

汽轮机故障诊断的机电融合技术及应用分析

牛银川

浙江山鹰纸业有限公司 浙江嘉兴 314000

【摘要】随着电力工业规模扩大与城市用电需求增长,现代发电机组呈现大型化与智能化发展趋势,但设备复杂度提升导致机组故障风险加剧。汽轮机作为核心动力装置,其运行状态直接影响电力系统可靠性,传统单一学科诊断方法已难以应对复合型故障问题。机电融合技术通过整合机械动力学特征与电气参数变化,构建多源异构数据协同分析模型,在汽轮机故障诊断领域展现出显著优势。基于此,本文主要论述了汽轮机常见故障类型和诊断关键点,并给出了一些故障诊断技术,为汽轮机故障诊断提供重要参考。

【关键词】汽轮机;故障诊断;机电融合技术

Analysis of electromechanical fusion technology and application in steam turbine fault diagnosis

Niu Yinchuan

Zhejiang Shan Ying Paper Co., LTD., Jiaxing, Zhejiang 314000

【Abstract】 With the expansion of the power industry and the growing demand for urban electricity, modern generating units are trending towards larger size and higher intelligence. However, the increased complexity of equipment has led to an increased risk of unit failures. As a core power device, the operating condition of steam turbines directly affects the reliability of the power system. Traditional single-discipline diagnostic methods are no longer sufficient to address complex fault issues. Electromechanical integration technology, by combining mechanical dynamics characteristics with electrical parameter changes, constructs a multi-source heterogeneous data collaborative analysis model, demonstrating significant advantages in the field of steam turbine fault diagnosis. Based on this, this paper mainly discusses common types of steam turbine faults and key diagnostic points, and provides some fault diagnosis techniques, offering important references for steam turbine fault diagnosis.

【Key words】 steam turbine; fault diagnosis; mechatronics integration technology

汽轮机作为现代工业动力系统的核心设备,其安全稳定运行至关重要。然而,由于长期运行在复杂工况下,汽轮机极易发生各种故障,严重威胁生产安全,造成经济损失。传统的故障诊断方法往往依赖于单一的机械或电气参数监测分析,难以全面反映汽轮机的运行状态,诊断效率和准确性有待提升。因此,将机械工程和电气工程技术深度融合,构建机电融合的故障诊断体系,成为当前汽轮机故障诊断领域的研究热点。

一、汽轮机常见故障类型

(一) 转子不平衡

汽轮机转子不平衡作为机组运行过程中最为常见的振动故障类型,其本质源于转子质量分布不均导致的动态失衡。该故障主要是由转子本体或装配部件的质量偏心所引发,具体成因可追溯至制造阶段的材料加工缺陷、热处理不均匀导致的金属组织差异,或是长期运行中叶片结垢脱落、紧固件松动等机械因素。当转子旋转时,质量偏心会产生周期性离心力,这种离心力矢量随转速升高呈现非线性增长,与机组支撑系统的固有频率形成耦合效应,从而显著放大振动幅度。这种异常振动在频谱分析中通常表现为工频分量突出,振幅与转速平方呈正相关,同时伴随相位稳定性变化等特征。故障发生时不仅会导致轴承座振动超标,还会通过机械传递路径诱发相邻部件的共振现象,严重时可能造成密封磨

损、动静碰摩等次生故障。在运行参数层面，除振动烈度上升外，通常可观察到轴心轨迹椭圆度增大、倍频分量异常等信号特征。

（二）不对中

汽轮机转子不对中是机组运行中因轴线偏移导致的典型机械故障，主要表现为转子轴线与设计基准线或相邻转子轴线在静态或动态条件下存在的空间偏差。当轴线偏差超出允许的范围时，转子旋转过程中会产生附加交变力矩，在联轴器部位形成周期性剪切应力，进而激发以二倍频为主的轴向与径向耦合振动。这种异常力学作用不仅导致轴承座振动幅值的陡增，还会通过刚性连接结构将振动能量传递至相邻的设备，造成齿轮箱、发电机等关联部件的异常受力。在动态特性层面，不对中故障会改变转子系统的刚度分布，使得临界转速发生偏移，同时诱发轴系扭振模态异常激活。故障持续发展时，联轴器螺栓可能因交变应力发生疲劳断裂，滑动轴承巴氏合金层会出现边缘磨损，密封环间隙则因轴系挠曲变形导致动态泄漏量增大。严重工况下，转子局部过大的弯曲应力可能会引发转轴塑性变形或叶片根部裂纹扩展，最终威胁机组整体的运行安全。

（三）油膜振荡

油膜振荡是汽轮机轴系因滑动轴承润滑特性异常引发的自激振动现象，属于流体动压效应与转子动力学耦合作用下的失稳故障。其本质源于轴承油膜动态压力分布失衡导致的负阻尼效应，当油膜承载力无法有效抑制转子涡动时，系统将脱离稳定工作区进入自激振动状态。故障诱因多与轴承结构参数匹配失当相关，包括轴瓦间隙设计不合理、长径比选择偏差、油楔几何形状缺陷等固有因素，同时机组超临界转速运行、润滑油黏温特性异常、轴承载荷分配不均等动态工况变化也会加剧失稳风险。在振动特征层面，油膜振荡表现为突发性强烈振动且振幅呈现不规则波动，频谱中会出现接近转子半速频率的次谐波分量，轴心轨迹则呈现扩散型不规则图形。在极端工况下，剧烈的径向摆动可能造成密封环径向碰磨，诱发转子热弯曲与动静部件干涉，严重时甚至导致轴承烧毁、转子永久性弯曲等灾难性后果。油膜振荡的发生往往伴随润滑油压波动、回油温度骤升等运行参数异常，其破坏性较质量不平衡或不对中等强迫振动更为显著，是威胁大型汽轮发电机组轴系安全的核心故障模式之一。

二、汽轮机故障诊断的关键点

（一）温度监测

温度监测作为汽轮机故障诊断体系中的核心参数分析维度，其关键在于通过轴承-轴瓦温度场与汽缸热梯度数据的实时追踪，揭示机组运行状态与潜在风险。针对轴瓦温度监测，主要反映滑动轴承润滑冷却系统的效能状态，当润滑油黏度异常、供油量不足或冷却器换热效率下降时，轴瓦接触面摩擦功耗增加将直接导致巴氏合金层温度异常上升。对于汽缸金属温度梯度的监测，重点在于缸体内外壁温差动态平衡的评估，该参数直接关联汽缸热膨胀均匀性与动静间隙控制精度。若暖机阶段升温速率失控或负荷突变引起蒸汽参数剧烈波动，将导致缸体轴向与径向热应力分布失衡，引发汽缸猫爪膨胀受阻、中分面密封失效等结构性异常。这两类温度参数的异常变化往往早于机械振动信号的显著恶化，可作为预测性维护的重要前置指标，其数据趋势分析对预防轴承烧瓦、汽缸变形等重大故障具有决定性诊断价值。

（二）热变形

热变形监测是汽轮机运行状态评估的核心指标，其本质在于追踪金属部件受热膨胀的线性规律与协调性。机组启停或变负荷过程中，汽缸与转子的差异化膨胀会显著改变通流部分动静间隙，滑销系统的导向精度直接决定膨胀矢量与设计路径的吻合度。当滑销卡涩、台板滑动面润滑失效或膨胀死点位移时，汽缸绝对膨胀量将偏离额定曲线，导致中分面法兰扭曲或轴承座偏移，引致轴系中心失准与振动超标。相对膨胀监测重点在于转子与汽缸的膨胀差动态平衡，该差值反映轴向推力轴承工作状态与通流间隙实际裕度，若因蒸汽升温速率失控、法兰加热不均或滑销导向异常引发差胀超限，会压缩隔板汽封径向间隙甚至引发叶片围带与汽封齿接触摩擦。热变形异常的表征包括缸体膨胀指示器数据停滞、差胀表指针持续偏离安全区，同时伴随排汽缸温度分布畸变、轴承座振动低频分量增强等现象。热变形参数的实时监控对预防膨胀受阻类故障具有预警作用，是保障机组热态运行安全的重要诊断依据。

三、汽轮机故障诊断的机电融合技术

（一）基于振动信号分析的故障诊断

基于振动信号分析的机电融合诊断技术通过解构机组运行过程中机械能与电磁能交互作用产生的复合振动特征,实现汽轮机故障的精准识别。振动信号作为机电系统动态行为的综合表征,其幅频特性与相位关系能够映射转子-轴承系统、电磁激励源及流体介质的耦合作用机制。通过多物理场耦合建模解析基频、倍频及边频带能量分布,可辨识质量不平衡引发的离心力激振、电磁偏心导致的谐波叠加或汽流激振诱发的宽频带能量扩散等典型故障模式。在机电融合视角下,振动信号中的调制现象需结合电气参数波动进行联合分析,例如发电机气隙磁场畸变与轴系扭振的互相关性研究,能够有效区分纯机械故障与机电耦合故障。高阶谱分析技术可提取非线性系统中的相位耦合信息,对齿轮箱齿面磨损、联轴器不对中等引发的冲击调制特征具有敏感捕捉能力。振动熵值计算与混沌特征量分析则能定量评估系统动态行为的复杂度变化,为早期微弱故障预警提供判据。该技术体系通过建立振动特征空间与故障模式集的映射关系,实现转子裂纹扩展、轴承松动、电磁拉筋断裂等复合故障的分离诊断。

(二) 基于温度监测的故障诊断

基于温度监测的机电融合诊断技术通过解析设备热力学参数与机械电气状态的动态关联,构建汽轮机故障的多维度判据体系。温度场分布作为能量转换与损耗的直观表征,其异常变化能够映射轴承摩擦功耗、绕组绝缘劣化、冷却介质流量异常等复合故障信息。在滑动轴承系统中,轴瓦温度梯度突变常与油膜破裂、合金层剥离等机械损伤相关联,而发电机定子绕组热点温度的非对称分布则可能反映电气绝缘击穿或气隙磁场畸变。机电耦合作用下的温度异常具有跨尺度传播特性,如转子匝间短路引发的铜损激增会通过热传导路径导致相邻支撑轴承温度攀升,形成机械与电气参数的交互影响。温度监测数据需结合振动频谱、电流谐波等特征进行联合解译,例如轴承座温升伴随高频振动能量扩散可判

定为滚动体剥落故障。该技术通过建立温度场重构模型与热应力分布图谱,能够辨识汽缸膨胀受阻引发的热变形累积、冷却水系统堵塞导致的传热效率下降等潜在风险,为预防性维护提供热力学维度的重要决策支撑。

(三) 智能化算法在故障诊断中的应用

随着智能化算法在机电系统故障诊断中的深化应用,汽轮机故障诊断领域逐步形成了基于多源数据融合的机电一体化分析框架。在机电融合技术架构下,支持向量机(SVM)凭借其在小样本、非线性分类场景中的优势,被广泛用于汽轮机轴系振动信号的故障特征提取与模式识别,通过构建高维特征空间实现转子不平衡、不对中等典型故障的精准判别。与此同时,深度置信网络通过逐层特征学习可有效挖掘叶片裂纹等潜在故障的温度场与压力场耦合关系,而改进型模糊聚类算法则能对油液监测数据进行异常模式发现,形成多维度故障预警体系。实际工程应用中通常结合自适应信号处理技术对原始数据进行降噪与特征增强,并利用迁移学习策略解决跨工况数据分布差异问题。通过融合机理模型与数据驱动方法的互补优势,该技术体系不仅提升了汽轮机复合故障的诊断灵敏度,还通过动态贝叶斯网络实现了故障演化路径的可视化分析,为机电系统的状态评估与维护决策提供了可靠支撑。

总结

综上所述,汽轮机故障诊断技术的创新之路是一个不断发展和适应时代变化的过程。未来,随着人工智能、大数据分析和云计算等技术的不断发展,汽轮机故障诊断的机电融合技术将朝着智能化、自动化和网络化的方向发展,为电厂的安全稳定运行提供更加可靠的技术保障,并进一步降低维护成本和能源消耗。

参考文献

- [1]王颖,李录平,陈尚年,等.基于运行参数相关分析的汽轮机组碰磨故障诊断方法及其应用[J].汽轮机技术,2023(3):207-213.
- [2]闫城,陈时熠,华心果,等.基于改进KNN算法的汽轮机通流故障诊断方法及应用[J].热力发电,2021(7).
- [1]楚新凯.电厂汽轮机常见振动故障分析及故障诊断技术[J].2023(22):141-143.