

# 数字孪生驱动下水电厂机组运行状态智能评估方法研究

安润序<sup>1</sup> 安序或<sup>2</sup>

1. 汉江水利水电(集团)有限责任公司丹江口火力发电厂 湖北十堰 442700

2. 汉江水利水电(集团)有限责任公司 湖北十堰 430000

**摘要:** 随着能源结构转型以及智能发电站建设不断发展,水电厂组运行管理逐步由靠人经验分析向数字化、智能化方向转变。传统运行状态评价主要基于脱机信息及静态模型,不能真实反映设备健康状态并存在反应慢、评估准确率低等问题,数字孪生技术为水力发电设备运行状态智能化评估提供了一种新的思路。本文在数字化双胞胎概念的基础上,建立虚拟实体与实体相结合的水电设备运行状态智能诊断系统,首先针对水电机组数字化双胞胎的概念与技术路线进行了阐释,并构建了多种运行数据的双胞胎映射模型;其次设计了一种基于深度学习与机理相结合的智能诊断方法,以从多维度数据中提取动态特征并预测设备健康状态;最后以典型机器实例进行验证,实验表明,此方法能及时发现重要运行参数并预测未来状态,显著增强设备状态评估精度与可靠性。

**关键词:** 数字孪生; 水电厂; 机组运行; 智能评估

水电厂几组是电力生产环节的最重要的一环,其机组的运行情况对电力生产的正常稳定和经济效益都有着直接影响。水电装机容量及工况条件不断增加与改善,仅仅依靠人工经验与单一指标定量量化的机组状态判断方式已不能再适应精确实时的机组运营管理方式的发展。近年来,随着以互联网、云计算、大数据、人工智能等技术为代表的发展,基于信息技术的机组信息实时收集与机器学习在机器健康状态监测与诊断方向的应用应时而生。最重要的一项技术是数字孪生技术,利用此技术可以形成真实机器组件实体的仿真模型,并以此为基础完成不间断监测、预测和修正决策的管理模式。对于水电行业来说,能看得见机器运行中发生的情况,以及对其各部分的整体知晓情况,并利用模拟环境来判断机器的健康程度,以此就能及时发现可能发生的故障,并且优化自己的操作模式。

## 1 数字孪生驱动下水电厂机组智能评估的理论基础与技术体系构建

### 1.1 数字孪生在水电机组运行监测中的理论内涵与发展演进

数字孪生(DigitalTwin)是一种以多源异构的数据为基础,构建复杂系统镜像,通过建立物理实体、虚拟模型、运行状态三者之间的相互耦合,实现跟踪监控、预测决策和智能控制的技术手段。在水电机运行监控中,将机械构件的结构

形态、工况、外部环境以及控制方法等都进行模仿,从而形成能实现“虚实联动、自我学习”的“实体”的“数字复制品”,以保障实时精准的水轮机监测和效率计算。从发展进程而言,数字孪生可分三阶段:第一阶段即静态模拟期,该时期主要依靠离线建模与物理试验来实现产品的设计与试验验证;第二阶段即动态对应期,该阶段依靠传感、通信技术的结合,实现虚拟模型与实际机械实体的实时数据交互;第三阶段即智能决策期,该阶段依靠人工智能以及机器学习的引入,使得双生体能够实现状态的识别、走势的预判以及最优决策的建议。

### 1.2 水电机组运行状态评估的理论模型与关键参数体系

水电机组运行状态评估,主要是对整个能耗转换过程及变化特性进行的一系列广泛性分析,以电机动力学方程、流体动力学方程及热传递方程为基础,在这个方法中采用数据驱动计算法来评估机械的性能,从而把机械和热量、电子以及环境做为四个组成部分,组成了一个多元测试矩阵。从机械角度看,主要分析电机的主轴振动、转速误差、冷却水流量和油压变化;从电力方面来考虑电机定子电流、激磁电压、功率因数谐波分量来评价能量输出的连续性和稳定性;从热力学角度来看,电机冷却水温、油脂温度和升高速率来检查机器的热平衡状况;对于环境方面的影响,如水压、水位和周围环境的温度、湿度都会对机器性能有较大的影响。

经典的评价方法只依赖于一个变量或者是线性的回归模式，无法解释各参数间的非线性关系。

### 1.3 数字孪生驱动下的机组运行智能评估总体技术架构

以“数据 – 模型 – 算法 – 反馈”循环为基础的数字孪生驱动的机组运行智能化评估系统目标是获得机组运行的在线监控能力、智能化评估能力以及智能自适应优化的控制策略。本系统的设计总体上可以划分为数据采集层、数字孪生构建层、智能评估层、可视分析层和决策反应层。数据采集层是采集设备运行过程中的多源异构数据，主要包括传感设备采集的信号、控制系统采集的数据以及场域监控设备采集的数据。同时通过上述信息，孪生建模层实现了对于设备模拟体的构建、模拟体特征及动作的实时映射，智能评估层基于机器学习、深度神经网络技术实现了对设备状态进行全面分析，给出设备的健康状态级别，获得用于操作状态评价指标的状态评价结果。可视化分析层将其通过 3D 模型、图示形式以及动态走势的形式进行呈现，实现综合信息交互与可视化诊断。

## 2 水电厂机组数字孪生模型构建与智能评估算法设计

### 2.1 水电机组数字孪生模型的构建流程与虚实映射机制

水电厂数字孪生模型主要是在虚拟空间建立能够准确对应现实并响应和预测的水电厂数字化对象。该建模包括几何、物理、行为及数据交互 4 个主要部分，其中通过建模软件对水轮机组的结构参数及 CAD 数据等信息进行建模，从而在虚拟环境中重建水轮机、发电机、调速器及其附属结构的空间布局，为基础模拟奠定基础。在考虑流体力学以及能量守恒定律之后，将水流动能、机械动能与电能进行转制并得出关于机器工作物理过程特征的一个表达公式。在此过程中，我们还会将机器工作控制原理、控制策略以及控制对象的机器反应方式综合起来，这样就能使得虚拟系统进行真实的模拟工作并可以做出对应的工作反应。除此之外，也会把通讯口以及感知网以某种状态进行实时的信息传输关系的构建，以此来构建对应的数据接收、发送以及映射过程。

### 2.2 机组多源运行数据的融合建模与特征提取方法

信息多源性的集成是数字复制品具有高精确度评判的前提条件。水电机组的运行状态由传感器阵列、在线控制系统日志记录、维修日志及外部环境监测等多源数据供给，数据特征复杂、时变、且有较强噪声。基于构建良好模型考虑，采取了“多级混合、分阶段提炼”的技术路线。数据的前处理，利用滑动均值滤波和小波去噪法对采集信号的高频

噪声进行消除，利用归一化处理及时间同步处理解决不同采样率，不同数据尺度的采样信息。进而对所涉及的各个源数据应用加权贝叶斯估计进行数据融合层面的数据整合工作，并在数据整合的基础上实施各项源数据的概率加权计算，构建起一组完整的序列特征矩阵。这里将 DL 和传统的统计方法结合起来，利用 CNN 从空间上挖掘温度场形态、震幅分布、流速变化的趋势等规律信息来挖掘空间上的局部规律性。

### 2.3 智能评估算法的构建原理与评价指标体系

智能化的评价设备运行状态是在数字化双胞胎中以算法模型为基础，对系统复杂化、非线性的关系进行理解和预测，本文提出的智能评价模型包含三个部分：机器学习模型、模糊逻辑模块和专业数据库，形成“数据驱动的知识集成式”的综合评估系统。首先从机器学习角度出发，采用随机森林算法探究与区分融合特征的重要性，并根据该特征的重要性获取特征的关键要素。然后引入基于 BP 神经网络的一种改进算法，以对记录进行学习训练并产生追踪动态变化的模式，同时还引入一种对权重进行自动调整的方式，增强模型对异常样本的稳定性和抗干扰性。将设备工作环境设定模糊属性函数进行模糊推理，并对评价结果进行多级评判的模式。

### 2.4 数字孪生系统的动态反馈与模型自适应机制

最主要的是数字孪生体系拥有对实时反应和自适应调节的功能，以往的模型一般都是一些静态的参数，无法对环境中的工况进行调整，而这种孪生体能够在不断学习的过程中让自身的模型和对象一起进化。本文提出了一种结合残差修正和 RL 的自我调节方法对设备进行长期的稳健性维护和预测精度。该阶段动态反馈环节是利用孪生模型预报与观测数据差异实时调校，一旦差异量偏离预设的阈值，即触发修正参数模块并重新确定关键参数值。该环节融合使用卡尔曼滤波和遗传优化实现了模型参数的快速收敛和最小误差。对于自我学习环节，采取的措施是使用强化学习措施获取评估模型准确度的奖惩规则，修改模型框架结构和权重设置，使得双胞胎模型始终保持较强的鲁棒性。并同时建立模型漂移监测和在线复训练机制。

## 3 数字孪生驱动的水电机组智能评估系统实现与应用成效分析

### 3.1 智能评估系统的总体架构设计与功能模块划分

基于以上建立模型和设计算法的结果，本文设计了一

种用于水电装备状态智能评估的数字孪生系统，遵循“数据采集—建模仿真—状态评估—决策反馈”的闭环，侧重实时感知、智能分析与持续优化，形成多层级、各模块的复杂系统架构，简而言之就是可以分为数据采集层、建模层、算法评估层及用户呈现层四个关键步骤。数据采集与传输层是数据获取的基础，专门负责机器多源异构数据的实时采集和传输。通过将传感器网络、PLC 控制系统和 SCADA 监控系统有机结合，实现了对温度、振动、压力、电流、电压、流率等重要运行参数的高密度采样。应用边缘计算技术对信息进行预先处理、压缩和过滤以保证信息实时、精确，建立设备的虚拟模型，根据模型几何结构、工作方式以及物理参数，实现物与虚的实时对应。

### 3.2 智能评估系统在典型机组运行场景中的应用验证

为了验证该系统的工作可靠性与应用性，本文选择某大流量水电站的一台 150MW 级混流式水轮发电机组作为目标设备并在机端进行实时安装试验研究，在一年时间内对该系统进行启动停机、正常运行、负荷变化等工况的智能评价预判分析。启动过程中，系统通过数模复制来掌握转速、油压、水流的变化规律，找到了启动震动最大和动力反应时间延迟值，同时自动计算出效率转换值。该双胞胎系统的模拟运行模式与实际检测数据的准确度高，超过了 96%。当处于稳定运行状态时，该双胞胎系统将对电流、温度和震动状态等量值进行持续的监测，发现微小的失衡抖动，提前发出可能存在的风险警报，以规避机器性能下降或零部件损害情况变严重的后果。

### 3.3 系统运行效能与安全性分析

该评价系统借助分布式计算和 GPU 并行化加速实现模型的运行和大数据的控制处理。实验结果表明，系统响应时间的平均值为 1.2s 以下的标准值，即响应迅速、即兴性好，数据流量能达到百万级传感器结点的数据采集需求，提供百万级的实时集控监测技术。在安全方面采用多层次加密、限制访问策略。采用 TLS 安全加密协议的传输层保证信息的安全传输，利用存储层的分布式冗余备份技术防范信息丢失；对用户访问权的控制采取角色权限制控制，将所有的动作记录在块状日志系统中以方便追踪；平台具有错误容错和网络自愈的功能，可以解决设备离线或数据截断时通过切换至备份链路保证核心功能连续稳定地执行。

### 3.4 数字孪生评估系统在水电智能运维中的拓展应用

通过数字孪生平台能够实现对机组状态识别与预测，并展现出数字化辅助决策与生产指挥应用方面的潜力，可以通过接口与火电企业能量管理系统（EMS）、点检诊断管理系统（PdM）相联接，实现机组运行调整、点检计划的智能自动生成。当机组发生异常工况触发后，自动触发故障检修并预警到集控中心，实现基于设备状态的运行管理模式。从能源角度，该系统通过仿真分析各个操作方法来选择使用最少的能源，以减少不必要的能源浪费、提高生产产出。此外，还具有工厂数字化协作维护和远程技术人员监测诊断的优势，使得工作人员可以通过数字化平台实时查看机组状态并必要情况下实施远程操作，达到“无人值守、集中管理”的智慧运维。

结语：本文针对水电机组运行状态诊断的智慧化需求，基于数字孪生体建模打造了物理 - 数字双胞胎下的智慧诊断评价系统架构，并从原理和方法上对数字孪生在水电机组安全监视中的发展原理和技术体系进行了阐述，提出了基于物理模型和数据模型相融合的方式进行建模，设计了适配不同运行信息的数据驱动智能诊断算法，并在一些典型机组运行环境中进行试验，验证结果表明能够精准识别和预测设备运行状态，可以很好地提升效率、预防事故、节油降耗等。

#### 参考文献：

- [1] 胡阳, 王蔚然, 房方, 等. 风电机组运行动态数字孪生建模及半物理仿真 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3):636–648.
- [2] 王印松, 姜灵斌, 王莺歌. 基于数字孪生技术的热电联产机组建模研究 [J]. 热力发电, 2023, 52(12):106–114.
- [3] 王晓君, 张耕野, 王东. 数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用 [J]. 智能城市应用, 2024, 7(3):126–128.
- [4] 朱程伟, 张义. 数字孪生在供水运行调度中的发展及应用 [J]. 移动信息, 2024, 46(3):289–292.
- [5] 吴崛起, 安凤栓, 王全康. 发电厂设备运行状态的在线数字孪生仿真系统 [J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1):148–152.

#### 作者简介：

安润序（1998-03），男，汉族，山东省济南市长清区，学历：本科，职称：助理工程师，研究方向：水利水电。

安序彧（1996-11），男，汉族，山东省济南市长清区，学历：本科，职称：助理工程师，研究方向：水利水电。