

# 人工智能在水电机组故障诊断与检修中的应用

金比尧

福建华电电力工程有限公司, 中国·福建 福州 350001

**摘要:** 在水力发电过程中, 水电机组作为一类核心设备, 通过保证水电机组运行的安全性和稳定性, 可以保证清洁能源的长期稳定供应。水电机组在长期负荷运行下, 由于水力环境较为复杂, 且机械部件逐渐出现老化问题, 将会导致水电机组出现各类故障问题, 包括绕组过热、轴承磨损以及转轮裂纹等。在传统水电机组故障诊断和检修工作中还存在一定的局限性, 检修效率相对较低, 主要依赖人工经验, 对故障问题的响应相对滞后, 因此无法充分保障水电机组的正常运行。通过运用人工智能技术, 可以充分挖掘特征, 并精准识别模式, 实现机组的智能决策, 使故障诊断从事后排查逐渐转变为事前预警, 采取预测性的维护措施, 使各类故障问题的发生概率得到降低, 全面保障水电机组的长期稳定运行, 促进我国水力发电行业的健康发展。

**关键词:** 人工智能; 水电机组; 故障诊断; 检修技术; 应用要点

## Application of Artificial Intelligence in Fault Diagnosis and Maintenance of Hydropower Units

Jin Biyao

Fujian Huadian Electric Power Engineering Co., Ltd., China Fujian Fuzhou 350001

**Abstract:** In the process of hydroelectric power generation, hydroelectric units, as a type of core equipment, can ensure a long-term stable supply of clean energy by guaranteeing the safety and stability of their operation. Under long-term load operation, due to the complexity of the hydraulic environment and the gradual aging of mechanical components, hydroelectric units may experience various faults, including winding overheating, bearing wear, and rotor cracks. There are certain limitations in the traditional fault diagnosis and maintenance of hydroelectric units, with relatively low maintenance efficiency, mainly relying on human experience, and a relatively delayed response to fault issues, thus unable to fully ensure the normal operation of hydroelectric units. By applying artificial intelligence technology, features can be fully extracted, and patterns accurately recognized, enabling intelligent decision-making for the units, shifting fault diagnosis from post-event investigation to pre-event warning, and adopting predictive maintenance measures, reducing the probability of various faults, comprehensively ensuring the long-term stable operation of hydroelectric units, and promoting the healthy development of China's hydroelectric power industry.

**Keywords:** Artificial intelligence; Hydropower units; Fault diagnosis; Maintenance technology; Key points of application

## 0 引言

随着我国“双碳”目标的持续深入, 水电产业的整体发展质量也逐渐提升, 水电装机容量也明显增大。为了保障水力发电效率, 充分保证电网安全, 需要加强水电机组运维管理, 实时诊断和检修机组故障问题, 保证水电机组的安全稳定运行。在传统运维管理模式中, 存在故障定位难度较大、响应迟缓等问题, 通过借助人工智能技术, 可以采用数字孪生、机器学习、多源感知等技术手段, 实现水电机组的精准检修, 并采取预测性维护措施, 严格防控各类故障问题, 保障机组的正常运行, 推动我国水电产业的高质量发展。

## 1 人工智能在水电机组故障诊断与检修中的应用优势

### 1.1 诊断效能显著提升

首先, 通过运用人工智能技术, 可以增强水电机组故障的早期预警能力, 精准捕捉早期劣化特征, 包括微秒级的声波异常、0.01mm 级的振动偏差等, 与传统阈值报警相比, 在故障预测方面能够提前 72 小时, 且具有更高的准确率。例如, 在水电机组运行过程中, 通过采用声波 AI 监测系统, 可以快速锁定滑轮裂纹, 一般能够在 23 秒内完成定位, 锁定的裂纹可以达到 0.2 毫米级, 有着较高的匹配度。其次, 从诊断精度和效率来看, 通过构建数字孪生平台,

可以缩短故障问题的定位时间,使其由原本的4小时转变为30分钟。与此同时,可以采取多算法融合模型,及时诊断多参数故障,提升复合故障的分离精度。最后,可以有效突破经验局限,在借助人工智能技术后,可以合理构建“声波指纹库”和故障知识图谱,并转化专家经验,建立起相应的算法模型,使人工诊断时的主观性得到消除,避免出现个体差异问题<sup>[1]</sup>。

### 1.2 检修模式优化升级

在水电机组故障检修时,通过运用人工智能技术,可以创新和升级检修模式,使机组由计划检修逐渐转变为预测性检修,并根据设备健康状态,精准预测剩余寿命,动态化的制定机组检修计划,防止出现非计划停机问题,缩短机组的停机时间。与此同时,在运用人工智能技术后,可以使机组故障诊断排查的盲目性得到消除,实现对故障问题的精准检修。在人工智能技术应用过程中,可以借助多源数据精准定位故障根源,并实现部件级的准确溯源,为检修人员提供指导,确保可以明确故障点,延长检修周期,降低发电机组的运维成本。此外,借助人工智能技术可以从现场依赖逐渐拓展到远程协同,搭建起云-边协同架构,为虚拟仿真推演以及远程实时诊断提供支持,确保充分共享专家资源,缩短故障问题的应急响应和处置时间。

### 1.3 管理与安全价值凸显

在人工智能技术应用时,借助数据驱动,可以实现闭环管理目标。在水电机组故障诊断和检修过程中,可以充分整合故障、检修和运行数据,确保协同监测、检修、诊断以及评估等环节,使水电机组运维策略得到持续优化。与此同时,在实现人工智能管控后,可以严格控制安全风险,实现高风险故障问题的精准识别,包括转轮叶片脱落以及主轴轴衬磨损等,使机组停机和安全事故得到规避,降低发电机组的年损失量。此外,还可以高效配置资源,借助人工智能系统,实现检修人员、备件和设备的自动调度,防止发生资源冲突问题,使发电机组的协同运维效率得到提高<sup>[2]</sup>。

## 2 人工智能应用的全流程框架

### 2.1 数据感知层

首先,在感知部署方面,可以将传感器布设在机组的关键部位,并确保覆盖各种类型的参数,包括水力、电气以及机械等。对于所采用的传感器,包括温度、振动、压力、摆度、油液分析等类型,并要配置声波或者声纹采集单元,做好高清摄像头、红外热像仪的安装工作。例如,在水电站可以布设声纹采集单元,并确保具有边缘计算能

力,在发现异常问题后实现毫秒级响应。其次,在数据传输方面,可以借助工业以太网和5G专网,并根据边缘计算节点,在低延迟情况下实时传输数据,并在现场预处理后,向云端平台上传原始数据。最后,在数据预处理过程中,可以借助特征归一化、时空对齐以及滤波去噪等操作,建立起标准化的数据集。在发现不平衡样本后,可以借助SMOTE算法,并运用迁移学习技术,使故障样本的稀缺问题得到解决。

### 2.2 模型分析层

人工智能技术可以基于特征工程,做好时序、时频域以及空间等特征的提取,其中空间特征包括网络节点关联、时序特征包括LSTM长短期依赖等,时频域特征包括频谱峰值以及小波包能量等,可以在多维度下建立故障特征向量。在算法选型和融合过程中,可以采取双驱动模型,结合机理与数据,确保与各类故障场景充分适配。在传统机器学习方面,可以运用随机森林以及SVM以及GBDT等技术,确保可以融合多项参数,获取小样本故障,在早期精准识别故障问题。对于深度学习,主要包括图卷积网络等。在不确定性推理方面,可以运用证据理论与贝叶斯网络等。此外,在模型训练和迭代方面,应根据工况数据,并建立故障特征库,合理运用联邦学习,确保可以协同训练多电站数据,借助知识蒸馏建立轻量化的优化模型,与边缘计算场景十分适配<sup>[3]</sup>。

### 2.3 诊断决策层

首先,在故障诊断方面,可以与故障特征库实时匹配,明确故障发生位置、类型,确定故障严重程度和发展趋势,并出具诊断报告,将因果链准确标注,明确置信度。在检修决策方面,可以根据设备的健康等级,并建立电网调度计划,做好风险评估工作,合理优化检修方案。在实际检修过程中,可以确定优先级,确定时间窗口和工序流程,并采取安全措施。最后,在虚拟推演过程中,可以根据数字孪生体,对故障发生过程展开模拟,并确定检修方案效果,使各项工序和资源配置得到优化,使现场试错成本得到降低。

### 2.4 检修执行层

在任务下达方面,可以建立智能运维平台,向责任人分配检修任务,确定时限、标准和工序,为移动终端提供支持,确保可以实施接收信息,并作出反馈。在现场执行过程中,可以运用智能巡检机器人、AR导航,确保精准定位故障点,并形成可视化的检修过程。通过机器人可以对人工巡检有效替代,并自动识别异常情况,包括表计异

常以及漏油等。在远程协同方面,可以借助数字孪生平台,为复杂故障的检修提供远程指导,保证数据以及画面的实时共享,使故障问题的处置效率得到提高。

## 2.5 评估优化层

在检修评估方面,可以从多个维度出发,包括机组恢复性能、成本消耗、检修周期以及故障消除率等,实现检修效果的量化评估。在模型优化时,可以在模型训练集纳入故障案例和检修数据,实现故障特征库的更新目标,使故障问题的诊断准确率得到提升。在策略迭代方面,可以结合评估结果,合理划分设备健康等级,动态化的调整检修周期,并确定算法参数,建立起闭环运维体系<sup>[4]</sup>。

## 3 人工智能在水电机组故障诊断中的核心应用场景

### 3.1 旋转机械部件故障诊断

在水电机组运行过程中,故障发生概率较高的旋转部件包括转轮、轴承以及主轴等,一般表现为声纹畸变以及振动异常等故障问题。通过运用人工智能,可以深度分析声纹与振动数据,并精准识别早期故障问题。在诊断轴承故障时,可以运用 1D CNN 提取轴承振动信号的时频域特征,并根据 LSTM 实现信号时序关联的精准捕捉,能够准确识别早期故障,包括滚珠剥落以及轴承滚道磨损等,具有较高的诊断准确率。与传统频谱分析相比,通过运用此类技术,能够将各类干扰因素及时排除,包括电网波动以及水力脉动等,精准识别微弱故障特征。在转轮故障诊断过程中,可以运用声纹识别技术,为水轮机转轮建立声波指纹库,借助高斯混合模型实时匹配转轮声纹和标准指纹,确保及时发现各类故障问题,如空化蚀损以及叶片裂纹等。水电站通过运用此类技术,可以提前识别故障,防止水电机组出现非计划停机事故。除此之外,在诊断主轴摆动异常时,可以采用随机森林算法,充分融合主轴摆度的多维度数据,包括转速关联摆度、轴向摆度以及径向摆度等,基于摆度异常建立分类模型,快速定位轴系不平衡以及主轴同心度偏差等故障问题,缩短故障识别时间。

### 3.2 电气系统故障诊断

对于水电机组的电气系统而言,所包含的子系统较多,包括调速系统、励磁系统、转子以及定子等,且有着多种故障类型,包括励磁异常、绝缘老化以及绕组过热等,有着较高的风险性。通过运用人工智能技术,可以智能化的分析各类电气参数,包括电压、电流以及温度等,确保实时监测和预警电气故障。首先,在绕组过热诊断过程中,可以运用红外热成像技术,采用 YOLO 算法检测定子绕组

的温度场图像,实现异常温度区域的精准识别,借助 BP 神经网络对温度趋势展开预测。一旦绕组温度出现异常,且达到阈值以上,系统能够自动预警,确保运维人员具有充足的处置时间。其次,在绝缘老化诊断时,可以借助支持向量机,识别变压器油中的溶解气体,分析组分数据,为绝缘老化问题建立分级诊断模型。在过程中,可以将绝缘状态划分为不同等级,包括故障、重度老化、轻度老化以及正常。最后,在励磁系统的故障诊断过程中,可以借助 GRU 网络,根据励磁电流、功率以及电压的时序数据,合理构建模型,准确捕捉动态异常特征,确保及时识别故障问题,防止出现机组失磁事故。

### 3.3 水力系统故障诊断

针对水力系统故障展开分析,具体包括水压脉动、涡带以及空化等,与水流流态具有密切联系,在采用传统诊断方法时,无法实现量化分析目标。通过运用人工智能技术,可以深入分析水力参数,并借助流态仿真模拟,精准研判水力故障。首先,在诊断空化故障问题时,应将各类数据充分融合,包括振动、流量以及水压等,并借助各类算法构建预测模型,确保可以精准预测空化故障。在空化时会有压力脉动特征产生,通过展开特征分析可以量化评估空化程度,具体划分为重度空化、轻度空化以及无空化等类型,为机组负荷调整提供参考依据。其次,在涡带振动诊断过程中,可以采用数字孪生技术和计算流体力学,为水轮机流道建立虚拟模型,通过深度学习算法对比流场数据和仿真数据,准确识别涡带位置,确定振动频率,为机组负荷和导叶开度的调整提供指导,使涡带振动得到抑制<sup>[5]</sup>。

## 4 人工智能在水电机组检修中的应用要点

### 4.1 预测性检修

在水电机组检修中,运用人工智能技术,可以展开预测性检修,充分评估设备的健康状态,并预测设备剩余寿命,动态化的优化检修计划。在评估设备健康状态时,可以采用多源数据融合技术,充分整合设备各项数据,包括检修记录、故障历史以及运行数据等,可以结合神经网络和模糊综合评价法,为机组设备建立健康指数体系。在预测设备剩余寿命时,可以运用深度学习算法,根据转轮以及轴承等部件的老化规律与运行工况,确保精准预测剩余寿命。

### 4.2 检修方案优化

在结合人工智能和数字孪生技术后,可以借助虚拟仿真,优化检修方案,使现场检修成本得到降低。首先,可

以智能化的生成检修方案,根据故障诊断结果,并建立数字孪生模型,通过人工智能系统,实现设备型号与故障类型的自动匹配,生成初步检修方案,做好工期安排,确定检修工序,并采取安全措施。在虚拟检修推演过程中,可以通过构建数字孪生平台,模拟方案实施,确保合理衔接各项工序,优化资源配置,确定作业风险点。

## 5 结语

综上所述,通过运用人工智能技术,可以创新水电机组故障诊断和检修模式,充分融合多源数据,采用智能算法展开分析,并实现数字孪生仿真,使传统运维管理难点得到破解,保证故障问题的精准诊断,做好机组的预测性检修,提升机组检修水平,保障故障诊断的准确性。因此,在水电机组运行期间,应合理应用人工智能,优化故障诊断和检修工作,确保可以提前采取预防和控制措施,实现

水电机组的安全稳定运行目标。

## 参考文献:

- [1] 李琰,胡昌雄,李祥等.基于全面稳定性试验的老旧水电站机组故障诊断与处理[J].电力设备管理,2025(16):199-201.
- [2] 杨晔,李书明,鞠军.水电机组故障诊断专家系统的设计与实现[J].工业控制计算机,2025,38(6):90-92.
- [3] 郝国文,何铮,陆小康等.基于噪声特征的水电机组故障诊断技术研究与实践[J].水电与抽水蓄能,2023,9(6):98-102.
- [4] 郭旭有,何继全,冀锐龙等.某抽蓄电站水轮发电机组抽水工况上机架振动偏大原因分析与处理[J].水电站机电技术,2025,48(10):140-144.
- [5] 陈辉,饶毅,李金阳.流域梯级水电站集控中心在线自诊断系统[J].机电工程技术,2023,52(7):182-185.