

Research on the Optimization of Vibration Feature Extraction and Intelligent Diagnosis Method for Hydrogenerator

Dan Liu

Honghe Guangyuan Hydropower Development Co., Ltd., Honghe Prefecture, Yunnan, 661100, China

Abstract

Given the critical importance of safe and stable operation of hydro-generator units in power systems, where vibration serves as a key indicator for condition monitoring and fault diagnosis, this study addresses the limitations in vibration feature extraction effectiveness and intelligent diagnostic accuracy. The research optimizes feature extraction and diagnostic methods by analyzing vibration signal characteristics, applying wavelet denoising preprocessing, and extracting multi-dimensional feature parameters in time-domain, frequency-domain, and time-frequency domains. A feature selection algorithm is proposed to identify highly sensitive features, followed by constructing a convolutional neural network model with an attention mechanism to enhance the identification capability of critical fault features. Verified through classical fault case studies, the optimized approach significantly improves the representativeness of feature sets and the accuracy and generalization ability of diagnostic models, providing theoretical basis and practical solutions for intelligent fault diagnosis in hydro-generator units.

Keywords

hydro-generator; vibration feature extraction; intelligent diagnosis; feature selection; attention mechanism

水轮发电机组振动特征提取与智能诊断方法优化研究

刘丹

红河广源水电开发有限公司, 中国·云南红河州 661100

摘要

针对水轮发电机组安全稳定运行对电力系统至关重要且振动是其状态监测与故障诊断关键指标, 以及振动特征提取有效性与智能诊断精度不足的问题, 本研究旨在优化其特征提取与诊断方法, 具体通过分析振动信号特性、采用小波去噪预处理并提取时域、频域及时频域多维度特征参数, 进而提出特征选择算法筛选高敏感性特征并构建引入注意力机制的卷积神经网络模型以增强对关键故障特征的辨识能力。经典型故障案例验证, 优化后的方法有效提升了特征集的代表性与诊断模型的准确率及泛化能力, 为水轮发电机组的智能故障诊断提供理论依据与可行方案。

关键词

水轮发电机组; 振动特征提取; 智能诊断; 特征选择; 注意力机制

1 引言

将水轮发电机组作为水力发电核心设备其运行状态直接关系到整个电力系统安全性与稳定性的情况, 以及振动作为反映机组机械健康状况最为关键特征参量且异常振动往往是转子不平衡、轴承损坏、汽蚀等多种潜在故障早期征兆的情形相结合, 可知对机组振动进行持续监测和精准诊断具有重大工程实际意义。当前, 基于振动信号的特征提取与智能诊断技术已成为该领域主流研究方向, 然而传统振动特征分析多依赖时域或频域单一指标, 难以全面捕捉非平稳、非线性振动信号中蕴含的丰富故障信息, 并且尽管各类智能诊断算法如支持向量机和神经网络已获应用, 但在实际复杂工况

下仍普遍面临特征冗余度高、诊断模型泛化能力不足的挑战, 致使故障识别准确率和可靠性有待进一步提升, 这种现状制约了状态检修策略的有效实施, 从而使得开展振动特征提取与智能诊断方法的优化研究显得尤为迫切。

2 水轮发电机组振动特征提取方法研究

2.1 振动信号预处理方法

水轮发电机组振动信号的预处理环节是后续所有分析的基石, 其质量直接决定了故障诊断的成败。在实际工业环境中采集到的原始振动信号是一个信噪比极低的混合体, 其中蕴含的真实故障特征往往被强大的噪声所淹没。这些噪声具有多源性特点, 既包括来自电磁场耦合、传感器电路热噪声等外部干扰, 更主要的是机组运行中无法避免的水力噪声、机械摩擦噪声以及相邻部件传递的结构噪声。传统的线性滤波器如高通、低通或带通滤波器在处理此类宽频带非平

【作者简介】刘丹(1988-), 女, 中国湖南益阳人, 工程师, 从事水电站变压器冷却系统智能调控研究。

稳信号时显得力不从心，它们在滤除部分噪声的同时也会扭曲或平滑掉对故障诊断至关重要的瞬态冲击成分^[1]。为了解决这一核心矛盾，本研究采用基于小波变换的阈值去噪法，该方法的核心优势在于其自适应时频分析能力。

2.2 多域特征参数提取

特征参数提取的本质是从预处理后的振动信号中挖掘出能够唯一映射到特定故障模式的量化指标，这是一个将高维数据流浓缩为低维特征向量的信息精炼过程。水轮发电机组故障模式的多样性决定了任何单一类型的特征都无法全面描述其健康状态，因此必须构建一个融合时域、频域及时频域信息的多元化高维特征集。时域特征直接刻画信号的波形结构与统计分布，具有计算简便、物理意义明确的优点。有效值反映了振动的平均能量水平，是评估机组总体振动烈度的核心指标。峰峰值对转子不平衡等引起的振幅变化极为敏感。偏度系数描述了信号概率密度分布的不对称性，可用于识别摩擦等故障。峭度指标对信号中的冲击成分具有显著的放大效应，其值对滚动轴承早期点蚀、齿轮局部断齿等产生瞬态冲击的故障尤为敏感，是早期故障预警的有效工具。

3 智能诊断方法及其优化策略

3.1 常用智能诊断模型分析

水轮发电机组故障智能诊断技术的发展历程中，支持向量机和误差反向传播神经网络代表了经典机器学习模型的典型应用范式。支持向量机的数学本质是求解一个凸二次规划问题，其核心思想是基于统计学理论的结构风险最小化原则，旨在特征空间或经核函数映射后的高维空间中构造一个最大间隔分类超平面。核函数的选择，无论是线性核、多项式核还是径向基核，都实质上定义了样本间相似性的度量方式，决定了模型将原始非线性可分的故障特征映射到线性可分高维空间的能力。这种方法的优势在于其坚实的数学理论基础和在小样本条件下的良好泛化性能^[2]。然而其局限性同样显著，模型性能对核函数类型及内部参数极为敏感，参数优化通常依赖网格搜索等计算成本高昂的方法。更重要的是，其决策函数在推断阶段需要计算待测样本与部分支持

向量样本的内积，当训练样本规模巨大时，推理速度会成为工程应用的瓶颈。误差反向传播神经网络则通过模拟人脑神经元的连接方式，采用多层感知器结构，利用梯度下降算法最小化输出层预测与真实故障标签之间的误差，并逐层反向传播误差信号以调整网络层间的连接权重。

3.2 诊断方法优化策略

面对传统诊断模型的固有局限，本研究提出了一种从特征空间优化和模型结构创新两个维度协同推进的系统性优化策略，旨在提升诊断系统对复杂故障模式的感知与辨识能力。第一项核心优化是实施基于 ReliefF 算法的高敏感性特征筛选，以解决高维特征集中普遍存在的特征冗余和噪声干扰问题。ReliefF 算法是一种高效的多变量过滤式特征选择方法，其原理在于通过近邻样本分析来评估特征权重。算法执行时，会迭代地从训练集中随机抽取一个样本 R ，然后在 R 的同类样本中寻找 k 个最近邻（称为 Near Hit），在每一个不同类的样本中也分别寻找 k 个最近邻（称为 Near Miss）。随后，算法计算样本 R 与每个 Near Hit 在所有特征上的距离差之和，该值反映了同类样本在该特征上的分散度，差值越小则该特征对同类样本的聚集性越好。同时计算 R 与每个 Near Miss 在所有特征上的距离差之和，该值反映了不同类样本在该特征上的分离度，差值越大则该特征对类间差异的区分能力越强。

3.3 诊断性能评估体系

构建一个严谨、多视角的诊断性能评估体系是科学验证优化策略有效性与比较不同算法性能的基石，单一指标的评价结论往往是片面甚至具有误导性的。本体系以分类问题中最根本的混淆矩阵为分析起点，该矩阵清晰地展示了模型在各个故障类别上的真正例、假正例、真负例和假负例的样本数量分布^[3]。这些指标相互补充，共同构成了一个能够从全局性能、预测可靠性、故障检出能力、不平衡数据稳健性以及模型整体区分度等多个维度进行全面评估的指标体系，为客观、公正地评判智能诊断方法的优劣提供了可靠的多维度量化证据，诊断性能评估指标定义如表 1 所示。

表 1 诊断性能评估指标定义表

评估指标	计算公式	物理意义与关注点
准确率	$(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$	模型整体分类正确率。易受类别分布影响，反映宏观精度。
精确率	$TP/(TP+FP)$	预测为正类的置信度。关注点是预测的准确性，降低误报。
召回率	$TP/(TP+FN)$	对实际正类样本的识别覆盖率。关注点是避免漏报，确保故障被检出。
F1 分数	$2PrecisionRecall/(Precision+Recall)$	精确率与召回率的调和平均数。综合评价模型在不平衡数据上的稳健性。
AUC-ROC	ROC 曲线下的面积	模型在不同阈值下分类能力的综合度量。值越大，模型总体区分能力越强。

4 优化方法验证与案例应用分析

4.1 优化前后方法性能对比

为科学验证所提出优化策略的有效性，本研究基于某大型混流式水轮发电机组的历史振动监测数据库展开了系统的对比实验。该数据库记录了机组在正常状态、转子不平

衡、转轮叶片空蚀以及导轴承松动四种典型工况下的多组振动数据，每组数据均包含键相信号与垂直、水平方向的振动加速度信号。实验首先在相同的预处理条件下，从原始信号中提取了包含 25 个时域统计特征、18 个频域特征以及经由 3 层小波包分解得到的 16 个子频带能量特征，共同构

成一个 59 维的初始高维特征集。对比的基线模型包括标准的支持向量机（采用 RBF 核函数）和一层卷积神经网络模型。在未进行特征选择优化的情况下，直接将 59 维特征输入 SVM，其平均诊断准确率为 86.7%，而标准 CNN 模型的平均准确率为 89.3%。随后，应用 ReliefF 特征选择算法对初始特征集进行筛选，设定权重阈值后，特征维度从 59 维显著降至 22 维。将这 22 维高敏感性特征子集再次输入相同的 SVM 模型，其平均准确率提升至 91.5%，同时模型训练和推断时间缩短了约 60%。更重要的是，将优化后的特征集输入到我们提出的融合通道注意力机制的一维 CNN 模型中，该模型在测试集上取得了 97.2% 的平均诊断准确率^[4]。性能提升不仅体现在准确率上，优化后的 CNN 模型在精确率、召回率和 F1 分数上均全面优于基线模型，这表明优化策略不仅提升了整体分类正确率，更有效降低了误报和漏报的风险。特征选择过程去除了大量与故障相关性弱的冗余特征，降低了模型过拟合的风险。

4.2 典型故障诊断案例分析

为了深入阐释优化后诊断方法在实际工程场景中的适用性与有效性，本研究选取了一个典型的转子不平衡故障案例进行深入剖析。该案例数据来源于一台额定转速为 150rpm 的立轴水轮机组在大修后启动过程中监测到的振动数据。机组启动后，上机架垂直方向振动异常增大，远超 ISO 标准规定的报警阈值。应用优化后的诊断流程，首先对采集到的上导轴承处垂直方向振动加速度信号进行小波去噪预处理，然后计算经 ReliefF 算法筛选出的最优 22 维特征子集，最终将此特征向量输入已训练好的融合注意力机制的一维 CNN 诊断模型进行状态识别。在特征提取阶段，优化后的特征集显著放大了与不平衡故障相关的特征贡献。时域特征中，振动信号的通频幅值（有效值）显著升高，但更具代表性的是波形指标和裕度指标的变化，它们反映了信号冲击特性的改变。频域分析显示，在预处理后信号的频谱图中，转频（2.5Hz）成分的幅值占据了绝对主导地位，其能量占总能量的比例超过 70%，而谐波成分能量较弱，这一频谱结构是刚性转子存在显著质量不平衡的典型标志。时频域的小波包能量特征进一步证实了能量主要集中在与转频相关的狭窄频带内。这些经过筛选的特征共同指向了转子不平衡

故障^[5]。优化后的 CNN 模型在接收到此特征向量后，其内部的通道注意力模块自动为包含转频及其谐波信息的特征通道分配了最高的权重，这表明模型自主地“学会”了关注对诊断不平衡故障最关键的频率成分。模型的最终输出以概率形式呈现，其对“转子不平衡”这一故障类别的判断置信度高达 98.5%，远高于其他故障类别的置信度，诊断结论明确。现场后续的动平衡校验处理结果证实了该诊断结论的准确性，通过在指定配重面上添加试重块，机组振动值降至优良范围。该案例充分证明了本文所提出的优化诊断方法不仅具备高精度，而且其决策过程依赖于清晰的物理特征，诊断结果具有极强的工程解释性，能够为现场工程师提供直接、可靠的维修决策支持。

5 结语

本研究系统性完成对水轮发电机组振动特征提取与智能诊断方法的优化研究及构建从信号预处理、多域特征提取到智能诊断模型优化的完整技术路线，通过引入小波去噪与多域特征融合方法提升特征参数对故障模式的表征质量，采用 ReliefF 特征选择算法与注意力机制卷积神经网络的协同优化策略显著增强诊断模型从复杂数据中聚焦关键信息的能力与泛化性能，案例验证表明该方法能有效识别转子不平衡等典型故障且显著提升诊断准确性与可靠性，研究成果为水轮发电机组的智能化状态监测与精准运维提供切实可行的解决方案，对预防重大设备事故、降低运维成本、保障电力系统稳定运行具有明确工程应用价值。

参考文献

- [1] 陈政,曹龙伟,魏镜园,等.水轮发电机组保护动作后闭锁机组开关合闸的方法与实施[J].价值工程,2025,44(33):100-102.
- [2] 沈鹏,柏沁,郭连恒,等.高海拔冲击式大型水轮发电机定子绕组防晕性能研究[J].发电设备,2025,39(06):355-361.
- [3] 莫书杰.水轮发电机调速器压力油温自动控制技术与应用[J].红水河,2025,44(05):148-152.
- [4] 平少栋,成传诗,黄奎,等.水轮发电机座环端面在位移动式加工机器人及应用研究[J/OL].机床与液压,1-8[2025-11-26].
- [5] 夏鹏,李嘉,王伟.水轮发电机主回路及分支回路升级改造[J].水电与新能源,2025,39(10):15-18.