

【自动化技术】

潜艇重力辅助惯性导航系统研究与仿真

袁伟^{1,2},程农^{1,2}

(1. 清华大学自动化系,北京 100084;2. 飞行器控制一体化技术重点实验室,西安 710065)

摘要:从工程应用出发,通过分析水下重力测量的各种误差源,建立精确的重力异常数据误差模型。改进了匹配算法,并设计了不同精度的一组惯性导航系统以验证重力辅助导航的可行性。结果表明,海洋固体潮、海潮、海面地形计算精度及厄特弗斯改正都是影响水下重力测量精度的主要因素,并行卡尔曼滤波算法能有效抑制非线性重力数据带来的滤波影响。

关键词:重力导航;匹配算法;厄特弗斯改正;卡尔曼滤波
中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A

文章编号:1006-0707(2011)05-0077-03

重力辅助惯性导航系统(gravity aided inertial navigation system, GAINS)是一种利用地球固有特征信息,通过一定的数据匹配方法实现校正惯性导航系统(惯导)累积误差,从而获取高精度位置信息的自主导航技术。GAINS主要应用于战略核潜艇导航,以实现其导航系统的自主化、无源化^[1]。经过半个多世纪的发展,惯性仪表自身精度已得到极大提高,如静电陀螺仪精度可达 $10^{-4}^{\circ}/h$,重力异常(空间实际重力与参考重力大小之差)已经成为高性能惯导系统主要误差源^[2]。GAINS是基于数据的匹配导航系统,重力异常数据精度直接关系到导航计算精度。目前应用于海洋测绘和导航的动基座重力仪精度在0.1m Gal左右,由于全球大地模型精度还有待提高,运载体受海浪、洋流、潮汐以及导航误差等扰动因素影响,有害重力扰动往往大于实际重力变化幅度,重力辅助导航手段也就失去了意义。目前,学者较多研究匹配算法和理论,对重力场数据获取和处理缺少系统的分析。同时,由于GAINS主要应用于高精度惯性导航系统,需要建立更加精确的惯导误差模型和更精确地匹配算法,这都是决定GAINS在工程实际中可行性和导航精度的重要因素。

1 大地测量误差

惯导进行解算时,通常用于简单地球参考椭球体来描述重力场,即用正常重力公式计算实际重力矢量。而由于地球质量分布不均匀,参考椭球体不能完全反映地球形状和质量变化,这种偏差就是重力异常。显然,比力矢量的变化会引起惯导中加速度计输出误差,从而引起定位误差。

1.1 纬度误差补偿

在精度要求不高的惯导计算模型中,一般采用正常重力公式已能满足要求。椭球面上任一点正常重力公式,即索密里安(Somigliana)公式:

$$\gamma = \frac{a\gamma_e \cos^2 B + b\gamma_p \sin^2 B}{\sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}} \quad (1)$$

式中: B 是大地纬度; γ_e, γ_p 分别是赤道和两极的正常重力,可以根据大地椭球参数求得; a, b 分别为椭球的长、短半轴。因此正常重力 γ 是大地纬度 B 的函数,并且变化幅度相当大(从赤道 9.78 m/s^2 到两极 9.83 m/s^2)。同时,由于纬度位置信息由惯导提供,而惯导本身存在定位误差,这种误差又会影响到重力测量精度。用式(1)对纬度求导,可知在惯导纬度误差 $1'$ 情况下,正常重力将产生最大幅度约1.5m Gal变化,这显然是一个必须要进行修正的误差量,在惯导的力学编排中,必须充分考虑纬度误差对重力异常的影响。

1.2 区域基准面转换误差

卫星测地出现之前,地球参考模型是各大洲根据独立测量数据建立起来的,并以此建立了各自的参考地球模型。我国地图普遍采用的是1954北京坐标系或者1980西安坐标系下的高斯投影坐标,但目前精确位置信息的获取通常采用差分GPS数据。而GPS以美国国防部研制确定的WGS84坐标系为基准。实际上,GPS的测量结果与我国54或者80坐标系相差几十至一百多米,随纬度不同略有差异。文献[3]研究了西安80与WGS84坐标系转换关系,通过转换后,地图匹配精度优于 $\pm 0.7 \text{ m}$ 。近几十年来,通过大量观测,地球参数愈来愈精确,国际大地测量学与地球物理学联合会(IUGG)推荐了基本参数值,利用这些数值可以导出新的更精确的公式。

1.3 大地水准面与潮汐修正

重力场通常用重力位面(又称等位面或水准面)来描述,处于平均海平面的重力位面称为大地水准面。

图1描述了地球平均海平面的横截面(即大地水准面)、地球地表面和近似参考椭球。 R 是大地垂线, N 为平均海水面与大地水准面的高度差(又称海面地形)。研究表明,全球没有潮汐影响的海面地形有2~3m,中国海域起伏在0~70cm^[4]。由于海面地形具有较强的规则性,确定海面地形的经典方法是通过组合法:大洋地区起伏程度可以通过已知EGM96海面地形模型计算有限阶次得到,而大地水准面

收稿日期:2011-03-11

作者简介:袁伟(1981—),男,硕士,主要从事导航制导与控制方面研究。

的细微构造可根据当地重力异常数据的斯托克斯方程确定。由于重力匹配导航主要应用于深海大洋运载体自主导航,这里只给出海面地形模型的球谐表达式:

$$N = \sum_{l=0}^N \sum_{m=0}^l (c_{lm} \cos m L + d_{lm} \sin m L) \bar{P}_{lm}(\sin B) \quad (2)$$

式中: (B, L) 为测量点大地坐标; N 为海面地形球谐展开的最高阶(目前小于 25); c_{lm} 、 d_{lm} 为海面地形模型位系数; $\bar{P}_{lm}(\sin B)$ 为规格化勒让德函数。位系数可以通过卫星测高数据和地面重力数据采用最小二乘配置法解算求得。文献[5]根据中国海域水文资料,将模型精确到 7 阶,推算了中国近海海面地形高度,误差优于 10 cm。

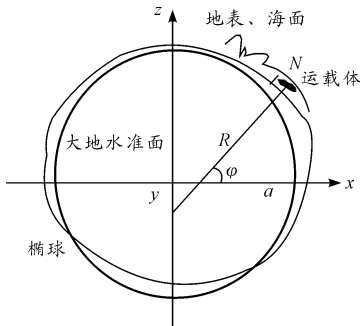


图 1 参考地球椭球的几何形状

绝对重力观测仪所观测的重力值,不仅包含测量点的地球重力值,同时还包含日月引力以及所引起的地球潮汐变形的重力效应。固体地球在日、月引潮力作用下引起的弹性形变称固体潮,理论固体潮汐模型可以由 Cartwright 的全调和展开组成^[6]:

$$\delta g = \sum \delta_i H_i \cos(\omega_i t + x_i) \quad (3)$$

式中: H_i 、 x_i 和 ω_i 分别为第 i 个潮汐的理论振幅、初角和角频率; δ_i 则为第 i 个潮汐的重力潮汐因子。根据以上公式计算出来的固体潮引起重力变化约为 $\pm 0.3 \text{ m Gal}$ ^[7]。

世界范围内海潮变化比较复杂,潮差大小受引力、地形和地域等条件影响,随时间及地点不同。潮差较大值为 13 ~ 15 m,中国沿海潮差大约有 2 m,分布趋势是东海沿海最大,渤海黄海次之,南海最小。研究海潮主要是通过建立高质量的潮高或海潮模型。20 世纪 80 年代以来,国内外大多采用 Schwiderski 海潮模型。随着 20 世纪 90 年代 TOPES/POSEIDON 测高卫星的发展,卫星测高数据使得建立全球潮汐模型成为可能,并发展了更精确的全球海潮模型。目前,国际上使用比较多的全球海潮模型有 CSR3.0、ORI、FES95.2、TPXO.2、NAO99.b 等。这些模型在开阔海域的精度较高,一般精度优于 30 cm,而在沿岸和浅海地区则误差较大,需要长期的观测和更精密的区域模型。

潜艇在大洋中航行,所受重力受海面地形与潮汐的影响较大,平均每米潮差可引起大约 0.3 m Gal 的重力偏差,因此,海面地形修正和精确的潮汐模型成为重力辅助导航重要的研究内容之一。

2 厄特弗斯改正

基于惯导的重力辅助导航系统,重力仪安装在载体稳定

平台上,载体因运动产生的离心力也会被重力仪敏感。这种效应称为厄特弗斯改正(Eötvös correction)。厄特弗斯改正可用式(4)计算:

$$\delta g_E = 2\omega V \cos B \sin A + V^2 / (R_B - h) \quad (4)$$

其中: ω 为地球角速率; R_B 代表纬度 B 的地球半径; h 为水下运载体航行深度; A 为运载体航向角。由于水下运载体深度一般在 200 m 以内,与地球半径相比,基本可以忽略不计(计算中,取 $R_B = 6\,378\,137 \text{ m}$, $\omega = 7.292\,115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$)。速度误差、航向误差以及深度误差对厄特弗斯改正影响是不相同的。对式(4)取微分,单位归算为 m Gal,速度、航向和纬度误差分别以 0.01 m/s, 1' 和 1 n mile (1 n mile $\approx 1\,852 \text{ m}$) 为单位。

$$\begin{aligned} d(\delta g_E) &= \frac{\partial(\delta g_E)}{\partial V} dV + \frac{\partial(\delta g_E)}{\partial A} dA + \frac{\partial(\delta g_E)}{\partial B} dB = \\ &= (0.146 \cos B \sin A + 0.003) \times dV + \\ &= (0.043\,6 \cos B \cos A) \times dA + \\ &= (-0.043\,6 \sin B \sin A) \times dB \end{aligned} \quad (5)$$

假设潜艇在纬度为 20° 附近海域航行,惯导系统速度、航向及纬度分别有 0.5 m/s, 5' 及 1 n mile 误差,表 1 列举了不同精度惯性器件及误差对厄特弗斯改正影响。

表 1 不同精度惯性器件及厄特弗斯改正

| 陀螺/加计 (°/h, ug) | 0.005/ 20 | 0.001/ 10 | 0.000 1/ 1 |
|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|
| 纬度误差/m | 6 000 | 1 500 | 150 |
| 经度误差/m | 20 000 | 5 000 | 500 |
| 航向角误差/(°) | 0.06 | 0.01 | 0.001 5 |
| 东向速度误差/(m·s ⁻¹) | 0.5 | 0.2 | 0.02 |
| 北向速度误差/(m·s ⁻¹) | 0.8 | 0.3 | 0.025 |
| 厄特弗斯改正/(m Gal) | ±14.1 | ±5.4 | ±0.47 |

通过上述计算可见,速度误差是厄特弗斯改正主要误差源,在低纬度地区航向角误差也是一个需要考虑的因素,而纬度误差一般对厄特弗斯改正影响不大。

3 惯导建模及航迹仿真

惯导精度主要取决于惯性器件(陀螺和加速度计)的误差,为了验证 GAINS 可行性,需要建立不同精度的一组惯导模型。这里以潜艇为运载体模型,仿真了一条位于中国南海的航行轨迹,图 2 为潜艇轨迹的平面图和潜深变化图。

航行轨迹从三亚港出发,经南沙到台湾南部海域,包含转弯、潜浮、加速、减速等机动过程,总航程 2 572 km,仿真时间 72 h。陀螺和加速度计参数设置如图 3。

陀螺仪参数有常值漂移、一阶马尔可夫过程、高斯白噪声以及刻度系数误差;加速度计参数主要有零偏、高斯白噪声和刻度系数误差。仿真中以捷联惯导建立数学平台模拟平台坐标系,采用旋转矢量的双子样优化算法作姿态更新,速度解算时考虑旋转效应和划桨效应补偿,以满足潜艇在高动态环境下仿真的精度要求。仿真结果如图 4 所示。

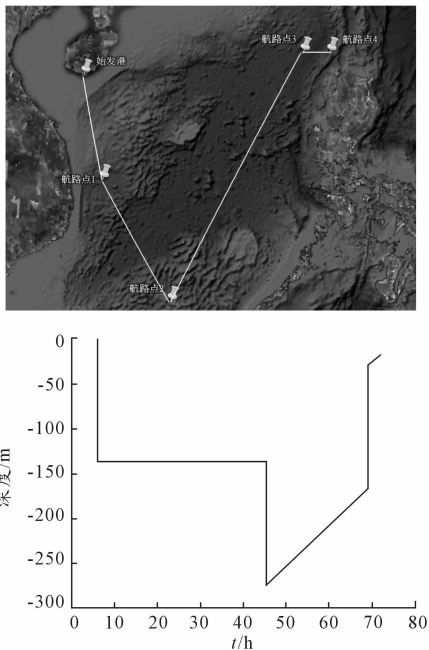


图2 潜艇航行轨迹及潜深

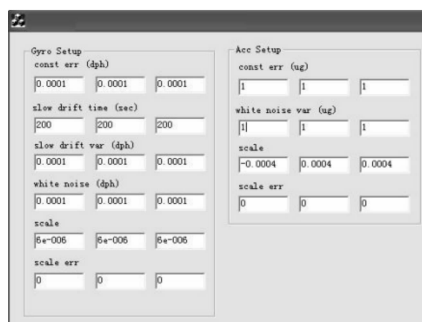


图3 惯性器件仿真参数

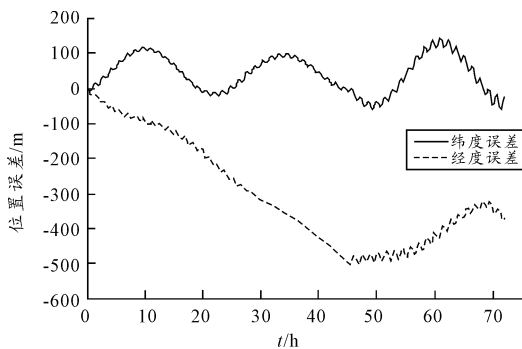


图4 惯导仿真位置误差

由仿真图形可见,惯性器件误差会引起傅科周期调制的舒拉周期震荡,经度误差随时间增长而呈发散趋势。仿真结果表明,捷联惯导仿真与理论分析相符合,能较为精确地模拟平台式高精度惯导。

4 GAINS 仿真分析

SITAN 算法最早应用于重力匹配导航,它的核心是数据线性化和扩展卡尔曼滤波(EKF)。由于重力数据的强非线性,线性化会带来随时间的积累的误差,重力异常数据奇异值也可能导致滤波发散,最终使导航失败。引入并行卡尔曼滤波算法,能较好解决上述问题。基于 kalman 滤波的 SITAN 并行卡尔曼滤波算法,按时间先后,算法分为搜索和跟踪 2 个阶段。

如图 5 所示,在搜索阶段,以惯导系统给出的概略位置为中心,构建一面积足以包括潜艇真实位置的区域,并在该区域内按照重力数据分辨率设置一组并行滤波器。假设惯导有 2 000 m 圆概率误差,则潜艇有 99% 可能性出现在以惯导指示位置为中心,半径为 5 160 m 圆范围内 (2.58σ)。在每个并行滤波器进行了滤波计算后,取平滑加权残差平方和最小的滤波器作为最佳滤波器,并与其周围最近的 8 个滤波器位置一起进行加权平均,作为最终搜索阶段的匹配位置。

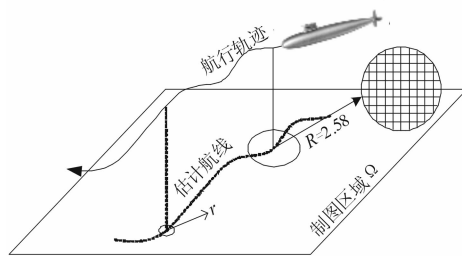


图5 并行 SITAN 算法示意图

在跟踪阶段,以搜索阶段获取的位置信息与惯导系统的位置信息之差作为量测值,建立量测方程,进行扩展卡尔曼滤波。跟踪阶段惯导不确定区域半径 r 要小得多,以便能实时跟踪结算。

仿真中,假设区域基准面转换误差、大地水准面与潮汐修正、厄特弗斯改正等确定性误差都得到有效补偿。惯导精度取表 1 第 1 列 ($0.005/20 \mu\text{g}$),航迹参照图 4,仿真时间 2 h,重力异常采用格网数据,精度为 360 m。GAINS 系统仿真结果如图 6 所示。

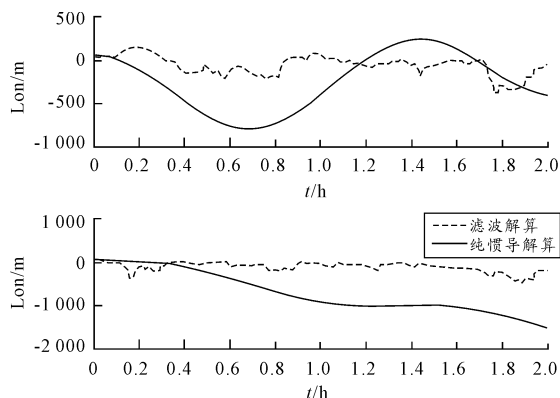


图6 GAINS 仿真位置误差