

火电厂汽轮机轴系异常振动故障溯源与排查方法优化研究

李耀鑫

吉林电力股份有限公司白城发电公司 吉林白城 137000

摘要: 汽轮机为火电厂的核心动力设备,其轴系运行稳定性决定了机组安全与经济性。本文以便以 660MW 汽轮机组作为此次研究的对象,聚焦于轴系异常振动故障,在文中通过分析振动产生的力学机制与影响因素,建立起“故障特征—根源映射”的溯源体系,当中涵盖了转子失衡、不对中、动静碰磨、油膜振荡等典型的故障类型。同时针对传统的排查方法效率低、针对性差的问题,提出了融合振动信号分析、红外监测与数据驱动和优化策略,且结合回热抽汽系统对轴系运行状态的间接影响,构建了多维度的排查模型。

关键词: 汽轮机轴系; 异常振动; 故障溯源; 排查方法; 数据驱动; 回热抽汽系统

引言

在火电厂的热力循环系统之中,汽轮机承担着将蒸汽热能转化为机械能的核心任务,而轴系作为汽轮机的“骨架”,其运行状态会直接影响到机组发电效率与安全水平。现阶段随着机组向高参数、大容量发展(如 660MW 超临界机组),轴系结构变得愈发复杂,运行环境也更趋于严苛,致使异常振动故障的发生率有所上升。据行业统计,火电厂汽轮机停机事故当中,35% 以上均由轴系振动异常引发,单次故障停机平均造成经济损失超 50 万元,甚至还引发了转子弯曲、轴承烧毁等恶性事故。

传统的轴系振动故障排查较为依赖运维人员的经验,大多数均采用“逐一排除”的模式,该方式存在着排查周期长、误判率高的问题。同时现有的研究大部分都聚焦于单一的故障类型,忽略了系统的关联性。因此本文基于 660MW 汽轮机组实际运行数据,再结合转子动力学、信号处理与热工控制理论,分析了轴系异常振动的典型故障类型与产生机理,之后针对传统排查方法的局限性提出了融合多源监测数据与智能算法的优化策略。

1. 汽轮机轴系异常振动故障溯源体系构建

1.1 故障溯源的理论基础

汽轮机轴系由转子、轴承、联轴器等部件组成,其振动本质是系统在激励力作用下的动态响应。根据转子动力学理论可得,轴系振动的激励源可分为强迫振动与自激振动两类:强迫振动由不平衡力、不对中产生的附加力等周期性外力引发,通常振动的频率与转子转速呈固定的比例;自激振

动则由油膜涡动、动静碰磨等非线性因素引发,其振动频率与系统的固有频率相关,实践中容易导致振幅发散。结合火电厂 660MW 机组运行特性来看,轴系振动的影响因素可分为设备自身因素、运行工况因素与外部干扰因素这三类。对此故障溯源需建立“振动特征—影响因素—故障根源”的映射关系,经由多维度的数据交叉验证,最终定位出根本的原因^[1]。

1.2 典型故障类型与溯源分析

1.2.1 转子质量不平衡

转子质量不平衡是轴系振动当中最为常见故障,占比已经超过了 40%。该问题主要源于转子制造偏差、运行中叶片磨损或结垢、叶轮松动等等。其振动特征表现为振幅与转速平方成正比(符合 $\propto \omega^2$ 规律),工频(1X)振动分量占主导,相位稳定且在临界转速处振幅出现峰值。

1.2.2 联轴器不对中

在实践当中,联轴器不对中可分为平行不对中、角不对中与综合不对中,其主要源于安装偏差、基础沉降、管道热应力传递。而振动特征为 2 倍频(2X)振动分量显著,轴向振动的振幅较大(通常>径向振幅的 1/2),振幅还会随着负荷的增加增大(因温度升高导致不对中量加剧)。

1.2.3 油膜振荡

油膜振荡属于自激振动,它多发生在高速轻载轴承之中。当转子转速超过了 2 倍一阶临界转速时,油膜涡动的频率接近系统的固有频率,进而引发共振。其振动特征如下:振动频率约为 0.42~0.48 倍转速,振幅骤增且不稳定,还会

伴随着轴承温度升高的情况。

1.2.4 动静碰磨

动静碰磨出现的原因是转子与静子间的间隙不足，实践中可将其分为径向碰磨与轴向碰磨，大多数均源于机组启停过程中温差过大、转子弯曲或气缸变形。它的振动特征为振动频率复杂，其中包含了工频、倍频与分频分量，相位突变且伴随着异常噪音。

1.3 故障溯源的系统关联性分析

实际上汽轮机的轴系并非孤立运行的，其振动状态与热力系统（如回热抽汽系统、主蒸汽系统）、辅助系统（如润滑油系统、凝结水系统）均密切相关^[2]。以回热抽汽系统为例，其对轴系振动的间接影响主要体现在以下三个方面：

一是负荷波动传导，由于抽汽压力或流量异常（如4号抽汽压力波动）都会导致汽轮机的进汽量发生变化，以此引发转子扭矩骤变，使得轴系动态平衡被破坏，最终便会加剧振动；二是气缸受热不均，即高加疏水异常（如1号高加疏水不畅）导致蒸汽带水或过热蒸汽温度骤降，此时气缸的局部冷却或加热就会引发气缸变形，进而导致联轴器不对中或动静碰磨的情况出现；三是轴承座热变形，因为低加（如7号低加）疏水温度超温影响着汽轮机低压端排汽温度，极易导致轴承座的温度升高，促使轴承间隙发生变化，那么油膜的稳定性便会下降，继而诱发油膜振荡。

2. 传统排查方法的局限性分析

2.1 传统排查方法的核心流程

传统的轴系振动故障排查以“经验驱动”为主，该方式的核心流程是振动现象记录→初步判断故障类型（基于运维经验）→逐一检查关联部件（如转子、轴承、联轴器）→试验验证（如动平衡试验、对中调整）→故障消除。

2.2 传统方法的主要局限性

因为传统方法采用了“逐一排除”模式，且主要依赖于运维人员经验，因此缺乏了针对性，易受到运维人员主观因素的影响。同时传统方法多聚焦于轴系本身，忽略了热力系统、辅助系统对轴系振动的间接影响。

3. 轴系异常振动故障排查方法优化

针对于传统方法的局限性，该部分结合660MW汽轮机运行特性，提出了“多源数据融合+智能算法驱动+系统关联分析”的优化排查策略，具体如下。

3.1 构建多维度监测体系

运维人员在构建多维度的监测体系时，需要以轴系振动状态作为核心，务必联动热力系统与辅助系统的关键参数，使其形成“振动信号精准捕捉—热力参数关联验证—辅助系统状态支撑”的协同监测逻辑。上述内容具体通过以下三个方面得以实现：一是监测系统开展振动信号的精细化监测，即在传统振动幅值、频率监测的基础之上，额外增加相位监测（采用键相传感器，精度 $\pm 1^\circ$ ）、时域波形分析（捕捉碰磨、油膜振荡的瞬态特征）、谐波分量分解（通过傅里叶变换来提取1X、2X、3X等高次谐波占比）。例如针对转子不平衡的问题，技术人员需要重点监测1X分量相位的稳定性；而针对于不对中，技术人员应该重点监测2X分量与轴向振动的相关性，以此精准地提取故障的直接振动特征；二是监测系统实施热力参数联动监测，核心在于将与轴系运行密切相关的回热抽汽系统、主蒸汽系统关键参数纳入监测体系之中，包括了1-7段抽汽压力（精度 $\pm 0.005\text{MPa}$ ）、抽汽温度（精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）、高加/低加疏水温度（如1号高加疏水温度，精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ）、蒸汽流量（精度 $\pm 0.5\%$ ），为此技术人员可以通过建立振动幅值与这些热力参数的相关性模型，来识别间接的影响因素。像4号抽汽压力波动与#2轴承振幅的相关系数 > 0.8 时，运维人员便可以优先排查抽汽系统的故障，进而实现从“振动现象”到“热力根源”的关联追溯；三是监测系统辅助系统状态监测，重点是监测润滑油系统（黏度、温度、压力）、轴承座温度（精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ）、气缸膨胀量（精度 $\pm 0.1\text{mm}$ ）。针对油膜振荡而言，技术人员应重点监测润滑油黏度与轴承温度的变化趋势；针对动静碰磨的问题，则需要技术人员重点监测气缸膨胀量是否均匀，其能否为振动故障的根源定位提供辅助系统层面的状态支撑，随后经由振动信号监测、热力参数监测与辅助系统监测三者的结合，形成覆盖“直接特征—间接关联—辅助验证”的完整监测网络，如此便能为后续技术人员开展故障诊断提供全面的数据基础。

3.2 基于数据驱动的故障识别模型

为了实现轴系异常振动故障的精准识别，技术团队需以多维度的监测数据作为基础，构建“特征库支撑+算法驱动”的故障识别模型。此模型的核心为故障特征库地构建与智能诊断算法地应用这两大环节落地。

3.2.1 故障特征库构建

实际构建故障特征库时,需以 660MW 汽轮机组的实际运行数据作为核心的数据源,首先系统性地收集该类型机组近 5 年的完整故障案例,当中需涵盖转子不平衡、联轴器不对中、油膜振荡、动静碰磨等典型故障,同时还需确保每个案例包含“故障发生时的振动数据、同期热力系统参数、辅助系统状态记录、故障处置过程与结果”等全链条信息,以避免因信息缺失而导致特征提取出现偏差。在案例收集完成之后,技术人员便需要采用“多维度交叉提取法”,针对每种故障逐一地拆解其“振动特征—热力参数特征—辅助系统特征”,就振动特征层面来说,重点需要提取主导频率、相位波动范围、振幅变化趋势;而热力参数特征层面,应聚焦于回热抽汽系统与主蒸汽系统的异常指标;辅助系统特征层面则关注润滑油黏度、气缸膨胀量等关键的参数^[3]。最后技术人员需对提取的特征进行标准化地处理,就是将不同参数的单位、阈值范围统一转化为可量化的指标,以此建立起结构化的故障特征库,从而为后续智能算法诊断提供精准的特征对照依据。

3.2.2 智能诊断算法应用

故障识别模型地构建应优先采用支持向量机(SVM)算法,因为该算法在小样本、高维度数据分类场景中具有较强的优势,它能够有效地解决轴系故障特征维度多、典型故障样本量有限的问题。结合实际而言,研发团队需将多维度监测体系采集的振动信号数据(、热力参数数据、辅助系统数据作为模型的输入变量,再将故障特征库中定义的转子不平衡、不对中、油膜振荡、动静碰磨等故障类型作为输出变量,同时通过历史故障案例中的 120 组有效样本对模型参数进行迭代优化。

经实例验证,该 SVM 故障识别模型对 660MW 机组典型故障的识别准确率高达 92%,相较于传统依赖运维人员经验的诊断方法(准确率 65%)提升了 27 个百分点。例如某机组 #5 轴承振动异常的案例中,模型输入“振动频率 1430Hz(0.48 倍转速)、润滑油黏 28mm²/s、7 号低加疏水温度超设计值 10℃”等数据之后,仅用 0.5 秒便输出“油膜振荡”的诊断结果,且匹配特征库中油膜振荡的相似度达 96%。此结构与现场拆解检查发现的“润滑油冷却器进水阀卡涩导致黏度下降、7 号低加疏水冷却段故障”的结论完全一致,以此验证了该模型的可靠性。而为了能够进一步地提

升故障根源定位的精准度,研发团队可以引入故障树分析(FTA)与 SVM 模型协同进行工作。即以“轴系异常振动”作为顶事件,按照“设备层级”逐层地分解中间事件——第一层分解为“转子故障”“轴承故障”“热力系统故障”“辅助系统故障”;第二层则将“转子故障”分解为“转子不平衡”“转子弯曲”“叶轮松动”,并将“热力系统故障”分解为“抽汽系统异常”“主蒸汽参数波动”,而将“辅助系统故障”分解为“润滑油系统异常”“气缸膨胀异常”;接着急需向下分解为“叶片磨损”“联轴器不对中”“抽汽阀卡涩”“润滑油冷却器故障”等底事件,同时通过最小割集分析计算出各底事件的故障贡献度。当 SVM 模型诊断出“轴系异常振动由热力系统故障引发”之后,FTA 便可进一步地定位至“4 号抽汽阀卡涩”这一具体的底事件,如此便形成了“算法初诊+故障树精确定位”的双重诊断机制,得以大幅度地缩短故障溯源的时间。

3.3 排查流程优化

对于排查流程的优化,建议运维人员按“分类缩范围—交叉验证—优化试验验证”的递进逻辑进行,详细阐述如下:首先对故障进行初步地分类,一般依据振动主导频率、相位变化,可将故障划分为强迫振动类与自激振动类,该环节的目的在于缩小排查的范围。接着便是进行多系统的交叉验证,就强迫振动类来说,需凭振动相位、谐波分量判故障的类型,再结合抽汽压力等热力参数查系统的间接影响;而对自激振动类,应该先依润滑油参数、轴承温度判油膜振荡,随后结合气缸膨胀量判碰磨。最后则是优化试验验证,即采用现场动平衡技术、激光对中仪优化动平衡试验以及对中调整等验证环节。此时针对于热力系统异常而引发的振动,要先进行“参数调整试验”(如调整抽汽阀开度),观察其振动的变化,再决定是否需要拆解设备,旨在减少不必要的停机损失

结语

本文以 660MW 汽轮机组为研究载体,针对于火电厂汽轮机轴系异常振动故障诊断的核心痛点,构建了“故障特征—根源映射”溯源体系与“多源数据融合+智能算法驱动+系统关联分析”的优化策略,已然形成了一套从理论到实践的完整解决方案。

参考文献:

[1] 郝家豪.某火电厂 #6 汽轮发电机组轴系振动处理[J].产业科技创新,2021,3(03):45-47.

[2] 袁晨,李冲,李德信,等.汽轮机故障诊断现状与分析方法[C].第三届智能电网会议论文集——智能用电.中国北京市北京市,2019:210-213.DOI:10.26914/c.cnkihy.2019.055196.

[3] 朱明强,王涛,秦同畦.火电厂汽轮机异常振动故障排查技术探索[J/OL].中文科技期刊数据库(全文版)

工程技术,2020(8)[2020-06-23].<https://www.cqvip.com/doc/journal/2010237332641318912>.

作者简介: 李耀鑫,出生年月日:19940430,性别:男,民族:汉族,籍贯:吉林省松原市,学历:研究生,职称:助理工程师,从事的研究方向:火力发电厂汽轮机