

区域似大地水准面精化及水利工程应用前景

宋 雷^{1,2},黄 腾¹,方 剑³,周旭华³,张绪鹏²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.山东省水利勘测设计院,山东 济南 250013;
3.中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学重点实验室,湖北 武汉 430077)

摘要 为了从 GPS 观测的高程信息中获得 GPS 观测点的正常高,利用某区域平均分辨率优于 $5.0' \times 5.0'$ 的重力数据和 GPS/水准数据,EGM96 全球重力场模型以及该区域 $30'' \times 30''$ 数字高程模型并采用移去-恢复技术计算了该区域 $2.5' \times 2.5'$ 分辨率似大地水准面模型.该模型内、外符合精度均优于 0.060 m ,与 GPS 观测数据相结合可以得到四等及四等以下几何水准精度要求的正常高,真正实现 GPS 技术在几何和物理意义上的三维定位功能.最后对似大地水准面在水利工程中的应用前景进行了展望,认为 GPS 平面与高程一体工程控制网为水利工程水准施测困难区域高程测量提供了新的途径.

关键词 区域似大地水准面 高程异常 大地高 GPS/水准 水利工程测量

中图分类号 P224.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)01-0093-04

精确确定全球和区域(似)大地水准面是物理大地测量学要解决的主要问题之一.精化区域(似)大地水准面是一个国家或地区建立现代高程基准的主要任务.将 GPS 技术与高精度、高分辨率(似)大地水准面模型相结合,就可以测定正(常)高,真正实现 GPS 技术在几何和物理意义上的三维定位功能^[1-2].我国最新的似大地水准面 CQG2000 的模型分辨率为 $5.0' \times 5.0'$,高程异常的总体精度为 $\pm 0.36\text{ m}$.这是我国似大地水准面精化的阶段性成果,但与国际先进水平相比还有相当大的差距.我国部分省(市)和经济发达地区应率先建立区域高精度、高分辨率似大地水准面模型^[2].

本文利用某区域的 GPS/水准数据和重力数据,以重力组合法构建了该区域厘米级似大地水准面模型,并对似大地水准面在水利工程测量中的应用前景进行了展望.

1 数据预处理

1.1 地面重力数据归算及格网化处理

该区域地面实测重力数据平均分辨率优于 $5.0' \times 5.0'$,精度优于 2 mGal .首先利用地面实测重力数据和高分辨率的数字高程模型(DEM)数据并通过空间改正、层间改正、局部地形改正和均衡改正等重力归算,获得高平滑度的离散点的均衡重力异常(作为已知(采样)值),然后采用局部拟合内插法确定 $5.0' \times 5.0'$ 格网结点均衡重力异常,最后在格网结点上经过上述重力归算的反过程,就可得到似地形面上 $5.0' \times 5.0'$ 格网空间重力异常.

1.2 全球地球重力场模型

EGM96 重力场模型是美国国家宇航局利用卫星跟踪数据、海洋卫星测高观测值以及各国的地面重力观测数据联合计算的 360 阶全球重力场模型,是目前国际上普遍采用的参考模型.

1.3 数字高程模型(DEM)

采用美国地质调查局(USGS)根据地形信息的光栅和矢量源数据计算的 GTOPO30 数字高程模型(DEM).GTOPO30 是全球 $30'' \times 30''$ (小于 1 km) 格网数字高程模型,其高程单位为 m ,高程起算面为全球平均海面,精度为 $\pm 30\text{ m}$.平面基准是 WGS84 椭球.

收稿日期 2007-03-14
基金项目 国家自然科学基金(40574033 40674013) 363 计划项目(2006AA092153)
作者简介 宋雷(1970—),男,山东济南人,博士研究生,主要从事物理大地测量与大地水准面精化研究.

1.4 GPS/水准数据

收集区域内 C 级 GPS 网点 65 点,点间平均距离为 10 km.该 C 级 GPS 网采用 Leica 双频 GPS 接收机施测,作业方式为经典静态相对定位测量模式.卫星截止高度角为 10°,采样间隔为 15 s,每个点位均观测 2 个时段 6 h 以上,利用 GPSuvery 软件进行基线处理和平差计算,控制网在 WGS-84 下无约束平差,点位中误差为 mm 级.每个 C 级 GPS 点均以三等精度进行了水准观测,高程系统采用 1985 国家高程基准.平差后最大高程中误差为 ± 2.31 cm.该区 GPS/水准点分布如图 1 所示.

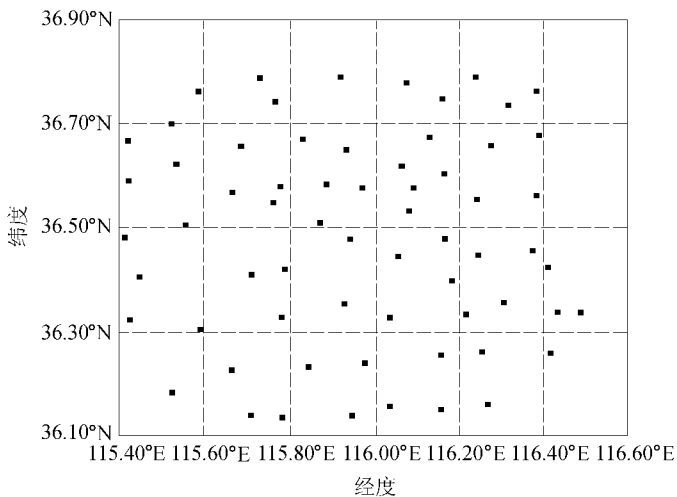


图 1 GPS/水准点分布

Fig.1 Distribution of GPS/leveling points

2 似大地水准面的计算

2.1 似大地水准面计算方案

由于计算区域平均高程较低,起伏不大,地形起伏对似大地水准面的影响为 mm 级,地球重力场模型(360 阶)分辨率为 50 km,移去模型重力异常的残差重力异常也顾及到了局部地形的影响,因此把似大地水准面高分为 2 部分来计算.第 1 部分是由全球重力场模型计算的模型(似)大地水准面高及模型重力异常.第 2 部分是由观测重力异常移去第 1 部分的重力异常得到的残差重力异常以及由残差重力异常格网数据计算得到的残差似大地水准面高,即^[1,3-4]

$$\zeta = \zeta_M - \Delta\zeta \tag{1}$$

其 ζ_M 是由 EGM96 重力场模型计算得出的模型高程异常,计算公式为^[5-6]

$$\zeta_M = \frac{fM}{\gamma\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{k=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (\bar{C}_{nk} \cos k\lambda + \bar{S}_{nk} \sin k\lambda) \bar{P}_{nk}(\cos\theta) \tag{2}$$

式中: r ——地面点矢径; θ ——极距; a ——参考椭球长半径; λ ——地心经度; fM ——地球引力常数; $\bar{\gamma}$ ——正常重力均值; $\bar{P}_{nk}(\cos\theta)$ ——完全规格化的伴随勒让德多项式; $\bar{C}_{nk}, \bar{S}_{nk}$ ——完全规格化的球谐系数.以 WGS-84 椭球作为参考椭球^[1,3].

2.2 重力似大地水准面计算

将 Molodensky 级数的 0 阶项与 1 阶项合并,取 1 阶项近似等于重力局部地形改正,与残差空间异常相加形成残差 Faye 异常,应用 Stokes 公式计算 2.5' × 2.5' 格网结点残差高程异常 $\Delta\zeta$ 并顾及重力地形改正代替严格 1 阶项应增加的 3 个改正项严密表达式.计算公式为^[7-9]

$$\Delta\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} (\delta\Delta g + \delta g_{TC}) S(\varphi) d\sigma - \frac{h_A \Delta g_A}{\gamma} + \frac{\pi G \rho h_A^2}{\gamma} - \frac{\pi G \rho}{\gamma} \delta h_A^2 \tag{3}$$

式中: R ——地球平均半径; $\delta\Delta g$ ——残差空间异常; δg_{TC} ——局部地形改正; ρ ——地壳平均密度; G ——万有引力常数; φ ——计算点和流动点之间的角距; $S(\varphi)$ ——Stokes 函数; $d\sigma$ ——单位球面上的面元; δh_A^2 ——全球地形高平方(h^2)的球谐展开 0 阶和 1 阶项之和,可利用球面纬度 φ 和球面经度 λ 为引数计算,具体表达式为^[10]

$$\delta h_A^2 = 0.453 - 0.018 \sin\varphi + 0.087 \cos\varphi \cos\lambda + 0.204 \cos\varphi \sin\lambda \tag{4}$$

利用重力位模型系数计算 2.5' × 2.5' 格网结点上的模型高程异常 ξ_M (模型高程异常 ξ_M 与残差高程异常 $\Delta\zeta$ 之和即为恢复后的 2.5' × 2.5' 格网高程异常),这样就可得到重力似大地水准面格网数值模型.

2.3 重力似大地水准面与 GPS/水准似大地水准面的拟合

由于受我国验潮站海域海面地形的影响(量级约为 0.5 m),我国区域似大地水准面并不和全球似大地水准面重合,全球重力位模型和局部地面重力数据的长波误差的不一致,不同数据源高程基准和椭球基准的差别,这些因素都将导致重力数据确定的似大地水准面和以 GPS/水准点为控制的似大地水准面之间有一定的系统偏差和不符合值,并且误差成分比较复杂,难以用简单的坐标变换参数来模拟.根据国内外 2 类似大地水准面拟合的经验,采用 4 次拟合多项式作为拟合函数将重力似大地水准面拟合到 65 个以 GPS/水准点为控

制的GPS/水准似大地水准面上,4次多项式中2阶以下的低次项包含1个偏差参数、2个倾斜参数和3个非线性参数,3次以上的高次项可将拟合残差限制在较低水平,这样就获得了该区域似大地水准面的最后结果.似大地水准面的格网数值模型以文件形式给出,2.5'×2.5'格网高程异常等值线图2所示.

总体来看,该区域似大地水准面变化平缓(图2),这与该区域位于平原的地形、地貌比较符合.

3 似大地水准面的精度分析

为验证所用方法的可靠性,对似大地水准面最后结果进行内符合精度和外符合精度的评定,精度评定的表达式为^[10]

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}}$$

(5)

式中:Δ——似大地水准面模型计算的高程异常和GPS/水准点实测高程异常之差;n——用于检核GPS/水准点的个数.

利用2.5'×2.5'格网似大地水准面模型结果内插65个C级GPS/水准点的高程异常,并与GPS/水准实测高程异常进行比较,由于65个C级GPS/水准点参加了该区域似大地水准面模型的构建,此差值看做内符合精度的检验数据.将某工程在该区域布设的35个D级GPS点作为外符合精度检验数据.35个D级GPS点也均以三等精度进行了水准观测.由于35个D级GPS点没有参与似大地水准面模型的构建,检测结果作为外符合精度,其内、外精度的统计结果见表1.

从表1比较数据来看,区域似大地水准面内、外符合精度在该区域均优于6.0cm.由此可知,似大地水准面模型较逼真地表示了区域高程异常的变化特征,精度达到cm级.

4 似大地水准面在水利工程测量中的应用前景

虽然提供高精度的三维坐标是GPS测量突出的优点之一,GPS相对定位技术能够在10⁻⁶~10⁻⁸的量级精度上获得所测点位的大地高差,但水利工程测量中的高程控制仍沿用传统的几何水准测量方法.交通不便、地形复杂、通视条件差、国家水准点稀少、水准测量线路相对较长等条件的限制使得水利工程高程测设极为困难.通过高分辨率的cm级似大地水准面模型,可以将GPS大地高转换为正常高,使其达到四等及四等以下几何水准的精度要求.与传统水准测量相比,利用似大地水准面布设GPS三维控制网具有GPS点间不需通视、降低劳动强度、误差不累积和提高工作效率等诸多优点,可以满足水利工程中、小比例尺地形图图根控制和河道纵、横断面端点对高程的精度要求,并为“数字水利”提供高效的数据采集系统.

5 结 语

随着GPS技术的不断发展以及高精度、高分辨率似大地水准面的不断精化,似大地水准面联合GPS观测进行高程测量将逐步取代常规几何水准测量,实现真正意义上的GPS三维定位功能.在水利工程中,GPS平面与高程一体工程控制网将成为水利工程控制测量的发展方向,也为水利工程水准施测困难区域高程控制测量提供了一种新的方法.

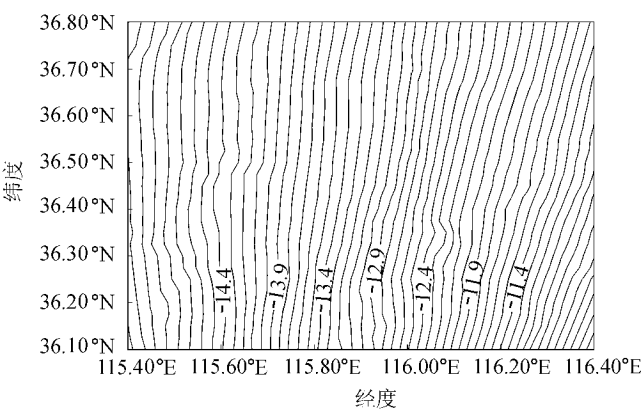


图 2 高程异常等值线
Fig.2 Isoline map for height anomaly

表 1 似大地水准面结果内、外符合精度统计与比较

Table 1 Statistics and comparison of inner and outer precisions of quasi-geoid						m
精度统计类型	检验点个数	最大值	最小值	平均值	标准差	
内符合精度	65	0.072 9	-0.065 71	0.001 0	±0.031 5	
外符合精度	35	0.118 8	-0.098 40	-0.001 0	±0.055 6	

参考文献:

- [1] 李建成,陈俊勇,宁津生,等.地球重力场逼近理论与中国2000似大地水准面的确定[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [2] 宁津生,罗志才,李建成.我国省市级大地水准面的现状及技术模式[J].大地测量与地球动力学,2004,24(1):4-8.
- [3] 魏子卿,王刚.用地球位模型和GPS/水准数据确定我国大陆似大地水准面[J].测绘学报,2003,32(1):1-5.
- [4] JEYAPALAN K. Local geoid determination using global positioning systems[J]. Surveying and Land Information Science, 2004, 64(1): 65-75.
- [5] RAPP R H. Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a spherical harmonic representation of the height anomaly/geoid undulation difference[J]. Journal of Geodesy, 1997, 71: 282-289.
- [6] 管泽霖,宁津生.地球形状与外部重力场[M].北京:测绘出版社,1981:283-358.
- [7] 李建成,姜卫平,秦政国,等.无锡市厘米级似大地水准面的研究[J].地理空间信息,2005,3(2):1-5.
- [8] 宁津生,罗志才,杨沾吉,等.深圳市1 km 高分辨率厘米级高精度大地水准面的确定[J].测绘学报,2003,32(2):102-107.
- [9] SJÖBERG L E. A discussion on the approximations made in the practical implementation of the remove-compute-restore technique in regional geoid modelling[J]. J Geod, 2005, 78: 645-653.
- [10] 张全德,郭春喜,王斌.浙闽赣区域似大地水准面精化[J].测绘科学,2007,32(1):11-17.

Refining of region quasi-geoid and prospect of its application to water conservancy engineering

SONG Lei^{1,2}, HUANG Teng¹, FANG Jian³, ZHOU Xu-hua³, ZHANG Xu-peng²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy, Jinan 250013, China;

3. Key Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430077, China)

Abstract :The study was performed to obtain the normal height of GPS observation points from the elevation information of GPS surveying data. With the remove-restore method, a region quasi-geoid model of the resolution $2.5' \times 2.5'$ was constructed by using the region gravity data with the mean resolution superior to $5.0' \times 5.0'$, EGM96 global gravity field models, $30'' \times 30''$ digital elevation model, and GPS/leveling data. The inner and outer precisions of the quasi-geoid model are both superior to 0.060m. The model combined with GPS surveying data could obtain the normal height meeting the requirement of the geometric leveling precision of the fourth-grade or below. Thus, 3D positioning function of GPS technique in geometric and physical senses was realized. Finally, the further application of the quasi-geoid to water conservancy engineering was prospected. It is considered that GPS plane-height integrated engineering control network provides a new thought for height measurement in the region where the leveling is difficult to be measured in water conservancy engineering.

Key words :region quasi-geoid; height anomaly; geodetic height; GPS/leveling, surveying in water conservancy engineering