

矿山变形监测中常规 RTK 精度提高方法研究

李黎¹, 龙四春¹, 张立亚¹, 何原荣², 周威³, 杨光锐³, 姚磊³

(1. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 厦门理工学院 空间信息科学与工程系, 福建 厦门 361024; 3. 湖南科技大学 建筑与城乡规划学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 矿山变形监测是矿山安全开采与可持续发展的重要组成部分. 基于 GPS RTK 技术, 利用实地采集的观测数据, 以静态相对定位结果作为参考, 分析对中杆倾斜量对于 RTK 流动站水平和垂直点位精度的影响. 研究表明, 对中杆倾斜误差对 RTK 水平定位精度影响较大, 但对垂直误差影响很小; 采用三脚架模式, 可获得毫米级的平面定位精度; 而高程精度与点间高差相关性较大, 只能达到厘米级的精度.

关键词: GPS; RTK; 变形监测; 对中杆; 三脚架

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)02-0018-04

Research on the precision improvement methods of mining deformation monitoring based on the conventional RTK

LI Li¹, LONG Si-chun¹, ZHANG Li-ya¹, HE Yuan-rong², ZHOU Wei³, YANG Guang-rui³, YAO Lei³

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Clean Coal Resources Utilization and Mine Environmental Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Spatial Information Science & Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

3. School of Surveying and Mapping Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Mining deformation monitoring is an important component to mining safety and sustainable development. Comparing with the static relative positioning results, the GNSS real time kinematic (RTK) observation data collected in the field was used to analyze the effects of rover pole inclination angle on its horizontal and vertical positioning precision. The results show that the inclination of rover pole has greater impact on the horizontal positioning precision than the vertical positioning precision. The horizontal positioning precision of millimeter level can be obtained by using tripod mode. We obtain centimeter level vertical positioning precision due to its related to the height difference between points.

Key words: GPS; real time kinematic (RTK); deformation monitoring; rover pole; tripod

矿山地面变形会破坏矿区地表的自然地貌, 造成矿区内的构建物和交通生活设施产生裂缝和扭曲等变形, 给矿山生产和矿区人们生活带来安全隐患. 矿山变形监测可及时掌握其变形程度, 为评估灾害损失和预测变形趋势提供依据, 是矿山安全开

采与可持续发展的重要组成部分^[1-2].

传统的矿山变形监测手段主要依赖于经纬仪或全站仪的角度距离测量和水准仪的高程测量. 随着 GPS 技术的出现, GPS 以其方便灵活的三维高精度测量成为目前主要的变形监测手段之一, 从周期性

收稿日期: 2014-01-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41304029; 41204034); 湖南省教育厅科学研究项目(12JC0105); 湖南省科技计划项目(2012FJ4271); 大地测量与地球动力学国家重点实验室基金项目(SKLGED2014-5-3-E)

通信作者: 龙四春(1975-), 男, 湖南涟源人, 博士, 副教授, 主要从事 DInSAR 及工程测量等方面的研究. E-mail: sclong@hnust.edu.cn

监测到长时间的实时连续监测, GPS 技术实现了矿山变形监测的革命性发展^[2-6]. 目前的 GPS 技术, 就相对定位而言, 静态可以获得毫米级的定位精度, 动态(如 RTK、网络 RTK 和 CORS 等)也可以获得厘米级甚至毫米级的定位精度^[4, 7-8]. 而精密单点定位(Precise Point Positioning)技术以其低成本、不依赖参考站、克服了距离限制等优点可成为偏远矿区变形监测的替代手段之一^[9-11]. 但是, 一般单位和个人难以得到 PPP 实时解算必需的实时精密卫星轨道和钟差, PPP 的普及还需要 CORS 等基础设施的进一步完善. 因此, 在时效性要求较高, 地区范围较小的矿山变形监测作业中完全可以使用常规 RTK 技术, 将其应用于地面变形的高精度监测.

本文将利用实地采集的 GPS 观测数据, 基于常规 RTK 技术, 以静态相对定位(网解)结果作为参考, 研究分析对中杆倾斜量对于 RTK 流动站水平和垂直点位精度的影响.

1 常规 RTK 技术原理

常规 RTK 是以载波相位为主要观测值的实时动态定位技术, 主要由基准站、无线电台数据链路和流动站 3 部分组成. 在 RTK 作业模式下(如图 1 所示), 基准站接收机可架设在坐标已知的基站上, 也可架设在坐标未知的任意视野开阔处, 以高频接收截止角以上所有可见卫星的 GPS 信号, 再将其基准站观测值及站点坐标信息通过无线电台数据链路发送给流动站, 流动站将接收到的基准站观测值数据与其自身采集的同一组卫星观测数据在用户端进行实时相对定位处理, 完成整周模糊度的搜索求解后, 即可瞬时得到高精度的流动站点位坐标. RTK 流动站的实时相对定位精度取决于基准站和流动站之间的距离, 距离越远则精度越低, 距离越近则精度越高, 一般在几公里的范围内可得到水平厘米级到毫米级, 垂直厘米级的定位精度.

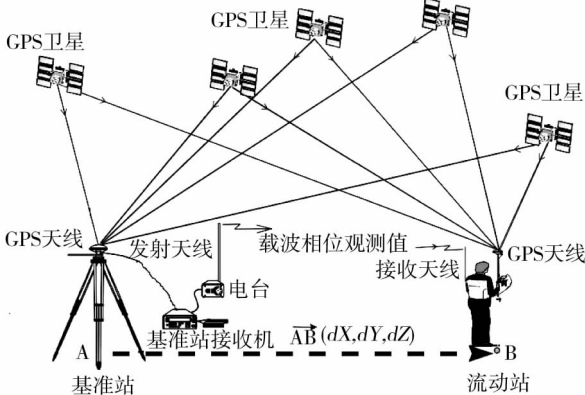


图 1 常规 RTK 工作原理图

2 流动站对中杆晃动误差分析

一般来说, 为了提高作业效率, RTK 流动站大部分都使用如图 1 所示的对中杆进行测量. 虽然对中杆均配备了圆水准器, 但由于在 RTK 工作过程中人为很难做到严格水泡居中, 并且圆水准器自身的整平精度也有限, 所以对中杆的整平效果必然影响 RTK 流动站的定位精度. 图 2 为对中杆倾斜对 RTK 点位精度的影响示意图, 由图 2 可知:

$$\begin{cases} \Delta H = L \times \sin\alpha; \\ \Delta V = L - L \times \cos\alpha. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, L 为对中杆的长度, m, 一般为 2 m; α 为对中杆的倾斜角, ($^\circ$); ΔH 和 ΔV 分别为对中杆长度为 L 、倾斜角为 α 时产生的水平误差和垂直误差, m. 表 1 为根据式(1)所计算的 $L = 2$ m 时不同倾角所产生的水平和垂直距离误差.

表 1 对中杆倾斜角引起的水平垂直距离误差

$\alpha / (^\circ)$	$\Delta H / \text{cm}$	$\Delta V / \text{cm}$	$\alpha / (^\circ)$	$\Delta H / \text{cm}$	$\Delta V / \text{cm}$
$0^\circ 10'$	0.58	0.00	$1^\circ 00'$	3.49	0.03
$0^\circ 20'$	1.16	0.00	$2^\circ 00'$	6.98	0.12
$0^\circ 30'$	1.74	0.01	$3^\circ 00'$	10.47	0.27

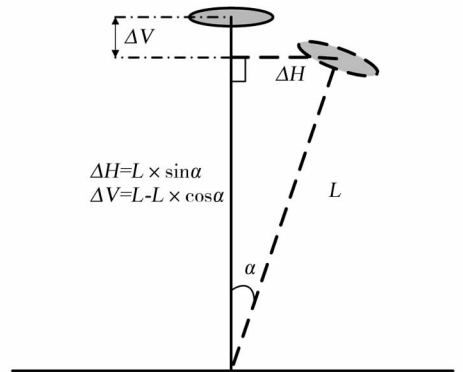


图 2 流动站对中杆倾斜影响示意图

3 RTK 试验分析

3.1 RTK 试验方案

本次 RTK 试验的测量点分布在湖南科技大学南校区图书馆到南校区门口之间的两侧道路上, 共有 8 个测点, 测区环境良好, 地势平坦, 远离发射塔、高压线等电磁波辐射源, 且周围无大面积水域、停车场和大型建筑物(尤其是玻璃幕墙), GPS 信号接收良好, 点位标志及其分布如图 3 所示.

在 RTK 试验测量之前, 分别用 GPS 静态测量和水准测量测定各点的精确坐标和高程, 作为检核 RTK 流动站测量精度的参考值. GPS 测量仪器为

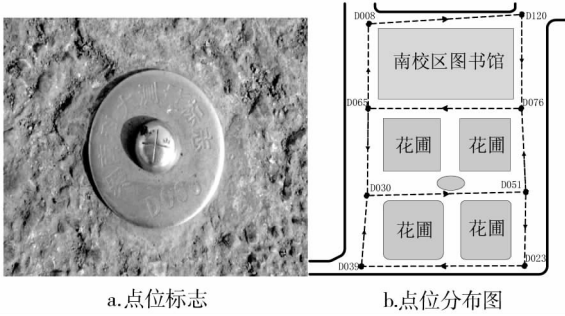


图3 点位标志及其分布图

南方测绘公司出产的 S86 - T 双频双星 (GPS + GLONASS) 接收机, 其静态相对定位测量的标称精度为 $\pm 2.5 \text{ mm} + D \times 10^{-6}$ (D 为边长, 单位: km), 试验区内最长边不到 500 m, 完全可以达到毫米级的相对定位精度. 水准测量仪器为徕卡测量公司出产的 DNA 03 电子水准仪 (如图 4 - a 所示), 严格按照二等水准测量规范的要求进行作业, 高差测量精度可以达到 0.1 mm, 水准测量过程如图 4 - b 所示. 常规 RTK 测量仍然使用南方测绘公司出产的 S86 - T 双频双星接收机, 为了分析对中杆晃动对流动站定位精度带来的影响, 分别使用对中杆和三脚架 2 种模式进行流动站测量, 并对比结果, 如图 5 所示.



图4 水准测量



图5 RTK 基准站及流动站模式

3.2 RTK 定位精度分析

RTK 测量之前, 分别用静态 GPS 求得的 3 个点平面坐标 (D008/D023/D051) 和精密水准测量得到的相同点位的高程进行点校正, 求得了独立

坐标系的转换参数, 然后在同一坐标系下对其余的 5 个点进行 RTK 测量, RTK 流动站分别用手扶对中杆和三脚架对中模式进行测量, 其中手扶对中杆模式每秒测量 1 次, 共测量 60 次, 取加权平均值作为最终定位结果, 三脚架模式也是在流动站中对平整之后以 1 s 的频率采集相同的次数. 下面将分别对各点的平面坐标和高程进行统计分析.

1) 水平精度分析

除用于点校正的 3 个点之外, 表 2 统计了其余 5 个点分别用静态 GPS 和 2 种 RTK 模式得到的平面坐标 (x, y), 并对它们的坐标较差进行比较. 从表 2 可知, 手扶对中杆模式的平均较差大约为 12 mm, 与本文第 3 节的理论基本一致, 说明在手扶对中杆模式下, 对中杆的晃动误差对平面点位坐标的影响较大, 即使采用多次观测取加权平均值的方法, 也很难达到理想的精度. 而三脚架模式的平均较差大约为 6 mm, 说明三脚架模式能使对中杆的对中整平效果达到最好, 避免对中杆晃动误差的影响, 基本可以达到 RTK 自身的内符合精度 ($\pm 1.0 \text{ mm} + D \times 10^{-6}$ (D 为边长; 单位: km)), 接近静态 GPS 的相对定位精度.

表2 RTK 流动站平面坐标精度比较 (静态 GPS 与 RTK 模式)

点号	静态 / m	RTK 流动站对中模式				
		对中杆/m 较差/mm		三脚架/m 较差/mm		
D120	x	3 087	3 087	3 087	3 087	
		876.316	876.306	10	876.312	
	y	393	393	24	393	
		412.573	412.597	4	412.569	
D065	x	3 087	3 087	11	3 087	
		730.284	730.273	2	730.282	
	y	393	393	9	393	
		315.522	315.513	6	315.528	
D076	x	3 087	3 087	12	3 087	
		730.655	730.643	5	730.650	
	y	393	393	10	393	
		412.765	412.775	8	412.773	
D030	x	3 087	3 087	9	3 087	
		643.514	643.505	10	643.504	
	y	393	393	15	393	
		317.953	317.968	7	317.946	
D023	x	3 087	3 087	13	3 087	
		533.166	533.179	9	533.157	
	y	393	393	8	393	
		412.373	412.381	3	412.370	
均值	-	-	-	12	-	6

2) 高差精度分析

从本文第三节分析可知,为保证 RTK 流动站的水平定位精度,对中杆必须对中,尽量使圆水准器居中,倾斜角小于 $20'$,这时的对中杆倾斜误差对 RTK 流动站的高程影响很小,几乎可以忽略.因此,我们用普通对中杆测量各点的大地高,并计算相邻两点之间的高差,并与水准测量得到的高差进行比较.如表 3 所示.

表 3 相邻点间高差比较(水准测量与 RTK 测量)

起点 - 终点	水准测量/m	RTK 测量/m	较差/mm
D008 - D120	0.119 9	0.134 1	14.2
D120 - D076	-0.246 0	-0.227 4	18.6
D076 - D065	-0.284 3	-0.299 2	14.9
D065 - D008	0.410 4	0.398 7	11.7
D065 - D030	-5.919 7	-5.941 5	21.8
D030 - D051	0.196 5	0.208 6	12.1
D051 - D076	6.007 5	6.030 1	22.6
D051 - D023	-0.726 4	-0.738 6	12.2
D023 - D039	-0.112 0	-0.119 4	7.4
D039 - D030	0.641 9	0.630 7	11.2

表 2 共记录了相邻点位之间 10 条基线的高差,并与水准测量所得的高差进行比较,基本上可以反映出 RTK 流动站的测高精度.从表 2 可知,与水准测量相比而言,在高差较小的平坦地区,RTK 测量的高程精度大约为 14 mm 左右,基本与其标称的内符合精度相称.但在高差较大的区域,RTK 的测高精度明显有所降低,最大达到了 22.6 mm,说明高差与 RTK 测高误差存在较强的相关性.

4 结论

本文利用实地采集的 GPS 实验数据,基于 RTK 定位技术分析其在变形监测中的应用.研究表明,观测条件较好的情况下,卫星数量较多 (>6) 和被观测卫星星座分布合理 ($GDOP < 1.5$),如果 RTK 采用三脚架进行流动站测量,避免了对中杆晃动误差的影响,则可以获得毫米级的平面定位精度,基本可以达到 RTK 自身的内符合精度.至于 RTK 高程精度,则与点间高差大小相关性较强,在地形起伏较小的平坦地区,可达到其标称精度,但在地形起伏较大的区域,RTK 的测高精度会有

所降低.

参考文献:

- [1] 刘国林,张连蓬,成枢,等.合成孔径雷达干涉测量与全球定位系统数据融合监测矿区地表沉降的可行性分析[J].测绘通报,2005(11):10-13.
- [2] Xu C H, Wang J L, Gao J X, et al. Precise point positioning and its application in mining deformation monitoring [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): s499 - s505.
- [3] Gao J, Hu H. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 1081 - 1088.
- [4] Gao J, Liu C, Wang J, et al. A new method for mining deformation monitoring with GPS - RTK [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(3): 659 - 664.
- [5] Dai L, Wang J, Rizos C, et al. Pseudo - satellite applications in deformation monitoring [J]. GPS Solutions, 2002, 5(3): 80 - 87.
- [6] Kim D D, Langley R B, Bond J, et al. Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: initial study [J]. GPS Solutions, 2003, 7(3): 176 - 185.
- [7] 张连贵,王健,刘显云,等.煤矿单基站 CORS 系统建设及应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(5):73-77.
- [8] Zhang K, Hu Y, Liu G., et al. Deformation monitoring and analysis using Victorian regional CORS data [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2005, 4(1-2): 129 - 138.
- [9] Raziq N, Collier P, High precision GPS deformation monitoring using single receiver carrier phase data [C] // Geodetic Deformation Monitoring: from Geophysical to Engineering Roles. Berlin ;Springer - Verlag, 2006.
- [10] Takasu T. High - rate precise point positioning: observation of crustal deformation by using 1 - Hz GPS data [C] // Text GPS/GNSS Symp. Tokyo: Institute of Positioning, Navigation and Timing of Japan, 2006.
- [11] Heroux P, Kouba J. GPS precise point positioning using IGS orbit products [J]. Physics and Chemistry of the Earth Part A - Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(6-8): 573 - 578.