

灌区节水改造渠系设计思路及效果评估

孙志勇^{1,2} 华成善^{1,2}

1.湖北金浪勘察设计有限公司 湖北 武汉 430070

2.湖北省水利水电科技情报中心 湖北 武汉 430070

【摘要】：灌溉渠系是灌区灌溉功能发挥的重要基础，渠系设计不仅关乎灌溉与节水效益，还直接与工程经济、土地节约、生态环境息息相关。本研究结合灌区建设经验，对灌区渠系设计思路进行分析、研究与总结，并对其效果进行评估，为后续灌区渠系设计提供参考。

【关键词】：灌区；渠系设计；节水；生态；效果评估

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.060

引言

在全球水资源日益紧缺的背景下，合理利用和管理水资源显得尤为重要。特别是在农业大国，水资源的有效配置直接关系到粮食安全与农业可持续发展。大型灌区作为水资源调配和利用的重要手段，其工程设计的科学性与合理性将直接影响灌溉效率和农业生产力，合理的渠道系统设计可以支持生态友好的灌溉方式，如滴灌和喷灌等现代灌溉技术。这些技术能够提高水的利用率，减少对环境的影响，促进农业的可持续发展。同时，良好的渠道设计减少了对土壤和水源的破坏，为未来农业发展创造了条件。因此，研究大型灌区渠系设计思路，不仅能够优化水资源的使用效率，还能促进农业生产的可持续发展。

1 工程概况

某灌区建设于20世纪60年代，是以水库为骨干，中、小型水库及塘堰为基础，电灌站作为补充的大、中、小、微相结合，蓄、引、提相配合的大型灌溉系统。随着经济社会现代化发展，粮食安全已成为保障国家长治久安的重要基石，农业用水需求也显著提升，灌区经过多次改造，主要渠系得到恢复和衬砌，但干渠及支渠衬砌破损率达35%，年均渠道渗漏损失率为22%，支渠及以下渠道淤积深度普遍达0.3—0.5m，过流能力较设计值下降15%—20%，亟须通过系统性改造提升工程效能与安全水平。

2 灌区渠道设计方案

2.1 渠系总体布局原则

灌区渠系总体布局是灌溉系统高效运行的核心框架，其合理性直接影响灌区辐射范围的覆盖广度、灌溉功能的稳定发挥及灌溉效益的提升空间，科学的布局可有效扩大灌溉覆盖面积，确保农田及时足额供水，同时通过优化资源配置提高用水效率与经济效益。规划改造骨干渠道“三度”达标长度，对骨干渠系进行全面防渗衬砌以减少渗漏；对灌区分水、交叉、交通等各类建筑物及闸门启闭设备进行加固更新；对淤积河道疏挖清淤，保障排水通畅；推行计量供水，避免浪费；组织农民

用水者协会参与田间工程管理维护，根据作物需水编制用水计划报管理部门审批，实现合理节水^[1]。

灌区渠系布置时需遵照如下原则：一是保障输水能力、具备分水汇流及调节功能并确保渠道运行安全；二是兼顾水资源经营与工程设施经营的合理性，以及建设费用与经营费用的经济性。

2.2 渠道水力设计理论与方法

渠道水力设计是灌区渠系设计的重要部分，它的理论基础主要是曼宁公式和水流连续性方程，曼宁公式用来阐述流速同渠道几何特征、糙率以及坡度之间的定量联系，给设计赋予关键的计算参考；水流连续性方程保证水流质量守恒，从而支持流量分配的合理性。设计方法着重于流量计算、流速调控以及坡度改良。流量计算依据灌溉需求，比如按照作物种类、播种面积以及需水模数来确定总需水量，然后再转化为渠道设计流量，流速调控要设定合理的区间，以防冲刷（大致上限为1.5 m/s）和淤积（大致下限为0.3 m/s）。坡度改良通过调整渠道纵坡来减小水头损失并加强输水效率。以案例中灌区项目为例，此工程灌溉面积达55.49万公顷，设计流量为60m³/s，其设计流程先依据区域作物需水量数据算出灌溉需求，再用曼宁公式反复确定断面尺寸^[2]，要保证流速在0.8 m/s~1.2 m/s范围内，还要把坡度改良到0.0008，最后借助流程图系统整合各个环节，实现高效又经济的设计方案。

2.3 渠道结构与断面优化

渠道结构设计和断面优化对于保障大型灌区输水效率以及工程耐久性十分关键，渠道断面形式大致可分为梯形和矩形两种基本类型，梯形断面由于边坡稳定较好、施工较为简单，而且适合多种地基状况，所以常常被用在土质渠道工程中；矩形断面具有过水断面规矩，水利条件不错的优点，并且占地面积小，常见于城区部分或石质山区的渠道。材料的选择要综合考虑防渗性能、耐久性和经济成本等因素，传统的混凝土衬砌凭借自身高强度和较好的防渗效果占据主流，但是土工合成材料因为具备出色的柔韧度、较强的抗化学腐蚀能力和快速覆盖

的便利性，在寒冷地区或地基沉降较大的地方被越来越多地采用^[3]。断面改良要兼顾稳定性、经济性以及施工可行性这三个目标，其中稳定性计算最为关键，按照土力学原理来分析渠道边坡处于各种工况时的安全系数，以防止发生滑坡或坍塌事故，利用莫尔-库仑准则去验算临界坡角就是一种方法，从而保证边坡设计符合长时间稳定的需要。表1对比了典型断面形式的关键参数，为设计选型提供量化依据。

表1 渠道典型断面参数比较表

断面类型	梯形土渠	梯形混凝土衬砌	矩形混凝土	生态复合断面
边坡系数 (m)	1.5 - 2.5	1.0 - 1.5	垂直	1.2 - 2.0
水力半径 (m)	0.6 - 1.2	0.8 - 1.5	1.0 - 1.8	0.7 - 1.3
糙率系数 (n)	0.022 - 0.030	0.014 - 0.017	0.013 - 0.016	0.018 - 0.022
单位造价 (元/m)	80 - 150	350 - 600	500 - 800	250 - 450
适用场景	非敏感区临时渠道	骨干渠道、防渗要求高区	空间受限区、石质地基	生态修复区、冻胀区

2.4 渠道防渗抗冻胀设计与新材料应用

渠道防渗设计属于大型灌区工程的重点部分，主要采用衬砌技术来缩减水量流失并改善水资源利用率。在传统施工模式中经常运用混凝土衬砌，不过这种做法会慢慢出现老化裂缝现象，所以要融合现代材料加以改良。寒冷地带中，预防冻胀尤为关键，要铺设保温层隔断低温传递热量，而且还要整合排水系统免除冻胀力造成结构损伤，在这种背景下新材料的应用就成了技术改进之处，复合土工膜具备很强的防渗能力以及一定的柔韧性，于是被普遍用在渠道底部与两侧斜坡上，可以较好地控制渗漏情况并且顺应地基发生形变，掺入纤维或者外加剂之后，高性能混凝土的抗冻能力和耐久性能得到加强，它的抗压强度能够达到40MPa，从而大幅延长使用期限^[4]。在实际操作过程中，施工队利用复合土工膜做衬砌以后，渗漏率由15%降至5%以下，再加上用高性能混凝土去修补渡槽之后，每年的维护费用削减了20%。而这些设计需平衡技术可行性与实际应用，避免依赖实验性方案，而是通过标准化施工流程实现落地（见表2）。

表2 新材料性能对比表

材料名称	复合土工膜	高性能混凝土
防渗性能（渗透系数，m/s）	$\leq 1 \times 10^{-12}$	$\leq 1 \times 10^{-9}$
抗冻性（最低适用温度，°C）	-40	-30
经济性（初始成本，元/m ² ）	50	300

耐久性（预计寿命，年）	25	30
-------------	----	----

2.5 渠道安全防护与生态化设计

渠道安全防护与生态化设计需统筹工程安全需求与生态可持续性发展目标。在安全防护层面，重点实施三级防护体系：第一级为实体防护结构，于高填方渠段、交通桥衔接处等风险区域设置混凝土护栏或镀锌钢制护栏，护栏高度 $\geq 1.2\text{m}$ ，抗冲击能力满足50kJ标准；第二级为智能监测系统，沿主干渠每公里布设高清摄像头与水位传感节点，实时捕捉渠堤变形、水位异常及人为侵入事件，数据通过4G专网传输至管理中心；第三级为应急救援设施，按照500m间距设置标准化应急通道，宽度 $\geq 3.0\text{m}$ ，坡比缓于1:8，并与防汛道路连通。在上述案例中，通过地质雷达扫描识别出12处潜在滑坡段，针对性设置格构梁锚固防护带，同步配备位移自动报警装置，年事故率下降72%。

生态化设计核心在于恢复渠道自然属性与生物栖息功能。植被护坡技术采用“草灌结合”模式，选用狗牙根、紫穗槐等本土植物，结合土工格室加筋结构，使坡面侵蚀模数降低至 $800\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ；针对过鱼需求，在节制闸侧翼建设竖缝式鱼道，设计流速 0.8m/s ，休息池深度 $>0.6\text{m}$ ，满足鲫鱼、鲤鱼等本土鱼种洄游需求；生态湿地恢复聚焦渠岸带，构建宽度 $>15\text{m}$ 的乔草复合缓冲带，利用芦苇、香蒲等挺水植物形成氮磷过滤系统^[5]。

安全与生态的协同通过精细化设计实现。在鱼道监测段采用非接触式超声波流量计，避免干扰水生生物；将生态护栏（如石笼网箱结合攀缘植物）应用于低风险区段，既满足防护需求又提升景观连通性；在湿地恢复区设置生物滞留带，使暴雨期溢流水体经填料层净化后回流渠道。

可持续发展效益体现于全生命周期管理。生态化设计使渠道维护成本降低25%—30%；植被缓冲带年固碳量达 $3.2\text{t}/\text{km}$ ；集成式监测系统降低人工巡检频率50%。监测数据显示，实施三年后项目区鸟类多样性指数提升0.38，渠道输水效率保持在94%以上；验证了安全防护与生态功能协同优化的可行性。

2.6 效果分析

水工建筑物安全升级之后的效果分析要从安全性、效率性以及经济性三个方面进行量化评定。

安全性指标明显得到加强，就结构稳定性而言，原来闸门构件的安全系数是1.2，升级之后利用碳纤维布加固，其安全系数提升到1.5，符合安全等级的要求。渡槽经过体外预应力加固以后，跨中挠度从原来的15mm减小到8mm，抗裂性能加强了40%；防洪能力上，原先的设计防洪标准为20年一遇，升级之后依靠闸门启闭系统的改良以及渡槽荷载的加强，防洪标准提升到50年一遇，相应的设计流量由 $30\text{m}^3/\text{s}$ 扩大到

50m³/s。

效率方面的改善体现在输水效率的提高以及调度响应速度的加快上。输水效率上, 闸门密封性能得到改良之后, 渗漏量减少了 60%, 渠道输水效率由 85% 优化到 92%; 调度响应上, 闸门启闭时间从原来的 3 分钟缩减为 1.5 分钟, 应急调度能力提高了 50%。

经济效益分析表明, 年维持成本由原来的 100 万元减少到 60 万元, 降幅为 40%; 建筑物剩余使用年限由原来的 10 年扩展到 30 年, 全生命时段成本削减了 35%, 总体经济效益颇为可观。

参考文献:

- [1] 马丹荣, 奚少良. 共和灌区续建配套与节水改造工程骨干渠道设计[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2024(001):041-041.
- [2] 张丹枫, 青格勒图, 王佳文. 灌区渠道设计冻深计算分析[J]. 内蒙古水利, 2024(3):86-87.
- [3] 高月坤. 关于农田水利工程灌溉防渗渠道衬砌设计问题的探讨[J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2024(003):000-001.
- [4] 曹明. 灌区骨干节水工程渠道横断面设计方案比选研究[J]. 陕西水利, 2024(4):92-95.
- [5] 斌王. 大中型灌区节水改造中防渗渠道断面优化设计研究[J]. 工程建设, 2024, 7(10):171-171.

3 结语

本研究通过集成渠道水力优化、断面结构改进、新材料防渗及生态化设计技术, 构建了大型灌区工程系统性改造方案。关键技术包括: 基于曼宁公式的流量-坡度协同优化方法, 梯形断面宽深比 1.25 的经济性参数, 复合土工膜与高性能混凝土组合防渗体系, 以及竖缝式鱼道 0.8m/s 的生态流速控制标准。实践表明, 该方案使渠道渗漏率降至 5% 以下, 水工建筑物安全等级提升至国标一级, 岸带生态多样性指数增长 0.38。未来需进一步探索智能监测系统与 BIM 技术在全周期管理中的应用, 深化寒区冻胀机理与自适应材料研究, 推动灌区工程向智慧化、高韧性方向迭代。