

Research on the Application of Vibration Signal Analysis in Fault Early Warning of Electrical Automation Equipment

Shaoquan Li

Heilongjiang Jianlong Iron and Steel Co., Ltd., Shuangyashan, Heilongjiang, 155126, China

Abstract

Vibration signal is a barometer of the operating state of electrical automation equipment, which contains a lot of fault feature information. With the help of in-depth analysis of vibration signals, early identification and accurate early warning of equipment faults can be realized, which provides a scientific basis for preventive maintenance. This paper focuses on the application of vibration signal analysis in fault early warning of electrical automation equipment, and studies from four aspects: multi-dimensional feature extraction, multi-sensor fusion, machine learning prediction and remote early warning under the industrial Internet architecture. In order to build an efficient and reliable fault early warning system, the difficulties of traditional operation and maintenance mode are solved, and the operation and maintenance of electrical automation equipment is upgraded in the direction of intelligence and refinement.

Keywords

vibration signal; electrical automation equipment; fault warning

振动信号分析在电气自动化设备故障预警中的应用研究

李少泉

黑龙江建龙钢铁有限公司, 中国·黑龙江 双鸭山 155126

摘 要

振动信号是电气自动化设备运行状态的“晴雨表”，里面蕴含着诸多丰富的故障特征信息。借助对振动信号进行深度剖析，可实现设备故障的早期识别以及精准预警，为预防性维护提供科学依据。该文聚焦于振动信号分析在电气自动化设备故障预警当中的运用，从多维度特征提取、多传感器融合、机器学习预测以及工业互联网架构之下的远程预警这四个方面着手研究，以构建一套高效且可靠的故障预警体系为目的，破解传统运维模式的难点，推动电气自动化设备运维朝着智能化以及精细化的方向升级。

关键词

振动信号；电气自动化设备；故障预警

1 引言

在现代工业生产体系里面，电气自动化设备已然成为核心生产要素。它稳定地运行着，这直接关联生产效率以及经济效益。不过，轴承磨损、齿轮断齿、电机转子不平衡等高频出现的故障，大多时候会引发设备无计划地停机，造成巨大的生产损失。传统故障监测要依靠人工去巡检以及事后进行维修，效率非常低，而且很难实现早期预警。单一振动信号的监测容易受到环境干扰，有很高的误报率，没有办法契合复杂工业场景对精准预警的需求。探索多维度、智能化的故障预警技术，变成了提升设备运维水平、保障生产连续性的迫切需求。

2 基于振动特征提取的典型故障精准识别

在电气自动化设备全生命周期管理的体系当中，轴承磨损、齿轮断齿以及电机转子不平衡等高频发生的故障，是致使非计划停机、令生产能效降低的核心诱因。振动信号属于设备运行状态的直接映射载体，凭借多维度特征提取以及分析，可实现对于典型故障的精准识别以及早期预警，给设备预防性维护提供核心决策的依据^[1]。

时域特征提取方面，是故障识别的基础环节。借助捕捉振动信号的峰值、均方根这类关键的指标，可以快速判断设备运行的异常状态。峰值指标可有效地反映出轴承点蚀、齿轮断齿等冲击性故障的瞬时能量的变化情况。当轴承表面出现早期磨损的时候，摩擦所产生的微小冲击会使振动信号峰值出现不规则的突变。在其数值超出正常阈值的20%以上时，就可判定设备存在局部损伤的风险。均方根值运用量化振动信号整体能量水平的方式，去反映设备磨损劣化这一渐进过程。要知道，轴承磨损程度与均方根值是呈正相关的。

【作者简介】李少泉（1982-），男，中国黑龙江牡丹江人，本科，工程师，从事电气自动化研究。

某汽车零部件制造企业依靠持续监测电机轴承的均方根值,可把故障预警提前至磨损初期,避免了后续因为轴承失效所引发的生产线停机事故。

频域特征分析着重于振动信号的频谱特性,借助快速傅里叶变换将时域信号转变为频域信号,接着提取频谱峰值、谐波分量以及其他之类的特征参数。不同类型的故障部件有着其独特特征频率,像轴承外圈磨损会在频谱当中呈现出与转速有关的特征峰值,这个峰值的频率是轴承基频的整数倍;而齿轮断齿则会导致谐波分量加重,其幅值可以达到正常状态的 5-8 倍;同时,电机转子不平衡故障的频谱峰值跟转子的旋转频率对应上。借助匹配预先设定的故障特征频率库,可在短短 10 秒之内完成故障类型的精准定位,识别的准确率达到 95% 以上。

时频域分析是针对像设备启动、负载突变这样的非平稳运行状态而言的,选用小波变换之类的技术来提取时频域特征,切实有效地捕捉瞬态故障信号。在电机启动阶段,转子不平衡引发的振动信号有着时变的特性,传统频域分析没办法很好地捕捉到有效特征,然而小波变换可在时间以及频率的维度同时把信号细节聚焦起来,提取瞬态故障特征,它的识别准确率相较于频域分析大幅提高。

基于多维度的振动特征数据,来构建起涉及不同故障类型、不同劣化阶段的故障特征数据库,并且建立起动态阈值比对机制。实时采集得到的振动信号特征跟数据库阈值进行匹配,要是特征参数超出了正常的区间范围,那么系统会自动触发预警的操作,并且输出对于故障类型、位置以及严重程度诊断成果,给运维人员提供了精准的决策支持方面的帮助,以此最大限度地减少设备非计划停机的时间以及维护成本。某钢铁企业的相关应用数据体现出,该系统把设备非计划停机率降低,同时减少维护成本,有效地提高了设备运维管理的精细化程度。

3 多传感器融合的振动信号协同预警

在电气自动化设备故障预警体系当中,单一的振动信号监测是有其自身局限性的:受到设备运行环境的干扰以及负载波动的影响,很容易出现故障特征被淹没、预警误报之类的问题,难以符合复杂工业场景之下对于精准预警的需求。多传感器融合的振动信号协同预警机制,借助整合温度、电流、噪声等多维度的监测数据,来构建多源数据关联分析模型,可实现故障特征的交叉验证和互补,从根本上提高预警系统的可靠性和稳定性。

温度传感器数据与振动信号进行关联分析,可有效地识别设备热劣化与机械故障的耦合关系。当轴承出现磨损故障的时候,摩擦加剧会致使温度异常升高,振动信号的时域峰值、频域特征频率也会同步产生变化。运用温度-振动特征映射模型的构建,能将单纯因环境温度改变所造成的振动信号波动排除掉,精准地对机械损伤致使的异常状况进行定

位。某化工企业的泵组运维数据说明,选用温度传感器开展协同监测之后,轴承磨损故障的误报率大幅降低,预警的准确性有了大幅提高。

电流传感器的相关数据可体现出设备的负载变化以及电气特性异常的情况。电机转子不平衡故障会使得定子电流的谐波分量增加,和振动信号的倍频特性形成对应的关系。这二者的协同剖析可把机械故障和电气故障区分开来,防止单一信号监测出现误判的状况。当电机定子绕组出现绝缘老化之时,电流信号会产生不规则的波动,然而振动信号却没有明显异常。在这个时候倚仗电流-振动信号的交叉验证,可快速地对电气故障类型给予定位,给运维人员给予精准的维修方向。

噪声传感器所采集的声学信号,可作为振动信号的一种有效补充。齿轮断齿故障将会产生特定频率的冲击噪声,其频谱特性跟振动信号的频域峰值有着很高的一致性。借助噪声-振动信号的时频域特性融合,可以在强背景噪声环境当中提取出有效的故障信息,解决振动信号极易受到结构传播干扰的问题。在矿山机械的齿轮箱监测之中,噪声-振动融合模型对于断齿故障的识别准确率比单一振动监测要提高很多,达成了复杂工况下的精准预警^[2]。

依托多源传感数据,运用加权融合算法来构建协同预警模型:经由机器学习算法对不同维度数据的故障特征进行权重分配,提高强关联特征的贡献程度,减弱干扰信号的影响。只有当多维度数据同时触发异常阈值的时候,系统才会输出预警信息,有效地降低了因为单一信号波动而引发的误报情况。该模型已运用在大型风电机组以及工业机器人等设备之中,预警准确率比单一振动监测系统提高 40% 以上,给设备全生命周期运维以实现提供了更为精准的决策依据。

4 机器学习驱动的振动信号趋势预测与故障演化分析

在工业设备运维领域中,传统故障预警模式大多凭借阈值触发,只可在故障出现之后给予响应,很难契合现代生产对于预防性维护的需要。机器学习所驱动的振动信号趋势预测以及故障演化分析技术,借助深入剖析振动时序数据的内在规则,给设备健康状态的动态评估运用了新路径,可把故障的超前预判予以实现,为精准的维护决策提供支撑。

长短期记忆网络(LSTM)是处理时序数据的核心算法,可把振动信号里的长期依赖关系有效捕捉到。设备故障的演化属于一个渐进的过程,比如轴承磨损会使振动信号的时域特性、频域特性持续产生细微的改变。LSTM 依靠学习历史数据当中的演化规律,从貌似平稳的信号里可识别出早期劣化的趋势,对设备健康状态的走向进行预判。对时序规律的深度挖掘,能让系统在故障刚开始萌芽的时候,就捕捉到其中潜在风险,给维护规划提供了相当充足的提前量。

卷积神经网络(CNN)特别擅长提取振动信号的局部

特征,借助卷积层去处理时频图等二维特征,可精准识别像齿轮断齿、转子不平衡等这些冲击性故障的早期信号。这些故障基本会伴随着瞬时的能量突变情况,传统方法很容易被背景噪声给掩盖住,但是 CNN 却可以聚焦信号当中的局部异常,把它从特别复杂的振动数据里面分离出来,给故障类型的判别提供关键依据。

使用 LSTM 和 CNN 融合来构建的深度学习模型,可以同时兼顾时序趋势以及局部特征这两方面的分析,提高故障预判的准确性。借助持续训练的海量振动数据,模型可构建起涉及故障全生命周期的特征库,旨在对从萌芽、发展到恶化的整个过程给予跟踪。当监测数据偏离正常的演化轨迹的时候,系统可有故障发生的时间窗口以及严重程度评估输出,向运维人员提供明确的决策参考依据^[3]。

运用基于机器学习的分析技术,打破了传统运维的被动响应模式,朝着主动的预防性维护进行转变。运维团队可依据预判的结果合理安排维护的计划,把非计划停机所带来的生产中断予以避免,并且优化维护资源的配置,让不必要的运维成本得以降低。在风电、轨道交通这些对设备可靠性要求特别高的领域之中,该技术已然成了提高运维智能化水平的核心支撑,将设备管理从“事后抢修”推动至“事前预防”这种根本性的转变。

5 工业互联网架构下的振动信号远程预警系统应用

在分布式电气设备运维场景里,一直以来,传统依靠现场巡检的模式,存在着响应滞后、效率不高的问题,很难去契合现代工业对于设备可靠性的高需求。而工业互联网架构下所拥有的振动信号远程预警系统,借助边缘计算和云平台的协同运作,打造出全域设备状态感知网络,给设备运维朝着智能化的转型提供了最为核心的支持。

边缘计算节点被设置在设备端,履行着振动信号实时采集和预处理的工作。面对工业现场复杂的电磁干扰环境,边缘节点内部设有信号滤波以及特征提取算法,可迅速把冗余数据过滤掉,精准地提取出像时域峰值、频域特征频率这样的关键参数,仅仅只将有效的信息传送到云平台那里。这种架构一方面减少了网络带宽的消耗,同时还防止了原始数

据传输所带来的延迟问题,切实保证故障预警的实时性。

云平台是系统的核心枢纽,它收集全域分布式设备的振动数据,依靠大数据分析引擎来关联挖掘多维度数据。云平台构建设备健康状态基准模型,实时和边缘节点上传的特征参数进行比对,快速找到异常状态,然后触发预警机制。云平台有很强的存储实力,长期留存设备全生命周期的振动数据,为故障溯源与规律分析给出数据基础。

远程预警监控中心是系统的可视化交互载体,有故障报警推送、历史数据追溯与智能诊断报告生成这三大核心功能。监控界面利用动态图表、拓扑地图等形式直观呈现设备运行状态,当异常被触发时,系统借助弹窗、短信等多渠道推送预警信息,保证运维人员可在第一时间做出响应。历史数据追溯功能支撑按照设备编号、时间范围、故障类型这些维度来调取存储的数据,凭借对故障演化的轨迹开展分析,对设备劣化规律挖掘,为预防性维护策略的优化提供根据。智能诊断报告模块借助云平台的分析结果,有自动生成包含故障定位、影响评估、处置建议的专业报告的功能,替代掉传统的人工分析流程,明显提高运维决策的效率。

6 结语

本文细致阐述了振动信号分析用于电气自动化设备故障预警里的关键技术以及应用架构。借助多维度振动特征的提取,实现了对典型故障的精确识别;多传感器融合这一机制,切实提高了预警可靠性;机器学习所驱动的趋势预测,为预防性维护给予了科学支持;工业互联网架构下的远程预警系统,则做到了对设备集群的全面管控。这些技术的融合应用,明显降低了设备非计划停机率以及运维成本。以后,伴着人工智能以及工业互联网技术的不断发展,振动信号分析会在设备智能运维领域起到更为关键的作用,给工业生产的高效、安全运行提供有力保障。

参考文献

- [1] 乐越. 振动信号分析技术在输电线路隐患排查中的应用[J]. 大众用电, 2025, 40(12): 49-50.
- [2] 马风海. 基于振动信号分析技术的化工设备智能化诊断系统设计[J]. 粘接, 2025, 52(12): 201-204.
- [3] 施晓刚. 振动信号分析法在汽轮机故障诊断中的应用研究[J]. 中国机械, 2025, (30): 87-90.