

# 跨海中长距离高程传递测量研究

顾伟 顾健 曹锡军

南通市江海测绘院有限公司 江苏南通 226300

DOI : 10. 12238/j pm. v6i 3. 7839

**[摘要]** 本文阐述了全站仪精密三角高程测量实现长距离跨海高程传递原理、数据处理方法和数据质量控制原则，研究了跨海高程传递中主要误差的消除方法，并通过实测数据分析了高程传递精度。实验结果证明了文中方法与分析误差结论有效，可行，在工程实例中具有很大的操作空间性。

**[关键词]** 长距离跨海高程传递；精密三角高程测量；精度分析

## Research on long-distance elevation transfer measurement across the sea

Gu Wei Gu Jian Cao Xijun

Nantong Jianghai Surveying and Mapping Institute Co., LTD., Jiangsu Nantong 226300

**[Abstract]** This paper expounds the principle, data processing method and data quality control principle of long distance cross-sea elevation transmission of the whole station, studies the method of eliminating the main errors in cross-sea elevation transmission, and analyzes the accuracy of elevation transmission through the measured data. The experimental results prove that the method and analysis error are effective and feasible in engineering examples.

**[Key words]** long distance cross-sea elevation transmission; precision triangle elevation measurement; precision analysis

### 1 引言

我国海域辽阔，岛屿众多，陆地与岛屿的高程基准统一是国家建设提出的需求。长距离跨海高程传递是建立陆海一体化大地基准的一种主要手段。受到设备和技术能力限制，过去一直无法进行长距离跨海高程传递，如：海南的高程测量曾长期以海口秀英港为水准点进行测量，自成系统，游离于全国高程系统之外。由于不同海洋的潮汐等情况不同，因此，海平面高度并不一致，海峡两岸的高程数据也时有误差。在这样的条件下，根本无法建设跨海通道这样的重大工程。随着全站仪技术的发展进步，长距离跨海高程传递已经成为了可能。本文介绍了采用全站仪精密三角高程测量实现长距离跨海高程传递的原理和数据处理方法，并通过实测数据分析了测量精度。以某跨海高程传递项目为例，验证了文中方法的可行性与有效性，

分析误差理论中深入研究了削弱误差的方法。

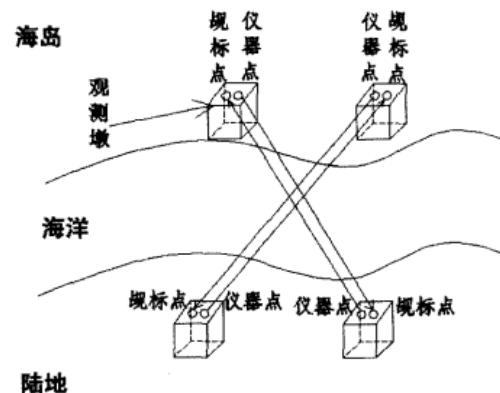


图1 跨海高程传递测量原理

## 2 测量原理和数据处理基础

### 2.1 跨海高程传递测量原理

高精度三角高程测量实现长距离跨海高程传递的基本原理如图 1 所示，分别在陆地、海岛上建立两处特制观测墩，能够进行三角高程对向观测及卫星定位同步观测。

基本方法是在观测墩上设立两个标志作为仪器点和觇标点，觇标上架设特制的觇灯作为照准目标，采用两台仪器及双觇灯同步对向进行垂直角观测。

### 2.2 数据处理采用的基准及处理流程

本文数据所采用的高程基准为 1985 国家高程基准，重力基准为 2000 国家重力基本网，大地基准为 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000)，参考椭球为 CGCS2000 参考椭球。数据处理流程如图 2 所示。

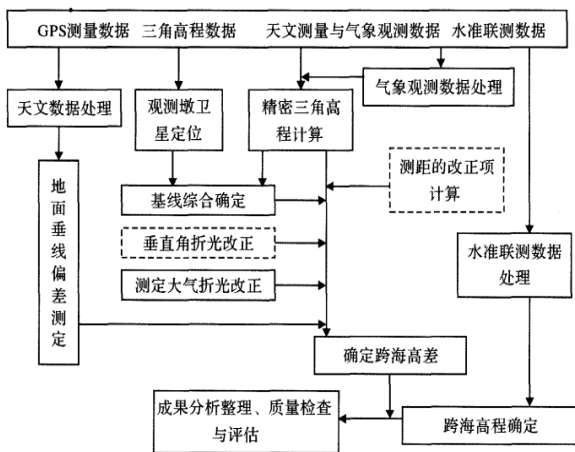


图 2 跨海高程传递数据处理流程图

### 2.3 观测数据质量控制

#### (1) 光段高差间的互差

为了有效地消除大气垂直折光差的影响，采用全站仪测量时，要求采用两台仪器及双觇标同步对向观测垂直角，垂直角观测光段数为 4\*S，其中 S 为跨距，单位为千米，每光段的测回数数为 8。每条测线各光段高差间的互差应符合规定限值：

$$dH_{限} = \pm 4M_A \sqrt{N \times S} \quad (1)$$

其中， $M_A$  为每千米水准测量的偶然中误差； $N$  为观测光段数，若光段高差间的互差大于 2 倍限差，该光段数据应舍去不参与计算。

#### (2) 闭合环的闭合差

跨海测线构成的大地四边形可组成三个独立闭合环，各环线的闭合差  $W$  应不大于限差：

$$W = \pm 6M_W \sqrt{S} \quad (2)$$

其中， $S$  为跨距，单位为千米； $M_W$  为每千米水准测量的

权中误差限值，如闭合差符合限差要求，则观测的数据可以采用，否则舍去。

### 3 跨海观测高差的计算

#### 3.1 全站仪测量数据计算陆海跨距

用全站仪观测的距离  $D_0$  要加气象改正  $\Delta D_1$ 、仪器加常数改正  $\Delta D_2$ 、乘常数改正  $\Delta D_3$ ，得到两点间的距离（斜距）。

$$D = D_0 + \Delta D_1 + \Delta D_2 + \Delta D_3 \quad (3)$$

其中， $\Delta D_2$ 、 $\Delta D_3$  为仪器常数，测量前已经标定。 $\Delta D_1$  计算式表示如下：

$$\Delta D_1 = 281.8 \frac{0.29065 \times P}{1+t/273.16} + \frac{4.126 \times 10^{-4}}{1+t/273.16} \times 10^x \times D_0 \times 10^{-6}$$

$$h = e/E$$

$$E = 10^{a+0.7858}$$

$$e = 6.107 \times 10^{-6} - 0.000662(t-t')(1+0.001146t')P \quad (4)$$

$$x = \frac{7.5 \times t}{237.3+t} + 0.7857$$

$$a = \frac{7.5 \times t'}{237.3+t'}$$

$$P = P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3$$

其中， $\Delta D_1$  为气象改正数 (m)； $P$  为气压 (hPa)； $h$  为相对湿度； $t$  为温度干球温度 (°C)； $t'$  为温度即湿球温度 (°C)； $P_0$  为测站 (境站) 气压计读数； $\Delta P_1$  为气压计刻度订正； $\Delta P_2$  为气压计温度订正； $\Delta P_3$  为气压计补充订正；

#### 3.2 GPS 测量陆海跨距

采用 GPS 观测获得的数据是跨海观测点之间的空间距离  $D_0$ ，需将其化算为仪器点至觇标点间的距离（斜距）：

$$D = \sqrt{D_0^2 - (v-i)^2 \cos^2 a} + (v-i) \times \sin a \quad (5)$$

其中， $v$  为觇灯距观测墩面高 (m)； $i$  为仪器高 (m)； $a$  为跨海观测的垂直角中数。

#### 3.3 剩余垂直折光精确测定

跨河三角高程测量时，大气折光对高差的影响具有一定的特殊性。跨河视线不仅通过地面，而且通过水面，由于地面和水面上空空气密度分布不均，形成了视线两端向上弯曲，中间向下弯曲的“U”型曲线。故对向同步观测垂直角时，若光线弯曲的对向入射角相等，则对向观测垂直角之和可消除垂直大气折光影响。但由于海岸带区域垂直对流强烈，当视线长度增加，光线弯曲的对向入射角存在的差别变得不可忽视，就出现了剩余垂直大气折光。测定剩余垂直大气折光改正  $\Delta$ ，就可修正测距三角高程中垂直角观测量：

$$\Delta = \left[ (P_a + P_b) - O_{ab} + (V_a + V_b) \right] / 2 \quad (6)$$

其中,  $P_a, P_b$  为观测墩,  $a, b$  为垂直角观测;  $O_{ab}$  为两岸观测墩椭球面法线夹角;  $V_a, V_b$  为观测墩,  $a, b$  处垂线偏差在视线-法线面的投影。

### 3.4 中短距离跨海高差计算方法

跨海距离在 8km 以内, 采用下列公式计算:

$$h = \frac{1}{2}(D_{12} \times \sin a_{12} - D_{21} \times \sin a_{21}) - \frac{1}{2}(i_2 - i_1) - \frac{1}{2}(v_2 - v_1) + \frac{1}{4R}(D_{12}^2 - D_{21}^2) + \frac{1}{4R}(k_2 D_{21}^2 - k_1 D_{12}^2) \quad (7)$$

其中,  $h$  为仪器点至视标点的高差;  $D_{12}, D_{21}$  为仪器点至视标点间的距离(斜距);  $i, v$  分别为仪器高、视标高;  $R$  为地球平均曲率半径, 数据单位均为米;  $k$  为大气垂直折光系数, 当同时对向进行垂直角观测时  $k_1 \approx k_2$ 。

### 3.5 长距离跨海高差计算方法

跨海距离在 8 km 以上则需实施二等天文观测, 计算垂线偏差, 跨海两点间高差计算采用下列公式:

$$h_{12} = \frac{1}{2}(D_{12} \times \cos(Z_{12} + \Delta) - D_{21} \times \cos(z_{21} + \Delta_{\text{剩余大气折光}})) - \frac{1}{2}(v_2 - v_1) + \frac{k_2 - k_1}{4R} S^2 - \frac{l}{\rho''}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) - \frac{ae^2}{2}(B_2 - B_1)^2 \cos^2 B_m \quad (8)$$

其中,  $h_{12}$  为仪器点至视标点的高差;  $\frac{k_2 - k_1}{4R} S^2$  为大气垂直折光的影响, 当同时对向进行垂直角观测时,  $k_2 - k_1 \approx 0$ ;

$\frac{l}{\rho''}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$  为垂线偏差影响,

$$\varepsilon - \xi \cos A + \eta \sin A, \quad \xi = \varphi - B, \quad \eta = (\lambda - L) \cos B,$$

$$1 = \frac{D_{12} \cos a_1 + D_{21} \cos a_2}{2} \left( 1 + \frac{H_m}{R} \right), \quad \xi, \eta, \lambda, \phi, A \text{ 分别为垂线偏差的子午、卯酉分量、天文经度、天文纬度和大地方位角; } \Delta \text{ 为剩余垂直大气折光改正; } z_{12} \text{ 为观测垂直角; } B_1, B_2, L_1, L_2 \text{ 分别为两点的大地经纬度; } B_m \text{ 为两点的平均纬度。}$$

为垂线偏差的子午、卯酉分量、天文经度、天文纬度和大地方位角;  $\Delta$  为剩余垂直大气折光改正;  $z_{12}$  为观测垂直角;  $B_1, B_2, L_1, L_2$  分别为两点的大地经纬度;  $B_m$  为两点的平均纬度。

## 4 算例分析

采用本文的数据处理方法, 如图 1 所示在每个海岛礁上分别观测了合限的 4S 个光段的垂直角与观测距离, 计算得到各光段的高差, 然后取中数作为一条测线的跨海高差。在跨海处对向同步观测了 4 条测线, 加上同岸水准观测方法得到的两条测线, 构成了大地四边形, 对其进行平差得出每公里高差中数中误差。并对用三角高程测量得到的墩面点的高差: 角与用 GPS 测量得到的墩面点的高差作了外部检核, 如表 1 所示。

表格 1 长距离跨海高程传递测量精度

海岛礁名称	跨距 (km)	每公里高差中数中误差 (mm)	$H_{\text{三角}} - H_{\text{GPS}}$ (m)
DHD	11.6	±0.52	0.0212
DZZD	5.5	±0.50	0.0184
JAD	5.9	±0.39	0.0106
MZD	8.3	±0.52	0.0199
NAD	7.4	±0.69	0.0200

由表 1 可知海岛礁的每公里高差中数中误差均达到了毫米级, 符合国家等级的水准测量精度。

## 5 结束语

采用精密三角高程测量的方法来实现长距离跨海高程传递, 在观测合理、数据处理方法得当的情况下, 每公里高差中数中误差均达到了毫米级, 可以实现国家水准测量的精度, 为海域开发、维权执法、交通运输、国防建设等提供了精确的海岛(礁)定位成果。

### [参考文献]

[1]李国鹏, 石林峰, 张建华, 等.优化的长距离跨海高程

传递测量方法研究[J].测绘科学, 2022, 47(12): 90-95+137.

[2]成益品, 宋神友, 董理科, 等.一种新型长距离精密跨海高程传递测量视标的设计及在深中通道工程中的应用[J].隧道建设(中英文), 2022, 42(11): 1942-1946.

[3]王雪帆, 单丹.长距离跨海高程传递测量在人工岛建设工程中的应用[J].珠江水运, 2022, (20): 77-80.

[4]董斌斌, 刘远海, 周建营, 等.GNSS 测量法在长距离跨海高程传递中的应用[J].海洋技术学报, 2022, 41(01): 13-19.

[5]卢群, 邱卫宁, 范玉磊, 等.长距离跨海高程传递测量方法研究与工程实践[J].测绘地理信息, 2016, 41(01): 70-73.