

数字孪生技术在水利工程造价管理中的应用研究

李 行

广西珠委南宁勘测设计院有限公司 广西 南宁 530000

摘 要：数字孪生技术凭借虚拟模型精准复刻水利工程全生命周期，达成数据实时更新、全流程可视化呈现以及模拟预测功能，为水利工程造价管理提供有力支撑。本文从技术理论层面展开剖析，深入探讨其在投资决策、设计优化、施工监控以及竣工结算等环节的应用场景，构建涵盖数据层、模型层与应用层的框架体系，并提出技术保障、管理协同与人才培养等策略，为水利工程全生命周期成本管控开辟智能化路径。

关键词：数字孪生技术；水利工程造价管理；应用框架；实施策略

引言：随着水利工程规模不断扩大、复杂程度日益提升，对造价管理提出了更为严苛的要求。传统造价管理方法过度依赖人工经验与静态数据，难以有效应对动态施工环境与潜在成本风险。数字孪生技术通过虚实映射与动态仿真，能够实时监控工程数据、模拟多方案成本变化，促进多参与方协同合作，为造价管理提供精准且前瞻性的支持，已然成为推动水利行业数字化转型的关键技术手段。

1 相关理论基础

1.1 数字孪生技术理论

数字孪生技术通过虚拟模型复刻物理实体全生命周期，是融合多学科的新型技术。其核心要素包括数据采集、模型构建、仿真分析。数据采集利用传感器与物联网设备，获取物理实体几何形状、运行状态、环境参数等多源信息，为虚拟模型提供数据支撑。模型构建借助计算机图形学与建模软件，将采集数据转化为高精度三维模型，实现物理实体数字化映射。仿真分析基于模型与实时数据交互，模拟物理实体在不同工况下的行为与性能变化。技术工作原理基于物理世界与虚拟世界的双向映射。物理实体运行产生的数据实时传输至虚拟模型，驱动模型同步更新；虚拟模型通过仿真分析，反向指导物理实体优化运行策略^[1]。其技术架构分为四层：感知层负责数据采集，网络层实现数据传输，平台层处理数据与模型运算，应用层面向不同场景提供可视化展示与决策支持。在工程领域，数字孪生技术优势显著。通过实时监控与仿真模拟，可提前预判设备故障与施工风险，降低运维成本与安全隐患。虚拟模型支持多方案对比，辅助工程设计优化，提升方案科学性。技术实现数据集中管理与共享，打破信息孤岛，促进工程多参与方协同工作，提高项目整体管理效率。该技术能够贯穿工程规划、建设、运维的各个阶段，为全流程智能化管理

提供有效途径，助力工程领域向数字化、智慧化方向转型。

1.2 水利工程造价管理理论

水利工程造价管理是对水利工程建设全过程费用进行预测、控制、核算的管理活动，目的是在保证工程质量与进度前提下，合理确定与有效控制工程造价，其贯穿工程投资估算、设计概算、施工图预算、工程结算等各个阶段。投资估算阶段，依据工程规划与初步方案，结合类似工程经验与市场价格，估算项目总投资，为项目决策提供经济依据。设计概算以初步设计图纸为基础，细化工程费用，确定项目投资最高限额，对后续设计与施工起到控制作用。施工图预算根据施工图纸与预算定额，精确计算工程量与费用，是工程招投标与施工成本控制的重要参考。工程结算阶段，依据施工合同、工程变更资料，核算实际完成工程量与费用，确定工程最终造价。在水利工程全生命周期管理中，造价管理作用十分关键。前期为项目立项、融资提供经济可行性分析；设计阶段通过限额设计，平衡技术与经济关系，避免设计浪费。施工阶段动态监控成本，及时发现与纠正造价偏差。竣工后总结造价管理经验，为后续工程提供数据积累与参考，保障水利工程投资效益最大化，实现资源合理配置。

2 数字孪生技术在水利工程造价管理中的应用

2.1 应用优势

数字孪生技术为水利工程造价管理带来多维度提升。数据实时更新能力打破传统管理的数据滞后性，借助物联网传感器与智能终端，工程建设中的材料价格波动、设备运行状态、工程量变化等信息即时传输至虚拟模型。虚拟模型依据新数据自动刷新造价参数，使管理人员随时掌握工程造价动态，避免因信息延迟导致的成本失控^[2]。全流程可视化特性改变传统管理依赖文字报

表的模式,将水利工程从规划设计到竣工交付的全过程转化为可视化虚拟场景,投资估算阶段的项目布局、设计阶段的方案设计、施工阶段的现场作业、竣工阶段的工程实体,均以三维模型直观呈现。各阶段的造价构成与变化趋势通过模型颜色、数据标注等方式展示,使复杂造价信息变得清晰易懂,便于管理者快速识别关键问题。模拟预测功能赋予造价管理前瞻性。虚拟模型可模拟不同施工方案、市场波动、政策调整等因素对工程造价的影响。通过输入变量参数,模型自动生成多种造价变化趋势,预测潜在成本风险。提前模拟极端天气对施工进度影响,计算由此增加的人工、设备租赁等费用,为风险应对预留时间,制定合理的成本控制策略。多参与方协同优势解决传统管理的信息孤岛问题。数字孪生平台作为统一数据中枢,设计单位、施工企业、造价咨询机构等各方均可实时访问与更新模型数据。设计变更信息即时同步至造价模块,施工进度数据自动关联成本计算,各方基于同一模型协同工作,避免因信息不对称导致的沟通成本增加与决策失误,提升项目整体管理效率。

2.2 应用场景

在投资决策阶段,数字孪生技术助力方案比选。针对不同工程选址、建设规模、技术路线的方案,构建对应数字孪生模型。通过模拟各方案的工程量、施工周期、材料需求,自动计算相应造价,从而对比不同方案在全生命周期内的成本投入,结合社会效益与环境影响评估,为决策者提供量化参考,筛选出经济合理的投资方案。设计阶段,数字孪生技术可实现造价优化。将设计图纸转化为三维数字孪生模型,在模型中实时关联各构件的材料、工艺与造价信息,通过调整设计参数,模型同步更新造价数据,向设计人员直观展示设计变更对造价的影响。通过不断优化设计细节,如调整结构形式、优化材料选型,在满足工程功能与质量要求的前提下,实现造价最小化。施工阶段,数字孪生技术用于成本动态监控。施工现场部署的传感器实时采集工程量完成情况、材料消耗、设备使用时长等数据,传输至数字孪生模型。模型自动比对实际数据与计划数据,发现偏差时及时预警。如某段河道疏浚工程实际进度滞后,模型预测后续工期延长将增加成本,管理者据此调整施工计划,调配资源,避免成本进一步超支。竣工阶段,数字孪生技术辅助结算审核。将竣工后的工程实体数据与数字孪生模型进行比对,快速核查工程量完成情况。模型自动识别施工过程中的设计变更、现场签证等资料,结合合同条款,精准计算应调整的造价金额,减少人工审核的工

作量与误差,确保工程结算的准确性与公正性。

2.3 应用框架构建

数字孪生技术应用于水利工程造价管理的框架由数据层、模型层、应用层构成。数据层负责数据采集、存储、处理。采集环节通过传感器网络、智能终端、信息系统接口等,获取工程建设中的多源异构数据,包括设计图纸数据、施工进度数据、材料价格数据、设备运行数据等。存储过程采用分布式数据库技术,确保数据的安全性及可扩展性。处理阶段运用大数据分析技术,清洗、整合数据,提取与造价管理相关的关键信息^[3]。模型层聚焦水利工程数字孪生模型构建。基于数据层提供的信息,运用建模软件与算法,构建涵盖工程地理信息、结构模型、施工流程、造价数据的高精度三维虚拟模型。模型具备参数化特性,可根据工程实际变化灵活调整。同时建立模型与物理实体的实时映射关系,确保模型能够准确反映工程建设动态。应用层实现造价分析、预测、决策支持等功能。造价分析模块通过模型数据直观展示工程造价构成与变化趋势,支持多维度对比分析。预测模块利用历史数据与算法模型,对未来造价走势进行预判。决策支持模块基于分析与预测结果,结合预设规则与经验库,为管理者提供优化方案与建议。管理者通过应用层界面与数字孪生模型交互,实现对水利工程造价的智能化管理。

3 数字孪生技术应用的实施策略

3.1 技术保障策略

数据采集与传输是数字孪生系统运行的基础。以水库大坝为例,根据水利工程监测需求,在大坝部署应变传感器监测应力,利用水位传感器获取河道水位信息,确保实时掌握工程状态。为保证数据准确性,需定期校准和维护传感器,防止误差累积。数据传输采用5G和物联网技术,凭借5G的高带宽低延迟特性,确保监测数据快速稳定地传输至数据中心,支撑数字孪生模型实时更新。建模技术对数字孪生模型的精度和可用性至关重要。运用三维建模软件结合GIS技术,构建水利工程几何模型,融合地形地貌和地质条件,形成高度贴合实际的场景模型。建模过程中,简化次要结构,突出关键部分,平衡模型精度与运算效率,降低系统资源消耗。

仿真分析为造价管理提供决策支持,通过选用适配算法模拟水利工程施工、设备运行等场景,例如模拟混凝土浇筑过程中的温度变化以预测裂缝风险及成本增加情况。建立仿真模型与实际工程之间的反馈机制,依据监测数据调整参数,通过多工况模拟提供多维度成本预测与风险评估数据。引入无人机和卫星遥感技术,进一

步丰富数据来源,增强模型的全面性和可靠性。技术平台搭建整合了数据采集、存储、处理等多个模块,采用分布式存储解决海量数据存储问题,并运用云计算动态分配计算资源。系统集成打通数据接口,实现数字孪生系统与造价、施工管理系统无缝对接,确保系统稳定高效运行。

3.2 管理协同策略

建立跨部门、跨专业协同机制是数字孪生技术应用的关键。成立专门的协同管理小组,成员涵盖设计、施工、造价、监理等部门人员。制定协同工作制度,明确各部门在数字孪生技术应用中的工作流程与时间节点。在设计阶段,设计部门完成图纸后,及时将相关数据提交给造价部门,造价部门基于数字孪生模型进行造价分析,并将结果反馈给设计部门,以便进行设计优化。优化管理流程,减少冗余环节,提高工作效率。将数字孪生技术融入项目全生命周期管理流程,在投资决策阶段,利用数字孪生模型辅助方案比选;设计阶段实现设计与造价的联动优化;施工阶段通过模型进行成本动态监控。简化传统管理流程中繁琐的审批环节,采用线上审批方式,加快信息传递速度。建立信息共享平台,各参与方在平台上实时获取工程进展、造价数据、设计变更等信息,避免因信息不对称导致的决策失误与工作延误。明确各参与方职责,避免职责不清导致的管理混乱^[4]。设计单位负责提供准确的设计数据,确保数字孪生模型的几何准确性与技术合理性;施工单位按照模型要求进行施工,并及时上传施工进度、材料使用等数据;造价咨询机构基于数字孪生模型进行造价分析与控制,定期提交造价报告;监理单位依据模型对施工过程进行监督,确保施工质量与进度符合要求。各参与方在协同工作中相互配合、相互监督,共同推动数字孪生技术在造价管理中的应用。

3.3 人才培养策略

针对数字孪生技术和水利工程造价管理所需的复合型人才,应制定系统化的人才培养计划。在专业培训方面,组织内部课程,邀请行业专家讲授数字孪生技术原

理、建模方法与仿真分析等核心内容,同时融入水利工程造价管理的最新理念与实践。选派员工前往高校和科研机构进修,深入掌握前沿理论与应用技术。鼓励员工参与行业研讨会和学术交流活动,拓宽视野,紧跟技术发展趋势。人才引进是快速提升团队能力的重要手段。制定具有吸引力的优惠政策,积极引进具备数字孪生与造价管理双重背景的高素质人才。招聘过程中注重考察实际项目经验和技术应用能力,确保引进人员能够迅速适应岗位要求。建立人才储备库,加强与高校、科研单位的合作,提前锁定优秀毕业生和研究人才,为未来发展储备力量。同时健全人才激励机制,激发人才的积极性和创造力。设立专项奖励基金,对在数字孪生技术应用中表现突出的个人或团队给予物质奖励,并将技术成果纳入晋升考核体系,提供职业发展通道。营造开放包容、协同创新的工作氛围,促进团队成员之间的交流与协作,打造高效协同的专业队伍。通过系统的人才培养、引进与激励措施,为数字孪生技术在水利工程造价管理中的深入应用提供坚实的人力资源支撑。

结束语

数字孪生技术在水利工程造价管理领域的应用优势突出,能够实现数据实时更新、全流程可视化、模拟预测以及多参与方协同作业,显著提升管理效率与精确度。通过构建科学合理的应用框架,并实施技术保障、管理协同、人才培养等一系列策略,可推动该技术在水利工程造价管理中广泛应用,为水利工程高质量发展提供坚实支撑,有力推动行业数字化发展进程。

参考文献

- [1]孙伟.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].山西水利,2023,(05):51-53+61.
- [2]张婕.基于机电数字孪生的水利工程智能运维与故障诊断方法研究[J].水电站机电技术,2024,47(02):81-83.
- [3]周海龙,王一鑫.数字孪生供水工程建设期管理平台设计与实现[J].水利技术监督,2024,(08):26-29+36.
- [4]黄一彬,马洪羽.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].水电站机电技术,2023,46(06):85-86.