

电厂汽轮发电机组振动监测及故障诊断

朱伟男 薛 隽

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210035

摘要: 电厂运行中的设备和结构中普遍存在振动现象,包括燃气机组、汽轮发电机组、水轮机组等主机设备或者引风机、给水泵、循环水泵等辅机设备的机械振动,包括轴承座、汽缸、凝汽器等固有结构的振动,甚至包括蒸汽、给水等管道的振动及混凝土基础、钢梁、厂房等土建结构体的振动。振动状态是机组或设备制造设计、安装检修、运行维护的直接反映参数,也是衡量机组是否可靠连续运行的重要指标,若振动较大且持续将危及机组安全运行,可能造成设备损坏事故。通过开展振动监测及特征分析,可以诊断已出现及潜在的问题和风险,确保机组出现严重损坏前提供事先报警,并采取针对性措施进行预防。

关键词: 机械振动;重要指标;安全运行;特征分析;措施预防

1 振动概述

机械振动是物体(或设备)的某种状态,随时间周期反复变化的一种物理现象,通常以其振幅、频率和相位来描述,它们是构成振动的三个基本要素。

振幅代表动态运动或着振动的幅度,是反映振动严重程度或烈度的重要指标;频率代表物体在单位时间内出现振动的周期数,用来反映振动的快慢程度,根据振动频率分布,我们可以初步查明振动的“根源”,所以频率是振动原因分析的主要依据;机械振动可看作一个矢量在一定空间内随转轴旋转,相位代表该矢量在任一时刻相对于转轴上同步旋转的某个特定物理标志位的夹角。

电厂运行中的设备和结构中普遍存在振动现象,包括燃气机组、汽轮发电机组、水轮机组等主机设备或者引风机、给水泵、循环水泵等辅机设备的机械振动;包括轴承座、汽缸、凝汽器等固有结构的振动,甚至包括蒸汽、给水等管道的振动及混凝土基础、钢梁、厂房等土建结构体的振动。按照类型划分,机械振动包括随机振动、非周期振动及周期振动。例如,汽车行驶时车内地板的振动或飞机飞行过程中遭遇气流时机舱的振动属于随机振动;地震或爆炸引起的建筑物或地面物体的非破坏性振动属于非周期振动;运动物体随时间按谐和函数形式变化的简谐振动属于周期振动。电厂汽轮发电机组、给水泵、风机等旋转机械振动大多属于周期振动,机械振动的激振力主要来自于周期转动的转轴。

2 机械振动的分类

根据引起机械振动的原因,汽轮发电机组轴系出现的弯曲(或横向)振动,主要分为自激振动和强迫振动。

自激振动呈现的是与外力作用无关的、且旋转机械实际存在的一种振动,正常情况下并不会发生,其本身

就是属于异常振动,必须采取适当措施加以控制并消除。自激振动包括汽流激振、轴承自激振动及摩擦涡动。自激振动的产生频率与外界力没有关联,只与机械系统的某种固有频率保持一致。汽轮发电机组运行中产生自激振动的原因,主要是转子及其支撑系统中某种机械能的反馈,由于反馈使转子从转动中获得能量,并转换为某特定频率的横向振动能量,进而维持振动。

强迫振动呈现的是旋转机械在外界力作用下,不可避免所引起的一种振动,其本身并不属于异常振动。如果外力较正常时显著偏大,或者外界力的频率与机械系统的某种固有频率非常接近甚至完全一致,那么振动幅值超过限值,这时就会出现振动异常。强迫振动的产生频率与外部激振力的频率相关甚至相同。汽轮发电机组运行中产生强迫振动的原因,主要包括轴系中心不正(对中不良)、机械松动、转子不平衡、电磁激振等。

自激振动和强迫振动产生机理本质上有所不同,振动性质差异也很大。所以,从汽轮发电机组异常振动诊断角度来看,首先要了解异常振动的不同类型、反映的不同振动现象,才能对设备进行振动故障诊断。

3 振动故障诊断

振动故障诊断作为提取、识别和分析振动故障的主要方式,同时也建立起振动故障和识别振动故障关系特征。振动特征频谱具有较为全面的识别特征信息(如伯德图、波形频谱图、轴心轨迹图等),为振动故障诊断“四步序”提供了有力支撑。

振动异常诊断

一是全面测试机组振动,通过振动测量结果判断是否振动异常,当振动超过限值时直接认定振动异常,同时确定振动异常发生的部位。二是振动在线监测的持续

性，若振动相比较其基准线值出现一定变化时（指旋转机械长期运行时，各振动测量位置和方向振动数据的基准线值），同样可以认定振动异常。

频谱特征分析

确定机组振动异常后，首要就是进行频谱特征分析，观察并分析振动频率是基频（和转速同步）、低频（低于转速频率）、二倍频（二倍转速）、还是高次（高于二倍）谐波频率。

如振动呈现的是低频振动为主，说明振动故障可能包括轴承自激振动、汽流激振或分数谐波振动等；如振动呈现的是以基频分量为主，说明振动故障可能包括动静碰磨、转子不平衡等；如振动呈现的是除基频分量外，并且有明显的二倍频分量，说明振动故障包括电磁激振、联轴器对中不良等；如振动呈现的是含有较多的高次（高于二倍）谐波频率，说明振动故障可能包括机

械松动、轴承缺陷等。

辅助因素分析

引起汽轮发电机组振动的因素并不是单一的，因此一种振动频率经常对应几种振动故障，所以需要引入振动故障识别的辅助因素，例如时间轴、机组负荷、汽轮机转速、润滑油温、凝汽器真空、振动变化趋势及增量分析、轴振与轴承座振动比值等，根据辅助因素分析进一步认定振动异常原因。举例来说，对于低频振动，如发生在高压转子且与负荷有关，说明可能是汽流激振；如发生在轴系任何轴承同时与汽轮机转速有一定关系，或出现在空负荷工况，说明可能是轴承自激振动。

振动原因判断

综上所述，通过振动频谱特征及辅助因素两者共同分析，对比各种故障状态下反映出的振动特性，进而判断出振动异常的确切原因。

表1-1 机组强迫振动常见故障及识别

强迫振动		故障识别
稳定强迫振动	质量不平衡	1.振动频谱以一倍频分量为主，存在于启停机、升降速过程、空转和带负荷等各种运行工况及机组负荷、凝汽器真空、润滑油温、励磁电流等不同运行参数 2.一倍频分量幅值相对于通频值振值的比例大于80% 3.一倍频分量相位处于稳定状态
	结构共振	1.振动响应峰值所对应转速与转子各阶临界转速不相重合且相差较远 2.振动所对应的共振转速区与转子临界转速区相比较偏窄 3.结构在垂直、水平、轴向三个方向的共振转速不一致
	不对中	1.故障可直接产生引起振动的扰动力并且在升速过程中就可以表现出来；一般情况下振动频谱以一倍频分量为主，有时也可能有较明显的二倍频分量 2.故障影响下，现场动平衡加重后相位变化很小 3.故障引起并网带负荷过程中振动变化较大，一般负荷增加振动随之增大
不稳定强迫振动	汽轮机转子热弯曲	1.振动频谱以一倍频分量为主，汽轮机转子热弯曲引起的振动与有功负荷有关，通常冷态运行时（空载）振动较小，随着负荷的增加、振动明显增大，但振动随着有功负荷的变化存在一定的时间滞后 2.对于中心孔积油引起的转子热弯曲，振动随负荷增加及运行时间延长而增大，数十分钟至2小时内振动就会超限，通常出现在新机调试或机组大修后 3.对于汽轮机叶轮的轮毂之间，或者轴上其它套装零件与轴凸台之间轴向间隙不足及不均匀情况，以及套装部件失去紧力引起的热弯曲，一般在机组冷态启动和带负荷过程发生振动，而且负荷升得越快振动越大；机组负荷稳定一段时间后，振动逐渐减小直至恢复原始状态；机组热态启动或升负荷较慢时，振动变化较小
	动静碰磨	1.振动频谱以一倍频分量为主，有时会有少量的低频、倍频以及高频成分；振动时域波形有时会出现“削顶”或跳动现象 2.机组转速一定时，基频振动的幅值和相位不断波动，甚至出现振幅快速增大 3.机组降速过程过临界转速时的振动幅值比开机时增加较多，停机后转子的晃度比原始值也增大很多 4.机组启机或停机过程过临界转速时，由于动静间隙较小、动挠度增大出现的动静碰磨使得振动系统阻尼增大、临界区拓宽，可能表现为过临界转速时振动峰值不明显或出现多个峰值 5.轴心动态轨迹有时会出现转折、跳动甚至出现反向进动或局部反向进动情况
	转动部件断裂飞脱	1.振动频谱以一倍频分量为主，轴振动和轴承振动一倍频幅值或相位同时出现突变 2.转动部件断裂飞脱引起振动突变后，即使有功负荷降低但振动变化不大，或即使振动有所减小但振动整体水平较以前有所增加 3.转动部件断裂飞脱后停机过程过临界转速振动较以前有明显增加

续表:

强迫振动		故障识别
	转子裂纹	1.转子裂纹日渐扩展和加深,一倍频、二倍频振动分量的量值随时间而稳定增长,这是存在裂纹与其它产生一倍频、二倍频振动故障的区别 2.转子发生横向裂纹时,振动特征与轴弯曲相似,工作转速以及过临界转速时,一倍频分量振动较以前有所增大 3.随裂纹深度加深及长度扩展,二倍频振动分量会逐渐加大;在升速或降速过程中,转速通过一阶临界转速一半左右时的二倍频振动量值明显增加 4.转子发生裂纹后,动平衡会出现不正常现象
	膨胀不畅	1.机组启、停以及带负荷过程中,由于汽缸膨胀受阻是逐渐发展,轴承座刚度是逐渐降低,因此振动逐渐上升 2.振动频谱以一倍频分量为,振动主要反映为量值的变化,而相位变化相对较小 3.膨胀不畅导致轴承座刚度降低,轴承座振动变化明显,而轴振变化不大,也可能出现轴承座振动大于轴振的现象 4.汽缸体积庞大,加热或冷却时缸体温度变化缓慢,膨胀不畅使振动上升过程持续时间比较长,可以达到数小时或几天;振动呈阶梯式变化,阶梯式上升或阶梯式下降 5.机组绝对膨胀值呈阶梯状变化;相对膨胀值(胀差)会有阶跃变化
	高次谐波振动	1.振动通频值比较大,除一倍频分量外还有较大的2X、3X、4X等高次谐波振动分量 2.振动波动范围大,幅值瞬间不断跳动,轴瓦有较大的异音 3.高次谐波振动在机组任何轴瓦上都可能发生,且在轴瓦上的垂直、水平及轴向三个方向呈现的振动频率不相同

表1-2 机组自激振动常见故障及识别

自激振动	故障识别
油膜涡动和油膜振荡	1.轴承自激振动与转速有关即振动敏感于转速并且具有突发性;振动通常在某一转速下突然出现,消失时转速一般低于出现时转速。轴承自激振动拥有传递性;振动首先在某一个轴承上出现,后续迅速传递到相邻的其它轴承 2.主要频率呈低频特性,油膜涡动的振动频率为转速频率的40%-48%,油膜振荡的振动频率为一阶临界转速频率;由于非线性因素,振动频率含有其它低频或高频振动分量 3.轴承自激振动先表现为油膜半速涡动,当转速继续上升且大于转子一阶临界转速频率二倍时油膜涡动发展为油膜振荡;油膜振荡出现后,不管转速继续升至多少,涡动频率始终为转子一阶临界转速频率 4.振动发生时,无论是油膜半速涡动还是油膜振荡,通频振动和低频分量变化趋势呈现不稳定的振荡状,而非一般不平衡振动时所表现出的较为平直的曲线 5.轴承自激振动表现为转子的正向涡动,即涡动方向与转子转动方向一致
汽流激振	1.通常出现在高参数、大容量机组的高(中)压转子且在机组并网之后、机组负荷增加过程中。而且振动敏感于负荷且一般发生在较高负荷;突发性振动通常有门槛负荷,负荷超过门槛时引发汽流激振,低于门槛负荷时汽流激振消失 2.主要频率呈低频特性,振动频率通常以接近工作转速一半的频率为主;当发生严重汽流激振时,振动频率与高(中)压转子一阶临界转速频率相吻合。此外,由于实际蒸汽力和轴承油膜力的非线性特性,振动频率也会包含一些其它谐波频率分量 3.汽流激振引起的振动,根据现场实际有时与调门开启顺序及开度有关,可以调换或关闭有关阀门,能够有效避免低频振动发生或者减小低频振动幅值 4.汽流激振表现为转子的正向涡动,即涡动方向与转子转动方向一致

结束语

汽轮发电机组通常处于高温、高压、高转速的运行工况下,振动状态是机组或设备制造设计、安装检修、运行维护的直接反映参数,也是衡量机组是否可靠连续运行的重要指标,若振动较大且持续将危及机组安全运行,减少使用寿命,有些情况下还会造成设备损坏,甚至发生重大设备事故。通过开展振动监测及特征分析,可以评估汽轮发电机组的运行状态,可以诊断已出现及潜在的问题和风险,确保机组出现严重损坏前提供事先

报警,并采取针对性措施进行预防。

参考文献

- [1]房伟伟,旋转设备振动监测及故障诊断,华能集团TDM系统培训,2022.
- [2]张学延,沙德生等,燃煤电厂汽轮机状态检修导则,华能集团企业标准,2021.
- [3]孙聘、王猛等,汽轮机监督管理标准,华能集团企业标准,2024.