

# 水利工程水闸金属结构施工方法

阳林宏 黎亮

中交长江（重庆）水利工程有限公司 重庆 401147

**【摘要】**：水闸金属结构是水利枢纽挡水、泄水及启闭运行的核心承载设施，结构状态与施工品质直接关乎水闸运行安全与实际服役年限。文章依托各类水利工程案例，探究水闸金属结构力学性能、施工装配、环境适配三类核心工程特质，梳理荷载参数、材料防腐、连接构造的设计优化要点，阐述预埋安装、闸门吊装、设备布设、启闭调试的全套现场施工流程。研究从原料把控、施工过程、运维检修、团队管理四方面搭建完善的质量管控体系。成果可为不同水文气候工况下水闸金属结构的设计优化、标准化施工与长效运维提供工程参考。

**【关键词】**：水闸；金属结构；设计优化；施工工艺；质量管控

DOI:10.12417/2811-0528.26.15.069

## 引言

水闸属于流域防洪、水资源调配、河道治理的重要水利构筑物，金属结构作为水闸核心组成部分，负责设施挡水、控水、启闭运行的各项功能。结构长期处于水压作用、交替荷载、温度冻融、水体侵蚀的复杂环境，会产生结构疲劳、构件锈蚀、安装偏移等各类病害，影响水闸整体运行的稳定性。水利工程朝标准化、智能化方向升级，金属结构的设计施工与运维养护标准也随之提升。本文结合多项一线工程实践，针对结构服役阶段的常见病害问题，归纳对应工程属性，细化设计改良方式、施工工序及质量管控举措，助力水闸金属结构工程品质与使用性能的整体提升。

## 1 水闸金属结构自身工程特性

### 1.1 力学性能特征

水闸金属结构依托钢材力学属性适配水工工况受力需求，具备良好抗拉、抗压强度与结构刚度，可抵御汛期水压、波浪冲击、地震荷载的叠加影响<sup>[1]</sup>。山东龙口黄水河吕家拦河闸改建项目采用 Q355B 合金钢打造 2.8m 高钢坝闸门，单孔门体可承受正向 3.2m、反向 1.5m 交替水头荷载，经主梁受力验算，未出现。构件长期承受启闭往复荷载易产生疲劳问题，主梁、支铰销轴等应力集中部位反复承受交变应力，不当截面构造易滋生疲劳裂纹。上海淀东排涝闸 30m 大跨度直升门监测数据表明，桁架节点年均应力循环次数超 3.6 万次，材料优化方式可规避疲劳断裂风险。钢材性能易受温度影响，低温会降低钢材韧性引发脆裂，高温热胀易造成轨道错位、止水失衡。胶东调水龙口段分水钢闸常年承受半岛近 40℃ 温差变化，预留伸缩结构可削弱温度变形带来的结构损伤。

### 1.2 施工装配特点

水闸金属结构实行工厂预制、现场拼装的工业化施工形

式，闸门门叶、主反轨、启闭机架可在厂区完成分段下料与焊接成型。平陆运河青年枢纽人字门划分六段于岳阳厂区预制加工，构件完成探伤、防腐工序后转运至闸址，相较混凝土现浇闸体施工，现场工期可缩短近 40%。钢结构装配拥有轻量化优势，同等挡水标准下钢闸门自重远小于混凝土闸门。颍河阜阳节制闸 12.45m 宽弧形闸门单扇重 115 吨，普通吊车即可完成吊装就位，对闸室土建基础承载力要求不高，无需增设桩基进行地基加固。现场装配主要依靠螺栓紧固与现场焊接衔接构件，主反轨节段采用精制螺栓拼接后补焊坡口，预埋构件与土建插筋通过搭接焊紧密结合。分段预制会积攒尺寸误差累积，单节轨道小幅安装偏差会在拼接后造成门槽整体偏移，装配过程需反复复测校正构件尺寸。

### 1.3 环境适配特点

金属结构常年承受河道干湿交替、泥沙淤积、水体腐蚀的水环境作用，淡水下泥沙堆积会加速构件电化学腐蚀，沿海闸站易受海水氯离子侵蚀破坏。泉州南埔围垦临海闸站适配高盐环境，闸门采用耐候低合金钢材与多重防腐涂层，相较普通碳钢可提升 5~8 年服役时长<sup>[2]</sup>。金属结构便于后期运维检修，钢闸门及启闭机配件均可单独拆分维护。高邮杨庄漫水闸升卧式钢闸门检修作业中，单扇门体可直接吊离更换止水、滚轮构件，无需拆解门体主体结构，缩减检修停工时长。不同区域气候条件对应不同结构处理方式，北方寒区水闸配置保温层与伸缩间隙，南方高温闸站为启闭机加装防雨密封结构。龙口拦河闸依据胶东冻融气候，在门槽埋件底部设置排水坡口，规避积水结冰胀裂预埋轨道的结构问题。

## 2 水闸金属结构设计优化要点

### 2.1 荷载与结构参数优化

设计阶段依据闸址水文勘测成果核算静水压力、动水冲

击、风振荷载、地震附加荷载四类核心荷载，大跨度水闸通过CAD三维建模与有限元仿真开展多工况受力演算。淀东排涝闸30m中孔直升门依托数值模拟，分析不同水位与大风耦合作用下的桁架变形状态，优化主梁截面尺寸，缩减钢材用量同时保障结构抗风稳定性。中小型分水闸结合常年过闸流量与汛期水位确定荷载上限，龙口兰高泵站1.8m×1.8m分水钢闸参照二十年一遇洪水标准校核荷载，优化竖梁排布间距，规避极端行洪时局部荷载超限引发的失稳问题。高耸门架与外露闸门需核验风振系数，6m以上外露钢闸门设置横向加固拉杆，削弱强风带来的共振变形，结合极端温度预留构件形变余量，将单节轨道伸缩缝控制在3~5mm之间（见图1）。

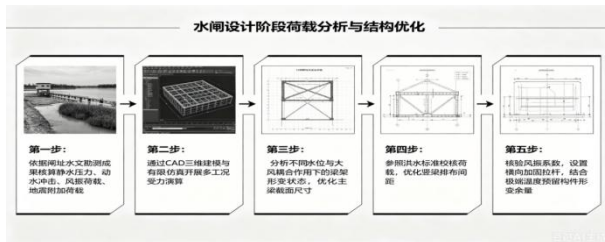


图1 荷载与结构参数优化

## 2.2 用材及防腐优化设计

金属主材按水体含盐量、干湿循环强度分级选取，内陆淡水河道主梁采用Q235C碳素钢，近海与盐碱河道闸门主体选用Q345D低合金耐腐蚀钢。白龙河鱼池头钢坝闸底轴、支铰座等关键构件使用Q355B合金钢，抵御河道泥沙磨蚀与水质腐蚀。防腐设计依托基材预处理与多层涂层形成复合防护，构件厂区喷砂除锈至Sa2.5级，逐层涂刷环氧富锌底漆、环氧云铁中层漆与聚氨酯防腐面漆。临海闸站增设牺牲阳极保护，南埔围垦水闸水下构件加装锌块，阻挡氯离子侵蚀金属基材。门槽轨道、止水座板等易磨部位镶嵌不锈钢板材，高邮杨庄漫水闸止水接触面铺设不锈钢结构，避免止水磨损后水体侵蚀碳钢基体，减少结构腐蚀与后续维修频次。

## 2.3 连接构造与疲劳优化设计

构件连接形式按受力部位差异化设置，主次梁衔接采用全熔透坡口焊，门槽埋件与土建插筋采用搭接围焊，非受力附属构件使用高强螺栓可拆卸连接，方便后期构件养护更换<sup>[3]</sup>。平陆运河人字门节间采用8.8级高强螺栓配合局部补强焊，平衡结构整体性与拆装性能。疲劳高发的应力集中节点做圆弧过渡处理，消除构件直角结构带来的受力突变。颍河阜阳弧形闸门支臂与门叶衔接处打磨为R30圆弧，有效降低荷载循环下的裂纹产生概率。结构疲劳寿命结合启闭频次验算，日均启闭超五次的节制闸加厚销轴、耳板截面。宁夏秦坝关渠首钢闸改良吊耳开孔构造，杜绝长期交变应力引发的耳板撕裂病害。关键

受力焊缝落实无损探伤检测，排查焊缝内部缺陷，规避施工隐患诱发的结构疲劳破损。

## 3 水闸金属结构现场施工工艺

### 3.1 预埋构件安装施工

埋件由载重货车运送至闸址现场，通过汽车吊分批吊入各闸孔门槽内部。底坎优先完成预埋就位作业，吊装完成后依托千斤顶、手拉导链调整构件高程、平面平整度与孔口中心线。龙口吕家拦河闸底坎安装高程误差控制在2mm以内，中心线偏移不超过1.5mm，达标构件与土建一期插筋焊接固定后浇筑二期混凝土，混凝土达标拆模后再次复核构件尺寸。施工以底坎顶面基准线放样主轨与反轨控制线，从底节轨道开始分段吊装，调节螺栓临时固定后完成初步定位，依托精密仪器完成精准调校。单节轨道验收合格后接续安装剩余轨段，各节构件通过螺栓紧固、焊缝满焊打磨并补做防腐处理。门楣埋件单独验收合格后推进上部轨道施工，椒花水库拦污栅埋件沿用这套施工流程，可有效控制多节轨道拼接产生的累计安装误差。

### 3.2 钢闸门拼装与吊装施工

工厂预制的闸门构件运输至闸室空地后，可在平整场地完成门叶、止水橡皮、行走滚轮等配件预装工作。天台抽水蓄能下水库检修闸门采用场外整体拼装吊装工艺，取代传统原位拼装方式，减少土建与金结交叉施工造成的工期影响。门槽埋件验收清杂结束后，匹配荷载的汽车吊将整体闸门平稳吊放至门槽。落槽作业观察轮轨配合状态，防止卡顿刮伤止水座板。颍河阜阳节制闸115吨弧形闸门采用200吨汽车吊分次吊装就位，微调止水缝隙，让闸门全关时水封压缩量保持均匀稳定。

### 3.3 启闭机设备安装施工

固定卷扬式启闭机进场核对配件与出厂资质文件，依托闸门中心线划定设备纵横轴线，以卷筒中心把控安装高程。设备吊装就位后于混凝土机座，利用机具校正机架水平，纵向、横向水平偏差分别严控0.3mm/m、0.2mm/m标准。基座预留孔浇筑固结后，对角分次紧固地脚螺栓，复测参数合格后点焊固定垫板楔块，完成钢丝绳布设缠绕施工。杨庄漫水闸启闭机采用三级螺栓紧固方式，避免受力不均导致机架形变。液压启闭机油缸与管路同步安装，管线预留热胀空间，接口加装密封配件防范渗油。白龙河钢坝闸液压启闭机卧式布置于闸底板，管线暗敷于闸墩减少外力磕碰损坏。

### 3.4 设备启闭调试作业

闸门与启闭机安装完成后开展整机启闭试验，试验前清理门槽淤泥杂物，清水润湿止水橡皮与不锈钢座板接触面，全行程启闭试验次数不得少于三次。高邮杨庄漫水闸单扇闸门启闭

全程监测滚轮运行状态,无卡顿、异响即可判定行走机构达标,闸门全关后采用漏光法检测密封性能,缝隙无连续透光即为止水合格。试验完成后提起闸门,检查止水橡皮无撕裂、脱槽、变形等问题,对启闭机空载与带载工况调试行程限位、过载保护装置。宁夏秦坝关智能闸站联动远程控制系统,校验远程启停、开度调控、故障报警等功能,开度控制误差维持在 $\pm 3\text{cm}$ 以内,满足设备调试合格标准。

## 4 水闸金属结构施工质量管控措施

### 4.1 原材料进场源头管控

工程需建立供应商准入筛选机制,优先选用持有特种设备生产资质、具备完整质保体系的钢材及配件厂商。胶东调水龙口管理站吕家拦河闸施工中,进场钢材均配备随车材质化验单,现场抽样检测钢材屈服强度与耐腐蚀性能,Q355B合金钢不合格批次全部清退出场<sup>[4]</sup>。止水橡胶、防腐涂料、高强螺栓等辅材进场需核验合格证与第三方检测报告,抽检止水橡皮硬度、压缩回弹性能,通过现场试涂核验防腐涂料附着力,杜绝劣质材料投入加工。平陆运河人字门用材落实一车一检、分批留样存档制度,从源头规避原材料质量缺陷。项目依托数据设备搭建供应商动态评级台账,对供货质量不达标的厂家终止后续合作。

### 4.2 现场施工过程管控

施工全程落实工序三检制度,依托班组自检、项目部复检、监理抽检层层把控质量,埋件调校、闸门焊接、启闭机就位等工序均需验收签字后,方可开展后续施工。闸门关键受力焊缝全部开展超声波无损探伤,不合格焊缝彻底清除后重新焊接施工。椒花水库金属结构安装落实人员全程旁站制度,对吊装、焊接等关键工序实时管控施工细节。施工误差采用分段测量管控模式,单节轨道安装完成即刻复测校核,将尺寸偏差控制在单节构件范围内,规避多节拼装产生的整体超差问题。露天防腐喷涂避开高温、阴雨等恶劣天气,低温工况下开展钢结构焊接需提前预热,保障焊缝成型与连接质量。

## 参考文献:

- [1] 李波.水闸施工技术在水利水电工程中的运用探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(20):214-216.
- [2] 王兰秋.水利工程中水闸施工的技术要点[J].水上安全,2024,(11):145-147.
- [3] 高学先.水利工程水闸金属结构施工方法[J].全面腐蚀控制,2024,38(3):92-96.
- [4] 何巧清.水闸施工的技术要点及注意事项探讨[J].珠江水运,2023,(13):101-103.
- [5] 张彬.水利工程水闸金属结构施工方法研究[J].珠江水运,2022,(7):89-91.

## 4.3 后期运维检修管控

工程需搭建常态化巡检运维体系,搭配智能监测系统实现闸门开度、设备运行状态的远程在线管控<sup>[5]</sup>。龙口胶东调水渠道分水闸加装智能监测模块,设备出现卡滞、渗漏故障时可自动弹窗预警,便于运维人员及时处置隐患。项目按季度落实常规巡检工作,及时清理门槽淤积泥沙、清除构件表层浮锈,汛期前对所有闸门与启闭设备开展全行程试运行,更换老化止水构件与磨损滚轮。湖北崇阳天城水闸加固后建立年度大修台账,结合构件磨损数据分批完成配件更换与局部防腐翻新,根据设备老化状况适时推进结构技改,将老旧手摇启闭机逐步升级为电控卷扬设备。

## 4.4 专业施工队伍建设管理

组建分专业作业班组,分设钢结构预制、现场安装、防腐涂装、机电调试四类专项施工岗位,上岗前结合现场工况开展专项技术交底与实操培训。依托龙口本地拦河闸施工实例,让作业人员掌握沿海冻融、淡水淤积等不同环境的施工重难点。项目建立施工绩效考核制度,将安装精度、一次验收合格率纳入考核指标,对操作失误引发构件报废、尺寸超差的班组进行绩效处罚。定期组织技术人员对标优质工程观摩研学新工艺,持续精进作业人员专业水平,适配智能化金属结构精密安装的施工要求。

## 5 结语

本文系统梳理了水闸金属结构的固有工程特性,围绕结构受力、防腐耐久、装配施工等核心施工难点,明确参数优化、用材升级、构造改良的科学设计思路,标准化完善了整套现场施工工艺流程,搭建起覆盖施工全流程的质量管控体系。研究结合多项实际水利工程案例,验证了各项优化技术措施的实用性与落地性,有效解决了金属结构疲劳开裂、腐蚀破损、安装偏差超限等行业常见病害。后续可依托智能化监测技术,进一步优化动态设计方案与精准运维模式,持续提升水闸金属结构的运行安全性、使用耐久性与工况适配性,为各类水利水电新建及提质改造工程提供可靠的技术参考与实践借鉴。