

数字化管控支撑水利枢纽灌区水资源精细分配发展对策

熊大辉

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要：本文立足于水利枢纽灌区水资源分配的现实困境，系统分析了数字化管控在提升水资源分配精细程度方面的技术优势与赋能机理，提出了涵盖感知层、传输层、数据层、应用层、决策层的技术体系架构。在此基础上，从健全监测感知网络、构建数字孪生平台、优化调度决策模型、完善配水管理机制、强化制度标准保障等方面，阐述了数字化支撑水资源精细分配的发展对策。研究表明，构建“感知全域化、传输网络化、数据资源化、模型智能化、管控协同化”的数字化管控体系，能够有效提升灌区水资源分配的精准性、时效性和公平性，对于保障粮食安全、促进生态文明建设具有重要的战略意义。

关键词：数字化管控；水利枢纽；灌区；水资源分配；精细化管理

引言

我国作为农业大国，灌区是粮食生产的核心，但长期面临水资源短缺与利用效率低下的双重挑战。水利枢纽灌区作为水源与田间的枢纽，其配水的科学性与精细度直接关乎灌溉保障、作物产量和农民收益。传统分配方式依赖经验，存在信息滞后、预测粗放、计量不准、响应迟缓等问题，难以应对气候变化与多元用水需求。数字化管控融合物联网、大数据、人工智能与数字孪生等技术，可实现对水情、墒情、雨情、工情的实时感知、智能分析与精准调控，推动灌区管理由粗放经验型向精细智能型转型。国家已出台政策推进智慧水利和数字孪生灌区建设，强调构建“四预”（预报、预警、预演、预案）体系。然而，技术集成、数据融合、模型优化与制度协同等难题，仍是实现水资源精细化分配的关键挑战。

1 水利枢纽灌区水资源分配的现实审视

1.1 传统分配模式的主要局限

在传统管理模式，灌区水资源分配主要依靠基层水利员和农民用水户协会的经验判断。信息采集以人工观测和逐级上报为主，数据时效性和准确性难以保证。需水预测多采用定额法或经验系数法，难以反映作物实际耗水动态。配水调度以计划供水为主，灌溉用水过程粗放，斗渠及以下计量设施缺失，用水量难以精确核算。应急响应能力不足，遭遇旱情或工程故障时缺乏快速优化调度手段。灌区管理部门之间信息壁垒突出，数据共享不畅，难以形成决策合力。上述局限导致水资源分配过程中普遍存在上游用水浪费、下游用水紧张、用水纠纷频发、灌溉水利用系数偏低等问题。

1.2 精细分配的内在需求

灌区水资源精细分配的核心内涵是：在空间上精确到每个用水单元，在时间上细化到每个灌溉时段，在作物上精准到不同生育阶段，在效果上实现供水与需水的最优匹配。这要求管理部门能够实时掌握水源来水、渠道水位、闸门开度、田间墒情等动态信息，准确预测未来时段的可供水量和需水量，科学制定不同来水情景下的配水计划，自动执行或远程控制闸门启闭，并对供水效果进行跟踪评估和动态调整^[1]。实现这一目标，离不开数字化管控技术的系统性支撑。精细分配不仅关乎水资源利用效率的提升，更是应对水资源刚性约束、保障灌区可持续发展的必然要求。

2 数字化管控技术体系与赋能逻辑

2.1 数字化管控的核心技术构成

支撑灌区水资源精细分配的数字化管控技术体系主要包括五个层次。感知层：部署水位计、流量计、雨量计、土壤水分传感器、闸位计等智能感知设备，实现来水、输水、配水、用水全过程数据自动采集。传输层：采用物联网通信技术（如NB-IoT、LoRa、4G/5G等）构建全覆盖、低功耗、高可靠的数据传输网络，确保监测数据实时上传和控制指令可靠下达。数据层：建设灌区数据资源中心，整合水情、墒情、雨情、工情、农情、气象等多源数据，形成统一数据底座，提供标准化数据服务。应用层：开发灌区水资源管理信息系统，涵盖需水预测、配水计划、实时调度、水费计收、运行维护等功能模块。决策层：构建水文模型、作物需水模型、水资源优化配置模型和数字孪生平台，支持情景推演和智能决策。

2.2 数字化赋能精细分配的作用机理

数字化技术从信息、模拟、调控、评价四个环节赋

能灌区水资源精细分配。信息赋能：通过自动监测和网络传输，解决“看不远、听不见、报不准”的问题，使管理者能够实时、准确掌握灌区全域的水资源状态。模拟赋能：利用水文模拟和需水预测模型，解决“说不清、判不准”的问题，实现对未来水情和需水趋势的科学预判。调控赋能：通过远程控制和自动调度，解决“管不住、调不灵”的问题，实现配水计划的精准执行和快速响应。评价赋能：利用数据分析和绩效评估，解决“说不明、改不了”的问题，实现对分配效果的量化评估和持续改进。四个环节相互衔接、闭环迭代，推动水资源分配从被动应对走向主动掌控，从静态计划走向动态优化。

3 数字化支撑水资源精细分配的关键策略

3.1 构建全域覆盖的监测感知网络

实现精细分配的前提是“看得清、测得准”。应按照“统一规划、分步实施、标准先行”的原则，构建覆盖水源、骨干渠道、分水口、田间末端的水资源监测感知网络。在枢纽上游布设水文自动监测站，实时获取入库流量、水位、水质等信息。沿干渠、支渠、斗渠分级设置水位和流量监测点，关键节点加装视频监控。在典型田块布设土壤水分传感器和田间水位计，获取作物真实耗水数据。监测设备选型应注重可靠性和适应性，满足野外恶劣环境长期运行要求^[2]。建立感知设备运维管理制度，定期校准维护，保证数据质量。加密监测站点与移动监测手段相结合，对临时或重点区域开展机动监测，弥补固定站点覆盖不足。

3.2 建设数字孪生驱动的决策支持平台

数字孪生技术通过构建灌区物理实体与虚拟模型的实时映射与交互反馈，为水资源精细分配提供全新的决策范式。建设灌区数字孪生平台，集成地理信息系统（GIS）、建筑信息模型（BIM）和实时监测数据，实现灌区地形地貌、渠系网络、水工建筑物、农田分布的三维可视化呈现。耦合水文模型、水动力学模型、作物生长模型和优化算法，构建来水预报、需水预测、配水模拟、调度预演等功能模块。平台应具备“四预”能力：预报来水情势和作物需水趋势，预警干旱风险和工程异常，预演不同调度方案下的供水效果，生成最优预案和应急响应措施。数字孪生平台能够支持管理者在虚拟环境中进行“如果-怎样”分析，降低实地试错的成本和风险。

3.3 建立动态精准的需水预测与配水模型

突破传统定额法经验模式的局限，构建基于遥感反演、实时墒情、气象预报和作物生长模型的动态需水预测模型。利用多源卫星遥感数据反演作物种植结构、面

积和长势，识别实际灌溉面积。融合地面墒情站网数据和气象预报产品，采用彭曼-蒙特斯公式等方法计算参考作物腾发量，结合作物系数和生育期参数，逐日动态估算作物实际耗水量。在此基础上，建立考虑渠系输水损失、土壤入渗和有效降雨的净需水向毛需水转换模型。配水模型应以总供水量为约束，以灌溉保证率最大化、缺水损失最小化、用水公平性最优等为目标，采用线性规划、遗传算法、强化学习等方法求解最优配水方案。模型应支持分级分解功能，从枢纽总出库到干渠分水、再到斗口配水，逐级形成可操作的水量分配指令。

3.4 推进远程自动控制与智能调度

对灌区关键闸门和分水设施实施自动化改造，配备电动启闭机、远程控制单元和闸门开度传感器，实现闸门的远程控制和自动调节。建设闸群联调联动控制系统，根据配水模型输出的调度指令，自动计算各闸门的目标开度和启闭时序，通过闭环反馈控制确保实际流量与目标流量的偏差控制在允许范围内。对于不具备自动控制的渠道，可先期部署水位遥测和手动遥控相结合的半自动方式^[3]。建立异常工况下的应急调度机制，当发生暴雨、溃堤、设备故障等突发事件时，系统能够快速生成应急调度方案并支持一键执行。智能调度系统还应与灌区现有的防汛抗旱、工程管理、安全监测等系统实现数据互通和联动响应。

3.5 深化数据资源的整合共享与挖掘应用

建立灌区数据资源目录和数据标准体系，对分散在水利、农业、气象、自然资源等部门的数据进行汇聚治理，形成标准统一、质量可控、安全可信的数据资源池。数据治理工作包括元数据管理、数据清洗、时空对齐、异常值处理和质量标定等。建设数据共享交换平台，打通各业务系统之间的信息孤岛，实现数据“一次采集、多方共享”。在此基础上，开展数据挖掘分析应用：利用长序列历史数据识别灌区用水规律和灌溉效率，评价不同管理措施的实施效果；采用机器学习方法建立渠道输水损失、闸门水位-流量关系等经验模型，弥补物理机理模型的不足；开发用水态势分析和异常诊断功能，对水情异常、设备故障、用水违规等情况自动识别和预警。

4 数字化管控支撑精细分配的发展对策

4.1 完善法规政策与标准规范体系

数字化管控体系建设需要顶层制度保障。建议研究制定《灌区数字化建设与管理办法》，明确建设主体、管理职责、资金渠道、数据权属和安全保密等基本要素。出台灌区水资源精细分配的指导意见，将数字化管

控成效纳入最严格水资源管理制度考核。加快制定灌区数字化相关标准规范,包括监测设备选型与布设规范、数据传输协议与接口标准、数据资源分类编码规则、数字孪生平台建设指南、配水模型测试验证规程等。建立标准动态更新机制,根据技术发展和应用实践适时修订。推动地方结合实际情况制定实施细则,形成上下衔接、层级清晰的标准体系。

4.2 健全多元投入与长效运维机制

灌区数字化管控体系建设投资规模大、运维成本高,需要建立稳定可持续的资金保障机制。将灌区信息化建设纳入国家水网、智慧水利等重大工程专项,争取中央财政专项资金支持。发挥地方财政主导作用,将灌区数字化建设和运行维护经费列入年度预算,保障设施更新和系统升级。探索政府和社会资本合作(PPP)模式,吸引社会资本参与灌区智慧化建设和运营。创新投融资方式,整合高标准农田建设、农业水价综合改革、灌区续建配套等各类涉水资金,形成政策合力。建立灌区数字化资产管理制度,明确资产登记、折旧、报废等管理要求。推广“建管养用”一体化模式,鼓励灌区管理单位、农民用水合作组织和专业化服务公司共同参与运行维护。

4.3 推进组织变革与协同治理

数字化管控不仅是技术升级,更需要管理理念和组织方式的深刻变革。优化灌区管理机构职能配置,设立信息化管理专职岗位,明确其在数据治理、系统运维、决策支持等方面的职责。建立由水利、农业、气象、生态环境等部门参与的灌区水资源管理协调机制,定期会商解决跨部门数据共享和业务协同问题。推动基层水管员职能转型,从传统的查水、分水、收费向设备巡检、数据审核、系统操作等新职能转变^[4]。创新用水户参与机制,通过手机App、微信小程序等渠道向用水户推送水量信息、灌溉预报和缴费情况,增强用水透明度和用户获得感。建立数字化管理成效评估机制,定期组织第三方对监测覆盖率、数据质量、模型精度、用水效率提升等指标进行评价,评价结果与管理人员绩效挂钩。

4.4 筑牢网络与数据安全防线

灌区数字化系统涉及国家水安全关键信息基础设施,必须同步规划、同步建设、同步运行网络安全防护体系。落实网络安全等级保护制度,根据系统重要程度合理定级并开展测评备案。对监测终端、控制设备、网络通信、数据中心、应用系统等实行分层分域的纵深防御,严格身份认证和权限管理。建立供应链安全管理制度,对关键软硬件产品进行安全审查,优先采用自主可控技术和产品。制定数据分类分级管理规范,明确水情数据、工程数据、地理信息数据等不同类型数据的保护要求。建立容灾备份和恢复机制,对重要数据和系统进行异地备份。定期开展网络安全应急演练,提高应对网络攻击和数据泄露事件的处置能力。

5 结语

水资源精细分配是水利枢纽灌区高质量发展的核心,数字化管控为解决传统管理中信息滞后、决策粗放、调控低效等问题提供了革命性路径。本文从感知网络、数字孪生、决策模型、自动控制和数据应用五个维度,系统阐述了数字化赋能的关键策略,并提出完善法规政策、加大资金投入、强化组织协同、保障网络安全等配套对策。需强调的是,数字化建设非一蹴而就,而是一个持续迭代的过程。各地应立足灌区自然条件、工程基础与管理水平差异,科学规划实施路径。当前重点在于整合治理存量数据、补强关键监测设施,并在条件成熟灌区率先开展数字孪生试点,形成可复制经验。随着数字技术与水利业务深度融合,数字化管控将在提升用水效率、保障粮食安全和促进生态文明中发挥日益关键的作用。

参考文献

- [1]陈晓宏,张强.数字孪生灌区建设的关键技术与应用前景[J].水利信息化,2023(2):1-8.
- [2]赵勇,王建华.智慧水利发展现状与未来展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2021,19(5):481-489.
- [3]刘家宏,王忠静.灌区水资源优化调度模型研究进展[J].水利学报,2022,53(6):641-652.
- [4]李原园,郦建强.国家水网工程智能化建设与管理[J].中国水利,2021(15):20-24.