数字孪生技术在水利水电工程调度与虚拟实训中的应用研究

赵归璧[1] 张益静[2]
1. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司 湖南 长沙 410007；
2. 湖南汽车工程职业大学 湖南 长沙 412001

摘 要 以国内某水电站为核心案例，系统研究数字孪生技术在水利水电工程调度中的应用价值与教育融合路径。研究构建“物理实体—数据中枢—虚拟模型—调度服务”四级技术体系，并在此基础上提出“技术—文化”双螺旋教育应用框架，探索数字孪生平台在职业本科相关专业的虚拟实训、网络安全意识培养与调度决策素养提升中的实践机制。通过案例实证，表明该技术不仅提升工程调度精准性与效率，还可作为“技教融合”平台，支撑“技术操作能力”与“安全文化素养”双轨并行的教育创新。

关键词 数字孪生技术；水利水电工程；职业本科教育；“技术—文化”双螺旋；网络安全教育

Application of Digital-Twin Technology in Hydropower Project Operation and Virtual Training

Zhao Gui-bi[1], Zhang Yi-jing[2]
1. Hunan Provincial Water Resources and Hydropower Survey, Design, Planning and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410007, Hunan Province, China;
2. Hunan Automotive Engineering Vocational University, Changsha 412001, Hunan Province, China

Abstract Taking a large domestic hydropower station as the core case, this study systematically investigates the operational value of digital-twin technology in water–hydropower engineering and its integration path into vocational education. A four-level technical framework—“physical entity–data hub–virtual model–dispatch service”—is constructed, on which a “technology-culture” double-helix educational application framework is proposed. The paper explores the practical mechanism of the digital-twin platform in virtual training for undergraduate vocational majors, cultivating cyber-security awareness and improving dispatch decision-making literacy. Case validation shows that the technology not only enhances the accuracy and efficiency of project dispatching, but also serves as a “technology-education convergence” platform supporting dual-track educational innovation that combines technical operation ability with safety-culture literacy.

Key words Digital-Twin Technology; Water Resources & Hydropower Engineering; Vocational Undergraduate Education; “Technology-Culture” Double Helix; Cyber-Security Education

水利水电工程是实现水资源调控与能源供应的关键基础设施，其调度科学性直接关系到防洪安全、能源保障、生态保护等多重目标的协同达成。随着经济社会发展，传统调度模式在时效性、精准性和协同性方面的不足日益显现[1]。数字孪生技术以其对物理实体的精准映射、实时数据驱动的动态仿真以及智能决策支持能力，为突破传统调度瓶颈提供了新路径。同时，该技术也展现出与职业本科教育深度融合的潜力，可作为“技术—文化”双螺旋育人理念的有效载体，促进技术能力与安全文化素养的协同提升。本文以国内某大型水电站为例，该电站流域水文变幅大、汛期集中，承担着发电、防洪、通航、供水等多项调度目标。通过系统梳理数字孪生技术的应用体系和关键技术，旨在为同类工程的规模化推广应用提供理论与实践参考。

1 数字孪生技术在水利水电工程调度中的体系构建

1.1 数字孪生技术体系核心架构

数字孪生技术应用体系以物理实体、数据中枢、虚拟模

[基金项目] 1. 湖南省教育科学“十四五”规划项目，项目名称：“技术—文化”双螺旋驱动职业本科网络安全教育模式的创新研究，项目编号：XJK25BZY003；2. 株洲市社科职教专项课题项目，项目名称：服务株洲“3+3+2”产业体系的高层次技能型人才网络安全素养提升路径研究，项目编号：ZZZJ2025081。

型、调度服务为四级架构，形成从数据采集到决策输出的完整闭环，实现调度全流程数字化升级。这一架构遵循“感知—传输—建模—决策”的核心逻辑，各层级环环相扣、协同发力，确保技术效能充分释放。水电站在该架构落地过程中，结合工程规模和调度需求进行精细化设计[2]。物理实体层部署1.2万个监测点，全面覆盖大坝、32台机组及流域关键站点，构建了全域感知网络；数据中枢层采用分布式存储架构，日处理数据超50 TB，多源数据融合效率达95%，为后续建模提供高质量数据；虚拟模型层构建与物理实体1∶1映射的孪生体，按照动态性适配原则，水文模型每15 min更新以匹配水文过程，结构模型每小时更新以契合结构变化；调度服务层采用微服务架构，指令响应时间达秒级，实现多目标方案一体化生成。

1.2 数字孪生技术体系构建关键维度

体系构建需聚焦感知、建模、服务三个核心维度，通过各维度的技术适配与效能提升，实现整个体系的最优运行。感知维度按照流域监测规范和工程安全标准布设点位，监测点密度达1站/50 km²，采用5G、北斗等传输技术保障传输时延≤20 ms，通过时间同步协议实现1 ms的时钟同步精度；建模维度采用现场试验标定与参数敏感性分析相结合的方法，敏感参数计算精度≥98%，同时嵌入混凝土碳化、钢材腐蚀等老化模型，实现模型动态更新；在服务维度结合多目标调度场景，定制专属界面，通过嵌入行业规范库确保方案合规性达100%，搭建多方案对比评估模型支持优选决策。该体系核心性能数据如表1所示。

表1 数字孪生技术体系核心性能数据

体系层级	监测密度/更新周期	核心性能指标	数据质量要求
物理实体层	关键断面≤5 m	采样率≥100 Hz	完整率≥99%
数据中枢层	实时传输	融合效率≥95%	准确率≥99.5%
虚拟模型层	15 min ~ 1 h	映射精度≥98%	参数匹配度≥97%
调度服务层	方案生成≤5 min	响应时间≤1 s	决策匹配度≥95%

2 数字孪生技术在水利水电工程调度中的应用

2.1 水文水资源精准预测

水文预测作为水利水电调度的核心环节，其精度直接影响决策的科学性和工程效益。通过整合长时序水文气象数据、地理信息等多源信息，数字孪生技术构建了机理与数据驱动相融合的预测模型，显著提升预测能力。某水电站基于该技术路径，融合近50年水文资料与流域地形、气候特征优化模型，在2023年汛期实现洪水预测值偏差仅3.2%，洪峰时间偏差小于2 h，为防洪调度争取了关键时间窗口。该融合模型短期预测纳什效率系数≥0.9，中期≥0.8，支持12类极端水文情景推演，并通过GPU集群加速实现7天预测耗时≤5 min，充分满足调度实时性需求。

2.2 工程运行状态监控

工程运行状态监控是保障水利水电工程安全稳定运行的重要防线，通过实时掌握设施状态并及时预警异常，可有效降低故障风险和损失[3]。数字孪生技术的应用可以实现对工程运行状态的全方位、精细化监控。水电站在大坝和发电机组监控中充分应用该闭环逻辑，取得了显著成效。大坝部署1 200余个监测点，2022年通过系统实时捕捉坝体应变异常数据，结合虚拟模型分析定位风险区域，及时采取温控措施避免了裂缝产生；发电机组监控形成完善的故障识别体系，故障诊断准确率≥95%，2023年成功预警2台机组温度异常，提前检修减少损失超千万元。大坝采用分层监测策略，表层变形精度达±2 mm，内部应变分辨率1 $\mu\varepsilon$；机组构建振动、温度、电磁三位一体监测网络，故障预警提前时间可达两周以上。

2.3 调度方案智能生成

调度方案的质量直接决定水利水电工程综合效益的发挥，优质方案能够在满足多重约束的前提下，实现防洪、发电、通航等目标的最优平衡。数字孪生技术通过虚拟仿真与智能优化算法的深度融合，实现调度方案的自动生成、优化与验证，大幅提升方案质量和制定效率。水电站基于这一技术逻辑，建立了完善的调度方案生成体系。采用层次分析法科学确定各目标权重，融入改进粒子群优化算法提升方案优化能力，2023年枯水期生成的调度方案使发电量提升5.8%，同时保障了下游通航水深和灌溉供水需求。方案生成流程清晰包含目标设定、约束构建、优化计算三阶段，设置粒子种群规模100、迭代500次以保障优化效果，生成后通过虚拟模型多情景推演验证鲁棒性，极端场景下效益损失率可控制在5%以内。

3 数字孪生技术应用的关键支撑技术

3.1 多源数据感知技术

多源数据感知是数字孪生技术应用的基础前提，只有获取全面、精准、实时的数据，才能实现虚拟模型与物理实体的精准映射和协同交互[4]。水电站构建了空天地水一体化监测网络，实现全域覆盖：流域布置20余个北斗监测站；坝区采用5G专网保障高带宽、低时延传输；核心业务数据通过光纤传输，时延＜10 ms，速率达10 Gbps。针对不同监测对象，通过多传感器融合提升精度：水位监测误差±1 mm，流量误差±0.5%；

结构监测采用裂缝计与超声相控阵，识别精度达0.01 mm；设备监测融合红外与光纤传感，温度误差 ± 0.5 ℃。

3.2 高精度建模技术

高精度建模是实现虚实融合的核心。水电站历时2年完成全工程建模，航测覆盖1 000 km²流域，采集点云超10亿个；大坝模型含500余万个构件。专业模型分工清晰：地理建模精度0.05 m，结构建模还原钢筋布置细节，水文模型涵盖100 km河道并采用CFD模拟，机电模型包含500余个零部件并精准复刻装配关系。基于联邦建模技术实现多模型集成，采用LOD技术优化渲染，画面帧率稳定在60 fps。

3.3 实时仿真技术

实时仿真是支撑调度决策的关键[5]。水电站通过硬件升级与算法优化，大幅提升仿真效率：采用8台GPU组建集群，洪水推演速度提升10倍，100 km河道仿真仅需5 min。硬件采用CPU/GPU/FPGA异构架构，总带宽32 GB/s；算法应用并行计算，效率提升4 ~ 6倍，并通过动态网格平衡精度与速度[6]。仿真同步采用数据驱动与事件触发机制，响应时间≤1 s，定期以均方根误差校验模型，超阈值则自动调参。

3.4 智能决策优化技术

智能决策是调度系统实现智能化升级的核心。水电站构建了“规则引擎+机器学习+启发式算法”的融合架构：底层规则引擎嵌入12类行业规范，保障决策合规性；中层采用随机森林、LSTM等模型挖掘历史调度规律；顶层引入改进遗传算法与粒子群算法进行全局寻优，在多重约束下实现调度效益最大化[7]。

4 数字孪生技术在职业本科教育中的融合

4.1 “技术—文化”双螺旋教育框架构建

数字孪生系统不仅是工程调度的技术平台，更应成为职业本科教育中“技术—文化”双螺旋理念的重要实践载体。通过构建与真实工程1∶1映射的虚拟仿真实训环境，学生可在高度真实的调度场景中开展操作训练，同步提升技术应用能力与安全规范意识，实现“技防”与“人防”并重的教育目标。

4.2 虚拟实训平台构建与教学实施

水电站数字孪生系统已具备完整的感知、建模、仿真与决策功能，可作为职业本科水利类专业的虚拟仿真实训平台。平台支持学生进行水文预测、调度方案生成、风险识别与应急决策等全流程操作，并在虚拟环境中体验极端水文、设备故障等复杂场景，培养其在真实岗位中的应变能力与责任意识。

在实施层面，平台可嵌入网络安全与数据规范模块，强化学生对水务网络安全、数据隐私保护、系统操作伦理等文化素养的认知，呼应“技术—文化”双螺旋中“文化”维度的教育目标。

4.3 教育成效评估与持续改进

通过数字孪生平台的实训数据记录与行为分析，可对学生操作规范性、决策合理性、风险识别能力等进行量化评估，形成“操作—评估—反馈—提升”的闭环教学机制。平台支持多人协同实训，模拟调度团队协作场景，培养学生的沟通协调与团队文化素养，进一步提升教育模式的综合性与实效性。

5 结束语

本文以国内某水电站为例，系统研究了数字孪生技术在水利水电调度中的应用体系与关键技术，并提出其在职业本科教育中的融合路径。研究表明，该技术不仅能推动调度模式由经验驱动向数据驱动转型，还可作为“技术—文化”双螺旋教育理念的实践平台，促进职业本科教育在虚拟实训、安全文化培育与综合能力提升方面的创新。未来，可进一步探索数字孪生系统在跨专业教学与校企协同育人等场景的应用，构建更开放、融合、智能的教育新生态。

参考文献

[1]谭凌照.水利工程设计中基于GIS技术的水资源调度与管理系统研究[J].水上安全,2025(2):169-171.

[2]李汶谕.基于数字孪生技术的水利水电工程地质勘察[J].陕西水利,2024(4):118-121.

[3]罗炜,谢明霞,陈杰,等.数字孪生水利水电工程中BIM自适应流转技术研究[J].水利水电快报,2024,45(3):118-123.

[4]罗旺,周韩宝.数字孪生技术在水利水电工程地质的应用[J].江苏水利,2022(S2):90-92.

[5]王国岗,赵文超,陈亚鹏,等.浅析数字孪生技术在水利水电工程地质的应用方案[J].水利技术监督,2020(5):309-315.

[6]吴若,艾菲,方丽,等.数字孪生技术在都江堰灌区小水电站中的应用探索[J].四川水利,2024,45(6):143-146.

[7]胡文才,张煜煜.数字孪生技术助力南四湖防洪调度与二级坝工程管理[J].水利信息化,2024(5):50-54.

（本文编辑　杜宇琪）

