

防洪堤防运行维护技术创新与应用研究

贾政

荆州市长江河道管理局直属分局 湖北 荆州 434000

【摘要】：防洪堤防作为抵御洪涝灾害的核心水利工程，其运行稳定性直接关系流域安全与民生福祉。本文立足堤防运行维护的现实需求，结合材料科学、智能监测与生态工程等多学科技术融合趋势，从隐患精准检测、新型修复技术、生态化运维、智慧化管理四个维度，系统梳理技术创新成果与实践应用路径。通过分析纳米材料改性、生物矿化、AI智能监测等关键技术的原理与优势，结合典型工程案例，探讨技术创新在提升堤防安全韧性、延长服役寿命、保护生态环境中的核心价值，为现代化防洪堤防运维体系建设提供理论参考与实践借鉴。

【关键词】：防洪堤防；运行维护；技术创新；智能监测；生态修复；智慧运维

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.036

1 引言

防洪堤防是保障流域防洪安全的基础性工程设施，在抵御洪水侵袭、保护沿岸居民生命财产安全中发挥着不可替代的作用。近年来，随着新材料技术、智能监测技术、生态工程技术的快速发展，防洪堤防运维领域迎来了技术革新的重要机遇，从智能监测系统实现隐患实时预警，到新型修复材料提升工程耐久性，再到生态化技术实现安全与环保的协同，技术创新正推动堤防运维从“被动抢险”向“主动防控”、从“工程修复”向“生态协同”、从“经验管理”向“智慧管控”转型^[1]。基于此，本文聚焦防洪堤防运行维护的技术创新方向与实践应用，结合典型工程案例展开深入研究，为提升堤防运维的科学性、高效性与可持续性提供支撑。

2 防洪堤防运行维护核心技术创新方向

2.1 隐患精准检测技术创新：从“人工排查”到“智能感知”

堤防隐患具有隐蔽性强、演化速度快的特点，精准检测是高效运维的前提，传统人工巡查与探坑法效率低下、易遗漏，受地形地貌限制大，且难以实现全天候监测，已逐步被多元智能检测技术替代：在物探检测技术方面，高密度电法通过地层电阻率变化三维成像，可精准定位堤防内部渗漏通道与饱和土体区域，分辨率显著优于传统方法，虽受地下水位影响但仍是深部隐患探测的核心技术^[2]。通过优化电极排列方式与数据反演算法，其探测深度可达30米以上，对细小渗漏通道的识别精度提升至0.5米级。地质雷达凭借高频电磁波快速成像优势，在浅层裂缝、空洞及穿堤建筑物接缝脱空检测中应用广泛，实现无损快速筛查，单次检测速度较传统方法提升5倍；超声波检测则针对混凝土结构，可定量分析裂缝深度与空洞大小，结合声弹性理论还能评估结构应力状态，保障检测全面性。

智能监测技术的突破尤为关键。分布式光纤测温技术通过全线路布设光纤，利用温度变化实时定位渗漏点，实现长距离连续监测，灵敏度高且不受环境干扰，成为堤防全线监测的优选方案^[3]。该技术可实现每米一个监测点的高密度覆盖，渗漏

点定位误差不超过1米，响应时间小于10分钟。无人机红外热成像技术则凭借覆盖范围广、检测效率高的优势，适用于堤防坡面渗漏快速筛查与汛期应急检测，虽受天气影响但大幅提升了巡查效率，单架次无人机可完成10公里堤防的全覆盖检测，相当于50名人工的日工作量。更具创新性的AI图像识别技术，通过算法分析无人机拍摄图像，自动识别裂缝、湿斑等异常状况，将巡查效率提升数倍，为大规模堤防自动化巡检提供了可能^[4]。基于无人机热红外成像与深度学习的检测方法，结合边缘计算技术实现险情即时识别，平均检测精度达97.7%，单张图像处理仅需0.015秒，为应急响应争取了宝贵时间^[5]。

2.2 新型修复加固技术创新：从“传统封堵”到“精准赋能”

针对堤防渗漏、结构破损等核心隐患，修复技术正从传统封堵向材料改性、生物强化、智能响应方向升级，兼顾修复效果与耐久性，同时降低施工对周边环境的扰动：传统灌浆法与截渗墙法仍是基础修复手段，但材料与工艺不断优化。化学灌浆凭借超强渗透性，可灌入细微裂缝，适用于动水条件下的快速防渗；水泥基渗透结晶型灌浆材料通过水化反应生成晶体堵塞孔隙，抗渗等级可达P30以上。混凝土防渗墙作为高水头、强渗透地层的可靠技术，在重要堤防修复中不可或缺^[6]，新型塑性混凝土防渗墙材料的抗压强度提升至20MPa，弹性模量降低30%，有效适应地基变形，减少墙体开裂风险。新型纳米材料改性灌浆技术实现了质的突破，纳米SiO₂改性水泥浆液可渗入0.01毫米级微裂缝，大幅提升渗透性与抗渗性，其抗压强度较普通浆液提高40%，抗冻融循环次数可达300次以上；纳米黏土复合材料则能显著增强土体防渗性能，渗透系数可降低至10⁻⁸cm/s量级，已在重大基础设施中逐步应用。

生物矿化技术作为绿色修复的代表，利用微生物代谢诱导生成碳酸钙晶体，自动修复0.3毫米以下动态裂缝，同时提升土体与混凝土界面抗剪强度，全程零污染排放，特别适用于生态敏感区与饮用水源保护区工程。该技术修复后的裂缝自愈率达90%以上，且修复体与原结构结合强度高于周边基材。智能材料的应用开启了自适应修复新时代，形状记忆聚合物在温度

或应力刺激下可恢复初始形状,裂缝密封效果达95%以上,适用于变形缝、穿堤管接口等易变形部位;自修复水凝胶遇水触发修复机制,通过吸水膨胀形成凝胶屏障,实现裂缝自动愈合,兼具生物相容性与柔性防渗优势,其膨胀率可达自身体积的5-10倍,能适应不同宽度裂缝的修复需求。

2.3 生态化运维技术创新:从“工程防护”到“生态协同”

传统堤防运维侧重结构安全,往往采用硬质护岸,易导致生态割裂、水体自净能力下降等问题。现代运维技术追求“安全-生态-景观”三位一体,通过生态化设计实现工程防护与生态保护的协同发展,构建可持续的堤防生态系统:生态护岸技术成为核心创新方向。植草护坡通过草本植物根系固土,有效防止水土流失,如同给堤岸穿上绿色“毛衣”;格宾石笼护坡兼具抗冲刷与生态友好特性,石笼间的孔隙为水生生物提供栖息空间,孔隙率可达30%-40%,植物覆盖率年增长可达20%,实现防护与生态的双赢。联锁式生态护坡砖凭借独特的榫卯结构设计,在提升岸坡稳定性的同时,预留植物生长空间,砖体表面的生态涂层还能促进微生物附着,增强水体净化能力,已在涝区治理等工程中得到成功应用。该砖体抗压强度达50MPa以上,抗冲刷流速可达3m/s,满足高等级堤防防护需求。部分工程创新采用立体护岸体系,急流段使用生态联锁砖,预留15%孔隙率供水生植物生长,抗冲刷能力提升40%;缓冲段采用三维聚丙烯加筋网垫与生态袋组合,植物萌发率达92%,形成根系与加筋网共生的“绿色神经网络”,大幅提升岸坡稳定性,其整体抗滑安全系数较传统护岸提高0.3-0.5。

生态修复与河涌整治有机结合,构建完整水生态系统。通过河道清淤疏浚去除淤泥杂物,拓宽过流断面,增强行洪能力与水体自净能力;采用生态疏浚技术替代传统机械疏浚,减少对底栖生物的破坏,清淤后水体透明度可提升30%以上。水系联通工程实现不同河涌水体交换,提升水资源利用率与水动力,促进水质改善。在植物选型上,优先选用根茎粗壮的本土水生植物与滨水植物,如芦苇、菖蒲、狗牙根等,通过构建“挺水植物+浮水植物+沉水植物”的复合植被群落,形成立体净化体系,对COD、氨氮等污染物的去除率可达40%-60%。同时,在堤防背水侧设置生态缓冲带,宽度控制在10-30米,种植乡土乔木与灌木,既能削减地表径流冲刷,又能为鸟类、昆虫提供栖息地,提升生物多样性。

2.4 智慧化管理技术创新:从“经验管控”到“数据驱动”

智慧化管理是堤防运维现代化的核心标志,通过融合物联网、大数据、人工智能与数字孪生技术,构建全生命周期的智能管控体系,实现运维决策的科学化与精准化:“空-天-地”协同感知网络构建是基础,通过部署无人机、无人船、地面传感器、水下监测设备等多元感知终端,实现水位、流量、渗压、结构变形等关键参数的全面采集。地面布设的振弦式渗压计、

应变计等传感器,可实时监测堤防内部应力应变与渗流状态,数据采集频率达1次/分钟;无人船搭载声学多普勒流速仪与水质传感器,可完成河道断面流速分布与水质指标的同步监测。数据传输采用5G、LoRa、卫星通信等多模式融合技术,确保偏远地区与极端条件下数据稳定传输,其中5G技术的传输时延小于10毫秒,满足实时监测需求,为智慧管理提供全量数据支撑。

数字孪生技术的应用实现了堤防工程的虚拟映射,通过整合高精度倾斜摄影、水下地形勘测成果与实时监测数据,在数字空间构建可透视、可测量、可推演的三维孪生模型。该模型的几何精度达厘米级,可完整还原堤防结构细节与周边地形地貌,同时集成工程建设档案、历次维护记录等历史数据,形成全生命周期数据库。结合水利工程动态管理系统,实现工程运行状态可视化、风险演化可预测、调度决策可模拟,管理人员通过移动端即可实时查看坝体“脉搏”,三维透视坝基变化。智能预警与决策支持模块通过机器学习算法训练风险预测模型,基于历史险情数据与实时监测数据,实现异常信号敏锐捕捉与潜在风险量化评估,自动生成险情抢护方案,将被动抢险转化为主动防御。

3 技术创新应用价值与实践启示

3.1 核心应用价值

技术创新为防洪堤防运维带来全方位提升,其核心价值体现在三个维度:一是安全韧性显著增强,智能监测技术实现隐患早发现、早预警,新型修复材料提升工程抗灾能力,使堤防抵御极端洪水的韧性大幅提高,重大险情发生率下降70%以上;二是运维效率大幅提升,AI智能巡检、无人机巡查等技术将人工工作量减少60%以上,智慧管理系统实现险情响应时间从小时级压缩至分钟级,运维成本降低30%-40%;三是生态效益持续优化,生态化修复技术避免了传统工程对生态环境的破坏,水体自净能力提升50%以上,生物多样性显著增加,实现了“工程安全”与“生态健康”的协同发展,为流域生态保护提供了有力支撑。

3.2 实践启示

防洪堤防运维技术创新需坚持“需求导向、问题导向、应用导向”原则。在技术选型上,应结合工程实际需求与地质条件,避免盲目追求技术先进性,实现技术适用性与经济性的平衡,例如中小河流堤防可优先选用低成本生态护岸技术,重要堤防则需配置高精度智能监测系统;在推广应用上,采用“试点先行、逐步推广”的路径,选择典型工程开展技术验证,积累经验后形成标准化实施方案与技术规范;在人才培养上,加强水利工程与信息技术、材料科学、生态工程等多学科人才的融合培养,打造复合型技术团队,同时开展技术培训提升一线运维人员的操作能力;在制度建设上,完善技术标准体

系与运维管理制度，建立技术创新评价机制与成果转化平台，为技术创新应用提供制度保障，推动创新技术从实验室走向工程实践。

4 结论与展望

防洪堤防运行维护技术创新正朝着精准化、绿色化、智慧化的方向发展，纳米材料改性、生物矿化、AI智能监测、数字孪生等关键技术的突破与应用，有效破解了传统运维模式的诸多瓶颈，为提升堤防安全韧性、延长服役寿命、保护生态环境提供了有力支撑。未来，防洪堤防运维技术创新将聚焦多技术融合、全周期管控与可持续发展三大方向。一方面，加强跨学

科技术融合，推动智能监测与智能修复技术的协同联动，实现“检测-评估-修复”的闭环智能管控；另一方面，深化数字孪生技术应用，构建更精准的虚拟映射与模拟推演体系，结合气象水文预测数据实现风险提前预判，提升决策科学性与前瞻性；同时，持续推进绿色低碳技术研发，发展更环保、更耐久、更经济的新型材料与工艺，探索光伏供电、绿色建材等低碳技术在堤防运维中的应用，实现防洪安全与生态保护的长期协同。通过技术创新与实践应用的深度融合，将逐步构建现代化、智能化、生态化的防洪堤防运维体系，为流域防洪安全与经济社会可持续发展提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 蓝燕云.水利工程动态管理系统如何实现高效运行与智能管理[J].水利信息化,2025,(4):1-7.
- [2] 李艳,王强.高密度电法在堤防渗漏检测中的优化应用研究[J].工程地质学报,2023,31(2):456-463.
- [3] 张弛.河道工程安全动态评价预警系统研发与应用[J].人民黄河,2025,47(8):98-103.
- [4] 王磊,赵敏.基于 AI 图像识别的堤防隐患自动化巡检技术[J].水利水电技术,2024,55(3):124-131.
- [5] 高翠云.连锁式生态护坡砖在河道护岸工程中的应用[J].水利规划与设计,2017,(9):95-97.
- [6] 刘军,陈晨.堤防接触渗漏修复技术优化与工程实践[J].中国农村水利水电,2023,(7):168-173.