

水库工程水资源优化调度与运行管理实践分析

王赛

新疆维吾尔自治区水利运行调度中心, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 随着全球气候变化加剧与人类用水需求的持续增长, 水库工程作为调控水资源时空分布的核心基础设施, 其调度与管理模式正经历从单一目标向多目标协同、从经验驱动向数据智能驱动的深刻转型。本文系统综述了水库工程水资源优化调度与运行管理的理论演进、技术革新与实践挑战。

关键词: 水库调度; 水资源优化; 运行管理; 多目标协同; 数字孪生; 适应性管理

Practice Analysis of Water Resources Optimization Dispatching and Operation Management in Reservoir Projects

Wang Sai

Xinjiang Uygur Autonomous Region Water Conservancy Operation and Dispatching Center, China Xinjiang Urumqi 830000

Abstract: With the intensification of global climate change and the continuous growth of human water demand, reservoir projects—as core infrastructure for regulating the spatiotemporal distribution of water resources—are undergoing a profound transformation in their dispatching and management models, shifting from single-objective to multi-objective coordination and from experience-driven to data-intelligent approaches. This paper systematically reviews the theoretical evolution, technological innovations, and practical challenges in water resources optimization dispatching and operation management of reservoir projects.

Keywords: Reservoir dispatching; Water resources optimization; Operation management; Multi-objective coordination; Digital twin; Adaptive management

0 引言

水库是人类改造自然、调控水循环最有力的工程手段之一, 承载着防洪、供水、发电、航运、生态等多重使命。在我国, 已建成各类水库近十万座, 构成了庞大而复杂的水利基础设施网络, 为国家粮食安全、能源安全与生态安全提供了坚实保障。然而, 随着经济社会发展进入新阶段, 传统以“工程为中心、供给为导向”的调度管理模式日益显现出不适应性: 一方面, 气候变化导致水文情势非平稳性增强, 极端旱涝事件频发, 基于历史序列设计的调度规则面临失效风险; 另一方面, 用水主体多元化、诉求差异化使得单一目标优化难以兼顾公平与效率, 生态流量保障、碳减排等新目标不断纳入调度决策视野, 目标间权衡复杂度呈指数级上升; 再者, 公众参与意识提升与法治建设深化, 要求调度过程更加透明、协商与可问责, 单纯的技术理性已不足以支撑合法合规的运行管理。

1 水库调度问题的范式重构与多维挑战识别

准确界定问题是解决问题的前提。当前水库调度所面临的困境, 根源在于问题本身已从确定性的工程技术问题演变为充满不确定性的社会-生态系统治理问题, 必须进

行范式层面的重新理解。

1.1 从确定性假设到非平稳性现实的认知跃迁

传统水库调度建立在“水文序列平稳性”这一核心假设之上, 即过去的水文统计规律可以代表未来。然而, 气候变化与下垫面改变已使这一假设普遍失效。气温升高导致蒸散发增加、积雪消融提前, 降水时空格局重组, 极端事件频率强度变化显著, 使得设计洪水、枯水频率曲线发生偏移。若继续沿用旧有参数, 可能导致防洪标准虚高或供水保证率不足。更深层的问题在于, 非平稳性不仅是统计特征的变化, 更是系统内在动力学机制的改变——如冰川退缩区径流由“温度驱动”转向“降水驱动”, 城市化区域产汇流时间大幅缩短。这意味着调度模型不能仅做参数校准, 而需嵌入气候-陆面-水文耦合过程, 实现对驱动机制的动态响应。同时, 社会经济系统同样处于非平稳演化中: 人口流动、产业结构调整、节水技术进步等因素持续改变需水结构与弹性。因此, 真正的适应性调度必须同时捕捉自然系统与人类社会的双重非平稳性, 并将其转化为可操作的调度策略调整机制, 而非静态的规则集。

1.2 从单目标最优到多目标权衡的价值整合

早期调度多以发电量最大或供水量最多为单一目标,优化逻辑清晰但价值维度狭窄。现代水库被赋予多重功能,且各目标间常存在根本性冲突:抬高水位利于发电却压缩防洪库容;保障生态基流可能减少灌溉供水;汛期预泄腾库虽增安全却损效益。这些冲突无法通过简单加权求和化解,因为不同目标代表不同利益群体、不同时间尺度乃至不同价值体系(如经济价值 vs. 存在价值)。实践中,常出现“名义多目标、实质单主导”现象,生态等弱势目标被边缘化。真正的多目标优化需引入协商式决策框架,将技术分析 with 利益相关方偏好 elicitation 相结合,识别帕累托前沿上的可接受解集,而非追求虚幻的“全局最优”。这要求调度者具备价值翻译能力,能将抽象的生态健康、文化意义等转化为可量化、可比较的指标,并在不确定性下评估各方案的稳健性与公平性。唯有如此,调度结果才兼具科学合法性与社会可接受性。

1.3 从工程控制到系统韧性的功能拓展

传统调度视水库为可控的“水龙头”,强调对水流的精确操控。但在高度不确定的环境中,过度追求控制反而削弱系统韧性——当扰动超出设计范围时,刚性系统易发生灾难性失效。韧性视角则将水库视为流域社会-生态系统的一部分,其功能不仅是提供稳定服务,更是在扰动中维持核心功能、吸收冲击并实现适应性转型的能力。这意味着调度目标需从“避免失败”转向“安全地失败”:允许在非关键时段适度偏离目标,以换取极端事件下的生存空间;预留操作弹性(如可变汛限水位、动态生态流量阈值),使系统能根据实时状态自我调节;建立冗余与备份机制(如多库联合、应急水源),分散风险。韧性还要求关注慢变量与临界点,如地下水超采导致的含水层退化、湿地萎缩引发的生物多样性丧失等,这些变化可能在短期内不影响调度指标,却悄然侵蚀系统长期存续基础。因此,调度决策必须纳入长周期反馈回路,警惕短期优化对长期韧性的透支。

2 优化调度方法的技术演进与应用边界辨析

面对重构后的问题,调度方法经历了从解析解到启发式、从离线优化到在线学习的深刻变革,但每种方法都有其适用条件与局限,盲目追捧新技术易陷入误区。

2.1 经典优化算法的适用性与改进潜力

线性规划、非线性规划、动态规划等经典方法因其理论严谨、结果可解释,仍是许多工程实践的基础。尤其动态规划在处理时序决策问题上具有天然优势。但其“维数灾”限制了在高维多库系统中的应用。近年来,通过状态

离散化策略改进、近似动态规划、滚动时域优化等技术,部分缓解了该问题。例如,将连续状态空间聚类为代表性情景,或利用函数逼近器估计值函数,可在保持一定精度的前提下大幅提升计算效率。这些改进版经典算法在结构相对清晰、不确定性可参数化的场景中仍具竞争力,尤其适合需要严格满足物理约束与安全规范的场合。其优势在于透明度高、易于与现有规程衔接,缺点是难以处理非凸、非光滑及黑箱型目标函数。因此,不应因其“传统”而轻视,而应视其为复杂方法的重要基准与补充。

2.2 智能优化与机器学习的融合应用与陷阱

遗传算法、粒子群优化等元启发式算法因不依赖梯度、可处理复杂约束,被广泛用于多目标调度。但其收敛性无保证、参数敏感、结果不可复现等问题突出,且易陷入局部最优。深度强化学习(DRL)近年备受瞩目,其通过与环境交互学习策略,有望实现在线自适应调度。然而,DRL 在水库调度中面临严峻挑战:训练需海量高质量数据,而水文事件稀疏、代价高昂;奖励函数设计困难,多目标权衡难以编码;策略缺乏可解释性,难获管理者信任;仿真环境与真实系统差距可能导致部署失败。成功案例多限于简化场景或作为辅助决策工具。因此,智能方法不应被视为万能钥匙,而需在充分理解其假设与局限的前提下谨慎使用。更有效路径或是“混合智能”:用机理模型约束学习过程,用专家知识引导探索方向,用不确定性量化评估策略可靠性,实现数据驱动与知识驱动的有机融合。

2.3 数字孪生与仿真推演的支撑作用与现实差距

数字孪生通过构建高保真虚拟镜像,实现对水库系统的全要素映射与动态模拟,为调度方案预演、风险评估与应急演练提供强大平台。其价值不仅在于预测,更在于“what-if”分析,帮助理解系统行为、发现潜在漏洞。然而,当前多数所谓“数字孪生”仍停留在可视化或简化模型集成层面,距离真正的高保真、自进化、闭环控制尚有差距。主要瓶颈包括:多过程耦合模型精度不足(如水-沙-生态相互作用);实时数据同化能力弱,模型状态与实际脱节;计算资源限制导致仿真延迟,难以支持实时决策;缺乏标准化接口与互操作性,形成数据孤岛。更重要的是,数字孪生本身是人对系统的认知投射,若初始认知有偏,孪生体只会放大错误。因此,数字孪生建设必须坚持“问题导向、迭代验证、人机协同”原则,避免陷入技术炫技。其终极目标不是替代人,而是增强人的判断力与预见力,在虚实互动中共同逼近系统真相。

3 运行管理实践的治理转型与系统集成路径

技术方法的有效性最终取决于运行管理的制度环境与

执行能力。脱离治理谈优化，如同无舵之舟，纵有精良引擎亦难抵彼岸。

3.1 制度机制创新与多元共治格局构建

水库调度本质上是公共资源分配的政治过程，技术只是其中一环。现行管理体制常存在条块分割、权责不清、激励错配等问题：水利部门管水量、生态环境部门管水质、能源部门管发电，目标冲突时缺乏高效协调机制；地方政府重开发轻保护，生态流量常被挤占；用户缺乏参与渠道，对调度结果认同度低。破解之道在于构建多层次、包容性的治理架构：在流域层面建立跨部门、跨区域的权威协调机构，赋予其统筹调度权与争议仲裁权；完善生态补偿与水权交易机制，使外部成本内部化，激励节水与护水；搭建开放式协商平台，让农民、企业、环保组织、社区居民等利益相关方实质性参与规则制定与效果评估；推行调度信息公开与听证制度，增强透明度与公信力。唯有将技术嵌入良治框架，优化成果才能落地生根、持久生效。

3.2 全域感知与数据治理能力的夯实

精准调度依赖于全面、及时、可靠的数据支撑。当前许多水库仍存在监测盲区（如库区支流、地下水、生态断面）、设备老化、传输中断、数据孤岛等问题，导致“巧妇难为无米之炊”。需构建“空-天-地-水”一体化感知网络：卫星遥感监测大范围水汽、植被与地表形变；无人机巡查库岸稳定与排污口；地面站点加密水文水质气象要素；水下机器人探测淤积与结构安全。更重要的是加强数据治理：建立统一标准与元数据体系，确保数据可比可溯；实施全流程质量控制，剔除异常、填补缺失、评估不确定性；构建共享开放的数据平台，打破部门壁垒；培育数据素养，使管理人员善用数据而非被数据淹没。数据不是目的，而是理解系统、支撑决策的媒介。高质量数据资产是智慧调度的基石，其建设需长期投入与制度保障，绝非一朝一夕之功。

3.3 风险管理与应急响应体系的韧性塑造

再完美的调度也无法消除所有风险。必须建立覆盖“事前预防-事中应对-事后恢复”全链条的风险管理体系。事前开展系统性风险辨识与评估，识别薄弱环节与临界阈值，制定分级预警标准与预案库；事中依托数字孪生与实时监测，快速研判态势、启动应急响应、动态调整调度指令，同时保持沟通畅通，避免信息真空引发恐慌；事后及时复盘总结，更新风险数据库与预案，实现“吃一堑长一智”。特别要重视“灰犀牛”与“黑天鹅”事件的防范：对已知高风险（如老旧大坝、超标洪水）制定专项应

对策略；对未知不确定性保留足够缓冲与冗余，避免系统紧绷。风险管理不是消极防御，而是主动塑造韧性的过程。它要求管理者具备底线思维、系统思维与学习思维，在不确定性中守护安全底线，为优化调度提供容错空间与演进基础。

4 结语

水库工程水资源优化调度与运行管理，是一项融自然科学、工程技术、社会科学与人文哲思于一体的复杂实践。它超越了算法的精巧与设备的先进，触及人类如何在有限与不确定中寻求共存与繁荣的根本命题。当我们不再将水库视为征服自然的勋章，而是理解为与自然对话的媒介；当调度不再执着于控制的幻觉，而是学会在流动中把握平衡、在变化中培育韧性；当每一立方米水的分配都承载着对生命的敬畏、对公平的关切与对未来的责任，水利工程便不再是冰冷的混凝土巨兽，而成为文明与自然和解的温暖见证。前路依然漫长，气候变化的阴影、利益博弈的纠葛、技术伦理的迷雾，都需要我们以谦卑之心持续探索。但只要我们坚守系统思维、秉持人文关怀、拥抱开放学习，就一定能在江河之上筑起既安全可靠又生生不息的智慧之坝。这不仅是对工程技艺的锤炼，更是对文明成熟度的考验——让每一座水库都成为人水和谐的课堂，让每一次调度决策都化作对可持续未来的郑重承诺。在守护碧水安澜的道路上，我们终将明白：真正的优化，不在于榨取每一滴水的功利价值，而在于唤醒我们对水之神圣、生命之珍贵、共同体之脆弱的深切体认；真正的管理，不在于掌控万物的傲慢，而在于学会与不确定性共舞、与他者共生、与时间共进的谦卑智慧。

参考文献：

- [1] 邵涛. 安庆市下游山水库灌区水资源配置与工程方案研究[J]. 治淮, 2026(3): 12-15+23.
- [2] 胡忙全, 付阿雄. 大藤峡库区运行库容线复核、影响因素分析及管理建议[J]. 中国水能及电气化, 2026(3): 13-21. DOI:10.16617/j.cnki.11-5543/TK.2026.03.03.
- [3] 罗斌, 唐海华, 周超等. 流域水工程联合智能调度平台[J]. 水利水电快报, 2026, 47(1): 132-133.
- [4] 徐祖平. 复杂非线性高效算法及其在水库水资源优化调度中的应用研究[D]. 扬州大学, 2025. DOI:10.27441/d.cnki.gyzdu.2025.000064.
- [5] 陈权富. 考虑平陆运河航运用水需求的郁江流域库群多目标优化调配研究[D]. 广西大学, 2025. DOI:10.27034/d.cnki.ggxu.2025.001225.