

# 电磁波测距三角高程测量在山区高程控制测量中的应用分析

郑 干

(中煤科工集团南京设计研究院有限公司, 江苏 南京 210031)

**摘 要** 利用电磁波测距三角高程测量可解决地形起伏较大的山区高程控制测量问题。本文阐述了三角高程测量原理及数学模型, 结合工程实例进行了数据处理分析。本次四等高程控制测量整体平差结果: 符合线路闭合差实测最大值为 13.45 mm, 限差为 ±78.84 mm; 闭合环线路线闭合差实测最大值为 -33.20 mm, 限差为 ±88.14 mm, 可以满足四等高程控制测量规范的相关精度要求。

**关键词** 水准测量; 电磁波测距三角高程测量; 精度分析

中图分类号: TB22

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.005

## 0 引言

目前, 国家高程控制网测量精度等级划分为一、二、三、四等, 各等级高程控制宜采用水准测量, 四等及以下可采用电磁波测距三角高程测量; 在工程测量场景中, 五等高程控制可采用卫星定位高程测量。<sup>[1]</sup> 传统的水准测量方法精度较高, 但在地形起伏较大的山区, 实际操作起来费时、费力, 工作效率较低; 卫星定位高程测量受地球曲率、卫星信号等影响, 其测量精度较低, 很难满足测量需求。相比以上两种高程测量方法, 电磁波测距三角高程测量具有高效、作业简单灵活、适用范围广等优点<sup>[2]</sup>。

## 1 电磁波测距三角高程测量原理

地面上两个不同高程的点 A、B (如图 1 所示), A 点的高程为  $H_A$ , 则只需要知道两点的高差  $h_{AB}$ , 再利用公式可得出另一个待测点 B 的高程  $H_B$ <sup>[3]</sup>。当用水准测量方法测定 A、B 两点间的高差  $h_{AB}$  有困难时, 可以利用图中测得的斜距  $S$ 、竖直角  $\alpha$ 、仪器高  $i$ 、棱镜高  $v$ , 依式 (1) 计算  $h_{AB}$ :

$$h_{AB} = S \cdot \sin \alpha + i - v \quad (1)$$

由式 (2) 进而求得待测点 B 的高程  $H_B$ :

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + S \cdot \sin \alpha + i - v \quad (2)$$

考虑地球曲率和大气折光 (合为球气差) 对三角高程测量的影响,  $r$  为大气折光误差 (气差改正:  $r = k(S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R$ ),  $p$  为地球曲率误差 (球差改正:  $p = (S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R$ ), 由此得出球气差改正:

$$f = (1 - k)(S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R \quad (3)$$

式 (3) 中,  $R$  为地球曲率半径,  $k$  为大气折光系数。

结合式 (1) 和式 (3), 得出三角高程观测法计算公式:

$$h_{AB} = S \cdot \sin \alpha + i - v + (1 - k)(S \cdot \sin \alpha)^2 / 2R \quad (4)$$

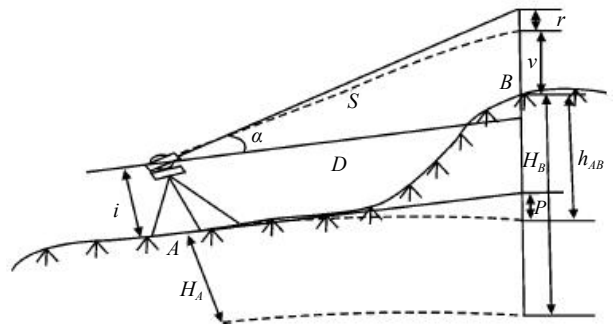


图 1 电磁波测距三角高程测量原理示意图

国家相关规范规定<sup>[4]</sup>: 采用电磁波测距三角高程测量方法, 高程导线可布设为每一照准点安置仪器进行对向观测 (以下简称每点设站) 的路线, 即先在 A 点设站, B 点置棱镜, 计算得出高差  $h_{AB}$  (往测); 然后, 在 B 点设站, A 点置棱镜, 计算得出高差  $h_{BA}$  (返测), 求取往返测高差平均值为两点的高差  $\bar{h}_{AB}$ :

$$\bar{h}_{AB} = (h_{AB} - h_{BA}) / 2 \quad (5)$$

在实际观测中, 考虑往返测两站点时间较短, 故认为  $k$  近似不变, 且往返测测距也近似相等, 得出:

$$(1 - k_1)(S_1 \cdot \sin \alpha_1)^2 / 2R \approx (1 - k_2)(S_2 \cdot \sin \alpha_2)^2 / 2R \quad (6)$$

作者简介: 郑干 (1991-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 工程测量。

式(6)中,下标1为往测观测,下标2为返测观测。结合式(4)、(5)、(6)得出:

$$\bar{h}_{AB} = \frac{1}{2}(S_1 \cdot \sin \alpha_1 - S_2 \cdot \sin \alpha_2 + i_1 - v_1 - i_2 + v_2) \quad (7)$$

因此,在气象条件稳定时,采用电磁波测距三角高程测量每点设站法,有效地消除了球气差的影响<sup>[5]</sup>,减小了测量误差,提高了测量精度。

## 2 实例应用分析

测区位于地形起伏较大的山区,平均海拔约2 685 m,高差约510 m。为在测区建立四等高程控制网,首先在测区收集到SQ02、GPS05、BT03、GPS02四个已知高程点;其次考虑测区地形实际情况,平坦地区采用水准测量方法;最后在地形起伏较大的山区采用电磁波测距三角高程测量每点设站法。外业观测步骤严格按照规范要求实施,测区高程控制网如图2所示。

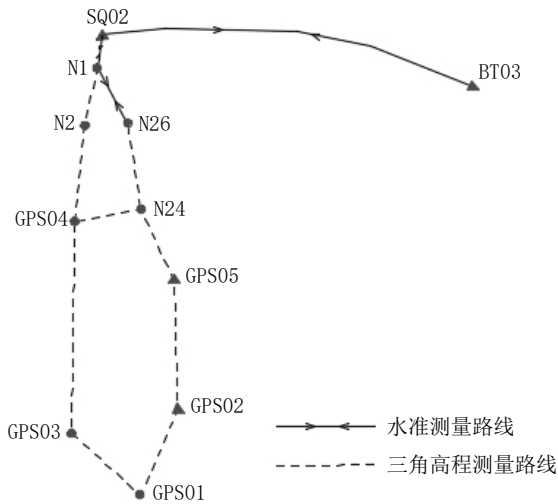


图2 高程控制网布设图

### 2.1 平坦地区水准测量

采用1台Trimble Dini03数字水准仪及配套条码因瓦水准尺进行观测,按照《国家三、四等水准测量规范》中四等水准测量技术要求进行观测,测量数据见表1。

表1 水准测量数据

起点	终点	高差(m)	往返高差不符值(mm)	距离(km)	测站数
SQ02	BT03	-99.3 595	-14.0	6.3 359	138
BT03	SQ02	99.3 455		6.1 371	128
SQ02	N1	15.5 925	11.5	1.3 843	54
N1	SQ02	-15.5 810		1.3 671	48
N1	N26	17.8 645	2.0	0.7 088	16
N26	N1	-17.8 625		0.7 008	16

由表1可知,最大往返高差不符值为SQ02~BT03测段,平均路线长度为6.24 km,实测高差不符值为-14.0 mm,限差为±49.5 mm;最小往返高差不符值为N1~N26测段,平均路线长度为0.71 km,实测高差不符值为2.0 mm,限差为±16.8 mm,可见各测段、路线往返高差不符值均满足规范±20√K(K为测段路线长度,单位为km)。

### 2.2 山区电磁波测距三角高程测量

#### 2.2.1 外业数据采集

本次测量任务采用的仪器为拓普康GTS332W,仪器各项指标均满足国家检定要求。采用“每点设站”高程导线的观测方法,路线为单程,气象数据测定的时间间隔为每条边观测的始末,数据的取用为每边两端的平均值,边长往返各观测两个测回,各边长斜距观测读数误差和测回中数之间的互差分别为10 mm和15 mm,垂直角观测采用中丝法测量,观测4个测回,测回差和指标互差均不超过5″。观测前后,利用钢卷尺对仪器高和棱镜高各量测一次,两次互差不得超过3 mm<sup>[6]</sup>。

实际测量中考虑两待测点之间的通视及观测视线长度等因素,在待测点之间增设部分临时转点,整个高程导线网共计32个测站。实测中对全站仪棱镜常数和气象参数进行设置,以便仪器在观测斜距时内置程序自动改正。

#### 2.2.2 外业数据预处理

各测段往返测高差计算后,应对高程导线测量往返测高差不符值进行计算分析(因观测路线测站较多,只取部分测段进行表述),见表2。

由表2可知,最大往返测高差不符值为N14-GPS03测段,高差不符值为-37.5 mm,限差为±38.3 mm;最小往返测高差不符值为N5-GPS04测段,高差不符值为-0.4 mm,限差为±20.2 mm,可见各测段往返高差不符值均满足规范±45√D(D为测站间或照准间的观测水平距离,单位为km)<sup>[7]</sup>。

表 2 高程导线测量往返测高差不符值

测段	高差 (m)	测段	高差 (m)	高差不符值 (mm)	限差 (mm)
SQ02-N1	15.5 898	N1-SQ02	-15.5 788	11.0	37.3
N1-N2	17.8 277	N2-N1	-17.8 297	-2.0	32.5
N5-GPS04	-11.7 374	GPS04-N5	11.7 370	-0.4	20.2
N14-GPS03	19.9 716	GPS03-N14	-20.0 091	-37.5	38.3
GPS01-N16	-36.4 993	N16-GPS01	36.4 747	-24.6	25.0
N16-GPS02	-91.6 535	GPS02-N16	91.6 595	6.1	43.5
N20-GPS05	-5.8 795	GPS05-N20	5.8 719	-7.7	16.6
N26-N1	-17.8 628	N1-N26	17.8 601	-2.7	32.5
N24-GPS04	7.2 413	GPS04-N24	-7.2 437	-2.4	12.8

2.3 数据平差及精度分析

待外业采集数据处理完成后,内业整体平差采用 CosaLEVEL 水准测量数据处理软件,高程起算数据选取测区 SQ02、GPS05、BT03、GPS02 四个已知高程点,平差结果见表 3。

由表 3 可知,符合线路闭合差实测最大值为 13.45 mm,规范允许限差为 ±78.84 mm; 闭合环线闭合差实测最大值为 -33.20 mm,规范允许限差为 ±88.14 mm,可见整体平差后各测段符合路线、环线闭合差均满足规范  $\pm 20\sqrt{K}$  (K 为测段路线长度,单位为 km) [8]。

表 3 符合路线、环线闭合差平差结果

观测线路	线路总长度 (km)	高差闭合差 (mm)	限差 (mm)
GPS05、N24、N26、N1、SQ02	6.29	1.94	50.16
符合线路 BT03、SQ02、N1、N26、N24、GPS05	12.43	0.45	70.51
GPS02、GPS05、N24、N26、N1、SQ02、BT03	15.54	13.45	78.84
闭合线路 GPS04、N2、N1、N26、N24	5.92	24.92	48.66
GPS02、GPS05、N24、GPS04、GPS03、GPS01	19.42	-33.20	88.14

3 结束语

本文采用电磁波测距三角高程测量方式进行山区高程控制测量,通过对外业观测和内业数据的处理,得出各项技术指标均满足四等高程控制测量相关规范要求,可知平差后的待测点高程值的精度可靠,有效地解决在地形起伏较大的山区高程控制测量较为困难的问题,在类似工程中可以推广应用。

[3] 覃辉,马德富,熊友谊.测量学[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.  
 [4] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.国家三、四等水准测量规范(GB/T 12898-2009)[S].北京:中国标准出版社,2009.  
 [5] 杨伟明.对全站仪三角高程测量方法的分析[J].运输经理世界,2022(14):41-43.  
 [6] 董建鹏,乔伟国,刘继伟.全站仪三角高程测量在工程测量中的应用[J].公路交通科技,2020,16(05):141-142,149.  
 [7] 何建权,吴垠,夏炜.精密三角高程测量误差规避探讨[J].地理空间信息,2022,20(06):121-123.  
 [8] 郑文斌,赵春华,张书锋.三角高程控制测量的方法、应用和精度分析[J].测绘标准化,2025,41(02):131-137.

参考文献:

[1] 住房和城乡建设部.工程测量标准(GB 50026-2020)[S].北京:中国计划出版社,2020.  
 [2] 严伯锋,张立臣,孙久长,等.全站仪三角高程测量的精度分析及其应用[J].岩土工程技术,2021,35(06):351-355,360.