

浅析水利工程建设中的水闸设计策略

曹欣峰¹ 曹俊锋² 沈丽娟³

1 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西省西安市, 710065;

2 中国水利水电建设工程咨询西北有限公司, 陕西省西安市, 710100;

3 陕西长风河汉生态环境工程有限公司, 陕西省西安市, 710061;

摘要: 水闸作为水利工程中的核心控制构筑物, 承担着调节水量、维持水位、保障防洪和供水安全等多重功能, 其设计策略直接关系到工程运行的稳定性与长远效益。随着水利建设需求的日益增长, 水闸设计需在结构安全、运行效率与生态保护等方面实现多目标协同。本文围绕水闸设计在水利工程中的功能定位、结构设计原则、选型与布置优化、材料与施工工艺以及运行管理系统建设等方面展开探讨, 梳理当前工程实践中存在的关键技术要点与优化路径, 旨在为今后水闸设计提供系统性思路与工程参考, 推动水利工程建设水平的持续提升。

关键词: 水闸设计; 水利工程; 结构优化; 布置形式; 运行安全

DOI: 10.69979/3060-8767.25.05.013

引言

水利工程在区域经济发展与资源调控中发挥着基础性作用, 水闸作为其关键节点工程, 是实现防洪抗旱、水资源合理配置以及生态保护的功能核心。传统水闸设计多以结构安全与基本功能实现为导向, 然而当前水利建设面临的多目标、多约束、多环境需求促使水闸设计理念发生深刻变革。结构设计需兼顾极端气候适应性与运行可靠性, 布置方案需结合流域特征与地质条件科学决策, 材料选择与施工工艺则需满足耐久性与工程经济性双重要求。随着智能监测与自动控制技术的发展, 水闸运行维护管理也逐步从经验操作转向数据驱动的集成模式。因此, 系统化梳理水闸设计全过程的关键环节, 构建科学高效的设计策略体系, 对于提升工程运行效率和管理水平具有重要意义。

1 水闸设计在水利工程中的功能定位

1.1 水闸在防洪调度中的关键作用

水闸在防洪体系中处于核心控制地位, 通过调节上下游水位实现蓄泄配合, 有效缓解洪水高峰压力。在流域性降雨或上游突发洪峰情况下, 水闸可根据实时水文监测数据执行调度指令, 保障河道通洪能力, 避免沿线堤防及城镇遭受淹没。调度中必须兼顾闸下承载力、水位稳定性和泄流能力匹配问题, 确保各类极端工况下运行安全。部分地区已建立水闸群协同调度机制, 形成区域防洪联动响应体系。闸门启闭方式与控制精度直接影响泄洪效率与应急响应速度, 尤其在中小流域高强度短历时暴雨频发区域, 水闸成为削减峰值流量、延缓洪水

推进的重要保障节点。

1.2 水闸在灌溉供水系统中的枢纽作用

水闸是引水与分水工程的重要枢纽, 其设计与布置直接关系到农业灌溉的用水效率与区域供水的可持续性。在灌区骨干渠系的交汇点或干渠引水口常设置水闸控制水量, 保障农业生产时段内水源稳定供应。通过调节水闸开启程度, 可精准控制下游支渠或末级渠段水位, 优化水资源分配, 减少输水过程中的损耗与渗漏问题。城市供水系统中的引水闸亦承担类似功能, 尤其在多水源联合调度背景下, 水闸通过调控流向保障高峰期供水压力平衡。闸门控制系统的自动化程度影响水量调配精度, 需结合流域调水格局与下游用水需求进行动态管理, 图1为无坝引水中进水闸的灌溉示意图。



图1 无坝引水中进水闸的灌溉示意图

1.3 水闸对生态环境调节的工程支撑

生态水利理念的推广使得水闸不仅承担水资源调控任务, 也需兼顾生态系统保护与修复目标。在涵养湿地、恢复河道生境、保障水生物迁移通道畅通等方面, 水闸发挥着关键性调节作用。合理设计闸门启闭频次与

过流流速,有助于模拟自然水文节律,减少人为干扰对生态系统造成的不利影响。在部分流域,生态调度已成为水闸运行计划的重要组成,按照季节性生态需水量进行阶段性放水,为鱼类洄游、水生植被恢复和生物多样性维持创造条件。部分新型生态水闸在设计中引入鱼道、生态底孔与缓坡出水口等结构,以减轻对生物通道和自然冲淤过程的破坏,提升工程与自然系统的协同融合水平。

2 水闸结构设计的基本原则与技术规范

2.1 设计荷载与水力条件的匹配要求

水闸结构的设计必须充分考虑所处区域的水力边界条件与工程所承受的各类荷载类型。常见荷载包括静水压力、动水冲击、闸门自重、冰压、风荷载及启闭机械反作用力等,这些荷载在不同工况下表现差异显著。设计需根据多年实测水文数据确定最大设计水位和可能出现的极端工况,结合局部流速、水头差及流态特征选取合适的结构断面。闸体结构应具有良好的抗滑、抗倾覆与抗冲刷性能,对基础冲刷、地基承载力及边坡稳定性进行专项校核。在设计中还应考虑水流对结构表面的空蚀影响,合理布置消能工与护底构件,确保长期运行稳定性。

2.2 结构安全与稳定性的计算基础

水闸结构稳定性分析需建立在多荷载耦合效应的力学计算基础之上,涵盖强度计算、整体稳定分析与构件局部应力控制。计算模型应考虑闸体与地基的接触特性、闸墩与翼墙的连接方式以及水流与结构间的相互作用力。结构材料在长期受力状态下的应力松弛、疲劳损伤及温度效应亦需纳入计算范围。对于高水头或深基坑闸室,设计中需进行有限元模拟,分析不同荷载组合下的变形趋势与内力分布,防止因应力集中导致的早期结构失效。稳定性评价标准应符合国家相关水工规范,必要时辅以第三方技术审查,确保在地震、洪水、沉降等多因素影响下依然具备足够的安全冗余度。

2.3 相关标准与设计参数的选取依据

水闸结构设计必须严格遵循《水工建筑物设计规范》《闸门设计规范》《水利工程抗震设计规范》等现行国家及行业标准,确保设计过程的系统性与科学性。设计参数如设计洪水频率、设计水头、最大流速、基岩容许应力等应来源于权威资料或实测成果,并结合区域水文气象条件进行修正。在具体参数选取过程中,应综合考虑工程使用年限、运维方式、经济技术指标与管理要求

等因素,形成符合实际需要的参数体系。参数设置还应满足后期施工与运维可行性,避免因设计偏差导致施工方案复杂或启闭系统频繁调整。标准与参数体系应根据最新规范及时更新,并根据典型经验工程成果进行适度优化。

3 水闸选型与布置形式的优化策略

3.1 按工程功能选配闸门类型的技术要求

水闸闸门类型的选取需依据工程服务功能、水头高度、通水流量和启闭频率等多重条件进行技术匹配。对于承受高水头的防洪工程,宜采用结构强度高、启闭稳定性好的平面钢闸门或弧形闸门,以提升抗压能力和操作灵敏度。供水与灌溉系统中常采用平板滑动闸门和翻板闸门,便于精细化调节水量并实现快速响应。特殊功能如生态放水或泥沙排泄,可配备带底孔或浮箱式闸门以满足多工况运行要求。闸门选型应综合启闭力计算、止水效果验证与运行寿命评估,优先选用标准化、系列化产品,以提升工程施工效率和后期运维的可靠性与经济性。

3.2 布置方式对运行效率与维修便捷性的影响

水闸布置形式直接决定工程运行的水力条件与设备维护便捷性,科学布置能够有效降低水头损失、提升启闭响应效率。单孔布置适用于中小型水利工程,结构简单、便于操作,但在大流量排泄时存在能力不足的问题;多孔对称布置适合大中型工程,有助于均匀分配流速,增强通水能力并分散结构应力集中。闸门布置还应考虑启闭设备的空间布局与维护通道设置,确保日常检修不干扰水流主通道。闸墩与翼墙的位置安排需避免形成紊流或负压区,降低对下游消能结构的冲刷影响。维修平台与启闭机械应预留合理检修空间,并配备防腐与避震设施,保障设备运行与维保的高效性与安全性,图2为一种三项式布置的分水闸构成。

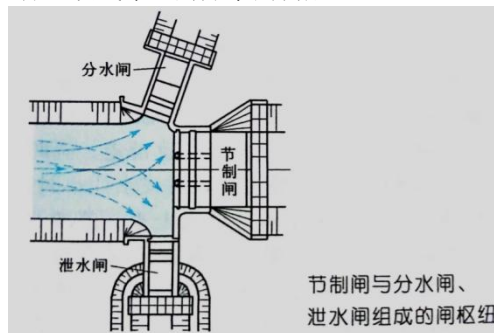


图2 一种三项式布置的分水闸构成

3.3 不同水文地质条件下的布置适应性分析

水闸布置应充分考虑所处区域的水文地质背景,以

确保工程适应性与长期稳定性。在山区河道，流速大、落差急，应采用集中布置并强化底板及闸墩抗冲刷能力；平原地区地基较弱，需优化闸室基础结构设计，并辅以防渗加固处理，避免渗流对结构稳定性的破坏；滨海或水位波动频繁区域，应加强抗腐蚀处理，提升整体抗冲击与抗盐碱能力。水文特征如流量年际变化、洪峰历时、水位回落速度等因素亦对布置方案具有显著影响，需通过数值模拟与物理模型测试进行验证。布置形式还应考虑与上下游岸线、航道、涵管等设施的协调关系，确保整体工程系统运行顺畅、排布合理、效能最大化。

4 水闸建设材料与施工工艺的选择要点

4.1 主体结构材料的耐久性与适用性评估

在三峡水利枢纽工程中，闸墩与底板采用 C50 抗渗混凝土，设计抗压强度为 50 兆帕，抗渗等级 P12，有效阻止水压渗透及化学侵蚀。掺加矿物掺合料 30%，降低水胶比至 0.38，提高结构致密度和抗碳化能力。为应对高流速冲刷，消力池段混凝土表面设厚度 40 毫米耐磨层，采用玄武岩集料提升抗磨性能。钢筋选用 HRB500E 高强钢，屈服强度达到 500 兆帕，具备良好的延展性与抗疲劳能力，适应启闭频繁引发的应力变化。在小浪底工程中，钢结构闸门采用 Q345qD 桥梁结构钢，屈服强度不低于 345 兆帕，具备优良的焊接性与低温韧性。工程运行超过 15 年仍维持结构完好，年均启闭频率超过 250 次，未发生裂缝扩展和材料劣化问题。材料选择需基于环境湿度、水流速度、运行荷载等多因子协调设计，确保在 50 年以上设计年限内保持结构完整性与功能稳定性。

4.2 启闭设备配套设施的技术性能要求

在丹江口水利枢纽改扩建工程中，闸门启闭系统采用卷扬式启闭机，单机额定启闭力 1200 千牛，匹配弧形钢闸门重量为 210 吨，设计启闭速度 1.5 米每分钟，满足汛期快速调度需要。设备主轴承采用双列调心滚子轴承，使用寿命达到 15 万小时，在高负荷频繁运行中保持低磨损率。控制系统配置 PLC 可编程模块，实现远程控制、过载保护与状态实时监测。闸门启闭周期小于 12 分钟，响应延迟不超过 5 秒，启闭同步误差控制在 3 毫米以内，确保双向启闭均衡。在安康水电站工程中，液压启闭系统采用双缸同步液控技术，有效控制偏载力矩小于 5%。导轨和滑轮系统采用耐腐蚀铝青铜合金，摩擦系数控制在 0.09，大幅提升启闭平稳性。启闭设备需满足高可靠性、高控制精度与低维护周期要求，并通过动力学计算与疲劳试验验证其在水工环境下的适

应能力。

4.3 施工工序对整体质量控制的技术措施

在乌东德水电站水闸建设过程中，基坑开挖深度达 46 米，施工采用分级支护和多点变形监测技术，最大控制沉降量小于 15 毫米，有效防止边坡失稳。底板混凝土浇筑采用分层分块法，单次浇筑厚度不超过 1.2 米，振捣采用插入式电动振动棒，频率为 120 次每秒，提高密实度并消除蜂窝麻面。养护采用自动喷淋系统，温控误差小于 ± 2 摄氏度，有效防止温度裂缝。钢筋绑扎间距误差不得超过 10 毫米，模板安装偏差控制在 5 毫米以内。在大藤峡工程中，施工全过程应用 BIM 模型进行技术交底与进度管控，浇筑强度增长曲线由传感器采集并实时上传至调度平台，混凝土强度 7 日龄达到 32 兆帕，28 日龄达标率 100%。通过施工工序标准化、过程控制数字化与验收评定精细化管理，工程施工质量得到有效保障，返工率控制在 1% 以内。

5 结语

水闸作为水利工程中关键的控制节点，其设计水平直接影响到工程整体效能与运行安全。从功能定位到结构选型，从施工材料到布置策略，每一环节均需遵循科学规范并结合实际条件综合考量。随着水利工程建设目标的不断拓展，水闸设计正从单一调水功能向生态协调、智能管控等多维方向转变，对工程综合性提出更高要求。规范化设计理念与定制化技术应用的融合成为水闸建设质量提升的关键路径。通过不断完善结构体系、优化布置方式、提升运行保障机制，可有效推动水利工程在安全、效率、可持续性方面实现协同发展，为水资源合理配置与生态系统稳定提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 王跃武. 水利工程中智能水闸控制系统的设计与应用[J]. 珠江水运, 2024, (24): 105-107.
- [2] 张峰, 郭丽萍. 水闸钢丝绳攀爬装置结构设计与仿真分析[J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(06): 27-32+58.
- [3] 何立慧. 水利工程水闸基础结构设计要点研究[J]. 价值工程, 2024, 43(36): 57-59.
- [4] 李壤, 黄锦鹏, 张周文, 陈蔚华, 胡绪宝. 水闸工程方案阶段 BIM 正向设计应用研究[J]. 人民珠江, 2024, 45(S2): 142-144.
- [5] 董冠驿. 水利水电工程中水库水闸设计的实践探究[J]. 水上安全, 2024, (20): 160-162.