

数字化建模技术赋能水利水电工程精细化设计

卜德强

泰安市水利勘测设计研究院有限公司 山东 泰安 271000

摘要: 针对传统水利水电工程二维设计精度不足、协同低效、方案优化滞后、返工率高等痛点,本文依托全生命周期、数字协同等理论,围绕 BIM、GIS、数字孪生等数字化建模核心技术展开研究。剖析技术赋能精细化设计的四层作用机理,阐述其在工程勘测规划、主体结构设计、多专业协同落地的应用路径,梳理当前技术应用短板,并从标准、技术、体系层面提出优化策略,助力水利工程设计提质增效、精准落地。

关键词: 数字化建模技术; 水利水电工程; 精细化设计

引言: 水利水电工程地质条件复杂、构筑物空间交错,传统二维图纸设计模式难以满足高精度、一体化设计需求。数字化建模凭借可视化、参数化、协同化优势,成为推动设计提质升级的关键手段。本文结合全生命周期与数字协同理论,对比传统设计现存痛点,剖析数字建模赋能逻辑,结合工程实例阐述应用路径,针对行业发展瓶颈提出改进思路,助力水利设计智能化转型。

1 相关理论与核心技术体系

1.1 核心概念界定

(1) 数字化建模技术: 指利用计算机图形学、数字测量与数据融合等手段,将物理实体或地理空间信息转化为可计算、可交互的数字表达方法。其核心特征包括数据驱动、多维可视、动态可溯;按技术路径可分为参数化建模、实景重建、混合现实建模等类型。(2) 水利水电工程精细化设计: 指在满足国家及行业设计标准(如 SL、NB 系列规范)基础上,对工程结构、水力条件、地质适配等开展高精度计算与多方案比选的设计模式。核心要求涵盖几何精度控制、专业接口匹配、施工可行性与运维可达性前置校验^[1]。(3) 技术赋能的核心内涵: 数字化建模通过“数据—模型—应用”三层传导,显著优化设计流程的自动化水平,提升几何与属性精度至毫米级,并依托云端协同环境实现跨专业实时校审,降低设计返工率。

1.2 基础理论支撑

(1) 全生命周期设计理论: 将水利工程划分为规划、设计、施工、运维四个紧密关联阶段,强调设计成果向下游传递的信息连续性与可追溯性,构建“一次建模、全程复用、持续更新”的数据闭环,避免各阶段信

息割裂造成的重复投入与质量损失。(2) 精细化管理理论: 聚焦设计阶段的资源分配、进度节点控制与风险因素精准识别,通过将工程分解为独立管控单元并制定量化控制指标,支撑设计参数的精调优化,实现设计质量从宏观把控向微观细节管控的转变。(3) 数字协同理论: 构建涵盖地质、水文、结构、机电等多源异构数据的统一语义框架与数据交换标准,基于通用数据环境(CDE)建立权限可控、流程规范的协同作业机制,保障多专业在同一信息源下并行推进设计工作。

1.3 数字化建模核心技术

(1) BIM 三维参数化建模技术: 以族库和约束驱动为核心,搭建水工建筑物(如大坝、厂房、泄洪闸)三维模型,实现构件参数联动调整与工程量自动提取,提升设计修改效率。(2) GIS 空间建模技术: 集成 DEM、地质钻孔与水文监测数据,构建工程区地形地貌及水文地质空间模型,支持淹没分析、边坡稳定性评价等环境适配分析。(3) 数字孪生建模技术: 通过实时数据映射构建工程虚实同步场景,支持施工进度模拟、结构响应预测及设计方案迭代优化。(4) 激光点云与航测建模技术: 利用无人机航摄与地面激光扫描获取实景密集点云,经滤波、分类与曲面重建生成高保真地形模型,为选址与工程量估算提供精确本底数据。

2 传统水利水电工程设计痛点与数字化赋能机理

2.1 传统工程设计模式与现存问题

(1) 设计载体局限: 传统设计以二维 CAD 图纸为核心表达载体,空间结构需通过多张平、立、剖面图组合解读,水工建筑物复杂的曲面与空间交叉结构难以直观呈现,易产生表达偏差与读图歧义,直接影响施工放样与质量控制。(2) 设计精度不足: 水文计算、地质参数

选取及结构受力核算多依赖简化公式与经验系数,对复杂坝基条件、洪水频率等变量把握粗放,导致设计安全裕度偏大或局部隐患未被识别,后期变更频繁,增加工程投资与工期风险。(3)协同效率低下:水工、机电、金属结构、地质等专业各自建立独立设计文件,专业间信息传递依赖会议协调与图纸会签,设计冲突(如管线与结构碰撞、廊道与锚固重叠)往往在施工图审查甚至施工阶段才暴露,返工成本高昂。(4)方案优化滞后:方案比选与优化主要依靠工程师个人经验,对多工况组合(如不同水位、地震烈度、施工导流方式)缺少快速模拟手段,难以在有限设计周期内完成系统性的多方案量化对比,制约了设计质量的持续提升。

2.2 数字化建模技术的赋能优势

(1)可视化赋能:借助三维实景建模与可视化渲染,将地形、地质、构筑物及附属设施在统一空间框架中直观呈现,使设计意图在内部校审、外部评审及施工交底中清晰传达,大幅降低沟通成本与理解偏差。(2)精准化赋能:基于参数化驱动建模,几何尺寸、体积、面积等工程量数据随模型变动自动更新,水力要素(如过流断面、水位—库容关系)可由模型直接提取计算,减少人工统计失误,确保数据链条的准确闭合^[2]。(3)协同化赋能:以通用数据环境(CDE)为支撑,各专业在同一中心模型上开展并行设计,修改实时同步、冲突在线检测,将碰撞问题前置至设计阶段解决,有效缩短设计协调周期。(4)动态化赋能:模型支持快速修改与版本迭代,可依据设计方案变更即时联动更新,同时通过时间轴设置实现施工顺序、蓄水进程等动态模拟,为阶段性设计优化提供灵活操作空间。

2.3 数字化建模赋能精细化设计的作用机理

(1)数据层赋能:整合地质钻探、遥感影像、水文监测等异构数据,按统一坐标与编码体系进行清洗、融合与存储,构建标准化的工程基础数据库,打通勘测—设计—分析的数据通道,消除信息孤岛。(2)模型层赋能:依托高精度地形实景模型与结构参数化模型,实现对坝基断层、渗流路径、配筋细节等关键要素的精细化几何表达,模型精细度(LOD)可达施工下料级,为后续算量与出图提供可靠依据。(3)流程层赋能:将传统“串联式、阶段性”设计流程重构为“并联协同、持续迭代”的闭环流程,建立模型审查—碰撞检测—修改更新的常态化 workflow,实现设计质量的全过程精细管控。(4)决策层赋能:基于集成模型开展渗流分析、结构有限元计算、泄洪仿真等模拟验证,将分析结果实时反馈至设计方案调整中,为设计参数优选、风险预判及

应急预案制定提供量化数据支撑,提升科学决策能力。

3 数字化建模技术赋能水利水电工程精细化设计应用与实践

3.1 工程前期勘测与规划精细化应用

(1)基于航测与点云的高精度地形、地质模型构建:利用无人机倾斜摄影与地面三维激光扫描获取工程区密集点云数据,经噪声滤波、地面分类与曲面重构,生成分辨率达厘米级的高精度数字高程模型(DEM)与三维地质界面模型,精确反映地形起伏、岩层产状及断裂构造分布,为后续设计提供可靠本底数据。(2)GIS水文环境模拟与工程选址、布局精细化规划:基于GIS平台集成流域数字水系、降雨径流、历史洪痕等空间数据,开展淹没范围模拟、汇流路径分析及库岸稳定性分区评估,将模拟结果叠加至三维实景模型中,辅助比选坝轴线、泄洪建筑物进出口位置及施工附属设施布局,实现选址论证由经验判断向空间量化分析转变^[3]。(3)多方案数字化模拟对比,优选经济、安全、生态适配方案:针对不同坝型、不同泄洪方案、不同施工导流方式分别建立数字化模型,在统一平台上进行工程量估算、施工工期推演及环境影响模拟,建立涵盖投资、安全系数、生态扰动等多维指标的综合评价矩阵,快速筛选最优方案。

3.2 主体工程结构精细化设计应用

(1)坝体、泄洪洞、厂房等核心构筑物BIM参数化精细建模:基于主流BIM软件平台,开发水利水电专用参数化构件族库,涵盖碾压混凝土坝、泄洪洞、地下厂房等核心构筑物。将结构尺寸、坝体分区强度等级、配筋率、止水布置等关键设计参数与模型几何维度联动绑定,实现任一参数调整即驱动模型几何形态与属性信息同步更新,同时一键生成各阶段平立剖面施工图及精确的土建、钢筋、金属结构工程量清单,从源头消除设计与算量成果不一致问题。(2)结构应力、水流工况数字化仿真与细部设计优化:基于统一模型,通过标准数据接口将BIM几何信息传递至有限元分析与CFD仿真平台,开展坝体多工况应力—应变分析、坝基深层抗滑稳定验算、泄洪雾化模拟及水工隧洞水力过渡过程计算。将仿真结果映射回三维模型,对高应力集中区、空蚀易发部位及振动敏感区域进行针对性细部设计调整——如结构体形优化、配筋加密布置、掺气坎位置优选等,形成“建模—仿真分析—结果反馈—模型优化”的闭环迭代机制^[4]。(3)机电设备与土建结构一体化建模,规避空间碰撞问题:在水工建筑物结构模型基础上,同步引入水轮机、发电机、主变压器、闸门启闭机、桥机及电

气盘柜、电缆桥架等机电设备精细化模型，在真实三维空间坐标下进行设备定位与管路走向规划。运用 BIM 碰撞检测引擎自动筛选硬碰撞（空间占位冲突）与软碰撞（检修维护间距不足），系统化生成碰撞问题清单并引导逐项整改，确保设备布置、检修通道与土建结构空间高度协调。

3.3 多专业协同精细化设计落地

（1）搭建统一数字化协同设计平台，统一建模标准与坐标基准：基于云架构或企业级服务器部署协同设计管理系统，统一设定工程平面坐标系、高程基准、投影带参数及度量单位，制定涵盖各专业的模型精细度等级、颜色编码规则、构件命名字典及交付文件格式，形成正式发布的设计执行计划（BEP），确保水工、机电、地质、金结等所有参与方在同一技术框架下开展工作。（2）多专业同步建模、实时校核，实现设计问题前置整改：依托协同平台的模型实时同步机制，各专业工程师并行开展本专业模型搭建，任何修改通过权限控制即时推送至中心模型，触发自动化的冲突检测与规范性校核，并生成可追溯的问题报告。设计协调由定期的线下会议转变为持续在线的模型会审，使专业间空间占位矛盾、预留预埋遗漏等问题在设计过程早期即被识别并整改，杜绝问题传导至施工阶段^[5]。（3）模型版本动态管理，保障设计数据一致性与迭代精准性：建立严格的模型版本控制流程，每次设计变更生成带有唯一版本号、时间戳及修改人日志的中心模型存档，支持任意历史版本快速回溯与版本间变更内容差异可视化对比。各专业设计审查及出图均以经审批锁定的最新版本为唯一依据，确保施工现场所获图纸与设计院当前设计意图完全一致。

3.4 应用现存问题与优化策略

（1）现存问题：当前应用中主要面临四方面挑战：一是行业级建模标准尚不健全，各软件平台间数据格式互通性差，模型传递丢失信息严重；二是现有技术对复杂地质条件、高地应力、强震区等特殊场景的适配性存在短板，建模精度难以保证；三是兼具水利工程专业功底与数字化建模技能的复合型人才严重不足；四是高额的软硬件投入、平台维护及人员培训成本对中小型设计院形成显著资金压力。（2）标准优化：联合行业主管部

门、龙头设计院及软件开发商，加快制定并颁布《水利水电工程数字化建模技术标准》，明确勘测、初设、招标、施工图各阶段模型细度等级（LOD）要求、构件属性信息完整度标准及模型质量审查认证流程，推动行业内数据互通与模型成果互认。（3）技术优化：持续推动 BIM+GIS+ 数字孪生 + 物联感知的多技术深度融合，研发面向复杂水工结构、特殊地质体的专用建模插件与轻量化数据接口，提升多源数据融合能力与系统运行稳定性。鼓励 AI 辅助建模与智能审图技术引入，降低人工重复劳动强度。（4）体系优化：推进高等院校水利专业课程体系中增设数字化建模方向，联合企业共建实训基地培养复合型人才；设计院内部建立数字化专项流程管控机制与配套考核激励办法；制定覆盖软件选型、硬件部署、培训轮训、运维升级的分阶段资金规划，通过试点项目积累经验，逐步降低转型风险与综合成本。

结束语

本文系统探究了数字化建模技术在水利水电工程精细化设计中的赋能逻辑与实践路径，证实该技术可有效破解传统设计的各类弊端，实现设计精准化、协同化、动态化升级。当前行业仍存在标准不全、技术适配不足、复合型人才短缺等问题。未来需持续推进多技术融合创新，完善行业标准体系与人才培养机制，深化数字化技术全流程落地，推动水利水电工程设计向智慧化、高品质方向持续发展。

参考文献

- [1] 解凌飞, 李德. 基于 BIM 技术的水利水电工程三维协同精细化设计研究 [J]. 中国农村水利水电, 2023, 14(3): 105-111.
- [2] 邓北平. 双曲拱坝施工阶段 BIM 数字化建模方法研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2024, 16(6): 94-99.
- [3] 刘金宝, 崔艺璇. 数字化建模技术在水利水电工程精细化设计与建设中的应用 [J]. 智能科技, 2024, 21(30): 89-91.
- [4] 杨松. BIM+GIS 融合建模在水利水电工程可研与设计阶段的精细化应用 [J]. 水力发电, 2022, 48(7): 78-82.
- [5] 周林. 水利水电工程全生命周期数字化建模与精细化设计体系构建 [J]. 水利学报, 2023, 54(4): 485-493.