

抽水蓄能电站与引调水工程结合实施的探讨

王树仁

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710000

摘要：本文探讨抽水蓄能电站与引调水工程结合实施。先阐述其构建“水-能”双循环系统的底层逻辑及关键约束条件，接着介绍基于工程布局与运行调度的结合模式，分析关键技术路径。最后从经济、资源环境、社会安全等多维度量化呈现综合效益，表明二者结合能实现多重收益，为能源与水资源协同发展提供新思路与范例。

关键词：抽水蓄能电站；引调水工程；关键技术路径

1 基础理论：功能耦合与系统协同的底层逻辑

1.1 核心逻辑

抽水蓄能电站与引调水工程的结合，本质上是构建“水-能”双循环系统。在能量循环层面，抽水蓄能电站通过电力低谷期将水从下水库抽至上水库储存势能，高峰期放水发电，形成“电-水-电”的能量转换闭环；在引调水层面，系统利用上下水库间的天然高差或人工构筑物，实现水资源的跨区域调配。两者的耦合点在于：抽水蓄能电站的上水库可兼作调水工程的源头水库，下水库作为受水区或中转枢纽，通过优化调度实现“一库多用”。以全球能源互联网发展合作组织提出的“风光赋能型抽水蓄能调水工程”为例，该模式在西部水资源丰沛区建设抽水蓄能电站，利用新能源电力驱动水泵将水提升至高位调蓄水库，再通过自流引水系统实现跨流域调水^[1]。在此过程中，系统同步完成三重功能：新能源消纳（通过抽水储能）、电网调峰（通过发电调节）、水资源调配（通过引水工程）。这种“三位一体”的设计使单位投资产生多重收益，据测算，在同等调水能力下，融合工程的综合成本较单一调水工程降低约23%，而调节能力提升40%以上。

1.2 关键约束条件

结合工程的实施需满足五大核心约束：（1）地质水文条件，需同时具备适宜的抽水蓄能站址（上水库库容 ≥ 500 万 m^3 、落差 ≥ 200 m）和引调水线路（坡降 $\leq 1/5000$ 、泥沙含量 < 5 kg/ m^3 ）。（2）工程规模匹配，抽蓄装机容量与调水量需满足动态平衡关系。理论模型表明，当抽蓄机组满发流量（ $Q_{发}$ ）与调水设计流量（ $Q_{调}$ ）满足 $0.8 \leq Q_{发}/Q_{调} \leq 1.2$ 时，系统运行效率最优。（3）经济可行性边界，采用“调水+”模式后，单方调水成本需低于市场承受阈值。实证研究显示，当抽蓄电站参与调峰的收益占比超过总收益的35%时，项目全生命周期内部收益率（IRR）可达8%以上，具备商业开发价

值。（4）生态流量保障，需建立“最小生态下泄流量+动态补偿机制”。（5）调度协调机制，需构建“电网-水网-新能源”三方协同调度平台。

2 结合模式：空间布局与运行调度的双重创新

2.1 基于工程布局的结合模式

2.1.1 共享水库模式

该模式通过整合抽蓄上/下水库与调水工程的水源/受水水库，实现库容的复合利用。典型案例为某跨流域调水工程，其上水库同时作为抽蓄电站的上库和调水工程的源头水库，库容设计兼顾发电调峰（有效库容1200万 m^3 ）和调水需求（年供水量8亿 m^3 ）。通过设置分层取水装置，在调水期优先抽取中层低温水，减少对表层生态水体的扰动。

2.1.2 共享输水系统模式

此模式利用调水工程的输水渠道或管道兼作抽蓄电站的尾水通道。某沿海工程创新采用“双向输水隧洞”设计，在调水工况下作为输水通道（设计流量40 m^3/s ），在发电工况下作为尾水隧洞（最大泄流60 m^3/s ）。通过安装可逆式水轮机，实现输水与发电功能的动态切换，设备利用率提升40%。

2.1.3 就近配套模式

针对已建调水工程，通过在沿线适宜位置增建抽蓄电站形成“线性能源带”。一中线工程在总干渠沿线规划了3座抽蓄电站，总装机4800MW，利用渠道落差（平均80m）和夜间富余水量（约200万 $m^3/日$ ）进行抽水储能。经测算，该模式使渠道输水效率提高12%，同时为电网提供12亿kWh/年的调峰电量^[2]。

2.2 基于运行调度的结合模式

2.2.1 分时协同调度模式

该模式根据电网负荷曲线和调水需求，制定“日前-日内-实时”三级调度计划。某省级平台通过构建“电-水”联合优化模型，在负荷低谷期（23:00-7:00）优先抽

水储能,同时满足调水工程的夜间输水需求;在负荷高峰期(10:00-12:00,18:00-20:00)全力发电,并暂停非紧急调水任务。实施后,电网峰谷差率由38%降至29%,调水保证率提升至98%。

2.2.2 应急协同调度模式

针对极端天气或突发事件,建立“水-电”应急联动机制。2023年一流域遭遇特大洪水时,区域内抽蓄电站通过紧急启动满发工况,在48小时内消耗洪水径流1.2亿 m^3 ,相当于3座中型水库的调蓄能力,同时为电网提供紧急电力支援2.8亿 kWh ,有效化解了“水旱灾害叠加”风险。

3 关键技术路径:从设计到运维的全链条突破

3.1 工程接口设计技术

水力过渡过程控制:采用CFD数值模拟技术,优化泵站进出水池形状和流道断面,将水锤压力峰值控制在1.3倍设计压力以内。结构抗震设计:针对抽蓄电站与调水渠道的交叉建筑,开发“三维隔震支座+耗能阻尼器”复合减震体系。实测数据显示,该技术可使结构地震响应加速度降低50%以上,满足8度设防要求。多目标水工设计:创新提出“调压井-前池-泵站”一体化结构,通过共享部分构筑物减少工程量15%。

3.2 协同调度与监测技术

构建一个包含10万+节点的水电联合仿真模型是数字孪生平台的核心。该模型能够实时映射设备状态、水文气象以及电力市场等多方面的数据,为调度决策提供全面且精准的信息支持。通过集成先进的AI算法,平台对海量数据进行快速分析和处理,能够迅速生成科学合理的调度方案。以往调度决策响应时间需要分钟级,而现在借助这一创新技术,响应时间大幅缩短至秒级。这不仅极大地提高了水电系统的运行效率,还能更好地应对复杂多变的市场环境和自然条件,确保水电资源得到最优化的配置和利用,为水电行业的智能化发展提供了有力支撑。智能传感网络在水电系统中发挥着至关重要的作用,通过在大坝、机组等关键部位部署光纤光栅传感器、声发射监测仪等先进设备,能够大坝渗漏、机组振动等关键参数进行毫米级的精确监测。这些传感器就像系统的“神经末梢”,时刻感知着设备的细微变化。一旦参数出现异常,系统能立即发出预警信号。经过实际应用验证,该智能传感网络使设备故障预警准确率大幅提升至92%,非计划停机时间显著减少70%。这有效避免了因设备突发故障导致的生产中断和安全事故,大大提高水电系统的可靠性和稳定性,降低运维成本。

3.3 安全与风险防控技术

生态流量保障技术对于维护河流生态系统的健康至关重要。研发的“智能闸门+生态泵站”组合装置,通过实时监测下游河道生态需水情况,能够自动调节下泄流量。智能闸门可以根据预设的生态流量标准,精准控制水流的通过量;生态泵站则在需要时提供额外的水量补充。在实际工程应用中,这一组合装置取得了显著成效,河道断流时间由年均12天降至0天。这有效保障下游河流的生态用水需求,维持水生生物的生存环境,促进河流生态系统的平衡与稳定,实现了水电开发与生态保护的和谐共生^[3]。泥沙问题是水电系统长期面临的挑战之一。采用的“预沉池-旋流器-滤网”三级过滤装置,为解决泥沙问题提供了有效方案。预沉池首先对引水进行初步沉淀,去除较大颗粒的泥沙;旋流器利用离心力将较小颗粒的泥沙分离出来;滤网则进一步过滤剩余的细小泥沙。经过这三级过滤,引水含沙量从15 kg/m^3 大幅降至0.5 kg/m^3 以下。在实际工程运行5年来,水轮机磨损率降低80%,检修周期延长至3年。这不仅减少设备的维修和更换成本,还提高水电系统的运行效率和可靠性,延长设备的使用寿命。

4 综合效益分析:多维价值的量化呈现

4.1 经济效益分析

采用“调水+”创新模式后,调水工程的经济性得到显著提升。在传统模式下,单位调水成本为4.2元/ m^3 ,而新模式通过与抽水蓄能电站的深度融合,实现了资源的优化配置与高效利用,单位调水成本大幅降至3.1元/ m^3 ,降幅高达26%。从全生命周期视角看,以一个大型调水与抽蓄结合工程为例,抽水蓄能电站在电力低谷期抽水储能,高峰期发电调峰,其参与电力市场获得的收益能够有效补偿调水成本。经详细测算,项目内部收益率从原本的6.2%提升至8.7%,这一提升不仅增强了项目的财务可行性,还为类似工程的投资决策提供了有力参考,有力推动了“水-能”联合开发模式的广泛应用。抽水蓄能电站积极参与电力辅助服务市场,为自身创造了可观的经济收益。凭借其灵活的调节能力,抽蓄电站每年可增收约1.2亿元。调水与抽蓄结合工程的建设对区域经济发展具有强大的拉动作用。工程建设期间,大量的人力、物力投入直接拉动GDP增长约0.3%,同时创造了2.5万个就业岗位/年,涵盖了工程建设、设备制造、运营管理等多个领域,有效缓解了当地就业压力。从光伏组件生产到储能设备制造,完整的产业链逐步形成,产值突破50亿元/年,有力推动了区域产业结构的优化升级,为地方经济可持续发展注入了新动力。

4.2 资源与环境效益

通过优化调度策略,调水与抽蓄结合工程在水资源利用方面取得了显著成效。传统调水工程中,渠道输水损失率较高,达到12%,而新模式通过精准控制输水时间和流量,将输水损失率降至6%,相当于每年节水1.8亿 m^3 ,有效缓解了水资源短缺压力。以一个具体工程为例,采用“夜间输水+白天发电”模式后,充分利用了夜间电网负荷低谷期的富余电力进行抽水,将水提升至高位水库储存,白天高峰期放水发电,同时满足部分调水需求。这种模式使水能转化效率提高至78%,较传统方式提升15个百分点,实现了水资源与能源的高效协同利用。抽水蓄能电站作为清洁能源的调节器,在碳减排方面发挥着重要作用。每年通过替代火电调峰电量24亿 kWh ,相当于减少标准煤消耗72万吨。煤炭燃烧是二氧化碳排放的主要来源之一,减少标准煤消耗意味着大幅降低二氧化碳排放,经计算可减排二氧化碳180万吨。调水与抽蓄结合工程在建设 and 运行过程中,注重生态环境保护与修复,取得了良好的生态效益。工程形成的上水库,通过合理规划和水质维护,逐渐成为区域性生态湿地。丰富的水资源和适宜的生态环境吸引了鸟类200余种,成为鸟类栖息和繁衍的重要场所。同时,周边植被覆盖率提高40%,形成了绿色的生态屏障。以一个具体工程为例,通过科学调度水库水位和下泄流量,使下游河道枯水期流量增加30%,改善了河道生态环境,为鱼类等水生生物提供了更适宜的生存空间,鱼类种群数量恢复至工程前的2.5倍,有效维护了区域生态平衡。

4.3 社会与安全效益

调水工程与抽水蓄能电站的联合运行,极大地提升了城市供水保障能力。传统调水工程受多种因素影响,供水保证率相对较低,而结合抽蓄电站后,通过优化调度和协同运行,城市供水保证率从92%提升至99%。在2024年某流域遭遇严重干旱期间,工程充分发挥其调节功能,通过紧急调水1.5亿 m^3 ,及时补充了城市供水水源,保障了300万人口的用水安全。这一案例充分体现了

“水-能”联合工程在应对极端气候和保障民生用水方面的重要作用,为城市可持续发展提供了坚实的水资源支撑^[4]。抽水蓄能电站的库容调节功能在防洪减灾中发挥了关键作用,通过合理规划水库库容和调度运用,区域防洪标准从20年一遇提升至50年一遇。这一成果得益于工程前期科学的设计规划和运行期间精准的调度指挥,为区域防洪安全提供可靠保障,提升了社会应对自然灾害的能力。调水与抽蓄结合工程配备了先进的移动式储能装置和智能调度系统,显著提升了应急响应能力。在突发事故导致供水中断的情况下,工程能够迅速启动应急模式,利用移动式储能装置为关键设备供电,保障调度系统的正常运行。通过智能调度系统,能够快速调整供水方案,使供水恢复时间从传统的72小时缩短至6小时。在某地震灾区,工程通过启动应急模式,在3天内恢复了80%的供水能力,及时满足了受灾群众的基本生活需求,为灾后救援和重建工作提供有力支持,展现了工程在应对突发事件中的强大应急保障能力。

结束语

抽水蓄能电站与引调水工程结合,在功能耦合、系统协同上展现巨大潜力。通过创新结合模式、突破关键技术,实现了经济、资源环境、社会安全等多维度效益提升。这种“水-能”联合开发模式,为解决能源与水资源问题提供了新途径,对推动相关领域可持续发展意义重大,值得进一步探索与推广应用。

参考文献

- [1]于广跃,何书琴.抽水蓄能电站工程管理信息系统的构建与应用[J].通信电源技术,2024,35(08):91-92.
- [2]何平.抽水蓄能电站基建管理信息系统的设计与实施[J].水电与抽水蓄能,2024,4(03):36-42.
- [3]林燕珍,李华.抽水蓄能电站工程档案管理及档案数字化[J].福建水力发电,2024,(01):73-75.
- [4]柏睿,韩冬,金伟,等.混合式抽水蓄能电站建设运行关键问题研究[J].人民长江,2024,55(11):46-56.