数字孪生技术在闸站水工建筑物运维监测中的构建研究

蓝　鹏　王金伟

江苏省水利建设工程有限公司　江苏　扬州　225000

摘　要：传统闸站水工建筑物运维监测模式普遍存在管理粗放、智能化程度不足的问题，很难满足当下精细化运维的整体要求。本文以数字孪生技术为研究核心，简要阐述该技术的基础特性与核心技术体系，结合闸站运行条件确定系统搭建标准，搭建分层运维架构并完成模型校准与功能开发，进一步分析该技术在优化运维模式、规避工程风险、挖掘数据价值、推进水利智能建设方面的实际作用。

关键词：数字孪生技术；闸站；水工建筑物；运维监测；构建

引言：水利闸站在水资源调配与防洪排涝工作中承担着重要作用，设备长期处于复杂工况下，往往会出现结构老化、运行故障等各类问题。传统的人工监测模式存在明显弊端，很难及时发现潜在的运行隐患。为有效解决这类运维难题，本文引入数字孪生技术，搭建适配闸站工程的智能化监测运维体系，梳理相关技术理论，探究其实际应用价值，希望能为水工建筑智能运维工作提供一定的参考思路。

1 数字孪生技术概述

数字孪生是依托多种新型信息技术整合而成的数字化技术体系，十分适用于水利工程的智能化运维管理工作。该技术和传统的静态建模方式存在较大区别，能够在虚拟空间中完整复刻实体工程的各项状态信息，搭建出可以实时更新、动态推演的数字化仿真模型，真正实现物理实体与虚拟模型的双向交互，形成完整的虚实联动管控模式。整体来看，数字孪生技术具备五项核心特征，主要包含虚实精准映射、数据动态迭代、多源信息融合、智能仿真推演以及全周期应用赋能，这些特性相互配合、协同作用，能够全方位覆盖水利工程运维管理的各个工作环节[1]。这项技术的落地应用，也需要依靠三维精细化建模、物联网信息感知、大数据分析处理以及智能仿真预警等关键技术作为支撑，各项基础技术层层衔接，为智能运维工作开展提供可靠保障。在闸站水工建筑物的实际运维场景中，数字孪生技术可以突破传统监测手段的诸多局限，有效解决人工监测覆盖面不足、数据更新滞后、风险预判被动等常见问题。该技术能够完成全域实时监测、隐性风险前置处置、海量数据高效利用以及全流程智能管控等工作，全方位弥补传统粗放运维模式的短板，稳步提升闸站工程运维管理的精细化程度与科学水平，为水利工程智慧化运维发展提供有效的技术助力。

2 数字孪生技术在闸站水工建筑物运维监测中的构建

2.1 总体构建原则

闸站水工建筑物数字孪生运维监测系统的搭建工作，需要依托多项基础设计原则作为支撑，这样搭建完成的系统框架才会更加科学合理，也能兼顾日常使用的实用性与后期升级的拓展性。首先是精准保真原则，这也是整个系统搭建的核心根本，工作人员在构建数字模型的过程中，需要严格参照闸站真实的结构外形、材质属性以及日常运行规律开展建模工作，尽量减少虚拟模型与实体工程之间的数据误差，保证系统输出的仿真数据和监测结果，能够真实反映出水工建筑物的实际运行状况。其次是实用高效原则，系统设计需要贴合基层运维人员的现场工作场景，聚焦结构形变监测、设备故障排查、运行风险预警等核心业务，删减不必要的冗余功能，同时优化数据传输与运算流程，有效提升整体运维工作的效率。再者是全域协同原则，系统需要全面覆盖闸站主体结构、机电配套设备以及周边水域环境，整合各类静态结构数据与动态运行数据，实现多类数据和运维功能的协同联动。最后是兼容扩展原则，系统整体采用开放式模块化设计，能够适配不同类型闸站的运行工况，同时预留充足的升级接口，可适配后续设备迭代与技术优化，保障系统可以长期稳定投入使用。

2.2 多层级架构体系构建

为满足闸站水工建筑物日常运维和安全监测的实际工作需求，本次研究搭建了一套五层递进式数字孪生架构体系，整套架构主要由感知层、数据层、模型层、功

能层以及应用层共同组成，各个层级之间相互衔接、互为支撑，能够形成完整的虚实联动运维闭环体系。感知层属于整套架构的底层基础，工作人员会在闸站结构表面和河道监测区域布置各类传感设备，同时搭配对应的气象采集设备，以此全天候收集工程结构状态、水流变化情况、环境参数以及机电设备运行的基础数据[2]。数据层主要承担数据整理与存储的工作，系统会自动对现场采集的大量原始数据进行筛选、清洗和分类整合，再按照规范标准完成入库存储，能够方便工作人员随时查阅和调用相关监测资料。模型层是整套智能运维系统的核心载体，研究人员可以通过精细化建模技术与仿真算法不断校正模型参数，让虚拟数字模型可以真实还原实体闸站的实时运行状态。功能层能够覆盖闸站大部分运维场景，可实现状态监测、仿真推演与风险研判等基础业务功能。应用层主要服务于一线运维和管理人员，依托可视化操作界面，顺利实现数据展示、隐患预警和运维管控的智能化落地。

2.3 高精度数字模型搭建与校准

数字化模型的搭建与校准工作，是闸站水工建筑物实现虚实对比监测和智能化运维管理的核心基础，整套工作流程主要包含基础建模、精度优化以及动态更新三个关键环节。工作人员在建模作业过程中，一般会综合运用 BIM 建模、无人机测绘以及激光扫描等常用技术手段，系统收集闸站各类构筑物的尺寸参数、空间位置和整体布局等基础信息，以此建立和实体工程高度契合的三维数字化模型，完整还原工程结构与机电设备的安装布局及连接关系。模型初步搭建完成后，研究人员会将工程用材特性、结构力学性能等基础参数逐一录入系统，让数字模型既具备完整的几何样貌，又拥有贴合现场工况的物理属性。为尽量降低建模误差，工作人员会依托现场实测数据以及工程长期积累的运行资料，反复调整和修正模型的运算参数，有效削弱建模操作、算法计算以及外界环境干扰带来的数据偏差，保证仿真计算结果可以如实反映工程的受力状态与形变规律。系统还能够接收监测设备的实时传回数据，持续更新模型运行状态，及时同步结构变形、设备损耗等动态变化，让静态模型可以适配复杂多变的现场工况，长期维持模型数据的准确性与有效性。

2.4 运维监测功能模块开发

为贴合闸站水工建筑物日常监测与运维的实际工作场景，本研究结合现场业务需求开发了多项核心功能模块，以此搭建出能够适配大部分运维场景的智能化监测管理体系。系统设置的全域状态监测功能，可以依托三维可视化展示平台，帮助运维人员直观掌握闸站的实时运行情况，系统能够自动汇总结构形变、水流工况、设备运转以及周边环境的各类监测数据，便于工作人员及时察觉各类运行异常问题[3]。系统搭载的智能仿真推演功能，能够结合实时运行数据和过往积累的历史资料，模拟不同环境与工况下闸站的运行变化规律，提前预判结构老化、设备磨损等问题的发展趋势，为工作人员开展预防性运维工作提供可靠的数据参考。分级风险预警功能可以结合闸站实际运行特点建立适配性监测标准，自动识别现场存在的各类运行隐患，并且完成风险等级划分，及时向工作人员推送预警信息。运维智能分析功能可以深度整理长期积累的监测数据，归纳工程薄弱部位与设备损耗规律，为运维方案编制和资源调配提供参考。平台具备的全流程运维管控功能，能够实现隐患处置的闭环管理，完整留存各项运维工作数据，有效提升闸站运维管理的规范化水平。

3 数字孪生技术在闸站水工建筑物运维监测中的应用价值

3.1 革新传统运维监测模式提升运维效率

以往闸站水工建筑物的运维监测工作，大多依靠人工巡查和定点抽样检测的方式开展，这种较为粗放的管理方式本身存在不少缺陷，不仅监测覆盖范围有限、数据更新速度偏慢，整体的人力投入成本也相对较高，很难满足现代水利工程精细化、常态化的运维管理标准。数字孪生技术的引入，能够有效突破传统运维方式的各类局限，逐步形成一套以数据为核心、虚实联动的智能化运维管理模式。该技术可以借助全域智能感知设备完成全天候监测作业，有效弥补人工巡检存在的盲区问题，让数据采集的完整性和时效性都得到明显提升。同时系统可以依托数字模型自主完成设备状态分析、故障识别和运行趋势判断，减少了人工整理、核对数据的繁琐工作，也能规避人工经验判断带来的偏差。这种前置化、智能化的处置方式，能够加快隐患处理速度，节约人力运维成本，从整体上提升闸站运维工作的质量与效率。

3.2 精准把控结构运行状态规避安全风险

闸站水工建筑物在长期运行过程中，会持续受到水流冲击、土体压力、温度变化以及交替荷载的综合影响，因此这类工程结构很容易产生沉降、开裂、防渗失效以及设备老化损坏等各类安全问题，如果相关隐患没能得到及时处理，就会影响闸站的正常运行，甚至造成工程损坏，对区域水利运行安全造成不利影响[4]。传统监测手段的检测精度相对有限，只能识别较为明显的运行异常，很难发现细微结构变形和潜在隐患，整体

的风险预判效果并不理想。数字孪生技术可以依靠高精度虚实映射和动态仿真的能力，精准捕捉建筑物微小的位移、沉降和应力变化，提前排查结构老化、防渗性能下降等隐性问题。系统还能模拟暴雨、高水位等复杂工况，分析闸站结构的受力稳定性，提前预判安全风险，搭配分级预警模式，工作人员可以快速定位故障位置、判断风险程度并落实处置工作，有效降低闸站运行的安全隐患。

3.3 实现数据资源化利用支撑科学决策

闸站在常年运行的过程当中，会持续产生各类监测信息与运维资料，不过传统运维模式对于数据的处理方式较为简单，各类资料大多处于分散存放的状态，整体数据较为零散，工作人员很难对其进行整合梳理与深度分析，这就造成大量数据资源无法发挥实际作用，难以辅助日常运维与工程优化工作。数字孪生系统能够搭建统一的数据管理平台，工作人员可以将闸站全周期产生的各类信息统一收纳整理，完成标准化分类存储，有效解决了以往数据孤立脱节的问题，让各类数据能够实现共享复用。系统可以结合智能分析手段挖掘数据隐藏的运行规律，总结工程结构运行特点、设备损耗情况以及故障出现的主要原因，据此形成对应的分析内容。工作人员可以依托这些数据成果制定合理的检修周期与设备更换方案，同时也能依托长期数据总结工程运行短板，为闸站改造优化提供参考，逐步改变以往依靠经验决策的模式，让运维管理决策变得更加科学合理。

3.4 助力水利智慧化建设推动行业升级

水利行业当下正朝着智能化、数字化的方向稳步发展，闸站水工建筑物的智能运维工作，也是水利智慧化建设当中十分关键的一环。数字孪生技术作为当下水利智能化改造的核心手段，将其运用在闸站运维监测工作中，能够很好地改变传统水利运维粗放落后的模式，逐步完成数字化、精细化的转型升级。在实际工程管理工作中，这套虚实联动的运维体系，可以让闸站监测、预警、决策以及管控等各项工作全部实现智能数字化处理，完善基层水利智能管控体系，弥补传统运维模式存在的智能化短板[5]。同时，闸站工程落地的数字孪生运维模式，也能够为水库、堤防、泵站等同类水利工程的运维管理提供有效参考，为整个水利运维行业的智能化发展提供助力。该技术体系在长期运行中，还可以持续积累海量的水利工程运行数据，不断丰富水利行业数据资源，为后续智能算法优化、技术创新提供数据支撑，稳步提升水利工程运行安全与水资源调配能力，为水利行业长效高质量发展筑牢基础。

结束语

综上所述，数字孪生技术凭借虚实映射、数据融合与智能推演的独特优势，能够有效弥补传统闸站运维监测模式的各类缺陷。该技术可实现水工建筑物运行状态的动态感知、风险预判与精细化管控，全面提升闸站运维的科学性与高效性。随着水利智能化技术持续迭代，数字孪生体系也会不断完善，可为水利工程智慧运维与行业高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

[1] 张牧, 盛方斌. 水利工程闸站水工建筑物变形监测方法探讨 [J]. 工程技术研究,2025,10(3):170-172.

[2] 杨琨. 水利工程闸站水工建筑物变形监测方法研究 [J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2025(10):070-073.

[3] 王涛. 水工建筑物沉降监测技术研究 [J]. 计算机应用文摘,2025,41(23):242-244.

[4] 马小园, 徐志敏, 范子星. 数字孪生闸泵工程建设技术导则编制研究 [J]. 中国标准化,2026(10):176-183.

[5] 马磊. 水工建筑物运维管理模式的创新与实践 [J]. 中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2022(10):16-18.