

水利工程运行管理中的生态调度模式探索

曹恒 张岩 封锐

连云港市通榆河北延送水工程管理处 江苏 连云港 222000

摘要: 随着生态文明建设理念的深入人心,传统以单一经济目标为导向的水利工程运行管理模式已难以满足新时代对人水和谐共生的要求。生态调度作为一种将生态保护目标内嵌于水利工程调度决策过程中的新型管理模式,正日益成为破解水资源开发与生态保护矛盾的关键路径。本文系统梳理了生态调度的理论内涵与发展脉络,深入剖析了当前我国水利工程运行管理中实施生态调度所面临的制度、技术与实践困境。在此基础上,文章从目标体系构建、多维协同机制、智能技术赋能及制度保障创新四个维度,提出了构建适应性生态调度模式的系统性框架。最后,结合长江流域梯级水库群等典型案例,论证了该模式的可行性与有效性,并对未来研究方向进行了展望,旨在为推动我国水利工程高质量发展、实现流域生态系统健康提供理论支撑与实践参考。

关键词: 水利工程;运行管理;生态调度;生态系统健康;多目标协同;智能调度

引言

水利工程在防洪、灌溉、发电等方面作用重大,是国家发展基石。但大规模建设运行改变了河流自然特性,引发连通性中断、生物多样性锐减等生态问题,制约流域可持续发展。传统水利工程管理遵循“以需定供”,聚焦防洪、供水、发电等经济目标,忽视河流生态需求,造成水资源开发与生态保护对立。新时代,生态文明建设上升至战略高度,相关法律法规要求统筹生态用水需求。在此背景下,生态调度应运而生,它不是对传统调度的修补,而是范式转变,将河流视为生命共同体,在满足人类用水需求时,为河流生态“留白”。探索构建科学高效的生态调度模式,是修复河流生态、实现水利工程“人水和谐”转型的核心。本文将系统探讨,为水利工程绿色转型提供思路方案。

1 生态调度的理论内涵与发展演进

1.1 概念界定与核心要义

生态调度,是指在水利工程(如水库、水闸、泵站等)的日常运行管理中,有意识地调整其下泄流量、水位、水温、泥沙等过程,以模拟或恢复河流自然水文情势的关键特征,从而满足下游及库区特定生态目标的一种调度策略与管理实践。其核心要义首先体现在目标的融合性上,即打破传统调度目标的单一性,将生态目标与防洪、供水、发电等经济社会目标置于同等重要的地位,进行统筹协调与多目标优化。其次,生态调度强调过程导向性,关注的不仅是水量的多少,更是水流过程的动态特征,包括流量的大小、历时、频率、发生时间以及变化速率等,这些过程共同构成了维系生态系统健康的“生态流”。最后,生态调度具有鲜明的系统整体性,

它超越单个工程点的局限,着眼于整个流域尺度,考虑上下游、左右岸、干支流以及地表水与地下水之间的系统耦合关系,追求流域生态系统的整体健康,而非局部利益的简单叠加。

1.2 外发展脉络

我国对生态调度的关注始于21世纪初,初期多为针对特定物种(如长江四大家鱼、中华鲟)的试验性调度。近年来,随着生态文明建设的推进,生态调度逐渐从“应急补救”走向“常态管理”。三峡水库连续多年开展促进四大家鱼自然繁殖的生态调度试验,黄河通过全流域水量统一调度成功实现了不断流并兼顾了河口湿地生态,这些都是我国生态调度实践的重要里程碑。然而,相较于国际先进水平,我国在生态调度的系统性、精细化和法治化方面仍有较大提升空间,亟需构建更具普适性和韧性的本土化模式。

2 当前生态调度实践面临的主要困境

尽管生态调度重要性已获广泛认同,但在将其全面融入水利工程日常运行管理的过程中,仍面临着一系列深层次的挑战。

2.1 制度与认知层面的障碍

法律地位的不明确是首要障碍。虽然新出台的流域保护法提及了生态用水,但“生态用水”或“生态流量”的法律内涵、权属、优先序等关键问题尚未在《水法》等上位法中得到清晰界定。这导致在实际调度冲突中,生态目标往往因缺乏刚性约束而让位于更具紧迫性的经济社会用水需求。与此同时,部门协同壁垒依然坚固。生态调度涉及水利、生态环境、农业农村、自然资源等多个部门,各部门目标诉求不同,数据标准不一,沟通协调

成本高昂，“九龙治水”的格局使得跨部门的联合调度决策机制难以有效建立^[1]。更深层次的问题在于价值认知的偏差，部分管理者和公众仍存在“生态调度是额外负担”的错误观念，未能充分认识到健康的河流生态系统本身就是一种宝贵的生产资料和财富源泉，其提供的生态服务价值远超短期的经济收益损失。

2.2 技术与方法层面的瓶颈

生态响应机理的不清是制约调度精准化的根本原因。对于复杂的河流生态系统而言，特定水文过程变化如何精确影响特定生物种群或生态过程，其内在机理尚不完全清楚。这导致生态调度目标的设定带有较强的主观性和不确定性，难以做到有的放矢。与之相伴的是监测-评估-反馈体系的薄弱。目前，我国缺乏覆盖全流域、多要素的长期、高密度、自动化监测网络，调度效果的后评估往往滞后且不系统，难以形成有效的“调度-监测-评估-优化”闭环，使得调度实践长期停留在经验摸索阶段。此外，多目标优化模型的复杂性也是一大技术瓶颈。将生态目标量化并与其他目标一同纳入优化模型，面临着目标函数构建困难、约束条件繁多、计算量巨大等难题。尤其是在梯级开发密集的流域，上游水库的调度会对下游产生复杂的叠加效应，模型求解尤为困难，限制了调度方案的科学性和前瞻性。

2.3 工程与运行层面的制约

许多已建水利工程在规划设计阶段并未预留生态调度的设施，这是工程先天不足的体现。例如，缺乏分层取水口使得无法有效调控下泄水温，缺少专用的生态放水管道则限制了小流量调度的灵活性，导致后期实施生态调度时，只能在流量上做文章，效果大打折扣。同时，现有调度规程多为刚性规定，缺乏根据实时水情、工情和生态需求进行动态调整的弹性空间。外部需求的挤压也不容忽视，电网调峰、农业灌溉等刚性任务常常占据了宝贵的调度窗口，进一步压缩了生态调度的操作余地，使其在实践中常处于被动和从属的地位。

3 构建适应性生态调度模式的路径探索

针对上述困境，亟需构建一个集目标引领、协同驱动、技术支撑和制度保障于一体的适应性生态调度模式。该模式应具备前瞻性、系统性和可操作性。

3.1 构建多层次、差异化的生态调度目标体系

生态调度不能“一刀切”，必须因地制宜、因河施策。在流域层面，应确立流域生态完整性为最高目标，重点维护河流纵向连通性、横向漫滩连通性、关键生物廊道以及河口三角洲的生态功能，确保整个流域作为一个生命共同体的健康运转。在河段层面，则需根据不同河段

的主导生态功能设定差异化的保护目标。例如，在珍稀鱼类产卵场河段，重点保障繁殖期所需的涨水过程；在重要湿地河段，则需保障关键时期的淹没面积和历时，以维持湿地植被的生长和水鸟的栖息^[2]。最终，在工程层面，必须将这些宏观和中观目标分解为具体、可量化的调度指标，如最小生态流量、脉冲流量峰值与历时、适宜水温范围、年内不同时间段的流量过程线等，并将其正式纳入工程调度规程，使之成为日常运行管理的硬性约束。

3.2 建立跨部门、跨区域的多维协同机制

强化流域统筹是破除协同壁垒的关键。应依托流域管理机构，建立由水利牵头，生态环境、农业农村等部门共同参与的流域生态调度协调委员会，负责制定流域生态调度总体方案、审批重大调度计划、协调解决跨区域冲突，形成权威高效的决策中枢。在此基础上，必须大力推动信息共享，构建统一的流域水信息共享平台，整合水文、气象、水质、生态、工程运行等多源数据，打破信息孤岛，为协同决策提供坚实的数据底座^[3]。此外，还应引入利益相关方参与机制，将科研机构、环保组织、社区代表等纳入调度方案的制定和效果评估过程，通过多方对话与协商，增强决策的科学性、民主性与公信力，形成全社会共同守护母亲河的良好氛围。

3.3 以智能技术赋能调度全过程

现代信息技术为破解生态调度的技术瓶颈提供了强大工具。首先，在感知端，应利用物联网、卫星遥感、无人机、eDNA等技术，构建天地空一体化的智能感知网络，实现对流域生态要素的实时、精准、全覆盖监测，为调度决策提供“千里眼”和“顺风耳”。其次，在模拟与预测端，应基于大数据和人工智能，构建耦合水文-水动力-水质-水生态的数字孪生流域模型。该模型不仅能高精度模拟现状，更能对未来不同调度情景下的生态响应进行预测，为方案比选提供科学依据，变“被动响应”为“主动预演”。最后，在决策端，应应用机器学习、强化学习等算法，开发能够自动学习历史调度经验、实时响应外部变化、并在多目标间寻求最优平衡的智能调度决策支持系统。该系统可自动生成多个可行调度预案，并推荐最优方案，极大提升调度效率与精准度，实现从“经验调度”向“智慧调度”的跃升。

3.4 完善法制与市场双重保障机制

健全的法规标准体系是生态调度行稳致远的根本保障。应加快修订《水法》，明确生态流量的法律地位和保障措施，并制定覆盖不同类型河流、不同功能区的生态流量确定技术导则和调度规程国家标准，为实践提供统一、权威的规范指引。在此基础上，必须创新生态补

偿机制。对于因实施生态调度而导致发电、供水等经济效益损失的工程管理单位,应建立合理的生态补偿机制,可通过设立流域生态补偿基金、发行绿色债券、开展水权交易等方式,将生态效益内部化,有效激发工程管理方的积极性,变“要我调度”为“我要调度”。最后,应全面推行适应性管理理念,将生态调度视为一个持续学习和改进的过程^[4]。建立常态化的调度后评估制度,根据监测评估结果,定期滚动修编调度方案,实现管理模式的动态优化和迭代升级,确保生态调度始终与河流生态系统的实际需求同频共振。

4 案例分析:长江流域梯级水库群生态调度实践

长江是我国第一大河,也是生态调度探索的前沿阵地。以三峡及其上游梯级水库群为例,其生态调度实践集中体现了前述模式的应用。长江流域面临的生态挑战十分严峻。三峡工程的建成显著改变了长江中游的水文节律,尤其是春季涨水过程的消失,严重抑制了四大家鱼等产漂流性卵鱼类的自然繁殖。同时,密集的梯级开发还带来了水温分层、泥沙淤积等一系列复合型生态问题。面对这些挑战,长江流域的生态调度实践走出了一条科学、协同、智能的道路。通过长期的科学研究,管理部门精准锁定了四大家鱼产卵的关键水文触发因子——日流量增长速率和持续时间,并据此设定了具体的生态调度目标:在每年5-6月的繁殖期内,制造1-2次持续4-7天、日均流量增幅超过1000立方米每秒的“人造洪峰”。为实现这一目标,在长江水利委员会的统一协调下,三峡、溪洛渡、向家坝等梯级水库联合制定调度方案,确保人造洪峰过程在传播至中游监利等关键江段时,仍能保持足够的强度和历时。这一过程依托于先进的长江流域水工程联合调度系统,该系统集成水文预报、水库调度、水动力模拟等模块,能够提前数日甚至数周预演不同调度方案的效果,择优实施。更为重要的是,建立了常态化的评估机制,每年调度后,联合科研机构开展专项监测,通过鱼卵径流量调查、声学探测等手段,定量

评估调度对鱼类繁殖的实际促进效果,并据此微调下一年的调度参数。多年的实践表明,生态调度显著提升了四大家鱼的自然繁殖规模,证明了该模式的有效性。这一案例深刻启示我们,成功的生态调度必须建立在坚实的科学认知、强有力的流域统筹、先进的技术支撑和持续的跟踪评估之上,任何一个环节的缺失都可能导致整体效果的打折。

5 结语

水利工程运行管理中的生态调度,是协调人水关系、实现流域可持续发展的必然选择。本文通过系统分析,揭示了当前生态调度实践面临的制度、技术和工程等多重困境,并提出构建一个以多层次目标体系为引领、以多维协同机制为驱动、以智能技术为支撑、以法制市场为保障的适应性生态调度模式。长江等流域的实践案例验证了该模式的可行性与优越性。未来,生态调度的研究与实践还需在以下方向深化。首先,应继续深化基础研究,加强河流生态系统对水文情势变化的响应机理研究,特别是气候变化背景下生态阈值的动态演变,为调度提供更坚实的科学支撑。其次,应努力拓展调度维度,从单一的流量调度,向水温、溶解氧、泥沙、营养盐等多要素协同调控拓展,实现更全面、更精细的生态修复。最后,应积极推动全球协作,积极参与国际河流生态调度的合作与交流,借鉴先进经验,贡献中国智慧,共同应对全球水生态危机。

参考文献

- [1]耿大伟,邢宝革.水利项目中的生态与环境调度[J].区域治理,2020,(03):126-128.
- [2]刘鑫.水利工程水资源供水调度与生态效应研究分析[J].陕西水利,2024,(10):51-53+57.
- [3]赵先进,梅亚东,李析男,等.夹岩水利枢纽工程水库生态调度关键技术[M].中国水利水电出版社:202311:213.
- [4]戴会超,生态友好的水利水电工程预报调度关键技术与应用.北京市,中国长江三峡集团有限公司,2021-06-07.