

全站仪外观监测自动化技术在大坝安全分析中的应用与挑战

冉光天 韦小明

广西国能水电开发有限公司, 广西南宁, 530000;

摘要: 大坝安全监测是确保水利工程稳定运行的关键环节。全站仪外观监测自动化技术凭借高精度和实时性, 为大坝安全分析提供了新手段, 可连续监测大坝外观变形并及时发现隐患。然而, 该技术面临环境干扰、复杂的数据处理和系统稳定性等挑战。本文探讨了该技术的应用现状, 分析了技术应用中的挑战, 并提出了相应解决策略, 以期为大坝安全管理提供科学依据和技术支持。

关键词: 全站仪; 自动化监测; 大坝安全; 变形监测; 技术挑战

DOI: 10.69979/3060-8767.24.05.022

引言

大坝安全关乎人民生命财产和社会稳定。传统监测手段难以满足现代大坝高精度、实时性要求。全站仪外观监测自动化技术应运而生，借助先进设备实现全天候、高频率监测，助力及时发现大坝隐患。但实际应用中面临诸多挑战，如自然环境干扰、海量数据处理和系统稳定性问题，需深入研究探索，以充分发挥其在大坝安全分析中的重要作用。

1 全站仪外观监测自动化技术在大坝安全分析中的应用现状

1.1 技术原理与特点

全站仪外观监测自动化系统由测量机器人、观测墩、观测房、自动启闭控制窗、气象站、供电、通讯、视频监控及报警设施等组成。其特点包括无人值守、远程控制、24 小时连续观测、自动气象改正、全圆观测法、多种平差方法、多种通讯方式及开放式数据接口。早期系统以徕卡测量机器人

+GEOMOS 软件为主, 精度高但功能有限。现升级改造后, 系统采用全圆法观测, 数据实时传输至服务器进行存储、计算和平差, 生成可视化变形曲线, 直观展示大坝变形趋势。

1.2 应用案例分析

广西梧州市旺村水利枢纽是一座以发电为主, 结合航运, 兼顾其他综合利用的水利枢纽工程, 坝址位于珠江流域西江水系桂江下游河段梧州市长洲区平浪村附近, 距上游京南水利枢纽坝址 42.3km, 距桂江河口 24km, 其地理位置是东经 $111^{\circ} 5' \sim 111^{\circ} 15'$, 北纬 $23^{\circ} 30' \sim 23^{\circ} 50'$ 之间, 为桂江开发的最末一个梯级电站。

2024 年，公司对外观测监测点进行全站仪自动化升级改造，以节约人力并获取精确数据。全站仪放置在观测房内，监测软件安装在中控室服务器上，实现测量机器人的定时定点数据采集、传输、计算、上传和分析。该系统整合了测量机器人、自动升降窗、气象站、供电和通讯等子系统，实现全自动化运行。

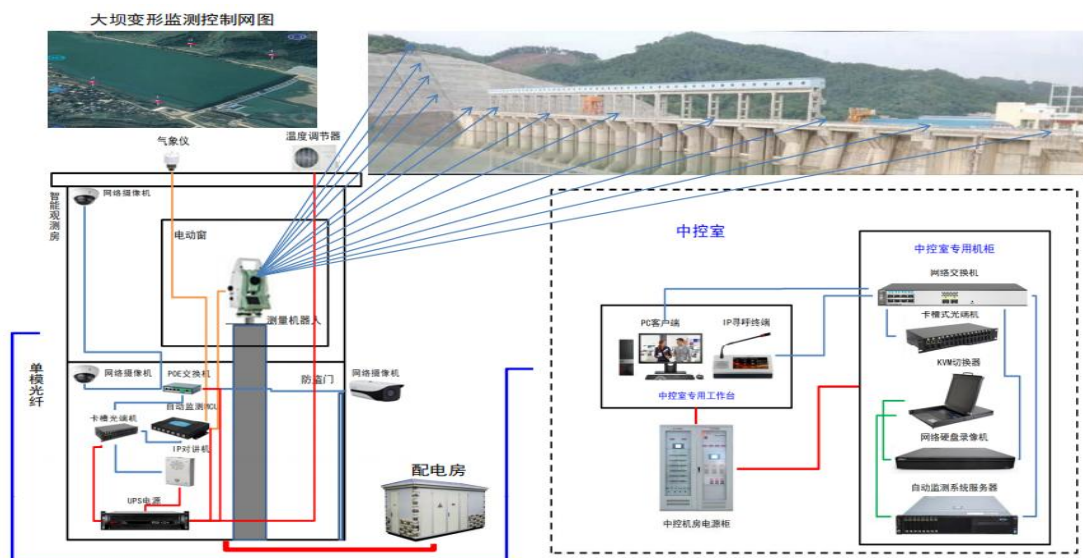


图 1 大坝变形监测控制网图

全站仪自动化监测系统的监测点布置在左岸护坡坝轴线方向每个马道布设 1 个观测墩,共 5 个观测墩,编号:LD6~LD10。在坝轴线方向上游 2.88m 每个坝段各布置 1 个水平位移测点,共 23 个水平位移测点,编号:S01~S23。

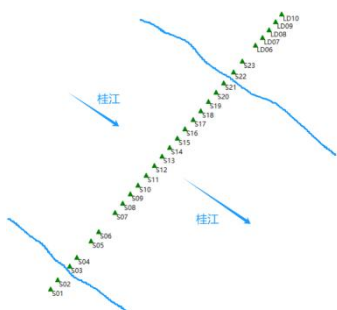


图 2 监测点布置示意图

监测软件安装在大坝机房控制中心,当湿度小于 90%时,软件自动唤醒全站仪并启动自动升降窗户。随后,全站仪进入自动测量模式,先转动到控制点大致方位,利用自动目标识别功能锁定监测点棱镜,发射激光脉冲采集原始斜距,并记录水平角和垂直角数值。数据采集遵循《混凝土坝安全监测技术规范(DL/T5178-2016)》标准。完成 4 个测回的数据采集约需 60 分钟,具体时间视现场环境稍有起伏。采集到的原始数据通过单模光纤实时传输至中控室服务器。

数据采集传输流程如下图:

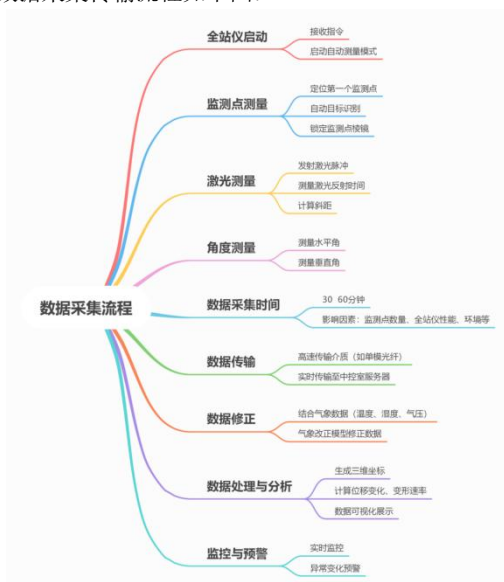


图 3 数据采集传输流程图

在系统运行初期,我们选择夜里 0 时、早上 5 时、中午 12 时和下午 19 时四个时段进行数据采集与稳定性分析。7 月 3 日的统计分析显示:夜里 0 时因空气湿度 100%未启动,无数据;早上 5 时数据完整但 S08 点未采集到,耗时 88 分钟,2c 值和 i 值波动小;中午 12 时 TN02 和 S01 数据未采集到,

耗时 66 分钟,2c 值和 i 值波动大,边长计算比其他时段长 2mm;下午 19 时数据完整,耗时 52 分钟,2c 值和 i 值波动小。综合分析后,将数据采集时间定在下午 20 时。

经过半年的持续监测,系统表现出高稳定性,每天定时采集数据,数据质量良好。本次平面变形精度在 1mm 以内,高程精度在 3mm 以内,累计变形数据符合大坝变形规律。监测结果显示各监测点位移变化量均在合理范围内,如 S01 点到 11 月 26 日止本次变化量基本保持在平面 1mm、高程 1.5mm 内波动,其他监测点本次变化量也表现出类似结果,表明监测系统整体结构稳定,监测系统运行可靠,为大坝安全分析提供了有力的数据支持。

1.3 全站仪自动化技术作用与优势剖析

全站仪外观监测是大坝安全监测的重要且可靠的手段。传统手工监测耗费人力且工作辛苦,随着人工成本上升和对数据实时性要求提高,全站仪自动化技术的重要性愈发凸显。自动化集成技术的成熟有效降低了数据采集难度,通过服务器软件自动化平差,数据可靠性增强,每天至少获取 1 次测量数据,可实时掌握大坝变形状况。例如,2024 年 6 月至 12 月的监测数据显示,大坝冬季向下游移动 4mm-6mm,累计变形符合大坝变形规律。

传统大坝外观监测方法(全站仪/经纬仪位移监测、电子水准仪沉降监测)正逐步被 GNSS 和全站仪自动化监测取代。尽管 GNSS 安装维护便捷,但其精度可靠性不足,且当监测点位增多时,总投入可能超过全站仪自动化监测。

2 全站仪外观监测自动化技术面临的环境干扰挑战

2.1 环境因素对监测精度的影响

全站仪自动化监测是大坝外观监测的重要手段,数据真实可靠,但存在仪器误差、环境干扰等影响。规范化设置测量步骤可消除大部分仪器误差,但仍需关注仪器轴系误差和环境影响。恶劣天气(如雾、霾、强风、大雨)会显著影响测量精度,导致数据波动大且不够准确。

2024 年 8 月 14 日,现场开始断断续续的降雨,数据采集和测量成功时间推后,且测点漏测较多。特别是 LD08 号点出现几十毫米的偏移,表明环境变化对某些监测点(如 S08、S18、S19、S20、S21、S22、S23、LD08 等)的测量结果影响较大。在后续几天的监测中,部分监测点的坐标变化量也显示出明显的波动。例如,S22 点在 8 月 13 日的坐标变化量为 $\Delta X=-0.9\text{mm}$ 、 $\Delta Y=0.9\text{mm}$ 、 $\Delta Z=-1.8\text{mm}$,而在 8 月 14 日的坐标变化量为 $\Delta X=9.6\text{mm}$ 、 $\Delta Y=-6.0\text{mm}$ 、 $\Delta Z=1.8\text{mm}$,8 月 15 日的

坐标变化量为 $\Delta X=-8.9\text{mm}$ 、 $\Delta Y=7.1\text{mm}$ 、 $\Delta Z=-2.3\text{mm}$ 。其他监测点如 S08、S18、S19、S20、S21、S23、LD08 等也表现出类似的变化趋势。表明 8 月 14 日受间断降雨影响，监测数据出现了较大的误差，这些数据波动不仅影响了测量的准确性，还可能导致对大坝变形状态的误判。

2.2 降低环境干扰的技术手段探讨

全站仪测量数据受大气折射和仪器误差影响大。大气折射因大气密度不均导致光线偏折，尤其在长距离跨水域测量时对角度的数据影响显著。本区域夜间易起雾，因此选择在太阳下山后的 20 时开始测量，避开日出日落时段。经分析，将测量时间 21 时左右比较合适，以降低大气折射影响，提高精度。仪器误差主要源于全站仪校准后垂直角零点基准的变化，即使多次校准，仍会有几秒的偏差。根据三角高程公式

$$h_{AB} = D * \tan \alpha + iA - VB$$

当距离较远时，还需考虑大气折光和地球曲率的影响，改正公式为

$$h_{AB} = D * \tan \alpha + iA - VB + f$$

其中：其计算公式通常为 $f = (1-k)D^2 / (2R)$ ，其中 k 为大气垂直折光系数， R 为地球平均曲率半径。

在 500 米观测距离下，折光系数变化导致的高差变化通常在 0.5 毫米以内，而垂直角 α 的变化是高差波动的主要原因，一天内的垂直角差值可达 $5''$ 以上，高差差值可达 12 毫米。三角高程测量，尤其是跨河单向测量，高程结果波动（5mm-10mm）显著，高程数据仅可作为长期沉降参考，不能据此怀疑监测系统错误。

3 海量监测数据处理的复杂性与应对策略

3.1 海量数据特点及处理难点

全站仪外观监测采用全圆法测量，通过盘左、盘右分别进行上、下半测回观测，计算 2C 值、平均读数及水平角值，具有高精度和可靠性，适用于多方向夹角测量。但测回数多导致测量时间长，易出现测回间互差超限，使数据无效，影响实时性。为此，自动化监测软件设置两种机制：一是控制点被遮挡时，结束本期测量。二是当某个监测点不被测量到的时候，我们在后续的测回里面将该点剔除出。这样能保证数据解算的准确性和数据测量的完整性、时效性结合。

3.2 先进数据处理技术与算法应用

全站仪外观测量常用的经典平差方法（最小二乘法）在实际应用中因场地控制网通视条件不理想，导致测站点与控制点间难以建立可靠控制网。为解决此问题，增加了位于大

坝上游的临时基准点。然而，监测数据显示，2024 年 7 月至 12 月期间，大坝右岸的 TN02 控制点与测站点的平距逐渐增大，从 152.567 米增加到 152.571 米，尤其在 12 月气温下降后，日均变化达 0.1 毫米/天，一个月变化约 3 毫米。为此，我们将平差方法改为自由网平差，在解算监测网之前先对控制网进行平差，并根据平差结果更新控制网坐标，从而确保数据的真实性和可靠性。

3.3 数据处理流程的方法

测量结束后，对同一周期内的数据进行平差计算，以提高测量精度。平差包括平面网平差和高程网平差。首先对单个测回的水平角和垂直角进行 2c 和 i 值计算，得到平均值，并对斜距进行气象改正。其次计算 4 个测回的平均角值，进行水平角归零计算，对斜距进行加乘常数改正，再通过天顶距和斜距计算高差和平距，并进行球气差及投影面改正。最后生成平差文件进行自动平差，输出平差结果文件。

4 全站仪自动化监测系统的稳定性问题及解决方法

4.1 系统稳定性影响因素分析及解决措施

通过对 2024 年 7 月至 12 月的数据分析，发现影响全站仪自动化监测系统稳定性的主要因素包括：控制点遮挡导致平差结果突变，需定期检查通视情况；雨天数据采集易中断且质量差，设置软件机制为下雨则停止本周期数据采集；气象数据读取错误影响距离改正，调整为测量前后读取平均值进行改正；仪器搜索角度过小导致 ATR 数据丢失，扩大搜索范围解决；ATR 测量模式照准错误导致波动，改用精测模式；全站仪校准后垂直角零点变化影响高程，尽量减少校准次数；平差功能受限于控制网点数，一旦出现某个控制点变化，剔除本期观测以避免误差。

4.2 保障系统稳定性的技术措施

为保障全站仪自动化监测系统的稳定性，需确保各子系统协同运行。仪器设备性能、气象数据准确性、电机系统、网络设备和采集软件的预设机制与平差模块均是关键因素。需要定期维护仪器，保持仪器整平和清洁，使用高精度气象设备，保障数据改正的可靠。节约成本方面可采用全站仪保护罩、4G 通讯和太阳能供电。软件方面，需不断更新性能，提升平差功能，加强数据筛选和图表展示能力。监测采用全圆观测法，遵循《混凝土坝安全监测技术规范

（DL/T5178-2016）》标准，优化软件 ATR 搜索机制，解决了数据漏采问题。平差方法采用合适平差方法，使数据计算结

果稳定可靠。

5 全站仪外观监测自动化技术在大坝安全分析中的综合应用与实践

5.1 技术应用与挑战解决的总结回顾

外观自动化监测技术近年来在国内多个电站得到应用，但应用效果较好的并不多。多数电站采用单点多次测量取平均值的方法，依赖徕卡全站仪的高精度与稳定性，但未将控制网点纳入整网平差，导致仪器偏差可能传递至监测点。旺村水电站采用全圆观测法采集数据，确保数据质量和真实性，可追踪源头并查缺补漏。同时，利用采集的气象数据进行距离改正，并分析气温变化与大坝变形的关系。系统采用多种平差方法（经典平差、自由网平差、拟稳平差），为控制点突发情况提供多种解决方案，确保数据真实性和位移判断的准确性。

5.2 技术应用成效与未来前景展望

全站仪外观监测自动化技术在旺村水电站的应用成效显著，显著提高了监测效率和精度。该技术通过高精度测量设备与计算机系统连接，实现了监测数据的自动采集、处理和分析，能够实时监测大坝和边坡的位移与变形。在国内多个高安全性和稳定性要求的工程项目中，全站仪自动化监测系统已广泛应用，能够及时发现并解决安全隐患，确保工程安全运行。

6 结语

全站仪外观监测自动化技术在大坝安全分析中表现卓越，从技术原理到实际应用，均展现出强大的性能与潜力。该技术有效应对环境干扰、复杂的数据处理和系统稳定性挑战，显著提升了监测精度、效率及预警准确性。未来，随着技术不断创新与融合，其将在更多大坝安全监测项目中发挥关键作用，为保障大坝安全运行、守护人民生命财产安全提供有力支持，具有广阔的发展前景和深远的意义。

参考文献

- [1] 康文轩, 张军荣. 构建小水库大坝监测信息系统的研究[J]. 水上安全, 2024, (24): 103-105.
- [2] 张昕. 基于智能全站仪的自动化监测系统[J]. 机械工程与自动化, 2022, (06): 218-219.
- [3] 王伟才, 杨晨辉, 彭成山, 等. 全站仪自动化监测中的控制测量和坐标传递[J]. 地理空间信息, 2021, 19(1): 66-70+7.
- [4] 曾兴颖, 贺映. 测边前方交会法在大坝变形监测中的应用与分析[J]. 湖南水利水电, 2023, (01): 5-7+27.
- [5] 周建国, 彭朵, 蒋卫国, 等. 智能全站仪大坝自动化监测时的辅助水位测量[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(06): 160-165.

作者简介：冉光天，男，（1973.12—），土家族，籍贯：思南，工程师，本科，研究方向：大坝安全监测。