

水利水电工程水力学与水工结构设计优化

吴涛

安徽省现代农业工程设计研究院 安徽合肥 230031

摘要: 水利水电工程作为国家基础设施建设的关键领域,其水力学分析与水工结构设计的科学性和可优化性直接影响工程的安全性、经济性和可持续性。本文结合流体力学理论与结构工程原理,系统分析水力学在水工结构设计中的核心作用,探讨基于数值模拟、智能算法和新材料应用的设计优化方法,并针对复杂地质条件、生态环境影响等现实挑战提出解决方案,旨在为水利水电工程的高效设计与安全运行提供理论支撑和实践指导。

关键词: 水利水电工程;水力学;水工结构;设计优化;数值模拟;智能算法

引言

水利水电工程是利用水资源实现防洪、发电、灌溉等综合效益的重要手段,其核心在于通过合理的水工结构设计实现对水流的有效控制与利用。水力学作为研究流体机械运动规律的学科,是水工结构设计的理论基础,涉及水流与结构相互作用、泄洪消能、输水管道水力计算等关键环节。随着我国水利水电工程向高坝、大流量、复杂地质条件等方向发展,传统设计方法在应对极端工况、生态环境保护 and 成本控制等方面的局限性日益凸显,亟需通过理论创新与技术升级实现水力学分析与水工结构设计的优化整合。本文从水力学基础理论出发,结合现代设计方法与工程实践,系统探讨水利水电工程的设计优化路径^[1]。

一、水力学在水工结构设计中的基础作用

(一) 水流特性分析与结构选型

水工结构的型式选择与布置需以水流特性分析为前提。在坝型设计中,重力坝、拱坝、土石坝的水流荷载分布差异显著:重力坝主要依靠坝体自重抵抗水压力,其水力学分析重点在于静水压力与扬压力的平衡;拱坝通过拱圈将水压力传递至两岸岩体,需精确计算拱座处的动水压力分布;土石坝则需通过渗流分析确定防渗体结构,避免渗透破坏。以溢流坝设计为例,水力学中的堰流理论用于确定溢流堰的型式(如WES堰、实用堰)和尺寸,确保过流能力满足设计洪水标准;挑流消能工的设计需运用水舌轨迹计算和空中扩散理论,减少下游冲刷。

(二) 水力荷载计算与结构受力分析

水力学荷载是水工结构设计的主要外荷载,包括

静水压力、动水压力、渗透压力和波浪压力等。静水压力随水深呈线性分布,是坝体应力计算的基础;动水压力则涉及水流脉动、冲击波等非恒定流现象,如闸门启闭过程中产生的水锤效应可能对输水管道造成瞬间高压冲击,需通过水锤方程计算峰值压力并优化阀门启闭程序。渗透压力对土石坝和地基的稳定性影响显著,通过渗流场分析可确定浸润线位置,为坝体防渗结构(如黏土心墙、混凝土防渗墙)的设计提供依据。此外,波浪压力的计算需结合风速、水深等参数,采用小风区波浪理论或规范公式确定浪高和冲击力,确保坝顶结构的安全裕度。

(三) 泄洪消能与水流控制设计

泄洪消能是水工结构设计的关键环节,其核心目标是通过控制水流形态减少对下游河床和岸坡的冲刷。水力学中的消能理论为消能工设计提供了理论支撑:底流消能通过在坝下游设置消力池,利用水跃消除能量,需计算消力池深度和长度以确保水跃充分发展;挑流消能利用鼻坎将水流挑射至远离坝体的下游,需通过水舌空中运动轨迹计算确定挑射距离和扩散效果;面流消能则通过导流坎将高速水流引导至水面,利用表层水流与底层水流的流速梯度消能。近年来,随着高坝建设的增多,联合消能工(如底流-挑流联合消能)和新型消能工(如宽尾墩、消能塘)的应用日益广泛,其设计需结合模型试验和数值模拟优化体型参数,实现消能效率与工程投资的平衡。

二、水工结构设计优化的关键方法与技术

(一) 数值模拟技术的应用与发展

1. 计算流体力学(CFD)的深化应用

CFD技术通过求解Navier-Stokes方程模拟水流运动,

已成为水工结构水力学分析的核心工具。在泄洪洞水流模拟中，CFD可精确计算洞身压力分布、空化空蚀风险区域，优化洞身体型以避免负压和空化破坏；在水电站引水系统设计中，CFD可模拟不同工况下的水流流态，分析压力管道内的非恒定流特性，为调压室尺寸设计提供依据。目前，CFD与结构有限元分析的耦合技术（如流固耦合分析）正逐渐成熟，可模拟洪水冲击下坝体的动态响应，为抗震设计和应急管理提供数据支持^[2]。

2. 离散元法（DEM）与颗粒流模拟

在土石坝填筑、河道泥沙淤积等涉及颗粒介质运动的场景中，离散元法通过跟踪单个颗粒的运动轨迹和相互作用，揭示颗粒体系的宏观力学行为。例如，在堆石坝坝体填筑模拟中，DEM可分析不同粒径石料的堆积密度和孔隙率分布，优化填筑工艺以提高坝体密实度；在水库泥沙冲淤计算中，结合CFD与DEM可模拟水流与泥沙颗粒的相互作用，预测库区泥沙淤积形态和下游河床冲刷深度，为水库调度和河道整治提供参考。

（二）智能算法在结构优化中的创新应用

1. 遗传算法（GA）与粒子群优化（PSO）

智能算法在解决水工结构多目标优化设计中展现出显著优势。以重力坝为例，通过遗传算法对坝体断面进行优化，旨在实现坝体体积最小化以降低成本，同时确保应力分布均匀以增强安全性。该算法通过调整坝体上下游边坡系数和防渗排水布置等设计变量，能够在满足设计安全标准的前提下，通过优化坝体断面尺寸，减少工程量10%~15%，有效提升经济性。对于拱坝体型优化，粒子群优化算法结合有限元应力分析，能够自动调整拱圈中心角和厚度等关键参数，从而优化坝体应力分布，提高结构的整体性能和耐久性。这些智能算法的应用，为水工结构设计提供了高效、可靠的优化手段。

2. 神经网络与机器学习模型

机器学习技术在水利工程领域中的应用正日益显现其价值。通过分析大量的历史工程数据，机器学习可以建立水力学参数与结构设计指标之间的映射关系，从而辅助工程师进行快速而准确的设计。以溢流坝为例，通过构建基于BP神经网络的挑流鼻坎尺寸预测模型，工程师可以输入设计流量、上下游水位差等关键参数，模型便能自动计算出最优的鼻坎挑角和反弧半径，极大地提高了设计效率。同样，利用随机森林算法对土石坝的渗流监测数据进行深入分析，可以建立渗透系数与坝体变形之间的关联模型。这一模型能够为防渗结构的实时安

全评估提供科学依据，有助于及时发现和预防潜在的渗流问题，确保大坝的安全运行。机器学习技术的应用不仅提升了水工设计的智能化水平，也为水利工程的安全管理带来了新的可能性^[3]。

（三）新材料与新结构型式的协同创新

1. 新型筑坝材料的力学性能优化

首先，针对新型筑坝材料的微观结构，通过调整材料的成分和制备工艺，提高其强度和韧性。其次，优化材料的配比，使材料在受力时能够更好地分散应力，降低裂缝的产生。再者，通过表面处理技术，如涂层、镀膜等，增强材料的耐久性和抗腐蚀性。此外，结合工程实际需求，开发具有特定力学性能的新型筑坝材料，如高强轻质、高抗冲击等。通过这些措施，可以有效提升筑坝材料的整体力学性能，为水利水电工程的安全稳定提供有力保障。

2. 装配式结构与模块化设计

装配式水工结构以其高效的施工方式在水利工程中得到广泛应用。在设计这类结构时，必须充分考虑水流荷载对节点连接的影响，确保其强度和防渗性能。以装配式重力坝为例，预制坝段之间的连接必须设置可靠的止水系统和键槽结构，以防止水渗漏并确保接缝处具备足够的抗剪强度。此外，模块化鱼道设计采用标准化预制构件的组合，不仅能够快速适应各种河道地形条件，缩短施工周期，还能优化鱼类通行的水流条件，提高水利工程的生态效益。这些设计考虑不仅提升了施工效率，也增强了水工结构的整体性和耐用性。

三、复杂条件下的设计优化挑战与应对策略

（一）高地震烈度区的结构抗震优化

在高地震烈度区，水工结构面临着静水力荷载和地震动荷载的双重挑战，这对结构的动力响应评估提出了更高的要求。为了有效应对这一挑战，设计策略包括以下几个方面：首先，采用三维有限元法对坝体、地基和库水进行耦合地震响应分析，这种方法能够充分考虑动水压力（如通过附加质量法模拟）和地基辐射阻尼对结构动力行为的影响。其次，优化坝体结构型式，例如在重力坝中设置横缝止水加强层以增强结构整体性，或在拱坝中采用抛物线型坝顶曲线以减少地震产生的惯性力。最后，应用耗能减震技术是降低地震能量输入的有效手段，如在坝基安装粘滞阻尼器以吸收地震能量，或在闸墩间安装摩擦耗能装置以分散地震作用力。这些策略的综合运用，有助于提高水工结构在地震作用下的安全性，确保其在极端条件下的稳定性和可靠性。

（二）深厚覆盖层地基的处理与结构优化

针对深厚覆盖层地基承载力低、压缩性高的问题，水工结构设计需要采取一系列优化方法来确保沉降控制和抗滑稳定性。首先，采用深层搅拌桩、高压旋喷桩等复合地基技术是提高地基承载力的重要手段，这些技术可以有效加固地基，减少坝体沉降。其次，优化基础型式也是关键，例如，将重力坝的浅基础改造为深桩基础，这样可以通过桩基将上部结构荷载有效传递至深层较为密实的土层，增强整体的稳定性。最后，在土石坝坝基设置防渗墙并结合排水减压系统，可以显著降低渗透压力，有效控制坝基的渗流变形，从而进一步提高水工结构的整体安全性。这些设计优化措施的实施，对于确保深厚覆盖层地基上的水工结构安全运行至关重要。

（三）生态环境约束下的设计理念革新

随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入，水工结构设计需兼顾工程功能与生态保护。优化路径包括：①采用“生态护坡+透水底板”的河道整治结构，维持河道水生态系统的连续性；②在水库大坝设置生态流量泄放设施，通过水力学计算确定合理的泄放流量和设施型式（如底孔、岸边泄槽），保障下游河道生态需水；③优化鱼道、过木道等过坝建筑物的水流条件，利用CFD模拟鱼类通行的适宜流速和流态，提高过坝设施的生态友好性。

四、未来发展趋势与研究方向

（一）智能化设计与数字化孪生技术

未来水利水电工程设计将迈向智能化和数字化新阶段。通过构建工程数字化孪生体，我们能够实现水力学分析、结构设计、施工模拟和运行监测的全方位融合。具体应用中，BIM技术的三维模型将水工结构可视化，并与水力学计算结果如压力分布和流速场相结合，进行设计方案的实时可视化校验。此外，物联网传感器的应用使得能够实时监测坝体变形和渗流压力等关键数据，这些数据驱动数字化孪生模型不断更新，为工程运行期的结构安全评估和调度优化提供了强大技术支撑，从而提高了工程设计的效率和安全性。

（二）多场耦合理论与跨学科协同创新

水工结构设计是一个多学科交叉的复杂领域，它融合了水力学、岩土力学、结构力学等多个学科的知识。面对未来，必须加强多场耦合理论的研究与应用。具体而言，我们需要深入研究渗流、应力和温度三场耦合

对混凝土坝裂缝扩展的影响，建立一套基于损伤力学的裂缝预测模型，以提升混凝土坝的安全性和耐久性。同时，探索地震、水流与结构之间的复杂动力相互作用，发展抗震分析方法，考虑库水的可压缩性和地基的非线性特性，以增强水工结构的抗震性能和抵御极端自然条件的能力。这些研究的深入将极大推动水工结构设计的科学化。

（三）低碳化与可持续设计理念的深化

在实现“双碳”目标的背景下，水工结构设计领域正迎来深刻的变革。研究者们正致力于将低碳化和资源循环利用的理念融入水工结构设计的全过程。具体研究方向包括：一是创新研发低碳混凝土材料，如利用工业废渣作为胶凝材料，以降低水泥使用量和减少碳排放；二是通过优化施工组织设计，推广预制构件和绿色施工技术，从而有效降低施工过程中的能耗；三是针对退役水工结构，制定拆除与生态修复方案，确保工程在全生命周期内实现环境保护和资源循环利用的可持续目标。这些研究将为我国水工结构设计的绿色转型提供理论支撑和技术保障。

结语

水利水电工程的水力学分析与水工结构设计是一个多学科融合、多目标优化的复杂系统工程。本文通过阐述水力学在结构选型、荷载计算和泄洪消能中的基础作用，分析数值模拟、智能算法和新材料应用等优化技术，探讨复杂条件下的设计挑战与应对策略，揭示了从理论分析到工程实践的优化路径。未来，随着智能化技术的发展和可持续理念的深化，水利水电工程设计需进一步加强多学科协同创新，实现工程安全性、经济性与生态性的有机统一，为国家水资源的高效利用和绿色发展提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 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, (01): 22-24.
- [2] 李应周, 曾理, 毛新莹, 章勋, 苏熙宁. 大型水利枢纽工程中水工结构的设计要点分析[J]. 珠江水运, 2024, (24): 44-46.
- [3] 范梅香. 水工建筑混凝土结构设计与施工质量控制分析[J]. 水上安全, 2024, (24): 109-111.