

文章编号:1671-8860(2013)11-1261-05

文献标志码:A

# 海域多源重力数据融合处理的解析方法

黄谟涛<sup>1</sup> 欧阳永忠<sup>1,2</sup> 翟国君<sup>1</sup> 刘传勇<sup>1</sup>

(1 海军海洋测绘研究所,天津市友谊路40号,300061)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**在深入分析海域多源重力数据观测技术特性的基础上,提出了基于双权因子的多源数据网格化一步融合处理方法,以及基于分步平差、拟合、推估和内插相结合的多步融合处理方法,并通过实际算例验证了两种解析融合处理方法的有效性。

**关键词:**多源重力数据;融合处理;平差;内插;解析方法

中图法分类号:P229; P228.41

随着地球重力场信息获取技术的发展,重力测量数据种类日益丰富,测量精度不断提高<sup>[1]</sup>。如何有效地处理由各种不同测量手段获取的重力场观测数据成为研究热点。这些数据具有不同的频谱属性、分辨率、空间分布和误差特性,必须通过数据处理手段,进行有效融合处理。

国内外学者对多源重力数据融合问题提出了许多处理方法,主要有统计法和解析法两大类型。最小二乘配置是统计法的典型代表,由于该方法可以联合处理不同类型的重力数据,因此得到了广泛应用<sup>[2-8]</sup>。协方差函数的构建是配置法应用的核心问题,尽管可以通过自适应调整模型参数的方式来改善协方差函数的特性<sup>[7]</sup>,但由于经验协方差函数的建立必须以足够分辨率的观测数据为基础,因此在实际应用中要想获得较高逼近度的协方差函数模型,特别是三维空间协方差函数模型并非易事,基于配置法的融合处理效果也并非尽善尽美<sup>[6-8]</sup>。为此,不少学者仍致力于传统解析融合方法的研究,文献[9-10]基于利用残差重力异常修正重力位模型系数的思想,提出了融合卫星、航空、地面(海面)重力数据的迭代计算方案。本文针对以上三类数据源的技术特性,提出了基于分步平差、拟合、推估和内插相结合的多源重力数据融合处理方法,并通过实际算例验证了改进方法的有效性。

## 1 海域多源重力数据特性分析

目前国内外在海域获取地球重力场信息的主要技术手段包括卫星重力探测、卫星测高、航空和海面船测重力测量等<sup>[1,11-12]</sup>。考虑到卫星重力探测信息主要用于改善全球重力场位模型,暂不将其列入海域多源重力数据融合处理的研究范畴。

卫星测高技术可提供除两极以外的全球海域重力异常信息,空间分辨率可达 $1' \times 1'$ ,与海面船测重力相比较,符合精度在 $5 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>之间,在近岸海域,由于受地形地物和水文复杂环境的影响,测高数据会出现较大的误差。我国的航空重力测量工作起步较晚,目前实施区域主要限于陆海交界地带,覆盖范围非常有限,空间分辨率一般为 $5' \times 5'$ ,与地面实测数据相比较,符合精度在 $\pm 3 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>之间,同样存在 $4 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>左右的系统性偏差<sup>[8,12]</sup>。我国的海面船测重力工作起步较早,但由于受测量载体航行速度的限制,作业效率相对较低,覆盖范围也比较有限,空间分辨率在1~10 km之间不等,在良好的导航定位条件下,船测重力观测精度可达 $\pm (1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5})$  m/s<sup>2</sup><sup>[11]</sup>。此外由于在基准和系统转换方面的差异,卫星测高与海面船测重力之间还存在 $2 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$  m/s<sup>2</sup>的系

收稿日期:2013-07-10。

项目来源:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ12004503);国家863计划资助项目(2006AA06A202,2009AA121405);国家自然科学基金资助项目(41174062)。

统性偏差<sup>[11]</sup>。

从以上对比分析可知,海域三种主要重力数据源在覆盖范围、空间分辨率和精度水平等各个方面都存在较大差异,特别是它们之间还存在不可忽略的系统性偏差。

## 2 多源重力数据融合处理数学模型

将本文的多源重力数据融合问题描述为:以卫星测高、航空和海面船测获取的、已归算到平均海面的重力异常为基础,选择合理的数学模型,通过多源信息融合处理手段,构建阶段性优化的网格化基础数据模型,为后续应用提供数据支撑。

### 2.1 一步融合处理数学模型

本文研究的多源重力数据融合问题,实际上已经转变为网格化重力异常数字模型构建问题,也就是重力数据拟合插值问题。与普通拟合插值不同的是,这里要同时顾及多源数据的空间相关性和精度水平差异,即需要考虑两个方面因素的影响,一是已知点到数据内插点的距离因素,二是已知点的观测精度因素。为此,本文提出基于双权因子的重力数据网格化内插模型如下:

$$\Delta g_j = \sum_{i=1}^n p_1(d_{ij}) p_2(m_i) \Delta g_i / \sum_{i=1}^n p_1(d_{ij}) p_2(m_i) \quad (1)$$

式中,  $\Delta g_j$  代表待计算的网格点重力异常;  $\Delta g_i$  为已知的观测点重力异常;  $p_1(d_{ij})$  和  $p_2(m_i)$  分别代表反映距离远近和观测精度因素影响的权因子。参照 Shepard 方法的定权原则<sup>[1]</sup>, 取权函数  $p_1(d_{ij})$  为:

$$p_1(d_{ij}) = \begin{cases} 1/(d_{ij} + \epsilon)^2 \\ \frac{27}{4D_j} \left( \frac{d_{ij}}{D_j} - 1 \right)^2 \\ 0 \end{cases}$$

$$0 \leq \Delta \varphi_{ij} \leq \Delta \varphi_0 / 3, 0 \leq \Delta \lambda_{ij} \leq \Delta \lambda_0 / 3$$

$$\frac{\Delta \varphi_0}{3} < \Delta \varphi_{ij} \leq \Delta \varphi_0, \frac{\Delta \lambda_0}{3} < \Delta \lambda_{ij} \leq \Delta \lambda_0 \quad (2)$$

$\Delta \varphi_{ij} > \Delta \varphi_0, \Delta \lambda_{ij} > \Delta \lambda_0$  式中,  $d_{ij} = [\Delta \varphi_{ij}^2 + (\Delta \lambda_{ij} \cos \varphi_j)^2]^{1/2}$ ;  $D_j = [\Delta \varphi_0^2 + (\Delta \lambda_0 \cos \varphi_j)^2]^{1/2}$ ;  $\Delta \varphi_{ij} = |\varphi_i - \varphi_j|$ ;  $\Delta \lambda_{ij} = |\lambda_i - \lambda_j|$ ;  $(\varphi_i, \lambda_i)$  为已知观测点坐标;  $(\varphi_j, \lambda_j)$  为网格点坐标;  $\Delta \varphi_0, \Delta \lambda_0$  分别代表内插数据窗口在纬度和经度方向上的半宽度,一般取  $\Delta \varphi_0 = \Delta \lambda_0$ , 其大小视内插网格和观测点分布密度而定,单位取为角分;  $\epsilon$  是为防止权函数分母趋于零而加上的

小正数。式(1)中的权因子  $p_2(m_i)$  一般取为:

$$p_2(m_i) = 1/m_i^2 \quad (3)$$

式中,  $m_i$  代表已知点观测值中误差,单位为  $10^{-5}$   $m/s^2$ 。 $m_i$  主要用于反映不同数据源观测精度的差异,在同一种数据源内部,  $m_i$  一般取为常值。

对于空间分辨率和观测精度都有明显差异的多源重力观测数据,  $p_1(d_{ij})$  和  $p_2(m_i)$  双权因子可起到对内插值贡献大小进行合理调配的作用, 满足“距离越近, 贡献越大; 精度越高, 贡献也越大”的基本要求。

### 2.2 分步融合处理数学模型

计算过程简单易行是一步融合处理方法的特点,当多源数据空间分布比较均匀时,一步融合处理方法能获得比较理想的计算效果。但实际情况并非全都如此。为此,本文进一步提出基于分步平差、拟合、推估和内插相结合的多源重力数据融合处理方法,其主要思想是使用较高质量的数据源去校正较低质量的数据源。现以卫星测高与船测重力两种数据源融合处理为例,将其具体计算模型介绍如下。

首先,将卫星测高和船测重力两种数据源的系统性误差综合效应表示为如下形式的趋势面函数<sup>[13]</sup>:

$$\delta \Delta g = F(\varphi, \lambda) = a_0 + a_1 \Delta \varphi + a_2 \Delta \lambda + a_3 \Delta \varphi \Delta \lambda + a_4 \Delta \varphi^2 + a_5 \Delta \lambda^2 + \sum_{i=1}^n b_i Q_i(\varphi, \lambda),$$

$$Q_i(\varphi, \lambda) = [(\varphi - \varphi_i)^2 + (\lambda - \lambda_i)^2 \cos^2 \varphi + c]^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $\delta \Delta g = F(\varphi, \lambda)$  代表误差综合效应;  $(\varphi, \lambda)$  为测点坐标;  $\Delta \varphi = \varphi - \varphi_{\min}$ ,  $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_{\min}$ ,  $(\varphi_{\min} \sim \varphi_{\max}, \lambda_{\min} \sim \lambda_{\max})$  表示两种数据源重叠区域大小;  $a_i, b_i$  为待定系数;  $Q_i(\varphi, \lambda)$  为多面函数,  $(\varphi_i, \lambda_i)$  为数据节点坐标,一般选测点局部特征点(即局部最大最小值点)作为数据节点;  $c$  为拓展因子,一般选与测点最小间距大小相当即可。根据式(4),可将卫星测高和船测重力的观测数学模型表示为:

$$\Delta g = \Delta g_0 + F(\varphi, \lambda) + \Delta \quad (5)$$

式中,  $\Delta g$  代表重力异常观测值;  $\Delta g_0$  为重力异常真值;  $\Delta$  为观测白噪声,即偶然误差影响项。利用卫星测高重力异常可以内插出船测重力每个测点(这里把船测重力测点称为公共重复测点)上的重力异常,设  $\Delta$  的改正数为  $v$ , 则可在卫星测高和船测重力的公共重复测点上建立如下误差方程式:

$$v_k^w - v_k^c = -F_k^w(\varphi, \lambda) + F_k^c(\varphi, \lambda) + (\Delta g_k^w - \Delta g_k^c) \quad (6)$$

式中,下标  $k$  代表公共测点的序号; 上标  $w$  代表

卫星测高;上标<sub>c</sub>代表船测。将式(6)写成矩阵形式为:

$$\mathbf{V}^{(w,c)} = \mathbf{A}^{(w,c)} \mathbf{X}^{(w,c)} - \mathbf{L}^{(w,c)} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{V}$ 代表卫星测高和船测重力数据不符值改正数向量; $\mathbf{X}$ 为系统误差模型的待求参数向量; $\mathbf{A}$ 为系数矩阵; $\mathbf{L}$ 为卫星测高和船测重力对应点的不符值向量;上标<sub>(w,c)</sub>代表卫星测高和船测数据对应测点的相关值。

式(7)中,由于由两种数据源相减获得的不符值 $\mathbf{L}$ 是一种相对观测量,因此通过平差只能唯一地确定其待求参数的相对变化量,要想求得误差模型的绝对参量,必须增加必要的约束条件<sup>[14]</sup>。

为了简化数据处理解算过程,参照文献[14]的研究思路,将卫星测高和船测重力的融合处理分为4步进行:

1) 使用条件平差法对卫星测高和船测重力公共测点进行平差,根据式(6),可将条件平差模型简写为:

$$\bar{\mathbf{B}}\bar{\mathbf{V}} - \mathbf{L} = 0 \quad (8)$$

式中, $\bar{\mathbf{V}}$ 为包含偶然误差 $\Delta$ 和系统误差 $\delta\Delta g$ 在内的改正数向量, $\mathbf{B}$ 为由1和-1组成的系数矩阵, $\mathbf{L}$ 仍为卫星测高和船测重力对应点的不符值向量。方程式(8)的最小二乘解为:

$$\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{L} \quad (9)$$

相应的协因数阵为:

$$\mathbf{Q}_{\bar{\mathbf{V}}} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{B}^T)^{-1} \mathbf{B} \mathbf{P}^{-1} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{P}$ 为 $\mathbf{L}$ 的权矩阵。

2) 根据现代测量平差理论<sup>[15]</sup>,按式(9)求得 $\bar{\mathbf{V}}$ 值以后,可进一步将 $\bar{\mathbf{V}}$ 作为新型的观测量,使用与式(4)相同的误差模型函数,对包含偶然误差和系统误差的 $\bar{\mathbf{V}}$ 值进行滤波处理。与式(7)不同的是,这里只需分别独立地处理卫星测高和船测重力数据在重叠点处的“观测”信息(即 $\bar{\mathbf{V}}$ 值)。设卫星测高所对应的“观测”向量为 $\mathbf{L}^w = \bar{\mathbf{V}}^w$ ,误差模型待求参数向量为 $\mathbf{X}^w$ ,则类似于式(7),可建立相应的误差方程式如下:

$$\mathbf{V}^w = \mathbf{A}^w \mathbf{X}^w - \mathbf{L}^w \quad (11)$$

其最小二乘解为:

$$\mathbf{X}^w = (\mathbf{A}^{wT} \mathbf{P}_V^w \mathbf{A}^w)^{-1} \mathbf{A}^{wT} \mathbf{P}_V^w \mathbf{L}^w \quad (12)$$

式中, $\mathbf{A}^w$ 和 $\mathbf{P}_V^w$ 分别代表对应于卫星测高数据的误差方程系数阵和“观测”向量 $\bar{\mathbf{V}}^w$ 的权矩阵,实际计算时可视为等精度处理。

前面是把卫星测高数据作为一个整体来处理的,对于船测重力数据,考虑到测量过程中测线数据内部的相关性比测线之间的相关性更强,可对每条测线进行独立处理。此时,其误差模型可在

式(1)基础上简化为单一自变量模型,自变量可选为单一测线上的航行时间或测线弧长。

3) 利用相应的误差模型对卫星测高和船测重力数据进行系统偏差改正。

4) 将经过系统误差改正后的卫星测高和船测重力数据视为等精度观测,按一步融合处理方法完成网格化数字重力模型构建,此时只需考虑反映距离远近因素影响的单一权因子 $p_1(d_{ij})$ 。

当同时存在卫星测高、航空测量和船测重力三种数据源需要融合处理时,考虑到船测重力数据具有较高的精度和可靠性,可按照计算流程的前三步分别完成船测重力与卫星测高数据、船测重力与航空测量数据之间的系统偏差校正,最后使用经误差补偿后的三种数据源按步骤4)完成网格化数字重力模型的构建。

### 3 实际算例验证与分析

为验证之前提出的数据融合方法的有效性,选用一个海上实际重力观测网数据和对应区域的卫星测高数据进行融合处理分析。船测重力观测网由东西方向布设的50条主测线和南北方向布设的4条检查测线组成,测点总数180 012个,观测值变化范围为 $-101.0 \times 10^{-5} \sim 110.4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,主测线间距约10 km,检查测线间距约100 km,共求得主、检测线有效交叉点重力不符值200个,主、检测线相交内符合精度为 $\pm 0.68 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ;卫星测高数据采用丹麦国家空间中心于2010年发布的覆盖全球的 $1' \times 1'$ 空间重力异常数据集DNSC08<sup>[16]</sup>,由于对近岸测高数据进行了二次波形重构处理,因此该数据集整体精度得到显著提升,在部分海区与船测重力比对的符合精度优于 $\pm 4 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。本算例使用的数据覆盖范围为 $4.5^\circ \times 4^\circ$ ,包括 $1' \times 1'$ 网格卫星测高重力数据64 800个,卫星测高重力与相对应的船测重力测点分布如图1所示。由网格点卫星测高重力内插船测离散点处卫星测高重力,可求得它们之间的不符值,具体统计结果如表1所示(见误差补偿前一行)。

表1 测点船测重力与卫星测高内插重力不符值统计结果( $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Tab. 1 Statistics of Discrepancies Between Ship-measured and Satellite-derived Gravity Anomalies Before and After Error Compensation ( $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

参量	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
误差补偿前	20.49	-23.58	-2.21	4.00	3.34
误差补偿后	10.11	-10.46	-0.00	1.45	1.45

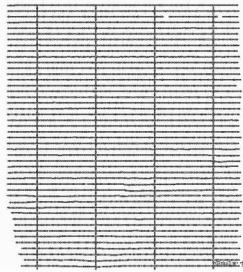


图1 船测重力航迹图

Fig. 1 Tracks of Ship-measured Gravity

首先使用本文提出的一步融合处理数学模型对卫星测高和船测重力数据进行融合处理,形成融合处理后的 $1' \times 1'$ 空间重力异常数据模型(记为模型一),计算时取内插窗口半宽度: $\Delta\varphi_0 = \Delta\lambda_0 = 1.1'$ ,海面船测重力观测值中误差取为 $m_1 = \pm 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,卫星测高重力观测值中误差取为 $m_2 = \pm 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

接着使用本文提出的多步融合处理数学模型对卫星测高和船测重力数据进行融合处理,形成融合处理后的另一套 $1' \times 1'$ 空间重力异常数据模型(记为模型二),计算参数取值与前面相同。经误差补偿后的卫星测高与船测重力相交点不符值统计结果也列于表1(见误差补偿后一行)。

为了说明模型一和模型二对船测重力数据的符合程度,分别使用两个模型网格数据内插船测点位重力异常,并将其与船测数据作比较,计算结果如表2所示。两个模型之间的互差统计结果也列于表2,两模型互差值的影像图如图2所示。表3同时列出了融合模型一和模型二与 $1' \times 1'$ 网格卫星测高重力数据的比对统计结果。

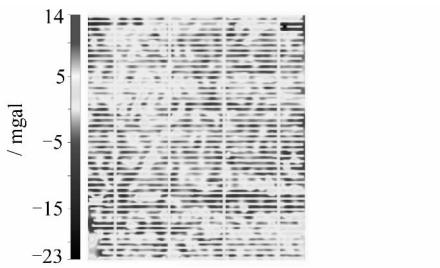


图2 模型一与模型二差值影像图

Fig. 2 Image of Differences Between Models One and Two

表2 融合模型值与船测重力数据互差

统计结果/ $(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$ Tab. 2 Statistics of Discrepancies Between the Models and Ship-born Anomalies/ $(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$ 

模型	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
模型一	15.82	-14.87	-0.08	1.24	1.24
模型二	15.72	-15.01	0.00	1.23	1.23
模型一与 模型二互差	14.19	-22.55	-1.07	2.28	2.01

表3 融合模型值与卫星测高重力数据  
互差统计结果/ $(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$ Tab. 3 Statistics of Discrepancies Between the Models and Satellite-derived Anomalies/ $(10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})$ 

模型	最大值	最小值	平均值	均方根	标准差
模型一	23.00	-16.43	1.21	2.86	2.59
模型二	25.80	-18.12	2.29	3.80	3.03

由表2和图2可知,虽然两个融合模型对船测数据的逼近度都很高,但两模型互差值在一些区域出现了比较明显的阶梯式变化。这显然与一步融合处理方法在船测重力测线中间地带出现船测重力数据控制空白情况有关。在这些区块,卫星测高重力数据得不到有效修正,因此,在局部区域融合重力异常可能出现阶梯式变化。表2和表3结果说明,模型一只是在船测点位附近取得了较好的融合效果,在其他大部分区块主要还是体现卫星测高单一数据源的作用。与此相反,多步融合处理方法则是通过分步平差和误差补偿,从整体上消除两种数据源之间的不符,因此不会出现阶梯式变化现象,能够同时体现两种数据源的互补作用。结合表1、表2、表3和图2可以看出,就整体融合效果而言,模型二要明显好于模型一,特别是在消除两种数据源之间的系统性偏差方面,模型二优势更加明显,它充分体现了以稀疏高精度数据为控制,修正其他较低精度数据源融合处理方法的主要特点。

## 4 结语

针对海域多源重力观测数据的技术特点,本文提出了一步和多步融合处理方法,前者适用于多源数据分布密度比较均匀的区域建模,后者适用于多源数据分布密度差异较大时。相较于传统的统计融合处理方法,解析法具有计算过程简单、适用范围更广、融合效果更好等诸多优点,具有较好的推广应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 李建成,陈俊勇,宁津生,等. 地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003
- [2] Tscherning C C, Rubek F, Forsberg R. Combining Airborne and Ground Gravity Using Collocation[J]. Geodesy on the Move, 1998, 119:18-23
- [3] Strykowski G, Forsberg R. Operational Merging of Satellite, Airborne and Surface Gravity Data by Draping Techniques[J]. International Association of Geodesy Symposia, 1998, 19:243-248

- [4] Tziavos I N, Sideris M G, Forsberg R. Combined Satellite Altimetry and Shipborne Gravimetry Data Processing[J]. Marine Geodesy, 1998, 21: 299-317
- [5] Kern M, Schwarz K P, Sneeuw N. A Study on the Combination of Satellite, Airborne and Terrestrial Gravity Data[J]. Journal of Geodesy, 2003, 77: 217-225
- [6] 邹贤才,李建成. 最小二乘配置方法确定局部大地水准面的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(3): 218-222
- [7] 翟振和,孙中苗. 基于配置法的局部重力场延拓模型构建与应用分析[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1700-1706
- [8] 翟振和. 陆海交界区域多源重力数据的融合处理方法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2009
- [9] Kern M. An Analysis of the Combination and Downward Continuation of Satellite, Airborne and Terrestrial Gravity Data[OL]. <http://www.geomatics.ucalgary.ca/links/GradTheses.html>, 2003
- [10] 郝燕玲,成怡,刘繁明,等. 融合多类型海洋重力数据算法仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 4 897-4 900
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003
- [14] 黄谟涛,翟国君,欧阳永忠,等. 海洋重力测量误差补偿两步处理法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 251-255
- [15] 黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京:解放军出版社, 1990
- [16] Andersen O B, Knudsen P. The DNSC08GRA Global Marine Gravity Field from Double Retracked Satellite Altimetry[J]. J Geod, 2010, 84: 191-199

第一作者简介:黄谟涛,博士生导师,主要研究方向为海洋重力场测量理论方法及海洋测深数据处理。

E-mail: Zhaigj@163.com

## Analytical Methods of Multi-source Gravity Data Fusion Processing in the Sea Area

HUANG Motao<sup>1</sup> OUYANG Yongzhong<sup>1</sup> ZHAI Guojun<sup>1</sup> LIU Chuanyong<sup>1</sup>

(1 Navel Institute of Hydrographic Surveying and Charting, 40 Youyi Road, Tianjin 300061, China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Nowadays, extensive marine gravity measurements, airborne gravity measurements and satellite gravity data exist for sea areas, and can be combined to build a precise digital gravity model. Based on a brief analysis of multi-source gravity data characteristics, we propose two new analytical methods for optimal combination of the marine, airborne and satellite gravity data. The first new method is called one-step fusion processing, in which an interpolation model is used to grid the multi-source gravity data with a double weight factor. The other new method is called multi-step fusion processing, in which the data management procedure is modified to a four step process based on the theories of adjustment, filtering, prediction and interpolation. When compared to the traditional statistical methods, such as Least Square Collocation, using these two new approaches can simplify data fusion procedures, with stable and reliable computation results. Finally, a practical marine gravity measurement and a satellite gravity data set are used as a case study to demonstrate the efficiency of these proposed analytical data fusion processing methods.

**Key words:** multi-source gravity data; fusion processing; adjustment; interpolation; analytical method

**About the first author:** HUANG Motao, Ph D supervisor. He is engaged in marine gravity field and data processing for marine surveying.  
E-mail: Zhaigj@163.com