

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018年5月24日 (24.05.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/090634 A1

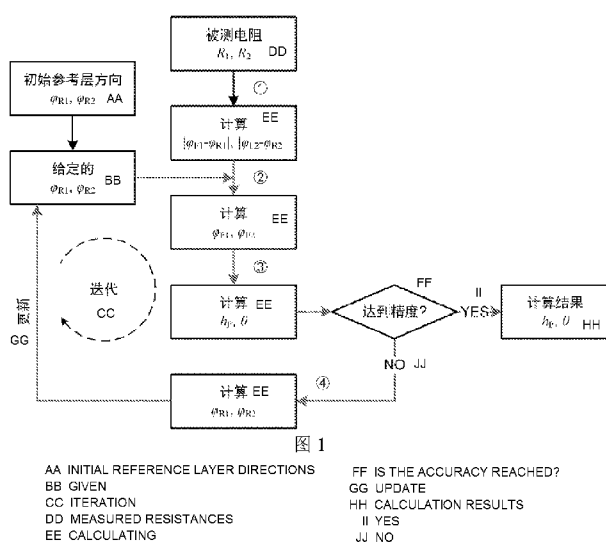
- (51) 国际专利分类号:
G01R 33/09 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/090545
- (22) 国际申请日: 2017年6月28日 (28.06.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201611019183.7 2016年11月18日 (18.11.2016) CN
- (71) 申请人: 清华大学(TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 清华四川能源互联网研究院(SICHUAN ENERGY INTERNET RESEARCH INSTITUTE, TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国四川省成都市天府新区天府大道南段2039号天府创客街区, Sichuan 610213 (CN)。
- (72) 发明人: 欧阳勇(OUYANG, Yong); 中国四川省成都市天府大道南段2039号天府创客街区, Sichuan 610213 (CN)。 何金良(HE, Jinliang); 中

国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 胡军(HU, Jun); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 王善祥(WANG, Shanxiang); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 赵根(ZHAO, Gen); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 王中旭(WANG, Zhongxu); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 曾嵘(ZENG, Rong); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 庄池杰(ZHUANG, Chijie); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 张波(ZHANG, Bo); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。 余占清(YU, Zhanqing); 中国北京市北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 成都九鼎天元知识产权代理有限公司(CHENGDU JIUDINGTIANYUAN INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY LTD.); 中国四川省成都市洗面桥街33号艺墅花乡405袁春晓, Sichuan 610041 (CN)。

(54) Title: ALL-QUADRANT MEASUREMENT METHOD FOR MIDDLE-LARGE MAGNETIC FIELD

(54) 发明名称: 一种中大磁场全象限测量方法



(57) Abstract: Disclosed is an all-quadrant measurement method for a middle-large magnetic field, relating to the technical field of magnetic field measurement. The method comprises: placing four orthogonally configured magnetic resistances in an external magnetic field; determining two magnetic resistances with the minimum resistance values, thereby determining that the other two magnetic resistances are in an S1 status, and making resistance values of the two magnetic resistances which are in the S1 status be R1 and R2, and at the same time taking an initial reference layer magnetization direction of the two magnetic resistances as a given reference layer magnetization direction when there is no magnetic field; respectively calculating, according to the resistance values of the two magnetic resistances, an included angle between a free layer magnetization direction and the reference layer magnetization direction of the two magnetic resistances; respectively calculating, according to the given reference layer magnetization direction and the included angle between the free layer magnetization direction and the reference layer magnetization direction of the two magnetic resistances, the free layer magnetization direction of the two magnetic resistances; and solving, according to the given reference layer magnetization direction and the free layer magnetization



WO 2018/090634 A1

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

direction of the two magnetic resistances, a magnetic field amplitude and direction of the external magnetic field.

(57) 摘要: 一种中大磁场全象限测量方法, 涉及磁场测量技术领域。包括: 将四个正交配置的磁阻电阻放置到外加磁场中; 确定最小阻值的两个磁阻电阻, 进而确定另外两个磁阻电阻处于S1状态, 并令处于S1状态的两个磁阻电阻的阻值为 R_1 , R_2 , 同时将无磁场时这两个磁阻电阻的初始参考层磁化方向作为给定的参考层磁化方向; 根据这两个磁阻电阻的阻值分别计算这两个磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角; 分别根据这两个磁阻电阻的给定参考层磁化方向及自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角计算出这两个磁阻电阻的自由层磁化方向; 根据这两个磁阻电阻的给定参考层磁化方向、自由层磁化方向求解外加磁场的磁场幅值及方向。

一种中大磁场全象限测量方法

技术领域

本发明涉及磁场测量技术领域，尤其是一种针对中大范围的磁场强度的测量方法。

背景技术

隧穿磁阻电阻在待测磁场较小时具有良好的线性度，测量精度较好，但是其难以对中大范围（磁场强度约为 $4\sim 6 H_{AF}$ ， H_{AF} 为磁阻电阻的自由层的各向异性场，不同的磁阻电阻其 H_{AF} 是不同的，一般说来为几十 Oe 。 Oe 为磁场强度单位——奥斯特）的磁场进行测量，这是因为：1）隧穿磁阻电阻的传感曲线在中大范围由线性趋向饱和，严重非线性，需要建立非线性模型进行计算；2）隧穿磁阻电阻的参考层将发生显著旋转，必须考虑参考层的影响；3）隧穿磁阻磁畴方向可能发生不可逆翻转，电阻值会跳变，形成两根分叉的不同传感曲线。

发明内容

本发明所要解决的技术问题是：针对上述存在的问题，提供一种适用于中大磁场的隧穿磁阻的矢量测量方法。

本发明提供的中大磁场测量方法，包括：

一种中大磁场测量方法，其特征在于，包括：

步骤 1：将四个正交配置的磁阻电阻放置到外加磁场中；其中第一磁阻电阻与第三磁阻电阻位于一条直线上，第二磁阻电阻与第四磁阻电阻位于另一条直线上，所述一条直线与所述另一条直线垂直；四个磁阻电阻自由层的内部易轴偏置磁场大于各向异性场；

步骤 2：确定最小阻值的两个磁阻电阻，进而确定另外两个磁阻电阻处于

S1 状态，并令处于 S1 状态的两个磁阻电阻的阻值为 R_1, R_2 ，同时将无磁场时处于 S1 状态的两个磁阻电阻的初始参考层磁化方向作为给定的参考层磁化方向 $\varphi_{R1}, \varphi_{R2}$ ；S1 状态是指磁阻电阻的自由层磁畴处于易轴正方向；

步骤 2：根据阻值 R_1, R_2 分别计算两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角；

步骤 3：分别根据两个处于 S1 状态的磁阻电阻的给定参考层磁化方向 $\varphi_{R1}, \varphi_{R2}$ 及两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角计算出两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向；

步骤 4：根据两个处于 S1 状态的磁阻电阻的给定参考层磁化方向、两个处于 S1 状态的隧穿磁阻电阻的自由层磁化方向求解外加磁场的磁场幅值及方向；

步骤 5：将本次计算得到的外加磁场的磁场幅值及方向与前一次计算结果相比，若两次结果的差值大于设定阈值，则根据本次计算得到的外加磁场的磁场幅值及方向更新两个处于 S1 状态的磁阻电阻的参考层磁化方向并将其作为新的给定的参考层磁化方向 $\varphi_{R1}, \varphi_{R2}$ ，并再次执行步骤 2~步骤 5，直到两次结果的差值小于设定值。

进一步，步骤 2 中，计算两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角的公式分别为： $|\varphi_{F1} - \varphi_{R1}| = \arccos\left(\frac{R_{1\max} + R_{1\min} - 2R_1}{R_{1\max} - R_{1\min}}\right)$ ；其中 φ_{F1} 为第一个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向， $R_{1\min}$ 为第一个处于 S1 状态的磁阻电阻的最小值， $R_{1\max}$ 为第一个处于 S1 状态的磁阻电阻的最大值；

$|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}| = \arccos\left(\frac{R_{2\max} + R_{2\min} - 2R_2}{R_{2\max} - R_{2\min}}\right)$ ；其中 φ_{F2} 为第二个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向， $R_{2\min}$ 为第二个处于 S1 状态的磁阻电阻的最小值， $R_{2\max}$ 为第二个处于 S1 状态的隧穿磁阻电阻的最大值。

进一步，步骤 3 中，根据公式计算两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向：

$\varphi_F = \varphi_R + |\varphi_F - \varphi_R|$ ，将 $|\varphi_F - \varphi_R|$ 、 φ_{R1} 带入前式便得到第一处于 S1 状态的磁阻电阻

的自由层磁化方向 φ_{F1} ，将 $|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}|$ 、 φ_{R2} 带入前式便得到第二处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向 φ_{F2} 。

进一步，步骤 4 中利用下列方程组求解外加磁场的磁场幅值 h_F 及方向 θ ：

$$\begin{pmatrix} -\sin(\alpha_1 + \varphi_{F1}) & \cos(\alpha_1 + \varphi_{F1}) \\ -\sin(\alpha_2 + \varphi_{F2}) & \cos(\alpha_2 + \varphi_{F2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_F \cos \theta \\ h_F \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{BF} \sin(\varphi_{F1} - \theta_{BF}) + \sin \varphi_{F1} \cos \varphi_{F1} - h_{JFR} \sin(\varphi_{F1} - \varphi_{R1}) \\ h_{BF} \sin(\varphi_{F2} - \theta_{BF}) + \sin \varphi_{F2} \cos \varphi_{F2} - h_{JFR} \sin(\varphi_{F2} - \varphi_{R2}) \end{pmatrix};$$

式中 α_1, α_2 分别为两个处于

S1 状态的磁阻电阻的易轴方向， h_{JFR} 为任意一个磁阻电阻的自由层与参考层的耦合场， $h_{BF} = H_{BF} / H_{AF}$ ， H_{BF} 为磁阻电阻的自由层的内部偏置磁场大小， H_{AF} 为自由层各向异性场大小； θ_{BF} 为自由层的内部偏置磁场方向。

进一步，步骤 5 中，更新两个处于 S1 状态的磁阻电阻的参考层磁化方向 φ_{R1} ， φ_{R2} 的步骤进一步包括：

求解一元四次方程 $x_1^4 - 2h_{X1}x_1^3 + (h_{X1}^2 + h_{Y1}^2 - 1)x_1^2 + 2h_{X1}x_1 - h_{X1}^2 = 0$ ，其中 h_{X1} ， h_{Y1} 分别为外加磁场在第一处于 S1 状态的磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场，二者根据步骤 4 的计算结果得到： $h_{X1} = h_F \cos \theta$ ， $h_{Y1} = h_F \sin \theta$ ； $x_1 = \sin \varphi_{R1}$ ；

上述一元四次方程具有 4 个解，当隧穿磁阻处于稳定平衡状态时， φ_{R1} 只有一个解，该解取决于 3 个条件：

- 1) x_1 为实数且 $|x_1| \leq 1$ ；
- 2) $h_{Y1} \cos \varphi_{R1} + h_{X1} \sin \varphi_{R1} + \cos 2\varphi_{R1} \geq 0$ ；
- 3) 该解与磁阻电阻的初始位置间所有角度能量必须小于初始位置的能量；

求解一元四次方程 $x_2^4 - 2h_{X2}x_2^3 + (h_{X2}^2 + h_{Y2}^2 - 1)x_2^2 + 2h_{X2}x_2 - h_{X2}^2 = 0$ ，其中 h_{X2} ， h_{Y2} 分别为外加磁场在第二处于 S1 状态的磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场，二者根据步骤 4 的计算结果得到： $h_{X2} = h_F \sin \theta$ ， $h_{Y2} = h_F \cos \theta$ ； $x_2 = \sin \varphi_{R2}$ ；

上述一元四次方程具有 4 个解，当隧穿磁阻处于稳定平衡状态时， φ_{R2} 只有一个解，该解取决于 3 个条件：

- 1) x_2 为实数且 $|x_2| \leq 1$ ；

$$2) h_{y2} \cos \varphi_{R2} + h_{x2} \sin \varphi_{R2} + \cos 2\varphi_{R2} \geq 0;$$

3) 该解与磁阻电阻的初始位置间所有角度能量必须小于初始位置的能量；
将求解得到的 φ 值分别作为新的给定的参考层磁化方向 φ_{R1} , φ_{R2} 。

综上所述，由于采用了上述技术方案，本发明的有益效果是：

本发明提供的中大磁场测量方法实现了对中大磁场的准确测量，扩大了隧穿磁阻电阻的磁场强度测量范围。

附图说明

本发明将通过例子并参照附图的方式说明，其中：

图 1 为本发明方法流程图。

图 2 为隧穿磁阻电阻的单畴行为的归一化星形曲线示意图。

图 3 为采用两个磁阻电阻测量磁场时测量范围随被测磁场强度角度变化的仿真图。

图 4 为本发明另一个实施例中四个磁阻电阻布设的结构示意图。

图 5 为采用四个磁阻电阻测量磁场时测量范围随被测磁场强度角度变化的仿真图。

具体实施方式

本说明书中公开的所有特征，或公开的所有方法或过程中的步骤，除了互相排斥的特征和/或步骤以外，均可以以任何方式组合。

本说明书中公开的任一特征，除非特别叙述，均可被其他等效或具有类似目的的替代特征加以替换。即，除非特别叙述，每个特征只是一系列等效或类似特征中的一个例子而已。

本发明方法适用于隧穿磁阻电阻、巨磁阻电阻等磁阻电阻，本实施例以隧

穿磁阻电阻为例进行说明。

如图 1，本发明方法一个实施例的步骤包括：

(1) 对于任一外加磁场，测量得到两个不同易轴方向的隧穿磁阻电阻 R_1 ， R_2 ，同时将无磁场时的初始参考层磁化方向作为给定方向 φ_{R1} ， φ_{R2} 。需要说明的是隧穿磁阻的核心典型结构包括反铁磁层（钉扎层）/铁磁层（被钉扎层）/非磁性金属/铁磁层（参考层）/势垒层/铁磁层（自由层），电流垂直膜面。其中，参考层和被钉扎层通过一层非常薄的非磁性金属诱导形成人工合成反铁磁结构，使得参考层和被钉扎层的磁化方向更加稳定，不易受到外界强磁场破坏。而自由层的磁化方向随外界磁场变化而变化。

若隧穿磁阻电阻沿某一轴或方向最容易被磁化则称为易轴，反之则谓难轴。

隧穿磁阻电阻的阻值能够随外加磁场的变化而变化，因此测量其阻值便可测量外加磁场。将两个具有不同易轴方向的隧穿磁阻电阻放置于外加磁场中，通过全桥或其他电阻测量电路可得到两个电阻的阻值。

(2) 根据两个电阻的阻值，可以计算得到各个电阻自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角 $|\varphi_{F1} - \varphi_{R1}|$ ， $|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}|$ ，对应如图 1 过程①，计算公式为：

$$|\varphi_{F1} - \varphi_{R1}| = \arccos\left(\frac{R_{1\max} + R_{1\min} - 2R_1}{R_{1\max} - R_{1\min}}\right); \text{ 其中 } \varphi_{F1} \text{ 为第一个隧穿磁阻电阻的自由层}$$

磁化方向， $R_{1\min}$ 为第一个隧穿磁阻电阻的最小值， $R_{1\max}$ 为第一个隧穿磁阻电阻的最大值。

$$|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}| = \arccos\left(\frac{R_{2\max} + R_{2\min} - 2R_2}{R_{2\max} - R_{2\min}}\right); \text{ 其中 } \varphi_{F2} \text{ 为第二个隧穿磁阻电阻的自由层}$$

磁化方向， $R_{2\min}$ 为第二个隧穿磁阻电阻的最小值， $R_{2\max}$ 为第二个隧穿磁阻电阻的最大值。

$R_{1\min}$ 、 $R_{1\max}$ 、 $R_{2\min}$ 及 $R_{2\max}$ 均可通过分别标定两个隧穿磁阻电阻得到。

(3) 对于给定的参考层磁化方向, 计算自由层磁化方向 φ_{F1} , φ_{F2} , 如图 1 过程②, 计算公式为 $\varphi_F = \begin{cases} \varphi_R + |\varphi_F - \varphi_R|, S_1 \\ \varphi_R - |\varphi_F - \varphi_R|, S_2 \end{cases}$, 将 $|\varphi_{F1} - \varphi_{R1}|$ 、 φ_{R1} 带入前式便得到第一隧穿磁阻电阻的自由层磁化方向 φ_{F1} , 将 $|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}|$ 、 φ_{R2} 带入前式便得到第二隧穿磁阻电阻的自由层磁化方向 φ_{F2} 。

式中, S_1, S_2 分别表示自由层磁畴处于图 2 中的易轴正方向范围 ($-\pi/2 \sim \pi/2$) 或者易轴负方向范围 ($\pi/2 \sim 3\pi/2$)。对于特定的磁阻电阻其自由层磁畴的状态是唯一的。

(4) 根据计算得到的自由层磁化方向 φ_{F1} , φ_{F2} , 计算被测磁场幅值和方向 h_F , θ , 如图 1 过程③, 计算公式为式:

$$\begin{pmatrix} -\sin(\alpha_1 + \varphi_{F1}) & \cos(\alpha_1 + \varphi_{F1}) \\ -\sin(\alpha_2 + \varphi_{F2}) & \cos(\alpha_2 + \varphi_{F2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_F \cos \theta \\ h_F \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{BF} \sin(\varphi_{F1} - \theta_{BF}) + \sin \varphi_{F1} \cos \varphi_{F1} - h_J \sin(\varphi_{F1} - \varphi_{R1}) \\ h_{BF} \sin(\varphi_{F2} - \theta_{BF}) + \sin \varphi_{F2} \cos \varphi_{F2} - h_J \sin(\varphi_{F2} - \varphi_{R2}) \end{pmatrix};$$

式中, 式中 α_1 , α_2 分别为两个隧穿磁阻电阻的易轴方向, h_{JFR} 为任一个隧穿磁阻电阻的自由层与参考层的耦合场, $h_{BF} = H_{BF} / H_{AF}$, H_{BF} 为隧穿磁阻电阻自由层的内部偏置磁场大小, H_{AF} 为自由层各向异性场大小; θ_{BF} 为自由层的内部偏置磁场方向。当各隧穿磁阻电阻相同时, 我们认为其内部的固有参数是相同的。

(5) 针对计算得到的磁场参数与前一次结果比较, 是否达到精度要求 (本实施例中, 当两次计算结果中磁场强度的差值小于 $1E-4$, 方向的差值小于 0.01° 时认为达到精度要求), 达到要求则输出结果; 否则根据磁场计算更新参考层磁化方向角度 φ_{R1} , φ_{R2} , 如图示过程④, 并返回步骤 (2) 继续迭代。

其中更新参考层磁化方向角度的步骤为:

求解一元四次方程 $x_1^4 - 2h_{x1}x_1^3 + (h_{x1}^2 + h_{y1}^2 - 1)x_1^2 + 2h_{x1}x_1 - h_{x1}^2 = 0$, 其中 h_{x1} , h_{y1} 分别为外加磁场在第一磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场, 二者根据步骤 4 的

计算结果得到， $h_{x1} = h_F \cos \theta$ ， $h_{y1} = h_F \sin \theta$ ； $x_1 = \sin \varphi_{R1}$ 。

上述一元四次方程具有 4 个解，当隧穿磁阻处于稳定平衡状态时， φ_{R1} 只有一个解。该解取决于 3 个条件：

- 1) x_1 为实数且 $|x_1| \leq 1$ ；
- 2) $h_{y1} \cos \varphi_{R1} + h_{x1} \sin \varphi_{R1} + \cos 2\varphi_{R1} \geq 0$ ；
- 3) 该解与隧穿磁阻的初始位置间所有角度能量必须小于初始位置的能量。

求解一元四次方程 $x_2^4 - 2h_{x2}x_2^3 + (h_{x2}^2 + h_{y2}^2 - 1)x_2^2 + 2h_{x2}x_2 - h_{x2}^2 = 0$ ，其中 h_{x2} ， h_{y2} 分别为外加磁场在第二磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场，二者根据步骤 4 的计算结果得到，由于第一磁阻电阻与第二磁阻电阻正交，因此 $h_{x2} = h_F \sin \theta$ ， $h_{y2} = h_F \cos \theta$ ； $x_2 = \sin \varphi_{R2}$ 。

与 φ_{R1} 的筛选过程同理，确定 φ_{R2} 。

将求解得到的 φ 值分别作为新的给定的参考层磁化方向 φ_{R1} ， φ_{R2} 。

在其他实施例中，可以借助计算机数值方法进行求解以下公式得到磁阻电阻的参考层磁化方向角度，即将技术人员认为可能的角度带入下列公式计算，判断其结果是否接近 0，如是则认为带入的角度为 φ 的解：
 $h_Y \sin \varphi - h_X \cos \varphi + \sin \varphi \cos \varphi = 0$ ， h_X ， h_Y 分别为外加磁场在磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场。上式为隧穿磁阻单畴模型计算在参考层的磁化方向角度的一般表达式，令 $x = \sin \varphi$ ，上式可演化为：

$x^4 - 2h_X x^3 + (h_X^2 + h_Y^2 - 1)x^2 + 2h_X x - h_X^2 = 0$ ，亦即前一实施例计算参考层磁化方向的公式。但是使用计算机数值方法求解会存在精度、时间和全局收敛性问题，因此推荐使用前一实施例计算磁阻电阻参考层磁化方向。

通过上述迭代，参考层磁化方向将逐渐收敛到真实方向，同时计算得到的外加磁场也收敛到真实的外加磁场。迭代算法的收敛性取决于在计算参考层磁

化方向时是否收敛。

若重复迭代设定次数后，计算结果与前次计算结果的差值仍然不小设定值，则认为计算过程不能收敛，当前的外加磁场为极大磁场。设定次数根据不同的磁阻电阻及计算精度要求设定，本实施例设定的次数是 20 次。

图 3 为采用本实施例测量磁场时，磁场方向测量范围随被测磁场不同角度的测量范围仿真。可以看到当被测处于 $0\sim 90^\circ$ 时，两个磁阻电阻自由层始终处于 S1 状态，不会发生磁畴不可逆旋转，因此迭代算法中的步骤（3）使用的公式确定为 S1 状态时的值，从而具有较大的测量范围；而当被测磁场处于 $90^\circ\sim 360^\circ$ 时，磁畴可能发生不可逆旋转，此时磁阻电阻的自由层状态不确定，也无法事先确定芯片自由层状态。若迭代算法中的步骤（3）使用的公式固定为 S1 状态时的值，当磁场较小时，芯片自由层仍处于 S1 状态，迭代算法有效；而当磁场较大时，由于磁畴发生不可逆旋转，最后迭代算法收敛到错误值或不收敛。因此在只有两个芯片的情况下，被测磁场为 $90^\circ\sim 360^\circ$ 时的测量范围取决于自由层内部偏置场到星形曲线的距离，此时磁畴旋转可逆连续。通常自由层的内部偏置场很小，其到星形曲线的距离很短，因此 $90^\circ\sim 360^\circ$ 时的测量范围很小。

为了提前确定隧穿磁阻芯片的自由层状态，扩大 $90^\circ\sim 360^\circ$ 的测量范围，增加另两个正交布置的芯片 R_3 、 R_4 ，四个芯片布置如图 4。

当上述四个隧穿磁阻自由层的内部易轴偏置磁场大于各向异性场 ($h_{B_{XF}} > 1$) 时，总至少有两个隧穿磁阻自由层处于 S1 状态，朝向各自的易轴正方向，从而可以利用这两个电阻进行迭代计算，得到较大的测量范围。而制作自由层的内部易轴偏置磁场大于各向异性场的隧穿磁阻电阻又是本领域技术人员可以实现的。同时被测磁场朝向难轴负方向的两个隧穿磁阻电阻最小，通过这两个

电阻即可确定处于 S1 状态的两个电阻。如图 5 所示，相对于 R_2 和 R_3 的易轴方向，被测磁场趋向其难轴负方向，这两个电阻值最低，而相对于 R_1 和 R_2 的易轴方向，被测磁场趋向其易轴正方向，且位于星形曲线外，其磁畴状态肯定趋向易轴正方向，处于 S1 状态。

对此，先测量四个电阻的阻值，找出其中阻值最小的两个电阻，然后可以确定另外两个电阻处理 S1 状态，进而将处理 S1 状态的两个电阻值带入前述的步骤中进行迭代计算，从而得到待测磁场的强度及方向。

图 6 示出了采用四个磁阻电阻测量磁场的测量范围随被测磁场方向变化的仿真图。与图 3 相对，采用四个磁阻电阻测量外界磁场，当外界磁场的方向为 $90^\circ\sim 360^\circ$ 范围时，也能获取较大的测量范围。

图 7 展示的是当四个磁阻电阻如图 4 那样布设时，在不同的被测磁场方向下与各个磁阻电阻的状态。在实际运用中，无需严格参照本表格，只需要根据实际测量到的电阻的阻值便能确定处于 S1 状态的两个磁阻电阻。

本发明并不局限于前述的具体实施方式。本发明扩展到任何在本说明书中披露的新特征或任何新的组合，以及披露的任一新的方法或过程的步骤或任何新的组合。

权利要求书

1、一种中大磁场全象限测量方法，其特征在于，包括：

步骤 1：将四个正交配置的磁阻电阻放置到外加磁场中；其中第一磁阻电阻与第三磁阻电阻位于一条直线上，第二磁阻电阻与第四磁阻电阻位于另一条直线上，所述一条直线与所述另一条直线垂直；四个磁阻电阻自由层的内部易轴偏置磁场大于各向异性场；

步骤 2：确定最小阻值的两个磁阻电阻，进而确定另外两个磁阻电阻处于 S1 状态，并令处于 S1 状态的两个磁阻电阻的阻值为 R_1 , R_2 ，同时将无磁场时处于 S1 状态的两个磁阻电阻的初始参考层磁化方向作为给定的参考层磁化方向 φ_{R1} , φ_{R2} ；S1 状态是指磁阻电阻的自由层磁畴处于易轴正方向；

步骤 2：根据阻值 R_1 , R_2 分别计算两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角；

步骤 3：分别根据两个处于 S1 状态的磁阻电阻的给定参考层磁化方向 φ_{R1} , φ_{R2} 及两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角计算出两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向；

步骤 4：根据两个处于 S1 状态的磁阻电阻的给定参考层磁化方向、两个处于 S1 状态的隧穿磁阻电阻的自由层磁化方向求解外加磁场的磁场幅值及方向；

步骤 5：将本次计算得到的外加磁场的磁场幅值及方向与前一次计算结果相比，若两次结果的差值大于设定阈值，则根据本次计算得到的外加磁场的磁场幅值及方向更新两个处于 S1 状态的磁阻电阻的参考层磁化方向并将其作为新的给定的参考层磁化方向 φ_{R1} , φ_{R2} ，并再次执行步骤 2~步骤 5，直到两次结果的差值小于设定值。

2、根据权利要求 1 所述的一种中大磁场全象限测量方法，其特征在于，步骤 2 中，计算两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向和参考层磁化方向的夹角的公式分别为：

$|\varphi_{F1} - \varphi_{R1}| = \arccos\left(\frac{R_{1\max} + R_{1\min} - 2R_1}{R_{1\max} - R_{1\min}}\right)$ ；其中 φ_{F1} 为第一个处

于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向， $R_{1\min}$ 为第一个处于 S1 状态的磁阻电阻的最小值， $R_{1\max}$ 为第一个处于 S1 状态的磁阻电阻的最大值；

$$|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}| = \arccos\left(\frac{R_{2\max} + R_{2\min} - 2R_2}{R_{2\max} - R_{2\min}}\right); \text{ 其中 } \varphi_{F2} \text{ 为第二个处于 S1 状态的磁阻电}$$

阻的自由层磁化方向, $R_{2\min}$ 为第二个处于 S1 状态的磁阻电阻的最小值, $R_{2\max}$ 为第二个处于 S1 状态的隧穿磁阻电阻的最大值。

3、根据权利要求 1 所述的一种中大磁场全象限测量方法, 其特征在于, 步
5 骤 3 中, 根据公式计算两个处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向:

$\varphi_F = \varphi_R + |\varphi_F - \varphi_R|$, 将 $|\varphi_H - \varphi_R|$ 、 φ_{R1} 带入前式便得到第一处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向 φ_{F1} , 将 $|\varphi_{F2} - \varphi_{R2}|$ 、 φ_{R2} 带入前式便得到第二处于 S1 状态的磁阻电阻的自由层磁化方向 φ_{F2} 。

4、根据权利要求 1 所述的一种中大磁场全象限测量方法, 其特征在于, 步
10 骤 4 中利用下列方程组求解外加磁场的磁场幅值 h_F 及方向 θ :

$$\begin{pmatrix} -\sin(\alpha_1 + \varphi_{F1}) & \cos(\alpha_1 + \varphi_{F1}) \\ -\sin(\alpha_2 + \varphi_{F2}) & \cos(\alpha_2 + \varphi_{F2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_F \cos \theta \\ h_F \sin \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{BF} \sin(\varphi_{F1} - \theta_{BF}) + \sin \varphi_{F1} \cos \varphi_{F1} - h_{JFR} \sin(\varphi_{F1} - \varphi_{R1}) \\ h_{BF} \sin(\varphi_{F2} - \theta_{BF}) + \sin \varphi_{F2} \cos \varphi_{F2} - h_{JFR} \sin(\varphi_{F2} - \varphi_{R2}) \end{pmatrix}; \text{ 式中 } \alpha_1, \alpha_2 \text{ 分别为两个处于}$$

S1 状态的磁阻电阻的易轴方向, h_{JFR} 为任意一个磁阻电阻的自由层与参考层的耦合场, $h_{BF} = H_{BF} / H_{AF}$, H_{BF} 为磁阻电阻的自由层的内部偏置磁场大小, H_{AF} 为自由层各向异性场大小; θ_{BF} 为自由层的内部偏置磁场方向。

15 5、根据权利要求 1 所述的一种中大磁场全象限测量方法, 其特征在于, 步骤 5 中, 更新两个处于 S1 状态的磁阻电阻的参考层磁化方向 φ_{R1} , φ_{R2} 的步骤进一步包括:

求解一元四次方程 $x_1^4 - 2h_{X1}x_1^3 + (h_{X1}^2 + h_{Y1}^2 - 1)x_1^2 + 2h_{X1}x_1 - h_{X1}^2 = 0$, 其中 h_{X1} , h_{Y1} 分别为外加磁场在第一处于 S1 状态的磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场, 二者根据步骤 4 的计算结果得到: $h_{X1} = h_F \cos \theta$, $h_{Y1} = h_F \sin \theta$; $x_1 = \sin \varphi_{R1}$;

上述一元四次方程具有 4 个解, 当隧穿磁阻处于稳定平衡状态时, φ_{R1} 只有一个解, 该解取决于 3 个条件:

1) x_1 为实数且 $|x_1| \leq 1$;

$$2) h_{Y1} \cos \varphi_{R1} + h_{X1} \sin \varphi_{R1} + \cos 2\varphi_{R1} \geq 0;$$

3) 该解与磁阻电阻的初始位置间所有角度能量必须小于初始位置的能量;

求解一元四次方程 $x_2^4 - 2h_{X2}x_2^3 + (h_{X2}^2 + h_{Y2}^2 - 1)x_2^2 + 2h_{X2}x_2 - h_{X2}^2 = 0$, 其中 h_{X2} , h_{Y2}

分别为外加磁场在第二处于 S1 状态的磁阻电阻易轴和难轴方向上的磁场, 二

5 者根据步骤 4 的计算结果得到: $h_{X2} = h_F \sin \theta$, $h_{Y2} = h_F \cos \theta$; $x_2 = \sin \varphi_{R2}$;

上述一元四次方程具有 4 个解, 当隧穿磁阻处于稳定平衡状态时, φ_{R2} 只有一个解, 该解取决于 3 个条件:

$$1) x_2 \text{ 为实数且 } |x_2| \leq 1;$$

$$2) h_{Y2} \cos \varphi_{R2} + h_{X2} \sin \varphi_{R2} + \cos 2\varphi_{R2} \geq 0;$$

10 3) 该解与磁阻电阻的初始位置间所有角度能量必须小于初始位置的能量;

将求解得到的 φ 值分别作为新的给定的参考层磁化方向 φ_{R1} , φ_{R2} 。

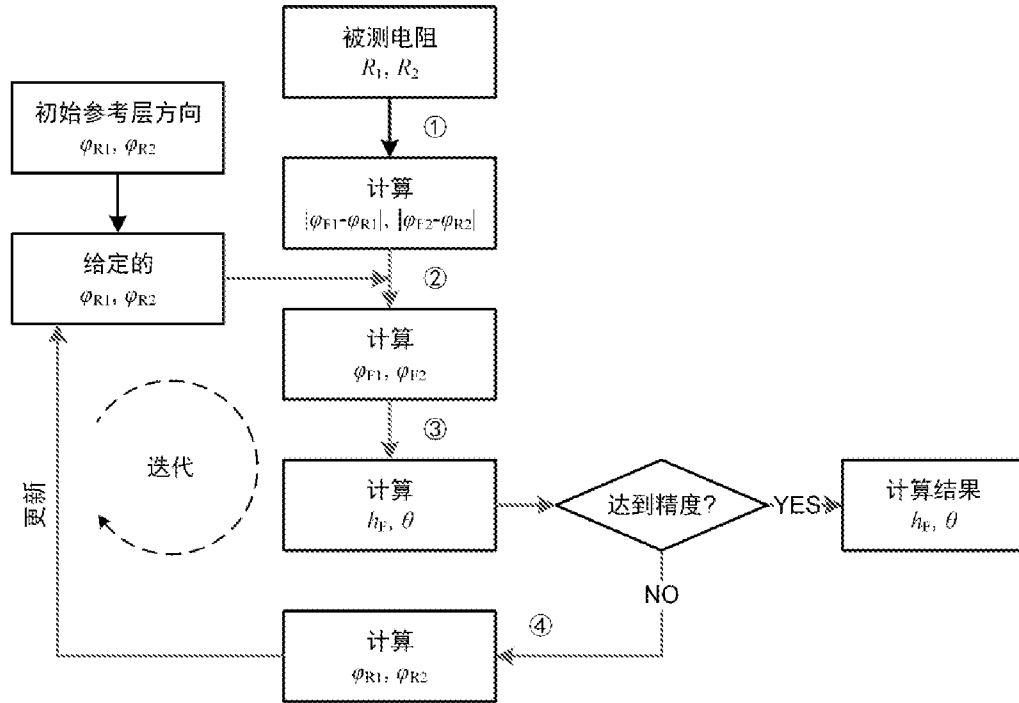


图 1

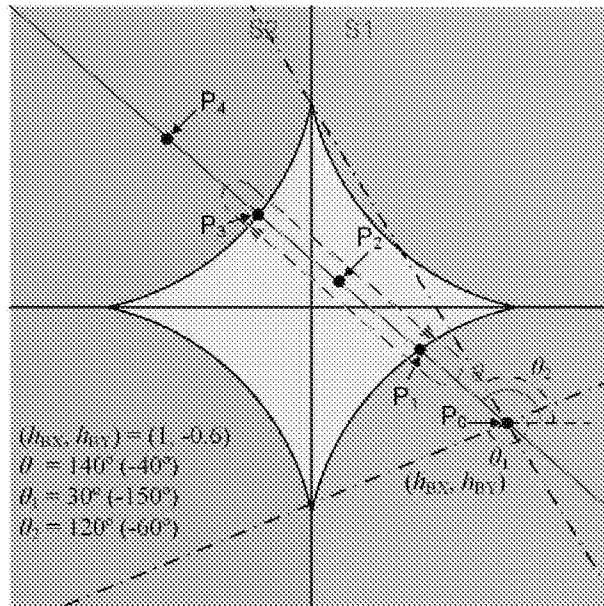


图 2

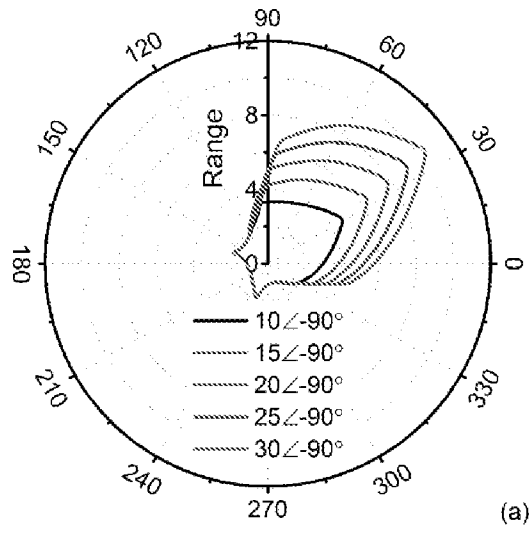


图 3

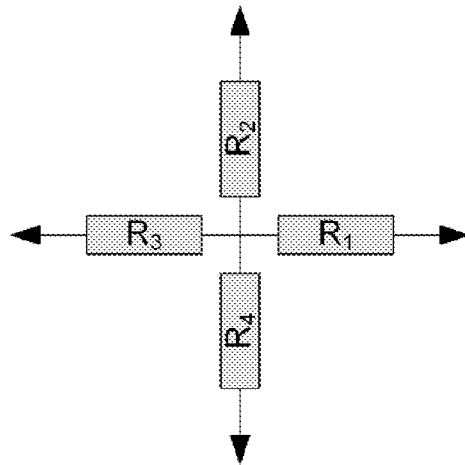


图 4

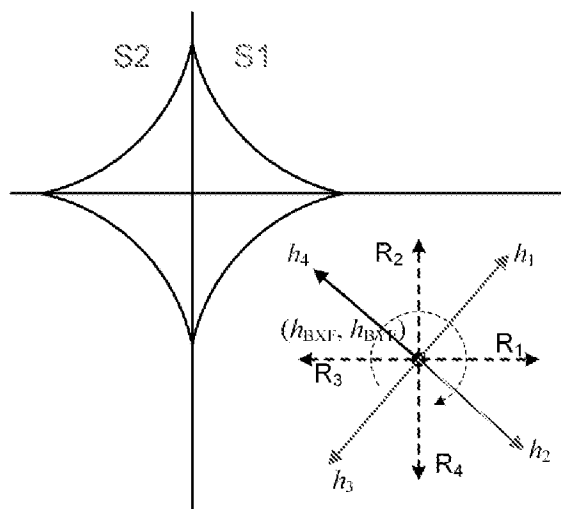


图 5

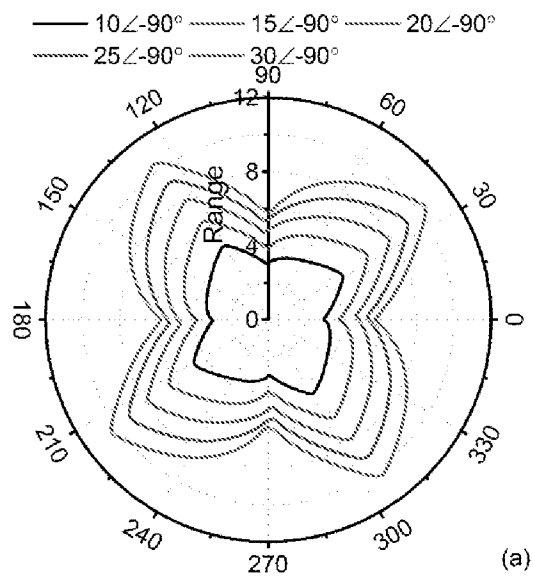


图 6

被测磁场方向	两个最小电阻的芯片	两个 S1 状态电阻的芯片
$0^\circ \sim 90^\circ$	R_2, R_3	R_1, R_2
$90^\circ \sim 180^\circ$	R_3, R_4	R_2, R_3
$180^\circ \sim 270^\circ$	R_4, R_1	R_3, R_4
$270^\circ \sim 360^\circ$	R_1, R_2	R_4, R_1

图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/090545

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 33/09 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC: 清华大学, 清华四川能源互联网研究院, Tsinghua University, Sichuan Energy Internet Research Institute, 欧阳勇, 何金良, 胡军, 王善祥, 赵根, 王中旭, 曾嵘, 庄池杰, 张波, 余占清, 磁场, 测量, 象限, 磁阻, 电阻, 正交, 垂直, 偏置, 磁化, 自由层, 参考层, 角, 幅值, 幅度, 方向, 阈值, magnetic field, magetic, quadrant, measur+, resistance, vertical, upright, magnetization, angle, range, scope, direct+, valve

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 106772147 A (TSINGHUA UNIVERSITY et al.), 31 May 2017 (31.05.2017), claims 1-5, description, paragraphs [0003]-[0073], and figures 1-7	1-5
A	CN 102707246 A (SAE MAGNETICS LTD.), 03 October 2012 (03.10.2012), description, paragraphs [0028]-[0040], and figures 1-4	1-5
A	CN 102129053 A (TSINGHUA UNIVERSITY), 20 July 2011 (20.07.2011), entire document	1-5
A	CN 102830374 A (FUDAN UNIVERSITY), 19 December 2012 (19.12.2012), entire document	1-5
A	US 2012053059 A1 (HATSUKADE, Y. et al.), 01 March 2012 (01.03.2012), entire document	1-5
A	JP 2007534340 A (4D NEUROIMAGING et al.), 29 November 2007 (29.11.2007), entire document	1-5

Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search
08 August 2017

Date of mailing of the international search report
11 September 2017

Name and mailing address of the ISA
State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao
Haidian District, Beijing 100088, China
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer
GUO, Junhong
Telephone No. (86-10) 61648426

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2017/090545

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 106772147 A	31 May 2017	None	
CN 102707246 A	03 October 2012	US 2012249130 A1	04 October 2012
		CN 102707246 B	20 January 2016
		US 8664950 B2	04 March 2014
CN 102129053 A	20 July 2011	CN 102129053 B	10 October 2012
CN 102830374 A	19 December 2012	None	
US 2012053059 A1	01 March 2012	WO 2010122733 A1	28 October 2010
		US 8548542 B2	01 October 2013
		EP 2423698 A1	29 February 2012
		JPWO 2010122733 A1	25 October 2012
JP 2007534340 A	29 November 2007	US 6731968 B2	04 May 2004
		WO 2005016139 A1	24 February 2005
		AU 2003253688 A1	07 March 2005
		CA 2533917 A1	24 February 2005
		EP 1651107 A1	03 May 2006
		US 2004006267 A1	08 January 2004

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/090545

<p>A. 主题的分类 G01R 33/09(2006.01)i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																							
<p>B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G01R</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT、CNKI、WPI、EPODOC: 清华大学, 清华四川能源互联网研究院, Tsinghua University, Sichuan Energy Internet Research Institute, 欧阳勇, 何金良, 胡军, 王善祥, 赵根, 王中旭, 曾嵘, 庄池杰, 张波, 余占清, 磁场, 测量, 象限, 磁阻, 电阻, 正交, 垂直, 偏置, 磁化, 自由层, 参考层, 角, 幅值, 幅度, 方向, 阈值, magnetic field, magetic, quadrant, measur+, resistance, vertical, upright, magnetization, angle, range, scope, direct+, valve</p>																							
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 106772147 A (清华大学 等) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 权利要求1-5、说明书第[0003]-[0073]段, 附图1-7</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102707246 A (新科实业有限公司) 2012年 10月 3日 (2012 - 10 - 03) 说明书第[0028]-[0040]段, 附图1-4</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102129053 A (清华大学) 2011年 7月 20日 (2011 - 07 - 20) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 102830374 A (复旦大学) 2012年 12月 19日 (2012 - 12 - 19) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2012053059 A1 (HATSUKADE, YOSHIMI 等) 2012年 3月 1日 (2012 - 03 - 01) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2007534340 A (4D NEUROIMAGING 等) 2007年 11月 29日 (2007 - 11 - 29) 全文</td> <td>1-5</td> </tr> </tbody> </table> <p><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。 <input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p> <p>* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件</p>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 106772147 A (清华大学 等) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 权利要求1-5、说明书第[0003]-[0073]段, 附图1-7	1-5	A	CN 102707246 A (新科实业有限公司) 2012年 10月 3日 (2012 - 10 - 03) 说明书第[0028]-[0040]段, 附图1-4	1-5	A	CN 102129053 A (清华大学) 2011年 7月 20日 (2011 - 07 - 20) 全文	1-5	A	CN 102830374 A (复旦大学) 2012年 12月 19日 (2012 - 12 - 19) 全文	1-5	A	US 2012053059 A1 (HATSUKADE, YOSHIMI 等) 2012年 3月 1日 (2012 - 03 - 01) 全文	1-5	A	JP 2007534340 A (4D NEUROIMAGING 等) 2007年 11月 29日 (2007 - 11 - 29) 全文	1-5
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
PX	CN 106772147 A (清华大学 等) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 权利要求1-5、说明书第[0003]-[0073]段, 附图1-7	1-5																					
A	CN 102707246 A (新科实业有限公司) 2012年 10月 3日 (2012 - 10 - 03) 说明书第[0028]-[0040]段, 附图1-4	1-5																					
A	CN 102129053 A (清华大学) 2011年 7月 20日 (2011 - 07 - 20) 全文	1-5																					
A	CN 102830374 A (复旦大学) 2012年 12月 19日 (2012 - 12 - 19) 全文	1-5																					
A	US 2012053059 A1 (HATSUKADE, YOSHIMI 等) 2012年 3月 1日 (2012 - 03 - 01) 全文	1-5																					
A	JP 2007534340 A (4D NEUROIMAGING 等) 2007年 11月 29日 (2007 - 11 - 29) 全文	1-5																					
国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期																						
2017年 8月 8日	2017年 9月 11日																						
ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员																						
中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	郭军宏																						
传真号 (86-10)62019451	电话号码 (86-10)61648426																						

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/090545

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	106772147	A	2017年 5月 31日	无			
CN	102707246	A	2012年 10月 3日	US	2012249130	A1	2012年 10月 4日
				CN	102707246	B	2016年 1月 20日
				US	8664950	B2	2014年 3月 4日
CN	102129053	A	2011年 7月 20日	CN	102129053	B	2012年 10月 10日
CN	102830374	A	2012年 12月 19日	无			
US	2012053059	A1	2012年 3月 1日	WO	2010122733	A1	2010年 10月 28日
				US	8548542	B2	2013年 10月 1日
				EP	2423698	A1	2012年 2月 29日
				JPWO	2010122733	A1	2012年 10月 25日
JP	2007534340	A	2007年 11月 29日	US	6731968	B2	2004年 5月 4日
				WO	2005016139	A1	2005年 2月 24日
				AU	2003253688	A1	2005年 3月 7日
				CA	2533917	A1	2005年 2月 24日
				EP	1651107	A1	2006年 5月 3日
				US	2004006267	A1	2004年 1月 8日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)