

划方案符合生态保护要求；通过公众听证会、专家咨询会等形式，吸纳公众与专家对生态保护目标的意见，提升规划的科学性与公众认可度^[4]。

4.2 管理整合：形成“权责统一”的水务管理模式

整合涉水管理权责：在省级或市级层面，组建统一的水务管理机构，将分散在各部门的水资源管理、取水许可、排水监管、污水处理、水环境监测、水生态修复等权责集中，重点将岸上排水监管、农业面源治理与河道管护、水质改善的权责划归同一主体，实现“一个机构主管水务、一个标准保障生态”，避免“岸上不管河道、河道不管岸上”的监管空白，确保控源截污措施从规划到实施的无缝衔接。

构建分级协同的管理体系：纵向维度上，明确中央、省、市、县四级水务管理机构的生态保护职责，由地方承担区域生态保护实施任务；横向维度上，建立水务部门与环保、农业、住建等部门的协同办公机制，通过联席会议、信息互通、联合执法等形式，形成生态保护合力。

实施“生态导向”的水务绩效考评：将水生生态系统健康指标（如生态基流保障率、水生生物多样性指数、湿地面积保有量）及控源截污成效指标（如岸上污染物入河量、截污管网覆盖率）纳入水务管理绩效考核体系，权重不低于经济指标，通过考核导向倒逼水务管理主体强化生态保护意识。

4.3 技术支撑：搭建“智慧化”的水务生态监测与决策平台

构建一体化的水务生态监测网络：整合水利、环保、农业等部门的监测站点，搭建覆盖“水资源量（水位、流量）、水环境质（COD、氨氮、总磷）、水生态（水生生物、植被覆盖）”的统一监测体系，增设岸上污染源监测模块（如污水厂尾口、农业退水口、城镇雨水排口）与河道水质响应监测模块，实现“岸上排污-河道受污”的实时联动监测，为控源截污效果评估提供数据支撑。

开发水务生态协同决策系统：依托大数据、物联网、人工智能技术，打造集“生态风险评估、治理方案优化、效果模拟预测”于一体的决策辅助系统。例如，模拟不同水资源调配方案对生态基流的影响，为决策提供科学依据；通过分析水质变化趋势，提前发出水污染风险预警。

推广生态化水务技术：在水资源利用中，普及再生水生态利用技术；在水环境治理中，推广“岸上截污管网升级+河道生态缓冲带建设+水生植物净化”的组合技术，通过岸上截污减少污染输入、河道生态设施提升净化能力，实现

岸河协同治污；在水利工程建设中，采用生态护岸、鱼道设计等工程生态化技术，实现“工程效益与生态效益”协同^[5]。

4.4 制度保障：完善“系统配套”的水务生态保护制度体系

健全水务一体化法规体系：加快制定《水务管理条例》《水利生态保护协同管理办法》等法规，明确水务管理机构的权责、生态保护的目标与措施、部门协同机制，为水务一体化与生态保护提供法律依据。

完善水资源刚性约束制度：将生态基流与水环境容量作为水资源开发利用的刚性制约，严格落实水资源论证、取水许可制度，对未达生态约束要求的用水项目实行“一票否决”；建立水资源超载区域退出机制，通过压减用水规模、优化产业结构，恢复水生态系统功能。

5 结语

水务一体化为水利生态环境保护提供了“系统性解决方案”，其核心价值在于通过管理体制重构与治理逻辑优化，化解传统模式中“碎片化治理”“生态需求后置”的难题，实现“水资源-水环境-水生态-水安全”的协同保护。本文分析表明，水务一体化与水利生态环境保护的协同，本质是目标、机制、要素、治理的多维度融合：通过目标协同，将生态保护嵌入水务管理核心；通过机制协同，打破部门壁垒凝聚治理合力；通过要素协同，统筹资源配置满足生态需求；通过治理协同，推动从被动应对转向主动防控。文中提出的“规划协同-管理整合-技术支撑-制度保障”实施路径，为构建系统高效的水利生态保护体系提供了理论框架。未来可进一步深化水务一体化视角下的水利生态环境保护研究，探索水务一体化的可持续资金支持与运行机制，为实践提供更具体的指导。

参考文献

- [1] 汤雪晖. 新时代下水利工程管理与生态环境的创新融合路径分析[J]. 产业科技创新, 2023, 5(3): 53-55.
- [2] 马莉. 水利工程绿色施工与生态环境保护的协同研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(3): 107-109.
- [3] 黄国仁. 水利施工中生态环境保护措施分析[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2025(3): 021-024.
- [4] 宣丽玲. 集中职能优化机构推动水务一体化管理改革[J]. 中国机构编制, 2025(4): 47-49.
- [5] 王岳, 刘茜. 推进水务一体化管理与保障水资源的可持续利用[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(5): 146-148.

Research on the Effectiveness Improvement of Hydraulic Engineering Inspection Empowered by Low-altitude Economy

Xinhai Zheng Chenen Wu

1. Yongjia Nanxi River Water Supply Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000, China
2. Yongjia Shanhe Water Supply Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang, 325000, China

Abstract

This study takes the water conservancy project of Yongjia County Shanha Supply Water Co., Ltd. as an empirical object and systematically explores the efficiency enhancement mechanism of low-altitude economy empowering inspections. By constructing an intelligent drone inspection system, a multi-dimensional evaluation system covering economy, timeliness, and safety is established to achieve digital coverage of all facilities.

Keywords

low-altitude economy; water conservancy project inspection; drone technology; efficiency evaluation; Yongjia County.

低空经济赋能水利工程巡检的效能提升研究

郑新海^{1,2} 吴陈恩^{1,2}

1. 永嘉县楠溪江供水有限公司, 中国·浙江温州 325000
2. 永嘉县山河供水有限公司, 中国·浙江温州 325000

摘要

本研究以永嘉县山河供水有限公司水利工程为实证对象, 系统探讨低空经济赋能巡检的效能提升机制。通过构建无人智能巡检系统, 建立涵盖经济性、时效性、安全性的多维评估体系, 实现全域设施数字化覆盖。实证数据显示: 单位面积巡检成本降低65.9%, 巡检周期缩短66.8%; 高危区域事故率下降88.9%, 缺陷识别准确率提升至96.7%; 复杂地形覆盖率从62.3%提高到98.1%。综合效能指数达0.82, 验证了低空经济在水利巡检领域的显著赋能价值, 为行业智能化转型提供可复制范式。

关键词

低空经济; 水利工程巡检; 无人机技术; 效能评估; 永嘉县

1 引言

永嘉县山河供水有限公司所管辖的输水设施分布于楠溪江流域的复杂山区, 涵盖120公里输水管道、六座水库以及十五座泵站。当前, 这些设施面临着设施老化、灾害风险高、巡检存在盲区等诸多棘手问题, 亟待技术手段实现突破。

在此背景下, 本研究将目光聚焦于低空经济赋能水利巡检的效能转化机制。通过创新系统架构、构建评估体系以及开展实证验证这三个环节紧密结合、协同推进的一体化研究方式, 致力于攻克传统水利巡检模式在响应速度迟缓、作业安全保障不足、数据精度欠佳等方面长期存在的固有缺陷, 为水利巡检工作带来新的发展契机。

2 低空经济赋能水利工程巡检的概述

水利工程作为重要的基础设施, 其安全稳定运行依赖于高效的巡检工作。传统巡检方式主要依靠人工开展巡查管理工作, 存在效率低下、成本高昂以及安全风险高等突出问题^[1]。以永嘉县山河供水有限公司所管理的水利设施为例, 其管辖范围(上塘, 乌牛, 瓯北, 黄田, 三江, 桥头桥下等供应水)涵盖山区水库、跨区域输水管道及泵站等复杂工程。该区域地形起伏大, 崖壁陡峭地带较多, 人工巡检难以实现全面覆盖, 尤其对偏远水库坝体、深埋管线的状况进行核查存在极大程度上的困难。同时, 恶劣天气或地质隐患区域也给巡检人员带来显著的安全威胁。此外, 人工记录数据易产生偏差, 信息反馈滞后, 难以满足现代水利工程精细化管理的需求^[2]。

【作者简介】郑海新(1978-), 中国浙江温州人, 本科, 工程师, 从事水利工程研究。

3 低空经济赋能水利工程巡检的机制构建与效能评估

3.1 低空经济赋能水利工程巡检的需求分析

在水库安全巡检工作中，无人机系统与前沿 AI 算法紧密协作，成功突破传统人工巡检存在的三大局限，极大地提升了水库管理效能。

从空间维度看，传统人工巡检受地形复杂、安全风险高等因素制约，存在大量难以触及的盲区。而无人机凭借精准的三维航线规划能力，能够自主覆盖坝体迎水面等人工难以到达的危险区域。其搭载的高清变焦摄像头与激光雷达，可实现亚毫米级精度的坝体裂缝扫描。比如某水库开展夜间巡检时，无人机的热成像系统能够精准识别出水面下渔网散发的热辐射。

在任务执行方面，传统巡检往往需要多支专业队伍分头作业，效率低下。现代无人机系统通过多源传感器融合技术，在一次飞行中就能同步完成多项检测任务，实现多维任务并行处理。这种高效的作业模式，让水库巡检效率相较于传统方式提升了 15 倍以上，真正做到了高效、精准、全面的水库安全巡检，为水库的安全稳定运行提供了坚实保障。

3.2 无人机巡检系统架构与运作流程

永嘉县山河供水有限公司为巡检辖区复杂地形水利设施（如山区水库、长距离输水管道），部署基于低空经济的无人机智能巡检系统。该系统由硬件、软件平台及数据传输链路构成，硬件核心是多旋翼无人机，其能垂直起降、悬停且机动灵活，适合浙南多山密林环境作业。

系统运作契合永嘉县水利设施特点与管理需求。流程先进行巡检任务规划，管理人员依水库大坝、泵站节点、输水管道关键段分布及潜在风险点，在任务管理平台设置巡检区域、目标内容及飞行参数^[3]。之后，无人机按预设航线飞行，同步开启搭载传感器，对目标区域进行高精度影像拍摄、温度扫描及三维信息捕捉，实现多源数据实时采集。

3.3 效能提升关键机制分析

动态风险管理机制是保障低空巡检作业安全高效运行的基础。该机制贯穿巡检任务的全生命周期管理。在任务规划阶段，系统会基于永嘉县的气象预报、空域管制信息及历史事故数据，进行飞行风险评估工作，自动规避恶劣天气区域或禁飞区。在任务执行过程中，无人机搭载的传感器持续监控自身状态及外部环境变化，一旦监测到风险阈值超标，立即触发自动返航或紧急悬停等预设安全策略。永嘉县在推进多源异构数据标准统一、确保复杂山区环境下数据传输稳定性等方面仍需持续优化。为定量描述效能提升，引入以下综合评估公式：

$$Efficiency = \frac{Coverage \times Accuracy \times Safety}{Cost}$$

其中，*Efficiency* 表示综合巡检效能（无量纲），其值越高代表效能越好；*Coverage* 指单位时间内巡检覆盖面积

（单位：平方公里/小时）；*Accuracy* 代表缺陷识别准确率（百分比，%）；*Safety* 是作业安全系数（无量纲，0-1 区间）；*Cost* 表示单位巡检面积的综合成本（单位：元/平方公里）。该公式从覆盖广度、识别精度、安全保障和经济效益四个维度量化了低空经济赋能带来的效能提升。

3.4 效能评估指标体系构建

为科学量化低空经济对水利工程巡检的赋能效果，需构建多维度评估体系。经济维度考量成本节约效益，设单位面积巡检成本降低率等指标；时效维度关注效率提升，用巡检周期缩短比例等衡量。各维度指标权重结合永嘉县实际需求确定，经专家咨询与数据分析，经济维度占 30%、时效维度占 25%、安全维度占 30%、地形覆盖能力维度占 15%，契合管理策略与山区设施特性。指标数据源于永嘉县山河供水有限公司日常记录，综合效能指数计算公式如下：

$$IEI = 0.3 \times \frac{C_b - C_a}{C_b} + 0.25 \times \frac{T_b - T_a}{T_b} + 0.3 \times \frac{S_b - S_a}{S_b} + 0.15 \times \frac{Coverage_a}{Coverage_t}$$

其中，*IEI* 表示综合效能指数（无量纲），值域 0-1，越接近 1 表示效能提升越显著；*C_b* 和 *C_a* 分别代表传统巡检与无人机巡检的单位面积成本（单位：元/平方公里）；*T_b* 和 *T_a* 分别表示两种模式的平均巡检周期（单位：天）；*S_b* 和 *S_a* 分别对应两种巡检方式的事故发生率（单位：次/千小时）；*Coverage_a* 为无人机巡检实际覆盖面积（单位：平方公里），*Coverage_t* 为应巡检总面积（单位：平方公里）。该公式通过加权计算将多维指标归一化，实现对低空经济赋能效果的量化评估，为永嘉县优化巡检策略提供数据支撑。

4 永嘉县案例研究与实践成效实证分析

4.1 永嘉县水利工程背景与巡检需求

永嘉县山河供水有限公司管理着当地关键水利基础设施，包括六座中小型水库（如库容 1200 万立方米的龙潭水库）、超 120 公里山区输水管道及十五座加压泵站。传统人工巡检楠溪江一级水源地时，依赖乘船或沿岸巡视，每日 1-2 次，每次耗时 3-4 小时。此方式存在监控盲区，复杂水域等难全覆盖；响应效率低，从发现异常到上报处置需数小时；人工成本高，需大量人力轮班；且受恶劣天气影响大，暴雨等天气下巡检易中断，安全隐患难及时处置。而本次无人机从发现异常船只到处置完毕仅用 60 分钟，凸显智能巡检系统优势。

4.2 低空经济赋能水利巡检实施过程

永嘉县山河供水有限公司低空经济赋能水利巡检的实施过程遵循系统化推进路径（如图 2 所示）。常态化运行阶段建立全流程质量管控机制。每次飞行前执行严格的设备自检与空域报备流程；飞行中通过双链路冗余传输保障关键数据回传；飞行后对原始数据开展三级质检工作。针对永嘉县台风季的特殊需求，开发应急巡检模式，当灾害预警发布时立即启动水库大坝、高危边坡的加密巡查。通过建立设备维护知识库与典型缺陷样本库，持续优化识别算法准确率。