

适用于青藏高原地区中大比例尺重力勘查的大地测量方法技术研究

杜辉,耿涛,高鹏,刘生荣,冀显坤,白运

(国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,中国地质调查局西安地质调查中心,陕西西安 710054)

[摘要]中大比例尺重力勘查工作是各种物探方法中对大地测量精度(尤其是高程精度)要求最高的一种。近年来,在青藏高原地区开展的矿产地质调查项目中越来越多地应用了重力勘查手段,但由于青藏高原地区特殊的自然地理及人文环境,基础测绘程度低,因此,一些在人口稠密、经济发达的内地开展工作时常用的成熟大地测量方法在青藏高原地区已不方便或出现了新的问题。本文通过对青藏高原地区近年来开展中大比例尺重力勘查时测量工作遇到的实际问题进行梳理研究,结合具有针对性地方法技术试验成果,总结了一套解决问题的方法,可作为今后青藏高原及类似困难地区开展中大比例尺重力勘测时的参考。

[关键词] 青藏高原 重力勘查 测量方法 技术研究

[中图分类号] P631 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2017)05-08

Du Hui, Geng Tao, Gao Peng, Liu Sheng-rong, Ji Xian-kun, Bai Yun. Study on geodetic methods in gravity surveys of medium-large scales applicable to the Tibetan Plateau[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(5): 0915-0922.

近年来,随着矿产地质调查工作程度的提高,地表矿产获得重大发现的几率越来越小,攻深找盲已逐步成为矿产地质调查工作的重点。在这类矿产地质调查项目中,利用多种物探方法发现异常,确定成矿有利区,进而进行查证已经成为重要的手段(曹洛华等,1997;于昌明,1999;周圣华等,2007;张锐等,2008;袁桂琴等,2010;柳建新等,2012;于宝显等,2014)。青藏高原地区基础地质工作程度高低不一(许长坤,2011),而无论在找矿和成矿区预测中,重力勘查均能起到重要作用(刘士毅等,2004)。

中大比例尺重力勘查方法对测量精度的要求是最高的,现行的中大比例尺重力规范对重力测点的高程要求一般都在 $\pm 0.4\text{m}$ 以内(不同的精度要求有所差异)^{①-②}。为了满足精度要求,重力勘查中的测量工作必须按照测量的规范顺序、系统地进行。

目前,全国各地在进行中大比例尺重力勘查工作时,采用的测量方法很多,且很成熟。但是在青藏高原地区,由于海拔高差大、地广人稀、交通不便等,

基础测绘程度低,因此,以往在人口稠密、经济发达的内地开展工作时常用到的一些成熟的方法在青藏高原地区已不方便或出现了新的问题。

近几年,中国地质调查局在青藏高原地区陆续部署了多个包含中大比例尺重力勘查工作的矿产地质调查项目。本文通过总结这些项目的野外工作过程,归纳、讨论了青藏高原地区中物探测网布设过程中遇到的各类测量方法技术问题,提出了解决方法,为以后在青藏高原地区及工作条件相类似地区开展中大比例尺重力勘查时物探测网布设工作提供参考。

1 GPS控制点CGCS2000坐标获取时遇到的问题及解决办法

1.1 常用控制点坐标获取方法存在的问题

现阶段重力勘查的测量工作中已将测地型GPS接收机作为工作的主要设备,从前期准备阶段的首级控制网联测,到实际施工阶段进行测点坐标放样、

[收稿日期] 2017-05-15; [修改日期] 2017-06-18; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 国土资源部公益性行业科研专项项目(201511020)、中国地质调查局“东昆仑铜镍多金属资源基地调查”二级项目(DD20160013)和中国地质调查局“青海祁漫塔格成矿带金属矿地质矿产调查”项目(12120113031600)联合资助。

[第一作者] 杜辉(1987年-),男,工程师,主要从事物探测量工作。E-mail: 296772098@qq.com。

坐标数据采集等,均采用 GPS 进行,由于其便捷、快速、高效,在工作中显示出极大的优势。

目前,各施工单位在进行重力勘查的测量工作时,普遍采用“先整体后局部”的施工原则,即首先利用 GPS 静态作业模式建立首级 GPS 控制网(叶培,2014),并计算得出的控制点坐标;其次将控制点的坐标导入 RTK 测量手簿作为基准站数据,进行后续的测点坐标放样和三维坐标采集工作。

根据《国土资源部、国家测绘地理信息局关于加快使用 2000 国家大地坐标系的通知》(国土资发[2017]30 号)文件和地调局关于采用 CGCS2000 坐标系开展图幅地质工作的要求,这就存在满足精度的测点 CGCS2000 坐标如何获得的问题;且在重力勘探中,为了求取布格重力异常而进行的高度改正,要求测点的高程为正常高系统(水准高,一般为 1985 黄海高程),这就包含将测点的大地高转换为正常高的问题。

现在普遍采用的坐标转换方法二种:一是利用覆盖测区的 CORS(连续运行参考站网络)系统直接测量得出测点的 CGCS2000 坐标和 1985 高程;二是工区内建立统一的 GPS 控制网,联测区域内具有 CGCS2000 坐标的各等级控制点,约束平差后作为工区平面坐标的基准,高程转换一般采用模型改正、曲面拟合等方式进行转换计算。

但是,由于青藏高原地区的特殊性,这些方法在该地区应用时会存在以下主要问题:

(1)虽然 CORS 网络可以大大提高测量的速度与效率,降低测绘劳动强度与成本,保证测点的精度(刘经南等,2009),但目前 CORS 网络主要覆盖人口较密的地区。由于青藏高原大部分地区基础测绘程度低,一般进行矿产地质调查工作的区域,几乎没有 CORS 网络覆盖,因此,CORS 系统直接得出满足要求的测点坐标的方法在该类地区不可行。

(2)建立高精度 GPS 控制网时,一般需要联测 2~3 个以上的 CGCS2000 坐标控制点。由于青藏高原地区地广人稀,基础测绘程度低,国家高等级 GPS 控制点稀少且分布不均匀,往往需要联测的国家级 GPS 控制点与工作区相距很远,交通、通讯都非常困难,而且经常会遇到建网时只在网的某一个方向(甚至是距网边数百公里远的地方)才有一个或两个,这就造成远离国家级控制点方向的控制网强度减弱。最终可能导致控制网的精度不能满足中大比例尺重力勘查对测量精度的要求。

(3)早期的重力勘查工作中测点的高程是采

用水准测量取得的,但在青藏高原地区由于水准点稀少且保存完好率低,以致于采用该方法劳动强度大,成本高,效率低,且精度难以保证,因此,现在已不采用。目前常用的是模型改正法和曲面拟合法。

利用模型改正法求取控制点水准高程需要高精度的模型支撑,而现阶段测绘局能够提供使用的 CQG2000 似大地水准面模型,其精度在东部(东经 102° 以东)优于 $\pm 0.3\text{m}$,西部优于 $\pm 0.4\text{m}$ (东经 102° 以西,北纬 36° 以北)和 $\pm 0.6\text{m}$ (东经 102° 以西,北纬 36° 以南),基本格网分辨率东部为 $15' \times 15'$,西部为 $30' \times 30'$ (耿涛等,2010,2012)。而一幅 1:5 万标准分幅的地形图的面积也仅仅为 $15' \times 10'$,这表示西部的一幅 1:5 万地形图中最多只分布一个 CQG2000 模型的网格点。而且在高山区高程异常(水准高与大地高的差异)变化大,CQG2000 分辨率太低使得模型精度得不到保证。如图 1 所示,在等值线间隔均为 0.5m 的网格图中,EGM2008 模型数据很好的反映了地形变化对高程异常的影响,而 CQG2000 模型数据则完全呈现出南北向高程异常的不兼容,是模型分辨率低的直接结果。中国地质调查局西安地质调查中心在昆仑山地区验证的 CQG2000 模型在青藏高原地区的实际精度显示,实际高程异常与模型计算的高程异常最大差值为 0.473m (北纬 36° 以南)和 0.337m (北纬 36° 以北)(耿涛等,2010;耿涛等,2012),这个精度可以满足小比例尺(1:25 万以下)重力调查工作的要求,但不能满足中大比例尺重力勘查对高程的精度要求。

曲面拟合法是目前应用比较广泛的一种拟合方法,具有拟合精度高、适应多种地形条件的优点,但该方法需要测区内有较多且分布均匀的已知高程异常点(刘俊岭等,2009)。而在控制点高程转换中,因为青藏高原的特殊性,显然没有条件来对控制点进行拟合计算。

1.2 解决办法

为了解决上述问题,近几年来中国地质调查局西安地质调查中心在青藏高原地区开展重力调查工作时进行了大量实验验证工作,总结得出了一套适用于青藏高原地区基于中大比例尺重力勘查需求的测量工作方法。

(1)利用精密单点定位技术求取 GPS 控制点的高精度 CGCS2000 坐标。

精密单点定位(precise point positioning,PPP)技术由美国喷气式推进实验室(JPL)于 1997 年提出

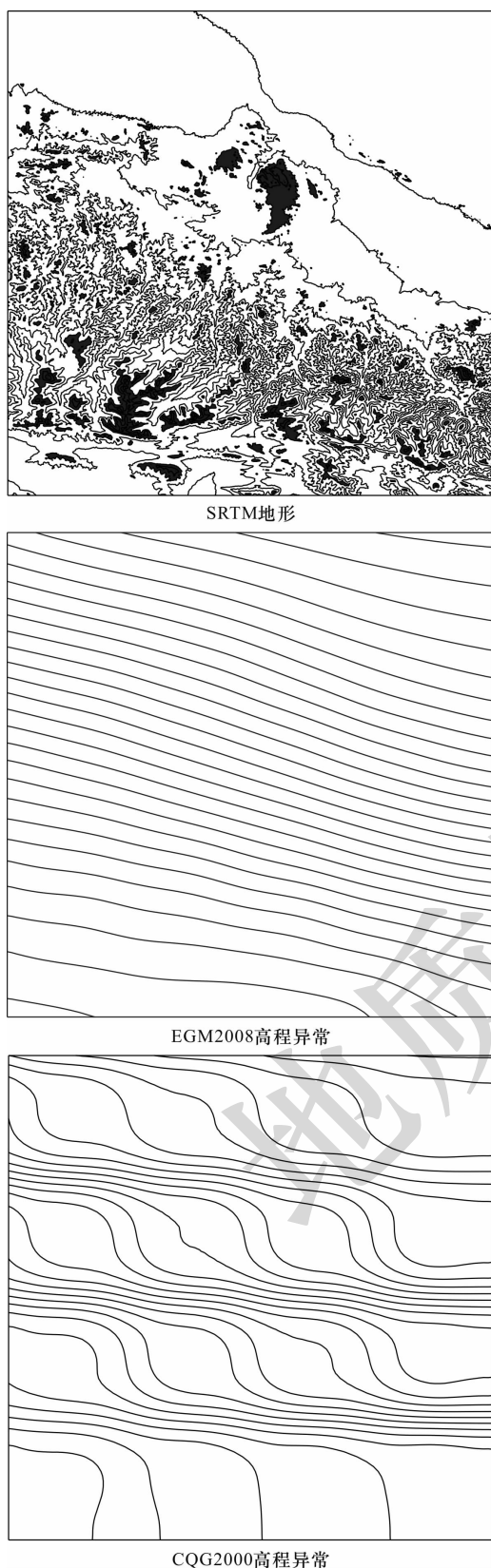


图1 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 范围的 EGM2008 与 CQG2000 模型分辨率对比图

Fig.1 Comparison of resolutions of models EGM2008 and CQG2000 in a $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ area

的,这种方法近几年发展很快(刘经南等,2002;李连江等,2009)。单点定位技术测量中,各控制点独立观测,独立解算,具有灵活、方便的特点,非常适合青藏高原地区进行控制测量工作。

GPS 测量所采用的坐标系统为 WGS-84 坐标系统(曹幼元,2002),那么精密单点定位技术得出的坐标成果当然也属于 WGS-84 坐标系。而同一历元下,WGS-84 坐标与 CGCS2000 坐标的差值在 cm 级范围内,根据重力勘探的坐标精度要求,可以认为 WGS-84 坐标与 CGCS2000 坐标一致(彭小强等,2015)。

精密单点定位技术解算得出的控制点 WGS-84 坐标,其 X、Y、Z 方向精度可以达到 $\pm 0.2\text{m}$ (刘经南等,2002),其解算精度与连续观测时长有关。中国地质调查局西安地质调查中心通过在青藏高原地区的大量试验证明,在保证 4 小时连续观测的情况下,一般平面精度可以达到 $\pm 0.3\text{m}$,高程精度可以达到 $\pm 0.2\text{m}$ (耿涛等,2012),这个精度已能满足相关重力勘查规范对中大比例尺重力勘查测量精度的要求^{①-②}。

精密单点定位技术对控制点的观测条件要求较高(地势开阔,截至高度角 10 度以内无任何遮挡,多路径效应小),连续观测时间不得少于 4h,且为保证精度,每一个控制点上应有多天的观测数据分别进行解算。

考虑到工作效率,在实际工作中,利用精密单点定位技术解算 3 个控制点,代替国家 B 级 GPS 点作为整个 GPS 控制网的起算点,约束平差得到其余控制点高精度的三维坐标。

具体做法是,GPS 控制网采用分级布设,逐级联测,作业方式选择相对定位模式。首级控制网中选择 3 个分布均匀的控制点按照精密单点定位技术的观测要求进行观测,观测完成后对其进行精密单点定位计算,统计得出的这些控制点的精确坐标作为整个控制网的起算坐标。最终经过约束平差,得到所有控制点的高精度 WGS-84 坐标,即获得了 GPS 控制点的高精度 CGCS2000 坐标。

(2)利用 EGM2008 地球重力场模型求取 GPS 控制点的高精度正常高

EGM2008 地球重力场模型由美国国家地理空间情报局(U. S. National Geospatial - Intelligence Agency:NGA)在充分利用地面重力、卫星测高、卫星重力和航空重力测量等现代重力场探测技术的基础上,根据最新数据研制并发布的新一代地球重力场

模型,其最新产品的基本格网分辨率达到 $1' \times 1'$,可以利用模型提供的大地水准面波动值计算基于 WGS-84 坐标的高程异常值,该模型数据可从 NGA 的官方网站中下载得到(章传银等,2009;冯林刚等,2010;符阳等,2016)。

相关试验验证证明,EGM2008 模型计算的我国似大地水准面总体精度为 20cm,华东地区 12cm,华北地区 9cm,西部地区精度为 24cm(章传银等,2009)。

GPS 水准高程异常与 EGM2008 模型高程异常之差的平均值主要由两部分组成,一是水准网的系统偏差(GPS 水准高程测量的系统误差),二是国家高程基准与 EGM2008 模型定义的全局高程基准之间的差别(符阳等,2016)。

在上述情况下,EGM2008 模型所计算得出的控制点正常高的精度,取决于高程基准的改正(冯林刚等,2010)。假设控制点 a 的大地高为 H_a ,控制点 b 的大地高为 H_b ,实际高程异常为 ζ ,EGM2008 模型内插的高程异常为 ξ ,若已知正常高为 h_a ,那么可以通过计算得出 b 点的正常高 h_b :

$$\zeta = \xi + \Delta h_0 \quad (1)$$

Δh_0 为我国高程基准(1985 黄海高程)与 EGM2008 定义的全局高程基准之间的系统偏差,

$$h_a = H_a - \zeta_a, h_b = H_b - \zeta_b \quad (2)$$

根据式(1)、(2)得:

$$\begin{aligned} \Delta h_{ab} &= h_b - h_a = H_b - H_a - (\zeta_b - \zeta_a) \\ &= H_b - H_a - (\xi_b - \xi_a) \end{aligned} \quad (3)$$

则:

$$h_b = h_a + \Delta h_{ab} = h_a + \Delta H - \Delta \xi \quad (4)$$

式(4)中不包含高程系统间的偏差参数 Δh_0 ,所以不用考虑偏差参数的求取方法,且 EGM2008 模型的相关性误差也可以抵消。为了保证控制网精度的整体性,将式(3)求得的各控制点之间的高差,利用水准网平差的原理进行平差,将平差后的高差代入式(4),即可求得各控制点的高精度正常高。

实际工作中,在 GPS 控制网联测中,联测工区附近 1~2 个水准点(闭合水准路线和附合水准路线的区别),在 GPS 控制网平差完成后,即可利用上述公式计算得出各控制点的正常高。

2 重力测点放样与坐标采集中遇到的问题及解决办法

2.1 测点放样与坐标采集过程的问题

在控制网平差完成后,即可将最终的控制点成

果导入 RTK 手簿,进行 GPS-RTK 测量就可以直接得出重力测点的 CGCS2000 坐标和 1985 高程。在这一过程中,通常会遇到以下问题:

RTK 作业模式中,基准站的差分数据链一般采用电台进行发送。由于青藏高原地区地形复杂、切割剧烈,那么在实际工作中,主要遇到的问题是高山对信号的遮挡,导致数据链中断,流动站接收不到基准站发来的差分信号,进行伪距测量所得到的重力测点坐标精度根本不能满足中大比例尺重力勘查的要求。

2.2 解决办法

解决的办法主要有以下两种,下面分别讨论这些做法在应用中应注意的事项。

(1) GPS 支基点

当测量过程中遇到大面积无信号(如一道高山梁的一侧)或中继电台不能有效工作时(RTK 参考站校正数据的有效作用距离超限),可以根据地形条件结合 RTK 接收差分信号的情况选点支测 GPS 支点,直接得出该点的相应坐标。将该支点作为参考站,进行后续的重力测点放样和坐标采集工作。

在青藏高原地区,由于交通不便,通信较差,大规模加密首级 GPS 控制网的工作量非常大,因此可以在重力测点测量的同时,采用边支边测的方式,逐步开展工作。

需要注意的是,为了保证 GPS 支基点的精度和控制误差的逐级传递,GPS 支基点都应和二个及以上的已知控制点进行三角形联测,并利用首级控制点进行平差计算。其实在实际中这点很容易做到,将一台 GPS 在就近(一般就在驻地)的首级控制点上进行静态观测,而作为参考站的 GPS 在进行 RTK 测量时,本身就采集了静态观测数据,在利用 RTK 支测该支点后,再利用静态作业方式对该点观测一小时(实际中只需随车携带三脚架和基座),构成同步环或异步环,进行平差计算后最终得出该支点的高精度坐标,利用参考站坐标变化与流动站坐标一一对应的关系对重力测点坐标进行修正,即可得到满足精度要求的重力测点坐标。

(2) 利用快速静态方式代替 GPS-RTK 作业方式

当测量中遇到由于小山包、陡坎等遮挡电台信号,造成个别测点接收不到差分数据的情况时,支测 GPS 支基点将造成极大的浪费,那么可以采用快速静态方式代替 GPS-RTK 作业,采集该测点的静态数据,进行后处理,得到该测点满足精度要求的重力

测点坐标(陈武等,2001)。

需要注意的是,首先该快速静态作业需要二个控制站组成三角形以保证测点精度,而采用边支边测的方式作业时,就有两个控制站的静态数据;其次,进行约束平差计算时应选择控制站的 CGCS2000 的三维坐标进行计算,得出测点的 CGCS2000 三维坐标后,采用与手簿中的高程转换模型一致的转换方式,将快速静态方式采集的测点大地高转换为正常高。

3 应用实例

本文采用2016年青海东昆仑地区实施的某矿产地质调查项目开展的1:5万重力调查工作为例,对上文所述的测量方法及其最终应用效果进一步进行说明。

该矿产地质调查项目工作区位于柴达木南缘,昆仑山北侧的祁漫塔格地区,山势陡峻,地形复杂,切割剧烈,工作区内无水准点和国家级GPS控制点。经收集资料,在工区西侧约5 km处找到一个二等水准点,将其进行GPS联测,作为控制网正常高的起算数据;在工区西北和东北分别收集到一个国家B级GPS控制点,但都距离工区较远(如图2所示)。组网联测后,西北点的最短基线长度为115 km,东北点的最短基线长度为80 km。将其已知的CGCS2000坐标,作为控制网平面位置和大地高的起算数据,同时收集这两点的正常高作为试验数据;收集的区内CQG2000似大地水准面模型分辨率为 $15' \times 15'$,EGM2008重力场模型分辨率 $1' \times 1'$ 。根据施工需要,先期埋设了七个首级GPS控制点,考虑到后续试验需要和网形强度,又将其分为三个PPP点和四个平差点,同时采用边连式将上述B级GPS点和二等水准点都联测入网。

工作过程中,在建立GPS控制网时,采用徕卡GS15型接收机对这些控制点进行静态相对测量,需进行精密单点定位计算的点观测4个时段,观测时长采用8 h,其余点观测2个时段,观测时长采用4 h。

联测完成后,以国家B级GPS控制点的三维坐标作为已知点,利用Cosa(地面控制测量平差软件)5.21进行约束平差,得出埋设的七个控制点的三维坐标值,经统计控制网中误差为平面 $\pm 0.013\text{m}$,高程 $\pm 0.017\text{m}$,将其称为方案1得出的坐标值和控制网精度。重力测点坐标测量同样采用徕卡GS15型接收机,进行RTK测量,精度统计采用同精度检查的方式进行,经统计测点平面位置中误差 $\pm 0.118\text{m}$,高程中误差 $\pm 0.047\text{m}$ 。

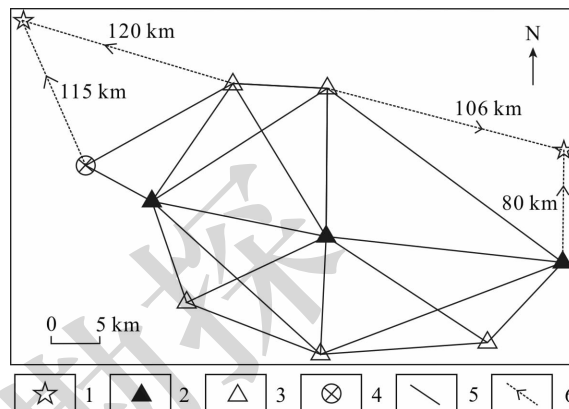


图2 GPS控制网示意图

Fig.2 Schematic map of GPS control network

1 - B 级 GPS 点; 2 - PPP 点; 3 - 平差点; 4 - 水准点; 5 - GPS 基线;
6 - 示意线
1 - B - class GPS point; 2 - PPP point; 3 - balancing point; 4 - bench mark; 5 - GPS baseline; 6 - schematic line

3.1 精密单点定位技术应用

对PPP点的观测值采用Bernese 5.0软件进行精密单点定位计算(周利等,2007),以经过历元改正后各点不同时段平均值作为该点的已知坐标,剔除与国家B级GPS控制点有关的基线,利用Cosa5.21软件进行约束平差,最终得到三个PPP点的精密单点定位三维坐标值和四个平差点新的三维坐标值,经统计控制网中误差为平面 $\pm 0.005\text{m}$,高程 $\pm 0.008\text{m}$,将其称为方案2得出的坐标值和控制网精度。

将方案1、方案2的三维坐标值进行比较,比较结果见表1。

表1 方案1和方案2的两类点坐标值较差表
Table 1 Comparison of schemes 1 and 2 for two kinds of coordinates

	x 较差			y 较差			H 较差		
	最大/m	最小/m	平均/m	最大/m	最小/m	平均/m	最大/m	最小/m	平均/m
PPP 点	0.013	0.002	0.008	0.061	0.022	0.046	0.020	0.007	0.016
平差点	0.017	0.005	0.012	0.068	0.027	0.048	0.022	0.009	0.018

由表 1 可以看出:

(1)在青藏高原地区精密单点定位技术所计算得出的控制点精度完全能够满足中大比例尺重力勘查对 GPS 控制网的精度要求。

(2)由于方案 2 中已知坐标点处于网的中间,而方案 1 中已知点处于网的一侧,且与网的距离很远,那么利用方案 2 计算得出的控制网精度将明显高于方案 1。

3.2 EGM2008 重力场模型应用

控制网中国家 B 级 GPS 控制点和个水准点具有 1985 黄海高程,GPS 控制网联测完成后,即可得出各点间的大地高差,利用收集的 EGM2008 重力场模型内插计算,直接得出各点的高程异常值,采用式③计算得出各点间的正常高差,将二等水准点及 B 级 GPS 点以最少环边数为原则分别组成二个闭合水准网,进行水准网平差计算,平差完成后采用式④最终得出二个 B 级 GPS 点 EGM2008 模型计算的正常高,将西北点命名为 1 号点,东北点命名为 2 号点。

将其计算的正常高与该点已知的正常高进行比

较,比较结果见表 2。

表 2 B 级 GPS 点平差高程与已知高程较差表
Table 2 Comparison of B-class GPS point
balancing and known elevations

点号	环边数/条	高程较差/m
1	4	0.064
2	6	0.091

由表 2 可以看出:

(1)采用 EGM2008 重力场模型计算得出的控制点正常高,能够满足中大比例尺重力勘查对 GPS 点正常高精度的要求。

(2)由于误差的传递和累积,水准环的边数将影响计算成果的精度。

3.3 快速静态代替 RTK 作业的应用

对 GPS-RTK 测量的重力测点,同步进行快速静态测量,观测时间为 12 分钟。对数据进行后处理,得出该测点的快速静态解。将该点的 RTK 测量值和快速静态解进行比较,比较结果见表 3。

表 3 测点 RTK 测量值和快速静态解较差表
Table 3 Comparison of measured RTK values and fast static solutions

点数	x 较差			y 较差			h 较差		
	最大/m	最小/m	中误差/m	最大/m	最小/m	中误差/m	最大/m	最小/m	中误差/m
50	0.233	0.001	0.124	0.268	0.002	0.136	0.068	0.000	0.028

由表 3 可以看出:

(1)较差呈现随机误差的特性,且精度与 RTK 测量的精度相当,即快速静态作业方式在特殊地形条件下能够代替 GPS-RTK 作业方式。

(2)由于快速静态作业方式观测时间长,数据处理为后处理方式,所以在实际作业中仅作为一种在特殊情况下的测量方法使用。

(3)由于不同型号的 GPS 接收机的性能不尽相同,因此,在正式开展工作前,如预计到工作过程中可能要用到快速静态测量方法,则应预先进行一些试验,获取与该型仪器相适应的控制站半径和测点观测时长。一般来说,在一个 1:5 万图幅内,控制半径都是没有问题的,有效观测时长不少于 12 分钟即可。

4 结论

由于青藏高原地区的工作条件特殊,因此,在该地区开展中大比例尺重力勘查时,测量方式的选择和数据处理方法与一般地区有所不同。根据客观条

件,在满足精度要求的前提下,选择便捷、高效的测量方法尤为重要。

上述文中提到的各种问题,也是近几年来多家单位在该类地区开展工作时遇到的共有问题,各单位解决问题所采用的方式也多种多样,但通过总结发现,各单位在解决问题时所采用的方法大都或多或少的存在一些问题。本文通过对这些问题的梳理,结合在青藏高原地区实施项目时有针对性地进行试验取得的成果,经过分析研究,提出了一套解决问题的方法。

当前重力勘查工作中,重力仪本身的精度已经很高了,要想提高重力观测的精度已经非常困难,而提高影响布格异常总精度的各项测量精度,还有很多能够改进的地方,以上论述所提到的方法技术都是为了提高布格异常总精度和工作效率而采取的措施。随着测量方式的革新以及测量技术的提高,在青藏高原地区的中大比例尺重力勘查工作中,可以进一步提高测量工作效率和布格异常总精度的方法有:

(1)随着我国各省 CORS 站的不断完善,在重力勘查的测量工作中,使用 CORS 站的数据链直接获取重力测点的 CGCS2000 坐标和正常高来代替 GPS 控制网的建立及 GPS - RTK 测量将成为一种趋势。

(2)现阶段各省似大地水准面的精化已经全面完成,快速、便捷的获得重力测点的高精度正常高已成为可能(陈俊勇等,2006)。

[注释]

- ① 中华人民共和国地质矿产部. 1997. DZ/T 0171 - 1997 大比例尺重力勘查规范[S].
- ② 中华人民共和国国土资源部. 2015. DZ/T 0004 - 2015 重力调查技术规范(1:50000)[S].

[References]

- Cao Luo-hua, Zhou An-chang, Wu Feng-xiang. 1997. The application of integrated geophysical survey to the prospecting for nonferrous metallic deposits[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 21(6): 425 - 434 (in Chinese with English abstract)
- Cao You-yuan. 2002. The application of pocket GPS in geologic exploration[J]. Geology and Prospecting, 38(5): 71 - 73 (in Chinese with English abstract)
- Chen Jun-yong, Li Jian-cheng, Ning Jing-sheng, Chao Ding-bo. 2006. Study and implementation of Quasi Geoid models with high precision and resolution in China and its some Provinces and Cities[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 31(4): 283 - 288 (in Chinese with English abstract)
- Chen Wu, Hu Cong-wei, Chen Yong-qi, Ding Xiao-li. 2001. Rapid static and kinematic positioning based on GPS active network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 26(6): 518 - 523 (in Chinese with English abstract)
- Feng Lin-gang, Zhang Suo-xiang, Meng Kui-wen. 2010. GPS height transform based on EGM2008 model[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 34(4): 550 - 552 (in Chinese with English abstract)
- Fu Yang, Fu Yong-hao. 2016. Application of EGM2008 model in RTK height conversion of topographic survey[J]. Geospatial Information, 14(11): 103 - 106 (in Chinese)
- Geng Tao, Liu Kuan-hou, Di Zhi-zhong, Li Gang, Yang Huai-ying. 2010. Application of accurate inspection of CQG2000 Quasi - Geoid model to regional gravity survey in Qinghai - Tibet Plateau[J]. Northwestern Geology, 43(2): 1 - 7 (in Chinese with English abstract)
- Geng Tao, Liu Kuan-hou, He Hao, Meng Jun-hai, Yang Ming-sheng, Gao Peng, Du Hui, Tian Zhong-ying. 2012. Some problems concerning regional gravity survey in difficult areas and their countermeasures[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 36(5): 749 - 754 (in Chinese with English abstract)
- Li Lian-jiang, Ju Li-hua, Liang Yan-qiang. 2009. Application of GPS PPP in geophysical surveying[J]. Petroleum Instruments, 23(4): 43 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jian-xin, Cao Chuang-hua, Tong Xiao-zhong, Guo Rong-wen, Tan Hui-yue, Cao Zhi-xiong. 2012. Application of integrated geophysical methods to a molybdenum polymetallic deposit in the Tibetan Plateau [J]. Geology and Exploration, 48(6): 1188 - 1198 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jing-nan, Liu Hui, Zhou Rong, Wei Na. 2009. Some thoughts on the establishment of nationwide continuously operating reference stations [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 34(11): 1261 - 1265 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jing-nan, Ye Shi-rong. 2002. GPS precise point positioning using undifferenced phase observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 27(3): 234 - 240 (in Chinese with English abstract)
- Liu Jun-ling, Liu Hai-sheng, Wang Yan-ling, Xia Xiao-jie. 2009. Study on the methods for GPS height fitting[J]. Geomatics & Spatial information technology, 32(1): 143 - 147 (in Chinese with English abstract)
- Liu Shi-yi, Sun Wen-ke, Sun Huan-zhen, Wu Hai-cheng, Zhou Jian-xin. 2004. A preliminary analysis of the train of thought for geophysical and geochemical exploration in china[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 28(1): 1 - 9 (in Chinese with English abstract)
- Peng Xiao-qiang, Gao Jing-xiang, Wang Jian. 2015. Research of the coordinate conversion between WGS84 and CGCS2000[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 35(2): 219 - 221 (in Chinese with English abstract)
- Xu Chang-kun. 2011. Discussion on the specificity of metallogenic geological features and prospecting layout in Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 47(5): 782 - 793 (in Chinese with English abstract)
- Ye Pei. 2014. Application of the kalman filter to control survey in the Yangshan gold mine[J]. Geology and Exploration, 50(Suppl): 1446 - 1450 (in Chinese with English abstract)
- Yu Bao-xian, Li De-liang, Zhang Shuai, Wang Huai-kun, Feng Chang-ge, Li Peng. 2014. Joint application of magnetic and electric methods to an iron - zinc polymetallic deposit in Middle Gobi Province of Mongolia[J]. Geology and Exploration, 50(1): 192 - 198 (in Chinese with English abstract)
- Yu Chang-ming. 1999. The research of exploring gold ore by comprehensive geophysical methods at He Lan Gou[J]. Progress in Geophysics, 14(2): 114 - 122 (in Chinese with English abstract)
- Yuan Gui-qin, Li Fei, Zheng Hong-shan, Ding Zhi-qiang. 2010. Geophysical technologies and their application effects for exploration of deep metallic mineral[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 32(5): 495 - 499 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Chuan-yin, Guo Chun-xi, Chen Jun-yong, Zhang Li-ming, Wang Bin. 2009. EGM2008 and its application analysis in Chinese Mainland[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 38(4): 283 - 289 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Rui, Liu Hong-tao, Liu Jian-ming, Lin Jian-hua. 2008. Application of comprehensive geophysical methods in the long tou shan ag - pb - zn deposit[J]. Geology and Exploration, 44(2): 67 - 72 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Li, Kuang Cui-lin. 2007. The introduction and practice of bernese high precise GPS data processing software[J]. Geomatics & Spatial

- information technology, 30(5):110-113 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Sheng-hua, Yan Yun-fei, Li Yan-jun. 2007. Application and efficiency of geophysical and geochemical exploration methods in present ore prospecting[J]. *Geology and Prospecting*, 43(6):58-62 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 曹洛华, 周安昌, 吴凤翔. 1997. 在有色金属矿勘查中综合物探的应用[J]. *物探与化探*, 21(6):425-434
- 曹幼元. 2002. 手持式 GPS 测量在地质勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 38(5):71-73
- 陈俊勇, 李建成, 宁津生, 晁定波. 2006. 全国及部分省市地区高精度、高分辨率大地水准面的研究及其实施[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 31(4):283-288
- 陈武, 胡从玮, 陈永奇, 丁晓利. 2001. 基于 GPS 基准网的 GPS 快速静态定位及动态定位方法[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 26(6):518-523
- 冯林刚, 张锁祥, 蒙奎文. 2010. 基于 EGM2008 模型的重力观测点 GPS 高程转换[J]. *物探与化探*, 34(4):550-552
- 符阳, 符永好. 2016. EGM2008 模型在地形测量 RTK 高程转换中的应用[J]. *地理空间信息*, 14(11):103-106
- 耿涛, 刘宽厚, 邸志众, 李钢, 杨怀英. 2010. CQG2000 模型在青藏高原地区的精度检验及其对区域重力调查工作的意义[J]. *西北地质*, 43(2):1-7
- 耿涛, 刘宽厚, 贺灏, 孟军海, 杨明生, 高鹏, 杜辉, 田中英. 2012. 青藏高原困难地区开展区域重力调查工作遇到的问题与对策[J]. *物探与化探*, 36(5):749-754
- 李连江, 鞠立华, 梁延强. 2009. 精密单点定位技术在物探测量中应用[J]. *石油仪器*, 23(4):43-45
- 柳建新, 曹创华, 童孝忠, 郭荣文, 谭辉跃, 曹志雄. 2012. 综合物探方法在青藏高原某钼多金属矿的勘查效果[J]. *地质与勘探*, 48(6):1188-1198
- 刘经南, 刘晖, 邹蓉, 魏娜. 2009. 建立全国 CORS 更新国家地心动态参考框架的几点思考[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 34(11):1261-1265
- 刘经南, 叶世榕. 2002. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 27(3):234-240
- 刘俊领, 刘海生, 王衍灵, 夏小杰. 2009. GPS 高程拟合方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 32(1):143-147
- 刘士毅, 孙文珂, 孙焕振, 吴海成, 周坚鑫. 2004. 我国物探化探找矿思路与经验初析[J]. *物探与化探*, 28(1):1-9
- 彭小强, 高井祥, 王坚. 2015. WGS84 和 CGCS2000 坐标转换研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 35(2):219-221
- 许长坤. 2011. 青海成矿地质特征的特殊性及找矿布局探讨[J]. *地质与勘探*, 47(5):782-793
- 叶培. 2014. 卡尔曼滤波在阳山金矿控制测量中的应用[J]. *地质与勘探*, 50(增刊):1446-1450
- 于宝显, 李德亮, 张帅, 王怀坤, 冯昌格, 李鹏. 2014. 综合地球物理方法在蒙古国中戈壁省某铁-锌多金属矿区勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 50(1):192-198
- 于昌明. 1999. 黑岗沟金矿的综合地球物理研究[J]. *地球物理学进展*, 14(2):114-122
- 袁桂琴, 李飞, 郑红闪, 丁志强. 2010. 深部金属矿勘查中常用物探方法与应用效果[J]. *物探化探计算技术*, 32(5):495-499
- 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 张利明, 王斌. 2009. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. *测绘学报*, 38(4):283-289
- 张锐, 刘洪涛, 刘建明, 林建华. 2008. 综合地球物理勘探在龙头山银铅锌多金属矿床中的应用[J]. *地质与勘探*, 44(2):67-72
- 周利, 匡翠林. 2007. Bernese 高精度 GPS 数据处理软件介绍及其应用实例[J]. *测绘与空间地理信息*, 30(5):110-113
- 周圣华, 鄢云飞, 李艳军. 2007. 矿产勘查中的物化探技术应用与地质效果[J]. *地质与勘探*, 43(6):58-62

Study on Geodetic methods in Gravity Surveys of Middle - Large Scales Applicable to the Tibetan Plateau

DU Hui, GENG Tao, GAO Peng, LIU Sheng-rong, JI Xian-kun, BAI Yun

(MLR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an, Shaanxi 710054)

Abstract: Among various geophysical methods, the geodetic methods in gravity surveys of medium - large scales have the highest requirements for measurement accuracy (especially the elevation accuracy). In recent years, the gravity method has been increasingly applied to geological and mineral resource surveys in the Tibetan plateau area. Because of special physiographic and the human environments and low degrees of basic geodetic surveys available in this vast region, some mature geodetic methods that are commonly used in densely populated and economically developed areas cannot work well or encounter new problems. In this paper, we analyze such practical problems encountered in the Tibetan Plateau in recent years. In combination with the aimed test results of gravity surveys, we sum up a set of methods to solve these problems, which can be used as a reference for future surveys in the Tibetan Plateau and the areas with similar natural conditions.

Key words: Tibetan Plateau, gravity survey, geodetic measurement, technical study