

基于实时旋转棱镜的隧道自动化监测方法

胡雷鸣

[上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200093]

摘要: 基于智能型全站仪组网观测的自动化监测系统已在隧道保护监测中得到了广泛应用,但传统组网方式无法实现相邻全站仪之间的实时对向观测,只能通过设置传递棱镜组之间或是传递棱镜与紧邻全站仪之间的三维坐标差作为平差条件以实现坐标解算。提出采用一种新型可实时旋转的棱镜固定在相邻全站仪之间,通过定时调整棱镜朝向的方式进行相邻全站仪之间的同步观测,实现类似于CPIII控制网的传递测量。模拟数据及实测数据显示,提出的新方法具有较好的可行性,可便捷地实现多台全站仪的组网观测,可旋转棱镜不存在相邻全站仪之间的偏心观测,可靠性更高。

关键词: 实时旋转棱镜;自动化监测;控制网平差;CPIII测量

中图分类号: U456

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0093-06

Tunnel Auto-Monitoring Method Based on Timed-Rotation Prisms

HU Leiming

[Shanghai Institute of Survey, Design and Research (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China]

Abstract: The automated monitoring system based on the networking observation of intelligent total stations has been widely applied in tunnel protection monitoring. However, the traditional networking method cannot achieve real-time mutual observation between adjacent total stations. The coordinate calculation can only be achieved by setting the three-dimensional coordinate difference between the transfer prism groups or between the transfer prism and the adjacent total station as the adjustment condition. A new type of timed-rotation prisms fixed between adjacent total stations is proposed for use. The synchronous observations between adjacent total stations are carried out by adjusting the orientation of the prism at regular intervals to achieve the transfer measurements similar to those in a CPIII control network. The simulation data and the measured data show that the new method proposed has the good feasibility, and can conveniently realize the networking observation among multiple total stations. The rotatable prism does not have eccentric observations between adjacent total stations, making it more reliable.

Keywords: timed-rotation prism; auto-monitoring; adjustment of control network; CPIII measurement

0 引言

随着城市轨道交通、大型公路隧道、大直径地下管廊等地下工程的蓬勃发展,国内数十个城市已广泛开展基于全站仪的地下隧道自动化监测,用于保护已建成的隧道。尤其是当邻近隧道施工范围较长时,往往采用多台全站仪组网进行实时的三维观测。由于地下隧道通常内径较小(小于20 m)、基本呈直伸敷设,因此无法采用传统的三角网组建监测控制网,只能在隧道变形影响区外尽可能多地布设控制点棱镜作为基准点,而多台全站仪基本均匀的布设与变形影响区内,形成类似于多测站、多点后方交会

的控制网网型。此时,由于全站仪固定在隧道内测量,因此无法实现相邻全站仪之间的对向观测,为了实现控制网的平差,只能采用在相邻全站仪之间设置传递棱镜的方式,利用偏心观测进行相邻测站的联测。平差计算时,需要事先测定好多个传递棱镜组之间或是传递棱镜与全站仪之间的三维坐标差,并将其作为固定的平差条件。国内许多学者已对基于智能型全站仪的自动化监测技术进行大量研究^[1-10],基于多测站、多台全站仪的自动化监测项目日趋增多。

需要指出的是,传统的多台全站仪组网观测方式存在一定的弊端。一方面,事先测量多个传递棱镜组之间或是传递棱镜与全站仪之间的三维坐标差,本身存在测量误差,且随着隧道变形的发展,三维坐标差本身会发生变化,如果将其始终固定不变,

收稿日期: 2025-08-13

作者简介: 胡雷鸣(1982—),男,硕士,高级工程师,从事岩土工程监测、精密工程测量等工作。

作为固定的平差条件,无疑会引入系统误差,对于精度要求非常高的隧道自动化监测系统而言造成一定精度损失;另一方面,传统的多台全站仪组网需要定期进行人工复测,增加了大量的外业工作量。

本文基于CPIII测量的思路,提出可采用一种新型可实时旋转的棱镜固定在相邻全站仪之间,通过定时调整棱镜朝向的方式进行相邻全站仪之间的同步观测,实现类似于CPIII控制网的传递测量。此方法可避免采用传递棱镜的偏心观测,摒弃固定三维坐标差作为平差条件,因此可实现更为可靠的结算成果。同时,可实时旋转棱镜的使用可减少或是无需单独进行控制网的人工复测,大幅减少内外业工作量,提升工作效率。

1 传统的隧道自动化监测控制网

1.1 自动化监测控制网的组网

当隧道监测区域较短(通常小于200 m)时,可在测区中央布置1台智能型全站仪,自动化监测较为简单,本文不再赘述。对于长距离、多台全站仪组网观测的项目,通常采用如下的方式进行相邻仪器之间的控制网联测:

(1)在变形影响区域外的隧道两端,分别布设若干个大棱镜作为基准点,一般数量不少于6个;沿监测区域基本均匀布设若干台智能型全站仪,相邻全站仪、全站仪与控制点棱镜间距一般为100 m左右。

(2)在全站仪下方的观测平台上固定1~2个传递棱镜(俗称偏置棱镜),使该全站仪相邻的全站仪能够观测到该传递棱镜。考虑到全站仪与传递棱镜之间相对稳定的空间关系(方位角与空间距离一般不发生变化),可固定全站仪与传递棱镜之间的三维坐标差作为平差附加条件,以实现相邻全站仪的同步联测。

(3)在相邻全站仪之间接近中部的的位置或按基本均匀分布的原则,布设一组或多组“背靠背”传递棱镜组(使用普通小棱镜或360°棱镜),根据“背靠背”传递棱镜之间相对稳定的空间关系(方位角与空间距离一般不发生变化),可固定同组传递棱镜之间的三维坐标差作为平差附加条件,以实现相邻全站仪的同步联测。

以3台全站仪组网观测为例,自动化监测控制网见图1。

如图1所示,在监测范围内基本均匀布设3台全站仪,通过在仪器台下方安置传递棱镜、两台全站仪

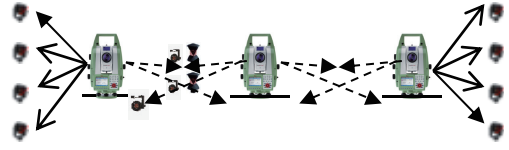


图1 由3台全站仪组网的自动化监测控制网图

之间安置“背靠背”传递棱镜的方式,实现控制网的自动化测量。

1.2 平差计算模型

平差计算一般采用三维平差的方式,水平角、天顶距、斜距等观测值放入同一观测方程进行平差计算。其中,则全站仪*i*到照准点*j*的水平方向观测值 L_{ij} 的误差方程可表示为:

$$v_{Lij} = a_{ij}\hat{x}_i + b_{ij}\hat{y}_i - a_{ij}\hat{x}_j - a_{ij}\hat{y}_j - \hat{w}_i - \left(L_{ij} + W_i^0 - \arctan \frac{Y_j^0 - Y_i^0}{X_j^0 - X_i^0} \right) \quad (1)$$

式中: v_{Lij} 为水平方向改正数; $\hat{x}_i$ 、 $\hat{y}_i$ 与 $\hat{x}_j$ 、 $\hat{y}_j$ 分别为平面坐标的改正数; W_i^0 、 $\hat{w}_i$ 分别为定向角概略值及其改正数; (X_i^0, Y_i^0, H_i^0) 、 (X_j^0, Y_j^0, H_j^0) 为概略坐标; $a_{ij} = \frac{Y_j^0 - Y_i^0}{D_{ij}^0 D_{ij}^0}$,

$$b_{ij} = -\frac{X_j^0 - X_i^0}{D_{ij}^0 D_{ij}^0}, D_{ij}^0 = \sqrt{(X_j^0 - X_i^0)^2 + (Y_j^0 - Y_i^0)^2}.$$

斜距观测值 S_{ij} 的误差方程可以表示为:

$$v_{Sij} = c_{ij}\hat{x}_i + d_{ij}\hat{y}_i + e_{ij}\hat{h}_i - c_{ij}\hat{x}_j - d_{ij}\hat{y}_j - e_{ij}\hat{h}_j - (S_{ij} - S_{ij}^0) \quad (2)$$

式中: v_{Sij} 为斜距改正数; $c_{ij} = \frac{X_j^0 - X_i^0}{S_{ij}^0}$, $d_{ij} = \frac{Y_j^0 - Y_i^0}{S_{ij}^0}$,

$$e_{ij} = \frac{H_j^0 - H_i^0}{S_{ij}^0}, S_{ij}^0 = \sqrt{(X_j^0 - X_i^0)^2 + (Y_j^0 - Y_i^0)^2 + (H_j^0 - H_i^0)^2}.$$

天顶距观测值 Z_{ij} 的误差方程可以表示为:

$$v_{Zij} = m_{ij}\hat{x}_i + n_{ij}\hat{y}_i + p_{ij}\hat{h}_i - m_{ij}\hat{x}_j - n_{ij}\hat{y}_j - p_{ij}\hat{h}_j - (Z_{ij} - Z_{ij}^0) \quad (3)$$

式中: v_{Zij} 为天顶距改正数; $m_{ij} = -\frac{(X_j^0 - X_i^0)(H_j^0 - H_i^0)}{D_{ij}^0 S_{ij}^0 S_{ij}^0}$,

$$n_{ij} = -\frac{(Y_j^0 - Y_i^0)(H_j^0 - H_i^0)}{D_{ij}^0 S_{ij}^0 S_{ij}^0}, \quad p_{ij} = \frac{D_{ij}^0}{S_{ij}^0 S_{ij}^0}, \quad Z_{ij}^0 =$$

$$\arccos \frac{H_j^0 - H_i^0}{\sqrt{(X_j^0 - X_i^0)^2 + (Y_j^0 - Y_i^0)^2 + (H_j^0 - H_i^0)^2}}.$$

i 点到 j 点的 ΔX_{ij} 、 ΔY_{ij} 、 ΔH_{ij} 的误差方程分别可以表示为:

$$v_{Xij} = -\hat{x}_i + \hat{x}_j - (\Delta X_{ij} - \Delta X_{ij}^0) \quad (4)$$

$$v_{Yij} = -\hat{y}_i + \hat{y}_j - (\Delta Y_{ij} - \Delta Y_{ij}^0) \quad (5)$$

$$v_{Hij} = -\hat{h}_i + \hat{h}_j - (\Delta H_{ij} - \Delta H_{ij}^0) \quad (6)$$

式中: v_{xij} 、 v_{yij} 、 v_{hij} 分别为坐标差改正数; ΔX_{ij}^0 、 ΔY_{ij}^0 、 ΔH_{ij}^0 分别为三维坐标差,通过人工测量得到,平差计算时将三维坐标差加入平差,并提高其观测权重(通常可设置其先验观测精度为0.1 mm),使三维坐标差在平差前后保持不变。

2 基于可实时旋转棱镜的自动化监测

国内轨道交通、高速铁路工程均已广泛使用CPIII测量用于轨道控制网测量(见图2),采用自由设站的方式在测量区域内基本均匀设站,每站进行边角网、三角高程测量,通过覆盖测区的多组传递棱镜,实现全站仪之间的相互联测。CPIII测量方式可有效提高相邻测站之间的相对精度,确保全网的控制网精度。

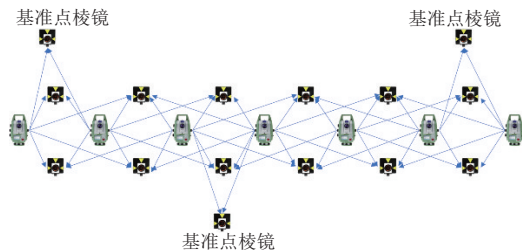


图2 CPIII测量示意图

基于CPIII测量的思路,本文提出可采用一种新型可实时旋转的棱镜,将其固定在相邻全站仪之间,通过定时调整棱镜朝向的方式进行相邻全站仪之间的同步观测,实现类似于CPIII控制网的传递测量。以两台全站仪组网观测为例,测量示意图见图3。

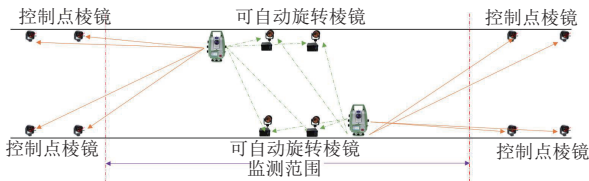


图3 基于新型实时旋转棱镜的控制网示意图

图3中在相邻两台智能型全站仪之间布置可自动化旋转棱镜,基于内置电机、伺服马达、5G网络传输及远程控制等技术,可在指定时间按照预设的旋转角度调整棱镜朝向,在控制网测量时可根据预先设定好的测量顺序,实现相邻全站仪对同一传递棱镜的同心观测。实时旋转棱镜见图4。

通过可自实时旋转棱镜,平差计算时无需引入相邻传递棱镜的三维坐标差作为平差条件,只需根据式(1)~式(3)的水平角、斜距、天顶距的观测误差方程进行最小二乘平差。全站仪、实时旋转棱镜三维坐标的最小二乘解可以表示为:



图4 新型实时旋转棱镜实景图

$$X = (B^T P B)^{-1} B^T P L \tag{7}$$

式中: X 为待结算的三维坐标; B 为观测方程的系数矩阵; P 为观测值的权重; L 为观测值。单位权中误差 σ_0 通常与水平方向观测的先验精度 m_L 设置为相等,则各个观测量的权重可式表示为:

$$P_L = \frac{\sigma_0^2}{m_L^2} = 1 \tag{8}$$

$$P_s = \frac{\sigma_0^2}{m_s^2} = \frac{m_L^2}{m_s^2} \tag{9}$$

$$P_v = \frac{\sigma_0^2}{m_v^2} = \frac{m_L^2}{m_v^2} \tag{10}$$

式中: P_L 、 P_s 、 P_v 分别为水平方向、斜距、天顶距的权; m_s 为斜距的先验精度,一般设置测距固定误差1~2 mm,比例误差1 ppm; m_v 为天顶距的先验精度,一般设为2"~4"。

作者采用C#编程语言编写了整套基于全站仪自动化监测控制网的平差程序,该程序包含平面平差、高程平差、三维平差等功能,并集成多种粗差探测功能,包括周江文法、丹麦法、Huber法、Hampel法、残差绝对值和最小法等,兼容Leica、科傻等原始观测数据。

该程序可用于基于“背靠背”传递棱镜、仪器台下方传递棱镜作为传递测量的平差方式,以及本文提出的基于新型实时旋转棱镜的平差方式,程序界面见图5。

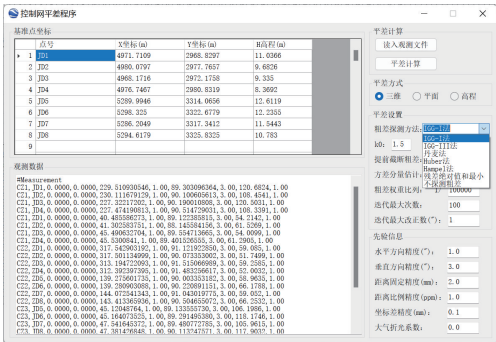


图5 用于隧道自动化监测的控制网平差程序

3 模拟计算

MicroSurvey StarNet 平差软件自带的平差预分析功能,可方便地进行控制网精度预分析,本文使用该软件进行控制网的模拟计算。以3台全站仪进行组网观测为例,模拟在每相邻两台全站仪之间设置4个可自动化旋转棱镜,设置水平角方向观测精度为0.5",距离观测固定误差为1.0 mm,比例误差1 ppm,天顶距观测精度为4"。控制网信息设置见表1。

表1 模拟控制网的坐标信息

点号	北坐标/m	东坐标/m	高程/m	说明
1#基准点棱镜	100	100	6	小里程4个基准点
2#基准点棱镜	100	124	5	
3#基准点棱镜	105	100	5	
4#基准点棱镜	105	124	6	
1#全站仪	105	244	5	位于1#、2#全站仪之间
1#实时旋转棱镜	100	284	5	
2#实时旋转棱镜	100	324	6	
3#实时旋转棱镜	105	284	5	
4#实时旋转棱镜	105	324	6	位于2#、3#全站仪之间
2#全站仪	100	364	6	
5#实时旋转棱镜	100	404	5	
6#实时旋转棱镜	100	444	6	
7#实时旋转棱镜	105	404	5	大里程4个基准点
8#实时旋转棱镜	105	444	6	
3#全站仪	105	484	6	
5#基准点棱镜	100	604	5	
6#基准点棱镜	100	628	6	
7#基准点棱镜	105	604	5	
8#基准点棱镜	105	628	6	

MicroSurvey StarNet 平差软件无需输入观测数据,通过各点位的模拟坐标、观测顺序、先验精度等即可完成精度预分析,各点位的平差精度情况见表2。

表2 精度预分析统计

点号	点位精度/mm			误差椭圆/mm		
	北坐标	东坐标	高程	长半轴	短半轴	高程
1#全站仪	0.5	0.5	1.0	1.3	1.2	2.0
1#实时旋转棱镜	0.7	0.9	1.2	2.2	1.6	2.4
2#实时旋转棱镜	0.8	0.9	1.2	2.2	1.8	2.4
3#实时旋转棱镜	0.7	0.9	1.2	2.2	1.7	2.4
4#实时旋转棱镜	0.8	0.9	1.2	2.2	1.8	2.4
2#全站仪	0.7	0.7	1.1	1.8	1.6	2.1
5#实时旋转棱镜	0.8	0.9	1.2	2.2	1.8	2.4
6#实时旋转棱镜	0.7	0.9	1.2	2.2	1.6	2.4
7#实时旋转棱镜	0.8	0.9	1.2	2.2	1.8	2.4
8#实时旋转棱镜	0.7	0.9	1.2	2.2	1.7	2.4
3#全站仪	0.5	0.5	1.0	1.3	1.2	2.0

从表2的模拟预分析情况可以看出,采用本文提出的可自动化旋转棱镜替代常规传递棱镜,点位精度完全可以满足需求。

4 实测项目案例

某地铁保护区监测项目位于杭州地铁5号线三坝站~萍水街站区间上行线隧道,监测范围长度约260 m,在测区范围基本均匀布置3台 Leica TM50 智能型全站仪。项目采用本文提出的实时旋转棱镜组建监测控制网,控制网见图6。

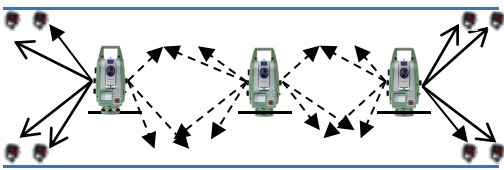


图6 某项目采用实时旋转棱镜的网型图

基准点棱镜的三维坐标见表3。

表3 基准点的三维坐标

点号	北坐标/m	东坐标/m	高程/m
1#基准点棱镜	4 971.710 9	2 968.829 7	11.036 6
2#基准点棱镜	4 980.079 7	2 977.765 7	9.682 6
3#基准点棱镜	4 968.171 6	2 972.175 8	9.335 0
4#基准点棱镜	4 976.746 7	2 980.831 9	8.369 2
5#基准点棱镜	5 289.994 6	3 314.065 6	12.611 9
6#基准点棱镜	5 298.325 0	3 322.677 9	12.235 5
7#基准点棱镜	5 286.204 9	3 317.341 2	11.544 3

通过远程控制程序,提前规划好两组实时旋转棱镜的转动时间、转动角度,按照如下的观测次序进行自动化测量,见表4。

表4 全站仪观测次序

观测段	仪器	照准点
第1个观测段	1#全站仪	1~4#基准点棱镜、1#~4#实时旋转棱镜
	3#全站仪	5~8#基准点棱镜、5#~8#实时旋转棱镜
第2个观测段	2#全站仪	1#~8#实时旋转棱镜

采用作者编制的控制网平差程序,平差成果见表5。

观测值精度及残差情况见表6。

从表5、表6可以看出,采用本文提出的新方法平差精度较高,三维坐标精度在1 mm左右,可以满足高精度自动化监测控制网的解算需求。

为进一步验证平差成果的可靠性,选取一周的平差数据,比较初始值成果,3台全站仪的历时变化曲线见图7至图9。

由图7至图9三台全站仪在7 d时间内的三维坐标历时变化曲线可以看出,位于测区中央的2#全站

表 5 各点位的平差成果及精度

点号	平差坐标/m			坐标精度/mm		
	北坐标(位移方向)	东坐标(里程方向)	高程	北坐标(位移方向)	东坐标(里程方向)	高程
1#全站仪	5 049.518 8	3 061.075 1	10.000 5	0.72	0.64	0.21
1#实时旋转棱镜	5 090.545 2	3 096.507 9	10.751 6	1.10	0.98	0.26
2#实时旋转棱镜	5 095.572 8	3 101.831 1	11.880 9	1.06	1.05	0.26
3#实时旋转棱镜	5 087.160 3	3 099.808 1	10.067 0	1.05	1.02	0.26
4#实时旋转棱镜	5 092.183 3	3 105.076 5	10.352 9	1.12	0.99	0.26
2#全站仪	5 131.482 7	3 139.094 4	11.994 4	1.02	0.95	0.22
5#实时旋转棱镜	5 171.174 7	3 182.698 0	11.985 2	1.18	1.06	0.28
6#实时旋转棱镜	5 176.027 3	3 188.035 1	11.568 4	1.13	1.09	0.28
7#实时旋转棱镜	5 167.550 3	3 185.839 5	10.886 8	1.13	1.11	0.28
8#实时旋转棱镜	5 172.344 5	3 191.237 0	11.016 1	1.16	1.06	0.28
3#全站仪	5 215.169 2	3 238.717 9	11.177 3	0.70	0.68	0.20

表 6 观测值精度与残差

后视点	前视点	水平角/DMS	残差/(″)	精度/(″)	斜距/m	残差/mm	精度/mm	天顶距/DMS	残差/(″)	精度/(″)
1#全站仪	控制点 1	229.510 931	-0.79	0.10	120.682 4	0.49	0.25	89.303 096	0.09	0.41
1#全站仪	控制点 2	230.111 679	0.37	0.11	108.454 1	0.25	0.25	90.100 606	0.26	0.51
1#全站仪	控制点 3	227.322 172	0.71	0.10	120.503 1	-0.43	0.25	90.190 011	0.95	0.41
1#全站仪	控制点 4	227.474 191	-0.30	0.11	108.339 1	0.22	0.25	90.514 729	0.34	0.51
1#全站仪	1#实时旋转棱镜	40.485 586	-0.26	0.23	54.214 2	0.29	0.67	89.122 386	-0.63	1.73
1#全站仪	2#实时旋转棱镜	41.302 584	0.24	0.21	61.526 9	0.01	0.67	88.145 584	0.32	1.46
1#全站仪	3#实时旋转棱镜	45.490 633	0.29	0.23	54.009 9	0.57	0.68	89.554 714	-0.23	1.74
1#全站仪	4#实时旋转棱镜	45.530 084	-0.26	0.21	61.290 5	-0.15	0.67	89.401 527	-0.21	1.47
2#全站仪	1#实时旋转棱镜	317.542 903	-0.28	0.21	59.085 0	-0.07	0.66	91.121 923	0.69	1.55
2#全站仪	2#实时旋转棱镜	317.501 135	0.20	0.24	51.749 9	0.28	0.68	90.073 353	-0.27	1.82
2#全站仪	3#实时旋转棱镜	313.194 722	0.32	0.21	59.258 5	0.25	0.68	91.515 067	0.24	1.54
2#全站仪	4#实时旋转棱镜	312.392 397	-0.22	0.23	52.003 2	0.17	0.67	91.483 257	0.17	1.81
2#全站仪	5#实时旋转棱镜	139.275 602	-0.07	0.23	58.963 5	0.35	0.69	90.003 353	-0.56	1.83
2#全站仪	6#实时旋转棱镜	139.280 903	-0.10	0.21	66.178 8	-0.26	0.68	90.220 891	-0.29	1.59
2#全站仪	7#实时旋转棱镜	144.072 541	0.18	0.23	59.052 0	0.55	0.69	91.043 020	-0.28	1.82
2#全站仪	8#实时旋转棱镜	143.413 366	-0.02	0.21	66.253 2	0.15	0.68	90.504 655	0.29	1.59
3#全站仪	控制点 5	45.120 488	0.36	0.11	106.198 6	0.18	0.25	89.133 556	-0.29	0.52
3#全站仪	控制点 6	45.164 074	-0.30	0.10	118.174 6	0.25	0.25	89.291 495	-0.08	0.42
3#全站仪	控制点 7	47.541 645	-0.08	0.11	105.961 5	-0.03	0.25	89.480 773	-0.43	0.52
3#全站仪	控制点 8	47.381 427	0.00	0.10	117.903 2	0.19	0.25	90.113 248	-0.78	0.42
3#全站仪	5#实时旋转棱镜	231.513 001	-0.08	0.20	71.234 5	0.28	0.68	89.210 102	0.68	1.42
3#全站仪	6#实时旋转棱镜	232.192 513	-0.09	0.22	64.039 3	-0.35	0.69	89.390 088	0.28	1.66
3#全站仪	7#实时旋转棱镜	227.595 267	0.22	0.20	71.159 8	0.37	0.68	90.140 291	0.33	1.42
3#全站仪	8#实时旋转棱镜	227.571 355	-0.02	0.22	63.940 5	0.16	0.69	90.084 134	-0.29	1.66

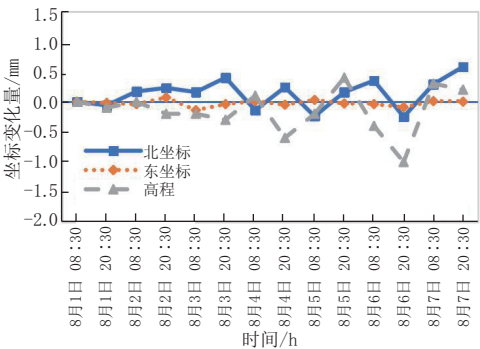


图 7 1#全站仪 7 d 的三维坐标变化历时曲线

仪的坐标变化量略大于两侧靠近基准点棱镜的 1#及 3#全站仪,但 3 台全站仪的平面坐标及高程变化始终在±1 mm 左右,进一步验证了本文新方法的可靠性。

5 结 语

基于智能型全站仪的隧道内自动化监测控制网是一类较为特殊的网型,本文给出了平差计算的模型,并编制了相应的平差软件。同时,本文提出可采

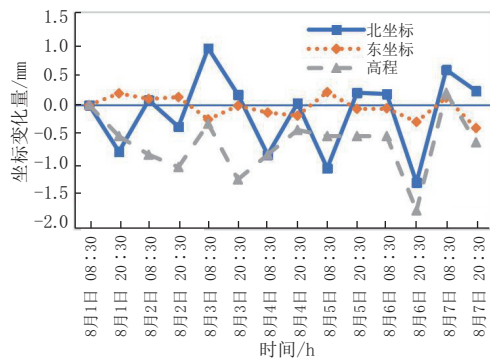


图8 2#全站仪7 d的三维坐标变化历时曲线

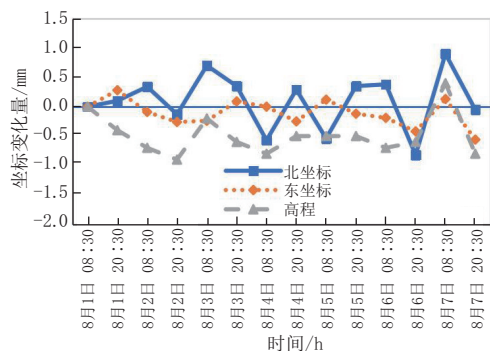


图9 3#全站仪7 d的三维坐标变化历时曲线

用一种新型实时旋转棱镜替代常用的基于“背靠背”传递棱镜、仪器台传递棱镜的传递测量方式,以摒弃使用传递棱镜三维坐标差作为平差附加条件。自动化监测周期通常达几个月甚至数年时间,常规自动化组网方式受外界扰动影响,传递棱镜可能发生相对转动造成附加条件变化,进而带来的系统误差。本文提出的新方法一方面可避免上述系统误差的影响,同时,控制网测量采用类似CPIII的测量方式,控制网网型始终保持稳定,无需增加人工复测,减少了内外业工作量。通过模拟数据及项目实测数据分

析,本文提出的新方法平差精度较高,可靠性可满足自动化监测需求。

参考文献:

- [1] 黄小斌,胡雷鸣,吴灿鑫.地铁保护区多测站串联监测方法探讨[J].测绘通报,2017(6):153-154.
- [2] 黄小斌,姜叶翔,胡雷鸣.一种改进极坐标二次基准实时差分方法在地铁自动化监测中的应用[J].测绘通报,2023(2):177-181.
- [3] 吴灿鑫,胡雷鸣.地铁自动化监测精度分析[J].测绘通报,2015(1):137-138.
- [4] 陶学红,从建峰,李凯,等.多台测量机器人串联组网技术在运营隧道长距离自动化监测中的应用[J].工程勘察,2024(12):51-55.
- [5] 谭瑞.基于伪公共点的隧道自动化变形监测技术研究[J].工程勘察,2020(3):69-72.
- [6] 余锐.测量机器人地铁隧道监测程序设计与实现[J].工程勘察,2018(2):62-66.
- [7] 潘国荣,李伟.多台测量机器人在地铁隧道自动化监测中的开发与应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015(2):79-85.
- [8] 卫建东,包欢,徐忠阳,等.基于多台测量机器人的监测网络系统[J].测绘学院学报,2005(2):154-156.
- [9] 潘国荣,李伟.多台测量机器人在自动化监测中的开发应用[J].江苏大学学报(自然科学版),2016(6):684-690.
- [10] 刘绍堂,王果,潘洁晨.测量机器人隧道变形自动监测系统研究进展[J].测绘工程,2016(10):42-48.
- [11] 柏文锋.基于智能全站仪的地铁隧道自动化监测精度分析及验证[J].测绘通报,2018(11):107-110.
- [12] 熊开明.基于智能全站仪组建地铁隧道多测站三维监测网的实践与精度分析[J].城市勘测,2020(1):155-162.
- [13] Huber, P. J. Robust statistics[M]. John Wiley & Sons, 1981.
- [14] Hampel F. R, et al. Robust Statistics[M]. John Wiley & Sons, 1986.
- [15] 李德仁.利用选择权迭代法进行粗差定位[J].武汉测绘学院学报,1984(1):46-68.
- [16] 杨元喜.参数M估计及验后精度综述[J].测绘通报,1991(6):6-10.
- [17] 周江文.经典误差理论与抗差估计[J].测绘学报,1989(18):114-120.

(上接第73页)

- velocimetry techniques[J]. Measurement, 2021, 186: 110086.
- [7] 梁爱武,刘庭金,王彦峰,等.高压电缆排管变形控制标准破坏性试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):712-719;758.
 - [8] 郝凤发.堆载作用下燃气管道埋地试验研究[D].郑州:河南工业大学,2015.
 - [9] 孙鹏飞,汪磊.加载条件下不同埋深原水管道受力特征模型试验[J].中国安全生产科学技术,2021,17(6):91-97.
 - [10] 吴奇峰,汪磊,周骏,等.加载条件下原水管道受力特征模型试验研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(4):174-179.
 - [11] Wang F, Han J, Parsons R L, et al. Performance of steel-reinforced high-density polyethylene pipes in soil during installation: a numerical

- study[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(4): 963-974.
- [12] 孙中菊.地面堆载作用下埋地管道的力学性状分析[D].杭州:浙江大学,2014.
 - [13] Zhang J, Liang Z, Zhao G. Mechanical behaviour analysis of a buried steel pipeline under ground overload[J/OL]. Engineering Failure Analysis, 2016, 63: 131-145.
 - [14] Liang Z, Yang Q, Zhang J, et al. Mechanical Analysis of Buried Polyethylene Pipelines under Ground Overload[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(1): 193-203.
 - [15] 贾堤,石峰,郑刚,等.深基坑工程数值模拟土体弹性模量取值的探讨[J].岩土工程学报,2008,30(增刊1):155-158.