

[燃气轮机]

燃气轮机典型故障统计分析 及运行维护

文/哈尔滨电气股份有限公司 孟凡刚 冯永志 于宁
哈尔滨工业大学能源科学与工程学院 孟凡刚 冯永志 刘占生

燃气轮机作为典型的高新技术密集型产品，有着广泛应用。但其结构复杂，长期处于高温、高压及高转速等复杂工况下，易发生故障。统计了燃气轮机典型故障模式，分析了故障的内在机理，提出了燃气轮机运行维护技术的未来发展方向，为燃气轮机的安全稳定运行提供支撑。

燃气轮机是装备制造业的高端装备，典型结构如图1所示，被誉为现代工业皇冠上的明珠，是多学科先进技术的高度集成，是国家高科技水平的重要标志。燃气轮机产业高度垄断，由于历史原因，我国燃机产业整体水平与国际先进水平差距明显，没有形成成熟的燃机研发设计生产体系与运行维护体系，总体水平落后约20年。

燃气轮机结构复杂，且长期处于高温、高压的复杂工况下，易发生故障，其中转子作为燃气轮机的整机设计的核心，其故障率占比最高，达45%以上。在实际工程中，一旦燃机出现故障停止运行，则会带来巨大的不可估量的经济损失。据统计，燃气轮机的运维费用占比整个电厂修理费用最大，达60%以上。由于我国燃机产业核心设计技术及运维技术受制于人，被美国GE、德国西门子及日本三菱等发达国家企业所垄断，所以不得不支付高昂代价，且这种垄断将长期持续。

燃气轮机典型故障模式统计与分析

燃气轮机的故障模式繁多，形式各异，主要包括质量不平衡、不对中、热弯曲、裂纹和动静碰摩等典型故障。

基金项目：国家科技重大专项（2017-1 V-0008-0045）
哈尔滨电气集团有限公司科技项目：重型燃气轮机转子典型故障机理研究（18-43004）

1. 质量不平衡故障

由于材料质量、制造加工及装配等因素的影响，质量不平衡是燃气轮机最常见的转子故障，转子质量中心（质心）与旋转中心存在偏心距，从而产生周期性的离心力，其主要表现特征为1倍频振动过大，长时间运行会导致零部件疲劳，严重时甚至会诱发轴承磨损破坏以及内部转子与静子碰摩等故障现象。

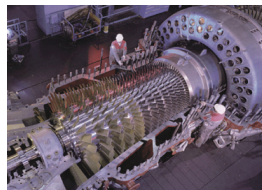


图1 典型燃气轮机结构

2. 不对中故障

在燃机转子—轴承系统中，由于制造、安装以及运行环境的影响，造成转子支承间的线位移偏差（平行不对中）或角位移偏差（角不对中），所以不对中现象是不可避免的。联轴器、轴承等部件是燃机转子系统不对中故障的激励源，不对中故障会造成燃机转子机械振动增大、轴心位置偏离、轴承磨损加剧、转轴挠曲

变形、油膜失稳、转子与定子发生碰摩及振动噪声等现象。

当转子支承间外部不对中超出允许公差时,即发生不对中故障,故障特征主要表现为振动频谱中倍频成分增加,严重时还可能造成轴承油膜压力偏离正常值。

3. 热弯曲故障

燃气轮机处于高温高压等复杂工况下,内部最高温度可达到上千摄氏度,在停机冷却过程中,都会经历温度骤变,发生对流换热现象,使燃机转子上下表面形成温度梯度,热膨胀受热不均匀,从而产生热弯曲变形,并随着停机时间的累积,热弯曲形变量达到最大值,导致转子的质量分布特征发生变化;而燃机再启动后,势必会导致振动响应特性变化,影响燃机运行的安全性与可靠性。

转子的热弯曲形变改变了转子的质量分布,相当于形成了转子额外不平衡量,所以这与转子质量不平衡故障表象特征相似,但是存在着本质的内在机理差别。

4. 裂纹故障

裂纹故障是燃气轮机转子的常见故障,主要发生在转轴、叶片及轮盘等部件。这类故障大多是由于转子设计不当、装配不当以及操作有误等原因造成的。转子裂纹是缓慢增长的故障破坏,如果燃气轮机在运行过程中未被检测到,裂纹(也称为疲劳裂纹)将不断增长,直至剩余转子的横截面减小到无法承受对其施加的静态或动态载荷时,即发生脆性断裂,零部件穿透机匣,甚至透过墙壁,这是灾难性的破坏。

裂纹常出现在转子的局部最大应力区域,如阶梯轴的阶跃处、键槽、冷缩配合或其他不连续处。转子出现裂纹后,裂纹会随着应力场垂直方向扩散,随着可用横截面的减小,弯曲刚度降低,并且表现为各向异性。

5. 碰摩故障

随着燃气轮机性能要求不断提高,其结构越加复杂化、布局越加紧凑化,动静碰摩成为了燃气轮机一种较为常见的故障。

当燃机转子与静子安装间隙超过允许公差,或者因高温与受力而产生的形变等,都会造成转子碰摩故障,转子易发生的碰摩位置如图2所示。碰摩故障可分为局部径向摩擦与全周摩擦,轻度碰摩故障会造成燃机的振动噪声加

剧、部件密封磨损等,严重时则会造成整机损坏事故。

当燃机发生碰摩故障时,轴心位置会发生变化,产生异常的轨迹形状,频谱出现次同步或谐波分量。此故障与不对中、热弯曲等其他故障密切相关,因此属于一种典型的二次故障。

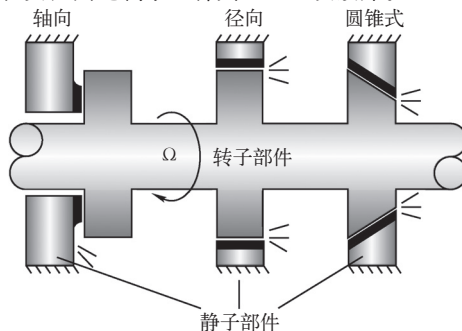


图2 转子与静子易发生碰摩位置

运行维护

随着科学技术的发展,对燃气轮机在容量、效率和安全可靠性等方面提出了越来越高的要求。由于燃气轮机产品结构及工作环境的复杂性,国内外学者与工程技术人员对燃气轮机转子系统的故障基础研究相对比较零散,薄弱,更多地集中于燃气轮机零部件的故障表象。此外,其故障类型单一,数据量少。因此,需要实现由燃机故障表象到内在机理研究的突破。

燃机故障机理研究是探索故障本质的所在,首先需对燃机建立数学或数值仿真模型,某型燃机仿真模型示例如图3所示。然后建立燃气轮机试验测试平台,某型模化燃机转子试验平台示例如图4所示,燃机转子故障试验平台是基于动力学相似原理,设计搭建的可用于模拟质量不平衡、不对中、热弯曲和动静碰摩等典型故障的单跨、双跨或多跨模型试验台。然后通过试验修正仿真模型,提取故障特征,探索故障的内在机理,提取故障诊断准则,最终开发燃气轮机故障诊断专家系统,实现燃气轮机最终的故障诊断与运行维护,总体技术路线如图5所示。

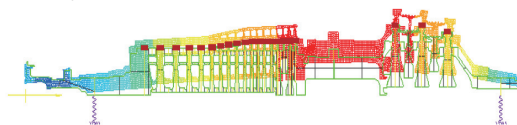


图3 数值仿真模型

通过燃机故障内在机理的研究以及专家故障诊断系统的开发,可以实现由燃机故障的定性研究到定量计算,由燃机零部件到整机系统的研究,并由单一故障到群耦合故障的研究,以及对

(下转第56页)

更换完毕后重新将本体重瓦斯恢复。认真做好设备季节性特殊巡视工作，特别要注意高温季节、重负载条件下充油、充气设备的巡视，检查油位表、气压表和温度计是否运行正常，并结合负载—油位（气压）曲线、温度—油位（气压）曲线等做好负载及油温、油位、气压和液压参数的分析比照，及时掌握设备运行状况，发现问题立即汇报。对于油位（气压）偏高的设备，要结合停电机会及时进行处理。

结束语

通过查询发现，2003年7月某供电公司110 kV变电站也是由于呼吸器托油罩上侧的密封垫安装时没有拆除，在2006年6月由于黄淮地区环境温度异常升高，造成220 kV某变电站2#主变压器压力释放阀动作喷油；另外，2005年6月某省供电公司

北郊110 kV变电站1#主变压器压力释放阀的压力弹簧随温度变化，机械强度也随之改变，在高温天气里，变压器油不断膨胀，变压器本身的温度较高，而变压器上层油温更高。压力释放阀装在变压器的上部，在高温条件下，弹簧压力会有所降低，使压力释放阀的开启压力为55~5 kPa，造成压力释放阀误动，开启喷油等多起由于不同原因引起变压器压力释放动作喷油。

随着电力系统的不断发展和完善，对供电可靠性的要求更高，使得变压器的安全可靠也越来越高。通过对该起压力释放阀故障而引起变压器喷油情况进行的分析，提出了相应的防范措施，从而降低了变压器发生故障的概率，为主变压器及电网的安全可靠运行提供了保障。EA

（收稿日期：2019.07.27）

（编辑：朱金凤）

（上接第53页）



图4 燃气轮机转子试验平台

潜在微弱故障的预防与诊断识别。

开发燃气轮机故障诊断专家系统的核心关键在于知识库的建立与完善，可通过以下5种方式建立与完善知识库：①书本、资料和文献数据；②故障仿真模型分析数据；③故障试验研究测试数据；④燃机工程故障案例数据；⑤现场正常燃机运行数据。

基于燃机故障诊断专家系统，以此实现燃气轮机故障知识库的共享，避免一些重复性的研究建设，这必是未来国内外的发展趋势，为燃气轮机的安全稳定运行及预防维护具有重大意义，有着十分广阔的应用前景和经济价值。

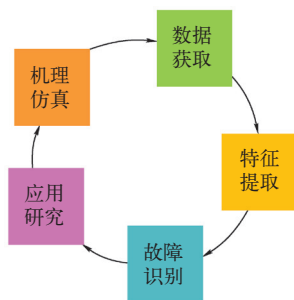


图5 故障研究技术路线

结束语

本文对燃气轮机在实际工程运行及试验过程中所常见的几种典型故障模式进行了统计与内在机理分析，提出了燃气轮机故障内在机理研究与燃气轮机故障诊断专家库开发是燃气轮机运行维护技术的未来发展方向与发展趋势，这对燃气轮机产业的发展有着十分广阔的应用前景和经济价值。EA

（收稿日期：2019.11.05）

（编辑：朱金凤）