

亦可能触发边坡快速失稳,给工程整体安全带来重大隐患。因此,边坡防护与排水系统的科学设计与维护对于提升高填方渠段运行安全至关重要。

4.3 渗漏风险的产生与发展路径

渠道渗漏是高填方渠段运行中的重要安全隐患,其成因主要包括防渗层施工质量缺陷、材料老化、填方体孔隙发育、地下水位变化等。渗漏初期多表现为防渗层局部薄弱或接口开裂,随时间推移,渗流逐步侵蚀土体,形成渗漏通道,进一步削弱渠道结构稳定性。长期渗漏还可能引发填方体湿陷、土体流失和沉降加剧,导致渠道整体变形与破坏。特别是在高水位、长时间连续运行条件下,渗漏风险呈现加速发展趋势,对运行安全形成严重威胁。

5 高填方渠段安全风险防控技术与管理策略

5.1 风险分级管理与智能监测预警

基于风险评估结果,建立高填方渠段风险分级管理机制。按照风险等级分类实施差异化管理,高风险区重点加强监测和巡查,制定专项应急预案。引入智能监测系统,集成地表位移、土体应力、渗流压力、地下水位等多元传感器,实现对重点部位的全天候实时监测。监测数据自动上传至云平台,通过大数据分析 with AI 算法识别异常变化,及时发布预警信息。通过信息化、自动化手段提升风险感知和应急处置能力,有效防控高填方渠段重大安全隐患。

5.2 工程加固与结构优化技术

针对高填方渠段地基沉降、边坡失稳和渗漏等突出问题,采用多元工程加固与结构优化措施。对于地基承载力不足区域,可采用注浆加固、土体置换、碎石桩等地基处理技术,提升地基整体稳定性。边坡失稳高发区加强护坡结构、设置排水沟与反滤层,合理布局拦水带和坡脚防护。渗漏隐患区域采用复合土工膜、黏土防渗墙等新型材料与结构进行加固,提高防渗性能和耐久性。结构优化过程中注重施工质量全过程控制,确保加固效果的长期稳定。

5.3 信息化与智慧水利技术应用

在智慧水利建设持续推进的背景下,南水北调中线高填方渠段积极引入信息化和智能化手段,实现了从传统人工管理向数字化、网络化、智能化运维的全面转型。以 GIS 空间数据管理为核心,通过整合地形地貌、地质条件、工程结构及运行环境等多源空间数据,为高填方渠段的全生命周期管理提供精准的地理信息支撑。物联网技术广泛应用于渠道变形、渗流压力、地下水位等关键部位的实时感知,通过无线传感网络实现监测数据的自动采集、远程传输和动态更新,极大提升了监测的时效性和全面性。

依托云计算与大数据分析平台,工程运行的各项监测数据能够被高效处理和深度挖掘,风险隐患点实现自动识别与动态预警。基于这些信息,项目建设和覆盖全渠段的数字孪生平台,将工程实体与虚拟仿真系统高度融合,实现工程状态的一体化可视化管理。管理者可通过智慧平台远程监控渠道运行状态、动态评估风险水平、调度应急资源并辅助决策。平台还集成了风险预警、应急指挥、工程维护等多项功能,实现了从风险感知、分析到响应、处置的全过程信息化闭环管理。事实证明,智慧水利技术不仅提升了高填方渠段的运行管理效率,也为其长效安全和精细化管理提供了强有力的技术支撑,成为保障南水北调中线工程安全稳定运行的重要基础。

6 结语

南水北调中线工程高填方渠段作为保障国家水资源战略布局和区域供水安全的关键单元,其长期稳定运行对于工程全线的安全和效益具有决定性意义。随着运行年限增长和自然环境变化,高填方渠段的安全风险日趋复杂多样,风险识别、评估与主动防控成为水利工程管理的重要方向。本文基于系统风险评估体系和多源数据分析,厘清了高填方渠段的主要风险类型与成因机制,提出了分级管理、智能监测、工程加固与智慧化管理等多元防控技术路径。研究表明,融合信息化、工程加固与科学管理的新型风险防控体系,能够有效提升工程安全保障能力和应急响应效率,为南水北调中线高填方渠段的可持续安全运行奠定了坚实基础。未来,应继续加强新材料、新技术在高填方渠段的应用推广,深化智慧水利平台建设,完善多元协同的风险管理机制,进一步提升国家水资源调配工程的运行安全和社会服务能力。

参考文献

- [1] 刘辉,赵文飞,刘先林,等.南水北调中线工程高填方渠道PS-InSAR形变监测[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(06):1-9.
- [2] 周学友,田振宇,宁昕扬,等.南水北调中线工程弱膨胀土填方渠堤裂缝灌浆技术研究[J].水利水电快报,2023,44(09):51-56.
- [3] 解林,陈雪兵.南水北调中线工程高填方渠段裂缝处理应用技术浅析[C]//中国水利学会.中国水利学会2019学术年会论文集第四分册.南水北调中线干线工程建设管理局渠首分局;2019:68-70.
- [4] 刘正才,南水北调中线工程高填方渠道碾压质量实时监控技术研究与应用.河南省,河南省南水北调中线工程建设管理局,2014-07-18.
- [5] 屈志刚,申黎平,李明新,等.南水北调中线工程高填方渠道加强措施探讨[J].人民长江,2013,44(16):63-66.

Study on optimal allocation of water resources and operation guarantee mechanism in joint scheduling of reservoir groups

Yabing Zhang

Anyang Municipal Water Conservancy Project Operation Guarantee Center, Anyang, Henan, 455133, China

Abstract

With water scarcity intensifying, coordinated reservoir scheduling has become a crucial approach for optimizing basin resource allocation and management. This study focuses on a typical two-stage reservoir system, developing a configuration model that incorporates water inflow uncertainties, diversified supply-demand relationships, and ecological constraints. The research explores optimization mechanisms and stakeholder coordination across multiple objectives including flood control, water supply, power generation, and ecological protection. Case analysis demonstrates that this model enhances water utilization efficiency, reduces flood and drought risks, while balancing ecological and developmental needs. However, operational challenges persist, including information asymmetry and inadequate risk management. To address these issues, the paper proposes enhancing information sharing, risk early-warning systems, dynamic adjustment mechanisms, and collaborative management frameworks. These improvements drive intelligent and refined coordinated scheduling, providing actionable insights for basin governance and sustainable water resource utilization.

Keywords

reservoir group; joint operation; optimal allocation of water resources; operation guarantee mechanism; two-stage upstream and downstream; watershed management

水库群联合调度中的水资源优化配置及运行保障机制研究

张亚兵

安阳市水利工程运行保障中心, 中国·河南 安阳 455133

摘要

随着水资源短缺加剧, 水库群联合调度成为流域优化配置与管理的重要手段。本文以典型上下游两段式水库群为对象, 构建考虑来水不确定性、供需多元化与生态约束的配置模型, 探讨其在防洪、供水、发电、生态等多目标下的优化机制及上下游利益协调。案例分析表明, 该模式可提升水资源利用率, 降低水旱灾害风险, 兼顾生态与发展需求。但在运行中仍面临信息不畅与风险管控不足等挑战。为此, 文章提出完善信息共享、风险预警、动态调整与协同管理机制, 推动联合调度向智能化、精细化发展, 为流域治理与水资源可持续利用提供路径参考。

关键词

水库群; 联合调度; 水资源优化配置; 运行保障机制; 上下游两段式; 流域治理

1 引言

我国水资源分布极不均衡, 传统单库调度已难适应复杂水文条件和多元需求。随着流域管理升级, 多水库联合调度成为提升防洪抗旱、集约利用和生态保护的关键。长江、黄河等流域形成以上下游分工为特征的两段式运行体系, 在发挥功能优势的同时增强了流域调蓄与弹性。然而, 当前仍存在来水不确定性大、上下游利益难平衡、信息滞后、风险预警不足及生态约束强化等问题。本文在梳理国内外研究的基础上, 构建适用于我国的多目标联合调度模型, 评估其在供水、防洪、生态等方面的作用, 并从机制创新、技术支撑

与协同管理提出完善建议, 为流域水资源高效配置与治理现代化提供参考。

2 水库群联合调度的理论基础与发展现状

2.1 水库群联合调度的内涵与理论基础

水库群联合调度, 是指在同一流域内, 按照水库的地理位置、功能分工和水文联系, 对多个水库进行协同运行, 以实现区域水资源的优化配置和效益最大化。其核心在于打破单库独立调度的局限, 通过信息互通、目标共享和资源统筹, 协调上下游、左右岸及多用途之间的用水矛盾, 提高整体调蓄能力和系统抗风险能力。从理论上, 水库群联合调度融合了系统工程、水文学、水力学、最优控制、决策分析等多学科原理, 强调多目标、多约束、多方案下的综合最优。随着流域经济社会结构的多样化, 联合调度目标从传统的防

【作者简介】张亚兵(1983-), 男, 中国河南濮阳人, 本科, 助理工程师, 从事水利工程运行管理研究。

洪、供水、灌溉逐步拓展至发电、生态、航运等多元领域，调度手段也从人工经验向数学优化、信息化、智能化方向快速发展。当前，基于水文预测、实时遥感、数值模拟、智能决策的现代联合调度方法，为多水库协同高效运行提供了理论支撑和技术保障^[1]。

2.2 国内外水库群联合调度发展现状

发达国家自20世纪中后期起高度重视水库群联合调度，美国田纳西流域、澳大利亚默里—达令流域、日本多摩川流域均建立了信息化调度与利益协调机制，实现多目标、实时化和高效化管理。我国自改革开放以来，伴随大型水利枢纽建设与流域管理体制完善，水库群联合调度取得显著进展。长江、黄河、珠江等流域已形成以防洪、供水、发电、生态为核心的多库联合格局，并探索分层次、分区块、分阶段的调度模式，推动水资源优化配置。近年来，“一库一策”“分布协同”“生态优先”等理念深入推进，信息化、智能化平台加快建设，显著提升调度科学性与适应性。但与发达国家相比，我国仍存在数据共享不畅、模型适应性不足、利益补偿机制不完善和生态约束响应滞后等问题，亟须理论创新与机制改进。

2.3 上下游两段式水库群调度的格局与典型特征

上下游两段式水库群调度，是我国许多流域根据自然地理格局和经济用水需求，形成的典型协同调度模式。通常，上游水库以防洪、蓄水、调峰和生态补水为主，下游水库则侧重供水、灌溉、发电及城市运行保障。两段水库间通过河道、渠道、支流等实现水量、水质和能量的动态调节。在此格局下，联合调度需充分考虑上下游来水时空分布、功能定位、调蓄能力差异、信息反馈与响应时效，以及跨区域、跨部门的利益协调。典型案例如长江上游的三峡水库与中下游的中型调蓄水库联合调度，不仅提高了流域整体调蓄能力，还有效缓解了极端旱影响，实现了“上游拦洪蓄水、下游灵活分配”的协同效益^[2]。上下游两段式调度以其科学的空间布局、灵活的运行机制和良好的综合效益，成为当前流域水库群优化配置的重要实践路径。

3 上下游两段式水库群联合调度的优化配置机制

3.1 多目标水资源优化配置模型构建

在上下游两段式水库群调度中，需同时兼顾防洪、供水、发电、生态、灌溉等多元目标。针对这一复杂系统，构建多目标优化配置模型成为理论与实践的基础。首先，模型需综合上下游各水库的库容、来水、蒸发损失、出流要求等物理约束；其次，兼顾各用水对象（如城市、农业、生态）对水量、水质、时空分布的不同需求。多目标优化可采用权重法、优先级法或多目标进化算法，将各目标效益与约束条件合理量化，形成可操作的调度方案。在建模过程中，需充分考虑来水的不确定性与气候变化影响，采用蒙特卡洛模拟、模糊优化等方法增强模型的适应性和鲁棒性。通过对典型流域案

例的实证分析，证明多目标优化模型能显著提升水库群整体效益，实现上下游利益的动态平衡。

3.2 上下游协调与水量动态分配策略

水库群联合调度的实效，关键在于上下游之间的协调运行与水量动态分配。首先，上游水库通过拦蓄主汛期径流，为下游在枯水期及高需求时段提供调峰补水，提高流域抗旱能力。其次，调度方案需根据实时来水预报、下游用水需求、生态流量保障等信息，动态调整各库出流。为实现科学分配，建立上下游协商机制和信息共享平台至关重要。调度过程中，可采用优先级分水、用水权交易、生态补偿等手段，平衡上下游利益诉求。通过建立“预案+实时”相结合的动态调度规则，确保在突发旱、极端气候事件下，调度决策具备灵活性和前瞻性。案例显示，合理的上下游协调分配策略，能够兼顾防洪安全、供水可靠、生态流量和经济效益，有效提升水资源整体利用率。

3.3 生态保护与社会经济效益的协同实现

上下游两段式水库群调度不仅要保障人类社会的用水需求，还需高度重视流域生态系统的完整性和可持续性。生态流量保障、湿地补水、河道连通性维护等已成为调度优化的新要求。调度模型需设定生态红线，对下游敏感河段、重点湖泊、典型湿地实施生态流量强制约束。通过“生态优先、综合平衡”原则，实现生态与社会经济的协同共赢。部分流域通过实施生态补水、人工增湿、梯级调蓄等工程措施，明显改善了河道断流、湖泊干涸、湿地退化等生态问题。社会经济效率方面，水库群联合调度通过提升水资源配置效率，保障了农业灌溉、城市供水、工业用水和水力发电的综合收益。调度方案需强化多元利益平衡，实现生态保护与经济发展的协调统一，推动流域绿色高质量发展^[3]。

4 水库群联合调度的运行保障机制与案例剖析

4.1 信息化与智能化调度支撑平台

实现上下游两段式水库群高效联合调度，离不开先进的信息化、智能化调度平台。通过遥感监测、在线水文测站、自动化闸门、智能传感网络，实现对库区来水、库容、气象、用水、生态等数据的实时采集和动态更新。调度平台集成水文预报、旱涝预警、优化决策、协同控制等功能，支持多维信息共享与联合会商决策。部分流域已建设“智慧水库群”系统，通过云计算、大数据、人工智能等技术，实现调度模型与实际运行的深度耦合，提升调度科学性和应急响应速度。平台还应兼容历史数据挖掘与情景模拟，支持突发事件下的调度推演和应急指令发布，为流域管理部门提供智能决策支持。智能化平台极大提升了水库群运行的精细化、自动化与智能化水平，是实现上下游两段式高效调度的坚实技术保障。

4.2 预案管理与风险预警响应机制

水库群联合调度受气候波动、来水不确定性及极端事件影响，建立健全预案管理与风险预警机制至关重要。应制