

学习处理电源EMI的 几个问题

南京航空航天大学自动化学院

赵修科

2008.5

一、电磁兼容一般知识

- ◆ 噪声—无用的信号称为噪声。
- ◆ 电磁兼容(EMC)—设备或系统在共同的电磁环境中能完成的功能。
- ◆ 噪声传播—通过传导和辐射。依赖导体传播噪声的方式称为传导；依赖电磁波传播噪声的方式称为辐射。
- ◆ 传导：通过电源、互连线和共阻传播。 <1GHz
- ◆ 辐射：通过天线，天线长 $> \lambda / 4$ ($\lambda = 3 \times 10^8 / f$)
开关电源主要是近场： $r < \lambda / 2 \pi$ ，电容耦合和电感耦合。

二、关于‘地’

电路中参考点—零电位点，称为地点。开关电源中的‘地’：

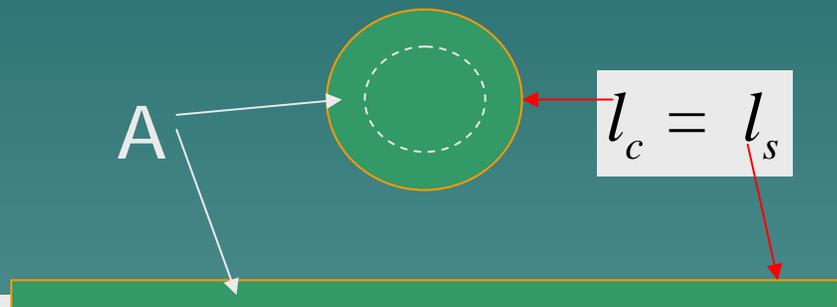
- ◆ 公共端(common)—输出与输入参考点。例如PFC与后继变换器输入端的公共端。
- ◆ 电路中的地(ground-GND)—所有电路共用参考点。如辅助电源与PFC及DC/DC公共端。
- ◆ 大地(earth-E)电网供电设备通常以大地E作为零电位。三相输配电三相中点接大地E，同时引出中线N。
- ◆ 接地阻抗很小的大面积‘地’称为地平面(Ground plane)。

◆ 接地阻抗—与接地导体尺寸有关：

单导体电阻和电感(回线无穷远)。

$$R = \rho \frac{l}{A_e}$$

$$L_\infty = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \times 10^{-7} (\text{H})$$



$$H = \frac{I}{l}$$

大直径电感小，高频存在集肤效应，粗圆导线交流电阻增大，相同截面积，扁导线自感更小，同时薄铜带减少高频电阻。大面积敷铜皮，更小的电阻和电感—地平面

三、开关电源的供电

- ◆ 供电方式：开关电源由电网交流供电，单相一般是相线L—火线和中线N，为安全，开关电源通常外壳和散热器接大地E。一些便携电源，没有接大地线。
- ◆ 三相供电可能不平衡，中线电位不为零。中线不能作为地。

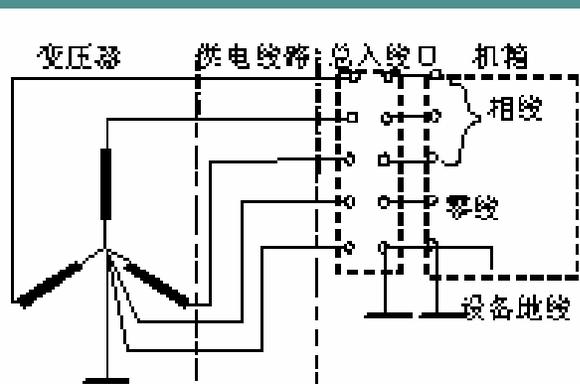


图 41 三相 5 线制供电图

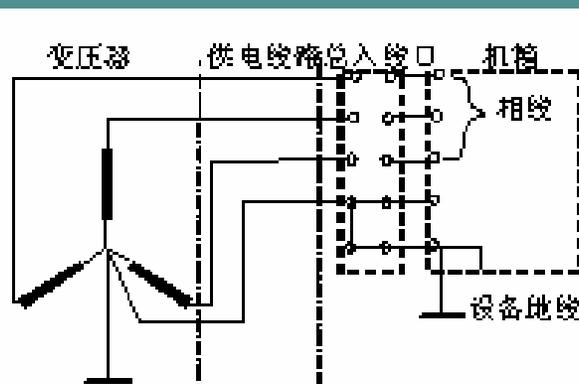
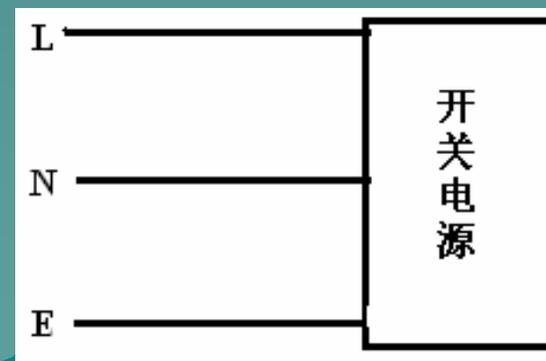
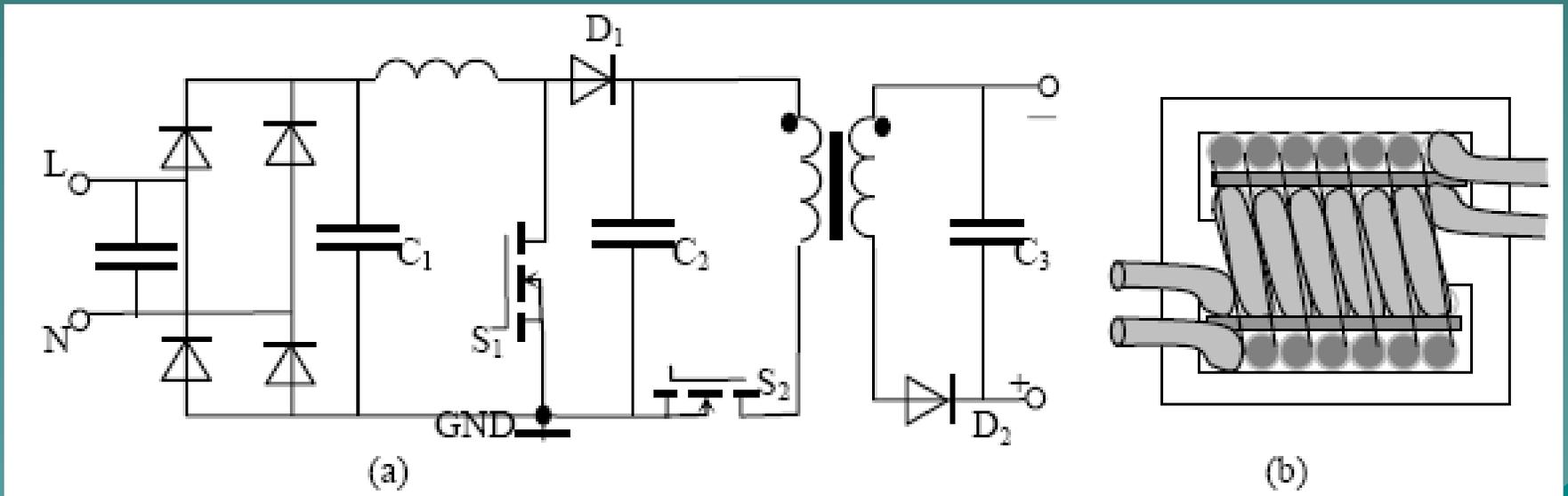


图 42 三相 4-5 线制供电图



四、开关电源中静点

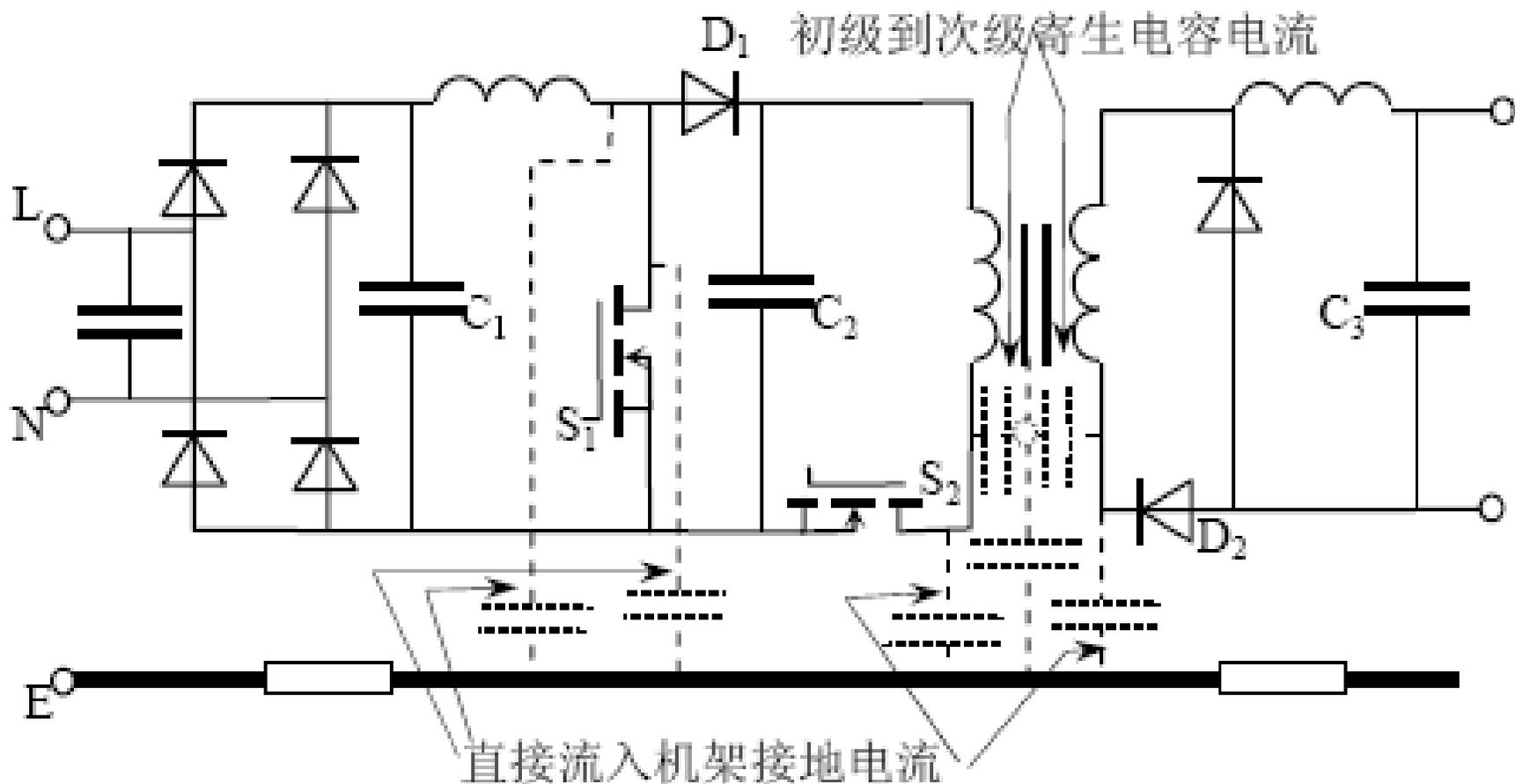
- ◆ 开关电源电路中，凡是相对大地E电位不变或缓慢变化的电路接点称为‘静点’：
开关电源中的静点：GND, D1阴极，输出+。



- ◆ 是否凡是相对大地E电位变化的电路接点称为‘动点’。

五、开关电源中‘动点’

- ◆ 电网供电带有PFC的正激电源-元件安装在机架上。传导—共模和差模



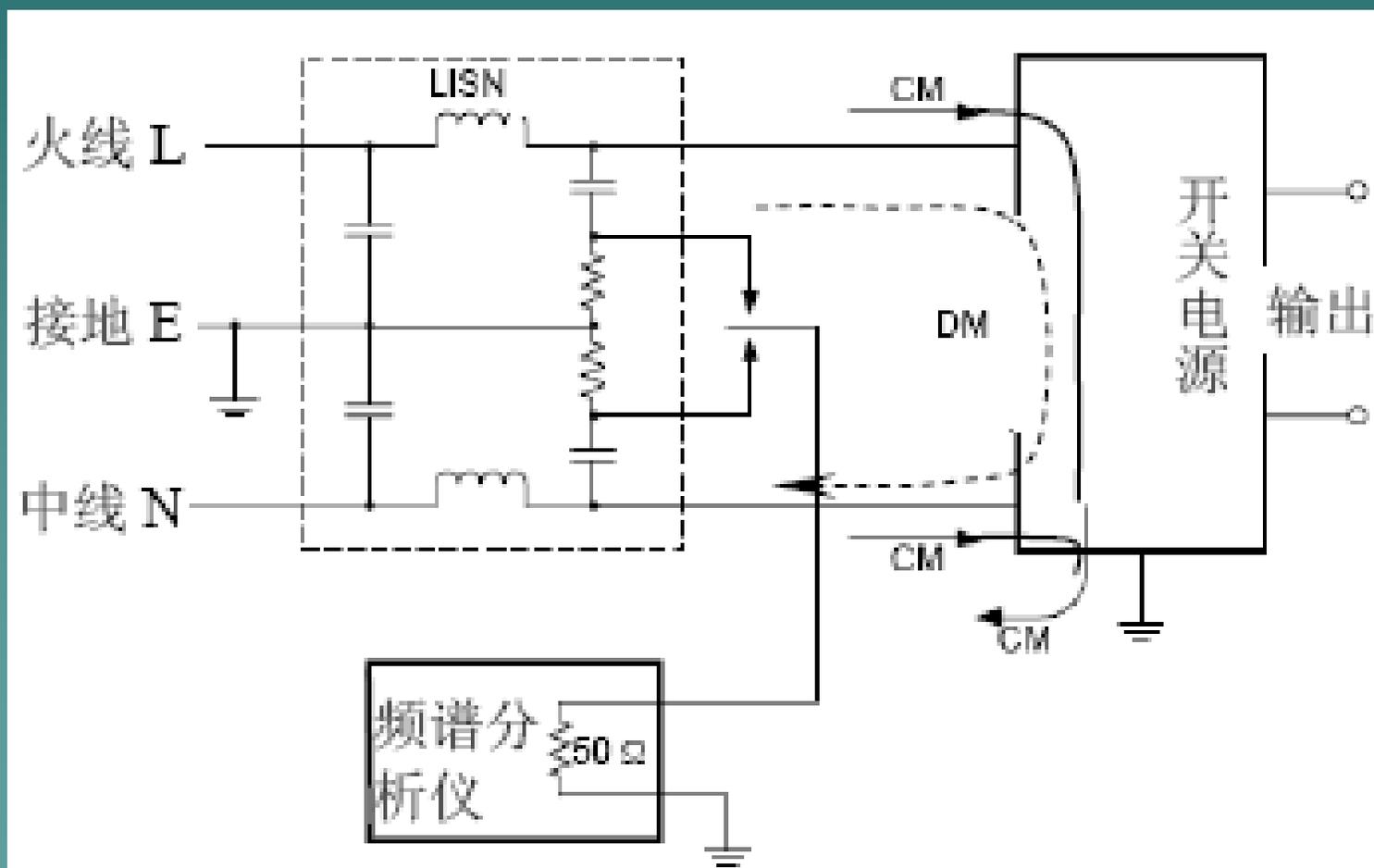
六、噪声性质与测量—对电网干扰

- ◆ PWM开关噪声—差模，谐波电流，电压和电流，传导。
- ◆ 电容耦合—电流源：寄生电容很小，容抗相对被干扰电路是电流源。干扰电流， $i_n = Cdu/dt$
- ◆ 互感耦合—电流源。干扰电压 $u = Mdi/dt$

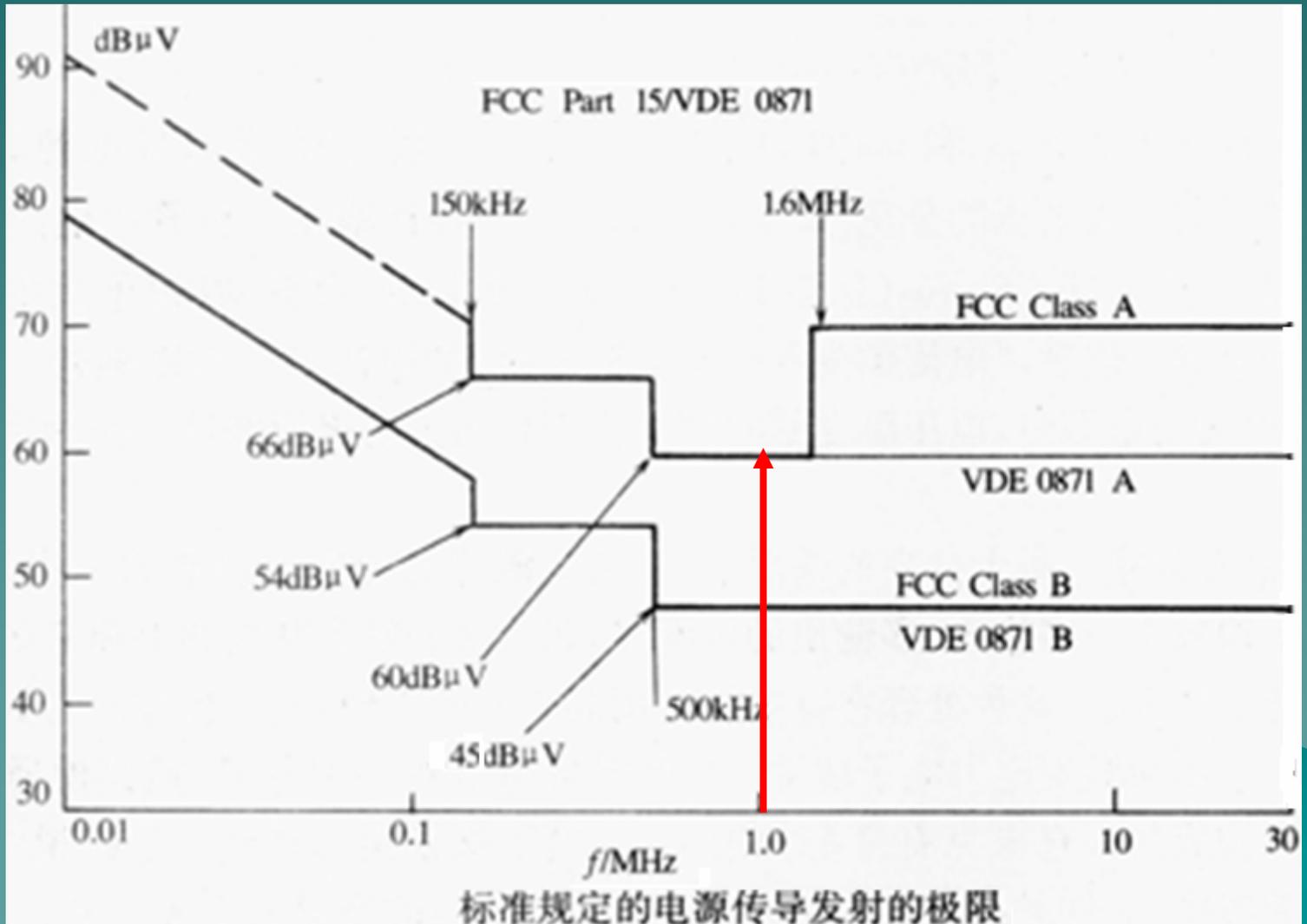
测试标准是对电网干扰，电网阻抗相对较小，通过电阻压降测试干扰电流。测试干扰电流需要宽带高频电流钳，价格昂贵，测试电压比较容易。标准规定测试通过并联在输入端 $50\ \Omega$ 上压降代替测试噪声电流。为避免电网阻抗和电网噪声干扰测试结果，在电网和被测电源之间增加LISN (Line Impedance Stabilization Network) 。

LISN

◆ LISN内部等效电路和测试接法



电磁兼容传导标准



关于标准

- ◆ 标准允许噪声限额能量很小，在nW级。
- ◆ 标准中传导只测到30MHz，30MHz以上传导测量不准确。实际传导可达1GHz。
- ◆ 传导噪声分为共模和差模，标准没有分开。
- ◆ 辐射噪声测试必须在电磁屏蔽室内进行。要求严格。
- ◆ 标准测试量为准峰值。单位以 $1\ \mu\text{V}$ 为基础，测试电压 U ，表示为 $20\log(U/1\ \mu\text{V})\text{dB}\ \mu\text{V}$ 。

七、减少共模电流的对策

元件安装在机架上，机架接大地。

- ◆ 屏蔽—功率MOSFET与散热器(E)之间电容和变压器初级与次级之间电容用接静点屏蔽隔开。

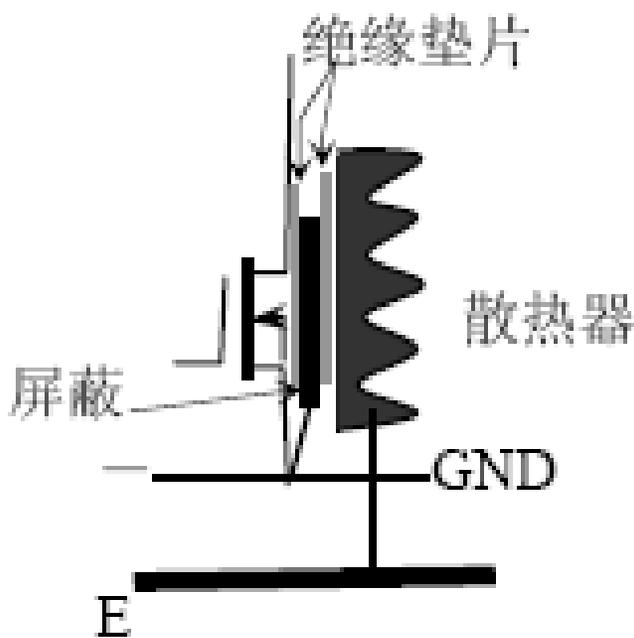


图 9-6 功率管屏蔽

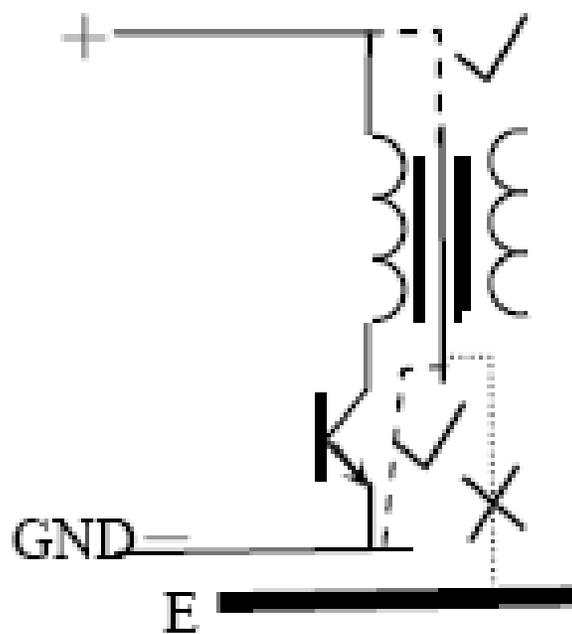
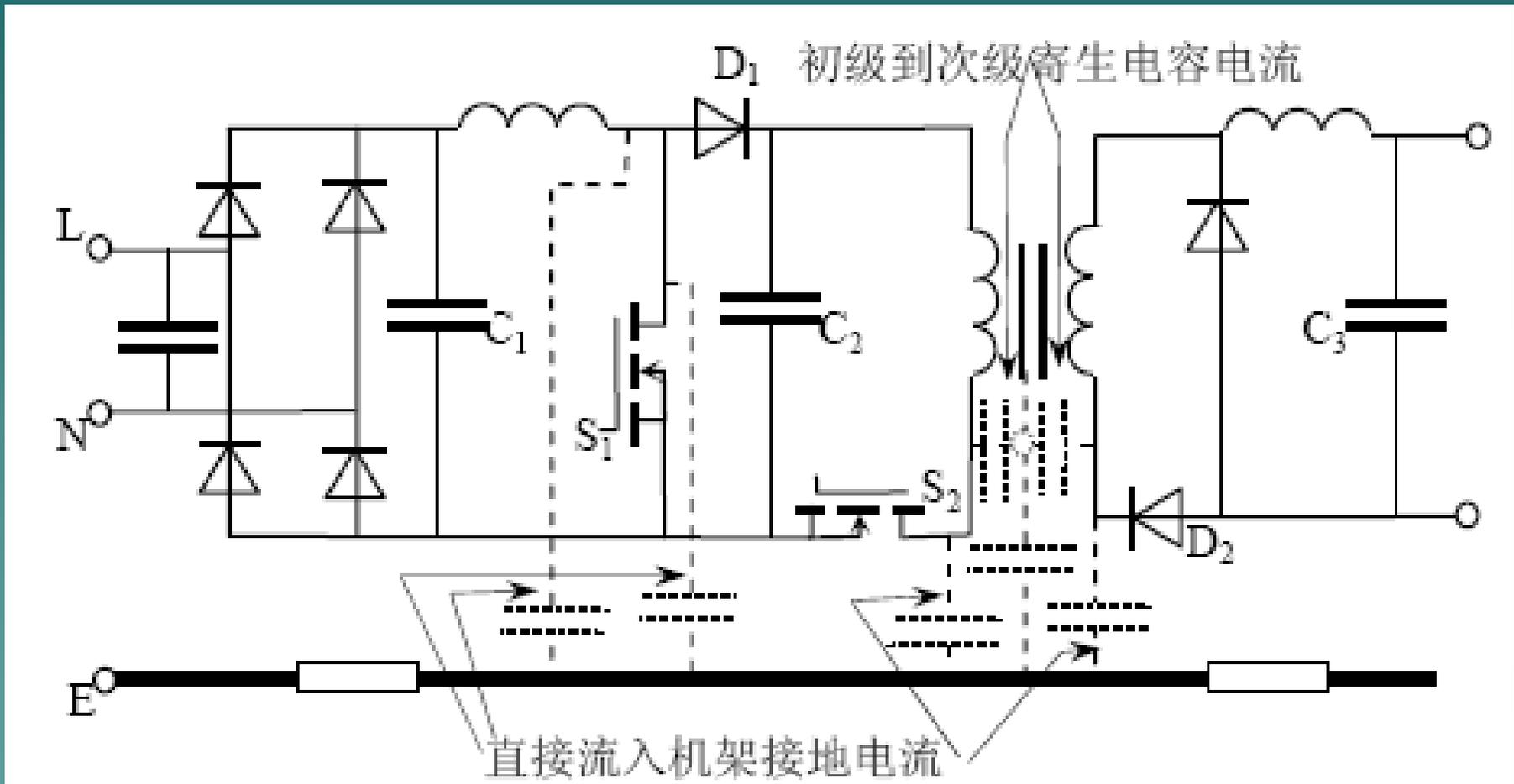


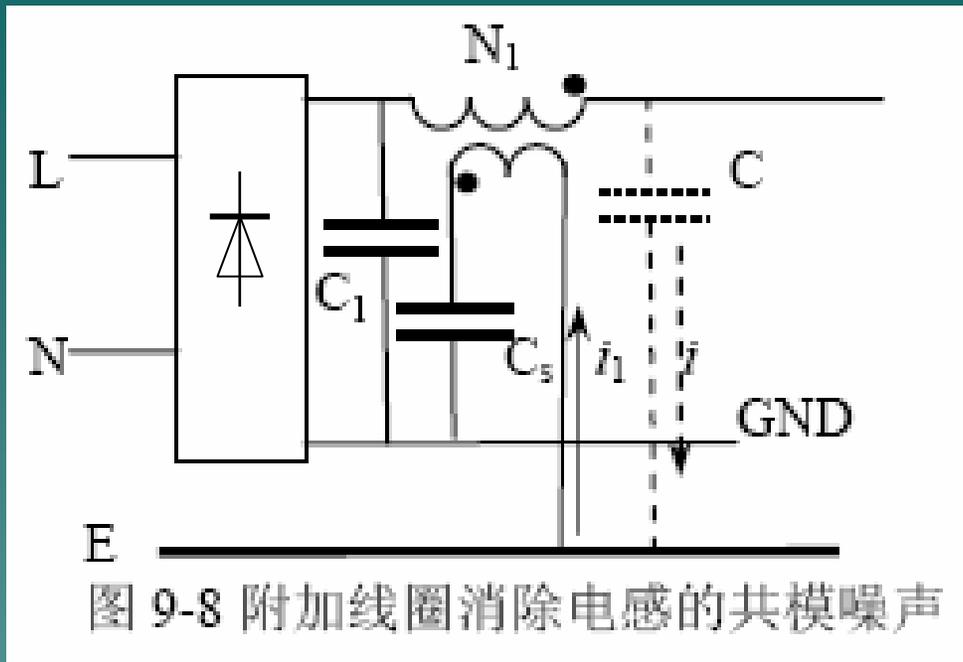
图 9-7 变压器屏蔽

漏极与屏蔽之间电容，将共模变换成差模电流，差模与共模互换。

升压电感对地E分布电容



分流—将共模电流不流入50Ω：



1. 测试升压电感对大地电容C，选择
 $C_s = N_1 C / N_2$.

$$i = C \frac{du_1}{dt}$$

$$i_1 = C_s \frac{du_2}{dt} = \frac{N_1 C}{N_2} \frac{du_2}{dt}$$

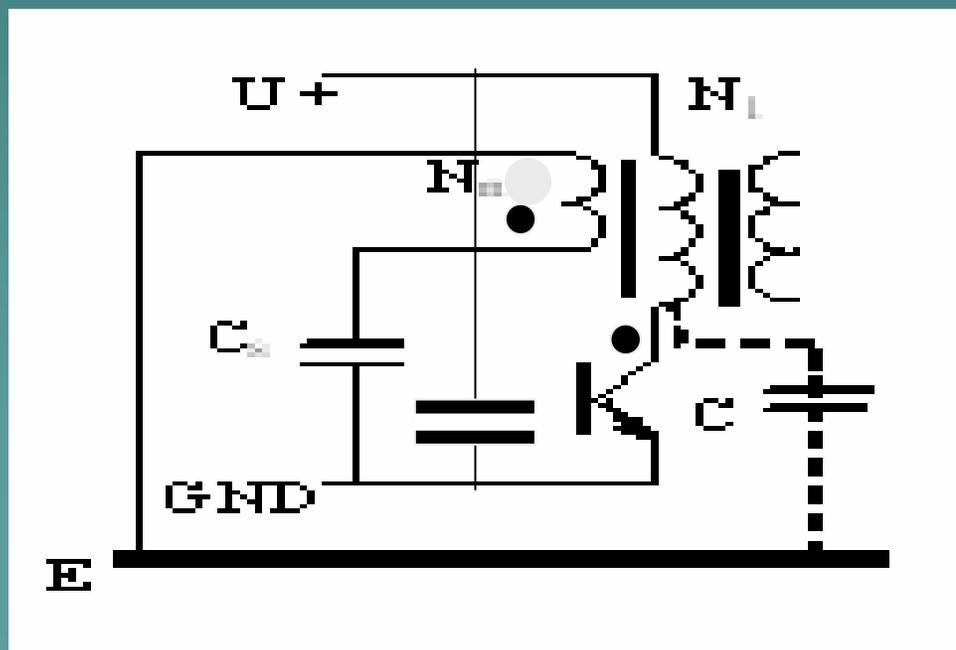
$$u_2 = \frac{N_2}{N_1} u_1$$

$$\therefore i = i_1$$

$i - E - i_1 - C_s - GND - C_1 - N_1$ 注意同名端

2. 变压器开关点对大地电容C

- ◆ 相似地，变压器初级对地E寄生电容也可以利用类似方法求得寄生电容C，并在变压器上绕一个 N_n ，接一个电容 C_s ，计算方法与以上相同。

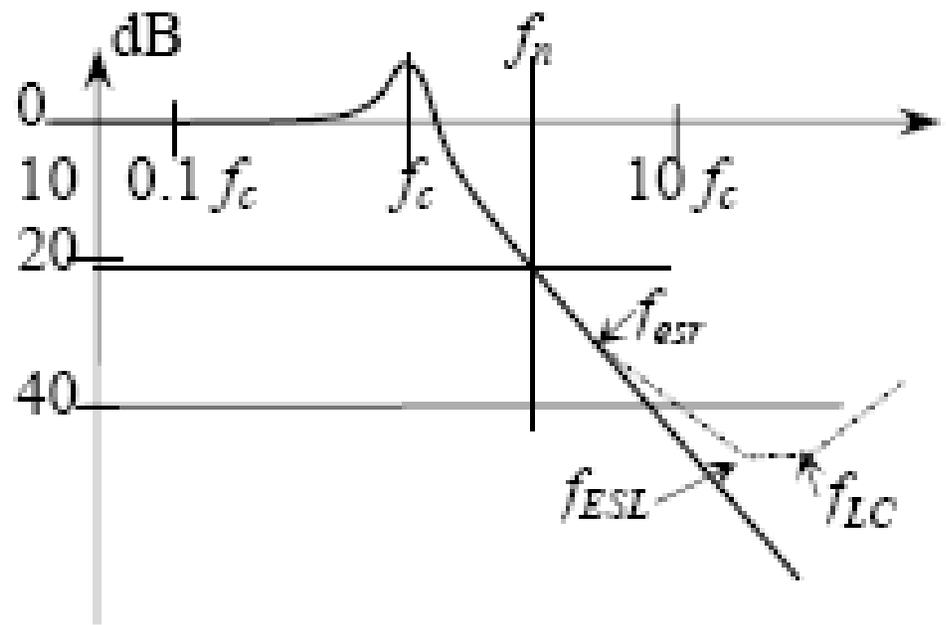
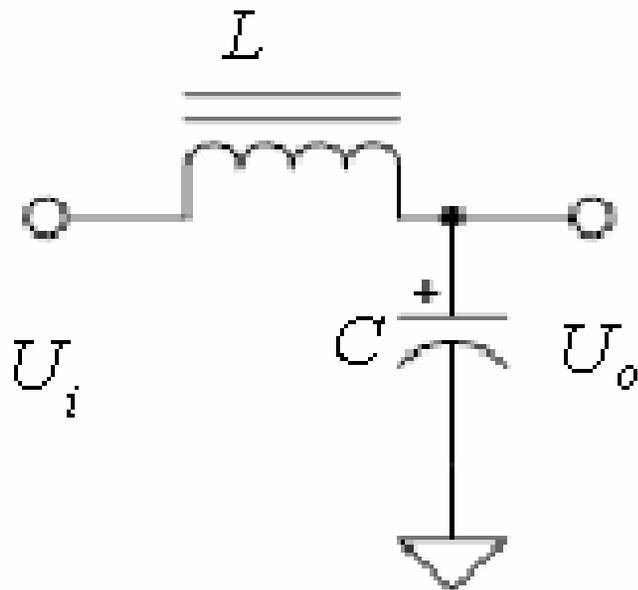


元件安装在地平面GND上，屏蔽

- ◆ 变压器和电感安装的地平面上，地平面为静点，相当于屏蔽层，磁元件线圈与大地间剩余电容很小。共模电流减少，而差模电流增加。
- ◆ 差模滤波电容不受限制。

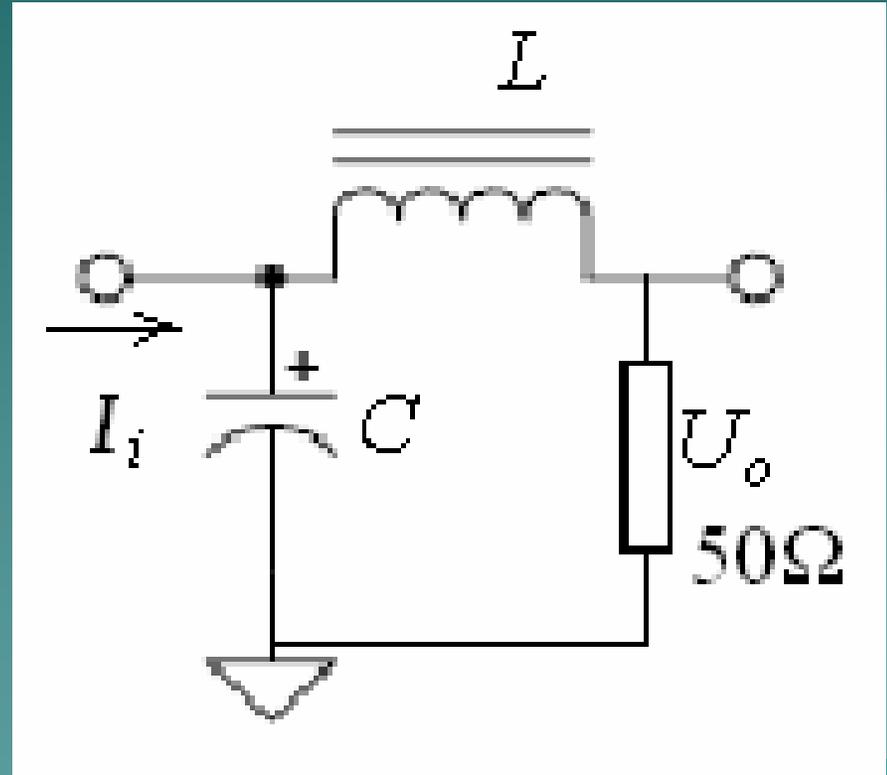
滤波

- ◆ 两种不同噪声滤波：电压噪声与电流噪声
- ◆ LC滤波电路，噪声为高频采用低通滤波器
电压源噪声：输入—L—C—输出，40dB/Dec衰减—受寄生参数影响。



电流源噪声：输入—C—L—输出，电容分压，L滤波，20dB/Dec衰减。

- ◆ 输入噪声电流，在电容C上电压降，变换成电压源，再经L滤波，在 $50\ \Omega$ 上电压降。LR一阶滤波，以 -20dB/Dec 衰减



八、一个实际例子

- ◆ 正激变换器—输入100V，假设 $D=0.5$ ，漏极电压在 $\pm 200V$ 之间摆动(复位)， $f_s=200kHz$ ，S与散热器之间电容 $12\sim 30pF$ 。 $t=0.1\mu s$ 。取最小电容，开关引起瞬态共模电流为：

$$I_c = C \frac{dU}{dt} = 12 \times 10^{-12} \times \frac{400}{0.1} = 48 \text{ mA}$$

VDE871,最低频率为150kHz，A级在200kHz允许噪声为66dB μV ，即2mV，B级为0.5mV。这是准峰值，比峰值小，比有效值大。为便于计算，我们采用有效值计算，结果修正。以共模噪声为例。噪声流向—由右至左。

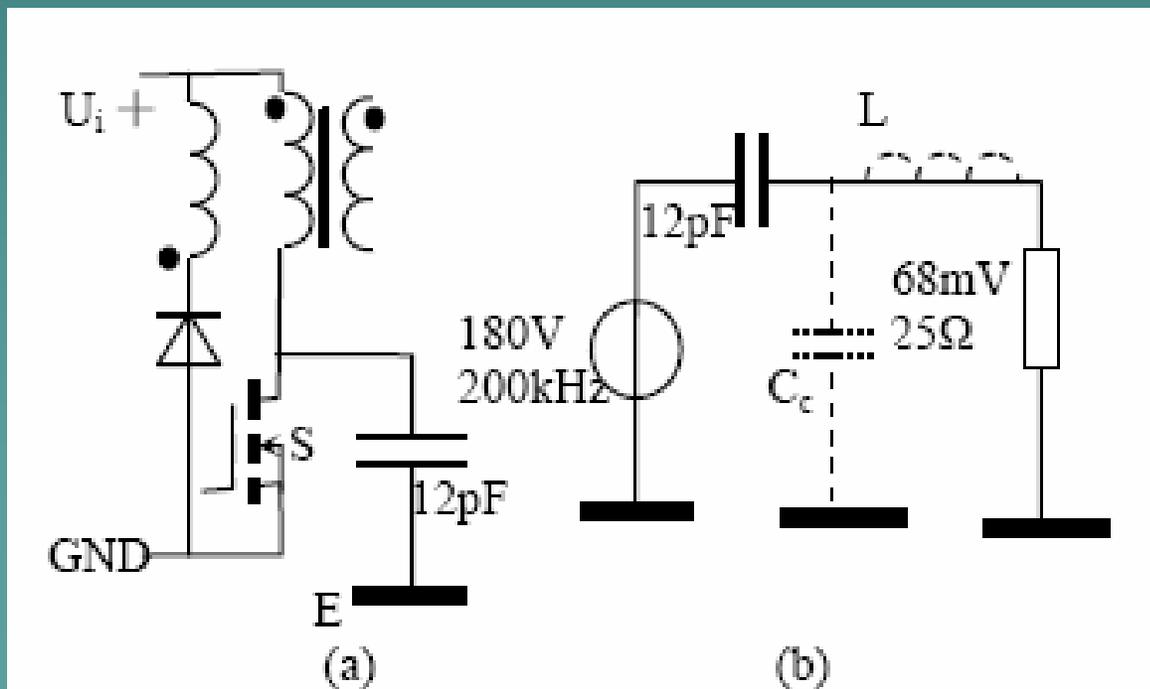
◆ $D=0.5$, 200V方波有效值 $U=0.9 \times 200 = 180V$, 12PF电容在200kHz阻抗约为 $69k\Omega$, 远远大于 25Ω , 故为电流源。电流

$$I_c = \omega C U = 2\pi \times 2 \times 10^5 \times 12 \times 10^{-12} \times 180 = 2.71 \times 10^{-3} \text{ A}$$

如果不加滤波, 直接加在 25Ω , $67.75mV$, $96dB/\mu V$, 超出标准 $2mV$, 加滤波, 等效电路如图

(b)
从安全考虑, L和N对E的漏电流小于 $0.5 \sim 3.5mA$ 。允许电容 $< 10nF$, 选择 $C_c = 2.2nF \times 2$ 。分得电压:

$$U_c = 490mV$$



- ◆ 已经将电流源变换成电压源，需要一个电感，衰减在 $25\ \Omega$ 上压降到 2mV 。变为1阶滤波器，需要的衰减量： $20\lg 490 / 2 = 47.8$

选择 50dB ，LR以 -20dB 衰减，转折频率

$$f_c = f_s / 10^{50/20} = 200 / 10^{2.5} = 632\text{Hz}$$

需要的电感量：

$$L = \frac{R}{2\pi f} = \frac{25}{2\pi \times 632} = 6.3\text{mH}$$

允许分布电容：

$$C \leq \left[(2\pi f_s)^2 L \right]^{-1} = 100\text{pF}$$

可以看到计算是从右向左进行的！

最后的EMC滤波

- ◆ C_{d1} , L_{d1} 主差模滤波, C_{c1} 、 C_{c2} 和 L_{c1} 、 L_{c1} 共模滤波, L_{d1} 一般较大, 利用 L_{c1} 漏感第二次滤波。
 L_N 对开关频率陷波, C_{c2} 最后清理.

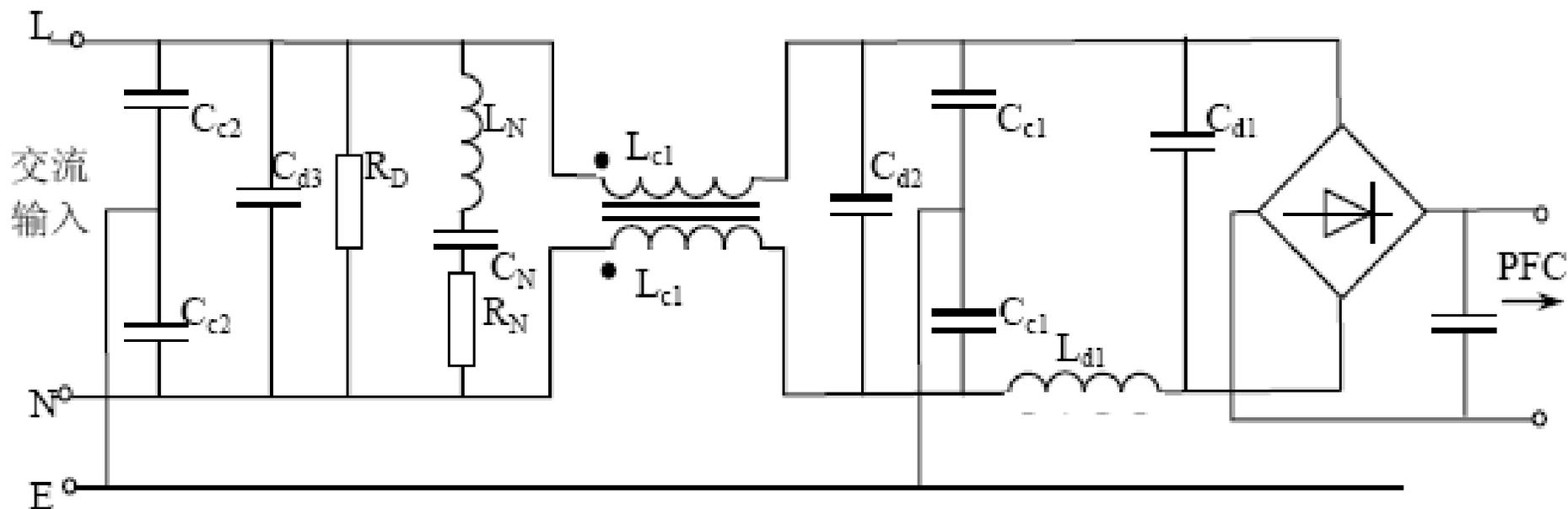
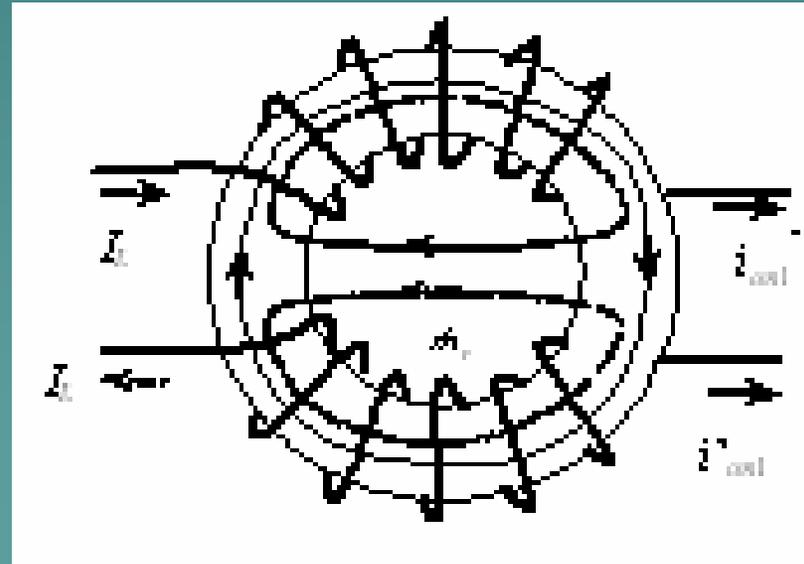


图 10-14 实际 EMC 滤波器

九、关于共模电感

- ◆ 电感量：两个线圈各自电感量 L_1 ，两个线圈耦合线圈各自等效电感量为 $L_1 + M$ ，对两个 $50\ \Omega$ 电阻并联 $L = (L_1 + M)/2$ 。如果 $k=1$ ， $M = L_1$ ，并联后 $L = L_1$ 。
- ◆ 为增加带宽，减少寄生电容， $k < 1$ ，即漏感大， M 小于 L_1 。并联后小于 L_1 。



- ◆ 低频段要求电感量大，高 μ 材料，匝数少，寄生电容小，获得较宽带宽。
- ◆ 注意线圈绕法—Z，分段，阶梯和蜂房绕法。尽量减少分布电容。
- ◆ 应用高磁导率材料磁芯注意避免在满载时磁芯饱和。

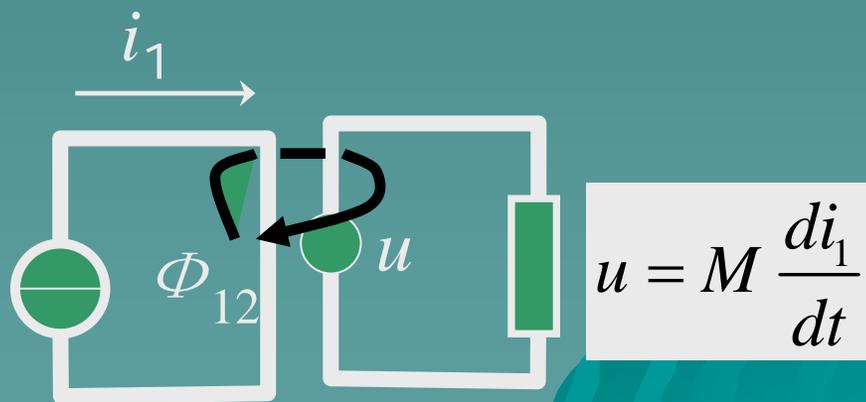
十、互感耦合

- ◆ 脉冲电流回路对耦合电路的干扰—尤其在PCB上。互感电路

$$M = \frac{\psi_{12}}{i_1} = \frac{N_2 \phi_{12}}{i_1} = N_2 N_1 \mu \frac{A}{l}$$

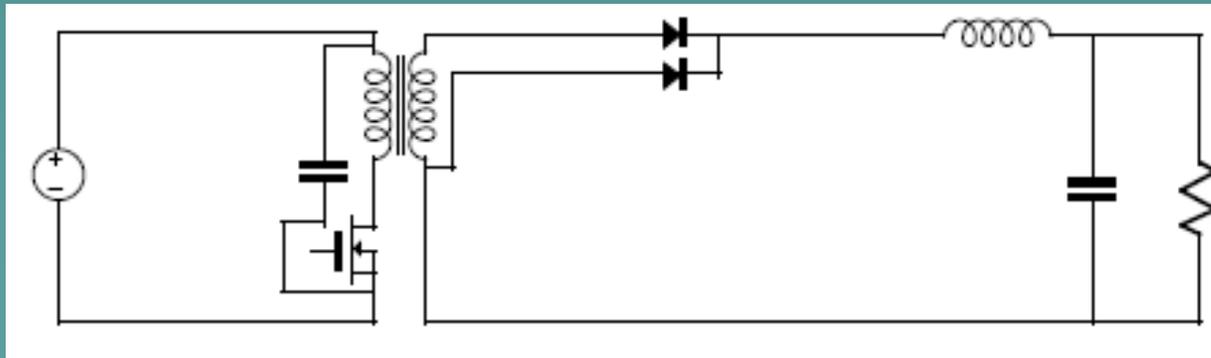
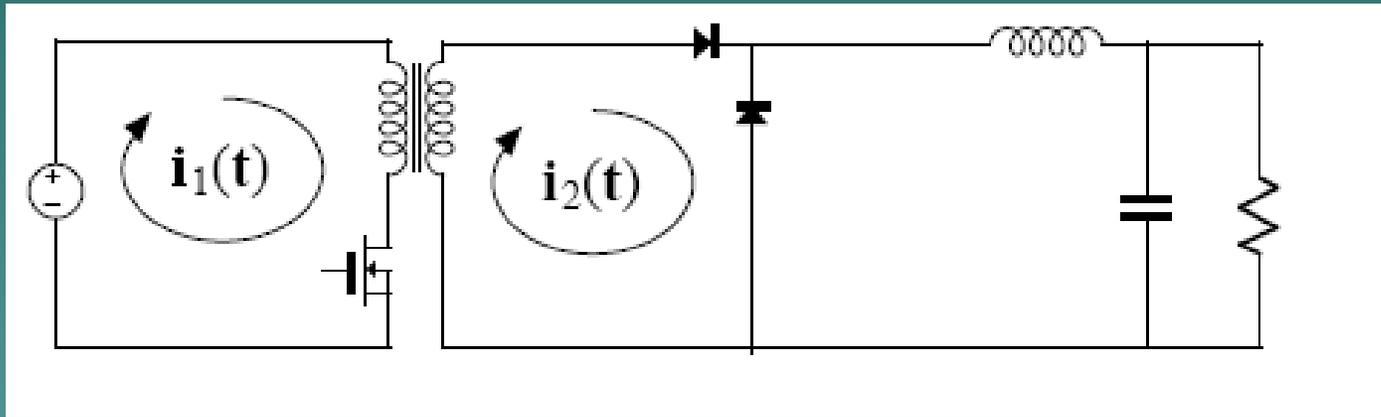
减少耦合：

1. 减少截面积
2. 增大磁路长度
3. 交叉走线

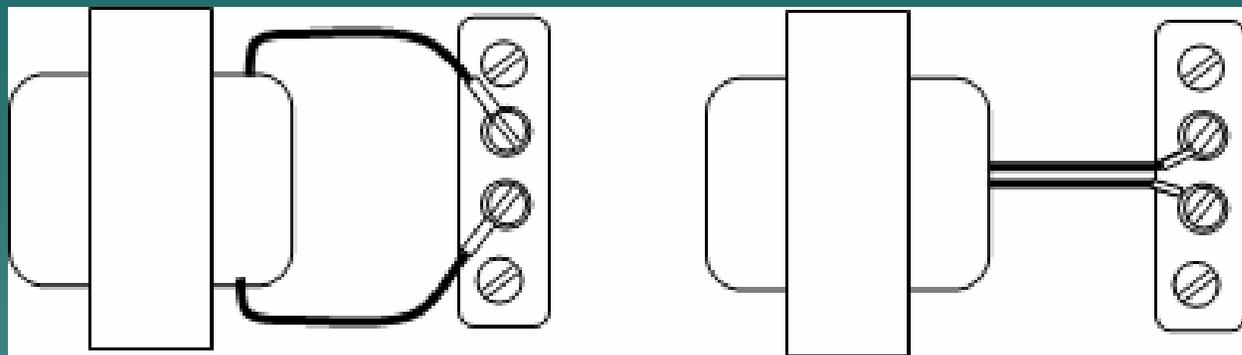


互感具体电路

输入与输出布局



变压器次级到整流器



参考文献

- ◆ Understanding and Optimizing Electromagnetic Compatibility in Switchmode Power Supply —Bob Mammano and Bruce Carsten
- ◆ EMI and Layout Fundamentals for Switched-Mode Circuits —R.W. Erickson
- ◆ 电磁兼容性结构设计 吕仁清 蒋全兴 东南大学出版社
- ◆ 开关电源的骚扰抑制问题—钱振宇
- ◆ RT