

# 堤防险情隐患快速巡查系统研究与设计

徐兰玉<sup>1,2</sup>, 张 波<sup>3</sup>, 杨浩东<sup>1,2</sup>

(1. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;  
3. 深圳市城市公共安全技术有限公司, 广东 深圳 518038)

**摘要:**为提高堤防工程运行安全管理水平,改变传统人工巡查模式,解决堤防巡查效率低下等问题,通过运用激光雷达扫描技术、可见光热红外等传感技术,采用高可靠性无人机载平台搭建空中巡查平台,集成堤防隐患定量化表征、数据实时传输与多算法融合,开发设计高效一致化数据库与可视化及智能交互软件,实现灾害或汛期条件下堤防隐患的快速探测、识别,提高堤防巡查效率。

**关键词:**堤防; 隐患; 巡查系统; 激光雷达; 红外可见光

**中图分类号:**TV698.2      **文献标识码:**B      **文章编号:**1007-7839(2023)09-0055-0004

## Research and design of a rapid patrol system for embankment hazards and hidden dangers

XU Lanyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>3</sup>, YANG Haodong<sup>1,2</sup>

(1. *Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China*; 2. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*;  
3. *Shenzhen Urban Public Safety Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518038, China*)

**Abstract:** In order to improve the operation safety management level of dike engineering, change the traditional manual patrol mode, and solve the problem of low efficiency of dike inspection, the aerial inspection platform is built by using high reliability UAV platform, laser radar scanning technology, visible light thermal infrared and other sensing technologies. The quantitative characterization of embankment hazards, real-time data transmission and multi-algorithm fusion are integrated, and the efficient and consistent database and visualization and intelligent interactive software are developed and designed to realize the rapid detection and identification of hidden dike hazards under disaster or flood season conditions, and improve the efficiency of dike inspection.

**Key words:** embankment; hidden dangers; patrol system; laser radar; infrared visible light

## 1 概 述

堤防是重要的防洪工程,《2019年全国水利发展统计公报》<sup>[1]</sup>统计显示,截至2019年底,全国共建

成5级以上江河堤防32.0万km,其中1级、2级达标堤防长度3.5万km。堤防在长期服役过程中容易出现开裂、滑坡、浸散、管涌、流土和冲刷等灾害现象,引起洪水泛滥、影响居民生命财产安全及工农业的

收稿日期:2023-07-07

**基金项目:**江苏省水利科技项目(2021073);防汛抢险急需技术装备揭榜攻关项目(堤防险情隐患快速巡查空中成套技术装备之四);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(Y922016)

**作者简介:**徐兰玉(1981—),女,高级工程师,博士,主要从事水利工程监测及安全评价工作。E-mail:22567850@qq.com

生产。堤防工程的空间跨度大,造成水文地质条件、隐患分布沿线随机性变化很大,采用传统的点式传感器进行堤防安全监测针对性不强,往往不能发现堤防工程发生的隐患及险情。因此,为掌握堤防工程安全状态,特别是汛期堤防的工作性态,确保堤防工程安全,巡视检查是较有效的方式之一,目前主要采用的是人工拉网式巡检。该巡检方式以目视为主,检查手段较为落后,需耗费大量人力,人工巡检效率较低、容易漏检且难以及时完全发现堤防隐患缺陷,无法适应国家提出的构建智慧水利体系的要求。

随着传感技术的发展和遥感技术的不断进步,分布式光纤<sup>[1]</sup>、红外热成像<sup>[2-3]</sup>、声发射<sup>[4-5]</sup>、雷达<sup>[6-7]</sup>、无人机<sup>[8]</sup>及水下机器人<sup>[9]</sup>等新型技术和装备被引入堤坝无损检测领域,利用无人机搭载多传感器获取堤防多源数据实现隐患识别已成为可能,这为堤防巡检提供了新的思路 and 手段。

因此,本文紧密结合堤防巡查的实际需求,以堤防灾害及隐患快速诊断为方向,利用无人机能实现大范围空中快速巡查的优势,研究利用无人机平台搭载可见光、红外、雷达等融合技术载荷用于堤防的日常巡检,有效提高巡检工作效率和堤防巡检

的智能化水平,为保障堤防工程运行安全提供科技支撑。

## 2 空中堤防险情隐患快速巡查技术装备

### 2.1 结构组成

系统通过无人机平台集成搭载集可见光、热成像相机、激光雷达等传感器,为堤防隐患巡查提供新的监测手段。空中堤防险情隐患快速巡查成套装备包括:高可靠性的防雨抗风无人机,可更换电池和载荷的自主起降保障设施,可配备有双光载荷、热成像载荷、激光雷达、倾斜相机、多光谱相机等的智能载荷,拥有高性能的4G/5G和无线电图传链路,基于云平台的智能化大数据处理平台,可实现堤坝巡检过程中航拍、测绘、数据分析、数据整理等功能。该系统既可以区域化部署,也可以全域部署和移动部署。

如图1所示,利用无人机搭载可见光热红外双光相机及激光雷达载荷,对堤坝工程管理范围进行连续探测,从而获得全面覆盖堤坝的可见光、红外影像及激光雷达扫描数据,再通过机载图传系统将所采集的图像实时传输至地面站,从而实现堤防隐患的远程探测和实时辨识。



图1 基于激光雷达、可见光及热红外传感设备的空中巡堤平台

### 2.2 技术路线

通过分析各传感监测技术在堤防巡检方面的应用现状和趋势,采用“实验分析—机理剖析—关

键技术—集成应用”全链条研发思路,应用多学科交叉融合理论方法,围绕实现堤防险情隐患快速巡查空中成套技术装备的总体目标,构建技术路线

(图2)。

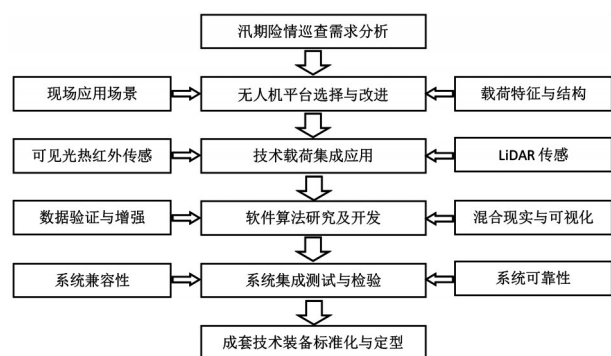


图2 技术路线

### 2.3 关键技术

(1)汛期堤防隐患高精度巡查要求下高可靠性空中平台选择。汛期条件下,尤其是刮风降雨以及承担一定的任务条件下,本项目的关键技术是如何确保空中平台的航迹稳定、长航时保证、巡检精准和起降可控以及结构模块化、通讯一体化和数据处理分析边缘计算化,使空中平台具有适应恶劣环境的能力。本项目在成熟军用产品JC-M15模组式多旋翼无人机的基础上,针对防尘防水性能方面的改进要求,通过对电机、外壳、通气孔、外露紧固件及接插件进行防尘防水设计,所有紧固件均选用高强度不锈钢材质,防水防锈处理,外露接插件和接口均采用防水接头或加装橡胶防水帽,机臂接插件处加装防水密封圈等,保证整机的防尘防水能力,以适应汛期恶劣的工作环境。

(2)汛期堤防隐患高精度快速探测与定量化表征。堤防渗漏识别的红外热成像检测技术:堤防实际环境复杂,受植被覆盖、非渗漏积水等表面温度场干扰,仅依靠原始红外图像读取温度异常点进行堤防渗漏病害判别的准确性很低,因此提出堤防温度场辨识新指标,建立典型渗漏病害红外图

谱,以提高渗漏病害识别的准确度;激光雷达变形监测技术:通过对堤防巡查范围的机载激光雷达数据的获取和处理,得到精度很高的机载激光雷达DEM产品,拟从定性和定量2个方面对多期机载激光雷达数据进行堤防变形动态监测,掌握一定时间段内堤防的变形趋势和特征,测算变形量;技术载荷的多样性决定了现场采集数据量大,如何完成实时监测和快速预警成为关键,为此将在应用微波通讯、4G/5G等多种无线通讯方式的基础上,采用自适应路由算法解决数据实时传输问题,结合压缩感知研发海量数据实时传输智能算法,采用自我生成算法实现信息的自我增强,采用像素级、特征集、决策级等多级融合算法实现多源数据融合;通过收集积累不同的险情案例,采用分类聚类算法和动态数据库技术形成险情动态对比数据库,采用专业UI设计实现界面友好、实时展示、长期预报、隐患预警、案例对比等功能的数据库构建和三维可视化软件开发。

## 3 系统实现与现场测试

在完成前期设计、单元开发与室内测试的基础上,选择在江苏省宿迁市南水北调泗洪站管理所“堤防险情模拟试验测试试验场”进行野外模拟实地测试联调演练,测试内容主要包括无人机搭载可见光、红外、激光雷达和微型SAR技术载荷进行堤防空中快速巡查,实现对堤防大范围高精度快速巡查,管涌、大面积渗漏、变形、塌陷、滑坡等多类型险情。模拟滑坡、渗漏、泥泞路段成C字型,泥泞路段最接近河道、模拟渗漏堤防垂直于河道、滑坡测试场景平行于河道,测区总面积约0.2 km<sup>2</sup>(图3)。

现场模拟了1 m范围的滑坡,塌窝险情,直径10 cm及以上的积水或管涌渗流,温差4℃及以上、背水坡直径≥5 cm的点状渗漏隐患以及温差4℃及以上、背水坡直径≥10 cm的面状渗漏隐患。在堤坝

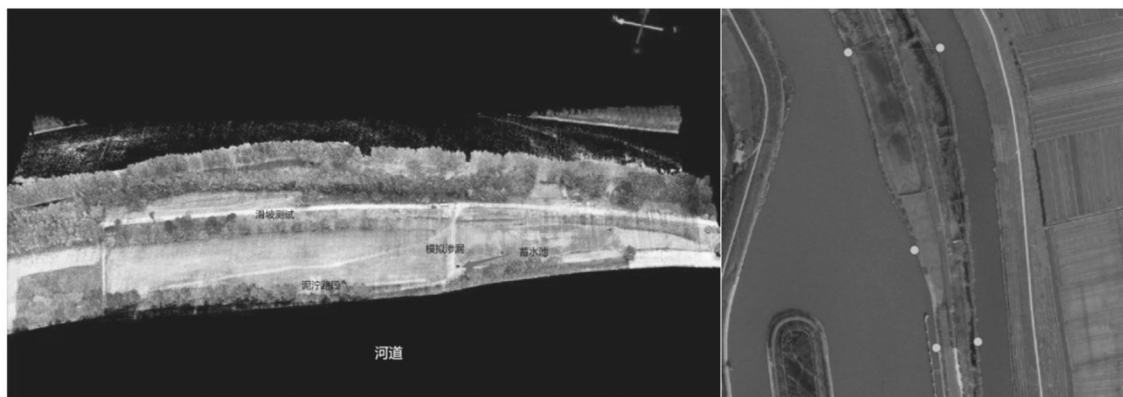


图3 现场测区

内部设置了多种渗漏场景,用于模拟不同深度、不同部位、不同流速的渗漏。

无人机巡检时根据线路运行情况、巡检要求,搭载可见光相机/红外热像仪、三维激光扫描仪等传感设备,各传感器主要监测目标见表1,主要形变及

渗流监测结果见图4~8所示。

测试基本完成了各空中载荷的监测目标,从激光雷达获取的点云和DEM模型中能较为清晰地看出人为模拟的塌坑、滑坡隐患,并可从模型中量取塌坑的宽度和深度等特征值信息,且测得的塌坑宽

表1 不同空中载荷采集目标

传感器	数据采集目标
三维激光扫描仪	堤防地形测量、三维地形重建、水位高程及堤防形变监测及标识定位等
红外成像仪	渗漏隐患监测与识别,渗漏隐患定位等
可见光相机	堤防巡查区域照片获取、正射影像图生成、滑坡塌窝险情识别及其他隐患校准等
POS系统	堤防巡查线路飞行平台任意时刻的位置、姿态的实时获取等

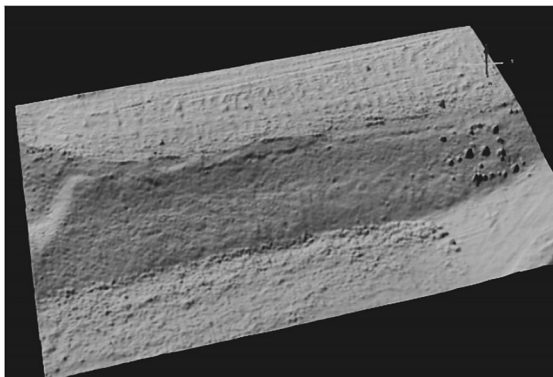


图4 隐患前形变输出

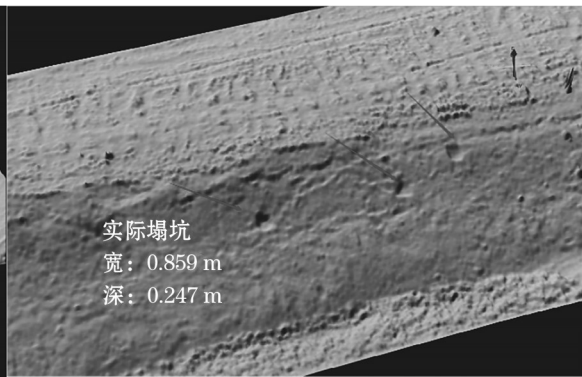


图5 隐患后形变输出

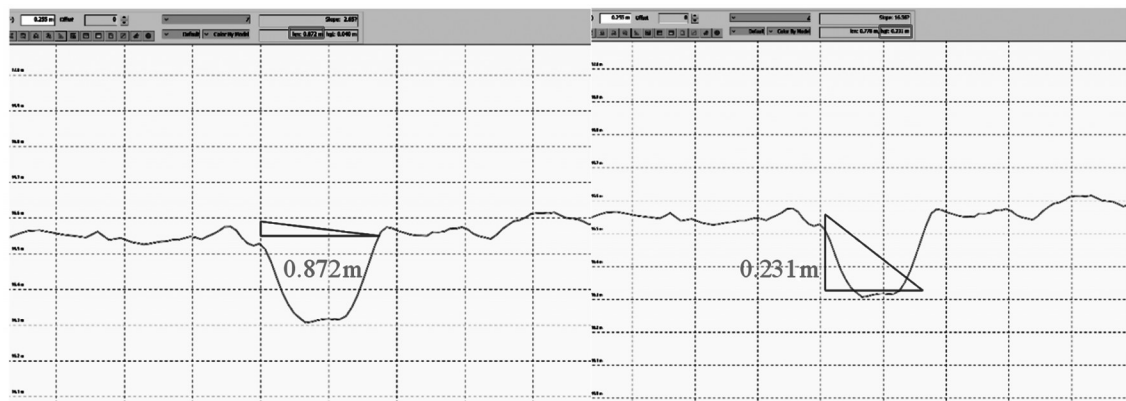


图6 模拟塌坑形变输出



图7 渗漏部位可见光图像输出

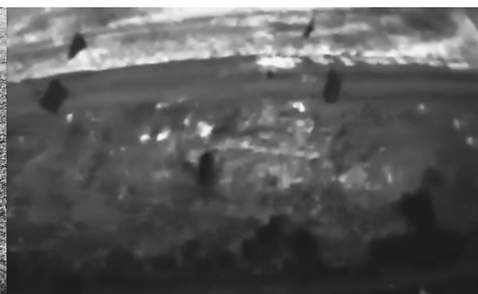


图8 渗漏部位红外影像

(下转第72页)

督促相关部门申领取水许可证,规范其取用水行为。同时,要创新形式,增加包容性。环卫洒水、绿化灌溉就近取水,取水地点不固定,取水设施多样,取水强度不稳定,取水总量难预测,与一般的工业取水有较大差异。水行政主管部门应对该项审批进行深入研究,抓住总量控制、节约用水、计量取水等要件,对现行取水许可审批程序进行修订,以保障城乡环境用水取水合法合规。

## 2.5 细化自来水下游用水户用水分类统计

自来水公司的下游企业涵盖各行各业,有居民生活区、服务业、建筑业、工业、畜禽养殖业等。用水总量核算时,服务业、建筑业、畜禽养殖业用水量等是依据统计年鉴和用水定额计算而得。由此可知,自来水公司上报的取水量包含了其下游的服务业、建筑业、畜禽养殖业的用水量,与通过年鉴和用水定额推算的服务业、建筑业、畜禽养殖业的用水量存在重复统计。为避免重复统计,要做好自来水公司售水量分类统计工作,总量核算过程中,要将相关行业用水量重复统计部分予以扣除。同时,要做好典型调查工作,用水定额有一定的局限性和滞后性,需要选择合适的典型调查对象,在当前的经

济社会和技术条件下,统计典型对象的取用水情况,以便对用水定额进行修正。

## 3 结 语

解决用水统计所面临的问题,要加大农业灌溉用水典型区块计量的覆盖面,划清取水许可管理范畴,应管尽管。做好对公共供水企业的监管,掌握其下游用水情况,做好典型对象的调查研究,充分弥补定额的不足。除此之外,还应加大用水统计基层队伍建设和培训力度,同时也要积极探索采用购买第三方服务的方式开展用水调查。

### 参考文献:

- [1] 陈茂山,陈金木.把水资源作为最大的刚性约束如何破题[J].水利发展研究,2020,20(10):15-19.
- [2] 董一洪,刘沂轩,刘聪贤,等.连云港市水资源公报[R].连云港:连云港市水利局,2020.
- [3] 刘广丽.试论加强用水计量和统计体系建设[J].内蒙古水利,2007(2):110-111.
- [4] 尤洋,来海亮,陈建刚.对用水计量和用水统计制度的思考[J].城镇供水,2015(5):53-56.

(上接第58页)

度深度数据均与实际坑的尺寸有较好一致性;渗漏部位在可见光图像中几乎不能区分,不过在红外图像中表现异常,比较显著,渗漏部位温度明显低于周围土体,但依旧难以与植被区分开来,可结合可见光图像综合考虑。但由于前期样本数量收集及模型训练的不足,本次测试未能实现隐患的机器自动识别。

## 4 结 语

空中巡查系统不仅可以在应急条件下直观、便捷地标识出堤防渗漏、形变等隐患险情,特别是通过多次巡查影像差分分析实现厘米级的形变定量监测,还可为堤防早期隐患识别和中长期的变形监测提供重要技术手段。通过样本的不断积累和模型训练,机器学习算法可以学习和识别堤防隐患特征,最终实现堤防隐患险情的判断和预测,使管理人员能够更直观地了解堤防的运行性态。

### 参考文献:

- [1] 何斌,何宁,张中流,等.基于传感光纤技术的堤坝分布

式变形监测[J].水利水运工程学报,2021(5):137-143.

- [2] 曹文星,张炜杰,游天宇,等.无人机搭载双光相机探测堤防渗漏试验分析[J].江苏水利,2022(10):63-65.
- [3] 周仁练,苏怀智,刘明凯,等.基于被动红外热成像的土石堤坝渗漏探测试验研究[J].水利学报,2022,53(1):54-67.
- [4] 明攀,耿晓明,陆俊,等.基于声发射监测的堤防管涌试验[J].水利水电科技进步,2020,40(4):33-38.
- [5] 明攀,陆俊,胡少伟,等.堤基管涌破坏过程中的声发射信号特性研究[J].水电能源科学,2018,36(2):176-179.
- [6] YUTAKA W, YOSHIHISA K, MAKOTO K. Accuracy assessment of uav lidar survey for river morphological mapping[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B1 (Hydraulic Engineering), 2017, 73(4):553-558.
- [7] 熊寻安,龚春龙,王明洲.基于北斗/GNSS与InSAR的水库群坝体表面变形监测体系[J].水利信息化,2019(3):45-49,61. DOI:10.19364/j.1674-9405.2019.03.009.
- [8] 付伟锋.垂起固定翼搭载激光雷达在河道堤防测量中的应用[J].广东水利水电,2022(1):109-115.
- [9] 周正,田金章,贾强强.堤防缺陷水下检测技术综述和展望[J].中国水运(下半月),2022,22(11):94-96,99.