

一种高精度大尺寸工业测量移站闭合算法

郭巍¹, 潘国荣¹, 张鹏², 周跃寅¹, 唐航¹

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 上海金艺检测技术有限公司, 上海 201900)

摘要: 针对运载火箭舱体建造、船舶建造等大尺寸工业构件高精度的测量需求, 提出一种基于严密平差的移站闭合测量算法。将不同测站采集的数据进行严密平差处理, 以降低移站累计误差, 提高整体测量精度, 从而保证大尺寸构件的建造精度。实验表明, 该算法对误差积累有着较好的改善效果, 各测站误差分配均匀, 点位整体精度可提升约 35%。

关键词: 大尺寸测量; 移站测量; 严密平差; 精度控制; 累积误差

中图分类号: P258

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)02-0064-08

A Closed Shift Station Algorithm for Large Scale High Accuracy Industrial Measurement

Guo Wei¹, Pan Guorong¹, Zhang Peng², Zhou Yueyin¹, Tang Hang¹

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Jinyi Inspection Technology Co. Ltd, Shanghai 201900, China)

Abstract: To meet the demand for high accuracy measurement of large scale industrial components such as rocket cabin construction and ship building, a closed algorithm for shift station measurement based on rigorous adjustment is studied. Rigorous adjustment processing of data collected by different stations was conducted so as to reduce the accumulated error caused by shifting station, to enhance the overall measurement accuracy, and thus to ensure the construction accuracy of large-size components. Experiment results show that with this algorithm, the error of each station is evenly distributed, and the average position accuracy is improved about 35%, greatly improving error accumulation.

Key words: large scale measurement; shift station measurement; rigorous adjustment; accuracy control; accumulated error

随着现代建造业的发展, 精度控制成为影响大尺寸构件建造质量的关键因素^[1-3], 大尺寸工业测量及精密数据处理成为研究的热点^[4-8], 如文献[4]对大尺寸测量的误差来源进行了研究, 文献[7]研究了大尺寸测量点云的自动拼接技术。由于被测目标尺寸较大, 如火箭舱体、船舶分段等, 测量仪器在一个位置上通常无法观测到所有被测元素, 于是需要将仪器置于不同测站进行多次测量, 针对此种情况可预先建立控制网, 再将测量仪器设在控制点上进行测量, 但控制网的建立过程较为复杂, 不易于在现场作业环境中实施。为方便测量作业, 一般采用自由设站法^[9-10], 根据不同测站对公共点的测量, 进行坐标系转换计算, 进而统一各测站观测数据。该方法不用预先建立控制网, 避免了大量数据的后处理工作, 还可根据采集数据及时判定点位偏

收稿日期: 2013-11-29

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金(博导类)项目(20120072110049); 测绘地理信息公益性行业科研专项项目(HY14122136)

作者简介: 郭巍(1981—), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 主要研究方向为精密工程工业测量与数据处理、三维可视化仿真。

E-mail: guoweisky2008@163.com

潘国荣(1960—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师, 主要从事精密工程测量、工业测量与测量自动化方面的研究工作, 本文通信作者。E-mail: pgr2@163.com

差,进行现场校核,较好地解决了大尺寸测量问题,如文献[11]将移站测量应用于造船建造精度控制,文献[12]提出一种基于模式搜索的大尺寸测量移站坐标转换方法。由于每次移站都会产生移站误差,多次移站后的测站累计误差不可忽略,文献[13]将各测站转换矩阵之积为1作为约束条件,研究了多测站整体平差算法,但不易编程实现且不能保证在所有情况下都能收敛。本研究提出一种测站回归闭合算法,先统一各测站坐标系,然后再对全部测量数据进行整体平差,以降低移站误差,提高测点精度。

1 移站测量

工业测量中,通常一个测站很难观测到待测构件上的所有特征点,并且由于受场地限制、不通视或后视距离太短,通常无法建立控制网。这时移动测量仪器,在不同测站上进行观测,各测站坐标与观测点的坐标一般表示在不同仪器坐标系内,此时若在不同测站上观测一组公共点,就可以将这些测站下的坐标与全部测点坐标归算至同一个坐标系^[9-11]。

移站测量就是根据上述原理,移站后对前一测站不可见点进行测量,并在相邻两测站观测一组公共点,根据公共点坐标进行空间直角坐标转换,将所有待测点的三维坐标归算到统一坐标系下,以方便进行整体精度控制、评估、三维建模和装配模拟。

1.1 移站测量观测误差模型

不同测站进行坐标测量时,测量仪器均通过测站坐标以及对目标点的基本观测量(斜距、水平角、天顶距)来计算目标点的坐标值。因此,如何通过观测公共点获取当前测站的坐标是移站测量能否完成的关键。利用公共点获取测站坐标的实质是运用边角交会法计算交会点坐标的过程,实际运用过程中,常把平面坐标和高程坐标分开计算。工业测量通常是获取测点的空间位置关系,而点的空间位置是由平面位置和高程位置共同构成的一个三维整体,因而体现整体关系的观测数据应具有完整性和统一性,人为分开分别进行一、二维平差,在理论上是不够严密的,必然会对定位点的平面位置和高程位置及其精度造成不利影响^[14-15]。下面推导以斜距、水平角、天顶距为观测量获取测站点坐标的三维平差方法。

如图1所示,设A,B两点为已知点,三维坐标分别为 (X_A, Y_A, Z_A) 和 (X_B, Y_B, Z_B) ,P为测站点,由P点位置对A,B两点进行观测,获取的观测值分别为斜距 S_1, S_2 ,天顶距 β_1, β_2 和水平方向 γ_1, γ_2 ,因此,可列出各观测值的误差方程。

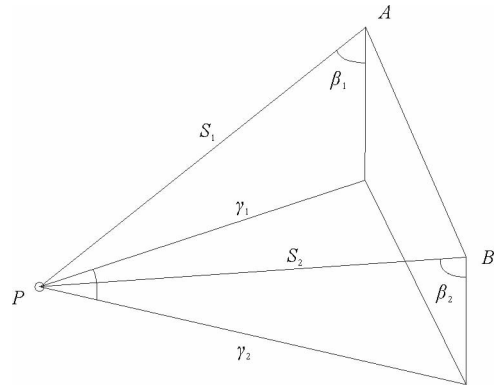


图1 移站测量计算原理图

Fig. 1 Theorem diagram of shift station measurement

1) 斜距误差方程

斜距观测值 S_i 可根据测站坐标 (X_P, Y_P, Z_P) 以及目标点坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 计算,并考虑测距误差,则有:

$$S_i + v_{s_i} = [(X_i - X_P)^2 + (Y_i - Y_P)^2 + (Z_i - Z_P)^2]^{1/2}; \quad (1)$$

其中, v_{s_i} 为距离残差,对式(1)进行线性化可得:

$$v_{s_i} = \frac{X_i - X_P^0}{S_i^0} dx + \frac{Y_i - Y_P^0}{S_i^0} dy + \frac{Z_i - Z_P^0}{S_i^0} dz - (S_i - S_i^0). \quad (2)$$

其中, dx, dy, dz 为微分项, (X_P^0, Y_P^0, Z_P^0) 为测站坐标近似值,可由

$$\begin{cases} X_P^0 = X_i - S_i \sin \beta_i \cos \gamma_i \\ Y_P^0 = Y_i - S_i \sin \beta_i \sin \gamma_i \\ Z_P^0 = Z_i - S_i \cos \beta_i \end{cases}. \quad (3)$$

求得,斜距近似值为:

$$S_i^0 = [(X_i - X_P^0)^2 + (Y_i - Y_P^0)^2 + (Z_i - Z_P^0)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

2) 天顶距误差方程

天顶距观测值可由测站坐标及目标点坐标计算,考虑观测误差,有:

$$\cos(\beta_i + v_{\beta_i}) = \frac{Z_i - Z_P}{S_i}; \quad (5)$$

其中, v_{β_i} 为天顶距残差,线性化后可得

$$v_{\beta_i} = \rho \frac{(X_i - X_P^0)(Z_i - Z_P^0)}{S_i^{0.2} \cdot D_i^0} dx + \rho \frac{(Y_i - Y_P^0)(Z_i - Z_P^0)}{S_i^{0.2} \cdot D_i^0} dy - \rho \frac{D_i^0}{S_i^{0.2}} dz - (\beta_i - \beta_i^0). \quad (6)$$

其中: $\rho = 206\,265''$; $\beta_i^0 = \arccos \frac{Z_i - Z_P^0}{S_i^0}$, 为天顶距近似值; $D_i^0 = [(X_i - X_P^0)^2 + (Y_i - Y_P^0)^2]^{1/2}$, 为平距近似值。

3) 水平方向误差方程

水平方向观测值 γ_i 可由测站坐标及目标点坐标与定向角计算,并考虑测角误差,则有:

$$\tan(\gamma_i + v_{\gamma_i} - z_i) = \frac{Y_i - Y_P}{X_i - X_P}; \quad (7)$$

其中: z_i 为定向角参数, v_{γ_i} 为水平方向残差。线性化后可得:

$$v_{\gamma_i} = -dz_i - \rho \frac{Y_i - Y_P^0}{D_i^0} dx + \rho \frac{X_i - X_P^0}{D_i^0} dy - (\gamma_i - \gamma_i^0). \quad (8)$$

其中, γ_i^0 为水平方向观测近似值,其余变量参考式(6)。

1.2 移站测量数学模型

1.2.1 平差方程

根据 1.1 各观测值误差方程,可组成形如下式的方程组:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{X} - \mathbf{L}. \quad (9)$$

其中, $\mathbf{X} = [\hat{X}_P \quad \hat{Y}_P \quad \hat{Z}_P]^T$,

$$\mathbf{L} = \left[S_1 - S_{AP}^0 \quad S_2 - S_{BP}^0 \quad \beta_1 - \arctg \frac{\bar{S}_{AP}^0}{\Delta Z_{AP}} \quad \beta_2 - \arctg \frac{\bar{S}_{BP}^0}{\Delta Z_{BP}} \quad \gamma - \arctg \frac{\Delta Y_{BP}}{\Delta X_{BP}} + \arctg \frac{\Delta Y_{AP}}{\Delta X_{AP}} \right]^T,$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_{PA}}{S_{PA}^0} & \frac{\Delta X_{PB}}{S_{PB}^0} & \frac{\Delta X_{PA} \times \Delta Z_{PA}}{S_{PA}^{02} \times S_{PA}^0} & \frac{\Delta X_{PB} \times \Delta Z_{PB}}{S_{PB}^{02} \times S_{PB}^0} & -1 & -1 \\ \frac{\Delta Y_{AP}}{S_{PA}^0} & \frac{\Delta Y_{BP}}{S_{PB}^0} & \frac{\Delta Y_{PA} \times \Delta Z_{PA}}{S_{PA}^{02} \times S_{PA}^0} & \frac{\Delta Y_{PB} \times \Delta Z_{PB}}{S_{PB}^{02} \times S_{PB}^0} & -\frac{\Delta Y_{PA}}{S_{PA}^{02}} & -\frac{\Delta Y_{PB}}{S_{PB}^{02}} \\ \frac{\Delta Z_{PA}}{S_{PA}^0} & \frac{\Delta Z_{PB}}{S_{PB}^0} & \frac{\bar{S}_{PA}^0}{S_{PA}^{02}} & \frac{\bar{S}_{PB}^0}{S_{PB}^{02}} & \frac{\Delta X_{PA}}{S_{PA}^{02}} & \frac{\Delta X_{PB}}{S_{PB}^{02}} \end{bmatrix}.$$

设方向观测中误差为 m_0 , 距离观测中误差为 m_s ; $m_s^2 = a^2 + b^2 s^2 \cdot 10^{-6}$, a 为测距固定误差, b 为测距比例误差。设角度权为单位权, 距离权

$$P_s = \frac{m_0^2}{m_s^2}; \quad (10)$$

记 \mathbf{P} 为各观测值的权所组成的对角矩阵, 利用最小二乘平差求解参数改正数向量 $\hat{\mathbf{x}}$, 并进行迭代求解:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Q} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}. \quad (11)$$

1.2.2 测站坐标精度分析

设经 N 次移站后, 选择 A, B 任意两点作为公共点, 考虑 A, B 两点点位误差, 对 $N+1$ 站的站点 P_{station} 坐标可列误差方程:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B} \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} = \mathbf{B} \hat{\mathbf{x}} - (\mathbf{L} - \mathbf{B} \mathbf{x}^0 - \mathbf{d}); \quad (12)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_Q \quad \hat{y}_Q \quad \hat{z}_Q]^T$, $\mathbf{d} = \mathbf{K} \boldsymbol{\lambda}$, $\boldsymbol{\lambda}$ 为起算数据, 设其精度为 \mathbf{Q}_λ , 有:

$$\mathbf{Q}_l = \mathbf{Q} + \mathbf{K} \mathbf{Q}_\lambda \mathbf{K}^T. \quad (13)$$

因观测值 S, β, γ 与 $\boldsymbol{\lambda}$ 不相关, 可知 $\mathbf{Q}(\mathbf{L}, \boldsymbol{\lambda}) = 0$ 。得 P_{station} 点坐标改正协因数阵为:

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} (\mathbf{Q} + \mathbf{K} \mathbf{Q}_\lambda \mathbf{K}^T) \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{N}^{-1}; \quad (14)$$

即

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1} + \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{K} \mathbf{Q}_\lambda \mathbf{K}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{N}^{-1}. \quad (15)$$

其中, $N = B^T P B$, K 则是起算数据的系数阵, P 为观测值的权阵, 定权可参照(10)式。

2 移站测量的严密平差模型

由上述移站测量算法可知, 经多次移站后, 测站误差将逐站累积, 从而降低该测站测点的测量精度。因此, 本研究在多测站移站回归闭合算法基础上, 实现了所有测站观测值及测站坐标的整体严密平差, 以降低移站误差积累, 实现高精度整体测量, 原理图如图 2 所示。

2.1 移站闭合严密平差原理

为方便表述, 文中将以测站为坐标原点, 仪器纵轴为 z 轴, 水平度盘零方向为 x 轴方向的左手空间直角坐标系, 称为测站坐标系。由于移站闭合严密平差模型中三维空间网为自由网, 需要引入相应的基准。文中以第一个测站坐标系

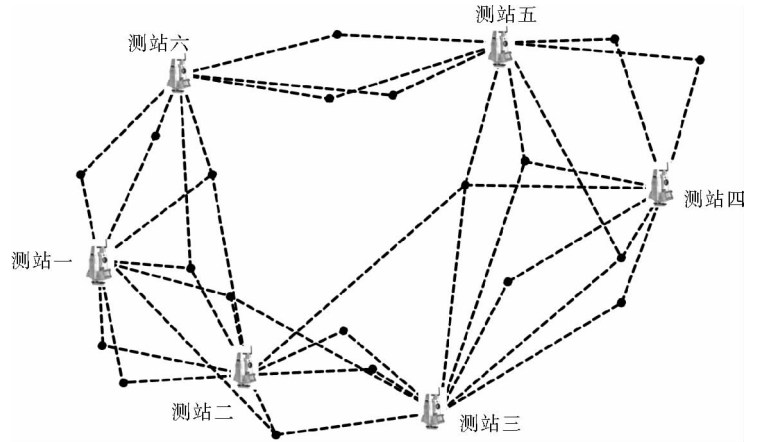


图 2 移站闭合测量原理图

Fig. 2 Theorem diagram of closed shift station measurement

为统一参照系, 即测量坐标系。经过测量后, 测站点(即测站坐标系原点)和目标点同时存在于测量坐标系和各测站坐标系中, 所有测站点和目标点构成一个空间三维网。各测站坐标系相对于测量坐标系的旋转和平移变换^[11], 其中, 旋转参数为 $(R_{X_{S_i}}, R_{Y_{S_i}}, R_{Z_{S_i}})$, 平移参数(即测站的在测量坐标系下的坐标)为 $(X_{S_i}, Y_{S_i}, Z_{S_i})$, 其中, $i = 2, \dots, n$, 记测站点与目标点在 i 个测站坐标系中的坐标为 $(X_{i_k}, Y_{i_k}, Z_{i_k})$, 其中, $i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, m$ 。目标点在测量坐标系中的坐标为 $(X_{T_k}, Y_{T_k}, Z_{T_k})$, 其中, $k = 1, 2, \dots, m$, 则测站点或目标点在测量坐标系下的坐标与在第 i 个测站坐标系下的坐标关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} X_{i_k} \\ Y_{i_k} \\ Z_{i_k} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_{T_k} - X_{S_i} \\ Y_{T_k} - Y_{S_i} \\ Z_{T_k} - Z_{S_i} \end{bmatrix} = \lambda_i \mathbf{R}(\alpha_i) \mathbf{R}(\beta_i) \mathbf{R}(\gamma_i) \begin{bmatrix} X_{T_k} - X_{S_i} \\ Y_{T_k} - Y_{S_i} \\ Z_{T_k} - Z_{S_i} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

其中, λ_i 为尺度参数, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 分别为旋转矩阵 \mathbf{R} 对应的欧拉角(分别以绕 x 轴、 y 轴、 z 轴逆时针旋转方向为正),

$$\mathbf{R}(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}, \mathbf{R}(\beta_i) = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & \sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix}, \mathbf{R}(\gamma_i) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i & 0 \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{旋转矩阵 } \mathbf{R}$$

如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i \cos \gamma_i & \sin \alpha_i \sin \beta_i \cos \gamma_i + \cos \alpha_i \sin \gamma_i & -\cos \alpha_i \sin \beta_i \cos \gamma_i + \sin \alpha_i \sin \gamma_i \\ -\cos \beta_i \sin \gamma_i & -\sin \alpha_i \sin \beta_i \sin \gamma_i + \cos \alpha_i \cos \gamma_i & \cos \alpha_i \sin \beta_i \sin \gamma_i + \sin \alpha_i \cos \gamma_i \\ \sin \beta_i & -\sin \alpha_i \cos \beta_i & \cos \alpha_i \cos \beta_i \end{bmatrix}. \quad (17)$$

当第一个及第 i 个测站均处于整平状态时, $\alpha_i = \beta_i = 0, \mathbf{R}(\alpha_i) = \mathbf{R}(\beta_i) = \mathbf{I}$, 可以通过平面相似变换实现测站坐标系与统一参照系之间的相互转换。

2.2 测站坐标系下的观测值方程

设第 i 个测站对第 k 个目标点的观测值分别为 $H_{i_k}, V_{i_k}, S_{i_k}$; 对应地, 第 i 个测站坐标系下该目标点的坐标为 $(X_{i_k}, Y_{i_k}, Z_{i_k})$ 。根据空间极坐标原理, 存在以下函数关系:

$$\begin{cases} H_{ik} = 2\pi - \arctan \frac{Y_{ik}}{X_{ik}} \\ V_{ik} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{Z_{ik}}{\sqrt{X_{ik}^2 + Y_{ik}^2}} \\ S_{ik} = \sqrt{(X_{ik} - X_{S_i})^2 + (Y_{ik} - Y_{S_i})^2 + (Z_{ik} - Z_{S_i})^2} \end{cases} \quad (18)$$

结合式(16)和(17),将式(18)中目标点的坐标 (X_{ik}, Y_{ik}, Z_{ik}) 用测站点、目标点的坐标、在测量坐标系下的坐标以及测站的旋转参数表示。将方程组线性化后,同样采用间接平差原理迭代求解。

2.3 误差方程与求解

根据间接平差,对于每个原始观测值,可列出误差方程:

$$V = B\delta X - L;$$

其中, $\delta X = [\delta X_{S_2} \ \delta Y_{S_2} \ \delta Z_{S_2} \ \delta \alpha_2 \ \delta \beta_2 \ \delta \gamma_2 \ \cdots \ \delta \gamma_m \ \cdots \ \delta X_{T_1} \ \delta Y_{T_1} \ \delta Z_{T_1} \ \cdots \ \delta Z_{T_n}]^T$ 为定向参数残差矩阵,并设定向参数初值为:

$$X^0 = [\delta X_{S_2}^0 \ \delta Y_{S_2}^0 \ \delta Z_{S_2}^0 \ \delta \alpha_2^0 \ \delta \beta_2^0 \ \delta \gamma_2^0 \ \cdots \ \delta \gamma_m^0 \ \cdots \ \delta X_{T_1} \ \delta Y_{T_1} \ \delta Z_{T_1} \ \cdots \ \delta Z_{T_n}]^T; \quad (19)$$

设观测值的权为 P ,定权方法参照 1.2.1,根据间接平差原理可得:

$$\delta X = (B^T P B)^{-1} B^T P L. \quad (20)$$

迭代至收敛,可求得测站点、目标点在测量坐标系下的坐标及测站旋转参数,从而完成平差。

3 实验与分析

为验证本文算法的正确性和在消弱移站误差积累方面的效果,利用激光跟踪仪进行了 6 站测量,测站编号分别记为 1,2,3,4,5,6,相邻测站均有不少于 3 个的公共点,为方便分析移站测量导致的误差积累,每测站都对 $P1$ 和 $P2$ 两点进行了测量。依次设站测量各站测点,并根据测站坐标计算该测站坐标系下的全部测点坐标,各测站下测点坐标值如表 1 所示。

表 1 各测站测点坐标值数据

Tab. 1 Coordinate observations in different stations

mm

Station 1				Station 2			
点名	X	Y	Z	点名	X	Y	Z
P1	-14 253.360	1 557.035	624.332	P1	22 810.004	-1 256.619	-1 101.206
P2	797.726	-18 884.008	128.582	P2	3 149.546	21 682.444	-938.611
P3	13 566.138	-13 461.537	-316.860	P3	-303 3.857	16 965.686	-447.371
P4	-859.960	5 861.363	-180.094	P4	8 998.740	-393 1.746	-293.548
P10	19 894.705	2 572.900	-1 123.187	P10	-11 221.341	1 806.298	532.350
P11	3 082.678	19 038.963	-779.465	P11	3 519.564	-16 540.244	452.917
P12	11 479.246	-10 296.223	-504.775	P16	-3 008.309	15 345.796	-493.494
P13	5 883.109	-4 813.377	-397.215	P17	8 539.428	-9 472.883	-2 229.250
P14	165.369	798.524	-270.413	P18	8 599.949	-12 327.122	-2 113.059
P15	-5 443.629	6 296.352	-146.473				
Station 3				Station 4			
点名	X	Y	Z	点名	X	Y	Z
P2	15 722.600	7 617.230	-863.705	P2	26 032.835	-4 410.735	-696.599
P3	9 547.285	2 882.706	-448.888	P3	19 705.462	-8 951.386	-439.014
P5	4 425.207	21 912.346	-842.142	P5	15 196.559	10 236.267	-566.157
P6	-2 875.634	12 863.110	-240.764	P6	7 604.494	1 416.403	-210.419
P9	-12 717.716	5 184.481	424.864	P9	-2 484.452	-5 953.184	201.882
P10	1 390.276	-12 301.821	385.989	P16	19 684.828	-10 569.916	-520.542
P16	9 577.338	1 263.367	-502.843				

续表 1

Station 5				Station 6			
点名	X	Y	Z	点名	X	Y	Z
P2	36 492.916	-13 500.822	-1 426.074	P2	9 386.717	-4 402.894	-100.026
P3	30 475.294	-18 430.421	-972.385	P3	6 454.967	2 816.907	-118.215
P5	24 754.111	430.994	-1 137.160	P5	26 165.426	2 699.630	-172.049
P6	17 749.141	-8 848.011	-518.640	P6	19 370.427	12 153.121	-187.310
P7	-979.210	6 950.392	105.200	P19	14 022.001	9 861.856	-246.457
P8	-7 049.023	1 812.920	567.443	P20	20 239.629	2 016.436	-252.403
P9	8 162.359	-16 837.583	207.804	P12	2 735.284	2 082.606	-301.447
P19	21 512.519	-13 282.378	-694.791	P13	-4 447.760	-1 046.700	-277.154
P20	27 153.296	-5 030.037	-1 229.437	P14	-11 796.156	-4 241.230	-235.194
				P15	-18 998.736	-7 377.913	-194.774

根据移站测量原理,每次转站均以前一站公共点坐标值为基准,采集获取本站公共点坐标,最终全部坐标值均可转至第一测站坐标系下,现取第一测站 P2,P3 两点为坐标参考值,分别计算其余各测站该两点坐标值,结果如表 2 所示。

表 2 移站测量计算结果

Tab. 2 Calculated result of shift station measurement method

mm

站号	点名	X	Y	Z	点名	X	Y	Z
1		7 987.726	-18 884.008	128.582		13 566.138	-13 461.537	-316.860
2		7 987.721	-18 884.135	128.782		13 566.301	-13 461.554	-316.928
3	P2	7 987.729	-18 883.941	128.820	P3	13 566.281	-13 461.442	-316.782
4		7 987.901	-18 883.914	128.612		13 566.325	-13 461.524	-316.788
5		7 987.800	-18 883.819	128.682		13 566.145	-13 461.465	-317.090
6		7 987.987	-18 883.879	128.537		13 566.320	-13 461.276	-317.109

根据移站闭合原理,将全部测站数据进行整体闭合平差处理,仍以第一测站 P2,P3 两点坐标值为参考,计算其余各测站两点坐标值,结果如表 3 所示。

表 3 移站闭合计算结果

Tab. 3 Calculated result of closed shift station measurement method

mm

站号	点名	X	Y	Z	点名	X	Y	Z
1		7 987.726	-18 884.008	128.582		13 566.138	-13 461.537	-316.860
2		7 987.654	-18 884.152	128.754		13 566.246	-13 461.583	-316.954
3	P2	7 987.594	-18 883.947	128.738	P3	13 566.181	-13 461.483	-316.873
4		7 987.779	-18 883.976	128.543		13 566.228	-13 461.612	-316.851
5		7 987.683	-18 883.932	128.707		13 566.042	-13 461.593	-317.060
6		7 987.868	-18 884.133	128.715		13 566.206	-13 461.533	-316.911

依据表 2 和表 3,各测站 P2,P3 两点坐标值与第一测站下参考值在不同处理方法下的偏差(图 3、图 4)。由图 3、图 4 分析可知,利用移站测量法测量时,随测站数的增加,测点的点位误差将会积累增加,呈逐步上升趋势;而移站闭合算法能较好地削弱由移站带来的误差累计,使各测站误差分布均匀,且整体误差也明显小于移站测量法,如在 2~6 测站中,P2 点的移站测量和移站闭合平均点位偏差分别为 0.241,0.181 mm,P3 点的移站测量和移站闭合平均点位偏差分别为 0.242,0.130 mm,点位误差分别减少了 25%和 46%(平均约 35%)。

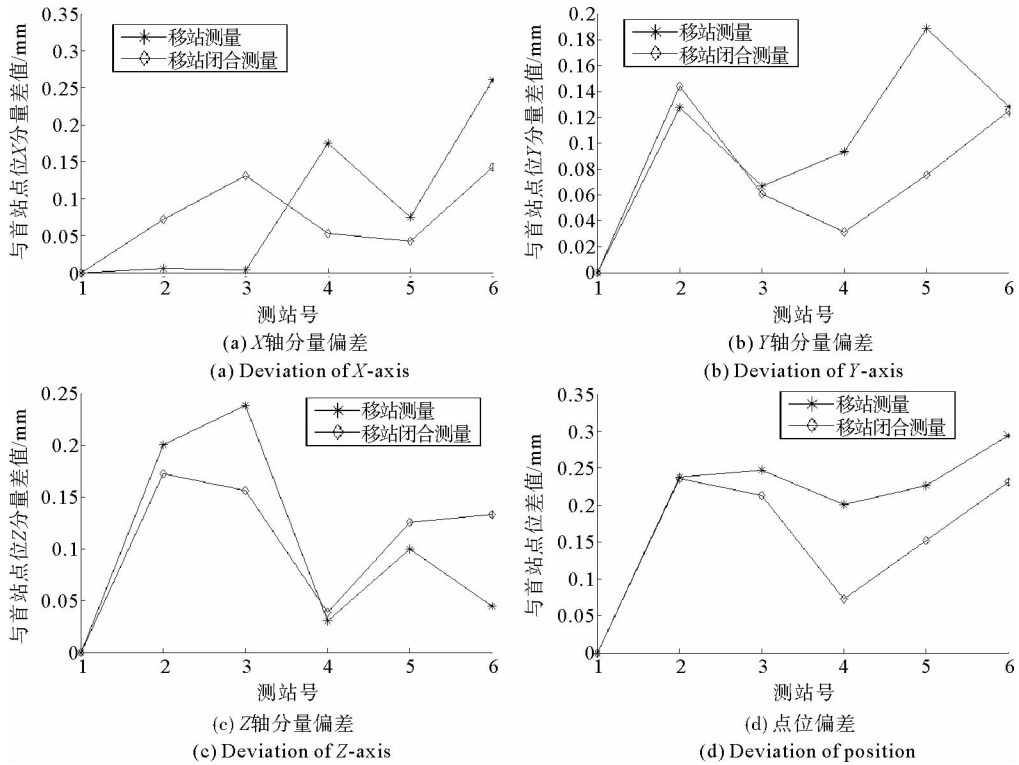


图 3 P2 点各测站点位偏差

Fig. 3 Deviation of P2 in different stations

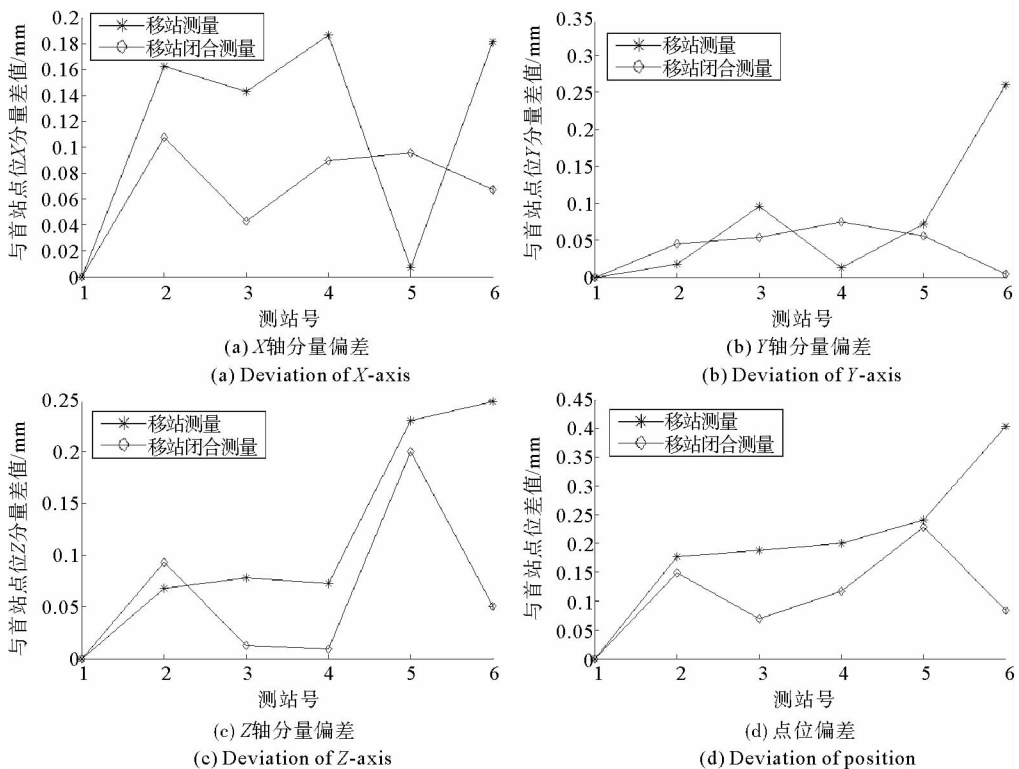


图 4 P3 点各测站点位偏差

Fig. 4 Deviation of P3 in different stations

另外,移站测量的各方向偏差呈两种状况:①随着测站号递增误差逐步累积增大;②不同测站点位偏差值有较大波动。而移站闭合测量中各方向偏差整体呈平稳趋势,未有以上两种状况,可见移站闭合在误差累积和数据整体稳定性上明显优于移站测量法。

4 结论

本研究提出的移站测量闭合算法,通过对全部测站数据以闭合回归的方式进行整体平差,有效避免了由于多次移站造成的误差积累,能够合理分配移站过程中各站误差,提高整体测量精度。该方法应用于工业测量领域,将会解决大尺寸构件数据采集时因移站较多导致的测量精度差的问题,为工程工业构件的建造质量提供保障。该方法简便,易于编程实现,计算速度较快,具有一定的应用和推广价值。

参考文献:

- [1]李广云,李宗春.工业测量系统原理与应用[M].北京:测绘出版社,2011:46-71.
- [2]Estler W T,Edmundson K L,Peggs G N,et al. Large-scale metrology: An update, CIRP annals[J]. Manufacturing Technology,2002,51(2):587-609.
- [3]景冬,卢秀山,郑文华,等.一种基于刚性坐标系的工业测量系统数据处理方法[J].山东科技大学学报:自然科学版,2011,30(3):33-37.
Jing Dong,Lu Xiushan,Zheng Wenhua,et al. A data processing method for industrial measuring system based on rigid coordinate system[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2011,30(3):33-37.
- [4]Wang Q,Zissler N,Holden R. Evaluate error sources and uncertainty in large scale measurement systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2013,29:1-11.
- [5]Cuypers W,Vangestel N,Voet A,et al. Optical measurement techniques for mobile and large scale dimensional metrology[J]. Optics and Lasers in Engineering,2009,47(3/4):292-300.
- [6]Liu Z G,Xu Y Z,Liu Z Z,et al. A large scale 3D positioning method based on a network of rotating laser automatic theodolites[C]//IEEE International Conference on Information and Automation,Harbin,June,2010:513-518.
- [7]苏志部.大尺寸测量的点云自动拼合技术研究[D].武汉:华中科技大学,2009:23-34.
- [8]贾小丽.大型结构件检测的关键技术与实验研究[D].天津:天津大学,2008:20-29.
- [9]朱振宇,江国焰,王永明.工业测量系统自由坐标系建立方法研究[J].矿山测量,2009(5):63-69.
Zhu Zhenyu,Jiang Guoyan,Wang Yongming. Study on the establishment of free coordinate system of industrial measurement system[J]. Mine Surveying,2009(5):63-69.
- [10]刘红英,王淑清,李晓萍.自由设站的应用体会[J].山西建筑,2008,34(5):360-361.
Liu Hongying,Wang Shuqing,Li Xiaoping. Discussion on the new methods of total station instrument height measurement[J]. Shanxi Architecture,2008,34(5):360-361.
- [11]潘国荣,张鹏,孔宁.造船精度控制系统中移站测量的一种实现方法[J].大地测量与地球动力学,2010,30(5):121-124.
Pan Guorong,Zhang Peng,Kong Ning. A station-moving measurement method for acquiring point position information in precision control system ship building[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,30(5):121-124.
- [12]张春富,张军,唐文彦,等.一种基于模式搜索的大尺寸测量移站坐标转换方法[J].理论与实践,2003,23(6):12-14.
Zhang Chunfu,Zhang Jun,Tang Wenyan,et al. Coordinate transformation method of moving the station of large scale measurement based on mode searching[J]. Theory and Practice,2003,23(6):12-14.
- [13]潘国荣,范伟.船舶测量自由移站法及多站转换参数的整体平差[J].山东科技大学学报:自然科学版,2013,32(3):64-70.
Pan Guorong,Fan Wei. Integrated adjustment of the coordinate conversion parameters on ship free-moving measurement[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2013,32(3):64-70.
- [14]张忠良,杨友涛,刘成龙.轨道精调中后方交会点三维严密平差方法研究[J].铁道工程学报,2008(5):33-36.
Zhang Zhongliang,Yang Youtao,Liu Chenglong. Study on three-dimensional strict adjustment method of space resection for precise positioning track[J]. Journal of Railway Engineering Society,2008(5):33-36.
- [15]李丽,法维刚.全站仪使用中边角后交的几种计算方法[J].辽宁科技学院学报,2009,9(2):38-39.
Li Li,Fa Weigang. Research of side angle resection[J]. Liaoning University of Science and Technology,2009,9(2):38-39.