

# 精密三角高程测量在高陡边坡垂直位移监测中的应用

白雷雷<sup>1</sup>, 刘明波<sup>2</sup>

(1. 大唐雅安电力开发有限公司, 四川雅安 625500;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065)

**摘要:**对水电站边坡的位移、应力和地下水等进行监测, 当 GNSS 静态测量的数据采集质量受地形影响较大和几何水准测量不具备条件时, 采用高精度全站仪测量斜距、水平角和垂直角来监测水平位移和垂直位移, 成为目前最可行的人工监测方法。本文结合 TM30 全站仪监测某水电站枢纽区高陡边坡的实例, 讨论提高精密三角高程测量精度的措施, 检验精密三角高程测量在高陡边坡垂直位移监测中的精度, 供类似项目参考。

**关键词:**水电站; 边坡监测; 高精度全站仪; 人工监测

**中图分类号:** P224.2; U213.1+3; TU196+.4

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2023)04-0090-04

## Application of Precise Triangle Elevation Survey in Vertical Displacement Monitoring of High and Steep Slopes

BAI Leilei<sup>1</sup>, LIU Mingbo<sup>2</sup>

(1. Datang Ya'an Electric Power Development Co., Ltd., Ya'an Sichuan 625500;

2. PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an Shanxi 710065)

**Abstract:** When the quality of GNSS static measurement data collection is greatly affected by terrain and the conditions for geometric leveling are not available during the monitoring of displacement, stress and groundwater of the slope of the hydropower station, using the high precision total station to measure oblique distance, horizontal and vertical angle for monitoring horizontal and vertical displacement has become the most feasible manual monitoring method at present. Based on the example of TM30 total station monitoring a high and steep slope in a hydropower station hub area, this paper discusses the measures to improve the accuracy of precision triangular elevation measurement, and tests the accuracy of precision triangular elevation measurement in vertical displacement monitoring of high and steep slopes, which can provide a reference for similar projects.

**Keywords:** Hydropower station; Slope monitoring; High precision total station; Manual monitoring

## 0 引言

边坡安全监测是对边坡的位移、应力、地下水等进行监测, 掌握边坡位移情况, 能更好地为相关项目和工程服务。边坡安全监测按监测设施布置的位置可分为表面监测和内部监测, 表面监测主要包含水平位移监测和垂直位移监测。目前, 边坡水平位移人工监测主要采用 GNSS 静态测量方法和全站仪边角法, 垂直位移人工监测主要采用几何水准测量法和精密三角高程测量法。在水电站高陡边坡人工监测中, 当 GNSS 静态测量的数据采集质量受地形影响较大、几何水准测量不具备条件时, 采用高精度全站仪测量斜距、水平

角、垂直角来监测水平位移和垂直位移成为了最可行的人工监测方法。

Leica TM 系列全站仪是能自动搜索、跟踪、识别和精确瞄准目标, 自动读取并记录角度、距离、三维坐标等信息的高精度智能全站仪。目前使用的 TM 系列全站仪主要有 TM30、TM50、TM60。相关研究表明, 使用 TM 系列全站仪测量三角高程时可以达到二等水准的精度<sup>[1-3]</sup>, 并在高精度精密工程测量和变形监测中广泛应用。

### 1 某边坡监测实施情况

西南某大(I)型水电站枢纽区右岸岩石边坡设计了 13 个表观监测点, 监测点为有强制对中盘的观测墩, 各监测点位分布见图 1。

收稿日期: 2023-06-26

由于边坡陡峭,大部分监测点间主要通过钢爬梯通行,监测方法设计为全站仪边角法,监测频次为1次/月。工作基点为河流左岸的观测墩 $TN_1$ 、 $TN_2$ ,工作基点和监测点的平距范围520 m( $TN_2-TP_{51}$ )~790 m( $TN_2-TP_{11}$ ),天顶距范围 $80^{\circ}52'23.6''$ ( $TN_1-TP_{31}$ )~ $97^{\circ}50'50.0''$ ( $TN_2-TP_{51}$ )。采用仪器为徕卡TM30全站仪,机载软件为“三维变形监测软件”。

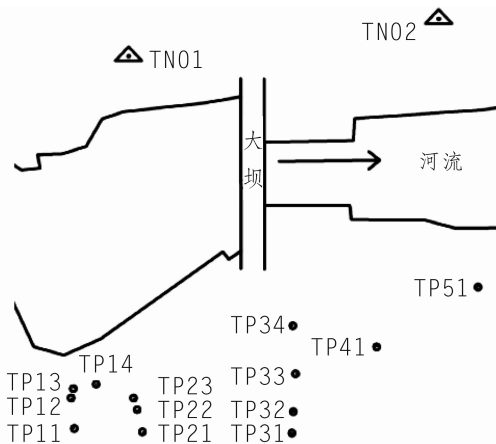


图1 各监测点位分布图

数据采集时,测回数 and 边角观测限差在“三维变形监测软件”中预置:测回数为4;水平角两次读数差 $4''$ 、半测回归零差 $6''$ 、一测回 $2C$ 互差 $9''$ 、同一方向值各测回较差 $6''$ ;边长一测回读数间较差 $2.0\text{ mm}$ 、各测回较差 $2.0\text{ mm}$ ;测回间垂直角指标差限差 $8''$ 、垂直角互差 $5''$ 。观测始末读取仪器高、棱镜高、干温、湿温、气压,仪器高和棱镜高读至 $0.5\text{ mm}$ ,温度读至 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,气压读至 $0.5\text{ mbar}$ 。考虑到观测边长较长,为保证三角高程测量的精度,每次边长测量都要往返测。

该边坡已按同一监测方法连续监测多年,结果表明边坡稳定。本文选取2021年度的12期数据进行研究。

## 2 三角高程数据处理

三角高程数据处理包含实测斜距修正、斜距化平、高差计算、监测点高程平差计算等步骤。

### 2.1 实测斜距修正

测距边经过气象、加常数和乘常数改正后的斜距才能用于化算水平距离。

当测距仪标称精测频率和实际精测频率互差小于 $10\text{ Hz}$ 时,不进行频率改正。若周期误差的

振幅 $A$ 小于测距中误差绝对值的倍时,无需进行周期误差修正,对于脉冲式测距仪不进行周期误差改正。

全站仪测距的气象修正值按仪器说明书计算。TM30全站仪实测斜距的气象修正公式为<sup>[4-5]</sup>:

$$\Delta S_1 = 286.34 - \frac{0.29525 \cdot p}{(1 + \alpha \cdot t)} + \frac{4.126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1 + \alpha \cdot t)} \cdot 10^x \quad (1)$$

式中  $\Delta S_1$  为气象改正,ppm; $p$  为气压,mbar; $t$  为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $h$  为相对湿度, $\%$ ; $\alpha = 1/273.15$ , $x = (7.5 \times t / (237.3 + t)) + 0.7857$ 。

测距仪加常数和乘常数修正中的加常数与乘常数由仪器检定证书给出。

### 2.2 斜距化平

利用下列公式将修正后的斜距化平:

$$D = S \cdot \sin Z \quad (2)$$

式中  $D$  为平距,m; $S$  为经修正后的斜距,m; $Z$  为天顶距, $(^{\circ} \prime \prime)$ 。

### 2.3 三角高差计算

单向观测的三角高差的计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$h = D \cot Z + (1 - k) \frac{D^2}{2R} + i - v \quad (3)$$

式中  $h$  为高差,m; $K$  为大气垂直折光系数, $R$  为地球平均曲率半径,m; $i$  为仪器高,m; $v$  为棱镜高,m。

式(3)中 $\frac{D^2}{2R}$ 为球差改正,当地面上两点间距离大于 $300\text{ m}$ 时要顾及地球曲率的影响,此时应加此项改正; $-k \frac{D^2}{2R}$ 为大气垂直折光改正,是观测视线受大气垂直折光的影响而成为一条向上凸起的弧线引起的改正,球差改正和大气垂直折光改正合称球气差改正<sup>[7]</sup>。

对向观测时,取高差均值作为工作基点至监测点的高差。

### 2.4 监测点高程计算

在平差软件中,输入工作基点的已知高程和工作基点至监测点的高差与平距,计算各监测点的高程。

## 3 提高三角高程测量精度的措施

由式(3)可知,三角高程测量的主要误差有垂直角测量误差、测距误差、大气折光系数误差、量

取仪器高和棱镜高误差<sup>[8]</sup>。可以有针对性地采取措 施来减小误差,提高三角高程测量的精度。

### 3.1 使用高精度测量仪器

LeicaTM 系列全站仪中的 0.5 s 级全站仪是 世界上精度最高的全站仪。TM30 全站仪的标称 测角精度为 0.5",精密和标准测距精度分别为  $\pm(0.6+10^{-6}D)$ mm、 $\pm(1+10^{-6}D)$ mm。高精度 测量仪器的投入最大程度保证了测角和测距的 精度。

### 3.2 数据采集

一般情况下,可以通过限制测量边长和垂直角 度来减小三角高程测量的误差,保证结果精度。对 于监测项目而言,方法确定后基准点和监测点的相 对位置就确定了,边长和垂直角也就确定了。

数据采集时可以采取以下保证精度的措施:

- (1)选择成像稳定的时段进行观测;
- (2)通过多测回观测提高测边和测角的精度;
- (3)仪器高和棱镜高采用深度卡纸量取,且在 基座的三个方向量取,取平均数使用。觇牌采用 徕卡插入式觇牌,统一作记号,作为量高时的统一 位置。

### 3.3 减弱大气垂直折光的影响

使用对向观测数据计算折光系数  $k$  的公式为:

$$k = 1 + 2R \frac{(D_{AB} \cot Z_{AB} + D_{BA} \cot Z_{BA}) + (i_{AB} + i_{BA}) - (v_{AB} + v_{BA})}{D_{AB}^2 + D_{BA}^2} \quad (4)$$

式中  $R$  为地球平均曲率半径,  $m$ ;  $D_{AB}$  为  $A$  站 至  $B$  站的平距,  $m$ ;  $Z_{AB}$  为  $A$  站至  $B$  站的天顶距, ( $^\circ$  ' ' ');  $i_A$  为  $A$  站的仪器高,  $m$ ;  $v_A$  为  $A$  站的棱镜 高,  $m$ 。

两点对向观测时,取对向观测所得高差绝对 值的均值可抵消地球曲率的影响和减弱大气垂直 折光的影响,提高三角高差测量的精度。

当两点间无法实施对向观测时,可以利用式 (4)计算测区相邻测边的折光系数。计算三角高 差时采用气象条件类似边长的折光系数,减弱大 气垂直折光的影响,提高三角高差的精度。

### 4 折光系数变化情况及对三角高程的影响

根据式(4)计算了工作基点  $TN_1$ 、 $TN_2$  和各 监测点边长的折光系数,并进行统计分析,折光系 数特征值统计见表 1。

表 1 折光系数特征值统计表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
均值	0.72	0.74	0.77	1.29	1.29	1.25	1.27	1.29	1.27	1.28	0.52	0.55
极小值	0.45	0.50	0.50	0.71	1.04	1.06	1.05	0.95	1.05	1.00	0.16	0.31
极大值	0.84	0.88	0.89	1.54	1.58	1.54	1.47	1.51	1.43	1.48	0.73	0.69
变幅	0.40	0.38	0.38	0.82	0.54	0.48	0.42	0.56	0.38	0.48	0.57	0.39

从表 1 可知:(1)每次监测时各点的折光系统 不尽相同,其变幅为 0.38~0.82;(2)每次测量时 的测区折光系数均值都不相同,折光系数均值变 化范围为 0.52~1.29;(3)折光系数的极值与均 值的最大偏离值为 0.58( $TN_1 - TP_{51}$ ,2021 年 4 月)。

平距 790 m、折光系数偏离值为 0.58 时,折 光系数对三角高差的影响为  $\pm 28$  mm。由此可 见,高精度三角高程测量中要重视折光系数的 求取和运用。

### 5 监测成果分析

2021 年的 12 期监测都采用了边角交会法和 边长往返测。采用以下四种方案计算各监测点的 三角高程:

方案一:架站  $TN_1$  和后视  $TN_2$ ,测量水平角、

垂直角和边长;返测各监测点到  $TN_1$  的垂直角和 边长。

方案二:分别架站  $TN_1$  和  $TN_2$ ,互为后视,测 量水平角、垂直角和边长;返测各监测点到  $TN_1$ 、  $TN_2$  的垂直角和边长。

方案三:分别架站  $TN_1$  和  $TN_2$ ,互为后视,测 量水平角、垂直角和边长, $k$  取值 0.14。

方案四:分别架站  $TN_1$  和  $TN_2$ ,互为后视,测 量水平角、垂直角和边长, $k$  取值取测区折光系数 的均值。

利用白塞尔公式计算各监测点的高程中误 差,用各点每次的观测值和均值相减后取绝对数, 最大数值为极限误差。各监测点高程中误差和极 限误差见表 2。

从表 2 可知:(1)采用方案一、二、四时,各监

测点高程中误差范围分别为 $\pm 1.0 \sim \pm 2.7$  mm、 $\pm 0.9 \sim \pm 2.3$  mm、 $\pm 1.3 \sim \pm 2.7$  mm。三种方法计算的高程精度都优于 $\pm 3$  mm,满足相关规范要求;(2)采用方案三时,各监测点高程中误差范围为 $\pm 9.1 \sim \pm 11.5$  mm,方案三计算的高程数据

不能用于高精度监测;(3)采用方案一、二、四时,各监测点高程极限误差都小于3倍中误差,监测成果可信度高;(4)方案四为提高无法对向观测的监测点高程精度和全站仪自动监测的高程精度提供了一种解决思路。

表2 各监测点高程中误差和极限误差

mm

方案	一		二		三		四	
	中误差	极限误差	中误差	极限误差	中误差	极限误差	中误差	极限误差
TP <sub>11</sub>	1.7	3.4	1.4	3.2	11.1	18.9	2.1	4.2
TP <sub>12</sub>	2.3	3.9	1.8	2.4	11.1	16.3	1.5	2.6
TP <sub>13</sub>	1.9	3.7	1.7	3.1	10.7	16.3	1.9	3.1
TP <sub>14</sub>	2.7	5.0	2.3	4.7	10.3	15.7	2.7	5.8
TP <sub>21</sub>	1.1	2.0	0.9	1.8	11.5	17.5	1.3	2.4
TP <sub>22</sub>	1.9	3.8	1.5	3.1	11.5	20.2	1.7	3.8
TP <sub>23</sub>	2.2	3.7	1.6	2.9	11.1	19.1	2.5	3.7
TP <sub>31</sub>	1.0	2.1	0.9	1.9	11.2	16.3	1.5	3.7
TP <sub>32</sub>	1.4	2.3	1.0	1.8	10.9	17.0	1.3	2.3
TP <sub>33</sub>	1.8	2.9	1.3	2.1	11.4	17.1	2.2	3.3
TP <sub>34</sub>	2.2	3.7	1.5	2.7	9.1	13.0	2.3	4.9
TP <sub>41</sub>	2.1	4.4	1.6	2.4	9.7	14.3	2.4	4.7
TP <sub>51</sub>	2.7	5.3	1.4	2.5	9.5	14.0	2.3	4.4

## 6 结 语

(1)折光系数受气温、气压、日照、时间、地面情况和视线高度等因素影响,同一条边不同时间的折光系数不同,同一时间不同边的折光系数也不同。

(2)折光系数影响三角高程测量结果;可以通过对向观测减弱折光系数对三角高程的影响,也可以通过取测区平均折光系数的方法提高单向三角高程测量的精度。

(3)该项目监测边长平距达520~790 m时,采取投入高精度测量仪器、选择成像稳定的时间进行观测、多测回测边测角、高精度测量仪器高和棱镜高等措施后,三角高程中误差优于 $\pm 3$  mm。

(4)取测区平均折光系数计算单向观测三角高程的中误差优于 $\pm 3$  mm,随边长的变短精度还会提高。这为提高无法实施对向观测的监测点位和全站仪自动监测的三角高程精度具有借鉴意义。

### 参考文献:

(上接第84页)

精细化管理。目前,锅浪跷水电站三台机组投运已稳定运行了半年多,机组运行情况良好,说明蜗壳安装焊接质量可靠。

### 作者简介:

- [1] 沈忱,杨风芸,胡松会. TM30 测量机器人三角高程代替二等水准测量[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012,(3):335-339.
- [2] 杜正乔,杜俊凤. 金沙江乌东德水电站工程中三角高程测量代替二等水准测量的可行性研究[J]. 西北水电,2018,(2):32-36.
- [3] 杜文举,张恒,景淑媛. 精密三角高程代替二等水准测量的研究[J]. 铁道勘察,2020,(4):1-4.
- [4] 刘明波,何为聪,鹿恩锋. TM30 全站仪精密测距的相对湿度修正[J]. 西北水电,2018,(2):30-31,57.
- [5] Leica TS30/TM30 用户手册 1.1 版.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程测量规范:SL 197-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [7] 李天文. 现代测量学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [8] 马成梧,范汉文,曾群意. 变形监测中提高三角高程测量精度的方法研究[J]. 电力勘测设计,2020,(S2):78-82.

### 作者简介:

白雷雷(1985-),男,蒙古族,四川成都人,学士,从事水电站工程建设工作;

刘明波(1982-),男,四川井研人,硕士,从事测绘与安全监测管理工作. (责任编辑:卓政昌)

李万有(1974-),男,内蒙古赤峰人,工程师,学士,主要从事水电站机电安装工程管理工作;

杨小军(1975-),男,四川岳池人,高级工程师,学士,主要从事水电站机电安装监理工作;

杨宏(1966-),男,陕西汉中,工程师,学士,主要从事水电站金结制作安装及监理工作. (责任编辑:卓政昌)