

## 基于数字孪生的泵站全生命周期管理系统设计

王 挺

杭州山科智能科技股份有限公司 浙江杭州

**【摘要】**传统泵站管理模式在信息孤岛、运维效率低、全生命周期可视化不足等方面存在显著局限。数字孪生技术的兴起为泵站管理系统带来了转型契机。本文以数字孪生为核心，构建涵盖设计、施工、运维、改造等阶段的泵站全生命周期管理系统。系统集成三维建模、实时监控、预测性维护、虚实同步等功能，实现数据驱动的管理模式转变。该系统可有效提升设备管理智能化水平与运行安全性，促进泵站运维决策科学化。通过实际场景测试，验证了系统在工程全周期中的实用性与可拓展性，为智慧水利建设提供了理论基础与技术支撑。

**【关键词】**数字孪生；泵站管理；全生命周期；智慧水利；系统设计

**【收稿日期】**2025 年 8 月 21 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250200

### Design of pumping station lifecycle management system based on digital twin

Ting Wang

Hangzhou Seck Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang

**【Abstract】**The traditional pumping station management model has significant limitations, such as information silos, low operation and maintenance efficiency, and insufficient lifecycle visualization. The rise of digital twin technology has brought a transformation opportunity for pumping station management systems. With digital twin as the core, this paper constructs a pumping station lifecycle management system covering the stages of design, construction, operation and maintenance, and renovation. The system integrates functions including 3D modeling, real-time monitoring, predictive maintenance, and virtual-real synchronization, realizing the transformation of a data-driven management model. This system can effectively improve the intelligence level of equipment management and operational safety, and promote the scientificization of pumping station operation and maintenance decisions. Through testing in actual scenarios, the practicality and scalability of the system in the entire engineering cycle are verified, providing a theoretical basis and technical support for the construction of smart water conservancy.

**【Keywords】**Digital twin; Pumping station management; Lifecycle; Smart water conservancy; System design

### 引言

泵站作为城市排涝、农业灌溉及工业供水系统的重要组成部分，其运行效率与管理水平直接影响整体水利系统的安全与稳定。当前，多数泵站在设计与管理中仍依赖传统方式，存在运维周期割裂、信息共享困难、应急响应滞后等问题。数字孪生技术以虚实融合为基础，通过构建泵站的数字镜像，实现物理实体与虚拟模型间的实时交互，为泵站全生命周期管理提供了全新路径。本文聚焦数字孪生在泵站中的应用实践，从系统构建、关键技术到实际效能进行探讨，旨在为水利设施的智能化升级提

供技术支撑与管理思路，助力实现高效、智能、可持续的泵站运行模式。

### 1 泵站传统管理存在的核心问题与挑战

泵站作为城市排水、防洪、农业灌溉和工业供水系统中的关键基础设施，其运维管理水平直接决定了整个水利系统的可靠性与效率。然而，在传统泵站管理模式中，由于信息系统建设滞后，各阶段管理存在明显脱节问题。设计、施工、运行、维护等生命周期节点间缺乏统一的管理平台，导致数据流断裂、信息共享受限。运维人员往往依赖经验进行设备巡检与判断，缺乏精准的数据支持，极大降低

了运行安全性与响应速度。设备运行状态监测手段落后,预警与故障预测能力薄弱,常常处于“被动维修”的状态,无法实现主动运维与科学决策。

在泵站运行中,由于缺乏高效的感知系统,设备运转数据的采集手段有限,时效性差,致使管理层难以及时掌握泵站运行状态。各类监控数据孤立分布于不同系统平台,形成“信息孤岛”,缺乏统一的数据中心进行整合分析<sup>[1]</sup>。这种碎片化管理模式不仅增加了管理难度,也不利于提升设备综合利用效率。特别是在泵站突发故障、极端天气等情况下,传统管理方式在调度与应急响应中的滞后性严重影响了泵站保障能力。缺乏可视化手段也是一项关键问题,使得管理者对泵站设施的空间布局、流程路径、设备状态等缺乏直观感知。

传统泵站管理还存在缺乏全生命周期管理理念的问题。设计单位、施工单位、运维单位之间缺少有效数据衔接,系统集成度不高,使得早期建设数据难以服务于后期运维。设备型号、安装参数、维护周期等信息往往无法在后期调取,导致维修难度加大,成本上升。这种割裂式管理方式限制了泵站从规划到退役阶段的全过程优化空间,制约了系统智能化升级的可能性。随着水利设施数字化、智能化进程加快,传统泵站管理模式已难以适应现代化水利工程对高效、安全、可持续运维的管理需求,亟待引入先进的信息技术加以变革。

## 2 数字孪生在泵站全生命周期中的应用价值分析

数字孪生技术作为融合多源数据建模、实时仿真驱动、智能预测控制的先进理念,正在水利基础设施管理领域展现出显著的应用价值。通过构建泵站物理实体的数字映射模型,实现设备运行状态、环境参数、运维行为等信息的全面感知与同步映射,为泵站管理提供高精度、全景化的数据基础。该技术能够将泵站从设计到退役的各阶段数据进行统一建模管理,实现“虚实同步、时空协同”,为管理者提供实时决策支持与预警分析能力,全面提升泵站运行的智能化水平。

在泵站全生命周期管理中,数字孪生技术可贯穿设计、施工、运行、维护、升级各阶段,实现数据与模型的迭代融合。在设计阶段,三维建模结合水力模拟,可提前验证泵站结构的合理性与流程的高效性;施工阶段,BIM模型与传感系统结合,有效控制施工质量与进度;运维阶段,借助实时数据与

历史数据融合分析,实现对设备寿命周期的动态预测与主动维修策略制定;改造阶段,通过对既有系统的仿真推演,辅助制定优化方案,降低决策风险。这种贯穿式、闭环式的数字孪生应用模式,构建了泵站管理的新范式,打破了传统阶段割裂的管理困局。

数字孪生为泵站的多维度综合评价提供了强大支撑。在安全监测方面,数字孪生通过虚拟感知与数据融合,实现对关键设备如水泵、电机、闸门等运行状态的精准分析,及时发现隐患并推送预警;在节能降耗方面,通过能耗数据与设备性能参数的深度比对,识别高耗运行环节,提出节能调度建议;在资产管理方面,通过构建设备数字档案,实现对资产状态、折旧进度、维保记录的全流程管理,为设备更新与预算编制提供可靠依据<sup>[2]</sup>。数字孪生不仅重塑了泵站管理的技术路径,更推动了水利基础设施向智能化、集约化、可持续方向发展。

## 3 泵站数字孪生管理系统的功能架构与关键技术

构建一套完善的基于数字孪生的泵站全生命周期管理系统,需从系统功能架构与技术实现两个层面进行系统规划。在功能架构方面,该系统通常包含数据采集层、模型驱动层、智能分析层、可视化交互层和决策控制层五个主要组成部分。数据采集层负责实时获取泵站运行中的水位、水压、流量、设备状态等信息;模型驱动层以物理建模和数据建模为基础,构建泵站虚拟镜像,实现虚实协同;智能分析层则基于大数据和人工智能算法,对设备健康状态、运行趋势等进行综合评估;可视化交互层提供三维仿真界面,便于用户直观理解泵站动态;决策控制层支持管理者进行自动化调度、预警响应和策略优化。

在关键技术实现方面,首先是多源数据融合技术,系统需兼容多种传感器、控制系统与管理平台的数据格式,实现对结构数据、实时数据、环境数据等的统一接入与标准化处理。其次是物理建模与机理模型构建,需基于泵站结构图纸、工艺流程、运行参数建立高精度虚拟模型,确保数字孪生系统具备准确的动态仿真能力。再者是人工智能与预测算法的应用,如基于长短期记忆网络(LSTM)的设备寿命预测、基于支持向量机(SVM)的异常检测模型,有助于提高系统的预警响应与自适应能力。最后是人机交互与可视化呈现技术,采用三维GIS、WebGL等工具,实现泵站运行状态的全景呈现与历史回溯,提高用户体验和管理效率。

系统的稳定性与扩展性也是设计的重要考量。在稳定性方面,需保障系统对大量高频数据流的处理能力,采用分布式架构与边缘计算技术进行数据预处理,减少中心系统负荷;在扩展性方面,系统设计应具备可插拔模块化架构,便于后期新增功能如智能检修、远程培训等<sup>[3-7]</sup>。系统需具备良好的安全机制,对数据通信过程进行加密处理,保障泵站关键运行信息不被泄露。通过整合上述关键技术,构建出的数字孪生泵站管理系统不仅具备强大的信息处理与决策支持能力,也为后续智慧水利系统的拓展奠定了坚实基础。

#### 4 系统实施成效评估与优化策略建议

在实际应用中,基于数字孪生的泵站管理系统展现出显著的效能优势。在运行管理方面,系统通过多维度数据驱动实现对泵站设备状态的实时监测与分析,使运维人员能够精准掌握设备运行状况,及时采取干预措施,有效降低了故障率与维护成本。系统支持全过程可追溯管理,建立了从设计到运维的完整数据链,为泵站设备后期改造与运维策略优化提供了数据支持。在应急响应方面,系统通过仿真预测与场景演练功能提升了突发事件处置能力,提升了泵站整体运行的安全性与鲁棒性,增强了对极端气候事件的适应能力。

在系统运行中,也暴露出一些需进一步优化的问题。部分老旧泵站在接入数字孪生系统时存在数据标准不统一、接口协议不兼容的问题,影响系统整体协同效率。高频数据流对系统服务器与网络环境提出较高要求,需要进一步优化数据处理架构,增强系统的吞吐能力与稳定性。用户层面,一线运维人员在新系统操作上的适应周期相对较长,存在培训不充分、操作不熟练等问题。针对这些问题,需要从技术、管理与培训多维度协同推进系统优化,确保系统稳定运行并持续发挥效能。

为提升系统实际效能,建议在技术层面构建统一的数据标准体系,规范泵站设备与传感系统的数据格式与接口协议,提升系统兼容性;在平台架构上,引入边缘计算与云平台融合架构,实现数据的分层处理与弹性存储;在人员培训方面,制定分层次的培训体系,加强对运维人员的数字化素养培养。建立反馈机制,结合实际运行数据不断迭代优化模型参数与系统功能<sup>[8]</sup>。通过持续优化系统设计与管理机制,基于数字孪生的泵站全生命周期管理系统

将更好地支撑现代水利工程智能化发展,为建设数字水利和智慧城市提供有力支撑。

#### 5 结语

基于数字孪生的泵站全生命周期管理系统构建了虚实融合、高度协同的管理新模式,全面打破了传统泵站在信息孤岛、阶段割裂和运维粗放等方面的局限。该系统以数据驱动为核心,融合三维建模、实时监测、智能分析等关键技术,贯穿设计、施工、运维与改造全过程,有效提升了泵站运行的智能化、精细化和高效化水平。未来,随着技术不断演进与工程实践的深入推进,数字孪生将在更大范围内助力水利工程的智慧化转型,为构建现代化水利基础设施管理体系提供坚实支撑与发展动能。

#### 参考文献

- [1] 吴科军,徐雷,孙煜涵,等. 面向数字孪生的排涝泵站管理信息系统设计与应用[J].浙江水利水电学院学报,2025,37(03):45-50.
- [2] 蒋涛,刘斌,陈诚,等. 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用分析[J].江苏水利,2025,(06):21-26.
- [3] 刘海瑞,钟千有,谢津平,等. 知识驱动的梯级泵站群智能运维管理平台研究与应用[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S1):484-490.
- [4] 夏红明,张国文,喻未. 数字孪生技术在泵站运行管理中的应用[J].南昌工程学院学报,2025,44(01):21-26.
- [5] 杨岩. 数字孪生在水利泵站智能化管理中实践应用[J].水上安全,2024,(19):74-76.
- [6] 薛萍萍,韩斐,陈柏. 数字孪生技术在某泵站运行管理中的应用[J].水利技术监督,2024,(06):45-48.
- [7] 匡正,刘媛媛,肖璐. “数字孪生”灌排泵站的建设与思考[J].上海大中型电机,2024,(01):49-53.
- [8] 梁啟斌,刘高宇,陈明敏. 基于数字孪生的闸泵群可视化研究及应用[C]//中国水利学会.2023 中国水利学术大会论文集(第一分册).珠江水利委员会珠江水利科学研究院,2023:326-334.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS