

水利工程结构优化设计与耐久性提升技术

马彩霞

哈密托实水利水电勘测设计有限责任公司，新疆 哈密 839000

[摘要]随着我国水利基础设施大规模建设与长期服役，其结构安全与长效耐久性已成为关乎国计民生的重大课题。传统设计方法常偏重结构强度而轻忽全生命周期性能与环境耦合作用，导致混凝土开裂、钢筋锈蚀等工程病害频发，年均维修费用高达数十亿元。通过引入高性能材料、基于智能算法的结构优化以及物联网驱动的数字监控手段，可显著提升结构在复杂环境下的服役性能，延长水利工程使用寿命至百年以上，降低约 20%~30% 的后期维护成本，对提升工程韧性和促进行业可持续发展具有重要现实意义。

[关键词]水利工程；优化设计；耐久性；全生命周期成本；高性能材料；健康监测

DOI: 10.33142/hst.v8i9.17694

中图分类号: TV31

文献标识码: A

Optimization Design and Durability Improvement Technology for Water Conservancy Engineering Structures

MA Caixia

Hami Tuoshi Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Co., Ltd., Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract: With the large-scale construction and long-term service of water conservancy infrastructure in China, its structural safety and long-term durability have become major issues related to national economy and people's livelihood. Traditional design methods often focus on structural strength while neglecting the coupling effect between full life cycle performance and environment, resulting in frequent engineering diseases such as concrete cracking and steel corrosion, with an average annual maintenance cost of billions of yuan. By introducing high-performance materials, intelligent algorithm based structural optimization, and Internet of Things driven digital monitoring methods, the service performance of structures in complex environments can be significantly improved, the service life of water conservancy projects can be extended to over a hundred years, and maintenance costs can be reduced by about 20% ~30%. This has important practical significance for enhancing engineering resilience and promoting sustainable development of the industry.

Keywords: water conservancy engineering; optimization design; durability; full life cycle cost; high performance materials; health monitoring

引言

水利工程作为国家关键基础设施，在开展防洪供水以及发电等方面工作时，具有不可替代作用。然而，诸多水工建筑物长期处于复杂且严苛环境中（如水压冻融、冲刷以及化学侵蚀等方面），普遍面临着混凝土开裂钢筋锈蚀等耐久性方面的问题。据统计，我国大约 30% 水库大坝存在老化病害，每年用于除险加固资金超过百亿元，传统设计把短期强度和安全系数当作核心，缺乏对长期性能演化充分考量，从而导致“重建轻维护”困境。因此，将结构优化与耐久性提升技术进行深度融合，从事后补救转向事前预防，是实现水利工程长寿命高可靠性以及低维护运行必然选择，也是当前工程领域重要前沿。

1 基于全生命周期成本（LCC）的结构优化设计

传统的设计方法通常以初始建设成本最低为主要目标，而优化设计则着眼于工程从规划、设计、建造、运营维护到报废处置的全生命周期，追求总成本最低和综合效益最优。

1.1 设计理念转变：从强度设计到性能设计

现代水工结构设计理念经历着深刻转变过程，正逐步

从传统依赖经验“强度设计”模式，转向更为系统化可量化“性能设计”模式。这一转变所涵盖内容，不仅仅是设计方法层面升级，它充分体现了工程安全观以及可持续性目标。性能设计方法核心要点在于，在设计阶段便明确结构，在设计使用年限内需要达成多层次性能目标，这些目标一般包括在常规荷载作用下能够保持正常使用状态、在极端荷载作用下允许出现可修复损坏情况，以及在大灾作用下坚决防止整体倒塌等方面，性能目标为设计工作提供了清晰明确且具有可评估性导向^[1]。

基于明确这些目标，设计师能够在材料选择结构体系构造措施以及后期维护策略等多个方面进行综合优化。这种灵活性使在全生命周期内统筹安全耐久以及经济性成为了可能，最终达成寿命周期成本（LCC）最小化。因此，性能设计不仅是技术层面进步，更是实现水工结构长效安全与经济性统一重要途径。

1.2 智能优化算法应用

结构优化本质上是一类具有复杂性、多变量、多目标且高度非线性工程问题，传统方法往往很难在多个相互冲突目标之间实现有效平衡。而随着计算机算力的极大程度

提升,遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)、粒子群算法(PSO)等智能优化算法逐渐成为解决此类问题关键工具。

这些算法通过模拟自然进化或者物理社会机制,能够在包含结构尺寸、构件形状、材料配比、配筋形式等大量设计变量复杂空间中高效进行全局搜索。它们不但可以处理单一目标优化,更能够获取多目标优化中 Pareto 前沿,在不同性能指标(经济性安全性、轻量化)之间取最佳权衡非劣解集。基于智能算法优化设计,能够在严格满足规范安全和功能要求前提下,实现显著工程效益。研究表明,该类方法可以引导结构混凝土用量降低 5%-15%,促进结构轻量化与资源高效利用,为提升水工结构经济性与环境可持续性提供了有效路径。

1.3 精细化数值模拟支撑

基于有限元法(FEM)和计算流体动力学(CFD)数值模拟技术,已然成为现代水工结构精细化设计与性能评估核心工具。它们能够以高精度模拟结构在静力、动力以及复杂流体荷载耦合作用下响应情况,揭示传统方法难以捕捉到内在机理^[2]。

通过构建高保真数值模型,设计师可以对不同设计方案应力分布、变形特性、流场状态乃至材料损伤的演化过程进行可视化仿真与分析。在坝工设计中,可借助 CFD 分析泄洪流态与空化风险,利用 FEM 进行坝体体型优化,显著减小拉应力区范围,从根源上抑制裂缝产生与发展。这种“模拟驱动优化”策略,使工程师能够在建造前预见并消除潜在的设计缺陷,实现结构形态与材料配置深度协同,达成“优生”设计。它不仅极大程度提升了结构在全寿命周期内的耐久性与可靠性,也为实现安全与经济性统一提供了关键技术支撑。

2 多维度耐久性提升关键技术

提升耐久性需要从材料、结构本身以及外部防护等多个维度构建综合防护体系。

2.1 材料层面创新与运用

材料是决定工程结构耐久性的根本要素。在当前建筑材料领域内,高性能混凝土(HPC)以及超高性能混凝土(UHPC),由于其卓越的力学性能以及耐久性能,已然成为研究与应用的重要方向。高性能混凝土(HPC)借助掺入优质粉煤灰、矿粉、硅灰等活性矿物掺合料,开展降低水泥用量的工作,进而优化混凝土微观结构。这些掺合料填充了水泥颗粒之间的空隙,使混凝土更加密实,孔隙率以大幅降低。因而,HPC 具备优异抗渗透性能,其氯离子扩散系数相较于普通混凝土能够低一个数量级,碳化速度也明显减缓。同时,其抗冻性能到显著提升,抗冻等级可达 F300 以上,适用于严寒盐蚀等恶劣环境,能够极大程度延长结构服役寿命。

超高性能混凝土(UHPC)则是在 HPC 基础上进一步突破了材料性能极限,其抗压强度能够超过 150MPa,

同时具备较高韧性以及几乎不渗透特性。尽管 UHPC 原材料成本较高,然而由于其卓越的抗冲、抗磨、抗空蚀以及抗化学侵蚀的能力,特别适用于关键易损部位。泄洪消能建筑物、闸门槽、结构接缝以及桥面连接处等,在这些部位选用 UHPC,能够显著减少维修频率,降低长期维护成本,从全生命周期角度来看具有显著经济效益。

2.2 结构设计与构造措施优化

合理结构设计是提高工程耐久性规避潜在隐患关键手段,通过科学设计方法,能够从源头上对损伤的发生与发展进行控制,显著延长结构使用寿命。在裂缝控制方面,设计阶段需要采取系统措施来限制裂缝的产生与扩展,运用预应力技术能够在结构中建立初始压应力,有效抵消外部荷载所引起的拉应力,进而减少裂缝的形成。同时,通过设置诱导缝引导裂缝在预定位置的发生,避免出现有害无序开裂。在配筋设计方面,采用小直径的密间距钢筋分布方式能够更好地约束混凝土,限制裂缝宽度,通常要求将运营期裂缝宽度控制在 0.2mm 以下。如此便能够从根本上切断氯离子、二氧化碳等有害介质侵入路径,保护内部钢筋免于锈蚀。

除此以外,完善防排水系统设计对于维持结构耐久性至关重要。在挡水坝体中设置排水廊道,或者在隧道衬砌背后设置排水盲沟,能够及时排除渗水,显著降低结构内部的渗透压力,避免冻胀破坏发生。同时,良好的排水能力还能够减少水分以及其中所含盐分、酸性物质等在混凝土内部富集,减缓材料劣化的进程。最后,采用“牺牲层”设计理念也是一种有效耐久性策略,在混凝土结构表面额外增设一层指定厚度的保护层,或者铺设高性能的耐磨护面材料,该层材料预先考虑到了环境磨蚀、化学腐蚀所造成损耗,在其使用年限内承担主要损伤,从而确保主体结构在设计使用年限内保持完整与安全。这种设计方法尤其适用于水工建筑港口以及腐蚀性工业环境等苛刻工况。

2.3 附加防护技术与措施

对于已建成工程或者处于极端恶劣环境下结构而言,附加防护技术是进一步提升其耐久性、延长服役寿命的有效补充手段,这些技术针对材料老化、钢筋锈蚀以及裂缝扩展等常见问题,提供了可靠的后期解决方案。表面涂层与浸渍是应用广泛的防护方法之一,通过在混凝土表面涂覆环氧树脂、聚脲等高性能防腐蚀涂料,或者在表面施加硅烷硅、氧烷等浸渍剂,能够有效形成憎水性的保护膜。这道屏障能够显著阻止水分、氯离子以及其他有害介质侵入,从而延缓碳化和钢筋腐蚀进程,该方法施工便捷,尤其适用于海洋环境、除冰盐区域以及化工厂房等强腐蚀环境。

在电化学防护方面,主要技术包括阴极保护和电化学修复技术。阴极保护通过施加外部电流使钢筋成为阴极,从而抑制其电化学的腐蚀过程,普遍适用于长期处于水下钢结构和钢筋混凝土构件;而电化学除氯和再碱化技术,

则可以在不破坏结构前提下,将已侵入氯离子排出,或者恢复混凝土孔隙液碱度,终止钢筋锈蚀发展。这类技术已经成为修复已发生锈损结构的有效工程技术手段。裂缝自修复技术代表了耐久性防护前沿方向,通过在混凝土中预埋含有微生物胶囊或结晶型添加剂,一旦裂缝产生并且有水侵入,这些材料被激活并促使碳酸钙沉淀,从而自动封堵微裂缝。这种“自愈合”能力不仅恢复了结构抗渗性能,也减少了对人工维修的依赖,特别适用于难以频繁检修下的工程隧道和大跨度结构^[3]。

3 智能化运维与健康监测技术

提升耐久性不仅在于良好的设计和建造,更依赖于运营期间的精准管理和维护。

3.1 结构健康监测(SHM)系统

借助布设光纤光栅(FBG)传感器、渗压计以及腐蚀传感器等物联网智能传感设备,能够构建起一套覆盖范围全面、响应速度迅速、结构健康的监测系统,此系统能够达成对工程结构应力状态的变形趋势、渗流压力、裂缝发展以及内部钢筋锈蚀程度等关键参数,全天候自动化采集以及传输,切实达成从“被动检修”到“主动感知”运维模式转变。

这类监测系统作用机制可以形象的被比作为给工程结构安装了一套实时的“心电图”。传感器网络持续捕捉结构“生命体征”,并且将数据借助无线传输技术发送至中央处理平台,平台依靠大数据分析和人工智能算法,对数据进行实时解析以及预警,精准判断结构是否存在异常损伤是否在发展,乃至预测剩余使用寿命。光纤光栅传感器能够灵敏识别混凝土微应变与裂缝动态;腐蚀传感器能够直接反映内部钢筋电化学状态;渗压计则实时监测渗透压力变化,评估防排水系统有效性。该系统不但极大程度上提升了运维效率,降低突发结构安全事件风险,同时还为基于数据长期性能评估与智能决策提供了坚实支撑,特别适用于大坝、桥梁隧道、高层建筑等重要基础设施,是实现结构全寿命周期的精细化管理手段^[4]。

3.2 数据驱动预测性维护

由于先进监测系统所采集海量多源数据,结合大数据分析 with 人工智能(AI)技术,能够构建出高精度、结构性能退化模型与寿命预测模型,实现对工程结构全寿命周期智能化的健康管理。该系统不但能够实时感知结构状态,更能够深入挖掘数据背后的演化规律,标志着设施运维由传统定期检修迈入“预测性维护”新阶段。通过大数据技术,系统对来自光纤光栅传感器、应变计、腐蚀传感器等多类物联网设备监测信息进行清洗、集成以及融合处理,

提取与性能退化密切关联关键特征指标。在此基础上,选用人工智能方法(如机器学习深度学习)建立结构响应与损伤机理之间映射关系,构建能够反映材料老化、裂缝发展、钢筋锈蚀等病害演变的规律数字化模型,这些模型能够实现对未来性能衰退、轨迹动态推演与剩余寿命可靠预测。

该智能诊断系统核心功能在于早期病害识别与预警。AI算法能够从微弱信号中识别异常模式,智能诊断出结构的初始损伤,精准判断病害的类型位置及严重程度,并预测其发展趋势。系统会在临界时间点马上自动发出分级预警,提示管理人员采取有针对性的维养措施,从而实现更精准、高效和经济的养护决策,这种预测性维护策略,有效避免了以往“定期检修”可能带来过度维护或检修不及时问题。它不但显著降低突发结构破坏风险,提升工程安全水平,同时还能优化资源分配,减少非必要维修带来经济浪费,为重大基础设施长期运营与可持续发展提供关键技术支持^[5]。

4 结语

水利工程结构开展优化设计以及耐久性提升这项工作,是一项系统工程,其覆盖了规划设计施工以及运维全生命周期,其核心在于把设计理念从传统“强度保证”转变为“全寿命性能最优”。综合运用智能算法、高性能材料、精细化构造以及智能监测等技术,构建起“设计-材料-防护-监测”一体化技术体系,推动这些技术进行深度融合以及广泛应用,对于提高我国水利设施安全性以及耐久性具有重大战略意义。在未来,应当加快推进相关技术标准、实用化以及智能化,通过科技创新来驱动水利工程实现高质量发展。

[参考文献]

- [1]张秋生.坝肩边坡桩-锚结构设计优化及造价分析[J].江西建材,2025(6):312-315.
- [2]于小龙.混凝土坝结构在水利工程中的应用及优化设计[J].城市建设理论研究(电子版),2024(28):214-216.
- [3]黄学伟.桩墙联合防渗优化设计及其在水利工程中的应用[D].郑州:中原工学院,2024.
- [4]卢聪,陈芬.水利工程泵站结构设计及流道优化设计分析[J].低碳世界,2024,14(1):55-57.
- [5]张鹏,栗一粟,徐伟.水利工程中混凝土结构的优化设计思路分析[J].建筑技术开发,2020,47(24):14-15.

作者简介:马彩霞(1991.10—),毕业院校:西北农林科技大学,所学专业:水利水电工程专业,哈密托实水利水电勘测设计有限责任公司,当前职称级别:工程师。