

文章编号: 1001 - 893X(2012)09 - 1465 - 04

重力异常对航天测量船惯导姿态测量的影响与补偿*

冯鸿奎, 李晓勇, 钟德安, 赵李健, 张同双

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要:分析了重力异常产生的原因,根据有害加速度对于惯导系统的影响,建立了基于重力异常的惯导比力误差方程及姿态误差测量模型。结合航行试验分析了影响与应用效果,试验结果表明,高精度的姿态测量系统中必须考虑重力异常的影响,利用该方法可以基本消除重力异常的影响,部分海域可使惯导姿态精度提高约 20",对提高航天测量船外测精度具有重要意义。

关键词:航天测量船;惯导;水平姿态精度;重力异常;补偿方法

中图分类号:TN911;U666.12 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-893x.2012.09.010

Influence of Gravity Anomaly on Space TT&C Ship's INS Attitude Measurement and its Compensation Method

FENG Hong-kui, LI Xiao-yong, ZHONG Deng-an, ZHAO Li-jian, ZHANG Tong-shuang

(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: The cause of gravity anomaly is analysed. Specific INS(Inertial Navigation System) force equation and attitude error model are proposed based on harmful acceleration caused by gravity anomaly. The effect is discussed through sailing test and the result shows the influence of gravity anomaly must be considered in high precision attitude measurement system, this method can effectively eliminate its influence, the INS attitude precision can be improved about 20" at some sea area. It is significant for improving the exterior ballistic measurement precision of the space tracking, telemetering and command(TT&C) ship.

Key words: space TT&C ship; inertial navigation system(INS); attitude precision; gravity anomaly; compensation method

1 引言

无论是平台式惯导还是捷联式惯导,均是基于加速度计建立比力运动方程,加速度计输出的测量值除了载体相对地球的加速度外还包含了有害加速度(如重力加速度及哥氏加速度),而且由于地球为非真正的椭球体,密度不均匀,因此存在重力偏差,即重力异常,一般有几个至几十毫伽^[1](1 gal = 1 cm/s²),因此实际重力相对正常重力会产生垂线偏差,导航系统由此会产生速度、位置及姿态测量的误差。考虑目前惯导系统中位置、航向分别用 GPS 及天文测星修正去除误差,而水平姿态没有高精度比

对基准,也就无法去除重力异常的影响,且惯导系统的姿态测量精度在航天测量船船载测控设备的外测精度中影响较大,因此,需要分析重力异常对于惯导姿态测量的影响,并对补偿的方法进行研究。

2 重力异常的测量

地球上任一点的重力加速度值是随纬度和高度变化的,是所在点相对于地球位置的函数,按照重力场理论,可以按下式计算地球表面任一点处的正常重力值:

$$g = g_0(0.0052884\sin^2\varphi - 0.0000059\sin^22\varphi) + g_0 - 0.0003086h \quad (1)$$

* 收稿日期:2011-08-16;修回日期:2012-05-03

式中, g_0 为赤道海平面重力加速度值 ($g_0 = 978.049 \text{ cm/s}^2$), φ 为纬度, h 为海拔高度(m)。

但实测结果 g_m 并不一定满足式(1), 两者之差即为重力异常 Δg :

$$\Delta g = g_m - g \tag{2}$$

考虑到地球上重力异常并没有什么规律性, 只能将地球表面划分成若干区域^[2], 通过卫星测量获取, 如可以参考“全球重力垂线偏差数据库(美国加州大学圣地亚哥分校测地学专业的教育网站)”, 按照“墨卡托(Mercator)投影理论”, 解算出某个经纬度区域($2' \times 2'$)的东向 Δg_x 、北向 Δg_y 及斜向 Δg_z 3个重力垂线偏差; 也可以引用 D. T. Sandwell 等最新公布的 V18.1 全球($1' \times 1'$)重力异常数据。

3 基于重力异常的误差测量方程

3.1 加速度计的比力误差方程

载体相对于地球运动时, 加速度计测得的比力方程^[3]为

$$f = \bar{V} + (2\omega_{ie} + \omega_{ep}) \times \bar{V}_{ep} - \bar{g} \tag{3}$$

式中, $2\omega_{ie} \times \bar{V}_{ep}$ 为哥氏加速度, $\omega_{ep} \times \bar{V}_{ep}$ 为载体围绕地球运动产生的向心加速度, \bar{g} 为重力加速度。

该方程为惯导的基本方程, 综合式(2)、(3), 可得出比力方程在地理坐标系中的投影:

$$\begin{bmatrix} f_x^t \\ f_y^t \\ f_z^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -(2\omega_{iez}^t + \omega_{az}^t) & (2\omega_{iey}^t + \omega_{ay}^t) \\ (2\omega_{iez}^t + \omega_{az}^t) & 0 & -(2\omega_{iey}^t + \omega_{ay}^t) \\ -(2\omega_{iey}^t + \omega_{ay}^t) & (2\omega_{iez}^t + \omega_{az}^t) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x^t \\ V_y^t \\ V_z^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{V}_x^t \\ \dot{V}_y^t \\ \dot{V}_z^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta g_x \\ \Delta g_y \\ (g_0 + \Delta g_z) \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, t 为地理坐标系, p 为平台坐标系, i 为惯性坐标系, e 为地球坐标系,

$$\omega_{ie}^t = \begin{bmatrix} \omega_{iey}^t \\ \omega_{iez}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos \varphi \\ \omega_{ie} \sin \varphi \end{bmatrix} \text{ 为地球自传角速率,}$$

$$\omega_{ea}^t = \begin{bmatrix} \omega_{eay}^t \\ \omega_{eaz}^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{V_{ay}^t}{R_{yt}} \\ \frac{V_{ax}^t}{R_{xt}} \\ \frac{V_{ax}^t}{R_{xt}} \text{tg} \varphi \end{bmatrix} \text{ 为地理坐标系相对于地球坐}$$

标系的角速率。

式(4)可以简化为

$$\begin{bmatrix} f_x^t \\ f_y^t \\ f_z^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_x^t \\ \dot{V}_y^t \\ \dot{V}_z^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{Bx} \\ a_{By} \\ a_{Bz} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中, a_{Bx} 、 a_{By} 、 a_{Bz} 为有害加速度, 也是需要从加速度测量值中去除项。

由于平台坐标系是跟踪地理坐标系, 所以从平台上的角度传感器就可以取得载体的姿态角误差, 如果平台的误差角为 ϕ_x 、 ϕ_y 、 ϕ_z , 则 t 系至 p 系的变换矩阵为

$$C_t^p = \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

测量船垂直方向速度 V_z^t 与水平方向速度 V_x^t 、 V_y^t 相比是小量, 可以略去, 斜向偏差 Δg_z 与正常重力常数 g_0 (980 gal) 差异大, 且对偏差角影响较小, 因此在计算斜向垂线偏差角时近似用 g_0 代替。这里对高度通道不作讨论, 则由式(4)~(6)可知存在重力异常时转化到平台坐标系的比力方程为

$$\begin{cases} f_x^p = \dot{V}_x^t - (2\omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_x^t}{R_{xt}} \text{tg} \varphi) V_y^t - \Delta g_x - \phi_y g_0 \\ f_y^p = \dot{V}_y^t - (2\omega_{ie} \sin \varphi + \frac{V_x^t}{R_{xt}} \text{tg} \varphi) V_x^t - \Delta g_y + \phi_x g_0 \end{cases} \tag{7}$$

从上述存在重力异常情况下的比力误差方程看, 重力异常的水平分量 Δg_x 、 Δg_y 和加速度计偏置误差对惯导误差的影响是等效的。重力异常东向分量会造成平台绕北向轴的常值偏转, 北向分量会造成平台绕东向轴的常值偏转。

3.2 姿态误差方程

根据惯导系统编排, 分别由东向加速度计—北向陀螺仪、北向加速度—东向陀螺仪构成两条水平回路, 当存在重力异常时, 由式(7)可知, 两条水平回路的平台误差角为

$$\begin{cases} \phi_x = -\Delta g_y / g_0 \\ \phi_y = \Delta g_x / g_0 \end{cases} \tag{8}$$

由于 ϕ_x 、 ϕ_y 是相对于大地方位正北和正东方向的倾斜量, 在船摇纵摇 ψ 、横摇 θ 上的表现随航向 k 的变化而变化, 则建立惯导水平姿态修正测量方程为

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_c \\ \theta_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos k & \sin k \\ \sin k & -\cos k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, ψ_c, θ_c 为船摇测量值, ψ, θ 为消除重力异常影响的修正值。

在实际应用中,可采用修正惯导姿态误差零位方法对重力异常的影响进行补偿,其修正方程为

$$\begin{pmatrix} \Delta\psi \\ \Delta\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\psi_0 + \Delta\psi_c \\ \Delta\theta_0 + \Delta\theta_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中, $\Delta\psi, \Delta\theta$ 为新的姿态零位, $\Delta\psi_0, \Delta\theta_0$ 为初始姿态零位, $\Delta\psi_c, \Delta\theta_c$ 为运用星体标校方法^[4]获取的姿态误差。

4 应用效果分析

以测量船某次航行试验为例进行分析,试验区选取为 127.69°E、7.36°N 至 127.69°E、13.83°N, 船舶航向为 0°, 机动范围 ± 2°, 解算惯导水平姿态的误差^[5], 图 1 为航行区域示意图, 图 2 为该区域的重力异常分布图, 图 3 为重力异常引起的水平姿态误差曲线。

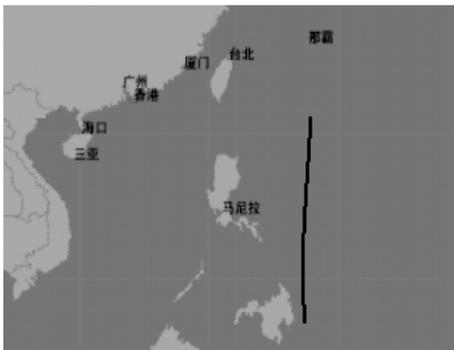


图 1 航行区域示意图
Fig.1 Correlation of sailing area

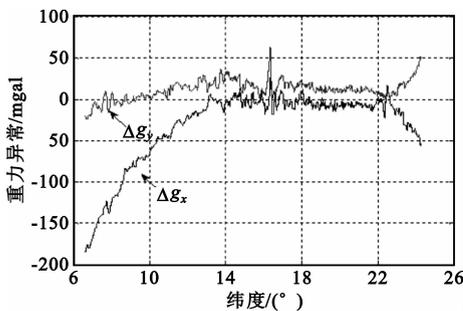


图 2 重力异常分布图
Fig.2 Map of gravity anomaly

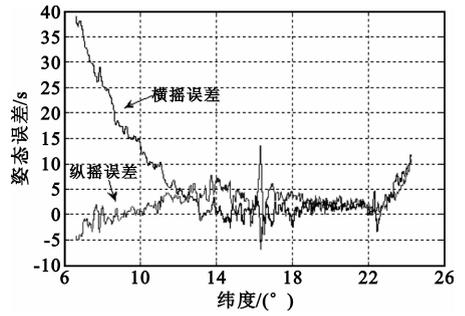


图 3 重力异常引起的水平姿态误差曲线
Fig.3 Attitude error vs gravity anomaly

表 1 列出了本次航行试验 24 h 的姿态误差变化统计结果。

表 1 姿态误差统计结果
Table 1 Attitude error result

次数	未考虑重力异常误差/(")		考虑重力异常后误差/(")	
	横摇	纵摇	横摇	纵摇
1	40.62	-10.89	10.92	-9.35
2	29.65	3.30	3.48	2.14
3	17.72	-6.68	-6.91	-6.26
4	25.13	-2.83	0.50	-2.41
5	32.03	7.71	7.97	8.26
6	23.67	-5.00	-0.39	-4.45
7	20.36	2.85	-3.70	3.40
8	8.67	-2.39	-6.41	-2.88
9	15.06	8.34	-0.23	7.77
10	-8.51	3.03	-7.43	-1.12
11	8.18	13.59	5.46	8.17
RMS	23.19	7.03	5.90	5.83

由图 1~3 及表 1 可知:

- (1)重力异常随地理位置的变化而变化,沿海、岛屿附近较大,最大可达 178 mgal,深海相对较小;
- (2)重力异常对于姿态的影响较大,而且对横摇、纵摇角的影响与测量船的航向相关;
- (3)在该地区未考虑重力异常时,姿态误差均方差横摇 23.19"、纵摇 7.03",采用该方法进行修正后,横摇 5.90"、纵摇 5.83",姿态精度大幅提高,如横摇精度可提高约 20"。

5 结论

通过航行试验发现,由于各地区重力异常不一样,导致系统的姿态误差的影响也不一样,在沿海地区的影响较大,其最大处可达 40"以上,而在远离了陆地较远处影响较小。运用该方法进行重力异

常的补偿,可以基本消除重力异常对于惯导姿态测量误差的影响,对提高惯导姿态测量精度进而提高测量船总体测控精度具有重要意义。但由于重力异常数据的获取是非实时的,实际重力异常数据受到各种扰动力的影响,因此仍然存在一定的误差,对于海洋重力异常的实时测量与惯导校正的技术有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Haxby W F. Gravity Field of the World's Oceans[R]. Arlington, Virginia: US Navy Naval Office of Research, 1985.
- [2] 方剑. 中国海及邻域重力场特征及其构造解释[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 42 - 49.
FANG Jian. Gravity Feature and Tectonic Interpretation in China Sea and Its Adjacent Regions[J]. Progress In Geophysics, 2002, 17(1): 42 - 49. (in Chinese)
- [3] 陈永冰, 钟斌. 惯性导航原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 165 - 169.
CHEN Yong - bing, ZHONG Bin. Principle of Inertial Navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 165 - 169. (in Chinese)
- [4] 姚兆宁, 孙小昶, 李成文. 舰载精密测量雷达星体标校方法及应用[J]. 现代雷达, 1999(4): 7 - 12.
YAO Zhao-ning, SUN Xiao-chang, LI Cheng-wen. Shipborne Accurate Instrumentation Radar Star Check out Method and Application[J]. Modern Radar, 1999(4): 7 - 12. (in Chinese)
- [5] 周朝猛, 朱伟康, 张同双, 等. 基于星体测量的惯导水平姿态标定技术[J]. 中国惯性技术学报, 2009(6): 253 - 257.
ZHOU Chao-meng, ZHU Wei-kang, ZHANG Tong-shuang, et al. Horizontal Attitude Calibration Technology of Inertial Nav-

igation Based on Star Measurement[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009(6): 253 - 257. (in Chinese)

作者简介:

冯鸿奎(1971—),男,江苏泰州人,1994年获学士学位,现为高级工程师,主要研究方向为惯性导航技术;

FENG Hong-kui was born in Taizhou, Jiangsu Province, in 1971. He received the B.S. degree in 1994. He is now a senior engineer. His research concerns inertial navigation technology.

Email: Girlfox@foxmail.com

李晓勇(1962—),男,湖南新宁人,研究员,主要研究方向为数据处理与精度分析;

LI Xiao-yong was born in Xinning, Hunan Province, in 1962. He is now a senior engineer of professor. His research concerns data processing and precision analysis.

钟德安(1964—),男,江苏江阴人,1990年获硕士学位,现为研究员,主要研究方向为测量船标校技术;

ZHONG De-an was born in Jiangyin, Jiangsu Province, in 1964. He received the M.S. degree in 1990. He is now a senior engineer of professor. His research concerns calibration techniques for TT&C ship.

赵李健(1981—),男,江苏淮阴人,2005年获硕士学位,现为工程师,主要研究方向为船姿船位技术;

ZHAO Li-jian was born in Huaiyin, Jiangsu Province, in 1981. He received the M.S. degree in 2005. He is now an engineer. His research concerns attitude and position technology for TT&C ship.

张同双(1968—),男,江苏淮阴人,2006年获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为船姿船位测量、标校、校飞。

ZHANG Tong-shuang was born in Huaiyin, Jiangsu Province, in 1968. He received the M.S. degree in 2006. He is now a senior engineer. His research concerns attitude and position determination, calibration, flight test for TT&C ship.