

## 实验 A3 巨磁电阻效应实验

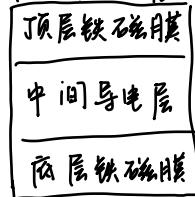
[实验前思考题]

1. 什么是巨磁电阻效应？
2. 巨磁电阻结构组成有何特点？
3. 检索资料，尽可能多地列举测量磁感应强度的方法。

1. 磁性材料电阻率在有外磁场时产生巨大变化的效应。

2.

← 无外磁场时顶层磁化方向



巨磁电阻有多层膜结构和自旋阀结构。多层膜结构中无外磁场时顶层与底层磁化方向相反都与外磁场方向一致，称为平行耦合。施加足够强的外磁场后，两层铁磁膜磁化方向都与外磁场磁化方向一致。自旋阀结构中外磁场能改变自由层磁感应强度的方向。

无外磁场时底层磁化方向 →

3. ① 电流天平法 ② 磁偏转法 ③ 电磁感应法 ④ 霍尔效应法。

(请自行加页)



## [ 实验目的 ]

1. 了解 GMR 效应的原理。
2. 测量 GMR 模拟传感器的磁电转换特性曲线。
3. 测量 GMR 的磁阻特性曲线。
4. 测量 GMR 开关(数字)传感器的磁电转换特性曲线。
5. 用 GMR 传感器测量电流。
6. 用 GMR 梯度传感器测量齿轮的角度移，了解 GMR 转速(速度)传感器的原理。
7. 通过实验了解磁记录与读出的原理。

## [ 仪器用具 ]

| 编号 | 仪器名称    | 数量 | 主要参数(型号, 测量范围, 测量精度等)    |
|----|---------|----|--------------------------|
| 1  | 巨磁电阻实验仪 | 1  | ZKY - JCZ                |
| 2  | 基本特性组件  | 1  | ZKY - JCZ - S1 24000 高/m |
| 3  | 电流测量组件  | 1  | ZKY - JCZ - S3           |
| 4  | 角位移测量组件 | 1  | ZKY - JCZ - S4           |
| 5  | 磁读写组件   | 1  | ZKY - JCZ - S2           |
| 6  | 导线      | 若干 |                          |

## [ 原理概述 ]

### 1. 磁电阻效应(MR)

磁电阻效应全称为磁致电阻变化效应(magneto resistance effect, 简称MR)，指金属或半导体材料的电阻值随外加磁场作用而改变的效应。磁电阻效应的强弱可用磁电阻率来表示

$$MR = (\rho_B - \rho_0)/\rho_0 \quad (1)$$

其中 $\rho$ 为电阻率，与电阻的几何尺度无关， $\rho_B$ 为施加磁感应强度为 $B$ 的外磁场时样品的电阻率， $\rho_0$ 为没有外磁场时的电阻率。MR效应普遍存在于各种磁性和非磁性材料中。

### 2. 巨磁电阻效应(GMR)

电子除携带电荷外，还具有自旋特性，自旋磁矩有平行或反平行于外磁场两种可能取向。1936年，诺贝尔奖获得者N. F. Mott指出，在过渡金属中，自旋磁矩与材料的磁场方向平行的电子，所受散射几率远小于自旋磁矩与材料的磁场方向反平行的电子。总电

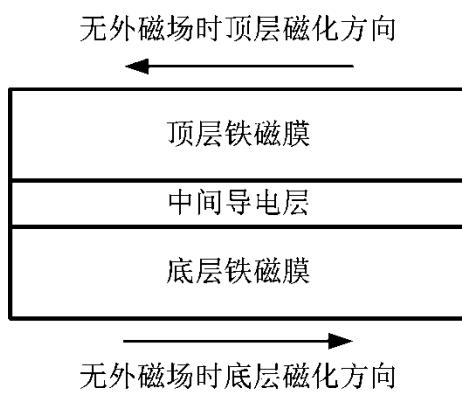
流是两类自旋电流之和；总电阻是两类自旋电流的并联电阻，称为双电流模型。

在图1(a)所示的多层膜结构中，设电流的方向平行于膜面。无外磁场时，上下两层磁性材料的磁化方向是相反的，称为反平行(或反铁磁)耦合。施加足够强的外磁场后，两层铁磁膜的磁化方向都与外磁场方向一致，称为平行耦合。外磁场使两层铁磁膜从反平行耦合变成了平行耦合，此过程中中间层电阻发生显著变化。这种效应称为巨磁电阻效应(Giant Magneto Resistance, GMR)。分别由法国物理学家阿贝尔·费尔(Albert Fert)和德国物理学家彼得·格伦贝格(Peter Grunberg)在铁-铬-铁薄膜周期结构中发现，并因此获得2007年的诺贝尔物理学奖。

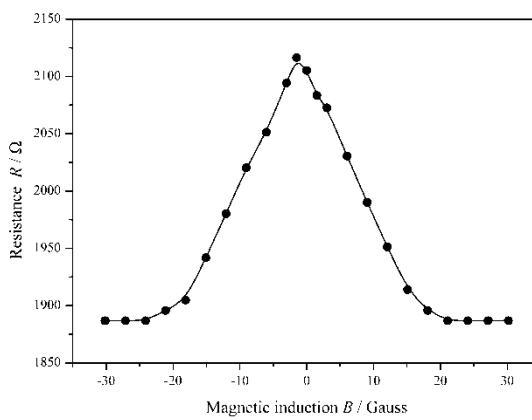
在巨磁电阻样品中，有两类与自旋相关的散射会影响巨磁电阻效应，分别为界面上的散射和铁磁膜内的散射。无外磁场时对应高电阻状态，有外磁场时对应低电阻状态。

目前，电脑等各类数码电子产品中所装备的硬盘磁头，基本上都应用GMR效应，该效应使硬盘的容量提高几百倍，达到TB的量级。利用巨磁电阻效应制成的多种传感器，也已广泛应用于各种测量和控制领域。

图1(b)为某种GMR样品的磁阻特性，即电阻随外磁场强度的变化关系曲线，中间峰值 $R_0$ 的位置对应外磁场感应强度 $B = 0$ 。随着外磁场增大，电阻逐渐减小，其间有一段线性区域。当外磁场已使两铁磁膜磁化方向完全平行耦合后，继续加大磁场，电阻不再减小，进入磁饱和区域。磁阻变化率 $\Delta R/R$ 超过10%。加上反向磁场时磁阻特性是对称的。由于铁磁材料的磁化具有一定的滞后性(表现为磁滞回线)，故磁场增大与磁场减小过程中的磁阻特性略有不同。



(a) 多层膜 GMR 结构示意图



(b) 某种 GMR 材料的磁阻特性

图 1 多层膜 GMR 结构

### 3. 自旋阀结构的GMR

在数字记录与读出领域,为进一步提高GMR样品的灵敏度,发展了自旋阀结构的GMR(Spin valve GMR, SV-GMR)。如图2所示,SV-GMR在图2(a)所示结构的基础上增加了一层反铁磁材料层,称为钉扎层。底层铁磁膜采用硬铁磁材料,称为被钉扎层。两层之间的相互耦合作用使得被钉扎层磁化强度的方向固定下来,不随外加磁场的变化而改变。顶层铁磁膜采用软铁磁材料,初始磁化方向与被钉扎层的磁化方向相互垂直,称为自由层,其磁化方向易于随外磁场转动。采用这种结构,很弱的外磁场就会改变自由层磁感应强度的方向,磁灵敏度很高。

当磁记录材料的磁化方向与被钉扎层的方向相同时,自由层的磁化方向与被钉扎层同向,GMR处于低电阻状态,对应数字0;当方向相反时,GMR处于高电阻状态,对应数字1。检测出GMR电阻的变化,就可确定记录材料所记录的信息,硬盘所用的GMR磁头就采用这种结构。

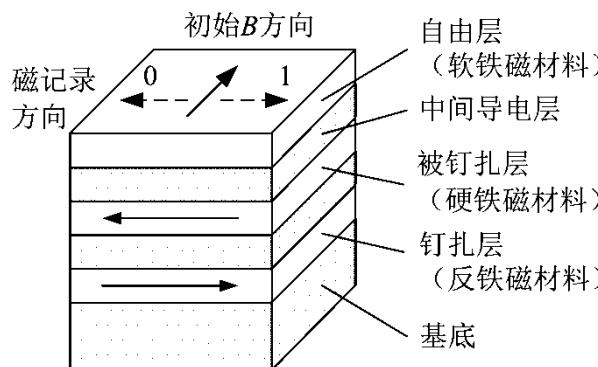


图 2 SV-GMR 结构示意图

#### 4. GMR传感器结构

实用的GMR传感器常做成图3所示的电桥形式,其中 $R_3$ 和 $R_4$ 覆盖了一层高导磁材料进行磁屏蔽,其阻值保持不变,桥臂平衡由 $R_1$ 和 $R_2$ 决定。当外磁场为零时,四个电阻的阻值均为 $R$ (通常为 $k\Omega$ 量级),电桥平衡,输出电压 $U_{out}$ 几乎为零。由于半导体工艺的限制,4个桥臂电阻值不一定完全相同,导致外磁场为零时输出不一定为零,但电压值不大。当有外加磁场时, $R_3 = R_4 = R$ 保持不变, $R_1$ 和 $R_2$ 变化 $\Delta R$ ,电桥失去平衡,输出电压

$$U_{out} = U_{in}\Delta R / (2R - \Delta R) \quad (3)$$

测出 $U_{out}$ 值(通常为mV量级),就可以推算出磁感应强度的数值。

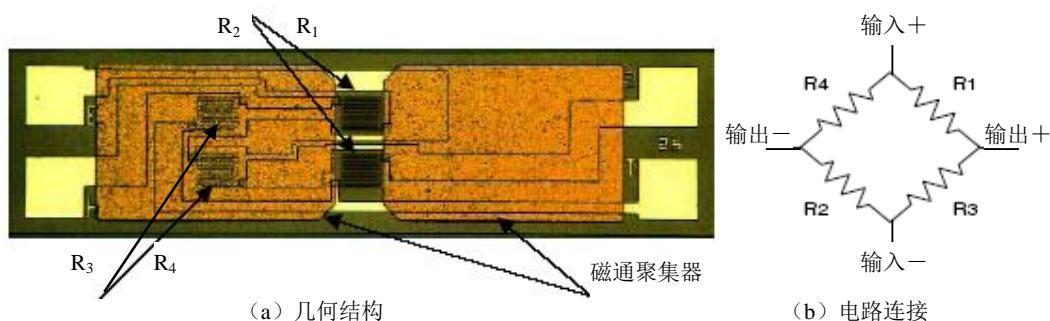


图 3 GMR 传感器结构

## [ 实验设备 ]



图 4 巨磁电阻效应及应用实验仪前面板

实验仪从上到下分成 4 个区域：

- (1) 电流表，有 2mA 和 200mA 两个档位，由电流量程按钮选择。
- (2) 电压表，有 2V 和 200mV 两个档位，由电压量程按钮选择。
- (3) 恒流源，输出电流连续可变，有 2A 和 200mA 两个档位，由检测量程按钮选择。
- (4) 电压源，包括 GMR 传感器工作时所需的 4V 电压和运算放大器电路所需的 8V 电压。



图 5 巨磁电阻效应及应用实验所需配件

## [ 安全注意事项 ]

1. 由于巨磁阻传感器具有磁滞现象，故实验中恒流源只能单方向调节，不可回调。否则测得的实验数据将不准确。
2. 测试卡组件不能长期处于“写”状态。
3. 实验过程中，实验设备附近不得有强磁场。

## [ 实验内容及步骤 ]

### 1. GMR 传感器的磁电转换特性测量

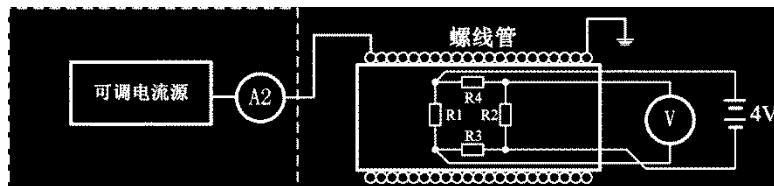


图 6 GMR 传感器磁电转换特性测量原理图

(1) 采用图 5(a)所示的基本特性组件，将 GMR 传感器置于螺线管中，“功能切换按钮”置“传感器测量”。组件的“螺线管电流输入”端接恒流源，“巨磁电阻供电”端接 4V 电源，“模拟信号输出”端接电压表。实验原理如图所示。

(2) 测量时先将励磁电流  $I_M$  调至+100mA，然后逐渐减小  $I_M$ ，即减小磁感应强度  $B$ ，记录相应的输出电压值  $U_{out}$ 。由于恒流源不提供负向电流，当  $I_M$  减至 0 时，需交换恒流输出接线的极性，使  $I_M$  反向；相应地，螺线管内的  $B$  也反向，将该方向定义为负。增大  $I_M$ ，记录  $U_{out}$ 。

(3)  $I_M = -100\text{mA}$  后，逐渐减小至 0，交换恒流源输出接线的极性后，再继续增加至+100mA。记录  $U_{out}$ 。

(4) 根据螺线管上标明的线圈密度  $n$ ，由式 (4) 计算出螺线管内的磁感应强度  $B$ ，

$$B = \mu_0 n I_M \quad (4)$$

其中  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$  为真空磁导率。采用国际单位制时，由上式计算出的  $B$  值的单位为特斯拉 (Tesla, T)， $1\text{T}=10000\text{Gauss}$ 。

(5) 以  $B$  作横座标， $U_{out}$  为纵座标，作出 GMR 传感器的磁电转换特性曲线。

### 2. GMR 磁阻特性测量

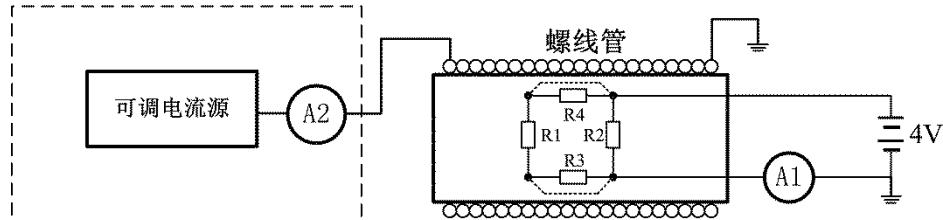


图 7 GMR 磁阻特性测量原理

- (1) 组件不变，“螺线管电流输入”和“模拟信号输出”接线不变，“功能切换按钮”置“巨磁阻测量”，实验仪的4伏电压源串联电流表后接“巨磁电阻供电”。
- (2) 调节励磁电流  $I_M$ , 按 $+100\text{mA} \rightarrow 0 \rightarrow -100\text{mA} \rightarrow 0 \rightarrow +100\text{mA}$ 的规律逐点改变磁感应强度  $B$ , 记录相应的磁阻电流  $I_R$ 。注意  $I_M=0$  时需要改变励磁电流接线的极性。
- (3) 根据式(4)计算  $B$ , 根据  $R = U/I_R$  计算磁阻。以  $B$  为横坐标,  $R$  为纵坐标, 作出 GMR 传感器的磁阻特性曲线。

### 3. GMR 开关(数字)传感器的磁电转换特性曲线测量

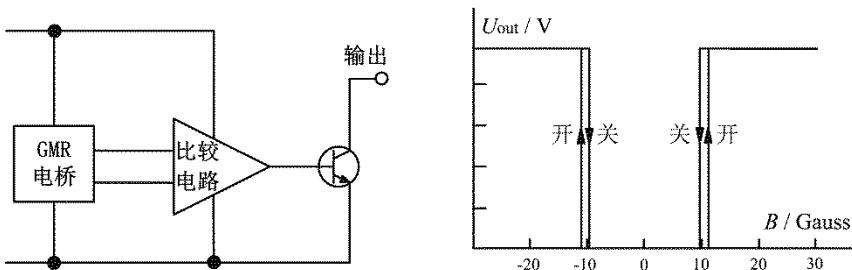


图 8 GMR 数字传感器工作原理

(1) 组件不变，“螺线管电流输入”接线不变，“功能切换按钮”置“传感器测量”。“巨磁电阻供电”接4伏电压源，“电路供电”端接实验仪8V的“电路供电”端口，“开关信号输出”接电压表。

(2) 调节励磁电流  $I_M$ , 按 $+50\text{mA} \rightarrow 0 \rightarrow -50\text{mA} \rightarrow 0 \rightarrow +50\text{mA}$ 的规律逐渐改变磁感应强度  $B$ , 仔细观察并记录该过程中  $U_{out}$  发生跳变时对应  $I_M$  的数值和方向, 以及  $U_{out}$  跳变前后的电压值, 确定是由高电平 $\rightarrow$ 低电平还是由低电平 $\rightarrow$ 高电平跳变。

(3) 根据式(4)计算  $B$ , 以  $B$  为横坐标,  $U_{out}$  为纵坐标作出 GMR 开关传感器的磁电转换特性曲线。

### 4. 用 GMR 传感器测量电流

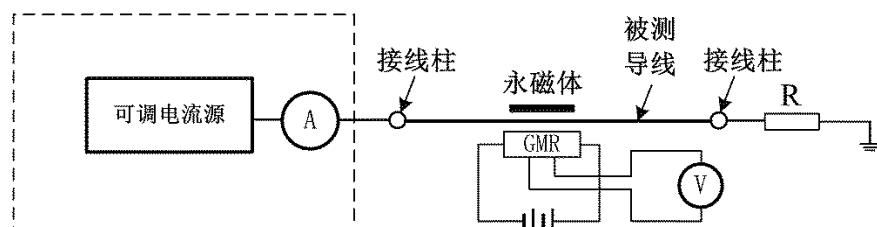


图 9 GMR 传感器测电流的原理

- (1) 采用图 5(b) 的电流测量组件, “待测电流输入”端接恒流源, “巨磁电阻供电”接4伏电压源, “信号输出”接电压表。测量原理如图所示。
- (2) 待测电流  $I$  调为 0, 调节永磁体与 GMR 传感器的距离, 使  $U_{out}$  约 25mV。
- (3) 调节待测电流  $I$ , 按 $+300\text{mA} \rightarrow 0 \rightarrow -300\text{mA} \rightarrow 0 \rightarrow +300\text{mA}$ 的规律逐点改变, 记录相应的



输出电压  $U_{out}$ 。注意  $I=0$  时需要改变恒流源接线的极性。

- (4) 待测电流  $I$  调为 0, 调节永磁体与 GMR 传感器的距离, 使  $U_{out}$  约 150mV。
- (5) 用相同的实验方法, 测量  $U_{out}$  随  $I$  变化的数值。
- (6) 以  $I$  为横坐标,  $U_{out}$  为纵坐标, 在同一幅图中画出 4 条曲线。画图时要注意将不同的曲线标识清楚。

## 5. GMR 梯度传感器的特性及应用

- (1) 采用图 5 (c) 的角位移测量组件, “巨磁电阻供电”接 4V 电压源, “信号输出”接电压表。
- (2) 逆时针慢慢转动齿轮, 当  $U_{out} = 0$  时记录起始角度  $\theta_0$ , 之后每转一定角度记录一次角度  $\theta$  与  $U_{out}$  值, 要求记录的  $U_{out}$  变化 2 个周期以上, 数据点不少于 20 个。角度间隔由学生根据实验情况自行确定。
- (3) 以  $\theta$  为横坐标,  $U_{out}$  为纵坐标作图。

## 6. 磁记录与读出

- (1) 采用图 5 (d) 的磁读写组件。“巨磁电阻供电”端接 4 伏电压源, “电路供电”端接实验仪的 8V “电路供电”端, “读出数据”端接电压表。同时按下“0/1 转换”和“写确认”按键约 2 秒将读写组件初始化后就可以进行读写操作。
- (2) 先写出需要写入与读出的十进制数字的二进制数据。数字  $\leq 2^8=256$ 。
- (3) 写入: 将磁卡有磁条和刻度线的一面朝向传感器并朝向实验者, 沿着箭头标识的方向插入划槽, 以磁卡上的刻度区域线为开始和结束的标志, 写入上述二进制数据。按“0/1 转换”按键, 当状态指示灯为红色表示当前为“写 1”状态, 绿色表示为“写 0”状态。当刻度区域线到达磁头边界时, 按住“写确认”按键不放开始写入, 缓慢移动磁卡至该区域写入状态完全相同时停止。
- (4) 完成写数据后, 松开“写确认”按键, 组件处于“读”状态。将磁卡移动到读磁头区, 根据刻度区域在电压表上读出相应的输出电压并记录。
- (5) 注意, 由于测试卡区域的两端数据记录可能不准确, 因此实验中只记录中间的 1~8 号区域的数据。

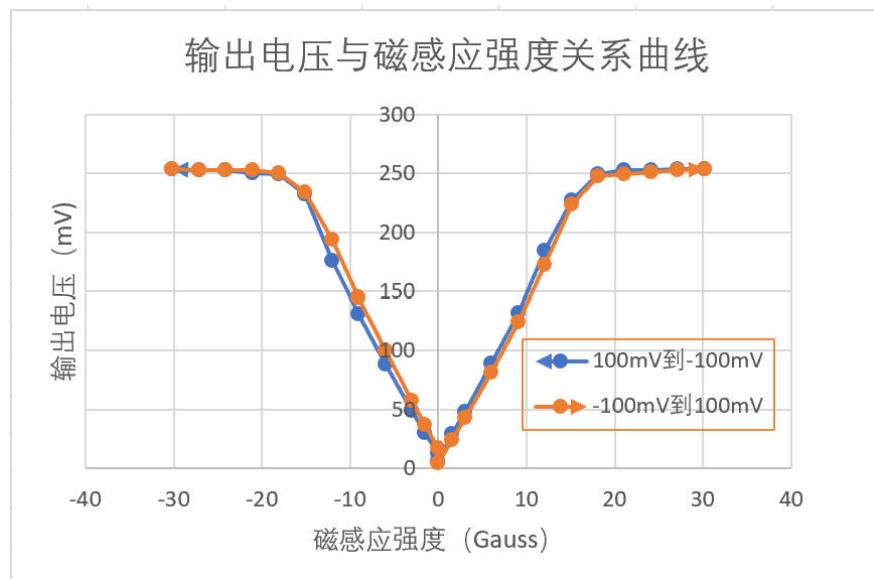


## [ 数据记录及处理 ]

## 1. GMR 传感器的磁电转换特性测量

## (1) 实验数据

| 螺线管磁感应强度<br>$B/\text{Gauss}$ | 输出电压 $U_{out}/\text{mV}$           |                                     |                                     |                                    |     |
|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----|
|                              | $I_M=100 \text{ mA} \rightarrow 0$ | $I_M=0 \rightarrow -100 \text{ mA}$ | $I_M=-100 \text{ mA} \rightarrow 0$ | $I_M=0 \rightarrow 100 \text{ mA}$ |     |
| 励磁电流<br>$I_M/\text{mA}$      | $B/\text{Gauss}$                   |                                     |                                     |                                    |     |
| 100                          | 30.16                              | 254                                 | 254                                 | 254                                | 254 |
| 90                           | 27.14                              | 254                                 | 253                                 | 253                                | 253 |
| 80                           | 24.13                              | 253                                 | 253                                 | 253                                | 251 |
| 70                           | 21.11                              | 253                                 | 252                                 | 253                                | 249 |
| 60                           | 18.10                              | 249                                 | 249                                 | 250                                | 248 |
| 50                           | 15.08                              | 227                                 | 232                                 | 234                                | 224 |
| 40                           | 12.06                              | 184                                 | 176                                 | 194                                | 172 |
| 30                           | 9.05                               | 132                                 | 131                                 | 145                                | 124 |
| 20                           | 6.03                               | 89                                  | 88                                  | 100                                | 81  |
| 10                           | 3.02                               | 48                                  | 49                                  | 57                                 | 43  |
| 5                            | 1.51                               | 29                                  | 30                                  | 37                                 | 24  |
| 0                            | 0                                  | 6                                   | 13                                  | 17                                 | 4   |

(2) 作  $U_{out}-B$  关系曲线 (在图中用几个箭头标出磁感应强度变化的方向)

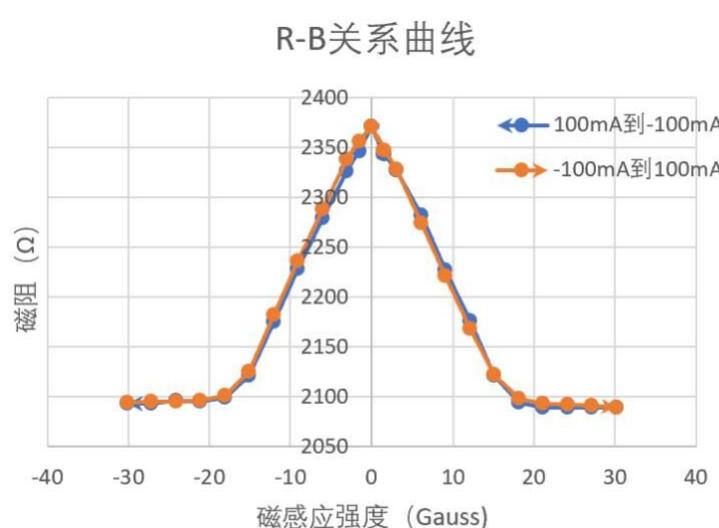


## 2. GMR 磁阻特性测量:

(1) 实验数据  $U = 4V$

| 螺线管磁感应强度<br>$B/\text{Gauss}$ | 磁阻电流 $I_R / \text{mA}$ , 磁阻 $R/\Omega$             |                   |  |                   |            |
|------------------------------|--|-------------------|--|-------------------|------------|
|                              | $I_M = 100 \text{ mA} \rightarrow -100 \text{ mA}$ |                   | $I_M = -100 \text{ mA} \rightarrow 100 \text{ mA}$ |                   |            |
| 励磁电流<br>$I_M / \text{mA}$    | 磁感应强度<br>$B / \text{Gauss}$                        | $I_R / \text{mA}$ | $R/\Omega$   | $I_R / \text{mA}$ | $R/\Omega$ |
| 100                          | 30.16  | 1.911             | 2093.1   | 1.910             | 2094.2     |
| 90                           | 27.14  | 1.911             | 2093.1   | 1.909             | 2095.3     |
| 80                           | 24.13  | 1.908             | 2096.4   | 1.909             | 2095.3     |
| 70                           | 21.11  | 1.909             | 2095.3   | 1.908             | 2096.4     |
| 60                           | 18.1   | 1.906             | 2098.6   | 1.904             | 2100.8     |
| 50                           | 15.08  | 1.886             | 2120.8   | 1.882             | 2125.4     |
| 40                           | 12.06  | 1.839             | 2175.1   | 1.833             | 2182.2     |
| 30                           | 9.05   | 1.795             | 2228.4   | 1.789             | 2235.9     |
| 20                           | 6.03   | 1.755             | 2279.2   | 1.748             | 2288.3     |
| 10                           | 3.02   | 1.720             | 2325.5   | 1.717             | 2337.8     |
| 5                            | 1.51   | 1.705             | 2346.0   | 1.698             | 2355.7     |
| 0                            | 0  | 1.687             | 2371.1   | 1.687             | 2371.0     |
| -5                           | -1.51  | 1.707             | 2343.3   | 1.704             | 2347.4     |
| -10                          | -3.02  | 1.719             | 23326.9  | 1.718             | 2328.3     |
| -20                          | -6.03  | 1.753             | 2281.8   | 1.759             | 2274.0     |
| -30                          | -9.05  | 1.796             | 2227.1   | 1.801             | 2221.0     |
| -40                          | -12.06   | 1.838             | 2176.2   | 1.845             | 2168.0     |
| -50                          | -15.08   | 1.886             | 2120.8   | 1.885             | 2122.0     |
| -60                          | -18.10   | 1.910             | 2094.2   | 1.907             | 2097.5     |
| -70                          | -21.11   | 1.915             | 2088.8   | 1.911             | 2093.1     |
| -80                          | -24.13   | 1.915             | 2088.8   | 1.912             | 2092.0     |
| -90                          | -27.14   | 1.915             | 2088.8   | 1.913             | 2091.0     |
| -100                         | -30.16   | 1.915             | 2088.8   | 1.915             | 2088.8     |

(2) 作  $R-B$  关系曲线 (在图中用几个箭头标出磁感应强度变化的方向)





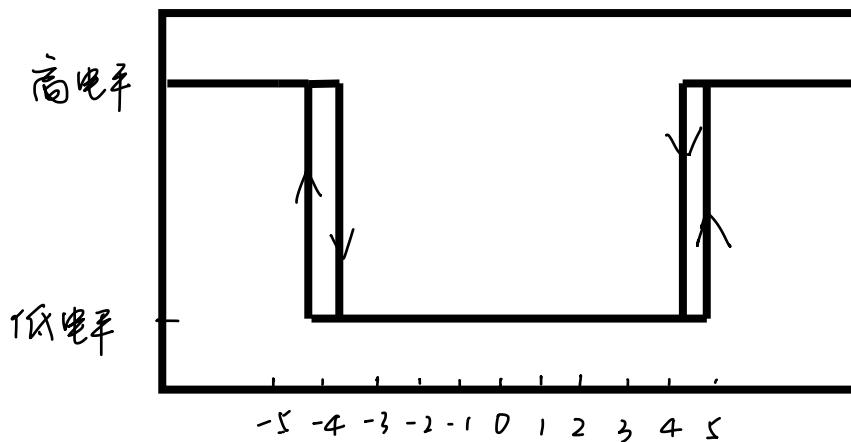
### 3. GMR 开关(数字)传感器的磁电转换特性曲线测量:

#### (1) 实验数据

高电平: 1V, 低电平: -1V;

| $I_M = +50 \text{ mA} \rightarrow -50 \text{ mA}$ |                 |                  | $I_M = -50 \text{ mA} \rightarrow +50 \text{ mA}$ |                 |                  |
|---|-----------------|------------------|---|-----------------|------------------|
| 开关动作  | $I_M/\text{mA}$ | $B/\text{Gauss}$ | 开关动作  | $I_M/\text{mA}$ | $B/\text{Gauss}$ |
| 关(高→低)  | 13.8            | 4.16             | 关(高→低)  | -11.7           | -3.53            |
| 开(低→高)  | -14.3           | -4.31            | 开(低→高)  | 16.1            | 4.86             |

#### (2) 作 $U-B$ 关系曲线

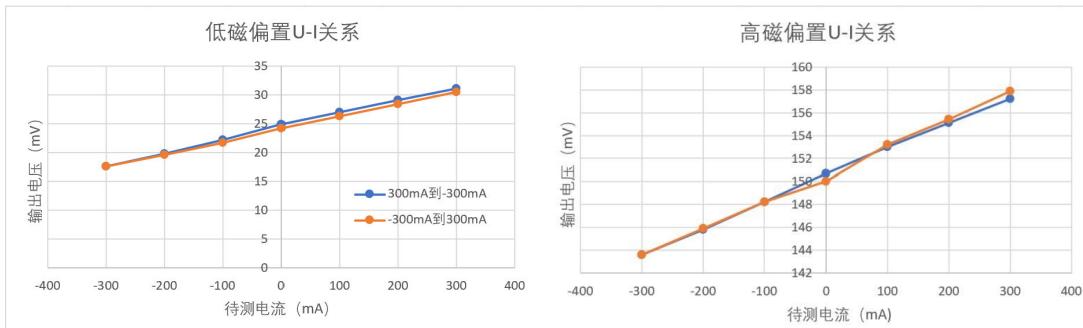


$U-B$  关系曲线.

### 4. 用 GMR 模拟传感器测量电流

#### (1) 实验数据 $U=4V$

| 待测电流 $I/\text{mA}$ |                  |   | 300   | 200   | 100   | 0     | -100  | -200  | -300  |
|--------------------|------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 输出电压 /mV           | 低磁偏置<br>(约25mV)  | $I=+300\text{mA} \rightarrow -300\text{mA}$ | 31.1  | 29.1  | 27.0  | 24.9  | 22.2  | 19.8  | 17.6  |
|                    |                  | $I=-300\text{mA} \rightarrow +300\text{mA}$ | 30.5  | 28.4  | 26.3  | 24.2  | 21.7  | 19.6  | 17.6  |
|                    | 高磁偏置<br>(约150mV) | $I=+300\text{mA} \rightarrow -300\text{mA}$ | 157.2 | 155.1 | 153.0 | 150.7 | 148.2 | 145.8 | 143.6 |
|                    |                  | $I=-300\text{mA} \rightarrow +300\text{mA}$ | 157.9 | 155.4 | 153.2 | 150.0 | 148.2 | 145.9 | 143.6 |

(2) 作  $U-I$  关系曲线

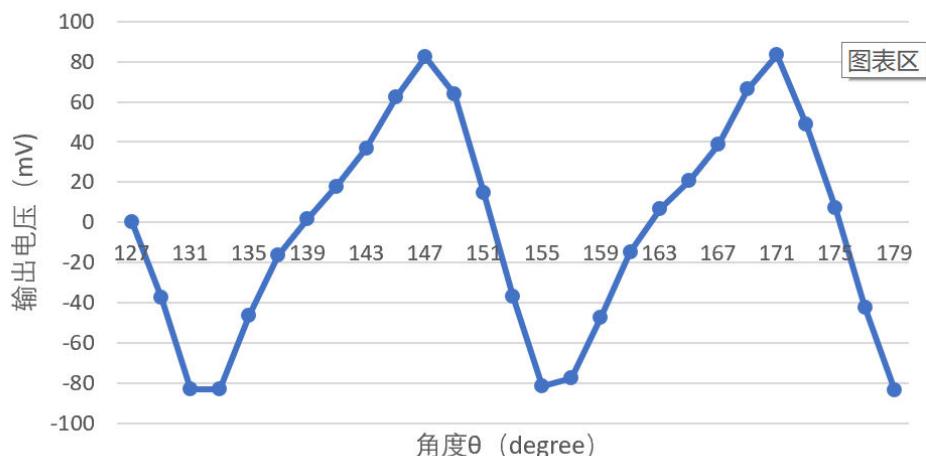
## 5. GMR 梯度传感器的特性及应用

## (1) 实验数据

|                  |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |       |       |      |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| $\theta$ /degree | 127   | 129   | 131   | 133   | 135   | 137   | 139  | 141  | 143  | 145  | 147   | 149   | 151  | 153   | 155   |
| $U_{out}$ /mV    | 0     | -37.7 | -83.2 | -81.3 | -46.8 | -16.6 | 1.6  | 17.9 | 36.7 | 62.5 | 82.4  | 63.8  | 14.8 | -36.9 | -81.5 |
| $\theta$ /degree | 157   | 159   | 161   | 163   | 165   | 167   | 169  | 171  | 173  | 175  | 177   | 179   |      |       |       |
| $U_{out}$ /mV    | -77.5 | -47.6 | -14.8 | 6.5   | 20.6  | 38.9  | 66.5 | 83.4 | 48.8 | 6.9  | -42.3 | -83.5 |      |       |       |

(2) 作  $U_{out}-\theta$  关系曲线

输出电压与角度关系曲线





## 6. 磁记录与读出

### (1) 实验数据

|         |       |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 十进制数字   | 55    |       |       |       |       |       |
| 二进制数字   | 1     | 1     | 0     | 1     | 1     | 1     |
| 磁卡区域号   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 读出电平(V) | 1.954 | 1.953 | 0.003 | 1.954 | 1.954 | 1.954 |

### [ 实验后思考题 ]

- 试分析不同磁偏置影响电流测量灵敏度的原因是什么？
- 根据实验原理，GMR 梯度传感器能否用于车辆流量监控？试写出基本思路。（选作）。

1. 传感器附近的磁感应强度  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \Delta\vec{B}$ ， $\vec{B}_0$  是偏置磁场， $\Delta\vec{B}$  是载流导线产生的磁场。

灵敏度  $k = \frac{dU_{out}}{d|\Delta\vec{B}|}$ ，由测量结果知高制偏置比低磁偏置灵敏度高。

$$\text{灵敏度 } k \propto \frac{d|\vec{B}|}{d|\Delta\vec{B}|} \approx \frac{d\sqrt{B_0^2 + 2B_0 \cdot \Delta B \cos\angle B_0, \Delta B}}{d|\Delta\vec{B}|}$$

在偏置磁场、载流导线产生磁场变化较小的情况下，影响灵敏度的是  $\cos\angle B_0, \Delta B$  这一项。

故推制偏置磁场方向与载流导线产生磁场的方向是影响灵敏度因素。

- GMR 梯度传感器在有铁磁体接近时输出高电平，故车辆经过时可输出一个电压波峰，可实现车流量监测。