

GPS 似大地水准面精化及精度分析

范占永¹, 李磊², 蔡东健¹, 高笔清³

(1. 苏州工业园区测绘地理信息有限公司, 江苏 苏州 215001;

2. 张家港市城市测量队, 江苏 张家港 215600; 3. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 基于原有似大地水准面, 利用具有高精度实测的 GPS 水准点, 采用二次多项式拟合法, 结合最小二乘建立某区域似大地水准面精化模型。通过平均偏差、最大偏差、中误差对精化后的似大地水准面模型作精度分析, 证明某区域似大地水准面精化的有效性。通过精化后, 最终得到的似大地水准面内符合精度为 ± 0.016 m。

关键词: 似大地水准面; GPS 水准点; 精化; 精度分析

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)06-0161-04

Refining Quasi Geoid and Precision Analysis with GPS

FAN Zhanyong¹, LI Lei², CAI Dongjian¹, GAO Biqing³

(1. Suzhou Industrial Park Surveying, Mapping and Geoinformation Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215001, China;

2. Zhangjiagang City Surveying and Mapping Institute, Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China; 3. School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Based on the existing quasi geoid, the regional quasi geoid refinement model with high precision measurement of GPS leveling points was established using quadratic polynomial fitting method and least square. And then the precision analysis was conducted on this model from the aspects of average deviation, maximum deviation and mean square error. The conclusion proves the validity of a regional refined quasi geoid. Through the refinement, the internal accuracy of quasi geoid is ± 0.016 m.

Keywords: quasi geoid; GPS leveling points; refinement; precision analysis

随着现代空间测量技术的迅速发展, 大地水准面理论研究也不断深入, 区域似大地水准面精化精度已发展到厘米级的研究阶段^[1-3]。

大地水准面精化的方法一般有 GPS 水准拟合法、重力法及组合法三种方法^[4-7]。当不考虑地球重力场模型和重力等数据影响的时候, 在某小区域范围里, 利用高精度的 GPS 大地高和精密几何水准数据通过最小二乘方法来拟合区域似大地水准面能得到良好的效果^[8]。

通过一定方法对原有的似大地水准面进行精化, 达到在区域范围内代替低等级水准测量和三角高程测量的目的, 从而使精化后的似大地水准面可以通过 GPS(RTK)测量就能方便快速获取该区域内任一点的正常高。

1 区域似大地水准面精化

空间大地测量中, 有大地高系统、正高系统、正常高系统, 它们分别是以椭球面为基准、大地水准面为基准、似大地水准面为基准。大地测量中, 将似大地水准面与椭球面之间的高差称之为高程异常^[9-10]。

GPS 水准点就是 GPS 得出大地高和通过水准测量得出正常高的点。由 GPS 点获得大地高 $H_{\text{大}}$, 水准点获得正常高 $H_{\text{正}}$, 两者(大地高和正常高)作差可得高程异常 $N_{\text{GPS}} = H_{\text{大}} - H_{\text{正}}$; 由于通过原似大地水准面格网值内插法也可得出该点的高程异常 $N_{\text{Q-Geoid}}$, 从而有差值 $\Delta N = N_{\text{GPS}} - N_{\text{Q-Geoid}}$, 利用此差值即可构建似大地水准面拟合模型。在似大地水准

面拟合模型中,平面模型、曲面模型、切比雪夫模型、三次多项式模型以及多面函数模型等一般被学者们常用来构建精化似大地水准面拟合模型^[11-15]。

曲面拟合法的原理是将 GPS 水准点获得的高程异常近似看作各点坐标的曲面函数,通过此拟合函数从而来计算其他地方的 GPS 点的高程异常,从而得到正常高,它也是区域似大地水准面精化常用的一种方法。由于本文所精化的区域北宽南窄,呈三角形,地势西南向东北略有倾斜,属平原地带,总面积约 1 000 km²,境内最高海拔 136.6 m,故拟采用二次多项式曲面拟合法来拟合高程异常从而进行该区域的似大地水准面的精化,二次多项式的数学模型如下:

$$\Delta N = a_0 + a_1(\varphi - \varphi_m) + a_2(\lambda - \lambda_m) + a_3(\varphi - \varphi_m)^2 + a_4(\varphi - \varphi_m)(\lambda - \lambda_m) + a_5(\lambda - \lambda_m)^2 \quad (1)$$

其中, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 为拟合系数; φ_m, λ_m 为拟合区的中心纬度和经度。设 $B = [1, \varphi - \varphi_m, \lambda - \lambda_m, (\varphi - \varphi_m)^2, (\varphi - \varphi_m)(\lambda - \lambda_m), (\lambda - \lambda_m)^2]^T, \hat{A} = [a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]$ 为拟合系数。当有足够的观测值 $\Delta N'$ (大于或等于 6 个) 后,对于函数模型 $V = B\hat{A} - \Delta N'$, 利用经典最小二乘平差方法,可以得到

拟合系数的估值 $\hat{A}$ 。拟合系数求出以后,根据 GPS 测点的经纬度代入此模型中就可以求得其高程异常,进而可得到测点正常高。

根据上述大地水准面精化原理,开发具有可操作界面的应用程序,程序在 .NET3.5 框架下,采用 C# 语言进行开发。利用该程序实现此精化范围内大地高向国家 85 高程基准的转换。

2 实例及精度分析

某区域实测 GPS 水准点 36 个,其中,GPS 点为 C 级 GPS 控制网点,水准点通过二等水准测量得到,GPS 水准点(通过经纬度体现)分布位置如图 1 所示,利用实测得到的 36 个二等水准点与原有似大地水准面内插法得到的正常高相比较并作精度统计,统计结果如表 1 所示。

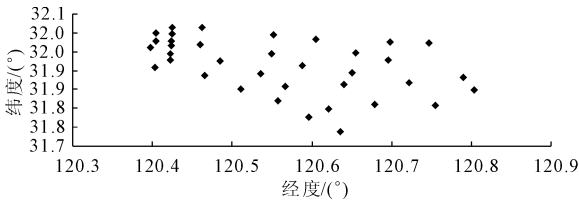


图 1 GPS 水准点分布位置

表 1 原似大地水准面精度统计

点名	与实测高程的差值/m	点名	与实测高程的差值/m	点名	与实测高程的差值/m	点名	与实测高程的差值/m
A100	-0.005	C060	-0.001	C150	-0.032	C250	0.006
A200	-0.015	C070	0.009	C160	-0.032	C260	-0.002
B000	-0.013	C080	0.001	C170	-0.011	C270	0.016
C000	-0.025	C090	0.015	C180	-0.052	C280	0.028
C010	-0.002	C100	-0.017	C190	-0.019	C300	-0.016
C020	-0.015	C110	-0.038	C210	0.004	C310	0.013
C030	-0.017	C120	-0.006	C220	0.021	C320	-0.010
C040	-0.031	C130	-0.018	C230	0.003	D100	-0.007
C050	-0.025	C140	0.034	C240	0.008	D200	0.027

根据图 1 中 GPS 水准点分布情况,该区域进行似大地水准面精化采用二次多项式拟合法结合最小二乘平差方法,考虑到需作内、外符合精度比较,数据处理时只选取 18 个特征点参与拟合计算出似大地水准面模型,剩下的 18 个点作为外符合精度检核点。利用精化后的似大地水准面计算出 36 个点的正常高,然后同精化前的水准测量的正常高相比较,并按式(2)、式(3)、式(4)分别依此计算出似大地水准面精化后正常高的平均偏差、最大偏差和中误差:

平均偏差 $\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta_i|}{n}$ (2)

最大偏差 $\Delta_{\max} = \max_{i=1}^n |\Delta_i|$ (3)

中误差 $m_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n}}, (i = 1, 2, \cdots, n)$ (4)

本文通过似大地水准面精化成果将参与精化似

大地水准面计算的 18 个 GPS 点的大地高转换为正常高,与水准测量所得的正常高相比较,得到似大地水准面精化成果的内符合精度,数据如表 2 所示。

表 2 精化似大地水准面内符合精度统计					
点号	与实测高程的差值 /m	点号	与实测高程的差值 /m	点号	与实测高程的差值 /m
C010	0.019	C130	-0.013	C220	0.029
C070	0.018	C140	0.033	C240	0.008
C080	0.005	C160	-0.026	C250	0.004
C090	0.005	C180	-0.011	C280	0.010
C100	-0.026	C190	-0.005	C300	-0.017
C110	-0.018	C210	0.034	C320	-0.007

通过式(2)、式(3)、式(4),可得精化后内符合平均偏差为 0.016 m,最大偏差为 0.034 m,中误差为 ± 0.019 m。

将剩下没参与拟合的 18 个 GPS 点的大地高导入似大地水准面精化成果中计算拟合模型中的正常高,所得到的正常高与已知的水准高进行比较,从而得到似大地水准面精化后的外符合精度。外符合数据如表 3 所示。

同理,通过式(2)、式(3)、式(4),可得精化后外符合平均偏差为 0.013 m,最大偏差为 0.041 m,中误差为 ± 0.018 m。

表 4 第二次精化似大地水准面内符合精度统计					
点名	与实测高程的差值 /m	点名	与实测高程的差值 /m	点名	与实测高程的差值 /m
A100	0.000	C060	0.004	C150	-0.022
A200	-0.009	C070	0.013	C160	-0.019
B000	-0.006	C080	0.001	C170	0.011
C000	-0.018	C090	0.002	C180	-0.026
C010	0.004	C100	-0.019	C190	-0.002
C020	-0.009	C110	-0.023	C210	0.025
C030	-0.007	C120	0.001	C220	0.033
C040	-0.014	C130	-0.012	C230	0.008
C050	-0.014	C140	0.041	C240	0.017
				C250	0.008
				C260	-0.007
				C270	0.008
				C280	0.007
				C300	-0.013
				C310	0.020
				C320	-0.003
				D100	-0.001
				D200	0.033

从表 4 可得出内符合精度情况,平均偏差为 0.013 m,最大偏差为 0.041 m,中误差为 ± 0.016 m。与第一次内符合精度比较,平均偏差和中误差均优于第一次,虽然 C140 GPS 水准点相较于第一次偏差有所增大,但最大偏差依然没有超过第一次的最大偏差,整体精度依然比第一次精化后的结果有提高。

表 3 精化似大地水准面外符合精度统计					
点号	与实测高程的差值 /m	点号	与实测高程的差值 /m	点号	与实测高程的差值 /m
A100	-0.004	C040	-0.019	C230	0.000
A200	-0.011	C050	-0.022	C260	-0.005
B000	-0.006	C060	0.000	C270	0.005
C000	-0.016	C120	0.004	C310	0.028
C020	-0.011	C150	-0.030	D100	0.004
C030	-0.016	C170	0.016	D200	0.041

由表 1 中数据可得出,原似大地水准面平均偏差为 0.016 m,最大偏差为 0.052 m,中误差为 ± 0.020 m。由此可得知,精化后的似大地水准面成果相较于原似大地水准面精度由 ± 0.020 m 提高到 ± 0.018 m,这一结果验证了似大地水准面精化的正确性和有效性。

为了充分利用 GPS 水准点数据,将 36 个点的 GPS 大地高成果直接用原有似大地水准面转换为正常高,与实测水准高比较,发现没有超过三倍中误差的点,故利用所有点,即 36 个 GPS 水准点全部作为拟合点来参与拟合计算第二次区域似大地水准面精化模型。第二次精化后,内符合精度统计结果如表 4 所示。

图 2 所示为:原似大地水准面、第一次精化似大地水准面、第二次精化似大地水准面的计算的正常高与实测水准高程的较差,可得出虽然精化之后的结果大体上优化了精度,但是仍然有少数点的高程偏差反而会增大,这可能是由于 GPS 水准点本身误差就存在相对较大的情况,也可能是由于这些点处于似大地水准面精化边界所造成的。

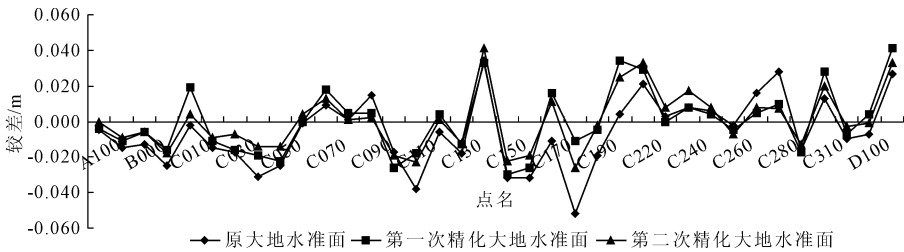


图 2 似大地水准面拟合高程与实测水准高程较差

根据本区域精化后的似大地水准面内外符合精度可知,高程异常精度满足一般工程要求(城市似大地水准面精度要求为 $\pm 0.020\text{ m}$)。由以上数据可得,原似大地水准面外符合精度为 0.02 m (与实测水准点相比较);第一次精化时选取 18 个点作为拟合点,18 个点作为外符合精度检核点,得第一次精化后内符合精度为 $\pm 0.019\text{ m}$,外符合精度为 $\pm 0.018\text{ m}$;第二次精化利用 GPS 水准点所有点作为拟合点,得第二次似大地水准面内符合精度为 $\pm 0.016\text{ m}$,故本区域选用第二次精化成果为最终精化成果用于工程实践中。

3 结 语

高精度的 GPS 大地高,精密的几何水准测量点,两者作差获得的高程异常可在一定区域内对原似大地水准面进行精化。

(1) 二次多项式拟合法结合最小二乘平差能满足整体区域较为平缓的似大地水准面精化,对于面积较小、地势平坦的地区,采用二次多项式曲面拟合法能够得到较好的逼近效果。

(2) 精化后的似大地水准面,通过 GPS(RTK)测量可以快速方便地获取该精化区域内任一点的正常高,这将为外业工作者提高巨大的工作效率。

(3) 本文通过最大偏差、平均偏差、中误差来阐述了似大地水准面精化结果的正确性和有效性,最终得到似大地水准面精化精度为 $\pm 0.016\text{ m}$ 。本文在讨论似大地水准面精化精度时只考虑了 GPS 水准点精度,而对已知点的数量和分布、精化时所选用拟合模型等影响精化精度的因素没有过多赘述。

参考文献:

[1] 廖超明,王龙波,覃允森,等.一种有效的区域似大地水准面精度检测方法[J].测绘科学,2008,33(6):53-54,

41.

[2] 宋 雷,陈晓华,胡伍生,等.卫星重力信息融合及区域似大地水准面精化应用[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(S2):316-319.

[3] 郭春喜,聂建亮,王 斌,等.区域似大地水准面拟合方法及适用性分析[J].大地测量与地球动力学,2013,33(1):103-107.

[4] 范宏涛.利用重力场模型对中国陆地和岛礁 GNSS 水准沉降进行分析[J].测绘与空间地理信息,2015(1):84-87.

[5] 张延波,徐 伟,孟昭山,等.大庆市区域似大地水准面精化[J].测绘与空间地理信息,2012(11):67-68.

[6] 李华平,马新莹,章纬之,等.基于 EGM2008 模型进行芜湖市似大地水准面精化[J].城市勘测,2013(5):101-104.

[7] 孙中苗,翟振和,肖 云.渤海湾航空重力及其在海域大地水准面精化中的应用[J].测绘学报,2014(11):1101-1108.

[8] 于小平,杨国东,王凤艳,等.GPS 高程拟合转换正常高的研究[J].测绘科学,2007(2):40-41.

[9] 胡 杰,胡伍生.基于格网模型的似大地水准面精化方法的研究[J].测绘科学,2009(S2):56-58.

[10] 马新莹.局部大地水准面精化中几个问题的探讨[D].武汉:武汉大学,2005.

[11] 张正禄,邓 勇,罗长林,等.利用 GPS 精化区域似大地水准面[J].大地测量与地球动力学,2006,26(4):14-17.

[12] 张宝松,郑加柱,滕 龙,等.区域似大地水准面的二次精化及其软件实现[J].物探与化探,2014(6):1290-1292.

[13] 马鸿伟,郭金运,李国伟,等.一种区域似大地水准面模型拟合方法分析[J].海洋测绘,2014(1):8-11.

[14] 徐 平,杜向锋.几种常用似大地水准面插值方法精度分析[J].全球定位系统,2014(2):79-81.

[15] 朱 毅.云南省局部区域似大地水准面精化方法探讨与精度分析[D].昆明:昆明理工大学,2012.