

何宗友, 胡海驹, 朱紫阳, 等. 三角高程法在跨河水准测量中的主要误差及控制措施[J]. 华南地震, 2017, 37 (1): 68-72. [HE Zongyou, HU Haiju, ZHU Ziyang, et al. Main Error and Control Measures of Cross-River Trigonometric Leveling[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 68-72.]

三角高程法在跨河水准测量中的主要误差及控制措施

何宗友, 胡海驹, 朱紫阳, 钟焕良

(广东省国土资源测绘院, 广州 510500)

摘要: 以珠江三角洲区域高程基准框架跨河水准测量实测为例, 对三角高程测量的方案、原理及误差来源进行分析, 提出了全站仪水平视线结合水准近标尺读数准确测出仪器高而消除仪器高误差的方法, 重点分析了测量中的主要误差影响和控制措施。结果表明: 合理选择跨河点, 控制视线垂直角、视线长度, 对称观测等手段, 可以削弱大气折光误差、地球曲率误差的影响, 采用高精度全站仪、增加测回数可以提高测量精度。

关键词: 跨河水准; 三角高程测量; 误差; 全站仪

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 01-0068-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.01.011

Main Error and Control Measures of Cross-River Trigonometric Leveling

HE Zongyou, HU Haiju, ZHU Ziyang, ZHONG Huanliang

(Surveying and Mapping Institute Lands and Resource Department Of Guandong Province,
Guangzhou 510500, China)

Abstract: Taking the Pearl River Delta regional datum frame cross river leveling measurement for example, the paper analyzed the principle and error sources of the trigonometric leveling scheme, and putted forward the method eliminating the high error of instrument by combining with the total station and the level of nearly horizontal line of sight readings measure instrument. The paper focused on the analysis of the impact of the error on the measurement and control measures. The results show that reasonable selection of river crossing point, line of sight control vertical angle, the length of sight, symmetry and other means of observation, can weaken the influence of atmospheric refraction error, earth curvature error, measure to increase the number of accuracy can be improved by using high precision electronic tachometer.

Keywords: Cross-river leveling; Trigonometric leveling; Error; Electronic Total Station

收稿日期: 2016-02-02

基金项目: 广东省国土资源科技专项 (GDGTKJ2016001); 广东省 2015 年度基础测绘计划项目

作者简介: 何宗友(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事测绘技术研究和成果质量检查工作。

E-mail: 9322127@qq.com.

0 引言

珠江三角洲地区水网密度大、河流跨度普遍较大、人类经济活动强度大,这三种因素对水准测量的实施带来严重影响,跨河水准测量(特别是一、二等)是水准测量工作面临的难点^[1]。依据《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897-2006),跨河水准测量可以使用的方法有光学测微法、倾斜螺旋法、经纬仪倾角法、测距三角高程法和 GPS 测量法^[2]。比较上述跨河水准测量方法,测距三角高程法更具有以下优点:一是方法简单,便于实施;二是目前全站仪发展迅速,自动化程度越来越高,操作简单、快捷,测角精度可达 $\pm 0.5''$,测距精度可达 $0.6+1 \text{ ppm}$;三是不要求仪器和观测员频繁调岸,利于提高作业效率;四是对跨河场地要求更低,两侧跨河点不用一样高;五是能进行 $3\ 500 \text{ m}$ 河流跨度甚至更长距离跨度的测量。

在实际跨河测量中,观测容易受到各种因素的影响而使测量产生误差,其中人、仪器、外部环境是引起观测误差的主要因素。如何有效发现并科学采取相应措施削弱误差的影响是提高成果精度的重要保证。

1 三角高程测量方案

跨河点除了符合常规控制点要求外,还必须满足以下要求:一是跨河点位于测线附近,在江河的狭窄处,为减弱球气差等误差的影响,点位应尽可能选择在靠近河边稳固的地方,至少两岸地形尽可能相似,视线距离水面有足够的高度;二是跨河水准点布设图形多样,但最常采用也是最优的方案为大地四边形方法^[3](如图1),其中 $AB \approx CD \approx 10 \text{ m}$, AC 和 BD 为河宽。采用两台全站仪测垂直角,标尺采用木质 0.5 mm 分划的钢瓦标尺配合 $30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 的标准觇板。其跨河水准示意图如图1。

2 三角高程测量原理

三角高程测量的基本公式为:

$$h = S \tan a + i - v + \frac{1-k}{2R} S^2 \quad (1)$$

式(1)中, S 为平距, a 为垂直角, i 为仪器高, v 为觇标高, k 为大气折光, R 为地球半径。设在A、D两点同时架设全站仪,B、C两点竖立附带

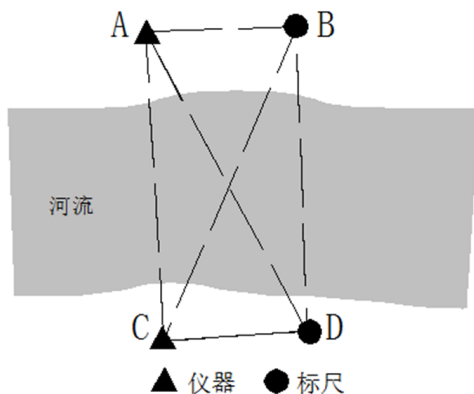


图1 跨河水准示意图

Fig.1 Schematic diagram of cross-river Leveling

了觇标的钢瓦合金标尺,在A点分别照准B、C两点的觇标,由三角高程测量的原理可得AB、AC的高差为:

$$h_{AB} = S_{AB} \tan a_{AB} + i_A - v_B + \frac{1-k}{2R} S_{AB}^2 \quad (2)$$

$$h_{AC} = S_{AC} \tan a_{AC} + i_A - v_C + \frac{1-k}{2R} S_{AC}^2 \quad (3)$$

式(2)、(3)中, $C = \frac{1-k}{2R}$ (CS^2 称为球气差), K 为大气垂直折光系数(取 $k=0.16$), R (取 $R=6\ 370 \text{ km}$)为地球半径。由于 $S_{AB} \approx S_{CD} \approx 10 \text{ m} \ll R$,因此

$C_{AB} S_{AB}^2 \approx 0$ 。利用闭合环ABC的闭合条件,可以得到BC两点之间的高差为:

$$h_{BC1} = h_{AC} - h_{AB} = S_{AC} \tan a_{AC} - S_{AB} \tan a_{AB} + v_B - v_C + C_{AC} S_{AC}^2 \quad (4)$$

在D点同理可得到BC两点间的高差为:

$$h_{BC2} = h_{DC} - h_{DB} = S_{DC} \tan a_{DC} - S_{DB} \tan a_{DB} + v_B - v_C + C_{DC} S_{DC}^2 \quad (5)$$

从公式(4)和(5)可以看出, h_{BC1} 和 h_{BC2} 已经不再含有A点的仪器高,在观测中,按常规的方法量测仪器高,精度很难满足要求,可以采用在A(D)测站通过全站仪观测水平视线结合水准近标

尺读数法确定 AB (DB)、AC (DC) 高差, 利用闭合环 ABC 的闭合条件, 即可确定 BC 之间的高差, 即利用全站仪水平视线和水准近标尺读数可以不要量测仪器高实现两点之间的高差, 从而避免由于仪器量高所引起的误差。

3 三角高程测量的误差分析

三角高程测量观测的高差计算如公式(1)所示, 其误差关系式为^[4-8]:

$$m_h^2 = \left(\tan a + \frac{1-k}{R} S \right)^2 m_s^2 + \left(S \sec^2 a \right)^2 \left[\frac{m_a}{\rho} \right]^2 + m_i^2 + m_v^2 + \left(\frac{S^2}{2R} \right)^2 m_k^2 \quad (6)$$

量时一般采用 0.5"。即可计算 a 和 S 分别取不同值时, m_s 、 m_a 和 CS^2 对 m_h 的影响见下表 1:

4 主要误差及其控制措施

从公式(6)和表 1 可知:

表 1 不同 α 和 S 时, m_s 、 m_a 、 CS^2 对 m_h (mm) 的影响

Table 1 Different α and S , the impact of m_s 、 m_a 、 CS^2 on m_h (mm)

$a(^{\circ})S(m)$	$\tan a m_s$			$S \sec^2 a \frac{m_a}{\rho}$			CS^2
	1	5	10	1	5	10	
100	0.02	0.10	0.19	0.24	0.24	0.25	0.00
500	0.03	0.13	0.26	1.21	1.22	1.25	0.02
1 000	0.04	0.18	0.35	2.43	2.44	2.50	0.07
1 500	0.04	0.22	0.44	3.64	3.66	3.75	0.15
2 000	0.05	0.26	0.53	4.87	4.89	5.00	0.26
3 500	0.08	0.40	0.80	4.88	4.85	4.85	0.81

局限于全站仪, 实践证明 GPS 在短边上距离测量精度与测距仪实测的结果精度基本相当^[9], 甚至能够实现更高精度, 按照基线向量相对精度 10^{-6} 测定平距, 测距精度对高差的影响更小, 完全可以忽略不计。

(2) 测距 S 影响及控制措施: 从表 1 可知, 在角度一定情况下, 距离 S 对 m_s 的影响很小, 但从球气差公式 CS^2 可知, 距离对球气差的影响还是很大, 所以在选点时尽量选择利于布设工作场地与观测的较窄河段处, 使 S 尽可能最小。

(3) 垂直角 a 及其误差 m_a 影响及控制措施: 从表 1 可知垂直角 a (1° 对 m_h 的影响明显小于 5° 和 10°) 对 m_h 的影响明显。同时距离一定时, 随着角度增大 m_h 变化明显, 角度影响明显大于距离变化影响, 测角误差是精密三角高程测量的主要

由式(6)可以看出, 三角高程测量的精度 m_h 除了受测距 S 及其误差 m_s , 垂直角 a 及其误差 m_a , 仪器和觇标量高 m_i 、 m_v 误差外, 还受大气折光 m_k 的影响由上式可知, m_s 对 m_h 的影响为:

$$\left(\tan a + \frac{1-k}{R} S \right) m_s \quad (7)$$

跨距 $S \leq R$, 故式(7)可视为 $\tan a m_s$ 。 m_a 对 m_h 的影

响为 $S \sec^2 a \left[\frac{m_a}{\rho} \right]$, m_a 一般为 $0.5'' \sim 2''$, 高精度测

(1) 测距误差 m_s 影响。随着全站仪技术的发展, 测距精度可以达到 $(0.6 + 1 \times 10^{-6} \times S) \text{mm}$, 跨距为 10 km 的跨河测量对 m_h 影响不足为 0.2 mm, 但是测距相对于测角要复杂很多, 测距时的观测方法、多项改正及边长归算都严重制约测距三角高程测量的发展, 随着 GPS 定位技术的发展, 测距已不

误差来源。因此观测时尽可能采用高精度的测角仪器, 观测角度尽量不要超过 1° , 观测时保证成像清晰稳定, 并提高测回数即重复观测来提高精度。

(4) 仪器高 m_i 和觇标高 m_v 误差: 以往的仪器高主要通过钢卷尺测量得到, 明显这样的精度不能满足二等水准精度需要, 从第 2 节跨河水准测量原理分析可知通过全站仪观测近标尺水平视线法消除仪器高, 从而消除仪器高误差影响; 觇标高误差主要来源于觇板指标中心线对准标尺分划线的人眼视觉误差, 按人眼的最小分辨率, 其误差应为 0.1 mm, 也是影响很小的。

(5) 大气折光 m_k 误差及控制措施: 由于折光系数的不确定性, 其误差主要由跨河视线两端地形的不对称性、气温变化及水面上方大气气流的不稳定等因素引起, 其影响规律复杂, 不易人为

控制,一直以来球气差改正中的气差改正是三角高程跨河测量中的主要误差源。为削弱以上误差,常采取合理选择跨河场地(两岸地形对称)、缩短观测时间尽可能同时对向观测,选择好天气、水面热辐射小、风力较小的条件下进行。

除了上述误差,测量还受观测误差、仪器本身误差等误差的影响,随着测绘仪器的现代化、智能化,上述误差对测量精度的影响越来越小。

5 观测实例

我们以珠江三角洲区域高程基准框架的崖门水道跨河水准测量数据为例,按照上述误差影响及控制措施进行跨河测量,在跨河点选取时注意各种外界因素对测量精度的影响,在河两岸分别选取4个跨河点A、B、C、D,构成大地四边形,两岸地形及观测场地条件基本相似,跨河视线长度力求最短,长度642 m,同岸点两点间距约10 m。视线离水面高约3.5 m,跨河视线垂直角在 $\pm 1^\circ$ 以内。观测时选择风小、阴天进行同时对称测量,观测步骤和方法如图2,采用2台徕卡TS60i0.5" R1000全站仪、两台附带觇板的钢瓦标尺(采用0.5 mm分划的钢瓦标尺配合30×40 cm的标准觇板)先后安置在两岸的跨河点上,依次观测远近标尺读数,分别于2016年9月23日至24日进行4个时间段,16个测回的角度观测,同时采用4台徕卡GPS仪器进行边长观测。其观测步骤和方法如图2。

上述一流程观测完成,两台仪器共完成四个单测回,其中半测回中的组数为8,共需4个时段

16个测回数完成所有外业数据采集。其观测数据如表2。

根据二等水准测量规范要求及观测结果分析,各单测回互差最大值为6.7 mm,限差为 ± 15.7 mm;由大地四边形组成三个独立闭合环,其同一个时段的各条边高差闭合差最大值为-7.0 mm,限差为 ± 9.6 mm,跨河点GPS基线水平分量中误差为 ± 2.6 mm,限差 ± 5 mm,垂直分量中误差为 ± 2.6 mm,限差为 ± 10 mm,符合二等跨河水准测量限差要求。

按照条件平差原理对跨河水准网进行严密平差,6个观测值,3个多余观测值,组成3个条件方程式,每千米高差中数中误差 ± 0.75 mm,限差为 ± 1 mm,符合二等水准的精度要求。

6 结语

本文以珠江三角洲区域高程基准框架跨河水准测量实测为例,对三角高程法的方案、原理及误差来源进行分析,提出了全站仪水平视线结合水准近标尺读数准确测出仪器高而消除仪器高误差和采用GPS测距的方法,重点分析了误差影响和控制措施。结果表明,GPS短距离测边能代替测距仪进行边长测量,合理选择跨河点,控制视线垂直角、视线长度,同时对称观测等手段,可以削弱大气折光误差、地球曲率误差的影响,采用高精度全站仪、增加测回数可以提高测量精度。随着测量仪器的现代化、智能化,观测手段不断改善,GPS测距结合全站仪测角将来更加广泛应用于更长的跨距、更广泛的其他精密水准测量,带来显著的经济效益和社会效益。

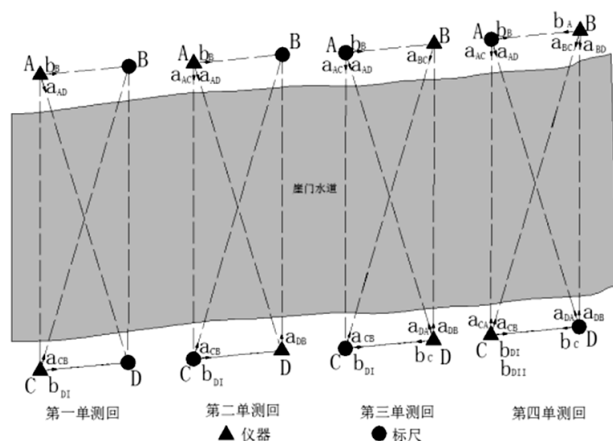


图2 崖门水道跨河水准步骤和方法

Fig.2 Cross-River Trigonometric Leveling steps and methods on yamen channel

表 2 崖门水道二等跨河水准观测数据汇总表

Table 2 Second Cross-River Leveling summary table onyamen channel

类型		时段高差/m				最大互差 /mm	限差/mm	边长/m
		1	2	3	4			
边	AC	-0.044 91	-0.043 47	-0.043 81	-0.048 78	5.3	±15.7	642.306
	AD	-0.100 45	-0.103 38	-0.102 84	-0.103 32	2.9	±15.7	642.176
	BC	0.058 25	0.059 76	0.060 11	0.057 29	2.8	±15.7	642.539
	BD	-0.002 96	0.003 49	0.003 74	0.002 12	6.7	±15.7	642.282
	AB	-0.104 46	-0.104 46	-0.104 46	-0.104 46	近标尺采用		8.947
	CD	-0.056 26	-0.056 26	-0.056 26	-0.056 26	水准观测数据		9.039
环闭合差/mm	ABC	-1.3	-1.2	-0.5	1.6	1.6	±9.6	1 293.792
	ABD	-7.0	2.4	2.1	1.0	-7.0	±9.6	1 293.405
	ABCD	-6.3	-1.2	-0.7	2.7	-6.3	±9.6	1 302.574

参考文献:

- [1] 刘忠林, 薛维刚. 精密跨河水准测量方法与数据处理[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32 (4): 204-206.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. 国家一、二等水准测量规范: GB/T 12897-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [3] 吴迪军, 熊 伟, 李剑坤. 精密三角高程跨河水准测量的改进方法[J]. 测绘通报, 2010 (3): 4-6+20.
- [4] 张 艳, 高 飞, 李晓莉. 应用精密三角高程测量实现跨河水准的研究[J]. 合肥工业大学学报, 2007, 30 (10): 1 345-1 348.
- [5] 周燕芳, 戴阳松, 李 明. 三角高程实施跨河水准方法探讨及精度分析 [J]. 测绘通报, 2009 (9): 32-35.
- [6] 范百兴, 夏治国. 全站仪实施跨河水准测量及其精度分析[J]. 测绘工程, 2004, 13 (1): 41-43.
- [7] 孔 宁, 林 鸿, 欧海平, 等. 基于自动照准全站仪的精密三角高程测量代替二等水准测量的研究与应用[J]. 测绘通报, 2016 (2): 107-109.
- [8] 欧阳桂崇, 尹成玉, 徐新强, 等. 基于三角高程测量的跨海高程传递方法[J]. 海洋测绘, 2011, 31 (6): 59-62.
- [9] 王俊勤, 汤进九, 田金国. GPS 与测距仪短距离测量精度探讨[J]. 海洋测绘, 2004, 24 (2): 24-27.