

智慧水利技术在灌区节水灌溉精准管理中应用研究

徐阿通

新疆阿勒泰地区水利水电勘测设计院，新疆阿勒泰，836500；

摘要：近年来，全球范围内的水资源紧缺加重以及灌溉用水效率下降的现状日趋严重，中国农业用水占比超过 60% 以上，新疆多地农业用水占比超 90% 以上。本文分析了智慧水利技术的应用，通过精准管理模式来改善灌区节水及精准控制问题，采用物联网感知、大数据分析、人工智能等手段，构建实现“监视-诊断-调控-评估”全过程的管理模式。还分析了存在的技术融合壁垒、运维体系不完善、标准不统一等问题，如提出构建跨部门数据共享平台、建立专业化运维团队、完善智慧灌溉技术标准体系等对策建议。

关键词：智慧水利；灌区精准管理；节水灌溉；智能决策；物联网技术

DOI：10.69979/3060-8767.25.11.058

引言

世界性水资源供需矛盾突出，全国人均水资源仅为世界平均水平 1/3，年缺水达 500 亿 m³，其中农业灌溉用水占社会总用水量的 62%，但传统的灌溉方式导致单位水资源利用效率是发达国家的 20%-30%。越来越多的灌区管理者进行了精准灌溉的实践摸索，实践表明，精确监测灌溉用水量对于保障粮食安全具有重要作用，智慧水利技术的应用可以解决水资源管理难题。依据《节约用水条例》、“十四五”节水型社会发展计划要求，农田灌溉水利用系数要提高到 0.58 及以上，灌区的管理工作也就要由经验管理转为数据驱动，通过物联网监控和智能决策技术手段实施灌溉用水动态调控来解决“水资源短缺与浪费并存”的矛盾，并能支撑农村发展、创造明显的生态环境效益、经济效益和社会效益。

1 智慧水利技术体系与理论基础

1.1 核心技术构成

表 1 智慧水利的技术类型介绍

技术类型	核心功能	灌区管理应用场景
物联网	实时数据采集与传输	智能雷达流量计监测渠道流量、土壤墒情速测
大数据	多源数据融合与趋势预测	灌溉用水效率评估、干旱/洪涝风险预警
人工智能	决策模型构建与参数优化	作物需水量预测、灌溉制度智能生成
遥感与 GIS	空间信息获取与可视化管理	区域墒情分布监测、灌区内水资源空间调配

技术间通过“感知-传输-分析-决策”链路形成协同机制：物联网设备采集的原始数据经边缘计算预处理后，通过 5G 网络传输至大数据平台，人工智能算法基于历史数据与实时参数生成优化方案，最终通过 GIS 可视化界面辅助管理者制定精准灌溉策略。

1.2 精准灌溉理论支撑

精准灌溉理论是以作物水分需求模型为核心，结合经典彭曼-蒙特斯公式和作物系数、土壤水特征曲线进行作物全生育期需水量估算。例如，在小麦种植过程中，

智慧水利通过多种技术相互结合建立了灌区节水灌溉的精准管理，物联网则是其中的关键，使用智能雷达流量计、土壤水分传感器等工具来实现信息的实时获取，如江汉平原使用的智能检测设备能够实现精准的定位水位波动和以此为依据制定灌溉计划。利用大数据负责信息的处理工作，主要任务是对远程测量仪表与卫星遥感的数据进行收集，使得洪峰时刻能够及时提前 6 个小时预警，出现干旱可以及时在 15 分钟内调整。

人工智能算法被视作是精准灌溉的“大脑”，通过作物水氮亏缺诊断模型等多种人工智能算法，将收集到的数据转化为可行的灌溉计划。研究表明，利用智能控制系统，能够节约 28% 的水量，而水肥一体化技术结合的自动控制，使灌溉平均覆盖率达到 90% 以上。通过对遥感与 GIS 技术的综合运用形成了空间角度上的分析，卫星遥感影像可以提供灌区内的土壤水分影像地图，GIS 可直观表示出渠沟、作物分布状况，据此建立个性化浇灌计划并为个性化浇灌计划提供空间决策支持。

可根据水测量值与农业生产过程模型结合来监测作物生长，实时调控灌水时间与灌水量，节水 35%。水肥协同调控技术打破传统灌溉方式“水肥分施”的思维壁垒，根据作物营养吸收原理，实现水分与养分供应相互调控，达到“以水促肥、以肥调水”的效果。

传统灌溉主要依据经验确定灌溉水量和时间，常常造成“大水漫灌”、“周期固定”、“一刀切”等现象，精准灌溉却依据“按需调整”原则进行灌溉，通过现场土壤含水率实时监测、环境实时监控以及作物生长环境，构建“土壤-作物-大气”的水平衡模型。“按需调整”、

“按需灌水”、“精准节水”是灌溉工作从理论到实践层面本质的转变,即决策从经验向数据转变,手段从“大水漫灌”到精准控制的转变,管理目标从单一产量转向“节水-增产-生态”协同。以上一系列理论指导形成智慧水利相关技术应用,例如墒情监测技术便是基于土壤水分阈值理论,在土壤含水率应用方面的技术发展,而调度决策系统核心便是基于作物需水量模型的应用,在此基础上,实现作物用水的精准灌溉。

2 智慧水利技术在灌区精准管理中的应用

2.1 精准监测与数据采集

建立灌区全时段、全覆盖性在线监测网络是精确管理灌区的基础,采用安装在土壤深处的传感器来监测土壤水分信息,包含浅层埋设在土壤层 0-20cm 的传感器来监测植物根系活动层中水分变化状态,深层埋设在土壤层 20-60cm 的传感器来监测土壤层水分储存状态;采用配合自动校准算法使误差不大于 2%;同时采用气象监测系统,监测土壤温度、湿度、日晒强度、风速风向等,借助边缘计算节点对原始数据进行降噪处理,使所采集数据的有效率达 98%以上;同时利用“无人机遥感+地面定点观测”的方式,无人机搭载多光谱相机采集的 NDVI 植被指数,与地面光谱仪监测得到的实测数据,实现作物叶绿素含量及其生物量的反演,形成公顷与米级监测尺度衔接。

采用“WSN+5G+卫星通信”的数据传输模式:在灌区通过低功耗通信协议传输土壤墒情信息,传输距离 3 km-5km;核心节点利用 5G 切片以实现实时控制命令的毫秒级响应;远端利用北斗短报文完成补充数据传输,

构建无死角通信覆盖;以“边缘节点预处理+云端集中存储”多维数据存储架构,允许边缘端对高频信息进行压缩并过滤后将超过阈值变化量的有用信息上报至云端,云端通过分布式文件系统存储历史数据,单平台可实现数百万级传感器接入及 PB 级数据管理。基于此技术架构,可以将检测信息周期由传统的 3 天压缩到 15 分钟,并且通过每 4 小时一次的预测决策周期使灌溉决策时间准确率提升至 97%,使土壤含水量预报误差达到 $\leq 5\%$ 。

2.2 智能决策与优化调度

灌区用水的精准管理,关键是利用智慧水利建立了一个基于全生命周期的作物用水决策模型,该模型通过融合多源数据实现精准识别,包括通过高光谱遥感获取的叶片含水量信息、茎秆直径微变化传感器所检测的水分胁迫信号等,再应用深度学习算法以生成可视化的亏缺热力图,识别精度达 92%。由此形成的灌溉方案生成系统可以随着作物不同生长阶段所需的水资源不同而改变给水量频次模式,如在玉米抽穗时采取“少量多次”模式,在籽粒期转变为“间歇湿润”,实现所需水资源与实际供应间的动态平衡。

大数据分析也可对灌区长距离输水的水资源调配提供科学支撑。通过整合气象预报数据、水库蓄水量、渠系输水损失率等参数,构建多目标优化模型,在保障作物需水的前提下最小化水资源消耗。某大型灌区应用该系统后,干支渠配水效率提升 28%,非灌溉期弃水量减少 40%。智能决策系统还具备自学习能力,持续迭代优化算法参数,使长期运行的节水效益逐年递增。

表 2 不同决策方式对比

决策方式	数据依据	响应速度	节水率	适用场景
传统经验决策	人工观测+历史记录	小时级	10%-15%	小面积、单一作物灌区
智能算法决策	多源实时监测+作物模型	分钟级	25%-35%	大面积、多作物复杂灌区

2.3 自动化控制与执行

灌区自动控制系统实现了由“被动调整”到“主动响应”的转变。电子液压驱动闸门控制系统配备了双冗余电机和位移传感器,可对开度进行 0.1mm 级精确的开关操作,响应时间为 $\leq 500\text{ms}$ 。系统具备自适应调节能力,可根据上端流速以及末端需水量自动决定最佳开度,并且在紧急情况下可切换为紧急关闭防止发生灌溉事故。变量灌溉设备采用的 PWM 控制技术,可使喷头流量在 0~20L/h 间自由调节,也可配置分区控制阀以满足不同地段灌溉需要。

精准管理的一条完整路径是“感知-决策-执行”管理:土壤湿度传感器将数据定时传递到云端,人工智能决策中心对上述数据实时做出判断生成灌溉指令,再通过 5G 技术传输到控制终端,由控制终端操控电磁阀组

执行灌溉工作,结果再返回到云端形成闭环循环。“感知-决策-执行”方式应用于某示范区后,灌溉均匀度比传统地面灌溉方式提升到了 90%以上,一次灌溉周期缩短 40%左右,可以节约管理人员工作量超 50%。

2.4 信息化管理平台构建

灌区信息化管理平台通过数据采集、调度决策、运行操作形成管控中心,借助三维 GIS 建立灌区数字模型,实时显示渠道图、种植分布、设备状态等,可直接查询任一监控点的数据和历史曲线。量水模块集智能水表、电磁流量计于一体,实现了从水源到田间全过程的水量计量,并以数据形式自动上传到农业水权交易系统,提供了水资源分配、交易的基础数据。远程运维模块有设备状态诊断和故障预测的功能,它可通过振动、温度等进行预先故障诊断后,发送维修任务给手机 APP,可使

平均修复时间从 48 小时缩减到 6 小时。

灌区信息化管理平台平台实现了与政策要求的深度衔接,平台自带了监测用水总量与流量双控制的双监测模块,并将实时监测的实际用水量与用水指标进行对比,一旦超出限额值就报警并给出节水管理建议。某一个灌溉区域使用该平台之后,管理人员数量减少了 60%,用水纠纷占比减少了 85%,并且节约了 300 万元的年度管理成本。此外,可依托气象局和农业农村部门的数据共享,以技术手段支持跨部门的联合决策,进而推进灌区管理工作从“单一水利”向“大农业”视角转变。

3 灌区智慧化管理面临的挑战与对策

表 3 管理与运维的问题表现与解决思路

问题表现	解决思路
专业运维人员缺口达 40%	联合职业院校开设智慧水利定向培养班,建立“理论培训+实操考核+认证上岗”培养体系
水利、农业、气象部门数据割裂	成立跨部门协调小组,制定数据共享目录与更新机制,开发统一数据中台
农户智能设备操作技能不足	编制图文版操作手册,开展“田间课堂”培训,培育“技术带头人”示范推广

基层灌区普遍缺乏既懂水利又通信息技术的复合型人才,并且多部门数据壁垒显著,灌溉用水数据分散在水利、农业、气象等 6 个部门,数据更新频率从日级到月级不等,难以支撑动态调度。部分农户对智能设备存在抵触心理,担心操作复杂或设备故障影响灌溉,导致 30%的智能控制功能处于闲置状态。

3.3 政策与标准支撑

目前由于技术标准体系不统一、缺乏明确的传感器通信协议和数据格式,致使不同设备生产企业产品兼容性差。同时,已有激励政策并不能真正激发农户的使用意愿,如在农业水权交易试点中,节水效益转化为经济收益的路径不清晰,这制约了农户的自主选择智慧技术的积极性和。因此需要根据《水利高质量发展实施方案》要求,加速完善制定智慧灌区建设标准导则并将智慧灌溉标准化工作纳入地方政府绩效考核范畴,同时,也要完善节水的补助办法,采用“以奖代补”减轻农民的初始投入费用。

4 结论

综上所述,智慧水利技术通过构建“监测-决策-控制-管理”全链条数字化体系,为灌区节水灌溉精准管理提供系统性解决方案。技术融合应用显著破解了水资源粗放利用难题,验证了“数据驱动”模式对灌区管理从经验化向精准化转型的核心价值,为农业节水增效提供了可靠的技术支持。

参考文献

[1]王浩,雷晓辉,蒋云钟.智慧水利关键技术研究与应用

3.1 技术层面

由于不同的监测设备使用了各自的私有通信协议,制约了智慧灌区的效果,不能实现不同信息的资源共享。此外,多技术融合还带来了其他挑战,包括算法挑战,物联网收集的数据具有时间和空间的差异性,这增加了训练人工智能模型的复杂程度。例如天气预报数据和土壤湿度检测数据间的时间分辨率差异,可能延迟 2—4 个小时的灌溉决策。最后,设备环境适应性差也是应用短板,寒冷地区的传感器当温度低于-15℃时会造成数据漂移,高含沙水流中雷达流量计的测量误差可达 15%以上,导致监测精度和系统稳定性的下降。

3.2 管理与运维

用进展[J].水利学报,2021,52(01):11-12.

[2]李原园,刘江,赵勇.基于数字孪生的灌区智慧化管理系统构建与应用[J].中国水利,2022(15):36-37.

[3]陈菁,彭世彰,徐俊增.农业节水灌溉智能化技术应用现状与发展趋势[J].农业工程学报,2020,36(14):9-10.

[4]李养雄.探究农业水利工程中高效节水灌溉的技术要点[J].新农业,2021(6):88.

[5]乔源,郑莉.对农业水利工程中高效节水灌溉技术的几点探讨[J].农村实用技术,2020(6):158-159.

[6]刘辰星,李淇涵.农业水利工程中高效节水灌溉的技术要点[J].江西农业,2022(24):33-34.

[7]张金雨.农田水利信息技术在水利工程管理中的应用[J].农业工程技术,2022,42(27):59-60.

[8]张晓霞.浅谈水利工程建设中水利防汛信息技术的应用[J].中国设备工程,2022(14):231-233.

[9]乌云高娃.农田灌区节水灌溉工程水利信息化技术的作用与应用[J].农业工程技术,2021,41(26):48,50.

[10]徐春梅.水利信息化技术在灌区节水灌溉工程中的应用[J].住宅与房地产,2021(24):235-236.

作者简介:徐阿通,出生年月:1987 年 8 月,性别:男,民族:汉族,籍贯:河南项城市,职称:高级工程师,学历:本科,研究方向:新建水库、水闸枢纽设计,已建枢纽除险加固及兴利调度研究,灌区骨干工程规划设计研究,田间高效节水灌溉技术与智慧化管理。