



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115542225 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 30

(21) 申请号 202211246081.4

(22) 申请日 2022.10.12

(71) 申请人 中国科学院国家空间科学中心  
地址 101400 北京市怀柔区京密北二街中  
科院空间中心  
申请人 中国科学院力学研究所

(72) 发明人 刘彬彬 杨震 强丽娥 徐鹏  
彭晓东 马晓珊 唐文林 张玉珠

(74) 专利代理机构 北京方安思达知识产权代理  
有限公司 11472  
专利代理师 陈琳琳 张红生

(51) Int. Cl.  
G01R 35/00 (2006.01)  
G01C 25/00 (2006.01)

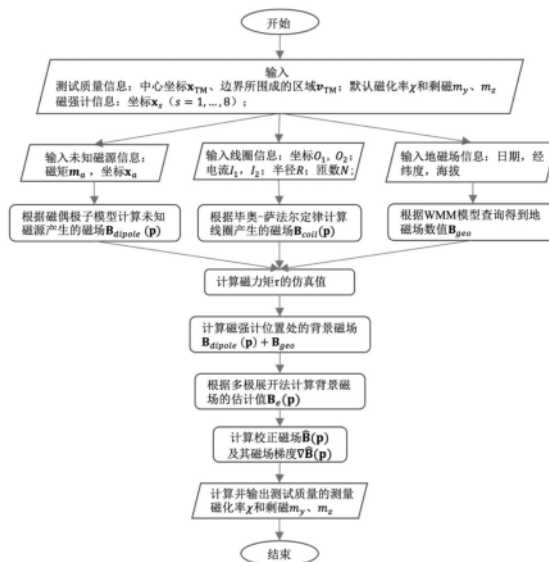
权利要求书4页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法

(57) 摘要

本发明提供了一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,所述方法适用于非磁洁净条件下的扭秤磁性测量实验,通过在扭秤装置的测试质量附近放置多个磁强计,对实验中的磁场进行监测,并采用基于多极展开法对除线圈产生的磁场之外的背景磁场及其磁场梯度进行重构,通过磁场校正来提升测试质量的磁性测量精度,最后得到测试质量磁化率和测试质量剩磁在两个坐标轴方向上的分量。本发明的优势在于:本发明通过磁强计读数监测环境磁场,对背景磁场采用多极展开法进行高精度重构,从而在计算测试质量磁性时,磁场及磁场梯度可以采用更接近真实磁场的校正磁场重构值,进而提升了测量精度。在非磁洁净实验条件下,本发明亦可应用于其他领域。



1. 一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,所述方法适用于非磁洁净条件下的扭秤磁性测量实验,通过在悬丝扭秤装置的测试质量附近放置多个磁强计,对实验中的磁场进行监测,并采用基于多极展开法对除线圈产生的磁场之外的背景磁场及其磁场梯度进行重构,通过磁场校正来提升测试质量的磁性测量精度,最后得到测试质量磁化率和测试质量剩磁在两个坐标轴方向上的分量。

2. 根据权利要求1所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述方法具体包括:

步骤1:搭建非磁洁净条件下的扭秤磁性测量实验环境,获取实验环境信息;

步骤2:进行至少三次扭秤磁性测量实验,记录测量数据;

步骤3:采用基于多极展开法对除线圈产生的磁场之外的背景磁场及其磁场梯度进行重构,通过磁场校正计算测试质量磁化率和测试质量剩磁在两个坐标轴方向上的分量。

3. 根据权利要求2所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述步骤1具体为:

搭建测试环境为:最顶端设置悬吊支撑机构,通过一根悬丝先后连接悬丝调节机构和测试质量;测试质量放置在支撑台上的电极笼里;电极笼两侧平行设置两个大小相同的通电线圈,通电线圈垂直设立在线圈轨道上,并可沿线圈轨道水平移动;

电极笼为正方体,在电极笼的8个顶点,分别放置有一个磁强计,用于监测测试质量附近的磁场以及磁场校正;

设定坐标系,其中坐标原点为 $o$ 建立在测试质量几何中心, $x$ 轴平行于悬丝, $y$ 轴平行于通电线圈的线圈轨道, $z$ 轴垂直于 $xoy$ 平面;

电极笼垂直于 $z$ 轴的两个侧面上,各装有两块电极板,电极板连接测控电路,用于读出测试质量所受磁力矩信息;

整个悬丝扭秤装置放置在隔振地基上,同时封装在一个真空、恒温的系统内;

获取实验信息包括:实验开展的日期、实验地点的经纬度和海拔;未知磁源的磁矩和未知磁源的位置;测试质量几何中心的坐标、测试质量的区域边界、测试质量的默认磁化率和测试质量的默认剩磁;磁强计的位置坐标;通电线圈几何中心的坐标、通电线圈半径、通道线圈匝数和通电线圈的电流。

4. 根据权利要求3所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述步骤2具体为:

每次沿着线圈轨道调整线圈的位置,或者改变电流方向后进行至少三次实验,记录通电线圈几何中心的坐标和通电线圈的电流,并根据测控电路读出测试质量所受磁力矩。

5. 根据权利要求2所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述步骤3具体为:

步骤3-1:计算背景磁场的估计值;

步骤3-2:计算测试质量所在位置处的校正磁场值和磁场梯度;

步骤3-3:利用校正磁场值、磁场梯度和至少三次实验测量的力矩计算测试质量磁化率和测试质量剩磁在 $y$ 、 $z$ 方向上的分量。

6. 根据权利要求5所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述步骤3-1具体为:

任意点 $p=(x, y, z)$ 处背景磁场的估计值 $B_e(p)$ 在 $x, y, z$ 方向的三个分量分别为:

$$B_{e,x} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^l Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial x}$$

$$B_{e,y} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^l Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial y}$$

$$B_{e,z} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^l Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial z}$$

其中, $r$ 为点 $p$ 在坐标系下的模长, $r \equiv |p|$ ;  $\mathbf{n}$ 为点 $p$ 在坐标系下的方向的单位向量, $\mathbf{n} \equiv p/r$ ;  $M_{lm}$ 和 $Y_{lm}(\mathbf{n})$ 分别为 $l$ 阶和 $m$ 次的多极系数和球谐函数; $L$ 为截断阶数,满足 $3N_{\text{mag}} \geq L(L+2)$ ,  $N_{\text{mag}}$ 为磁强计的数量;

设定方程组:

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial M_{lm}} = 0$$

其中, $l=1, \dots, L, m=-1, \dots, 1$ ; 根据 $l$ 和 $m$ 的不同取值可以得到 $L(L+2)$ 个 $M_{lm}$ , 其对应的 $L(L+2)$ 个方程构成待求解的方程组;

$\varepsilon^2$ 表示均方误差:

$$\varepsilon^2 = \sum_{s=1}^{N_{\text{mag}}} |(\mathbf{B}_{\text{geo}} + \mathbf{B}_{\text{dipole}}(\mathbf{x}_s)) - \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_s)|^2$$

其中, $\mathbf{x}_s$ 表示第 $s$ 个磁强计的位置坐标; $\mathbf{B}_e(\mathbf{x}_s)$ 表示磁强计处背景磁场; $\mathbf{B}_{\text{geo}}$ 表示地磁场, 通过查询世界磁场模型得到; $\mathbf{B}_{\text{dipole}}(\mathbf{x}_s)$ 表示磁强计处未知磁源产生的磁场:

$$\mathbf{B}_{\text{dipole}}(\mathbf{x}_s) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{a=1}^n \frac{3[\mathbf{m}_a \cdot \mathbf{n}_a] \mathbf{n}_a - \mathbf{m}_a}{|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_a|^3}$$

其中,未知磁源用磁偶极子来模拟, $n$ 表示磁偶极子的数目; $\mathbf{m}_a$ 表示第 $a$ 个磁偶极子的磁矩矢量; $\mathbf{n}_a = (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_a) / |\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_a|$ 表示从第 $a$ 个磁偶极子的坐标 $\mathbf{x}_a$ 指向第 $s$ 个磁强计坐标 $\mathbf{x}_s$ 的单位向量; $\mu_0$ 为真空磁导率常数,取值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ m kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$ ;

使用最小二乘法计算方程组得到最优估计多极系数 $M_{lm}$ 。

7. 根据权利要求6所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述步骤3-2具体为:

测试质量所在区域内一点 $p=(x, y, z)$ 的校正磁场值 $\widehat{\mathbf{B}}(p)$ 为:

$$\widehat{\mathbf{B}}(p) = \mathbf{B}_{\text{coil}}(p) + \mathbf{B}_e(p)$$

其中, $\mathbf{B}_{\text{coil}}(p)$ 表示两个通电线圈在点 $p=(x, y, z)$ 处产生的磁场值, $\mathbf{B}_{\text{coil}}(p)$ 在 $x, y, z$ 方向上的分量分别为

$$B_{\text{coil},x} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \cos \theta \left( \frac{I_2(z - z_{o2})}{|r_{A_2P}|^3} - \frac{I_1(z - z_{o1})}{|r_{A_1P}|^3} \right) d\theta$$

$$B_{coil,y} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \sin \theta \left( \frac{I_2(z - z_{o2})}{|r_{A_2P}|^3} - \frac{I_1(z - z_{o1})}{|r_{A_1P}|^3} \right) d\theta$$

$$B_{coil,z} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \sum_{i=1}^2 \frac{I_i(\sin \theta (y_{oi} - y) + R - \cos \theta x)}{|r_{A_iP}|^3} d\theta$$

其中,

$$|r_{A_1P}| = \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta - y_{o1})^2 + (z - z_{o1})^2}$$

$$|r_{A_2P}| = \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta - y_{o2})^2 + (z - z_{o2})^2}$$

$|r_{A_1P}|$ 表示点p到通电线圈1上的任一点 $A_1$ 的距离,两个通电线圈的几何中心的坐标分别为 $O_1(0, y_{o1}, z_{o1})$ 和 $O_2(0, y_{o2}, z_{o2})$ , $\theta$ 为积分变量,表示 $\overrightarrow{O_1A_1}$ 与x轴的夹角,过点 $O_2$ 作平行于 $O_1A_1$ 的射线与通电线圈2交于一点 $A_2$ ,使得 $\overrightarrow{O_1A_1} = \overrightarrow{O_2A_2}$ , $|r_{A_2P}|$ 表示点p到点 $A_2$ 的距离, $N$ 为线圈的匝数;

对校正磁场值公式求偏导数得到测试质量所在区域内点 $p = (x, y, z)$ 校正后的磁场梯度 $\nabla \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$ :

$$\nabla \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z} \end{bmatrix}$$

其中, $\partial B_{coil,x}/\partial x$ 为 $B_{coil,x}$ 对x的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,x}/\partial y$ 为 $B_{coil,x}$ 对y的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,x}/\partial z$ 为 $B_{coil,x}$ 对z的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,y}/\partial x$ 为 $B_{coil,y}$ 对x的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,y}/\partial y$ 为 $B_{coil,y}$ 对y的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,y}/\partial z$ 为 $B_{coil,y}$ 对z的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,z}/\partial x$ 为 $B_{coil,z}$ 对x的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,z}/\partial y$ 为 $B_{coil,z}$ 对y的偏导数在点p处的值; $\partial B_{coil,z}/\partial z$ 为 $B_{coil,z}$ 对z的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,x}/\partial x$ 为 $B_{e,x}$ 对x的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,x}/\partial y$ 为 $B_{e,x}$ 对y的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,x}/\partial z$ 为 $B_{e,x}$ 对z的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,y}/\partial x$ 为 $B_{e,y}$ 对x的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,y}/\partial y$ 为 $B_{e,y}$ 对y的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,y}/\partial z$ 为 $B_{e,y}$ 对z的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,z}/\partial x$ 为 $B_{e,z}$ 对x的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,z}/\partial y$ 为 $B_{e,z}$ 对y的偏导数在点p处的值; $\partial B_{e,z}/\partial z$ 为 $B_{e,z}$ 对z的偏导数在点p处的值。

8. 根据权利要求7所述的提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,其特征在于,所述步骤3-3具体为:

将至少三组实验测得的力矩 $\tau$ 和步骤3-2计算的校正磁场值、磁场梯度代入如下公式,形成多元一次线性方程组,计算得到测试质量的磁化率和测试质量剩磁沿y轴、z轴的分量:

$$\tau = \iiint_{v_{\text{TM}}} \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{m_y}{v_{\text{TM}}} + \frac{\chi}{\mu_0} B_y \right) \left( y \frac{\partial B_y}{\partial z} - z \frac{\partial B_y}{\partial y} \right) \\ & + \left( \frac{m_z}{v_{\text{TM}}} + \frac{\chi}{\mu_0} B_z \right) \left( y \frac{\partial B_z}{\partial z} - z \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) \\ & + \frac{m_y}{v_{\text{TM}}} B_z - \frac{m_z}{v_{\text{TM}}} B_y \end{aligned} \right] \times dx dy dz$$

其中,  $v_{\text{TM}}$  为积分区域, 具体为测试质量边界所围成的区域,  $x, y, z$  为积分变量;  $m_y$  和  $m_z$  为待求解的测试质量剩磁沿  $y$  轴和  $z$  轴的分量;  $\chi$  为待求解的测试质量磁化率;  $B_y$  和  $B_z$  分别为积分区域内积分变量  $(x, y, z)$  对应位置  $p$  处的校正磁场值  $\widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$  在  $y, z$  方向上的分量, 其表达式分别为:

$$B_y = B_{\text{coil},y} + B_{e,y}$$

$$B_z = B_{\text{coil},z} + B_{e,z}$$

$\frac{\partial B_y}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial B_y}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial B_z}{\partial z}$  和  $\frac{\partial B_z}{\partial y}$  分别为积分区域内积分变量  $(x, y, z)$  对应位置  $p$  处的校正后的磁场梯

度  $\nabla \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$  的 4 个分量, 其表达式分别为:

$$\frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{\partial B_{\text{coil},y}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{\partial B_{\text{coil},y}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{\partial B_{\text{coil},z}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\partial B_{\text{coil},z}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y} \quad \circ$$

## 一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于惯性传感器关键性能地面测试领域,具体涉及一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法。

### 背景技术

[0002] 在地球重力场测量、等效原理验证、空间引力波探测等任务中,惯性传感器的在轨性能通常可以借助地面关键性能测试进行评价。在惯性传感器地面评价系统中,悬丝扭秤装置是弱力测量的重要工具,在地面高精度引力实验和基础物理实验等弱力检测实验中有着广泛的应用,它适用于kg级测试质量,具有更高的分辨率,因而成为未来惯性传感器地面关键性能评价的首选。

[0003] 为了降低在轨磁噪声对惯性传感器的影响,需要开展基于悬丝扭秤装置的地面实验对测试质量的磁性(包括剩磁M和磁化率 $\chi$ )进行测量,特别是空间引力波探测任务对精度要求极高,待评估的噪声也更多,因而对悬丝扭秤装置的测量精度提出了更大的挑战。

[0004] 在悬丝扭秤装置的地面实验中,我们的实验室尽可能保持真空、恒温、隔振,并拥有高精度惯性传感器测试平台。平台中的通电线圈在测试质量附近产生磁场,与测试质量本身的剩磁以及磁化率耦合会产生力和力矩。在测试质量磁性测量时,主要有两种测量方案:一是通过实验测得测试质量所受力矩的信息反演测试质量磁性;二是通过实验测得测试质量所受力的信息反演测试质量磁性。然而,在该悬丝扭秤装置中,地磁场(约25000~65000nT)以及其他未知磁源也会对实验测量精度产生影响,尽管他们本身与通电线圈产生的磁场相比很小,但若予以忽略,仍会引入一定误差,且这种误差最终将表现为测试质量磁性测量误差,因而,受限於磁场精度的限制,悬丝扭秤装置测试质量磁性测量的精度存在一定偏差。综上所述,目前针对非磁洁净实验条件下,悬丝扭秤装置的磁性测量精度方面仍存在较大的提升空间,而提升测量精度主要可以从两个方面进行考虑:一是在硬件层面提升仪器测量精度;二是采用数据处理方法对噪声进行扣除。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服现有非磁洁净实验条件下,悬丝扭秤装置的磁性测量精度不高的缺陷。

[0006] 为了实现上述目的,本发明提出了一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法,所述方法适用于非磁洁净条件下的扭秤磁性测量实验,通过在悬丝扭秤装置的测试质量附近放置多个磁强计,对实验中的磁场进行监测,并采用基于多极展开法对除线圈产生的磁场之外的背景磁场及其磁场梯度进行重构,通过磁场校正来提升测试质量的磁性测量精度,最后得到测试质量磁化率和测试质量剩磁在两个坐标轴方向上的分量。

[0007] 作为上述方法的一种改进,所述方法具体包括:

[0008] 步骤1:搭建非磁洁净条件下的扭秤磁性测量实验环境,获取实验环境信息;

[0009] 步骤2:进行至少三次扭秤磁性测量实验,记录测量数据;

[0010] 步骤3:采用基于多极展开法对除线圈产生的磁场之外的背景磁场及其磁场梯度进行重构,通过磁场校正计算测试质量磁化率和测试质量剩磁在两个坐标轴方向上的分量。

[0011] 作为上述方法的一种改进,所述步骤1具体为:

[0012] 搭建测试环境为:最顶端设置悬吊支撑机构,通过一根悬丝先后连接悬丝调节机构和测试质量;测试质量放置在支撑台上的电极笼里;电极笼两侧平行设置两个大小相同的通电线圈,通电线圈垂直设立在线圈轨道上,并可沿线圈轨道水平移动;

[0013] 电极笼为正方体,在电极笼的8个顶点,分别放置有一个磁强计,用于监测测试质量附近的磁场以及磁场校正;

[0014] 设定坐标系,其中坐标原点为o建立在测试质量几何中心,x轴平行于悬丝,y轴平行于通电线圈的线圈轨道,z轴垂直于xoy平面;

[0015] 电极笼垂直于z轴的两个侧面上,各装有两块电极板,电极板连接测控电路,用于读出测试质量所受磁力矩信息;

[0016] 整个悬丝扭秤装置放置在隔振地基上,同时封装在一个真空、恒温的系统内;

[0017] 获取实验信息包括:实验开展的日期、实验地点的经纬度和海拔;未知磁源的磁矩和未知磁源的位置;测试质量几何中心的坐标、测试质量的区域边界、测试质量的默认磁化率和测试质量的默认剩磁;磁强计的位置坐标;通电线圈几何中心的坐标、通电线圈半径、通道线圈匝数和通电线圈的电流。

[0018] 作为上述方法的一种改进,所述步骤2具体为:

[0019] 每次沿着线圈轨道调整线圈的位置,或者改变电流方向后进行至少三次实验,记录通电线圈几何中心的坐标和通电线圈的电流,并根据测控电路读出测试质量所受磁力矩。

[0020] 作为上述方法的一种改进,所述步骤3具体为:

[0021] 步骤3-1:计算背景磁场的估计值;

[0022] 步骤3-2:计算测试质量所在位置处的校正磁场值和磁场梯度;

[0023] 步骤3-3:利用校正磁场值、磁场梯度和至少三次实验测量的力矩计算测试质量磁化率和测试质量剩磁在y、z方向上的分量。

[0024] 作为上述方法的一种改进,所述步骤3-1具体为:

[0025] 任意点 $p=(x, y, z)$ 处背景磁场的估计值 $B_e(p)$ 在x,y,z方向的三个分量分别为:

$$[0026] \quad B_{e,x} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^l Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial x}$$

$$[0027] \quad B_{e,y} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^l Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial y}$$

$$[0028] \quad B_{e,z} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^l Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial z}$$

[0029] 其中,r为点p在坐标系下的模长, $r \equiv |p|$ ;n为点p在坐标系下的方向的单位向量, $\mathbf{n} \equiv p/r$ ;  $M_{lm}$ 和 $Y_{lm}(\mathbf{n})$ 分别为l阶和m次的多极系数和球谐函数;L为截断阶数,满足 $3N_{\text{mag}} \geq L(L+2)$ ,  $N_{\text{mag}}$ 为磁强计的数量;

[0030] 设定方程组:

$$[0031] \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial M_{lm}} = 0$$

[0032] 其中,  $l=1, \dots, L, m=-1, \dots, 1$ ; 根据  $l$  和  $m$  的不同取值可以得到  $L(L+2)$  个  $M_{lm}$ , 其对应的  $L(L+2)$  个方程构成待求解的方程组;

[0033]  $\varepsilon^2$  表示均方误差:

$$[0034] \quad \varepsilon^2 = \sum_{s=1}^{N_{mag}} |(\mathbf{B}_{geo} + \mathbf{B}_{dipole}(\mathbf{x}_s)) - \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_s)|^2$$

[0035] 其中,  $\mathbf{x}_s$  表示第  $s$  个磁强计的位置坐标;  $\mathbf{B}_e(\mathbf{x}_s)$  表示磁强计处背景磁场;  $\mathbf{B}_{geo}$  表示地磁场, 通过查询世界磁场模型得到;  $\mathbf{B}_{dipole}(\mathbf{x}_s)$  表示磁强计处未知磁源产生的磁场:

$$[0036] \quad \mathbf{B}_{dipole}(\mathbf{x}_s) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{a=1}^n \frac{3[\mathbf{m}_a \cdot \mathbf{n}_a] \mathbf{n}_a - \mathbf{m}_a}{|\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_a|^3}$$

[0037] 其中, 未知磁源用磁偶极子来模拟,  $n$  表示磁偶极子的数目;  $\mathbf{m}_a$  表示第  $a$  个磁偶极子的磁矩矢量;  $\mathbf{n}_a = (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_a) / |\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_a|$  表示从第  $a$  个磁偶极子的坐标  $\mathbf{x}_a$  指向第  $s$  个磁强计坐标  $\mathbf{x}_s$  的单位向量;  $\mu_0$  为真空磁导率常数, 取值为  $4\pi \times 10^{-7} \text{ m kg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$ ;

[0038] 使用最小二乘法求解方程组得到最优估计多极系数  $M_{lm}$ 。

[0039] 作为上述方法的一种改进, 所述步骤 3-2 具体为:

[0040] 测试质量所在区域内一点  $p = (x, y, z)$  的校正磁场值  $\widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$  为:

$$[0041] \quad \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p}) = \mathbf{B}_{coil}(\mathbf{p}) + \mathbf{B}_e(\mathbf{p})$$

[0042] 其中,  $\mathbf{B}_{coil}(\mathbf{p})$  表示两个通电线圈在点  $p = (x, y, z)$  处产生的磁场值,  $\mathbf{B}_{coil}(\mathbf{p})$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量分别为

$$[0043] \quad B_{coil,x} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \cos \theta \left( \frac{I_2(z - z_{o2})}{|r_{A_2P}|^3} - \frac{I_1(z - z_{o1})}{|r_{A_1P}|^3} \right) d\theta$$

$$[0044] \quad B_{coil,y} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \sin \theta \left( \frac{I_2(z - z_{o2})}{|r_{A_2P}|^3} - \frac{I_1(z - z_{o1})}{|r_{A_1P}|^3} \right) d\theta$$

$$[0045] \quad B_{coil,z} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \sum_{i=1}^2 \frac{I_i(\sin \theta (y_{oi} - y) + R - \cos \theta x)}{|r_{A_iP}|^3} d\theta$$

[0046] 其中,

$$[0047] \quad |r_{A_1P}| = \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta - y_{o1})^2 + (z - z_{o1})^2}$$

$$[0048] \quad |r_{A_2P}| = \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta - y_{o2})^2 + (z - z_{o2})^2}$$

[0049]  $|r_{A_1P}|$  表示点  $p$  到通电线圈 1 上的任一点  $A_1$  的距离, 两个通电线圈的几何中心的坐标分别为  $O_1(0, y_{o1}, z_{o1})$  和  $O_2(0, y_{o2}, z_{o2})$ ,  $\theta$  为积分变量, 表示  $\overrightarrow{O_1A_1}$  与  $x$  轴的夹角, 过点  $O_2$  作平行于  $O_1A_1$  的射线与通电线圈 2 交于一点  $A_2$ , 使得  $\overrightarrow{O_1A_1} = \overrightarrow{O_2A_2}$ ,  $|r_{A_2P}|$  表示点  $p$  到点  $A_2$  的距离,  $N$  为线圈的匝数;

[0050] 对校正磁场值公式求偏导数得到测试质量所在区域内点  $p = (x, y, z)$  校正后的磁



场梯度 $\nabla\hat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$ :

$$[0051] \quad \nabla\hat{\mathbf{B}}(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z} \end{bmatrix}$$

[0052] 其中,  $\partial B_{coil,x}/\partial x$  为  $B_{coil}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,x}/\partial y$  为  $B_{coil,x}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,x}/\partial z$  为  $B_{coil,x}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,y}/\partial x$  为  $B_{coil,y}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,y}/\partial y$  为  $B_{coil,y}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,y}/\partial z$  为  $B_{coil,y}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,z}/\partial x$  为  $B_{coil,z}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,z}/\partial y$  为  $B_{coil,z}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,z}/\partial z$  为  $B_{coil,z}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,x}/\partial x$  为  $B_{e,x}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,x}/\partial y$  为  $B_{e,x}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,x}/\partial z$  为  $B_{e,x}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,y}/\partial x$  为  $B_{e,y}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,y}/\partial y$  为  $B_{e,y}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,y}/\partial z$  为  $B_{e,y}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,z}/\partial x$  为  $B_{e,z}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,z}/\partial y$  为  $B_{e,z}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,z}/\partial z$  为  $B_{e,z}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值。

[0053] 作为上述方法的一种改进,所述步骤3-3具体为:

[0054] 将至少三组实验测得的力矩  $\tau$  和步骤3-2计算的校正磁场值、磁场梯度代入如下公式,形成多元一次线性方程组,计算得到测试质量的磁化率和测试质量剩磁沿  $y$  轴、 $z$  轴的分量:

$$[0055] \quad \tau = \iiint_{v_{TM}} \begin{bmatrix} \left( \frac{m_y}{v_{TM}} + \frac{\chi}{\mu_0} B_y \right) \left( y \frac{\partial B_y}{\partial z} - z \frac{\partial B_y}{\partial y} \right) \\ + \left( \frac{m_z}{v_{TM}} + \frac{\chi}{\mu_0} B_z \right) \left( y \frac{\partial B_z}{\partial z} - z \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) \\ + \frac{m_y}{v_{TM}} B_z - \frac{m_z}{v_{TM}} B_y \end{bmatrix} \times dx dy dz$$

[0056] 其中,  $v_{TM}$  为积分区域,具体为测试质量边界所围成的区域,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为积分变量;  $m_y$  和  $m_z$  为待求解的测试质量剩磁沿  $y$  轴和  $z$  轴的分量;  $\chi$  为待求解的测试质量磁化率;  $B_y$  和  $B_z$  分别为积分区域内积分变量  $(x, y, z)$  对应位置  $p$  处的校正磁场值  $\hat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$  在  $y$ 、 $z$  方向上的分量,其表达式分别为:

$$[0057] \quad B_y = B_{coil,y} + B_{e,y}$$

$$[0058] \quad B_z = B_{coil,z} + B_{e,z}$$

[0059]  $\frac{\partial B_y}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial B_y}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial B_z}{\partial z}$  和  $\frac{\partial B_z}{\partial y}$  分别为积分区域内积分变量  $(x, y, z)$  对应位置  $p$  处的校正后的磁

场梯度  $\nabla\hat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$  的4个分量,其表达式分别为:

$$[0060] \quad \frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z}$$

$$[0061] \quad \frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y}$$

$$[0062] \quad \frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z}$$

$$[0063] \quad \frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y}。$$

[0064] 与现有技术相比,本发明的优势在于:

[0065] 1、针对惯性传感器性能地面评价中测试质量磁性测量受背景噪声影响导致的精度降低问题,本发明通过磁强计读数监测环境磁场,对背景磁场采用多极展开法进行高精度重构,在计算测试质量磁性时,磁场及磁场梯度采用更接近真实磁场的校正磁场重构值,进而提升了测量精度。

[0066] 2、在非磁洁净实验条件下,本发明可以通过传感器监测手段,对背景噪声进行重构,从而实现磁场校准目的,该技术亦可应用于其他领域,如高精度温度监测。

### 附图说明

[0067] 图1所示为悬丝扭秤装置测试质量磁性测量示意图;

[0068] 图2所示为线圈产生的磁场计算示意图;

[0069] 图3所示为含背景磁场的悬丝扭秤装置示意图;

[0070] 图4所示为磁性测量重构校正方法流程图;

[0071] 图5所示为三次实验的磁场仿真图之一;

[0072] 图6所示为三次实验的磁场仿真图之二;

[0073] 图7所示为三次实验的磁场仿真图之三;

[0074] 图8所示为磁场重构仿真结果及误差示意图,其中图8(a)所示为理论背景磁场的x分量,图8(b)所示为估计背景磁场的x分量,图8(c)所示为背景磁场x分量的估计误差;

[0075] 图9所示为校正前后的误差对比图,其中图9(a)所示为校正前后的误差对比,图9(b)所示为重构校正方法的误差;

[0076] 图10所示为磁性参数反演对比图,其中图10(a)所示为不同方法对剩磁 $m_y$ 的反演与线圈电流大小之间的关系,图10(b)所示为不同方法对剩磁 $m_z$ 的反演与线圈电流大小之间的关系,图10(c)所示为不同方法对磁化率 $x$ 的反演与线圈电流大小之间的关系。

### 具体实施方式

[0077] 本发明基于力矩的信息反演测试质量磁性,主要考虑在数据处理方法层面提升测试质量磁性测量精度。

[0078] 针对扭秤测试质量磁性测量实验中的测量精度要求,本发明提出了一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法。该方法适用于非磁洁净条件下的扭秤磁性测量实验,通过在扭秤装置的测试质量附近放置8个磁强计,对实验中的磁场进行监测,并采用基于多极展开法对除线圈产生的磁场之外的背景磁场及其磁场梯度进行重构,通过磁场校正来提升测试质量的磁性测量精度。仿真结果显示,在考虑地磁场和磁偶极子磁源的情况下,该方法能有效提升悬丝扭秤装置的磁性测量精度。

[0079] 下面结合附图对本发明的技术方案进行详细的说明。

[0080] 传统的惯性传感器测试质量磁性地面测量中,未考虑地磁场和其他未知微小磁源的影响。本发明则是在测试质量附近放置8个磁强计进行磁场监测,通过重构算法对测试质量所在位置处的磁场进行校正,从而提升测量精度。

[0081] 1. 悬丝扭秤装置概述

[0082] 用于测试质量磁性测量的悬丝扭秤装置示意图如图1所示。最顶端为悬吊支撑机构,通过一根悬丝先后连接悬丝调节机构和测试质量。坐标系如图例所示,其中坐标原点为0建立在测试质量中心,x轴平行于悬丝,y轴平行于线圈(1、2)的调整轨道,z轴垂直于xoy平面。测试质量放置在支撑台上的电极笼里,且在电极笼垂直于z轴的两个侧面上,各装有两块电极板,电极板连接测控电路,可用于测试质量所受磁力矩信息的读出。在电极笼的8个顶点,分别放置有一个弱磁探测传感器,如各向异性磁阻传感器(Anisotropic Magneto Resistance,AMR),用于监测测试质量附近的磁场以及磁场校正。两个通电线圈可沿着平行于y轴的轨道移动。整个装置放置在隔振地基上,同时封装在一个真空、恒温的系统内。

[0083] 下面给出线圈产生的磁场表达式,如图2所示,设两个通电线圈的电流大小分别为 $I_1$ 和 $I_2$ ,线圈1和线圈2半径均为 $R$ ,且其几何中心的坐标分别为 $O_1(0, y_{o1}, z_{o1})$ 和 $O_2(0, y_{o2}, z_{o2})$ ,则根据毕奥-萨法尔定律,两个线圈在点 $p=(x, y, z)$ 处产生的磁场值 $B_{coil}(p)$ 在x、y、z方向上的分量分别为:

$$[0084] \quad B_{coil,x} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \cos \theta \left( \frac{I_2(z-z_{o2})}{|r_{A_2P}|^3} - \frac{I_1(z-z_{o1})}{|r_{A_1P}|^3} \right) d\theta \quad (1)$$

$$[0085] \quad B_{coil,y} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \sin \theta \left( \frac{I_2(z-z_{o2})}{|r_{A_2P}|^3} - \frac{I_1(z-z_{o1})}{|r_{A_1P}|^3} \right) d\theta \quad (2)$$

$$[0086] \quad B_{coil,z} = \frac{N\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \sum_{i=1}^2 \frac{I_i(\sin \theta(y_{oi}-y)+R-\cos \theta x)}{|r_{A_iP}|^3} d\theta \quad (3)$$

[0087] 其中,

$$[0088] \quad |r_{A_iP}| = \sqrt{(x - R \cos \theta)^2 + (y - R \sin \theta - y_{oi})^2 + (z - z_{oi})^2}, \quad i=1,2 \quad (4)$$

[0089]  $|r_{A_1P}|$ 表示点p到通电线圈1上的任一点 $A_1$ 的距离,两个通电线圈的几何中心的坐标分别为 $O_1(0, y_{o1}, z_{o1})$ 和 $O_2(0, y_{o2}, z_{o2})$ , $\theta$ 为积分变量,表示 $\overrightarrow{O_1A_1}$ 与x轴的夹角,过点 $O_2$ 作平行于 $O_1A_1$ 的射线与通电线圈2交于一点 $A_2$ ,使得 $\overrightarrow{O_1A_1} = \overrightarrow{O_2A_2}$ , $|r_{A_2P}|$ 表示点p到点 $A_2$ 的距离, $N$ 为线圈的匝数; $\mu_0$ 为真空磁导率常数,取值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{m kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$ 。

[0090] 2. 背景噪声描述

[0091] 一般而言,悬丝扭秤装置的磁性测量实验在非理想磁洁净情况下,会受到背景磁场的影响。这些背景噪声将在测试质量位置处产生磁场,进而影响测试质量磁性测量的精度。在此,本发明主要考虑两种背景噪声的影响:地磁场,以及实验设备周围可能存在其他未知磁源产生的磁场,如图3所示,其中未知磁源通过磁偶极子来模拟。

[0092] 2.1. 地磁场噪声

[0093] 在本发明的地面实验中,地球的影响不容忽视。一般来说,地磁场的大小约为25000~65000nT。可以通过查询世界磁场模型(World Magnetic Model,WMM)获得本地磁场值。例如查询北京地区(40°N,117°E,海拔43米)2022年9月1日的磁场值:

$$[0094] \quad \mathbf{B}_{\text{geo}} = (-47101.8, 27757.6, -3720.9) \text{ nT} \quad (5)$$

[0095] 其中 $\mathbf{B}_{\text{geo}}$ 为地磁场在图1坐标系下的磁场值。此外,地磁场在实验室局部范围可以视为均匀场。

### [0096] 2.2. 未知磁源噪声

[0097] 在实际的实验环境中,由于存在一些未知磁源的干扰,测试质量附近的磁场将偏离通电线圈在此处产生的磁场。未知磁源可以用磁偶极子来模拟,根据磁偶极子理论模型,磁偶极子在任一点 $\mathbf{p} = (x, y, z)$ 处产生的磁场值,可以由下式给出:

$$[0098] \quad \mathbf{B}_{\text{dipole}}(\mathbf{p}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{a=1}^n \frac{3[\mathbf{m}_a \cdot \mathbf{n}_a] \mathbf{n}_a - \mathbf{m}_a}{|\mathbf{p} - \mathbf{x}_a|^3} \quad (6)$$

[0099] 其中, $n$ 是磁偶极子的数目, $\mathbf{m}_a$ 是第 $a$ 个磁偶极子的磁矩矢量, $\mathbf{n}_a = (\mathbf{p} - \mathbf{x}_a) / |\mathbf{p} - \mathbf{x}_a|$ 是从第 $a$ 个磁偶极子坐标 $\mathbf{x}_a$ 指向点 $\mathbf{P}$ 的单位向量。

### [0100] 3. 磁性测量重构校正方法

[0101] 在不考虑地磁场和未知磁源的背景磁场情况下,测试质量所在区域的磁场可由公式(1)~公式(4)给出,然而,事实上地磁场和未知磁源是客观存在的,若仍用公式(1)~公式(4)求解测试质量的磁性参数,则会产生一定偏差,而本发明提出的磁性测量重构校正方法可以通过对包括地磁场和未知磁源产生的磁场在内的背景磁场进行重构,对这一偏差进行修正,从而提升测试质量磁性测量精度。

[0102] 测试质量所在区域内一点 $\mathbf{p} = (x, y, z)$ 的真实磁场可以由通电线圈产生的磁场、地磁场、未知磁源产生的磁场三者叠加产生,即:

$$[0103] \quad \mathbf{B}(\mathbf{p}) = \mathbf{B}_{\text{coil}}(\mathbf{p}) + \mathbf{B}_{\text{geo}} + \mathbf{B}_{\text{dipole}}(\mathbf{p}) \quad (7)$$

[0104] 地磁场和未知磁源产生的磁场叠加后产生背景磁场,该磁场与通电线圈产生的磁场相比较小,因而,本发明采用多极展开法对背景磁场进行重构。

[0105] 在真空条件下,测试质量区域的背景磁场具有零散度和零旋度,因此,多极展开法中,点 $\mathbf{p} = (x, y, z)$ 处背景磁场的估计值 $\mathbf{B}_e(\mathbf{p})$ 在 $x, y, z$ 方向的三个分量分别为:

$$[0106] \quad B_{e,x} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^{-l} Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial x} \quad (8)$$

$$[0107] \quad B_{e,y} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^{-l} Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial y} \quad (9)$$

$$[0108] \quad B_{e,z} = \sum_{l=1}^L \sum_{m=-l}^l M_{lm} \frac{\partial [r^{-l} Y_{lm}(\mathbf{n})]}{\partial z} \quad (10)$$

[0109] 其中, $r$ 为点 $\mathbf{p}$ 在球坐标系下的模长,取值为 $r \equiv |\mathbf{p}|$ ;  $\mathbf{n}$ 为任意点 $\mathbf{p}$ 在球坐标系下的方向的单位向量,取值为 $\mathbf{n} \equiv \mathbf{p}/r$ ,其原点为测试质量的几何中心, $M_{lm}$ 和 $Y_{lm}$ 分别为1阶和 $m$ 次的多极系数和球谐函数; $L$ 为截断阶数,需满足 $3N_{\text{mag}} \geq L(L+2)$ ,  $N_{\text{mag}}$ 为磁强计的数量,例如:对于 $N_{\text{mag}} = 8$ 个磁强计的情形,可展开到 $L = 4$ 阶。

[0110] 为了使重构误差最小化,令:

$$[0111] \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial M_{lm}} = 0, \quad l = 1, \dots, L, m = -l, \dots, l, \quad (11)$$

[0112] 其中,

$$[0113] \quad \varepsilon^2(M_{lm}) = \sum_{s=1}^{N_{\text{mag}}} |(\mathbf{B}_{\text{geo}} + \mathbf{B}_{\text{dipole}}(\mathbf{x}_s)) - \mathbf{B}_e(\mathbf{x}_s)|^2 \quad (12)$$

[0114] 为均方误差, $\mathbf{x}_s$ 是磁强计的位置坐标。根据 $l$ 和 $m$ 的不同取值可以得到 $L(L+2)$ 个 $M_{lm}$ ,

从而公式 (11) 可以生成  $L(L+2)$  个方程, 组成方程组, 由最小二乘法计算得到最优估计系数  $M_{1m}$ , 进而将系数  $M_{1m}$  代入公式 (8) ~ 公式 (10) 可最终实现点  $p$  处的背景磁场重构。最后, 得到测试质量所在区域内一点  $p = (x, y, z)$  处的校正磁场:

$$[0115] \quad \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p}) = \mathbf{B}_{coil}(\mathbf{p}) + \mathbf{B}_e(\mathbf{p}) \\ = (B_{coil,x} + B_{e,x}, B_{coil,x} + B_{e,x}, B_{coil,x} + B_{e,x}). \quad (13)$$

[0116] 其中,  $B_{coil,x}$ 、 $B_{coil,y}$ 、 $B_{coil,z}$  分别为  $B_{coil}(\mathbf{p})$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量,  $B_{e,x}$ 、 $B_{e,y}$ 、 $B_{e,z}$  分别为  $B_e(\mathbf{p})$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量。

[0117] (13) 式对  $x$ 、 $y$ 、 $z$  求偏导数可得校正后的磁场梯度  $\nabla \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$ :

$$[0118] \quad \nabla \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p}) = \nabla \mathbf{B}_{coil}(\mathbf{p}) + \nabla \mathbf{B}_e(\mathbf{p}). \\ = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{e,x}}{\partial x} & \frac{\partial B_{e,x}}{\partial y} & \frac{\partial B_{e,x}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{e,y}}{\partial x} & \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y} & \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{e,z}}{\partial x} & \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y} & \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z} \end{bmatrix} \\ [0119] \quad = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,x}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,x}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,y}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z} \\ \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial x} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial x} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y} & \frac{\partial B_{coil,z}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (14)$$

[0120] 其中,  $\partial B_{coil,x}/\partial x$  为  $B_{coil,x}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,x}/\partial y$  为  $B_{coil,x}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,x}/\partial z$  为  $B_{coil,x}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,y}/\partial x$  为  $B_{coil,y}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,y}/\partial y$  为  $B_{coil,y}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,y}/\partial z$  为  $B_{coil,y}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,z}/\partial x$  为  $B_{coil,z}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,z}/\partial y$  为  $B_{coil,z}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{coil,z}/\partial z$  为  $B_{coil,z}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,x}/\partial x$  为  $B_{e,x}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,x}/\partial y$  为  $B_{e,x}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,x}/\partial z$  为  $B_{e,x}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,y}/\partial x$  为  $B_{e,y}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,y}/\partial y$  为  $B_{e,y}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,y}/\partial z$  为  $B_{e,y}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,z}/\partial x$  为  $B_{e,z}$  对  $x$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,z}/\partial y$  为  $B_{e,z}$  对  $y$  的偏导数在点  $p$  处的值;  $\partial B_{e,z}/\partial z$  为  $B_{e,z}$  对  $z$  的偏导数在点  $p$  处的值。

[0121] 图1中的悬丝扭秤只有一个方向的自由度, 因而只能检测垂直于  $x$  轴的力矩, 该力矩可以被写为:

$$\tau = \tau_{grad} + \tau_m \\ [0122] \quad = \iiint_{v_{TM}} \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{m_y}{v_{TM}} + \frac{\chi}{\mu_0} B_y \right) \left( y \frac{\partial B_y}{\partial z} - z \frac{\partial B_y}{\partial y} \right) \\ & + \left( \frac{m_z}{v_{TM}} + \frac{\chi}{\mu_0} B_z \right) \left( y \frac{\partial B_z}{\partial z} - z \frac{\partial B_z}{\partial y} \right) \\ & + \frac{m_y}{v_{TM}} B_z - \frac{m_z}{v_{TM}} B_y \end{aligned} \right] \times dx dy dz \quad (15)$$

[0123] 其中,  $\tau_{grad}$  是磁场梯度产生的力矩,  $\tau_m$  是测试质量剩磁和磁场耦合产生的力矩;  $v_{TM}$

为积分区域,具体为测试质量边界所围成的区域; $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为积分变量; $B_y$ 和 $B_z$ 分别为积分区域内积分变量 $(x, y, z)$ 对应位置 $p$ 处的校正磁场值 $\widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$ 在 $y$ 、 $z$ 方向上的分量,其表达式分别为:

$$[0124] \quad B_y = B_{\text{coil},y} + B_{e,y} \quad (16)$$

$$[0125] \quad B_z = B_{\text{coil},z} + B_{e,z} \quad (17)$$

[0126]  $\frac{\partial B_y}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial B_y}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial B_z}{\partial z}$ 和 $\frac{\partial B_z}{\partial y}$ 分别为积分区域内积分变量 $(x, y, z)$ 对应位置 $p$ 处的校正后的磁场梯度 $\nabla \widehat{\mathbf{B}}(\mathbf{p})$ 的4个分量,其表达式分别为:

$$[0127] \quad \frac{\partial B_y}{\partial z} = \frac{\partial B_{\text{coil},y}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial z} \quad (18)$$

$$[0128] \quad \frac{\partial B_y}{\partial y} = \frac{\partial B_{\text{coil},y}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,y}}{\partial y} \quad (19)$$

$$[0129] \quad \frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{\partial B_{\text{coil},z}}{\partial z} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial z} \quad (20)$$

$$[0130] \quad \frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{\partial B_{\text{coil},z}}{\partial y} + \frac{\partial B_{e,z}}{\partial y} \quad (21)$$

[0131]  $m_y$ 和 $m_z$ 为待求解的测试质量剩磁沿 $y$ 轴和 $z$ 轴的分量; $x$ 为待求解的测试质量磁化率;待求解的未知量为3个,因此,至少需要进行3组力矩测试实验,构建3个(15)式,并将其联立组成三元一次方程组,然后求解得到测试质量的磁性参数:磁化率 $x$ 、剩磁 $m_y$ 和 $m_z$ 。这3组实验可通过沿着线圈轨道调整线圈的位置,或者改变电流方向来获得不同实验条件下的力矩信息,如图1和图3所示。

[0132] 本发明一种提升悬丝扭秤装置磁性测量精度的校正方法的流程图如图4所示。

[0133] 本发明的优势在于:

[0134] (1) 针对惯性传感器性能地面评价中测试质量磁性测量受背景噪声影响导致的精度降低问题,本发明通过磁强计读数监测环境磁场,对背景磁场采用多极展开法进行高精度重构,在计算测试质量磁性时,磁场及磁场梯度采用更接近真实磁场的校正磁场重构值,进而提升了测量精度。

[0135] (2) 在非磁洁净实验条件下,本发明通过传感器监测手段,对背景噪声进行重构,从而实现磁场校准目的,该技术亦可应用于其他领域,如高精度温度监测。

[0136] 通过仿真的方法展示本申请的技术效果。

[0137] 1. 仿真实验设计

[0138] 为求解测试质量的磁性参数,需要至少设计三次实验,每次实验可对应一个公式(15),最终构成关于未知量磁化率 $x$ 、剩磁 $m_y$ 和 $m_z$ 的三元一次方程组,求解该方程组可得到最终的测试质量磁性参数。

[0139] 首先,给出三次仿真实验的相同参数。测试质量中心的坐标 $x_{\text{TM}}$ 设置在原点,体积 $v_{\text{TM}}$ 为 $4 \times 4 \times 4 \text{cm}^3$ ;8个磁强计的坐标为 $(\pm 2.5, \pm 2.5, \pm 2.5) \text{cm}$ ;两个线圈半径均为 $1.7 \text{cm}$ , $z_{o1} = 62.5 \text{mm}$ , $z_{o2} = -62.5 \text{mm}$ ,线圈匝数均为 $N = 240$ ;为简单起见,只设置一个磁偶极子来模拟未知磁源,其磁矩模长为 $100 \text{A} \cdot \text{m}^2$ ,位置为 $(0.3, 0.3, 0.3) \text{m}$ ;最后,地磁场的参数选取如公式(5)所示。另外,三次仿真实验的不同参数设计如表1所示。

[0140] 表1三次仿真实验的不同参数设计

实验序号	$I_1/A$	$I_2/A$	$y_{o1}/mm$	$y_{o2}/mm$
[0141] 1	1.5	1.5	0	0
2	1.5	1.5	20.15	-20.15
3	1.5	-1.5	20.15	-20.15

[0142] 由表1可知,在实验1中,两个线圈呈对称分布,且电流方向相同;在实验2中,两个线圈呈非对称分布,且电流方向相同;在实验3中,两个线圈呈非对称分布,且电流方向相反。

[0143] 在不考虑地磁场以及未知磁源影响的情况下,三次仿真实验对应的理论磁场如图5、图6、图7所示。

[0144] 2. 背景磁场重构结果

[0145] 在测试质量磁性测量实验中,磁场精度的高低直接影响测试质量磁性特征的求解精度,因而,首先考虑测试质量附近的磁场重构效果,如图8所示。

[0146] 可以看出,理论背景磁场的x分量和估计背景磁场的x分量高度相似,且测试质量附近的重构误差在1%以下。这说明,放置8个磁强计对测试质量所在环境进行监测,可以采用多极展开法实现对悬丝扭秤装置磁性测量实验中背景磁场的高精度重构。

[0147] 为了进一步分析重构校正对于降低磁场误差的效果,以磁场的x分量为例,通过随机选取磁偶极子的方向进行了100次实验,对比了其他两种情形下的误差:一是忽略地磁场和未知磁源的影响,直接采用线圈产生的磁场进行磁性测量,如图9(a)虚线所示;二是在只忽略未知磁源的影响,在线圈产生的磁场基础上,扣除地磁场的影响,如图9(a)星线所示。

[0148] 图9(a)表明,地磁校正与未做磁场校正相比,误差并没有明显地降低;而采用多极展开法进行重构校正后,误差明显降低,如图9(a)实线所示,其误差波动情况如图9(b)所示,可以看出,绝对误差的量级从 $10^{-4}$ 降低到 $10^{-8}$ 。

[0149] 3. 磁性参数反演结果

[0150] 为了研究重构校正方法对于提升测试质量磁性测量精度的效果,对不同电流大小的情形下,对无校正、地磁校正和重构校正的测量精度进行评价,如图10所示。

[0151] 图10表明,利用重构磁场求解计算得到的磁性参数与理论值具有较高的一致性,而无校正和地磁校正,在通电线圈电流较小时,偏差较大,在通电线圈电流较大时,才与理论值较为接近。特别是,地磁校正并不一定能带来精度的提升,甚至可能导致精度下降,这是由于地磁场和未知磁源的影响产生了一定的抵消导致。总的来说,通过磁强计读数对磁场进行监测,采用重构校正方法对提升悬丝扭秤装置磁性测量的精度具有重要作用。

[0152] 最后所应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,都不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

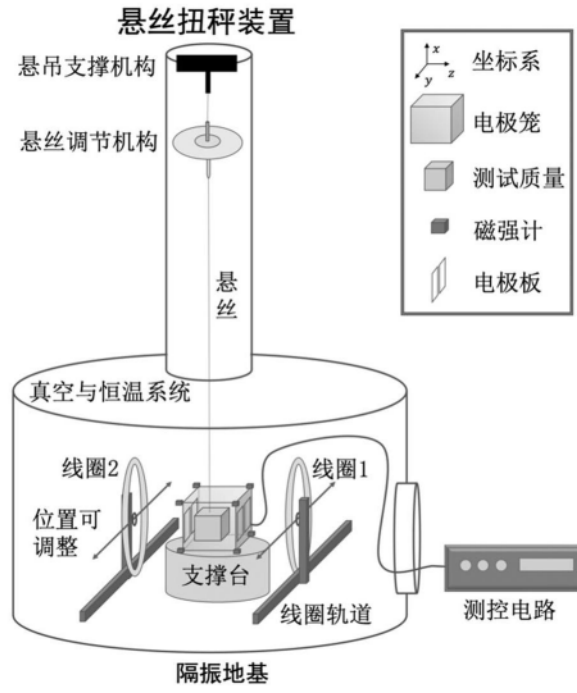


图1

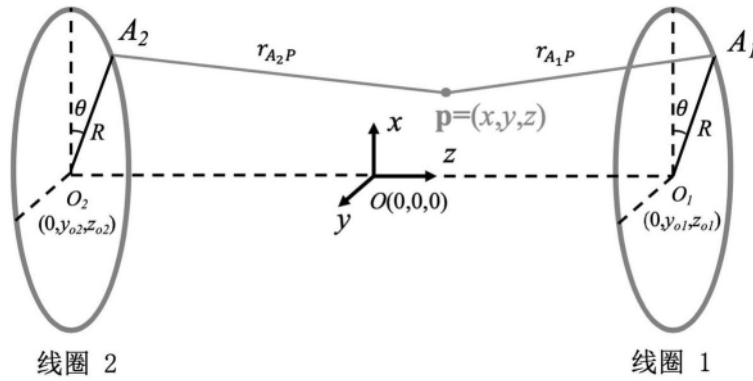


图2



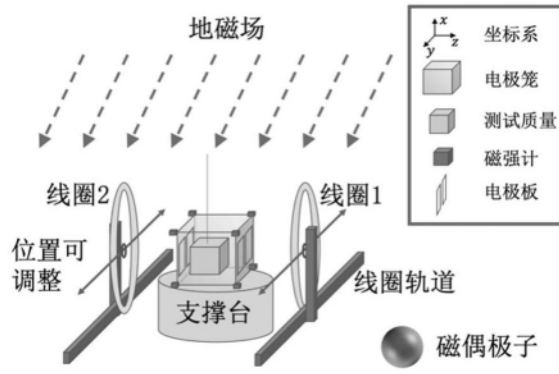


图3

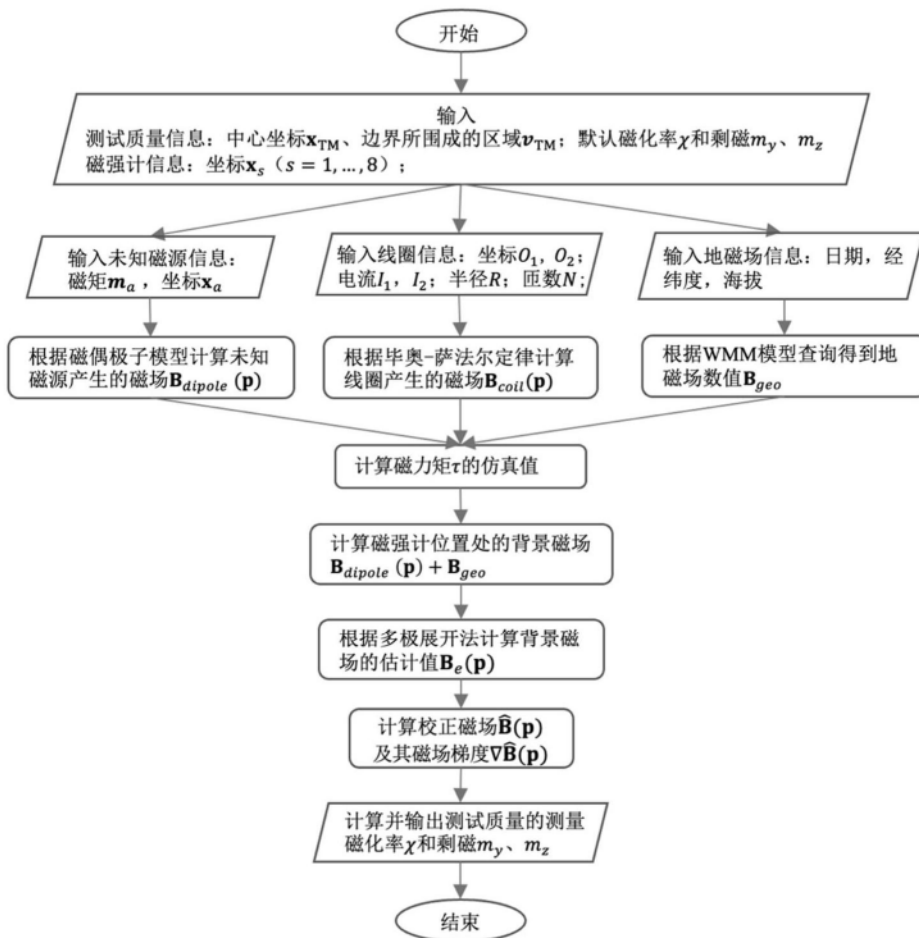


图4

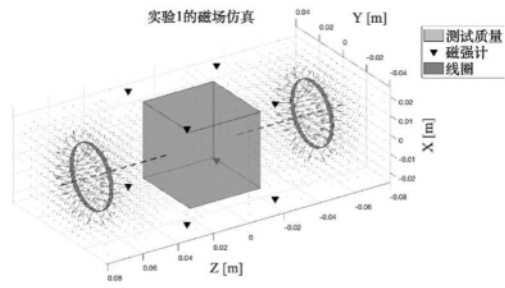


图5

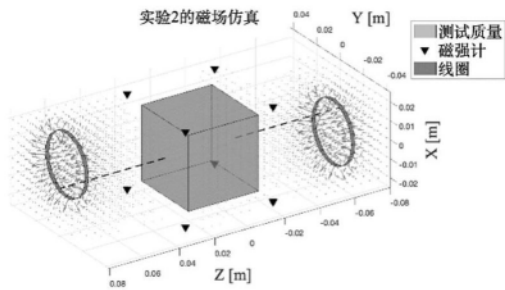


图6

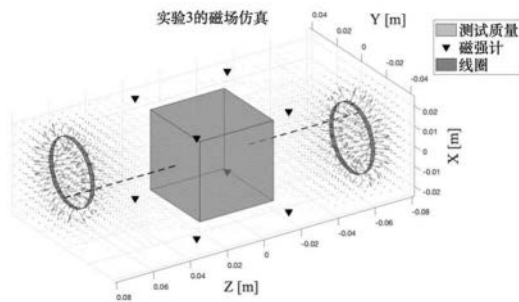


图7

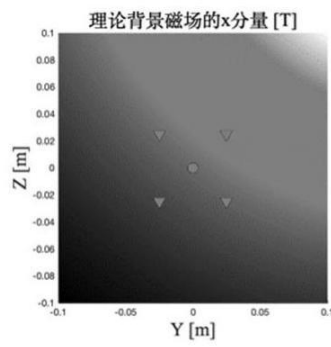


图8 (a)

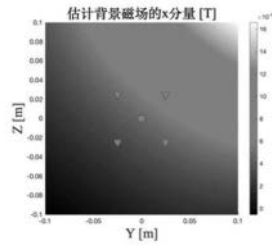


图8 (b)

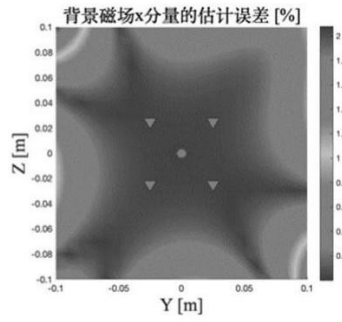


图8 (c)

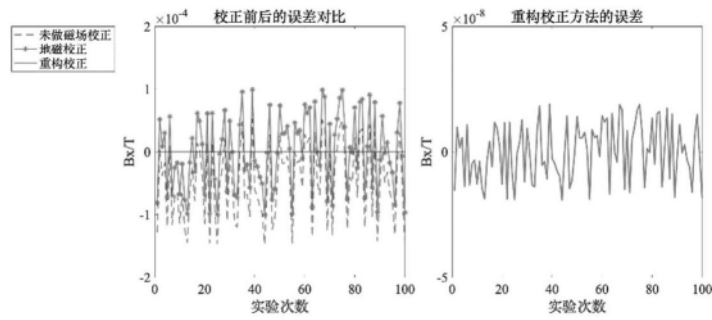


图 9 (a)

图 9 (b)

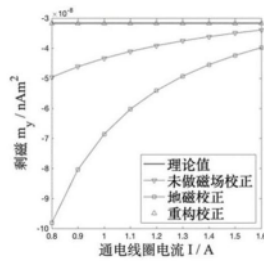


图10 (a)

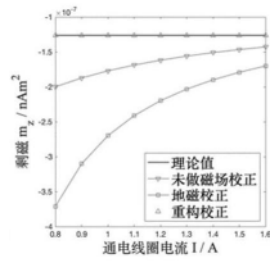


图10 (b)

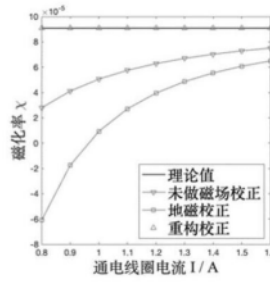


图10 (c)