

A8 磁性材料基础测量：静态磁化特性和交流磁化率

磁性材料是广泛使用的一类材料，与我们的生产生活紧密相关。许多生产设备上都安装有由磁性材料制成的部件，比如发电机中的永磁体、电动机中的转子、各类电磁铁中的铁芯、用于密封润滑的磁性液体等。我们使用的磁性材料根据其矫顽力的大小可分为三类，即硬磁材料、半硬磁材料、软磁材料。其中硬磁材料具有很高的矫顽力，适合用于需要永久磁场的场合，比如电机定子中的磁瓦、扬声器中的永磁体等。

磁性参数的测试是评价一种磁性材料应用潜力的一个重要手段，因此有必要对各种磁性材料的次性能进行测试。

实验内容一 铁磁性材料的静态磁性测量

【实验目的】

1. 掌握测量铁磁材料磁滞、动态磁滞回线和基本磁化曲线的原理和方法，加深对铁磁材料基本磁性参量的理解
2. 学习用电子积分器测量磁感应强度。
3. 学会根据磁性材料的磁性曲线确定其矫顽力、剩余磁感强度、饱和磁感强度，磁滞损耗、磁滞损耗等磁化参数。
4. 学习测量磁性材料磁导率 μ 的一种方法，了解磁性材料的主要特性。

【仪器用具】

静态磁特性参数测量仪，直流电源，计算机

【实验原理】

铁磁材料应用广泛，从常用的永久磁铁、变压器铁芯到录音、录像、计算机存储用的磁带、磁盘等都采用各种特性的铁磁材料。铁磁材料多数是铁和其他金属元素或者非金属组成的合金以及某些包含铁的氧化物（铁氧体），他们除了具有高的磁导率外，另一个重要的磁性特点就是磁滞。铁磁材料的磁滞回线和磁化曲线表征了磁性材料的基本磁化规律，反应了磁性材料的基本参数。对铁磁材料的应用和研制有重要意义。由于磁性材料的磁化过程很复杂，影响磁性材料磁化特性的因素有很多，如：掺杂、结构、温度等。在多数场合无法用解析式来定量描述 $H-B$ 之间的关系，只能通过实验测定它。本实验中，将待测的磁性材料做成闭合环状，上面均匀地绕两组线圈。给其中一组线圈通电流 I ，使其产生强度为 H 的磁化场，这组线圈称为初级线圈。当初级线圈中的电流发生变化时，在另外一组线圈即次级线圈中，将产生感应电动势 ε ，用电子积分器测出 ε ，经计算可以得到 B ，根据 $H-B$ 的对应关系可以绘出它们的曲线。

1. 初始磁化曲线

研究磁性材料的磁化规律，通常是通过测量磁化场的磁感强度 H 与磁感应强度 B 的关系来进行的。磁化曲线也叫 $B-H$ 曲线，即表示物质中的磁场强度 H 与所感应的

磁感应强度 B 之间关系的曲线。铁磁材料的磁化过程非常复杂， B 和 H 的关系如图 1 所示。将处在未磁化状态的磁性材料 ($H=0$ 、 $B=0$) 加以磁化，当逐渐增加磁场强度 H 时，磁感强度 B 也随之增加而非线性增加，经过一段急剧增加的过程后又缓慢下来，当 H 增大到一定值 H_s 后， B 增加十分缓慢或者基本不再增加，这时磁化就达到了饱和，称为磁饱和。到达磁饱和的 H_s 和 B_s 分别称为饱和磁场强度和饱和磁感强度（对应图 1-1 中的 a 点）。从未磁化到饱和磁化， H 和 B 对应的关系曲线称为初始磁化曲线或者起始磁化曲线。如图 1-1 中 Oa 所示。

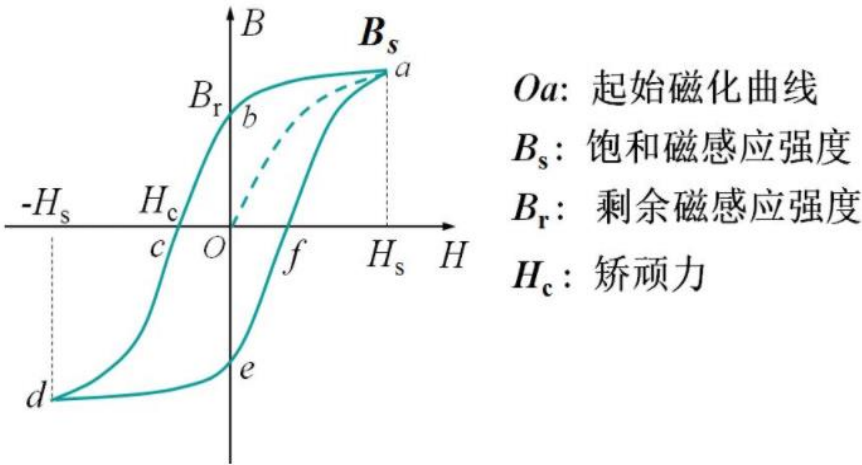


图 1-1 起始磁化曲线和磁滞

2. 磁滞回线

磁性材料还有一个重要的特性，那就是磁滞。磁滞是指 B 的变化滞后于 H 的变化。如图 1-1 所示，当磁性材料的磁化达到饱和之后，如果使 H 单调减小， B 不沿原路沿 aO 返回，而是沿一条新的路线(沿 abc)下降。当 H 减小到 0, B 并不为 0, 而是到达 B_r , 说明此时铁磁材料中仍然保留有一定的磁性，这种现象称为磁滞效应， B_r 称为剩余磁感强度，简称剩磁。要消除这个剩磁（使 $B=0$ ）就得加一个反向的磁化场，直到反向磁化场到达 H_c , B 才恢复为零。 H_c 被称为**矫顽力**。如果继续增加反向的磁化场使 H 继续增加，铁磁材料将被反向磁化直至达到反向饱和，此后减小磁化场 H 直至 0, 再沿正方向增加 H 至饱和，曲线回到 a 点。由此得到一条 $H-B$ 的闭合曲线，这条关于原点对称的闭合曲线，称为该材料的**磁滞回线**。如图 1-1 所示。实验表明，经过反复的磁化后，铁磁材料达到稳定的磁化状态， $B-H$ 的量值关系形成一个稳定的闭合“磁滞回线”，通常以这条曲线来表示铁磁材料的磁化性质。

3. 基本磁化曲线

当从初始状态 ($H=0, B=0$) 开始周期性地改变磁场强度 H 的幅值时, 在磁场由弱变强单调增加过程中, 可以得到一系列面积由小到大的稳定的磁滞回线, 如图 1-2 所示, 其中最大面积的磁滞回线称为极限磁滞回线, 把图 1-2 中原点 O 和各个磁滞回线的顶点 a_1, a_2 等连成曲线, 此曲线即为铁磁材料的基本磁化曲线。不同的铁磁材料其基本磁化曲线是不相同的。根据基本磁化曲线可以近似确定铁磁材料的磁导率 μ 。从基本磁化曲线上一点到原点 O 连线, 其斜率 $\mu = B/H$ 定义为这种磁化状态下的磁导率。

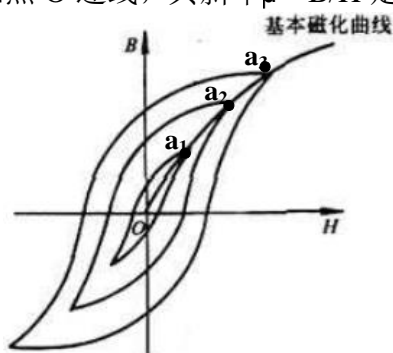
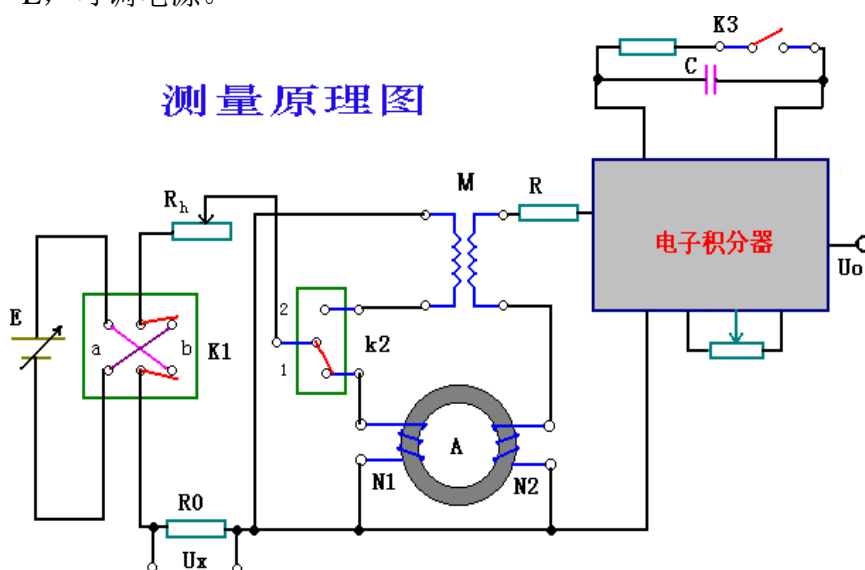


图 1-2 基本磁化曲线

4. 测量原理

测量电路如图 1-3 所示, 图中 A 为环状磁性材料, N_1 、 N_2 分别为绕在其上的初、次级线圈的匝数; M 为互感器; R_0 是取样电阻, 阻值为 1Ω ; 电子积分器用于测量 B , 由运算放大器等构成。K1, 电流换向开关; K2, 选择测量开关; K3, 复位按钮开关; E , 可调电源。



① H 的测量:

图 1-3 测量原理图

磁化场H可以表示为:

$$H=N_1 I_0/L \quad (1)$$

上式中 I_0 表示通过初级线圈的磁化电流, L 为环型磁性材料的平均周长。 H 的变化是通过改变 I_0 实现的, 因此 H 的测量就转换成了 I_0 的测量。但是计算机不能直接采集 I_0 信号, 需通过采样电阻 R_0 , 将 I_0 转化成与 H 成正比的电压信号 U_x 。于是:

$$H=N_1 U_x/LR_0 \quad (2)$$

② B 的测量:

本实验中通过电子积分器测量B。

电子积分器是一种实现积分运算的电路, 通过对连续变化的感应电动势进行累加, 来测量随时间变化的磁场。电子积分器由运算放大器、 R 、 C 组成。电子积分器的输出电压 U_0 表示为:

$$U_0 = -1/RC \int U_i dt - U'_c$$

上式中 U_i 是积分器的输入电压, U'_c 是积分器在 0 时刻的输出电压, U'_c 可以通过在测量之前对电容 C 放电使之成为 0, 这样上式就简化成

$$U_0 = -1/RC \int U_i dt \quad (3)$$

由上式可见积分器的输出电压 U_0 正比于输入电压 U_i 对时间的积分。式中负号表示 U_0 与 U_i 反位相。

参见图1-3, 在测量电路中, 单调地改变流过 N_1 中的电流 I_0 , 样品内部的磁化场 H 发生变化, 此时在 N_2 中, 将产生感应电动势 ϵ , ϵ 的大小为:

$$\epsilon = -N_2 S dB/dt \quad (4)$$

式中, S 是环状磁性材料的横截面积。将 N_2 接到积分器的输入端, 对 ϵ 积分, 得到:

$$U_0 = N_2 S/RC \int dB = N_2 S (B - B_0) / \tau$$

上式中 τ 是时间常数， $\tau=RC$ ，由电路参数决定； B_0 是样品中的剩磁，只要在正式测量之前将样品退磁，即可使 $B_0=0$ ，于是上式简化成

$$U_0 = N_2 S B / \tau \quad (5)$$

(5) 式表明积分器的输出正比于磁感应强度 B 。

实验时只要单调、缓慢地改变磁化电流 I_0 ，计算机就可以同步画出与 $H-B$ 关系相对应的 U_x-U_0 曲线。 U_0 、 U_x 的大小可以分别从计算机所绘的曲线上求得。

③ τ 的确定

τ 的大小可以用互感器 M 测定。实验时 K_2 选择 2。用互感器替代样品线圈。改变流过 M 的电流 I （注意： I 不能超过 M 的额定值），则由 M 产生的电动势 ε_1 为

$$\varepsilon_1 = -M \, dI/dt$$

对 ε_1 积分，积分器的输出电压：

$$U_{0M} = M U_{XM} / (\tau R_0)$$

由此得

$$\tau = M U_{XM} / (R_0 U_{0M}) \quad (6)$$

当电流 I 从 0 逐渐增加到互感器的额定电流值时，计算机将绘出一条直线，如图1-4， U_{XM} 、 U_{0M} 可分别从直线上得到。将 (6) 代入 (5) 中，则 B 即为

$$B = M U_{XM} U_0 / (N_2 S R_0 U_{0M}) \quad (7)$$

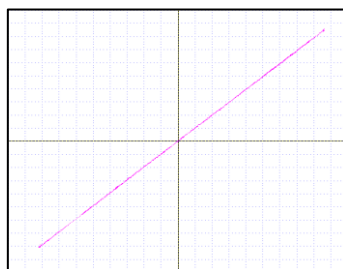


图 1-4

【实验装置】

实验装置包括直流电源、计算机和静态磁性测量仪，如图 1-5 所示，



图 1-5 实验装置图

TF_CIA 静态磁性测量仪操作面板介绍：

1. 上面板

静态磁性测量仪线路原理，如下图 1-6 所示，

首先，样品或互感器由 A 周围的 4 个接线柱连接到仪器上，连接样品时，K2 关闭（指示灯 灭）；连接互感器时，K2 打开（指示灯亮），

左下为电流调节按钮，调节电流大小，按住按钮，电流增大；该按钮无锁，松手后电流逐渐减少直至为 0，这样可以避免长时间处于电流状态。

K1 为电流方向控制开关：控制电流方向，通过按下和凸起的切换改变电流的正负开关的涵义见图 1-6 说明。

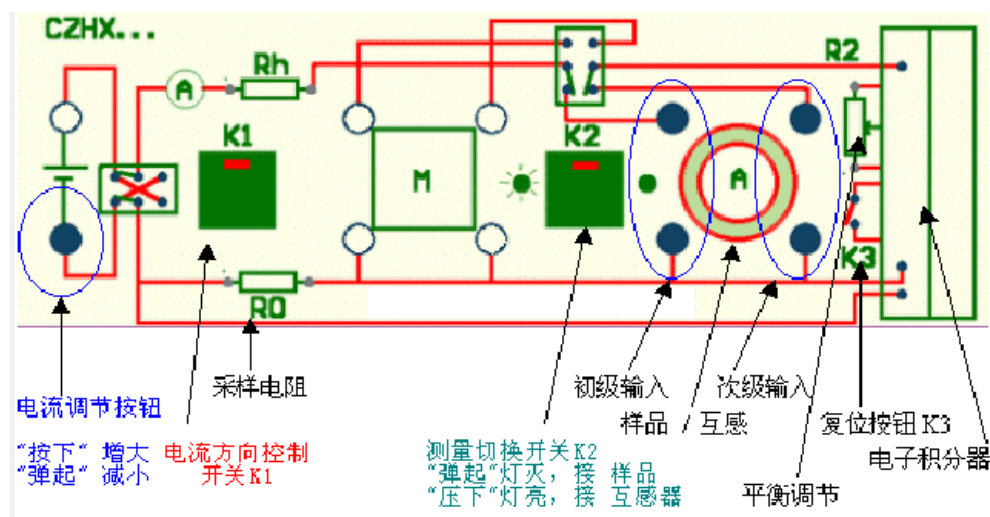


图 1-6 静态磁性测量仪上面板示意图

2. 前面板

模拟电流表上显示的为磁化电流，与磁场强度H对应。请注意，尽管本系统可以

提供3A以上的电流，但请将磁化电流控制在0.8A以内。

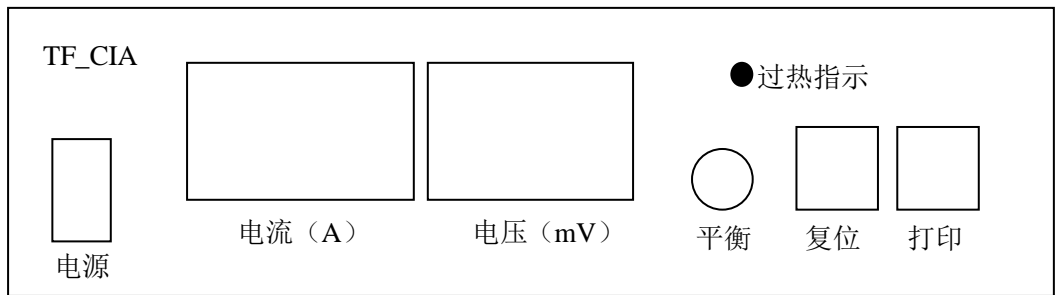


图 1-7 静态磁性测量仪前面板示意图

数字电压表上显示的为积分器输出电压 U_0 ，与磁感应强度 B 对应。

接入样品后，调节“平衡按钮”，使得数字表上的读数基本保持不变。

复位按钮，压下对积分电容放电，使得积分器在 0 时刻的输出电压接近零。

打印按钮，保留，无作用。

注意：当磁化电流较大，且持续时间长，系统发热很大。系统自动保护装置启动，过热指示灯亮，此时不能正常进行测量记录。解决方法：调小磁化电流，并且等 5--15 分钟，等系统恢复正常。

3. “平衡”调节方法

连接好实验样品。测量前，必须进行“平衡”调节。调节方法：平衡旋钮、复位按钮相互配合，同时注意观察电压表的数字变化。具体步骤如下：

如果电压表显示的数字一直向“负向”快速增大，将“平衡”旋钮按“顺时针”方向旋转；如果电压表显示的数字一直向“正向”快速增大，将“平衡”旋钮按“逆时针”方向旋转；如果电压表发生“溢出”，按一下“复位”按钮。反复几次如上调节，电压表上的数字变化趋向平缓。进一步仔细进行微调，使电压表上的数字基本不变，此时可以认为达到平衡。再按一下“复位”按钮，准备测量。

【实验注意事项】

1.不要长时间处于大电流状态，每个测量过程应终止在0电流状态。本实验测量过程中，请将电流控制在0.8A以内，否则会引起过热而无法操作。

【实验步骤】

1.开启电脑，在电脑上双击如下所示的“静态磁滞回线测量仪TF_CIA_P3.12”图标，运

行静态磁性测量仪应用程序，了解仪器和软件各功能区（“原理演示”、“数据测量”及“数据处理”）的使用方法。

2.熟悉电流调节按钮，以此改变磁场的大小和方向（注意：测量时，请将电流控制在0.8A以内）

3. 测量初始磁化曲线（接线图可以参考多媒体软件）

（1）环状磁性材料手动退磁：在测初始磁化曲线之前必须对被测材料退磁，本实验采用电流幅值在0到0.8A间取三到四个点逐次减少手动退磁，比如电流幅值依次取 $0 \rightarrow 0.6\text{A} \rightarrow 0 \rightarrow -0.6\text{A} \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow 0.4\text{A} \rightarrow 0 \rightarrow -0.4\text{A} \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow 0.2\text{A} \rightarrow 0 \rightarrow -0.2\text{A} \rightarrow 0$ 等。（实际由于仪器本身的偏置，退磁只能无限接近偏置量，而不能达到零，所以，以退磁达到本台仪器最小的纵轴输出值即可）

（2）测绘曲线。

按图1-7，K1 选择 a 或者 b（对应正向或反向单调取值），K2 断开（弹起接样品），K3 闭合再断开（退磁）。用鼠标点击“记录”栏，调节电流由 0 缓慢、单调地增大，此时计算机绘出的曲线即为该材料的初始磁化曲线，曲线上点的坐标即为（ U_x 、 U_0 ）。停止记录，保存数据。

4. 测量磁滞回线。

（1）调平衡：接入样品后，调节“平衡”按钮，使得数字表上的读数基本保持不变。具体步骤如下：按下“复位”按钮并松开，如果电压表显示的数字一直向“负向”快速增大，将“平衡”旋钮按“顺时针”方向旋转；如果电压表显示的数字一直向“正向”快速增大，将“平衡”旋钮按“逆时针”方向旋转；如果电压表发生“溢出”，按一下“复位”按钮。反复几次如上调节，电压表上的数字变化趋向平缓。进一步仔细进行微调，使电压表上的数字基本不变，此时可以认为达到平衡。再按一下“复位”按钮，测量程序处于记录状态，准备测量。（注意，每测试一次磁滞回线，需重新调节平衡）

（2）开始测量：“点击”软件界面上的“记录”按钮，做好数据记录准备。然后按住仪器上的电流调节按钮，电流逐步增大，观察记录到的测量曲线，基本达到饱和后，松开电流调节按钮，电流自动逐步减小到0，此时按一下K1电流换向开关，改变电流方向。再次按住电流调节按钮，反向增大电流，观察测量曲线，达到饱和后，松开电流调节按钮，电流自动逐步减小到0。计算机由此绘出一条封闭的曲线，即为磁滞

回线。调整坐标原点，使其位于磁滞回线中点，求出剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 。

电流 I_0 ：

零——增大到幅值 —— 减小到 0 —— 电流换向——反向增大到幅值——零

注意：如果绘制的曲线不闭合，说明“平衡”没有调好，根据曲线开口方向，微调“平衡”旋钮。然后重新绘制测量曲线。停止记录数据。保存数据。

6.测量基本磁化曲线。

控制调节电流按钮，周期性地改变磁化电流并调整磁化电流的幅值，得到一系列面积由小到大的稳定的磁滞回线，然后绘出铁磁材料的基本磁化曲线。

7. 在测量条件、参数和显示区域设定后，按下“记录”命令按钮，系统进入测量状态。同时，一些相关的按钮和选单变灰，此时“暂停”按钮有效。

8. 测量过程中，按下“暂停”命令按钮，系统进入待命状态，此时可以进行：变更显示坐标，平滑测量曲线，保存数据，更新显示区域等操作。按下“继续”按钮，系统再次进入测量状态。

9. 在记录仪的“测量曲线显示区”中，用鼠标任意拉出一方框，单击“选定”按钮，显示区更新为所框定的区域，即可对选定区域进行局部放大。

10. 在“待命”状态下，单击“平滑”按钮，则根据“设定常数”窗口中设置的平滑点数，对所绘制的曲线进行平滑处理并更新显示区。

11.测试完后，关掉各测试仪器。

【实验数据记录与处理】

1.记录环形线圈的参数(内径、外径对应内直径、外直径)：

环型磁性材料的平均周长 $L=$ _____；环状磁性材料的横截面积 $S=$ _____

初、次级线圈的匝数 $N_1=$ ____， $N_2=$ ____， $\tau =$ _____

2.从实验结果中拷贝出相关数据，调整坐标原点，使其位于磁滞回线的中点，求出剩磁和矫顽力。

【思考题】

1、 测量初始磁化曲线时，为何没有出现 $B-H$ 的饱和区？

- 2、 实验中为何多次强调要单调地改变电流？否则会出现什么样的结果？
- 4、 根据从初始磁化曲线上求出的B 和H，能否绘出磁导率 μ 与H 关系的曲线？
($\mu = dB/dH \approx \Delta B/\Delta H$)

附：

仪器时间常数：

编号：C201710-122, $\tau=0.0083$

编号：C201710-124, $\tau=0.0099$

编号：C201710-127, $\tau=0.0100$

编号：C201710-128, $\tau=0.0101$

编号：C201711-130, $\tau=0.0103$

编号：C201711-131, $\tau=0.0102$

编号：C201711-129, $\tau=0.0097$

同时， τ 在测量仪后边标签上也有标示。

实验内容二 铁磁性材料交流磁化率测量

【实验目的】

1. 观察铁磁性转变及转变温度（居里温度） T_C ,
2. 测量不同铁磁样品的交流磁化率随温度的变化曲线,
3. 掌握测量不同铁磁样品的交流磁化率

【实验设备】

1. 锁相放大器、锁相波形发生器和加热炉
2. 待测样品, 计算机等

【实验原理】

测量磁性材料的交流磁化率是研究铁磁性材料磁性特性的重要方法之一。磁化率是衡量铁磁材料响应外磁场能力的物理量, 它描述了物质在磁场作用下的磁化程度。交流磁化率是物质在交变磁场下的响应能力, 它在电子学、电工和材料科学领域均具有重要的应用。

1. 磁化率和物质磁性的分类

研究材料磁性的基本任务是确定材料的磁化强度 M 与外加磁场强度 H 和温度 T 的关系, 即确定磁状态方程 $M = f(H, T)$, 在给定的外界条件($T = \text{常数}$)下, 若所研究的材料向异性, 且 $M \parallel H$, 则上述关系可表为:

$$M = \chi H \text{ 或者 } \chi = M / H \quad (1)$$

式中, χ 称为物质的磁化率, 它把物质的磁化强度 M 与外磁场强度 H 联系了起来, 显然它的大小反映了物质磁化的难易程度, 仅与磁介质性质有关, 没有单位, 为一纯数。 χ 可正、可负, 决定于材料的不同磁性类别。

若对原不存在宏观磁性的材料施加一个由零逐渐增大的磁场, 则对不同的材料都可得到不同的 M - H 曲线, 称为基本磁化曲线, 如图 2-1 所示。显然, 曲线上任意一点都对应着材料的某种磁化状态, 它与坐标原点连线的斜率即表示材料在该磁场

下的磁化率。通常磁化率有三种表示形式， χ_v 表示单位体积(每 cm^3)的磁化率， χ_A 表示每摩尔的磁化率， χ_g 表示单位质量(每克)的磁化率，它们之间的关系为：

$$\chi_A = \chi_v V = \chi_g A = \chi_A A/\delta \quad (2)$$

式中， A 为原子量， V 为每摩尔的体积， δ 为比重。

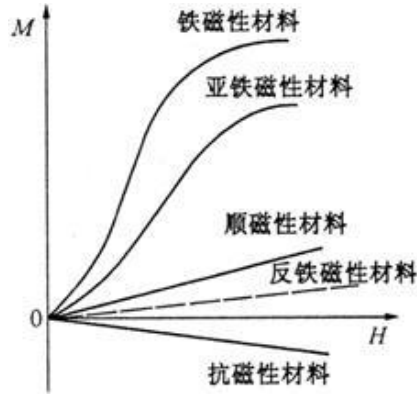


图 2-1 五类磁体的磁化曲线

磁体在磁性质上有很大的不同，可以根据物质的磁化率大小和符号大致分为五类：

(1) 抗磁性：是一种原子系统在外磁场作用下，获得与外磁场方向反向的磁矩的现象。某些物质当它们受到外磁场 H 作用后，感生出与 H 方向相反的磁化强度，其磁化率 $\chi_m < 0$ 。这种物质称为抗磁性物质。

(2) 顺磁性：许多物质在受到外磁场作用后，感生出与磁化磁场同方向的磁化强度，其磁化率 $\chi_m > 0$ ，但数值很小，仅显示微弱磁性。这种磁性称为顺磁性。多数顺磁性物质的 χ_m 与温度 T 有密切关系，服从居里定律，即

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (3)$$

式中， C 为居里常数，它的值为 $N\mu_B^2 / 3k$ ，其中 N 为阿伏加德罗常数， μ_B 为波尔磁子， k 为波尔兹曼常数； T 为绝对温度。然而，更多的顺磁性物质的 χ_m 与温度的关系，遵守居里-外斯定律 (Curie-Weiss law)，即

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_p} \quad (4)$$

式中， T_p 为临界温度，称为顺磁居里温度。

(3) 反铁磁性：另有一类物质，当温度达到某个临界值 T_N (奈耳温度) 以上，其磁化率与温度的关系与正常顺磁性物质的相似，服从居里—外斯定律，但是，表现出在式(4)中的 T_p 常小于零。当 $T < T_N$ 时，磁化率不是继续增大，而是降低，并逐渐趋于定值。所以，这类物质的磁化率在温度等于 T_N 的地方存在极大值。显然， T_N 是个临界温度，它是奈耳发现的，被命名为奈耳温度。上述磁性称为反铁磁性。

(4) 铁磁性：这种磁性物质和前述磁性物质大不相同，它们只要在很小的磁场作用下就能被磁化到饱和，不但磁化率 $\chi_m > 0$ ，而且数值大到 $10 \sim 10^6$ 数量级，其磁化强度 \mathbf{M} 与磁场强度 \mathbf{H} 之间的关系是非线性的复杂函数关系。反复磁化时出现磁滞现象，物质内部的原子磁矩是按区域自发平行取向的。上述类型的磁性称为铁磁性。铁磁性物质的磁特性随温度的变化而改变。当温度上升到某一温度时，铁磁性材料就由铁磁状态转变为顺磁状态，即失掉铁磁性物质的特性而转变为顺磁性物质，这个温度称之为居里温度，以 T_c 表示，并服从居里—外斯定律，即

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_c} \quad (5)$$

式中， C 是居里常数。

居里温度是磁性材料的本征参数之一，它仅与材料的化学成分和晶体结构有关，几乎与晶粒的大小、取向以及应力分布等结构因素无关，因此又称它为结构不灵敏参数。测定铁磁材料的居里温度不仅对磁材料、磁性器件的研究和研制，而且对工程技术的应用都具有十分重要的意义。

(5) 亚铁磁性：除了上面四种物质具有的磁性以外，另有一类物质，它们的宏观磁性跟铁磁性相同，仅仅是磁化率的数量级稍低一些，大约为 $1 \sim 10^3$ 数量级。它们的内部磁结构却与反铁磁性的相同，但相反排列的磁矩不等量。所以，亚铁磁性是未抵消的反铁磁性结构的铁磁性。

2. 交流磁化率的测量

(1) 交流磁化率基本概念及表示

磁性物质具有自发性的磁偶极矩，在外加磁场下，物质中的磁偶极方向会因外界磁场作用而倾向沿着外加磁场方向。而当外加磁场是交变磁场且交流频率不太高

时（一般在微波频率以下），磁偶极的方向可随着此外加交变磁场，做来回周期性振荡，此即交流磁化率的物理原因。磁偶极的振荡频率与外加交变磁场频率一致，但瞬间磁偶极方向并不一定与外加磁场方向相同，其间的差异可用磁偶极相对外加交变磁场的周期性振荡相位差来代表。因此，一个材料的交流磁化率 χ_{oc} 可以表示成 $\chi_0 e^{-i\theta}$ ，其中 χ_0 代表材料磁导率强度，而 θ 就是材料磁偶距相对外加交变磁场的周期性振荡相位差，即当某一瞬间时间点， H 到达最大值，但 M 却尚未到达最大值，而是在该瞬间点一段时间后（ Δt ），才到达最大值。这样的现象即称为磁偶极与外加交变磁场间的相位差，相位差 θ 的大小为 $(\Delta t/T/\pi) \times 180^\circ$ ，其中 T 为外加交变磁场振荡周期。

除了以磁导率强度 χ_0 及相位差 θ 来表示材料的交流磁导率 χ_{oc} 外，若将 $\chi_0 e^{-i\theta}$ 展开成复数形式 $\chi_0 \cos\theta - i\chi_0 \sin\theta$ ， χ_{ac} 可表示为 $\chi_r + i\chi_i$ ， $\chi_r = \chi_0 \cos\theta$ ，称为交流磁化率实部(real part, $\text{Re}[\chi_{ac}]$)，而 $\chi_i = -\chi_0 \sin\theta$ ，称为交流磁化率虚部(imaginary part, $\text{Im}[\chi_{ac}]$)。所以，材料的交流磁化率 χ_{ac} 亦可用 $\text{Re}[\chi_{ac}]$ 及 $\text{Im}[\chi_{ac}]$ 来表示。

上述可简单描述为任何一种物质的交流磁化率 χ 可表示为：

$$\chi(\omega) = \chi'(\omega) + i\chi''(\omega) \quad (6)$$

$\chi'(\omega)$ 是交流磁化率的实数部分，它正比于线圈的电感或互感的变化，是该磁性材料对外加交变磁场能量的吸收。在 $\omega=0$ 时， $\chi'(\omega) = \chi_0$ 称为静磁磁化率。在用低频测试时， $\chi'(\omega)$ 近似等于 χ_0 。 $\chi''(\omega)$ 是交流磁化率的虚数部分，它正比于材料的交流损耗，表示该磁性材料会吸收外加磁场的能量。

χ_{ac} 可表示为 $\chi_r + i\chi_i$ ， $\chi_r = \chi_0 \cos\theta$ ，称为交流磁化率实部 (real part, $\text{Re}[\chi_{ac}]$)，而 $\chi_i = -\chi_0 \sin\theta$ ，称为交流磁化率虚部 (imaginary part, $\text{Im}[\chi_{ac}]$)。所以，材料的交流磁化率 χ_{ac} 亦可用 $\text{Re}[\chi_{ac}]$ 及 $\text{Im}[\chi_{ac}]$ 来表示。交流磁化率测量仪就是在测量 $\text{Re}[\chi_{ac}]$ 及 $\text{Im}[\chi_{ac}]$ (或 χ_0 及 θ)。其中值得注意的是， $\text{Im}[\chi_{ac}]$ 所代表的物理意义，是该磁性材料对外加交变磁场能量的吸收； $\text{Im}[\chi_{ac}]$ 愈大，表示该磁性材料会吸收外加磁场的能量。

(2) 测量方法及说明

交流磁化率测量方法主要有两类：(1) 交流互感电桥，如哈特森(Hartshorn)电桥；(2) 自感法，即测量样品在线圈中引起的电感变化。其中交流互感电桥方法使用的很普遍，并且随着电子技术的发展，它的测量灵敏度和测试精度都有很大提高。灵敏度可达到 10^{-8}emu ，相对精度达到 0.1%。互感法是将一对绕在同一空心轴上的线圈和锁相放大器连接，线圈分为初级线圈和次级线圈，初级线圈由锁相放大器提供交变信号，产生交变磁场。样品放置在线圈的中心，当在初级线圈的交变磁场作用下，产生磁性改变时将引起次级线圈中的感生电流的变化而由锁相放大器测出，其工作原理如图 2-2 所示。

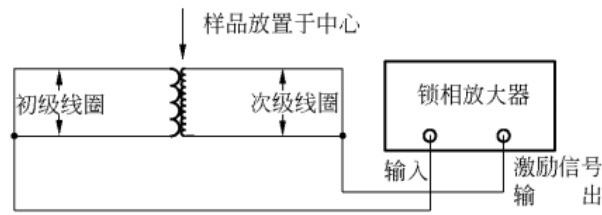


图 2-2 互感式单对线圈测量交流磁化率的示意图

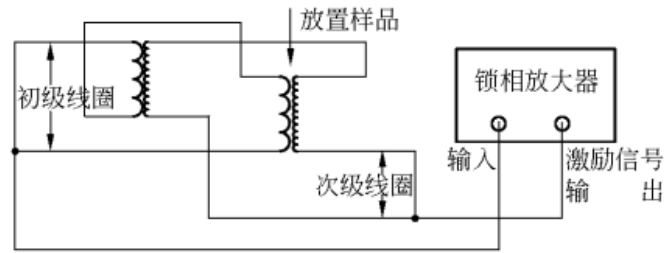


图 2-3 互感式四线圈测量交流磁化率的示意图

当感应线圈所在空间的磁性发生变化时，在感应线圈中就会产生感应电动势，由电磁感应定律有：

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (7)$$

式中 S 为线圈的面积， N 为线圈的匝数，将此感应电动势 ε 送入测试电路板中，测试电路板的积分电路将对 ε 作时间积分得：

$$B = -\frac{1}{NS} \int \varepsilon dt \quad (8)$$

故由积分电路输出的信号即正比于总的磁感应强度 B 。

需要注意的是：本实验装置采用的是偏差读出法，实验输出即所得纵轴值为电压值（单位:mV），因此为了得到磁化率的绝对值，必须要用标准样品进行校准，实现测量电压值向磁化率绝对值的转换。为此，若采用标准样品-莫尔盐 $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为校准样品，校准的方法是用本实验相同的方法测量莫尔盐在不同温度下锁相放大器的输出电压 V ，然后根据测量求出电压与温度的关系 $V(T)$ 。并且，若已知莫尔盐测量温度 T 与磁化率 χ_g 的关系 $\chi_g(T)$ ，如：

$$\text{已知莫尔盐的磁化率为: } \chi_g = \frac{9500 \times 10^{-6}}{T + 1} \text{ emu/g} \quad (9)$$

则可以根据测量电压 $V(T)$ 的关系并结合 $\chi_g(T)$ 求出： $\chi_g(T) = CV(T)$ 。图 2-4 画出了磁化率 χ_g 与输出电压 V 的线性关系曲线，如图所示，其中直线的斜率即为锁相放大器互感电桥的常数 C 。可见，斜率 C 为一常数，由此，可由 $\chi_g(T) = CV(T)$ 实现测量电压向磁化率绝对值的转换。

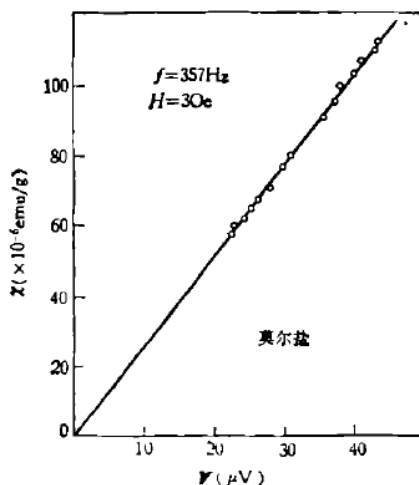


图 2-4 交流互感电桥的校准曲线：测量频率为 357Hz,测量磁场为 30Oe, $C=2.562 \times 10^{-6} \text{ emu/g}/\mu\text{V}$

然后，在已知交流电桥常数 C 的情况下，我们就能计算出由锁相放大器输出的单位电压值 V 所对应的单位质量(每克)的磁化率 χ_g 。因而，在放入其他待测样品后，测量不同温度下得到锁相放大器输出电压值的变化 $V(T)$ ，通过 $\chi_g(T) = CV(T)$ 就能计算出该样品具有铁磁性转变样品磁化率的绝对值。

针对本实验，需要注意的是，数据处理过程中，根据测量温度求出 $V(T)$ (T 为温度)，并根据测量温度由 $\chi_g = CV(T) = \sqrt{\text{实部}^2 + \text{虚部}^2} = \chi_g(T)$ 计算得到磁化率 $\chi_g(T)$ 。然而，由于课堂时间限制，本次实验中，互感电桥的常数 C 不再采用莫尔盐样品实际测量出来，而直接用常数 C 带入处理，即锁相放大器交流互感电桥常数在测量电压向磁化率转化的处理过程中始终用常量 C 表示出来即可。

【实验装置】

交流磁化率测量装置由锁相放大器、锁相波形发生器、可调速率加热炉三部分组成。可以测量样品从室温到 500°C 的磁化率及损耗的变化。

1. 锁相放大器

接线：锁相放大器后板有四个线缆接口，左侧两个同轴接口已在内部连接在一起，为被测量弱信号的输入接口。右四芯插座为信号同步脉冲输入接口，通过专用线缆与锁相波形发生器同步输出口相连。五芯接口为 PC 通信接口，用专用线缆与电脑串口或 USB 转串口连接。

操作：连接好线路，打开电源开关后，锁相放大器完成自检后会显示出被测量信号实部部分和当前的前级增益 (P) 以及后级增益 (A)，右侧四个按键分别与显示屏上右侧显示的四个功能相对应，“选择”键可以切换显示当前显示的内容（信号实部、虚部、模值以及相角），“调节”键可以选择调节前级和后级增益的大小，“增大”或“减小”键可以调节前级和后级增益的大小。显示“饱和”提示表示当前信号过大或增益过高，无法准确测量。

参数：电源：220V 交流 50Hz 70W 增益：6~3000 倍

分辨率：1 / 19999 精确度：0.0001V

2. 锁相波形信号发生器

接线：波形发生器面板接口“同步输出”，输出正弦波同步信号，通过专用电缆与锁相放大器相连。“输出”接线柱输出正弦波。输出信号为稳压信号，严禁短路。输出接线柱通过红色和黑色电缆与加热炉中的激励线圈相连。输出指示灯显示输出状态，指示灯亮起表示正常输出，指示灯灭表示波形正在载入，此时输出不可用，输出波形无用。重载按钮用于更新输出，仪器上电后会自动更新输出，使用中如果要改变频率，则需在将频率选择拨至目标频率后按一下重载按钮。通过幅值调节旋钮可以调

节输出电压的大小。

参数：电源：220V 交流 50Hz 50W

输出频率：275 Hz；525 Hz；1025 Hz；2025 Hz；5025 Hz；10KHz

输出电压：0~12V（峰峰值） 输出波形：正弦波

输出最大电流：0.5A

注意：波形发生器的输出端严禁短路！

3. 可调速率加热炉

接线：加热炉背面有一个同轴接口与探测线圈相连，通过同轴电缆与锁相放大器相连，一组红、黑接口与激励线圈相连，通过红、黑线缆与波形发生器相连。

操作：可调速率加热炉面板功能及背板接口连接方法：

（1）温度显示器用于显示炉内的当前温度；

（2）升温速度（每分钟升温度数）显示器用于显示当前升温设置。当加热器升温速率过快或过慢时，适当调整升温速度以满足实验要求；

（3）“设置”键用于设置温度控制仪的工作参数，按下“设置”键，“状态”灯亮，通过“+1”、“-1”、“X10”键设置加热器目标温度（单位℃），再按下“设置”键，可调速率加热炉退出“设置”状态，进入正常工作状态；

（4）“加热”键用于启动加热器，同时“加热”指示灯亮；

（5）“停止”键使加热器停止加热。但由于热惯性，加热器并不会立即停止升温，而是继续升温一段时间后会停止；

（6）“▼”键是调节每分钟升温度数（小），按下“▼”键，每分钟升温度数显示器显示“XX”，可调节每分钟加热度数，最小为1℃/分；

（7）“▲”键是调节每分钟升温度数（大），按下“▲”键，每分钟升温度数显示器显示“XX”，可调节每分钟加热度数，最大为25℃/分；

（8）“报警”指示灯根据“工作参数”中的设定，定时闪亮；

（9）“加热”键、“停止”键的第二功能“+1”、“-1”与“设置”键共同使用。

参数：电源：220V 50Hz 最高温度：500℃ 功率：2000W

注意：加热炉加热过程中不能提起炉头，否则可能导致加热失控。如果要提起加热炉炉头则要先停止加热。加热炉为大功率用电器，使用前应确保电源符合供电需求，稳定可靠。

5. 软件功能介绍

交流磁化率软件与交流磁化率测量装置配套使用，可以记录实验所得数据并绘制温度特性曲线。软件运行中绘制三条曲线，分别为红色的实部曲线，蓝色的虚部曲线以及绿色的温度曲线。

软件运行后，首次实验时应在“文件”——“串口”中分别设置加热炉和锁相放大器的串口号，然后点击“操作”选框部分的“开始”按钮，如能正确显示仪器的温度和实部、虚部等信息，则设置正确，否则会提示错误。

软件界面的“设置”选框可以设置绘图的横坐标、纵坐标以及数据记录周期，显示当前数据的实部、虚部等信息。其中“本底电压”为使用者输入用，可以补偿测量系统的直流偏置。图形中纵轴实际显示，即运行状态里的实部、虚部电压值=实测电压-本底电压。因而实验中，需要选择合适的本底电压，使红色的实部曲线和蓝色的虚部曲线在图形中得到较好的显示（尽量在 y 方向关于 x 轴对称）。

“运行状态”选框用于显示当前测量的数据，并显示运行时间和记录数据量，以及信号是否溢出的状态等。

用户通过“操作”选框的按钮可以控制绘图的“开始”、“结束”等 操作。

【安全注意事项】

1. 本实验中，温控器的温度设置在 300℃即可。
2. 实验过程中，加热炉炉体高温，严禁触碰。
3. 加热炉后部有高压危险，严禁触碰。
4. 需注意实验中绿色温度曲线是否显示正常。

【实验内容和步骤】

1. 将锁相放大器、锁相波形发生器和加热炉一一对应连接，并将其与计算机相连。
2. 开启电脑，在电脑上双击“交流磁化率记录软件”图标，选择温度及锁相放大器的串口号，运行交流磁化率软件。（软件使用见软件功能介绍部分）
3. 首先，取出样品，点击“开始”，测量没有样品时，系统本身的直流偏置，并记录“实测电压”里的电压“实部”、“虚部”值。
4. 将待测样品插入加热炉，将温控器的目标温度设置到 300℃。点击开始，同时开启加热炉升温。（此处操作见可调速率加热炉操作部分）

此处需注意，点击“开始”两秒内数据稳定后，为了观察方便，需要调整一次“本底电

压”，选择合适的本底电压，使红色的实部曲线和蓝色的虚部曲线在图形中得到较好的显示（尽量靠近、不重合并关于 y 轴对称）。具体方法：运行状态里的实部、虚部电压值=实测电压-本底电压。之后重新“开始”，继续测量，并观察输出电压随温度的变化。

5. 升温过程中，出现磁性转变点并稳定后，**需尽快停止升温**，以防因升温太高而导致降温过程耗时太久。
6. 之后测量降温，出现降温过程中的磁性转变点并稳定之后，停止数据采集。
7. 保存待测样品的实验数据。
8. 样品真实电压即为有样品的“实测电压”减去无样品时系统本身偏置的“实测电压”。

【实验数据处理】

1. 将测量数据采用 Excel 或 Origin 软件进行分析，绘制出锁相放大器输出电压随温度的变化，求出居里温度和所测样品的磁化率。
2. 根据升温过程中电压随温度的变化和降温过程中电压随温度的变化，绘制出所测样品的铁磁性转变的迟滞效应。

【思考题】

1. 铁磁性转变应是怎样的曲线，陡峭与否与哪些因数有关？
2. 为什么必须缓慢加热试样？