

生态友好型水电站设计关键技术研究

姚浩宇

广西壮族自治区河池水利电力勘测设计研究院 广西南宁 547000

摘要：随着可持续发展理念的深化，生态友好型水电站设计成为水电开发的重要方向。本研究以实现水电开发与生态保护协同发展为目标，提出最小生态破坏、维持生态平衡、促进生态恢复三大设计基本原则，从源头上减少工程建设对生态环境的负面影响。同时，深入探讨水电站选址、水工建筑物设计、生态流量保障等关键技术。选址阶段综合评估生态、地质等多因素；水工建筑采用低影响坝型与地下厂房设计；生态流量通过多方法计算与智能调控保障。这些技术的应用，有效降低水电站建设与运行对生态系统的扰动，为生态友好型水电站的科学设计与建设提供理论支撑与实践指导。

关键词：生态友好型；水电站设计；关键技术

引言

水电作为清洁可再生能源，在能源结构中占据重要地位，但传统水电站建设常伴随生态扰动。随着生态保护意识增强，如何实现水电开发与生态环境的协调共生成为关键课题。本文聚焦生态友好型水电站设计，系统探讨选址、水工建筑、生态流量保障等关键技术，旨在为减少工程生态影响、推动水电行业可持续发展提供技术路径与理论参考。

一、生态友好型水电站设计的基本原则

（一）最小生态破坏原则

在水电站设计的全生命周期内，最小生态破坏原则如同贯穿工程的生命线，需从规划、建设到运营的每个环节精准落实。在选址阶段，需综合运用地理信息系统（GIS）、遥感影像（RS）和生态调查等技术手段，构建多维度生态评估体系。通过分析区域生态敏感性，绘制生态红线图，明确自然保护区、珍稀濒危物种栖息地、国际重要湿地等生态敏感区域，确保坝址、厂房及输水线路等关键设施与这些区域保持安全距离。例如，在某西南山区水电站选址时，通过GIS叠加分析发现原规划方案将穿越一处滇金丝猴核心栖息地，设计团队及时调整线路，绕行12公里避开该区域，有效避免了对珍稀物种生存环境的破坏。

进入工程建设阶段，先进施工技术的应用成为降低生态扰动的关键。在土石方开挖环节，采用定向爆破、微差爆破等精细化爆破技术，通过控制炸药用量、起爆顺序和延期时间，将爆破振动速度控制在 3cm/s 以内，减

少对周边山体稳定性和植被根系的破坏^[1]。例如，某峡谷型水电站在坝肩开挖时，利用电子雷管微差爆破技术，使岩石破碎块度均匀，避免了大面积抛洒对周边植被的冲击，同时减少了二次破碎产生的粉尘污染。在基础施工中，推广旋挖钻孔灌注桩、静压桩等低扰动成桩工艺，替代传统冲击钻成孔方式，降低泥浆排放对河道水质的影响。施工场地规划同样体现着最小生态破坏理念。通过BIM技术进行三维场地模拟，科学规划施工便道、材料堆场、弃渣场等临时设施布局。优先利用现有道路、荒地和劣质地设置施工场地，采用装配式活动板房、可拆卸钢栈桥等临时设施，减少永久占地。例如，某水电站在施工期间，将混凝土搅拌站设置在已废弃的矿区内，通过改造原有场地，既满足了施工需求，又避免了占用周边林地。同时，对弃渣场采取“先挡后弃、分层压实、覆土绿化”的生态防护措施，同步实施截排水工程，防止弃渣流失造成水土流失，最大限度降低施工活动对生态环境的负面影响。

（二）维持生态平衡原则

维持河流生态系统平衡是生态友好型水电站设计的核心目标，需从水文、水质、水生态等多维度构建系统性解决方案。在生态流量保障方面，摒弃传统经验取值法，转而采用生物完整性指数（IBI）、栖息地模拟模型（PHABSIM）等先进技术，结合鱼类产卵繁殖、底栖生物生长等关键生态过程需求，精准计算不同季节、不同河段的生态流量阈值。例如，长江中游某水电站通过构建鱼类栖息地动态模型，识别出四大家鱼产卵繁殖期的关键生态流量需达到日均 $800\text{m}^3/\text{s}$ ，据此在坝体设置生态

流量泄放专用通道，并配备超声波流量计与远程控制系统，确保生态流量下泄误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。

水温调控是维持生态平衡的关键环节。针对水库蓄水导致的水温分层问题，创新采用智能型叠梁门分层取水系统，通过实时监测库区水温剖面数据，动态调整取水口高程。如金沙江某水电站设置的24层叠梁门，可根据下游鱼类繁殖对水温的需求，精准提取表层20~24℃的适宜水温，有效避免了传统深层取水导致的低温水对下游鱼类性腺发育的抑制作用。另外，通过数值模拟技术优化取水口流态，减少水流紊动对浮游生物群落的扰动，维持水体生态结构稳定。水质保障体系需贯穿水电站全生命周期。在施工期，建立三级沉淀-超滤膜处理系统，对混凝土养护废水、机械冲洗废水进行处理，确保重金属、悬浮物等指标达到《污水综合排放标准》一级A标准。运营阶段，引入在线生物毒性监测仪，实时预警水体中突发性污染物。例如，澜沧江某水电站在库区设置的生物毒性预警系统，可在15分钟内检测出氰化物、重金属等剧毒物质，联动启动应急处理程序。同时，通过生态调度增加水库下泄流量，提升河道自净能力，维持水体溶解氧含量不低于5mg/L，保障水生生物呼吸需求。

（三）促进生态恢复原则

面对水电站建设过程中不可避免的生态扰动，系统性生态恢复工程需贯穿“预防-修复-监测全链条”。在施工迹地生态修复方面，采用“土壤重构+植被重建”双轮驱动模式。针对开挖形成的裸露边坡，创新应用三维土工网垫结合客土喷播技术，通过在坡面铺设高强度聚丙烯网垫，注入由腐殖土、保水剂、纤维黏结剂和本地草种组成的混合基质，形成稳固的植被生长层。例如，金沙江某水电站通过该技术对23万 m^2 高陡边坡进行修复，3个月内植被覆盖率达到75%，有效控制了水土流失。对于施工废弃地，采用微生物菌剂改良技术，通过添加解磷菌、固氮菌等功能菌群，加速土壤中重金属固化和有机质分解，为植被恢复创造良好立地条件^[2]。

水生生物恢复工程则需构建“生境修复+种群重建”复合体系。在栖息地修复方面，针对水库蓄水导致的河道形态改变，开展人工鱼礁建设与浅滩湿地恢复。如长江中游某水电站，通过投放混凝土鱼礁模块2.3万组，构建总面积达8.6万 m^2 的立体栖息空间，为鱼类提供索饵、繁殖场所；同时，在库区支流恢复季节性淹没湿地，通过设置生态闸控系统，模拟自然水文节律，促进沉水植物群落的重建。在种群重建方面，采用“精准增殖放流+遗传多样性保护”策略，建立鱼类种质资源库，运用

微卫星标记技术筛选遗传背景清晰的亲本，确保放流鱼苗与土著种群的基因兼容性。某澜沧江水电站通过连续5年放流澜沧江裂腹鱼、长丝鲈等珍稀鱼类320万尾，并配套实施生态调度，使下游河段目标鱼类资源量回升41%，有效促进了水生生态系统的结构恢复与功能重建。

二、生态友好型水电站设计关键技术

（一）水电站选址技术

水电站选址技术是生态友好型水电站建设的首要环节，需综合运用地理信息系统（GIS）、遥感（RS）、全球定位系统（GPS）等空间信息技术，结合现场勘察与大数据分析，构建多维度、立体化的评估体系。在生态环境评估方面，通过高分辨率遥感影像解译，可识别植被覆盖类型、湿地分布、水系网络等生态要素，结合GIS空间分析功能，叠加生态保护红线、生物多样性热点区域等数据，建立生态敏感性评价模型^[3]。该模型采用层次分析法（AHP）确定各生态因子权重，从生物多样性、生态系统服务功能、景观连通性等维度，将区域划分为高、中、低生态敏感区，为选址提供直观的生态风险图谱。例如，在青藏高原某流域水电站选址时，通过该模型发现原规划坝址位于藏羚羊迁徙通道与湿地生态廊道交汇处，属于高生态敏感区，最终调整方案绕行20公里，避免了对珍稀物种栖息地的破坏。

地质条件评估是选址的关键支撑。借助地质雷达、钻探取样、地震波探测等技术，对潜在坝址区域进行详细勘察，分析地层岩性、地质构造、地震活动带分布等信息。利用三维地质建模技术，直观呈现地下地质结构，评估山体稳定性、渗漏风险等工程地质问题。例如，在西南某山区水电站选址中，通过地质雷达探测发现原坝址下游存在隐伏断层，经重新选址并结合数值模拟分析，最终确定了地质条件稳定的新坝址，有效降低了溃坝风险。

（二）水工建筑物设计技术

水工建筑物设计技术是生态友好型水电站实现生态保护与能源开发协调的关键，其核心在于通过创新结构设计与技术应用，将工程建设对生态系统的扰动降至最低。在坝型选择与设计环节，低坝、橡胶坝、翻板坝等新型坝体凭借可调节性与低生态影响的优势，成为生态友好型建设的首选。以橡胶坝为例，其充水时可蓄水发电，放空后能恢复河道自然状态，显著降低对鱼类洄游、泥沙输移的阻隔。如某山区河流采用充水式橡胶坝，坝高仅8米，较传统高坝减少淹没面积达70%，同时利用坝体表面的生态凹槽设计，为底栖生物提供附着空间，维持河流生物链稳定。此外，新型生态混凝土坝体通过

孔隙结构促进水体交换，表面粗糙纹理为鱼类提供产卵基质，实现工程结构与生态功能的有机融合。

引水系统设计强调对河流自然水文的最小干预。深埋式引水隧洞或管道技术可有效减少地表开挖，降低对植被与土地资源的占用。在施工中，采用TBM（全断面隧道掘进机）等先进设备，配合激光导向系统，实现高精度掘进，减少超挖与塌方风险^[4]。例如，某大型水电站引水隧洞全长15公里，埋深达300米，通过TBM施工将地表生态扰动范围缩小至传统明挖法的1/5。同时，引水系统集成智能生态流量调控装置，利用超声波流量计与PLC控制系统，根据下游生态需求实时调整泄流量。当监测到鱼类产卵期，系统自动开启生态旁通管，确保河道维持适宜的水流条件，保障水生生物繁衍。厂房设计突破传统工业建筑模式，向生态化、地下化方向发展。地下厂房或半地下厂房通过将主体结构埋入山体，仅保留必要的通风口与设备通道，极大减少对地表景观的破坏。如某抽水蓄能电站采用地下厂房设计，地面仅设置景观化通风竖井，与周边山林环境浑然一体。在内部布局优化方面，运用BIM（建筑信息模型）技术进行三维空间模拟，合理规划水轮机、发电机等设备位置，缩短水流路径，降低水头损失，将发电效率提升3%~5%。

（三）生态流量保障技术

生态流量保障技术是维持河流生态系统健康的核心技术，其实施需构建“精准计算-稳定泄放-智能调控”三位一体的技术体系。在生态流量计算环节，单一方法已难以满足复杂生态需求，常采用多方法耦合的精细化评估模式。例如，在长江中游某水电站设计中，首先运用Tennant法初步划定生态流量范围，再结合PHABSIM（物理栖息地模拟模型）分析不同流量条件下四大家鱼产卵场的适宜性，同时引入Instream Flow Incremental Methodology（IFIM）模型，通过鱼类生物量与流量关系的历史数据，建立动态流量计算模型。最终确定的生态流量方案不仅满足河流基本生态需求，还精准匹配了鱼类繁殖、索饵等关键生态过程，使计算结果的生态适配度提升40%以上^[5]。

生态流量泄放设施的设计与建设体现工程技术创新。传统底孔、表孔泄流方式正逐步升级为智能可控的复合型设施。例如，金沙江某水电站采用“分层生态泄流孔+智能调节堰”组合方案，分层泄流孔可根据下游水温需求选择不同高程取水，避免低温水下泄；智能调节堰通过液压驱动系统，可在0.5~30m³/s范围内实现流

量无级调节，调节精度达±0.2m³/s。此外，新型生态放水管采用仿生学设计，内部设置螺旋导流叶片与消能装置，使泄流水流形态更接近自然河道，减少对下游河床的冲刷。某山区小型水电站应用该技术后，下游河道底栖生物群落结构完整性指数提升28%，有效保护了河流生态基底。自动化监测与调控系统是生态流量保障的“神经中枢”。依托物联网（IoT）、大数据分析与人工智能技术，构建全域感知的智能监控网络。在澜沧江某流域，部署了由32个监测断面组成的实时监测系统，每个断面集成超声波流量计、水质传感器、水温探头等设备，数据采集频率达1次/分钟。当监测数据触发生态流量阈值时，系统自动启动三级响应机制：首先通过优化发电调度曲线，在保证基本供电的前提下优先泄放生态流量；若仍不达标，则联动开启备用泄流通道；极端情况下，触发水电站减负荷运行指令。

结语

生态友好型水电站设计通过最小生态破坏、维持生态平衡与促进生态恢复三大原则，以及选址、水工建筑、生态流量保障等关键技术的协同应用，有效缓解了水电开发与生态保护的矛盾。这些技术的创新实践，不仅降低了工程建设对生态系统的扰动，更推动了水电行业向绿色可持续方向转型。未来，随着生态保护要求的不断提高，需进一步深化多学科融合，探索智能化、精细化设计方案，完善技术标准与评估体系，助力生态友好型水电站建设迈向更高水平。

参考文献

- [1] 黄健平. 水电站建设与运行中的生态环境保护技术探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (28): 103-105.
- [2] 方子帆, 舒承宇, 黄瑞鸿, 赵爽, 侯春尧, 董元发. 水电站生态调度智能操作门机体系架构及实现[J]. 机械工程学报, 2024, 60(21): 320-335.
- [3] 高菲, 段光福, 蔡贵珍, 崔学品, 范筱林. 西藏扎拉水电站开发对陆生生态影响研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(08): 96-102.
- [4] 余丽娟. 小型水电站生态流量监测问题及系统构建策略[J]. 地下水, 2024, 46(04): 266-267+307.
- [5] 马彪, 欧传奇, 郑明珂, 叶敏敏. 生态友好型旋涡水电站旋涡特性研究[J]. 中国水利, 2018, (08): 49-53.