

经纬仪工业测量系统的模型研究*

熊春宝 叶声华

(天津大学土木工程系,天津市卫津路 92 号,300072)

摘要 将柔性坐标系引入经纬仪工业测量中,使其系统自定位不再受仪器整平误差和相对定向误差的影响。为了求解系统自定位的参数,本文给出了两种系统自定位方法,并对它们进行了精度分析。

关键词 经纬仪工业测量;柔性坐标系;系统自定位

分类号 P 241.1; P211; TB2

工业生产中,对三维尺寸的检测主要是采用三坐标测量机,但这种机器难以检测大体积和不可触及的目标(如轿车车身等)。随着高精度电子经纬仪的普及,以传统空间前方交会测量原理为基础的光学三维坐标无接触测量系统在现代化精密工业测量中开始得到应用。这一系统由 2 台或多台电子经纬仪和一台微机组成,另外再配一根已知长度的标准尺(如钢钢横基尺)。测量之前,首先必须进行经纬仪系统本身的标定(或称系统自定位)^[1]: 1) 将仪器整平; 2) 通过 2 台仪器互相瞄准完成相对定向; 3) 通过观测标准尺两端点的水平角和竖直角反算出 2 台仪器之间的基线长度和高差。在这一传统的系统自定位过程中,由于整平仪器和互相瞄准均受人为主观因素的影响,这无疑在一定程度上限制了系统测量精度的提高。为此,本文提出了一种新的系统模型,使得以此模型建立的测量系统不再受上述人为因素的影响。

1 系统模型的建立^[2]

如图 1 (a) 所示, $O-XYZ$ 为左站经纬仪的直角坐标系,其中坐标原点 O 为经纬仪中心(即横轴与竖轴的交点),坐标面 XOY 与水平度盘(并非要求严格水平)平行, X 轴平行于度盘上 0° 刻划线的方向, Z 轴通过坐标原点且垂直于水平度盘向上, Y 轴方向使坐标系 $O-XYZ$ 成为左手系。现将经纬仪瞄准目标看作是理想的单孔成像模型,并假设在 $X=1$ 处有一成像平面,此平面垂直于 X 轴,并在成像平面上建立一个二维的像平面直角坐标系 $o-yz$,其中原点 o 为 X 轴与像平面的交点, y 轴、 z 轴分别与 Y 轴、 Z 轴平行且方向一致。同样,可建立右站经纬仪的直角坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 和像平面直角坐标系 $o'-y'z'$ (如图 1 (b) 所示)。

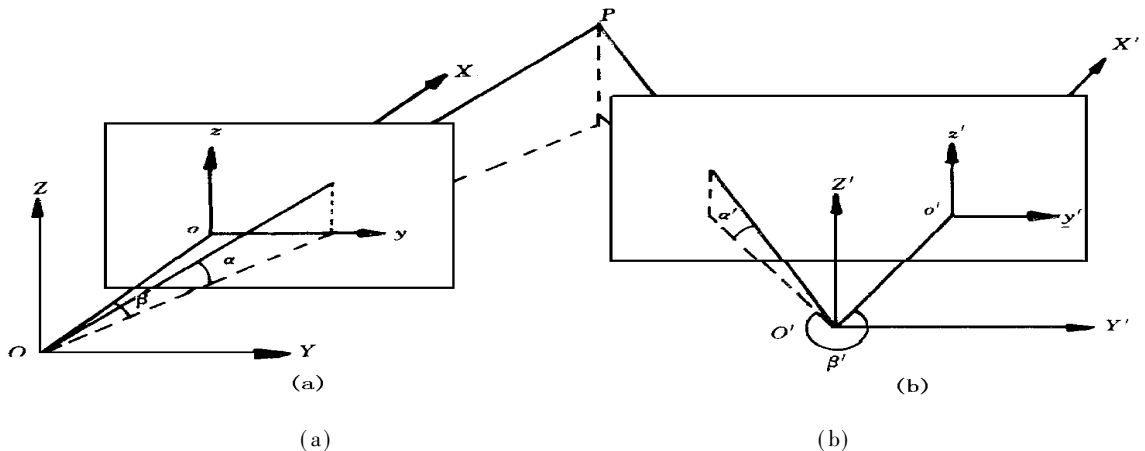


图 1 柔性自定位坐标系

Fig. 1 Flexible Coordinate System of Self-locating

当 2 台经纬仪观测目标 P 点时,水平角分别为 $\cup \cup$, 竖直角分别为 $\top \top$ 。设 P 点在两坐标系的坐标分别为 (X, Y, Z) 和 (X', Y', Z') , 则 P 点对于左站经纬仪有:

$$y = \tan \cup, \quad z = \tan \top / \cos \cup \quad (1)$$

而 $\tan \cup = Y/X, \quad \tan \top / \cos \cup = Z/X \quad (2)$

由 (1) (2) 式得:

$$Y = X \cdot y, \quad Z = X \cdot z \quad (3)$$

同理,对于右站经纬仪,有:

$$y' = \tan \cup', \quad z' = \tan \top' / \cos \cup' \quad (4)$$

$$\tan \cup' = Y'/X', \quad \tan \top' / \cos \cup' = Z'/X' \quad (5)$$

$$Y' = X' \cdot y', \quad Z' = X' \cdot z' \quad (6)$$

设 2 台经纬仪直角坐标系之间的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Lx \\ Ly \\ Lz \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵, $L = [Lx \quad Ly \quad Lz]^T$ 为平移矩阵

将 (3) 式 (6) 式代入 (7) 式, 解之, 并联立 (3) 式, 得:

$$\begin{cases} X = [Lz(r_4 + r_5y' + r_6z') - Ly(r_7 + r_8y' + r_9z')] / [z(r_4 + r_5y' + r_6z') - y(r_7 + r_8y' + r_9z')] \\ Y = X \cdot y \\ Z = X \cdot z \end{cases} \quad (8)$$

(8) 式中, y, z, y', z' 可通过两经纬仪对目标点观测水平角和竖直角由 (1) 式和 (4) 式求得。从 (8) 式可以看出, 由于 2 台经纬仪各自的坐标系不一致, 也并未通过严格整平仪器和互相瞄准完成相对定向使两坐标系达到统一, 而是通过旋转矩阵 R 和平移矩阵 L 来实现它们之间的联系和统一, 即整体的测量坐标系是一个柔性坐标系。因此, 只要已知旋转矩阵 R 和平移矩阵 L , 那么, 对于任意一被测目标, 通过观测角度 $\top \cup \top \cup$ 即可求得它的三维坐标 $X \ Y \ Z$

2 系统自定位参数的求解

显然, 本文建立的系统模型, 其自定位实际上是求解旋转矩阵 R 和平移矩阵 L 中的各元素

2.1 后方交会法^[3]

如图 2 所示, 将 2 台经纬仪安置大致等高并整平后, 在 2 台经纬仪的正前方与经纬仪大致等高处水平放置一标准尺, 并根据这一水平标准尺建立一物方坐标系 $S-UVW$: 以标准尺有刻划的

边缘线为空间坐标系的 V 轴, 标准尺的零点为坐

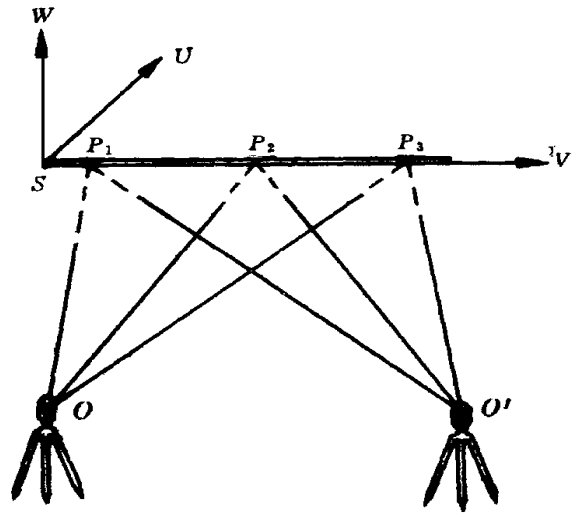


图 2 后方交会法的系统自定位

Fig. 2 Resection of Self-locating of System

标原点 S , 过原点的铅垂线向上的方向为 W 轴方向, U 轴方向使 $S-UVW$ 成为左手系。在标准尺上选择了 3 个点: $P_1(0, V_1, 0)$, $P_2(0, V_2, 0)$ 和 $P_3(0, V_3, 0)$, 然后用 2 台经纬仪对这 3 个点进行水平后方交会, 分别得水平角 $\cup_1 \cup_2$ 和 $\cup'_1 \cup'_2$, 则左站经纬仪中心的平面坐标为^[5]:

$$\begin{cases} U_0 = N / (1 + \cot^2 Q) \\ V_0 = V_3 + \cot Q [N / (1 + \cot^2 Q)] \end{cases} \quad (9)$$

(9) 式中, $N = (V_1 - V_3) (\cot \cup_1 + \cot Q)$, $\cot Q = [V_3 - V_2] \cot \cup_2 - (V_1 - V_3) \cot \cup_1 / (V_3 - V_1)$ 。同理也可得右站经纬仪中心的平面坐标 U_0', V_0' 。由 2 台经纬仪中心的平面坐标可算得水平距离 $D_{OO'}$ (2 台经纬仪中心连线的水平长度, 称为基线), 还可算得水平距离 $D_{OP_1}, D_{O'P_1}$ 以及坐标方位角 $\cup_{OP_1}, \cup_{O'P_1}, \cup_{OO'}$, 再用两经纬仪瞄准 P_1 点并将 2 台经纬仪的水平度盘分别配置成 $90^\circ - (\cup_{OO'} - \cup_{OP_1})$ 和 $270^\circ + (\cup_{O'P_1} - \cup_{OO'})$, 这样就在 2 台仪器不需要相互瞄准的情况下实现了系统的相对定向。若不考虑 2 台仪器竖轴的倾斜误差, 2 台仪器的直角坐标系平行、同向, 且坐标轴 $X \ Y$ 与基线 OO' 在同一竖直面内。下面进一步求解 2 台仪器的高差。

再次用 2 台经纬仪瞄准尺上 P_1 点, 并观测竖直角 \top_{OP_1} 和 $\top_{O'P_1}$, 则有:

$$W_{P_1} = W_0 + D_{OP_1} \tan \top_{OP_1}$$

$$W_{P_1} = W_0' + D_{O'P_1} \tan \top_{O'P_1}$$

上两式相减得:

$$\begin{aligned} \Delta W_{OO'} &= W_0' - W_0 = \\ &D_{OP_1} \tan \top_{OP_1} - D_{O'P_1} \tan \top_{O'P_1} \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式即为 2 台仪器的高差。至此, 完成了系统

的自定位,其自定位参数为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11a)$$

$$L = [0 \quad D_{oo'} \quad \Delta W_{oo'}]^T \quad (11b)$$

2.2 向量共面法^[4]

如果需要考虑 2 台仪器竖轴的倾斜误差,则可采用向量共面法作系统自定位。

由图 1 知,对于任意一被测目标 P,视线 OP、O'P 和两仪器中心的连线 OO' 总在同一平面内,如果将视线 OP、O'P 和两仪器中心的连线 OO' 看作 3 个向量 \vec{OP} 、 $\vec{O'P}$ 、 $\vec{OO'}$,根据 3 个向量的共面条件,有:

$$\vec{OP} \cdot (\vec{OO'} \times \vec{O'P}) = 0$$

即

$$\begin{vmatrix} X & Y & Z \\ L_x & L_y & L_z \\ X - L_x & Y - L_y & Z - L_z \end{vmatrix} = 0 \quad (12)$$

由 (12) 式有:

$$\begin{aligned} & (YL_z - ZL_y, ZL_x - XL_z, XL_y - YL_x) \cdot \\ & (X - L_x \quad Y - L_y \quad Z - L_z)^T = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

将 (7) 式代入 (13) 式:

$$\begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = 0 \quad (14)$$

在建立坐标系时,不妨使 X 轴、X' 轴大致垂直基线方向,那么 $X \cdot X' \neq 0$,因此可将 (3) 式、(6) 式代入 (14) 式且两边除以 $X \cdot X'$ 得:

$$\begin{aligned} & (yL_z - zL_y)(r_1 + r_2y' + r_3z') + \\ & (zL_x - L_z)(r_4 + r_5y' + r_6z') + \\ & (L_y - yL_x)(r_7 + r_8y' + r_9z') = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

(15) 式可看成一含有未知参数 r_1, \dots, r_9 和 L_x, L_y, L_z 的方程式,用 2 台经纬仪每观测一个目标点即可得到这样一个方程式。对于 L_x, L_y, L_z 而言,(15) 式是一个齐次方程,因此由 (15) 式组成的方程组只能解得含有比例因子的平移矩阵 L。从坐标系的建立方法可知 $L_y > 0$,那么令:

$$L^T = L_y \cdot l^T = L_y(l_x \quad 1 \quad l_z) \quad (16)$$

式中, l 为不含比例因子的平移矩阵。另外,若将右站经纬仪的坐标系 O'-X'Y'Z' 分别绕 X' 轴、Y' 轴、Z' 轴按逆时针方向旋转 h, k, κ 角,使之与左站经纬仪的坐标系 O-XYZ 平行且方向一致,则旋转矩阵 R 中的元素可用 3 个旋转角 h, k, κ 的三角函数来表示:

$$\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos k & 0 & \sin k \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin k & 0 & \cos k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cosh & -\sinh \\ 0 & \sinh & \cosh \end{bmatrix}$$

即

$$\begin{cases} r_1 = \cos k \cos \kappa \\ r_2 = -\cosh \sin \kappa + \sinh \sin k \cos \kappa \\ r_3 = \sinh \sin \kappa + \cosh \sin k \cos \kappa \\ r_4 = \cos k \sin \kappa \\ r_5 = \cosh \cos \kappa + \sinh \sin k \sin \kappa \\ r_6 = -\sinh \cos \kappa + \cosh \sin k \sin \kappa \\ r_7 = -\sin k \\ r_8 = \sinh \cos k \\ r_9 = \cosh \cos k \end{cases} \quad (17)$$

为了简化 (17) 式,可在用上述的后方交会法之后再 用向量共面法作系统自定位,此时的旋转角 h, k, κ 即为因 2 台仪器竖轴不严格竖直(一般情况下,两竖轴既不平行,也不共面)所导致的小角度,那么, $\sinh \doteq h, \sin k \doteq k, \sin \kappa \doteq \kappa, \cosh \doteq 1, \cos k \doteq 1, \cos \kappa \doteq 1$,则式 (17) 可简化为:

$$\begin{aligned} r_1 &= 1, & r_2 &= hk - \kappa, & r_3 &= hk + k, \\ r_4 &= \kappa, & r_5 &= hk\kappa + 1, & r_6 &= k\kappa - h, \\ r_7 &= -k, & r_8 &= h, & r_9 &= 1 \end{aligned} \quad (18)$$

将 (18) 式和 (16) 式代入 (15) 式,得:

$$\begin{aligned} & (yl_z - z) [1 + (hk - \kappa)y' + (hk + k)z'] + \\ & (zl_x - l_z) [k + (hk\kappa + 1)y' + (k\kappa - h)z'] + \\ & (1 - yl_x) [-k + hy' + z'] = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

(19) 式为一具有 5 个未知参数 h, k, κ, l_x, l_z 的非线性方程,用 $F(h, k, \kappa, l_x, l_z) = 0$ 表示

将 $F(h, k, \kappa, l_x, l_z)$ 在 $F(h_0, k_0, \kappa_0, l_{x_0}, l_{z_0})$ 处用泰勒级数展开,并略去二次以上的项,则变为:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\partial F}{\partial h} \right]_0 h + \left[\frac{\partial F}{\partial k} \right]_0 k + \left[\frac{\partial F}{\partial \kappa} \right]_0 \kappa + \\ & \left[\frac{\partial F}{\partial l_x} \right]_0 l_x + \left[\frac{\partial F}{\partial l_z} \right]_0 l_z + F_0 = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

式中,

$$\begin{cases} (F/\partial h)_0 = (yl_{z_0} - z)(k_0y' + \kappa_0z') + \\ (zl_{x_0} - l_{z_0})(k_0\kappa_0y' - z') + (1 - yl_{x_0})y', \\ (F/\partial k)_0 = (yl_{z_0} - z)(h_0y' + z') + (zl_{x_0} - \\ l_{z_0})(h_0\kappa_0y' + \kappa_0z') + (1 - yl_{x_0})(-1) \\ (F/\partial \kappa)_0 = (yl_{z_0} - z)(-y' + h_0z') + \\ (zl_{x_0} - l_{z_0})(1 + h_0k_0y' + k_0z') \end{cases}$$

$$\begin{cases} (LF/Il_x)_0 = z[\kappa_0 + (h_0 \kappa_0 \alpha_0 + 1)y'] + \\ (k_0 \alpha_0 - h_0)z'] + (-y)(-k_0 + h_0 y' + z') \\ (LF/Il_z)_0 = y[1 + (h_0 k_0 - \kappa_0)y' + \\ (h_0 \kappa_0 + k_0)z'] + (-1)[\kappa_0 + (h_0 \kappa_0 \alpha_0 + \\ 1)y' + (k_0 \alpha_0 - h_0)z'] \\ F_0 = (y/lz_0 - z)[1 + (h_0 k_0 - \kappa_0)y' + \\ (h_0 \kappa_0 + k_0)z'] + (z/lx_0 - lz_0) \cdot \\ [\kappa_0 + (h_0 \kappa_0 \alpha_0 + 1)y' + (k_0 \alpha_0 - h_0)z'] + \\ (1 - y/lx_0)[-k_0 + h_0 y' + z'] \end{cases} \quad (21)$$

根据 (20) 式,每观测一个目标点,即可写出一个误差方程式:

$$v_i = (LF/Il_h)_{oi} h + (LF/Il_k)_{oi} k + (LF/Il_\kappa)_{oi} \kappa + (LF/Il_x)_{oi} l_x + (LF/Il_z)_{oi} l_z + F_{oi} \quad (22)$$

式中, $(LF/Il_h)_{oi}$ $(LF/Il_k)_{oi}$ $(LF/Il_\kappa)_{oi}$ $(LF/Il_x)_{oi}$ $(LF/Il_z)_{oi}$ F_{oi} 为将各目标点的 y_i z_i y'_i z'_i 代入 (21) 式后所得值。然后按间接平差通过迭代法求得未知数 h k κ l_x l_z

求得 h k κ l_x l_z 后,将 h k κ 代入 (18) 式,将 l_x l_z 代入 (16) 式,然后将 (18) 式、(16) 式代入 (8) 式,可求得含比例因子 L_Y 的各点坐标,进而根据两点的距离公式求得含比例因子 L_Y 的标准尺长度,而标准尺的长度本来又是已知的,由此可解得比例因子 L_Y ,最后再将 L_Y 代入 (16) 式,求得平移矩阵 L 。至此,向量共面法的系统自定位参数 $r_1, \dots, r_9, L_x, L_y, L_z$ 全部得以求解。

3 精度分析

3.1 后方交会法

如图 3 所示,后方交会的点位中误差的计算公式为^[5]:

$$m_0 = m [b / (d \sin(\theta_{1+} - \theta_2))] [(a_1 / S_1)^2 + (a_2 / S_2)^2 - (a_1 / S_1)(a_2 / S_2) \cos(\theta_{1+} - \theta_2)]^{1/2} \quad (23)$$

结合本文所建模型的实际情况,可设 $S_1 \doteq S_2 \doteq 1$ m, $a_1 \doteq 2$ m, $a_2 = 2.8$ m, $b \doteq 2.2$ m, $U_1 + U_2 \doteq 45^\circ$, $\theta_{1+} - \theta_2 = 180^\circ - (U_1 + U_2) \doteq 135^\circ$, $m \doteq \pm 1.4''$, 将以上数据代入 (23) 式,得仪器中心 O (或 O') 的点位中误差为: $m_0 \doteq \pm 0.08$ mm。这里, m_0 只是仪器中心的平面点位中误差,且未考虑仪器竖轴倾斜误差对水平角观测精度的影响。

工业测量所用的经纬仪主要是电子经纬仪,较先进的电子经纬仪配备有轴系补偿装置(采用硬件或软件),因此仪器竖轴的倾斜可以通过补偿来消除其对测角的影响,但补偿往往不是十分完

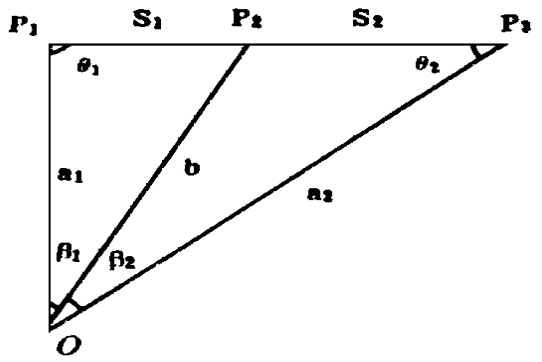


图 3 后方交会示意图

Fig. 3 Diagram of Resection

善,其剩余误差有时达到十几秒^[6]。若竖轴存在倾斜角 W ,其首先直接影响竖直角观测精度,其次,它对水平角观测的误差影响为^[7]:

$$\Delta W = W \cos V \tan T \quad (24)$$

式中, V 为从竖轴倾斜平面起算的横轴方位角; T 为被测目标的竖直角。显然,当被测目标与仪器大致等高,即望远镜大致水平时,竖直角 T 很小。从 (24) 式可以看出,其对水平角的误差影响 ΔW 可忽略不计,但是用经纬仪作工业测量时,竖直角往往较大,因此,对于精密工业测量,有必要顾及仪器竖轴的倾斜误差对测角的影响。

3.2 向量共面法^[8]

用向量共面法作系统自定位,其精度主要由求解 h k κ 和 L_x L_y L_z 的精度决定。从 (22) 式知,未知参数 h k κ l_x l_z 的精度除了与坐标值 y_i z_i y'_i z'_i 的测量精度有关外,还与由 (22) 式组成的法方程的解算精度有关。

本文所介绍的向量共面法是在作后方交会法之后进行,此时左右两端经纬仪的直角坐标系大致平行,因此,不妨取 $F(h_0 k_0 \kappa_0 l_x_0 l_z_0) = F(0 0 0 0 0)$ 。这里, (21) 式将变为:

$$\begin{cases} (LF/Il_h)_0 = y' \\ (LF/Il_k)_0 = -zz' - 1 \\ (LF/Il_\kappa)_0 = zy' \\ (LF/Il_x)_0 = zy' - yz' \\ (LF/Il_z)_0 = y - y' \\ F_0 = -z + z' \end{cases} \quad (24)$$

将 (24) 式代入 (22) 式,得:

$$v_i = y'_i h - (z_i z'_i + 1) k + z_i y'_i \kappa + (z_i y'_i - y_i z'_i) l_x + (y_i - y'_i) l_z + (z_i - z'_i) \quad (25)$$

在解算法方程时,若法方程的系数矩阵为奇异矩阵或病态矩阵,则法方程将无解或解的误差较大。为了避免法方程系数矩阵呈奇异性或病态性,首先选择收敛速度快的迭代算法。另外,从 (25) 式可以看出,在选择被测目标时,还要注意:

- 1) 若各目标均选在 XOY 面上或其附近,则

$z_i \neq 0$, 那么类似 (25) 式的各误差方程中 k 的系数均趋于 1, κ 的系数均趋于零, 这样, 由 (25) 式组成的法方程系数矩阵将出现奇异或病态。因此, 目标点应尽量选择高点或低点

2) 如果各目标点均选在同一高度上, 则 $z_1 = z_2 = \dots = z_i = c$ 为一常数, (25) 式中 κ 的系数是 h 的系数的 c 倍 (若 2 台经纬仪等高, 此时 $z_i = z_i = c$), 则还有 l_x 的系数是 l_z 的系数的 $-c$ 倍) 那么, 法方程系数阵也将出现奇异或病态。因此各目标点也不能都选在同一高度上。

3) 假设各目标点均选在 $X'O'Z'$ 面上或其附近, 则 $y_i \neq 0$, 那么 (25) 式中的 $h\kappa$ 的系数均趋于零, 由此所得的法方程系数阵也是奇异阵或病态阵。故各目标点不要都靠近坐标面 $X'O'Z'$ 。

4) 同样, 当各目标点均在坐标面 XOZ 上或其附近时, 有 $y_i \neq 0$, 这时 (25) 式中的 l_x 系数变为 $z_i y_i$, 与 κ 的系数相等, 则其法方程系数矩阵为奇异矩阵或病态矩阵。因此, 各目标点也不可都在 XOZ 面附近。

4 结束语

本文介绍的经纬仪工业测量系统模型, 其特点主要是采用柔性坐标系。为了求解系统自定位参数, 先用后方交会法作系统自定位, 此法基本上克服了因 2 台仪器互相无精确标志可瞄而存在的相对定向误差 (假设不存在竖轴倾斜误差的影响), 然后再用向量共面法作系统自定位, 此法进一步解决了因存在的整平误差且仪器竖轴补偿不完善而引起测角误差的问题。上述这两种求解方法也可单独采用。从理论上讲, 向量共面法可以不

须先用后方交会法即可使系统自定位不再受相对定向误差和竖轴倾斜误差的影响, 本文先用后方交会法再用向量共面法, 只是为了使向量共面法的求解过程简易可行; 另一方面, 当仪器本身具有完善的竖轴补偿装置时, 系统自定位只采用后方交会法即可。

向量共面法作系统自定位后的结果并未使两仪器的竖轴呈铅直状态 (两竖轴既不铅直也不共面), 而只是求得了两仪器坐标系统的相对位置关系。向量共面法求解自定位参数时, 其精度与目标点坐标值 y_k, z_k, y_k, z_k 的测量精度以及法方程的解算精度有关。这里应强调指出的是, 法方程的解算精度除直接受解算方法的影响外, 更主要的是与目标点坐标值 y_k, z_k, y_k, z_k 的大小有关, 而 y_k, z_k, y_k, z_k 的大小取决于自定位时的交会图形。因此, 如何选择一种非常好的解算方法以及怎样提高自定位时交会图形的结构强度有待进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 方佩竹. 以电子经纬仪为传感器的现代化工业大地测量系统. 工程勘察, 1991 (3)
- 2 熊春宝. 工业大地测量系统无整平定向的自定位法. 工程勘察, 1997 (5)
- 3 冯文灏. 非地形摄影测量. 北京: 测绘出版社, 1991
- 4 王之卓. 摄影测量原理. 北京: 测绘出版社, 1986
- 5 武汉测绘科技大学《测量学》编写组. 测量学. 北京: 测绘出版社, 1991
- 6 杨俊志. 电子经纬仪轴系补偿问题. 测绘通报, 1995 (5)
- 7 陈 健. 应用大地测量学. 北京: 测绘出版社, 1989
- 8 Strang G. 线性代数及其应用. 天津: 南开大学出版社, 1990

Theoretical Study on the Model of Theodolite Industrial Measurement System

Xiong Chunbao Ye Shenghua

(Department of Civil Engineering, Tianjin University, 92 Weijin Road, Tianjin, China, 300072)

Abstract Flexible coordinate system is introduced into theodolite industrial measurement, so there aren't errors of instruments levelling and relative orientation in self-locating of the system. Two solutions of self-locating parameters of the coordinate system are given and their accuracies are analyzed.

Key words theodolite industrial measurement; flexible coordinate system; self-locating of system