

# 汽轮机性能优化与故障诊断技术研究

刘东晓

北京国电电力有限公司萨拉齐电厂 内蒙古 包头 014100

**摘要:** 本文聚焦汽轮机性能优化与故障诊断技术。先阐述汽轮机工作原理与结构,从热力系统、通流部分、密封技术、运行参数等方面探讨性能优化技术;又分析振动、热力性能等常见故障类型及特征,介绍多种故障诊断方法,还提及多信息融合与远程故障诊断技术。最后论述性能优化与故障诊断技术集成应用,包括架构设计、功能实现,并通过案例说明其应用效果,为汽轮机高效稳定运行提供参考。

**关键词:** 汽轮机;性能优化;故障诊断技术

## 1 汽轮机基本原理与结构

### 1.1 汽轮机工作原理

汽轮机是旋转式动力机械,在能源转换领域极为关键,其工作原理基于蒸汽在级内的能量转换。汽轮机由多个级构成,每级包含喷嘴和动叶栅。当具有一定压力和温度的蒸汽进入汽轮机,会先进入喷嘴。在喷嘴内,蒸汽热能部分转化为动能,压力降低、流速增加。高速蒸汽流按一定方向冲击动叶栅,蒸汽动能作用于动叶栅,推动其旋转,将动能进一步转化为机械能。多个级依次串联,使蒸汽能量逐步释放,机械能不断积累<sup>[1]</sup>。最终,驱动汽轮机转子高速旋转,进而带动发电机发电或驱动其他机械运转。从热力学角度,汽轮机遵循朗肯循环原理。在朗肯循环中,水在锅炉被加热成高温高压蒸汽,蒸汽进入汽轮机膨胀做功,压力和温度降低,做功后的乏汽进入凝汽器凝结成水,凝结水再经给水泵送回锅炉,完成循环。汽轮机是该循环中实现热能向机械能转换的关键设备,其效率对热力循环经济性有着直接影响。

### 1.2 汽轮机结构组成

汽轮机结构复杂精密,主要由转动部分和静止部分组成。转动部分即转子,是核心部件之一,包含主轴、叶轮、动叶片和联轴器等。主轴承受转子重量和旋转离心力,并传递动力。叶轮固定在主轴上,用于安装动叶片。动叶片安装在叶轮上,直接受蒸汽冲击而旋转,将蒸汽动能转化为转子机械能。联轴器连接汽轮机转子和发电机转子,实现功率传递。静止部分涵盖汽缸、喷嘴、隔板、静叶栅、汽封和轴承等。汽缸是外壳,将通流部分与大气隔开,形成封闭汽室,保证蒸汽完成能量转换。喷嘴安装在汽缸上,将蒸汽热能转化为动能。隔板固定静叶栅,分隔汽缸为若干汽室,使蒸汽按预定路径流动。静叶栅安装在隔板上,与动叶栅配合,引导蒸汽流动并改变方向。汽封安装在转子与汽缸动静间隙

处,防止蒸汽泄漏,提高效率。轴承支撑转子,确保其平稳旋转。

## 2 汽轮机性能优化技术研究

### 2.1 汽轮机热力系统优化

汽轮机热力系统优化是提高汽轮机效率和经济性的重要手段。热力系统包括锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵等设备以及它们之间的连接管道和阀门。在热力系统优化中,首先要对系统进行全面的热平衡计算和分析,找出能量损失的主要环节<sup>[2]</sup>。同时对凝汽器进行优化,改善凝汽器的真空度,降低排汽压力,能够增加汽轮机的有效焓降,提高汽轮机的出力。采用先进的热力系统仿真软件,对不同的热力系统方案进行模拟和比较,选择最优的热力系统配置,也是热力系统优化的重要方法。

### 2.2 通流部分优化

通流部分是汽轮机中蒸汽流动和能量转换的主要区域,其性能直接影响汽轮机的效率和出力。通流部分优化主要包括叶片型线优化、通流面积优化和级间匹配优化等。叶片型线优化通过采用先进的空气动力学设计方法,设计出更加合理的叶片型线,减少蒸汽在叶片中的流动损失,提高叶片的效率。通流面积优化则是根据汽轮机的运行工况和蒸汽参数,合理调整各级的通流面积,使蒸汽在通流部分中的流动更加顺畅,避免出现局部过流或欠流现象。级间匹配优化主要考虑各级之间的压力、温度和流量匹配关系,通过调整各级的参数,使各级之间能够更好地协同工作,提高整个通流部分的效率。

### 2.3 密封技术优化

汽轮机的密封性能对机组的经济性和安全性有着重要影响。良好的密封可以减少蒸汽泄漏,降低能量损失,提高汽轮机的效率。目前,汽轮机常用的密封技术包括汽封、轴封和阀门密封等。在汽封优化方面,采用新型的汽封结构,如蜂窝汽封、刷式汽封等,可以提高

汽封的密封性能,减少蒸汽泄漏。轴封优化则主要是改进轴封的密封结构和材料,提高轴封的可靠性和使用寿命。阀门密封优化通过采用高性能的密封材料和合理的密封结构设计,减少阀门内漏和外漏,提高阀门的密封性能。

#### 2.4 运行参数优化

运行参数优化是根据汽轮机的实际运行工况,对主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、排汽压力等运行参数进行合理调整,以提高汽轮机的运行效率和经济性。例如,适当提高主蒸汽压力和温度,可以增加蒸汽的做功能力,提高汽轮机的出力。但过高的压力和温度也会对汽轮机的材料 and 安全性提出更高的要求,因此需要在保证机组安全运行的前提下进行优化。通过优化排汽压力,使凝汽器处于最佳的工作状态,也能够提高汽轮机的效率。另外,采用先进的运行监控系统和优化算法,实时监测和调整运行参数,实现运行参数的动态优化,是提高汽轮机运行效率的重要途径<sup>[1]</sup>。

### 3 汽轮机故障诊断技术研究

#### 3.1 常见故障类型及特征分析

汽轮机长期复杂运行下,难免出现各类故障,不仅干扰机组正常运行,还可能引发重大安全事故。振动故障是汽轮机最常见的故障类型。其特征显著,转子振动幅值增大是直观表现,正常情况下转子在特定转速下振动幅值稳定,超出范围即可能存在故障;振动频率异常也是重要特征,正常频率与转速等参数相关,若出现不规则变化,如新频率成分出现或原有频率幅值突变,就预示着故障。振动故障诱因多样,转子不平衡是常见原因,可能因转子材质不均、加工误差或运行中部件脱落导致质量分布不均;不对中是重要因素,安装时转子与联轴器对中不良,会使转子旋转时产生附加力引发振动;轴承损坏会使转子支撑不稳,同样引起振动异常。热力性能故障主要表现为汽轮机出力下降、效率降低,相同工况下无法达到应有输出功率,或维持相同功率需消耗更多能量。这可能是通流部分结垢,蒸汽通过结垢叶片时流动阻力增大、能量转换效率降低;也可能是汽封泄漏,蒸汽泄漏量增加,有效做功蒸汽减少,影响机组热力性能。动静碰磨故障指转子与静止部件碰磨,会产生异常振动和噪声,与正常运行声音有明显区别,严重时摩擦力使转子局部升温,导致转子弯曲或损坏。叶片断裂故障严重,会使汽轮机功率急剧下降,特征为振动突变且可能伴有金属碎片飞出,威胁周边设备和人员安全。

#### 3.2 故障诊断方法概述

汽轮机故障诊断对保障机组安全稳定运行至关重要,目前主要的诊断方法涵盖基于振动分析、热力参数分析、油液分析以及无损检测等方法。基于振动分析的方法应用广泛。它在汽轮机关键部位安装振动传感器,实时监测转子振动信号,再利用专业信号处理技术提取振幅、频率、相位等特征参数。振幅体现振动强度,频率与故障类型紧密相关,相位信息能判断振动方向和位置。结合历史数据与经验,分析这些参数就能判断汽轮机运行状态和故障类型。基于热力参数分析的方法从热力性能角度诊断故障。汽轮机的温度、压力、流量等热力参数直接反映能量转换过程,故障时这些参数会相应变化。通过实时监测并对比正常工况参数,可诊断出热力性能故障。基于油液分析的方法聚焦润滑系统,润滑油运行时携带内部零部件的磨损颗粒、污染物等信息。对润滑油采样分析,检测金属颗粒成分、大小、数量以及污染物种类和浓度,能了解零部件磨损情况和运行状态。基于无损检测的方法,如超声波检测、射线检测等,可直接检测零部件内部缺陷和损伤。超声波检测利用超声波在材料中的传播特性,通过反射波和透射波信息判断内部是否存在裂纹、气孔等缺陷;射线检测利用射线穿过零部件后的衰减情况形成影像,发现内部缺陷。这些方法能在不破坏零部件的前提下,准确检测内部质量问题,为故障诊断提供重要依据。

#### 3.3 基于多信息融合的故障诊断技术

在实际的汽轮机故障诊断中,单一的故障诊断方法往往存在一定的局限性。每种方法只能从特定的角度获取汽轮机的运行信息,难以全面、准确地反映机组的实际状态。而基于多信息融合的故障诊断技术则可以有效解决这一问题,它将多种诊断方法获取的信息进行综合分析和处理,从而提高故障诊断的准确性和可靠性。多信息融合技术可以将振动信号、热力参数、油液分析数据等多种信息进行有机融合。这些信息从不同的侧面反映了汽轮机的运行状态,通过建立合适的故障诊断模型,对它们进行综合评估,可以更全面地了解机组的健康状况。利用人工智能算法,如神经网络、模糊逻辑等,对融合后的信息进行处理和分析,能够进一步提高故障诊断的智能化水平<sup>[4]</sup>。神经网络具有强大的自学习和自适应能力,它可以通过大量的历史数据进行训练,建立起输入信息与故障类型之间的非线性映射关系。当输入新的信息时,神经网络可以快速、准确地判断出故障类型。模糊逻辑则可以处理模糊和不确定的信息,对于一些难以用精确数学模型描述的故障特征,模糊逻辑可以对其进行合理的推理和判断,从而更准确地诊断出故障。

### 3.4 远程故障诊断技术

随着信息技术发展,远程故障诊断技术在汽轮机领域广泛应用。该系统一般由数据采集、传输和诊断分析模块构成。数据采集模块是基础,负责实时采集汽轮机的振动信号、热力参数等运行数据,这些数据是判断运行状态和故障类型的关键依据,所以需具备高精度、高可靠性,确保数据准确。数据传输模块负责将采集的数据通过网络传至远程诊断中心。为保证传输及时、稳定,会采用光纤通信、4G/5G网络等高速稳定技术。同时为保障数据安全,会采用加密技术处理数据,防止其被窃取或篡改。诊断分析模块是核心,它利用先进诊断算法和专家系统分析数据。诊断算法依据数据特征,结合历史数据和经验,能快速准确判断汽轮机有无故障及故障类型、位置。专家系统整合大量专业知识经验,为诊断人员提供决策支持和维修建议。若发现潜在故障,该模块会及时预警并提供维修建议,指导现场维修。远程故障诊断技术可实时监测、远程诊断汽轮机,打破地域限制,让专业诊断人员及时掌握运行状态。

## 4 汽轮机性能优化与故障诊断技术集成应用

### 4.1 集成系统的架构设计

汽轮机性能优化与故障诊断技术集成系统是一个综合性的系统,其架构设计需要考虑系统的功能需求、数据传输和处理能力等因素。集成系统通常采用分层架构设计,包括数据采集层、数据传输层、数据处理层和应用层。数据采集层负责采集汽轮机的各种运行数据,如振动信号、热力参数、油液分析数据等。数据传输层通过网络将采集到的数据传输到数据处理层。数据处理层对传输过来的数据进行预处理、分析和挖掘,提取有用的信息。应用层则根据数据处理层的结果,实现性能优化和故障诊断的功能,如提供优化建议、显示故障诊断结果等。

### 4.2 集成系统的功能实现

集成系统的主要功能包括性能监测与评估、故障诊断与预警、性能优化决策等。性能监测与评估功能实时监测汽轮机的运行参数和性能指标,如效率、出力等,并与标准值进行比较,评估汽轮机的运行状态。故障诊断与预警功能通过对运行数据的分析,及时发现汽轮机的潜在故障,并发出预警信号,提醒运行人员采取相应

的措施。性能优化决策功能根据性能监测和故障诊断的结果,结合汽轮机的实际运行工况,提供性能优化的建议和方案,如调整运行参数、进行设备维护等。

### 4.3 应用案例分析

以某电厂的汽轮机为例,该电厂引入了汽轮机性能优化与故障诊断技术集成系统。通过数据采集层实时采集汽轮机的振动信号、热力参数等数据,并传输到数据处理层进行分析。在性能监测方面,系统发现汽轮机的效率有所下降。通过对热力参数的分析,发现给水回热系统存在优化空间<sup>[5]</sup>。系统根据分析结果提供了优化建议,调整回热加热器的抽汽参数,使给水温度提高了5°C,汽轮机的效率提高1.2%。在故障诊断方面,系统监测到汽轮机转子的振动幅值异常增大。通过对振动信号的深入分析,结合多信息融合技术,判断为转子不平衡故障。系统及时发出预警信号,运行人员根据建议对转子进行动平衡校正,避免故障的进一步扩大。通过该集成系统的应用,该电厂的汽轮机运行效率和可靠性得到显著提高,降低维修成本和能耗。

### 结束语

汽轮机性能优化与故障诊断技术对保障其高效稳定运行意义重大。通过多种性能优化技术可提升汽轮机效率与经济性,故障诊断技术能及时发现并预警潜在故障。性能优化与故障诊断技术集成应用,实现对汽轮机的全方位监测与管理。实际应用案例验证了该集成系统的有效性。未来,应持续深入研发相关技术,进一步提高汽轮机运行水平,推动能源领域的发展与进步。

### 参考文献

- [1]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.
- [2]胡愈杰.化工汽轮机技术改进及故障排除方法分析[J].中国设备工程,2021(19):188-189.
- [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,(06):74-76.
- [4]王兆暄.电厂汽轮机控制系统故障诊断与优化策略研究[J].中国科技期刊数据库工业A.2024(07):0177-0180
- [5]马义良,田硕.汽轮机叶片在电气短路故障下的动响应分析[J].汽轮机技术.2024(04):249-252,311