



反激变换器的变压器

陈为 博士

chw@fzu.edu.cn

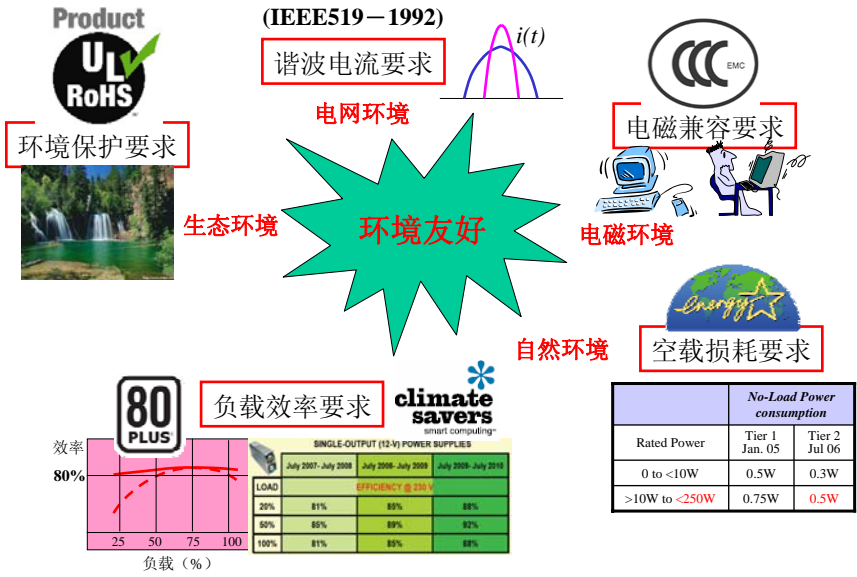
福州大学电气工程与自动化学院 教授, 博士生导师
中国电源学会理事, 变压器与电感器专委会 主任委员



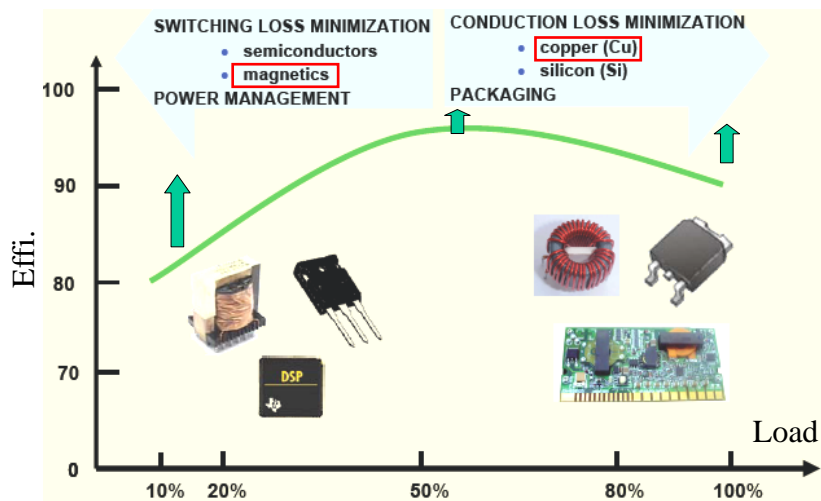
主要内容

- 磁性元件对功率变换器发展的重要性
- 反激式变压器的设计考虑
- 反激式变压器杂散参数的效应
- 反激式变压器的磁(场)特性-感性效应
- 反激式变压器的电(场)特性-容性效应

绿色电源要求



影响全负载范围效率的因素



磁性元件的损耗和设计对全负载范围效率有重要影响

磁性元件的设计考虑

结构设计

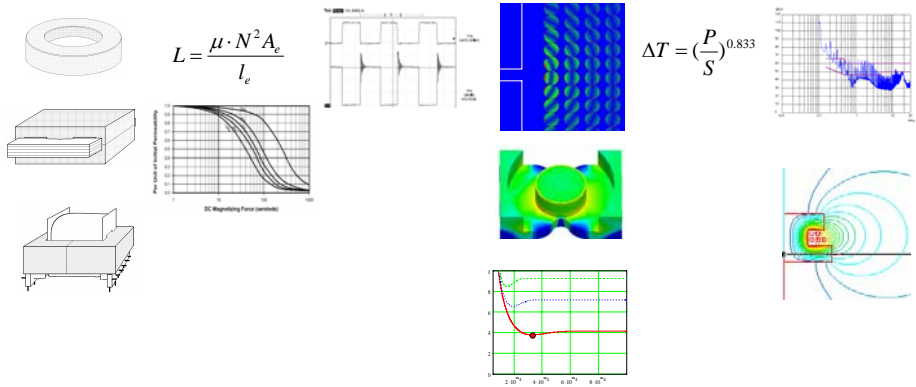
电气设计

杂散参数

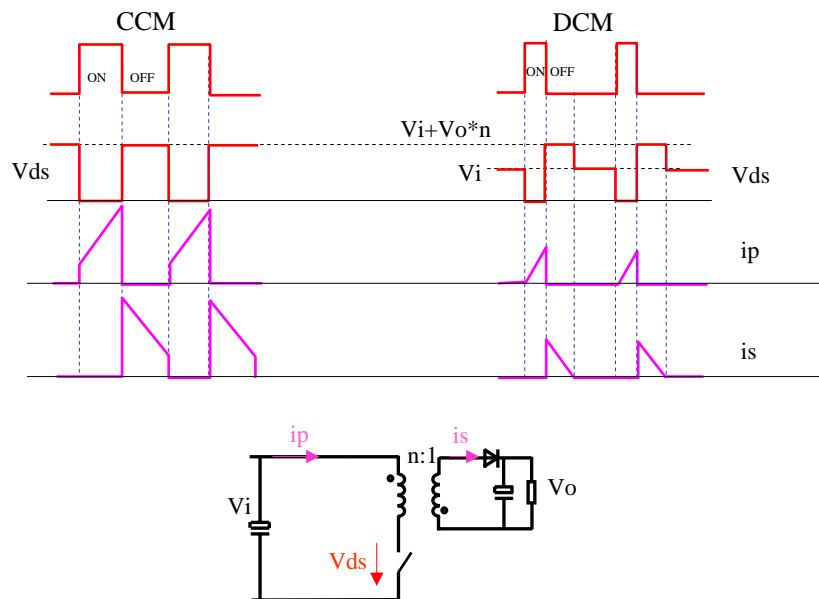
损耗设计

热设计

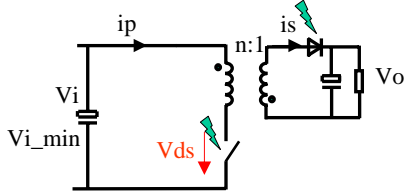
EMI设计



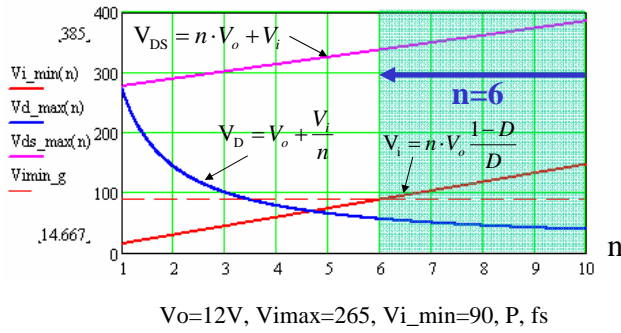
反激变换器理想工作波形



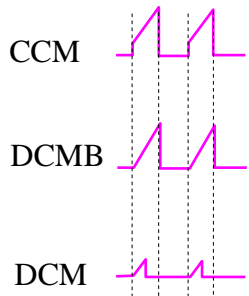
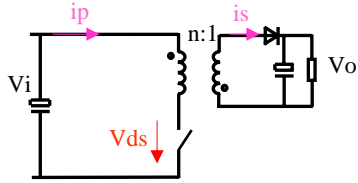
反激变压器基本电气设计-- 匝比



- 最大占空比限制 $D_{max}=0.45$
- 二极管反向耐压限制
- 开关管承受电压限制



反激变压器基本电气设计- 电感量



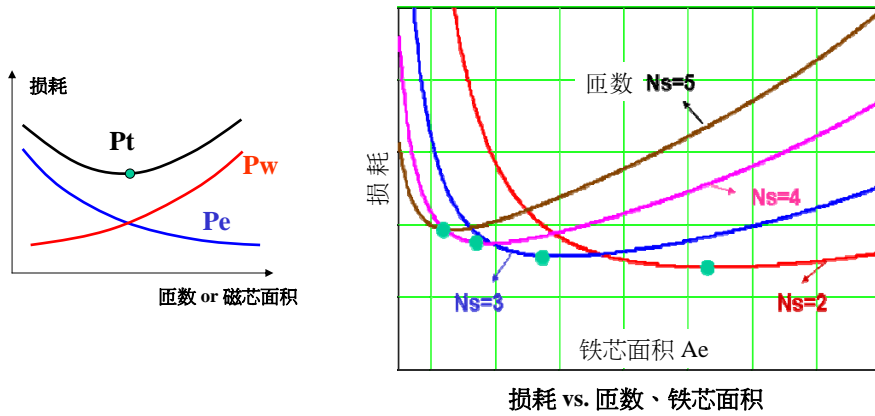
$$I_{pk} = \frac{V_{i_min} \cdot D_{max}}{L_p \cdot f}$$

$$P_{total} = \frac{1}{2} \cdot L_p \cdot I_{pk}^2 \cdot f$$

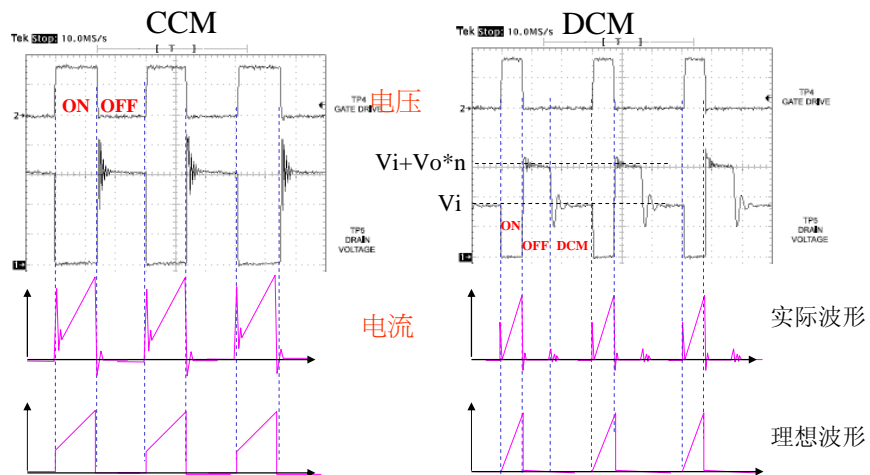
$$\Rightarrow L_p = \left(\frac{V_{i_min} \cdot D_{max}}{2 \cdot P_{total} \cdot f} \right)^2$$

反激变压器优化设计- 铁芯面积/匝数

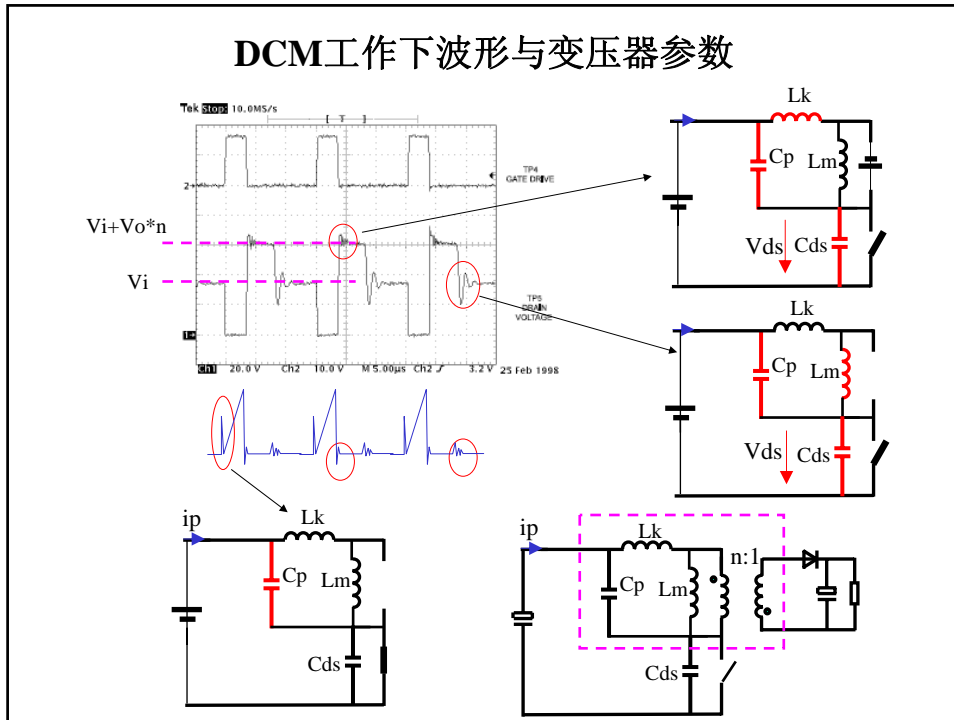
绕组损耗模型 → 匝数, 匝长(磁芯面积), 绕组结构, 线规(线径/股数), 频率
 磁芯损耗模型 → 匝数, 磁芯面积, 材质, 体积, 频率



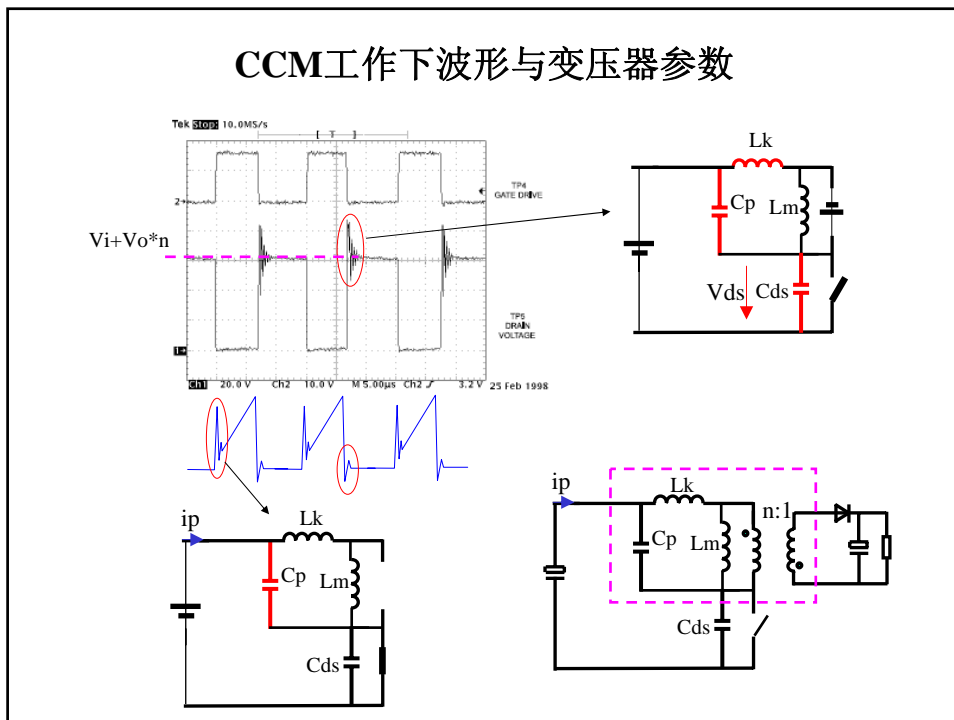
反激变换器实际工作波形



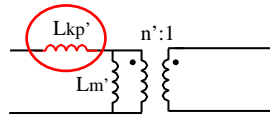
DCM工作下波形与变压器参数



CCM工作下波形与变压器参数



反激变压器的漏感参数及其效应



$$L_{po} = L_{kp}' + L_m'$$

$$L_{so} = L_m' / n'^2$$

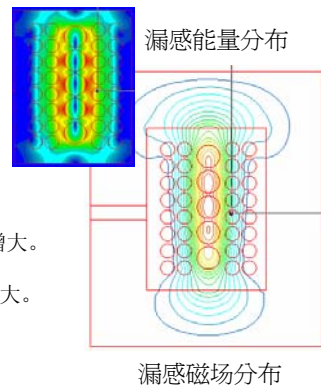
$$L_{ps} = L_{kp}'$$

对EMI的效应 → 振荡频率 $f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{kp}' \cdot (C_p // C_{ds})}}$

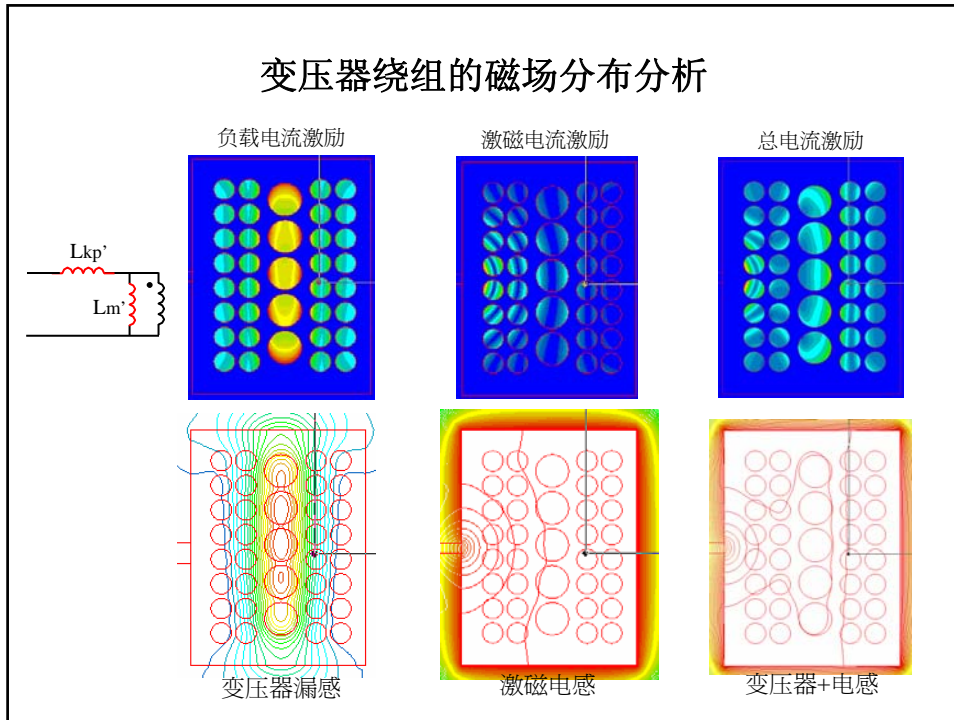
对损耗的效应 → $P_{Lk} = \left(\frac{1}{2} \cdot L_{kp}' \cdot I_{pk}^2\right) \cdot f$

对反激变压器漏感的一些认识

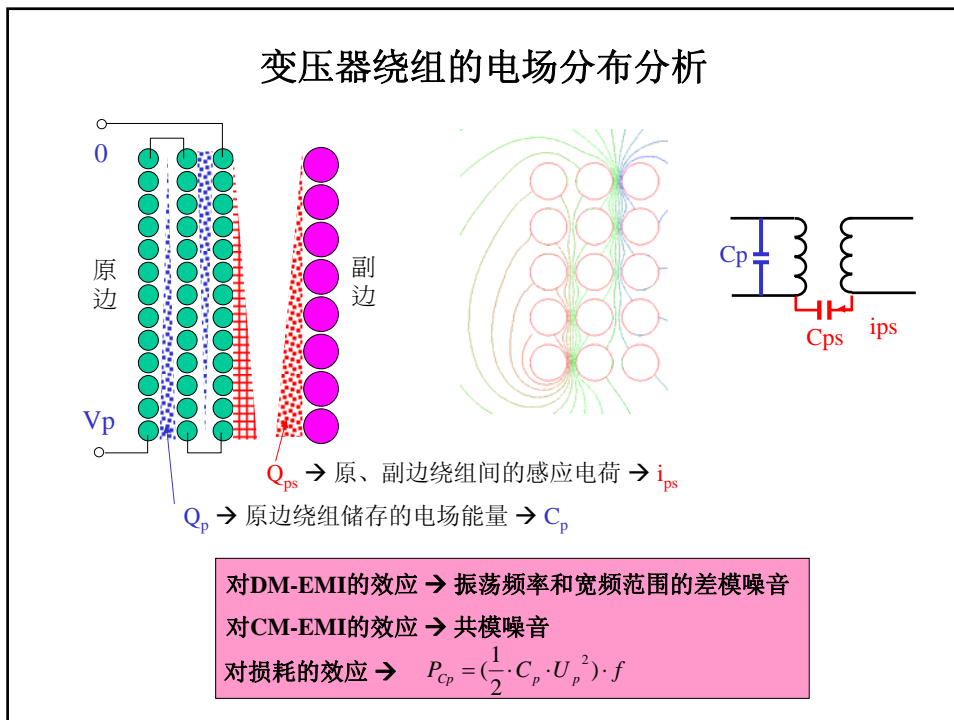
- 漏感与气隙的大小关系不大。
- 耦合系数随着气隙的增大而下降。 $k = \frac{L_m}{L_m + L_k}$
- 气隙增大会引起效率降低是因为 I_{pk} 的增大，漏感能量增大。
- 气隙增大会引起绕组损耗增大是因为气隙扩散损耗的增大。



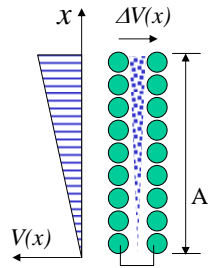
变压器绕组的磁场分布分析



变压器绕组的电场分布分析



绕组并联等效电容Cp

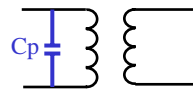
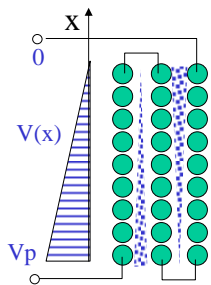


$$\Delta V(x) = V_p \frac{x}{A}$$

C_{p0} : 绕组层间的结构电容

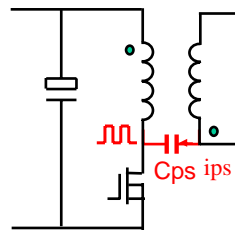
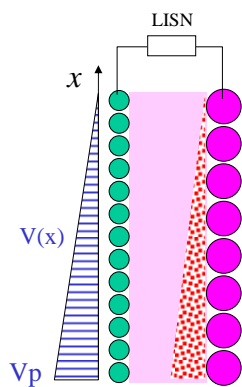
$$E = \int_0^A dE = \frac{1}{2} \frac{C_{p0}}{A} \cdot \int_0^A \Delta V(x)^2 dx = \frac{1}{2} \frac{C_{p0}}{A} \left(\frac{V_p^2}{A^2} \cdot \frac{A^3}{3} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{C_{p0}}{3} \right) V_p^2$$

$$C_p = \frac{C_{p0}}{3} \quad C_p = C_{p0}/3$$



$$C_p = (C_{p0}/3) \text{串} (C_{p0}/3) = C_{p0}/6$$

原、副边绕组间等效共模噪音电流

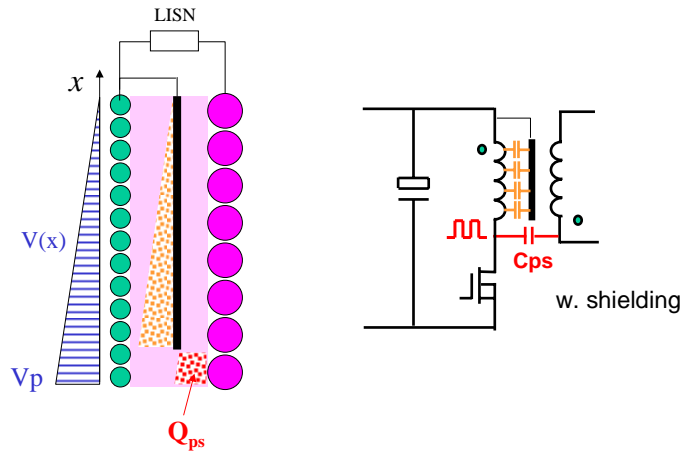


$$Q_{ps} = \int_0^A dq_{ps} = \frac{C_{ps0}}{2 \cdot A} V_p$$

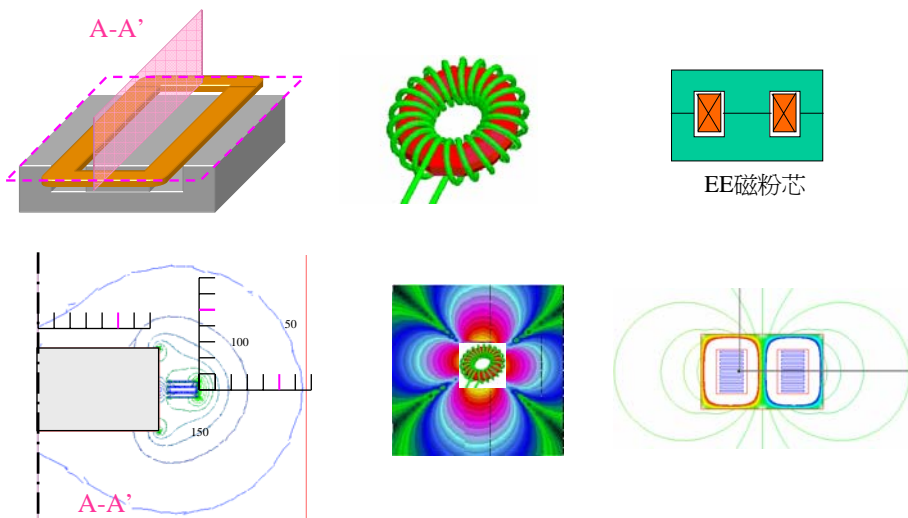
$$C_{ps} = \frac{C_{ps0}}{2}$$

C_{ps0} : 原副边绕组间的结构电容

有屏蔽变压器原、副边绕组电场分布



变压器的电磁场近场辐射





福州大学
FUZHOU UNIVERSITY

Magnetics and Power Conversion Lab

Thanks !