

汽轮机设备故障诊断技术研究

李鹏凯

中煤鄂州能源开发有限公司 湖北 鄂州 436000

摘要: 汽轮机是电力、化工等行业核心动力设备,其运行稳定性关乎生产系统安全与经济效益。伴随高参数、大容量发展趋势,汽轮机故障发生率攀升,不仅造成设备停机,还可能引发重大安全事故与经济损失。本文全面梳理汽轮机机械、热力、控制系统及润滑系统等常见故障类型,剖析振动分析法、油液分析法等传统诊断方法原理与应用,探讨人工智能技术在故障诊断中的优势,详细阐述故障诊断系统架构设计、硬件选型、软件开发及集成测试流程,旨在完善诊断技术体系,为企业提供精准高效方案,提升运维水平。

关键词: 汽轮机;故障诊断;振动分析

引言:工业生产中,汽轮机因高效能量转换,成为火力发电、核电、冶金等行业的核心动力装备,其运行状况直接影响生产系统的连续与可靠。如今工业技术升级,汽轮机运行参数提高、结构复杂化,故障隐患增多,停机损失与安全风险加剧。故障诊断技术作为保障汽轮机安全运行的关键,可及时识别、定位故障,分析原因,为处理提供依据,降低运维成本、避免事故。本文聚焦该技术,梳理故障类型、分析诊断方法、设计实现系统,为运维提供指引。

1 汽轮机故障常见故障类型

1.1 机械故障

机械故障是汽轮机最常见的故障类型之一,主要发生在转子、轴承、叶片、联轴器等核心机械部件,多由部件磨损、疲劳、安装偏差等因素引发。转子故障包括不平衡、不对中、裂纹、弯曲等,其中转子不平衡会导致设备振动超标,长期运行会加剧部件磨损,甚至引发转子断裂;轴承故障主要表现为磨损、油膜振荡、温度升高等,油膜振荡会导致设备剧烈振动,严重时损坏轴承和转子;叶片故障多由疲劳冲刷、腐蚀等导致,表现为叶片磨损、裂纹、断裂,直接影响汽轮机的做功效率,甚至引发整机故障;联轴器故障主要包括连接松动、不对中,会导致动力传递不畅,产生振动和噪声,影响设备运行稳定性。此类故障具有隐蔽性强、发展速度快的特点,需及时诊断处理。

1.2 热力故障

热力故障主要源于汽轮机热力系统异常,与蒸汽参数、热力循环、换热效率等因素密切相关,直接影响汽轮机的能量转换效率和运行安全性。常见的热力故障包括汽阀故障、密封泄漏、换热管结垢、蒸汽品质不达标等。汽阀故障表现为阀门卡涩、开度异常,导致蒸汽流

量控制失衡,影响机组负荷调节;密封泄漏会造成蒸汽损耗,降低机组效率,同时泄漏的蒸汽可能损坏周边部件;换热管结垢会降低换热效率,导致机组排汽温度升高,增加能耗;蒸汽品质不达标会加剧叶片、转子等部件的腐蚀和磨损,缩短设备使用寿命。热力故障多表现为参数异常,诊断过程中需结合热力系统运行数据进行综合分析^[1]。

1.3 控制系统故障

控制系统故障主要发生在汽轮机的控制单元、传感器、执行机构等部件,影响设备的自动调节和运行控制,严重时会导致机组停机或失控。常见的控制系统故障包括传感器故障、执行机构卡涩、控制单元故障等。传感器故障会导致运行参数采集失真,如振动、温度、压力等参数测量不准确,影响故障诊断和控制决策;执行机构卡涩会导致控制指令无法正常执行,如汽阀调节失灵、调速系统故障,影响机组负荷和转速控制;控制单元故障会导致整个控制系统瘫痪,无法实现对汽轮机的实时监控和调节。此类故障具有突发性强、影响范围广的特点,需建立完善的监控机制及时发现。

1.4 润滑系统故障

润滑系统是保障汽轮机机械部件正常运转的关键,其故障会导致部件磨损加剧、温度升高,甚至引发卡死、断裂等严重故障。常见的润滑系统故障包括润滑油油质劣化、供油不足、油路堵塞、油温过高等。润滑油油质劣化会降低润滑效果,加剧部件磨损,还可能产生油泥堵塞油路;供油不足会导致部件润滑不充分,产生干摩擦,迅速损坏轴承、转子等核心部件;油路堵塞会导致润滑油无法正常循环,无法起到冷却和润滑作用;油温过高会降低润滑油的粘度和润滑性能,加速油质劣化,同时影响部件的散热。润滑系统故障多与维护不当、油

液选型不合理等因素相关，需加强日常监测和维护。

2 汽轮机故障诊断方法与技术

2.1 振动分析法

振动分析法是汽轮机故障诊断中应用最广泛、最成熟的方法之一，其核心原理是通过监测汽轮机运行过程中的振动信号，分析信号的时域、频域特征，识别故障类型和故障位置。该方法主要通过振动传感器采集转子、轴承等部件的振动数据，对数据进行去噪、滤波等预处理后，采用时域分析（峰值、有效值、峭度等）、频域分析（频谱分析、功率谱分析）等手段，提取故障特征。例如，转子不平衡会在特定频率下出现峰值振动，转子不对中会产生倍频振动信号，叶片故障会出现特征频率的幅值异常。振动分析法具有实时性强、诊断精准、操作便捷的优势，能够有效识别机械故障，是汽轮机故障诊断的核心技术之一。

2.2 油液分析法

油液分析法主要用于诊断汽轮机润滑系统故障和机械部件磨损故障，其原理是通过分析润滑油的物理化学性质和所含磨损颗粒，判断设备的运行状态和故障类型。该方法主要包括油液光谱分析和油液铁谱分析两种方式：油液光谱分析通过检测润滑油中金属元素的含量，判断部件的磨损程度和磨损部位，如轴承磨损会导致润滑油中铁、铜等元素含量升高；油液铁谱分析通过分离润滑油中的磨损颗粒，观察颗粒的形态、大小和数量，判断磨损类型和故障严重程度^[1]。油液分析法能够提前发现潜在的磨损故障，实现故障的早期预警，弥补了振动分析法在润滑系统故障诊断中的不足，广泛应用于汽轮机日常运维诊断中。

2.3 温度监测法

温度监测法作为汽轮机故障诊断的重要手段之一，主要是通过持续监测汽轮机各部件的温度参数，精准判断设备的运行状态以及潜在的故障类型。其核心操作是借助高精度的温度传感器，对轴承、转子、汽阀、润滑油等关键部位的温度数据进行实时采集。这些部位的温度变化往往能直观反映设备的健康状况。采集到温度数据后，将其与设备正常运行时的温度范围进行细致对比。一旦发现温度超出正常区间，即可识别出温度异常情况，并进一步深入分析故障原因。比如，当轴承温度过高时，可能是润滑不足导致摩擦增大，也可能是轴承自身磨损，亦或是油膜振荡引发异常升温；汽阀温度异常，或许是阀门卡涩影响正常流通，或是密封泄漏致使热量积聚；润滑油温度过高，则可能是油路堵塞阻碍了油的正常循环，或是冷却系统出现故障无法有效降温。

温度监测法具有设备简单、成本较低、操作便捷的显著优势，能实时掌握设备运行状态，及时发现温度异常故障，常与其他诊断方法联合使用，以提高故障诊断的准确性。

2.4 性能分析法

性能分析法在汽轮机热力系统故障诊断中占据着关键地位。其核心原理在于对汽轮机一系列热力性能参数进行严密监测，像蒸汽压力、温度、流量，还有机组负荷、效率等。这些参数犹如汽轮机热力系统的“健康指标”，通过将实时监测到的参数与设备在正常运行状态下预先设定的性能指标进行细致对比，就能精准分析出性能偏差情况，进而识别出故障类型以及背后的故障原因。为了实现这一目标，通常会建立汽轮机热力性能模型，依据该模型计算出理论上的性能参数，再与实际采集到的参数一一比对。一旦发现差异，就意味着热力系统可能存在异常。比如，当机组效率下降时，可能是密封泄漏导致蒸汽泄漏，或是换热管结垢影响热交换效率，亦或是汽阀故障影响蒸汽的正常流通；而蒸汽流量异常，则可能是汽阀开度异常，或者管道出现堵塞等情况。性能分析法能全面且深入地反映汽轮机的热力运行状态，为诊断热力系统故障提供有力支撑，还能为机组性能优化提供科学依据^[3]。

2.5 人工智能技术应用

在科技飞速发展的当下，人工智能技术凭借其强大的能力，在汽轮机故障诊断领域的应用愈发广泛，极大地弥补了传统诊断方法的短板，显著提升了故障诊断的精准度与效率。常见的人工智能技术涵盖人工神经网络、支持向量机、随机森林以及深度学习等。这些技术的核心逻辑是通过对大量故障数据进行训练，构建出精准的模型，从而挖掘出故障数据与故障类型之间千丝万缕的关联关系，最终实现故障的智能识别与预测。例如，利用人工神经网络构建故障诊断模型，将振动、温度等故障数据输入其中，经过模型的反复训练，就能精准识别出转子故障、轴承故障等；深度学习技术则能对多源故障数据进行深度处理，不仅可以实现多种故障同时耦合的诊断，还能在故障早期就发出预测信号。人工智能技术具备自适应、自学习以及抗干扰能力强的显著优势，能够轻松应对复杂的故障数据，有力推动汽轮机故障诊断朝着智能化、精准化的方向大步迈进。

3 汽轮机故障诊断系统设计与实现

3.1 系统架构设计

汽轮机故障诊断系统采用分层架构设计，分为数据采集层、数据预处理层、故障诊断层、人机交互层四个

核心层次,各层次协同工作,实现故障的实时监测、诊断和预警。数据采集层负责采集汽轮机振动、温度、油液、热力等各类运行参数,通过传感器、数据采集模块实现数据的实时采集和传输;数据预处理层对采集到的原始数据进行去噪、滤波、归一化、异常值剔除等处理,提升数据质量,为故障诊断提供可靠的数据支撑;故障诊断层结合振动分析法、油液分析法及人工智能技术,构建故障诊断模型,实现故障类型识别、故障位置定位和故障原因分析;人机交互层负责数据展示、故障报警、诊断结果输出等功能,为运维人员提供直观的操作界面,便于及时掌握设备运行状态和故障信息。系统架构设计遵循模块化、可扩展性原则,便于后续功能升级和维护。

3.2 硬件选型与配置

硬件选型与配置围绕系统功能需求,遵循可靠性、精准性、兼容性原则,选取适配汽轮机运行环境的硬件设备。数据采集模块选用高精度振动传感器、温度传感器、油液传感器和压力传感器,其中振动传感器选用压电式传感器,测量范围0-100mm/s,精度 $\pm 1\%$,安装于转子、轴承等关键部位;温度传感器选用热电偶传感器,测量范围-50℃-500℃,确保满足汽轮机各部件温度监测需求;油液传感器选用在线油液监测传感器,实时监测润滑油的粘度、水分、金属颗粒含量等参数。数据传输模块选用工业以太网模块,实现数据的高速、稳定传输;数据处理模块选用高性能工业计算机,配置多核处理器和大容量内存,确保数据处理和故障诊断的实时性。同时,配置报警装置,当检测到异常数据时及时发出声光报警,提醒运维人员处理^[4]。

3.3 软件设计与开发

软件设计与开发基于Windows操作系统,采用C#编程语言,结合MATLAB数据处理工具,实现系统各功能模块的开发。软件主要包括数据采集模块、数据预处理模块、故障诊断模块、数据存储模块、人机交互模块和报警模块。数据采集模块实现与硬件设备的通信,实时采集各类运行参数,支持多通道同时采集;数据预处理模块采用小波变换、卡尔曼滤波等方法,对原始数据进行去噪处理,剔除异常值,标准化数据格式;故障诊断模块集成振动分析、油液分析等算法和人工智能诊断模型,实现故障的自动识别和分析;数据存储模块采用

SQLServer数据库,存储设备运行数据、故障数据和诊断结果,支持数据查询和历史数据分析;人机交互模块设计简洁直观的操作界面,实现数据展示、参数设置、诊断结果查看等功能;报警模块实现异常数据的实时报警,支持报警信息查询和历史报警记录统计。

3.4 系统集成与测试

系统集成阶段,将硬件设备与软件系统进行对接,完成各模块的协同调试,确保数据采集、传输、处理、诊断等环节正常运行。首先进行硬件集成,将传感器、数据采集模块、工业计算机、报警装置等设备连接,调试设备通信状态,确保数据采集准确、传输稳定;然后进行软件与硬件的集成,调试软件各模块与硬件设备的兼容性,确保软件能够正常读取硬件采集的数据,实现数据的实时处理和故障诊断。系统测试分为功能测试、性能测试和稳定性测试,功能测试验证各模块功能是否符合设计要求,性能测试检测系统的数据处理速度、诊断精度和实时性,稳定性测试通过长时间连续运行,检验系统的运行稳定性。针对测试中发现的问题,及时优化调整,确保系统达到设计目标,能够满足汽轮机故障诊断的实际需求。

结束语

汽轮机设备故障诊断技术对保障设备安全稳定运行、降低运维成本、确保工业生产连续可靠意义重大。本文系统梳理了汽轮机机械、热力、控制系统及润滑系统等常见故障,深入剖析振动分析法等传统诊断方法原理与应用,探讨人工智能技术优势,详细阐述故障诊断系统从架构设计到集成测试的流程,构建了较完整的技术体系。当下,该技术正朝智能化、精准化、实时化迈进,未来要进一步优化诊断算法,强化多源信息融合,提升故障早期预警能力。

参考文献

- [1]王杰.火电厂汽轮机振动故障和诊断技术研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(1):17-19.
- [2]李国仁.汽轮机设备故障诊断与预防探讨[J].中国设备工程,2025(3):156-158.
- [3]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(6):74-76.
- [4]张泽,周斌,董伟,等.基于CNN的汽轮机故障特征提取方法[J].发电设备,2025,39(6):362-366,374.