

大型水库水资源调度优化模型研究与应用

苏伟源

广东省潮州市潮安区登塘镇综合事务中心，广东潮州，515638；

摘要：大型水库是水资源调控的核心枢纽，调度效率直接关系防洪安全、供水保障与生态平衡。当前，水资源供需矛盾加剧与极端气候频发，传统调度模式已难以适配复杂用水需求。本文聚焦大型水库调度痛点，梳理水资源调度优化模型的发展脉络与核心特征，剖析模型构建的关键制约因素。结合多目标优化理念，从模型构建逻辑、约束条件设定、求解算法革新层面，提出适应性优化路径，为提升水库水资源利用效率、实现综合效益最大化提供理论与实践支撑，助力水利工程高质量发展。

关键词：大型水库；水资源调度；优化模型；多目标优化；调度效率

DOI：10.69979/3029-2727.25.05.080

引言

水资源是社会经济发展与生态稳定的基础性资源，大型水库凭借蓄水、调控、供水等功能，成为水资源管理的关键载体。受全球气候变化影响，极端降水与干旱事件频发，叠加城镇化进程中工农商用水需求刚性增长，大型水库调度面临严峻挑战。传统经验型调度易引发防洪与兴利冲突，导致生态用水保障不足。水资源调度优化模型通过量化系统内各类关系，为科学调度提供精准支持。深入研究模型构建与应用，对破解水资源供需矛盾、提升水利工程综合效益具有重要现实意义。

1 大型水库水资源调度优化模型的核心内涵

1.1 定义与本质特征

大型水库水资源调度优化模型是基于系统工程理论的重要工具，整合水文、水利、经济等多领域数据，通过数学方法模拟水资源运动与分配全过程。其本质是在多重约束下实现调度目标的最优平衡，这一核心属性决定了模型的实用价值。动态性与综合性是其显著特征，动态性体现为能实时响应降水、径流等水文情势变化，及时调整计算参数与输出结果。综合性则表现为统筹防洪、供水、发电、生态等多元目标，避免单一目标导向导致的调度失衡，确保水库运行各环节协调有序。

1.2 功能定位

优化模型在大型水库调度中承担决策支撑与风险预判双重功能，是提升调度科学性的核心手段。决策支撑方面，模型通过构建多场景模拟体系，针对丰水期、枯水期等不同水文条件，生成对应的最优调度方案，为调度人员提供明确的决策依据，提升决策的前瞻性与精准性。风险预判方面，模型能量化极端气候、用水需求

突变等因素带来的调度风险，提前识别供水缺口、防洪压力等潜在问题。基于这些预判结果，调度人员可提前制定风险防控措施，降低水库运行风险，保障水利工程安全稳定运行。

1.3 核心目标体系

大型水库调度优化需构建兼顾安全、效益与生态的多元协同目标框架，这是实现水资源可持续利用的基础。安全性目标以防洪安全为核心，通过科学计算确定汛期安全水位阈值，确保水库在极端降水情况下不发生溃坝等安全事故。效益性目标涵盖供水保障与发电效率，需满足工业生产、农业灌溉、居民生活等刚性用水需求，同时优化发电调度提升能源利用效益。生态性目标聚焦维持下游河道生态基流，保障水生生物生存环境，保护水生态系统完整性与稳定性，实现经济发展与生态保护的协调统一。

2 大型水库调度优化模型构建的关键制约因素

2.1 数据不确定性影响

水文水资源数据的精准性是模型构建的前提，而水文要素的随机性与预测误差导致数据存在显著不确定性。降水、径流等水文参数受大气环流、地形地貌等多重因素影响，本身具有较强随机性，难以实现完全精准预测。降水预报的偏差、流域下垫面因城镇化、植被变化产生的扰动，都会使模型输入数据与实际情况偏离。这种不确定性会通过模型计算过程层层传导，导致输出的调度方案与实际需求不符，降低方案可靠性，增加水库运行中的供水不足或防洪压力等风险。

2.2 多目标冲突问题

大型水库调度的多元目标间存在内在冲突，是模型

构建的核心制约因素。汛期为保障防洪安全，需提前腾出库容降低水位，这与同期农业灌溉高峰期的用水需求易产生矛盾，可能导致灌溉供水不足影响农业生产。为提升发电效益维持高水位运行时，又会减少下游河道下泄流量，影响生态基流供给，威胁水生生物生存。这些目标冲突使模型无法同时实现各目标最优，需在复杂权衡中寻找平衡点。如何科学设置目标权重、协调不同利益主体需求，大幅增加了模型构建的难度。

2.3 模型与场景适配不足

部分优化模型构建中过度简化实际调度场景，导致模型与实践脱节，适配性不足。硬件约束方面，模型常未充分考虑水库工程设施实际运行条件，如泄洪闸门最大开度、输水管道流量限制等，使计算出的调度方案在实际操作中无法实现。软件约束方面，对地方用水习惯、突发公共卫生事件等应急调度需求等人文与管理因素融入不足。这种适配性缺陷让模型输出的优化方案缺乏实操性，难以落地执行，不仅浪费模型构建的人力物力成本，还会削弱模型在实际调度中的实用价值。

3 大型水库水资源调度优化模型的构建逻辑与方法

3.1 模型框架设计

模型框架设计需以系统分析为核心，全面兼顾水库调度系统的复杂性与关联性，实现对系统的全面解构与有机整合，确保框架的科学性、完整性与实用性。首先要明确模型的边界范围与核心要素，清晰界定水库入库径流预测、出库水量分配、工程设施约束、用水需求响应等关键环节的计算范围与技术标准，避免出现要素遗漏或边界模糊的问题。其次需构建“数据输入—过程模拟—目标优化—方案输出—反馈修正”的闭环框架，保证各模块之间逻辑衔接顺畅，数据传递高效准确，形成完整的逻辑链条。框架设计还需预留灵活的扩展接口，充分考虑不同水库在地理位置、功能定位、工程规模等方面的差异，以及全球气候变化、流域用水结构调整等外部环境变化带来的影响，使模型能够通过参数调整或模块扩展，灵活适配不同场景下的个性化调度需求，提升模型的通用性与生命力。

3.2 约束条件量化

约束条件的科学量化是模型有效性的核心保障，必须结合水库调度的实际需求，区分硬约束与软约束进行针对性处理，确保约束条件既符合规范要求又贴近实践场景。硬约束是保障水库安全运行与基本功能实现的底线，包括水库汛期与非汛期的水位上下限、泄洪设施的

最大泄洪能力、供水对象的最低保证率、输水系统的安全运行阈值等强制性指标，这些指标需依据相关法律法规、工程设计标准采用明确的数值范围进行量化界定，在模型计算中绝对不可突破。软约束则涵盖生态基流保障、区域用水优先级、水资源配置公平性等弹性指标，这类指标无绝对统一的标准，需结合流域生态保护目标、地方发展规划与用水权益协商结果，通过设置合理的权重系数或阈值范围，将其转化为模型可计算、可优化的数学条件。通过构建系统化的约束矩阵，将各类约束条件全面、系统地融入模型计算过程，实现约束条件的全面覆盖、精准计算与有效管控，为模型输出科学合理的调度方案奠定基础。

3.3 模型求解策略

针对调度优化问题普遍存在的非线性、多维度、多约束特征，融合智能算法的求解策略能够显著提升模型的寻优效率与方案质量，是当前模型求解技术的主流发展方向。传统的数学规划方法如线性规划、动态规划等，在面对高维度、强耦合的复杂调度问题时，容易出现寻优效率低、易陷入局部最优解等问题，难以满足实际调度需求。引入遗传算法、粒子群优化算法、蚁群算法等智能算法，可有效解决这一技术瓶颈，这些算法通过模拟生物进化、群体协作等自然机制，能够快速遍历复杂的解空间，高效找到全局范围内的较优解。通过对智能算法的改进与融合，例如采用混合算法结构或改进适应度函数，可有效解决多目标优化中的 Pareto 最优解筛选问题，为调度人员提供多组不同目标权重组合的权衡方案，满足不同场景下的决策需求。同时，结合模拟退火算法强大的局部搜索能力，对初步寻优结果进行二次优化与微调，能够进一步提升解的质量，避免模型陷入局部最优，确保输出的调度方案在兼顾多元目标的同时具有更高的实用性与可行性。

4 提升调度优化模型应用效能的关键路径

4.1 水文监测与数据融合

构建高精度水文监测与数据融合体系是提升模型输入质量的关键。在水库流域内科学布设雨量站、水位站、流量站等监测设施，形成全覆盖的监测网络，实现降水、径流等水文要素的实时动态监测。建立多源数据融合平台，整合实测数据、卫星遥感数据、数值预报数据等多类型信息，打破数据孤岛。运用数据同化技术，将不同来源数据进行融合处理，修正预测误差。通过数据质量控制剔除异常值，再进行标准化预处理，为模型提供精准、可靠的输入数据，从源头降低不确定性影响。

4.2 模型与管理系统协同

推动模型与水库调度管理系统深度协同,可打破数据壁垒与功能分割,提升模型应用效能。将优化模型嵌入现有调度管理平台,实现模型计算模块与日常调度业务模块的无缝衔接,使模型输出的优化方案能直接转化为调度操作指令。建立模型结果反馈机制,定期将实际调度效果与模型预测结果对比分析,量化两者偏差。根据偏差原因及时修正模型参数,如调整径流系数、目标权重等,不断提升模型的适应性与实用性,实现模型与实践的良性互动。

4.3 动态调整与迭代优化

强化模型应用中的动态调整与迭代优化,是保障模型长期适用的重要路径。建立模型动态调整机制,实时跟踪水文情势变化与用水需求波动,及时更新模型输入参数与约束条件。在汛期、枯水期等关键时段,加密模型计算频次,从常规每日计算调整为每小时计算,确保调度方案能快速响应短期水情变化。定期开展模型迭代优化,结合调度实践经验与大数据、人工智能等新技术发展,完善模型结构与算法,提升模型的先进性与长期适用性,适应不断变化的调度需求。

5 调度优化模型发展的未来趋势

5.1 智慧化模型升级

智慧化技术驱动下,调度优化模型将向深度智能化方向升级,这是行业发展的必然趋势。引入机器学习算法,通过大量历史调度数据训练模型,实现模型参数的自动校准与调度方案的自学习优化,减少人工干预。结合数字孪生技术,构建与实体水库精准匹配的虚拟仿真系统,集成水文、工程、调度等多维度数据,实现调度过程的可视化模拟。通过沉浸式决策界面,调度人员可直观预判不同方案效果,提升模型对极端天气、突发事件等复杂场景的模拟与应对能力。

5.2 生态优先目标重构

在生态文明建设背景下,生态优先理念将深度融入模型目标体系,推动调度模式转型。模型将进一步提升生态目标权重,细化生态约束条件,不仅关注下游河道生态基流,还将纳入水温调控、水质保护等指标,保障鱼类产卵、洄游等生态需求。构建“生态—社会—经济”

协调发展的目标函数,改变以往重经济轻生态的倾向,实现生态效益与传统效益的均衡优化。通过模型重构,推动水库调度从“工程调度”向“生态友好型调度”转型,促进水资源开发利用与生态保护的协调统一。

5.3 跨区域协同应用拓展

针对流域水资源统筹管理需求,模型应用将向跨区域协同调度拓展,提升流域整体水资源利用效率。突破单一水库调度局限,构建流域尺度的联合调度优化模型,整合流域内多座水库、水电站、取水口等水利设施数据,实现多水库、多区域水资源的统筹分配。通过模型量化区域间用水权益与生态责任,科学协调上下游、左右岸的用水矛盾,避免区域间无序取水。在干旱年份,通过模型统一调配流域水资源,优先保障生活用水与生态用水,实现流域水资源的高效、公平利用。

6 结论

模型以多元协同目标为导向,在保障防洪安全、满足用水需求的同时,兼顾生态保护,实现水资源可持续利用。当前,数据不确定性、目标冲突、场景适配不足等问题制约模型效能,通过构建高精度数据体系、推动模型与管理系统协同、强化动态优化等路径可有效破解。未来,在智慧化技术驱动与生态优先理念引领下,模型将向智能化、生态化、跨区域协同方向发展。通过持续完善模型,可为大型水库科学调度提供支撑,助力水利行业高质量发展。

参考文献

- [1]张礼兵,焦丽萍,金菊良,等.基于水库旱限水位的大型灌区水资源空间均衡优化调控[J].水利学报,2024,55(10):1187-1198.
- [2]余祥,周玉洁,吕娜.四川省大桥水库灌区二期工程水资源配置分析[J].四川水利,2019,40(01):86-88.
- [3]黄艳.面向生态环境保护的三峡水库调度实践与展望[J].人民长江,2018,49(13):1-8.
- [4]谢遵党,鲁俊,方洪斌,等.黄河水资源短缺与梯级水库调节能力需求关系研究[J].人民黄河,2025,47(11):65-70.
- [5]刘楠楠,石明睿,方红远.骆马湖水库洪水资源利用运行方案分析[J].水资源与水工程学报,2025,36(05):29-37+47.