

## 实验 7.1 磁性材料 B-H 特性的测量

### 引言

磁性材料，一般只具有铁磁性或亚铁磁性并具有实际应用价值的磁有序材料。广义的磁性材料也包括具有实际应用价值或可能应用的反铁磁材料或其他弱磁性材料。

磁性材料种类很多，磁特性参量不少。从技术应用角度出发，常关注材料的 B-H 特性。从 B-H 磁滞回线上可以方便地得到这样一些参量：(1) 剩余磁感应强度  $B_r$ （简称剩磁），其意义在于磁性材料被饱和和磁化后，材料内部磁化场下降到零时，材料内所保存的磁感应强度值，通常  $M_r < B_r$ 。(2) 最大磁能积  $(BH)_m$ ，磁性材料 B-H 磁滞回线第二和第四象限部分称为退磁曲线。退磁曲线上每一点的磁感应强度 B 和磁场强度 H 的乘积 BH 称为磁能积，其中最大者称为最大磁能积。这是磁性材料单位体积储存和可利用的最大磁能密度的量度。

(3) 矫顽力  $H_c$ ，它是指磁性材料 B-H 退磁曲线  $B=0$  处的磁场强度，其意义是对磁性材料反向磁化过程中，使  $B=0$  的反向磁场大小，通常  $H_c < H_c$ 。根据磁性材料矫顽力的大小，可将磁性材料分为三类，及软磁、半硬磁及硬磁。很多变压器铁芯，偏转线圈磁芯都是软磁材料制成的。硬磁材料都是作为磁场源（各种永久磁铁）来应用的。

磁性材料应用十分广泛，其特性测量方法有特殊性。学习 B-H 特性测量既有实用意义，又有方法学上的意义。

### 实验目的

了解磁性材料的某些特征量，学习用法拉第感应法加电子有源积分器测量软、硬磁材料的 B-H 回线及某些特征量。

### 实验原理

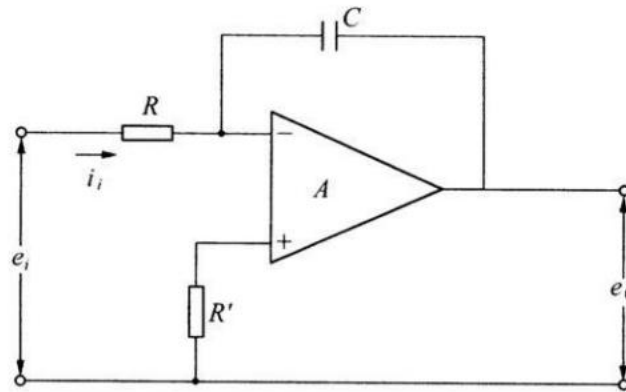
磁学量多为导出量，例如电流、电压、作用力等可以直接测量，但磁通、磁感应强度等必须借助热学的、电学的、光学的物理量测量结果推算出来。常用的且方便的方法是利用电磁感应定律，从测量的电学量推算出磁学量。

根据法拉第定律，一个开路线圈内的磁通发生变化时，其两端产生感应电压

$\varepsilon(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$ 。如果线圈很截面积 S、匝数 N 均为定值，则  $\varepsilon(t) = -NS \frac{dB(t)}{dt}$ 。对感

应电压积分  $\int \varepsilon(t) dt = -NS \int \frac{dB(t)}{dt} dt$ ，则  $B(t) = -\frac{1}{NS} \int_0^t \varepsilon(t) dt$ 。

对线圈两端感应电压进行积分，用得比较普遍的是  $R-C$  有源积分器。基本的  $R-C$  有源积分器如图所示。



图(1) 有源积分器基本原理图

考虑到运算放大器有很大的输入阻抗和输入端可看成“虚地”的性质，有如下关系。

$$e_i(t) = Ri_i(t) + \frac{1}{C} \int i_i(t) dt$$

$$e_o(t) = -\frac{1}{C} \int i_i(t) dt$$

若适当选择  $R$ 、 $C$  的数值，满足  $RC \gg \frac{1}{2\pi f}$ ， $f$  为输入信号频率，则

$$i_i(t) \approx \frac{e_i(t)}{R}$$

$$e_o(t) \approx -\frac{1}{RC} \int e_i(t) dt$$

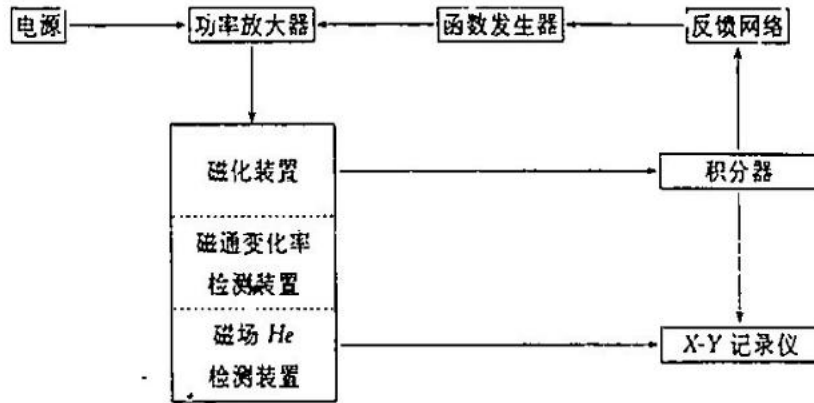
若  $e_i(t) = \varepsilon(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} = -NS \frac{dB(t)}{dt}$ ，则

$$e_o(t) = \frac{NS}{RC} \int dB(t) = \frac{NS}{RC} \Delta B$$

$$\text{即 } \Delta B = \frac{RC}{NS} \cdot e_o$$

## 实验仪器

图是根据法拉第感应定律用有源积分器进行  $B-H$  磁滞回线测量的仪器框图。



图(2)  $B-H$  回线测量仪器框图

其中函数发生器和功率放大器给磁化装置提供随时间变化的磁化电流，磁通变化率检测装置（检测线圈）将感应电压  $e(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$  送给积分器，积分器输出与磁通  $\Phi$  成正比的信号至 X-Y 记录仪的 Y 输入。外加磁场测量装置测出与磁场对应的信号送至 X-Y 记录仪的 X 输入。于是记录到  $\Phi-H$  曲线。再通过  $\Phi$  与  $B$  的关系算出  $B-H$  曲线。反馈网络是为了控制函数发生器的扫描速度在  $\Phi$  变化剧烈区间， $H$  变化缓慢些，以便记录更精确。

#### 硬磁材料的 $B-H$ 磁滞回线测量

硬磁材料矫顽力  $B H_c$  高，饱和磁化场  $H_s$  高。因此长江待测样品夹在电磁铁两磁极间，并尽可能使样品两端面平行光洁，与电磁铁两磁极紧密接触，以避免在样品内出现退磁场。在样品上紧密绕  $N$  匝线圈，线圈两端接入高输入阻抗的有源积分器。利用磁场的切向连续性，将特斯拉计探头紧靠样品表面，测出样品的磁化场  $H$ 。图为测量装置示意图。

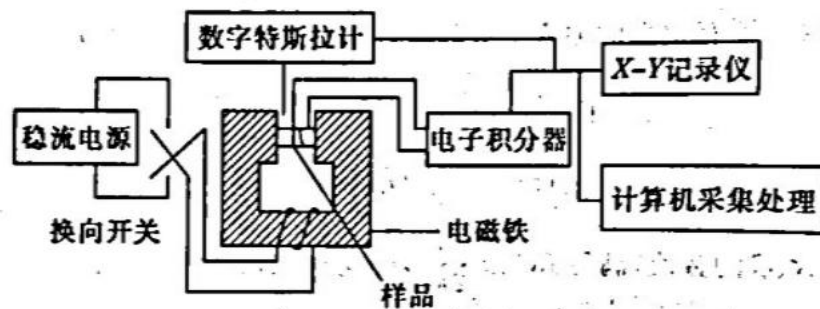


图 7.1-3 硬磁材料  $B-H$  磁滞回线测量装置

$B-H$  磁滞回线的第二（第四）象限部分称退磁曲线，如图所示。如将退磁曲线上各点的  $H$  值和  $B$  值相乘后，可发现乘积中有一个最大值，称为最大磁能积，即为  $(HB)_M$ ，是硬磁材料最重要的参数之一，并可近似地从作图法求得，即分别从  $B_r$  和  $H_c$  作  $H$  轴与  $B$  走的平行线交于  $O'$ ，则直线  $O-O'$  与退磁曲线的交点  $P$  所对应的  $H$  与  $B$  值，就是达到该种硬磁材料最大磁能积的相应值。当利用硬磁材料产生恒定磁场时，就应根据实际可能，尽量将硬磁材料器件的形状设计成使该器件出于该种材料最大磁能积所对应的  $B_M$ 。

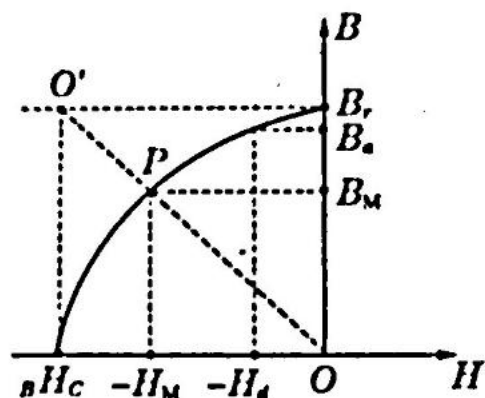


图 7.1-4 退磁曲线

软磁材料  $B-H$  磁滞回线的测量

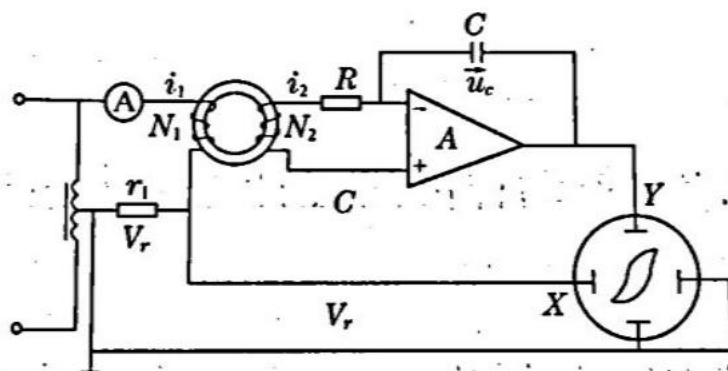


图 7.1-5 软磁材料  $B-H$  回线测量装置

软磁材料的  $H_c$  低，饱和磁化场  $H_s$  低，一般情况将样品制成环状，作如图的配置。在你磁化线圈  $N_1$  中通过适当的交变电流使其磁化。线圈  $N_2$  为检测线圈，其两端电压

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$$

磁化场  $H$  的测量可以根据安培环路定律，通过测量磁化线圈  $N_1$  中的电流得到，即

$$HL = i_1 N_1$$

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

其中  $L$  为环的平均长度。又， $V_r = i_1 r_1 = \frac{r_1 L}{N_1} H$ 。因此可将  $r_1$  上的电压信号送至 X-Y 记录

装置的 X 输入端，将积分器的输出送 X-Y 记录仪的 Y 输入端，记录到  $\Phi-H$  回线。在如图所

示的测量方法中， $B = \frac{\Phi}{N_2 S}$ ，其中  $S$  为样品环的截面积。从而由  $\Phi-H$  回线，很容易得到

$B-H$  磁滞回线。

测量软磁材料的直流特性，甚低频特性时，X-Y 记录仪常用计算机采集系统等。测量软磁材料的交流特性，特别是高频特性，记录装置可用示波器。

## 实验内容

测出环状铁氧体永磁材料，块状硬磁材料，环状高频磁芯和软铁环的  $\Phi-H$  曲线。根据  $\Phi-H$  曲线，画出  $B-H$  曲线，按图上定义，算出剩磁  $B_r$ ，矫顽力  $H_c$ ，最大磁能积  $(BH)_M$ 。待测量亦可在  $\Phi-H$  曲线上测出。

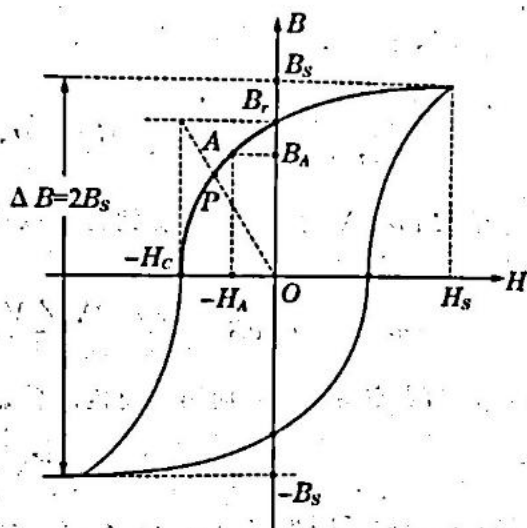


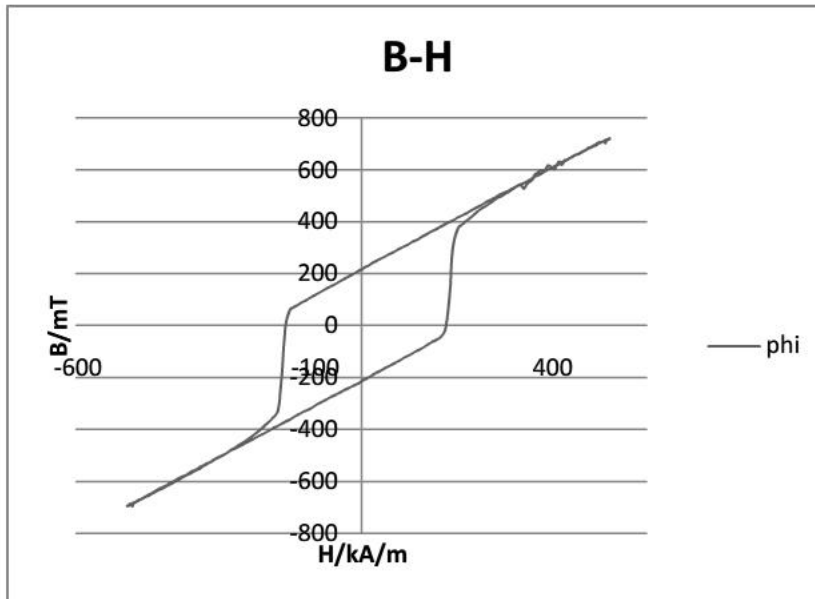
图 7.1-6  $B-H$  磁滞回线

## 数据记录及处理

1、实心磁铁测量：

磁铁几何参数： $d = 2.65\text{cm}$ ， $N = 10$ 。所以  $S = 5.52\text{cm}^2$

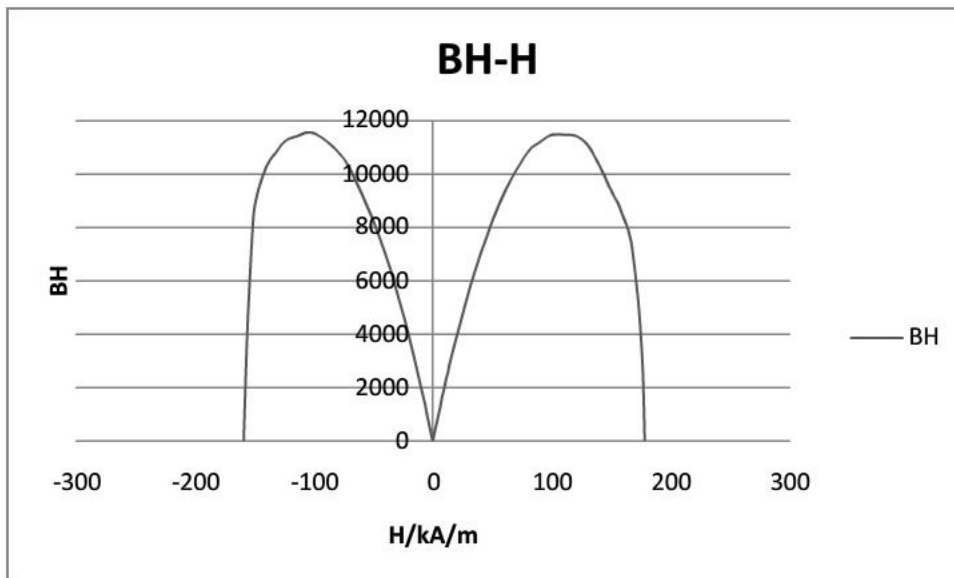
测量结果如图所示：



根据图像可以得出：

剩磁  $B_r = 281 \text{ mT}$

矫顽力  $H_C = 160 \text{ kA/m}$



在  $H = -110 \text{ kA/m}$  时，有最大磁能积  $(BH)_M = 11476 \text{ kA} \cdot \text{mT} / \text{m}$

## 2、环形磁铁测量

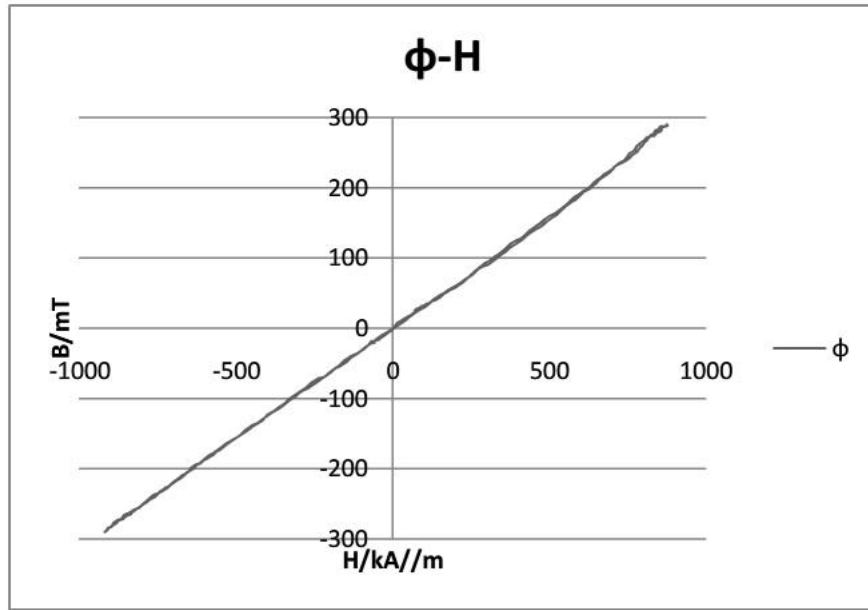
(1) 空心线圈测量：

空心线圈几何参数：线圈  $D = 34 \text{ mm}$ ，环形磁铁  $d_1 = 31 \text{ mm}$ ， $d_2 = 18 \text{ mm}$

计算得：线圈  $S_1 = 9.08 \text{ cm}^2$ ；环形磁铁面积  $S_0 = S_2 - S_3 = 5.01 \text{ cm}^2$ 。

对于线圈： $\phi = n\mu_0 SH = aH$

测量得到的曲线如图：

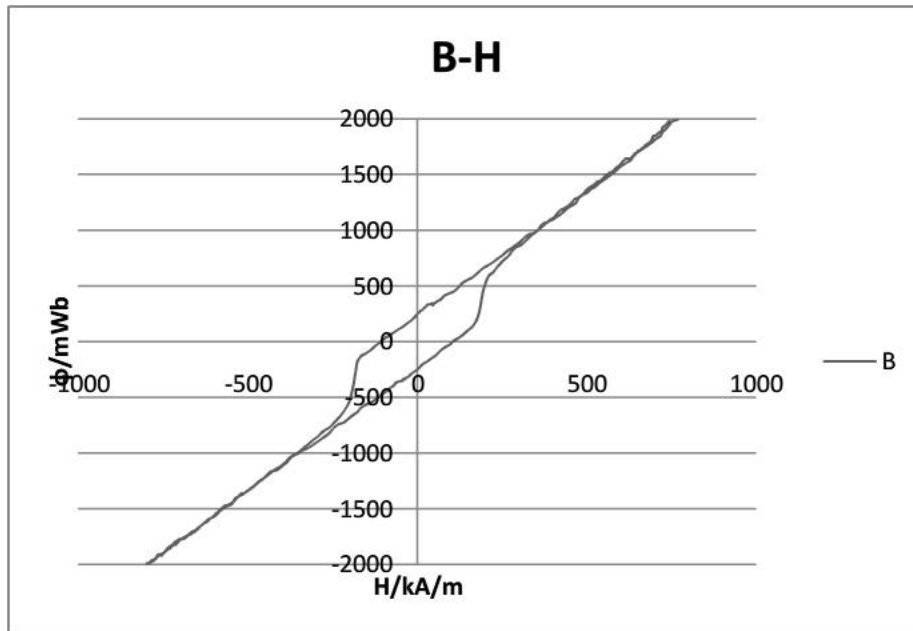


利用最小二乘法计算得： $a = 0.325 \text{ mWb} \cdot \text{m} / \text{kA}$

于是可以计算得到线圈匝数  $n = \frac{a}{\mu_0 S} = 285$

(2) 待测材料测量：

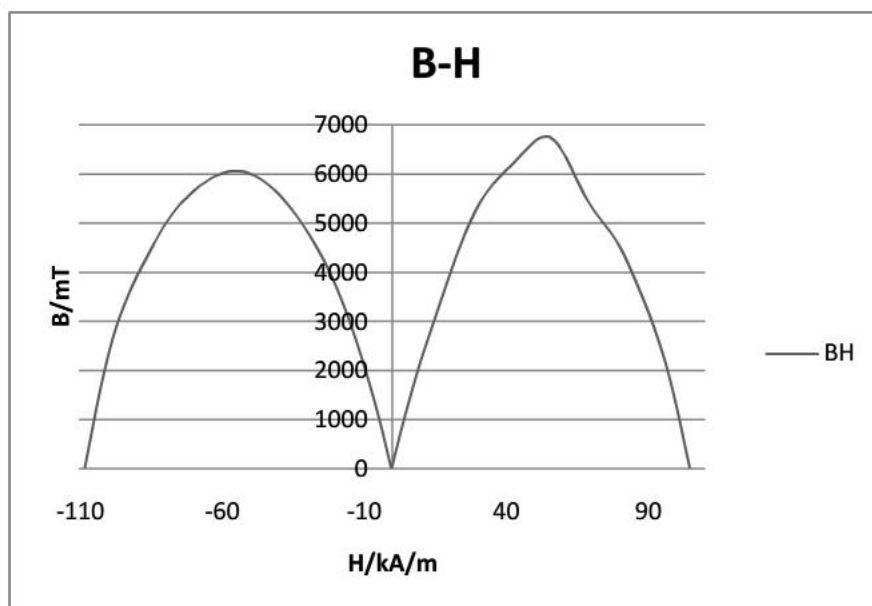
待测材料的测量曲线如图：



根据图像可以得出：

剩磁  $B_r = 244 \text{ mT}$

矫顽力  $H_C = 109 \text{ kA} / \text{m}$



在  $H = -57 \text{ kA/m}$  时，有最大磁能积  $(BH)_M = 6056 \text{ kA} \cdot \text{mT/m}$

## 思考题

1、 如何利用  $B-H$  回线算出内禀矫顽力  $M H_C$  ?

答：利用  $M = \frac{B}{\mu_0} - H$  求出  $M-H$  曲线，再用与求  $B H_C$  类似的方法就可以找到  $M H_C$ 。

2、 用作图法求得的最大磁能积  $(BH)_M$  与计算的  $(BH)_M$  有何差别？

答：作图法将退磁曲线近似为一段直线。但是，实验实际测量得到的结果明显偏离直线，因此用作图法得到的结果并不准确。通过计算得到的  $(BH)_M$ ，其精确度只和测量精度有关，因此，计算得到的  $(BH)_M$  比作图法精确。

## 参考文献

- [1]王德芳，叶妙元，磁测量[M].北京：机械工业出版社，1990
- [2]南京大学近代物理教研室.近代物理实验[M].南京：南京大学出版社，1997
- [3]李国栋，当代磁学[M].合肥：中国科技大学出版社，1999