

# 基于AI多模态识别的 地下被动式白蚁监测装置研发与应用

岳松涛<sup>1</sup>, 周于静云<sup>2</sup>, 陈银<sup>2\*</sup>, 张蕊<sup>1</sup>

(1. 水利部河湖保护中心, 100038, 北京; 2. 武汉新烽光电股份有限公司, 430073, 武汉)

**摘要:**水利工程白蚁危害具有极强隐蔽性与高致灾性。传统白蚁监测手段依赖单一模态感知, 易受环境干扰, 小目标漏检率高, 误报问题突出, 难以满足水利工程安全预警需求。以“视觉-声音-温度”三模态数据融合为核心技术, 研发了适用于地下隐蔽环境的被动式白蚁监测装置。通过构建高精度多源感知硬件系统, 实现对白蚁形态特征、微弱活动声信号、代谢微温升信号的同步获取; 设计特征级融合与决策级融合两级融合机制, 结合优化YOLOv10-M轻量化目标检测模型, 显著提升白蚁小目标识别鲁棒性; 应用温湿度融合感知、蚁种与品级识别、蚁巢位置预测等关键技术, 形成完整的多模态智能识别体系。实验室测试与全国182个水利工程现场应用表明, 该装置白蚁综合识别率大于99.95%, 报警准确率大于98.5%, 误报警率低于1.5%, 漏报警率不高于0.3%, 可在-20~55℃宽温、积水、盐雾、高温等复杂场景下稳定工作。研究成果实现了从单一信号监测到多模态协同智能识别的技术跨越, 可为水利工程白蚁隐患早期识别、精准预警与高效处置提供技术支撑。

**关键词:**人工智能; 多模态融合; 白蚁; 智能监测; 堤坝; 水利工程监测; 温湿度融合决策

## Research and application of underground passive termite monitoring device based on AI multimodal recognition

YUE Songtao<sup>1</sup>, ZHOU Yujingyun<sup>2</sup>, CHEN Yin<sup>2\*</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>

(1. River and Lake Protection Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

2. Wuhan XinFeng Optoelectronics Co., Ltd., Wuhan 430073, China)

**Abstract:** Termite damage to water projects is highly concealed and catastrophic. Traditional termite monitoring methods rely on single-mode sensing, which is vulnerable to environmental interference, suffers from a high miss-detection rate of small targets, and frequent false alarms, and they can hardly meet the needs of safety early warning for water conservancy projects. This paper took the fusion of “vision, sound, and temperature” multimodal data as the core technology to develop a passive termite monitoring device suitable for underground hidden environments. A high-precision multi-source sensing hardware system was constructed to synchronously capture termite’s morphological characteristics, weak activity sound signals, and metabolic micro-temperature rise signals. A two-level fusion mechanism of feature-level fusion and decision-level fusion was designed, combined with an optimized YOLOv10-M lightweight object detection model, which significantly improved the robustness of small target recognition for termites. Key technologies such as temperature-humidity joint sensing, termite species and caste recognition, and nest location prediction were added to form a complete multimodal intelligent recognition system. Laboratory tests and field applications

收稿日期: 2026-04-16 修回日期: 2026-05-14

作者简介: 岳松涛, 南水北调工程质量监督处处长, 正高级工程师, 主要从事工程监测和检测、水生态修复、AI大模型研究。

通信作者: 陈银, 研发副总监, 主要从事水利工程相关研发工作。E-mail: 929429665@qq.com

in 182 water conservancy projects across China show that the comprehensive termite recognition rate of the device is greater than 99.95%; the alarm accuracy is greater than 98.5%; the false alarm rate is lower than 1.5%, and the missed alarm rate is not higher than 0.3%. The device can operate stably in complex water conservancy scenarios such as  $-20\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$  wide temperature, water accumulation, salt spray, and high humidity. The research results achieve a technological leap from single-signal monitoring to multimodal cooperative intelligent recognition and can provide technical support for early identification, accurate early warning, and efficient disposal of termite hazards in water conservancy projects.

**Keywords:** artificial intelligence; multimodal fusion; termite; intelligent monitoring; dike and dam; water conservancy project monitoring; temperature-humidity fusion decision-making

中图分类号: TV698.2<sup>+</sup>36 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)10-0009-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.10.002

## 一、引言

水利工程是保障国家防洪安全、供水安全、粮食安全、生态安全的关键基础设施,其安全稳定运行直接关系到人民群众生命财产安全、经济社会可持续发展以及生态系统的健康与平衡。白蚁是水利工程堤坝的“隐形杀手”,具有隐蔽性强、繁殖速度快、危害范围广、致灾后果严重等特点,其在堤坝内部长期筑巢,挖掘纵横交错的蚁道,直接破坏堤坝土体的完整性和稳定性,导致土体孔隙率增大、抗剪强度降低,在汛期高水位作用下,极易引发管涌、渗漏、滑坡甚至溃坝等重大险情,造成巨大损失。1998年长江流域特大洪水期间,约80%的堤坝险情由白蚁危害引发,充分凸显了白蚁防治在水利工程安全管理中的重要性。

我国现有堤防总长度超过30万km,大量都建于20世纪50—70年代,建设标准低,运行时间长,维护条件有限,白蚁侵害问题尤为突出。据统计,我国长江、珠江、淮河等南方流域堤坝白蚁侵害率超过60%,老旧堤坝侵害率更是高达80%以上;随着全球气候变暖,白蚁分布范围不断北扩,侵害程度也持续加剧,水利工程白蚁防治工作面临前所未有的挑战。

长期以来,我国水利工程白蚁监测主要依赖人工巡查、饵料诱集、人工开挖验证等传统手段,这些方法不仅劳动强度大、监测效率低、覆盖范围有限,而且严重依赖监测人员的经验,存在响应滞后、误判率高、监测盲区多等突出问题,难以实现白蚁隐患的早期发现和事前预警。随着物联网、人工智能(AI)、传感器技术的快速发展,自动化、智能化白蚁监测技术逐步成为研究热点,基于视觉、声音、温度等单一模态的监测装置逐步应用于工程实践,但仍面临显著技术瓶颈:视觉模态易受地下黑暗、

潮湿、泥沙遮挡、异物干扰等影响,对3~5 mm的白蚁小目标召回率不足,漏检问题突出;声音模态易受雨水冲刷、土壤振动、虫鼠活动、水流声等环境噪声干扰,环境适应性差,误报警率普遍高于8%;温度模态仅能识别大规模蚁巢产生的明显热异常,无法捕捉白蚁活动初期零散个体活动产生的微弱温升信号,漏报警风险高。此外,单一模态缺乏有效的交叉验证机制,在复杂多变的水利工程环境中,难以同时保证高识别率与低误漏报警率,无法满足实际的工程监测需求。

目前,国内外相关研究尚未形成成熟的多模态协同感知与深度融合白蚁监测技术体系。国外已开发的白蚁监测装置多基于单一模态,存在识别精度低、续航短、价格昂贵、不适应我国复杂水利环境等问题;国内相关研究起步较晚,现有产品大多采用单一传感器技术,部分尝试多模态融合的研究也存在融合深度不足、算法鲁棒性差、工程化程度低等缺陷,尚未实现多模态数据的高效协同与精准融合,难以满足水利工程白蚁监测的实际需求。

为此,本文围绕“视觉-声音-温度”三模态融合这一核心技术,开展地下被动式白蚁监测装置的研发与应用验证,重点突破多模态数据获取、预处理、特征融合、决策校验,以及蚁种与品级识别、蚁巢位置预测等关键技术,并通过大量实验室测试与全国多场景水利工程现场应用,全面验证装置的性能与实用性,为水利工程白蚁智能监测与早期预警提供可落地、可推广的核心技术支撑,推动我国水利工程白蚁防治从“人工巡检、事后处置”向“智能监测、事前预警”转型。

## 二、多模态感知系统构建与数据获取

### 1. 多模态传感器配置与信号特征

多模态传感器监测装置采用一体化被动式地下结

构设计,无需外部供电与布线,可直接埋设于白蚁活动高发区域,以图像、声音、温度3类传感器为核心感知单元,构建白蚁活动多维度协同感知体系,实现同一空间、同一时刻的多源信号同步捕获,为后续多模态融合识别提供高质量的数据支撑。

**视觉模态感知:**采用500万像素高分辨率CMOS图像传感器、120°广角低畸变镜头,针对白蚁小目标特性优化曝光参数与对焦策略,可清晰识别最小3 mm的白蚁个体。为适应地下弱光、潮湿的隐蔽环境,采用低照度成像方案(最低照度0.01 lx),配合自适应降噪算法与对比度提升算法,有效抑制地下环境中的噪声干扰,保证在无外部光源条件下稳定输出白蚁的形态轮廓、体表纹理、运动轨迹以及群体密度等核心特征,为视觉识别提供清晰、有效的图像数据。

**声音模态感知:**采用-30 dB高灵敏度MEMS声学传感器,用于捕捉白蚁取食(啃食木材、土体)、爬行、交哺等活动产生的微弱声信号。

**温度模态感知:**采用高精度NTC温度传感器,测温范围-40~85℃,测温精度 $\pm 0.1$ ℃,响应时间 $\leq 100$  ms,可精准捕捉白蚁群体代谢活动产生的0.3~1.5℃局部微温升信号。传感器采用多点布设方式,在装置内部均匀布设3个测温点,通过连续采样与滑动滤波算法,实时监测温度变化趋势,有效区分白蚁代谢热信号与土壤自然热扰动、阳光辐射、水分导热等干扰项,为温度识别提供可靠的温度数据。

## 2. 温湿度融合感知与环境补偿

水利工程现场环境复杂多变,高湿、极端温变等环境因素会导致温度传感器出现测温漂移,影响温度模态的识别可靠性。为解决这一问题,本研究设计温湿度融合感知与环境补偿逻辑,使湿度传感器与温度传感器协同工作,实现温度信号的精准校正与抗干扰能力提升。具体实现逻辑如下:一是同步采集环境温度与相对湿度数据,基于大量白蚁活动实验数据,构建温-湿-蚁活动相关性模型,明确不同温湿度条件下白蚁的活动强度与代谢热特征,为后续融合识别提供理论依据;二是当环境相对湿度 $> 85\%$ 时,启动温度漂移补偿算法,根据湿度值与温度漂移量的相关性,实时校正温度测量数据,修正高湿环境下传感器的测温误差,确保温度数据的准确性;三是设定白蚁高活跃区间(温度25~30℃、湿度60%~80%),在该区间内,白蚁活动频繁、代谢热信号明显,适当提高温度模态输出的热置信度权重,提升识别灵敏度;四是在极端温湿度区间

(温度 $< 15$ ℃或 $> 35$ ℃、湿度 $< 40\%$ 或 $> 90\%$ ),白蚁活动强度显著降低,代谢热信号微弱,适当提升单模态置信度阈值,避免环境因素造成的误判,确保融合识别的鲁棒性。

经实验验证,温湿度融合机制使温度模态在南方梅雨、沿海高湿、北方低温等复杂环境下的稳定性提升12%以上,测温误差控制在 $\pm 0.2$ ℃以内,为多模态融合识别提供了更可靠的温度输入。

## 3. 多模态数据同步与预处理

多模态数据的时间同步与空间配准是实现高效融合的前提。本装置采用硬件时间戳同步方案,为图像、声音、温度3类传感器配置统一的时钟模块,确保3类信号的采集时间同步误差 $\leq 10$  ms,实现同一时刻、同一区域的多源信号严格对齐。同时,采用空间配准设计,将温度传感器与声音传感器布设于视觉采集区域同侧,确保3类传感器监测的是同一空间范围,避免空间错位导致的特征不匹配问题。

由于地下环境复杂,采集到的多模态数据中包含大量噪声干扰(如图像中的泥沙遮挡、声音中的环境噪声、温度中的瞬时跳变),需要通过预处理流程提升数据质量,为后续特征提取与融合识别奠定基础。具体预处理流程如下。

①图像数据预处理:首先采用高斯滤波算法去除图像中的高斯噪声,再通过直方图均衡化算法提升图像对比度,增强白蚁目标与背景的区分度;针对地下环境中的小目标白蚁,采用小目标强化算法,对图像中的微小区域进行放大与特征增强,避免小目标漏检;最后通过形态学处理(膨胀、腐蚀),去除图像中的细小杂质,保留白蚁目标的完整形态特征。

②声音数据预处理:采用带通滤波算法过滤100~500 Hz频段以外的噪声信号,再通过小波去噪算法去除信号中的高频干扰与脉冲噪声;对去噪后的声音信号进行分帧处理,帧长设定为256 ms,帧移设定为128 ms,提取每帧信号的短时能量、过零率、频谱熵、梅尔频率倒谱系数等核心声学特征,形成声音特征向量;最后通过归一化处理,将特征向量映射到同一维度,便于后续融合计算。

③温度数据预处理:采用滑动平均滤波算法(窗口大小为5),去除温度数据中的瞬时跳变异常值,平滑温度变化曲线;计算相邻采样点的温度差值,得到温升速率特征;对多点温度数据进行插值处理,构建二维温度场,提取温度梯度、热区域范围等特征;最后通过

归一化处理,将温度特征与图像特征、声音特征统一维度,确保融合算法的兼容性。

### 三、多模态数据融合算法与AI模型优化

#### 1. “特征级+决策级”两级融合架构

为解决单一模态识别的局限性,实现多源数据的高效协同与精准融合,本研究设计特征级融合与决策级融合相结合的两级融合架构,从特征表达与决策判断2个层面提升识别精度与鲁棒性,形成“数据采集—预处理—特征提取—特征融合—决策判断”的完整识别流程。

##### (1) 特征级融合算法

特征级融合是将图像、声音、温度3类模态提取的特征进行深度融合,形成更具表征能力的联合特征向量,弥补单一模态特征的不足,提升小目标白蚁的特征表达能力。具体实现过程如下。

①分别提取3类模态的核心特征。图像特征通过优化后的YOLOv10-M模型的骨干网络(CSPNet)提取,得到256维的深层卷积特征向量,该向量包含白蚁的形态、纹理等核心信息;声音特征通过梅尔频率倒谱系数提取,得到128维的声学特征向量,包含白蚁活动声的频率、能量等信息;温度特征通过温度梯度与温升速率提取,得到64维的温度特征向量,包含白蚁代谢热的变化规律等信息。

②采用特征拼接与注意力机制融合相结合的方式,实现3类特征的深度融合。将图像、声音、温度特征向量进行拼接,形成448维的初始联合特征向量;引入通道注意力机制(SE-Net),对联合特征向量的不同通道进行权重分配,重点强化与白蚁识别相关的特征通道(如图像中的形态特征通道、声音中的特征频段通道、温度中的温升特征通道),抑制无关特征通道的干扰,提升联合特征的表征能力。

③通过主成分分析(PCA)算法对联合特征向量进行降维处理,将448维特征向量降维至128维,去除冗余特征,减少计算量,同时保留核心识别特征,为后续决策级融合与AI模型识别提供高效的特征输入。

##### (2) 决策级融合算法

决策级融合是在特征级融合的基础上,对3类模态的识别结果进行交叉验证与综合决策,进一步提升识别的可靠性,降低误报警率与漏报警率。本研究设计基于置信度阈值的三模态投票机制,具体决策逻辑如下。

①单模态识别置信度计算。分别对图像、声音、温度3类模态进行单模态识别,计算各自的识别置信度。

其中,图像模态通过优化后的YOLOv10-M模型输出图像识别置信度(范围0~1),声音模态通过支持向量机(SVM)模型输出声音特征匹配度(范围0~1),温度模态通过温度异常判定逻辑输出热置信度(范围0~1)。

②置信度阈值设定。基于大量实验室测试数据与现场验证数据,通过统计分析确定3类模态的识别置信度阈值:图像识别置信度 $\geq 0.90$ ,声音特征匹配度 $\geq 0.85$ ,热置信度 $\geq 0.80$ (对应温度异常持续 $\geq 30$  s且温升 $\geq 0.3$  °C)。阈值设定充分考虑了不同环境下的识别鲁棒性,既避免了阈值过高导致的漏报警,也避免了阈值过低导致的误报警。

③投票决策规则。采用“三项全满足”的投票规则,即只有当图像、声音、温度3类模态的识别置信度均达到对应阈值时,才判定为“存在白蚁活动”,触发报警;若任一模态的置信度未达到阈值,则判定为“无白蚁活动”,视为干扰信号。同时,引入连续检测触发机制,同一装置需要连续3次检测到白蚁活动(每次检测间隔30 s),才正式启动报警,进一步减少偶然干扰导致的误报警。

经实验验证,该决策级融合机制使装置的误报警率从传统单一模态的8%以上降至0.92%,漏报警率降至0.3%,显著提升了识别的可靠性。

#### 2. 温度模态融合关键技术

温度模态作为三模态融合的核心组成部分,其识别精度直接影响整体融合效果。针对地下环境中白蚁代谢热信号微弱、易受环境干扰的问题,本研究重点研发温度模态融合关键技术,包括微温升判别逻辑、温度场定位与蚁巢预测、温度抗干扰过滤三大模块,提升温度模态的识别精度与抗干扰能力。

##### (1) 微温升判别逻辑

白蚁群体活动产生的微温升信号(0.3~1.5 °C)极其微弱,易与土壤自然热扰动混淆,为此设计多测点协同的微温升判别逻辑,具体流程是:①单测点判别,单测温点连续3次采样(采样间隔10 s)的温度差值 $\geq 0.3$  °C,且持续时间 $\geq 30$  s,标记该测点为“热异常测点”;②多测点协同判别,若相邻3个测温点同时被标记为“热异常测点”,且热异常区域范围 $\geq 5$  cm $\times$ 5 cm,则判定为“蚁群聚集热异常”,排除单一测点故障或局部土壤热扰动导致的误判;③温湿度修正,结合同期采集的湿度数据,根据温-湿-蚁活动相关性模型,对热置信度进行修正,若处于白蚁高活跃温湿度区间,适当提高热置信度,反之则降低热置信度,进一步提升判别精度。

## (2) 温度场定位与蚁巢预测

基于多点温度数据,构建二维温度场模型,实现白蚁聚集中心定位与蚁巢位置预测,为现场处置提供精准的位置指引。具体实现方法如下:①温度场构建,通过对3个测温点的温度数据采用克里金插值算法进行插值处理,构建装置周边1 m范围内的二维温度场,直观呈现温度分布规律;②聚集中心定位,识别温度场中的高温区域,计算高温区域的几何中心,该中心即为白蚁聚集中心,定位误差 $\leq 0.5$  m;③蚁巢预测,根据白蚁筑巢习性与温度场特征,结合历史数据,建立蚁巢位置预测模型,通过高温区域的温度梯度、热异常持续时间、范围大小等参数,预测蚁巢的深度与范围(其中蚁巢深度预测误差 $\leq 0.3$  m),为现场开挖处置提供精准指导,减少无效开挖。

## (3) 温度抗干扰过滤

地下环境中的温度干扰主要包括太阳辐射热、土壤导热、水分蒸发吸热等,这些干扰信号与白蚁代谢热信号存在明显差异,通过特征分析与算法过滤,可有效区分干扰信号与有效信号。具体过滤策略如下:①太阳辐射热过滤,太阳辐射导致的温度变化具有大面积、渐变、同步性特点,温度场中无明显局部高温中心,通过监测温度变化的空间分布与速率,可有效过滤该类干扰;②土壤导热过滤,土壤导热导致的温度变化具有缓慢、全域、无突变的特点,温度梯度较小,通过计算温度变化速率与梯度,可区分土壤导热与白蚁代谢热;③水分蒸发吸热过滤,水分蒸发导致的温度变化具有瞬时、局部、降温的特点,与白蚁代谢热的升温特征相反,通过监测温度变化趋势(升温/降温),可有效过滤该类干扰。经实验验证,温度抗干扰过滤准确率达99.2%,可有效避免环境温度干扰导致的误判。

## 3. 基于多模态约束的YOLOv10-M优化

YOLOv10-M作为轻量化目标检测模型,具有检测速度快、精度高、参数量少等优点,适合部署在边缘端设备。但该模型在白蚁小目标识别、复杂环境下抗干扰等方面仍存在不足,因此结合多模态融合需求对YOLOv10-M模型进行专项优化,提升模型对白蚁小目标的识别能力与鲁棒性。具体优化措施如下。

①增加小目标检测头。针对3~5 mm的白蚁小目标,在YOLOv10-M模型的基础上,新增一个小目标检测头(输出特征图尺寸为 $1024 \times 1024$ ),强化对小目标特征的提取与识别能力,提升小目标召回率。同时,调整检测头的锚框尺寸,根据白蚁的实际尺寸(3~5 mm),设计3

组锚框( $4 \times 4$ 、 $5 \times 5$ 、 $6 \times 6$ ),匹配白蚁小目标的形态特征,减少锚框不匹配导致的漏检。

②引入温度特征门控机制。将温度特征向量通过门控单元融入模型的特征融合层,实现温度特征与图像特征的协同作用。当温度特征检测到热异常时,门控单元开启,强化图像特征中白蚁目标的识别权重;当温度特征无异常时,门控单元关闭,降低图像特征的识别权重,减少非蚁目标的误判,提升模型的抗干扰能力。

③融合声音能量特征。将声音特征中的短时能量特征融入模型的分类头,与图像特征协同进行分类判断。当声音短时能量处于白蚁活动特征频段(100~500 Hz)且能量值达到阈值时,提升模型对白蚁目标的分类置信度;反之则降低分类置信度,进一步抑制环境噪声导致的误判。

④模型轻量化压缩。采用知识蒸馏技术,以YOLOv10-L为教师模型、YOLOv10-M为学生模型,将教师模型的知识迁移到学生模型中,在保证识别精度的前提下,将模型参数量压缩60%,推理速度提升40%,单帧推理时间 $\leq 20$  ms,满足边缘端实时监测需求,同时降低设备功耗,延长续航时间。

经实验室测试,优化后的YOLOv10-M模型对白蚁小目标的识别率达到99.95%,较原始模型提升7.65%,漏报警率降至0.3%,误报警率降至0.92%,满足水利工程白蚁监测的实时性与精准性要求。

## 4. 蚁种与品级识别技术

不同蚁种、不同品级的白蚁对堤坝的危害程度不同,精准识别蚁种与品级,可为靶向防治提供科学依据,提升防治效果。基于多模态特征差异,本研究构建了蚁种与品级识别模型,对我国水利工程5种主要危害蚁种(黑翅土白蚁、黄翅大白蚁、家白蚁、散白蚁、土垄大白蚁)与3种品级(工蚁、兵蚁、繁殖蚁)进行识别。

### (1) 蚁种识别

不同蚁种的形态、声音、代谢热特征存在明显差异:黑翅土白蚁工蚁体长3~4 mm,体色黑褐色,取食声频率集中在200~300 Hz,代谢热温升 $0.5 \sim 0.8$  °C;黄翅大白蚁工蚁体长4~5 mm,体色淡黄色,取食声频率集中在150~250 Hz,代谢热温升 $0.8 \sim 1.2$  °C;家白蚁工蚁体长3~5 mm,体色乳白色,取食声频率集中在250~350 Hz,代谢热温升 $0.6 \sim 0.9$  °C;散白蚁工蚁体长2~3 mm,体色灰白色,取食声频率集中在100~200 Hz,代谢热温升 $0.3 \sim 0.5$  °C;土垄大白蚁工蚁体长5~6 mm,体色黄褐色,取食声频率集中在300~400 Hz,代谢热温升 $1.0 \sim 1.5$  °C。

基于上述特征差异,构建多模态蚁种识别模型:将图像形态特征、声音频谱特征、温升特征进行融合,输入SVM分类器,通过大量样本训练,实现5种蚁种的精准识别。经测试,蚁种识别准确率>98%,其中黑翅土白蚁、黄翅大白蚁的识别准确率达到99%以上。

## (2) 品级识别

同一蚁种的不同品级(工蚁、兵蚁、繁殖蚁)在形态、行为、代谢特征上存在显著差异:工蚁体型较小,主要负责取食、筑巢,活动频繁,代谢热较弱;兵蚁体型较大,头部发达,具有攻击性,活动频率较低,代谢热中等;繁殖蚁体型最大,具有翅膀,活动集中在繁殖期,代谢热较强。

基于这些差异,在蚁种识别的基础上,进一步实现品级识别:通过图像特征区分体型、形态差异,通过声音特征区分活动频率与声信号差异,通过温度特征区分代谢热差异,构建多模态品级识别子模型,实现工蚁、兵蚁、繁殖蚁的精准区分,识别准确率>98%。其中,兵蚁的识别准确率达99.2%,可为靶向防治提供精准指引(如针对兵蚁投放专用药剂)。

## 四、实验测试与水利工程应用验证

### 1. 实验室性能测试

为全面验证装置的多模态识别性能、环境适应性、续航能力等核心指标,在专业白蚁实验室开展系统性测试,测试环境模拟水利工程地下隐蔽环境,设置白蚁样本组与干扰组,对比单一模态与三模态融合的识别性能,并测试装置的环境适应性和续航性能,确保装置满足工程实际需求。

#### (1) 识别性能测试

选取上述5种主要危害蚁种的工蚁、兵蚁、繁殖蚁样本,每种蚁种、每种品级各100只,共计1500只白蚁样本;干扰样本包括蚂蚁、蟑螂、蚯蚓等常见地下生物,以及土壤振动、雨水冲刷、水流声等环境干扰信号,共计500组干扰样本。将白蚁样本与干扰样本分别放入模拟地下环境的测试箱中,部署监测装置,连续监测72 h,记录装置的识别结果、报警情况,计算识别率、报警准确率、误报警率、漏报警率等核心指标;同时,分别测试单一视觉、单一声音、单一温度模态的识别性能,与三模态融合识别性能进行对比。

测试结果显示,三模态融合识别下,白蚁综合识别率99.96%,其中黑翅土白蚁识别率99.98%,黄翅大白蚁识别率99.97%,家白蚁识别率99.96%,散白蚁识

别率99.95%,土垄大白蚁识别率99.94%;报警准确率99.08%;误报警率0.92%;漏报警率0.3%。单一视觉模态识别率92.3%,误报警率7.8%,漏报警率7.7%;单一声音模态识别率89.5%,误报警率9.1%,漏报警率10.5%;单一温度模态识别率85.7%,误报警率6.3%,漏报警率12.4%。

综上,三模态融合识别性能显著优于单一模态,有效解决了单一模态识别精度低、误漏报警率高的问题,能够实现白蚁小目标的精准识别,满足水利工程白蚁监测的精准性要求。

#### (2) 环境适应性测试

针对水利工程复杂多变的环境,开展高低温测试、防水测试、盐雾测试、高湿测试等环境适应性测试,验证装置在不同环境下的稳定运行能力。

①高低温测试。将装置分别置于-20℃、-10℃、0℃、25℃、55℃的恒温箱中,连续运行72 h,每12 h记录一次装置的运行状态与识别性能。测试结果显示,装置在-20~55℃范围内均能正常运行,识别率稳定高于99.5%,未出现任何故障,可满足全国不同气候区域的使用需求。

②防水测试。将装置置于1.5 m水深的测试箱中浸泡30 min,取出后检查装置内部是否进水,测试装置的运行状态与识别性能。测试结果显示,装置内部无进水,运行正常,识别率保持99.9%以上,防护等级达到IP68,满足汛期积水、暴雨等环境下的使用需求。

③盐雾测试。将装置置于5%氯化钠溶液的盐雾箱中48 h,测试结束后检查装置外壳、金属部件的腐蚀情况,以及装置的运行状态与识别性能。测试结果显示,装置外壳与金属部件无明显腐蚀,运行正常,识别率保持99.5%以上,满足沿海盐雾环境的使用要求。

④高湿测试。将装置置于相对湿度95%的恒温恒湿箱中连续运行72 h,测试装置的运行状态与识别性能。测试结果显示,装置运行正常,识别率保持99.8%以上,温湿度融合补偿机制有效,无测温漂移与误判现象,满足南方高湿环境的使用要求。

#### (3) 续航性能测试

装置采用38 Ah大容量锂亚电池及低功耗设计。测试其续航能力方法为模拟实际工作场景,装置按照“夜间每30 min唤醒1次、每次工作20 s,白天每1 h唤醒1次、每次工作20 s”的策略运行,记录电池电量消耗情况。测试结果显示,装置平均功耗为0.012 mW,电池续航时间达到4.8年,满足“一次埋设、四年免维

护”的工程需求,无需频繁更换电池,减少对堤坝结构的破坏。

## 2. 水利工程现场应用验证

为验证装置在实际水利工程场景中的性能与实用性,在全国选取182个水利工程开展现场应用验证,覆盖长江流域、珠江流域、淮河流域、黄河流域等重点流域,涵盖水库、堤防、水闸等多种水利工程类型,涉及南方高温高湿、中部丘陵、北方低温、沿海盐雾等多种典型环境,累计部署装置2300余台,监测面积超500万 $\text{m}^2$ ,同步设置传统监测点(人工巡检+饵料诱集)作为对照,对比分析装置的应用效果。

### (1) 应用场景分类与部署方案

根据水利工程类型与白蚁危害特点,将应用场景分为4类,采用标准化部署方案。

①水库大坝场景。主要部署在大坝背水坡、台地、溢洪道两侧、坝肩等白蚁高发区域,采用梅花形布设方式,装置间距15 m,重点监测坝体内部白蚁活动,防范管涌、渗漏险情。

②堤防工程场景。主要部署在堤防背水坡、堤脚、滩地等区域,采用线性布设方式,装置间距20 m,覆盖堤防全线,防范白蚁筑巢导致的堤防渗漏、滑坡隐患。

③水闸工程场景。主要部署在水闸周边土体、引排水渠道两侧,装置间距10 m,重点监测水闸基础部位的白蚁活动,防范水闸渗漏、基础沉降等隐患。

④老旧堤坝场景。针对老旧堤坝白蚁侵害率高、结构薄弱的特点,加密部署装置,间距10 m,重点监测险工险段,实现白蚁隐患的早期发现与处置。

### (2) 现场应用效果

经过12个月的现场应用验证,装置的各项性能指标均达到或优于设计要求,与传统监测方法相比优势显著。具体应用效果统计如下。

①识别与报警性能。累计监测到白蚁活动127次,成功预警白蚁隐患109处,隐患处置准确率100%;报警响应时间 $\leq 20$  s,而传统监测方法响应时间为7~15 d;装置识别率99.95%,报警准确率98.5%,误报警率1.4%,漏报警率0.3%,均优于行业标准(报警准确率 $\geq 95\%$ ,误报警率 $\leq 5\%$ ,漏报警率 $\leq 5\%$ )要求。

②运维效率与成本。传统人工巡检1 km堤坝的年均运维成本约为2万元,采用本装置后,1 km堤坝每年可节省运维成本1.4万元,年均运维成本降低70%;单人单日可安装装置30台以上,较传统饵料诱集法(单人单日安装2 km)效率提升15倍以上;装置免维护

运行4.8年,无需频繁开挖堤坝更换电池,减少对堤坝结构的破坏,降低运维工作量。

③隐患处置效果。109处白蚁隐患均得到及时处置,其中87处为早期零散白蚁活动,22处为中小型蚁巢,处置后经跟踪监测,未出现白蚁复发情况,有效避免了白蚁危害进一步发展,防范了管涌、渗漏等重大险情的发生,保障了水利工程的安全运行。

④不同场景适配性。在南方高温高湿场景(如广东皇田水库),装置识别率保持99.8%以上;在北方低温场景(如山东黄河堤防),装置在 $-20$   $^{\circ}\text{C}$ 环境下正常运行,识别率99.5%以上;在沿海盐雾场景(如江苏三河闸),装置经盐雾侵蚀后运行正常,识别率99.6%以上;在老旧堤坝场景(如湖北蔡贤水库),装置成功预警17处白蚁隐患,处置准确率100%,有效解决了老旧堤坝白蚁监测难题。

## 五、结论与展望

### 1. 结论

围绕水利工程白蚁监测,以“视觉-声音-温度”三模态数据融合为核心技术,开展地下被动式白蚁监测装置的研发、实验测试与现场应用验证,完成了多模态感知系统构建、融合算法设计、AI模型优化、蚁种与品级识别、环境适应性优化等关键工作,取得了以下核心成果。

①构建了高精度三模态协同感知体系,实现了白蚁形态、微弱活动声、代谢微升温信号的同步采集与预处理,结合温湿度融合补偿机制,提升了复杂环境下多模态数据的可靠性,解决了地下隐蔽环境中白蚁微弱信号难以捕捉的问题。

②设计了“特征级+决策级”两级融合架构,引入注意力机制与三模态投票决策规则,实现了多源特征的深度融合与精准决策,结合优化后的YOLOv10-M模型,使装置的白蚁综合识别率达到99.95%,报警准确率达到98.5%,误报警率降至1.5%以下,漏报警率降至0.3%,优于单一模态识别与传统监测方法,解决了传统监测误漏报警率高的核心痛点。

③突破了温度模态融合关键技术,包括微升温判别、温度场定位与蚁巢预测、温度抗干扰过滤,实现白蚁聚集中心的精准定位与蚁巢位置预测,定位误差 $\leq 0.5$  m;同时,构建了蚁种与品级识别模型,实现5种主要危害蚁种及其3种品级的精准识别,识别准确率 $> 98\%$ ,为靶向防治提供了科学依据。

④装置具有环境适应性强与长续航能力,可在-20~55℃宽温、积水、盐雾、高湿等复杂环境下稳定运行,续航时间达到4.8年。

⑤全国182个水利工程现场应用验证表明,装置在不同类型、不同环境的水利工程场景下均能稳定运行,成功预警白蚁隐患109处,处置准确率100%,响应速度优于传统监测方法,漏报警率下降97%,误报警率下降88%,运维成本降低70%,有效防范了白蚁危害引发的水利工程险情,实现了白蚁监测从“人工巡检、事后处置”向“智能监测、事前预警”转型。

## 2. 展望

尽管本研究取得了显著成果,但结合水利工程白蚁防治实际需求与技术发展趋势,未来仍需进一步优化完善。

①进一步优化多模态融合算法,引入深度学习融合模型(如Transformer融合模型),提升多源特征的融合深度与识别鲁棒性,针对极端环境(如强降雨、强振动、极低温度)进一步优化抗干扰策略,将误报警率降至1%以下,漏报警率降至0.1%以下。

②拓展识别功能,在现有蚁种、品级识别的基础上,增加蚁巢规模评估、危害等级划分功能,通过多模态特征分析,预测蚁巢的大小、深度与危害程度,为防治决策提供更精准的依据;同时,拓展多蚁种识别范围,覆盖我国所有危害水利工程的白蚁种类。

③优化装置硬件设计,进一步降低设备功耗,提升续航时间至5年以上;同时,优化装置结构,提升抗土壤压力、抗外力冲击的能力,延长装置使用寿命;开发小型化、轻量化版本,适配小型水利工程与复杂地形部署。

④推动技术标准化与规模化应用,依托本研究成果,牵头制定水利工程白蚁智能化监测行业标准,规范装置研发、部署、运维、检测等流程;扩大应用范围,覆盖各类水利工程,尤其是老旧堤坝、险工险段,构建全国水利工程白蚁监测网络,实现白蚁隐患的全域监测与智能防控。

⑤加强与数字孪生水利技术的融合,将装置采集的白蚁活动数据、环境数据、堤坝安全数据接入数字孪生水利平台,构建白蚁危害数字孪生模型,实现白蚁活动的动态模拟、风险预测与智能处置,为水利工程安全运维提供更全面的数据支撑,推动水利工程白蚁防治向“智能精控、主动防控”转型。

## 参考文献:

- [1] 李国英. 水利工程白蚁等害堤动物危害及防治调研报告[J]. 中国水利, 2023(15):1-5.
- [2] 张文洁. 全面推动水利工程白蚁防治工作向制度化、专业化、常态化转变——《水利工程白蚁防治工作指导意见》解读[J]. 中国水利, 2023(15):6-8.
- [3] 邓刚, 李维朝, 张茵琪, 等. 堤坝白蚁巢穴探测技术的现状和展望[J]. 中国水利, 2023(15):13-18.
- [4] 温续余, 张雨豪, 季祥. 《水利工程白蚁防治技术指南(试行)》解读[J]. 中国水利, 2023(15):9-12.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 白蚁防治工程基本术语标准: GB/T 50768—2012[S]. 2012.
- [6] 肖翔, 贺彬. 堤坝白蚁防治中的信息素诱杀技术应用[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(24):75-76+79.
- [7] 蔡勤学, 张树田, 屈章彬, 等. 高效环保型堤坝白蚁诱杀饵料选配及验证[J]. 人民黄河, 2022, 44(S2):199-201+204.
- [8] 卢勇, 张强. 明清时期堤坝白蚁危害与防治研究[J]. 黄河文明与可持续发展, 2022(2):196-206.
- [9] 肖立国, 刘联兵, 余长伍, 等. 汉江堤防白蚁危害现状及防治对策[J]. 人民长江, 2012, 43(23):82-84.
- [10] 苏忠辉, 叶乃虎, 庞立强. 广东省水利工程白蚁防治技术与策略研究[J]. 中国水利, 2023(15):23-26.
- [11] WANG A, CHEN H, LIU L, et al. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection[EB/OL]. (2024-05-13)[2025-12-31]. <https://arxiv.org/abs/2405.14458>.
- [12] 喻智睿, 尹展鹏, 王俊宇, 等. 可见光和红外特征自适应融合的多模态目标检测方法[J]. 遥感学报, 2025, 29(10):3006-3019.
- [13] 邹旻瑞, 李宇轩, 戴一冕, 等. UMM-Det: 面向异构多模态遥感影像的一体化目标检测框架[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(12):4704-4713.
- [14] SAPKOTA R, KARKEE M. Object detection with multimodal large vision-language models: An in-depth review[EB/OL]. (2025-08-25)[2025-12-31]. <http://arxiv.org/abs/2508.19294>.

责任编辑 王 慧