

## 巨磁电阻效应及应用

人们早就知道过渡金属铁、钴、镍能够出现铁磁性有序状态，后来发现很多过渡金属和稀土金属的化合物具有反铁磁有序状态，相关理论指出这些状态源于铁磁性原子磁矩之间的直接交换作用和间接交换作用。直接交换作用的特征长度为 0.1-0.3nm,间接交换作用可达 1nm 以上，所以，科学家们开始了探索人工微结构中的磁性交换作用。

1986 年，德国物理学家彼得·格伦贝格尔（Peter Grunberg）采用分子束外延方法制备了铁-铬-铁三层单晶薄膜，发现对于非铁磁层铬的某个特定厚度，没有外磁场时，两边铁磁层磁矩是反平行的，这个新现象称为巨磁电阻（Giant magneto resistance,简称 GMR）效应出现的前提。进一步发现，两个磁矩反平行时对应高电阻状态，平行时对应低电阻状态。

1988 年，法国物理学家阿尔贝·费尔（Albert Fert）的研究小组，将铁、铬薄膜交替制成几十个周期的铁-铬超晶格薄膜，发现当改变磁场强度时，超晶格薄膜的电阻下降将近一半，这个前所未有的电阻巨大变化现象被称为巨磁电阻效应。

GMR 效应的发现，导致了新的自旋电子学的创立，GMR 效应的应用使得计算机硬盘的容量从几百、几千兆，一跃而提高几百倍，达到几百 G 乃至上千 G。阿尔贝·费尔和彼得·格伦贝格尔因此获得 2007 年诺贝尔物理学奖。

### 【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位移，了解 GMR 转速（速度）传感器的原理

### 【实验仪器】

巨磁电阻效应及应用实验仪，基本特性组件,电流测量组件,角位移测量组件。

### 【实验原理】

根据导电的微观机理，电子在导电时并不是沿电场直线前进，而是不断和晶格中的原子产生碰撞（又称散射），每次散射后电子都会改变运动方向，总的运动是电场对电子的定向加速与这种无规则散射运动的叠加。电子在两次散射之间走过的平均路程称为平均自由程，电子散射几率小，则平均自由程长，电阻率低。电阻定律  $R=\rho l/S$  中，把电阻率  $\rho$  视为常数，与材料的几何尺度无关，这是因为通常材料的几何尺度远大于电子的平均自由程（例如铜中电子的平均自由程约 34nm），可以忽略边界效应。当材料的几何尺度小到纳米量级，只有几个原子的厚度时（例如，铜原子的直径约为 0.3nm），电子在边界上的散射几率大大增加，可以明显观察到厚度减小，电阻率增加的现象。

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。早在 1936 年，英国物理学家、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，这就是所谓的两电流模型。

在图 1 所示的多层膜结构中，无外磁场时，上下两层磁性材料是反平行（反铁磁）耦合的。施加足够强的外磁场后，两层铁磁膜的方向都与外磁场方向一致，外磁场使两层铁磁膜从反平行耦合变成了平行耦合。电流的方向在多数应用中是平行于膜面的。

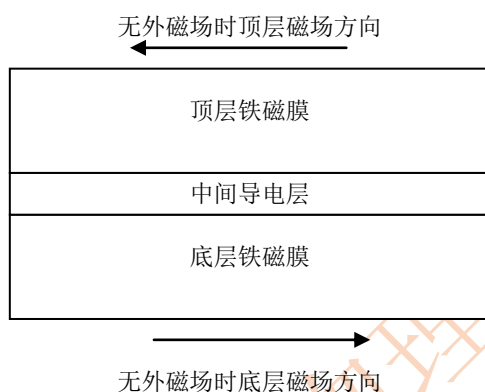


图 1 多层膜 GMR 结构图

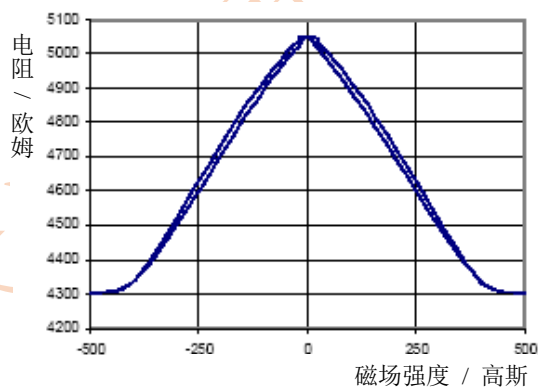


图 2 某种 GMR 材料的磁阻特性

图 2 是图 1 结构的某种 GMR 材料的磁阻特性。由图 2 可见，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  $\Delta R/R$  达百分之十几，加反向磁场时磁阻特性是对称的。注意到 2 中的曲线有两条，分别对应增大磁场和减小磁场时的磁阻特性，这是因为铁磁材料都具有磁滞特性。

有两类与自旋相关的散射对巨磁电阻效应有贡献。

其一，界面上的散射。无外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向相反，无论电子的初

始自旋状态如何，从一层铁磁膜进入另一层铁磁膜时都面临状态改变（平行一反平行，或反平行一平行），电子在界面上的散射几率很大，对应于高电阻状态。有外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向一致，电子在界面上的散射几率很小，对应于低电阻状态。

其二，铁磁膜内的散射。即使电流方向平行于膜面，由于无规散射，电子也有一定的几率在上下两层铁磁膜之间穿行。无外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向相反，无论电子的初始自旋状态如何，在穿行过程中都会经历散射几率小（平行）和散射几率大（反平行）两种过程，两类自旋电流的并联电阻相似两个中等阻值的电阻的并联，对应于高电阻状态。有外磁场时，上下两层铁磁膜的磁场方向一致，自旋平行的电子散射几率小，自旋反平行的电子散射几率大，两类自旋电流的并联电阻相似一个小电阻与一个大电阻的并联，对应于低电阻状态。

## 【实验仪器介绍】

### 1. 巨磁电阻效应及应用实验仪



图 3 巨磁阻实验仪操作面板

图 3 所示为实验系统的实验仪前面板图。

区域 1——电流表部分：作为一个独立的电流表使用。

两个档位：2mA 档和 20mA 档，可通过电流量程切换开关选择合适的电流档位测量电

流。

区域 2——电压表部分：作为一个独立的电压表使用。

两个档位：2V 档和 200mV 档，可通过电压量程切换开关选择合适的电压档位。

区域 3——恒流源部分：可变恒流源。

实验仪还提供 GMR 传感器工作所需的 4V 电源和运算放大器工作所需的±8V 电源。

## 2. 基本特性组件



图 4 基本特性组件

基本特性组件由 GMR 模拟传感器，螺线管线圈及比较电路，输入输出插孔组成。用以对 GMR 的磁电转换特性，磁阻特性进行测量。

GMR 传感器置于螺线管的中央。

螺线管用于在实验过程中产生大小可计算的磁场，由理论分析可知，无限长直螺线管内部轴线上任一点的磁感应强度为：

$$B = \mu_0 n I \quad (1)$$

式中  $n$  为线圈密度， $I$  为流经线圈的电流强度， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  为真空中的磁导率。采用国际单位制时，由上式计算出的磁感应强度单位为特斯拉（1 特斯拉 = 10000 高斯）。

## 3. 电流测量组件



图 5 电流测量组件

电流测量组件将导线置于 GMR 模拟传感器近旁，用 GMR 传感器测量导线通过不同大小电流时导线周围的磁场变化，就可确定电流大小。与一般测量电流需将电流表接入电路相比，这种非接触测量不干扰原电路的工作，具有特殊的优点。

#### 4. 角位移测量组件

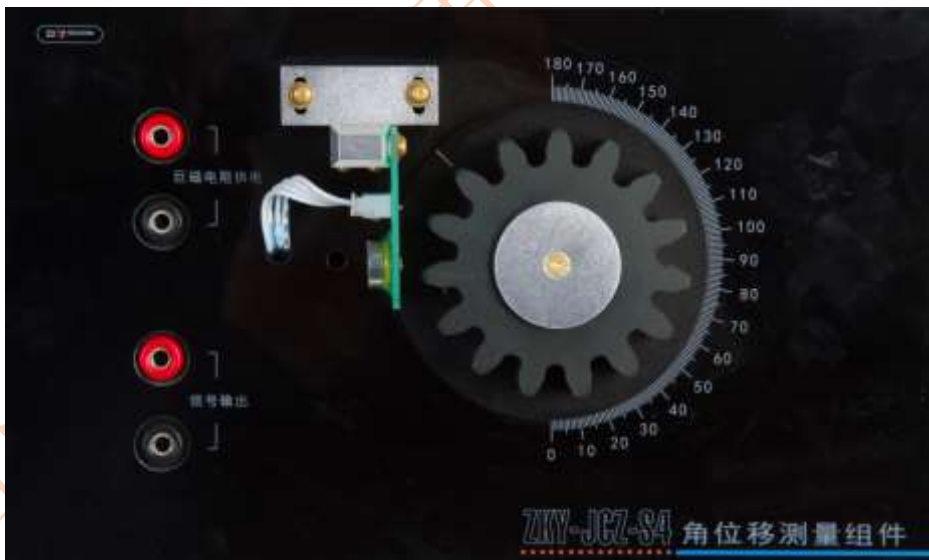


图 6 角位移测量组件

角位移测量组件用巨磁阻梯度传感器作传感元件，铁磁性齿轮转动时，齿牙干扰了梯度传感器上偏置磁场的分布，使梯度传感器输出发生变化，每转过一齿，就输出类似正弦波一个周期的波形。利用该原理可以测量角位移（转速，速度）。汽车上的转速与速度测

量仪就是利用该原理制成的。

## 【实验内容】

### 1. GMR 模拟传感器的磁电转换特性测量

在将 GMR 构成传感器时，为了消除温度变化等环境因素对输出的影响，一般采用桥式结构，图 7 是某型号传感器的结构。

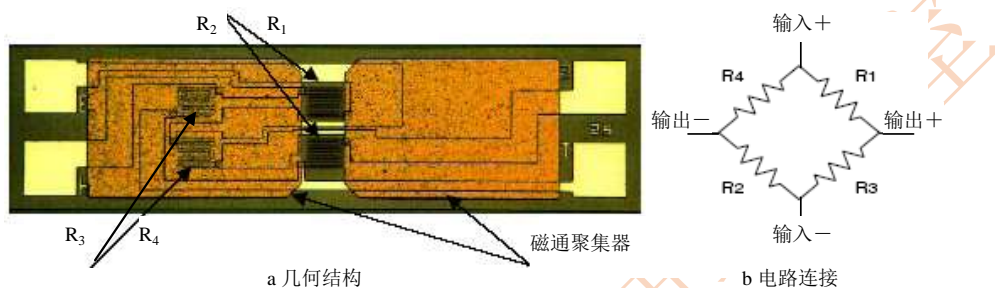


图 7 GMR 模拟传感器结构图

对于电桥结构，如果 4 个 GMR 电阻对磁场的响应完全同步，就不会有信号输出。图 7 中，将处在电桥对角位置的两个电阻  $R_3$ 、 $R_4$  覆盖一层高导磁率的材料如坡莫合金，以屏蔽外磁场对它们的影响，而  $R_1$ 、 $R_2$  阻值随外磁场改变。设无外磁场时 4 个 GMR 电阻的阻值均为  $R$ ， $R_1$ 、 $R_2$  在外磁场作用下电阻减小  $\Delta R$ ，简单分析表明，输出电压：

$$U_{OUT} = U_{IN} \Delta R / (2R - \Delta R) \quad (2)$$

屏蔽层同时设计为磁通聚集器，它的高导磁率将磁力线聚集在  $R_1$ 、 $R_2$  电阻所在的的空间，进一步提高了  $R_1$ 、 $R_2$  的磁灵敏度。

从图 7 的几何结构还可见，巨磁电阻被光刻成微米宽度迂回状的电阻条，以增大其电阻至  $k\Omega$ ，使其在较小工作电流下得到合适的电压输出。

图 8 是某 GMR 模拟传感器的磁电转换特性曲线。图 9 是磁电转换特性的测量原理图。

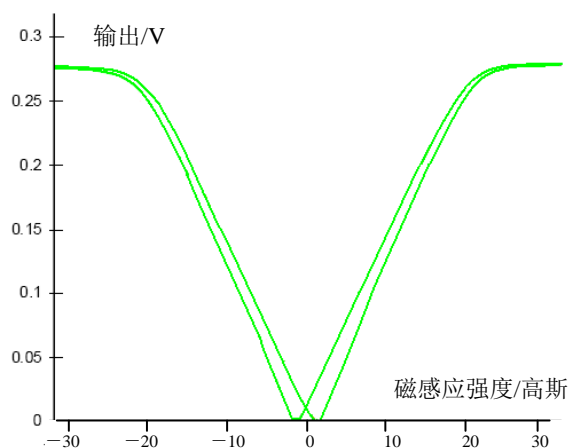


图 8 GMR 模拟传感器的磁电转换特性

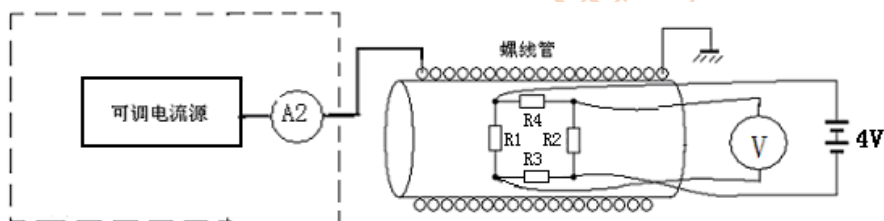


图 9 模拟传感器磁电转换特性实验原理图

实验装置：巨磁阻实验仪，基本特性组件。

将GMR模拟传感器置于螺线管磁场中，功能切换按钮切换为“传感器测量”。实验仪的4V电压源接至基本特性组件“巨磁电阻供电”，恒流源接至“螺线管电流输入”，基本特性组件“模拟信号输出”接至实验仪电压表。

按表 1 数据，调节励磁电流，逐渐减小磁场强度，记录相应的输出电压于表格“减小磁场”列中。由于恒流源本身不能提供负向电流，当电流减至0后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时流经螺线管的电流与磁感应强度的方向为负，从上到下记录相应的输出电压。

电流至-100mA后，逐渐减小负向电流，电流到0时同样需要交换恒流输出接线的极性。从下到上记录数据于“增大磁场”列中。

理论上讲，外磁场为零时，GMR传感器的输出应为零，但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，在有的传感器中可以观察到这一现象。

表 1 GMR 模拟传感器磁电转换特性的测量

电桥电压: 4V

磁感应强度/高斯		输出电压/mV	
励磁电流/mA	磁感应强度/高斯	减小磁场	增大磁场
100			
90			
80			
70			
60			
50			
40			
30			
20			
10			
5			
0			
-5			
-10			
-20			
-30			
-40			
-50			
-60			
-70			
-80			
-90			
-100			

根据螺线管上标明的线圈密度, 由公式 (1) 计算出螺线管内的磁感应强度  $B$ 。

以磁感应强度  $B$  作横坐标, 电压表的读数为纵坐标做出磁电转换特性曲线。

不同外磁场强度时输出电压的变化反映了 GMR 传感器的磁电转换特性, 同一外磁场强度下输出电压的差值反映了材料的磁滞特性。

## 2. GMR 磁阻特性测量

为加深对巨磁电阻效应的理解, 我们对构成 GMR 模拟传感器的磁阻进行测量。将基本特性组件的功能切换按钮切换为“巨磁阻测量”, 此时被磁屏蔽的两个电桥电阻  $R_3$ 、 $R_4$  被短路, 而  $R_1$ 、 $R_2$  并联。将电流表串连进电路中, 测量不同磁场时回路中电流的大小, 就可计算磁阻。测量原理如

图 10 所示。



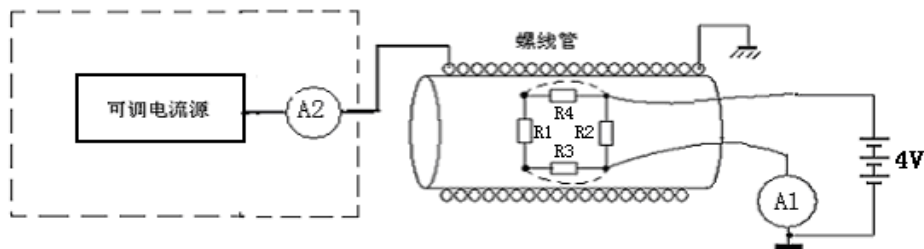


图 10 磁阻特性测量原理图

实验装置：巨磁阻实验仪，基本特性组件。

将 GMR 模拟传感器置于螺线管磁场中，功能切换按钮切换为“巨磁阻测量”实验仪的 4 伏电压源串连电流表后接至基本特性组件“巨磁电阻供电”，恒流源接至“螺线管电流输入”。

按表 2 数据，调节励磁电流，逐渐减小磁场强度，记录相应的磁阻电流于表格“减小磁场”列中。由于恒流源本身不能提供负向电流，当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时流经螺线管的电流与磁感应强度的方向为负，从上到下记录相应的输出电压。

电流至 -100mA 后，逐渐减小负向电流，电流到 0 时同样需要交换恒流输出接线的极性。从下到上记录数据于“增大磁场”列中。

表 2 GMR 磁阻特性的测量

磁阻两端电压：4V

磁感应强度/高斯		磁阻/ $\Omega$			
		减小磁场		增大磁场	
励磁电流/mA	磁感应强度/高斯	磁阻电流/mA	磁阻/ $\Omega$	磁阻电流/mA	磁阻/ $\Omega$
100					
90					
80					
70					
60					
50					
40					
30					
20					
10					
5					
0					
-5					
-10					

-20					
-30					
-40					
-50					
-60					
-70					
-80					
-90					
-100					

根据螺线管上标明的线圈密度，由公式（1）计算出螺线管内的磁感应强度  $B$ 。

由欧姆定律  $R=U/I$  计算磁阻。

以磁感应强度  $B$  作横坐标，磁阻为纵坐标作出磁阻特性曲线。不同外磁场强度时磁阻的变化反映了 GMR 的磁阻特性，同一外磁场强度下磁阻的差值反映了材料的磁滞特性。

### 3. GMR 开关（数字）传感器的磁电转换特性曲线测量

将 GMR 模拟传感器与比较电路，晶体管放大电路集成在一起，就构成 GMR 开关（数字）传感器，结构如图 11 所示。

比较电路的功能是，当电桥电压低于比较电压时，输出低电平；当电桥电压高于比较电压时，输出高电平。选择适当的 GMR 电桥并结合调节比较电压，可调节开关传感器开关点对应的磁场强度。

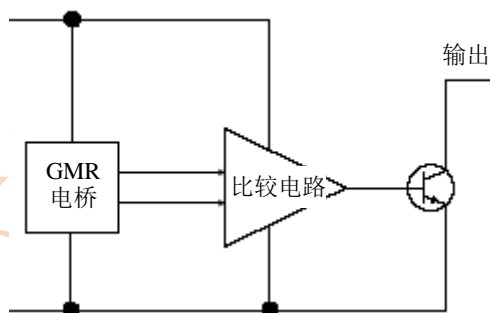


图 11 GMR 开关传感器结构图

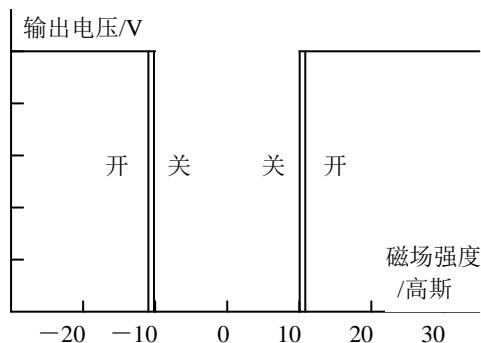


图 12 GMR 开关传感器磁电转换特性

图 2 是某种 GMR 开关传感器的磁电转换特性曲线。当磁场强度的绝对值从低增加到 12 高斯时，开关打开（输出高电平），当磁场强度的绝对值从高减小到 10 高斯时，开关关闭（输出低电平）。

实验装置：巨磁阻实验仪，基本特性组件。

将 GMR 模拟传感器置于螺线管磁场中，功能切换按钮切换为“传感器测量”。实验仪的 4V 电压源接至基本特性组件“巨磁电阻供电”，“电路供电”接口接至基本特性组件对应的“电路供电”输入插孔，恒流源接至“螺线管电流输入”，基本特性组件“开关信号输出”接至实验仪电压表。

从 50mA 逐渐减小励磁电流，输出电压从高电平（开）转变为低电平（关）时记录相应的励磁电流于表 3 “减小磁场”列中。当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时流经螺线管的电流与磁感应强度的方向为负，输出电压从低电平（关）转变为高电平（开）时记录相应的负值励磁电流于表 3 “减小磁场”列中。将电流调至 -50mA。

逐渐减小负向电流，输出电压从高电平（开）转变为低电平（关）时记录相应的负值励磁电流于表 3 “增大磁场”列中，电流到 0 时同样需要交换恒流输出接线的极性。输出电压从低电平（关）转变为高电平（开）时记录相应的正值励磁电流于表 3 “增大磁场”列中。

表 3 GMR 开关传感器的磁电转换特性测量

高电平= V 低电平= V

减小磁场			增大磁场		
开关动作	励磁电流/mA	磁感应强度/高斯	开关动作	励磁电流/mA	磁感应强度/高斯
关			关		
开			开		

根据螺线管上标明的线圈密度，由公式（1）计算出螺线管内的磁感应强度  $B$ 。

以磁感应强度  $B$  作横坐标，电压读数为纵坐标做出开关传感器的磁电转换特性曲线。

#### 4. 用 GMR 模拟传感器测量电流

从图 13 可见，GMR 模拟传感器在一定的范围内输出电压与磁场强度成线性关系，且灵敏度高，线性范围大，可以方便的将 GMR 制成磁场计，测量磁场强度或其它与磁场相关的物理量。作为应用示例，我们用它来测量电流。

由理论分析可知，通有电流  $I$  的无限长直导线，与导线距离为  $r$  的一点的磁感应强度为：

$$B = \mu_0 I / 2\pi r = 2I \times 10^{-7} / r \quad (3)$$

在  $r$  不变的情况下，磁场强度与电流成正比。

在实际应用中，为了使 GMR 模拟传感器工作在线性区，提高测量精度，还常常预先给传感器施加一个固定已知磁场，称为磁偏置，其原理类似于电子电路中的直流偏置。

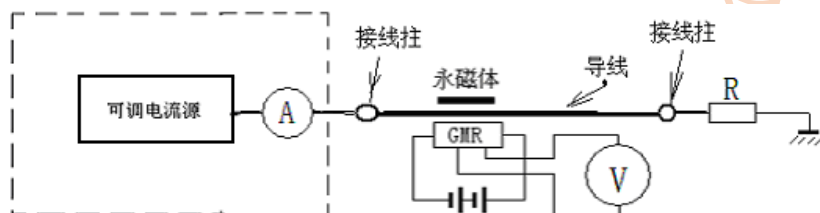


图 13 模拟传感器测量电流实验原理图

实验装置：巨磁阻实验仪，电流测量组件。

实验仪的 4V 电压源接至电流测量组件“巨磁电阻供电”，恒流源接至“待测电流输入”，电流测量组件“信号输出”接至实验仪电压表。

将待测电流调节至 0。

将偏置磁铁转到远离 GMR 传感器，调节磁铁与传感器的距离，使输出约 25mV。

将电流增大到 300mA，按表 4 数据逐渐减小待测电流，从左到右记录相应的输出电压于表格“减小电流”行中。由于恒流源本身不能提供负向电流，当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时电流方向为负，记录相应的输出电压。

逐渐减小负向待测电流，从右到左地记录相应的输出电压于表格“增加电流”行中。当电流减至 0 后，交换恒流输出接线的极性，使电流反向。再次增大电流，此时电流方向为正，记录相应的输出电压。

将待测电流调节至 0。

将偏置磁铁转到接近 GMR 传感器，调节磁铁与传感器的距离，使输出约 150mV。

用低磁偏置时同样的实验方法，测量适当磁偏置时待测电流与输出电压的关系。

表 4 用 GMR 模拟传感器测量电流

待测电流/mA		300	200	100	0	-100	-200	-300
输出电压/mV	低磁偏置 (约25mV)	减小电流						
	增加电流							

	适当磁偏置 (约150mV)	减小电流							
		增加电流							

以电流读数作横坐标，电压表的读数为纵坐标作图。分别做出 4 条曲线。

由测量数据及所作图形可以看出，适当磁偏置时线性较好，斜率（灵敏度）较高。由于待测电流产生的磁场远小于偏置磁场，磁滞对测量的影响也较小，根据输出电压的大小就可确定待测电流的大小。

用 GMR 传感器测量电流不用将测量仪器接入电路，不会对电路工作产生干扰，既可测量直流，也可测量交流，具有广阔的应用前景。

### 5. GMR 梯度传感器的特性及应用

将 GMR 电桥两对对角电阻分别置于集成电路两端，4 个电阻都不加磁屏蔽，即构成梯度传感器，如图 14 所示。

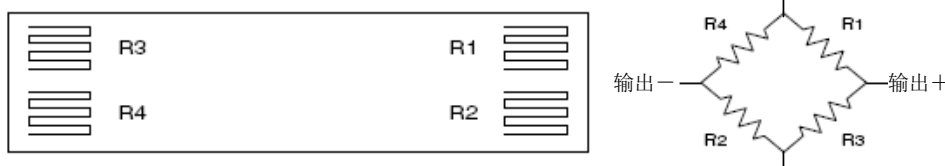


图 14 GMR 梯度传感器结构图

这种传感器若置于均匀磁场中，由于 4 个桥臂电阻的阻值变化相同，电桥输出为零。如果磁场存在一定的梯度，各 GMR 电阻感受到的磁场不同，磁阻变化不一样，就会有信号输出。图 15 以检测齿轮的角位移为例，说明其应用原理。

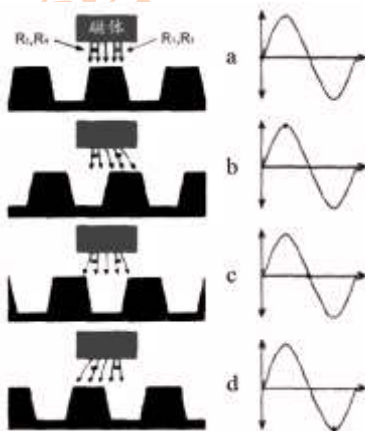


图 15 用 GMR 梯度传感器检测齿轮位移

将永磁体放置于传感器上方，若齿轮是铁磁材料，永磁体产生的空间磁场在相对于齿牙不同位置时，产生不同的梯度磁场。a 位置时，输出为零。b 位置时， $R_1$ 、 $R_2$  感受到的磁场强度大于  $R_3$ 、 $R_4$ ，输出正电压。c 位置时，输出回归零。d 位置时， $R_1$ 、 $R_2$  感受到的磁场强度小于  $R_3$ 、 $R_4$ ，输出负电压。于是，在齿轮转动过程中，每转过一个齿牙便产生一

个完整的波形输出。

实验装置：巨磁阻实验仪、角位移测量组件。

将实验仪 4V 电压源接角位移测量组件“巨磁电阻供电”，角位移测量组件“信号输出”接实验仪电压表。

逆时针慢慢转动齿轮，当输出电压为零时记录起始角度，以后每转 3 度记录一次角度与电压表的读数。转动 48 度齿轮转过 2 齿，输出电压变化 2 个周期。

表 5 齿轮角位移的测量

转动角度/度														
输出电压/mV														

以齿轮实际转过的度数为横坐标，电压表的读数为纵向坐标作图。

### 【注意事项】

1. 由于巨磁阻传感器具有磁滞现象，因此，在实验中，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。实验表格中的电流只是作为一种参考，实验时以实际显示的数据为准。
2. 实验过程中，实验仪器不得处于强磁场环境中。