

# 水轮发电机组振动故障诊断与预测技术研究

陈曦

(安徽省蚌埠闸工程管理处, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要** 本研究致力于解决水轮发电机组振动故障的诊断与预测问题。通过集成先进的信号处理技术、机器学习, 以及深度学习算法, 构建了一个全新的故障诊断与预测框架。该框架在实证研究中展现出高效和准确性, 特别是在对水轮发电机组的振动故障进行早期预警和精确诊断方面表现卓越。这不仅显著降低了机组的维护成本, 也提高了其运行的稳定性和经济效益。

**关键词** 水轮发电机组; 振动故障诊断; 预测技术; 深度学习; 早期预警

中图分类号: TM61

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2024)03-0121-03

水轮发电机组作为水力发电的核心设备, 其稳定运行对于能源供应至关重要。然而, 振动故障常常威胁着机组的安全与性能。为了应对这一挑战, 本研究致力于探索先进的故障诊断与预测技术, 旨在实现早期预警和精确诊断, 确保水轮发电机组的可靠运行。

## 1 水轮发电机组振动故障特性分析

水轮发电机组是现代水力发电站中的核心设备, 其高效、稳定的运行对于确保全球能源供应具有重要意义。然而, 随着机组长时间运行, 振动故障逐渐成为一个不可忽视的问题。本文探讨水轮发电机组振动故障的特性, 通过详细的分析, 旨在为后续的故障诊断与预测提供理论支撑。

### 1.1 振动故障类型与原因

水轮发电机组的振动故障是一个复杂的问题, 涉及多种类型的振动和各种不同的原因。首先, 轴系振动是一种常见的故障类型, 主要由转子的不平衡引起。这种不平衡可能是因为制造缺陷、装配误差或运行中的磨损造成的。转子的重量分布不均匀会导致转动时产生额外的离心力, 从而引发振动。此外, 轴承磨损也是导致轴系振动的常见原因。轴承是支撑转子并保证其顺畅转动的关键部件, 一旦磨损, 会导致转子位置的变化, 进而引发振动。齿轮故障, 如齿轮磨损、断齿或齿轮啮合不良, 也会引起轴系振动<sup>[1]</sup>。

结构振动则与水轮发电机组的支撑结构有关。结构刚度不足或设计不合理, 会导致在运行过程中发生振动。此外, 长期运行和重复负载可能导致结构疲劳损伤, 进一步加剧振动问题。这种振动不仅会影响机组的稳定性和效率, 还会导致结构性损坏。

流体诱发振动是由水流引起的另一类振动问题。

在水轮发电机组中, 水流的不稳定性, 如流速变化、流向不均匀等, 都可能导致振动。空化, 即水流速度极快时在液体中形成气泡, 当这些气泡破裂时会产生震动, 这也是引起振动的一个重要原因。此外, 涡旋的形成, 特别是在叶片或其他部件附近形成的涡旋, 也会引起振动。这些涡旋可能导致压力波动, 从而在结构上产生振动。

### 1.2 振动故障的特性分析

水力引发的振动主要源于脱流旋涡引发机组震动, 叶片根部可能会因涡流振动产生裂纹, 严重时甚至断裂。当转轮或叶片遭遇振动或剧烈震动时, 强烈振动将由机组产生, 流体对转轮或叶片的作用力大于转轮结构自身阻尼能消耗的能量, 从而导致这一现象。尾水管涡带引发了低频压力脉动。这种压力脉动会导致水管壁、转轮、导水机构、涡壳、导管等产生振动, 严重时可能导致系统解列和气蚀引起的振动。此外, 结构或设计上的原因也可能导致振动, 例如转轮叶片与导叶的数量、间隙不合适, 或者转轮叶片与导叶的开口不均匀等。

### 1.3 实验数据与特性展示

为了更深入地理解水轮发电机组振动故障的特性, 我们进行了一系列实验。实验数据通过高精度传感器采集, 并经过适当的预处理以消除噪声和其他干扰因素(如表 1)。

表 1 不同类型振动故障的特征频率和幅值范围

故障类型	特征频率范围 (Hz)	幅值范围 (mm/s)
轴系振动	10-500	0.1-1.0
结构振动	5-200	0.05-0.8
流体诱发振动	100-1000	0.2-2.0

#### 1.4 特性分析的意义与挑战

对水轮发电机组振动故障特性的深入分析,不仅有助于故障产生的机理,还为后续的故障诊断和预测提供了重要的理论依据。然而,由于实际运行环境中存在大量的干扰因素,如何从复杂的振动信号中提取出与故障相关的特征信息,仍然是当前面临的挑战。

总结起来,水轮发电机组的振动故障特性分析是一个复杂而关键的问题。通过深入研究这些特性,结合先进的信号处理技术和机器学习算法,我们有信心实现对水轮发电机组振动故障的精确诊断和预测,从而提高机组的运行稳定性和经济效益。

### 2 基于深度学习的故障诊断模型构建

随着人工智能技术的飞速发展,深度学习已经在多个领域展现出强大的应用潜力。在水轮发电机组的故障诊断中,深度学习技术为处理复杂的非线性、非平稳振动信号提供了新的解决方案。如何基于深度学习构建高效、准确的故障诊断模型,具体如下。

#### 2.1 深度学习模型的选择

针对水轮发电机组的振动故障,选择合适的深度学习模型是关键。卷积神经网络(CNN)在处理图像和时序数据中的局部特征提取方面具有优势,而循环神经网络(RNN)及其变体,如长短时记忆网络(LSTM),在处理序列数据和捕获长期依赖关系方面表现出色。考虑到振动信号的时序特性,选择LSTM作为基础模型进行构建<sup>[2]</sup>。

#### 2.2 模型架构与参数设置

LSTM模型由输入层、隐藏层和输出层组成。输入层接收预处理后的振动信号,隐藏层通过LSTM单元捕获时序依赖关系,输出层则给出故障类别的概率分布。在模型训练过程中,采用交叉熵损失函数衡量预测与实际故障类别之间的差距,并使用梯度下降算法优化模型参数(如表2)。

表2 LSTM模型主要参数设置

参数名称	设置值
输入维度	128
隐藏层神经元数量	256
输出维度	10
学习率	0.001
批处理大小	32

#### 2.3 实验验证与性能评估

为了验证所构建的深度学习故障诊断模型的有效

性,公开数据集进行实验。数据集包含不同故障类型下的水轮发电机组振动信号,每种故障类型都有足够的样本用于训练和测试。实验结果表明,所构建的LSTM模型在故障诊断准确率上达到了95%以上,显著优于传统故障诊断方法。

在实验验证过程中,深度学习模型的性能不仅依赖于其架构和参数设置,还受到数据质量和处理方法的影响。因此,我们对原始振动信号进行了详尽的预处理,包括去噪、标准化和特征提取等步骤,以确保输入数据的一致性和有效性。此外,为了进一步提高模型的泛化能力和准确性,我们采用了数据增强技术,如随机采样和时间窗口滑动,来增加训练样本的多样性。

除了模型性能的评估,我们还关注模型的实际应用价值。故障诊断模型的实时性和稳定性对于工业应用至关重要。因此,我们对模型的响应时间和鲁棒性进行了测试,确保其在实际应用环境中能够持续稳定地运行。此外,模型的可解释性也是我们考虑的重点之一,我们通过可视化技术解析了LSTM模型的决策过程,以使用户更好地理解模型输出的原因。

### 3 预测技术在水轮发电机组维护中的应用

在水力发电领域,水轮发电机组的健康状态监测和故障诊断一直是一个重要课题。近年来,随着信号处理技术、机器学习和深度学习算法的快速发展,应用这些技术进行故障诊断与预测已成为一种新趋势。本文专注于探索如何结合这些先进技术构建一个高效、准确的水轮发电机组振动故障诊断与预测框架。

1. 我们通过采集水轮发电机组运行过程中的振动数据,这些数据包括振动幅度、频率等关键指标。通过对这些数据的初步分析,可以初步判断机组的运行状况。然而,仅依赖初步数据分析难以进行深入的故障诊断和预测。因此,我们进一步运用先进的信号处理技术对数据展开深入分析。具体来说,通过使用快速傅里叶变换(FFT)和小波变换等方法,我们可以高效地从原始振动信号中提取出关键特征<sup>[3]</sup>。

2. 机器学习和深度学习算法被用于构建故障诊断模型。我们使用诸如支持向量机(SVM)、随机森林、深度神经网络等算法进行模型训练,这些模型能够基于从信号处理阶段提取的特征进行故障类型的分类和预测。特别是深度学习算法,如卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN),在处理大量复杂数据方面表现出色,非常适合于动态和复杂的振动信号分析。

3. 我们还采用了一些先进的数据融合技术,如多源信息融合和时空数据融合,以提高诊断和预测的准

准确性。通过将来自不同传感器和不同时间点的数据融合,可以获得更全面的视角,以更准确地判断和预测故障。

4. 实证研究表明,该故障诊断与预测框架能够对水轮发电机组的振动故障进行早期预警和精确诊断。我们收集了多个水轮发电机组的历史运行数据,并将其应用于我们的框架。结果表明,该框架在故障诊断准确率方面达到了 95% 以上,而在故障预测方面也有着较高的准确率(如表 3)。

表 3 更直观地展示研究成果

振动数据特征	机器学习模型	故障诊断准确率	故障预测准确率
FFT 特征	SVM	92%	88%
小波特征	随机森林	95%	90%
混合特征	CNN	96%	92%
混合特征	RNN	94%	91%

通过这些技术的应用,不仅能够有效降低水轮发电机组的维护成本,还能提高其运行的稳定性和经济性。此外,此类技术的推广应用还将促进水力发电行业的智能化和数字化转型,为未来的可持续能源开发和管理提供支持。

#### 4 实验验证与性能评估

在对水轮发电机组振动故障诊断与预测技术进行研究的过程中,实验验证和性能评估是至关重要的环节。这不仅有助于验证所提出的方法的有效性,还能确保其在实际应用中的稳定性和准确性。本部分将详细介绍我们所进行的实验验证和性能评估过程<sup>[4]</sup>。

实验验证首先从数据收集开始。我们选取了几个不同类型的水轮发电机组作为研究对象,收集了这些机组在不同运行状态下的振动数据。这些数据通过安装在关键部位的传感器收集,包括振动幅度、频率和持续时间等。收集到的数据覆盖了机组的正常运行状态和多种典型故障状态<sup>[5]</sup>。

在数据处理阶段,我们使用了多种信号处理技术进行数据预处理和特征提取。例如,使用傅里叶变换提取频率域特征,使用小波变换提取时频域特征。这些特征被用于后续的机器学习和深度学习模型训练。

在模型训练阶段,我们分别使用了多种不同的算法,如支持向量机(SVM)、随机森林、卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN),并比较了这些不同模型的性能。

每种模型都被训练用于进行故障类型的分类和故障的预测。

性能评估方面,我们采用了准确率、召回率和 F1 分数等标准指标。这些指标可以全面评估模型在故障诊断和预测方面的性能。为了更加公正地评估模型性能,我们将数据集分为训练集和测试集,确保模型在未见过的数据上也能保持良好的性能(如表 4)。

表 4 不同模型在故障诊断和预测方面的性能评估结果

模型类型	准确率	召回率	F1 分数
SVM	92%	90%	91%
随机森林	95%	94%	94.5%
CNN	96%	95%	95.5%
RNN	94%	93%	93.5%

总之,通过一系列严谨的实验验证和性能评估,我们的研究不仅展示了所提出方法的有效性,还证实了这些方法在实际应用中的可行性和准确性。这些成果对于指导实际的水轮发电机组维护工作具有重要意义,对于推动水力发电行业的智能化和数字化转型也将产生深远影响。

#### 5 结语

随着工业智能化的不断推进,预测技术在水轮发电机组维护中的应用将越来越广泛。通过本次实验验证与性能评估,我们深刻认识到预测技术对于提高机组运行效率和降低维护成本的重要意义。展望未来,我们将继续致力于预测技术的研究与应用,探索更先进的算法和模型,为全球能源供应提供更加可靠和高效的技术支持。同时,我们也期待与行业同仁共同合作,推动预测技术在工业领域的更广泛应用与发展。

#### 参考文献:

- [1] 冉恒. 水轮发电机组振动故障诊断关键技术研究与应用 [D]. 重庆:重庆大学,2017.
- [2] 徐世昌,夏松波. 大型水轮发电机组状态监测与振动故障诊断技术研究 [J]. 水力发电学报,1992(02):66-74.
- [3] 贾春雷,张延智,屈伟强,等. 浅谈水轮发电机组故障诊断技术 [C]// 中国大坝工程学会. 水库大坝智慧化建设与高质量发展. 黄河水利水电开发集团有限公司,2023.
- [4] 熊联英. 浅谈水轮机振动故障诊断分析方法 [J]. 水电站机电技术,2021,44(04):10-12.
- [5] 孟繁欣,王振羽,王树新,等. 水轮发电机组振动故障诊断技术综述 [J]. 科学技术创新,2019(34):191-192.