

AUV 水下移动重力测量建模及误差分析

张志强^{1,2}, 于瑞航³, 崔银锋⁴

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;
3. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073;
4. 中国人民解放军 陆军特种作战学院 机电工程系, 广东 广州 510502)

摘要 水下移动重力测量能够连续实施近水底的重力勘测, 如使用自主水下无人航行器 (AUV) 还能允许水面母船同时执行多个任务, 进而降低水下重力测量相关的高昂成本和准入门槛。研究了水下移动重力测量的基本原理和方法, 建立了水下移动重力测量模型和相应的误差模型, 重点分析了捷联式重力仪的传感器、姿态、位置、速度等误差源。讨论了达到 1 mgal 测量精度的可行性以及对水下定位设备的性能要求。经计算, 在重力传感器与捷联式航空重力仪一致, 水声定位系统定位精度达到测量斜距的 0.5%, 水压深度计测深测量精度达到 5 cm, 多普勒计程仪测速精度达到 0.1 m/s 的情况下, 可以确保水下移动重力测量达到精度要求。

关键词 水下移动重力测量; 自主水下无人航行器; 海洋测量

中图分类号 P229 : P744 : U674

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2021)01-0001-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.01.001

Modeling and Error Analysis of AUV Underwater Mobile Gravimetry

ZHANG Zhiqiang^{1,2}, YU Ruihang³, CUI Yinfeng⁴

(1. School of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 3. School of Intelligent Science, University of National Defense Science and Technology, Changsha 410073, China; 4. Department of Mechanical and Electrical Engineering, PLA Army Special Operations College, Guangzhou 510502, China)

Abstract Gravity survey near the bottom can be continuously carried out in underwater mobile gravimetry, such as using autonomous underwater vehicle (AUV) to allow the surface mother ship to perform multiple tasks Simultaneously, and thus reducing the high cost and access threshold of underwater gravity survey. In this paper, the basic principles and methods of underwater mobile gravimetry are studied, the underwater mobile gravimetry model and the corresponding error model are established, and the error sources of sensor, attitude, position and velocity of Strapdown gravimeter are analyzed emphatically. The feasibility of reaching 1 mgal measurement accuracy and the performance requirements of underwater positioning equipment are discussed. The calculation shows that on the premise that the gravity sensor and the Strapdown gravimeter are consistent, the positioning accuracy of the underwater acoustic positioning system can reach 0.5% of the measured slant distance, the sounding accuracy of the water pressure depth meter can reach 5 cm, and the velocity accuracy of the Doppler log can reach 0.1 m/s, which can ensure that the underwater mobile gravimetry meets the accuracy requirements.

Key words underwater mobile gravimetry; autonomous underwater unmanned vehicle; oceanography

收稿日期: 2020-12-09

作者简介: 张志强 (1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水下目标探测、水下无人航行器总体技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (深远海 AUV 重力/重力梯度测量与探测关键技术研究 41874091)。

0 引言

准确感知海洋地球物理信息是认知海洋的首要前提。而对于海洋重力数据研究来说,其在地球物理、矿产资源勘探、军事运用、弹道导弹发射等方面均有广泛应用,是海洋地球物理信息中至关重要的一部分,尤其在探测海底矿藏方面,重力测量是得到地下结构剖面的有力工具和矿产资源勘探的有力手段^[1-3]。尽管卫星测高和船载重力测量获得的重力数据能解决数千米乃至更大区域的重力特性问题^[4-6],但较小规模的地质特征,例如亚公里空间波长的地质特征,仍需辅以水下和近海底调查,克服离势场源过远所造成的信号衰减问题。

水下移动重力测量,也就是在靠近海底的移动平台上使用可连续记录的重力仪,能够大大增加重力测量的次数和空间覆盖范围。因此,在一些情况下,如热液矿床测量,既要保证一定的分辨率,又要确保探测区域和效率,采用水下移动重力测量是最佳手段。水下移动重力测量主要采用拖曳式和自航式。拖曳式水下移动重力测量方面,Zumberge开发了一种拖曳式海洋重力测量系统 Towdog^[7],它在海底上方大约 30 m 高度拖曳,具有 0.1 mgal 的精度。使用拖曳方式实施重力测量解决了连续水下重力测量问题,但其需要庞大的作业母船进行保障,而且还存在拖曳与水面母船运动耦合、难以保持安全高度以及水下操纵能力有限等不足。自航式水下移动重力测量方面,随着自主水下无人飞行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)越来越多地用于海洋测量及调查工作,许多以前由拖曳系统、HOV 和 ROV 进行的地球物理测绘任务,包括多波束测深、磁力测量等,改由 AUV 完成。如 Purcell 使用 3 台 REMUS 6000 型 AUV 快速调查了较大海域的深海海底,成功寻找到了法国航空公司 447 航班的残骸^[8]。AUV 由于是自主控制、无拖缆的水下飞行器,能够明显减轻水面母船的作业压力,允许水面母船同时执行多个任务,进而降低了水下重力测量相关的高昂成本和准入门槛,是理想的水下移动重力测量平台。

当前不同功能定位的 AUV 平台快速发展,以

此为基础,本文提出利用当前发展比较成熟的 AUV 平台,搭载相关测量设备进行水下重力测量的思路,该方法摆脱了以往水下定点重力测量或拖曳重力测量的局限与不足,为深海资源勘察、军事目标探测等任务提供技术支撑,这也是深远海研究中一个非常重要的热点研究方向。

进行水下移动重力测量的理论难点是测量误差的分析,相对于常见的航空、船载移动重力测量,水下移动重力测量主要存在 2 方面的问题:1) 水下无法使用卫星定位信号,需要使用水声定位、捷联惯导以及深度计等多种辅助定位设备才能得到准确三维位置信息;2) 水下航行物体运动姿态与飞机、舰船航行有较大区别,对于重力测量的影响机理不同。本文介绍了水下移动重力测量的相关基础知识,推导了水下移动重力测量情形下重力扰动计算公式,分析了捷联重力仪水下测量误差的特性。

1 水下移动重力测量基础理论

水下航行物体搭载重力仪在水下按一定航线航行,由牛顿第二运动定律可知,惯性系中质点运动方程可以表示为^[9]

$$\ddot{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{f} + \boldsymbol{g} \quad (1)$$

式中: $\ddot{\boldsymbol{r}}$ 为质点在惯性系下的加速度; \boldsymbol{f} 为比力; \boldsymbol{g} 为重力加速度。

由式(1)得到:

$$\boldsymbol{g} = \ddot{\boldsymbol{r}} - \boldsymbol{f} \quad (2)$$

式(2)是水下移动重力测量的基本原理,即利用牛顿第二定律,将地球引力加速度从动态测量值中分离出来,其中包括了载体加速度。由广义相对论的等效原理可知,加速度和万有引力的作用是等效的,因此不能使用加速度计对重力直接进行测量。

进行水下静态重力测量时,由于测量设备处于静止状态,其载体加速度为 $\ddot{\boldsymbol{r}} = 0$,因此,通过对重力传感器敏感轴的空间指向(垂直水平面的方向)进行调整就能够测得重力加速度。水下静态重力测量的测量精度可以很高,能够达到地面测量的精度水平,水下静态的测量深度可达 km 量级,但这种水下逐点依次测量的方式效率比较低下,不能满足

大范围内水下重力测量的作业需求。为解决水下静态重力测量效率低、覆盖面小的问题, 需要考虑采用水下移动重力测量方法。

水下移动重力测量的过程中, 设备处于不断运动状态, 因此加速度不再为 0。此时, 重力传感器测得的结果同时包含重力加速度和载体加速度, 并且这两种加速度无法区分。因此, 对移动重力测量进行研究时迫切需要解决 2 方面问题: 1) 解决在运动状态下, 如何让传感器的敏感轴保持稳定的指向; 2) 载体加速度与引力加速度如何进行有效分离。

对于第 1 个问题, 主要有 3 种方法: 1) 利用周期性阻尼和以陀螺为主的惯性传感器组成惯性稳定平台, 维持测量设备的稳定垂直指向和水平基准, 如美国 Lacoste & Romberg 重力仪; 2) 采用舒勒调谐平台, 以消除水平加速度对重力传感器测量输出的影响, 这类设备以俄罗斯 GT 系列重力仪和加拿大 AIRGrav 重力仪为代表^[10]; 3) 采用“数学平台”, 通过计算载体坐标系与当地地理坐标系的姿态转换矩阵, 将重力传感器测量值投影到相应坐标系下, 一般被称为捷联式惯性稳定平台^[11]。

对于第 2 个问题, 主要有 2 方法: 1) 将共基线的 2 个加速度计测量得到的结果求差, 旨在消除运动载体因共有运动所产生的误差。在共用基线可以保持稳定的运动状态且可以旋转的条件下, 对其做差可以从差值中分离出相应的重力梯度分量, 这就是重力梯度测量的基本原理。但梯度测量设计的技术方法和对硬件要求相当苛刻, 实现难度很大。2) 使用 2 种不同且独立的测量方法, 要求由一种方法得到的测量值含有引力加速度信息的比力观测值; 另一种方法得到的测量值只包含载体加速度, 同一坐标系下做差, 就能够得到重力加速度。现阶段, 有卫星应用条件下的重力测量方法大多采用差分卫星定位 (DGNSS) 技术来求解载体加速度, 进而实现重力加速度的分离。而对于水下重力测量来讲, 卫星导航系统 GNSS 不可用, 因此需要引入新的测量方法。

通过上述分析可知, 使用 AUV 开展水下移动

重力测量需要 3 个组成部分: 第 1 为重力传感器分系统, 该部分包括获取比力的重力仪或加速度计; 第 2 为平台分系统, 使加速度计保持水平或计算其姿态; 第 3 为定位分系统, 主要用于得到 AUV 的惯性加速度。典型 AUV 重力测量系统如图 1 所示, 这是日本海洋科学与技术中心 (JAMSTEC) 的 URASHIMA 型 AUV 搭载的重力测量系统, 其重力仪为 Lacoste 公司的动态重力仪 S-174, 平台分系统为惯性三轴陀螺平台, 定位分系统由多普勒计程仪 (DVL)、惯导、深度传感器、超短基线水声定位装置以及母船搭载的差分 GPS 组成, 母船和 AUV 之间采用水声技术进行通信。

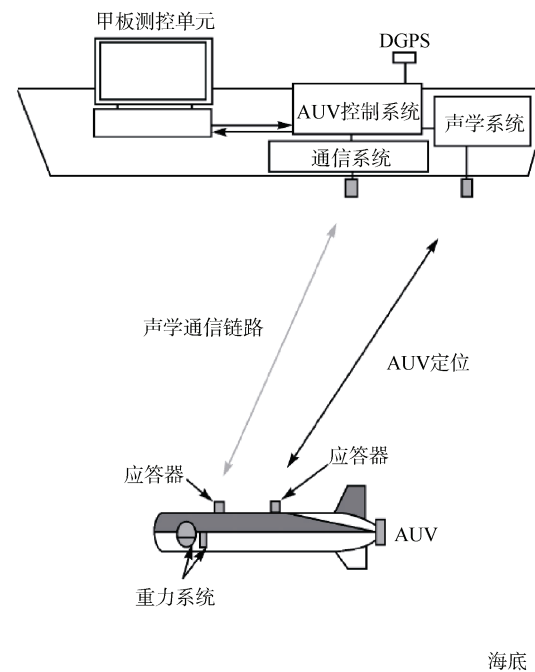


图 1 典型 AUV 重力测量系统

Fig. 1 Typical AUV gravity measurement system

AUV 重力测量按照测量结果可以分为标量、矢量、梯度重力测量 3 类, 常见的重力测量为标量重力测量。按照使用的平台分系统可以分为平台式、捷联式、旋转不变式 3 类。标量重力测量可以使用 3 种平台分系统中的任何一种, 平台式使用了精密加速度计, 捷联式使用了数字平台, 旋转不变式使用三轴加速度计。矢量重力测量主要使用平台和捷联式。梯度重力测量使用旋转不变式平台分系统进行测量。

2 水下移动重力测量数学模型

由上述分析可知,水下移动重力测量的基本原理是利用牛顿第二定律,将地球引力加速度从动态测量值中分离出来,进而得到导航坐标系下的移动重力测量模型。依据 AUV 搭载传感器特点以及建立的动态重力测量模型,可以分析相应重力测量的误差特性。

结合当地的地理导航坐标系内部机械编排可知,导航坐标系下地速 v_e^n 的变化率可通过在惯性坐标系下的变化率得到^[12]:

$$\left. \frac{dv_e}{dt} \right|_n = \left. \frac{dv_e}{dt} \right|_i - [\omega_{ie} + \omega_{en}] \times v_e \quad (3)$$

式中: ω_{ie} 为相对于惯性系的地球自转角速度; ω_{en} 为相对于导航系的相对转动角速度。

另一方面,惯性系下的速度变化率可以表示为

$$\left. \frac{dv_e}{dt} \right|_i = f - \omega_{ie} \times v_e + g_I \quad (4)$$

式中, g_I 为当地重力矢量。

将式(4)代入式(3)中,得:

$$\left. \frac{dv_e}{dt} \right|_n = f - [2\omega_{ie} + \omega_{en}] \times v_e + g_I \quad (5)$$

其在导航坐标系中表示为

$$\dot{v}_e^n = C_b^n f^b - [2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n] \times v_e^n + g_I^n \quad (6)$$

式中: ω_{ie}^n 为地球自转角速度在导航坐标系的投

影; ω_{en}^n 为导航坐标系相对于地球坐标系的角速度在导航坐标系下的投影; C_b^n 为方向余弦矩阵。通过下面的方程计算得到:

$$\dot{C}_b^n = C_b^n \omega_{nb}^b \quad (7)$$

式中, ω_{nb}^b 为导航坐标系下载体的角速度,是斜对称矩阵,由下式计算得到:

$$\omega_{nb}^b = \omega_{ib}^b - C_b^n [\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n] \quad (8)$$

式中, ω_{ib}^b 为测得的载体角速度。

将式(6)的重力值移到等式左边,于是,移动重力测量的表达式在导航系下可以表示为

$$g^n = \dot{v}_e^n - C_b^n f^b + (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v_e^n - \gamma^n \quad (9)$$

式中: g^n 为重力矢量载体; f^b 为使用加速度计测量得到的载体坐标系下的比力; v_e^n 为载体运动速度; \dot{v}_e^n 为载体的运动加速度。

引入正常重力 γ , 则扰动重力矢量 δg^n 可以表示为

$$\delta g^n = \dot{v}_e^n - C_b^n f^b + (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v_e^n - \gamma^n \quad (10)$$

为便于表述,后文中如无说明,则速度和加速度均为载体相对于地球在导航系中的表示,即 $\dot{v}_{eb}^n \equiv \dot{v}^n$, $v_{eb}^n = v^n$ 。

式(10)是矢量表达式,通过计算可以得到重力的3个分量表达式:

$$\begin{bmatrix} \delta g_N \\ \delta g_E \\ \delta g_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_N - f_N + 2\omega_{ie} v_E \sin L - \frac{v_D v_N}{R_N + h} + \frac{v_E^2 \tan L}{R_E + h} \\ \dot{v}_E - f_E - 2\omega_{ie} (v_E \sin L + v_D \cos L) - \frac{v_N v_E \tan L}{R_E + h} - \frac{v_E v_D}{R_N + h} \\ \dot{v}_D - f_D + 2\omega_{ie} v_E \cos L + \frac{v_E^2}{R_E + h} + \frac{v_N^2}{R_N + h} - \gamma \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: δg_N , δg_E , δg_D 为扰动重力在北向、东向、地面向的分量; v_N , v_E , v_D 为载体速度在3个方向的分量; \dot{v}_N , \dot{v}_E , \dot{v}_D 为载体加速度在3个方向的分量; f_N , f_E , f_D 为比力在3个方向的分量; R_N 为子午圈曲率半径; R_E 为卯酉圈曲率半径; L , h , γ 分别为纬度、高度、正常重力值。

式(11)中的第3个分量就是标量重力测量的基本原理:

$$\delta g_D = \dot{v}_D - f_D + \left[2\omega_{ie} v_E \cos L + \frac{v_E^2}{R_E + h} + \frac{v_N^2}{R_N + h} \right] - \gamma \quad (12)$$

式中,等式右边[·]项为厄特弗斯改正项,记作 δa_E 。

分析重力扰动计算式(10),在计算扰动重力的过程中,算式右侧的比力测量值 f^b 和方向余弦矩阵 C_b^n 由惯性器件输出信息和惯性导航求出;剩余项与

载体位置(纬度 L , 经度 λ , 高度 h)、速度(v_N, v_E, v_D)、加速度($\dot{v}_N, \dot{v}_E, \dot{v}_D$)有关。如子午圈半径、卯酉圈半径、赤道半径分别由式(13)–(15)计算。

$$R_N = \frac{R(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 L)^{3/2}} \quad (13)$$

$$R_E = \frac{R}{(1-e^2 \sin^2 L)^{1/2}} \quad (14)$$

$$R_0 = \sqrt{R_N R_E} \quad (15)$$

$$g_{M,N}^n(L_b, b_b) \approx -8.08 \times 10^{-9} h_b \sin 2L_b, \quad g_{M,E}^n = 0$$

$$g_{M,D}^n(L, h) \approx g_0(L) \left\{ 1 - \frac{2}{R_0} \left[1 + f(1 - 2 \sin^2 L) + \frac{\omega_{ie}^2 R_0^2 R_P}{\mu} \right] h + \frac{3}{R_0^2} h^2 \right\} \quad (17)$$

式中, $g_0(L)$ 为地表重力:

$$g_0(L) \approx 9.7803253359 \frac{(1 + 0.001931853 \sin^2 L)}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 L}} \quad (18)$$

综合以上分析, 高精度的载体信息, 如位置、重力仪姿态、速度、加速度等是得到高精度扰动重力计算值的基础。此外, 需要在水下重力测量过程中进行误差估计并对误差进行补偿。

3 水下重力测量误差分析

由扰动重力矢量计算公式即式(10)可以得到水下移动重力测量的误差模型:

$$d\delta g^n = \delta \dot{v}_e^n - C_b^n \delta f^b - f^n \times \psi - v_e^n \times (2\delta \omega_{ie}^n + \delta \omega_{en}^n) + (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v_e^n - \delta \gamma^n \quad (19)$$

式中: $d\delta g^n$ 为重力异常的测量误差; f^n 为地理系下的比力测量值; $\delta \dot{v}_e^n$ 为 v_e^n 的测量误差; C_b^n 为载体系到导航系的方向余弦阵; ψ 为姿态误差; δv_e^n , $\delta \omega_{ie}^n$, $\delta \omega_{en}^n$, $\delta \gamma^n$ 分别为 v_e^n , ω_{ie}^n , ω_{en}^n , γ 的计算误差。

根据 AUV 水下移动重力测量特点, 分析移动重力测量的误差模型可知, 影响水下移动重力测量精度的因素有很多, 如捷联惯导系统中重力传感器包括加表测量误差 δf_{ib}^b 、陀螺测量误差 $\delta \omega_{ib}^b$ 、导航解算计算姿态误差 \tilde{C}_b^n , 同时也有载体的位置测量误差 δp^n 、速度测量误差 δv_e^n 和加速度测量误差

正常重力 γ 与所在纬度 L 、高度 h 等位置信息相关:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{\left(1 + \frac{h}{R_0}\right)^2} \quad (16)$$

本文中的正常重力 g_M^n 使用 WGS-84 基准数据 (datum) 中给出的模型, 该模型是载体所在的纬度 L 和高度 h 的函数, 其北向、东向、垂向分量分别为

$\delta \dot{v}_e^n$, 另外还有多源测量系统集成造成的时间同步误差和安装位置不重合导致的杆臂测量误差等。本文主要研究和 AUV 载体直接相关的姿态、速度、位置测量误差。

3.1 姿态测量误差

由式(19)可知, 比力测量误差还与捷联惯导系统姿态测量误差 ψ 有关。

对式(19)右边第 1 项进行展开, 可得:

$$f^n \times \psi = \begin{bmatrix} \psi_D f_E - \psi_E f_D \\ \psi_N f_D - \psi_D f_N \\ \psi_E f_N - \psi_N f_E \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: f_N , f_E , f_D 为导航系下比力的北向、东向、地向 3 个方向的分量; ψ_N , ψ_E , ψ_D 为导航系下姿态误差角在 3 个方向的分量。

由式(20)的前 2 个分量可知, 重力的北向和东向 2 个水平分量受姿态误差影响较大。水平姿态出现误差, 水平分量测量误差就会达到约 4.7 mgal, 由式(20)的最后 1 个分量可知, 水平加速度对重力测量精度也会产生较大的影响。但对于标量重力测量来说, 姿态测量精度根据不同长度的滤波周期, 可以相对放宽 10" 以上。

3.2 位置测量误差

载体位置测量误差主要引起 2 个方面的计算误差, 即离心加速度和哥氏加速度的计算误差和正

常重力的计算误差。

导航系下位置误差引起的离心加速度和哥氏加速度计算误差为^[13]

$$\delta\omega_{en}^n = \left[-\frac{v_E \cdot \delta h}{(R_E + h)^2} \quad \frac{v_N \cdot \delta h}{(R_N + h)^2} \quad \frac{v_E \cdot \tan L \cdot \delta h}{(R_E + h)^2} - \frac{v_E \cdot \sec^2 L \cdot \delta L}{R_E + h} \right]^T \quad (23)$$

由上式可以看出,位置误差主要是由纬度误差引起,以纬度误差 100 m 为例,则 $\delta L = 1.57 \times 10^{-5}$, 而 $|\delta\omega_{ie}^n| = \omega_{ie}^n \cdot \delta L = 1.14 \times 10^{-9}$, $\delta\omega_{ie}^n$ 的量级为 10^{-9} , 可以忽略不计。而 $\delta\omega_{en}^n$ 的量级也在 10^{-12} 级别,纬度测量误差的影响可以忽略。

对于水下重力测量来说,主要使用水声定位方式对 AUV、ROV 等水下航行器实施主动定位,包括超短基线水声定位、短基线水声定位以及长基线水声定位系统等。常用的超短基线水声定位系统精度可以达到测量斜距的 0.5% 以内,如我国“蛟龙”号深潜器配套的超短基线定位系统,在环境噪声为 60 dB 时最大作用距离为 8 000 m,在 60° 圆锥角内时测距精度为 0.3% 斜距,最大工作水深达到 7 000 m^[14]。以水下 500 m 水深的重力测量为例,超短基线定位误差可以控制在 0.3 m 以内,因此完全满足上述对位置精度的理论要求。

正常重力的计算误差与高度和纬度相关,正常重力对高度求偏导数,有:

$$\frac{d\gamma}{dh} = -0.3086 \text{ mgal/m} \quad (24)$$

所以,对于水下重力测量来讲,1 m 的深度测量误差将引起 0.3 mgal 左右的误差。而目前深度计的测量精度可以达到 5 cm,因此,正常重力的计算误差小于 0.02 mgal,满足水下重力测量对位置、高度等定位精度要求。

3.3 速度测量误差

速度误差引起的离心加速度和哥氏加速度计算误差为

$$d\delta g_p^n = (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \delta v_e^n \quad (25)$$

计算表明,当速度误差在 0.1 m/s 时,速度产生的误差主要是厄特弗斯校正误差,可达 mgal 级。因此,速度测量精度比较关键。

由于水下有多普勒计程仪 (DVL) 可以提供速

$$d\delta g_p^n = [v_e^n \times] (2\delta\omega_{ie}^n + \delta\omega_{en}^n) \quad (21)$$

$$\text{其中: } \delta\omega_{ie}^n = [-\omega_{ie} \sin L \quad 0 \quad \omega_{ie} \cos L]^T \cdot \delta L \quad (22)$$

度测量信息,在对底跟踪的条件下,目前常用的多普勒测速仪速度误差低于 0.1 m/s,因此可以满足水下重力测量对速度的精度要求。

3.4 其他误差

载体运动加速度的测量精度决定了重力测量精度和分辨率,在航空重力测量以及海洋重力测量的过程中,利用全球卫星导航定位系统 (GNSS) 求解的载体加速度精度可达 mgal 级。而在水下重力测量中,无法直接利用 GNSS 提供精确的位置信息求解加速度信息^[15],因此需要其他方式如超短基线水声定位系统 (USBL)、多普勒计程仪 (DVL)、惯导和深度计为水下重力仪提供定位信息。对于垂直方向上的载体加速度,深度计测得的深度信息相比水声定位系统精度更高,因此,垂直方向的载体加速度信息主要由深度计数据计算得到。如果获得的信息含有大量噪声,则需要采用低通滤波的方法将高频部分的噪声滤除,以提高加速度测量精度。

捷联惯导系统与其他分系统如多普勒计程仪、深度计、超短基线等设备的量测值存在时间同步的时间误差和安装杆臂的空间误差。对于时间同步误差,在典型的动态环境下,时间同步误差为 1 ms 时重力测量误差会达到 20 mgal,因此必须将时间同步误差降至 50 ns 以内,这样才有可能使测量精度达到 1 mgal 内^[16]。

4 结束语

本文通过研究船载和航空重力测量,推导了基于捷联式重力仪的水下移动重力测量模型,将地球引力加速度从动态测量值中分离出来,分析了移动重力测量中需要解决的稳定重力传感器敏感轴以及分离载体加速度两个问题。在此基础上以典型 AUV 水下重力测量为例,说明了水下移动重力测量所需的重力传感器分系统、平台分系统和定位分系统。

由于水下移动重力测量涉及惯性坐标系、地固坐标系、导航坐标系以及载体坐标系的相互转换,介绍了这几类常用坐标系,说明了方向余弦矩阵、欧拉角和四元数的转换关系。接着推导了导航坐标系下的移动重力测量模型和误差模型,重力测量值可以由比力、方向余弦矩阵、载体位置、速度和加速度测量值计算得出,其中比力测量值和方向余弦矩阵可以由惯性器件输出的测量信息和惯性导航解算得到,载体位置、速度和加速度则需要由专门的水下导航定位设备得到。分析了捷联重力仪安装在 AUV 上实施测量时的误差特性,推导了基于捷联式重力仪的水下移动重力测量误差模型,研究了重力传感器、姿态测量、位置测量、速度测量以及其他测量手段带来的误差。根据水下移动重力测量特点,结合水下导航定位设备特点和性能,讨论了达到 1 mgal 测量精度的可行性以及对水下定位设备的性能要求。经计算,在重力传感器与捷联式航空重力仪一致,水声定位系统定位精度达到测量斜距的 0.5%,水压深度计测深测量精度达到 5 cm,多普勒计程仪测速精度达到 0.1 m/s 的情况下,可以确保水下移动重力测量达到精度要求。

参考文献

- [1] 李建成. 地球重力场的意义及其在地球科学中的作用[J]. 地理教育, 2012 (Z2): 1-3.
- [2] CHIANG K W, LIN C A, KUO C Y. A feasibility analysis of land-based SINS/GNSS gravimetry for groundwater resource detection in Taiwan[J]. Sensors, 2015, 15 (10): 25039-25054.
- [3] LI X. Using radial basis functions in airborne gravimetry for local geoid improvement[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92 (5): 471-485.
- [4] LU B, BARTHELMES F, LI M, et al. Shipborne gravimetry in the Baltic Sea: data processing strategies, crucial findings and preliminary geoid determination tests[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93 (7): 1-13.
- [5] REUDINK R, KLEES R, FRANCIS O, et al. High tilt susceptibility of the Scintrex CG-5 relative gravimeters[J]. Journal of Geodesy, 2014, 88 (6): 617-622.
- [6] SUN L, WANG Z, ZHAO G, et al. Magnetic attitude tracking control of gravity gradient microsatellite in orbital transfer[J]. The Aeronautical Journal, 2019, 123 (1269): 1881-1894.
- [7] ZUMBERGE M A, RIDGWAY J R, HILDEBRAND J A. A towed marine gravity meter for near-bottom surveys[J]. Geophysics, 1997, 62: 1386-1393.
- [8] PURCELL M, GALLO D, PACKARD G, et al. Use of Remus 6000 AUVs in the search for the air France flight447[C]// Proceedings of IEEE/MTS Oceans Conference. US: IEEE, 2011.
- [9] 张开东. 基于 SINS/DGPS 的航空重力测量方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [10] 刘站科, 李建成, 肖学年, 等. GT-2A 航空重力仪静态测量实验及性能分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44 (4): 482-488.
- [11] CAI S, WU M, ZHANG K, et al. The first airborne scalar gravimetry system based on SINS/DGPS in China[J]. Sci China Earth Sci, 2013, 56: 2198-2208.
- [12] 蔡劭琨. 航空重力矢量测量及误差分离方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [13] TITTERTON D, WESTON J. 捷联惯性导航技术[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [14] 张同伟, 刘焯瑶, 唐嘉陵, 等. 大深度载人潜水器之超短基线定位系统: 海上试验及载人深潜应用[J/OL]. 应用基础与工程科学学报, [2019-01-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20190121.2148.004.html>.
- [15] 张志强, 陈柄尧, 李东, 等. 一种应用于水下机器人的低成本巡线视觉识别系统[J]. 水雷战与舰船防护, 2017, 25 (3): 7-11.
- [16] 于瑞航. 捷联式车载重力测量关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.

(责任编辑: 曹晓霖)