

# 巨磁电阻效应实验

## 【实验目的】

1. 了解巨磁电阻效应原理，测量不同磁场下的巨磁电阻阻值  $R_B$ ，作  $R_B/R_0 - B$  关系图，求电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值；
2. 学习巨磁电阻传感器定标方法，计算巨磁电阻传感器灵敏度，由巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$ ，得到电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值；
3. 测定巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  与其工作电压  $V_+$  的关系；
4. 测定巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  与通电导线电流  $I$  的关系。

## 【实验原理】

### （一）巨磁电阻效应

早在 1856 年，英国物理学家 W. 汤姆孙就发现了磁致电阻效应。所谓磁致电阻效应是指由磁场引起材料电阻变化的现象。通常以电阻率的相对变化率  $\Delta\rho/\rho_0$  来表示磁电阻的大小， $\Delta\rho/\rho_0 = (\rho_H - \rho_0)/\rho_0$ ，其中  $\rho_H$  和  $\rho_0$  分别为磁场强度为  $H$  和零时的电阻率。也可以用  $\Delta R/R_0 = (R_B - R_0)/R_0$  来表示，其中  $R_B$  和  $R_0$  分别为磁感应强度为  $B$  和零时的电阻。目前发现的磁电阻效应有：正常磁电阻效应（OMR）、各向异性磁电阻效应（AMR）、巨磁电阻效应（GMR）、庞磁电阻效应（CMR）及隧穿磁电阻效应（TMR）等。

1988 年法国巴黎大学阿尔贝·费尔教授和德国优利西研究所的彼得·格林贝格尔教授分别独立发现了巨磁电阻效应，因而共同获得了 2007 年诺贝尔物理学奖。巨磁电阻材料的电阻率在有外磁场作用时较之无外磁场作用时大幅度减小， $\Delta\rho/\rho_0$  比各向异性磁电阻效应高一到两个数量级。磁场的微弱变化将导致巨磁电阻材料电阻值产生明显改变，从而能够用来探测微弱信号。一般材料的  $\Delta\rho/\rho_0$  值都很小，通常小于 1%；各向异性磁电阻材料（例如坡莫合金）， $\Delta\rho/\rho_0$  可达到 3%；而巨磁电阻材料  $\Delta\rho/\rho_0$  通常都在 -10% 以上，有些可达到 -100% 以上。因此，巨磁电阻材料受到了世界各国学术界和工业界的巨大关注，在短时间内取得了令人瞩目的理论及实验成果，并迅速进入应用领域获得巨大成功。

巨磁电阻是一种层状结构，由厚度为几个纳米的铁磁金属层（Fe, Co, Ni 等）和非磁性金属层（Cr, Cu, Ag 等）交替制成的，相邻铁磁金属层的磁矩方向相反。这种多层膜的电阻随

外磁场变化而显著变化。当外磁场为零时，材料电阻最大；当外磁场足够大时，原本反平行的各层磁矩都沿外场方向排列，材料电阻最小。

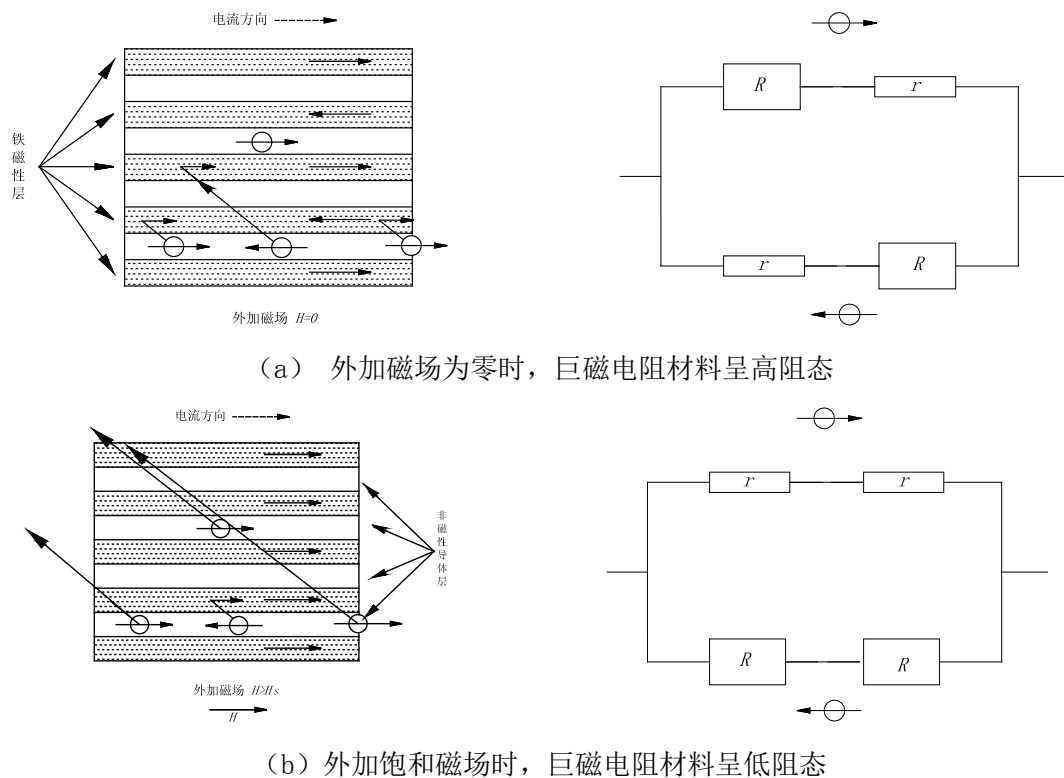


图 1 二流体模型对巨磁电阻效应的解释

巨磁电阻效应可以由二流体模型来解释。在铁磁金属中，导电的  $s$  电子要受到磁性原子磁矩的散射作用，散射的几率取决于导电的  $s$  电子自旋方向与薄膜中磁性原子磁矩方向的相对取向。即自旋方向与磁矩方向一致的电子受到的散射作用很弱，自旋方向与磁矩方向相反的电子则受到强烈的散射作用，而传导电子受到的散射作用的强弱直接影响到材料电阻的大小。

根据二流体模型，传导电子分成自旋向上和自旋向下两种，由于多层膜中非磁性金属层对两组自旋状态不同的传导电子的影响是相同的，所以只考虑磁层的影响。外加磁场为零时，相邻铁磁层的磁矩方向相反，如图 1a 所示，两种电子都在穿过与其自旋方向相同的磁层后，在下一磁层受到强烈的散射，宏观上看，巨磁电阻材料处于高电阻状态。当外加磁场足够大时，如图 1b 所示，原本反平行排列的各磁层磁矩都沿外磁场方向排列，一半电子可以穿过许多磁层只受到很弱的散射，另一半在每一层都受到很强的散射，宏观上，材料处于低电阻状态。这样就产生了巨磁电阻现象。

## （二）巨磁电阻传感器

本仪器所用巨磁电阻传感器采用惠斯登电桥和磁通屏蔽技术。传感器基片上镀了一层很

厚的磁性材料，这层材料对其下方的巨磁电阻形成屏蔽，不让任何外加磁场进入被屏蔽的电阻器。惠斯登电桥（见图 2a）由四只相同的巨磁电阻组成，其中  $R_1$  和  $R_3$  在磁性材料的上方，受外磁场作用时电阻减小，而  $R_2$  和  $R_4$  在磁性材料的下方，被屏蔽而不受外磁场影响，电阻不变。

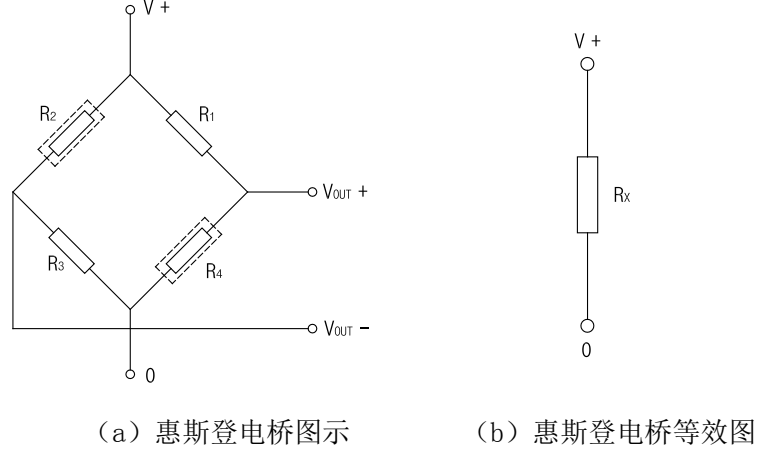


图 2 巨磁电阻传感器示意图

由巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$ ，得到电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值：

由图 2a 可知：
$$V_{\text{输出}} = V_{OUT+} - V_{OUT-} = V_+ R_4 / (R_1 + R_4) - V_+ R_3 / (R_2 + R_3) \quad (1)$$

当外磁场为 0 时， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ ，传感器输出  $V_{\text{输出}}$  为 0；当外磁场不为 0 时，未被屏蔽的巨磁电阻  $R_1 = R_3 = R_B$ ，电阻值随磁场增加而减小，被屏蔽的巨磁电阻  $R_2 = R_4 = R_0$ ，电阻值不随磁场变化。由公式（1）得到：

$$V_{\text{输出}} = V_+ (R_0 - R_B) / (R_0 + R_B) \quad (2)$$

由公式（2）得到：
$$R_B / R_0 = (V_+ - V_{\text{输出}}) / (V_+ + V_{\text{输出}}) \quad (3)$$

$$(R_B - R_0) / R_0 = -2V_{\text{输出}} / (V_+ + V_{\text{输出}}) \quad (4)$$

测量不同磁场下的巨磁电阻阻值  $R_B$ ，得到电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值：

若将图 2a 中惠斯登电桥的四只巨磁电阻等效成一只巨磁电阻  $R_X$ （见图 2b），则有：

$$R_X = \frac{1}{2} (R_B + R_0) \quad (5)$$

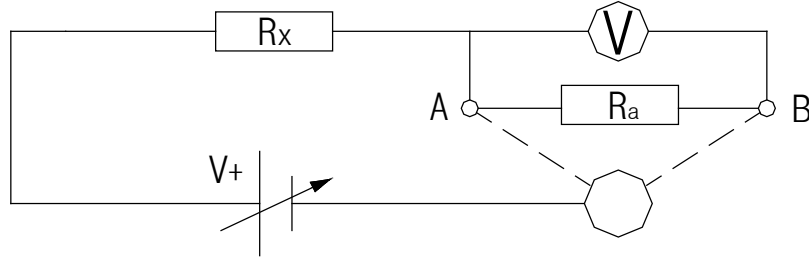


图 3 巨磁电阻测量示意图

图 3 为巨磁电阻  $R_X$  测量示意图，其中  $R_a$  为精密电阻，阻值为  $4.70\text{K}\Omega$ 。当白色波段开关拨至 B 点时，精密电阻  $R_a$  与巨磁电阻  $R_X$  串联，为巨磁电阻阻值与磁感应强度关系测量实验（其他实验时，拨至 A 点， $R_a$  不接入电路）。可调电源  $V_+$  需调节在  $4\text{V}$  以内，因为测量  $R_a$  两端电压的电压表量程为  $2\text{V}$ 。当外磁场为零时，电压表显示  $V_0$ （即  $R_a$  分压），则由公式（5）得到：

$$R_X \Big|_{B=0} = R_0$$

$$\frac{V_+ - V_0}{R_X \Big|_{B=0}} = \frac{V_0}{R_a}$$

推出：

$$R_0 = \frac{V_+ - V_0}{V_0} R_a \quad (6)$$

当磁场不为 0 时，由于  $R_B$  随磁场增加而逐渐减小，导致  $R_a$  分压  $V$  逐渐增加，直至饱和，则：

$$R_X = \frac{V_+ - V}{V} R_a \quad (7)$$

由公式（5）可以得到：

$$R_B = 2R_X - R_0 \quad (8)$$

巨磁电阻传感器应用广泛，可用来测量弱磁场、角度、转速、位移、电流等，与各向异性磁电阻传感器相比，具有灵敏度更高、线性范围宽、可靠性高、寿命长，抗恶劣环境等优点。巨磁电阻传感器可制成测速仪、定向仪、验钞机等，可用于汽车无人驾驶、卫星定位、安全检查等各种自动控制系统，另外巨磁电阻传感器在医疗方面也有很大应用。本仪器主要介绍了巨磁电阻传感器在测量电流方面的应用。

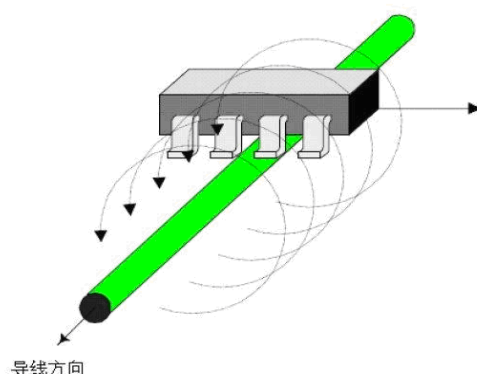


图 4 巨磁电阻传感器用于测量电流

由于巨磁电阻传感器灵敏度高，因此能有效的检测到由待测电流产生的磁场，进而得到待测电流的大小。用巨磁电阻传感器测量通电导线电流值时，导线放在传感器的上方或下方，电流方向需平行于管脚，见图 4。通电导线会在导线周围产生环形磁场，其磁感应强度与电流大小成正比。当传感器中的巨磁电阻材料感应到磁场，传感器就产生一个电压输出。当电流增大时，周围的磁场增大，传感器的输出也增大；同样，当电流减小时，周围磁场和传感器输出都减小。

### 【实验装置】



图 5 巨磁电阻效应实验仪装置图

FD-GMR-B 型巨磁电阻效应实验仪主要由两台实验主机，实验装置架及各种连接线组成。实验装置架包括亥姆霍兹线圈和巨磁电阻传感器，实验主机含亥姆霍兹线圈用恒流源，待测直流电源，传感器工作电源，传感器输出测量表及巨磁电阻测量表等。

## 【实验内容】

**实验一** 了解巨磁电阻效应原理，测量不同磁场下的巨磁电阻阻值  $R_B$ ，作  $R_B/R_0 - B$  关系图，求电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值

1. 用航空线连接主机和实验装置，将亥姆霍兹线圈用红黑导线串联起来，与主机上的线圈用恒流源相连，将测量电压表下的白色波段开关拨向 B 点；
2. 打开主机，将线圈电压调零，传感器工作电压调为 3V 左右，逐渐升高线圈电流，可以看见测量电压表的输出逐渐增大，将线圈电流归零；
3. 记下线圈电流为 0 时测量电压表的数值  $V_0$ ，从 0 开始逐渐升高线圈电流。每隔 0.05A 左右记一次测量电压表的输出值  $V$ ；
4. 计算不同磁场下的巨磁电阻阻值  $R_B$ ，作  $R_B/R_0 - B$  关系图，求  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值。

**实验二** 学习巨磁电阻传感器定标方法，计算巨磁电阻传感器灵敏度，由巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$ ，得到电阻相对变化率  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值

1. 将传感器输出表头下的放大倍数档调至  $\times 1$  档，测量电压表下的白色波段开关拨向 A 点；
2. 打开主机，将线圈电流调零，传感器工作电压调为 5V 左右，将传感器输出调零。逐渐升高线圈电流，可以看见传感器输出逐渐增大，将线圈电流和传感器输出再次归零；
3. 将线圈电流由零开始逐渐增大，每隔 0.05A 左右记一次传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$ ；
4. 以传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  为 Y 轴，磁场  $B$  为 X 轴作图，得到巨磁电阻传感器的灵敏度  $K$ ；
5. 由巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  推算  $(R_B - R_0)/R_0$  的最大值。

**实验三** 测定巨磁电阻传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  与其工作电压  $V_+$  的关系

1. 将传感器输出表头下的放大倍数档调至  $\times 1$  档，测量电压表下的白色波段开关拨向 A 点；
2. 打开主机，将线圈电流调零，传感器工作电压调为 2V 左右，传感器输出调零，将线圈电流调至 0.6A 左右，记下传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$ ，将传感器工作电压  $V_+$  逐渐升高，每隔 1V 左右记一次传感器在线圈电流为 0.6A 时的输出  $V_{\text{输出}}$ （每次变换传感器工作电压都需重新调零）；
3. 以传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  为 Y 轴，传感器工作电压  $V_+$  为 X 轴作图。

#### 实验四 测定巨磁电阻传感器输出电压 $V_{\text{输出}}$ 与通电导线电流 $I$ 的关系

1. 用红黑导线将实验装置黑色底板上的插座与主机上的被测电流相连，将传感器输出表头下的放大倍数档调至 $\times 10$ 档，测量电压表下的白色波段开关拨向 A 点；
2. 将被测电流调零，传感器工作电压调为 5V 左右，巨磁电阻传感器输出调零，逐渐升高被测电流，可以看见传感器输出逐渐增大，将被测电流和传感器输出再次归零；
3. 将被测电流由零开始逐渐增大，每隔 0.5A 左右记一次传感器输出电压，以传感器输出电压  $V_{\text{输出}}$  为  $Y$  轴，被测电流值  $I$  为  $X$  轴作图。

注：线圈电流或被测电流不用时均要调为零，避免测量时两磁场叠加，引起测量误差。

#### 【注意事项】

1. 实验中，需注意地磁场对实验产生的影响；
2. 使用磁性传感器时，应尽量避免铁质材料和可以产生磁性的材料在传感器附近出现；
3. 仪器上的恒流源不用时应归零，以提高使用寿命。