

文章编号:1001-1595(2011)05-0736-09

导航用重力梯度基准图构建方法的比较研究

钱 东, 刘繁明, 李 艳, 张迎发

哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

Comparison of Gravity Gradient Reference Map Composition for Navigation

QIAN Dong, LIU Fanming, LI Yan, ZHANG Yingfa

College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: In order to overcome some drawbacks, such as little consideration of existing gravity database and physical meaning of the modeled results in reference map composition researches, a mapping method which starts from Free-air anomaly and Bouguer anomaly data is proposed. Based on gravity reduction theory, principle of the method is derived first, and then key algorithms in the computation is introduced. Effectiveness of the approach is analyzed detail by detail through two application examples, the results demonstrate that most value and characteristics of the acquired reference map compare favorably with measured gravity gradient data when high resolution gravity anomaly appears, which embodies practical value of the method. In addition, correlative software work can be referenced for the study of GGANS.

Key words: gravity; gravity gradient; navigation; reference map; matching

摘 要: 系统研究一种基于自由空间异常或布格异常数据的构图方法, 避免相关研究构建梯度图时较少考虑标准测量数据, 构图结果物理意义不明确和缺乏实用性的缺点。以重力归算理论推导构图方法原理, 然后用频域算法实现构图过程中两个关键计算过程, 通过算例分析构图效果。所构基准图数值、轮廓等关键特征均与实测重力梯度吻合较好, 证明该方法在重力梯度辅助导航基准图构建中的实用价值。

关键词: 重力; 重力梯度; 导航; 基准图; 匹配

中图分类号: P223 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(60834005)

1 引 言

重力梯度辅助导航实用化研究的瓶颈多年集中于重力梯度仪和重力梯度基准图两个问题。重力梯度测量目前正步入标准化勘探阶段^[1], 在商业市场逐渐被接受已是不争的事实^[2-5]。通过航空重力梯度测量实现大范围基准数据库的构建, 仍需要漫长的过程^[6]。重力梯度数据缺乏不便于匹配算法、匹配区域选择等理论研究的开展^[7], 实际应用也要求系统存储大量基准数据以增强辅助导航的区域适应性。近几年, 理论模型逼近重力梯度的研究取得一定成果, 为构造重力梯度辅助导航图提供了基础。

重力梯度可用地形数据建模, 如棱柱法^[8]、直接数字积分^[9]和快速傅里叶变换(FFT)等。为建立基准梯度图, 文献^[10]曾以棱柱法为基础, 提出基于高分辨率 DEM 的构图方法, 并简单分析了计算半径、高程误差和密度误差对构图精度的影

响。由于重力梯度是地下介质、周围地形、纬度和高度等因素综合作用的结果, 地形数据建模能反映地形起伏引起的重力梯度变化, 却得不到高精度逼近结果。重力梯度是重力的一阶导数, 因此也可用重力数据建模^[11]。采用高分辨率重力数据计算梯度的方法常用于评价重力梯度仪测量精度^[12-15], 文献^[6]也在其重力梯度辅助导航研究中提出了 EGM96 重力模型构建基准图的方法。当前重力数据还未全面达到 DEM 的分辨率水平, 低分辨率重力数据建模只能反映重力梯度的低频特征, 使这类方法的适用范围受到约束。文献^[16]兼顾当前 DEM 数据和重力数据的现状, 提出 DEM 和重力数据联合建模。文献^[17-19]相继开展了联合建模在基准梯度图构建方面的应用研究。联合构图用 DEM 数据计算重力梯度高频特征, 同时用重力数据计算地质密度变化等因素引起的梯度, 理论上可提高构图精度。相关研究在构图过程中对数据来源、构图方法精度有所

考虑,但实用性尚显不足。一方面,构图模型推导不够精确和深入。上述文献一般先单独计算DEM和重力数据引起的重力梯度,然后将计算梯度相加得到结果,而两种计算结果能否直接相加、相加后有无物理意义欠缺考虑。另一方面,重力数据利用只以EGM96模型为主。EGM96模型计算局部范围的重力梯度基本为常数,并不能充分发挥重力数据反映密度异常的能力,采用通用重力数据库进行重力梯度建模还未见研究。而DEM和重力数据出自不同数据库,是否需要数据格式和参考坐标系转换,不同分辨率数据构图结果的融合、算法实现等具体问题还少有讨论。上述方法的构图结果能模拟重力梯度的数量级和基本特性,却与实际重力梯度存在较大差别。

众所周知,基准梯度图始终是重力梯度匹配不可回避的问题。无论仿真还是实用,都期望构图结果能与实测数据趋于一致。本文结合实际重力数据库常用的数据形式,深入研究了基于自由空间重力异常和布格重力异常的基准梯度图构建方法。通过算例具体讨论构图过程中的若干问题和不同重力数据的构图精度,以期提高重力梯度构图结果的实用性。

2 原理

为获取感兴趣的重力异常,重力观测数据通常经过不同的改正,从而形成了各种重力异常。为便于描述,首先给出以下两个常用定义。

定义1:自由空间重力异常(free-air gravity anomaly)是重力观测值作高度改正和正常场改正后所得的结果^[20]

$$\Delta g_{FA} = g_0 - g_T + \left(\frac{\delta g}{\delta z}\right)H \quad (1)$$

式中, Δg_{FA} 为自由空间重力异常; g_0 为经零点漂移改正、厄特弗斯改正后的重力观测值; g_T 为测点正常重力值; H 为测点高度; $\delta g/\delta z$ 为正常重力垂直梯度,通常取值 0.3086 mGal/m ($1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ cm/s}^2$)。

定义2:布格重力异常(Bouguer anomaly)是在自由空间重力异常基础上进行地形改正和中间层改正所得的结果^[21]

$$\Delta g_{BA} = \Delta g_{FA} - \Delta g_{BC} - \Delta g_{BB} + \Delta g_{TC} \quad (2)$$

式中, Δg_{BA} 为布格重力异常; Δg_{BC} 为中间层改正; Δg_{BB} 为曲率改正; Δg_{TC} 为地形改正。

式(2)中,中间层改正计算公式为

$$\Delta g_{BC} = 2\pi G\rho h \quad (3)$$

式中, ρ 为地质体密度; h 为地形高度; G 为万有引力常量($6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$)。

曲率改正采用如下近似公式^[22]

$$\Delta g_{BB} = 1.464h - 0.3533h^2 + 0.000045h^3 \quad (4)$$

自由空间异常和布格异常是重力、重力梯度测量中最常用的数据形式,重力测量规范中一般也要求将观测值归算为这两种异常。自由空间重力梯度异常包含了周围地形和地下介质共同作用引起的重力梯度,特征更明显,实际使用中可将其作为辅助导航的匹配对象。因此基准图构建的目标应在于自由空间重力梯度异常。从重力归算角度出发,本文推导了三种方法。

2.1 基于自由空间重力异常

重力梯度为重力的一阶导数,利用自由空间重力异常可直接求导计算自由空间重力梯度异常而得到基准梯度图。设重力与重力梯度间的转换用 P 表示,则该过程可表示为

$$\Delta \Gamma = P(\Delta g_{FA}) \quad (5)$$

式中, $\Delta \Gamma$ 为待求重力梯度。

该方法求得的重力梯度分辨率将和所用重力数据分辨率相同。重力异常数据分辨率较高时,直接利用自由空间重力异常计算可很好地逼近重力梯度。

2.2 基于布格重力异常

由于布格重力异常在归算时已进行了中间层和地形改正,它只包含地壳内各种偏离正常密度分布的地质体和地壳下界面起伏的影响,因此用布格重力异常构图时,还要加入其他因素引起的重力梯度异常。

由式(2)有

$$\Delta g_{FA} = \Delta g_{BA} + \Delta g_{BC} + \Delta g_{BB} - \Delta g_{TC} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,用布格重力异常计算自由空间重力梯度,可先重新计算中间层改正 Δg_{BC} 、曲率改正 Δg_{BB} 和地形改正 Δg_{TC} ,然后用下述公式计算得到待求重力梯度

$$\Delta \Gamma = P(\Delta g_{BA} + \Delta g_{BC} + \Delta g_{BB} - \Delta g_{TC}) \quad (7)$$

显然,布格重力异常数据计算重力梯度同样存在分辨率问题,而且计算中间层改正、曲率改正要用到地形数据。

2.3 重力异常和DEM联合构图

文献[15]的结果表明联合构图在重力数据分辨率不足时能取得满意效果。公式(7)中,

$P(\Delta g_{TC})$ 表示地形改正引起的重力梯度。联合构图即当布格重力异常数据分辨率较低时, 不计算该项, 而用高分辨率 DEM 直接计算地形引起的重力梯度。设 DEM 与重力梯度之间的转换为函数 Q , 则有

$$\Delta\Gamma = P(\Delta g_{BA} + \Delta g_{BC} + \Delta g_{BB}) - Q(h) \quad (8)$$

对于低分辨率自由空间重力异常数据, 将式(2)代入式(8), 同样可得

$$\Delta\Gamma = P(\Delta g_{FA} + \Delta g_{TC}) - Q(h) \quad (9)$$

式(8)和式(9)为重力异常和 DEM 联合构建自由空间重力梯度图的数学模型。两式中, 前半部分利用重力异常数据, 体现质量体密度等因素引起的梯度变化, 后半部分则利用地形数据。可以看出, 这种构图方法关键在于重力数据到重力梯度的计算(P)和 DEM 到重力梯度的计算(Q)。

3 算法

利用重力数据和地形数据计算重力梯度有多种算法。文献[11]先后提出了斯托克斯积分、最小二乘配置等重力数据计算重力梯度的算法并进行了对比; 文献[23]则提出用重力数据计算全张量重力梯度的快速傅里叶变换(fast fourier transform)算法, 结果表明该算法均方根误差在 $2E(1E=10^{-9} \text{ s}^{-2})$ 左右。地形数据计算重力梯度常采用棱柱方法。棱柱法模型计算稳定, 却存在计算速度偏慢的缺点, 目前已基本被一些频域计算方法取代。考虑到重力梯度匹配算法在大范围构图时对计算速度、实时性有较高要求, 采用两种频域算法实现了 P 和 Q 的计算。

3.1 重力数据计算重力梯度(P)

重力数据计算重力梯度的频域算法主要基于傅里叶变换。设重力数据的傅里叶变换为

$$D(k) = \mathfrak{F}(g(x, y)) \quad (10)$$

式中, x, y 为水平坐标; \mathfrak{F} 表示傅里叶变换; g 和 D 则分别为变换前后的重力异常。

则由傅里叶变换微分定理可得到重力和重力梯度的频域关系^[23]

$$\Gamma_{ij}(k) = \mathbf{K}D(k) \quad (11)$$

式中, Γ_{ij} ($i = x, y, z; j = x, y, z$) 分别对应各自方向的梯度张量, 且有

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \frac{-k_x^2}{|k|} & \frac{-k_x k_y}{|k|} & -ik_x \\ \frac{-k_x k_y}{|k|} & \frac{-k_y^2}{|k|} & -ik_y \\ -ik_x & -ik_y & |k| \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, k_x, k_y 为 x, y 方向波数, $k_x = 2\pi f_x, k_y = 2\pi f_y, f_x, f_y$ 为空间频率, $|k| = -ik_z$ 且 $|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ 。

在式(11)基础上, 进行傅里叶反变换可进一步得到重力梯度空间域结果

$$\Gamma_{ij}(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}[\Gamma_{ij}(k)] \quad (13)$$

重力梯度匹配时航空和水上计算时的基准面有所不同, 因此构图过程中可能还会涉及数据延拓, 采用的延拓公式为^[24]

$$D(k) = D(k, 0)e^{-2\pi k z} \quad (14)$$

式中, z 为延拓高度, 向上为正, 向下为负。

鉴于重力向下延拓是不稳定的过程, 这里采用向上延拓方法。即水下应用时将艇载测量值延拓到水准面后匹配; 航空应用时则先将水准面数据延拓到飞行平面后再匹配。

3.2 地形数据计算重力梯度(Q)

文献[18]在其重力梯度辅助导航的研究中曾利用频域 Parker 算法构建基准梯度图, 该算法计算重力梯度时对角线张量存在常值偏差^[9], 为避免该缺点, 这里在利用地形数据计算重力梯度时采用 Forsberg 算法。

重力梯度定义为引力势求二阶导数, 根据牛顿第二定律, 有

$$\Gamma_{ij}(x_0, y_0) = G\rho \int_V \frac{\partial^2}{\partial i \partial j} \frac{1}{r} dv \quad (15)$$

式中, G 为地球引力常数; ρ 为密度; r 为观测点到计算点的位矢; $\Gamma_{ij}(x_0, y_0)$ 为观测点重力梯度。

令 $F_{ij} = \frac{\partial^2}{\partial i \partial j} \frac{1}{r}$, 代入式(15)有

$$\Gamma_{ij}(x_0, y_0) = G\rho \iint_A \int_0^{h(x, y)} F_{ij} dz dA \quad (16)$$

式中, $h(x, y)$ 为网格化地形高度。

Forsberg 算法核心思想是对 F_{ij} 进行泰勒展开并以卷积积分表示。以式(16)为基础, 文献[9]推导 Forsberg 算法的卷积形式为^[9]

$$\Gamma_{ij}(x_0, y_0) = G\rho \sum_{n=1}^{\infty} d_{ij}^{n-1} * h^n(x, y) \quad (17)$$

式中, $*$ 为卷积; n 为泰勒展开阶数, 且

$$d_{ij}^{n-1} = \frac{F_{ij}^{n-1}}{n!} \quad (18)$$

卷积可以采用傅里叶变换进行频域计算, 然后反变换到空间域, 即

$$\Gamma_{ij}(x_0, y_0) = G\rho \sum_{n=1}^{\infty} \mathfrak{F}^{-1}[\mathfrak{F}(d_{ij}^{n-1})\mathfrak{F}(h^n)] \quad (19)$$

4 计算程序的设计

为在某重力梯度辅助导航仿真系统中实现高精度重力梯度基准图的构建,利用 MATLAB 编写了构图方法的相关应用软件。软件共三部分,分别完成由重力计算重力梯度、由地形计算重力梯度及联合构图。

4.1 程序 1: GA2GG.M

该程序实现 2.1 节中所述 FFT 算法,完成重力数据计算重力梯度的功能。数据可以是自由空间异常或者布格异常,推荐采用类似 XYZ 格式的规则网格文件,存储内容为经度、纬度和重力值(目前还不支持其他类型的专业软件格式)。程序运行时需要用户输入数据文件的路径、网格间距和数据维数等参数。以下为该部分程序的伪码:

步骤 1 导入重力异常数据;

步骤 2 输入网格间距 Δx 、 Δy , 维数 m 、 n 参数;

步骤 3 生成 x 、 y 方向空间频率和波数,例如 x 方向上空间频率为

$p = 0 : m - 1$;

$q = 0 : n - 1$;

for $ctr = 1 : m$

if $p(ctr) \leq (m / 2 - 1)$

$f_x(ctr) = p(ctr) / (m\Delta x)$;

else

$f_x(ctr) = (p(ctr) - m) / (m\Delta x)$;

end

end

步骤 4 重力异常数据傅里叶变换 $D(k)$;

步骤 5 计算矩阵 K ;

步骤 6 $F_{ij}(k) = KD(k)$;

步骤 7 $F_{ij}(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[F_{ij}(k)]$;

步骤 8 保存数据。

4.2 程序 2: DEM2GG.M

程序实现 Forsberg 算法,完成由地形计算重力梯度的功能。数据格式和参数与程序 1 基本相同,但还要求给出计算点高度参数。该算法关键是求解 F_{ij} 的 $n-1$ 阶导数。为提高效率,程序中以符号函数形式对 F_{ij} 求导,然后进行变量替换和数值计算。展开阶数 n 取至 20 阶,求出 F_{ij} 后计算 d_{ij} ,然后求计算 d_{ij} 和 $h(x, y)$ 的傅里叶变换。逐阶叠加后得到频域重力梯度。最后求反变换转换到空间域。以下为该部分程序的伪码:

步骤 1 导入 DEM 数据;

步骤 2 输入网格间距 Δx 、 Δy , 数据维数 m 、 n 和计算高度 alt 参数;

步骤 3 计算距离矩阵 r

$p = 0 : m - 1$;

$q = 0 : n - 1$;

for $ctr = 1 : m$

$r_x(ctr) = p(ctr) \Delta x$;

end

for $ctr = 1 : n$

$r_y(ctr) = q(ctr) \Delta y$;

end

$r = \text{sqrt}(r_x^2 + r_y^2 + alt^2)$;

步骤 4 迭代求解重力梯度频域值

$sigma = 0$;

for $i = 1 : 20$

$F_{ij} = F^{(i-1)}(r, alt)$;

$sigma = sigma + \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(F_{ij}) / i! \mathcal{F}(h'))$;

end

步骤 5 $F_{ij}(x, y) = G_0 sigma$;

步骤 6 保存数据。

4.3 程序 3: COMBINE2GG.M

该程序以上述两程序为基础,完成重力异常和 DEM 联合构图的功能。目前重力数据分辨率通常都不高,因此联合构图常用于提高构图结果的细节。该程序需要将 DEM 和重力数据同时导入并完成相应参数设置,同时在运行过程中完成对程序 1 和程序 2 的调用。可用重力数据分为自由空气异常或布格异常两种,二者计算步骤也有所不同。其伪码如下:

步骤 1 导入 DEM 和重力数据;

步骤 2 输入数据分辨率 Δx 、 Δy , 维数 m 、 n 和计算高度 alt 等参数;

步骤 3 判断重力数据类型

if free-air data

步骤 3.1 计算布格改正、曲率改正和简单布格改正并延拓至飞行高度;

步骤 3.2 计算地形改正;

步骤 3.3 计算经过完全布格改正后重力异常;

end

步骤 4 用程序 1 计算布格异常引起的重力梯度;

步骤 5 用程序 1 计算布格改正、曲率改正

引起的重力梯度;

步骤6 用程序2计算DEM引起的重力梯度;

步骤7 由公式(8)求联合梯度;

步骤8 滤波、作图、保存数据。

上述程序中,计算结果均保存为.XYZ格式,前两列分别为纬度、经度(有时为x、y方向上的网格序号),其后为重力梯度六个张量。

5 应用

通过两个算例,具体说明了构图过程中重力异常数据获取、格式和应用等问题。同时,重点以实测重力数据为参考,分析不同数据取得的构图效果。

5.1 算例1: 澳大利亚 West Arnhem Land 地区

Bell Geospace 在澳大利亚 West Arnhem Land 地区进行了航空重力梯度测量,文献[13]给出了部分测量结果。该次测量采用 Air-FTG 重力梯度测量系统,测量过程中飞行高度 655 m,东-西、南-北向测线间隔分别为 2 km 和 20 km。测量区域大小约为 92×24 km,如图 1(a) 中黑框所示。图 1(b)是该区域 Γ_{zz} 张量的自由空间异常实测结果。

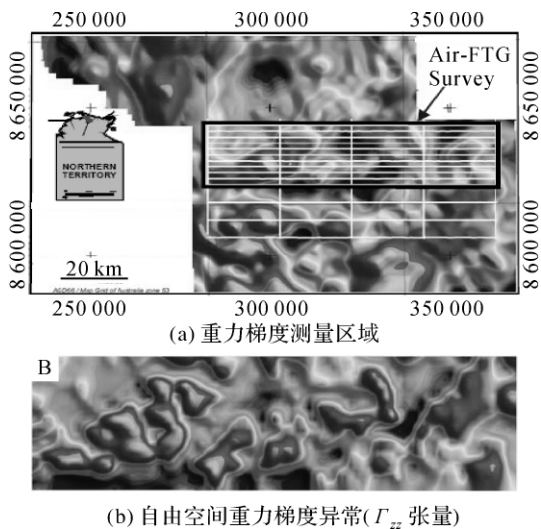


图1 试验区及 Air-FTG 测量结果^[14]

Fig. 1 Test area and measured free-air gravity gradient data by Air-FTG^[14]

从澳大利亚地球科学中心 (geoscience australia, GA) 下载该区域重力和 DEM 数据^[25], 用于测试构图方法的正确性。该网站重力数据有自由空间异常和布格异常两种,均经过滤波处理,

空间半波长约为 2.1 km^[22]。数据参考系统为 GDA94,高程基准为 AHD71,分辨率 0.004°。DEM 采用 GEODATA 数字高程模型,参考坐标系也为 GDA94,分辨率 9''^[26]。数据库下载时均为 .ers 格式,下载后转换为 .XYZ 格式。图 2 给出了试验区域的自由空间重力异常、布格重力异常和 DEM 数据,其统计信息如表 1 所示。

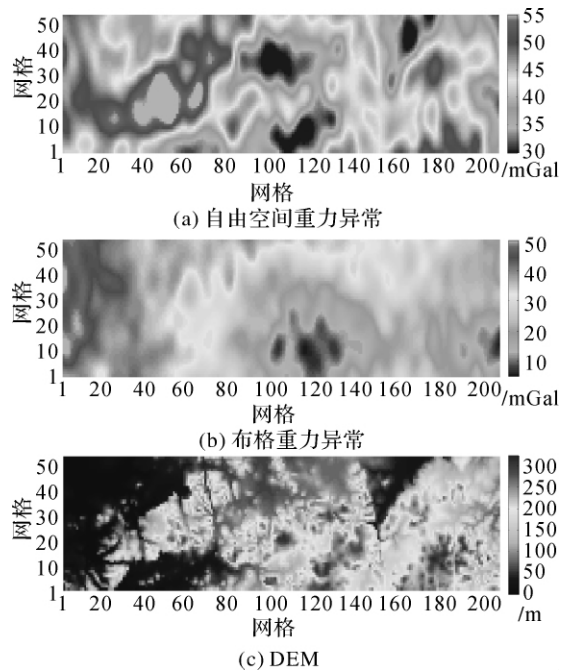


图2 试验区域的重力异常数据和地形数据

Fig. 2 Gravity anomaly data and terrain data of the test area

表1 重力异常数据和地形数据统计特征

Tab. 1 Statistical character of gravity and terrain data

数据类型	最小	最大	平均值	标准差
自由空间异常/mGal	26.6	61.6	42.4	6.25
布格异常/mGal	5.4	52.6	27.7	9.99
地形/m	0	322.7	122.7	80.5

计算时重力单位为 mGal,地形为 m,重力梯度取为 E。地形密度 ρ 取值 2.67 g/cm³,计算高度取值 655 m。由于 DEM 数据与重力异常数据的分辨率不同,构图过程中将 DEM 数据归算到重力异常数据网格。考虑算例中重力数据分辨率较高,因此分别试验了以下四种构图方法的效果:

方法1 单独用自由空间重力异常构图,使用程序为程序1;

方法2 单独用 DEM 数据构图,使用程序2;

方法3 利用自由空间重力异常和 DEM 数

据联合构图,使用程序为程序 3;

方法 4 布格重力异常和 DEM 数据联合构图,使用程序为程序 3。

图 3 给出了四种方法的构图结果。其中,图 3(a)和(b)分别为自由空间重力异常、DEM 数据单独构图结果。比较可以看出,DEM 单独构图细节比自由空间异常单独构图时好,显然这是因为 DEM 分辨率更高的缘故。从数值角度看,自由空间异常计算的重力梯度范围在 -45~50 E 之间,而后者最大才 12 E 左右,说明地形起伏造成的重力梯度在本算例中较小,只占总梯度异常的 20%左右。

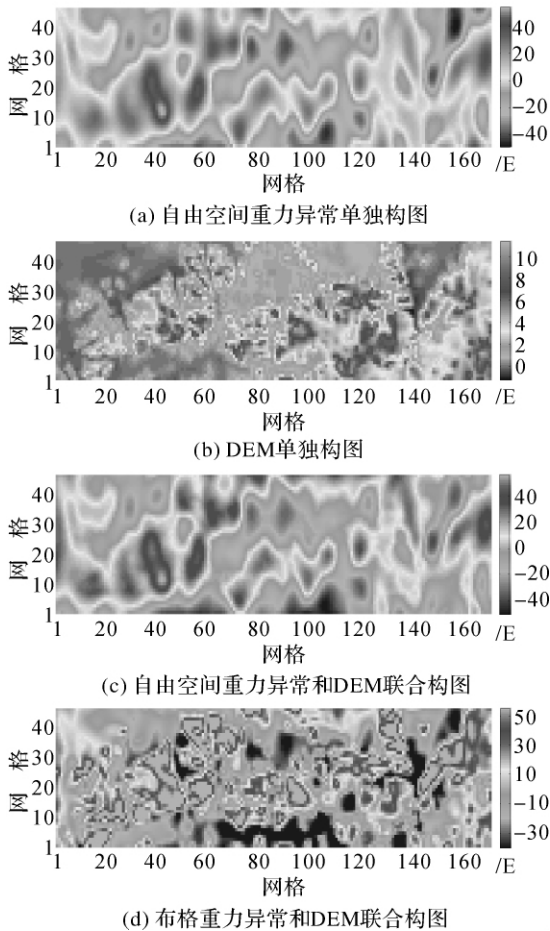


图 3 四种方法的构图结果

Fig. 3 Results of four different methods

图 3(c)为自由空间重力异常与 DEM 联合构图结果。该结果与图 3(a)总体区别不大,但这并不是联合构图方法未起到作用。一方面如前所述,试验区域内 DEM 的重力梯度值较小,因此构图结果主要还取决于自由空间异常。联合构图时自由空间重力异常进行地形改正后,程序 3 并未

对改正结果进行低通滤波归算到与重力异常相同的空间分辨率上,可能使地形改正与 DEM 计算重力梯度产生了抵消效果。但图 3(c)右半部分与图 3(a)还是有较大区别。图 3(d)则为布格重力异常与 DEM 联合构图。由于布格异常数据的地形改正已经低通滤波处理^[22],因此即使同为联合构图,DEM 对图 3(d)的改善也明显比图 3(c)更大。

验证构图方法效果的最佳办法是将构图结果与实测重力梯度数据对比。以 Air-FTG 观测结果为参考,对构图结果进行了进一步比较。由于无法得到源数据,采取相似度衡量的办法。与图 1(b)中的垂直重力梯度比较,前三种构图方法(图 3(a)~(c))得到的自由空间重力梯度异常从轮廓特征上看还不太吻合。但布格异常与 DEM 联合构图(图 3(d))则取得了最佳效果。构图结果和实测数据特征十分吻合,充分证明了构图方法用于梯度数据库构建的可行性和实际意义。

图 4 中给出一剖面上四种构图方法的曲线,直观体现了以上分析中所述差别。多数文献目前采用 DEM 单独建模的方法,确实能反映一些重力梯度的高频特征。但恰如图 4 所示,DEM 建模结果只代表重力梯度异常一部分(在本算例中甚至更小),这是重力梯度辅助导航的理论研究中单独利用 DEM 构建重力梯度图,不一定能保证研究结果正确性的原因。现有重力梯度仪采样率普遍在 1 s 左右^[6],观测结果还要滤波消除高频噪声,因此重力梯度数据的分辨率也不是越高越好。重力异常数据分辨率足够,单独构图或联合构图能取得理想精度,物理意义明确也方便与测量自由空间重力梯度匹配,条件满足时应优先选用。

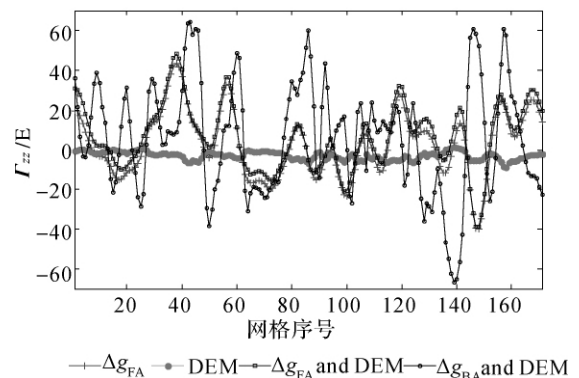


Fig. 4 Profile of four different methods

5.2 算例 2: EGM2008 与 DEM 联合构图

以目前的条件,还不能随时拥有算例 1 中那

样的高分辨数据,单独用自由空间重力异常构建基准梯度图局限于此,因此低分辨率数据与高分辨率 DEM 联合构图效果如何,往往是更值得关注的问题。地球重力场模型是当今物理大地测量学最为活跃的研究领域,也基本是目前覆盖范围最广的通用重力数据库。文献[17—18]曾用 EGM96 研究了联合构图方法,但该模型分辨率太低,所谓的联合构图基本上只能看做是在 DEM 计算结果上加一偏置,并不能真正体现联合构图的效果。算例 2 考察了应用最新的 EGM2008 重力场模型联合构图时的效果。

EGM2008 重力模型阶次完全至 2 159 阶(球谐系数阶扩展至 2 190,次扩展至 2 159),模型空间分辨率约 9 km^[27],精度和分辨率与 EGM96 相比,都取得了巨大进步。国内不少学者均对该模型进行了测试,效果良好^[28-30]。2009 年 6 月,NGA 官方公布了 EGM2008 模型计算的 2.5'×2.5'和 5'×5'自由空间重力异常数据,参考坐标系 WGS84。数据包采用单精度浮点格式(Real×4),并以二进制文件形式存储^[31]。编写了调用该文件数据的程序,输入经纬度范围后可提取相应区域的重力异常数据。

算例 2 同样以算例 1 中的区域为研究区域。图 5(b)首先给出了该区域 EGM2008 重力场模型计算的自由空间异常。与图 5(a)相比,可看出 EGM2008 与 EGM96 在分辨率上的差别。

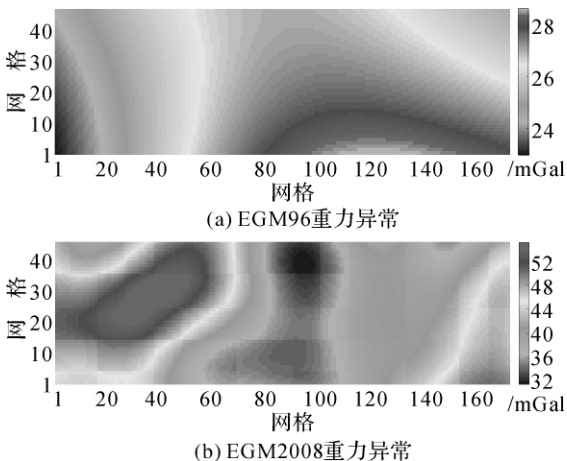


图 5 EGM96 和 EGM2008 重力异常
Fig. 5 EGM96 and EGM2008 gravity anomaly

DEM 仍采用从 GA 网站下载数据。虽然 EGM2008 和 DEM 数据参考坐标系不同(分别为 GDA94 和 WGS84),但二者基准面差别小于

1 m,本算例中视为一致^[32]。图 6 分别给出了利用 EGM2008 模型得到的两组构图结果。其中,图 6(a)为单独利用 EGM2008 构图。EMG2008 分辨率约 5',因此单独构图也只反映了重力梯度低频信息,对梯度匹配而言可能还不具实用价值。图 6(b)是 EGM2008 和 DEM 联合构图的结果。联合构图结合 DEM 和重力异常数据各自的优点,利用 DEM 来补偿重力数据分辨率的不足,使构图结果细节上获得了一定的改进。

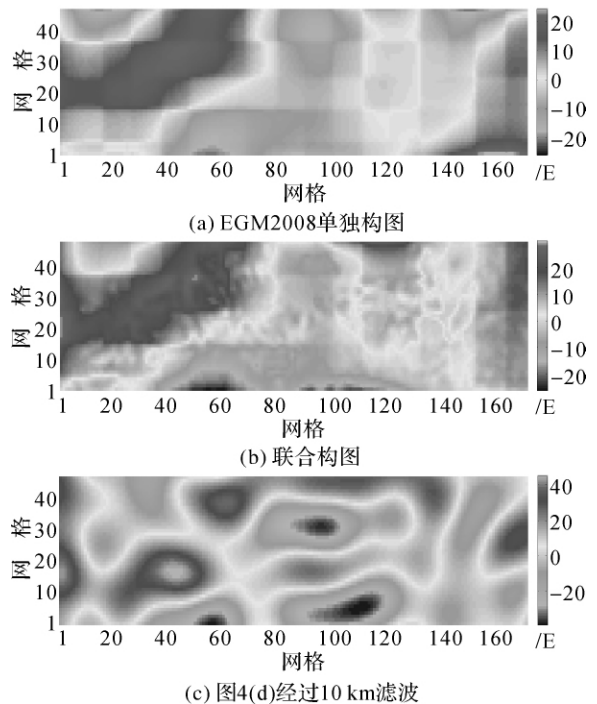


图 6 EGM2008 构图结果
Fig. 6 Mapping results of EGM2008

算例 2 与算例 1 处于同一区域,最后将 EGM2008 的构图结果与图 4(d)进行了对比。与高分辨率重力异常构图结果相比,同为联合构图,EGM2008 的构图结果在数值、细节特征上都还有较大差别。这其中地形引起的重力梯度较小是部分原因,但本质仍在于二者分辨率的差别。从信号角度看,高分辨率重力异常联合构图相当于在高频信号基础上叠加更高频信号,而 EGM2008 则只相当于在低频信号上叠加高频信号。为此,将图 4(d)通过了截止频率 10 km 的低通滤波器,得到的结果如图 5(c)所示。此时再比较,则可以发现 EGM2008 联合构图结果与滤波后保留的低频部分十分吻合,特别是峰值出现的区域,吻合更加明显。当构建的基准梯度图分辨率较低时,反

过来对观测重力梯度进行低通滤波或许也能使匹配顺利进行,更深入的研究可作为下一步工作。

6 结 论

目前一般认为重力梯度辅助导航实用化关键在测量仪器,但基准梯度图也是匹配导航的前提。重力梯度测量从实验到使用至今经历近十年的过程,要实现大范围测量确实还需要较长的过程,而DEM和重力数据质量不断提高,使用和获取也越来越方便,利用理论模型逼近重力梯度,加速基准数据库的构建,甚至在重力梯度匹配过程中实时快速构图,都将是可行的。

本文重点讨论了如何提高构图方法实用性。回顾了相关研究的不足,提出在构图方法建模过程中必须明确构图结果的物理意义,同时要结合实际重力数据库的细节。系统推导了利用自由空间异常和布格异常构建基准梯度图的方法,重点在实用构图方法实现方面进行了一些工作。算例结果也表明构图方法完全有能力达到实用的标准和要求。本文的成果目前应用于某重力梯度仿真系统,希望能为相关研究提供借鉴和参考。在重力梯度正演算法选择和构图精度分析方面,本课题将进一步深入和完善。

参考文献:

- [1] DIFRANCESCO D, MEYER T, CHRISTENSEN A, et al. Gravity Gradiometry: Today and Tomorrow [C] // SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition, Swaziland; [s. n.], 2009: 80-83.
- [2] HAMMOND S. Air-FTG: Bell Geospace's Airborne Gravity Gradiometer: A Description and Case Study [J]. ASEG Preview, 2003, 105: 24-26.
- [3] ROSE M, ZENG Y, DRANSFIELD M. Applying FALCON Gravity Gradiometry to Hydrocarbon Exploration in the Gippsland Basin, Victoria [J]. Exploration Geophysics, 2006(37): 180-190.
- [4] MURPHY C A, BREWSTER J. Target Delineation Using Full Tensor Gravity Gradiometry Data [C] // 19th International Geophysical Conference and Exhibition (ASEG). Perth: [s. n.], 2007: 1-3.
- [5] MIMS J, SELMAN D, DICKINSON J, et al. Comparison Study between Airborne and Ship-borne Full Tensor Gravity Gradiometry (FTG) Data [C] // SEG International Exposition and Annual Meeting. Houston: [s. n.], 2009: 942-946.
- [6] RICHESON J A. Gravity Gradiometer Aided Inertial Navigation within Non-GNSS Environments [D]. Baltimore: University of Maryland, 2008.
- [7] XIA Bing, CAI Tijing. Gravity Matching Regions Selection by Statistical Product and Service Solutions [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(1): 1-84. (夏冰, 蔡体菁. 基于 SPSS 的重力匹配区域选择算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(1): 1-84.)
- [8] NAGY D, PAPP G, BENEDEK J. The Gravitational Potential and Its Derivatives for the Prism [J]. Journal of Geodesy, 2000, 74(7): 552-560.
- [9] JEKELI C, ZHU Lizhi. Comparison of Methods to Model the Gravitational Gradients from Topographic Data Bases [J]. Geophysical Journal International, 2006, 166(3): 999-1014.
- [10] WU Lin, MA Jie, ZHOU Yao, et al. Modeling Full-tensor Gravity Gradient Maps for Gravity Matching Navigation [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(22): 7037-7041. (武凛, 马杰, 周瑶, 等. 重力场匹配导航的全张量重力梯度基准图模拟 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(22): 7037-7041.)
- [11] ZHU Lizhi, JEKELI C. Comparing Methods to Model the Local Gravity Gradients from Gravity Anomalies [EB/OL]. [2010-05-22]. http://www.hgk.mil.tr/dergi/makaleler/OZEL18/ozel18_50.pdf.
- [12] MUAMW G R. Marine 3D Full Tensor Gravity Gradiometer [J]. Hydro International, 2004, 8(7): 38-41.
- [13] HINKS D, MCLNTOSH S, LANE R. A Comparison of the Falcon and Air-FTG Airborne Gravity Gradiometer Systems at the Kokong Test Block, Botswana [J]. Airborne Gravity, 2004, 18: 125-134.
- [14] MATARAGIO J, BREWSTER J, MURPHY C, et al. Air-FTG for Regional Scale Mapping [EB/OL]. [2010-03-01]. http://www.bellgeo.com/doc/AGU_07.pdf.
- [15] ZUIDWEG K, MUMAW G R. Airborne Gravity Gradiometry for Exploration Geophysics: the First Five Years [EB/OL]. [2010-03-01]. http://www.hgk.mil.tr/dergi/makaleler/OZEL18/ozel18_46.pdf.
- [16] ZHU Lizhi, JEKELI C. Gravity Gradient Modeling Using Gravity and DEM [J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(6): 557-567.
- [17] ROGERS M M. An Investigation into the Feasibility of Using a Modern Gravity Gradient Instrument for Passive Aircraft Navigation and Terrain Avoidance [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB Graduate School of Engineering and Management, 2009.
- [18] WU Lin, HU Wei, MA Jie, et al. Modeling Full-tensor Gravity Gradient Maps Using Gravity Anomaly Analysis [J]. Journal Huazhong University of Sci. & Tech: Natural Science, 2009, 37(11): 57-60. (武凛, 胡维, 马杰, 等. 基于重力异常分析的重力梯度图制备方法 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 57-60.)
- [19] DEGREGORIA A. Gravity Gradiometry and Map Matching: An Aid to Aircraft Inertial Navigation Systems [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB

- Graduate School of Engineering and Management, 2010.
- [20] WANG Miaoyue. Exploration Geophysics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003. (王妙月. 勘探地球物理学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.)
- [21] LÜ Chuanchuan, HAO Tianyao, XU Ya. Complete Bouguer Correction in the Oceanic Gravity Exploration[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 513-521. (吕川川, 郝天尧, 徐亚. 海洋重力勘探中的完全布格校正[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 513-521.)
- [22] GABELL A R, TUCKETT H. Project 200380 West Arnhem Land GT-1A Airborne Gravity Survey[R]. Canberra: Geoscience Australia and Northern Territory Geological Survey, 2004.
- [23] MICKUS K L, HINOJOSA J H. The Complete Gravity Gradient Tensor Derived from the Vertical Component of Gravity: A Fourier Transform Technique[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 46(3): 159-174.
- [24] ZHANG Fengxu. The Study of Method and Technology for Highprecision Data Processing of Gravity Anomalies[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (张凤旭. 高精度重力异常数据处理方法技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.)
- [25] Geoscience Australia. Geophysical Archive Data Delivery System (GADDS) [EB/OL]. [2010-05-10]. <http://www.ga.gov.au/gadds>.
- [26] HUTCHINSON M, AADERSON H. GEODATA 9 Second Digital Elevation Model[R]. Canberra: Geoscience Australia, 2008.
- [27] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 [R]. Vienna: General Assembly of the European Geosciences Union, 2008.
- [28] ZHANG Chuanyin, GUO Chunxi, CHEN Junyong, et al. EGM2008 and Its Application Analysis in Chinese Mainland[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(4): 284-289. (章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 284-289.)
- [29] ZHANG Xingfu, LIU Cheng, WANG Binghai, et al. Analysis of Method and Accuracy of GPS Height Transformation without Leveling Data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(1): 114-118. (张兴福, 刘成, 王兵海, 等. 无水准数据的 GPS 高程转化方法及精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(1): 114-118.)
- [30] LIU Xiaogang, WU Xiaoping, TIAN Yanfeng, et al. Precision Comparison of the Earth Gravity Field Models of DQM2000d, UGM05 and EGM2008 [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010(2): 8-10. (刘晓刚, 吴晓平, 田颜峰, 等. DQM2000d、UGM05 和 EGM2008 地球重力场模型精度比较[J]. 测绘通报, 2010(2): 8-10.)
- [31] National Geospatial-Intelligence Agency. EGM2008 Gravity Anomalies and DOV Data[EB/OL]. [2009-12-10]. http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravity-mod/egm2008/anomalies_dov.html.
- [32] Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping. Geocentric Datum of Australia Technical Manual [EB/OL]. [2010-5-11]. <http://www.icsm.gov.au/gda/gdatm/gdav2.3.pdf>.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-07-22

修回日期: 2010-10-14

第一作者简介: 钱东(1985—),男,博士生,研究方向为水下潜器定位、重力梯度辅助导航技术。

First author: QIAN Dong (1985—), male, PhD candidate, majors in the underwater vehicle position, gravity gradient aided navigation technology.

E-mail: qiandong@yeah.net

《测绘学报》影响因子位列第一

[本刊讯] 2011年12月中国科学技术信息研究所与万方数据联合发布的《2011年版中国科技期刊引证报告(核心版)》统计结果显示,《测绘学报》2010年度影响因子在其收录的14种测绘学类科技期刊中位列第一。《中国科技期刊引证报告(CJCR)》选用的是中国科技论文统计源期刊,即中国科技核心期刊,这些期刊是在经过严格的定量和定性分析的基础上选取的各学科的重要科技期刊。中国科技论文统计源期刊的期刊论文构成了中国科技论文与引文数据库(CSTPCD),该数据库的统计结果编入国家统计局和国家科学技术部编制的《中国科技统计年鉴》,统计结果被科技管理部门和学术界广泛采用。

在中国知网日前发布的《中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术2011版)》中,《测绘学报》的影响因子在其收录的25种测绘科学技术科技期刊中同样位列第一。

(本刊编辑部)