

大比例尺重力勘探 GPS 高程转换

冯林刚¹, 张锁祥², 钟仁¹, 赵军¹, 宝音乌力吉¹

(1. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古国土资源勘查开发院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要:在大比例尺重力勘探工作中,当布格重力异常设计总精度提高到 $0.025 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 时,要求测点高程均方误差为 0.05 m。为使 GPS 高程能够达到该精度要求,提出利用 EGM2008 模型和 GPS 水准数据拟合局部似大地水准面的方法以实现测点 GPS 高程的转换,并利用某地区 GPS 水准资料,对转换方法的可行性进行验证分析。结果表明,这种方法完全适用于大比例尺重力勘探工作。

关键词:重力勘探;GPS;高程转换;EGM2008 模型;似大地水准面

中图分类号: P631.1;P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2011)05-0701-03

在大比例尺重力勘探工作中,当布格重力异常设计总精度提高到 $0.025 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 时,要求测点高程均方误差为 0.05 m^[1]。这样高的精度,虽然采用全站仪测距高程导线或水准测量的方法可以达到要求,但由于测量的外业工作量大、作业效率低、生产成本低,所以在野外工作中难以广泛采用。EGM2008 模型是美国国家地理空间情报局经过长达 4 年的研究,在充分利用卫星重力、卫星测高以及地面重力等最新数据的基础上,采用先进的建模技术与算法完成的最新一代全球重力场模型^[2]。由于它的阶次已经扩展到了 2 190(带一些附加项后由 2 159 阶次扩展而成),所以它是迄今为止世界上分辨率最高、精度最好、阶次最多的全球重力场模型^[3]。如果利用 EGM2008 模型和少量 GPS 水准点能以厘米级精度实现 GPS 高程的转换,那么在大比例尺重力勘探工作中,就可以利用 GPS 技术快速测定重力观测点的高程。为此,笔者提出利用 EGM2008 模型和 GPS 水准数据拟合局部似大地水准面的方法来实现大比例尺重力勘探 GPS 高程的转换,并通过算例对其应用的可行性进行分析。

1 局部似大地水准面拟合及 GPS 高程转换

首先在测区利用 GPS 和水准测量技术测设一定数量且符合规定精度要求的 GPS 水准点。其次在测区中心附近任选一个 GPS 水准点作为 WGS84 坐标系下 GPS 大地高的起算点,其值 H_0 按

$$H_0 = h_0 + \zeta_{m0} + \Delta h_g \quad (1)$$

计算。式中, h_0 为该 GPS 水准点正常高, Δh_g 为我国高程基准与 EGM2008 定义的全局高程基准之间的系统偏差, ζ_{m0} 为 EGM2008 模型计算的模型高程异常,其计算公式为

$$\zeta_{mi} = \frac{G}{\rho \gamma_i} \sum_{n=2}^{2190} \left(\frac{a}{\rho} \right)^n \cdot \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{mn} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{mn} \sin(m\lambda)) \bar{P}_{mn}(\sin\varphi) \quad (2)$$

式中, ρ, φ, λ 为计算点 i 的地心向径、地心纬度和经度, G 为地心引力常数, γ_i 为计算点的正常重力值, a 为椭球长半径, $\bar{C}_{mn}, \bar{S}_{mn}$ 为完全规格化位系数, $\bar{P}_{mn}(\sin\varphi)$ 为完全规格化缔合勒让德函数。

假设由 GPS 基线在 WGS84 坐标系中的大地高差计算的各 GPS 水准点相对于大地高起算点的大地高差为 ΔH_{i0} ,那么在 GPS 网数据处理时以大地高起算点的 H_0 为约束值进行约束平差,就可求得各 GPS 水准点的大地高 H_i 为

$$H_i = H_0 + \Delta H_{i0} = h_0 + \zeta_{m0} + \Delta h_g + \Delta H_{i0} \quad (3)$$

众所周知,EGM2008 模型似大地水准面与 GPS 水准似大地水准面虽较为接近,但不可能完全吻合。要使模型似大地水准面最大限度地逼近 GPS 水准似大地水准面,就必须对两个面之间的差异进行曲面拟合,即有

$$H_i - h_i - \zeta_{mi} - \Delta h_g = f(x, y) \quad (4)$$

式中, $f(x, y)$ 可以是多项式、多面函数、样条函数等。

将式(3)代入式(4),得

$$\Delta H_{i0} - (h_i - h_0) - (\zeta_{mi} - \zeta_{m0}) = f(x, y) \quad (5)$$

设 $h_i - h_0 = \Delta h_{i0}, \zeta_{mi} - \zeta_{m0} = \Delta \zeta_{mi0}$, 则式(5)变为

$$\Delta H_{i0} - \Delta h_{i0} - \Delta \zeta_{mi0} = f(x, y)。$$

(6)

式中, Δh_{i0} 为各 GPS 水准点相对于大地高起算点的正常高差, $\Delta \zeta_{mi0}$ 为 EGM2008 模型计算的各 GPS 水准点相对于大地高起算点的高程异常差。

由于式(6)不包含高程系统间的偏差参数 Δh_g , $\Delta \zeta_{mi0}$ 中的模型相关性误差经差分也被抵消, 而 ΔH_{i0} 和 Δh_{i0} 可分别由 GPS 和水准测量技术以很高的精度获得, 所以按照本方法计算拟合函数 $f(x, y)$ 的未知参数可以获得很高的精度。

从以上计算过程和结果可以看出, 在整个拟合计算中最终利用的是 EGM2008 计算的模型高程异常差, 而不是高程异常; 另外, Δh_g 无论取何值, 都不会影响拟合的最终结果。因此, 将式(1)和式(4)中的 Δh_g 去掉后变为

$$H_0 = h_0 + \zeta_{m0},$$

(7)

$$H_i - h_i - \zeta_{mi} = f(x, y)。$$

(8)

在利用 EGM2008 模型和 GPS 水准数据按照上述方法解算出函数 $f(x, y)$ 的未知参数后, 就可以得到拟合后的似大地水准面模型

$$\zeta_i = \zeta_{mi} + f(x, y)。$$

(9)

求得拟合似大地水准面模型后, 就可以根据各 GPS 点的平面坐标计算其正常高

$$h_i = H_i - \zeta_i。$$

(10)

2 算例与分析

笔者收集了某地区长约 90 km 的公路沿线及其两侧共计 151 个四等 GPS 水准点资料进行局部似大地水准面的拟合计算和分析, 所在地段为平原、丘陵区, 平均海拔高程约 560 m, 最大比高约 60 m。本算例采用的 EGM2008 模型的分辨率为 $2.5' \times 2.5'$ 。

首先在测区中心附近选一个 GPS 水准点, 按式(7)计算大地高的起算数据, 然后在 WGS84 下进行三维平差求得全部 GPS 水准点的大地高, 连同各点坐标和 EGM2008 模型计算的高程异常值一起存放在一个指定的文件中。除作为大地高起算的 GPS 水准点外, 用存放在文件中的大地高与各 GPS 水准点(150 个)的正常高计算其高程异常(简称 GPS 水准高程异常), 并用 EGM2008 模型高程异常与其进

表 1 EGM2008 模型高程异常与 GPS 水准高程异常差值的统计结果

点数/个	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	均方误差/cm
150	6.9	-8.4	0.2	±2.9
11	5.0	-4.2	0.9	±3.1

行比较统计(表 1)。由表 1 可以看出, 用 EGM2008 计算模型高程异常的相对精度是比较高的。

在实际作业中, GPS 水准点的数量十分有限, 只能按实际点数对 EGM2008 模型进行精度评价。因此在表 1 中也列出了 EGM2008 模型与实际参与拟合的 11 个 GPS 水准点比较统计的结果。从表 1 统计结果看出, GPS 水准点数量过于悬殊, 对最大、最小误差的统计结果有影响, 而对均方误差的影响却很小。因此利用有限的 GPS 水准点在一定程度上也能对 EGM2008 模型的精度作出较为客观的评价。

EGM2008 模型评价结果的好坏, 会直接影响最终拟合似大地水准面的精度。因此可根据模型评价精度考虑采用整体一次性拟合和分区或分段拟合的方法计算局部似大地水准面。

在对 EGM2008 模型精度作出评价后, 利用参与拟合的 11 个 GPS 水准点的大地高、正常高以及模型高程异常作为已知数据, 代入式(8)组成相应的误差方程, 函数 $f(x, y)$ 采用二次多项式, 即

$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$ 。
根据最小二乘原理求解二次多项式的系数, 并将其代入式(9), 即得拟合后的局部似大地水准面模型:

$$\zeta_i = \zeta_{mi} + a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2。$$

为了检核拟合似大地水准面与 GPS 水准似大地水准面的逼近程度, 需要利用该模型来计算参与拟合的 GPS 水准点和作为大地高起算的 GPS 水准点的拟合高程异常(共计 12 个点), 并与 GPS 水准高程异常进行比较, 其残差的统计结果见表 2。由表 2 结果可知, 拟合似大地水准面逼近 GPS 水准似大地水准面的程度比模型似大地水准面提高约 1 倍。

表 2 拟合高程异常与 GPS 水准高程异常残差的统计结果

点数/个	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	均方误差/cm
12	3.6	-1.8	0	±1.5

为了客观真实地评价拟合似大地水准面的精度, 需要对其进行外部检核。笔者利用 139 个(除去 11 个拟合点和 1 个大地高起算点) GPS 水准点(检核点)对该拟合似大地水准面检核的统计结果见表 3。由表 3 可知, 拟合似大地水准面的外部检核精度为 ± 1.8 cm, 比表 2 所列精度稍低, 而比表 1 所列精度提高约 0.7 倍。

表 3 拟合高程异常与检核点实测高程异常差值的统计结果

点数/个	最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	均方误差/cm
139	4.3	-5.2	-0.5	±1.8
11	4.3	-2.5	-0.2	±1.8

在实际作业中, 检核点的数量十分有限, 故应分布在不同地形类别区域, 而且应尽可能布置在用于

似大地水准面拟合的相邻 GPS 水准点的中间。按此要求,在所有 GPS 水准点中选了 11 个检核点,对拟合似大地水准面的精度进行实际检核,其统计结果也列于表 3 中。由表 3 可知,虽然检核点数量很少,但统计结果却没有多大变化,而且最大、最小误差都不会超过均方误差的 3 倍。因此利用少量检核点实测高程异常对拟合似大地水准面的精度进行外部检核是可行的。

综合以上分析,可以得出以下几点结论和认识。
(1)利用 EGM2008 模型和 GPS 水准数据确定局部似大地水准面的精度可达厘米级,可以满足大比例尺重力勘探利用 GPS 技术测定重力观测点高程的需要。

(2)在局部似大地水准面拟合计算中,隐含利用 EMG2008 模型高程异常差的目的。这是为了消除我国高程基准与 EGM2008 定义的全球高程基准之间的系统偏差以及模型相关性误差,进而提高拟合似大地水准面的精度。

(3)由于 EGM2008 模型的精度具有明显的地域性差异,所以在不同地区利用本方法拟合局部似大地水准面的精度也会有所不同。

(4)利用 TGO 软件的 Grid factory 功能,将 EGM08. GGF 模型按照测区大小提取出对应的子网格模型,并上传到 Trimble RTK 控制手簿中,可以很方便地实现用 RTK 同时测定平面和高程的一体化

作业模式,而这种作业模式的实现对于在大比例尺重力勘探工作中全面推广和普及 RTK 技术,无疑具有非常重要的现实意义。

3 结束语

利用 EGM2008 模型计算的高程异常差和 GPS 水准数据拟合局部似大地水准面以实现 GPS 高程转换的方法,能够满足大比例尺重力勘探工作的要求。在当今 GPS(RTK)平面、高程一体化测量技术几乎完全取代常规测量手段的大背景下,本方法具有很好的应用价值。

参考文献:

[1] DZ/T 0171 - 1997,大比例尺重力勘查规范[S].
[2] Pavlis N K, Holmes S A. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008 [EB/OL]. [2008 - 10 - 08] [http://www.dgfi. badw. de/typo3_mt/fileadmin/2kolloquium_muc/2008 - 10 - 08/bosch/EGM2008. Pdf](http://www.dgfi.badw.de/typo3_mt/fileadmin/2kolloquium_muc/2008-10-08/bosch/EGM2008.Pdf).
[3] 冯林刚,张锁祥,蒙奎文. 基于 EGM2008 模型的重力观测点 GPS 高程转换[J]. 物探与化探,2010,34(4):549 - 552.
[4] 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):283 - 289.
[5] 张兴福,刘成,刘红新. 利用 GPS/水准数据检核 EGM2008 重力场模型的精度[J]. 测绘通报,2009(2):7 - 9.
[6] 冯林刚,赵军,赵锁志. EGM2008 模型在 GPS 高程转换中的应用研究[J]. 测绘信息与工程,2009,34(5):6 - 8.

GPS HEIGHT TRANSFORM IN LARGE-SCALE GRAVITY PROSPECTING

FENG Lin-gang¹,ZHANG Suo-xiang²,ZHONG Ren¹,ZHAO Jun¹,BAOYIN Wu-liji¹

(1. Inner Mongolia Geological Survey Institute, Hohhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Land and Resources Exploration and Development Institute, Hohhot 010020, China)

Abstract:In large scale gravity prospecting, when total accuracy of Bouguer gravity anomaly is increased to $0.025 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, the height mean square error of the measuring point must be 0.050 m. Using EGM2008 model and GPS leveling data to fit local quasi-geoidic surface, the authors transformed the altitude of the measuring point GPS, thus reaching the accuracy. By using GPS leveling data of a certain area, the authors studied the feasibility of the transforming method. The result shows that the method is completely applicable to large scale gravity prospecting.

Key words:gravity prospecting; GPS; altitude transform; EGM2008 model; quasi-geoidic surface

作者简介:冯林刚(1964 -),男,内蒙古呼和浩特人,教授级高工,主要从事 GPS 技术的应用研究和测量工作,公开发表学术论文 20 余篇。