

复杂测区条件下精密三角高程测量技术的研究

段恩新

(中铁十四局集团有限公司, 山东 济南 270004)

摘要:在精密三角高程测量的原理、误差来源及误差分析的基础上,对光电三角高程测量及二等水准测量的精度进行估算,探讨了精密三角高程测量在特定条件下代替二等水准测量的关键问题及可行性,提出了采用徕卡 TCA2003 全站仪具体操作方法及要求,并在向莆铁路控制点的水准联测中进行了验证,取得了较好的经济效益。

关键词:全站仪;精度分析;二等水准;三角高程测量

中图分类号:P204 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2012)03-0098-05

1 概述

三角高程测量是指由测站向照准目标观测垂直角和它们之间的水平距离及斜距,计算测点与照准点高差的一种方法^[1]。这种方法具有速度快,操作简单灵活,受地形条件限制较少,特别在许多水准测量十分困难的高山、重丘地区,采用此种方法能十分方便进行高程测量。因此很多单位采用光电测距三角高程测量进行高精度水准测量的科研实验和生产作业。在铁路建设中2007年中铁二院结合渝利线高程控制测量开展了《采用三角高程进行山区三等水准测量方法的研究》,并通过试验验证山区采用光电测距三角高程测量进行三等水准测量是可行的。中铁四院与武汉大学共同完成“精密三角高程测量研究”的课题,并自2006年开始先后在大瑶山隧道成功实践,证明了精密三角高程测量成果完全满足二等水准测量的要求^[2,3]。在结合各研究成果的基础上,采用徕卡 TCA2003 全站仪进行光电三角高程测量(对向观测)可以代替二等水准测量;并成功运用于向莆铁路 FJ-3A 标 GCPI164-1 控制点与 FJ-5B 标 GCPI166 控制点的水准联测中,并取得了可观的经济效益。

2 精密三角高程测量的原理和方法

2.1 三角高程测量原理

光电测距三角高程测量与普通三角高程测量一样,均属于间接高程测量,都要通过测定两点间连线的天顶角或竖直角、边长(斜距或平距),以及量测仪器高和棱镜高,在计算高差时还要顾及地球曲率及大气折光的影响,所有观测与量测项目将综合影响施测高差的精度。测量原理如图1所示。

当采用三角高程测量时,计算公式为

$$\Delta h = S \cos Z_{1.2} + \frac{1-k}{2R} (S \sin Z_{1.2})^2 + i - v \quad (1)$$

式中, S 为斜距; Z 为天顶角; i 为仪器高; v 为棱镜高; k 为大气折光系数。由式(1)可知,在三角高程测量中,影响高差主要因素为竖直角测量、距离测量、大气折光系数及仪器高量取。

2.2 精密三角高程测量的主要方法

精密三角高程测量主要采用单向观测法和对向观测法,后者更适合高精度的高程控制测量^[4]。对向观测即将全站仪置于1点,棱镜置于2点,观测2点测取高差;再将仪器置于2点,棱镜置于1点,观测1点测取高差,然后取两高差中数作为观测结果。根据公式(1)则由1点观测2点的高差为

收稿日期:2012-04-20

作者简介:段恩新 男 1968年出生 高级工程师

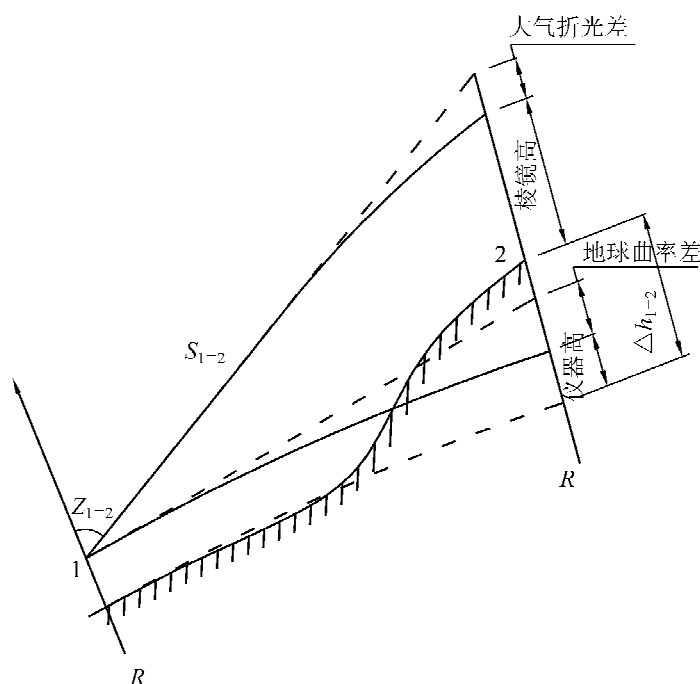


图1 光电测距三角高程测量原理

$$\Delta h_{1-2} = S \cos Z_{1-2} + \frac{1 - k_{1-2}}{2R} (S_{1-2} \sin Z_{1-2})^2 + i - v \quad (2)$$

由2点观测1点的高差

$$\Delta h_{2-1} = S \cos Z_{2-1} + \frac{1 - k_{2-1}}{2R} (S_{2-1} \sin Z_{2-1})^2 + i - v \quad (3)$$

则两点间的高差为

$$\Delta h = (\Delta h_{1-2} + \Delta h_{2-1})/2 \quad (4)$$

3 精密三角高程测量的精度分析

3.1 大气折光的影响

根据以往经验,如果对向观测是在相同的观测条件下进行时,大气折光系数 $K_{1-2} \approx K_{2-1}$ 。以 $S_{1-2} \sin Z_{1-2}$ 和 $S_{2-1} \sin Z_{2-1}$ 为对向观测1[#]、2[#]两点间的平距,也可近似相等,依据公式(1)(2)(3)故有

$$\frac{1 - k_{1-2}}{2R} (S_{1-2} \sin Z_{1-2})^2 \approx \frac{1 - k_{2-1}}{2R} (S_{2-1} \sin Z_{2-1})^2 \quad (5)$$

当三角高程测量采用对向观测时,计算公式为

$$\Delta h = [(S_{1-2} \cos Z_{1-2} + i_1 - v_2) - (S_{2-1} \cos Z_{2-1} + i_2 - v_1)]/2 \quad (6)$$

因此,由式(1)、(6)可知:若往测高差为正(负)时,球气差改正后会使高差增大(减小);这时返测高差为负(正),球气差改正后会使高差减小(增大);往返高差(对向)取均值则会完全抵消球气差的影响。

3.2 测角误差

测角误差(其中包括折光影响在内),是对高差精度影响的决定因素。因此,外业测量中应加以充分重视。根据以往经验采用2"的全站仪两测回测角精度可达到1.5",如果采用0.5"的全站仪两测回测角精度可达到0.35"。因此,投入高精度仪器可最大限度的降低测角误差的影响。

全站仪望远镜瞄准误差是影响测角精度的另一个主要因素。测量过程中当视线长度超过300 m时,人眼的瞄准误差将显著增大;超过500 m时,就必须用特制大觇牌作为照准目标。然而,复杂山区光电三角高程测量视线长度大部分都在700 m左右。因此,利用上述消除照准误差的传统做法已经很难满足二等光电三角高程测量的精度要求。所以利用徕卡TCA2003全站仪先进的自动目标识别功能(ATR),才能

与测角精度匹配;使光电三角高程对向观测代替二等水准测量成为可能。目前徕卡 TCA2003 全站仪就具有以上功能。其自动目标识别功能(ATR)的精度指标为:测角 $0.5''$,测距 $1 \text{ mm} + 1 \text{ mm}$,识别功能为 1 mm ($<200 \text{ m}$)、 1.2 mm ($<500 \text{ m}$)、 2.4 mm ($<1\,000 \text{ m}$),对点器 $1.0 \text{ mm}/1.5 \text{ m}$,补偿器范围 $\pm 4'$ 。

徕卡 TCA2003 全站仪自动观测过程中,为了减少测量时间,当望远镜十字丝与棱镜中心有小量偏差时就停止转动仪器(该偏差可达 5 mm),然后由 ATR1 测出十字丝与棱镜中心的偏移量及大气折光的影响并对水平角和垂直角进行相应改正。因此,在进行单向光电测距三角高程测量时,高差计算公式中不再考虑大气折光影响。

3.3 测距误差

光电三角高程测量最显著的特点,是边长测量具有很高的精度。所以测距误差相对于测角误差来说,对高差精度的影响很小,几乎可以忽略不计。

3.4 仪高及棱镜高误差

仪高及棱镜高的量测精度,一般在对中杆上直接读取或采用其它精密测量方法均可达到 1 mm 精度。但在施工现场测量中,测量人员习惯将平面与高程控制,通过导线测量的方法同时进行;棱镜也大多采用三角架基座架设。因此,为达到棱镜高量测精度 $\pm 1 \text{ mm}$ 的要求,测量过程中可以采取以下措施进行保证。

由于棱镜中心至棱镜觇板外侧边垂直距离是固定值,当现场量取棱镜觇板外侧边至测点斜长后,就与棱镜中心至测点垂直高构成一直角三角形如图 2 所示,通过三角形勾股定理即可计算出棱镜垂直高。精度完全能够保证 $\pm 1 \text{ mm}$ 的要求。

3.5 精度估算

通过以上分析对光电三角高程测量对向观测精度估算如下:首先,根据误差传播定律对式(2)式(3)进行偏导,并转化为中误差关系式得

$$m_{\Delta h}^2 = \frac{1}{4} \left[(S_{1-2} \sin Z_{1-2} / \rho)^2 m_{Z_{1-2}}^2 + \cos^2 Z_{1-2} m_{S_{1-2}}^2 + (S_{2-1} \sin Z_{2-1} / \rho)^2 m_{Z_{2-1}}^2 + \cos^2 Z_{2-1} m_{S_{2-1}}^2 + m_{g_1}^2 + m_{g_2}^2 \right] \quad (7)$$

式中, $g_1 = i_1 - v_2$; $g_2 = i_2 - v_1$ 。考虑到 $m_{Z_{1-2}}^2 = m_{Z_{2-1}}^2 = m_Z^2$, $m_{S_{1-2}}^2 = m_{S_{2-1}}^2 = m_S^2$, $m_{g_1}^2 = m_{g_2}^2 = m_g^2$, $S_{1-2} \sin Z_{1-2} = S_{2-1} \sin Z_{2-1} = D$, $Z_{1-2} \approx Z_{2-1} = Z$,则式(3)变成

$$m_{\Delta h}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{D}{\rho} \right)^2 m_Z^2 + \frac{1}{2} \cos^2 Z m_S^2 + \frac{1}{2} m_g^2 \quad (8)$$

由式(5)计算不同距离及不同天顶距对所测高差的影响。具体数值见表 1(取 $m_z = \pm 0.4''$, $m_s = 1 + 1 \text{ PPM} \cdot S$, $m_{\text{仪高}} = 1 \text{ mm}$, $m_{\text{棱高}} = 1 \text{ mm}$, $m_g = 1.4 \text{ mm}$)。

表 1 光电三角高程对向观测高差精度计算表

距离/ m	天顶角 $Z 87^\circ$					天顶角 $Z 70^\circ$					二等水准复测 限差
	测角 影响	测边 影响	仪站高	m_h	限差	测角 影响	测边 影响	仪站高	m_h	限差	
200	0.075	0.002	0.98	1.03	2.06	0.075	0.084	0.98	1.07	2.13	2.68
300	0.169	0.002	0.98	1.07	2.15	0.169	0.099	0.98	1.12	2.23	3.29
400	0.301	0.003	0.98	1.13	2.27	0.301	0.115	0.98	1.18	2.36	3.79
600	0.677	0.004	0.98	1.29	2.58	0.677	0.150	0.98	1.34	2.69	4.65
800	1.203	0.004	0.98	1.48	2.96	1.203	0.190	0.98	1.54	3.08	5.37
1 000	1.880	0.005	0.98	1.69	3.39	1.880	0.234	0.98	1.76	3.52	6.00
1 200	2.708	0.007	0.98	1.92	3.84	2.708	0.283	0.98	1.99	3.99	6.57

表 1 中数据显示:①测角误差对高差影响显著,测距误差影响不大。②天顶角大小对高差影响不大可不予限制。③受全站仪自动瞄准精度限制对向观测距离不允许超过 $1\,000 \text{ m}$ 。由表 1 中计算结果可知。在距离 $200 \sim 1\,000 \text{ m}$ 之内,采用徕卡 TCA2003 全站仪进行光电三角高程测量(对向观测)可以代替二等

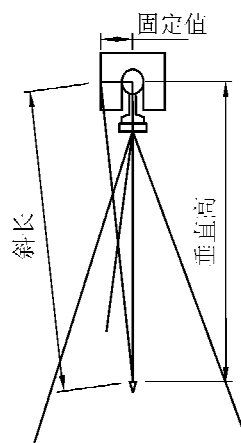


图 2 棱镜高量取原理

水准测量。

具体操作要求:采用自动目标识别功能(ATR)照准目标、仪高及棱镜高量测精度 $\pm 1.0\text{ mm}$ 、对向观测高差较差 $20\sqrt{L}$ 、竖直角大小对精度影响不大在作业时一般不予限制,但考虑到全站仪系统误差(竖轴、横轴、视准轴等)与竖直角大小成正比的影响,复杂环境下测量时竖直角宜限制在 20° 以内。观测的主要技术要求为指标差较差 $5''$,垂直角较差 $5''$,测距较差 3 mm ,高差较差为 $\pm 4\sqrt{D}$, D 为视线长度。

4 精密三角高程测量的应用实例

向莆铁路地处戴云山山脉,可谓山高路峭、沟壑丛生,测区条件十分复杂。其中向莆铁路 FJ-3A 标 GCPI164-1 控制点与 FJ-5B 标 GCPI166 控制点的水准联测中,受高山的阻隔使直线距离仅 3.1 km 的两相邻高程点,要绕行 200 km 的水准线路才能完成。长距离测量增加了测量人员劳动强度及测量费用,多测站又降低了测量精度,给高程测量带来一定问题^[5]。

在经过分析并咨询资深测量专家,控制距离 $200\sim 1\,000\text{ m}$ 之内,采用徕卡 TCA2003 全站仪进行光电三角高程测量(对向观测)成功的替代了二等水准测量。实施后测量线路仅有 3.8 km 的高程测量路线,测量成果见表2。

表2 三角高程测量计算书

测站	目标	竖直角	斜距/m	平距/m	仪高/m		镜高/m		高差/mm	实测高程/m	设计高程/m
					实测	修正	实测	修正			
GCPI164-2	ZD1	$-0^\circ 39' 20''$	412.668	412.641	1.562	1.559	1.486	1.483	-4.631 9	254.5321	254.532 1
ZD1	GCPI164-2	$0^\circ 39' 52''$	412.672	412.644	1.467	1.464	1.639	1.637	4.6279	249.902 2	
ZD1	ZD2	$13^\circ 19' 36''$	428.363	416.822	1.467	1.464	1.393	1.390	98.826 7		
ZD2	ZD1	$-13^\circ 20' 30''$	428.386	416.830	1.515	1.512	1.509	1.506	-98.832 9	348.732 0	
	ZD3	$12^\circ 53' 16''$	510.313	497.449	1.515	1.512	1.468	1.465	113.889 8		
ZD3	ZD2	$-12^\circ 53' 35''$	510.311	497.454	1.454	1.451	1.510	1.507	-113.902 6	462.628 2	
	ZD4	$19^\circ 59' 51''$	187.054	175.774	1.454	1.451	1.382	1.379	64.0435		
ZD4	ZD3	$-19^\circ 59' 12''$	187.037	175.774	1.441	1.438	1.567	1.564	-64.053 4	526.676 7	
	ZD5	$8^\circ 43' 13''$	351.061	347.000	1.441	1.438	1.512	1.509	53.1633		
ZD5	ZD4	$-8^\circ 42' 4''$	351.039	347.002	1.43	1.426	1.508	1.505	-53.173 9	579.845 3	
	ZD6	$-2^\circ 46' 25''$	859.731	858.729	1.43	1.426	1.420	1.417	-41.536 0		
ZD6	ZD5	$2^\circ 46' 14''$	859.735	858.725	1.46	1.457	1.547	1.544	41.529 9	538.312 4	
	GCPI166	$1^\circ 39' 58''$	1 172.332 1	1 171.830	1.471	1.468	1.660	1.658	34.009 5		
CPI166	ZD6	$-1^\circ 40' 15''$	1172.335	1171.842	1.605	1.602	1.508	1.505	-33.974 6	572.304 4	572.299 0

表2中可以看到部分测站的高差较差值超限,造成超限的原因经分析是由于大气折光系数(仪器默认为 $k=0.13$)选取不准造成的对向观测高差较差超限;但是球气差在对向观测高差取均值后完全可以消除,对最终测量精度不会产生影响。所以对超限的测站可再进行一组对向观测,只要两组对向观测高差平均值较差满足 $\leq 4\sqrt{D}$ 的要求,则不必强求同组之间对向观测高差较差超限的问题。

2011年11月15日组织测量人员对贯通后乌口岭隧道进行了贯通测量,所测贯通高程误差为 $+2.3\text{ cm}$,满足《高速铁路工程测量规范》中 $\pm 2.5\text{ cm}$ 的要求,达到了预期目的。贯通成果见表3。

5 经济分析

光电测距三角高程导线测量方法较普通高精度电子水准测量,每套设备增加约为30万元左右,但效果是显著的。对于山区中二等水准测量与精密三角高程测量效费比较,以向莆铁路 FJ-3A 标 GCPI164-1 点与 FJ-5B 标 GCPI166 点高程联测过程中的实际应用情况为例进行分析,结果表明采用二等水准测量需要总的时间为50个工作日,而采用精密三角高程测量仅需2个工作日。

6 施工体会

精密三角高程测量按照三角高程测量的基本原理,采用自动照准的高精度测量机器人(TCA2003)对向观测基本上可以消除或大大的削弱大气折射及其他因素的影响。在距离 $200\sim 1\,000\text{ m}$ 之内,采用徕卡

TCA2003 全站仪进行光电三角高程测量(对向观测),严格规范操作,可以代替二等水准测量。通过在复杂测区条件下测量时间实践,精密三角高程测量具有普通水准测量无法比拟的高效性优势,在高程传递上实现高速快捷,由此带来的经济效益也是可观的。

表 3 光电三角高程测量计算表(乌口岭隧道贯通复测)

测站	目标	竖直角	斜距	平距	仪高	镜高	高差	高差限差/mm	实测高程
GCPI164-2	A-1	7°3'1.5"	148.593 1	147.469 1	1.499	1.699	18.040 4	11.6	242.196 8
A-1	GCPI164-2	-6°58'12.7"	148.564	147.466 4	1.548	1.557	-18.036 0	11.6	260.235 0
A-1	WKL-2	0°13'44.6"	199.550 9	199.549 3	1.548	1.740	0.608 9	13.4	260.235 0
WKL-2	A-1	-0°10'22.6"	199.549 7	199.548 8	1.522	1.519	-0.596 2	13.4	260.837 6
WKL-2	WKL-3	0°8'33.3"	217.962 9	217.962 2	1.522	1.406	0.662 1	14.0	260.837 6
WKL-3	WKL-2	-0°10'46.8"	217.965 6	217.964 6	1.567	1.543	-0.655 8	14.0	261.496 6
WKL-3	WKL-4	0°8'37.9"	216.765 7	216.765 0	1.567	1.435	0.680 0	16.0	261.496 6
WKL-4	WKL-3	-0°11'3.0"	216.766	216.764 9	1.531	1.502	-0.664 1	16.0	262.168 7
WKL-4	WKL-5	0°9'15.2"	258.471 6	258.470 6	1.531	1.448	0.784 0	15.3	262.168 7
WKL-5	WKL-4	-0°10'11.4"	258.472	258.470 9	1.486	1.501	-0.775 9	15.3	262.948 7
WKL-5	WKL-6	0°10'9.1"	227.326 4	227.325 4	1.486	1.478	0.683 3	14.3	262.948 7
WKL-6	WKL-5	-0°12'6.3"	227.326 5	227.325 1	1.568	1.456	-0.684 4	14.3	263.632 6
WKL-6	WKL-8	0°9'36.8"	336.925 2	336.923 8	1.568	1.535	0.984 1	17.4	263.632 6
WKL-8	WKL-6	-0°11'15.1"	336.924 8	336.923 1	1.578	1.471	-0.986 8	17.4	264.618 1
WKL-8	Z3	0°10'20.5"	267.091 1	267.089 9	1.578	1.533	0.8541	15.5	264.618 1
Z3	WKL-8	-0°11'47.8"	267.092 4	267.090 9	1.597	1.538	-0.851 9	15.5	265.471 1
Z3	Z7	0°7'38.8"	286.837 3	286.836 6	1.597	1.478	0.763 5	16.1	265.471 1
Z7	Z3	-0°9'38.3"	286.840 15	286.839 1	1.525	1.473	-0.745 7	16.1	266.225 7
Z7	Z11	-0°21'39.3"	268.309 6	268.304 3	1.525	1.479	-1.638 5	15.5	266.225 7
Z11	Z7\	0°20'16.2"	268.311 05	268.306 3	1.533	1.478	1.642 7	15.5	264.585 1
Z11	L1	22°11'51.5"	416.540 65	385.659 7	1.533	1.465	157.449 8	19.4	264.585 1
L1	Z11	-22°12'0.1"	416.537 55	385.669 3	1.425	1.498	-157.446 4	19.4	422.033 2
L1	GCPI165	9°19'23.9"	588.610 55	580.826 3	1.425	1.354	95.455 5	23.0	422.033 2
GCPI165	L1	-9°20'54.2"	588.643 95	580.834 8	1.469	1.334	-95.456 2	23.0	517.489 1
GCPI165	GCPI166	5°11'20.6"	608.294 25	605.796 0	1.469	1.681			517.489 1

目前精密三角高程在测量中,都在研究、实践阶段,相信随着时代发展,科技的进步,各种先进的仪器和设备不断涌现,精密测量也会更加方便快捷。

参 考 文 献

- [1]陈龙飞,金其坤.工程测量学[M].上海:同济大学出版社,1990.
- [2]中华人民共和国铁道部.TB 10601—2009 高速铁路工程测量规范[S].北京:中国铁道出版社,2010.
- [3]黄礼辉.精密三角高程测量在客运专线山区二等水准测量中的应用研究[J].铁路建筑技术,2009(6):19-22.
- [4]潘小东,黄汝麟,徐大新,等.精密三角高程测量实验[J].城市勘测,2009(5):134-136.
- [5]张正禄,邓勇,罗长林,等.精密三角高程代替一等水准测量的研究[J].武汉大学学报,2006,31(1):5-8.

Study on Technology of Precise Trigonometric Leveling in Complex Survey Area

Duan Enxin

(The 14th China Railway Bureau Group Corporation, Ji'nan 270004, China.)

Abstract: Based on the precise trigonometric leveling principle, error sources and error analysis, the precision of photoelectric triangulated height and second-grade leveling survey is evaluated and the feasibility of the precise trigonometric leveling to replace the second-grade leveling is studied. In this paper, the specific operation method of The TCA2003 total station is put forward and is verified in the Xing-Pu railway leveling process.

Key words: total station; accuracy analysis; second-grade leveling; trigonometric leveling

(责任编辑 车轩玉)