

# CQG2000 似大地水准面模型 在青藏高原地区区域重力调查中的应用

邱志众, 周纪平

(中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100080)

**摘要:** 区域重力调查中, GPS 高程测量的精度直接影响重力测量成果的精度。用国内最新研制的测绘科技成果——CQG2000 似大地水准面模型, 对 GPS 测得的大地高程进行改算, 可得到较高精度的正常高成果。方法应用于青海三江流域 1: 20 万区域重力调查工作中, 取得了较好的效果。

**关键词:** 青藏高原; 区域重力调查; 似大地水准面模型; GPS 高程测量

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2007)05-0451-04

重力勘探是通过测量地表重力变化来探测地下物体结构分布情况的一种地球物理勘探手段, 是研究区域性地质构造的重要方法之一。重力测量需要知道观测点的平面坐标和高程, 不同比例尺的重力测量, 对测点高程的精度要求也有所不同。对重力数据进行处理需利用高程数据, 重力仪观测结果经过零点掉格改正之后所得到的只是各点相对总基点的重力差, 这个重力差除受地质因素影响外, 还包括受高度变化和中间层等因素的影响, 如布格改正

$$\Delta g_{\text{布改}} = (0.308 - 0.0419\sigma) \Delta h,$$

式中,  $\Delta h$  为测点相对于基点的高差;  $\sigma$  为中间层密度。从上式可看出,  $\Delta h$  的测定精度直接影响  $\Delta g_{\text{布改}}$  的精度, 所以说高程测量与重力勘探密切相关, 高程测量的精度直接影响重力测量成果的精度。

新颁布的《区域重力调查规范 (DZ/T0082-2006)》提高了重力测量精度的要求。例如, 将山区地形条件下, 1: 20 万重力调查布格重力异常总精度由原规范中  $\pm 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  提高到  $\pm 0.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ , 相应的测点平面位置均方误差由原规范  $\pm 100 \text{ m}$  提高到  $\pm 10 \text{ m}$ , 高程测量均方误差由原规范  $\pm 4.0 \text{ m}$  提高到  $\pm 1.6 \text{ m}$ 。从 2007 年开始, 区域重力调查工作精度均要求按照新的区域重力调查规范执行。因此, 探索新的测量方法, 提高区域重力调查中高程测量的精度, 是目前区域重力工作中急需解决的重要技术问题之一。

## 1 区域重力调查曾采用的高程测量方法

1991~1993 年, 地矿部第二综合物探大队开展

了 GPS 在物化探测地中的应用研究, 初步总结出一套适合一般地形条件、中小比例尺物化探勘查的 GPS 定位作业方法, 据此编写了《物化探 GPS 测量规程》, 在部系统内推广使用并一直沿用至今。

这是一种近似的计算方法, 在高山区高程异常变化较大的地区, 两点之间的高程异常之差最大可达到  $0.04 S$  ( $S$  以  $\text{km}$  为单位, 在距离为  $1 \text{ km}$  时高程异常之差最大  $4 \text{ cm}$ ), 若测量距离达  $40 \text{ km}$ , 则两点高程异常之差最大可能达到  $1.6 \text{ m}$ 。所以要提高 GPS 测量的精度, 就必须考虑高程异常改正问题。

## 2 CQG2000 似大地水准面模型介绍

中国新一代高精度高分辨率的大地水准面 (CQG2000) 于 2001 年问世, 它是陈俊勇院士为首的课题组经过几年研究而实现的。课题组在 3 年时间里搜集和使用了大量中国大陆及其周边海洋地区重力、高精度 GPS 水准、多代卫星测高数据和数字高程模型及海深模型等国内外资料, 并结合国情, 最终建立了我国新一代分米级精度大地水准面 (CQG2000) 模型。通过用中国地壳运动观测网络的 73 个 GPS 水准点进行独立检核, 表明其精度在东部 (东经  $102^\circ$  以东) 优于  $0.3 \text{ m}$ , 西部优于  $0.4 \text{ m}$  (东经  $102^\circ$  以西, 北纬  $36^\circ$  以北) 和  $0.6 \text{ m}$  (东经  $102^\circ$  以西, 北纬  $36^\circ$  以南), 整体精度达到分米级, 分辨率东部为  $15' \times 15'$ , 西部为  $30' \times 30'$ , 且首次覆盖了我国大陆和海岸线以外  $400 \text{ km}$  邻海。

由于地形条件的限制, 我国地面重力观测数据的密度和分布相当不均匀, 尤其在西部地区还存在

大量重力数据空白地区,致使 CQG2000 似大地水准面的精度在全国范围内是不一致的。通常,在东部地区由于重力观测数据丰富,似大地水准面精度较高,可以达到 0.30 m 左右;西部地区由于重力观测数据匮乏,部分地区还是空白区,其精度只能达到 0.50 ~ 0.60 m;全国平均精度理论上为 ±0.36 m。

如上所述,高程测量的精度直接影响物探测量的精度,目前地质勘探中使用最普遍的测量技术是 GPS 定位技术。使用 GPS 载波相位相对测量法可以获取高精度的相对大地坐标(精度可达厘米级),以遍布全国的高精度 GPS 控制(网)点为起算点进行平差,可以获取高精度的测点大地坐标,若用分米级的 CQG2000 似大地水准面模型对 GPS 测量中得到的大地高做改算,可以获得分米级的正常高结果。

### 3 CQG2000 模型的应用方法

高精度的 GPS 测量一般采用载波相位相对测量法,由 GPS 相对定位可以得到三维基线向量,通过 GPS 网平差,可以得到高精度的大地高差。如果网中有一点或多点具有精确的 WGS84 坐标,则可求得 GPS 点的 WGS84 大地(椭球)高程  $H_{84}$ 。实际应用中,地面点的高程都需要采用正常高(水准高程)系统,因此需要求出高程异常  $\xi$ ,把大地高  $H_{84}$  转换为正常高  $H_r$ 。

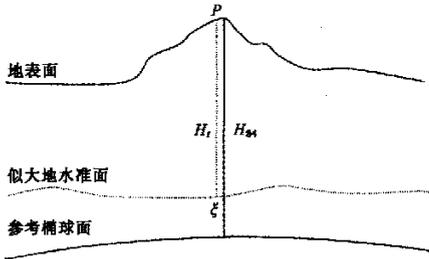


图1 大地高与正常高的关系

由物理大地测量学知道,地面点  $P$  的扰动位  $T$  与该点引力位  $V$  和正常引力位  $U$  之间的关系为  $T = V - U$ ,而  $P$  点的高程异常为  $\xi = T/r$  ( $r$  为  $P$  点的正常重力值)。因为  $r$  和  $U$  可以正确地计算出,所以只要求出  $P$  点的  $V$  即可求出其  $\xi$ 。按球谐函数级数式,  $V$  的表达式为

$$V = \frac{GM}{\rho} \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{\alpha}{\rho} \right)^n (C_{nm} \cos mL + S_{nm} \sin mL) P_{nm}(\sin B) \right],$$

式中,  $\rho$ 、 $B$ 、 $L$  为地面点  $P$  的矢径、纬度、经度;  $C_{nm}$ 、 $S_{nm}$  为位系数,  $P_{nm}(\sin B)$  为勒让德函数;  $n$  为阶,  $m$  为

次,  $\alpha$  为参考椭球的长半轴。

当  $n$  越趋向无穷大,上式越趋于正确。目前,国际上对球谐函数的  $n$  已求到 360 阶,推出了 GE-  
OID96、EGM96 等一些商品化的大地水准面模型,利用重力场模型对区域似大地水准面精化后,计算地面点正常高的精度已达到厘米级。

基于 CQG2000 模型的高程测量法是以国家 GPS 控制网为基础,加密高精度的物探控制点,因此要求加密控制测量的精度应高于测点精度一个数量级。一般来讲,以现有 GPS 接收机的精度,即使以 GPS 工程测量规范中的二级精度要求来观测,也很容易达到厘米级的测量精度。

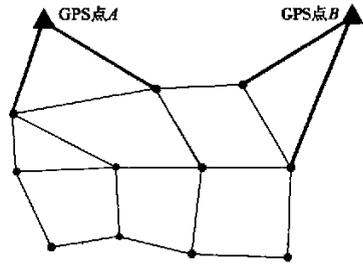


图2 高精度控制网布设方法

工作时,应严格按照观测要求和数据处理要求来进行。

(1) 观测要求。从 1 ~ 2 个国家 GPS 网点起算,作业中应严格对中整平;观测边长:单频机一般不超过 40 km,双频机不超过 100 km,基线边长过长时可加过渡点;观测时间:单频机一般不少于 2 h,双频机不少于 1 h,以获得双差固定解;推荐采用边连接组网方法,交通条件较差时也可采用点连接形式。

(2) 数据处理要求。所有基线应有双差固定解;以 WGS84 大地坐标起算;采用严密平差模型,控制网的最弱点位中误差和高程中误差一般应小于 ±0.2 m;平面可采用简单的三参数转换 WGS84 坐标到 1954 北京坐标;高程采用 CQG2000 模型内插测点上的高程异常。采用以下公式统一改算测点大地高为正常高(水准高程)

$$h_a = H_{84a} - \xi_a, \quad h_b = H_{84b} - \xi_b,$$

$$\Delta(h_b - h_a) = (H_{84b} - H_{84a}) - (\xi_b - \xi_a).$$

即 2 点间的高差应等于 2 点间的大地高差减去高程异常差。现阶段预期的高程精度(以 1: 20 万区域重力为例):控制测量高程误差 < ±0.2 m (最大值),CQG2000 模型误差 < ±0.6 m (最大值),测点误差 < ±0.5 m (经验值)。测点总的高程误差为

$$M_h = \sqrt{M_{\text{控}}^2 + M_{\text{CQG}}^2 + M_{\text{测}}^2} \leq \pm 0.8 \text{ m}.$$

## 4 应用效果

“青海三江北段重要成矿带 1: 20 万莫云幅、杂多县幅区域重力调查”, 是中国地质调查局组织实施的 2005 年地质大调查“西北地区重要成矿带基础地质调查及数据更新”计划项目中下设的工作项目, 地理坐标为东经  $94^{\circ}00' \sim 96^{\circ}00'$ 、北纬  $32^{\circ}40' \sim 33^{\circ}20'$ , 工作面积约  $13\ 600\text{ km}^2$ 。

设计主要技术指标: 测点平面位置均方误差小于  $\pm 100\text{ m}$ , 高程均方误差小于  $\pm 4\text{ m}$ , 布格重力异常总精度优于  $\pm 1.0 \times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ , 测点密度平均每点控制面积不大于  $6\text{ km}^2$ 。

本项目施工中应用 CQG2000 模型内插高程异常, 取得了较好的效果, 作业过程简述如下。

(1) 布设高精度加密控制网。在工区内均匀选出 8 个待定控制点作为固定站, 相邻固定站的距离不超过  $80\text{ km}$ 。利用分布在测区外围的 BS24、BS25 两个 GPS B 级点作为起算点, 与区内固定站组成 GPS 控制网 (图 3)。控制网观测采用常规大地测量方法, 用 6 台 GPS 接收机组成 2 个同步环, 环之间采用边连接, 分 2 个时段完成观测, 每时段观测 2 h。

(2) 测点定位。测点测量方式采用 GPS 快速静态测量法, 每个测点的有效观测时间不少于  $10\text{ min}$ , 固定站至流动站距离控制在  $40\text{ km}$  以内。

(3) GPS 数据处理。基线处理和网平差采用 Trimble Geomatics Office V1.62 软件, 参与平差的所有基线均为双差固定解。网中起算点 BS24 和 BS25 为国家 B 级 GPS 控制点, 起算数据包括 WGS84 大

地经纬度及大地高。因测区内外无国家等级控制点, 只能利用 WGS84 至 BJ54 椭球之间的通用转换参数:  $dx = -22.0\text{ m}$ ;  $dy = 118.0\text{ m}$ ;  $dz = 30.5\text{ m}$ 。

计算出待定控制点的 1954 北京坐标系平面坐标, 进而计算出测点的平面坐标。控制点和测点的高程仍使用 WGS84 坐标系大地高。

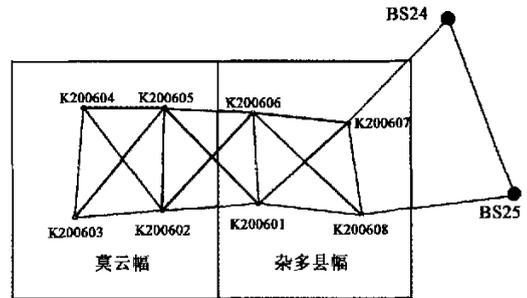


图 3 控制网布设示意

## 5 高程异常改正

利用 CQG2000 似大地水准面成果改算测点的 WGS84 大地高为正常高, 此过程通过一个简单的内插程序完成, CQG2000 成果由国家基础地理信息中心提供。本项目实测重力测点坐标 2 440 个; 完成测量质量检查点 122 个, 占总工作量的 5%。由测量精度统计表 1 可以看出, 实际高程测量误差中误差仅为  $\pm 0.7\text{ m}$ , 优于新规范规定的  $\pm 1.6\text{ m}$ 。这说明用 CQG2000 似大地水准面模型, 可以大幅度提高区域重力调查中高程测量的精度。

表 1 GPS 测量精度统计

项目		平面中误差		高程中误差		
设计误差	误差分配	控制测量 $M_s \leq \pm 2.0\text{ m}$	测点测量 $M_s \leq \pm 10.0\text{ m}$	控制点高程中误差 $M_h \leq \pm 0.5\text{ m}$	控制测量高程转换 $M_h \leq \pm 0.6\text{ m}$	测点测量 $M_h \leq \pm 2.3\text{ m}$
	总误差	$M_s \leq \pm 10.2\text{ m}$		$M_h \leq \pm 2.4\text{ m}$		
实测误差	误差分配	控制测量 $M_s \leq \pm 0.1\text{ m}$	测点测量 $M_s \leq \pm 1.7\text{ m}$	控制点高程中误差 $M_h \leq \pm 0.1\text{ m}$	控制测量高程转换 $M_h \leq \pm 0.6\text{ m}$	测点测量 $M_h \leq \pm 0.4\text{ m}$
	总误差	$M_s \leq \pm 1.7\text{ m}$		$M_h \leq \pm 0.7\text{ m}$		

## 6 方法应用的意义

目前, 我国地球物理勘探规范中对高程测量的要求大部分还停留在米级, 若 CQG2000 模型能推广应用, 高程测量的精度有可能提高一个数量级, 这将会大大提高重力测量等物探方法的探测精度, 对提升物探方法探测隐伏、小型矿体的效果意义重大。随着国家地质大调查工作的深入, 地质调查的重点

逐步由区域性扫面转为重点成矿区调查和勘探, 大比例尺地质勘探工作将逐步展开, 研究高精度的地球物理探测手段, 提高探测的精度和效果, 是我们地球物理工作者的一项重要任务。

区域重力调查一般是由多家单位分头作业, 推广使用 CQG2000 模型技术, 采用 GPS 控制网整体平差方案, 可以有效消除作业单位测地数据接边误差。

另一方面, 我国西部地区测绘工作程度较低, 三

角点、水准点稀少;三角点多采用交会法测量,精度偏低。但国家于 20 纪八九十年代建立的 GPS 控制网精度高,控制点保存较好,国家 GPS 网 + CQG2000 模型的作业方法将是解决西部地区测绘控制资料缺乏的有效途径。所以 CQG2000 模型在地球物理勘探中的应用,对促进我国青藏高原地区地球物理勘探工作意义重大。

**参考文献:**

[1] 管泽琳,宁津生.地球形状及外部重力场[M].北京:测绘出版社,1981.  
 [2] 施品浩,李征航,冯延明.东北地区高精度 GPS 定位试验初步结果[J].武汉测绘科技大学学报,1991(3).  
 [3] 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[J].武汉大学学报(信息科学版),2001,26(4).

**THE APPLICATION OF CQG2000 QUASI GEOID MODEL  
 TO REGIONAL GRAVITY SURVEY OF QINGHAI-TIBET PLATEAU**

DI Zhi-zhong, ZHOU Ji-ping

(Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The accuracy of regional gravity survey is directly affected by the precision of GPS altimetric survey. Using the CQG2000 quasi geoid model developed recently in China, the authors corrected the ellipsoidal height of GPS survey and, as a result, attained a higher accuracy of orthometric altimetric survey. With the method presented in this paper, a better result in 1: 200000 regional gravity survey was achieved in the Three-River Drainage Area of Qinghai Province.

**Key words:** Qinghai-Tibet plateau; regional gravity survey; quasi; geoid model; GPS altimetric survey

作者简介: 邸志众(1966 - ),男,甘肃民勤人,1989年毕业于武汉测绘科技大学航测与遥感专业,现从事 GPS 技术应用研究和工程测量工作,公开发表学术论文数篇。



**中文核心期刊《工程勘察》(月刊)征订启事**

刊号:CN11-2025/TU 邮发代号:2—832 单价:15 元 全年价:180 元

《工程勘察》杂志创刊于 1973 年 8 月,由中国建筑学会工程勘察分会和建设综合勘察设计研究院共同主办,为中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库核心期刊。

本刊内容涵盖四大专业:岩土工程与工程地质、地下水资源与环境、测绘与地理信息工程和工程物探。创刊 30 余年来,坚持“理论联系实际,面向工程实践”的办刊宗旨,面向工程勘察实践,面向广大科研、设计、教学、工程技术人员,以刊登技术交流方面的文章见长。现设有“学术研究”、“工程技术”、“信息园地”等栏目,是工程勘察信息与技术交流的优秀平台。为丰富杂志内容,提高论文质量,扩大杂志的影响,本刊每年都将根据读者和行业技术发展的需求,适时开展多种形式的学术活动,深受广大作者和读者欢迎,为工程勘察领域的技术发展和进步做出了积极的贡献。

《工程勘察》杂志为大 16 开本,每月 1 日出版,国内外公开发行,全国各地邮局均可订阅。

《工程勘察》杂志兼营广告,收费合理,具有一定规模,是展示企业形象、介绍新技术、提高产品知名度的良好平台。

本刊联系地址:北京市东城区东直门内大街 177 号 邮编:100007

联系电话:010-64043313 E-mail:gckczz@cigis.com.cn;newsroom@geot.com.cn