

火力发电厂汽动给水泵振动故障机理与诊断方法研究

宁尚雪 刘 斌

新疆皖能江布发电有限公司 新疆 昌吉 831100

摘要: 汽动给水泵作为火力发电厂热力系统中的核心辅机,其运行稳定性直接关系到整个机组的安全、经济与可靠。振动是反映汽动给水泵健康状态最敏感、最重要的指标之一。本文系统性地研究了汽动给水泵的结构特点与工作原理,深入剖析了其常见的振动故障机理,包括转子不平衡、不对中、动静部件碰摩、轴承故障、流体激振及基础松动等六大类。在此基础上,详细阐述了时域、频域及时频域等多种振动信号分析方法,并结合工程实例,构建了一套基于多特征融合与专家知识的综合诊断流程。最后,针对当前诊断技术的局限性,展望了人工智能、数字孪生等前沿技术在汽动给水泵智能诊断与预测性维护领域的应用前景,旨在为电厂设备管理人员提供一套系统、有效的故障诊断与运维决策支持框架。

关键词: 火力发电厂; 汽动给水泵; 振动故障; 故障机理; 信号分析; 故障诊断

引言

在现代大型火电厂中,给水系统连接锅炉与汽轮机,给水泵作为核心动力设备,性能与可靠性十分关键。其中,汽动给水泵(SDBFP)因节能优势被广泛应用,它利用汽轮机抽汽或新蒸汽驱动,避免“电能-机械能”二次转换损失,变负荷运行时经济性更突出。但汽动给水泵系统结构复杂、转速高、工况多变,是电厂故障率较高的关键设备。众多故障中,振动异常最为普遍危险,过大振动会加速关键部件磨损、缩短设备寿命,甚至引发灾难性事故,造成经济损失与安全风险。因此,深入研究其振动故障内在机理、掌握有效诊断方法意义重大。本文旨在系统梳理振动故障类型,揭示产生根源,构建综合诊断体系,为火电机组安全、高效、长周期运行提供技术支撑。

1 汽动给水泵系统结构与工作原理

汽动给水泵系统主要由三大部分构成:小汽轮机(驱动部分)、给水泵本体(工作部分)以及润滑油系统、调节保安系统等辅助系统。

1.1 小汽轮机(驱动部分)

小汽轮机是汽动给水泵的动力源,通常为单缸、单流、凝汽式或背压式结构。其工作原理与主汽轮机类似,高温高压蒸汽进入汽缸,推动转子叶片做功,将蒸汽的热能和压力能转化为机械能。小汽轮机的转速通过调节进汽量(调速汽门开度)来控制,从而实现对给水泵流量和扬程的精确调节,以适应锅炉负荷的变化。

1.2 给水泵本体(工作部分)

给水泵本体多为多级离心泵,由泵轴、叶轮、导叶、平衡盘(或平衡鼓)、轴封、轴承等部件组成。泵

轴与小汽轮机转子通过刚性或半挠性联轴器直接连接,构成一个高速旋转的轴系。当泵轴高速旋转时,叶轮带动液体一同旋转,在离心力的作用下,液体从叶轮中心被甩向叶轮外缘,压力和动能均得到增加。液体随后进入导叶,动能部分转化为压力能,再流入下一级叶轮,如此逐级增压,最终达到锅炉所需的给水压力。平衡盘(鼓)用于平衡由叶轮产生的巨大轴向推力,防止转子发生轴向窜动。

1.3 轴系动力学特性

整个汽动给水泵系统构成了一个复杂的柔性转子系统。其动力学特性受多种因素影响:临界转速:轴系在特定转速下会发生共振,此转速称为临界转速。设计时需确保工作转速远离一阶、二阶临界转速^[1]。支撑刚度:轴承座、基础的刚度直接影响轴系的振动响应。阻尼特性:油膜、结构阻尼等对振动有衰减作用。流固耦合效应:泵内高速流动的流体与转子之间存在复杂的相互作用力。正是这种复杂的动力学特性,使得汽动给水泵对各种扰动极为敏感,极易产生振动故障。

2 汽动给水泵常见振动故障机理分析

2.1 转子不平衡

转子不平衡是最常见的振动故障,约占所有振动故障的70%以上。其根本原因是转子的质量中心与旋转中心不重合,导致旋转时产生离心力。不平衡可分为:(1)原始不平衡:制造、装配过程中残留的不平衡量。(2)渐发性不平衡:运行中叶轮结垢、腐蚀、冲蚀或叶片断裂等导致的质量分布改变。(3)突发性不平衡:如异物进入泵腔打坏叶轮,或平衡盘失效等。振动信号在时域上表现为稳定的正弦波;在频域上,1倍频(1X)分量占

绝对主导地位，且振幅与转速的平方成正比。水平和垂直方向的振动相位差接近 90° 。

2.2 轴系不对中

不对中是指联轴器连接的两根轴的轴线未能精确对准，包括平行不对中（偏移）和角度不对中（偏角）。在汽动给水泵中，小汽轮机转子与给水泵转子之间的联轴器是轴系不对中的高发部位。不对中会产生附加的弯矩和交变力^[2]。振动特征表现为频谱中2倍频（2X）分量显著增大，甚至可能超过1X分量。同时，轴向振动分量也会明显增大，这是区别于不平衡的重要特征。对于角度不对中，2X分量尤为突出；对于平行不对中，除了2X，还可能出现3X、4X等高倍频分量。

2.3 动静部件碰摩

当转子因热膨胀、振动过大或轴承磨损等原因，其径向或轴向位移超过设计间隙时，旋转部件（如叶轮、轴套）会与静止部件（如泵壳、密封环）发生接触摩擦。碰摩可分为全周碰摩和局部碰摩，是一种非线性、非稳定的故障。振动特征表现为信号复杂且非线性。频谱中除1X、2X外，还会出现高次谐波（如 $1/2X, 1/3X$ 等分数谐波）以及丰富的超谐波（3X, 4X...）。在严重碰摩时，时域波形会出现削波现象。轴心轨迹会呈现内“8”字形或花瓣形等复杂形态。

2.4 轴承故障

轴承是支撑转子的关键部件，其故障直接影响轴系的稳定性。常见故障包括：（1）滑动轴承油膜失稳：如油膜涡动（OilWhirl）和油膜振荡（OilWhip）。油膜涡动频率通常为（0.42~0.48）倍转速频率，当其接近转子一阶临界转速时，会引发剧烈的油膜振荡，振幅急剧增大且难以通过降速消除。（2）滚动轴承损伤：虽然大型给水泵多用滑动轴承，但部分辅助轴承可能采用滚动轴承。滚动体、内外圈的点蚀、剥落会产生特定的故障特征频率（与轴承几何尺寸和转速相关）。振动特征表现为油膜涡动/振荡表现为频谱中一个稳定的、略低于0.5X的峰值。滚动轴承故障则表现为以其特征频率及其谐波为载波，转频为调制频率的边频带。

2.5 流体激振

流体激振源于泵内流场的不稳定，是流固耦合效应的直接体现。主要包括：（1）汽蚀（Cavitation）当泵入口压力低于输送液体的饱和蒸汽压力时，液体汽化形成气泡，气泡在高压区溃灭，产生巨大的冲击力，导致泵体剧烈振动和噪声，并侵蚀叶轮表面。（2）流道堵塞或不对称：叶轮流道内有异物堵塞或结垢不均，导致流场不对称，产生径向交变力。（3）喘振（Surge）在小流量

工况下，泵的性能曲线可能出现不稳定区域，导致流量和压力周期性大幅波动，引发强烈振动。汽蚀振动通常表现为宽频带的随机噪声，高频成分丰富。喘振则表现为低频（远低于1X）的大振幅周期性波动。流道不对称的振动特征与不平衡类似，但可能伴随有叶片通过频率（ $BPF = \text{叶片数} \times \text{转速}$ ）及其谐波。

2.6 基础松动与结构共振

基础松动是指轴承座地脚螺栓松动、台板结合面接触不良或混凝土基础开裂等，导致支撑系统的刚度周期性变化。结构共振则是指外部激励频率（如转频或其倍频）与泵体、管道或基础的固有频率重合，引发共振^[3]。基础松动的典型特征是频谱中出现大量的高次谐波（如3X, 4X...10X），且水平方向的振动远大于垂直方向。结构共振则表现为在特定转速下，某阶固有频率处的振幅急剧放大，相位会发生 180° 的突变。

3 汽动给水泵振动信号分析与诊断方法

3.1 时域分析方法

时域分析直接观察振动信号随时间变化的形态。（1）波形分析：观察信号的幅值、形状。正弦波可能指示不平衡；削顶波形可能指示碰摩；冲击脉冲可能指示轴承损伤。（2）统计特征量：计算有效值（RMS）、峰值、峭度、裕度等。RMS反映振动能量总体水平；峭度对冲击性故障敏感，是早期轴承故障诊断的有效指标。

3.2 频域分析方法

频域分析通过傅里叶变换（FFT）将时域信号转换为频谱，揭示信号中包含的频率成分及其幅值，是故障诊断的核心手段。（1）频谱图：直观显示各频率分量的幅值。根据前述故障机理，通过识别特征频率（1X, 2X, 0.5X, BPF等）及其幅值关系，可初步判断故障类型。（2）幅值/相位分析：测量不同测点、不同方向的振动幅值和相位，有助于精确诊断。例如，不平衡在不同轴承处的相位基本一致；不对中则存在特定的相位关系。

3.3 时频域分析方法

对于非平稳、非线性的振动信号（如碰摩、喘振），传统的FFT分析存在局限。时频分析能同时提供信号的时间和频率信息。（1）短时傅里叶变换（STFT）将信号分段进行FFT，适用于频率变化较慢的信号。（2）小波变换（Wavelet Transform）具有可变的时间-频率分辨率，在高频段时间分辨率高，低频段频率分辨率高，非常适合分析冲击、瞬态等信号，能有效提取碰摩、轴承早期故障的特征^[4]。（3）轴心轨迹与全息谱分析：通过两个相互垂直的传感器信号合成轴心轨迹图，能直观反映转子的运动形态。全息谱则将幅值、频率、相位信息

集成在一个三维谱图中, 诊断信息更为丰富。

3.4 综合诊断流程构建

单一的分析方法往往难以应对复杂的故障耦合情况。因此, 构建一个系统化的综合诊断流程至关重要。

数据采集与预处理: 使用高精度传感器在关键测点(小机前后轴承、泵前后轴承的水平、垂直、轴向)采集振动信号, 并进行滤波、去噪等预处理。

初步筛查: 计算各测点振动总值(如RMS), 判断是否超标。若超标, 则进入详细分析。

频谱主导特征识别: 对超标测点进行FFT分析, 找出主导频率成分(1X, 2X, 0.5X等)。

多维度特征交叉验证:

若1X主导, 检查相位一致性、振幅与转速平方关系, 判断是否为不平衡。

若2X及轴向振动大, 结合联轴器状态, 判断是否为不对中。

若出现0.42-0.48X分量且振幅大, 结合轴承温度、油压, 判断是否为油膜振荡。

若出现丰富谐波及分数频, 结合轴心轨迹, 判断是否为碰摩。

若宽频噪声大, 结合泵的NPSH(净正吸入压头)裕量, 判断是否为汽蚀。

历史数据与工况对比: 将当前数据与历史趋势、相似工况下的数据进行对比, 判断故障的发展趋势。

专家知识介入: 对于疑难杂症, 需要结合设备结构、检修历史、运行参数等专家知识进行综合研判。

4 案例分析

某600MW机组汽动给水泵在580MW负荷下, #3轴承振动异常升高, 垂直达 $92\mu\text{m}$ 、水平 $88\mu\text{m}$, 远超 $75\mu\text{m}$ 报警值。润滑油系统及轴承温度正常, 无异响。振动频谱显示垂直与水平方向均以2X工频(100Hz)为主, 幅

值占总振动70%以上, 1X分量较小; 轴心轨迹呈“香蕉形”, 相位测试显示相邻轴承1X振动接近反相, 符合不对中特征。趋势分析表明振动在多次启停或负荷变动后阶梯式上升。停机检查发现小汽轮机与给水泵联轴器对中严重超差(径向偏差 0.35mm , 轴向张口 0.28mm), 且小汽轮机猫爪支撑螺栓松动, 导致热态运行中转子中心偏移。处理措施包括紧固螺栓、重新冷态对中并考虑热膨胀补偿。复机后振动降至 $20\mu\text{m}$ 以下, 2X分量基本消失, 故障消除。该案例典型体现了联轴器不对中引发的2倍频振动特征, 通过精准对中与基础紧固有效解决。

5 结语

本文系统研究火力发电厂汽动给水泵振动故障问题, 得出重要结论: 其振动故障主要源于转子不平衡等六大机理, 每种机理有独特振动信号特征; 有效故障诊断需构建融合多维度信息的综合诊断流程; 基于特征频率识别和专家知识的综合诊断方法能准确高效定位故障根源, 保障机组安全稳定运行。展望未来, 随着工业4.0和智能电厂建设推进, 汽动给水泵故障诊断技术朝着智能化、预测化发展, 如利用人工智能与大数据驱动实现智能诊断、构建数字孪生体实现预测性维护、采用边缘计算与云平台协同提高诊断时效性和准确性。

参考文献

- [1]赵悦涵, 谢晔航, 闫佳佳. 某型汽动给水泵轴系动力学特性优化[J]. 机电设备, 2025, 42(05): 70-74.
- [2]孙志军. 660MW机组汽动给水泵热态启动轴承振动大的问题及对策[J]. 自动化应用, 2025, 66(S1): 260-261+265.
- [3]张康. 汽动给水泵振动危害与处理研析[J]. 电力设备管理, 2025, (10): 126-128.
- [4]张立杰. 大型发电机组汽动给水泵典型故障分析及处理方法[C]//2024年北京电机工程学会年度论文集. 内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司, 2024: 99-102.