

八 观测铁磁材料的磁滞回线

【实验简介】

磁性材料应用广泛，从常用的永久磁铁、变压器的铁芯到录音、录像、计算机存储用的磁带、磁盘等都采用磁性材料。铁磁材料是最常见和最常用的磁性材料。它分为硬磁和软磁两大类，其根本区别在于矫顽力的大小不同。硬磁材料的剩磁和矫顽力大，因而磁化后，其磁感应强度可长久保持，适宜做永久磁铁。软磁材料的矫顽力小，但磁导率和饱和磁感应强度大，容易磁化和去磁，故广泛用于电机、变压器、电器和仪表制造等工业部门。磁滞回线和磁化曲线反映了铁磁材料的主要特征。本实验将对铁磁材料的动态磁滞回线和（准）静态磁滞回线进行测量。

【实验目的】

1. 掌握利用示波器测量铁磁材料动态磁滞回线的方法；
2. 掌握利用霍尔传感器测量铁磁材料（准）静态磁滞回线的方法；
3. 了解铁磁性材料的磁化特性；
4. 了解磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念，加深对饱和磁化强度、剩余磁化强度、矫顽力等物理量的理解。

【实验仪器与用具】

1、磁特性综合测量实验仪（包括正弦波信号源，待测样品及绕组，积分电路所用的电阻和电容）。双踪示波器，直流电源，电感，数字多用表。

磁特性综合测量实验仪主要技术指标如下：

1) 样品 1：锰锌铁氧体，圆形罗兰环，磁滞损耗较小。平均磁路长度 $l=0.130\text{ m}$ ，铁芯实验样品截面积 $S=1.24\times 10^{-4}\text{ m}^2$ ，线圈匝数： $N_1=150$ 匝， $N_2=150$ 匝； $N_3=150$ 匝。

2) 样品 2：EI 型硅钢片，磁滞损耗较大。平均磁路长度 $l=0.075\text{ m}$ ，铁芯实验样品截面积 $S=1.20\times 10^{-4}\text{ m}^2$ ，线圈匝数： $N_1=150$ 匝， $N_2=150$ 匝； $N_3=150$ 匝。

3) 信号源的频率在 $20\sim 200\text{ Hz}$ 间可调；可调标准电阻 R_1 、 R_2 均为无感交流电阻， R_1 的

调节范围为 $0.1 \sim 11 \Omega$; R_2 的调节范围为 $1 \sim 110 \text{ k}\Omega$ 。标准电容有 $0.1 \mu\text{F} \sim 11 \mu\text{F}$ 可选。

2、磁性材料磁滞回线和磁化曲线测定仪（包括数字式特斯拉计、恒流源、磁性材料样品、磁化线圈、双刀双掷开关、霍耳探头移动架、双叉头连接线、箱式实验平台）。

其主要技术指标如下：

- 1) 数字式特斯拉计：四位半 LED 显示，量程 2.000T ；分辨率 0.1mT ；带霍耳探头。
- 2) 恒流源：四位半 LED 显示，可调恒定电流 $0\text{--}600.0\text{mA}$ 。
- 3) 磁性材料样品：条状矩形结构，截面长 2.00cm ；宽 2.00cm ；隔隙 2.00mm ；平均磁路长度 $\bar{l} = 0.240\text{cm}$ （样品与固定螺丝为同种材料）。
- 4) 磁化线圈总匝数 $N=2000$ 。

【实验原理】

1. 铁磁材料的磁化特性

把物体放在外磁场 H 中，物体就会被磁化。其内部产生磁场。设其内部磁化强度为 M ，磁感应强度为 B ，可以定义磁化率 χ_m 和相对磁导率 μ_r 表示物质被磁化的难易程度：

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$
$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$

其中， μ_0 是真空磁导率（ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ）。由于 $B = \mu_0(M + H)$ ，因此 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 。物质的磁性按磁化率可以分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三种。抗磁性物质的磁化率为负值，通常在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 的量级，且几乎不随温度变化；顺磁性物质的磁化率通常为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 之间，且随温度线性增大；而铁磁性物质的磁化率通常大于 1，且随温度增高而变小。铁磁性材料主要是铁、钴、镍及他们的合金和氧化物，以及稀土与过渡族元素组成的合金等。由于铁磁材料的磁导率很高，常被用作电感、电磁铁、变压器的铁芯材料，以增大线圈中的磁通量。

除了磁导率高以外，铁磁材料还具有特殊的磁化规律。对于一个处于磁中性状态（ $H = 0$ ，且 $B = 0$ ）的铁磁材料加上由小变大的磁场 H 进行磁化时，磁感应强度 B 随 H 的变化曲线称为起始磁化曲线，它大致分为三个阶段：（1）可逆磁化阶段，当 H 很小时， B 随 H 变化可逆，见图 1 中的 OA 段，若减小 H ， B 会沿 AO 返回至原点；（2）不可逆磁化阶段，见图 1 中 AS 段，若减小 H ， B 不会沿 SA 返回（比如当磁场从 D 点的 H_D 减小到 $H_D - \Delta H$ ，再从 $H_D - \Delta H$ 增

大到 H_D ， $B-H$ 轨迹会是图中点线所示的回线样式)；(3) 饱和磁化阶段，见图 1 中 SC 段，在 S 点材料已经被磁化至饱和状态，继续增大 H ，磁化强度 M 不再增大，由于 $B = \mu_0(M + H)$ ， B 会随 H 线性增大，但增量极小。图中 H_S 和 B_S 表示 M 刚刚达到饱和值时的 H 和 B 的值，分别称为饱和磁场强度和饱和磁感应强度。

如果将铁磁材料磁化到饱和状态（图 1 中 S 点）后再减小磁场 H ，那么磁感应强度 B 会随 H 减小而减小，但并不沿起始磁化曲线 SAO 减小，而是沿着 SP 这条更缓慢的曲线减小。当 H 减小到 0 时， B 并不为 0， H 称为矫顽力 H_C 。当反向磁场达到 $-H_S$ ，铁磁材料达到反向饱和磁化状态 S' 。而若 H 从反向饱和值 $-H_S$ 变到 0，再增大至正向饱和值 H_S 时， B 会沿曲线 $S'P'Q'S$ 返回至正向饱和值 B_S 。曲线 $S'P'Q'S$ 与 $SPQS'$ 以原点 O 成中心对称，它们形成的闭合曲线 $SPQS'P'Q'S$ 叫做饱和磁滞回线。饱和磁滞回线反映了磁化场由 H_S 变到 $-H_S$ 再变回到 H_S 往复一周的变化过程中， B 随 H 的往复变化情况。

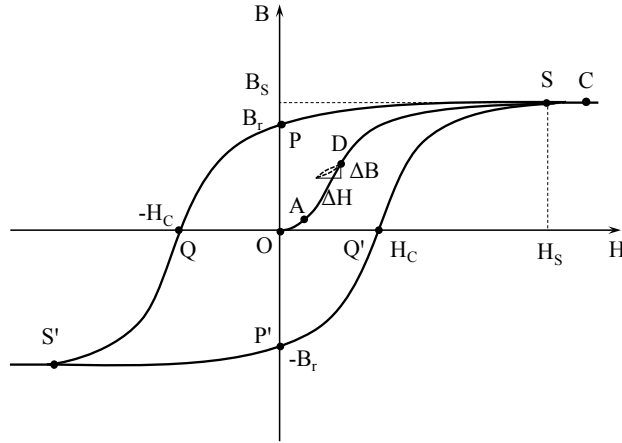


图 1 铁磁材料的起始磁化曲线和饱和磁滞回线示意图

由于铁磁材料加上磁场 H 后产生的 B 不仅与 H 有关，也与磁化历史有关，所以在研究铁磁材料的起始磁化性质时，通常先对铁磁材料进行退磁处理，使之达到磁中性状态，一种较为简便易行的方法是交流退磁。具体做法是，对材料加交变磁化场，先用大幅度励磁电流使它饱和磁化，再在不断改变磁场方向的过程中逐渐减小励磁电流幅度至 0 使它退磁。

如果磁场在任意 $[-H_m, H_m]$ 范围内作循环变化，那么 B 也会做循环变化，形成一个闭合的磁滞回线。磁滞回线的面积对应于循环磁化一周所发生的能量损耗。对材料进行准静态磁化时，损耗来自于磁滞损耗。对材料进行交流动态磁化时，除了有磁滞损耗外，还会有涡流损耗和剩余损耗。一般由金属和合金所组成的金属磁性材料电阻率低，在高频磁化时其涡流损耗大，而由金属氧化物组成的铁氧体磁性材料电阻率高，高频条件下其涡流损耗很小。

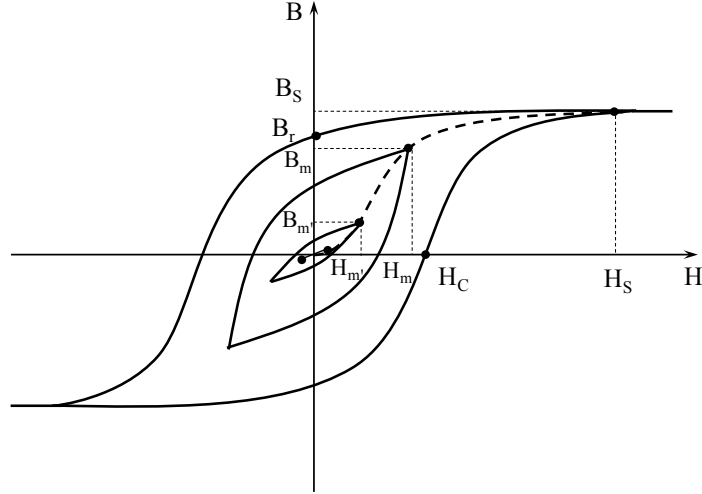


图 2 铁磁材料的动态磁滞回线和动态磁化曲线示意图

动态磁滞回线形状与磁化场频率和幅度都有关。在同一频率下，交变磁场幅度不同时，动态磁滞回线也会不同。将磁场幅值从 0 增到 H_s ，这些动态磁滞回线的顶点 (H_m, B_m) 的连线称为动态磁化曲线（见图 2）。在这条线上任意一点的 B_m 和对应 H_m 的比值 $\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$ 称为振幅磁导率。对于工作在幅度较大的交变磁场下的电感铁芯，比如变压器铁芯，振幅磁导率是衡量其性能的一个重要指标。

当交流磁化场幅度很小时，铁磁材料的磁化过程是可逆的，磁滞回线退化成一条斜线（见图 2 中原点附近的小线段）。对于没有直流偏置磁场的情况，这个过程对应于起始磁化曲线起始的可逆阶段（图 1 中的 OA 段），可以定义起始磁导率为 $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{\mu_0 H}$ ，它表征了起始可逆磁化阶段的磁化性能。用于弱磁场中的材料，例如通讯器件上应用的软磁材料，其磁化性能主要由 μ_i 来表征。

有的电感铁芯工作在既有直流偏置又有交流弱磁场的情况下，比如在图 1 中的 D 点附近以弱交变磁场循环磁化，当磁场足够弱时回线会退化成一条斜线，此时，交流弱磁场引起的磁感应强度变化 ΔB 与磁场强度变化值 ΔH （ ΔH 趋于 0）之比决定了电感性能，相关的磁导率称为可逆磁导率，定义为 $\mu_R = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}$ 。直流偏置磁场可以影响 μ_R 的大小，这一原理被应用在磁放大器的设计中。

2. 动态磁滞回线的测量

测量动态磁滞回线的原理电路如图 3 所示。

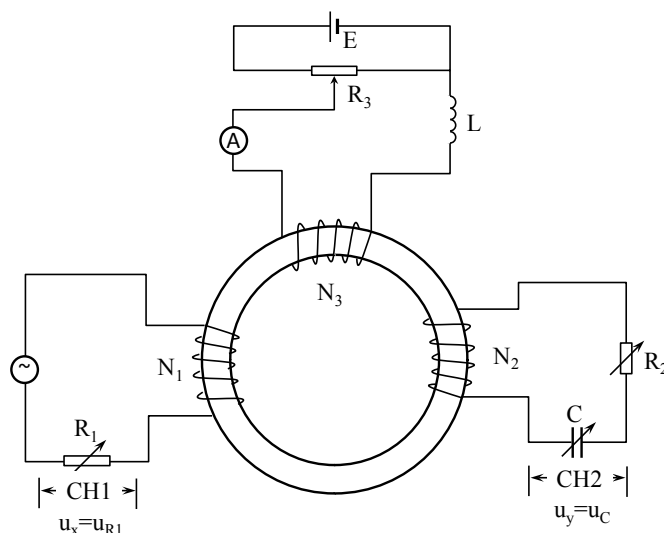


图 3 用示波器测量动态磁滞回线电路图

环形铁芯上绕有三组线圈，线圈 1 为交流励磁线圈，线圈 2 为感应线圈，线圈 3 为直流励磁线圈。线圈 1 接交流正弦信号源，根据安培环路定理，磁场强度正比于线圈中的电流，因此也正比于电阻 R_1 上的电压 u_{R_1} 。线圈 2 接 RC 积分电路，磁感应强度正比于线圈 2 上感应电压 u_2 的时间积分，因此也正比于积分电容 C 上的电压 u_C 。将 u_{R_1} 和 u_C 从示波器两通道输入，在示波器 X-Y 显示模式下，就可以看到动态磁滞回线。测有直流偏置磁场下的可逆磁导率时，需要将线圈 3 接直流电源，用电表测量电流计算磁场强度，要能有效调节励磁电流；为了减小交流磁场在线圈 3 中产生的感应信号对直流稳定性的影响，需要在回路中串入一只大电感 L 。

交流磁场强度 H 的测量原理。由安培环路定理，磁场强度 H 正比于励磁电流 i_1 ：

$$H = \frac{N_1}{l} i_1$$

其中 N_1 是线圈 1 的匝数， l 是磁环的等效磁路长度。由于 $i_1 = u_{R_1} / R_1$ ，因此 H 也与 u_{R_1} 成正比

$$H = \frac{N_1}{l R_1} u_{R_1} \quad (1)$$

交流磁感应强度 B 的测量原理。由法拉第电磁感应定律，线圈 2 上的感应电压 u_2 来源于线圈 2 中的全磁通的变化

$$u_2 = -\frac{N_2 d\Phi}{dt} = -\frac{N_2 S dB}{dt}$$

其中 N_2 是线圈 2 的匝数， Φ 是单匝线圈中的磁通量， S 是单匝线圈环绕的面积（对绕在磁芯上的线圈相当于磁芯的横截面积）。如果 $R_2 C \gg T$ （ T 是外磁场周期），那么电容 C 上的电压远小于总电压 u_2 ，电阻 R_2 上的电压 u_{R_2} 近似等于总电压 u_2 ，电容 C 上的电压为：

$$u_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{CR_2} \int u_{R_2} dt \approx \frac{1}{CR_2} \int u_2 dt$$

其中 Q 是电容器极板上的电荷量， i_2 是线圈 2 中的电流。交流磁感应强度 B 正比于 u_C

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} u_C \quad (2)$$

3 （准）静态磁化曲线和磁滞回线的测量

如果对绕上磁化线圈的铁磁材料样品施加直流激励，便会在样品中产生稳定的磁场。当直流激励的大小发生变化， H 与 B 也随之改变，形成磁化曲线和磁滞回线。如果在样品的磁路中开一极窄均匀气隙，在对磁化线圈中的磁化电流最大值 I_m 磁锻炼的基础上，对应每个磁化电流 I_k 值，用数字式特斯拉计，测量气隙均匀磁场区中间部位的磁感应强度 B ，便能得到该磁性材料的磁滞回线。如图 4 左图中的 $ARA'R'A$ ，组成的曲线为磁滞回线， OA 曲线为材料的初始磁化曲线。对于一定大小的回线，磁化电流最大值设为 I_m ，对于每个不同的 I_k 值，使样品反复的磁化，可以得到一族磁滞回线，如图 4 右图所示。把每个磁滞回线的顶点以及坐标原点 O 连接起来，得到的曲线称基本磁化曲线。

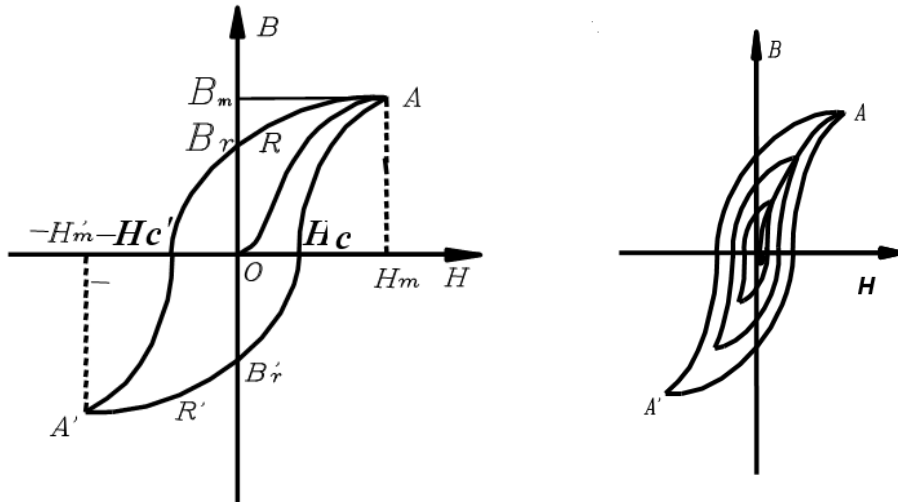


图 4 （左）磁化曲线和磁滞回线，（右）基本磁化曲线。

用霍尔传感器测量（准）静态磁滞回线的原理电路如图 5 所示。条状矩形结构待测材料的磁化线圈与直流稳流电源相连，利用电流表可以读出磁化电流的大小，在材料的缝隙中插入霍尔传感器，并与数字式特斯拉仪连接，从数字式特斯拉仪可以获得测试点 B 的大小，换向开关可以改变材料中电流的方向，从而改变 H 的方向。

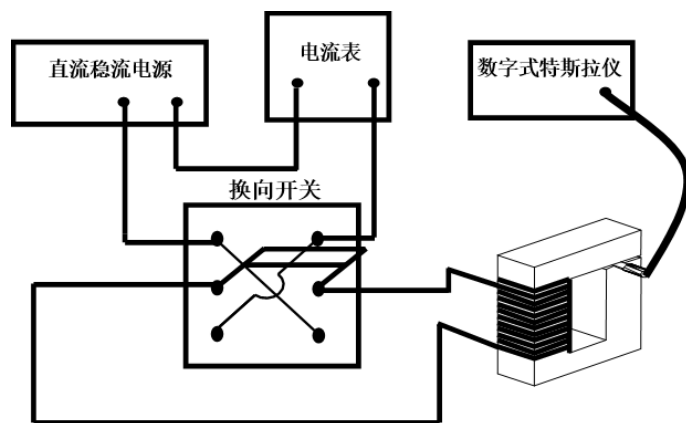


图 5 磁滞回线和磁化曲线测量装置

测量初始磁化曲线或基本磁化曲线都必须由原始状态 $H = 0$ ， $B = 0$ 开始，因此测量前必须对待测量样品进行退磁，以消除剩磁。为了得到一个对称而稳定的磁滞回线，必须对样品进行反复磁化，即“磁锻炼”。这可以采取保持最大磁化电流大小不变，利用电路中的换向开关使电流方向不断改变。在环形样品的磁化线圈中通过的电流为 I ，则磁化场的磁场强度 H 为

$$H = \frac{N}{\bar{l}} I \quad (3)$$

N 为磁化线圈的匝数， \bar{l} 为样品平均磁路长度， H 的单位为 A/m

为了从间隙中间部位测得样品的磁感应强度 B 值，根据一般经验，截面方形样品的长和宽的线度应大于或等于间隙宽度 8—10 倍，且铁芯的平均磁路长度 \bar{l} 远大于间隙宽度 ℓ_g ，这样才能保证间隙中有一个较大区域的磁场是均匀的，测到的磁感应强度 B 的值，才能真正代表样品中磁场在中间部位实际值。

在实际测量中，由于缝隙的存在，往往需要对 (3) 式计算出的 H 进行修正。若铁芯磁路中有一个小平行间隙 ℓ_g ，铁芯中平均磁路长度为 $\bar{\ell}$ ，而铁芯线圈匝数为 N ，通过电流为 I ，那么由安培回路定律：

$$H\bar{\ell} + H_g\ell_g = NI \quad (4)$$

(4) 式中， H_g 为间隙中的磁场强度。一般来说，铁芯中的磁感应强度不同于缝隙中的磁感应强度。但是在缝很窄的情况下，即正方形铁芯截面的长和宽 $\gg \ell_g$ ，且铁芯中平均磁路长度 $\bar{\ell} \gg \ell_g$ 情况，此时

$$B_g \cdot S_g = BS \quad (5)$$

(5) 式中 S_g 是缝隙中磁路截面, S 为铁芯中磁路截面, 在上述条件下, $S_g \approx S$, 所以 $B = B_g$ 。

即霍尔传感器在间隙中间部位测出的磁感应强度 B_g , 就是铁芯中间部位磁感应强度 B 。又在缝隙中

$$B_g = \mu_0 \mu_r H_g \quad (6)$$

(6) 式中, μ_0 为真空磁导率, μ_r 为相对磁导率, 在间隙中, $\mu_r = 1$ 。所以 $H_g = B / \mu_0$, 这样, 铁芯中磁场强度 H 与铁芯中磁感应强度 B 及线圈安培匝数 NI 满足:

$$H\bar{\ell} + \frac{1}{\mu_0} B\ell_g = NI \quad (7)$$

在实际科研测量时, 应使待测样品满足 $H\bar{\ell} \gg \frac{1}{\mu_0} B\ell_g$ 条件, 即线圈的安培匝数 NI 保持

不变时, 平均磁路总长度 $\bar{\ell}$ 须足够大, 间隙 ℓ_g 尽可能小, 这样, $H\bar{\ell} \approx NI$ 。如果 $\frac{1}{\mu_0} B\ell_g$ 对

$H\bar{\ell}$ 不可忽略时, 可利用 (7) 式对磁化曲线中的 H 值进行修正, 得出 H 值准确的结果。

【实验内容】

第一部分 用示波器观测动态磁滞回线

1. 观测样品 1 (铁氧体) 的饱和动态磁滞回线

(1) 测量频率 $f=100$ Hz 时的饱和磁滞回线。取 $R_1=2.0 \Omega$, $R_2=50 \text{ k}\Omega$, $C=10.0 \mu\text{F}$ 。示波器选择 X-Y 模式。调节励磁电流大小及示波器的垂直、水平位移旋钮, 在示波器显示屏上调出一个相对于坐标原点对称的饱和磁滞回线。测量并画出饱和磁滞回线的 $B-H$ 图。上下半支各选取 9 个以上的测量点。测量 B_S , B_r , H_C 。可通过示波器光标 (cursor) 来读数。

(2) 保持信号源幅度不变, 在仪器频率可调范围内, 观测不同频率时的饱和磁滞回线。用不同频率时, 磁滞回线有何变化? 为什么? 保持 R_1 , R_2C 不变, 测量并比较 $f=95$ Hz 和 150 Hz 时的 B_r 和 H_C 。

(3) 在频率 $f=50$ Hz 下, 比较不同积分常量取值对李萨如图的影响。固定励磁电流幅度 $I_m=0.1 \text{ A}$, $R_1=2.0 \Omega$, 改变积分常量 R_2C 。调节 R_2C 分别为 0.01 s、0.05 s、0.5 s, 观察并粗

略画出不同积分常量下 $u_{R_1} - u_C$ 李萨如图形的示意图。请思考为什么积分常量会影响 $u_{R_1} - u_C$ 李萨如图形的形状？积分常量是否会影响真实的 $B-H$ 磁滞回线的形状？

2. 测量样品 1（铁氧体）的动态磁滞回线。（测量前需要对样品进行退磁。）

(1) 在 $f=100\text{ Hz}$ 时，调出不同幅度的动态磁滞回线，测量并画出动态磁化曲线。取 $R_1=2.0\ \Omega$ ， $R_2=50\text{ k}\Omega$ ， $C=10.0\ \mu\text{F}$ 。磁场幅度 H_m 从 0 到 H_s 单调增加，要求至少 20 个测量点。

(2) 根据测量数据计算并画出 $\mu_m - H_m$ 曲线。

(3) 测定起始磁导率 μ_i 。

3. 观察不同频率下样品 2（硅钢）的动态磁滞回线。

取 $R_1=2.0\ \Omega$ ， $R_2=50\text{ k}\Omega$ ， $C=10.0\ \mu\text{F}$ 。在给定交变磁场幅度 $H_m=400\text{ A/m}$ 下，测量 $f=20\text{ Hz}$ ， 40 Hz ， 60 Hz 的 B_m ， B_r ， H_C 。

***4. 测量样品 1（铁氧体）在不同直流偏置磁场 H 下的可逆磁导率。**（测量前需要先对样品进行退磁。）

交流磁场频率取 $f=100\text{ Hz}$ 。电路参数设置为： $R_1=2.0\ \Omega$ ， $R_2=20\text{ k}\Omega$ ， $C=2.0\ \mu\text{F}$ 。直流偏置磁场必须从 0 到 H_s 单调增加。测量时，为保证精度，需调交流信号源幅度使交流磁场 ΔH 足够小，并调节示波器，使李萨如图充分放大，以观测磁化是否可逆。画出 $\mu_R - H$ 曲线（至少 10 个点）。

第二部分 用霍尔传感器测量铁磁材料（准）静态磁滞回线

1. 测量模具钢样品的起始磁化曲线

1) 选择合适的电流与磁感应强度 B ，用数字式特斯拉计测量样品间隙中剩磁的磁感应强度 B 与位置 X 的关系， X 从 -10 mm 到 10 mm ，间隔 1 mm 测一组数据，求得间隙中磁感应强度 B 的均匀区范围 ΔX 值，将霍尔传感器放在测出的均匀区的中央。

2) 对样品进行退磁处理。其方法是利用双刀开关使磁化电流不断反向，且幅值由最大值逐渐减小至零，最终使样品的剩磁 B 为零。例如将电流值由 0 增至 600 mA 再逐渐减小至 0，然后双刀开关换为反向电流由 0 增至 500 mA ，再由 500 mA 调至零，这样磁化电流不断反向，最大电

流值每次减小 100mA，当剩磁减小到 100mT，每次最大电流减小量还需小些，最后将剩磁消除。

然后测量 $B-H$ 关系曲线。至少获取 20 个采样点的实验数值。

2. 测量模具钢的磁滞回线

1) 测量模具钢的磁滞回线前的磁锻炼。由初始磁化曲线可以得到 B 增加得十分缓慢时，磁化线圈通过的电流值 I_m ，然后保持此电流 I_m 不变，把双刀换向开关来回拨动 8-10 次，进行磁锻炼。(开关拉动时，应使触点从接触到断开的时间长些，这是为什么？磁锻炼的作用是什么？)

2) 测量模具钢的磁滞回线。通过磁化线圈的电流从饱和电流 I_m 开始逐步减小到 0，然后双刀换向开关将电流换向，电流又从 0 增加到 $-I_m$ ，重复上述过程，即 $(H_m, B_m) \rightarrow (-H_m, -B_m)$ ，再从 $(-H_m, -B_m) \rightarrow (H_m, B_m)$ 。每隔 50mA 测一组 (I_i, B_i) 值。

3. 数据处理及绘图

由公式(3)求出 H_i 值。测量模具钢的样品平均磁路长度 $\bar{\ell}$ 和间隙宽度 ℓ_g ，用公式(7)对 H_i 进行修正。用作图纸作模具钢材料的起始磁化曲线和磁滞回线，记录模具钢的饱和磁感应强度 B_m 、饱和磁场强度 H_m 和矫顽力 H_c 。

附：样品结构示意图。

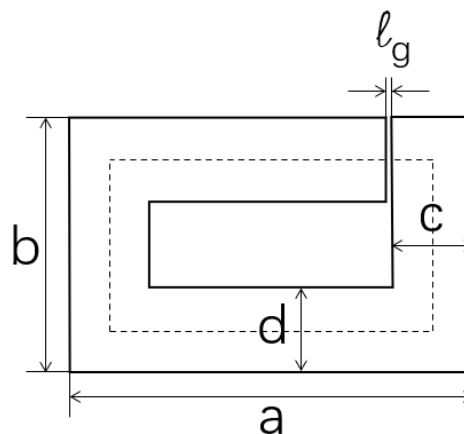


图 6：待测样品结构示意图

$a=10.00\text{cm}$; $b=6.00\text{cm}$; $c=d=2.00\text{cm}$; $\bar{\ell}$ 为样品平均长度（即样品中央轴线长度，如图中虚线所示）； ℓ_g 为平行间隙长度， $\ell_g=0.20\text{ cm}$ 。

【思考题】

1. 铁磁材料的动态磁滞回线与（准）静态磁滞回线在概念上有什么区别？铁磁材料动态磁滞回线的形状和面积受那些因素影响？
2. 什么叫做基本磁化曲线？它和起始磁化曲线间有何区别？
3. 铁氧体和硅钢材料的动态磁化特性各有什么特点？
4. 动态磁滞回线测量实验中，电路参量应怎样设置才能保证 $u_{R_1} - u_C$ 所形成的李萨如图形正确反映材料动态磁滞回线的形状？
5. 准静态磁滞回线测量实验中，为什么要对样品进行磁锻炼才能获得稳定的饱和磁滞回线？

【参考文献】

- [1] 吕斯骅，段家祗，张朝晖。新编基础物理实验（第二版），北京：高等教育出版社，2013。
- [2] FD-BH-I 磁性材料磁滞回线和磁化曲线测定仪使用说明。