

流域综合治理视角下水利工程规划设计优化研究

陈柱平

峨山县水利局, 云南 峨山 653200

DOI:10.61369/WCEST.2026010017

摘 要 : 在生态文明建设战略引导下, 流域综合治理为水利工程规划设计提供了系统性、整体性的全新框架。传统规划偏重单一工程目标, 易与流域生态保护、社会协调产生脱节。本研究立足于流域综合治理视角, 旨在系统探索水利工程规划设计的优化理论与方法。通过辨析二者内在关联, 揭示传统设计在目标协同、生态融合及适应性方面的局限, 进而从多目标权衡、生态水文耦合设计、适应性管理机制嵌入等核心维度提出优化路径。研究强调水利工程设计需从“工程中心”转向“流域系统中心”, 强化基于自然的解决方案, 以提升工程对流域水安全、生态完整性与社会可持续发展的综合贡献, 为推进新时代水利高质量发展提供科学参考。

关 键 词 : 流域综合治理; 水利工程; 规划设计

Research on Optimization of Water Conservancy Engineering Planning and Design from the Perspective of Comprehensive Watershed Management

Chen Zhuping

Eshan County Water Resources Bureau, Eshan, Yunnan 653200

Abstract : Under the guidance of the ecological civilization construction strategy, comprehensive watershed management provides a systematic and holistic new framework for the planning and design of water conservancy projects. Traditional planning tends to focus on a single engineering objective, which can easily lead to a disconnect with watershed ecological protection and social coordination. This study is based on the perspective of comprehensive watershed management, aiming to systematically explore the optimization theory and methods of water conservancy engineering planning and design. By analyzing the intrinsic relationship between the two, the limitations of traditional design in terms of goal coordination, ecological integration, and adaptability are revealed, and optimization paths are proposed from core dimensions such as multi-objective trade-offs, ecological hydrological coupling design, and embedded adaptive management mechanisms. The study emphasizes the need for water conservancy engineering design to shift from the "engineering center" to the "watershed system center", strengthen nature based solutions, and enhance the comprehensive contribution of engineering to watershed water security, ecological integrity, and social sustainable development, providing scientific references for promoting high-quality development of water conservancy in the new era.

Keywords : comprehensive watershed management; water conservancy engineering; planning and design

引言

流域是以水循环为纽带, 自然与社会经济要素紧密关联的复合系统。流域综合治理强调以系统思维统筹保护与发展, 这对作为关键调控手段的水利工程提出了更高要求^[1]。传统规划设计往往聚焦局部与单一功能, 对流域尺度的影响考量不足, 可能导致生态割裂等负外部性。当前, 在生态文明理念与可持续发展目标驱动下, 水利工程的定位亟需从“控制利用”向“系统和谐”演进。因此, 深入探究流域综合治理视角下水利工程规划设计的优化路径, 推动其与流域整体健康目标深度融合, 具有重要的理论价值与实践紧迫性, 是实现人水和谐、保障流域永续发展的关键课题。

一、流域综合治理与水利工程规划设计的理论关联

（一）流域综合治理的核心内涵对水利工程的统摄性要求

流域综合治理的核心在于其整体观、系统观与协同观，它将流域视为一个由水文、生态、社会经济要素构成的有机生命共同体，强调任何局部的干预都必须置于流域整体动态平衡中考量。这种理念对水利工程规划设计产生了根本性的统摄性要求^[2]。它要求彻底改变传统的“点状思维”，将工程视为流域复杂网络中的一个关键节点，其规划设计的首要目标不再是追求局部或单一功能的最大化，而是实现与流域整体功能优化相协调。在目标设定上，必须构建一个涵盖水安全、水资源、水生态、水环境及水文化价值的复合指标体系，并建立科学的多目标权衡决策机制。在空间维度，规划视野必须从工程选址本身拓展到整个流域系统，系统评估工程对上下游水文连通性、泥沙输移、生物迁徙廊道以及地下水补排关系的连锁影响。在时间维度，则要求超越基于历史水文序列的静态设计，充分考虑气候变化与社会经济发展带来的长期不确定性，将适应性作为工程的内在属性。因此，流域综合治理理念实质上是为水利工程设定了一个更高的“生态位”，要求其在全生命周期内通过其对流域整体服务功能贡献度的系统性检验^[3]。

（二）水利工程在流域综合治理体系中的功能再定位

在流域综合治理体系中，水利工程的功能亟待实现从“工程工具”向“系统元件”的根本性再定位。这意味着水利工程不仅是服务于防洪、供水、发电等具体目标的独立设施，更应成为调节、修复和维护流域自然-社会水循环整体健康的有机组成部分。其设计目标需超越单纯的安全保障与资源获取，转向主动塑造有利于生态完整、环境优美、社会协调的流域系统状态。例如，水库的运行调度需在满足社会需求的同时，成为维系下游生态水文节律、保障生物多样性的关键调控手段；河道治理工程需从追求断面规整、水流顺畅的防洪工程，转变为恢复河流蜿蜒性、增强水体自净能力、提供栖息地功能的生态廊道修复工程^[4]。这种再定位要求水利工程深度融入流域生命共同体，成为促进人与自然和谐共生的能动性基础设施。

（三）传统规划设计范式与流域治理要求的差距辨析

传统水利工程规划设计范式与流域综合治理的系统性要求之间存在多维度差距。目标导向上，传统范式偏重单一或少数核心功能的技术经济最优化，未能将生态保护修复、环境质量改善等目标置于同等重要的战略地位进行系统权衡。空间关联上，设计视野多局限于工程直接影响范围，对工程引发的流域尺度水文连通性改变、生态过程阻隔、环境影响累积等系统性效应评估不足。时间维度上，基于历史稳定序列的静态设计难以适应气候变化与剧烈人类活动带来的高度不确定性，缺乏应对长期风险与变化的动态韧性^[5]。例如在云南峨山县山岳涉及的曲江、绿汁江、小河源河等主要支流上，若仅依据局部需求规划水利设施，忽视其对小流域整体水循环路径、水源涵养功能及下游生态需水的系统性影响，极易导致工程效益与流域整体健康目标的背离。这些差距凸显了从传统分割管理思维向流域系统治理思维转型的迫切性。

二、流域综合治理视角下水利工程规划设计的关键优化维度

（一）目标体系重构：从单一功能优先到多目标协同权衡

优化的核心起点是重构水利工程规划设计的目标体系，确立多目标协同权衡的决策框架。这一框架应明确将流域整体效益最大化作为根本准则，构建一个至少包含水资源高效利用、防洪安全提升、生态保护修复、环境质量改善、社会经济发展与文化遗产等多维度的多层次目标集。每个维度需进一步分解为可量化或可评估的具体指标，如生态维度可包括关键物种栖息地面积、河流连通性指数、自然流态维持度等。在规划设计过程中，需运用多目标决策分析、系统仿真优化等方法，对不同规划方案下的各目标实现程度进行模拟预测与综合评价。关键在于建立公开透明的权衡机制，通过成本效益分析、多准则分析等技术，揭示不同目标之间的竞争、协同或权衡关系，例如增加生态流量下泄可能减少发电量，但会提升下游生态系统健康水平。决策者与利益相关方需要在此清晰的信息基础上，通过协商达成可接受的帕累托最优或满意解方案。这要求改变以往“先定工程方案，后补环评”的流程，将多目标协同分析贯穿于规划选址、规模论证、工程布局、调度规则制定的每一个环节，确保最终方案是流域综合效益的载体，而非单一部门或单一功能利益的体现。

（二）生态水文深度融合：基于自然解决方案的工程设计

将生态水文过程深度融入工程设计的实体方案，是优化设计的精髓所在。这要求广泛采纳和创新基于自然解决方案或生态工程的设计理念与技术。在工程布局上，应优先考虑对流域自然地貌和河流网络干扰最小的方案，尽可能避让生态敏感区，并利用天然地形、湿地等自然要素辅助实现工程功能。在结构设计上，大力推广和应用生态型水利工程技术。例如，对于山区河道整治，可采用近自然修复技术，利用当地材料构建鱼巢、丁坝、潜坝，恢复河流的蜿蜒性与深潭-浅滩序列，为水生生物创造多样化的栖息地；对于护岸工程，摒弃硬质混凝土衬砌，采用根系发达的本土植物进行生态护坡，或结合石笼、生态袋等透水性材料，增强岸坡稳定性与生态功能；对于堰坝类工程，必须科学设计并切实建设有效的过鱼设施（如鱼道、升鱼机）、分层取水设施以保证适宜的下泄水温，以及保障生态基流和脉冲流量的泄放设施。在云南省多是高山丘陵山区，生态脆弱，小型水利设施更应强调“小微”、“分散”、“生态化”，水利工程不仅要“取水于河”，更要“还利于河”，主动维护和修复流域的生态水文过程。

（三）全周期适应性管理：嵌入动态反馈与调整机制

为应对流域系统固有的复杂性与未来不确定性，必须在水利工程规划设计的初始阶段就系统性嵌入全周期适应性管理框架。这一理念将水利工程视为一个可迭代升级的“生命体”，其核心在于构建一个完整的“监测-评估-调整”闭环管理蓝图。规划方案需预设覆盖水文、生态、环境及社会效益等关键指标的长期立体监测网络，并明确数据采集的标准与流程。基于持续获取的监测数据与动态更新的流域模型，建立定期的效果评估机制，用以精准对比工程实际运行影响与规划预期目标之间的偏差，识

别未预见的问题或新的系统响应。一旦偏差超出预设阈值，或外部条件如气候情景、政策法规发生重大变化，便应触发预设的管理响应程序。响应行动依据工程设计的弹性空间进行，其形式包括运行调度规则的精细化优化，例如实施更为灵活的生态调度方案，也涵盖在物理结构允许范围内的适应性改造，如优化生态流量泄放设施或改良过鱼通道。该机制的有效运行，从根本上依赖于跨部门协同的数据共享平台、明确的责权分配体系、持续的科研技术支撑以及制度化的决策流程保障。

三、优化路径与集成应用框架构建

（一）多尺度嵌套的协同规划技术路径

实现流域综合治理视角下的优化设计，必须建立“流域宏观战略—子流域系统模拟—工程点生态设计”多尺度嵌套、迭代反馈的协同规划技术路径。这一路径旨在确保微观的工程设计与宏观的流域战略意图保持内在一致。在流域尺度，需开展顶层诊断与战略规划，通过综合评估流域本底状况、关键生态问题、保护红线与发展需求，划定不同的功能区，从而为水利工程的总体布局、功能定位设定战略性约束与空间指引。在子流域或工程直接影响区尺度，则需进行精细化的系统模拟与多方案比选。运用分布式水文模型、水动力—水质耦合模型、生态系统服务评估模型等工具，定量模拟不同工程选址、规模、组合及运行方式对流域水循环、泥沙输移、水质与栖息地质量产生的综合影响，借助多目标优化算法寻求综合效益最佳的推荐方案集。在工程点设计尺度，依据上层尺度确定的优化方案，最终进行具体的生态水文深度融合设计，将生态流量保障、生物通道建设、自然岸线修复等要求，转化为精确的工程参数、结构型式与生态材料。三个尺度的工作必须构成一个自上而下指导与自下而上反馈的动态闭环，确保下级设计中发现的关键制约能及时反馈至上级战略进行重新校核，最终实现从宏观愿景到微观实体的贯通与协同。

（二）跨学科知识融合与智能技术赋能

面对流域复杂系统，优化设计亟需打破学科壁垒，推动水文学、生态学、环境科学、地理学、工程学、社会学、经济学等多学科的深度交叉融合^[6]。规划设计团队应由多学科背景的专业人员共同组成，从问题识别、方案生成到评估决策的全过程进行协作。例如，生态学家需要提前介入，识别关键生态过程与敏感目标，并为生态工程设计提供具体参数；社会学家需要评估工程的社会影响与社区参与机制。同时，大数据、人工智能、数字孪生

等智能技术为这种融合提供了强大赋能。利用遥感、物联网等手段，可以获取流域多源、海量、实时的监测数据，构建流域数字底板。基于此，可以开发流域数字孪生系统，在虚拟空间中针对不同工程规划设计方案进行高保真的模拟推演，直观展示其长期、动态、多维的影响，为多目标权衡决策提供沉浸式、可视化的支撑平台。机器学习算法可用于从历史数据中挖掘水文生态响应规律，优化调度策略。智能技术的应用，极大提升了处理复杂系统问题的能力、预测的精度以及公众参与和理解的可达性。

（三）制度化保障与多元共治机制建设

优化设计的理念与先进技术最终需要坚实的制度基础和有效的治理机制来保障其落地与长效运行。首要任务是推动法规、政策与技术标准的系统性修订与完善，将流域综合管理、多目标协同、生态保护修复、适应性管理等核心要求，转化为水利工程规划、审批、建设、运行全链条中的强制性或强激励性条款，建立以流域整体健康和长期综合效益为核心的新型项目评价体系。同时，必须构建贯穿始终的多元共治机制，这是化解利益冲突、凝聚社会共识、提升方案可持续性的关键。应建立常态化的流域协调议事平台，依法保障上下游、左右岸不同行政区域，水资源、生态环境、农业农村、能源、交通等相关行业管理部门，以及科研机构、社会组织、当地社区（如直接受影响的居民、农民）等多元主体的知情权、参与权与监督权。通过规划阶段的听证咨询、方案共商，实施阶段的社区监督，运行阶段的共同监测与评估，将地方性知识、公众诉求与科学规划有机结合。这种开放、透明、协作的治理模式，不仅能增强规划设计的科学性与社会可接受度，也为工程后期的适应性管理积累了宝贵的社会资本与监督力量，是实现流域善治和工程长效运行的基石。

四、结语

流域综合治理视角为水利工程规划设计特别是大中型水利工程规划设计的范式革新提供了趋向指引。本研究系统阐述了从单一目标到多目标协同、从结构设计到生态水文融合、从静态方案到动态适应的核心优化维度。通过构建多尺度规划、跨学科融合与制度化保障的集成路径，能够推动水利工程更好地服务于流域系统的整体健康与可持续发展。未来，应持续深化对流域复杂系统规律的认识，完善相关技术标准与协同治理机制，使水利工程真正成为促进人水和谐、支撑区域高质量发展的韧性基础设施，为美丽中国与生态文明建设奠定坚实的水利根基。

参考文献

- [1] 尚文星. 浅析河道治理工程措施及水利工程质量——以华亭市渭河流域水环境综合治理工程为例[J]. 水上安全, 2024(5): 16-18.
- [2] 曾庆刚. 水利工程中的泥沙运移与河道治理研究[J]. 辽宁青年, 2023(9): 0163-0165.
- [3] 张坤, 苏妍妹, 徐得水. 竹溪河流域综合规划中水环境治理研究[J]. 水利规划与设计, 2024(2): 68-71.
- [4] 童朝. 枳槽河流域综合治理设计方案分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(2): 136-138.
- [5] 王向栋, 张瑜, 王飞. 生态清洁小流域综合治理工程质量监督探析[J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(8): 3-4.
- [6] 贺元波, 刘社教. 某生态清洁小流域项目综合治理区措施设计[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(10): 5-6.