超大跨度跨海大桥高程控制网研究与应用

曹 明

(浙江省交通规划设计研究院有限公司 杭州 310030)

[摘 要]针对当前沿海地区连岛工程跨度大的特点,文章提出一种基于 GPS 和测量机器人 5km 超大跨度高程传 递方法,对竖直角和边长精度之间的关系进行了分析研究,得出了竖直角越接近 90°,边长对高差影响越小,竖直角 在一定范围内完全可以使用 GPS 方法;并对观测方案进行优化处理,提高了观测精度和作业效率,完成了超大跨度高 程传递,满足国家二等水准精度要求。

[关键词]误差分析;超大跨度;优化改进;仪器高;精度分析

1 引言

沿海地区连岛工程高程传递是当前施工和 大面积地形图测绘的难点,大跨度高程传递是 建立统一的陆海高程基准框架网的一种重要手 段。目前工程实践中,跨河高程传递方法主要 有以下几种:光学测微法、倾斜螺旋法、短期 验潮法、三角高程法、GPS 水准和重力测量法 等。常规跨河水准测量存在跨度小、多项仪器 和人为误差、全站仪测距长度有限、场地选择 困难、观测操作复杂、照准目标困难,易受大 气垂直遮光影响, 气象因素干扰大, 作业工期 长,效率低:短期验潮法对验潮仪安放位置和 观测环境要求较高,且观测周期较长,无法完 成项目上的要求,在无高精度的局部大地水准 面模型情况下 GPS 水准法无法完成孤岛高程传 递的情况,且 GPS 高程精度无法满足二等高程 控制的精度要求^[1]。

本文提出一种基于 GPS 和高精度全站仪改 进方法,通过对仪器的改装以及测量方法的改 进,实现了超大跨度两台仪器光线同径向间同 时对向观测,极大削弱了大气折光和地球曲率 的影响,提高了高程传递的距离、精度和作业 效率。

2 跨河精密三角高程测量原理

精密三角高程测量在三角高程测量原理的 基础上,采用两台带自动照准(ATR)功能高 精度全站仪,实现对向同步观测,其高差计算 公式如下^[2]:

 $h_{AB} = 0.5 * [(S_{AB} \tan a_{AB} - S_{BA} \tan a_{BA} - (K_{AB} - K_{AB}) \times \frac{S_{AB}^2 COT^2 a_{BA}}{2} + i - v - i + v]$ (1)

$$K_{BA}) \times \underline{2R} + \iota_A - v_B - \iota_B + v_A \rfloor \tag{1}$$

式中, S_{AB} 、 S_{BA} 为A、B亮点的平距, a_{AB} 、 a_{BA} 为 竖直角观测值, i_A 、 i_B 及 v_A 、 v_B 分别为仪器高和 目标高, K_{AB} 、 K_{BA} 分别为大气垂直折光系数; R为地球曲率半径。其中, $(K_{AB} - K_{BA}) \times \frac{S_{AB}^2}{2R}$ 项可 认为是大气折光对高差的影响。当同时对向观 测时,可认为所观测的高差受到大气垂直折光 的影响很小或不受大气折光的影响。同时在一 个侧端观测过程中,对向观测的边数应为偶 数,在测段的起、末水准点上(仪器到水准点的 距离为米)使用高度不变的同一棱镜杆,以避免 量取仪器高和觇标高,消除仪器和人为测量误 差。这样高差的计算公式简化为^[3]:

$$h_{AB} = 0.5 * (S_{AB}tana_{AB} - S_{BA}tana_{BA})$$
(2)
在起始站和结束站上的高差计算公式为:
$$h_{AB} = S_{AB}tana_{AB}$$
(3)

收稿日期: 2019-12-18

作者简介: 曹明(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事海洋测绘、港口码头及高速公路建设等工作。

• 沩江卖盈千技 •

2020年第3期

3 跨河精密三角高程误差来源及分析

3.1 距离误差及其影响

测距误差与仪器本身以及外界观测环境有着密切的关系,测距精度包含各种复杂的因素,为精确分析求得仅距离误差对三角高程的精度影响,特假定(3)中 *a*_{AB} 为真值,据此,可根据公式得出不同竖直角,如表 1 所示,距离

精度对三角高程测量高差的影响,测距误差对 高差影响很小,但竖直角(天顶距)增大而减 小,在边长为5km超大跨度,竖直角89°~90° 范围内,最大为1.73mm,平均约为0.87mm, 得出了竖直角越接近90°,边长对高差影响越 小,因此尽量选择两侧在同一水准面上的观测 点可以极大削弱距离误差对高差精度的影响。

Kalichur

表1 竖直角与距离精度的关系

	5000	5000. 1	5000. 2	距离精度为 20cm 对高差的影响	距离精度为 10cm 对高差的影响
88	174. 497484	174. 500973	174. 504463	-0.006980	0.003490
88.5	130. 884742	130. 887359	130. 889977	-0.005235	0.002618
89	87. 262032	87.263777	87. 265523	-0.003490	0.001745
89.5	43. 632677	43.633550	43. 634423	-0.001745	0.000873
90	0.000000	0. 000000	0.000000	0. 000000	0. 000000
90.5	-43. 632677	-43.633550	-43. 634423	0. 001745	-0.000873
91	-87. 262032	-87. 263777	-87. 265523	0.003490	-0.001745
91.5	-130. 884742	-130. 887359	-130. 889977	0.005235	-0.002618
92	-174. 497484	-174. 500973	-174. 504463	0. 006980	-0.003490

3.2 竖直角误差及其影响

1) 照准误差

影响竖直角测定精度的诸多因素中,照准 误差影响最大,合理的观测时间和观测角度尤 为重要,由于本次高程传递跨度大,已超出全 站仪测程,无法使用全站仪 ATR (自动照准功 能),只能采用人工照准方式。

2) 全站仪本身误差

这里所指的是仪器本身误差为全站仪竖盘 指标差,竖盘指标差在仪器使用说明书中或仪 器的鉴定书中已经给定,本次使用的是徕卡超 高精度全站仪 TM50,该项误差的中误差一般为 ±m=0.5"内。综合以上因素,盘左、盘右观测 竖直角平均中误差为: $m_{\beta} = \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{m} = 0.5"$; 可通过检测调整和自动补偿予以消除[4]。

3.3 仪器高和觇牌高量取误差及影响

仪器高和觇牌高的精度直接关系到三角高 程测量的精度,边长越长、测站数越少其精度 越高,即使使用专用觇牌也会存在约 2mm 的偏 差,此外仪器高的量取精度也会达到±2.5mm, 因此采用更加合理的观测方案和观测次序消除 这项误差对于超大跨度二等高程控制就显得尤 为重要。

3.4 球气差误差及影响

由于地球曲率和大气折光的存在,其严重 影响三角高程的精度,所以必须考虑"两差", 即"球差"和"气差"的改正。

表2 "两差"对高差的影响

两点间水平距离 D/m	100	200	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700
"两差"的综合影响	0	0	0.01	0.02	0.03	0.06	0.08	0.11	0.11	0.20

• 浙江交易科技 •

"球气差"对所测高差的影响随着两点间 的水平距离增大也越来越大,如表2所示,一 般来说,两点间的水平距离超过300m时,应考 虑"两差"改正。要避免或者削弱"球气差" 对三角高程测量的影响,最好的办法是采用双 向观测(对向观测或往返观测),因为在对向观 测条件相同(指正、反向同事观测或近似于同 时观测时)的情况下有 $f_{\text{E} homogentry} = f_{\text{K} homogenty}$,而符号 相反,即抵消"两差"影响^[5]。

4 舟山某连岛工程测量方案

4.1 点位布设及优化

如图 1 所示, 在花鼓山上选择一测量观测 墩, 用于架设全站仪 Y1; 在观测墩的旁边稳定 的位置架设脚架, 照准点(测灯 D1)安置于该 脚架上; 观测墩旁边路面上的铁钉 S1 作为临时 水准点。在对面鱼山岛上选择一测量观测墩用 于架设同型号全站仪 Y2; 在观测墩旁稳定的位 置假设脚架, 照准点(测灯 D2)安置于该脚架 上; 此网型布设的目的在于将仪器高全部作为 中间过程抵消。

值得注意的是,为尽可能保证跨海观测点 间的竖直角为90°,以削弱距离误差对高差的影 响,Y1与D2、Y2与D1需基本保持在同一水准 面上,必要时采用似大地水准面精化模型确定; 此外为最大程度削弱三角高程距离及大气折光 的影响,Y1、D1及S1和Y2、D2及S2布设尽 可能近。

由于本次跨海属于超大跨度,为最大程度 削弱球气差对高差精度的影响,使对岸两侧 Y1 对 D2、Y2 对 D1 观测路径保持一致,D1、D2 应尽量分别布设在 Y1 和 Y2 的延长线上;此外 观测墩旁边路面上放置尺垫作为临时水准点 S2, 在临时水准点 S1 和临时水准点 S2 上架设等高 (或同一个)观测目标或棱镜,以消除目标高度 对精度的影响。如下图 1 所示:

4.2 仪器选用及观测方案

根据上述误差来源,在良好的点位布设前 提下,高差测量的精度主要取决于竖直角的观 测精度;为最大程度削弱仪器误差带来的影响, 本次选用 Leica TM50 超高精度智能全站仪,其



图 1 跨海观测线路略图

测角精度为 0.5"。

本次高程传递位于大面积海域,观测条件 复杂,受风、温度、湿度、水汽等影响很大, 为保证外业观测质量,须根据现场气象条件和 潮汐变化情况,确定观测时间和观测方案^[8], 观测时间宜在晴朗无风的天气进行;此外本次 属超大跨度,已经超出现有测量机器人测程, 仪器自带的自动照准功能已无法使用,即使超 大觇牌也无法清晰观测,必须对观测目标重新 设计,本次提出发光对称的圆形灯替代常规的 觇牌+棱镜的模式,为保证目标清晰,观测时间 定在晴朗无风的夜间进行。

经上述分析,大跨度点位基本位于同一水 准面,竖直角接近 90°,其边长对高差影响极 小,因此 Y1—S2、Y2—S1 的距离可以采用 GPS 静态测量测定,Y1—D1、Y1—S1、Y1—D2、 Y2—D2、Y2—S2、Y2—D1 的竖直角通过测量 机器人观测获取。

(1) 大跨度边长测量

采取 GPS 静态观测。采样要求:时段数 2 个,时段长度 30 分钟,采样间隔 15 秒。

(2) 竖直角测量

跨海段对向观测只记录竖直角,采用正倒 镜测量模式。进行跨海段观测时应保证两边同 步进行(从Y1测站观测对岸测灯D2,从Y2测 站观测对岸测灯D1)。时段测回数规定:同岸 点间观测2测回,对岸观测8组,每组8测回, 共64测回;为保证观测时间一致性,若一组观 测时长超过20分钟,该组必须重新测量。观测 限差规定:一组中各测回,竖直角指标差较差 应不大于6秒,竖直角测回较差不大于3秒。观 测时段要求,2个观测时段,1个检测时段,上 半夜进行时段一观测,下半夜进行时段二观测, 检测时段选在另一时间进行。

(3) 测灯 D1 与 D2 应在测回间同时变换高度,以增加观测值的可靠性,最后将 S1 上的棱镜杆移至 S2 上,保持棱镜高度不变,观测 Y2 与 S2 之间的高差。

5 数据处理及精度分析

5.1 数据处理优化

为进一步简化外业操作、设备高误差及数 据处理过程,对过程中所有涉及仪器高的部分 全部采用假定值,观测值均为不包含设备高的 直接观测值:

$$\begin{split} h_{S1S2} &= H_{Y1} + i_{Y1} - (H_{S1} + v_{S1} + 0.5 * \\ [(H_{D1} + v_{D1} - H_{Y1} - i_{Y1} + H_{Y2} + i_{Y2} - \\ H_{D1} - v_{D1}) - (H_{D2} + v_{D2} - H_{Y2} - i_{Y2} + \\ \end{split}$$

$$H_{Y_1} + i_{Y_1} - H_{D2} - v_{D2}) \rfloor + H_{S2} + v_{S2} - (H_{Y2} + i_{Y2})$$
(4)

式中: *H*为点位绝对高程, *h*为点间高差, *i*为仪器高, *v*为目标高, 其中 *v*_{s1} 和 *v*_{s2} 为同一棱镜,因此 *v*_{s1} = *v*_{s2}。

由上式可知,所有设备高度为中间过渡值, 均可通过前后高差相互抵消,公式简化后:

$$h_{S1S2} = h_{Y1Y2} + 0.5 * [(H_{Y1D1} + H_{D1Y2})]$$

 $-(H_{Y2D2} + H_{D2Y1})] + H_{Y2D2}$

式中, h 均表示全站仪照准中心与目标中心间的 高差。

5.2 数据精度分析

本项目进行一段 5km 超大跨度跨海高程传 递,分两个时段进行,时段一和时段二分别在 晴朗无风夜晚上半夜和下半夜进行,高差观测 值如下表 3 所示。

表 3	各时段观测值
-----	--------

时段—							
测段	Y1-S1	Y1-D1	Y1-D2	Y2-S2	Y2-D2	Y2-D1	S1-S2
斜距 (m)	8. 10253	2.98505	4995. 6016	8. 12875	6.35733	4986. 7282	
天顶距均值 (DMS)	90. 5249578	83. 1557830	89. 4129769	90. 1159568	82. 1926808	90. 2002894	
高差 (m)	-0. 12450	0.35002	26. 88895	-0.02836	0. 84914	-29.08141	27.73377
测段	Y1-S1	Y1-D1	Y1-D2	Y2-S2	Y2-D2	Y2-D1	S1-S2
斜距 (m)	8.09987	2.98432	4995. 6016	8. 13389	6. 36355	4986. 7282	
天顶距均值 (DMS)	90. 5254593	83. 1636427	89. 4128918	90. 1153161	82. 2133071	90. 2002869	
高差 (m)	-0. 12466	0. 349384	26. 90956	-0.02812	0. 846113	-29.0808	27.73713
检核测段							
测段	Y1-S1	Y1-D1	Y1-D2	Y2-S2	Y2-D2	Y2-D1	S1-S2
斜距 (m)	8. 09898	2. 98561	4995. 6016	8. 1271	6.3628	4986. 7282	
天顶距均值 (DMS)	90. 5311135	83. 0350919	89. 4121767	90. 1452300	82. 0411038	90. 1956030	
高差 (m)	-0. 12529	0.36054	27.08275	-0.03312	0.87786	-28.91547	27.74105

表 4 高差成果与限差							
测码	百半	互差	检核较差	规范限差			
侧权	同左	(m)	(mm)	(mm)			
时段一	27.73377	2.4					
时段二	27.73713	5.4		8.9			
检核测段	27.74105		5.6				

上表中各时段大跨度均观测 8 组,数据为 各组平均值,可以看出不论是各时段互差还是 检核时段较差均小于规定限差;数据成果完全 满足二等水准限差要求。

6 结束语

对于超出测距设备测程的超大跨度连岛工

• 浙江卖盈千技 •

程,本文提出利用 GPS 测边和高精度测量机器 人测角的高程传递方法,研究了竖直角大小即 两点间坡度与边长精度之间的相对关系,得出 了在一定坡度范围内,边长精度对高差的影响 很小;采用对向观测的同时对观测方案进行优 化改进,充分保证对向观测往返为同一路径, 并且避免了观测过程中对设备高度的量取,简 化了作业环节,提高了成果精度,对观测成果 进行了分析,结果证明成果满足二等水准精度 要求。

为今后大跨度高程传递提供了准确数据依据,具有十分重要的意义,通过对观测目标的 进一步改进,获得更为快捷、准确的观测成果, 提高高程传递距离和精度。

参考文献

[1] 韩志刚, 孔云峰, 秦耀辰. 地理表达研究进展 [J]. 地理

科学进展, 2011, 30 (2): 141-146.

- [2] 赵景民, 杜琛. 无砟轨道施工测量与检测技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [3] 徐亚明, 施斌, 王代熊, 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.
- [4] 何宗友,胡海驹,朱紫阳,钟焕良.三角高程法在跨河水 准测量中的主要误差及控制措施[J].华南地震,2017, 37 (1):68-72.
- [5] 肖登.如何认识和避免"球气差"对三角高程测量的影响[J].人民珠江,2002年第3期.
- [6] 魏明耀,李显巨,陈国栋,孟祥梅.GPS 跨河高程拟合及 误差分析 [J].工程技术,2010,27:29-30.
- [7] Chen Fuchao, et al. Research on leveling counting reference
 [J]. China Science and Technology Achievment, 2011 (15): 39-41.
- [8] GB/T 12897-2006 国家一、二等水准测量规范 [S].北 京:中国标准出版社出版,2006.
- [9] 张艳,高飞,李晓莉.应用精密三角高程测量实现跨河水 准的研究[J].合肥工业大学学报,2007,(3).

• 浙江交易科技 •