



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

高频功率磁元件电磁参数与测试技术

主讲：陈为 博士

福州大学电气工程与自动化学院 教授，博导

中国电源学会常务理事、磁技术专业委员会主任委员

2018年3月7日



□ 引言

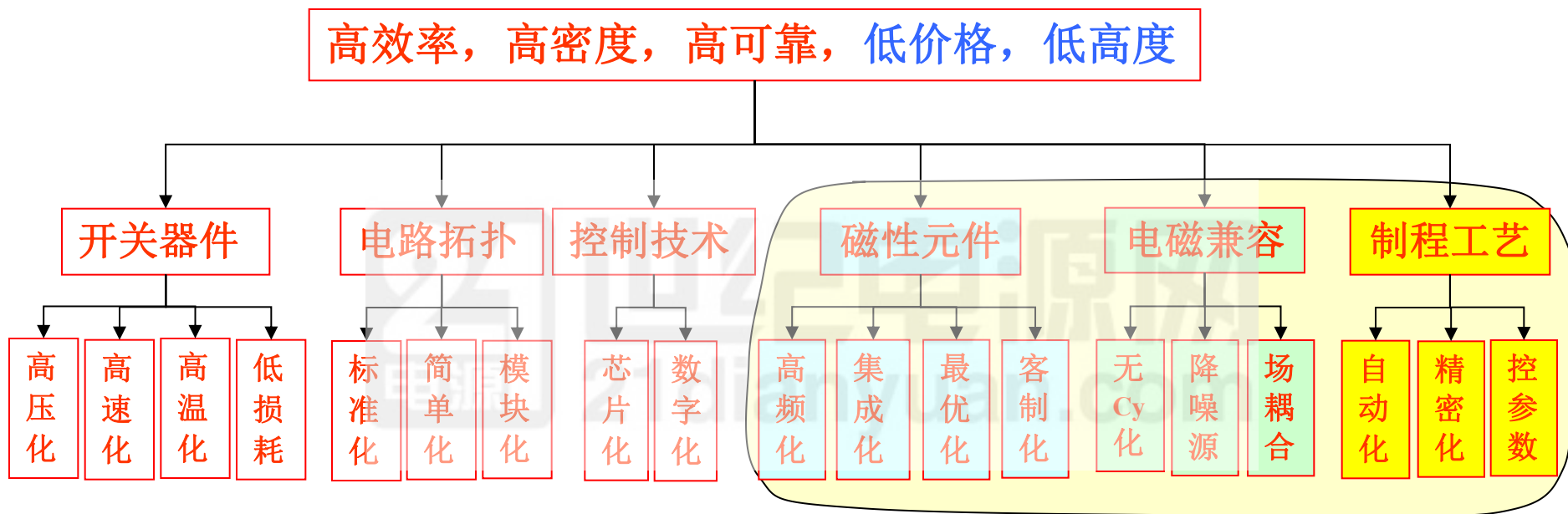
□ 磁性元件损耗参数测量

□ 磁性元件电气参数测量

□ 磁性元件电磁兼容参数测量

□ 磁性元件温升参数测量

功率变换器的要求和发展



- 碳化硅SiC
- 氮化镓GaN

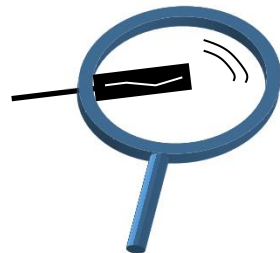
- 反激电路
- 无桥PFC
- LLC电路
- 全桥移相
- 多电平



与磁元件都有
密切关系

磁性元件高频化带来的挑战

- ❖ 更大的磁心损耗 (新材料开发与应用、关注散热设计)
- ❖ 急剧增大的线圈损耗 (高频涡流效应增强)
- ❖ 杂散参数的影响增大 (漏感、杂散电容)
- ❖ 电磁干扰的问题严重 (传导、耦合、辐射)
- ❖ 磁件参数对性能的影响增强 (电气、损耗、EMI模型)





测量的定义：

测量：用数据来描述观察到的现象，即对事物作出量化描述。

检测：用指定的方法检验测试被测对象指定的技术性能指标。

测量四要素：

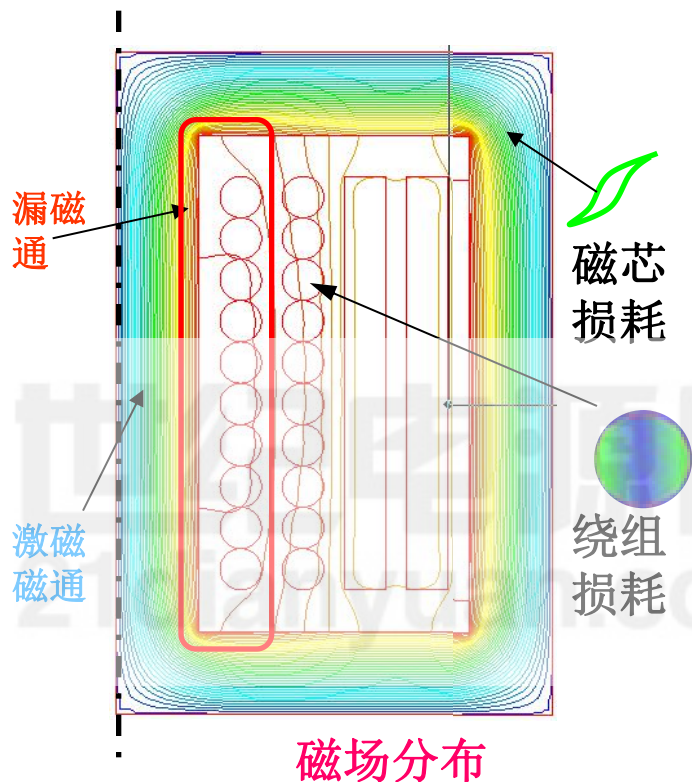
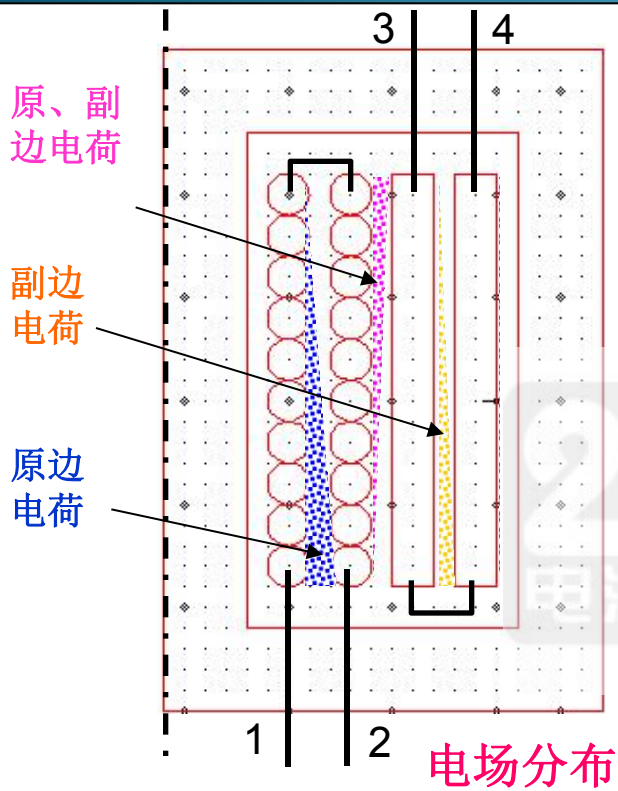
- 1、测量对象：
- 2、计量单位：
- 3、测量方法：
- 4、测量的准确度：

测量的目的：

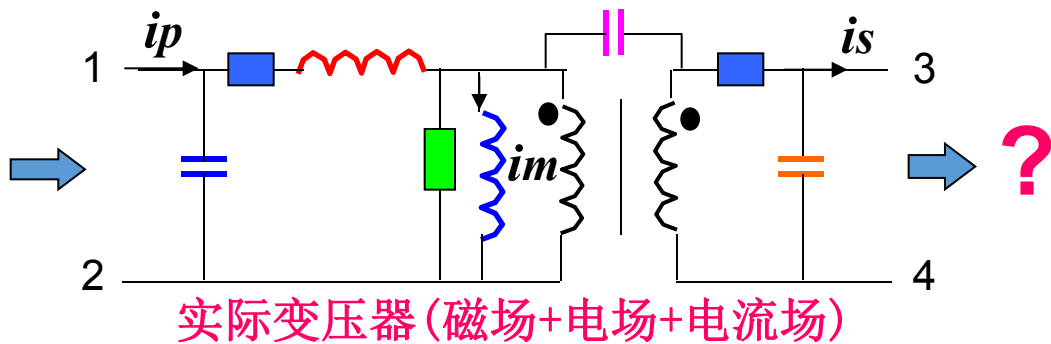
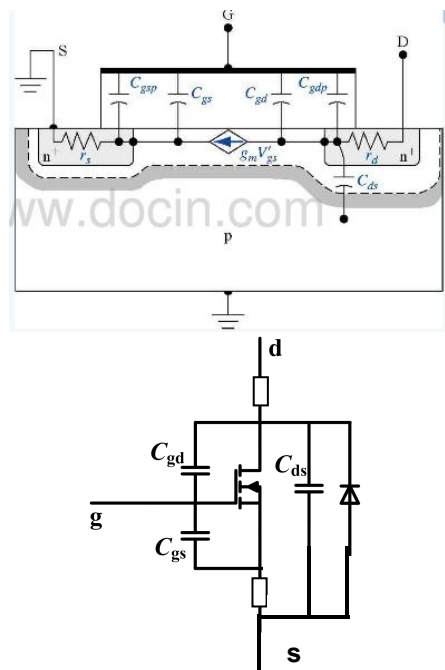
对磁元件做出定量化描述
验证理论和仿真分析的正确性
检验设计/优化设计的有效性
产品性能的质量控制/一致性

通俗讲：通过仪器设备获得磁元件模型的各项参数的数据。
在工程上：要求检测方法准确、有效、快捷、低成本。

磁元件模型的复杂性



半导体开关 (电场+电流场)



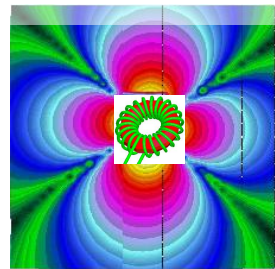
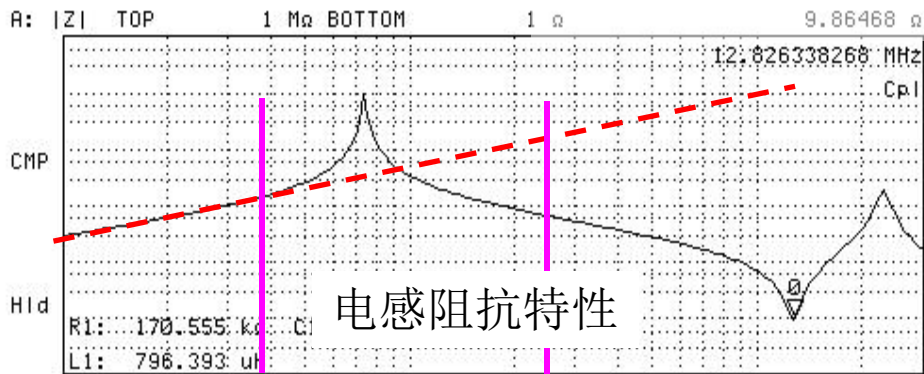
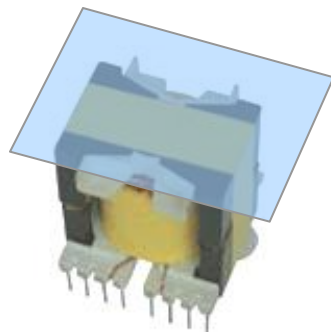
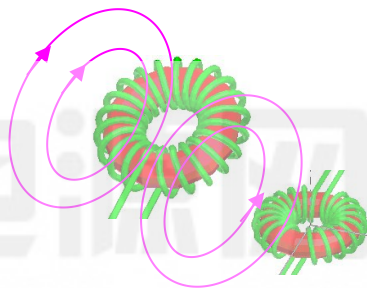
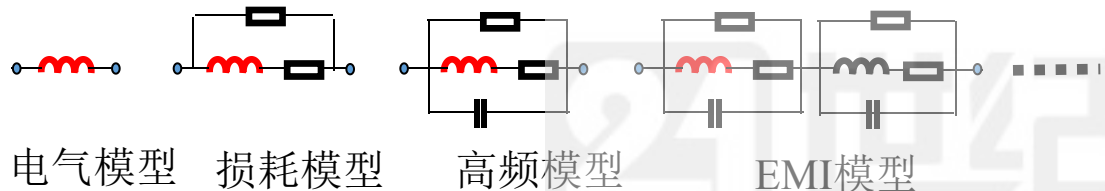
特点:

高频率/宽频带
大功率
非线性

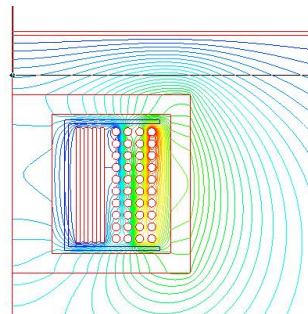
磁性元件

内部杂散参数

外部耦合参数



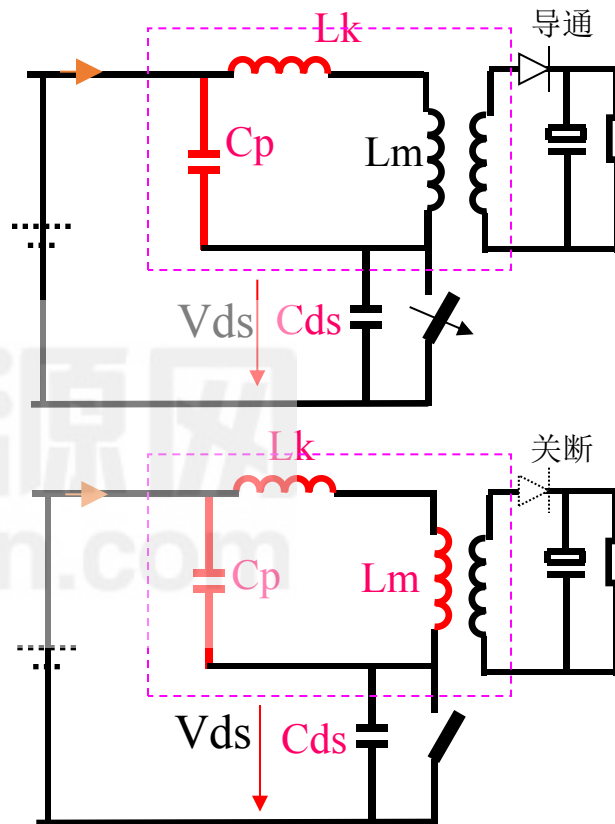
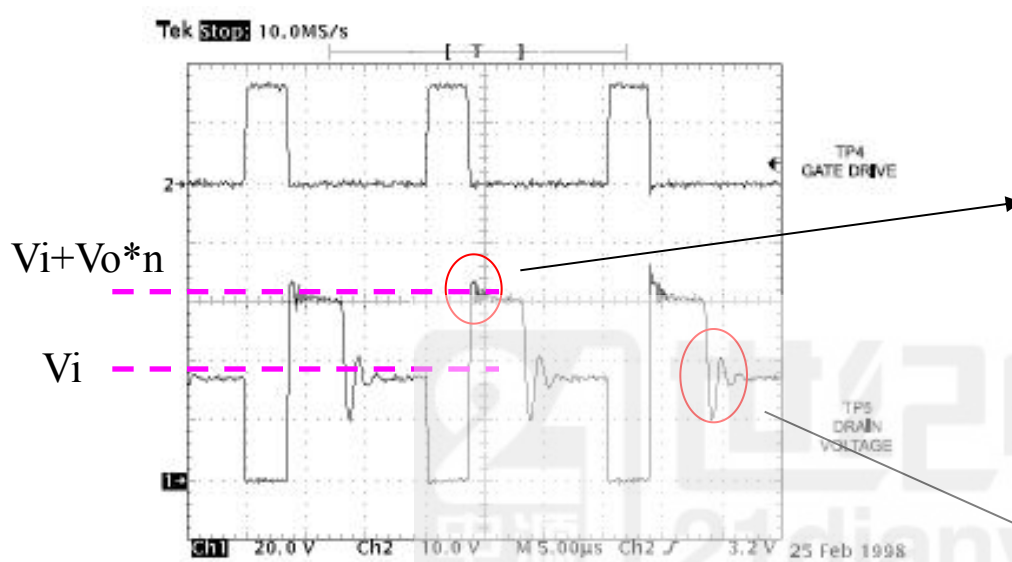
磁场泄漏耦合



电场感应耦合

❖ 磁元件高频特性给测试技术带来了更大的挑战 and 机会

磁元件分布参数对性能的影响



对电压应力、电流应力、电磁干扰、损耗都有显著影响。

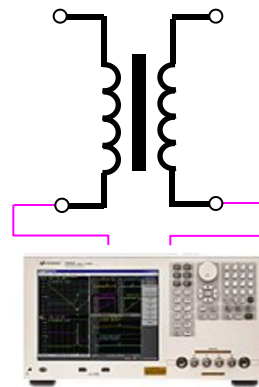
磁元件测试的新需求

测试的目的 {

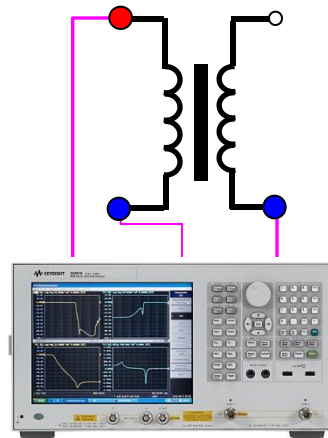
- 可以保证产品质量，促进产品升级；
- 可以更好的协调厂家与用户的关系；
- 可以带动测试技术和仪器产业进步。

- 随着新磁性材料(如合金磁粉芯)的应用
- 随着新磁性元件(如磁集成元件)的出现
- 随着新应用领域(如新能源变换)的发展
- 随着新测试技术(如新型传感器)的进步
- 随着新测试参数(如TX共模电容)的要求

测试方法和技术需要进步；
测试仪器和标准需要完善。



阻抗分析仪/LCR表



网络分析仪



磁性元件测量的主要参数类型

- **损耗参数：** 这类参数主要影响开关功率变换器的损耗和效率，如磁芯损耗和绕组损耗，电感线圈Q值等。
- **电气参数：** 这类参数主要影响开关功率变换器的电气性能，如电压电流工作波形、电压电流尖峰和振荡等。体现在参数上，包括磁导率，饱和磁密，电感量，漏感，匝数比等。
- **电磁兼容参数：** 这类参数主要影响开关功率变换器的电磁干扰特性。包括绕组分布电容，变压器原、副边耦合电容，近场耦合系数，共模有效电容，高频谐振点等。
- **温升参数：** 这类参数主要影响开关功率变换器的功率密度和安全等级，如表面温升，热点温升等。体现在参数上，包括温升，热阻，表面散热系数，风阻等。
- **可靠性参数：** 这类参数主要影响磁性器件的质量和可靠性，如耐压特性、局部放电特性、老化时效特性、跌落撞击特性、温湿度影响特性等。



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

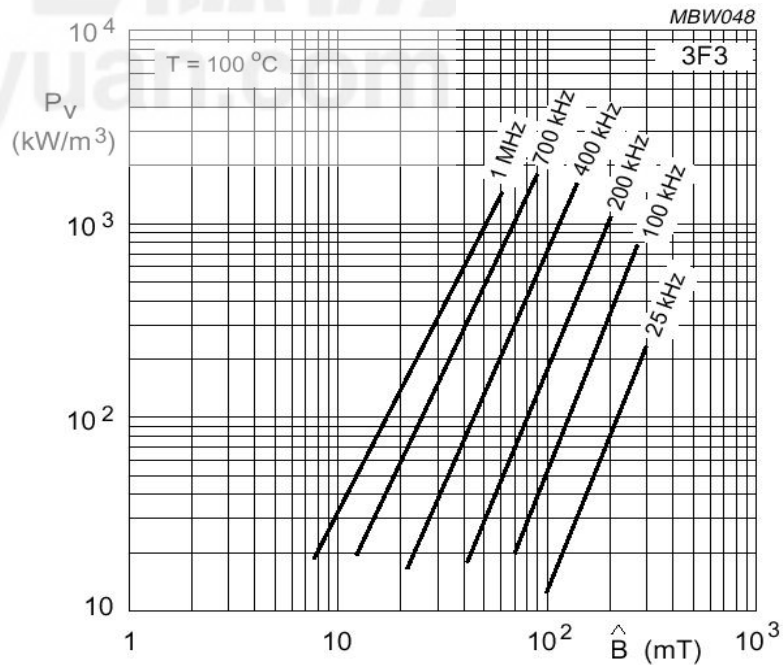
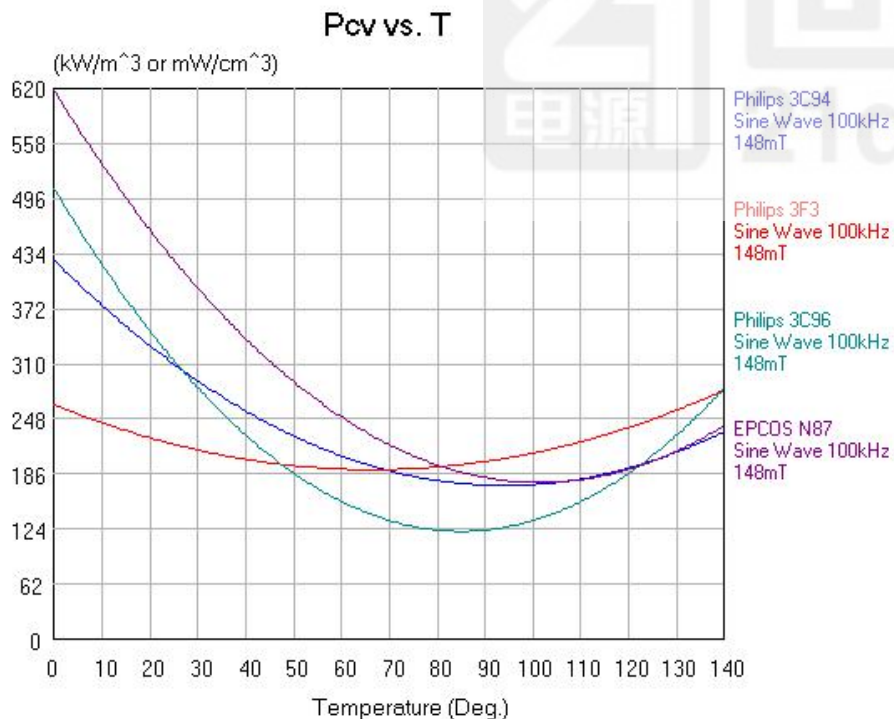
磁性元件损耗参数测量



$$P_{CV} = K \cdot f^{\alpha} \cdot B^{\beta} \cdot (C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2)$$

影响磁芯损耗因素:

- ❖ 材料材质
- ❖ 工作频率
- ❖ 磁通密度
- ❖ 温度
- ❖ 直流偏磁
- ❖ 励磁波形



磁芯损耗测量-交流功率法



$$H(t) = \frac{i(t) \cdot N}{l_e} = K_H \cdot i(t)$$

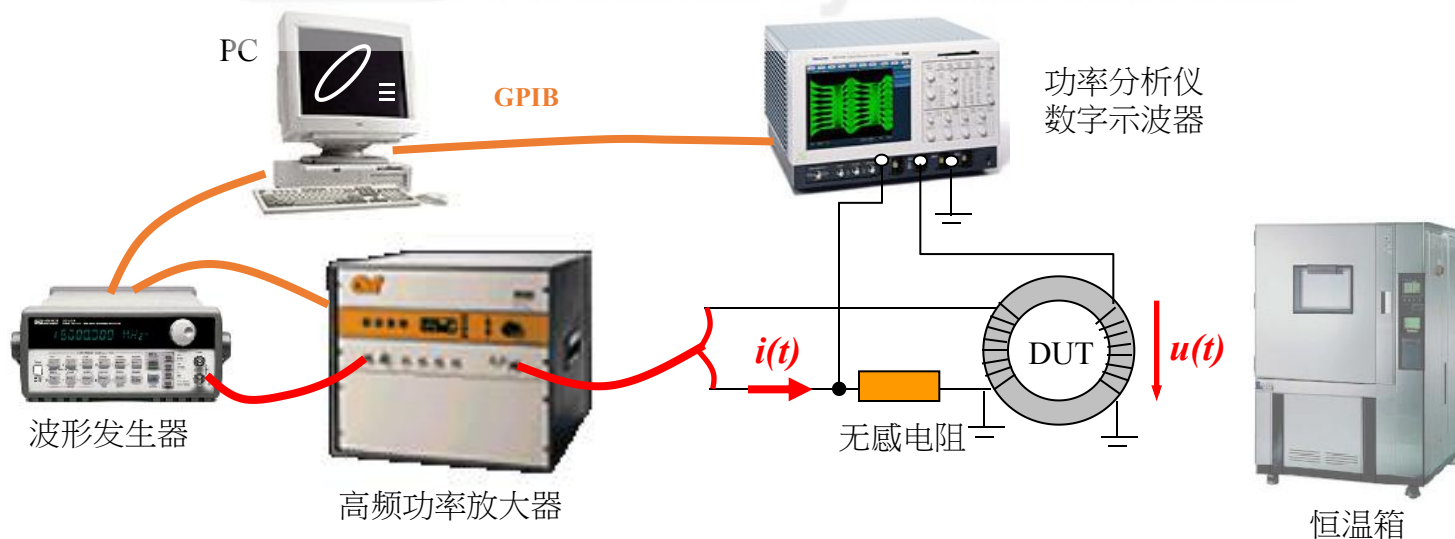
由 $i(t)$ 得到 $H(t)$

$$B(t) = \frac{1}{N \cdot A_e} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt = K_B \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$$

由 $u(t)$ 得到 $B(t)$

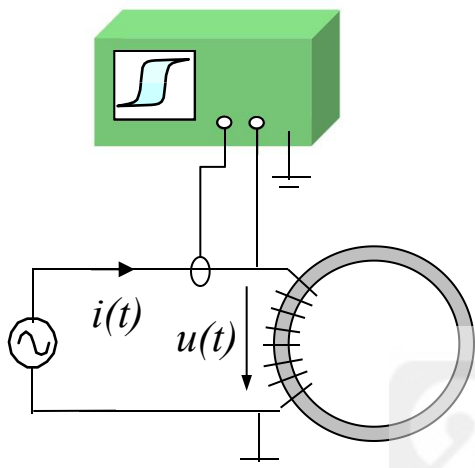
$$P_{core} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} u \cdot i \cdot dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} (A_e \cdot N \cdot \frac{dB}{dt}) \cdot (\frac{H \cdot l_e}{N}) \cdot dt$$

$$= A_e \cdot l_e \cdot \int_{B(0)}^{B(T_S)} H \cdot dB = V_e \cdot P_{cv}$$



磁芯损耗测量的采样方法

单绕组法



$$u(t) = i(t) \cdot R_s + N \cdot A_e \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad \rightarrow \quad u(t) \approx N \cdot A_e \cdot \frac{dB(t)}{dt}$$

i 很小或 R_s 很小

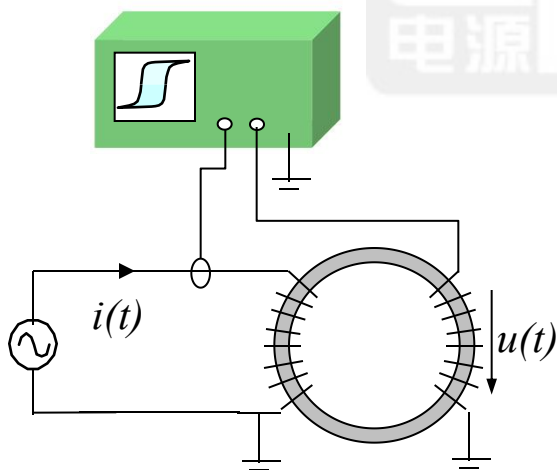
$$B(t) \approx \frac{1}{N \cdot A_e} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt = K_B \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$$

$$i(t) = \frac{H(t) \cdot N_H}{l_e} \quad H(t) = \frac{i(t) \cdot N}{l_e} = K_H \cdot i(t)$$

$$P_V = \frac{A_e \cdot l_e}{T} \int_T H(t) dB(t) = \frac{1}{T} \int_T i(t) \cdot u(t) dt$$

- 采用电阻小绕组 → 降低电阻电压降
- 采用单层绕组 → 降低分布电容影响

双绕组法



$$u(t) = N_B \cdot A_e \cdot \frac{dB(t)}{dt}$$

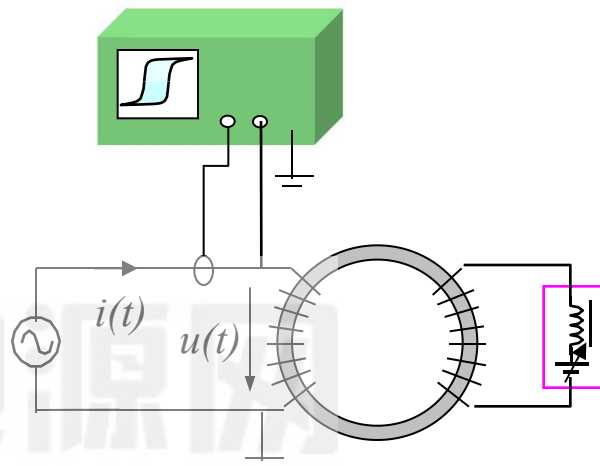
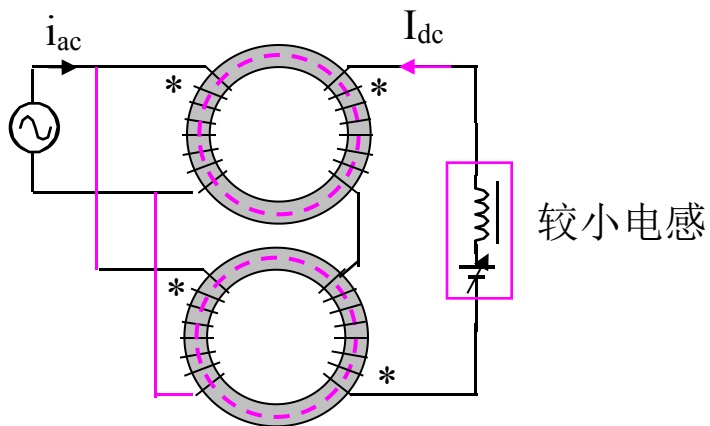
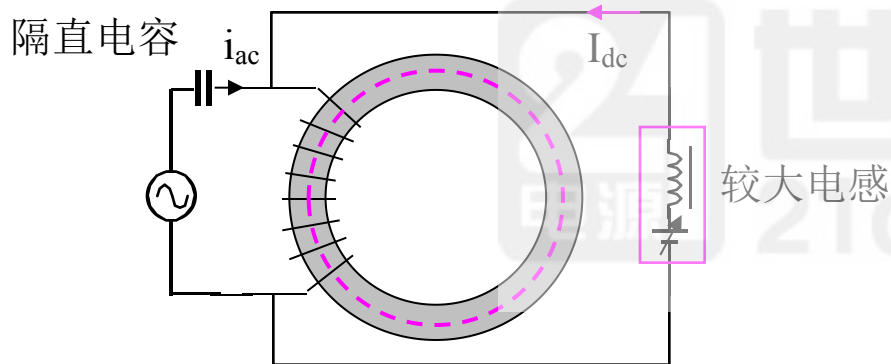
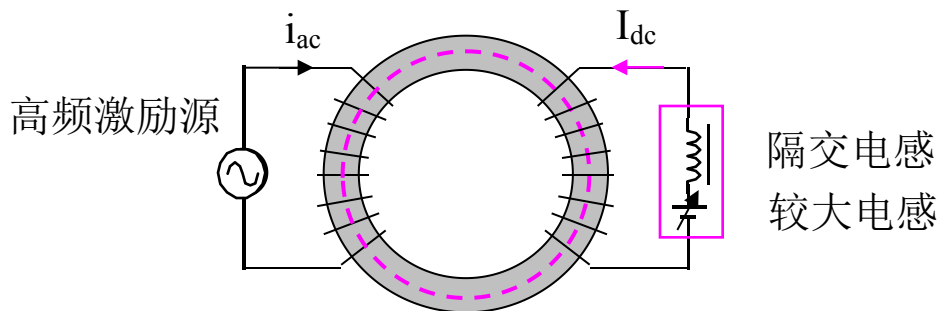
$$i(t) = \frac{H(t) \cdot N_H}{l_e}$$

$$P_V = \left(\frac{N_H}{N_B} \right) \frac{1}{T} \int_T i(t) \cdot u(t) dt$$

- 两个绕组并绕 → 降低耦合漏磁通
- 同名端相连接 → 降低电容漏电流
- 采用单层绕组 → 降低分布电容影响

- 双绕组法可以去除励磁电流在绕组电阻上的电压降的影响。
- 双绕组应该并绕，以提高磁场耦合

有偏磁下磁芯损耗的测量



偏磁电流源：高频内阻足够大的电流源

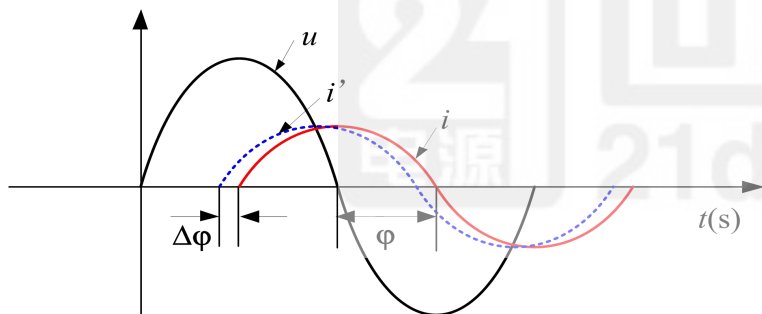
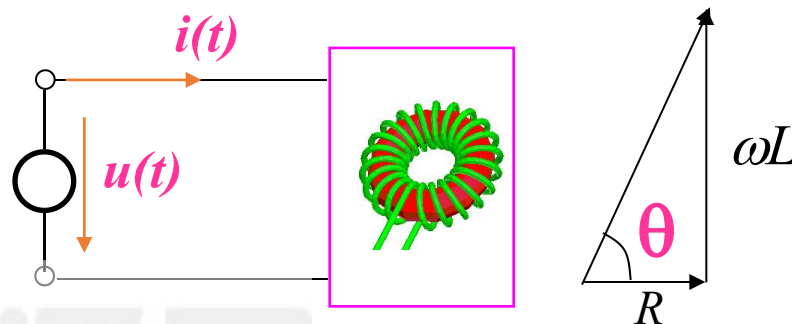


交流功率法测量误差分析

$$P = U \cdot I \cdot \cos \theta$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \boxed{|\operatorname{tg}(\theta) \cdot \Delta \theta|}$$

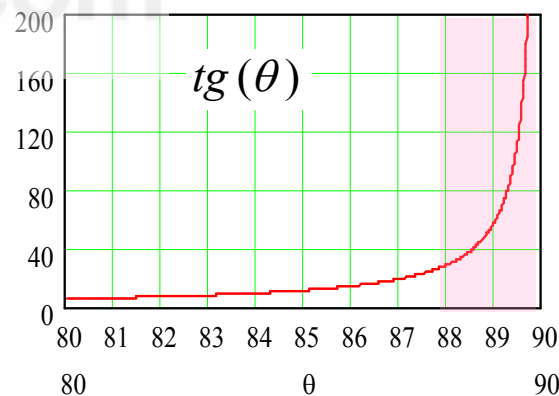
$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \boxed{|\operatorname{tg}(\theta) \cdot \Delta t \cdot f|}$$



大功率测量 → 采样时间差 Δt 难以避免 { 电流采样
通道延迟

高频励磁 → 较大采样相角差 $\Delta \theta = \Delta t \cdot f$

低损耗 → θ 角接近 90°



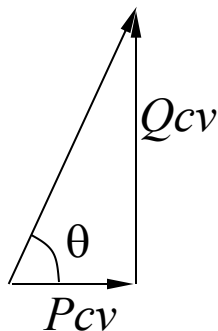
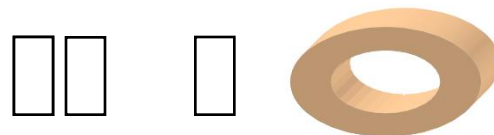
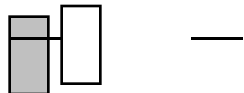
□ 被测件阻抗角 θ 对损耗测量精度影响很大

磁芯损耗测量误差（有气隙/磁粉芯）

铁氧体高磁导率材料

低磁导率磁粉芯或气隙铁氧体

$$\cos\theta = \frac{P}{U \cdot I}$$



- U 保持不变, B 不变, P 不变, 但由于电感大, I 很小, 所以 $\cos\theta$ 较高, 误差较小。

$$Q_{CV} = I_{RMS}^2 \cdot X_L = \frac{I_{pk}^2}{2} \cdot (2\pi fL) = 2\pi fE_m$$

$$Q_{CV} = 2\pi f \frac{B \cdot H}{2} = \pi f \frac{B^2}{\mu_e}$$

- U 保持不变, B 不变, P 不变, 但由于电感降低, I 增大, 所以 $\cos\theta$ 降低, 误差增大。

μ_e 越小, Q_{cv} 越大, θ 越大
 P_{cv} 越小, θ 越大



PX8000
12-bit A/D精度
100MS/s采样率
20MHz带宽。

	Material	B(T)	f(kHz)	μ_r	Pcv(kW/m3)	θ (°)
磁粉芯	Magnetics HF60	0.1	50	60	400	88.9
	Magnetics XFlux60	0.1	50	60	600	88.4
	Magnetics KM60	0.1	50	60	360	89.0
	Magnetics MPP60	0.1	50	60	150	89.6
铁氧体	Ferroxcube 3C96	0.2	100	5500	300	80.6
	Ferroxcube 3C96	0.1	100	5500	40	85.0

常见的交流功率法磁芯损耗测量仪



KEYSIGHT PQA系列
高精度功率分析仪



Clarke-Hess 2330
Sampling V-A-W Wattmeter

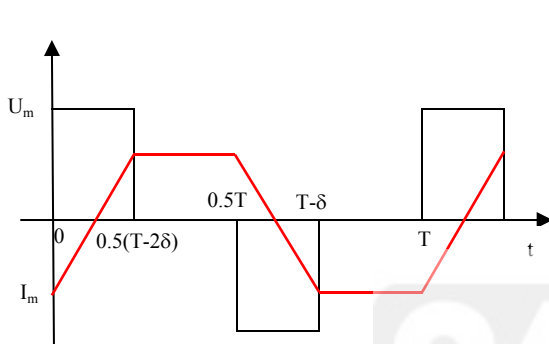


IWATSU SY-系列
B-H Analyzer

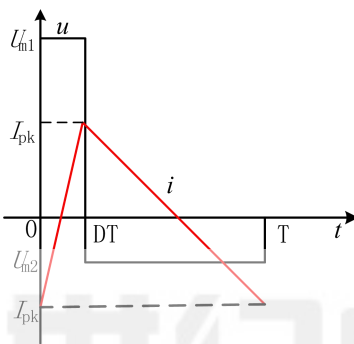


国产高频功率测量系统

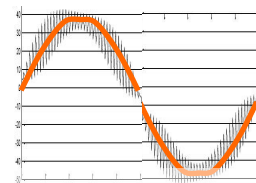
功率变换器各种磁芯励磁波形



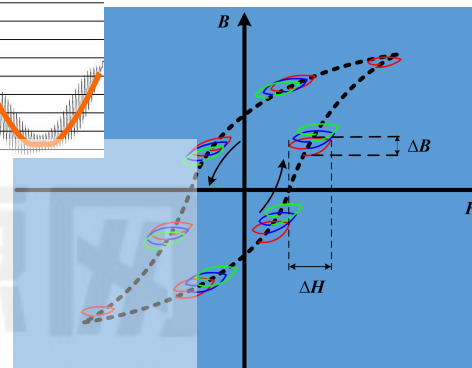
● 对称PWM



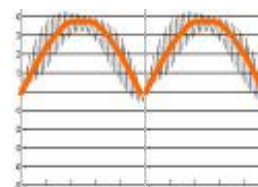
● 不对称PWM



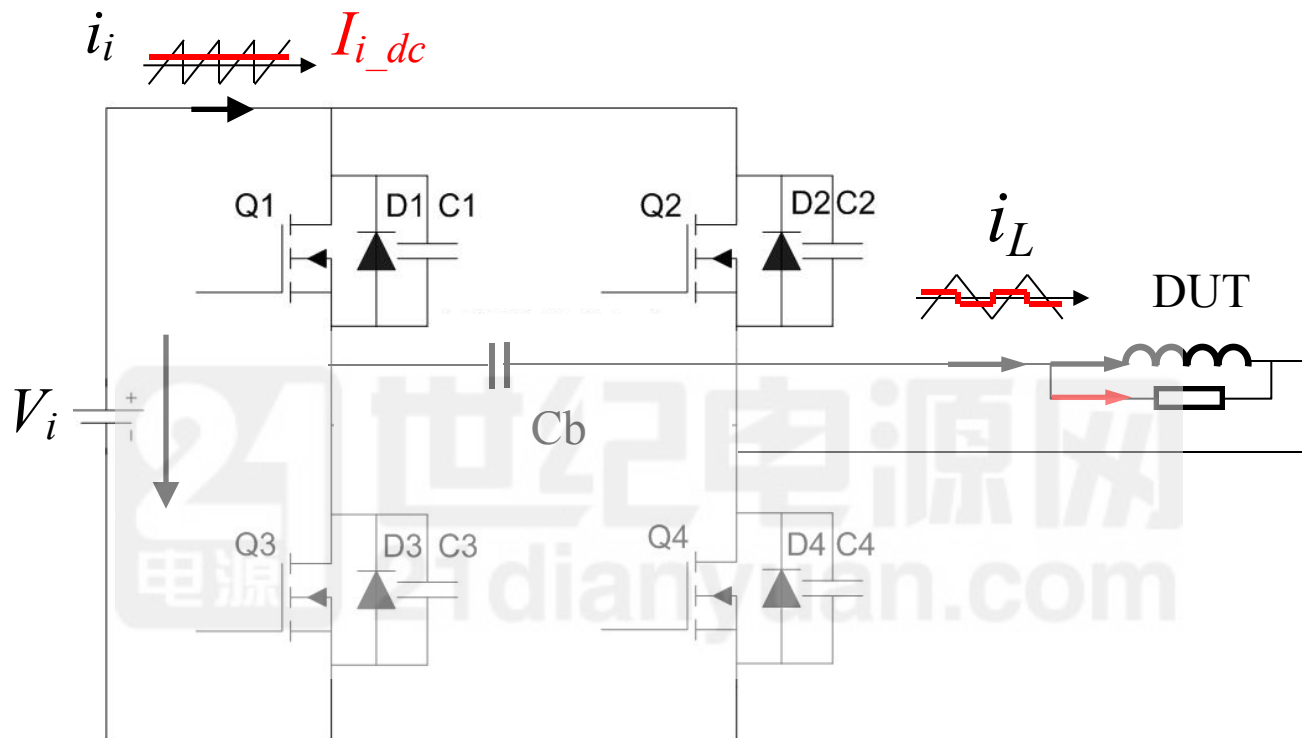
● 逆变电感



● PFC电感



□ 开关功率变换器中磁芯的实际励磁波形一般都非正弦。



$$P_{DUT} = P_{in} - P_{Others} \quad P_{in} = \frac{1}{T} \int_T V_i \cdot i_i dt = V_i \cdot \left(\frac{1}{T} \int_T i_i dt \right) = V_i \cdot I_{i_dc}$$

- ❑ 消除了交流功率测量法对阻抗角的误差影响
- ❑ 需要从很大的交流电流中测得很小的直流分量 I_{i_dc}
- ❑ 需要采用某种方法消除逆变器本身的损耗 P_{Others}

通过电容补偿降低阻抗角

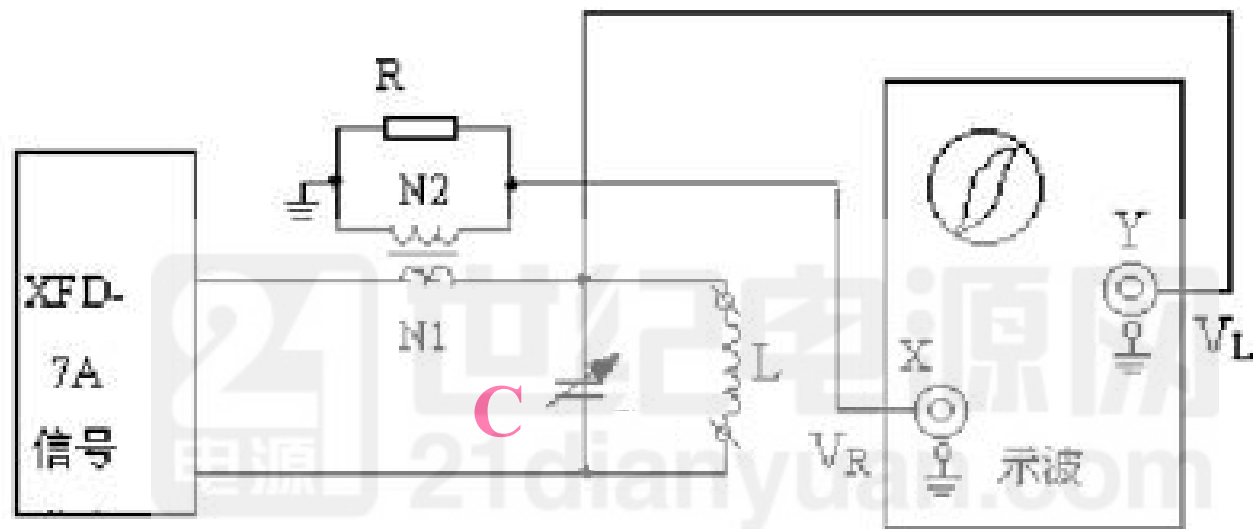


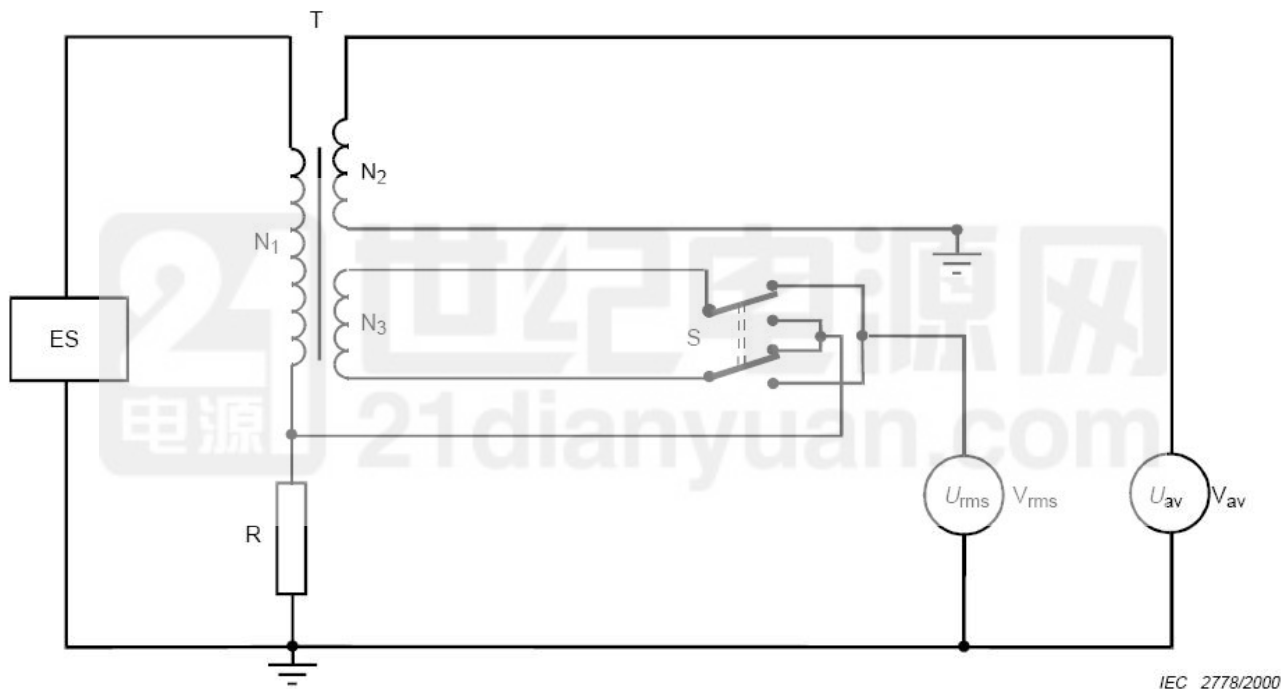
图1 谐振法测量功耗装置

- 补偿电容本身也有带来高频损耗，难以估算。
- 只适用于正弦波激励



- 1、注意仪器的校准，尤其对于低损耗的磁芯’
- 2、测量时加激励的时间要控制在3秒以内，以免铁芯温度上升；
- 3、电压和电流采样通道的时延对测量误差影响很大。如采用电阻采样，要用无感电阻；
- 4、对于单绕组测量，激励线圈应该采用Litz线，以降低线圈损耗的影响；
- 5、对于双绕组测量，激励绕组和采样绕组要并绕，以提高耦合度；
- 6、尽量采用没有气隙的磁环，以降低激励电流，提高测量精度。

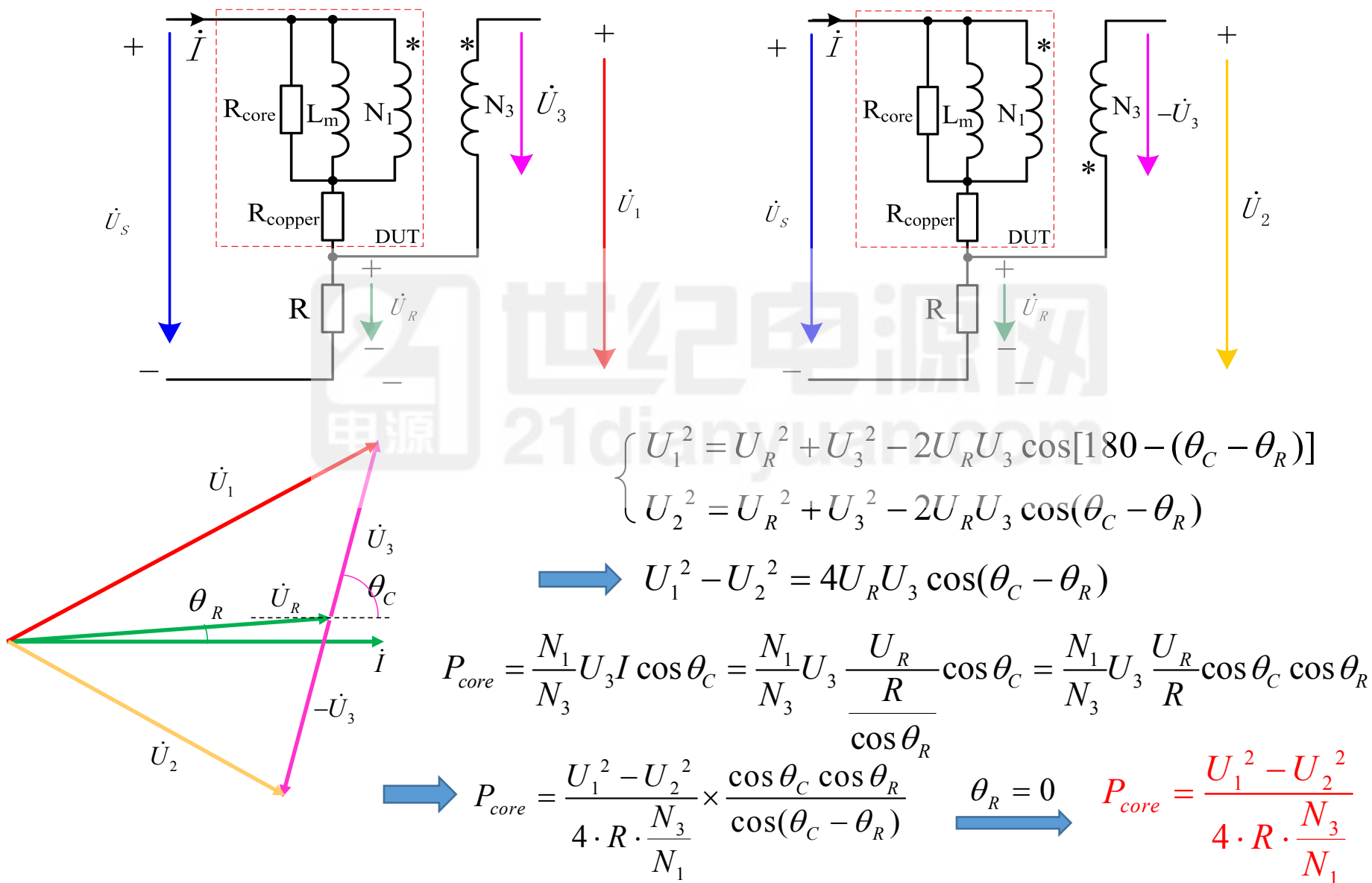
IEC 62044-2标准中RMS法（Root-mean-square method）



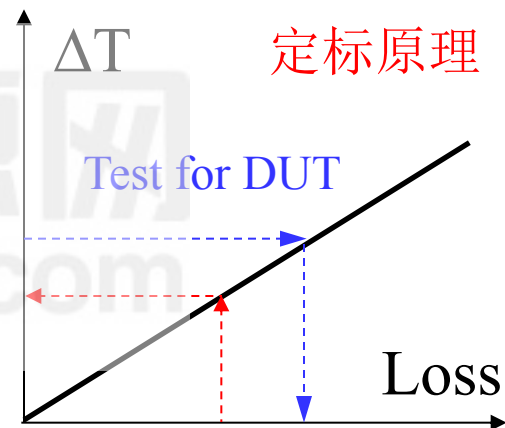
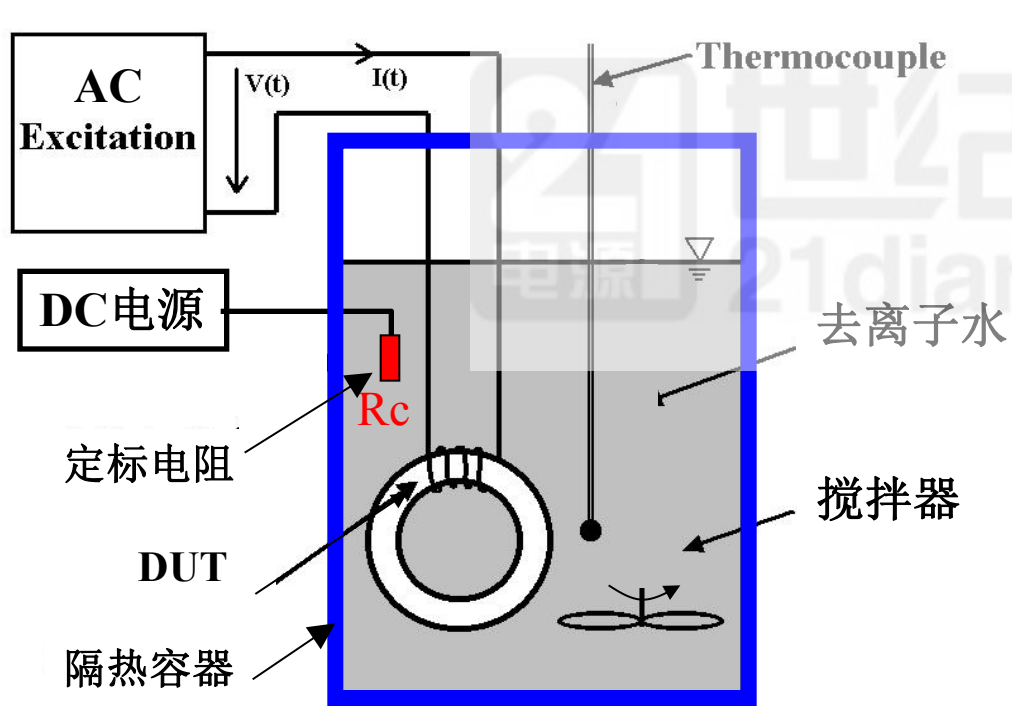
Calculation

The core power loss is given by

$$P = \overline{(u \times i)} = \frac{|U_1^2 - U_2^2|}{4 \cdot \frac{N_1}{N_3} \cdot R}$$

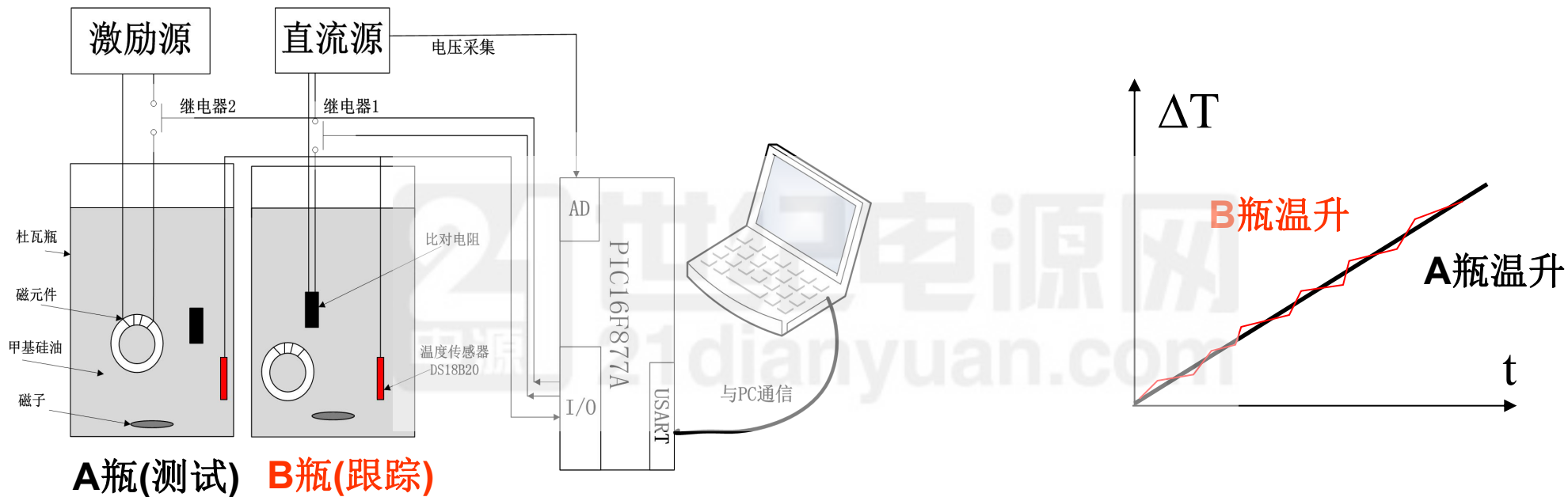


损耗 → 发热 → 温升



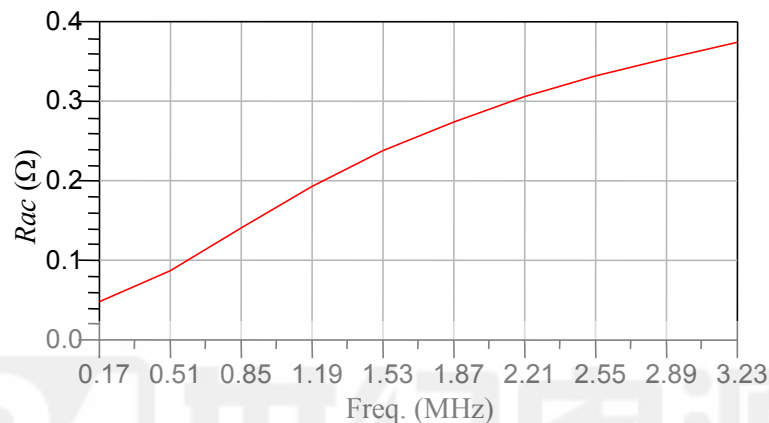
- 精度高;
- 测量复杂, 耗时长。

量热计法—比对校准

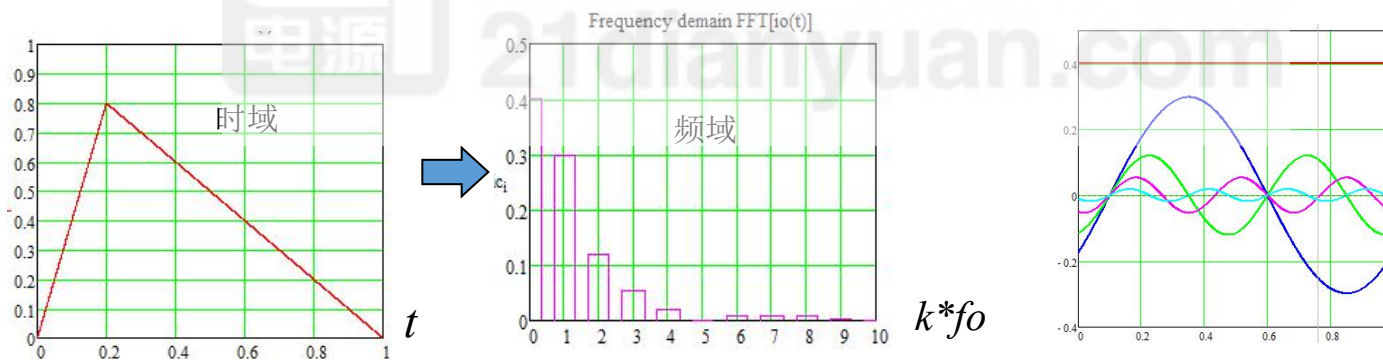


□ 量热法损耗自动测量装置可以基本消除热耗散、工热比热误差的影响，提高了测量精度；并能实现自动测量，大大减小了测量工作量。

1、测量交流电阻

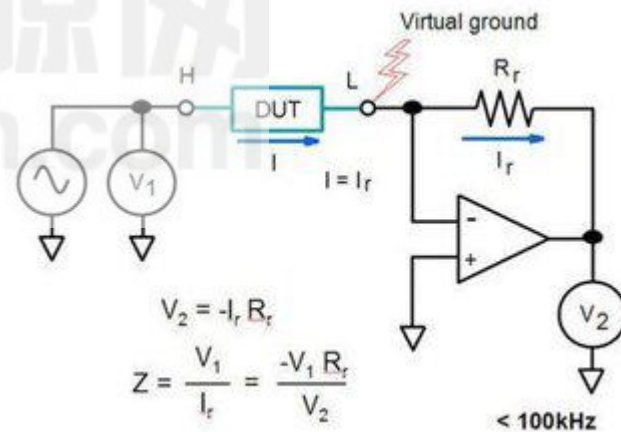
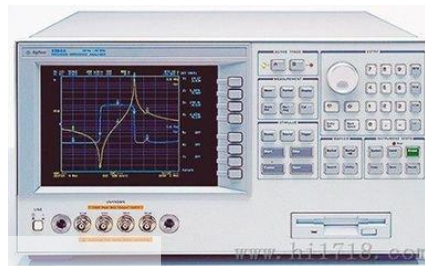
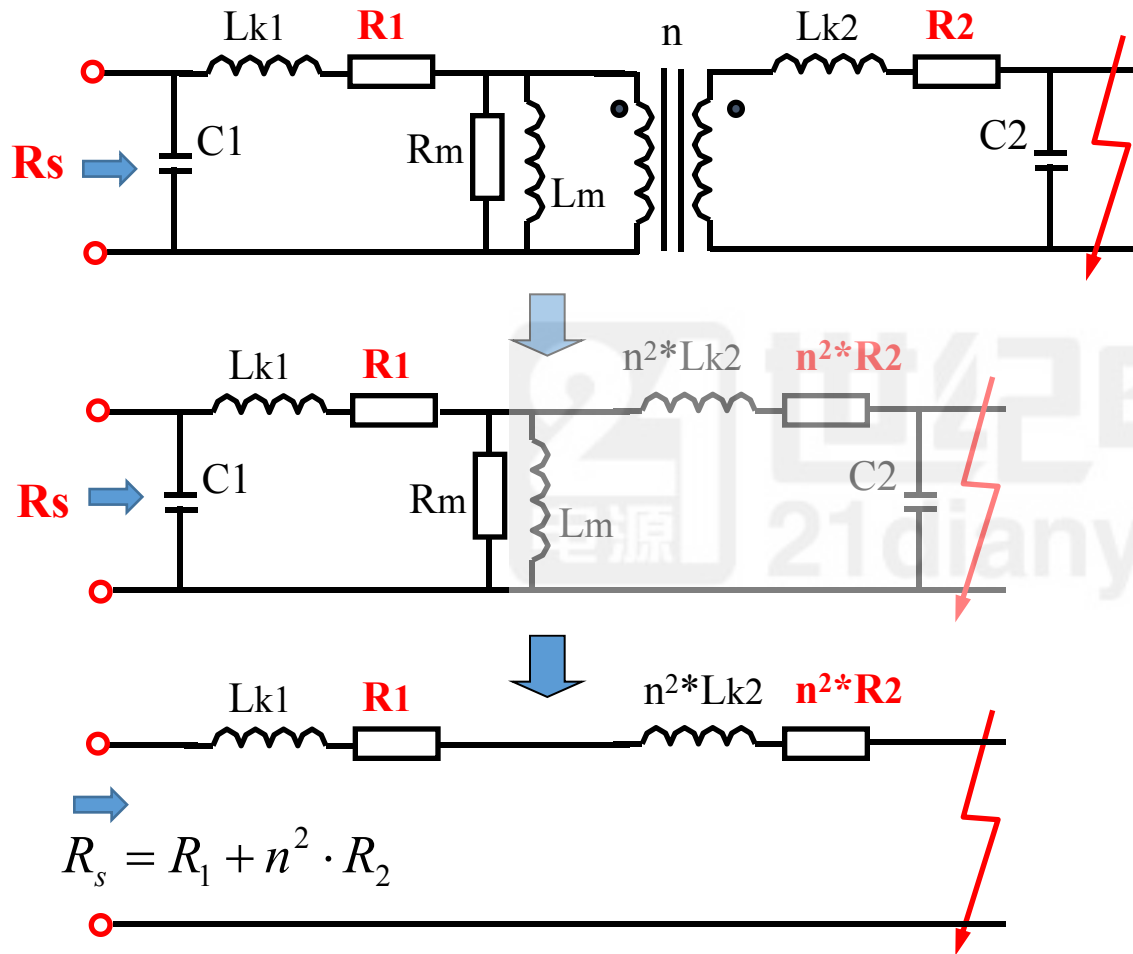


2、电流波形分解



3、绕组损耗计算

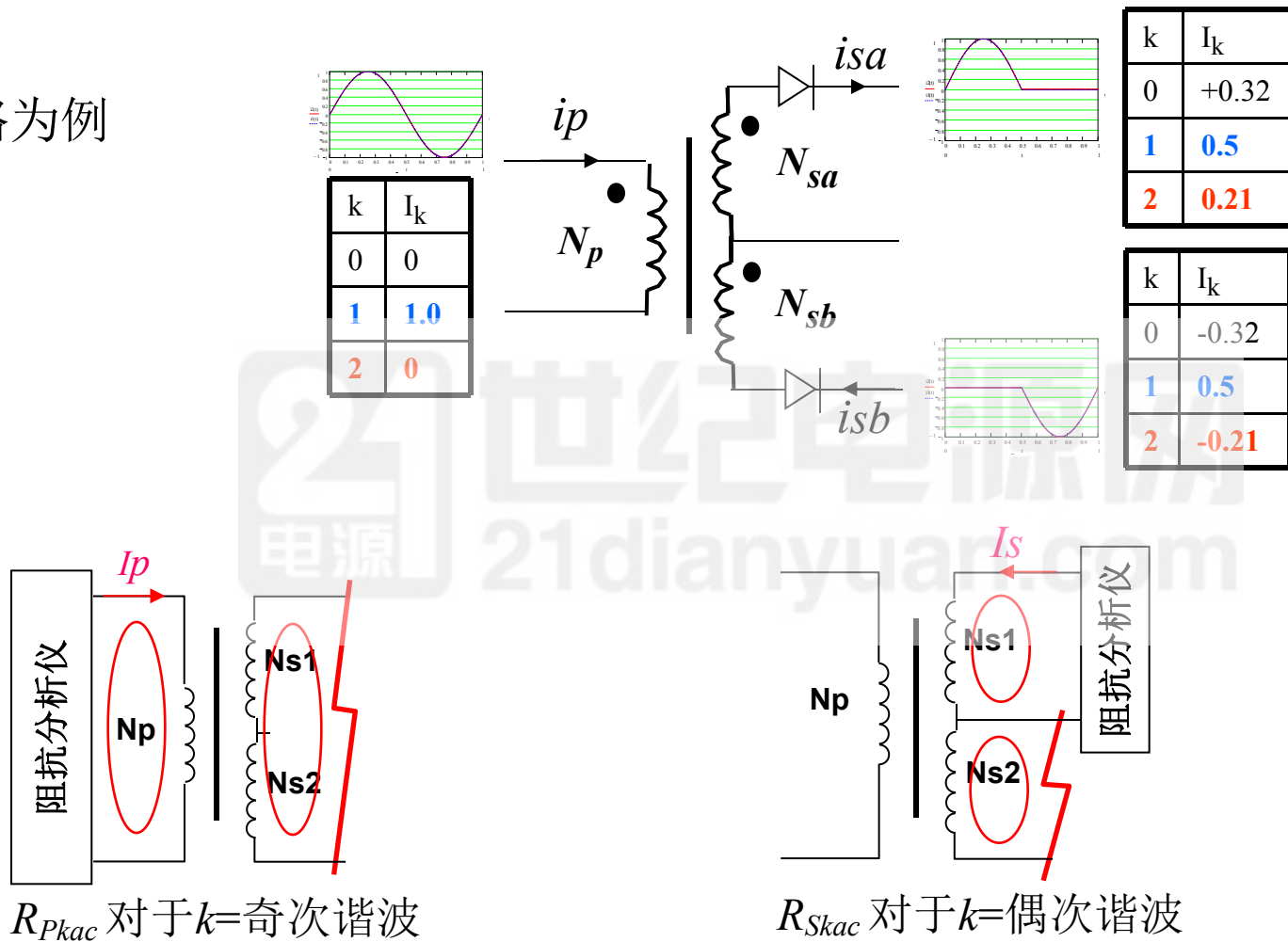
$$P_{w_total} = I_{dc}^2 \cdot R_{dc} + \sum_{All_harmonics} (I_{ac_k}^2 \cdot R_{ac_k})$$



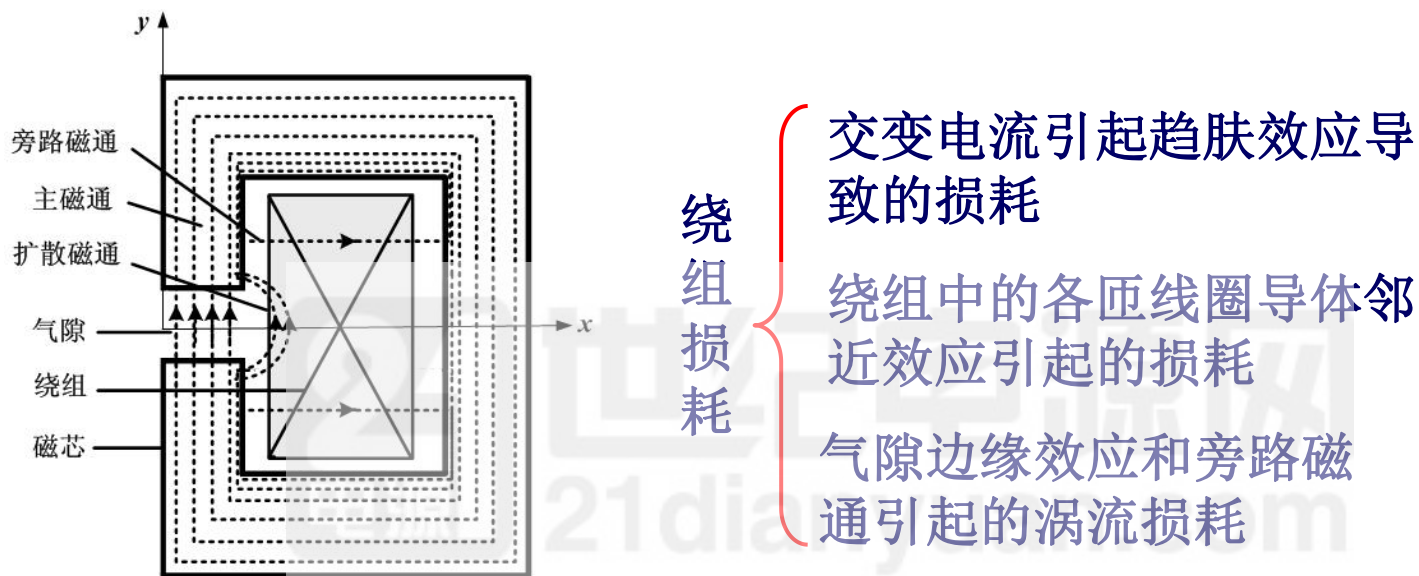
- 由于线圈交流损耗是线性的，因此可以通过阻抗分析仪(小信号)测量
- 由于线圈副边短路，磁芯没有磁通和损耗，因此只有绕组损耗
- 对于变压器，原边绕组和副边绕组的损耗是无法分离的

多绕组变压器绕组损耗测量

以LLC电路为例

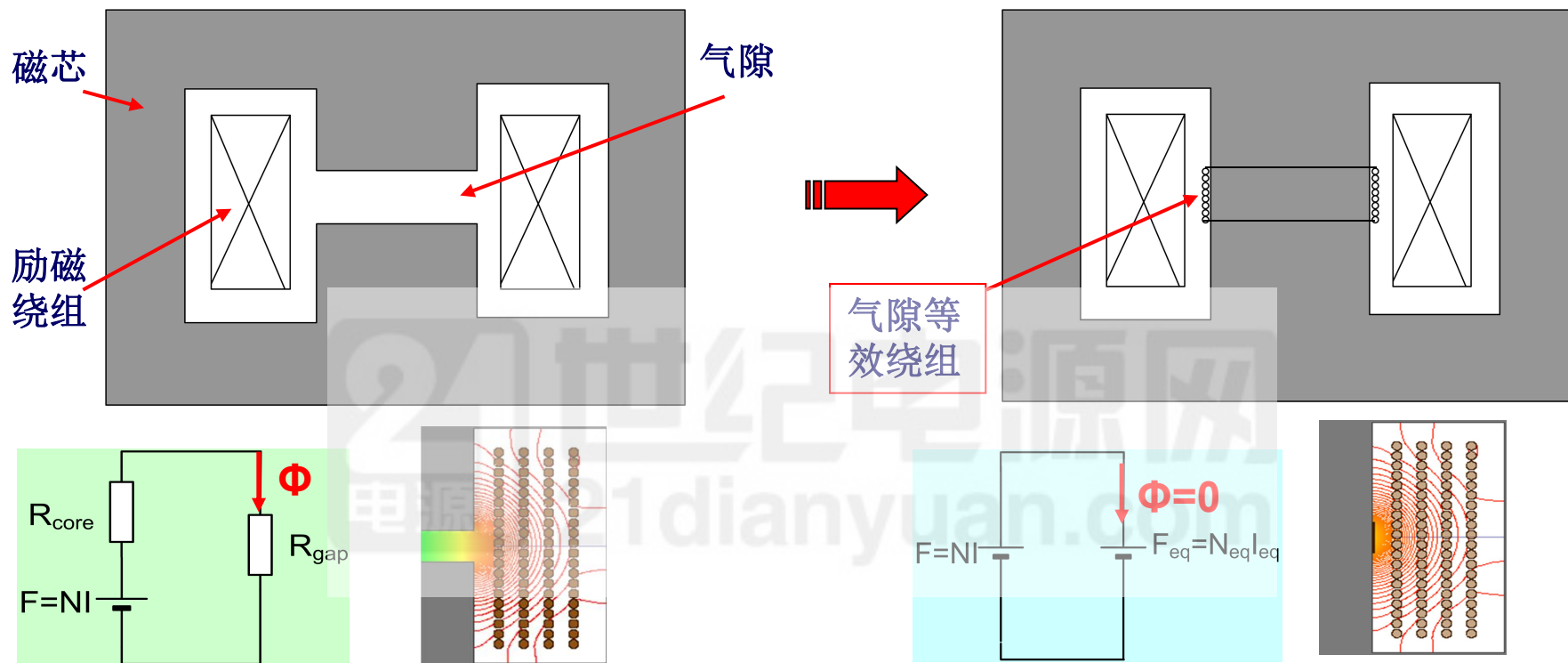


$$P_W = I_{dc}^2 \cdot R_{dc} + \sum_{\text{奇次谐波 } k} (I_{P_{kac}}^2 \cdot R_{P_{kac}}) + \sum_{\text{偶次谐波 } k} (I_{S_{kac}}^2 \cdot R_{S_{kac}})$$



电感器只有一个绕组，无法通过短路法消除磁芯磁通和损耗。

气隙周围的扩散磁通也造成绕组损耗



忽略磁芯磁压降，可以认为磁压降全部在气隙两端

用气隙等效绕组磁动势 $N_{eq}I_{eq}=NI$ （即短路）代替气隙磁压降

采用气隙等效绕组(短路)等效气隙磁压降，可以有效地模拟气隙边缘效应使得绕组窗口内磁场不变，且磁芯内部的磁场为零，那么就可以采用这种方法对绕组损耗进行评估。



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY

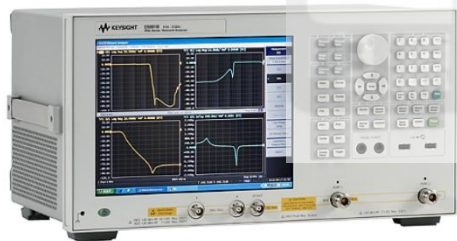


KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

磁性元件电气参数测量

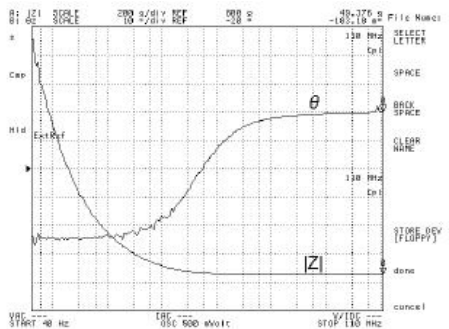


网络分析仪	阻抗分析仪	LCR表
<ul style="list-style-type: none"> • 测量两端器件、电路等 • 含有“源source”和“接收receiver” • 显示幅值和相位的比值 • 具有先进的误差修正 	<ul style="list-style-type: none"> • 测量两端器件 • 具有频率扫频功能 • 丰富的分析能力（标记、等效电路） • 图形化结果显示 • 直流偏置 	<ul style="list-style-type: none"> • 有限的测量条件 • 没有/有限的扫频功能 • 可以直流偏置 • 有限的分析能力（GO/NO-GO） • 用于简单测量



$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

测量激励响应/S参数

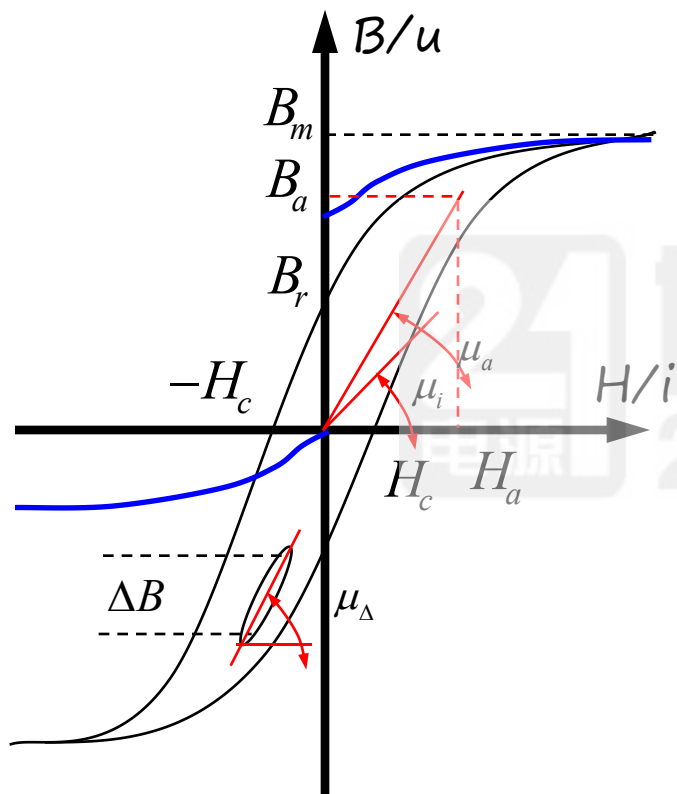


测量阻抗特性



测量阻抗

磁导率/电感的定义



初始磁导率:

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \left. \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|_{\Delta H \rightarrow 0}$$

幅值磁导率:

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_a}{H_a}$$

增量磁导率:

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \left. \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|_{H_{DC}}$$

电感测量仪器(正弦激励)



阻抗分析仪



B-H
分析仪



LCR表



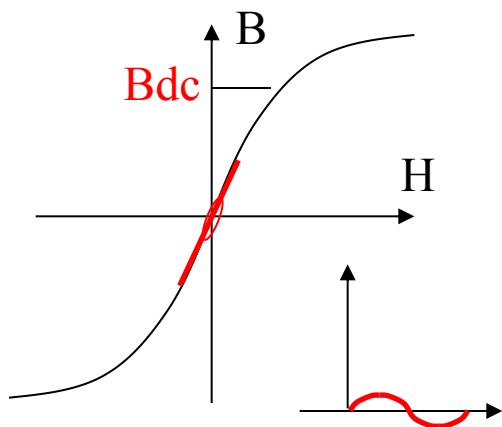
LCR表



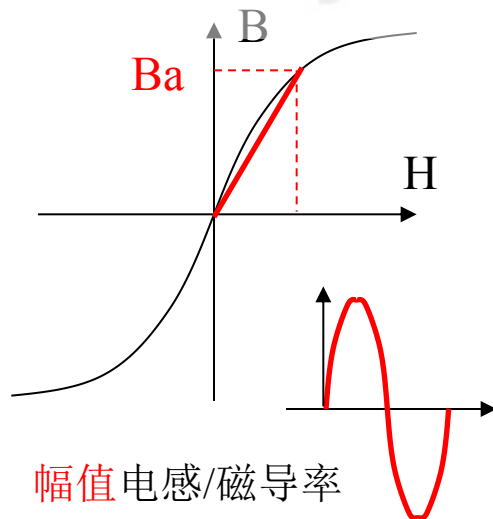
交流特性
测量仪



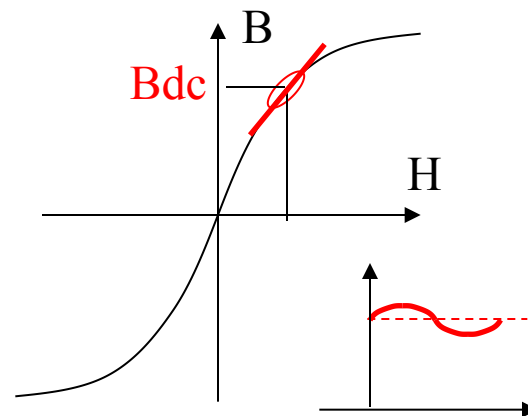
直流偏
置源



初始磁导率

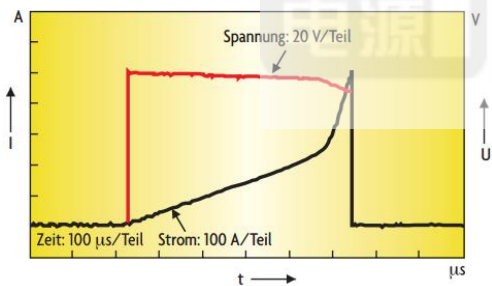
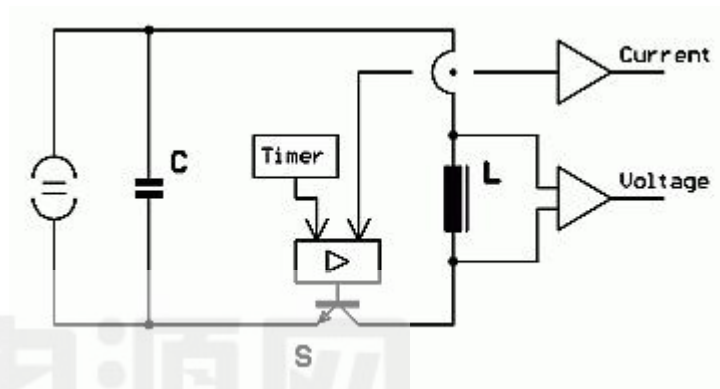


幅值电感/磁导率

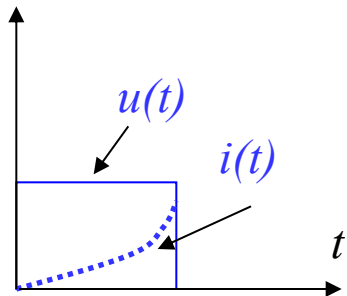
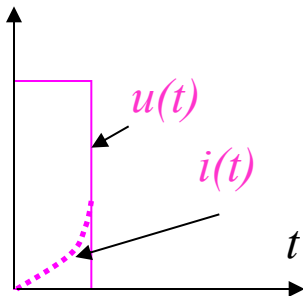
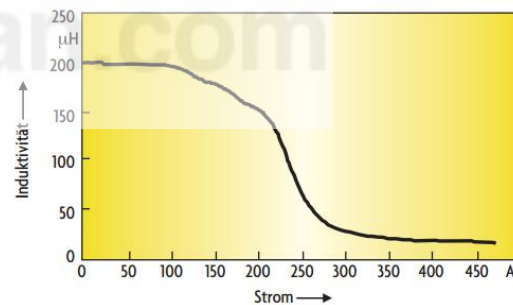


增量电感/磁导率

电感/磁导率特性测量（脉冲激励）

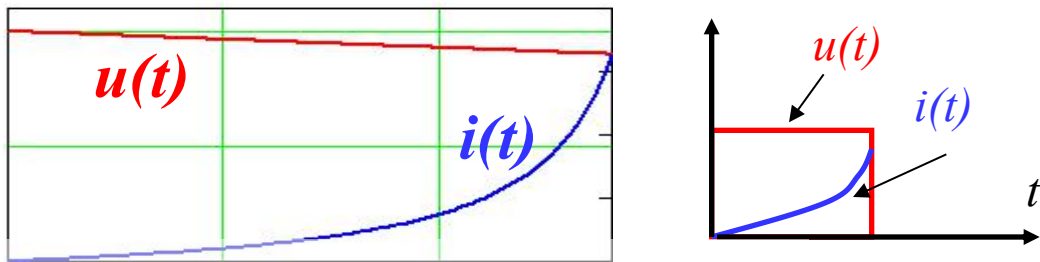


$$u(t) = L(i) \cdot \frac{di(t)}{dt}$$



□ 不同脉宽励磁下，
测量结果可能不同。

电压电流采样

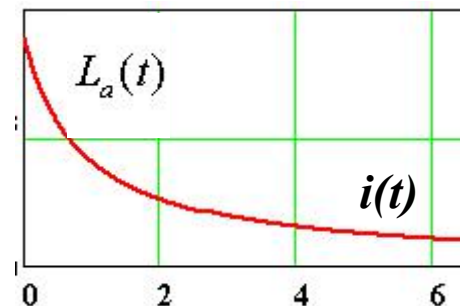
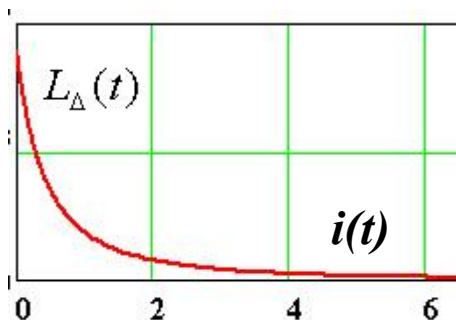
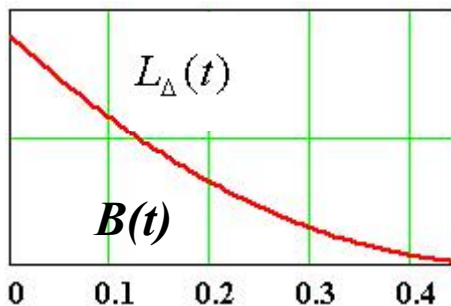


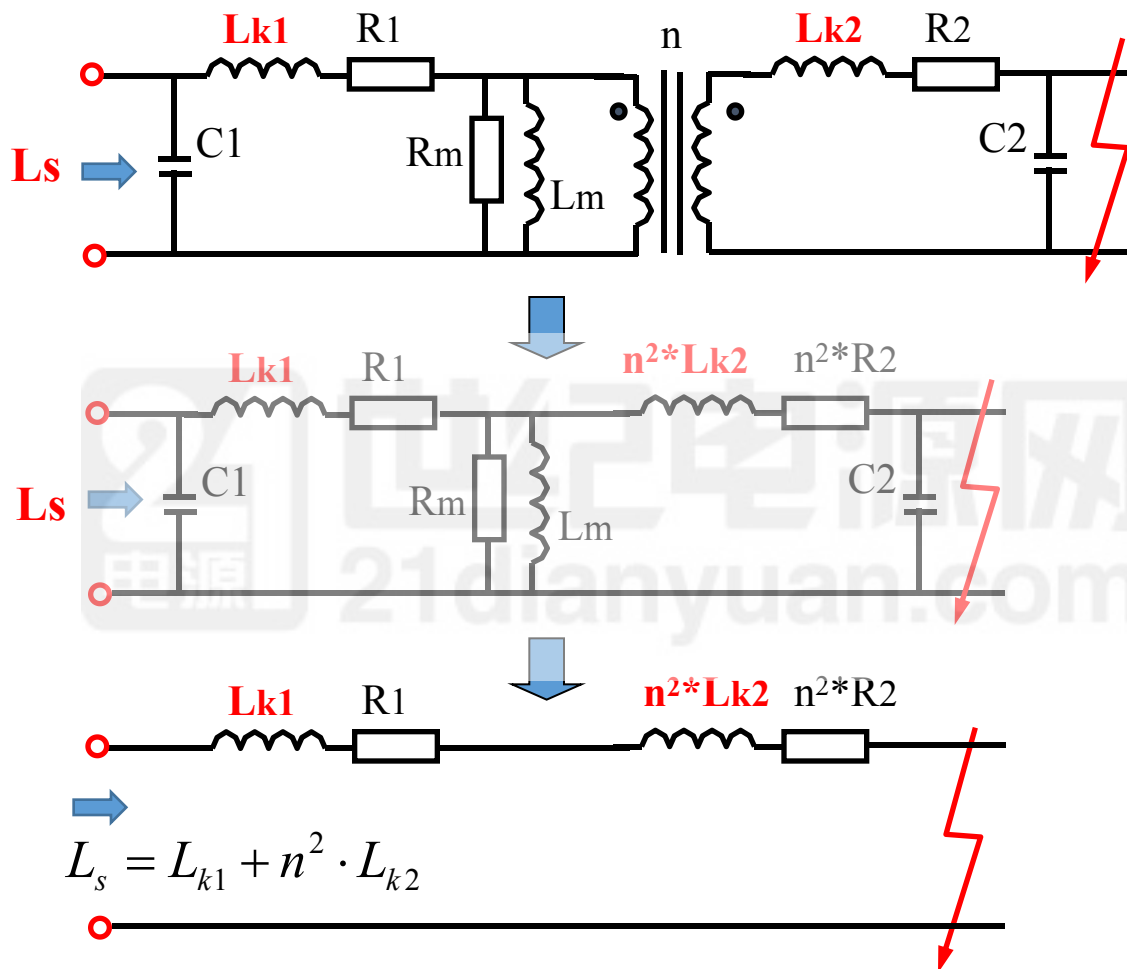
软件计算结果

$$B(t) = \frac{1}{N \cdot A} \int_0^t u(t) dt$$

$$L_{\Delta}(t) = u(t) / \frac{di(t)}{dt}$$

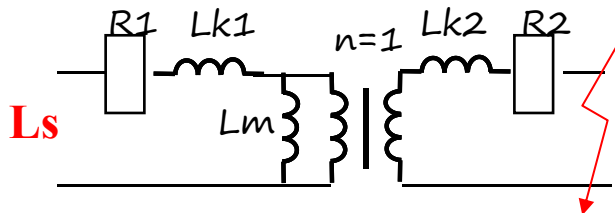
$$L_a(t) = \frac{B(t)}{i(t)} N \cdot A$$





- 由于漏感是线性的，因此可以通过阻抗分析仪(小信号)测量
- 由于线圈副边短路，磁芯没有磁通，因此不包含激磁电感
- 对于变压器，原边绕组和副边绕组的漏感是无法分离的

变压器漏感测量低频误差大的原因分析

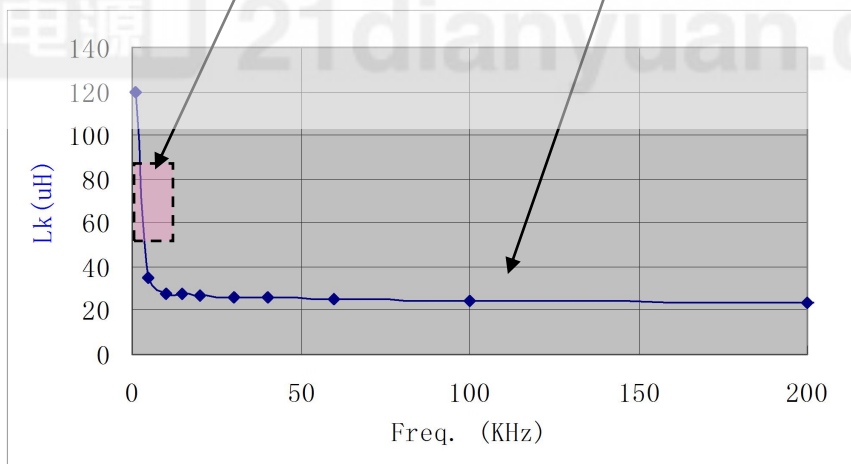


$$Z_s(f) = R_1 + j\omega \cdot L_{k1} + \frac{j\omega \cdot L_m \cdot (R_2 + j\omega \cdot L_{k2})}{j\omega \cdot L_m + (R_2 + j\omega \cdot L_{k2})}$$

$$L_k(f) = \frac{\text{Im}(Z_s(f))}{\omega}$$

如果 f 低, L_m 的感抗很小, 对副边电阻 R_2 折算到原边有很大影响, 因此要提高频率 f 以保证 $|2\pi f \cdot L_m| \gg R_2$ 。

频率低 → 漏感测量值太大 漏感测量值正确



- 1、注意绕组良好短路, 尤其是匝数很少的绕组短路;
- 2、对漏感的测量频率要足够大, 否则测量出来的漏感会偏大。



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY

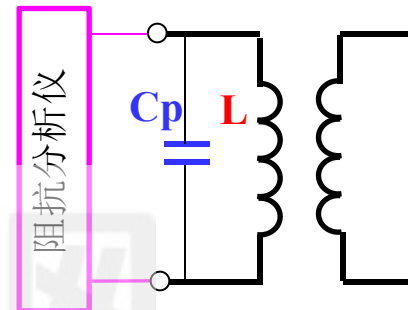
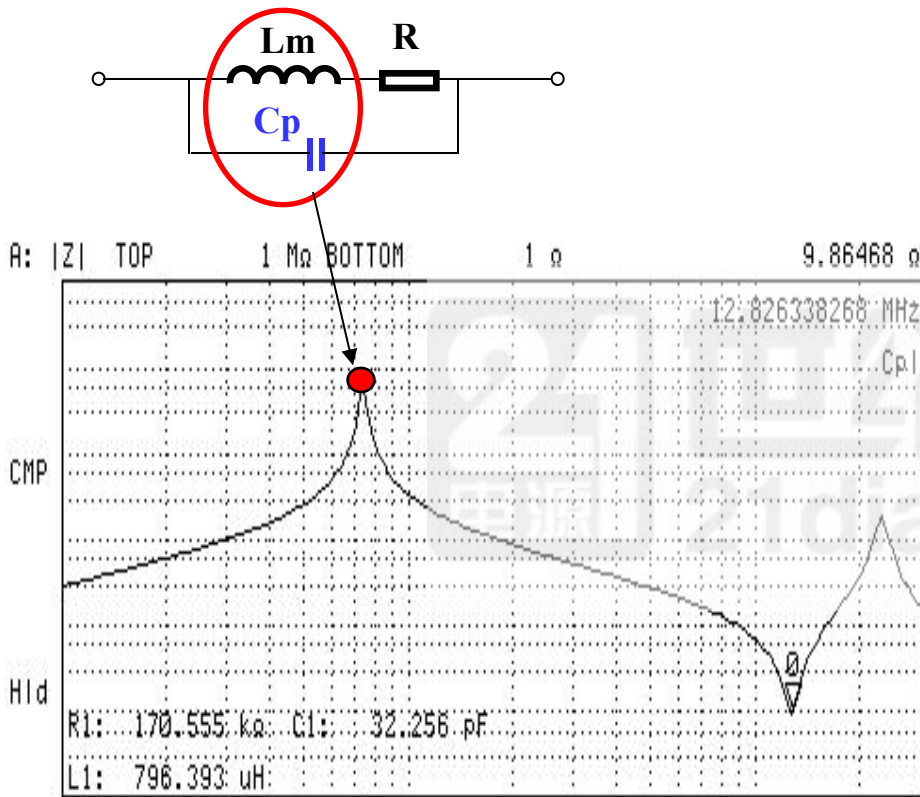


KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

磁性元件电磁兼容参数测量



绕组并联电容 C_p 的测量

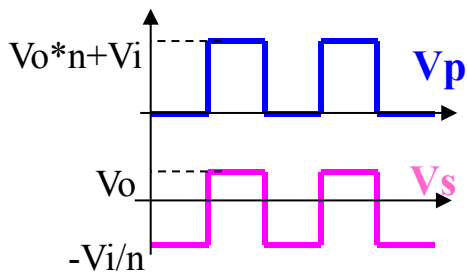
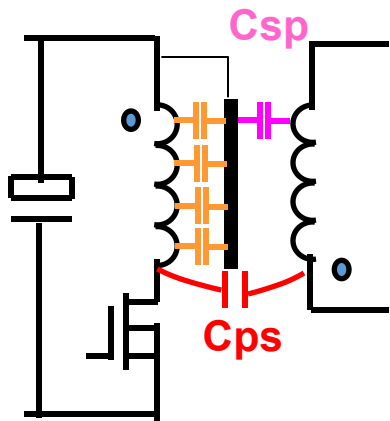
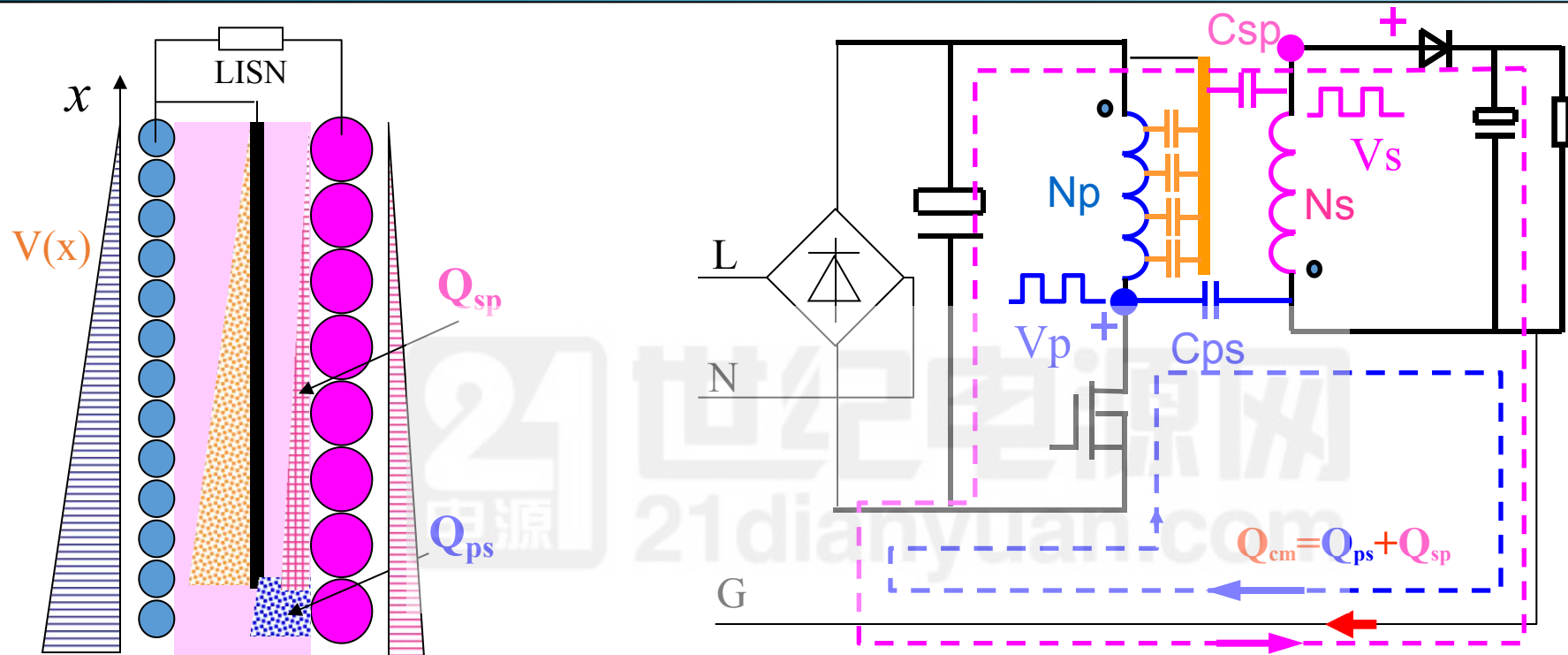


$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot C_p}}$$

$$C_p = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r)^2 \cdot L}$$

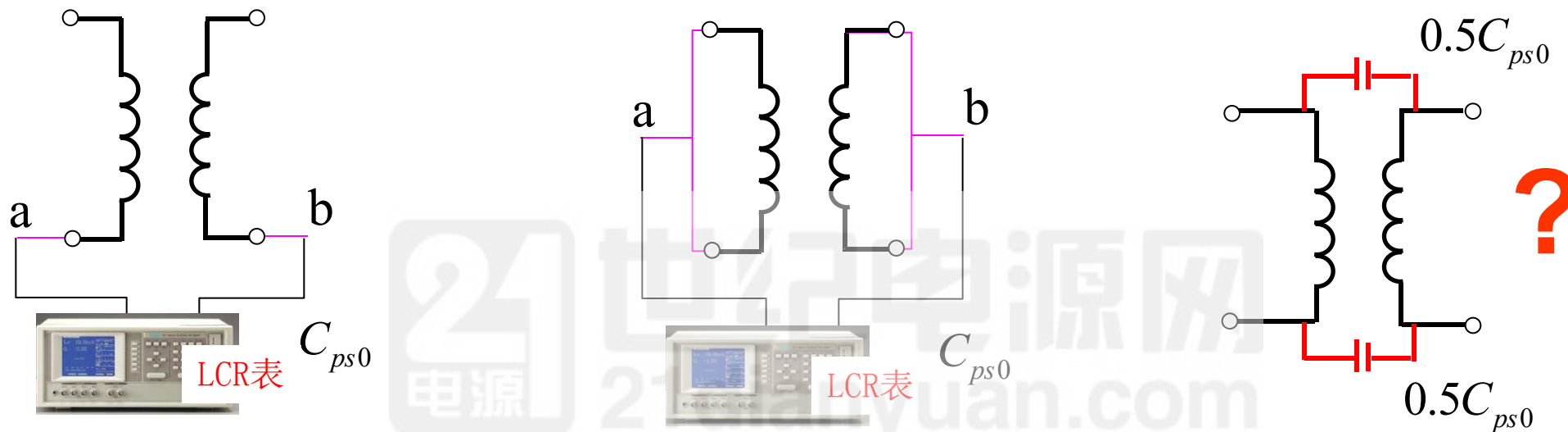
L 可以通过较低频率下的测量获得，而 C_p 通过谐振频率获得

反激变压器电场分布



当 $Q_{ps} = Q_{sp}$ 时，变压器的共模噪声抵消消除

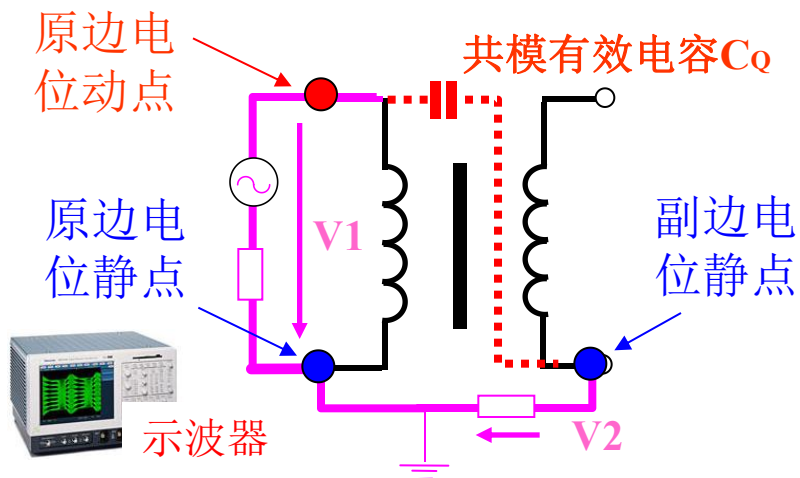
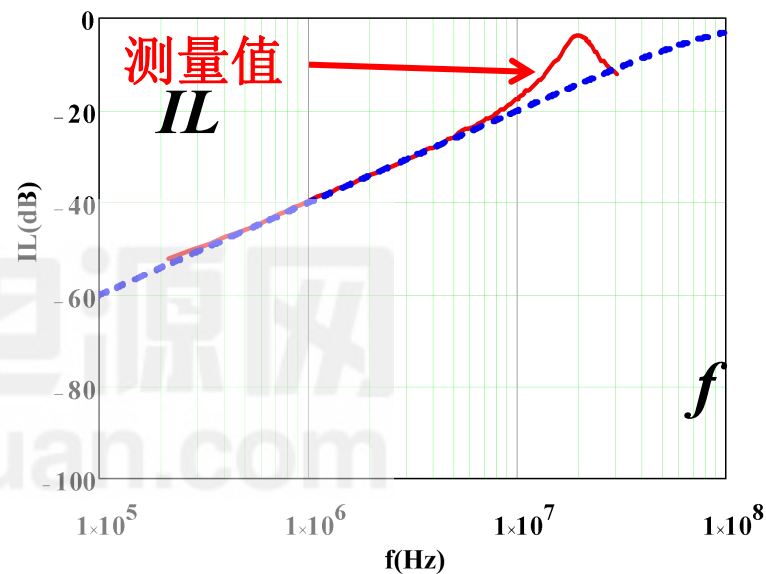
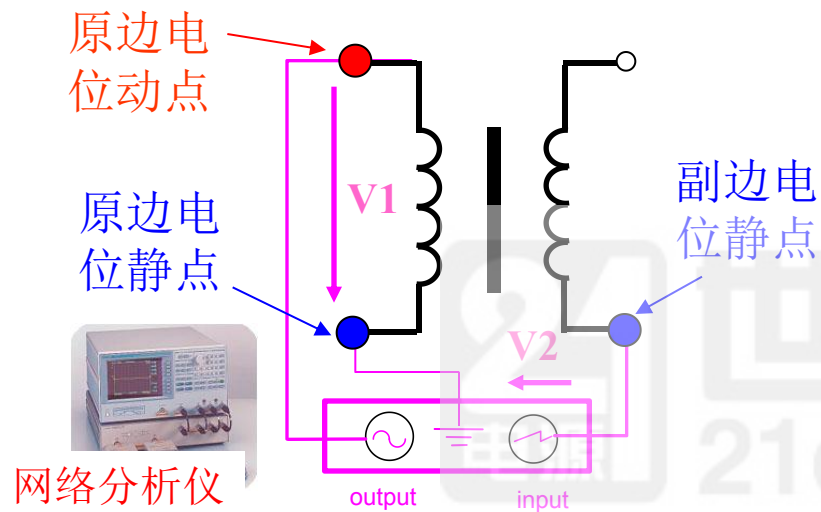
机理：在变压器绕组电压作用下，副边绕组感应电荷/位移电流



传统LCR表变压器原、副边电容测量方法 😞

- ❑ 采用阻抗分析仪或LCR表测量的是原、副边绕组间结构电容 C_{ps0}
- ❑ 不能体现绕组的电位分布特性对共模噪声动态电容等效的影响

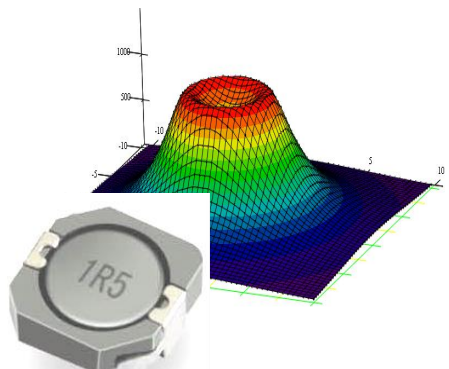
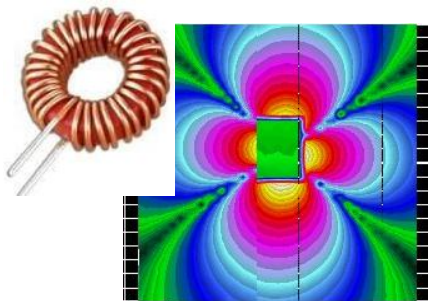
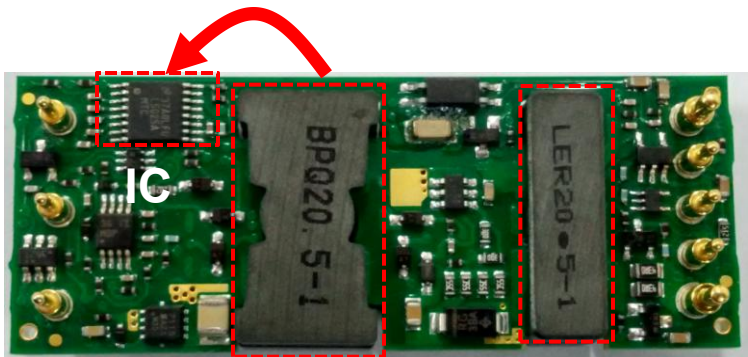
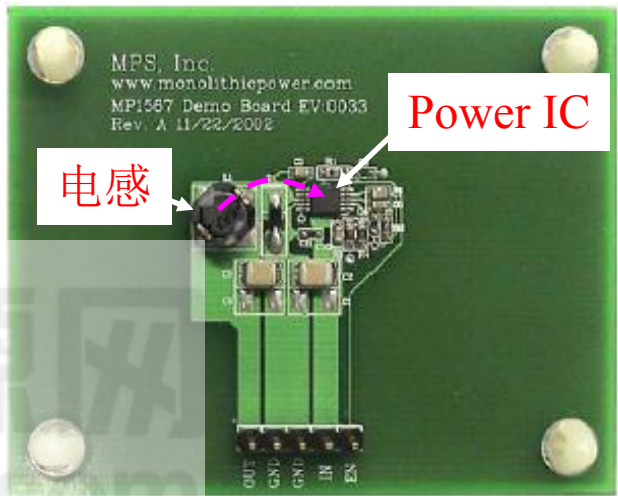
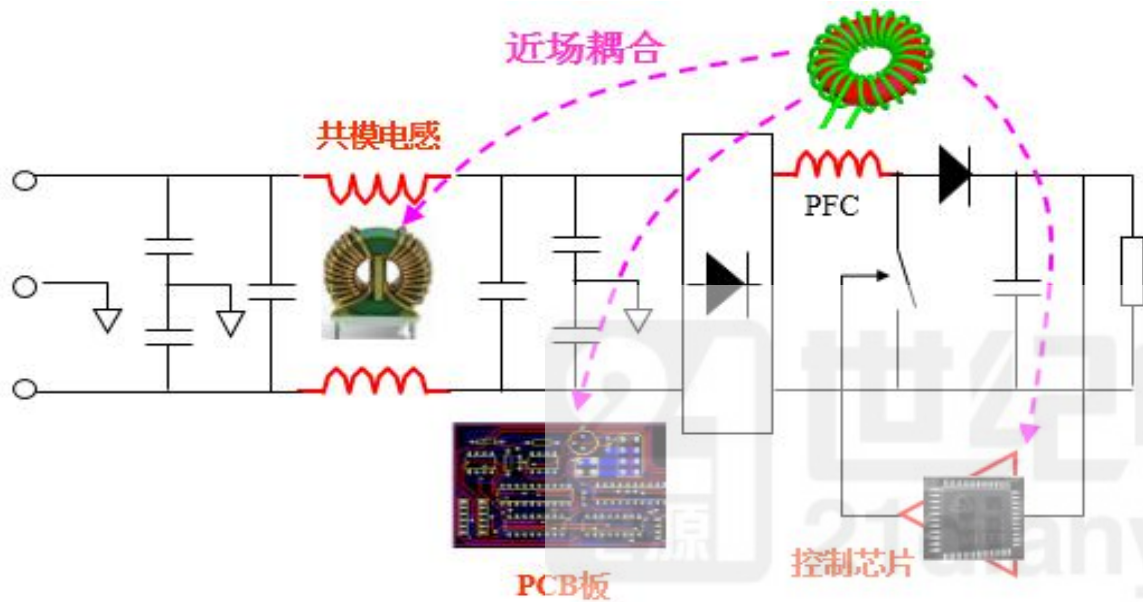
□ 网络分析仪/接收机等(两端口)



对线性段，可得：

$$C_Q = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \sqrt{10^{\frac{40-IL}{10}} - 10^4}}$$

磁元件近场泄露特性





近磁场测量系统



磁场测量- 霍尔探头



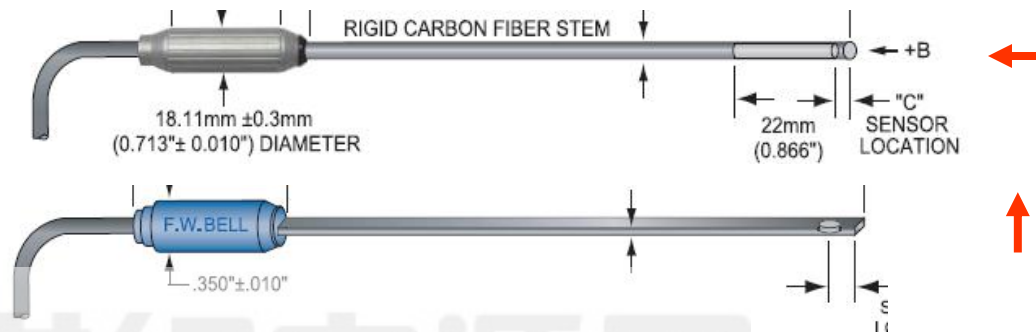
DC至20kHz



直流模式 DC交流模式 20Hz 至50kHz



DC-100k



一维探头



3D探头



磁场测量- 电磁感应探头

交流 100kHz 至50MHz



型号	特性曲线: 50欧姆, 1A测试电流时探头输出电压特性
<p>registered not registered</p> <p>LF-R 400</p>	<p>磁场近场探头, 可检测到10cm范围内的磁场。分辨率: 25 mm左右 主要用于机箱泄漏测试。</p>
<p>entering field in the top is registered</p> <p>LF-B3</p>	<p>磁场近场探头, 可检测垂直方向发射的电磁场。适合于检测由电流回路产生的电磁场。分辨率: 2 mm左右</p>

型号	特性曲线: 50欧姆, 1A测试电流时探头输出电压特性
<p>wird erfasst wird nicht erfasst</p> <p>LF-R 3</p>	<p>高分辨率磁场近场探头, 通过移动探头可以检测出磁场的方向和分布, 适用于IC引脚区域、滤波电容、EMC器件等的磁场检测。分辨率: 1mm左右</p>
<p>wird erfasst wird nicht erfasst</p> <p>LF-R 50</p>	<p>磁场近场探头, 可检测到3cm范围内的磁场。分辨率: 10mm左右</p>



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

磁性元件温升测量



□ 红外测温



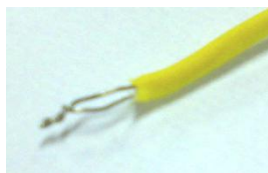
点温计



热成像仪

□ 电阻测温

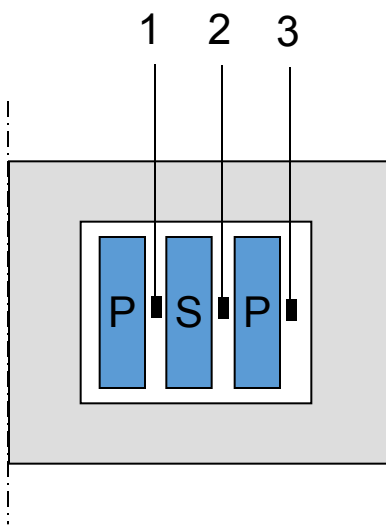
□ 热电偶



□ 铂电阻



问题分析:

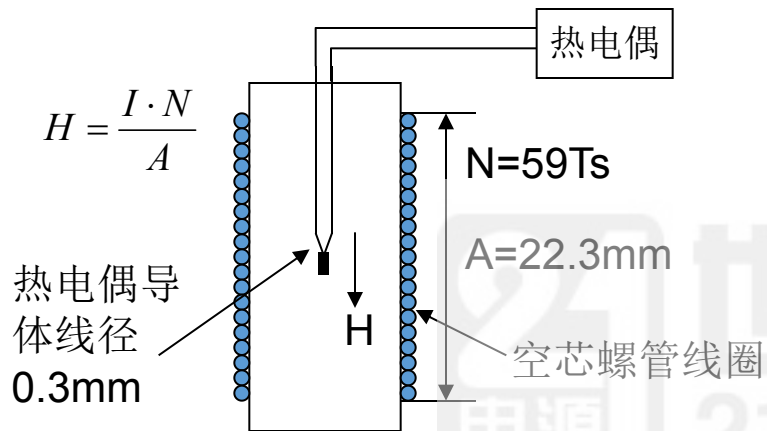


问题：在变压器绕组温升在线测量中，发现埋在原、副边绕组之间的热电偶1、2的温升明显大大高于线圈表面3的温升，无法用绕组损耗引起的温升来解释。



分析：原、副边绕组间是磁场最大的区域，热电偶的金属头部分在高频磁场作用下，产生涡流损耗，引起金属头部分很大的损耗密度，带来额外温升。

实验验证:



I_{pk} (A)	电流波形	H_{pk} (A/m)	f_s (KHz)	ΔT (°C)
1	三角波	2650	40	80
1	三角波	2650	30	68
1	三角波	2650	20	40
0.5	三角波	1325	20	13

解决思路:

- 1、在机器断电后一会儿，再读取温度值；
- 2、采用尽量细的热电偶线并尽量减小连接端头的体积，以减低涡流效应损耗；



福州大学
FUZHOU UNIVERSITY



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES



Q & A