

多台全站仪实现隧道自动化监测应用与分析

谢智剑

深圳市交通工程试验检测中心有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年11月6日; 录用日期: 2023年12月31日; 发布日期: 2024年1月10日

摘要

为了监测地铁保护区内大型基坑施工对临近地铁隧道造成的变形, 可以使用多台全站仪组成联测系统。实施方案是在独立工作的全站仪之间设置偏置棱镜和背靠背棱镜, 保持偏置棱镜与设站点之间的相对位置关系以及背靠背的两个棱镜之间的相对位置关系不变。通过这些相对关系作为限制条件进行间接平差计算, 将所有全站仪的测量统一至同一坐标系下, 实现多台全站仪的联测。监测实例表明, 这种多台自动化全站仪联测系统稳定可靠, 并能真实反映隧道的变形情况。

关键词

隧道变形监测, 多台全站仪联测, 间接平差, 人工复核

Application and Analysis of Tunnel Automatic Monitoring with Multiple Total Stations

Zhijian Xie

Shenzhen Traffic Engineering Testing and Detection Center Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Nov. 6th, 2023; accepted: Dec. 31st, 2023; published: Jan. 10th, 2024

Abstract

In order to monitor the deformation caused by the construction of large foundation pits in the subway protection zone on adjacent subway tunnels, multiple total stations can be used to form a joint measurement system. The implementation plan is to set up bias prisms and back-to-back prisms between independent working total stations, maintaining the relative position relationship between the bias prisms and the designated stations, as well as the relative position relationship between the two prisms in a back-to-back manner. By using these relative relationships as limiting conditions for indirect adjustment calculations, the measurement of all total stations is unified into the same coor-

dinate system, achieving joint measurement of multiple total stations. The monitoring examples show that this multiple-station automatic total station joint measurement system is stable and reliable, and can truly reflect the deformation situation of the tunnel.

Keywords

Tunnel Deformation Monitoring, Joint Measurement of Multiple Total Stations, Indirect Adjustment, Manual Review

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地铁作为城市主要交通工具，在提供出行、缓解交通压力中起到了举足轻重的作用。我国地铁始建于改革开放初期，初期只在大城市才会修建地铁。伴随着国内各大城市经济的快速发展，很多二三线城市陆续修建地铁项目。为保证地铁安全稳定的运营，常规的监测任务必不可少。一般监测区域设置为地铁隧道外边线 50 m 作为地铁红线保护区，研究日常地铁两边深基坑施工对隧道的影响，提供有效的监测数据能够保障地铁安全稳定的运行。常规监测方法为人工加全站仪模式，不但效率低，而且极易受到施工环境的影响，再加上隧道通视条件限制了监测线性不宜过长，为此增加了地铁监测任务的难度[1] [2]。文献[3]研究了基于测量机器人的隧道自动化监测，提升了工作效率并与常规监测方法比较，证明了测量机器人可应用于隧道变形监测任务；文献[4]利用自动化监测技术实施了地铁内基坑支护体系及隧道结构的形变、地下水系统变化的实时自动化监测，通过其短程与远程有线监测功能实现数据的有效收集与分析，为科学管理及危害预警提供了有价值的技术支持。

本文以某城市地铁隧道为例，将多台全站仪与棱镜有效结合，实现了长隧道变形监测任务，通过利用偏置棱镜与背靠背棱镜组实现了坐标的传递与更新。利用人工观测的导线结果与采用本文方法获得的结果对比分析，验证了本文提供的方法可行且精度满足要求。

2. 多台全站仪联测实施方案

常规地铁隧道保护监测中重点关注的指标包括隧道水平直径位移、轨道道床沉降与道床水平位移。为了满足以上三个重要指标并获取能够反映其沉降位移的数值，隧道每个断面上布设了 4 个小棱镜(盾构隧道的 4 个小棱镜必须布设在同一环上)。为了建立独立的坐标系，选择沿隧道走向方向为 Y 轴方向，一般从小里程到大里程方向为正方向；垂直于隧道走向方向为 X 轴方向，一般指向基坑方向为正方向；竖直方向为 Z 轴方向，向上为正方向。使用固定在测站支架上的全站仪来测量每个小棱镜的三维坐标(x, y, z)，从而计算出相应沉降、水平直径、水平位移量，如表 1 所示。

1) 道床沉降

道床沉降主要考虑的是垂直方向的变化量，以 2 号或者 3 号棱镜的 Z 坐标变化量为例，各监测点的单次沉降变化量为：

$$\Delta Z_i = Z_i - Z_{i-1} \quad (1)$$

式中： Z_i 为第 i 次测量时棱镜 Z 坐标数值； Z_{i-1} 为第 $i-1$ 次测量时棱镜 Z 坐标， ΔZ_i 为第 i 次测量时沉降变化量。

Table 1. Calculation method for each measurement item
表 1. 各测项计算方式

序号	监测项目名称	对应监测点棱镜	备注
1	道床沉降	2 号或者 3 号棱镜	Z 坐标变化量
2	水平位移	2 号或者 3 号棱镜	X 坐标变化量
3	水平直径	1 号或者 4 号棱镜	空间距离变量

2) 水平位移

道床水平位移主要考虑的是垂直于隧道方向的 X 方向数值，以 2 号或者 3 号棱镜的 X 坐标变化量为例，各监测点的单次水平位移变化量为：

$$\Delta X_i = X_i - X_{i-1} \quad (2)$$

式中： X_i 为第 i 次测量时对应棱镜 X 坐标； X_{i-1} 为第 $i-1$ 次测量时对应棱镜 X 坐标； ΔX_i 为第 i 次测量时水平位移变化量。

一般情况下，因地铁隧道平面弯曲弧度平缓，故采用 X 方向的变量作为水平位移变化量。

3) 水平直径

1 号与 4 号棱镜处于过圆心且与地面平行的直径两 endpoint，利用两者坐标很容易算出水平直径的距离，两者距离变化即是水平直径的变化量。计算公式如下式所示：

$$S_i = \sqrt{(X_{i1} - X_{i4})^2 + (Y_{i1} - Y_{i4})^2 + (Z_{i1} - Z_{i4})^2} \quad (3)$$

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} \quad (4)$$

式中： X_{i1} 、 Y_{i1} 、 Z_{i1} 为第 i 次测量时 1 号棱镜的坐标； X_{i4} 、 Y_{i4} 、 Z_{i4} 为第 i 次测量时 4 号棱镜的坐标； S_{i-1} 为第 $i-1$ 次测量水平直径值； S_i 为第 i 次测量时水平直径值； ΔS_i 为第 i 次测量水平变化量。

受限于地铁隧道通视条件差，以上模式布设监测点时，前后视距 100 m 左右两者之和也不超过 200 m。单台全站仪观测效率低，还有可能存在系统误差的影响。使用多台全站仪联测模式，实现观测棱镜统一在一个坐标系下，实现更长距离的变形监测，提高了观测效率，降低了重新架设仪器带来的误差影响。

考虑到变形监测范围的确定由施工影响因素决定，同时顾及隧道监测中通视条件的限制，测站大都处于变形范围内。但是基准点作为监测起算点至关重要，所以通常将基准点布置在监测范围之外。因地铁夜间停放车时，需要对地铁隧道进行安全检测，可能对基准点造成一定的破坏。所以常常在 3 个基准棱镜的基础之上额外增加一个棱镜，这样避免了当一个棱镜损坏时，监测网无法正常运行，多台全站仪联测示意图如图 1 所示。

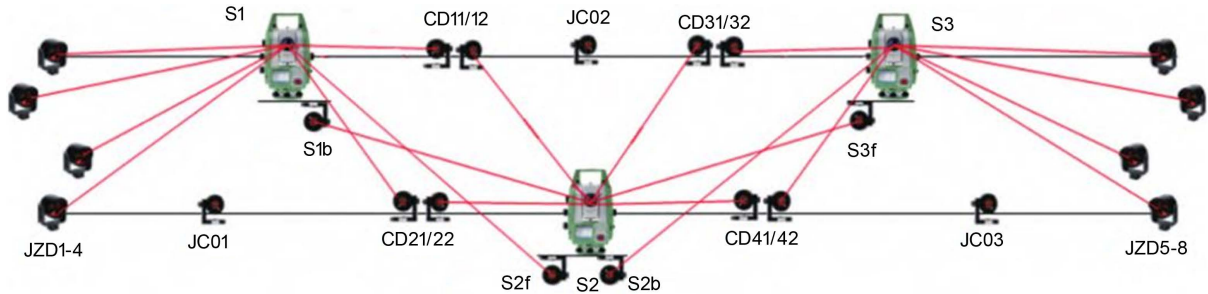


Figure 1. Schematic diagram of joint measurement of multiple total stations
图 1. 多台全站仪联测示意图

多台独立的全站仪如何统一至同一坐标系下,实现全站仪联测,可使用背靠背棱镜与偏置棱镜两种模式。其中,按照监测点要求布置一定数量的背靠背棱镜与偏置棱镜,并保证棱镜初始位置正确[5]。

初始测量时建立假定的相对空间直角坐标系,假设某个强制固定墩上方安置仪器,该位置已知,并于某一个基准棱镜建立 Y 方向。在其空余位置上架设砧板,一次照准基准棱镜、背靠背棱镜、偏置棱镜。按照相关技术规范要求满足相应等级导线观测要求,采用全圆观测法并观测 8 测回[6]。

可按照符合导线的模式经平差之后计算得到各点的坐标值,如基准站坐标、偏置棱镜坐标、背靠背棱镜坐标。由此计算测站与偏置棱镜、背靠背棱镜之间坐标差值,两者关系影响到整个监测网的精度,提高观测精度多次观测。

在固定墩上边安置偏置棱镜(如图 1 中的 S1b 棱镜)所示,该偏置棱镜安装位置如图 2 所示,该棱镜位置的变化可视为测站位置移动。当自动化监测时,测站 s_1 观测位置 s_2 的偏置棱镜,可简单理解为通过偏置棱镜的位移变化量代替测站 s_2 的变化量,从而逐渐更新测站坐标,以保证迭代坐标更新效率。

在两测站位置中间 $1/3$ 和 $2/3$ 处安置背靠背棱镜组,该棱镜组位置可认为基本一致,但朝向相反,如图 1 中 CD11/12 所示,实物样图如图 2 所示。可将背靠背棱镜组的两个棱镜位置保持不变,即将两者作为全站仪之间的公共连接点。当两台全站仪观测公共点时,通过坐标转换实现坐标统一,背靠背棱镜组数量一般定为 4 组,目的是增加多余观测实现有效平差。



Figure 2. Actual sample of bias prism and back-to-back prism

图 2. 偏置棱镜及背靠背棱镜的实物样图

在实际操作过程中,全站仪架设在强制对中墩上,观测导线的两端基准棱镜位置可认为不变,架站点与偏置棱镜两者之间相对位置不变,此时可认为背靠背的棱镜之间相对位置关系维持稳定。将这些限制条件以及两端基准棱镜坐标输入平差软件中,采用附有限制条件的间接平差计算各棱镜位置,进行坐标迭代更新,并分别照准各小棱镜位置,获取到各坐标值。

3. 实验

某城市地铁 2 号线贯穿城市东西方向,穿过繁华商业地段。地铁周边住宅与商业楼正在施工的居多,其中某高层住宅楼紧邻地铁线路。该住宅项目拟建 33 层超高住宅,在挖基坑项目中 1 号基坑深度可达 31.9 米,深挖面积约为 15.6 万平方米。该基坑影响地铁线路长度可达 267 米。

本次监测项目只需要监测一条线路,长度为 320 米,布设 4 台全站仪(标称精度 $0.5''$, $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$),建立隧道独立的坐标系,其中 X 方向垂直隧道, Y 方向沿隧道走向, Z 方向与 XY 形成平面垂直。为保证后续实施多台全站仪同步观测的连续性与稳定性,线路初始采用人工观测模式确定各测站、棱镜组坐标值与相对位置关系,并计算各项精度指标。本次项目进行了两次独立的人工观测,部分成果如表 2 所示,表格中只展示部分观测结果。

Table 2. Result table of two manual wire observations
表 2. 两次人工导线观测成果表

点类型	点名	第一遍人工导线成果/m			第二遍人工导线成果/m			两遍成果较差/mm		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
基准点	JZ-19	5093.6108	5664.1939	22.4752	5093.6147	5664.1929	22.4818	3.9	-1.0	6.6
基准点	JZ-02	5098.1024	5675.9878	20.9035	5098.1066	5675.9855	20.9099	4.2	-2.3	6.4
测站 偏置	B1ZB	5093.2572	5676.2206	21.3993	5093.2609	5676.2185	21.4060	3.7	-2.1	6.7
测站点	B1	5095.2486	5781.6682	22.3993	5095.2516	5781.6674	22.4042	3.0	-0.8	4.9
测站 偏置	B1ZA	5095.1591	5781.8169	22.1378	5095.1642	5781.8148	22.1468	5.1	-2.1	9.0
测站 偏置	A1ZB	5003.9769	5891.1367	20.6211	5003.9818	5891.1358	20.6278	4.9	-0.9	6.7
测站点	A1	5003.8939	5891.2885	20.8955	5003.8967	5891.2879	20.8993	2.8	-0.6	3.8
测站点	A2	5002.9899	5891.4321	20.6282	5002.9916	5891.4311	20.6347	1.7	-1.0	6.5

将上表观测的两侧数值取均值导入平差系统中，观测初始依次瞄准后视棱镜，偏置棱镜、背靠背棱镜，每次观测测回数满足要求。待各棱镜观测稳定后取均值计算，分别计算仪器支架与偏置棱镜、两个背靠背棱镜之间坐标差值，分别导入自动化平差软件中，设置各自限差后观测。平差软件计算过程中，为使人工导线成果纠正自动化过程中出现的异常情况，可将人工观测结果与系统平差成果差值尽量最小。表 3 展示了自动化系统平差的成果与人工观测导线平差成果的比较。

Table 3. Comparison table between automatic monitoring adjustment results and manual observation results
表 3. 自动化监测平差结果与人工观测结果比较表

点类型	点名	人工导线测量成果/m			自动化监测系统平差成果/m			较差/mm		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
基准点	JZ-19	5093.6128	5664.1934	22.4785	5093.6124	5664.1929	22.4871	-0.4	-0.5	8.6
基准点	JZ-02	5098.1045	5675.9867	20.9067	5098.1047	5675.9864	20.9124	0.2	-0.2	5.7
测站 偏置	B1ZB	5093.2591	5676.2196	21.4027	5093.2583	5676.2191	21.4088	-0.8	-0.5	6.1
测站点	B1	5095.2501	5781.6678	22.4018	5095.2497	5781.6676	22.4022	-0.4	-0.2	0.4
测站 偏置	B1ZA	5095.1617	5781.8159	22.1423	5095.1632	5781.8142	22.1429	1.5	-1.7	0.6
测站 偏置	A1ZB	5003.9794	5891.1363	20.6245	5003.9777	5891.1366	20.6253	-1.7	0.3	0.8
测站点	A1	5003.8953	5891.2882	20.8974	5003.8944	5891.2876	20.9012	-0.9	-0.6	0.9
测站点	A2	5002.9908	5891.4316	20.6315	5002.9919	5891.4306	20.6330	1.1	-1.0	1.5

在平差计算中部分偏置棱镜数据偏差较大，这部分数据不选用，取而代之的背靠背棱镜起到了传递两测站坐标的作用。

自动化系统建立平稳运行，并在基坑施工期间隧道的水平位移与沉降观测中发现变化较大，人工观测导线结果对自动化观测成果进行检核，测量对比结果如表 4 所示。由表格可知，自动化平差各坐标分量与人工观测导线成果偏差均在 3 mm 以内，符合相关规范要求。充分证明了该自动化系统运行结果可靠稳定。

Table 4. Comparison table between automatic monitoring and manual review
表 4. 自动化监测与人工复核比较表

点类型	点名	人工导线复核坐标/m			自动化系统平差坐标/m			差值/mm		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
测站点	X1	5095.2536	5781.6681	23.3996	5095.2538	5781.6684	23.4002	0.2	0.3	0.6
测站点	X2	5095.8084	5891.2876	21.8887	5095.8075	5891.2877	21.8911	-0.9	0.1	2.4
测站点	X3	5095.9559	5903.1055	22.4785	5095.9554	5903.1047	22.4800	-0.5	-0.8	1.5
测站点	X4	5000.0727	5000.5673	21.1372	5000.0731	5000.5666	21.1393	0.4	-0.7	2.1
测站点	X5	5000.5447	6210.7698	21.0879	5000.5453	6210.7681	21.0899	0.6	-1.7	2.0
测站点	X6	6116.7417	6280.8227	21.4847	6116.7423	6280.8218	21.4869	0.6	-0.9	2.2

4. 结束语

本文阐述了多台全站仪联测来实现地铁隧道变形监测的方法。通过实际案例，证实此方法有较好的效果，能较准确反映地铁隧道的变形。在多台自动化全站仪联测系统搭建初期，需重视人工导线采集的精度，应独立观测 2 次，两次人工导线的较差应满足限差要求，从而提供较为准确的测站间、测站与偏置棱镜间的相互位置关系，以此保证整个监测系统的精度。

参考文献

[1] 张晨琛. 自动化监测技术在矿山采场边坡变形监测中的应用[J]. 四川建材, 2023, 49(10): 29-30+45.

[2] 唐浩耀, 谭社会, 金卫锋, 等. 基于北斗自动化监测的大跨度桥梁变形研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(9): 103-106+110.

[3] 李文雅, 赵秀琴. 测量机器人自动化监测系统在轨道交通运营隧道监测中的应用[J]. 城市勘测, 2023(5): 139-143.

[4] 刘燕岭. 自动化监测技术在地铁隧道施工中的应用探析[J]. 工程机械与维修, 2023(5): 107-109.

[5] 刘志东. 自动化监测技术在某地铁基坑施工期间的应用[J]. 山西建筑, 2023, 49(19): 75-77+81.

[6] 王晓初, 刘湘邦, 王义, 等. 一种基坑水平位移自动化监测系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2023, 36(10): 26-28.