

汽轮机轴系振动特性的研究及振动抑制方法研究

刘功

川投（达州）燃气发电有限公司，甘肃白银，635000；

摘要：本文聚焦汽轮机轴系振动特性分析与抑制方法研究，首先论述轴系振动对汽轮机安全稳定工作的关键意义，通过理论分析与实验研究，全面剖析轴系振动特性，涉及振动的型式、激励的来源及传递的机理，就常见的振动问题而言，如不平衡、不对中、油膜涡动等，全面探究其产生缘由及影响因子，基于这一基础，系统介绍多种振动抑制方法，诸如动平衡方面的技术、安装与对中优化策略、轴承设计改进途径等，并评估各方法实际效果，研究成果给提高汽轮机运行的可靠和稳定性提供了有力的理论支撑及技术引导。

关键词：汽轮机轴系；振动特性；振动抑制

DOI：10.69979/3060-8767.25.04.007

引言

身为电力、化工等领域关键动力设备的汽轮机，其运行的可靠性十分要紧，轴系身为核心构件，一旦出现异常的振动，不仅让设备性能出现下降，还可能引发严重事故，伴随机组容量扩充与参数提升，轴系振动问题愈显复杂态势，全面研究轴系振动特性，探求高效抑制途径，对保障汽轮机安全高效运转意义攸关，已成为工程领域研究的热点课题。

1 汽轮机轴系振动理论基础

1.1 轴系动力学模型建立

汽轮机轴系结构复杂，由多个转子、连接用的联轴器及支撑轴承构成，在构建动力学模型之际，集中质量法把轴系分割成若干集中质量单元，各单元依靠具有一定刚度和阻尼特性的弹簧与阻尼器连接，能直观展现轴系质量分布及相互连接关系，适合初步开展简单轴系振动分析。而有限元法将轴系切割成众多微小单元，对各单元开展力学分析后汇总，可精确模拟复杂结构轴系，顾及轴系各部件几何形状、材料属性及边界条件等细节，但计算量较大，需按照轴系实际的尺寸、材料参数、支撑条件等内容，正确挑选建模方法并敲定模型参数，以保证模型能精准展现轴系动力学特性，为后续的振动分析搭建可靠支撑。

1.2 振动基本方程推导

按照牛顿第二定律，在轴系上随机挑一微段，研判其受力情形，涉及惯性、弹性以及阻尼力，惯性力跟微段质量及加速度相互关联，弹性力的大小由轴系材料弹性特性定，阻尼力可刻画振动能量的耗散现象，将这些力代入牛顿第二定律表达式，耦合轴系几何关系与边界条件，历经一系列数学推导可获轴系振动基本方程。就拉格朗日方程角度而言，先弄清楚轴系的动能、势能和

耗散函数，运用拉格朗日函数对广义坐标和广义速度求偏微分，跟着依据拉格朗日方程的形式规格进行整理，同样可推导出振动的基本方程，方程中的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵存有轴系各部件质量、刚度及阻尼信息，这些参数彼此作用，共同决定轴系振动响应特性。

1.3 振动特性参数分析

轴系振动剧烈程度可借振动幅值直观反映，一般借助位移传感器进行测量，幅值过大表明轴系运行状态异常，也许引发部件的磨损、疲劳状况甚至毁坏，频率为振动特性的关键参数，各种故障类型会造成轴系产生特定频率振动，如转子不平衡常引发1倍频振动，轴系不对中极易产生2倍频振动，通过频谱分析可识别故障特征频率。相位则用于确定振动信号在时间轴上的相对位置，对判定轴系不平衡位置以及多测点间振动的关联意义非凡，可利用相位差分析轴系各部分振动的同步性，在真实的工程操作里，一并运用振动幅值、频率和相位的资讯，可确切判定轴系的运行情形，快速发现潜在的故障苗头。

2 汽轮机轴系振动特性分析方法

2.1 时域分析方法

时域分析借助传感器获取轴系振动位移、速度及加速度的时域信号，这些原始信号直观展示出振动随时间的变化情形，采用峰值数据，可迅速捕捉轴系突发剧烈振动的时刻，为判别是否存在异常冲击提供佐证；均值计算可体现出振动的平均水平，助力判定轴系运行是否处于稳定状态，采用对振动信号开展积分或微分运算，还可依据位移信号导出速度与加速度信号，完整剖析轴系振动态势，协助发现早期故障苗头。

2.2 频域分析方法

频域分析按照傅里叶变换原理开展，把时域的振动

信号变成频域信号,以频谱图的样式展现,汽轮机轴系运行时,各类故障引发的振动具有特定频率属性,像转子不平衡这种情况,一般会产生与转速同步的1倍频振动;轴系不对中时,往往伴有2倍频的振动成分。凭借对频谱图的缜密分析,对正常与异常工况下各频率成分的幅值差异加以对比,可精准认定故障类型,频域分析还可借助功率谱密度等相关指标,进一步量化振动能量在不同频率上的分布,深度挖掘振动信号里的隐密信息,为故障诊断及预测给予有力依托。

2.3 时频域分析方法

时频域分析技术聚合了时域与频域分析的长处,尤其适合处理汽轮机轴系的非平稳振动信号,用小波变换举例,它能在不一样的时间尺度下对信号做局部分析,可抓住振动信号在时域的突变瞬间,也能分析出相应时刻的频率组成,当轴系出现如摩擦、松动等复杂故障时,其振动信号呈现出突出的非平稳状态,常规的时域或频域分析无法全面呈现故障特征,利用时频域分析可生成时频图,直观呈现振动信号频率随时间的动态演变,清楚呈现故障的产生、发展轨迹,有利于精准判定故障成因与发展走向,大幅提高了针对复杂振动问题的诊断水平。

3 汽轮机轴系振动产生原因分析

3.1 转子不平衡

转子作为汽轮机轴系里的核心组件,该不平衡现象是引发振动的常见根源,在制造工作阶段,因加工工艺存在局限,叶片质量偏差与轮毂偏心等情形时有显现,使得转子质量分布偏离旋转中心线,叶片铸造过程里合金成分偏析造成质量不匀,也或是机械加工时尺寸精度未达标,都会促成初始不平衡形成。运转过程里,工况改变造成转子表面结垢,仿若蒸汽里杂质附着上去,引起质量分布的改变,长期服役有概率引发叶片腐蚀、断裂继而脱落,造成不平衡进一步加剧情形,若转子处于高速旋转情形,不平衡质量造就的离心力 $F=m\omega^2r$ (m 为不平衡的那个质量, ω 即为角速度, r 即偏心距,此离心力按照转速平方的规律增长,成为激起轴系振动的主要外力,不平衡所引发的振动主要为1倍频,振动幅值与转速的联系十分紧密,幅值急剧且大幅上扬,严重情形下引发轴系剧烈振动,对设备安全运行构成威胁。

3.2 轴系不对中

轴系不对中包含平行不对中、角度不对中以及综合不对中,极大地影响了轴系振动,施工精准度欠佳,如在联轴器安装时未精准校正,引发两轴中心线出现平行或角度上的偏差,偏差数值超出许可范围,就会埋下振动隐患,基础沉降不平均、热膨胀有差别等因素也会引起不对中。基础沉降往往是地质条件复杂、基础设计不

合理或者长期重载运行的结果,引起轴系支撑位置出现偏移,关于热膨胀这一范畴,汽轮机各部件的材质及受热程度不一样,膨胀量有差异度,好比高压缸和低压缸的膨胀步调不一致,造成轴系产生额外弯矩。若轴系呈现不对中状态,联轴器传递扭矩期间伴有附加力,引发轴系振动,振动频谱的标志性特征为2倍频,也含有1倍频以及高次谐波,垂直方向的振动幅值大多比水平方向大,联轴器周遭的振动情况极为明显,长久的不对中现象加速部件磨损,缩短设备服役寿命。

3.3 轴承故障

作为轴系支撑关键要素的轴承,故障易诱发轴系的振动现象,润滑问题为轴承故障的主要缘由,润滑油量匮乏,为油泵故障、油路堵塞等所引起,令轴颈与轴瓦无法形成完好的油膜,引起干摩擦与半干摩擦状况,譬如水分、杂质混入,造成油膜稳定性降低,减弱润滑能力。温度过高让油黏度出现下降,若温度过低,黏度随之上升,流动性变欠佳,均有碍油膜的形成,受长期交变载荷长时间作用,轴承金属陷入疲劳困境,出现像剥落、裂纹的缺陷,剥落之处让轴颈和轴瓦的接触状态突变,引起冲击状振动;裂纹的扩大可能引起轴承失效现象,轴承故障呈现出复杂振动特性,除跟轴承结构有关系的特征频率振动以外,高频冲击振动十分明显,伴着故障的演进,振动幅值不断拓展,不时伴有油温升高、噪声变剧的现象,极大地破坏轴系的稳定性。

3.4 汽流激振

汽轮机运转期间,通流部分里蒸汽流动特性的异常引发汽流激振,常见诱因是汽封间隙不均,加工制造偏差、安装环节失误或运行期间部件出现变形,让汽封圆周方向间隙变得参差不齐,蒸汽在流经之际,若间隙小则流速高、压力低,大间隙处流速低而压力高,形成周向的压力落差,引起汽流激振的力出现。蒸汽流量及压力产生波动,如负荷猛然变动、调节阀开启大小不均,造成汽流稳定性缺失,同样会引起激振,转子工作频率要高于汽流激振频率,属于低频范畴的振动,振动幅值跟蒸汽参数紧密相连,负荷上扬、蒸汽流量扩增,幅值一般升高,特定工况期间,汽流激振力频率逼近轴系固有频率,轴系振动急剧飙升,极大危及机组的安全可靠运行。

4 汽轮机轴系振动抑制方法研究

4.1 动平衡技术

动平衡技术借助调整转子质量分布达成目标,排除掉不平衡的离心力,缓解轴系出现的振动,此原理依靠转子动力学支撑,若转子质量分布存在不均,旋转状态下会产生跟转速平方成正比的离心力,针对刚性转子而言,实际工作转速远低于临界转速,不平衡量致变形小,

可按刚体模式处理,在低转速阶段实施动平衡检测。采用动平衡机,将各微段的不平衡离心惯性力系约简至选定两截面,在这两个面添加或去掉一些重量以实现平衡,一般动平衡机有软支承与硬支承两种,前者实施振动检测操作,后者实施对支承作用力的检测,柔性转子于超临界转速下开展工作,启动和制动过临界转速时,不平衡量引起转子显著的变形,不可按刚性转子模式处理。振型法依据转子各阶固有振型分解掉不平衡量,趋近某临界转速的当儿,检测这明显振型,判定消除这阶不平衡分量必需的校正质量大小和方位,依阶操作达成平衡目标,运用影响系数法需在转子选定校正面及测量面,历经多次运转调试,凭借某校正面上单位校正量在特定转速下造成测量面的振动,结合不平衡所产生的振动,敲定各校正面配重或去重的位置及大小,借此有效抑制轴系因不平衡引起的振动。

4.2 优化安装与对中

安装及对中优化是降低轴系振动的基础环节,在安装工作阶段,基础施工质量尤为关键,得让基础坚实、平展,防止运行过程里基础沉降影响轴系稳定性,设备吊装之际需借助高精度全站仪、激光测距仪等测量仪器才行,严格管制各部件安装位置的精度水平,把误差抑制在极小的范围之内。轴系实施连接之际,联轴器对中精度是核心要点,采用激光对中仪,借助发射出激光束,精准衡量两轴相对位置的偏差量,协助安装人员实施调整工作,使两轴中心线的重合度契合设计设定,降低因轴未对齐产生的附加弯矩和振动,百分表也常用以辅助检测相关内容,其可达到0.01mm的测量精度,可对轴系径向和轴向的偏差做精细测量与调校,安装时还需严格控制各部件装配间隙,杜绝因间隙过小在运行期间引发动静摩擦,利用安装及对中优化,可切实降低轴系初始振动量级,为汽轮机的长期稳定运转筑牢可靠根基。

4.3 改进轴承设计

改进轴承设计为提升轴系稳定性、抑制振动之重要途径,可倾瓦轴承由若干可灵活摆动的瓦块组合而成,各瓦块可按照轴颈旋转情形自适应地调节油膜压力分布,面对不同工况之际,瓦块可自动变动倾斜角度,维持油膜厚度的稳定水平,增强轴系抵御振动的本领,切实遏制油膜涡动等非稳定振动状况。动静压轴承汇聚了动压润滑和静压润滑的长处,静压系统生成高压油膜,让轴颈与轴瓦分开分离,防止形成干摩擦,减轻启动阶段磨损,动压油膜建起,进一步增强承载能力及稳定性,适应高转速、大载荷的工作情形,在轴承设计参数优化的过程里,恰当调节间隙大小,促使油膜的刚度与阻尼达最佳范围,足以保证轴承承载水平,又可以抑制振动的继续传递,采用新型能耐磨又抗疲劳的轴承材料,如

特种合金以及高性能复合材质,可以增长轴承的使用年限,降低因轴承故障引起的轴系振动风险概率,提高汽轮机运行可靠性水平。

4.4 主动控制技术

主动控制技术凭借先进传感、控制及执行系统,实时监控并抑制轴系震动,通过在轴系关键部位安装高精度加速度传感器、位移传感器,可实时抓取振动信号,信号输送到控制器里,借助快速傅里叶变换(FFT)等算法实施分析处理,精准取得振动幅值、频率、相位等资讯。控制器凭借分析得到的结果,驱使执行器生成与原振动幅值相同、相位相悖的控制力,去除部分或完整抵消激振力,电磁性执行单元,若如电磁轴承,凭借调节电磁力精准定位转子位置,响应速度迅猛,可在毫秒范畴内完成调整,切实抑制振动现象。液压式执行器借助高压油液生成精准控制力,主动平衡系统可按照振动变化态势,自动挪调配重的位置,保证转子平衡的维持,主动控制技术呈现响应迅猛、控制精度高超的优势,可于复杂工况当中,如负荷突变、电网波动时,切实抑制轴系的振动,只是该技术的系统十分复杂,需要高水平的控制算法,而且相对成本偏高,目前正不断研发改进,为提高工程实用及经济水平。

5 结语

本文对汽轮机轴系的振动特性及抑制方法进行深入研究,确定轴系振动出现的原因及影响因子,系统说明多种振动抑制途径并评价效果,研究成果对提高汽轮机运行的可靠稳定有作用,今后要持续推进复杂工况下轴系振动特性的剖析,加大智能振动抑制技术开发及应用力度,为汽轮机安全高效运行提供更有力的后盾。

参考文献

- [1] 袁化翔. 西门子1000MW超超临界汽轮机轴系的安装[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(S1): 69-72.
- [2] 李玮, 赵凯, 刘文彦, 朱明江. 一起1000MW机组汽轮机轴系振动异常的诊断及处理[J]. 电站系统工程, 2021, 37(06): 58-60.
- [3] 薛胜峰, 郑祥东, 谭旭东, 肖群雄. 核电厂汽轮机轴系振动测量系统抗雷击干扰性能提升研究[J]. 中国核电, 2020, 13(04): 505-511.
- [4] 李珍兴, 谷军生, 姚坤, 万杰. 防止汽轮机轴系振动失稳的高调阀组进汽模式切换组合方法研究[J]. 节能技术, 2020, 38(04): 312-316.
- [5] 徐超超, 夏建林, 贾爱国, 魏振岭, 杨长城. 发电厂汽轮机轴系中心调整[J]. 电力设备管理, 2019, (12): 78-80.