# 高精度 GPS 实时变形监测系统应用研究

何 宁,钱亚俊,何 斌,王国利,汪璋淳,李登华

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要**: 三差分量测算法是 GPS 测量技术中的一个新突破.介绍了一种采用三差分量测算法的高精度 GPS 测量 系统,并通过精度验证试验和工程应用来验证该 GPS 测量系统实时测量精度、测量技术、测量数据传输和处理 技术.试验和工程应用研究所取得的大量实测数据表明,采用三差分的 GPS 三维变形实时测量技术具备毫米级 测量精度,测量简单,测量数据集中处理,监测效率高,具备远程数据采集、接收和传输功能;该高精度 GPS 测量 系统是工程表面变形实时监测工作中的一种新技术,在工程表面变形监测中具有良好的应用前景.

关 键 词: GPS; 三差分测量法; 测量精度; 表面变形; 实时监测
 中图分类号: TU413.6<sup>+</sup>2
 文献标志码: A
 文章编号: 1009-640X(2013)01-0054-06

随着 GPS 的不断发展并趋于成熟,该技术将广泛应用于工程测量、地形测量、放样等测绘领域中<sup>[1-7]</sup>. GPS(RTK)实时动态定位测量技术具有观测时间短、坐标实时解算等优点,其定位精度可达厘米级,可用于 城市的控制测量,能大大提高生产效率;1998年,我国的隔河岩大坝外部变形首次采用 GPS 自动化监测系 统.目前,国内采用 GPS 定位技术进行精密工程测量和大地测量,平差后控制点的平面精度为1~2 mm,高 程精度为2~3 mm,但这是基于数小时测量的结果,没有真正实现 GPS 测量技术的实时变形监测.本文结合 试验和工程实际应用成果,研究分析一种采用三差分量测算法的高精度 GPS 测量技术在工程表面变形实时 监测中的应用.

1 GPS 测量技术的三差分量测算法

GPS 测量技术的三差分量测算法采用载波相位差分和自定义的卡尔曼滤波技术对 GPS 系统接收的数据进行计算,从而得到位于大坝或其他目标工程上 GPS 测站点实时、准确可靠的三维变形数据,这一技术实现了毫米级精度的变形实时监测.

采用三差分量测算法的 GPS 测量技术与传统 GPS 动态(RTK)定位技术不同. RTK 定位技术是基于实时 载波相位差分的实时动态定位技术,在 RTK 作业模式下,基准站除了采集卫星数据外,还要通过数据链将其 观测值和站点坐标信息一起传送给流动站,流动站在采集卫星数据的同时,还要接收来自基准站的数据链, 并在系统内对采集和接收的两组数据进行实时载波相位差分的处理,得出定位结果<sup>[8]</sup>. 三差分量测算法采 用载波相位差分和自定义的卡尔曼滤波技术<sup>[9-10]</sup>,该 GPS 测量技术并不在 GPS 接收装置内部对量测数据进 行处理,而是在中心计算机上由系统数据处理程序进行数据载波相位差分处理,同时系统软件采用卡尔曼滤 波算法以消除卫星信号受到的噪声、多径等影响,计算定位结果,从而可以有效地降低定位的误差,进一步提 高定位精度.而且该 GPS 测量系统数据流由 RTK 定位技术的数据双向流方式发展为系统全部接收装置 (GPS 测量参考站和移动站)只向中心计算机上传输需要处理的 GPS 测量数据的单向流方式,减少了 GPS 接 收机的硬件和软件配置,在提高了系统性能的同时降低了系统成本.

收稿日期:2012-05-27

基金项目:水利部 948 项目(201012);"十一五"国家科技支撑计划课题(2009BAK56B04)

作者简介:何 宁(1969-),男,江西高安人,教授级高级工程师,主要从事岩土工程领域研究. E-mail: nhe@ nhri. cn

# 2 验证试验结果分析

为验证该 GPS 变形监测系统的测量精度和其他系统功能,开展了系统实时监测精度的验证试验研究, 试验研究的系统设备安装在 6 楼楼顶(该楼处于半山腰处,楼顶附近无遮挡物,视野开阔),其中基点站 (GPS1 天线)安装在特制的固定式金属支座上,测量站(GPS2 天线)安装在特制的可调式金属支座上,支座 底盘通过膨胀螺丝架空,不与混凝土表面接触,从而避免了接触面变形可能引起的毫米级误差.将基点站和 测量站分别绝对调平,测量站用绝对方位标定.采用游标卡尺量测测量站的调节位移,测量精度为0.1 mm. GPS 接收机和 GPS 监测系统微机都安装在 5 楼会议室,微机与网络连接,以便于开展监测系统的远程访问 功能试验.

系统安装调试完毕后,于 2009 年 4 月 2 日 15:30 开始测量 精度验证试验,试验历时 25 h. 在试验过程中对 GPS2 天线位置进 行了 3 次调整,分别是 4 月 2 日 16:00 将 GPS2 天线位置向西和 向下各位移 10 mm,4 月 3 日 15:51 将 GPS2 天线位置向东位移 40 mm,4 月 3 日 16:12 将 GPS2 天线位置向上位移 40 mm.

系统精度验证试验全过程采用 GPS 变形实时监测系统跟踪测量人工调整的测量站(GPS2 天线)位置的方法进行,变形监测数据的跟踪测量、数据的计算分析处理和相关图表的绘制均由系统软件自动完成,试验全过程实现了系统的无人值守,4 月 2 日晚通过互联网完成了对系统精度验证试验测量结果的远程访问功能验证.系统测量精度试验成果如图 1 和表 1 所示<sup>[11]</sup>.



Fig. 1 Real-time monitoring graph of system

试验时刻	方 向	GPS2 测站调整值/	系统测	系统测量结果	
		mm	方 向	测值/ m	mm
4日2日	向东	-10	向东	-0.010 0	0
4 月 2 日	向北	0	向北	0.001 2	1.2
10:00	向上	-0.010 0	向上	-0.010 7	0.7
4日2日	向东	40	向东	0.028 3	1.7
4万5日	向北	0	向北	0.000 6	0.6
15:51	向上	0	向上	-0.009 5	0.5
4日2日	向东	0	向东	0.029 5	0.5
4万3日	向北	0	向北	-0.002 3	2.3
10:12	向上	40	向上	0.034 1	4.1

# 表1 系统监测精度试验结果

Tab. 1 Monitoring test results

注:表中向东位移负值表示 GPS2 天线向西调整,向上位移为负值表示 GPS2 天线向下调整.

由表 1 可见,在调整 GPS2 天线位置的同时,系统能实时跟踪并监测到 GPS2 测站位置的变化,其瞬时监测结果与实际位置值的误差在水平方向小于 3 mm,垂直方向小于 4 mm.

图1为整个精度验证试验的监测结果.整个试验从4月2日15:30开始,至4月3日16:30结束,试验场 区天气经历了多云、阵雨和小雨等多种恶劣天气和昼夜变化,但在整个试验过程中,该GPS 三维变形监测系 统的监测精度未发生变化,表明该系统的监测精度不受周围环境影响,能真正做到全天候地对大坝等工程的 外部变形实现全自动监测.本次试验开展的监测系统无人值守、数据发布和远程访问功能试验表明,该系统 具备可靠的无人值守和远程访问功能,系统能自动可靠地采集完整的数据,实现对采集数据的自动保存,数 据计算分析和绘制相应图表等操作简单,并可以通过互联网简单方便地远程访问系统发布的实时变形监测 数据成果. 本次 GPS 变形实时监测系统的精度验证试验成果表明:该系统水平位移测量精度能达到1~3 mm,垂直精度能达到1~4 mm,并具备可靠的无人值守、数据发布和远程访问功能.

3 克孜尔水库除险加固工程表面变形监测的应用研究

# 3.1 工程和 GPS 变形监测系统概述

克孜尔水库位于新疆阿克苏地区拜城县境内,距拜城县 约60 km,距库车县约70 km.设计库容6.4 亿 m<sup>3</sup>,是一座以 灌溉、防洪为主兼水力发电等综合利用的大型水利枢纽,主 要由主坝、副坝、溢洪道、泄洪排砂洞、发电引水洞和电站等 组成.坝顶高程1154.60 m,坝型为黏土心墙坝,主坝坝顶长 920.6 m,最大坝高44.0 m;副坝坝顶长1288.0 m,最大坝高 32.6 m.水库于1998 年 10 月竣工验收并正式投入运行, 2009 年对水库大坝进行加宽加高等除险加固工作.2010 年 底采用高精度 GPS 变形监测系统对除险加固的克孜尔水库 大坝开展大坝表面变形实时监测,系统的 GPS 测站布置如图 2 所示.

克孜尔水库除险加固工程 GPS 变形监测系统包括参考 站1套(编号 REF)、大坝表面变形 GPS 测站4套(编号 REM1~REM4)和系统数据中心1套.参考站 REF 布置在水 库二道坝下游的山体上,表面变形 GPS 测站分别在主坝和副 坝各布置2套(编号为 REM1,REM2 和 REM3,REM4),测站 均位于坝顶下游边坡.系统数据中心安装在位于水库大坝左 坝肩1 km 以外的水库管理局办公楼内,系统数据传输通讯 采用 900 MHz 的无线通讯方式.GPS 参考站和测站均采用太 阳能板和蓄电池组合的供电方式,同时预留交流电供电接 口,系统安装情况见图 3.



图 2 克孜尔水库 GPS 变形监测系统布置 Fig. 2 Layout of GPS deformation monitoring system in Kezier reservoir



Fig. 3 GPS monitoring system installation

#### 3.2 监测数据统计分析

克孜尔水库除险加固工程中的 GPS 变形监测系统于 2010 年 11 月 23 日安装调试完成后即投入正常监测,已连续不间断监测半年多,系统 4 个 GPS 测站均可每秒监测得到 1 组数据,各 GPS 测站每组数据包括测站接收数据的卫星数量、GPS 时间(GPS 星期数和 GPS 秒数)、大地坐标绝对值和相对变化值以及统计参数(X,Y,Z,ΔX,ΔY,ΔZ,σX,σY,σZ),WGS-84 坐标系的经、纬度、高程绝对值和相对变化值以及统计参数(N,E,H,ΔN,ΔE,ΔH,σN,σE,σH).由于测量数据过于庞大,故从本系统半年(2010-11-23—2011-05-23)监测资料中每月选取月初和月中各 2 d,共计 12 d 的监测数据进行统计分析.将各 GPS 测站每天 86 400 组分别进行统计分析,12 d 的监测数据得到的 4 个 GPS 测站单日统计分析结果的最大值见表 2.

Tab. 2 The statistical analysis results of GPS real-time displacement monitoring data

	方差最大值/mm			标准偏差最大值/mm		
	X	Y	Н	X	Y	Н
REM1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.3
REM2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.6	0.4
REM3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5
REM4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.4	0.3

表 2 所示 4 个 GPS 测站各 12 d 测值的单日监测数据样本统计分析结果为:4 个 GPS 测站监测数据单日 86 400 组数据的水平位移 X 向(平行坝轴)、Y 向(垂直坝轴)和垂直位移 H 的最大方差均为 0.3 mm. 水平 位移 X 向的最大标准差为 0.5 mm,水平位移 Y 向的最大标准差为 0.6 mm,垂直位移 H 的最大标准差为 0.5 mm.统计分析结果表明,该 GPS 变形实时监测系统在克孜尔水库大坝表面变形监测中取得了实时(每秒 1 组监测数据)、准确可靠的三维变形数据,实现了毫米精度的大坝表面变形实时监测,可以满足大坝表面变 形监测要求.

#### 3.3 系统监测的大坝表面变形监测资料分析

克孜尔水库除险加固工程中,GPS 大坝表面变形监测系统测得大坝4个 GPS 测站处坝体表面变形过程 线见图4.图中X向水平位移正值表示向坝左岸方向位移,Y向水平位移负值表示向下游方向位移,垂直位 移H负值表示坝体发生沉降.



Fig. 4 The surface deformation graphs obtained from four stations

图4所示 GPS 系统4个测站测得的变形,是克孜尔水库大坝在下游贴坡加高加固后,位于大坝坝顶下游位置的坝体主、副坝均发生了小量位移后的变形,主坝坝顶变形值较副坝略大,数据显示主坝坝顶向下游方向水平位移最大为9.8 mm,最大沉降11.6 mm,副坝坝顶向下游方向水平位移最大为6.7 mm,最大沉降7.2 mm;且主、副坝坝顶下游的表面变形规律基本一致,即前期变形速率相对较大,后期变形速率逐渐降低,到2011年3月初变形趋于稳定;而平行坝轴线方向水平位移无明显变化,4个测站数据显示坝顶下游平行坝轴向水平位移始终在毫米精度内波动.克孜尔水库除险加固工程中GPS大坝表面变形监测系统的监测资料表明,其实施的下游贴坡加宽加高坝体的坝顶表面变形小,且趋于稳定,说明克孜尔水库除险加固工程的坝顶变形是安全的.同时由监测资料可知GPS测值在毫米精度内波动,表明该系统可以满足土石坝毫米级表面变形安全监测精度要求.

#### 3.4 GPS 实时变形监测系统对大坝地震变形的监测分析

库区在 2011 年 5 月 13 日、22 日和 23 日共经历了 3 次地震,其中 5 月 13 日 14:48 和 5 月 22 日 16:52 均 为 4.8 级地震,5 月 23 日 16:38 为 4.4 级地震.在地震过程中,GPS 大坝表面变形监测系统 4 个 GPS 测站均 测到地震对大坝表面变形的影响,以布置在主坝的 REM1 测站和布置在副坝的 REM3 测站监测数据为例,共 118 800 组数据得到 REM1 测站和 REM3 测站的坝顶表面变形过程线见图 5.



Fig. 5 The surface deformation caused by earthquake in REM1 and REM3 stations

GPS 系统监测数据表明该系统能够实时监测到地震引起的大坝表面细小(0.5~1.0 mm)变形,在5月22日16:52地震(4.8级)发生时和5月23日16:38地震(4.4级)发生时,REM1和 REM3测站均测得对应位置坝顶下游发生少量的向下游方向的水平位移和向下的沉降变形,而 REM1处平行坝轴方向未测得有明显水平位移,REM3处则产生了微量的平行坝轴线的水平位移,量值为0.5 mm,其原因是由于 REM3测站位置的坝体座落于活动断层上,地震引起坝体产生了平行坝轴方向水平位移.同时监测成果也表明,4.4~4.8级地震对克孜尔水库大坝基本不造成永久性坝体变形,一定历时后地震所引起的坝顶表面变形逐渐消失,说明4.4~4.8级小地震所引起的克孜尔水库大坝坝体变形基本为弹性变形,仅很小一部分为塑性变形.GPS系统在地震过程中的监测资料表明,该系统能够在恶劣环境下实时、准确可靠地对工程表面细小变形进行有效监测,实现了毫米精度的大坝表面变形实时监测,完全可以满足大坝表面变形监测要求.

#### 4 结 语

(1)高精度 GPS 变形实时监测技术具备操作简单、测量数据采集效率高,能远程接收、采集和传输数据 等特点,能够适应恶劣环境,是工程表面变形监测真正意义上的全天候高效率全自动监测技术;

(2)试验研究表明,该 GPS 变形监测系统水平位移精度能达到1~3 mm,垂直精度能达到1~4 mm;

(3)通过在克孜尔水库大坝工程监测中的应用,证明无论在大坝变形的日常监测中还是短期地震变形 监测中,该技术都能实时、准确可靠地对工程表面细小变形进行有效监测,实现了毫米精度的大坝表面变形 实时监测,可以满足大坝表面变形监测要求.

该变形监测系统的 GPS 变形监测技术是工程安全监测中一个新技术成果,是工程安全监测技术的一种 有效补充.由于该系统采用无线通讯和太阳能供电方式,具有远程接收、采集和传输数据功能,具备适应恶劣 环境等特点,该技术在地质灾害预警预报监测中将具有广阔的应用前景.

### 参考文献:

[1] 李本玉,高伟,胡晓. GPS 实时动态定位技术的发展与应用研究[J]. 矿山测量, 2009(4): 76-80. (LI Ben-yu, GAO Wei, HU Xiao. The development and application of GPS real-time dynamic positioning technology[J]. Mine Surveying, 2009 (4): 76-80. (in Chinese))

- [2] 郑洪达,刘学海. GPS-RTK 在地籍测量中的使用[J]. 黑龙江水利科技, 2009, 37(4): 265-266. (ZHENG Hong-da, LIU Xue-hai. GPS-RTK use in cadastration [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2009, 37(4): 265-266. (in Chinese))
- [3] 刘立龙,王新桥,朱军桃. GPS 动态基准站精密相对定位方法的研究[J]. 工程勘探, 2009(8): 64-66. (LIU Li-long, WANG Xin-qiao, ZHU Jun-tao. The algorithm of GPS precise relative positioning for kinematical base station[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(8): 64-66. (in Chinese))
- [4] 夏龙. RTK+测深仪结合全站仪在河道断面测量中的应用[J]. 中国水运, 2009, 9(7): 163-164. (XIA Long. The application of RTK+ sounder combined total station in the river section measurement[J]. China Water Transport, 2009,9(7): 163-164. (in Chinese))
- [5] 黄晓瑞,崔平远,崔枯涛. 差分 GPS 定位方法与应用研究[J]. 航空兵器, 2001(3): 5-8. (HUANG Xiao-rui, CUI Pingyuan, CUI Ku-tao. The introduction and application of differential GPS positioning method[J]. Aero Weaponry, 2001(3): 5-8. (in Chinese))
- [6] 刘文波. GPS 在水下地形测量中的应用[J]. 电力勘测, 1997(1): 30-33. (LIU Wen-bo. The application of GPS in underwater topographic survey[J]. Power Survey Design, 1997(1): 30-33. (in Chinese))
- [7] 过静珺,戴连君,卢云川. 虎门大桥 GPS(RTK)实时位移监测方法研究[J]. 测绘通报, 2000(12): 4-6. (GUO Jing-jun, DAI Lian-jun, LU Yun-chuan. The study of GPS(RTK) real-time displacement monitoring methods in Humeng Bridge[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2000(12): 4-6. (in Chinese))
- [8] 王玉柱, 王冬梅, 刘明. RTK 在控制测量中的应用研究[J]. 矿山测量, 2009(4): 10-12. (WANG Yu-zhu, WANG Dong-mei, LIU Ming. The application of RTK in control survey[J]. Mine Surveying, 2009(4): 10-12. (in Chinese))
- [9] RUTLEDGE D, GNIPP J, KRAMER J. Advances in real-time GPS deformation monitoring for landsides, volcanoes and structures, Session III: software for deformation data collection, processing, and analysis[D]. California, 2001: 110-121.
- [10] 刘海洋,杨乐,陈杰.改进无色卡尔曼滤波算法在 GPS 系统中的应用[J].系统仿真学报,2009,21(15):4859-4865.
  (LIU Hai-yang, YANG Le, CHEN Jie. Application of modified unscented Kalman filter algorithm in GPS system[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4859-4865. (in Chinese))
- [11] 何宁,何斌,费增争. GPS变形监测系统在工程安全监测中的应用研究[C]//2009 年江苏省仪器仪表学会学术年会论 文集,2009:13-17.(HE Ning, HE Bin, FEI Zeng-zheng. The application of GPS deformation monitoring system in engineering safety monitoring[C]//The Annual Conference Memoir of Jiangsu Province Instrument and Control Society in 2009, 2009:13-17.(in Chinese))

## Application study on the real-time GPS deformation monitoring system

HE Ning, QIAN Ya-jun, HE Bin, WANG Guo-li, WANG Zhang-chun, LI Deng-hua

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract**: The triple-differences method is a new breakthrough in GPS deformation monitoring system. This paper provides more information about highly accurate GPS deformation system with triple-difference method. The measurement accuracy, measurement technology, measurement data transmission and treatment technology of this deformation monitoring system have been studied through accuracy verification tests and engineering application. The research results show that the GPS deformation measuring technology with triple-difference method is of high measuring precision in terms of the grade of mm, the simplicity, the centralized data processing, the high monitoring efficiency and the function of long-distance data acquisition, receiving and transmission. It is an innovative research achievement in real-time deformation monitoring and is prospective in engineering application in the future.

Key words: GPS (global positioning system); triple-difference measurement; measurement accuracy; surface deformation; real-time monitoring