

# 数字孪生技术在水利发电设备运维中的应用

王 凯

河北省水务中心石津灌区事务中心 河北 石家庄 050000

**摘要：**随着水利发电行业规模持续扩大与智能化升级加速，设备运维的复杂性与重要性日益凸显。本文探讨数字孪生技术在水利发电设备运维中的应用。先概述该技术的概念、发展历程、原理及体系架构，分析建模、仿真、物联网、大数据与人工智能等关键技术。重点阐述其在设备实时监测与状态评估、故障预测与诊断、运维决策支持与优化及全生命周期管理等方面的应用，包括多维度数据融合、智能故障定位等具体方式。研究显示，该技术能提升设备可靠性、降低运维成本、提高发电效率、增强决策科学性，为水利发电行业智能化升级提供支撑。

**关键词：**数字孪生技术；水利发电；设备运维；应用

**引言：**水利发电在能源结构中占据重要地位，水利发电设备的稳定运行直接关系到电力供应的可靠性与稳定性。传统运维方式多依赖人工定期巡检与经验判断，难以实时精准掌握设备状态，故障发现与处理存在滞后性，导致运维成本高、发电效率受影响。数字孪生技术作为新兴的数字化手段，通过构建物理设备的虚拟镜像，能实现对设备全生命周期的实时监测、智能分析与精准决策。将其应用于水利发电设备运维，有望解决传统运维难题，推动水利发电行业向智能化、高效化转型。

## 1 数字孪生技术的概述

### 1.1 概念与发展历程

数字孪生是通过数字化手段构建与物理实体精准对应的虚拟模型，依托实时数据交互实现对实体状态的动态模拟、监测及性能优化。这一概念的雏形由美国密歇根大学迈克尔·格里夫斯于2003年提出，当时被描述为“物理产品的数字等价物”，早期主要服务于制造业的产品研发。2010年，NASA将其应用于航天器的状态监控与维护，促使该技术向复杂工程系统领域拓展。随着物联网、大数据等关联技术的成熟，2015年后数字孪生技术加速发展，应用场景从工业领域延伸至城市管理、能源等多个领域，成为连接物理世界与数字空间的关键技术。

### 1.2 技术原理与体系架构

数字孪生技术的核心原理是虚实精准映射与实时动态交互。通过部署在物理实体上的感知设备采集运行数据，经边缘节点预处理后传输至虚拟模型，虚拟模型通过仿真运算生成优化方案，再反作用于物理实体，形成完整的闭环控制流程。其体系架构分为四层：物理层由传感器、控制器等硬件组成，负责数据采集与指令执行；数据层对多源异构数据进行清洗、融合与存储；模型层构建高保真虚拟模型，实现物理实体的行为仿真与

状态推演；应用层提供可视化界面与功能模块，支撑具体业务场景的决策与管理，各层级通过网络协议实现数据互通与协同工作<sup>[1]</sup>。

## 2 数字孪生的关键技术

### 2.1 建模技术

建模技术是数字孪生构建的基础，需实现物理实体的多维度精准数字化映射。其核心在于融合几何建模、物理建模与行为建模：几何建模通过三维扫描等技术还原实体外形与结构细节；物理建模基于力学、热力学等原理构建数学模型，模拟实体物理特性；行为建模则结合历史数据与实时状态，刻画实体在不同工况下的动态响应。建模过程需平衡精度与效率，通过参数化建模、轻量化处理等技术，确保虚拟模型既能精准反映实体状态，又能满足实时交互需求，为后续仿真与分析提供可靠基础。

### 2.2 仿真技术

仿真技术是数字孪生实现动态推演的核心支撑，通过数值计算与场景模拟复现物理实体的运行过程。依托建模技术生成的虚拟模型，仿真技术可模拟实体在不同环境、负载及故障条件下的行为，如设备振动、能耗变化等。其关键在于构建高精度仿真引擎，支持多物理场耦合分析与实时动态更新，同时结合并行计算技术提升仿真效率。通过仿真，可提前预判实体潜在问题，测试不同操作方案的效果，为运维决策提供数据支持，减少物理实验的成本与风险。

### 2.3 物联网技术

物联网技术为数字孪生提供实时数据交互通道，是连接物理实体与虚拟模型的桥梁。通过在实体上部署各类传感器（如温度、振动、压力传感器），实时采集运行参数、环境数据等信息；借助无线通信（如5G、

LoRa) 与边缘计算技术, 实现数据的快速传输与预处理, 确保数据时效性与完整性。物联网技术需解决多设备协同、海量数据传输稳定性等问题, 通过标准化接口与协议, 实现不同类型设备的数据互通, 为虚拟模型的动态更新与精准仿真提供持续的数据输入。

#### 2.4 大数据与人工智能技术

大数据与人工智能技术为数字孪生赋予智能分析与决策能力。大数据技术负责处理物理实体与虚拟模型产生的海量多源异构数据, 通过数据清洗、融合与挖掘, 提取隐藏规律与特征; 人工智能技术则基于这些数据训练预测模型、诊断模型等, 实现设备状态的智能评估、故障的精准预测与定位。例如, 机器学习算法可通过分析历史故障数据, 识别故障前兆特征; 深度学习模型能处理图像、振动等复杂数据, 提升诊断精度<sup>[2]</sup>。

### 3 数字孪生技术在水利发电设备运维中的应用

#### 3.1 设备实时监测与状态评估

##### 3.1.1 多维度数据采集与融合

在水利发电设备运维中, 多维度数据采集与融合依托数字孪生体系实现全面感知。通过在水轮机、发电机、闸门等关键设备部署振动、温度、压力传感器, 同步采集水文数据(如水位、流速)、电气参数(如电压、电流)及环境信息(如湿度、水质)。利用物联网技术将异构数据传输至数据层, 经清洗、校准后, 通过时空对齐与特征融合算法, 消除数据冗余与误差, 形成统一数据集。该过程打破传统监测的数据孤岛, 为设备状态评估提供多维度、高保真的数据基础, 确保虚拟模型与物理实体的精准映射。

##### 3.1.2 实时状态可视化展示

实时状态可视化展示借助数字孪生的虚拟建模与渲染技术, 将水利发电设备的运行状态以三维动态形式呈现。基于高保真虚拟模型, 叠加实时采集的关键参数(如机组转速、轴承温度、闸门开度), 通过色彩标注(如红色预警高温区域)、动态曲线(如振动幅值变化)等方式, 直观展示设备健康状态与运行趋势。运维人员可通过交互界面查看设备内部结构细节、参数波动及异常点分布, 甚至对水下部件等难达区域进行虚拟巡检。这种可视化方式提升了状态监测的直观性与效率, 便于快速识别潜在问题。

##### 3.1.3 基于模型的状态评估

基于模型的状态评估利用数字孪生的物理模型与仿真能力, 实现水利发电设备的精准状态研判。虚拟模型融合设备设计参数、材料特性及力学原理, 结合实时采集的运行数据, 通过多物理场仿真(如流场、应力场

分析) 模拟设备性能衰减过程。通过将实测数据与模型仿真结果对比, 量化评估设备健康指数(如叶片磨损程度、发电机绝缘老化状态), 并预测剩余寿命。例如, 针对水轮机气蚀问题, 模型可通过流场仿真与振动数据关联分析, 提前评估气蚀对机组效率的影响, 为维护提供科学依据。

#### 3.2 故障预测与诊断

##### 3.2.1 基于数据分析的故障预测

基于数据分析的故障预测借助数字孪生积累的海量设备运行数据, 结合机器学习算法构建预测模型。通过挖掘历史故障数据与设备参数(如振动频率、油温变化)的关联规律, 识别故障前兆特征。例如, 针对发电机定子绝缘故障, 模型可通过分析局部放电量、温度梯度等数据的异常趋势, 提前数周甚至数月预测潜在故障风险。同时, 结合虚拟模型仿真不同工况下的设备响应, 动态修正预测阈值, 提升预测精度。这种方式打破传统定期维护的局限性, 实现故障“早发现、早预警”, 减少非计划停机时间。

##### 3.2.2 智能诊断与故障定位

智能诊断与故障定位依托数字孪生的虚实交互能力, 实现故障的精准研判与定位。当设备出现异常时, 虚拟模型同步复现物理实体的异常状态, 结合实时数据与历史案例库, 通过深度学习模型(如卷积神经网络)分析故障特征(如振动频谱畸变、压力脉冲异常)。例如, 水轮机叶片裂纹可通过流场仿真与振动信号的关联分析, 定位裂纹位置及扩展程度; 发电机轴承故障则通过温度场分布与振动模态对比, 确定故障类型。诊断结果以可视化方式呈现, 辅助运维人员快速制定维修方案, 提升故障处理效率。

#### 3.3 运维决策支持与优化

##### 3.3.1 模拟不同运维策略效果

数字孪生技术通过构建高保真虚拟模型, 可对不同运维策略进行仿真模拟, 为决策提供量化依据。例如, 针对水轮机检修, 可在虚拟环境中模拟“停机大修”“局部部件更换”“带载维护”等多种方案, 通过仿真计算各方案的停机时长、成本投入及对发电效率的影响。结合历史数据与实时工况, 模型能预测不同策略下设备的长期运行稳定性, 如模拟频繁启停对发电机寿命的影响, 或不同检修周期下的故障发生率。

##### 3.3.2 优化设备运行参数

基于数字孪生的实时数据交互与仿真能力, 可动态优化水利发电设备的运行参数。虚拟模型融合水轮机效率曲线、发电机负荷特性等物理规律, 结合实时水文

数据（如流量、水头）与电网需求，通过智能算法求解最优运行参数组合。例如，自动调整导叶开度与机组转速，使水轮机在不同流量下保持最高效率；根据温度、振动数据动态优化冷却系统参数，避免设备过热。

### 3.3.3 资源调度优化

数字孪生技术可实现水利发电设备运维资源的智能化调度。虚拟模型整合设备状态、维护需求、人员技能、备品备件库存等信息，通过运筹学算法生成最优资源分配方案。例如，当多台机组同时出现维护需求时，模型可根据故障紧急程度、维修人员位置与技能匹配度，自动规划检修顺序与人员调度路径，缩短响应时间；针对备品备件，通过模拟不同库存水平下的缺货风险与资金占用，优化库存策略。

## 3.4 设备全生命周期管理

### 3.4.1 设计阶段的应用

在水利发电设备设计阶段，数字孪生技术可构建虚拟原型进行多方案仿真验证。通过输入水文条件、材料特性等参数，在虚拟环境中模拟水轮机、发电机等设备的运行状态，分析不同设计方案的水力效率、结构强度及能耗表现。例如，对叶片曲面造型进行流体动力学仿真，优化水流过流特性；通过结构力学模拟，验证机组在极端水压下的稳定性。设计人员可基于仿真结果迭代优化方案，减少物理样机试制次数，缩短研发周期，同时提前规避潜在设计缺陷，提升设备初始设计的合理性和可靠性。

### 3.4.2 制造与安装阶段的应用

制造与安装阶段，数字孪生技术通过虚拟映射实现过程精准管控。在制造环节，虚拟模型实时接收生产线数据，模拟零部件加工精度、焊接质量等关键指标，对比设计标准及时修正工艺参数，确保产品一致性。安装阶段，基于三维虚拟场景模拟设备吊装、定位与连接流程，提前规划安装路径与工序，避开空间干涉风险。例如，针对水轮机与发电机的同轴度安装，通过虚拟校准模拟调整方案，指导现场施工，降低安装误差，缩短安装周期，同时为后续运行维护积累初始设备参数基线。

### 3.4.3 运行与维护阶段的应用

运行与维护阶段是数字孪生技术应用的核心环节，通过虚实交互实现动态管理。虚拟模型持续接收设

备运行数据，同步更新状态参数，模拟机组在不同负荷、水文条件下的性能变化，提前预警潜在故障。维护时，基于设备健康状态评估结果，生成个性化维护计划，如预测性更换易损部件、优化检修窗口期。同时，通过虚拟仿真模拟维护操作流程，培训运维人员，提升现场作业规范性与安全性，最大化设备可用率，延长使用寿命。

### 3.4.4 退役阶段的应用

在设备退役阶段，数字孪生技术助力实现环保与资源高效利用。虚拟模型整合设备全生命周期数据，评估退役设备的残余价值与可回收部件，模拟拆解流程与资源回收方案，如确定发电机定子、转子等部件的再利用可行性。同时，通过仿真预测设备退役后对周边生态环境的影响，制定污染防控与场地修复方案。例如，针对水轮机叶片等金属部件，模拟不同拆解工艺的能耗与排放，选择绿色处理方式，实现退役过程的低碳化与资源化，为设备更新迭代提供数据支撑与决策依据<sup>[3]</sup>。

## 结束语

数字孪生技术为水利发电设备运维注入了智能化活力，从实时监测到全生命周期管理，其深度融合物理实体与虚拟空间的特性，有效破解了传统运维模式的低效与滞后难题。尽管当前在高保真建模、海量数据处理等方面仍面临技术挑战，但随着相关技术的持续迭代，其应用潜力将进一步释放。未来，通过深化虚实交互能力与跨场景协同，数字孪生技术必将成为推动水利发电行业提质增效、绿色发展的核心引擎，为构建安全、高效、可持续的能源体系提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1]齐波,冀茂,郑玉平,朱柯翰,潘书燕,赵林杰,李成榕.电力物联网技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J].高电压技术,2022,48(08):3012-3031.
- [2]张露,鲁非,刘睿,卢仰泽.新型电力系统背景下电力装备数字孪生技术架构及应用展望[J].湖北电力,2022,46(03):36-44.
- [3]齐波,张鹏,张书琦,赵林杰,王红斌,黄猛,唐志国,冀茂,李成榕.数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J].高电压技术,2021,47(05):1522-1538.