

# 灌区输配水系统节水改造与智能监控应用探析

刘丹

许昌市节约用水中心 河南 许昌 461000

**【摘要】**：灌区输配水系统作为农业水资源调配的核心载体，其运行效率直接影响区域水安全与农业可持续发展。传统输配水模式普遍存在渗漏损失大、调控精度低、管理粗放等问题，亟需通过工程改造与技术创新实现系统性节水。推动输配水设施的现代化升级与智能化管控，已成为提升农业用水效率、保障粮食安全的必然路径，对促进水资源集约利用具有深远意义。

**【关键词】**：灌区；输配水系统；节水改造；智能监控；应用

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.058

## 引言

在全球水资源日益紧缺的背景下，农业节水已成为各国应对水危机的重要战略。灌区输配水环节长期存在输水损耗高、分配不均、动态响应不足等短板，制约了整体节水效益的发挥。将节水改造与智能监控技术深度融合，构建精准感知、智慧决策、自动调控的输配水管理体系，是突破当前管理瓶颈、推动灌区向高效节水型转型的关键举措。

## 1 灌区现代化改造的政策导向与战略需求

灌区现代化改造是当前水利基础设施建设的重要组成部分，其推进受到多重政策导向与战略需求的深刻影响。从政策层面看，国家高度重视水资源集约安全利用，持续推进农业节水增效，明确要求加快大中型灌区续建配套与现代化改造，强化用水总量和强度双控，推动水利工程向数字化、网络化、智能化方向转型。这一导向体现了从单纯规模扩张向质量效益提升转变的治理思路。从战略需求来看，保障国家粮食安全和重要农产品供给是首要任务，而灌区作为农业生产的重要基础设施，其输配水效率直接关系到农业综合生产能力的稳固。同时，应对日益严峻的水资源短缺挑战，缓解经济社会发展用水矛盾，迫切需要通过工程改造与智能监控手段提高水资源利用效率。此外，推进乡村振兴和农业农村现代化也要求灌区管理方式实现由粗放向精细的跨越，构建适应现代农业发展需求的智慧灌区管理体系，从而在更高水平上实现节水、增产与生态保护的协调统一。

## 2 农业节水面临的挑战

### 2.1 工程设施老化失修与输水效率低下

当前农业节水面临的首要挑战在于输配水工程设施的严重老化与结构性缺陷。大量灌区骨干渠道建设年代久远，长期运行导致混凝土衬砌剥蚀、冻胀破坏及裂缝渗漏现象极为普遍，部分甚至处于带病运行状

态。由于防渗体系失效，输水过程中明渠渗漏损失巨大，无效弃水严重。同时，渠系建筑物配套不全，节制闸、分水闸等关键节点自动化程度低，难以实现精准控水和高效配水。这种物理层面的工程短板直接导致灌溉水利用系数远低于设计标准，使得有限的水资源在输送环节大量流失，极大制约了农业节水潜力的挖掘与发挥。

### 2.2 水资源时空分布不均与供需矛盾尖锐

农业节水面临的深层次挑战源于水资源天然禀赋与农业需水规律之间的错配。我国季风气候显著，降水时空分布极不均匀，汛期暴雨集中而枯水期干旱频发，导致水资源的时间调节能力严重不足。在空间上，水土资源组合不平衡，许多粮食主产区与缺水地区高度重叠。随着工业化、城镇化进程加速，生活与工业用水挤占农业用水的现象日益突出，农业用水红线面临严峻考验。加之地下水超采引发的水位下降，进一步加剧了水源获取的难度。这种供需关系的极度紧张，使得传统的大水漫灌方式难以为继，对水资源的高效循环利用提出了更为苛刻的要求。

### 2.3 管理模式粗放与智能化监管能力缺失

长期以来，许多灌区沿用行政指令式的计划配水模式，缺乏科学的需水预测与动态调度机制，导致上下游用水矛盾突出，末端用水户权益难以保障。基层水管单位普遍存在人员冗余、经费不足的问题，缺乏专业化运维能力。在监管层面，传统人工巡测手段效率低、误差大，无法实时掌握田间墒情与管网运行工况。由于缺乏基于物联网的智能感知与决策支持系统，管理者难以及时发现跑冒滴漏并进行闭环处置，导致节水措施流于形式，无法实现从源头到田间的全过程精细化管控。

### 3 输配水系统节水改造关键技术体系

#### 3.1 骨干渠道防渗衬砌技术体系

骨干渠道作为灌区输水的主动脉，其防渗性能直接决定输水效率。该技术体系重点在于根据渠道断面尺寸、地质条件及冻胀敏感性，科学遴选衬砌材料与结构型式。主要包括现浇混凝土、预制混凝土板、复合土工膜及浆砌石等防渗方案。施工中需强化伸缩缝止水工艺与渠基夯实处理，有效解决因温度应力及土基变形导致的开裂渗漏问题。通过优化衬砌断面水力要素，降低糙率，不仅可显著减少深层渗漏损失，还能提升渠道输水流速与过流能力，缩短轮灌周期，是实现工程节水增效的最基础且关键的措施。

#### 3.2 渠系建筑物配套与一体化改造技术

针对节制闸、分水闸、渡槽及倒虹吸等关键节点老化破损、过流能力不足等问题，该技术聚焦于建筑物的标准化更新与功能提升。通过采用新型复合材料闸门替代传统锈蚀金属闸门，并优化进出口流道设计，减少水头损失与涡流现象。重点解决建筑物与渠道衔接处的接触渗漏及不均匀沉降隐患，实施一体化防渗衔接处理。此举旨在打通输配水网络中的物理堵点，恢复并提升渠系建筑物的调控灵活性，确保各级渠道间水力衔接顺畅，为全渠道系统的精准水量分配提供坚实的工程硬件支撑。此外，结合智能监控系统的应用，将传统渠系建筑物改造为具备远程控制与状态反馈功能的智能测控单元。通过预留传感器接口与自动化控制模块，实现闸门开度的精准定位与流量数据的实时上传，使物理工程设施无缝融入灌区信息化管理体系，从而全面提升输配水系统的整体协同运行效能。

#### 3.3 管网输水系统优化与管材应用技术

对于具备条件的灌区或高标准农田区域，推广低压管道输水灌溉是替代明渠的高效方案。该技术体系涵盖管网拓扑结构优化、管径科学匹配及高性能管材选用。重点应用 PVC-U、PE 等抗冲击、耐老化塑料管材及球墨铸铁管，通过水力计算确定经济流速与最小工作压力，降低沿程水头损失。相较于明渠，管网系统可完全杜绝蒸发与深层渗漏，输水利用系数极高。同时，结合地面移动软管或固定式喷微灌设备，实现水肥一体化输送，大幅提升田间水肥利用率，是现代灌区工程改造的重要发展方向。

#### 3.4 量测水设施精准化布设技术

精准计量是节水管控的前提，该技术体系旨在构建全覆盖、高精度、智能化的量水网络。针对不同类型的渠道断面，布设雷达水位计、超声波流量计及巴

歇尔槽等量测水设施，解决传统人工观读精度低、时效性差的问题。重点攻克复杂杂态下流量自动率定与数据稳定传输难题，实现干支斗农各级渠道分水口及典型断面的实时在线监测。通过统一量水标准与数据接口，为用水户提供透明的水量结算依据，也为调度中心提供可靠的水力数据支撑，从根本上改变粗放配水的局面。

#### 3.5 排水系统生态化改造与雨洪资源化利用

完善的排水系统是节水改造中防止次生盐碱化的重要保障，该技术体系强调灌排并重，通过疏浚淤积沟道、修复排水涵闸，构建高效畅排的排水网络。同时，引入生态排水理念，采用植草护坡、生态袋等柔性防护材料，增强沟渠自净能力与生物多样性。在条件允许的区域，结合坑塘、洼地建设雨水集蓄利用工程，将汛期弃水转化为可利用的水资源。通过排水再利用与雨洪资源调控，不仅降低了地下水位，减轻了土壤盐渍化风险，还实现了水资源的多次循环利用，提升了灌区整体的水资源承载力。

### 4 灌区智能监控与信息化管理系统构建

#### 4.1 多维感知层构建与水情立体监测技术

智能监控系统的基石在于全面、实时的数据采集，需构建覆盖渠首至田间的全链条感知网络。该技术聚焦于部署高精度雷达水位计、超声波时差法流量计及压力传感器，实现对干支斗农各级渠道水位、流量及压力的连续在线监测。同时，结合田间土壤墒情传感器、气象站及作物长势遥感监测设备，形成水-土-气-作物的多维数据融合。重点解决复杂环境下传感器供电稳定性、数据传输抗干扰性及设备防盗防损难题，确保源头数据的准确性与连续性。通过高密度、网格化的感知节点布设，彻底取代人工巡测，为灌区运行态势的数字映射提供第一手全息数据支撑。

#### 4.2 输配水水力模型与需水预测算法

数据驱动的核心是构建高保真的数学模型，以实现从被动响应到主动预测的决策跃升。该系统基于圣维南方程组构建明渠非恒定流水力仿真模型，模拟不同闸门动作下的水流传播过程与波速演变，为远程调度提供虚拟推演环境。同时，利用机器学习算法，融合历史用水数据、气象预报及作物生育期特征，建立分区分类的作物需水预测模型。通过深度学习优化灌溉制度，精准预报未来短期内的用水峰值与缺口。该算法体系能够有效解决传统经验配水滞后性强、偏差大的问题，为水资源的高效配置提供科学的量化依据。

### 4.3 远程闸阀联动控制与边缘计算技术

执行端的自动化是实现精准调控的物理保障，重点在于研发适应野外恶劣环境的机电一体化控制装备。系统采用太阳能供电的智能闸门控制器，集成步进电机或液压启闭机，支持开度精准定位与手自一体切换。通过在闸门本地部署边缘计算模块，实现就地数据采集、异常诊断及紧急关断功能，即便在网络中断情况下也能维持基础安全运行。控制中心下发调度指令后，系统可自动完成多闸门协同联调，实现上游恒水位或下游恒流量的自动控制模式。这种云边端协同的控制架构，大幅缩短了系统响应时间，解决了人工操作滞后导致的弃水与缺水并存问题。

### 4.4 数据中台与可视化决策支持平台

面对海量异构数据，需构建统一的数据中台进行清洗、存储与治理，打破信息孤岛。基于GIS地理信息系统，开发可视化的灌区一张图，将工程设施、实时水情、视频监控及调度指令叠加展示，实现物理灌区在数字空间的动态映射。决策支持平台内置水量平衡分析、调度方案预演及突发事件应急预案模块，支持多屏联动与移动端应用。管理人员可通过PC端或大屏指挥中心，直观掌控全域运行态势，一键生成调度工单。该平台不仅提升了管理的透明度，更通过数据挖掘辅助管理者进行宏观决策，实现了从经验管理向数据驱动的现代化治理转型。

### 4.5 通信组网与安全防御体系建设

稳定可靠的通信网络是连接感知层与控制层的神经中枢，需构建融合多种通信技术的混合组网架构。针对灌区地域广阔、信号遮挡严重的特点，采用5G、LoRa、北斗短报文及自组网技术相结合的方式，确保

偏远地区数据回传的实时性与完整性。同时，鉴于水利监控系统的关键基础设施属性，必须建立纵深网络安全防御体系。通过部署工业防火墙、入侵检测系统及数据加密传输协议，防范网络攻击与数据篡改。建立严格的权限管理与审计机制，确保控制指令的合法性与唯一性。只有筑牢网络安全防线，才能保障智能监控系统在全天候环境下的稳健运行。

### 5 灌区运维管理机制创新与技术展望

面向未来，灌区可持续发展亟需工程管理体制机制的同步革新。应深入推进农业水价综合改革，建立健全反映水资源稀缺程度与供水成本的定价机制，通过实行超定额累进加价制度，倒逼用水户主动节水。积极探索“以大带小、小小联合”的物业化、专业化管护模式，引入社会资本参与灌区运维，破解基层水管单位人员老化与经费短缺困局。同时，依托数字孪生流域建设契机，深化大数据、人工智能与水利业务的融合，研发具备自我学习能力的智慧大脑，实现从“人控”向“智控”的质变。未来技术将向天空地一体化感知、自主无人巡检及水-土-作物全要素协同调控方向演进，最终构建起工程设施完善、管理手段先进、运行机制灵活的现代化灌区治理体系。

### 6 结语

灌区输配水系统的节水改造与智能监控应用，标志着农业用水管理向精细化、智能化方向迈出了坚实步伐。通过持续优化基础设施与技术创新，不仅能够显著提升水资源利用效率，也为构建现代化灌区、保障水安全与农业可持续发展奠定了坚实基础。未来应进一步强化技术集成与机制创新，推动节水智能管理走向更广泛、更深入的实践。

### 参考文献:

- [1] 韩笑冬,霍雨.麻地壕灌区骨干输配水工程治理思路探讨[J].内蒙古水利,2024,(02):99-101.
- [2] 苑希民.大型水库及灌区智能调控与施工在线监控技术.广西壮族自治区,崇左市左江治旱工程管理中心,2022-06-05.
- [3] 智慧水利全面感知技术研究编委会.智慧水利全面感知关键应用技术研究报告[M].中国水利水电出版社:202012.164.
- [4] 丁相锋.陕西省交口抽渭灌区输配水系统优化及效益评价研究[D].西北农林科技大学,2020.
- [5] 高凯茹.基于遗传算法的富裕灌区渠系输配水优化研究[D].东北农业大学,2020.
- [6] 刘德龙,李夏,李腾,冯宾春,王明军.智慧水利感知关键技术初步研究[J].四川水利,2020,41(01):111-115.
- [7] 胡宇祥.北方灌区输配水系统优化模式及综合效益评价研究[D].东北农业大学,2018.