

实 验 报 告

物理与电子系 物理升华专业1201班

姓名 张 涛 学号1003120505 指导老师 徐富新

实验时间2014年5月25日，第十三周，星期日

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 实验名称巨磁电阻效应及其应用  【目的要求】   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. 用GMR传感器测量电流 5. 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   【原理简述】  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散射运动的叠加。称电子在两次散射之间走过的平均路程为平均自由程，电子散射几率小，则平均自由程长，电阻率低。电阻定律 R=ρl/S中，把电阻率ρ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2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3是图2结构的某种GMR材料的磁阻特性。由图可见，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 ΔR/R 达百分之十几，加反向磁场时磁阻特性是对称的。注意到图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－反平行，或反平行－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。  多层膜GMR结构简单，工作可靠，磁阻随外磁场线性变化的范围大，在制作模拟传感器方面得到广泛应用。在数字记录与读出领域，为进一步提高灵敏度，发展了自旋阀结构的GMR。  【实验装置】  **巨磁电阻实验仪**  区域1  区域2  区域3  图5 巨磁阻实验仪操作面板  图5所示为巨磁阻实验仪系统的实验仪前面板图。  区域1——电流表部分：做为一个独立的电流表使用。  两个档位：2mA档和200mA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：做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。  **基本特性组件**  图6 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 = μ0nI （1）  式中n为线圈密度，I为流经线圈的电流强度，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）。  **电流测量组件**  图7 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。  **角位移测量组件**  图8 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。  **磁读写组件**  图9 磁读写组件  磁读写组件用于演示磁记录与读出的原理。磁卡做记录介质，磁卡通过写磁头时可写入数据，通过读磁头时将写入的数据读出来。  【实验内容】  **一、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。  a 几何结构 b电路连接  GMR模拟传感器结构图  对于电桥结构，如果4个GMR电阻对磁场的影响完全同步，就不会有信号输出。图17-9中，将处在电桥对角位置的两个电阻R3, R4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R1，R2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， R1、R2在外磁场作用下电阻减小△R，简单分析表明，输出电压： U=U (2R-R) (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R1、R2电阻所在的空间，进一步提高了R1，R2的磁灵敏度。 　　 从几何结构还可见，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数量级，使其在较小工作电流下得到合适的电压输出。  GMR模拟传感器的磁电转换特性  模拟传感器磁电转换特性实验原理图  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i，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的极性。从下到上记录数据于表一“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。  根据螺线管上表明的线圈密度，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作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。  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 |  | 259 | 259 | | 90 |  | 259 | 259 | | 80 |  | 259 | 258 | | 70 |  | 258 | 256 | | 60 |  | 256 | 250 | | 50 |  | 239 | 224 | | 40 |  | 198.7 | 176.8 | | 30 |  | 151.0 | 130.2 | | 20 |  | 104.1 | 88.0 | | 10 |  | 62.5 | 49.8 | | 5 |  | 43.8 | 29.3 | | 0 |  | 24.2 | 8.5 | | －5 |  | 10.2 | 33.6 | | －10 |  | 38.6 | 52.2 | | －20 |  | 77.2 | 92.7 | | －30 |  | 117.6 | 138.5 | | －40 |  | 163.2 | 186.2 | | －50 |  | 212 | 230 | | －60 |  | 245 | 253 | | －70 |  | 255 | 257 | | －80 |  | 258 | 258 | | －90 |  | 259 | 259 | | －100 |  | 259 | 259 |   **二、GMR磁阻特性测量**  磁阻特性测量原理图  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R3、R4被短路，而R1、R2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，就可以计算磁阻。  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。由于恒源流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。  　 电流至一100mA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。  根据螺线管上表明的线圈密度，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，磁阻为纵坐标做出磁阻特性曲线。  应该注意，由于模拟传感器的两个磁阻是位于磁通聚集器中，与图3相比，我们作出的磁阻曲线斜率大了约10倍，磁通聚集器结构使磁阻灵敏度大大提高。  　　不同外磁场强度时磁阻的变化反映了GMR的磁阻特性，同一外磁场强度的差值反映了材料的磁滞特性。  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/Ω | | | | | 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/Ω | 磁阻电流/mA | 磁阻/Ω | | 100 |  | 1.912 |  | 1.910 |  | | 90 |  | 1.911 |  | 1.910 |  | | 80 |  | 1.911 |  | 1.909 |  | | 70 |  | 1.910 |  | 1.900 |  | | 60 |  | 1.908 |  | 1.892 |  | | 50 |  | 1.891 |  | 1.876 |  | | 40 |  | 1.852 |  | 1.831 |  | | 30 |  | 1.807 |  | 1.786 |  | | 20 |  | 1.763 |  | 1.748 |  | | 10 |  | 1.725 |  | 1.713 |  | | 5 |  | 1.709 |  | 1.696 |  | | 0 |  | 1.692 |  | 1.676 |  | | －5 |  | 1.678 |  | 1.699 |  | | －10 |  | 1.704 |  | 1.716 |  | | －20 |  | 1.738 |  | 1.752 |  | | －30 |  | 1.776 |  | 1.793 |  | | －40 |  | 1.818 |  | 1.838 |  | | －50 |  | 1.864 |  | 1.882 |  | | －60 |  | 1.896 |  | 1.905 |  | | －70 |  | 1.906 |  | 1.909 |  | | －80 |  | 1.909 |  | 1.910 |  | | －90 |  | 1.910 |  | 1.910 |  | | －100 |  | 1.910 |  | 1.910 |  |   **三、用GMR模拟传感器测量电流**  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 = μ0I/2πr =2 I×10-7/r （3）  磁场强度与电流成正比，在r已知的条件下，测得B，就可知I。  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。  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4伏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3 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+减小电流) | 26.0 | 25.7 | 25.3 | 25.0 | 24.6 | 24.3 | 23.9 | | 输出电压/mV (低磁偏置+增加电流) | 26.0 | 25.6 | 25.3 | 24.9 | 24.6 | 24.2 | 23.9 | | 输出电压/mV (适当磁偏置+减小电流)  减小电流 | 149.3 | 148.8 | 148.3 | 147.7 | 147.1 | 146.5 | 145.9 | | 输出电压/mV (适当磁偏置+增加电流) | 149.5 | 148.9 | 148.3 | 147.7 | 147.0 | 146.4 | 145.9 |   以电流读数作横坐标，电压表的读数为纵坐标作图。分别作出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。  **四、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17所示。  这种传感器若置于均匀磁场中，由于4个桥臂电阻阻值变化相同，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18以检测齿轮的角位移为例，说明其应用原理。  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，R1、R2 感受到的磁场强度大于R3、R4，输出正电压。c位置时，输出回归零。d位置时，R1、R2 感受到的磁场强度小于R3、R4，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。这一原理已普遍应用于转速（速度）与位移监控，在汽车及其它工业领域得到广泛应用。  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4 齿轮角位移的测量   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 起始角度/度 | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | | 转动角度/度 | 0 | 46.2 | 89.1 | 67.2 | -7.4 | -70.9 | -59.5 | -29.2 | 6.3 | | 输出电压/mV | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 | 42 | 45 | 48 |  | | 起始角度/度 | 46.6 | 90.3 | 65.3 | -10.9 | -61.4 | -61.1 | -27.1 | 5.3 |  |   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。 |
| 【实验数据处理】 1.GMR模拟传感器的磁电转换特性测量  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | | 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 | 30.15928947 | 259 | 259 | | 90 | 27.14336053 | 259 | 259 | | 80 | 24.12743158 | 259 | 258 | | 70 | 21.11150263 | 258 | 256 | | 60 | 18.09557368 | 256 | 250 | | 50 | 15.07964474 | 239 | 224 | | 40 | 12.06371579 | 198.7 | 176.8 | | 30 | 9.047786842 | 151.0 | 130.2 | | 20 | 6.031857895 | 104.1 | 88.0 | | 10 | 3.015928947 | 62.5 | 49.8 | | 5 | 1.507964474 | 43.8 | 29.3 | | 0 | 0 | 24.2 | 8.5 | | －5 | -1.507964474 | 10.2 | 33.6 | | －10 | -3.015928947 | 38.6 | 52.2 | | －20 | -6.031857895 | 77.2 | 92.7 | | －30 | -9.047786842 | 117.6 | 138.5 | | －40 | -12.06371579 | 163.2 | 186.2 | | －50 | -15.07964474 | 212 | 230 | | －60 | -18.09557368 | 245 | 253 | | －70 | -21.11150263 | 255 | 257 | | －80 | -24.12743158 | 258 | 258 | | －90 | -27.14336053 | 259 | 259 | | －100 | -30.15928947 | 259 | 259 |   以B为横坐标，输出电压U为纵坐标，作图得：  **磁感应强度B与输出电压U之间的关系曲线** 2. GMR的磁阻特性曲线的测量  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 磁感应强度/高斯 | | 磁阻/Ω | | | | | 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/Ω | 磁阻电流/mA | 磁阻/Ω | | 100 | 30.15928947 | 1.912 | 2092.05 | 1.910 | 2094.24 | | 90 | 27.14336053 | 1.911 | 2093.14 | 1.910 | 2094.24 | | 80 | 24.12743158 | 1.911 | 2093.14 | 1.909 | 2095.34 | | 70 | 21.11150263 | 1.910 | 2094.24 | 1.900 | 2105.26 | | 60 | 18.09557368 | 1.908 | 2096.44 | 1.892 | 2114.16 | | 50 | 15.07964474 | 1.891 | 2115.28 | 1.876 | 2132.20 | | 40 | 12.06371579 | 1.852 | 2159.83 | 1.831 | 2184.60 | | 30 | 9.047786842 | 1.807 | 2213.61 | 1.786 | 2239.64 | | 20 | 6.031857895 | 1.763 | 2268.86 | 1.748 | 2288.33 | | 10 | 3.015928947 | 1.725 | 2318.84 | 1.713 | 2335.08 | | 5 | 1.507964474 | 1.709 | 2340.55 | 1.696 | 2358.49 | | 0 | 0 | 1.692 | 2364.06 | 1.676 | 2386.63 | | －5 | -1.507964474 | 1.678 | 2383.79 | 1.699 | 2354.32 | | －10 | -3.015928947 | 1.704 | 2347.41 | 1.716 | 2331.00 | | －20 | -6.031857895 | 1.738 | 2301.50 | 1.752 | 2283.10 | | －30 | -9.047786842 | 1.776 | 2252.25 | 1.793 | 2230.90 | | －40 | -12.06371579 | 1.818 | 2200.22 | 1.838 | 2176.28 | | －50 | -15.07964474 | 1.864 | 2145.92 | 1.882 | 2125.40 | | －60 | -18.09557368 | 1.896 | 2109.71 | 1.905 | 2099.74 | | －70 | -21.11150263 | 1.906 | 2098.64 | 1.909 | 2095.34 | | －80 | -24.12743158 | 1.909 | 2095.34 | 1.910 | 2094.24 | | －90 | -27.14336053 | 1.910 | 2094.24 | 1.910 | 2094.24 | | －100 | -30.15928947 | 1.910 | 2094.24 | 1.910 | 2094.24 |   **磁阻与磁感应强度关系曲线** 3、MR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 | 26.0 | 25.7 | 25.3 | 25.0 | 24.6 | 24.3 | 23.9 | | 增加电流 | 26.0 | 25.6 | 25.3 | 24.9 | 24.6 | 24.2 | 23.9 | | 适当磁偏置  (约150mV) | 减小电流 | 149.3 | 148.8 | 148.3 | 147.7 | 147.1 | 146.5 | 145.9 | | 增加电流 | 149.5 | 148.9 | 148.3 | 147.7 | 147.0 | 146.4 | 145.9 |   **待测电流与输出电压关系曲线:** 4、梯度传感器的特性及应用  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 转动角度/度 | 0 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | | 输出电压/mV | 0 | 46.2 | 89.1 | 67.2 | -7.4 | -70.9 | -59.5 | -29.2 | 6.3 | | 转动角度/度 | 27 | 30 | 33 | 36 | 39 | 42 | 45 | 48 |  | | 输出电压/mV | 46.6 | 90.3 | 65.3 | -10.9 | -61.4 | -61.1 | -27.1 | 5.3 |  |   **转动角度与输出电压间的关系曲线：** |