

中国大陆和香港高程基准面重力位差的测定^{*}

莫志明¹⁾ 王建华²⁾ 罗志才³⁾ 郭志和⁴⁾ 徐菊生²⁾ 卓力格图²⁾

1) 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港

2) 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

3) 武汉大学测绘学院地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079

4) 香港地政署测绘处大地测量组, 香港

摘要 根据海面地形与高程基准的定义, 利用全球重力场模型 EGM₉₆ 及 GPS 水准数据计算了香港主要高程基准面与黄海 1956 高程基准面的重力位差, 实现了两个高程基准的统一。计算结果表明两个基准面的重力位差为 $(8.366 \pm 0.765) \text{ ms}^{-2}$, 相当于香港主要高程基准面低于黄海 1956 高程基准面 $(0.855 \pm 0.078) \text{ m}$, 由此推算两个高程基准点(验潮站)处的海面倾斜为香港高于青岛 0.44 m (相对于历元 1994.9), 这些结果与水准联测及海面地形研究成果一致。

关键词 海面地形 高程基准 重力位差 GPS 水准

中图分类号: P224

文献标识码: A

MEASUREMENT OF DIFFERENCE OF GRAVITY POTENTIALS BETWEEN HEIGHT DATUMS OF THE MAINLAND AND HONG KONG

Esmond Mok¹⁾, Wang Jianhua²⁾, Luo Zhicai³⁾, Guo Zihé⁴⁾, Xu Jusheng²⁾ and Zhuoli Getu²⁾

1) Dept. of Land Surveying and Geo-Information, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

2) Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071

3) School of Geodesy and Geomatics of Wuhan Univ., Wuhan 430079

4) The Agency of Surveying and Mapping, The Office Hong Kong Land Administration, Hong Kong

Abstract In the terms of the definitions of sea surface topography and elevation datum, by use of the global gravity field model EGM₉₆ and the GPS leveling data the difference of gravity potential between the basic height datum of Hong Kong and Huanghai 1956 mean sea level has been calculated, hence the two height datums has been united. The result calculated shows that the difference of gravity potential between these two datums is $(8.366 \pm 0.765) \text{ ms}^{-2}$ which means that the basic height datum of Hong Kong is $(0.855 \pm 0.078) \text{ m}$ lower than the Huanghai 1956 mean sea level and it is deduced that the sea surface tilt at Hong Kong height datum point (tidal station) is 0.44 m (relative to epoch 1994.9) higher than that at Qingdao station. These results are consistent with the results from connection leveling and research on sea surface topography.

* 收稿日期: 2003-09-09

基金项目: 大陆、香港、台湾三方合作研究项目

作者简介: 莫志明, 男, 副教授, 博士, 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 从事大地测量教学与科研工作

Key words: sea surface topography, height datum, difference of gravity potential, GPS, leveling

1 引言

高程基准是高程测定的依据, 它的基本定义是和高程起算的参考面联系的。例如大地高的参考面为椭球体面, 正高或正常高为大地水准面或似大地水准面^[1,2], 但是对于正高(正常高), 长期以来, 人们一直把平均海平面作为高程起算面, 这是因为平均海平面可以由一个或多个长期验潮站在某一时期内的观测值以某种形式取平均而方便地获得, 地面点的高程通过水准测量(结合重力测量)的联测而得到^[3]。然而大地水准面与平均海平面是不同的, 通常将平均海平面到大地水准面的距离称为海面地形^[4]。由于验潮站位置的不同, 观测时间段和资料处理方法的不同以及海面地形的存在, 使各个国家或地区定义的高程基准面存在着差异, 就海面地形而言, 这种差异在全球范围内最大达到 2 m。建立全球统一的高程基准, 研究区域性高程基准间的关系, 对于构建“数字区域”、“数字地球”及研究全球或区域性环境变化具有重要的科学意义和现实意义。因此, 从上世纪 70 年代空间大地观测技术发展后就受到大地测量学家的关注, 目前在理论上和实际应用上均已取得了一定的成果^[5~11]。

2 测定两个邻近区域高程基准面差的基本方法

R. Rummel et. al 对高程基准的联接和统一, 给出了严密的计算方法。本文从高程基准的基本定义出发, 直接利用全球重力场模型和 GPS 水准计算重力位差, 从而求得两个相邻区域高程基准面垂直偏差。利用这种方法实现了香港主要高程基准面与黄海 1956 高程基准面的统一。

2.1 基本公式

根据正常高的定义, 任意点 P 相对于黄海 1956 高程基准面的正常高为

$$H_{56}(P) = - \frac{W(P) - W_{56}}{\gamma(P)} \quad (1)$$

其中 $\gamma(P)$ 为 P 点的平均正常重力, $W(P)$ 和 W_{56} 分别为 P 点的重力位和黄海 1956 高程基准面的重力位。

同样, P 点相对于香港主要高程基准面的正常高为:

$$H_{hk}(P) = - \frac{W(P) - W_{hk}}{\gamma(P)} \quad (2)$$

其中, W_{hk} 为香港主要高程基准面的重力位。

令 $\Delta H(P) = H_{56}(P) - H_{hk}(P)$, $\Delta W = W_{56} - W_{hk}$, 则黄海 1956 高程基准面与香港主要高程基准面的重力位差为:

$$\Delta W = \Delta H(P) \cdot \gamma(P) \quad (3)$$

假设有 N 个 GPS 水准点参与了计算, 并且各观测量为独立等权的, 则重力位差的估值为:

$$\Delta W = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta W_i \quad (4)$$

单位权中误差为:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta W_i - \Delta W)^2}{(N-1)}} \quad (5)$$

重力位差 ΔW 的中误差为:

$$\sigma_{\Delta W} = \sigma / \sqrt{N} \quad (6)$$

设 γ 为香港高程基准点的平均正常重力, 则香港主要高程基准面与黄海 1956 高程基准面在该点的垂直偏差为:

$$\Delta H = \Delta W / \gamma \quad (7)$$

2.2 正常高的传递

根据上面确定重力位差的方法, 必须同时知道 P 点相对于香港主要高程基准面和黄海 1956 高程基准面的正常高。位于香港的 P 点相对于香港主要高程基准面的正常高是已知的, 而 P 点相对于我国 1956 黄海高程基准面的正常高可以利用 GPS 联测结果结合全球重力场模型来传递。

众所周知, 任意点 P 的 GPS 椭球高 $h(P)$ (或大地高) 等于该点的正常高 $H(P)$ (或正高) 与高程异常 $N(P)$ (或大地水准面高) 之和, 即

$$h(P) = H(P) + N(P) \quad (8)$$

由此可知, 任意两点间的正常高之差为:

$$\Delta H_{ij} = \Delta h_{ij} - \Delta N_{ij} \quad (9)$$

这里 Δh_{ij} 和 ΔN_{ij} 分别为该两点间的椭球高差和大地水准面高差(或高程异常差), 前者由 GPS 联测结果给出, 后者由全球重力场模型计算得到。

通常由全球重力场模型计算的大地水准面高 N_{GM} 与 GPS 水准实测的大地水准面高 N_{GPSL} 之间存在系统偏差, 本文采用下面的模型对系统偏差进行修正, 即

$$N_{GPSL} = N_{GM} + \alpha_0 + \cos(B) \cos(L) \alpha_1 + \cos(B) \sin(L) \alpha_2 \quad (10)$$

则系统偏差修正后任意两点之间的大地水准面高差为:

$$\Delta H_{ij} = \Delta N_{ij} + [\cos(B_j) \cos(L_j) - \cos(B_j) \cos(L_j)] \alpha_1 +$$

$$[\cos(B_j)\sin(L_j) - \cos(B_i)\sin(L_i)]\alpha_i \quad (11)$$

式中, B_i 和 L_i 为 GPS 测点的大地纬度和经度, α_i 为待求参数。

假设 GPS 水准网由 N 个点组成, 其中 m 个点相对于黄海 1956 高程基准面的正常高是已知的, 则按间接平差方法由 (9) 式可组成如下误差方程组:

$$V = AX - L \quad (12)$$

其中 A 为系数矩阵, X 是由未知点相对于黄海 1956 高程基准面的正常高和 α_i 组成的待求参数矩阵, L 为常数矩阵。

求解 (12) 式可得:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (13)$$

其中, P 是由 GPS 水准点之间的距离确定的权阵。目前 GPS 测定椭球高和精密水准测量测定正常高的精度可达厘米级甚至毫米级, 因此, 按照该方法传递正常高的精度主要取决于由全球重力场模型确定大地水准面高差的精度。

2.3 数据来源

利用上述方法计算香港主要高程基准面与黄海 1956 高程基准面偏差时, 需要利用全球重力场模型、GPS 联测及相应 GPS 站的正常高。数据主要来源是:

1) GPS 联测的大地高采用 1994 年 11 月 14 日至 18 日由中国地震局地震研究所和香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港地政署测绘处合作进行的 GPS 联测成果, 测网共 8 个站, 其中大陆 3 个站(广州、珠海和惠州), 香港 5 个站(编号为 62、78、86、98、504), 见图 1, 同时联测的还有上海和武汉 SLR 站。

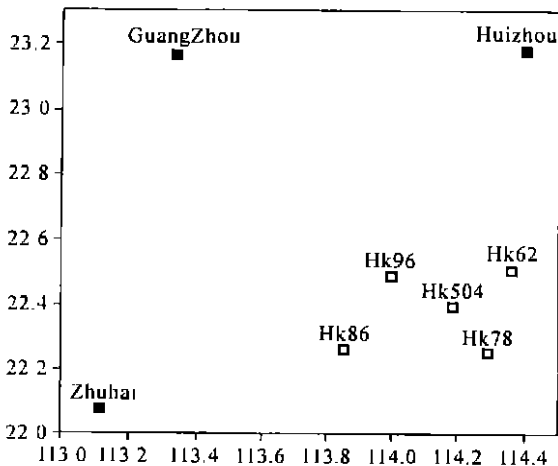


图 1 GPS 水准点的分布

Fig. 1 Distribution of GPS leveling points

数据处理采用 GAMIT 软件和 NGS 精密星历, 起始点为武汉 IGS 跟踪站, 起始值为该站 SLR 1995 年

全球统一公布的数值加上归心改正。处理后获得的测站高程方向的精度优于 1 cm。

2) 正常高分别由大陆和香港的相关部门提供, 香港测站的正常高部份由三角高程测定, 据相关研究^①表明三角高程的测定精度约为 10 cm。两地的水准测量均为三等水准, 其精度为几个厘米。

3) 重力场模型及精度

目前国内外建立的全球重力场模型很多, 国际上较为著名的有 360 阶的 EGM96, 1800 阶的 GPM98C 等, 国内有 720 阶的 IGG97, 360 阶的 WDM94, 3600 阶的 IGGSCSOOB 等, 根据对上述模型的精度检验, EGM96 在全球最差的地区达到 0.5 m, 好的地区可达到 0.1~0.2 m, 而国内的模型由于充分利用了国内的重力数据信息, 因此更适合于我国, 其精度一般可达到 0.2~0.3 m。考虑到在本项研究中, 重力场模型选择对计算结果有较大影响, 因此曾选用了多种模型进行计算和比较, 其中包括由卫星测高推估的 ALT 和 ET97 等模型。比较结果表明 EGM96、WDM94、IGG97 和 IGGSCSOOB 等模型基本接近, 表 1 为 4 种模型的比较 (Δ 为后 3 种模型相对于 EGM96 的差值)。

大地水准面系统偏差纠正与否对计算结果影响也比较显著, 经综合分析, 选定 EGM96^[11] 经系统偏差改正后的大地水准高作为最终计算值。同时列出 WDM94^[12] 作为参考值。

3 计算结果及分析

根据本文提出的方法, 首先利用全球重力场模型和大陆 3 个已知 GPS 水准点, 按方程 (13) 推求香港 5 个 GPS 水准点相对于黄海 1956 高程基准面的正常高, 然后根据方程 (4) 求得两个基准面间的重力位差, 根据方程 (7) 计算两个水准面的垂直偏差, 并进行内符合精度评定, 在计算时采用两种方案, 方案一是直接采用由地球重力场模型计算的大地水准面高差, 第二种方案是经系统偏差改正后的大地水准面高差, 将残差大于 2 倍中误差的点 (HK 78) 剔除。按方案 2 得到的重力位差计算结果见表 2。

上述结果表明利用 EGM96 模型得到的香港主要高程基准面与黄海 1956 高程基准面的重力位差为 -8.366 ms^{-2} , 香港主要高程基准面低于黄海 1956 高程基准面 0.855 m。利用 WDM94 得到的相应值为 -8.974 ms^{-2} , 0.917 m 作为参考值。测定结果的内符合精度优于 0.1 m。

① 罗志才、宁津生、杨沾吉、陈永奇. 高分辨率厘米级局部大地水准面的典型应用, 待发表。

表 1 大地水准面高的比较(m)

Tab. 1 Comparison between geoid heights(m)

| 编号 | EGM ₉₆ | WDM ₉₄ | Δ | IGG ₉₇ | Δ | IGG SCSO OB | Δ |
|------|-------------------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------|----------|
| 1- 2 | 1. 225 | 1. 358 | 0. 133 | 0. 491 | - 0. 734 | 1. 143 | - 0. 082 |
| 1- 3 | 3. 875 | 3. 380 | - 0. 495 | 3. 572 | - 0. 403 | 3. 938 | 0. 063 |
| 4- 5 | 0. 076 | 0. 370 | 0. 294 | - 0. 139 | - 0. 215 | 0. 070 | - 0. 006 |
| 4- 6 | - 1. 472 | - 1. 358 | 0. 114 | - 1. 555 | - 0. 083 | - 1. 455 | + 0. 017 |
| 4- 7 | - 1. 317 | - 1. 345 | - 0. 028 | - 1. 397 | - 0. 080 | - 1. 072 | 0. 245 |
| 4- 8 | - 0. 474 | - 0. 397 | 0. 077 | - 0. 528 | - 0. 054 | - 0. 495 | - 0. 021 |
| 5- 6 | - 1. 548 | - 1. 728 | - 0. 180 | - 1. 416 | 0. 132 | - 1. 525 | 0. 023 |
| 5- 7 | - 1. 393 | - 1. 715 | - 0. 322 | - 1. 248 | 0. 145 | - 1. 142 | 0. 251 |
| 5- 8 | - 0. 550 | - 0. 767 | - 0. 217 | - 0. 389 | 0. 161 | - 0. 465 | 0. 085 |
| 6- 7 | 0. 155 | 0. 013 | - 0. 142 | 0. 168 | 0. 013 | 0. 383 | 0. 228 |
| 6- 8 | 0. 998 | 0. 961 | - 0. 037 | 1. 027 | 0. 029 | 1. 060 | 0. 062 |
| 7- 8 | 0. 843 | 0. 948 | 0. 105 | 0. 859 | 0. 016 | 0. 677 | - 0. 166 |
| 最大 | | | 0. 495 | | 0. 734 | | 0. 251 |
| 最小 | | | 0. 037 | | 0. 013 | | 0. 006 |
| 均值 | | | - 0. 058 | | - 0. 089 | | + 0. 058 |
| 方差 | | | 0. 230 | | 0. 270 | | 0. 140 |

表 2 重力位差的计算结果(单位:ms⁻²)

Tab. 2 Calculated results of difference of gravity potentials

| 重力场模型 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | σ | σ _{ΔW} |
|-------------------|-----------|----------|----------|---------|-----------------|
| EGM ₉₆ | - 9. 322 | - 6. 091 | - 8. 366 | ±1. 530 | ±0. 765 |
| WDM ₉₄ | - 10. 791 | - 7. 020 | - 8. 974 | ±1. 542 | ±0. 771 |

4 讨论和结论

1) 利用重力位模型和 GPS 水准, 测定两相邻高程基准面间的重力位差, 主要误差为重力场模型误差, 不同模型其结果相差最大可达到 0. 2~ 0. 3 m, 这和当前全球重力场模型的实际精度基本一致。为了提高计算结果的可靠性, 在可能的情况下, 利用两个基准所属地区的重力资料进行局部重力场精化。同时随着全球重力场模型的精度和分辨率的不断提高, 利用这个方法有望得到更好的结果。

2) 为了验证本文方法的有效性和计算结果的正确性, 引证以下结果以作比较:

①在香港和大陆(深圳)曾进行过直接的水准联测, 其一是几年前的单点水准联测获得黄海 1956 高程基准面比香港主要高程基准面高 0. 873 m, 其二是 2001 年由 8 个站(香港、深圳各 4 个)进行水准联测获得的结果为 0. 835 m 这些结果与本文结果在精度范围内基本一致。

②高程基准面和海面地形密切相关, 获得了香港高程基准面和我国黄海 1956 高程基准面的垂直偏差后, 很容易得到两个平均海平面的垂直偏差即两地的海面倾斜。

由于海平面随时间在变化, 因此研究海面倾斜

需要将平均海平面归算到相同历元, 黄海 1956 高程基准面是由 1950~ 1956 年青岛验潮站的潮汐观测资料取平均得到的平均海平面, 香港主要基准面是由 1953~ 1965 年共 19 年的维多利亚港的北点自动化验潮站的观测资料求得的, 按照已有公式^[13]计算出高程基准的相应历元: 黄海 1956 高程基准的历元为 1953. 50, 香港对应的历元为 1974. 5。我们利用的 GPS 数据的观测时间为 1994 年 11 月即 1994. 9, 以此进行历元归算。据相关研究认为香港地区平均海平面变化为+ 1. 9 mm/a^[15], 青岛的平均海平面变化为- 0. 68 mm/a^[13], 可以对香港和大陆的高程基准面进行以下归算:

$$\text{香港}(1994. 9 - 1974. 5) \times 1. 9 = 38. 8 \text{ mm}$$

$$\text{青岛}(1994. 9 - 1953. 50) \times (- 0. 68) = 28. 2 \text{ mm}$$

香港主要高程基准面所对应的平均海平面与 1956 黄海高程基准面的海面倾斜为:

$$\Delta S = 1. 23 - 0. 855 + 0. 039 - (- 0. 028) = 0. 442 \text{ m}$$

即香港高程基准点处的平均海平面在历元 1994. 9 期间高于青岛验潮站的平均海平面 0. 442 m。

近年来我国一些学者利用水准联测, 水文资料及卫星测高等方法研究了我国东部沿海相对青岛基准点的海面倾斜, 主要结果见表 3^[4, 15, 16]。

表 3 海面倾斜研究成果比较

| Tab. 3 Comparison between the results of sea surface tilt calculated by some researchers | | | |
|--|------------------|----------------|---------|
| 作者 | 方法 | 验潮站位置 | 差值(cm) |
| 赵明才 | 几何水准 | 赤湾(1966~ 1989) | 38 |
| | 几何水准 | 榆林(1954~ 1989) | 40 |
| | 几何水准、水文、卫星测高混合方法 | 闸坡 | 42 |
| 陈宗镛 | 几何水准 | 榆林(1957~ 1975) | 40 |

胡明城、徐德宝等研究我国东部沿海由南至北的海面倾斜为0.68 m和 0.67 m(相对于 85 基准),这些结果与本文计算结果一致。

通过以上分析可以认为本文所提出的方法是可行的,其结果是可靠的。

致谢:中国科学院测量与地球物理研究所陆洋博士提供了多种全球重力场模型的计算结果,台湾明新技术大学张瑞刚博士参与了前期研究工作,香港理工大学、中国地震局科技监测司和国际合作司给予经费资助,在此一并表示感谢!

References

- Schdlbauer A. 先进技术出现后的大地坐标高程系统[A]. GPS 译文集[C]. 地震出版社,1989.
- W. Torge 著,徐菊生等译. 重力测量学[M]. 地震出版社,1993.
- Heiskanen W A and Moritz. H 著,卢福康等译. 物理大地测量学[M]. 测绘出版社,1979.
- 管泽霖,徐德宝,等. 我国海域平均海面、海面地形,海洋大地水准面的测定[M]. 西安:西安地图出版社1991.
- Guan Zelin, Xu Debao, et al. Measurement of the average sea surface, sea surface topography and ocean geoid of China[M]. Xi'an: Xi'an Publishing House of Map, 1991. (in Chinese)
- 张赤军. 略论重力在建立全球垂直基准中的作用[J]. 地球物理学进展,1988, 13(4): 1~ 8.
- Zhang Chijun. On the Gravity peay a Roll In Constructing the Global vertical datums[J]. Progress in Geophysics, 1998, 13(1): 1~ 8. (in Chinese)
- Grafarend E W and Ardalan A A. An estimate in the Finish Height Datum N60, Epoch 1993. 4, from twenty- five GPS points of the Baltic Sea Level Projects [J]. Journal of Geodesy, 1997, 71: 673- 679.
- Rummel R and Teunissen P. Height datum definition, height datum connection and the role of geodetic boundary value problem[J]. Bulletin Geodesique, 1988, 62(4): 477- 498.
- 焦文海,魏子卿,马欣,等. 1985 国家高程基准面相对于大地水准面的垂直偏差[J]. 测绘学报,2002, 31, (3): 196~ 200.
- Jiao Wenhai, Wei Ziqing, Ma Xin, et al. The origin vertical shift of national height datum 1985 with respect to the Geoidal Surface[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica 2002, 31(3): 196- 200.
- Pan M, et al. Unification of vertical datums by GPS and gravimetric geoid models with application to Fennoscandia [J]. Journal of Geodesy, 1988, 72: 64- 70.
- 张赤军. 全球垂直基准研究中的几点思考[J]. 地球科学进展,2000, 15(1): 106~ 109.
- Zhang Chijun. Some considerations of the investigation in global vertical system [J]. Apvance in Earth Sciences, 2000, 15(1): 106- 109. (in Chinese)
- Lemoine F G, et al. The development of the NASA GSTZ and National IMA joint geopotential model EGM96 July 1998[R]. NASA technical report, Report No: NASA/TP, 1997, 1988- 20681.
- 宁津生,李建成,晁定波,管泽霖. WDM94 360 阶地球重力场模型研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,1994, 19(4): 283~ 291.
- Ning J S, Li J C, Chao, D B, et al. The research of the earth's gravity field model WDM94 complete to degree 360 [J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1994, 19(4): 283- 291. (in Chinese)
- 董鸿闻. 青岛平均海平面趋势性变化与固定高程基准历元的研究[M]. 西安:西安地图出版社,1991.
- Dong Hongwen. Study on the trend change and fixed height datum epoch of Qingdao [M]. Xi'an: Xi'an Publishing House of Map, 1991. (in Chinese)
- Ding X, et al. Sea level changes in Hong Kong from tide gauge measurements[J]. Journal of Geodesy, 2001: 74, 683 - 689.
- 徐宗镛.“1985 国家高程基准”与中国平均海平面[J]. 军事测绘,1986, 4
- Xu Zongyong. 1985 National Height Datum and the average sea surface of China [J]. Army surveying and mapping, 1986, 4. (in Chinese)
- 赵明才,等. 中国近海海面地形的计算与机制的研究[A]. 中国东部沿海地区海平面与陆地垂直运动论文集[C]. 海洋出版社,1998, 240~ 245.
- Zhao Mingcai, et al. Study on the calculation and mechanism of offshore sea surface topography of China [A]. Collected works on sea surface and centirental movement in eastern coastal region of China [C]. Press of Oceanography, 1998, 240- 245. (in Chinese)