

CNIC-01129
ECBGE-0003



CN9701128

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE
AND TECHNOLOGY REPORT

变形观测三维网方法研究

THE STUDY OF THREE-DIMENSIONAL NET METHOD
OF DEFORMATION OBSERVATION

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

VOL 28 第 16



费景云:华东地质学院教授,1960年毕业于武汉测绘学院大地测量系。

JIA Jinyun; Professor of Geological Institute of East China. Graduated from Geodesy Department, Wuhan Mapping and Surveying College in 1960.

变形观测三维网方法研究

吴景勤

(核工业华东地质局, 南昌)

摘 要

由于各种因素的影响,核电站、水电工程等建筑物及设备的运营过程中,都会产生变形,特别是核电站区断裂活动、边缘危岩体的滑动、基础的位移,从而影响正常使用,危及安全。然而传统的三角网控制方法已无法满足高精度的变形观测需要。因此采用了地形均衡垂线偏差,通过对斜距合理分解出水平分量与垂直分量,用精确的垂直分量参与制约观测点的高差,增强观测点的精度。选择因子模型,建立三维形变高精度监测网。用天文大地垂线偏差改正观测值,所得高差是大地高差,平面坐标是在平行于参考椭球面的某一平面上确定的。该三维网方法观测简单,平差简捷,为核电站等变形观测提供了一种先进、精确的测量方法。

The Study of Three-Dimensional Net Method of Deformation Observation

(In Chinese)

WU Jingqin

(East China Bureau of Geology, Nuclear Industry, Nanchang)

ABSTRACT

Due to the influence of all kinds of factors, when buildings and equipments of nuclear power stations, water power stations and so on are in their service, deformations always happen to them. Especially, the breakage, the slide of edge danger rocks and basic displacement in the area of nuclear power station site can all interfere its regular operation, even endanger safety. But the traditional trigonometric net control can not obtain high precise deformation observation. So, topographic balanced vertical deviations are applied. The slope distance is divided rationally into horizontal and vertical components, then the precise vertical component is used to participate in restricting the deflection in order to enhance the observation post's precision. Meanwhile, the element model is selected, high precise monitoring net of three-dimensional deformation is set up, using astro-geodetic deflection of the vertical to correct the observation values. In this way, the earth error of height is given, the plane coordinate is defined by paralleling some plane of reference ellipsoid. This method may satisfy the deformation observation in the projects such as nuclear power stations or so.

1 三维控制网计算的基本思想

三维控制网的观测量可以分为水平观测量、垂直观测量及水平与垂直的综合观测量三类。水平角属于水平观测量，在高度 h_0 投影面（全区平面坐标系所在平面）上与 X, Y 平面坐标有函数关系。几何水准属于垂直观测量，直接与高程有联系。斜距及垂直角属于水平与垂直的综合观测量，与平面坐标及高程有函数关系，通过综合观测量可以使平面坐标与高程发生联系。

在图 1 中，设 A, B 为三维控制网中相邻的两测点， h_A, h_B 分别为 A, B 两点的大地高程， DE 平面为 h_0 高程的投影面，由于控制网覆盖的面积较小，将 DE 球面视作平面不会产生有影响的误差。观测的水平方向只要经垂线偏差改正后归算到该投影面上的方向就可以建立方向误差式。斜距 AB 投影到 DE 平面上的边长为 DE 。 AB, DE 与 A, B 两点的大地高差 BC (BC 与 $h_B - h_A$ 的差异可以忽略，因此 BC 可视为大地高程差) 三者之间存在下列的几何关系：

$$\overline{AB}^2 = \overline{BC}^2 + (\overline{DE} + \overline{FC})^2$$

根据上式可以建立斜距的误差方程式。在图 2 中， θ_A 及 θ_B 分别为 A, B 两点在参考椭球体法线与垂线的夹角，在 AB, BA 方向上的分量： Z_1, Z_2 分别为 A, B 两点的大地天顶距； z_1, z_2 为观测天顶距。当观测天顶距转化为大地天顶距后，则大地天顶距 Z_1, Z_2 、斜距 AB 、地球曲率改正、大气折射改正与大地高差 BC 相互之间又存在一定的函数关系，于是可建立垂直角的误差方程式。在 A, B 两点间高差不大、水准路线较平坦的情况下，沿测线方向的垂线偏差是基本上随距离而匀称地变化，这样，几何水准高差与大地高差的差异主要与 θ_A 及 θ_B 有关，从而可建立几何水准的误差方程式。各类观测量的误差方程式建立后，就可以根据最小二乘原理解算未知参数。

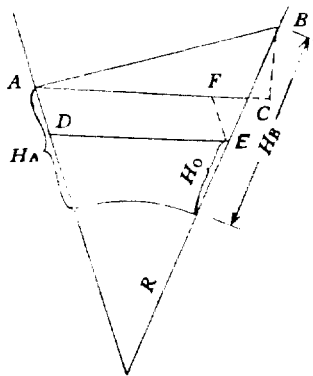


图 1

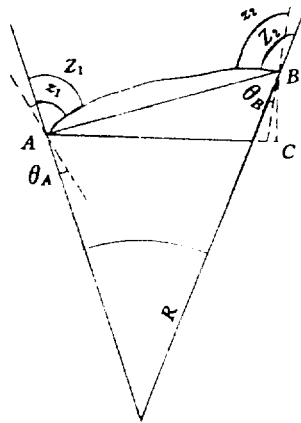


图 2

2 观测值的几项改正

2.1 水平方向的改正

地面实测水平方向归算到投影面参考椭球体上的改正 Δr 包含以下两方面内容：垂线偏

差对实测水平方向的影响及正常重力线的曲率变化对水平方向的影响。 Δr 按下式计算

$$\Delta r = \frac{\eta_{Ag} \cos A - [\zeta_{Ag} + 0''.171 h_i \sin 2\varphi] \sin A}{\tan z}$$

式中

A ——观测方向的坐标方位角；

z ——观测目标的天顶距；

h_i ——观测点的大地高 (km)；

ζ_{Ag} ——观测点天文大地垂线偏差的子午分量， $0''.171 h_i \sin 2\varphi$ 是将此分量化为垂线和法线之间夹角的子午分量；

η_{Ag} ——天文大地垂线偏差的卯酉分量。

一般 $0''.171 h_i \sin 2\varphi$ 是一个小值，用下式代替不影响改正精度

$$\Delta r_i = \frac{\eta_{Ag} \cos A - \zeta_{Ag} \sin A}{\tan z}$$

2.2 垂直角的改正

(1) 仪器高与觇标高不相等的改正

为了便于成果的处理，观测的垂直角和斜距都应归算到测站标心至目标标心的相应值，对观测值要加仪器高与觇标高不相等的改正。根据图3可直接写出垂直角的该项改正 $(\Delta\beta'_{ik})_1$ 。

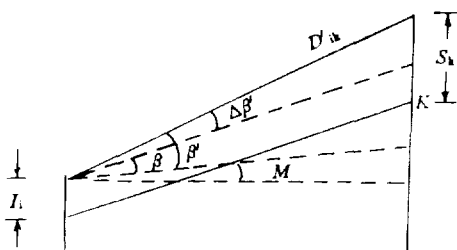


图3

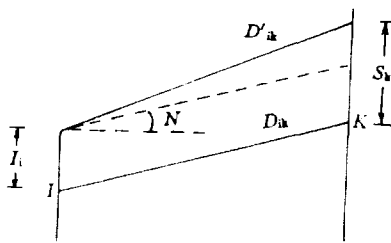


图4

图注： $M = \frac{D'_{ik} \cos \beta'_{ik}}{2R} \cdot \rho''$ ， $N = \beta'_{ik} + \frac{D'_{ik} \cos \beta'_{ik}}{2R} \cdot \rho''$

$$(\Delta\beta'_{ik})_1 = - \frac{(S_k - I_i) \cos (\beta'_{ik} + \frac{D'_{ik} \cos \beta'_{ik}}{2R} \cdot \rho'') \cdot \rho''}{D_{ik}}$$

上式 I_i 与 S_k 分别为仪器高与觇标高。

(2) 观测垂直角化为大地垂直角的改正

观测天顶距化为大地天顶距的改正为

$$Z - z = (\zeta_{Ag} + 0''.171 h_i \sin 2B) \cos A + \eta_{Ag} \sin A$$

上式中， Z 是大地天顶距； z 是观测天顶距； B 是大地纬度，可以采用测区的平均纬度 B_m 。

由于大地垂直角 $\beta_{ik} = 90^\circ - Z$ ，于是大地垂直角的改正可写为

$$(\Delta\beta'_{ik})_2 = \beta_{ik} - \beta'_{ik} = - [(\zeta_{Ag} + 0''.171 h_i \sin 2B_m) \cos A + \eta_{Ag} \sin A]$$

(3) 斜距的改正

根据图 4 可写出观测斜距归算到测站标心至目标标心距离的改正为

$$\Delta D'_{ik} = D_{ik} - D'_{ik} = - (S_k - I_i) \sin \left(\beta'_{ik} + \frac{D'_{ik} \cos \beta'_{ik}}{2R} \rho'' \right)$$

式中 I_i 及 S_k 分别为测距仪的仪高及镜高。

3 地形均衡垂线偏差的计算

三维网计算公式是建立在以参考椭球体法线为依据的基础上, 外业取得的观测数据是以垂线方向为依据, 为此, 对观测数据需要加天文大地垂线偏差的改正, 化成以参考椭球体法线为依据的数据。以上已述及, 对于小规模控制网的观测数据归算利用地形均衡垂线偏差效果较好, 在这次研究中, 三维网的观测数据也是用均衡垂线偏差加以改正的, 现将计算垂线偏差的一般公式列出, 详细计算方法可参阅文献 [1]。

3.1 任一方块 R_i 之计算

$$\begin{aligned} R_1 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, & R_2 &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \\ R_3 &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, & R_4 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \\ R_5 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + Z^2}, & R_6 &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + Z^2}, \\ R_7 &= \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + Z^2}, & R_8 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + Z^2}. \end{aligned}$$

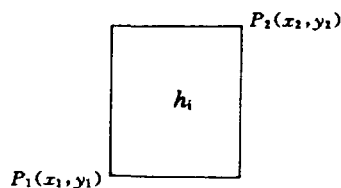


图 5

其中 x_1, y_1 及 x_2, y_2 为方块两个角点 P_1, P_2 的直角坐标; h_i 为方块的高程; h_0 为计算点高程; $Z = h_i - h_0$ 。

3.2 子午方向的地形均衡垂线偏差之计算

$$(1) \zeta''_T = C \cdot [Z \cdot \ln A_1 + y_2 \cdot \ln A_2 + y_1 \cdot \ln A_3 + x_2 (\arctan A_4 - \arctan A_5) + x_1 (\arctan A_6 - \arctan A_7)]$$

式中:

$$A_1 = \frac{(y_2 + R_7) \cdot (y_1 + R_5)}{(y_2 + R_6) \cdot (y_1 + R_4)}, \quad A_2 = \frac{(Z + R_7) \cdot R_4}{(Z + R_6) \cdot R_3},$$

$$A_3 = \frac{(Z + R_5) \cdot R_2}{(Z + R_6) \cdot R_1}, \quad A_4 = \frac{y_1 \cdot Z}{x_2 \cdot R_6},$$

$$A_5 = \frac{y_2 \cdot Z}{x_2 \cdot R_7}, \quad A_6 = \frac{y_2 \cdot Z}{x_1 \cdot R_6}, \quad A_7 = \frac{y_1 \cdot Z}{x_1 \cdot R_5},$$

$$C = \frac{3\delta}{4\pi R \delta_m} \rho'', \quad \delta \text{ 为地壳密度, } \delta_m \text{ 为地球密度, 地球半径 } R \text{ 以 m 为单位。}$$

$$(2) \zeta''_D = -\frac{h}{T} (\zeta''_T)$$

式中 (ζ''_T) 的计算同 ζ''_T , 但其中 $Z = T$, 而 T 为测区地壳均衡深度 (km)。

$$(3) \zeta''_{DT} = \zeta''_T + \zeta''_D$$

3.3 卯酉方向的地形均衡垂线偏差之计算

$$(1) \eta''_T = C \cdot [Z \cdot \ln B_1 + x_2 \cdot \ln B_2 + x_1 \cdot \ln B_3 + y_2 (\arctan B_4 - \arctan B_5) + y_1 (\arctan B_6 - \arctan B_7)]$$

式中:

$$B_1 = \frac{(x_2 + R_7)(x_1 + R_5)}{(x_2 + R_6)(x_1 + R_4)}, \quad B_2 = \frac{(Z + R_7)R_2}{(Z + R_6)R_3}$$

$$B_3 = \frac{(Z + R_5)R_4}{(Z + R_8)R_1}, \quad B_4 = \frac{x_1 \cdot Z}{y_2 \cdot R_8}$$

$$B_5 = \frac{x_2 \cdot Z}{y_1 \cdot R_7}, \quad B_6 = \frac{x_2 \cdot Z}{y_1 \cdot R_6}, \quad B_7 = \frac{x_1 \cdot Z}{y_1 \cdot R_5}$$

$$(2) \quad \eta'_0 = -\frac{h}{T} (\eta'_r)$$

式中 (η'_r) 的计算同 η'_r , 但 $Z=T$ 。

$$(3) \quad \eta'_{r0} = \eta'_r + \eta'_0$$

4 观测量的微分关系式

在三维控制测量中, 一个测站的观测量有斜距 D 、垂直角 β 及方位角 A , 其中斜距 D 与垂直角 β 是使全区平面坐标系与高差发生联系的观测量。图 6 是通过测站点 P_i , 照准点 P_k 及地球中心 O 的剖面图, EF 为高程等于 h_0 的投影平面, 也是全区平面坐标系所在的平面。过 P_i 作 $\overline{P_iC} \parallel EF$, 过 P_k 作 $\overline{P_kK} \perp \overline{P_iC}$, $\overline{P_iC}$ 与 $\overline{P_kK}$ 相交于 K 点。 $\overline{P_kK}$ 与 $\overline{P_iC}$ 长度较接近。 $\overline{P_kK}$ 可视作 P_i, P_k 两点间的大地高差 $H_k - H_i$ 。再通过 P_i, P_k 的平均高程作平面 AB 平行于 EF , 则 $\overline{AB} = \overline{P_kK}$ 。

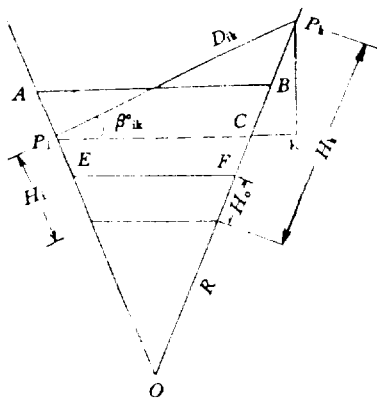


图 6

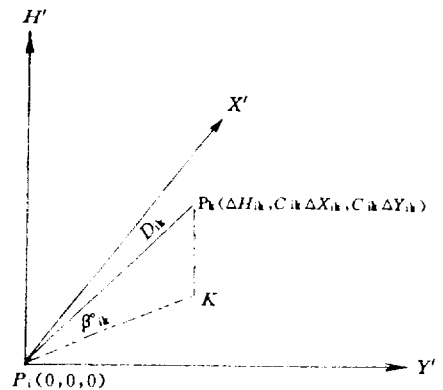


图 7

以测站点 P_i 为原点可引进一个如图 7 所示的测站直角坐标系, 取通过 P_i 并平行于 $\overline{P_kK}$ 方向作为 H' 轴, X' 轴位于 P_iC 平面指向正北, Y' 轴位于 P_iC 平面指向正东, X', Y' 轴分别与高程为 H_0 的投影面上全区平面坐标系的 X, Y 轴相平行。这样, 斜距 D_{ik} 在平面 $X' - Y'$ 上的长度相当于在图 6 中投影到 AB 面上的长度 \overline{AB} 。设 P_i 点在全区平面坐标系中的坐标为 (X_i, Y_i) , P_k 的坐标为 (X_k, Y_k) , 则在测站坐标系中, 两者的坐标差为

$$\Delta X'_{ik} = \frac{\frac{1}{2}(H_i + H_k) + R}{H_0 + R} \cdot \Delta X_{ik} = C_{ik} \cdot \Delta X_{ik}$$

$$\Delta Y'_{ik} = C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik}$$

所以在测站坐标系中, P_i 的坐标为 $(0, 0, 0)$, P_k 的坐标为 $(\Delta H_{ik}, C_{ik} \cdot \Delta X_{ik}, C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik})$ 。 D_{ik} 为观测斜距, β'_{ik} 为测站坐标系中的垂直角, 相当于加地球曲率改正及垂直折光改正后的观测垂直角。在计算时, 起始点的高程一般只具有正常高数据, 这不影响三维网的

计算, 因计算的高差是大地高差, 起始点为正常高只不过相当于高程投影面略向上下浮动的结果。在图 7 的测站坐标系中, 斜距 D_{ik} 、垂直角 β_{ik}^0 、方位角 A 与三维坐标 X', Y', H' 之间存在下列关系:

$$D_{ik}^2 = (\Delta X'_{ik})^2 + (\Delta Y'_{ik})^2 + \Delta H_{ik}^2$$

$$\sin \beta_{ik}^0 = \Delta H_{ik} / D_{ik}$$

$$\tan A_{ik} = \Delta Y'_{ik} / \Delta X'_{ik}$$

如果用 ΔX 及 ΔY 来表示, 可以写成下列关系式:

$$D_{ik}^2 = (C_{ik} \cdot \Delta X_{ik})^2 + (C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik})^2 + \Delta H_{ik}^2$$

$$\sin \beta_{ik}^0 = \Delta H_{ik} / D_{ik}$$

$$\tan A_{ik} = \Delta Y_{ik} / \Delta X_{ik}$$

微分以上各式可导出任一测站坐标系中观测量与坐标的微分关系式:

$$dD_{ik} = \frac{C_{ik}^2 \Delta X_{ik}}{D_{ik}^3} (dX_k - dX_i) + \frac{C_{ik}^2 \Delta Y_{ik}}{D_{ik}^3} (dY_k - dY_i) + \frac{\Delta H_{ik}}{D_{ik}^2} (dH_k - dH_i) \quad (1)$$

$$d\beta_{ik}^0 = -\frac{C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} (dX_k - dX_i) - \frac{C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} (dY_k - dY_i) + \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{(D_{ik}^0)^2} (dH_k - dH_i) \quad (2)$$

$$dA_{ik} = -\frac{\Delta Y_{ik}}{d_{ik}^2} (dX_k - dX_i) + \frac{\Delta X_{ik}}{d_{ik}^2} (dY_k - dY_i) \quad (3)$$

上式中, D_{ik}^0 为近似斜距, $d_{ik} = \sqrt{(\Delta X_{ik})^2 + (\Delta Y_{ik})^2}$ 为 D_{ik}^0 在 H_0 投影面上的长度。

5 观测量的误差方程式

5.1 水平方向误差方程式

$$r_{ik} + \omega_i + Vr_{ik} = A_{ik}^0 + dA_{ik}$$

将式 (3) 代入上式整理后得到

$$Vr_{ik} = -d\omega_i + \rho'' \frac{\Delta Y_{ik}}{d_{ik}^2} dX_i - \rho'' \frac{\Delta X_{ik}}{d_{ik}^2} dY_i - \rho'' \frac{\Delta Y_{ik}}{d_{ik}^2} dX_k + \rho'' \frac{\Delta X_{ik}}{d_{ik}^2} dY_k + [A_{ik}^0 - (r_{ik} + \omega_i^0)]$$

上式中, ω_i^0 为测站 P_i 定向角的近似值; ΔX_{ik} 及 ΔY_{ik} 为 P_i, P_k 两点在 h_0 投影面上的近似坐标差: $d_{ik} = \sqrt{(\Delta X_{ik})^2 + (\Delta Y_{ik})^2}$, 近似方位角 $A_{ik}^0 = \arctan \frac{\Delta Y_{ik}}{\Delta X_{ik}}$ 。观测方向的权采用 $P_r = C/m^2$ 。

5.2 垂直角误差方程式

$$\beta_{ik} + \rho'' \frac{1-K_i}{2R} D_{ik}^0 \cos \beta_{ik}^0 + V\beta_{ik} = \beta_{ik}^0 + d\beta_{ik}^0$$

以 $\cos \beta_{ik}^0 = \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{D_{ik}^0}$ 及式 (2) 代入上式经整理后得到

$$V\beta_{ik} = \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dX_i + \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dY_i - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{(D_{ik}^0)^2} dH_i - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dX_k - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dY_k + \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{(D_{ik}^0)^2} dH_k + \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{2R} \cdot K_i + (\beta_{ik}^0 - \beta_{ik} - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{2R})$$

上式中, K 为地面大气折光系数; $\beta_{ik} = \arcsin \frac{\Delta H_{ik}}{D_{ik}^0}$ 为用近似坐标计算的垂直角; β_{ik} 为天文垂直角; $D_{ik}^0 = \sqrt{(C_{ik} \cdot d_{ik})^2 + \Delta H_{ik}^2}$ 为近似斜距。观测垂直角的权采用 $P_{\beta} = C/m_{\beta}^2$ 。

折光系数 K 为未知参数, 实践表明, 在整个测区垂直角测量中的 K 值变化较大, 不能看作一个常数; 每测站垂直测量中的 K 值也是相差较大, 同样不能看作一个常数; 惟有每条边在两端同时对向观测高度角时, 两者的 K 值比较接近, 且与测站点及照准点的高程无关, 为此, 可以将每条边看作一个未知参数 K_i 。

5.3 斜距的误差方程式

$$D_{ik} + VD_{ik} = D_{ik}^0 + dD_{ik}$$

以式 (6-1) 代入上式经整理后得到

$$VD_{ik} = -\frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta X_{ik}}{D_{ik}^0} dX_i - \frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta Y_{ik}}{D_{ik}^0} dY_i - \frac{\Delta H_{ik}}{D_{ik}^0} dH_i + \frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta X_{ik}}{D_{ik}^0} dX_k + \frac{C_{ik}^2 \Delta Y_{ik}}{D_{ik}^0} dY_k + \frac{\Delta H_{ik}}{D_{ik}^0} dH_k + (D_{ik}^0 - D_{ik})$$

D_{ik} 为观测斜距, 观测斜距的权 $P_D = C/m_D^2$ 。

5.4 水准观测高差的误差方程式

设 P_i 点在 $P_i P_k$ 方向上的天文大地垂线偏差为 θ_i ; P_k 点在 $P_k P_i$ 方向上的天文大地垂线偏差为 θ_k ; 用水准测量测得 P_i 点至 P_k 点的高差为 Δh_{ik} 。当高差 Δh_{ik} 不大, 测线不长且路线较平坦时, Δh_{ik} 可视为 P_i, P_k 两点间的正常高差, 又 $\frac{\theta_k - \theta_i}{2\rho''} D_{ik}^0 \cos \beta_{ik}^0$ 为 P_i, P_k 两点天文大地高度异常之差, 于是水准观测高差与大地高差之间按大地高的定义可建立如下关系:

$$\Delta h_{ik} + \frac{\theta_k - \theta_i}{2\rho''} D_{ik}^0 \cos \beta_{ik}^0 + Vh_{ik} = \Delta H_{ik} + d(\Delta H_{ik})$$

以 $D_{ik}^0 \cos \beta_{ik}^0 = C_{ik} d_{ik}$ 代入上式经整理后得到如下的水准观测高差的误差方程式:

$$Vh_{ik} = -dH_i + dH_k + (\Delta H_{ik} - \Delta h_{ik} - \frac{\theta_k - \theta_i}{2\rho''} \cdot C_{ik} \cdot d_{ik})$$

观测高差的权 $P_h = C/m_h^2$ 。

6 误差椭球的计算

误差椭球长短半径的计算公式

$$E = m_0 \sqrt{\lambda_E}$$

$$F = m_0 \sqrt{\lambda_F}$$

$$G = m_0 \sqrt{\lambda_G}$$

式中, $\lambda_E = 2 \sqrt{-(P/3)} \cos \varphi - \frac{a}{3}$

$$\lambda_F = 2 \sqrt{-(P/3)} \cos (\varphi + 120^\circ) - \frac{a}{3}$$

$$\lambda_G = 2 \sqrt{-(P/3)} \cos (\varphi + 240^\circ) - \frac{a}{3}$$

$$a = -(Q_{XX} + Q_{YY} + Q_{HH})$$

$$b = (Q_{XX}Q_{YY} + Q_{XX}Q_{HH} + Q_{YY}Q_{HH} - Q_{XY}^2 - Q_{XH}^2 - Q_{YH}^2)$$

$$c = (Q_{XX}Q_{YH}^2 + Q_{YY}Q_{XH}^2 + Q_{HH}Q_{XY}^2 - Q_{XX}Q_{YY}Q_{HH} - 2Q_{XY}Q_{XH}Q_{YH})$$

$$p = -\frac{a^2}{3} + b$$

$$q = \frac{2a^3}{27} - \frac{ab}{3} + c$$

$$\cos 3\varphi = \frac{-q}{2\sqrt{-(p/3)^3}}$$

误差椭球半径在 X, Y, H 轴上的分量为 U, V, W , 其方向余弦为

$$r_1 = \frac{U}{T} \quad r_2 = \frac{V}{T} \quad r_3 = \frac{W}{T}$$

$$\text{式中 } U = Q_{XH} (Q_{YY} - \lambda) - Q_{XY}Q_{YH}$$

$$V = Q_{YH} (Q_{XX} - \lambda) - Q_{XY}Q_{XH}$$

$$W = Q_{XY}^2 - (Q_{XX} - \lambda)(Q_{YY} - \lambda)$$

$$T = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$$

7 观测权的估计

在三维网平差计算中, 正确确定各类观测量的权比极为重要, 如果将水平方向的观测权定得偏大, 则平差后平面坐标的精度估算偏高而高程的精度偏低; 反之, 垂直角的权偏大则平差后高程的精度偏高而平面坐标的精度偏低。斜距的观测权偏大, 则要看哪一类分量占优势, 如果是水平分量占优势, 则与水平方向观测权偏大的作用一致; 垂直分量占优势, 则与垂直角观测权偏大的作用一致。唯有各观测量的权比合适时, 平差后的精度才比较可靠。

在研究过程中, 在某工地建立了一个三维控制网, 现将观测值按不同权比的计算结果列于表 1, 表中数据充分反映出上面所阐述的规律性。同时从表中可以看出, 权比不同仅在此例中可以使点位精度最大改变 44%, 而实际点位精度并没有如此大的改变。

最小二乘原理是在各观测值对应的单位权方差相同的条件下导出的, 用验后值来检验并修改先验权比, 可以获得平差结果的合理性。本文就是根据以上原则来确定各类观测量的权比, 下面列出有关计算公式及说明具体作法, 至于公式的详细推导过程可参阅文献 [6]。

设 A_1 A_2 A_3 为对应于水平方向、垂直角、斜距观测量的误差或方程式系数阵, 相应的改正数向量为 V_1 V_2 V_3 , 相应的权阵为 P_1 P_2 P_3 , 法方程式系数中, 由以上三组误差式分别组成的部分系数阵为

$$C_1 \quad m \times m = A_1' P_1 A_1 = \begin{pmatrix} C_{11} & & \\ & \dots & \\ & & C_{1m} \end{pmatrix}$$

$$C_2 \quad m \times m = A_2' P_2 A_2 = \begin{pmatrix} C_{21} & & \\ & \dots & \\ & & C_{2m} \end{pmatrix}$$

$$C_3 \quad m \times m = A_3' P_3 A_3 = \begin{pmatrix} C_{31} & & \\ & \dots & \\ & & C_{3m} \end{pmatrix}$$

再设

$$\left(C_{1\dots m} \right) = \left(C_{11\dots C_{1m}} \right) + \left(C_{22\dots C_{2m}} \right) + \left(C_{31\dots C_{3m}} \right)$$

$$\text{Sp}(K_1) = \left[\frac{C_{1i}}{C_i} \right] \quad (i=1 \sim m)$$

$$\text{Sp}(K_1^2) = \left[\frac{C_{1i}^2}{C_i^2} \right]$$

$$\text{Sp}(K_1 K_2) = \left[\frac{C_{1i} \cdot C_{2i}}{C_i^2} \right]$$

$$\text{Sp}(K_1 K_3) = \left[\frac{C_{1i} \cdot C_{3i}}{C_i^2} \right]$$

.....

于是,根据文献[6]的推导过程给出计算 $\sigma_{01}^2, \sigma_{02}^2, \sigma_{03}^2$ 的公式如下:

$$V'_1 P_1 V_1 = \{n_1 - 2\text{Sp}(K_1) + \text{Sp}(K_1^2)\} \sigma_0^2 + \text{Sp}(K_1 K_2) \sigma_{02}^2 + \text{Sp}(K_1 K_3) \sigma_{03}^2$$

$$V'_2 P_2 V_2 = \text{Sp}(K_1 K_2) \sigma_{01}^2 + \{n_2 - 2\text{Sp}(K_2) + \text{Sp}(K_2^2)\} \sigma_{02}^2 + \text{Sp}(K_2 K_3) \sigma_{03}^2$$

$$V'_3 P_3 V_3 = \text{Sp}(K_1 K_3) \sigma_{01}^2 + \text{Sp}(K_2 K_3) \sigma_{02}^2 + \{n_3 - 2\text{Sp}(K_3) + \text{Sp}(K_3^2)\} \sigma_{03}^2$$

式中 $\hat{\sigma}_{01}^2, \hat{\sigma}_{02}^2, \hat{\sigma}_{03}^2$ 分别为方向、垂直角、斜距观测量的单位权方差估值。当 $\hat{\sigma}_{01}^2, \hat{\sigma}_{02}^2, \hat{\sigma}_{03}^2$ 三者相差较大时,表明所定的先验权比不恰当,此时,可按下式修改观测值的权:

$$P'_1 = P_1 \frac{\sigma_0^2}{\hat{\sigma}_{01}^2} \quad P'_2 = P_2 \frac{\sigma_0^2}{\hat{\sigma}_{02}^2} \quad P'_3 = P_3 \frac{\sigma_0^2}{\hat{\sigma}_{03}^2}$$

一般可以设 $\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_{01}^2$, 则

$$P'_1 = P_1 \quad P'_2 = P_2 \frac{\hat{\sigma}_{01}^2}{\hat{\sigma}_{02}^2} \quad P'_3 = P_3 \frac{\hat{\sigma}_{01}^2}{\hat{\sigma}_{03}^2}$$

以 $P'_2 = C / (m'_\beta)^2$ 及 $P'_3 = C / (m'_D)^2 = C / (K^2 + (r')^2 \cdot S^2 \cdot 10^{-6})$ 代入上式得到

$$m'_\beta = m_\beta \frac{\hat{\sigma}_{02}}{\hat{\sigma}_{01}} \quad r' = r \frac{\hat{\sigma}_{03}}{\hat{\sigma}_{01}}$$

用 m'_β 及 r' 修改垂直角的观测标准差及测距的比例误差,直到 $\hat{\sigma}_{01}^2, \hat{\sigma}_{02}^2, \hat{\sigma}_{03}^2$ 三者大致接近即可。在表 1 中,用 $r = 1.71 \times 10^{-6}$ 及 $m_\beta = 1''.74$ 定权,得到 $\hat{\sigma}_{01}^2 \approx \hat{\sigma}_{02}^2 \approx \hat{\sigma}_{03}^2$, 表明该列所计算的点位中误差较为可靠。在三维网观测中,观测的水准路线极少,而水准测量的观测精度为人们所熟悉,用其先验方差定权,对点位精度的估计不会有明显的影响。

8 从三维网观测的实例对几种计算方法的讨论

在某工地建立了一个如图 8 所示的三维控制网,共有六个测点,除了 1~5 方向不通视外,在每个测点上观测了其余所有测点的水平方向、垂直角及斜距,此外在 2、4 两点间加测了水准高差。斜距最大边长为 2711 m,最短为 920 m,平均斜距边长约 1.7 km。垂直角最大为 $6^\circ 59'$ 。观测水平方向及垂直角均使用 Wild T3 经纬仪;斜距使用 ME3000 短程测距仪;水准使用 Koni 007 自动安平水准仪。水平方向观测 12 个测回,在一个时间段内完成;斜距观测占两个时间段,每个时间段观测 2 测回;垂直角观测 6 测回,在一个时间段内完成。表 2 列出了计算的地形均衡垂线偏差分量。

表 1

| 测点 | $r=1.65 \times 10^{-6}, m_{\beta}=2^{\circ}.9$ | | $r=1.76 \times 10^{-6}, m_{\beta}=1^{\circ}.75$ | | $r=1.71 \times 10^{-6}, m_{\beta}=1^{\circ}.74$ | | $r=1.66 \times 10^{-6}, m_{\beta}=1^{\circ}.10$ | |
|-----|--|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|
| | $\hat{\sigma}_{01}=0.102, \hat{\sigma}_{02}=0.037$ | | $\hat{\sigma}_{01}=0.105, \hat{\sigma}_{02}=0.101$ | | $\hat{\sigma}_{01}=0.104, \hat{\sigma}_{03}=0.102$ | | $\hat{\sigma}_{01}=0.102, \hat{\sigma}_{02}=0.255$ | |
| | $\hat{\sigma}_{03}=0.116$ | | $\hat{\sigma}_{03}=0.094$ | | $\hat{\sigma}_{03}=0.103$ | | $\hat{\sigma}_{03}=0.111$ | |
| | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ |
| Y/m | | Y/m | | Y/m | | Y/m | | |
| H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | |
| 2 | 10310.2954 | ± 1.19 | 10310.2953 | ± 1.41 | 10310.2954 | ± 1.39 | 10310.2953 | ± 1.70 |
| | 2017.0646 | | 2011.0646 | | 2017.0646 | | 2017.0646 | |
| | 161.7595 | ± 6.58 | 161.7595 | ± 4.64 | 161.7595 | ± 4.63 | 161.7596 | |
| 3 | 11747.6530 | ± 1.79 | 11747.6531 | ± 2.11 | 11747.6530 | ± 2.08 | 11747.6530 | ± 2.57 |
| | 2859.9910 | | 2859.9910 | | 2859.9910 | | 2859.9910 | |
| | 70.9178 | ± 6.30 | 70.9207 | ± 4.50 | 70.9206 | ± 4.50 | 70.9215 | |
| 4 | 10670.7397 | ± 2.03 | 10670.7397 | ± 2.39 | 10670.7397 | ± 2.37 | 10670.7396 | ± 2.91 |
| | 3321.2190 | | 3321.2190 | | 3321.2190 | | 3321.2191 | |
| | 173.1904 | ± 6.64 | 173.1903 | ± 4.74 | 173.1903 | ± 4.14 | 173.1902 | |
| 5 | 12621.8280 | ± 2.48 | 12621.8281 | ± 2.89 | 12621.8281 | ± 2.86 | 12621.8281 | ± 3.53 |
| | 3142.5569 | | 3142.5569 | | 3142.5569 | | 3142.5569 | |
| | 121.7761 | ± 7.12 | 121.7768 | ± 5.02 | 121.7768 | ± 5.02 | 121.7776 | |
| 6 | 12741.6899 | ± 2.01 | 12741.6898 | ± 2.31 | 12741.6898 | ± 2.29 | 12741.6897 | ± 2.81 |
| | 1572.8803 | | 1512.8807 | | 1572.8807 | | 1572.8807 | |
| | 261.8353 | ± 5.84 | 261.8364 | ± 4.11 | 261.8364 | ± 4.17 | 261.8368 | |

附注：(1)水平方向测角标准差一律采用 $0^{\circ}.7$ ；
 (2) r 为测距的比例误差，固定误差一律采用 0.2^{mm} ；
 (3) m_{β} 为垂直角测角标准差。

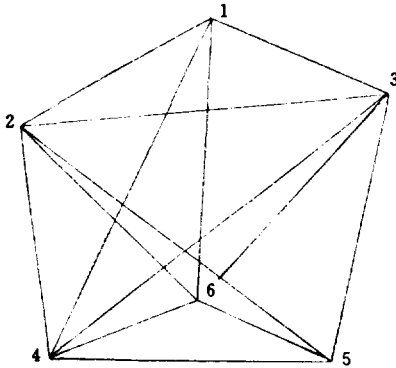


图 8

表 2

| 测点 | 垂线偏差分量 | |
|----|---------|----------|
| | ξ'' | η'' |
| 1 | -0.29 | +1.77 |
| 2 | +4.92 | -0.52 |
| 3 | +1.20 | +0.82 |
| 4 | +6.48 | -1.32 |
| 5 | -0.97 | +1.38 |
| 6 | -1.96 | +2.64 |

对以上三维网的观测数据采用三种平差计算方法进行处理。第一种方法是以地形均衡垂线来改正水平方向及垂直角的观测值，并以每条边的折光系数作一个未知参数，即本文所介绍的方法，称为 A1 类方法；在 A1 类方法中，对观测值不加垂线偏差改正的称为 A2 类方法。第二种方法是将平面与高程的平差计算分开处理，也分为两类情况，一类是对观测值加地形均衡垂线偏差改正的，称为 B1 类方法；另一类是观测值不加改正的，称为 B2 类方法。第三种方法是利用一个点的地形均衡垂线偏差的两个分量作为已知分量，其余 $n-1$ 个测点的 $2(n-1)$ 个垂线偏差分量作为未知参数，每条边的折光系数仍作为一个未知参数，这种平

差方法称为 C 类方法。其误差方程式具有下列形式：

$$V_{r_{ik}} = -d\omega_i + \rho'' \frac{\Delta Y_{ik}}{d_{ik}^2} dX_i - \rho'' \frac{\Delta X_{ik}}{d_{ik}^2} dY_i - \rho'' \frac{\Delta Y_{ik}}{d_{ik}^2} dX_k + \rho'' \frac{\Delta X_{ik}}{d_{ik}^2} dY_k + \frac{\Delta Y_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{C_{ik} d_{ik}^2} \zeta_i - \frac{\Delta X_{ik} \Delta H_{ik}}{C_{ik} d_{ik}^2} \eta_i + [A_{ik}^0 - (r_{ik} + \omega_i^0)]$$

$$V_{\beta_{ik}} = \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dX_i + \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dY_i - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{(D_{ik}^0)^2} dH_i - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dX_k - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \cdot \Delta H_{ik}}{d_{ik} (D_{ik}^0)^2} dY_k + \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{(D_{ik}^0)^2} dH_k + \frac{\Delta X_{ik}}{d_{ik}} \zeta_i + \frac{\Delta Y_{ik}}{d_{ik}} \eta_i + \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{2R} \cdot K_i + (\beta_{ik}^0 - \beta_{ik} - \rho'' \frac{C_{ik} \cdot d_{ik}}{2R})$$

$$V_{D_{ik}} = -\frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta X_{ik}}{(D_{ik}^0)^2} dX_i - \frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta Y_{ik}}{D_{ik}^0} dY_i - \frac{\Delta H_{ik}}{D_{ik}^0} dH_i + \frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta X_{ik}}{D_{ik}^0} dX_k + \frac{C_{ik}^2 \cdot \Delta Y_{ik}}{D_{ik}^0} dY_k + \frac{\Delta H_{ik}}{D_{ik}^0} dH_k (D_{ik}^0 - D_{ik})$$

$$V_{\lambda_{ik}} = -dH_i + dH_k + \frac{1}{2\rho''} \cdot C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \zeta_i + \frac{1}{2\rho''} \cdot C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \eta_i + \frac{1}{2\rho''} \cdot C_{ik} \cdot \Delta X_{ik} \zeta_k + \frac{1}{2\rho''} \cdot C_{ik} \cdot \Delta Y_{ik} \eta_k + (\Delta H_{ik} - \Delta l_{ik} - \frac{\theta_i - \theta_k}{2\rho} \cdot C_{ik} \cdot d_{ik})$$

表 3

| 测点 | A1 | A2 | B2 |
|----|-------|-------|-------|
| | mH/mm | | |
| 2 | 8.68 | 8.96 | 11.86 |
| 3 | 8.59 | 8.87 | 12.20 |
| 4 | 8.69 | 8.97 | 11.90 |
| 5 | 10.33 | 10.66 | 14.20 |
| 6 | 8.42 | 8.69 | 12.06 |
| 平均 | 8.97 | 9.26 | 12.48 |

在垂直角观测数据中,发现 1~4、3~4 两条边的垂直角观测值含有粗差,现将 A1 类、A2 类及 B2 类等三种平差方法计算的高程精度列于表 3,其中 A1、A2 类计算是采用了最合适的权比。

从计算结果看出高程网平差结果(即 B2 类方法)与 A1 类相比,误差增大了 39%,表明这种粗差不是由于地形均衡垂线偏差计算不可靠所产生,而多半是由于在边的两端同时对向观测高度角时,两个相反方向的视线受到差异较大的折光影响所致。

剔除以上含有粗差的两条边的垂直角后,将各种平差方法计算的点位及其精度列于表 4。将 A1 类方法与 B1 类相比,A2 类与 B2 类相比,两者具有如下共同点:(1)平面点位精度相互比较接近,但高程精度 A 类方法高得多,所以 B1 类点位总误差比 A1 类增大了 22%,B2 类比 A2 类增大了 19%。(2)A 类与 B 类计算的同测点高程之差,当测点高程接近网的平均高程时,其差值小;与网的平均高程相差越大,差值也越大。例如 3 号测点高程最低,A1 类

B1 类两种方法计算的高程相差最大,达 1.6^{mm} ,这表明斜距的垂直分量在三维网平差中起到了约束作用,这种作用还表现在当垂直角观测误差越大,A 类计算高程的精度更高于 B 类。

(3)A 类方法平差后,三维坐标差与斜距的下列几何关系仍能满足

$$C_{ik}^2(\Delta X_{ik}^2 + \Delta Y_{ik}^2) + \Delta H_{ik}^2 = (D_{ik} + V_{D_{ik}})^2$$

从这方面意义来说,A 类平差方法比 B 类要严密。

表 4

| 测点 | A1 | | A2 | | B1 | | B2 | | C | |
|-----|--|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | $\hat{\sigma}_{01}=0.104, \hat{\sigma}_{02}=0.102$ | | $\hat{\sigma}_{01}=0.115, \hat{\sigma}_{02}=0.115$ | | $\hat{\sigma}_{01}=0.104, \hat{\sigma}_{02}=0.104$ | | $\hat{\sigma}_{01}=0.177, \hat{\sigma}_{02}=0.118$ | | | |
| | $\hat{\sigma}_{03}=0.103$ | | $\hat{\sigma}_{03}=0.114$ | | | | | | | |
| | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ | X/m | $\frac{m_{XY}}{\text{mm}}$ |
| Y/m | | Y/m | | Y/m | | Y/m | | Y/m | | |
| H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | H/m | $\frac{m_H}{\text{mm}}$ | |
| 2 | 10310.2954 | ± 1.39 | 10310.2950 | ± 1.64 | 10310.2953 | ± 1.27 | 10310.2949 | ± 1.48 | 10310.2957 | ± 1.28 |
| | 2017.0646 | | 2017.0648 | | 2017.0646 | | 2017.0648 | | 2017.0644 | |
| | 161.7595 | ± 4.63 | 161.7449 | ± 4.25 | 161.7595 | ± 5.94 | 161.7447 | ± 5.44 | 161.7779 | ± 17.26 |
| 3 | 11747.6530 | ± 2.08 | 11747.6540 | ± 2.39 | 11747.6531 | ± 1.90 | 11747.6541 | ± 2.16 | 11747.6527 | ± 2.53 |
| | 2859.9910 | | 2859.9909 | | 2859.9909 | | 2859.9908 | | 2859.9918 | |
| | 70.9206 | ± 4.50 | 70.9310 | ± 4.13 | 70.9222 | ± 5.81 | 70.9321 | ± 5.33 | 70.9237 | ± 19.20 |
| 4 | 10670.7397 | ± 2.37 | 10670.7397 | ± 2.73 | 10670.7397 | ± 2.16 | 10670.7395 | ± 2.47 | 10670.7401 | ± 2.31 |
| | 3321.2190 | | 3321.2191 | | 3321.2190 | | 3321.2192 | | 3321.2186 | |
| | 173.1903 | ± 4.74 | 173.1797 | ± 4.37 | 173.1903 | ± 6.01 | 173.1795 | ± 5.51 | 173.2159 | ± 35.47 |
| 5 | 12621.8281 | ± 2.86 | 12621.8288 | ± 3.25 | 12621.8282 | ± 2.61 | 12621.8289 | ± 2.94 | 12621.8275 | ± 2.68 |
| | 3142.5569 | | 3142.5561 | | 3142.5568 | | 3142.5561 | | 3142.5576 | |
| | 121.7768 | ± 5.02 | 121.7895 | ± 4.60 | 121.7772 | ± 6.44 | 121.7898 | ± 5.90 | 121.7971 | ± 30.71 |
| 6 | 12741.6898 | ± 2.29 | 12741.6904 | ± 2.58 | 12741.6898 | ± 2.07 | 12741.6904 | ± 2.32 | 12741.6880 | ± 2.95 |
| | 1572.8807 | | 1572.8788 | | 1572.8806 | | 1572.8788 | | 1572.8811 | |
| | 261.8364 | ± 4.17 | 261.8345 | ± 3.83 | 261.8371 | ± 5.38 | 261.8348 | ± 4.93 | 261.8506 | ± 12.78 |
| 平均 | $\frac{m_{XY}}$ | ± 2.25 | | ± 2.57 | | 2.05 | | ± 2.32 | | ± 2.42 |
| | $\frac{m_H}$ | ± 4.62 | | ± 4.24 | | ± 5.93 | | ± 5.43 | | ± 24.62 |
| | $\frac{m_{XYH}}$ | ± 5.41 | | ± 4.96 | | ± 6.27 | | ± 5.90 | | ± 24.74 |

由于以上三维网各测点间的高差不大,最大垂直角不到 7° ,当各点间高差再增大时,三维网平差提高点位精度的效果无疑会更显著。这里还要提及的是,不顾及地形均衡垂线偏差(严格地说,应该是天文大地垂线偏差)影响的 A2 类三维网平差方法,斜距的水平分量是不能真正化到与参考椭球体面平行的投影面上,从这一点来说,A2 类方法是不够严密的。对于精密控制网如果要求点的坐标正确,则应采用 A1 平差方法。

C 类方法由于设立的未知参数过多,平差后的点位误差最大,且每次平差对同一点都会出现差异较大的垂线偏差分量,显然是不合理的,所以 C 类方法是不可取的。

9 垂线偏差改正对形变监测网测定位移量的影响

形变监测网的任务是测定空间测点的位移量,工程上对位移量测定精度有很高的要求。三维网的观测数据归算改正虽然可以利用内业计算的地形均衡垂线偏差,但在地形图上的量测工作量还是较大的。为此,有必要讨论垂线偏差改正对形变监测网测定动点位移的影

响。

形变监测网按间接观测平差时,其误差方程式的一般形式为

$$V=AX+d-L$$

式中, d 为常数向量; L 为观测值向量。用A1类方法计算时, $L=L_1$ 为经天文大地垂线偏差归算改正后的观测值向量, X_1 为未知数向量,其法方程式为

$$A'PA X_1 + A'P(d-L_1) = 0$$

解算上式得到

$$X_1 = - (A'PA)^{-1} A'P(d-L_1) \quad (4)$$

当某些测点发生位移后,观测值向量增加 ΔL ,这时未知数向量为

$$X_1 + \Delta X_1 = - (A'PA)^{-1} A'P(d-L_1 - \Delta L) \quad (5)$$

(5)-(4)得位移向量

$$\Delta X_1 = (A'PA)^{-1} A'P(\Delta L)$$

用A2类方法计算时, $L=L_2$ 为观测值向量,其未知数向量为

$$X_2 = - (A'PA)^{-1} A'P(d-L_2) \quad (6)$$

在与上述相同情况下,当某些测点发生位移后,观测值向量仍然增加 ΔL ,这时的未知数向量为

$$X_2 + \Delta X_2 = - (A'PA)^{-1} A'P(d-L_2 - \Delta L) \quad (7)$$

由式(7)-(6)得位移量

$$\Delta X_2 = (A'PA)^{-1} A'P(\Delta L)$$

显然 $\Delta X_2 = \Delta X_1$

由此可以得出这样的结论:利用形变监测网重复测量成果计算动点相对稳定点(或动点相对动点)的位移量(或相对位移量),对观测数据作天文大地垂线偏差归算改正与不改正的计算结果是不一致的。表5是用一个三维网计算的实例来进一步表明上述结论的可靠性。

10 结论

(1)本文所介绍的短边三维网计算原理,是以平差后三维坐标增量与改正后的观测值保持严格几何关系的原则为依据的。用天文大地垂线偏差改正观测值(应采用适合我国领土的参考椭球面的新坐标计算),所得的高差是大地高差,平面坐标是在平行于参考椭球面的某一平面上确定的。如果用地形均衡垂线偏差改正观测值,计算的高差是相当于另一类的大地高差(与上述的大地高差比较接近),这类大地高差是以极小范围地区重合较好的参考椭球面为计算依据的,而平面坐标是在平行于上述椭球面的平面上确定的。所以用地形均衡垂线

偏差改正观测值,在理论上也是严密的。

表 5

| 测点 | A1 | | | A2 | | |
|----|------------|------------|---------|------------|------------|---------|
| | (I) | (I) | | (I) | (I) | |
| | X/m | X/m | | X/m | X/m | |
| | Y/m | Y/m | (I)-(I) | Y/m | Y/m | (I)-(I) |
| | H/m | H/m | /mm | H/m | H/m | /mm |
| 2 | 10310.2954 | 10310.2947 | +0.7 | 10310.2952 | 10310.2945 | +0.7 |
| | 2017.0646 | 2017.0649 | -0.3 | 2017.0647 | 2017.0651 | -0.4 |
| | 161.7595 | 161.7589 | +0.6 | 161.7451 | 161.7444 | +0.7 |
| 3 | 11747.6530 | 11747.6522 | +0.8 | 11747.6539 | 11747.6531 | +0.8 |
| | 2859.9910 | 2859.9915 | -0.5 | 2859.9910 | 2859.9915 | -0.5 |
| | 70.9208 | 70.9193 | +1.5 | 70.9304 | 70.9290 | +1.4 |
| 4 | 10670.7396 | 10670.7394 | +0.2 | 10670.7394 | 10670.7391 | +0.3 |
| | 3321.2190 | 3321.2194 | -0.4 | 3321.2192 | 3321.2196 | -0.4 |
| | 173.1903 | 173.1897 | +0.6 | 173.1799 | 173.1792 | +0.7 |
| 5 | 12621.8281 | 12621.8270 | +1.1 | 12621.8287 | 12621.8276 | +1.1 |
| | 3142.5569 | 3142.5586 | -1.7 | 3142.5564 | 3142.5581 | -1.7 |
| | 121.7768 | 121.7748 | +2.0 | 121.7895 | 121.7875 | +2.0 |
| 6 | 12741.6898 | 12741.6953 | -5.5 | 12741.6902 | 12741.6957 | -5.5 |
| | 1572.8807 | 1572.8901 | -9.4 | 1572.8789 | 1572.8883 | -9.4 |
| | 261.8365 | 261.8359 | +0.6 | 261.8344 | 261.8337 | +0.7 |

注：“I”表示用实测数据平差计算的结果，“I”表示对I的观测数据略作变更后的计算结果。

(2)用同样经地形均衡垂线偏差改正的观测值,按三维网平差处理后的成果与平面、高程分开平差处理的相比,在地形起伏还不是很大的地区,平均点位精度(包括高程)前者可提高18%,同时减少了点位系统误差;当地形起伏再增大时,点位精度还可以提高,具有明显的优越性及实用性。

(3)未经垂线偏差改正的观测值,按三维网平差处理,这样作虽然不是严密的,但其结果与用同样观测值的平面、高程分开平差相比,点位精度也有显著改善,在上述同样地区条件下,前者比后者平均点位精度提高16%。目前有不少高精度控制网,主要观测量是水平方向、斜距与水准高差,对以上三类观测量也同样可用三维网平差方法进行处理,精度也会有所提高,所以本文所介绍的建立三维网方法具有广泛的适用性。

(4)用形变监测网观测动点位移量,观测值不必作垂线偏差的改正,按三维网平差方法处理,与观测值经改正的效果是不一致的。

(5)无论是平面网或三维网平差,观测量间的权比对正确评定精度极为重要,只有权比合适,平差后的精度才比较可靠,这对三维网平差更为重要。

(6)经试算,以各测点的垂线偏差分量为未知参数的三维网平差方法,平差值精度是不高的,且每次解算同测点的垂线偏差分量随观测值的差异,变化较大,是不值得提倡的。

(7)在一个小范围测区,同一地点在不同时间段的垂直折光系数也是差异很大,为此,三

维网平差时,应采用一条边的折光系数作为一个未知参数。在实际观测时,“同时对向观测垂直角”只经历一个时间段,有少数边直、反视的折光影响仍有较大差异,今后垂直角应至少观测两个时间段,以削弱以上折光的随机影响。为了进一步提高三维网的高程精度,观测边长有缩短的必要。

(8)本文所介绍的建立短边三维网的方法,除了平差后的点位精度能进一步提高且适用性强外,增加外业工作量不多,而且计算方法也比较简单。

参 考 文 献

- 1 西南冶金地质勘探公司测绘队,长江流域规划办公室勘测处测量科. 高山区矿山三角网垂线偏差的试验研究.
- 2 管泽霖,宁津生. 地球形状及外部重力场(上册).
- 3 武汉测绘学院天文与重力测量教研组. 大地重力学.
- 4 薄志鹏. 三维大地测量概况. 武测资料,1981,1~2
- 5 卡尔·林纳教授讲稿. 关于大地测量、工程测量、海洋测量的一些问题,1981.10
- 6 周江文. 观测权的估计. 误差理论.
- 7 路伯祥,廖重华. Helmert 趋近定权法在导线平差中的应用.
- 8 张基石,曾志元. 高山区矿山控制网垂线偏差试验研究报告.
- 9 赵全麟. 变形观测控制网的几个问题探讨.
- 10 陶本藻. 自由网平差与变形分析. 北京:测绘出版社,1984
- 11 杨国华. 场论方法在地壳垂直形变数据处理中的应用. 地壳形变与地震,1991.11(2)
- 12 杨国华. 水平形变场的函数描述及其实现方法. 地壳形变与地震,1992.12(1)
- 13 杨国华,马青. 通量均衡意义下中国大陆现今地壳垂直及其梯度与构造活动的某些关系. 地壳形变与地震,1992,12(4)
- 14 国家地震局地质研究所. 现代地壳运动研究. 北京:地震出版社,1988
- 15 张文佑等. 中国及邻区海陆大地构造. 北京:科学出版社,1986
- 16 国家地震局分析预报中心. 中国地震大形势预测研究. 北京:地震出版社,1990
- 17 国家地震局. 中国岩石动力学地图集. 北京:中国地图出版社,1989
- 18 国家地震局分析预报中心. 中国及邻近地震震源机制图. 北京:中国科学技术出版社,1991
- 19 Rauhala U A. General Theory of Algebra in Nonlinear Least Squares and Robust Estimation. ASPRS Spring Convention, Denver,1990
- 20 Rauhala U A, Kunkel G W, Kluth V S, et al. Global Least Squares Matching Automates the Image Registration Process. ASPRS. Washington D. C. August,1992
- 21 Rosenholm D. Accuracy Improvement of Digital Matching for Evaluation of Digital Terrain Models. Int. Arc. of ISPRS Vol. 26, Comm. 1, Rovaniemi,1986. 573~587
- 22 Rosenholm D. Multi-point Matching Using the Least Squares Technique for Evaluation of Three-Dimensional Models. PERS,1987(6)
- 23 Rosenholm D. Multi-point Matching Along Vertical Lines in SPOT Images. International Journal of Remots Sensing, Vol. 9, Nos. 10 & 11, 1988, 1687~1703
- 24 Wrobel B. Facets Stereo Vision (FAST Vision)——A New Approach to Computer Vision and to Digital Photogrammetry Proceedings of Intercommission Conference of ISPRS on Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, 1987
- 25 ZHANG Zuxun, ZHANG Jiangqing, WU Xiaoliang, et al. Global Image Matching with Relaxation Method. Proceedings of the International Colloquium on Photogrammetry, Remote Sensing and Geographic Information System. Wuhan, China, May, 11~14, 1992
- 26 Helava U V. Object Space Least Squares Correlation. Int. Arc. of ISPRS Vol. 27, Comm. 1, Kyoto, 1988. 321~331
- 27 Krzystek P. Fully Automatic Measurement of Digital Elevation Models with Match-T. 43rd Photogrammetric Week, Stuttgart, Sep. , 9~14, 1991

- 28 Li M X. Hierarchical Multi-point Matching with Simultaneous Detection and Location of Breaklines. Doctorial Dissertation, Department of Photogrammetry, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1989
- 29 Li M X. Hierarchical Multipoint Matching. PERS, 1991(8)
- 30 March R. Computation of Stereo Disparity Using Regularization. Pattern Recognition Letters, 8 Oct, 1988
- 31 Miller S B, Helava U V, Helava K D. Softcopy Photogrammetric Workstations. PERS, 1992
- 32 Barnard S T. Stochastic Stereo Matching Over Scale. International Journal of Computer Vision, 1989(3)
- 33 Ebner H, Heipke C. Integration of Digital Image Matching and Object Surface Reconstruction. Int. Arc. of ISPRS Vol. 27, Comm. II, Kyoto. Bll. II, 1988, 534~545
- 34 Foerstner W. On the Geometric Precision of Digital Image Correlation. Int. Arc. of ISPRS Vol. 24, Comm. II, Helsinki, 1982
- 35 Gruen A. Adaptive Least Squares Correlation, A Powerful Image Matching Technique. Sixth African Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 1985, 14(3)
- 36 Rauhala U A. Fast Compiler Position Algorithms and Techniques of Array Algebra in Analytical and Digital Photogrammetry. ISPRS Intercommission Conference, Interlaken, 1987
- 37 Rauhala U A. Compiler Positioning System, An Array Algebra Formulation of Digital Photogrammetry. PERS, 1989(3)
- 38 Rauhala U A, Davis D, Baker K. Automated DTM Validation and Progressive Sampling Algorithm of Finite Element Array Relaxation. PERS, 1989(4)
- 39 Rauhala U A. Compiler Position of Array Algebra Technology. Int. Arc. of ISPRS, Vol. 26-3/3, Comm. II, Symposium, Rovaniemi, 1986
- 40 Ackermann F. Digital Image Correlation, Performance and Potential Application in Photogrammetry. Photogrammetric Record, 1984, 11(64)
- 41 Barnard S T. Stereo Matching by Hierarchical Microcanonical Annealing. SRI-International Technical Note, No. 414, February, 1987
- 42 Rauhala U A. A Review of Array Algebra. Comm. II ISP Congress Helsinki, 1976
- 43 Rauhala U A. Array Algebra as General Base of Fast Transforms. Comm. II Image Processing Symposium ISP, Graz, 1977
- 44 Rauhala U A. Array Estimation in Signal Processing. PERS, 1982, (3)

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01129 ECBGE-0003:变形观测
三维网方法研究/吴景勤著. —北京:原子能出版社,
1996. 12

ISBN 7-5022-1625-1

I. 中… I. 吴… III. ①核技术-研究报告-中国②工
程-变形观测-研究 IV. TL-24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 21788 号

变形观测三维网方法研究

吴景勤著

©原子能出版社, 1996

原子能出版社出版发行

责任编辑: 郭向阳

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 1/16·印张 1·字数 26 千字

1996 年 12 月北京第一版·1996 年 12 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-1625-1



9 787502 216252 >