# 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<sup>[2]</sup>:

$$h_{AB} = 0.5 * \left[ (S_{AB} \tan a_{AB} - S_{BA} \tan a_{BA} - (K_{AB} - K_{BA}) \times \frac{S_{AB}^2 COT^2 a_{BA}}{2R} + i_A - v_B - i_B + v_A \right]$$
(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, $(K_{AB}-K_{BA})$  ×  $\frac{S_{AB}^2}{2R}$  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

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

差。这样高差的计算公式简化为[3]:

$$h_{AB} = S_{AB}tana_{AB} \tag{3}$$

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。

## 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。

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

"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 $f_{\mathbb{E} \cap \mathbb{R} \mathbb{R} \mathbb{R}} = f_{\mathbb{R} \cap \mathbb{R} \mathbb{R} \mathbb{R}}$ 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

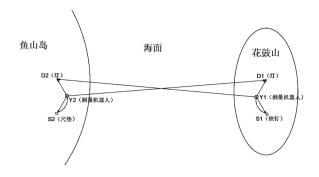


图 1 跨海观测线路略图

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<sup>[8]</sup>,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.

$$h_{S1S2} = H_{Y1} + i_{Y1} - (H_{S1} + v_{S1} + 0.5 *$$

$$[(H_{D1} + v_{D1} - H_{Y1} - i_{Y1} + H_{Y2} + i_{Y2} - H_{D1} - v_{D1}) - (H_{D2} + v_{D2} - H_{Y2} - i_{Y2} + i_{Y2} - i_{Y2} + i_{Y3} - i_{Y3} - i_{Y3} + i_{Y3} - i_{Y3} - i_{Y3} + i_{Y3} - i_{Y$$

$$H_{Y1} + i_{Y1} - H_{D2} - v_{D2}) ] + H_{S2} + v_{S2} - (H_{Y2} + i_{Y2})$$
(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:

$$\begin{split} h_{S1S2} &= h_{Y1Y2} + 0.5 * \left[ \left( H_{Y1D1} + H_{D1Y2} \right) \right. \\ &- \left( H_{Y2D2} + H_{D2Y1} \right) \right] + H_{Y2D2} \end{split}$$

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

A. I HAMINE								
			时段一					
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

测段	高差	互差	检核较差	规范限差
侧权		(m)	( mm)	(mm)
时段一	27. 73377	3. 4		
时段二	27. 73713	3. 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

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).