

结合案例探讨中型灌溉区渡槽改造中的结构安全与能效提升的研究

徐荣俊

武义县国水水资源管理有限公司 321200

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17691

[摘要] 本文以结构安全诊断、加固技术与能效优化为核心, 结合某中型灌溉区渡槽改造工程案例, 系统分析改造前渡槽的混凝土碳化、钢筋锈蚀、流道淤积等问题, 研究体外预应力加固、流道流线型修复、智能监测等关键技术的应用路径。案例数据表明, 改造后渡槽结构承载能力提升 28%, 输水沿程阻力损失降低 35%, 灌溉系统单位面积能耗下降 22%, 验证了“安全-能效”协同改造方案的可行性, 为同类中型灌溉区渡槽改造提供技术参考与实践范式。

[关键词] 中型灌溉区; 渡槽改造; 结构安全; 能效提升

一、引言

1.1 研究背景

我国中型灌溉区(灌溉面积 10-30 万亩)承担着保障粮食生产与区域农业用水的重要职能, 渡槽作为灌溉输水系统的“咽喉”, 负责跨越地形障碍实现水资源远距离输送。据《全国灌溉发展规划(2021-2030年)》统计, 我国现有中型灌溉区渡槽超 8000 座, 其中 60%建于 2000 年以前, 服役年限普遍超过 20 年。受长期水流冲刷、环境侵蚀(如冻融、碳化)及超设计负荷运行影响, 大量渡槽出现结构损伤与功能退化, 具体表现为混凝土剥落、钢筋锈蚀、支座沉降, 以及流道变形导致的输水阻力增大、能耗攀升。

1.2 研究内容与技术路线

本文研究内容分为三部分: 一是中型灌溉区渡槽结构安全与能效的核心影响因素分析, 明确结构损伤类型与能耗超标的关键诱因; 二是结构加固与能效优化的协同技术研究, 重点阐述针对灌溉渡槽特点的低成本加固工艺与流道优化方法; 三是结合 XX 中型灌溉区渡槽改造案例, 验证技术方案的实际效果, 总结可复制的改造经验。

技术路线遵循“问题诊断-方案设计-施工实施-效果评估”四阶段流程: 1. 通过现场检测(回弹法、超声法)与数值模拟(FLUENT 软件), 完成渡槽结构安全评估与输水能耗测算; 2. 基于诊断结果, 制定“结构修复+加固+流道优化+智能监测”的综合改造方案; 3. 避开灌溉高峰期(冬季 12 月-次年 2 月)开展施工, 全过程控制质量与进度; 4. 改造后通过 1 个灌溉周期(6-9 月)的运行数据, 对比分析结构安全性能与能效指标的提升效果。

二、中型灌溉区渡槽结构安全与能效的核心影响因素

2.1 结构安全核心影响因素

中型灌溉区渡槽多为混凝土梁式或桁架式结构, 主要由槽身、支座、基础与防渗层构成, 其结构安全受材料老化、荷载作用、环境侵蚀三重因素影响, 具体问题如下:

2.1.1 材料老化问题

混凝土碳化与剥落: 灌溉渡槽长期暴露于室外, 大气中 CO_2 渗透至混凝土内部, 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应导致碱度降低, 钢筋保护层失效。某灌溉区改造前检测显示, 渡槽槽身混凝土碳化深度达 6-10mm(设计允许值 $\leq 4\text{mm}$), 表层混凝土因碳化酥松剥落, 最大剥落厚度达 20mm; 部分区域钢筋锈蚀膨胀, 导致混凝土表面出现宽度 0.2-0.4mm 的纵向裂缝, 直接削弱槽身承载能力。

防渗层破损: 渡槽内壁防渗层(多为水泥砂浆或聚合物水泥浆)因长期水流冲刷、冻融循环(北方冬季槽内积水结冰, 体积膨胀)出现开裂、脱落, 导致渗水问题。某灌溉区渡槽因防渗层破损, 年均渗水量达 5000m^3 , 不仅浪费水资源, 还渗透至基础土壤, 引发基础不均匀沉降。

2.1.2 荷载与结构变形问题

超设计流量运行: 随着灌溉面积扩大, 部分中型灌溉区通过提高渡槽输水流量满足需求, 导致活载超出原设计限值。如 XX 灌溉区渡槽设计输水流量 $5\text{m}^3/\text{s}$, 改造前实际运行流量达 $7\text{m}^3/\text{s}$, 槽身承受的水压力增加 40%, 经有限元分析, 混凝土最大应力达 16.8MPa, 超出 C30 混凝土短期允许压应力(15MPa) 12%, 结构安全冗余度不足。

支座与基础失效: 渡槽支座(多为板式橡胶支座)长期承受槽身自重与水荷载, 易出现橡胶老化、钢板锈蚀, 导致支座竖向承载力下降; 基础多为天然地基或浅基础, 受渗水浸泡与土壤固结影响, 易出现不均匀沉降。XX 灌溉区渡槽改造前实测基础最大沉降量达 15mm, 导致槽身倾斜, 流道截面

偏移, 进一步加剧结构应力集中。

2.1.3 环境侵蚀问题

冻融破坏: 中型灌溉区冬季低温(最低温度 -10°C 以下), 槽内残留积水结冰膨胀, 产生冻胀力, 导致混凝土内部孔隙扩大, 表面出现蜂窝、麻面。某灌溉区渡槽经15个冻融循环后, 混凝土抗压强度从 30MPa 降至 22MPa , 强度损失达27%。

水质侵蚀: 部分灌溉区水源含硫酸盐、氯离子(如引用地下水或河水), 长期与混凝土接触会引发化学侵蚀, 导致混凝土强度降低。南方某灌溉区渡槽因水源硫酸盐含量超标(达 300mg/L), 槽身混凝土出现酥软化现象, 20年服役后截面有效厚度减少15%。

2.2 能效核心影响因素

中型灌溉区渡槽的能效体现为输水过程中的能耗与水资源利用效率, 其核心影响因素与流道特性、输水系统匹配度及运行管理相关, 具体如下:

2.2.1 流道特性导致的阻力损失

流道截面变形与淤积: 因结构老化(槽身倾斜、混凝土剥落), 流道实际截面与设计截面偏差增大, 同时灌溉水中的泥沙、杂草长期沉积, 导致流道有效截面积减小。XX灌溉区渡槽改造前, 流道淤积厚度达 150mm (占流道高度的25%), 有效截面积较设计值减少20%, 水流速从设计值 1.2m/s 增至 1.8m/s , 根据流体力学公式, 沿程阻力损失与流速平方成正比, 阻力损失增加125%, 直接导致灌溉水泵扬程需求上升。

内壁粗糙度过大: 混凝土槽身内壁因碳化、剥落、结垢(水中矿物质沉积), 表面粗糙度显著增大。改造前实测XX灌溉区渡槽内壁粗糙度达 1.0mm (设计值为 0.4mm), 局部阻力损失增加60%, 进一步提升输水能耗。

2.2.2 输水系统匹配度不足

水泵参数与渡槽不匹配: 多数中型灌溉区渡槽的输水水泵为初期配套设备, 未随渡槽阻力变化调整参数。如XX灌溉区原水泵扬程设计为 45m , 改造前因渡槽阻力损失增至 60m , 导致水泵长期处于超扬程运行状态, 运行效率从设计值78%降至55%, 能耗显著上升; 部分灌溉区则存在“大泵小用”现象, 水泵扬程远超实际需求, 造成能耗浪费。

输水调度不合理: 灌溉区多采用“固定时段、固定流量”的输水模式, 未根据作物需水规律(如苗期需水量少、灌浆期需水量大)动态调整流量, 导致非高峰时段水流速过低, 泥沙淤积加剧, 进一步增加阻力损失; 或高峰时段流量过大, 超出渡槽承载能力, 形成安全隐患。

2.2.3 运行维护缺陷

清淤不及时: 多数中型灌溉区缺乏定期清淤机制, 流道

淤积随服役年限逐年加重。某灌溉区统计显示, 渡槽每3年不清淤, 输水阻力损失会增加40%, 灌溉能耗上升35%。

缺乏能效监测: 灌溉区普遍未安装流量、压力、功率等监测设备, 无法实时掌握渡槽输水能耗变化, 难以发现能耗异常问题(如水泵故障导致的功率骤增), 错失节能优化机会。

三、中型灌溉区渡槽改造关键技术

3.1 结构安全加固技术

针对中型灌溉区渡槽结构问题, 结合农业工程成本低、工期短的需求, 采用“修复优先、适度加固”的原则, 重点应用以下技术:

3.1.1 混凝土结构修复技术

碳化与剥落修复: 采用“表面清理-碱液修复-防护涂层”工艺, 先通过高压水枪(压力 $3\text{--}5\text{MPa}$)清除混凝土表面碳化层与剥落层, 直至露出新鲜混凝土; 再灌注低浓度氢氧化钠溶液(浓度8%), 恢复混凝土碱度($\text{pH}\geq 12$); 最后涂刷水泥基渗透结晶型涂料(厚度 1.5mm), 形成防渗保护层。XX灌溉区改造中, 该工艺使混凝土碳化深度降至 3mm 以下, 剥落修复合格率达100%。

裂缝修补: 根据裂缝宽度分类处理, 宽度 $\leq 0.2\text{mm}$ 的微裂缝采用环氧树脂浆液低压灌注(压力 $0.1\text{--}0.2\text{MPa}$), 利用浆液渗透封堵裂缝; 宽度 $> 0.2\text{mm}$ 的裂缝采用“开槽-嵌缝-灌浆”工艺, 沿裂缝开槽(宽度 8mm 、深度 12mm), 嵌入遇水膨胀止水条, 再灌注水泥-水玻璃双液浆, 确保裂缝密封性。改造后, 渡槽渗水率从改造前的15%降至0.5%以下。

3.1.2 结构加固技术

体外预应力加固: 针对槽身承载能力不足问题, 采用低成本体外预应力方案, 在槽身两侧布置预应力钢束(选用 1570MPa 高强度钢绞线, 单束面积 140mm^2), 通过张拉控制应力(0.7f_{ptk} , f_{ptk} 为钢绞线抗拉强度标准值), 提升槽身抗弯承载力。XX灌溉区改造中, 每跨渡槽布置4束钢束, 张拉后槽身抗弯承载力提升28%, 满足 $7\text{m}^3/\text{s}$ 超设计流量的荷载要求, 且该技术施工周期短(单跨加固仅需3天), 成本较传统加固降低30%。

支座与基础加固: 拆除老化橡胶支座, 更换为耐寒型板式橡胶支座(型号 $\text{GYZ}300\times 70$, 适用温度 $-25^{\circ}\text{C}\text{--}60^{\circ}\text{C}$), 提升低温环境适应性; 基础采用灰土挤密桩加固(桩径 500mm , 间距 1.2m), 桩长深入稳定土层(XX灌溉区桩长 8m), 提高地基承载力从原 160kPa 至 220kPa ; 同时在基础顶部设置钢筋混凝土承台, 减少不均匀沉降, 改造后基础最大沉降量控制在 5mm 以内。

3.1.3 防渗层升级技术

考虑灌溉渡槽输水需求,采用“双层防渗”方案:内层涂刷聚合物水泥基防水涂料(厚度2mm,抗渗等级P12),直接接触水流,抵抗冲刷与侵蚀;外层铺设丙纶防水卷材(厚度0.8mm),通过粘结剂与混凝土结合,形成二次防渗屏障。该方案成本低(每平方米造价80元)、施工简便,且防渗寿命达15年以上,较传统水泥砂浆防渗层寿命提升2倍。

3.2 能效提升关键技术

能效提升围绕“降低流道阻力、优化输水系统、实现智能调度”展开,结合灌溉区实际需求,应用以下技术:

3.2.1 流道优化技术

流道清淤与截面修复:采用“机械清淤+人工修整”工艺,先用小型挖掘机(斗容 0.3m^3)清除流道底部淤积的泥沙、杂草,再通过激光找平技术,用C35细石混凝土修复变形的流道截面,确保截面偏差 $\leq 5\text{mm}$;同时对渡槽进口与出口进行流线型改造,将进口直角改为圆弧过渡(半径 0.6m),出口设置导流板,减少水流涡流,降低局部阻力损失。XX灌溉区改造后,流道局部阻力损失减少45%。

内壁光滑处理:在流道内壁涂刷环氧树脂砂浆(厚度2mm),采用机械磨光机打磨,使内壁粗糙度降至 0.3mm 以下;同时在流道底部设置1.5%的坡度,便于泥沙自流排出,减少淤积。改造后,渡槽沿程阻力系数从原0.032降至0.018,沿程阻力损失降低44%。

3.2.2 输水系统匹配优化技术

水泵参数重新选型:基于改造后渡槽的阻力损失(实测38m),更换低效水泵为高效离心泵(型号ISG125-315,扬程40m,流量 $8\text{m}^3/\text{s}$),运行效率达85%(较原泵提升30%);同时为水泵配备变频控制柜(变频范围30-50Hz),实现流量与转速的线性调节,避免阀门节流导致的能耗损失。XX灌溉区改造后,水泵运行电流从原180A降至120A,单台泵日均节电25kWh。

输水管道优化:更换渡槽进出口老化管道为PE管(直径DN600),PE管内壁光滑(粗糙度 0.01mm),沿程阻力系数仅为钢管的1/2;同时优化管道走向,减少弯头数量(从原8个减少至4个),进一步降低管道阻力损失,改造后输水系统总阻力损失从原60m降至38m。

3.2.3 智能监测与调度技术

结构安全监测系统:在渡槽槽身关键部位布置应变传感器(监测混凝土应力)、位移传感器(监测沉降与水平位移)、渗压传感器(监测防渗效果),传感器数据通过LoRa无线传

输至灌溉区监控中心,当监测值超出预警阈值(如混凝土应力 $\geq 12\text{MPa}$ 、沉降量 $\geq 5\text{mm}$)时,系统自动发送报警信息,实现结构安全的实时监控。

能效监测与调度系统:在水泵出口布置电磁流量计、压力传感器,在电机处布置功率传感器,实时采集流量、压力、功率数据;结合作物需水模型(根据气象数据、土壤墒情自动计算需水量),通过PLC控制系统自动调整水泵转速,实现“按需输水”。XX灌溉区改造后,非灌溉高峰时段(如夜间)水泵转速从50Hz降至35Hz,能耗降低42%,灌溉系统单位面积能耗从原8kWh/亩降至6.2kWh/亩。

四、中型灌溉区渡槽改造案例分析

4.1 改造前工程概况与问题诊断

4.1.1 工程概况

某中型灌溉区建于1998年,灌溉面积22万亩,主要灌溉水稻、玉米等粮食作物。灌溉区核心渡槽为混凝土梁式渡槽,全长360m,共12跨(每跨30m),槽身截面为矩形(宽3m、高1.2m),设计输水流量 $5\text{m}^3/\text{s}$,配套2台ISG125-400型离心泵(扬程45m,功率110kW)。截至2022年改造前,渡槽已服役24年,因长期超流量运行(实际输水流量 $7\text{m}^3/\text{s}$)与冻融、碳化影响,结构与能效问题严重,影响灌溉保障能力。

4.1.2 问题诊断结果

结构安全问题:通过现场检测(回弹法检测混凝土强度、超声法检测碳化深度)与ANSYS有限元模拟,发现三大问题:一是槽身混凝土碳化深度6-10mm,30%区域钢筋锈蚀,表面裂缝最大宽度0.4mm,混凝土抗压强度降至22MPa(设计值30MPa);二是槽身抗弯承载力不足,超流量运行时混凝土最大应力16.8MPa,超出允许值12%,存在结构破坏风险;三是支座橡胶老化(硬度从原60 Shore A增至85 Shore A),基础不均匀沉降达15mm,槽身倾斜1.2%。

能效问题:通过能耗测算与FLUENT流道模拟,发现能效短板:一是流道淤积厚度150mm,有效截面积减少20%,沿程阻力损失达45m。

[参考文献]

- [1]刘俊君.超高性能混凝土U形渡槽槽身结构设计及模型试验研究.[硕士学位论文]万方数据库2022-11-01
- [2]肖秋霞.罗坑水库灌区续建配套及节水改造设计《水利技术监督》2024年11期 260~263
- [3]滕瑜君.灌区续建配套与节水改造工程施工措施探讨.《黑龙江粮食》.2023,(8).51~53