

## 高频功率磁性元件测试技术

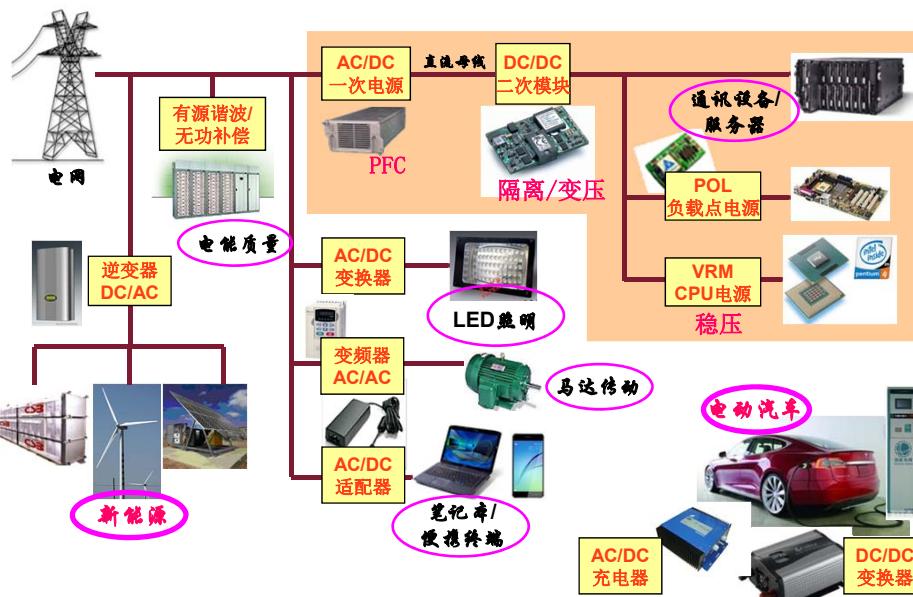
陈庆彬、陈为

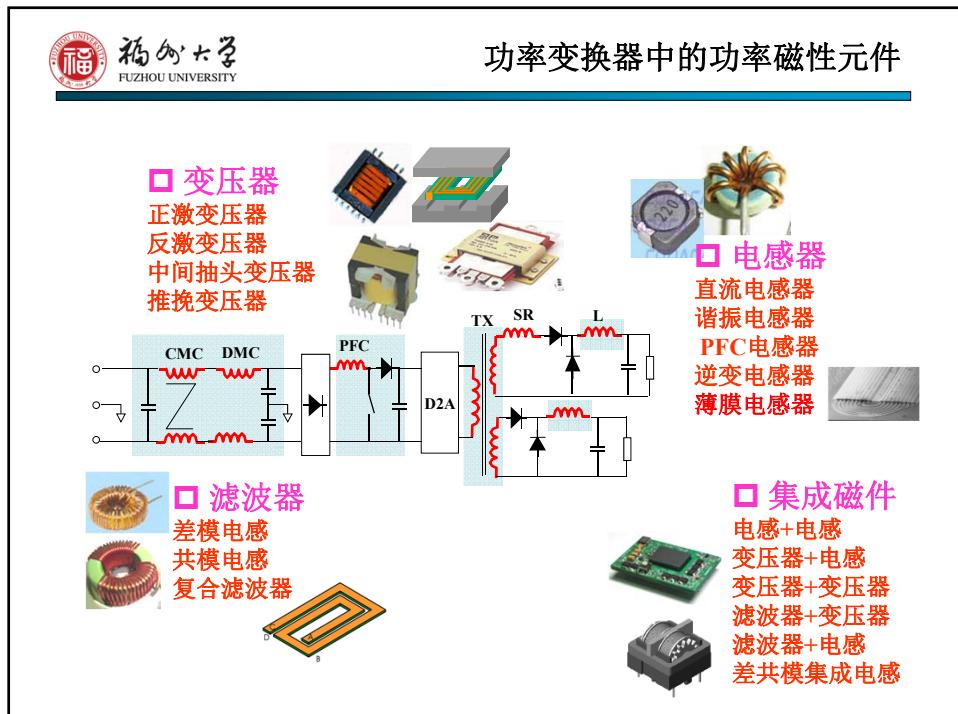
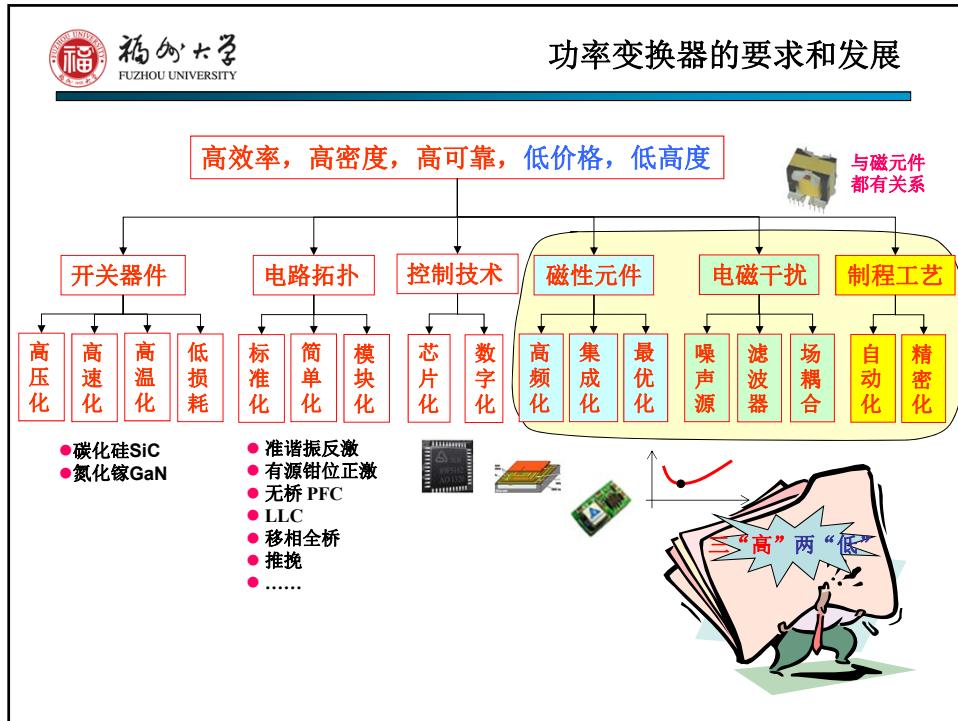
E-mail: cqb@fzu.edu.cn

福州大学电气工程与自动化学院  
 2018年8月 福建·建阳



## 功率变换器的广泛应用领域





福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY

## 磁性元件的重要性

- 尺寸、重量、形状、高度
- 电路工作状态
- 损耗、温升
- 电磁兼容
- 安规、耐压
- 人工成本
- 其他各项性能



- ◆ 高频磁性元件/磁技术已经成为功率变换器进一步发展的重要瓶颈
- ◆ 磁技术已经成为当前开关电源主要关注内容之一

福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY

## 磁性元件的主要参数

- **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**等。
- **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。体现在参数上, 包括**磁芯损耗密度**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。包括绕组结构电容, 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

### 磁性元件参数 v.s. 磁芯材料参数

电感

- 不同频率下的电感感量  
 $L_A(f) \Leftrightarrow \mu_A(f)$
- 不同直流偏置下的电感感量  
 $L_A(I_{DC}) \Leftrightarrow \mu_A(H_{DC})$
- 不同频率下的磁芯损耗  
 $R_c(f, B) \Leftrightarrow P_{cv}(f, B)$

变压器

- 不同频率下的激磁电感感量  
 $L_m(f) \Leftrightarrow \mu_A(f)$
- 不同频率下的等效匝比
- 不同频率下的磁芯损耗  
 $R_c(f, B) \Leftrightarrow P_{cv}(f, B)$

□ 体积小  
□ 损耗低  
□ 密度高 } 优化设计  $\Rightarrow$  参数的准确测量至关重要

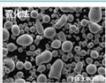
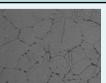
福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY

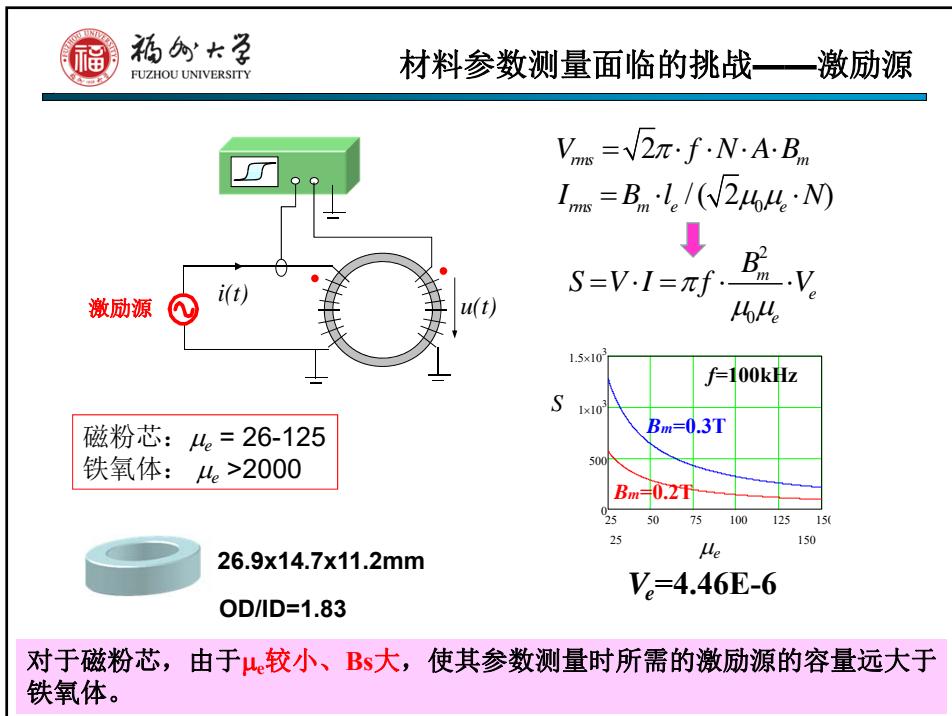
### 磁芯材料参数测量技术的新挑战

- ◆ 高工作频率已经成为主要发展趋势(铁氧体: >MHz)
- ◆ 低损耗的粉芯材料已经广泛应用(磁粉芯: >200-300kHz)
- ◆ PWM波下的磁芯损耗测试与开关电源的工况更吻合

 福州大学  
FUZHOU UNIVERSITY

磁粉芯 V.S. 铁氧体

	磁粉芯	铁氧体
定义	金属磁粉+绝缘涂层+空气	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + (Ni-Zn, Mn-Zn) 氧化		
用途	电感	变压器、电感(加气隙)、EMI滤波器
饱和	高B <sub>s</sub> 软饱和	
低B <sub>s</sub> 硬饱和		
参数	$\mu_a$ 、 $\mu_s$ 、B <sub>s</sub> 、P <sub>cv</sub>	$\mu_a$ 、 $\mu_s$ 、B <sub>s</sub> 、P <sub>cv</sub>
磁芯形态	环形、块	
$\mu$	低(26-125)	高(>2000)
激磁电源	大功率(大电压且大电流)	小功率(大电压但小电流)
测试匝数	同时考虑电压和电流 $V = \sqrt{2}\pi f \cdot N \cdot A \cdot B_m$ $I = B_m \cdot l_e / \sqrt{2}(\mu \cdot N)$	只考虑电压 $V = \sqrt{2}\pi f \cdot N \cdot A \cdot B_m$
阻抗角	很大(>89°)	较小(<85°)



 福州大学  
 FUZHOU UNIVERSITY

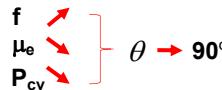
### 磁粉芯与铁氧体的阻抗角



$$Q = I_{ms}^2 \cdot X_L = \frac{I_{pk}^2}{2} \cdot (2\pi f \cdot L) = 2\pi f \cdot E_m = 2\pi f \frac{B \cdot H}{2} \cdot V_e = \frac{B^2}{\mu_0 \mu_e} \pi f \cdot V_e$$

$$P = P_{CV} \cdot V_e$$

$$\operatorname{tg}(\theta) = Q / P = \left( \frac{B^2}{\mu_0 \mu_e} \cdot \pi \cdot f \right) / P_{CV}$$



$$\theta \rightarrow 90^\circ$$

	Material	B (T)	f (kHz)	$\mu_e$	Pcv (kW/m³)	$\theta$ (°)
Powder	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
Ferrite	Ferroxcube 3C96	0.2	100	5500	300	80.6
	Ferroxcube 3C96	0.1	100	5500	40	85.0

磁粉芯:  $\theta > 89^\circ$   
 铁氧体:  $\theta < 85^\circ$

 福州大学  
 FUZHOU UNIVERSITY

### 材料参数测量面临的挑战——频率、阻抗角

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

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

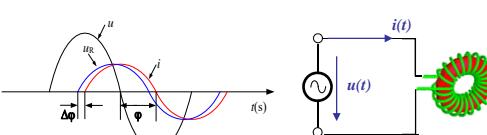
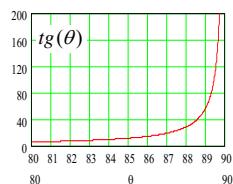
$$= \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \operatorname{tg}(\theta) (\Delta t \cdot f)$$

$\left\{ \left| \frac{\Delta U}{U} \right|, \left| \frac{\Delta I}{I} \right|$

精度非常高

$\operatorname{tg}(\theta) (\Delta t \cdot f)$

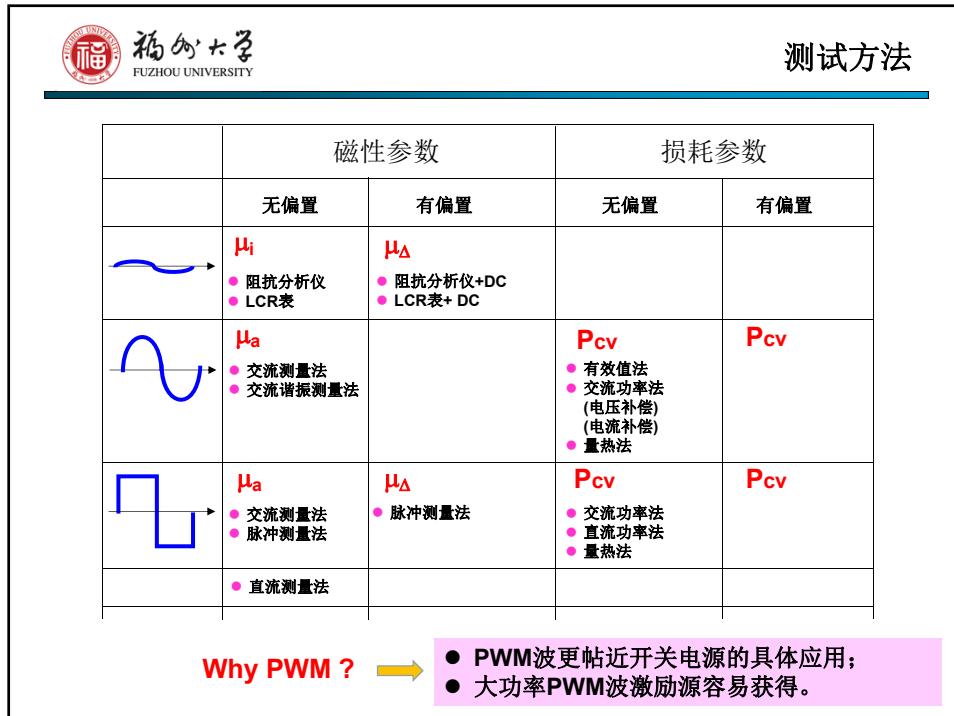
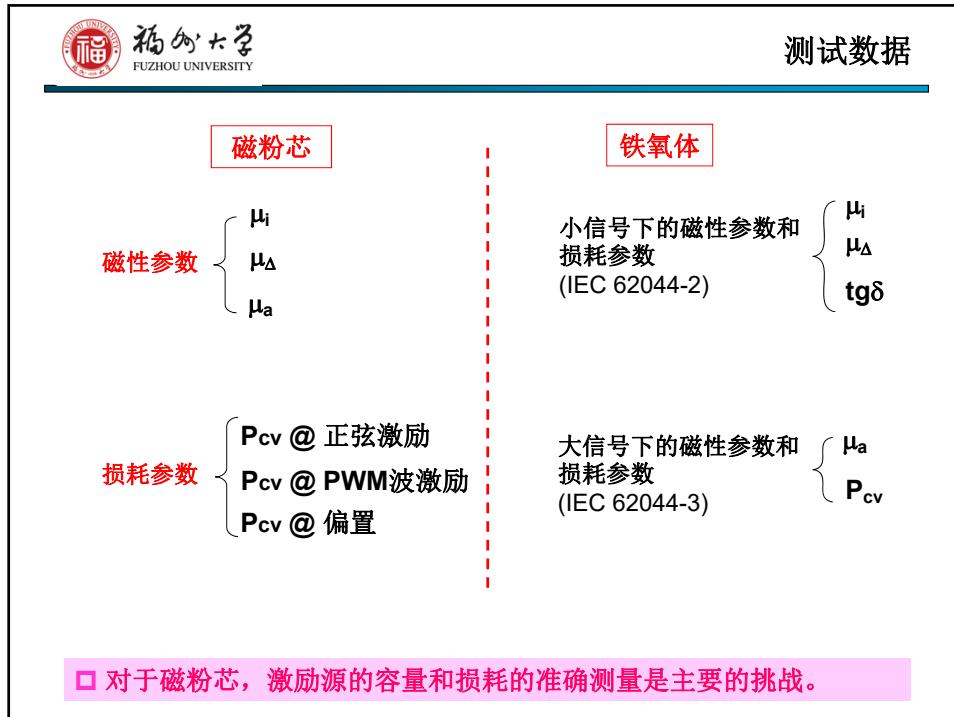
主要影响因素



- 大信号激励源  $\rightarrow$  电压通道与电流通道的同步时间误差  $\Delta t$  难以完全消除
- 高频测试场合中  $\rightarrow \Delta \theta = \Delta t \cdot f$
- 阻抗角大  $\rightarrow \theta$  接近  $90^\circ$ ,  $\operatorname{tg}(\theta)$  很大

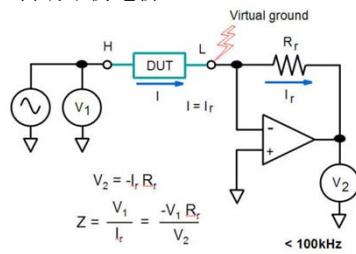
- 磁粉芯的磁芯损耗测量误差大的主要原因是: 大阻抗角 ( $> 89^\circ$ )
- 铁氧体的磁芯损耗测量误差大的主要原因是: 频率高 ( $> \text{MHz}$ )



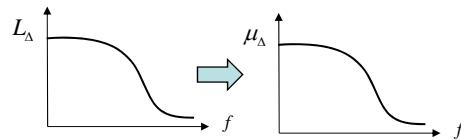
## 磁性参数测量

## 阻抗分析仪和LCR表

自动平衡电桥



阻抗分析仪和LCR表



**交流测量法**

$$\left\{ \begin{array}{l} B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot A_e} \int_0^t u_2(t) dt \\ H(t) = \frac{N_1}{l_e} \cdot i(t) \\ \mu_a = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m} \end{array} \right.$$

IWATSU SY-8258  
B-H Analyzer

国产高频功率测量系统

B  
H

☺ 传统的方法  
☺ 对于磁粉芯需要非常大容量的激励源

**交流谐振测量法**

$$\left\{ \begin{array}{l} B(t) = \frac{1}{N_2 \cdot A_e} \int_0^t u_2(t) dt \\ H(t) = \frac{N_1}{l_e} \cdot i_1(t) \\ \mu_{a\_i} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{m\_i}}{H_{m\_i}} \end{array} \right.$$

$C < \frac{R^2}{4} \cdot L$ 
 $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$

u<sub>2</sub>(t)  
i<sub>1</sub>(t)

B<sub>m\_i</sub>  
H<sub>m\_i</sub>

☺ 激励源的容量小  
☺ 一次测量便可获得完整的B-H曲线  
☺ 谐振频率随L和C变化

**脉冲测量法**

FUZHOU UNIVERSITY

实验照片：

原理图：

公式：

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

$$L_a(t) = \frac{\Psi(t)}{i(t)} = \frac{\int_0^t u(t) dt}{i(t)}$$

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

波形图：

注意事项：

- 激励源容量小；
- 脉冲电压高度或者电流的上升斜率可能会影响测试结果；
- 宽范围的电流采样难度较大。

**直流测量法**

FUZHOU UNIVERSITY

原理图：

公式：

$$B_{dc} = \frac{1}{N \cdot A_e} \int_0^\infty u(t) dt = B(0) - B(\infty) = B(0)$$

$$H_{dc} = \frac{I_{dc} \cdot N}{l_e}$$

$$\mu_a = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{dc}}{H_{dc}}$$

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

波形图：

注意事项：

- 激励源容易小；
- 可获得真正直流的B-H磁化特性曲线或 $\mu_a$ ；
- 测试时间长。

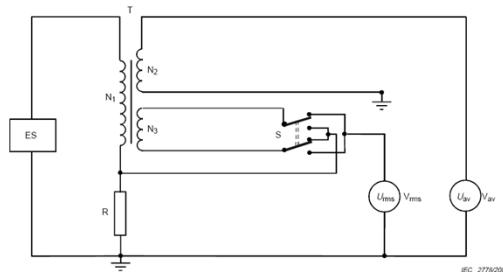


## 损耗参数测试

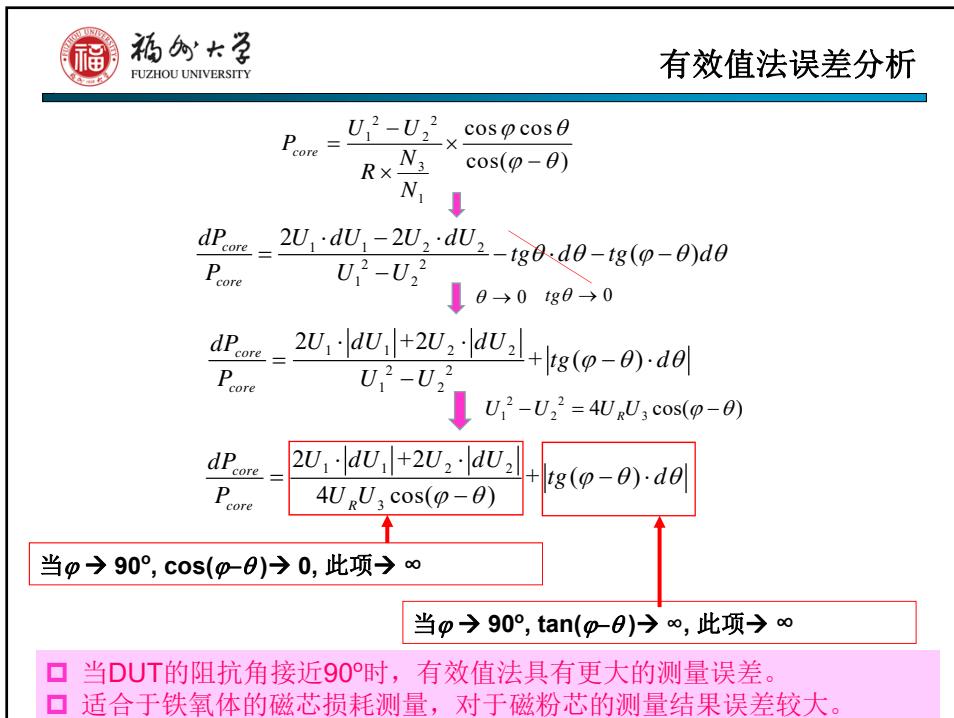
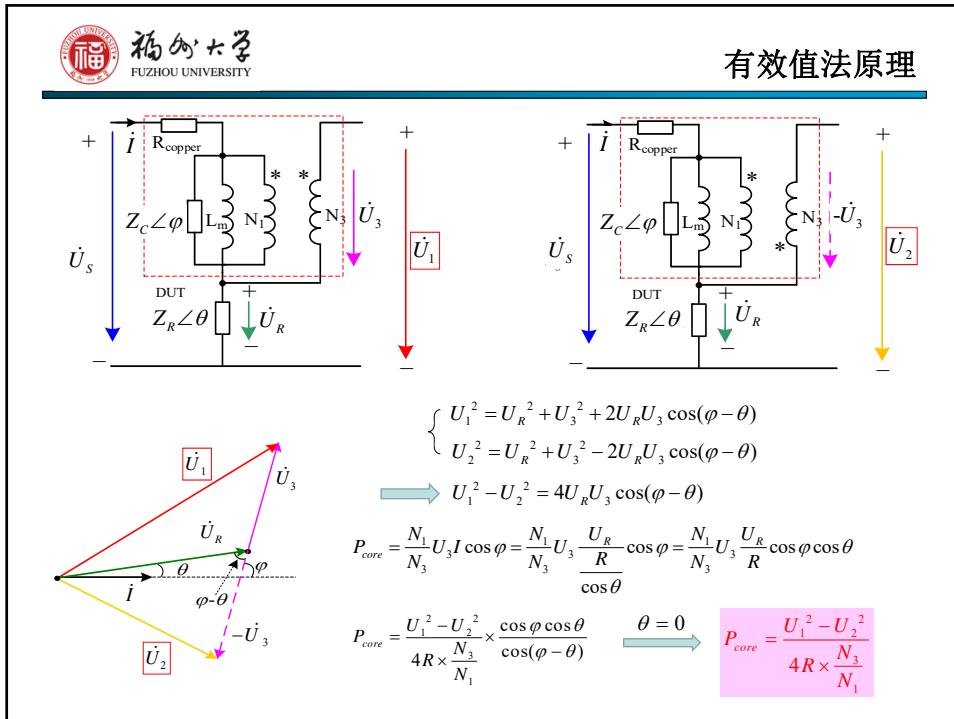


有效值法

有效值法- (Root-Mean-Square method) IEC 62044-2



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



**交流功率法**

高頻  
功率  
放大器

$i(t)$

$u_1(t)$

$N_1$

$N_2$

$u_2(t)$

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \left( \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot u_2(t) dt \right)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + \left| \frac{\Delta \theta}{\theta} \right| f \cdot \Delta t$$

Yokogawa PX8000  
Power Analyzer

IWATSU SY-8258  
B-H Analyzer

Clarke-Hess 2330  
V-A-W Wattmeter

- ☺ 标准、简单、直接的方法
- ☺ 可以正弦波或PWM波激励
- ☺ 相位误差会带来很大的测量误差

f	B	$\theta$	
		60:5	60:60
5kHz	10mT	89.76	89.83
	50mT	89.61	89.59
	100mT	89.54	89.52
10kHz	50mT	89.58	89.54
	100mT	89.47	89.59
20kHz	10mT	89.75	89.69
	50mT	89.47	89.59
	100mT	89.42	89.53
50kHz	10mT	89.65	89.59
	50mT	89.36	89.56
	100mT		
100kHz	10mT	89.41	89.77
	50mT		
	100mT		
200kHz	10mT	89.13	89.75
	50mT		
	100mT		

样品: FeSiAl60 D1-1  
仪器: Iwatsu SY8216 B-H Analyzer

**电流补偿**

Ampt

$V_{in}$

电流探头

$i(t)$

$u_1(t)$

$C$

$L$

$i_{in}$

- ☺ 阻抗角 $\theta$ 减小，相位误差所带来的测量误差变小，测量一致性提高；
- ☺ 电容本身的损耗不能忽略（测量精度不一定提高）；
- ☺ 好的电容成本高；
- ☺ 不同频率下的补偿电容不同。

$P$

$Q_L$

$Q_c$

$\theta$

**电压补偿**

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_2 - \dot{U}_{L_r} = (R_{core} + j\omega L - j\omega L_r) \cdot \dot{I}$$

$$P_c = \frac{1}{T} \int_T u_3(t) \cdot i_R(t) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_T u_2(t) \cdot i_R(t) dt - \frac{1}{T} \int_T u_{L_r}(t) \cdot i_R(t) dt$$

θ 减小

θ 基本不变

- ☺ 可以减小相位角，且该补偿方法与频率无关，可以提高测量的一致性；
- ☹  $L_r$  和  $T_r$  难以制作；
- ☹ 当原磁芯的阻抗角很接近90°时补偿效果较差。

**直流功率法(PWM波)**

$$P_{in} = V_i \cdot I_{i\_DC}$$

$$P_{core} = P_{in} - P_{ex}$$

各种PWM波激励波形

- ☺ 直流功率可以精确测量；
- ☺ 容易获得各种PWM波激励波形，可获得PWM波下的磁芯损耗；
- ☹  $P_{ex}$  需要扣除。

**设计：** 通过使用更好的器件和软开关技术减小逆变电路的损耗；

**校准：**  $P_{ex}(D, V_i, f, I_{pk}) = \alpha \cdot (3 - 4D) \cdot I_{pk}^2 + \beta \cdot V_i^2 f + \gamma \cdot f \cdot I_{pk} + \eta \cdot V_i f$

福州大学 FUZHOU UNIVERSITY

### 量热法

将损耗转为热量和温升  $W = c \cdot m \cdot \Delta T$

😊 精度高
😢 耗时

福州大学 FUZHOU UNIVERSITY

### 建议

	磁性参数测量		损耗参数测量	
	无偏置	有偏置	无偏置	有偏置
	$\mu_i$ 阻抗分析仪 LCR表	$\mu_\Delta$ 阻抗分析仪+ DC LCR表+ DC		
	$\mu_a$ B-H分析仪		$P_{cv}$ B-H分析仪 A-V-W测试仪 量热法	$P_{cv}$
	$\mu_a$ 脉冲测量法	$\mu_\Delta$ 脉冲测量法	$P_{cv}$ 直流动功率法 量热法	$P_{cv}$



2018第八届中国功率变换器磁元件联合学术年会

Thanks!



Magnetics & Power  
Conversion Lab