

多台测量机器人在地铁隧道自动化监测中的 开发与应用

潘国荣, 李 伟

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘 要:利用测量机器人在自动变形监测方面的优势,采用多台自动全站仪进行自由设站,对狭长型的隧道构成监测网,开发针对地铁隧道的自动化变形监测系统。相邻测量机器人之间通过测量公共点进行传递,利用地铁隧道两端站台的稳定基准点,对多测站转换参数进行整体平差,实现地铁隧道自动化监测数据的高精度处理。试验结果显示,运用整体平差方法,测站定位精度达到了亚毫米级。

关键词:测量机器人;变形监测;自由设站;坐标转换;整体平差

中图分类号:P258;TH761

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)02-0079-07

Development and Application of Georobots in Automatic Monitoring of Subway

Pan Guorong, Li Wei

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking advantage of georobots in automatic deformation monitoring, automatic total stations were used in free stationing to make a monitoring network in the long and narrow tunnel, with the purpose of developing an automatic deformation monitoring system for subway tunnels. In the proposed method, the adjoining georobots were contacted by measuring common points, and integral adjustment on transformation parameters at stations was conducted by using the datum points distributed at both ends of the tunnel on the platform to achieve the high accuracy of automatic monitoring data processing of subway tunnels. The experiment result shows that the integral adjustment method increases the accuracy of station positioning to submillimeter.

Key words: georobot; deformation monitoring; free stationing; coordinate transformation; integral adjustment

测量机器人是一种能够进行目标自动搜索、识别、跟踪和精确照准并获得角度、距离和三维坐标等信息的自动化智能型电子全站仪^[1]。测量机器人在全站仪上安装步进马达和 CCD(charged coupled device)影像传感器构成的视频成像系统,并且利用相应的软件进行控制和分析,步进马达实现照准功能,CCD 影像传感器实现识别功能,能够进行目标自动识别,利用机载软件进行分析、判断和推理,实现自我控制,并且自动完成照准和读数等操作。利用厂家提供的二次开发技术,可以编制相应的自动化监测软件对测量机器人进行有效控制,对测得的数据进行保存和处理,最后形成数据报表。

目前,地铁隧道的监测手段主要有人工测量、自动化静力水准和测量机器人等。人工测量会产生人为照准误差,费时费力,而且夜间不能进行观测,出报表周期长;静力水准虽然能实现自动化,但是仅能给出一维沉降信息,有一定的局限性;测量机器人则能给出高精度、高频率的三维坐标,在自动化监测中具有广泛的应

收稿日期:2014-12-08

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

作者简介:潘国荣(1960—),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事精密工程测量、工业测量与测量数据处理等方面的研究。
E-mail: pgr2@163.com

用前景。国内已经将测量机器人应用在大坝^[2]、桥梁^[3]和滑坡^[4-5]监测等领域,但是针对地铁隧道的监测系统相对较少,主要原因是地铁隧道狭长,传统的一站式测量不符合地铁隧道监测的特点。

地铁隧道两端站台有基础,站台端的基准点是稳定的。本研究提出一种基于多台测量机器人在地铁隧道里自由设站,利用地铁隧道两端站台的稳定基准点进行多测站转换参数的整体平差方法,提高测量精度。

1 多台测量机器人监测系统主要功能

利用多台(本系统最多支持 5 台)索佳 NET05 智能型全站仪(测角精度为 $0.5''$,测距精度在以索佳反射片为配合目标、200 m 范围内达到 $\pm(0.5 + 10^{-6} \times D)$ mm, D 为测量距离,以棱镜为配合目标、3 500 m 范围内达到 $\pm(0.8 + 10^{-6} \times D)$ mm,此型号仪器具有精度高、测量速度快、稳定性高等特点,以其提供的二次开发指令集为基础,针对地铁隧道开发基于多台测量机器人的自动化监测系统,总体结构如图 1 所示。监测模型由测量点组、测量机器人组、计算机以及软件系统组成。该系统以棱镜为测量机器人的合作目标,可以实现无人值守监测,其原理是多台测量机器人在地铁隧道里自由设站,相邻测量机器人之间通过测量公共点进行坐标系统一,利用地铁隧道两端站台的稳定基准点,通过软件系统对多测站转换参数进行整体平差,实现对监测点组的监测。通过基准数据以及监测得到的原始数据,用附有限制条件的间接平差进行数据处理,得到监测结果,最终绘制变形曲线,导出报表。

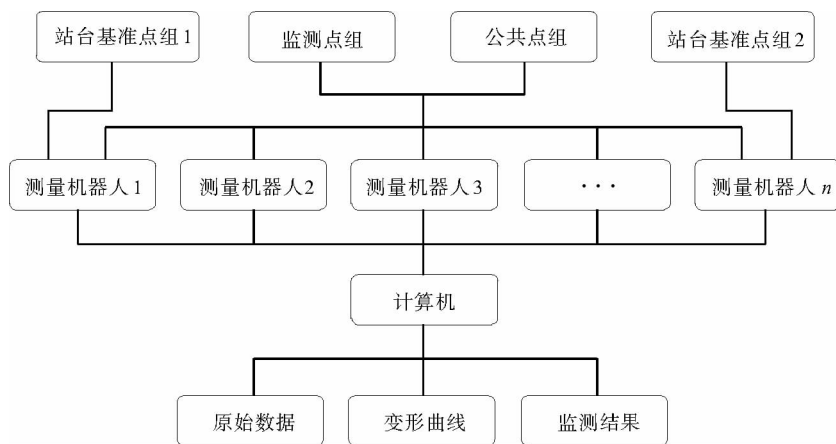


图 1 系统总体结构图

Fig. 1 The whole structure figure of the system

软件主要包含工程管理、自动监测和数据报表三个功能。

1.1 工程管理

工程管理包括打开工程和新建工程两个模块。将每一个监测项目保存为一个 Access 数据库文件,该文件中保存监测项目的所有信息,如测量基本配置、已知点数据、定时测量信息、学习数据、后处理数据等。

1.2 自动监测

自动监测包括监测前的全站仪链接、已知控制点、测站定向、学习、测量配置、自动测量和关闭自动测量模块。

全站仪链接:在自动监测前,需要做准备工作,首先是设置相应的串口通信参数,用数据线将电脑和全站仪链接起来。

已知控制点:将已知控制点通过全站仪测量或者直接输入,便于后期转换参数整体平差时使用。

测站定向:此软件的测站定向和传统意义上的测站定向不完全相同,该功能是为了测量各测站之间的公共点,通过隧道两端基准点实现对监测网的整体控制,如图 1 所示。

学习功能:对目标监测点进行预测量,将点位的概略位置记录到数据库中,便于自动测量时寻找目标。

测量配置:设置自动测量时是进行半测回还是一测回的测量,以及仪器的警戒值(即测站位移达到一定数值时输出报警信号)等。

自动测量:做好准备工作之后,即可进行自动测量,需要停止时关闭自动测量。

1.3 数据报表

数据报表包括单点变形曲线、数据图和数据表格。

单点变形曲线:可以得到任意一个变形监测点在各方向上的变形时序图。

数据图:可以得到各变形监测点在各方向上的本次变形、当天变形和累计变形。

数据表格:将各变形监测点在各方向上的首次监测值、当天初始监测值、最新监测值以及相应的变形情况、测量时间和是否报警等信息保存到 EXCEL 表格中。

2 监测方案及原理

2.1 监测方案

地铁隧道狭长,观测条件比较差,测量机器人在隧道中的视距会受一定影响,一台测量机器人难以完成监测,因此需要多台测量机器人进行配合。由于地铁隧道两端站台是有基础的,比较稳定,所以可以选择将基准点布设在两端站台,如图 2 所示:黑色实心圆点表示位于地铁隧道两端站台的稳定基准点,是整个监测系统的控制基准;圆环表示位于地铁隧道中的各个测站,用于监测附近点位;圆圈表示相邻测站的公共点位,用于联系相邻的测站坐标系;三角形表示被监测点。

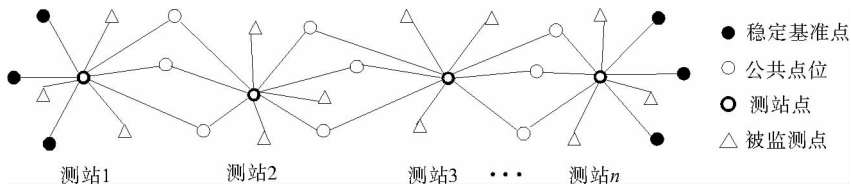


图 2 监测示意图

Fig. 2 Monitoring diagram

此监测方案的特点是:各测站独立完成监测工作,相邻两测站之间通过观测公共点相联系,通过地铁隧道两端站台的基准点对整个坐标系统进行控制,使监测结果更加准确,实现对整条地铁隧道的实时监控。相比于测站后视定向方法,此方法允许测站点位于不稳定区域,不会对监测结果有影响,并且能够避免测站点的对中误差。

2.2 监测原理

由于有多个测站,所以需要将多站所测的坐标转换到同一个坐标系统中,这需要相邻测站之间的公共点进行联系。为了提高转换精度,可利用地铁隧道两端车站稳定的基准点对平差进行约束。

2.2.1 坐标转换

以测站点为坐标原点、全站仪水平度盘零度方向为 Y 轴方向、测站天顶方向为 Z 轴方向建立右手坐标系,为测站坐标系。如图 3 所示,P 点为待测点,P' 点为 P 点在水平面内的投影, h_z 为水平方向观测值,即水平度盘零度方向顺时针旋转到 P' 点与 O 点连线方向的水平角, v 为 P 点垂直角,S 为 P 点和测站点之间的斜距。则 P 点坐标为:

$$\begin{cases} X_P = S \cos v \sin h_z \\ Y_P = S \cos v \cos h_z \\ Z_P = S \sin v \end{cases} \quad (1)$$

若此测站可以观测到多个基准点,而基准点在基准坐标系中有一套坐标,在测站坐标系也有相应的坐标,则这些基准点相当于两个坐标系的公共点,可以求出转换参数,将在此测站上测出的其他点的坐标转换到与基准点同一坐标系中。

相邻两坐标系之间的转换模型^[6]为

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_{i+1} = \begin{bmatrix} X_{OP} \\ Y_{OP} \\ Z_{OP} \end{bmatrix}_i + \mu_i \mathbf{R}_1(\alpha_i) \mathbf{R}_2(\beta_i) \mathbf{R}_3(\gamma_i) \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_i \quad (2)$$

其中: $\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_i$ 和 $\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_{i+1}$ 是点 P 在相邻两坐标系之间的坐标

标,即 P 为公共点; $\begin{bmatrix} X_{OP} \\ Y_{OP} \\ Z_{OP} \end{bmatrix}_i$ 表示坐标转换的平移参数; μ_i 为

缩放系数,此系统所用全站仪为同一型号,所以缩放系数为 1; \mathbf{R} 为旋转矩阵,

$$\mathbf{R}_1(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2(\beta_i) = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & -\sin \beta_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i \end{bmatrix}, \mathbf{R}_3(\gamma_i) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i & -\sin \gamma_i & 0 \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2.2 附有限制条件的间接平差

假设系统有 n 台测量机器人,则将地铁隧道左端站台的基准点坐标转换到右端站台的基准点坐标系下,要进行 $n+1$ 次坐标转换。由于转换参数之间有约束条件,故采用有限制条件的间接平差,限制条件为:

$$\mathbf{T}_{n+1} + \mathbf{R}_{n+1} \mathbf{T}_n + \dots + \mathbf{R}_{n+1} \dots \mathbf{R}_3 \mathbf{T}_2 + \mathbf{R}_{n+1} \dots \mathbf{R}_2 \mathbf{T}_1 + \mathbf{R}_{n+1} \dots \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{R}_n = \mathbf{R}_1(\alpha_n) \mathbf{R}_2(\beta_n) \mathbf{R}_3(\gamma_n)$, \mathbf{T}_n 和 \mathbf{R}_n 分别表示第 n 个坐标系转换到第 $n+1$ 个坐标系时的平移矩阵和旋转矩阵。由于两端站台的基准点位于同一个坐标系,转换到最后一个坐标系时坐标不变,即隧道左端站台的任一基准点坐标,经过各相邻坐标系之间转换参数的转换,转换到右端站台的基准点坐标系后等于该点的原始坐标。

因为式(3)对于左端站台的任意基准点都适用,所以有:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{R}_{n+1} \dots \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_{n+1} + \mathbf{R}_{n+1} \mathbf{T}_n + \dots + \mathbf{R}_{n+1} \dots \mathbf{R}_3 \mathbf{T}_2 + \mathbf{R}_{n+1} \dots \mathbf{R}_2 \mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (4)$$

将式(2)与式(4)线性化,即可得到附有限制条件的间接平差模型^[7]:

$$\begin{cases} \mathbf{V} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \\ \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{W}_x = \mathbf{0} \end{cases} \quad (5)$$

求得参数 $\hat{\mathbf{x}}$ 的协因数阵为

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}_{bb}^{-1} - \mathbf{N}_{bb}^{-1} \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{N}_{bb}^{-1} \mathbf{C}^T)^{-1} \mathbf{C} \mathbf{N}_{bb}^{-1} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{N}_{bb} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$ 。

而未对转换参数进行限制时,转换参数的协因数阵为 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}_{bb}^{-1}$ 。因此,可以看出经过整体平差后,各

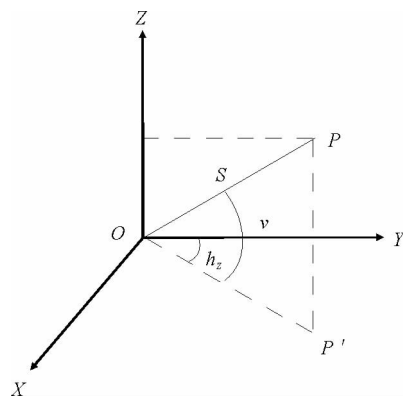


图 3 测站坐标系

Fig. 3 Station coordinate system

参数的精度得到提高,具体值为矩阵 N_{bb}^{-1} 与矩阵 $N_{bb}^{-1}C^T(CN_{bb}^{-1}C^T)^{-1}CN_{bb}^{-1}$ 相应对角元的差值。

通过附有限制条件的间接平差求出各转换参数的改正值之后,即可通过转换参数求得各测站的坐标,最后计算监测点的坐标。

3 试验

在同济大学测量馆场地上,按照监测方案布置试验,利用多台测量机器人自动化监测系统监测,现场如图 4 所示。在利用串口数据线将自动全站仪和计算机进行连接之后,实现数据和指令在全站仪与计算机之间的传送,全站仪和计算机的连接如图 5 所示。



图 4 试验现场

Fig. 4 Profile of the experiment



图 5 利用串口传输数据

Fig. 5 Use COM to transmit data

3.1 试验概况

由于条件限制,本次试验使用了两台索佳 NET05 全自动全站仪。将走廊模拟成地铁隧道,在走廊两端各布设 3 个基准点,基准点使用棱镜代替。为使基准点位于统一坐标系下,在试验前使用同一台全站仪测出全部基准点的坐标,整个试验过程中,基准点保持稳定。每台全站仪监测 3 个监测点,两台全站仪之间的公共点使用 360° 棱镜,由于解算转换参数时只需要解算平移和旋转 6 个参数,所以 2 个棱镜作为公共点就够了。

首先,在全站仪上设置相关参数,利用系统设置串口参数,将全站仪与计算机通过串口数据线进行链接;然后,利用某台全站仪测出所有基准点坐标或者输入已知基准点坐标,得到基准点坐标后即可进行测站定向,此时的测站定向不同于传统的测站定向,需要测量基准点(只有在隧道两端的测站需要)和公共点,用于整体的控制;最后,进行学习,此时需要人工粗略瞄准目标,全站仪进行自动精确瞄准,学习的目的是记住目标的粗略位置。

接下来,进行自动测量,设置每 5 min 观测一次,观测模式为一测回观测。每完成一个周期的监测,在计算监测点坐标之前,根据基准点对观测网进行整体平差,计算出测站点的坐标,因此测站可处于变形区域,且监测结果的精度不会受到影响。监测数据通过串口数据线传输到计算机完成数据的自动存储和自动处理,相应点坐标与上一次测量坐标和首次测量坐标之差可得到本次位移和累计位移,得到变形信息后绘制相关变形曲线,对超限变形进行报警。

3.2 试验结果和分析

本系统的的功能处理主要是在整体平差之后实现各种变形曲线的绘制和数据报表的输出。系统可以实时展现变形曲线和数据报表,直观地显示变形情况。

试验准备就绪之后,开始自动测量,第 4 个周期结束时稍微调整 6 个监测点棱镜的脚架,之后又监测 11 个周期。经过程序解算,每个监测周期各测站的定位精度达到 0.6 mm。得到单点曲线图,ssu3 点的单点曲线图如图 6 所示,单位为 mm。

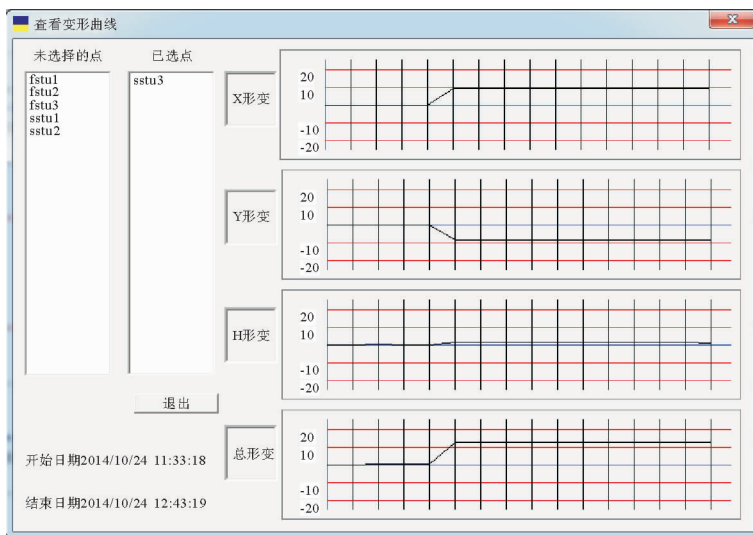


图 6 单点曲线界面图

Fig. 6 Interface of single point curve

从图 6 可以看出,第 4、第 5 周期之间各方向均出现了变形,这是由于监测点棱镜位置变动,在第 4 周期之前和第 5 周期之后,变形曲线都是一条水平直线,说明没有变形,也说明监测系统是可靠的,在外界没有移动棱镜时监测结果是稳定的。

系统还可以显示各监测点各方向的本次变形、当天变形和累计变形情况,如图 7 所示。在该界面上可以根据需要勾选相应选项,直观地显示出各点相应的变形情况。各监测点 Y 方向本次变形基本为 0,原因是本次试验仅在第 4 监测周期之后移动了监测点棱镜位置,第 5 监测周期之后就一直未动。而本次变形表达的是本周期监测值和上一周期监测值的比较结果,所以变形为 0 是合理的。

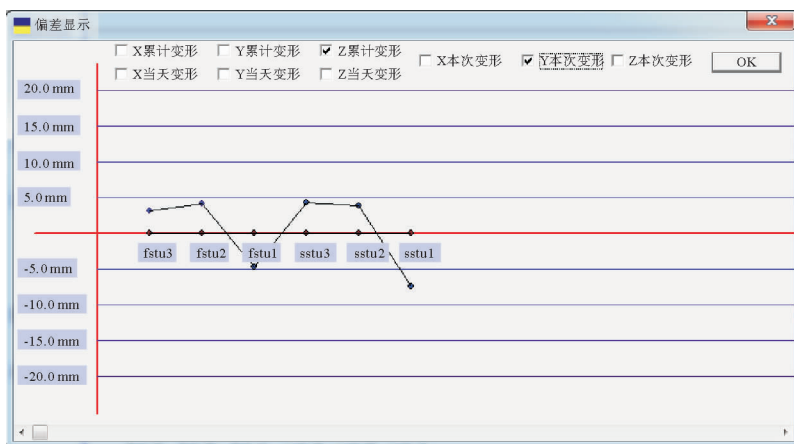


图 7 变形数据界面图

Fig. 7 Interface of deformation data chart

除了显示各种变形曲线,系统也能够将得到的数据形成数据表格并保存数据报表,如图 8 所示。

数据表格的内容包括监测点号,各方向的首次监测值、当天初始监测值、最新监测值,本次变形、当天变形、累计变形,是否报警和测量时间。可以看出,有些监测点移动幅度比较大,达到了预设的报警值。

从试验结果来看,本系统监测结果非常稳定,精度较高。但是,地铁隧道的监测条件比试验要复杂很多,路线也更加狭长,需要加入更多的测站,因此,实际应用时精度会有所损失。

点号	首次X监测(M)	当天初始X监测(M)	最新X监测(M)	本次X变形(mm)	当天X变形(mm)	累积X变形(mm)	本次是否报警	测量时间
f...	3.014	2.994	2.994	0.1	0.0	-19.8	否	2014/10/24 12:
f...	3.003	2.981	2.981	0.1	0.0	-22.4	否	2014/10/24 12:
f...	3.022	3.027	3.027	0.1	0.0	4.8	否	2014/10/24 12:
s...	-7.330	-7.294	-7.294	-0.2	0.0	35.7	是	2014/10/24 12:
s...	-7.474	-7.425	-7.425	0.1	0.0	48.7	是	2014/10/24 12:
s...	-7.673	-7.721	-7.721	-0.0	0.0	-48.3	是	2014/10/24 12:

点号	首次Y监测(M)	当天初始Y监测(M)	最新Y监测(M)	本次Y变形(mm)	当天Y变形(mm)	累积Y变形(mm)	本次是否报警	测量时间
f...	1.490	1.475	1.475	0.1	0.0	-15.0	否	2014/10/24 12:
f...	0.202	0.199	0.199	0.0	0.0	-3.5	否	2014/10/24 12:
f...	-1.180	-1.203	-1.203	0.0	0.0	-23.6	是	2014/10/24 12:
s...	-2.968	-3.003	-3.003	0.0	0.0	-34.9	是	2014/10/24 12:
s...	-1.739	-1.747	-1.747	0.1	0.0	-7.9	否	2014/10/24 12:
s...	-0.353	-0.349	-0.349	0.0	0.0	4.3	否	2014/10/24 12:

点号	首次高程监测(M)	当天初始高程监测(M)	最新高程监测(M)	本次沉降(mm)	当天沉降(mm)	累积沉降(mm)	本次是否报警	测量时间
f...	-0.393	-0.390	-0.390	0.0	0.0	3.2	否	2014/10/24 12:4
f...	-0.426	-0.422	-0.422	-0.0	0.0	4.2	否	2014/10/24 12:4
f...	-0.039	-0.043	-0.043	0.0	0.0	-4.8	否	2014/10/24 12:4
s...	-0.303	-0.299	-0.299	-0.9	0.0	4.4	否	2014/10/24 12:4
s...	-0.377	-0.373	-0.373	-0.1	0.0	4.0	否	2014/10/24 12:4
s...	-0.192	-0.199	-0.199	-0.0	0.0	-7.5	否	2014/10/24 12:4

图8 数据表格界面图

Fig. 8 Interface of data table

4 结束语

实现了利用索佳指令集对 NET05 自动全站仪进行有效控制,建立监测数据库,数据采集之后,在自动全站仪和计算机之间进行数据通信,最后根据监测数据形成报表。试验结果表明,利用多台测量机器人在地铁隧道里自由设站,相邻测站通过公共点进行坐标系的统一,利用地铁隧道两端站台的稳定基准点对转换参数进行整体平差的方法,在技术上是可行的。

基于多台测量机器人的自动化变形监测系统具有全自动、高频率、高精度、实时化、操作简单并且是三维监测的特点,在一定范围内,可实现无人值守的自动化监测。相比于单台测量机器人,多台测量机器人更符合地铁隧道的监测特点。随着城市地铁的不断建设,自动化监测已经逐渐成为监测手段的主流方式,而测量机器人是自动化测量的发展方向之一,基于其自动化、高精度和高频率的优势,测量机器人将会在更多的变形监测领域得到应用。

参考文献:

- [1]梅文胜,张正禄,黄全义. 测量机器人在变形监测中的应用研究[J]. 大坝与安全,2002(5):33-35.
Mei Wensheng,Zhang Zhenglu,Huang Quanyi. Research on application in deformation monitoring with georobot[J]. Dam and Safety,2002(5):33-35.
- [2]卫建东,徐忠阳,李清彪,等. TCA2003 测量机器人在南水大坝监测网测量中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测,2005(1):70-73.
Wei Jiandong,Xu Zhongyang,Li Qingbiao,et al. Application of georobot to monitoring network of Nanshui dam[J]. Hydro-power Automation and Dam Monitoring,2005(1):70-73.
- [3]梅文胜,张正禄,郭际明,等. 测量机器人变形监测系统软件研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2002,27(2):165-171.
Mei Wensheng,Zhang Zhenglu,Guo Jiming,et al. Software of georobot deformation monitoring system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2002,27(2):165-171.
- [4]张正禄,梅文胜,邸国辉. 用测量机器人监测三峡库区典型滑坡研究[J]. 湖北地矿,2002(4):56-59.
Zhang Zhenglu,Mei Wensheng,Di Guohui. Researches on georobot deformation monitoring system software for landslides of the Three Gorges[J]. Hubei Geology and Mineral Resources,2002(4):56-59.
- [5]崔有祯,李亚静. 徕卡 TM30 测量机器人三维测量在基坑边坡监测中的应用[J]. 测绘通报,2013(3):75-77.
Cui Youzhen,Li Yajing. The application of arbitrary stations with 3D survey of geodetic robot in the running stability for slope monitoring of foundation pits[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2013(3):75-77.
- [6]王解先,季凯敏. 工业测量拟合[M]. 北京:测绘出版社,2008:31-33.
- [7]王穗辉. 误差理论与测量平差[M]. 上海:同济大学出版社,2010:155-166.

(责任编辑:吕文红)