

水利工程设计与生态环境保护

葛彩莲

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：水利工程作为国家基础设施建设的核心领域，其设计理念与实施效果直接影响区域生态系统的稳定性与可持续性。而传统设计模式以工程安全与功能实现为主导，常忽视对水陆生态系统的完整性保护。因此，本文系统探讨水利工程设计中融入生态环境保护理念的路径，提出从生态修复材料应用、仿自然结构布局、生物多样性保护空间预留三方面重构设计范式，以实现水利功能提升与生态系统保护的协同增效，为构建人与自然和谐共生的现代化水网提供理论支撑与实践参考。

关键词：水利工程；设计；生态环境保护

引言

传统设计模式以“刚性结构”为主导，通过混凝土硬化、河道裁弯取直等手段实现工程目标，却割裂了水陆生态系统的物质循环与能量流动，导致水体自净能力弱化、生物迁徙通道阻断等连锁反应。随着生态文明建设的深入推进，水利工程设计正从“单一功能导向”向“生态-经济-社会复合效益导向”转型。

1 水利工程设计

1.1 设计过程

设计过程是水利工程实现安全、经济与生态目标的核心环节，需以系统性思维贯穿全周期技术管理。（1）初始阶段需严格遵循国家水利技术标准与行业规范，以流域为单元开展水文特性综合分析。通过整合气象站、水文站长期观测数据，构建降水-径流-洪水耦合模型，重点模拟不同重现期下暴雨洪水过程及产汇流机制，量化分析洪峰流量、洪水总量及历时等关键参数，结合历史灾害记录与未来气候变化预测，为工程等别确定与防洪标准选择提供量化支撑。（2）同步推进的地质勘察工作需采用工程地质测绘、物探、钻探及原位测试等综合手段^[1]。查明工程区地层岩性、地质构造及不良地质现象分布，重点评估地基承载力是否满足建筑物抗滑、抗倾稳定要求。通过渗透试验确定岩土体渗透系数，分析库区渗漏通道与坝基扬压力分布规律，结合区域地震动参数区划图，复核地震设防烈度与场地类别，对存在活动断层或软弱夹层的区域，需开展地震动力响应分析，确保建筑物在极端工况下的抗震安全性。（3）在完成基础数据收集后，设计团队需运用水力学、岩土力学及结构力学理论，开展多方案比选优化，针对不同坝型（重力坝、拱坝、土石坝）开展应力应变数值模拟，结合施工条件与材料供应，确定经济合理的断面形式与结构尺

寸。（4）设计成果需通过三维建模与碰撞检测技术进行可视化验证，重点检查建筑物与地质条件、生态空间的协调性。对穿越生态敏感区的工程，需采用地下洞室或低影响路基形式减少地表扰动，同时制定施工期环境监测计划，明确水质、噪声、振动等污染因子的控制阈值，确保设计意图在工程实施阶段得到有效落实。

1.2 工程布局设计

（1）主体工程的位置选择需深度融合地形地质条件与功能需求，水库大坝的选址应优先选择地质构造稳定、河谷狭窄且两岸基岩完整的峡谷段。此类区域可有效减少坝体填筑量与基础处理难度，并利用天然地形形成较大库容。（2）堤防工程的走向需严格遵循天然河势的弯曲形态，避免直线化布置破坏河流横向展宽空间，导致水流集中冲刷岸坡。对于弯曲段，需通过丁坝、顺坝等导流建筑物优化水流条件，降低局部淘刷风险。（3）水闸工程的选址需紧密结合区域水资源配置需求，靠近取水口或排水通道布置，缩短引水距离的同时减少水头损失。对灌溉闸需考虑与渠系网络的衔接，确保水流能高效输送至田间，对排涝闸则需结合洼地分布与排水路径，提升内涝水外排效率。（4）跨流域调水工程还需协调输水线路与受水区生态需水的关系，通过动态调度模型优化水量分配，防止因过度引水导致调出区河流断流或受水区土壤次生盐渍化。

1.3 结构设计

（1）针对不同工程规模和地质条件，混凝土重力坝凭借其结构简单、适应性强、施工导流便利等优势，常用于中低山峡谷地形。拱坝通过拱结构将荷载传递至两岸山体，可显著减少坝体混凝土用量，适用于河谷狭窄、岩体坚硬的区域。土石坝则因就地取材便利、对地形适应性强，成为平原或丘陵地区水库工程的首选。

(2) 坝型确定后,需通过有限元数值模拟技术。建立包含坝体、地基及库水的三维计算模型,系统分析正常蓄水、设计洪水、校核洪水等工况下的静水压力分布,结合地震动输入模拟动水冲击与惯性力作用,量化评估结构应力应变状态,重点校核坝踵、坝肩及基础接触面的抗剪稳定性,对高拱坝还需开展非线性断裂力学分析,预防裂缝扩展引发的结构失稳风险。(3) 配筋设计需根据混凝土开裂风险评估结果确定,对重力坝上游面受拉区、拱坝坝肩应力集中区等关键部位,采用双层双向配筋增强抗裂性能,钢筋直径与间距需通过裂缝宽度计算验证。(4) 材料选择直接影响结构耐久性,高坝工程应优先采用低热水泥并掺入粉煤灰、矿渣等活性掺合料,降低水化热温升,并布置冷却水管进行分期通水冷却,防止温度裂缝产生^[2]。土石坝防渗体需选用级配良好的黏性土或土工膜,反滤层材料应满足滤土不透水的原则,避免渗透变形引发管涌险情。

2 水利工程生态环境保护措施

2.1 设计阶段的生态环境保护

(1) 在护岸工程设计中,应摒弃传统硬质化结构,优先采用透水性强的生态材料与仿自然工艺,如多孔隙生态混凝土可通过其内部连通孔隙为微生物附着提供载体,促进硝化、反硝化等水体净化过程。而石笼网箱则通过填充块石形成柔性结构,既能适应河岸变形防止冲刷,又为水生生物提供栖息场所。其孔隙率可达30%以上,有利于水体交换与物质循环。(2) 鱼道设计需以目标物种的生物学特性为核心,通过水力学模型模拟自然河流的流速分布,设置不同坡度的梯级段与休息池,确保洄游鱼类在能量消耗与体力恢复间达到平衡。对于溯河产卵的珍稀鱼类,还需在关键位置增设诱鱼设施^[3]。如利用水流声、光影变化或信息素引导鱼类进入鱼道;跨流域调水工程应建立动态生态补水机制,根据受水区河流生态需水规律,制定分时段、分流量的补水方案,通过设置生态流量泄放闸或旁通管,确保最小生态基流满足鱼类繁殖、水生植物生长及湿地维持需求,避免因河道断流引发区域性生态崩溃。(3) 设计阶段需系统规划生态补偿空间,针对水库淹没导致的陆生生物栖息地丧失,应在淹没区周边划定植被恢复带,选择乡土树种进行乔灌草混交种植,构建多层次植被结构,为鸟类、小型哺乳动物提供食物来源与隐蔽场所。对施工占用的临时用地,需制定表土剥离与复垦方案,保存优质耕作层土壤,施工结束后及时恢复为农田或林地,最大限度减少工程建设对区域生物多样性的长期影响。

2.2 施工期的生态环境保护

施工期的生态环境保护是水利工程实现绿色建设的重要环节,需构建覆盖施工全周期的环境管控体系,从污染防控、生态修复到资源循环利用形成闭环管理。

(1) 施工废水处理应采用分级沉淀与生物过滤组合工艺,通过初沉池去除大颗粒悬浮物,再经曝气生物滤池降解有机物,最后用活性炭吸附重金属离子,确保出水悬浮物浓度低于50mg/L、石油类低于5mg/L。处理后的中水优先用于混凝土养护、车辆冲洗及场地降尘,实现水资源循环利用率超80%。(2) 扬尘控制需建立“覆盖-洒水-冲洗”三位一体防控机制,对裸露土方、砂石料堆场采用密目防尘网全覆盖,配备智能喷雾系统根据空气湿度自动调节喷淋频次。并且,在施工出入口设置车辆自动冲洗平台,确保轮胎及底盘无泥土带出^[4]。(3) 噪声管理需从设备选型与空间布局双重管控,优先选用低噪声振动筛、静音发电机等设备。对高噪声的破碎机、挖掘机等作业区设置3米高双层隔音屏障,并通过合理安排施工时段(避免夜间22:00至次日6:00进行高噪声作业),使厂界噪声满足相关要求。(4) 固体废弃物处理需实施“分类-减量-资源化”策略,将建筑垃圾分为混凝土块、钢筋、木料等类别,混凝土块经破碎筛分后制成再生骨料用于临时道路铺设,钢筋回收加工后重新利用,木料用于制作临时支护模板,生活垃圾则委托具备资质的机构进行无害化处理。

2.3 运营期的生态环境保护

(1) 水质监测网络应覆盖水库全域及干支流关键断面,通过部署多参数水质传感器实现pH值、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮等指标的实时采集与无线传输。结合机器学习算法对历史数据与实时监测值进行关联分析,建立富营养化预警模型,当总磷浓度连续3日超过0.02mg/L或藻类生物量突破10mg/L阈值时,自动触发生态调度预案。(2) 生态流量调控需建立闸坝群协同控制平台,集成气象预报、水文模型与生态需求数据,根据季节性水位变化和鱼类繁殖周期动态优化下泄方案。在干旱季节采用“小流量长时段”模式维持河道基本生态功能,在鱼类繁殖期实施“大流量短脉冲”放水,通过模拟自然洪水过程冲刷产卵床并激发鱼类性腺发育。(3) 水土保持管理需建立库周植被健康档案,通过无人机激光雷达扫描与高光谱成像技术,每季度评估植被覆盖度、物种多样性及病虫害情况。对退化区域采用“客土喷播+植被毯覆盖”技术快速恢复植被,优先选用芦苇、香蒲等本土湿生植物构建滨水缓冲带,并利用其根系固土能力减少径流冲刷,同步在入库支流建设人工湿地。通过砾石层过滤、水生植物吸收及微生物降解三级处理系统,

有效削减农业面源污染中的氮磷负荷,降低入库水体富营养化风险。(4)运营期需开展长期生态跟踪研究,应用环境DNA技术对水体样本进行宏条形码分析,精准识别鱼类种群组成与优势物种变化。此外,利用多时相卫星遥感影像解译土地利用变化,通过归一化植被指数(NDVI)动态监测植被恢复成效,对生态修复效果未达预期的区域及时调整管理策略,形成“数据驱动决策、科技赋能保护”的现代化生态运营模式,确保水利工程在发挥防洪、供水、发电等综合效益的同时,持续维护区域生态系统稳定与生物多样性保护目标。

2.4 技术创新

(1)技术创新是推动水利工程生态保护从被动治理向主动修复跨越的核心驱动力,其通过跨领域技术融合与系统性解决方案重构,为破解传统工程生态矛盾提供了新路径。其中,智慧水利平台作为集成化创新载体,依托物联网技术构建覆盖全流域的传感器网络,实时采集水质、水量、气象及生物活动数据,结合云计算强大的数据存贮与处理能力,实现海量信息的秒级响应与动态分析^[5]。而人工智能算法则通过机器学习模型对历史数据与实时监测值进行深度挖掘,不仅能精准预测藻类爆发、重金属污染等生态风险,还可基于多目标优化算法生成生态调度方案,自动平衡防洪、供水、发电与生态用水需求,使工程运行从经验驱动转向数据驱动。(2)材料科学领域的突破为生态友好型工程提供了物质基础,生物基混凝土以植物纤维、工业废渣为原料,通过微生物矿化技术形成具有生物活性的多孔结构,其碳足迹较传统混凝土降低40%以上,同时为水生植物提供附着基质,促进人工边坡向自然生态系统演替。可降解地膜采用淀粉基或聚乳酸材料,在完成土壤保温、保湿功能后,可在6-12个月内完全分解为二氧化碳和水,从源头消除农业面源污染中的塑料残留问题,实现农业生产与生态保护的协同增效。(3)基于自然的解决方案(NbS)通过模仿自然生态系统机理,以低成本实现高效率生态修复。人工浮岛利用水生植物根系吸收作用与微生物降

解功能,构建移动式水体净化单元,其单位面积氮磷去除效率是传统处理工艺的2-3倍。生态沟渠通过优化断面形态与植被配置,形成“沉淀-过滤-吸附-生物降解”复合净化系统,在拦截农田径流中90%以上悬浮物的同时,为青蛙、蜻蜓等两栖动物提供栖息场所,重建退化的农田-水系生态廊道。这些技术创新通过学科交叉融合与技术迭代升级,推动水利工程功能定位从单一防洪抗旱向“生态安全保障、水资源高效利用、生物多样性维护、碳汇功能提升”复合效益体系转型,为构建“河湖连通、水清岸绿、鱼翔浅底”的现代化水网提供全链条技术支撑。

结语

综上所述,水利工程设计与生态环境保护的深度融合,是应对全球气候变化与生物多样性丧失挑战的必然选择。未来,研究需进一步结合数字孪生技术,构建动态生态风险评估模型,实现设计方案的精准优化与实时调整。唯有将生态保护理念内化为水利工程设计的基因,才能推动行业从“工程治水”向“生态治水”跨越,为全球可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]陈功,丁冬,钱玉超,等.水利工程运行管理与生态环境保护的协调[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(25):216-219.
- [2]朱贲贤,施雷杰.生态水利设计理念在水利工程设计中的应用[C].广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流论文集.宁波市水利水电规划设计研究院有限公司,2025:260-263.
- [3]周明旭.水利工程绿色施工技术与生态环境保护[J].人民黄河,2024,46(S1):60-61+63.
- [4]郭秀成.水利建设对生态环境的影响及对策探讨[J].黑龙江环境通报,2024,37(06):126-128.
- [5]马敏.水利工程设计过程中的生态理念应用[J].石材,2024,(06):36-38.