

DOI:10.13203/j.whugis20150630



文章编号:1671-8860(2018)04-0586-06

海空重力测量平台倾斜改正修正模型

刘 敏^{1,2} 黄漠涛^{2,3} 马越原^{1,2} 欧阳永忠² 邓凯亮² 陆秀平² 翟国君^{2,3}

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 海军海洋测绘研究所,天津,300061

3 海军工程大学导航工程系,湖北 武汉,430033

摘 要:针对现行海空重力测量平台倾斜改正模型存在的近似性问题,提出了顾及地球扰动重力和科里奥利(Coriolis)加速度两个水平分量影响的平台倾斜改正修正模型,从理论上论证了使用修正模型的合理性,通过数值计算评估了使用近似模型可能带来的误差影响量值,同时使用实际观测数据验证了修正模型的有效性,为修改完善海空重力测量作业标准和数据处理模型提供了必要的理论支撑。

关键词:海空重力测量;水平加速度;平台倾斜;修正模型

中图法分类号:P223; P229

文献标志码:A

随着现代科学技术的进步,近 20 a 来,海空重力测量特别是航空重力测量技术取得了重大进展,航空重力测量精度已经从原先的 ± 10 mGal ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ m/s}^2$) 提高到 $\pm (2 \sim 3)$ mGal 甚至更高的水平^[1-4]。航空重力测量技术能够取得如此迅猛的进步主要得益于 3 个方面的技术突破,一是差分 GNSS 测定载体位置、速度和加速度技术的实现;二是新型重力测量传感器的研制;三是海空重力测量数据处理精密模型的构建。对于使用陀螺稳定平台的重力测量系统,由于受海上和空中作业环境的影响和平台自身技术性能的制约,重力传感器观测记录不可避免地要受到水平加速度的干扰,必须对其进行必要的补偿和修正。围绕此问题,国内外学者开展了深入研究并提出了多种改正计算模型^[2,3],可归结为两大类。一类为直接使用加速度计观测测量和外部导航信息计算平台倾斜重力改正数^[5,6],即一步法模型;另一类为首先确定平台倾斜角再计算重力改正数^[1,7,8],即两步法模型。文献[1,2,9,10]研究比较了两类模型之间的差异和关联性,文献[11]从理论上证明了在一定近似条件下两类模型的等价性。中国现行航空重力测量国家标准推荐使用一步法改正模型^[12]。但研究结果表明,目前使用的

两类计算模型都是一定意义下的近似模型,只顾及了平台倾斜条件下载体运动引起的水平加速度干扰,而忽略了地球扰动重力和科里奥利(Coriolis)加速度两个水平分量的影响。计算分析结果显示,这种忽略是不恰当的,在高精度航空重力测量中必须顾及。为了强理解,同时避免称呼不明确造成不必要的误解,本文建议将传统的水平加速度改正改称为平台倾斜改正,并提出了顾及地球扰动重力和科里奥利加速度的修正模型。

1 传统计算模型及误差分析

1.1 传统计算模型

由文献[11]知,目前国内外普遍采用的平台倾斜重力改正计算模型主要包括所谓的一步法和两步法模型,其中,一步法计算模型为:

$$\delta a_H = (f_x^2 + f_y^2 - a_e^2 - a_n^2) / (2g_m) \quad (1)$$

式中, δa_H 代表平台倾斜重力改正数; f_x 和 f_y 分别为平台两轴敏感到的横向(x 轴)和纵向(y 轴)水平加速度; g_m 为重力仪观测值; a_e 和 a_n 分别代表由高精度定位信息导出的运动载体东向(e 轴)和北向(n 轴)水平加速度。两步法两个代表性的计算模型分别为:

收稿日期:2016-09-06

项目资助:国家自然科学基金(41474012,41174062,41374018);国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ12004503);国家安全重大基础研究计划(613219);国家重点研发计划(2016YFC0303007)。

第一作者:刘敏,博士生,主要从事海洋重力场测定理论方法及应用研究。Ouyangyz@sohu.com

通讯作者:邓凯亮,博士。dengkailiang036@163.com

$$\delta a_H = g_m \cdot (\theta_x^2 + \theta_y^2)/2 - a_{ex} \cdot \theta_x - a_{ny} \cdot \theta_y \quad (2)$$

$$\delta a_H = -\sin\theta_x \cdot f_x - \cos\theta_x \sin(\theta_y) \cdot f_y - (1 - \cos\theta_x \cos\theta_y) \cdot g_m \quad (3)$$

式中, θ_x 和 θ_y 分别为平台倾斜角 θ 在横轴和纵轴方向的分量; a_{ex} 和 a_{ny} 为运动载体水平加速度在横轴和纵轴方向的分量, 它们的计算式分别为:

$$\theta_x = (a_{ex} - f_x)/g_m \quad (4)$$

$$\theta_y = (a_{ny} - f_y)/g_m \quad (5)$$

$$a_{ex} = a_e \cos\alpha - a_n \sin\alpha \quad (6)$$

$$a_{ny} = a_e \sin\alpha + a_n \cos\alpha \quad (7)$$

式中, α 代表测量载体运动方位角; 其他符号同前。关于一步法和两步法计算模型的应用参见文献[11]。

1.2 观测误差影响分析

为了考察式(1)~式(3)中 3 个模型的计算精度, 按照误差传播定律讨论不同模型参量误差对平台倾斜改正计算结果的影响。首先对式(1)求偏导数, 然后作误差方差运算, 同时假设模型参量之间相互独立, 可得:

$$M_{\delta a}^2 = \left(\frac{f_x}{g_m}\right)^2 M_x^2 + \left(\frac{f_y}{g_m}\right)^2 M_y^2 + \left(\frac{a_e}{g_m}\right)^2 M_e^2 + \left(\frac{a_n}{g_m}\right)^2 M_n^2 + \left(\frac{f_x^2 + f_y^2 - a_e^2 - a_n^2}{2g_m^2}\right)^2 M_m^2 = M_1^2 + M_2^2 \quad (8)$$

式中, M_x 、 M_y 、 M_e 、 M_n 、 M_m 分别代表观测参量 f_x 、 f_y 、 a_e 、 a_n 、 g_m 的中误差; M_1 和 M_2 分别为:

$$M_1^2 = \left(\frac{f_x}{g_m}\right)^2 M_x^2 + \left(\frac{f_y}{g_m}\right)^2 M_y^2 + \left(\frac{a_e}{g_m}\right)^2 M_e^2 + \left(\frac{a_n}{g_m}\right)^2 M_n^2 \quad (9)$$

$$M_2^2 = \left(\frac{f_x^2 + f_y^2 - a_e^2 - a_n^2}{2g_m^2}\right)^2 M_m^2 \quad (10)$$

令 $M_x = M_y = M_e = M_n = M_m = M$, 则当 M 取不同量值大小时, 根据文献[4]提供的 Z 测线实测数据, 可分别计算得到 M_1 、 M_2 和 $M_{\delta a}$ 3 个误差估值大小, 见表 1。

表 1 观测误差对倾斜改正结果的影响/mGal

Tab.1 Effect of Observation Errors/mGal

M	M_1	M_2	$M_{\delta a}$
2	0.05	0.00	0.05
10	0.27	0.00	0.27
30	0.82	0.00	0.82
50	1.36	0.00	1.36
100	2.72	0.00	2.72

从表 1 结果看出, 4 个水平加速度分量 (f_x 、 f_y 、 a_e 、 a_n) 观测误差对倾斜改正的影响随观测误差量值的增大而增大, 垂直分量 (g_m) 观测误差的

影响则完全可以忽略不计, 这是因为相比 4 个水平加速度分量, 垂直加速度分量的绝对量值要大得多, 相同量值观测误差对其影响的敏感度要低得多的缘故。为此, 本文在后面的修正模型推导过程中, 不再特别强调垂直加速度分量必须事先作厄特弗斯改正(也即科里奥利加速度的第三分量)处理。值得注意的是, 尽管水平加速度分量观测误差的量值一般不会超过 10 mGal, 但如果是由模型近似原因引起比观测误差大得多的偏差, 则这种近似处理是不能忽略的, 本文将在下一节做进一步论述。

对于式(2)和式(3)两个模型, 可采用分步方式对其进行误差估计。首先对倾斜角计算误差进行估计, 由式(4)和式(5)得:

$$M_{\theta_x}^2 = (M_{ex}^2 + M_x^2)/g_m^2 \quad (11)$$

$$M_{\theta_y}^2 = (M_{ny}^2 + M_y^2)/g_m^2 \quad (12)$$

式中已经忽略了 g_m 观测误差的影响, 其他符号意义同前。令 $M_x = M_y = M_{ex} = M_{ny} = M$, 当 M 取不同量值大小时, 同样可求得倾斜角计算误差的估值, 见表 2 第二列。

表 2 观测误差对倾斜角和倾斜改正的影响

Tab.2 Effect of Observation Errors

M /mGal	$M_{\theta_x} = M_{\theta_y}/(^{\circ})$	$M_{\delta a}$ /mGal
2	0.60	0.06
10	2.98	0.27
30	8.93	0.82
50	14.88	1.37
100	29.76	2.73

根据误差传播律, 由式(2)可直接写出平台倾斜重力改正误差估计公式:

$$M_{\delta a}^2 = g_m^2 (\theta_x^2 M_{\theta_x}^2 + \theta_y^2 M_{\theta_y}^2) + a_{ex}^2 M_{\theta_x}^2 + \theta_x^2 M_{ex}^2 + a_{ny}^2 M_{\theta_y}^2 + \theta_y^2 M_{ny}^2 \quad (13)$$

按照前面的参数约定, 由式(13)可计算得到与式(2)相对应的平台倾斜重力改正误差估值 ($M_{\delta a}$), 具体见表 2。采用类似的方法可对式(3)进行误差估计, 估算结果与式(13)完全一致。对比表 1 和表 2 计算结果不难看出, 目前使用的两类平台倾斜改正模型误差估值不存在实质性的差异, 这也从另一侧面证明文献[11]的理论推演是正确的。

2 倾斜改正修正模型

如文献[1, 2, 7, 11]所述, 平台倾斜对重力观测造成的影响主要体现在两个方面, 一方面是由于平台倾斜使得各类水平加速度在重力传感器垂

向敏感轴上产生了附加的作用;另一方面是由于平台倾斜使得重力传感器感受到的不是真正重力垂线方向上的加速度。由此得知,只要发生平台倾斜,即使不存在水平加速度干扰,也必须进行平台倾斜重力改正。由此,本文建议将传统的水平加速度改正项改称为平台倾斜改正。需要指出的是,我们在前面特别强调“各类”水平加速度在重力传感器垂向敏感轴上产生了附加的作用,是因为已有众多国内外文献在推导和使用平台倾斜改正模型时^[1-3,5-12],几乎都一致将水平干扰加速度简化为单一的运动载体水平加速度。而实际上,在水平方向上除了运动载体加速度外,还存在地球扰动重力和由载体运动引起的科里奥利加速度分量。显然,忽略上述两类干扰水平加速度的影响是不合适的。为此,本文给出顾及3类水平加速度影响的平台倾斜改正计算修正模型。

首先给出对应于一步法的修正模型。由文献[11]知,一步法改正模型源于旋转不变式标量重力测量原理。根据动态重力测量基本方程:

$$\mathbf{g} = \mathbf{q} - \mathbf{f} \quad (14)$$

可得到:

$$(\mathbf{f})^2 = (\mathbf{q} - \mathbf{g})^2 \quad (15)$$

式中, \mathbf{g} 为重力加速度矢量; \mathbf{q} 代表科里奥利加速度和载体运动加速度的矢量和; \mathbf{f} 为重力传感器(加速度计)观测矢量。由式(15)可进一步得到:

$$\begin{aligned} f^2 &= f_z^2 + f_x^2 + f_y^2 = (q_u - g_u)^2 + \\ &(q_e - g_e)^2 + (q_n - g_n)^2 = \\ &G^2 + (q_e - \delta g_e)^2 + (q_n - \delta g_n)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

式中, G 代表各类垂向加速度的代数和; δg_e 和 δg_n 分别代表扰动重力加速度的东向和北向分量; q_e 和 q_n 表示为:

$$q_e = a_e + C_e \quad (17)$$

$$q_n = a_n + C_n \quad (18)$$

式中, C_e 和 C_n 分别代表科里奥利加速度的东向和北向分量;其他符号意义同前。采用与文献[11]相同的推导思路,可直接写出一步法的倾斜改正修正模型如下:

$$\begin{aligned} \delta a_H &= [f_x^2 + f_y^2 - (a_e + C_e - \delta g_e)^2 - \\ &(a_n + C_n - \delta g_n)^2] / (2g_m) \end{aligned} \quad (19)$$

对比式(1)和式(19)不难看出,两者的差异主要体现在后者增加了地球扰动重力和科里奥利加速度两个水平分量的影响。

对于两步法模型,不难理解,其修正公式的形式仍保持与式(2)和式(3)一致,不同的只是两个倾斜角计算式(4)和式(5)及两个水平轴(横和纵)方向的加速度分量计算式(6)和式(7)应有如下改变:

$$\bar{\theta}_x = (\bar{a}_{ex} - f_x) / g_m \quad (20)$$

$$\bar{\theta}_y = (\bar{a}_{ny} - f_y) / g_m \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \bar{a}_{ex} &= (a_e + C_e - \delta g_e) \cos \alpha - \\ &(a_n + C_n - \delta g_n) \sin \alpha \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \bar{a}_{ny} &= (a_e + C_e - \delta g_e) \sin \alpha + \\ &(a_n + C_n - \delta g_n) \cos \alpha \end{aligned} \quad (23)$$

显然,式(20)和式(21)与式(4)和式(5)、式(22)和式(23)与式(6)和式(7)之间的差异,同样表现为前者增加了地球扰动重力和科里奥利加速度两个水平分量的影响。

科里奥利加速度两个水平分量的计算公式为^[1,2,13]:

$$C_e = \left(\frac{v_e}{N+h} + 2\omega \cos \varphi \right) \cdot (v_u - v_n \operatorname{tg} \varphi) \quad (24)$$

$$C_n = \left(\frac{v_e}{N+h} + 2\omega \cos \varphi \right) v_e \operatorname{tg} \varphi + \frac{v_n v_u}{M+h} \quad (25)$$

式中, v_e 、 v_n 和 v_u 分别代表载体运动速度在当地水平坐标系的东、北、径(向上为正)向分量; ω 为地球自转角速度; φ 为地理纬度; h 为大地高; N 和 M 分别代表地球椭球的卯酉圈和子午圈曲率半径,其计算式为:

$$N = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi} \quad (26)$$

$$M = a(1 - e^2) / \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3} \quad (27)$$

式中, a 为地球椭球长半轴; e 为椭球第一偏心率。

扰动重力加速度可采用当前国际上最新发布的超高阶地球位模型(如EGM2008)进行计算,其两个水平分量计算式为^[14]:

$$\begin{aligned} \delta g_e &= -\frac{GM}{r^2 \cos \varphi} \sum_{n=2}^{\max} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n m (\bar{C}_{nm}^* \sin m \lambda - \\ &\bar{S}_{nm} \cos m \lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \delta g_n &= \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{\max} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m \lambda + \\ &\bar{S}_{nm} \sin m \lambda) \frac{d}{d\varphi} \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \end{aligned} \quad (29)$$

式中, GM 为地球引力常数; r 为地心向径; \bar{C}_{nm}^* 和 \bar{S}_{nm} 为已知的完全规格化位系数; $\bar{P}_{nm}(\sin \varphi)$ 为完全规格化缔合勒让德函数,由递推公式进行计算。其中:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\varphi} \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) &= \sqrt{(n-m)(n+m+1)} \cdot \\ \bar{P}_{nm+1}(\sin \varphi) - m \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \end{aligned} \quad (30)$$

3 实测数值计算与分析

平台倾斜重力改正修正公式与传统公式的差异,主要表现为前者比后者增加了地球扰动重力和科里奥利加速度两个水平分量的影响。从形式上看,就是在修正公式(19)中用 $(a_e + C_e - \delta g_e)$ 和 $(a_n + C_n - \delta g_n)$ 替代传统公式(1)中的 a_e 和 a_n ;在修正公式(20)、(21)中用 \bar{a}_{ex} 和 \bar{a}_{ny} 替代传统公式(4)、(5)中的 a_{ex} 和 a_{ny} ;在修正公式(22)、(23)中用 $(a_e + C_e - \delta g_e)$ 和 $(a_n + C_n - \delta g_n)$ 替代传统公式(6)和式(7)中的 a_e 和 a_n 。由此不难看出,传统公式相对于修正公式的模型误差可当作载体运动加速度 a_e 和 a_n 的观测误差进行讨论,也就是说,可将地球扰动重力和科里奥利加速度两个水平分量作为误差量,代入式(8)、式(11)和式(12)进行模型误差估计。

表 3 科里奥利和扰动引力加速度及倾斜改正计算结果比较/mGal

Tab.3 Results of Coriolis and Disturbed Gravitational Accelerations and Tilt Corrections/mGal

计算参量	西北至东南向测线					东南至西北向测线				
	最小	最大	平均	标准差	均方根	最小	最大	平均	标准差	均方根
C_e	318.66	360.79	340.17	11.21	340.36	-295.99	-277.68	-286.49	3.24	286.51
C_n	382.93	442.30	414.90	16.66	415.24	-360.40	-337.02	-349.90	5.62	349.95
δg_e	1.67	64.04	33.12	15.66	36.64	1.84	64.36	33.80	16.57	37.65
δg_n	-49.26	8.43	-23.96	15.73	28.66	-49.15	8.26	-24.35	16.33	29.32
$\delta a_{H传}$	-15.08	8.50	-1.34	2.41	2.76	-15.00	19.46	-1.13	3.13	3.33
$\delta a_{H修}$	-18.80	11.07	-1.45	2.82	3.17	-18.30	19.84	-1.26	3.56	3.78
$\delta a_{H传} - \delta a_{H修}$	-3.78	4.02	0.11	1.35	1.35	-2.62	3.56	0.13	1.13	1.14

由表 3 计算结果看出,科里奥利和地球扰动重力加速度对平台倾斜改正的影响最大可达数个 mGal,传统模型与修正模型计算结果的互差均方根值超过 1 mGal,它们与 § 1.2 所作的理论估算结果相吻合。显然,这样的影响量值对于现代高精度要求的海洋和航空重力测量作业,都是不可忽略的。因此,在实际应用中应当统一采用本文提供的修正模型进行平台倾斜重力改正计算。表 4 给出了使用倾斜改正修正模型前后上述重复测线计算结果符合性的对比情况,该结果同样说明使用修正模型替代传统模型实施平台倾斜改正是必要和有效的。从表 4 也看出,该重复测线往返观测结果之间存在一个比较明显的系统性偏差,具体原因待查。

4 结 语

通过理论分析发现,目前使用的海空重力测量平台倾斜改正模型,是忽略了地球扰动重力和

由式(24)、式(25)知, C_e 和 C_n 的量值主要取决于主项 $C_{e主} = 2\omega \cdot \cos\varphi \cdot v_n \cdot \text{tg}\varphi$ 和 $C_{n主} = 2\omega \cdot \cos\varphi \cdot v_e \cdot \text{tg}\varphi$ 的大小。对于相同的航速和地理纬度, $C_{e主}$ 在南北向航线上取得最大绝对值, $C_{n主}$ 则在东西向航线上取得最大绝对值,当取 $v = 300 \text{ km/h}$, $\varphi = 20^\circ$ 时, $C_{e主max} = C_{n主max} = 416 \text{ mGal}$ 。对照表 1 和表 2 估算结果可以看出,如果忽略掉如此大量值的干扰加速度的影响,可能引起平台倾斜改正出现 10 mGal 以上的偏差。又由文献[14]知,根据式(28)和式(29)计算得到的扰动重力加速度量值一般在数十 mGal,由此引起的平台倾斜改正误差也可达 mGal 级。根据文献[4]提供的实测资料,选取一条西北至东南向测线和另一条方向相反的东南至西北向重复测线,依次计算科里奥利和地球扰动重力加速度两个水平分量的大小,以及对应于传统模型和修正模型的倾斜改正数及其互差值。统计结果见表 3。

表 4 使用倾斜改正修正模型前后重复测线相互比对结果/mGal

Tab.4 Co-comparisons of Overlapping Measurements from Approximate and Exact Tilt Correction Models/mGal

模型	最小差	最大差	平均差	标准差	中误差
传统	-4.34	6.20	4.28	1.95	4.70
修正	-4.19	5.97	4.17	1.73	4.52

科里奥利加速度两个水平分量作用后的近似模型。实际数值计算表明,这种近似处理可能带来 mGal 级的误差影响。本文提出了重力平台倾斜改正的修正模型,同时使用实际观测数据验证了新模型的有效性,为下一步修改完善海空重力测量作业标准和数据处理模型提供了必要的理论支撑。

参 考 文 献

[1] Olesen A V. Improved Airborne Scalar Gravimetry for Regional Gravity Field Mapping and Geoid Determination[D]. Copenhagen: University of Copenhagen, 2002

- [2] Sun Zhongmiao. Theory, Methods and Applications of Airborne Gravimetry [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004(孙中苗. 航空重力测量理论、方法及应用研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2004)
- [3] Alberts B. Regional Gravity Field Modeling Using Airborne Gravimetry Data [C]. Publications on Geodesy 70, Netherlands Geodetic Commission, Delft, 2009
- [4] Ouyang Yongzhong, Deng Kailiang, Lu Xiuping, et al. Test of Multi-type Gravimeters and Analysis [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(4):6-11(欧阳永忠, 邓凯亮, 陆秀平, 等. 多型航空重力仪同机测试及其数据分析 [J]. 海洋测绘, 2013, 33(4):6-11)
- [5] Valliant H D. The Lacoste and Romberg Air/Sea Gravity Meter: An Overview [M] // Geyer R A. CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea. UK: CRC Press, 2nd Edition, 1991
- [6] Shi Pan, Sun Zhongmiao, Xiao Yun. Calculation and Spectra Analysis of Horizontal Acceleration Corrections for Airborne Gravimetry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(6):549-554(石磐, 孙中苗, 肖云. 航空重力测量中水平加速度改正的计算与频谱分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(6):549-554)
- [7] Swain C J. Short Note: Horizontal Acceleration Corrections in Airborne Gravimetry [J]. *Geophysics*, 1996, 61(1):273-276
- [8] Peters M F, Brozena J M. Methods to Improve Existing Shipboard Gravimeters for Airborne Gravimetry [C]. The IAG Symposium on Airborne Gravity Field Determination, Colorado, 1995
- [9] Sun Zhongmiao, Xia Zheren, Li Yingchun, et al. Horizontal Acceleration Correction for the L&R Airborne Gravimeter [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2007, 24(4):259-262(孙中苗, 夏哲仁, 李迎春, 等. L&R 航空重力仪的水平加速度改正 [J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(4):259-262)
- [10] Sun Zhongmiao, Zhai Zhenhe, Xiao Yun, et al. Systematic Error Compensation for Airborne Gravimetry [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(1):47-52(孙中苗, 翟振和, 肖云, 等. 航空重力测量的系统误差补偿 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(1):47-52)
- [11] Huang Motao, Ning Jinsheng, Ouyang Yongzhong, et al. Test and Equivalent Verification of Gravity Correction Models for Platform Tilt in Sea-Borne and Airborne Gravimetry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6):738-744(黄谟涛, 宁津生, 欧阳永忠, 等. 海空重力测量平台倾斜改正模型等价性证明与验证 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(6):738-744)
- [12] GJB 6561-2008. Rules for Operations of Airborne Gravimetry [S]. Beijing: Military Standard Press of the Headquarters of General Equipment, 2008(GJB 6561-2008. 航空重力测量作业规范 [S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2008)
- [13] Zhu Yonggang, Xu Zhengyang. Theory and Application of Inertial Surveying System [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1989(祝永刚, 徐正扬. 惯性测量系统的理论与应用 [M]. 北京:测绘出版社, 1989)
- [14] Huang Motao, Zhai Guojun, Guan Zheng, et al. The Determination and Application of Marine Gravity Field [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2005(黄谟涛, 翟国君, 管铮, 等. 海洋重力场测定及其应用 [M]. 北京:测绘出版社, 2005)

A Modified Correction Model for Platform Tilt in Air-Sea-Borne Gravimetry

LIU Min^{1,2} HUANG Motao^{2,3} MA Yueyuan^{1,2} OUYANG Yongzhong²
DENG Kailiang² LU Xiuping² ZHAI Guojun^{2,3}

1 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China

3 Department of Navigation, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: A modified correction model, has takes into account of the effect of two horizontal acceleration components of Coriolis force and disturbing gravitational attraction, aiming at platform tilt in air-sea-borne gravimetry is proposed for the approximation of existing models. The reasonableness of using modified model is analyzed and demonstrated theoretically. The amount of influence due to the

approximation of existing models is estimated by using numerical calculations. And a practical airborne gravimetry data set is used as a case study to test the efficiency of the proposed model. These works provide a reliable theoretical support to improve the existing models of data processing, uniform operation standards and for the next revision of existing rules for operations of airborne gravimetry.

Key words: air-sea-borne gravimetry; horizontal acceleration; platform tilt; modified model

First author: LIU Min, PhD candidate, majors in the studies of marine gravity field theory and applications. E-mail: Ouyangyz@sohu.com

Corresponding author: DENG Kailiang, PhD. E-mail: dengkailiang036@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos.41474012,41174062,41374018; the Great Scientific Instrument Development Project of China, No.2011YQ12004503; the National Security Basic Research Program of China, No.613219; the National Major Development Program of China, No.2016YFC0303007.

.....
(上接第 515 页)

plex indoor and underground space. Indoor map usually uses user-defined local plane coordinate system, which results in contradictions in terms of mathematics basic between indoor and outdoor map, and also among different building's indoor maps. Taking geographical coordinate system as the unified mathematics basic adopted by indoor map spatial data, this paper studied the method for transforming indoor map from local plane coordinate system into geographical coordinate system. Through analysis the applicability of traditional map mathematical transformation methods, this paper proposed a method for indoor map unified mathematical transformation based on transition projecting plane. Choosing a residential area's survey data to perform a transformation experiment, the results show that the method proposed in this paper can improve the accuracy of indoor map mathematical transformation efficiently in contrast to traditional methods.

Key words: indoor map; mathematics basic; local plane coordinate system; geographic coordinate system; transition projecting plane; Gauss-Krüger projection

First author: SUN Weixin, PhD, specializes in the geographic information intelligent service. E-mail: swxgis@163.com

Corresponding author: WANG Guangxia, PhD, professor. E-mail: wangguangxia2011@163.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503500; the National Natural Science Foundation of China, Nos.41771487,41371383; the National High-tech Research and Development Program (863 Program) of China, No.2013AA12A202.