



福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY

# 共模滤波电感器设计的关键影响因素

报告人：林苏斌 博士

福州大学功率变换与高频电磁技术研究室

2018中国第八届中国功率变换器磁元件联合学术年会

2018年8月17日 中国 南平建阳



- 研究背景
- EMI滤波器的基本设计流程
- 共模滤波电感器设计关键影响因素
- 结论

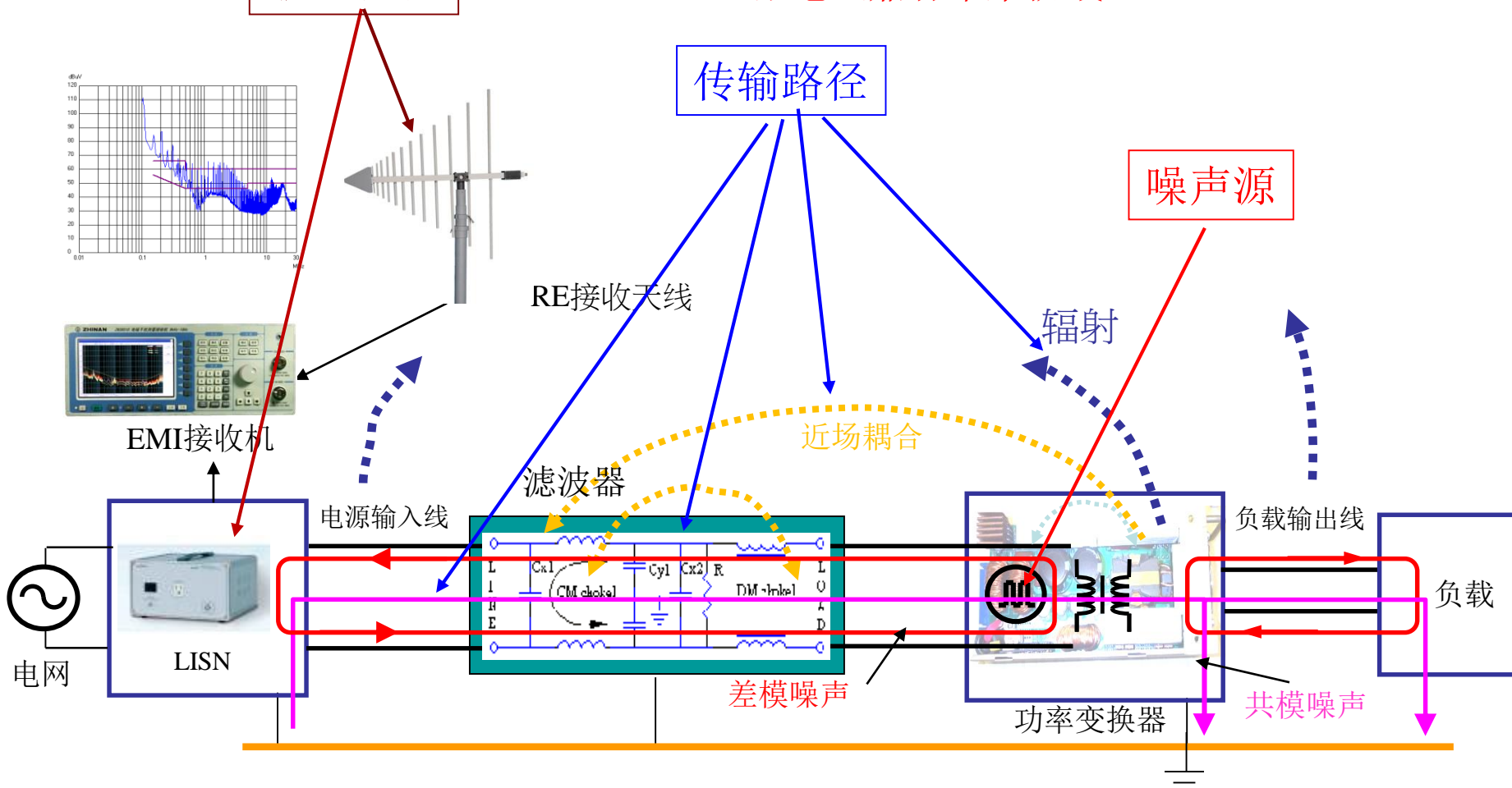
## 功率变换器电磁兼容

高频率、高功率密度的发展趋势给功率变换器电磁兼容带来挑战。

敏感设备

传输路径

噪声源



电磁兼容成为开关功率变换技术的一个重要关注点



## 开关功率变换器中的EMI抑制策略

### 变换器:

#### □ 拓扑

★电磁兼容特性较好的拓扑、减小拓扑中电位跳变点的数量：如图腾柱PFC电路等；

★减小输入和输出的电流纹波：如多路交错并联等；

#### □ 驱动

★降低驱动速度：如在开关管上串磁珠；

#### □ 开关管的电压

★减小开关管的电压尖峰大小：如使用RCD吸收电路减小电压过冲；

#### □ PCB布局

★减小高频回路；

★减小电位跳变点与大地正对；

#### □ 屏蔽

★机壳屏蔽

★器件屏蔽

#### □ 磁性元件(电感器和变压器)

### EMI滤波器:

#### □ 拓扑结构

★增加EMI滤波器的阶数

#### □ 器件的参数设计

★增加电容的容量

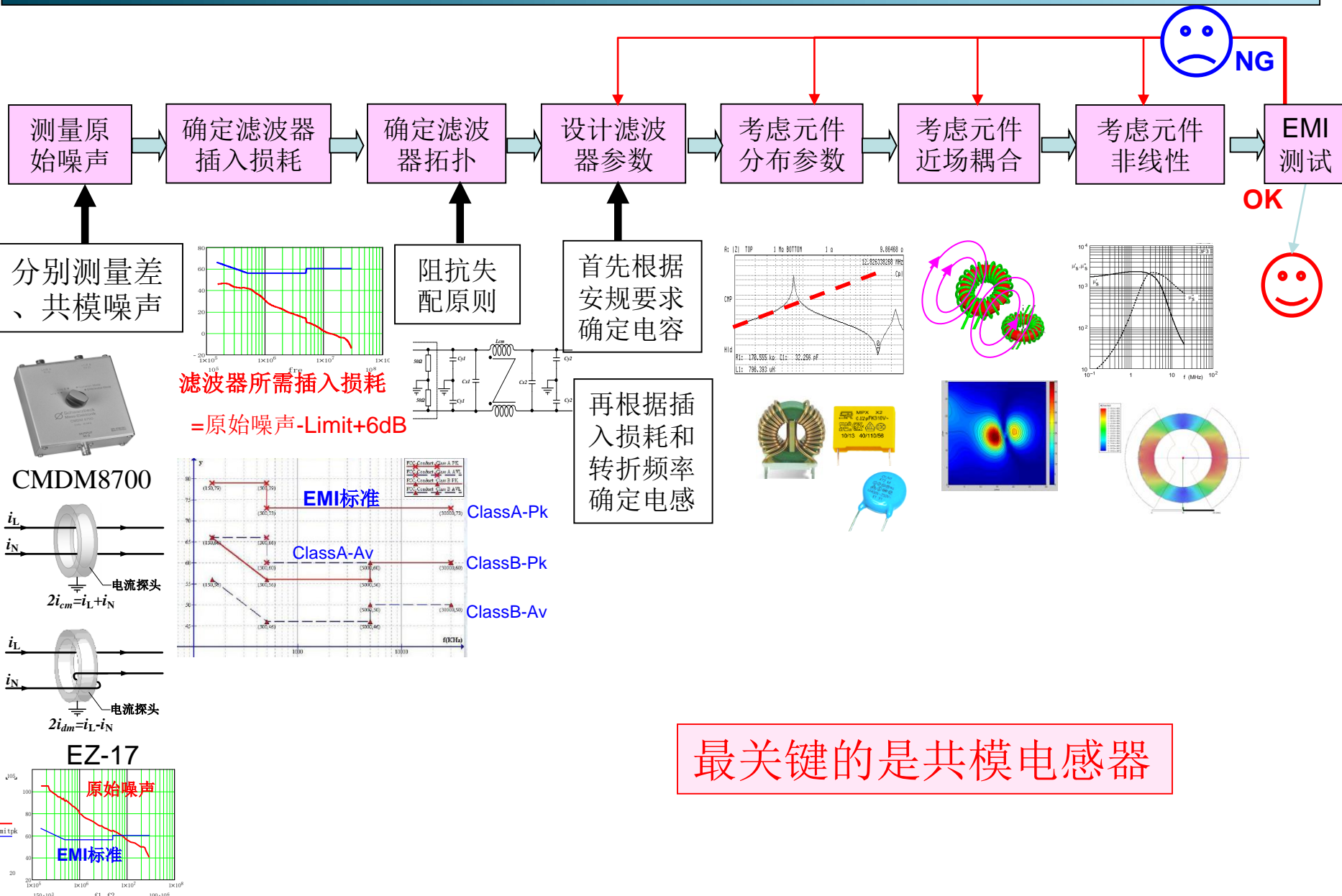
#### □ 电气参数设计

#### □ 电感设计

#### □ 滤波器中的耦合设计

**滤波器是最常用且有效的电磁干扰抑制手段**

# 滤波器的基本设计过程



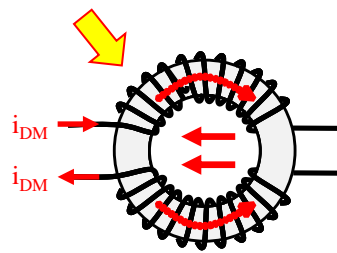
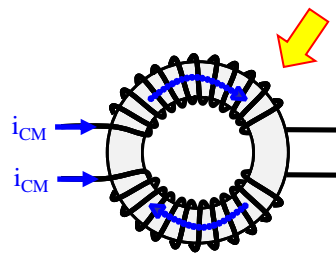
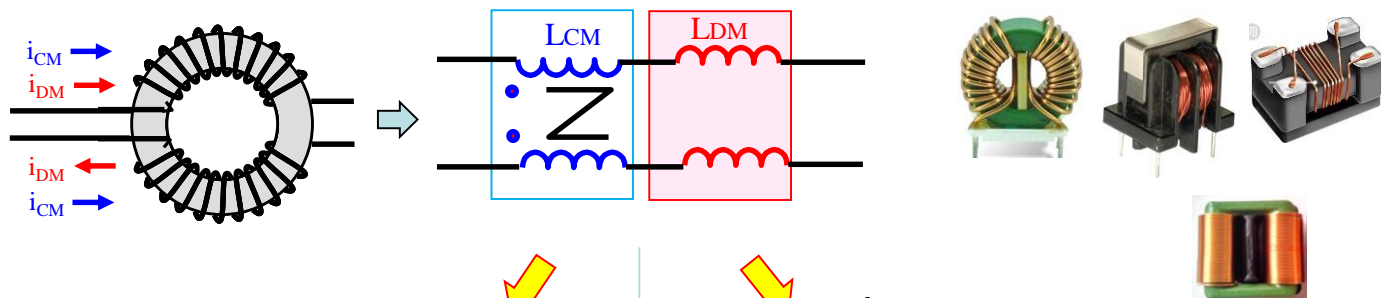
# 共模滤波电感器等效电路

## 电感器等效电路:

噪声电流

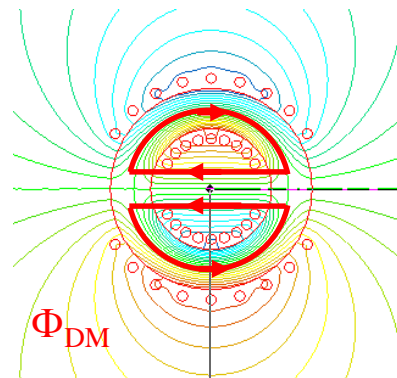
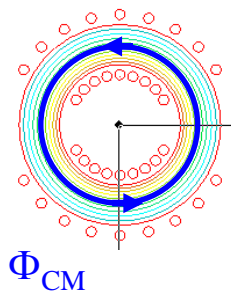
$$i_L = i_{CM} + i_{DM}$$

$$i_N = i_{CM} - i_{DM}$$



## 滤波电感磁场分布特点:

共模磁通基本都在磁芯内部，使得共模电感量很大；

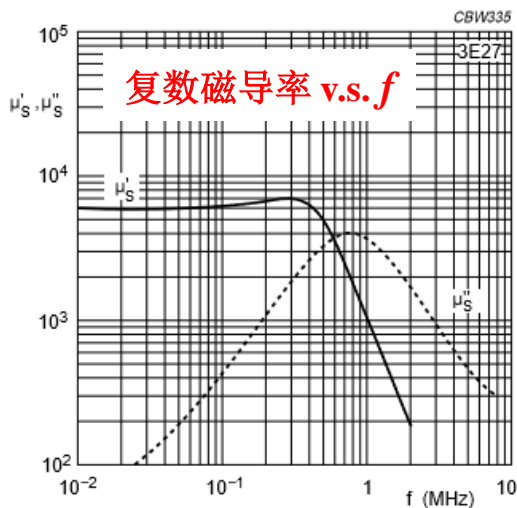


差模磁通通过磁芯外部空气，使得差模电感量较小；

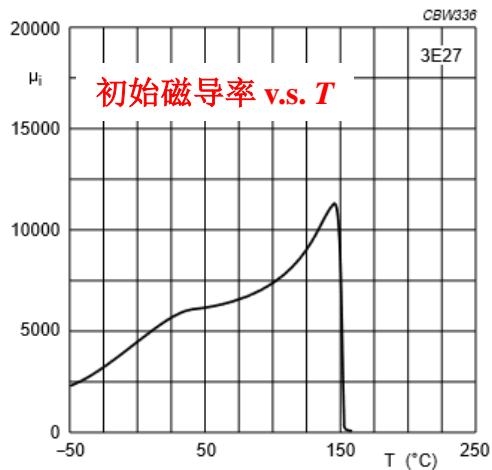
# 共模滤波电感器的磁芯考虑

## 磁芯考虑:

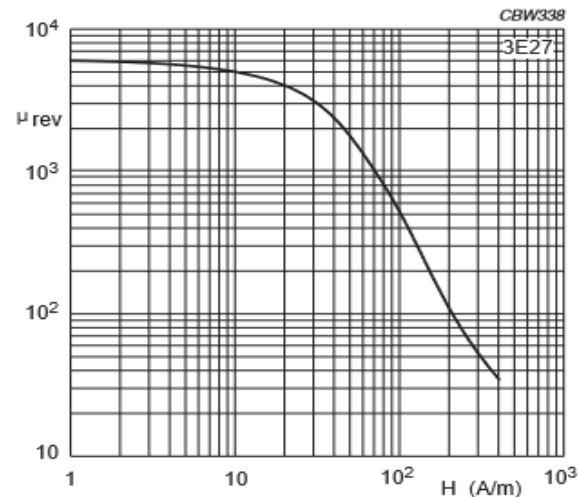
磁芯的磁导率-频率特性要与噪声频率配合



磁芯的适当高温有助于提高磁导率



工频偏磁对磁导率的影响



频率

温度

偏磁

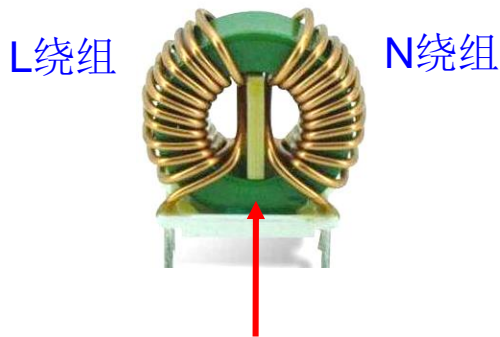


动态电感

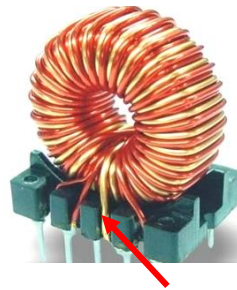
# 共模滤波电感器的绕组考虑

## 绕组考虑:

### 1、L和N绕组要安规隔离

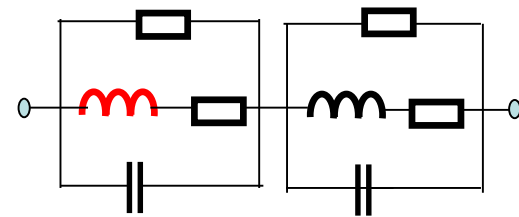


L和N线分绕，差模漏感大，需要安规隔板

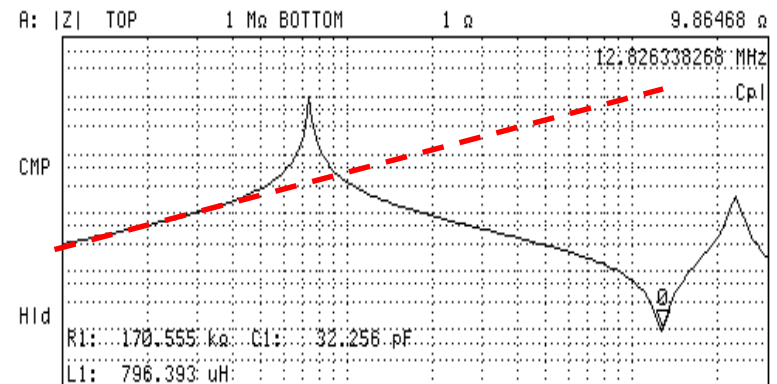


L和N线并绕，漏感很小，但一个绕组用三层绝缘线(TIW)

### 2、绕组分布电容要小



EMI模型



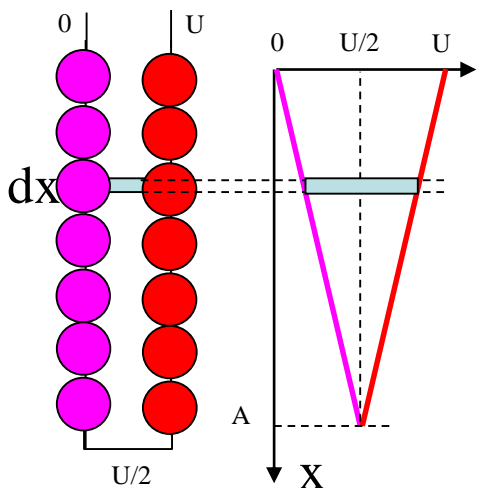
分布电容对阻抗特性影响大





# 绕组寄生分布电容的计算方法

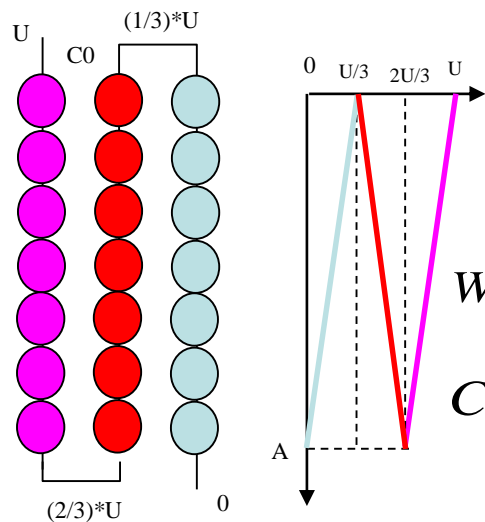
设：两层绕组之间的电容（层间结构电容）为 $C_0$



$$W_{Total} = \int_0^A dw = \frac{1}{2} \int_0^A dC \cdot \Delta U^2 = \frac{1}{2} \int_0^A \left(\frac{C_0}{A} dx\right) \Delta U^2$$

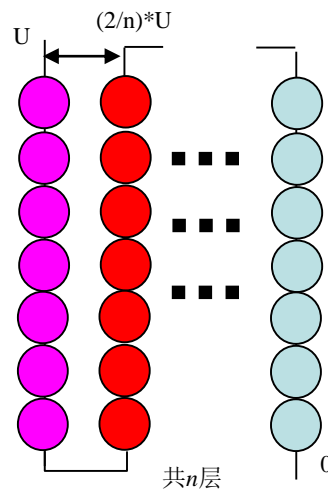
$$W_{Total} = \frac{U^2}{2} \frac{C_0}{A} \int_0^A \left[\frac{x}{A}\right]^2 dx$$

$$W_{Total} = \frac{U^2}{2} \frac{C_0}{A} \frac{A}{3} = \frac{U^2}{2} \left(\frac{C_0}{3}\right) \quad C_{Effect} = \frac{C_0}{3}$$



$$W_{Total} = W_{(1-2)} + W_{(2-3)}$$

$$C_{Effect} = \frac{8}{27} C_0$$



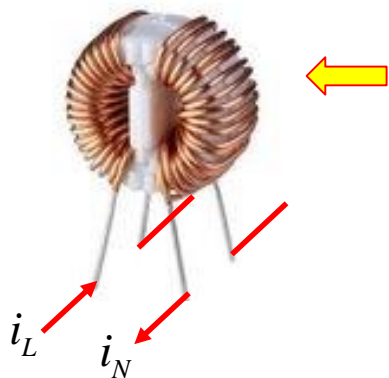
$$C_{Effect} = \left(\frac{2}{n}\right)^2 \left(\frac{n-1}{3}\right) C_0$$

影响分布电容的因素：

- ❖ 绕组层间距离
- ❖ 层间绝缘介电常数
- ❖ 绕线布置方式（电位分布）

共模电感，绕组分布电容要小，应尽量避免多层绕制

# 共模滤波电感的工频电流偏磁

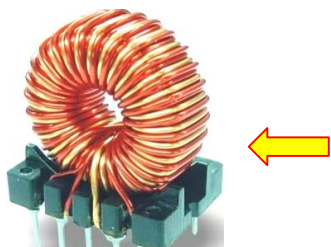


对分绕结构，在工频功率电流（差模形态）作用下，磁芯存在偏磁磁通

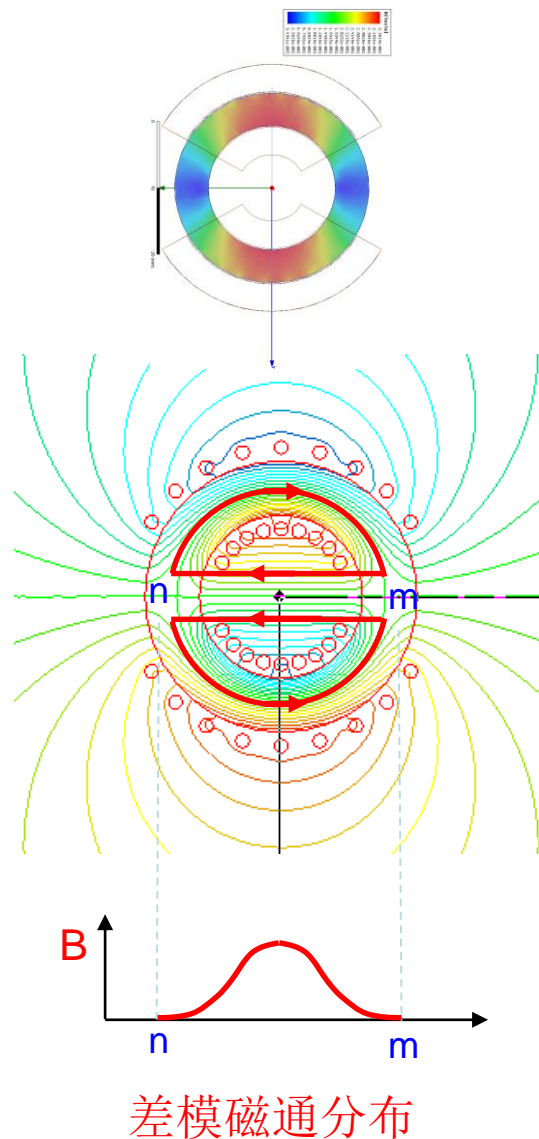
偏磁磁通沿磁芯分布不均匀，在绕组中间部位磁密最大

如果在偏磁磁通下，磁密最大处磁芯饱和，则共模感量急剧下降

漏感(差模电感)越大，在工频电流下偏磁通越大，则磁芯越容易局部饱和

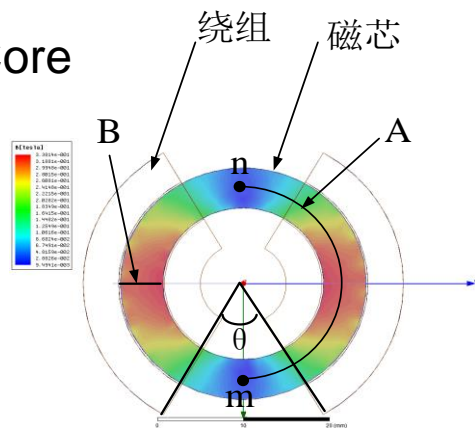


对并绕结构共模电感，由于漏感很小，基本不存在工频偏磁的局部饱和问题

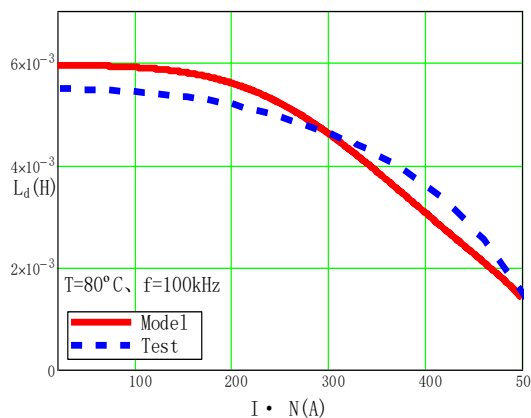
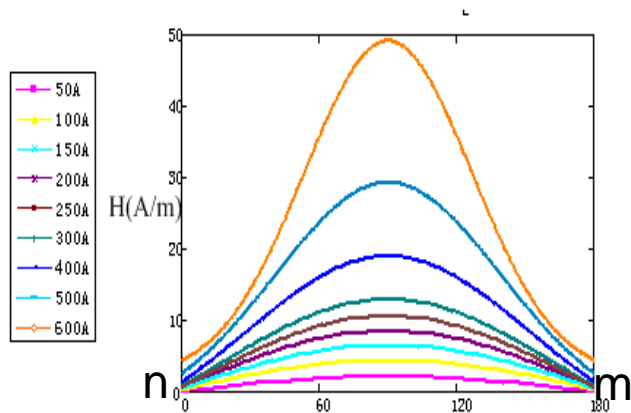
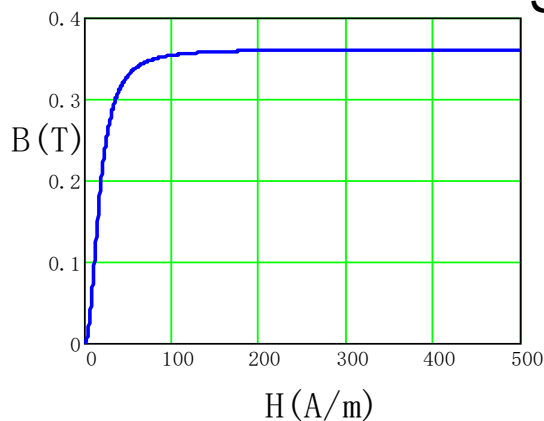
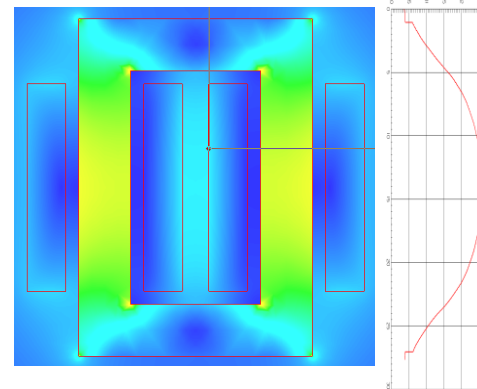


# 共模滤波电感的工频电流偏磁影响

T Core



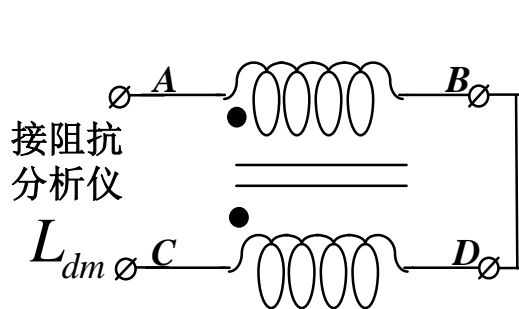
SQ Core



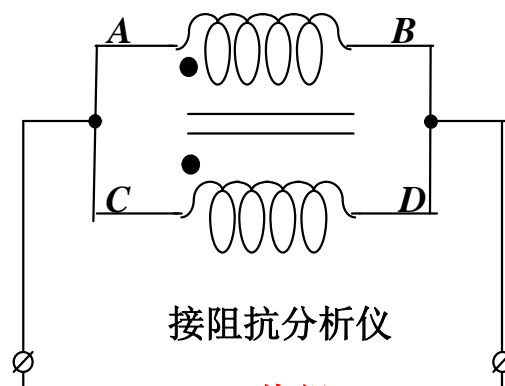
□ 偏磁电流（直流/工频）对共模电感的影响需要考虑



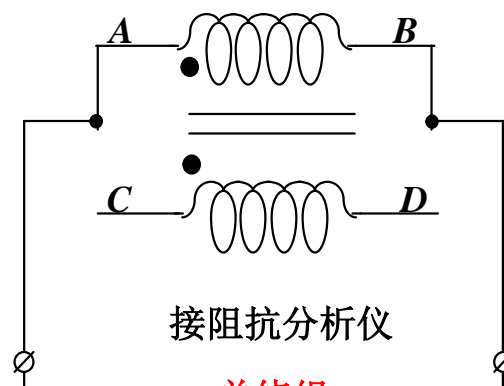
# 共模滤波电感的测量方法



差模电感分量

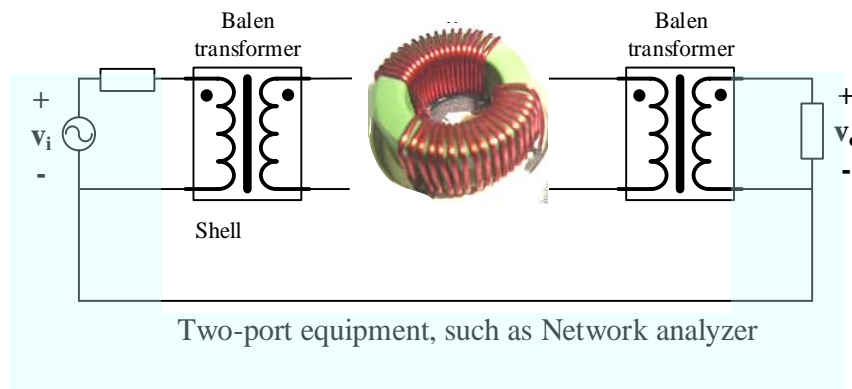


双绕组



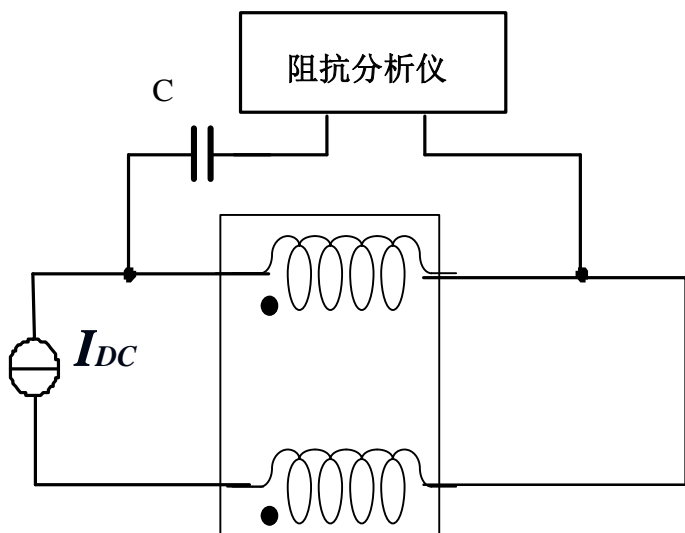
单绕组

共模电感分量



二端口参数测量

# 工频电流偏磁下阻抗测量

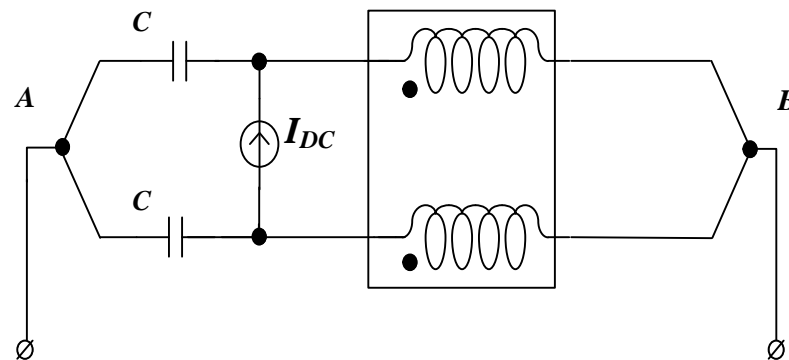
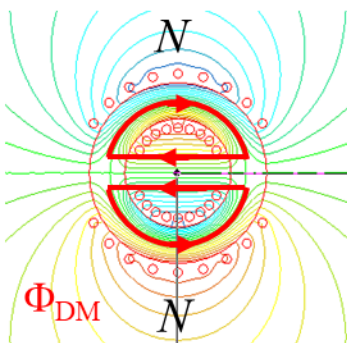


单端测量法（直流电流源）

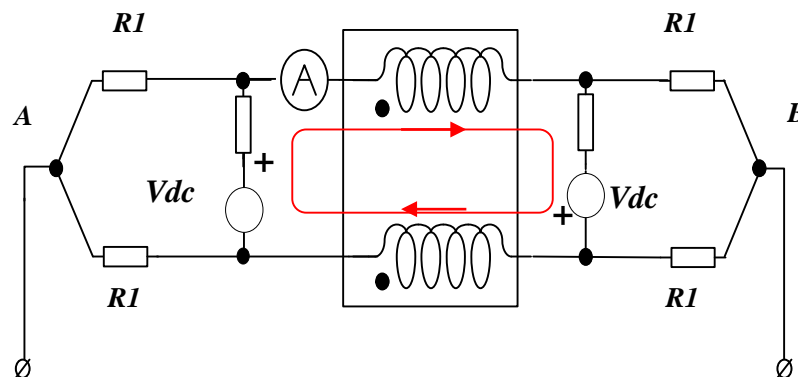
直流电流偏磁影响评估

$$L_{dm} \cdot i_{dc} = 2 \cdot N \cdot A_e \cdot B_{dc}$$

差模  
电感  
工频  
电流  
峰值



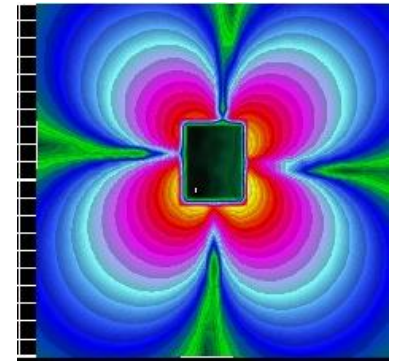
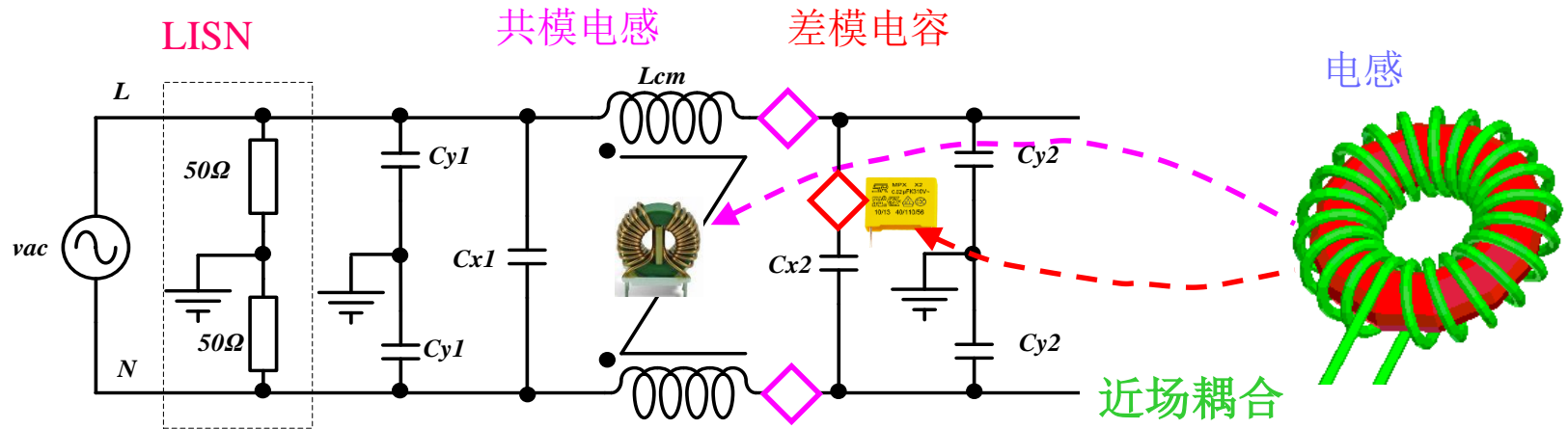
双端测量法（直流电流源）



双端测量法（直流电压源）

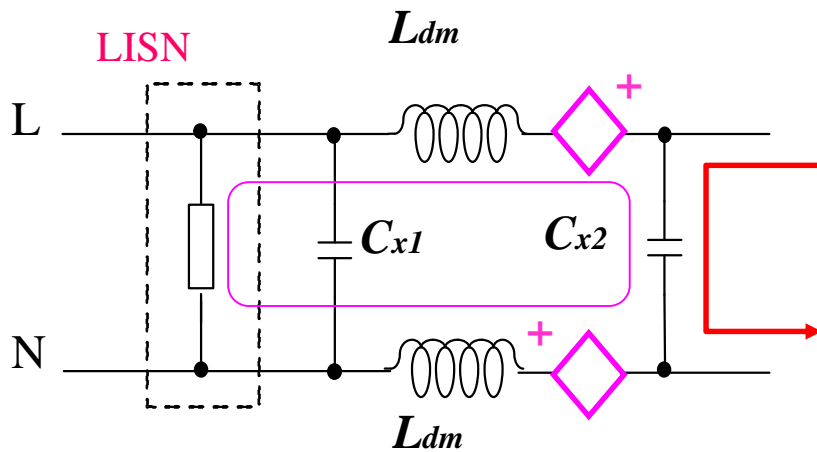
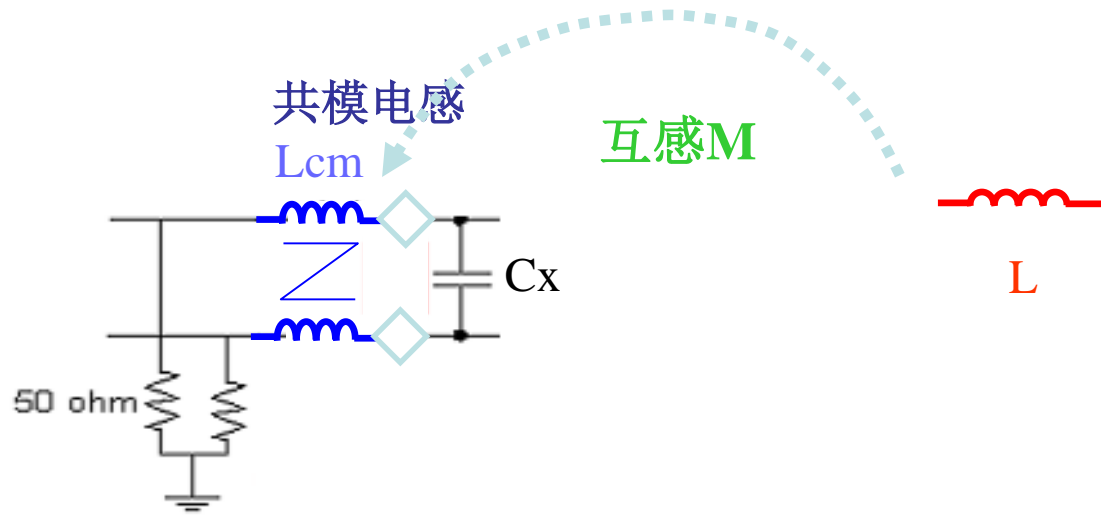


# 滤波器元件近场耦合问题

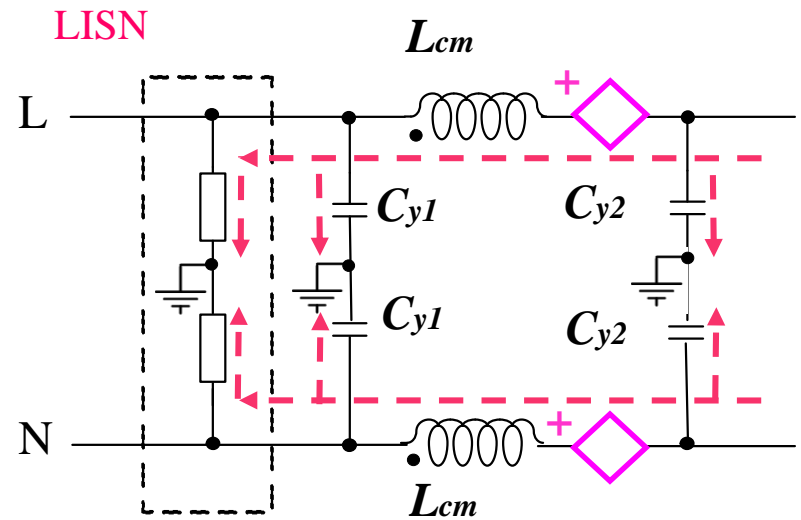




# 磁性元件近场耦合对EMI的影响



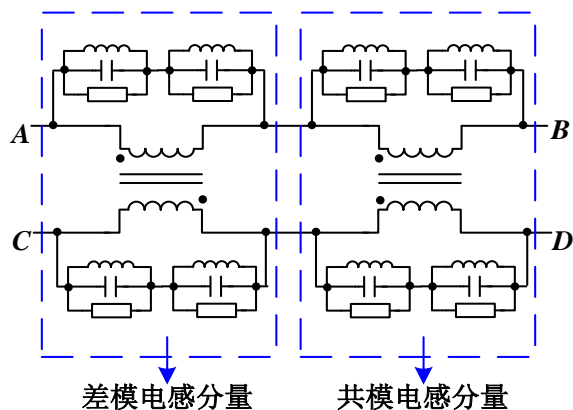
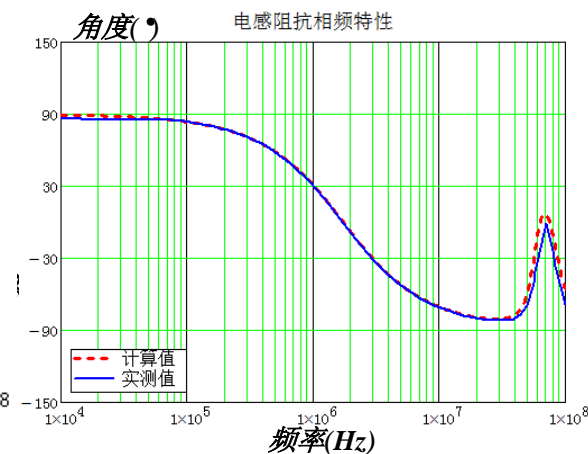
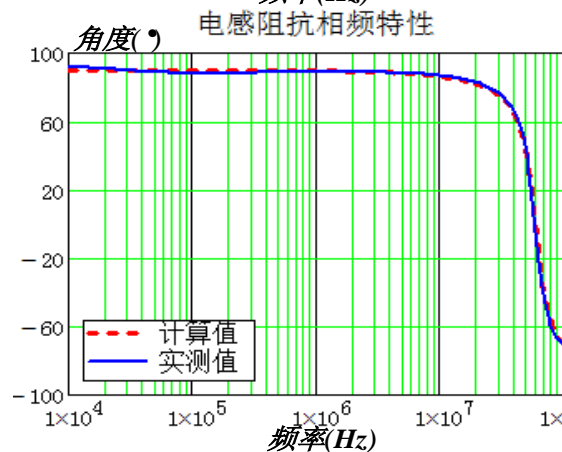
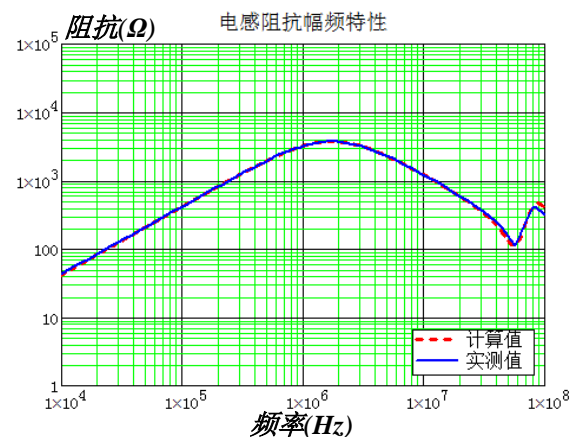
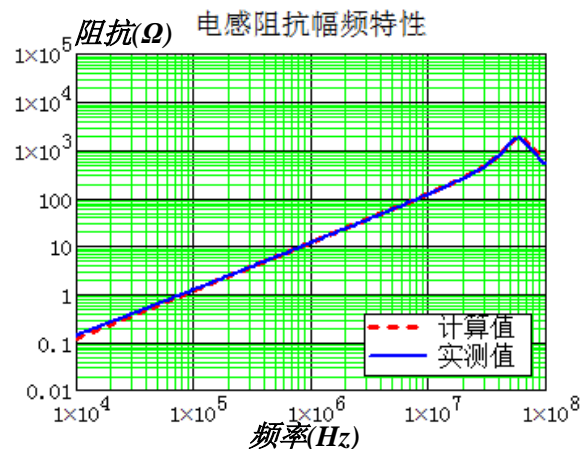
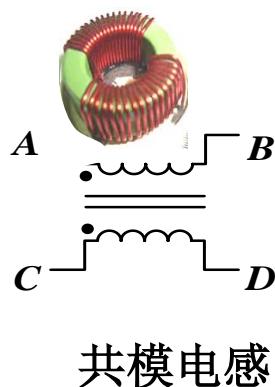
差模噪声的影响



共模噪声的影响

# 共模滤波电感的仿真模型

## 共模电感阻抗特性模型



共模电感仿真模型

共模电感差模分量

共模电感共模分量





1、共模滤波电感器是**EMI**滤波器中最重要的需要设计的器件，对滤波效果作用大。

2、共模电感器磁心参数涉及非线性和频变性的特点，内部磁场存在分布性；绕组间、绕组与磁心间存在分布电场，寄生参数丰富；存在磁场泄露，易于其它元件产生耦合，设计时应综合考虑这些因素的影响。



福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY

谢 谢 ！