

# 数据融合模型选取对工业测量整体平差结果的影响分析

周跃寅<sup>1</sup> 潘国荣<sup>1</sup> 吴 廷<sup>2</sup> 汪大超<sup>1</sup>

1 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092  
2 上海市建筑科学研究院,上海,200232

**摘 要:**工业测量中,传统移站测量法的点位测量误差会随着移站次数的增加不断累积增加,导致最终的测量精度不可控。讨论了基于原始观测值和基于坐标观测值的两种整体平差数据融合方法,与传统移站测量法相比,这两种方法解算的点位精度较高且稳定。实验表明,即使融合的函数模型和随机模型等价,采用不同的融合方法,得到的融合结果并不完全等价。在实际应用中需根据具体情况选择不同的融合方法,从而得到解算精度可靠的待测点坐标。

**关键词:**工业测量;移站测量;数据融合;整体平差;条件数  
**中图法分类号:**P258 **文献标志码:**A

数据融合最初仅仅局限于军事领域,是针对异质传感器产生的海量数据进行一致性估计的方法<sup>[1-3]</sup>。20 世纪 90 年代后,数据融合的概念被引入中国<sup>[4]</sup>。文献[5]将数据融合的结构分为 3 层,即数据层、特征层和决策层,在不同层进行数据融合会得到不同的结果,其差异体现在融合精度和处理效率等方面,此结构也作为基本的数据融合结构应用于其他领域。

在大地测量领域,文献[6]从函数模型误差和随机模型误差两方面详细讨论了不同的融合结果,具有较大的理论意义,相关的数据融合应用也较为广泛,体现在 GPS 与 INS 组合导航<sup>[7]</sup>、GPS 与 In-SAR<sup>[8]</sup>、GPS 不同系统间的融合<sup>[9]</sup>、遥感图像及地图数据融合<sup>[9,10]</sup>以及 3S 集成<sup>[11]</sup>等方面。在工业测量中,相关的数据融合理论方法并不常见,文献[12]介绍了在盾构自动导向中综合利用全站仪和倾斜仪数据联合平差解算盾构姿态的方法,体现了采用多源异质传感器进行数据融合的优势。

在 mm 级精度的工业测量中,是采用全站仪进行特定点的三维坐标的采集,全站仪是测距仪(获取斜距)和经纬仪(获取角度)的集成,其获取的坐标实际是测距数据和测角数据的融合结果;而在船舶、飞机制造等工业测量领域,由于一些大

型构件无法一站式获取全部待测点位三维信息,需采用移站测量(moving station method, MSM)的方法<sup>[13]</sup>,通过在不同测站上重复测量公共点,将不同测站的坐标系统一起来。但是,随着移站次数的增加,测量误差会不断积累,影响整体测量的精度。

本文以工业测量整体平差(overall adjustment, OA)为例,讨论了两种不同数据融合方法,即基于原始观测值(水平角、竖直角、斜距)的平差模型和基于坐标观测值(直角坐标系中的三维坐标)的平差模型,从解算精度、多余观测值的敏感性以及随机模型偏差对结果的影响等 3 方面,详细对比了两者的区别并和传统的移站测量结果进行比较,得到在工业测量中融合策略选取的相关结论。

## 1 工业测量整体平差函数模型

### 1.1 基于原始观测值的模型

在传统的工业测量中,采用全站仪获取数据是使用最多的方法之一。在每站测量前经过整平后,全站仪的原始观测值为测站点到待测点的水平方向、竖直角和斜距,这 3 个观测值互相独立,

并在全站仪出厂时会给出角度和距离测量的标称精度。通常所有的待测点无法在一个测站全部观测,故采用移站测量的方法将不同测站的坐标系通过重复测量公共点进行统一,一般都以起始测站的坐标系作为全局坐标系。

在基于原始观测值的整体平差函数模型中,

$$\begin{cases} L_s + V_s = \sqrt{(\hat{X}_i - \hat{X}_{\text{stat-}j})^2 + (\hat{Y}_i - \hat{Y}_{\text{stat-}j})^2 + (\hat{Z}_i - \hat{Z}_{\text{stat-}j})^2} \\ L_H + V_H = \arctan \frac{\hat{Y}_i - \hat{Y}_{\text{stat-}j}}{\hat{X}_i - \hat{X}_{\text{stat-}j}} - \hat{A}_{\text{azi-}j} \\ L_V + V_V = \arctan \frac{\hat{Z}_i - \hat{Z}_{\text{stat-}j}}{\sqrt{(\hat{X}_i - \hat{X}_{\text{stat-}j})^2 + (\hat{Y}_i - \hat{Y}_{\text{stat-}j})^2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $L_s$ 、 $L_H$ 、 $L_V$ 分别为斜距、水平角、竖直角观测值;对应 $V_s$ 、 $V_H$ 、 $V_V$ 为观测值的改正数; $\hat{A}_{\text{azi-}j}$ 为

设第  $j$  测站在全局坐标系中的坐标为  $(\hat{X}_{\text{stat-}j}, \hat{Y}_{\text{stat-}j}, \hat{Z}_{\text{stat-}j})$ ,测量了  $n$  个全局坐标系中的待测点  $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ ,其中  $i=1,2,\dots,n$ ,则有:

第  $j$  测站在全局坐标系中水平角初始零方向参数。将式(1)线性化后有:

$$\begin{cases} V_s = p_1 \delta \hat{X}_{\text{stat-}j} + p_2 \delta \hat{Y}_{\text{stat-}j} + p_3 \delta \hat{Z}_{\text{stat-}j} - p_1 \delta \hat{X}_i - p_2 \delta \hat{Y}_i - p_3 \delta \hat{Z}_i - l_s \\ V_H = -p_4 \delta \hat{X}_{\text{stat-}j} + p_5 \delta \hat{Y}_{\text{stat-}j} + p_4 \delta \hat{X}_i - p_5 \delta \hat{Y}_i - \delta \hat{A}_{\text{azi-}j} - l_H \\ V_V = p_6 \delta \hat{X}_{\text{stat-}j} + p_7 \delta \hat{Y}_{\text{stat-}j} + p_8 \delta \hat{Z}_{\text{stat-}j} - p_6 \delta \hat{X}_i - p_7 \delta \hat{Y}_i - p_8 \delta \hat{Z}_i - l_V \end{cases} \quad (2)$$

最小二乘法迭代,这些近似值在不断迭代的过程中经求解的改正数调整,直到求解的改正数小于某一给定的阈值  $\delta$ 。

在某次测量任务中,假设共测了  $s$  个测站,目标点一共有  $t$  个,以第一站的坐标系作为全局坐标系,则需要解得参数共有  $(s-1) \times 3 + t \times 3 + (s-1)$  个。需要注意的是,在  $t$  个目标点中某些点是在多个测站中重复观测的,也就是在移站测量中的公共点。参数解为:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}} = & \left( \underbrace{\delta \hat{X}_{\text{stat-}2} \ \delta \hat{Y}_{\text{stat-}2} \ \delta \hat{Z}_{\text{stat-}2} \ \cdots \ \delta \hat{X}_{\text{stat-}s} \ \delta \hat{Y}_{\text{stat-}s} \ \delta \hat{Z}_{\text{stat-}s}}_{s-1 \text{ 个测站坐标}} \right. \\ & \underbrace{\delta \hat{X}_1 \ \delta \hat{Y}_1 \ \delta \hat{Z}_1 \ \cdots \ \delta \hat{X}_t \ \delta \hat{Y}_t \ \delta \hat{Z}_t}_{t \text{ 个目标点坐标}} \\ & \left. \underbrace{\delta \hat{a}_{\text{azi-}2} \ \cdots \ \delta \hat{a}_{\text{azi-}s}}_{s-1 \text{ 个测站初始零方向参数}} \right)^T \end{aligned} \quad (4)$$

由于第一个测站的测站坐标和初始零方向都为 0,因此该测站列立的误差方程仅有目标点的坐标参数。

观测方程的随机模型由仪器标定精度给定,测距精度  $\sigma_s = (a + b \times L_s)$ ,  $a$  为固定误差,  $b$  为比例误差,  $L_s$  为测站点到目标点的斜距;由于一般测量目标点的角度值都是半测回测一次的结果,而标称精度一般为一测回方向的精度,所以实际的测角精度  $\sigma_{\text{angle}}$  为给定测角精度的  $\sqrt{2}$  倍,在空间上带来的误差影响为  $\sigma_{\text{angle}} \times L_s$ 。此外,距离观测与角度观测之间是独立的,因此基于原始观测值的整体平差权阵为对角阵。对于一次观测目标点

$$\begin{cases} p_1 = \frac{X_{\text{stat-}j_0} - X_{i_0}}{S_{i_0}} \\ p_2 = \frac{Y_{\text{stat-}j_0} - Y_{i_0}}{S_{i_0}} \\ p_3 = \frac{Z_{\text{stat-}j_0} - Z_{i_0}}{S_{i_0}} \\ p_4 = \frac{Y_{\text{stat-}j_0} - Y_{i_0}}{D_{i_0}^2} \\ p_5 = \frac{X_{\text{stat-}j_0} - X_{i_0}}{D_{i_0}^2} \\ p_6 = \frac{(Z_{\text{stat-}j_0} - Z_{i_0}) \cdot (X_{\text{stat-}j_0} - X_{i_0})}{D_{i_0} \cdot (D_{i_0}^2 + (Z_{\text{stat-}j_0} - Z_{i_0})^2)} \\ p_7 = \frac{(Z_{\text{stat-}j_0} - Z_{i_0}) \cdot (Y_{\text{stat-}j_0} - Y_{i_0})}{D_{i_0} \cdot (D_{i_0}^2 + (Z_{\text{stat-}j_0} - Z_{i_0})^2)} \\ p_8 = \frac{-D_{i_0}^2}{D_{i_0} \cdot (D_{i_0}^2 + (Z_{\text{stat-}j_0} - Z_{i_0})^2)} \\ l_s = L_s - S_{i_0}; \\ l_H = L_H + A_0 - A_1 \\ l_V = L_V - \arctan \frac{Z_i - Z_{\text{stat-}j_0}}{D_{i_0}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $X_{\text{stat-}j_0}$ 、 $Y_{\text{stat-}j_0}$ 、 $Z_{\text{stat-}j_0}$  为在全局坐标系中第  $j$  测站坐标的近似值; $X_{i_0}$ 、 $Y_{i_0}$ 、 $Z_{i_0}$  为在全局坐标系中第  $i$  目标点的坐标近似值; $A_0$  为初始零方向近似值; $A_1$  为通过测站和目标点近似值解算的初始零方向,两者的范围都为  $0^\circ \sim 360^\circ$ ;  $S_{i_0}$  和  $D_{i_0}$  分别为通过测站点和目标点近似值求得的点间距及其水平投影。由于式(1)为非线性函数,求解通过

的 3 个原始观测值权阵为：

$$\mathbf{P}_1 = \text{diag} \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_s^2} & \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_{\text{angle}} \times L_s)^2} & \frac{\sigma_0^2}{(\sigma_{\text{angle}} \times L_s)^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_0$  为给定的验前单位权中误差, 一般设定为 1 mm。验后单位权中误差由式(6)求得：

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{V}}{n - (s - 1) \times 4 - t \times 3} \quad (6)$$

式中,  $n$  为总的观测值个数;  $\mathbf{V}$  为式(2)中的残差向量, 则求解参数  $\hat{\mathbf{X}}$  的精度：

$$\mathbf{D}_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}}} = \hat{\sigma}_0^2 \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}\hat{\mathbf{X}}} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{B}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{B})^{-1} \quad (7)$$

式中, 矩阵  $\mathbf{B}$  为式(2)中的系数阵。

1.2 基于坐标观测值的模型

基于坐标观测值的整体平差中, 在第  $j$  测站, 观测  $i$  号点的函数模型为：

$$\begin{pmatrix} L_X \\ L_Y \\ L_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \hat{X}_j \\ \Delta \hat{Y}_j \\ \Delta \hat{Z}_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \hat{\gamma}_j & -\sin \hat{\gamma}_j & 0 \\ \sin \hat{\gamma}_j & \cos \hat{\gamma}_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{X}_i \\ \hat{Y}_i \\ \hat{Z}_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\Delta \hat{X}_j$ 、 $\Delta \hat{Y}_j$ 、 $\Delta \hat{Z}_j$ 、 $\hat{\gamma}_j$  为第  $j$  测站相对于全局坐标系的平移参数和绕  $Z$  轴的旋转角;  $\hat{X}_i$ 、 $\hat{Y}_i$ 、 $\hat{Z}_i$  为  $i$  号待测点在全局坐标系中的三维坐标值。

式(8)中, 求解站与站之间转换参数采用的观测值为坐标, 而坐标值是由笛卡尔坐标系中原始观测的斜距、水平角和竖直角推算求得的：

$$\begin{cases} L_X = L_s \cdot \cos L_H \cdot \sin L_V \\ L_Y = L_s \cdot \sin L_H \cdot \sin L_V \\ L_Z = L_s \cdot \cos L_V \end{cases} \quad (9)$$

可以看出, 虽然原始观测值之间是独立的, 但是坐标观测值是相关的, 由误差传播可知, 坐标观测值的方差阵为：

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{XYZ} &= \mathbf{A} \cdot \text{diag} \\ &[\sigma_s^2 \quad (\sigma_{\text{angle}} \times L_s)^2 \quad (\sigma_{\text{angle}} \times L_s)^2] \cdot \mathbf{A}^T \end{aligned} \quad (10)$$

式中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos L_H \sin L_V & \sin L_H \sin L_V & \cos L_H \cos L_V \\ \sin L_H \sin L_V & \cos L_H \sin L_V & \sin L_H \cos L_V \\ \cos L_V & 0 & \sin L_V \end{bmatrix} \quad (11)$$

仍设定验前单位权中误差为  $\sigma_0$ , 则对应权阵为：

$$\mathbf{P}_2 = \left( \mathbf{D}_{XYZ} \right)^{-1} \quad (12)$$

与式(1)一样, 式(8)也是非线性的函数, 需进行线性化, 可以参考大角度七参数三维基准转换模型<sup>[14]</sup>。需要注意的是, 由于以第一测站的坐标

系作为全局坐标系, 其误差方程更为简单：

$$\begin{pmatrix} L_X \\ L_Y \\ L_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{X}_i \\ \hat{Y}_i \\ \hat{Z}_i \end{pmatrix} \quad (13)$$

传统移站测量方法中, 站与站之间通过观测公共点将坐标系统一并传递下去。实际公共点在两套坐标系的观测值中都含有误差, 而实际上一概仅采用最小二乘方法处理, 忽略了系数阵的误差, 因此随着移站的增多, 误差累积越来越大。

对比 § 1.1 和 § 1.2 可以看出, 两者采用不同的函数模型, 但最终都能通过整体平差求解出待测点在第一测站坐标系下的坐标, 而且没有传统移站测量中出现的误差累积的问题; 此外, 两者的系数阵中都不存在含观测误差的观测值, 因此通过传统最小二乘算法和准确的随机模型即可获得准确的参数估计, 而避免采用整体最小二乘等较复杂的方法来提高解算精度。

2 算例与分析

为了对比研究两种数据融合模型的优劣, 笔者利用索佳 Net05 高精度全站仪, 围绕某旗杆墩架设了 4 个测站, 并在墩上的 4 个面观测了 24 个贴有反射片的待测点, 在每个测站上都可以观测到两个墩面共 12 个目标点, 测站 1 观测 1~12 号点, 测站 2 观测 7~18 号点, 测站 3 观测 13~24 号点, 测站 4 观测 19~24 号点和 1~6 号点, 如图 1 所示。



图 1 实验示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Experiment

对于索佳 Net05, 当反射物为反射片时, 测距标称精度为  $\sigma_s = (0.5 + 1 \times \text{ppm}) \text{ mm}$ , 测角精度为  $0.5''$ , 则半测回某方向的精度为  $\sigma_{\text{angle}} = 0.5 \times \sqrt{2} \approx 0.7''$ , 采用 § 1.1 中的融合方法及式(7)的精度评定公式, 以第一测站坐标系作为全局坐标系, 得到该坐标系下除测站 1 的其他 3 个测站的测站坐标及初始零方向参数和 24 个待测点的坐标, 解算结果见表 1、表 2。同理可以得到按照 § 1.2 的

融合方法的解算结果,见表 3、表 4。

表 1 基于原始观测值的整体平差结果  
Tab.1 Result of Overall Adjustment Based on Original Data

类型	编号	X/m	Y/m	Z/m	$\hat{\sigma}_X/\text{mm}$	$\hat{\sigma}_Y/\text{mm}$	$\hat{\sigma}_Z/\text{mm}$
待测点	1	-1.847 0	-11.186 5	0.764 1	0.2	0.2	0.1
	2	-1.483 9	-10.830 7	0.779 2	0.2	0.1	0.1
	3	-1.064 8	-10.431 0	0.796 8	0.1	0.2	0.1
	4	-1.872 2	-11.153 5	0.230 3	0.2	0.2	0.1
	5	-1.521 4	-10.806 9	0.196 2	0.2	0.1	0.1
	6	-1.098 7	-10.396 3	0.173 7	0.1	0.2	0.1
	7	-0.786 9	-10.499 8	0.823 1	0.1	0.2	0.1
	8	-0.454 7	-10.842 2	0.828 7	0.2	0.2	0.2
	9	-0.108 5	-11.190 8	0.835 5	0.2	0.2	0.2
	10	-0.768 9	-10.449 1	0.260 0	0.1	0.2	0.1
	11	-0.417 1	-10.811 3	0.272 4	0.2	0.2	0.1
	12	-0.082 2	-11.157 0	0.318 2	0.2	0.2	0.2
	13	-0.093 4	-11.504 2	0.759 5	0.2	0.2	0.2
	14	-0.439 7	-11.837 9	0.779 4	0.3	0.2	0.2
	15	-0.826 0	-12.211 0	0.767 9	0.3	0.2	0.2
	16	-0.054 3	-11.531 9	0.179 0	0.2	0.2	0.2
	17	-0.442 7	-11.904 3	0.191 9	0.3	0.2	0.2
	18	-0.798 3	-12.253 4	0.168 8	0.3	0.2	0.2
	19	-1.116 3	-12.211 5	0.733 2	0.3	0.2	0.1
	20	-1.468 5	-11.854 8	0.745 2	0.3	0.2	0.1
	21	-1.845 4	-11.474 2	0.735 1	0.2	0.2	0.1
	22	-1.150 9	-12.234 0	0.235 4	0.3	0.2	0.1
	23	-1.493 8	-11.888 1	0.222 7	0.3	0.2	0.1
	24	-1.877 1	-11.502 8	0.192 6	0.2	0.2	0.1
测站	2	11.670 7	-12.423 4	-0.018 8	0.3	2.5	0.1
	3	-1.140 5	-23.007 8	-0.013 3	2.1	0.1	0.1
	4	-11.095 8	-11.317 5	0.039 3	0.1	1.8	0.1

表 2 测站其他参数平差结果  
Tab.2 Result of Other Parament

编号	初始零方向	解算	验后单位权中
	/rad	精度/( $''$ )	误差/mm
2	-2.922 588	41.6	0.5
3	0.741 673	37.4	
4	5.704 257	37.9	

从表 1、表 2 可以看出,待测点的点位解算精度可达 0.3 mm 左右,且精度分布均匀。从表 3、表 4 可以看出,点位解算精度基本在 0.5 mm 左右,且测站的定位参数解算精度也不如表 1、表 2 的结果高。虽然从数学角度看,§ 1.2 的融合方法中,观测值是由 § 1.1 的原始观测值等价推导得到的,随机模型也是从 § 1.1 的误差模型通过误差传播得来的,但是融合结果却不是完全等价的。

按照传统移站测量的思路,采用 § 1.1 的函数模型进行分站平差,即第一测站观测的 1~12 点都为全局坐标系的坐标;第二测站观测 7~12 点来解算测站参数,根据解算得到的测站参数和 13~18 点的原始观测值解算出 13~18 点的全局

坐标系的坐标;同理,第三测站也可求解出 19~24 点的全局坐标系坐标。此方法称为基于原始观测值的移站测量法。同理采用 § 1.2 的函数模型进行传统移站测量的方法称为基于坐标观测值的移站测量法。

通过不同的方法得到 24 个待测点的全局坐标,有如下 4 种方案:①基于原始观测值的整体平差法;②基于坐标观测值的整体平差法;③基于原始观测值的移站测量法;④基于坐标观测值的移站测量法。分别对比表 1、表 2 和表 3、表 4,可以看出方案①的参数解算精度较高。因此,以方案①解算的待测点坐标为基准,可以得到方案①与方案②、方案①与方案③以及方案②与方案④的坐标点位偏差,如图 2 所示。

可以看出,方案①与方案②的各点点位偏差较均匀,范围在 0.1~0.6 mm 之间;而在传统的 MSM 中,无论是基于原始观测值或是坐标观测值,其解算的点位偏差随着搬站的增加而递增。

图 2 中 MSM 采用 6 个公共点进行搬站,在经过 2 次搬站后测得的 19~24 号点与整体平差

表 3 基于坐标观测值的整体平差结果

Tab.3 Result of Overall Adjustment Based on Coordinate Data

类型	编号	X/m	Y/m	Z/m	$\hat{\sigma}_X/\text{mm}$	$\hat{\sigma}_Y/\text{mm}$	$\hat{\sigma}_Z/\text{mm}$
待测点	1	-1.847 1	-11.186 5	0.764 1	0.1	0.4	0.0
	2	-1.483 8	-10.831 0	0.779 3	0.1	0.3	0.1
	3	-1.064 9	-10.431 4	0.796 8	0.1	0.3	0.1
	4	-1.872 2	-11.153 6	0.230 3	0.1	0.4	0.0
	5	-1.521 4	-10.807 0	0.196 2	0.1	0.3	0.0
	6	-1.098 7	-10.396 7	0.173 7	0.1	0.3	0.0
	7	-0.786 8	-10.499 2	0.823 0	0.1	0.3	0.1
	8	-0.455 0	-10.841 7	0.828 7	0.1	0.3	0.1
	9	-0.108 4	-11.190 4	0.835 5	0.1	0.4	0.1
	10	-0.768 7	-10.448 7	0.260 0	0.1	0.3	0.1
	11	-0.417 4	-10.811 0	0.272 4	0.1	0.3	0.1
	12	-0.082 0	-11.156 6	0.318 2	0.1	0.4	0.1
	13	-0.093 3	-11.504 0	0.759 5	0.5	0.4	0.1
	14	-0.439 8	-11.837 5	0.779 5	0.5	0.3	0.1
	15	-0.825 9	-12.210 5	0.767 9	0.6	0.3	0.1
	16	-0.054 5	-11.531 7	0.179 1	0.5	0.4	0.1
	17	-0.442 8	-11.903 8	0.191 9	0.5	0.3	0.1
	18	-0.798 1	-12.252 8	0.168 8	0.6	0.3	0.1
	19	-1.116 1	-12.211 9	0.733 2	0.6	0.3	0.1
	20	-1.468 5	-11.855 1	0.745 2	0.5	0.3	0.1
	21	-1.845 6	-11.474 2	0.735 1	0.5	0.4	0.1
	22	-1.150 8	-12.234 4	0.235 4	0.6	0.3	0.1
	23	-1.494 0	-11.888 4	0.222 7	0.5	0.3	0.1
	24	-1.877 4	-11.502 9	0.192 6	0.5	0.4	0.1
测站	2	8.697 1	-14.663 0	0.018 8	5.2	1.5	0.0
	3	16.385 9	16.191 1	0.013 3	3.7	4.0	0.0
	4	3.090 5	15.541 9	-0.039 3	4.4	2.2	0.0

表 4 测站其他参数平差结果

Tab.4 Result of Other Parament

编号	绕 Z 轴旋转	解算	验后单位权中
	角/rad	精度/(")	误差 /mm
2	2.922 953	100.6	1.7
3	-0.742 009	98.3	
4	0.579 411	91.0	

的点位偏差可达 3~4 mm 左右,而实际测量中一般不会采用这么多公共点进行移站测量。如若在 24 个待测点中选取 12 个点,如选取 1、3、5、…、19、21、23 号待测点,每两个测站之间只有 3 个公共点,即减少了多余观测数,可以得到两种 OA 结果与对应传统 MSM 的点位偏差,如图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出,基于原始观测值的 OA 和 MSM 受多余观测值数量的影响较小,而基于坐标观测值的 OA 和 MSM 受多余观测数的影响非常明显。当搬站公共点仅有 3 个的时候,经两次搬站后测量的目标点与整体平差点位偏差可达将近 3 cm,因此基于坐标观测值的 MSM 的点位偏差更加难以控制。

为了进一步比较当随机模型与实测数据存在偏差,即存在随机模型误差时,方案①和方案②的

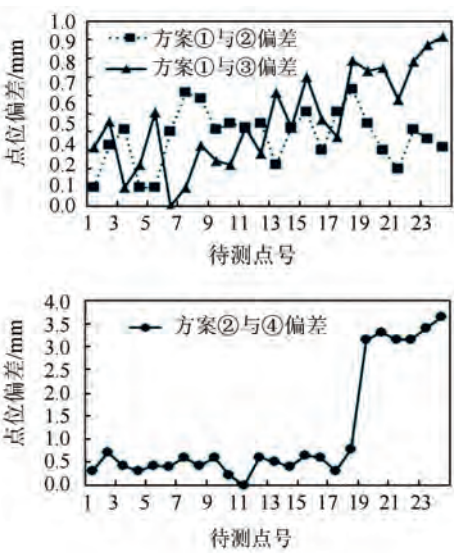


图 2 不同方案坐标解算点位偏差  
Fig.2 Coordinate Differences Between  
Different Schemes

解算稳定性,在所有斜距原始观测值分别添加中误差为 1 mm 和 5 mm 的白噪声(标称精度仅为 0.5 mm),而随机模型仍然采用仪器的标称精度计算,可以得到两种方案在相同额外白噪声影响下解算的坐标偏差,如图 4 所示。

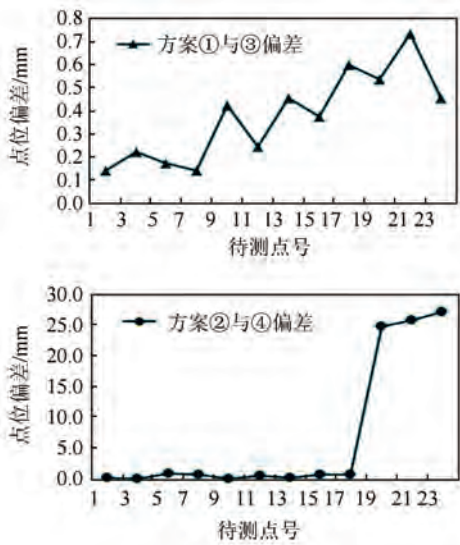


图 3 3 个公共点时整体平差与移站测量的点位偏差  
Fig.3 Coordinate Differences Between OA and MSM with 3 Common Points

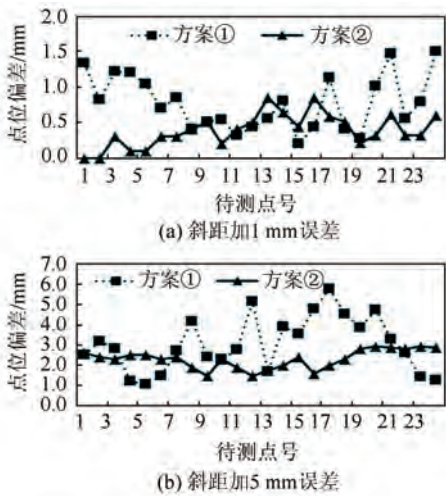


图 4 添加不同白噪声对两种解算点位偏差影响  
Fig.4 Influence on the Coordinate Deviation when Adding Different White Noise

方案①在外加 1 mm 斜距误差后解算的 24 个待测点位与不加误差时偏差在 0.2~1.5 mm, 在外加 5 mm 斜距误差后解算的 24 个待测点位与不加误差时偏差在 1.1~5.9 mm;同样的条件, 方案②的偏差分别在 0~0.8 mm 和 1.1~2.9 mm。从以上偏差的范围和稳定性都可以看出,当随机模型含有误差时,方案②参数解算稳定性更高。

3 结 语

1) 当随机模型的误差不明显,即仪器实际测量精度和标称精度相差不大时,采用基于原始观

测值的整体平差融合算法来解算待定点坐标的方法精度最高。在传统的移站测量解算中,采用基于原始观测值的方法也比基于坐标观测值的结果要稳定。

2) 当多余观测数较少,即公共点个数较少时,若采用传统移站测量法解算点位坐标,不宜采用基于坐标观测值的融合方法,采用基于原始观测值的融合方法会更可靠。

3) 当随机模型含有明显误差时,基于坐标观测值的整体平差法的融合结果要比基于原始观测值的整体平差融合结果稳定可靠。

参 考 文 献

[1] Waltz E, Lilnas J. Multisensor Data Fusion [M]. Boston: Artech House, 1990

[2] Hall D L, Llinas J. An Introduction to Multisensor Data Fusion[J]. *Proc IEEE*, 1997, 85(1): 6-23

[3] Waltz E, Buede D M. Data Fusion and Decision Support for Command and Control [J]. *IEEE Trans on Syst, Man & Cybern*, 1986, 16(6): 865-879

[4] He You, Peng Yingning, Lu Da. Survey of Multi-sensor Datafusion Models [J]. *Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)*, 1996, 36(9): 14-20 (何友, 彭应宁, 陆大. 多传感器数据融合模型综述 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(9): 14-20)

[5] Varshney P K. Distributed Detection and Data Fusion [M]. New York: Springer, 1997

[6] Yang Yuanxi, Zeng Anmin. Fusion Modes of Various Geodetic Observations and Their Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 771-774 (杨元喜, 曾安敏. 大地测量数据融合模式及其分析 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 771-774)

[7] Xiao Jinli, Pan Zhengfeng, Huang Shengxiang. Data Synchronization Method of GPS /INS Integrated Navigation System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(7): 715-717 (肖进丽, 潘正风, 黄声享. GPS/INS 组合导航系统数据同步处理方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(7): 715-717)

[8] Xu Caijun, Wang Hua, Huang Jinsong. Prospect on the Integration of GPS and InSAR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28 (SI): 58-62 (许才军, 王华, 黄劲松. GPS 与 InSAR 数据融合研究展望 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(特刊): 58-62)

[9] Li Lianying, Xu Xiaolan, Wu Zhongheng, et al. Research on Integration and Updating Method of

Multi-sources Electronic Map Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(4):409-412(李连营, 许小兰, 吴中恒, 等. 多源导航电子地图数据融合更新方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(4):409-412)

[10] Zhu Weidong, Li Quanhai, Xu Keke, et al. Hyperspectral Remote Sensing Images Fusion Algorithm Based on Second Generation Bandelet and PCA Transform [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(7): 1 068-1 073 (朱卫东, 李全海, 徐克科, 等. 基于二代 Bandelet 和主成分变换的高光谱遥感图像融合[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7):1 068-1 073)

[11] Li Deren, Guo Bingxuan, Wang Mi, et al. Vehicle Navigation System Design and Implementation Based on Integration of GPS and GIS [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(3): 208-211(李德仁, 郭丙轩, 王密, 等. 基于 GPS 与 GIS 集成的车辆导航系统设计与实现[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3):208-211)

[12] Pan Guorong, Li Huaifeng, Wang Suihui. A New Method of Shield Attitude Automatic Measurement and Multi-Source Data Processing [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(4): 619- 623(潘国荣, 李怀锋, 王穗辉. 盾构姿态自动导向及多源数据融合处理方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 619-623)

[13] Pan Guorong, Zhang Peng, Kong Ning. A Station-moving Measurement Method for Acquiring Point Position Information in Precision Control System for Ship Building [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(5): 121-124(潘国荣, 张鹏, 孔宁. 造船精度控制系统中用移站测量获取点位信息的一种方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(5):121-124)

[14] Pan Guorong, Zhou Yueyin. The Comparison of Two Ways of Calculation on Coordinate Transfer [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(3): 58-62(潘国荣, 周跃寅. 两种坐标系转换计算方法比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(3): 58-62)

**Influence on Selection of Data Fusion Model to Overall Adjustment in Industrial Measurement**

ZHOU Yueyin<sup>1</sup> PAN Guorong<sup>1</sup> WU Ting<sup>2</sup> WANG Dachao<sup>1</sup>

1 College of Survey and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200232, China

**Abstract:** In industrial measurement, the coordinate measurement error of the traditional moving station measurement will accumulate constantly with the increase of number of stations, which leads to the uncontrollability of the measurement accuracy. Based on the original observations and the coordinate observations respectively, this paper proposes two methods of data fusion of the overall adjustment in which the point precision is both higher and more stable than the traditional moving station measurement. Experiments show that the fusion results won't be completely equivalent within different fusion methods even if the mathematical model and stochastic model are equivalent. In order to get more reliable accuracy of coordinates of unknown points, we should choose different fusion methods based on the specific situation in practical application.

**Key words:** industrial measurement; moving station measurement; data fusion; overall adjustment; condition number

**First author:** ZHOU Yueyin, PhD candidate, specializes in industrial measurement data fusion. E-mail: ag-yue@163.com

**Corresponding author:** PAN Guorong, PhD, professor. E-mail: pgr2@163.com

**Foundation support:** The Fundamental Research Funds for the Central Universities; China Special Fund for Surveying, Mapping and Geoinformation Research in the Public Interest, No. HY14122136.