



此培训资料来源于德州仪器（TI）和中国电源学会（世纪电源网）合作举办的“TI 现场培训”课程，世纪电源网同意在 TI 网站上分享这些文档

。





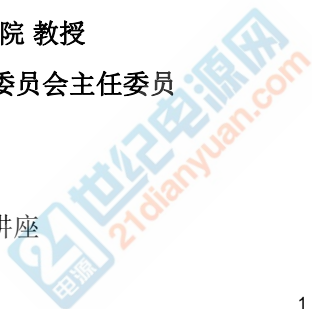
第三讲 EMI滤波器设计方法

主讲：陈为 博士

福州大学电气工程与自动化学院 教授

中国电源学会常务理事、磁技术专业委员会主任委员

功率变换器磁元件技术系列讲座
2015年3月





- 一、开关电源EMI基本概念
- 二、EMI滤波器理想参数的设计
- 三、EMI滤波器元件分布参数提取
- 四、滤波器元件近场耦合效应分析

高频磁性元件的全面设计考虑



结构设计

电气设计

杂散参数

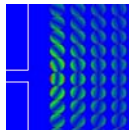
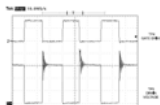
损耗设计

温升设计

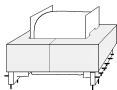
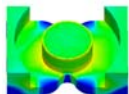
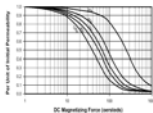
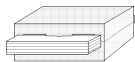
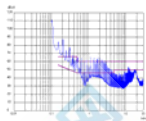
EMI设计



$$L = \frac{\mu \cdot N^2 A_e}{l_e}$$



$$\Delta T = \left(\frac{P}{S}\right)^{0.833}$$



空间可行性

电气可行性

电应力

效率/功率密度

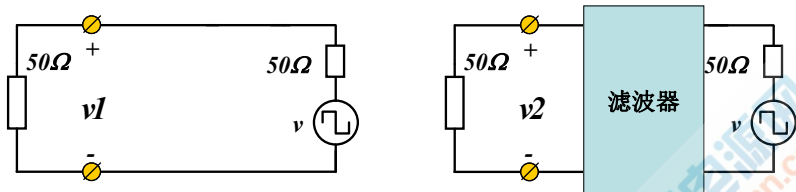
温升规范

EMI规范

二、EMI滤波器理想参数设计

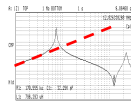
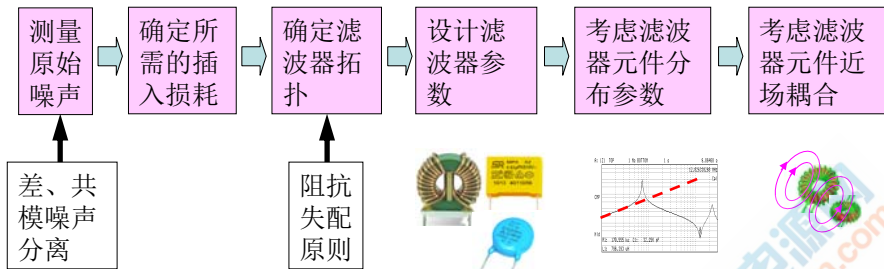
滤波器插入损耗IL的定义

在滤波器的设计中，通常用插入损耗来反映使用该滤波器和未使用前信号功率的损失和衰减程度。插入损耗越大，表示衰减越多，滤波器的效果越好。



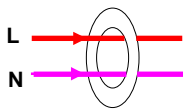
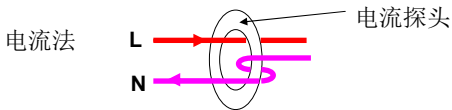
插入损耗: $IL = 20 \log\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$

滤波器基本设计步骤

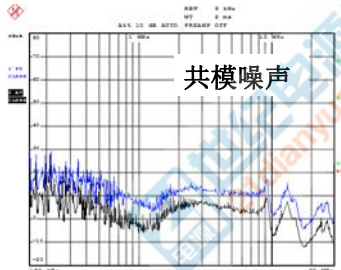
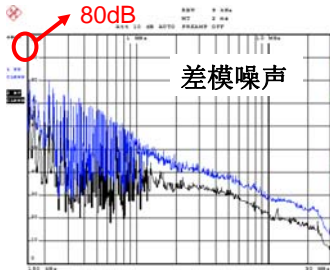


EMI原始噪声的测量

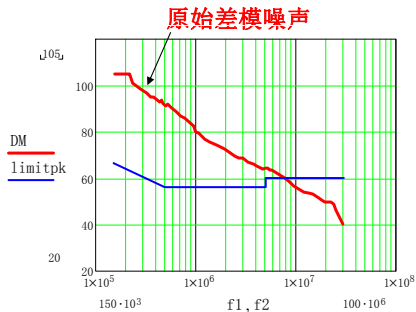
将样机的EMI滤波器拆除，测量原始噪声。但要注意由于原始总噪声较高，可能超过量程范围。



电压法：双LISN法，差共模分离器



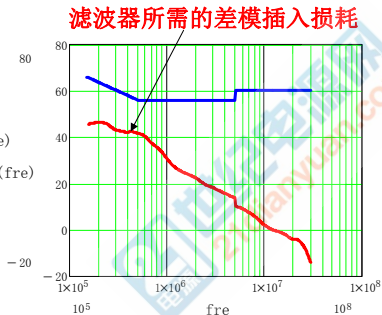
确定所需的插入损耗



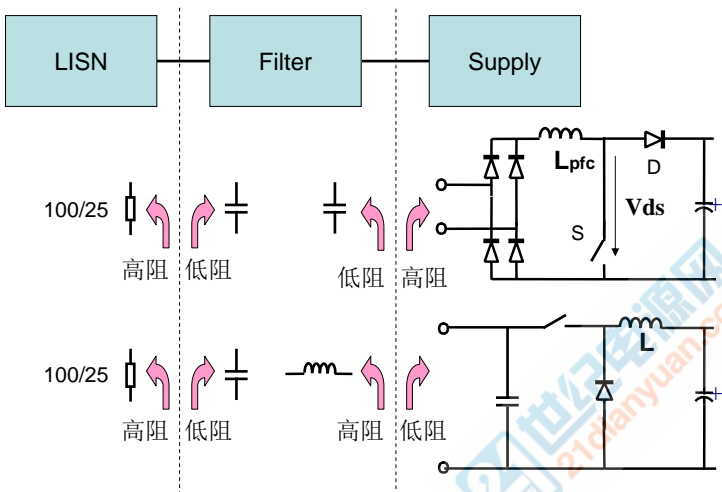
$$IL_{dm} = DM_{ori} - Limit_{pk} + 6dB$$



$$\frac{IL_{dm}(fre)}{limit_{pk}(fre)}$$

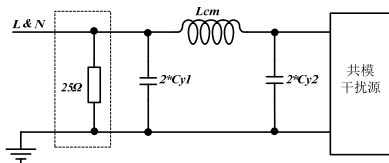
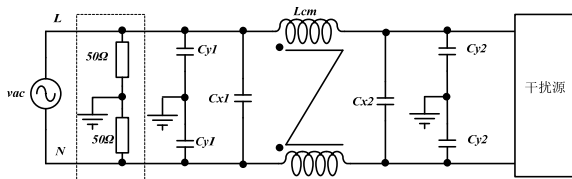


滤波器拓扑失配原则

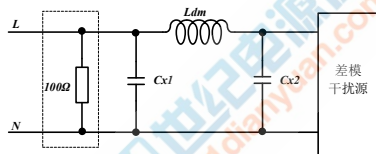


确定滤波器拓扑(一阶)

一阶EMI滤波器结构:



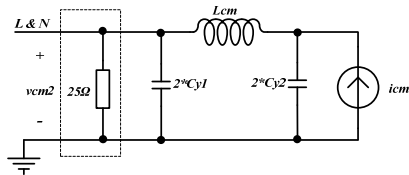
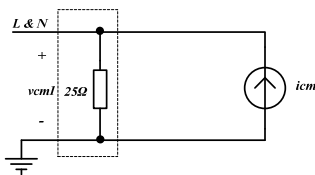
等效**共模**滤波器结构



等效**差模**滤波器结构

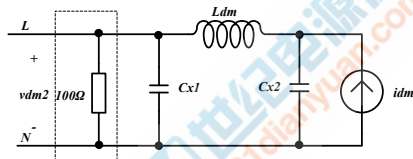
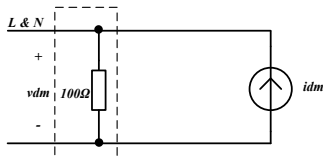
一阶滤波器插入损耗模型

一级EMI滤波器**共模**插入损耗数学模型：



$$IL_{cm}(s) = \frac{v_{cm1}(s)}{v_{cm2}(s)} = L_{cm} \cdot 2C_{y2} \cdot 2C_{y1} \cdot R_{cm} \cdot s^3 + L_{cm} \cdot 2C_{y2} \cdot s^2 + R_{cm} \cdot (2C_{y1} + 2C_{y2}) \cdot s + 1$$

一级EMI滤波器**差模**插入损耗数学模型：

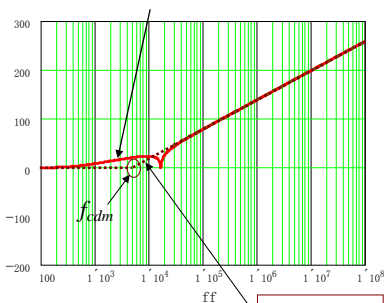


$$IL_{dm}(s) = \frac{v_{dm1}(s)}{v_{dm2}(s)} = L_{dm} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot R_{dm} \cdot s^3 + L_{dm} \cdot C_{x2} \cdot s^2 + R_{dm} \cdot (C_{x1} + C_{x2}) \cdot s + 1$$

一阶差模插入损耗数学模型简化

根据一阶差模插入损耗的数学模型可以化简出下图：

$$IL_{dm}(s) = L_{dm} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot R_{dm} \cdot s^3 + L_{dm} \cdot C_{x2} \cdot s^2 + R_{dm} \cdot (C_{x1} + C_{x2}) \cdot s + 1$$



-60dB/Dec

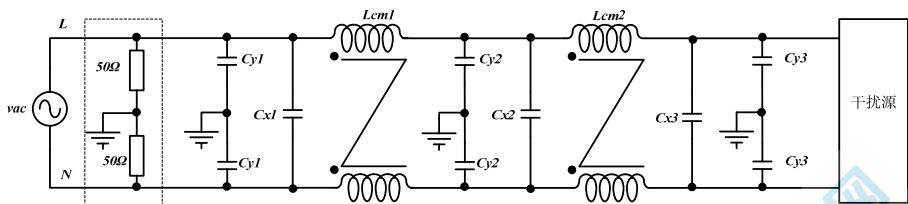
一阶差模滤波器转折频率 f_{cdm} 的表达式为：

$$f_{cdm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{L_{dm} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot R_{dm}}}$$

$$IL_{dm3}(s) = L_{dm} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot R_{dm} \cdot s^3$$

二阶滤波器插入损耗数学模型

二阶EMI滤波器结构:



二阶EMI滤波器**共模**插入损耗数学模型:

二阶EMI滤波器**差模**插入损耗数学模型:

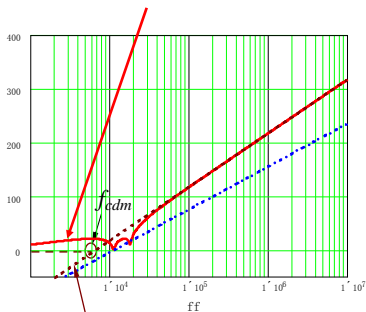
$$\begin{aligned}
 IL_{cm}(s) = & L_{cm1} \cdot L_{cm2} \cdot 2C_{y1} \cdot 2C_{y2} \cdot 2C_{y3} \cdot R_{cm} \cdot s^5 + L_{cm1} \cdot L_{cm2} \cdot 2C_{y2} \cdot 2C_{y3} \cdot s^4 + \\
 & [L_{cm1} \cdot R_{cm} \cdot 2C_{y1} \cdot (2C_{y2} + 2C_{y3}) + L_{cm2} \cdot R_{cm} \cdot 2C_{y3} \cdot (2C_{y1} + 2C_{y2})] s^3 + \\
 & (L_{cm1} \cdot 2C_{y2} + L_{cm2} \cdot 2C_{y3} + L_{cm1} \cdot 2C_{y3}) \cdot s^2 + R_{cm} \cdot (2C_{y1} + 2C_{y2} + 2C_{y3}) \cdot s + 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 IL_{dm}(s) = & L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot R_{dm} \cdot s^5 + L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot s^4 + \\
 & [L_{dm1} \cdot R_{dm} \cdot C_{x1} \cdot (C_{x2} + C_{x3}) + L_{dm2} \cdot R_{dm} \cdot C_{x3} \cdot (C_{x1} + C_{x2})] \cdot s^3 + (L_{dm1} \cdot C_{x2} \\
 & + L_{dm2} \cdot C_{x3} + L_{dm1} \cdot C_{x3}) \cdot s^2 + R_{dm} \cdot (C_{x1} + C_{x2} + C_{x3}) \cdot s + 1
 \end{aligned}$$

二阶差模插入损耗数学模型化简

根据二阶差模插入损耗的数学模型可以化出下图：

$$IL_{dm}(s) = L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot R_{dm} \cdot s^5 + L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot s^4 + [L_{dm1} \cdot R_{dm} \cdot C_{x1} \cdot (C_{x2} + C_{x3}) + L_{dm2} \cdot R_{dm} \cdot C_{x3} \cdot (C_{x1} + C_{x2})] \cdot s^3 + (L_{dm1} \cdot C_{x2} + L_{dm2} \cdot C_{x3} + L_{dm1} \cdot C_{x3}) \cdot s^2 + R_{dm} \cdot (C_{x1} + C_{x2} + C_{x3}) \cdot s + 1$$



-100dB/Dec

$$IL_{dm}(s) = L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot R_{dm} \cdot s^5$$

$$IL_{dm2}(s) = L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot s^4$$

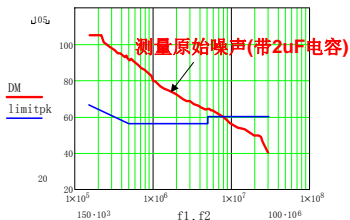
二阶差模滤波器转折频率 f_{cdm} 的表达式为：

$$f_{cdm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot R_{dm}}}$$

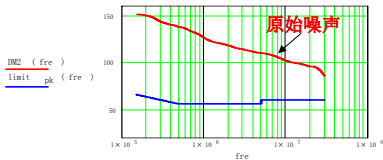
选择设计滤波器电路

根据所提供的样机进行EMI滤波器电气参数的设计，设计流程如下：

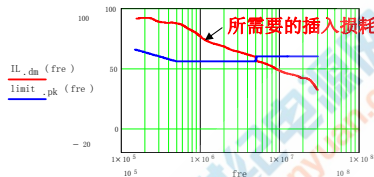
1、由于样机的总噪声主要来自于差模噪声，且样机没有地线，所以针对差模噪声设计EMI滤波器。由于测试条件限制，并联一个2uF电容进行测试，样机原始差模噪声为：



2、由于测试时加入一个2uF电容，将测试的原始噪声转化成实际原始噪声为：



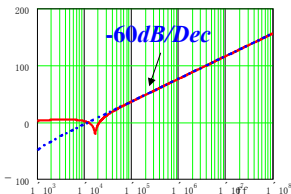
3、将实际原始差模噪声与EN55022 Class B的标准线相比，再加入6dB的裕量，可以得到所需的插入损耗曲线：



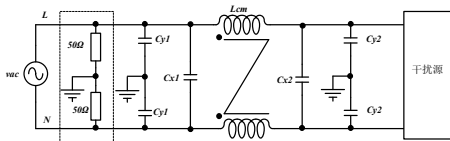
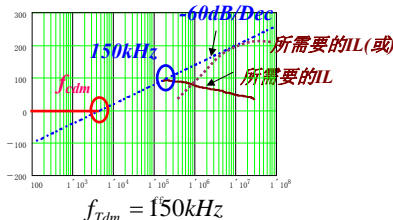
4、根据所需差模噪声插入损耗的特性选择设计一阶或二阶的EMI滤波器。

设计滤波器参数（一阶）

1) 一阶差模EMI滤波器的插入损耗
传递函数及其幅频特性:



2) 差模噪声的最小频率点 f_{Tdm} 为:
(150kHz以后)



3) 差模噪声的最小频率点 (150kHz以后) 处的插入损耗为:

$$V_{dmreq} = 90\text{dB}$$

4) 一阶差模EMI滤波器的转折频率 f_{cdm} 为:

$$f_{cdm} = 10^{\frac{-V_{dmreq}}{60}} \cdot f_{Tdm} = 4.74\text{kHz}$$

5) 由 f_{cdm} 选取 C_{x1} , C_{x2} 及 L_{dm} :

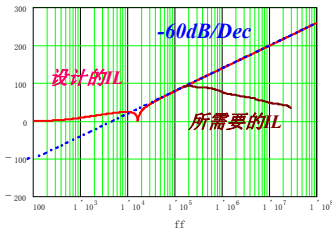
$$f_{cdm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{L_{dm} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot R_{dm}}}$$

设计滤波器参数（一阶）

令 $C_{x1}+C_{x2}=4\mu F$ ，其中设 $C_{x1}=2\mu F$ ， $C_{x2}=2\mu F$ ，则：

$$L_{dm} = \frac{1}{C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot R_{dm} \cdot 8 \cdot \pi^3 \cdot f_{cdm}^3} = 94.4\mu H$$

6) 验证 $L_{dm}=94.4\mu H$ ， $C_{x1}=2\mu F$ ， $C_{x2}=2\mu F$ 时差模插入损耗能否满足要求：



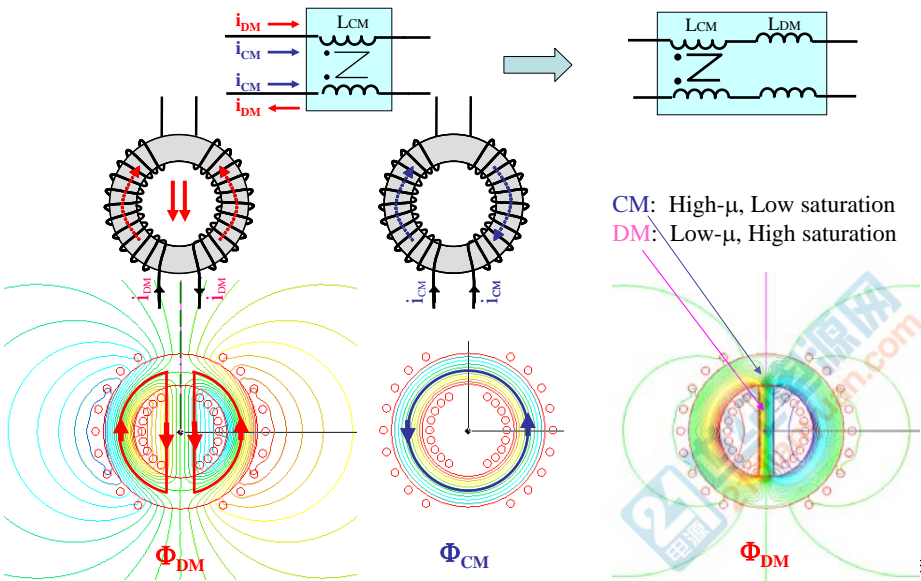
$$V_{dmL} = 90.149\text{dB} @ f = 150\text{kHz}$$

7) 一阶差模滤波器设计结果如下：

$$\begin{aligned} L_{dm} &= 94.4\mu H, \\ C_{x1} &= 2\mu F, \\ C_{x2} &= 2\mu F. \end{aligned}$$

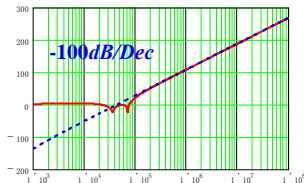
8) 用共模电感的漏感来作差模电感。

共模滤波电感的差模分量

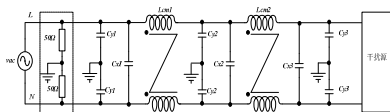
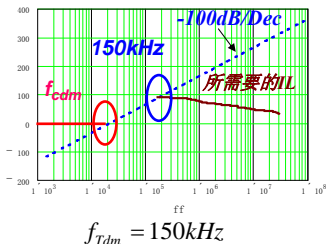


滤波器参数设计（二阶）

1) 二阶差模EMI滤波器的插入损耗 传递函数及其幅频特性：



2) 差模噪声的最小频率点 f_{Tdm} 为： (150kHz以后)



3) 差模噪声的最小频率点（150kHz以后）处的插入损耗为：

$$V_{dmreq} = 90dB$$

4) 二阶差模EMI滤波器的转折频率 f_{cdm} 为：

$$f_{cdm} = 10^{\frac{-V_{dmreq}}{100}} \cdot f_{Tdm} = 18.9kHz$$

5) 由 f_{cdm} 计算 $Cx1$, $Cx2$, $Cx3$ 及 L_{dm1} 和 L_{dm2} 。

$$f_{cdm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt[5]{L_{dm1} \cdot L_{dm2} \cdot C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot R_{dm}}}$$

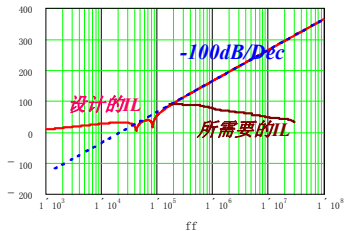
设计滤波器参数（二阶）

令 $C_{x1} + C_{x2} + C_{x3} = 4\mu F$ ，其中设
 $C_{x1} = C_{x2} = 1\mu F$ ， $C_{x3} = 2\mu F$ ，

$$L_{dm1} = \sqrt{\frac{1}{C_{x1} \cdot C_{x2} \cdot C_{x3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_{cdm})^5}} = 10.3\mu H$$

$$L_{dm2} = L_{dm1} = 10.3\mu H$$

6) 验证差模插入损耗能否满足要求：



$$V_{dmIL} = 87.02\text{dB} @ f = 150\text{kHz}$$

由于受到谐振点的影响，插入损耗略小，让 $C_{x2} = 2\mu F$ ，可以提高插入损耗，使其满足要求。

$$V_{dmIL} = 92.3\text{dB} > 90\text{dB} @ f = 150\text{kHz}$$

7) 二阶差模滤波器设计结果如下：

$$\begin{aligned} L_{dm1} &= L_{dm2} = 10.3\mu H; \\ C_{x1} &= 1\mu F; \\ C_{x2} &= 2\mu F; \\ C_{x3} &= 2\mu F; \end{aligned}$$

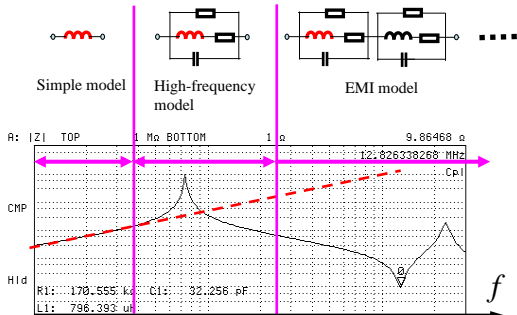
三、滤波器分布参数提取与分析

磁元件模型

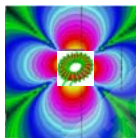
磁元件

内部分布参数

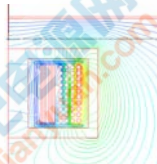
外部分布参数



电感的阻抗特性

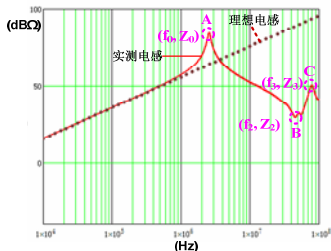
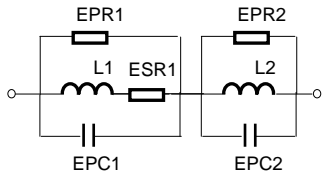


磁场泄露



电场泄露

电感元件模型参数提取



首先：利用阻抗分析仪或网络分布仪测得电感的阻抗曲线

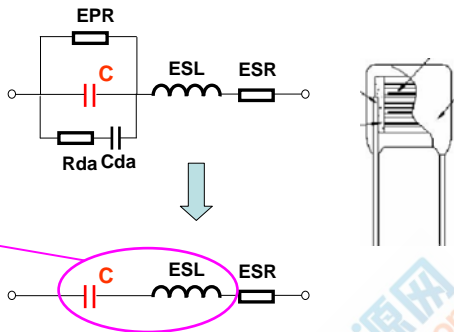
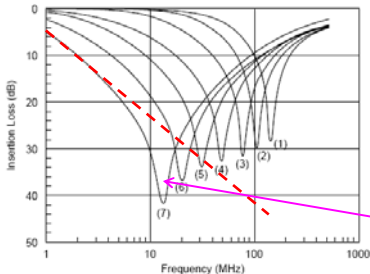
第二：从阻抗曲线得到低频时的电感 $L1$

第三：从阻抗曲线的第一个并联谐振点计算 $EPC1$

第四：从阻抗曲线的第二串联谐振点和第三个并联谐振点联立计算 $L2$ 和 $EPC2$

第五：调整 ESR ， $EPR1$ 和 $EPR2$ 的阻尼大小，从而调整谐振峰值

电容元件的频率特性与模型



其中：

C: 静态电容

EPR: 表示电容的介质损耗，即绝缘电阻。对于低压电容，可以忽略

ESL: 表示引线和内部等效电感

ESR: 表示引线和内部等效电阻

Rda, Cda: 介质吸收电阻和介质吸收电容，表示内部介质的恢复特性

电容元件模型参数提取

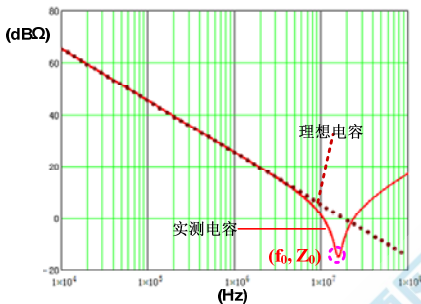


$$C = \frac{1}{j \cdot 2\pi f \cdot Z_c}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C \cdot ESL}}$$

$$ESL = \frac{1}{(2\pi \cdot f_0)^2 \cdot C}$$

$$ESR = Z_0$$



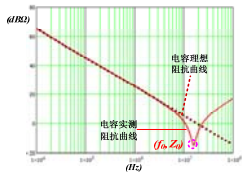
- 1、利用阻抗分析仪测得电容的阻抗特性曲线；
- 2、从曲线的低频段(直线段)特性计算静态电容C；
- 3、从阻抗特性曲线中找出阻抗最低点时的谐振频率 f_0 ；
- 4、计算ESL和ESR。

电容高频分布参数提取流程

电容高频参数提取流程:

($C_y=10nF$)

1、利用网络分析仪进行测量，得到其阻抗曲线



2、电容的容值的提取

低频时: $f_l=10kHz$, $Z_{cl}=65.36dB \Omega$.

电容的容值为:

$$C = \frac{1}{j \cdot 2\pi f \cdot Z_c} = 8.587nF$$

3、电容的ESL、ESR的提取

从电容的阻抗曲线中找出阻抗最低点时的频率 f_0 及幅值 Z_0

由模型可知，当 C 与 ESL 并联谐振时，阻抗最小。

谐振点: $f_0=15922087.27Hz$, $Z_0=-15.2dB \Omega$

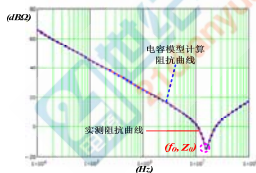
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{C \cdot ESL}}$$

电容的ESL为:

$$ESL = \frac{1}{(2\pi \cdot f_0)^2 \cdot C}$$

电容的ESR为: $ESR = Z_0$

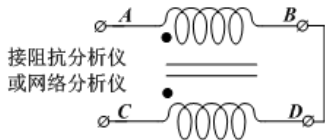
4、参数提取结果与实测结果比较



EMI滤波器共模电感参数提取

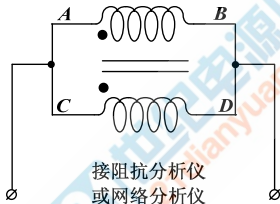
□ 共模电感差模部分寄生参数提取

将共模电感的两个绕组的一组同名端短接，然后测量另外一组同名端的阻抗。对差模分量分布参数的提取方法与电感的分布参数提取方法一致。



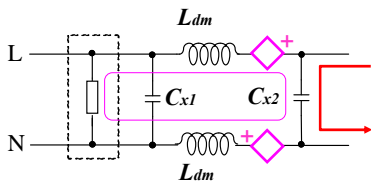
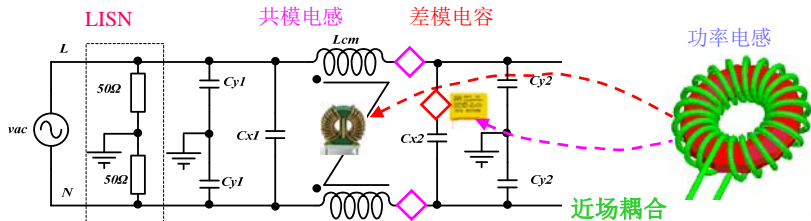
□ 共模电感共模部分寄生参数提取

将共模电感的两个绕组同名端短接，然后再测量两端的阻抗。对共模部分的分布参数提取也同电感的分布参数提取方法一致。

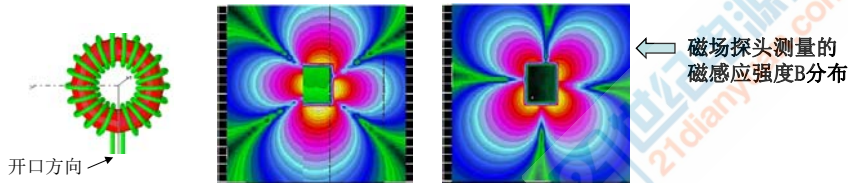
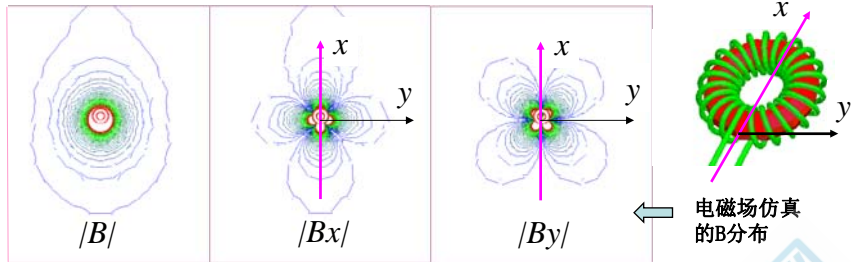


四、磁元件近场耦合效应分析

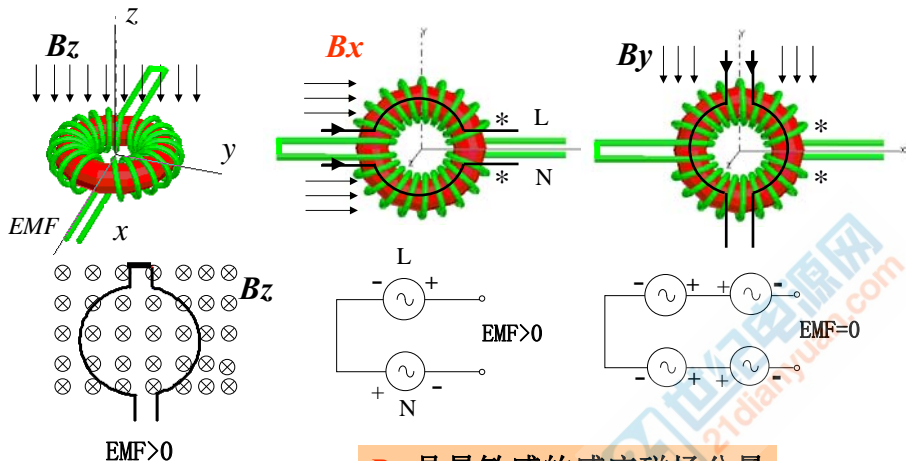
滤波器元件近场耦合分析



环形电感产生的磁场近场辐射干扰

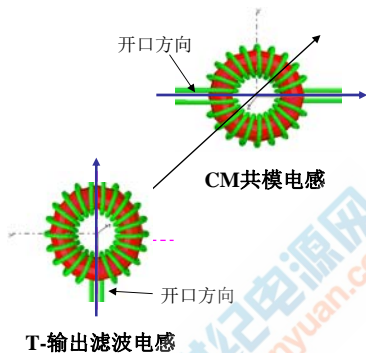
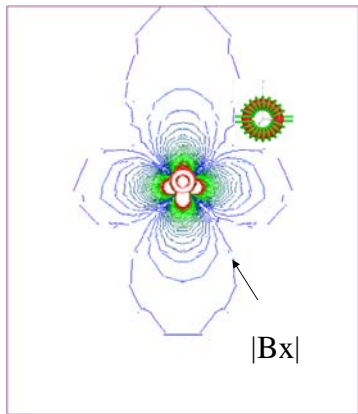


外部磁场对共模电感的干扰分析



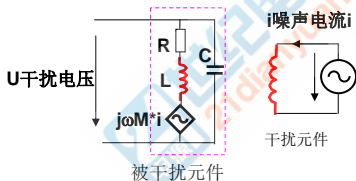
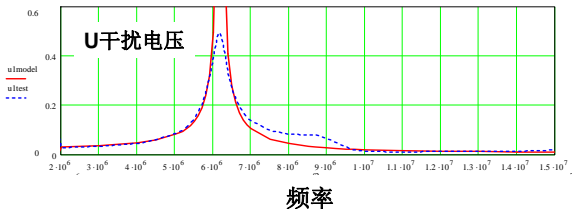
B_x 是最敏感的感应磁场分量

具有最小干扰的相对位置

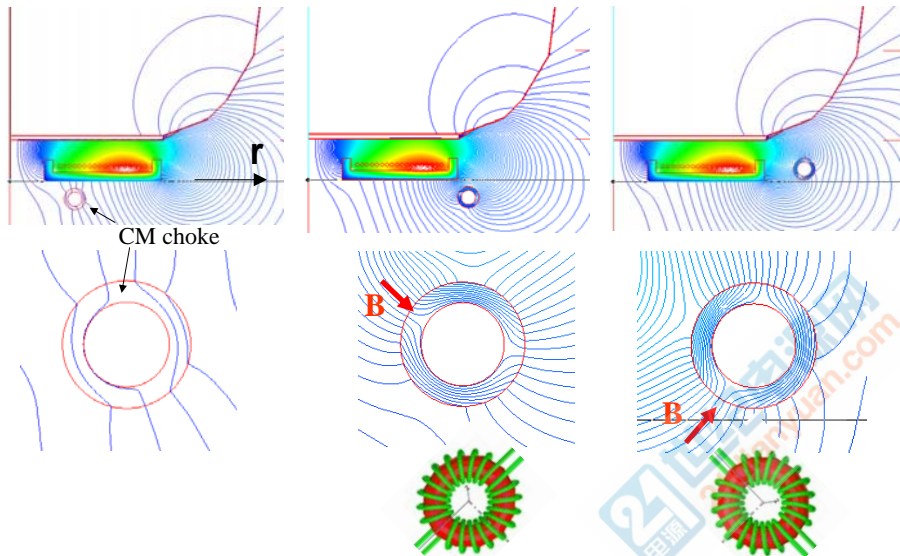


影响近场耦合效应的因素分析

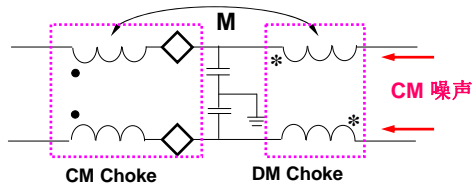
- 干扰元件与被干扰元件之间的距离
- 干扰元件与被干扰元件之间的相对位置/角度
- 被干扰元件的内部分布参数 -- R, L & C



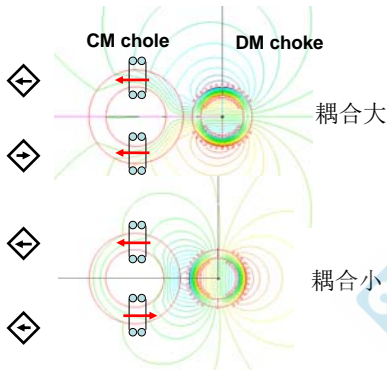
电磁炉磁场分布及对共模电感的影响



滤波器中磁元件之间的耦合干扰



CM Choke DM Choke



21世纪电源网
电源 21dianyuan.com

磁元件近场耦合效应的测量

信号检测法

频谱分析仪/示波器



干扰
磁场



被干扰体

插入损耗法

接收机/网络分析仪



输出

输入



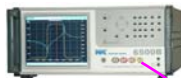
被干扰体



干扰体

阻抗测量法

阻抗分析仪



* L1 干扰体



* L2 被干扰体



$$2 * M = L1 + L2 - L12$$



谢谢 Q & A

