

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200518

中间设站法三角高程测量水尺零点高程方法与实践

杨小明¹, 刘辉², 高峰³, 任毅³, 徐晓磊³

(1.安徽省水文局,安徽合肥 230001;2.安徽大学资源与环境工程学院,安徽合肥 230601;
3.安徽省滁州水文水资源局,安徽滁州 239000)

摘要:在水文测量中,水尺零点高程一般采用四等水准测量,但通常受到现场地形起伏的限制,实施难度大,效率低。以基层水文站工作需求为出发点,根据三角高程测量基本原理,提出了一种采用免棱镜全站仪中间设站法进行水尺零点三角高程测量的新方法,分析了观测精度的主要影响因素,依据误差传播定律进行了精度评定,并以滁州水文站等三个站五组水尺为例进行了工程实践。结果表明:本方法精度指标优于四等水准测量,满足规范要求。

关键词:水尺零点;三角高程测量;中误差;中间设站法;精度评定

中图分类号: P332.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2021)05-0038-05

0 引言

水文站水尺零点高程测量,是水文测验中一项非常重要的基础工作,每年汛前汛后及大洪水过后都需要进行复测和检核^[1]。一直以来,安徽省基层水文站水尺零点高程按照《水文测量规范》(SL58—2014)^[2]要求,用四等水准测量的方法进行测量,但劳动强度大、耗时长、效率较低。近年来,基层测验任务日益繁重,采用新方法测量水尺零点高程,全面降低劳动强度,提升工作效率,便显得尤为重要。

三角高程测量主要适用于起伏较大的地形条件,常规观测方法的精度一般低于水准测量,主要受到以下限制:(1)为提高观测精度,经典三角高程测量一般采用对向观测方法,但水尺是预先埋设在堤坝上,无法进行对向观测;(2)经典三角高程测量一般采用每点设站法或隔点设站法,但受基本水准点与水尺通视条件、精确量取仪器高度困难等限制,也难以实现^[3];(3)为实现成果检核和平差需要,三角高程测量一般布设成连续设站的闭合或附合路线,但水尺固定的安装位置限制了路线布设方式。

随着现代测绘科技的发展,高精度免棱镜全站仪

的出现,使用三角高程方法进行水尺零点高程测量成为可能。基于此,本文结合基层水文站现场条件,提出了一种采用免棱镜全站仪中间设站法进行水尺零点三角高程测量的新方法,根据测量误差传播定律,分析了该方法的精度指标及误差来源,并通过工程实践,验证了该方法的可靠性。

1 中间设站法三角高程测量原理与方法

1.1 基本原理

三角高程测量的基本思想是根据由测站向照准点所观测的垂直角(或天顶距)和它们之间的水平距离,计算测站点与照准点之间的高差。这种方法工作效率高,简便灵活,受地形条件的限制较少,但易受外界条件影响,故适用于地形相对复杂,水准测量无法进行的区域^[4]。

由图1所示,分别在点A和点B上架设全站仪和棱镜,通过观测A、B两点的距离和垂直角,则可计算出A、B两点的高差为:

$$h_{AB} = S \sin \alpha_{AB} + CS^2 \cos^2 \alpha_{AB} i - v \quad (1)$$

在小范围内,可忽略地球曲率和大气折光的影响,则为:

收稿日期:2020-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(K110139012);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0003)

作者简介:杨小明(1979—),男,湖北枣阳人,工学学士,工程师,注册测绘师,主要从事水文监测、水土保持等方面的工作。E-mail:75301681@qq.com

通信作者:刘辉(1982—),男,山东肥城人,工学博士,副教授,主要研究方向为精密工程测量和矿山开采沉降。E-mail:lhui99@aliyun.com

$$h_{AB} = S \sin \alpha_{AB} + i - v \quad (2)$$

式中: h_{AB} 为AB两点之间高差; S 为两点间斜距; D 为两点间平距; C 为球气差改正系数; i 为仪器高; v 为棱镜高。

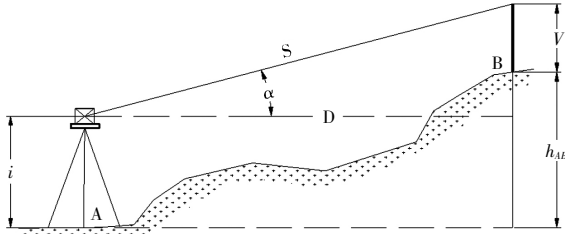


图1 三角高程测量原理

Fig.1 Principle of trigonometric leveling

若在一个测站上,有多个目标点需同时观测,可在一个已知点上设置观测棱镜作为后视,采用全站仪依次观测多个目标点,便可得到多个目标点的高程。如:在水尺零点观测中,可将临近1组水尺作为观测目标,在距离相同处架设免棱镜全站仪,即可获得已知水准点与水尺零点之间的高差(见图2)。

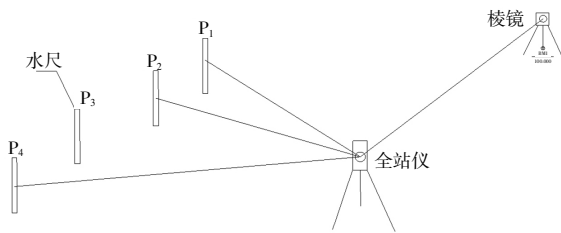


图2 中间设站法三角高程测量方法

Fig.2 Trigonometric leveling method by setting station in the middle of water gauges

根据式(1),测站与水准点之间高差的 h_0 为:

$$h_0 = S_0 \sin \alpha_0 + C S_0^2 \cos^2 \alpha_{AB} + i_0 - v_0 \quad (3)$$

测站与水尺零点之间高差 h_n 为:

$$h_n = S_n \sin \alpha_n + C S_n^2 \cos^2 \alpha_n + i_n - v_n \quad (4)$$

式中: n 为水尺编号。

式(3)与式(4)相减,即求得水准点与水尺零点之间的高差。由于两次观测中,测站为中间站点,前后视观测时无需移动,仪器高相同,即: $i_0 = i_n$,水尺零点直接采用免棱镜功能观测,即棱镜高 $v_n = 0$,则水准点与各水尺之间的高差可表示为:

$$h_{0n} = S_0 \sin \alpha_0 - S_n \sin \alpha_n + C (S_0^2 \cos^2 \alpha_0 - S_n^2 \cos^2 \alpha_n) - v_0 \quad (5)$$

将 C 值代入,式(5)变为:

$$h_{0n} = S_0 \sin \alpha_0 - S_n \sin \alpha_n + \frac{1-k}{2R} (S_0^2 \cos^2 \alpha_0 - S_n^2 \cos^2 \alpha_n) - v_0 \quad (6)$$

式中: C 为球气差改正系数; k 为大气折光系数; R 为地球平均曲率半径。

1.2 观测方法和注意事项

为提高观测精度,采用正倒镜多测回观测法进行外业观测,一个测回的观测步骤为:首先采用正镜照准棱镜,读取读数,然后依次测量各水尺 P_1, P_2, \dots, P_n ,完成上半测回;然后再倒镜依次测量 P_n, \dots, P_1, P_2 ,最后测量棱镜,完成下半测回观测。

根据三角高程测量方法及观测要求,在外业观测中一般要注意:(1)尽量选择测角测距精度高、性能稳定的全站仪进行测量,否则应增加测回数;(2)确保站点与棱镜及水尺相互通视,一般竖直角以不超过 20° 为宜^[5];(3)对于棱镜杆高更应不同方向多次量取,力求准确;(4)开始观测前,精确观测气象参数及并设置 DEM 参数;(5)各测回同一组水尺应尽量测量同一刻度值处;(6)每测回均应重新架设仪器,高度变化不小于 10cm ;(7)计算各测回较差,一般不超过 3mm 为宜。

在实际生产中,四等水准的方法测量水尺零点高程需要 $2\sim 3$ 人,1人司镜,2人扶尺,耗费时间较长,该方法则具有如下优势:(1)设站灵活,基本不受通视条件限制,一站完成,不用频繁搬站;(2)不用量取仪器高,避免了仪器高量取误差,提高了测量精度;(3)所需人员较少,只需1人操作仪器,不需要扶尺和记录人员;(4)免棱镜测量属于无接触测量,人员不用到达水尺即可完成,无须人员在河边频繁跑动,降低了安全风险。

2 精度分析

2.1 影响测量精度的误差因素

根据测量误差传播定律,由式(6)可知(略去微小值),各水尺与水准点高差的中误差可由式(7)表示:

$$m_{h_{0n}}^2 = m_{s_0}^2 \cdot \sin^2 \alpha_0 + \frac{(S_0 \cos \alpha_0 m_{\alpha_0})^2}{\rho^2} + m_{s_n}^2 \cdot \sin^2 \alpha_n + \frac{(S_n \cos \alpha_n m_{\alpha_n})^2}{\rho^2} + \frac{S_0^4 \cos^4 \alpha_0 + S_n^4 \cos^4 \alpha_n}{4R^2} m_k^2 + m_{v_0}^2 \quad (7)$$

式中: $m_{h_{0n}}$ 为单向观测高差中误差; m_s 为测距中误差; m_{α} 为测角中误差; m_v 为棱镜高量取误差; m_k 为大气折光系数中误差; ρ 为角度与弧度转换常数,取 206265 ; R 为地球平均曲率半径,取 6371km 。

从式(7)可以看出,三角高程测量的误差影响因素如下:

(1)测距误差。测距误差对高差的影响与垂直角有关,垂直角越大,其影响越大。一般全站仪的测距精度都非常高,它对高差精度的影响很小。以徕卡 TS09 全站仪为例,测距标称精度 $m_{测}$:有棱镜 $1\text{mm}+1\text{ppm}\cdot S$ (S 为距离, km), 1mm 为固定误差, 1ppm 为比例误差,下同),免棱镜 $2\text{mm}+2\text{ppm}\cdot S$;棱镜的偏心误差 $m_{偏}$, $m_{偏}$ 的经验值为 1.5mm ,由误差传播定律可知:

$$m_s^2 = m_{测}^2 + m_{偏}^2 \quad (8)$$

不同距离的测距精度估算见表 1。

表1 测距精度估算统计
Table1 Statistics of ranging accuracy estimation

s/m	有棱镜		免棱镜		
	$m_{测}/\text{mm}$	m_s/mm	$m_{测}/\text{mm}$	$m_{偏}/\text{mm}$	m_s/mm
10	1.01	1.01	2.02	1.5	2.52
20	1.02	1.02	2.04	1.5	2.53
50	1.05	1.05	2.10	1.5	2.58
100	1.10	1.10	2.16	1.5	2.63

(2)测角误差。垂直角的观测误差对高差的影响随着水平距离的增加正比例增大,其影响远远超过测距误差,是制约高差精度的最主要来源。测量水尺距离一般很短,不会超过 100m ,可增加测回数,来提高测角精度。

TS09 全站仪标称一测回测角中误差 $1''$,则半测回测角中误差 $1.4''$ 。

(3)棱镜高量取误差。采用徕卡专用对中杆,经过多次量取,误差在 $0\sim 0.3\text{mm}$;取最大误差 0.3mm 。

(4)大气折光误差。大量的实测资料统计表明, k 值在 $0.08\sim 0.14$ 之间,经验值为 0.13 ,变化值通常在 $0.03\sim$

0.05 。通过计算,距离 100m 时,大气折光误差导致的距离误差 0.001mm ,在 200m 时,则为 0.016mm ,故在短距离时候,该误差可以忽略。

2.2 高差精度估算

以正倒镜观测作为一个测回,正倒镜高差均值为测回值,根据误差传播定律可知:

$$\text{测回偶然中误差为: } \frac{\sqrt{2}}{2} m_{h\text{单}} \quad (9)$$

水准仪测量水尺时,一般视距非常短,坡降较大,用测站数计算限差。而三角高程每站属于不等精度观测,无法用单站中误差与水准进行精度比较,故事先统计了滁州水文水资源局约 20 组水尺视距,并预估了同等距离下水准仪站数。本文通过两方面来验证方法的可行性:一是估算全站仪两个测回高差较差中误差,与水准测量的往返不符值进行比较,二是估算全站仪两个测回高差均值中误差,与水准仪测量偶然中误差进行比较。由误差传播定律可以求得,2 个测回高差较差中误差为 $m_{h\text{单}}$,2 个测回高差均值中误差为 $0.5m_{h\text{单}}$ 。根据《水文测量规范》^[2],水尺往返测量不符值限差 $M_{h\Delta}$ 为 $3\sqrt{n}$,测量精度应达到限差的 2 倍,即 $1.5\sqrt{n}$,则水尺往返高差均值偶然中误差为 $0.75\sqrt{n}$,即单站的高差偶然中误差为 0.75mm 。误差估算时, a 取较大角,前后距离相等,估算数据见表 2、3。

从表 2 可知,即使竖直角很大,全站仪两测回较差中误差也是小于水准测量往返不符值;从表 3 知,在距离较短,竖直角较大时,全站仪两测回均值中误差略大于水准测量往返均值偶然中误差限差,为保险起见,测量时竖直角不宜超过 20° 。通过上述两差的初步验证,免棱镜全站仪中间设站法三角高程测量的精度不低于

表2 全站仪两测回高差较差偶然中误差估算

Table2 Estimation of accidental mean square errors of height differences between two sets of total station measuring

s/m	α									站数 n	$3\sqrt{n}/\text{mm}$
	1°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°			
10	0.6	0.7	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.2	2	4.2	
20	0.7	0.9	1.0	1.3	1.7	2.2	2.7	3.3	3	5.2	
50	1.1	1.2	1.2	1.5	1.9	2.3	2.8	3.4	6	7.4	
100	2.0	2.0	2.1	2.2	2.5	2.8	3.2	3.7	9	9.0	

注:取 2 倍中误差为极限误差;经过对滁州水文水资源局近 20 组水尺统计,大约 $7\sim 10\text{m}$ 需要架设 1 次水准仪。

表3 全站仪两测回均值中误差估算

Table3 Estimation of mean square error of two sets of total station measuring

s/m	α									站数 n	$0.75\sqrt{n}/\text{mm}$
	1°	2°	5°	10°	15°	20°	25°	30°			
10	0.3	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.6	2	1.1	
20	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.3	1.6	3	1.3	
50	0.6	0.6	0.6	0.8	0.9	1.2	1.4	1.7	6	1.8	
100	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.9	9	2.3	

注:取2倍中误差为极限误差。

水准测量水尺的精度,完全满足规范要求,该方法是可行的。同时,对2"全站仪的中误差也进行了估算,由于距离很小,与1"全站仪的数据相差不大,受时间和篇幅限制,未详细陈述。

3 工程实践

为进一步验证使用免棱镜全站仪中间架站进行单程三角高程测量水尺的各项精度指标,选取滁州水文水资源局所属滁州站、全椒站、汊河集闸站五组不锈钢水尺进行测量。水尺共计45根,基本水准点距最近水尺间距5~20m。使用徕卡TS09全站仪(1"精度)按上述方法测2个测回,同步使用徕卡NA730光学水准仪(每公里

往返测量偶然中误差1.5mm)按照三等水准测量要求进行水尺零点高程测量。

通过表4中的测量成果及精度数据,经过对比分析可以看出:

(1)通过实测数据求取的全站仪两测回高差较差与估算的两测回高差较差中误差基本一致,均远小于相同路线长度的水准测量往返不符值,更远小于规范的允差10mm(水准测量11站时)。

(2)通过全站仪两测回高差较差求取的每公里高差均值偶然中误差为2.9mm,即使以极小的距离来定权,仍然满足规范三等水准3mm的限差,远优于四等水准5mm的限差;每站2测回高差均值偶然中误差在视

表4 水尺零点高程成果及精度统计

Table4 Statistics of zero point evaluation of water gauges and its precision

站名	水尺编号	视距	全站仪			三等水准		往返不符值		偶然中误差		全中误差	
			一测回	二测回	测回均值	测站数	往返均值	测回较差	水准允差	测回均值	水准允差	与水准较差	限差
滁 州 站	P ₁	14.9	17.221	17.221	17.221	1	17.219	0.2	3.0	0.3	0.8	2.0	5.0
	P ₂	17.3	16.528	16.528	16.528	1	16.527	0.1	3.0	0.4	0.8	1.0	5.0
	P ₃	19.8	15.684	15.683	15.684	2	15.680	-0.3	4.2	0.4	1.1	3.5	5.0
	P ₄	22.3	14.872	14.871	14.872	2	14.868	0.8	4.2	0.4	1.1	3.5	5.0
	P ₅	24.6	14.178	14.178	14.178	2	14.176	1.1	4.2	0.4	1.1	2.0	5.0
	P ₆	27.3	13.444	13.445	13.445	2	13.442	-0.7	4.2	0.5	1.1	2.5	5.0
	P ₇	29.8	12.773	12.773	12.773	3	12.770	0.2	5.2	0.5	1.3	3.0	5.0
	P ₈	37.4	11.965	11.964	11.965	3	11.961	1.2	5.2	0.6	1.3	3.5	5.0
	P ₉	40.4	11.093	11.093	11.093	4	11.090	0.1	6.0	0.6	1.5	3.0	5.0
	P ₁₀	43.5	10.135	10.135	10.135	4	10.136	-1.1	6.0	0.6	1.5	-1.0	5.0
	P ₁₁	46.4	9.262	9.262	9.262	4	9.260	0.5	6.0	0.6	1.5	2.0	5.0

根据偶然中误差计算公式,求 $M_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{1}{4n} \left[\frac{\Delta\Delta}{R} \right]}$ 得全站仪每公里高差偶然中误差为2.9mm,略优于《三四等水准测量规范》^[6]中三等水准3mm的限差,远优于四等水准5mm的限差。

注:①表4中距离单位、高程单位为m,各项较差、允差、限差及中误差单位均为mm;②全站仪两测回高差均值偶然中误差根据距离定权,通过每公里偶然中误差求出;③全站仪竖直角均介于10°~20°;④实践中以三等水准测量(水尺测量要求四等,试验提高了测量等级)的高差为真值,三角高程求取的高差与之较差值即为全中误差;⑤受篇幅限制,仅列举滁州站试验数据,全站仪每公里偶然中误差根据全部45组数据计算。

距较小时略优于估算中误差,在视距较大时远优于估算中误差,亦小于相同路线长度的水准测量往返均值偶然中误差,更小于规范的允差 2.5mm(水准测量 11 站时)。

(3) 水位观测的精度要求 10mm,测量精度应至少提高 2 倍,即水尺零点高程测量的全中误差应不大于 5mm。通过表 4 可以看出,通过实测数据计算的全中误差(即与水准较差)100%小于 5mm,90%数据小于 3mm,50%数据小于 2mm。

(4) 通过上述分析可以看出,各项精度指标均与预估精度一致,优于或达到水准测量水尺的精度,满足规范中各项限差,充分验证了该方法可行性与可靠性。

通过偶然中误差与全中误差数据可以看出,在这种超短距离三角高程测量中,系统误差占全中误差的比例较大,说明除了仪器本身的偶然误差和系统误差以外,测量中还带入了其他系统性误差,实践中发现了例如水尺安装不垂直、刻度不标准、水尺零点差等问题。

4 结论

本文以基层水文站水尺零点高程测量为研究对象,提出了一种采用免棱镜全站仪进行连续设站三角高程测量的新方法,基于误差传播定律,分析了该方法的精度及关键影响因素,从工程实践可以看出,免棱镜全站仪中间设站法三角高程测量水尺零点高程的方法精度可靠,提升了工作效率,降低了安全风险,是完全可行的。在《水文测量规范》总则 1.0.7 中指出“采用先进的测量仪器和新测绘技术时,精度不低于本标准相应

的要求”,通过理论推导与工程实践数据验证,该方法精度优于规范要求,为推广应用这种方法提供了依据。

参考文献:

- [1] 黄辰虎,陆秀平,边刚,等. 中短期验潮站验潮零点不规则漂移精密处理[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018,43(11):1673-1680. (HUANG Chenhu, LU Xiuping, BIAN Gang, et al. Precise processing on the irregularly drift of the zero point of the medium-short tide gauge [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018,43(11):1673-1680.(in Chinese))
- [2] SL58-2014,水文测量规范[S]. (SL58-2014, Specification for Geodesic Survey in Hydrology [S]. (in Chinese))
- [3] 徐亚明,施斌,王代雄,等. 改进的三角高程法在跨海高程传递中的应用[J]. 测绘通报, 2014(4):65-67+78. (XU Yaming, SHI Bin, WANG Daixiong, et al. An improved trigonometric leveling method for cross-sea elevation transfer [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(4):65-67+78. (in Chinese))
- [4] 刘辉,何春桂,邱光举,等. 山区连续设站三角高程测量方法与试验[J]. 煤炭科学技术, 2011,39(1):111-114. (LIU Hui, HE Chungui, QIU Guangju, et al. Trigonometrical high level measuring method and experiment on continued stations set in mountain area [J]. Coal Science and Technology, 2011,39(1):111-114.(in Chinese))
- [5] 梁静,王铜,董岚,等. 棱镜瞄准特征选择引起的全站仪测角误差分析[J]. 测绘通报, 2019(S1):222-226. (LIANG Jing, WANG Tong, DONG Lan, et al. Analysis of the angular surveying error caused by the characteristics of prism aimed from total station [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S1):222-226. (in Chinese))
- [6] GB/T 12898-2009,国家三、四等水准测量规范[S]. (GB/T 12898-2009, Specification for the Third and Fourth Order Leveling [S]. (in Chinese))

Method and Practice of Trigonometric Leveling by Setting Stations in the Middle of Water Gauges

YANG Xiaoming¹, LIU Hui², GAO Feng³, REN Yi³, XU Xiaolei³

(1. Anhui Provincial Bureau of Hydrology, Hefei 230001, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Chuzhou Bureau of Hydrology and Water Resources of Anhui Province, Chuzhou 239000, China)

Abstract: The fourth grade leveling is generally used in the zero point elevation survey of water gauge in hydrologic survey, but it is usually restricted by the topographic relief on site, which is difficult to implement and has low efficiency. Based on the working requirements of basic hydrological stations and the principle of trigonometric leveling, this paper proposed a new method of trigonometric leveling by setting station in the middle of water gauges for zero point measuring, and analyzed the main influencing factors. The accuracy was evaluated according to the error propagation law. At last, a engineering practice was carried out by taking five groups of water gauges of three stations including Chuzhou hydrological station as an example. The results show that the accuracy indexes of the new method are superior than that of the fourth grade leveling, which can meet the specification requirements.

Key words: zero point of water gauge; trigonometric leveling; mean square error; intermediate station method; accuracy evaluation