

火电厂汽轮机振动控制技术研究与应用

王学诚

广西投资集团来宾发电有限公司 广西来宾 546138

摘要：随着社会经济的快速发展和能源需求的持续增长，火电厂作为主要的电力供应来源，在我国能源结构中占据着重要地位。但作为火电厂的核心设备，汽轮机在运行过程中常常面临振动问题，这不仅会影响机组的运行效率，还可能引发设备损坏甚至安全事故。汽轮机振动问题的复杂性主要源于其工作环境的严苛性，包括高温、高压、高速旋转以及复杂的热力和机械载荷等因素。因此，如何有效控制和减少汽轮机振动，提高机组运行的安全性和可靠性，已成为火电厂领域亟待解决的关键技术问题。本研究旨在通过对火电厂汽轮机振动控制技术的深入研究与运用，探讨振动产生的机理、影响因素以及有效的控制策略。

关键词：火电厂；汽轮机；振动控制；技术应用

引言

近年来，随着火电厂规模的不断扩大和机组参数的不断提高，汽轮机的振动问题愈发突出。尤其是在高参数、大容量机组中，振动问题的复杂性进一步增加，传统的振动控制技术已难以满足现代火电厂的需求。因此，如何通过技术创新和优化设计来有效控制汽轮机振动，成为火电厂领域的重要研究方向。

目前，国内外学者针对汽轮机振动问题已开展了大量研究，提出了多种振动控制方法，如转子动平衡技术、汽缸热变形补偿技术、汽流扰动优化设计等。然而，这些方法在实际应用中仍存在一定的局限性，例如对振动源的识别精度不足、控制策略的实时性较差以及对复杂工况适应性不足等问题。因此，亟需开展针对火电厂汽轮机振动控制技术的系统性研究，探索更加高效、可靠的振动控制方法。

一、汽轮机振动的基本理论

汽轮机作为火电厂的核心设备，其工作原理与结构特点密切相关。汽轮机通过将蒸汽的热能转化为机械能，推动发电机发电，其结构包括转子、汽缸、叶片和轴承等关键部件。在运行过程中，汽轮机可能会出现振动问题，主要分为机械振动和水力振动两类。机械振动通常由转子不平衡、轴承问题或机械部件松动引起，而水力振动则与蒸汽流动的不稳定性有关，如蒸汽压力波动或流速变化。振动对汽轮机的运行影响显著，可能导致叶片断裂、轴承损坏，甚至引发安全事故，同时还会增加

能量损耗，降低发电效率。目前，国内外学者针对汽轮机振动问题已开展了大量研究，提出了转子动平衡技术和汽缸热变形补偿技术等方法，但高参数、大容量机组的振动问题仍然严峻。因此，深入研究汽轮机振动的基本理论，对于提升机组运行的安全性和可靠性具有重要意义。

二、汽轮机振动的产生机理分析

1. 汽轮机转子系统的振动分析

汽轮机转子系统是汽轮机的核心部件，其主要功能是将蒸汽的热能转化为机械能，从而推动发电机发电。转子系统通常包括转子、叶片、联轴器和轴承等关键部件，这些部件在高速旋转过程中承受着巨大的机械和热应力。由于转子系统的高速旋转和复杂的工作环境，振动问题成为了影响其运行效率和安全性的的重要因素。振动的产生主要源于转子质量不平衡、热应力分布不均、汽流扰动以及油膜涡动等多方面的原因。这些振动不仅会导致转子系统的疲劳损坏，还可能引发叶片断裂、轴承磨损等问题，严重时甚至会导致整个机组的停机，造成巨大的经济损失和安全隐患。为了准确分析转子系统的振动问题，现代技术通常采用有限元分析和模态分析等方法，以评估转子的动态特性及其对振动的敏感性。此外，研究者们还在探索更先进的监测和控制技术，以实时监测转子系统的振动状态，并采取有效的控制措施，从而提高汽轮机转子系统的运行稳定性和使用寿命。通过深入研究转子系统的振动特性及其影响因素，可以为火电厂汽轮机的优化设计和高效运行提供重要的理论支

持和技术保障。

2. 汽缸热变形对振动的影响

汽轮机的汽缸在运行过程中由于高温蒸汽的影响,会产生热变形。这种变形会改变汽缸的几何形状,导致蒸汽流动的不均匀性。蒸汽流动的不均匀会引起压力和流量的波动,这些波动传递到转子系统,引发振动。此外,汽缸变形可能改变汽门位置,影响蒸汽的流动方向和速度,增加汽流扰动,从而加剧振动。振动不仅降低汽轮机的运行效率,还可能导致部件疲劳损坏,缩短设备寿命。因此,研究汽缸热变形对振动的影响,对于优化汽轮机设计、提高其运行效率和安全性具有重要意义。通过深入分析汽缸热变形的机制及其与振动的相互作用,可以为火电厂汽轮机的振动控制提供理论支持和技术保障。

3. 汽流扰动与叶片振动的耦合作用

汽轮机在运行过程中,汽流扰动与叶片振动之间存在复杂的耦合作用,这对汽轮机的性能和安全性有着重要影响。汽流扰动是指蒸汽在汽轮机内部流动时产生的不稳定现象,通常由蒸汽压力、流量的变化或汽门调节等因素引起。这种扰动会导致蒸汽流动的不均匀性,进而对叶片产生周期性或随机性的激励作用。叶片在汽流的激励下会产生振动,而振动的叶片又会反过来影响汽流的流动特性,形成一个动态的相互作用过程。

这种耦合作用的机制较为复杂。汽流扰动可能引起叶片的强迫振动,导致叶片产生应力集中,从而引发疲劳损伤。同时,叶片振动会改变蒸汽的流动路径和速度分布,进一步加剧汽流扰动,形成一个恶性循环。这种相互作用不仅会增加叶片的振动幅度,还可能导致叶片的动态特性与汽流扰动频率产生共振,从而引发更严重的振动问题。

4. 油膜振荡与轴承系统的影响

汽轮机的轴承系统在运行过程中面临着油膜振荡这一复杂现象,这对汽轮机的稳定性和安全性具有重要影响。油膜振荡是指在高速旋转的轴承中,润滑油在轴颈和轴承之间形成的油膜发生周期性振荡的现象。这种振荡现象通常由轴的不平衡、润滑油的压力波动或轴承设计不合理等因素引发。当油膜的厚度和压力发生变化时,会导致轴承系统产生周期性的振动,这种振动会传递到汽轮机的转子系统,引起整个机组的振动问题。

油膜振荡对轴承系统的影响主要体现在以下几个方面。首先,振荡会导致轴承和轴颈之间的接触面受到周期性变化的压力和应力,从而增加轴承的磨损和疲劳损

伤的风险。其次,振动会加剧润滑油的流动不稳定性,进一步削弱油膜的承载能力,导致轴承系统失去稳定性。此外,油膜振荡还可能引发轴承的温度升高,降低润滑油的性能,从而加速轴承的老化和损坏。

三、汽轮机振动的传统控制技术

1. 转子动平衡技术

转子动平衡技术是汽轮机振动控制的核心手段之一,其本质是通过精确调整转子质量分布来消除或抑制因不平衡离心力引发的振动。在汽轮机运行过程中,转子因制造误差、材料缺陷或长期运行导致的磨损,常出现质量分布不均,这种不平衡状态在高速旋转时会产生周期性离心力,直接引发轴承振动超标甚至引发疲劳损伤。动平衡技术的实施需结合理论计算与现场实测,通常先通过低速动平衡试验在转子未装配状态下识别并消除静不平衡,利用试加重法确定不平衡质量的位置与大小,再通过焊接、配重块或螺栓固定等方式进行修正;对于已装配的转子,则需通过高速动平衡技术,借助振动传感器采集相位与幅值数据,结合影响系数法或模态分析技术,精确计算配重参数并在现场实施调整。这一过程需反复迭代,直至振动幅值降至允许范围内。

实际应用中,动平衡技术面临多重挑战。例如,复杂转子结构(如多级叶轮、拉筋或围带)可能导致不平衡量分布分散,传统配重方法难以完全消除残余振动;高温高压环境下,转子材料的蠕变或氧化也可能改变质量分布,导致平衡状态失效。为解决这些问题,现代动平衡技术逐渐引入激光全息测量、无线传感网络等高精度监测手段,结合有限元分析模拟转子动态特性,提升配重方案的精准度。此外,部分先进机组采用在线动平衡系统,通过实时调整配重块位置实现振动主动控制,避免停机损失。

2. 汽缸热变形补偿技术

汽缸热变形补偿技术是应对汽轮机启停及变负荷过程中因温差导致的振动问题的关键措施,其核心在于通过结构设计与主动控制手段抵消汽缸热膨胀或收缩引发的动静间隙变化。汽轮机运行时,高温蒸汽与缸体金属的热交换使汽缸沿轴向、径向产生非均匀热变形,这种变形若超出设计允许范围,会导致转子与静子部件碰磨,进而引发剧烈振动甚至设备损坏。传统补偿技术主要依赖滑销系统优化与热态对中调整,前者通过合理布置纵销、横销及立销,引导汽缸沿预定方向膨胀,减少局部应力集中;后者则借助激光对中仪或千分表,在机组热

态下实时监测汽缸变形量,通过调整轴承标高或转子位置恢复动静间隙。然而,这些方法对热膨胀模型的精度要求极高,实际运行中蒸汽参数波动、材料热物性偏差等因素常导致补偿效果偏离预期。

为提升补偿可靠性,现代技术开始融合智能监测与主动控制手段。例如,在汽缸关键部位布置光纤光栅传感器或热电偶阵列,实时捕捉温度场与应变分布,结合有限元分析构建动态热变形模型,预测汽缸膨胀趋势并提前调整滑销预紧力或轴承载荷。部分先进机组还采用液压顶升系统或电磁作动器,根据监测数据主动改变轴承支撑刚度或转子位置,实现热变形的实时补偿。

3. 汽流扰动优化设计

汽流扰动优化设计是降低汽轮机振动的重要策略,其核心在于通过流道结构的精细化调整,减少汽流不均匀性引发的激振力。汽轮机内部,蒸汽在静叶栅与动叶栅间高速流动时,易因流道几何偏差、边界层分离或尾迹干扰形成涡流、二次流等复杂流动现象,这些非定常流动会激发叶片高频振动,严重时导致疲劳损伤。传统优化方法聚焦于叶片型线设计与静叶栅布局改进,例如采用三维流体力学(CFD)模拟技术,对叶片表面压力分布进行迭代优化,通过修型减少流动分离;或调整静叶安装角与轴向间距,改善汽流均匀性,降低周向不均匀度。然而,实际运行中蒸汽参数的时变性及多级叶栅间的相互干扰,常使设计工况与实际工况产生偏差,导致优化效果受限。

为突破这一瓶颈,现代设计开始引入多物理场耦合分析与智能优化算法。例如,结合结构动力学与流固耦合模型,预测汽流对叶片模态特性的影响,针对性调整叶根刚度或增加阻尼结构;利用伴随方法或遗传算法,在复杂设计空间内快速搜索最优流道参数组合,平衡效率与振动抑制需求。

4. 油膜振荡抑制技术

油膜振荡抑制技术是解决汽轮机转子轴承系统稳定性问题的关键手段,其核心在于通过改变油膜动力学特性或轴承结构参数,消除因油膜失稳引发的自激振动。当转子转速接近轴承第一阶临界转速两倍时,油膜力可能因惯性效应与挤压效应耦合而失稳,导致振幅急剧增大,这种非线性振动现象对高速轻载轴承尤为危险。传统抑制方法聚焦于轴承参数优化与结构创新,例如通过调整轴承长径比(L/D)至0.8~1.2范围内,降低油膜

涡动概率;或减小轴承间隙比($\psi = \delta/D$,通常控制在0.001~0.0015),增强油膜阻尼特性。此外,提高润滑油入口压力(0.08~0.2MPa)可改善进油楔形效应,但需注意避免过高的温升导致粘度下降。

为进一步提升抑制效果,可倾瓦轴承技术被广泛应用。其多块独立瓦块(通常为4~6块)可随转速变化自动调整倾角,形成更稳定的油膜压力分布。例如,某600MW汽轮机采用五瓦块可倾瓦轴承后,油膜振荡临界转速从原设计的4200r/min提升至5800r/min,振幅降低70%。近年来,智能材料的应用为油膜振荡抑制开辟了新路径,如压电陶瓷作动器可实时调整轴承瓦块预载荷,磁流变液轴承则能通过磁场强度(0~0.5T)控制油膜刚度。

结论

随着火电行业的发展,汽轮机作为核心设备,其振动问题一直是影响机组运行效率和安全性的重要因素。本研究通过对火电厂汽轮机振动的深入分析,探讨了振动的产生机理及其对设备的影响,总结了传统和现代振动控制技术的优缺点,并通过数值模拟和实验研究验证了多种控制方法的有效性。研究表明,转子动平衡技术、汽缸热变形补偿技术、智能控制技术以及振动监测与诊断技术等在实际应用中能够显著降低振动幅度,提高汽轮机的运行效率和安全性。未来,随着科技的进步,振动控制技术将朝着更加智能化、精准化和综合化的方向发展。

参考文献

- [1] 尹大升.关于汽轮机组振动控制技术及其设计优化的研究[J].内燃机与配件,2025(1).
- [2] 胡帅.1000MW汽轮机启停调峰过程中的振动控制研究[C]//第十五届全国振动理论及应用学术会议摘要集.2023.
- [3] 何群山,吴董炯.针对汽轮机转子故障样本不足的典型故障检测方法研究[J].噪声与振动控制,2024,44(3):101-108.
- [4] 陈江,沙德生,王洋,等.BEST励磁机过临界振动问题分析与处理[J].汽轮机技术,2024,66(4):315-317.
- [5] 李效杰.汽轮机运行中的振动问题的防治对策分析[J].中国科技期刊数据库 工业A,2023(011):000.