

基于计算流体力学与人工智能的水利设施优化设计

刘振献, 王亚茹

(山东昌利建设集团有限公司, 济南 250000)

摘要: 针对传统水利设施设计存在的效率低、精度不足等问题, 提出一种融合计算流体力学(CFD)与人工智能(AI)的优化设计方法。利用 CFD 技术构建流体动力学模型, 结合 AI 算法实现数据驱动的参数优化与智能控制, 形成“模拟-分析-优化-控制”一体化设计体系。研究结果表明, 该方法可显著提升水利设施的处理效率、降低能耗, 并增强系统的自适应能力, 为水利工程智能化升级提供理论支撑。

关键词: CFD; AI; 水利设施优化; 智能控制; 多目标优化

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A

Optimization design of water conservancy facility based on computational fluid dynamics and artificial intelligence

LIU Zhenxian, WANG Yaru

(Shandong Changli Construction Group Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: In response to the problems of low efficiency and insufficient accuracy in traditional water conservancy facility design, an optimization design method that integrates computational fluid dynamics (CFD) and artificial intelligence (AI) is proposed. By using CFD technology to construct fluid dynamics models and combining AI algorithms to achieve data-driven parameter optimization and intelligent control, an integrated design system of “simulation-analysis-optimization-control” is formed. The research results indicate that this method can significantly improve the processing efficiency of water conservancy facilities, reduce energy consumption, and enhance the system’s adaptability, providing theoretical support for the intelligent upgrading of water conservancy engineering.

Key words: CFD, AI, optimization of water conservancy facility, intelligent control, multi-objective optimization

1 引言

作为保障水资源安全与可持续利用的核心基础设施, 水利工程的设计效率与运行性能直接影响区域经济社会发展。传统设计方法依赖经验公式与物理模型试验, 存在周期长、成本高、难以适应复杂工况等局限性。随着计算能力的提升与 AI 技术的突破, CFD 与 AI 的融合为水利设施优化提供了新路径。CFD 通过数值模拟解析流体流动特性, AI 则通过机器学习与深度学习算法实现参数优化与智能控制, 二者结合可显著提升设计精度与系统效率。

2 CFD 与 AI 在水利设施优化中的技术原理

2.1 CFD 技术在水利设施中的应用

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术以求解 Navier-Stokes 方程为核心, 能够在微观尺度上详细描述流体在时空中的流动行为。该技术在水利设施的设计、分析与运行优化中发挥着日益重要的作

用, 通过高精度的数值模拟, 显著降低了传统设计方法中的风险与成本。

CFD 技术广泛应用于水利结构的优化设计。例如, 在沉淀池、混合池、反应池等水处理单元中, 通过 CFD 模拟水流路径、速度矢量和湍流分布, 可以识别流场中的死区、短流和回流区域。基于模拟结果, 工程师可以对挡板、导流板的布局进行合理调整, 优化池体几何形状, 从而提升水力混合效率和反应效果, 降低能耗^[1]。

CFD 在水力性能预测中具有显著优势。通过模拟不同工况(如进水流量、流速变化等)下的流动特性, 可评估水池的液龄分布、紊流强度、能量耗散等关键参数。这类分析有助于决策者选择最优运行参数, 并对未来水质变化进行预判, 从而保障设施的稳定运行。

当水力系统运行出现异常工况(如水锤效应、水流分布不均或局部高压区)时, CFD 技术可用于事后分析及故障预警。基于可视化仿真结果, 工程人员可以精确识别问题源头和影响区域, 快速制定维护策略, 提升系统的可靠性与安全性^[2]。

2.2 AI技术在水利设施中的赋能作用

AI技术,尤其是深度学习、强化学习和进化算法等方面的快速发展,为传统水利工程的智能化和精细化管理注入了新动能。其与CFD技术的深度融合,进一步拓宽了水利设施在建模、预测与控制方面的能力。

在湍流建模方面,传统的CFD依赖经验模型(如 $k-\varepsilon$, $k-\omega$ 模型)可以描述湍流结构,但在复杂几何或高雷诺数条件下,精度往往不足。AI技术可以通过训练大量高保真数值模拟数据,利用神经网络对湍流模型参数进行动态修正,从而提升模型对非线性、非稳定流动的适应能力,增强计算准确性。

AI支持的降阶建模(Reduced Order Modeling, ROM)显著降低了CFD仿真成本。通过将复杂流场数据映射至低维特征空间,神经网络可构建替代性预测模型,实现近乎实时的流体行为预测。这类模型尤其适用于大规模水利系统的在线仿真与响应分析,提高了工程管理的时效性与智能化水平^[3]。

在控制优化方面,AI结合强化学习与进化算法(如ICA算法),可实现系统运行参数的自适应调整。例如,在污水处理系统中,AI可以基于在线监测数据实时调整曝气强度和药剂投加量,以实现处理效率最大化与能耗最小化的平衡。此外,AI可基于历史数据建立多目标优化模型,利用遗传算法、粒子群等手段,在处理质量、运行成本和系统稳定性等目标间进行全局优化。

3 CFD与AI融合的优化设计方法

3.1 技术框架

基于CFD与AI的优化设计流程是当前水利设施智慧化升级的重要方向,其整体技术框架融合了高精度流体仿真能力与数据驱动的智能优化方法,形成从建模到实时控制的闭环系统。

3.1.1 CFD建模

首先,根据水利设施的几何形态与工况参数建立物理模型。通过CFD软件(如ANSYS Fluent, OpenFOAM)定义流体属性、边界条件(如入口流速、出口压力)和初始条件,求解Navier-Stokes方程组,获得目标区域的速度场、压力场和湍流参数等。基本的不可压缩Navier-Stokes方程如下:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f} \quad (1)$$

其中, ρ 为流体密度; \vec{u} 为速度矢量; p 为压力; μ 为粘度系数; \vec{f} 表示外力项。

3.1.2 数据生成

在完成初步CFD建模后,通过变更边界条件、结构参数或运行参数生成多组仿真数据。这些数据(如流速、剪切应力、湍动能)可构建多维训练数据集,用于后续的AI模型训练与验证。

3.1.3 AI模型训练

此阶段利用深度神经网络(如CNN, LSTM)对CFD数据进行特征学习和拟合,建立流动预测代理模型。对于控制策略优化,强化学习(如DDPG, PPO)可在仿真环境中通过与CFD模型交互不断调整策略,优化系统性能。此外,降阶模型(ROM)可通过主成分分析(PCA)或自编码器提取低维特征,实现高速预测。

3.1.4 优化设计

基于训练完成的AI代理模型,结合多目标优化算法(如NSGA-II、粒子群算法)对设计参数进行迭代调整。在保证模拟精度的基础上,通过评价函数(如能耗、水力效率、混合均匀性)搜索最优设计。例如,设置目标函数:

$$\min_x J(x) = w_1 E(x) + w_2 (1 - \eta(x)) + w_3 V(x) \quad (2)$$

其中, $E(x)$ 表示能耗; $\eta(x)$ 为水力效率; $V(x)$ 为流动均匀性指标; w_1, w_2, w_3 为权重系数。

3.1.5 实时控制

工程实施阶段可集成优化后的控制策略与传感器反馈系统,实现对设备(如水泵、闸门、曝气器)的实时调节。控制系统可通过AI模型预测当前状态并做出动作,从而保障系统在负载波动或突发情况下维持高效运行。

3.2 关键技术实现

3.2.1 数据驱动的湍流建模

基于经验公式,传统湍流模型(如 $k-\varepsilon$, $k-\omega$ 模型)难以精准刻画复杂边界或非定常湍流现象。近年来,数据驱动的建模方法逐渐兴起,可以利用直接数值模拟(DNS)或大涡模拟(LES)生成高精度湍流数据,从而构建神经网络来预测雷诺应力项。雷诺应力张量表示为:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} \quad (3)$$

其中, $u_i' u_j'$ 表示速度脉动的协方差,反映了湍流对平均流动的影响。在数据驱动方法中,可将 τ_{ij} 作为目标输出,用深度网络拟合其与局部流场梯度的非线性关系。

研究表明,采用深层神经网络训练槽道流的 $u_i' u_j'$ 模型后,其预测结果与DNS数据误差小于5%,远优于传统 $k-\varepsilon$ 模型。此方法已逐渐成为高精度CFD建模的重要补充。

3.2.2 智能网格生成与自适应优化

网格划分对模拟精度与计算效率具有决定性影响。人工划分不仅效率低,还易产生高Aspect Ratio网格,导致计算误差增加。基于AI的智能网格生成方法可自动学习几何特征与误差分布,生成最优划分方案。例如,使用生成对抗网络(GAN)可训练出匹配复杂边界的高质量网格结构;而网格自适应技术(如基于残差估计的细化)可在计算中动态调整网格密度,确保高梯度区具有足够精度。组合这2种方法可显著减少仿真时间和内存消耗,提升整体效率。

(下转第161页)

掘进参数设置(如推力、转速、注浆量)提供决策依据。地层识别准确率的提升可通过以下模型表达:

$$A_g = \frac{N_c}{N_t} \times 100\% \quad (5)$$

其中, A_g 表示地质识别精度; N_c 为正确识别的地质单元数量; N_t 为总识别单元数量。实际应用中识别精度提升至92.7%,有效降低了地质突发风险。

3.2.2 施工阶段

在施工阶段,系统平台支持BIM施工进度模拟与工序管理,按周或按天粒度进行可视化演示与优化。通过模型碰撞检测,项目提前发现23处管线冲突问题,在图纸优化阶段及时处理,避免了后期返工与工期延误。在掌子面安全控制方面,布设微震传感器网络,实现围岩微震监测与应力场动态反演,可通过系统分析提前预警软弱围岩坍塌和突泥涌水风险。实时安全预警等级计算模型如下:

$$R_s = \alpha \cdot \sigma_v + \beta \cdot M + \gamma \cdot D \quad (6)$$

其中, R_s 表示综合风险评分; σ_v 为垂直应力; M 为震动幅值; D 为监测数据波动率; α, β, γ 为权重系数。基于此模型,平台成功预警并处置3次重大突发风险,保障了TBM施工安全连续性。

3.2.3 运维阶段

进入运维阶段,系统充分发挥数字孪生体对设备运转状态的实时监控能力。平台将BIM模型中的水泵、闸门、阀门等关键设备与SCADA系统联动,支持设备远程启停控制与能耗监测分析。基于传感器反馈与历史能耗模型,调整泵站启闭逻辑,实现运行效率提升达18%。

(上接第158页)

3.2.3 多物理场耦合模拟与协同优化

水利系统往往涉及流-固-热等耦合效应,如泵站振动、管道热膨胀等问题。AI可有效分析各物理场的交互作用,并通过深度学习提取关键特征,实现预测与控制。例如,水轮机系统通过深度神经网络拟合流固耦合后的结构应力响应,可以提前判断部件在高流速下的振动幅值,为结构减振设计提供依据。该方法显著减少了对复杂耦合方程组的直接求解,提升了跨学科模拟的效率与准确性。此外,多物理场数据可统一输入至联合优化模型,实现系统在多目标约束下(如能耗最小化、结构稳定性最大化)的协同设计,从而打造更加高效、安全的水利设施系统。

4 结束语

本文提出了一种基于CFD与AI的水利设施优化设计方法,通过数值模拟与智能算法的深度融合,实现了设计效率与运行性能的双重提升。未来,可进一步探索以下方向:针对复杂工况(如极端天气、设备老化),提高

泵站单位能耗可用以下公式进行动态评估:

$$\eta = \frac{Q \cdot H}{P} \quad (7)$$

其中, η 为泵效; Q 为流量; H 为扬程; P 为功率。系统监控数据显示,在中低负荷运行阶段,设备运行效率显著优化,泵效提升尤为明显。

为应对暴雨洪水等突发事件,平台整合气象雷达、雨量站数据,结合实时入库流量预测模型,进行数字洪水演进模拟。依据模拟结果,系统可以自动调整水库预泄逻辑,优化调度方案,使应急响应时间缩短40%,有效缓解了城市内涝风险。

4 结束语

本文提出的“BIM+GIS”数字孪生系统利用多源数据融合、模型轻量化与三维仿真技术,实现了城市水利工程全生命周期的虚实交互与智能管控。应用案例表明,该系统可显著提升工程规划科学性、施工安全性与运维效率,降低全生命周期成本。

参考文献:

- [1] 郑少慧. 基于BIM+GIS技术的灌区数字孪生系统研究与探索[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(8): 39-42.
- [2] 张迎. 数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径分析[J]. 数字化用户, 2025(14): 79-81.

作者简介:

董庆法(1980—), 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。

AI模型的泛化能力;结合边缘计算与5G技术,实现水利设施的毫秒级响应控制;融合材料科学、环境科学等多领域知识,推动水利工程的绿色化与智能化发展。CFD与AI的融合为水利设施优化设计开辟了新路径,其应用前景广阔,有望成为未来水利工程智能化升级的核心技术。

参考文献:

- [1] 高飞. 土地整理工程中农田水利设施优化设计[J]. 世界家苑, 2024(24): 168-170.
- [2] 吴菲菲, 厉彦玉, 刘中伟. 水利设施中变频调速异步电机结构的优化设计研究[J]. 中国水能及电气化, 2021(7): 23-26.
- [3] 周晓光. 水利水电建筑中防洪设施优化设计对提升城市防灾能力的意义[J]. 建筑工程技术与设计, 2022, 10(23): 43-45.

作者简介:

刘振献(1966—), 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程。