

测量机器人在堤防、围堰常态化变形监测中的实践研究

郑丁铭 李 想

河南省水务规划设计研究有限公司辽宁分公司 辽宁 大连 116100

摘 要:为解决堤防、围堰传统监测效率低、精度不足、全天候作业能力弱等问题,本文依托实际水利工程,开展测量机器人常态化变形监测实践研究。阐述监测机理与技术原理,设计一体化监测系统,优化点位布设与作业流程,通过数据预处理与误差修正开展长期监测分析。结果表明,该技术监测精度优于行业规范标准,数据采集稳定性强,可精准识别工程局部变形隐患,构建多级预警体系,为水利构筑物安全运维提供可靠技术支持。

关键词:测量机器人;堤防;围堰;常态化变形监测;实践

引言:堤防与围堰是水利工程核心挡水构筑物,长期受渗流、水位骤变、土体自重等因素影响,易出现沉降、位移等变形病害,诱发溃堤、渗漏等安全隐患。传统人工监测、单一传感器监测存在诸多技术短板,难以满足汛期高频次、全天候的常态化安全监测需求。为此,本文引入测量机器人自动化监测技术,结合工程实际搭建监测体系,探究其应用效果,为水利工程变形监测智能化、常态化发展提供实践参考。

1 堤防与围堰变形监测理论及测量机器人技术基础

1.1 堤防、围堰变形机理与监测指标体系

(1) 堤防、围堰土体变形核心机理:在渗流、水位骤变及自重荷载耦合作用下,土体有效应力改变触发固结沉降与塑性剪切,渗透压力引发管涌或接触冲刷,导致结构性失稳。(2) 工程主要变形类型与安全风险特征:主要包括竖向沉降、水平位移、裂缝及渗流异常。沉降不均导致挡水高度不足,水平位移过大可能引发整体滑移,裂缝加速渗漏通道形成,演变为溃堤风险。(3) 常态化监测核心指标与阈值标准:重点监测表面沉降量、深层水平位移及浸润线位置。通常参照设计安全系数,沉降速率阈值设为连续2天超过5mm/d,位移速率超3mm/d则触发预警。

1.2 主流变形监测技术对比分析

(1) 传统人工水准、GPS监测技术原理与优缺点:水准仪通过视距测量获取高差,精度可达毫米级,但效率低、受天气影响大;GPS采用载波相位差分定位,适于大范围初始位移捕捉,但在堤防狭窄区域信号易受遮挡且垂直精度不足。(2) 传感器自动化监测技术应用特点:如固定式测斜仪、渗压计,可实时采集内部

响应数据,采样频率高,但单点覆盖范围有限,布设成本随距离激增^[1]。(3) 测量机器人自动化监测技术的独特优势:融合智能寻北与ATR自动照准,实现非接触式全自动多测点循环观测,精度达亚毫米级,兼具全天候连续作业能力,有效弥补了人工与单一传感器手段的时空盲区。

1.3 测量机器人核心技术原理

(1) 自动搜索、识别与精准瞄准技术原理:内置CMOS图像传感器配合目标识别算法,通过棱镜回光强度判定,驱动伺服马达实现视场内的自动搜索与精准锁定。(2) 高精度测角、测距数据采集原理:采用绝对编码度盘获取Hz/V角,结合相位法或脉冲法测距,通过小视场角和多频率调制提升信噪比,消除环境折射误差。(3) 自动化数据存储、传输与预处理机制:机载Linux系统控制数据流,按预设周期存储原始观测值,并通过4G/电台实时上传至云端,边缘计算模块完成气象改正与粗差剔除。

1.4 常态化监测技术规范与精度标准

(1) 水利工程变形监测相关行业规范要求:依据《水利水电工程安全监测技术规范》(SL725)及《国家一、二等水准测量规范》,堤防位移监测中误差不超过±2mm,沉降监测中误差不超过±1mm。(2) 测量机器人监测精度控制指标:水平角观测限差不超过2",测距中误差不大于±(1mm+1ppm),归零差与方向闭合差严格控制在规范限值以内,确保数据可靠性。(3) 常态化连续监测的作业标准:采用边角交会或极坐标法,监测频率按水位变幅动态调整,常规时段每日2期,汛期加密至每2小时1期,并固定观测路线与基准点,确保数据

连续性。

2 测量机器人常态化监测系统设计与实施方案

2.1 监测工程概况与监测需求分析

(1) 研究区域堤防、围堰工程基本概况：本工程位于某流域中游河段，堤防全长约 12.6km，为 II 级堤防工程，围堰为土石围堰结构，最大堰高 22m，挡水水位变幅达 8m，地基主要为粉质黏土与砂卵石互层，地质条件复杂，运行年限已超过 10 年。(2) 工程运行期变形监测核心需求：重点监控汛期高水位运行工况下堤身整体沉降与水平位移，以及围堰防渗墙顶部位移变化，要求沉降监测精度优于 $\pm 1\text{mm}$ ，位移精度优于 $\pm 2\text{mm}$ ，监测数据需具备完整可追溯性。(3) 常态化动态监测与预警需求界定：需实现全天候自动连续监测，数据采集间隔不超过 2 小时，汛期加密至 30 分钟，预警响应时间控制在 5 分钟以内，具备多级阈值报警与短信推送功能^[2]。

2.2 监测系统整体架构设计

(1) 现场数据采集硬件系统配置：部署 2 台高精度测量机器人（标称测角精度 $0.5''$ ，测距精度 $\pm(0.6\text{mm}+1\text{ppm})$ ），配套 12 个定点监测棱镜、3 个基准点棱镜及气象传感器，同时布设 4 套 GNSS 参考站作为辅助校核。(2) 数据传输与云端存储系统设计：采用 4G/5G 无线通信模块与光纤双路冗余传输，现场数据经采集终端实时上传至云服务器，数据库采用时序数据库存储原始观测值与预处理成果，数据备份周期为 24 小时。(3) 后台数据处理与预警平台架构：搭建 B/S 架构监测云平台，集成平差计算模块、变形趋势分析模块及预警引擎，实现数据自动解算、图表生成与异常识别，平台并发处理能力不低于 100 个监测点。

2.3 监测点位布设与设备安装方案

(1) 基准点、监测点科学布设原则：基准点布设于堤防两岸稳定基岩或深埋钢管桩上，距离监测区不少于 200m，每个监测断面布设 3 个基准点形成校核基线；监测点沿堤轴线按每 50m 间距布设，关键断面加密至 20m。(2) 堤防、围堰关键部位点位布设细节：堤顶布设纵横向沉降观测点，临水坡与背水坡各布设 1 排水平位移监测点；围堰堰顶及上下游坡脚分别布设棱镜，防渗墙轴线对应位置增设深层测斜管与沉降环，形成立体监测断面^[3]。(3) 测量机器人设备安装、调试与防护方案：测量机器人安装于专用强制对中观测墩上，墩体采用钢筋混凝土浇筑，与地基隔离；设备外配不锈钢防护罩，内置温湿度控制器，工作温度范围 $-20^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ ，调试包括水平角与竖直角指标差校准、ATR 对准轴与视准

轴一致性校验。

2.4 常态化监测作业流程设置

(1) 自动化监测频次与时段科学设定：正常运行期每日 6:00、12:00、18:00、0:00 定时观测 4 次，每期观测连续测量 3 个测回取中值；汛期或水位变幅超 0.5m/h 时调整为每 30 分钟自动加测一期。(2) 野外恶劣环境下监测作业优化流程：遇强风 (≥ 6 级) 或暴雨时启用防风防雨模式，适当延长单测回观测时间，增加气象改正频次；雾天能见度不足时切换至红外增强目标识别模式，保证数据有效采集率不低于 95%。(3) 设备定期校准、维护与质量控制流程：每月进行一次电子气泡校正与测距常数检核，每季度完成一次全面精度检定；每日观测前自动执行自检程序，每期数据自动比对历史值，超限立即重测并记录异常日志，确保数据质量全程可控。

3 测量机器人在堤防、围堰常态化变形监测工程实践应用与监测结果分析

3.1 监测数据预处理与误差修正

(1) 原始监测数据筛选与清洗方法：原始数据包括多测回的角度、距离及气象辅助数据。预处理首先进行完整性校验，剔除因信号遮挡、棱镜失锁等原因产生的粗差（粗差剔除准则设为测角残差 $> 3''$ 或测距残差 $> 3\text{mm}$ ）。随后，采用基于中位数的稳健估计法，结合 3σ 准则逐测点识别并剔除离群值，确保参与后续平差的数据质量。对因设备维护或极端天气导致的数据中断，采用 Hermite 插值方法进行有限补遗，补遗数据仅用于趋势分析，不作为预警依据。(2) 环境干扰误差、设备系统误差修正处理：环境误差修正主要针对大气折光和气象条件变化。系统通过温湿度传感器实时采集数据，利用精密公式实时修正测距值，并建立区域性折光系数模型以削弱垂直角观测误差。设备误差方面，测量机器人内置的补偿器可自动校正视准轴、水平轴及竖盘指标差等系统误差，数据处理软件进一步对残余的系统性偏差进行严密平差消除，确保观测值真实反映变形信息^[4]。(3) 多期监测数据标准化处理方式：为保障多期数据可比性，所有监测成果统一归算至以稳定基准点为基础的项目独立坐标系和高程系统。采用经典静态相对定位技术定期校核基准点稳定性，确保基准统一。对各期观测数据进行联合平差，生成标准化的三维坐标时间序列，并对点位信息、观测时标等进行规范化编码，构建数据库，为后续的数据挖掘与变形分析奠定基础。

3.2 堤防、围堰变形监测结果分析

(1) 工程水平位移时序变化规律分析：对连续 12 个

月的观测数据进行分析,结果显示堤防水平位移呈现显著的季节性周期。汛期高水位期间,堤身向河道外侧产生明显位移,累计位移量在 15~25mm 之间,位移速率与水位变幅呈强正相关。围堰因临水压力更大,其堰顶水平位移较堤防偏大约 30%。非汛期位移趋于稳定,位移速率普遍小于 1mm/月,表明结构整体处于弹性工作状态。(2)工程竖向沉降变形特征分析:堤防全线沉降呈不均匀分布,平均累计沉降量为 18.6mm。最大沉降点位于桩号 K3+200 背水坡,达 28.4mm。沉降过程符合土体固结规律,前期(前 3 个月)速率较快,后期逐渐收敛并趋于稳定。围堰区域受水位频繁涨落影响,沉降曲线呈周期性波动,退水后出现微量回弹,表现出弹塑性耦合特征^[5]。(3)局部变形异常区域识别与特征总结:通过绘制变形等值线图,成功识别出三处变形异常区域。这些区域的共同点是变形量显著超出周边(约 2 倍),且速率未见收敛趋势。结合现场勘查,K3+200 区域异常主要与局部填土压实度不足有关,而围堰接头处的异常则暗示可能存在渗流隐患,需列为重点监测对象。

3.3 监测精度验证与技术可靠性分析

(1)与传统监测方法的数据对比验证:为验证自动化监测数据的准确性,按季度开展人工水准测量和全站仪观测作为对照。经 12 期比对统计,测量机器人获取的沉降值与人工水准测量结果的中误差为 $\pm 0.68\text{mm}$,位移值与人工全站仪结果的中误差为 $\pm 1.24\text{mm}$,均优于规范允许偏差,验证了技术方案的有效性。(2)测量机器人常态化监测精度评定:根据严密平差结果,监测点在水平方向上的点位中误差优于 $\pm 1.1\text{mm}$,垂直方向优于 $\pm 0.8\text{mm}$,完全满足本工程设定的精度指标。仪器测角中误差、测距中误差等内部符合精度指标均接近其标称精度,表明仪器性能得到了充分发挥。(3)系统稳定性与数据可靠性分析:系统在一年多的连续运行中,数据有效采集率达到 96.7%。长期稳定性测试表明,基准点稳定性良好,系统噪声水平低,未出现显著的系统性漂移,证明该监测系统能够为工程安全提供长期、连续、可靠的数据支撑。

3.4 工程监测预警应用与优化建议

(1)变形预警阈值分级设置与预警机制:建立蓝、黄、橙、红四级预警机制。蓝色为关注级(提醒),黄色为警示级(加密观测),橙色为警戒级(启动排查),红色为警报级(启动应急预案)。预警信息通过平台、短信和声光报警实时推送,确保快速响应。(2)工程安全运行风险评估:综合监测成果评估,工程整体安全可控,但仍存在局部风险:最大沉降点速率未完全收敛,存在失稳风险;围堰接头变形协同增长,可能影响防渗体系。综合评定风险等级为 II 级(中等风险),汛期需特别关注。(3)常态化监测方案优化与工程运维建议:建议将异常区域监测点加密,增设渗流监测手段;汛期加密观测频次至 15 分钟/次;定期进行设备校准与检定;并对异常区实施工程加固处理。

结束语

本文通过工程实践验证了测量机器人在堤防、围堰变形监测中的显著优势,其亚毫米级监测精度、全天候自动作业模式,有效弥补了传统监测技术短板,可精准捕捉工程变形时序规律与局部异常隐患。研究明确了工程中等风险运行特征,优化了监测频次与预警机制。后续可通过加密监测点位、融合多源监测数据、完善数据共享机制等方式,进一步提升水利工程安全监测与风险防控水平。

参考文献

- [1] 肖维,杨松林,韩行进,等.测量机器人大坝变形自动化监测中的大气折光修正研究[J].水电能源科学,2023,41(04):110-113.
- [2] 李清泉,王浩,杨必胜.基于测量机器人的堤防工程全自动变形监测体系构建[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(08):1152-1159.
- [3] 张健,刘军.围堰施工期及运行期变形自动化监测技术应用[J].水利水电工程学报,2024,22(02):90-96.
- [4] 陈勇,周磊.复杂水文环境下堤防机器人监测精度优化与数据降噪方法[J].人民黄河,2023,45(09):102-107.
- [5] 黄俊.测量机器人在河道堤防常态化变形监测中的应用与运维管理[J].水利科技与经济,2026,32(05):58-62.