

谷坡 GNSS 监测点高高程部位垂直位移误差较大原因分析

王利新¹, 柏金川², 刘通¹, 胡航¹, 宋明富¹, 闵四海¹

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610051;
2. 四川中水成勘院测绘工程有限责任公司, 四川成都 400061)

摘要:传统的大地测量方式存在的问题主要有安全风险高、观测费用高和外观测量观测周期较长,无法及时反映水工建筑物工作性态和安全状态。相反,外部变形监测自动化系统(GNSS)可以提高监测效率、节约成本、降低安全风险和满足现代化与智能化需要,所以有必要对大坝外观变形观测进行自动化改造。某电站进行自动化改造后发现高高程部位监测数据与人工数据差值较大,通过对数据进行对比和统计学相关性分析发现:GNSS 高程数据受日均温变化影响显著,与降雨量数据有中相关性,与库水位呈弱相关性。

关键词:大坝;变形监测;GNSS;监测网

中图分类号: TU196+.4

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2025)01-0154-04

DOI: 10.20196/j.cnki.scsld.20250133

Analysis on the Causes of Large Vertical Displacement Error in High Elevation of GNSS Monitoring Points in Valley Slopes

WANG Lixin¹, BO Jinchuan², LIU Tong¹, HU Hang¹, SONG Mingfu¹, MIN Sihai¹

(1. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610051;
2. Sichuan Zhongshui Chengkanyun Surveying & Mapping Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 400061)

Abstract: The problems of traditional geodetic survey are high safety risks, high observation costs and long observation period, which can not reflect the working behavior and safety state of hydraulic structure in time. On the contrary, the external deformation monitoring automation system (GNSS) can improve the monitoring efficiency, save costs, reduce safety risks and meet the needs of modernization and intelligence, so it is necessary to automate the dam appearance deformation observation. After the automatic reconstruction of a project, it is found that the difference between the monitoring data and the manual data is large. Through the comparison and statistical correlation analysis of the data, it is found that the GNSS high-elevation data is significantly affected by the change of daily temperature, and it has a moderate correlation with the rainfall data, and had a weak correlation with the reservoir water level.

Key words: DAMS; Deformation monitoring; GNSS; Monitoring network

0 引言

在大坝外部变形观测自动化系统改造之前,某水电站外部变形观测采用传统的大地测量方式,存在安全风险高、观测费用高及外观测量观测周期长等问题,通过开展自动化建设工作,可以进一步降低安全风险、节约生产成本,同时也满足智能化电站建设需要。

金龙山谷坡位于某水电站库首左岸,距大坝约为 600~1 500 m,金龙山谷坡外部变形观测主

要由平面基准网、垂直位移基准网、地表变形监测点组成。

该项目包括在大坝下游近坝区相对稳定的区域建立 2 个 GNSS 基准站为 GNSS 测点提供基准(GJRR1 高程为 1 214.50 m 和 GJRR2 高程为 1 208.87 m); 15 个金龙山谷坡 GNSS 测点和 3 个大坝坝顶 GNSS 测点。金龙山谷坡稳定性测点位置分布见图 1。

自试运行以来,金龙山 GNSS 监测点位受地形条件、大气环境条件等影响,少量高高程部位的

收稿日期: 2023-10-31

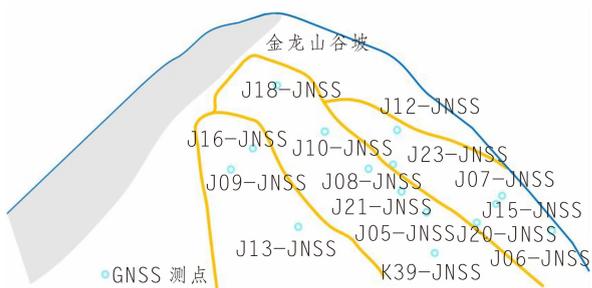


图 1 金龙山谷坡稳定性测点位置分布图

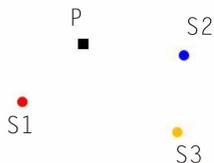
测点垂直位移与常规大地测量成果相较有一定程度的差异,没有达到规范^[1]精度要求。规范将中误差作为指标来定义精度,黄友灿等^[2]提出一种综合评价指标,借此来解决单一指标和多种指标简单融合无法有效表征 GNSS 定位结果的数据质量问题。同时有许多学者为提升大坝变形监测的可靠性和精确度对 GNSS 在数据处理模型和数据处理解算方面作出了改进,李卓骏等^[3]进行数据处理模型优选研究中考虑了参数选择、策略模型改进和监测设计,发现解算参数中高度截止角、解

算策略模型中星座星历、监测设计中时段组网是模型选择的重要因素;李小伟等^[4]采用 GNSS 多基站数据融合技术可以得到与实际比较吻合的观测数据;刘恒等^[5]通过对某大坝 BDS 外部变形监测系统在数据接收、数据解算、数据成果分析等方面与 GPS 外部变形监测系统比较,验证了高海拔地区 BDS 外部变形监测系统在精度和可靠性方面替代 GPS 外部变形监测系统的可行性。综上,在设计阶段却仍不能全面有效地设计出一定能满足规范精度要求的 GNSS 自动化监测系统,因此有必要对该问题的原因进行分析,可以为类似工程的监测系统改造提供借鉴。

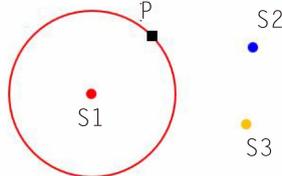
1 GNSS 测量基本原理

将无线电信号发射台从地面点搬到卫星上,组成卫星导航定位系统,应用无线电测距交会原理(后方交会),便可由三个以上地面已知点(控制站)交会出卫星的位置,反之利用三颗以上卫星的已知空间位置又可交会出地面未知点(用户接收机)的位置,GNSS 测量基本原理见图 2。

P=所在位置
S1=卫星 1
S2=卫星 2
S3=卫星 3

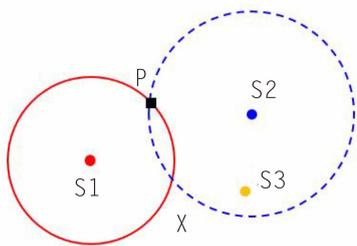


(a)



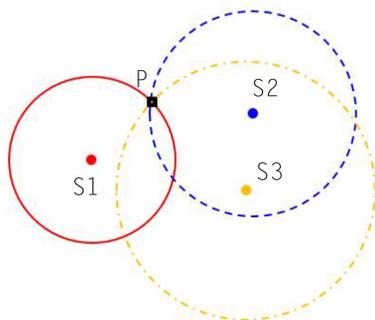
如果只用 1 颗卫星所测出的距离作参数即所在位置可以在红色圈上任何一点

(b)



如果有 2 颗卫星所测出的距离作参数则所在位置可以在红、蓝两个圈上相交的两点其中一点,可以是 P,或是 X

(c)



有 3 颗卫星所测出的距离作参数时就看出如何锁定所在位置 P

(d)

图 2 GNSS 测量基本原理

在 GPS 测量中,影响观测量精度的主要误差来源可分为与 GPS 卫星有关的误差、与信号传播

有关的误差和与接收设备有关的误差三种。GPS 卫星有关的主要误差包括卫星钟差、卫星轨道误

差;信号传播有关的主要误差包括电离层折射的影响、对流层折射的影响和多路径效应影响;接收设备有关的主要误差包括观测误差、接收机钟差和天线的相位中心位置偏差。

2 人工与自动化系统测量成果差异分析

2.1 人工与自动化系统测量成果差异

土建施工工作实际于 2022 年 5 月 15 日完成,设备调试于 2022 年 6 月 1 日至 2022 年 7 月 30 日完成,于 2022 年 8 月 14 日完成现场阶段验收后进入试运行,明确系统试运行期为 2022 年 8 月 15 日至 2022 年 12 月 31 日。

金龙山人工观测(常规大地测量法)每季度观测一次,观测时间 2022 年 3、6、8、12 月共计 4 次。选取 GNSS 自动化监测系统 18 个测点与相应部位的人工观测成果进行对比。选取与人工观测时段相同的 GNSS 观测成果数据,获得 GNSS 监测间隔位移量与人工观测成果进行对比。

水平位移观测对比时间段选择为 2022 年 8 月 14 日至 2022 年 12 月 11 日;垂直位移观测对比时间段选择为 2022 年 8 月 14 日至 2022 年 12 月 6 日。

金龙山 GNSS 测点与人工观测垂直位移观测成果对比见图 3,共有 6 个测点垂直位移量比测值超限,大于 10 mm,分别为交 9、交 23、交 16、交 10、交 12 及交 18。其中交 18 位移量差值最大,其值为 29.9 mm,表现为 GNSS 高高程测点与人工观测垂直位移差异较大,差异值与测点高程相关。在高程上与观测基准点相差约 100 m 以内的测点数据误差均较小,表明基准点对测点的约束高度在 100 m 左右。

金龙山 GNSS 测点与人工观测水平位移观测成果对比见图 4, K39 在临空向位移量差值最大,其值为 8.3 mm,满足比测差值均小于 10 mm 的要求。

2.2 GNSS 测量误差原因分析

选取日均温、日降雨量及库水位作为原因量进行分析。通过图 5 最高点 J18 垂直位移变化与环境量关系过程线可以看出:垂直累计位移与温度、降水量变化呈正相关性,且表现显著,垂直位移变化随环境量变化呈周期性波动,但总体表现稳定。

通过图 6 最低点 K39 垂直位移变化与环境

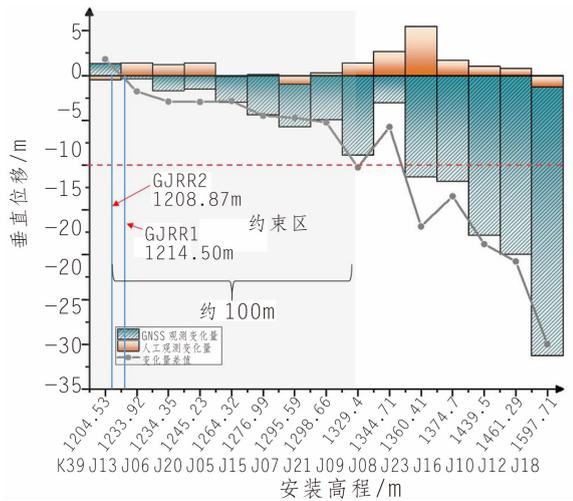


图 3 GNSS 测点与人工观测垂直位移观测成果对比

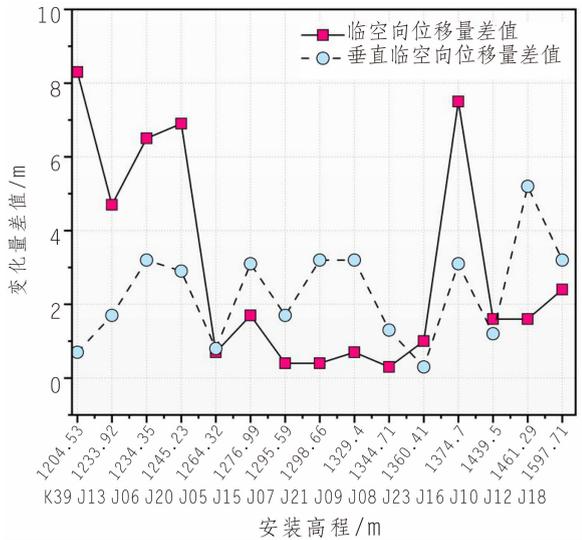


图 4 金龙山 GNSS 测点与人工观测水平位移观测成果对比

量关系过程线可以看出:垂直累计位移与温度变化、降水量变化相关性不显著,垂直位移变化随环境量变化影响相对较小,总体变化延续前期缓慢沉降趋势。

当 Spearman 相关性系数 $|r| \geq 0.7$ 时,认为两变量强相关;当 $0.4 \leq |r| < 0.7$ 时,认为两变量中度相关;当 $0 \leq |r| < 0.4$ 时,认为两变量弱相关或不相关;如图 7 所示,GNSS 与日均温的相关性系数随着安装高程的增加呈增大趋势,在高程位置呈强相关性,整体上与降雨量呈中度相关性,与库水位呈现弱相关性。

GNSS 测点高程与工作基点高程差值越小,气象差异越小,对流层改正模型计算差值就越小,

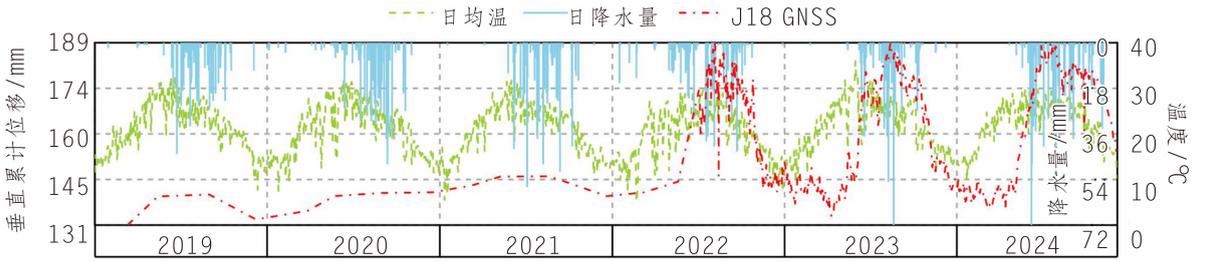


图 5 最高点 J18 垂直位移变化与环境量关系过程线

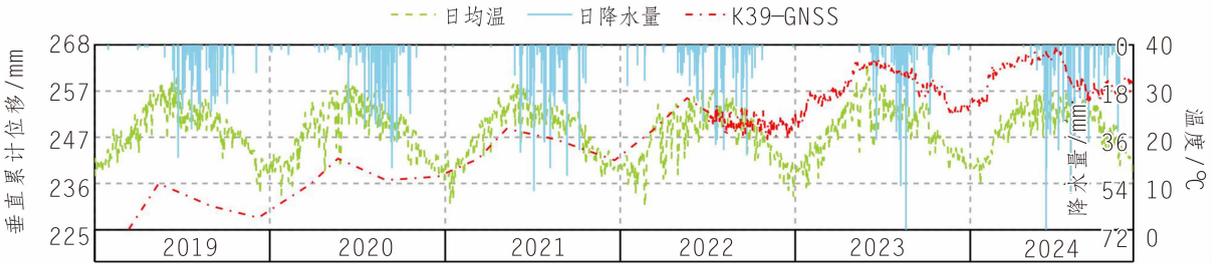


图 6 最低点 K39 垂直位移变化与环境量关系过程线

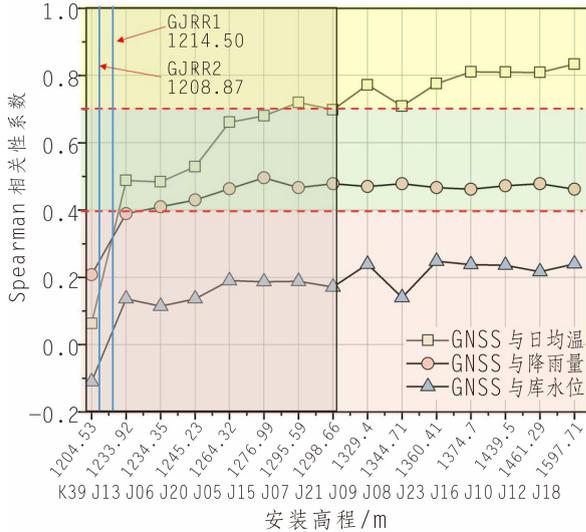


图 7 GNSS 数据与环境量的相关系数

反之越大。GNSS 测点高程与工作基点高程差值越大,距离越远,测点相对于基点的测量精度就越差,与基点距离越远、高差越大,基点对其约束越差,其中日均温是主要影响因素。

3 结 语

金龙山 GNSS 测点高高程垂直位移变化与前期人工差异大,主要是因对流层延迟消除不彻底,受大气变化影响垂直位移呈周期性波动,导致位移量变幅较大,经长期观察变化总体相对稳定,变化基本正常,未见异常变化,其中温度是主要影响因素。

金龙山 GNSS 监测基点布设不均匀,在同

一高程面上,与部分监测点高程的高差相对较大,基点无法对高差较大的监测站高程方向误差进行较好的约束,且基点约束高度大约在 100 m。

建议目前维持测点正常运行,保持数据的连续性,观察年度周期性变化规律,数据波动较大时需参考历年同期数据进行对比分析。其次进行专项研究,准确计算对流层延迟,获取 GNSS 信号传播路径上的压强和温、湿度,并将日均温作为重点考虑因素,建立符合测区的对流层改正模型。另外有条件可考虑增加高高程 GNSS 基准点,基点完全控制测区高程,对高高程点误差进行较好约束,同时提高观测精度。

参考文献:

- [1] 水电工程全球导航卫星系统(GNSS)测量规程:NB/T 35116-2018[S].
- [2] 黄友灿,陈玉林,薛阳,等. 一种 GNSS 定位结果质量评价指标[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(11):1167-1171.
- [3] 李卓骏,赵志华,武志刚,等. 龙羊峡大坝监测网 GNSS 数据处理模型优选研究[J]. 数字通信世界, 2023(1):7-11.
- [4] 李小伟,冯永祥. GNSS 多基站数据融合技术在水电站大坝精密变形监测中的应用[J]. 大坝与安全, 2021(1):28-32.
- [5] 刘恒,柯虎,江德军,等. BDS 在某大坝外部变形监测系统运行状态研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(4): 24-28.

(下转第 163 页)

