

基于振动频谱分析的锅炉风机轴承全生命周期故障预测与安全生产优化

张佳佳

(内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 内蒙古 托克托 010206)

摘 要 本研究聚焦锅炉风机轴承全生命周期的故障预测与安全生产优化,旨在提升设备的运行可靠性与安全性,以振动频谱分析为核心技术。随着工业设备的日益复杂化,传统的维护方法已无法满足快速发展的生产需求,因此,采用先进的振动分析技术进行早期故障诊断与预测尤为重要。本文详细阐述了振动频谱分析的基本原理及其在轴承故障诊断中的应用价值;构建了从轴承早期隐性缺陷到严重失效的监测体系,实现对设备状态的动态实时监控;通过分析各阶段的典型故障特征,提出了相应的预测模型,并结合实际生产情况制定了优化的运维策略,以期为相关人员提供参考。

关键词 振动频谱分析; 锅炉风机轴承; 全生命周期; 故障预测; 安全生产

中图分类号: TH165

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.027

0 引言

锅炉作为工业生产的中心设备,它的稳定运行对整个生产过程来说是至关重要的。风机轴承属于关键部件,它的工作情况直接关系到锅炉的性能表现。在恶劣工况、频繁负荷波动等种种因素的影响下,风机轴承很容易出现各种各样的故障情形,这既会造成设备停机检修,又可能会埋下安全隐患。传统的维护手段大多依靠定时查看和人工观察,不过这些办法存在反应迟缓、准确度不够高等问题。而振动频谱分析则是一种较为先进的故障诊断技术,它通过把轴承振动信号进行频域剖析,可以有效地找出潜在的故障特征并提前警报,进而为设备的健康管理体系提供可靠的理论依据和技术支撑。

1 振动频谱分析在锅炉风机轴承故障预测中的理论基础

1.1 振动频谱分析的基本原理

振动频谱分析利用傅里叶变换技术把时域振动信号转换成频域表达形式,从而得到它的频率组成及其幅值分布状况。在锅炉风机轴承工作时,各种故障模式都会导致一定的频率范围内的振动。内圈损伤一般以内圈通过频率为基础出现谐波现象,外圈缺陷一般以外圈通过频率为基准出现谐波特性。利用频谱分析的手段来找到故障特征频率,从而对轴承的运作状况进行科学的判断并做出故障判断。

1.2 轴承故障特征频率的计算方法研究

轴承故障特征频率准确得到是振动频谱分析的要项^[1]。滚动轴承的典型故障特征频率有内圈通过频率、外圈通过频率、滚动体通过频率和保持架通过频率等。这些频率的取得,需联系轴承的几何参数,如节圆直径、滚动体直径以及数量,也要考虑轴承的运行情况,如转速等,还需经过繁杂的数学推导。利用科学计算得出的故障特征频率,可以为后续的频谱分析提供可靠的数值支持,进而改善故障识别精度及稳定性。其中内圈通过频率的计算要关联到转速和滚动体数量,而外圈通过频率还要关联到节圆直径和滚动体直径的比例,保持架通过频率的计算则要考虑内外圈转速的差异。计算时要先校准几何参数的测量精度,以免出现参数误差使频率偏移,同时依据轴承实际运行转速动态调整计算值,保证特征频率和实际故障信号能够精确定位,为故障类型精确判断打下基础。

1.3 锅炉风机轴承的故障类型分析

锅炉风机轴承作为工业设备中重要的零部件,种类多、复杂。故障的种类主要是内圈损坏、外圈损坏、滚动体磨损、保持架坏等。内圈损伤表现为内圈通过频率谐波,外圈损伤表现为外圈通过频率异常信号。滚动体损伤会导致滚动体通过频率信号的增幅,保持架故障会使得振动频谱中出现保持架的相关特征频率。另外,在恶劣工况下,轴承还可能出现疲劳裂纹、腐蚀或过热等状况,这些都可能造成振动信号异常。对

这些故障类型进行分析时，常常使用振动频谱分析技术，通过对信号做频域分解，可显示出不同的故障模式所特有的频率特征，从而完成故障诊断。准确识别各种故障类型的特征频率，并进行及时的检测和预警，是保障锅炉风机轴承高效安全运行的关键^[2]。

2 锅炉风机轴承全生命周期故障特征与预测方法

2.1 轴承早期故障特征及预测研究

锅炉风机轴承在运行初期就会产生一些隐藏的故障，最明显的表现就是微小裂纹或者刚开始就出现的一些早期磨损等故障特征。这种初期缺陷引发的振动信号很小，在复杂的工况条件下很易被环境噪声所遮盖，因此传统的检测方法因为不能对微弱信号进行识别，所以难以及时发现隐患。振动频谱分析技术以信号处理的优势为早期故障诊断提供了有效的途径。通过把时域数据变成频域分布，可以显著加快故障特征信息提取的速度，并且还为实现精确预警提供了有力的理论和操作依据。轴承内圈细微裂纹引发的振动频谱一般会体现出围绕某个频率出现微小谐波分布的特征，这种类型的谐波信号成了开展故障判定的指标，在故障诊断领域具有极为重要的作用，特别是在对于故障进行早期的检测工作当中。如果想对可能的故障做出准确的预测，就要正确设置阈值参数，并使用有效的信号处理技术。阈值的设计要考虑设备的运行状况和环境噪声的特性，既要保证微弱的故障信号能够被提取出来，又不能出现误判的情况。

2.2 轴承中期故障特性及发展趋势预测

锅炉风机轴承随工作时间的增长，开始就存在的隐患在应力及机械磨蚀下会逐步显化。在该时间段内，故障特征频率幅值逐渐增大，波动规律更加明显。在中期故障诊断的过程中振动频谱分析技术具有重要的作用，不仅能够准确识别出故障的具体类型，还能够判断出故障的发展情况。轴承外圈磨损加剧后，外圈通过频率的谐波成分的幅值就明显增大，直接体现出了故障发展的趋势。各阶段频谱图的变化可以通过对比就能清晰明了地反映出故障演变的过程和特征。要量化故障的发展速度，就要建立包含故障特征频率幅值动态变化及阶段相关性的数学模型^[3]。

2.3 轴承后期故障特征及预测研究

锅炉风机轴承在运行后期会出现故障模式逐步恶化的状况，严重的甚至发展为卡涩或者直接失效等现象，这样的结果会导致较大的安全隐患。在这个过程中，振动信号内部存在大量的非线性特点，故障相关频率

分量幅值有明显增加，传统的频谱分析手段无法精准得到这些繁杂的信息。要提高故障诊断的准确性和可靠性，就要采用时域分析技术，用峭度系数、峰值因子等核心参数来综合判断。峭度系数是体现信号冲击特征的重要指标，轴承遭受到严重损伤时，冲击能量增大，这就致使震动信号的峭度数值远远超出正常情况下的范围。峰值因子可以表示出信号峰值与有效值的比例情况，轴承后期出现磨损、剥落等故障的时候，由于局部缺陷造成的脉冲信号加强，峰值因子会有很大改变，加上它们以及其他时刻的数据就能更好地捕捉到故障的发展情况，从而为后期的故障预测提供可靠的依据，降低突然发生故障的风险。

2.4 全生命周期故障预测模型的构建

要达到锅炉风机轴承全生命周期故障的精准预测，需要建立包含早期、中期和后期故障特征的预测模型。该模型应该具备强大的数据融会和学习能力，并能挖掘出各个阶段故障特征之间的内在联系。利用机器学习算法建立预测模型是一个很好的选择，支持向量机、神经网络等^[4]。支持向量机有着很强的非线性分类能力，能够在高维空间找到最佳分类超平面，对故障特征实现精确的分类和预测。神经网络具有自我学习和自我适应的功能，经过大量的历史振动数据的训练和学习，它会自动创建故障特征与轴承运行状态之间的复杂映射关系。建立模型还需要加入轴承的运行环境参数以及维护记录，利用多种数据来源的融合提高模型的泛化能力，并且设定动态更新机制，根据实时采集到的运行数据来更新模型参数，以保证在整个生命周期中对于不同的故障阶段都有准确的预测，从而给出轴承维护的准确时间点。

3 基于故障预测的锅炉风机轴承安全生产优化策略

3.1 维修策略优化

依靠振动频谱分析的故障预测技术，维修策略的优化是保证锅炉风机轴承长时间稳定工作的关键。传统的定期检修方法按照预设的时间区间来执行设备检查，忽视了设备实际的运行情况，所以很容易出现过度或者不足的问题。过度维修不但增加了企业的经营成本，而且会因为常常拆卸机器造成机器损坏；维修不充分又会造成潜伏性故障的积存，增加故障率，甚至造成更大的事故。要优化维修策略就需要采用动态维修机制。动态维修利用对锅炉风机轴承实施即时获取振动信号，结合故障预测模型，就能准确判定设备健康情况。振动频谱分析一旦显示出现有隐患的特征

时,维修的选择就会根据设备的情况而变。例如:在轴承出现早期的故障特征时,可采用在线监测加定时巡查的方法,及时跟进故障的发展情况,不需要提前安排停机保养。当故障发展到中期并且有加重的趋势时,可以提前做好维修物资和人员的准备,以便及时处理。对于严重的故障应该马上停机,不能继续运转。通过这种依据实时数据与故障预测的维修策略,可以明显提高维修的准确性和经济性,保证设备处于最佳运行状态。

3.2 运行参数调整

锅炉风机轴承的工作参数,如转速、负载等都会对设备运行性能及使用寿命产生重要影响。通过对振动频谱分析得到的故障预测结果,能对锅炉风机的运行参数做出科学有效的提升^[5]。合理地改变运行参数,不但可以减小设备的磨损,同时还可以增加轴承的寿命,提高系统的整体可靠性。对早期故障预估的结果,若发现轴承内圈存在微小裂纹或者磨痕之类的情况,可能是轴承一直处在过高的负荷或者过高的转动速度之下,使得这种应力积聚加速了故障进程的发展。在这样的情况下,可以通过降低速度或者减小负载来有效地减缓轴承内圈出现裂纹,从而延长故障发生的时间。这样改变运行参数来减轻轴承负担的方式不仅可以延长轴承使用寿命,还能降低维修成本和减少轴承故障所引起的停机时间损失。同样,在锅炉风机的运行中也会遇到负荷波动这一工况。频繁出现的负荷波动状况会使风机轴承的运行环境变得不稳定,进而加大磨损现象发生的风险。利用振动频谱分析,对运行参数进行实时监测和预测,可以及时调节锅炉风机的负荷波动范围,使其处在轴承可以承受的安全区间内,从而减少过度磨损的情况发生。

3.3 安全监测预警系统优化

要想保证锅炉风机轴承能够安全生产,必须建立完善的安全生产监测预警系统。利用振动频谱分析手段,能够达到锅炉风机轴承持续监控的目的,迅速识别振动信号当中异常的波动现象,尽早察觉隐藏的故障隐患,从而为生产决策提供支撑。这种系统依靠多层次报警手段,按照故障轻重缓急的情况,慢慢加大警报强度,为运维人员提供明确的处理指南。首先安全监测系统可以持续对轴承的运行状态实施监督,收集振动信息并实行频谱分析。通过对信号里包含的频率的即时分析,可以提前检测到有可能出现的故障状况,如轴承内圈或者外圈的小裂缝,还有滚动球的磨

损等情况都可以在这个早期阶段被检测出来。当振动信号有异常时,就会立刻发出初级预警,提醒运维人员要时刻注意设备的状态,并且要定时地进行检查。随着故障不断加重,预警系统会按照分析结果自动升级警报。例如:当故障达到维修程度时,就会有中级预警提示;如果故障达到要停机修理的程度,系统就会发出高级预警。安全监测预警系统具有大数据分析的功能,通过对历史振动数据的深度挖掘,分析出不同的工况下设备的运行状况,为未来的故障预测提供数据支持^[6]。通过多层次的预警系统,在故障发生之前采取相应的措施,防止因为突发性的故障造成的生产安全问题。基于振动频谱分析的安全监测预警系统可以实时地捕捉到设备的故障信息,并且通过多层次的预警可以有效地保证生产的安全,减少事故发生的可能性,提高设备的运行可靠性及安全性。

4 结束语

本研究选取振动频谱分析作为核心技术,围绕锅炉风机轴承展开全生命周期故障预估及安全改良设计。通过详细解释振动频谱分析的根本原理并突出其特点,再深入分析轴承各个运行时期所出现的典型故障特征以及隐藏的风险状况,进而构建对应的故障预警模型。结合科学合理的检修安排、按照标准规范修改工作数据、改进观察警告体制、扩充人员技能训练等措施,能有效改进机器运作的可靠性,减少出现事故的概率,保障工厂生产体系的安全和稳定。

参考文献:

- [1] 李善跃. 基于振动频谱分析的锅炉风机轴承全生命周期健康评估模型[J]. 振动与冲击, 2024, 43(02): 123-130.
- [2] 徐晓彤. 基于振动能量矩的风机轴承早期故障预警方法[J]. 中国电力, 2024, 57(04): 41-46.
- [3] 张志海. 锅炉风机轴承振动频谱与运行参数的关联分析[J]. 动力工程学报, 2025, 45(04): 85-92.
- [4] 杨云, 丁磊, 张昊宇, 等. 改进一维卷积神经网络与双向门控循环单元的轴承故障诊断研究[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(04): 538-545.
- [5] 张小刚, 丁华, 王晓波, 等. 深度残差网络在滚动轴承故障诊断中的研究[J]. 机械设计与制造, 2022, 371(01): 77-80.
- [6] 张延琛. 基于时域特征的风机轴承 PSO-RBF 故障诊断[J]. 现代制造技术与装备, 2022(10): 13-16, 20.