汽轮机推力轴承轴电流腐蚀故障分析与处理

车慧敏（山西潞安煤基合成油有限公司，山西　长治　046000）

摘　要：空分机组汽轮机运行时一直存在轴位移缓慢变化至超标的现象，通过对故障现象综合分析，判断为汽轮机轴电流过大导致推力瓦块腐蚀。检修时通过对损坏的轴承瓦块进行失效分析，验证了这一分析结论。

关键词：汽轮机；轴位移；推力轴承；轴电流

1 设备概述

该空分机组由汽轮机驱动，工作机包括空压机和增压机。其中，汽轮机型号为 NKS50/63/28，空压机型号为 RIK100–4，增压机型号为 RZ35–7。机组调速范围为 4238r/min~5933r/min，额定运行转速为 5650 r/min。汽轮机进汽压力为 3.72MPa，进汽温度为 430℃，排汽压力为 0.016MPa。推力轴承型式为金斯伯雷，轴位移报警门限为 ±0.50mm，联锁门限为 ±0.70mm。全厂工艺系统中，设计有两套 28000m^3/h 的空分机组，为全厂提供 3.5MPa 的氧气供气化炉使用，同时副产部分液氧和液氮外售。空分装置作为全厂的核心工艺设备，两套空分机组能否安稳长满优的经济运行，直接关系到全公司能否满负荷生产。

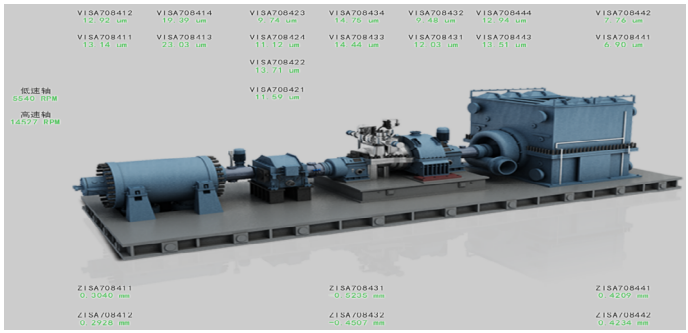

图 1　机组总貌图

2 故障现象

机组正常运行期间，各设备振动幅值均不高，其中汽轮机振动值保持在 15μm 左右，空压机振动幅值低于 15μm，齿轮箱高、低速轴振动幅值均在 15μm 以下，增压机振动幅值在 30μm，总体振动幅值趋势均比较平稳，从相关图谱评估，振动表现无异常。

机组中修后，自 2020 年 2 月 15 日起开始启机运行，起初各监测参数均比较稳定，但在一周后，汽轮机轴位移出现了缓慢变化的趋势，两通道轴位移数值分别从 –0.12mm 和 –0.20mm 缓慢变化，一直到 2020 年 7 月 4 日停机时，汽轮机轴位移数值分别变化至 –0.45mm 和 –0.56mm，累计变化范围达到 0.35mm，触发报警门限。在此期间，汽轮机主推力轴承温度也有同步变化，从 65℃缓慢上涨至 80℃左右。而同一时间段内，监测的压缩机低压缸和高压缸轴位移数值和推力轴承温度均无明显变化。

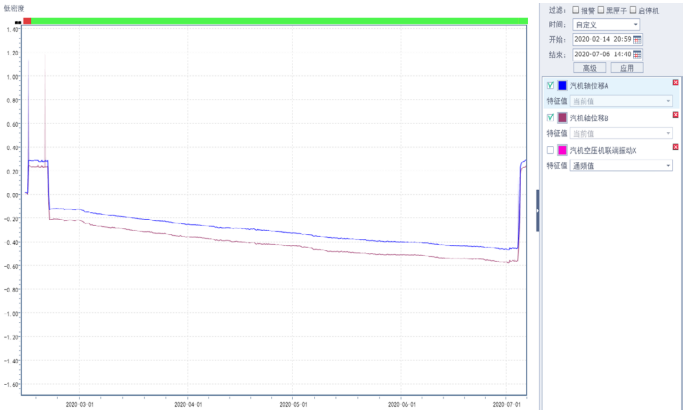

图 2　汽轮机轴位移趋势图

3 故障分析及结论

3.1 GAP 电压问题

查看此时间段内，查看汽轮机轴位移传感器的 GAP 电压趋势，两通道 GAP 电压值分别从初始的 –11V 和 –12V 左右变化至 –13.5V 和 –14.5V，变化范围达 2.5V 左右。经过计算，GAP 电压值的变化量与位移值的变化基本吻合（1V 对应 125μm），评估此数值变化为设备真实轴位移数据，通过趋势检查发现两个位移测量点均有一致的连续变化趋势，并且仪表通过排查确认测量的准确性，同时该问题在大修前也出现这个现象，在大修时，主止推瓦确实磨损严重（大修未发现其他异常），排除测量方面的问题；故排除仪表方面的异常因素。

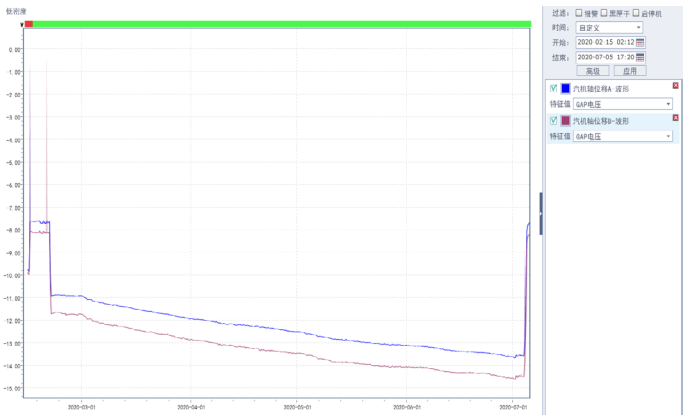

图 3　汽轮机轴位移探头 GAP 电压趋势图

另外，从 GAP 电压数值的变化上看，表现为位移盘在逐渐远离传感器探头，结合机组的结构和传感器布置位置，判断转子在向着主推力方向缓慢变化。

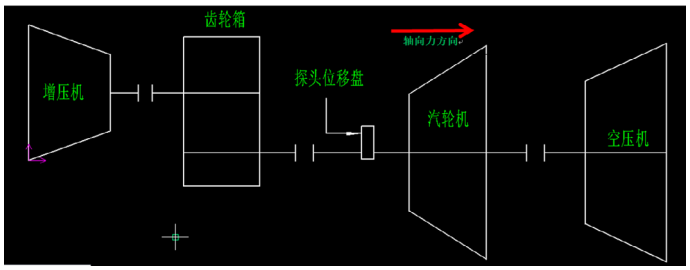

图 4　汽轮机轴位移测点示意图

机组在运行过程中，转子逐渐向主推力方向变化一般与轴向力变化或者推力轴承磨损有关。

3.2 油膜问题

通过现场操作调高或者调低油温；调高止推轴承油压测试均不能对位移的持续性上涨得到节制；并且主止推瓦温度并不高（不超过 55℃），与典型的轴瓦磨损造成轴温高的现象并不吻合；（2017 年 9 月 B 套空压机位移上涨轴温同时升高），基本排除润滑不良的问题。

3.3 调整汽轮机负荷

2018 年 11 月 22 日开始从降低汽轮机负荷入手进行调整；汽轮机转速由 5540rpm 调至 5450rpm（再低将接近临界转速区域）；尽可能调低空压机进口导叶开度，调低表冷器排气压力，将空压机出口压力从 0.495MPa 降至 0.475MPa，将增压机出口压力从 6.7MPa 降至不超过 6.4MPa，将增压机段间换热器循环水关小，降低空气密度，将蒸汽消耗量一度从 88t/h 降至 82t/h 蒸汽但是位移依旧持续上涨。从设计上看该汽轮机能带到 108t/h 蒸汽负荷，得出结论位移的增长并不是由汽轮机蒸汽超负荷引起的。

3.4 受力不平衡问题（调节平衡管压力）

怀疑是不是汽轮机平衡盘处的平衡管不畅通，平衡盘的平衡力未达到设计要求导致，经过测量平衡管温度均在 240 度以上（我车间出现过运行过程中大气安全阀密封水含油蜡堵塞情况），该温度即使油蜡也融化了，不会堵塞平衡管道，通过开打平衡管直接去表冷器导淋，关小或者关闭其余导淋，目的是尽可能扩大平衡盘的平衡力压差；但是发现位移依旧持续增长；而且，从每天的历史趋势看，存在一个奇怪的现象，就是气温高时位移不增长甚至还有回调量，气温一降低开始增长，并且不断创新高，气温越低增长越快；基本排除受力不平衡问题。

针对轴向力发生改变，一是与负荷调整有关。此机组在运行期间，汽轮机的调汽阀和压缩机防喘振阀门均未进行过主动调节，且压缩机两个缸的轴位移数值和推力轴承温度都没有明显变化，故可排除负荷调整方面因素；二是与汽轮机通流部分结垢有关。通过查看振动趋势，1X 幅值和 1X 相位均没有明显变化，而且对于判断通流部分是否结垢的一个关键指标——轮室压力上看，也无明显变化，所以基本可排除结垢方面的因素。

针对推力轴承磨损方面，一是与残余轴向力较大，推力轴承不能完全平衡掉轴向力，此一般与设计有关，在新机组上可能存在此问题；二是推力轴承出现润滑不良或者电流腐蚀有关。该机组上次检修时，在推力轴承及支撑轴承上均发现有不同程度的微小的黑色凹坑，怀疑此为轴电流腐蚀所致。

3.5 电腐蚀问题

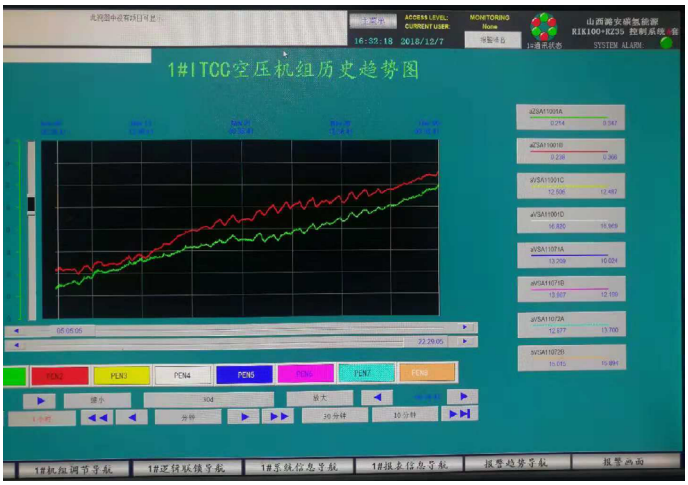

图 5　11 月 2 日至 12 月 2 日汽轮机位移趋势（安装零时导线之前）

图 6　12 月 3 日至 12 月 13 日汽轮机位移趋势（安装零时导线之后）

为排查此问题，我们利用在汽轮机转轴上的裸露位置外接导线测量轴电压值。经现场人员检测，发现在转子旋转时，转子的轴电压值在 60V~80V 左右，最高瞬时电压可以达到 200V，转子上的确有轴电压存在，由此判断此问题与轴电流腐蚀有关。因推力轴承处存在电腐蚀现象，导致推力瓦块表面的巴氏合金出现磨损，推力轴承抵消残余轴向力的能力下降，轴位移和轴承温度都出现了缓慢变化的情况。

空分机组对于任何一个化工单位来说，都是非常重要的生产工段。空分机组故障导致全厂减负荷或者停产，对于任何一化工单位来说都是非常大的损失。针对现在汽轮机位移增长的现象。现场技术人员在汽轮机裸露位置外加导线，将汽轮机轴上的电压导至接地线中。这样可以维持正常稳定的生产。待停车检修时安装正式导电电刷，检查处理径向轴承和止推轴承运行情况，根据检查情况更换有腐蚀磨损的轴瓦瓦块。根据安装零时接地装置的时轴位移趋势图可以看出，导电前后汽轮机轴位移的变化情况如图 5 和图 6。

通过采取临时导电措施，更进一步证明了轴电压对汽轮机组运行的影响，找到了轴位移增加的真正原因。为下一步处理指明方向。

在旋转机械转子系统中，大部分机组采用的都是滑动轴承，转子在高速旋转时与轴承之间有油膜绝缘。由于转子对地存在电阻，一旦带电，就会建立起对地电压，当电压升高到某一数值，就会在电阻最小的区域击穿，发生电火花放电 [2]。而机组中最容易出现电火花放电的部位就是在径向轴承和推力轴承的承载面上。对于径向滑动轴，轴承电蚀凹坑的发展会使巴氏合金表面受到严重的腐蚀，这不仅会改变轴承的原有间隙，而且表面光洁度下降还会导致轴承表面的擦伤和擦痕、局部高温和烧伤。推力轴承的电火花烧伤是油膜过薄引起的，一般推力瓦块在电火花的侵蚀下很快磨耗。

基于此，建议机组在运行时，可尝试降低油温至设计下限，并提高汽轮机推力轴承处的支管油压，以增加进油量。

4 故障验证

图 7 汽轮机主推力轴承拆解照片

机组运行至 2020 年 7 月 7 日，利用停产间歇对汽轮机推力轴承进行了拆解检查。发现在主推力轴承侧每个瓦块的巴氏合金上，沿止推盘旋转方向均磨出一个斜坡，瓦块上油楔的出口端磨蚀区和非磨蚀区之间存在明显的界线，磨蚀区已失去金属光泽，而非磨蚀区仍保持巴氏合金原有的加工面光泽。观察推力盘两侧外观也不相同，主推力侧表面呈浅灰色，像喷过砂一样没有光泽，表面布满了点蚀凹坑，而副推面仍保持加工面的金属光泽 [1]。此为推力轴承出现电腐蚀的典型特征。

轴电流的形成除了外部对转子施加一定的电位之外，大多数则是与下面的几种因素感应而产生的：

对于电机类转子，产生轴电流的原因主要是磁力线分布的不对称效应与转轴的磁化效应。磁力线分布不对称通常是由于叠片层的不对称间隙引起的。除电机类转子外，其他设备也会因轴的磁化而产生轴电流。

现代大型化工装置中由蒸汽透平驱动端离心机组，虽非电力设备，但有时也会形成很高的轴电流。经查阅相关资料，这是一种由粒子碰撞摩擦引起的静电效应。对于蒸汽透平——离心压缩机组，多数是由于湿蒸汽粒子碰撞使转子带电，尤其是冷凝式蒸汽透平，末几级的湿度含量较高，水蒸气粒子对转子叶片的碰撞和摩擦引起的静电效应而带电。因此在冷凝式蒸汽透平中会比较多的遇到轴电流问题，而在背压式蒸汽透平中较少发生。

此外，离心压缩机和蒸汽透平转子工作时也可能因润滑油引起带电，当润滑油通过过滤器时，由于滤网通路很小，通常只有几微米，油分子与滤网的碰撞与摩擦会导致分子带电。当电位升高到一定值时，将在油膜电阻最低处击穿而产生电火花放电。

减小或消除轴电流引起的损伤，主要手段是限制轴电压的升高，一般认为，足以引起轴电流损伤的电压在 20V 以上，典型的轴承损伤电压在 30~100V 之间。如果把轴电压降到 1V 以下，基本上就可以消除轴电流带来的故障。限制和降低轴电压主要方法就是增加接地装置，例如用炭刷使转子对地导通，消除转轴静电电位。对于在运转过程中已经发生轴电流侵蚀的机器，使用改变油膜厚度的方法 (例如改变油的黏度、改变润滑油供应量、改变轴承速度和负荷等) 也可以减小电流侵蚀的速度，实际使用证明此法有一定效果。

对于蒸汽透平产生的静电电荷，可以用控制水蒸气微滴的大小，改变喷嘴和叶片的材料和光洁度等，以减小液滴碰撞和摩擦起电。但是，这种措施对于已在运行中的机器往往是不现实的，它意味着需要重新设计一套防止产生轴电流的有效装置。

针对该汽轮机轴电流问题，我们在检修时在汽轮机两端加装了导电刷，使转子对地导通，消除转子静电电位。并将转子返厂进行测磁、消磁处理，后续机组运行时，轴位移趋势较为平稳，未再出现轴电流腐蚀现象。

参考文献：

[1] 马斌 , 魏杰 . 压缩机轴电流腐蚀引起的轴位移增大故障的诊断与处理 [J]. 中国设备工程 ,2009,000(006):36-37.

[2] 王潜 , 肖昌汉 . 旋转机械中一种新的电腐蚀机理——轴电流腐蚀 [J]. 武汉化工学院学报 ,2002.

作者简介：

车慧敏（1984- ），男，民族：汉，籍贯：山西太谷人，学历：本科，现有职称：中级工程师，研究方向：化工机械。