

山区测距三角高程代替二等水准测量精度分析

赵天鹏

(贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 介绍了测距三角高程测量的误差来源及减弱或者消除方法。结合不同海拔地区的4个水利水电大坝边角施工控制网和1个变形监测网测量项目观测数据, 通过对采用有强制对中装置的观测墩和使用脚架光学对中方法施测的实践工程数据的计算分析, 验证了测距三角高程测量代替二等水准测量在山区应用的可行性。对在山区水利水电工程建立精密三维控制网具有一定参考价值。

关键词: 测距三角高程; 二等水准测量; 偶然中误差; 环闭合差; 三维控制网

中图分类号: P221.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2017) 02-0021-04

Accuracy analysis of trigonometric leveling instead of second-order leveling in mountain area

ZHAO Tianpeng

(Guizhou Hydraulic and Hydropower Survey and Design Institute, Guiyang 550002, Guizhou)

Abstract: The error sources and methods of reduction or elimination by trigonometric leveling are introduced in this paper. The observation data of four water conservancy and hydropower dam side angle construction control network and one deformation monitoring network are obtained. Through the calculation and analysis of practical engineering data by observation pier with forced centering device and measurement method using optical tripod, the feasibility of trigonometric leveling instead of two leveling in mountainous area is verified. It has certain reference value for the establishment of precise three-dimensional control network in hydraulic and hydropower projects in mountain area.

Key words: trigonometric leveling; second-order leveling; accidental error; closed loop error; three dimensional control network

0 引言

目前高程测量方法主要分为几何水准测量、测距三角高程测量、GPS水准拟合测量三大类^[1]。传统几何水准测量方法所得到地面点高程精度较高, 普遍用于建立国家基本高程控制网点及测区首级高程控制网点, 这种方法施测进度缓慢, 工作效率低下, 在山区有时非常困难。对于地面高低起伏较大、坡度较陡的地区, 三角高程测量以方便、

快捷、经济效益优于几何水准测量得以广泛应用, 尤其在山区建立高精度施工控制网, 几何水准测量就显得非常困难, 而三角高程测量就能够充分发挥其很大的优势, 解决了几何水准测量难以观测的问题^[1]。

随着现代科学计算的发展, 全站仪生产技术有了很大进步, 测距、测角精度均有很大提高^[2]。通过控制观测环境, 一定的测量及计算方法又可

收稿日期: 2016-11-29

作者简介: 赵天鹏 (1963-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事水利水电测量生产与研究工作。

以减弱或者消除三角高程测量中各种误差源的影响,从而达到高精密水准测量的精度。

1 测距三角高程测量误差来源

三角高程测量单向观测高差计算公式:

$$h_{AB} = S_{AB} \sin Z_{AB} + (1-K)(S_{AB} \times \cos Z_{AB})^2 / (2R) + i_A - V_B \quad (1)$$

式中:

h_{AB} —A点至B点的高差, m;

S_{AB} —A点至B点经各项改正后的斜距, m;

Z_{AB} —A点至B点的垂直角($^\circ$);

K —大气折射系数;

i_A 、 i_B —A、B点的仪器高, m;

l_A 、 l_B —A、B点的棱镜高, m;

R —地球平均曲率半径, 采用 6369000, m。

由高差计算公式可知, 观测高差 h 与垂直角 Z 、边长 S 、大气折射系数 K 、地球曲率、仪器高 i 、棱镜高 l 有关。这些数值有误差, 必然引起高差产生误差。

1.1 仪器误差

测角误差: 垂直角观测误差主要由仪器精度和照准误差、整平误差、调焦误差引起。外界环境条件对观测也会产生一定影响, 如空气清晰程度, 会很大程度上干扰观测时的目标瞄准质量, 从而影响垂直角观测值精度。垂直角观测误差对高差影响随边长 S 的增大而增大, 它的影响比测边误差影响大很多。

测距误差: 测距误差除与仪器本身精度有关外, 还受外界环境影响, 如温度、湿度、气压、大气折射等。对于测距精度较高的精密全站仪来说, 测距精度对于高差精度影响很小, 对高差的影响与垂直角的大小有关, 随垂直角的增大而增大。

1.2 大气垂直折射和地球曲率的影响

大气垂直折射系数的变化很复杂, 完全准确掌握其变化规律非常难。大气折射误差系数随不同地区、海拔、季节、时刻、地形条件、覆盖物以及视线超出地面高度等因素而变化。由于地球质量对大气分子的引力作用, 使大气密度呈现上疏下密的基本分布, 越接近地面密度就越大, 反之就越小。并随着温度变化而变化。因此, 在各种不同情况下, 折射系数 K 值都有很大差异。目前还不能精确测定它的数值。

单向观测中, 地球曲率对高差的影响与两点间距离的平方成正比。尤其是在地形起伏较大地区, 地球曲率影响更加明显。而大地水准面是一个不规则的曲面, 地球曲率改正计算也就很难做到十分精确。

1.3 仪器高和棱镜高的量测误差

仪器高和棱镜高的量测误差是三角高程测量中影响较大的误差源之一, 仪器高和棱镜高量取误差直接影响高差值精度, 应控制其在最小误差范围内。

2 误差的减弱和消除

2.1 仪器误差减弱

测距中误差对高差的影响随角度的增加变化较大, 随着距离增加的变化量较小。测角中误差对高差的影响随着角度的增加变化较小, 随距离的增加变化量较大。减弱方法是选用高精度测角、测距的全站仪, 增加垂直角测回数, 尽量控制垂直角不宜过大。

2.2 大气垂直折射和地球曲率的减弱和消除

大气垂直折射及其减弱措施, 根据折射定律, 曲线总是弯向密度大的一方。可采取选择有利观测时间, 提高观测视线高度, 利用短边传算高程等措施减弱其影响。对向观测, 由于光路基本相同, 在相同时间段, 其折射路径大致相同。采用对向观测的方法可以基本消除其影响。

地球曲率对高差的影响, 可以通过改正计算或对向观测来减弱或消除其影响。

2.3 仪器高和棱镜高的量测误差

三角高程测量可以通过下面的作业方法减弱其影响: ①架设仪器和棱镜的架头应尽量保持水平; 仪器和棱镜高应分别从 120° 夹角的 3 个方向进行量取, 互差在限差内, 取其 3 个方向测量平均值使用; ②通过改变测量方式, 如采用中间观测法, 避免仪器高量测, 减少一个误差来源。

3 实例计算分析

3.1 观测

观测采用测距精度为 1+1ppm、测角精度为 1 秒级的 Leica1800 L 全站仪。垂直角(中丝法)及边长均观测 3 个测回, 采取对向观测方法。边长观测时读取测站气压、温度、湿度等数据, 作为边

长气象改正计算用^[3]。仪器高和棱镜高从120°夹角的3个方向分别进行量取,互差小于2 mm时,取其中数进行记录。

3.2 计算方法

测距边长经过气象、加常数、乘常数改正^[4]后,才能够进行高差计算。计算步骤为:

1) 高差计算前应先按式(2)^[5]计算各边的大气折射系数 K 值。

$$K=1+R/D_{AB}^2 \times [(S_{AB}\sin Z_{AB}) + S_{BA}\sin Z_{BA} + (i_A - l_B) + (i_B - l_A)] \quad (2)$$

式中:

D_{AB} —A点至B点D的平距, m; 其余符号意义与(1)式相同。

2) 使用(2)式计算的大气折射系数,再按公式(1)计算单向观测高差。

3) 用各段往、返测高差不符值,按公式(3)^[5]计算每千米高差中数偶然中误差 M_Δ 。

$$M_\Delta = \sqrt{\frac{1}{4n} \left[\frac{dd}{S^2} \right]} \quad (3)$$

式中:

M_Δ —偶然中误差(mm);

d —往、返测高差不符值, mm;

S —A点至B点斜距, km;

n —测段数。

4) 按公式(4)^[6]计算闭合路线环闭合差。

$$W_h = 4\sqrt{D} \quad (4)$$

式中:

W_h —闭合差限差, mm;

D —闭合环长度, km。

3.3 精度统计与分析

花山水利枢纽工程采用地面标石,使用木质脚架及光学对中方式安置仪器及棱镜。其余4个工程项目的仪器及棱镜均安置在有强制对中装置的观测墩上。

黔中水利枢纽大坝控制网13个点组成,观测高差33段(联测已知点高差一段);往、返测不符值最大+3.85 mm、限差 ± 3.1 mm;最小0.0 mm、限差 ± 1.8 mm。最大高差156.554 m、垂直角14° 51' 29"、边长590.226 m。渠首电站控制网由4个点组成,观测高差6段;高差往、返测不符值最大 $W_h = -0.93$ mm、 $h_{\text{限}} = \pm 2.5$ mm;最小 $W_h = -0.02$ mm、 $h_{\text{限}} = \pm 2.3$ mm。最大高差77.066 m、垂

直角11° 34' 40"、边长376.237 m。网中最长边940.375 m;最大垂直角24° 42' 31"、高差往、返测不符值最-0.71 mm、限差 ± 1.6 mm。

七里塘电站大坝控制网9个点组成,观测高差19段。往、返测不符值最大+0.37 mm、限差 ± 2.5 mm;最小-0.02 mm、限差 ± 1.7 mm。最大高差48.699 m、垂直角7° 21' 05"、边长377.629 m;网中最长边377.629 m;最大垂直角21° 03' 47"、高差往、返测不符值-0.13 mm、限差 ± 1.1 mm。

五嘎冲水库大坝控制网7个点组成,观测高差14段。往、返测不符值最大-0.69 mm、限差 ± 2.54 mm;最小-0.03 mm、限差 ± 3.7 mm。最大高差66.433 m、垂直角10° 46' 13"、边长349.182 m。网中最长边875.952 m;最大垂直角12° 17' 54"、高差往、返测不符值-0.36 mm、限差 ± 1.9 mm。

大田河电站大坝变形监测网6个点组成,观测高差11段;往、返测不符值最大-0.01 mm、限差 ± 2.2 mm;最小-0.00 mm、限差 ± 1.8 mm。最大高差8.488 m、垂直角1° 39' 41"、边长293.334 m;网中最长边460.611 m;最大垂直角1° 43' 13"、高差往、返测不符值-0.01 mm、限差 ± 2.1 mm。

花山水利枢纽大坝控制网9个点组成,观测高差21段。往、返测不符值最大-2.85 mm、限差 ± 2.1 mm;最小-0.03 mm、限差 ± 1.8 mm。最大高差165.512 m、垂直角15° 32' 02"、边长595.437 m;网中最长边926.451 m;最大垂直角29° 42' 51"、高差往、返测不符值-2.85 mm、限差 ± 2.1 mm。

全部103个测段往、返测高差不符值统计见表1所示。

将控制网中全部测段高差往、返测不符值,按上述公式(4)计算偶然中误差。将未知点的高差组成闭合路线,计算环闭合差,统计结果见表2。

从表1看:5个工程项目的6个控制网共计103段高差,有3段往、返测高差不符值超限,占2.9%,小于1/3限差有89段,占86.4%。说明往、返观测是可以消除或减弱地球曲率和大气折射引起的误差。

从表2看:采用脚架光学对中方法进行观测的花山水利枢纽大坝控制网偶然中误差都超限,线路1环闭合差超限,线路2环闭合差在限差内。采用强制对中装置的观测墩进行观测的5个控制网,偶然中误差及环闭合差均小于限差要求。

表 1 测段往、返测高差不符值分布统计

项目名称	高差测段数	$W \leq 1/3W_{限}$	$1/3h_{限} < W \leq 1/2h_{限}$	$1/2h_{限} < W \leq 3/4h_{限}$	$3/4h_{限} < W \leq h_{限}$	$h_{限} < W$
黔中水利枢纽大坝	32	27	3	1	0	1
黔中水利渠首电站	6	5	1	0	0	0
七里塘电站大坝	19	19	0	0	0	0
五嘎冲水库大坝	14	14	0	0	0	0
大田河电站大坝	11	11	0	0	0	0
花山水利枢纽大坝	21	13	2	2	2	2
合计	103	89	6	3	2	3

表 2 环闭合差、偶然中误差统计

项目名称	偶然中误差	二等水准限差	环线长	环闭合差	环限差	备注
黔中水利枢纽大坝	± 0.93	$\leq \pm 1.0$	3.76	-2.10	± 7.75	观测墩
黔中水利渠首电站	± 0.60	$\leq \pm 1.0$	1.50	-1.40	± 4.9	观测墩
七里塘电站大坝	± 0.40	$\leq \pm 1.0$	1.80	-1.29	± 5.37	观测墩
五嘎冲水库大坝	± 0.52	$\leq \pm 1.0$	1.55	3.28	± 4.97	观测墩
大田河电站变形监测网	± 0.01	$\leq \pm 1.0$	1.96	-4.71	± 5.59	观测墩
花山水利枢纽大坝（线路 1）	± 1.77	$\leq \pm 1.0$	2.40	-9.71	± 6.2	脚架观测
花山水利枢纽大坝（线路 2）	± 1.77	$\leq \pm 1.0$	3.11	-5.64	± 7.05	脚架观测

4 实践与体会

(1) 先用往返观测数据计算各个测段的折射系数 K 值, 以各测段的 K 值, 用单向观测高差公式分别计算高差, 得到往返测高差不符值来计算偶然中误差, 评定高差观测精度。

(2) 边角控制网由三角形、大地四边形构成, 冗余观测较多, 组成的闭合环路线可选的测段较多, 闭合路线中测段的选择不一定是最短路线, 可根据往返测不符值精度选择最佳路线。

(3) 通过对 5 个不同海拔、季节观测的控制网测量数据比较分析; 测距三角高程测量能够满足国家二等水准测量的精度要求。证明了测距三角高程测量能够代替二等精密水准测量在高山、峡

谷地段的可行性。采用有强制对中装置的观测墩精度会更好。

参考文献:

[1] 李凯, 石力, 朱清海. 应用精密三角高程测量替代二等水准测量[J]. 城市勘测, 2012(10).

[2] 韩军生, 顾和和. 短视距精密三角高程测量代替二等水准的探讨[J]. 地理空间信息, 2011(12).

[3] 刘冠兰, 杨川, 崔国立. 高原地区精密三角高程测量实践[J]. 测绘地理信息, 2016(10)

[4] GB/T16818-2008, 中、短程光电测距规范[S].

[5] SL197-2013, 水利水电工程测量规范[S].

[6] GB/T12897-2006, 国家一、二等水准测量规范[S].

(责任编辑: 王宏伟)