

# 隧洞及渠首建筑物在中小型灌溉系统中的适应性调整

高玉龙

新疆科新工程管理咨询有限公司，新疆巴音郭楞，841000；

**摘要：**本文以中小型灌溉系统隧洞和渠首建筑物为研究对象，对它们在设计、工艺、维修和系统效率上的主要问题进行了系统的分析。针对设计标准化中存在的脱离当地条件、结构功能错配、设施老化失修、管理粗放的核心难题，建议强化适应性设计、优化结构功能，建立长效管护机制与集成智能技术的综合调整策略。研究认为：以技术和管理协同创新是灌溉系统提质增效和可持续发展的关键路径。

**关键词：**中小型灌溉系统；隧洞工程；渠首建筑物；适应性设计；智能灌溉

**DOI：**10.69979/3060-8767.26.03.042

隧洞和渠首建筑物作为灌溉输水系统中的重点控制性工程，设计的合理性和运行的可靠性直接关系到水资源利用效率和灌溉保障能力。特别是中小型灌溉系统，由于资金、技术和管理条件的限制，这类建筑往往面临着设计标准化脱离当地条件，设施老化和技术落后的难题。本研究的目的在于对其存在的问题进行系统的分析，探索适应性调整的策略，为促进灌溉系统整体效能的发挥提供借鉴。

## 1 隧洞及渠首建筑物的基本概念

### 1.1 隧洞建筑物在灌溉系统中的作用

隧洞作为跨越山体或者地下输水廊道，担负灌溉系统关键性输配水作用。它的核心功能是克服地形屏障的影响，以最短的道路，较低的水头损失及较好的封闭性来达到水资源有针对性、有效地、可靠地传输<sup>[1]</sup>。与绕行明渠相比，隧洞可显著降低占地，避免一路蒸发渗漏的流失，有效地保护水体不受污染。特别是山丘地区，隧洞成了联系水源和灌区的“主动脉”。它是保证灌溉面积和水资源空间优化配置必不可少的工程工具，对于整个系统运行的效率和稳定性起着决定性的影响。

### 1.2 渠首建筑物的功能及其对灌溉系统的影响

渠首建筑物是建于水源（如河流、水库）岸边或坝端的取水枢纽，是灌溉系统的“咽喉”。它的主要作用是按照灌区的需要，系统地引走规定的水量，同时完成水流中泥沙和漂浮物的治理和处理，例如建立拦河坝以提高水位，冲沙闸以排沙以及进水闸以调节流量<sup>[2]</sup>。渠首设计和运行质量的优劣，直接决定着引进灌区的水量大小，水质优劣和取水可靠性。有效的渠首可以最大限度地发挥有限水源的作用，降低泥沙淤积给渠道造成的

损失，以保证下游输配水网络整体畅通和长远效益，并对灌溉系统可持续运行产生深远影响。

## 1.3 中小型灌溉系统的特点与需求

中小型灌溉系统一般都是为区域性农田服务，其特点是项目规模比较小、分布广，与农业生产单元直接接近等。它要求的核心是实用性、经济性和易维护性。这种系统通常资金投入是有限的，所以要求隧洞、渠首及其他建筑物既要满足输水和调控的基本功能，又要追求结构型式简单，造价较低，施工方便，同时又要适应各地的材料和施工技术条件<sup>[3]</sup>。同时由于管理维护力量比较弱，项目要求可靠性高、耐久性好、操作运行追求简单直观等。因此其设计和施工需要特别注意密切结合当地地形地质、水源条件和管理能力等因素，以寻求最佳的经济和收益。

## 2 隧洞及渠首建筑物在中小型灌溉系统中的存在问题

### 2.1 隧洞建筑物设计不适应性问题的

中小型灌溉系统隧洞工程普遍存在着设计标准脱离地方实际情况。很多隧洞在设计阶段常直接套用大型工程标准图集或者简化经验公式进行设计，没有充分考虑项目区具体地质构造、水文条件及施工能力等因素<sup>[4]</sup>。如复杂破碎岩层或者膨胀土区域的支护结构设计过弱，造成施工期及运行期塌方危险性增大；衬砌型式简单，未按围岩状况及内外水压力有区别地设计，使某些地段衬砌出现裂缝，漏水现象严重，另一些地段则有过度设计浪费现象。另外水力设计简陋，进口流态，沿程水头损失及出口消能等方面的计算不充分，往往造成实际过流能力无法达到设计值或诱发严重的淤积及气蚀破坏

等<sup>[5]</sup>。这样的“一刀切”设计策略导致隧道在完工后的适应能力较弱，存在明显的安全风险，很难在经济和安

全之间找到一个平衡点。中小型灌溉隧洞设计主要问题案例见表1。

表1 中小型灌溉隧洞设计主要问题案例

问题类型	具体表现	典型案例/影响
地质适应性不足	支护方案与实际围岩条件不符，导致施工期安全隐患	西南某灌区隧洞因低估断层影响，施工中发生塌方，工期延误超半年，处理费用增加35%
结构设计标准化	机械套用标准断面与衬砌，未考虑局部应力与水文变化	西北一引水隧洞采用等厚衬砌，运行3年后在高压渗水段出现多处环向裂缝，渗漏量显著增加
水力设计不完善	忽视局部水头损失与流态优化，实际过流能力偏低	华中某隧洞因进口型式不佳产生涡流，实测过流能力仅为设计值的82%，无法满足下游灌溉峰值需求
耐久性设计缺失	未针对环境腐蚀、冻融等作用采取专门防护措施。	北方一隧洞洞口段衬砌因未考虑冻融循环，5年后混凝土大面积剥落，钢筋裸露锈蚀，修复困难

## 2.2 渠首建筑物存在的技术瓶颈

中小型渠首在技术上面临引水可靠性低与泥沙处理能力弱的双重瓶颈。受投资制约，常采用简易的底栏栅或无坝引水形式，在枯水期或洪水期难以稳定控制引水流量与水位，保证率不高。泥沙问题特别严重，大部分渠首缺乏高效低耗沉沙和排沙设施，致使大量泥沙流入下游渠道并产生严重淤积现象，每年都需要花费大量的人力和物力进行清淤工作。另外，缺少准确的量水和调控设备，自动化程度很低，水量配置粗放，很难做到按需，准确引水，限制水资源高效利用。

## 2.3 设施老化与维护困难

大量已建的隧洞和渠首建筑物作业年代较早，一般都进入了老化期。混凝土结构的碳化，剥蚀和钢筋锈蚀以及砌石结构勾缝的剥落和变形和金属结构的锈死和磨损以及机电设备的报废日趋严重。但在维护改造中却遇到了很大的难题：专项维修资金不足，很多病害仅能做临时性的修复；专业技术力量弱，基层管理单位检测评估和修复能力不强；一些项目的建设时期规范不高，数据缺失等问题也造成了修复设计的难度。这种“带病运行”的状态不仅会出现功能衰减的现象，而且还会带来安全隐患，时刻都有可能诱发局部失稳乃至损坏。

## 2.4 灌溉系统效率低下

从系统整体看，隧洞和渠首的功效没有完全发挥出来，造成灌溉水利用效率较低。隧洞渗漏损失得不到有效治理和渠首引水调度不够科学等原因使输水由水源向田间输水时造成了大量水量流失。两者之间以及与其他渠道的建筑连接，经常出现不协调的情况，导致水流受阻，从而进一步提高了输水的阻力和时间消耗。管理中缺乏统一调度和信息化手段，常凭经验操作而不能达到水资源时空优化配置。其最终成果是：有限水资源在

输送环节上遭到了极大浪费，实际灌溉面积及灌溉保证率均未达到设计目标，项目整体效益也远远低于期望。

## 3 隧洞及渠首建筑物的适应性调整策略

### 3.1 加强隧洞设计的适应性调整

中小型灌溉隧洞设计要彻底改变传统的“标准化套用”方式，向以精细勘察和动态反馈为基础的适应性设计转变。首先要促进地质勘察精度和深度的提高，结合地质雷达，钻孔成像技术手段构建精确地质模型作为个性化支护和衬砌设计依据。以云南的一个山区灌溉项目为例，设计团队遵循了“地质分段、动态设计”的策略：在稳定的岩层部分使用喷锚作为支撑，对于破碎的带使用钢拱架和超前注浆进行加固，而在浅层软弱区则选择了加强型钢筋混凝土作为衬砌材料。这种差异化的设计策略使得工程的总投资相较于原先的标准化方案减少了大约15%，并且在施工过程中没有发生任何安全事故。水力设计需要借助于数值模拟手段对进口渐变段、弯道和出口消能工形式进行优化，以保证流态顺畅和过流能力合格。最后要编制出适合本区域的标准化参考图集和设计指南，以便为类似项目提供一个既规范又灵活的技术框架。

### 3.2 优化渠首建筑物的结构与功能

针对渠首“引水”与“排沙”的矛盾以及适应水文变化能力不足的问题，优化策略应聚焦于结构创新与智能调控。在结构上，大力推广分层取水和导流墙与冲沙廊道相结合的新布置型式。以甘肃的一个灌区为例，他们对原有的侧面引水式渠首进行了一系列的改进，如增加了底部的冲沙通道和曲线导流墙，这使得流入渠道的泥沙减少了超过70%，有效地解决了渠道的淤积问题。对于水文变幅大的河流，可考虑采用活动坝（如橡胶坝，液压升降坝）或带有调节闸门的低堰组合，从而灵活调

节壅水高度, 兼顾枯水期引水与汛期泄洪安全。从功能上看, 要积极对小型渠首进行自动化改造、加装水位、流量传感器和电动启闭装置等设备, 同时设置远程监控系统以实现依据下游需水情况以及河道来水情况进行自动调节, 促进水资源调度准确及时。

### 3.3 提升设施的维修与管理能力

破解设施老化与维护困局的关键在于构建“资金保障, 技术支撑, 机制健全”三位一体的长效管护体系。在经费方面, 要明晰工程产权和管护主体, 设立以财政补助为主, 水费收入和社会资本等为辅的维修养护基金和实行“以奖代补”等机制, 对业绩较好的管理单位进行奖励。技术上需为基层管理单位配备简易检测工具, 并定期开展专业技能培训, 同时探索与专业机构合作的“定期体检”与“病害诊断”服务模式。在机制上要实行工程标准化、精细化管理, 对每一条隧洞及渠首都要建立包括设计图纸, 施工记录, 历次维修档案等内容的“健康身份证”; 要制定周密的日常检查, 定期检修及应急预案。例如陕西的某个灌区管理局采纳了上述的综合策略, 成功地将主要建筑的完好状态从65%提高到了

90%, 同时每年的紧急救援次数也减少了60%。

### 3.4 利用新技术提升灌溉效率

现代信息和工程技术对系统性地提高灌溉效率具有很强的推动作用。感知层面通过布设于渠首, 关键隧洞和分水口的物联网传感器对水位、流量、闸门开度和工程应力应变状态等信息进行实时监控, 构成全域数字感知网络。调度层面上, 以监测数据和作物需水模型为基础, 研发灌区智能调度系统以实现渠首引水至田间配水整个流程的自动化决策和远程控制。以宁夏的一个中型灌区为例, 通过构建这种智能平台, 渠系的水利用效率从0.55增加到了0.68, 每年节省的水量超出了200万立方米。在工程新材料和新技术的应用中, 大力推广采用高性能抗渗混凝土和玻璃钢夹砂管作为耐久性材料修补隧洞衬砌; 渠首用新型耐磨蚀材料做闸门止水及过流面; 本研究旨在探讨如何运用地理信息系统(GIS)和建筑信息模型(BIM)技术来进行工程项目的数字化建模和全生命周期管理, 从而为项目的规划、设计和维护提供一个统一的平台。灌溉系统新技术应用实例及效能提升见表2。

表2 灌溉系统新技术应用实例及效能提升

技术类别	应用场景	实施效果/数据
智能感知与控制	渠首及干渠关键节点	实现7×24小时无人值守监测与调控, 响应时间由小时级缩短至分钟级, 人力成本降低约40%。
智慧调度平台	全灌区水资源统一调度	年均节水率达15%-25%, 灌溉水有效利用系数平均提升0.1-0.15, 灌溉保证率提高至90%以上。
新材料应用	隧洞衬砌修复与新建	材料抗渗等级提高1-2级, 修复后渗漏量减少80%以上, 结构设计使用年限延长至少15年。
数字化建模与管理	工程规划、设计、施工与维护	设计效率提升约30, 施工期工程变更减少25%, 运维阶段可精准定位病害, 维修成本降低20%。

## 4 结论

综上所述, 中小灌溉系统隧洞和渠首建筑物为保证系统效能发挥的关键环节。针对其设计脱节, 技术瓶颈, 老化失管和效率低等主要问题, 需要采用以精细化勘察和动态设计为主线, 整合结构优化, 智能调控和长效管护机制的适应性调整策略。同时积极引进物联网, 自动化调度以及新材料等新技术是系统性地提高灌溉效率和可持续集约利用水资源的必经之路。唯有通过技术与管理协同创新, 才能确保工程长期安全运行并发挥最大效益。

### 参考文献

- [1] 张东生, 李洪涛. 农田水利灌溉中小型水闸工程的施工技术与质量控制[J]. 南方农机, 2025, 56(14): 187-190.
- [2] 李建永. 巨野县中小型农田智能灌溉技术应用可行性分析[J]. 农业工程技术, 2025, 45(17): 61-62.
- [3] 华有斌, 曾昭献, 姜文卿. 一种智能农业灌溉系统设计与实现[J]. 南方农机, 2025, 56(24): 72-74.
- [4] 梁晓波. 灌溉系统性能评估与水资源管理策略研究[J]. 水利技术监督, 2026, (01): 56-61.
- [5] 赵立策, 田娅娟, 郭一君, 等. 小型光伏提水灌溉系统设计及运行稳定性分析[J]. 水电站机电技术, 2025, 48(12): 163-166.