

证书号第2646445号



# 发明专利证书

发明名称：一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法

发明人：石波；刘云鹏；马跃；张从跃；阳凡林；景冬；卢秀山；刘振

专利号：ZL 2015 1 0809463.7

专利申请日：2015年11月20日

专利权人：山东科技大学

授权公告日：2017年10月03日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发本证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年，自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年11月20日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长  
申长雨

申长雨



2017年10月03日



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105425246 B

(45)授权公告日 2017. 10. 03

(21)申请号 201510809463.7

G01S 7/497(2006.01)

(22)申请日 2015.11.20

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105425246 A

EP 2866052 A1, 2015.04.29,

WO 2014/165781 A1, 2014.10.09,

CN 102927974 A, 2013.02.13,

CN 104019803 A, 2014.09.03,

(43)申请公布日 2016.03.23

(73)专利权人 山东科技大学

地址 266590 山东省青岛市经济技术开发区前湾港路579号

余建伟等.中海达船载水上水下一体化三维移动测量系统.《测绘通报》.2013,(第7期),第119-120页.

(72)发明人 石波 刘云鹏 马跃 张从跃

阳凡林 景冬 卢秀山 刘振

阳凡林等.多波束勘测运动传感器偏移的改正方法.《武汉大学学报 信息科学版》.2010,第35卷(第7期),第816-820页.

(74)专利代理机构 济南舜源专利事务有限公司 37205

代理人 陈海滨

张静远等.水下地形辅助导航技术的研究与应用进展.《国防科技大学学报》.2015,第37卷(第3期),第128-135页.

(51)Int.Cl.

G01S 17/89(2006.01)

审查员 陈曦

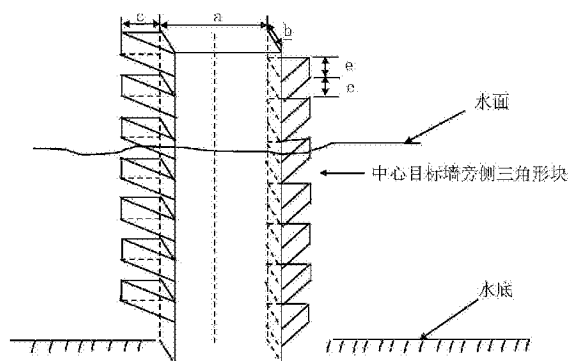
权利要求书2页 说明书10页 附图2页

### (54)发明名称

一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法

### (57)摘要

本发明公开了一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密校准方法,属于海洋测绘技术领域,本发明在获取船载多传感器测量系统整体粗标定参数以及激光扫描仪的精检校参数基础上进行,本发明根据精检校后的激光扫描仪测量数据可作为目标物体的准确空间点云数据,以此为基础通过比较多波束测量数据与激光扫描仪测量数据,以粗标定获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作初值,获得多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角度的精确修正值,实现测量系统整体校准。本发明集成了激光扫描仪和多波束测深仪,可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据,实现了船载多传感器测量系统在水池内的精密整体检校。



1. 一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,采用船载水岸线一体化测量系统,其近岸水上部分包括激光扫描仪和惯性导航系统,水下部分包括多波束测深仪,水上部分与水下部分通过一个平台支架固连;其中的激光扫描仪用于测量近岸水上地形数据,多波束测深仪用于测量水下地形数据,惯性导航系统用于为激光扫描仪和多波束测深仪提供定位信息、时间信息、姿态信息和航向信息;

其特征在于:所述的在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,按照如下步骤进行:

步骤1:建造水池,在水池中建造中心目标墙并在中心目标墙的两侧建造依次等间距分布的三角形块,中心目标墙的其中一侧等间距分布的三角形块的第一位三角形块低于另一侧等间距分布的三角形块的第一位三角形块,将中心目标墙以及两侧等间距分布的三角形块作为检校目标物;以及建立ENU坐标系;

步骤2:通过激光扫描仪和多波束测深仪同时进行信息采集,针对检校目标物获取水上、水下测量点数据,分别提取水池中的中心目标墙和中心目标墙两侧三角形块的测量点信息;

步骤3:计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在横摇、纵摇和艏摇方向的角度偏转修正量;

步骤4:在完成以上步骤基础上,以激光扫描仪测量的数据为准,根据中心目标墙和两侧三角形块已知尺寸,获取多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系偏移量的修正值。

2. 根据权利要求1所述的在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,其特征在于:在步骤3中,具体包括

步骤3.1:对船载一体化测量系统进行整体粗标定,获取激光扫描仪坐标系以及多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角;

步骤3.2:对激光扫描仪进行精检校,获得激光扫描仪的精检校参数;

步骤3.3:以获得的激光扫描仪的精检校参数为基础,以粗标定获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作为初始值,利用检校目标物在水上水下保持尺寸与方位一致,选取分别通过多波束测深仪和激光扫描仪获取的测量点数据进行拟合的平面;

步骤3.4:以通过激光扫描仪获取的测量点数据拟合的平面为准,与多波束测深仪测量数据拟合的平面进行比对;

步骤3.5:在步骤1中建立的ENU坐标系下,计算通过多波束测深仪获取的测量点数据拟合的平面相对于通过激光扫描仪获取的测量点数据拟合的平面在横摇、纵摇和艏摇方向的偏转角度,并确定偏转角度的正负方向;

步骤3.6:根据步骤3.5中得到的角度偏转量,重新归算多波束测量数据到地理坐标系下,并迭代求解该角度偏转量,最终获取多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在横摇、纵摇和艏摇方向的角度偏转修正量。

3. 根据权利要求1所述的在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,其特征在于:在步骤4中,具体包括

步骤4.1:针对检校目标物的中心目标墙,分别选取通过激光扫描仪和多波束测深仪获

取的水面上下两平面内测量点数据,并分别求取水面上下两平面内测量点数据在ENU坐标系的X轴方向的坐标值并取平均值,则水面上下两平面内的测量点数据在X轴方向的平均值之差即为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在ENU坐标系的X轴方向的偏移量的修正值;

步骤4.2:针对检校目标物中的两侧三角形块,分别选取通过激光扫描仪和多波束测深仪获取的水面上下两水平面内测量点数据,并分别求取水面上下两平面内测量点数据在ENU坐标系的Z轴方向的坐标值并取平均值,即得到水面上下两水平面在ENU坐标系的Z轴方向的实际距离值;根据设计尺寸获得水上三角形块与水下三角形块的平面高度差,并将此高度差作为ENU坐标系的Z轴方向的距离真值;将两平面测量的实际距离值与获得的距离真值求差,即得到多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在ENU坐标系的Z轴方向的偏移量的修正值;

步骤4.3:针对检校目标物中的两侧三角形块,分别选取通过激光扫描仪测量的数据拟合的平面和多波束测深仪测量的数据拟合的平面,将两拟合的平面投影到底面后获得两条在水平面内的直线,将此两条直线分别与平行于ENU坐标系的Y轴的直线求交点,两交点在ENU坐标系的Y轴方向的偏差即为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在ENU坐标系的Y轴方向的偏移量的修正值;

步骤4.4:获取的多波束测深仪测量的数据相对于激光扫描仪测量的数据在ENU坐标系的X轴、Y轴、Z轴三个方向的偏移量即为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系偏移量的修正值。

## 一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及海洋测绘技术领域,具体涉及一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法。

### 背景技术

[0002] 激光扫描系统可快速获取水面以上大量点云数据,多波束测深仪能够快速获取海底大面积海底地形信息,集成激光扫描仪和多波束测深仪的“船载水上水下一体化测量系统”可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据,解决近岸海岸带和滩涂地形测量问题。“船载水上水下一体化测量系统”的整体检校是保障测量精度的重要方面。国内外对综合测量系统的整体检校方法少有报导,因此对于“船载水上水下一体化测量系统”整体检校方法有必要进行研究和实施,以保障一体化测量精度。

### 发明内容

[0003] 针对现有技术中存在的上述技术问题,本发明提出了一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,设计合理,提高了测量数据的准确性,具有良好的效果。

[0004] 为了实现上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0005] 一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,采用船载水岸线一体化测量系统,其近岸水上部分包括激光扫描仪和惯性导航系统,水下部分包括多波束测深仪,水上部分与水下部分通过一个平台支架固连;其中的激光扫描仪用于测量近岸水上地形数据,多波束测深仪用于测量水下地形数据,惯性导航系统用于为激光扫描仪和多波束测深仪提供定位信息、时间信息、姿态信息和航向信息;

[0006] 所述的在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,按照如下步骤进行:

[0007] 步骤1:建造水池,在水池中建造中心目标墙并在中心目标墙的两侧建造依次等间距分布的三角形块,中心目标墙的其中一侧等间距分布的三角形块的第一位三角形块低于另一侧等间距分布的三角形块的第一位三角形块,将中心目标墙以及两侧等间距分布的三角形块作为检校目标物;以及建立ENU坐标系;

[0008] 步骤2:通过激光扫描仪和多波束测深仪同时进行信息采集,针对检校目标物获取水上、水下测量点数据,分别提取水池一侧中心目标墙和两侧三角形块的测量点信息;

[0009] 步骤3:计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在横摇、纵摇和艏摇方向的角度偏转修正量;

[0010] 步骤4:在完成以上步骤基础上,以激光扫描仪测量的数据为准,根据中心目标墙和两侧三角形块已知尺寸,获取多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系偏移量的修正值。

[0011] 优选地,在步骤3中,具体包括

[0012] 步骤3.1:对船载一体化测量系统进行整体粗标定,获取激光扫描仪坐标系以及多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角;

[0013] 步骤3.2:对激光扫描仪进行精检校,获得激光扫描仪的精检校参数;

[0014] 步骤3.3:以获得的激光扫描仪的精检校参数为基础,以粗标定获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作为初始值,利用检校目标物在水上水下保持尺寸与方位一致,选取分别通过多波束测深仪和激光扫描仪获取的测量点数据进行拟合的平面;

[0015] 对测量船经过可测量获得的三个竖直平面进行了标识:P1、P2、P3。对应水上部分激光扫描仪测量数据获取平面为 $P_{L1}$ 、 $P_{L2}$ 、 $P_{L3}$ ;对应水下部分多波束测深仪测量数据拟合平面为 $P_{M1}$ 、 $P_{M2}$ 、 $P_{M3}$ 。此外,为对纵摇方向进行偏转角度计算,定义平面P4,对应水上部分激光扫描仪测量数据获取平面为 $P_{L4}$ ,该平面同时垂直于平面 $P_{L1}$ 与平面 $P_{L2}$ ;对应水下部分多波束测深仪测量数据拟合平面为 $P_{M4}$ ,该平面同时垂直于平面 $P_{M1}$ 与平面 $P_{M2}$ 。

[0016] 其中对应平面的平面方程为:

$$[0017] \quad P_{Li}: a_{Li}x + b_{Li}y + c_{Li}z = d_{Li}$$

$$[0018] \quad P_{Mi}: a_{Mi}x + b_{Mi}y + c_{Mi}z = d_{Mi}$$

[0019] 其中,  $i = 1, 2, 3, 4$ 。

[0020]  $P_{L2}$ 和 $P_{M2}$ 用于计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在横摇方向的角度偏转量; $P_{L3}$ 和 $P_{M3}$ 用于计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在艏摇方向的角度偏转量;由激光扫描仪方面同时垂直于 $P_{L1}$ 与 $P_{L2}$ 的平面 $P_{L4}$ 和多波束测深仪方面同时垂直于 $P_{M1}$ 与 $P_{M2}$ 的平面 $P_{M4}$ 计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在纵摇方向的角度偏转量。

[0021] 步骤3.4:以通过激光扫描仪获取的测量点数据拟合的平面为准,与多波束测深仪测量数据拟合的平面进行比对;

[0022] 步骤3.5:在步骤1中建立的ENU坐标系下,计算通过多波束测深仪获取的测量点数据拟合的平面相对于通过激光扫描仪获取的测量点数据拟合的平面在横摇、纵摇和艏摇方向的偏转角度,并确定偏转角度的正负方向;

[0023] 使船右侧靠近目标物并从目标物左侧沿目标物中心平面水平方向航行,使船航行时惯性导航系统的坐标轴向与ENU坐标系轴向一致。平面的法向量只选取朝向目标物外侧的法向量进行比较,此时进行计算法向量间的夹角余弦值皆为正值。

[0024] 横摇方向偏转夹角大小与方向确定:

[0025] 首先计算平面 $P_{L2}$ 和平面 $P_{M2}$ 法向量的夹角,然后取平面 $P_{L2}$ 和平面 $P_{M2}$ 的法向量分别与向量 $(0, 0, 1)$ 求夹角余弦值,若多波束测深仪所求的余弦值小于激光扫描仪所求余弦值,定义多波束测深仪相对于激光扫描仪横摇角度偏差 $\delta_\gamma$ 为正值;反之,若多波束测深仪所求的余弦值大于激光扫描仪所求余弦值,则定义多波束测深仪相对于激光扫描仪横摇角度偏差 $\delta_\gamma$ 为负值。

[0026] 艏摇方向偏转角度大小与方向确定:

[0027] 首先计算平面 $P_{L3}$ 和平面 $P_{M3}$ 法向量的夹角,然后取平面 $P_{L3}$ 和平面 $P_{M3}$ 的法向量分别与 $P_{L2}$ 平面的法向量求夹角余弦值,若多波束测深仪所求的余弦值小于激光扫描仪所求余弦值,定义多波束测深仪相对于激光扫描仪艏摇角度偏差 $\delta_\phi$ 为负值;反之,若多波束测深仪所求余弦值大于激光扫描仪所求余弦值,则定义多波束测深仪相对于激光扫描仪艏摇角度 $\delta_\phi$

为正值。

[0028] 纵摇方向偏转角度大小与方向确定：

[0029] 首先计算平面 $P_{L3}$ 和平面 $P_{M3}$ 法向量的夹角，然后取平面 $P_{M4}$ 法向量和平面 $P_{L4}$ 法向量分别与 $P_{L1}$ 法向量求夹角余弦值，若多波束测深仪所求的余弦值小于激光扫描仪所求余弦值，定义多波束测深仪平面相对于激光扫描仪平面纵摇偏转角 $\delta_\theta$ 为正值；反之，若多波束测深仪所求的余弦值大于激光扫描仪所求余弦值，定义多波束测深仪平面相对于激光扫描仪平面纵摇偏转角 $\delta_\theta$ 为负值。

[0030] 步骤3.6：获取的三个方向角度偏转修正量 $(\delta_\gamma, \delta_\theta, \delta_\varphi)$ 分别为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系下的横摇、纵摇和艏摇的角度偏转修正量，单位为弧度。

[0031] 考虑到小角的情况下，对于角度修正量的近似旋转矩阵为

$$[0032] \quad \Omega_b^b = \begin{pmatrix} 0 & -\delta_\varphi & \delta_\gamma \\ \delta_\varphi & 0 & -\delta_\theta \\ -\delta_\gamma & \delta_\theta & 0 \end{pmatrix}$$

[0033] 利用以上旋转矩阵对多波束原始数据进行修正，将测量数据重新归算到地心地固坐标系下，归算公式为：

$$[0034] \quad \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{oe} + R_l^e \cdot R_b^l \cdot \left[ (I + \Omega_b^b) \cdot R_m^{b*} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}_b + \begin{bmatrix} \Delta l_x \\ \Delta l_y \\ \Delta l_z \end{bmatrix}_b \right]$$

[0035] 其中： $[X_e \ Y_e \ Z_e]$ 为地心地固坐标系下坐标； $[X \ Y \ Z]_{oe}$ 为惯性导航系统中心在地心地固坐标系下坐标； $R_l^e$ 为当地水平坐标系向地心地固坐标系的旋转矩阵，此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系； $R_b^l$ 为惯性导航系统坐标系向当地水平坐标系的旋转矩阵，此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系； $R_m^{b*}$ 为粗标定后多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的初始旋转矩阵； $(I + \Omega_b^b)$ 为校准获得的对粗标定后多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系角度偏转的修正矩阵， $I$ 为单位阵； $[X \ Y \ Z]_m$ 为多波束测深仪坐标系下的测量点坐标； $[l_x \ l_y \ l_z]_b$ 为粗标定后多波束测深仪坐标系中心相对惯性导航系统中心的初始偏移量； $[\Delta l_x \ \Delta l_y \ \Delta l_z]_b$ 为多波束测深仪坐标系中心相对于惯性导航系统坐标系中心偏移量的修正量，当前未进行偏移量的修正量计算，因此当前步骤可设置为零。

[0036] 重新转换测量点坐标到以建筑物中心点为原点建立的ENU坐标系下坐标，求解多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向角度偏转的修正量，改正到前一次的角度偏转修正量中，迭代该过程直到多波束测量平面的法向量与激光扫描仪测量平面的法向量夹角小于一定阈值时结束迭代，该阈值由实际情况确定。整个迭代过程获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向旋转量的修正量为最终角度检校结果。

[0037] 优选地，在步骤4中，包括

[0038] 步骤4.1：对多波束测量数据进行以上检校角度修正后，针对检校目标物的中心目标墙，分别选取通过激光扫描仪和多波束测深仪获取的水面上两平面内测量点数据，并



分别求取水面上上下两平面内测量点数据在ENU坐标系的X轴方向的坐标值并取平均值,则水面上上下两平面内的测量点数据在X轴方向的平均值之差即为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在ENU坐标系的X轴方向的偏移量的修正值;

[0039] 步骤4.2:针对检校目标物中的两侧三角形块,存在一个与中心墙平面成一定角度的竖直面,还存在上下两个垂直于中心墙平面的水平面,激光扫描仪和多波束可以分别测量到水上和水下三角形块的水平面,分别选取通过激光扫描仪和多波束测深仪获取的水面上上下两水平面内测量点数据,并分别求取水面上上下两平面内测量点数据在ENU坐标系的Z轴方向的坐标值并取平均值,即得到水面上上下两水平面在ENU坐标系的Z轴方向的实际距离值;根据设计尺寸获得水上三角形块与水下三角形块的平面高度差,并将此高度差作为ENU坐标系的Z轴方向的距离真值;将两平面测量的实际距离值与获得的距离真值求差,即得到多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在ENU坐标系的Z轴方向的偏移量的修正值;

[0040] 步骤4.3:取激光扫描仪数据拟合 $PL_1$ 平面和多波束数据拟合 $PM_1$ 平面,将他们投影到底面后获得两条在XOY平面的直线,利用平行于ENU坐标系的Y轴的直线分别与激光扫描仪测量的数据在底面投影直线和多波束测深仪测量的数据在底面投影直线求交点,两交点在ENU坐标系的Y轴方向的偏差即为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在ENU坐标系的Y轴方向的偏移量的修正值;

[0041] 步骤4.4:获取的多波束测深仪测量的数据相对于激光扫描仪测量的数据在ENU坐标系的X轴、Y轴、Z轴三个方向的偏移量即为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系偏移量的修正值。

[0042] 本发明所带来的有益技术效果:

[0043] 本发明提出了一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,与现有技术相比,一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法,集成了激光扫描仪和多波束测深仪,可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据,解决近岸海岸带和滩涂地形测量问题;激光扫描仪精检校获取的偏移量和旋转角度具有较高精度,以精检校后激光扫描仪测量的数据为准,求取多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系精确的角度偏转和距离偏移修正值,实现了船载水上水下一体化测量系统整体精密校准,对固定目标检校物进行一体化测量。

[0044] 本发明主要适用于水池或码头等有固定目标检校物的区域。

## 附图说明

[0045] 图1为本发明一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法中检校目标物的三维效果图。

[0046] 图2为本发明一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法中检校目标物的前视效果图。

[0047] 图3为本发明一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法中检校目标物的俯视效果图。

[0048] 图4为本发明一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法中在检校目标物上定义的当地水平坐标系示意图。



[0049] 图5为本发明一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法的流程图。

### 具体实施方式

[0050] 首先介绍一下本发明所需要的理论基础：

[0051] 1. 平面拟合理论

[0052] 平面公式：

[0053]  $ax+by+cz-d=0$

[0054] 求解过程如下：

[0055] 1) 待拟合的n个扫描点  $(x_i, y_i, z_i)$ ，拟合的平面方程为：

[0056]  $ax+by+cz=d$

[0057] 条件为：

[0058]  $a^2+b^2+c^2=1$

[0059] 则任一数据点到平面的距离：

[0060]  $d_i = |ax_i + by_i + cz_i - d|$

[0061] 2) 要获取最佳拟合平面，使  $e = \sum_{i=0}^n d_i^2$  得最小值，条件为  $a^2+b^2+c^2=1$ ，得公式

[0062] 
$$f = \sum_{i=1}^n d_i^2 - \lambda(a^2 + b^2 + c^2 - 1)$$

[0063] 3) 将f分别对四个未知参数d,a,b,c求偏导：

[0064] 对d求偏导得：

[0065] 
$$\frac{\partial f}{\partial d} = -2 \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i - d) = 0$$

[0066] 求出第一个参数：

[0067] 
$$d = a \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} + b \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} + c \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$$

[0068] 则任一数据点到平面的距离：

[0069] 
$$d_i = |ax_i + by_i + cz_i - d|$$
  

$$= |a(x_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}) + b(y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}) + c(z_i - \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n})|$$

[0070] 令： $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ,  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ ,  $\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}$

[0071] 则  $d_i = |a(x_i - \bar{x}) + b(y_i - \bar{y}) + c(z_i - \bar{z})|$

[0072] 令： $(x_i - \bar{x}) = \Delta x_i$ ,  $(y_i - \bar{y}) = \Delta y_i$ ,  $(z_i - \bar{z}) = \Delta z_i$

[0073] 4) 对a,b,c分别求导得：

[0074] 
$$\frac{\partial f}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta x_i - 2\lambda a = 0$$

$$[0075] \quad \frac{\partial f}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta y_i - 2\lambda b = 0$$

$$[0076] \quad \frac{\partial f}{\partial c} = 2 \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)\Delta z_i - 2\lambda c = 0$$

[0077] 整理后:

$$[0078] \quad \begin{pmatrix} \sum \Delta x_i \Delta x_i & \sum \Delta x_i \Delta y_i & \sum \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum \Delta x_i \Delta y_i & \sum \Delta y_i \Delta y_i & \sum \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum \Delta x_i \Delta z_i & \sum \Delta y_i \Delta z_i & \sum \Delta z_i \Delta z_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}$$

[0079] 令

$$[0080] \quad \begin{pmatrix} \sum \Delta x_i \Delta x_i & \sum \Delta x_i \Delta y_i & \sum \Delta x_i \Delta z_i \\ \sum \Delta x_i \Delta y_i & \sum \Delta y_i \Delta y_i & \sum \Delta y_i \Delta z_i \\ \sum \Delta x_i \Delta z_i & \sum \Delta y_i \Delta z_i & \sum \Delta z_i \Delta z_i \end{pmatrix} = A$$

$$[0081] \quad \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = x$$

[0082] 则以上公式表示为:

$$[0083] \quad Ax = \lambda x$$

$$[0084] \quad \text{由 } Ax = \lambda x, (x, x) = a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

$$[0085] \quad \text{则 } (Ax, x) = (\lambda x, x), \lambda = (Ax, x)$$

$$[0086] \quad \text{即 } \lambda = \sum_{i=1}^n (a\Delta x_i + b\Delta y_i + c\Delta z_i)^2$$

$$[0087] \quad \text{得 } \lambda = \sum_{i=1}^n d_i^2$$

[0088] 5) 求特征向量和特征值即得到拟合平面的法向量(a,b,c),进而得到d。

[0089] 2. 求两直线的夹角

[0090] 计算两向量夹角

[0091] 对于向量 $\vec{a}$ 和向量 $\vec{b}$ :

$$[0092] \quad \cos \langle \vec{a}, \vec{b} \rangle = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|}$$

$$= \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \cdot \sqrt{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2}}$$

[0093] 其中:  $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3)$ ,  $\vec{b} = (b_1, b_2, b_3)$ 。

[0094] 下面结合附图以及具体实施方式对本发明作进一步详细说明:

[0095] 如图1-2所示,设计检校目标物中心目标墙长为a,宽为b;两侧三角形块短边长都

为c,高度为e;相邻三角形块间隔为e(以上设计尺寸根据实际情况可调)。

[0096] 一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法(如图5所示),该方法采用R2sonic 2024多波束测深仪,RIEGL VZ1000激光扫描仪,SPAN-LCI组合惯性导航系统系统,按照如下步骤进行:

[0097] 步骤1:建造水池,在水池中建造中心目标墙并在中心目标墙的两侧建造依次等间距分布的三角形块,中心目标墙的其中一侧等间距分布的三角形块的第一位三角形块低于另一侧等间距分布的三角形块的第一位三角形块,将中心目标墙以及两侧等间距分布的三角形块作为检校目标物;

[0098] 步骤2:行驶测量船,以测量船右侧位于目标物左侧为准,并使测量船行进方向尽量与检校目标物中心平面在水平方向平行,使船航行时惯性导航系统的坐标轴向与ENU坐标系轴向一致。

[0099] ENU坐标系(站心坐标系或者当地水平坐标系)定义:以站心为坐标系原点O,Z轴与椭球法线重合,向上为正(天向),y轴与原点所在经线相切,向北为正(北向),x轴与原点所在纬线相切,向东为正(东向)所构成的右手空间直角坐标系。

[0100] 建立ENU坐标系(如图4所示),将ENU坐标系原点建立在检校目标物的中心位置,ENU坐标系的Z轴方向与检校目标物的竖直方向一致,ENU坐标系的Y轴方向与中心目标墙平面的水平方向一致,北方向为Y轴正向;ENU坐标系的X轴正向与检校目标物中心平面垂直向右的方向一致;检校目标物的竖直面严格垂直当地水平面,通过激光扫描仪和多波束测深仪同时进行信息采集,针对检校目标物获取水上、水下测量点数据,分别提取水池一侧墙壁上中心目标墙和两侧三角形块的测量点信息;

[0101] 步骤3:计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系偏转角的准确修正量;首先以获取船载多传感器测量系统整体粗标定参数以及激光扫描仪的精检校参数为基础,精检校后的激光扫描仪测量数据可作为目标物体的准确空间点云数据,在此基础上以粗标定获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的偏移量和旋转角作初值,利用检校目标物在水上水下保持尺寸与方位一致,用激光扫描仪测量数据进行拟合水上部分检校目标物测量平面,并以该拟合的平面为准与多波束测量数据拟合平面进行比对,在步骤2中建立的ENU坐标系下,分别求取多波束数据拟合平面相对于激光扫描仪数据拟合平面在横摇,纵摇和艏摇方向的角度偏转量;

[0102] 在步骤3中,具体包括

[0103] 步骤3.1:选取所需的多波束和激光扫描仪测量数据拟合的平面

[0104] 图3为检校目标物的俯视图,图中对测量船经过可测量获得的三个竖直平面进行了标识:P1,P2,P3。对应水上部分激光扫描仪测量数据获取平面为 $P_{L1}$ , $P_{L2}$ , $P_{L3}$ ;对应水下部分多波束测量拟合平面为 $P_{M1}$ , $P_{M2}$ , $P_{M3}$ 。此外,为对纵摇方向进行偏转角度计算,定义平面P4(如图3中所示),对应水上部分激光扫描仪测量数据获取平面为 $P_{L4}$ ,该平面同时垂直于平面 $P_{L1}$ 与平面 $P_{L2}$ ;对应水下部分多波束测量拟合平面为 $P_{M4}$ ,该平面同时垂直于平面 $P_{M1}$ 与平面 $P_{M2}$ 。

[0105] 其中对应平面的平面方程为:

[0106]  $P_{Li}: a_{Li}x + b_{Li}y + c_{Li}z = d_{Li}$

[0107]  $P_{Mi}: a_{Mi}x + b_{Mi}y + c_{Mi}z = d_{Mi}$

[0108] 其中,  $i=1,2,3,4$ 。

[0109]  $P_{L2}$ 和 $P_{M2}$ 用于计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在横摇方向的角度偏转量;  $P_{L3}$ 和 $P_{M3}$ 用于计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在艏摇方向的角度偏转量; 由激光扫描仪方面同时垂直于 $P_{L1}$ 与 $P_{L2}$ 的平面 $P_{L4}$ 和多波束测深仪方面同时垂直于 $P_{M1}$ 与 $P_{M2}$ 的平面 $P_{M4}$ 计算多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在纵摇方向的角度偏转量。

[0110] 步骤3.2: 计算多波束数据拟合平面相对于激光扫描仪数据拟合平面在横摇、纵摇和艏摇方向的偏转角度, 并确定偏转角度的正负方向

[0111] 使船右侧靠近目标物并从目标物左侧沿目标物中心平面水平方向航行, 平面的法向量只选取朝向目标物外侧的法向量进行比较, 此时进行计算法向量间的夹角余弦值皆为正值。

[0112] 横摇方向偏转夹角大小与方向确定:

[0113] 首先计算平面 $P_{L2}$ 和平面 $P_{M2}$ 法向量的夹角。然后取平面 $P_{L2}$ 和平面 $P_{M2}$ 的法向量分别与向量 $(0,0,1)$ 求夹角余弦值, 若多波束测深仪所求的余弦值小于激光扫描仪所求余弦值, 定义为多波束测深仪相对于激光扫描仪横摇角度偏差 $\delta_\gamma$ 为负值。反之, 若大于激光扫描仪所求余弦值则说明多波束测深仪相对于激光扫描仪横摇角度偏差 $\delta_\gamma$ 为正值。

[0114] 艏摇方向偏转角度大小与方向确定:

[0115] 首先计算平面 $P_{L3}$ 和平面 $P_{M3}$ 法向量的夹角。然后取平面 $P_{L3}$ 和平面 $P_{M3}$ 的法向量分别与 $P_{L2}$ 平面的法向量求夹角余弦值, 若多波束测深仪所求的余弦值小于激光扫描仪所求余弦值, 定义为多波束测深仪相对于激光扫描仪艏摇角度偏差 $\delta_\phi$ 为负值。反之, 若大于激光扫描仪所求余弦值则说明多波束测深仪相对于激光扫描仪艏摇角度 $\delta_\phi$ 为正值。

[0116] 纵摇方向偏转角度大小与方向确定:

[0117] 首先计算平面 $P_{L3}$ 和平面 $P_{M3}$ 法向量的夹角。然后取平面 $P_{M4}$ 法向量和平面 $P_{L4}$ 法向量分别与 $P_{L1}$ 法向量求夹角余弦值, 若多波束测深仪所求的余弦值小于激光扫描仪所求余弦值, 说明多波束测深仪平面相对于激光扫描仪平面纵摇偏转角 $\delta_\theta$ 为正值。反之, 若值大于激光扫描仪所求余弦值, 说明多波束测深仪平面相对于激光扫描仪平面纵摇偏转角 $\delta_\theta$ 为负值。

[0118] 步骤3.3: 获取的三个方向角度偏转修正量 $(\delta_\gamma, \delta_\theta, \delta_\phi)$ 分别为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系下的横摇, 纵摇和艏摇的角度偏转修正量, 单位为弧度。考虑到小角的情况下, 对于角度修正量的近似旋转矩阵为

$$[0119] \quad \Omega_{b^*}^b = \begin{pmatrix} 0 & -\delta_\phi & \delta_\gamma \\ \delta_\phi & 0 & -\delta_\theta \\ -\delta_\gamma & \delta_\theta & 0 \end{pmatrix}$$

[0120] 利用以上旋转矩阵对多波束原始数据进行修正, 将测量数据重新归算到地心地固坐标系下, 归算公式为:

$$[0121] \quad \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{oe} + R_l^e \cdot R_b^l \cdot \left[ (I + \Omega_{b^*}^b) \cdot R_m^{b^*} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}_b + \begin{bmatrix} \Delta l_x \\ \Delta l_y \\ \Delta l_z \end{bmatrix}_b \right]$$

[0122] 其中:  $[X_e \ Y_e \ Z_e]$  为地心地固坐标系下坐标;  $[X \ Y \ Z]_{oe}$  为惯性导航系统中心在地心地固坐标系下坐标;  $R_l^e$  为当地水平坐标系向地心地固坐标系的旋转矩阵, 此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系;  $R_b^l$  为惯性导航系统坐标系向当地水平坐标系的旋转矩阵, 此处当地水平坐标系为测量时惯性导航系统中心所在位置为原点建立的当地水平坐标系;  $R_m^{b*}$  为粗标定后多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的初始旋转矩阵;  $(I + \Omega_b^b)$  为校准获得的对粗标定后多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系角度偏转的修正矩阵,  $I$  为单位阵;  $[X \ Y \ Z]_m$  为多波束测深仪坐标系下的测量点坐标;  $[l_x \ l_y \ l_z]_b$  为粗标定后多波束测深仪坐标系中心相对惯性导航系统中心的初始偏移量;  $[\Delta l_x \ \Delta l_y \ \Delta l_z]_b$  为多波束测深仪坐标系中心相对于惯性导航系统坐标系中心偏移量的修正量, 当前未进行偏移量的修正量计算, 因此当前步骤可设置为零。

[0123] 重新转换测量点到以建筑物中心点为原点建立的ENU坐标系下坐标, 求解多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向角度偏转的修正量, 改正到前一次的角度偏转修正量中, 迭代该过程直到多波束测量平面的法向量与激光扫描仪测量平面的法向量夹角小于一定阈值时结束迭代, 该阈值由实际情况确定。整个迭代过程获得的多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系的横摇、纵摇以及艏摇三个方向旋转量的修正量为最终角度检校结果。

[0124] 步骤4: 在完成以上步骤基础上, 以激光扫描仪测量的数据为准, 根据中心目标墙和两侧三角形块已知尺寸, 获取多波束测深仪测量的数据相对于激光扫描仪测量的数据在ENU坐标系的X轴、Y轴、Z轴三个方向的偏移量, 该偏移量为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系偏移量的修正值;

[0125] 在步骤4中, 具体包括

[0126] 步骤4.1: 对多波束测量数据进行以上检校角度修正后。对目标中心平面截取水面上下两部分测量点数据, 分别选取两平面内测量点在E(东)方向也就是X轴方向的坐标值并取平均值, 此时多波束相对于惯性导航系统的X偏移量为上下两平面测量点取X平均值之差。

[0127] 步骤4.2: 目标中心墙两侧的三角形块可以探测到的有一个与中心墙平面成一定角度的竖直面, 还存在上下两个垂直于中心墙平面的水平面。激光扫描仪和多波束可以分别测量到水上和水下三角形块的水平面; 选取测量到的数据量合适的水上水下两个三角形块的平面测量数据, 根据设计尺寸可以获得水上水下两个三角形块平面高度差作为Z方向的距离真值, 然后分别求解水上水下两个水平面测量数据中Z坐标值的平均值从而获得此两个平面在Z方向的实际距离, 将两平面测量的实际距离与之前获得的距离真值求差, 得到多波束相对于惯性导航系统在Z方向的偏移量修正值。

[0128] 步骤4.3: 取激光扫描仪数据拟合  $PL_1$  平面和多波束数据拟合  $PM_1$  平面, 将他们投影到底面后获得两条在XOY平面的直线, 利用平行于Y轴的直线分别与激光扫描仪数据在底面投影直线和多波束数据在底面投影直线求交点, 两交点在Y方向的偏差为多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系在Y方向的偏差值。

[0129] 本发明提出了一种在水池内进行的船载一体化测量系统精密检校方法, 集成了激光扫描仪和多波束测深仪, 可以同时获取海底地形和近岸水上地形数据, 解决近岸海岸带

和滩涂地形测量问题;激光扫描仪精检校获取的偏移量和旋转角度具有较高精度,以精检校后激光扫描仪测量的数据为准,求取多波束测深仪坐标系相对于惯性导航系统坐标系精确的角度偏转和距离偏移修正值,实现了船载水上水下一体化测量系统整体精密校准,对固定目标检校物进行一体化测量。

[0130] 本发明主要适用于水池或码头等有固定目标检校物的区域。

[0131] 当然,上述说明并非是对本发明的限制,本发明也并不仅限于上述举例,本技术领域的技术人员在本发明的实质范围内所做出的变化、改型、添加或替换,也应属于本发明的保护范围。

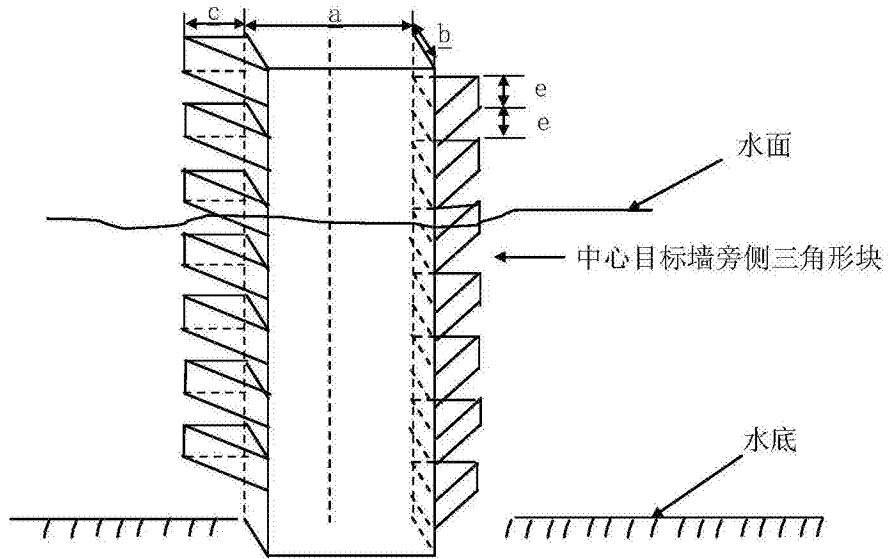


图1

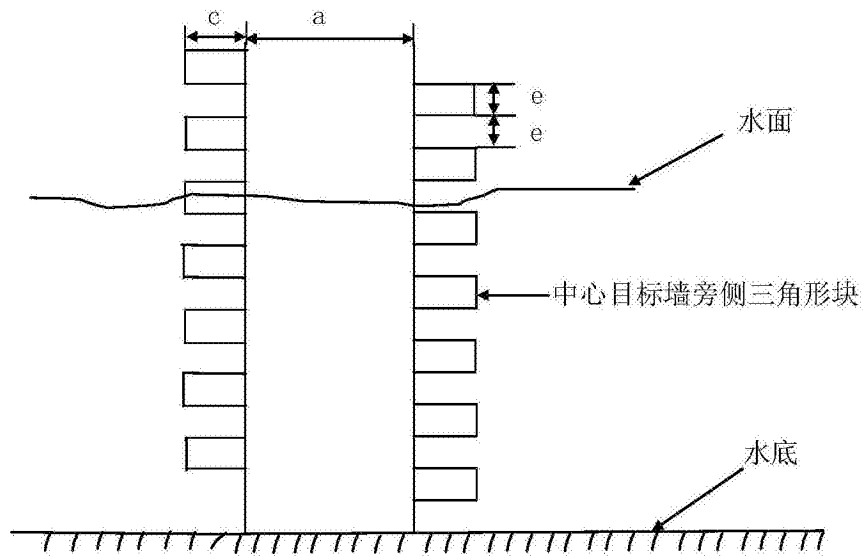


图2

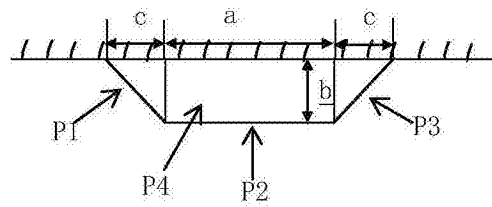


图3



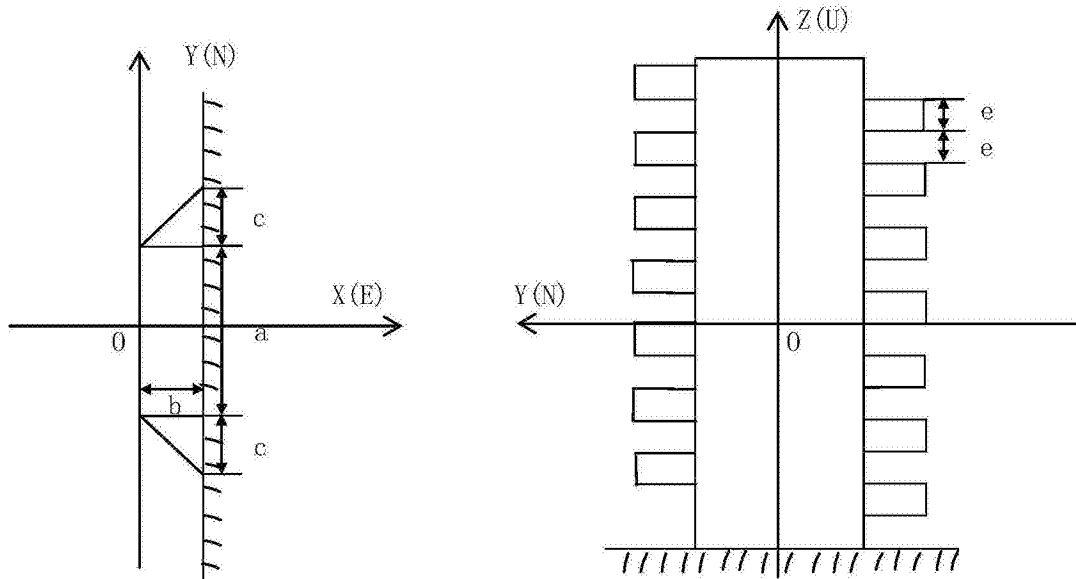


图4

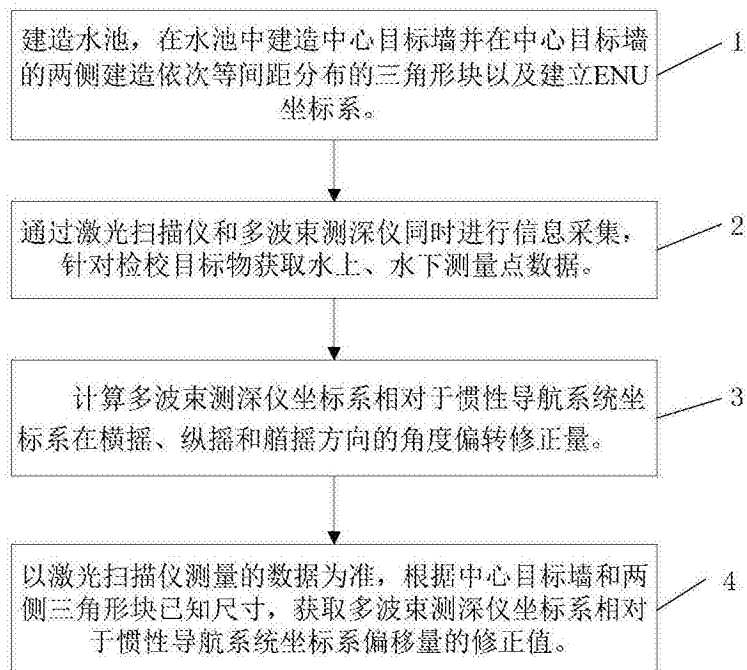


图5