



GNSS 测高法在控制测量中的研究

刘 阳, 舒晓明, 徐 畅, 何 阳
(长江航道测量中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对实际长距离控制测量中, 传统水准测量费时费力、受地形影响大等问题, 进行全球卫星导航系统 (GNSS) 测高法取代四等水准测量的可行性研究。依托某运河工程, 以 GNSS 测高法所建控制网数据为基础, 利用省级高精度似大地水准面高程模型对控制点进行正常高转换, 求得控制点的 1985 国家高程结果, 并与第三方水准结果进行对比, 进而对 GNSS 测高法进行精度评定。结果表明, 所依托工程中 GNSS 测高法可达到三、四等水准测量的精度; 在四等水准测量精度要求下, 可用 GNSS 测高法替代传统水准测量。

关键词: GNSS 测高; 整网平差; 精度分析

中图分类号: U612.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0193-05

GNSS elevation measurement method in control measurement

LIU Yang, SHU Xiaoming, XU Chang, HE Yang

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

Abstract: The traditional leveling measurement has the problems in actual long-distance control measurement, such as time-consuming and labor-intensive, as well as being greatly affected by terrain. A feasibility study on the GNSS elevation measurement method to replace fourth order leveling measurement is carried out. Based on a canal project and the control network data built by GNSS elevation measurement method, the provincial high-precision quasi geoid elevation model is used to transform the normal height of the control points. The 1985 national elevation results of the control points are obtained to compare them with the third-party leveling results, and the results precision of GNSS elevation measurement method is evaluated. The results show that the GNSS height measurement method in this project can achieve the precision of third and fourth class leveling. Under the precision requirements of fourth class leveling, the GNSS results measurement method can be used to replace traditional leveling measurement.

Keywords: GNSS elevation measurement; whole network adjustment; precision analysis

随着测绘技术的不断发展及各省级似大地水准面^[1-3]的建立, 利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)定位获取的大地高经过高程拟合直接求解高精度的正高已经成为一种趋势, 该项技术的不断成熟使得其可以取代如三角高程测量和低等级水准测量等传统的高程测量方法。随着该技术的广泛应用, 极大地减轻了

外业工作量, 大幅提高了工作效率, 带来可观的经济效益。GB 50026—2020《工程测量标准》^[4]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。

收稿日期: 2023-02-28

作者简介: 刘阳 (1984—), 工程师, 从事航道测绘、工程测量、大地测量和测绘管理。

本文依托某运河工程实例，探讨在实际长距离控制测量中，利用 GNSS 测高法取代三、四等水准测量的可行性，并将其结果与第三方水准结果进行对比，评定 GNSS 测高法的精度。

1 GNSS 测高法在水准测量中的应用

1.1 三、四等水准测量

三、四等水准测量一般用于建立小区域测图以及一般工程建设场地的高程首级控制，高程从附近的高等水准点引测^[5]。作为传统海拔高程主要采用的测定方式，水准测量应用范围较为广泛，但目前水准测量在部分施测距离较长的项目中存在以下问题：1) 逐站传递，作业效率低，累计误差易超限；2) 山区海域无法实施；3) 基准靠地面标石维持，

易破坏；4) 长距离的水准测量作业非常耗时、耗力。

1.2 GNSS 测高法

GNSS 测高法即“GNSS+似大地水准面模型”测定海拔高的方法^[6]。GNSS 可简单、廉价、快速地测定地面点的大地纬度、大地经度和大地高 (H_{GNSS})，但大地高是几何高，两点间高差与重力位差无直接关系，因此不能用于工程建设。工程中使用的海拔高，是地面点到大地水准面的高度 (h)。 H_{GNSS} 与 h 之差就是大地水准面差距。利用地面重力数据、航空重力数据以及卫星重力数据等可以精确计算重力似大地水准差距^[7]。然后通过少量的 GNSS 水准点(既有大地高，又有水准高的点)，移去系统性偏差，即可获得似大地水准面模型，见图 1。

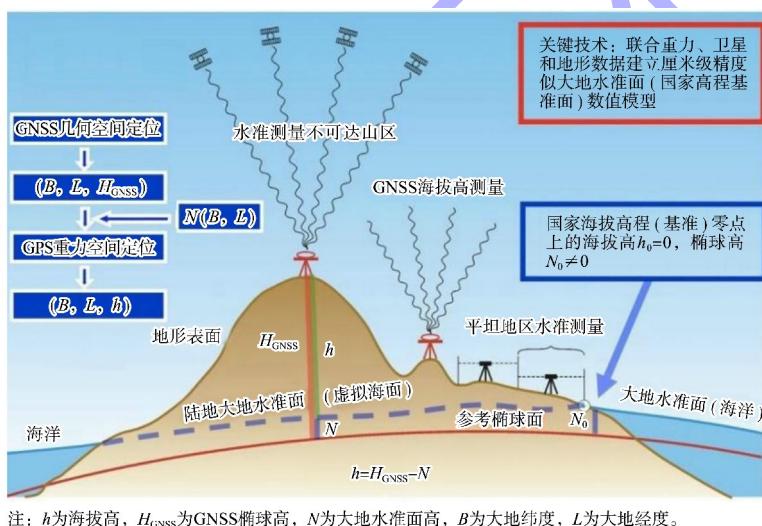


图 1 高程系统之间的关系

目前，全国近 27 个省和近 70 个市均建立了覆盖全省或全市的似大地水准面模型，利用大地水准面差距模型，就可以用 GNSS 直接测定海拔高，彻底实现平面与高程“三位一体”定位。

GNSS+似大地水准面模型的高程测定模式克服了传统水准测量几乎所有局限性，是一种无需建立地面标石的“绿色模式”，不再受地面沉降、洪水、地震、滑坡等自然灾害以及人类活动的影响。新的作业模式是一种地表“无障碍模式”，不

受山区和水域自然环境所限，也是一种相对独立的测高模式，改变了传递高程的概念，无传递累积误差影响。

2 工程应用

2.1 工程概况

2022 年 7 月江苏省某运河工程中，控制测量目的为建立 E 级 GNSS 控制网，并利用 GNSS+似大地水准面模型确定水准点的 1985 国家高程，进行全段 GNSS 测高静态观测，解算出高程与平面数

据。工程共设置了新控制点 501 个, 同时测区周边含有 4 个高等级控制点进行联测, 使用的仪器为 12 台中海达 iRTK5 GNSS 接收机, 平面标称精度为 $\pm(10\text{mm}+10^{-6}D)$, 其中 D 为被测点间距离, 高程标称精度为 $\pm(20\text{mm}+10^{-6}D)$, 利用静态采集测区内 505 个控制点的平面和高程数据。

2.2 GNSS 静态测量数据采集及平差

2006—2020 年末, 江苏省卫星导航定位基准站网(JSCORS), 在全省范围内建有 160 个支持北斗、GPS、GLONASS 和 Galileo 等卫星导航系统的

连续运行卫星导航基准站网点, 动态维持江苏省三维地心坐标框架, 形成江苏省大地基准框架的主体, 实时提供覆盖全省的高精度定位服务。静态测量时, 根据 GB/T 18314—2009《全球定位系统(GPS)测量规范》^[8]要求, 对控制点进行静态采集, 每次采样间隔为 5 s。静态观测共 55 个区段, 累计观测 620 点, 采集数据总时间 620 h, 将实际采集的所有控制点数据参与解算。JSCORS 技术指标见表 1。采用控制网周边共 11 个 JSCORS 基准站作为框架网起算基准, 站点名称见表 2。

表 1 JSCORS 技术指标

静态定位 覆盖范围	动态定位参考精度基准	实时定位精度/cm		事后精密定位 精度/mm
		内符合	外符合	
全省范围	地心坐标的坐标分量绝对精度优于 0.05 m; 基线向量的坐标分量相对精度优于 3×10^{-8}	水平优于 ± 3 垂直优于 ± 5	水平优于 ± 5 垂直优于 ± 10	水平优于 ± 5 垂直优于 ± 10

注: 覆盖范围是指不顾及通信网络覆盖时, 系统定位能够满足精度要求时的空间范围; 定位精度数值为 1 倍中误差。

表 2 参与框架网解算的 JSCORS 站名和代号

站名 代号	淮阴 BBHY	宿迁 BBUI	扬中 BByZ	泗阳 BTsy	贾汪 GBJW	宝应 GTBY	丁伙 GTDH	界首 GTJS	洪泽 JSHZ	徐州 JSUZ	新店 XZXD
----------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------	------------

静态数据平差解算采用 Trimble Business Center 商用计算软件计算。根据 JSCORS 中心解算的 102 个 GNSS 控制点成果, 选取其中 42 个平均分布测区的公共点成果作为约束网平差起算点, 56 个控制点作为检核点。在基线解算合格的基础上进行闭合环的检核, 检核合格后开始平差计算, 先进行起算点兼容性检核, 经检核合格后进行整网平差计算。分别进行 CGCS2000 下的无约束平差和三维约束平差计算, 获得 CGCS2000 坐标值。

基线处理软件采用天宝 Trimble Business Center 软件。该软件在利用精密星历的情况下, 基线解的相对精度能够达到 10^{-9} 左右, 在基线解算完成后, 根据 GB/T 18314—2009《全球定位系统(GPS)测量规范》的相关要求, 对各项精度指标进行检测, 作为基线解算质量的评价, 基线解算后进行基线数据检核。

2.3 基线及复测基线检核

2.3.1 基线检核

卫星 GNSS 网中基线测量中误差 σ 按下式

计算:

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (bD)^2} \quad (1)$$

式中: a 为固定误差, mm; b 为比例误差系数, mm/km; D 为相邻点间的距离, km。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 取 10、 b 取 10。

检核结果: 整网共检核了 3 142 条基线, 所检核的基线中误差水平方向为 5 mm, 垂直方向为 27 mm, 均小于限差, 基线解算全部合格。

2.3.2 复测基线检核

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:

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

式中: c_i 为各时段基线解的各分量, σ_i^2 为相应分量的协方差, \bar{c} 为相应基线分量的加权平均值,

R 为相应的重复性。

整网的重复精度可用固定误差和比例误差两部分表示, 即:

$$\sigma' = a + bl \quad (3)$$

式中: σ' 为分量的重复性精度指标; a 为分量的固定误差, mm; b 为相对误差; l 为基线的长度, km, 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 网共检核了 68 条重复基线, 所检核的复测基线长度较差均小于限差, 全部合格。其中误差较大的控制网重复性基线较差计算及检核结果见表 3。

表 3 控制网重复性基线较差计算

起点	终点	差值/mm	限差/mm	检核结果
Z ₃₂₀	Z ₃₀₅	6.555	28.023	合格
		-6.555	28.023	合格
Z ₂₈₈	E ₀₈₁	3.302	24.229	合格
		-3.302	24.229	合格
Z ₂₇₁	E ₀₈₀	-3.385	27.170	合格
		3.385	27.170	合格
Z ₂₅₀	Z ₂₅₂	-5.642	22.635	合格
		5.642	22.635	合格
Z ₂₃₂	E ₀₆₆	-9.226	23.287	合格
		9.226	23.287	合格
Z ₂₁₆	Z ₂₁₅	11.297	23.081	合格
		-11.297	23.081	合格

2.4 整网平差计算

2.4.1 三维无约束平差

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计算, 获得 CGCS2000 坐标值。

无约束平差计算中, 基线分量的改正数绝对值应满足: $V_{\Delta x} \leq 3\sigma$ 、 $V_{\Delta y} \leq 3\sigma$ 、 $V_{\Delta z} \leq 3\sigma$, 其中 σ 为基线测量中误差。

2.4.2 三维约束平差

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。

约束平差计算中, 基线分量改正数与经过粗

差剔除后的无约束平差结果在同一基线, 相应改正数较差的绝对值应满足: $dV_{\Delta x} \leq 2\sigma$ 、 $dV_{\Delta y} \leq 2\sigma$ 、 $dV_{\Delta z} \leq 2\sigma$ 。

根据框架网 102 个框架点位分布情况, 对整网 505 个控制点进行 CGCS2000 基准下的三维约束平差。具体解算时, 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参与平差框架点位的数量, 最终得到高精度的网平差结果, 具体流程为: 1) 在 102 个框架点中, 采用平均分布测区的若干个框架点约束, 剩余的未参加约束框架点作为检核, 分析网平差精度; 2) 根据网平差精度分析, 调整约束的框架点数量及分布, 在误差大于 ± 30 mm 的点位周边加密框架点进行约束, 再次进行平差, 利用参与约束的框架点分析网平差精度; 3) 重复以上 2 个步骤, 直至得到高质量的网平差结果为止。

最终采用 42 个框架点作为起算约束, 56 个框架点检核。经过 3 次约束平差计算, 最终检核点网平差点位精度控制在 ± 15 mm 以内, 整网点位精度控制在 ± 10 mm 以内, 完全满足精度要求, 规整结果后与第三方水准结果进行对比。

2.5 结果分析

1) 本次 D 和 E 级 GNSS 控制点布设均匀, 结构合理, 观测时间符合规范要求, 采用边联式观测, 满足项目技术要求。

2) 本次框架网和整网数据处理分别采用武汉大学研制的 COSA 软件和 Trimble Business Center 软件, 数据处理模型严密, 方法合理。数据处理中综合运用多种精密数据处理技术, 获得了控制网点高精度结果。

3) E 级网(整网)平差后, 统计 x 分量的平均中误差为 4 mm, y 分量的平均中误差为 6 mm, z 分量的平均中误差为 4 mm, 满足工程技术和设计要求。

4) 利用江苏省高精度似大地水准面高程模型对控制点进行正常高转换, 计算控制点的 1985 国

家高程结果与第三方水准成果对比, 取 $\sqrt{2} \times 60$ mm (85 mm) 为检测限差, 较差中误差为 32 mm。经比对, 全部检测点精度符合限差要求, 满足三、四等水准精度要求, 部分控制点两种测量方式高程比较见表 4。

表 4 部分控制点两种测量方式高程比较

起点	终点	GNSS 观测 高差/m	三角高程 高差/m	高差之差/ m
Z ₂₇₁	Z ₂₇₃	-11.319	-11.291	0.028
Z ₂₈₁	Z ₂₈₃	-26.440	-26.475	-0.035
Z ₂₇₈	Z ₂₈₀	0.939	0.955	0.017
Z ₂₉₀	Z ₂₉₂	17.691	17.681	-0.010

3 结语

1) GNSS 测高评价准则中数据对比为关键部分, 数据采集的精度需要严格控制, 本文将误差较大的控制网重复性基线较差项列出, 使得在研究时更加直观、易理解。

2) 本文探讨了 GNSS 测高法在控制测量中的研究及应用, 对促进该领域的研究提供了实际数据支撑, 进一步验证了在三、四等水准精度要求之下, GNSS 测高可以代替传统水准测量。

(上接第 130 页)

- [3] 长江重庆航运工程勘察设计院. 三峡库区航道泥沙原型观测(2009—2019 年度)总结分析[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2020.
- [4] 王涛, 张璠, 刘天云, 等. 三峡水库变动回水区三角碛河段消落期维护疏浚方案[J]. 水运工程, 2015 (1): 120-125.
- [5] 长江重庆航运工程勘察设计院. 三峡库区航道泥沙原型观测 2019 年—2020 年度分析报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2020.

参考文献:

- [1] 陈宗勇, 阎凤霞. 利用 GNSS RTK 高程拟合代替四等水准的可行性分析[J]. 地理空间信息, 2018, 16(3): 106-108, 10.
- [2] 粟剑. GNSS 拟合高程代替三等水准测量的可行性分析[J]. 全球定位系统, 2015, 40(6): 92-94.
- [3] 马雷, 田磊, 刘汝伟, 等. 基于地球重力场模型的 GNSS 高程转换与精度分析[J]. 地理空间信息, 2020, 18(1): 47-50, 93.
- [4] 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.
- [5] 李善军, 刘辉, 苏勇, 等. 适用于工程测量三、四等水准要求的 GNSS 水准方法研究[J]. 全球定位系统, 2020, 45(6): 92-99.
- [6] 张邵贺, 周卫军, 石成岗. 《工程测量标准》(2020 版)修订说明[J]. 测绘标准化, 2022, 38(1): 7-10.
- [7] 赵忠海, 朱李忠. 基于重力场模型的 GNSS 点高程拟合研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(10): 39-42.
- [8] 国家测绘局测绘标准化研究所, 国家测绘局第一大地测量队, 国家基础地理信息中心. 全球定位系统(GPS)测量规范: GB/T 18314—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(本文编辑 王璁)

- [6] 长江重庆航运工程勘察设计院. 三峡库区航道泥沙原型观测 2020 年—2021 年度分析报告[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2021.
- [7] 长江重庆航运工程勘察设计院. 2021 年—2022 年度三峡库区航道维护性疏浚技术方案[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2021.
- [8] 长江重庆航运工程勘察设计院. 2019 年—2020 年度三峡库区航道维护性疏浚技术方案[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2019.

(本文编辑 王传瑜)