



精密三角高程测量技术 在航电枢纽工程中的应用^{*}

卢自来, 刘超群

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川成都610017)

摘要: 针对航电枢纽工程建设中无法实施传统跨江(河)水准测量的高等级高程控制测量的问题, 开展精密三角高程测量技术的理论和应用实践研究。介绍三角高程测量技术的原理, 分析三角高程测量误差影响因素, 并提出误差削减措施。以犍为航电枢纽高程控制网测量为研究案例, 采用徕卡TS50测量机器人, 选择适宜的观测时间窗口, 验证全站仪精密三角高程测量代替二等跨江(河)水准测量的可行性。实践表明该方法行之有效, 能满足二等水准测量规范限差要求。研究成果对后续大型水运航电枢纽建设中的高等级高程控制测量具有指导意义。

关键词: 航电枢纽工程; 精密三角高程; 跨江(河)二等水准; TS50测量机器人

中图分类号: P 216; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0021-05

Application of precision triangulation elevation measurement technology in navigation and electricity hub projects

LU Zi-lai, LIU Chao-qun

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd, Chengdu 610017, China)

Abstract: In the construction of navigation and electricity hub projects, traditional river-crossing leveling for high-grade elevation control measurement cannot be implemented. In view of this, this paper carries out research on the theory and application practice of a precision triangulation elevation measurement technology. The paper introduces the principle of triangulation elevation measurement technology, analyzes the factors affecting the error of triangulation elevation measurement, and proposes measures for mitigating errors. Taking the elevation control network measurement in Qianwei navigation and electricity hub as a case study, we use the Leica TS50 measuring robot and selects a suitable observation time window to verify the feasibility of replacing second-class river-crossing leveling with total station precision triangulation elevation measurement. Practice shows that the method is effective and can meet the difference limit requirements of second-class leveling specifications. The research results can provide guidance for the high-grade elevation control measurement in subsequent large-scale navigation and electricity hub construction.

Keywords: navigation and electricity hub project; precision triangulation elevation; river-crossing second-class leveling; TS50 measuring robot

在航电枢纽工程建设中, 高程控制网一般要求二等, 且高程控制点要布设在江(河)的两岸, 这就需要进行跨江(河)二等水准测量^[1]。在进行

测量时, 往往江(河)水面太宽、测区上下游没有桥梁导致无法实施传统的跨江(河)水准测量; 或者有桥梁但桥梁离测区距离太远, 在实施传统跨江

收稿日期: 2022-06-13

*基金项目: 四川省交通勘察设计研究院有限公司科技项目(232022015)

作者简介: 卢自来(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为内河航道及公路工程测量研究。

(河)水准测量时工作量巨大、作业效率难以提高,而且水准路线较长导致测量精度降低。近年来,测绘技术与测绘仪器迅速发展,高精度的测量机器人越来越智能化,使得三角高程测量技术得到了广泛的应用。三角高程测量具有单站观测距离长、不受高差限制、快速、简便、受地形限制较小、高效等优点,在我国西部山区高程控制测量及跨江(河)高程控制测量等中得到了广泛的应用^[2-3]。

1 三角高程测量原理

使用全站仪在两站间测量其垂直角(或天顶距)和水平距离,运用三角学原理计算出相邻两站间的相对高差,从而推导出前视点的绝对高程^[4]。三角高程测量的基本原理见图 1, A、B 为两个高程控制点,其水平距离为 D 、垂直角为 α , A 点仪器高为 i , B 点目标高为 v , 高差为 h_{AB} 。

$$h_{AB} = D \tan \alpha + i - v \quad (1)$$

式(1)是假设地球表面为平面的计算公式,实际上地球表面为不规则椭球面,会产生地球曲率误差;大气折光差是由大气密度或质量不同造成的,它取决于测站与观测目标之间大气的物理条件。在实际观测中,不能完全掌握观测时的瞬时天气情况来计算折光差,一般只能估计其大概值,或采取措施削弱其对计算结果的影响。在三角高程中,地球曲率和大气折光的影响严重。当两站的观测距离 >200 m 时,应加入地球曲率及大气折光差改正。

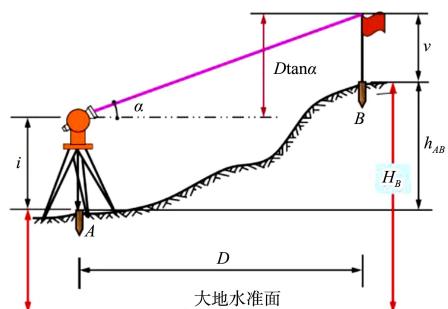


图 1 三角高程测量方法

2 三角高程测量误差及削减措施

2.1 仪器高和目标高误差及削减措施

仪器高及目标高的误差包括测量时卷尺的误

差及读数误差。其中目标高误差容易控制,可以采用固定高度的目标高进行测量,从而减弱测量过程中目标高误差对高差测量的影响;仪器高误差较难控制,但可通过多次测量求平均值的方法削减,选择高精度的卷尺在测前和测后分别从 3 个方向测量仪器高,以削减仪器高误差。笔者使用精密三角高程方法进行跨江(河)二等高程控制测量时采用联合水准法削减仪器高误差,通过两点的高差求出仪器高,使仪器高精度达到 0.1 mm。

2.2 距离测量误差及削减措施

观测边距离由全站仪激光测距所得,受仪器本身精度影响存在测量误差,因此可以采取精度高的仪器进行三角高程的距离测量。目前测量机器人的距离测量精度达到了毫米级,在进行三角高程测量时稍微控制两点间的高差,使两点间的观测天顶距在 $(-1^\circ, 1^\circ)$,通过式(1)计算可以发现,距离测量误差对三角高程测量的高差影响在微米级以下,可忽略不计。

2.3 角度测量误差及削减措施

垂直角(天顶距)的观测误差对高差的影响与观测边的长短正相关,即随着观测边距离增加误差也增加。垂直角测量误差主要有仪器误差、观测误差以及外界环境误差等^[5]。仪器误差不可避免;观测误差主要有读数误差、照准误差、气泡居中误差等,由于人眼的分辨率有限,因此观测边距离越长照准误差就越大^[6];外界天气环境对角度测量也会发生影响,如跨河空气干净度,在一定情况下会影响观测的照准精度,进而影响角度观测质量。以上误差可以采用高精度的测量机器人削减,测量机器人测角精度最好大于等于 $0.5''$,由于测量机器人具备自动整平、探测和记录目标等智能辅助功能,能很好地削减角度测量误差,当三角高程的观测边距离变长时,还可通过增加垂直角测量次数来提高观测精度。

2.4 球气差及削减措施

由地球曲率和大气折光的综合影响引起的误差称为球气差。三角高程测量中球气差按照下

式计算:

$$f = (1-k) \frac{D^2}{2R} \quad (2)$$

式中: f 为球气差(km); k 为大气折光系数; D 为观测边长(km); R 为地球半径(km)。从式(2)可以看出三角高程测量中的球气差与大气折光系数和观测边距离有关, 球气差与大气折光系数成反比、与观测边距离的平方成正比。三角高程测量中观测边距离可以精确到毫米, 因此观测边距离的影响可以精确求出。但大气折光系数 k 随季节、地区环境和气候、地面覆盖物以及视线超出地面高度等条件不同而发生改变, 目前想要精确求出 k 的数值很难实现。折光系数 k 对三角高程测量中

球气差的影响见表 1。由表 1 可知, 当观测边长超过 200 m 时, 在三角高程测量中一定要考虑球气差。一般而言, 理想情况下大气折光系数 k 介于 0.08~0.20。但是当观测边视线较低时贴近地面的大气层会出现异常波动, 当太阳光较强时大气层也会出现异常波动, 都会造成 k 值极不稳定, 有时可能为负值。因此 k 值的选取对三角高程测量十分重要。

综上所述, 三角高程测量在目标高误差、仪器高误差、距离测量误差、角度测量误差等方面都能够得到较好控制, 但大气折光系数变化范围较大且无规律导致球气差不易被控制。因此三角高程测量的误差主要来自球气差影响。

表 1 折光系数 k 与观测边长 D 对球气差的综合影响

D/m	f/m									
	$k=0.1$	$k=0.2$	$k=0.3$	$k=0.4$	$k=0.5$	$k=0.6$	$k=0.7$	$k=0.8$	$k=0.9$	
100	0.001 4	0.001 3	0.001 1	0.000 9	0.000 8	0.000 6	0.000 5	0.000 3	0.000 2	
200	0.005 6	0.005 0	0.004 4	0.003 8	0.003 1	0.002 5	0.001 9	0.001 3	0.000 6	
300	0.012 7	0.011 3	0.009 9	0.008 5	0.007 1	0.005 6	0.004 2	0.002 8	0.001 4	
400	0.022 6	0.020 1	0.017 6	0.015 1	0.012 5	0.010 0	0.007 5	0.005 0	0.002 5	
500	0.035 3	0.031 4	0.027 4	0.023 5	0.019 6	0.015 7	0.011 8	0.007 8	0.003 9	
1 000	0.141 1	0.125 4	0.109 8	0.094 1	0.078 4	0.062 7	0.047 0	0.031 4	0.015 7	
1 500	0.317 5	0.282 2	0.246 9	0.211 7	0.176 4	0.141 1	0.105 8	0.070 6	0.035 3	
2 000	0.564 4	0.501 7	0.439 0	0.376 3	0.313 6	0.250 9	0.188 1	0.125 4	0.062 7	
3 000	1.270 0	1.128 9	0.987 8	0.846 7	0.705 6	0.564 4	0.423 3	0.282 2	0.141 1	

3 案例分析

3.1 测区概况

试验区位于岷江水系下游乐山地区内的岷江犍为航电枢纽工程, 枢纽主要建(构)筑物有发电厂房、水泥混凝土重力坝、船闸、过鱼通道、泄洪冲沙闸和防洪堤坝等, 施测精度采用二等。由于犍为航电枢纽建设在岷江上, 岷江水面宽度大于 300 m, 无法高效且经济地实施传统跨河水准测量, 拟建航电枢纽大坝下游 1.5 km 为犍为岷江大桥, 此大桥是犍为县唯一一座跨江大桥, 交通繁忙, 实施交通管制成本较大, 因此采用水准测量配合精密三角高程测量可建设二等高程控制网。

3.2 精密三角高程测量实施方法

3.2.1 高程控制点布设方案

为满足航电枢纽施工测量需要, 在犍为航电

枢纽大坝上下游岷江两岸各布设 2 个二等高程控制点。为保证精密三角高程测量精度, 点位选择满足以下要求: 每个高程控制点与岷江对岸的 2 个高程控制点都保持通视、4 个高程控制点的两两高差控制在观测天顶距在 $(-1^\circ, 1^\circ)$ 。通过实际踏勘并选点, 在左岸布设 BM01、BM03 两个二等高程控制点, 在右岸布设 BM02、BM04 两个二等高程控制点。

3.2.2 测绘仪器的选择

精密三角高程测量使用徕卡 TS50 全站仪, 距离测量精度为 $(0.6 \text{ mm} + 10^{-6} \times D)$, 角度测量精度为 $0.5''$, 具有自动整平、自动搜索目标、自动照准目标、自动观测目标等功能, 因此很好地削减了距离及角度测量误差。采用 3 个徕卡 Jeoc ADS13 高精度金属外壳棱镜并配备 3 个固定高度的棱镜杆,

使用前均对重复性及互换性检核，并对棱镜高进行验证，在实施测量前可最大程度地削减目标高误差。施测前 30 min，先将仪器置于露天环境，使徕卡 TS50 全站仪与外界环境温度趋于接近。

3.2.3 实施方案

施测前，首先在 BM01、BM02、BM03、BM04、附近 20m 左右各选择 1 个位置埋设普通水准标识 A、B、C、D 共 4 个水准点，且保证相邻水准点高程基本相等，并采用水准仪测量 BM01 与 A 点的高差、BM02 与 B 点的高差、BM03 与 C 点的高差、BM04 与 D 点的高差，用以计算仪器高，如图 2 所示。

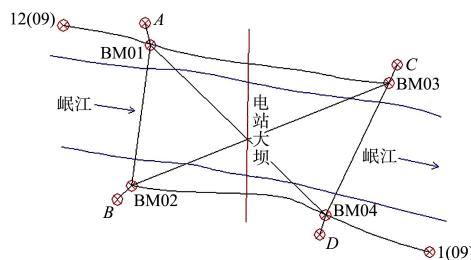


图 2 精密三角高程及水准测量实施路线

岷江同一岸的高程控制点采用传统二等水准方法进行施测，并接测国家水准点，其中 12(09) 和 1(09) 为国家一等水准点。不同岸的高程控制点采用精密三角高程方法，观测时先在 BM01 上架设全站仪，在 A、BM02、BM04 上架设棱镜，全站仪同时观测 A、BM02、BM04 上的棱镜，由

于 BM01 与 A 点的高差已使用符合精度要求的数字水准仪测量出，且 BM01 与 A 点距离只有 20 m，球气差可以忽略不计，因此可以通过全站仪测量出的 BM01 与 A 点的高差求出仪器高度，其精度达到 0.1 mm，很好地削减了仪器高误差，再根据三角学原理求出 BM01 与 BM02 及 BM01 与 BM04 之间的高差。按照此方法依次在 BM02、BM03、BM04 上架设全站仪进行观测。为确保精密三角高程测量精度，每个高程控制点分别观测 6 个不同时段，实施路线见图 2。

3.3 精度统计分析

共施测 4 段二等水准路线，每段水准路线各进行 2 个往返测，往返测数据成果见表 2。精密三角高程测量共完成 4 组对向观测，每组对向观测分 6 个不同时段进行，完成全部数据采集工作后，利用徕卡全站仪测量软件对所有测量数据进行数据处理分析，可视为等精度观测^[7]。数据成果统计包括各时段两测站对向观测高差较差统计及各时段两测站的高差统计，结果见表 3、4。

通过 6 个时段的测量结果可发现，12:00—15:00 的 2 个观测时段测量成果误差较大；观测时发现这两个时段在全站仪中能够明显看到大气剧烈波动，而且可以看到棱镜在大气剧烈波动中上下跳动。出现这种情况的原因是由于观测季节正值夏季，该时段气温较高、太阳光照射强、空气流动剧烈。

表 2 二等水准测量成果数据

起点	终点	测段距离均值/m	往测高差/m	返测高差/m	往测高差/m	返测高差/m	高差较差/mm	高差较差限差/mm
12(09)	BM01	591.232	3.547 03	-3.546 99	3.547 06	-3.546 90	1.1	±3.1
BM01	BM03	1 068.123	-2.511 63	2.511 44	-2.509 12	2.512 14	3.0	±4.1
1(09)	BM04	1 570.089	2.726 11	-2.726 08	2.725 50	-2.726 52	1.0	±3.8
BM04	BM02	908.116	4.035 11	-4.034 62	4.036 20	-4.033 92	2.3	±5.0

表 3 各时段两测站对向观测高差较差

对向观测 控制点	对向观测 距离/m	对向观测高差较差/mm						限差
		1时段	2时段	3时段	4时段	5时段	6时段	
BM01-BM02	906.746	3.2	1.7	24.3	46.5	2.2	1.8	±3.8
BM01-BM04	1 177.870	2.9	1.6	37.5	19.6	2.4	2.6	±4.3
BM03-BM02	1 248.089	3.6	0.7	47.4	38.9	2.5	1.3	±4.5
BM03-BM04	910.247	0.3	1.1	27.2	33.9	0.3	2.1	±3.8

注：1时段 09:00-10:30；2时段 10:30-12:00；3时段 12:00-13:30；4时段 13:30-15:00；5时段 15:00-16:30；6时段 16:30-18:00。下同。

表 4 各时段两测站的高差

对向观测控制点	对向观测距离/m	两测站高差/m					
		1时段	2时段	3时段	4时段	5时段	6时段
BM01-BM02	906.746	1.919 6	1.921 5	1.904 4	1.914 2	1.920 1	1.918 1
BM01-BM04	1 177.870	-2.116 3	-2.114 2	-2.100 7	-2.108 1	-2.115 2	-2.117 1
BM03-BM02	1 248.089	4.430 2	4.431 2	4.446 7	4.438 7	4.429 9	4.428 9
BM03-BM04	910.247	0.397 1	0.395 6	0.411 1	0.404 8	0.398 2	0.394 9

采用精密三角高程测量替代二等水准测量, 根据测量机器人观测的满足要求的 4 个时段的测量成果, 与水准路线测量成果统一平差处理^[8-11]。二等高程控制测量共形成 5 个闭合环和 4 条附合路线, 其精度统计分析结果显示(表 5): 最长的附合路线(闭合环)施测长度为 5 385.649 m, 最短

的附合路线(闭合环)施测长度为 2 992.732 m; 附合路线 12(09)-BM01-BM02-BM04-1(09) 的施测误差最小, 闭合环 BM03-BM04-BM02-BM03 的施测误差最大, 所有附合路线(闭合环)的精度都能够满足二等水准的施测精度要求。

表 5 附合路线和闭合环精度统计

附合路线(闭合环)名称	附合路线(闭合环)长度/m	附合路线(闭合环)闭合差/mm	附合路线(闭合环)闭合差限差/mm	单位距离高差中误差/(mm·km ⁻¹)
BM01-BM03-BM04-BM02-BM01	3 793.232	0.5	±7.8	0.2
BM01-BM03-BM04-BM01	3 156.240	1.1	±7.1	0.4
BM01-BM03-BM02-BM01	3 222.958	-0.9	±7.2	0.3
BM01-BM04-BM02-BM01	2 992.732	-0.6	±6.9	0.2
BM03-BM04-BM02-BM03	3 066.452	1.4	±7.0	0.5
12(09)-BM01-BM03-BM04-1(09)	4 139.691	0.3	±8.1	0.1
12(09)-BM01-BM04-1(09)	3 339.191	-0.8	±7.3	0.2
12(09)-BM01-BM03-BM02-BM04-1(09)	5 385.649	-1.1	±9.3	0.3
12(09)-BM01-BM02-BM04-1(09)	3 976.183	-0.2	±8.0	0.2

4 结论

1) 工程实践证明, 为航电枢纽精密三角高程施测附合路线(闭合环)最大闭合差为 1.4 mm, 单位距离高差中误差为 0.5 mm/km; 最小闭合差为-0.2 mm, 单位距离高差中误差为 0.2 mm/km。测量精度完全能满足二等水准测量规范的限差要求。

2) 仪器高通过联合水准方法求得, 提高了仪器高的精度, 可使仪器高的精度达到 0.1 mm。

3) 在实施过程中保证水准点观测天顶距在(-1°, 1°), 距离测量误差对高差的影响可忽略不计。

4) 实施过程中避免在 12:00—15:00 大气折光系数极度不稳定时进行测量作业, 减弱球气差的影响。

5) 本文施测方法可用于大型水运航电枢纽建设中无法实施传统跨河(江)水准测量的工程项目, 进行高等级高程控制网的建设与维护。

参考文献:

- [1] 王志岗, 江超, 杨生春, 等. 精密电子水准测量技术应用研究[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 316-319.
- [2] 刘志文. 黑河干流河道的跨河水准测量方法[J]. 测绘技术装备, 2006, 8(2): 39-40.
- [3] 王璐, 王国良. 港珠澳大桥主体工程桥梁跨海三角高程控制测量[J]. 公路, 2018, 63(9): 231-233.
- [4] 孔祥元, 郭际明. 控制测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- [5] 杨敏. 单向三角高程测量在大坝变形监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2016, 14(1): 97-98. (下转第 47 页)