



喀斯特地貌地区 GNSS 高精度静态测量方案

刘思航, 张子凡

(长江航道测量中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 喀斯特地貌地区控制点的高精度测量对区域地形调绘和水文测验均有重要意义。在喀斯特地貌地区传统测量困难, CORS 站点稀疏, 静态测量多路径效应严重, 单点 GNSS 静态测量无法满足精度要求。为此, 针对布设的 237 个 GNSS E 级控制点, 设计出相应的 GNSS 静态测量方案以提高测量精度。该方案在测区中间添加 1 个全天候观测的固定基准站, 测量时再添加 1 个移动基准站, 与其它 N 个流动站进行同步测量, 然后结合 6 个连续运行的 CORS 站点进行解算。最终静态测量的结果符合测量标准要求, 其中控制检核点 X 坐标平均中误差为 0.007 m, Y 坐标平均中误差为 0.018 m。测量的大地高结合广西似大地水准面精化模型进行精化后, 控制点高程测量结果与测出的水准高程进行对比, 较差中误差为 0.024 m, 且所有点较差都低于限差。“1+1+N”静态测量模式显著提高了喀斯特地貌地区测量精度, 通过似大地水准面精化模型精化后的结果符合四等水准测量高程的要求。

关键词: GNSS 静态测量; “1+1+N”模式; 似大地水准面精化

中图分类号: U612; P208

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0233-05

High-precision static GNSS surveying scheme in karst topography areas

LIU Sihang, ZHANG Zifan

(Changjiang Waterway Bureau Survey Center, Wuhan 430010, China)

Abstract: The high-precision measurement of control points in karst topography areas holds significant value for regional topographic mapping and hydrological testing. Traditional surveying in karst regions is challenging due to sparse CORS stations and severe multipath effects in static surveys, rendering single-point GNSS static measurements inadequate for achieving the required accuracy. For the established 237 GNSS E-level control points, a specific GNSS static survey scheme is devised to enhance the precision of static measurements. The main approach involves adding one all-weather fixed base station in the center of the survey area, followed by the inclusion of one mobile base station during the survey to assist other N roaming stations. The computation process incorporates data from six continuously operating CORS stations. The final static survey results meet the required standards, with the average mean error in X coordinate of the control check points being 0.007 m, and in Y coordinate being 0.018 m. The geodetic heights measured are refined using the Guangxi quasi-geoid model, and when compared to the leveled heights, the differential mean error is 0.024 m, with all points falling below the allowable error limit. The “1+1+N” static survey mode significantly enhanced the measurement accuracy in karst topography areas, and the results refined with the quasi-geoid model meet the requirements for fourth-class level survey heights.

Keywords: GNSS static measurement; “1+1+N” mode; refinement of quasi geoid

收稿日期: 2023-12-15

作者简介: 刘思航 (1979—), 工程师, 从事航道测绘、工程测量等工作。

控制点位的高精度测量对区域的水情监测、通航水位计算等都有重要的意义。在传统高程测量中,水准高程测量存在作业效率低、测量周期长等问题,且三角高程受地形的影响较大^[1]。在喀斯特地貌地区进行控制点测量时,控制点数量多、范围大且地形起伏大,传统方式测量需要耗费极高的人力和物力。随着卫星导航和信息技术的发展,逐渐使用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)进行控制点的高精度测量。GB 50026—2020《工程测量标准》首次将卫星定位动态控制测量作为平面控制测量的方法用于一、二级控制网的建立,将自由设站测量用于各等级控制网的加密测量或变形监测网的加密测量,提出卫星定位高程测量的概念,并将其应用于高程控制测量中^[2-4]。同时在GNSS静态测量中,已有许多学者基于跨区域资源共享(cross-origin resource sharing, CORS)网络的GNSS静态测量进行研究,包括CORS支持下的单点测量、长基线测量、双基线矿区监测等^[5-8]。胡在凰等^[9]对CORS支持下的GNSS高精度高程测量进行验证,同时得出加密基准站点的方式可以显著提高GNSS静态测量的方式。

广西似大地水准面精化效果良好^[10-11],但在喀斯特地貌地区存在CORS站稀疏、基线较长、静态测量数据多路径效应严重的问题,以单点静态测量经过似大地水准面精化后难以满足要求。在测量站点较多时,由于仪器设备和人力物力的限制,需要设计合理的测量方案。针对布设的E级控制点,采取“1+1+N”模式进行测量,即在整个区域有6个连续运行的CORS站点时,测区再添加1个全天候观测的固定基准站点,然后确定每天测量的区域,在每天测量时将测量区域信号较好的1个控制点设置为移动基准站点,协助其他N个流动站点的测量,每个流动站与移动的基准站及固定基准站形成同步观测,完成对237个GNSS E级站点的测量,精度符合要求。该方案全过程只增加2个接收仪器,在提高测量精

度的同时不增加时间,且测量得到的高程经广西似大地水准面精化后,符合水准测量要求。

1 测量区域

测量区域为漓江桂林虞山大桥—平乐县恭城河口,为I类航道养护区域,测量范围航道总里程为118.5 km。该区域地形为喀斯特地貌,漓江阳朔段两岸是最典型的岩溶峰林地貌。为服务于航道运输和最高、最低通航水位的设计,依据控制点布设的原则,在区域共布置237个E级点,进行整个河段区域的控制点高精度测量,测区长度和点位分布见图1。

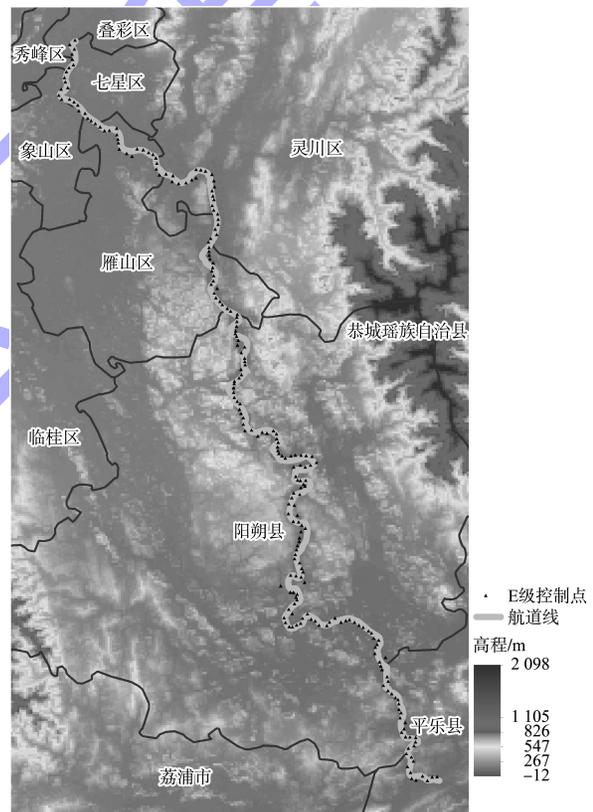


图1 GNSS控制点分布

2 GNSS静态测量方案和似大地水准面方法设计

2.1 外业静态测量方案

由于点位众多、较为密集、部分点位多路径效应严重,最初基于单点观测结合CORS站点解算的方式静态观测结果未能符合预期效果。为此,设计“1+1+N”的测量模式。在测区中心添加1个固定基准站,设置在信号较好的位置且在测区中

间进行全天候观测, 然后分为几个子区域, 每个子区域再添加 1 个移动基准站, 每天测量 1 个子区域。移动基准站点的位置选择当天所测区域其中的 1 个控制点, 同时确保其信号较好且位于所有测点的几何中心区域。

现场测量时, 采取静态定位测量方式, 添加的 1 个固定基准站点采取全天候观测, 添加的 1 个移动基准站点观测时间为 8 h 以上, 其他 N 个流动站观测时间为 2 h, 固定基准站和各个移动基准站的设置位置见图 2。下文中将添加了固定基准站和移动基准站的测量模式称作为“1+1+N”模式, 未添加的称为“N”模式。

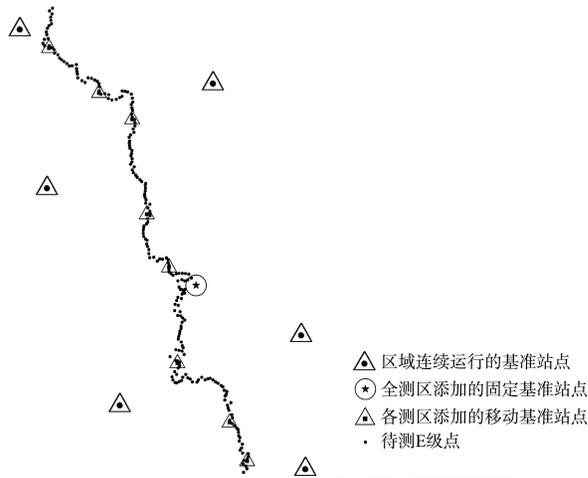


图2 基准站及添加的固定站点和移动站点分布

2.2 内业数据处理方案

外业数据测量完成后, 需要获取控制点的高精度坐标。利用 Trimble Business Center 软件进行静态数据平差解算, 基准框架采用国际 GNSS 服务站和周边高精度卫星导航定位基准站作为 CGCS 2000 坐标框架基准。与已知的 GNSS 控制点进行 GNSS 联测, 获取控制点在 CGCS2000 框架下精准的大地坐标, 再利用高精度大地水准面精化模型, 将控制点大地高 H 转换为国家 1985 高程 h 。数据处理方案流程图如图 3 所示。

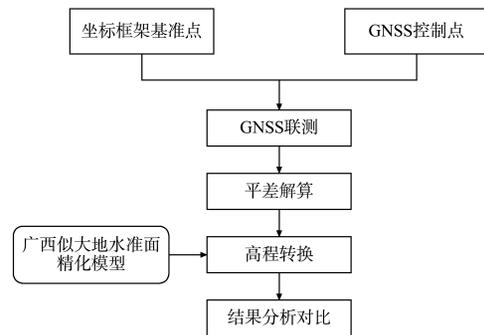
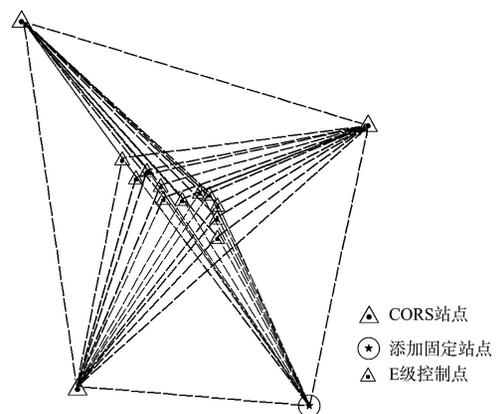


图3 数据处理流程

2.2.1 控制网的选取及基线解算方式

在内业数据处理前, 关键任务是确定控制网并进行基线解算。为了精确解算 E 级点, 设计“1+1+N”和“N”2 种模式的解算方法及其对应的控制网。GNSS E 级控制点在选择控制点网和进行联合平差计算时, 考虑到部分基线距离较远, 同时综合了观测时间和点位分布情况。因此, 将 GNSS E 级控制点网分为 8 个区段, 每个区段与 6 个 GXCORS 基准站中的 1 个进行联合平差解算。在“1+1+N”模式相比于“N”模式的解算中, 额外增设了固定基准站进行平差计算, 而移动基准站点则设置在测量控制点上, 作为控制点的一部分一起纳入解算。图 4 展示了“1+1+N”模式中 2 个区段的控制网, 包括 CORS 站点和添加的固定基准站点, 其中一个站点用于验证和检核, 其余站点参与解算。



a) 区段2

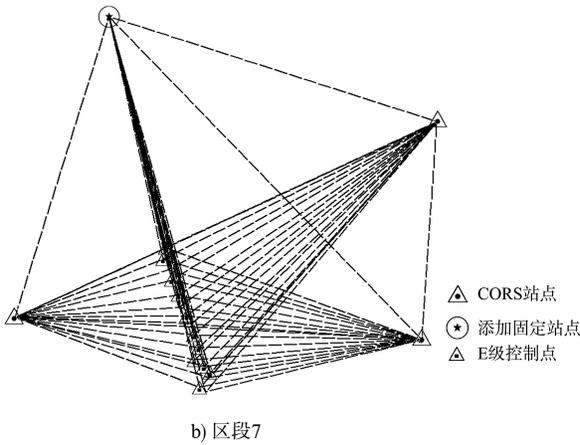


图4 “1+1+N”模式控制网

2.2.2 似大地水准面精化模型选择

数据处理的最终目的是得到高精度的 X、Y 坐标和 1985 高程。利用似大地水准面高程模型完成 GNSS 大地高向正常高的转换：

$$h = H - \xi \quad (1)$$

式中： ξ 为高程异常。

高程转换的似大地水准面精化模型使用 101 130 个点重力数据和 96 个 GNSS 水准资料，EIGEN-6C4 地球重力场模型作为参考重力场，采用航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) 的空间飞行任务数据库 DTM 资料，由第二类 Helmert 凝聚法完成大地水准面的计算。分辨率 2.5'×2.5'，1985 国家高程基准下，检测外符合精度为 ±0.033 m，局部区域精度优于 ±0.030 m，模型成果达到国际先进水平^[12]。在 GNSS 静态数据处理后，通过模型对 GNSS E 级点所得的大地高采取似大地水准面精化方式。

3 方案评估

3.1 基线解算精度评估

评估“1+1+N”模式的基线解算精度并与“N”模式进行对比。卫星 GNSS 网中基线测量中误差 σ_1 计算：

$$\sigma_1 = \sqrt{a_1^2 + (b_1^2 d^2)} \quad (2)$$

式中： a_1 为固定误差， b_1 为比例误差系数， d 为相邻点间的距离。根据设计和规范要求，本测区 GNSS 控制网计算相邻点间弦长精度时， a_1 取 10，

b_1 取 10。

“1+1+N”模式测量中，整网共检核了 2 650 条基线，水平方向误差为 0.005 m，垂直方向误差为 0.027 m，各个区段基线中误差精度统计见表 1。“N”模式测量共检核基线 1 291 条，水平方向误差为 0.009 1 m，垂直方向误差为 0.038。“1+1+N”模式基线检核结果的精确度显著提高。

表1 “1+1+N”模式基线中误差统计

区段	基线数/条	水平精度/m	垂直精度/m
1	294	0.004	0.024
2	331	0.004	0.020
3	474	0.008	0.029
4	335	0.006	0.037
5	488	0.006	0.029
6	369	0.006	0.030
7	316	0.005	0.025
8	43	0.003	0.018
合计	2 650	-	-
平均值	-	0.005	0.027

在对基线进行检核评估后，各时段解向量的重复性反映了基线解的内部精度，是衡量基线解质量的一个重要指标。其定义为：

$$R = \left[\frac{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2 / \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n (1/\sigma_i^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中： R 为重复性， C_i 是各时段解基线的各分量， σ_i^2 是相应分量的协方差， \bar{c} 为相应基线分量的加权平均值。

整网的重复精度可用固定误差和比例误差两部分表示：

$$\sigma_2 = a_2 + b_2 l \quad (4)$$

式中： σ_2 为分量的重复性精度指标； a_2 为分量的固定误差； b_2 为相对误差； l 为基线长度，由分量的重复性进行固定误差与比例误差的直线拟合得到。GNSS 网共检核 3 025 条重复基线，复测基线长度较差均小于限差，全部合格。

综上所述，“1+1+N”模式的基线解算精度相比原模式有显著提高，同时检核的复测基线长度均小于限差，全部合格。

GNSS E 级网平差在基线和闭合环都检核合格

的基础上,先进行起算点兼容性检核,经检核合格后开始进行整网无约束平差,获得 CGCS2000 坐标值。无约束平差中,基线分量的改正数绝对值应满足: $V_{\Delta x} \leq 3\sigma_3$, $V_{\Delta y} \leq 3\sigma_3$, $V_{\Delta z} \leq 3\sigma_3$, 其中 σ_3 为基线测量中误差。

利用无约束后的观测量,以部分均匀分布测区的框架网成果分别作为起算基准进行三维约束平差计算和成果检核。根据 GNSS E 级网点位分布情况约束平差中,基线分量改正数与经过粗差剔除后的无约束平差结果的同一基线,相应改正数较差的绝对值应满足: $V_{\Delta x} \leq 2\sigma_3$, $V_{\Delta y} \leq 2\sigma_3$, $V_{\Delta z} \leq 2\sigma_3$ 。

分别对每个区段中 GNSS E 级控制点进行 CGCS2000 基准下的三维无约束平差和三维约束平差。解算时,分多次选取若干已知点进行约束和检核,根据平差结果精度分析调整已知点,最终得到高精度的网平差结果。依据不同区段的情况,选择连续运行的基准站点(GXCORS)或者添加的其中固定基准站点(XMB)中的1个点作为检核点。最终,采用“1+1+N”模式观测和解算后,空间直角坐标系中,8个区段检核点网平差 X、Y、Z 中误差分别为 0.007、0.018、0.009 m。未添加固定基准站和移动基准站“N”模式下平差后检核点的 X、Y、Z 中误差分别为 0.010、0.024、0.110 m。在控制点整网解算精度上,“1+1+N”模式解算精度 X、Y、Z 中误差分别为 0.010、0.026、0.013 m,“N”模式解算精度 X、Y、Z 中误差分别为 0.046、0.123、0.590 m。由此可知“1+1+N”模式测量大地坐标和大地高的精度有显著提升。

表2 GNSS 解算精度

分量 坐标	GNSS E 级检核点 平差中误差/m		GNSS E 级控制点整网 平差中误差/m	
	“1+1+N”模式	“N”模式	“1+1+N”模式	“N”模式
X	0.007	0.010	0.010	0.046
Y	0.018	0.024	0.026	0.123
Z	0.009	0.110	0.013	0.059

3.2 似大地水准面精化效果评估

针对“1+1+N”模式测量解算出来的大地高,采取广西似大地水准面精化模型进行精化,转换为 1985 高程。然后在测区选取相应点位,采用水

准测量和三角高程测量出相应的水准高程,精化后的结果进行对比。

基于测量的 237 个 GNSS E 级控制点,根据规范要求选择 30 个点位进行较差比较。取 0.047 m 为检测限差,试验区检测点精度全部符合限差要求。较差中误差为 0.024,满足三、四等水准测量要求。

4 结语

1) 设计的“1+1+N”模式在基线解算精度和平差精度上相比于没有添加固定基准站和移动基准站的“N”模式有较大提高。基于检核点检验坐标误差,得出“1+1+N”模式的检核误差精度在 0.018 m 以内,而“N”模式达到 0.110 m。“1+1+N”模式提高了大地高和大地坐标的测量精度。

2) “1+1+N”模式测量的大地高采用模型进行似大地水准面精化后,与测出的水准高程进行对比。所有点的较差均小于限差,较差中误差仅为 0.024 m,“1+1+N”模式测量结合似大地水准面精化方法完成了喀斯特地貌地区控制点的高精度测量。

参考文献:

- [1] 杨坤,李和平.引入似大地水准面精化模型的山区水情监测方法[J].测绘通报,2016(8):89-91.
- [2] 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司,中国有色工程有限公司.工程测量标准:GB 50026—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [3] 潘纯建.多基准站点模式 GNSS 静态测量的应用[J].地矿测绘,2017,33(3):5-6,43.
- [4] 胡青峰,刘文锴,马唐敬,等.基于静态 GNSS 双基线的山区地表开采沉陷监测方法[J].金属矿山,2019(10):42-47.
- [5] 李玉平.精密单点定位结合 EGM2008 模型在新疆某河地质断面测量中的应用[J].测绘与空间地理信息,2020,43(1):192-195.
- [6] 王爱国,张殿江,丁文利,等.CORS 支持下的单点测量模式的探讨[J].测绘通报,2016(12):13-15.
- [7] 姜鸿.论 CORS 框架下的高精度 GPS 测量方法在公路测量中的应用[J].公路工程,2018,43(2):296-300.

(下转第 244 页)