

用示波法研究铁磁材料的磁化特性

铁、钴、镍等金属及其众多合金以及含铁的氧化物（铁氧体）被称为铁磁材料，在室温下其磁导率比空气的磁导率大几百倍甚至几千倍，即使处于较弱的磁场中，也会得到极高的磁化强度，即使当外磁场撤去后，某些铁磁材料仍可保持极强的磁性。铁磁材料因其特有的磁化性质，被广泛应用于生产和生活中，如扬声器里的永久磁铁、发电机和变压器的铁芯、电磁仪表的铁芯、存储音像的磁带等。

一、实验目的

- (1) 理解磁化曲线和磁滞回线的概念；
- (2) 测绘铁磁材料样品的基本磁化曲线和磁滞回线；
- (3) 根据磁滞回线确定铁磁材料的饱和磁感应强度、剩磁、和矫顽力等参数；
- (4) 比较两种铁磁物质的磁化特性不同。

二、实验仪器

磁滞回线实验仪、示波器。

三、实验原理

1. 起始磁化曲线

磁性物质内部的磁感应强度 B 和磁场强度 H 之间的关系为

$$B = \mu H \quad (1)$$

其中 μ 为磁介质的磁导率。对于铁磁材料， μ 不是一个常量，而是随 H 的改变而变化，即 B 与 H 之间的关系是非线性的。铁磁材料在未被磁化时的状态称为去磁状态，此时 $H=0$ ， $B=0$ 。这时若在铁磁材料上加一个由小到大的磁化场，则铁磁材料内部的磁场强度 H 与磁感应强度 B 也随之变大。在磁场强度 H 从零开始增加的初始阶段，磁感应强度 B 随之缓慢上升，如图 1 中 B - H 曲线的 Oa 段所示；继之 B 随 H 迅速增长，如 ab 段所示；其后 B 的增长又趋缓慢，并当 H 增至 H_m 时， B 几乎不再随 H 的增加而增加，此时磁化已达饱和，饱和值为 B_m 。如图 1 中 B - H 曲线所示，从未磁化到饱和磁化的这段磁化曲线 $Oabc$ 称为起

始磁化曲线，这个过程中 μ 的变化如图中 μ -H 曲线所示。

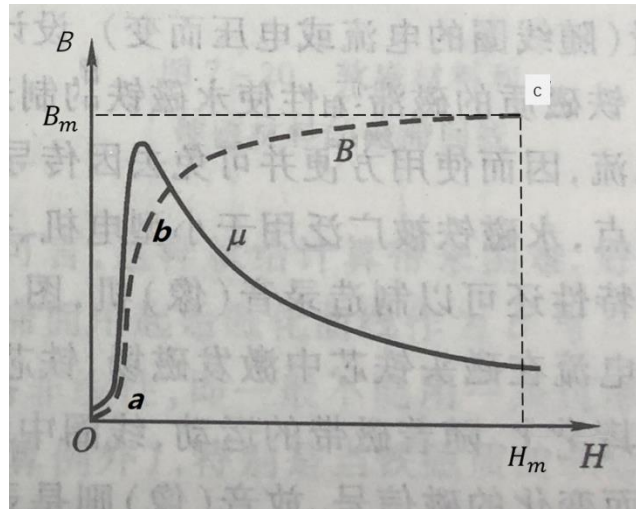


图 1 起始磁化曲线和 μ 与 H 的关系

2. 磁滞回线

铁磁材料达到磁化饱和后，当磁场从 H_m 逐渐减小至零，磁感应强度 B 并不沿起始磁化曲线恢复到“O”点，而是如图 2 所示，沿另一条新曲线 cd 下降， $H=0$ 时，磁感应强度仍然保持一定数值 B_r ，称为剩磁，此时铁磁体成为永久磁铁。若想把剩磁完全消除，需要施加一个反向磁场，当反向磁场从 0 逐渐增大到 $-H_c$ 时，磁感应强度 B 才会完全消失，这个过程称为退磁， de 段曲线称为退磁曲线， H_c 称为矫顽力，它的大小反映了铁磁材料保持剩磁状态的能力。此时进一步增大反向磁场，将使磁感应强度在相反方向达到饱和值 $-B_m$ ，如图 2 中 ef 段曲线所示。此时如果减小反向磁场 H ，磁感应强度 B 并不沿原来的曲线 fe 返回，而是沿下部的曲线 fg 上升，当 H 再次减小到 0 时，铁磁材料具有了反向剩磁 $-B_r$ 。之后从 0 正向增大磁场 H ，磁感应强度 B 将沿曲线 ghc 再次达到饱和磁感应强度 B_m ，这样磁化曲线就构成了一个闭合曲线。从图 2 可知，磁感应强度 B 的变化总是落后于磁场强度 H 的变化，这一现象称为磁滞，当磁场强度 H 按 $H_m \rightarrow 0 \rightarrow -H_c \rightarrow -H_m \rightarrow 0 \rightarrow H_c \rightarrow H_m$ 次序变化时，磁感应强度 B 相应地按照 $B_m \rightarrow B_r \rightarrow 0 \rightarrow -B_m \rightarrow -B_r \rightarrow 0 \rightarrow B_m$ 顺序变化，所形成的封闭曲线 $cdefghc$ 称为磁滞回线。

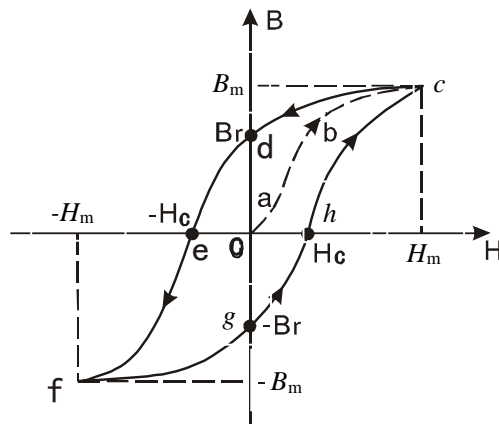


图 2 铁磁材料的磁滞回线

当铁磁材料处于交变磁场中时（如变压器中的铁芯），将沿磁滞回线反复被“磁化→去磁→反向磁化→反向去磁”，在此过程中要消耗额外的能量，并以热的形式从铁磁材料中释放，这种损耗称为磁滞损耗，磁滞损耗与磁滞回线所围的面积成正比。磁滞回线的大小和形状反映了铁磁材料的特性，图 3 为常见的两种典型的磁滞回线，其中软磁材料磁滞回线狭长，矫顽力、剩磁和磁滞损耗均较小，是制造变压器、电机、和交流磁铁的主要材料，而硬磁材料磁滞回线较宽，矫顽力大，剩磁强，适宜于制造永磁体。

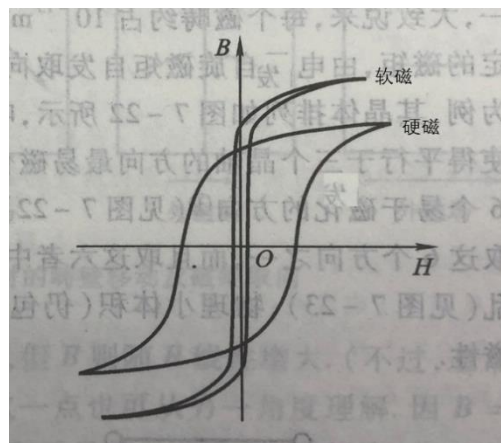


图 3 软磁材料和硬磁材料的磁滞回线

3. 退磁

将铁磁体处于交变磁场中，从初始状态 $H=0$ 和 $B=0$ 开始，由弱到强地单调增加磁场强度幅值过程中，可以得到面积由小到大的一系列磁滞回线，如图 4 所示，这些磁滞回线顶点的连线称为铁磁材料的基本磁化曲线。当磁场强度大小达到 H_m 时，将得到最大面积的磁滞

回线，称为饱和磁滞回线。此后即使再增大磁场强度，只是迟滞回线端点收缩成的直线向两边延长，回线面积基本不再增加。

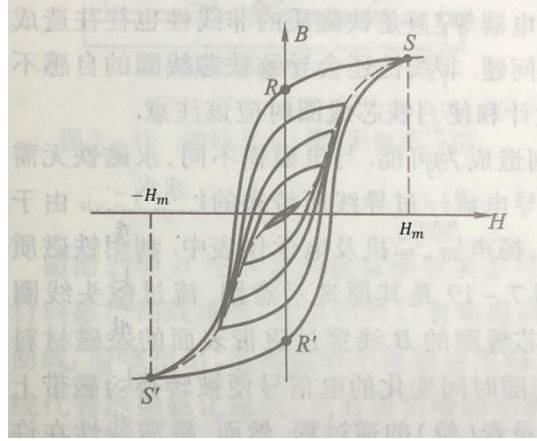


图 4 增大交流磁场幅值得到的一系列磁滞回线

由于铁磁材料磁化过程的不可逆性及具有剩磁的特点，在测定基本磁化曲线和磁滞回线时，首先必须将铁磁材料预先退磁，以保证所测得的基本磁化曲线都是由原始状态（ $H=0$ ， $B=0$ ）开始，材料的磁特性可以复现。

从图 4 所示增大交流磁场幅值可以得到的一系列面积逐渐增大的磁滞回线得到启示，如果使铁磁材料在幅值足够大的交流磁场中磁化达到磁饱和，然后逐渐减少磁化电流，直到为 0，则该材料的磁化过程中就是一连串面积逐渐缩小而最终趋于原点的环状曲线，从而实现当 H 减小到 0 时， B 亦同时降为 0，达到完全退磁的目的。

4. 用示波法观察磁滞回线的原理

观察和测量磁滞回线和基本磁化曲线的线路如图 5 所示。

待测样品为 EI 型铁芯， N_1 为励磁绕组， N_2 为用来测量磁感应强度 B 而设置的绕组。 R_1 为励磁电流取样电阻，设加在 N_1 两端的交流电压为 U_H ，通过 N_1 的交流励磁电流为 i_1 ，则

$$i_1 = \frac{U_H}{R_1} \quad (2)$$

根据安培环路定律，样品的磁化场强

$$H = \frac{N_1 \cdot i_1}{L} = \frac{N_1}{LR_1} \cdot U_H \quad (3)$$

其中 L 为样品的平均磁路长度，式中 N_1 、 L 、 R_1 均为已知量，所以知道了 U_H 即可确定 H 。

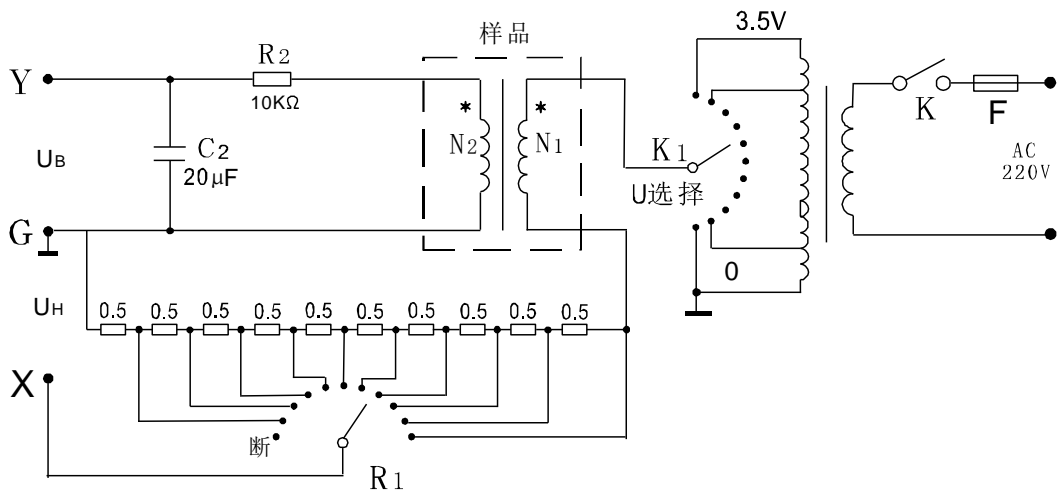


图 5 用示波器观察磁滞回线的电路图

在交变磁场下，样品的磁感应强度瞬时值 B 是由测量绕组和 R_2C_2 电路确定的，根据法拉第电磁感定律，由于样品中的磁通 φ 的变化，在测量线圈中产生的感生电动势的大小为

$$\varepsilon_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{1}{N_2} \int \varepsilon_2 dt \quad (5)$$

$$B = \frac{\varphi}{S} = \frac{1}{N_2 S} \int \varepsilon_2 dt \quad (6)$$

其中 S 为样品的截面积。

如果忽略自感电动势和电路损耗，则回路方程为

$$\varepsilon_2 = i_2 R_2 + U_B \quad (7)$$

式中 i_2 为感生电流， U_B 为积分电容 C_2 两端电压。设在 Δt 时间内， i_2 向电容 C_2 充电的电荷量为 Q ，则

$$U_B = \frac{Q}{C_2} \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = i_2 R_2 + \frac{Q}{C_2} \quad (9)$$

如果选取足够大的 R_2 和 C_2 使 $i_2 R_2 \gg Q/C_2$ ，则

$$\varepsilon_2 = i_2 R_2 \quad (10)$$

$$\text{又因} \quad i_2 = \frac{dQ}{dt} = C_2 \frac{dU_B}{dt} \quad (11)$$

$$\text{所以} \quad \varepsilon_2 = C_2 R_2 \frac{dU_B}{dt} \quad (12)$$

由 (6) 和 (12) 两式可得

$$B = \frac{C_2 R_2}{N_2 S} U_B \quad (13)$$

式中 C_2 、 R_2 、 N_2 和 S 均为已知量，所以测定 U_B 就可得到 B 。

由式 (3) 和 (13) 可知样品中的 $H \propto U_H$ ， $B \propto U_B$ ，所以如果将 U_H 和 U_B 输出分别加到示波器的“X 输入”和“Y 输入”端，在交流电压 U_H 作用下，便可观察到样品的 B-H 曲线形状，并可用示波器测出 U_H 和 U_B 大小，进而根据公式计算出 B 和 H ，得到样品的动态磁滞回线。用该方法，还可得到饱和磁感应强度 B_m 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 、磁滞损耗 W_{BH} 以及磁导率 μ 等参数。

四、仪器介绍

磁滞回线实验仪主要包括励磁电源、样品、实验面板和其他元器件等。变压器对 220V、50Hz 市电进行隔离、降压后，作为样品的磁化电压 U_H ，共分 11 档，即 0、0.5、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4、2.7、3.0 和 3.5V，通过波段开关可选择不同的磁化电压。样品 1 和样品 2 均采用 EI 型铁芯，其尺寸相同，但磁导率不同，磁滞损耗不同。样品 1 和样品 2 的测量绕组匝数相同，励磁绕组匝数不同。实验面板上有样品 1、样品 2、励磁电源、励磁电流的取样电阻 R_1 、以及为测量磁感应强度 B 所设定的积分电路元件 R_2 、 C_2 等元件的连接插孔，需用专用导线连后进行实验。面板左侧还有 U_B 、 U_H 的 BNC 输出插孔，用来连接示波器观察磁滞回线或用交流毫伏表进行测量。

五、实验内容与步骤

1. 测量前准备

将样品 1 作为测量对象，按图 5 所示的电路图连接线路，并令 $R_1=5\Omega$ ，“U 选择”置于 0V 位置。 U_H 和 U_B 分别用 BNC 信号线接示波器的“CH1 输入”和“CH2 输入”。

打开示波器电源，设置示波器工作模式为“X-Y 模式”，“CH1 输入”为 AC 方式，“CH2 输入”为 DC 方式。

打开实验仪电源，对样品进行退磁，即顺时针方向转动“U 选择”旋钮，令 U 从 0V 增至 3.5V，同时在示波器上观察磁滞回线不断扩大，到最后大小几乎不再增加。此时分别调节示波器两通道的灵敏度，使磁滞回线尽可能占满显示屏的大部分空间。然后逆时针方向转动旋钮，将 U 从最大值降为 0，同时在示波器上观察磁滞回线不断缩小，直至最终缩为一个点，即完成了退磁准备，样品原有的剩磁已被消除，此时样品处于磁中性状态，即样品内 $H=0$ ， $B=0$ 。调节示波器 CH1 和 CH2 两通道光标位移旋钮，使光点处于显示屏中心。

2. 测量基本磁化曲线

从 $U=0V$ 开始，逐档提高励磁电压，直到 3.5V，将在示波器显示屏上得到面积由小到一个套一个的一系列磁滞回线，记录每一档励磁电压下磁滞回线顶点在显示屏上 X 轴和 Y 轴的格数，填入表 1 中。

表 1 测量基本磁化曲线数据记录表

$R_1=5\Omega$ ，CH1 灵敏度=_____，CH2 灵敏度=_____

U/V	0	0.5	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.5
X/格											
Y/格											

3. 测量磁滞回线

将 U 从 3.5V 调为 3V，调节示波器两通道的灵敏度，使磁滞回线尽可能占满显示屏的大部分空间，读取完整的迟滞回线上包括两端点在内的不少于 36 个点的坐标，填入表 2 中。

表 2 测量磁滞回线数据记录表

$R_1=5\Omega$ ， $U=3V$ ，CH1 灵敏度=_____，CH2 灵敏度=_____

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	……
X/格											
Y/格											

4. 换样品 2，重复进行上述测量。

六、数据处理与分析

1. 已知 $R_2=10k\Omega$ ， $C_2=20\mu F$ ，样品 1 和样品 2 的平均磁路长度 $L=75mm$ ，截面积 $S=120$

mm^2 ，样品 1 和样品 2 的测量绕组匝数均为 $N_2=200$ ，样品 1 的励磁绕组匝数 $N_1=60$ ，样品 2 的匝数 $N_1=90$ 。由表 1 中基本磁化曲线测量数据，根据式 (3) 和 (13)，计算得出施加不同磁化强度 H 时相应的磁感应强度 B ，做样品 1 和样品 2 的基本磁化曲线图。

2. 由表 2 中磁滞回线测量数据，用同样方法计算得出各个数据点的 H 值和 B 值，做励磁电压为 3V 时样品 1 和样品 2 的磁滞回线图。

3. 由样品 1 和样品 2 的磁滞回线图，求得相应的饱和磁感应强度 B_m ，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 等参数，并通过估算曲线的面积求得磁滞损耗 W_{BH} 。

4. 从式 (1) 得 $\mu = B/H$ ，由基本磁化曲线图，做样品 1 和样品 2 的磁导率随磁场变化的 μ - H 图。

5. 由前面的数据处理结果，比较样品 1 和样品 2 的磁化特性不同。

七、经验提示

1. 注意事项

(1) 在开始实验测量前，应先对样品进行退磁处理。

(2) 测量基本磁化曲线和磁滞回线时，调节励磁电压增加或减小应单调变化。

(3) 电容 C_2 和励磁电压 U 的一端已经与地相连，所以不能与其他接线端相连接，否则会造成元件短路。

2. 关键环节

本实验的关键环节是确保正确连接测量线路。

3. 常见问题

(1) 磁滞回线顶部出现编织状的小环。可能原因：①示波器通道输入模式设置不正确；② R_1 值选择不合适；③励磁电压 U 过高。

(2) 观察不到磁滞回线。可能原因：①线路连接错误；②示波器灵敏度过大或过小。

4. 易犯错误

(1) 退磁完成后，没有将示波器光点调至中心。

(2) 示波器输入通道灵敏度选择不合适，得到的磁滞回线面积过小，影响测量精度。

八、实验思想方法精髓

当实验中需要给出一个物理量随另一个物理量的变化图像时，逐个数据点进行测量并再

进行作图是一个基本的方法，但当自变量是一个周期性变化的电压，或者可以转化为一个周期性变化的电压，因变量也可以用电压变化来代表，这时可以采用示波法，将自变量对应的电压信号输入到示波器的 X 通道，因变量对应的电压变化输入到示波器的 Y 通道，采用“X-Y 模式”显示，则可以在示波器显示屏上直接得到两个物理量的变化关系图像，快速而又直观，这一实验方法在弗兰克-赫兹实验中观察板极电流随加速电压的变化，在冉绍尔-汤森效应实验中观察板极电流和屏极电流随加速电压的变化中都有用到。

九、思考题

1. 实验测量前为什么要将样品先进行退磁？
2. 起始磁化曲线与基本磁化曲线有什么不同？

十、深入探究

1. 本实验中励磁电压使用的是正弦波交流电压，如果采用其他波形的交流电压，对结果会有什么影响？

参考资料：何森,张旭峰,姜卫,曹美珍,高永全.用三角波电流励磁改进交流磁滞回线实验[J].大学物理实验,2014,27(01):62-64.

2. 对于用示波法测量磁滞回线，应该如何评价测量结果的不确定度？

参考资料：王建中,黄林,王应辉,熊水兵.动态磁滞回线实验的不确定度评定[J].大学物理实验,2010,23(04):83-86.

铁磁材料的磁化特性研究原始数据

姓名: _____ 学号: _____ 班号: _____ 教师姓名: _____

实验时间: _____年____月____日 (☐上午 ☐下午 ☐晚上)

1. 测量样品 1 基本磁化曲线

实验条件: $R_1=5\Omega$, CH1 灵敏度=_____, CH2 灵敏度=_____

[illegible]

2. 测量样品 1 磁滞回线

实验条件: $R_1=5\Omega$, $U=3V$, CH1 灵敏度=_____, CH2 灵敏度=_____

[illegible][illegible][illegible]

3. 测量样品 2 基本磁化曲线

实验条件: $R_1=5\Omega$, CH1 灵敏度=_____, CH2 灵敏度=_____

[illegible]

4. 测量样品 2 磁滞回线

实验条件: $R_1=5\Omega$, $U=3V$, CH1 灵敏度=_____, CH2 灵敏度=_____

[illegible][illegible][illegible]