

水电站水轮发电机组推力轴承异常磨损原因分析

张 宣¹ 何 伟²

1.杭州华辰电力控制工程有限公司 浙江 杭州 311122

2.浙江华东咨询工程有限公司 浙江 杭州 311122

【摘 要】：推力轴承是立式水轮发电机组的主要承载部件，它承受着机组转动部分全部的轴向荷载，它的运行稳定性直接影响到机组的安全可靠程度。目前大多数水电站的机组长时间处在变负荷、频繁启停工况下，推力轴承容易产生瓦面磨损、温度异常、油膜不稳定等问题，严重的时候会引发烧瓦停机事故，造成较大的经济损失。本文根据水电站机组运行检修的实际，从设计制造、安装调试、润滑系统、运行工况、设备老化、电气因素这六个方面，对推力轴承异常磨损的主要原因进行系统的分析，总结出各种故障产生的机理，针对不同的故障给出相应的整改和防控措施，可以为水电站推力轴承运维管理、故障处理以及机组的安全稳定运行提供技术上的借鉴。

【关键词】：水轮发电机组；推力轴承；异常磨损；油膜润滑；设备运维

DOI:10.12417/3083-5526.25.10.001

引言

水电站实际生产中，由于设备安装偏差、润滑系统故障、运行工况变化、零部件老化、电气异常等因素的影响，推力轴承油膜很容易出现破裂、变薄、分布不均等状况，造成轴瓦和镜板直接接触，引起异常磨损。轻微磨损会导致瓦温上升、机组振动变大，加快设备的疲劳损耗，严重的磨损会造成轴瓦烧损、机组摆度超限，迫使机组非计划停机，不但会缩短设备的使用寿命，还会严重影响水电站发电效率和电网供电稳定性。因此，对推力轴承异常磨损原因进行深入分析，并构建起系统的预防和控制体系，对提高水电机组运维质量、减少设备故障风险有着十分重要的现实意义。

1 水电站水轮发电机组推力轴承结构及正常运行机理

常见的立式水轮发电机组推力轴承是由推力瓦、镜板、推力头、油槽、润滑冷却装置、支撑部件等组成。推力瓦为扇形巴氏合金结构，均匀分布在推力轴承座上，镜板和主轴推力头固定连接，随主轴同步转动。机组正常运行时，镜板高速转动带动润滑油流动，在镜板和推力瓦接触面之间形成一层连续的、均匀的、稳定的油膜，依靠流体动压原理。油膜可以把两个金属接触面完全隔开，把固体摩擦转变成液体摩擦，从而大大减小摩擦系数，利用润滑油的循环作用带走摩擦产生的热量，保持轴瓦温度处于合适的范围内，防止出现金属磨损以及高温损伤的情况。

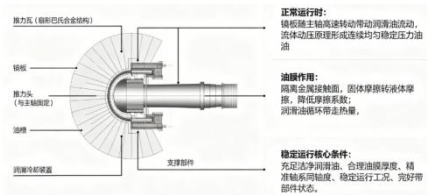


图1 水电站水轮发电机组推力轴承结构

2 推力轴承异常磨损主要原因分析

2.1 设计与制造质量缺陷

设备设计和制造质量是推力轴承长期稳定运行的基础，先天缺陷会造成机组投运后一直存在磨损问题。部分早期投产的水电站机组，推力轴承结构设计不合理，推力瓦支撑结构刚度不够，瓦面弧度匹配度差，不能适应机组额定负荷和转速工况，运行时瓦面受力不均，局部区域应力集中，长期运行后产生局部磨损。制造加工过程中产生的精度偏差也属于主要的诱因。镜板平面度、光洁度不合格，表面有细微的划痕、凹凸等缺陷，推力瓦厚度偏差过大、巴氏合金镀层不均匀，都会破坏油膜的完整性。镜板表面过于粗糙，会加大润滑油的流动阻力，破坏油膜的形成，而且还会增加瓦面的磨损。推力瓦合金层浇筑质量不好，有气孔、夹渣、分层等内部缺陷，运行时缺陷处容易出现局部脱落、磨损，慢慢发展成大面积的瓦面损伤。另外，轴承选型不合理、机组实际工况与之不符，导致承载能力不足，长时间超负荷运转会造成油膜失效，造成连续性异常磨损。

2.2 安装调试工艺不规范

机组安装调试质量直接影响到轴系运行精度，也是造成推力轴承早期异常磨损的主要人为原因。轴系同轴度偏差是常见的安装问题，主轴、推力头、镜板安装不同心，机组运行时镜板出现偏摆，造成各块推力瓦受力极不均匀，部分瓦块承载过大，油膜厚度骤减，出现局部干摩擦磨损，其余瓦块受力过小，油膜稳定性不足，长期运行后整体磨损失衡。推力瓦受力不均的现象比较普遍。安装时没有严格按照工艺标准对受力进行校核，瓦块支撑高度偏差过大，机组运行时荷载集中在少数瓦块上，超负荷的瓦块油膜很容易破裂，产生高温磨损，同时造成机组振动加剧，加重轴承运行环境。镜板水平度调整偏差、推力头安装间隙不合理，都会引起轴向受力不均，破坏油膜分布均匀性，造成瓦面单边磨损、局部烧损。安装时施工现场的杂

物清理不到位，微小金属颗粒、粉尘等残留在油槽内，投运后随润滑油一起循环到瓦面上，与瓦面、镜板相接触，造成机械磨损痕迹，逐渐增大磨损面积。

2.3 润滑及冷却系统运行异常

润滑冷却系统是保证推力轴承油膜稳定、控制运行温度的重要系统，润滑冷却系统故障是造成轴承磨损的高频原因。润滑油品质劣化会影响润滑效果，机组长时间运行之后，润滑油会混入水分、金属杂质、灰尘等污染物，水分会降低润滑油粘度和油膜强度，使油膜承载能力下降，不能很好地隔开金属接触面。硬质金属杂质随着油液的流动而冲刷、研磨瓦面和镜板，使瓦面的磨粒磨损加剧，长期积累会造成瓦面光洁度急剧降低。润滑油老化变质情况比较严重，高温下长时间使用会产生氧化、酸化等物质，造成粘度指标超标准，润滑效果大大降低。油液粘度过大，会加大流动阻力，油膜散热不良；粘度过小，油膜过薄，承载能力不够，都会造成异常磨损。润滑循环系统故障会造成供油不足，油泵出力不足、油路堵塞、节流装置失效等问题，造成轴承工作面润滑油供给量不足，油膜成型不完整，局部出现干摩擦状态。

2.4 机组运行工况不合理

水电站机组受电网调度、来水工况的影响，频繁启停、变负荷运行、低负荷空载运行等工况都会增大推力轴承磨损的风险。机组启停时转速不在额定范围内，油膜处在动态成型与消散之中，稳定性很差，启停瞬间容易产生油膜薄弱、局部干摩擦，反复启停会不断累积磨损损伤。部分水电站为了适应电网调峰的需求，每天多次启停机组，长时间的累积会导致推力瓦面疲劳磨损。机组长时间处于低负荷运行状态时，主轴转速下降，润滑油的动压作用减小，油膜厚度不够，不能形成完整的润滑保护层，瓦面摩擦损耗明显增大。另外机组运行中水力不平衡、转轮气蚀、流道杂物堵塞等都会引起机组振动、摆度超限，振动不断冲击油膜，使油膜反复波动、破裂，破坏润滑稳定性，造成瓦面周期性磨损。振动幅度过大时，会使轴系发生偏移，增大轴承局部负荷，加快磨损故障的发展。

2.5 设备老化与维护管理不到位

机组长时间运行之后，由于零部件的自然老化会使得轴承的运行性能下降。推力瓦巴氏合金层在交变荷载作用下长期使用，易产生疲劳老化、硬度降低、表面剥落等问题，使耐磨性大幅下降。镜板受到摩擦磨损后表面光洁度降低，存在氧化、锈蚀、细微裂纹等缺陷，从而导致油膜形成的根基被破坏。轴承支撑弹簧、调整垫块等部件出现老化变形时，就会造成瓦块受力状况的改变，进而引起受力不平衡的现象产生。日常运维管理上的不足也会造成磨损故障加重。运维人员没有严格执行定期油质化验、油液过滤、设备巡检制度，不能及时发现润滑油劣化、杂质超标等问题。设备定期检修不到位，没有按时对

轴系同轴度、瓦块受力、镜板精度进行校核，小的偏差、小的磨损长期积累发展成严重的故障。部分电站检修工艺不规范、备件质量不合格，更换的推力瓦、润滑油质量不合格，检修后没有进行充分的磨合和调试，造成机组运行后很快出现异常磨损。

2.6 轴电流电气损伤

水轮发电机组运行时，由于磁路不对称、绕组绝缘损坏、接地不良等原因，在主轴两端会产生轴向感应电压，即轴电流。轴电流会把推力轴承变成闭合回路，电流穿过瓦面和镜板接触面的时候，就会产生电火花放电，造成金属表面电蚀损伤。部分中小型水电站对于轴电流的监测不够重视，监测装置失灵、接地保护不好，造成轴电流长期超标运行，加速轴承报废。

3 推力轴承异常磨损防控及整改措施

3.1 优化设备设计，把控制造质量

根据老旧机组先天设计缺陷和机组运行工况进行技术优化改造，对推力瓦支撑结构进行升级，提高支撑刚度，优化瓦面弧度和承载结构，保证瓦面受力均匀。选型阶段严格按照机组的荷载、转速参数来选择合适的高承载、耐磨型推力轴承，防止出现小马拉大车的现象。

设备制造和备件采购阶段，严格把好质量验收关，对镜板平面度、光洁度、硬度，推力瓦厚度均匀性、合金层浇筑质量等进行全方位的检测，严禁不合格的零部件投入使用。新设备投用或者备件更换之前要进行外观检查以及精度校核，清除掉气孔、夹渣、划痕这些制造上的瑕疵，从源头上避免先天磨损的隐患。

3.2 规范安装检修工艺，提升装配精度

严格依照机组安装、检修工艺标准，对轴系安装调试流程进行细化。安装时对主轴、推力头、镜板同轴度、镜板水平度进行精确调整，保证安装误差在规范允许范围内。用专业的检测仪器逐块校核、微调各块推力瓦的受力情况，保证所有的瓦块受力均匀，防止局部荷载过大。加强检修现场管理，检修前将油槽、油路和零部件表面的杂物全部清理干净，不得有硬质杂质残留。机组大修之后、开机之前做盘车试验，检测轴系摆度和振动数据，排查瓦面受力异常问题。建立检修质量追溯制度，规范检修流程，杜绝违章作业，保证装配精度满足设备使用要求。

3.3 强化润滑冷却系统运维，保障润滑效果

建立润滑油全生命周期管理机制，定期做油质化验，主要检测粘度、水分、杂质、酸值等主要指标，指标超标时及时更换润滑油。定期清洗油槽、滤网、油路管道，安装高精度过滤装置，保持油液清洁，防止磨粒磨损。根据机组运行工况选择合适的优质润滑油，防止油液选型错误造成润滑失效。定期对冷却系统设备进行检查，清理换热器、冷却管道结垢堵塞，保

证冷却水流量、压力稳定。安装温度、流量在线监测装置，实时监测轴承油温、瓦温变化，出现异常及时排除。定期对油泵、阀门等设备进行性能检测，保证润滑循环系统正常工作，保证充足的润滑油供应和良好的散热条件，保持稳定的油膜。

3.4 优化机组运行方式，改善运行工况

根据电网调度的要求以及设备的性能来合理地安排机组的运行方式，减少不必要的频繁启停。合理控制机组低负荷运行时间，尽量使机组处于高效稳定区运行，提高油膜形成稳定性。机组启停时严格按照升降速规定进行，平稳调节转速的变化，减小启停阶段油膜波动对设备造成的损害。定期对机组水力系统进行检测，及时处理转轮气蚀、流道堵塞、水力不平衡等造成的机组振动、摆度幅值增大问题。加装振动、摆度在线监测系统，实时监测机组运行状况，数据超标时及时调节运行参数或者停机检修，防止振动冲击破坏轴承油膜，从工况上降低磨损风险。

3.5 完善运维管理制度，落实定期维保

创建常态化设备巡检制度，主要针对推力瓦温度、油位、油温、机组振动摆度等重要参数实施实时监控，做好运行数据的记载并加以分析，从而对可能存在的故障做出预估。编制科学合理的定期检修计划，按时进行小修、大修工作，重点对轴系精度、瓦面磨损情况、支撑部件性能进行校核，及时修复轻微磨损、变形等缺陷，避免小故障发展成大问题。加强运维人员专业培训，提高人员对故障的识别、检修的操作能力，规范日常操作和检修流程。严格控制备件质量，选用正规厂家的合

格备件，检修后做好设备调试、磨合运行，保证检修质量达到标准，提高设备运维精细化水平。

3.6 治理轴电流隐患，消除电气损伤

完善机组轴电流保护系统，对机组绝缘装置、接地装置做定期检查，保证主轴绝缘、轴承接地状态良好，有效地切断了轴电流回路。加装轴电压、轴电流在线监测装置，对电气参数进行实时监测，发现超标立即停机查找原因。对发电机的绝缘性能定期检测，修复磁路不均匀、绝缘被破坏等问题，从根源上减少轴电流产生的可能性。对已经发生电蚀磨损的瓦面及时进行打磨修复或者更换，清除油液中的炭化杂质，消除电气磨损叠加隐患。

4 结论

水轮发电机组推力轴承异常磨损是由设计制造、安装检修、润滑冷却、运行工况、设备老化、电气故障等多方面因素共同造成的，各种诱因互相叠加、互相影响，形成恶性循环，严重危及机组的安全稳定运行。水电站实际运维工作要以预防为主、综合治理为原则，从设备源头质量、安装检修精度、系统运维保障、运行工况优化、电气隐患治理、常态化维保六个方面建立全方位的防控体系，准确找到各种磨损隐患，及时采取措施进行整改。经由规范化并精细化的运维管理，可以有效地削减推力轴承出现异常磨损故障的几率，进而让设备拥有更长久的使用期限，从而加强水轮发电机组运行的稳定与可靠程度，给水电站的安全、高效发电以及电网的稳定供电赋予强有力的支撑。

参考文献：

- [1] 官标,周玉国,陈典龙,等. 百万千瓦水轮发电机组推力轴承润滑油膜承载性能计算及分析 [J]. 水电与新能源, 2024, 38 (6): 20-23.
- [2] 赵霖,闵占奎,刘秀良,等. 某水电站推力轴承温度过高原因分析及处理 [J]. 机械研究与应用, 2022, 35 (3): 132-133. DOI:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2022.03.038.
- [3] 王亚龙,王骥,刘多斌,等. 水轮发电机组推力轴承支柱螺栓套损坏原因分析及处理 [J]. 东北电力技术, 2021, 42 (12): 47-50.
- [4] 欧阳宁东,杨培平,蒋牧龙. 基于推力轴承的水轮发电机组推力负荷测试研究 [J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6 (6): 20-24.