



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102853760 B

(45) 授权公告日 2015.06.17

(21) 申请号 201210353395.4

理想正交的快速校正算法》.《系统工程与电子技术》.2011,第33卷(第8期),1698-1702.

(22) 申请日 2012.09.13

审查员 赵令令

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区一匡街2号哈尔滨工业大学科学园E2栋400

(72) 发明人 颜世佐 叶青 王亚东 王常虹

(51) Int. Cl.

G01B 7/305(2006.01)

G01R 33/02(2006.01)

(56) 对比文件

CN 102236111 A, 2011.11.09, 全文.

JP 特开 2011-191067 A, 2011.09.29, 全文.

US 5953683 A, 1999.09.14, 全文.

CN 102353917 A, 2012.02.15, 全文.

殷勤 等.《电磁跟踪系统磁传感器三轴非

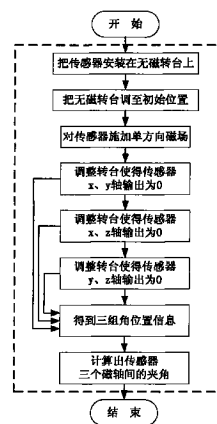
权利要求书3页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

一种三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法

(57) 摘要

一种三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法,采用三维磁场发生器和无磁转台,先把三维磁场发生器和无磁转台安装好,并把需要标定的磁传感器固定在转台上。由磁场发生器给出一个从上到下的大磁场,使得传感器测得的数值不为0;标记转台的0位,记录转台3轴角度值,旋转转台的3个轴,使得传感器,m、n轴输出为0,记录转台3轴角度值;再旋转转台的3个轴,使得传感器m、p轴输出为0,记录转台3轴角度值;继续旋转转台的3个轴,使得传感器n、p轴输出为0,记录转台3轴角度值。由所记录的各个角度值计算得出0-mn-p各轴与坐标系O3-x3y3z3各轴的变换关系,得出标定结果。本发明方法简单可行,精度高,误差小。



1. 一种三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法,采用三维磁场发生器和无磁转台,所述的三维磁场发生器由三组相互正交的赫姆霍兹线圈及相应的程控恒流源组成,程控恒流源由计算机控制,产生相应的恒定或预期变化的电流,从而在三组相互正交的赫姆霍兹线圈中心指定的局部空间,产生预期、可控的三维磁场,采用外加固定大磁场、通过记录传感器输出过零位置,进而进行计算得到标定数据,其特征在于,方法如下:

首先把三维磁场发生器和无磁转台安装好,并把需要标定的磁传感器固定在无磁转台上,由三维磁场发生器给出一个从上到下的大磁场,使得磁传感器处在磁场中,该磁场大小远大于环境磁场,使得磁传感器各测量轴测得的该磁场分量的数值不为 0 即为满量程,以提高过零的灵敏度并消除环境磁场的影响;

坐标系定义如下:选取惯性坐标系为外环坐标系 $O_0-x_0 y_0 z_0$;坐标原点 O_0 在无磁转台的旋转中心上, z_0 轴指向赫姆霍兹线圈的竖直方向,与竖直方向产生的磁场方向平行, x_0 轴指向水平方向与赫姆霍兹线圈一个产生水平磁场的方向平行, y_0 轴与 x_0 轴、 z_0 轴成右手正交坐标系,选取无磁转台初始状态,定义外环轴指向 x_0 轴方向、中环轴指向 y_0 轴方向、内环轴指向 z_0 轴方向时的状态为无磁转台初始状态,选取与中环框架固连的中环坐标系 $O_1-x_1 y_1 z_1$;坐标原点 O_1 在无磁转台的旋转中心上,初始时刻与 $O_0-x_0 y_0 z_0$ 重合;选取与内环框架固连的内环坐标系 $O_2-x_2 y_2 z_2$;坐标原点 O_2 在无磁转台的旋转中心上,初始时刻与 $O_1-x_1 y_1 z_1$ 重合;选取与夹具框架固连的目标坐标系 $O_3-x_3 y_3 z_3$;坐标原点 O_3 在无磁转台的旋转中心上,初始时刻与 $O_2-x_2 y_2 z_2$ 重合;选取非正交磁轴坐标系 $O-m n p$,坐标原点 O 在无磁转台的旋转中心上, m 、 n 、 p 分别为三轴磁传感器三个磁轴的真实方向;

通过给定的 z_0 方向的外加磁场,旋转无磁转台的 3 个轴,使得传感器 m 、 n 轴输出为 0,记录无磁转台 3 轴角度值;再旋转无磁转台的 3 个轴,使得传感器 m 、 p 轴输出为 0,记录无磁转台 3 轴角度值;继续旋转无磁转台的 3 个轴,使得传感器 n 、 p 轴输出为 0,记录无磁转台 3 轴角度值, $O-m n p$ 各轴方向的单位矢量 om 在 $O_3-x_3 y_3 z_3$ 中的坐标为 r_{11}, r_{21}, r_{31} ; on 在 $O_3-x_3 y_3 z_3$ 中的坐标为 r_{12}, r_{22}, r_{32} ; op 在 $O_3-x_3 y_3 z_3$ 中的坐标为 r_{13}, r_{23}, r_{33} ;

则有:

$$r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 1 \quad (1)$$

$$r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2 = 1 \quad (2)$$

$$r_{13}^2 + r_{23}^2 + r_{33}^2 = 1 \quad (3)$$

且从 $O-m n p$ 到 $O_3-x_3 y_3 z_3$ 的坐标变换为:

$${}^3R_T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

从 $O_3-x_3 y_3 z_3$ 到 $O_2-x_2 y_2 z_2$ 的坐标变换为:

$${}^2R_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

从 $0_2-x_2 y_2 z_2$ 到 $0_1-x_1 y_1 z_1$ 的坐标变换为：

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

从 $0_1-x_1 y_1 z_1$ 到 $0_0-x_0 y_0 z_0$ 的坐标变换为：

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

从 $0-mn p$ 到 $0_0-x_0 y_0 z_0$ 的坐标变换为：

$${}^0R_T = {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_T \quad (8)$$

其中：

α 为从初始状态到终止状态无磁转台外环轴转过的角度，三次试验转过的角度分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 ；

β 为从初始状态到终止状态无磁转台中环轴转过的角度，三次试验转过的角度分别为 β_1 、 β_2 、 β_3 ；

γ 为从初始状态到终止状态无磁转台内环轴转过的角度，三次试验转过的角度分别为 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 ；

对应于三次试验的旋转角度，三次试验从 $0-mn p$ 到 $0_0-x_0 y_0 z_0$ 的坐标变换分别为 ${}^0R_{T1}$ 、 ${}^0R_{T2}$ 、 ${}^0R_{T3}$ ；

记外加磁场强度为 H ，终止状态下外加磁场沿磁传感器三轴方向的磁场分量分别为 h_m 、 h_n 、 h_p ，则有：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T2} \begin{bmatrix} 0 \\ h_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T3} \begin{bmatrix} h_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

由 (9) 得到：

$$\cos \beta_1 \cos \gamma_1 r_{13} - \cos \beta_1 \sin \gamma_1 r_{23} + \sin \beta_1 r_{33} = 0 \quad (12)$$

$$(\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \gamma_1 + \cos \alpha_1 \sin \gamma_1) r_{13} + (-\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \gamma_1 + \cos \alpha_1 \cos \gamma_1) r_{23} - \sin \alpha_1 \cos \beta_1 r_{33} = 0 \quad (13)$$

由 (10) 得到：

$$\cos \beta_2 \cos \gamma_2 r_{12} - \cos \beta_2 \sin \gamma_2 r_{22} + \sin \beta_2 r_{32} = 0 \quad (14)$$

$$(\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \gamma_2 + \cos \alpha_2 \sin \gamma_2) r_{12} + (-\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \gamma_2 + \cos \alpha_2 \cos \gamma_2) r_{22} - \sin \alpha_2 \cos \beta_2 r_{32} = 0 \quad (15)$$

由 (11) 得到：

$$\cos \beta_3 \cos \gamma_3 r_{11} - \cos \beta_3 \sin \gamma_3 r_{21} + \sin \beta_3 r_{31} = 0 \quad (16)$$

$$(\sin \alpha_3 \sin \beta_3 \cos \gamma_3 + \cos \alpha_3 \sin \gamma_3) r_{11} + (-\sin \alpha_3 \sin \beta_3 \sin \gamma_3 + \cos \alpha_3 \cos \gamma_3) r_{21} - \sin \alpha_3 \cos \beta_3 r_{31} = 0 \quad (17)$$

解由方程 (1)-(3), 方程 (12)-(17) 所组成的齐次方程组, 能够解出 3R_T , 即传感器三个磁轴相对于目标坐标系的标定矩阵。

2. 根据权利要求 1 所述的一种三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法, 其特征在于: 对需要标定的磁传感器, 当环境磁场的影响无法忽略, 则需要一个磁屏蔽室, 三维磁场发生器和无磁转台安装在磁屏蔽室内。

一种三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法。

背景技术

[0002] 磁场探测尤其是弱磁场的精确探测已经涉及到国防建设、科学研究、工业生产以及日常生活等重要领域,如环境磁场监测、地磁场研究、石油矿藏勘探、磁性材料无损探伤、水面水下舰艇武器侦查、宇宙空间磁场测量等各个方面。要想对磁场进行精确探测,磁测方法与磁测仪器的研究是关键。

[0003] 磁场传感器是电子测量领域及发展高水平控制系统的关键器件之一,使用磁性材料制成的磁传感器及相关器件在电机控制、工业机器人、医疗电子、自动化等领域得到广泛的应用。而随着地磁导航技术及其他信息技术的发展,人们对磁传感器的大小、灵敏度、稳定性及功耗等提出了越来越高的要求,为此,国内外都致力于开发具有高灵敏度、快速响应和强抗干扰能力的新型磁传感器。

[0004] 近二三十年来,磁力法磁强计目前还在一定领域内使用,但其已逐步被磁通门磁强计等其它形式的磁强计所取代;磁感应法磁强计是最有效的脉冲强磁场测量仪器;磁通门磁强计应用广泛,特别是在弱磁场的测量中,且微型化是其发展进步的趋势;新效应的发现和应用,以及新材料和新工艺的出现,使得电磁效应法磁强计的应用范围进一步扩大,特别是巨磁阻、巨磁阻抗效应法在微弱磁场测量领域已显现出巨大的应用潜力;磁共振磁强计作为精密磁强计,在弱磁场测量领域仍占据重要地位;超导效应法磁强计仍然是最精密的磁场测量仪器,且随着高温 SQUID 技术的成熟,其应用范围将进一步扩大;基于磁光效应法的光纤磁场测量仪器适于测量强磁场,但随着基于磁致伸缩效应的光纤微弱磁场传感技术的进步,光纤磁场测量仪器在微弱磁场测量领域也将有新的应用空间。随着计算机、自动化、超大规模集成电路制造等技术的发展以及新材料和新工艺的出现,像其它仪器一样,高准确度、高稳定度、高分辨率、微型化、数字化、智能化是磁场测量技术及仪器发展的必然方向。

[0005] 目前,应用于静态磁场测量的传感器较多,其中三分量磁通门传感器的应用较为广泛,如用于舰艇磁场测量、地磁导航中地磁场测量、磁性检测站的磁场测量、水下定点磁场探测、金属探测、磁探伤等场合。

[0006] 三分量磁通门传感器是舰船磁场测量、地磁场测量、水中兵器引信及舰船导航中常用的仪器。这种传感器内部由三个螺线管作为其对三维磁场的敏感元件,这三个螺线管确定了一个正交的测量坐标系。但是由于加工工艺等原因,使这样一个由三个螺线管确定的坐标系存在坐标系三个坐标轴不完全正交带来的系统误差

[0007] 三轴磁强计和三轴亥姆霍兹线圈都要求互相垂直,但是由于加工工艺水平和安装工艺水平的限制,它们不可能做到完全垂直,这种非正交性对整个系统精度的影响非常突出,所以我们需要对它们的垂直度进行测量并校正。目前测量三轴非正交垂直度误差的方法有一些,这些方法有的精度不高,有的对设备要求过于苛刻,还有测量仪器量程的限制,

目前还没有一种解决这些问题的一个很好的方法,重要的是还没有一种对三轴磁强计磁轴垂直度进行标定的方法。

发明内容

[0008] 本发明针对目前三轴非正交垂直度误差测量方法的弊端,提出一种可以实现高精度、不受测量仪器量程限制、不受产生磁场精度限制的三轴磁强计磁轴垂直度标定方法。

[0009] 本发明所采用的技术如下:

[0010] 本发明采用三维磁场发生器和无磁转台,该三维磁场发生器由三组相互正交的赫姆霍兹线圈及相应的程控恒流源组成,程控恒流源由计算机控制,产生相应的恒定或预期变化的电流,从而在三组相互正交的赫姆霍兹线圈中心指定的局部空间,产生预期、可控的三维磁场,方法为:首先把三维磁场发生器和无磁转台安装好,并把需要标定的磁传感器固定在转台上,由三维磁场发生器给出一个从上到下的大磁场,使得磁传感器处在磁场中,该磁场大小远大于环境磁场,使得传感器各测量轴测得该磁场分量的数值不为0即为满量程,以提高过零的灵敏度并消除环境磁场的影响;各个坐标系定义如下:选取惯性坐标系为外环坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$;坐标原点 O_0 在转台的旋转中心上, z_0 轴指向磁场发生装置的竖直方向,与竖直方向产生的磁场方向平行, x_0 轴指向水平方向与磁场发生装置一个产生水平磁场的方向平行, y_0 轴与 x_0 轴、 z_0 轴成右手正交坐标系。选取无磁转台初始状态,定义外环轴指向 x_0 轴方向、中环轴指向 y_0 轴方向、内环轴指向 z_0 轴方向时的状态为转台初始状态。选取与中环框架固连的中环坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$;坐标原点 O_1 在转台的旋转中心上,初始时刻与 $O_0-x_0y_0z_0$ 重合。选取与内环框架固连的内环坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$;坐标原点 O_2 在无磁转台的旋转中心上,初始时刻与 $O_1-x_1y_1z_1$ 重合。选取与夹具框架固连的目标坐标系 $O_3-x_3y_3z_3$;坐标原点 O_3 在无磁转台的旋转中心上,初始时刻与 $O_2-x_2y_2z_2$ 重合。选取非正交磁轴坐标系 $O-mn p$,坐标原点 O 在无磁转台的旋转中心上, m 、 n 、 p 分别为三轴磁传感器三个磁轴的真实方向。

[0011] 通过给定的 z_0 方向的外加磁场,旋转无磁转台的3个轴,使得传感器 m 、 n 轴输出为0,记录无磁转台3轴角度值;再旋转无磁转台的3个轴,使得传感器 m 、 p 轴输出为0,记录转台3轴角度值;继续旋转转台的3个轴,使得传感器 n 、 p 轴输出为0,记录转台3轴角度值。 $O-mn p$ 各轴方向的单位矢量 om 在 $O_3-x_3y_3z_3$ 中的坐标为 r_{11}, r_{21}, r_{31} ; on 在 $O_3-x_3y_3z_3$ 中的坐标为 r_{12}, r_{22}, r_{32} ; op 在 $O_3-x_3y_3z_3$ 中的坐标为 r_{13}, r_{23}, r_{33} 。

[0012] 则有:

$$[0013] \quad r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 1 \quad (1)$$

$$[0014] \quad r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2 = 1 \quad (2)$$

$$[0015] \quad r_{13}^2 + r_{23}^2 + r_{33}^2 = 1 \quad (3)$$

[0016] 且从 $O-mn p$ 到 $O_3-x_3y_3z_3$ 的坐标变换为:

$$[0017] \quad {}^3R_T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0018] 从 $O_3-x_3y_3z_3$ 到 $O_2-x_2y_2z_2$ 的坐标变换为:

$$[0019] \quad {}^2R_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0020] 从 $0_2-x_2y_2z_2$ 到 $0_1-x_1y_1z_1$ 的坐标变换为：

$$[0021] \quad {}^1R_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0022] 从 $0_1-x_1y_1z_1$ 到 $0_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换为：

$$[0023] \quad {}^0R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0024] 从 $0-m n p$ 到 $0_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换为：

$$[0025] \quad {}^0R_T = {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_T \quad (8)$$

[0026] 其中：

[0027] α 为从初始状态到终止状态转台外环轴转过的角度，三次试验转过的角度分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 ； β 为从初始状态到终止状态转台中环轴转过的角度，三次试验转过的角度分别为 β_1 、 β_2 、 β_3 ； γ 为从初始状态到终止状态转台内环轴转过的角度，三次试验转过的角度分别为 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 。对应于三次试验的旋转角度，三次试验从 $0-mnp$ 到 $0_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换分别为 ${}^0R_{T1}$ 、 ${}^0R_{T2}$ 、 ${}^0R_{T3}$ 。

[0028] 记外加磁场强度为 H ，终止状态下外加磁场沿磁传感器三轴方向的磁场分量分别为 h_m 、 h_n 、 h_p 。

[0029] 则有：

$$[0030] \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[0031] \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T2} \begin{bmatrix} 0 \\ h_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[0032] \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T3} \begin{bmatrix} h_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0033] 由 (9) 可得：

$$[0034] \quad \cos \beta_1 \cos \gamma_1 r_{13} - \cos \beta_1 \sin \gamma_1 r_{23} + \sin \beta_1 r_{33} = 0 \quad (12)$$

$$[0035] \quad (\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \gamma_1 + \cos \alpha_1 \sin \gamma_1) r_{13} + (-\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \gamma_1 + \cos \alpha_1 \cos \gamma_1) r_{23} - \sin \alpha_1 \cos \beta_1 r_{33} = 0 \quad (13)$$

[0036] 由 (10) 可得：

$$[0037] \quad \cos \beta_2 \cos \gamma_2 r_{12} - \cos \beta_2 \sin \gamma_2 r_{22} + \sin \beta_2 r_{32} = 0 \quad (14)$$

$$[0038] \quad (\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \gamma_2 + \cos \alpha_2 \sin \gamma_2) r_{12} + (-\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \gamma_2 + \cos \alpha_2 \cos \gamma_2) r_{22} - \sin \alpha_2 \cos \beta_2 r_{32} = 0$$

$$r_{22} - \sin \alpha_2 \cos \beta_2 r_{32} = 0 \quad (15)$$

[0039] 由 (11) 可得：

$$\cos \beta_3 \cos \gamma_3 r_{11} - \cos \beta_3 \sin \gamma_3 r_{21} + \sin \beta_3 r_{31} = 0 \quad (16)$$

$$(\sin \alpha_3 \sin \beta_3 \cos \gamma_3 + \cos \alpha_3 \sin \gamma_3) r_{11} + (-\sin \alpha_3 \sin \beta_3 \sin \gamma_3 + \cos \alpha_3 \cos \gamma_3) r_{21} - \sin \alpha_3 \cos \beta_3 r_{31} = 0 \quad (17)$$

[0042] 解由方程 (1)-(3), 方程 (12)-(17) 所组成的齐次方程组, 可以解出 3R_1 , 即传感器三个磁轴相对于传感器固定坐标系的标定矩阵。

[0043] 本发明方法简单可行, 精度高, 采用过零法来标定三轴磁传感器磁轴的垂直度不依赖于传感器的量程, 适用于任何量程的传感器。不依赖于其他磁场测量仪器, 不会带来其他磁场测量仪器的测量误差。测量为静态测量, 不会带来动态测量误差。标定的是真实磁轴间的夹角, 不会带来磁传感器测量轴与真实磁轴之间的误差。

附图说明

[0044] 图 1 为本发明流程图；

[0045] 图 2 为三轴转台示意图；

具体实施方式

[0046] 本系统采用无磁转台和三维磁场发生器。

[0047] 三维磁场发生器, 由三组相互正交的赫姆霍兹线圈及相应的程控恒流源组成。程控恒流源由计算机控制, 可以产生相应的恒定或预期变化的电流, 从而在三组相互正交的赫姆霍兹线圈中心指定的局部空间, 产生预期、可控的三维磁场。三轴磁传感器磁轴垂直度的标定方法是: 首先把三维磁场发生器和无磁转台安装好, 并把需要标定的磁传感器固定在转台上。由磁场发生器给出一个从上到下的大磁场, 使得磁传感器处在磁场中, 该磁场大小远大于环境磁场, 使得传感器磁轴与标定场一旦不垂直, 磁轴测得的数值就会超过量程, 以提高过零的灵敏度并消除环境磁场的影响。如果是弱磁传感器, 环境磁场的影响无法忽略的情况, 则需要一个磁屏蔽室, 创造一个无磁环境, 标定设备安装在磁屏蔽室内。坐标系定义如下: 选取惯性坐标系为外环坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$: 坐标原点 O_0 在转台的旋转中心上, z_0 轴指向磁场发生装置的竖直方向, 与竖直方向产生的磁场方向平行, x_0 轴指向磁场发生装置的水平方向与一个水平方向产生的磁场方向平行, y_0 轴与 x_0 轴、 z_0 轴成右手正交坐标系, 选取转台初始状态, 定义外环轴指向 x_0 轴方向、中环轴指向 y_0 轴方向、内环轴指向 z_0 轴方向时的状态为转台初始状态, 选取与中环框架固连的中环坐标系 $O_1-x_1y_1z_1$: 坐标原点 O_1 在转台的旋转中心上, 初始时刻与 $O_0-x_0y_0z_0$ 重合, 选取与内环框架固连的内环坐标系 $O_2-x_2y_2z_2$: 坐标原点 O_2 在转台的旋转中心上, 初始时刻与 $O_1-x_1y_1z_1$ 重合, 选取与夹具框架固连的目标坐标系 $O_3-x_3y_3z_3$: 坐标原点 O_3 在转台的旋转中心上, 初始时刻与 $O_2-x_2y_2z_2$ 重合, 选取非正交磁轴坐标系 $O-mn p$, 坐标原点 O 在转台的旋转中心上, m 、 n 、 p 分别为三轴磁传感器三个磁轴的真实方向；

[0048] 通过给定的 z_0 方向的外加磁场, 旋转转台的 3 个轴, 使得传感器 m 、 n 轴输出为 0, 记录转台 3 轴角度值; 再旋转转台的 3 个轴, 使得传感器 m 、 p 轴输出为 0, 记录转台 3 轴角度值; 继续旋转转台的 3 个轴, 使得传感器 n 、 p 轴输出为 0, 记录转台 3 轴角度值, $O-mn p$ 各

轴方向的单位矢量 om 在 $O_3-x_3y_3z_3$ 中的坐标为 r_{11}, r_{21}, r_{31} ; on 在 $O_3-x_3y_3z_3$ 中的坐标为 r_{12}, r_{22}, r_{32} ; op 在 $O_3-x_3y_3z_3$ 中的坐标为 r_{13}, r_{23}, r_{33} ;

[0049] 则有:

$$[0050] \quad r_{11}^2 + r_{21}^2 + r_{31}^2 = 1 \quad (1)$$

$$[0051] \quad r_{12}^2 + r_{22}^2 + r_{32}^2 = 1 \quad (2)$$

$$[0052] \quad r_{13}^2 + r_{23}^2 + r_{33}^2 = 1 \quad (3)$$

[0053] 且从 $O-mn p$ 到 $O_3-x_3y_3z_3$ 的坐标变换为:

$$[0054] \quad {}^3R_T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0055] 从 $O_3-x_3y_3z_3$ 到 $O_2-x_2y_2z_2$ 的坐标变换为:

$$[0056] \quad {}^2R_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0057] 从 $O_2-x_2y_2z_2$ 到 $O_1-x_1y_1z_1$ 的坐标变换为:

$$[0058] \quad {}^1R_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0059] 从 $O_1-x_1y_1z_1$ 到 $O_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换为:

$$[0060] \quad {}^0R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0061] 从 $O-mn p$ 到 $O_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换为:

$$[0062] \quad {}^0R_T = {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_T \quad (8)$$

[0063] 其中,

[0064] α 为从初始状态到终止状态转台外环轴转过的角度,三次试验转过的角度分别为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$;

[0065] β 为从初始状态到终止状态转台中环轴转过的角度,三次试验转过的角度分别为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$;

[0066] γ 为从初始状态到终止状态转台内环轴转过的角度,三次试验转过的角度分别为 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$;

[0067] 对应于三次试验的旋转角度,三次试验从 $O-mnp$ 到 $O_0-x_0y_0z_0$ 的坐标变换分别为 ${}^0R_{T1}, {}^0R_{T2}, {}^0R_{T3}$;

[0068] 记外加磁场强度为 H ,终止状态下外加磁场沿磁传感器三轴方向的磁场分量分别为 h_m, h_n, h_p ,

[0069] 则有:

$$[0070] \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ h_p \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[0071] \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T2} \begin{bmatrix} 0 \\ h_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[0072] \quad \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{bmatrix} = {}^0R_{T3} \begin{bmatrix} h_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0073] 由 (9) 可得：

$$[0074] \quad \cos \beta_1 \cos \gamma_1 r_{13} - \cos \beta_1 \sin \gamma_1 r_{23} + \sin \beta_1 r_{33} = 0 \quad (12)$$

$$[0075] \quad (\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \cos \gamma_1 + \cos \alpha_1 \sin \gamma_1) r_{13} + (-\sin \alpha_1 \sin \beta_1 \sin \gamma_1 + \cos \alpha_1 \cos \gamma_1) r_{23} - \sin \alpha_1 \cos \beta_1 r_{33} = 0 \quad (13)$$

[0076] 由 (10) 可得：

$$[0077] \quad \cos \beta_2 \cos \gamma_2 r_{12} - \cos \beta_2 \sin \gamma_2 r_{22} + \sin \beta_2 r_{32} = 0 \quad (14)$$

$$[0078] \quad (\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \cos \gamma_2 + \cos \alpha_2 \sin \gamma_2) r_{12} + (-\sin \alpha_2 \sin \beta_2 \sin \gamma_2 + \cos \alpha_2 \cos \gamma_2) r_{22} - \sin \alpha_2 \cos \beta_2 r_{32} = 0 \quad (15)$$

[0079] 由 (11) 可得：

$$[0080] \quad \cos \beta_3 \cos \gamma_3 r_{11} - \cos \beta_3 \sin \gamma_3 r_{21} + \sin \beta_3 r_{31} = 0 \quad (16)$$

$$[0081] \quad (\sin \alpha_3 \sin \beta_3 \cos \gamma_3 + \cos \alpha_3 \sin \gamma_3) r_{11} + (-\sin \alpha_3 \sin \beta_3 \sin \gamma_3 + \cos \alpha_3 \cos \gamma_3) r_{21} - \sin \alpha_3 \cos \beta_3 r_{31} = 0 \quad (17)$$

[0082] 解由方程 (1)-(3), 方程 (12)-(17) 所组成的齐次方程组, 可以解出 3R_T , 即传感器三个磁轴相对于传感器固定坐标系的标定矩阵。

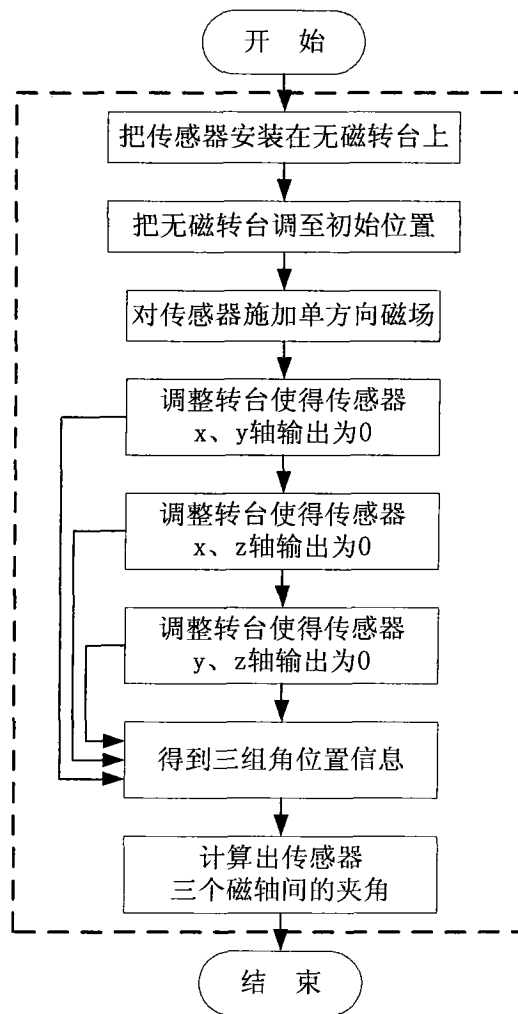


图 1

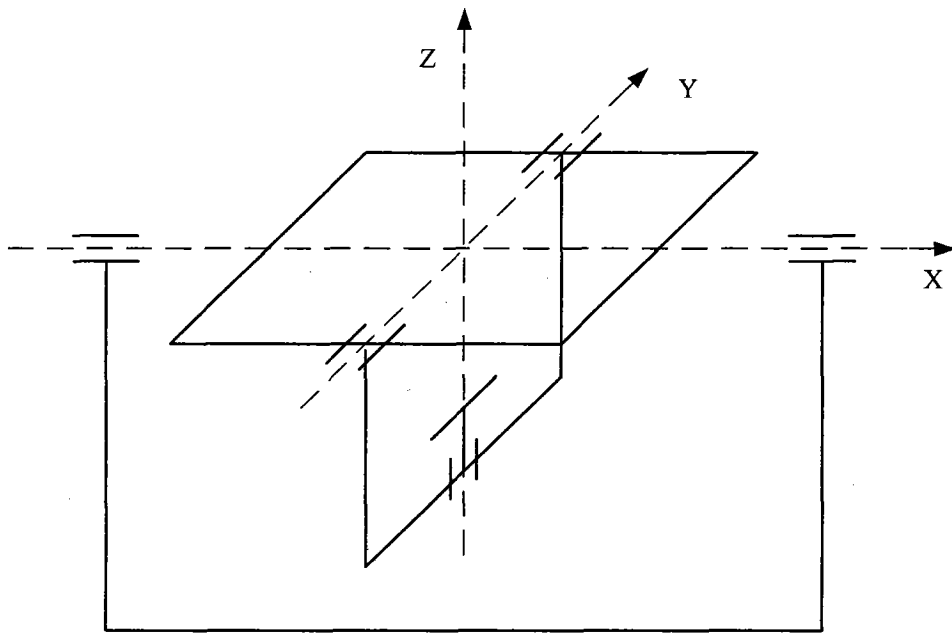


图 2