

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.002

空间体系法在超高水头偏心铰弧门设计中的应用

张雪才^{1,2}, 谢遵党¹, 张富富¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘要: 针对目前世界上运行水头最高、连续运用时间最长、泄水流量较大、结构最复杂偏心铰弧形闸门的结构设计难题, 基于水工金属结构大数据设计技术, 直接采用空间体系法进行全过程设计, 即根据结构布置进行偏心铰弧形闸门的三维几何建模、空间结构分析、三维及二维工程出图。结果表明: 采用空间体系法设计偏心铰弧形闸门, 设计过程更加直观形象、可实时对闸门整体结构进行分析、提高了闸门结构的设计质量, 设计周期为平面体系法的20%~30%, 提升了主液压启闭机和偏心铰液压启闭机容量的精准度, 同时为偏心铰弧形闸门结构的制造安装提供了便利。首次采用空间体系法对偏心铰弧形闸门进行全过程设计, 弥补了平面体系设计方法的不足, 促进了闸门设计手段的更新和进步。

关键词: 偏心铰弧门; 超高水头; 空间体系法; 结构设计

中图分类号: TV663.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0009-08

Design of Ultra-high Head Eccentric Hinge Radial Gate Based on Spatial System Method

ZHANG Xuecai^{1,2}, XIE Zundang¹, ZHANG Fufu¹

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China;

2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin,
Ministry of Water Resources, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Based on the big data design technology of hydraulic metal structures, the spatial system method is directly adopted for the entire process design of the eccentric hinge radial gate, which has the highest operating head, longest continuous operation time, larger discharge flow rate, and most complex structure in the world. Based on the structural layout, the three-dimensional geometric modeling, spatial structure analysis, and three-dimensional and two-dimensional engineering drawings of the eccentric hinge radial gate are directly carried out. Spatial system method was used to design the eccentric hinge radial gate, the design process is more intuitive and visual, and the overall structure of the gate can be analyzed in real time, improving the design quality of the gate structure. The design cycle is 20% to 30% of the plane system method, which improves the capacity accuracy of the main hydraulic hoist and the eccentric hinge hydraulic hoist. At the same time, it provides convenience for the manufacturing and installation of the eccentric hinge radial gate structure. For the first time, the spatial system method was used for the full process design of eccentric hinged radial gates, which made up for the shortcomings of the plane system design method, promoted the updating and progress of hydraulic steel gate design methods.

Keywords: eccentric hinge radial gate; ultra-high head; spatial system method; structural design

弧形闸门因无需门槽、流态较好而广泛应用于高水头、大流速泄水道上调节流量的工作闸门中^[1], 因操作运行方式不同可分为常规弧形闸门和

偏心铰弧形闸门, 常规弧门最早出现在19世纪30年代, 偏心铰弧门出现在20世纪50年代、我国70年代开始着手研究, 并首次在龙羊峡水电站泄洪底

收稿日期: 2025-12-24

修稿日期: 2026-03-01

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3206703); 黄河设计公司一类科研课题(2025KY006)

作者简介: 张雪才(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水利工程勘察设计研究工作。E-mail: xnzxc1990@163.com

通讯作者: 谢遵党(1968—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水利工程勘察设计研究工作。E-mail: xzund@126.com

孔上应用^[2-4]。闸门设计规范^[5]规定,作用在闸门上的水头超过 85 m 时宜选用设有突扩门槽的压紧式或充压式止水弧门,经常局部开启的高水头弧门宜选用压紧式止水。带突扩门槽的压紧式弧门一般指偏心铰弧门,而偏心铰弧门根据偏心机构的不同可分为偏心铰轴式和偏心轴套式两种,因偏心轴套式结构复杂、检修维护困难,已较少使用。超高水头、超长连续运用时间、超大流速弧门结构的安全性、启闭的灵活性、止水的耐久性均与止水型式密切联系。结构安全性要求止水严密性要高(止水的预压缩量愈大密封性愈好),不出现因止水漏水而导致的参数振动^[6];启闭灵活性和止水耐久性就要求止水预压缩量小,既减小启闭力也减轻对止水的摩擦。常规型式止水难以满足闸门高水头局开运用要求,为解决上述矛盾,通常采用偏心铰压紧式止水和充压式止水^[7]。调研工程实例^[8-9]发现充压式止水结构复杂、易卡阻、多泥沙河流上易淤堵,偏心铰压紧式止水配合突扩突跌布置可适应高水头作用下弧门因压缩变形、温度变形、门叶与埋件变形、制造与安装误差等要求,可利用突扩突跌布置对高速水流补气减小下游流道的空蚀破坏,可利用偏心铰后撤闸门以减小阻力避免橡皮止水的磨损,可保证高水头作用下闸门全关和局开运行时良好的封水状态,尤其对局开运行时因漏水而引起的闸门振动有抑振作用,可防止长时间局开运行时门体错位脱落,故偏心铰压紧式止水应用较为普遍。

为确保偏心铰弧门合理布置和结构安全,一些学者对其设计、制造和安装等方面进行了研究,张之涓^[10]对龙羊峡水电站底孔偏心铰弧门、郑登有^[2]对东江水电站二级放空洞偏心铰弧门、谢遵党^[11]对小浪底排沙洞偏心铰弧门、李锋等^[12]对拉西瓦水电站泄洪底孔偏心铰弧门、尹成运等^[13]对九甸峡右岸泄洪洞偏心铰弧门、陈丽晔等^[14]对河口村 1 号泄洪洞偏心铰弧门的门槽、偏心参数、止水、支铰等结构设计分别进行了论述;王河生等^[15]对小浪底排沙洞偏心铰弧门顶水封切片进行了缝隙空穴流试验,并分析了清水、浑水条件下的空化空蚀状况,张燎军等^[16]采用附加质量法对九甸峡偏心铰弧门动力特性进行了分析,张军等^[17]采用 ANSYS 软件应用壳单元建立东江水电站偏心铰弧门模型进行了静力特性分析;刘俊玲等^[18]对小浪底排沙洞偏心铰弧门、江健炜^[19]对巴基斯坦塔贝拉偏心铰弧门的结构制造及精度要求等方面进行了介绍,唐荣书^[20]对东江水电站偏心铰弧门工地加工制造过程进行了介绍;

曹毅^[21]介绍水布垭偏心铰弧门倒装法安装流程,齐界夷等^[22]介绍了长龙山抽蓄电站下水库偏心铰弧门门槽一次安装技术及整体定位技术。上述学者对偏心铰弧门的设计、制造和安装等方面进行了总结,促进了偏心铰弧门的发展和进步。

随着计算理论和技术的发展,对偏心铰弧门结构的认识和设计手段也发生了变化,偏心铰弧门的门槽面板已属于中厚板的范畴^[25]、主梁已属于深梁的范畴^[26]、支臂也进入了中柔度杆范围^[27],再继续采用基于薄板理论、细长梁理论和大柔度杆理论的平面体系法设计偏心铰弧门,会因计算理论的误差导致较大的设计误差;另一方面,因偏心铰弧门结构复杂,采用传统的平面体系法对偏心铰弧门进行简化设计也会导致计算误差增大、二维工程图量大且不易表达,给设计制造安装环节带来较大困难。为弥补现行设计手段的不足,基于水工金属结构大数据设计技术^[28],采用考虑中厚板理论、深梁理论和中柔度杆理论的空间体系法对偏心铰弧门进行全过程结构设计,提高了闸门设计质量和效率(平面体系法完成偏心铰弧门设计的整个过程需要 3—4 个月,空间体系法可在 1 个月内完成),同时直接根据三维几何模型,可准确计算出主提升启闭机和偏心铰启闭机的容量,三维交付成果为制造厂家和安装单位提供了极大的便利。采用空间体系法直接进行偏心铰弧门结构设计,可高效设计出安全可靠、经济合理的闸门结构,促进水工闸门设计手段的更新和进步,为同类水工金属结构的设计提供了借鉴和参考。

1 设计参数及方法

1.1 设计参数

以某水电站低位洞出口偏心铰弧门为例,根据该水电站工程总体布置的需要,共设置 1 孔低位运行洞、出口处布置 1 扇偏心铰弧门,其孔口尺寸 4.0 m × 4.1 m(宽 × 高),设计水头 181.5 m,运行水头 176.5 m,最大泄量 400 m³/s,最大流速达 43.9 m/s。为满足建设期下游河道生态和河流航运的需要,要求偏心铰弧门连续运行 18 个月以上,该偏心铰弧门是目前世界运行水头最高、连续运用时间最长、结构较复杂的闸门结构。为确保闸门设计质量和效率,基于水工金属结构大数据设计技术,采用空间体系法对其进行全过程设计。

依据水工金属结构大数据设计技术、小浪底排沙洞和孔板洞偏心铰弧门^[29]成功运行经验及水工模型试验,初步确定该偏心铰弧门的突扩和突跌尺寸分别

为0.5和1.5 m、主止水采用山型橡皮 LD-19 材料^[30]、辅助止水采用方头 P60 橡皮止水和转铰止水,门体采用 Q355C 材料、埋件采用 Q355B 材料、支铰采用 ZG310-570 材料、底槛采用 022Cr22Ni5Mo3N 材料、止水座板和侧滑块采用 12Cr18Ni9 材料,采用蓄能器锁定启闭机。借鉴小浪底排沙洞偏心铰弧门维护措施及后期运行效果^[31],再结合本工程实际,防腐抗蚀措施采用在面板和孔口 2m 范围内的埋件过流面喷涂碳化钨。

1.2 设计方法

水工金属结构大数据设计技术是基于大数据思想,收集整理已建工程中水工闸门的数据资料,并根据孔口尺寸、设计水头、使用条件相近原则快速进行水工闸门设计的一种技术。采用该技术,借鉴运行成功的工程案例,依据设计规范和手册^[32],可快速确定该偏心铰弧门主要构件的初步尺寸。空间体系法设计理念是直接建立偏心铰弧门的空问结构模型,并进行空问结构分析,不再按照板、梁、柱的计算模式进行简化,因闸门结构本身就是空问结构,其空问效应极强,闸门整体结构共同承担荷载,人为进行结构简化和荷载分配,必将导致较大的计算误差。基于水工金属结构大数据设计技术,采用空问体系

法设计偏心铰弧门的具体过程(图1):①根据偏心铰弧门的孔口尺寸、设计水头直接得到偏心铰弧门的初始布置和初步尺寸,其中布置参数主要确定闸门的初始布置、尺寸参数主要确定闸门结构的初始几何尺寸;②在 Workbench 前处理建立偏心铰弧门的几何模型;③对偏心铰弧门的几何模型网格划分、施加荷载和边界条件、结构分析;④提取分析结果,并根据分析结果调整几何模型再分析,直到得到结构合理的偏心铰弧门结构;⑤对三维模型进行尺寸标注或生成二维工程图,交付成果。

偏心铰弧门三维几何建模和结构分析时应遵循相应的分析原则来确保几何模型真实、有限元模型正确、边界条件恰当、分析结果稳定、设计过程清晰、成果表达直观,工程出图遵照相关的制图标准。采用空间体系法对偏心铰弧门设计的要点:①要熟悉和明晰偏心铰弧门结构的整体组成、门体布置、作用荷载、传力路径和运用方式;②要掌握 Workbench 中几何建模过程和有限元分析理论;③要全局把控几何建模的关联性和传递性、施加约束和荷载及结果分析间的内在联系;④从理论分析和工程经验等方面对分析结果进行合理评价。

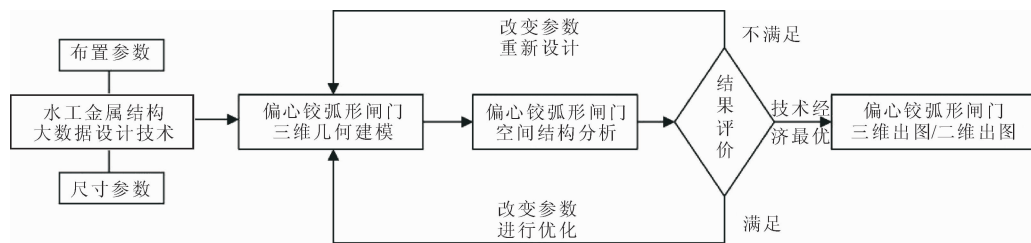


图1 偏心铰弧门设计框架

2 结构设计

2.1 三维几何模型

采用 Workbench 设计平台中的前处理 SCDM (SpaceClaim Direct Modeler 的简称)直接建立偏心铰弧门的三维几何模型(见图2)^[33]。支铰连线中点为空间坐标原点,沿水流方向为 X 轴,垂直水流方向指向右支铰为 Y 轴,垂直水流方向垂直向上为 Z 轴,符合右手螺旋坐标系法则。偏心铰弧门为双主横梁式直支臂结构,主要结构的三维几何模型见图3,门叶结构(图3(a))、支臂结构(图3(b))、支铰链结构(图3(c))、支铰座结构(图3(d))、偏心轴结构(图3(e))、拐臂结构(图3(f))。考虑突扩和突跌等布置要求,闸门宽度 5.0 m,高度 5.3 m,面

板曲率半径 8.0 m,设计水头 181.5m,总水压力 50 727.0 kN。为减少安装误差和安装接头,确保闸门结构几何精度,在满足运输和吊装的前提下,尽可能减少运输单元,故将偏心铰弧门分为门叶、支臂、支铰座、偏心轴和拐臂等运输单元,然后在现场进行拼接和安装。

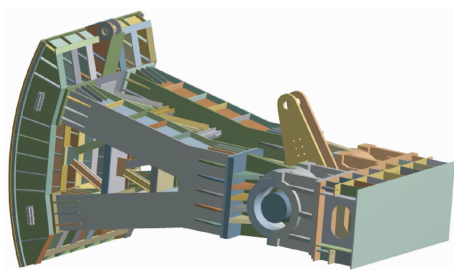


图2 偏心铰弧门结构三维模型

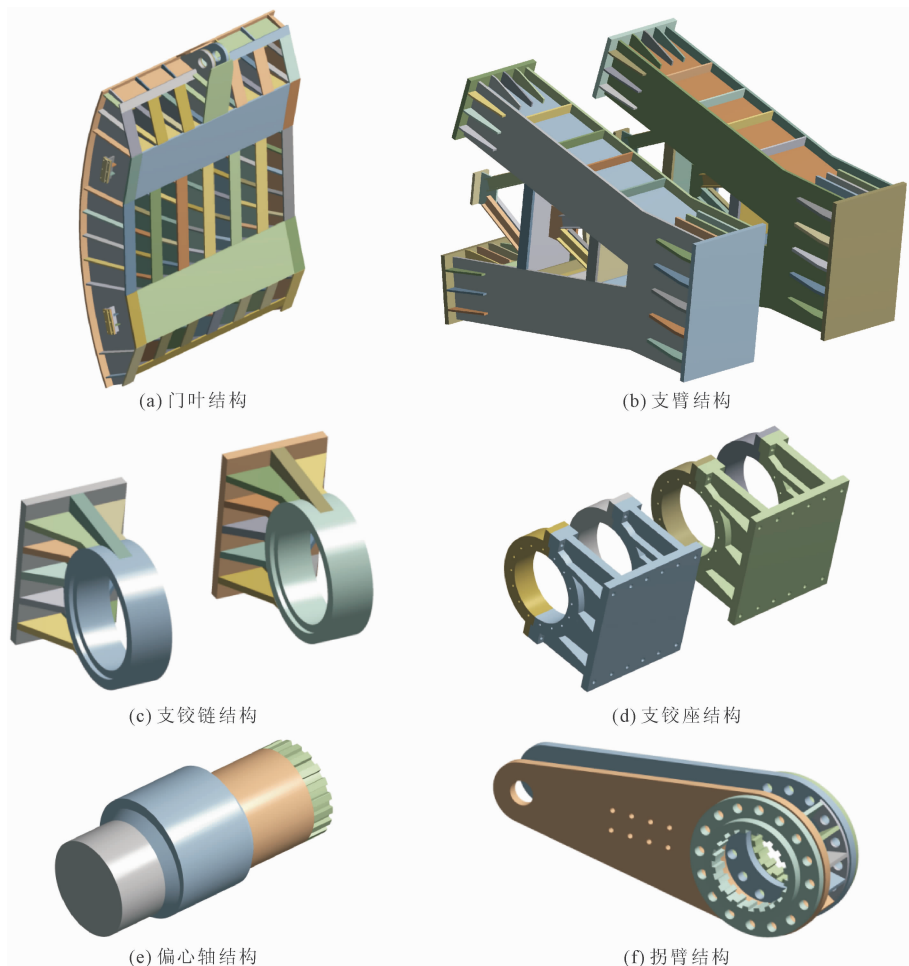


图 3 主要结构的三维几何模型

图 3(a) 中面板底边下游侧宜做成 45° 锐缘, 可使水流平顺, 减缓水流脉动作用; 也可避免当局部开启时主止水橡皮压缩部分与非压缩部分之间产生的剪切力对止水橡皮的损害。

偏心铰弧门的门框构件(图 4)指在孔口周围由两侧弧形部分和上下水平直线部分组成的一个闭合周界, 用来固定主止水橡皮, 并在闸门工作时承受压紧力, 作为埋设的钢构件, 其断面要有足够的刚度。门框的左右两侧和底槛部分往往做成箱型截面, 构

成空气室, 并与埋于坝体内的通气管相通, 以便泄流时从断面上的开孔处向水舌两侧及底部补气, 消除气蚀和防止闸门振动。主止水橡皮通常镶嵌在门框构件的凹槽上。

主止水的压缩量主要考虑: ①止水橡皮的必要压缩; ②闸门及构件制造及安装允许公差; ③因荷载及温度变化引起结构的伸缩及变形; ④止水橡皮本身的磨损; ⑤荷载长期作用引起橡皮松弛与残余变形; ⑥温度降低时橡皮的弹性损失。辅助止水通常

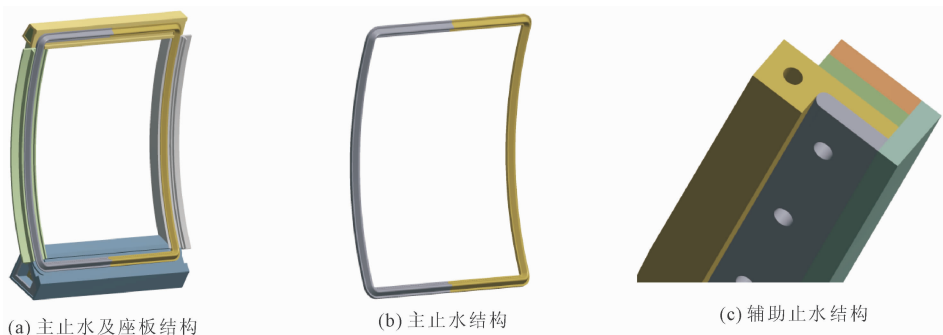


图 4 主止水及辅助止水结构

采用顶部的转铰止水和两侧方头 P 型止水(图 4(c)),顶部转铰止水依靠库水压力使之与面板压紧,防止闸门开启时顶部射流;两侧方头 P 型止水采用预压缩的方式(预压缩量一般为 4mm)来防止闸门任意开度运行时两侧狭缝射流。

偏心铰弧门运行过程中起主要作用的是偏心轴结构和拐臂结构,偏心铰是偏心铰弧门的关键部件,面板与止水的压紧或脱开,均通过偏心铰和操作装置来实现。偏心半径,偏转角度及偏心位置的合理确定是偏心铰弧门设计过程中的关键步骤,关系到偏心轴结构设计、偏心操作机构的容量和布置。为合理确定偏心参数,在充分分析闸门前移后撤径向位移的基础上,确保主止水压缩量及压缩分布、搓切值,启闭行程及容量,偏心轴结构均在最优合理区间,确定了该偏心铰弧门的合理偏心参数(见图 5):偏心半径 45 mm, O_N 为偏心铰中心,高程为 49.843 m; O_1 为主止水压紧位置,高程为 49.80 m; O_2 为主止水松开位置,高程为 49.829 m;合力中心线与水平线的夹角为 29.1349° ,即该偏心铰弧门前移后撤

的距离为 63.6396 mm,偏转角度为 90° 。 O_N 、 O_1 、 O_2 三点是偏心铰弧门设计、制造、安装的关键参考点,其中 O_N 是铰座的圆心, O_1 是支铰链及门体的圆心。

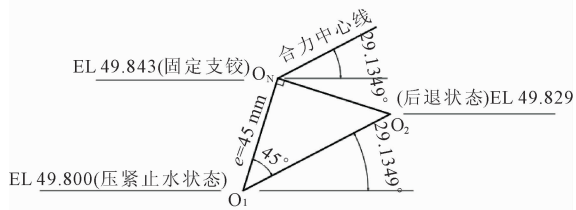


图 5 偏心铰偏心参数及位置

2.2 空间结构分析

偏心铰弧门在启闭过程中,受力条件复杂、受力状态随时变化。依据设计规范和手册,采用空间体系法对偏心铰闸门在瞬开挡水状态下的结构进行了分析^[34]。限于篇幅,给出了偏心铰弧门整体结构、主梁结构、支臂结构、支铰链结构和拐臂结构的分析结果,分别见图 6—图 10。

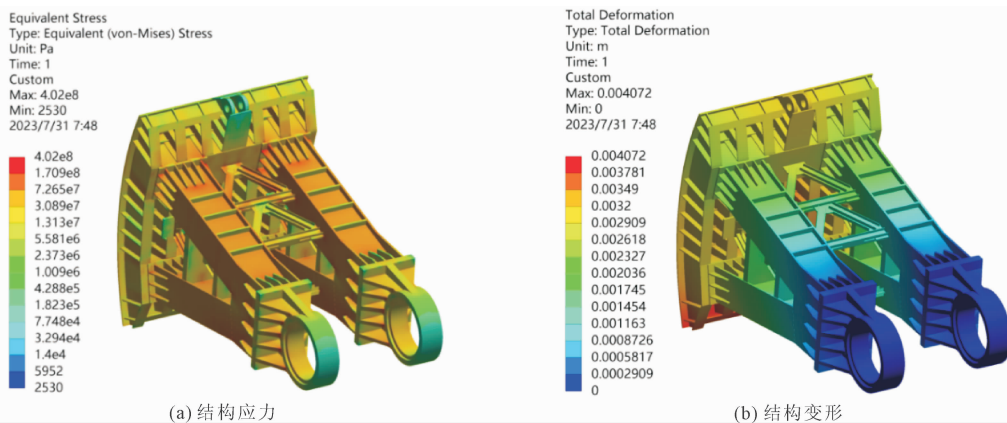


图 6 闸门整体结构分析

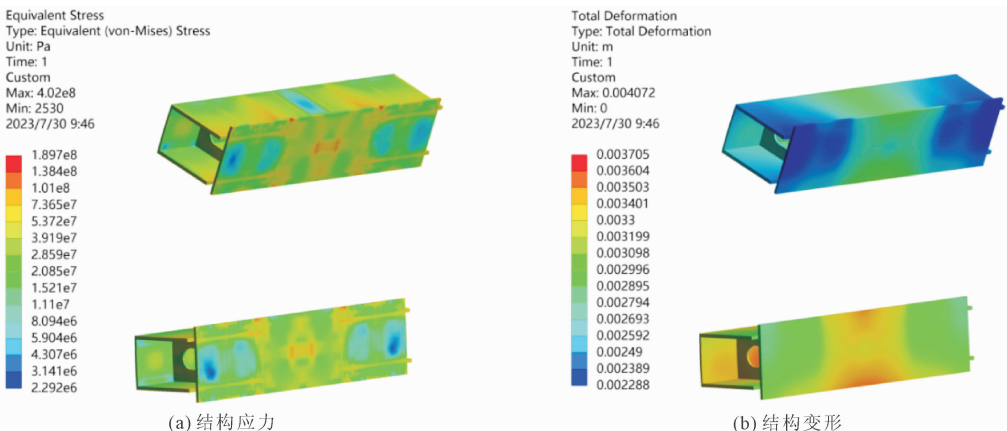


图 7 主梁结构结构分析

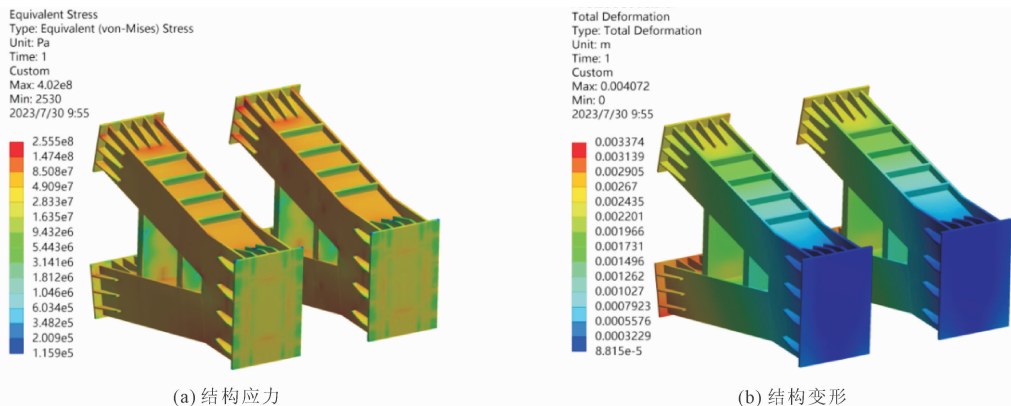


图 8 支臂结构结构分析

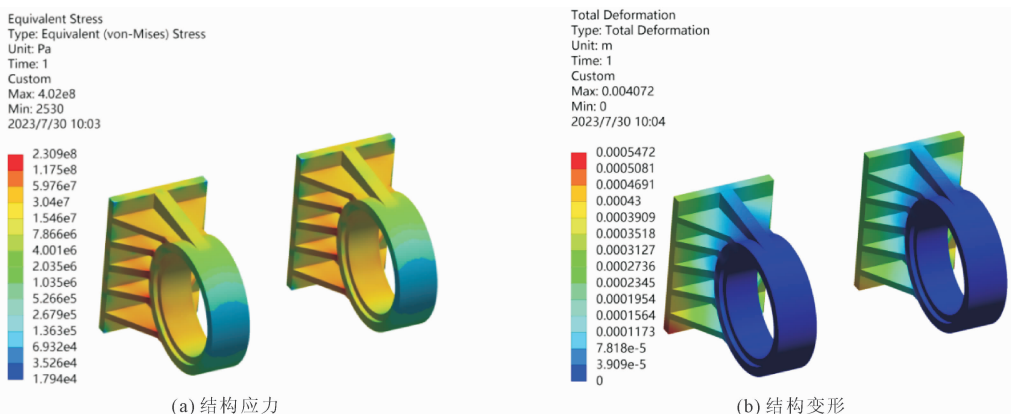


图 9 支铰链结构结构分析

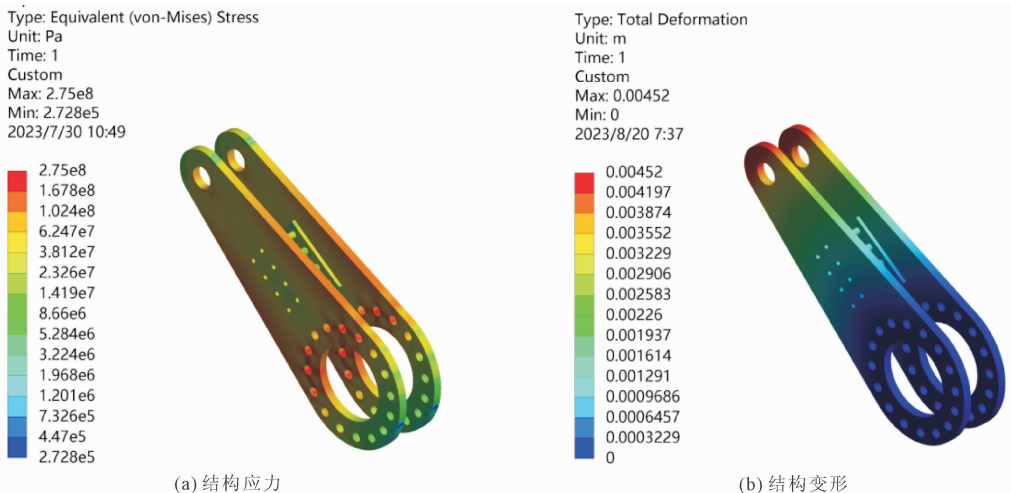


图 10 拐臂结构分析

由图 6—图 10 可知, 闸门整体结构最大等效应力为 402.0 MPa, 位于闸门支臂前端板与主梁连接处, 考虑材料的应力重分布等情况, 闸门整体结构平均等效应力为 170.9 MPa, 满足设计规范中材料容许应力 330 MPa 的要求; 闸门整体结构最大变形为 4.1 mm, 位于闸面板底缘处, 满足设计规范容许

值 6.7 mm。主梁结构最大等效应力为 189.7 MPa, 位于支臂与主梁连接处主梁下翼缘结构翼缘处; 主梁结构最大变形为 3.7 mm, 位于下主梁下翼缘处。支臂结构最大等效应力为 255.5 MPa, 位于支臂与主梁连接处支臂结构翼缘处; 支臂结构最大变形为 3.4 mm, 位于下支臂前挡板处。支铰链结构最大等

效应力为 230.9 MPa,位于支铰链结构横向加强板边缘处;最大变形为 0.55 mm,位于支铰链结构端部。拐臂结构最大等效应力为 275.0 MPa,位于拐臂结构吊耳处;最大变形为 4.5 mm,位于拐臂结构最端部。可知该偏心铰弧门的强度、刚度均满足设计规范要求。

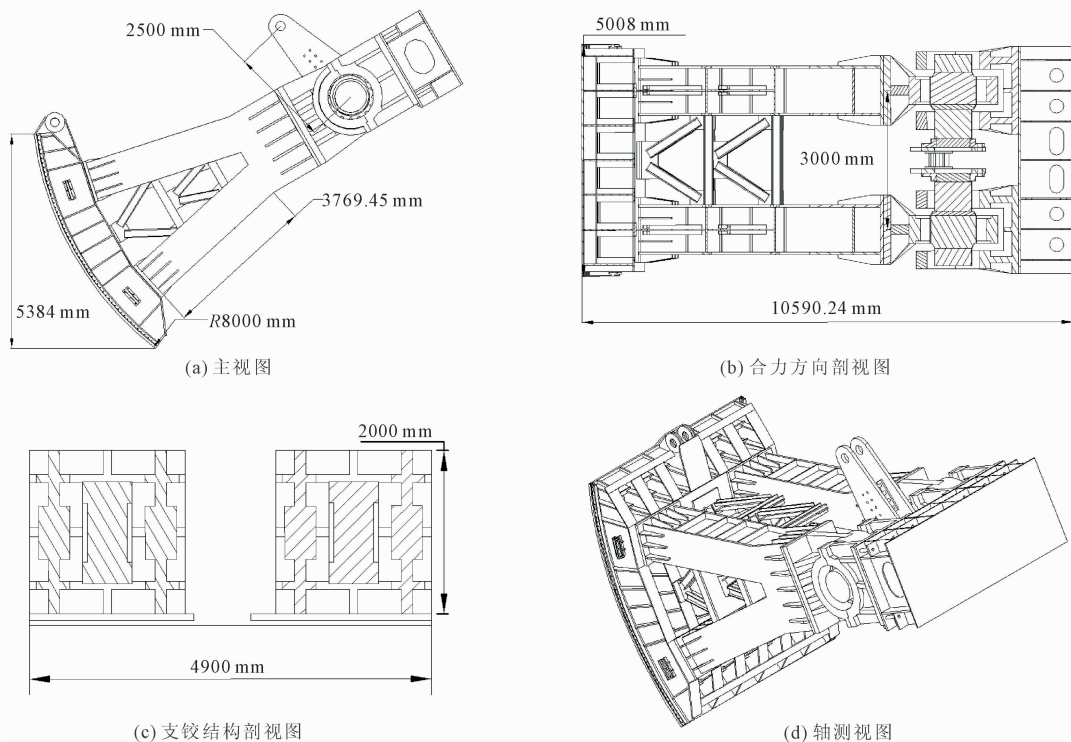


图 11 偏心铰弧门工程设计图

3 制造安装及运维

3.1 制造安装

偏心铰弧门的制造安装精度高于常规弧门。面板水平向不平度、闸门与埋件之间装配间隙偏差是控制止水压缩分布均匀的先决条件,偏心铰的装配精度和拐臂与偏心轴端花键的装配精度是保证闸门正常运行的必要条件。门体采用低合金钢焊接结构,为使构件加工成型后不再产生时效变形,门体各部件焊接后必须先整体退火,消除焊接应力后,再进行构件连接断面加工;门叶在工厂总组装后进行面板外弧面加工,加工后要求 $R8000 \pm 1$ mm,面板厚度不小于 50 mm,面板光洁度为 ∇_3 ,外圆弧水平方向不平度小于 1 mm;门槽埋件为铸钢件,经退火后进行内弧面加工,方法与外弧面相同;各构件出厂前必须进行总组装,严格控制轴的偏心位置与拐臂装配中心线间的相对位置,角度偏差小于 $3'$ 。安装前必须在工地预装基础上确定安装方案,安装完毕后进

2.3 工程设计图

采用 Workbench 前处理模块直接导出二维工程图(见图 11),为保证图纸的简洁,仅标出少许尺寸,同时还可以根据实际需要定制工程图纸模板和图框,直接进行三维交付。

行总体检查时,必须在拐臂操作自如、检验合格的前提下,闸门在最低位置后撤至最大间隙状态,做两项检查:①检查面板外缘与止水自由表面之间的距离,要求各点偏差不大于 4 mm;②检查闸门空载起落过程中面板外弧面上任一点至顶帽顶点之间的距离,其偏差不应大于 ± 1.5 mm,检查合格后,才能浇筑二期混凝土。直接进行三维成果交付,可真实模拟制造加工及安装过程,提高制造加工精度和安装质量。

3.2 运维

因该工程弧门需长时间局开运用,就要求任何开启位置都能锁定液压启闭机活塞杆,防止油缸漏油引起的活塞杆下沉。对偏心铰弧门来说,主提升液压启闭机活塞杆下降,会导致闸门下降,引起主止水受切搓而撕裂,偏心铰液压启闭机活塞杆下降,闸门后退直接影响止水效果,导致闸门漏水,只有采用可靠的防滑锁紧装置,才能确保闸门正常运行。借鉴小浪底排沙洞和孔板洞偏心铰弧门防滑锁紧装置及运用效果,在该工程中采用气囊式蓄能器,该蓄能

保压装置配备小型冲压泵组,能做到在油缸泄露、降压、活塞杆下沉的同时,蓄能器自动向油缸下腔补油,从而起到保压锁紧的作用,并具有自动保压、运行灵活、无级调压等优点。采用空间体系法设计,再结合数字孪生技术,可直接模拟各种条件下弧门的运行状态,为后期运维提供极大的便利。

4 结 论

采用空间体系法对目前世界上运行水头最高、连续运用时间最长、泄水流速较大、结构最复杂的偏心铰弧形闸门进行了全过程设计,得到以下主要结论:

(1) 首次采用空间体系法对闸门结构进行了全过程设计,弥补了平面体系设计方法的不足,为同类水工金属结构的设计提供了借鉴和参考。

(2) 采用空间体系法对偏心铰弧形闸门结构进行设计,便于确定偏心轴的合理参数及门体结构的重心位置,提升了主液压启闭机和偏心铰液压启闭机容量的精准度,设计过程更加直观。

(3) 仅对偏心铰弧形闸门的静力特性进行了研究,下一步将对其动力特性及疲劳特性进行分析,以便体现空间体系法的优势。

参考文献:

- [1] 张雪才,王正中,孙丹霞,等. 弧门主框架及启闭机系统结构布置的多工况多目标优化[J]. 工程科学与技术,2017,49(04):37-45.
- [2] 郑登有. 东江水电站的金属结构设计[J]. 水力发电,1991,17(01):29-35.
- [3] 肖兴斌,潘化兰. 高压弧形闸门突扩跌坎式掺气减蚀应注意的问题[J]. 长江水利教育,1998,15(01):59-62.
- [4] 张之涓. 龙羊峡水电站偏心铰弧形工作闸门的研制和运行[J]. 水力发电,1992,18(12):39-41.
- [5] SL 74—2019 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2020.
- [6] 王正中,张雪才,刘计良. 大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J]. 水力发电学报,2017,36(10):1-18.
- [7] 龙见颖,杨自文,周星宇. 弧形闸门充压伸缩式水封粘接及安装工艺探析[J]. 水电与新能源,2023,37(08):62-65.
- [8] 李纪新,金树训. 小浪底工程排沙洞偏心铰弧门设计中几个问题的研究[J]. 人民黄河,1998,35(08):29-30.
- [9] 张绍春,栗国忧,汪志龙. 高水头弧形闸门的框形伸缩式水封切片试验研究[J]. 水力发电学报,1996,15(01):59-65.
- [10] 张之涓. 龙羊峡水电站底孔偏心铰弧门设计[J]. 水

力发电,1985,11(11):40-44.

- [11] 谢遵党. 计算机在小浪底工程排沙洞偏心铰弧形闸门设计中的应用[J]. 人民黄河,1999,36(05):44-47.
- [12] 李 锋,赵清静. 拉西瓦水电站底孔偏心铰弧形闸门的设计[J]. 西北水电,2010,28(04):76-80,86.
- [13] 尹成运,杨 兵. 九甸峡水利枢纽工程偏心铰弧门设计[J]. 水力发电,2010,36(11):82-84.
- [14] 陈丽晔,姚宏超,杨丽娟. 河口村水库偏心铰弧门设计与研究[J]. 人民黄河,2014,36(11):93-95.
- [15] 王河生,柴恭纯. 浑水条件下偏心铰弧形闸门的空化空蚀[J]. 水利水运科学研究,1997,25(03):237-241.
- [16] 钱声源,张燎军,邹 辉,等. 偏心铰弧形闸门振动特性研究[J]. 水电能源科学,2008,26(03):166-168,178.
- [17] 张 军,田海平,黄 波. 水电站二级放空洞偏心铰弧形闸门静力特性有限元分析[J]. 湖南电力,2017,37(03):16-18.
- [18] 刘俊玲,董素芳,赵丽丽. 偏心铰弧门的检验[J]. 水利电力机械,2005,27(03):38-40.
- [19] 江健炜. 偏心铰弧门拼装尺寸链的计算[J]. 水电站机电技术,2021,44(05):37-39.
- [20] 唐荣书. 东江水电站偏心铰弧形闸门的机械加工[J]. 水利电力施工机械,1997,18(03):36-38.
- [21] 曹 毅. 水布垭放空洞超大型弧门及启闭机的安装[C]//中国水力发电工程学会金属结构专业委员会,全国水利水电工程金属结构专业信息网. 水工机械技术 2008 年论文集. 中国葛洲坝集团机电建设有限公司,2007:8.
- [22] 齐界夷,程雪如. 抽水蓄能电站高水头偏心铰弧形闸门安装技术[J]. 电力勘测设计,2023,30(12):87-92.
- [23] 吴艳民,王青贤,王冬生. 阿尔塔什水利枢纽工程偏心铰弧门安装工艺总结研究[J]. 价值工程,2022,41(02):112-114.
- [24] 年文亮,张自敬,郑登有. 东江一水电站偏心铰弧形闸门的设计、制作与安装[J]. 水力发电,1987,13(11):68-73.
- [25] 张雪才,杨顺群,侯庆宏,等. 水工闸门面板结构空间有限元分析原则[J]. 水力发电,2021,47(10):61-70.
- [26] Zhang Xuecai, Lou Senyuan, Chen Liye, et al. Study on analysis principle of spatial system method for a hydraulic steel gate[J]. Sustainability, 2022, 14(22): 14804.
- [27] 张雪才,陈丽晔,姚宏超,等. 弧形闸门支臂结构空间有限元分析原则研究[J]. 水力发电,2021,47(07):73-82.

- Solid Earth, 1987,92(B2):1337-1347.
- [7] Zimmerman R W, Bodvarsson G S. Hydraulic conductivity of rock fractures[J]. *Transport in Porous Media*, 1996, 23:1-30.
- [8] Kling T, Schwarz J O, Wendler F, et al. Fracture flow due to hydrothermally induced quartz growth [J]. *Advances in Water Resources*, 2017,107:93-107.
- [9] 钟振,闫金秀,徐从强,等.粗糙单裂隙渗透性尺寸效应及其影响因素研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021,52(04):192-201.
- [10] Pyrak-Nolte L J, Nolte D D. Approaching a universal scaling relationship between fracture stiffness and fluid flow [J]. *Nature Communications*, 2016, 7(01):10663.
- [11] Wang Lichun, Cardenas M B. Development of an empirical model relating permeability and specific stiffness for rough fractures from numerical deformation experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016,121(07):4977-4989.
- [12] He Xinxin, Yu Pengliang, Eijsink A, et al. Co-evolution of specific stiffness and permeability of rock fractures offset in shear [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2025,130(05):e2024JB030633.
- [13] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1981,18(05):429-435.
- [14] Amadei B, Illangasekare T. A mathematical model for flow and solute transport in non-homogeneous rock fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1994,31(06):719-731.
- [15] Cao Cheng, Xu Zengguang, Chai Junrui, et al. Radial fluid flow regime in a single fracture under high hydraulic pressure during shear process [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,579:124142.
- [16] Renshaw C E. On the relationship between mechanical and hydraulic apertures in rough-walled fractures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B12):24629-24636.
- [17] Javanmard H, Ebigho A, Walsh S D C, et al. No-flow fraction (NFF) permeability model for rough fractures under normal stress [J]. *Water Resources Research*, 2021,57(03):e2020WR029080.
- [18] 陈跃都.水力耦合作用下岩体粗糙裂隙渗流及滑移失稳机理研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [19] Deng Qinglin, Shangguan Jianming, Ji Yinlin, et al. Relating normal stiffness to permeability of a deformed self-affine rough fracture using its geometric properties [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024,17(05):2829-2842.
- [19] Röttger M C, Sanner A, Thimons L A, et al. Contact engineering-create, analyze and publish digital surface twins from topography measurements across many scales [J]. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2022,10(03):035032.
- [20] Liu Pengyuan, Meng Fanzhen, Yue Zhufeng, et al. A multi-device data fusion method for 3D rock fracture reconstruction: Development, comparison, and implications for hydro-mechanical simulations [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2026, 202:106507.
- [21] 熊峰.裂隙岩体非线性渗流特性及水热耦合模拟研究[D].武汉:武汉大学,2020.

(上接第16页)

- [28] 谢遵党,杨顺群,张雪才,等.一种基于大数据技术的水工金属结构设计方法 [P]. 河南省:CN113609555B, 2021-11-05.
- [29] 林秀山.黄河小浪底水利枢纽规划设计丛书——枢纽规划设计[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [30] 西北水电勘测设计研究院,西安理工大学.黄河小浪底工程偏心铰弧门压紧式止水试验总报告[R].郑州:黄河勘测规划设计研究院有限公司,1996.
- [31] 谭莹.偏心铰弧门面板抗磨防腐涂层研究与应
- 用[J]. *中小企业管理与科技(下旬刊)*, 2018,11(02):152-153.
- [32] 水电站机电设计手册编写组.水电站机电设计手册金属结构(一)[M].北京:水利电力出版社,1988.
- [33] 哈佳,张雪才,陈丽晔,等.平面闸门全过程三维参数化设计及应用[J]. *水电能源科学*, 2023,41(05):178-181,177.
- [34] 张雪才,陈丽晔,王正中.水工弧形闸门结构的 APDL 建模方法[J]. *图学学报*, 2021,42(02):271-278.