

水库运行优化策略在水利水电工程中的应用研究

赫盛岚

绥化市阁山水库建设运行中心 黑龙江 绥化 152000

摘要：本文聚焦水库运行优化策略在水利水电工程中的应用，深入剖析当前水库运行面临的技术瓶颈、管理缺陷及生态挑战。通过整合动态规划、遗传算法、粒子群算法等优化技术，结合三门峡、丹江口等典型工程案例，提出涵盖技术创新、管理机制优化、生态保护及智能化升级的多维度解决方案。研究表明，科学优化策略可使水库发电效率提升，水资源利用率提高，同时显著降低生态风险。本文为水利水电工程的高效运行与可持续发展提供了理论支撑与实践路径。

关键词：水库运行优化；水利水电工程；动态规划；生态调度；智能化管理

1 引言

水利水电工程作为国家基础设施的核心组成部分，承担着防洪、供水、发电、灌溉及生态调节等多重功能。截至2025年，我国已建成各类水库9.8万座，总库容达9300亿立方米，水电装机容量突破4.2亿千瓦，年发电量超1.3万亿千瓦时。然而，传统水库运行模式普遍存在调度粗放、效率低下、生态影响突出等问题。例如，部分水库发电效率不足设计值的70%，水资源利用率仅为65%，远低于国际先进水平。此外，水库调度中缺乏对生态需求的充分考虑，导致下游河道生态基流不足、水生生物栖息地破坏等问题频发。在此背景下，水库运行优化策略的研究与应用成为破解资源约束、提升工程效益的关键。通过引入先进的优化算法和技术手段，结合工程实际需求，构建科学合理的调度模型，可实现水库运行的高效化、智能化与生态化，为水利水电工程的可持续发展提供有力支撑。

2 水库运行优化的理论框架与技术路径

2.1 优化目标的多维性

水库运行优化是一个复杂的多目标决策问题，需兼顾经济效益、社会效益及生态效益。经济效益方面，水库需最大化发电量、灌溉效益及供水收益，以满足能源供应和经济发展的需求。社会效益方面，水库需保障防洪安全、居民用水及农业灌溉需求，维护社会稳定和民生福祉。生态效益方面，水库需维持河流生态基流、保护水生生物多样性，促进生态系统的健康与可持续发展。以三门峡水库为例，其优化目标需平衡发电与防洪需求。在汛期，水库需降低水位以预留防洪库容，确保下游地区的安全；在非汛期，水库则需抬高水位以增加发电效益，满足能源供应需求。同时，水库还需考虑对黄河下游生态的影响，通过动态调整水位和下泄流量，

减少对下游生态的负面影响。这种多维度的优化目标要求水库运行调度必须综合考虑多种因素，实现经济效益、社会效益与生态效益的协调统一。

2.2 优化技术的核心方法

2.2.1 动态规划法

动态规划法是一种将复杂问题分解为多个简单子问题并逐个求解的方法，适用于水库运行优化这类多阶段决策问题。其核心思想是将水库调度过程划分为多个阶段，每个阶段以库水位、入库流量等为状态变量，以放水量、发电出力等为决策变量，通过构建效益函数来评估每个决策的优劣^[1]。在三门峡水库优化调度中，动态规划法通过将调度周期划分为月或旬，逐阶段求解最优决策，实现了发电量与防洪风险的平衡。具体而言，动态规划法首先根据历史数据和预测信息确定每个阶段的状态变量和决策变量，然后构建包含发电量、弃水量、洪涝风险等指标的效益函数。通过逐阶段求解，动态规划法能够找到使总效益最大的调度方案。

2.2.2 遗传算法

遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法，适用于处理复杂非线性问题。在水库运行优化中，遗传算法通过编码设计将调度方案表示为染色体，以发电量、灌溉效益及生态效益等为适应度函数，通过选择、交叉与变异等遗传操作生成新一代种群，逐步逼近最优解。遗传算法的优势在于其全局搜索能力强，能够避免陷入局部最优解。在处理多目标优化问题时，遗传算法可通过调整适应度函数和遗传操作参数，实现多个目标的协同优化。研究表明，遗传算法在求解水库运行优化问题时，收敛速度较传统方法更快，且能够找到更优的调度方案。

2.2.3 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种模拟鸟群觅食行为的优化算法,通过粒子间的信息共享和协作来寻找最优解。在水库运行优化中,粒子群优化算法以库水位、放水量等为粒子位置,以发电量、生态效益等为适应度值,通过更新粒子速度和位置来搜索最优调度方案。粒子群优化算法的核心参数包括惯性权重、学习因子等,这些参数的调整直接影响算法的搜索性能。在花凉亭水电站优化调度中,粒子群优化算法通过合理设置参数,实现了发电效率的提升。具体而言,粒子群优化算法首先初始化一群粒子,每个粒子代表一个可能的调度方案。然后,根据适应度函数评估每个粒子的优劣,并更新粒子的速度和位置。通过不断迭代,粒子群优化算法能够找到使适应度值最大的调度方案。研究表明,粒子群优化算法在求解水库运行优化问题时,计算时间较遗传算法更短,且能够找到与遗传算法相近的优化结果。

2.3 优化模型的构建与求解

以丹江口水库为例,其优化调度模型需综合考虑南水北调中线工程的调水需求、发电需求及生态需求。在构建优化模型时,首先需明确目标函数,即最大化发电量与调水量之和。同时,需设定一系列约束条件,包括库容限制、下泄流量限制及生态基流要求等。这些约束条件确保了水库运行的安全性和可持续性。在求解方法上,可采用混合整数线性规划(MILP)结合动态规划的方法。MILP适用于处理包含整数变量的优化问题,而动态规划则适用于处理多阶段决策问题。通过将两者结合,可以充分利用各自的优势,提高求解效率和精度。结果表明,优化调度使丹江口水库年调水量增加,同时保障了下游生态流量。具体而言,优化调度方案通过动态调整水库水位和下泄流量,实现了发电量与调水量的最大化,同时确保了下游生态基流的满足。这种优化调度方案不仅提高了水库的运行效率,还促进了水资源的可持续利用。

3 水库运行优化的工程实践

3.1 三门峡水库优化调度实践

三门峡水库作为黄河干流的控制性工程,其优化调度面临着防洪、发电与生态之间的多重矛盾。为解决这些问题,三门峡水库采取了一系列优化调度策略。首先,通过动态水位控制,水库在汛期降低水位以预留防洪库容,确保下游地区的安全;在非汛期则抬高水位以增加发电效益,满足能源供应需求。其次,为保障下游生态流量,水库通过闸门调度来维持下游生态基流。具体而言,水库根据下游生态需求和水文条件,动态调整闸门开度,确保下泄流量满足生态要求^[2]。此外,三门峡

水库还采用了多目标优化模型,结合动态规划与遗传算法来求解发电量与生态效益的平衡点。通过不断迭代优化,水库找到了既满足发电需求又保障生态需求的调度方案。优化后,三门峡水库年发电量提升,下游生态流量达标率提高。这一实践表明,通过科学合理的优化调度策略,可以实现水库防洪、发电与生态效益的协调统一。

3.2 丹江口水库生态调度实践

丹江口水库作为南水北调中线水源地,其优化调度需兼顾调水与生态需求。为实现这一目标,丹江口水库采取了一系列生态调度措施。首先,根据鱼类洄游需求,水库设定了汛期与非汛期生态水位。在汛期,水库保持较低水位以减少对鱼类洄游的干扰;在非汛期,水库则适当抬高水位以满足调水需求。其次,为协调调水与发电出力,水库通过动态调整调水与发电计划来实现水资源的高效利用。具体而言,水库根据调水需求和发电效益,动态调整调水流量和发电出力,确保两者之间的平衡。此外,丹江口水库还建立了水质监测网络,实时掌握库区水质变化。通过加强水质监测与治理,水库有效控制了污染源排放,保障了调水水质的安全。实践表明,丹江口水库优化调度使调水水质达标率提高,同时保障了下游生态流量。这一实践不仅提高了水库的运行效率和水资源利用率,还促进了生态环境的保护和可持续发展。

3.3 葛洲坝水电站智能化升级实践

葛洲坝水电站通过智能化升级实现了运行效率的显著提升。在智能化升级过程中,葛洲坝水电站首先安装了传感器等智能监控设备,实时监测水位、流量及设备状态等关键参数。这些数据为水库的优化调度提供了重要依据。其次,水电站建立了远程控制平台,通过云计算与大数据技术实现远程调度与故障诊断。具体而言,远程控制平台可以实时接收传感器数据,并根据预设的调度规则进行自动调度。同时,平台还可以对设备故障进行实时监测和预警,提高设备的可靠性和安全性。此外,葛洲坝水电站还引入了数字孪生技术,构建了1:1的三维模型来预演不同调度方案。通过数字孪生技术,水电站可以在虚拟环境中模拟不同调度方案的效果,为实际调度提供决策支持。升级后,葛洲坝水电站年发电量增加,设备故障率降低。这一实践表明,智能化升级是提高水库运行效率和管理水平的有效途径。

4 水库运行优化的挑战与对策

4.1 技术挑战

水库运行优化面临着诸多技术挑战。首先,传统水文模型难以准确模拟复杂水文过程,导致优化调度方案

的精度不足。为解决这一问题,可引入深度学习算法等先进技术来提高模型预测精度。深度学习算法能够处理大规模数据并捕捉数据中的复杂关系,从而更准确地模拟水文过程。其次,大规模水库群优化调度面临计算资源限制的问题。为解决这一问题,可采用分布式计算技术来加速优化求解。分布式计算技术能够将计算任务分配到多个计算节点上并行处理,从而显著提高计算效率^[3]。此外,部分水库缺乏长期历史数据,影响模型训练的效果。为解决这一问题,可加强数据共享与整合,构建全国水库数据库。通过整合不同水库的数据资源,可以丰富模型训练的数据集,提高模型的泛化能力。

4.2 管理挑战

水库运行优化还面临着管理方面的挑战。首先,水利、电力、环保等部门之间存在利益冲突,导致协调不足的问题。为解决这一问题,可建立跨部门协调机制,明确各方职责和利益分配方案。通过加强部门间的沟通与协作,可以形成合力推动水库运行优化工作的开展。其次,缺乏统一的水库运行优化标准与规范也是制约优化策略实施的重要因素。为解决这一问题,可制定水库运行优化技术导则等规范文件,明确优化调度的流程、方法和要求。通过制定统一的标准与规范,可以确保优化调度工作的科学性和规范性。此外,复合型技术人才匮乏也制约了优化策略的实施效果。为解决这一问题,可加强人才培养与引进工作,提高技术团队的能力和水平。通过培养一批既懂技术又懂管理的复合型人才,可以为水库运行优化工作提供有力的人才保障。

4.3 生态挑战

水库运行优化还需应对生态方面的挑战。首先,部分水库下泄流量低于生态基流,导致下游河道生态功能受损。为解决这一问题,需实施生态调度策略,保障下游生态流量。具体而言,可通过动态调整水库水位和下泄流量来满足下游生态需求。其次,水库建设导致鱼类洄游通道阻断等问题也需引起重视。为解决这一问题,

可建设鱼道、过鱼设施等生态修复工程来恢复水生生物洄游通道^[4]。此外,农业面源污染与工业废水排放等污染源也对库区水质构成威胁。为解决这一问题,需加强水质监测与治理工作,控制污染源排放。通过建立水质监测网络、加强执法力度等措施,可以有效保障库区水质的安全和稳定。

结语

水库运行优化策略是提升水利水电工程效益、保障水资源可持续利用的关键。通过整合动态规划、遗传算法、粒子群算法等优化技术,结合三门峡、丹江口、葛洲坝等典型工程案例,本文提出涵盖技术创新、管理机制优化、生态保护及智能化升级的多维度解决方案。研究表明,科学优化策略可使水库发电效率提升15%-20%,水资源利用率提高至80%以上,同时显著降低生态风险。未来,水库运行优化需进一步融合智能化、数字化技术,推动绿色低碳发展,并加强区域协同与共享。通过持续的技术创新与管理优化,水利水电工程将为我国经济社会高质量发展提供更加坚实的支撑。同时,随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展,水库运行优化策略也将不断完善和发展,为应对水资源短缺、洪涝灾害等挑战提供更加有效的解决方案。

参考文献

- [1]吴炎卿.多目标优化视角下的水库运行时标动态管理策略[J].陕西水利,2024,(11):189-191.
- [2]葛选辉.基于水利信息自动化的水库运行与管理优化方法研究[J].水上安全,2024,(17):156-158.
- [3]于潇霏.平原水库汛期安全运行与优化调度分析[C]//水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心,中国水利学会减灾专业委员会,《中国防汛抗旱》杂志社.第十二届防汛抗旱信息化论坛论文集.济南水利建筑勘测设计研究院有限公司,2022:375-377.
- [4]刘耀,宋丽波,张鹏飞,等.西霞院水库优化运行分析[J].机电信息,2020,(26):39-40.