

区域水环境治理的泵闸调度优化研究

沈晓磊

昆山市水事综合管理中心 江苏 昆山 215300

摘要: 泵闸调度是区域水环境治理的核心环节,其优化水平直接影响治理成效。本文聚焦区域水环境治理中的泵闸调度优化问题,梳理了区域水环境与泵闸调度基础理论,分析研究区域水环境现状及泵闸调度现存问题。随后构建多维度驱动优化技术与方法体系,涵盖理论框架、多源数据模拟模型、机器学习规则提取、多目标优化算法及突发水事件应急模型,最后提出技术、管理、政策经济层面的保障措施。研究为区域水环境治理中泵闸调度的科学化、精细化提供技术支撑,助力实现水环境质量提升与水资源高效利用的协同目标。

关键词: 区域;水环境治理;泵闸调度优化;方法;措施

引言: 随着区域水环境问题日益复杂,泵闸调度作为水环境治理的关键手段,现存调度方案缺乏多目标统筹、依赖经验决策、协同性不足等问题凸显,制约治理效果。本文以改善区域水环境、优化泵闸调度为目标,先阐述水环境与泵闸调度基础理论,再剖析现状与问题,进而研发多维度优化技术与方法,配套保障措施。旨在解决当前泵闸调度痛点,为区域水环境治理提供系统的技术与管理方案,推动水环境治理从被动应对转向主动调控。

1 区域水环境与泵闸调度基础理论

1.1 区域水环境系统构成

区域水环境系统是由水体、水文要素、污染源及周边环境要素共同构成的复杂体系。其中,水体包括河流、湖泊、水库等不同形态的水域,是系统的核心载体;水文要素涵盖降水、径流、水位变化等,直接影响水体的循环与更新;污染源则包含点源污染与非点源污染,对水体质量形成关键影响。各要素间相互关联、相互作用,共同决定区域水环境的整体状态,其结构与功能的稳定性,是区域生态平衡与水资源可持续利用的重要基础。

1.2 泵闸调度的功能与作用

泵闸调度以泵闸设施为核心,通过对设施运行状态的调控,实现对区域水资源的调节。从功能层面看,其核心在于对水体流动方向、流量大小及水位高度的控制,以此协调区域内水量的分布与配置。在运行过程中,调度行为需结合区域水资源供需状况、水文变化趋势,通过科学调控,保障水体在不同时段、不同区域的合理分配,为区域水环境稳定与水资源利用提供基础支撑。

1.3 水环境治理与泵闸调度的关系

水环境治理与泵闸调度存在紧密的关联,二者相互

影响、相互配合。泵闸调度通过对水量分配、水流方向及流速的精准调节,不仅能为水环境治理创造水量保障条件,还可通过优化水体交换效率,辅助控制污染物扩散范围,助力改善水体质量;而水环境治理的阶段性目标与长期需求,又为泵闸调度划定核心方向,调度方案需围绕水质达标、生态保护等治理要求动态调整,确保调度行为与治理需求深度契合。二者的协同配合,是提升区域水环境治理效果、实现水资源可持续利用的关键环节^[1]。

2 区域水环境现状与泵闸调度现存问题分析

2.1 研究区域基础特征与水环境现状

研究区域的水文与水系特征呈现显著关联性,水系网络的连通性与完整性直接影响水体循环效率,而降水时空分布差异则导致区域内水量季节性波动明显。污染源分布具有分散性与复合型特点,点源与非点源污染叠加,对水体质量形成持续影响。当前区域水环境整体呈现出水质指标区域不均衡、部分水域污染物累积的特征,水体自净能力受水量调控不足的制约,难以有效应对污染负荷变化,整体水环境状态处于需通过系统性调控改善的阶段。

2.2 泵闸调度现存核心问题与成因

现有泵闸调度存在三方面核心问题:(1)调度方案制定缺乏对水环境多目标的统筹考量,未能充分结合水质改善需求进行动态调整;(2)调度决策依赖历史经验,对实时水文、水质数据的利用不足,导致调度响应滞后;(3)不同区域泵闸设施间协同性不足,调度行为缺乏整体联动,难以形成区域层面的调控合力。从成因来看,一是调度体系缺乏多要素耦合的决策支撑,二是跨部门数据共享与协同机制不完善,同时现有设施的监测与调控能力也难以满足精细化调度需求^[2]。

3 多维度驱动的区域泵闸调度优化技术与方法

3.1 泵闸调度优化理论框架构建

框架要融合系统工程、水资源科学、环境生态学等多学科理论,形成指导性与实用性兼具的体系,为技术落地提供逻辑支撑。(1)框架核心导向。以“区域水环境质量提升”与“水资源高效循环利用”为双核心,明确调度优化旨在通过泵闸调控实现水环境系统动态平衡,而非单一追求技术指标。(2)核心维度构成。含三层结构:目标层区分核心目标(水质达标率、水体流动性)与次要目标(能耗、设备损耗),明确层级;约束层涵盖自然(水文周期、降水)、工程(泵闸额定流量、设备年限)、生态(栖息地水位、生态流量)约束,界定边界;支撑层整合数据(监测、历史)、技术工具(模拟模型、算法)、管理机制(跨部门协同、权限划分),提供保障。(3)维度关联逻辑。“目标-约束-支撑”形成闭环:目标引导约束边界设定,避免约束过度限制目标;约束规范目标合理性,防止脱离实际;支撑保障二者协同,确保目标在约束内推进,提升框架系统性。(4)区域适配机制。考虑平原河网与山地流域、城市与农村水域差异,预留参数调整空间,通过区域特征系数、动态修正约束阈值,避免“一刀切”。

3.2 多源数据驱动的水环境模拟模型构建

模型是掌握水环境演变规律的核心工具,通过多数数据整合与耦合结构,定量刻画水体运动与水质变化,为调度优化提供支撑。(1)数据采集与预处理。采集四类数据:水文(水位、流量、流速, ≥ 1 次/小时)、水质(COD、氨氮等, ≥ 1 次/天)、泵闸运行(闸位、启停、流量,实时)、气象(降水、风速等, ≥ 1 次/6小时)。预处理分三步:插值补缺失、标准差除异常;标准化消除量纲(如流量归一化至 $[0,1]$);时空匹配(时间戳对齐, $\geq 1\text{km}\times 1\text{km}$ 网格),形成标准数据集。(2)模型结构设计。采用“水动力-水质”双向耦合:水动力模块基于圣维南方程组,有限差分法计算流速、水位、流量,刻画水流;水质模块基于对流-扩散方程,结合一级反应动力学,模拟污染物迁移转化,量化水质变化。二者共享边界条件(河道断面、初始水位),确保连贯。(3)参数校准流程。“分步校准-整体验证”:先校准水动力,调曼宁系数、糙率,使模拟与实测误差 $\leq 10\%$;再基于此校准水质,调扩散、降解系数,误差 $\leq 15\%$;最后用独立数据验证吻合度,确保稳定可靠。(4)模型迭代优化。每季度评估精度,若水动力误差 $> 12\%$ 、水质误差 $> 18\%$,则更新参数、优化结构(如复杂河网加支流模块)、拓展数据(新增监测点纳入),提

升适配性与精度。

3.3 基于机器学习的泵闸调度规则提取

通过智能算法挖掘历史数据规律,将数据关联转化为可操作规则,提升调度科学性,减少经验依赖。(1)特征变量筛选。从标准数据集选三类变量:状态(水位、水质、流速)、驱动(降水、上游来水、污染排放)、控制(闸位、水泵台数、调控时长)。用皮尔逊分析(剔除 $|r| < 0.3$)、随机森林(保留前80%),确定10-15个核心变量,避免过拟合。(2)算法选型与参数优化。选两类算法:分类算法(决策树、随机森林)提“条件-动作”规则,回归算法(梯度提升树、神经网络)提“变量-阈值”规则。5折交叉验证优化参数:数据7:3分训练/测试集,网格搜索遍历参数(决策树深度、森林数量),以规则准确率为指标选最优组合。(3)规则挖掘与转化。先训练模型获原始规律(决策树分支、回归系数);再筛除冲突(同条件反动作)、冗余(条件相似动作一致)规律,转化为含“触发条件-调控动作-执行阈值”的结构化规则。(4)规则验证与更新。离线验证:用历史数据模拟,对比规则应用前后效果(水质达标率、水位精度);在线验证:小范围试点,未达预期(如水质提升 $< 5\%$)则调整。每半年用新数据重挖规则,替换过时低效项。

3.4 多目标优化算法在泵闸调度中的应用

解决多目标冲突(水质与能耗、防洪与生态),通过寻优平衡目标,生成兼顾方案。(1)目标函数构建。三类函数:水质改善(达标率最大化、污染降低最大化,量化与标准偏差);水量调控(生态流量保障率最大化、水位偏差最小化,结合阈值范围);能耗控制(能耗最小化、设备时长均衡,基于功率与时间)。标准化至 $[0,1]$,消除量纲影响。(2)约束条件量化。转化为数学式:水文(流量 \leq 额定、水位 \leq 警戒)、工程(水泵连续运行 ≤ 8 小时、闸位调整 $\leq 0.1\text{m}/\text{min}$)、生态(生态流量 $\geq X$ 、流速 $\geq 0.2\text{m}/\text{s}$)、操作(调控间隔 ≥ 30 分钟),确保可行。(3)算法选型与改进。选NSGA-II(2-3目标,快排、拥挤度提多样性)、NSGA-III(≥ 4 目标,参考点提均匀性)。改进两点:用历史最优方案生成初始种群,提收敛;离散交叉算子适配泵闸参数(如闸位0.1m整数倍),确保解可行。(4)优化方案生成与筛选。迭代100-200次生成20-50个非支配解。多属性决策筛选:AHP定权重(如水质0.4、水量0.3、能耗0.3),加权求和算得分,选最高且合规方案,相近则按需求(如汛期优先防洪)二次筛选。

3.5 面向突发水事件的应急调度优化模型

应对突发污染、极端水文，快速响应调整，降低水环境破坏。(1)事件识别与分级。内置模块自动识别：污染事件(水质超正常1.5倍且1小时上升)、水文事件(水位超警戒0.5m或流量超历史1.2倍)。按影响范围(局部/全流域)、严重程度(轻/重度)分I-IV级，供调度依据。(2)应急目标优先级设定。动态机制：I、II级以“水质安全、控风险”为首要(权重 ≥ 0.6)，III、IV级兼顾“降成本、减损耗”(权重0.4-0.5)。污染事件优设“截留率最大化、污染面积最小化”，水文事件优设“水位安全、生态流量保障”。(3)模型动态调整机制。实时数据驱动：IoT接入数据(更新 ≥ 5 次/分钟)；动态更新方案：事件超预期(污染加快、水位急升)则重优化，调参数(增闸位、水泵台数)，更新间隔按等级(I级10分、II级20分、III级30分、IV级60分)。(4)方案输出与执行保障。方案含三类信息：调控参数(闸位、水泵台数、时长)、预期效果(水质、水位、风险范围)、注意事项(设备预警、下游监测)。标准化格式(Excel、PDF)推至控制中心与部门，内置反馈模块，偏差(如设备故障)则生成修正方案，确保落地^[3]。

4 区域水环境治理泵闸调度优化的保障措施

4.1 技术保障措施

构建以下全流程技术支撑体系：(1)完善监测网络，优化水文、水质、泵闸运行监测站点布局，提升数据采集的实时性与准确性，为调度决策提供精准数据输入；(2)建设智能控制平台，整合模拟模型、优化算法与实时监测数据，实现调度方案的自动生成、动态调整与远程控制，提升调度效率；(3)建立技术更新机制，定期引入数字化、智能化技术(如物联网、大数据分析)，迭代升级调度相关软硬件，适配调度优化的技术需求。(4)强化技术验证与风险防控，建立调度技术效果评估机制，定期对模拟模型精度、优化算法有效性进行复盘验证，及时修正偏差。

4.2 管理保障措施

优化管理机制以消除执行障碍。(1)明确跨部门

协同职责，划定水利、环保、住建等部门在调度中的权责边界，建立常态化沟通协调机制，避免职责交叉或空白；(2)规范调度流程，制定从方案生成、审批到执行、反馈的标准化流程，明确各环节的时间节点与责任主体，确保调度操作有序开展；(3)加强人员管理，定期开展专业培训，提升调度人员的技术能力与应急处置水平。

4.3 政策经济保障措施

强化政策与经济支持力度，政策层面出台专项指导文件，明确泵闸调度优化的实施要求与考核标准，将调度效果纳入区域水环境治理评价体系；经济层面设立专项经费，用于监测设施升级、平台建设、人员培训等，保障各项保障措施的资金投入；同时探索多元化资金渠道，引导社会资本参与泵闸调度相关技术研发与工程改造，增强保障措施的可持续性^[4]。

结束语：本文系统构建了区域水环境治理的泵闸调度优化体系，明确基础理论与现状问题，提出多维度优化技术方法及保障措施，实现了从理论到实践的完整闭环。研究虽为泵闸调度优化提供可行路径。未来可进一步结合数字孪生技术，提升调度的动态性与精准度，同时深化跨区域、跨部门协同机制研究，推动泵闸调度在更大范围的水环境治理中发挥实效，助力水资源可持续利用。

参考文献

- [1]黄丽蓉.桃浦河水系综合治理的泵闸调度优化研究[J].中国市政工程,2023(6):36-39+98.
- [2]孟湛博,陶园,管孝艳,虞斐杰,刘笑吟.闸泵调度对洛塘河圩区河道水位和流量的影响[J].水电能源科学,2025,43(7):36-40.
- [3]钱睿智,陈静,李章林,谈立,杨咏梅.扬州市中心城区河网闸泵联合调度优化研究与应用[J].江苏水利,2019(12):18-22.
- [4]陆宇杰.城市泵闸建设管理与河道水环境改善分析[J].工程建设与设计,2021(22):89-91.