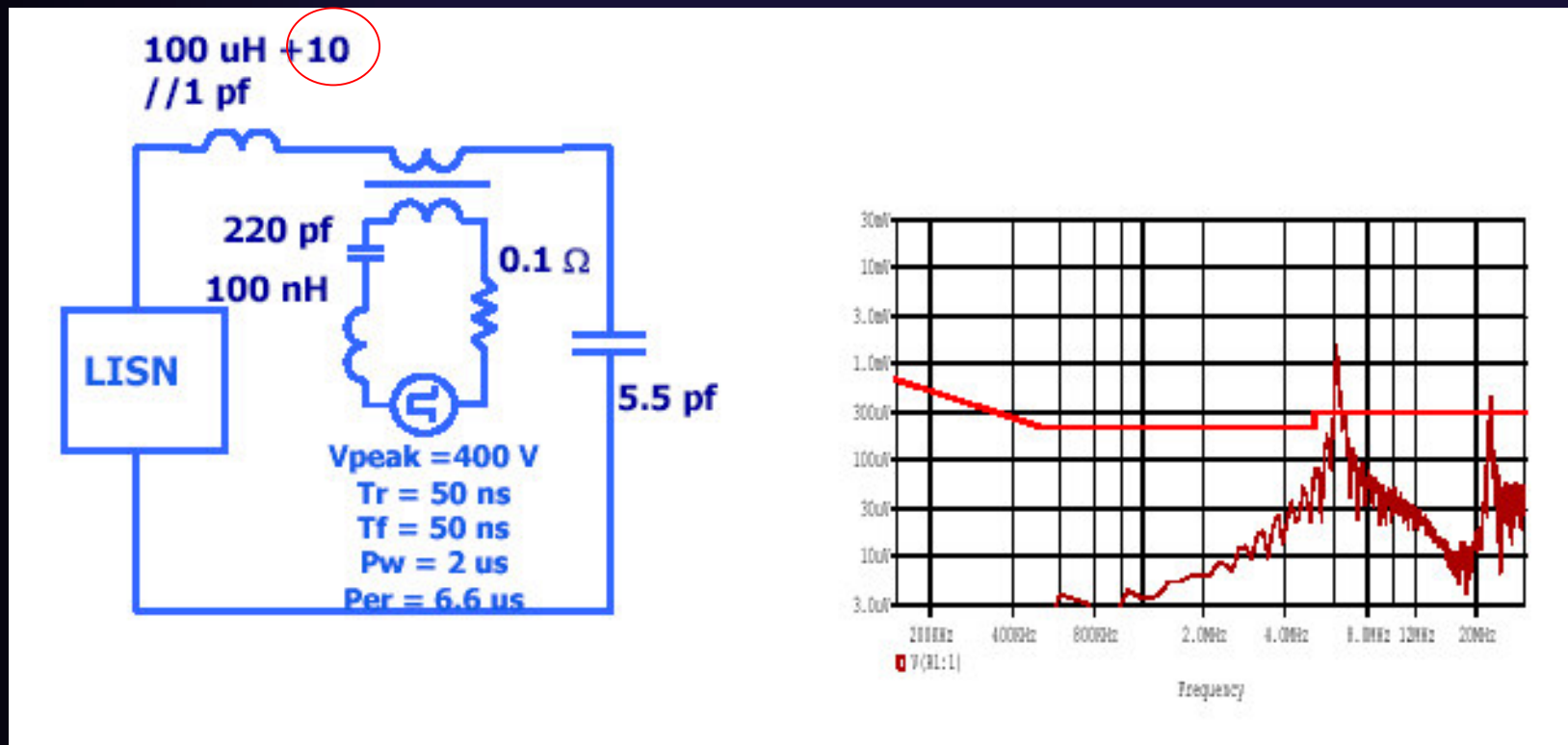
- 解决措施——加电感，增大环路的阻抗



虽然原来的谐振点消失了，但增加了新的谐振电。  
电感只是移动了谐振点的频率。

# 开关电源EMI中的谐振问题

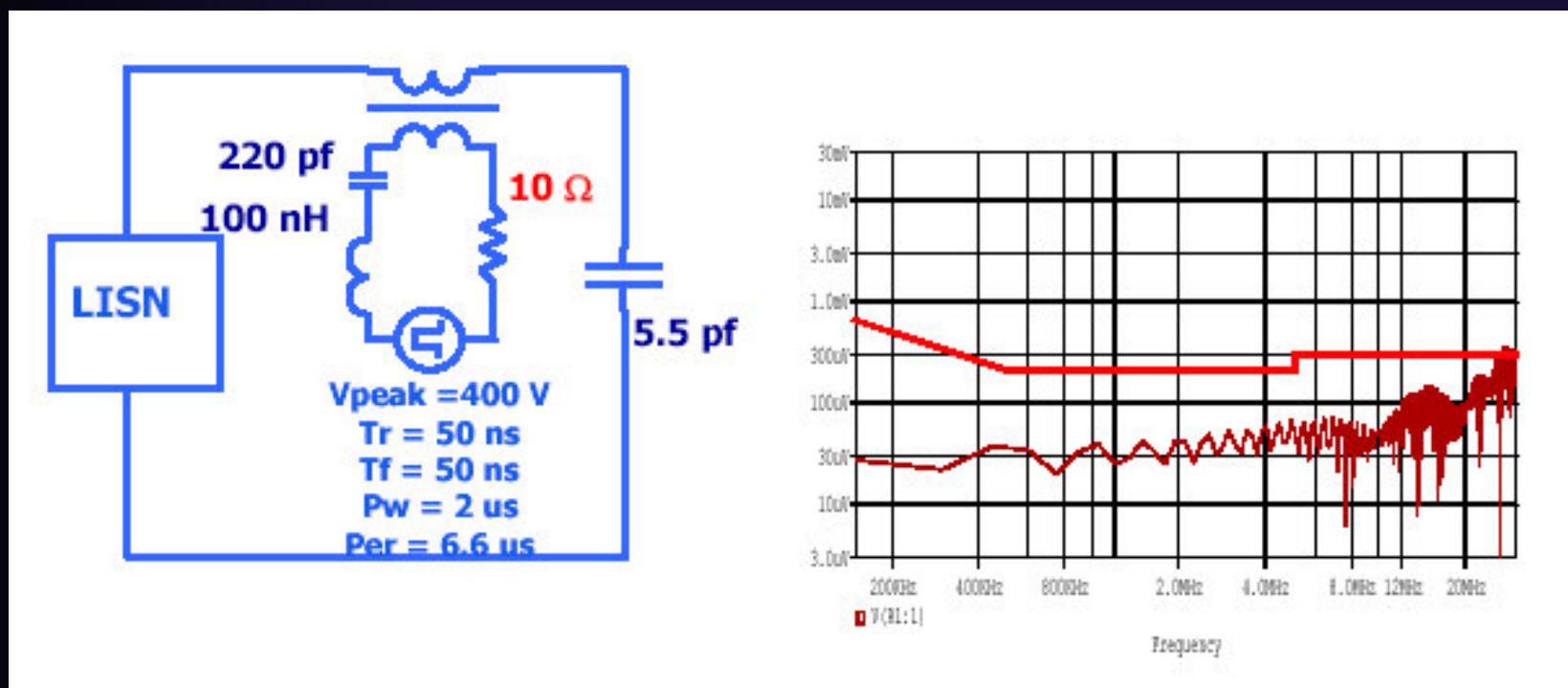
- 解决措施——在前面的措施上，加大环路的电阻：  
0.1ohm $\rightarrow$ 10ohm



并没有改善很多？

# 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：  
 $0.1\text{ohm} \rightarrow 10\text{ohm}$



改善很多，但实际中如何实现呢？