

一种快速检核水运工程控制点高程的方法



孙洪瑞, 何斌, 吴卫平

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对控制点高程检核效率低的问题, 对北斗地基增强系统和高分辨率 EGM2008 重力场模型($1' \times 1'$)的原理和数据处理方法进行研究, 通过融合这两种技术, 提出一种快速获取待定点高程的具体流程和操作方法, 并通过工程实例验证。结果表明, 本方法获取的高程外符合精度均小于 5 cm; 可以有效鉴别已有成果的可用性, 并判别其高程系统的类型; 该方法不仅准确可靠、便捷高效, 而且可以降低生产成本, 对类似工程具有参考价值。

关键词: 控制点; 高程; 水运工程; 北斗地基增强系统; EGM2008 重力场模型

中图分类号: U 652.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0035-05

A method to quickly check elevation of control point for port and waterway engineering

SUN Hong-rui, HE Bin, WU Wei-ping

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: To address the low efficiency in checking the elevation of the control point, this paper studies the principles and data processing methods of the Beidou ground-based augmentation system and the high-resolution EGM2008 gravity field model($1' \times 1'$). By integrating the above two technologies, this paper puts forward a specific process and an operation method for quickly obtaining the elevation of the point to be determined and verifies the method through engineering examples. The results show that the error is less than 5 cm regarding the external coincidence accuracy obtained by this method. It can effectively identify the availability of existing results and distinguish the type of an elevation system. The results of the proposed method are accurate and reliable, and the operation is convenient and efficient. In addition, the method can reduce the costs, which has a reference value for similar port and waterway engineering.

Keywords: control point; elevation; port and waterway engineering; Beidou ground-based augmentation system; EGM2008 gravity field model

控制点的高程成果是工程建设全周期内必备的重要基础资料, 必须采用统一的高程基准, 且引用的成果需要保持延续性且均符合国家规范要求。随着测量技术水平的不断提升和市场竞争的加剧, 前期测量控制点高程成果的检核效率、可用性或可靠性对后期各阶段的工程设计、施工质量和进度将产生重大影响, 甚至造成不可弥补的事故。高程的常规检核方法是采用水准测量技术, 占用人力、物力资源较多, 且工效不高。此外,

传统方法还无法识别前期控制点成果的高程基准类型, 如属于 1985 国家高程基准还是当地理论最低潮面。传统检核方法存在一定的弊端和局限性。

黄永帅等^[1]利用千寻北斗地基增强系统实现了在滑坡监测领域的厘米级应用, 说明北斗地基增强系统具有高精度和便捷性; 章传银等^[2]采用 EGM2008 全球重力场模型计算大地水准面和高程异常, 说明我国整体高程异常精度约为 0.20 m; 李玉平等^[3]提出在一定范围内利用 EFM2008 模型

对 GPS(global positioning system, 全球定位系统)大地高进行转换可以代替四等以下水准测量的观点; 张兴福等^[4]利用 GPS 水准数据, 检核 EGM2008 重力场模型的外符合精度中误差在 5 cm 内; 吴波等^[5]基于 EGM2008 重力场模型, 构建江苏地区的区域似大地水准面; 王鸣鹤等^[6]基于 EGM2008 重力场模型和相关算法, 构建矿区的区域似大地水准面。上述研究是利用北斗地基增强系统(北斗二号)和分辨率为 5'×5' 的 EGM2008 模型进行数据处理和分析, 测量的精度和可靠性有待提高并加以验证。

本文探索一种新的检核方法, 利用全新的北斗地基增强系统(北斗三号)和网格分辨率为 1'×1' 的高精度 EGM2008 模型, 通过融合这两种技术, 提出获取高程的具体实施流程和操作方法, 并通过工程实例数据, 统计待定点高程的外符合精度, 分析成果数据的可用性, 以验证该方法的有效性和快速性。

1 北斗地基增强系统

北斗地基增强系统(Beidou ground-based augmentation system, BDS-GBAS)是一套可以使北斗定位精度达到厘米级的系统, 于 2018-05-23 完成基本系统研制建设。目前我国的北斗地基增强系统服务平台主要是千寻位置网络有限公司(简称“千寻”)。该系统是利用在全国各地布设的基准站建立一个网, 经过计算, 给用户发布实时的改正信息。与常规单基准站 RTK(real-time kinematic, 实时动态载波相位差分技术)定位相比, 该方法覆盖范围更广、定位精度更高、可靠性更强, 可实时提供厘米级定位结果。

“千寻知寸”(FindCM)提供的厘米级高精度定位服务, 依托移动网络信号, 可获得水平精度 2 cm、高程精度 5 cm 的实时定位数据, 数据采集速度快, 使用方便。

2 EGM2008 地球重力场模型

EGM2008 重力场模型是美国国家地理空间情

报局(NGA)重力场研发小组在 2008 年 4 月发布的全球超高阶地球重力场模型, 模型的基本空间分辨率为 5'×5', 其最高网格分辨率达 1'×1', 即约 1.8 km, 精度非常高。该模型的高程异常全球精度为 13 cm, 在我国大陆地区总体精度为 20 cm。

EGM2008 模型的主要数据来源为卫星重力、地面重力、卫星测高等, 基于该模型的高程异常计算公式为:

$$\xi_M = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{+\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \cdot$$

$$\sum_{m=0}^n [\bar{C}_{nm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{nm} \sin(m\lambda)] \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (1)$$

式中: ξ_M 为模型计算的高程异常值; GM 为地心引力常数; a 为参考椭球长半径; r 为 GNSS(global navigation satellite system, 全球导航卫星系统)观测点的地心向径; γ 为正常重力; θ 为纬度; λ 为经度; n 为最高展开阶数; m 为次数; \bar{C}_{nm} 和 \bar{S}_{nm} 为完全格式化扰动位系数; $\bar{P}_{nm}(\cos\theta)$ 为完全规格化的缩合勒让德函数。

3 高程获取方法

利用接收北斗卫星信号的 GNSS 多频接收机, 并通过网络接入千寻知寸(FindCM)信号源, 设置端口号为 8003, 即可获取实时测量控制点的国家 2000 大地坐标(X, Y, H)和经纬度坐标(θ, λ, h); 再通过开源软件 AllTrans EGM2008 Calculator, 重力场数据选用 Und_min1x1_egm2008_isw = 82_WGS84_TideFree_SE(网格间距约 1.8 km), 直接得到模型的高程异常值 ξ_M 。

根据《工程测量标准》^[7], 当所测控制点等级要求高时, 需要相应的测回数, 取均值作为最终成果。测回数要求见表 1。

表 1 一、二级卫星定位测量控制网动态测量测回数要求

等级	一级	二级
测回数	≥4	≥3

GNSS 观测采集到的高程是基于 WGS84 椭球的大地高, 而我国使用的高程系统是基于似大地水准面的正常高, 如 1985 国家高程系统, 是以青

岛验潮站多年平均海平面为基准的一种近似海拔高度。大地高与正常高之间的转换关系可表示为:

$$h = H - \xi \quad (2)$$

式中: H 为测点的大地高, 通过 GNSS 静态解算或实时动态所得(本文是基于实时动态方法测得); h 为测点的正常高, 是由水准测量所得; ξ 为该点的高程异常值, 该值与 EGM2008 模型值 ξ_m 存在一定的系统差, 假设为 $\Delta\xi$, 此时式(2)可以变换为式(3):

$$h = H - \xi_m - \Delta\xi \quad (3)$$

差值 $\Delta\xi$ 不是在每个地方都相同, 但在一般的水运工程中, 控制点离测区一般不超过 10 km, $\Delta\xi$ 变化很小, 本文采用 2 个以上的已知控制点 $\Delta\xi_i$ 的均值, 推算出各待定点改化后的模型计算正常高, 然后与水准高比较, 统计分析各点的高程残差以及高程中误差。

本文提出利用 BDS-GBAS 技术与 EGM2008 重力场模型获取待定点高程的流程, 见图 1。

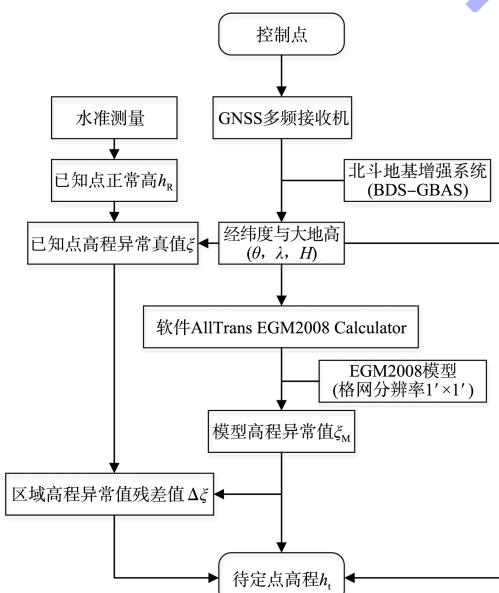


图 1 利用 BDS-GBAS 与 EGM2008 获取待定点高程的流程

4 工程实例分析

4.1 工程概况

实例 1 为江苏省盐城市某钢铁项目规划设计阶段海域地形测量, 于 2019 年 9 月施测, 设计阶段为工可阶段, 搜集到的已有控制点成果未说明高程系统, 对于水运工程而言, 鉴别高程系统是

至关重要的环节, 需明确属于 1985 国家高程基准还是属于当地理论最低潮面, 以确保提供的成果质量可靠、可用。

实例 2 为南通港某码头工程(A 标段)地形测量, 于 2020 年 4 月施测, 设计阶段为施工图阶段, 属于江苏省 2020 年重点工程。勘察设计周期非常紧迫, 且涉及多家单位的测量资料融合匹配, 我单位的高程数据与建设单位后续提供的控制点成果相差十几厘米, 差异较小, 但需要鉴别其可用性并说明情况, 否则就需要重新进场补测。

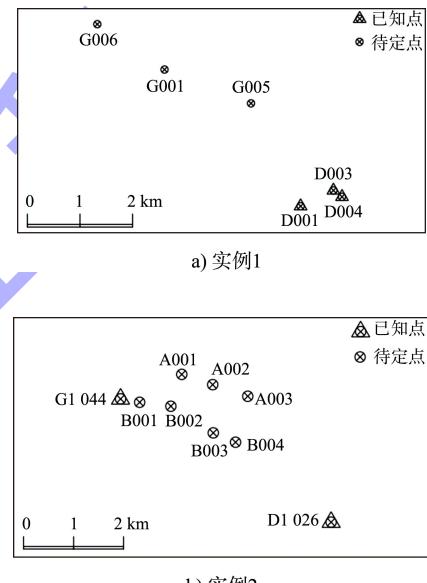


图 2 控制点分布

两个实例的控制点分布见图 2。可以看出, 图 2a) 的待定点距已知点 4~8 km; 图 2b) 的待定点距已知点 1~4 km。

本文控制点均按照表 1 中的一级精度要求施测, 利用千寻北斗地基增强系统服务, 采用华测 T8 型多频接收机, 对每个控制点施测 4 个测回, 取均值作为经纬度坐标 (θ, λ, h) 的真值。此外, 两个实例中的控制点均按四等以上水准测量精度进行了联测。

4.2 数据分析

4.2.1 精度和可用性评定标准

本文采用外符合精度评定高程的精度和可用性, 通常外符合精度以高程中误差^[8] 表示, 公

式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu_i = h_i - h_{R_i} \\ \sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \nu_i^2}{n}} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中： σ 为高程中误差； ν_i 为高程残差； h_i 、 h_{R_i} 为各控制点改化坐标后的模型计算正常高、实测正常高； n 为控制点个数。

4.2.2 精度分析

采用本文提出的控制点高程获取方法，对实

例 1 和 2 的实测数据进行分析，各个待定点的高程残差见图 3，高程外符合精度见表 2。

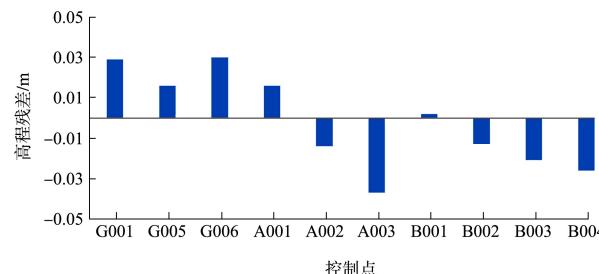


图 3 控制点高程残差

表 2 高程外符合精度

实例	点号	H/m	ξ_M/m	h_m/m	$\Delta\xi_i/m$	h_i/m	h_{R_i}/m	ν_i/cm	σ/cm
1	* D003	9.689	6.161	3.528	-0.061	3.467	3.466	-	± 2.6
	* D004	13.194	6.169	7.025	-0.061	6.964	6.961	-	
	* D001	9.640	6.128	3.512	-0.061	3.451	3.454	-	
	G001	12.772	5.995	6.777	-0.061	6.716	6.687	2.9	
	G005	12.900	6.081	6.819	-0.061	6.758	6.742	1.6	
	G006	12.732	5.926	6.806	-0.061	6.745	6.715	3.0	
2	* G3011	19.118	10.987	8.131	-0.612	7.519	7.523	-	± 2.1
	* G1026	18.058	10.508	7.550	-0.612	6.938	6.933	-	
	A001	18.331	11.079	7.252	-0.612	6.640	6.624	1.6	
	A002	18.228	11.051	7.177	-0.612	6.565	6.579	-1.4	
	A003	18.258	11.026	7.232	-0.612	6.620	6.657	-3.7	
	B001	18.539	11.072	7.467	-0.612	6.855	6.853	0.2	
	B002	18.110	10.049	8.061	-0.612	7.449	7.462	-1.3	
	B003	19.669	11.037	8.632	-0.612	8.020	8.041	-2.1	
	B004	18.667	10.032	8.635	-0.612	8.023	8.049	-2.6	

注：带 * 为已知点； H 为各控制点的大地高； h_m 为直接利用重力场模型计算所得的模型正常高。

由表 2 可知，实例 1 的待定点高程残差最大为 3.0 cm，高程中误差 ± 2.6 cm，均不超过 5 cm；实例 2 的待定点高程残差最大为 -3.7 cm，高程中误差 ± 2.1 cm，均不超过 5 cm。

4.2.3 可用性分析

采用本文提出的控制点高程获取方法，计算出实例 2 的待定点高程，与建设单位提供的控制点成果（高程精度为三等水准）比较结果见表 3。可以看出，最大、最小、平均较差分别为 -0.124、-0.105、0.115 m，说明 2 套数据呈现系统性误差，鉴于均采用了水准测量的方法传递高程，可能原因是起算点资料引用有差异。

表 3 实例 2 的控制点计算高程与已知高程比较

点号	计算高程 h_i/m	已知高程 \bar{h}_{R_i}/m	高程较差 $\Delta h/m$
A001	6.640	6.519	-0.105
A002	6.565	6.468	-0.111
A003	6.620	6.544	-0.113
B001	6.855	6.735	-0.118
B002	7.449	7.338	-0.124
B003	8.020	7.924	-0.117
B004	8.023	7.933	-0.116
均值			-0.115

4.2.4 高程系统判断

采用本文提出的控制点高程获取方法，计算出实例 1 的已知点高程，与搜集的控制点成果比较结果见表 4。可以看出，2 套高程数据平均较差

为-1.569 m, 这种差异不可能是高程异常残差 $\Delta\xi$ 引起的, 故可以判断已知点成果不属于1985国家高程基准, 后根据搜集的资料(两高程系统的基面差值为-1.63 m), 判断控制点成果中的高程系统为当地理论最低潮面。

表4 实例1的控制点计算高程与已知高程比较

点号	计算高程 h_i/m	已知高程 \bar{h}_R/m	高程较差 $\Delta h/m$
* D003	3.528	5.096	-1.568
* D004	7.025	8.591	-1.566
* D001	3.512	5.084	-1.572
均值			-1.569

5 结论

1) 利用本文提出的高程获取方法, 高程残差和外符合精度均小于5 cm, 说明该方法不仅精度高, 还可以有效鉴别已有成果的可用性, 判别其高程系统的类型。

2) 本文提出的控制点检核方法只需一人携带一台多频接收机作业, 可大幅提高作业效率, 成本至少降低50%, 从而达到快速检核控制点精度和可用性的目的。

3) 本方法可在水运工程的规划或工程可行性研究阶段直接使用, 也可在初步设计或施工设计阶段推广使用, 为水运工程高质量建设提供技术保障。

4) 控制点的高程精度除了受EGM2008模型精度影响外, 还受移动网络信号强度、千寻改正数精度、天线高量测精度等多种因素影响, 为确保高程测量的精度, 应选择卫星遮挡少、网络信号强的时段作业, 并分时段采集多次观测值取平均。

5) 外业实施中, 宜选带支架的对中杆或架设

三脚架采集数据, 天线高取固定值或尽可能量取准确。

参考文献:

- [1] 黄永帅, 史俊波, 欧阳晨皓, 等. 千寻北斗地基增强系统在滑坡监测的应用[J]. 测绘通报, 2019(S2): 154-156, 160
- [2] 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 等. EGM2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. 测绘学报, 2009, 38(4): 283-289.
- [3] 李玉平, 郭际明, 周丹, 等. EGM2008 求解高程异常在新疆地区的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(6): 638-643.
- [4] 张兴福, 刘成, 刘红新. 利用GPS/水准数据检核EGM2008重力场模型的精度[J]. 测绘通报, 2009(2): 7-9.
- [5] 吴波, 高建东, 张兴福. 江苏地区组合地球重力场模型的精度及适用性分析[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第十一届中国卫星导航年会论文集: S02 导航与位置服务. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2020: 124-130.
- [6] 王鸣鹤, 孙成志, 许丹萍, 等. EGM96/2008 重力场模型在似大地水准面构建中的应用[J]. 北京测绘, 2020, 34(5): 687-690.
- [7] 中国有色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.
- [8] 张登奎, 孙洪瑞. GPS PPK 技术在鱼山海域测量中的应用及其精度分析[J]. 水运工程, 2021(5): 162-165.

(本文编辑 王璁)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。