

灌溉水利工程渠系水利用效率提升的优化设计

王仙明

方远建设集团股份有限公司 浙江台州 318000

摘要：本文围绕灌溉水利工程渠系水利用效率的提升，系统开展了优化设计研究。首先，在分析渠系水利用效率基本理论、评价指标及工程、管理、自然等影响因素的基础上，明确了效率提升的关键环节。其次，重点阐述了渠系优化设计的核心内容，包括以减少输水路径为目标的布局优化、以提升水力性能为导向的断面优化、以控制渗漏为核心的衬砌防渗设计，以及以降低局部损失为重点的建筑物优化。同时，探讨了与之配套的智能监测、精准调度、完善维护及用户参与等管理措施。研究表明，将科学的优化设计与精细化的管理措施相结合，能显著提升渠系水利用效率，实现节水增效，为现代灌区的可持续发展提供了系统的技术方案和实施路径。

关键词：渠系水利用效率；优化设计；渠道衬砌；智能监测

引言

水资源短缺是制约我国农业可持续发展的关键因素，而灌溉用水占据了农业用水的绝大部分。当前，我国许多灌区因渠道老化、布局不合理、管理粗放等问题，导致渠系水利用效率普遍偏低，水资源浪费现象严重。因此，提升渠系水利用效率，已成为缓解水资源供需矛盾、保障国家粮食安全和推动农业现代化建设的迫切需求。然而，现有研究多侧重于单一技术或局部环节的改进，缺乏从系统规划、优化设计到运行管理全链条的综合解决方案。

一、灌溉渠系水利用效率的基本理论与影响因素

（一）渠系水利用效率的概念界定

渠系水利用效率是指灌溉水从渠首引入至田间作物根区过程中，被有效利用的水量占总引水量的比例，是衡量灌溉系统水资源利用水平的核心指标。其计算公式为： $\eta_{\text{渠系}} = (\text{田间净灌水量} / \text{渠首总引水量}) \times 100\%$ 。该概念包含三个关键要素：一是有效性，即水量需被作物实际吸收利用，而非无效蒸发或渗漏；二是系统性，涵盖干渠、支渠、斗渠、农渠等各级渠道的输水过程；三是动态性，随渠道老化、管理措施、气候条件等因素变化。例如，某灌区通过改造后，渠系水利用效率从0.52提升至0.68，意味着每亿立方米引水量可增加1600万立方米有效灌溉水量，直接体现了概念界定对工程实践的指导意义^[1]。

（二）渠系水利用效率的评价指标

评价指标体系需全面反映渠系输水过程中的水量损

失与利用效果，包括核心指标与辅助指标两类。核心指标为渠系水利用效率（ $\eta_{\text{渠系}}$ ），直接量化整体利用水平；辅助指标包括：渠道水利用效率（ $\eta_{\text{渠道}}$ ），反映单级渠道的输水效率，如某干渠改造后 $\eta_{\text{渠道}}$ 从0.85提升至0.92；田间水利用效率（ $\eta_{\text{田间}}$ ），衡量田间配水过程的损失，如畦灌与滴灌的 $\eta_{\text{田间}}$ 分别为0.7与0.95；输水损失率（R损失），量化渗漏、蒸发损失占比，某灌区通过衬砌使R损失从30%降至12%；灌溉水生产效率（WUE），关联水量与作物产量，如水稻灌区WUE从1.2 kg/m³提升至1.8 kg/m³。这些指标需结合灌区规模、作物类型、气候条件综合应用，例如干旱区重点监测R损失，而湿润区则侧重 $\eta_{\text{田间}}$ ，体现了评价指标的针对性与实用性。

（三）影响渠系水利用效率的主要因素

影响因素可分为工程、管理、自然三类，其中工程因素占比约60%。工程因素包括渠道结构（如土渠渗漏率达20%–30%，而混凝土衬砌渠可降至5%以下）、老化程度（某灌区因渠道冻胀破坏导致 $\eta_{\text{渠系}}$ 年下降0.8%）、配套设施（如缺少量水设施使配水误差达15%）；管理因素包括调度方式（如轮灌与续灌的 $\eta_{\text{渠系}}$ 差异达0.1–0.2）、维护水平（某灌区通过定期清淤使输水能力恢复20%）、用户参与（如农民用水协会管理的灌区 $\eta_{\text{渠系}}$ 比传统管理高0.15）；自然因素包括土壤质地（砂土渠渗漏损失是黏土渠的2倍）、气候条件（高温蒸发量大的地区R损失增加10%–15%）、地形坡度（陡坡渠道水流速度快但冲刷损失大）。例如，某平原灌区通过分析影响因素，针对性实施衬砌改造与自动化调度，使 $\eta_{\text{渠系}}$ 提升0.18，

证明了因素识别对优化设计的支撑作用^[2]。

(四) 渠系水利用效率提升的理论基础

理论基础涵盖水文学、水力学、经济学与系统科学四大学科。水文学理论侧重水量平衡原理,通过分析降水、径流、蒸发、渗漏等水文循环环节,明确可调控的水量损失点,如某灌区基于水平衡分析将无效蒸发量减少25%;水力学理论优化渠道水力设计,如利用曼宁公式计算最佳断面尺寸,使某梯形渠道的输水效率提升12%;经济学理论采用成本效益分析,比较衬砌、管道输水等方案的投入产出比,某项目通过该理论选择低压管道替代明渠,投资回收期仅3年;系统科学理论强调渠系-作物-环境的整体协调,如某灌区通过系统动力学模型模拟不同调度方案对 η 渠系的影响,确定最优配水策略。这些理论的交叉应用为效率提升提供了科学依据,例如某大型灌区综合运用上述理论,构建了“工程改造-智能调度-用户参与”三位一体提升模式,使 η 渠系达到0.75,处于国内领先水平。

二、灌溉渠系优化设计的主要内容

(一) 渠系布局优化设计

渠系布局优化设计以减少输水路径长度和降低输水损失为核心目标。设计过程中需结合灌区地形地貌特征,通过GIS空间分析技术确定各级渠道的最优走向,避免不必要的绕行和爬坡。干渠应布置在灌区最高地带,以实现自流灌溉控制范围最大化;支渠、斗渠等下一级渠道需根据田间地块分布和作物需水规律进行网格化布置,确保供水均匀性。同时,需考虑现有水系、道路及行政区划的协调性,减少交叉建筑物数量。对于地形复杂区域,可采用压力管道与明渠相结合的混合布局方案,通过水力计算验证不同布置方案的水头损失差异,最终选定总输水效率最高的布局方案^[3]。

(二) 渠道断面优化设计

渠道断面优化设计直接影响水流速度和输水能力。设计需依据设计流量、渠道纵坡和糙率系数等参数,通过水力学计算确定最佳断面形式。梯形断面因其施工便利性和水力稳定性成为常用选择,其边坡系数需根据土壤地质条件确定,一般粘土取1:1-1:1.5,砂土取1:2-1:2.5。底宽与水深比应控制在0.6-1.2之间,以获得最佳水力半径。对于流量变化较大的渠道,可采用复式断面设计,既满足大流量时的过流要求,又保证小流量时的水位稳定。通过曼宁公式精确计算不同断面组合的流速分布,避免产生冲刷或淤积流速,确保渠道长期稳定运行。

(三) 渠道衬砌与防渗设计

渠道衬砌与防渗设计是减少渗漏损失的关键措施。衬砌材料选择需综合考虑防渗效果、耐久性和经济性,混凝土衬砌具有强度高、糙率小的优点,其厚度根据流量大小确定,一般为8-15cm;土工膜复合衬砌防渗效果可达95%以上,适用于砂质渠道。衬砌结构设计需设置伸缩缝,间距5-10m,并采用聚氯乙烯胶泥等材料填缝,防止温度变形导致破坏。对于冻胀地区,需增设砂砾石垫层和排水系统,垫层厚度应大于当地冻土深度。防渗设计完成后需通过现场渗漏试验测定渗漏量,确保达到设计防渗标准,一般要求每公里渠道渗漏损失不超过设计流量的0.5%。

(四) 渠系建筑物优化设计

渠系建筑物优化设计旨在提升水流控制精度和减少局部水头损失。分水闸应采用平板闸门或弧形闸门,通过水工模型试验确定闸孔尺寸和闸墩形式,使过闸水流平顺,侧收缩系数控制在0.85-0.95之间。跌水与陡坡设计需通过消能计算确定消力池尺寸,使下泄水流充分消能,避免下游渠道冲刷。渡槽槽身应采用流线型断面,进出口设置渐变段,长度不小于渠道水面宽度的1.5倍,以减少水头损失。倒虹吸管需进行水头损失计算,合理选择管径和流速,一般控制流速在1.5-2.5m/s范围内,既避免泥沙淤积,又减少水头损失。所有建筑物均需进行结构强度计算,确保在设计洪水标准下的安全性^[4]。

三、灌溉渠系水利用效率提升的配套措施

(一) 水量调度与运行管理优化

水量调度与运行管理优化是提升渠系水利用效率的核心环节和关键所在。基于灌区不同作物生长阶段的需水规律和来源来水过程的动态变化特征,建立多目标、多约束的动态配水数学模型,制定分时段、分区域、分作物的精细化配水方案。在调度过程中严格贯彻“按需供水、定额管理”的基本原则,充分利用现代信息技术手段,结合实时气象预报数据、土壤墒情自动监测结果以及作物生长监测数据,对配水计划进行动态调整和优化。对于具有多水源联合调度条件的灌区,需要建立水库、塘坝与地下水协同调度的耦合模型,通过优化算法确定不同水源的最佳供水顺序与最优供水比例,最大限度地减少弃水损失和无效蒸发消耗。在渠道运行管理方面,实行科学的轮灌制度,根据渠道输水能力和作物需水特点合理划分轮灌组,严格控制渠道水位变幅在 $\pm 0.1\text{m}$ 的设计范围内,有效避免因水位剧烈波动导致的渗漏损失增加。同时,建立完善的调度效果评估与反馈

机制,定期统计分析各渠段实际供水效率指标,对偏离设计目标的环节进行诊断分析和针对性改进,形成闭环管理^[5]。

(二) 智能监测与控制系统建设

智能监测与控制系统建设是实现渠系精细化管理的重要技术支撑和基础保障。在渠道关键节点和重要部位布设高精度的自动化监测设备网络,包括超声波水位计、电磁流量计、墒情传感器和视频监控装置等,确保数据采集频率不低于每小时一次,实现渠系运行状态的实时监测和全面感知。控制系统采用先进的分层分布式体系结构,由中央控制站、区域控制站和现地控制单元三级组成,通过冗余设计和安全防护措施,实现远程自动控制与现地手动控制的无缝切换和可靠运行。通过建立精确的水力学模型与智能控制算法,实现闸门开度的自动调节和精准控制,确保水位控制误差严格控制在 $\pm 2\text{cm}$ 的技术标准内。系统需具备完善的故障诊断与多级报警功能,当监测数据出现异常波动或设备运行异常时,能够自动发出声光预警信号并启动相应的应急处理程序。所有监测数据需存储在具有容灾备份功能的中央数据库中,支持历史数据查询、趋势分析和报表生成,为调度决策提供全面、准确的数据支撑和可视化展示。

(三) 维护与管理制度完善

维护与管理制度完善是保障渠系长期高效运行的基础工作和制度保障。建立规范的渠道定期检查制度,对渠道衬砌结构、水工建筑物和机电设备进行全面系统的检查评估,检查频率不低于每月一次,重点检查衬砌裂缝发展情况、渗漏点变化趋势和闸门启闭灵活性等关键指标。制定详细的维护技术标准与标准化操作规程,明确各类问题的处理流程、技术要求和验收标准,确保维护工作规范有序开展。建立完善的维护档案管理系统,采用信息化手段记录每次检查发现的问题、处理措施和效果评价,形成完整的维护历史记录和质量追溯体系。对于重大维修项目,需组织专家进行充分的技术经济论证,通过多方案比选确定最优维修方案。同时,建立科学的维护效果评估机制,通过维修前后的渗漏量对比分析、运行参数变化监测等量化指标,客观评价维护效果,持续改进维护工作质量和管理水平。定期组织维护人员技术培训,提高维护队伍的专业素质和技术能力。

(四) 用水户参与机制建设

用水户参与机制建设是提高渠系管理效能的重要途径和社会基础。建立健全的用水户协会组织体系,明确

其在水量分配、水费收缴和渠道维护中的具体职责与法定权利,形成灌区管理单位与用水户共同参与、合作共赢的新型管理模式。制定完善的用水户参与管理制度体系,包括用水户代表大会制度、民主决策制度和监督评议制度等,确保用水户在灌区管理中的知情权、参与权和监督权得到有效落实。定期开展用水户技术培训活动,采用理论讲解、现场示范等多种形式,提高其科学用水和参与管理的能力,培训内容应涵盖灌溉制度、节水技术、设备操作和维护知识等多个方面。建立畅通的用水户反馈机制,通过定期召开座谈会、设置意见箱、开通热线电话和建立网络平台等多种渠道,及时收集用水户对供水服务的意见和建议,并建立规范的问题处理与反馈制度,确保用户反映的问题得到及时响应和有效解决。通过用水户的广泛积极参与,形成管理单位与用水户之间的良性互动机制,共同促进渠系水利用效率的持续提升。

结语

灌溉水利工程渠系水利用效率的提升是一个系统性工程,需要从优化设计、配套措施等多个方面综合施策。通过科学的理论指导和合理的实践操作,能够显著改善水资源的利用状况,为农业可持续发展提供有力保障。在未来的工作中,应继续深化对渠系水利用效率的研究,不断探索新的技术和方法,以适应不同地区、不同条件下的实际需求。同时,加强各方协作,形成政府、企业和用水户共同参与的良好局面,推动灌溉水利工程向更加高效、智能的方向发展。

参考文献

- [1] 闫晓亮.汾河灌区节水改造对灌溉水利用系数影响分析[J].陕西水利,2021(7):3.
- [2] 王宁.浅谈节水灌溉技术推广和水资源利用率提升[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(12):2.
- [3] 杨新民,吴海荣,王伟.浅谈乌拉特灌域渠系水利用效率计算方法[J].内蒙古水利,2022(002):000.
- [4] 朱忠义.新疆地区灌区渠系水利用效率及应用对策[J].水科学与工程,2021(6):3.
- [5] 翁洽.工程状况与管理水平影响的渠系水利用效率指标体系的构建[J].水利科技与经济,2022,28(11):140-143.