

一种弱磁方向传感器的标定方法

申请号：[200910117170.7](#)

申请日：2009-06-26

申请(专利权)人 [中国科学院合肥物质科学研究院](#)
地址 [230031安徽省合肥市西郊董铺1130信箱智能所](#)
发明(设计)人 [陈池来](#) [朱荣华](#) [林新华](#) [高理升](#)
主分类号 [G01P21/00\(2006.01\)I](#)
分类号 [G01P21/00\(2006.01\)I](#)
公开(公告)号 [101587132](#)
公开(公告)日 [2009-11-25](#)
专利代理机构 [合肥天明专利事务所](#)
代理人 [奚华保](#)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200910117170.7

[43] 公开日 2009年11月25日

[11] 公开号 CN 101587132A

[22] 申请日 2009.6.26
 [21] 申请号 200910117170.7
 [71] 申请人 中国科学院合肥物质科学研究院
 地址 230031 安徽省合肥市西郊董铺 1130 信箱智能所
 [72] 发明人 陈池来 朱荣华 林新华 高理升

[74] 专利代理机构 合肥天明专利事务所
 代理人 奚华保

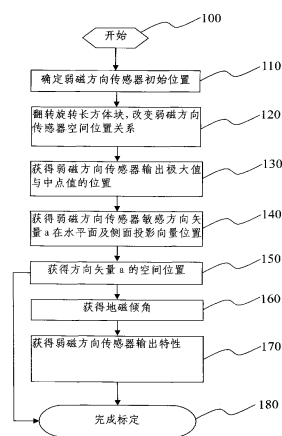
权利要求书 2 页 说明书 11 页 附图 3 页

[54] 发明名称

一种弱磁方向传感器的标定方法

[57] 摘要

本发明公开了一种弱磁方向传感器的标定方法，特别是磁场响应值相当于或者小于地磁场的弱磁方向传感器标定方法。该方法实现装置包括一个台面水平的一维旋转平台，一个装弱磁方向传感器的长方体，整个装置无磁。通过在一维旋转平台水平方向 360 度旋转以及长方体块 90 度整数倍翻转的弱磁方向传感器空间位置变化所对应的传感器输出变化，确定弱磁方向传感器敏感方向在磁场与水平面组成的坐标系和长方体块坐标系中的空间位置，确定弱磁方向传感器输出特性。该方法不需要现有弱磁传感器标定使用的磁屏蔽房和亥姆霍兹线圈，在简单设备情况下实现对弱磁方向传感器的高精度标定。



1. 一种弱磁方向传感器的标定方法, 通过地磁场对弱磁方向传感器 (3) 进行标定, 其特征在于该方法实现装置包括一个台面水平的一维旋转平台, 一个装弱磁方向传感器的长方体, 整个装置无磁; 通过在一维旋转平台水平方向 360 度旋转以及长方体块 90 度整数倍翻转的弱磁方向传感器空间位置变化所对应的传感器输出变化, 确定弱磁方向传感器敏感方向在磁场与水平面组成的坐标系和长方体块坐标系中的空间位置, 确定弱磁方向传感器输出特性。

2. 根据权利要求 1 所述的弱磁方向传感器标定方法, 其特征在于所述一维旋转平台 (1) 在水平面内围绕竖直方向旋转, 台面有水平二维直角坐标系 XY;

所述长方体块 (2) 是无磁的, 长方体块 (2) 也可为封装后的完整弱磁方向传感器 (3) 本身, 或者是作为标定的弱磁方向传感器 (3) 的容器;

所述弱磁方向传感器 (3) 输出由地磁场在弱磁方向传感器 (3) 敏感方向 a 的投影决定, 输出量为电学量, 弱磁方向传感器 (3) 敏感方向矢量记为 a , a 为单位矢量;

将长方体块 (2) 底边紧靠水平坐标系两条垂直轴 X 和 Y, 选定为初始位置, 以 X 轴为旋转轴, 以逆时针方向为正方向翻转长方体块 (2) 0 度, 90 度、180 度、270 度, 在这些位置上 360 度旋转一维旋转平台 (1), 获得弱磁方向传感器 (3) 输出与一维旋转平台 (1) 旋转角度之间的关系 $V = g_1(\varphi)$ 、 $V = g_2(\varphi)$ 、 $V = g_3(\varphi)$ 、 $V = g_4(\varphi)$, 相应的弱磁方向传感器 (3) 输出极小值对应的一维旋转平台 (1) 转角为 φ_{10} 、 φ_{20} 、 φ_{30} 、 φ_{40} , 初始位置旋转输出极小值的位置 φ_{10} 后第一个中点值位置为 φ_{11} ;

θ 角为 a 矢量初始位置时在水平面上的投影与长方体块 (2) X 轴夹角, γ 角为 a 矢量初始位置时在长方体块含 X 轴侧面上的投影 X 轴夹角, ψ 角为初始位置方向矢量 a 与长方体块含 X 轴侧面的夹角, ϕ 角为方向矢量 a 与水平面的夹角, β 为方向矢量 a 与地磁场 B 的夹角, α 为地磁场 B 与水平面的夹角;

该方法流程如下:

利用 φ_{10} 、 φ_{20} 、 φ_{30} 、 φ_{40} , 确定 θ 和 γ ;

利用 θ 和 γ ，求出 ψ 和 ϕ ；

利用 ϕ 、 φ_{10} 和 φ_{11} ，求出 α ；

利用 α 、 φ_{10} 和 ϕ ，获得 β 和 φ 之间的函数关系；

利用 β 和 φ 之间的函数关系以及 $V = g_1(\varphi)$ ，获得弱磁方向传感器 (3) 输出特性。

3. 根据权利要求 2 所述的弱磁方向传感器标定方法，其特征是：所述的 $\theta = (\varphi_{30} - \varphi_{10})/2$ ， $\gamma = (\varphi_{20} - \varphi_{40})/2$ ， $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ， $-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ 。

4. 根据权利要求 2 所述的弱磁方向传感器标定方法，其特征是：所述的 $\phi = \tan^{-1}\left[\left(\tan \frac{\varphi_{20} - \varphi_{40}}{2}\right) \cos \frac{\varphi_{30} - \varphi_{10}}{2}\right]$ ， $\psi = \tan^{-1}\left[\left(\tan \frac{\varphi_{30} - \varphi_{10}}{2}\right) \cos \frac{\varphi_{20} - \varphi_{40}}{2}\right]$ 。

5. 根据权利要求 2 所述的弱磁方向传感器标定方法，其特征是：所述的地磁场 B 的磁倾角 α ， $\alpha = \tan^{-1}\left(-\frac{\cos \phi \cos(\varphi_{11} - \varphi_{10})}{\sin \phi}\right)$ 。

6. 根据权利要求 2 所述的弱磁方向传感器标定方法，其特征是：所述的弱磁方向传感器敏感方向矢量 a 和地磁场 B 的夹角 $\beta = \cos^{-1}[(\cos \alpha \cos \phi \cos(\varphi - \varphi_{10}) + \sin \alpha \sin \phi)]$ 。

7. 根据权利要求 2 所述的一种弱磁传方向感器标定方法，其特征是：所述的弱磁方向传感器输出 V 与 β 角之间的关系为

$$V = f(\beta) = g_1\left(\cos^{-1}\left(\frac{\cos \beta - \sin \alpha \sin \phi}{\cos \alpha \cos \phi}\right) + \varphi_{10}\right)。$$

8. 根据权利要求 1-7 任一项所述的弱磁方向传感器标定方法，其特征是：上述的弱磁方向传感器标定方法，能够标定各向异性磁阻传感器、霍尔效应磁传感器、磁通门磁传感器等方向敏感且量程与地磁场相仿或者小于地磁场的磁传感器。

一种弱磁方向传感器的标定方法

技术领域

本发明涉及对弱磁方向传感器的标定,特别涉及利用地磁场对方向敏感的弱磁方向传感器的标定。

背景技术

弱磁方向传感器因其方向敏感性而被广泛用于方向定位和局域性探测,如车辆识别、地震监测、运动导航、姿态显示等。

弱磁方向传感器在处于不同空间角度的时候会有不同的输出,因而其标定内容包括弱磁方向传感器内部的输出特性以及敏感方向与传感器外部结构之间的空间位置关系。

现有的弱磁方向传感器标定一般使用无磁的方法,利用磁屏蔽房或者三维线圈将环境磁场抵消,然后再产生一个大小及角度容易控制的磁场来对其进行标定。这种方法对仪器条件要求苛刻,需要昂贵且体积大的磁屏蔽房和三维亥姆霍兹线圈。

在专利 CN 101393022A 中,发明者在环境磁场存在的情况下利用弱磁方向传感器在特定位置的输出值对其本身进行标定,不需要昂贵的磁屏蔽仪器和磁产生仪器。然而,这种标定方法需要对弱磁方向传感器的 22 个方位角输出值进行测量,过于复杂,且这 22 个位置中,有 45 度、135 度、225 度和 315 度的空间位置出现,对于外形为长方体的弱磁方向传感器而言,空间位置容易实现的是 90 度整数倍的位置,而对其它位置的实现比较困难,并且带入误差较大,因而这种标定方法所能达到的精度只能是 3~5 度,而对于现在测量精度已经达到 0.5 度的弱磁方向传感器而言,显然是不合适的。另外,这种标定方法基于弱磁方向传感器输出特性为线性的假定,因而不能对弱磁方向传感器的输出特性进行标定。

发明内容

本发明目的是针对现有弱磁方向传感器的标定方法所需的仪器庞大而且昂贵的缺点,提出一种利用地磁场对弱磁方向传感器进行标定的方法,该方法使用

一个一维旋转平台,利用弱磁方向传感器在不同空间方向的输出值变化对弱磁方向传感器进行标定。

本发明为实现其目的所采取的技术方案:一种弱磁方向传感器的标定方法,通过地磁场对弱磁方向传感器进行标定,其特征在于该方法实现装置包括一个台面水平的一维旋转平台,一个装弱磁方向传感器的长方体,整个装置无磁;通过在一维旋转平台水平方向 360 度旋转以及长方体块 90 度整数倍翻转的弱磁方向传感器空间位置变化所对应的传感器输出变化,确定弱磁方向传感器敏感方向在磁场与水平面组成的坐标系和长方体块坐标系中的空间位置,确定弱磁方向传感器输出特性。

所述一维旋转平台(1)在水平面内围绕竖直方向旋转,台面有水平二维直角坐标系 XY;

所述长方体块(2)是无磁的,长方体块(2)也可为封装后的完整弱磁方向传感器(3)本身,或者是作为标定的弱磁方向传感器(3)的容器;

所述弱磁方向传感器(3)输出由地磁场在弱磁方向传感器(3)敏感方向 a 的投影决定,输出量为电学量,弱磁方向传感器(3)敏感方向矢量记为 a, a 为单位矢量;

将长方体块底边紧靠水平坐标系两条垂直轴 X 和 Y,选定为初始位置,以 X 轴为旋转轴,以逆时针方向为正方向翻转长方体块 0 度、90 度、180 度、270 度,在这些位置上 360 度旋转一维旋转平台,获得弱磁方向传感器输出与一维旋转平台旋转角度之间的关系 $V = g_1(\varphi)$ 、 $V = g_2(\varphi)$ 、 $V = g_3(\varphi)$ 、 $V = g_4(\varphi)$,相应的弱磁方向传感器输出极小值对应的一维旋转平台转角为 φ_{10} 、 φ_{20} 、 φ_{30} 、 φ_{40} ,初始位置旋转输出极小值的位置 φ_{10} 后第一个中点值位置为 φ_{11} 。

θ 角为 a 矢量初始位置时在水平面上的投影与长方体块侧面的夹角, γ 角为 a 矢量初始位置时在包含 X 轴侧面上的投影与长方体块底面的夹角, ψ 角为方向矢量 a 与包含 X 轴的初始位置长方体侧面的夹角, ϕ 角为方向矢量 a 与水平面的夹角, β 为方向矢量 a 与地磁场 B 的夹角, α 为地磁场 B 与水平面的夹角;

该方法流程如下:

利用 φ_{10} 、 φ_{20} 、 φ_{30} 、 φ_{40} ，确定 θ 和 γ ；

利用 θ 和 γ ，求出 ψ 和 ϕ ；

利用 ϕ 、 φ_{10} 和 φ_{11} ，求出 α ；

利用 α 、 φ_{10} 和 ϕ ，获得 β 和 φ 之间的函数关系；

利用 β 和 φ 之间的函数关系以及 $V = g_1(\varphi)$ ，获得弱磁方向传感器输出特性。

利用上述弱磁方向传感器输出特性，利用弱磁方向传感器输出极小值对应的一维旋转平台转角 φ_{10} 、 φ_{20} 、 φ_{30} 、 φ_{40} 之间的角度差，确定弱磁方向传感器敏感方向在立方体各个面上投影的位置关系， $\theta = (\varphi_{30} - \varphi_{10})/2$ ， $\gamma = (\varphi_{20} - \varphi_{40})/2$ ， $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ， $-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ 。

利用上述磁方向传感器敏感方向在立方体各个面上投影的位置关系，确定弱磁方向传感器方向矢量 a 与长方体各个面之间的夹角，

$$\phi = \tan^{-1} \left[\left(\tan \frac{\varphi_{20} - \varphi_{40}}{2} \right) \cos \frac{\varphi_{30} - \varphi_{10}}{2} \right], \psi = \tan^{-1} \left[\left(\tan \frac{\varphi_{30} - \varphi_{10}}{2} \right) \cos \frac{\varphi_{20} - \varphi_{40}}{2} \right]。$$

利用上述弱磁方向传感器输出极值和中点值时的一维旋转平台转角的差值 $\varphi_{11} - \varphi_{10}$ 以及方向矢量 a 与水平面之间的夹角 ϕ ，确定地磁场 B 的磁倾角 α ，

$$\alpha = \tan^{-1} \left(-\frac{\cos \phi \cos(\varphi_{11} - \varphi_{10})}{\sin \phi} \right)。$$

利用上述地磁场 B 的磁倾角 α 和弱磁方向传感器敏感方向 a 与水平面的夹角 ϕ ，确定弱磁方向传感器敏感方向矢量和地磁场 B 的夹角 β 与一维旋转平台旋转角度 φ 的对应关系， $\beta = \cos^{-1}[(\cos \alpha \cos \phi \cos(\varphi - \varphi_{10}) + \sin \alpha \sin \phi)]$ 。

利用上述弱磁方向传感器敏感方向矢量 a 和地磁场 B 的夹角 β 的对应关系，确定弱磁方向传感器输出 V 与 β 角之间的关系为

$$V = g_1 \left(\cos^{-1} \left(\frac{\cos \beta - \sin \alpha \sin \phi}{\cos \alpha \cos \phi} \right) + \varphi_{10} \right) = f(\beta)。$$

上述的标定方法，能够标定各向异性磁阻传感器、霍尔效应磁传感器、磁通

门磁传感器等方向敏感且量程与地磁场相仿或者小于地磁场的磁传感器。

本发明的有益效果：用于弱磁方向传感器的标定方法所需求的仪器只需要一个可测旋转角度的水平旋转平台，不需要磁屏蔽房和三维亥姆霍兹线圈，能够利用地磁场本身对弱磁方向传感器进行标定。

用于弱磁方向传感器的标定方法只需要在小范围标定空间以内稳定且均匀的磁场存在，因而可在有铁磁物质干扰的地方标定，不需要到野外无干扰环境。

用于弱磁方向传感器的标定方法只需要对弱磁方向传感器进行旋转和 90 度整数倍的翻滚，因而对机械平台的要求只需要水平度高，能在水平面内旋转，而不需要有非 90 度整数倍的倾斜角，对机械加工要求低。

用于弱磁方向传感器的标定方法包括实验操作部分和数据处理部分，实验操作只需要翻转长方体块四次和水平旋转平台四次，时间很短，因而对环境要求低。

用于弱磁方向传感器的标定方法因地磁场在短时间内具有高度稳定性，用于弱磁方向传感器的标定方法精度决定于机械旋转的精度，因而可以为精度达 0.5 度的弱磁方向传感器进行标定。

附图说明

图 1 为弱磁方向传感器标定流程图。

图 2 为弱磁方向传感器标定装置示意图。

图 3 为零位置时坐标系、地磁场、弱磁方向传感器敏感方向矢量以及弱磁方向传感器方向矢量关系示意图。

图 4 为弱磁方向传感器敏感方向矢量空间位置求解示意图。

图 5 为地磁场倾角求解示意图。

具体实施方式

下面结合附图和实施例对本发明作进一步的详细说明：

图 1 为弱磁方向传感器标定流程图。该方法步骤为：

开始（步骤 100）；确定弱磁方向传感器 3 初始位置（步骤 110），即将长方体块 2 置于一维旋转平台 1 之上，并确保其底面垂直的棱与 XY 轴平行；翻转旋转长方体块 2，改变弱磁方向传感器 3 空间位置关系（步骤 120），包括两个部分，

一方面以 90 度倍数以 X 轴为旋转轴翻转，另一方面水平旋转平台；获得弱磁方向传感器 3 输出极小值与中点值的位置（步骤 130），获得每一个按 X 轴翻转后位置的弱磁方向传感器 3 水平旋转所得的输出极小值与中点值所对应的一维旋转平台 1 旋转角度；获得弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量 a 在水平面及侧面投影向量位置（步骤 140）；获得方向矢量 a 的空间位置（步骤 150），即求出方向矢量 a 与水平面及含 X 轴侧面的夹角；获得地磁倾角（步骤 160），即求出地磁场与水平面夹角；获得弱磁方向传感器 3 输出特性（步骤 170），即求出弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量和传感器输出的函数关系；完成标定（步骤 180）

图 2 为弱磁方向传感器标定装置示意图。

一维旋转平台 1 即可绕垂直轴 360 度水平旋转的平台，台面上有二维直角坐标系 XY，一维旋转平台 1 的旋转角度可被精密转角传感器测得。弱磁方向传感器 3 装于长方体块 2 之中，如图 2 (a) 所示，其敏感方向矢量为 a ，为单位矢量，弱磁方向传感器 3 的输出由外磁场在该方向矢量上的投影决定，即与 $\cos \beta$ 成正比，其中 β 为弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量 a 与地磁场 B 的夹角，如图 2 (b) 所示，弱磁方向传感器 3 输出电学量。一维旋转平台 1 和长方体块 2 都是无磁的。

图 3 为零位置时坐标系、地磁场、弱磁方向传感器敏感方向矢量以及弱磁方向传感器方向矢量关系示意图。

三维直角坐标系 $e, (e_1, e_2, e_3)$ ， $\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ ，其中 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 为大地磁场坐标系， e_3 为万有引力反方向， $e_1 e_2$ 面为水平面，地磁场 B 处于 $e_1 e_3$ 面内且与 e_1 、 e_3 皆成钝角； $\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 坐标系中 η_3 为万有引力反方向，与 e_3 相同， η_1 、 η_2 分别对应于一维旋转平台 1 上的 X 和 Y，该坐标系随一维旋转平台 1 的旋转而变化。零位置是指矢量 a 、地磁场 B 处于同一个平面且夹角为钝角的一维旋转平台 1 所处的位置。

弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量为 a ，矢量 a 零位置在 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 里的表达式为 $a = (e_1, e_2, e_3) (\cos \phi, 0, \sin \phi)^T$ ， ϕ 为矢量 a 与水平面夹角，零位置即 a 与外磁场

B 处于同一个平面的位置。地磁场 B 与水平面夹角为 α ，地磁场在 $e_1, (e_1, e_2, e_3)$ 中的表达为 $(e_1, e_2, e_3)(-B\cos\alpha, 0, -B\sin\alpha)^T$ ，在零位置，矢量 a 与长方体块 2 含 X 轴侧面夹角为 ψ ， ϕ 与 ψ 皆为锐角。

图 4 为弱磁方向传感器敏感方向矢量空间位置求解示意图。

确定初始位置(步骤 110)，旋转一维旋转平台 1，获得初始位置的 $V = g_1(\phi)$ ，找出两个极值和两个中点值，以逆时针方向为正方向，则极小值和极大值时矢量 a 处于 e_1e_3 面，即与地磁场 B 处于同一平面，极小值时 a 与 e_1 、 e_3 皆成锐角，极大值时 a 与 e_1 、 e_3 皆成钝角，极小值时转角记为 ϕ_{10} ，从极小值旋转至极大值之间的中点值的转角记为 ϕ_{11} 。

翻转旋转长方体块 2，改变弱磁方向传感器 3 空间位置关系(步骤 120)。以 X 轴为旋转轴，以逆时针方向为正方向翻转长方体块 90 度、180 度、270 度。

获得弱磁方向传感器 3 输出极小值与中点值的位置(步骤 130)，在上述位置旋转一维旋转平台 1，获得弱磁方向传感器 3 输出与旋转角度之间的关系 $V = g_2(\phi)$ 、 $V = g_3(\phi)$ 、 $V = g_4(\phi)$ ，相应的弱磁方向传感器 3 输出极小值记为 ϕ_{20} 、 ϕ_{30} 、 ϕ_{40} 。

获得弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量 a 在水平面及侧面投影向量位置(步骤 140)。 ϕ_{10} 是矢量 a 在初始位置与地磁场 B 处于同一平面时的一维旋转平台 1 转角，即长方体块 2 的零位置，而 ϕ_{30} 是长方体块 2 以 X 轴为旋转轴翻转 180 度后所获得的极小值点的一维旋转平台 1 转角。初始位置 ϕ_{10} 时 $a = (e_1, e_2, e_3)(\cos\phi, 0, \sin\phi)^T$ ，此时长方体块 2 的侧面与 $\eta_1\eta_3$ 面平行，因此 a 与 $\eta_1\eta_3$ 面夹角为 ψ ，以 X 轴为旋转轴翻转 180 度以后 $a = (e_1, e_2, e_3)(\cos\phi\cos 2\theta, \cos\phi\sin 2\theta, -\sin\phi)^T$ ，其中 θ 为 η_1 和 a 在水平面投影之间的夹角。将一维旋转平台 1 水平旋转到 ϕ_{30} 时， a 再次与地磁场处于同一平面，且

坐标变为 $(e_1, e_2, e_3)(\cos\phi, 0, -\sin\phi)^T$ ，也就是说将 $(e_1, e_2, e_3)(\cos\phi\cos 2\theta, \cos\phi\sin 2\theta, -\sin\phi)^T$ 水平旋转角度 $(\varphi_{30} - \varphi_{10})$ 后变为 $(e_1, e_2, e_3)(\cos\phi, 0, -\sin\phi)^T$ ，按照坐标转换公式可知

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi_{30} - \varphi_{10}) & \sin(\varphi_{30} - \varphi_{10}) & 0 \\ -\sin(\varphi_{30} - \varphi_{10}) & \cos(\varphi_{30} - \varphi_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\phi \\ 0 \\ -\sin\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi\cos 2\theta \\ \cos\phi\sin 2\theta \\ -\sin\phi \end{pmatrix}, \quad \text{从而得到}$$

$\theta = (\varphi_{30} - \varphi_{10})/2$ 。 θ 角同时也为 a 矢量初始位置时在水平面上的投影与长方体块 2 侧面的夹角 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 。

依据上述方法，对比以 X 轴翻转轴的 90 度和 270 度旋转所得到的 φ_{20} 和 φ_{40} 可以获得 $\gamma = (\varphi_{20} - \varphi_{40})/2$ ，其中 γ 角为 a 矢量初始位置时在 $\eta_1\eta_3$ 面上的投影与长方体块 2 底面的夹角， $-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$ 。

获得方向矢量 a 的空间位置（步骤 150）。 θ 角为角度 ψ 在水平面即初始位置方块底面的投影， γ 角为 ϕ 角在初始位置时 $\eta_1\eta_3$ 面上的投影，因而

$$\tan\phi = \tan\gamma\cos\theta, \quad \tan\psi = \tan\theta\cos\gamma, \quad \text{从而}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\left(\tan\frac{\varphi_{20} - \varphi_{40}}{2}\right)\cos\frac{\varphi_{30} - \varphi_{10}}{2}\right], \quad \psi = \tan^{-1}\left[\left(\tan\frac{\varphi_{30} - \varphi_{10}}{2}\right)\cos\frac{\varphi_{20} - \varphi_{40}}{2}\right].$$

图 5 为地磁场倾角求解示意图。

获得地磁倾角（步骤 160）。弱磁方向传感器 3 在初始位置旋转过程中的最大值逆时针方向第一个中点值一维旋转平台 1 角度为 φ_{11} ，此时矢量 a 与地磁场 B 的夹角为 90 度。此时矢量 a 是在坐标系 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 中的坐标为 $(e_1, e_2, e_3)(\cos\phi, 0, \sin\phi)^T$ 旋转 $\varphi_{11} - \varphi_{10}$ 获得，所以表达式为 $(e_1, e_2, e_3)(\cos\phi\cos\theta, \cos\phi\sin\theta, \sin\phi)^T$ ，而地磁场 B 在 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 中的表达为 $(e_1, e_2, e_3)(-B\cos\alpha, 0, -B\sin\alpha)^T$ ，则二者的点乘结果为零，即

$\cos\phi\cos(\varphi_{11}-\varphi_{10})\cos\alpha+\sin\phi\sin\alpha=0$ ，即 $\alpha=\tan^{-1}\left(-\frac{\cos\phi\cos(\varphi_{11}-\varphi_{10})}{\sin\phi}\right)$ ，因 α 为

锐角，可唯一确定，即确定了地磁场 B 的磁倾角。

初始位置水平旋转平台，获得 $V_1=g_1(\varphi)$ ，其中 φ 为一维旋转平台 1 旋转角度。而矢量 a 在坐标系 $\eta,(\eta_1,\eta_2,\eta_3)$ 中的表达式为 $(\eta_1,\eta_2,\eta_3)(\cos\phi\cos\theta,\cos\phi\sin\theta,\sin\phi)^T$ ，而坐标系 $\eta,(\eta_1,\eta_2,\eta_3)$ 在坐标系 $e,(e_1,e_2,e_3)$

中的表达式为 $(\eta_1,\eta_2,\eta_3)=(e_1,e_2,e_3)\begin{pmatrix} \cos(\varphi-\varphi_{10}) & -\sin(\varphi-\varphi_{10}) & 0 \\ \sin(\varphi-\varphi_{10}) & \cos(\varphi-\varphi_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ ，因而矢量 a

表达式为 $(e_1,e_2,e_3)(\cos\phi\cos(\varphi-\varphi_{10}),\cos\phi\sin(\varphi-\varphi_{10}),\sin\phi)^T$ 。

获得弱磁方向传感器 3 输出特性（步骤 170）。弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量 a 与地磁场 B 的夹角为 β ，因 $\cos\beta=\frac{a\bullet B}{|a||B|}$ ，则

$\beta=\cos^{-1}[(\cos\alpha\cos\phi\cos(\varphi-\varphi_{10})+\sin\alpha\sin\phi)]$ ，从而能够获得弱磁方向传感器 3 输出

V 与夹角 β 之间的关系 $V=g_1(\varphi)=g_1\left(\cos^{-1}\left(\frac{\cos\beta-\sin\alpha\sin\phi}{\cos\alpha\cos\phi}\right)+\varphi_{10}\right)=f(\beta)$ 。

完成标定（步骤 180）。确定了弱磁方向传感器 3 敏感方向矢量 a 与长方体块 2 的各面之间的夹角 ϕ 与 ψ 、 a 在坐标系 $e,(e_1,e_2,e_3)$ 中的表达式以及传感器输出 V 与角 β 之间的关系 $V=f(\beta)$ ，即完成了弱磁方向传感器 3 的标定。

实施例

三维电子罗盘的标定，三维电子罗盘利用地磁场的三维分量确定物体所处的方位，广泛用于导航系统。

标定内容为电子罗盘在任一位置与外磁场方向角及倾角。电子罗盘外形为长方体块，其三个单维弱磁方向传感器敏感方向矢量为 a, b, c ，分别与坐标系 $\eta,(\eta_1,\eta_2,\eta_3)$ 中的 η_1, η_2, η_3 成锐角； a, b, c 构成三维空间坐标系 (a, b, c) ；电子罗盘自身三条不平行的棱构成坐标系 $\eta',(\eta'_1,\eta'_2,\eta'_3)$ ，其在水平时与坐标系

$\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 重合；电子罗盘在空间的任意方位可以看成是电子罗盘在零位置起
始先后绕 η_3 轴、 η_2 轴、 η_1 轴旋转 ϕ 、 ϕ' 、 ϕ'' 角获得，此时 ϕ 角为电子罗盘与地
磁场 B 的水平夹角， ϕ' 角为电子罗盘的俯仰角， ϕ'' 角为电子罗盘的翻滚角。

依据上述方法，可以获得电子罗盘的三个单维弱磁方向传感器方向向量 a，
b，c 在坐标系 $\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 中的表达式为

$$(\eta_1, \eta_2, \eta_3) \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi' \cos \theta' & \cos \phi'' \cos \theta'' \\ \cos \phi \sin \theta & \cos \phi' \sin \theta' & \cos \phi'' \sin \theta'' \\ \sin \phi & \sin \phi' & \sin \phi'' \end{pmatrix}, \text{ 其中}$$

$$\theta = (\phi_{30} - \phi_{10})/2, \quad \phi = \tan^{-1} \left[\left(\tan \frac{\phi_{20} - \phi_{40}}{2} \right) \cos \frac{\phi_{30} - \phi_{10}}{2} \right]$$

$$\theta' = (\phi'_{30} - \phi'_{10})/2, \quad \phi' = \tan^{-1} \left[\left(\tan \frac{\phi'_{20} - \phi'_{40}}{2} \right) \cos \frac{\phi'_{30} - \phi'_{10}}{2} \right], \quad \theta \text{ 角为矢量}$$

$$\theta'' = (\phi''_{30} - \phi''_{10})/2, \quad \phi'' = \tan^{-1} \left[\left(\tan \frac{\phi''_{20} - \phi''_{40}}{2} \right) \cos \frac{\phi''_{30} - \phi''_{10}}{2} \right]$$

a 在水平面投影与 η_1 的夹角， ϕ 为矢量 a 与水平面夹角； θ' 角为矢量 a 在水平面
投影与 η_1 的夹角， ϕ' 为矢量 a 与水平面夹角； θ'' 角为矢量 b 在水平面投影与 η_1 的
夹角， ϕ'' 为矢量 c 与水平面夹角。在初始位置旋转长方体块的时候，与 a, b, c
对应的弱磁方向传感器极大值时的一维旋转平台转角分别为 ϕ_{10} 、 ϕ'_{10} 、 ϕ''_{10} ；以
X 轴为旋转轴，以逆时针方向为正方向翻转长方体块 90 度、180 度、270 度，获
得与 a, b, c 对应的弱磁方向传感器极大值的一维转角传感器转角记为 ϕ_{20} 、 ϕ'_{20} 、
 ϕ''_{20} ； ϕ_{30} 、 ϕ'_{30} 、 ϕ''_{30} ； ϕ_{40} 、 ϕ'_{40} 、 ϕ''_{40} 。

上述表达为初始位置 (a, b, c) 在水平面上即围绕 η_3 轴旋转 ϕ 角时在坐标
系 $\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 中的表达式，在实际操作中为三维旋转，还应该添加上围绕 η_2 轴
旋转的角度 ϕ' 和绕 η_1 轴旋转的角度 ϕ'' ，因而构建坐标系 $\eta', (\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3)$ ，该坐标
系为坐标系 $\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 围绕 η_2 轴旋转角度 ϕ' 再绕 η_1 轴旋转 ϕ'' 的角度后所得坐
标系，二者关系为

$$(\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3) = (\eta_1, \eta_2, \eta_3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi' & -\sin \varphi' \\ 0 & \sin \varphi' & \cos \varphi' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{pmatrix}.$$

坐标系 $\eta, (\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ 在坐标系 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 中的表达式为

$$(\eta_1, \eta_2, \eta_3) = (e_1, e_2, e_3) \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \varphi_{10}) & -\sin(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ \sin(\varphi - \varphi_{10}) & \cos(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ 因而坐标系 } \eta', (\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3)$$

在坐标系 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 中表达式为

$$(\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3) = (e_1, e_2, e_3) \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \varphi_{10}) & -\sin(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ \sin(\varphi - \varphi_{10}) & \cos(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi' & -\sin \varphi' \\ 0 & \sin \varphi' & \cos \varphi' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{pmatrix}$$

三维弱磁方向传感器敏感方向矢量组 (a, b, c) 与坐标系 $\eta', (\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3)$ 之间的关系为确定关系, 无论如何旋转都不会改变, 因而

$$(a, b, c) = (\eta'_1, \eta'_2, \eta'_3) \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi' \cos \theta' & \cos \phi'' \cos \theta'' \\ \cos \phi \sin \theta & \cos \phi' \sin \theta' & \cos \phi'' \sin \theta'' \\ \sin \phi & \sin \phi' & \sin \phi'' \end{pmatrix}, \text{ 从而}$$

$$(a, b, c) = (e_1, e_2, e_3) \times \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \varphi_{10}) & -\sin(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ \sin(\varphi - \varphi_{10}) & \cos(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi' & -\sin \varphi' \\ 0 & \sin \varphi' & \cos \varphi' \end{pmatrix} \times$$

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi'' & 0 & -\sin \varphi'' \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi'' & 0 & \cos \varphi'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi' \cos \theta' & \cos \phi'' \cos \theta'' \\ \cos \phi \sin \theta & \cos \phi' \sin \theta' & \cos \phi'' \sin \theta'' \\ \sin \phi & \sin \phi' & \sin \phi'' \end{pmatrix}$$

依据上述方法, 可知与 a, b, c 对应的三维磁传感器响应曲线分别为 $V = f_1(\beta)$, $V' = f_2(\beta')$, $V'' = f_3(\beta'')$, 其中等式坐标为传感器输出电学量, 自变量为外磁场 B 与 a, b, c 三个方向矢量的夹角, 则 $(\beta, \beta', \beta'') = (f_1^{-1}(V), f_2^{-1}(V'), f_3^{-1}(V''))$ 。

当长方体块在空间旋转某个角度后, 三维弱磁方向传感器的输出为 V_1, V_2, V_3 ,

则可求出外磁场 B 与三个坐标轴的夹角分别为 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3) = (f_1^{-1}(V_1), f_2^{-1}(V_2'), f_3^{-1}(V_3''))$ ，因而外磁场 B 在 (a, b, c) 坐标系中的表达式为 $(a, b, c) (\cos \beta_1, \cos \beta_2, \cos \beta_3)^T$ ，在坐标系 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 中的表达式为

$$(e_1, e_2, e_3) \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \varphi_{10}) & -\sin(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ \sin(\varphi - \varphi_{10}) & \cos(\varphi - \varphi_{10}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi' & -\sin \varphi' \\ 0 & \sin \varphi' & \cos \varphi' \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi'' & -\sin \varphi'' \\ 0 & \sin \varphi'' & \cos \varphi'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi' \cos \theta' & \cos \phi'' \cos \theta'' \\ \cos \phi \sin \theta & \cos \phi' \sin \theta' & \cos \phi'' \sin \theta'' \\ \sin \phi & \sin \phi' & \sin \phi'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta_1 \\ \cos \beta_2 \\ \cos \beta_3 \end{pmatrix},$$

可记为 $(e_1, e_2, e_3)(d_1, d_2, d_3)^T$ ，而在坐标系 $e, (e_1, e_2, e_3)$ 中，外磁场 B 的表达式为

$$(e_1, e_2, e_3) (-B \cos \alpha, 0, -B \sin \alpha)^T, \text{ 可联立方程 } \begin{pmatrix} -B \cos \alpha = d_1 \\ 0 = d_2 \\ -B \sin \alpha = d_3 \end{pmatrix}, \text{ 从而能够解出 } \varphi、$$

$\varphi'、\varphi''$ ，即电子罗盘与地磁场 B 的水平夹角为 φ ，与水平面夹角 φ' ，翻滚角 φ'' 。

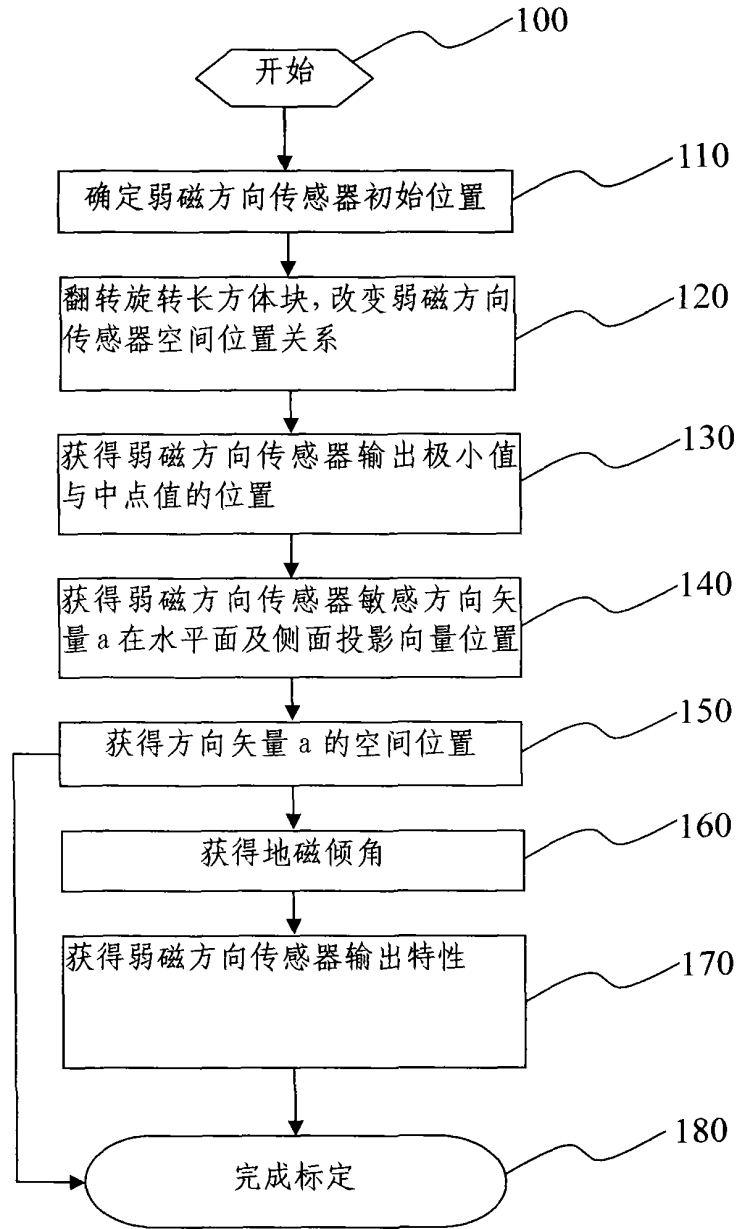


图 1

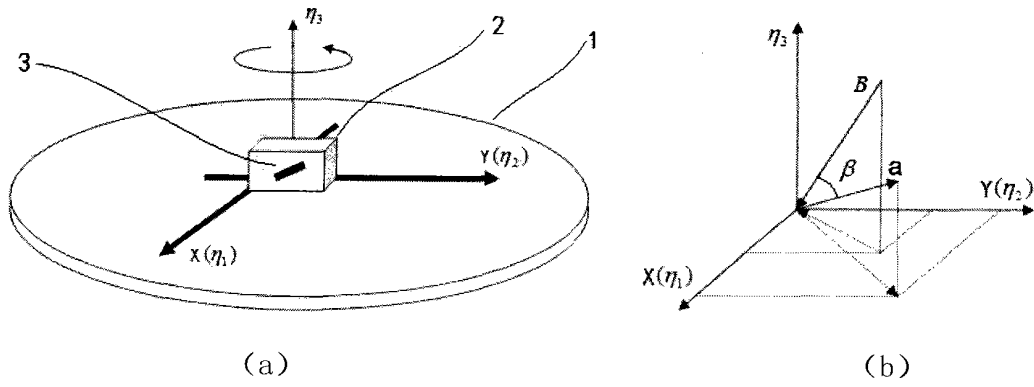


图 2

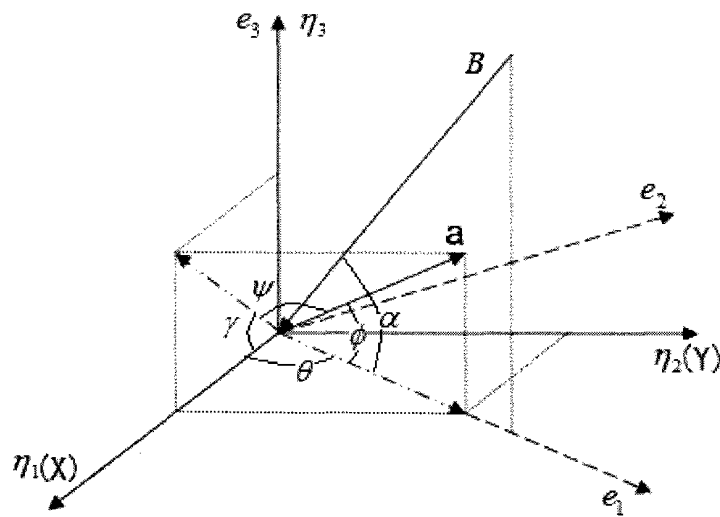


图 3

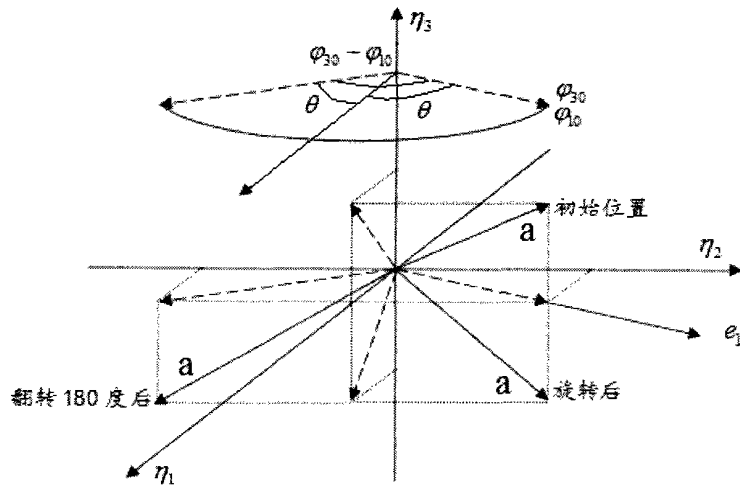


图 4

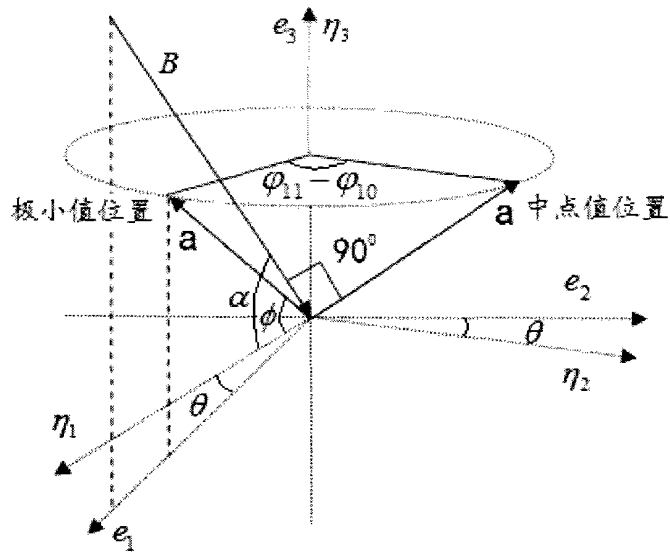


图 5