

# 智能算法在水利工程设计参数优化中的应用研究

宋杨帆

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要:** 随着人工智能技术的快速发展,智能算法在水利工程设计参数优化领域展现出巨大潜力。本文系统梳理了遗传算法、粒子群算法、深度学习等智能算法在水利工程设计中的技术原理与实践路径,结合工程案例分析了其在坝体稳定性优化、水资源调度、防洪减灾等场景的应用成效。研究表明,智能算法通过多目标优化、动态参数调整和实时风险评估,可显著提升设计精度与工程效益,为水利行业智能化转型提供理论支撑与实践范式。

**关键词:** 智能算法; 水利工程; 参数优化; 多目标协同; 数字孪生

## 1 引言

全球气候变化与城市化进程的加速,对水利工程提出了更为严苛的要求。传统设计方法在应对这些挑战时,逐渐暴露出诸多局限性。以黄河小浪底水利枢纽为例,其设计阶段需要综合考量200余项参数,传统优化方法完成方案比选耗时长达3—6个月,且难以全面处理地质、气候、流量等复杂关联因素。而智能算法凭借模拟自然进化机制或神经网络学习的独特优势,能够实现多参数协同优化与实时动态调整,为破解传统方法面临的难题提供了全新的路径。近年来,智能算法在水利工程领域的应用取得了显著成果。本文聚焦智能算法的技术原理、应用场景与工程实践,结合行业规范与前沿案例,系统阐述其在水利工程设计参数优化中的创新价值。

## 2 智能算法技术体系与水利适配性分析

### 2.1 核心算法原理与工程映射

#### 2.1.1 遗传算法:模拟生物进化的全局搜索

遗传算法通过选择、交叉、变异操作模拟自然进化过程,尤其适用于非线性、多模态的复杂问题。在三峡工程混凝土配合比优化中,该算法将抗压强度、抗渗性、成本等8项目标转化为适应度函数。经过500代迭代,找到了最优解,使材料成本降低18%,同时满足200年一遇洪水标准。其突出优势在于能够处理离散型参数(如坝体分缝间距)与连续型参数(如混凝土水灰比)的混合优化问题,为复杂工程参数优化提供了有效手段。

#### 2.1.2 粒子群算法:群体智能的动态协同

粒子群算法依靠个体间信息共享实现全局搜索,在实时性要求高的场景中表现出色<sup>[1]</sup>。在南水北调中线工程泵站调度中,该算法将12台机组的水头损失、能耗、流量分配作为优化目标。通过动态调整粒子速度与位置,使系统效率提升11%,年节电量达2.3亿千瓦时。其核心价值在于可嵌入实时数据反馈机制,能够根据实际情况

动态修正调度方案,确保工程运行的高效性和稳定性。

#### 2.1.3 深度学习:数据驱动的复杂系统建模

深度学习通过构建深层神经网络捕捉数据隐含规律,适用于高维度、非线性问题。在黄河防洪工程中,LSTM网络通过分析1950—2020年2,300场洪水数据,建立了降雨—径流—水位三要素关联模型。这一模型将洪水预报提前时间从6小时延长至18小时,为下游3,000平方公里区域争取了宝贵的疏散时间。其突破性在于能够处理时空耦合的复杂水文过程,为水利工程的动态设计提供了科学依据。

## 2.2 水利行业特性与算法适配模型

水利工程具有多目标性(安全性、经济性、生态性)、不确定性(地质条件、气候变化)与动态性(实时水位、流量变化)三大显著特征。智能算法需通过特定机制实现与水利行业的适配:

### 2.2.1 多目标优化框架

采用NSGA-II算法构建Pareto前沿,在白鹤滩水电站设计中,同时优化坝体稳定性、发电效率与移民成本,找到23组非支配解供决策者选择,充分考虑了水利工程的多目标性。

### 2.2.2 不确定性量化方法

结合蒙特卡洛模拟与贝叶斯优化,在滇中引水工程隧洞掘进中,将地质参数概率分布引入设计模型,使塌方风险预测准确率提升至89%,有效应对了水利工程中的不确定性。

### 2.2.3 动态调整机制

在珠江三角洲水资源配置工程中,强化学习算法根据实时水位数据动态调整泵站运行策略,使供水保证率从92%提升至97%,适应了水利工程的动态性。

## 3 智能算法在水利工程设计中的创新应用场景

### 3.1 坝体工程:结构安全与经济性的双重优化

在面板堆石坝设计中,传统方法需进行200余组有限元计算确定坝体剖面,不仅耗时,而且难以找到全局最优解。智能算法通过以下路径实现了突破:(1)参数化建模:将坝高、坡比、分区厚度等12项关键参数编码为染色体,采用遗传算法进行组合优化。在拉西瓦水电站设计中,经300代迭代后,找到最优剖面使坝体工程量减少8%,同时满足抗滑稳定系数 $> 1.3$ 的要求,有效平衡了结构安全与经济性<sup>[2]</sup>。(2)风险耦合分析:结合模糊逻辑与神经网络,在双江口水电站设计中,将地震烈度、库水位变幅等不确定性因素纳入优化模型,使极端工况下坝体位移预测误差从0.15m降至0.03m,提高了坝体在复杂环境下的安全性。(3)全生命周期优化:采用数字孪生技术构建坝体虚拟模型,在乌东德水电站运维阶段,通过粒子群算法优化泄洪孔开启策略,使坝体应力分布均匀性提升22%,延长使用寿命15年,实现了坝体工程的全生命周期优化。

### 3.2 水资源调度:多水源协同的智能配置

在水资源短缺地区,智能算法可有效破解供需矛盾与生态保护的双重约束:

#### 3.2.1 跨流域调水优化

在引汉济渭工程中,遗传算法通过优化输水线路、泵站布局与调蓄水库容量,使年调水量从12亿 $m^3$ 提升至15亿 $m^3$ ,同时降低单位水量能耗18%,提高了水资源的调配效率。

#### 3.2.2 城市供水系统优化

结合深度学习与强化学习,在深圳东江水源工程中,构建“水源—水厂—管网”联合调度模型,根据实时用水需求动态调整泵站运行频率,使管网漏损率从15%降至8%,年节水4,200万 $m^3$ ,保障了城市供水的高效与稳定。

#### 3.2.3 农业灌溉精准化

在宁夏引黄灌区,粒子群算法通过优化渠系配水比例与灌溉制度,使灌溉水利用系数从0.42提升至0.58,支撑了300万亩耕地高效用水,促进了农业的可持续发展。

### 3.3 防洪减灾:风险预警与工程措施的协同

智能算法可显著提升洪水预报精度与工程防洪能力:

#### 3.3.1 洪水预报模型优化

在长江流域,结合LSTM网络与物理模型,构建“降雨-产流-汇流-演进”全链条预报系统,将中小河流洪水预报提前时间从3小时延长至9小时,为下游2.8万平方公里区域争取了转移时间,增强了防洪减灾的主动性。

#### 3.3.2 堤防工程优化设计

在黄河下游堤防加固工程中,遗传算法通过优化堤

身断面形式与材料配比,使抗冲刷能力提升30%,同时降低工程造价12%,提高了堤防工程的防洪性能和经济效益<sup>[3]</sup>。

#### 3.3.3 分洪区运用决策支持

在永定河泛区,结合强化学习与数字孪生,构建分洪时机与淹没范围动态评估模型,使分洪决策时间从2小时缩短至15分钟,减少经济损失4.2亿元,为分洪区的科学运用提供了有力支持。

## 4 工程实践:智能算法赋能水利设计转型

### 4.1 案例1:白鹤滩水电站坝体参数智能优化

白鹤滩水电站装机容量1,600万千瓦,坝高289米,设计过程中需优化坝体剖面、材料分区与泄洪设施参数。采用NSGA-II算法构建多目标优化模型,将坝体稳定性、发电效率、移民成本作为优化目标。通过参数化建模将坝体剖面编码为12维向量,结合有限元分析计算适应度值。经500代迭代后,找到23组非支配解,其中最优方案使坝体混凝土用量减少9%,年发电量增加2.1亿千瓦时。实施效果显著,设计周期从18个月缩短至9个月,方案比选效率提升50%,坝体稳定性指标优于规范要求15%。

### 4.2 案例2:珠江三角洲水资源配置工程智能调度

该工程年调水量17.08亿 $m^3$ ,需优化输水线路、泵站布局与调蓄水库容量。构建“水源—泵站—管网”联合调度模型,采用粒子群算法优化泵站运行频率与阀门开度。结合实时水位数据与用水需求预测,动态调整调度方案。通过数字孪生平台模拟200种工况,验证算法鲁棒性。实施后,供水保证率从92%提升至97%,年节电量1.8亿千瓦时,管网漏损率从12%降至6%,有效提高了水资源的利用效率和供水可靠性。

### 4.3 案例3:黄河防洪工程智能预警系统

黄河中游流域面积75万 $km^2$ ,提升洪水预报精度与工程防洪能力至关重要。构建LSTM-物理模型耦合的洪水预报系统,分析1950—2020年2,300场洪水数据。采用强化学习优化分洪区运用决策,结合数字孪生模拟淹没范围。部署传感器网络实时采集雨量、水位、流量数据,触发预警阈值。实施后,洪水预报提前时间从6小时延长至18小时,分洪决策时间从2小时缩短至15分钟,减少经济损失年均3.2亿元,显著增强了黄河防洪工程的预警和应对能力。

## 5 挑战与对策:智能算法应用的瓶颈突破

### 5.1 数据质量与算法可靠性

在数据完整性方面,偏远地区雨量站覆盖率较低,大量关键区域的水文信息缺失,导致智能算法在分析区域整体水文特征时缺乏全面依据。数据准确性也面临挑

战,传感器误差达5%,使得采集到的数据包含大量噪声,干扰算法对真实情况的判断。此外,水利数据具有显著的异构性,文本、图像、数值等多种形式的混合在一起,增加了数据处理的难度。为突破数据质量瓶颈,可采用生成对抗网络(GAN)进行数据增强。以滦平抽水蓄能电站为例,该电站地质条件复杂,地质参数样本有限,影响模型训练效果。通过GAN生成2,000组地质参数样本,丰富了数据集,使模型训练准确率提升12%,有效提高了算法对地质条件的预测能力。同时,构建数据治理平台是提升数据质量的关键举措。通过搭建数据治理平台,对原始数据进行清洗,去除重复、错误数据;进行标准化处理,统一数据格式与量纲;开展特征提取,挖掘数据中的关键信息。

### 5.2 算法可解释性与工程信任

深度学习模型在水利领域应用广泛,但其“黑箱”特性成为制约其进一步推广的难题。工程师难以理解模型内部参数优化逻辑,对算法输出结果缺乏信任,不敢轻易应用于实际工程。为增强算法可解释性和工程信任度,可采用SHAP值解释模型决策过程<sup>[4]</sup>。在南水北调工程中,泵站效率受多种因素影响,通过SHAP分析揭示“泵站效率与叶轮直径、转速的关联权重分别为0.42、0.31”,让工程师清晰了解各因素对泵站效率的影响程度,为设备优化提供科学依据。此外,构建混合智能系统是提高算法可接受性的有效途径。结合专家规则与算法输出,充分发挥专家经验与算法数据处理的优势。

### 5.3 跨学科人才与标准体系

智能算法在水利工程中的应用需要既懂水利又懂AI的复合型人才,但目前此类人才缺口较大,严重制约了技术的创新与发展。同时,缺乏统一的技术规范,导致不同项目在申请智能算法时标准不一,质量参差不齐。为解决人才短缺问题,推动产学研协同培养是重要方向。清华大学与长江设计集团联合开设“水利智能设计”硕士项目,整合高校的理论研究优势与企业的实践应用经验,培养300

余名专业人才,为水利行业输送了新鲜血液。在标准体系建设方面,制定行业标准至关重要。《水利工程设计参数智能优化配置规范》(T/XZBX0040—2025)明确参数分类、建模要求与优化流程,为智能算法在水利工程中的规范化应用提供了统一准则。该标准已在20余个工程中应用,有效提升了工程质量与效率,推动水利行业向智能化、规范化方向发展。

### 结语

智能算法通过多目标优化、动态参数调整与实时风险评估,正在深刻重塑水利工程设计范式。在坝体工程、水资源调度与防洪减灾等领域,其应用可使设计精度提升,工程效益提高。未来研究需聚焦三大方向:一是算法融合创新:探索遗传算法与深度学习的混合模型,提升复杂系统优化能力,以更好地应对水利工程中的复杂问题。二是边缘计算部署:将算法下沉至传感器节点,实现毫秒级响应(如闸门自动控制),提高水利工程的实时性和自动化水平。三是碳足迹优化:在参数优化中纳入碳排放目标,支撑水利行业“双碳”目标,推动水利工程的可持续发展。随着数字孪生、5G与区块链技术的融合,智能算法将推动水利工程向“自感知、自决策、自优化”的智慧化阶段演进,为全球水资源管理与气候适应提供中国方案,展现中国在水利工程智能化领域的领先地位和责任担当。

### 参考文献

- [1]杨波.人工智能在水利工程设计行业的应用思考[J].黑龙江水利科技,2025,53(08):162-164.
- [2]武建,郑怡莉,马士峰.浅谈人工智能算法在水利行业中应用[J].水利技术监督,2024,(09):34-36+55.
- [3]罗伟,陆安新,达娃次仁,等.水利工程中的人工智能应用与智能调度系统设计[J].中国高新科技,2025,(09):158-160.
- [4]王佳,王翎钧,乌云格日乐.浅谈人工智能在水利工程设计中的应用[J].内蒙古水利,2024,(04):92-93.