关于水工建筑设计中的水工结构专业设计探讨

任佳蔚
余姚江河水利建筑设计有限公司　浙江　宁波　315100

摘　要：水工结构专业设计是水利工程安全运行的基石，需综合荷载分析、材料适配、体型优化及抗渗防冲蚀等技术体系。本文聚焦其核心要素与关键技术应用，涵盖静动荷载识别、高耐久材料选配、流线型体型设计及智能监测防渗等维度，通过数值模拟验证、多目标优化算法及健康监测预警等技术手段，实现结构安全、功能可靠与全生命周期经济性的有机统一，助推水利工程绿色可持续发展。

关键词：水工结构设计；荷载分析；耐久性技术

引言：水工结构作为水利工程的基础骨架，其设计质量直接关系工程安全与功能实现。随着水利事业发展，对工程安全性、功能性的要求日益提高，尤其在复杂水文地质条件下，水工结构设计需全面适配自然环境、精准分析荷载特性、优化材料性能，并融合数值模拟、物理模型试验及智能监测等多维度技术实现精准设计，为工程长期稳定运行奠定坚实基础。

1 水工建筑设计中水工结构专业设计的重要性

水工结构专业设计是水工建筑设计的核心环节，直接决定工程的安全性、功能性与耐久性，其重要性体现在对自然环境与工程需求的精准适配上。设计需综合考量水文地质条件、荷载特性及材料性能，构建科学合理的结构体系，是工程安全的基础保障与功能实现的关键支撑。（1）在抗洪防灾方面：结构设计通过优化坝体、堤防的断面形态与材料配比，提升结构抗冲刷、抗渗透能力。例如，混凝土重力坝采用合理分缝与配筋设计，有效分散水压力与温度应力，防止裂缝产生；土石坝通过滤层设置与坡比控制，增强整体抗滑稳定性，避免管涌、塌陷等风险。同时，防渗墙、排水棱体等复合防渗排水系统的应用，可进一步降低渗流量，减少对结构本体的侵蚀风险。（2）在功能实现层面：结构设计需匹配工程具体用途。灌溉工程中，渠系建筑物的结构需适应水流特性，通过合理设置跌水、渡槽等结构，减少水流阻力与能量损失；水电站厂房结构则需兼顾设备安装需求与抗震要求，采用框架-剪力墙体系或空间网格结构，实现高效传力与空间利用。此外，结构设计还需关注长期耐久性，通过选用高性能混凝土、耐腐蚀钢材等材料，结合表面防护涂层与阴极保护技术，延缓结构老化进程。数字化设计工具的应用为结构优化提供了科学支撑，通过三维建模与有限元分析，可精准模拟结构受力状态，优化构件尺寸与配筋方案，减少材料浪费与施工难度[1]。同时，BIM技术实现了设计、施工、运维全生命周期的信息协同，提升了工程管理的效率与精度。水工结构专业设计通过科学设计与技术创新，推动水工建筑向更安全、更高效、更可持续的方向发展，为水利事业提供坚实支撑，是水利工程建设不可或缺的核心环节。

2 水工建筑设计中水工结构专业设计的核心要素

2.1 水工结构荷载与受力分析设计

水工结构荷载与受力分析是水工建筑设计的核心环节，直接影响工程安全与功能实现。荷载类型需全面覆盖静水压力、动水冲击、自重、温度应力及地震作用等，其中静水压力随水深呈线性分布，需通过结构几何形态优化平衡压力集中区域，如采用圆弧形坝面分散荷载；动水荷载需结合流速、涡流及波浪冲击特性分析，通过流场数值模拟验证泄洪洞等结构表面的动态应力峰值。受力分析需融合有限元法与解析法，对混凝土、钢材等材料进行多尺度建模，重点评估极端工况下的应力分布与变形协调性，如拱坝拱圈与梁体的协同受力需通过三维有限元模型校核各向异性材料的应力扩散路径。材料选择需兼顾强度、耐久性与经济性，高强度混凝土可减小截面尺寸，但需验证其抗裂性能与长期耐久性；钢材需采用防腐涂层或合金化处理延长使用寿命。结构稳定性需通过整体稳定系数与局部稳定验算双重保障，结合地质条件分析地基承载力，确保在多种荷载组合下不发生失稳或过度变形。最终实现安全、经济、适用的设计目标，为水工建筑长期稳定运行提供科学支撑。

2.2 水工结构材料选择与性能适配设计

水工结构材料选择与性能适配是保障工程安全与功能实现的关键环节。材料需根据工程环境特性与荷载条件进行精准匹配，如高流速水域的闸墩宜选用高强度混凝土，以抵御水流冲刷；寒冷地区的坝体需采用抗冻性能优异的材料，避免低温开裂。材料性能适配需综合考

虑力学特性、耐久性及环境兼容性。例如，钢筋混凝土结构中，钢筋的屈服强度与混凝土的抗压强度需形成合理配比，确保结构在受力时协同工作；防腐涂料的选择需匹配结构所处环境的湿度、盐度等参数，延长钢结构使用寿命。此外，材料创新与性能优化是提升工程效能的重要路径。通过掺入纤维增强材料可提高混凝土抗裂性能；采用高性能合金或复合材料能减轻结构自重，提升抗震能力。同时，需关注材料的可持续性，优先选用再生骨料混凝土、绿色建材等环保材料，降低工程全生命周期的环境影响[2]。材料选择与性能适配设计需依托科学实验与数值模拟，通过材料性能测试、结构受力分析等手段，确保材料特性与工程需求高度契合，最终实现结构安全、功能可靠与经济合理的统一。

2.3 水工结构体型与空间布局设计

水工结构体型与空间布局设计是构建安全高效工程的关键环节，需结合工程特性与自然条件实现科学配置。体型设计需适应水流特性与地质条件，如溢洪道弧形闸墩可优化水流流态，减少涡旋与空蚀风险；重力坝梯形断面通过合理分压提升抗滑稳定性，避免坝体开裂。空间布局则需统筹功能需求与施工可行性，如泵站厂房采用框架-剪力墙结构，既满足设备安装空间又增强抗震性能；渠系线路沿等高线布置，可减少土方工程量并降低水流阻力。设计过程中需注重结构协同性，体型与空间布局需形成整体优化。例如，水库岸坡护坡结构需与边坡稳定分析结合，通过坡比控制与植被恢复实现生态防护；闸门启闭机房的位置布局需考虑操作便捷性与结构受力平衡，避免局部应力集中。此外，数字化工具的应用可提升设计精度，通过三维建模模拟结构空间关系，利用有限元分析验证受力状态，确保设计方案的科学性与可行性。最终，体型与空间布局设计需实现安全、功能与经济的统一，通过精准适配工程环境与运行需求，推动水工建筑向更可靠、更高效、更可持续的方向发展，为水利事业提供坚实支撑。

2.4 水工结构抗渗与抗冲蚀设计

水工结构抗渗与抗冲蚀设计需结合工程特性与环境条件，构建多维防护体系以保障长期安全。抗渗设计聚焦材料优化与构造创新，混凝土中掺入硅灰或短切纤维可填充孔隙、提升密实度，减少早期裂缝产生；接缝处采用橡胶止水带或聚氨酯注浆技术形成弹性密封层，适应结构变形需求并阻断渗漏通道。排水系统通过预设减压井或梯级排水孔阵列，有效降低地下水位，避免水压力累积引发渗透破坏，同时结合反滤层设计防止细颗粒流失。抗冲蚀设计强调流态调控与表面强化，高流速区域采用硅粉混凝土或环氧树脂涂层提升表面耐磨性；导流结构如梯形导流墩可优化水流路径，减少局部冲刷；表面设置锚钉加筋层或铺设抗冲蚀块体，增强整体抗冲蚀性能并延缓材料磨损。长期耐久性需兼顾环境适配，在含泥沙水体中选用铬锰合金等耐磨蚀材料，在酸性水环境采用硫铝酸盐水泥基复合材料；结合智能监测传感器实时追踪结构表面状态，通过数据分析建立预防性维护机制，延长结构使用寿命[3]。通过抗渗与抗冲蚀协同设计，水工结构可全面提升对水压力、水流冲刷及环境侵蚀的抵御能力，确保工程长期安全稳定运行。

3 水工建筑设计中水工结构专业设计的关键技术应用

3.1 水工结构模拟与分析技术

水工结构模拟与分析技术通过多维度技术融合实现设计优化与风险预判。数值模拟依托有限元、有限差分及计算流体动力学等方法，构建三维结构模型，精准模拟复杂荷载下的应力分布、变形特征及流场特性。例如，流体-结构耦合分析可优化闸门启闭过程中的流固相互作用，避免振动失稳；渗流-应力耦合模型能评估坝体渗透稳定性，提前识别潜在渗漏路径；温度场-应力场耦合分析可预测混凝土结构的温度裂缝风险。物理模型试验通过缩尺模型复现实际工况，验证设计合理性。水工模型试验直观观测水流流态、冲刷形态及结构响应，为数值模拟提供校准依据；离心模型试验通过重力场模拟，研究土石坝等结构的长期变形规律；振动台模型试验可验证结构抗震性能。结构健康监测结合传感器网络与数据分析，实现运行状态实时追踪。布设应变计、位移计、光纤传感器等，采集关键部位应力、变形数据，结合机器学习算法识别异常模式，预警潜在风险。这些技术协同应用，贯穿设计验证到运行维护全周期，提升结构安全性、耐久性与经济性，为水利工程建设提供科学支撑。

3.2 水工结构优化设计技术

水工结构优化设计技术以提升工程效能与安全为核心，通过多维度技术整合实现结构性能升级。结构形态优化是基础，如拱坝采用抛物线型拱圈可更高效分散水压力，减少材料用量；重力坝通过调整坝体断面形态优化应力分布，避免局部应力集中。材料选型与配比优化同步推进，高强度混凝土可缩小截面尺寸，纤维增强复合材料能提升抗裂性能，而轻质骨料混凝土则有利于减轻自重，降低地基承载压力。数值模拟技术贯穿设计全程，有限元分析可精准捕捉结构在静水压力、温度变化、地震波等复合荷载下的应力分布规律，为关键部位强化提供依据；计算流体动力学则能模拟水流对结构的冲刷、涡流影响，指导消能工布置与抗冲刷设计。施工可行性需

纳入优化考量，模块化设计与预制构件应用可缩短工期，提升施工质量；可调节式支座与变形缝设计能适配温度变形与地基沉降，保障结构长期稳定[4]。优化设计需平衡安全、经济与环保需求，通过多方案比选确定最优解，确保结构在全生命周期内满足功能要求，同时降低全寿命周期成本，实现技术经济性最优。

3.3 水工结构防渗与排水系统设计技术

水工结构防渗与排水系统设计是工程安全运行的核心保障，需统筹考虑地质条件、水压力特性及材料性能。防渗设计采用复合防渗体系，如混凝土防渗墙与土工膜组合，前者通过垂直截渗阻断地下水渗透路径，后者通过柔性铺设增强接触面密闭性，形成“刚柔并济”的双重屏障。这种设计可显著降低渗流量，减少水流对结构本体的侵蚀风险，延长工程使用寿命。排水系统需与防渗措施协同布置，通过排水孔、管及集水廊道构建有序的渗水导出网络。设计时需精确计算水压力梯度，避免局部积水引发渗透破坏；例如，在坝体背水侧设置排水棱体可有效降低浸润线高度，减少扬压力对坝体的顶托作用；基础部位布置排水帷幕则能减小地下水对地基的托举力，增强整体稳定性。材料选择强调耐久性与适应性，高密度聚乙烯土工膜需具备抗老化、抗紫外线性能，混凝土需优化配比以增强抗裂性。系统运行中需建立定期监测机制，通过渗压计、流量计实时追踪渗压及渗流量变化，及时修复局部缺陷，确保防渗与排水功能长期有效，最终实现结构安全与工程耐久性的双重目标。

3.4 水工结构耐久性提升设计技术

水工结构耐久性提升需从材料、构造与环境适配三方面系统设计。（1）材料选择是基础：高性能混凝土通过优化颗粒级配与掺加矿物掺合料，可增强密实度与抗渗性，延缓碳化与氯离子侵蚀；纤维增强复合材料能抑制微裂缝扩展，提升抗拉强度与抗冲击性能；耐蚀钢材通过表面处理或合金化工艺，可降低电化学腐蚀速率，延长金属构件使用寿命。（2）构造设计：需减少应力集中与腐蚀风险，例如采用圆弧倒角替代直角过渡，避免局部应力集中引发开裂；增大保护层厚度可延缓有害介质渗透，延长钢筋锈蚀时间；设置变形缝与伸缩装置能适应温度变形与地基不均匀沉降，避免结构开裂。（3）环境适配：需考虑自然因素与使用条件，例如在盐碱地区采用抗硫酸盐侵蚀水泥，减少硫酸盐对混凝土的化学侵蚀；在寒冷地区采用引气混凝土，提升抗冻融循环能力；在潮湿环境采用密封涂料或环氧树脂涂层，增强表面防护性能[5]。系统运行中需建立定期检测与维护机制，通过无损检测技术监测混凝土裂缝、钢筋锈蚀等隐蔽缺陷，及时修复局部损伤，确保结构耐久性在全生命周期内持续满足设计要求，实现安全、经济、可持续的工程目标。

结束语：未来，需聚焦数字化工具与新材料研发，推动水工结构技术创新。通过BIM技术实现三维协同设计，提升结构优化效率；研发高性能复合材料与智能混凝土，增强结构耐久性与自适应能力。结合物联网传感器与AI算法，构建智能监测预警系统，实现运行状态实时追踪与风险预判。这些技术突破将推动水工建筑向更安全、高效、可持续方向发展，为水利事业高质量发展注入持久动力。

参考文献：

[1]韦吉华.高坝大库水工结构设计中的关键技术分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(3):001-004.

[2]乔宇.水工建筑混凝土结构设计及其施工质量控制[J].建筑与装饰,2025(18):159-161.

[3]曾丹丹.水工结构设计标准化体系的构建与优化[J].大众标准化,2025(1):22-24.

[4]李瑞金.水工混凝土的结构设计及施工质量控制[J].水上安全,2025(2):154-156.

[5]王宸.水利工程中水工建筑物结构设计的关键问题研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(10):053-056.