

金属磁粉芯直流磁化特性的测量分析

张宇超, 汪晶慧, 陈为

福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350000

摘要: 为了功率变换器中磁性元件的优化设计, 需精确确定磁芯的幅值磁导率和增量磁导率。金属磁粉芯是由金属磁粉颗粒、绝缘包裹以及空气(粘合剂)的组合物, 其饱和磁感应强度高, 磁导率低, 阻抗角接近90度。因此测量磁粉芯的磁导率所需激励源容量大(电压高, 电流大), 导致测量非常困难。为了快速便捷地测量磁粉芯的磁化特性, 本文介绍了测量磁粉芯幅值磁导率和增量磁导率的直流测量方法, 详细分析了直流测量法的工作原理和测量误差, 通过实验验证了该方法的可行性。

关键词: 磁粉芯, 磁化特性, 直流源

Direct current measurement method of metal magnetic powder core

ZHANG YU CHAO, WANG JING HUI, CHEN WEI

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350000

Abstract: In order to optimize the magnetic components in power converters, it is necessary to determine the amplitude permeability and the incremental permeability of the cores accurately. Metal magnetic powder Core is a combination of metal magnetic particle, insulating package and air (binder), its saturation flux density is high, the permeability is low, and the impedance angle is close to 90 degrees. Therefore, it is very difficult to measure the magnetic flux of magnetic powder Core (high voltage and current) because of the large excitation source. In order to measure the magnetization characteristics of magnetic powder cores quickly and conveniently, this paper presents a DC measurement method for measuring magnetic permeability and incremental magnetic permeability of magnetic powder cores. The theory of DC measurement method and measurement error are analyzed in detail and the feasibility is verified by experiments.

Keywords: Magnetic powder core, magnetization characteristic, DC source

1 引言

金属磁粉芯是一种由铁磁性材料粉末经过绝缘包裹后, 通过粉末冶金方法制成的一种复合软磁材料。由于铁磁性粉末颗粒很小, 又被非铁磁性绝缘介质形成的膜物质隔开, 因此磁粉芯一方面可以隔绝涡流, 使材料适用于较高频率的场合; 另一方面由于颗粒的间隙效应, 导致材料具有低导磁率及软饱和特性。金属磁粉芯特殊的软磁性能使其在许多应用场合具有其他磁性材料难以比拟的优势, 被广泛应用于电讯、雷达、电视、电源、太阳能发电等领域^{[2][3]}。

幅值磁导率 μ_a 和增量磁导率 μ_Δ 是描述磁粉芯磁化特性的两个重要参数。幅值磁导率 μ_a 为磁芯初始磁化曲线上一点磁感应强度 B_a 与磁场强度 H_a 的比值; 增量磁导率 μ_Δ 为一定直流偏磁下磁感应强度的增量 B_Δ 与磁场强度增量 H_Δ 的比值。根据磁粉芯磁导率 μ 随外加磁场强度 H 的变化特性可以合理选择满足工况的磁芯型号。传统金属磁粉芯的磁化特性测量方法基本都是采用交流激励, 如大信号交流源激励法, 通过对磁芯施加正弦交流激励测量其饱和特性, 然而交流激励法对信号源要求较高; 阻抗分析法通过功率放大器将正弦小信号放大后施加在磁芯两端

测量其磁化特性, 测量结果较为精确, 但是仪器设备成本较高, 不便于用户或者厂家测量; 脉冲测量法适用于脉冲磁化特性的测量, 多用于指导脉冲磁元件的设计与性能分析, 具有高磁化速率与高等值频率两个重要特点^[7]。脉冲测量法对于采样精度要求较高, 且完整的实验平台较难搭建。

本文介绍了测量磁粉芯直流磁化特性的一种新型方法——直流测量法, 详细说明了直流测量法的基本原理, 分析了直流测量法的主要误差来源, 通过实验验证了该方法的可行性, 并对实验结果进行了讨论。

2 直流测量法的原理和分析

2.1 直流测量法的原理

直流测量法的测量电路如图 1 所示。图 1 中: U_0 为直流激励源; S 为控制开关; R_1 为充电电阻; R_2 为放电电阻, L 为被测磁性元件。测量开始 S 闭合, 直流激励源给磁性元件充电至所需幅值电流 I_{DC} ; 接着断开 S , 磁性元件通过电阻 R_2 放电至零。采样被测磁性元件 L 放电过程的电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 。

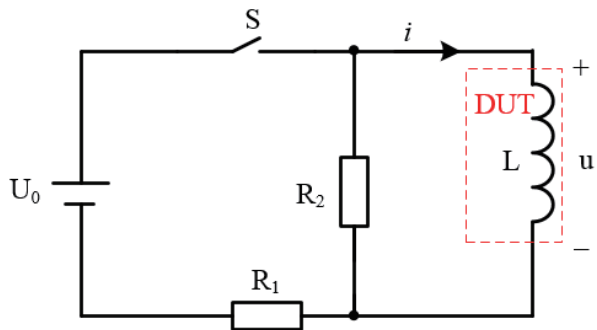


图 1 直流测量法测量磁芯磁化特性原理图

若被测磁性元件绕组匝数为 N , 横截面积为 A_e , 有效磁路为 l_e , 假设磁芯中无剩磁, 则:

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

$$H_{dc} = \frac{N \cdot I_{dc}}{l_e} \quad (2)$$

式中 I_{dc} 为磁性元件放电电流的初始值。测量不同的

B_{dc} 和 H_{dc} 得到的直流磁化曲线如图 2 所示^{[1][5][7]}。

幅值磁导率 μ_a 和增量磁导率 μ_{Δ} 表示为:

$$\mu_a = \frac{B_{dc}}{\mu_0 \cdot H_{dc}} \quad (3)$$

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B_{dc}}{\mu_0 \cdot \Delta H_{dc}} \quad (4)$$

其中 μ_0 是真空磁导率。图 2 所示磁化曲线的每一点都表征直流磁感应强度 B_{dc} 和磁化强度 H_{dc} , 因此直流测量法测量的磁化曲线是直流磁化曲线。

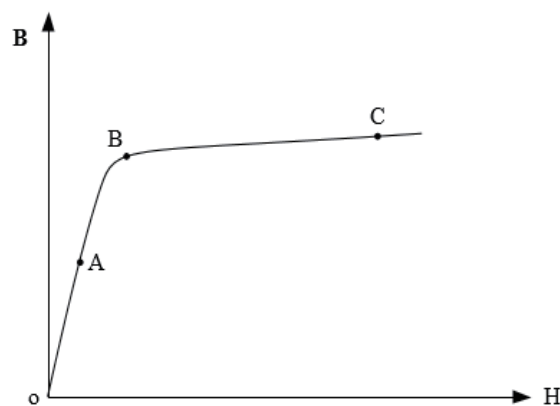


图 2 磁芯磁感应强度 B 与磁场强度 H 的 B-H 曲线

2.2 直流测量法误差分析

为了扣除磁性元件绕组损耗对测量的影响, 磁性元件采用双绕组绕制, 根据被测件 (DUT) 的等效模型^[4], 直流测量法实验原理图如图 3 所示。图 3 中 R_{copper} 为磁性元件绕组损耗等效电阻, R_{core} 为磁性元件磁心损耗等效电阻, 采样被测件 (DUT) 的副边开路感应电压 $u_2(t)$ 和原边励磁电流 $i(t)$, 通过公式分别计算 B_{dc} 和 H_{dc} 。

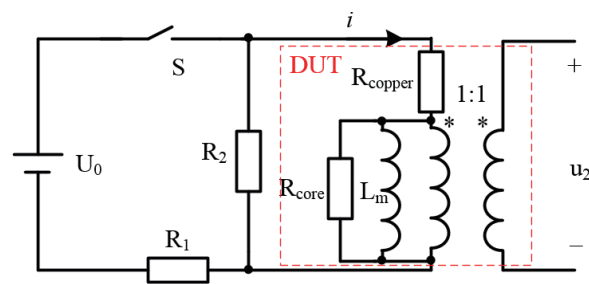


图 3 直流测量法实验原理图

开关 S 闭合和断开的等效电路图如图 4 所示，以 S 断开为例，假设在 $t=0$ 时刻开关断开，则：

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = i(0_-) = \frac{U_0}{R_1 + R_{copper}} = I_{dc} \quad (5)$$

电路中的电流和电压为：

$$i_L(t) = I_{dc} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

$$i_R(t) = -I_{dc} \cdot \frac{R_2 + R_{copper}}{R_2 + R_{copper} + R_{core}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

$$i(t) = i_L(t) + i_R(t) \quad (8)$$

因此：

$$i(0_+) = I_{dc} \cdot \left(\frac{R_{core}}{R_2 + R_{copper} + R_{core}} \right) \quad (9)$$

$$u_2(t) = \frac{-I_{dc} \cdot (R_2 + R_{copper}) \cdot R_{core}}{R_2 + R_{copper} + R_{core}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

其中 τ 为时间常数，单位为 s：

$$\tau = \frac{L_m}{(R_2 + R_{copper}) \cdot R_{core}} \quad (11)$$

高阻抗角磁粉芯磁芯损耗并联等效电阻 R_{core} 高达几千欧姆，远远大于放电电阻 R_2 与绕组损耗串联等效电阻 R_{copper} 的和，因此磁性元件的磁芯损耗对 $i(t)$ 和 $u_2(t)$ 测量结果的影响较小，不会影响 H_{dc} 和 B_{dc} 的测量结果。式和式可以简化为：

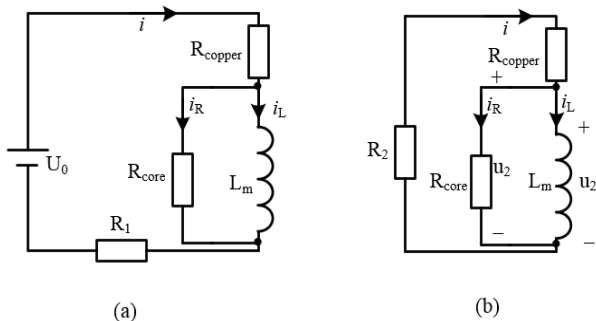


图 4 (a) 充电等效电路图 (b) 放电等效电路图

$$u_2(t) = -I_{dc} \cdot (R_2 + R_{copper}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

$$\tau = \frac{L_m}{R_2 + R_{copper}} \quad (13)$$

3 实验测试

按图 1 搭建直流测量法的测量回路，其中开关 S 采用手动开关，充电电阻 R_1 选用两个功率为 200W 的 1 电阻并联，放电电阻 R_2 选用功率为 200W 的 1 电阻。数据采集设备选择功率分析仪 PX8000，具有 12 位的 AD 转换精度和 100MS/s 的采样率。被测件选用铂科磁粉芯 NPF184090，具有高饱和磁通密度和出色的直流偏置特性。磁芯具体参数见表一。

表一 磁粉芯 NPF184090 参数

有效磁路长度 (cm)	横截面积 (cm ²)	原边绕组匝数	副边绕组匝数	计算电感值 (uH)	测量电感值 (uH)
10.74	1.990	36	36	271.6	276.86

改变直流源电压 U_0 ，测量电感原边电流 $i(t)$ 和副边电压 $u_2(t)$ ，通过公式和可以计算幅值磁导率 $\mu_a=97.5$ ， $\mu\Delta=93.4$ 。

实验测量过程中，采集电压电流的变化过程越精确，后期数据处理的过程就越精确。对于采集的电压和电流波形，一般认为 4 倍时间常数 τ 后衰减结束，为精确捕捉电压电流的衰减过程，电压电流的变化时间不能小于数据采集设备最小上升时间 t_r 的 5 倍：

$$4 \cdot \tau > 5 \cdot t_r \quad (14)$$

本次实验时间常数 τ 为 271.5us，功率分析仪 PX8000 的上升时间 $t_r=18ns$ ，足以满足精确采集波形的要求。另外对于离散采样计算数值积分，采样时间步长越长，计算数值积分的截断误差就越大。如果选择梯形公式计算采样数据，那么其余项表达式为^[6]：

$$R_n = -\frac{4 \cdot \tau}{12} \cdot \Delta t^2 \cdot u_2''(\eta), \quad \eta \in (0, 4\tau) \quad (15)$$

其中 Δt 为采集设备的采样周期。若要求 $R_n < 0.001$ ，则 Δt 应小于 $8 \cdot 10^{-8}s$ ，时间常数 τ 应小于 2ms。因此对于本次实验，数字采集设备是满足精度要求的。

下转 150 页