

水利工程水闸设计要点分析

刘 钊

河北省水利工程局集团有限公司第五分公司 河北 石家庄 050000

摘要：水利工程水闸设计要点涵盖多方面。选址需综合地形、地质、水流等条件，确保地基稳定。水力设计要精准计算过闸流量，合理选取消能工形式。结构方面，做好抗滑、抗倾、抗浮验算，保障混凝土耐久性。同时，考虑抗震与抗冲刷需求。此外，还应注重生态设计，保障生态流量，选用环保建材。设计需结合实际，采用先进技术，确保水闸安全、经济、环保运行。

关键词：水利工程；水闸；设计要点

引言：水利工程中，水闸是调控水流、保障水资源合理利用与防洪安全的关键设施。随着气候变化加剧、水资源需求多元化以及生态保护要求的提升，水闸设计面临更复杂的挑战。传统设计模式已难以满足现代水利工程的综合需求，需兼顾功能性与生态性、安全性与经济性。本文从水闸的分类与功能出发，系统分析其设计基础理论，并探讨选址布局、水力优化、结构创新等核心要点，为提升水闸设计水平提供参考。

1 水利工程水闸设计基础理论

1.1 水闸分类与功能

(1) 按用途分：节制闸主要用于调节河道水位、控制下泄流量，保障流域水资源合理分配，常见于江河干流及骨干支流；进水闸多设置在灌溉、供水工程的首部，负责引入水源，需精准匹配下游用水需求；排水闸用于排除农田涝水、城市雨水或防止潮水倒灌，在平原圩区和滨海地区应用广泛，部分排水闸兼具挡潮功能。

(2) 按结构分：开敞式水闸闸室顶部敞露，过流能力强，适用于流量大、水位变幅小的河道；涵洞式水闸闸身呈涵洞状，顶部覆盖土堤，常用于穿越堤坝的灌溉或排水工程；双扉式水闸采用上下两层闸门，可根据水位变化灵活调整开启高度，适合水位变幅较大的水域，能有效减少闸门尺寸和启闭设备负荷。

1.2 水力设计原理

(1) 过闸流量计算：核心采用宽顶堰流公式 $Q = \sigma \epsilon m B \sqrt{2g} H^{3/2}$ （其中Q为流量， σ 为淹没系数， ϵ 为侧收缩系数，m为流量系数，B为堰顶宽度，g为重力加速度，H为堰顶水头）；当闸后水位高于堰顶，需引入淹没系数 σ 修正，淹没系数根据闸后水位与堰顶水头的比值确定，确保计算结果符合实际过流状态。(2) 水跃消能设计：底流消能通过设置消力池、消力坎等，使水流在闸后形成水跃，消耗动能，适用于水头较低、下游水深较大的

情况，能有效保护河床免受冲刷；面流消能利用闸下出流与下游水流的表面接触摩擦消能，适用于水头较高、下游水深较浅且河床抗冲能力较强的场景，避免消力池开挖过深^[1]。

1.3 结构力学分析

(1) 闸室稳定性计算：抗滑验算需保证闸室沿基础底面的抗滑力大于滑动力，通常采用抗滑稳定系数法，结合基础摩擦系数和粘聚力计算；抗倾验算通过分析闸室各部分重力与水压力对闸室倾覆点的力矩，确保抗倾力矩大于倾覆力矩；抗浮验算针对地下水位较高的情况，计算闸室自重与浮力的平衡，必要时设置抗浮桩或增加压重。(2) 混凝土结构耐久性设计：裂缝控制需通过优化混凝土配合比（如添加抗裂纤维）、合理设置伸缩缝和后浇带，减少温度应力和收缩应力引发的裂缝；防腐措施根据环境类别选择，在腐蚀性水体或土壤中，可采用防腐涂层、耐腐蚀钢筋，或提高混凝土保护层厚度，延长结构使用寿命。

1.4 抗震与抗冲刷设计

(1) 地震动参数选取：依据工程所在地区的地震烈度区划图确定基本地震烈度，结合水闸重要性等级调整地震动参数；采用反应谱分析方法，计算不同振型下结构的地震作用效应，叠加后得到总地震力，确保结构在地震作用下不发生破坏。(2) 河床冲刷深度预测：采用经验公式（如别列柳伯斯基公式、沙莫夫公式）初步估算冲刷深度，公式参数需结合当地水文泥沙资料校准；同时结合数值模拟（如FLUENT、MIKE21等软件），模拟水流运动和泥沙输移过程，更精准预测冲刷范围和深度，为闸基防护工程设计提供依据。

2 水利工程水闸设计核心要点

2.1 选址与总体布局

(1) 地形地质条件评估：需详细勘察选址区域岩土

层分布, 优先选择地基承载力强、压缩性低的黏性土或岩石地层, 避开软土、淤泥层等不良地质; 重点排查断层活动痕迹, 分析断层破碎带的宽度、走向及活动性, 若无法避让, 需采取灌浆加固、设置防渗帷幕等措施, 防止断层影响导致闸基不均匀沉降或渗漏。同时, 评估边坡稳定性, 避免在滑坡、崩塌隐患区选址, 确保闸室及周边场地安全。(2) 水文条件分析: 根据水闸功能和所在流域防洪标准, 确定设计洪水流量与水位, 如灌溉水闸常采用10-20年一遇洪水标准, 防洪节制闸需按50-100年一遇标准设计; 结合历年水文数据, 分析泥沙淤积规律, 预测闸前、闸后淤积量, 对多沙河流, 需配套设置冲沙闸或排沙廊道, 减少泥沙淤积对过流能力的影响。此外, 还需考虑潮汐、凌汛等特殊水文现象, 优化闸室结构应对极端情况^[2]。(3) 与周边工程协同设计: 若水闸附近设有泵站, 需协调两者的水位衔接, 确保泵站取水或排水时, 水闸能配合调节水位, 避免水流干扰; 与堤防衔接时, 闸室轴线应与堤防走向合理匹配, 闸身与堤防结合部位需加强防渗处理, 防止渗漏破坏堤防安全; 同时, 兼顾航道、桥梁等周边设施, 预留足够的通航、通行空间, 避免工程建设相互制约, 提升整体水利系统的协同运行效率。

2.2 水力设计优化

(1) 闸孔规模确定: 采用经济流速法时, 根据水流特性确定合理流速(一般取1.0-2.0m/s), 结合设计流量计算闸孔总宽度, 确保在经济造价范围内满足过流需求; 同时, 需匹配流域调蓄能力, 若上游有水库等调蓄工程, 可适当减小闸孔规模, 利用调蓄设施调节洪峰; 若为平原河道, 需考虑河道行洪能力, 避免闸孔过窄导致壅水过高, 影响两岸防洪安全。此外, 还需验算不同工况(如灌溉、排涝、防洪)下的闸孔过流能力, 确保各工况均能稳定运行。(2) 消能工形式选择: 消力池设计需根据闸下水流流速、水深等参数, 确定池长、池深及坎高, 一般采用试算法结合水力公式计算, 确保水流在池内充分消能; 防冲槽通常设置在消力池下游, 采用块石、混凝土预制块等材料铺设, 槽深和槽宽需根据河床土质抗冲性能确定, 防止水流冲刷河床危及闸基; 对于高水头水闸, 可组合采用挑流消能与消力池, 进一步优化消能效果, 减少对下游河道的影响。(3) 闸门启闭方案: 单孔独立控制适用于闸孔较多、需灵活调节局部流量的场景(如灌溉渠道水闸), 可根据不同区域用水需求, 单独开启对应闸孔, 提高水资源利用效率; 整体联动方案适用于防洪、排涝等需快速调节总流量的情况, 通过同步启闭所有闸孔, 迅速控制水位或流量, 避

免水流不均匀导致闸室受力失衡。同时, 需配置可靠的启闭设备, 结合自动化控制系统, 实现启闭过程的精准控制, 且需设置手动启闭备用装置, 应对突发故障^[3]。

2.3 结构设计创新

(1) 新型材料应用: 高性能混凝土(如C60及以上强度等级)具有高强度、高耐久性, 可减小闸室结构尺寸, 降低自重, 适用于大跨度或高水头水闸; 纤维增强复合材料(如玻璃纤维、碳纤维复合材料)质量轻、耐腐蚀, 可用于闸门面板、胸墙等部件, 替代传统钢材, 减少维护成本; 此外, 透水混凝土可用于闸室下游护坦, 增强渗排水能力, 降低扬压力对闸基的影响。

(2) 结构轻量化设计: 空腹式闸室通过在闸墩或闸底板设置空腹腔室, 减少混凝土用量, 降低结构自重, 同时空腹可作为检修通道或布置设备, 提升空间利用率; 预应力技术适用于大跨度闸室或厚板式结构, 通过施加预应力, 抵消部分荷载产生的应力, 减少结构裂缝, 提高结构刚度和抗裂性能; 对于小型水闸, 可采用装配式结构, 预制闸墩、闸板等构件, 现场拼装, 缩短施工周期, 降低现场作业难度^[4]。(3) 抗震加固措施: 隔震支座(如橡胶隔震支座)设置在闸室与基础之间, 通过支座的变形吸收地震能量, 减少地震作用向闸室传递, 适用于地震烈度较高的地区; 耗能装置(如金属阻尼器、摩擦阻尼器)可安装在闸墩与闸门、闸室与堤防衔接部位, 在地震作用下通过自身变形或摩擦消耗能量, 减轻结构振动响应; 此外, 还可通过优化结构刚度分布, 避免结构产生共振, 增强整体抗震性能, 如合理调整闸墩高度、厚度, 使结构自振频率避开地震动主要频率范围。

2.4 智能化与生态化设计

(1) 智能监测系统: 传感器布局需覆盖闸室关键部位, 在闸墩、闸底板布置应力应变传感器, 监测结构受力状态; 在闸上下游布置水位、流速传感器, 实时掌握水文变化; 在基础及堤防部位布置渗压传感器, 监测渗漏情况, 传感器间距根据结构尺寸和监测精度要求确定, 一般为5-10m。数据采集频率根据工况调整, 正常运行时每15-30分钟采集一次, 洪水、地震等特殊工况下, 缩短至1-5分钟, 采集数据通过无线传输至控制中心, 结合大数据分析技术, 实现结构安全预警和运行状态优化。(2) 生态流量保障: 仿自然鱼道设计需模拟天然河道的水流形态, 采用弯曲的通道轴线、变化的底坡和水深, 设置砾石、水草等仿自然障碍物, 为鱼类提供栖息和洄游条件, 鱼道宽度和水深需根据主要保护鱼类的体型确定, 一般宽度不小于2m, 水深不小于0.5m; 过鱼设施(如升鱼机、鱼闸)适用于高水头水闸, 需与鱼类

洄游季节同步运行,确保鱼类顺利通过。此外,还需保障闸下最小生态流量,根据下游河道生态需求(如维持水生生物生存、河道自净能力),确定最小下泄流量,避免断流导致生态破坏^[5]。(3)绿色建材选择:低碳混凝土通过采用工业废渣(如粉煤灰、矿渣粉)替代部分水泥,减少水泥用量,降低碳排放,同时提升混凝土耐久性,适用于闸室主体结构;可再生能源利用方面,可在闸顶、管理房顶部安装太阳能光伏板,为智能监测系统、启闭设备等提供电力,减少传统能源消耗;此外,采用可回收钢材、生态透水砖等建材,降低工程建设对环境的影响,实现水利工程与生态环境的和谐共生。

3 水利工程水闸设计要点优化建议

3.1 政策与标准完善

(1)动态调整设计洪水标准:需结合气候变化预测模型,整合近30年流域降水、径流数据,分析极端洪水发生频率变化趋势,建立洪水标准动态调整机制。例如,对气候敏感区域(如季风区、暴雨频发区),每5-10年重新核算设计洪水流量,将极端气候情景纳入标准体系,避免因标准滞后导致工程抵御洪水能力不足,保障水闸在气候变化背景下的安全运行。(2)强化生态设计规范:明确不同类型水闸的最小下泄流量阈值,依据下游河道生态基流需求(如维持水生生物栖息地、保障河道生态功能),结合流域水资源总量制定分级阈值。例如,灌溉水闸需保证下游河道枯水期最小流量不低于多年平均径流的10%-20%,并将生态流量指标纳入水闸设计强制条款,配套生态流量监测与考核机制,避免过度取水破坏下游生态。

3.2 技术创新方向

(1)数字孪生技术应用:推广BIM与CFD联合仿真技术,在设计阶段构建水闸数字孪生模型,通过BIM实现结构三维建模,结合CFD模拟水流运动、泥沙淤积及消能效果,精准优化闸孔尺寸、消能工参数;同时,将数字模型与实时监测数据联动,实现设计方案动态调整,减少物理模型试验成本,提升设计精度与效率。(2)模块化设计推广:制定水闸标准化构件库,对闸墩、闸门、启闭设备等核心部件进行模块化设计,统一尺寸与接口标准,实现工厂预制、现场快速组装。例如,小型

排水闸可采用模块化闸室单元,通过螺栓连接拼接,缩短施工周期50%以上,降低现场施工难度,同时便于后期维护更换。

3.3 全生命周期管理

(1)建立设计-施工-运维数据链:依托信息化平台,整合设计阶段的BIM模型、地质勘察数据,施工阶段的进度、质量数据,运维阶段的监测、检修记录,形成全生命周期数据库。通过数据共享与关联分析,实现设计参数与施工效果、运维需求的精准匹配,为工程优化提供数据支撑,避免各阶段数据割裂导致的管理漏洞。

(2)制定定期安全评估与改造计划:明确水闸安全评估周期,对运行10年以上的水闸,每3-5年开展一次全面评估,重点检查结构耐久性、抗震抗滑性能及生态流量保障能力;根据评估结果制定分级改造计划,对存在安全隐患的水闸优先实施加固改造,对技术落后的水闸逐步升级智能化设施,延长工程使用寿命,保障长期稳定运行。

结束语

水利工程水闸设计是一项复杂且系统的工作,关乎水资源调控、防洪安全及生态平衡。设计过程中需综合考量地形地质、水力条件、结构安全等因素,并融入生态理念与智能化技术。未来,随着材料科学、数字技术的进步,水闸设计将更趋精准高效、绿色可持续。设计者需持续创新,严格遵循规范标准,确保水闸在全生命周期内发挥最大效益,为水利事业高质量发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]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(36):57-59.
- [2]许华勇.水利工程中水闸设计的要点及注意事项分析[J].陕西水利,2021(03):202-203.
- [3]刘志宏.水利工程水闸除险加固的施工方法研究[J].地下水,2021(04):291-292.
- [4]林建程.水利工程中水闸除险加固工程施工组织设计研究[J].中州建设,2022(06):65-67.
- [5]陈芬,卢聪.水利工程水闸除险加固设计分析[J].低碳世界,2023(12):37-39.