

# 水库配套泵站与渠道联合运行调度优化研究

帅永奎 于金涛

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250000

**摘要：**针对水库、泵站、渠道联合输水系统运行耦合性强、调度方案粗放、能耗偏高、工况适配性不足等实际工程问题，本文开展站渠库联合运行调度优化研究。系统分析了联合系统的结构功能、水力响应规律及核心影响因素，构建兼顾供水保障、节能降耗、运行稳定与生态补水的多目标调度模型，明确各项工程约束条件。针对传统优化算法求解精度低、易陷入局部最优等缺陷，改进算法迭代机制与权重分配方式，并完成性能对比验证。最后从信息化监测、管理机制、制度政策方面建立长效保障体系。

**关键词：**水库泵站渠道；联合运行；调度优化；多目标模型；优化算法

**引言：**水库配套泵站与渠道是区域跨流域调水、农田灌溉及城乡供水的重要水利设施。现阶段多数输水工程仍采用经验化调度模式，未充分考虑库、泵、渠之间的水力耦合关系，易出现水量匹配不均、泵站能耗偏高、渠道输水损耗大、工况调控滞后等问题，难以适配不同水文时期的用水需求。为提升水资源利用效率与工程运行稳定性，亟需开展联合调度优化研究。本文依托实际工程运行特征，从机理分析、模型构建、算法改进和保障策略四个方面开展系统研究，旨在形成适配工程实际的精细化调度技术体系。

## 1 水库配套泵站与渠道联合运行基础理论与特性分析

### 1.1 联合运行系统组成与功能定位

水库、配套泵站与输水渠道共同构成区域调水供水一体化系统，是水资源优化配置的核心工程载体。水库承担主要调蓄功能，通过汛期蓄水、枯期补水平抑用水时空差异，为系统提供稳定水源。泵站作为核心提水动力设施，克服区域地形高差，将水库蓄水提升至输水渠道，解决重力输水受限问题。渠道作为输水分配载体，逐级输送、调配水量，满足区域农业灌溉、生活及工业用水需求。三者形成“蓄水—提水—输水”闭环运行体系，各项运行指标严格遵循工程规范与水资源禀赋条件，明确库容、流量、机组运行等边界约束，保障系统常态化稳定运行。

### 1.2 联合运行的水力特性与动态响应规律

水库、泵站、渠道各单元水力参数存在强耦合关联。水库出水工况直接决定泵站进水条件，影响机组提水扬程与运行效率；泵站输出流量与压力变化，会直接扰动渠道进口水流状态，造成渠道内部流速、水位动态

波动。不同水文时期系统水力响应特征差异明显，丰水期水库来水充足、出水稳定，泵站运行平稳，渠道输水均匀、损耗偏低；枯水期水库出库水量受限，泵站需频繁调整运行参数，流量稳定性下降，易造成渠道滞水、渗漏增加、输水效率降低。把握系统水力动态响应规律，是实现精细化调度、规避水力失衡风险的基础。

### 1.3 联合运行调度的关键影响因素识别

站渠库联合调度效果受多重实际因素共同制约。水文气象条件决定水库蓄水量与水源补给能力，是调度运行的基础条件。区域用水需求存在季节与空间差异，直接决定系统输水规模与调配方案。工程设备运行状态构成硬性约束，泵站机组老化、频繁启停、设备故障及渠道淤积、破损等病害，会直接降低提水与输水效率。调度目标的差异化侧重，会改变水量分配与机组运行策略，共同影响系统供水保障水平与运行效益<sup>[1]</sup>。

## 2 水库配套泵站与渠道联合运行调度模型构建

### 2.1 调度目标体系构建

本文构建多目标协同调度体系，兼顾工程运行实际与水资源管控需求，明确各目标量化标准与优先级。（1）供水保障目标。以供水保证率、供需水量偏差为指标，保障生活、灌溉及工业刚性用水，提升各时段用水匹配度。（2）能耗最优目标。以单位水量能耗、机组小时耗电量为指标，依托机组性能曲线匹配最优运行组合，降低低效运行能耗。（3）运行稳定目标。控制渠道水位波动、机组负荷率与输水流量稳定性，规避设施冲刷、设备过载等安全风险。（4）生态保障目标。严格恪守水库最小下泄生态流量，保障河道与库区基础生态水量，维持区域水文生态平衡。

## 2.2 约束条件分析与数学表达

结合工程实际参数,确立系统调度约束边界。(1)水库水量平衡约束。基于时段水量收支关系核算库容变化,库容始终控制在死库容与正常蓄水位库容区间。(2)泵站运行性能约束。机组流量、扬程、负荷保持在额定区间,严控机组启停频次,保障设备安全运行。(3)渠道过流能力约束。依据渠道断面、坡度与衬砌参数,限定输水上下限流量,避免漫溢冲刷与淤积堵塞问题。(4)用水需求约束。各区域供水量满足最低用水标准,符合区域限额配水管理要求。

## 2.3 联合调度模型的建立与求解框架设计

基于多目标优化理论,构建站渠库联合调度数学模型,以水库下泄流量、机组运行组合、渠道输水流量为决策变量,整合多目标函数并完成权重配比,嵌入全部运行约束条件,贴合系统全流程运行规律。模型采用分层分步求解框架,依次完成基础工程与水文数据录入、模型参数初始化、智能算法迭代寻优、约束条件校验剔除无效解,最终输出适配不同工况的最优调度方案,满足工程常态化调度应用需求<sup>[2]</sup>。

## 3 联合运行调度优化算法设计与改进

### 3.1 常用优化算法适配性分析

水库-泵站-渠道联合调度模型具备多目标、非线性、强约束、变量耦合的典型特征,常规数学规划算法难以适配复杂工况下的调度求解需求。本文选取工程调度领域应用最广泛的遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法开展适配性对比,结合站渠库调度实际运算特点,分析各算法的适用短板与匹配优势,为后续算法改进提供依据。(1)遗传算法。该算法依托种群迭代、交叉、变异机制完成全局寻优,对多目标、非线性优化模型兼容性较强,无需严格满足目标函数可导、连续的条件,适配水利调度多变量求解场景。但在联合调度实际运算中,该算法存在明显缺陷,迭代后期种群收敛速度大幅下降,易陷入局部最优解,且针对泵站机组约束、渠道过流限值等强约束条件,算法容错性较差,容易生成大量无效可行解,增加运算冗余量。(2)粒子群算法。算法结构简单、运算效率高,参数调整便捷,适合快速求解单目标及低维度调度问题。在站渠库联合调度场景中,该算法能够快速匹配基础输水流量、机组负荷分配方案,但存在全局搜索能力不足的问题。面对供水、能耗、生态多目标冲突场景,算法易出现早熟收敛,无法精准平衡多目标权重,高维度变量迭代过程中稳定性较差。(3)模拟退火算法。算法基于温度衰减机制开展寻

优,全局搜索能力稳定,可有效规避局部最优问题,适配强约束优化模型求解。但该算法缺陷较为突出,迭代收敛周期长、计算耗时久,对海量水文时序数据、机组运行数据的处理效率较低,无法满足灌区实时调度、短期滚动调度的时效性要求,工程落地适用性有限<sup>[3]</sup>。

### 3.2 改进型多目标优化算法设计

结合主流算法的适配短板,本文以经典非支配排序遗传算法为基础,针对联合调度模型强约束、多目标冲突、求解效率低等问题,从种群初始化、自适应交叉变异、动态权重调整三个维度开展针对性改进,适配站渠库联合调度的工程求解需求。(1)可行域种群初始化优化。传统算法种群初始化完全随机,会产生大量违背库容限值、渠道过流、机组负荷约束的无效个体,占用迭代资源。改进后算法结合调度模型约束边界,划定变量可行域范围,对初始种群个体进行筛选校验,剔除超出输水流量、机组启停、库容调度阈值的无效解,保证初始种群全部为可行解,缩减算法前期迭代筛选时间,提升种群整体质量。(2)自适应交叉变异策略优化。固定的交叉、变异概率易导致算法迭代前期搜索不足、后期过度变异。本文设置动态自适应概率机制,迭代前期采用高交叉概率、低变异概率,扩大全局搜索范围;迭代后期降低交叉概率、提升变异概率,打破局部最优僵局,平衡算法全局搜索与局部深耕能力,适配多目标调度方案的精细化寻优。(3)多目标动态权重调整优化。传统算法目标权重固定,无法适配丰、平、枯不同水文工况的调度需求。改进算法引入动态权重因子,根据实时水库蓄水量、区域用水缺口、机组运行状态,自动调整供水保障、能耗控制、生态补水目标的权重配比,贴合工程动态调度的实际需求,提升最优解的工程实用性。

### 3.3 算法性能验证与对比

为验证改进算法的求解性能与工程适配性,选取标准测试函数结合调度模型实测数据开展仿真验证,从收敛精度、计算效率、解集多样性三个核心维度,与传统遗传算法、粒子群算法进行横向对比,量化分析算法改进效果。(1)收敛精度对比。通过多组迭代试验可知,传统算法迭代至后期仍存在目标函数波动,寻优结果偏差较大,多目标平衡精度不足。改进算法迭代曲线平稳性显著提升,可快速收敛至最优帕累托前沿,求解结果偏差值大幅降低,能够精准匹配多目标协同最优的调度方案,有效解决传统算法局部最优的问题。(2)计算效率对比。在相同运算参数、数据量级的前提下,改进算法有效规避了无效解迭代过程,迭代收敛步数显著减少。相较于传统算法,整体运算耗时缩短,大幅提升了

站渠库联合调度模型的求解效率,可满足灌区日调度、旬调度等短时调度场景的运算需求。(3)解集多样性对比。传统算法优化解集分布集中、多样性不足,可选择的调度方案有限,难以适配不同水文工况与用水场景。改进算法生成的帕累托解集分布均匀、覆盖范围更广,可根据工程实际需求灵活筛选侧重供水保障、节能降耗或生态补水的调度方案,工程适配性与实用性更强<sup>[4]</sup>。

#### 4 联合运行调度优化保障体系与策略建议

##### 4.1 调度优化的监测与信息化支撑体系

结合水库、泵站、渠道联合调度的实际运行需求,搭建全覆盖、高精度的监测与信息化支撑体系,补齐传统人工调度数据滞后、监测盲区多的短板,为精细化调度提供数据基础。(1)布设全域动态监测网络。在水库库区布设水位、库容、雨量监测设备,在泵站机组点位加装电流、扬程、机组负荷传感装置,在渠道关键断面布设流量、水位、流速监测设备。重点覆盖渠首、分水口、输水末端等关键节点,实现水文参数、设备运行参数的全天候实时采集。(2)搭建一体化调度信息平台。整合各类监测终端数据,统一数据传输与存储标准,完成数据汇总、校核与分析处理。平台集成工况监控、数据查询、参数预警、方案推演功能,可实时反馈系统运行状态,为动态调度调整、机组工况匹配提供精准数据支撑。

##### 4.2 联合运行调度管理机制与协同策略

站渠库联合调度涉及多岗位、多环节运行管控,需建立规范化协同管理机制,破解部门权责交叉、调度衔接不畅、现场执行滞后等实际问题。(1)明确层级职责分工。依据工程运维管理规范,划分调度决策、设备运维、现场管控、用水统计等岗位职责,明确水库管控、泵站操作、渠道管护各班组的工作边界,杜绝调度执行过程中推诿、漏管等问题。(2)建立常态化协同调度机制。建立定期调度会商制度,结合实时水情、雨情、用水计划,动态调整泵站运行组合、渠道分水比例、水库下泄水量。针对汛期、灌溉高峰期等特殊时段,优化调度衔接流程,提升系统响应效率。(3)完善应急调度响应机制。针对极端干旱、暴雨洪涝、设备故障、渠道破损等突发工况,制定专项应急调度预案,明确应急处置流程、水量调配方案与设备启停规则,保障系统安全稳定运行。

##### 4.3 调度优化的政策保障与长效运行策略

为保障优化调度方案常态化落地应用,结合区域水利管理现状,从制度规范、运维激励、标准建设等方面构建长效运行保障体系。(1)完善调度管理制度体系。结合工程运行实际,细化站渠库联合调度管理细则,规范日常调度流程、水量分配标准、设备运维制度,将优化调度模式纳入常态化水利管理范畴。(2)建立运维考核激励机制。将节水效率、能耗控制、供水保障率等指标纳入运维人员考核体系,依托考核制度约束调度行为,调动人员执行优化调度方案的主动性。(3)统一现场技术执行标准。结合工程工况制定适配的调度技术规范,统一机组运行、输水调控、日常巡检的技术标准,持续推进联合调度模式标准化、规范化、长效化运行<sup>[5]</sup>。

**结束语:** 本文系统完成了站渠库联合运行机理分析、调度模型构建、优化算法改进及运行保障策略研究,分析了多单元耦合系统的水力响应特征与主控因素。构建的多目标调度模型可有效平衡供水、能耗、安全与生态多重需求,改进优化算法显著提升了模型求解精度与工程适配性。研究明确了信息化监测、协同管控与制度规范相结合的完整保障体系。研究成果能够有效解决传统经验调度的短板,可为输水工程常态化、科学化、低耗化运行提供技术支撑,对提升区域水资源优化配置水平具有实际应用价值。

#### 参考文献

- [1] 原志丹,赵喜萍,李剑平,谢洪,卢怡璇.电站-水库-泵站联合调度最优模式研究[J].水利技术监督,2023(9):190-191+214.
- [2] 姜根基,费益新,孙璟,吴坤尧.基于多目标优化的泵站-闸门联合调度运行策略研究[J].中国科技期刊数据库工业 A,2026(6):092-096.
- [3] 郭生练,谢雨祚,钟斯睿.流域水库群运行水位优化设计与多目标联合调控[J].水利学报,2026,57(1):103-113+167.
- [4] 王颖,陈杰,张煜,徐曙光,周楠,刘亮,肖储君.基于动态规划算法的泵站优化调度研究与应用[J].水利技术监督,2026(8):120-123+136.
- [5] 孟雨尘.基于数字孪生模型的水库调度系统动态运行管理优化研究[J].大众科技,2025,27(6):14-17.