消除重力异常与高程相关现象的方法及应用

陈　超　　王晓柳
(中国地质大学应用地球物理系，武汉 430074)

摘　要

陈超等. 消除重力异常与高程相关现象的方法及应用. 石油物探，1998，37(4)：122～127

重力测量结果经过外部校正之后，有时布格异常形态会随着高程变化以致形成所谓"山形异常"，使真、假异常混淆。本文就引起布格重力异常与地形起伏相关的原因进行了分析探讨，针对由于重力外部校正不准确出现的这种相关现象，提出了用滑动窗口调整中间层密度的方法和以相对海拔高差作校正的方法，来避免这种虚假异常的产生。实际资料的处理证明效果十分明显。

关键词：布格异常　高度校正　中间层校正　相关性

ABSTRACT

Chen Chao* et al. A method for removing the correlation between gravity anomalies and elevations and its application. GPP，1998，37(4)：122～127

After the external correction, the Bouguer gravity anomaly shape may sometimes change with the elevation, confusing the true anomaly with the false anomaly. In the paper, we analyze the reason of the correlation between Bouguer gravity anomalies and topographic relief. In view of the correlation appearance due to the inaccurate external correction, we propose to adjust the interface layer density with sliding window and to make correction with relative elevation in order to avoid the false anomaly. Real data processing demonstrates the effectiveness of the method.

Key words: Bouguer anomaly, elevation correction, interface layer correction, correlation

一、引　　言

重力异常与高程相似性现象出现在地形起伏大的地区，在高海拔地区表现尤为突出，严重时将干扰对异常的认识和评价。事实上，对于高精度重力测量而言，它对异常质量所造成的影响远大于测量精度。本文针对重力异常与地形起伏相关现象产生的原因进行了分析讨论，同时提出了解决问题的基本思路和方法。

* Chen Chao, Department of Applied Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074
本文于 1997 年 12 月 15 日收到，修改稿于 1998 年 3 月 16 日收到。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk

二、布格异常与高程相关的原因分析

形成布格重力异常与地形起伏(或高程变化)相关的原因可以分为两类,一类是由地壳结构、地质构造、岩石分布等地质因素所引起,另一类则与异常的换算过程有关。

1. 地壳厚度变化与地形、地势

众所周知,布格重力异常是观测重力值相对于理想化的地球形状及内部物质密度分布产生的正常重力值之差,任何偏离这种正常密度分布物体的存在都将产生布格异常。宏观上看,大范围陆地和海洋盆地区域上的地壳厚度明显不同,按照艾里(G. B. Airy)的均衡假说,当地壳与地幔物质之间处于静力平衡状态时,高山地区的地壳厚度应大于正常厚度,而海洋盆地地区的地壳厚度应小于正常厚度。由于壳幔物质之间的密度差,布格异常应该在大陆高原地区为负异常,在海洋地区为正异常,布格异常与高程变化呈负相关关系。尽管这种均衡假说并不完善,但上述地壳厚度分布以及相应的布格异常特征在全球许多地区已得到证实。

2. 地质构造、岩石分布与地形

在许多地区地质构造和岩石分布形态与地形起伏有着密切联系,有时甚至是相关的。如高密度基底岩石层面隆起处地势高,沉积拗陷处地势低以及许多山间盆地地区,这些地质因素引起的区域性或局部性重力异常可能与地形相关,但它们与高程之间通常并不是简单的线性关系,而且可以通过对地表地质情况的了解和对构造及岩石分布的推断加以识别。

3. 高度(自由空间)校正

高度校正实际上是将大地水准面上正常重力值 $\gamma_0(\varphi)$ 延拓至 h 高度上。把高程 h 作为地球半径 R 的增量,则在空间任一高度处的正常重力值都可以用泰勒级数的展开式表示

$$\gamma_h(\varphi) = \gamma_0 + (\partial\gamma/\partial r)_0 h + (1/2)(\partial^2\gamma/\partial r^2)_0 h^2 + \cdots \tag{1}$$

其中

$$(\partial\gamma/\partial r)_0 h + (1/2)(\partial^2\gamma/\partial r^2)_0 h^2 + \cdots \tag{2}$$

为高度影响值。我国勘测部门已规定,取(2)式的二级近似为高度校正的计算公式。由于我们采用赫尔默特(1901～1909 年)公式作为正常重力公式,故相应的高度校正公式为

$$\delta g_h = 3.086[1 + 0.0007\cos(2\varphi)]h - 7.2 \times 10^{-7} h_2 \quad \text{g.u.} \tag{3}$$

当实际工作范围不大时,也常用简化公式进行校正,即

$$\delta g_h = 3.086h \quad \text{g.u.} \tag{4}$$

表 1 列出了用公式(4)和(5)计算结果之差。在地形起伏相同的情况下,海拔高度不大的地区,其校正量相差无几。随着平均海拔高度的增加,两者差异逐渐明显,而且差异随地形起伏而变化。可见,若在高海拔地区用简化公式作校正,可能造成异常与地形起伏一定程度上的正相关。

从理论上说,高度校正(3)式是依据正常重力 γ_0 在海平面附近($h=0$)的垂向变化率导出的,它不能完全准确地反映正常重力在高原上(如 $h=5000$m)的垂向变化情况,此时用(3)式作校正也有可能造成校正不足。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk

表 1 两种高度校正公式计算结果对比[(3)式－(4)式，$\varphi=30°$]

高程 (m)	校正量差 (g.u.)	相对差 (g.u.)	高程 (m)	校正量差 (g.u.)	相对差 (g.u.)	高程 (m)	校正量差 (g.u.)	相对差 (g.u.)
136	0.13	0.00	3136	－3.69	0.00	5136	－13.45	0.00
157	0.15	0.02	3157	－3.77	－0.07	5157	－13.58	－0.13
268	0.24	0.10	3268	－4.16	－0.47	5268	－14.29	－0.85
533	0.37	0.24	3533	－5.17	－1.48	5533	－16.07	－2.62

注：相对差为校正量之差的相对变化。

4. 中间层校正

中间层物质密度的确定，是保证校正正确实施的关键因素之一。通常我们在测区内用统一的中间层密度进行校正，校正密度取测区地表岩石平均密度，对于绝对布格异常，一般取上地壳平均密度为 2.67g/cm^3。用统一密度校正并非对所有地段都适宜。当统一密度与当地地表岩石有差异时，由于地形起伏将可能产生与地形相关的假异常。很容易证明，在校正密度大于地表物质密度的地段上，有可能产生与地形起伏呈负相关的假异常；在校正密度小于地表物质密度的地段上，有可能产生与地形起伏呈正相关的假异常。

中间层是指测点高程与大地水准面(或基准面)之间高差为厚度的物质层，从有限范围考虑，它的影响可以视为一个等厚度圆盘在其顶面中心处产生的重力效应

$$\delta g = 2\pi G\sigma[h + R - (h^2 + R^2)^{1/2}] \tag{5}$$

式中，R 为圆盘半径，h 为测点海拔高程(或高差)，σ 为圆盘密度，相应的中间层校正量为

$$\delta g_\sigma = -0.419\sigma[h + R - (h^2 + R^2)^{1/2}] \quad \text{g.u.} \tag{6}$$

当 $R \ll h$ 时，则有

$$(h^2 + R^2)^{1/2} = R[1 + (1/2)h^2/R^2 + \cdots]$$
$$\approx R[1 + (1/2)h^2/R^2]$$

代入(6)式中可得

$$\delta g_c = -0.419\sigma[h - (1/2)h^2/R] \quad \text{g.u.} \tag{7}$$

此式为勘测部门规定使用的中间层校正公式。当 $R \to \infty$ 时，把圆盘当作无限大平板，即有

$$\delta g_\sigma = -0.419\sigma h \quad \text{g.u.} \tag{8}$$

在实际工作中也常用公式(8)作校正。对于有限半径的圆盘，式(8)和(7)分别可视为一级近似、二级近似公式。比较用(7)、(8)两式校正的结果(见表 2)，可以看到在不同海拔地区它们的差异。在低海拔地区相差不大，但在高海拔地区差异则十分明显，同样表现出随高差增大而增大

表 2 用两种中间层校正公式计算结果对比[(7)式－(8)式，$R=20000$m，$\sigma=2.0$g/cm^3]

高程 (m)	校正量差 (g.u.)	相对差 (g.u.)	高程 (m)	校正量差 (g.u.)	相对差 (g.u.)	高程 (m)	校正量差 (g.u.)	相对差 (g.u.)
136	0.39	0.00	3136	206.03	0.00	5136	552.63	0.00
157	0.52	0.13	3157	208.80	2.77	5157	557.16	4.53
268	1.50	1.12	3268	223.74	17.71	5268	581.40	28.77
533	5.95	5.56	3533	261.50	55.47	5533	641.37	88.74

注：相对差为校正量之差的相对变化。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnk

的特点，差值可达数十 g.u.。可见，用一级近似公式进行中间层校正在高海拔地区可能因校正过度而形成与地形起伏呈负相关的虚假异常。

在中间层校正过程中，另一个可能引起校正不准确的因素就是中间层校正半径 R。校正公式(7)是在圆板半径 R 远大于厚度 h 前提下的结果，且不考虑圆板以外的物质所产生引力效应的影响，而当测区内平均海拔达到数千米时，这部分引力效应不应被忽略。一般认为地形校正最大范围不超过半径为 33km 的圆域即可满足要求，相应的中间层圆盘最大半径 R 也取同样大小。目前国内开展的 1∶5～10 万的重力调查中，地形校正半径通常为 20km。对此，我们把 20～33km 范围的物质引力效应作为被忽略的部分列入表 3。从表中可见，取 20km 作为中间层校正半径时，在低海拔平原地区影响不大，而在高原地区有可能造成较严重的校正不足，将导致布格异常形态与地形起伏正相关。由此产生的假异常经常被误解为是校正密度不准所致。

表 3　不同海拔背景上圆板以外(20～33km，$\sigma=2.0 g/cm^3$)物质的引力效应

高程 (m)	引力效应 (g.u.)	相对差 (g.u.)	高程 (m)	引力效应 (g.u.)	相对差 (g.u.)	高程 (m)	引力效应 (g.u.)	相对差 (g.u.)
136	0.15	0.00	3136	81.16	0.00	5136	217.70	0.00
157	0.20	0.05	3157	82.26	1.09	5157	219.49	1.78
268	0.59	0.44	3268	88.14	6.98	5268	229.04	11.33
533	2.34	2.19	3533	103.02	21.85	5533	252.66	34.96

注：相对差为引力效应的相对变化。

三、 消除与地形起伏相关假异常的方法

如上所述，由非地质因素导致异常与地形相关的原因主要来源于校正过程，因此，可以通过下面几方面的处理来避免或减少产生这种假异常。

1. 使用准确的高度校正和中间层校正公式作校正

随计算机技术的普及，重力野外观测资料的整理均由计算机完成，因此，可以方便地运用准确公式进行各种校正计算，对于有限范围的中间层校正，笔者建议采用公式(6)更为准确。

2. 进行相对高度和中间层校正

重力异常资料的整理有两种途径，一是将测量的重力值相对大地水准面进行校正，另一种是相对某一基准面进行。由于后者一般是以测区内或测区附近的总基点所在的水准面为基准面，依据测点与其之间高差进行高度和中间层校正，当测区绝对高程很大时，这样可以把所有测点与基准面的高程差减小，相当于把高海拔地区的校正问题变成低海拔地区的校正问题。从表 1、2、3 中不难得知，在低海拔地区采用不同的公式或校正范围所造成的影响是有限的。因此作相对校正可以使高海拔地区的重力异常减少受地形起伏的干扰，其结果并不影响后续的地形校正和异常解释。

3. 利用滑动窗口调整局部地区中间层校正密度

大范围地用统一的密度值进行中间层校正，将有可能因局部范围内地表岩石密度偏离统一密度而导致虚假异常。我们可以在统一密度校正的基础上，对局部地段上的校正密度进行调

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk

整，以达到变密度校正的目的。这种方法的基本原理可描述如下：

考虑到因中间层校正密度不准确引起的虚假异常与地形近似呈线性关系，故可表示为

$$\Delta g_{虚假} = a + bh \tag{9}$$

式中，a 为任意常数；$b=-2\pi G\Delta\sigma$，这里 $\Delta\sigma$ 为校正密度与实际值的离差。通过对局部地段异常值与高程进行线性回归统计，可以确定出 b 值，进而得到 $\Delta\sigma$，并用于对异常作补充中间层校正

$$\delta g_{\sigma补充} = -0.419\Delta\sigma h \quad \text{g.u.} \tag{10}$$

最终达到抑制或消除虚假异常的目的。对于大范围的校正问题，可以选择适当的窗口在测区内滑动处理。考虑到实测重力异常中所包含着的区域、局部地质因素引起的异常形态与高程变化通常在一定范围内无关或不为线性关系，且局部异常和区域异常在任意相邻 3～5 个点之间近似呈线性变化，可先对异常$\{\Delta g_i\}$及高程数据$\{h_i\}$进行求偏差处理，以使$\{\delta g_i\}$中不包含局部异常和区域异常成分，即

$$\begin{cases}\delta g_i = (\Delta g_{i-1} + \Delta g_{i+1})/2 - \Delta g_i \\ \delta h_i = (h_{i-1} + h_{i+1})/2 - h_i\end{cases} \quad (i = 1,2,3,\cdots,n \text{ 为测点号})$$

其中，Δg_{i-1}、Δg_{i+1}和 h_{i-1}、h_{i+1}分别为测点附近点上的异常值和高程值。然后再对$\{\delta g_i\}$和$\{\delta h_i\}$进行线性统计。为了减小因数据误差造成调整的盲目性，滑动时可根据窗口内$\{\Delta g_i\}$与$\{h_i\}$的线性相关系数来确定是否需要调整。例如，当相关系数的绝对值小于 0.75 时，此处可不作调整，即令 $\Delta\sigma=0$。也可以先将求出的全测区密度调整值 $\Delta\sigma$ 绘成等值线图，与地形及地质资料对比之后再来确定调整与否。

四、应用实例

笔者曾应用上述方法对若干高程跨度较大的实际重力测量结果进行了改算和处理，效果十分明显。图 1 和图 2 展示了西藏羌塘盆地地区某 1∶5 万高精度重力剖面测量结果处理前后的情况。

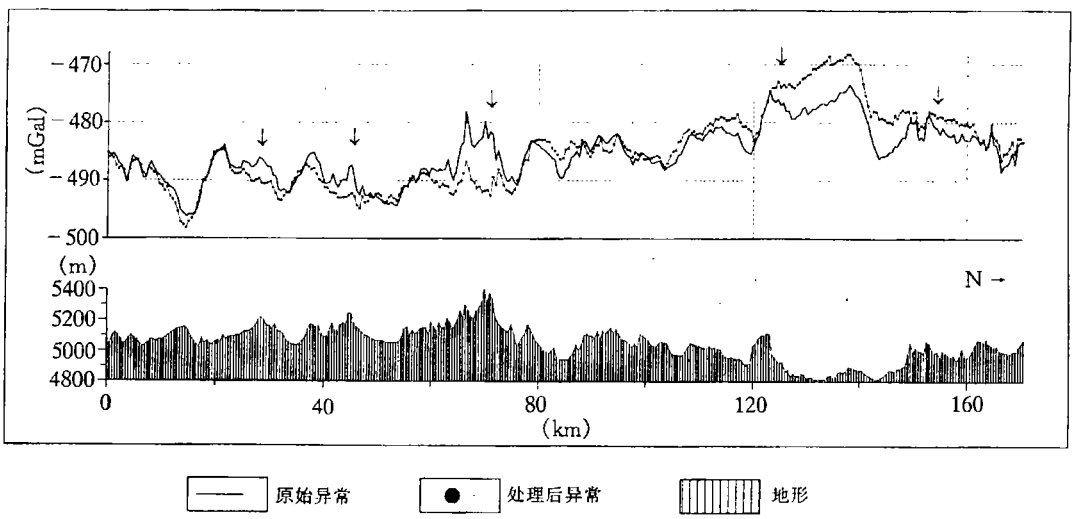


图 1 剖面原始异常与处理后异常对比

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnk

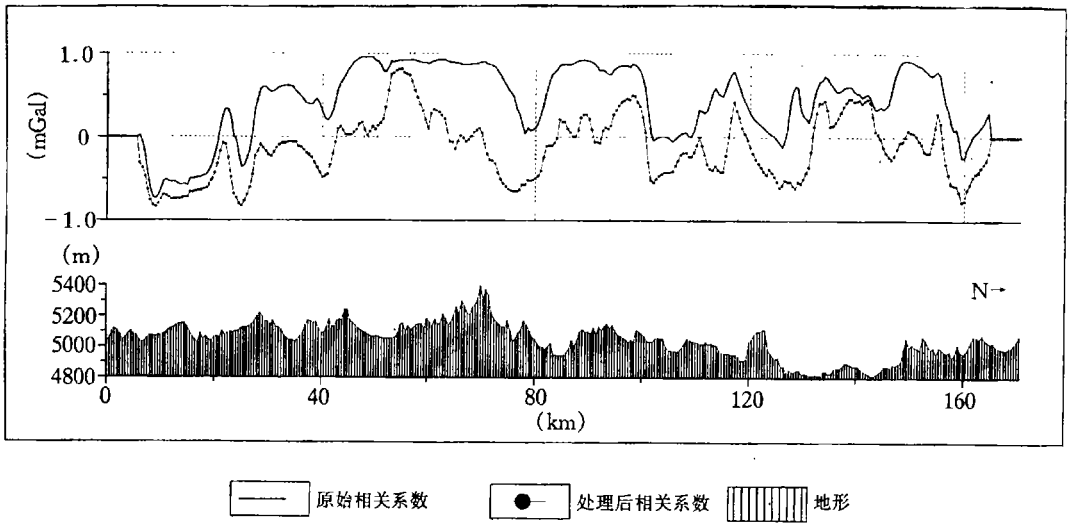


图 2　剖面原始异常和处理后异常与高程的线性相关系数对比

从图 1 中可见，原始布格异常与地形存在着相关性，有些地段甚至可以直接从其形态中辨别出来。图 2 展示了它们之间线性相关系数的分布，在 40～100km 的地段上它们存在着普遍且明显的正相关。正如我们前面所指出的，这主要是由于中间层校正不足引起的。在对剖面异常进行处理时，首先把原始异常中“绝对”布格校正改为“相对”布格校正，即用相对高差作高度和中间层校正（密度仍暂用 2.67g/cm^3），然后通过中间层密度调整作补充校正。处理后的异常仍保留了局部异常和区域异常的基本特征，但虚假异常得到了有效的压制，在许多局部异常地段上（箭头所指之处）明显可见。从相关系数的分布来看，已呈随机的正负变化态势，没有明显的区域性正或负相关的地段，表明这种处理方法对压制这种虚假异常是有效的。

参　考　文　献

[1] Wolfgong Torge, Gravimetry, Walter de Gruyter Press, Hannover(德国), 1989.

[2] Uotila, U. A., Analysis of correlation between free-air anomalies and elevations, OSU Rep., No. 94, 1967.

[3] 吕梓龄，山区区域重力测量中间层校正系数的确定，《物探与化探》，1998，13(1)。

[4] 《区域重力调查技术规定》，地质出版社，1983 年。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk