

大型提灌工程输水暗渠水力震荡过程及破坏特征研究

文 / 刘义强 甘肃省景泰川电力提灌水资源利用中心

刘锦宇 昆明理工大学

摘要：大型提灌工程的输水暗渠在长期运行里，水力震荡现象频繁出现，极大影响了工程的安全与耐久。本文依托多个实际工程，全面剖析了输水暗渠水力震荡的诱发因素、动态传播过程以及对结构的破坏方式。水流瞬变、阀门操作有误和系统共振等因素相互作用引发了水力震荡，其破坏特点有衬砌开裂、接缝渗水和材料剥蚀等。采取优化运行调度、增设缓冲装置和增强结构抗震能力等措施，能有效降低水力震荡的风险。本研究对提灌工程暗渠的设计、施工与维护意义重大。

关键词：大型提灌工程；输水暗渠；水力震荡过程；破坏特征

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.012

引言

输水暗渠是大型提灌工程中至关重要的输水结构，运行稳定性对灌溉效率和工程使用寿命起着直接作用。不过在实际运作时，水力震荡引发的压力波动与结构振动问题愈发显著，已成为工程安全的主要隐患。尤其是在多泵联动、流量骤变等复杂工况下，暗渠的水力-结构耦合响应机制还不清晰。所以要剖析水力震荡的动态发展规律，制定分级防控策略，保证其稳定性。

表 1 典型水流突变工况及压力波特征（某工程）

工况类型	压力波幅值 (MPa)	传播速度 (m/s)	主要影响区段
泵组突然停机	0.4 ~ 0.8	800 ~ 1200	泵站下游 1 ~ 3km
阀门快速关闭 (10s)	0.6 ~ 1.2	900 ~ 1300	阀门上游 200 ~ 500m
流量阶梯式调节	0.2 ~ 0.5	700 ~ 1000	全管线均匀分布

在某提灌工程里，主泵站因电力故障突然停机，压力监测系统显示下游 3km 处出现压力峰值，达 0.7MPa，约为正常工作压力的 1.8 倍。这一压力波在 30 秒内往复震荡 4 次，致使多处伸缩缝止水带撕裂。与之情况类似，某调水工程中，流量在 5 分钟内从 10m³/s 调至 4m³/s 时，管道中部测点观测到持续 15 分钟、压力在 0.3-0.4MPa 的低频压力波动，最终引发衬砌混凝土疲劳裂纹。

（二）阀门操作不当加剧震荡

阀门是流量调节的关键设备，其操作方式对水力系统稳定性影响显著。快速开关阀门会大幅提升水锤压力，操作时序有误还可能造成压力波叠加共振^[1]。工程实践显示，阀门关闭时间和压力升高值呈明显非线性关系，当关闭时间小于临界值，压力增幅会呈指数式上升。曾有平原灌区工程，检修阀在 8 秒内完全关闭，上游 200m 处记录到 1.1MPa 瞬态压力，超出设计承压能力 130%。事后模拟分析表明，若将关闭时间延至 25 秒，压力峰值可降至 0.6MPa 以下。另外，阀门类型选择也很关键，蝶阀因流道突变易产生涡流、诱发高频振动，锥形阀则凭借线性流量调节可有效降低震荡风险。

（三）系统共振放大破坏效应

当水力震荡频率接近暗渠结构固有频率，会引发流体-结构耦合共振，大幅放大破坏效应。暗渠固有频率主要由材料刚度、断面尺寸和覆土约束条件决定。现场

一、输水暗渠水力震荡的形成机理

（一）水流突变引发震荡

输水暗渠水力震荡最常见的诱发因素是水流突变，多在泵站启停、事故停机或流量急剧调节等工况下出现。当水流速度骤然改变，受水体惯性影响，管道内会形成以声速传播的压力波，也就是水锤波。此压力波在碰到管径改变处、弯头或封闭端时会反射，与入射波叠加后产生复杂的压力振荡。

振动测试发现，典型混凝土箱涵一阶固有频率多在 2—5Hz，水锤压力波基频通常为 0.1—10Hz，二者存在频带重叠风险。某输水工程出现周期性渗漏事故，频谱分析发现，泵站 4 台机组间隔 5 分钟交替运行产生的 1.2Hz 压力波动，与暗渠 1.25Hz 固有频率相符。共振使连接螺栓轴向力波动幅度达设计值 3 倍，致使橡胶密封垫蠕变失效^[2]。这提示运行调度时需避开“转速-管长-结构”组合的共振条件，必要时可增加结构阻尼（如内衬橡胶层）改变系统振动特性。

二、水力震荡对输水暗渠的破坏特征

水力震荡对输水暗渠的破坏是个复杂渐进的过程，不仅造成结构表观损伤，还深刻影响暗渠长期性能与安全稳定。材料层面，反复水力冲击使混凝土衬砌产生微裂纹并扩展成网状，裂缝变宽会使钢筋与混凝土黏结性能劣化、锈蚀加快，钢材锚固件还易应力腐蚀开裂。构造方面，水力震荡显著破坏暗渠接缝，伸缩缝止水材料会出现塑性累积损伤，螺栓连接节点松动，法兰连接管段密封垫片变形，增加渗漏风险。功能上，表面损伤改变暗渠水力特性，空蚀使糙率系数增大、水力损失增加，渗漏加剧会造成资源浪费与土体变形。不同区段破坏特征有别，泵站或阀门下游易衬砌压裂，凸起部位常见空蚀破坏，转弯或变径处易局部冲刷。从时序看，运行初期是表面轻微损伤和接缝微渗漏，中期裂缝扩展、材料

退化明显，10 年以上可能出现重大结构损伤。因此，对水力震荡的防控需贯穿工程全寿命周期。

三、影响水力震荡破坏程度的因素

暗渠在水利工程中应用广泛，其水力震荡破坏受多种因素影响，需综合考量以保障工程安全。暗渠结构型式对抵抗水力震荡能力影响显著。矩形箱涵侧向刚度大，能抵抗水平向水力冲击，但转角易应力集中，导致混凝土保护层开裂与钢筋锈蚀，适用于浅埋段，需加强角部配筋。圆形隧洞环向受力优，抗裂性好，但接头是薄弱环节，适用于深埋段，要重视接头防水。U 型槽水力条件佳，但底板抗浮弱，适用于明挖段，要做好抗浮设计。暗渠结构选择需综合抗震、水力、施工等因素。材料性能对水力震荡破坏发展起决定性作用。混凝土是主要结构材料，普通 C30 混凝土抗裂性差，改性混凝土优势明显。止水材料性能关键，新型遇水膨胀止水材料力学性能稳定，疲劳寿命长。碳纤维复合材料常用于结构加固，能提升抗弯承载力、控制裂缝宽度，但加固效果与施工工艺有关。运行管理方式是预防水力震荡破坏的关键。需实施精细化控制，降低水力冲击，维持系统稳定。运行管理包括阀门操作、泵站调度、监测预警等方面，要构建完整规程与应急预案。阀门操作要严格把控时间，快速启闭易引发震荡，工程实践显示，阀门关闭时间与压力峰值呈明显的负相关关系，延长操作时间能有效减轻震荡强度。为规范操作流程，可依据管径制定分级控制标准，具体如下表 2 所示：

表 2 阀门操作时间建议标准

管径 (mm)	最小关闭时间 (s)
DN ≤ 800	20
800 < DN ≤ 1500	30
DN > 1500	45

四、水力震荡防治措施

(一) 优化阀门操作程序

优化阀门操作程序是控制水力震荡的基础。合理的启闭策略能平衡调节效率与压力稳定性，不当操作易引

表 3 不同类型缓冲设施的适用条件

设施类型	适用场景	设计要点	消能效率
调压井	管线高程突变段	容积 ≥ 3 倍管段水体积	60% ~ 75%
空气阀	管线凸起部位	启闭压力差 ≤ 0.1MPa	30% ~ 50%
减压池	下游水位波动大的区段	池长 ≥ 10 倍管径	40% ~ 60%

(三) 结构加固技术

在水利工程中，输水暗渠受水力震荡影响后，恢复其承载能力、延长使用寿命极为重要，而结构加固是关键所在。选择加固方案时，要综合考量破坏形式、结构类型、材料性能和施工条件等多方面因素，以确保加固后的结构能有效抵御后续水力荷载的反复作用。合理的加固技术不仅能修复现有损伤，还能显著提升结构的整体抗震和抗冲击性能，降低未来水力震荡引发破坏的风险。在裂缝修复方面，环氧树脂注浆技术优势明显。该技术凭借其优异的渗透性和粘结强度，将低粘度环氧树脂材料通过压力注浆注入裂缝内部，形

成连续补强体，恢复结构整体性。施工时，要严格把控注浆压力（通常为 0.3-0.5MPa）和速度，防止对原有结构造成二次损伤。对于微裂缝，改性环氧树脂材料修复效率可达 90% 以上，且长期可靠性高。对于大面积表面剥落或强度严重降低的区段，碳纤维布粘贴加固技术效果显著。碳纤维材料高强度、轻质且耐腐蚀，通过专用粘结剂分层粘贴在结构表面形成复合加固层。基底处理是关键施工环节，其质量直接影响黏结效果。加固后，结构抗弯承载力提升，与原结构协同工作性能良好。当暗渠出现严重变形或局部坍塌时，钢衬砌加固是可靠之选。通过在原有结构内侧安装钢制内衬并

发水锤效应和结构振动。系统优化要综合考虑阀门特性、管道参数和运行工况。

阀门操作时间影响水锤压力幅值，过短关闭时间会使水流动能急剧转化为压力能。对于典型混凝土暗渠系统，每公里管段关闭时间至少需 2 秒，实际工程常采用更保守标准。大口径管道阀门操作宜采用“先快后慢”的分级控制策略，可显著降低最大水锤压力，提升水力稳定性。阀门类型选择也很关键。蝶阀适用于中等管径管路，但要注意 90° 关闭位置的水锤风险；球阀低流阻，适合高压管路；闸阀虽流阻大，但在精确调节场合有优势；锥形阀可调流态，适合大管径流量控制。选型需综合管径、压力和流量特性。现代智能控制系统为阀门操作调控提供新手段。基于 PLC 控制的电动执行机构可实现可编程启闭曲线，通过实时压力反馈动态调节，具备加速度控制、故障自诊断和远程监控等功能，让阀门操作更安全可靠^[6]。操作人员专业素质是确保阀门操作安全的关键。规范培训体系应涵盖水锤理论、操作规程、异常识别和应急处置等内容。定期专项演练能让操作人员掌握特殊情况处理方法，经过培训的操作团队可大幅降低人为操作失误，提升系统运行可靠性。

(二) 增设缓冲设施

缓冲设施是缓解输水暗渠水力震荡的关键工程措施。通过改变水流状态或提供额外空间，吸收和耗散压力波动能量。选型与布置要综合考量管线走向、地形条件和运行工况等，确保在不同水力条件下稳定发挥效能。调压井是常见缓冲设施，消能效率和井体尺寸、连接方式有关。若调压井容积达保护管段水体量 3 倍以上，可削减 60% ~ 75% 压力波动峰值。受地形限制时，可采用串接式小型调压室分布式布置。空气阀应用需精确控制启闭特性，快开慢闭型且启闭压差在 0.05-0.1MPa 范围最佳，能排气囊还防二次水锤。安装高度要高于管线顶点 1.5 倍管径，确保排气彻底。减压池适用于下游水位波动大的输水末端，池长 10 倍管径、池宽 3 倍管径可形成径流消能区。含沙量高的工程，池底要设沉沙槽和冲沙闸，防泥沙淤积。

成连续补强体，恢复结构整体性。施工时，要严格把控注浆压力（通常为 0.3-0.5MPa）和速度，防止对原有结构造成二次损伤。对于微裂缝，改性环氧树脂材料修复效率可达 90% 以上，且长期可靠性高。对于大面积表面剥落或强度严重降低的区段，碳纤维布粘贴加固技术效果显著。碳纤维材料高强度、轻质且耐腐蚀，通过专用粘结剂分层粘贴在结构表面形成复合加固层。基底处理是关键施工环节，其质量直接影响黏结效果。加固后，结构抗弯承载力提升，与原结构协同工作性能良好。当暗渠出现严重变形或局部坍塌时，钢衬砌加固是可靠之选。通过在原有结构内侧安装钢制内衬并

灌浆填充空隙，形成钢—混凝土复合受力体系，能承受内部水压力，约束结构变形。选择加固方案时，需兼顾经济性和施工可行性。环氧树脂注浆适用于早期轻微损伤，施工快捷、成本低；碳纤维加固适合中等

程度损伤，能平衡修复效果和长期性能；钢衬砌用于严重损伤部位，虽成本高但长期保护可靠。某大型提灌工程采用分级加固策略，使系统结构性能恢复良好，且成本控制在预算内。

表 4 常用加固方法对比

技术类型	适用破坏形式	施工要点	耐久性（年）	成本指数（元/m ² ）
环氧树脂注浆	宽度 <2mm 的裂缝	压力注浆（0.3 ~ 0.5MPa）	10 ~ 15	300 ~ 500
碳纤维布粘贴	大面积表面剥落	基底处理 + 三层粘贴	20+	800 ~ 1200
钢衬砌加固	严重变形的管段	焊接锚固 + 灌浆填充	30+	1500 ~ 2500

（四）实时监测与预警

水力震荡实时监测与预警对输水暗渠安全运行至关重要。水力震荡突发且破坏性强，传统定期检测难以及时发现潜在风险。建立高精度、高响应的实时监测系统，连续采集分析压力波动、结构振动和变形等关键参数，是早期预警与主动防控的重要技术支撑。实际工程中，监测系统设计要综合考虑暗渠结构、运行工况与环境条件。压力监测是核心，在泵站出口、阀门上下游等关键位置布置测点，用高精度传感器记录水压变化。系统设定分级预警阈值，当压力波动超设计值 20% 可能引发结构损伤，分级响应可避免过度干预，及时处置重大风险。

振动检测关注结构动态响应，按暗渠振动模态特性布置三轴加速度传感器，重点监测易损部位。数据分析需区分正常与异常信号，结合历史数据建立基准频谱，设置时域—频域联合分析算法提高震荡识别准确性。变形监测针对结构长期劣化趋势，用光纤传感或电子测缝计监测接缝开合度等参数评估累积损伤。参数变化速率比绝对值更具预警价值，监测系统应具备趋势预测功能。现代监测系统向智能化发展，通过物联网融合多源数据，关联分析运行数据识别震荡诱因。系统与控制系统联动实现闭环管理，响应措施要在秒级完成。

表 5 监测系统配置标准

监测参数	测点间距	采样频率	预警阈值	联动措施
水压力	每 500m	10Hz	设计压力的 ±20%	自动调节阀门
振动加速度	每 1km	100Hz	0.3g（水平向）	启动应急泄压
接缝开合高度	每个结构缝	1Hz	初始值的 150%	触发巡检警报

（五）定期维护管理

定期维护管理是确保输水暗渠长期稳定运行的核心环节。其关键在于通过系统的检查、评估和修复，及时处理水力震荡造成的潜在损伤，防止小问题演变成大事故。与被动维修相比，预防性维护能延长工程寿命，降低全生命周期成本。在实际管理中，维护方案应依据暗渠运行年限、结构特点和历史损伤差异化制定。对于运行超 10 年的老旧暗渠，重点关注材料老化，每两年全面检测混凝土碳化深度、钢筋锈蚀率等指标。当混凝土碳化深度达保护层厚度 60%，结构抗裂性大幅下降，需采取防护措施。新建暗渠则在前三年加强监测，记录压力波动与结构振动关系，建立维护基准数据库。维护技术要与破坏特征匹配。针对环向裂缝，采用低压注浆修复，控制注浆压力避免二次破坏；止水带失效用原位硫化技术再造接缝。维护周期需综合环境和运行工况确定。北方冻融地区春季解冻后全线检测渗漏，多泥沙河段汛期前后检查冲蚀部位。可通过建立关联模型精准预测维护时机。维护效果评估应建立量化指标体系，除检查结构完整性，还监测修复区长期性能演变。如注浆修复区跟踪裂缝张开速率，异常则升级加固。

伴随材料科学与信息技术持续发展，会有更多创新技术用于输水暗渠的保护修复。这不仅有利于水资源高效利用，也为水利工程可持续发展提供坚实支撑，确保输水暗渠在复杂环境下稳定发挥作用。

参考文献

[1] 周顺潮, 周建荣. 大型斜轴伸泵站典型故障分析及水力优化研究 [J]. 水利建设与管理, 2024, 44 (11): 37-42.
 [2] 令志强, 杨云芳, 杨波. U 型渠道在农田水利工程建设中的应用 [J]. 水科学与工程, 2024, (05): 47-50.
 [3] 项正军. 暗渠抢护与溃口封堵等抗洪抢险技术研究与应用 [J]. 人民黄河, 2023, 45 (S2): 128+131.
 [4] 罗金柳. 水利工程渠道覆盖断面结构设计优化 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52 (11): 67-69.
 [5] 焦文娟, 李超. 水利工程渠道的防渗漏结构设计 [J]. 地下水, 2021, 43 (04): 286-288.
 [6] 董钰国. 水利工程输水暗渠施工对策探究 [J]. 农业与技术, 2021, 41 (13): 60-62.

作者简介：刘义强，男，1971 年 10 月，甘肃榆中，汉，本科，高级工程师，用它方向：水流泥沙运动机理。刘锦宇，女，2004 年 11 月，甘肃景泰，汉，本科，研究方向：水动力要素演变规律及模拟技术研究。

基金项目：课题名称：大型提灌工程输水暗渠水力震荡过程及破坏特征研究。项目名称：甘肃省水利厅关于下达 2024 年水利科学试验研究及技术推广计划。项目编号：24GSLK023。

结语

要保障输水暗渠安全稳定运行，结构加固、实时监测预警与定期维护管理至关重要。运用先进加固技术、智能化监测系统及科学维护策略，能有效应对水力震荡难题，既延长暗渠使用寿命，又降低维护成本。未来，