

水系维护工程数字水利信息系统的研究

付翔

江西水利职业学院 江西南昌 330100

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17633

[摘要] 为推动水利信息化向智慧水利升级, 解决传统水系维护工程中管理效率低、数据精度不足、可视化程度低等问题, 本研究以江西省某县水系连通及水美乡村建设工程为研究对象, 融合机载激光探测与测距 (LiDAR) 技术、三维地理信息系统 (3D GIS) 及组件式开发技术, 开展水系维护工程数字水利信息系统的设计与应用研究。首先梳理国内外水利信息化研究进展, 明确当前智慧水利建设中存在的理论与实践差距; 随后通过系统需求分析, 解决用户需求表达模糊、变更频繁等关键问题, 构建“数据采集-存储管理-分析决策-监督维护”一体化系统框架, 并完成数据库、用户界面及数字高程模型 (DEM) 生产流程的详细设计; 最终提出分阶段实施计划与预期成果。研究表明, 该系统可突破传统二维 GIS 技术局限, 实现水系维护的可视化管理与精准决策, 降低人力成本与测量误差, 提升水质监测精度, 为该县实现“河畅水清、岸绿景美、人水和谐”的整治目标提供技术支撑, 同时为全国同类水系维护工程的数字化转型提供参考范式。

[关键词] 水系维护工程; 数字水利信息系统; 三维 GIS; 智慧水利

一、引言

水利是国民经济与社会发展的基础性、战略性支撑产业, 随着“国家现代化”战略的推进, “水利现代化”成为重要组成部分, 而“水利信息化”作为水利现代化的基础与先导, 其发展水平直接决定了水利管理的效率与精度^[1]。近年来, 我国先后出台《“十四五”水安全保障规划》《智慧水利建设顶层设计》等政策文件, 2021年全国水利工作会议明确提出“提升智慧水利建设水平”, 要求以新一代信息技术推动水利行业从“传统管理”向“智能管控”转型^[2]。当前, 我国水系维护工程管理仍面临诸多痛点: 一是传统监测依赖人工巡检, 存在人力成本高、覆盖范围有限、实时性差等问题, 难以应对复杂水系的动态变化; 二是现有水利信息系统多基于二维 GIS 开发, 将高程信息作为平面坐标的附属属性, 无法直观再现三维水系空间特征, 导致水流模拟、污染扩散等分析精度不足; 三是部分地区智慧水利建设停留在“信息可视化”层面, 缺乏“拟人智能”的自适应决策能力, 系统可扩展性差, 难以满足个性化水系维护需求^[3]。

二、研究内容与方法

2.1 研究区域与案例选择

本研究选择江西省某县水系连通及水美乡村建设工程作为实践案例, 主要基于以下原因: 一是该县作为南昌市的城市副中心, 是“南昌都市后花园”, 其农村生态环境在南昌市乃至江西省具有代表性, 水系维护直接关系到乡村振兴与

生态宜居建设目标的实现; 二是该县水系属于中小流域, 涵盖河流、池塘、沟渠等多种水体类型, 且存在部分断头河、水流不畅等问题, 亟需通过数字化手段优化水系维护; 三是该县已有一定的水系治理基础, 具备开展数字水利信息系统应用的工程条件与数据储备。

2.2 关键技术体系

机载 LiDAR 技术是一种主动式遥感技术, 通过向目标物体发射激光束, 接收反射信号并计算信号传播时间, 结合全球定位系统 (GPS) 与惯性导航系统 (INS), 可直接获取目标物体的三维坐标 (X、Y、Z)。该技术具有以下优势: 一是采集效率高, 可快速覆盖大范围区域, 尤其适用于山高坡陡、植被茂密、交通不便的水利工程区域; 二是数据精度高, 平面精度可达 0.5m, 高程精度可达 0.15m, 满足水系维护对地形数据的高精度要求; 三是数据维度丰富, 除三维坐标外, 还可获取回波强度信息, 为水体边界识别、植被覆盖度分析提供支撑。在本研究中, 机载 LiDAR 技术主要用于该县水系区域的地形数据采集, 具体流程包括: ①飞行规划: 根据该县水系范围, 确定飞行航线、高度、重叠度等参数; ②数据采集: 通过机载 LiDAR 设备获取点云数据; ③数据预处理: 包括点云去噪 (去除植被、建筑物等非地面点)、点云分类 (区分地面点、水体点、植被点); ④数据转换: 将预处理后的点云数据转换为数字高程模型 (DEM) 与数字正射影像 (DOM), 为后续三维 GIS 建模提供基础数据。

三维 GIS 技术突破了传统二维 GIS 将高程信息作为属性的局限，通过构建三维空间模型，直观再现现实世界的空间关系，其核心优势在于“空间表达的真实性与分析的精准性”。与二维 GIS 相比，三维 GIS 在水系维护中的优势体现在：一是可直观展示水系的三维形态，如河道深度、边坡坡度、堤坝高度等，便于管理人员快速掌握水系特征；二是支持三维空间分析，如水流路径模拟、洪水淹没范围预测、污染物扩散轨迹分析等，为水系维护决策提供科学依据；三是提升用户体验，通过三维可视化界面，降低非专业人员的操作门槛。

本研究采用组件式三维 GIS 开发框架，基于 ArcGIS Engine 或 SuperMap Objects 等组件库，实现三维 GIS 功能的模块化开发。具体包括：①三维场景构建：整合机载 LiDAR 获取的 DEM、DOM 数据，以及水系矢量数据（如河流、池塘边界）、工程设施数据（如堤坝、闸门），构建该县水系三维场景；②空间分析功能开发：实现距离测量、坡度分析、淹没分析、剖面分析等功能；③数据交互功能开发：支持三维场景的旋转、缩放、平移，以及点击查询（如点击某河段查看水质、水位数据）。

组件式开发技术是一种基于“组件复用”的软件开发方法，通过将系统功能拆分为独立的组件（如数据采集组件、分析组件、可视化组件），实现组件的灵活组合与复用。该技术适用于本系统开发的原因在于：一是可提升开发效率，通过复用成熟的 GIS 组件、数据处理组件，减少重复编码；二是增强系统可扩展性，若后续需新增功能（如水质预测模型），仅需开发新组件并接入现有系统，无需重构整体框架；三是降低维护成本，组件的独立性使得故障排查与版本更新更便捷。

本研究采用 C# 语言结合 ArcGIS Engine 组件库，基于 .NET 框架开发系统，具体开发流程包括：①组件划分：将系统划分为数据采集组件、数据存储组件、三维可视化组件、空间分析组件、监督管理组件；②组件开发：针对每个组件，编写核心代码并进行单元测试；③组件集成：通过接口调用实现组件间的协同工作；④系统测试：对集成后的系统进行功能测试与性能测试。

2.3 系统分析阶段

该阶段的核心目标是明确系统需求与可行性，解决“为什么开发”“开发什么”的问题，重点突破需求分析的三大

难点：用户需求表达不清、需求变更频繁、开发人员与用户认知偏差。

采用“实地访谈+问卷调查+文献分析”相结合的方法，调研对象包括该县水利局管理人员、乡镇水利员、当地村民及相关技术人员。调研内容涵盖：水系监测指标（水位、水质、流量）、日常维护任务（巡河、清淤、堤坝检修）、数据查询需求（历史数据、实时数据）、决策支持需求（洪水预警、污染溯源）。通过召开需求评审会，组织用户与开发人员共同梳理需求，形成《需求规格说明书》，明确需求的优先级与验收标准，减少需求变更的频率。从技术、经济、操作三个维度开展可行性分析：技术上，机载 LiDAR、三维 GIS 等技术已成熟，且研究团队具备相关开发经验；经济上，项目经费尚可，可覆盖文献出版、差旅费、劳务费等开支；操作上，系统界面设计遵循“易用性原则”，确保基层管理人员可快速上手。

2.4 系统设计阶段

该阶段将系统分析的“逻辑模型”转换为“物理模型”，分为总体设计与详细设计。

明确系统的架构与功能模块划分。系统采用“B/S（浏览器/服务器）+C/S（客户端/服务器）”混合架构：B/S 架构用于数据查询、报表生成等轻量级功能，支持多终端访问；C/S 架构用于三维场景渲染、大数据分析等重量级功能，确保系统性能。功能模块划分为 5 个核心模块：实现机载 LiDAR 数据、传感器实时数据（水位、水质）、人工巡检数据的接入与预处理。构建分布式数据库，存储地形数据、水文数据、水质数据、工程设施数据，并实现数据的备份与更新；构建该县水系三维场景，支持场景交互与数据可视化展示；提供淹没分析、污染扩散模拟、水资源调度优化等功能；实现巡河任务派发、维护记录管理、问题上报与处理闭环。

聚焦系统的技术细节，确保各模块可落地实现，采用 PostgreSQL 数据库结合 PostGIS 空间扩展，设计数据表结构，包括“地形数据表”（存储 DEM、DOM 数据路径）、“水文实时数据表”（存储水位、流量、水温等实时数据）、“水质数据表”（存储 pH 值、溶解氧、氨氮等指标）、“工程设施数据表”（存储堤坝、闸门的位置与属性）。同时，通过建立索引、数据分区等方式优化数据库性能，解决数据查询效率低。采用“扁平化+轻量化”设计风格，界面布局分为“菜单栏-工具栏-三维场景区-属性面板”四部分。菜单栏包含系

统所有功能入口；工具栏提供常用功能的快捷按钮（如场景旋转、缩放）；三维场景区为核心展示区域；属性面板用于显示选中对象的详细信息（如点击某河段，显示其水质、流量数据）。基于机载 LiDAR 点云数据，通过“点云去噪→地面点分类→TIN建模→栅格化→DEM平滑”五步流程生成DEM，其中点云去噪采用统计滤波算法，地面点分类采用渐进加密三角网算法，确保DEM精度满足水系分析需求。

2.5 系统实施、运行维护与评价阶段

1. 系统实施：包括编程开发与调试。开发人员基于组件式开发技术，按照详细设计文档编写代码，采用“增量开发”模式，先实现核心功能（如数据采集、三维可视化），再逐步完善扩展功能（如决策支持）。调试分为单元调试（组件级）、集成调试（模块级）、系统调试（整体功能），确保系统无功能缺陷与性能瓶颈。

2. 运行维护：系统部署后，建立“定期维护+实时响应”的维护机制：定期（每月）进行数据备份、系统漏洞扫描、性能优化；设立运维热线，实时响应用户反馈的问题（如数据异常、界面卡顿），并根据用户需求变更进行系统迭代更新。

3. 系统评价：由江西水利职业学院、江西省修江水利电力勘察设计有限责任公司共同组成评价小组，从“功能完整性、数据精度、操作便捷性、决策有效性”四个维度开展评价，采用“定量+定性”结合的方法：定量指标包括数据采集精度（如水位测量误差 $\leq 0.05\text{m}$ ）、系统响应时间（如三维场景加载时间 $\leq 3\text{s}$ ）；定性指标通过问卷调查收集用户满意度（目标满意度 $\geq 85\%$ ）。

三、预期技术与经济指标

机载 LiDAR 采集的地形数据平面精度 $\leq 0.5\text{m}$ ，高程精度 $\leq 0.15\text{m}$ ；水质监测数据误差 $\leq 5\%$ ，水位监测误差 $\leq 0.05\text{m}$ ，三维场景加载时间 $\leq 3\text{s}$ ，数据查询响应时间 $\leq 1\text{s}$ ，支持同时在线用户 ≥ 50 人；该县项目区河流纵向连通率 $\geq 0.5\%$ ，无断头河；河流水体透明度 $\geq 50\text{cm}$ ，水质达到IV类以上；构建完善的水质监测系统，实现每月至少1次的水质自动监测与实时预警。通过系统的智能化管理，减少人工巡检频次，预计每年降低人力成本30%-50%；水文数据处理时间缩短50%以上，水系维护任务完成周期缩短40%，减少因管理滞后导致

的工程返工成本；系统助力该县优化水资源配置，提升农业灌溉效率，预计每年为当地农业减少水资源浪费10%-15%，间接提升农业产值。

通过系统的水质监测与污染溯源功能，及时发现并处理生活污染、农业面源污染，减少污染物进入河道与池塘，提升水体自净能力。系统支持水系连通性分析与水流模拟，为江西某县优化水系格局、恢复河湖沟塘水力联系提供科学依据，逐步恢复河湖生态健康。该县作为南昌都市后花园，其生态环境是核心竞争力，系统通过精准的水系维护，助力该县保护生态优势，实现“绿水青山就是金山银山”的转化。

结论

数字水利信息系统通过技术创新与业务融合，正重塑水系维护的管理范式。其核心价值不仅体现在效率提升与成本降低，更在于推动水利治理从被动应对向主动防控的战略转型。未来，随着“四预”功能的深化与数字孪生技术的普及，数字水利将成为保障水安全、支撑可持续发展的关键基础设施。

[参考文献]

[1]任钟刚, 石现春. 数字水利技术在城市河道污染治理工程中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2024, 49(8): 80-85.

[2]刘瑞瑞. 数字孪生技术在水利工程设计中的应用研究[C]//2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛. 黄河口水文水资源勘测局, 2024.

[3]韩小平. 数字化技术在水利水电工程建设中的应用研究[J]. 区域治理, 2024(32): 0193-0195.

[4]付希义, 田亮, 张庆萍, 常红宾, 李双, 吴万兵. 数字孪生技术在水利工程运行维护管理中的应用[J]. 2024.

[5]姜龙, 汝楠, 王坤, 等. 流域水资源管理与调配“预警”方法及应用[J]. 水利水运工程学报, 2025: 1. DOI: 10.12170/20241028001.

作者简介：付翔（1987.11-），男，汉族，江西南昌人，硕士，副教授，研究方向：水工结构工程，水利BIM技术。

本文为：江西省教育厅科技项目“水系维护工程数字水利信息系统的应用研究”（项目编号：GJJ2209103）研究成果。