

# 汽轮机汽流激振的治理探讨

陈 杰

江西赣能股份有限公司丰城发电厂 江西 宜春 331100

**摘 要：**本文探讨了汽轮机汽流激振的治理。汽流激振在汽轮机运行中，呈现低频振动、与负荷相关且振动突变等现象，由叶轮偏心、密封流体力等引发。其危害极大，影响设备运行效率、缩短使用寿命，严重时危及电力生产稳定性。治理方法包括减小汽流激振力，如优化汽封间隙、改进汽封结构与布置、调整进汽调门；提高轴承稳定性裕度，像调整轴承标高、改变轴承几何形状、增加油膜径向刚度；选用合适汽封类型，如蜂窝汽封；运用反涡旋技术；以及加强检修与调整，确保转子与汽缸同心、关注关键间隙并加装涡动控制装置等，以此保障汽轮机安全稳定运行。

**关键词：**汽轮机；汽流激振；治理方法

引言：汽轮机作为电力生产等领域的关键设备，其稳定运行至关重要。然而，汽流激振问题却时常威胁着汽轮机的正常运转。汽流激振不仅会导致设备运行效率降低，增加能耗和成本，还可能引发设备损坏，造成严重的经济损失。随着汽轮机向着大容量、高参数方向发展，汽流激振问题愈发突出。目前，虽然对汽流激振已有一定研究，但在治理方法的系统性和有效性方面仍有提升空间。

## 1 汽轮机汽流激振现象与原理

### 1.1 汽流激振现象

在汽轮机运行过程中，汽流激振现象有着较为明显的表现。从振动频率特征来看，其振动往往会出现较大值的低频分量，这与普通振动频率特性存在显著差异，低频分量的出现是汽流激振的一个关键标志。从振动与运行参数的关系方面，汽流激振现象受运行参数的影响十分明显，并且振动增大通常呈突发性。当负荷发生变化时，振动情况会有显著改变。在负荷增加或降低的过程中，汽轮机的振动幅值可能会突然增大，有时这种变化十分迅速且幅度较大，可能导致机组振动超出正常允许范围，对机组的安全稳定运行构成威胁。从机组整体运行表现上，轴系振动会出现异常。这种异常振动可能会使机组产生晃动、发出异常声响等。如果持续发展，可能导致汽轮机的动静部件发生磨损，严重时甚至可能引发设备损坏事故。比如轴封处发生汽流激振时，轴封间隙的变化会导致动静部件之间的摩擦增加，长时间运行后会使得轴封磨损加剧，进而影响机组的效率和安全性。这些现象的出现都表明汽轮机可能发生了汽流激振，需要及时分析和处理，以保障机组的正常运行。

### 1.2 汽流激振原理

汽流激振由汽流力引发。当转子在旋转过程中，若

叶轮出现偏心，叶顶间隙沿圆周方向就会不均匀，导致蒸汽在间隙处流量不均，不同位置的叶轮圆周切向力不同，从而产生一个作用于叶轮中心的横向力，即间隙激振力<sup>[1]</sup>。当系统阻尼消耗的能量小于该横向力做的功时，振动就会被激发。密封流体力也是汽流激振力产生的原因之一。因转子转动时的动态偏心，蒸汽压力在轴封及隔板汽封的腔室中分布不均，会产生一个与转子偏移方向垂直的合力，这个合力会致使转子运动不稳定。作用在转子上的蒸汽激振力可分为静态力和动态力。静态力是恒定的，动态力是交变的，这两类力都能引发汽流激振。蒸汽激振力与蒸汽密度和级前后压差成正比，这也是汽流激振在大功率高参数汽轮机上更为突出的原因。激振力还与汽封的结构、长度、间隙大小有关，一般随着径向间隙增大而减小，随轴向间隙增大而增大。

## 2 汽流激振的危害

### 2.1 对设备运行效率的影响

汽流激振会严重影响设备运行效率。在汽轮机运转时，正常的蒸汽流动对设备稳定运行及高效工作至关重要。一旦发生汽流激振，蒸汽的正常流动状态被破坏。原本有序的蒸汽流在激振作用下变得紊乱，蒸汽无法按照理想的路径推动汽轮机叶片做功。从能量转换角度来看，汽流激振阻碍了热能向机械能的高效转化。汽轮机依靠蒸汽的能量推动叶片旋转，进而带动发电机发电。当汽流激振出现，蒸汽能量不能有效传递给叶片，部分能量在紊乱的汽流中损耗，导致汽轮机输出的机械能减少，发电效率降低。这意味着在相同的蒸汽输入量下，发电量较正常情况有所下降，能源利用率降低，增加了发电成本。在设备运行过程中，为了维持一定的功率输出，面对汽流激振导致的效率降低，往往需要增加蒸汽的供给量。这不仅会使燃料消耗增加，还加重了锅炉等

蒸汽产生设备的负担,可能导致设备运行不稳定,增加设备维护成本和故障率<sup>[2]</sup>。汽流激振引发的异常振动会使设备各部件之间的摩擦加剧,加快部件磨损,缩短设备使用寿命,进一步降低设备运行效率。设备频繁维修或更换部件,会导致停机时间增加,影响整个生产流程的连续性和稳定性,造成更大的经济损失。

## 2.2 对设备使用寿命的影响

汽流激振对设备使用寿命危害极大。正常运行时,汽轮机组各部件配合协调,磨损可控。但汽流激振一旦发生,设备内部便会出现异常。(1)异常振动是汽流激振引发的首要问题,这会让设备部件承受额外交变应力。正常运转时部件受力稳定,激振却使受力变得复杂且不稳定。轴承、叶片等关键部件长期受交变应力作用,金属材料会产生疲劳裂纹。随着时间推移,裂纹不断扩展,致使部件结构强度下降,甚至断裂,大幅缩短部件使用寿命。(2)振动还会加剧设备部件间的摩擦。振动状态下,原本精密配合的部件相对位置改变,配合精度降低,摩擦系数增大。像汽轮机转子与汽封、叶片与隔板等动静部件间的摩擦,不仅造成部件表面磨损,还可能引发局部过热。过热会改变金属材料性能,降低硬度,进一步加快磨损。(3)蒸汽的正常流动也会被汽流激振破坏,使蒸汽对设备部件的冲刷作用改变。蒸汽不再均匀稳定地冲击部件,而是紊乱地冲击,加速了部件的磨损与腐蚀。汽流激振引发的设备故障需要频繁维修和更换部件。维修时设备停机,不仅影响生产,频繁拆卸安装还可能对其他部件造成隐性损伤,进一步影响设备整体使用寿命,增加设备全生命周期成本。

## 2.3 对电力生产稳定性的影响

当汽流激振严重时,汽轮机可能会突然停机,这对电力系统的稳定供电会产生巨大冲击。在电力负荷高峰期,汽轮机的突然停机可能导致电网供电量骤减,引发电网电压波动,频率下降。而电网电压和频率的不稳定,会影响到各类用电设备的正常运行<sup>[3]</sup>。严重时,甚至可能引发电网局部崩溃,造成大面积停电事故,影响社会的正常生产和生活秩序。比如医院的医疗设备可能因停电而无法正常运行,影响病人的救治;交通信号灯熄灭,可能导致交通瘫痪;工厂的生产设备突然停止运转,不仅会造成生产中断,还可能损坏设备,给企业带来巨大的经济损失。

## 3 汽轮机汽流激振的治理方法

### 3.1 减小汽流激振力

#### 3.1.1 优化汽封间隙

汽封间隙的合理调整对减小汽流激振力意义重大。

适当增大叶顶汽封的径向间隙,能有效降低蒸汽对转子的作用力,进而减少汽流激振力的产生。同时减小轴向间隙,可降低蒸汽的轴向泄漏量,提高蒸汽的做功效率。在实际操作中,调整转子在汽缸中的位置也是必不可少的步骤。通过精确测量和细致调整,使圆周方向的动静间隙尽量均匀。比如在某电厂的汽轮机维护中,技术人员借助高精度测量工具,将转子与静子之间的间隙偏差控制在极小范围内,成功减少了因间隙不均匀而产生的汽流激振力。

#### 3.1.2 改进汽封结构与布置

采用新型汽封结构,是减小汽流激振力的有效手段。例如在叶顶汽封和端部汽封间隙等处安装止涡装置,该装置能够干扰间隙内工作介质的周向流动,破坏汽流的周向连续性,从而减小汽流力。除了安装止涡装置,还可以对汽封的布置方式进行优化。根据汽轮机的实际运行工况和汽流特性,合理调整汽封的位置和数量。不同的汽轮机型号和运行环境,其汽流特性存在差异,通过针对性地优化汽封布置,能够有效降低汽流激振力。

#### 3.1.3 调整进汽调门

进汽调门的开启顺序和重叠度,会影响汽流进入汽轮机的方向和速度分布,进而改变汽流对转子的作用方式。通过大量的试验和深入分析,确定最佳的进汽调门开启策略,能有效减小汽流激振力<sup>[4]</sup>。比如在采用顺序阀控制方式时,合理安排各调门的开启顺序和重叠度,使汽流均匀地作用于转子,避免因汽流不均而产生激振力。某大型发电厂在机组调试过程中,通过反复试验调整进汽调门,成功解决了汽流激振问题,保障了机组的高效稳定运行。

## 3.2 提高轴承稳定性裕度

### 3.2.1 调整轴承标高

轴承标高在汽轮机运行中起着关键作用,微小的标高变动都可能引发连锁反应。当轴承标高不合理时,转子受力不均,油膜特性也会受到影响。这就好比一个天平,两端重量失衡,整个系统就会失去平衡。通过专业测量与精确计算,适当提升或降低相关轴承标高,能够改变轴承的受力状态。这一调整使转子受力趋向均匀,让油膜的承载能力得到提升,稳定性也得以增强。如此一来,转子在运转过程中能够保持良好的平衡状态,有效降低了因汽流激振导致的振动风险,为汽轮机的稳定运行奠定基础。

### 3.2.2 改变轴承几何形状

传统的轴承几何形状在面对复杂的汽流激振力时,

往往难以提供足够的抗振能力。而对轴承几何形状进行优化设计,能够从结构层面提升稳定性。比如采用椭圆轴承,其独特之处在于侧边间隙加大,轴颈在轴瓦内的绝对偏心距增大,且上下部均可形成油楔。这种结构使油膜刚度和阻尼增大,当汽流激振力试图干扰转子时,能有效抑制振动。还有三油楔轴承,多个油楔共同作用,扰乱周向流动,减小其强度,为转子提供更稳定的支撑,大幅提升了转子在汽流激振环境下的稳定性。

### 3.2.3 增加油膜径向刚度

油膜径向刚度对轴承稳定性影响显著。调整轴承间隙和润滑油粘度,能让转子在运行时保持合适的偏心率,进而增加油膜径向刚度。对于360°滑动轴承,还可通过增加润滑油压力来实现这一目标。当油膜径向刚度提高,就如同给转子加上了一层坚固的保护屏障。即使面对汽流激振力的冲击,也能更好地维持自身的稳定,确保汽轮机在复杂工况下持续、稳定地运行,减少因振动带来的设备损耗与故障隐患。

### 3.3 选用合适汽封类型

在应对汽流激振问题时,选用合适的汽封类型至关重要,蜂窝汽封就是一种理想选择。蜂窝汽封技术发展成熟,常应用于高压转子轴封。传统梳齿汽封在抑制汽流激振方面存在一定局限,与之相比,蜂窝汽封具有独特的优势。蜂窝汽封的结构呈蜂窝状,当蒸汽通过时,会在其中形成复杂的紊流。这种紊流状态能有效干扰周向连续旋流,使原本有序流动的蒸汽变得紊乱。汽流的有序流动被破坏,汽流激振力就会相应减少,从而达到抑制汽流激振的目的。在众多实际应用案例中,蜂窝汽封都展现出了良好的抑制汽流激振效果,能显著提升汽轮机组运行的稳定性。

### 3.4 运用反涡旋技术

运用反涡旋技术也是防治汽流激振的有效手段。其原理是通过逆转向注入蒸汽流,对汽流的周向运动进行干扰,进而提高失稳转速界限。在汽轮机运行过程中,合适的位置和时机是成功运用反涡旋技术的关键。在恰当的位置设置蒸汽注入点,并在合适的时刻向汽流中注入反向的蒸汽流,可改变汽流原本的旋转方向和速度分布。汽流激振的产生需要特定的汽流条件,而反向蒸汽流的注入破坏了这些条件,使汽流激振难以发生。如此

一来,汽流激振的发生概率和强度都能得到有效控制,汽轮机的运行可靠性得以增强。

### 3.5 检修与调整

检修与调整工作对于消除或降低汽流激振故障意义重大。首先,要从调整转子与汽缸同心度入手。转子与汽缸之间的偏心是引发汽流激振的重要因素,减少这种偏心可有效解决汽流激振问题。在检修时,精确测量转子与汽缸的同心度是基础工作,通过细致测量,能够准确掌握偏心情况。之后,可采取调整轴承座位置、改变垫片厚度等方式,使转子与汽缸的同心度达到设计要求。在处理蒸汽激振力异常时,全面的检查维修不能忽视。叶顶间隙和汽封间隙对汽流激振有重要影响,需重点关注并进行检查调整。间隙的变化可能导致汽流力的改变,进而引发汽流激振。另外,在汽封位置加装涡动控制装置也是必要措施,其能调整轴系点位,防止转子汽缸偏移过大。通过这些检修与调整工作,可以及时发现并解决潜在的问题,确保汽轮机组的各个部件处于良好运行状态,从多方面消除或降低汽流激振故障的发生风险,保障汽轮机组的安全稳定运行。

结束语:综上所述,汽轮机汽流激振问题不容忽视。通过对其现象、原理的深入剖析,明确了汽流激振产生的原因及危害。在治理方面,从减小汽流激振力、提高轴承稳定性裕度、选用合适汽封类型、运用反涡旋技术以及加强检修与调整等多维度采取措施,可有效降低汽流激振的影响。在未来,随着技术的不断进步,应持续探索更高效、可靠的治理方法,进一步提升汽轮机运行的稳定性和可靠性,为电力生产等行业的稳定发展提供坚实保障。

### 参考文献

- [1]李文福.某生物质发电汽轮机汽流激振分析和处理[J].热力透平,2024,53(2):135-139.
- [2]曹丽华,孟宾,李盼.汽轮机叶顶汽封泄漏涡对汽流激振力的影响[J].振动与冲击,2020,39(16):283-288.
- [3]曹丽华,颜洪,司和勇.汽流激振下汽轮机各向异性转子振动特性分析[J].中国电机工程学报,2022,42(2):684-692.
- [4]马勇,马贤,张际顺.汽轮机带负荷过程避免汽流激振控制策略[J].电站辅机,2021,42(4):19-22+39.