

水工钢闸门结构受力分析与优化设计研究

于少杰 朱 筱 侯炳屹

南水北调中线信息科技有限公司 河南 新乡 453000

摘要：水工钢闸门作为水利工程中的关键设施，其结构受力与优化设计对工程安全及效益意义重大。本文首先介绍了其结构类型、组成与特点，分析静水压力、动水压力等荷载类型与作用方式，阐述材料力学、结构力学和有限元等受力分析方法及不同工况受力情况。接着说明了优化设计以保障安全功能为前提，降低材料消耗等目标，提出结构尺寸、形状和拓扑优化策略，介绍遗传算法等优化算法，给出建立优化模型、选择算法、结构分析、迭代优化和结果验证的优化设计流程。

关键词：水工钢闸门；结构受力分析；优化设计研究

引言：水利工程中，水工钢闸门是挡水、泄水及控制水流的关键设施。其结构复杂，运行中承受静水压力、动水压力、风浪力等多种荷载，受力条件恶劣。同时，不同工况下闸门受力差异大，对结构安全要求高。为保障水利工程安全高效运行，需深入研究水工钢闸门结构受力。此外，为提高工程效益，还需对其结构进行优化设计，降低材料消耗、提升性能。本文将围绕水工钢闸门结构受力分析与优化设计展开研究。

1 水工钢闸门结构概述

水工钢闸门按结构形式可分为平面闸门、弧形闸门、人字闸门等不同类型。平面闸门结构简单，制造与安装过程相对便捷，这使得它在各类水利工程中有着广泛的应用，能满足多种挡水、泄水场景的需求；弧形闸门在启闭过程中所需的力量较小，并且具备良好的水力学条件，在大门口闸门的应用中占据重要地位，能够有效降低水流对闸门的冲击以及能量损耗；人字闸门主要适用于船闸等工程，其独特的结构设计使其具有较好的密封性能，可确保船只在通过船闸时的安全和正常运行^[1]。水工钢闸门主要由门叶结构、支承结构、止水装置和埋件等部分组成。门叶结构作为闸门的主体，承担着水压力等各类荷载，是整个闸门结构中承受力的核心部分，其强度和稳定性直接关系到闸门能否正常工作；支承结构的主要作用是支承门叶，保证门叶能够灵活地进行启闭操作，使闸门可以根据需要实现挡水或泄水的功能；止水装置能够有效防止水流渗漏，避免因水流渗漏对闸门及周边工程造成损害，维持闸门内外的水流平衡；埋件则用于固定闸门的各个部件，确保闸门整体结构的稳定性，保证闸门在运行过程中各部件不会出现松动或移位等情况，从而保障闸门的正常运行。水工钢闸门具有结构复杂、受力条件恶劣、工作环境多变等特

点。其结构尺寸通常较大，在设计时需要充分考虑结构的整体稳定性和局部强度，以确保闸门在承受各种荷载时不会发生变形或破坏；在运行过程中，闸门承受着巨大的水压力、动水压力、风浪力等荷载，并且这些荷载的大小和方向会随着水位的变化而不断改变，增加了闸门结构受力的复杂性；同时，闸门长期处于水中，会受到水的腐蚀和冲刷，水中含有的各种杂质以及水流的动力作用，都会对闸门材料造成损害，因此对材料的耐久性提出了较高要求，需要选用耐腐蚀、耐磨性能良好的材料，并采取有效的防护措施。

2 水工钢闸门结构受力分析

2.1 荷载类型与作用方式

(1) 静水压力，静水压力是水工钢闸门承受的主要荷载之一其大小取决于水的密度、重力加速度以及水深，作用方向始终垂直于闸门表面，在闸门处于挡水状态时持续存在，对闸门结构产生持续的挤压作用。(2) 动水压力，在闸门开启或关闭过程中产生，水流因闸门运动状态改变而形成动水压力，其大小和分布与闸门开启速度、水流流态紧密相关，快速开启或关闭闸门会使动水压力显著增大且分布复杂，对闸门振动和稳定性影响重大，可能引发闸门共振等不利情况。(3) 风浪力，出现在有风浪的水域，其大小由风速、浪高、闸门受风面积等因素决定，作用方向随机多变，不同时刻风浪力方向可能不同，给闸门带来不规则的冲击力，增加闸门受力复杂性。(4) 自重，是闸门自身重量形成的荷载，作用方向竖直向下，对闸门支承结构和埋件产生压力，支承结构需承受闸门自重并将其传递至基础，埋件要保证闸门各部件在自重作用下位置稳定，自重大小与闸门材质、尺寸相关，大型闸门自重较大，对支承和固定结构要求更高^[2]。这些荷载共同作用于水工钢闸门，在设计

时需全面考虑各荷载大小、方向及组合情况,确保闸门结构安全可靠。

2.2 受力分析方法

水工钢闸门受力分析方法多样,不同方法各有特点与适用场景。材料力学方法适用于结构简单的水工钢闸门,它基于一些基本假设,把复杂结构简化为杆件或板件,借助材料力学公式来计算结构的应力与变形。此方法计算过程相对简便,能快速得出结果,不过由于简化程度较高,其分析精度较低,通常用于闸门设计的初步阶段,为后续设计提供大致数据参考和方向指引,帮助确定结构的基本尺寸和形式。结构力学方法则考虑了结构的整体性,采用力法、位移法等方法来求解结构的内力和变形。它对于分析一些较为复杂的结构,如桁架结构、框架结构等具有较好的适用性,能够更全面地考虑结构各部分之间的相互作用。然而,当面对形状不规则的结构时,结构力学方法的计算难度会大幅增加,需要处理复杂的力学关系和边界条件,对分析人员的专业能力和计算工具要求较高。有限元方法作为一种数值分析方法,将结构离散为有限个单元,通过建立单元刚度矩阵和整体刚度矩阵,进而求解结构的应力和变形。它具有较高的精度和广泛的适应性,能够分析各种复杂形状和受力条件的结构,无论是规则还是不规则结构,都能较为准确地模拟其受力状态,可全面考虑各种因素对闸门受力的影响,所以成为目前水工钢闸门结构受力分析的主要方法,能为闸门的安全设计和优化提供可靠依据。

2.3 不同工况下的受力分析

(1) 正常运行工况,闸门处于关闭状态,此时主要承受静水压力与自重。静水压力大小由水的密度、重力加速度以及水深共同决定,其作用方向始终垂直于闸门表面;自重则竖直向下作用于闸门。鉴于这两种荷载的存在,必须对闸门的门叶结构、支承结构和埋件进行细致的受力分析。门叶结构需具备足够强度以承受水压力,支承结构要能稳定支承门叶,并将所承受的荷载有效传递至基础,埋件则要保证闸门各部件位置固定,以此确保整个结构在正常运行时的强度和稳定性满足要求。(2) 检修工况下,闸门可能处于局部开启或完全开启状态,除静水压力和自重外,还可能受到动水压力和风浪力的作用。动水压力因闸门启闭导致水流变化而产生,其大小和分布与闸门开启速度、水流流态密切相关;风浪力大小取决于风速、浪高以及闸门受风面积,作用方向随机变化^[3]。此工况下,需重点分析闸门的振动和稳定性问题,防止因共振和失稳现象导致闸门损坏。(3) 地震工况下,闸门会受到地震力的作用,地震力的

大小和方向与地震烈度、场地条件等因素有关。此时受力分析需考虑结构的动力响应,采用动力分析方法计算结构的应力和变形,从而确保闸门在地震作用下不发生破坏,保障水利工程的安全稳定运行。

3 水工钢闸门结构优化设计

3.1 优化设计目标

首要前提是保障结构安全与使用功能不受影响,这是闸门发挥挡水、泄水等基本作用的基础,只有确保结构在各种工况下都能稳定可靠运行,才能保障水利工程的整体安全,避免因闸门结构问题引发工程事故。在此基础上,降低材料消耗是重要目标之一,通过合理规划结构形式和尺寸,避免不必要的材料浪费,使材料得到充分利用,从而减轻结构自重。结构自重的减轻具有多方面好处,不仅能降低对基础的要求,减少基础建设成本,还能在运输、安装等环节降低难度和费用,进而提高工程的经济效益。同时,优化后的结构需具备良好的水力学性能,这要求闸门的形状、表面光滑度等设计合理,以减少水流对闸门的冲击和阻力,降低水头损失,提高水流通过的效率,使闸门在运行过程中更加顺畅,提升水利工程的运行效能。此外,耐久性也是关键指标,闸门长期处于水中,受到水的腐蚀、冲刷以及水流中泥沙等杂质的磨损,优化设计要增强结构的抗腐蚀、抗磨损能力,选用合适的材料和防护措施,延长闸门的使用寿命,减少后期的维修和更换成本,从长远角度进一步提升工程的经济效益和社会效益,实现水工钢闸门在安全、经济、高效、耐久等多方面的协调发展。

3.2 优化设计策略

(1) 结构尺寸优化,聚焦于调整闸门各部件尺寸参数,像门叶厚度、主梁高度、支臂长度等。在开展此项优化时,需严格满足结构强度和刚度要求,以此为基础,通过合理调整这些尺寸参数,让结构材料消耗降至最低。为实现这一目标,可采用数学规划方法,如线性规划、非线性规划等,借助数学模型的精准计算,找到尺寸参数的最优组合。(2) 形状优化,旨在改变结构几何形状,以此改善结构力学性能^[4]。对于闸门门叶,优化其形状可使水流更为顺畅,降低水头损失,提升水流通过效率;针对支承结构,优化形状能增强其承载能力与稳定性,保障闸门稳定运行。形状优化通常运用有限元方法结合优化算法,先通过有限元分析结构受力情况,再运用优化算法对形状参数进行调整。(3) 拓扑优化,是在既定设计空间内,通过优化材料分布,使结构性能达到最优。它能找出结构最佳拓扑形式,去除多余材料,有效减轻结构自重。拓扑优化方法主要有变密度

法、均匀化方法等,变密度法通过引入密度变量,将拓扑优化问题转化为材料密度分布优化问题;均匀化方法则通过构造周期性微结构,以微结构参数为设计变量进行优化。三种优化策略各有侧重,综合运用可全面提升水工钢闸门结构性能。

3.3 优化设计算法

遗传算法是模拟生物进化过程的优化算法,具备全局搜索能力强的优势,尤其适用于复杂优化问题。在水工钢闸门结构优化中,它能全面搜索结构的最优尺寸、形状和拓扑形式,通过编码将结构参数转化为染色体,经选择、交叉、变异等操作不断迭代,逐步逼近最优解,有效处理多变量、多约束的优化难题。粒子群优化算法基于群体智能,借鉴鸟群或鱼群群体行为寻找最优解,具有收敛速度快、参数设置简单的特点^[5]。该算法把每个结构参数视为粒子,粒子在解空间中依据自身和群体经验调整飞行方向与速度,快速找到较优解,在水工钢闸门结构优化设计中能高效处理一些对实时性要求较高的优化任务。模拟退火算法模拟金属退火过程,引入随机因素避免陷入局部最优解,适用于组合优化和非线性优化问题。在水工钢闸门结构优化时,它可用于优化结构的拓扑形式,通过设定初始温度和降温策略,在搜索过程中以一定概率接受较差解,逐步跳出局部最优,最终找到全局最优拓扑结构。三种算法各有优势,遗传算法全局搜索佳,粒子群优化算法收敛快,模拟退火算法能避免局部最优,可根据具体优化需求灵活选用或组合使用,以实现水工钢闸门结构的最优设计。

3.4 优化设计流程

(1) 建立优化模型,需精准确定优化设计的目标函数、设计变量与约束条件。目标函数一般选取结构的材料消耗或重量,以此衡量优化效果;设计变量涵盖结构的尺寸、形状或拓扑参数,它们是可调整以实现优化的关键因素;约束条件包含结构的强度、刚度、稳定性等要求,确保优化后的结构安全可靠。(2) 选择优化算法,依据优化问题的特点,从遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等中挑选合适者,不同算法有不同优

势,能应对各类复杂优化情况。(3) 进行结构分析,运用有限元方法对不同设计变量下的结构开展受力分析,精准计算目标函数和约束条件的值,为后续优化提供数据支撑。(4) 迭代优化环节,按照所选优化算法的迭代规则,持续调整设计变量的值,逐步逼近最优解,直至满足优化终止条件,此时得到理论上的最优结构参数。

(5) 结果验证,对优化后的结构进行性能验证必不可少,可通过有限元分析再次核算结构受力与变形情况,也可借助其他试验手段直观检测结构性能,确保优化后的结构完全满足设计要求,保证水工钢闸门在实际工程中能安全、稳定、高效地运行,实现结构在安全、经济、性能等多方面的综合提升。

结束语

综上所述,水工钢闸门结构受力分析与优化设计研究,对水利工程意义重大。通过明确其结构类型、组成与特点,分析荷载类型、受力分析方法及不同工况受力,能为合理设计提供依据。优化设计以保障安全为前提,以降低材料消耗等为目标,提出多种优化策略、算法与流程。综合运用这些策略、算法与流程,可提升水工钢闸门结构性能,实现安全、经济、高效、耐久等多方面协调发展,保障水利工程稳定运行,为水利事业发展提供有力支持。

参考文献

- [1]李晶,舒刘海.水工钢闸门承载能力计算理论与设计方法研究[J].治淮,2025(10):24-26.
- [2]白润波,徐海宏.水工钢闸门轨道受力性能的有限元分析[J].水力发电,2011,37(10):57-60.
- [3]刘云中,颜亮亮.水工钢闸门主横梁结构优化[J].水电站机电技术,2024,47(7):84-87.
- [4]李玲,吴宇婧.江尖水利枢纽工程闸门加固结构的静、动力场影响变化研究[J].陕西水利,2023(1):20-23.
- [5]孙少楠,张瑞捷,马莉,邢云飞,罗福生.基于BIM+数值模拟的弧形闸门结构性能分析研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(12):155-166.