

万达开地区毗邻灌区智慧水网动态孪生系统构建研究

江虹翰 易汉铭

重庆三峡学院（财经学院）重庆万州 404020

摘要：随着智慧水利技术的发展，水资源管理逐渐向智能化、精准化、实时化方向发展。在极端气候和环境变化的背景下，万达开地区作为川渝灌区规划的典型地域并且面临水资源高效利用和精准调度的需求，智慧水网动态孪生系统作为水资源管理的重要工具，结合物联网、大数据、人工智能等技术，通过实时数据采集与模型预测，能够实现水网的动态监控与智能调度。本文旨在研究并构建万达开地区毗邻灌区的智慧水网动态孪生系统，主要通过引入数字孪生技术、物联网、区块链等现代信息技术的方式，优化跨区域水资源的调度与管理。

关键词：智慧水网；动态孪生系统；跨区域水权交易；灌区管理

引言

随着全球气候变化及人口增长带来的水资源短缺问题，水资源的合理配置与高效利用成为全球面临的重要课题。特别是在农业灌溉领域，如何应对日益复杂的水资源分配需求，并实现智能化、高效化的水利管理，已成为亟待解决的挑战。在我国，水资源的管理常常受到行政区划与区域间治理壁垒的制约，导致灌区水资源配置低效、管理难度大。而万达开地区毗邻的多个灌区，因其地理位置和行政划分的特殊性，面临着水资源调度和协同治理的重大难题。智慧水网利用现代信息技术，如物联网、大数据、人工智能、区块链等，提升水资源的智能调度和管理水平。

一、文献综述

（一）国内研究现状

数字孪生作为实现信息物理融合的重要使能技术，备受各行各业广泛关注。在数字孪生技术理论上，国内学者有着诸多研究，王家相（2025）等学者研究系统梳理了智慧水利及数字孪生流域在顶层设计、政策框架、内涵定义与理论体系等方面的研究进展，详细剖析我国在该领域的发展现状与应用实践成果，涵盖先行先试阶段项目建设的成功经验的同时引入国外最新研究成果，并着重探讨数字孪生流域平台建设的关键技术，为全面理解该领域发展态势提供多维视角。同时国内学者还把

数字孪生技术应用在多个领域上，取得了较好的期望的结果，李亚楠（2020）把数字孪生技术应用于智能网联汽车的道路测试上，他认为数字孪生测试整合传感器仿真、车辆动力学仿真、先进图形处理、交通流仿真、数字仿真及道路建模等多项前沿技术，深度还原道路试验环境。通过嵌入算法构建高度拟真的驾驶场景，并借助通信技术建立虚拟场景与真实场地被测车辆的实时交互通道，从而高效完成自动驾驶汽车的路测工作。国内学者初步探索了水利工程数字化。王建华等（2022）构造了“物理—数字”二元协同模型，验证了数字孪生系统在三峡水利工程调度中的可行性，但该模型尚未实现灌区多源异构数据（气象、土壤、作物生长）的实时融合问题。陶飞（2022）等学者在物理实体、数字孪生模型、数字孪生数据和服务的相关研究工作基础上，进一步探究并丰富了数字孪生五维模型理论体系，为数字孪生的理论研究和应用落地提供系列理论和方法参考。

二、万达开地区毗邻灌区智慧水网动态孪生系统构建现状

（一）万达开地区灌区基本情况

万州大型灌区位于重庆市万州区，灌区总幅员面积达518.55万亩（约合3,457平方公里）。该灌区属于多水源联合灌溉系统，由区内多个中小型水利工程整合而成，于1998年建成。灌区主要采用“蓄、引、提”相结合的灌溉方式，其中以蓄水灌溉为主。设计灌溉面积为56.78万亩，目前有效灌溉面积为49.88万亩，实际灌溉面积达到32.51万亩。达州市是传统的农业大市，其灌区体系规模庞大、基础扎实。全市已建成18个中型灌区，干支渠总长超过1200公里，有效灌溉面积达306.21万

基金项目：该论文由重庆市教育委员会科学技术项目“万达开现代化生态灌区建设与管理新模式研究（KJQN202501211）”资助。

亩。重庆开州区地处三峡库区，其灌区建设呈现出“因地制宜、攻坚克难”的特点，通过持续开展冬春农田水利建设和积极融入区域水网规划，建设水库中型灌区渠道，恢复和改善了数十万亩灌溉面积。

（二）万达开地区智慧水网动态孪生系统构建情况

近年来，在智慧水利与数字孪生技术发展的推动下，万达开地区围绕灌区现代化管理需求，已陆续启动智慧水网及相关信息化平台的建设工作，为动态孪生系统的构建奠定了基础。但目前整体仍处于“局部试点、初步集成”的阶段，尚未形成覆盖全域、全要素、全流程的一体化动态孪生系统。

万州大型灌区作为区域核心灌区，在信息化建设方面起步较早。目前已在部分骨干渠系、重要闸坝及水库布设了水位、流量、视频监控等物联网感知设备，并建立了灌区水量调度信息化平台，实现了主要节点水利工程的远程监测与控制。同时，万州积极探索与气象、农业部门的数据共享，尝试将短期降雨预报用于灌溉计划制定。达州市依托其灌区数量多、规模大的特点，正大力推进现有中型灌区信息化设施的升级与整合。通过实施灌区续建配套与现代化改造项目，部分灌区已建立了独立的自动化控制系统和数据采集网络。市级层面正筹划建设“智慧水利大脑”平台，旨在汇聚各灌区数据，初步实现灌区运行状态的“一张图”可视化展示。开州区结合三峡库区生态保护与农业节水增效的要求，在部分中型灌区开展了以高效节水灌溉为核心的智能化试点。试点区域部署了土壤温湿度传感器、气象站、智能阀门等先进感知与控制设备，并建立了基于作物需水模型的自动灌溉系统。

三、万达开地区毗邻灌区智慧水网动态孪生系统构建问题

（一）多源异构与共享融合难题突出

对于在万达开地区构建灌区水网动态孪生系统，其对数据支撑的全面性、准确性、实时性具有高度依赖性。然而，据调研发现，万达开地区在数据采集、整合与共享方面仍面临系统性瓶颈。该地区当前的感知设备主要集中布设于骨干渠道、重要闸坝和水库等关键工程节点，对于田间尺度、土壤墒情、地下水动态、作物生长状态、水质参数等精细化管理所需数据的监测覆盖严重不足，这样就导致了数据在空间上呈现“线状集中、面状稀疏”的特征，在时间上更新频率低、连续性差，无法满足数字孪生模型对高时空分辨率数据的需求，限制了其对灌区全域、全要素状态的精准刻画能力。

（二）模型精度与系统集成能力不足

现有灌区水网模型多侧重于水力学模拟，而对土壤-植物-大气连续体（SPAC）中水分运移、作物蒸散发动态、水盐运移等复杂生物物理过程的机理融合不足。模型参数往往依赖历史经验或概化取值，未能与实时监测数据进行有效的同化校准，导致模型模拟精度和预测可靠性受限，难以支撑诸如“按需灌溉”、“精准抑盐”等高级别应用。此外，已建的各类信息化平台多为独立建设和运行，系统架构设计时缺乏对开放性和扩展性的充分考虑。API接口不健全、数据服务能力弱、业务逻辑封闭，导致系统间难以实现数据和功能的互联互通。这种“碎片化”状态使得从感知、传输、处理到决策执行的完整闭环难以形成，阻碍了跨工程、跨水源的联合优化调度和“监测-预警-调度-控制”一体化智能链路的实现。

（三）跨区域协同与制度创新滞后

万州、达州、开州分属不同的市级行政单元，在水资源调配、水利工程运行管理、防汛抗旱应急等方面存在行政壁垒。缺乏一个具有足够权威和协调能力的跨区域常设管理机构或高效协商平台，导致在水资源统一调度、利益补偿、责任共担等关键问题上难以达成一致，使得智慧水网系统即使建成，其跨区域优化调度功能也可能因体制机制障碍而无法有效执行。在借助区块链等技术实现透明化水权交易的愿景，但实践层面仍面临基础制度缺失的困境。包括清晰的水权确权登记体系、公平合理的初始水权分配方案、精准可靠的用水计量设施、规范有序的交易规则、以及有效的市场监管机制等均未健全。区块链等技术仅能解决交易过程中的可信问题，无法替代这些基础制度的建设。没有成熟的水市场，水资源通过价格信号进行高效配置的机制就难以运转。

（四）业务融合与人才支撑薄弱

现有许多信息化系统由技术厂商主导开发，对灌区管理单位复杂的业务逻辑、管理习惯和实际痛点理解不够深入。系统功能往往停留在数据展示和远程控制层面，未能深度嵌入到水量分配计划制定、用水统计与核算、水费计收、工程维修养护、防汛应急会商等核心业务流程中，导致系统“实用性”和“粘性”不足，管理人员感觉系统是额外负担而非得力工具。此外，在水源和骨干渠系的宏观调度上以及田间末级的精准灌溉上面联动不足，当前试点多集中于某一端，两者间的智能联动与反馈机制尚未建立。这二者之间的脱节导致了智慧水网的协同优化效益大打折扣，整体水资源利用效率的提升

存在天花板。在人才储备上,智慧水网动态孪生系统的开发、管理和应用需要既精通水利水文专业知识,又掌握大数据、人工智能、物联网等现代信息技术的复合型人才。

四、对策建议

(一) 构建统一标准体系,推动数据融合与共享

针对数据多源异构、共享困难的问题,应制定统一的灌区数据采集、传输、存储与交换标准,推动跨区域、跨部门的数据资源整合。建议由省级水利主管部门牵头,联合气象、农业等部门,制定万达开地区智慧水网数据资源目录与共享规范,明确数据格式、质量、更新频率与接口协议。同时,加大田间、土壤、水质等精细化监测设备的布设密度,构建“空天地”一体化感知网络,提升数据的时空覆盖率和连续性。建设区域级水利数据中台,利用数据清洗、对齐、融合技术,打破“数据烟囱”,形成高质量、标准化的孪生数据资源池,为模型构建与智能决策提供可靠支撑。

(二) 研发高精度耦合模型,建设开放式系统平台

为提升模型精度与系统集成能力,应重点研发融合水力学、农学、气象学等多学科机理的“水文-作物-土壤”耦合模型。通过引入实时监测数据与遥感数据进行动态参数率定与数据同化,提高模型的模拟与预测准确性。在系统架构上,应采用微服务、容器化等开放架构设计,制定统一的系统接口规范与服务标准,推动现有独立平台的功能解耦与能力开放。建设可扩展的“数字孪生底座”,支持模型、算法与应用的灵活集成与迭代升级,最终形成“感知-模拟-决策-控制”一体化的智能闭环,实现从水源到田间的全过程协同优化。

(三) 创新跨区域协同机制,夯实水权交易制度基础

破解行政壁垒,需推动建立由省级层面协调、三省市共同参与的“万达开灌区水资源协同管理委员会”等实体化运作机构,负责统筹规划、调度协调与争议仲裁。同步研究制定跨区域水资源调配补偿办法与应急联动预案。针对水权交易,首要任务是配合国家水权改革方向,协同推进灌区内用水户的水权确权登记,建立精准的计量监测体系。

(四) 深化业务与技术融合,加强复合型人才培养

提升系统实用性,必须坚持“业务驱动、技术赋能”的原则。在系统开发与迭代过程中,建立技术人员与灌区管理人员的常态化沟通机制,通过联合设计、原型试点等方式,将水量调度、用水管理、工程维护、水

费计收等核心业务流程深度嵌入系统功能。特别要注重构建“宏观调度”与“田间灌溉”之间的智能联动与反馈机制,实现全链条优化。人才方面,应实施“内部提升+外部引进”双轮驱动策略,对内开展数字化技能专项培训,对外与高校、科研院所及企业合作,建立人才联合培养与引进机制,打造一支既懂水利业务又掌握信息技术的复合型专业队伍。

结论

万达开地区作为川渝灌区规划的典型区域,其多行政单元交叉、多水源联合灌溉的复杂特征,决定了智慧水网动态孪生系统是破解跨区域水资源高效利用与精准调度难题的关键技术支撑。该系统通过整合物联网、大数据、人工智能、区块链等现代信息技术,构建“物理空间-行政空间-数字空间”三重映射,能够突破传统灌区管理的行政壁垒与技术局限,为水资源全要素监测、全流程智能调度及透明化水权交易提供全新解决方案,对推动区域水利现代化与生态水利建设具有重要示范意义。

当前万达开地区智慧水网动态孪生系统构建仍面临多重挑战:数据层面存在感知覆盖不足与多源异构融合难题,难以形成高质量孪生数据资源池;技术层面缺乏多学科耦合的高精度模型,且现有系统集成能力薄弱,无法实现“监测-预警-调度-控制”一体化闭环;制度层面跨区域协同机制缺失与水权交易基础制度不健全,制约了技术功能的有效落地;保障层面业务与技术融合不深,复合型人才培养不足,影响系统的实用性与持续优化能力。

参考文献

- [1]李亚楠.智能网联汽车数字孪生测试理论和技术研究[D].吉林大学,2020.
- [2]陶飞,马昕,戚庆林,等.数字孪生连接交互理论与关键技术[J].计算机集成制造系统,2023,29(01):1-10.
- [3]季玮,赵志峰,谢天,等.数字孪生智能交通系统的技术内涵与应用展望[C]//中国智能交通协会.第十五届中国智能交通年会科技论文集(2).中国智能交通协会:中国智能交通协会,2020.
- [4]张楚汉,王涛,刘洋.基于“天-空-地”一体化的智慧灌区感知体系设计[J].农业工程学报,2022,38(10):112-120.