

热机汽轮机故障诊断与预测维护技术研究

李佳伦 王哲伦

黄陵矿业沮源发电有限公司 陕西 延安 727300

摘要：热机汽轮机作为能源转换的关键设备，其故障诊断与预测维护技术对于提高设备可靠性、降低维护成本具有重要意义。本文综述了基于振动分析、油液监测和热力参数监测的故障诊断方法，以及基于大数据、物联网和可靠性分析的预测维护技术。通过对比分析各种方法的优缺点，提出了综合应用多种技术手段进行故障诊断与预测维护的策略，旨在为热机汽轮机的智能化运维提供理论支撑和实践指导。

关键词：热机汽轮机；故障诊断；预测维护；监测技术

1 热机汽轮机的基本原理与结构

1.1 汽轮机的工作原理

汽轮机是一种将蒸汽的热能高效转化为机械功的外燃回转式机械。其基本原理基于蒸汽在汽轮机内部流动过程中，通过喷嘴和动叶片的作用，实现能量的转换。具有一定压力和温度的蒸汽进入汽轮机后，首先流经精心设计的喷嘴。在喷嘴内，蒸汽发生降压、膨胀和加速，从而获得很高的速度。这一过程将蒸汽的热能转换为汽流动能。随后，高速流动的蒸汽冲击汽轮机转子上的动叶片，动叶片受到蒸汽的冲击而转动，从而将蒸汽的动能转换为机械能。当动叶片为反动式时，蒸汽在动叶中发生膨胀产生的反动力亦使动叶片做功。动叶片带动汽轮机转子，按一定的速度均匀转动，进而驱动压缩机、泵等从动工作机。从能量转换的角度来看，汽轮机的工作过程是一个连续的能量转换链。蒸汽的热能在喷嘴内转换为汽流动能，动叶片又将动能转换为机械能。反动式叶片中，蒸汽在动叶膨胀部分直接由热能转换成机械能。这一转换过程高效且连续，使得汽轮机成为蒸汽能量转换的重要设备。汽轮机的工作原理还涉及到其如何适应外界负荷的变化^[1]。当外界负荷增加时，汽轮机需要增加输出功率以满足需求。这通常通过增加蒸汽流量或提高蒸汽参数来实现。相反，当外界负荷减小时，汽轮机需要减小输出功率以保持稳定运行。这可以通过调节蒸汽阀门开度或改变汽轮机转速等方式来实现。

1.2 汽轮机的结构特点

汽轮机结构复杂，由多个部件组成，每个部件都承担着特定的功能。其结构特点主要体现在几个方面：第一，汽轮机本体由转动和静止两大部件构成，转动部分包括主轴、叶轮、动叶片及联轴器等核心组件，负责将蒸汽的动能转换为机械能。静止部分则主要包括进汽装置、汽缸、隔板与静叶栅、汽封以及轴承等关键元件，

用于支撑和固定转动部分，并确保蒸汽在汽轮机内部高效完成能量转换。第二，汽缸作为汽轮机的外壳，其核心作用是将通流部分与外界大气隔绝，从而形成一个封闭的汽室。汽缸内部精心布置了喷嘴室、隔板及隔板套等部件，同时与进汽、排汽及抽汽等管道相联结。汽缸的设计考虑到热膨胀和收缩的影响，通常采用滑销系统来确保汽缸的合理膨胀，并保持动、静部件间隙在允许范围内。此外，汽缸还分为单层缸和双层缸两种形式，以适应不同参数的汽轮机需求。第三，转子是由合金钢锻件经过整体加工而成，是汽轮机的核心部件。根据结构和材料的不同，转子可分为套装转子、整锻转子和焊接转子等多种类型。套装转子多用于中、低参数的冲动式汽轮机，整锻转子则常用于大型汽轮机的高、中压转子。焊接转子则结合了整锻转子的优点，同时在经济性和发展潜力上更胜一筹，适用于汽轮机低压转子等质量大、承受离心力大的情况。第四，动叶片是汽轮机的关键部件，负责接受喷嘴叶栅射出的高速气流，并将蒸汽的动能高效地转换成机械能。叶片通常由叶型、叶根和叶顶三部分组成，其中叶型是叶片的工作部分，其设计直接影响到能量转换的效率。叶根则负责连接叶片与叶轮或转鼓，确保在各种运行条件下都能保持牢固连接。围带和拉筋等设计用于增强叶片的刚性和改变自振频率，以减小汽流弯应力和优化振动特性。第五，汽封装置用于防止蒸汽泄漏和空气漏入，确保汽轮机的效率和安全运行。轴承则分为径向支撑轴承和推力轴承两类，共同承受转子的重力并确定转子在汽缸中的精确位置。不同类型的轴承具有各自的特点和适用范围，如可倾瓦轴承因其稳定性好、承载范围大而受到青睐。

2 热机汽轮机常见故障类型及成因分析

2.1 机械故障

机械故障是热机汽轮机运行中常见的一类问题，主

要源于设备自身的物理磨损、部件老化或设计缺陷。这类故障通常表现为振动异常、噪音增大、轴承过热以及转子不平衡等现象。具体而言,振动异常可能是由于转子不平衡、轴承损坏或不对中引起的。当转子上的质量分布不均时,旋转过程中会产生离心力,导致振动加剧。轴承损坏则可能是由于润滑不良、过热或异物侵入造成的,这些都会增加轴承的摩擦和磨损,进而引发振动和噪音。汽轮机的联轴器、齿轮等传动部件的磨损或松动也可能导致不对中,影响设备的稳定运行^[2]。

2.2 热工故障

热工故障主要与汽轮机的热交换过程有关,涉及蒸汽参数异常、热膨胀不均以及部件过热等问题。蒸汽参数异常,如压力、温度波动超出正常范围,可能是由于控制系统故障、蒸汽管道泄漏或喷嘴堵塞等原因造成的。这些异常参数不仅会影响汽轮机的效率,还可能导致部件承受过大的热应力,从而引发热膨胀不均或过热故障。热膨胀不均可能会破坏汽缸与转子之间的间隙,导致摩擦和振动加剧。而过热则可能使部件材料性能下降,甚至引发裂纹和断裂。热工故障的成因通常与设备的设计、运行条件以及维护状况密切相关。例如,设计不合理的冷却系统可能导致部件过热;运行过程中的蒸汽参数控制不当也可能引发故障。

2.3 控制系统故障

控制系统是热机汽轮机稳定运行的核心,负责监测和控制蒸汽参数、转速以及负荷等关键变量。控制系统故障可能导致设备无法准确响应操作指令,甚至引发安全事故。这类故障可能表现为传感器失灵、执行机构故障以及控制逻辑错误等。传感器失灵可能是由于老化、污染或损坏造成的,这会导致控制系统无法准确获取设备状态信息。执行机构故障则可能是由于电气故障、机械卡涩或液压系统问题引起的,这些都会使控制指令无法有效执行。而控制逻辑错误则可能是由于软件缺陷或人为误操作导致的,这会使控制系统做出错误的决策。

3 热机汽轮机故障诊断方法研究

3.1 基于振动分析的诊断方法

基于振动分析的诊断方法是热机汽轮机故障诊断中最常用且有效的方法之一。汽轮机的振动状态直接反映了其运行健康状况,通过对振动信号的监测和分析,可以及时发现并定位设备内部的潜在故障。这种方法的核心在于振动传感器的合理布置和数据采集系统的精确性。传感器通常安装在汽轮机的关键部位,如轴承座、转子轴颈等,以实时监测设备的振动情况。数据采集系统则负责将传感器采集到的振动信号进行数字化处理,

并存储于计算机中,以便后续分析。在振动分析过程中,常用的技术手段包括时域分析、频域分析和时频域分析等。时域分析主要关注振动信号随时间的变化趋势,通过统计振动幅值、峰值等参数,可以初步判断设备的振动水平是否正常。频域分析则利用傅里叶变换等数学工具,将振动信号从时域转换到频域,通过分析频谱图中的特征频率,可以识别出与设备故障相关的振动成分。时频域分析则结合了时域和频域的优点,能够同时反映振动信号在时间和频率上的变化,对于诊断复杂故障尤为有效。基于振动分析的诊断方法不仅能够准确识别出汽轮机的常见故障,如转子不平衡、轴承损坏等,还能够对故障的发展趋势进行预测,为设备的维护决策提供重要依据。

3.2 基于油液监测的诊断方法

油液监测是另一种重要的热机汽轮机故障诊断方法。汽轮机在运行过程中,其内部的润滑油和冷却油会不断与设备部件接触并发生相互作用,油液中携带了大量的设备状态信息。油液监测的诊断方法主要包括油液理化性能分析、油液污染度监测以及磨损颗粒分析等。理化性能分析主要关注油液的粘度、闪点、酸值等指标,这些指标的变化可以反映油液的品质变化和老化程度。污染度监测则通过测量油液中固体颗粒物的数量、大小和分布,来评估设备的清洁度和磨损状况。磨损颗粒分析则利用显微镜、光谱仪等先进设备,对油液中的金属和非金属颗粒进行形态、成分和尺寸等方面的分析,从而推断出设备内部的磨损类型和程度^[3]。基于油液监测的诊断方法具有非破坏性、实时性和连续性等优点,能够及时发现设备的早期磨损和潜在故障,为设备的预防性维护提供有力支持。

3.3 基于热力参数监测的诊断方法

热力参数监测是热机汽轮机故障诊断中不可或缺的一环。汽轮机在运行过程中,其热力参数(如蒸汽压力、温度、流量等)的变化直接反映了设备的能量转换效率和运行状态。热力参数监测的诊断方法主要包括参数趋势分析、参数关联分析和参数异常检测等。参数趋势分析通过绘制热力参数随时间的变化曲线,可以直观地反映出设备的性能变化趋势和异常波动。参数关联分析则利用统计方法或机器学习算法,探究不同热力参数之间的相关性,从而揭示出设备内部的故障机制和影响因素。参数异常检测则通过设置合理的阈值和报警机制,当热力参数超出正常范围时及时发出预警信号,以便操作人员采取相应措施。基于热力参数监测的诊断方法具有直观性、实时性和准确性等优点,能够及时发现

设备的热工故障和性能异常,为设备的运行优化和故障处理提供重要依据。

4 热机汽轮机预测维护技术研究

4.1 基于大数据的预测维护技术

基于大数据的预测维护技术,主要是通过对汽轮机历史运行数据的收集、整理和分析,挖掘出设备故障发生前的潜在规律,从而实现对未来故障趋势的预测。在数据收集阶段,需要从汽轮机的监控系统中获取大量的运行数据,包括但不限于振动、温度、压力、流量等关键参数。这些数据通常具有时间序列特性,能够反映设备在不同工况下的运行状态。为了确保数据的准确性和可靠性,需要对数据进行预处理,包括数据清洗、异常值检测和数据标准化等步骤。在数据分析阶段,主要运用机器学习算法对预处理后的数据进行训练和学习。常用的机器学习算法包括支持向量机、神经网络、决策树等,它们能够自动从数据中提取特征,并建立起故障预测模型。这些模型能够识别出设备故障前的微小变化,从而实现对故障的提前预警。为了提高模型的预测精度,还需要采用交叉验证、网格搜索等技术对模型参数进行优化。基于大数据的预测维护技术具有显著的优势。一方面,它能够实现对设备状态的实时监测和预警,大大提高了维护的及时性和有效性。另一方面,通过对历史数据的挖掘和分析,可以发现设备故障发生的规律和趋势,为制定针对性的维护策略提供了有力支持。

4.2 基于物联网的预测维护系统

物联网(IoT)技术的兴起为热机汽轮机的预测维护提供了新的解决方案。在系统中,传感器被部署在汽轮机的关键部位,用于实时监测设备的振动、温度等关键参数。这些数据通过无线网络传输到云端数据中心,进行存储和分析。云计算平台具备强大的数据处理能力,能够实时处理和分析传感器上传的数据,识别出设备状态的异常变化,并触发预警机制。基于物联网的预测维护系统不仅提高维护的及时性和准确性,还降低人力成本。操作人员可以通过手机、电脑等终端设备远程查看设备的运行状态和维护计划,大大提高工作效率。系统还能够根据设备的实际使用情况动态调整维护策略,避免不必要的停机检修和零件更换,降低维护成本。

4.3 基于可靠性分析的预测维护策略制定

在热机汽轮机的预测维护中,基于可靠性分析的预测维护策略制定至关重要。在制定预测维护策略时,首先需要确定设备的可靠性指标,如平均无故障时间(MTBF)、平均修复时间(MTTR)等。这些指标能够反映设备的故障频率和修复能力,为制定维护策略提供了重要依据^[4]。其次,需要根据设备的运行历史和维护记录,分析设备故障发生的原因和规律,识别出潜在的故障模式和影响因素。基于可靠性分析的预测维护策略通常包括定期维护、视情维护和预测性维护等多种方式。定期维护是按照固定的时间间隔对设备进行检修和保养,适用于故障发生概率较高的设备。视情维护则是根据设备的实际运行状态和维护需求进行灵活的维护安排,适用于故障发生概率较低且维护成本较高的设备。预测性维护则是通过实时监测和分析设备的运行状态,提前预测并处理潜在的故障隐患,适用于对设备可靠性要求较高的场合。在制定预测维护策略时,还需要考虑设备的经济性、安全性和可操作性等因素。通过综合考虑这些因素,可以制定出既经济又有效的维护计划,确保设备的长期稳定运行。

结束语

热机汽轮机的故障诊断与预测维护技术研究是一个复杂而系统的工程。随着信息技术的不断进步和智能化运维理念的深入人心,未来的研究将更加注重技术的融合与创新,以提高故障诊断的准确性和预测维护的智能化水平。加强国际合作与交流,共同推动热机汽轮机运维技术的持续发展,也是未来研究的重要方向。

参考文献

- [1]郭帅.汽轮机运行中设备维护及常见故障处理[J].今日制造与升级,2023,(06):74-76.
- [2]李本荣,杨晓东,马宁.压水堆核电站汽轮机非核冲转期间跳闸故障分析及维护[J].自动化与仪器仪表,2021,(07):197-199.
- [3]刘刚.火力发电厂汽轮机常见故障分析与检修研究[J].中国设备工程,2022(2):43-44.
- [4]戴一晨鸣.发电厂汽轮机检修中的关键点探讨[J].质量与市场,2020(18):67-69.