

关于我国似大地水准面的精化及有关问题

晁定波¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:着重分析了我国新一代似大地水准面模型 CQG2000 的实际分辨率, 给出了该模型的精度估计, 得出总体分辨率为 20km, 精度为 $\pm 0.4\text{m}$; 60% 地区分辨率达到或优于 10km, 精度为 $\pm 0.3\text{m}$ 。介绍了目前精化大地水准面的国际先进水平, 指出了进一步精化我国大地水准面的必要性和途径及有关问题。

关键词:大地水准面数值模型; 分辨率; 精度

中图法分类号: P223.0

1 概述

大地水准面或似大地水准面(以下简称为(似)大地水准面)是一个国家高程系统(正高系统或正常高系统, 以下简称为正(常)高系统)的起算基准面, 其格网数值模型(以下简称模型)可以看作一种测定正(常)高的参考框架。水准测量的参考基准只是区域性(似)大地水准面上一个特定的点, 即在一个选定的验潮站上确定的平均海面上的一点, 且假定此平均海面就是(似)大地水准面, 其他所有地面点的正(常)高都要从这一点出发, 通过水准测量路线的高程传递来测定。由精密水准测量建立的国家高程控制网, 是水准测量测定高程的参考框架; (似)大地水准面模型提供了覆盖大陆地区实际可用的高程参考面, 由精密 GPS 大地高测量可以确定所测点的正(常)高($h_{\text{正}} = H_{\text{GPS}} - N$, 或 $h_{\text{正常}} = H_{\text{GPS}} - \zeta$, N 和 ζ 分别为大地水准面差距和高程异常), N 和 ζ 由(似)大地水准面模型提供, 因此可以认为所用模型起到了由 GPS 测定正(常)高的参考框架作用。从这个意义上说, 建立和精化(似)大地水准面模型, 就是现今 GPS 定位时代建立和维护国家高程参考框架, 和建立国家高精度 GPS 定位网或传统的国家高程控制网具有同样的重要意义, 也是一个国家发展测绘事业的一项大地测量基础建设。GPS 定位可实现纯几何空间三维大地测量定位(用地

心坐标或大地坐标表示地面点位), (似)大地水准面模型结合 GPS 定位则可实现物理(重力)空间的三维大地测量定位(用大地经纬度和正(常)高表示地面点位), 届时平面控制网与高程控制网分离的传统大地测量模式将成为历史。

GPS 定位相对一高精度基准站(如 GPS 永久跟踪站)单点测定大地高的精度能达到或优于 cm 级水平, 其作业方式可避免按一定路线传递高程, 原则上可单点独立测定, 在很大程度上可避免路线传递误差的累积。精密(似)大地水准面的确定使未来海拔高程的测量将以 GPS 测高为主, 辅以少量精密水准测量, 后者将起到高一级控制或检核作用。要实现这一目标, 要求有区域性的近全波段“绝对”大地水准面模型, 分辨率能满足通常中、大比例尺测图的需求, 精度能达到 GPS 测定大地高的精度水平。我国现有的大地水准面模型距此要求估计低 1~2 个量级。确定具有 cm 级精度的大地水准面是 21 世纪大地测量学家提出的任务, 它的实现需要发展测定地球重力场的新型技术, 主要包括卫星重力技术, 也要发展近地空间机载重力测量。这需要世界各国航天和大地测量部门的共同努力, 创造良好的国际合作环境, 期望少数技术先进的发达国家开放他们的卫星重力技术成果。我国是一个有能力发展卫星重力技术的国家, 应积极参与这一发展进程, 为实现精化全球重力场模型的世纪目标作出贡献。建立具有 cm 级精度的(似)大地水准面模型需要作出较长

期的努力, 乐观地估计, 包括技术和理论的新突破, 需要走过 10~15 年甚至更长的艰难历程。

2 似大地水准面 CQG2000 模型

我国似大地水准面的确定经历了近半个世纪的发展过程, 从 20 世纪 50 年代到 70 年代进行了全国一、二等天文重力水准路线的测量, 建立了我国 54 北京坐标系的第一代似大地水准面 CLQG60, 总体分辨率大致为 200~500km, 精度为 2~4m, 满足了当时建立国家天文大地网地面观测数据归算的需要; 20 世纪 80 年代初, 又将这一似大地水准面转换到新建立的我国 80 西安独立大地坐标系。

20 世纪 80 年代, 在国家“六·五”和“七·五”计划期间, 利用我国实测重力数据和全球 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 平均重力异常数据, 西安测绘研究所和原武汉测绘科技大学分别研制了适于我国应用的全球重力场模型 DQM 77(22 阶次)、DQM 84 序列(36 阶次和 50 阶次)和 WDM 89(180 阶次)^[1,2], 由 WDM 89 得到分辨率为 100km 的模型大地水准面, 分辨率和精度比 CLQG60 都有一定的改善。20 世纪 90 年代初, 在国家测绘局“八·五”攻关重点项目的支持下, 利用包括我国重力数据在内的全球 $30'\times 30'$ 平均空间重力异常, 研制成功 WDM 94(360 阶次)全球重力场模型, 相应模型大地水准面的精度在中国区域略优于当时最好的美国 OSU91 模型^[3]; 同时利用全国约 22 万个重力点值以及 $30'\times 30'$ DTM 与 WDM 94 模型, 计算了一个 $5'\times 5'$ 中国重力大地水准面模型 WZD94, 精度估计为 $\pm 1.1\text{m}$ ^[4]。“九·五”期间, 在国家测绘局重点项目的支持下, 由陈俊勇院士和宁津生院士共同主持继续进行了精化中国大地水准面的研究^[5~7], 主要利用已经建立的国家高精度 GPS A 级和 B 级网提供的 GPS 水准似大地水准面数据, 即高程异常控制网(HACN90)和全国 42 万重力点值, 同时利用了卫星测高数据, 完成了中国新一代似大地水准面模型的计算, 即 CQG2000, 是一个 $5'\times 5'$ 格网数值模型, 覆盖了包括海域在内的我国全部领土范围, 总体精度达到了 dm 级水平。该模型是作为我国正常高高程系统起算面的区域似大地水准面数值模型。

中国新一代似大地水准面 CQG2000 模型基本应用了目前我国全部适用的实测重力数据, 同时加入了 GPS 似大地水准面的控制, 是我国迄今分辨率和精度最高的似大地水准面模型。就分辨

率来说, $5'\times 5'$ 格网分辨率是计算的“模型分辨率”, 实际分辨率取决于地面重力测量的数据采样率。对该模型实际采用重力数据分布状况的统计表明, 重力测量空白地区最多的是新疆自治区, 总面积约 30 万 km^2 , 主要位于东南部塔克拉玛干沙漠东部及邻接的罗布泊地区、库姆塔格沙漠和阿尔金山地区; 其次是西部帕米尔和喀喇昆仑山地区; 西北部的哈尔克山、婆罗科努山、博格达山。西藏地区重力测量空白区则主要位于喜马拉雅山东段中印边界地区, 总面积约 12 万 km^2 。在这些空白区采用 EGM96 模型重力异常值填充, 大约占我国陆地面积的 4.4%。重力测量分布密度地区差别较大, 但基本上可明显地分为低密度和高密度两大区域, 低密度区大致集中在 ($28^{\circ}\text{N}\sim 36^{\circ}\text{N}$; $78^{\circ}\text{E}\sim 102^{\circ}\text{E}$) 区域, 主要包括西藏、青海南部、四川西部和云南, 总面积约 180 万 km^2 , 约占全国陆地面积的 19.0%, 平均分辨率约 25km; 高密度分布区占全国陆地面积的 76.6%, 平均分辨率约 13km。按相邻重力点平均距离统计, 在所用重力数据中, 间距小于 5km 的点占 33%, 5~10km 的点占 27%, 10~20km 的点占 17%, 20~50km 的点占 16%, 50~100km 的点占 7%, 因此, 我国重力数据大致有 60% 达到 $5'\times 5'$ 的分辨率, 全国重力数据分辨率的加权平均为 20.6km (大约 $10'\times 10'$ 分辨率)。CQG2000 模型采用的数据大约是 WZD94 模型采用数据的两倍, 用于研制 WZD94 模型的重力数据分布中约有 220 块 $30'\times 30'$ 重力空白, 在 $30'\times 30'$ 格网中, 有 102 块每块 1 个点, 139 块每块 2 个点, 总空白面积约 80 万 km^2 , 约占我国大陆总面积的 8.3%, 即 CQG2000 所用数据填补了 WZD94 所用数据存在的空白约一半, 使重力数据区域分布不均的状况有了显著改善, 模型的实际分辨率有较大提高。

CQG2000 模型比 WZD94 模型最大的改进是, 前者利用了由国家 GPS A 级和 B 级网加水准测量构成的高程异常控制网(HACN90)提供的实测似大地水准面数据, CQG2000 是将由重力数据确定的重力似大地水准面拟合到 HACN90 似大地水准面的结果。这不仅实现了将重力似大地水准面纳入到我国法定高程系统, 使之可用于由 GPS 测定正常高, 而且由于 HACN90 的控制作用, 使新模型比 WZD94 模型的精度有大幅度提高, 即从 m 级精度提高到 dm 级精度。当然重力数据的增加和分布的改善也有提高精度的作用, 但主要是改善模型的实际分辨率。HACN90 网的控制总体比较均匀, 经粗差检测, 实际使用的网

点数为 671 点(A 级网点 28, B 级网点 643)。网点在东西部的分布有较大差异,以 96°E 经线为界,以东地区网点分布基本均匀,呈网状,共 531 点,平均点距 109km;以西地区网点分布不均,呈环状,共 140 点,平均点距 152km,但其中约有 67 万 km^2 没有网点(包括新疆南部塔克拉玛干沙漠东南,青藏北部高原可可西里山和青藏公路以西柴达木盆地沙漠地区)。HACN90 高程异常精度为 0.08m,是控制 CQG2000 模型精度的基本保证。重力似大地水准面与 HACN90 似大地水准面分 4 个区拟合,4 个区以北纬 60° 和东经 108° 为界,拟合校正后残差的标准差,东北区为 $\pm 0.28\text{m}$,东南区为 $\pm 0.30\text{m}$,西北区为 $\pm 0.44\text{m}$,西南区为 $\pm 0.47\text{m}$;以东经 108° 为界,东部残差标准差平均为 $\pm 0.29\text{m}$,西部为 $\pm 0.46\text{m}$ 。大致可以认为,东部地区 CQG2000 $5' \times 5'$ 似大地水准的精度比西部地区精度高 $\pm 0.17\text{m}$ 。在全国陆地 CQG2000 $5' \times 5'$ 似大地水准面的总体精度(与 671 个 HACN90 网点比较)为 $\pm 0.38\text{m}$,即达到了 dm 级精度水平($\pm 0.4\text{m}$),其中主要包含 GPS 水准似大地水准面误差和重力似大地水准面误差的影响,前者的精度为 $\pm 0.08\text{m}$,则重力似大地水准面的精度为 $\sqrt{0.377^2 - 0.080^2} \approx \pm 0.37\text{m}$,比 WZD94 的精度($\pm 1.1\text{m}$)约高 $\pm 0.7\text{m}$ 。

陈俊勇院士推导设计了 HACN90 的精度指标和布网方案^[8,9],又协同宁津生院士共同主持了 CQG2000 模型的研制^[5~7]。所取得的成果,经外部检验,将 CQG2000 与中国地壳运动观测网络工程中的 73 个点的似大地水准面高程数据进行检核比较,差值的平均值为 $+0.009\text{m}$,均方差为 $\pm 0.36\text{m}$,标准差为 $\pm 0.36\text{m}$ 。这一检验结果表明其间不存在系统差。上述对 CQG2000 的精度估计是可靠的,因为从中国地壳运动观测网络工程中选定的分布全国的 73 个 GPS 水准点的等级,相当于或高于 HACN90 中的 A 级网点(精度优于 $\pm 0.08\text{m}$)。对 CQG2000 模型分辨率和精度的分析以及精度检验结果表明,完满地实现了建立 HACN90 网和研制 CQG2000 模型的设计方案以及预期分辨率和精度指标,为精化我国(似)大地水准面满足未来 5~10 年国家经济建设对测绘生产的需求作出了重要贡献。

3 结 语

CQG2000 模型的成功研制是我国精化(似)大地水准面的一个阶段性进展,分辨率和精度达

到了一个新的水平,但和目前国际上的先进水平相比还有相当大的距离。

美国在 20 世纪 90 年代前期,先后推出了 GEOID90、GEOID93 和分辨率为 $3' \times 3'$ 、精度为 $\pm 2.6\text{cm}$ 的 G9501C^[10];90 年代中后期,美国对精化其区域大地水准面作了进一步努力,主要是大力扩展 GPS 水准网,提高其分辨率和精度;在 G9501C 的基础上,接着推出了 GEOID96 模型,分辨率 $2' \times 2'$,精度比前者略有改进^[11]。最新的模型是 GEOID99^[12],分辨率提高到 $1' \times 1'$,使用的重力数据从 180 万点值增加到 260 万点值, GPS 水准点由 2 951 个增加到 6 195 个,并将大部分旧的 GPS 点进行了重测, GPS 椭球高测定的精度达到了 $\pm 1\text{cm}$,使 GEOID99 模型的精度达到 $\pm 2.0\text{cm} \sim \pm 2.5\text{cm}$ 的水平。加拿大大地水准面模型 GSD95 的分辨率为 $5' \times 5'$,该模型在几十 km 距离上具有 $\pm 5\text{cm} \sim \pm 10\text{cm}$ 的精度^[13]。整个欧洲地区大地水准面的计算始于 20 世纪 80 年代,第一代欧洲重力大地水准面 EGG1 和 EAGG1,分辨率约 20km,精度为几 dm,其中 EAGG1 比 EGG1 多了天文重力水准资料,精度略优(注意这两个模型的分辨率和精度类似我国 CQG2000 模型)。从 1994 年开始,他们先后推出了 EGG94、95、96 和 97 序列欧洲重力似大地水准面。EGG97 模型以 $1.0' \times 1.5'$ 格网表示,经分析表明,该模型中长波系统误差为 $\pm 8.0\text{cm}$,短波误差为 $\pm 1.3\text{cm}$ ^[14~16]。

与上述欧美国家精化大地水准面的先进水平相比,我国还有相当大的差距。从测绘生产的应用看, CQG2000 模型基本上可以满足西部地区中、小比例尺(小于 1:1 万)航测测图采用 GPS 测高作地面高程控制的需求;对 1:1 万比例尺测图,一般地区要求地面高程有 $\pm 0.3\text{m}$ 的精度,则 CQG2000 模型在该地区大致还要提高 $\pm 0.1\text{m} \sim \pm 0.2\text{m}$ 的精度;对于中、东部地区,特别是沿海经济发达地区,大比例尺(如 1:5 000 ~ 1:500)测图更新的需求量可望呈快速增长的趋势,对此 CQG2000 模型的分辨率和精度都不能满足要求,分辨率需要提高到 2~5km,精度要提高到 1~2cm 甚至更高。为满足该地区面临的这一现实需求,小范围地形平坦地区可仅用加密 GPS 水准点的方法实现;较大范围的小山区,则需考虑同时加密 GPS 水准点和加密重力测量,采用精化局部重力场的方法实现,应针对测区范围大小、地形起伏等级和实际精度要求进行技术方案设计,这是目前值得深入研究的一个问题。

我国是一个多山的国家, 地形起伏大, 特别是中西部地区, 区域重力场短波成分复杂, 中、大山区存在高重力梯度变化区, 多数地区在精化局部大地水准面的设计中, 需考虑适当作加密重力测量和加密 GPS 水准来提高分辨率和精度, 需要发展精密局部重力场逼近的设计和标准计算软件, 为此需要一个好的高精度、高阶全球重力场模型作参考场, 这个模型必须吸收我国目前已有的全部地面重力数据和利用更好的 DTM 数据, 以期缩小重力似大地水准面和 GPS 水准似大地水准面之间的拟合差和平滑非线性变化。目前普遍应用的 EGM96 模型用于高分辨率的局部重力场逼近还不是一个很理想的模型, 该模型 100km 分辨率的全球总体精度为 $\pm 26.0\text{cm}$, 50km 分辨率精度为 $\pm 42.1\text{cm}^{[17]}$ 。用我国的 HACN90 网点高程异常数据的检核结果表明, 该模型用于我国区域其精度正好与其全球整体精度估计相当, 大致为 $\pm 0.4\text{m}^{[5, 18]}$ 。据欧美对其重力大地水准面的精度分析表明, 其中主要包含模型中长波的系统误差和局部高程基准及全球大地水准面的偏差。

顺便指出, 目前国内利用我国的 GPS 水准网和 EGM96 模型估计我国高程基准和全球大地水准面的偏差为 $+0.2 \sim 0.3\text{m}$, 大致与 EGM96 模型在黄海海域的海面地形基本一致, 但从目前国内发表的由不同数据源和不同重力场模型导出的多种海面地形模型来看, 其间约有 0.5m 的差异, EGM96 模型本身在全球海洋区域的精度为 $\pm 22.6\text{cm}^{[17]}$, EGM96 海面地形与目前认为最好的主要由海洋数据导出的动力海面地形模型 POCM-4B 和 POP 之差的均方差 (RMS) 分别为 $\pm 10.5\text{cm}$ 和 $\pm 11.8\text{cm}^{[17]}$ 。海面地形的谱特性是长波绝对占优 (低于 30 阶), EGM96 在 $2 \sim 30$ 阶的累积误差为 $\pm 7.9\text{cm}$, 应用 EGM96 模型长波计算海面地形或高程基准面与全球大地水准面的偏差, 误差约 10cm 左右, 若用 EGM96 全波段 (360 阶) 来计算, 包含其短波截断误差估计 $\pm 16.7\text{cm}$, 其结果的误差可能要大于 20cm 。

目前海面地形的准确确定还是一个比较困难的问题, 未来寄希望于具有 cm 级精度的全球重力场 (大地水准面) 模型的问世, 要提高我国区域重力场逼近精度达到 cm 级水平也寄希望于此, 主要着重提高全球重力场模型中长波的绝对精度。新一代卫星重力计划 (CHAMP、GRACE 和 GOCE) 将为实现这一目标作出贡献, 给出接近 cm 级精度的 $180 \sim 250$ 阶全球重力场模型。届时可以利用这一超高精度的全球大地水准面模型,

在 cm 级精度水平上确定世界各国区域高程基准与全球基准 (全球统一大地水准面) 的差值, 从而统一全球高程系统, 同时也为各国区域大地水准面的精化提供一个高准确度的框架, 高于 180 阶或 250 阶的短波分量则必须由各区域自行加密重力测量和 GPS 水准测量来获得。我国 (似) 大地水准面的进一步精化, 需要利用未来的卫星重力数据, 发展卫星重力技术, 同时发展包含我国重力数据的更精密的全球重力场模型, 作为各地区局部重力场逼近的参考模型。根据地区经济发展的需要, 适当加密重力测量 (山区), 特别是努力开发航空重力测量, 填补我国重力测量的空白, 并适当加密 GPS 水准测量, 以期最终实现用 GPS 测量基本取代水准测量的发展前景。

参 考 文 献

- 1 宁津生, 邱卫根, 陶本藻. 地球重力场模型理论. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1990
- 2 许厚泽, 陆仲连, 等. 中国地球重力场与大地水准面. 北京: 解放军出版社, 1997
- 3 宁津生, 李建成, 晁定波, 等. WDM94 360 阶地球重力场模型研究. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 19(4): 283 ~ 291
- 4 管泽霖, 李建成, 晁定波, 等. WZD94 中国大地水准面研究. 武汉测绘科技大学学报, 1994, 29(4): 292 ~ 297
- 5 陈俊勇, 李建成, 宁津生, 等. 我国大陆高精度高分辨率大地水准面的研究和实施. 测绘学报, 2001, 30(2): 95 ~ 100
- 6 陈俊勇, 李建成, 宁津生, 等. 中国新一代高精度高分辨率大地水准面的研究和实施. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(4): 283 ~ 299
- 7 陈俊勇, 李建成, 宁津生. 推算我国陆地大地水准面的计算方案. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(2): 95 ~ 99
- 8 陈俊勇. 我国 GPS 水准网的布设及其精度探讨. 测绘学报, 1993, 22(2): 87 ~ 93
- 9 陈俊勇. 高程异常控制网中利用重力数据进行推估的精度评定. 测绘学报, 1995, 24(3): 161 ~ 167
- 10 Milbert D G. Improvement of a High Resolution Geoid Height Model in the United States by GPS Height on NAVD 88 Benchmarks, IAG Bulletin of D' Information 77, IgeS Bulletin N. 4, Special Issue, "New Geoids in the World", 1996. 13 ~ 63
- 11 Smith D A, Milbert D G. The GEOID96 High resolution Geoid Height Model for the United States. Journal of Geodesy, 1999, 73: 219 ~ 236
- 12 Smith D A, Roman D R. GEOID99 and G99SSS: Far-minute Geoid Models for the United States. Journal of Geodesy, 2001, 75: 469 ~ 490

13

Sideris M G, She B B. A New High-resolution for Canada and Part of the U S by the 1DFFT Method. Bulletin Geodesique, 1995, 69(2): 92 ~ 108

14

Denker H, Behrend D, Torge W. The European Gravitric Quasigeoid EGG95. IAG Bulletin of D' Informa-tion 77, IGES Bulletin N. 4, Special Issue, "New Geoids in the World", 1996a. 3 ~ 11

15

Denker H, Behrend D, Torge W. The European Gravi-metric Quasigeoid EGG96. IAG Symposium, Tokyo, 1996

16

Denker H, Torge W, Wenzel G. Investigation of Differ-ent Methods for the Combination of Gravity and GPS/

Leveling Data IAG Symposium, Birmingham, 1999

17

Lemoine F G, et al. The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, NASA/TP-1998-206861, 1998

18

Chen J Y, Li J C, Ning J S, et al. Testing and Evaluation of the GSFC/DMA EGM in China. International Geoid Service, Bulletin Special Issue, 1997

作者简介: 晁定波, 教授, 博士生导师。现主要从事物理大地测量和空间大地测量的研究。代表成果: 全球重力场的确定, 局部重力场的逼近和卫星测高技术的应用等。

E-mail: dbchao@wtusm.edu.cn

Refinement of Quasi-geoid in China and Relevant Problems

CHAO Dingbo¹

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

Abstract: This paper discusses the role of refining geoid in the development of contemporary surveying and mapping, and considers that a gridded digital geoid model is really a reference frame in datum sense for orthometric or normal height measurement. The real resolution of the new generation quasi-geoid model CQG2000 in China is analysed in detail, and the accuracy estimates of the model is also described. In addition, the advanced level in geoid refinement abroad is briefly introduced, and the necessity, requirement and possible approach for further refining the quasi-geoid model in China are pointed out.

Key words: geoid digital model; resolution; accuracy

About the author: CHAO Dingbo, professor, Ph. D supervisor. His main research fields are the physical geodesy and space geodesy. His typical achievements indude global gravity mode determination, local gravity field approximation, and altimetry application, etc.

E mail: dbchao@wtusm.edu.cn