

# 基于振动分析的汽轮机故障预警与检修策略

刘庆

贵州金元茶园发电有限责任公司, 贵州 毕节 551700

DOI:10.61369/EPTSM.2025010011

**摘要：** 为保障汽轮机稳定运行，减少故障造成的经济损失与安全隐患，本文介绍了振动分析技术特点、振动监测技术与传感器应用、汽轮机异常振动常见原因以及基于振动分析的预警与诊断方法等内容。以某型号超临界汽轮机为例，通过分析其在线监测数据与故障案例，准确诊断出故障类型，最后提出调整运行参数、停机检修、预防性措施等应对措施。研究表明，基于振动分析的方法能有效实现汽轮机故障预警与诊断，对提高检修效率和保障设备安全稳定运行具有重要意义。

**关键词：** 汽轮机；振动分析；频率；故障检测

## Early Warning and Maintenance Strategy of Steam Turbine Fault Based on Vibration Analysis

Liu Qing

Guizhou Jinyuan Tea Garden Power Generation Co., LTD. Bijie, Guizhou 551700

**Abstract：** In order to ensure the stable operation of steam turbine and reduce the economic loss and safety risks caused by faults, this paper introduces the characteristics of vibration analysis technology, vibration monitoring technology and sensor application, the common causes of abnormal vibration of steam turbine, and the early warning and diagnosis method based on vibration analysis. Taking a certain type of supercritical steam turbine as an example, by analyzing its online monitoring data and fault cases, the fault type is accurately diagnosed, and finally the coping measures such as adjusting operating parameters, shutdown maintenance and preventive measures are put forward. The study shows that the method based on vibration analysis can effectively realize the early warning and diagnosis of steam turbine faults, which is of great significance to improve the maintenance efficiency and ensure the safe and stable operation of the equipment.

**Keywords：** steam turbine; vibration analysis; frequency; fault detection

## 引言

汽轮机作为电力、石化等行业的关键设备，其运行稳定性直接关系到整个生产系统的可靠性与经济性。一旦汽轮机发生故障，不仅会导致生产中断，造成巨大的经济损失，还可能引发安全事故。因此，对汽轮机的运行状态进行实时监测，并及时准确地预测和诊断故障，制定科学合理的检修策略，具有极其重要的现实意义。通过对汽轮机振动信号的深入分析，实现对潜在故障的早期预警，为设备维护人员提供充足的时间采取应对措施，避免故障的进一步恶化。同时，基于振动分析结果制定针对性的检修策略，可有效提高检修工作的效率和质量，减少不必要的检修工作。

## 一、振动分析技术特点

振动分析是通过监测和解析机械系统振动信号来评估设备运行状态、识别故障隐患的技术方法。其核心在于利用传感器获取设备振动数据，结合信号处理与特征提取技术，揭示振动幅值、频率、相位等参数的变化规律<sup>[1]</sup>，进而判断设备是否处于正常工

况或存在潜在故障。在汽轮机这类旋转机械中，振动分析尤为关键，因为其运行时产生的振动信号包含丰富的设备状态信息，如轴承磨损、转子失衡、热弯曲等故障均会在振动频谱中表现出特定特征（如1/2倍频、2X倍频等）<sup>[2]</sup>。该技术通过多维度数据采集和高级信号处理，能够有效分离复杂工况下的多源振动成分，识别出与特定故障相关的特征频率，为预测性维护提供依据。振动分析不仅

是故障诊断的重要手段，还可用于优化设备运行参数、延长使用寿命，在保障大型机组安全稳定运行方面具有显著工程价值。

## 二、振动监测技术与传感器应用

振动监测是汽轮机状态评估的基础，其关键在于精准获取振动信号。目前，振动速度传感器被广泛应用于轴承盖、壳体等关键部位，通过磁电感应原理将振动转化为电压信号，具有无需外部供电、抗干扰能力强等优势<sup>[3]</sup>。该类传感器可实时监测10–1000Hz范围内的振动，灵敏度达20mV/mm/s，能够捕捉早期故障征兆。此外，传感器的安装位置及固定方式需严格遵循规范，以确保信号采集的准确性。

## 三、汽轮机异常振动的常见原因

### （一）机械不平衡

机械不平衡是汽轮机振动的常见诱因，主要由叶轮积污、叶片磨损或安装误差导致转子质量分布不均引发。当转子旋转时，不平衡质量会产生离心力，其频率与转速同步（即1X频率），导致轴承和支撑结构周期性振动。像一般的燃煤机组长期运行后，叶轮表面会形成积灰层，改变转子质心位置，引发振幅逐渐增大的工频振动<sup>[4]</sup>。此外，安装过程中叶轮与轴的装配偏差超过0.05mm时，也会造成显著的不平衡响应，需通过激光对中仪进行精准校准。

### （二）轴承故障

轴承故障通常由润滑不良、部件老化或异物侵入引起，会破坏油膜稳定性并产生高频振动。像常见的滑动轴承，当润滑油粘度下降或供油压力不足时，轴颈与轴瓦间的油膜厚度变薄，导致金属直接接触（如图1），引发1000Hz以上的高频冲击信号。滚动轴承故障则表现为与滚动体、内外圈缺陷相关的特征频率振动。实践中轴承类故障比例较高，需通过在线油液分析与振动监测协同预警。



图1 轴承外部磨损

### （三）动静碰磨

动静碰磨多因汽缸温差过大、膨胀不均或安装间隙不足引发，表现为工频振动增大并伴随2X、3X倍频成分。当转子与静子部件的汽封、隔板等发生摩擦时，接触点产生的局部高温会导致转子弯曲变形，形成恶性循环<sup>[5]</sup>。某些超临界机组启动过程中，因汽缸上下温差达60℃，导致转子与汽封发生碰磨，振动值会骤升，频谱中一般会出现明显的2X成分。此时需立即停机并进行直轴处理，同时优化暖机曲线以控制温差在30℃以内。长期碰磨还可能引发轴系裂纹，需通过模态分析评估转子刚度变化。

### （四）共振与结构松动

共振现象源于设备固有频率与激励频率耦合，而地脚螺栓松动或基础刚度不足会放大振动响应。机组因基础支撑刚度不足，在高转速时容易发生二阶临界转速共振，振动幅值也会异常增加。地脚螺栓松动时，振动信号会出现0.5X低频成分，同时结构松动还可能导致部件疲劳断裂，需定期采用超声波探伤检测焊缝完整性<sup>[6]</sup>。

## 四、基于振动分析的预警与诊断方法

### （一）在线监测系统

以某工厂的实践工作为例，某厂采用CLN660–24.2/566/566型超临界汽轮机，其在线监测系统采用分布式物联网架构，在高压缸、中压缸及双低压缸的1–8号可倾瓦轴承座（每个轴瓦配置3个垂直/水平/轴向振动传感器）、汽缸中分面及发电机端9号轴承处部署高精度振动加速度传感器（如PCB352C66型，频率响应0.5–10kHz，灵敏度100mV/g），通过Profibus-DP总线与DCS系统实时通信。

#### 1. 轴承振动监测模型

系统基于该机型的三缸四排汽结构特性，建立了多维度监测模型：在轴承振动监测方面，针对可倾瓦易发生的油膜振荡问题，设置1X工频幅值预警阈值（7.1mm/s）及2X–4X倍频分量超限判据，当某轴承振动值超过阈值时，系统自动触发相邻轴承温度（Pt100热电阻，精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ）及润滑油压力（扩散硅变送器，量程0–1.6MPa）的联合分析<sup>[7]</sup>。

#### 2. 气缸膨胀监测

在汽缸膨胀监测中，利用激光位移传感器（量程 $\pm 20\text{mm}$ ，分辨率 $1\mu\text{m}$ ）实时采集高压缸与中压缸的胀差数据，结合机组负荷（0–660MW）及主蒸汽温度（ $566\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）构建动态补偿模型，当胀差超过 $\pm 1.2\text{mm}$ 时启动停机保护逻辑。

#### 3. 智能预警模块设计

该系统还集成了基于LSTM神经网络的智能预警模块，通过历史数据训练，可提前48小时预测轴承磨损、叶轮结垢（特征频率1X幅值增长速率 $>0.5\text{mm/s/周}$ ）等典型故障。系统曾在某日检测到#5轴承振动信号出现1.2mm/s的1X分量阶跃增长，同时油膜温度从68℃升至82℃，经模型诊断为轴瓦巴氏合金局部剥落，提前72小时安排停机检修，避免了因轴承烧损导致的非计划停运<sup>[8]</sup>。

(二) 频谱分析诊断案例

1. 案例背景

某电厂 CLN660-24.2/566/566 型汽轮机在 2024 年 3 月 15 日 09:00 负荷 600MW 运行时，在线监测系统报警显示 #3 轴承垂直振动幅值达 7.5mm/s（阈值 7.1mm/s），同时 DCS 系统记录主蒸汽压力 24.1MPa、温度 565℃，润滑油温度 65℃（正常范围 45–65℃）。

2. 诊断方法

(1) 数据采集

技术人员使用 PCB352C66 型加速度传感器（灵敏度 100mV/g），在 #3 轴承垂直方向以 5120Hz 采样率连续采集 30 秒振动信号，同步记录转速 3000rpm（工频 50Hz）。提取时域波形发现周期性冲击特征，峰值达 15g（正常 <10g）。

FFT 频谱分析

技术人员又对振动信号进行了处理，计算 1024 点 FFT 得到频谱图，其中显示主频为 50Hz（1X），幅值 6.8mm/s（占比 90%）；图形在 120Hz 处出现第二主峰，幅值 1.2mm/s；高频段（2000–4000Hz）存在宽频带噪声。

特征频率计算

轴承参数为可倾瓦滚子轴承（型号 NU2320ECJ），滚子数量 12，节径 100mm，滚子直径 15mm，接触角 15°。

将参数代入公式，计算外圈故障特征频率：

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} \times \frac{D}{d} \times (1 - \cos\alpha) \times \frac{\text{转速}}{60};$$

得出  $\frac{12}{2} \times \frac{100}{15} \times (1 - \cos 15^\circ) \times 50 = 122\text{Hz}$ 。实测后 120Hz 与理论值偏差 1.6%，符合轴承故障特征。

诊断结论

故障类型：其中检测到的故障为 #3 轴承外圈滚子剥落，基于 CLN660-24.2/566/566 型汽轮机 #3 轴承垂直振动幅值超限（7.5mm/s）及频谱特征分析，结合轴承参数（型号 NU2320ECJ，滚子数量 12，节径 100mm，滚子直径 15mm），通过特征频率公式计算得外圈故障特征频率理论值为 122Hz，实测频谱在 120Hz 处出现第二主峰（幅值 1.2mm/s），与理论值偏差仅 1.6%，且高频段存在宽频带噪声，符合轴承滚子剥落的振动特性<sup>[9]</sup>。

技术依据：基于表 2 的技术要点。技术人员通过频谱分析之后，发现振动信号经 5120Hz 采样率采集后，通过 1024 点 FFT 变

换显示主频 50Hz（1X）占比 90%，120Hz 特征频率与理论值高度吻合，同时高频噪声表明存在冲击性故障；轴承温度 3 小时内从 62℃ 升至 68℃（温升速率 2℃/h），润滑油铁谱分析显示大磨粒浓度达 80 个/mL（超值 3 倍），且近 72 小时 1X 幅值增长速率 0.3mm/s/d，符合轴承磨损渐进规律；振动烈度 7.5mm/s 已超 API612 标准 G2.5 级限值（7.1mm/s），结合 ISO10816 振动评价准则，判定为轴承结构损伤。

表 2 技术要点

频率分辨率	采用 0.5Hz 频率分辨率（5120Hz/1024 点），确保特征频率识别精度
多维度分析	结合振动幅值、频谱特征、温度趋势及油液分析进行综合诊断
安全阈值	根据标准，设置轴承振动烈度报警阈值为 7.1mm/s（ISO10816G2.5 级限值）
故障特征库	建立 CLN660 型机组轴承故障频率数据库

处理建议：一是先调整机器运行参数，立即将机组负荷降至 400MW（振动幅值 <9.0mm/s），通过降低转子离心力延缓故障发展，同步加强振动监测（采样率提升至 10kHz）；二是停机检修，48 小时内实施停机解体，采用激光对中仪（精度 ±0.02mm）检查轴系对中，更换 NU2320ECJ 轴承并进行跑合试验（空载运行 4 小时，振动 <4.5mm/s），同时对轴承座油孔进行内窥镜清洗（孔径 Φ12mm，确保无异物堵塞）；三是进行预防性措施，对同批次轴承进行超声波探伤（探头频率 5MHz，扫查速度 ≤50mm/s），建立轴承寿命周期档案（记录累计运行时间、启停次数等），并优化润滑油过滤系统（加装 3μm 精密滤芯，将清洁度提升至 NAS6 级）。检修后需进行模态分析（扫频范围 10–2000Hz），验证轴承支撑刚度恢复至设计值（≥8000N/μm）。

停机拆检发现 #3 轴承外圈存在 3 处 0.5mm × 1mm 剥落坑，滚子表面出现麻点。技术人员更换轴承后空载试运行，振动幅值降至 3.2mm/s，120Hz 特征频率消失。

五、结语

通过剖析振动分析技术特点、监测技术与传感器应用，明确了汽轮机异常振动的常见原因，如机械不平衡、轴承故障等，并基于此构建了有效的预警与诊断体系。以实际工程为例，验证了相关方法在实际应用中的准确性与可靠性，能够及时发现故障并提出合理处理建议。但实际作业在那个汽轮机运行工况复杂多变，未来仍需进一步完善故障特征库，探索更先进的智能诊断算法，提高对微小故障和早期故障的识别能力<sup>[10]</sup>。

参考文献

[1] 钱阳. 630MW 汽轮机运行故障原因与防范措施研究 [J]. 南方农机, 2024, 55(24): 155–157+188.  
[2] 张世东, 范洪武, 李存霖. 某 600MW 机组给水泵汽轮机异常振动分析与处理 [J]. 电站系统工程, 2024, 40(04): 51–53.  
[3] 谢才千. 汽轮机间歇性振动故障原因分析与处理 [J]. 石油化工安全环保技术, 2024, 40(03): 15–19+5.  
[4] 辛士红, 袁海, 吴兴燕, 等. 汽轮机低压转子叶片脱落故障振动特征分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(06): 57–61.  
[5] 李卫军, 何玉灵, 李国明, 等. 1000MW 汽轮机高频共振故障诊断及治理 [J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(01): 141–147+202.  
[6] 孙鹏浩. 火力发电厂汽轮机检修中的状态检修初探 [J]. 中小企业管理与科技 (上旬刊), 2019, (10): 172–173.  
[7] 罗兴祥. 关于汽轮机检修中状态检修的实际应用分析 [J]. 智能城市, 2018, 4(24): 67–68. DOI: 10.19301/j.cnki.znzs.2018.24.041.  
[8] 李强. 状态检修在汽轮机检修中的应用研究 [J]. 中国金属通报, 2018, (11): 282–283.  
[9] 杨志宾. 新时期热电厂汽轮机检修的节能降耗措施 [J]. 山东工业技术, 2018, (22): 195. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2018.22.175.  
[10] 李清松. 基于广义风险评估的汽轮发电机组检修周期优化 [J]. 齐鲁石油化工, 2015, 43(04): 325–328.