



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103235278 B

(45) 授权公告日 2015. 11. 04

(21) 申请号 201310154178. 7

US 6130534 A, 2000. 10. 10, 全文 .

(22) 申请日 2013. 04. 28

WO 2004/003585 A1, 2004. 01. 08, 全文 .

(73) 专利权人 中国科学院空间科学与应用研究
中心

林春生等. 三轴磁强计正交误差分析与校
正.《探测与控制学报》. 2005, 第 27 卷 (第 2 期),
第 9-12 页 .

地址 100190 北京市海淀区中关村南二条 1
号

吴德会等. 基于 FLANN 的三轴磁强计误差校
正研究.《仪器仪表学报》. 2009, 第 30 卷 (第 3
期), 第 449-453 页 .

(72) 发明人 张艺腾

审查员 王晓媛

(74) 专利代理机构 北京法思腾知识产权代理有
限公司 11318

代理人 杨小蓉 杨青

(51) Int. Cl.

G01R 35/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101251584 A, 2008. 08. 27, 全文 .

CN 102298121 A, 2011. 12. 28, 全文 .

CN 103033786 A, 2013. 04. 10, 全文 .

US 4109199 1978. 08. 22, 全文 .

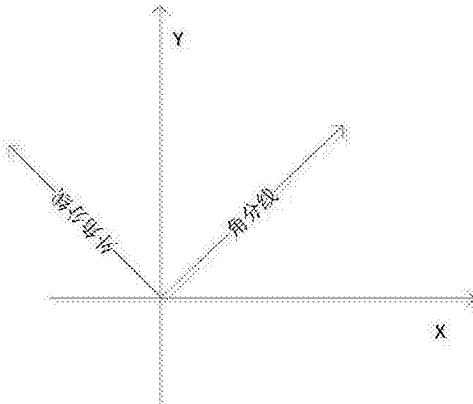
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法

(57) 摘要

本发明提出了一种测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法, 所述方法包含: 步骤 101) 将磁强计置于能够转动的无剩磁环境中旋转磁强计, 使外磁场通过磁强计某两个磁轴的角分线和外角分线若干次, 并依据测量时刻分别记录角分线和外交分线的磁场数值; 步骤 102) 依据记录的磁场数值获得两磁轴之间的夹角, 即获得了两磁轴之间的正交偏差; 步骤 103) 重复上述步骤测量每两个磁轴之间正交偏差的角度, 进而获得磁强计的三个磁轴之间的角度关系, 完成磁强计的正交性测量。本发明提供了一种测量磁强计三磁轴之间正交性的方法。该方法利用磁强计在稳定磁场中通过一些特殊姿态的测量, 可以计算出该磁强计三磁轴之间的角度关系。



1. 一种测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法,所述方法包含 :

步骤 101) 将磁强计置于能够转动的无剩磁环境中旋转磁强计,使外磁场通过磁强计某两个磁轴的角分线和外角分线若干次,并依据测量时刻分别记录角分线和外角分线的磁场数值;

步骤 102) 依据记录的磁场数值采用如下策略获得两磁轴之间的夹角,即获得两磁轴之间的正交偏差:若以磁轴 X 和磁轴 Y 来表示需要获得夹角的两磁轴,则:

基于测量得到的各个时刻磁轴 X 和磁轴 Y 的角分线和外角分线的磁强值 b_x 和 b_y 值,查找“ $b_x^2+b_y^2$ ”的最大值对应的各磁轴的磁场数据,并将该最大值对应的各磁轴的磁场数据记录为 (b_{x_1}, b_{y_1}) (b_{x_2}, b_{y_2}) ,其中下标 1 和 2 分别对应角分线与外角分线;依据上述最大值采用如下公式,获得无外磁场监测时的两磁轴之间夹角,其中 γ 表示磁轴 X 和磁轴 Y 两磁轴之间的夹角:

当无外磁场监测时,夹角公式为:

$$\cos\gamma = \frac{(b_{x_1}^2 + b_{y_1}^2) - (b_{x_2}^2 + b_{y_2}^2)}{2(b_{x_1}b_{y_1} - b_{x_2}b_{y_2})};$$

步骤 103) 重复上述步骤测量每两个磁轴之间正交偏差的角度,进而获得磁强计的三个磁轴之间的角度关系,完成磁强计的正交性测量;

所述步骤 103) 还采用如下正交修正矩阵修正测量得到的三轴磁场数据:

$$\begin{pmatrix} bx' \\ by' \\ bz' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\cos a}{\sin a} & 0 \\ \frac{\cos a}{\sin a} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix}$$

上述参数 A 计算公式如下:

$$A = 1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c$$

其中,a 表示磁轴 x 和磁轴 y 之间的夹角,b 表示磁轴 y 和磁轴 z 之间的夹角,c 表示磁轴 x 和磁轴 z 之间的夹角,磁轴 x,y 和 z 分别表示三个实测磁轴;磁轴 x'、y' 和 z' 为理想正交磁轴,bx, by 和 bz 表示实测磁轴 x、磁轴 y 和磁轴 z 三个磁轴的数据,bx', by' 和 bz' 表示经过正交修正的 x、y、z 三磁轴数据。

2. 根据权利要求 1 所述的测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法,其特征在于,所述能够转动的无剩磁环境采用无磁转台或简单手持。

3. 根据权利要求 1 所述的测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法,其特征在于,当两个磁轴分别为 x 轴和 y 轴时,所述步骤 101) 进一步包含:

步骤 101-1) 调整磁强计姿态使稳定外磁场方向指向磁轴 x 和磁轴 y 的角分线,在垂直 xy 平面的方向来回摆动磁强计一次,幅度不小于 40 度,记录各时刻测量的角分线的磁场数据;

步骤 101-2) 调整磁强计姿态使稳定外磁场方向指向磁轴 x 和磁轴 y 的外角分线,在垂直 xy 平面的方向来回摆动磁强计一次,幅度不小于 40 度,记录各时刻测量的外角分线的磁场数据。

4. 根据权利要求 3 所述的测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法,其特征在于,所述磁强计以缓慢的速度摆动,所述缓慢的速度的范围具体为:根据采样的频率,使磁强计的采

样间隔小于 0.1 度。

5. 根据权利要求 3 所述的测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法, 其特征在于, 当有外磁场监测时, 所述步骤 102) 进一步包含:

步骤 102-11) 在上述两组测量数据中, 查找 $(bx^2+by^2)/B^2$ 的最大值对应数据, 并记录为 (Bx_1, By_1) (Bx_2, By_2) , 其中 B 表示监测得到的外磁场的标量大小;

步骤 102-12) 依据上述最大值并采用如下公式, 获得磁轴 X 和磁轴 Y 两磁轴之间夹角, 其中 γ 表示两磁轴之间的夹角:

$$\cos \gamma = \frac{B_2^2(Bx_1^2 + By_1^2) - B_1^2(Bx_2^2 + By_2^2)}{2(B_2^2Bx_1By_1 - B_1^2Bx_2By_2)}$$

其中, B_1 和 B_2 分别表示角分线测量得到的 (Bx_1, By_1) 和外角分线测量得到的 (Bx_2, By_2) 对应的监测外磁场标量 B 的大小。

一种测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及磁强计研制领域的磁强计正交性测量,具体涉及一种测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法。

背景技术

[0002] 磁强计三磁轴的正交性极大地影响着磁强计测量的精度,尤其是高精度矢量磁强计。在地磁条件下(假设 60000nT),由磁强计磁轴正交偏差导致的总场偏差,在偏角为 1 度、1 分和 1 秒时分别为 473nT、7.8nT 和 0.13nT 左右。目前在磁强计产品中关于正交性的处理主要有以下做法:

[0003] 1、在低精度磁强计中,通常不标注正交性偏差,三轴数据将按照理想正交进行处理,显然这种磁强计在其低精度要求的应用范围内可以满足条件;

[0004] 2、在较高精度产品中,通常会标出三磁轴之间的正交偏差范围,如正交性偏差在 $\pm 0.05^\circ$ 以内,在总场要求不高的或只要求分量场精度时,这种做法是可以接受的。而在较高的总场测量精度要求下,该磁强计测量到的总场将产生高达 21nT 的误差,这将是高精度矢量磁强计难以接受的误差范围;

[0005] 3、对于高精度磁强计,通常在实验室中通过旋转加测量的方式对其进行正交性等仪器性能的测量,这使得正交性的精度大幅提高至秒级,但也会遇到操作复杂,实验时间长,实验条件要求高等问题。

[0006] 本方法发明了一种对标定条件要求不高,操作简单快速,并且具有角秒级精度的正交性测量方法。通过在比较稳定的外磁场条件下,在磁强计的几个特殊姿态进行测量,即可快速得出该磁强计的正交性偏差。

发明内容

[0007] 本发明的目的在于,为克服上述的磁强计正交性标注方法存在的缺陷,本发明提供了一种快速测量磁强计正交性的方法。

[0008] 为了实现上述目的,本发明提供了一种测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法,所述方法包含:

[0009] 步骤 101) 将磁强计置于能够转动的无剩磁环境中旋转磁强计,使外磁场通过磁强计某两个磁轴的角分线附近和外角分线附近若干次,并依据测量时刻分别记录角分线附近和外交分线附近的磁场数值;

[0010] 步骤 102) 依据记录的磁场数值计算两磁轴之间的夹角,即获得了两磁轴之间的正交偏差;

[0011] 步骤 103) 重复上述步骤测量每两个磁轴之间正交偏差的角度,进而获得磁强计的三个磁轴之间的角度关系,完成磁强计的正交性测量。

[0012] 上述能够转动的无剩磁环境采用无磁转台或简单手持。

[0013] 当两个磁轴分别为 x 轴和 y 轴时,所述步骤 101) 进一步包含:

[0014] 步骤 101-1) 调整磁强计姿态使稳定外磁场方向指向磁轴 x 和磁轴 y 的角分线附近, 在垂直 xy 平面的方向来回摆动磁强计一次, 幅度不小于 40 度, 记录各时刻测量的角分线附近的磁场数据;

[0015] 步骤 101-2) 调整磁强计姿态使稳定外磁场方向指向磁轴 x 和磁轴 y 的外角分线附近, 在垂直 xy 平面的方向来回摆动磁强计一次, 幅度不小于 40 度, 记录各时刻测量的外角分线附近的磁场数据。

[0016] 上述磁强计以缓慢的速度摆动, 所述缓慢速度的范围具体为: 根据采样的频率, 使磁强计的采样间隔小于 0.1 度。

[0017] 当无外磁场监测时, 所述步骤 102) 进一步包含:

[0018] 步骤 102-11) 基于测量得到的各个时刻磁轴 x 和磁轴 y 的角分线和外角分线附近的磁强值 b_x 和 b_y 值, 查找 " $b_x^2+b_y^2$ " 的最大值对应的各磁轴的磁场数据, 并将该最大值对应的各磁轴的磁场数据记录为 (b_{x_1}, b_{y_1}) (b_{x_2}, b_{y_2}) , 其中下标 1 和 2 分别对应角分线与外角分线;

[0019] 步骤 102-12) 依据上述最大值采用如下公式, 获得两磁轴之间夹角, 其中 γ 表示磁轴 x 和磁轴 y 两磁轴之间的夹角:

$$[0020] \cos\gamma = \frac{(b_{x_1}^2 + b_{y_1}^2) - (b_{x_2}^2 + b_{y_2}^2)}{2(b_{x_1}b_{y_1} - b_{x_2}b_{y_2})}$$

[0021] 当有外磁场监测时, 所述步骤 102) 进一步包含:

[0022] 步骤 102-11) 在上述两组测量数据中, 查找 $(b_x^2+b_y^2)/B^2$ 的最大值对应数据, 并记录为

[0023] (B_{x_1}, B_{y_1}) (B_{x_2}, B_{y_2}) , 其中 B 表示监测得到的外磁场的标量大小;

[0024] 步骤 102-12) 依据上述最大值并采用如下公式, 获得磁轴 x 和磁轴 y 两磁轴之间夹角, 其中 γ 表示两磁轴之间的夹角:

$$[0025] \cos\gamma = \frac{B_2^2(B_{x_1}^2 + B_{y_1}^2) - B_1^2(B_{x_2}^2 + B_{y_2}^2)}{2(B_2^2B_{x_1}B_{y_1} - B_1^2B_{x_2}B_{y_2})}$$

[0026] 其中, B_1 和 B_2 分别表示角分线附近测量得到的 (B_{x_1}, B_{y_1}) 和外角分线附近测量得到的 (B_{x_2}, B_{y_2}) 对应的监测外磁场标量 B 的大小。

[0027] 上述步骤 103) 还采用如下正交修正矩阵修正测量得到的三轴磁场数据:

$$[0028] \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\cos a}{\sin a} & 0 \\ \frac{\cos a}{\sin a} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} bx' \\ by' \\ bz' \end{pmatrix}$$

[0029] 上述参数 A 计算公式如下:

$$[0030] A = 1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c$$

[0031] 其中, a 表示磁轴 x 和磁轴 y 之间的夹角, b 表示磁轴 y 和磁轴 z 之间的夹角, c 表示磁轴 x 和磁轴 z 之间的夹角, 磁轴 x、y 和 z 分别表示三个实测磁轴; 磁轴 x'、y' 和 z' 为理想正交磁轴, bx, by 和 bz 表示实测磁轴 x、磁轴 y 和磁轴 z 三个磁轴的数据, bx', by' 和 bz' 表示经过正交修正的 xyz 三磁轴数据。

[0032] 与现有技术相比,本发明提供的测量三轴正交性的方法以及基于测定的三轴正交性修正实际测量的磁场数据的方法的技术优势在于:相比传统的测量方法本发明提供的正交性偏差快速测量确定的方法简单,测量精度高等优点。具体表现为当在磁强计测量精度为0.1/54000nT,采样率20Hz,外磁场在测量期间内稳定度为0.1/54000nT的实验条件下,测量角度的误差在2.16角秒以内。据此正交性偏差修正方法修正后的磁强计在地磁场条件下总场精度为0.28nT,对比不进行修正时,正交偏差1度带来的总场误差为473nT。

附图说明

[0033] 图1是本发明实施例提供的测量方法实现的理想正交磁轴的坐标系示意图;

[0034] 图2是本发明提供的测量磁强计三磁轴之间的正交性的方法的流程图。

具体实施方式

[0035] 下面结合附图和实施例对本发明所述方法进行详细说明。

[0036] 本发明提供的一套快速测量磁强计正交性的方法,按照该方法可以快速简便的计算出磁强计三磁轴之间正交偏差的角度。

[0037] 将磁强计置于可转动的无剩磁环境中(比如,无磁转台,或者手持)旋转磁强计,使稳定外磁场缓慢通过磁强计某两个磁轴的角分线附近;然后通过这两个磁轴的外角分线附近;记录并计算此两磁轴之间的正交偏差;重复上面的步骤,如此可以测量每两个磁轴之间正交偏差的角度。

[0038] 假设上述步骤中的两个磁轴分别为xy轴,记录角分线附近的 bx^2+by^2 的最大值为 $bx_1^2+by_1^2$,记录外角分线附近的 bx^2+by^2 的最大值为 $bx_2^2+by_2^2$,则磁轴xy之间的夹角 γ ,可以表示为:

$$[0039] \cos\gamma = \frac{bx_1^2+by_1^2}{\sqrt{2(bx_1^2+by_1^2)(bx_2^2+by_2^2)}}$$

[0040] 按照上述方法进行正交性偏差快速测量,将根据测量结果快速给出每两个磁轴之间的正交偏差角度。

[0041] 其中,所述无剩磁环境是指实验空间附近没有明显的铁磁性物质或者强电流源,这些物质会造成在实验空间内不稳定的,不均匀的磁场分布。虽然严格的无剩磁环境是非常难达到的,但是可以使用无磁转台,它只引入了很低的剩磁,简单手持也可以引入较低剩磁。所述稳定外磁场是指在实验空间内稳定的、均匀的天然磁场或人工磁场,包括但不限于磁宁静日的野外的地磁场,实验室空间内也是可以通过磁屏蔽和赫姆霍兹线圈等方式实现上述外磁场。由于本实验操作的时间尺度并不长,地磁的日变化造成的影响可以忽略。

[0042] 实验条件:

[0043] 1、稳定外磁场,比如在宁静日的野外的地磁场环境下,或实验室屏蔽桶内,假定在试验期间外磁场的扰动在0.1nT/60000nT范围内;

[0044] 2、具有一定精度的三轴磁强计,并且其每个轴已经进行过准确的灵敏度、零漂的测量,其噪声为0.1nT/60000nT,采样率为20Hz;

[0045] 3、无磁可旋转平台,比如无磁转台,或手持。

[0046] 测量方法如图2所示,具体包含如下步骤:

[0047] 1、调整磁强计姿态使外磁场方向指向理想正交磁轴 xy 的角分线附近,以磁轴 xy 的外角分线为旋转轴,以缓慢速度(比如 20Hz 采样率条件下,每秒 2 度)来回转动磁强计一次,幅度不小于 40 度。

[0048] 2、调整磁强计姿态使外磁场方向指向理想磁轴 xy 的外角分线附近,以磁轴 xy 的角分线为旋转轴,以缓慢速度来回转动磁强计一次,幅度在 30 度以内即可。

[0049] 3、若无外磁场监测,在上面两组测量数据中,查找 bx^2+by^2 的最大值对应数据;若有外磁场标量检测,查找 $(bx^2+by^2)/B^2$ 的最大值对应数据,并记录为 (bx_1, by_1) (bx_2, by_2) ,其中 B 表示磁场的标量大小;

$$[0050] \cos y = \frac{(bx_1^2 + by_1^2) - (bx_2^2 + by_2^2)}{2(bx_1 by_1 - bx_2 by_2)}, \text{ 或者 } \cos y = \frac{b_x^2(b_x^2 + b_y^2) - b_x^2(b_x^2 + b_y^2)}{2(b_x b_y - b_x b_y)}.$$

[0051] 重复上述步骤直至完成任意两个理想磁轴之间的夹角测量,即完成了磁强计三轴的正交偏差测量。

[0052] 由于正交偏差,导致测量数据并不能真实反应磁场的大小和方向,所以为了对测量数据的正交性进行修正,本发明还给出正交修正矩阵,通过正交修正矩阵的修正,实测数据将消除由于正交型偏差导致的测量偏差。这是基于磁轴 y 与磁轴 x 和磁轴 z 组成的磁轴平面的正交修正矩阵。假定经过上述方法实测得到的磁轴 x 和磁轴 y 之间的夹角为 a, 磁轴 y 和磁轴 z 之间的夹角为 b, 磁轴 x 和磁轴 z 之间的夹角为 c。并假定理想正交磁轴 x'、磁轴 y' 和磁轴 z' 与实测磁轴 x、磁轴 y 和磁轴 z 之间满足如下的关系:磁轴 y' 与磁轴 y 重合, 磁轴 x' 在 xy 平面内与磁轴 x 同在磁轴 y 的一侧。通过如下计算对非正交的磁轴 xyz 进行修正,可以得到理想正交磁轴 x' y' z' 的修正数据。其中 bx, by, bz 表示磁轴 xyz 的实测数据, bx', by', bz' 表示修正了正交性的理想正交磁轴 x' y' z' 的测量数据,也就是代表了真实磁场的理想正交的磁场数据。

$$[0053] \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{\cos a}{\sin a} & 0 \\ \frac{\cos a}{\sin a} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} bx' \\ by' \\ bz' \end{pmatrix}$$

[0054] 其中,字母 A 代表如下公式:

$$[0055] A = 1 - \cos^2 a - \cos^2 b - \cos^2 c + 2 \cos a \cos b \cos c$$

[0056] 通过计算每两个磁轴的正交偏差,得到磁强计三轴的正交偏差描述,并计算三轴正交修正矩阵,从而将磁轴 xyz 修正为理想正交磁轴 x' y' z',并计算得到新磁轴的测量值。

[0057] 以测量磁强计磁轴 x、y 的正交偏角为例,下例为初始的正交偏角为 1 度的仿真结果。磁轴 xyz 的磁场测量值写为 bx, by, bz。地磁场外场的总场大小为 54000nT, 稳定度 0.1nT, 磁强计的单轴精度 0.1nT, 采样率 20Hz。调整磁强计姿态,测量外磁场总场方向在磁轴 x、y 角分线附近的情况,考虑磁强计正负 20 度摆动,记录 20 秒数据,转动速度略有波动的情况下,其三轴的测量数据如下:

[0058]

序号	1	2	199	200	201	399	400
----	---	---	-------	-----	-----	-----	-------	-----	-----

bx	36203. 4	36232. 3	.....	38515. 2	38515. 5	38515. 4	.....	36193. 6	36187. 9
by	36211. 3	36200. 9	.....	38515. 4	38515. 4	38515. 4	.....	38515. 4	36203. 4
bz	-18515. 0	-18364. 4	.....	-76. 6	-115. 3	109. 0	.....	18386. 0	18468. 7

[0059] 其中, bx^2+by^2 的最大值为第 200 组数据。上表中显示了磁场数据的小数点后一位的不足近似。同样测量磁轴 x、y 的外角分线时, 三周的测量数据如下:

[0060]

序号	1	2	.....	199	200	201	.....	399	400
bx	35559. 6	35600. 4	.....	37848. 8	37849. 0	37849. 0	.....	35573. 5	35567. 8
by	-35570. 6	-35569. 1	.....	-37848. 6	-37849. 0	-37849. 1	.....	-35600. 1	-35560. 4
bz	-18482. 4	-18447. 7	.....	-163. 1	-9. 8	-1. 0	.....	18458. 9	18430. 6

[0061] 其中, bx^2+by^2 的最大值为第 201 组数据。根据上文的正交偏角计算公式

$$\cos \gamma = \frac{(bx_1^2 + by_1^2) - (bx_2^2 + by_2^2)}{2(bx_1 b x_2 + by_1 b y_2)},$$

可得出 $\gamma = 1.000011923$ 度。计算结果与初设的 1 度正交偏差相差 0.0429 角秒。重复 1000 次仿真计算的最大误差为 1.03 角秒, 而理论上的最大误差为 2.16 角秒。

[0062] 总之, 磁强计的三轴正交性对磁场测量的精度具有很大的影响, 高精度的磁强计都需要对其正交性进行严格测量, 正交性测量也会使普通磁强计的精度进一步提升。本发明提供了一种快速测量磁强计三磁轴之间正交性的方法。该方法利用磁强计在稳定磁场中通过一些特殊姿态的测量, 可以快速计算出该磁强计三磁轴之间的角度关系。该方法的精度主要依赖于磁强计的探测精度以及外磁场的稳定性。在平稳的地磁环境下高精度磁强计将可以达到 2.16 角秒测量精度。对比 1 度偏差导致的 473nT 总场偏差, 2.16 角秒会导致 0.28nT 的总场偏差。

[0063] 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。

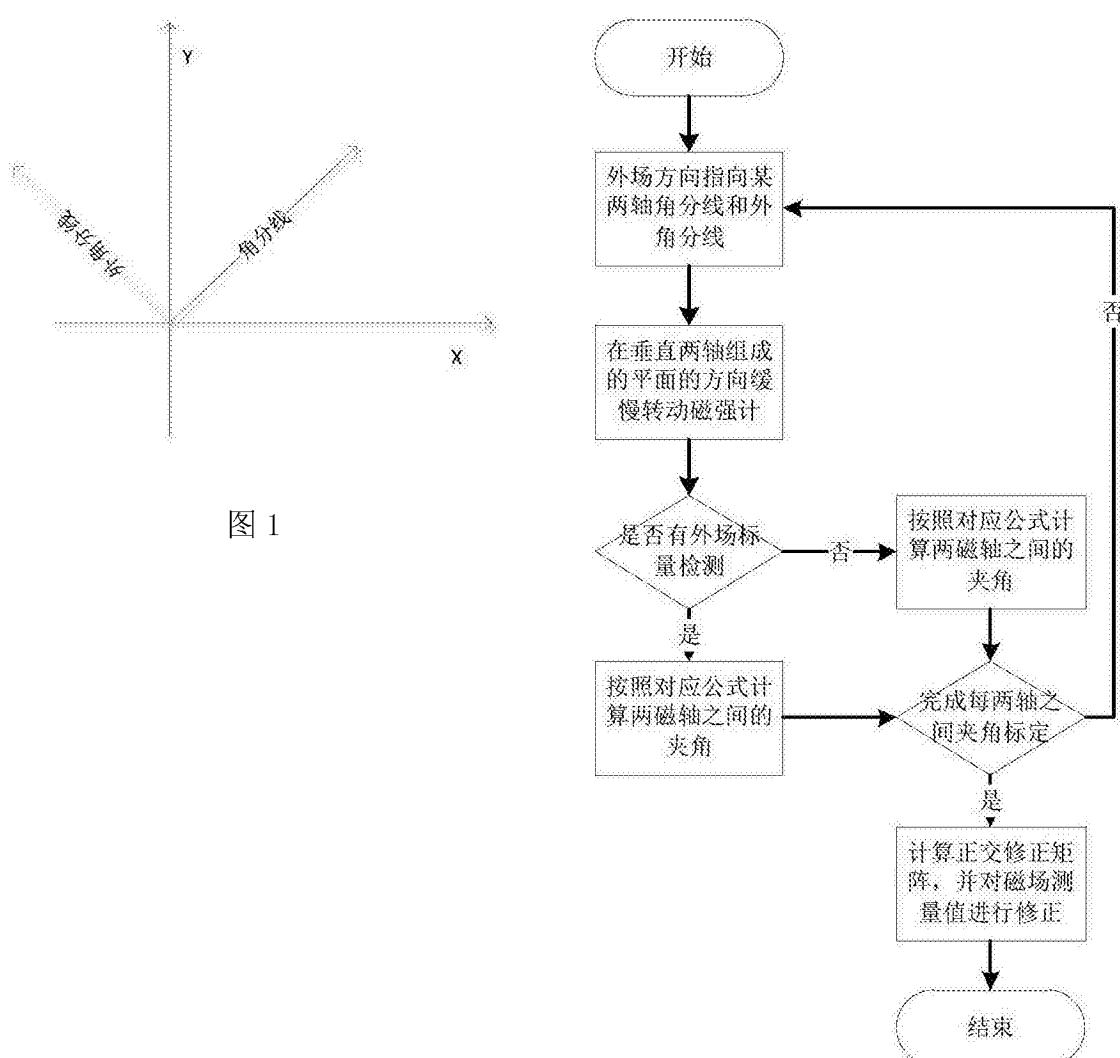


图 1

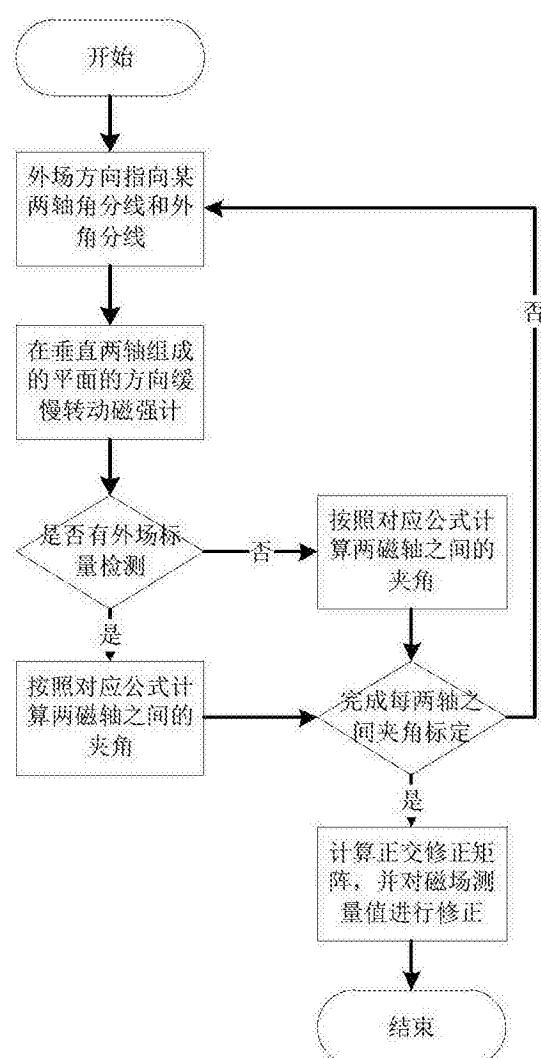


图 2