

引言

目前在火力发电厂，随着汽轮机组朝着高参数、大容量、高自动化方向发展，系统越来越复杂，设备出现故障的可能性越来越大，故障的危害性也越来越大。近几十年来，国内外已发生多起汽轮发电机组整机毁坏事故，因设备故障而导致重大经济损失和人员伤亡的事件时有发生。因此，保证汽轮机组的安全运行是十分重要的。

由于汽轮机不断的发展，在构造上和运行上已达到高度的完整性和可靠性。但在运行时，像其他别种机器一样，汽轮机也受着各种程度的严重故障的威胁。发生这些故障的程度和故障的范围，主要决定于机组的操作情况。关于机组的运行规程、可能发生的故障及其原因，以及预防和消除故障的措施的完备知识是与正确的设计，可靠的材料以及完善的生产同样重要的因素。所谓故障，我们理解为机组脱离正常运行的各种不正常的情况，但这些不正常的情况不一定能给机组带来损害。

本论文中汽轮机常见的事故包括汽轮机叶片断落和腐蚀、汽轮机振动，大轴弯曲、汽轮机漏油着火、汽轮机轴承损坏等，其中导致机组不稳定振动的原因是多方面的，其中机械损伤和腐蚀是叶片断裂或脱落的主要原因；此外引起的不稳定异常振动是由低压转子支承刚度低、汽缸中心动态偏移、转子中心孔进油、转子本身存在的缺陷等使机组振动异常；轴瓦损坏，胀差超限，大轴弯曲以及产生的强烈振动所造成的动静摩擦，都可以使叶片损坏。从对事故分析来看，这些事故有些可以杜绝发生或者防止，有些是由于技术限制无法解决，并且汽轮机的发展都是往大参数，大机组方向发展，这样出现的事故隐患会很难排除或防止。并且有些事故发生的后果会牵连面很广，在事故发生时由于没有及时正确操作或本身事故发生的危害性很大，结果会使事故范围额外扩大。

所以、汽轮机组在运行过程中出现的故障，都将会影响到机组的各个系统，因而对汽轮机组的事故分析领域要广一些。由于汽轮机组结构和系统的复杂性、运行环境的特殊性，汽轮机组的故障率较高，而且故障的危害性也很大。因此，树立科学安全观，按操作规程正确操作，经常检查机体是否运行正常，目的是要用新的安全理念指导安全生产的管理与实践，增强员工对安全生产的责任感及持久的驱动力，牢牢把握安全生产的主动权，从而实现企业的本质安全，实现员工与企业和谐发展，最终目的是在以最小事故率的生产使企业经济平稳地增长。

第一章 汽轮机本体及故障介绍

汽轮机基本作用

汽轮机组的结构特性

汽轮机组是利用蒸汽热能做功的旋转式原动机。它工作时进行两个能量转换过程,即先使蒸汽通过喷嘴使流速提高(而压力降低),将蒸汽的热能转换成蒸汽的动能;然后再将蒸汽的动能在动叶栅中转换成转子的旋转机械能。

汽轮机组与其他动力机械相比,具有单机功率大、尺寸小、重量轻和效率高等优点,并且其所用的工质成本低、无污染。所以,汽轮机组是电力工业、交通运输、国防工业上应用最广泛的原动机之一。

在火力发电厂中汽轮机是的三大主机之一。为了提高火电机组运行的安全性和循环效率,为汽轮机配置了一些辅助设备和系统。汽轮机组由汽轮机本体、凝汽系统、回热系统、调节保安系统几大部分组成。下面简单介绍汽轮机组的基本结构及结构特点。

汽轮机组的基本结构

一、汽轮机本体

汽轮机本体是汽轮机组的主要组成部分,它由转动部分(转子)和固定部分(静子)组成。转动部分包括动叶栅、叶轮、主轴和联轴器及紧固件等旋转部件;固定部分包括汽缸、蒸汽室、喷嘴、隔板、静叶持环、汽封、轴承、轴承座、滑销系统、机座以及有关紧固零件等。

1. 转子

汽轮机的转动部分总称转子,由转轴、动叶栅和联轴器组成。它是汽轮机最重要的部件之一,担负着把从喷嘴叶栅出来的蒸汽的动能转变为轴旋转的机械能及功率传递的重任,汽轮机转子的结构可分为转轮式和转鼓式两种基本类型。转轮式转子具有安装叶片的叶轮,一般由主轴、叶轮、动叶片和联抽器组成;而转鼓式转子没有叶轮,动叶直接装在转鼓上。通常冲动式汽轮机的转子采用转轮式转子,反动式汽轮机为避免轴向推力过大而采用转鼓式转子。

转子承担汽轮机最重要的任务,其工作状态比较复杂,在高温、高转速情况下,既承担着巨大的离心力及传递功率所产生的扭转应力,又承担着热应力、蠕变,还可

能产生弯曲、振动等。因此对转子的结构、材料性能要求特别苛求^[1]。转子工作时，高速旋转，它除了要转换能量、传递扭矩外，还要承受着叶片、叶轮、主轴本身质量离心力所引起的很大应力，以及由于温度分布不均匀引起的热应力和转子振动产生的交变应力。所以，要求转子具有很高的强度和均匀的质量，以保证其安全工作，运行中要特别监视转子的工作状况。任何设计、制造、安装、运行等方面的疏忽，都可能造成重大事故。

2. 静子

(1) 汽缸。汽缸是汽轮机的外壳，它是汽轮机中重量大、形状复杂并且处在高温高压下工作的一个部件。汽缸内安装着喷嘴室、隔板、隔板套等零部件，汽缸外连接着进汽、排汽、抽汽等管道。汽缸除了承受内外压差以及汽缸本身和装在其中的各零部件的重量等静载荷外，还要承受由于沿汽缸轴向、径向温度分布不均匀（尤其在启动、停机和工况变化时）而引起的热应力，特别是高参数、大功率汽轮机，这个问题更为突出。因此，在考虑汽缸结构时，除了要保证足够的强度、刚度和保证各部分受热时自由膨胀以及通流部分有较好的流动性能外，还应考虑在满足强度和刚度的要求下，尽量减薄汽缸壁和连接法兰的厚度。并力求使汽缸形状简单、对称，以减小热应力。此外，为了节省高级耐热合金钢，还应使高温高压部分限制在尽可能小的范围内。

(2) 喷嘴组、静叶环和静叶持环。大功率汽轮机基本上都是采用喷嘴调节，这种调节方法具有在部分负荷下效率高的优点。喷嘴调节法是在主汽门后用几个调节汽门分别控制相对应的几个喷嘴弧（喷嘴组）。当汽轮机负荷变化时，各调节汽门按规定的顺序依次开或关，以改变进汽量，调节汽轮机的出力。喷嘴调节的汽轮机的第一级称为调节级。调节级喷嘴叶栅通常是由若干个喷嘴组成喷嘴弧段后，再固定在单独设置的喷嘴室的圆弧形槽道中。从汽轮机的第二级开始，以后的各级喷嘴叶栅则固定在静叶环（隔板）上，而静叶环可直接固定在汽缸上，也可固定在静叶持环（隔板套）上，但多半是固定在静叶持环上，静叶持环再固定在汽缸上。

(3) 汽封。在汽轮机级内，在静叶环和主轴的间隙处，以及动叶顶部与汽缸（或静叶持环）的间隙处存在漏汽。此外，在汽轮机的高压端或高中压缸的两端，在主轴穿出汽缸处，蒸汽会向外泄漏。这些漏汽都将使汽轮机的效率降低，并增大工质损失。在汽轮机低压端或低压缸的两端，因汽缸内的压力低于大气压力，在主轴穿出汽缸处，会有空气漏入汽缸，使机组真空恶化，并增大抽气器的负荷。为了减少汽轮机各动静间隙处的漏汽和防止空气从轴端漏入汽缸，保证汽轮机正常安全运行，在汽轮机的上述间隙部位都设置了汽封。汽封的结构形式多种多样，目前大型汽轮机组普遍采用迷

官式汽封。

(4) 轴承。轴承是汽轮机的一个重要组成部件。汽轮机的轴承有支持轴承和推力轴承两种类型。前者用来承受转子的重量、调节级部分进汽引起的不平衡蒸汽作用力和转子不平衡质量的离心力，并确定转子的径向位置，以保证转子的旋转中心和汽缸中心保持一致；后者是用来承受汽轮机运行时蒸汽作用在转子上的轴向推力和发电机传来的轴向力，并确定转子在汽缸中的轴向位置，以保证汽轮机的通流部分轴向动、静间隙在允许范围内。

(5) 盘车装置。在汽轮机启动冲转前和停机后，使转子以一定的转速连续地转动，以保证转子均匀受热和冷却的装置称为盘车装置^[2]。

汽轮机故障

汽轮机发生故障或事故的可能原因

一、缺陷：1. 结构缺陷；2. 材料缺陷；3. 制造缺陷；4. 安装缺陷；5. 设备检修缺陷。

二、机组的不正常运行，是由于：

1. 运行人员在机组起动、停机或单位机组并入系统而直接造成的错误；
2. 运行人员缺乏应有的熟练程度；
3. 运行人员操作不注意；
4. 在机组运转中，当发现不正常象征时，运行人员没有及时处理或处理不当^[3]。

故障的分类

由于机械设备多种多样，因而故障的形式也有所不同，必须对其进行分类研究。故障分类的方式主要有以下几种：

一、按故障存在的程度分类

1. 暂时性故障。这类故障带有间断性，是在一定条件下，系统所产生的功能上的故障，通过调整系统参数或运行参数，不需要更换零件就可恢复系统的正常功能。

2. 永久性故障。这类故障是由某些零件损坏而引起的，必须经过更换或修复后才能消除故障。这类故障还可分为完全丧失所应有功能的完全性故障及导致某些局部功能丧失的局部性故障。

二、按故障发生、发展的进程分类

1. 突发件故障。出现故障前无明显的征兆，难以靠早期试验或测试来预测。这

类故障发生时间短暂，一般带有破坏性，如转子的断裂、人员误操作引起设备的损毁等属于这一类故障。

2. 渐发性故障。设备在使用过程中某些零部件因疲劳、腐蚀、磨损等使性能逐渐下降，最终超出允许值而发生故障。这类故障占有相当大的比重，具有一定的规律性，能通过早期状态监测和故障预报来预防。

三、按故障严重的程度分类

1. 破坏性故障。它既是突发性又是永久性的，故障发生后往往危及设备和人身安全。

2. 非破坏性故障。一般，它是渐发性的又是局部性的，故障发生后暂时不会危及设备和人身的安全。

四、按故障发生的原因分类

1. 外因故障。因操作不当或环境条件恶化而造成的故障，如调节系统的误动作，设备的超速运行等。

2. 内因故障。设备在运行过程中，因设计或生产方面存在的潜在的隐患而造成的故障。

五、按故障相关性分类

1. 相关故障。也可称间接故障，这类故障是由设备其他部件引起的，如轴承因断油而烧瓦的故障是因油路系统故障而引起的。

2. 非相关故障。也可称直接故障，这是因零部件本身直接因素引起的。

六、按故障发生的时期分类

1. 早期故障。这种故障的产生可能是设计加工或材料上的缺陷引起的，在设备投入运行初期暴露出来，这种早期故障经过暴露、处理、完善后，故障率开始下降。

早期故障不仅发生在新机械投入使用的初期，而且当机械的零部件经过维修或更换，重新投入使用时，也会出现早期故障。

2. 使用期故障。又叫偶发期故障，是产品有效寿命期内发生的故障。这种故障是由于载荷(外因、运行条件等)和系统特性(内因、零部件故障、结构损伤等)无法预知的偶然因素引起的。设备大部分时间处于这种工作状态，这时的故障率基本上是恒定的。对这个时期的故障进行监视与诊断具有重要意义。

3. 后期故障。又叫耗散期故障，它往往发生在设备的后期，由于设备长期使用，甚至超过设备的使用寿命后，因设备的零部件逐渐磨损、疲劳、老化等原因使系统功能退化，最后可能导致系统发生突发性的、危险的、全局性的故障。这期间设备故障

率呈加速上升趋势，通过监测、诊断等方式，发现失效零部件后应及时更换，以避免发生事故。

第二章 叶片损坏事故原因分析

汽轮机叶片的安全问题

叶片是汽轮机的心脏，也是事故最多的关键部件，它的安全可靠直接关系到汽轮机和整个电站的安全、满发。由于电力是国民经济的命脉，全世界的电力约有 76% 来自火电站中的锅炉-汽轮机-发电机以及核电站中的核反应堆-汽轮机-发电机。因此，提高汽轮机叶片的安全性对于满足不断高涨的电力需求，适应国民经济的发展，有着不容忽视的作用。

由于叶片高度和蒸汽参数的不断提高，叶片的工作条件也越来越严酷，在进汽端的调节级叶片，要承受最高 600℃ 的高温和喷嘴弧段的巨大冲击力，在排汽端，则要承受巨大的离心力和接近两倍音速的湿蒸汽流的冲刷，而所有动叶片部承受着多种形式的周期性或随机性激振力作用而处于强迫振动之中。正是这些不利条件使叶片长期成为汽轮机中影响安全、满发的最主要的因素。根据 1970 年前后英国、法国、原苏联等国的统计，汽轮机事故约有 45~72% 是叶片造成的。美国和联邦德国近期统计表明，叶片事故中汽轮机各部件中仍居首位，美国电力研究所指出，美国电站汽轮机强迫停运率的 70% 与叶片损坏有关。各国统计还一致反映，叶片事故引起的损失往往占全部损失的一半左右。

汽轮机叶片损坏与脱落

叶片的组成和作用

设计制造动叶片主要考虑如下方面的要求：叶片应具有足够的强度和良好的振动特性，即避开共振区以保证叶片安全运行，应具有良好的空气动力特性，以达到较高的效率；合理的结构和良好的工艺性，便于制造和安装。

叶片的组成：

叶型：叶片的主要工作部分，汽流通过由相邻叶片的型线部分构成的通道，完成能量转换。

叶根：将叶片固定在转子叶轮上的装配部分。

围带、拉筋等：属于链接件，并可调整叶片的自振频率和减少叶片所受的动应力。

动叶的作用：是在高温、高转速、高湿度和高速汽流绕流环境中工作，将高速汽流的动能转变为机械功。

事故特征

(1) 汽轮机内部或凝汽器内有突然的响声。

(2) 当断落的叶片落入凝汽器时，会将凝汽器钢管打坏，使凝汽器内循环水漏入凝结水中，导致凝结水硬度和导电度突然增大，凝结水水位增高，凝结水泵电动机电流增大。

(3) 机组振动通常会明显变化，有时还会产生瞬间强烈抖动，其原因是叶片断裂脱落，使转子失去平衡或摩擦撞击。但有时叶片在转子中间级断落，并未引起严重动静摩擦，在工作转速下机组振动不一定明显增大，只有在启动、停机过程中的临界转速附近，机组振动会出现明显增大。

(4) 叶片损坏较多时会使蒸汽通流面积改变，从而同一个负荷的蒸气流量、监视段压力、调速汽阀开度等都会改变。

(5) 如果断落叶片发生在抽汽级处，叶片就可能性进入抽汽管道，造成抽汽逆止阀卡涩或进入加热器，使加热器的管子受撞击断裂，引起加热器疏水水位升高。

(6) 在停机惰走过程或盘车状态下，有可能听到金属摩擦声，惰走时间缩短，在启动和停机过程中，通过临界转速时，机组振动将会明显地变化。

叶片断裂或脱落的原因

汽轮机的动静叶片是通流部分的主要零件，动叶片不但要承受高速转动时产生的离心力，还要承受高速气流的冲击力和由于气流不均匀而产生的往复振动作用力。因此，动叶片损坏是经常发生的。

一、叶片断落的现象

- 1、汽轮机内或凝汽器内发生明显的金属撞击声。
- 2、机组振动突然增大或抖动，轴向唯一显示增大或摆动。
- 3、叶片较多时，同样负荷下蒸汽流量增加，监视段压力上升。
- 4、凝结水导电度、Na⁺离子、Cl⁻离子增加、凝汽器水位上升，凝泵电流增加。
- 5、断裂的叶片可能进入抽汽管道造成逆止门卡涩等。
- 6、停机惰走或盘车状态能听到金属摩擦声。
- 7、可能引起轴瓦温度和回油温度升高，这是因转子平衡遭到破坏而造成的，同时推力瓦温度上升。
- 8、停机过程经过临界转速区时振动明显增加。
- 9、低压转子后部叶片断落时，叶片飞入凝汽器，会打破凝汽器铜管，使循环水

漏入凝结水中，可测出凝结水硬度和导电度突然增大。

二、叶片断裂或脱落的原因

造成叶片断裂或脱落的原因很多，它与设计、制造、材质、安装、检修工艺和运行维护等因素均有关系，归纳起来有下列几个方面：

1. 机械损伤

(1) 外来的机械杂质随蒸汽进入汽轮机内打伤叶片。

(2) 汽缸内部固定零部件脱落，如阻汽片、导流环等，造成叶片严重损伤。

(3) 因轴承或推力瓦损坏、大轴弯曲、胀差超限以及机组强烈振动，造成通流部分动、静磨擦，使叶片损坏。

2. 腐蚀和锈蚀

叶片的腐蚀常发生在开始进入湿蒸汽的各级，这些级段在运行中，蒸汽干、湿交替变化，使腐蚀工质易浓缩，引起叶片腐蚀。另外，长期停机备用的机组往往会因空气中的潮气或蒸汽漏入机内造成叶片严重锈蚀。

叶片受到侵蚀削弱后，不但强度减弱，而且叶片被侵蚀的缺口、孔洞还将产生应力集中现象，侵蚀严重的叶片，还会改变叶片的振动频率，从而使叶片因应力过大或共振疲劳而断裂。

3. 水蚀

水蚀一半多发生在末级湿蒸汽区的低压段长叶片上，尤其是末级叶片。水蚀是湿蒸汽中分离出来的水滴对叶片冲击造成的一种机械损伤，而末级叶片旋转线速度高，并且蒸汽湿度大，水滴多，故水冲蚀程度更严重。受水蚀严重，叶片将出现缺口、孔洞等，降低叶片的强度，导致断裂损坏。

4. 水冲击

汽轮机发生水冲击时，前几级叶片的应力会突然增加，并骤然受到冷却，使叶片过载，末几级叶片则冲击负荷更大。叶片遭到严重水击后会发生变形，其进汽侧扭向内弧，出汽侧扭向背弧，并在进出汽侧产生细微裂纹，成为叶片振动断裂的根源。水冲击有时会使叶片拉筋断裂，改变了叶片连接形式，甚至原来成组的叶片变成单个叶片，改变了叶片振动频率，降低叶片的工作强度，致使叶片发生共振，造成断裂。运行中叶片水蚀，使叶片强度降低。叶片受水冲击的载荷增大，叶片拉筋受水击断裂使叶片成为单只叶片，叶片的振动频率改变，使叶片陷入共振断裂。

(1) 设计应力过高或结构不合理，如叶片顶部太薄，围带铆钉头应力大，常在

(2) 叶片振动特性不合格，运行中因共振产生很高的动应力，使叶片损坏。

(3) 叶片材质不良或错用材料，如叶片材料机械性能差，金属组织有缺陷或有夹杂、裂纹；叶片经过长期运行后材料疲劳性能和振动衰减性能等降低而导致叶片损坏。

(4) 加工工艺不良，例如叶片表面粗糙，留有刀痕，围带铆钉孔或拉筋孔处无倒角等，都会导致应力集中而损坏叶片。

(1) 电网频率变动超出允许范围，过高、过低都可能使叶片振动频率进入共振区，产生共振而使叶片断裂。

(2) 机组过负荷运行，使叶片的工作应力增大，尤其是最后几级叶片，蒸汽流量增大，各级焓降也增加，使其工作应力增加很大而严重超负荷。

(3) 主蒸汽参数不符合要求，频繁而较大幅度地波动，主蒸汽压力过高、主蒸汽温度偏低或水冲击以及真空过高，都会加剧叶片的超负荷或水蚀而损坏。

(4) 蒸汽品质不良使叶片结垢、腐蚀，叶片结垢后将使轴向推力增大，引起某些级过负荷；叶片结垢后离心力增加，超过材料的抗拉强度而断落；叶片结垢后，改变其振动特性，进入共振区而断落。腐蚀容易引起叶片应力集中或材质的机械强度降低，导致叶片损坏。

(5) 停机后由于主蒸汽或抽汽系统不严密，使汽水漏入汽缸，时间一长，使通流部分锈蚀而损坏^[4]。

1、外来杂物造成叶片损坏。汽轮机叶片^[5]有时由含有杂质和流动的热气流损坏的。由于叶片间隙小，叶片在高速旋转过程中，如果外来杂物进入可使叶片损坏。这种情况出现一般是在新机组调试或大修后初次启动过程中，这是由于安装或检修不良遗留杂物所致。

2、汽缸内固定零件脱落造成叶片损坏。

3、轴瓦损坏，胀差超限，大轴弯曲以及产生的强烈振动所造成的动静摩擦，使叶片损坏。

4、水冲击可直接造成叶片损坏。

5、长时间水蚀严重造成叶片损坏。

6、叶片本身材料质量问题，长时间运行，超过疲劳极限使叶片损坏。如果叶片

运行中产生共振也能使叶片损坏，另外叶片设计不当也是叶片损坏的一个原因。

7、叶片过负荷。尤其是末几级叶片长度的原因更容易损坏叶片。

8、汽轮机超速。

9、汽轮机转子在临界转速中滞留时间过长使振动增大造成叶片损坏。

10、长时间低周波运行，使叶片自激振动增加容易损坏叶片。

11、汽温过低有两种危害：一是末几级叶片湿度过大，叶片受冲蚀，截面减少，应力集中引起叶片损坏。二是当汽温降低而出力不降低时，流量势必增加，从而引起叶片过载损坏叶片。

12、蒸汽品质不合格可使叶片结垢，通流面积减少，各级焓降增加，叶片应力增大。另外，叶片结垢也能引起叶片腐蚀，使强度降低。

13、真空过高或过低。真空过高时，可能使末级叶片过负荷和湿度增大，加速叶片水蚀。另外真空过低时，若仍保证最大出力不变也能是末几级过负荷。

14、启、停机及其增减负荷时操作不当，如果速率快可使胀差超限，发生动静摩擦，损坏叶片。

15、汽轮机在低负荷或空负荷情况下运行时间过长，此时末级叶片在小容积流量工况下会产生汽流，在叶片根部的脱流和叶片顶部的涡流现象，使叶片的动应力增加。如果汽轮机在高转速下紧急破坏真空，排汽压力升高，蒸汽比容增大，冲击力增大，可能会激发叶片的颤振，另外摩擦鼓风损失会使叶片局部达到很高的温度。所以后一种情况更为危险。

事故处理方法

汽轮机运行中如发觉有以上断叶片现象或机组突然发生强烈振动，应果断进行紧急停机。如确是断叶片引起的，特别是叶片断在中间的，应立即处理，不能犹豫不决、拖延时间。因为这样会使事故迅速扩大，设备严重损坏。

有些事故发生在汽缸内，只能根据叶片断裂事故可能出现的特征进行综合判断。当清楚地听到汽缸内发生金属响声或机组出现强烈振动时，应判断为通流部分损坏或叶片断落，则应紧急故障停机，准确记下惰走时间，在惰走和盘车过程中仔细倾听汽缸内声音，经全面检查、分析研究，决定是否需揭缸检查并更换新叶片。

防止叶片损坏

叶片是汽轮机的重要部件。它的作用是实现能量的转换。因此，叶片损坏将直接

原因是多方面的，与设计、制造、安装、运行维护等因素有关。汽轮机叶片损坏事故在汽轮机事故中占的比例较大，给汽轮机的经济安全运行带来一定的影响。因此，防止叶片损坏是非常重要的。

加强叶片金属监督，对汽轮机叶片、叶根、围带、拉筋孔附近进行检查，及早发现叶根和围带是否有松动等隐患。围带松动可捻铆围带铆钉或在围带内侧施银焊（低温区）。各厂应根据自己机组叶片结构和国内类似机组断叶片情况，有针对性的重点检查，尤其是对事故多发叶片[l69、313、432、665、680、700mm叶片]的检查，发现问题，应采取措施进行处理。

MANBS 等人^[6]测量 Ti6Al4V、12Cr 钢和 17Cr4NiPH 钢的本体与热处理态，HVOF 涂层，激光硬化处理 12Cr 钢以及 13Cr4Ni 钢本体的抗水蚀性能。防止外来杂物和缸内固定件脱落。检修时，管道内、喷嘴组前蒸汽室、自动主汽门、调节汽门、汽缸等部位必须清理吹扫干净，零部件要牢固、汽缸内加装部件要牢固。防止运行中松脱进入汽缸打坏叶片。山西某热电厂 2 号机 1984 年 10 月 29 日发生甩负荷事故，原因是中压自动关闭器滑阀下部 16mm 节流塞未敛缝和焊牢，运行中脱落，导致飞车事故。运行中左右两侧再热蒸汽压力偏差过大应停机检查。

频率不合格或频率安全裕度较小，低周率运行时突然落入共振区，使叶片发生共振而疲劳断裂的主要原因。然而频率不合格的主要原因是设计不当和安装工艺不良所引起。安装工艺不良，使叶片分散率不合格，运行中频率下降，使叶片频率由安装、检修时合格下降到运行后的不合格范围，致使叶片断裂。由此可见，只要设计时避开了叶片频率不合格范围，安装工艺方面采取了保证质量的措施，叶片的断裂事故一般可减少 60% 左右^[7]。

对缸体上的温度传感器或温度计要勤检查，对调节级后温度计插座套管要进行检查，对照图纸和工艺要求，检查材质、焊接性能及热处理方法是否合理。河南某电厂 1 号机 1987 年 8 月小修时发现速度级后测温热电偶套管折断，将压力级第一级 32 片动叶从根部打断。经初步光谱分析，发现热电偶套管接头材质是 25Cr2Mo1NiA，套管材质是 1Cr13Ni9Ti，焊接后再进行车屑加工，折断部位正好在连接处。按规定套管和接头应当是同一材质且整体车削加工，未做到这一点，是很危险的。

检修中应仔细检查动、静叶片有无损伤，有无裂纹。如果发现损伤或裂纹，应进行处理。

有的机组因设计问题和运行问题，末级叶片水蚀严重。对这种机组，运行中应保

硬质合金时，不应焊得过长、过宽、过厚，以避免叶片发生热变形。

对于动静叶片的裂纹，焊接时必须有正确的施工工艺，使用正确的焊接材料，同时还需要有合格的焊工。否则，裂纹会越焊越多，甚至运行中发生断裂。

振动与大轴弯曲事故原因分析

振动与大轴弯曲

往往是设备损坏的先兆或象征。剧烈的振动会损坏汽缸、轴承座、台板和基础之间的可靠连接，从而使振动进一步加剧。剧烈振动发展到一定程度会使机组动静之间发生碰擦，严重时将导致大轴弯曲，而动静相碰、大轴弯曲反过来又加剧了振动，产生恶性循环，最后可能引起汽轮机紧固件松弛、轴承乌金碎裂、轴承座基础松动，甚至损坏整个机组和厂房建筑物。汽轮机发生剧烈振动、大轴弯曲的事故是比较典型的恶性设备损坏事故。

一、汽轮机大轴弯曲及振动现象

在汽轮机大轴产生弯曲时，转子质量中心与回转中心已发生偏离，当汽轮机启动后，随着转子转速的升高振动不断加剧。所以，当汽轮机振动形式表现为低转速下转子偏心度大、高转速下振动大时，有可能大轴已发生弯曲。在进行停机处理后，抽用连续盘车时不是投不上，就是电流大或电流大幅波动。

当汽轮机发生轴承油膜不稳定震荡时，现象为无论在空转或带负荷下均有振动，振幅时大时小，但振动频率低，负荷变动时振幅特别大，有时会自行消失或突然又重新发生。汽轮机轴承油膜不稳定或油膜破坏是引起汽轮机轴系严重损坏的一大原因之一。

二、汽轮机异常振动的处理要点

当汽轮机在启动、停机、运行中发生强烈振动，振动幅值超过规定停机限额时，如一时难以判断发生振动的原因，应先进行紧急停机，避免振动发展到严重损坏设备的程度。然后再进一步分析查找原因，在原因不明、故障源未消除前不得重新启动汽轮机。

三、汽轮机异常振动的可能原因

1. 汽轮机转子塑性变形——大轴弯曲。

(1) 汽轮机轴封、隔板汽封块因安装问题而使间隙太小时，运行时会产生动静磨擦。因局部磨擦过热膨胀，使转子产生热弯曲，若强行通过临界转速，则很容易产生永久性弯曲。

(2) 汽缸受热不均或汽轮机进冷水、冷汽时，会造成上下汽缸温差过大，使汽缸产生热变形或拱背弯曲，导致汽轮机轴端和隔板径向间隙消失相碰。严重时汽缸下部

(3) 汽轮机停用后消缺或盘车装置存在问题,使盘车不正常,引起转子热弯曲、晃度值超标。

2. 汽轮机转子动平衡校正精度不高,或转子质量平衡块定位不牢固,造成转子在升速时产生不平衡振动。

3. 汽轮机运行中,转子上叶片断落,使转子产生新的不平衡,且由于叶片断落使转子受到的蒸汽力不平衡而产生较大弯矩,这些原因都将引起汽轮机异常振动。

4. 滑销系统存在问题,使汽缸膨胀受阻,轴承座标高发生变化,引起轴系中心破坏。

5. 汽轮机轴承基础不牢固、台板松动,轴承座坚固螺栓松动。

6. 振动发生在发电机部位,振动值随励磁电流的增加而增大,可能因为发电机转子有热弯曲。其原因一般有:发电机转子热处理不良,在通励磁电流后发热膨胀不均匀;发电机某一侧通风口堵塞;水内冷发电机转子部分水路阻塞使冷却不均匀。

7. 引进型 300MW 机组发电机的励磁机采用三支承结构,抗振动稳定性较差,由于氢冷发电机密封瓦间隙较小,一旦密封油温度偏低、密封瓦油膜不均匀、空氢侧油压差过大,即会引起密封瓦碰擦发电机,使励磁机振动加大。同时,由于励磁机转子动平衡精度不高,在密封瓦碰擦的扰动下,励磁机产生共振反过来又加剧了密封瓦碰擦,造成恶性循环、振动剧烈,这种情况在启动升速通过临界转速时尤为突出。

8. 汽轮机轴承油膜不稳定或震荡的原因一般有:轴瓦间隙过大,使运行中下瓦油膜不稳定;进入轴瓦的油量不足或瞬时中断,造成油膜破坏;汽轮机润滑油品质不良或用错润滑油牌号;润滑油温度过高,油质变稀,粘度过大 [8]。

300MW 汽轮机组几种异常振动现象及其原因分析

根据国产 300MW 汽轮机组的结构特点,; 轴承动态标高变化引起的 1 号轴承低频振动;高中压转子振动爬升;汽缸中心位置动态偏移引起的摩擦振动;某一特定流量指令下的高压转子不稳定振动。

N300MW 汽轮发电机组已经是我国电网中的主力机组。当前,国产 300MW 汽轮机组多数采用双缸(高中压合缸)双排汽、轴系四支承结构(见图 3-1),低压转子两端轴承坐落在排汽缸上。经过多年的现场试验研究和理论分析,这种 300MW 汽轮机组除了具有旋转机械一般振动特性外,由于其自身结构的特性,还有其独特的振动现象,应引起制造厂家、用户和有关技术人员的注意,以确保机组的安全稳定运行。

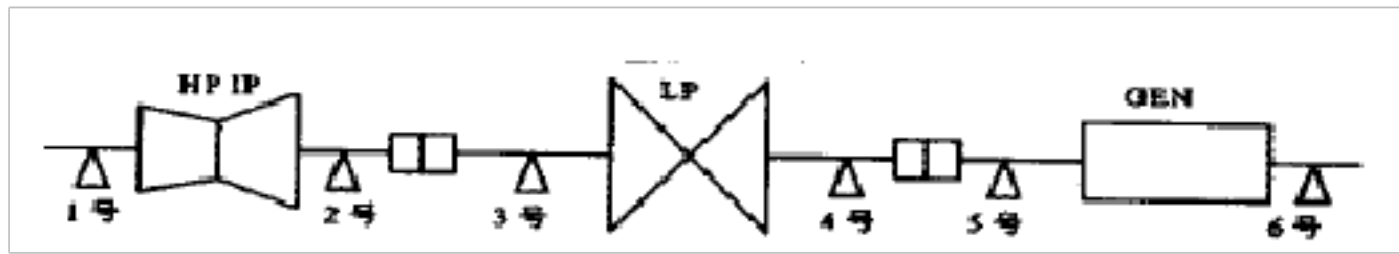


图 3-1 国产 N300MW 汽轮机组轴系示意图

低压转子支承刚度低引起的不稳定异常振动

国产 N300MW 汽轮机组的低压转子轴承 (3 号和 4 号轴承) 坐落在低压缸的下半两端, 轴承的下瓦呈悬臂梁结构。同时, 低压缸的结构尺寸大, 在轴向方向分为三段, 分别用钢板焊接而成, 再用螺栓连接起来。因此, 低压缸本身的刚度小, 在运行时, 由于大气压力和温度应力的作用, 极易产生变形, 导致机组低压转子产生不稳定振动。这种不稳定振动在国内数台 300MW 机组上发生过。例如, 某国产 300MW 汽轮机组自安装投运以来, 就存在低压转子振动不稳定的问题。在 2001 年下半年连续高负荷运行一段时间后, 发现在 200MW 左右负荷运行时, 低压转子两端轴振和瓦振较大, 4 号轴承处转轴水平振动(4X 轴振) 有时超过 $100\ \mu\text{m}$, 4 号轴承垂直振动可达 $50\ \mu\text{m}$, 且对运行参数变化反应十分灵敏。

低压转子的振动稳定性较差, 只要外界的影响因素有所改变, 振动就会发生变化。根据振动规律, 该机组的这种不稳定振动, 明显是由低压转子支承刚度太低、且在工作转速附近落入共振区引起的。

轴承动态标高变化引起的 1 号轴承低频振动

国产 300MW 机组高中压缸采用中分面猫爪支承, 中压排汽缸外缸两侧伸出的猫爪支承在 2 号轴承座上, 猫爪没有设置冷却装置。这种结构在运行过程将导致 2 号轴承座温度上升较大, 2 号轴承上抬, 从而使 2 号轴承的载荷增加, 1 号轴承的载荷降低。从而使 1 号轴承低频振动。

高中压转子振动爬升及其原因

所谓振动爬升, 是指机组从冷态开机开始, 随着机组经历从抽真空、冲转、并网、带负荷至满负荷这样一个过程时, 机组的振动幅值逐渐增加, 使得振幅达到或接近报警值, 甚至超过报警或停机阈值。如, 某国产 300MW 汽轮机组于 1998 年 2 月投运以后, 在多次开机过程中出现振动爬升现象, 振幅最大可爬升到 $130\ \mu\text{m} \sim 140\ \mu\text{m}$ 。为此, 对该机组进行振动测试, 获取振动爬升的规律。试验结果表明:

1. 冷态开机时, 在 2000r/min 转速下暖机过程中, 2 号轴振的振幅可增大 $30\ \mu\text{m} \sim$

40 μm , 相位变化 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

2. 冷态开机升速到工作转速时, 1 号、2 号、3 号和 4 号轴振并不大, 均在允许范围内。

3. 并网带负荷后, 振动继续增加, 一般振幅可增大 60 $\mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ 。

4. 带负荷后, 振幅爬升主要是在低负荷阶段, 当负荷超过 200MW 时, 变化很小, 在高负荷下运行一段时间后, 振幅略有减小。

5. 振动的爬升规律与高中压缸的缸温有一定的对应关系。特别是 2X 振动变化规律与高中压缸金属温度的变化规律有良好的对应关系。

6. 机组负荷突然变化后, 机组的振动并不发生突然变化。这说明转子上的力矩大小与振动之间并没有明显的关系。

7. 机组在经历抽真空-冲转-并网-带负荷-满负荷过程时, 高中压转子和低压转子的质量不平衡分布发生了较大的变化。

根据机组振动的特征, 可以发现, 振动爬升纯粹与机组的热状态有关, 即与转子的温度有关。产生上述规律的振动爬升, 主要原因可能有:

1. 冷态时, 转子上有过大的内应力。机组在经历抽真空-冲转-并网-带负荷-满负荷过程时, 转子的温度逐渐升高, 转子内部的应力分布也逐步发生变化, 从而改变了转子的不平衡质量的分布, 使得振动爬升。如某厂国产汽轮机^[9]在运行中发现 5 号轴承振动逐渐增大, 经分析可知是由转子平衡不良引起的。

2. 转轴材质不均匀。转轴在浇铸、锻造和热处理过程中形成的直径方向纤维组织不均, 造成线膨胀系数存在差别。当转子温度升高后, 线胀系数大的一侧膨胀量大于线胀系数小的一侧, 使转子形成弯曲。当转子冷却后, 弯曲又消失。由于这种弯曲值正比于转子温升, 因此, 在经历抽真空-冲转-并网-带负荷-满负荷过程时, 转子的温度逐渐升高(特别是在低负荷阶段, 转子的温度升高较快), 转子的弯曲值逐渐增大, 振动爬升^[10]。

转子中心孔进油引起的振动

汽轮机转子中心孔进油^[11]在现场时有发生。造成进油的原因通常有两种可能, 一是中心孔探伤后油没有及时清理干净, 残存在孔内; 二是大轴端部堵头不严, 运转起来后由于孔内外压差使得润滑油被逐渐吸入孔内。中心孔有油后会使转轴出现振动问题, 它造成的振动在机理上有数种不同的说法。

一种说法认为, 转动时孔内液体转速比转轴低, 这样液体会产生一个比转动频率

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/545102030242011123>