

高频开关电源变压器的动态测试

摘要：提出了开关电源变压器电磁特性的动态测试和分析方法。介绍了 JP9710B 数字化高频功率测量仪测量原理和测试功能。通过几个测试实例，详细讨论了开关电源变压器电磁参数及磁芯材料的动态测量分析技术。结果表明，采用该测量系统和方法，能够满足在实际工作条件下对开关变压器电磁参数的动态测试和分析，测试精度在 3% 以内，操作十分简便。

关键词：开关电源变压器；电磁参数；动态测试与分析

1 引言

目前，对开关电源变压器电磁参数测试一般使用两种方法：一种是用 LCR 表测量一些基本电磁参数，例如，开关电源变压器初次级电感、漏感、分布电容、绕组直流电阻以及匝比、相位等，我们称这种测试方法为“静态”测试；另一种是将开关电源变压器放到主机上考核其工作情况，对已经定型生产的开关电源变压器，为考核外购磁芯质量，通过测量变压器工作温升判断磁芯的损耗比较直观简便。前一种方法是在弱场、低频（磁感应强度 $B_m < 0.25 \text{ mT}$ ， $F = 1 \text{ kHz}$ ）下测量。由于磁性材料特性的非线性、不可逆和对温度敏感，在强场下工作与在弱场下工作时电磁特性有很大不同。弱场下测量结果不能反映变压器工作在强场下的情况。后一种方法虽随主机在强场下应用，但不能得到被测器件电磁参数，磁芯损耗需要专用仪器才能测量。高频开关电源变压器的上述测试方法的现状影响了此类器件的开发和生产。需要开发一种仪器或测试系统，这种测试系统能够模拟实际工作条件，完成对高频开关电源变压器主要电磁参数分析，例如，满载情况下变压器初级复数阻抗 Z 、等效电感 L 、功率损耗 P_T 、通过功率 P_{TH} 、传输效率 η 以及在指定频率下磁芯的传输功率密度等，我们称这种模拟实际工作条件的测试为“动态”测试。作为磁性器件综合测试系统，还要求具有对磁芯材料功率损耗的分析功能。在电器进一步高频化、小型化和采用高密度组装情况下，对器件进行“动态”分析对加速高频开关电源开发、提高器件质量显得特别重要。

下面介绍的测试仪器(系统)就是为磁性材料和器件特性动态测试(分析)设计的。

2 仪器简介

JP9710B 高频功率测量仪(中国西南应用磁学研究所研制)是一种交流电压、电流和功率的精密测量装置。其主要测量功能、指标和测量精度非常适用于磁性材料和磁性器件(例如开关电源变压器)的研究开发和磁芯的快速检测。该仪器和一台交流功率源配套就能组成完整的宽带精密测量系统。测量系统可完成对磁性材料和器件电磁参数的动态分析。系统具有如下主要测试功能：

(1) 软磁材料及器件交流功耗 (总功耗 P_c , 质量比功耗 P_{cm} , 体积比功耗 P_{cv}) ;

(2) 磁性材料振幅磁导率 μ_A ;

(3) 磁芯 (有效) 振幅磁导率 (μ_A)_e ; 以上测量均符合 IEC60367-1:1982 (或 GB/T9632-1988) 标准中推荐的测量方法。

(4) 电感、电容及组成器件 (例如开关电源变压器) 的等效电磁参数的动态测量和分析 ;

(5) 由测量数据可以计算下列参数 : 器件的复数阻抗 Z 、 $|Z|$ 、功率因数 $\cos\phi$ 、串联等效电感 L 、串联等效电阻 R 、初级有效电感 L_p 、初级有效电阻 R_p 、品质因数 Q 、损耗因子 D 、有效电感因子 (A_L)_e。

要特别指出的是, 带有磁芯的电感器具有非线性和不可逆特性。其测量结果与测试条件、操作程序密切相关。因此, 在实际应用条件下测量材料和器件的电磁参数有助于材料、器件研究设计和生产应用。与通常的元件阻抗分析仪 (如 HP4284A) 不同, J9710B 数字化电压、电流、功率测量系统是一种测量条件可以模拟实际应用的磁性器件阻抗参数动态分析仪。

本测试系统具有如下使用、操作特点 :

(1) 多功能、多参数、宽量程 ; 数字显示, 直接读数, 读数分辨率达 0.1% 。

工作频率范围 : $1\sim 550\text{ kHz}$, 电压范围 : $4\sim 400\text{ V}$, 电流范围 : $20\sim 2000\text{ mA}$, 功率测量范围 : $0.1\sim 200\text{ W}$ 。

(2) 对材料功率损耗作绝对测量, 与其它测量方法 (如电桥法) 比较无需标准器具。

(3) 测量材料功耗的同时可读取电压、电流 (真) 有效值, 测量精度与波形失真无关 (峰值因数 ≈ 10)。

(4) 操作简单, 测量快捷 : 对于材料测量, 完成一次测量仅需要 $5\sim 10\text{ s}$, 可避免试样温升引起的测量误差 ; 对于器件测量, 可以同时取得电流、电压、功率数据, 用于复数阻抗分析和被测器件等效参数计算。

(5) 具有负载无功电流补偿功能, 因此, 用于大试样 (如 EC54 磁芯及变压器) 测量时, 可以明显改善功率源输出状况, 提高系统测试能力和工作可靠性。JP9710B 采用乘法器工作原理, 符合 IEC60367-1:1982 和 GB/T9632-1988 推荐的测试方法。事实上, 该仪器对频率、功率的极宽的测量范围和对失真波形的处理能力, 使它适用于不同材料 (如软磁铁氧体、非晶、纳米材料) 及器件 (如

开关电源变压器)在不同应用状态下的功率损耗和阻抗特性等多种电磁参数的动态测量。

3 测试原理

3.1 磁芯电感器及其复数阻抗

磁芯加上线圈就构成一个有耗电感器或扼流圈。如果再加上一个或几个次级线圈则成变压器，用于反激式单端变换器的功率传输器件。如果磁路开有气隙，则称为变压器 扼流圈或储能变压器。它们统称为磁性器件，磁性器件串联等效电路如图 1 所示。图中， L 为器件串联等效电感，是器件的储能部分； R 为器件串联等效电阻，是器件的损耗部分。磁芯线圈串联等效电路复阻抗为

$$Z = R + jX_L = R + j\omega L$$

在电工学中，复数阻抗各部分之间有如下关系：

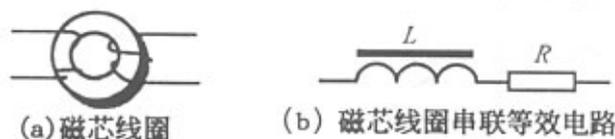


图1 电感器及其串联等效电路

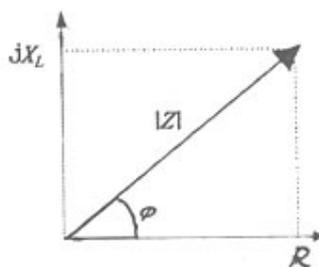


图2 串联电路阻抗复平面图

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

$$R = |Z| \cos \varphi,$$

$$X_L = \omega L = |Z| \sin \varphi.$$

上述关系可用图 2 所示复平面图表示（直角坐标）。

3.2 磁性器件复阻抗测量原理

对于高频开关电源变压器或电感器，从理论上可以通过测量器件的有功功率和视在功率得到被测器件端电压和通过电流之间的相位角。有了被测器件端电压和通过电流值以及它们之间的相位角，就可计算出磁性器件复数阻抗，这是该仪器设计的基本思路。

3.2.1 仪器工作原理—高（宽）频乘法器

该仪器从定义出发将电流电压瞬时值相乘，采用模拟变换和数字控制技术完成被测器件电流、电压真有效值和有功功率的测量。仪器工作核心是一个高（宽）频乘法器，如图 3 所示。设磁芯线圈两端电压为 u ，通过电流为 i ，则磁芯线圈消耗功率 P_c （有功功率 $P_{有功}$ ）由下式表示：

$$P_{有功} = UI \cos \varphi。$$

式中， U 、 I 分别为电流、电压（真）有效值，均为仪表显示值； UI 为磁芯线圈的视在功率； $\cos \varphi$ 为功率因数。

3.2.2 磁性器件复数阻抗及分量计算

根据以上关系由下面各式可以计算磁性器件复数阻抗及各分量：



图3 高（宽）频乘法器

- (1) 被测器件阻抗幅值 $|Z| = U/I$ ；
- (2) 功率因数 $\cos \varphi = P_{有功}/IU$ ， $\varphi = \cos^{-1}(P_{有功}/IU)$ ；
- (3) 复数阻抗 $R = |Z| \cos \varphi$ ， $X_L = |Z| \sin \varphi$ ；
- (4) 串联等效电感 $L = X_L/2\pi f$ ；
- (5) 器件 Q 值和损耗因子 D ： $Q = \tan \varphi = X_L/R = 2\pi fL/R$ ， $D = 1/Q$ 。

因此，只要测出器件电流、电压（真）有效值 I 、 U 和有功功率 $P_{有功}$ （在本系统中为仪表显示值），代入以上各式就能得到被测材料和器件的电磁参数。实现高（宽）频高场（大信号）工作条件对材料和器件电磁参数的动态分析。

3.3 测量系统误差及分析

下面的分析是为了对测量系统的测量误差进行评价。我们将会看到，系统测量误差与被测器件 Q 值有关。对于实际工作条件下的高频开关电源变压器，由于满载工作， Q 值小，因而可以获得较好的测试精度。

按照定义，加于被测试样上的交流电压与流过试样电流瞬时值的乘积在交流一周内的平均值即为被测试样的功率损耗。设器件复数阻抗为 $Z = R + j\omega L$ ，通过它的电流为

$$i = I_m \sin \omega t$$

则被测试样两端电压可以表示为

$$u = Z \times i = I_m R \sin \omega t + I_m \omega L \cos \omega t$$

因电流电压通道固有延时引起的通道相位差为 θ ，按定义将上两式代入并经简化得到功耗

$$P = \overline{\mu \times i} = (1/2)I_m^2 R \cos \theta + (1/2)I_m^2 \omega L \sin \theta$$

设 $\theta \ll 1$ ，并以有效值表示得到：

$$\begin{aligned} P_{\text{有功}} &= I^2 R \cos \theta + I^2 \omega L \sin \theta \\ &= I^2 R [1 + Q\theta] \end{aligned}$$

上式中， $I^2 R Q \theta$ 为误差项，是由通道相位频

率特性变化引起的功率误差，称为相位附加误差，表示为：

$$\Delta P_{\theta} / P = Q\theta$$

测试系统总误差由下式计算

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\theta}}{P}\right)^2}$$

测试系统在 1~550 k Hz 频率范围内，电流、电压测试误差为 $\pm 2\%$ ，附加相位变化 $\theta < 0.0075 \text{ rad}$ ，设被测试样 $Q=3$ （如磁性材料试样），按上式计算得到：

$$\Delta P / P = 3.61\%$$

开关电源变压器满负载测试情况下，初级绕组 Q 值一般要小于 1，功率测量误差将在 3% 以内。

4 测试系统及连接

测试系统由 JP9710B 高频功率分析仪和 EM619A 高频功率电源构成。连接十分简单，测试系统及连接如图 4 所示。

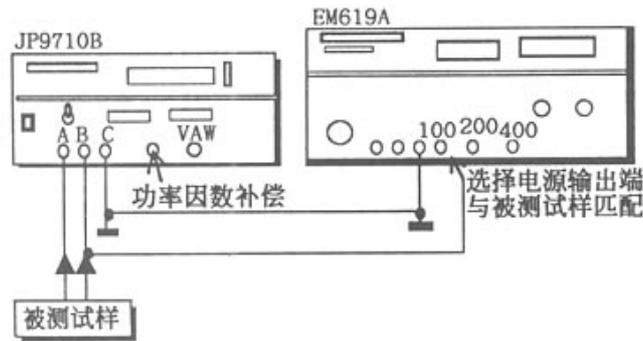


图4 测量系统组成及连接

5 测试应用举例

下面举 4 个实际测量例子说明测试系统测试功能和使用方法。前 2 例作为基础，是开关电源变压器用磁芯和材料测试；接着介绍用于双端和单端逆变电路中两种不同工作方式的开关电源变压器电磁特性动态测试和分析。

5.1 磁性材料和磁芯损耗特性测试

磁性材料损耗特性测试，按国家测试标准规定，必须采用环形试样。

被测样品材料：TP3（浙江天通电子公司生产，相当于日本 TDK 公司 PC40 材料）

样环尺寸：20 · 1mm × 13 · 3mm × 6.13mm，匝数 $N=20$ 。

磁芯因数： $C_1=2.5\text{m}^{-1}$ ， $C_2=0.1\text{m}^{-3}$ 。

有效尺寸： $A_e=20.5\text{m}^2$ ， $l_e=51.0\text{mm}$ ， $V_e=1048.0\text{m}^3$ 。

测量条件： $F=100\text{kHz}$ ， $B_m=200\text{mT}$ ， $T=15^\circ\text{C}$ ；按图 4 连接测试系统。

工作电压： $U=4.44fB_mA_eN=38.18\text{V}$ 。

系统设置：电压范围置 100V 档，电流范围置 100mA 档。

加测试电压 $U=38.18\text{V}$ ，将功能控制器分别置电压、电流、功率档，分别读取 U 、 I 、 $P_{\text{有功}}$ 值： $U_{\text{显示}}=38.18\text{V}$ ，

$I_{\text{显示}}=52.2\text{mA}$ ， $P_c=P_{\text{有功}}=P_{\text{显示}}=0.60\text{W}$ 。

比功耗 $P_{cV}=P_c/V_e=0.60\text{W}/1.048\text{cm}^3=0.572\text{W}/\text{cm}^3$ 。

注意：测量时尽量在 5 s 内读取功率数据，避免材料温升影响。

5.2 材料振幅磁导率 μ_a 和磁芯（有效）振幅磁

导率 $(\mu_a)_e$ 测量

材料振幅磁导率 μ_a 、磁芯（有效）振幅磁导率 $(\mu_a)_e$ 测量与功率损耗测试可以同时完成。以磁芯 ETD49 为例测量结果为：U=

$$U_{\text{显示}} = 168.6\text{V}, I = I_{\text{显示}}/2 = 560\text{mA}。$$

$$\text{已知 } l_e = 112.2\text{mm}, A_e = 216.2\text{mm}^2;$$

$$N = 9; \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m}。 \text{按公式求得：}$$

$$B_m = U/4.44fA_eN = 0.2\text{T},$$

$$H_m = 1.41NI/l_e = 62.88\text{A/m}。$$

代入 $(\mu_a)_e$ 公式求得：

$$(\mu_a)_e = B_m/\mu_0H_m = 2513。$$

用同样方法可测试材料振幅磁导率 μ_a ，但一定要使用样环测试（按测试标准规定）。

5.3 用于推挽或桥式逆变器中的变压器动态测试与分析

在推挽或桥式（全桥、半桥）逆变器研究开发和生产中，需要了解实际工作条件下开关电源变压器主要电磁参数，例如，满载情况下初级有效电感 L_p ，变压器通过功率 P_{th} 、功率损耗 P_T 、传输效率 η 、热阻 R_{th} 、温升 ΔT 、初级复数阻抗 Z 及在指定频率下磁芯的传输功率密度 D_p 等。测试系统可以完成所有上述参数动态测试而且测量分析十分简单。

开关电源变压器（或其他磁性器件）电磁参数动态测试方法与磁芯损耗测量方法相同。变压器结构如图 5 所示。

（1）被测开关电源变压器设计参数

工作频率：F=500 kHz，磁通密度 $B_m \leq 50\text{mT}$ ，

磁芯：EFD20（材料 TP4）； $C_1 = 1.52\text{mm}^{-1}$ ； $A_e = 31\text{mm}^2$ ， $l_e = 47\text{mm}$ ， $V_e = 1460\text{mm}^3$ ，初级匝数 $N_p = 105$ 。

满载功率为 20W。

(2) 测量条件： $U=171\text{V}$ ($B_m<50\text{mT}$ ， $F=500\text{kHz}$ ，要求 $P_{th}=20\text{W}$ ($R_L=0.85\Omega$)。在测试过程中，用点温计测量变压器的温升。

(3) 测量数据如表 1 所列。

(4) 分析和计算电磁参数

根据以上所测数据，可以计算变压器在实际工作条件下的初级复数阻抗 Z （初级有效电感 L_p 及有效电阻值 R_p ）、功率损耗 P_T 、通过功率 P_{th} 、传输效率 η 、EFD20 磁芯传输功率密度 D_p ($f=500\text{kHz}$) 并通过温升计算热阻 R_{th} 等。计算方法和结果如下：

A. 阻抗幅值： $|Z| = U/I = (171.0/0.148)\Omega = 1155.4\Omega$

B. 功率因数： $\cos\varphi = P_{in}/IU = 19.1/(0.148 \times 171) = 0.755$ ； $\varphi = \cos^{-1}(P_{in}/IU) = 41^\circ$ 。

C. 初级复阻抗： $R = |Z|\cos\varphi = 872\Omega$ ， $X_L = |Z|\sin\varphi = 758\Omega$ ；

$$Z = R + jX_L = 872\Omega + j758\Omega。$$

通过功率验证： $P_{th} = I^2R = 0.148^2 \times 872 = 19.1\text{W}$ ，与测量结果吻合。

D. 初级有效电感： $L_p = X_L/2\pi f = 240\mu\text{H}$ ；初级有效电阻： $R_p = 872\Omega$ 。

E. 有载 Q 值： $Q_{\text{有载}} = \tan\varphi = X_L/R = 0.869$ 。

F. 功率损耗和热阻计算：

$$P_T = P_{in} - (U_{\text{out}}^2/R_L) = 19.1 - (3.93)^2/0.85 = 0.94(\text{W})；$$

$$R_{th} = \Delta T/P_T = 32/0.94 = 34(\text{K/W})。$$

此时，计算热阻与实测热阻 ($P_{th}=32\text{K/W}$) 吻合。变压器的工作温度约 90°C ，符合 TP4 材料最低功耗温度 ($90\sim 100^\circ\text{C}$) 要求。

表1 EFD20高频变压器动态参数测试数据^[3]

输入电压	输入电流	输入功率	输出电压	负载电阻	输出功率	效率	温升
U/V	I/mA	P_{in}/W	U_{out}/V	R_L/Ω	P_{out}/W	%	$\Delta T/K$
171.0	148.0	19.1	3.93	0.85	18.2	95	32

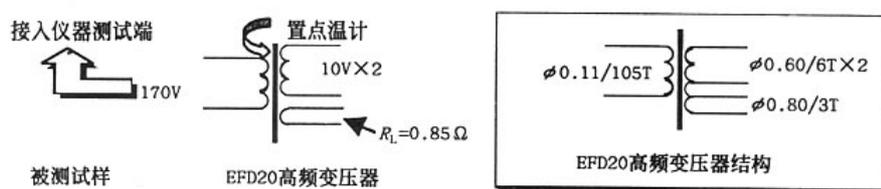


图5 EFD20高频变压器结构

G. 输出功率: $P_{out} = U_{out}^2/R_L = (3.93)^2/0.85 = 18.2(W)$

H. 传输效率: $\eta = (P_{th} - P_T)/P_{th} = P_{out}/P_{th} = 18.2/19.1 = 0.95。$

I.磁芯传输功率密度: EFD20 磁芯在频率为 500 k Hz 时传输功率密度为 $D_p = P_{th}/V_e = 19.1/1.46 = 13 (W/cm^3)$ (Philips 公司数据为 $D_p = 14W/cm^3$)。

5.4 用于单端反激式逆变器开关电源变压器的动态测试与分析

用于单端反激式变换器开关电源变压器磁路开有气隙,作为储能电感可以次级开路(不接负载)测试。可以测试如下电磁参数:初级复数阻抗 Z 、等效电感 L_p 、等效电阻 R ;工作电流峰值 I_p ;功率转换能力(储能特性 E_s);功率转换效率 η 等。下面以 EFD20 变压器扼流圈(储能变压器)为例说明这类器件的测试分析方法。

(1) 被测开关电源变压器设计参数

工作频率 $f = 500 \text{ k Hz}$, 磁通密度 $B_m \leq 50 \text{ mT}$;

磁芯: EFD20 (材料 TP4); $C_1 = 1.52 \text{ m m}^{-1}$, $A_e = 31 \text{ m m}^2$, $l_e = 47 \text{ m m}$, $V_e = 1460 \text{ m m}^3$, $N_p = 121$, 气隙长度 $l_g = 1.3 \text{ m m}$ 。

用于单端反激式变换器,满载功率为 20W,变压器结构同图 5。

(2) 测量条件: $f = 500 \text{ k Hz}$, $U = 173 \text{ V}$ 。

(3) 测量结果: 实测数据见表 2。

(4) 电磁参数计算和结果分析

A · 变压器初级复数阻抗

$$|Z| = U/I = 2288\Omega,$$

$$\cos\varphi = P_{\text{有功}}/UI = 0.30 / (173 \times 0.0756) = 0.023。$$

初级复数阻抗：

表2 EFD20开关电源变压器动态测试数据

频率	初级电压	初级电流	有功功率
kHz	U/V	I/mA	$P_{\text{有功}}/W$
500	173.0	75.6	0.30

$$R = |Z|\cos\varphi = 55.9\Omega, X_L = |Z|\sin\varphi = 2287\Omega。$$

初级有效电感： $L_p = X_L/2\pi f = 728\mu\text{H}$ ，与 HP4284A 测试结果(691 μH)基本相同，这是可以理解的，因为，开隙后磁芯磁化特性接近线性。

初级线圈流过的峰值电流： $I_p = I/0.4 = 75.6\text{mA}/0.4 = 189\text{mA}$ （按公式 $I_{\text{有效}} = I_p \times \sqrt{\delta/3}$ ，占空比 $\delta = 0.5$ 计算）。

以上数据是在测试电压为 173V 下测试结果，如果初级电压有效值为 310V，则 $I_p = (310/173) \times 189\text{mA} = 338.7\text{mA}$ （磁芯有气隙，可以认为电压电流为线性关系）。

B · 变压器储能特性

$$E_s = L_p I_p^2 / 2 = 728 \times 10^{-6} \times (338.7 \times 10^{-3})^2 / 2 = 41.7 (\mu\text{J})。$$

C. 通过功率: $P_{th} = E \times f = 41.70 \mu\text{J} \times 500 \times 10^3 / \text{s} = 20.8 \text{W}。$

D. 变压器总损耗计算: $P_T = (310/173)^2 \times P_{有功} = 1.79^2 \times 0.30 = 0.96 (\text{W})$

E. 变压器效率: $\eta = (P_{th} - P_T) / P_{th} = (20.8 - 0.96) / 20.8 = 0.95;$

F. 变压器实际输出功率: $P_{out} = P_{th} - P_T = 19.8 \text{W}。$

6 结束语

与通常的元件阻抗分析仪（如 HP4284A）不同，JP9710B 数字化电压、电流、功率测量系统是一种测量条件可以模拟实际应用的磁性器件矢量分析仪器。因而，可以用作功率电磁器件复数阻抗动态分析。测试实例说明，系统测试精度优于 3%，操作十分简便。

系统的测量原理是经典的，因此，可用于与复数阻抗有关的其它参数测量，例如，电子镇流器空载（启动）频率和有载（工作）频率变化的动态测量。